



Universiteit
Leiden
The Netherlands

Feldmethoden

Bubbenzer, O.; Casselmann, C.; Faßbinder, J.; Fischer, P.; Forbriger, M.; Hecht, S.; ... ; Miller, C.E.

Citation

Bubbenzer, O., Casselmann, C., Faßbinder, J., Fischer, P., Forbriger, M., Hecht, S., ... Zielhofer, C. (2022). Feldmethoden. In C. E. Miller (Ed.), *Geoarchäologie* (pp. 255-286). Berlin: Springer Spektrum.
doi:10.1007/978-3-662-62774-7_14

Version: Publisher's Version
License: [Leiden University Non-exclusive license](#)
Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/3564603>

Note: To cite this publication please use the final published version (if applicable).

LEHRBUCH

Christian Stolz
Christopher E. Miller *Hrsg.*

Geoarchäologie



 Springer Spektrum

Geoarchäologie

Christian Stolz · Christopher E. Miller
(Hrsg.)

Geoarchäologie

Hrsg.
Christian Stolz
Physische Geographie
Europa-Universität Flensburg
Flensburg, Schleswig-Holstein, Deutschland

Christopher E. Miller
Institut für Naturwissenschaftliche
Archäologie
Eberhard Karls Universität Tübingen
Tübingen, Baden-Württemberg
Deutschland

ISBN 978-3-662-62773-0 ISBN 978-3-662-62774-7 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-62774-7>

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

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2022

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Speicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung/Lektorat: Simon Rohlf s

Springer Spektrum ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Inhaltsverzeichnis

I Einführung

1	Was ist Geoarchäologie? – Eine Einführung	3
	<i>Helmut Brückner, Christopher E. Miller und Christian Stolz</i>	
1.1	Definition und Forschungsdesign	4
1.2	Interdisziplinarität	6
1.3	Kulturwissenschaften	7
1.4	Naturwissenschaften	9
2	Geschichte, Gegenwart und Zukunft der Geoarchäologie	13
	<i>Max Engel und Helmut Brückner</i>	
2.1	Von den Anfängen der geoarchäologischen Forschung im internationalen Kontext	14
2.2	Entwicklung der Geoarchäologie im deutschsprachigen Raum	18
2.3	Gegenwart und Zukunft der Geoarchäologie	20
3	Geoarchäologische Arbeitskreise in Deutschland	23
	<i>Markus Fuchs, Katleen Deckers, Eileen Eckmeier, Renate Gerlach, Mechthild Klamm und Marlen Schlöffel</i>	
3.1	Arbeitskreis Geoarchäologie	24
3.2	Arbeitsgruppe „Boden und Archäologie“	26
	Literatur	27
4	Praktische Anwendung und Perspektiven der Geoarchäologie	29
	<i>Renate Gerlach, Stefanie Berg und Martin Nadler</i>	
4.1	Prospektion: Überlieferungsbedingungen der archäologischen Substanz	32
4.2	Ausgrabung: Der „Dreck“ als archäologischer Befund	35
4.3	Auswertung: Der landschaftsarchäologische Kontext	38
5	Ausbildung von Geoarchäologen und berufliche Perspektiven	41
	<i>Renate Gerlach, Felix Henselowsky und Bertil Mächtle</i>	

II Sachthemen

6	Archäologische und naturwissenschaftliche Chronologien	49
	<i>Stefanie Berg und Christian Tinapp</i>	
7	Stratigraphie und Sedimentologie	55
	<i>Hans von Suchodoletz, Christian Tinapp und Lukas Werther</i>	
7.1	Sedimenttypen	56
7.2	Das Prinzip der Stratigraphie	64
8	Geoökologische Folgen historischer Landnutzung	71
	<i>Thomas Raab, Florian Hirsch, Anna Schneider und Alexandra Raab</i>	

9	Geoarchäologie in unterschiedlichen Landschaftsräumen	79
	<i>Thomas BIRDORFER, Helmut BRÜCKNER, Olaf BUBENZER, Markus DOTTERWEICH, Stefan DREIBRODT, Hanna HADLER, Peter HOUBEN, Katja KOTHIERINGER, Frank LEHMKUHL, Susan M. MENTZER, Christopher E. MILLER, Dirk NOWACKI, Thomas REITMAIER, Astrid RÖPKE, Wolfgang SCHIRMER, Martin SEELIGER, Christian STOLZ, Hans von SUCHODOLETZ, Christian TINAPP, Johann FRIEDRICH TOLKSDORF, Andreas VÖTT und Christoph ZIELHOFFER</i>	
9.1	Fluviale Systeme in humiden Räumen	81
9.2	Fluviale Systeme in Trockengebieten	95
9.3	Hochgebirge	108
9.4	Hangsysteme im Mittelgebirge und Gully-Erosion	115
9.5	Seen	120
9.6	Äolische Systeme	125
9.7	Lösslandschaften	129
9.8	Küsten	136
9.9	Höhlen und Abris	150
9.10	Quellen	156
10	Künstliche Ablagerungen	165
	<i>Hans-Rudolf BORK, Dagmar FRITZSCH, Svetlana KHAMNUEVA-WENDT, Dirk MEIER, Susan M. MENTZER, Christopher E. MILLER, Thomas RAAB, Astrid RÖPKE, Mara Lou SCHUMACHER, Mareike C. STAHSCHMIDT, Harald STÄUBLE, Christian STOLZ und Jann WENDT</i>	
10.1	Anthropogene Aufschüttungen	167
10.2	Tells	180
10.3	Formen der Agrarlandschaft	187
10.4	Gruben- und Grabenfüllungen	192
10.5	Anthropogene Ablagerungen im Siedlungsbereich	197
10.6	Bergbaurelikte	203
11	Kolluvien	207
	<i>Britta KOPECKY-HERMANN, Richard VOGT und Stefanie BERG</i>	
11.1	Datierung und Stratigraphie	210
11.2	Kolluvien in der Archäologie	211
11.3	Landschaftsveränderung durch Kolluvien	213
12	Böden und Bodenbildung	217
	<i>Dagmar FRITZSCH, Peter KÜHN, Dana PIETSCH, Astrid RÖPKE, Thomas SCHOLTEN und Heinrich THIEMEYER</i>	
12.1	Bodengenese und Bodenbildungsprozesse	218
12.2	Böden in archäologischen Fundstellen	227
12.3	Anthrosole	232
13	Taphonomie und postsedimentäre Prozesse	239
	<i>Christopher E. MILLER, Inga KRETSCHMER, Michael STROBEL, Richard VOGT und Thomas WESTPHALEN</i>	
13.1	Physikalische postsedimentäre Prozesse	242
13.2	Chemische postsedimentäre Prozesse	248

III Methoden

14	Feldmethoden	255
	<i>Olaf Bubener, Carsten Casselmann, Jörg Faßbinder, Peter Fischer, Markus Forbriger, Stefan Hecht, Karsten Lambers, Sven Linzen, Bertil Mächtle, Frank Schlütz, Christoph Siart, Till F. Sonnemann, Christian Stolz, Andreas Vött, Ulrike Werban, Lukas Werther und Christoph Zielhofer</i>	
14.1	Aufschlusstechniken, Bohrungen und Direct-Push-Sondierungen	256
14.2	Fernerkundung	264
14.3	Digitale Geoarchäologie	272
14.4	Geophysikalische Methoden	275
15	Analysemethoden	287
	<i>Katleen Deckers, Eileen Eckmeier, Peter Frenzel, Dagmar Fritzschn, Carolin Langan, Lucia Leierer, Susan M. Mentzer, Anna Pint, Alexandra Raab, Simone Riehl, Astrid Röpke, Frank Schlütz, Lyudmila S. Shumilovskikh und Katja Wiedner</i>	
15.1	Bodenchemische und bodenphysikalische Methoden	289
15.2	Pollenanalyse	300
15.3	Nichtpollen-Palynomorphe	303
15.4	Archäobotanische Makroreste	306
15.5	Anthrakologie (Holzkohlenanalyse)	307
15.6	Mikromorphologie	312
15.7	Biomarker	318
15.8	Foraminiferen und Ostrakoden	327
15.9	Phytolithe	329
15.10	Fourier-Transformations-Infrarotspektrometrie (FTIR)	331
16	Datierungsmethoden	337
	<i>Ronny Friedrich, Markus Fuchs, Peter Haupt, Nicole Klasen, Ernst Pernicka, Christoph Schmidt, Johann Friedrich Tolksdorf und Lukas Werther</i>	
16.1	Archäologische Datierung	338
16.2	Dendrochronologie und Holzfunde	345
16.3	Radiokohlenstoffmethode	346
16.4	Lumineszenzdatierung	352
17	Methoden der Geoinformatik in der Geoarchäologie	363
	<i>Bernhard Pröschel, Frank Lehmkuhl, Ulrike Grimm, Johannes Schmidt und Lukas Werther</i>	
17.1	Datenquellen	364
17.2	Höhenmodelle	369
18	Geoarchäologische Zeitschriften und Publikationsorgane	379
	<i>Christian Stolz und Christopher E. Miller</i>	
	Serviceteil	
	Literatur	384
	Stichwortverzeichnis	437



Feldmethoden

Olaf Bubbenzer, Carsten Casselmann, Jörg Faßbinder, Peter Fischer, Markus Forbriger, Stefan Hecht, Karsten Lambers, Sven Linzen, Bertil Mächtle, Frank Schlütz, Christoph Siart, Till F. Sonnemann, Christian Stolz, Andreas Vött, Ulrike Werban, Lukas Werther und Christoph Zielhofer

Inhaltsverzeichnis

- 14.1 Aufschlusstechniken, Bohrungen und Direct-Push-Sondierungen – 256**
 - 14.1.1 Invasive Methoden – 256
 - 14.1.2 Geringinvasive Methoden – 257
 - 14.1.3 Minimalinvasive Methoden – 258
- 14.2 Fernerkundung – 264**
 - 14.2.1 Funktionsweise und Daten – 265
 - 14.2.2 Theoretischer Rahmen – 266
 - 14.2.3 Geoarchäologische Anwendungen – 266
 - 14.2.4 Aktuelle Trends – 270
- 14.3 Digitale Geoarchäologie – 272**
- 14.4 Geophysikalische Methoden – 275**
 - 14.4.1 Geoelektrische Tomographie – 275
 - 14.4.2 Magnetische Prospektion – 277
 - 14.4.3 Georadar – 279
 - 14.4.4 Vermessung bei archäologischen Ausgrabungen – 279
 - 14.4.5 Geoarchäologische Zeigerpflanzen – 284

Das vorliegende Kapitel besteht aus mehreren Teilen, die von unterschiedlichen Arbeitsgruppen und Einzelpersonen getrennt voneinander erstellt worden sind. Da eine Gewichtung nach dem Umfang der Teilbeiträge aus diesem Grund nicht möglich ist, erfolgt die Angabe der Autorinnen und Autoren in alphabetischer Reihenfolge.

Zusammenfassung

Das zentrale Kapitel Feldmethoden liefert einen Überblick über das breite Methodenspektrum, das während geoarchäologischer Forschungskampagnen im Gelände zum Einsatz kommt. Beschrieben werden zunächst klassische Methoden wie Bohrungen, archäologische Grabungen und Baggerschürfe, gefolgt von der damit mittlerweile häufig kombinierten, jungen Methode der Direct-Push-Sondierung, womit gleichzeitige Messungen unterschiedlicher Parameter wie Spitzendruck, Farbe oder elektrischer Leitfähigkeit möglich sind. Dazugehörige Infoboxen befassen sich mit einem Beispiel aus der Feuchtbodenarchäologie und mit dem wichtigen Thema der langfristigen Probenarchivierung. Der Abschnitt Fernerkundung führt in die Geschichte und in die aktuelle Praxis der Methodik ein und befasst sich mit dem Potenzial von Luftbildern und räumlichen Satellitendaten. Das in einem weiteren Abschnitt vorgestellte Konzept der „Digitalen Geoarchäologie“ bewegt sich an der Schnittstelle zwischen Archäologie, Geo- und Computerwissenschaften. Weiterhin werden häufig eingesetzte geophysikalische Methoden, wie Geoelektrik, Geomagnetik und Georadar vorgestellt. Am Kapitelende geht es um das Potenzial archäologischer Zeigerpflanzen und ihrer Bedeutung für die archäologische Prospektion.

14

14.1 Aufschlussstechniken, Bohrungen und Direct-Push-Sondierungen

Peter Fischer, Christoph Zielhofer und Andreas Vött

Aufschlussstechniken und Bohrungen sind ein zentraler Bestandteil geoarchäologischer Forschungen, da erst durch eine gezielte, standortorientierte Auswahl der anzuwendenden Methode Bodendenkmäler in ihrem geoarchäologisch-stratigraphischen Kontext überhaupt erschlossen werden

können. Grundsätzlich wird zwischen invasiven, geringinvasiven und minimalinvasiven Methoden unterschieden (Zielhofer et al. 2018).

14.1.1 Invasive Methoden

14.1.1.1 Archäologische Grabung

Archäologische Grabungen sind die aufwendigste und detaillierteste Form der (geo-)archäologischen Erkundung (Schönfeld 2009, Werther und Feiner 2014). Der große Vorteil einer archäologischen Grabung liegt im Potenzial für eine größtmögliche Detaillichte an archäologischen Funden, stratigraphischer Auflösung und nachgeschalteten archäologischen und geoarchäologischen Analysetechniken (z. B. Cziesla und Ibeling 2014). Archäologische Grabungen orientieren sich entweder nach äquidistanten Abstichen (Planagrabung, z. B. Nami und Moser 2010) oder entlang der zu bergenden (geo-)archäologischen Schichtenabfolge (Stratagrabung). Archäologische Grabungen sind sehr zeit- und kostenaufwendig und führen zur Auflösung des Bodendenkmals im ursprünglichen Schichtungs- und Befundkontext. Von daher obliegt wissenschaftlichen Grabungsleitern eine wichtige Verantwortung nicht nur in der Durchführung der Grabung selbst, sondern auch in der Dokumentation des gesamten Grabungsablaufes, einschließlich nachhaltiger Datensicherung, und in der sorgfältigen Publikation der (geo-)archäologischen Funde und Befunde. Da die fachgerechte Lagerung des geborgenen Fundmaterials sehr teuer und aufwendig sein kann, müssen bei der Entscheidung für und gegen eine wissenschaftlich motivierte archäologische Grabung nicht nur der Grabungsaufwand, sondern auch nachgeschaltete Kosten und Personalkapazitäten für Analysen, Publikationen und Fundlagerung berücksichtigt werden. Ist das Bodendenkmal durch natürliche Prozesse (z. B. Hangerosion) oder durch unmittelbar an-

stehende Baumaßnahmen akut gefährdet, müssen Not- bzw. Rettungsgrabungen durchgeführt werden.

14.1.1.2 Baggerschurf

Baggerschürfe sind eine häufige Aufschlusstechnik im Zuge von geoarchäologischen Prospektionsmaßnahmen, bei allgemein landschaftsgenetischen Forschungen in archäologischem Kontext (Gerlach et al. 2012) sowie in der Flussgeoarchäologie und -geomorphologie (Fuchs et al. 2011). Häufig finden geoarchäologische Studien im Bereich aktueller Baggerschürfe statt, welche primär einem Bauvorhaben dienen. Hier sind insbesondere „lineare Projekte“ zu nennen wie Erdgas- oder Stromleitungen (Tinapp et al. 2008). Baggerschürfe haben den Vorteil, dass sie großräumige Aufschlussverhältnisse mit repräsentativen Profilaufnahmen und leicht zugängliche Probenentnahmestellen ermöglichen.

14.1.2 Geringinvasive Methoden

14.1.2.1 Rammkernsondierungen

Gerade bei Maßnahmen, bei denen invasive Eingriffe nicht durchführbar sind oder etwa durch hohe Grundwasserstände und schlecht zugängliches Gelände erschwert werden, stellen Rammkernsondierungen eine probate Alternative zur Erkundung des oberflächennahen Untergrundes dar. Im Vergleich zu Grabungen und Baggerschürfen sind sie zudem weniger zeit- und kostenaufwendig und ermöglichen stratigraphische Einblicke bis in deutlich größere Tiefen. In aktuellen geoarchäologischen Studien werden Rammkernsondierungen oft mit geophysikalischen Methoden gekoppelt (z. B. Kirchner et al. 2018; Wunderlich et al. 2018a). Dies geschieht einerseits, um Bohransatzpunkte unter Berücksichtigung variierender Ver-

hältnisse im Untergrund gezielter festlegen zu können, andererseits wird die stratigraphische Information aus den Rammkernsondierungen zur Kalibration der oberflächenbasierten geophysikalischen Prospektion genutzt. Zum Einsatz kommen in der Regel einseitig geschlitzte Sonden von einem oder zwei Metern Länge und Durchmesser zwischen 100 und 50 mm, die mit einem tragbaren Brennkraft- oder Hydraulikhammer in den Untergrund getrieben und anschließend hydraulisch geborgen werden. Bei bestimmten Fragestellungen bietet sich der Einsatz von geschlossenen Bohrsystemen an, bei denen in der Bohrsonde ein Plastikliner platziert wird. Diese Liner werden anschließend im Labor geöffnet und bieten die Möglichkeit einer umfassenden Untersuchung annähernd ungestörter Sedimentkerne. Wesentlich effektiver und ergonomischer im Vergleich zum Einsatz tragbarer Geräte ist die Durchführung von Rammkernsondierungen mit Spezialsondiergeräten auf Raupenfahrwerk, die zudem größere Bohrtiefen erlauben. Für den umfassenden Einsatz von Rammkernsondierungen, auch in Verbindung mit geophysikalischen Prospektionsmethoden, gibt es zahlreiche Beispiele, so etwa geoarchäologische und landschaftsgenetische Untersuchungen im Umfeld des antiken Ostia in Italien (Hadler et al. 2015a), an der mittelalterlichen Holsterburg in Nordrhein-Westfalen (Fischer et al. 2016a), im Bereich antiker Häfen auf Korfu (Finkler et al. 2018b) oder im Rungholt-Watt in Nordfriesland (Hadler et al. 2018a). Ein Beispiel umfangreicher Rammkernsondierungen entlang eines außergewöhnlichen Bodendenkmals stellt die von Zielhofer et al. (2014) im Zuge der Rekonstruktion des wasserbaulichen Konzeptes des Karlsgrabens (Fossa Carolina) durchgeführte Untersuchung dar.

14.1.3 Minimalinvasive Methoden

14.1.3.1 Direct-Push-Sondierungen

Direct-Push-Sondierungen stellen im Rahmen geoarchäologischer und geomorphologischer Forschungen eine innovative Methode dar, die – ursprünglich in der Ingenieurgeologie und Umweltanalytik entwickelt – zunehmend an Bedeutung gewinnt. Die Sondierungen erlauben die *in-situ*-Prospektion oberflächennaher Substrate mittels Sensoren, die in den Untergrund geschlagen oder hydraulisch gedrückt werden. Diese Technik ist vor allem für Lockersedimente bis zu einer Tiefe von etwa 30 m geeignet und dient vornehmlich der Messung, nicht der Probeentnahme. Die kontinuierlichen Messverfahren erlauben eine hohe vertikale, tiefengenaue Auflösung im Zentimeterbereich. Aus den gemessenen Parametern können direkte, hoch aufgelöste Rückschlüsse auf die Stratigraphie gezogen werden. Meistens werden Direct-Push-Messungen beispielsweise mittels einzelner Rammkernsondierungen unmittelbar kalibriert, wodurch die kosten- und zeiteffiziente Erstellung detaillierter Stratigraphien entlang von Transekten oder auf großen Flächen möglich ist (Fischer et al. 2016b; Finkler et al. 2018b; Hausmann et al. 2018; Obrocki et al. 2020). Dabei kommen je nach Fragestellung und Standortbedingungen unterschiedliche Sensoren zum Einsatz (▣ Abb. 14.1 und Infobox 14.1).

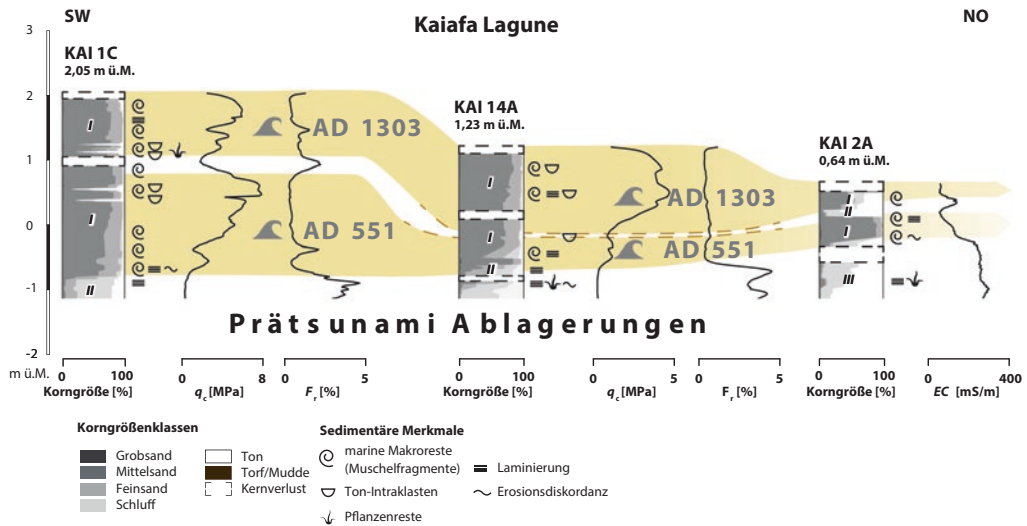
Die *in-situ*-Messung der elektrischen Leitfähigkeit (engl. *electrical conductivity*, EC), die sich reziprok zum elektrischen Widerstand verhält, basiert auf der sogenannten Vierpunktmethode. Eine typische EC-Messsonde besitzt vier Elektroden, die in Reihe äquidistant angeordnet sind. Über die beiden äußeren Elektroden wird kontinuierlich Strom bekannter Stärke in den Untergrund eingespeist, während an den beiden inneren Elektroden die Potentialdifferenz, also die elektrische Span-

nung gemessen und daraus die Leitfähigkeit abgeleitet wird (sogenannte Wenner-Anordnung). Die Messungen erlauben Rückschlüsse auf Korngrößenunterschiede, wobei in der Regel hohe Leitfähigkeiten mit feinkörnigen Substraten korrelieren und umgekehrt (z. B. Hausmann et al. 2018; Obrocki et al. 2020a; ▣ Abb. 14.2). Daten der Leitfähigkeitssondierungen lassen sich in die Auswertung oberflächenbasierter geoelektrischer Widerstandsmessungen integrieren und erhöhen deren Aussagekraft signifikant (Fischer et al. 2016b; Wunderlich et al. 2018b; vgl. ▣ Abb. 14.3 in Infobox 14.1). Leitfähigkeitsmessungen werden jedoch auch vom Chemismus des Porenwassers und dem Ionenbesatz der Substrate beeinflusst. Mittels eines hydraulischen Drucksensors (engl. *hydraulic profiling tool*, HPT) kann zusätzlich der körnungs- und lagerungsabhängige hydraulische Injektionsdruck gemessen und für den grundwassergesättigten Bereich die Permeabilität berechnet werden (z. B. Obrocki et al. 2020). Ein weiterer Vorteil der kombinierten EC- und HPT-Sondierungen besteht darin, dass die Messsonden nicht nur in den Untergrund gedrückt, sondern auch eingehämert und somit auch stärker konsolidierte Bereiche durchdrungen werden können.

Für die Durchführung von Drucksondierungen (engl.: *cone penetration testing*, CPT) werden Bohrgeräte mit sehr hohem Eigengewicht oder mit der Möglichkeit zur Verankerung im Untergrund benötigt, da die entsprechenden Messsonden nur hydraulisch gedrückt werden dürfen. Die Parameter Spitzen- und Porendruck (q_c und u_2 , engl.: *tip resistance* und *pore pressure*) sowie die Mantelreibung (*sleeve friction*, f_s) und das Reibungsverhältnis (F_r), die während der Drucksondierung erhoben werden, liefern unmittelbare Hinweise auf die Substrateigenschaften und die Lagerungsverhältnisse (▣ Abb. 14.2). Das Verhältnis der einzelnen Parameter zueinander kann



Abb. 14.1 a Direct-Push-Sondierung mittels HPT-Sonde bei Hallig Südfall (Nordfriesland). Über die elektrische Leitfähigkeit sowie die hydraulischen Eigenschaften der oberflächennahen Sedimente können z. B. die mittelalterliche Marschoberfläche sowie markante Sturmflutlagen identifiziert werden. b Seismische Drucksondierung (SCPT) an der Kaiafa-Lagune in Griechenland (siehe [Abb. 14.2](#)), für die das Bohrgerät im Untergrund verankert ist. In relevanten Tiefen wird mittels Hammerschlag ein seismischer Impuls ausgelöst. Über das an der Sonde montierte Geophon wird die tiefenspezifische Ausbreitungsgeschwindigkeit der seismischen Wellen (in diesem Fall: P- und S-Wellen) aufgezeichnet. Im untersuchten Geoarchiv konnten Sedimente zweier historischer Tsunami-Ereignisse eindeutig erfasst und charakterisiert werden (vgl. [Abb. 14.2](#); Fotos: A. Vött 2017, 2018)



▣ **Abb. 14.2** Stratigraphisches Transekt nordöstlich der Kaiafa-Lagune auf der Peloponnes in Griechenland (verändert nach Obrocki et al. 2020). Über die erhobenen Parameter der Druck- und Leitfähigkeitssondierungen lassen sich die Sedimente feinstratigraphisch untergliedern und die Tsunami-Lagen von 551 AD beziehungsweise 1303 AD, die durch eine feinkörnigere Zwischenlage getrennt sind, eindeutig identifizieren und verfolgen

für eine *in-situ*-Sedimentklassifikation herangezogen werden (z. B. Robertson 2016). Gekoppelt mit einem seismischen Sensor bzw. Geophon wird zusätzlich tiefengenau die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Primär- und Sekundärwellen abgegriffen (*seismic CPT*), die dann in die Auswertung oberflächenbasierter seismischer Messungen integriert werden können (z. B. Obrocki et al. 2020; ▣ Abb. 14.1b).

Allen angewandten Verfahren der Direct-Push-Techniken ist gemein, dass sie im Vergleich zu Rammkernsondierungen wesentlich

zeitsparender und tiefengenauer durchzuführen sind. Im Hinblick auf geophysikalische Erkundungen ermöglichen sie eine signifikante Erhöhung der vertikalen Auflösung und Aussagekraft oberflächenbasierter Prospektionsmethoden. Zusätzlich erlauben sie eine detaillierte Kennzeichnung der oberflächennahen Substrate, insbesondere wenn die Messergebnisse an relevanten Stellen über stratigraphische Informationen kalibriert sind (▣ Abb. 14.2). Moderne geoarchäologische Forschungen nutzen daher zunehmend Direct-Push-Messungen im Rahmen eines integrativen Ansatzes.

Infobox 14.1

Beispiele für Direct-Push-Anwendungen in der Geoarchäologie (Christoph Zielhofer, Peter Fischer, Ulrike Werban, Andreas Vött)

In Feuchtböden sind begrabene archäologische Strukturen wie die der *Fossa Carolina* (Karlsgraben), aber auch Reste von Pfahlbauten, Stauwehren, Schiffsländen oder Mühlen sehr zahlreich vorhanden. Diese (geo-)archäologischen Archive sind sehr wertvoll, da hohe Grundwasserspiegel eine

außergewöhnlich gute Erhaltung organikreicher Artefakte und anderer Umweltparameter mit sich bringen. Allerdings sind Feuchtbodenarchive schwer zu untersuchen, da Grundwasserzufluss, instabile Profilwände und große Mengen an organischen Materialien komplexe und teure Grabungstechni-

ken erfordern (Zielhofer 2017). Alternative Rammkernsondierungen führen zu starken Verdichtungen der organischen Lagen und weisen folglich erhebliche Höhenungenauigkeiten auf. Vor dem Hintergrund dieser Herausforderungen an die Feuchtboden(geo)archäologie werden bei den geoarchäologischen Untersuchungen an der *Fossa Carolina* erstmals umfangreiche DirectPush-Sondierungen mithilfe von Leitfähigkeits- und Farbsonden durchgeführt (Hausmann et al. 2018; Völlmer et al. 2018). An der *Fossa Carolina* fokussieren sich die Arbeiten auf die detaillierte Rekonstruktion von Kanalstrukturen in Zonen hohen Grundwasserspiegels, wo archäologische Grabungen nur mit unvertretbarem Aufwand möglich sind.

■ Abb. 14.3a zeigt Ergebnisse aus einer Direct-Push-Farbsondierung aus dem West-Ost-Bereich der *Fossa Carolina*. Das höhengenaue Querprofil dokumentiert die braungrauen organischen Lagen der verlandeten Kanalzone. Begrabene Hölzer (Weiden aus der Bruchtorfzone, aber auch mögliche Reste von Bauhölzern) sind als blasse, rötlich gelbe Farben deutlich zu erkennen (rote Kreise in ■ Abb. 14.3a).

Ein Beispiel für eine Kombination von Direct-Push-Sondierungen der elektrischen Leitfähigkeit mit geoelektrischer Widerstandstomographie zeigt ■ Abb. 14.3b.

Ein Problem oberflächenbasierter geophysikalischer Methoden im Allgemeinen und auch der geoelektrischen Widerstandstomographie im Speziellen ist die Vieldeutigkeit der Messergebnisse sowie die abnehmende Auflösung mit zunehmender Tiefe, solange keine Kalibration über stratigraphische Daten (z. B. aus Bohrkernen oder Aufschlüssen) vorgenommen wird. Direct-Push-Sondierungen der elektrischen Leitfähigkeit stellen einen innovativen Ansatz zur Reduzierung von Fehldeutungen und zur weiteren Annäherung an die tatsächliche stratigraphische Situation des oberflächennahen Untergrundes dar. Im Vergleich zu Rammkernsondierungen lassen sich nicht nur Schichtgrenzen in höherer Tiefengenauigkeit, sondern auch schichtinterne Widerstandswerte ableiten, die als Anfangsbedingungen in die Inversion der geoelektrischen Daten eingebunden werden können (Fischer et al. 2016b). Zusätzlich können engständig durchgeführte Leitfähigkeitsmessungen in Schichtmodelle überführt werden (sog. *blocking*), was eine weitere Verbesserung der vertikalen Auflösung geoelektrischer Profilmessungen erlaubt (Wunderlich et al. 2018b). Minimalinvasive Direct-Push-Verfahren werden durch das vielfältige Spektrum der einzusetzenden Messtechnik innerhalb der Geoarchäologie zukünftig weiter an Bedeutung gewinnen.

14.1.3.2 Profildokumentation an natürlichen Aufschlüssen

Insbesondere in wechselfeuchten Regionen sind entlang von Flussläufen häufig mächtige Profilwände von Auensedimenten natürlich aufgeschlossen. Dies ergibt für die Flussgeoarchäologie hervorragende Aufschlussverhältnisse, da sich Auenstratigraphien (Suchodoletz et al. 2018) aber auch begrabene Reste menschlichen Ursprungs entlang der Profilwände sehr gut untersuchen lassen (Ibouhouten et al. 2010). Die sehr guten

Aufschlussverhältnisse erlauben die repräsentative Dokumentation von Sediment-Boden-Abfolgen sowie die Rekonstruktion begrabener „Laufhorizonte“ und liefern sehr gute Datierungsmöglichkeiten, falls begrabene *in-situ*-Stationen (Feuerstellen, Kochgruben) erhalten sind. Ein weiterer Vorteil ist die leichte Verfügbarkeit von Sedimentprobenmaterial aus einem klaren stratigraphischen Kontext (siehe auch Infobox 14.2 zur Archivierung). Vorsicht ist geboten bei erhöhter Einsturzgefahr der mächtigen und verfestigten Lockersedimentmonolithen.

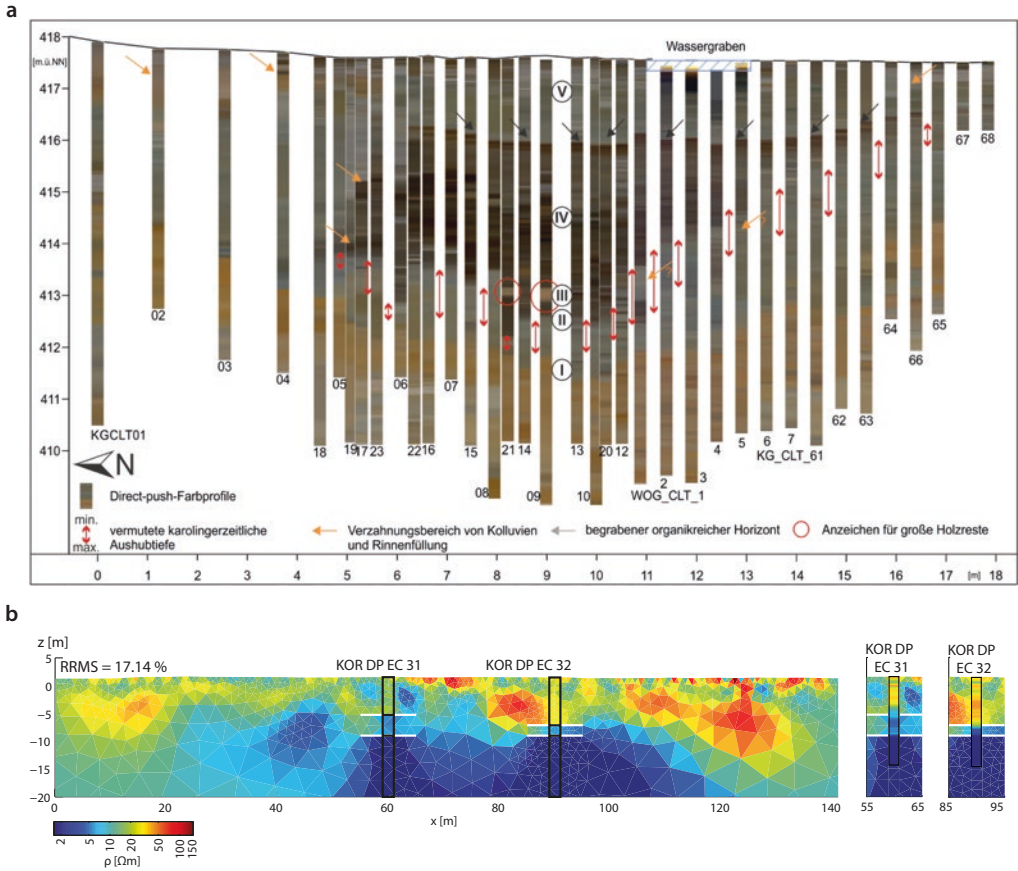


Abb. 14.3 a Transekt durch den West-Ost-Bereich des Karlsgrabens (Grafik: Universität Leipzig und Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung UFZ). Durch die hochauflösenden Messungen der Farbsonde können die verschiedenen Sedimente und die Geometrie des Grabens tiefengenau bestimmt werden. Im unteren Teil sind die rötlichen Farben des oxidierten sandig tonigen Untergrundes zu erkennen. Darüber und an den Rändern befindet sich feineres reduziertes (graues) Sediment. Im Zentrum befindet sich die mächtige organische Grabenfüllung. An den Rändern treten kolluviale Verlagerungen aus Richtung der Aushubwälle auf (Hausmann et al. 2018; Völlmer et al. 2018). b Geoelektrische Widerstandstomographie und Direct-Push-Sondierungen, hier als Widerstände in gleicher Skala abgebildet, entlang eines Transektes im Bereich des antiken Korfu (Ionische Inseln, Griechenland). Über die Integration von Schichtgrenzen (weiße Linien) und schichtspezifischen Widerständen innerhalb der Grenzen (rechte Darstellung), die aus den Sondierungen abgeleitet werden, wird das Inverserergebnis signifikant verbessert (Fischer et al. 2016b)

Infobox 14.2

Probenarchivierung (Lukas Werther)

Geoarchäologische Proben sind kultur- und umweltgeschichtliche Archive. Aus der Konvention von La Valetta bzw. Malta (Art. 1–4) lässt sich eine Zugehörigkeit zum ar-

chäologischen Erbe und damit eine Verpflichtung zur Inventarisierung und langfristigen sicheren Aufbewahrung ableiten (Europarat 1992). In der Praxis wird dieser

Verpflichtung nur eingeschränkt nachgekommen. Nicht alle Denkmalfachbehörden sehen diese Aufgaben in ihrem Zuständigkeitsbereich und selten werden dort Sedimentproben mit der zugehörigen Dokumentation systematisch archiviert. Anders als für geologische Bohrkerne, Flora und Fauna fehlen außerdem alternative Sammlungs- und Datenbankstrukturen auf nationaler oder internationaler Ebene. Häufig lagern geoarchäologische Proben und zugehörige Dokumentationen daher an Universitäten und Forschungseinrichtungen oder sogar in privaten Räumlichkeiten – und werden bei Personalwechseln, Umzügen, Platzmangel und veränderten Interessen entsorgt. Die Etablierung langfristiger Archiv- und Inventarisierungsstrukturen ist daher eine drängende Aufgabe (■ Abb. 14.4).

Für den Geoarchäologen stellen sich in diesem Zusammenhang drei grundlegende Fragen: Was soll archiviert werden, wie muss es archiviert werden und – eng mit den ersten Fragen verbunden – wofür soll es archiviert werden?

Bei der Auswahl der zu archivierenden Proben begegnen uns zwei Strategien. Weit verbreitet ist die Orientierung an bereits vordefinierten Fragestellungen, spezifischen Methoden und „spannenden“ Befunden. Selten ist die systematische Beprobung und Archivierung mit einem stärkeren Fokus auf zukünftige Fragestellungen und Methoden verbunden. Archiviert werden in der Regel unbearbeitete Sedimentproben (feucht und trocken; gestörte *bulk samples*/Sammelp Proben und ungestörte Blöcke/Kästen/Kerne), Reste und Präparate bearbeiteter Sedimentproben und ausgelesenes Material wie botanische Makroreste, Holz und Holzkohle oder Mollusken (Jacomet und Kreuz 1999; Goldberg und Macphail 2006). Für Proben aus Bodendenkmälern sind ggf. spezifische Vorgaben der zuständigen Denkmal-

behörden zu berücksichtigen (Verband der Landesarchäologen in der Bundesrepublik Deutschland 2006).

Die Form der Archivierung ist maßgeblich vom Probenmaterial und der geplanten zukünftigen Nutzung der Probe abhängig. Viele Proben und Analyseverfahren erfordern eine kühle und dunkle Lagerung ohne physikalische Belastungen, um eine längerfristige Stabilität der Struktur und vor allem der ggf. enthaltenen organischen Substanz zu garantieren. Sowohl die Trocknung und Erhitzung als auch die Zugabe von Stabilisierungs- und Konservierungsmitteln kann die Analysemöglichkeiten einschränken. Zentral ist neben der dauerhaften Lagerung der Probe die Dauerhaftigkeit der zugehörigen Kontextinformationen wie Fundplatz, Probennummer und Lokalisierung. Archivbeständige Schriftträger, sichere Zuordnung und eine langfristige Verständlichkeit unabhängig von der Person des Probennehmers sind unabdingbar. Dies gilt gleichermaßen für die zur Probe gehörende Dokumentation im Gelände und die dabei zugrunde gelegten Fragestellungen und Auswahlkriterien.

Die Form der Archivierung und die Probenauswahl bestimmen zusammen mit der verfügbaren Dokumentation im Gelände, wofür eine archivierte Probe zukünftig genutzt werden kann. Neben bereits bekannten wissenschaftlichen Fragestellungen und Analysemethoden sind dabei auch künftige Nutzungsoptionen zu berücksichtigen, was angesichts der enormen methodisch-analytischen Entwicklungen innerhalb der Geoarchäologie von zentraler Bedeutung ist. Sogar der Wissenschaftsrat (2011) hob in seinen Empfehlungen zu wissenschaftlichen Sammlungen als Forschungsinfrastrukturen die potenzielle bzw. prognostizierbare Relevanz von Objekten bzw. Proben ausdrücklich als Archivierungskriterium hervor.



▣ **Abb. 14.4** Nur langfristig archivierte Proben stehen auch zukünftigen Forschergenerationen für neue geoarchäologische Fragestellungen und Methoden zur Verfügung. Zentrale und systematische Archivierungskonzepte und -strukturen existieren ganz im Gegensatz zu anderen Disziplinen allerdings bislang kaum (Foto: Sammlung der BGR Berlin (o. J.), ► https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Sammlungen-Grundlagen/sammlungsschraenke_g.html. Zugegriffen: 12. Januar 2019)

14.2 Fernerkundung

Karsten Lambers und Till F. Sonnemann

14

Fernerkundung bedeutet im geoarchäologischen Kontext die berührungslose Untersuchung der Erdoberfläche mithilfe luft- oder satellitengestützter Sensoren, die von der Erdoberfläche reflektierte elektromagnetische Strahlung aufzeichnen. Da verschiedene Materialien die Strahlung unterschiedlich reflektieren, erlaubt das aufgezeichnete Signal Rückschlüsse darauf, was sich an der Erdoberfläche befindet, z. B. Wasser, Gestein, Boden(typen), Vegetation(sarten), Bebauung etc. (Albertz 2007).

Bereits seit über einem Jahrhundert verwendet die Luftbildarchäologie vom Flugzeug aufgenommene Luftbilder, um Fundstellen im Gelände zu detektieren (Luo et al. 2019).

Eine ebenso lange Geschichte hat die Fernerkundung zum Zwecke der Erd- und Umweltbeobachtung, wobei diese von Beginn an auf eine größere Bandbreite an Sensoren und Plattformen setzte (Lillesand et al. 2015). An der Schnittstelle zwischen beiden Disziplinen gelegen, kann die Geoarchäologie eine Reihe von Vorteilen der Fernerkundung nutzen:

- ▣ Die Fernerkundung erlaubt die kontaktlose Untersuchung der Erdoberfläche und liegt damit im Trend hin zu nicht-invasiven Methoden, die die Erhaltung von Bodendenkmälern in ihrem Kontext erlauben (Corsi et al. 2013).
- ▣ Ihre Vogelperspektive ermöglicht einen Blick auf größere landschaftliche und naturräumliche Zusammenhänge (Musson et al. 2013).
- ▣ Sie findet in vielen weiteren Bereichen Anwendung, von Geodäsie und Karto-

graphie über Stadt- und Raumplanung bis hin zu militärischen und kommerziellen Zwecken, sodass kontinuierlich und in großer Menge und Vielfalt Fernerkundungsdaten produziert werden, die potenziell für die Geoarchäologie relevant sind (Lillesand et al. 2015).

14.2.1 Funktionsweise und Daten

Fernerkundungssensoren nutzen die Energie weiter Bereiche des elektromagnetischen Spektrums, zu dem auch das sichtbare Licht gehört. Seit Erfindung der Kamera bietet das optische Spektrum eine große Breite an Anwendungen. Fotos lassen sich visuell, digital durch spezielle Algorithmen, aber auch photogrammetrisch (in 3D) auswerten (Bähr und Vögtle 2005). Die Entwicklung der Farbfotografie in den 1930er-Jahren ermöglichte multispektrale Aufnahmen (rot, grün, blau). Das Aufnahmespektrum wurde später in den nicht sichtbaren nahoptischen Bereich erweitert (ultraviolett, infrarot, Wärme). Neben der Entfernung zwischen Objekt und Sensor bestimmt die Wellenlänge die Qualität von Bilddaten: generell liefern höhere Frequenzen Daten höherer Auflösung, werden jedoch auch stärker von der Umwelt beeinflusst. Erdbeobachtung aus dem All kann nur mit Strahlung durchgeführt werden, welche die Atmosphäre durchdringt, wie Licht- oder Radiowellen.

Ein passives Fernerkundungssystem, z. B. eine optische Kamera, nutzt eine natürliche Energiequelle, z. B. Sonnenlicht, das von einem Objekt reflektiert wird, oder auch emittierte Wärmestrahlung. In der Geoarchäologie werden – soweit verfügbar – abhängig vom Ziel der Forschung die verschiedensten Sensoren genutzt (Goldberg und Macphail 2006): neben optischen Kameras auch solche, die Infrarot- und Wärmebilder aufnehmen. Bei multispektra-

len Aufnahmen decken die einzelnen Bilder jeweils einen breiten Frequenzbereich ab, während bei Hyperspektralaufnahmen ein Datenwürfel aus Bildern vieler Hundert eng aneinander liegender Frequenzen des elektromagnetischen Spektrums erstellt wird (Beck 2011). Die radiometrische, spektrale oder räumliche Bearbeitung der Daten und die Kombination verschiedener Bilddatensätze ermöglicht es, bestimmte Attribute der Erdoberfläche hervorzuheben und zu klassifizieren, um Aussagen z. B. über die Landnutzung, die Geologie, die mineralische Zusammensetzung von Böden oder die Hydrologie einer Region machen zu können. Bildauflösung und Abdeckung der Datensätze bestimmen dabei die Maßstabsebene der Untersuchung.

Ein aktives Fernerkundungssystem verfügt über eine eigene Energiequelle und sendet damit ein Signal aus, dessen Laufzeit nach der Reflexion am Objekt und Rückkehr zum Sensor gemessen wird. Da sich das Signal mit Lichtgeschwindigkeit ausbreitet, kann aus dieser Laufzeit auf die Distanz zwischen Objekt und Sensor geschlossen werden. Zu aktiven Systemen zählen LiDAR (engl. *light detection and ranging*) und SAR (engl. *synthetic aperture radar*). Hoch aufgelöste LiDAR-Geländemodelle eignen sich ideal für lokale oder kleinräumige Untersuchungen, z. B. von Siedlungsspuren (Nyffeler 2018). Satellitendaten mittlerer Auflösung liefern dagegen nützliche Daten auf regionaler Ebene, z. B. für Studien zur Land- und Ressourcennutzung (Wiseman und El-Baz 2007; Giardino 2011). Die seit wenigen Jahren für Wissenschaftler verfügbaren hoch aufgelösten SAR-Daten werden zur Erstellung von digitalen Höhenmodellen und zur Detektion von Landschaftsänderungen (Vulkanismus, Erdbeben) genutzt (Comer und Harrower 2013). Globale Geländemodelle oder atmosphärische Daten eignen sich wiederum für großflächige Studien, z. B. zum Klimawan-

del und zu Mensch-Umwelt-Beziehungen (Sirocko 2012; Goudie 2013).

14.2.2 Theoretischer Rahmen

Die Fernerkundung ermöglicht es, archäologische Hinterlassenschaften in ihrem naturräumlichen und kulturlandschaftlichen Kontext zu sehen, und zwar großflächig, hoch aufgelöst und mehrdimensional. Damit beschleunigt die Fernerkundung einen Perspektiven-, ja Paradigmenwechsel in der Archäologie, der aufgrund theoretischer Überlegungen ohnehin im Gange ist, nämlich weg von der Fundstelle hin zur Landschaft als Bezugsrahmen (geo-)archäologischer Forschung (Doneus 2013; Verhoeven 2017). Das Konzept der bezüglich räumlicher Abgrenzung, Zeitstellung und Funktion klar definierten Fundstelle (engl. *site*), das heute zumeist noch die Grundlage der archäologischen Denkmalpflege bildet, wird der Komplexität menschlichen Handelns in der Vergangenheit nicht gerecht. Dieses Handeln hat vielmehr Spuren in der gesamten Landschaft hinterlassen, nur eben in unterschiedlicher Zeitstellung, Art und Dichte (z. B. Siedlung, Landwirtschaft). Es hat damit die Landschaft ebenso geprägt wie natürliche Prozesse (z. B. Erosion, Sedimentation). Die Fernerkundung erlaubt die kombinierte Untersuchung anthropogener wie auch natürlicher Prozesse der Landschaftsgenese und ist damit ein ideales Werkzeug für geoarchäologische Forschungen.

14.2.3 Geoarchäologische Anwendungen

Die älteste und bekannteste Anwendung der Fernerkundung in geoarchäologischen Forschungen ist die Luftbildarchäologie. Die 1839 entwickelte Daguerreotypie lei-

tete den Beginn der Fotografie ein. Erste Landschaftsaufnahmen von einem Heißluftballon aus nahm Gaspar Felix Tournachon auf, genannt Nadar, der 1855 mit seiner fliegenden Dunkelkammer Furore machte (Albertz 2007). In der Archäologie wurde die Kombination erstmals 1889 von Giacomo Boni für Aufnahmen der Grabung des Forum Romanum genutzt. Für ortsfeste Aufnahmen an Grabungsstätten sind Ballons und Drachen auch heute noch im Einsatz, aber meist unbemannt mit Kamera und Intervall- oder Fernauslöser (Verhoeven 2009), wobei sie ab etwa 2010 durch die wesentlich manövrierfähigeren und erschwinglichen Drohnen abgelöst wurden. Die Frühzeit der Luftbildarchäologie wurde auch durch Versuche mit Luftschiffen (1896), Flugtauben (1903) und sogar Raketen geprägt, wie 1897 durch Alfred Nobel (Musson et al. 2013). Im Ersten Weltkrieg lieferten sich die gegnerischen Parteien ein Rennen um die Entwicklung von Luftbildkameras und deren Einsatz in Aufklärungsflugzeugen. In den 1920er-Jahren leitete O. G. S. Crawford (1929) durch eine Kartierungskampagne in England die systematische Luftbildarchäologie in Europa ein. Crawford interpretierte erstmals aus der Luft fotografierte Bewuchs- und Bodenmerkmale als Hinweise auf oberflächennahe archäologische Befunde wie Mauern und Fundamente oder verfüllte Gruben und Gräben, die durch ihre Präsenz das Pflanzenwachstum oder die Geländeoberfläche beeinflussen. Eine Herausforderung ist hierbei die Unterscheidung zwischen archäologischen und geo(morpho)logischen Befunden (z. B. Paläorinnen), die ähnliche Bewuchs- und Bodenmerkmale erzeugen können. Besonders in den gemäßigten, stark landwirtschaftlich genutzten Regionen Mitteleuropas stellt die Luftbildarchäologie bis heute eine der effektivsten Methoden zur nichtinvasiven Dokumentation archäologischer Hinterlassenschaf-

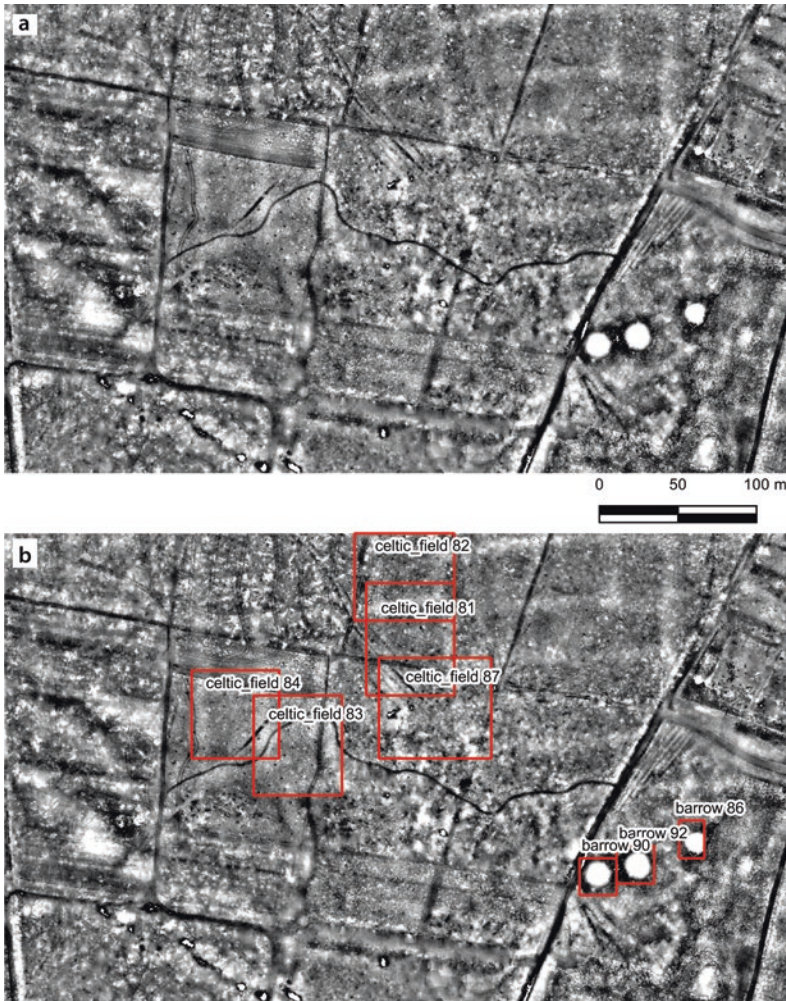
ten und ihres Umlandes dar (Cowley 2011). Der Erfolg dieser Prospektionsmethode hängt jedoch stark von Witterungsverhältnissen, rechtlichen und technischen Rahmenbedingungen wie auch von persönlichen Kenntnissen und Vorlieben der Luftbildarchäologen ab, weshalb die Luftbildarchäologie häufig als unsystematisch und subjektiv kritisiert wird (Cowley 2016; Verhoeven 2017). Ein entscheidender Nachteil ist zudem, dass diese Prospektionsmethode über bewaldetem Gebiet kaum Ergebnisse liefert, wodurch viele große Waldflächen in Mitteleuropa weiße Flecken auf der archäologischen Landkarte darstellen.

Diese weißen Flecken können erst seit der Einführung von luftgestütztem LiDAR gefüllt werden (auch bekannt als ALS, engl. *airborne laser scanning*) (Crutchley 2018). Die hohe Dichte der Pulse, die der am Flugzeug angebrachte Laser aussendet, bewirkt, dass einzelne Pulse auch in dichtem Wald den Boden erreichen und von dort reflektiert werden. Filtert man nun die vielen von der Vegetation reflektierten Pulse heraus, ergibt sich eine dreidimensionale Abbildung der Erdoberfläche (engl. *digital terrain model*, DTM) (Opitz und Cowley 2013). Da archäologische Befunde im Wald meist besser erhalten sind als auf landwirtschaftlich genutztem oder überbautem Land, konnten dank LiDAR zahlreiche bedeutende archäologische Befunde erstmals dokumentiert werden. Auf diese Weise hat sich LiDAR in weniger als zwei Jahrzehnten zu einer Standardmethode der archäologischen Prospektion entwickelt (Abb. 14.5).

Einen ähnlich rasanten Aufschwung in geoarchäologischer Forschung hat jüngst die Fernerkundung mittels Drohnen genommen (engl. *unmanned aerial vehicle*, UAV) (Campana 2017). Große Vorteile dieser Plattform sind die Flexibilität, die einfache Handhabung und die geringen Kosten. Zwar ist die Tragfähigkeit von Drohnen begrenzt, doch können sie problemlos handelsübliche Kameras tragen, die eine fotorealistische Aufnahme und gleichzeitig – bei ausreichender

Überlappung der Einzelbilder – eine dreidimensionale Modellierung des Geländes erlauben. Kombiniert mit autonomer Flugfähigkeit ergibt sich somit ein leistungsstarkes Dokumentationssystem für kleinräumige Geländeaufnahmen, z. B. von Ruinenstätten und ihrem Umland (Abb. 14.6). Die technische Entwicklung schreitet dabei sehr schnell voran. So werden Drohnen zur schnellen Dokumentation immer größerer Flächen eingesetzt. Außerdem stehen seit Kurzem auch LiDAR-Sensoren für UAVs zur Verfügung. Drohnen sind damit auf dem besten Wege, Kleinflugzeuge und Helikopter als Standardplattformen archäologischer Fernerkundung abzulösen.

Da Luftbilder schon seit weit über einem Jahrhundert und Satellitenbilder nunmehr auch bereits seit mehr als einem halben Jahrhundert aufgenommen werden, bietet die Fernerkundung eine zeitliche Tiefe, die die Untersuchung von Landschaftswandel im Laufe der Zeit ermöglicht (Hanson und Oltean 2013). Auch wenn diese Tiefe zumeist nicht in archäologisch relevante Epochen zurückreicht, kann ein Vergleich früher und heutiger Fernerkundungsdaten doch beispielhaft zeigen, wie Landnutzung oder Klimawandel die Landschaft verändern. Ein Beispiel ist die Generierung historischer Geländemodelle (engl. *historical digital elevation model*, hDEM) anhand alter Luftbilder, die eine Landschaft abbilden, wie sie heute nicht mehr existiert (Sevara et al. 2018). Ein Vergleich eines historischen mit einem aktuellen Geländemodell erlaubt die Quantifizierung des Landschaftswandels und gibt gleichzeitig Aufschluss über die Aufhebungsbedingungen archäologischer Befunde (Abb. 14.7). Außerdem zeigen historische Luft- und Satellitenbilder viele archäologische Fundstellen, die heute nicht mehr existieren. Besonders eindrücklich zeigt sich dies im Nahen und Mittleren Osten, wo Bilder von Spionagesatelliten aus den 1960er/70er-Jahren noch zahlreiche Fundstellen zeigen, die seither durch



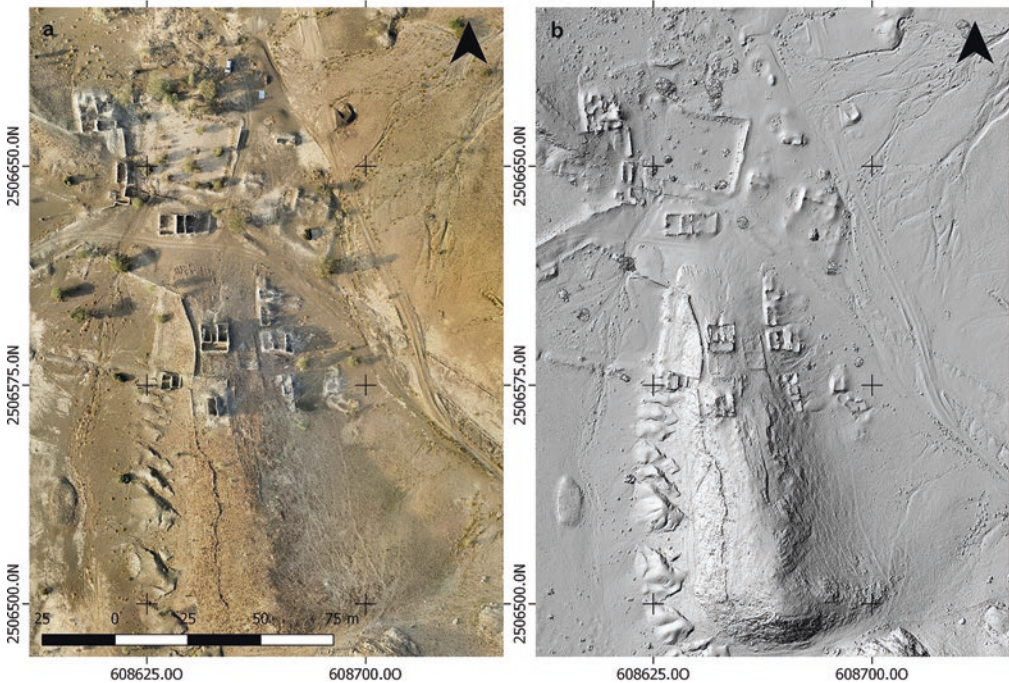
14

Abb. 14.5 LiDAR-Geländemodell der Region Veluwe in den zentralen Niederlanden. **a** Visualisierung mittels *simple local relief model* (SLRM). **b** Ergebnis einer automatisierten Fundstellendetektion. Markiert sind zwei Typen von Fundstellen, Grabhügel (engl. *barrows*) und Ackerspuren (engl. *celtic fields*). Die Zahl gibt auf einer Skala von 1 bis 100 jeweils die Wahrscheinlichkeit einer korrekten Detektion an. Datenquelle: ► www.ahn.nl, Graphik: W.B. Verschoof-van der Vaart, Leiden University (Mit freundlicher Genehmigung von © Wouter B. Verschoof-van der Vaart 2019. All Rights Reserved)

Urbanisierung, Mechanisierung der Landwirtschaft, Bewässerungsprojekte oder zuletzt durch Kriegseinwirkung verloren gingen (Casana und Cothren 2008).

Eine weitere wichtige Anwendung der Fernerkundung auf regionaler Ebene ist die Geofaktorenanalyse. In dieser dienen v. a. Geländemodelle und Multispektralbilder zur Klassifikation der Landschaft be-

züglich wesentlicher naturräumlicher Merkmale, die entweder direkt erfasst werden – z. B. Höhe, Böden, Vegetation, Wasserquellen und -läufe – oder aus den Daten abgeleitet werden – z. B. Geländeform, Hangneigung, Sonnenexposition, Bodengüte etc. Die räumliche Verteilung dieser Geofaktoren kann nun mit der räumlichen Verteilung archäologischer Befunde verglichen

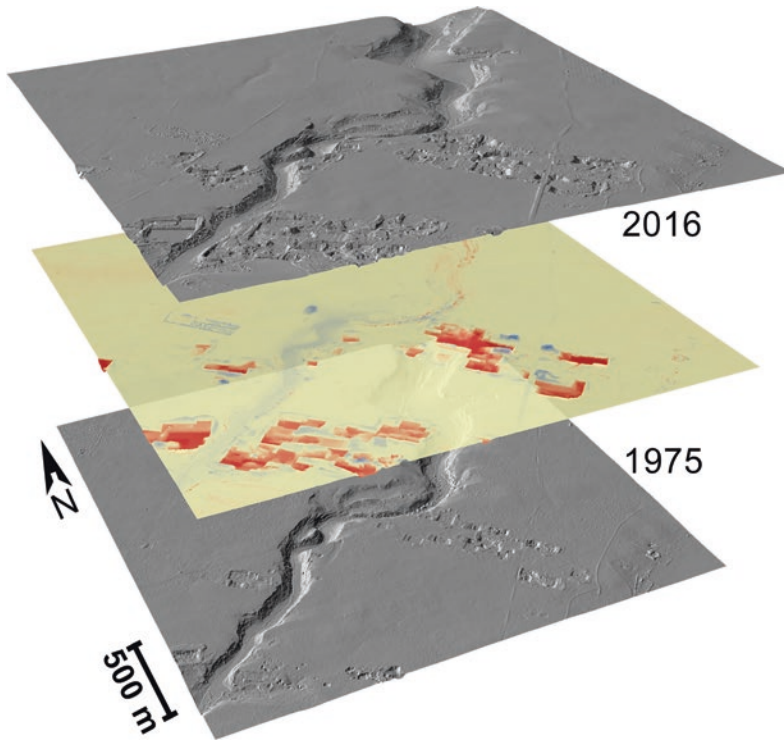


■ **Abb. 14.6** a Orthofoto mit b entsprechendem Geländemodell, beide berechnet auf der Grundlage von Luftbildern. Die Bilder dokumentieren die Oasensiedlung Safrat im Sultanat Oman und wurden mit einem SenseFly eBee Fixed-Wing-UAV, ausgestattet mit einem SenseFly S.O.D.A. RGB-Sensor, aufgenommen. Alle Daten wurden mit Pix4D verarbeitet. Die Datenerfassung und -verarbeitung wurde von Matthias Lang vom eScience-Center der Universität Tübingen durchgeführt (aus Lang et al. 2016; mit freundlicher Genehmigung von © Archaeopress Publishing Ltd 2016. All Rights Reserved)

werden. Sind dabei wiederkehrende Muster erkennbar, erlauben diese Rückschlüsse auf die Wirtschaftsweise und Landnutzung vergangener Gesellschaften. Außerdem können Siedlungsaktivitäten in der Vergangenheit zu einer charakteristischen Bodenbedeckung in der Gegenwart führen, was die Detektion weiterer, bisher unbekannter Fundstellen erlaubt (■ Abb. 14.8). In einem weiteren Schritt können solche Muster auch genutzt werden, um im Rahmen der Archäoprognose (engl. *predictive modelling*) die Wahrscheinlichkeit der Präsenz bisher unentdeckter Befunde in bestimmten naturräumlichen Kontexten einzuschätzen (Ducke 2007).

Eine solche stark ökologisch-/ökonomische Perspektive auf die Vergangenheit hat

jedoch den Nachteil, dass sie soziokulturelle Faktoren – z. B. politische, administrative, historische, kulturelle, ideologische oder ethnische Prägungen oder Grenzen – ausblendet, die die Landnutzung und -gliederung mindestens ebenso stark beeinflussen. Einigen dieser Faktoren kann man sich aufgrund von Fernerkundungsdaten jedoch zumindest annähern und sie so ebenfalls berücksichtigen. So kann z. B. die visuelle Wahrnehmung einer Landschaft anhand von Sichtbarkeitsbereichen (engl. *viewshed*) nachvollzogen werden, die auf der Grundlage von Geländemodellen berechnet werden. Ebenso können Siedlungen, Straßen oder religiöse Stätten als soziokulturelle Attraktoren in archäologische Prognosemodelle einbezogen werden. Auf diese Weise



■ **Abb. 14.7** Landschaftswandel auf Sizilien. Oben: aktuelles LiDAR-Geländemodell. Unten: historisches Geländemodell auf der Grundlage von Luftbildern. Mitte: Höhendifferenz (rot: Abtrag, blau: Akkumulation). Veränderungen ergeben sich aufgrund menschlicher Eingriffe (auf der Hochfläche) und natürlicher Prozesse (im Flusstal). Graphik: C. Sevara, Universität Wien (nach: Sevara et al. 2018, Fig. 5; mit freundlicher Genehmigung von © Christopher Sevara 2019. All Rights Reserved)

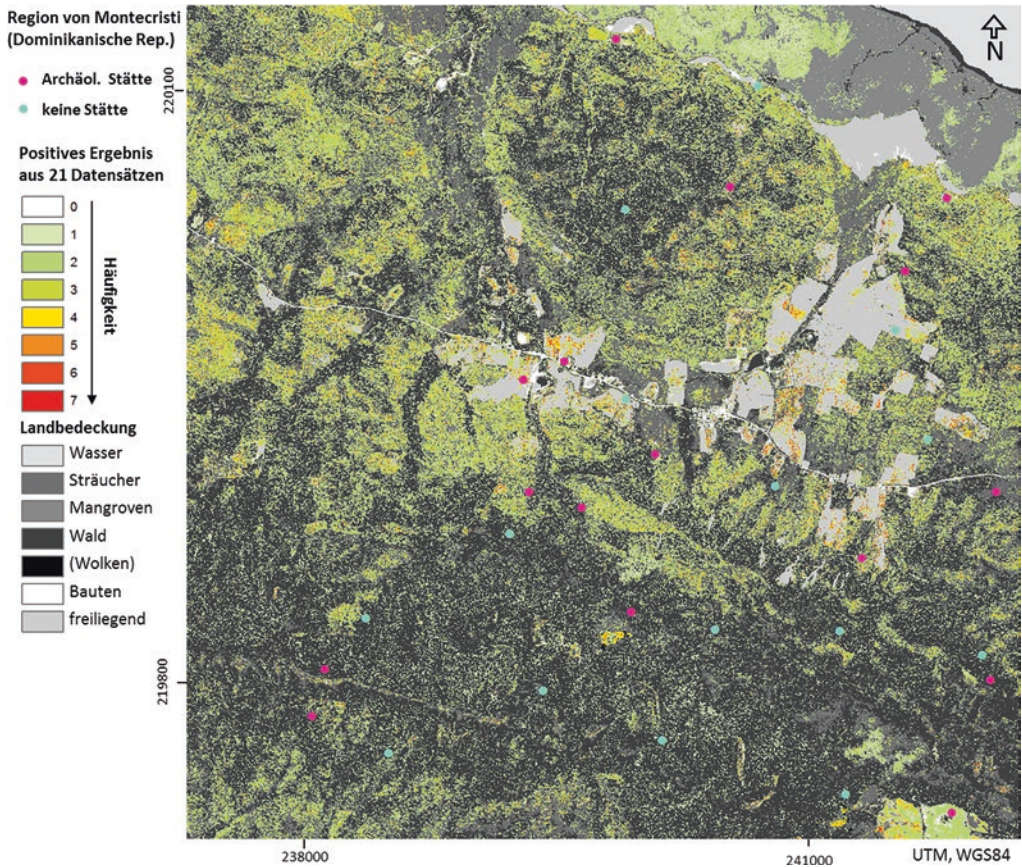
ergibt sich ein komplexeres, aber auch plausibleres Modell vergangener Verhältnisse in einer Untersuchungsregion (Kamermans et al. 2009; Verhagen und Whitley 2012).

14.2.4 Aktuelle Trends

Die heute verfügbare Quantität und Qualität an Fernerkundungsdaten stellt die geoarchäologische Forschung vor Herausforderungen, eröffnet ihr aber auch Chancen, wie sich in jüngsten Entwicklungen zeigt.

In der Luftbildarchäologie wurden zur Detektion archäologischer Befunde traditionell einzelne Luftbilder visuell abgesucht

und erkannte Spuren manuell kartiert. Heutige Fernerkundungsdaten sind für eine solche Vorgehensweise viel zu komplex. Daher werden seit wenigen Jahren in Zusammenarbeit mit der Informatik Algorithmen entwickelt, um häufig auftretende Kategorien von Fundstellen (z. B. Grab- oder Siedlungshügel) automatisiert zu detektieren (Lambers 2018). Bisher beruhen die meisten dieser Algorithmen auf generalisierten Beschreibungen solcher Fundstellentypen, aus denen sich Regeln ableiten lassen, wonach der Computer in Bildern suchen soll. Flexibler und robuster sind jedoch jüngste Anwendungen von maschinellem Lernen, bei denen selbstlernende Algorithmen an-



■ **Abb. 14.8** Wie ähnlich sind sich archäologische Stätten? Statistischer Ansatz, um über die Werte von Bildpunkten in 21 verschiedenen Datensätzen (multispektral, SAR) zu prüfen, ob sich indigene Siedlungsstätten auf Hispaniola anhand charakteristischer Muster besser kartieren bzw. neu entdecken lassen (Koordinaten: UTM, WGS84). Graphik: T. Sonnemann (nach Sonnemann et al. 2017, Fig. 9; mit freundlicher Genehmigung von © Till F. Sonnemann 2019. All Rights Reserved)

hand zahlreicher Beispiele von Befunden eines Typs trainiert werden, diese z. B. in LiDAR-Daten zu erkennen (■ Abb. 14.5). Die Automatisierung verspricht, die Effizienz und Effektivität der Auswertung von Fernerkundungsdaten erheblich zu steigern (Verschoof-van der Vaart und Lambers 2019; Lambers et al. 2019).

Eine Qualitätssteigerung ist auch durch die Kombination von Fernerkundungsdaten verschiedener Sensoren, Spektralbereiche und Auflösungen möglich (Sarris 2015). Dabei können auch geophysikalische Daten aus der terrestrischen Prospektion einbezo-

gen werden, die einen Blick unter die Erdoberfläche erlauben (siehe ► Abschn. 14.4). Es liegt auf der Hand, dass eine solche Datenfusion deutlich komplexere Auswertungen erlaubt als bisher, z. B. indem zusätzliche Umweltparameter einbezogen werden oder durch die Analyse über verschiedene Maßstabsebenen hinweg. Auch hierzu sind informatische Verfahren unabdingbar.

Insgesamt ist die Fernerkundung eine extrem vielseitige und leistungsstarke Methode der geoarchäologischen Forschung und bildet daher zu Recht die Grundlage vieler Forschungsprojekte. Der technolo-

gische Fortschritt bei Plattformen, Sensoren und Analysemethoden wird von zahlreichen Nutzern vorangetrieben (Opitz und Hermann 2018) und vollzieht sich in immer schnelleren Intervallen, sodass sich jegliche Anwendung der Fernerkundung heute mit den Chancen und Herausforderungen von Big Data konfrontiert sieht (Bennett et al. 2014; Bevan 2015). Die Geoarchäologie muss einerseits eigene Methoden entwickeln, um diese Datenfülle nutzen zu können. Andererseits zählt sie jedoch eindeutig zu den Nutznießern dieser Entwicklung, standen doch noch nie so zahlreiche und vielfältige Daten für die Forschung zur Verfügung wie heute. In Zukunft wird die Fernerkundung für die geoarchäologische Forschung daher eher noch wichtiger werden als heute (Forte und Campana 2016).

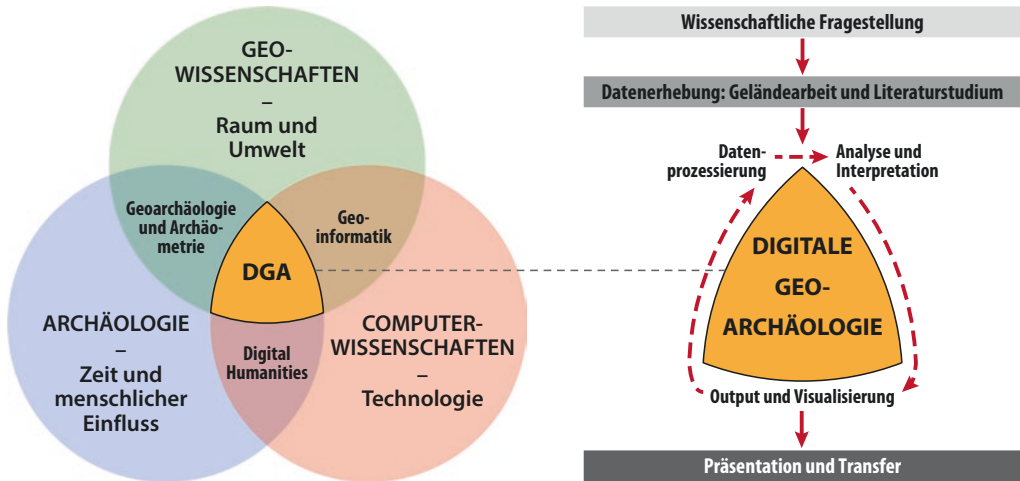
14.3 Digitale Geoarchäologie

Olaf Bubenzer, Christoph Siart und Markus Forbriger

Wie in allen anderen Wissenschaftsdisziplinen werden auch in der Geoarchäologie in zunehmendem Maße Daten digital aufgenommen, verarbeitet, analysiert und präsentiert. Grundsätzlich ermöglichen verbesserte Rechenleistungen und zunehmend einfacher zu bedienende Softwareprodukte sowie standardisierte Datenaustauschformate die Bearbeitung von interdisziplinären Fragestellungen zu Mensch-Umwelt-Wechselwirkungen und zum kulturellen Erbe auf unterschiedlichen räumlichen und zeitlichen Maßstabsebenen. Jedoch wurden in den letzten Jahren häufig auf disziplinärer Ebene Expertensysteme entwickelt, denen differierende fachspezifische Herangehensweisen zugrunde liegen. Hier setzt das Konzept „digitale Geoarchäologie“ an (vgl. Siart et al. 2018). Es verknüpft über die Computerwissenschaften archäologische und geowissenschaftliche Expertise, wodurch sich die oftmals unvollständig so-

wie monodisziplinär vorliegenden Sichtweisen überwinden und neue wissenschaftliche Erkenntnisse an der Schnittstelle zwischen dem Menschen und seiner Umwelt gewinnen lassen (Siart et al. 2018). Über klassische geowissenschaftliche Untersuchungen hinaus – zum Beispiel im Zuge der Analyse und Datierung von Geoarchiven wie Sedimenten, Böden und Landformen oder der geophysikalischen Prospektion (vgl. ▶ Abschn. 14.4 sowie Sarris et al. 2018; Theodorakopoulou et al. 2018) – werden auch in den Geisteswissenschaften – zum Beispiel in der Archäologie und Ethnologie – verstärkt digitale Methoden entwickelt und eingesetzt (Jannidis et al. 2017). Das Konzept „digital geoarchaeology“ führt disziplinär gewonnenen Daten (wieder) zusammen (■ Abb. 14.9, links). So ermöglichen flächendeckende Satellitenbildanalysen die Erkennung von (anthropogenen) Oberflächenstrukturen (vgl. ▶ Abschn. 14.2 und Lambers 2018), Laserscanning die (dreidimensionale) Identifizierung archäologischer Fundplätze (Hämmerle und Höfle 2018; Raun et al. 2018) und digitale Geländemodelle regionale Raum- und Weganalysen (Siart et al. 2013; Bubenzer et al. 2018; Knitter und Nakoinz 2018). Geographische Informationssysteme (GIS) und weitere computergestützte Analyseplattformen dienen bereits seit mehreren Jahren der Datenverarbeitung und -verwaltung und helfen, Kulturerbestätten zu detektieren, zu dokumentieren und zu schützen (z. B. Ioannides et al. 2014) (■ Tab. 14.1). Die mehr und mehr in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung vorliegenden Daten erlauben zudem, Skalenprobleme zu überwinden (z. B. Stein 1993; Schlummer et al. 2014). Letztere ergeben sich oftmals aus der Tatsache, dass die Archäologie räumlich und zeitlich begrenzte sowie auf den Menschen bezogene Fragestellungen bearbeitet, während die Geowissenschaften eher spezielle Umweltbedingungen und/oder deren Entwicklung über längere Zeitphasen untersuchen. Obwohl die technischen Vorausset-

14.3 Digitale Geoarchäologie



■ **Abb. 14.9** Das Konzept „digitale Geoarchäologie“ (DGA) an der Schnittstelle zwischen Archäologie, Geo- und Computerwissenschaften. Links: Während sich die Archäologie vor allem auf historische Zusammenhänge und Zeitscheiben an bestimmten „Stätten“ konzentriert, betrachten die Geowissenschaften längere Zeitscheiben und räumliche Dimensionen, etwa im Umfeld von archäologischen Stätten. Die Computerwissenschaften nutzen digitale Werkzeuge, vor allem zur Nachbereitung und Zusammenführung (Fusion) von archäologischen und digitalen Datensätzen. Alle drei Disziplinen arbeiten im Konzept „digitale Geoarchäologie“ zusammen, je nach Fragestellung in unterschiedlicher Gewichtung (verändert nach Siart et al. 2018, vgl. auch ■ Tab. 14.1). Rechts: Schematische Darstellung von Arbeitsabläufen im Konzept „digitale Geoarchäologie“. Je nach wissenschaftlicher Fragestellung und (archäologischem) Untersuchungsgegenstand werden verschiedene Datensätze gemeinsam und schrittweise generiert, zusammengeführt, verarbeitet, analysiert und die Ergebnisse präsentiert (vgl. auch ■ Tab. 14.1). Letztere können neben dem wissenschaftlichen Fortschritt in besonderem Maße auch dem „cultural heritage management“ und dem Schutz archäologischer Fundstätten dienen (verändert nach Siart et al. 2013, 2018)

zungen gegeben sind und die notwendigen Daten häufig in digitaler Form vorliegen, existieren bislang nur wenige echte interdisziplinäre Projekte. Dies mag in den großen disziplinenen Fortschritten in der Nutzung und Entwicklung digitaler Techniken begründet sein (Forte und Campana 2016), was im Hinblick auf (rein) archäologische Daten unter anderem zum Konzept „digital archaeology“ geführt hat (Zubrow 2006). Der Erkenntnisfortschritt bleibt jedoch so eher disziplinär und erschwert z. B. räumliche Analysen von Daten verschiedener Disziplinen, die letztendlich erst zu einem integrierten Verständnis von Mensch-Umwelt-Interaktionen führen können. Im umgekehrten Fall benötigen die Geowissenschaften verlässliche archäologische Informationen für ein solches Verständnis,

aber auch für die Beurteilung der Rolle des Menschen bei der (Kultur-)Landschaftsentwicklung. Die Arbeitsgruppe „Geoarchaeology“ in der *International Association of Geomorphologists (IAG)* und der „Arbeitskreis Geoarchäologie“ in der Deutschen Gesellschaft für Geographie tragen diesem Umstand in gewisser Weise Rechnung, gemeinschaftliche interdisziplinäre Forschungen auf Basis digitaler Daten und Anwendungen sind jedoch auch in diesen noch selten. Andererseits existieren archäologische Arbeitsgruppen, wie etwa die AG „Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology“ (CAA), die vor allem von der Archäologie, der Mathematik und den Computerwissenschaften betrieben werden, während dort die Geographie und die Geowissenschaften kaum vertre-

■ **Tab. 14.1** Konkrete interdisziplinäre Arbeitsschritte und Beispiele im Konzept „digitale Geoarchäologie“. Verändert nach Siart et al. (2018)

Daten(vor)prozessierung	Analyse und Interpretation	Ergebnisse und Visualisierung
(Stereoskopische) Luftbilder	Analyse digitaler Geländemodelle	Räumliche Mobilität (Straßen und Kommunikationsnetze)
Satellitendaten (Georeferenzierung, Orthorektifizierung, Mosaik)	„Least-cost“-Analyse	Untersuchungsstandort (Landnutzung, Siedlungslagen)
	Prognosemodelle	
LiDAR (Punktwolke, Registrierung, Organisation, Segmentierung)	GIS-basierte Raumanalysen	Begrabene archäologische Hinterlassenschaften (Mauern, Bewässerungssysteme)
Digitale Geländemodelle	Datenintegration (Raster-Vektor-Fusion)	Perspektivische Betrachtung des Untergrundes
Karten und Vektorisierung (historische, topographische und geologische Umweltdaten)	Analyse geophysikalischer Daten (räumliche Bezüge, 2D-/3D-Datenkonversion)	Landschaftsvisualisierung für verschiedene Zeitscheiben und Entwicklungsstadien

ten sind. Schließlich sind noch die Computerwissenschaften zu nennen, die sich zwar in den letzten Jahren zunehmend vernetzen, dies jedoch wiederum jeweils nur in die eine oder die andere Richtung, etwa im Zusammenhang mit der Dokumentation archäologischer Befunde (Schäfer et al. 2011; Var et al. 2013; Bogacz et al. 2015) oder der photogrammetrischen Bildanalyse (Sauerbier 2013; Kersten et al. 2014). Bock et al. (2013) fassen diese Studien unter dem Begriff „*computational humanities*“ zusammen. Für geoarchäologische Untersuchungen werden die hier gewonnenen interdisziplinären Fortschritte jedoch noch nicht ausreichend erschlossen. Auch werden Projektideen an der Schnittstelle von Mensch zu Umwelt kaum von der Informatik oder den Computerwissenschaften selbst entwickelt. Dies gilt in gleichem Maße für die „*digital humanities*“, die zwar verschiedene digitale Werkzeuge und Methoden, häufig in transdisziplinärer Sichtweise, nutzen (Burdick et al. 2012), die sich aber im Gegensatz zu den „*computational humanities*“ in einem engeren Spektrum auf die Informationswissenschaften konzentrieren (Bock

et al. 2013). Somit wird – v. a. in Deutschland – die Geoarchäologie im ursprünglichen Sinn hauptsächlich von der Physischen Geographie und insbesondere der Geomorphologie bestimmt, während die „*digital archaeology*“ und die „*computational humanities*“ schwerpunktmäßig von der Archäologie und den Computerwissenschaften ohne intensiven Austausch mit anderen Disziplinen betrieben werden. Dies ist nicht zuletzt den unterschiedlichen wissenschaftlichen Theorien und Herangehensweisen der genannten Disziplinen geschuldet.

Im Hinblick auf die Verarbeitung digitaler Daten wurden, wie bereits erwähnt, in allen Fächern große Fortschritte erzielt, die gewonnenen Erkenntnisse sind jedoch teils sehr speziell und die Anwendung der entwickelten Methoden benötigt meist Expertenwissen. Das multimethodische Konzept „digitale Geoarchäologie“ (■ Abb. 14.9, rechts) erlaubt es, dieses fragmentierte Wissen im Sinne einer echten interdisziplinären Betrachtung von Mensch-Umwelt-Interaktionen zusammenzuführen und neue Erkenntnisse zu gewinnen, ohne dabei die fachliche Unabhängigkeit der beteiligten Disziplinen infrage zu stellen.

14.4 Geophysikalische Methoden

14.4.1 Geoelektrische Tomographie

Stefan Hecht, Bertil Mächtle und Olaf Bubenzer

Bei der Bearbeitung geoarchäologischer Fragestellungen eignen sich geoelektrische Methoden sehr gut zur zerstörungsfreien Erkundung des oberflächennahen Untergrunds. Besonders bewährt hat sich dabei die geoelektrische Tomographie (*electrical resistivity tomography*, ERT), die meist gar nicht als „echte“ dreidimensionale 3D-Tomographie angewendet wird, sondern als zweidimensionale Messung (Sondierungskartierung) ein 2D-Schnittbild der Boden- und Sedimentschichten erzeugt. Gerade Lockersedimente können mithilfe der geoelektrischen Tomographie sehr gut differenziert werden, da sich Unterschiede in der Korngrößenzusammensetzung auf den Wassergehalt auswirken, der ein wesentlicher Faktor des spezifischen elektrischen Widerstands im Boden darstellt (zu geoelektrischen Methoden s. z. B. Reynolds 2011, Everett 2013 oder Berkold et al. 2005). Archäologische Artefakte, die in Lockermaterial (z. B. Hochflutsediment) eingebettet sind, zeichnen sich in der Regel gut als Anomalien höherer oder auch niedrigerer Widerstandswerte vom umgebenden Substrat ab. Da die meisten Substrattypen eine weite Wertespanne einnehmen können, ist es häufig nicht möglich, von den Messwerten direkt auf einen spezifischen Substrattyp zu schließen. Im Vergleich der Widerstandswerte sind aber in der Regel sowohl Differenzierungen zwischen Böden und Sedimenten unterschiedlichen Alters als auch die Identifizierung archäologischer Strukturen (z. B. verschüttete Mauerreste, Gräben) möglich.

Im Gelände wird üblicherweise mit Multielektrodenapparaturen gearbeitet, die z. B. 50 oder 100 Elektroden in linienhafter (für

2D) oder flächenhafter Anordnung (für 3D) miteinander verbinden (■ Abb. 14.10). Das Messprinzip der geoelektrischen Tomographie basiert auf den klassischen 4-Punkt-Verfahren (z. B. Lange und Jacobs 2005), bei denen jeweils zwei Elektroden einen Strom in den Untergrund speisen und zwei andere Elektroden das elektrische Potential im Boden bestimmen. Für ein Messprofil (2D) oder eine Messfläche (3D) werden z. T. mehrere Tausend Einzelmessungen mit unterschiedlichen Elektrodenabständen durchgeführt. Dabei wird die Messgeometrie, also die Anordnung von stromführenden und messenden Elektroden, an die jeweilige Fragestellung angepasst. Die Dipol-Dipol-Anordnung hat sich für die archäologische Prospektion bewährt, bei der laterale Inhomogenitäten in Böden und Sedimenten besonders gut detektiert werden können. Weitere verbreitete Anordnungen sind die Schlumberger-Konfiguration sowie die Wenner-Konfiguration, die besonders robust gegenüber störenden Einflüssen (z. B. schlechte Ankopplung der Elektroden an den Untergrund) arbeitet. Der Elektrodenabstand ist entscheidend für die räumliche Auflösung einer Messung. Je enger die Elektroden äquidistant angeordnet sind, desto genauer sind die Messergebnisse. Dabei entspricht die räumliche Auflösung ungefähr dem halben Elektrodenabstand. Für geomorphologische oder sedimentologische Fragestellungen im Kontext der Landschaftsentwicklung (*off-site*) können größere Elektrodenabstände bis 5 oder 10 m sinnvoll sein, um ein längeres Messprofil zu ermöglichen. Dagegen wird für die archäologische Prospektion (*on-site*) i. d. R. mit engeren Abständen von 0,5 m oder 1 m gearbeitet. Die Messung zahlreicher parallel angeordneter Messprofile ermöglicht eine sog. „Pseudo-3D-Messung“, bei der alle Einzelprofile zu einem 3D-Datensatz zusammengefügt werden.

Echte 3D-Tomographien werden dagegen mithilfe einer flächenhaften Anordnung der Elektroden gemessen. Der Vorteil von

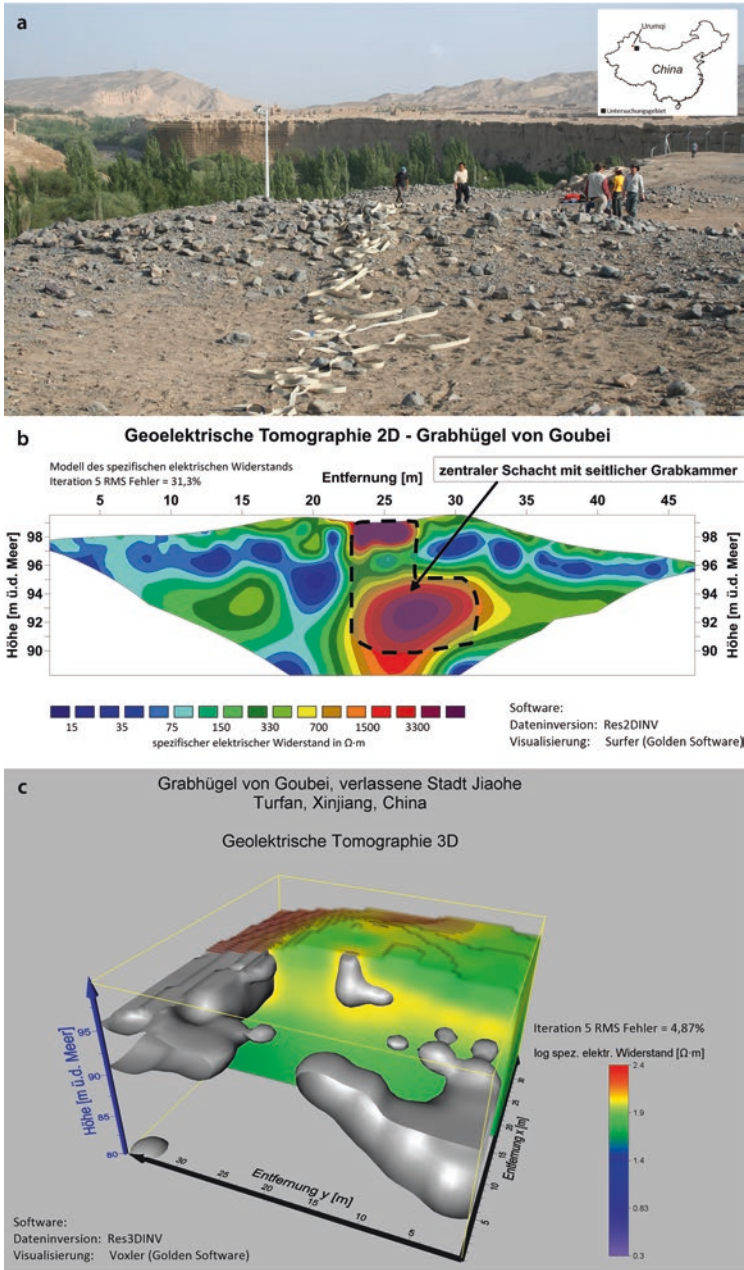


Abb. 14.10 Geoelektrische Tomographie 2D/3D. **a** Elektrodenauslage zur Messung einer geoelektrischen Tomographie über einen Grabhügel auf dem Gräberfeld Goubei nahe Turfan, Xinjiang/China. Im Hintergrund sind die Reste der verlassenen Stadt Jiaohe zu erkennen (Foto: O. Bubenzer). **b** Widerstandsverteilung entlang eines 2D-Messprofils über den Grabhügel (50 Elektroden, Abstand je 1 m, Dipol-Dipol-Konfiguration). Anhand von Anomalien höherer Widerstandswerte sind ein zentraler Schacht sowie eine seitliche Grabkammer in einer Tiefe von ca. 6 m zu erkennen. **c** 3D-Tomographie über den Grabhügel (10×10 Elektroden, Abstand je 4 m, Pol-Pol-Konfiguration). Durch die Abgrenzung höherer Widerstandswerte mithilfe der grauen Isofläche wird die räumliche Lage der Grabkammer deutlich sichtbar. Die Befunde decken sich gut mit Ergebnissen bisheriger archäologischer Grabungen auf dem Gräberfeld

3D-Tomographien liegt darin, dass archäologische Objekte vollständig und in ihrer räumlichen Lage betrachtet werden können. Zudem ist es möglich, volumetrische Daten zu gewinnen. Nowaczinski et al. (2015) konnten aus den Widerstandswerten beispielsweise Formen und Rauminhalte unterschiedlicher begrabener Gefäßtypen bestimmen.

Die Weiterverarbeitung der Messdaten erfolgt softwaregestützt, indem unter Berücksichtigung der Messgeometrie die Verteilung der Widerstandswerte im Untergrund (2D oder 3D) berechnet wird (■ Abb. 14.10). Zur Validierung der Ergebnisse ist der Vergleich mit anderen geophysikalischen Methoden oder mit Bohrungen sinnvoll. Die Konstruktion synthetischer Modelle der Widerstandsverteilung ist besonders zur Vorbereitung der Messungen zu empfehlen (z. B. Hecht 2016). Damit kann vorab geklärt werden, ob sich archäologische Strukturen überhaupt in den zu erwartenden Messergebnissen abzeichnen und wie sich andere Elektrodenkonfigurationen auf die Widerstandsverteilung auswirken. Eine sinnvolle Methodenkombination ergibt sich z. B. durch eine flächenhafte Magnetometer-Prospektion, die dann gezielt durch geoelektrische Tomographien (2D/3D) erweitert wird, um archäologische Strukturen oder auch Schichtgrenzen in ihrer räumlichen Lage abzubilden.

14.4.2 Magnetische Prospektion

Sven Linzen und Jörg Faßbinder

Das wohl bedeutendste, erstmals bereits Ende der 1950er-Jahre in der Archäologie eingesetzte geophysikalische Verfahren ist die magnetische Prospektion (Belshé 1957; Aitken 1958; Scollar et al. 1990; Becker 1995; Clark 1996; Neubauer et al. 1999). Mit dieser Methode können im Boden verborgene Strukturen flächenhaft, mit hoher Nachweisempfindlichkeit und selbst für große Areale in überschaubaren Messzeiten abgebildet werden. Solch ein magne-

tisches Abbild – **Magnetogramm** genannt – vermittelt dem (Geo-)Archäologen einen einzigartig detailreichen Einblick in den strukturellen Aufbau eines Fundplatzes und gibt Auskunft über dessen Gesamtausmaß (■ Abb. 14.11). Die so gewonnenen Daten sind Grundlage aller weiterführenden archäologischen, geoarchäologischen und geophysikalischen Untersuchungen. So können Grabungen gezielt platziert sowie deren Aufwand und der Eingriff in Bodendenkmäler minimiert werden. Dies trägt maßgeblich zum Grabungserfolg und zum Denkmalschutz bei. Weiterführend können anhand der Magnetogramme gezielt punktuelle Untersuchungen wie Bohrlochsondagen sowie lineare geophysikalische Untersuchungen wie geoelektrische Transekte erfolgen.

Die fehlerfreie Durchführung magnetischer Prospektionen und die korrekte Interpretation von Magnetogrammen erfordert ein tieferes Verständnis von Signalentstehung und magnetischer Messtechnik, was eingehend bei Fassbinder (2017) beschrieben wird. Ausgangspunkt sind die physikalischen Größen **magnetische Suszeptibilität** und **Remanenz** – Materialeigenschaften, die für viele im Untergrund vorkommende archäologische und geologische Strukturen unterschiedlich sind. Dies führt zu geringen Variationen des Erdmagnetfelds wenige Zentimeter über der Bodenoberfläche, die mit hochempfindlichen Magnetfeldsensoren wie Cäsium-Magnetometern, SQUIDS (Supraleitende Quantendetektoren) oder Förstersonden (engl. *fluxgates*) detektiert werden können. Beispielsweise sind damit Steinsetzungen und Gebäudefundamente lokalisierbar. Die Anreicherung magnetischer Minerale wie Maghemit und Magnetit in Oberböden und in Kulturschichten (Le Borgne 1955; Fassbinder et al. 1990) ermöglicht insbesondere den Nachweis von Feuerplätzen sowie verfüllten Gruben, Gräben und Holzpfostensetzungen als zentrale anthropogene Merkmale. Hier werden die besonderen Stärken der Methode deutlich. Zugleich sind die zu detektierenden Mess-

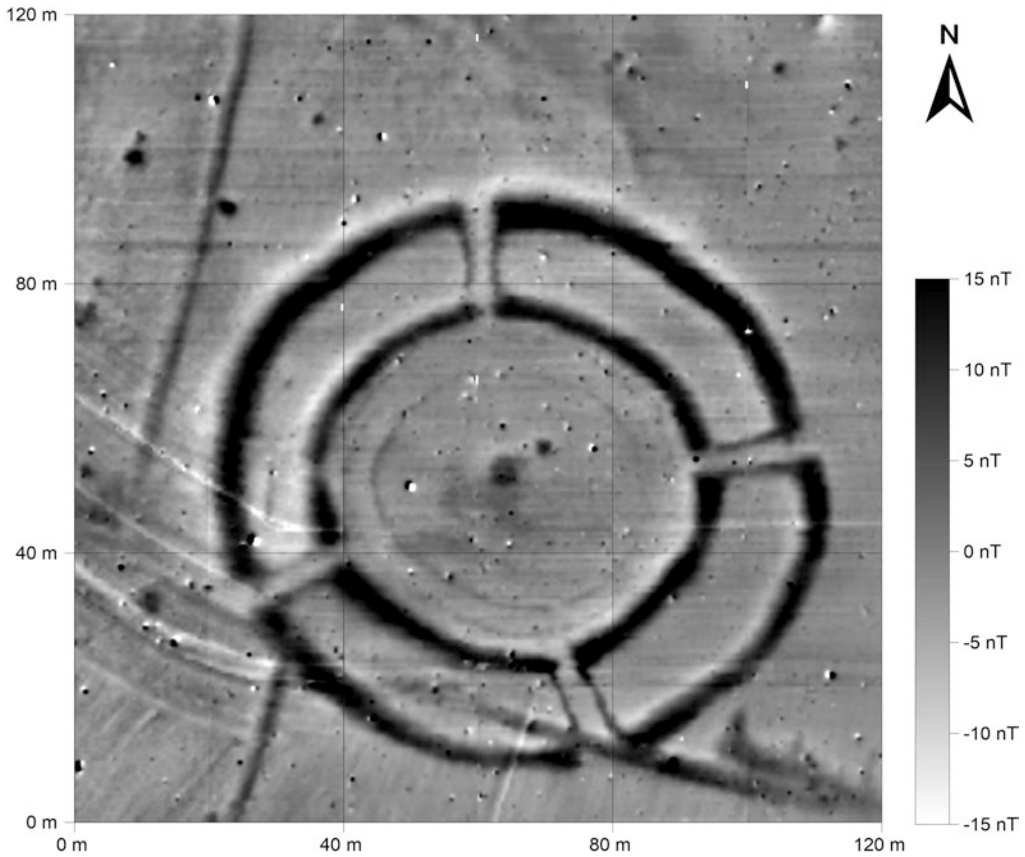


Abb. 14.11 Magnetogramm einer neolithischen Kreisgrabenanlage bei Steinabrunn, Österreich, aus Fassbinder (2017). Magnetische Prospektion mit Cäsium-Magnetometer (Scintrex CS-2) in Zwei-Sensor-Konfiguration. Die kreisförmigen, stark positiven Anomalien repräsentieren mit Oberbodenmaterial verfüllte Gräben. Die schwachen Ringstrukturen im Inneren spiegeln die Position früherer Palisaden wider, deren Pfostenlochverfüllungen mit von magnetotaktischen Bakterien gebildeten Mineralen angereicht sind

14

signale mit nur wenigen Nanotesla (10^{-9} T) um drei bis vier Größenordnungen (!) kleiner als das mittlere Erdmagnetfeld. Folglich setzt jede erfolgreiche magnetische Prospektion größte Sorgfalt und stricte magnetische Hygiene voraus. Für detaillierte Anforderungen siehe Fassbinder (2016).

Mit dem Bau und dem ersten Einsatz motorisierter Messsysteme für die großflächige magnetische Prospektion zu Beginn dieses Jahrtausends ist die technische Ent-

wicklung nicht abgeschlossen. Insbesondere die SQUID-Messtechnik (Chwala et al. 2001; Linzen et al. 2007, 2009), die mit speziellen Sensoranordnungen ein Höchstmaß an magnetischer Information gewinnen kann, d. h. den gesamten Magnetfeldtensor detektiert, eröffnet neue Wege bei der Berechnung von Tiefeninformationen und der Modellierung archäologischer Strukturen (Schneider et al. 2014; Linzen et al. 2017).

14.4.3 Georadar

Till F. Sonnemann

Bei der Georadarprospektion (engl.: GPR für *ground penetrating radar*) sendet ein Antennensystem in zeitlich oder, bei Nutzung eines Messrads, räumlich gleichen Abständen kurze elektromagnetische Impulse in den Untergrund. Die Frequenz liegt dabei zwischen wenigen MHz bis zu wenigen GHz. Die Laufzeit der Impulse bis zur Rückkehr wird an der Empfangsantenne gemessen. Die mit einem Monitor versehene Recheneinheit prozessiert das Antwortsignal sukzessiv für ein virtuelles Profil des Untergrundes.

Ursprünglich entwickelt für Eisstärkenmessung und ingenieurtechnische Untersuchungen (Jol 2008), hat sich das Georadar aufgrund seiner Vielseitigkeit und der 3-dimensionalen Datenvisualisierung durch spezielle Software (Goodman und Piro 2013), in der auch Topographie berücksichtigt werden kann, in der Geoarchäologie etabliert (Conyers 2016). Aufnahmequalität und besonders starke Reflektoren lassen sich schon während der Datenaufnahme im Bodenprofil des Radargramms ablesen: Das Radarsignal wird von Schichtgrenzen oder Objekten unterschiedlicher Permittivität ϵ (auch: dielektrische Leitfähigkeit) teilweise reflektiert und gestreut. Besonders starke Unterschiede, z. B. hervorgerufen durch Hohlräume, Festgestein oder Metallobjekte, zeigen sich deutlich. Da die Signalgeschwindigkeit materialabhängig ist, lässt sich die Signallaufzeit (in ns) durch eine Hyperbelgleichung von Punktquellen in ein Tiefenprofil (in cm) umrechnen. Die Eindringtiefe und Datenqualität ist einerseits abhängig von der eingesetzten Frequenz (grundsätzlich gilt: hohe Frequenz = hohe Bildauflösung, aber niedrige Eindringtiefe), aber auch allgemein von den natürlichen Bedingungen. Sandige Böden bescheren grundsätzlich gute Resultate, mineralhaltige

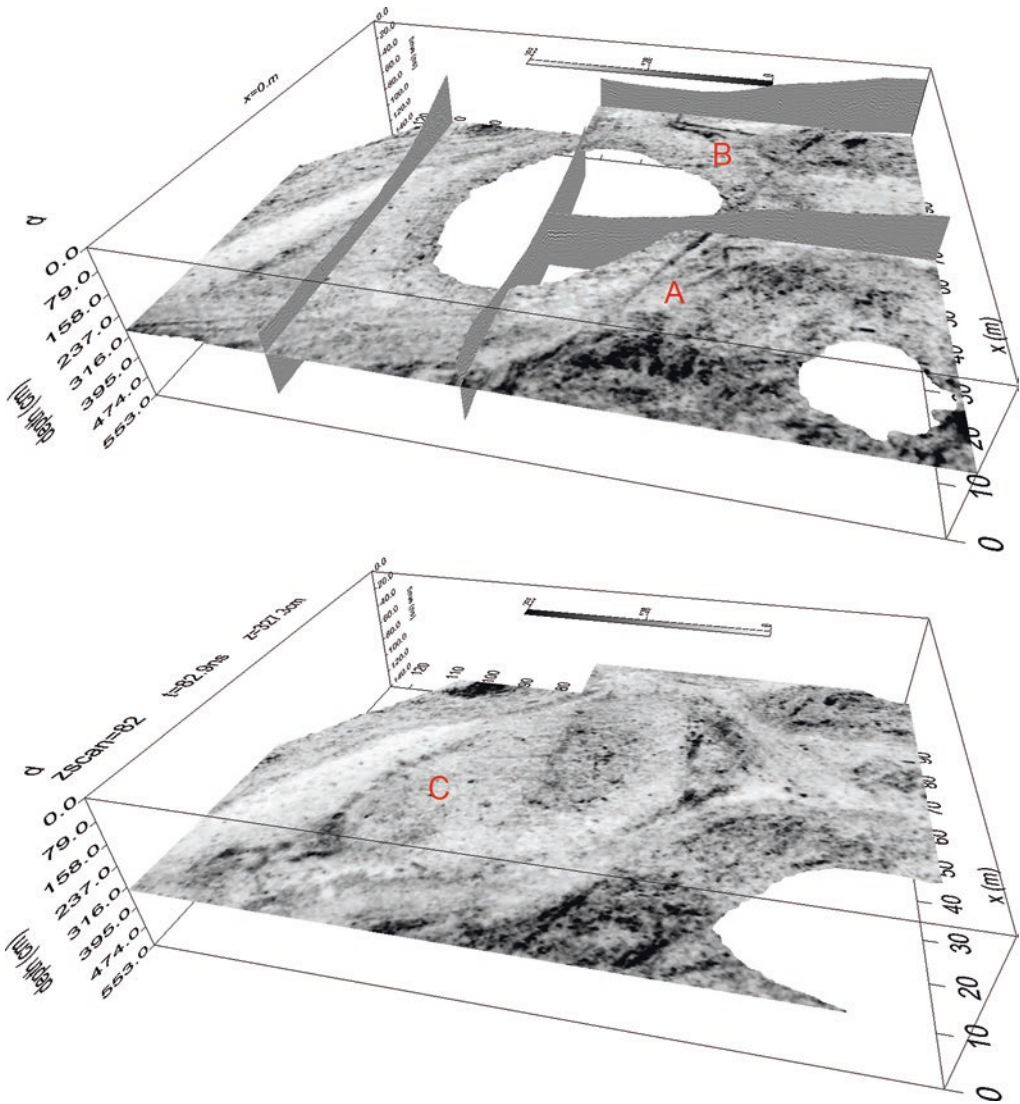
Tone und Lehme können das Signal stark stören; z. B. feuchte, salzhaltige Böden streuen das Signal extrem. Auch die Jahresszeit beeinträchtigt die Datenaufnahme, z. B. durch gestiegenen Grundwasserspiegel oder bei Bodenfrost. Durch das Herausfiltern hoch- oder niederfrequenter Störungen, die Verstärkung der Reflexion tieferer Schichten und Migration des Datensatzes mit Berechnung der Geschwindigkeit lässt sich die Qualität häufig deutlich verbessern.

In der Geoarchäologie liegt der Fokus auf Messung und Interpretation der Stratigraphie von Geoarchiven wie Fluss- und Seesedimenten, Kolluvien, Lagunenablagerungen, Dünen, Delta- oder Höhlensedimenten (Bristow und Jol 2003) und deren zeitlicher Veränderung durch natürliche oder menschliche Einflüsse (■ Abb. 14.12). Aufgrund der benötigten Eindringtiefe werden meist niederfrequente Antennen eingesetzt. Liegt der Fokus auf einer archäologischen Stätte, geht es darum, Gebäudefundamente, Gruben, Gräber und allgemein Siedlungshorizonte zu kartieren und diese in ihrem urbanen Kontext zu analysieren (Doneus 2013); bei historischem Wassermanagement dagegen um die Mächtigkeit von Terrassen oder die Dimension verlandeter Gräben oder Kanäle (Sonnemann 2015). Um Landschaftsveränderungen großflächig zu untersuchen, werden seit einiger Zeit auch Multiantennensysteme genutzt (Linford et al. 2010).

14.4.4 Vermessung bei archäologischen Ausgrabungen

Carsten Casselmann

Bei nahezu jeder archäologischen Ausgrabung ist die detailgenaue Einmessung von Funden und Befunden unverzichtbar. Prinzipiell sollte die Vermessung bei Ausgrabungen, Surveys und anderen archäologi-



■ **Abb. 14.12** Topographisch korrigierte Georadaraufnahme aus Süddeutschland mit Beispielprofilen (oben). Zu erkennen sind eine moderne Wasserleitung (A) und archäologische Siedlungsreste (B). Ein großer Teil der Siedlungsfläche wurde womöglich durch modernen Ackerbau gelockert und vom Regen abgetragen, wodurch eine Senke entstanden ist (C) (Aufnahme: Till F. Sonnemann)

schen Unternehmungen entsprechend dem Wirtschaftlichkeitsprinzip immer so genau wie möglich, aber nicht genauer als erforderlich, erfolgen. Vor Beginn jeder Vermessung steht also die Frage nach der erforderlichen Genauigkeit, nach der dann auch das geeignete Messwerkzeug gewählt wird.

Bei einer archäologischen Ausgrabung, bei der die Befunde und Funde *in situ* eingemessen werden, erfolgt die kartographische Darstellung von Plana und Profilen in der Regel im Maßstab 1:20, was bei einer möglichen Zeichengenauigkeit von 1 mm eine nötige Messgenauigkeit von wenigstens 2 cm

ermöglicht. Bei einer archäologischen Oberflächenprospektion sind die zu kartierenden Objekte meist verlagert, daher ist hier eine gröbere Vermessung ausreichend. Bei Gräberfeldern, deren Funde durch anthropogene oder natürliche Einflüsse an die Oberfläche gelangen, ist eine Messgenauigkeit von 50 cm in der Regel ausreichend. Bei Landschaftssurveys und geomorphologisch-bodenkundlichen Aufnahmen, bei denen einige Quadratkilometer untersucht werden, kann eine Genauigkeit von einigen Metern oder sogar 10–20 m ausreichend sein.

Zu Beginn jeder Grabung muss eine einfache Einbindung der späteren Dokumentation der Befunde und Funde in die Landeskoordinaten (Lage und Höhe) gewährleistet werden. Wenn es möglich ist, sollte man als Grabungssystem direkt im Landeskoordinatensystem arbeiten. Im letzten Jahrhundert war dies in Deutschland das **Gauß-Krüger-Koordinatensystem**. Die dafür zuständige Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV) hat 1995 im Zuge einer europaweiten Vereinheitlichung beschlossen, das **Universale Transversale Mercator-System (UTM)** in Verbindung mit dem ETRS89-Datum flächendeckend einzuführen. Seitdem müssen alle amtlichen Vermessungen in dieses System überführt werden. Auf handelsüblichen topographischen Karten finden sich in der Regel noch beide Systeme. Digitale Raumdaten liegen im UTM-System vor.

Bei allen größeren Grabungen wird üblicherweise ein orthogonales Rasternetz bzw. -gitter über das Grabungsareal gelegt, das während der laufenden Grabung eine schnelle und wirtschaftliche zentimetergenaue Einmessung aller Grabungsinhalte ermöglicht. Die Rasterweite kann dabei individuell sinnvoll angepasst werden. Bei Kartierungen im Maßstab 1:50 und der Verwendung von A3-Millimeterpapier zum Zeichnen können 10 × 20-m-Raster verwendet werden, bei sehr detailreichen Aus-

grabungen in Siedlungsbereichen können 1 × 1-m-Raster sinnvoll sein. Da die Rasterpunkte innerhalb der Grabung beim Tieferlegen der Plana immer wieder neu gesteckt werden müssen und die Befunde in diesen Bereichen möglichst wenig gestört werden sollten, empfiehlt sich hier die Verwendung von Vermessungsnadeln oder Ähnlichem. Das ganze Koordinatensystem sollte unbedingt durch die Anlage von Festpunkten außerhalb der Grabungsfläche gesichert werden. Dies ist besonders dann nötig, wenn die Grabung über mehrere Kampagnen geht. Bei der Anlage solcher Punkte ist auf mehrere Aspekte zu achten. Sie müssen dauerhaft vermarkert sein, sie müssen gegenseitig sichtbar sein, auch sollte von ihnen aus die Grabungsfläche sichtbar sein und es sollten Punkte in ausreichender Anzahl angelegt werden. Letzteres dient nicht nur der Gewährleistung der Erhaltung des Koordinatensystems bei Punktverlust, sondern zusätzlich auch zur Kontrolle der späteren Messungen.

Die Art der Vermarkung der Punkte richtet sich nach dem Untergrund. In Felsen, fest fundamentierten Steinen oder ähnlichem Untergrund können Meißelzeichen beispielsweise in Form eines Kreuzes angebracht werden. Sinnvoll sind auch Bohrungen, in die gegebenenfalls Vermessungsnägel eingeschlagen werden. In Asphalt oder ähnlichen etwas weicheren Untergründen können die Vermessungsnägel direkt eingeschlagen werden. Bei Untergründen aus Lockergestein haben sich Stahl- oder Eisenrohre bewährt, die gegebenenfalls, beispielsweise bei beackerten Flächen, auch unterirdisch, aber mindestens unterhalb des Pflughorizontes eingebracht werden können. Sollen die Rohre oberirdisch sichtbar sein, empfiehlt sich eine bodennahe Anbringung und eine Zementierung der oberen 10–20 cm. Ragen die Markierungen zu sehr aus dem Boden, ist die Gefahr einer Lageveränderung durch ungewollte mechanische Einflüsse zu groß. Prinzipiell sollten vorhandene Markierungen wie Messpunkte aus

Polygonzügen, Grenzsteine und andere Grenzmarkierungen in das Grabungssystem eingemessen werden.

Die Absteckung eines Rastersystems für Grabungen oder die Aufnahme der Einzelpunkte kann durch Messungen mit einem globalen Navigationssatellitensystem (*global navigation satellite system*, GNSS) erfolgen. Allerdings liegt die übliche Lagegenauigkeit hier nur bei 3–10 m. Der Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung (SAPOS) stellt über die Landesvermessungsämter Korrekturdaten für Positionsbestimmungen mittels Satelliten zur Verfügung, was durch die kontinuierlich betriebenen Referenzstationen eine Genauigkeit von bis zu 1 cm ermöglicht. Dabei stehen drei Dienste mit unterschiedlichen Genauigkeiten zur Auswahl:

- Der kostenfreie „Echtzeit-Positionierungs-Service“ (EPS), der eine Lagegenauigkeit von 0,3–0,8 m und eine Genauigkeit in der Höhe von 0,5–1,5 m liefert.
- Der „Hochpräzise Echtzeit Positionierungs-Service“ (HEPS), der eine Lagegenauigkeit von 1–2 cm und eine Genauigkeit in der Höhe von 2–3 cm liefert.
- Der „Geodätische Postprocessing Positionierungs-Service“ (GPPS), der eine Lagegenauigkeit von 1 cm und besser sowie eine Genauigkeit in der Höhe von 1–2 cm liefert.

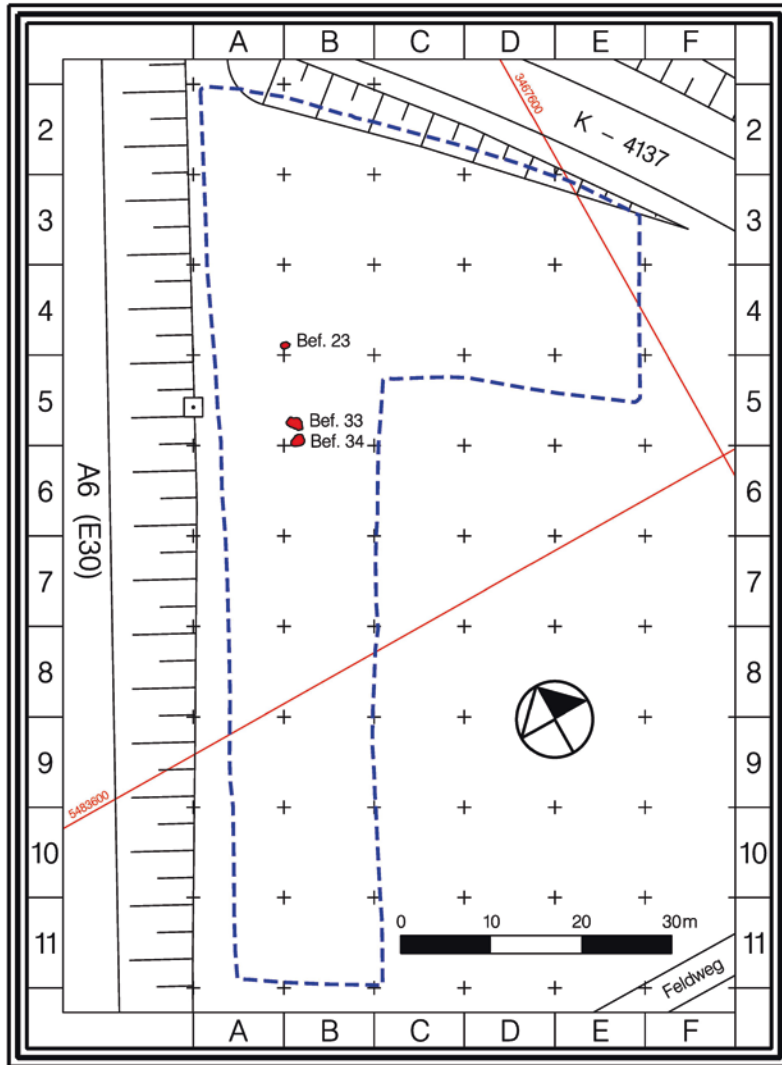
Der HEPS und der GPPS sind kostenpflichtig. Ähnliche Dienste werden von fast allen europäischen Ländern sowie von Japan und den USA angeboten.

Es kommt vor, dass beim Anlegen einer Grabung die direkte Einbindung in das jeweilige Landeskoordinatennetz nicht oder nur mit erheblichem Aufwand möglich ist. In diesen Fällen ist es sinnvoll, ein örtliches rechtwinkliges Koordinatensystem (ÖRK) anzulegen (■ Abb. 14.13). Dazu werden zunächst zwei vorhandene oder extra dafür vermarktete Punkte fest-

gelegt, die die Basislinie bzw. Abszissenachse des Systems definieren sollen. Dabei sind die oben erwähnten Kriterien zur Vermarktung zu beachten. Außerdem sollten diese beiden Punkte möglichst weit auseinanderliegen und ihr Abstand zueinander sollte länger als die größte Ausdehnung der Grabungsfläche sein. Sinnvoll ist auch die Ausrichtung entlang der Längsseite einer Grabung. Als Nächstes wird der Abstand dieser beiden Punkte millimetergenau bestimmt. Jeder Fehler, der hier gemacht wird, wirkt sich entsprechend dem Fehlerfortpflanzungsgesetz quadratisch auf die von dieser Basislinie abgeleiteten Punkte aus. Den Punkten werden dann Koordinaten zugeordnet. Zur Vermeidung negativer Werte im weiteren Verlauf der Grabung sollte der als Ursprungspunkt definierte Punkt genügend hohe Werte erhalten, z. B. $X(\text{hoch})=1000,000\text{ m}$ und $Y(\text{rechts})=2000,000\text{ m}$. Der zweite Punkt, der mit dem ersten zusammen die Abszissenachse X definiert, bekommt demnach die Koordinaten $X(\text{hoch})=(1000,000 + \Delta X)\text{ m}$ und $Y(\text{rechts})=2000,000\text{ m}$. ΔX bezeichnet den Abstand zwischen den beiden Punkten. Die Ordinate bzw. $Y(\text{rechts})$ -Richtung des Koordinatensystems definiert sich als Orthogonale zur Abszisse.

Zur Kontrolle sollten zusätzliche Punkte angelegt werden, die ebenfalls dauerhaft vermarkt werden. Dabei sollten in erster Linie bereits vorhandene Messpunkte verwendet werden, deren Landeskoordinaten ermittelt werden können. Zur Koordinatentransformation des ÖRK in das Landeskoordinatennetz werden mindestens drei Punkte benötigt: Zwei zur technischen Umsetzung und ein dritter zur Kontrolle.

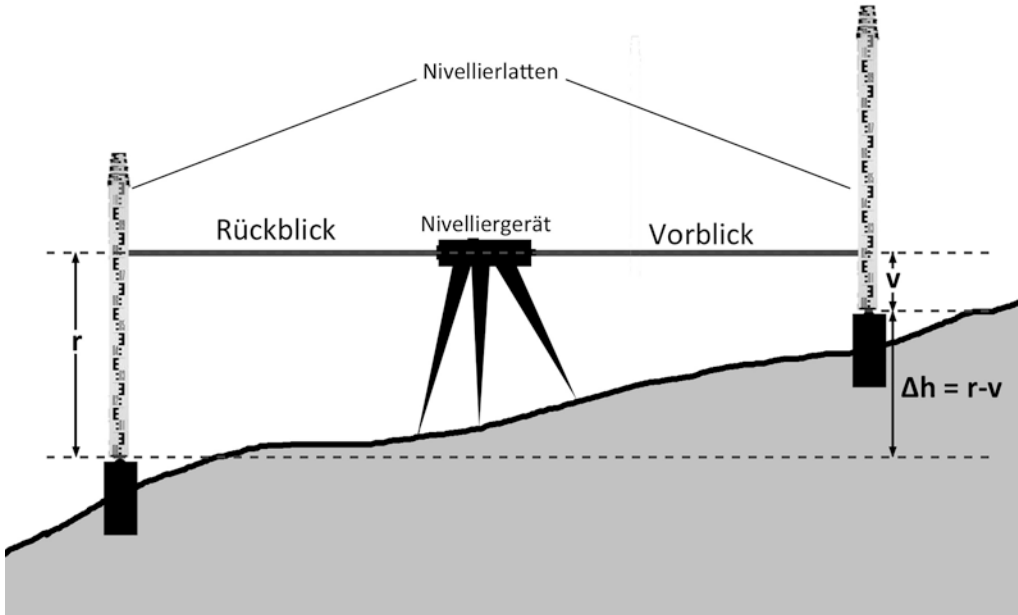
Bei Grabungen im Ausland ist es manchmal nicht möglich, an die vorhandenen Landeskoordinaten zu kommen oder sich in ein bestehendes Netz einzuhängen. In diesem Fall empfiehlt es sich, ein ÖRK einzurichten und drei Punkte per GNSS-Messungen mit möglichst hoher Ge-



■ **Abb. 14.13** Beispiel für die Anlage eines örtlichen rechtwinkligen Koordinatensystems (ÖRK) mit dem klassischen 10×10 -m-Grabungsnetz und der Einbindung in das Gauß-Krüger-Koordinatensystem (rot), „Atzelbukel“ bei Ilvesheim, Rhein-Neckar-Kreis, schnurkeramische Gruben (Casselman et al. 2002, S. 60)

naugigkeit zu bestimmen. Da in diesen Fällen in der Regel auch keine Korrekturdaten vorhanden sind, kann eine höhere Genauigkeit im Meter-, bestenfalls im Dezimeterbereich nur durch Messwiederholungen und eine statistische Ausgleichsrechnung erreicht werden. Wichtig ist es in diesen Fällen, dass die Genauigkeiten innerhalb des ÖRK hoch (unter 2 cm) sind.

In der Praxis ist es inzwischen so, dass alle größeren Grabungen mit einem elektrooptischen Tachymeter, auch Totalstation genannt, ausgestattet sind. Diese Geräte messen sowohl die Richtungswinkel als auch die direkten Entfernungen zu den Aufnahmepunkten. Über den integrierten Rechner werden direkt 2-D- oder 3-D-Koordinaten ermittelt. Ungeübten Anwendern



▣ **Abb. 14.14** Funktionsweise der Höhenmessung mit dem Nivellier (geometrisches Nivellement). Der Höhenunterschied Δh ist gleich Rückblick r minus Vorblick v

wird empfohlen, mit diesen Geräten nur Lagemessungen durchzuführen, da die Fehleranfälligkeit bei kombinierter Lage- und Höhenmessung hoch ist.

Zur Errichtung eines Grabungsnetzes bei kleineren Grabungen oder einfachen Befundaufnahmen können bis zu Entfernungen von 30 m auch Winkelprismen verwendet werden. Bei einer professionellen Anwendung dieser Geräte können diese bis zu Entfernungen von 30 m die erforderliche Genauigkeit von 2 cm erreichen.

Höhenmessungen (Nivellements) bei Grabungen sollten sich immer auf das jeweilige Landeshöhensystem beziehen. In Deutschland gilt seit Juni 2017 das von der AdV 2016 eingeführte **Deutsche Haupthöhennetz** (DHHN2016), dessen Höhen als Höhen über **Normalhöhen-Null** (NHN) bezeichnet werden. Die Abweichungen zu den vorherigen Höhenbezugssystemen betragen in der Regel maximal 16 cm.

Üblicherweise wird für Höhenmessungen bei archäologischen Ausgrabungen das geometrische Nivellement (▣ Abb. 14.14) angewandt. Dazu empfiehlt es sich, Nivelliergeräte mit automatischem Höhenkompensator zu verwenden, weil hier das Nachjustieren entfällt.

14.4.5 Geoarchäologische Zeigerpflanzen

Frank Schlütz und Christian Stolz

Die heutige Verbreitung vieler Pflanzen ist vom Menschen mitbestimmt. Als geoarchäologische Zeigerpflanzen sollen hier zwei Gruppen herausgestellt werden, für die der Mensch unbeabsichtigt (Metallophyten) oder intentionell (Stinsenpflanzen) nachhaltig neue Standorte mit geeigneten Substraten geschaffen hat. Funde ent-

14.4 Geophysikalische Methoden



■ **Abb. 14.15** **a** Die violette Galmei-Grasnelke (*Armeria maritima* ssp. *halleri*) und das Taubenkropf-Leimkraut (*Silene vulgaris* var. *humulis*) in der schwermetallhaltigen Flussaue der Oker im Harz, links im Vordergrund ein Schlackengeröll (Foto: Thomas Becker); **b** Krokusblüte im Husumer Schlosspark (Foto: Simone Mommsen); **c** das Kleine Immergrün (*Vinca minor*) im Bereich der Wüstung Seelbach im Taunus (Foto: Christian Stolz); **d** Bärlauch (*Allium ursinum*) als Gartenflüchtling im Bereich der Wohnplatzwüstung Riels Mühle aus der Mitte des 20. Jahrhunderts im Taunus (Foto: Christian Stolz)

sprechender Zeigerarten abseits ihrer angestammten Verbreitung können daher wichtige Hinweise auf ehemalige Bergbau- und Siedlungsaktivitäten sein.

Pflanzen, die auf stark schwermetallhaltigen Böden gedeihen, werden im weiteren Sinne als Metallophyten, auch Chalkophyten oder Galmeipflanzen bezeichnet. Es handelt sich um wenige, an hohe Metallkonzentrationen angepasste Arten (Kinzel 1982). Die gehölzfreien Standorte sind lichtreich und konkurrenzarm. Seit Beginn des obertägigen Erzbergbaus zerstört der Mensch diese Habitate und schafft mit den Bergbauhalden zugleich anthropogene Ersatzstandorte. Wo die Flüsse aus Gebirgen wie dem Harz ins Vorland austreten,

haben sich auf den belasteten Auenböden teils großflächige Schwermetallfluren entwickelt (■ Abb. 14.15a; Dierschke und Becker 2008; Ernst et al. 2009; Knolle et al. 2011). Bei der Frühlingsmiere und beim Taubenkropf-Leimkraut werden die Schwermetallsippen von den schwer unterscheidbaren Sippen der Normalstandorte begleitet. Bei der augenfälligen Galmei-Grasnelke ist dies seltener der Fall. Gelbes bzw. Violette Galmei-Stiefmütterchen sind gut kenntlich, doch nur im Raum Aachen bzw. einzig bei Blankenrode (Lokalendemit) in der südlichen Egge zu finden (Jäger 2017).

Mit der frühen Neuzeit kam die Kultivierung von Zierpflanzen im Umfeld von Herrensitzen immer mehr in Mode. Früh

untersucht wurde dies für die Steinhäuser (Stinse) Frieslands und dabei der inzwischen weiter gefasste Begriff der Stinsenpflanzen geprägt (van der Ploeg 1988; Petrischak 2014). Saure, nährstoffarme Sandböden wurden teilweise gezielt verbessert, zudem durch kalkhaltiges Baumaterial basenreicher. Viele der eingeführten Zierpflanzen sind Frühjahrsblüher (Geophyten), die sich unter den neuen klimatischen Gegebenheiten oft nur vegetativ ausbreiten. Daher, und wegen ihrer Nährstoffansprüche, blieben die Neuankömmlinge meist örtlich gebunden (Sukopp und Kowarik 2008). Lokale Massenausbreitung führt teilweise zu touristisch attraktiven Blühaspekten, wie das Beispiel der Krokusse im Husumer Schlosspark zeigt (■ Abb. 14.15b). Zu den Stinsenpflan-

zen zählen u. a. Blau- und Milchsterne, Narzissen, Schneeglöckchen, Tulpen, Krokusse sowie Winterling, Hohler Lerchensporn und Herbstzeitlose (Jäger et al. 2016; Schneider 2012).

Das Kleine Immergrün kam schon mit den Römern und kennzeichnet ehemalige Kultstätten sowie mittelalterliche Siedlungsplätze (Prange 1996; ■ Abb. 14.15c), Bärlauch kann im Bereich jüngerer Wüstungen als Gartenflüchtling auftreten (Stolz 2013; ■ Abb. 14.15d).

Eingeführte Stinsenpflanzen, einheimische Metallophyten und andere Gruppen können somit ehemalige Orte intensiver menschlicher Tätigkeit anzeigen und eignen sich daher zum Auffinden archäologisch und historisch relevanter Plätze.