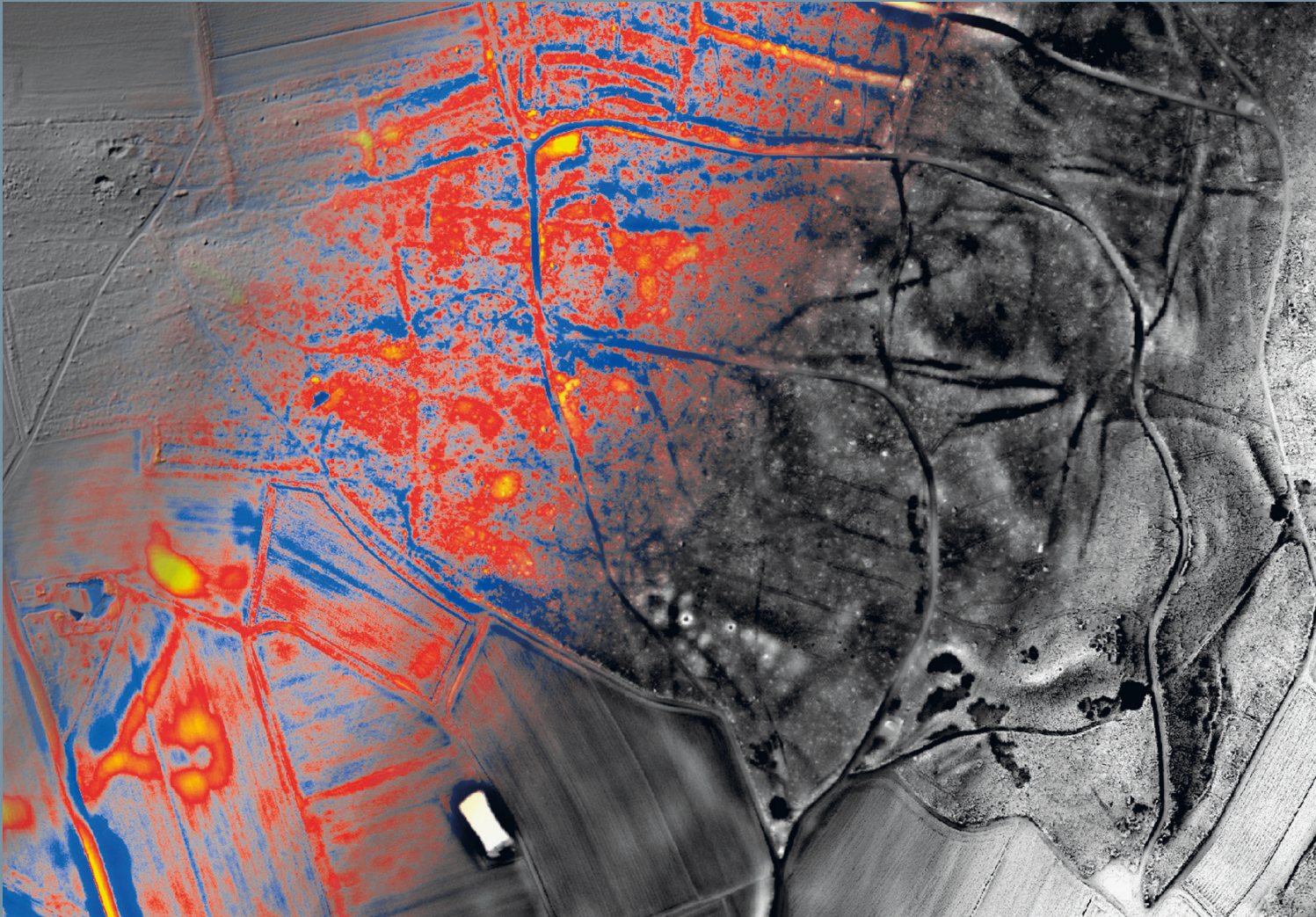




Forschungen des Instituts
für Archäologische Wissenschaften,
Denkmalwissenschaften und Kunstgeschichte 8



Jonas Nyffeler

Kulturlandschaft in neuem Licht

Eine Einführung zu LiDAR in der Archäologie



University
of Bamberg
Press

Kulturlandschaft in neuem Licht



**Forschungen des Instituts
für Archäologische Wissenschaften,
Denkmalwissenschaften und Kunstgeschichte**

herausgegeben vom Institut für Archäologische Wissenschaften, Denkmalwissenschaften
und Kunstgeschichte der Otto-Friedrich-Universität Bamberg

Abteilung
Archäologische
Wissenschaften

Michaela Konrad
Andreas Schäfer
Rainer Schreg
Till Sonnemann

Abteilung
Denkmalwissenschaften

Stefan Breitling
Rainer Drewello
Gerhard Vinken

Abteilung
Kunstgeschichte

Stephan Albrecht
Wolfgang Brassat

Band 8

Abteilung Archäologische Wissenschaften,
Verantwortlicher Herausgeber:
Andreas Schäfer

Jonas Nyffeler

Kulturlandschaft in neuem Licht

Eine Einführung zu LiDAR
in der Archäologie

Bibliographische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Dieses Werk ist als freie Onlineversion über den Hochschulschriften-Server (OPUS; <http://www.opus-bayern.de/uni-bamberg/>) der Universitätsbibliothek Bamberg erreichbar. Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Herstellung und Druck: Prime Rate, Budapest

Umschlaggestaltung: University of Bamberg Press Bamberg, Larissa Günther

Umschlagbild: Geländeabschnitt des Zürcher Weinlands mit diversen archäologischen Strukturen, dargestellt mit den Visualisierungen Hillshade, Local Relief Model, Local Dominance, Sky View Factor; © Jonas Nyffeler auf Basis Geodaten GIS-ZH (Amt für Raumentwicklung, Kanton Zürich)

© University of Bamberg Press Bamberg, 2018

<http://www.uni-bamberg.de/ubp/>

ISSN: 2196-4505

ISBN: 978-3-86309-537-6 (Druckausgabe)

eISBN: 978-3-86309-538-3 (Online-Ausgabe)

URN: urn:nbn:de:bvb:473-opus4-510511

DOI: <http://dx.doi.org/10.20378/irbo-51051>

Vorwort des verantwortlichen Herausgebers

Mit diesem Band steht in unserer Reihe wiederum eine hervorragende akademische Abschlussarbeit zur Veröffentlichung an. Sie wurde von Herrn Jonas Nyffeler M.A. im Rahmen des Masterstudiengangs Ur- und Frühgeschichtliche Archäologie im Jahr 2015 an der Otto-Friedrich-Universität Bamberg eingereicht und für den Druck in dieser Reihe noch einmal überarbeitet. Herrn Nyffeler ist für sein großes Engagement sehr zu danken. Für das hier vorliegende Ergebnis kann man ihm nur gratulieren.

Digitale Erfassungsmethoden haben in den Kulturwissenschaften im Allgemeinen und in den Archäologischen Wissenschaften im Besonderen in den vergangenen Jahren enorm an Bedeutung gewonnen. Gerade die Laserscantechnologie eröffnet in verschiedenen Skalen, von der Abtastung kleinster Fundobjekte bis zur flugzeuggestützten Erfassung ganzer Landschaften, ein zuvor nicht gekanntes Dokumentations- und Auswertungspotential. Die riesigen dabei erzeugten Datenmengen stellen die Wissenschaft aber auch vor große Herausforderungen und eine systematische und zielgerichtete Auswertung des Datenbestands sowie seine Archivierung rücken in den Vordergrund des Interesses.

In diesen Rahmen gehört die hier vorgelegte Arbeit, die sich eine systematische Evaluation der Erfassungs- und Auswertungsmöglichkeiten von LiDAR-Daten in der archäologischen Denkmalpflege zum Ziel gesetzt hat. Am Beispiel eines 51km² großen Testgebiets im Züricher Weinland (Kanton Zürich, CH) setzt sich Herr Nyffeler systematisch mit der Erhebung, Verarbeitung, Dokumentation, Manipulation, Interpretation, Bewertung und Archivierung von LiDAR-Daten für archäologische Belange in Denkmalpflege und Forschung auseinander. Besonderes Augenmerk liegt auf den relevanten am Markt verfügbaren Visualisierungsmethoden und deren Aussagemöglichkeiten. Thematisiert werden aber auch weit darüber hinaus reichende strukturelle Aspekte bis hin zu Problemen und Chancen der Implementierung von LiDAR-Daten in bestehende Fundstellenmanagementsysteme regionaler Fachbehörden.

Die Arbeit ist in hohem Maße praxis- und problemorientiert und bietet viele pragmatische und an der praktischen Umsetzbarkeit orientierte Lösungsvorschläge. Sie weist weit über die beispielhafte Behandlung eines regional verankerten Themas hinaus und ermöglicht als grundlegende methodische Studie nicht nur Anwendern in der Denkmalpflege, sondern allen am Potential dieser noch jungen Fernerkundungsmethode Interessierten eine bis zur Handreichung gehende Auseinandersetzung mit flugzeuggestützt erhobenen Geländedaten. Ihr ist eine hohe Rezeption in der Fachwelt zu wünschen.

Der Arbeit wurde ein sorgfältiges Lektorat und ein sehr ansprechendes und professionelles Layout zuteil, wofür dem Team Kathrin Brömse und Simone Tavenrath von „Satzzentrale GbR Marburg“ sehr zu danken ist. Frau Barbara Ziegler vom hauseigenen Verlag „University of Bamberg Press“ gebührt ebenfalls herzlicher Dank für die gelungene Integration in die vorliegende Reihe und ihre Bereitschaft, bei der Drucklegung neue Wege zu gehen.

Bamberg, im Oktober 2017

Andreas Schäfer
Professur für Ur- und Frühgeschichtliche Archäologie

Inhalt

| | | |
|----------|---|----|
| | Vorwort | 9 |
| 1 | Einleitung | 11 |
| 2 | Technik | 13 |
| | 2.1 Funktionsweise des Laserscanners | 13 |
| | 2.2 Messvorgang | 13 |
| | 2.3 <i>Discrete return</i> und <i>Full Waveform</i> -Systeme | 15 |
| | 2.4 Verarbeitung der Daten | 15 |
| | 2.4.1 Georeferenzierung der Punkte | 15 |
| | 2.4.2 Messgenauigkeit und Auflösung | 16 |
| | 2.4.3 Klassifikation der Punkte | 16 |
| | 2.5 Produkte für die archäologische Anwendung | 16 |
| | 2.5.1 Digitales Geländemodell (DTM) | 17 |
| | 2.5.2 Intensitätsdaten | 17 |
| 3 | LiDAR in der Archäologie | 19 |
| | 3.1 Produkte und ihre Anwendung | 19 |
| | 3.1.1 Digitales Geländemodell | 19 |
| | 3.1.2 Intensitätsdaten | 19 |
| | 3.1.3 Mehrzweckdaten | 19 |
| | 3.2 Forschungsgeschichte | 20 |
| | 3.3 LiDAR als Prospektionsmethode | 20 |
| | 3.3.1 Vorteile | 20 |
| | 3.3.2 Beschränkungen | 21 |
| | 3.4 LiDAR in der Forschung | 21 |
| 4 | Das Untersuchungsgebiet | 23 |
| 5 | Verwendeter Datensatz | 25 |
| | 5.1 Metadaten | 25 |
| | 5.1.1 Verwendete Technologie | 25 |
| | 5.1.2 Befliegung | 25 |
| | 5.1.3 Datenverarbeitung | 25 |
| | 5.1.4 Qualitätsprüfung | 26 |
| | 5.2 Bildfehler | 26 |

| | | |
|--------|--|----|
| 5.3 | Auflösung des DTM | 26 |
| 5.3.1 | Tests | 26 |
| 5.3.2 | Ergebnisse | 27 |
| 5.3.3 | Exkurs: DTM mit Gebäuden | 28 |
| 5.4 | Tests zur Genauigkeit des DTM | 29 |
| 6 | Visualisieren des DTM | 31 |
| 6.1 | Verwendete Software | 31 |
| 6.1.1 | Relief Visualisation Toolbox 1.1 (RVT) | 31 |
| 6.1.2 | LiDAR Visualisation Toolbox 1.0.0.23 (LiVT) | 31 |
| 6.1.3 | ArcGIS 10.2.2 | 32 |
| 6.1.4 | Verschiedene Dateiformate | 32 |
| 6.2 | Erstellen der Visualisierungen | 32 |
| 6.3 | Visualisierungsmethoden | 33 |
| 6.3.1 | <i>Hillshade (analytical hill shading)</i> | 33 |
| 6.3.2 | <i>Multiple Shading</i> | 35 |
| 6.3.3 | <i>Principal Component Analysis (PCA)</i> | 35 |
| 6.3.4 | <i>Slope</i> | 36 |
| 6.3.5 | <i>Openness</i> | 37 |
| 6.3.6 | <i>Sky view factor (SVF)</i> | 38 |
| 6.3.7 | <i>Trend Removal (TR)</i> | 40 |
| 6.3.8 | <i>Local Relief Model (LRM)</i> | 40 |
| 6.3.9 | <i>Local Dominance (LD)</i> | 42 |
| 6.3.10 | Zusammenfassung. | 43 |
| 6.4 | Visualisierung im GIS | 44 |
| 6.4.1 | <i>Mosaic Datasets</i> | 44 |
| 6.4.2 | Histogrammanpassung. | 44 |
| 6.4.3 | Analyse-Werkzeuge im GIS | 46 |
| 7 | Kartierung | 47 |
| 7.1 | Zielsetzung und Rahmenbedingungen | 47 |
| 7.2 | Vorgehen mit Hilfe eines Geografischen Informationssystems | 47 |
| 7.3 | Ansprache der kartierten Strukturen | 48 |
| 7.3.1 | Morphologische Ansprache | 48 |
| 7.3.2 | Interpretation | 49 |
| 7.4 | Quellen | 50 |
| 7.4.1 | Fernerkundungsdaten | 50 |

| | | |
|-------|---|----|
| 7.4.2 | Karten | 51 |
| 7.4.3 | Ergebnisse von Feldarbeiten | 52 |
| 7.5 | Schwierigkeiten der Interpretation | 53 |
| 7.5.1 | Potentielle archäologische Strukturen und zur Frage der Wahrscheinlichkeit | 53 |
| 7.5.2 | Natürliche versus anthropogene Strukturen | 53 |
| 7.5.3 | Überprägte archäologische Strukturen | 54 |
| 7.5.4 | Schwach ausgeprägte Strukturen | 56 |
| 7.5.5 | Nicht interpretierbare Strukturen | 56 |
| 7.6 | Datierung anthropogener Strukturen | 56 |
| 7.6.1 | Datierung mit alten Karten, Luftbildern oder Höhenmodellen | 56 |
| 7.6.2 | Datierung anhand der morphologischen Ausprägung | 57 |
| 7.6.3 | Datierung anhand sich überlagernder Strukturen | 57 |
| 7.7 | Organisation im GIS | 57 |
| 7.7.1 | Polylinien und Polygone | 57 |
| 7.7.2 | Aufbau der Datensets | 57 |
| 7.7.3 | Chronologie im GIS | 59 |
| 7.7.4 | Aufbereitung der Kartierungen | 59 |
| 7.8 | Zusammenfassung | 59 |
| 8 | Ergebnisse der Kartierungen | 61 |
| 8.1 | Spektrum der Strukturtypen | 61 |
| 8.1.1 | Hügel | 61 |
| 8.1.2 | Gruben | 61 |
| 8.1.3 | Gruben mit Aufschüttung | 62 |
| 8.1.4 | Plattformen | 62 |
| 8.1.5 | Rinnen | 62 |
| 8.1.6 | Rippen | 64 |
| 8.1.7 | Terrassenkanten | 66 |
| 8.1.8 | Geländekante | 67 |
| 8.2 | Häufigkeit und Verteilung der Strukturtypen | 67 |
| 8.2.1 | Häufigkeit der Strukturtypen | 67 |
| 8.2.2 | Waldflächen versus Ackerland | 68 |
| 8.2.3 | Bereits bekannte Fundstellen | 69 |
| 8.3 | Zusammenfassung zum Potenzial von LiDAR in der Archäologie | 70 |

| | | |
|---------------|---|-----|
| 9 | LiDAR im Fundstellenmanagement | 71 |
| 9.1 | Fundstellenmanagement der Kantonsarchäologie Zürich | 71 |
| 9.1.1 | Verwaltung und Schutz archäologischer Befunde | 71 |
| 9.1.2 | Ereignisse | 71 |
| 9.1.3 | Die Fundstelle – Theorie und Praxis | 72 |
| 9.2 | Erfassung neuer Fundstellen | 72 |
| 9.2.1 | Sicherheit der Interpretation | 72 |
| 9.2.2 | Elemente der Kulturlandschaft | 73 |
| 9.3 | Ergänzung bestehender Fundstellen | 74 |
| 9.4 | Archivierung großflächiger Kartierungen | 75 |
| 9.4.1 | Erstellen einer Fundstelle | 75 |
| 9.4.2 | Stellungnahme zu Baugesuchen | 76 |
| 9.4.3 | Zugriff auf die Kartierungen | 76 |
| 9.5 | Zusammenfassung | 76 |
| 10 | LiDAR in der Forschung | 79 |
| 10.1 | Kriegsschauplatz aus der Helvetischen Republik | 79 |
| 10.1.1 | Ausgangslage. | 79 |
| 10.1.2 | Befunde im DTM. | 79 |
| 10.1.3 | Historischer Kontext | 81 |
| 10.1.4 | Fazit. | 82 |
| 10.2 | Köhlerei am Stammerberg | 82 |
| 10.2.1 | Ausgangslage. | 82 |
| 10.2.2 | Befunde im DTM. | 82 |
| 10.2.3 | Forschungspotenzial. | 84 |
| 11 | Ausblick | 85 |
| 12 | Glossar | 87 |
| 13 | Literaturverzeichnis | 89 |
| 14 | Verwendete Karten | 97 |
| 15 | Abbildungsverzeichnis | 99 |
| 16 | Beilagen | 100 |

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand aus dem Wunsch heraus, mich im Rahmen meines Masterstudiums in *Ur- und Frühgeschichtlicher Archäologie* vertieft mit der Anwendung und dem Potenzial von LiDAR-Daten in der Archäologie auseinandersetzen. Sie wurde im Frühling 2016 als Masterarbeit an der Otto-Friedrich-Universität Bamberg angenommen. Betreut wurde die Arbeit von Prof. Dr. Andreas Schäfer und Dr. Karsten Lambers. Von Beginn an unterstützten sie mich in meinem Vorhaben, mich mit diesem speziellen Thema zu beschäftigen und standen mir mit fachlichem Rat zur Seite. Für ihr Engagement möchte ich ihnen an dieser Stelle herzlich danken.

Zahlreiche weitere Personen haben zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Zu großem Dank bin ich Dr. Patrick Nagy von der Kantonsarchäologie Zürich verpflichtet, der mir den Arbeitsplatz zur Verfügung stellte, den Zugriff auf den ausgewerteten LiDAR-Datensatz, diverse Karten und das Fundstellenarchiv ermöglichte und mich in fachlichen und administrativen Fragen unterstützte. Das wissenschaftliche Lektorat verdanke ich lic. phil. Kristin Kruse und Dr. Patrick Nagy. Während meiner Arbeit wurde ich zudem von verschiedensten Fachkollegen mit Diskussionen und Hinweisen unterstützt, durfte auf tatkräftige Mitarbeit bei Feldbegehungen zählen und erhielt Hilfe bei der Programmierung von Skripten. Für die große Unterstützung möchte ich allen beteiligten Personen herzlich danken. Ein letzter und besonderer Dank geht an Prof. Dr. Andreas Schäfer, der mir in dieser Publikationsreihe die Präsentation meiner Ergebnisse ermöglichte.

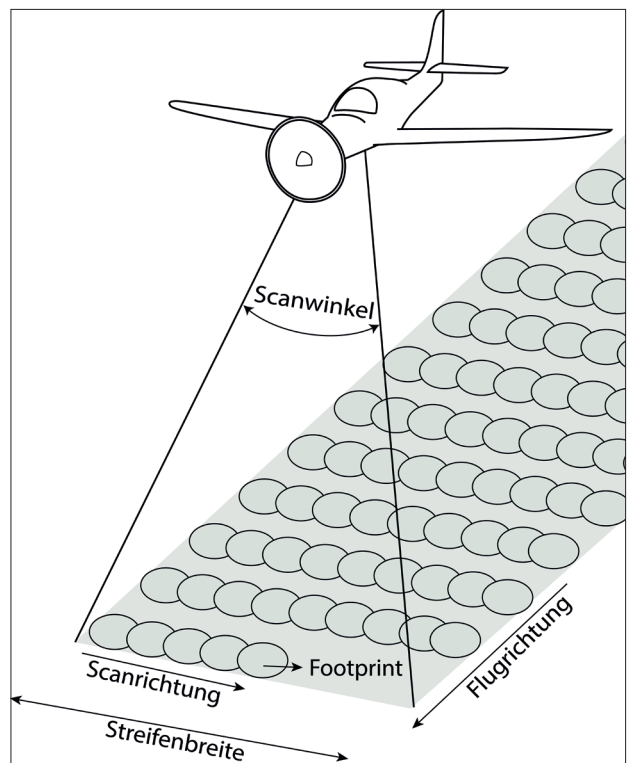
Winterthur, 10. Februar 2017
Jonas Nyffeler

1 Einleitung

Ziel dieser Arbeit ist es, einen umfassenden Überblick zum Thema *LiDAR in der Archäologie* zu vermitteln. Es werden dementsprechend auch nur wenige, spezifische Kartierungsergebnisse präsentiert. Vielmehr steht der praktische Umgang mit LiDAR-Daten mit seinen Vorteilen und Tücken im Zentrum und es sollen Fragen wie „Welche archäologischen Strukturen können sich in LiDAR-Daten abzeichnen?“ oder „Wie gehe ich bei der Auswertung eines LiDAR-Datensatzes vor?“ beantwortet werden. Die Auswertung eines LiDAR-Datensatzes ist jedoch nicht ohne den entsprechenden theoretischen Hintergrund möglich. Aus diesem Grund beginnt die Arbeit mit zwei Kapiteln zur Technologie und einer theoretischen Einführung zum Einsatz von LiDAR in der Archäologie. Am Beispiel eines Datensatzes des Kantons Zürich, Schweiz, wird anschließend der gesamte Arbeitsablauf, der bei der Auswertung eines LiDAR-Datensatzes anfällt, Schritt für Schritt aufgezeigt. Dabei handelt es sich nicht um eine Musterlösung, sondern um einen möglichen Weg, wie mit LiDAR-Daten verfahren werden kann. Einzelne Arbeitsschritte davon sind zwingend, andere können ausgelassen oder abgeändert werden. Beim Untersuchungsgebiet handelt es sich um einen 51 km² großen

Ausschnitt des Zürcher Weinlands, welcher vollständig kartiert wurde. Die Ergebnisse sollen dem Leser einen Eindruck vermitteln, welche Geländemerkmale sich in LiDAR-Scans abzeichnen. Ein eigenes Kapitel widmet sich der Verwendung von LiDAR-Daten und deren Auswertungsergebnissen im Bereich der Denkmalpflege.

Die im Lauftext dargestellten Ausschnitte des LiDAR-Datensatzes sollen die jeweils behandelten Themen exemplarisch illustrieren. Um die Standorte nicht ausgewerteter Fundstellen nicht zu publizieren, wurde auf die Angaben von Koordinaten der dargestellten Strukturen bei diesen Abbildungen bewusst verzichtet. Auf den Karten 1–10 ist ein Teil des Untersuchungsgebiets wiedergegeben. Dargestellt werden die Ergebnisse der Kartierungen und wie sich diese in verschiedenen, in dieser Arbeit genutzten, Visualisierungen ausprägen. Der Ausschnitt wurde so gewählt, dass besiedeltes Gebiet, Landwirtschafts- sowie Waldflächen vorhanden sind und auch verschiedene topografische Situationen abgebildet werden. Dies ermöglicht dem Benutzer einen Vergleich, in welcher Situation sich im Untersuchungsgebiet welche Geländestrukturen erhalten haben.



1 Verschiedene Parameter beeinflussen die Qualität eines Laserscans. Das Scanmuster (*scan pattern*) ist abhängig vom Scanmechanismus des Laserscanners.

2 Technik

LiDAR ist ein Kürzel für *Light Detection and Ranging*. Die zugrunde liegende Technologie ist das so genannte *Laserscanning*, mit welchem die Distanz zwischen einem Sensor und dem mit dem Laser angestrahlten Objekt gemessen werden kann¹. Laserscanner stellen damit eine Erweiterung konventioneller Radartechniken (*Radio Detection and Ranging*) auf einen Frequenzbereich mit sehr kurzen Wellenlängen dar. Durch die kürzere Wellenlänge kann eine höhere räumliche Auflösung erzielt werden².

In der Fernerkundung wird LiDAR verwendet, um die Topografie eines Gebietes dreidimensional zu erfassen. In diesem Zusammenhang wird für LiDAR auch synonym der Begriff *Airborne Laserscanning* (ALS) benutzt. Als Plattform werden Helikopter oder Kleinflugzeuge eingesetzt. Als LiDAR-Daten werden in dieser Arbeit alle Daten und daraus abgeleitete Produkte bezeichnet, die mit LiDAR-Technologie generiert werden.

2.1 Funktionsweise des Laserscanners

Die meisten für ALS genutzten Laserscanner verwenden das Verfahren des *pulsed laser*³, auch *Time of flight* (TOF) Technologie⁴ genannt. Dabei sendet ein Laser kurze Impulse mit einer Dauer von vier bis zehn Nanosekunden aus. Die Impulswiederholungsrate moderner Scanner beträgt 100–300 Kilohertz (100 000 bis 300 000 Impulse pro Sekunde). Über einen beweglichen Spiegel werden die Impulse quer zur Flugrichtung der Plattform abgelenkt⁵ und auf der Geländeoberfläche diffus reflektiert⁶. Der Rücklauf der Strahlung wird vom Sensor des Scanners registriert (Kap. 2.3). Anhand der Laufzeit, die ein Impuls vom Laserscanner zum reflektierenden Objekt und zurück benötigt, und der bekannten Geschwindigkeit des Laserstrahls kann die Distanz zwischen Scanner und Objekt berechnet werden⁷.

Der Reflexionsgrad einer Oberfläche beziehungsweise die diffuse Reflexion eines Laserimpulses ist von der Wellenlänge des Lasers abhängig. Je nach verwendeter Wellenlänge weisen Laserscanner beim Abtasten der Erdoberfläche deshalb unterschiedliche Vor- und Nachteile auf. Beispielsweise ist der Reflexionsgrad von Eis bei einer Wellenlänge von 1550 Nanometer sehr niedrig und eignet sich deshalb nur beschränkt für Gebiete mit viel Eis- und Schneebedeckung. Liegt die ver-

wendete Wellenlänge nahe des sichtbaren Spektrums, wird ein großer Teil der Strahlung von Wasser absorbiert. Laserscanner mit einer entsprechenden Wellenlänge können deshalb Wasserflächen kaum darstellen. Der Scan weist in diesem Bereich Datenlücken auf⁸. Für die Anwendung auf Land werden Wellenlängen zwischen 800 und 1550 Nanometer eingesetzt⁹, was dem nahen Infrarot entspricht.

2.2 Messvorgang

Durch die Fortbewegung des Flugzeugs wird ein Geländestreifen zeilenweise gescannt (Abb. 1). Die Streifenbreite (*swath width*) wird vom Öffnungswinkel (*scan angle*) und der Flughöhe der Plattform bestimmt und beträgt in der Regel einige hundert bis über tausend Meter. Das definierte Gebiet wird in parallel angeordneten Streifen abgescannt. Durch Überlappung nebeneinander liegender Streifen werden Datenlücken verhindert.

Die genaue Position und Orientierung der Plattform beziehungsweise des Laserscanners wird mit differenziellem GPS (*DGPS*) und einer inertialen Messeinrichtung (*Inertial Measurement Unit*, IMU) ermittelt. Das GPS kann in Kombination mit einer fest installierten GPS-Bodenstation die Position der Plattform auf wenige Zentimeter genau bestimmen. Die IMU ist auf

1 WEHR/LOHR 1999, 68.

2 BERARDIN et al. 2010, 3; WAGNER et al. 2004, 202.

3 WEHR/LOHR 1999, 70ff.

4 BERARDIN et al. 2010, 3; OPITZ 2013, 13f.

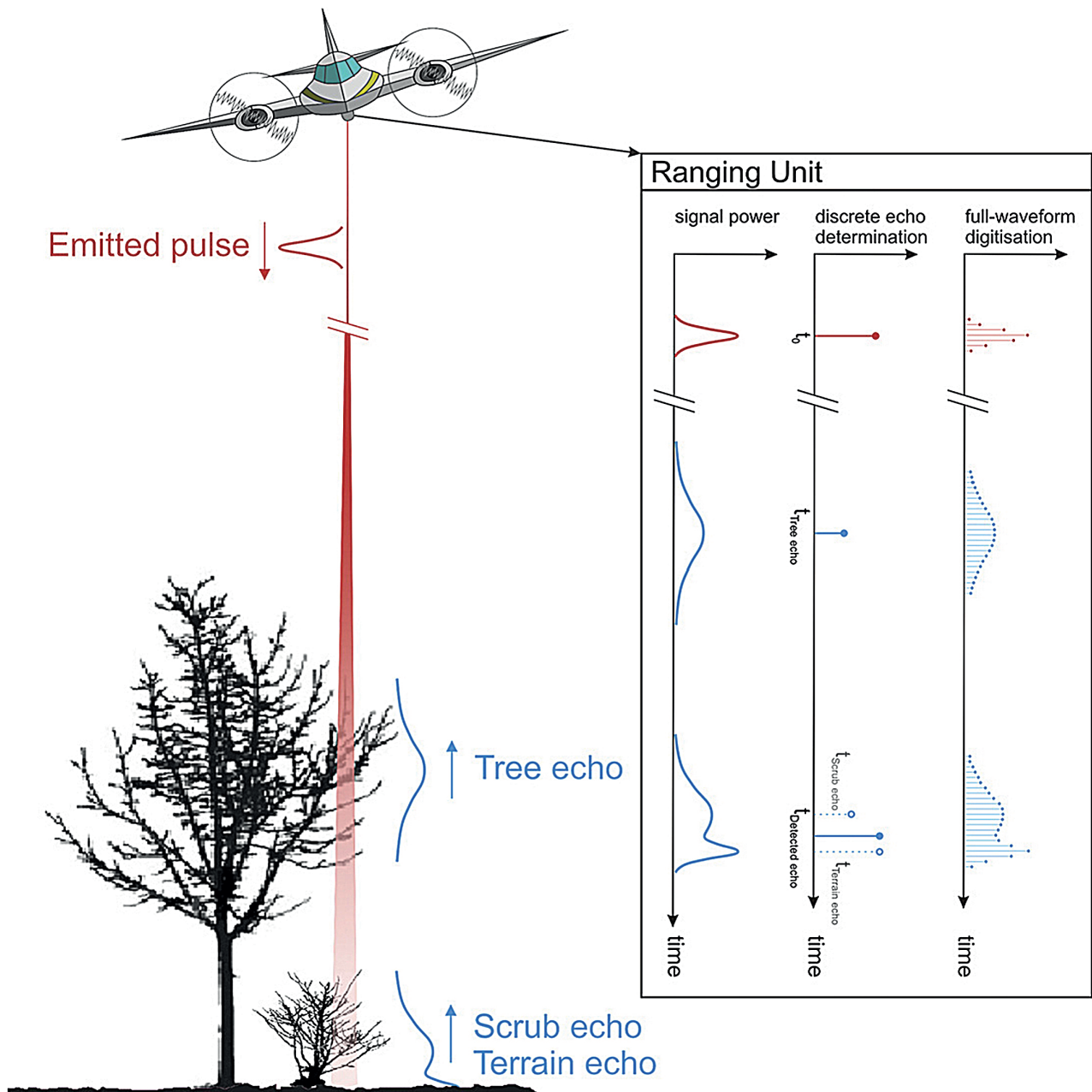
5 Verschiedene Scanmechanismen mit ihren Vor- und Nachteilen in BERARDIN et al. 2010, 16ff.

6 Ausnahme sind relativ glatte Oberflächen, welche die eintreffende Strahlung gerichtet reflektieren. In diesem Fall kann der Laserscanner den Rücklauf des Laserimpulses nicht registrieren, weshalb an den entsprechenden Stellen Datenlücken auftreten können. (BERARDIN et al. 2010, 15; DONEUS et al. 2008b, 138).

7 ACKERMANN 1999, 64. Physikalische Grundlagen zu Laser und Messverfahren in WEHR/LOHR 1999; WAGNER et al. 2003, 224ff.; BERARDIN et al. 2010, 3ff.

8 BERARDIN et al. 2010, 25f.

9 WAGNER et al. 2004, 202; HÖFLE/PFEIFER 2007, 416; BERARDIN et al. 2010, 12. Bei der Vermessung von Gelände unterhalb der Wasseroberfläche (LiDAR-Bathymetrie) kommen Wellenlängen im grünen Spektrum (z. B. 532 nm) zum Einsatz (Berardin et al. 2010, 35f.).



2 Auf seinem Weg zur Erdoberfläche kann der Laserstrahl auf unterschiedlichen Oberflächen reflektiert werden. Je weiter sich der Laserimpuls vom Sensor entfernt, desto größer wird sein Footprint. In der rechten Hälfte der Grafik ist dargestellt, wie das reflektierte Signal des Laserimpulses mit *discrete return* und *FWF*-Systemen vom Scanner aufgezeichnet wird (Kap. 2.3).

oder direkt neben dem Laserscanner angebracht und zeichnet die Beschleunigung sowie die Rotation der Plattform auf, woraus die Geschwindigkeit und die Orientierung der Plattform abgeleitet werden können¹⁰.

Die Ausdehnung des Laserimpulses auf der angestrahlten Oberfläche (*Footprint*) hängt von der Flughöhe und dem Winkel ab, mit dem der Impuls auf das reflektierende Objekt trifft. Der Laser besitzt einen runden Querschnitt, weshalb der Footprint auf der meist schräg zum Laserstrahl ausgerichteten Geländeoberfläche eine leicht ellipsoide Form aufweist¹¹. Bei mehreren hundert Metern Flughöhe beträgt der Durchmesser des Footprints je nach verwendetem Sensor zwischen

20 cm und 1 m¹². Auf seinem Weg vom Laserscanner zum Erdboden kann ein Laserimpuls auf verschiedenen Oberflächen reflektiert werden (Abb. 2). Erste Echos stammen häufig von Hausdächern, Stromleitungen oder Bäumen. Durch den großen Footprint wird derselbe Impuls häufig mehrfach auf verschiedenen Höhen reflektiert. So wird beispielsweise ein Teil der Laserstrahlung am Ast eines Baumes zurückgestrahlt. Weitere Teile der Strahlung dringen durch Lücken in der Vegetation bis zum Boden vor oder werden vom Unterholz reflektiert. Der Sensor zeichnet die in zeitlichen Abständen eintreffende Rückstrahlung auf und berechnet daraus mehrere Einzeldistanzen.

2.3 Discrete return und Full Waveform-Systeme

Der Rücklauf des ausgesendeten Laserimpulses kann von verschiedenen Sensoren auf unterschiedliche Weise aufgezeichnet werden. Es kommen hauptsächlich zwei verschiedene Systeme zum Einsatz (Abb. 2). *Discrete return* Systeme registrieren ein Echo, wenn dessen Intensität einen bestimmten Grenzwert überschreitet. Dabei speichern sie lediglich den entsprechenden Zeitpunkt, zu welchem das Echo auf den Sensor trifft. Informationen zur Form des Echos werden hingegen nicht aufgezeichnet¹³. Je nach Sensor können bis zu zehn diskrete Echos desselben Impulses aufgezeichnet werden. Sich teilweise überlappende Echos, wie sie bei der Reflexion desselben Impulses auf verschiedenen Oberflächen mit nur geringem Höhenunterschied entstehen, können nicht differenziert werden (vgl. Abb. 2, scrub echo). Die minimale vertikale Distanz, die notwendig ist, um aufeinander folgende Echos desselben Impulses erfassen zu können, ist abhängig von der verwendeten Pulsdauer. Bei einer Pulsdauer von 5 ns beträgt sie 0,75 m¹⁴.

Bei *Full Waveform-Systemen* (FWF) wird im Gegensatz zum *discrete return* System die gesamte Wellenform des reflektierten Laserimpulses vom Sensor aufgezeichnet (Abb. 2). Bei der anschließenden Verarbeitung der Daten wird die Wellenform in einzelne Gaußsche Verteilungskurven zerlegt. Aus diesen können einzelne, diskrete Echos berechnet werden. Die Echobreite der Kurve liefert dabei Informationen zur vertikalen Ausdehnung des reflektierenden Objektes. Liegt eine Oberfläche senkrecht zum ausgesendeten Laserimpuls, so weist das Echo eine geringe Breite und eine meist hohe Amplitude auf. Schräg zum Laserimpuls orientierte Oberflächen und räumlich struk-

turierte Objekte wie Gebüsch und Unterholz erzeugen eine größere Echobreite und können dadurch von Bodenpunkten unterschieden werden (vgl. Abb. 2). Dies ist in Hinblick auf die Klassifizierung der Punktwolke (Kap. 2.4.3) ein großer Vorteil gegenüber Daten, die mit einem *discrete return* System gemessen wurden. Gerade die Unterscheidung zwischen niederer Vegetation und Bodenpunkten bereitet ohne die Zusatzinformationen der Wellenbreite erhebliche Schwierigkeiten¹⁵.

2.4 Verarbeitung der Daten

2.4.1 Georeferenzierung der Punkte

Mit der Position und Orientierung des Laserscanners, der gemessenen Laufzeit des Laserimpulses (aus welcher die Distanz zwischen Objekt und Sensor berechnet wird) und der bekannten Richtung, in die die Impulse abgelenkt wurden, können die Koordinaten der reflektierenden Objektflächen berechnet werden. Alle auf diese Weise errechneten Messpunkte ergeben zusammen ein detailliertes Modell, welches als Punktwolke gespeichert wird. Diese bildet die vom Laser erfassten Objekte wie Gebäude, Vegetation und die Erdoberfläche dreidimensional ab (Abb. 3). Zusätzlich zu den Koordinaten werden zu jedem Punkt weitere Infor-

10 BERARDIN et al. 2010, 22f.

11 BERARDIN et al. 2010, 25f.

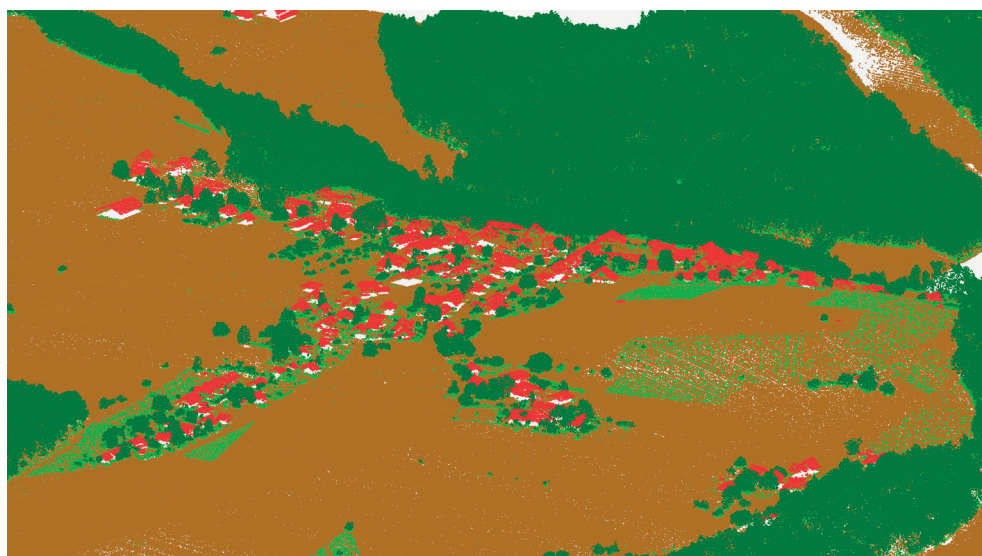
12 Dabei sind die Außengrenzen nicht scharf. Die Bestrahlungsstärke nimmt vom Zentrum des Footprints nach außen allmählich ab.

13 BERARDIN et al. 2010, 28; DONEUS et al. 2008b, 139f.; OPITZ 2013, 16.

14 BERARDIN et al. 2010, 3ff.

15 DEVEREUX et al. 2005, 658; DONEUS et al. 2008a, 883ff.; DONEUS et al. 2008b, 139ff.; BERARDIN et al. 2010, 28; MAAS 2010, 222ff.

3 Schrägansicht auf eine kleinere Siedlung. Punktwolke eingefärbt nach ihrer Klassifizierung (braun: Bodenpunkte, hellgrün: tiefe Vegetation, dunkelgrün: hohe Vegetation, rot: Gebäude).



mationen wie die Flugstreifennummer, GPS-Zeit und Öffnungswinkel gespeichert¹⁶.

2.4.2 Messgenauigkeit und Auflösung

Die absolute Genauigkeit der Punkte ist abhängig von der Präzision der Aufzeichnung von Position und Orientierung des Laserscanners sowie dessen Messgenauigkeit¹⁷. Abweichungen können in der Vertikalen ± 20 cm und in der Horizontalen bis zu ± 100 cm betragen¹⁸. Wichtiger für die archäologische Interpretation ist jedoch die relative Genauigkeit. Diese beschreibt die lokale Abweichung eng benachbarter Punkte beziehungsweise die Genauigkeit des wiedergegebenen Reliefs unabhängig von seiner Georeferenzierung und ist wesentlich höher als die absolute Genauigkeit. Je höher in einem LiDAR-Scan die vertikale Genauigkeit ausfällt, desto feinere Reliefunterschiede zeichnen sich im Geländemodell ab. Die Punktdichte des Modells ist von der Impulswiederholungsrate und dem Öffnungswinkel des Laserscanners sowie von der Geschwindigkeit und der Flughöhe der Plattform abhängig¹⁹ und kann bis zu 60 Punkte pro Quadratmeter betragen.

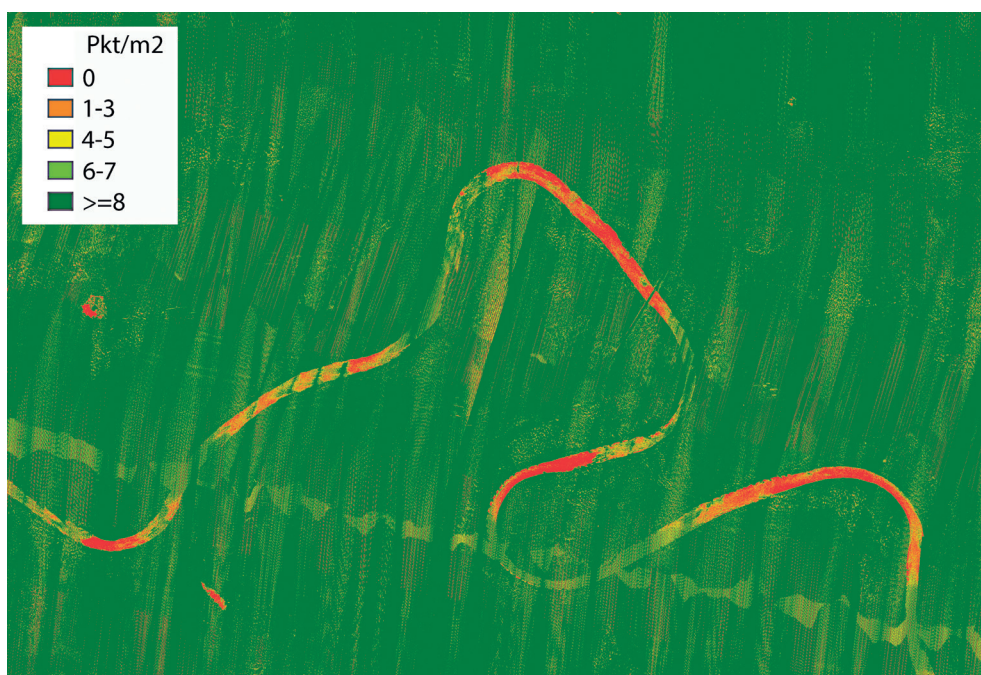
2.4.3 Klassifikation der Punkte

Wie bereits angemerkt, repräsentiert eine mit ALS erstellte Punktwolke die Erdoberfläche und die darauf befindlichen Objekte in ihrer räumlichen Ausdehnung. Um daraus Produkte wie ein digitales Geländemodell (*digital terrain model*, DTM, Kap. 2.5.1) oder ein digitales Oberflächenmodell (*digital surface model*, DSM) ableiten zu können, muss die Punktwolke zunächst gefiltert beziehungsweise klassifiziert werden. Hierfür

werden zuerst Bodenpunkte von Nichtbodenpunkten wie Vegetation oder Gebäude getrennt. In einem ersten Schritt werden dazu alle Punkte aussortiert, die nicht aus dem letzten Echo eines Laserimpulses errechnet wurden und damit mit Sicherheit nicht vom Boden stammen können. In einem zweiten Schritt werden die verbleibenden Punkte automatisch verschiedenen Klassen wie Boden, Gebäude oder Vegetation zugeordnet (Abb. 3). Für diese Klassifizierung gibt es eine Reihe an Algorithmen, welche geometrische Beziehungen zwischen den einzelnen Punkten analysieren²⁰. Von der Auswahl dieser Algorithmen und den festgelegten Parametern ist die Qualität der Klassifikation und aller aus der Punktwolke generierten Produkte abhängig. Bei mit FWF-Systemen erstellten Datensätzen (Kap. 2.3) stehen neben den Koordinaten eines Punktes auch noch die Intensität und Breite des gemessenen Echos als Information für die Klassifizierung zur Verfügung. Vor allem die Echobreite kann dazu dienen, tiefe Vegetation zuverlässiger von Bodenpunkten unterscheiden zu können²¹. Nach der automatischen Klassifizierung der Punkte kann diese auch manuell überprüft werden. Dieser Arbeitsschritt ist jedoch stark von der Erfahrung des jeweiligen Bearbeiters abhängig²².

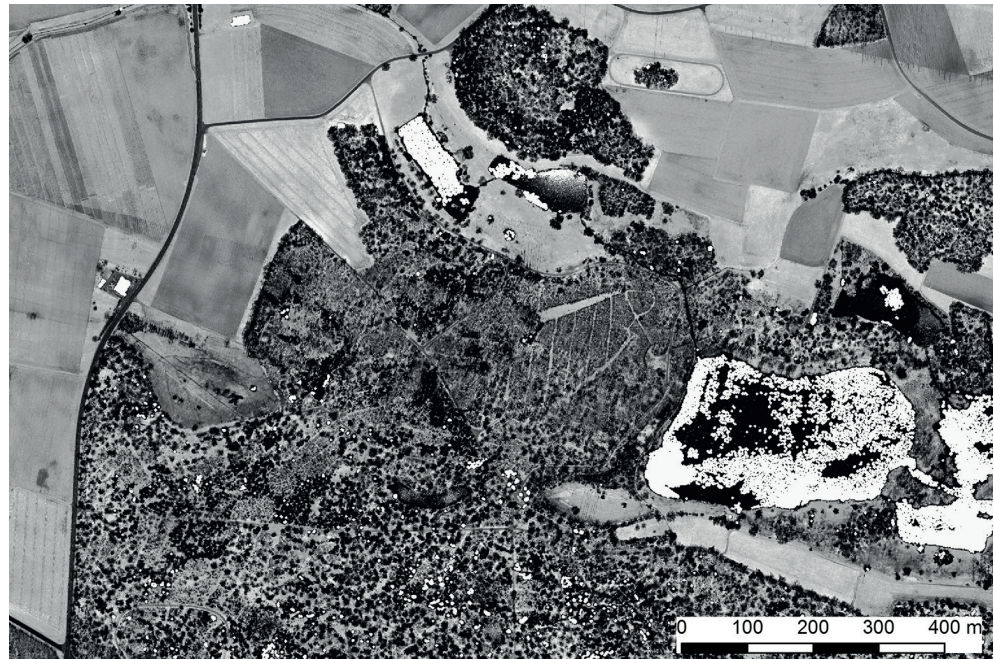
2.5 Produkte für die archäologische Anwendung

Aus der klassifizierten Punktwolke kann eine Reihe an Produkten abgeleitet werden, die in verschiedensten Bereichen verwendet werden. Im Folgenden werden



4 Punktdichtekarte der Bodenpunkte. Gut zu erkennen ist ein Flusslauf, da die Wasseroberfläche die Strahlung des verwendeten Lasers nur ungenügend reflektiert (vgl. Kap. 2.1).

5 Intensitätsdaten. In der oberen Bildhälfte sind Ackerflächen zu sehen. Dunkle Flächen sind bewaldetes Gebiet, (nicht reflektierende) Wasseroberflächen werden weiß abgebildet.



nur diejenigen Produkte beschrieben, die auch in der Archäologie eingesetzt werden. Die archäologiespezifische Anwendung solcher Datensätze wird in Kap. 3.1 erläutert.

2.5.1 Digitales Geländemodell (DTM)

Aus den klassifizierten Bodenpunkten, die noch immer als dreidimensionale Punktwolke gespeichert sind, kann anschließend ein digitales Geländemodell abgeleitet werden. Bei diesem Vorgang wird in der Regel ein Rasterdatensatz erstellt, der das Gelände als kontinuierliche Oberfläche repräsentiert²³. Die Berechnung der Höhenwerte der Rasterzellen wird durch Oberflächeninterpolation der Punkthöhen und verschiedene Annäherungsmethoden berechnet²⁴.

Die Qualität des DTM hängt von seiner Auflösung²⁵ sowie von der Qualität der Punktklassifikation ab. Die Wahl des Interpolationsalgorithmus, der zur Umrechnung der Punktwolke ins DTM verwendet wird, hat keinen wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis. Die Umrechnung ist jedoch mit einem gewissen Verlust der räumlichen Auflösung verbunden²⁶. Deshalb sollte die Auflösung des DTM in etwa der Punktdichte der Punktwolke entsprechen²⁷.

Größere Messlücken sind im regelmäßig gerasterten und interpolierten DTM nicht immer klar erkennbar. Zur Überprüfung dienen vom Datenlieferanten zur Verfügung gestellte Rasterdatensätze, in denen die lokale Punktdichte farbcodiert gespeichert ist (Abb. 4). Alternativ werden auch Vektordatensätze geliefert, in denen Punktlücken ab einer bestimmten Ausdehnung als Polygone verzeichnet sind.

2.5.2 Intensitätsdaten

Intensität ist das Maß für die Energie eines reflektierten Laserimpulses, die als Amplitude der Wellenform dargestellt wird (siehe Abb. 2, FWF). Neben verschiedenen anderen Variablen wie der Flughöhe, der Energie des Lasers oder der Atmosphäre ist die Intensität auch abhängig vom Reflexionsgrad des Objekts, auf das der Laserimpuls trifft²⁸. Verschiedene Oberflächen weisen deshalb im Output auch unterschiedliche Werte auf. Die Identitätswerte werden als Rasterdatensatz mit einer Graustufenskala visualisiert und sehen einer schwarzweissen Luftbildaufnahme ähnlich (Abb. 5)²⁹. Da das Bild aus den Daten einer aktiven Fernerkundungsmethode hergeleitet wird, weist es im Vergleich zum Luftbild jedoch keine durch Hindernisse wie Bäume hervorgerufenen Schattenflächen auf.

16 DONEUS et al. 2008a, 883; DONEUS et al. 2008b, 138; OPITZ 2013, 20.

17 Eine detaillierte Aufstellung zu den verschiedenen Fehlerquellen findet sich in LICHTI/SKALOUĐ 2010, 100ff.

18 BERARDIN et al. 2010, 29ff. Hohe Abweichungen der Koordinaten (bis 1 m) können vor allem auf eine größere Flughöhe der Plattform (bis 2000 m) zurückgeführt werden. Die Abweichung sollte im Rahmen der Qualitätskontrolle vom Datenlieferanten überprüft werden.

19 BERARDIN et al. 2010, 25ff.

20 DONEUS et al. 2008a, 887; BRIESE 2010, 137ff. Die Funktionsweisen verschiedener Filter werden besprochen in SITHOLE/VOSSELMAN 2004; BRIESE 2010, 150ff.; OPITZ 2013, 21ff.

21 DONEUS/BRIESE 2006a, 100f.; BRIESE 2010, 151ff.

22 OPITZ 2013, 22f.

23 Ein Rasterdatensatz besteht aus einer Matrix aus Zellen beziehungsweise Pixeln. Für jede Zelle wird ein Wert gespeichert (BURROUGH et al. 2015, 33f.). Beim Höhenmodell sind die Höheninformationen als Zellwerte abgelegt. Diese können beispielsweise mit einer Graustufenskala dargestellt

werden (vgl. Kap. 6.4). Ein Trianguläres Irreguläres Netzwerk (TIN, siehe dazu Burrough 2015, 57ff.) als zweite Möglichkeit für die Abbildung der Erdoberfläche eignet sich nicht für die anschließende Weiterverarbeitung der Daten im Rahmen einer archäologischen Auswertung.

- 24 BRIESE 2010, 156f.
- 25 Die angegebene Auflösung eines Rasterdatensatzes (z. B. 0,5m) bezieht sich jeweils auf die Seitenlänge einer Rasterzelle.
- 26 OPITZ 2013, 24ff.
- 27 Z. B. sollte aus einem LiDAR-Scan mit einer Auflösung von 5 Pkt./m² ein DTM mit 0,5m Auflösung gerechnet werden (was 4 Höhenwerten/m² entspricht). Die Auflösung von lediglich 1m hätte einen hohen Verlust an räumlicher Auflösung zur Folge. Ebenso wenig macht es jedoch Sinn, eine zu hohe Auflösung (0,25 m) für das DTM zu wählen, da diese eine höhere Genauigkeit des Datensatzes vortäuscht, jedoch nicht zu einem zusätzlichen Informationsgewinn führt.
- 28 Die physikalischen Grundlagen zur Intensität von LiDAR-Messungen sind in HÖFLE/PFEIFFER 2007 zusammengefasst.
- 29 BERALDIN et al. 2010, 14f.

3 LiDAR in der Archäologie

3.1 Produkte und ihre Anwendung

3.1.1 Digitales Geländemodell

Das aus der Punktwolke abgeleitete DTM (Kap. 2.5.1) bildet die Basis für die archäologische Nutzung von LiDAR-Daten. Anthropogene Strukturen, die sich bis heute im Relief erhalten haben, werden in ihrer Ausprägung im digitalen Geländemodell gespeichert. Mit Visualisierungsmethoden können aus dem DTM neue Rasterdatensätze abgeleitet werden, die solche Geländemerkmale kontrastreicher abbilden können (Kap. 6). Die dafür verwendeten Algorithmen sind meist darauf ausgerichtet, kleinräumige Strukturen hervorzuheben, die sich nur durch geringe Höhenunterschiede vom umgebenden Relief abheben³⁰. In einem Geografischen Informationssystem (GIS) können die Werte der neu berechneten Rasterdatensätze mit einer Farb- oder Graustufenskala grafisch dargestellt werden (vgl. Abb. 23). Dies ermöglicht anschließend eine Prospektion am Bildschirm, wobei der Bearbeiter die Grafiken visuell nach archäologischen Merkmalen absucht³¹. Entdeckte Strukturen können direkt im GIS kartiert werden.

3.1.2 Intensitätsdaten

Intensitätsdaten können in der archäologischen Prospektion als zusätzliche Interpretationsquelle eingesetzt werden. Da die in ALS eingesetzten Laser Wellenlängen im nahen Infrarotbereich aussenden (Kap. 2.1), sind als Graustufenbild visualisierte Intensitätsdaten vergleichbar mit den Ergebnissen einer Infrarotaufnahme. Die Daten geben Aufschluss über den Zustand von Böden und der Vegetation und liefern damit ähnliche Informationen wie Luftbilder³².

Das volle Potenzial von Intensitätsdaten ist bislang noch nicht erfasst. Dies hat unter anderem mit der anspruchsvollen Kalibrierung zu tun³³. Zudem ist der Reflexionsgrad verschiedener Materialien abhängig von der Wellenlänge des Lasers (Kap. 2.1), sodass Sensoren mit unterschiedlichen Wellenlängen auch unterschiedliche Intensitätswerte aufzeichnen. Um Intensitätsdaten korrekt interpretieren zu können, muss deshalb bekannt sein, mit welchem Sensor und welcher Wellenlänge das zu untersuchende Gebiet gescannt wurde³⁴. Des Weiteren sind die Messergebnisse besonders im Bereich von Vegetation von den Bedingungen zum Messzeitpunkt der LiDAR-Daten abhängig. Da Intensi-

tätsdaten neben den wichtigeren Höhendaten des ALS nur ein Nebenprodukt darstellen, wird der Zeitpunkt der Befliegung nicht nach optimalen Bedingungen für erstere (z. B. nach längerer Trockenzeit) ausgerichtet. Aus diesen Gründen werden Intensitätsdaten in der Archäologie bislang nur sehr beschränkt eingesetzt. Im Rahmen dieser Arbeit wurden sie ebenfalls nicht genutzt.

3.1.3 Mehrzweckdaten

Die meisten ALS-Datensätze, die in archäologischen Projekten Verwendung finden, wurden aufgrund der immensen Erstellungskosten nicht gezielt für die Archäologie produziert. Meist handelt es sich um Mehrzweckdaten, welche im Auftrag eines Staats oder Verwaltungsbezirks erstellt und verschiedenen Ämtern und Branchen bereits als DTM zur Verfügung gestellt werden. Als Folge davon ist auch die Aufbereitung der Daten nicht primär auf die Bedürfnisse der Archäologie ausgelegt. Gerade in bewaldetem Gebiet ist eine geeignete Wahl von Klassifizierungsalgorithmen für die Unterscheidung zwischen tiefer Vegetation und Bodenpunkten von großer Bedeutung. Zudem haben auch verschiedene Parameter während des Messvorgangs, wie die verwendete Wellenlänge des Lasers, der Scanwinkel oder der Messzeitpunkt, wesentlichen Einfluss auf das Endergebnis. Es ist deshalb wichtig, dass alle relevanten Informationen zur Erhebung und Verarbeitung der LiDAR-Daten als Metadaten dokumentiert sind. Diese sollten es dem Endnutzer ermöglichen, die Qualität des DTM abzuschätzen³⁵.

30 Verschiedene in Forschungsprojekten und in der hier präsentierten Arbeit angewendete Algorithmen werden in Kap. 6.3 ausführlich besprochen.

31 Die automatische Erkennung von Strukturen konnte sich aufgrund verschiedener Schwierigkeiten noch nicht etablieren (vgl. Kap. 11).

32 CRUTCHLEY/CROW 2009, 8.

33 Vgl. dazu HÖFLE/PFEIFER 2007, 422ff.

34 CHALLIS et al. 2011b, 4ff.; CHALLIS/HOWARD 2013, 161ff.

35 DONEUS/BRIESE 2011, 59; DONEUS/KÜHTREIBER 2013, 33f.; OPITZ 2013, 20. Dazu gehören der Flugzeitpunkt, der verwendete Laserscanner, Parameter während des Messvorgangs, die verwendete Plattform, die Punktdichte der Punktwolke sowie eine Dokumentation über die einzelnen Schritte der Datenverarbeitung.

3.2 Forschungsgeschichte

Das Potenzial von LiDAR in der Archäologie wurde erstmals im Jahr 2000 auf einer Tagung zu Luftbildarchäologie präsentiert. Der Datensatz stammte von der englischen Environment Agency und diente primär als Grundlage für Flutungsmodellierungen. Dass LiDAR-Technologie auch für die Archäologie von Interesse sein könnte, zeigte die Befestigung eines römischen Kastells, die sich in der Nähe eines Flussufers abzeichnete. Diese war bereits durch Luftbilder als Bewuchsmerkmal bekannt, galt jedoch durch jahrzehntelanges Pflügen als eingeebnet. Mit dem DTM der Environment Agency war es erstmals möglich, die dreidimensionale Ausdehnung der Fundstelle zu erfassen und zu visualisieren³⁶.

Die vorgelegten Ergebnisse waren Anstoß für mehrere Forschungsprojekte in England, um den Einsatz von LiDAR als Prospektionsmethode³⁷ sowie für die denkmalpflegerische Überwachung von Fundstellen³⁸ in offenem Gelände zu prüfen. Es folgten weitere Untersuchungen und Fallstudien zur Anwendung von ALS-Daten in bewaldetem Gebiet in Deutschland, Norwegen, England und Österreich³⁹.

Mit Ausnahme von Doneus und Briese⁴⁰ wurde in den erwähnten Forschungsprojekten das DTM lediglich mit einem *Hillshade* visualisiert. Im Wissen über die begrenzten Möglichkeiten dieser Visualisierungsmethode (Kap. 6.3.1) konzentrierte sich die Forschung in den Folgejahren auf die Entwicklung neuer Algorithmen⁴¹. Weitere wurden aus anderen Fachbereichen adaptiert⁴². Heute stehen Bearbeitern von LiDAR-Daten eine stetig zunehmende Anzahl verschiedener Algorithmen zur Verfügung, mit denen Visualisierungen für die Prospektion archäologischer Strukturen erzeugt werden können.

Die vielversprechenden Ergebnisse und die zunehmende Verfügbarkeit von geeigneten Datensätzen machten LiDAR-Technologie innerhalb weniger Jahre zu einer wichtigen und vielgenutzten Quelle in der archäologischen Forschung. Die Datensätze, die meist weitläufige Gebiete abdecken, bilden eine gute Basis für landschaftsarchäologische Forschungsprojekte. Die Ergebnisse der Prospektion können zudem in der Denkmalpflege genutzt werden, um das Fundstelleninventar zu erweitern und das darauf aufbauende Fundstellen-Management zu verbessern⁴³.

3.3 LiDAR als Prospektionsmethode

3.3.1 Vorteile

Das Potenzial von LiDAR in der Prospektion ergänzt die bislang genutzten Prospektionsmethoden in wichtigen Punkten und steigert die Möglichkeiten der archäologischen Prospektion erheblich. Mehrere Vorteile ergeben sich bereits beim Erstellen der Daten. Weitläufige Gebiete wie die Fläche des Kantons Zürich können innerhalb weniger Tage erfasst werden. Dies ermöglicht, die Aufnahme des gesamten Gebiets bei gleichen äußeren Bedingungen wie Wetter oder Vegetation durchzuführen, was die Vergleichbarkeit der Ergebnisse verschiedener Regionen erhöht. Mit einem Laserscanner als aktivem Sensor ist LiDAR im Vergleich zur Luftbildarchäologie nicht von der Sonneneinstrahlung abhängig⁴⁴. Dadurch, dass der Laser beliebig ausgerichtet werden kann, können Datenlücken (in der Luftbildarchäologie Schattenflächen) durch exponierte Objekte verringert werden. Zudem können die Daten auch nachts erhoben werden, was bei Einschränkungen durch die Flugsicherung in der Nähe von Flughäfen von Vorteil sein kann.

Dass Laserstrahlen in bewaldetem Gebiet bis zum Boden vordringen können, ist einer der Hauptgründe für den zunehmenden Einsatz von LiDAR-Technologie in der Prospektion. Durch den beschränkten Erfolg von Luftbildern sowie erschwerte Bedingungen für Begehungen oder Geophysik sind Waldgebiete bis heute häufig schlecht erforscht. Mit der Auswertung großflächiger Gebiete anhand von LiDAR-Daten können diese Lücken geschlossen und Fundstellendatenbanken ergänzt werden⁴⁵. Die Datenaufnahme wird zudem objektiv durchgeführt. Bei einer Kartierung im Gelände handelt es sich bereits um die Interpretation eines Feldarchäologen, dessen Aufmerksamkeit auf einzelne Merkmale fixiert ist. Kartiert wird eine Auswahl der Gesamtheit an Strukturen, welche der Prospektierende für seine Arbeit als relevant erachtet. In einem LiDAR-Scan hingegen wird das gesamte Gebiet und damit jede Unregelmässigkeit des Reliefs unabhängig seines archäologischen Potenzials mit derselben Genauigkeit erfasst, sofern dies die Vegetation zulässt⁴⁶. Die Interpretation der Daten findet erst zu einem späteren Zeitpunkt am Computerbildschirm statt und kann zu einem beliebigen Zeitpunkt unter gleichbleibenden Bedingungen wiederholt werden, was im Gelände nicht möglich ist.

Ein weiterer großer Vorteil von LiDAR ist die Möglichkeit, archäologische Strukturen optisch hervorzuheben, die so schwach ausgeprägt sind, dass sie mit bloßem Auge im Gelände nicht wahrnehmbar sind. Höhenunterschiede von wenigen Zentimetern sind

bereits ausreichend, um sie mit geeigneten Visualisierungsmethoden abbilden zu können.

Nicht zuletzt können auch die Anschaffungskosten im Vergleich zu anderen Prospektionsstechniken von Vorteil sein. Flächendeckende Datensätze der öffentlichen Hand stehen angegliederten Institutionen wie der Denkmalpflege häufig frei zur Verfügung (Kap. 3.1.3). In diesen Fällen bedarf es lediglich eines leistungsfähigen Rechners mit entsprechender Software und eines geübten Bearbeiters, um mit den Daten arbeiten zu können. Forschungseinrichtungen wie Universitäten erhalten die Daten häufig zu günstigen Konditionen. Die gezielte Erstellung von LiDAR-Daten für archäologische Projekte ist hingegen mit extremem finanziellem Aufwand verbunden und nur in den seltensten Fällen möglich.

3.3.2 Beschränkungen

Wie bei jeder Prospektionsmethode ist auch bei der Auswertung eines LiDAR-Datensatzes ein umfangreiches technisches und theoretisches Knowhow vorauszusetzen. Einschränkungen der Daten sowie der Aufbau verwendeter Werkzeuge und Algorithmen müssen bekannt sein, damit Fehlinterpretationen vermieden werden können⁴⁷. Neben einer umfassenden methodischen Auseinandersetzung mit dem Thema ist aber auch Erfahrung im praktischen Umgang mit LiDAR-Daten erforderlich. Eine große Herausforderung bei der Auswertung eines LiDAR-Datensatzes ist die Ansprache der Geländemerkmale. In einem Geländemodell wird lediglich die dreidimensionale Ausprägung der Erdoberfläche wiedergegeben. Die Möglichkeiten einer Interpretation von im DTM sichtbaren Strukturen sind dadurch begrenzt. Die Unterscheidung von archäologischen, rezenten und natürlichen Strukturen, die eine ähnliche oder dieselbe Oberflächenform aufweisen, ist häufig nur mit Informationen aus anderen Quellen wie alten Karten oder einer Überprüfung im Feld möglich (Kap. 7.4).

Eine weitere Beschränkung, die alle Fernerkundungsmethoden betrifft, ist die erschwerte Datierung archäologischer Strukturen (Kap. 7.6). Eine zeitliche Einordnung ist oft nur sehr grob oder überhaupt nicht möglich, da Befunde verschiedener Epochen dieselbe Ausprägung aufweisen. Für solche Abklärungen sind Feldprospektionen oder Bodeneingriffe nach wie vor unerlässlich.

Archäologische Befunde, die sich nicht durch ihre Oberflächenausprägung vom umgebenden Relief abheben, zeichnen sich in LiDAR-Daten nicht ab⁴⁸. Dies schränkt das Spektrum an Befunden ein, die mit Hilfe von LiDAR entdeckt werden können. Die Ergebnisse einer Prospektion, die lediglich auf Basis eines DTM durchgeführt werden, sind deshalb nicht repräsentativ für die Gesamtheit der vorhandenen Archäologie im Untersuchungsgebiet. Für die detaillierte Erfassung

einer Kulturlandschaft sollte LiDAR stets mit anderen Prospektionsmethoden kombiniert werden⁴⁹.

3.4 LiDAR in der Forschung

In der Forschung sind LiDAR-Daten für die Landschaftsarchäologie von besonderem Interesse. Die Auswertung des DTM ermöglicht eine lückenlose Erschließung des Forschungsgebiets und kann auch in bewaldeten Gebieten eingesetzt werden (Kap. 3.3.1). Das DTM kann zudem als Grundlage für räumliche Analysen wie Sichtbarkeitskarten, Verteilungsmuster oder *Cost Surfaces* genutzt werden⁵⁰. Neben dem Einsatz in der Landschaftsarchäologie können LiDAR-Scans auch für die Auswertung einzelner Fundstellen eine wichtige Quellengrundlage darstellen. Zudem sind vom DTM abgeleitete Visualisierungen wie ein *Hillshade* (Kap. 6.3.1) ein beliebtes Mittel, um archäologische Fundstellen und ihr Umland für Vorträge und Publikationen plastisch und einfach lesbar abzubilden.

In Kap. 10 werden zwei Beispiele vorgestellt, wie die Ergebnisse von LiDAR-Daten in Forschungsprojekten des Untersuchungsgebiets genutzt werden können.

36 HOLDEN et al. 2002, 177ff.

37 BEWLEY 2003, 284f.; BEWLEY et al. 2005; CHALLIS 2006; CHALLIS et al. 2008; CRUTCHLEY 2006.

38 BARNES 2003.

39 CRUTCHLEY 2006; DEVEREUX et al. 2005; DONEUS/BRIESE 2006a; DONEUS/BRIESE 2006b; RISBØL et al. 2006; SITTLER 2004; SITTLER et al. 2005; SITTLER/SHELLBERG 2006.

40 DONEUS/BRIESE 2006a.

41 HESSE 2010; KOKALJ et al. 2011b.

42 Z. B. DEVEREUX et al. 2008; DONEUS 2013a.

43 Das bisher aufwändigste und größte Prospektionsprojekt für das Fundstellenmanagement einer Denkmalpflege wird in Baden-Württemberg durchgeführt, wo die gesamte Fläche des Bundeslandes auf Basis von LiDAR-Daten prospektiert wird (HESSE 2013; HESSE/BOFINGER 2015).

44 WAGNER et al. 2004, 202; BERARDIN 2010, 22.

45 DEVEREUX et al. 2005, 648ff.; DONEUS et al. 2008b, 137; RISBØL 2013, 56.

46 DONEUS/BRIESE 2006a, 100; DONEUS 2008a, 890; MLEKUŽ (2013, 90) spricht in diesem Zusammenhang von „lack of selectiveness“.

47 HESSE 2013, 181; KOKALJ et al. 2013, 102f.; DONEUS/KÜHTREIBER 2013, 36ff.

48 Intensitätsdaten können zwar wie bereits festgehalten zusätzliche Informationen liefern, die Daten finden in der Archäologie bislang jedoch selten Verwendung.

49 CHALLIS et al. 2008, 1055ff.; CRUTCHLEY 2006, 256f.; CRUTCHLEY 2009, 66; DONEUS et al. 2008a, 891; DONEUS et al. 2008b, 152; DONEUS 2013b, 269ff.; HESSE 2013, 177ff.

50 DONEUS 2013b, 246; BOFINGER/HESSE 2011a, 39. Meist ist das DTM für solche Berechnungen jedoch viel zu hoch aufgelöst. Um rezente Geländeformen wie Feldwege oder Trichter umgestürzter Bäume zu eliminieren, sollte die Auflösung des Geländemodells deshalb stark verringert werden.

4 Das Untersuchungsgebiet

Das in dieser Arbeit ausgewertete Gebiet befindet sich im Nordosten des Kantons Zürich (Abb. 6). Es umfasst sechs Gemeinden des Zürcher Weinlands mit einer Gesamtausdehnung von 51 km². Von Osten nach Westen sind dies Oberstammheim, Unterstammheim, Wالتالtingen, Ossingen, Truttikon und Trüllikon. Die Region wurde als Untersuchungsgebiet ausgewählt, da bereits diverse archäologische Fundstellen verschiedenster Epochen in diesem Gebiet bekannt sind. Diese konnten den auf Basis der LiDAR-Daten kartierten Strukturen gegenübergestellt werden (Kap. 8.2.3). Zudem weist diese Region eine vielfältige und anspruchsvolle Topografie auf (siehe unten), was für die Untersuchung zur Qualität des zur Verfügung stehenden LiDAR-Datensatzes und dessen Nutzbarkeit in der archäologischen Anwendung von Vorteil war.

Seinen Namen erhielt das Zürcher Weinland vom extensiv betriebenen Weinbau während des Mittelalters und der Neuzeit. Zurückzuführen ist dies auf ein eher trockenes und warmes Klima, begünstigt durch die tiefe Lage von durchschnittlich 350–480 Meter ü. NN und die kiesigen Böden⁵¹. Noch heute sind zahlreiche Südhänge der Landschaft mit Reben bepflanzt. Ungefähr 60% der Fläche des Untersuchungsgebiets wird heute landwirtschaftlich genutzt, 30% sind bewaldet⁵².

Die Geologie des Zürcher Weinlands ist geprägt von zahlreichen Gletschervorstößen des Pleistozäns. Das meist hügelige Relief des Untersuchungsgebiets wird durch verschiedene glaziale Relikte wie Moränen, Drumlins und Schotter gestaltet (Abb. 7). Die obersten geologischen Schichten des gesamten Untersuchungsgebiets bestehen ausschließlich aus glazialen und fluvi-
alen Sedimenten (Kies, Sand etc.).⁵³ Die einzige Ebene des Untersuchungsgebiets befindet sich westlich des Stammerbergs, der das Untersuchungsgebiet gegen Osten abschließt (vgl. Karten 1–10). Es handelt sich dabei um ein ehemaliges Zungenbecken, eine durch den Gletscher ausgehobene Hohlform, die nach dem Rückzug des Eises mit Schutt verfüllt wurde⁵⁴.



6 Grundriss des Kantons Zürich mit dem Untersuchungsgebiet (rot).

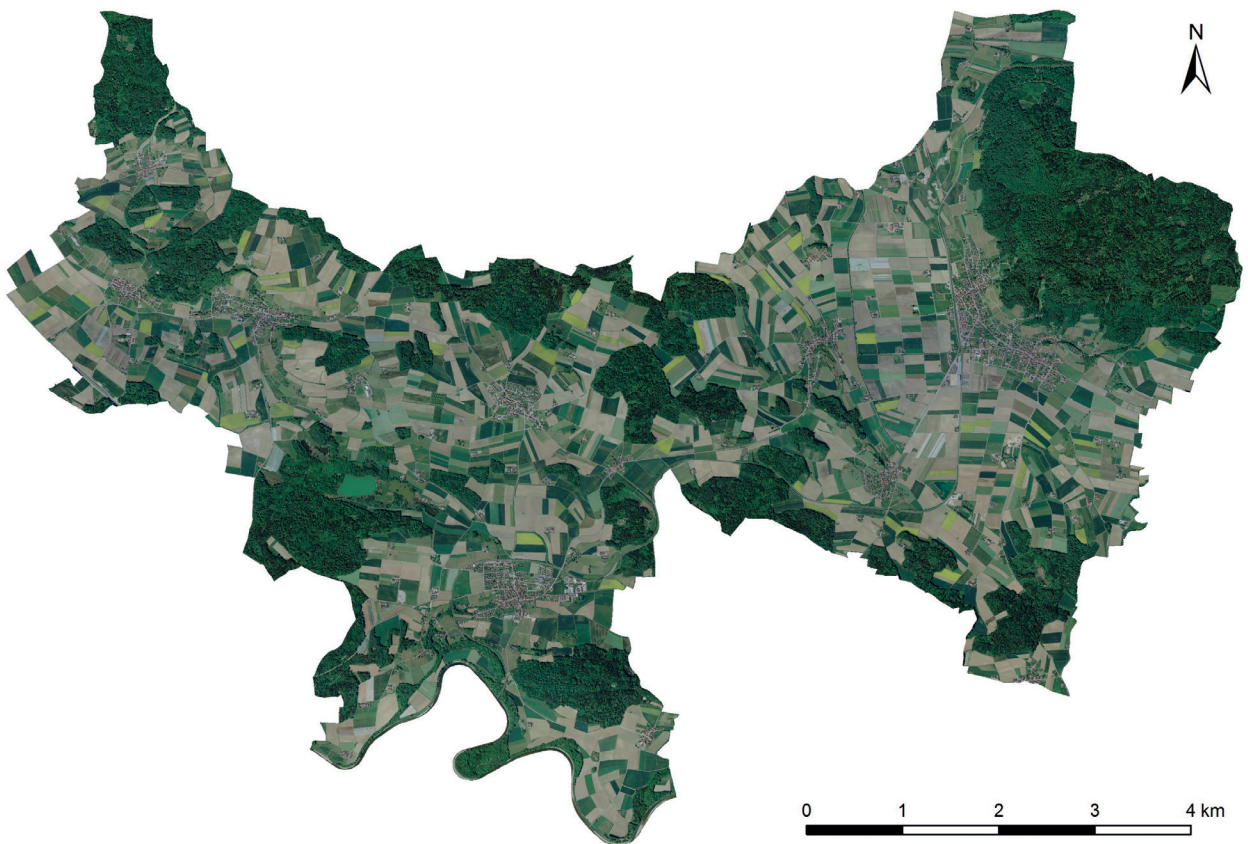
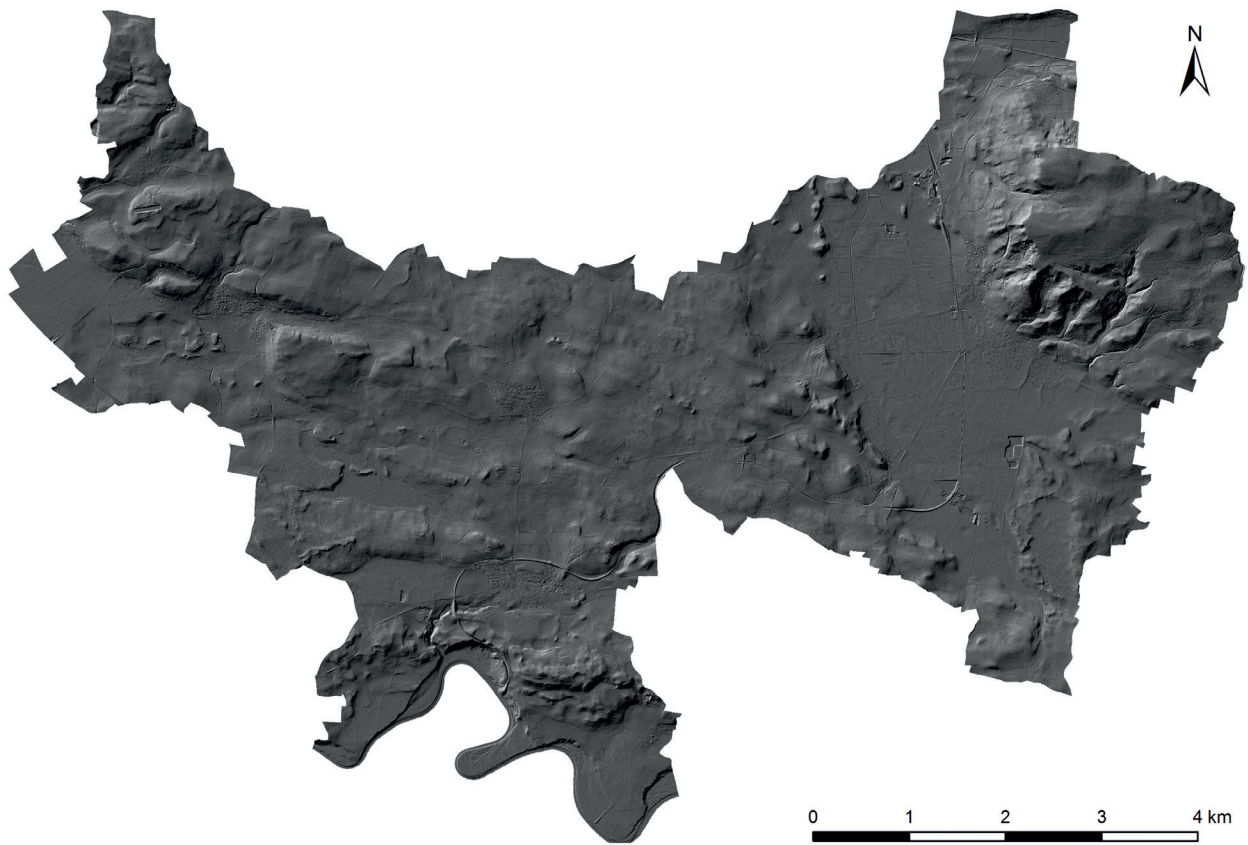
51 AKERET 1987, 11ff.; PFENNINGER 1987, 121.

52 Vgl. dazu Kap. 8.2.2 mit absoluten Angaben.

53 Geologischer Atlas der Schweiz, 1:25000, Kartenblätter 38 und 52.

54 HANTKE 1987, 78.

4 Das Untersuchungsgebiet



7 Das Untersuchungsgebiet als DTM (als *Hillshade* dargestellt, vgl. Kap. 6.3.1) und Luftbild. Der bewaldete Stammerberg ganz im Osten bildet die höchste Erhebung des Untersuchungsgebiets. Gleich westlich davon befindet sich eine Schotterebene. Das restliche, hügelige Gebiet ist durch verschiedene glaziale Merkmale geprägt. Ganz im Süden fließt die Thur.

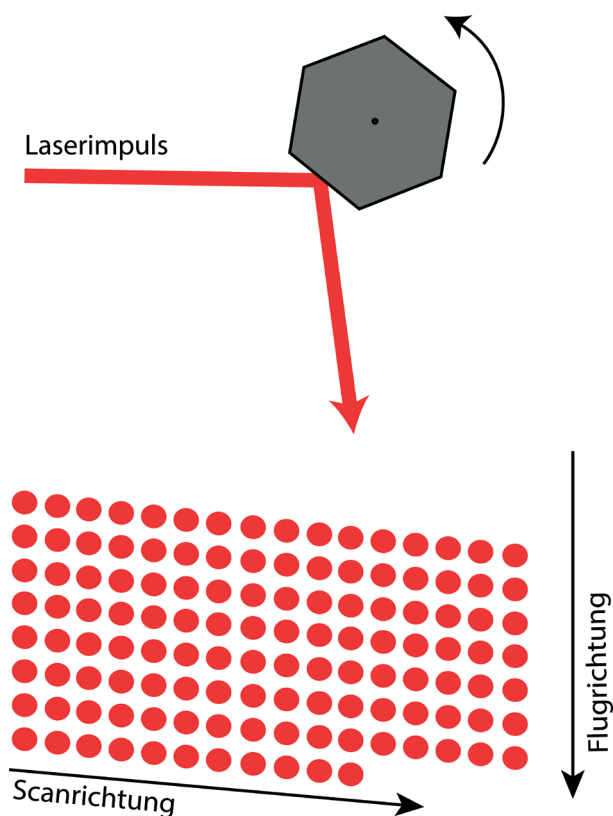
5 Verwendeter Datensatz

Der in dieser Arbeit verwendete LiDAR-Datensatz mit der etwas umständlichen Bezeichnung *LIDAR Laser-scanning-Geodaten Kanton Zürich*⁵⁵ wurde im Jahr 2014 von der Firma BSF Swissphoto AG erstellt. Er ist Bestandteil des vom Kanton Zürich in Auftrag gegebenen Projekts *Luftaufnahmen 42*. Das Projekt sieht vor, das gesamte Kantonsgebiet in regelmäßigen Zeitabständen mit hochauflösenden Laserscans und digitalen Orthofotos abzudecken⁵⁶.

5.1 Metadaten⁵⁷

5.1.1 Verwendete Technologie

Für die Erstellung der LiDAR-Scans wurde ein Laserscanner Trimble AX60 verwendet. Es handelt sich um ein FWF-System, das die gesamte Wellenform registriert (Kap. 2.3). Die verwendete Wellenlänge beträgt ca. 1000 nm. Die Laserimpulse werden mit einem rotierenden Polygonspiegel abgelenkt, was parallele Scanlinien und eine gleichmäßige Punkteverteilung auf der Erd-



8 Scanmechanismus des Trimble AX60.

oberfläche garantiert⁵⁸ (Abb. 8). Der Laserscanner misst mit einem Öffnungswinkel von $\pm 30^\circ$. Die Position und Orientierung des Messsystems wurde von einem Trimble AP50-System aufgezeichnet, einer Kombination aus geodätischem Zweifrequenz-GPS-Empfänger (Aufzeichnungsrate 5 Hz) und IMU (Aufzeichnungsrate 200 Hz).

5.1.2 Befliegung

Die Flugrouten wurden für das Projekt so gewählt, dass die vom Auftraggeber geforderte minimale Querüberlappung der Flugstreifen von 10% mit einem maximalen Öffnungswinkel von $\pm 20^\circ$ abgedeckt wurden. Der gemessene Bereich von -30° bis -20° und 20° bis 30° wurde für die Produktion der Daten nicht verwendet.

Die LiDAR-Scans für das Zürcher Weinland, welches das Forschungsgebiet der vorliegenden Arbeit darstellt, wurden im Zeitraum vom 10.–20. März 2014 durchgeführt. Zu diesem Zeitpunkt war der Schnee bereits geschmolzen. Die Bäume wiesen noch kein Laub auf, sodass auch in bewaldetem Gebiet eine genügend hohe Auflösung des Terrains erreicht werden konnte. Die Befliegungen erfolgten bei guten meteorologischen Bedingungen (Trockenheit, keine tiefen Wolken). Die Flughöhe über Meer betrug 5000 Fuß (ca. 1520 m), was zusammen mit dem Öffnungswinkel von $\pm 20^\circ$ in einer Streifenbreite von ca. 1100 m resultierte. Als Plattform für den Laserscanner wurde ein Helikopter mit einer Fluggeschwindigkeit von 45 Knoten eingesetzt. Die Impulswiederholungsrate des Laserscanners betrug 266 kHz. Mit den genannten Parametern wurde die Erdoberfläche mit durchschnittlich 8,8 Pkt./m² abgetastet⁵⁹.

5.1.3 Datenverarbeitung

Die hochfrequent und komplett aufgezeichnete Wellenform des FWF-Scanners wurde in einem ersten Verarbeitungsschritt in diskrete Distanzmessungen

55 <http://geolion.zh.ch/geodatensatz/show?nbid=2618> (22.09.2015).

56 Amt für Raumentwicklung 2015, 3.

57 Informationen dieses Kapitels wurden dem technischen Bericht der BSF Swissphoto (2015) entnommen.

58 BERARDIN et al. 2010, 16ff.

59 Die angegebenen Parameter und ihr Einfluss auf die Qualität des Laserscans werden in Kap. 2 erläutert.

umgerechnet (Kap. 2.3). Die minimale vertikale Distanz zwischen zwei Echos beträgt 0,4–0,7 m. Die Berechnungen wurden mit der Software RiAnalyse von Riegl durchgeführt. Pro Laserpuls konnten bis zu zehn Einzelmessungen generiert werden, im Durchschnitt wurden 17,6 Einzelmessungen/m² erreicht. Zur Berechnung der 3D-Koordinaten und Kalibrierung der Streifenangleichung wurde die Software Ri-Process verwendet. Die Punktdaten wurden durch eine automatische Klassifizierung in Fehlmessungen, Streifenrandpunkte, Bodenpunkte, Gebäudepunkte und sonstige Punkte eingeteilt. Verwendet wurde dafür eine Kombination von Klassifizierungsalgorithmen von TerraScan. Die Bodenpunktfilterung, die die Grundlage für das DTM bildet, wurde mit progressiver TIN-Verdichtung durchgeführt. Das Modell basiert auf ausgewählten, tief gelegenen Startpunkten, die sicher als Bodenpunkte angesprochen werden können. Durch zusätzliche Punkte der Punktwolke, welche bestimmte geometrische Kriterien im Verhältnis zu den bereits bestimmten Bodenpunkten erfüllen, werden die Anzahl Bodenpunkte schrittweise gesteigert⁶⁰. Nach der automatischen Klassifizierung wurde das Ergebnis visualisiert, überprüft und manuell mit der Software Terrascan korrigiert.

Die klassifizierte Punktwolke wurde im Format LAS 1.2 an den Kanton Zürich geliefert. Aufgrund der großen Datenmenge wurde die Fläche in quadratische Kacheln von 500 m Seitenlänge unterteilt. Ebenfalls im Lieferumfang enthalten waren ein aus der Punktwolke generiertes digitales Oberflächenmodell (DSM) sowie ein DTM. Das DTM wurde über die Delaunay-Triangulation⁶¹ (Dreiecksvermaschung) der klassifizierten Bodenpunkte erstellt und als Esri-Grid zur Verfügung gestellt. Das GIS-Zentrum des Kantons Zürich konvertierte das DTM anschließend ins Geotiff-Format und stellte diese den übrigen Ämtern als quadratische Kacheln von 1000 m Seitenlänge zur Verfügung. Diese Kacheln mit einer Auflösung von 0,5 m (Kap. 5.3) stellen die Ausgangslage für die archäologische Prospektion dar, die Thema dieser Arbeit ist.

5.1.4 Qualitätsprüfung

Die vertikale absolute Genauigkeit wurde mit Hilfe terrestrisch vermessener Kontrollflächen überprüft. Dabei wurde eine maximale Abweichung von ± 10 cm festgestellt. Zudem wurden die LiDAR-Daten durch eine externe Stelle auf mögliche Mängel überprüft. Dabei wurde für das DTM eine sehr hohe Qualität festgestellt und die präzisen Höhenangaben betont.

5.2 Bildfehler

Während des Messvorgangs und der anschließenden Verarbeitung können Artefakte entstehen, die sich in den LiDAR-Daten als Bildfehler abzeichnen. Um bei der archäologischen Auswertung eines LiDAR-Datensatzes Fehlinterpretationen zu vermeiden, ist es wichtig, dass Datenartefakte als solche erkannt werden können⁶².

Die in dieser Arbeit genutzten Daten weisen relativ wenig Bildfehler auf, die in der Regel auch schnell als solche erkannt werden können. Häufigstes Datenartefakt ist flächiges Rauschen im Bereich von zwei sich überlappenden Flugstreifen. Zurückzuführen ist dies auf einen leichten vertikalen Versatz zwischen einzelnen Flugstreifen (Streifendifferenzen), ausgelöst durch geringe Messfehler und ungenügende Streifenanpassung⁶³. Diese meist nur wenige Zentimeter Höhenunterschied reichen aus, um das in den Visualisierungen repräsentierte Relief im Überlappungsbereich zweier Streifen zu stören⁶⁴ (Abb. 9). Weitere im verwendeten Datensatz entdeckte Artefakte sind einzelne oder in Bündeln auftretende lineare Strukturen. Meist sind sie jedoch leicht als solche zu identifizieren, besonders dann, wenn sie moderne Strukturen überlagern⁶⁵ (Abb. 10).

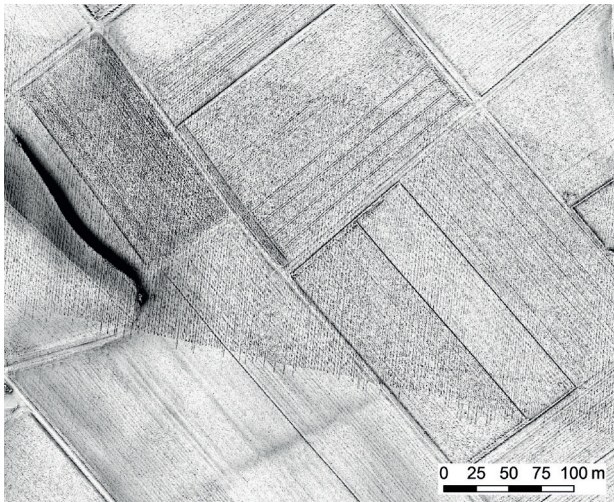
5.3 Auflösung des DTM

Bei einer durchschnittlichen Punktdichte der Punktwolke von 8,8 Pkt./m² stellte sich die Frage nach der Auflösung des in dieser Arbeit verwendeten Geländemodells. Als Möglichkeiten standen 1 m, 0,5 m sowie 0,25 m Auflösung zur Verfügung, was einem, vier oder 16 Pixel/m² entspricht. Auf einer Testfläche von 1000 × 1500 m wurde im Vorfeld geprüft, welche Auswirkungen die unterschiedlichen Auflösungen des DTM auf die Qualität der darauf aufbauenden Visualisierungen (Kap. 6.3) haben.

5.3.1 Tests

Die Testfläche wurde so gewählt, dass bewaldetes Gebiet wie auch Ackerflächen vorhanden sind. Zudem befinden sich verschiedene, bereits bekannte archäologische Strukturen im untersuchten Bereich. Die Test-DTM wurden mit der Software *FME Workbench* (Version 2014 SP4) aus den bereits klassifizierten Bodenpunkten im .las-Format mit Auflösungen von 1 m, von 0,5 m und von 0,25 m erstellt. Die durchschnittliche Punktdichte der klassifizierten Bodenpunkte beträgt in diesem Bereich 8,4 Pkt./m².

Aus dem DTM wurden verschiedene Visualisierungen berechnet (*Hillshades*, *PCA*, *positive* und *negative*



9 Ungenaue Streifenanpassung kann flächiges Rauschen verursachen.



10 Dieses streifenförmige Rauschen ist leicht als Bildartefakt erkennbar, da es eine moderne Straße überlagert.

Openness, *Sky View Factor* und *Local Dominance*, vgl. Kap. 6.3). Um vergleichbare Resultate der verschiedenen Auflösungen zu erhalten, mussten die in Pixel festgelegten Radien von auf Nachbarschaft basierenden Visualisierungsmethoden jeweils derselben absoluten Distanz in Metern entsprechen⁶⁶. Zudem musste bei der Darstellung jeweils dieselbe Histogrammanpassung verwendet werden⁶⁷.

5.3.2 Ergebnisse

Erwartungsgemäß die schlechtesten Ergebnisse lieferte die Auflösung von 1 m. Auch wenn damit bereits gute Resultate erzielt werden konnten und die benötigte Rechenleistung deutlich geringer war, zeigten beide Alternativen mit höherer Auflösung deutlich mehr Detail (Abb. 11). Besonders ins Gewicht fiel die grobe Auflösung bei Strukturen geringer Ausdehnung und erschwerte deren präzise Kartierung.

Eine Gegenüberstellung der Visualisierungen zeigte jedoch, dass eine höhere Auflösung keineswegs nur Vorteile mit sich bringt. Bei *Sky View Factor* (Kap. 6.3.6) sowie *Openness* (Kap. 6.3.5) waren bei höherer Auflösung schwach ausgeprägte Strukturen schlechter sichtbar. So wurden im Bereich von Ackerflächen Pflugspuren mit vergleichsweise markanten Niveauunterschieden und klaren Kanten hervorgehoben und überlagerten archäologische Spuren. Ähnlich verhielt es sich mit Rauschen im Bereich von Streifenüberlappung (Kap. 5.2), welches bei zunehmender Auflösung in den Vordergrund trat. Im Relief schwach ausgeprägte Strukturen wie eine Grabhügelgruppe wurden von den Pflugspuren und dem Rauschen überprägt und zeichneten sich nur ungenügend ab (Abb. 11)⁶⁸. Auch im *Hillshade* und den darauf aufbauenden Visualisierungsmethoden (Kap. 6.3.1–6.3.3) waren im Testgebiet bei 0,25 m Auflösung Pflugspuren und das Rauschen

gut erkennbar. Die Sichtbarkeit schwach ausgeprägter archäologischer Strukturen wurde in diesen Fällen jedoch nicht beeinträchtigt. Viel mehr zeichneten sie sich durch das schärfere Bild genauer ab, was die Kartierung erleichterte. Bei *Local Dominance* (Kap. 6.3.9) stellten Rauschen sowie Pflugspuren keine Behinderung in der Interpretation der Visualisierung dar. Für alle Visualisierungsmethoden gilt, dass sich gut im Relief ausgeprägte Strukturen bei hoher Auflösung klarer abzeichnen. Dies erleichtert die Interpretation der Strukturen und ermöglicht eine präzisere Kartierung derselben.

Da es keine optimale Auflösung des DTM für die in dieser Arbeit verwendeten Visualisierungsmethoden gibt, musste ein Kompromiss eingegangen werden. Aus den Punktwolken mehrere DTM mit verschiedenen Auflösungen zu berechnen, hätte einen großen Mehraufwand dargestellt, der weder im Rahmen eines Forschungsprojekts noch für die Anwendung in

60 AXELSSON 2000, 111ff.; SITHOLE/VOSSELMAN 2004, 89.

61 Vgl. dazu VOSSELMAN/KLEIN 2010, 59f.

62 CRUTCHLEY/CROW 2009, 26.

63 VOSSELMAN/KLEIN 2010, 52f.

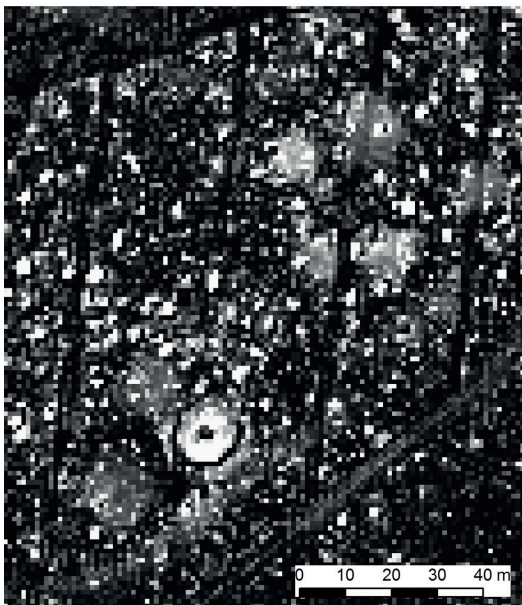
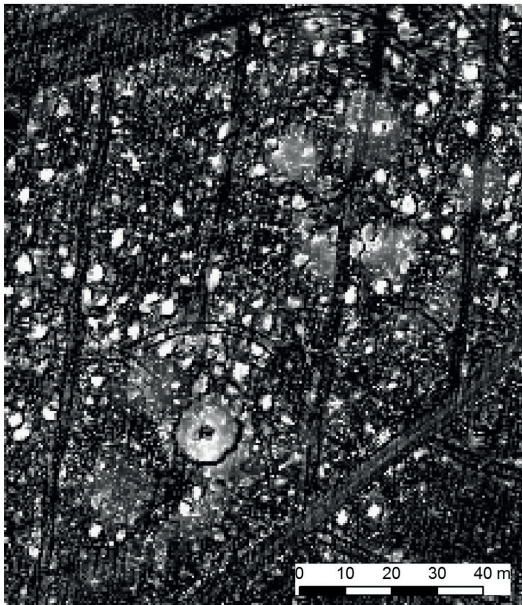
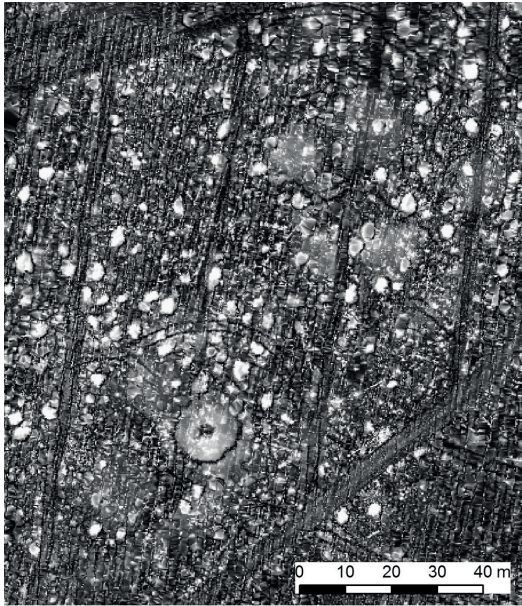
64 Die Visualisierungsalgorithmen sind meist speziell darauf ausgerichtet, geringe Höhenunterschiede hervorzuheben, weshalb die geringen Messfehler in den Visualisierungen als Bildrauschen enthalten sind.

65 CRUTCHLEY/CROW 2009, 26.

66 Z. B. wurde für eine Auflösung von 1 m beim SVF der Radius 10 (= 10 m) definiert. Bei 0,5 m Auflösung beträgt der Radius 20, bei 0,25 m Auflösung beträgt er 40.

67 Hierfür wurde ein *Minimum-Maximum-Stretch* verwendet (Kap. 6.4.2).

68 POIRIER et al. (2013, 187f.) testeten verschiedene Filter, um den störenden Effekt moderner Pflugspuren zu reduzieren. Dieselben Filter könnten wohl auch durch Streifendifferenzen hervorgerufenen Rauschen vermindern. Im Rahmen dieser Arbeit wurden entsprechende Filter jedoch nicht getestet.



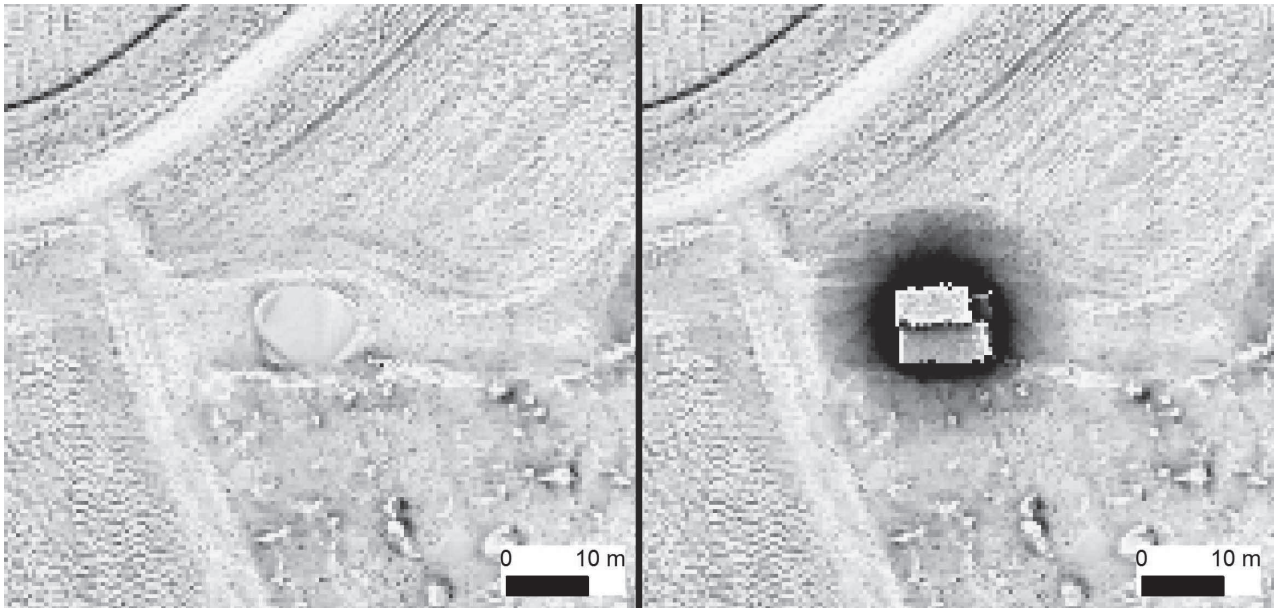
einem Denkmalamt realistisch ist. Die Auflösung von 1 m konnte aufgrund der oben besprochenen Nachteile ausgeschlossen werden. Die Entscheidung für das hochaufgelöste 0,25 m Grid hätte den Nutzen von *Sky View Factor* und *Openness* verringert. Ein weiteres wichtiges Argument gegen ein DTM mit 0,25 m Auflösung ist der benötigte Rechenpeicher bei der Berechnung der Visualisierungen sowie der immense Bedarf an Speicherplatz der berechneten Visualisierungen⁶⁹. Aus diesen Gründen wurde entschieden, für die Berechnung der Visualisierungen ein DTM mit einer Auflösung von 0,5 m zu verwenden. Da der Interpolationsalgorithmus für die Erstellung des DTM aus der Punktwolke wenig Einfluss auf die Qualität des DTM hat (Kap. 2.5.1), wurde für die Arbeit auf das bereits existierende DTM der BSF Swissphoto AG zurückgegriffen (vgl. Kap. 5.1.3).

5.3.3 Exkurs: DTM mit Gebäuden

Wie bereits ausgeführt wird das aus einem LiDAR-Scan abgeleitete DTM aus den als Boden klassifizierten Punkten der Punktwolke generiert (Kap. 2.5.1). Gebäude decken im Relief größere zusammenhängende Flächen ab, auf denen keine Bodenpunkte gemessen werden können. Diese Leerflächen werden bei der Verarbeitung eines DTM interpoliert. Die entsprechenden Stellen sind im DTM und in darauf basierenden Visualisierungen meist als leichte Anomalien zu erkennen.

Bei der archäologischen Auswertung eines DTM können isolierte Gebäude eine Überprüfung mit dem Kataster oder einem Orthofoto erfordern, um sie von möglicherweise für die Archäologie relevanten Strukturen unterscheiden zu können. Um diesen Arbeitsschritt während der Auswertung der Daten zu vermeiden, kann anstelle eines DTM ein Raster des Geländes mit den darauf stehenden Gebäuden verwendet werden (Abb. 12). Da ein solches Modell nicht standardisiert verfügbar ist, muss es selbst erstellt werden. Hierfür müssen die LiDAR-Daten in Form einer klassifizierten Punktwolke vorliegen sowie eine Software zur Verarbeitung der Punktwolke verfügbar sein⁷⁰. Beim Erstellen des neuen Rasters werden neben der Klasse der Bodenpunkte auch die Gebäudepunkte ausgewählt. Dieses Pseudo-DTM

¹¹ Vergleich derselben Grabhügelnekropole, oben mit einer Auflösung von 0,25 m, in der Mitte 0,5 m und unten 1 m. Das Rauschen (Streifen von oben nach unten, vgl. auch Abb. 9) ist im obersten Bild deutlich hervorgehoben. Die schwach ausgeprägten Grabhügel sind dadurch kaum mehr sichtbar. Ebenfalls nur ungenügend zeichnen sich Wege ab, die parallel zum Rauschen verlaufen. Im Vergleich dazu zeichnet sich die Grabhügelnekropole bei der größten Auflösung am deutlichsten ab (Visualisierung: *negative Openness*).



12 DTM mit Bildartefakt im Bereich des Gebäudes (links) im Vergleich mit einem DTM, bei welchem das Gebäude nicht weggerechnet wurde. Ist im linken Bild nicht klar ersichtlich, um was es sich bei der Anomalie handelt, bedarf dasselbe Objekt beim rechten Bild keinerlei zusätzlicher Abklärungen. Visualisierungsmethode: SVF.

und die darauf basierenden Visualisierungen bilden die Gebäude gut erkennbar ab, was die Arbeit mit den Daten vor allem auch für ungeübte Benutzer erleichtert⁷¹.

5.4 Tests zur Genauigkeit des DTM

Um zu überprüfen, wie präzise kleinräumige Gelände-merkmale des Reliefs im DTM wiedergegeben werden, wurden ausgewählte Strukturen im Gelände aufgenommen. Dokumentiert wurde jeweils ein Querschnitt der Strukturoberfläche im Maßstab 1:50. Dieser wurde anschließend einem im GIS angefertigten Profil des DTM derselben Stelle gegenübergestellt. Aufgenommen wurden ein Hohlwegsystem, zwei Grabhügel, eine Entnahmegrube, ein Meilerpodium, eine Grube unbekannter Funktion sowie fünf Wurzelstöcke umgestürzter Bäume. Ziel der Auswahl war, positive und negative Strukturen verschiedener Größen aufzunehmen. Mit dieser Grundlage sollte primär untersucht werden, ob die zur Klassifizierung der Punktwolke und Erstellung des DTM verwendeten Algorithmen eine glättende Wirkung auf archäologische Strukturen im DTM haben. Die Vermessung wurde mit einem Nivelliergerät vorgenommen. Die Georeferenzierung der Profile im Gelände erfolgte mit einem DGPS von Trimble⁷². Die Ergebnisse waren insgesamt sehr gut. Geringe Abweichungen bis maximal 10 cm zwischen dem gezeichneten Profil und jenem des DTM konnten in jedem Profil festgestellt werden. Diese können zumindest teilweise auch mit Ungenauigkeiten bei der Korrelation der beiden Profile und der groben Auflösung des DTM erklärt werden.

Lediglich bei positiven Strukturen geringer horizontaler Ausdehnung liess sich eine übermässige Glättung des Reliefs feststellen. So ist beim dokumentierten Hohlwegsystem eine Rippe zwischen zwei Hohlwegen im DTM geringer ausgeprägt als im Feld (Abb. 13). Extrem ist das Beispiel eines umgestürzten Baumes, wo anstelle des 2 m in die Höhe ragenden Wurzeltrichters eine ebene Fläche wiedergegeben wird (Abb. 14)⁷³. Im DTM kann ein solches Artefakt durchaus Ähnlichkeiten mit archäologischen Strukturen aufweisen, weshalb bei der Beurteilung solcher Merkmale während der Auswertung des Datensatzes Vorsicht geboten ist. Bei Feldbegehungen hat sich zudem gezeigt, dass Holzstapel wie in Abb. 15 und liegende Baumstämme aufgrund der (korrekten) Punktklassifikation nicht im DTM wiedergegeben werden. Dasselbe ist auch für Mauerreste von Ruinen oder

69 Im Vergleich zum 0,5 m Grid steigt die Datengrösse bei einer Auflösung von 0,25 m um das Vierfache.

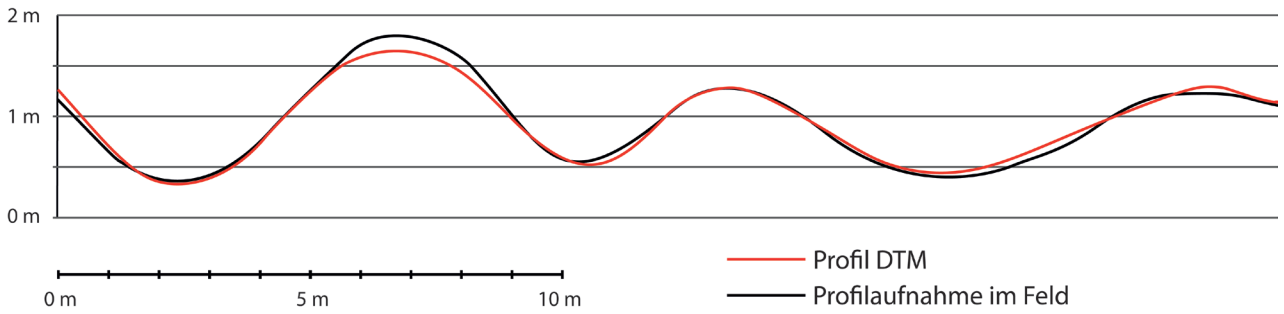
70 In der vorliegenden Arbeit wurde das Raster mit der Software FME Workbench erstellt.

71 Das optimierte Raster wurde lediglich für Tests auf einer kleinen Fläche erstellt. Die Auswertungen wurden mit einem „klassischen“ DTM ausgeführt.

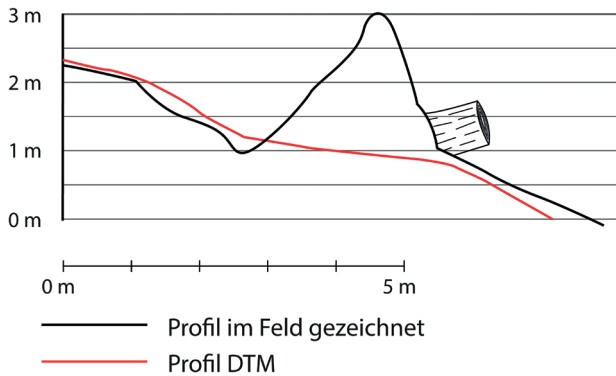
72 Da das DGPS nicht immer zur Verfügung stand, musste die Lage des Profils von mehreren umgestürzten Bäumen und zwei Grabhügeln im Nachhinein rekonstruiert werden. Da die Strukturen jeweils mittig geschnitten wurden, genügte dazu die im Feld erfasste Ausrichtung des gezeichneten Profils.

73 Bei der ALS-Befliegung könnten an der betreffenden Stelle nicht genügend Laserimpulse durch die Vegetation bis zur Erdoberfläche vorgedrungen sein oder die vorhandenen Punkte wurden fälschlicherweise als Vegetation klassifiziert. Als Folge davon wurde die Grundfläche des Wurzeltrichters als horizontale Ebene interpoliert.

5 Verwendeter Datensatz



13 Zweifach überhöhtes Profil eines Hohlwegbündels. Im Profil des DTM wird eine Rippe deutlich abgeflacht dargestellt.



15 Holzstapel.

14 Umgestürzter Wurzelteller im Profil, rechts davon der abgesägte Baumstrunk. Im DTM ist der Wurzeltrichter nicht feststellbar.

Weidmauern zu erwarten, die im vorliegenden LiDAR-Datensatz demnach nicht erfasst werden können.

Um ein Verständnis dafür zu erhalten, welche Geländemerkmale im DTM wiedergegeben werden, sind Feldbegehungen unumgänglich. Hierfür können auch verschiedene moderne Strukturen wie die erwähnten Holzstapel oder Totholzhaufen hilfreich sein, da diese markanten Objekte im Gelände zahlreich vorhanden sind und sehr einfach identifiziert werden können. Sie können jedoch innerhalb weniger Wochen bis Jahre nach dem Erstellen des Laserscans weggeräumt oder verändert werden. Auch andere Strukturen sind kontinuierlich der Erosion ausgesetzt und werden vom Menschen umgestaltet. Deshalb ist es von Vorteil, Feldbegehungen zur Qualitätsbeurteilung eines DTM für archäologische Zwecke so schnell wie möglich nach dem Erhalt der Daten vorzunehmen.

6 Visualisieren des DTM

Bevor mit der Auswertung eines Geländemodells begonnen werden kann, muss dieses mit geeigneten Algorithmen visualisiert werden. Ziel dabei ist, die dreidimensionale Topografie auf einer zweidimensionalen Grafik lesbar abzubilden. Dies ist in der Regel der erste Arbeitsschritt, den ein Archäologe bei der Auswertung von LiDAR-Daten ausführen muss. Wie bereits in Kap. 3.1.1 erwähnt, handelt es sich bei diesen Visualisierungen ebenfalls um Rasterdatensätze. Für jede Zelle des Rasters wird dabei auf Basis der Höhenwerte des DTM ein neuer Wert berechnet. Dies kann zum Beispiel die Neigung der Rasterzelle (Kap. 6.3.4) oder deren Anteil sichtbaren Himmels sein, der durch das umgebende Relief begrenzt wird (Kap. 6.3.6). Die Zellwerte des neuen Rasters werden anschließend mit einer Farb- oder Graustufenskala als Grafik wiedergegeben. Mit so erzeugten Visualisierungen können geringfügige Höhenunterschiede des Geländemodells optisch hervorgehoben werden und sie ermöglichen damit die Entdeckung schwach ausgeprägter, archäologischer Strukturen. Verschiedene in dieser Arbeit getestete Visualisierungen werden in Kap. 6.3 erläutert.

6.1 Verwendete Software

Zur Berechnung von Visualisierungen stehen zwei sehr hilfreiche Tools zur Verfügung, in welchen eine große Anzahl verschiedener Algorithmen implementiert ist. Bei beiden handelt es sich um Stand-Alone Software geringer Datengröße. Einfache Ableitungen des Geländemodells sind zudem standardmäßig in verschiedenen GIS-Softwares enthalten (vgl. Kap. 6.1.3). Die Darstellung der Visualisierungen sowie deren Auswertung werden ebenfalls in einem GIS ausgeführt.

6.1.1 Relief Visualisation Toolbox 1.1 (RVT)⁷⁴

Die RVT bietet eine kleinere Auswahl an Visualisierungsalgorithmen an, die sich in den letzten Jahren in verschiedenen Projekten bewährt haben. Die Bedienung läuft über eine Maske, in welcher alle verfügbaren Algorithmen aufgelistet sind. Es ist möglich, in einem Durchgang mehrere Dateien zu verarbeiten, was bei gekachelten Datensätzen (vgl. Kap. 6.2) ein großer Vorteil ist. Ebenfalls möglich ist die Berechnung verschiedener Visualisierungen im selben Arbeitsschritt.

Als Eingabe können alle Formate verwendet werden, die in der Geospatial Data Abstraction Library (GDAL) verzeichnet sind⁷⁵. Als Output werden jeweils zwei Geotiff-Files generiert (32-Bit für den Einsatz in GIS-Software sowie 8-Bit für Darstellungen in Bildprogrammen) sowie ein log-File, in welchem die Metadaten der getätigten Berechnung dokumentiert sind. Als Zusatz ist in der RVT ein Formatkonverter enthalten, mit welchem Datensätze in unterschiedliche Formate umgewandelt werden können. Zudem können alle Visualisierungsmethoden mit vertikaler Überhöhung berechnet werden.

6.1.2 LiDAR Visualisation Toolbox 1.0.0.23 (LiVT)⁷⁶

Bei der aktuell verfügbaren Version handelt es sich um eine Betaversion, bei der noch nicht alle Funktionalitäten getestet wurden und in der Praxis noch einige Fehler auftreten. Es stehen ebenfalls mehrere Visualisierungsmethoden zur Verfügung, die zum Teil mit jenen der RVT deckungsgleich sind. Im Vergleich zur RVT sind bei den einzelnen Visualisierungsmethoden häufig mehr Parameter festlegbar, was zu optimierten Ergebnissen führen kann. Im Gegenzug erfordert dies jedoch auch Erfahrung des Bearbeiters, damit dieser die Parameter korrekt festlegen kann. Als Input akzeptiert die LiVT ein generisches Binärdatenformat mit externer Headerdatei im ASCII-Format⁷⁷. Da kein Formatkonverter in der Software integriert ist, müssen andere Dateiformate vor der Berechnung in der LiVT mit einer anderen Software in ein Binärdatenformat konvertiert werden⁷⁸. Es kann jeweils nur eine Datei und eine Visualisierungsmethode gleichzeitig berechnet werden.

74 KOKALJ et al. 2011a; KOKALJ et al. 2011b.

75 http://www.gdal.org/formats_list.html (17.7.2015).

76 Nach HESSE 2016a, 110ff.

77 Dabei handelt es sich um folgende Formate: .bil, .bsq, .bip, .flt, oder .raw. Der Header der Binärdatei muss im selben Verzeichnis abgelegt sein und denselben Dateinamen aufweisen.

78 Hierfür wurde ArcGIS verwendet. Um die ins .bil-Format konvertierten Kacheln anschließend mit LiVT verarbeiten zu können, war eine Anpassung der Headerdateien erforderlich. Eine weitere Anpassung des Headers erforderte die Darstellung der mit LiVT berechneten Visualisierungen in ArcGIS. Das spezifische Problem scheint mit der Verwendung von ArcGIS als GIS-Software zu tun zu haben. Mit anderen GIS-Softwares wie Global Mapper tritt dieses scheinbar nicht auf (freundliche Mitteilung R. Hesse).

Dies war im Rahmen dieser Arbeit der größte Nachteil dieser Software, da die Berechnung für jede Kachel des Untersuchungsgebiets neu gestartet werden musste. Da LiVT lediglich einen Prozessorkern des Rechners verwendet, dauert die Berechnungszeit verglichen mit der RVT generell länger. Im Gegenzug ermöglicht diese Einstellung eine Nutzung der verbleibenden Rechnerkapazität für andere Arbeiten.

6.1.3 ArcGIS 10.2.2

Die in dieser Arbeit verwendete GIS-Software *ArcGIS 10.2.2* wurde primär zur Darstellung der berechneten Visualisierungen (Kap. 7.2) und deren Auswertung (Kap. 7 und 8) verwendet. Zusätzlich sind einfache Ableitungen des DTM wie *Slope* (Kap. 6.3.4) oder *Hillshades* (Kap. 6.3.1) bereits in GIS-Softwares implementiert, weshalb deren Berechnung direkt in ArcGIS ausgeführt wurde. Dabei wurden sie nicht wie bei den anderen Visualisierungen als eigener Rasterdatensatz berechnet (Kap. 5), sondern als Funktion des DTM ausgeführt. So errechnete ArcGIS die Daten in Echtzeit aus dem DTM, sobald auf die Visualisierung zugegriffen wurde. Dies hatte im Vergleich zu einem (statischen) Rasterdatensatz den Vorteil, dass die Parameter des *Hillshade*-Algorithmus bei Bedarf verändert werden konnten. Zudem war mit dieser Variante der Berechnungsaufwand (Kap. 6.2) im Vorfeld der Auswertung deutlich geringer und die Visualisierungen erforderten keinen zusätzlichen Speicherplatz.

6.1.4 Verschiedene Dateiformate

Für Rasterdaten gibt es eine Reihe an unterschiedlichen Dateiformaten und Versionen, die von verschiedenen Softwares genutzt werden. Setzt man sich zum ersten Mal intensiv mit GIS und LiDAR-Daten praktisch auseinander, kann der Überblick und das Verständnis, welcher Dateityp wie aufgebaut ist, fehlen. Ist

das entsprechende Wissen noch nicht vorhanden, sollte in einem Projekt für die Einarbeitung in dieses Thema genügend Zeit einberechnet werden.

In dieser Arbeit wurde hauptsächlich mit den Formaten Geotiff und einem binären Datenformat mit externem Header (Dateiendung *.bil*) gearbeitet, welche für die Arbeit mit den Visualisierungssoftwares vorausgesetzt wurden (Kap. 6.1). In vorausgehenden Tests (Kap. 5.3) wurden zusätzlich ASCII-Textdateien sowie Esri GRID verwendet. ArcGIS bietet den Vorteil, dass die Software (*fast*) alle Formate lesen und wiedergeben kann. Die Konvertierung in ein anderes Dateiformat wurde deshalb in der Regel mit ArcGIS ausgeführt.

6.2 Erstellen der Visualisierungen

Verschiedene für die Visualisierungen eingesetzte Algorithmen berücksichtigen Nachbarschaft (*Slope*, *SVF*, *Openness*, *TR*, *LRM*, *LD*). Der Wert einer Rasterzelle wird also über die Werte benachbarter Rasterzellen im DTM errechnet. In den Randbereichen eines DTM befindet sich dadurch ein Teil der für die Berechnung verwendeten Nachbarzellen ausserhalb des Geländemodells. Diese Zellen weisen Null-Werte auf. Die Folge davon ist, dass für die Randbereiche der daraus erstellten Visualisierungen falsche Werte berechnet werden⁷⁹. Je nach Größe eines DTM ist es aufgrund der begrenzten Leistungsfähigkeit von verwendeter Hard- und Software nicht möglich, das DTM in einem einzigen File zu verarbeiten. Aus diesem Grund werden große Geländemodelle in mehrere Kacheln mit geringerem Datenvolumen unterteilt, die anschließend separat verarbeitet werden. Werden aus diesen Kacheln berechnete, auf Nachbarschaft basierende Visualisierungen in einem GIS dargestellt, äußern sich die fehlerhaften Werte entlang der Kachelgrenzen meist als helle oder dunkle Streifen (Abb. 16).



16 Die einzeln berechneten und anschließend zusammen gesetzten Kacheln von 1000 m Seitenlänge weisen entlang des Randes fehlerhafte Pixelwerte auf (weiß). Visualisierung: *negative Openness*.

Das in der hier präsentierten Arbeit genutzte DTM stand als quadratische Kacheln von 1000m Seitenlänge im Geotiff-Format zur Verfügung. Um die eben angesprochenen Bildfehler bei den Visualisierungen zu vermeiden, wurden aus diesem DTM neue Kacheln generiert, die sich an jeder Kachelseite um 20m überlappen⁸⁰. Auf Grundlage dieser neu erstellten Kacheln mit Pufferzone wurden die angestrebten Visualisierungen mit den in Kap. 6.1 beschriebenen Softwares erstellt. Damit konnten auch in den Randbereichen der ursprünglichen Kachelausdehnung korrekte Werte erzielt werden. Den Visualisierungen wurden anschließend die 20m breite Pufferzonen mit den fehlerhaften Bildwerten entfernt. So konnte das gesamte Kachelmosaik ohne Unterbrechungen und Bildfehler zusammengefügt werden.

6.3 Visualisierungsmethoden

In den letzten Jahren wurde eine Vielzahl neuer Algorithmen zur Visualisierung archäologischer Strukturen entwickelt oder aus anderen Fachbereichen wie der Geografie übernommen und angepasst. Untersuchungen haben gezeigt, dass keiner dieser Algorithmen fähig ist, alle archäologischen Strukturen einer Landschaft hervorzuheben. Um ein Gebiet auf Grundlage eines ALS-Scans so vollständig wie möglich erfassen zu können, muss in einer archäologischen Auswertung eine Kombination verschiedener Visualisierungsmethoden eingesetzt werden⁸¹.

In diversen Artikeln wurden bereits verschiedene Visualisierungsmethoden einander gegenübergestellt und deren Vor- und Nachteile diskutiert⁸². Die Ergebnisse sind jedoch stark autorenabhängig. Zudem haben auch die Topografie und der Erhaltungszustand der archäologischen Strukturen einen wesentlichen Einfluss auf eine geeignete Wahl der Algorithmen. Es wurde deshalb im Rahmen dieser Arbeit eine eigene, ausführliche Testreihe durchgeführt, um eine geeignete Auswahl an Algorithmen für die Auswertung des Untersuchungsgebiets zu ermitteln.

Wie bereits in Kap. 3.3.2 ausgeführt, ist die Kenntnis der angewandten Algorithmen wichtige Voraussetzung. Nur wenn dem Bearbeiter klar ist, wie die Visualisierungen hergeleitet werden, können sie auch korrekt gelesen und interpretiert werden. Im Folgenden werden verschiedene in dieser Arbeit getestete Visualisierungsmethoden vorgestellt und ihre Funktionsweise erklärt (vgl. Abb. 23). In den Karten 1–10 ist ein repräsentativer Teil des Untersuchungsgebiets als klassische Kartendarstellung, in unterschiedlichen Visualisierungen sowie als Orthofoto abgebildet. Diese sollen es dem Betrachter ermöglichen, den Aufbau der einzelnen

Visualisierungen nachzuvollziehen und zu verstehen, welche Geländemerkmale wie dargestellt werden. Auf Abb. 17 ist zudem erfasst, welche Software und welche Parameter zur Erstellung der Visualisierungen gewählt wurden und für welche Geländebeziehungen die Visualisierungen geeignet sind.

6.3.1 Hillshade (*analytical hill shading*)

Analytical hill shading ist ein Algorithmus, der aus einem digitalen Geländemodell ein schattiertes Relief errechnet und in den meisten GIS-Softwares verfügbar ist. Dabei wird das Gelände relief als Lambertsche (diffus reflektierende) Oberfläche simuliert, die aus einer bestimmten Richtung von einer künstlichen Lichtquelle beleuchtet wird. Für die Berechnung müssen Einfallswinkel und Azimut der Lichtquelle vom Bearbeiter festgelegt werden. Die Parameter sind für jede Rasterzelle des DTM konstant. Der berechnete Wert⁸³ wird in der Regel mit einer Graustufenskala dargestellt (Abb. 23a, Karte 2). Flächen fast senkrecht zur Lichtquelle werden hell hervorgehoben. Solche mit einem Lichteinfallswinkel von 90° oder mehr liegen im Schatten und werden schwarz dargestellt⁸⁴. Die Visualisierung ist leicht les- und interpretierbar und ist deshalb eine bevorzugte Visualisierungsmethode für Geländemodelle. Um kontrastreichere Resultate zu erhalten besteht die Möglichkeit, das DTM vertikal zu überhöhen, bevor daraus ein *Hillshade* erstellt wird.

Wie bereits häufig kritisiert, bringt die Beleuchtung aus einer Richtung für die archäologische Auswertung eines DTM diverse Nachteile mit sich⁸⁵. Die Sichtbarkeit von Strukturen ist stark vom gewählten Einfallswinkel der Lichtquelle abhängig. Im „Schatten“ liegende Bereiche des Reliefs sind unterbelichtet, zur Lichtquelle ausgerichtete Hanglagen können dafür zu hell erscheinen.

79 Die Breite des Randstreifens mit falschen Werten entspricht jeweils dem Radius, der die maximale Entfernung der verwendeten Nachbarzellen definiert.

80 Dieser Arbeitsprozess wurde mit einem Pythonskript in ArcGIS ausgeführt. Für die Erstellung des Skripts sei Matthias Trauffer vom GIS-Zentrum des Kantons Zürich herzlich gedankt.

81 U. a. CRUTCHLEY 2009, 65; BENNETT et al. 2012, 43f.; CHALLIS et al. 2011, 288; ŠTULAR et al. 2012, 3357.

82 BENNETT et al. 2012; CRUTCHLEY 2013, Tab. 11.2; DONEUS 2013a, 6430ff.; HESSE 2016a; KOKALJ et al. 2011a; KOKALJ et al. 2011b, 407ff.; KOKALJ et al. 2013; ŠTULAR et al. 2012.

83 Dieser ist proportional zum Kosinus des Einfallswinkels der Lichtquelle auf die Oberfläche und wird in der Regel in einer 8-Bit-Skala gespeichert.

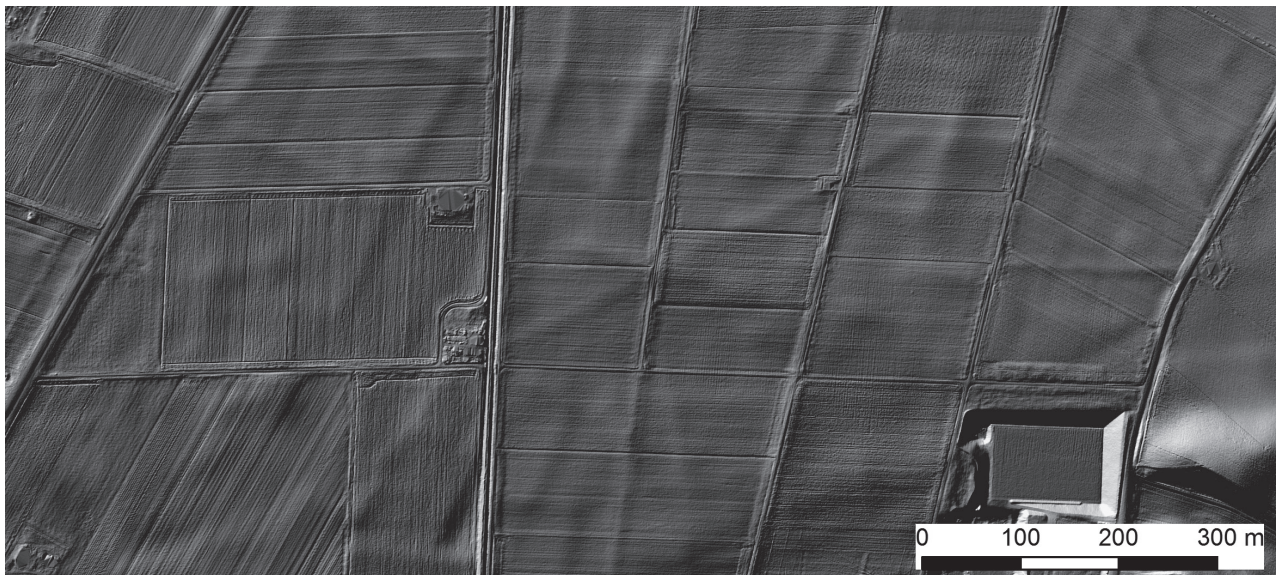
84 Beschreibung nach KOKALJ et al. 2011b, 400.

85 U. a. CHALLIS et al. 2011a, 288f.; KOKALJ et al. 2011a, 264; KOKALJ et al. 2011b, 400; DEVEREUX et al. 2008, 471; DONEUS/BRIESE 2006a, 103; HESSE 2010, 68; HESSE 2016a, 113; BENNETT et al. 2012, 45.

| Ausgangsformat, Grösse | Visualisierung | Verwendete Parameter | verwendete Software | Berechnungsdauer in Sekunden* | Filegrösse | Bemerkungen |
|------------------------|------------------|---|---------------------|-------------------------------|------------|---|
| Geotiff, 7857 KB | Hillshade | variabel | ArcGIS | on-the-fly | – | Darstellung erfordert Zugriff auf DTM |
| Geotiff, 7857 KB | Multiple Shading | Anzahl Richtungen: 16 Lichteinfallswinkel: 20 | RVT | 1,8 | 29164 KB | |
| Geotiff, 7857 KB | PCA | Anzahl Richtungen: 16 Lichteinfallswinkel: 10 Komponentenzahl: 3 | RVT | 5,1 | 53573 KB | |
| Geotiff, 7857 KB | Slope | variabel | ArcGIS | on-the-fly | – | Darstellung erfordert Zugriff auf DTM |
| Geotiff, 7857 KB | Sky View Factor | Anzahl Richtungen: 16 Radius: 20 | RVT | 8,2 | 15806 KB | |
| Geotiff, 7857 KB | Pos. Openness | Anzahl Richtungen: 16 Radius: 20 | RVT | 8,0 | 15164 KB | |
| Geotiff, 7857 KB | Neg. Openness | Anzahl Richtungen: 16 Radius: 20 | RVT | 8,1 | 15287 KB | |
| .bil, 15625 KB | Local Dominance | min. Radius: 10 max. Radius: 30 Distanzinkrement: 1 Winkelauflösung: 15 Beobachterhöhe: 1,7 | LiVT | 113 | 15626 KB | Anpassung der Headerdatei erforderlich, wenn mit ArcGIS dargestellt |
| Geotiff, 7857 KB | Trend Removal | Radius: 20 | RVT | 4,3 | 19290 KB | |
| Geotiff, 7857 KB | LRM | Filterform: Kreis Radius: 20 | ArcGIS | 57,5 | 16011 KB | wird als EsriGRID ausgegeben |

* Für die Berechnungen wurde ein Notebook mit einem Intel Core i7 Prozessor, 32 GB RAM und dem Betriebssystem Windows 8 (64 Bit) verwendet.

17 Getestete Visualisierungen mit in Tests ermittelten Parametereinstellungen und den Metadaten zur Berechnung.



18 Fünffach überhöhtes Hillshade (Lichteinfallswinkel: 20, Azimut: 315). Zu erkennen ist eine Abfolge von Feldgrenzen und Wegen.

In beiden Situationen sind Details schwer bis gar nicht zu erkennen. Parallel zur Beleuchtungsrichtung verlaufende Strukturen zeichnen sich ebenfalls nicht im *Hillshade* ab. Eine Beleuchtung aus südlicher Richtung hat zudem eine künstliche Reliefumkehr zur Folge, so dass unser Auge Erhöhungen als Senken wahrnimmt und umgekehrt. Des Weiteren erscheinen die Strukturen durch die gerichtete Belichtung leicht verschoben, was zu Ungenauigkeiten bei den Kartierungen führen kann. Um eine hohe Detektionsrate archäologischer Strukturen zu ermöglichen, müssten in der anspruchsvollen Topografie des Untersuchungsgebiets zahlreiche *Hillshades* aus verschiedensten Richtungen und mit verschiedenen Lichteinfallswinkeln beleuchtet werden. Ein effizienter Arbeitsfluss ist damit nicht möglich.

Die meisten im Untersuchungsgebiet sichtbaren Fundstellen sind nur relativ schwach ausgeprägt, weshalb mit einem tiefen Einfallswinkel der Lichtquelle von 20 Grad oder geringer gearbeitet wurde. Damit war es möglich, Strukturen in ebenem oder leicht geneigtem Gelände zu visualisieren. Ausgeprägte Topografie konnte mit diesen Einstellungen jedoch nicht zufriedenstellend dargestellt werden. Während des Kartierens wurde das *Hillshade* aufgrund der einfachen Lesbarkeit vor allem genutzt, um einen Eindruck der generellen Topografie zu erhalten (Kap. 7.2). Andere Autoren setzten es in Kombination mit anderen Visualisierungen ein, bei denen die allgemeine Topografie nicht mehr erkennbar ist⁸⁶. Ein überhöhtes *Hillshade* zeigte im topografisch anspruchsvollen Gebiet wenig Wirkung. Die Überhöhung bewirkt, dass sich die über- und unterbelichteten Bereiche des Reliefs verstärken und noch weniger Details sichtbar sind. Nützlich ist die Technik hingegen auf ebenen Flächen, wo sich gering ausgeprägte Strukturen gut sichtbar hervorheben lassen (Abb. 18).

Das *Hillshade* wurde direkt in ArcGIS als Funktion des DTM erstellt (Kap. 6.1.3). Dies hatte den Vorteil, dass Einfallswinkel der Lichtquelle sowie Azimut bei Bedarf an die vorliegende topografische Situation angepasst werden konnten.

6.3.2 Multiple Shading

Beim *Multiple Shading* werden mehrere, aus verschiedenen Richtungen beleuchtete Raster kombiniert. Dies reduziert die nicht sichtbaren Bereiche im Relief deutlich⁸⁷ (Abb. 23b). Neben dem Einfallswinkel muss zusätzlich die Anzahl an Beleuchtungsrichtungen festgelegt werden, die in regelmäßigem Abstand zwischen null und 360 Grad angeordnet werden. Die dabei generierten, einzelnen *Hillshades* werden als Einzelbänder eines *Multi-Band* Rasters gespeichert. Für die Darstellung können drei ausgewählte Bänder als Rot-, Grün- und Blaukanal eines RGB-Bildes ausgewählt werden.

Alternativ können *Multiple Shadings* mit einer Graustufenskala visualisiert werden, indem von allen verfügbaren Bändern gemittelte Werte berechnet werden.

Die besten Resultate eines *Multiple Shading* in ArcGIS konnten im Untersuchungsgebiet mit einer RGB-Darstellung erzielt werden. Generell gilt, dass das Relief einseitig beleuchtet wird, je näher die ausgewählten Bänder beieinanderliegen. Jedoch kann auch bei einer Anordnung der Bänder mit Abstand von je 90° oder 120° nicht vermieden werden, dass mit einem geringen Lichteinfallswinkel einige Hanglagen im Relief unterbelichtet bleiben. Mit zunehmendem Abstand zwischen den Bändern verschlechtert sich die Lesbarkeit, da die einzelnen Farbkanäle im Relief mehr zur Geltung kommen. Das Mittel aus allen acht Bändern kann nur markante Strukturen hervorheben. Bei schwach ausgeprägtem Relief neutralisieren sich die verschiedenen Beleuchtungsrichtungen gegenseitig.

Im Vergleich zum einfachen *Hillshade* stellt ein *Multiple Shading* eine Verbesserung dar, weist jedoch immer noch starke Mängel auf. Dazu ist auch der hohe Bedarf an Speicherplatz zu zählen. Aufgrund der aufgeführten Nachteile wurde während der Kartierung auf diese Visualisierungsmethode verzichtet. Für Visualisierungen in Publikationen ist ein *Multiple Shading* aufgrund der einfachen Lesbarkeit je nach Geländesituation durchaus geeignet. Die Visualisierung wurde mit der RVT ausgeführt. Die Berechnung aus acht verschiedenen Richtungen erwies sich als ausreichend. Verwendet wurde ein Lichteinfallswinkel von 20 Grad. Die Software bietet die Möglichkeit, ein *Multiple Shading* aus bis zu 64 Richtungen zu berechnen. Dies lohnt sich jedoch kaum, da der Detailgewinn marginal ist, der benötigte Speicherplatz dafür ins Unermessliche steigt.

6.3.3 Principal Component Analysis (PCA)

Die PCA ist ein Verfahren der multivariaten Statistik. Umfangreiche, multivariate Datensätze werden vereinfacht, indem ihre Variablen durch wenige aussagekräftige Linearkombinationen beziehungsweise Hauptkomponenten repräsentiert werden. Die erste Hauptkomponente weist dabei die größte Varianz aller Variablen auf, die zweite Hauptkomponente die zweitgrößte usw. Die ersten drei Hauptkomponenten beinhalten in der Regel bereits 99% der gesamten Varianz. Der entstandene Informationsverlust ist damit gering, die Übersichtlichkeit der Daten hingegen stark gestei-

86 Z. B. DONEUS/KÜHTREIBER 2013, 39; Hesse 2013, 77; KOKALJ et al. 2011b, 408.

87 DONEUS/BRIESE 2006a, 103.

gert⁸⁸ (Abb. 23c, Karte 3). Bei der Visualisierung von LiDAR-Daten dient ein *Multiple Shading* mit den bereits in Kap. 6.3.2 genannten Parametern als Grundlage für die Berechnung der PCA. Die einzelnen *Hillshades* stellen die Variablen dar. Die drei erstellten Hauptkomponenten können in ArcGIS als RGB-Bild dargestellt werden. Als Alternative ist es möglich, lediglich die dritte Komponente⁸⁹ oder alle drei Komponenten mit einer Graustufenskala abzubilden.

Wie bei allen *Hillshading*-Methoden hängt das Resultat maßgeblich vom Einfallswinkel der Lichtquelle ab, der nach der vorliegenden Topografie gewählt werden muss. Im Vergleich zum *Multiple Shading* weist ein mit PCA erstelltes Raster weniger abgedunkelte oder übermäßig belichtete Bereiche auf. Im Gegenzug wirkt das Relief weniger plastisch. Dennoch ist vor allem mit einem RGB-Bild sehr viel Detail zu erkennen. Die Lesbarkeit der Strukturen ist hingegen durch die Färbung des Reliefs bei einer Darstellung als RGB-Bild erschwert. In Gebieten mit starken Höhenunterschieden können Geländeelemente abhängig von ihrer Orientierung von einzelnen Komponenten und damit einzelnen Farbkanälen dominiert sein. Mit flacherem Lichteinfallswinkel tritt diese Erscheinung ausgeprägter auf. Zudem kann es besonders bei stark ausgeprägter Topografie zu einer künstlichen Umkehr des Reliefs kommen (Abb. 19).

Der benötigte Speicherplatz und die Rechenzeit sind für die PCA noch höher als beim *Multiple Shading* (Abb. 17). Ein weiterer Nachteil ist, dass sich aufgrund der Berechnungsgrundlage verschiedene Datensätze nicht vergleichen lassen⁹⁰. Dies betrifft auch gekachelte Datensätze, da die statistischen Werte für jede Kachel einzeln und nicht für das Gesamtgebiet berechnet werden. Wird das Gesamtgebiet dargestellt, grenzen sich die Kacheln aufgrund ihrer unterschiedlichen Ausprä-

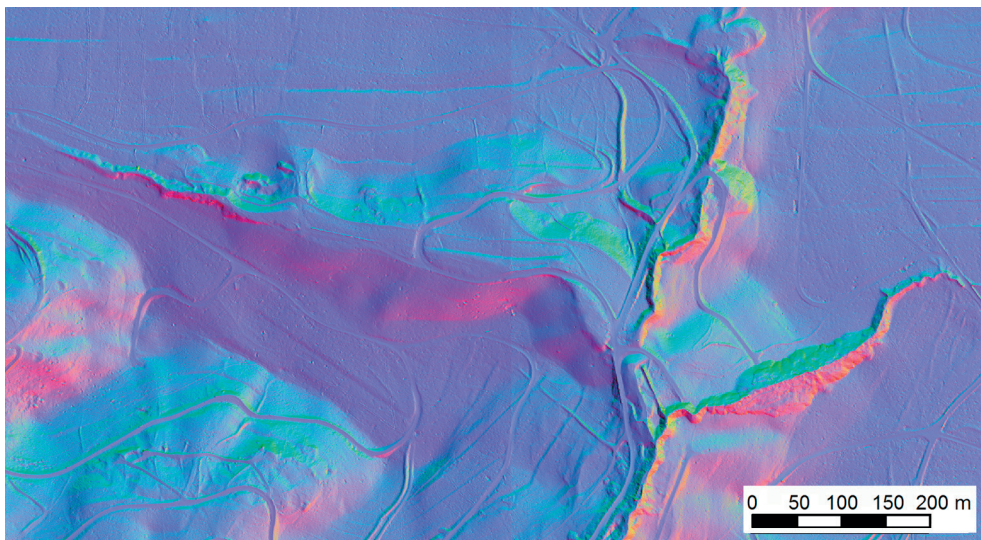
gung voneinander ab, was die Lesbarkeit des Bildes noch einmal erschwert (Abb. 19). Trotz der genannten Nachteile ist PCA aufgrund des dargestellten Details in Einzelfällen durchaus eine lohnenswerte Visualisierungsmethode und wurde auch im vorliegenden Projekt eingesetzt.

Die Visualisierung wurde mit der RVT berechnet. Als Input diente ein *Multiple Shading*, berechnet aus 16 verschiedenen Richtungen und mit einem Lichteinfallswinkel von 10 Grad.

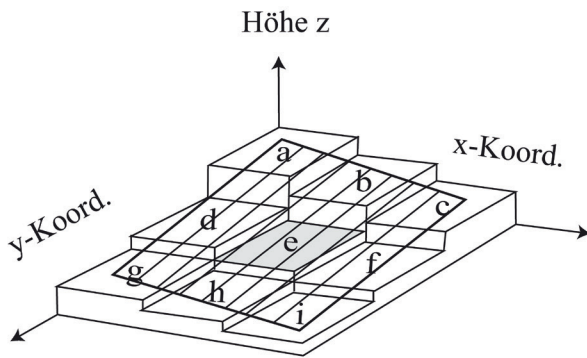
6.3.4 Slope

Slope berechnet die Neigung einer Rasterzelle aus den Höhenwerten seiner direkten Nachbarzellen. Dabei positioniert der Algorithmus über der zu berechnenden Zelle eine Fläche von 3×3 Zellen, deren Ausrichtung er bestmöglich den Höhenwerten der bedeckten Zellen anpasst (Abb. 20). Der Neigungswert der Fläche kann in Prozent oder in Grad angegeben werden⁹¹. Die Visualisierung der berechneten Werte mit einer umgekehrten Graustufenskala ermöglicht eine plastische Wiedergabe des Reliefs⁹² (Abb. 23d, Karte 4). Für die Berechnung der Neigung existieren verschiedene Algorithmen.

Tests haben gezeigt, dass *Slope* vor allem markante Strukturen und scharfe Kanten im Gelände hervorhebt⁹³. Für die Visualisierung schwach ausgeprägter Strukturen erwies sich die Methode in dieser Arbeit jedoch eher ungeeignet, weshalb sie nur in Gebieten mit ausgeprägter Topografie eingesetzt wurde. Da der Wert einer Zelle lediglich deren Neigung beschreibt, kann nicht bestimmt werden, ob im Relief eine Struktur positiv oder negativ ausgeprägt ist. Deshalb sind zusätzliche Informationen notwendig, um beispielsweise einen Wall von einem Graben unterscheiden zu können. Wird *Slope* mit einem *Hillshade* kombiniert, kann das Problem mit geringem Aufwand gelöst werden⁹⁴.



19 PCA. Die drei Komponenten werden als RGB-Bild dargestellt. Die drei Großstrukturen, die höher als das umgebende Relief scheinen, sind in Wirklichkeit durch Bäche erodierte Senken. Entlang der ungefähr in der Mitte liegenden Bildnaht verläuft eine Kachelgrenze.



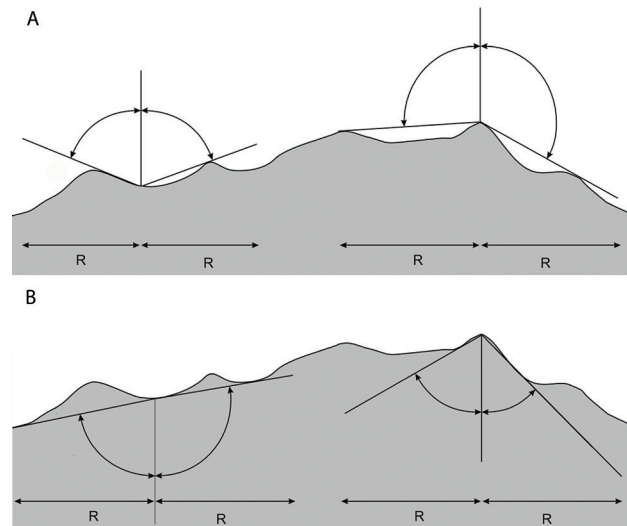
20 Funktionsweise des Horn-Algorithmus.

Slope ist bei verschiedenen GIS-Softwares sowie bei der RTV verfügbar. In dieser Arbeit wurde *Slope* analog zum *Hillshade* als Funktion des DTM in ArcGIS erstellt (Kap. 6.1.3). Zur Berechnung verwendet ArcGIS den Algorithmus von Horn⁹⁵ (Abb. 20).

6.3.5 Openness

Positive Openness berechnet für jede Rasterzelle innerhalb eines durch einen Radius definierten Sichtfelds das Mittel einer bestimmten Anzahl Zenitwinkel⁹⁶, die in regelmäßigem Abstand von 0 bis 360 Grad radial um die Zelle angeordnet sind. Die Zenitwinkel werden durch die umgebende Topografie begrenzt (Abb. 21). Im DTM exponierte Pixel weisen dadurch hohe Werte (= große Zenitwinke), Pixel in negativen Geländeformen tiefe Werte auf. Die berechneten Werte werden mit einer Graustufenskala visualisiert. Positive Geländemerkmale werden damit hell und negative Formen dunkel wiedergegeben (Abb. 23e, Karte 5). Die *negative Openness* basiert auf derselben Berechnungsweise. Anstelle des Mittels des Zenitwinkels wird jedoch das Mittel des Nadirwinkels auf Basis des Sichtfeldes unterhalb der Oberfläche kalkuliert. Die Winkel werden anschließend mit einer inversen Graustufenskala visualisiert, mit welcher die tiefsten Werte (=Erhebungen im Relief) am hellsten abgebildet werden (Abb. 23f, Karte 6). Dadurch wird das Bild einfacher lesbar und lässt sich auch in Kombination mit der *positiven Openness* besser interpretieren. Es ist wichtig, hervorzuheben, dass die *negative Openness* nicht einfach das Gegenteil der *positiven Openness* (180°-pos. Openness) darstellt⁹⁷ (Abb. 21).

Der festzulegende Radius hat großen Einfluss auf die Ausdehnung der Strukturen, die mit *Openness* hervorgehoben werden. Da ebene Flächen in der Topogra-



21 Bei *positiver Openness* wird innerhalb des durch den Radius R definierten Sichtfelds der durchschnittliche Zenitwinkel berechnet (A), bei *negativer Openness* der Durchschnitt des Nadirwinkels (B).

fie unabhängig ihres Neigungswinkels einen Zenit- beziehungsweise Nadirwinkel von 90° aufweisen, kann mit *Openness* nicht zwischen horizontalen und schrägen Flächen unterschieden werden. Mit anderen Worten werden nur konkave und konvexe Geländeverläufe optisch hervorgehoben⁹⁸. Für die archäologische Anwendung empfiehlt es sich, einen eher geringen Radius zu wählen (siehe unten), welcher in etwa der Größe archäologischer Strukturen entspricht. Die allgemeine Topografie, deren Formen das durch den kleinen Radius festgelegte Sichtfeld bei weitem übersteigen, wird beim Rechenprozess in zahlreiche kleine Ebenen mit nur geringfügiger Krümmung zerstückelt. Dadurch glättet *Openness* die allgemeine Topografie und hebt im Gegenzug das Mikrorelief und die darin enthaltenen archäologischen Strukturen optisch hervor (Karten 5 und 6). Die Interpretation dieser Strukturen wird durch die fehlende Topografie hingegen erschwert⁹⁹.

Positive Openness wurde im Untersuchungsgebiet vor allem in stark geneigten Hanglagen genutzt, bei

88 Beschreibung nach DEVEREUX et al. 2008, 471ff.

89 DEVEREUX et al. 2008, 477f.

90 KOKALJ 2013, 105.

91 BURROUGH et al. 2015, 219ff.

92 KOKALJ 2013, 108.

93 Wie CRUTCHLEY (2013, 143) bereits festgestellt hat, ist der Algorithmus sehr hilfreich für die Entdeckung von Meilerplattformen in Hanglagen (Kap. 8.1.4).

94 DONEUS/BRIESE 2006a, 104; DONEUS/BRIESE 2011, 66.

95 BURROUGH et al. 2015, 219.

96 Die Anzahl Richtungen kann selbst festgelegt werden. In der verwendeten Software RVT (Kap. 6.1.1) stehen 8, 16 und 32 Richtungen zur Auswahl.

97 Beschreibung nach YOKOYAMA et al. 2002, 257ff.

98 KOKALJ et al. 2011b, 404; DONEUS 2013a, 6434f.

99 KOKALJ et al. 2011b, 403f.



22 Negative Openness. Aufgelassene und modern genutzte Wege zeichnen sich deutlich als hell umrahmte, schwarze Linien ab.

welchen *Sky View Factor* (Kap. 6.3.6) mit der festgelegten Histogrammanpassung (Kap. 6.4.2) zu dunkle Bilder lieferte¹⁰⁰. Schwach ausgeprägte Strukturen wie Feldgrenzen vermag die Visualisierungsmethode nur ungenügend abzubilden. In ebenem Gelände wurde SVF der *positiven Openness* vorgezogen.

Negative Openness eignet sich hervorragend für die Kartierung gut ausgeprägter Wege und Drainagen, deren Verlauf beziehungsweise tiefster Punkt sehr genau abgebildet wird (Abb. 22). Auch schwach ausgeprägte Grabhügel zeichnen sich mit *negativer Openness* überraschend gut ab. Schwach ausgeprägte lineare Strukturen sind in dieser Visualisierung hingegen weniger gut sichtbar.

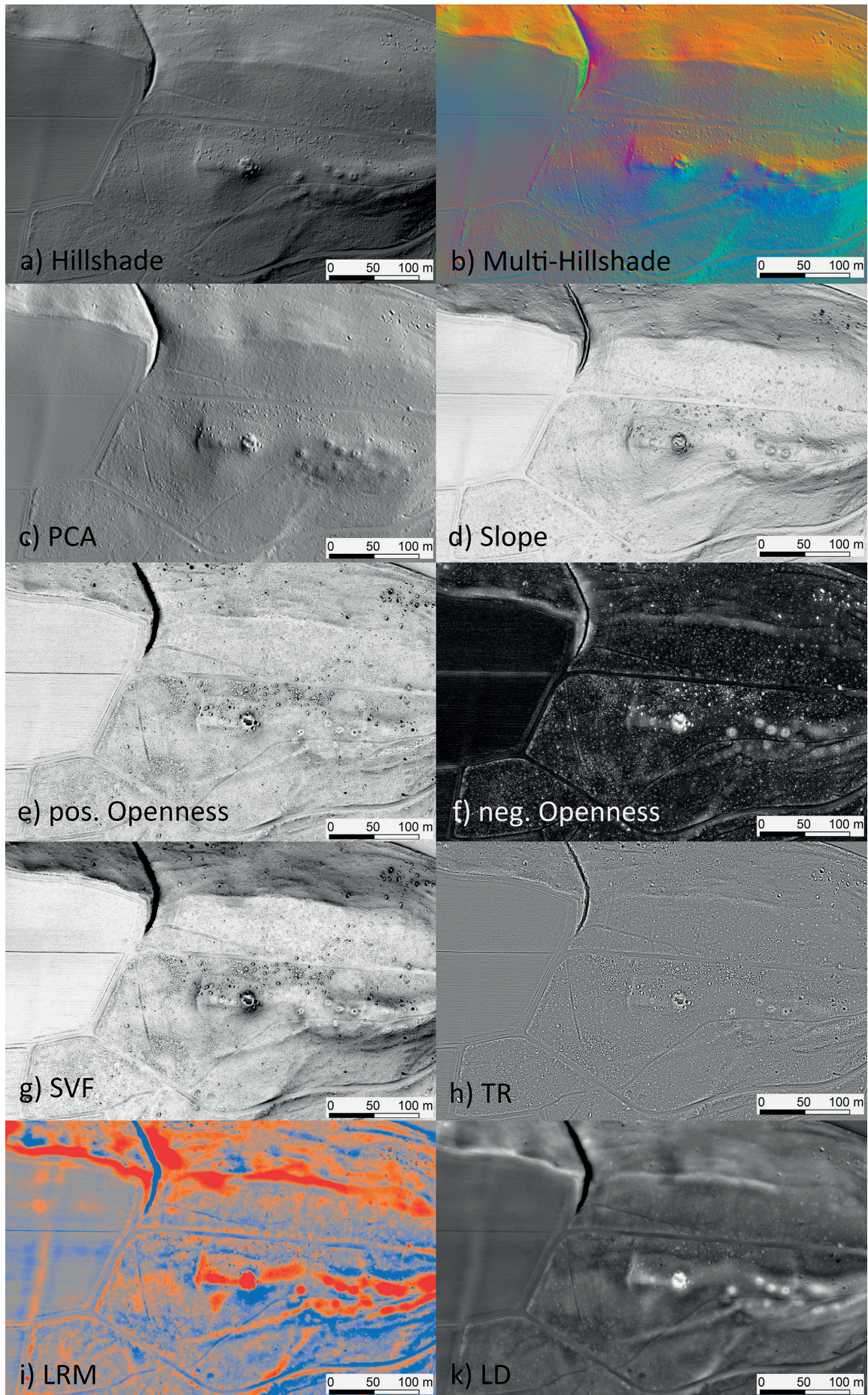
Für die Berechnung von *Openness* wurde ein Radius von 20 Pixel festgelegt, was bei der Auflösung des verwendeten DTM einer Distanz von 10m entspricht. Die Anzahl Radiallinien, in die der Zenit- beziehungsweise Nadirwinkel gemessen wurde, wurde auf 16 festgelegt (Abb. 17). Die Berechnungen wurden mit der RVT vorgenommen.

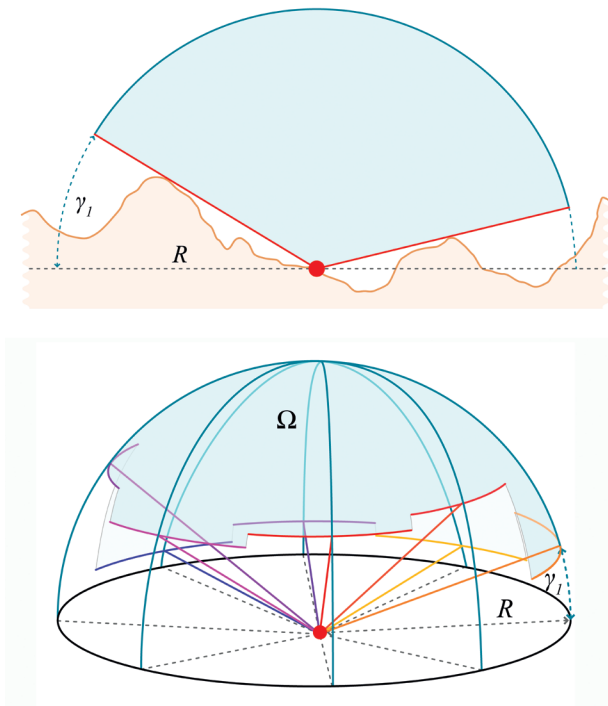
6.3.6 Sky view factor (SVF)

Sky View Factor basiert auf diffuser Belichtung. Als Lichtquelle dient eine horizontal über dem Pixel ausgerichtete, gleichmäßig helle Hemisphäre, deren Radi-

23 (siehe rechts) Verschiedene Visualisierungen desselben DTM-Ausschnitts. Im Gelände sind eine Grabhügelnekropole, ein tief eingeschnittener Hohlweg sowie weitere Wege und eine alte Feldgrenze (ganz im Osten, Nord-Süd-Verlauf) erkennbar. An der Hanglage im Norden zeichnen sich Hangrutschungen ab. Folgende Visualisierungsmethoden sind abgebildet: a) *Hillshade*; b) *Multi-Hillshade*; c) *Principal Component Analysis*; d) *Slope*; e) *positive Openness*; f) *negative Openness*; g) *Sky View Factor*; h) *Trend Removal*; i) *Local Relief Model*; k) *Local Dominance*. Parameter: a) Azimut: 315, Lichteinfallswinkel: 20°; b–c) Beleuchtungsrichtungen: 16, Lichteinfallswinkel: 20°; e–g) Radius: 20, Richtungen: 16; h–i) Radius: 20, k) Radius: 10–30, Richtungen: 16, Beobachterhöhe: 1.7, Distanzinkrement: 1.

¹⁰⁰ Auch eine Kombination von SVF mit transparent darübergelegter *positive Openness* hat gute Resultate ergeben.





24 Funktionsweise des Sky View Factor.

us R selbst festgelegt werden kann. Die Helligkeit einer Rasterzelle im DTM ist abhängig von seiner Lage im Relief beziehungsweise von der umgebenden Topografie, welche Teile der Hemisphäre abdeckt. Über die Horizontwinkel γ einer bestimmbar Anzahl Richtungen wird der sichtbare Anteil des Himmels (Ω) berechnet (Abb. 24). Die Ergebnisse werden auf Werte zwischen null und eins skaliert und mit einer Graustufenskala wiedergegeben (Abb. 23g, Karte 7). Je exponierter eine Rasterzelle im DTM ist, desto größer ist der sichtbare Anteil der Hemisphäre und desto höher der SVF. Wie bei *Openness* (Kap. 6.3.5) ist die Ausdehnung der durch SVF hervorgehobenen Strukturen abhängig vom Radius, in dessen Umkreis die Berechnungen durchgeführt werden. Die von *Openness* abweichende Berechnungsweise¹⁰¹ hat zur Folge, dass SVF in schrägen Ebenen geringere Werte erzielt als in horizontalen Ebenen. Hangflächen heben sich damit optisch von horizontalen Ebenen ab. Als Folge davon ist in der Visualisierung neben dem Mikrorelief auch die allgemeine Topografie enthalten¹⁰².

Im Vergleich zur *positiven Openness* stellt die Wiedergabe der allgemeinen Topografie einen entscheidenden Vorteil dar. Das Bild erscheint weniger abstrakt, was die Orientierung während der Kartierungsarbeit und die Interpretation der kartierten Strukturen erleichtert. Ein Nachteil ist, dass sich positive Geländemerkmale ähnlicher Ausprägung in Hanglage dunkler abzeichnen als in einer horizontalen Ebene und so dem ungeübten Auge stärker ausgeprägt erscheinen. So sind mit SVF in Hang-

lagen auch relativ schwach ausgeprägte Strukturen sichtbar¹⁰³, was in der Ebene aufgrund der generell helleren Farbwerte der Graustufenskala kaum möglich ist¹⁰⁴. Sehr gute Ergebnisse zeigt SVF bei der Hervorhebung von Hohlformen wie Gruben (Kap. 8.1.2) und Hohlwegen (Kap. 8.1.5)¹⁰⁵. Wie das *Hillshade* eignet sich SVF zudem auch für Übersichtsansichten, um die topografischen Verhältnisse des Untersuchungsgebiets zu erfassen.

SVF wurde wie *Openness* mit einem Radius von 20 Pixeln und in 16 verschiedene Richtungen berechnet. Die Visualisierung wurde mit RVT erstellt. LiVT bietet ebenfalls SVF an¹⁰⁶.

6.3.7 Trend Removal (TR)

Beim *Trend Removal* wird ein Geländemodell mit einem Tiefpassfilter¹⁰⁷ geglättet. Der Filterradius bestimmt dabei die Ausdehnung der Geländemerkmale, die durch den Filter geglättet werden. Dieses geglättete Geländemodell wird anschließend vom originalen DTM subtrahiert. Als Ergebnis verbleiben im errechneten Differenzmodell die geglätteten Strukturen in einem sonst ebenen Terrain mit der Höhe null¹⁰⁸. Erhöhungen werden dabei als positive, Vertiefungen als negative Werte dargestellt. Die Visualisierung kann mit Graustufen erfolgen, wobei positive Werte hell und negative Werte dunkel dargestellt werden können (Abb. 23h). Ebenfalls gute Ergebnisse liefert die Einfärbung der positiven und negativen Werte mit unterschiedlichen Farben.

Die Visualisierung wurde nur sehr rudimentär getestet, da in der Arbeit der Einsatz des dem TR überlegenen *Local Relief Model* geplant war (Kap. 6.3.8). Die fehlende Topografie erschwerte die Lesbarkeit des Bildes. Mit einem unterlegten *Hillshade* oder *Slope* kann diese ergänzt werden. Es hat sich jedoch gezeigt, dass die Visualisierung von schwach ausgeprägten Strukturen mit TR nur unbefriedigende Ergebnisse lieferte. Dies ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass die vertikale Ausdehnung der Strukturen im Differenzmodell im Vergleich zum originalen DTM geringer ausfällt. Grund dafür ist der erste Arbeitsschritt, bei welchem die Strukturen mit dem Tiefpassfilter lediglich geglättet und nicht komplett entfernt werden¹⁰⁹.

Die Berechnung wurde mit der RVT mit einem Radius von 20 Pixeln durchgeführt¹¹⁰. Im Vergleich zum *Local Relief Model* (Kap. 6.3.8) ist TR weniger rechenintensiv, was durchaus ein Vorteil sein kann. Im Untersuchungsgebiet war der Einsatz dieser Visualisierung aufgrund der zahlreichen, schwach ausgeprägten Strukturen nur bedingt geeignet.

6.3.8 Local Relief Model (LRM)

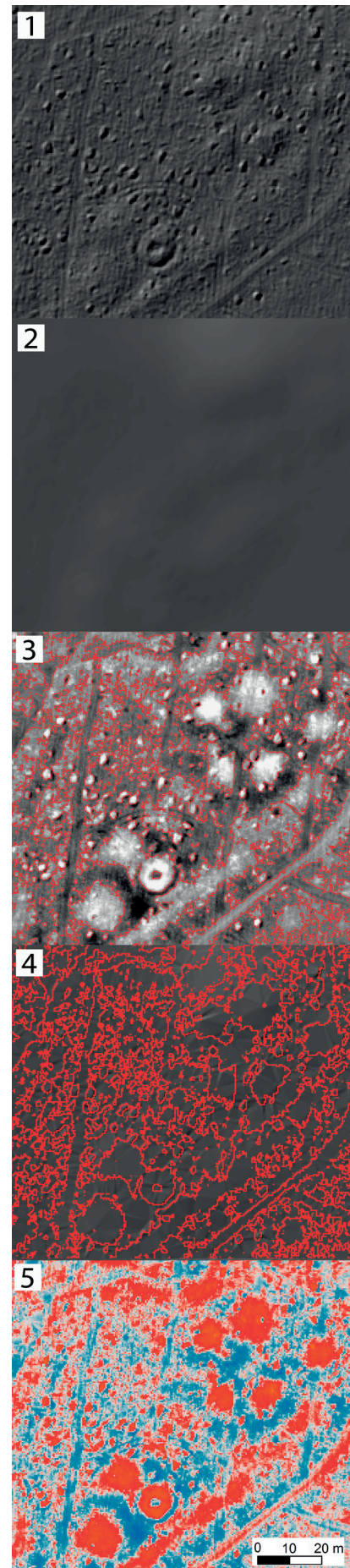
LRM ist eine Weiterentwicklung des *Trend Removal*. Aus dem originalen DTM werden diejenigen Rasterzellen

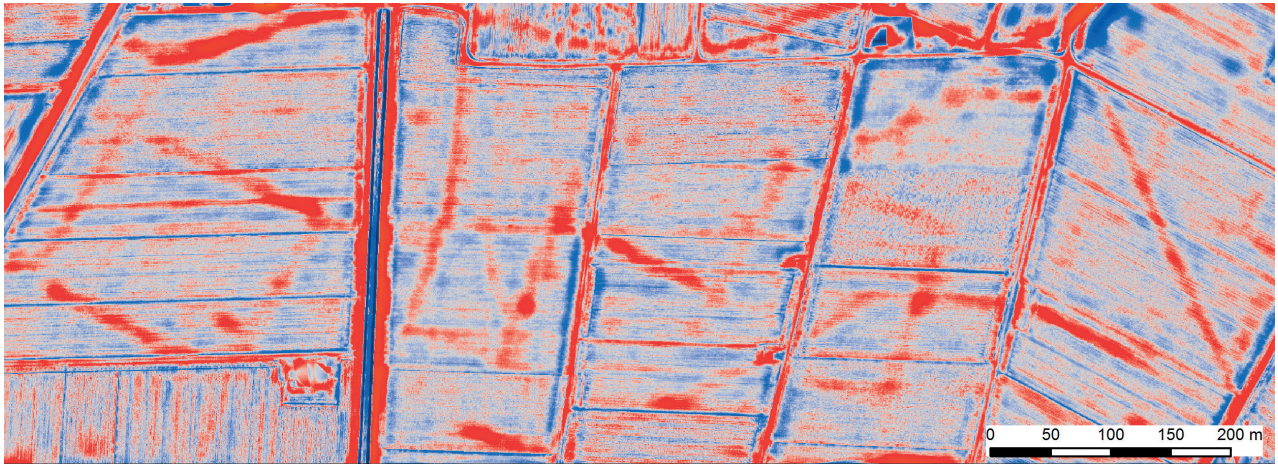
25 Visualisierung der einzelnen Arbeitsschritte von LRM: (1) Der Berechnung zu Grunde liegendes DTM (als Hillshade dargestellt), (2) Glättung des DTM, (3) Differenzmodell nach Subtraktion des geglätteten vom originalen DTM mit Höhenlinien der Höhe null (rot), (4) Markieren der Rasterzellen (rot) des originalen DTM entlang der 0 m-Höhenlinien und interpolieren der Leerflächen dazwischen, (5) Subtraktion des „gesäuberten“ DTM vom originalen DTM. Die neue Differenzkarte wird mit farbcodierten Höhenwerten dargestellt. Positive Geländeformen sind rot, negative Strukturen blau gekennzeichnet.

extrahiert, die auf dem mit TR erzeugten Differenzmodell die Höhe null besitzen (Abb. 25). Die dazwischenliegenden leeren Flächen (Grundflächen der beim TR geglätteten Strukturen) werden interpoliert. Dieses von den letztendlich gesuchten Strukturen „gesäuberte“ DTM wird nun vom originalen DTM subtrahiert. Das Ergebnis ist ein neues Differenzmodell, das die kleinräumigen Strukturen in ihrer ursprünglichen Ausdehnung wiedergibt. Durch unterschiedliches Einfärben von Vertiefungen und Erhebungen kann die Lesbarkeit des Bildes verbessert werden¹¹¹ (Abb. 23i, Karte 8).

Wie Hesse bereits festgehalten hat, ist die große Stärke von LRM die Visualisierung von unscheinbaren Strukturen wie Flurgrenzen (Kap. 8.1.6) und liefert auch

- 101 Die Zenit- bzw. Nadirwinkel von *positiver* und *negativer Openness* können theoretisch Maximalwerte von 180° erreichen. Berechnungen in einer horizontal ausgerichteten Hemisphäre ermöglichen hingegen auch an stark exponierten Stellen maximale Winkelwerte von 90°.
- 102 Beschreibung nach KOKALJ et al. 2011b; KOKALJ et al. 2013, 109ff.
- 103 Erodierete Terrassenkanten (Kap. 8.1.7) zeichnen sich beispielsweise relativ deutlich ab und erlauben eine präzise Kartierung dieses Strukturtyps.
- 104 Vgl. dazu Abb. 23g: die alte Feldgrenze ist auf der Visualisierung kaum zu erkennen. Die geologischen Rutschungen an den Hängen zeichnen sich jedoch sehr gut ab, obwohl sie, vergleicht man mit anderen Visualisierungen, ebenfalls nur schwach ausgeprägt sind. Vergleichbare Beispiele finden sich auch auf Karte 7. Wieviel Detail bei welcher Hangneigung mit SVF dargestellt werden kann, hängt hauptsächlich von der Histogrammanpassung (Kap. 6.4.2) der Graustufenskala ab. Es wäre durchaus möglich, die Skala so anzupassen, dass schwach ausgeprägte, positive Geländeformen sich auch in der Ebene abzeichnen. Mit derselben Einstellung würden dann jedoch Hangpartien viel zu dunkel bis ganz schwarz dargestellt. Dies ist auf Karte 7 in sehr steilen Geländepartien bereits ansatzweise der Fall. In solchen Situationen zeigt *positive Openness* (Karte 5) deutlich bessere Ergebnisse.
- 105 HESSE 2016a, 115.
- 106 HESSE 2016a, 115. Rauschen kann vermindert werden, indem für die Berechnungen ein Mindestradius angegeben wird, wodurch beispielsweise Pflugspuren herausgefiltert werden können.
- 107 Zur Funktion von Tiefpassfiltern siehe ALBERTZ 2009, 106f.
- 108 KOKALJ et al. 2013, 107; ŠTULAR et al. 2012, 3356.
- 109 HESSE 2010, 68. Die Abnahme der relativen Höhe beziehungsweise Tiefe nimmt progressiv mit der horizontalen Ausdehnung der Strukturen zu.
- 110 In der RVT wird die Methode als *Simple local relief model* bezeichnet.
- 111 HESSE 2010, 68.





26 *Local Relief Model*. Abfolge von Feldgrenzen und Wegen.

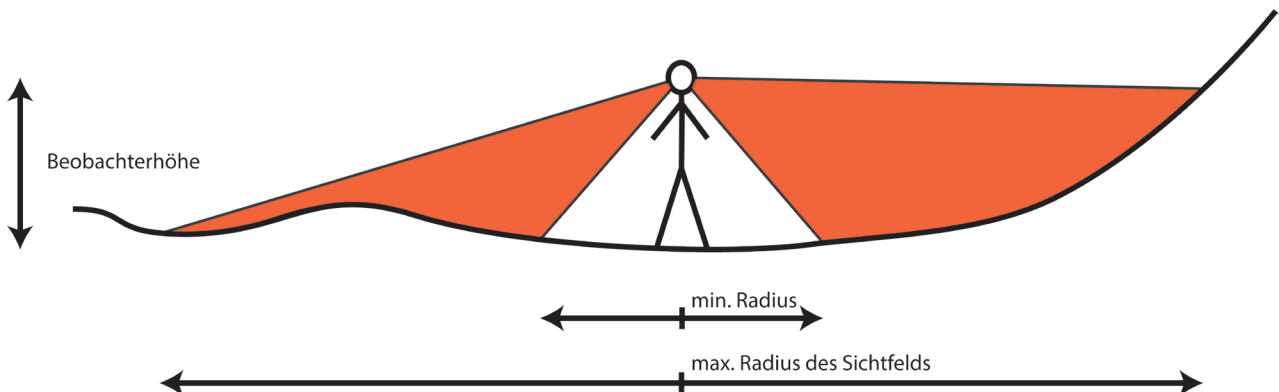
in flachem Gelände sehr gute Ergebnisse (Abb. 26). Die feine Auflösung der Höhenunterschiede führt jedoch auch dazu, dass sich zahlreiche geologische Elemente abbilden, was die Interpretation der sichtbaren Strukturen erschwert. Die Farbkodierung von blau für negative Werte und gelb/rot für positive Werte erleichtert das Lesen der Visualisierung enorm¹¹². Für kleinräumiges, komplexes Relief ist die Methode jedoch eher ungeeignet, da ein sehr abstraktes Bild entsteht, das nur schwer zu lesen ist (Hangsituationen auf Karte 8). Generell gehört LRM zu den anspruchsvolleren Visualisierungsmethoden, sodass die Interpretation der erstellten Bilder, besonders bei schwach ausgeprägten Strukturen und solchen in Hanglage¹¹³, Erfahrung erfordert. Die fehlende allgemeine Topografie vom LRM kann durch Darüberlegen eines transparenten *Hillshades* ergänzt werden¹¹⁴. Ein weiterer Nachteil ist die benötigte Rechenzeit bei der Erstellung der Visualisierung, die auf den komplexen Aufbau des Algorithmus zurückzuführen ist.

LRM kann mit der LiVT erstellt werden. Zudem ist über die Internetplattform *academia.edu* eine Toolbox für ArcGIS verfügbar, mit welcher die Berechnungen ebenfalls durchgeführt werden können¹¹⁵. Als Parame-

ter wurde ein Kreis-Filter mit dem Radius von 20 Pixeln festgelegt.

6.3.9 *Local Dominance (LD)*¹¹⁶

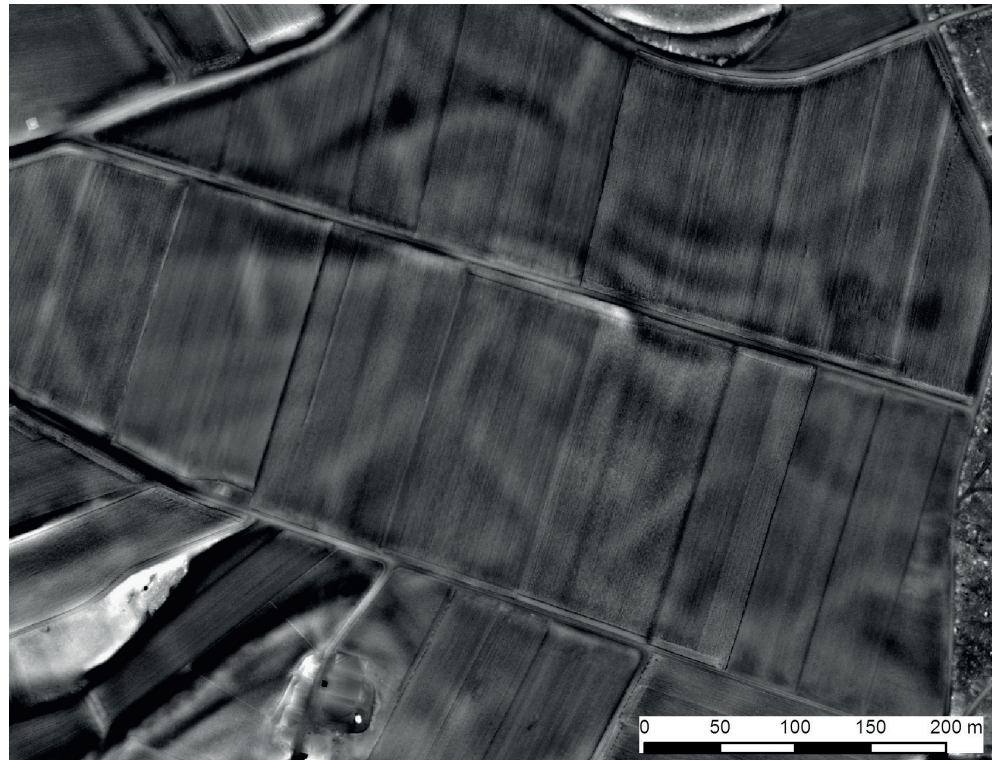
Diese Visualisierungsmethode stellt für jeden Pixel die lokale Dominanz eines virtuellen darauf positionierten Beobachters im Relief dar. Die Berechnung erfolgt wie bei SVF und *Openness* entlang radialer Linien. Das Blickfeld des Beobachters wird mit einem minimalen und einem maximalen Radius definiert (Abb. 27). Durch das Heraufsetzen des minimalen Radius kann im DTM vorhandenes Rauschen reduziert werden. Der letztendlich berechnete Wert ist ein gemittelter Wert der Steigung, mit welcher der Blick des Beobachters auf das umgebende Relief trifft. Das Ergebnis ist abhängig von der Höhe des Beobachters, die vom Benutzer bestimmt werden kann. Die errechneten Pixelwerte werden mit einer Graustufenskala visualisiert. Konvexe Strukturen erscheinen dabei hell, konkave Strukturen werden dunkel dargestellt (Abb. 23 k, Karte 9). Mit der Winkelaufösung wird der Abstand in Grad zwischen zwei radialen Linien festgelegt¹¹⁷. Ein Erhöhen des Entfernungsininkrements reduziert die Rechenzeit.



27 Funktionsweise von *Local Dominance*.

28 Local Dominance.

Letzte Reste kaum mehr erhaltener, wahrscheinlich mittelalterlicher Feldgrenzen.



LD eignet sich hervorragend für die Erkennung schwach ausgeprägter Geländemerkmale. Von allen verwendeten Visualisierungen hat LD zusammen mit LRM (Kap. 6.3.8) diesbezüglich die besten Ergebnisse geliefert. Besonders bei der Erkennung von Feldgrenzen (Kap. 8.1.6) sowie weiteren kaum im Relief erhaltenen Strukturen (Abb. 28) hat sich LD als sehr hilfreich erwiesen. Wie bei LRM hat die Visualisierung schwach ausgeprägter Strukturen jedoch die Folge, dass sich auch vermehrt natürliche Merkmale abzeichnen, was die Interpretation der Visualisierung erschwert. Rauschen wird mit den verwendeten Parametern (siehe unten sowie Abb. 17) nur sehr schwach abgebildet. Im Gegenzug zeichnen sich die Konturen der Strukturen nur unklar ab und erschweren eine präzise Kartierung. In stark konvexen Geländeabschnitten sollte das Histogramm für eine optimierte Darstellung speziell der Geländesituation angepasst werden. Die betreffenden Regionen können jedoch mit SVF (Kap. 6.3.6) als Alternative problemlos abgedeckt werden. Im Vergleich mit LRM stellt LD komplexes Relief mit großen Höhenunterschieden übersichtlicher dar und ist in solchen Situationen vorzuziehen (vgl. Karten 8 und 9).

Im Allgemeinen ist LD eine sehr mächtige, jedoch auch anspruchsvolle Visualisierungsmethode. Die Darstellungen sind sehr abstrakt. Um ein Verständnis der allgemeinen Topografie zu erhalten, empfiehlt sich ein regelmäßiger Vergleich mit einem *Hillshade*. Eine halbtransparente Projektion von letzterem über LD verrin-

gert die Sichtbarkeit schwach ausgeprägter Strukturen, weshalb davon abgeraten wird.

Die Berechnung von LD erfolgte mit der LiVT. Der minimale und maximale Radius wurden auf 10 beziehungsweise 30 festgelegt. Die restlichen Parameter wurden in der Standardeinstellung belassen (Winkelauflösung: 15, Beobachterhöhe: 1,7, Entfernungskreuz: 1).

6.3.10 Zusammenfassung

Mit zunehmender Erfahrung konnten im Verlauf des Projekts Ansätze erarbeitet werden, für welche topografischen Verhältnisse und bei welchen Strukturtypen sich welche Visualisierung besonders eignet (Abb. 29). Diese Ansätze sind von verschiedenen Faktoren wie der Datenqualität des Untersuchungsgebiets, der Auswahl der getesteten Visualisierungen und nicht zuletzt von persönlichen Vorzügen und Erfahrungen abhängig. Im Rahmen dieser Arbeit ermöglichten sie eine zeiteffizi-

112 HESSE 2010, 71; HESSE 2013, 177.

113 In Hanglagen eingeschnittene Strukturen mit horizontalen Flächen wie Terrassen oder Meilerplattformen äußern sich bedingt durch die Berechnungsweise von LRM als Abfolge eines positiven und negativen Geländemerkmals (vgl. DONEUS 2013, 6436ff. sowie Terrassen auf Karte 8).

114 HESSE 2013, 177.

115 NOVÁK 2014. Voraussetzung ist, dass die Erweiterungen *Spatial Analyst* und *3D Analyst* in ArcGIS aktiviert sind.

116 Nach HESSE 2016a, 116.

117 Für Berechnung in 16 verschiedene Richtungen muss die Winkelauflösung demnach mit 22,5 angegeben werden.

| Visualisierungsmethode | Vorteile | Nachteile |
|------------------------------|---|--|
| Hillshade | <ul style="list-style-type: none"> · Als dynamische Funktion im GIS erstellbar · Einfach lesbar · Gute Übersicht über die Topografie | <ul style="list-style-type: none"> · Strukturen parallel zur Lichtquelle werden nicht angezeigt · Über- und Unterbelichtung in stark reliefierten Gebieten · Künstliche Reliefumkehr bei Belichtung von Süden |
| Principal Component Analysis | <ul style="list-style-type: none"> · Bildet Relief detailreich ab · Gute Übersicht über die Topografie | <ul style="list-style-type: none"> · Benötigt viel Speicherplatz · Lesbarkeit durch Färbung erschwert · Mögliche, künstliche Reliefumkehr bei ausgeprägter Topografie |
| Slope | <ul style="list-style-type: none"> · Als dynamische Funktion im GIS erstellbar · Einfach lesbar · Geeignet für ausgeprägte Strukturen in Hanglage | <ul style="list-style-type: none"> · In ebenem Terrain ungeeignet |
| Positive Openness | <ul style="list-style-type: none"> · Einheitliche Darstellung kleinräumiger Strukturen unabhängig ihrer Lage im Relief · Gute Ergänzung zu SFV | <ul style="list-style-type: none"> · Fehlende allgemeine Topografie erschwert die Interpretation · Ungenügende Darstellung schwach ausgeprägter Strukturen |
| Negative Openness | <ul style="list-style-type: none"> · Einheitliche Darstellung kleinräumiger Strukturen unabhängig ihrer Lage im Relief · Präzise Kartierung negativer linearer Strukturen | <ul style="list-style-type: none"> · Fehlende allgemeine Topografie und abstrakte Darstellung erschweren die Interpretation |
| Sky View Factor | <ul style="list-style-type: none"> · Einfach lesbar · Allgemeine Topografie erkennbar · Visualisierung schwach ausgeprägte Strukturen in Hanglage · Visualisierung negativer Strukturen | <ul style="list-style-type: none"> · Ungenügende Darstellung schwach ausgeprägter Strukturen in ebenem Terrain · Ausprägung kleinräumiger Strukturen abhängig von ihrer Lage im Relief |
| Local Dominance | <ul style="list-style-type: none"> · Visualisierung sehr schwach ausgeprägter Strukturen · Rauschen zeichnet sich nur schwach ab | <ul style="list-style-type: none"> · Unklare Strukturgrenzen erschweren präzise Kartierung · Abstrakte Darstellung erschwert Interpretation · Erstellung zeitintensiv |
| Local Relief Model | <ul style="list-style-type: none"> · Visualisierung sehr schwach ausgeprägter Strukturen | <ul style="list-style-type: none"> · Abstrakte Darstellung erschwert Interpretation · In stark reliefiertem Terrain ungeeignet · Erstellung zeitintensiv |

29 Vor- und Nachteile der in der Auswertung verwendeten Visualisierungen.

ente Prospektion des Untersuchungsgebiets. Die am häufigsten verwendeten Visualisierungen waren *Sky View Factor*, *Local Dominance* und *negative Openness*. Für Übersichtsdarstellungen diente ein *Hillshade*. SVF ist als Alternative ebenfalls gut dafür geeignet. *Local Relief Model*, *Slope*, *Principal Component Analysis* und *positive Openness* ergänzten die bereits genannten Visualisierungen in bestimmten topografischen Situationen. Da die Berechnung der Visualisierungen mit LiVT relativ aufwändig ist (Kap. 6.1.2), wurde diese *Toolbox* nur zur Berechnung von *Local Dominance* verwendet. Alle restlichen Visualisierungen wurden mit der RVT oder ArcGIS erstellt.

6.4 Visualisierung im GIS

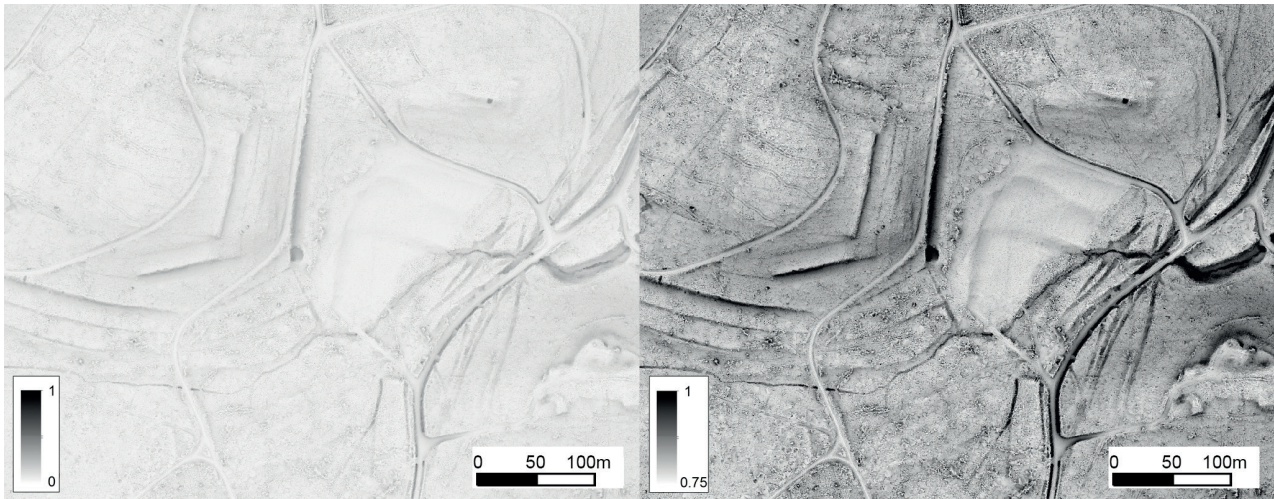
6.4.1 *Mosaic Datasets*

Für die Darstellung der berechneten Visualisierungen wurde die Software ArcGIS verwendet. Aus den in Kacheln gespeicherten Visualisierungen und ver-

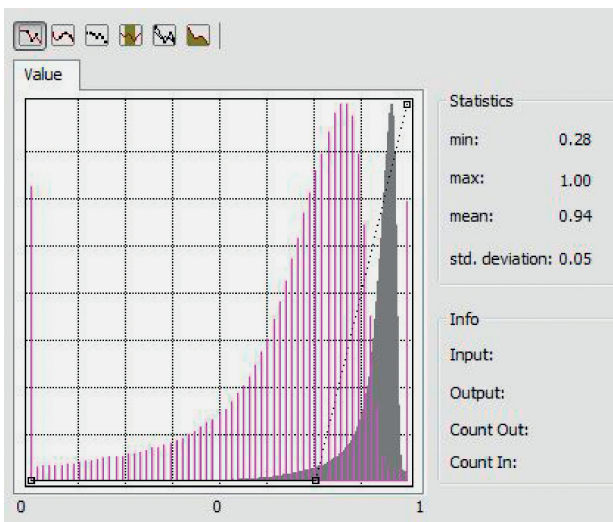
schiedenen Karten (Kap. 7.4.2) wurden jeweils *Mosaic Datasets*¹¹⁸ erstellt. Dies vereinfachte das Handling der zahlreichen Einzeldateien enorm und verbesserte die Leistung des GIS. Die *Mosaic Datasets* wurden in einer *File Geodatabase*¹¹⁹ gespeichert.

6.4.2 Histogrammanpassung

In der Regel deckt der für die archäologische Auswertung relevante Wertebereich einer Visualisierung nur einen bestimmten Abschnitt der gesamten Farb- oder Graustufenskala ab, die zur Darstellung der Bildwerte verwendet wird. Durch eine Histogrammanpassung (*histogram stretch*) kann der relevante Wertebereich auf die gesamte Skala ausgedehnt werden, wodurch sich die Visualisierung im GIS kontrastreicher abbildet und mehr Detail erkennbar ist¹²⁰ (Abb. 30). Ein mit *Sky View Factor* berechnetes Raster weist beispielsweise im Untersuchungsgebiet lediglich Werte von 0,28 bis 1 auf, die jedoch mit einer Skala von 0 bis 1 visualisiert werden. Für die Entdeckung archäologischer Strukturen sind sogar lediglich die Werte von ca. 0,75 bis 1 relevant. Die



30 Dasselbe, mit SVF visualisierte Areal ohne (links) und mit (rechts) Histogrammstreckung (vgl. auch Abb. 31). Zu sehen sind ein Hohlwegbündel und mehrere Terrassen.

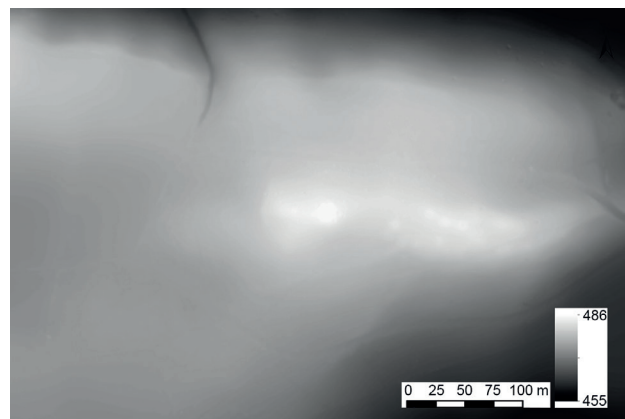


31 Histogramm von SVF im Untersuchungsgebiet. Grau dargestellt sind die effektiven Bildwerte, die auf der Skala von 0,28 bis 1 reichen. Lila dargestellt ist die Histogrammstreckung, mit welcher die Werte von 0,75 bis 1 auf die gesamte Graustufenskala ausgedehnt wurden (vgl. Abb. 30 rechts).

Wertestatistik wird in ArcGIS als Histogramm¹²¹ dargestellt. Der Wertebereich kann direkt in der Grafik oder durch die Eingabe von neuem Minimum- und Maximumwert angepasst werden (Abb. 31).

Eine Histogrammanpassung wurde bei der Darstellung von *Slope*, *Sky View Factor*, *Openness* sowie *Local Dominance* vorgenommen. Der gewählte Wertebereich ist von der Topografie des Untersuchungsgebiets abhängig. Zur Anwendung kam jeweils ein *Minimum-Maximum-Stretch*.

Ein *Histogram Stretch* kann nicht nur bei den Visualisierungen genutzt werden, sondern ist auch beim DTM selbst als eigene Visualisierungsmethode anwendbar¹²². Dabei wird die Farb- oder Graustufenskala auf einen geringen Höhenbereich des DTM eingegrenzt, wodurch der Farbkontrast im gewählten



32 DTM, die Höhenwerte werden mit einer Graustufenskala visualisiert (selber Ausschnitt wie Abb. 23). Aufgrund der ausgeprägten Topografie bilden sich die archäologischen Strukturen jedoch nur mit ungenügendem Kontrast ab.

Bereich gesteigert wird. Der Arbeitsgang macht jedoch nur in sehr ebenem Gelände Sinn, welches nur geringe Höhenunterschiede aufweist, sodass dadurch ein ausreichend starker Kontrast erreicht werden kann. Bei ausgeprägtem Relief (Abb. 32) ist diese Visualisierungs-

118 ESRI 2014, What is a mosaic dataset.

119 ESRI 2014, File Geodatabase.

120 Die Konsequenz davon ist, dass sich bei einer Graustufenskala alle Farbwerte tiefer als der definierte Wertebereich schwarz, alle höher als der Wertebereich weiß dargestellt werden.

121 Zur Funktion des Histogramms siehe BURGER/BURGE 2015, 41ff.

122 In der Fachliteratur findet sie sich unter den Bezeichnungen *Elevation Differentiation* (KOKALJ et al. 2013, 105), *Height Profiling* oder *Contour Profiling* (CRUTCHLEY 2013, 138), *Colour Cast* (ŠTULAR et al. 2012, 3356) oder *Constrained Colour Shading* (CHALLIS et al. 2011a, 280f.).

methode nicht zweckmäßig¹²³. Zudem gibt es auch für ebenes Gelände deutlich bessere Alternativen, die im Gegenzug jedoch etwas aufwändiger in der Erstellung sind und zusätzlichen Rechen- und Datenspeicher in Anspruch nehmen¹²⁴.

6.4.3 Analyse-Werkzeuge im GIS

Für die Auswertung des Geländemodells und die Interpretation der Visualisierungen sind im GIS zwei wichtige Hilfsmittel abrufbar. Mit dem *3D Analyst* kann in ArcGIS mit wenig Aufwand ein Profilschnitt erzeugt werden. Mit diesem Tool kann der genaue Verlauf einer Struktur schnell und mit nur geringem Aufwand nachvollzogen werden. Nur im Profil zeichnen sich manchmal wichtige Details im Relief ab, die in den Visualisierungen oder im DTM nicht nachvollzogen werden können. Mit wenigen Profilschnitten kann so beispielsweise zwischen einem potenziellen Grabhügel und einer natürlichen Kuppe in Hanglage unterschieden werden, welche in den Visualisierungen des DTM sehr ähnlich aussehen. Bei der Erstellung eines Profils muss dem Anwender bewusst sein, dass die Pixelwerte der Visualisierungen lediglich Ableitungen der effektiven Höhenwerte sind (Kap. 6). Damit die Höhenwerte des Geländes angezeigt werden, muss der gewählte Layer, aus welchem das Profil abgeleitet wird, zwingend das originale DTM sein.

Ebenfalls hilfreich für das Verständnis der Topografie sind Isohypsen (Höhenlinien). In dieser Arbeit wurden Höhenlinien mit einer Äquidistanz von 1 m verwendet. Im GIS als Vektorlayer aus dem DTM errechnet, konnten sie auf die Visualisierungen projiziert werden. Zur Erkennung anthropogener Strukturen sind Isohypsen jedoch nur geeignet, wenn das Gelände eben und die Strukturen gut ausgeprägt sind¹²⁵.

123 KOKALJ et al. 2013, 106.

124 Vgl. dazu *Local Relief Model* (Kap. 6.3.8) und *Local Dominance* (Kap. 6.3.9).

125 Hesse 2010, 68.

7 Kartierung

7.1 Zielsetzung und Rahmenbedingungen

Wie bereits in Kapitel 1 erwähnt, ist die hier präsentierte Arbeit vor allem methodischer Natur. Ziel der Kartierungen war, das Potenzial des zur Verfügung stehenden LiDAR-Datensatzes (Kap. 5) für die Archäologie abzuschätzen. Hierzu wurden in einem ausgewählten Gebiet alle potenziellen archäologischen Strukturen kartiert, die sich im Relief erhalten haben. Anschließend wurde eine Interpretation und zeitliche Einordnung der Strukturen vorgenommen. Die Ergebnisse sollten zu folgenden Punkten Antworten liefern:

- Welche archäologischen Strukturen zeichnen sich im Geländescan und den daraus abgeleiteten Visualisierungen ab?
- Welche Möglichkeiten und Grenzen gibt es bei der funktionalen und zeitlichen Ansprache der kartierten Strukturen?
- Welchen Einfluss hat die heutige Landnutzung auf die Sichtbarkeit archäologischer Strukturen? In welchen Nutzungszonen lohnt sich der Einsatz von LiDAR-Daten?

Um diese Zielsetzung zu erreichen, musste zuerst definiert werden, ab welchem Alter ein anthropogenes Geländemerkmale als archäologische Struktur angesprochen wird. Häufig wird in einer Kantonsarchäologie

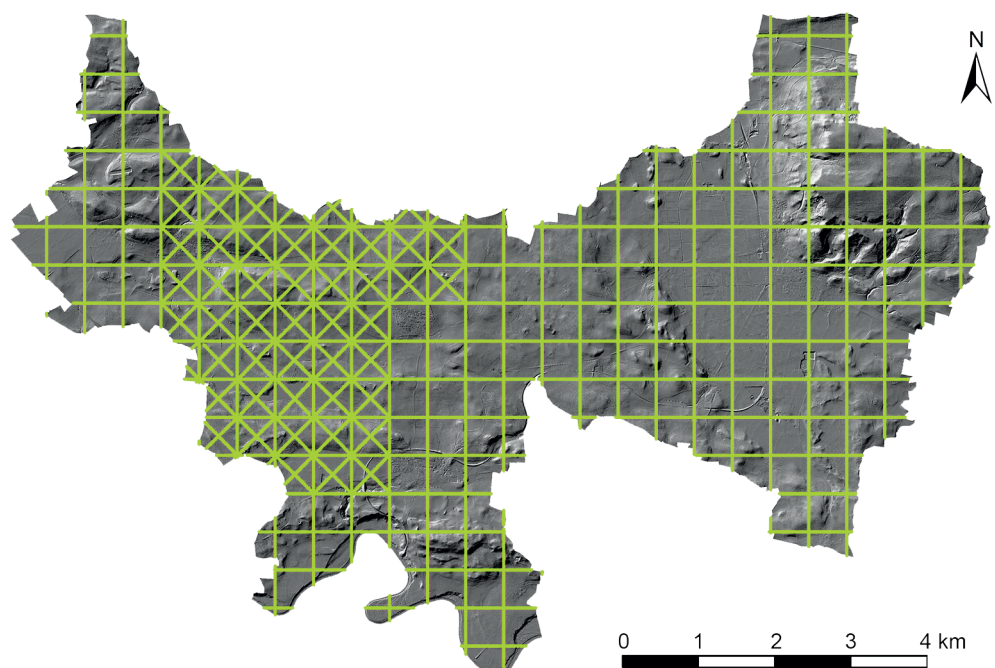
oder einem Denkmalamt aufgrund einer künstlich festgelegten Zeitgrenze entschieden, ob es sich bei einer anthropogenen Struktur um Archäologie handelt oder ob sie zu jung und damit aus archäologischer Perspektive nicht relevant ist¹²⁶. Meist handelt es sich um eine Jahreszahl, es sind aber auch Zeitspannen geläufig¹²⁷. Für diese Arbeit wurde die Grenze auf das Ende des zweiten Weltkriegs gelegt.

7.2 Vorgehen mit Hilfe eines Geografischen Informationssystems

Die Kartierungen wurden mit der Software ArcGIS (Kap. 6.1.3) durchgeführt. Um während des Kartierens der 51 km² großen Fläche stets die Übersicht bewahren zu können, wurde sie in quadratische Kacheln von je 500 m Seitenlänge unterteilt (Abb. 33). War eine Kachel kartiert, wurde sie jeweils markiert. Damit konnte der aktuelle Arbeitsstand leichter überblickt werden und es wurden keine Flächen ausgelassen oder mehrfach abgesucht.

126 Maßgebend ist dabei der Zeitpunkt, zu dem die Struktur erstellt wurde.

127 Z. B. alle Funde und Strukturen, die älter als hundert Jahre sind, sind für die Archäologie relevant.



33 Der aktuelle Arbeitsstand wurde mit einem Raster überwacht. Markierte Quadrate zeigen an, welche Flächen bereits kartiert wurden.

Für das Verständnis der allgemeinen Topografie wurde jede zu kartierende Kachel anfangs mit einem *Hillshade* dargestellt. Anschließend wurden die verschiedenen Visualisierungen in unterschiedlichen Maßstäben betrachtet¹²⁸ und nach Bedarf im Profil geschnitten (vgl. Kap. 6.4.3). Je nach Größe und Ausprägung zeichneten sich Strukturen in unterschiedlichen Maßstäben klarer ab. Als Beispiel seien schwach ausgeprägte Feldgrenzen genannt, deren Verlauf meist einfacher zu erkennen war, wenn die Visualisierung in größerer Auflösung dargestellt wurde. Für die Kartierung kleinräumiger Strukturen wie Grabhügel eigneten sich hingegen Detailansichten besser.

Bei den Kartierungen wurde die Aufmerksamkeit bewusst nicht auf bereits bekannte Fundstellen fokussiert. Damit sollte das gesamte Gebiet mit derselben Genauigkeit zu erfasst werden, ohne lokale Schwerpunkte zu setzen.

7.3 Ansprache der kartierten Strukturen

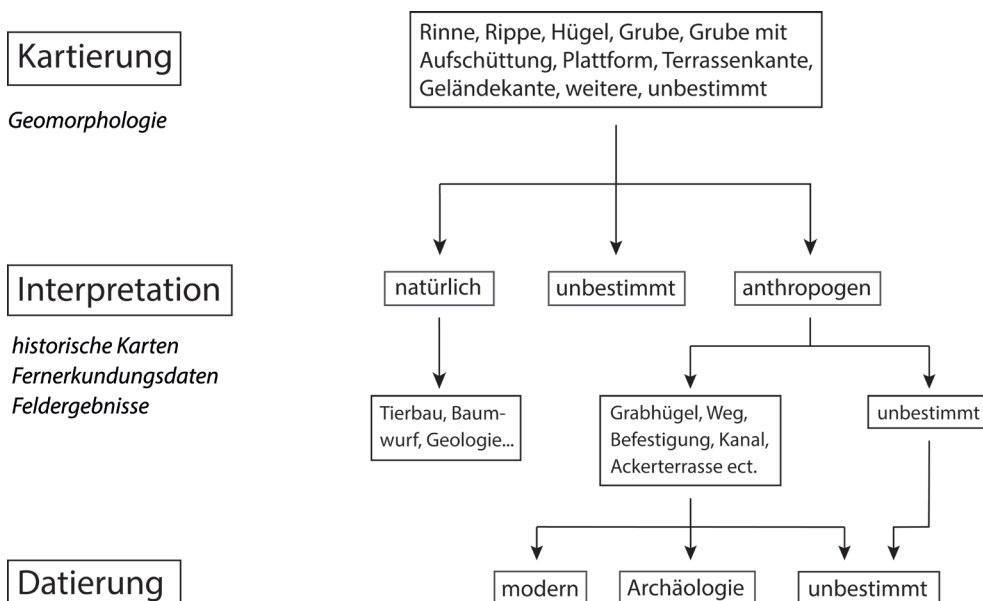
Für die Ansprache der kartierten Geländemerkmale wurde eine Vorgehensweise angewendet, die auch in der Luftbildarchäologie zum Einsatz kommt¹²⁹. Die Ansprache ist in zwei Teile gegliedert (Abb. 34). Der erste Teil beschreibt, was im Luftbild beziehungsweise im LiDAR-Scan zu sehen ist¹³⁰. Erfasst wird in einem ersten Schritt also die Form der entdeckten Struktur. Der zweite Teil der Ansprache befasst sich mit der Interpretation. Dabei soll der kartierten Struktur auf Grundlage ihrer Ausprägung, ihrer Lage im Relief und weiteren

verfügbaren Informationen eine Funktion zugeordnet werden. Im Idealfall kann darauf aufbauend eine grobe zeitliche Einordnung der Struktur vorgenommen werden.

7.3.1 Morphologische Ansprache

Zu jeder als Polygon oder Polylinie kartierten Struktur (Kap. 7.7.1) wurde schriftlich deren dreidimensionale Form erfasst. Diese morphologische Beschreibung war eine wichtige Grundlage für die funktionale Interpretation und unterstützte das Lesen der teilweise sehr abstrakten Visualisierungen.

Aus der Feldarchäologie ist dem Autor keine Richtlinie bekannt, welche für archäologische Strukturen nach morphologischen Kriterien definierte Bezeichnungen festlegt. Bei der Feldprospektion werden Geländemerkmale meist mit Begriffen angesprochen, in denen bereits eine archäologische Interpretation enthalten ist¹³¹. Auch in der Luftbildarchäologie scheint es hierzu keine Standards zur Terminologie zu geben. Eine Übernahme der Terminologie aus der Geomorphologie erwies sich als unzureichende Alternative¹³². Die zu detaillierte Erfassung macht bei der Ansprache archäologischer Objekte wenig Sinn. Die Größe der untersuchten Flächen und die hohe Anzahl zu erwartender Strukturen setzten zudem ein zeiteffizientes Arbeiten voraus. Für diese Arbeit wurde deshalb ein eigenes, einfaches System entwickelt. Die morphologische Erfassung der kartierten Strukturen wurde auf die Bestimmung einer Grundform reduziert. Auf eine detaillierte Beschreibung der Strukturen mit Maßen, Orientierung etc. wurde verzichtet¹³³. Während der Ar-



34 Aufbau der Kartierungsarbeiten. Links sind die drei aufeinander folgenden Arbeitsschritte aufgelistet, direkt unterhalb und kursiv markiert die dafür verwendeten Grundlagen. Rechts sind die verwendeten Begriffe für die jeweiligen Arbeitsschritte dargestellt.

beit haben sich acht Grundformen herauskristallisiert, welche im Folgenden kurz erklärt werden.

Hügel Erhebung mit ovalem bis rundem Grundriss.

Grube Vertiefung mit rundem bis amorphem Grundriss. In Hanglage ist es möglich, dass der tiefste vertikale Punkt der Grube Teil des Grubenrandes ist¹³⁴.

Grube mit Aufschüttung Grube entsprechend der oben genannten Definition mit einer Materialaufschüttung direkt neben dem Grubenrand oder bei großen Gruben innerhalb der Grube.

Rippe langgezogene Erhebung mit einem Verhältnis von Länge zu Breite von mindestens 2:1. Sie weist einen symmetrischen, meist gerundeten Querschnitt auf. Ihr Verlauf muss nicht geradlinig sein.

Rinne langgezogene Vertiefung mit einem Verhältnis von Länge zu Breite von mindestens 2:1. Sie weist einen meist gerundeten Querschnitt auf. Ihr Verlauf muss nicht geradlinig sein.

Terrassenkante Häufig sind Terrassen im Untersuchungsgebiet so stark erodiert, dass die Terrassenfläche nicht klar eingrenzbar ist. Aus diesem Grund wurden lediglich Terrassenkanten kartiert. Es handelt sich dabei um die Geländekante, welche die ebene oder schwach geneigte Terrassenfläche von der darunter liegenden Böschung trennt. Eine Terrasse befindet sich in abfallendem Gelände. Sie weist einen asymmetrischen Querschnitt bestehend aus Terrassenfläche und Böschung auf. Der Verlauf der Terrassenkante ist horizontal oder annähernd horizontal ausgerichtet.

Plattform Horizontal oder annähernd horizontal ausgerichtete Fläche, die sich durch eine Erhöhung oder Vertiefung vom umliegenden Gelände abhebt. In Hanglage setzt sie sich durch ihre horizontale Ausrichtung vom umgebenden, geneigten Relief ab. Von der Terrasse unterscheidet sich die Plattform in Hanglage durch die geringere Ausdehnung. Sie weist keine klare Längsachse parallel zum Hangverlauf auf, wie es bei Terrassen üblich ist.

Geländekante Sammelbezeichnung für Geländekanten, die nicht unter den Begriff „Terrassenkante“ fallen. Es handelt sich dabei generell um die Grenze zwischen zwei aufeinander treffenden Ebenen.

Konnte eine Struktur nicht einer der oben genannten Grundformen zugewiesen werden, wurden sie mit dem Attribut „weitere“ versehen. In seltenen Fällen waren Geländemerkmale so schwach ausgeprägt, dass sie in ausgewählten Visualisierungen zwar sichtbar (vgl. Kap. 7.5.4), jedoch nicht morphologisch ansprechbar waren. Diese wurden als „unbestimmt“ markiert.

7.3.2 Interpretation

Nachdem eine Struktur kartiert und morphologisch erfasst worden war, wurde in einem nächsten Schritt deren Funktion interpretiert. Dieser Arbeitsschritt musste nicht direkt im Anschluss an die Beschreibung vorgenommen werden, sondern konnte auch zu einem späteren Zeitpunkt erfolgen. Dies war insbesondere dann hilfreich, wenn die funktionale Ansprache einer Struktur eine Überprüfung im Gelände erforderte.

Die Interpretation eines Geländemerkmals basiert auf sehr ähnlichen Ansätzen wie in der Luftbildarchäologie¹³⁵. Bereits die Morphologie grenzt die Möglichkeiten der funktionalen Ansprache ein. Weitere wichtige Hinweise ergeben die Lage und Ausrichtung im Relief sowie im Verhältnis zu weiteren Strukturen. Zusätzlich sollten nach Verfügbarkeit weitere Quellen für die Interpretation von LiDAR-Daten genutzt werden¹³⁶. Diese sind Thema des nächsten Teilkapitels.

In diesem Projekt wurde die Interpretation hierarchisch aufgebaut (Abb. 34). Zuerst wurde beurteilt, ob es sich beim Objekt um eine natürliche oder um eine anthropogene Struktur handelt. Anschließend wurde die Struktur einem Strukturtyp zugewiesen (z. B. Tierbau, Grabhügel, Weg, Totholzhaufen). Diese Klassifikation erlaubte es, die Strukturen zu gliedern und gewährleistete die Übersicht über die große Datenmenge¹³⁷. Welche Strukturtypen im Untersuchungsgebiet auftreten und wie sie ausgeprägt sind, wird in Kap. 8.1 und 8.2 besprochen.

128 Die Kartierungen wurden in einem Maßstab zwischen 1:500 und 1:2000 vorgenommen.

129 PALMER 2013, 208; WILSON 1982, 189ff.; DONEUS 2013b, 196ff.

130 In der Luftbildarchäologie kann dies bereits Teil der Interpretation sein, beispielsweise wenn sich eine Struktur über Bewuchsmerkmale an der Erdoberfläche abzeichnet. Im DTM wird die Struktur hingegen dreidimensional wiedergegeben und kann auf Basis seiner räumlichen Ausprägung beschrieben werden.

131 Vgl. z. B. GLUTZ et al. 1984.

132 In diesem Fachgebiet wird ein umfassendes System basierend auf einfachen (Kulminationsbereich, Tiefenbereich oder Hang) und darauf aufbauenden komplexen Reliefformtypen (Erhebung, Flanke, geschlossene Hohlform, offene Hohlform oder Verebnung) verwendet. Letztere werden abhängig vom Querschnitt und vom Grundriss der Struktur mit zusätzlichen Attributen versehen (Beschreibung nach der Bodenkundlichen Kartieranleitung [SPONAGEL et al. 2005, 57ff.]).

133 Diese Informationen sind im DTM gespeichert und können für detaillierte Abklärungen mit Hilfe einer GIS-Software jederzeit extrahiert werden.

134 Dies kann zum Beispiel bei Kiesgruben der Fall sein, die horizontal in den Hang hineingegraben werden.

135 Vgl. dazu WILSON 1982, 190ff.

136 CRUTCHLEY 2006, 255f.; CRUTCHLEY 2009, 65; CRUTCHLEY/CROW 2009, 19ff.; DONEUS/KÜHTEIBER 2013, 33.

137 Die erste Hierarchiestufe der Interpretation (Abb. 33) scheint auf den ersten Blick vernachlässigbar, da vom Strukturtyp ausgehend offensichtlich ist, ob es sich um eine natürliche

7.4 Quellen

Es gibt drei große Quellengruppen, die für die Interpretation kartierter Strukturen sehr hilfreich sein können. Für das in dieser Arbeit ausgewertete Gebiet stand eine große Auswahl an Quellen zur Verfügung, die im Folgenden beschrieben werden.

7.4.1 Fernerkundungsdaten

Fernerkundungsdaten sind im Kanton Zürich vor allem in Form von Luftbildern verfügbar. Sie sind aufschlussreich in offenem Gelände, wo mit ihrer Hilfe moderne Strukturen identifiziert werden können. Die Vegetation wird detailgetreu dargestellt, was Rückschlüsse auf die lokale Qualität des auszuwertenden DTM erlaubt. Zusätzlich dienen die Fotos der allgemeinen Orientierung. Alte Luftbilder sind ein wichtiges Archiv, die den früheren Zustand einer Kulturlandschaft aufzeigen.

Alte LiDAR-Datensätze können durch den Abgleich mit den aktuellen Daten genutzt werden, um moderne Strukturen zu identifizieren, die erst nach der Erstellung des alten Datensatzes erstellt wurden. Dies ist vor

allem in bewaldeten Gebieten von Vorteil, wo Luftbilder nur ungenügende Informationen liefern können.

7.4.2.1 Luftbilder

Zur Anwendung kam der aktuellste verfügbare Orthofotodatensatz. Dieser stammte zum Zeitpunkt der Bearbeitung aus dem Jahr 2011 und wies eine Auflösung von 0,25 m auf. Schrägbildaufnahmen der Archäologie standen für ausgewählte Strukturen ebenfalls zur Verfügung. Auf der Internetseite map.geo.admin.ch werden zudem alte Luftaufnahmen zur Verfügung gestellt. Diese schwarz-weißen Orthofotos wurden ab 1931 in regelmäßigen Zeitabständen erstellt¹³⁸.

7.4.3.2 Höhenmodell DTM-AV

Der LiDAR-Datensatz DTM-AV wurde von der Swisstopo für das Gebiet des Kantons Zürich in den Jahren 2001 und 2002 in Auftrag gegeben¹³⁹. Die Rasterdaten mit einer Auflösung von 2 m wurden zu Beginn 2015 durch die im Rahmen des Projekts *Luftaufnahmen 42* erstellten und in dieser Arbeit untersuchten Daten abgelöst. Die grobe Auflösung des DTM-AV schränkte dessen Nutzen im Rahmen dieser Arbeit stark ein.



35 Verschiedene für die Interpretation von Strukturen verwendete Karten. Von links nach rechts: Zehntenplan Ossingen (1777), Wildkarte (1850), Siegfriedkarte (1880), Messstischplan (1930), Landeskarte (1956).

7.4.2 Karten

Verschiedenste Karten können den Bearbeiter der LiDAR-Daten mit wichtigen Zusatzinformationen versorgen (Abb. 35). Die Position von Straßen, Gemeindegrenzen, dem Verkehrs- und Gewässernetz ist präzise verzeichnet. Geologische Karten geben Aufschluss über den Untergrund. Alte Karten haben dieselbe Funktion wie alte Luftbilder. Sie bieten weniger Detail und Genauigkeit, reichen jedoch in der Regel noch weiter in die Vergangenheit zurück. Liegen mehrere, unterschiedlich alte Karten für ein Untersuchungsgebiet vor, kann damit die Entwicklung der Landnutzung und des Straßennetzes über mehrere Jahrhunderte verfolgt werden. Trotz Georeferenzierung können die Darstellungen eine gewisse Ungenauigkeit aufweisen. Diese sind auf den Kartenmaßstab sowie die damaligen Vermessungstechniken zurückzuführen.

7.4.2.1 Katasterplan

Im Katasterplan sind das aktuelle Verkehrsnetz, Gebäude und Grundstücksgrenzen verzeichnet. Dieser stand als Polygon-Layer zur Verfügung und ermöglichte die Identifizierung moderner Strukturen, die sich in den Visualisierungen abzeichneten. Besonders bei allein stehenden Gebäuden war dies sehr hilfreich. Im DTM weggerechnet, werden diese interpolierten Lücken in den Visualisierungen als leichte Anomalien dargestellt (vgl. Kap. 5.3.3), die nicht immer sogleich als Bildartefakt erkannt werden konnten.

7.4.2.2 GeoCover (Geologischer Atlas der Schweiz)

Die geologischen Vektordatensätze des Projekts *GeoCover*¹⁴⁰ basieren auf den Blättern des *Geologischen Atlas der Schweiz* 1:25000. Die Kenntnis über den geologischen Untergrund kann für die Interpretation gewisser Strukturen wie Materialentnahmestellen von Vorteil sein. Die Lage von Steinbrüchen ist ebenfalls im Datensatz verzeichnet.

7.4.2.3 Zehntenpläne

Zehntenpläne wurden im Kanton Zürich vom 17. bis ins 19. Jahrhundert von Zehntinhabern, im heutigen Kanton Zürich meist dem Zürcher Staat oder Klöstern, erstellt. Das Bezugsrecht des Zehnten, ursprünglich eine kirchliche Abgabe, konnte zu dieser Zeit verpfändet oder verhandelt werden. Um dadurch entstandene Unklarheiten zu regeln, wurden Zehntenpläne erstellt, welche den Zehntinhabern als Grundlage für ihre Forderungen dienten¹⁴¹. Auf den landwirtschaftlichen Flächen wurden zu diesem Zweck die Zelg- und in selteneren Fällen die Gewinnsgrenzen erfasst¹⁴². Häufig decken sich die ehemaligen Zehntbezirke mit den heutigen Gemeindegebieten.

Für die Arbeit mit LiDAR-Daten ist vor allem der Verlauf alter Wege und Feldgrenzen interessant, welche je nach Detailtreue und Genauigkeit der Pläne identifiziert und grob datiert werden können (vgl. Abb. 49). Auf den Zehntenplänen ebenfalls abgebildet sind Wald- sowie Rebgebiete, was auch bei allen jüngeren Karten (Kap. 7.4.2.4–7) der Fall ist. Mit dieser Grundlage lässt sich eine Entwicklung der Landnutzung nachvollziehen.

Im Vergleich zu den anderen alten Karten sind Zehntenpläne sehr heterogen was ihre Genauigkeit und den Zeitpunkt ihrer Erstellung betrifft. Versuche, einzelne Pläne zu georeferenzieren, brachten denn auch relativ unpräzise Ergebnisse. Dennoch war es dem Autor damit möglich, die Pläne im GIS darzustellen, was die Zuordnung einzelner Strukturen deutlich erleichterte. Als Identifizierungspunkte für die Georeferenzierung dienten entweder natürliche Geländemerkmale (Moränen, Flussschlaufen) oder anthropogene Strukturen wie Wegkreuzungen, Burgstandorte oder Terrassen. Zur Identifikation geeigneter Wegkreuzungen diente ein Abgleich mit der Wildkarte.

7.4.2.4 Wildkarte (Topografische Karte des Kantons Zürich)

Von 1845 bis 1852 wurde das gesamte Zürcher Kantonsgebiet im Maßstab 1:25000 aufgenommen. Das Kartenwerk wurde nach seinem Ersteller, Johannes Wild, benannt. Da zahlreiche Straßenausbauten erst nach der Aufnahme der Wildkarte durchgeführt wurden, zeigt diese ein Wegsystem, welches dem neuzeitlichen oder sogar mittelalterlichen Straßensystem ähnlich sein dürfte¹⁴³. Neben Straßen können auch Spuren des Rebbaus und ehemalige Waldgrenzen, die sich bis heute im Relief erhalten haben, mit den Eintragungen der Karte korrelieren und damit funktional sowie chronologisch angesprochen werden.

oder um eine anthropogene Struktur handelt. Der Arbeitsschritt ist jedoch für jene Strukturen notwendig, die als anthropogen beziehungsweise natürlich erkannt, aber keinem bestimmten Strukturtyp zugeordnet werden können.

138 Die einzelnen Aufnahmen können über den GIS-Browser der Website als Bilddatei geöffnet werden. Da diese Bilder weder georeferenziert noch genordet dargestellt werden, fällt die Orientierung auf dem Foto je nach Bildausschnitt relativ schwer. Die Fotos konnten Datierungsinformationen zu Terrassen und Steinbrüchen liefern.

139 <http://www.geolion.zh.ch/geodatensatz/show?nbid=1004> (17.09.2015).

140 <http://www.swisstopo.admin.ch/internet/swisstopo/de/home/products/maps/geology/geocover.html> (22.09.2015).

141 NÜESCH 1969, 11; 19.

142 NÜESCH 1969, 22.

143 OBERLI 1990, 27f.; STROMER 2007, 8.

7.4.2.5 Siegfriedkarte (*Topografischer Atlas der Schweiz*)

Der offizielle Name lautet *Topografischer Atlas der Schweiz*, jedoch ist die erste detaillierte Gesamtaufnahme der Schweiz¹⁴⁴ besser unter dem Namen *Siegfriedkarte* bekannt. Sie entstand in den Jahren 1870–1926 und wurde bis 1949 periodisch nachgeführt. Für das Untersuchungsgebiet sind zwei Versionen aus den Jahren 1880 und 1930 verfügbar.

7.4.2.6 Messtischblätter 1920er bis 1950er Jahre

Aus dem zweiten Viertel des 20. Jahrhunderts liegen für Zürcher Gemeinden sogenannte *Messtischblätter* vor. Sie wurden im Maßstab 1:5000 erstellt und sind damit die Vorläufer der aktuellen Zonenpläne¹⁴⁵. Auf ihnen sind auch Parzellengrenzen sowie kleinere Wege verzeichnet. Letztere sind vor allem in Waldgebieten von großem Nutzen für die Interpretation linearer Strukturen.

7.4.2.7 Alte Landeskarte

Die alte Landeskarte wurde im Zeitraum von 1956–1965 im Maßstab 1:25000 erstellt. Sie löste die Siegfriedkarte ab und ist die Grundlage der noch heute gültigen, offiziellen Landeskarte der Schweiz.

7.4.2.8 Historische Gewässerkarte

Auf der historischen Gewässerkarte des Kantons Zürich sind Veränderungen des Gewässernetzes seit dem 19. Jahrhundert verzeichnet. Mit Hilfe dieser Karte ließen sich beispielsweise Feuchtgebiete oder aufgegebene Kanäle zwischen kleineren Gewässern identifizieren¹⁴⁶.

7.4.2.9 Bundesinventar historischer Verkehrswege der Schweiz (IVS)

Das *Inventar historischer Verkehrswege der Schweiz* ist eine nationale Bestandsaufnahme von schützenswer-

ten historischen Verkehrswegen und wegbegleitenden Elementen in der Schweiz. Es enthält umfangreiche Informationen zum Verlauf der historischen Wege, ihrer Geschichte, ihres Zustands und ihrer Bedeutung¹⁴⁷. Ein Linien-Layer enthält die Verläufe der im IVS erfassten Wege. Entlang dieser schematisch kartierten Wegverläufe, die sich meist am Verlauf heutiger Verkehrswege orientieren, zeichnen sich häufig Hohlwege im LiDAR-Datensatz ab.

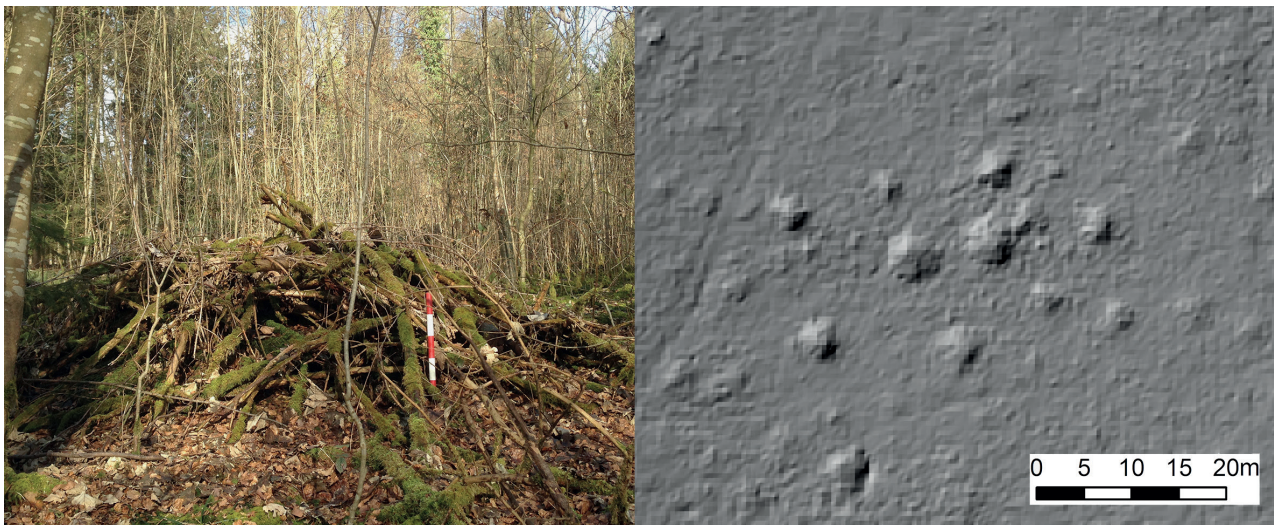
7.4.3 Ergebnisse von Feldarbeiten

7.4.3.1 Archäologisches Fundstelleninventar

Ergebnisse von Feldarbeiten wie Feldbegehungen, Ausgrabungen oder geophysikalische Messungen sind eine wichtige Quelle zur Interpretation und Datierung von Strukturen, die sich in LiDAR-Daten abzeichnen. Für das Untersuchungsgebiet konnte auf das Fundstellenarchiv der Kantonsarchäologie zurückgegriffen werden. Die in einer Datenbank erfassten Fundstellen konnten als Punktelayer im GIS visualisiert werden¹⁴⁸.

7.4.3.2 Überprüfung im Gelände

Wie bereits erörtert, basiert die Identifikation anthropogener Strukturen auf deren räumlicher Ausprägung und ihrer Einbettung ins umgebende Relief (Kap. 3.1.1). Häufig reichen diese Kriterien für eine funktionale Ansprache nicht aus, da sich Strukturen unterschiedlicher Funktion formal sehr ähnlich sein können. Deshalb ist es unerlässlich, Strukturen im Feld auf ihre Interpretation hin zu prüfen¹⁴⁹. Mit zunehmender Erfahrung kann dadurch ein Bildschlüssel aufgebaut werden, auf dessen Grundlage diverse Strukturen zuverlässig am Bildschirm bestimmt werden können¹⁵⁰. Es ist jedoch zu beachten, dass diese Überprüfung im Feld zwar zusätzliche Informationen



36 Potenzielle Grabhügel, die sich bei der Überprüfung im Feld als Totholzhaufen herausgestellt haben. Visualisierung: Hillshade.

zu einer Struktur liefern kann, aber nicht in jedem Fall zur erhofften Klarheit führen wird. Die Beurteilung einer Struktur im Gelände aufgrund ihrer Erscheinung ermöglicht im besten Fall die Identifizierung von natürlichen oder rezenten Strukturen, die demnach nicht archäologisch relevant sind (Abb. 36). Ob beispielsweise ein Hügel durch einen überwachsenen Lesesteinhaufen entstanden ist oder ob es sich um einen Grabhügel handelt, kann jedoch nur durch einen Bodeneingriff oder geophysikalische Untersuchungen geklärt werden. Im Rahmen dieser Auswertung wurden an insgesamt zehn Feldtagen zahlreiche Geländemerkmale in Waldgebiet überprüft. Zum einen wurden Strukturen aufgesucht, deren Funktion unbekannt war. Andererseits dienten die Feldtage auch als Qualitätskontrolle, um am Bildschirm aufgestellte Interpretationen im Feld auf ihre Richtigkeit hin zu überprüfen. In einem begrenzten Gebiet wurden zur Überprüfung von Meilerplattformen Sedimentbohrkerne entnommen (Kap. 10.2.2).

In bewaldetem Gebiet erfolgte die Orientierung anhand verschiedener im LiDAR-Scan abgebildeter Strukturen. Sehr hilfreich war das meist gut ausgebaute System an Forststraßen. Innerhalb einer Waldparzelle boten Rückewege, Wurzeltrichter umgestürzter Bäume, Geländekanten und vieles mehr Ansatzpunkte, um die angestrebte Struktur zu finden. Dennoch konnten nicht alle Strukturen lokalisiert werden¹⁵¹.

7.5 Schwierigkeiten der Interpretation

7.5.1 Potenzielle archäologische Strukturen und zur Frage der Wahrscheinlichkeit

Einen endgültigen Nachweis, dass es sich bei einem mittels LiDAR entdeckten Geländemerkmale um eine bestimmte archäologische Struktur handelt, kann aus methodischer Sicht nur durch einen Bodeneingriff erbracht werden¹⁵². Mittels LiDAR entdeckte Fundstellen, die nicht durch einen Bodeneingriff verifiziert wurden, müssen deshalb korrekterweise als „potenzielle archäologische Strukturen“ angesprochen werden¹⁵³. Dies betrifft natürlich auch die im Rahmen des hier präsentierten Projekts kartierten Geländemerkmale. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird aufgrund der Leserfreundlichkeit jedoch auf diesen sperrigen Begriff verzichtet und weiterhin nur von „archäologischen Strukturen“ geschrieben.

Die eben ausgeführte Unsicherheit der funktionalen Ansprache von in LiDAR-Daten entdeckten Geländemerkmale könnte als Argument genutzt werden, um für jede Struktur eine Interpretation zu wagen. Trotzdem wurde in der Arbeit versucht, zu

differenzieren und Strukturen nur dann funktional anzusprechen, wenn die Sicherheit dieser Interpretation als hoch eingeschätzt wurde¹⁵⁴. Diese Sicherheit beruht auf Informationen zusätzlicher Quellen wie historischen Karten, hauptsächlich jedoch auf Analogien beziehungsweise auf der eigenen Einschätzung und Erfahrung. Die damit verbundene Subjektivität ist daher – wie in fast allen Bereichen der Archäologie – nicht von der Hand zu weisen. Eine Klassifikation wie die in dieser Arbeit verwendeten Strukturtypen (Kap. 7.3.2) ermöglicht zumindest eine systematische Ansprache. Dadurch kann derselbe Bearbeiter in verschiedenen Projekten vergleichbare Ergebnisse erarbeiten. Es gibt zudem Geländemerkmale, die durch ihre spezifische Ausprägung sehr sicher identifizierbar sind¹⁵⁵.

7.5.2 Natürliche versus anthropogene Strukturen

Natürliche Geländemerkmale können sehr ähnliche Formen wie anthropogene Strukturen aufweisen wie beispielsweise eine Rutschung, die einer stark erodierten Terrasse gleicht. Aufgerichtete Wurzeltrichter umgestürzter Bäume und deren Negative im Boden zeichnen sich im DTM ebenfalls ab und können fälschlicherweise als anthropogene Spuren interpretiert

144 Maßstab 1:25000 für das Schweizer Mittelland, Südtessin sowie Jura beziehungsweise 1:50000 für den Alpenraum.

145 Die Gemeindegebiete sind auf zwei bis sechs einzelne Messischblätter aufgeteilt.

146 Im Laufe der Zeit durch unterirdische Dolen ersetzt, zeichneten sich letzte Reste dieser Kanäle in den Visualisierungen ab.

147 STROMER 2007, 40; <https://www.ivs.admin.ch/> (7.2.2016).

148 Grundlegende Fakten waren als Attribute gespeichert. Weiterführende Informationen konnten in der Fundstellendatenbank abgerufen sowie in analogen Dokumentationsmappen nachgeschlagen werden.

149 BOFINGER/HESSE 2011a, 38; CRUTCHLEY/CROW 2009, 19ff.; DONEUS et al. 2008a, 891; DONEUS et al. 2008b, 153; RISBØL et al. 2006, 111.

150 DONEUS/KÜHTREIBER 2013, 34ff.

151 Manche Geländemerkmale sind so schwach ausgeprägt, dass sie mit bloßem Auge im Relief gar nicht mehr wahrgenommen werden können (Kap. 7.5.4). An anderen Orten war das Unterholz so dicht, dass ein Durchkommen nicht möglich war.

152 DONEUS/KÜHTREIBER 2013, 39.

153 HESSE 2013, 179.

154 Strukturen, welchen keine sichere Funktion zugewiesen werden konnte, wurden als unbestimmt markiert (Kap. 7.5.5). Ausnahmen bildeten Grabhügel und Befestigungen, welche bei unsicherem Befund als unsichere Grabhügel bzw. unsichere Befestigungen kartiert wurden (vgl. Abb. 42 und 57).

155 HESSE 2010, 70. Dazu zählen beispielsweise Meilerpodien, Hohlwege oder Wölbäcker.



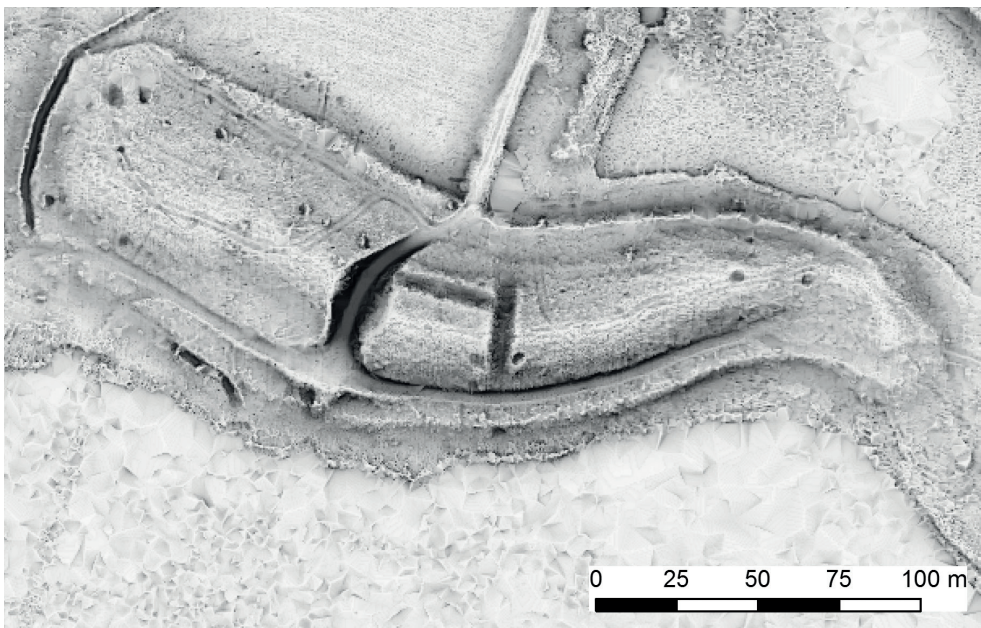
37 Zu Wällen aufgeschütteter Tierbau.

werden¹⁵⁶. Dachs- und Fuchsbauten befinden sich meist an exponierten Hängen oder auf Kuppen, so dass sie im Geländescan als Reste einer vermeintlichen Befestigung scheinen können¹⁵⁷ (Abb. 37). Mit zunehmender Erfahrung des Bearbeiters können sie jedoch sehr sicher identifiziert werden.

Um natürliche von anthropogenen Merkmalen am Bildschirm unterscheiden zu können, ist neben dem archäologischen Fachwissen besonders Erfahrung im Umgang mit den zur Verfügung stehenden LiDAR-Daten Voraussetzung. Durch die Überprüfung von unsicheren Strukturen im Gelände kann ein Bildschlüssel erstellt werden, auf dessen Grundlage Geländemerkmale in den Visualisierungen zuverlässiger angesprochen werden können (Kap. 7.4.3).

7.5.3 Überprägte archäologische Strukturen

Landschaft besitzt eine zeitliche Dimension, die sich in LiDAR-Daten sehr gut fassen lässt. Die Erdoberfläche befindet sich im stetigen Wandel. Seit dem Neolithikum nimmt der Mensch Einfluss auf die Gestaltung der Landschaft, formt sie um und hinterlässt auf vielfältige Weise seine Spuren. Ein Bruchteil dieser Spuren ist noch heute im Relief erhalten. Stetig werden neue hinzugefügt, andere durch Aktivitäten des Menschen wie auch durch die Natur überprägt oder verwischt. Alte Strukturen können in jüngeren Epochen vom Menschen gezielt weitergenutzt und umgeformt werden und werden so in die aktuelle Kulturlandschaft integriert. Dabei können sie ihre ursprüngliche Funktion beibehalten oder sie werden für einen anderen Zweck



38 Motte. Der Fußweg führt durch den westlichen Befestigungsgraben. Visualisierung: SVF.

umgenutzt¹⁵⁸. Das dadurch entstandene Relief als Ergebnis von Spuren alltäglicher Arbeiten und Ereignisse wird von Mlekuž treffend als *messy landscape* bezeichnet¹⁵⁹.

Eine der grössten Herausforderungen für die LiDAR-Prospektion stellen (modern) überprägte archäologische Strukturen dar¹⁶⁰. Obwohl sich diese noch immer im Relief abzeichnen, lässt sich der archäologische Ursprung solcher Geländemerkmale mit der LiDAR-Prospektion in zahlreichen Fällen wohl nicht erschließen. Als Beispiel können alte Straßen oder Landparzellierungen genannt werden, deren Verlauf bis heute unverändert geblieben ist. Der historische oder prähistorische Kern solcher Objekte kann lediglich über andere Quellen wie historische Karten oder Bodeneingriffe erkannt werden.

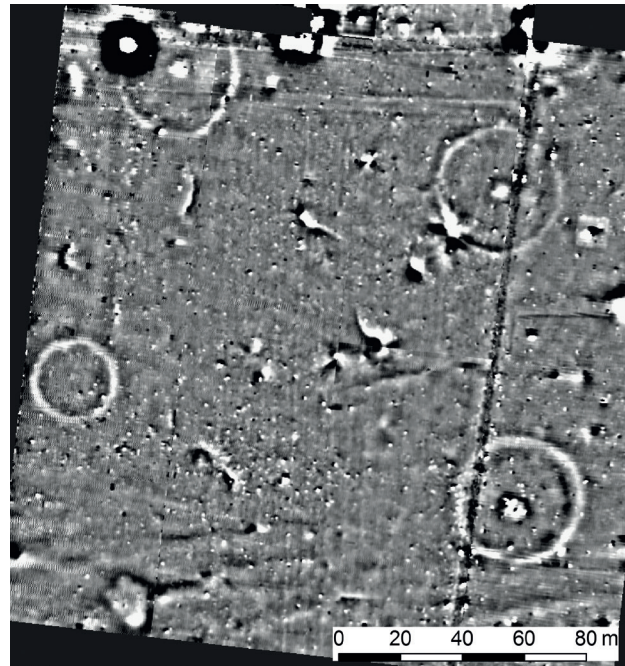
Die funktionale Umnutzung einer Struktur hat ebenfalls eine Überprägung derselben zur Folge¹⁶¹. Moderne Beispiele im Untersuchungsgebiet sind vermutete Meilerplattformen, die in Wendepunkte oder Kreuzungen moderner Forststraßen integriert wurden¹⁶². Gruben und Gräben werden im Wald teilweise genutzt, um Abfallholz der Holzproduktion zu entsorgen. Ein gut erkennbares Beispiel einer Überprägung im Untersuchungsgebiet ist ein Weg, welcher durch einen ehemaligen Befestigungsgraben einer Motte verläuft (Abb. 38).

7.5.3.1 Überprägung durch die Landwirtschaft

Als Überprägung kann auch die gezielte oder als Folge der Landnutzung auftretende Zerstörung archäologischer Strukturen gewertet werden. Langjährige landwirtschaftliche Tätigkeiten haben oftmals eine großflächige und extreme Überprägung ehemaliger Kulturlandschaften zur Folge. Neben der erodierenden Wirkung des Pfluges, welcher das Relief glättet, wurden zahlreiche archäologische Denkmäler wie Grabhügel oder Befestigungen für eine bessere Landnutzung eingeebnet¹⁶³. Als Beispiel sei im Arbeitsgebiet eine Grabhügelnekropole genannt, die sich in Luftbildern und Magnetikmessungen gut sichtbar abzeichnet¹⁶⁴ (Abb. 39). Im DTM ist sie jedoch nicht erkennbar. Nur in seltenen Fällen wie jenem der Heuneburg¹⁶⁵ wird die Einebnung von Kulturdenkmälern vor dem 20. Jahrhundert in schriftlichen Quellen dokumentiert sein. Das Auffinden dieser Quellen ist zudem mit erheblichem Aufwand verbunden.

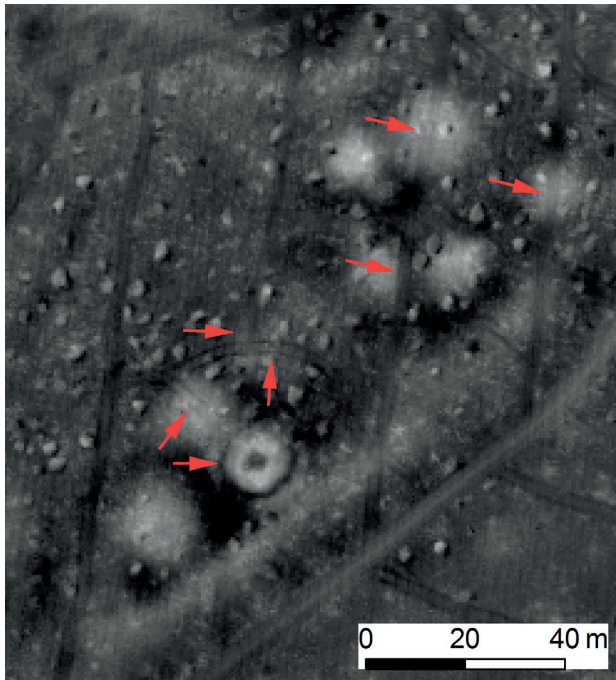
7.5.3.2 Überprägung durch Forstwirtschaft

In bewaldetem Gebiet sind archäologische Strukturen durch die Forstwirtschaft zunehmend von Überprägung und Zerstörung gefährdet. Neben der Anlage von Forststraßen stellen vor allem die Rückewege in den



39 Magnetikmessung. Es zeichnen sich deutlich die Umfassungsgräben und die Kammern von vier Grabhügeln ab.

- 156 Ausgewählte natürliche Merkmale, die in den Visualisierungen archäologischen Strukturen ähnlich sahen, wurden in diesem Projekt ebenfalls kartiert. Diese Vorgehensweise erfordert zwar zusätzlichen Aufwand, verbessert jedoch das Verständnis und die Lesbarkeit komplexer Landschaften. Zudem zeigt die Kartierung dem Bearbeiter und anderen Nutzern der Daten zu einem späteren Zeitpunkt an, dass die entsprechende Struktur während der Untersuchung des Gebiets nicht fälschlicherweise übersehen wurde und keiner weiteren Überprüfung bedarf. Ob eine natürliche Struktur kartiert werden soll oder nicht, wurde individuell nach ihrer Ausprägung und Lage in der Topografie entschieden.
- 157 Im Untersuchungsgebiet erreichten sie eine Ausdehnung von bis zu 30 m Breite.
- 158 DENECKE 1997, 40f.; DONEUS 2013b, 96ff.; MLEKUŽ 2013, 94ff. Wo heute als Motivation für diese Maßnahmen vermehrt der Schutz der Bodendenkmäler im Vordergrund steht, spielte in der Vergangenheit und häufig auch noch heute hauptsächlich der praktische Nutzen eines solchen Vorgehens eine wichtige Rolle, welches als „Nebenprodukt“ die Erhaltung der entsprechenden Struktur zur Folge hat.
- 159 MLEKUŽ 2013, 88ff.
- 160 Vgl. dazu QUASTEN 1997, 20f.
- 161 DONEUS 2013b, 97f. Dazuzuzählen ist auch die Erhaltung und touristische Vermarktung archäologischer Monumente. Diese hat jedoch keinen negativen Einfluss auf die Erkennbarkeit der Strukturen im DTM.
- 162 Eine sichere Identifikation ist in solchen Fällen nur noch über einen Bodeneingriff möglich. Ein Verdachtsfall im Untersuchungsgebiet konnte aufgrund des Straßenbelags nicht überprüft werden.
- 163 HAUPT 2012, 185.
- 164 MÄDER/NAGY 2010, 23f.
- 165 In einem Pachtvertrag hatte sich der Pächter 1804 zur Einebnung der Vorburgwälle der Heuneburg verpflichtet, um zusätzliches Ackerland zu gewinnen. Auf einer Flurkarte um 1800 ist der noch intakte Wall verzeichnet (KURZ 2008, 194ff. sowie Abb. 14).



40 Grabhügelnekropole. An den markierten Stellen werden sie von meist Nord-Süd-verlaufenden Rückewegen (dunkle, lineare Strukturen) überlagert. Die zahlreichen kleinen, schwarz-weißen Anomalien stammen von Wurzeltrichtern umgestürzter Bäume. (Visualisierung: LD).

Wäldern eine Gefährdung dar. Vollernter und andere schwere Maschinen verdichten den Boden und erzeugen tiefe Fahrspuren, welche die archäologische Substanz zerstören. Diese Rinnen lassen sich im DTM über weite Strecken verfolgen. Sie führen auch über archäologische Strukturen wie Grabhügel (Abb. 40) oder Meilerplattformen (Abb. 45, südliche Plattform). In alten Hohlwegen angelegte Rückewege überprägen erstere so stark, dass sich im schlechtesten Fall im DTM nur noch die modernen Radspuren abzeichnen.

7.5.4 Schwach ausgeprägte Strukturen

Eine weitere Schwierigkeit, die häufig auch mit dem Problem der Überprägung verbunden ist, stellen schwach ausgeprägte Strukturen dar. Mit den Visualisierungsmethoden *Local Dominance*, *Local Relief Model* oder auch mit *Sky View Factor* können Geländemerkmale sichtbar gemacht werden, welche weder mit bloßem Auge im Feld noch im Profil des DTM erkennbar waren. Diese Strukturen machen LiDAR als neue Prospektionsmethode speziell interessant, da diese minimalen Reliefunterschiede vor dem Aufkommen von LiDAR-Datensätzen mit keiner Methode erfasst werden konnten. Die geringe Ausprägung macht eine Interpretation jedoch schwierig. Je schwächer eine Struktur ausgeprägt ist, desto schwieriger sind auch seine morphologische Ansprache und die Interpretation. Die Frage, wie stark ein Geländemerkmale ausgeprägt sein

muss, um es kartieren zu können, kann nicht pauschal beantwortet werden. Vielmehr muss jedes Merkmal im Verhältnis zur Topografie und weiteren Strukturen individuell beurteilt werden¹⁶⁶.

7.5.5 Nicht interpretierbare Strukturen

Während der Auswertung der LiDAR-Daten wurden im Rahmen dieses Projekts auch regelmäßig anthropogene Strukturen kartiert, deren Funktion nicht erschlossen werden konnte. Dafür kann es zwei verschiedene Gründe geben. Zum einen können die vorliegenden Informationen zur Interpretation einer Struktur schlicht nicht ausreichen. Dabei handelt es sich zum Großteil um sehr schwach ausgeprägte, lineare Geländemerkmale. Es gibt jedoch auch zahlreiche Fälle, bei welchen mehrere Interpretationen plausibel sind und sich der Bearbeiter nicht festlegen kann. Gruben können beispielsweise das Ergebnis verschiedenster vergangener Aktivitäten sein. Eine Deutung ohne Informationen aus zusätzlichen Quellen fällt damit oftmals schwer.

7.6 Datierung anthropogener Strukturen

Die zeitliche Einordnung anthropogener Strukturen lediglich auf Grundlage der dreidimensionalen Ausprägung im Relief ist nur in seltenen Fällen möglich (Kap. 3.3.2). Es gibt jedoch Möglichkeiten, die zumindest eine Unterscheidung von modernen und archäologischen Strukturen¹⁶⁷ erlauben und damit die für die Archäologie relevanten Objekte des Untersuchungsgebiets identifizierbar machen¹⁶⁸.

Die meisten in dieser Arbeit verwendeten Quellen zur Datierung lagen in digitaler Form vor und konnten mit der verwendeten GIS-Software dargestellt werden. Dieser Umstand ermöglichte eine zeiteffiziente Auswertung. Auf andere Möglichkeiten wie die Datierung mit Schriftquellen oder über Bodeneingriffe wurde aufgrund des enormen Zeitbedarfs verzichtet. Im Rahmen von Forschungsprojekten (Kap. 10) oder bei detaillierten Abklärungen für das Fundstellenmanagement (Kap. 9) stellen die Ergebnisse entsprechender Maßnahmen jedoch wichtige Informationsgrundlagen dar.

7.6.1 Datierung mit alten Karten, Luftbildern oder Höhenmodellen

Historische Karten (Kap. 7.4.2) liefern zahlreiche Hinweise zur groben zeitlichen Einordnung von Wegsystemen. Im Untersuchungsgebiet konnten zudem mehrfach eingetragene Steinbrüche oder Feldgrenzen mit den entsprechenden Strukturen des DTM korreliert werden. Eine relative Datierung landwirtschaftlicher

Strukturen ist durch die Gegenüberstellung mit der auf Karten verzeichneten Landnutzung möglich¹⁶⁹. Rezentere Strukturen können mit dem aktuellen Katasterplan oder über Negativbefunde auf Luftbildern oder in älteren LiDAR-Datensätzen identifiziert werden (vgl. Kap. 7.4.1.2).

7.6.2 Datierung anhand der morphologischen Ausprägung

Lässt sich die Funktion einer Struktur auf Basis ihrer dreidimensionalen Ausprägung ansprechen, kann die Interpretation ebenfalls Rückschlüsse auf eine Datierung ermöglichen. So kann zwar nur selten auf eine bestimmte Epoche geschlossen werden. Häufig jedoch ist es zumindest möglich zu entscheiden, ob eine Struktur modern oder archäologisch relevant ist. Die Holzkohleproduktion beispielsweise wurde nach der Erschließung des Untersuchungsgebiets durch die Bahn aufgegeben (Kap. 10.2), weshalb Meilerpodien in jedem Fall archäologisch sind.

7.6.3 Datierung anhand sich überlagernder Strukturen

Mit LiDAR lassen sich anthropogene Strukturen unterschiedlichster Zeitabschnitte erfassen, die, wurden sie auf demselben Gebiet erstellt, sich überlagern oder schneiden können. Die darin enthaltene Information zur relativchronologischen Abfolge lässt sich in der Regel aus den Visualisierungen herauslesen¹⁷⁰. Ist für eine der zwei Strukturen eine Datierung bekannt, gilt für die andere ein *terminus post quem* beziehungsweise *terminus ante quem*¹⁷¹. Nehmen Geländemerkmale in ihrer Ausrichtung auf einander Bezug wie beispielsweise Feldgrenzen, die an ihren Enden aufeinandertreffen (Abb. 28), deutet dies auf eine zeitliche Zusammengehörigkeit hin¹⁷².

7.7 Organisation im GIS

Die Kartierungen wie auch die anschließende Interpretation wurden in diesem Projekt mit der Software ArcGIS durchgeführt (Kap. 6.1.3). Die effiziente Erfassung von Geländemerkmale und das Verwalten der verschiedenen Layer setzten einen durchdachten Aufbau des GIS-Projekts voraus. Das im Folgenden vorgestellte System wurde während den Kartierungen laufend verbessert und erlaubte ein übersichtliches und effizientes Vorgehen.

7.7.1 Polylinien und Polygone

Die kartierten Strukturen wurden als Polylinien (Rinnen, Rippen, Terrassen- und Geländekante) und Poly-

gone (Hügel, Gruben, Gruben mit Aufschüttung, Plattformen) erfasst. Da im GIS Polylinien und Polygone nicht in demselben Datenset (*Feature Class*¹⁷³) erfasst werden können, wurden für beide Geometrietypen je eine separate *Feature Class* mit identischem Aufbau erstellt¹⁷⁴. Diese waren ebenfalls in der *File Geodatabase* (vgl. Kap. 6.4.1) abgelegt.

7.7.2 Aufbau der Datensets

Wie bereits erläutert, sind Kartierung und Interpretation zwei verschiedene Arbeitsprozesse, die nicht direkt nacheinander erfolgen müssen (Kap. 7.3)¹⁷⁵. Um Anpassungen in der funktionalen Ansprache der Strukturen mit geringem Aufwand vornehmen zu können, wurden alle Strukturtypen, wie bereits im vorausgehenden Unterkapitel beschrieben, im selben

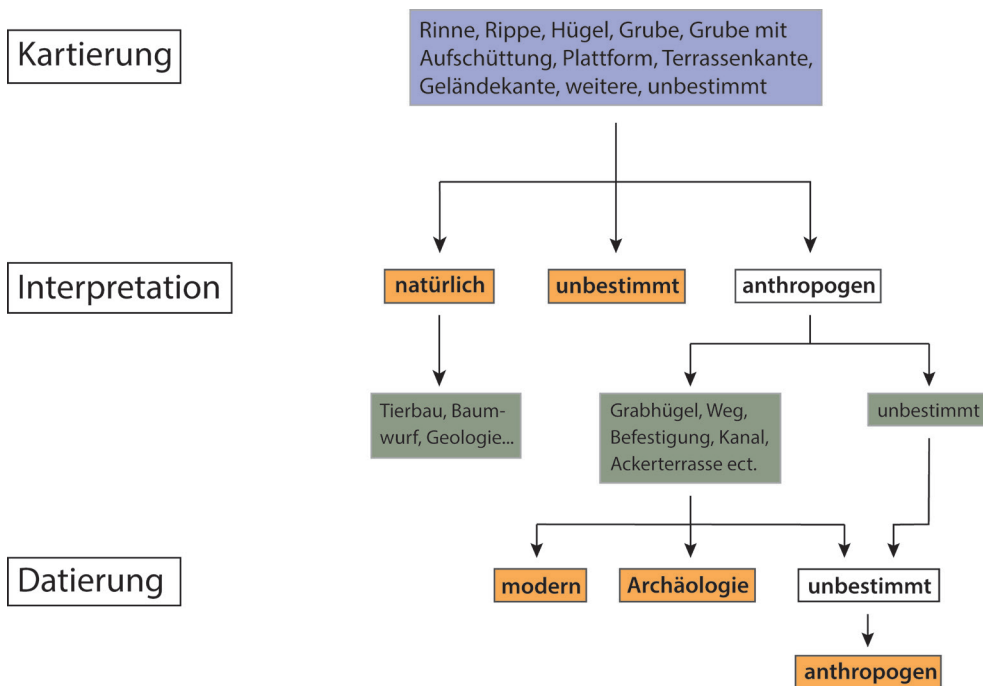
- 166 Für die Anregungen zum Thema sei M. DONEUS gedankt.
 167 Als archäologisch werden Strukturen bezeichnet, die vor dem Jahr 1945 erstellt wurden (Kap. 7.1).
 168 Geländemerkmale, die im Rahmen dieser Auswertung nicht zeitlich eingeordnet werden konnten, wurden weiterhin mit dem neutralen Begriff „anthropogen“ angesprochen (Abb. 41).
 169 Als Beispiel seien Ackerterrassen genannt, die auf bereits in historischen Karten als Waldgebiet gekennzeichneten Flächen liegen oder Feldgrenzen, deren Verlauf jenem auf historischen Karten und dem aktuellen Katasterplan abweichen und damit mit grosser Wahrscheinlichkeit älter sein müssen.
 170 Vgl. dazu eine Abfolge von Terrassen, die von mehreren Wegen geschnitten und von zwei Meilerpodien überlagert wird (Karte 1–9, (2702700/1277900)).
 171 Für eine sichere Ansprache als archäologische und moderne Struktur gibt es zwei mögliche Szenarien. Entweder schneidet eine undatierte Struktur eine moderne Struktur und ist damit jünger, oder erstere wird von einer archäologischen Struktur überlagert beziehungsweise geschnitten und ist damit älter und sicher als Archäologie ansprechbar. Als Beispiel für das zweite Szenario kann ein über historische Karten neuzeitlich datierter Weg genannt werden, der eine undatierte Terrasse schneidet.
 172 Zur chronologischen Aussagemöglichkeit von Luftbildern vgl. DONEUS 2013b, 207f.
 173 ESRI 2014, An overview of the Feature Class toolset.
 174 Lineare Strukturen hätten ebenfalls mit Polygonen erfasst werden können. Abgesehen vom größeren Zeitaufwand für die Kartierung würden diese jedoch aufgrund ihrer geringen Breite ab einem bestimmten Maßstab im GIS nicht mehr dargestellt. Für eine anschließende Auswertung der Kartierungen ist dies nicht zweckmäßig. Dasselbe Problem betrifft auch Polygone, jedoch aufgrund ihrer Ausdehnung ab einem weitaus kleineren Übersichtsmaßstab. Dieses Problem hätte mit der Kartierung der Strukturen in einem Punkt-Datenset behoben werden können, was zudem wesentlich zeitsparender gewesen wäre. In diesem Fall hätte jedoch die Ausdehnung der kartierten Strukturen nicht erfasst werden können.
 175 Erinnert sei an die Überprüfung unsicherer Strukturen im Gelände, welche abhängig von der Witterung und Jahreszeit bisweilen erst Monate nach deren Kartierung im GIS erfolgen kann.

| polygon_lv03 | | | | | |
|--------------|-------------|-------------|---------------------|--|--|
| OBJECTID * | Ebene 1 | Morphologie | Interpretation | Bemerkungen | |
| 416 | Archäologie | Hügel | Grabhügel | auf der Ostseite durch Weg begrenzt. | |
| 418 | unsicher | Hügel | Grabhügel | <Null> | |
| 419 | unsicher | Hügel | Grabhügel | <Null> | |
| 421 | Archäologie | Hügel | Grabhügel | umgestürzter Baum auf dem Hügel | |
| 422 | unsicher | Hügel | Grabhügel | evtl. Bereich eines weiteren Hügels (oder zwei), Relief scheint ni | |
| 425 | anthropogen | Grube | unbestimmt | <Null> | |
| 426 | anthropogen | Grube | <Null> | <Null> | |
| 427 | anthropogen | Grube | Entnahmegrube | <Null> | |
| 428 | anthropogen | Grube | Grabhügel | <Null> | |
| 429 | anthropogen | Grube | Befestigung | <Null> | |
| 430 | anthropogen | Grube | Weg | <Null> | |
| 431 | anthropogen | Grube | Wölbacker | <Null> | |
| 432 | anthropogen | Grube | Meilerpodium | <Null> | |
| 433 | anthropogen | Grube | Parzellengrenze | <Null> | |
| 434 | anthropogen | Grube | umgestürzter Baum | <Null> | |
| 436 | anthropogen | Grube | Drainage/Kanal | <Null> | |
| 440 | anthropogen | Grube | Reservoir | <Null> | |
| 441 | modern | Grube | Geologie | <Null> | |
| 442 | anthropogen | Grube | Totholzhaufen | <Null> | |
| 443 | modern | <Null> | Militär | Funktion nicht bekannt, auf Orthofoto 2011 erkennbar | |
| 444 | anthropogen | Hügel | unbestimmt | grosse Steinansammlung, wahrscheinlich Lesesteinhaufen, könn | |
| 445 | modern | Hügel | Forstwirtschaft | moderne Deponie, aus dem Hügel ragt ein modernes Dartheil her | |
| 447 | anthropogen | Grube | weitere | <Null> | |
| 448 | anthropogen | Grube | Grenzgraben | <Null> | |
| 449 | anthropogen | Grube | Feldgrenze | ca. 0.5 m tief | |
| 450 | anthropogen | Grube | Rebbau | <Null> | |
| 451 | anthropogen | Grube | Ackerterrassenkante | <Null> | |

41 Attributtabelle in ArcGIS.

Datenset kartiert¹⁷⁶. Die morphologische Ausprägung sowie der Strukturtyp wurden als Attribute festgehalten (Abb. 41).¹⁷⁷ Die zeitliche Einordnung der Strukturen (unbestimmt, Archäologie und modern) wurden mit Subtypen¹⁷⁸ in den *Feature Classes* festgehalten und im GIS unterschiedlich eingefärbt dargestellt (Abb. 42). Zeitlich nicht bestimmbar Strukturen wurden weiterhin mit dem zeitneutralen Begriff „anthropogen“ bezeichnet, um bei der Darstellung im GIS Verwechslungen mit funktional unbestimmten Strukturen (Ebene

„Interpretation“, vgl. Abb. 42) zu vermeiden (siehe unten). Natürliche Strukturen wurden ebenfalls als Subtyp gekennzeichnet. Konnte in seltenen Fällen nicht entschieden werden, ob es sich um eine anthropogene oder natürliche Struktur handelt, wurde diese dem Subtyp „unbestimmt“ zugeteilt. Die Hierarchie der Kartierungen (Kap. 7.3) wurde damit im GIS-Aufbau nicht korrekt eingehalten, da zwei unterschiedliche Hierarchieebenen miteinander vermischt wurden (Abb. 42). Mag diese Maßnahme anfangs etwas verwirrend wir



42 Aufbau der Kartierungsarbeiten in seiner Struktur im GIS. Orange markiert sind die als Subtypen festgehaltenen Felder, blau und grün sind zwei Attributfelder.



43 Verwendete Signaturen der GIS-Kartierungen.

ken, beschleunigte sie jedoch die Kartierungen enorm, da damit im GIS eine Hierarchieebene beziehungsweise ein Attributfeld eingespart werden konnte.

Weitere Informationen wurden als Attribute unter „Bemerkungen“ festgehalten¹⁷⁹. In einem separaten Feld wurde erfasst, ob die Interpretation einer Struktur im Gelände überprüft wurde und ob dies zu deren Verifikation geführt hat. Für jede Struktur wurde zudem eine automatisch gemittelte Punktcoordinate gespeichert, welche als Identifizierung der Struktur in Notizen außerhalb des GIS diente¹⁸⁰. Zwei weitere Felder speicherten das Erstellungs- sowie das aktuellste Änderungsdatum einer kartierten Struktur und dienten zur Kontrolle der eigenen Arbeit.

7.7.3 Chronologie im GIS

Bei sich überschneidenden *Geländemerkmale* konnte häufig eine relativchronologische Abfolge erkannt werden (Kap. 7.6.3). Voraussetzung dafür war, dass die Strukturen stark genug ausgeprägt waren, um zu beurteilen, welche die andere überlagerte beziehungsweise schnitt. Um diese Information in den Kartierungen darzustellen, wurden lineare Strukturen an ihren Schnittstellen nicht durchgezogen, sondern jeweils mit Unterbrechungen kartiert.

7.7.4 Aufbereitung der Kartierungen

Um die Darstellung der Kartierungsergebnisse zu optimieren, wurden nach Abschluss der Kartierung die Ergebnisse nach Strukturtyp in neue Datensets gegliedert (siehe Karte 1)¹⁸¹. Die Signatur zeigt die Funktion einer Struktur sowie deren zeitliche Einordnung an (Abb. 43).

7.8 Zusammenfassung

Generell ist es wichtig, vor Beginn eines Kartierungsprojekts genügend Zeit in den Aufbau des GIS und die Organisation der Kartierungsabläufe zu investieren. Je besser die einzelnen Arbeitsschritte geplant sind, desto zeitsparender können im Anschluss die Kartierungen durchgeführt werden. Der in diesem Kapitel beschriebene Aufbau im GIS und das Vorgehen bei der Kartierung hat sich insgesamt sehr bewährt. Unabdingbar

176 Alternativ hätte pro Strukturtyp ein Datenset erstellt werden können. Da die funktionale Ansprache jedoch erst nach der Kartierung der Struktur vorgenommen wird, hätte der entsprechende Eintrag für jede Struktur das Verschieben aus einem Datenset *unbestimmt* (in welche alle Strukturen erst hätten kartiert werden müssen) in jenes des betreffenden Strukturtyps bedeutet. Mit dem in dieser Arbeit verwendeten Aufbau konnte dieser Mehraufwand vermieden werden.

177 Die dafür verwendeten Termini wurden in *Domains* (ESRI 2014, A quick tour of attribute domains) gespeichert und konnten damit aus einer Drop-down-Liste ausgewählt werden. Dieses System erlaubte, Neueinträge und Änderungen sehr schnell vorzunehmen. Zudem wurde auf diese Weise die Datenintegrität sichergestellt, da Werte, die nicht in der Domain gespeichert waren, nicht ins Attributfeld eingegeben werden konnten.

178 ESRI 2014, A quick tour of subtypes.

179 In diesen Feldern wurde beispielsweise notiert, wenn eine Struktur mit Hilfe einer alten Karte interpretiert werden konnte oder eine Struktur in den Visualisierungen sehr schwach ausgeprägt war.

180 Die automatisch generierte *Object ID* eines *Features* wird neu vergeben, sobald dieses in eine andere *Feature Class* kopiert wird (vgl. Kap. 7.7.4). Zur Identifizierung von Strukturen ist sie deshalb im Rahmen dieses Projekts nicht geeignet.

181 Die Darstellung der verschiedenen Strukturtypen erfolgte mit unterschiedlichen Symbolen. Die zeitliche Einordnung (*Archäologie, anthropogen, modern*) wurde mit verschiedenen Farben dargestellt.

für die Kartierung ist die Untergliederung der Ansprache in Form und Funktion (Abb. 34). Die Erfassung weiterer Attribute ist abhängig von der Zielsetzung und der verfügbaren Zeit des Bearbeiters.

Zur Interpretation der kartierten Strukturen können verschiedene zusätzliche Quellen hinzugezogen werden wie alte Karten, Luftbilder oder bestehende Fundstellenregister. Überprüfungen im Feld tragen wesentlich zum Verständnis der im LiDAR-Scan vorliegenden Geländesituation bei und sind für die funktionale Ansprache bestimmter Geländeformen zwingend, um Fehlinterpretationen zu vermeiden.

Abschließend muss man sich in Erinnerung rufen, dass erfasste Geländemerkmale bereits eine Interpretation des Geländescans darstellen. Während der Kartierung findet eine Selektion aus der Gesamtheit an vorhandenen Strukturen statt, die dem Bearbeiter für die gestellten Zielsetzungen relevant erscheinen. Diese Selektion ist abhängig von der Erfahrung, dem archäologischen Fachwissen und der subjektiven Wahrnehmung des Bearbeiters sowie von der Wahl der verwendeten Visualisierungen (Kap 6.3). Gerade bei schwach ausgeprägten Strukturen werden deshalb von unterschiedlichen Bearbeitern verschiedene Resultate zu erwarten sein. Dasselbe trifft auch auf die funktionale Ansprache der kartierten Strukturen zu.

8 Ergebnisse der Kartierungen

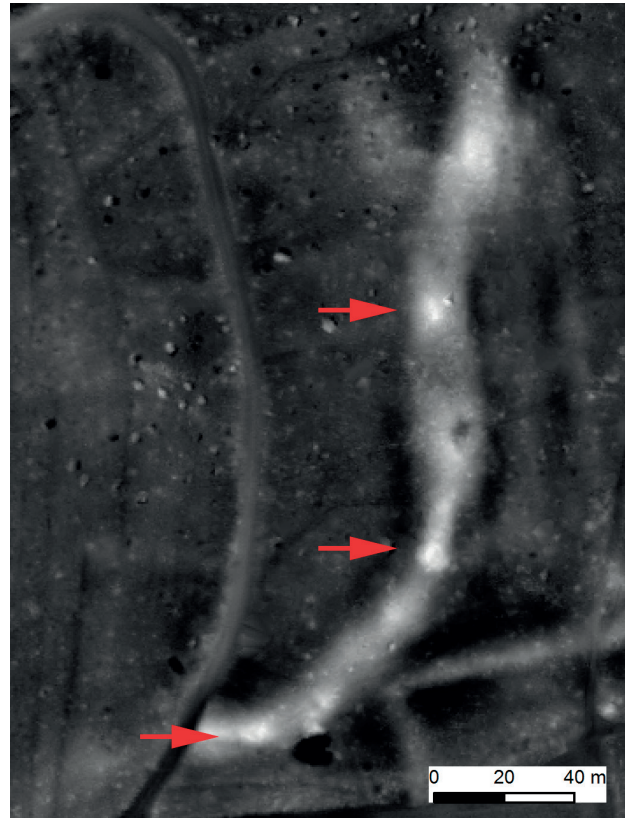
In diesem Kapitel wird aufgezeigt, welche anthropogenen Strukturen sich im Relief des Untersuchungsgebiets abzeichnen und wie diese ausgeprägt sind. Die Ergebnisse der Kartierungen werden nach der Morphologie der kartierten Strukturen geordnet besprochen. Zudem werden die Grundlagen dargelegt, auf deren Basis einzelne Strukturtypen identifiziert werden können. Ein Großteil der behandelten Strukturtypen ist im auf Karte 1 präsentierten Teil des Untersuchungsgebiets vertreten. Ein Abgleich mit den Karten 2–9 zeigt, wie sich die kartierten Strukturen in verschiedenen Visualisierungen äußern. Weitere Bildbeispiele finden sich in den Kapiteln 6 bis 8. Abschließend soll das Potenzial von LiDAR als Prospektionsmethode im Untersuchungsgebiet beurteilt werden.

8.1 Spektrum der Strukturtypen

8.1.1 Hügel

Wie bereits in der Fachliteratur festgestellt, sind Hügel eine sehr unspezifische Form, die durch verschiedene natürliche Prozesse und anthropogene Eingriffe in die Landschaft entstehen können¹⁸². Für eine Interpretation dieser Strukturen bedarf es deshalb meist weiterer Abklärungen im Gelände. Natürliche Hügel können beispielsweise durch die Wurzelsteller alleinstehender, flachwurzelnder Bäume entstehen. Diese nur schwach ausgeprägten Geländemerkmale können große Ähnlichkeit mit stark erodierten Grabhügeln aufweisen. Sie sind jedoch durch eine Feldüberprüfung oder mit Hilfe von Luftbildern, bei denen der Baum im Gegensatz zum DTM sichtbar ist, leicht identifizierbar. Ein größeres Problem im glazial überprägten Untersuchungsgebiet stellt die Unterscheidung von geologischen und anthropogenen Strukturen dar.

An archäologischen Strukturen sind im Untersuchungsgebiet mehrheitlich Grabhügel vertreten. Die Fundstellen waren vor der Auswertung des LiDAR-Datensatzes bereits bekannt, jedoch wurden in den Visualisierungen in mehreren Fällen zusätzliche, noch nicht entdeckte Hügel erkannt (vgl. Kap. 9.3). Der Großteil der Grabhügel befindet sich in erhöhter Lage auf glazialen Strukturen wie Moränen, was die Erkennung schwach ausgeprägter Exemplare in den Visualisierungen teilweise erschwerte (Abb. 44). Totholzhaufen,



44 Auf diesem Höhenzug lassen sich mindestens drei Grabhügel erkennen. Weitere Grabhügel sind möglich, jedoch kann es sich auch um natürliche Ausprägungen des Höhenzugs handeln. Visualisierung: LD.

die ähnlich wie Grabhügel ausgeprägt waren, (Abb. 36) wurden im Feld überprüft oder mit Hilfe des DTM-AV-Höhenmodells identifiziert. Die Lage in der Nähe von Forststraßen ist ebenfalls ein wichtiges Erkennungsmerkmal dieser modernen Strukturen. Weitere moderne Hügelstrukturen im Untersuchungsgebiet stellen Reservoirs oder Militärbunker dar.

8.1.2 Gruben

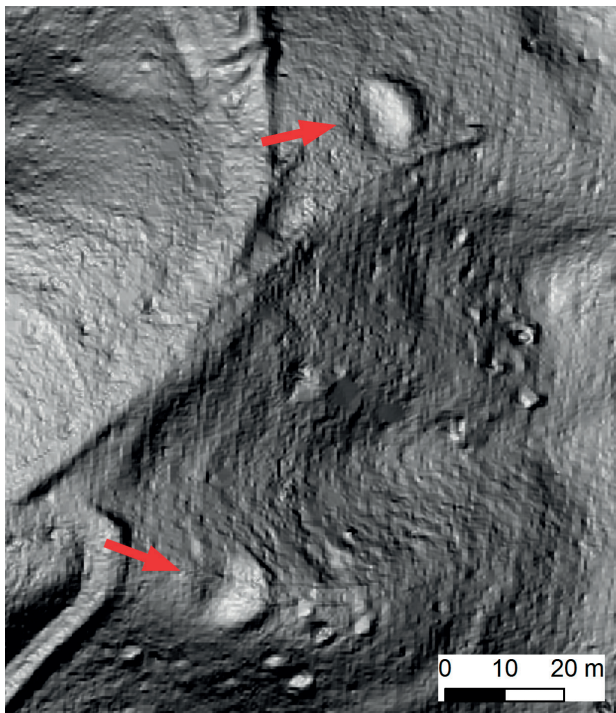
Gruben lassen sich in der Regel sehr sicher als anthropogene Merkmale ansprechen. Der Großteil der kartierten Strukturen im Untersuchungsgebiet kann als Materialentnahmegruben interpretiert werden. Die abgebauten Rohstoffe dürften sich mit wenigen Ausnahmen auf Sand, Kies und andere glaziale Sedimen-

182 DONEUS/BRIESE 2006a, 100; HESSE 2010, 70; Hesse 2013, 179.

te beschränken. Entsprechende Vorkommen sind im Zürcher Weinland überall vorhanden¹⁸³. Die Datierung größerer Entnahmegruben kann mit Hilfe von historischen Luftbildern oder alten Karten vorgenommen werden, auf denen Abbaustellen verzeichnet sind¹⁸⁴. Mit Ausnahme der Entnahmegruben war die funktionale Ansprache einzelner Gruben ohne zusätzliche Informationsquellen im Untersuchungsgebiet nicht möglich (vgl. Kap. 7.5.5).

8.1.3 Gruben mit Aufschüttung

Diese Geländeform wurde hauptsächlich wegen umgestürzter Bäume definiert. Sturmereignisse können durch die Entwurzelung zahlreicher Bäume das Mikrorelief einer Landschaft nachhaltig überprägen.¹⁸⁵ Aus dem Boden herausgerissene Wurzelteller können beachtliche Maße erreichen und werden durch Überwachsen neuer Vegetation dauerhaft ins Relief integriert (vgl. Abb. 40). Die Ausprägung dieser Geländemerkmale in den Visualisierungen ist sehr charakteristisch, sodass sie sich in der Regel leicht identifizieren lassen. Dennoch ist vereinzelt eine Überprüfung im Gelände notwendig, um unsichere Strukturen zu verifizieren. Ebenfalls als Gruben mit Aufschüttung bilden sich Entnahmegruben ab, die zu einem späteren Zeitpunkt als Deponie wiederverwendet wurden und teilweise verfüllt sind.



45 Meilerplattformen in steiler Hanglage. Visualisierung: *Slope*.

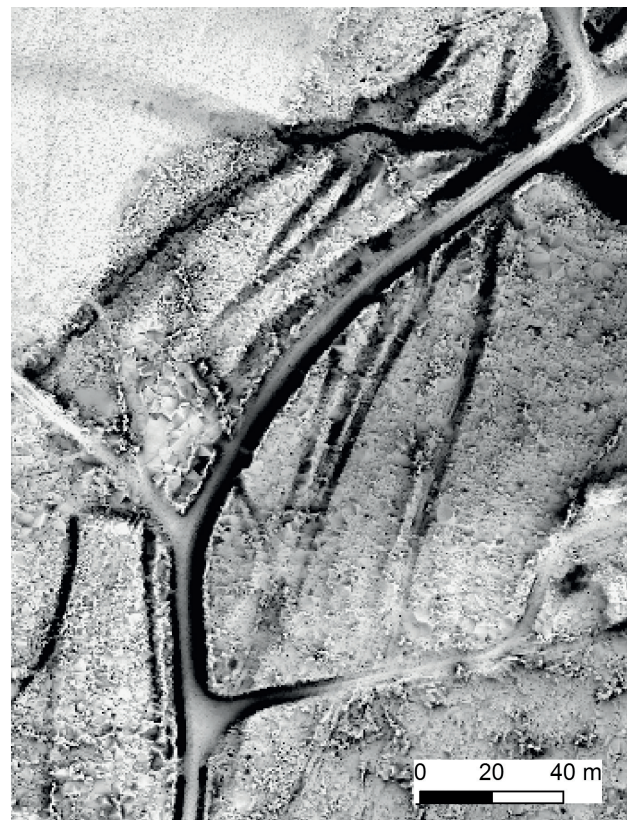
8.1.4 Plattformen

Meilerplattformen sind ein in ALS-Scans häufig verteilter Strukturtyp, der aufgrund seiner charakteristischen Ausprägung relativ sicher identifizierbar ist¹⁸⁶. Es handelt sich dabei um eine horizontale, im Untersuchungsgebiet runde bis ovale Plattform in Hanglage mit einem Durchmesser zwischen 6 und 12 m (Abb. 45). Weitere, sicher als Archäologie ansprechbare Plattformen konnten im Untersuchungsgebiet nicht festgestellt werden.

Bei weiteren Plattformen handelte es sich um durch fehlklassifizierte Punkte veränderte Reliefoberflächen wie umgestürzte Bäume, deren Wurzelteller „weggerechnet“ und die Leerflächen interpoliert wurden (vgl. Kap. 5.4). Dasselbe Muster kann auch bei korrekterweise weggefilterten Gebäuden entstehen. Auch verschiedene moderne Strukturen können sich als Plattformen abzeichnen. Meist sind es Einzelfälle wie Grillplätze, die mit Hilfe des Katasters, Luftbildern oder einer direkt daran anschließenden, modernen Zufahrtsstraße erkannt werden können.

8.1.5 Rinnen

Rinnen machen fast die Hälfte aller kartierten linearen Strukturen aus. Dies hat zum einen mit der Vielfalt an Strukturtypen zu tun, die als Rinne ausgeprägt sind. Zum anderen sind einzelne Strukturtypen sehr zahlreich im Relief vorhanden.



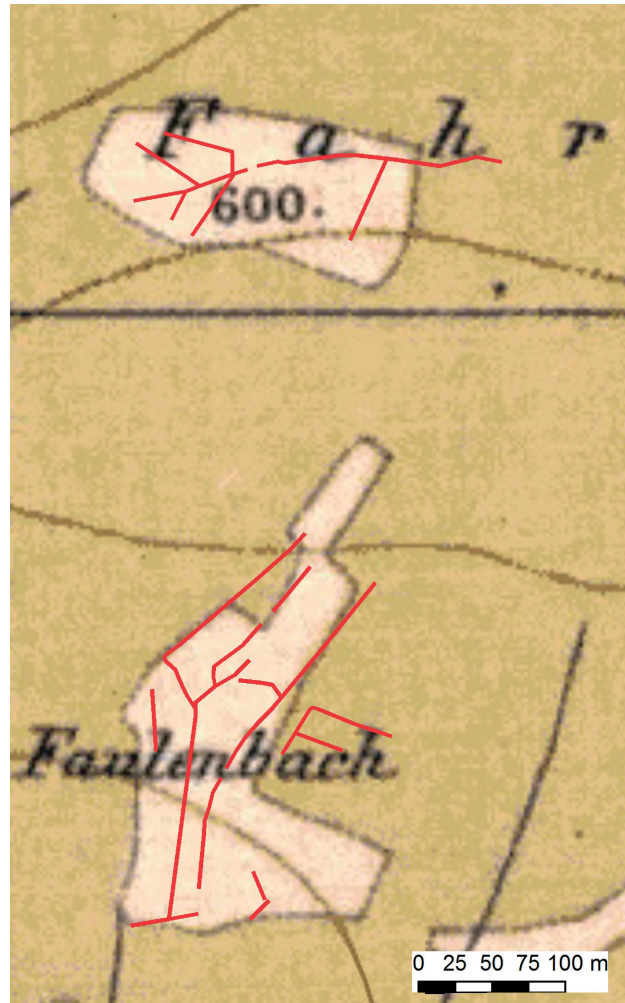
46 Hohlwegsystem, überlagert von modernen Forststraßen. Visualisierung: *SVF*.

Im Untersuchungsgebiet deutlich am häufigsten vertreten sind Wege. Wichtigstes Hilfsmittel zu deren Erkennung sind alte Karten, die auch eine grobe Datierung der Strukturen ermöglichen. Gut ausgeprägte Hohlwege lassen sich auch ohne stützendes Kartenmaterial sicher ansprechen, da keine weiteren Strukturen mit ähnlicher Ausprägung existieren¹⁸⁷. Ältere und lange genutzte Verbindungsachsen sind bei guter Erhaltung als Wegbündel mit mehreren Einzelwegen ausgeprägt (Abb. 46). Ließen sich in historischen Karten keine Hinweise für die Datierung eines Wegs finden, konnte aufgrund seiner Ausprägung, seines Verlaufs sowie seiner Position zu anderen Wegen häufig zumindest die Einteilung in *archäologische* oder *moderne Struktur* vorgenommen werden.

Eine sehr ähnliche Morphologie wie Hohlwege weisen neuzeitliche Grenzgräben auf, welche die Grenzen eines bestimmten Gebiets markierten. Bei den identifizierbaren Exemplaren im Untersuchungsgebiet handelt es um ehemalige oder noch immer bestehende Gemeindegrenzen. Für eine Identifizierung sind Karten unabdingbar. Es ist durchaus möglich, dass in diesem Projekt in Einzelfällen Grenzgräben fälschlicherweise als Wege erfasst wurden.

Ein erstaunlich häufiger Strukturtyp sind Drainagen/Kanäle. Modern angelegte, unterirdische Drainagen auf Agrarflächen bilden sich in LiDAR-Daten kaum ab. Zahlreicher sind ältere, offene Entwässerungskanäle in Waldgebieten, welche zum Teil noch heute ihre Funktion erfüllen. Diese weisen eine ähnliche Ausprägung auf wie Hohlwege. Sie sind jedoch meist durch die etwas tiefere Ausführung, den regelmäßigen und meist geradlinigen Verlauf, ihr Verhältnis zur Topografie oder den Anschluss an Gewässer erkennbar. Die zeitliche Einordnung solcher Strukturen ist nur über Kartenmaterial möglich. In dieser Hinsicht hilfreich war für das Untersuchungsgebiet die historische Gewässerkarte des Kantons Zürich (Kap. 7.4.2.8), die eine Unterscheidung von modernen und archäologischen Strukturen erlaubt. Auch nicht mehr genutzte, verfüllte Kanäle auf Landwirtschaftsflächen ließen sich mit Hilfe dieser Karte identifizieren. In einem Fall konnte ein in heutigem Waldgebiet gelegenes Netz von Drainagen mit Hilfe der Wildkarte und der Siegfriedkarte von 1880 identifiziert und grob datiert werden. Der Bereich des drainierten Gebiets entspricht auf den Karten einer offenen Fläche im Wald, die für landwirtschaftliche Zwecke genutzt wurde (Abb. 47). Auf der jüngeren Siegfriedkarte von 1930 ist die Fläche als Forstgebiet ausgewiesen¹⁸⁸.

Als meist breite Rinnen zeichneten sich Befestigungsgräben in den Visualisierungen ab. Das Vorkommen dieser Befundgruppe beschränkt sich im Untersuchungsgebiet auf vier Fundorte, von welchen drei bereits vor den Kartierungen bekannt waren¹⁸⁹.



47 Kartierte Drainagen (rot), hinterlegt mit der Wildkarte. Waldfläche wird grün, unbewaldetes Gebiet weiß dargestellt.

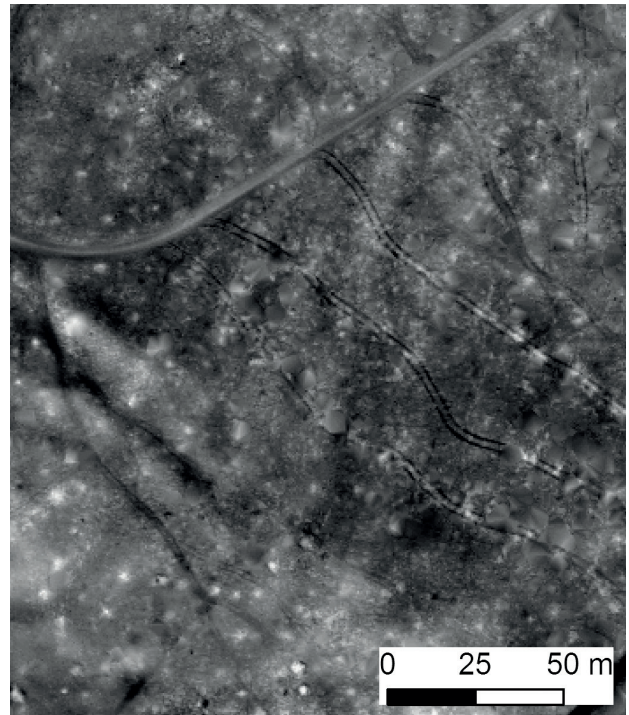
- 183 Meist wurden die Gruben seitlich in die Hänge eingetieft. Zahlreiche kleinere Gruben in der Nähe von Feldwegen lassen vermuten, dass ein Teil der benötigten Baustoffe für die Erstellung der Wege häufig direkt vor Ort abgebaut wurde.
- 184 Aufgrund des großen Zeitaufwands wurde dies in der Arbeit nur in Einzelfällen durchgeführt und der Großteil der kartierten Strukturen als „anthropogen“ markiert.
- 185 Als Extrembeispiel kann der Orkan Lothar aus dem Jahr 1999 genannt werden. Dieser hatte im Arbeitsgebiet starke Schäden angerichtet, welche noch heute im Gelände zu sehen sind.
- 186 HESSE 2010, 70.
- 187 Bei den Kartierungen wurde nicht zwischen Hohlwegen und kaum ausgeprägten, im Gelände mit bloßem Auge nicht mehr feststellbaren Wegen unterschieden, da die vertikale Ausdehnung eines Wegs, abhängig vom geologischen Untergrund, von den Erhaltungsbedingungen und der lokalen Topografie, innerhalb weniger Meter stark variieren kann.
- 188 Dieser Befund passt gut in den historischen Kontext. Mit der Erschließung des Eisenbahnnetzes in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts wurde vermehrt Getreide aus dem Ausland importiert. In der Folge des Preisverfalls nahm der Ackerbau stark ab und wenig ertragreiche Parzellen wurden aufgegeben (FREY 2008, 33ff.; FREY/VOGEL 1997, 263f.).
- 189 Der Vierte bedarf aufgrund der schwachen Ausprägung weiterer Abklärungen.

Sehr häufig auftretende Geländemerkmale sind Spuren moderner Forstwirtschaft. Rückewege, die von schweren Landmaschinen zum Abtransport des Holzes verwendet werden, konnten in fast allen Waldflächen beobachtet werden. Gut ausgeprägte Rückewege sind an den charakteristischen Reifenspuren erkennbar (vgl. Abb. 40 sowie 45)¹⁹⁰. Natürliche Rinnen, die in Geländescans anthropogenen Spuren ähnlich sehen können, sind lediglich Wasserrinnen und kleine Bachläufe. In Landkarten sind Bachläufe häufig eingetragen. Ist eine entsprechende Struktur auf keiner Karte verzeichnet, muss sie im Zweifelsfall im Gelände überprüft werden.

8.1.6 Rippen

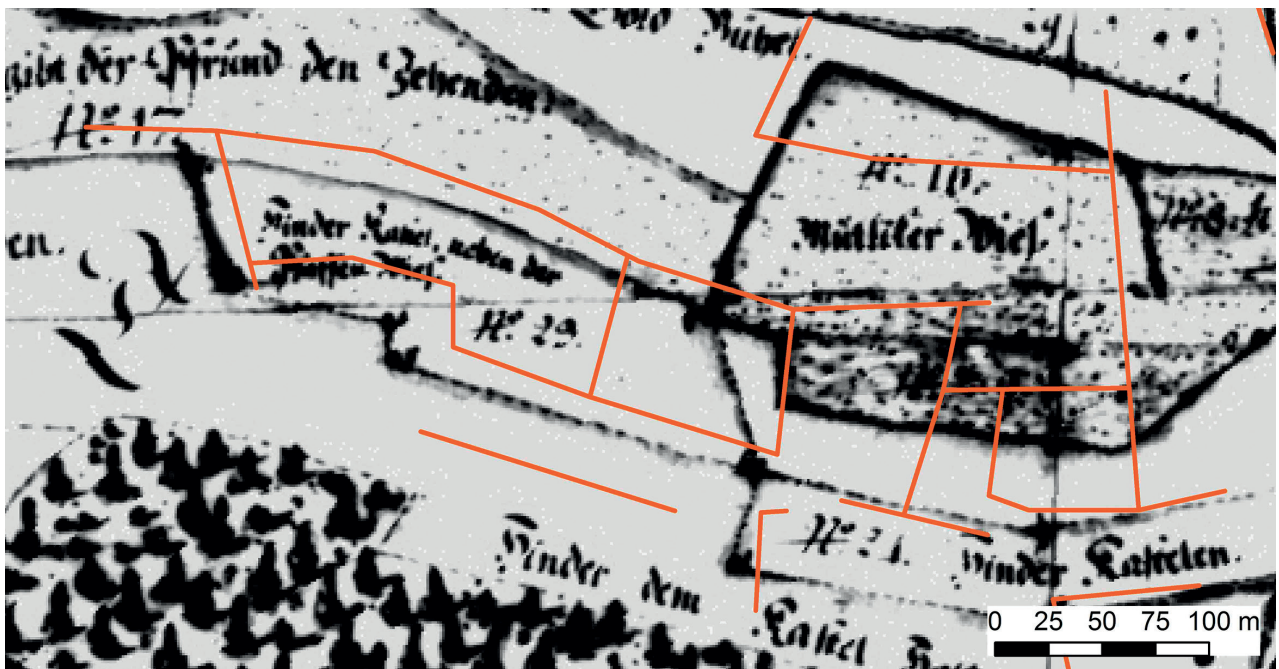
Relikte landwirtschaftlicher Tätigkeit machen den Großteil der durch Rippen im Relief repräsentierten anthropogenen Merkmale aus. Ein prominentes Beispiel sind Wölbäcker, die in großen Teilen Europas vorkommen¹⁹¹ und sich aufgrund ihrer charakteristischen Ausprägung in Geländemodellen sicher erkennen lassen. Im Untersuchungsgebiet ließen sich jedoch nur noch wenige, stark degenerierte Reste solcher Wölbäcker feststellen (Abb. 48). Dies wird auf die intensive ackerbauliche Nutzung des Geländes und die damit verbundene, teilweise gezielte Einebnung des Reliefs zurückzuführen sein¹⁹² (Kap. 7.5.3.1). Eine Schwierigkeit stellt die Unterscheidung zwischen schwach ausgeprägten Wölbäckern und Terrassen in Hanglage dar¹⁹³.

Feldgrenzen¹⁹⁴ sind der deutlich am häufigsten vertretene Strukturtyp auf heutiger landwirtschaftlicher Anbaufläche (vgl. Kap 8.2.2). Ihre Ausdehnung in der



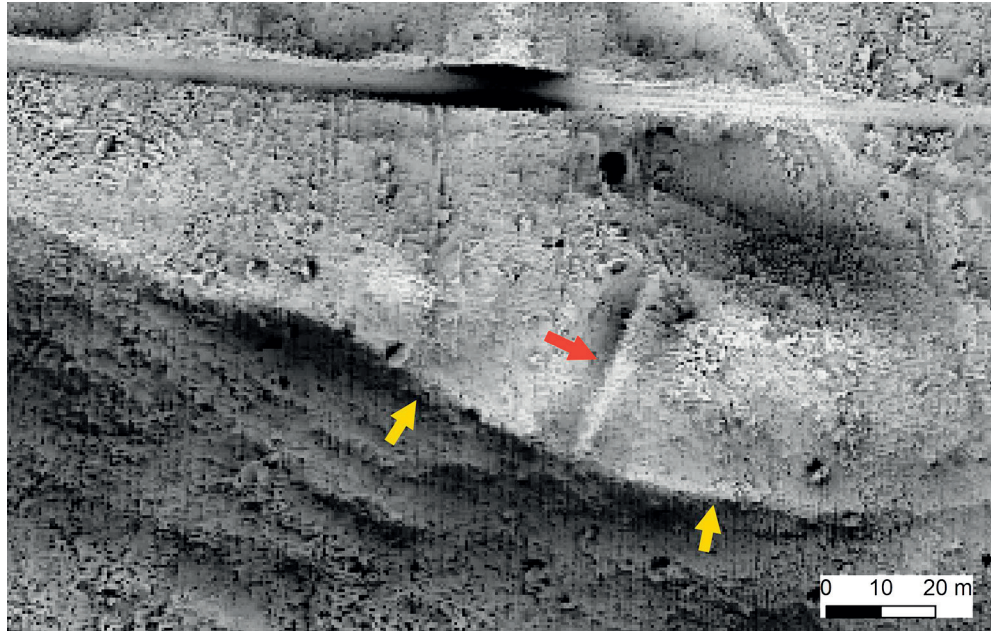
48 Letzte Reste von Wölbäckern in bewaldetem Gebiet. Sie sind als nord-süd-verlaufende, helle Streifen erkennbar. Visualisierung: LD.

Vertikalen beträgt selten mehr als 30 cm, dafür messen sie in der Breite bis zu 25 m¹⁹⁵ (Abb. 26 und 28). Das Alter von Feldgrenzen einzuschätzen ist ohne zusätzliche Hinweise aus Karten oder einen nachweisbaren Bezug zu datierbaren Befunden wie Siedlungen oder Grabhügeln kaum möglich¹⁹⁶. Im Untersuchungsgebiet konnten sie in Einzelfällen mit Einträgen auf Zehntenplänen korreliert werden (Abb. 49)¹⁹⁷. Auf jüngerem Kartenmaterial sind Feldgrenzen nicht ver-



49 Kartierte Feldgrenzen (orange), hinterlegt mit dem Zehntenplan von Ossingen 1777.

50 Abschnittswall quer zum Sporn eines Höhenzugs (rot). Die Südseite (gelb) scheint zudem künstlich abgebösch. Visualisierung: SVF.

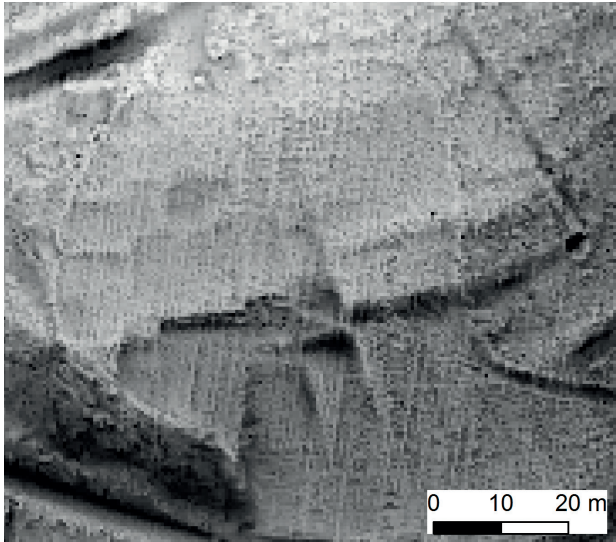


zeichnet. Als Unterstützung kann das Verkehrsnetz zu Hilfe gezogen werden. Feldgrenzen, die sich nicht am Verlauf der Straßen orientieren oder sogar von diesen geschnitten werden, sind entsprechend älter als das auf der vorliegenden Karte verzeichnete Straßennetz (Kap. 7.6.1). Heute nicht mehr genutzte Feldgrenzen, die sich am heutigen Verlauf des modernen Katasters orientieren, wurden als anthropogen markiert, da weder eine moderne noch eine archäologische Datierung ausgeschlossen werden konnte. Genauso wurde mit Feldgrenzen in Waldgebiet verfahren, da es sich dabei auch um moderne Parzellengrenzen handeln könnte.

In unbewaldetem Gelände können Wege und Straßen auf offenem Land ebenfalls als Rippe ausgeprägt sein¹⁹⁸. Die Unterscheidung zwischen Straßen und Feldgrenzen ist problematisch, da deren Morphologie identisch ist. In vielen Fällen wird es zudem zutreffend sein, dass alte Feldgrenzen auch die Funktion der Zugangswege zu den Feldern erfüllten¹⁹⁹, so wie auch zwischen heutigen Ackerflächen Feldstraßen angelegt sein können. Als Wege wurden in diesem Projekt nur jene Rippen markiert, die über historische Karten sicher identifiziert werden konnten²⁰⁰.

Auch Wälle von Befestigungen äußern sich im Relief als Rippen. Im Untersuchungsgebiet sind sie in den Visualisierungen eher schwach ausgebildet und wenig charakteristisch ausgeprägt. Die Ansprache als Befestigung ergibt sich aus dem Verlauf der Rippe im Gelände und in Bezug zur Topografie (Abb. 50)²⁰¹. Ebenfalls verdächtig sind Rippen in Form geschlossener Kreise oder Rechtecke, beziehungsweise wenn sich erhaltene Fragmente zu entsprechenden Formen ergänzen lassen. Sind mehrere Rippen gestaffelt hintereinander angeordnet oder liegen in Kombination mit

- 190 Oft sind mehrere Wege parallel zueinander angeordnet, es gibt jedoch auch Waldstücke, die ohne erkennbare Ordnung erschlossen sind. Die Überprägung von Waldflächen durch die Forstwirtschaft wird in Kap. 7.5.3.2 diskutiert.
- 191 FRIES 1995, 20f. mit weiterführender Literatur; TRÄCHSEL 1962, 20.
- 192 TRÄCHSEL 1962, 26. Im benachbarten Kanton Thurgau haben sich Wölbäcker auf ausgedehnten Obstbauflächen bis heute zahlreich erhalten. Dabei werden die Obstbäume in der Regel in einer Reihe auf dem Scheitel der Ackerwölbung gepflanzt (TRÄCHSEL 1962, 28).
- 193 Fragliche Flächen wurden in diesem Projekt mit Polygonen als *Landwirtschaft allgemein* kartiert.
- 194 Der Begriff wird in dieser Arbeit genutzt für Begrenzungen von Ackerfluren und Waldflächen.
- 195 Verschiedene Möglichkeiten, die zur Entstehung erhöhter Feldgrenzen führen können, werden von DENECKE (1979, 424ff.) und BECKER (1998, 106ff.) besprochen. Die zum Teil erstaunliche Breite der Strukturen wird auf jüngeren Ackerbau und die Verschleifung durch den Pflug zurückzuführen sein.
- 196 FRIES 1995, 12.
- 197 Das Erstellungsjahr der Karte stellt damit ein *terminus ante quem* für die Entstehung der Feldgrenze dar. In dieselbe Zeit oder früher werden Feldgrenzen mit sehr unregelmäßigem Verlauf datieren, welche die damalige Ackerfläche in kleinteilige Polygone unterteilten. Landparzellen in der beschriebenen Ausprägung sind regelmäßig auf Zehntenplänen dokumentiert.
- 198 Hervorgehoben werden wohl nur Straßen, die einen Straßenkoffer aufweisen, welcher die Struktur gegen Erosion und Ackerpflug stabilisiert.
- 199 Bei Zellsystemen, wie sie auf Zehntenplänen abgebildet sind, gab es jedoch auch Ackerfluren, die nicht an einen Weg angeschlossen waren. Der Zugang zu diesen Parzellen erfolgte in diesem Fall über bestehende Äcker und war durch zeitlich befristete Überfahrtsrechte geregelt (BECKER 1998, 54ff.; NÜESCH 1969, 14f.).
- 200 Dabei handelt es sich hauptsächlich um wichtige Verbindungen zwischen Ortschaften.
- 201 Dies können zum Beispiel Spornlagen sein.



51 Spuren ehemaligen Rebbaus. Visualisierung: SVF/positive Openness.

einem Graben vor, so ist die Deutung als Befestigung sehr wahrscheinlich. Dieselben Erkennungsmerkmale gelten auch für die Identifizierung von Befestigungsgräben (Kap. 8.1.5).

Ehemalige Rebgebiete hinterlassen im Relief wenig charakteristische Spuren. Eine erfolgreiche Zuweisung von Rippen im Gelände erlauben historische Karten, auf welchen Rebgebiete eingetragen sind. Ein weiteres Kriterium ist die Ausrichtung des Geländes nach Süden, welches jedoch nicht zwingend ist²⁰². Die Strukturen und die damit begrenzten Flächen können sehr kleinteilig und verwinkelt sein (Abb. 51).

8.1.7 Terrassenkanten

Terrassenkanten sind meist an Südhängen überliefert. Der Großteil der Terrassierungen im Untersuchungsgebiet wurde wohl für landwirtschaftliche Zwecke angelegt. Als Ackerterrassenkanten wurden gut ausgeprägte oder stufenweise hintereinander liegende Terrassenkanten kartiert, deren Verwendungszweck für den Ackerbau nahe liegt. Hinweise auf eine Datierung lieferten ein weiteres Mal historische Karten (Abb. 52)²⁰³. Auf landwirtschaftlicher Fläche können historische Luftbilder eine Datierungsgrundlage liefern²⁰⁴. Die Interpretation einzelner, schwach ausgeprägter Terrassenkanten, bei welchen sich auch keine rückseitige Begrenzung der Terrassenfläche feststellen



52 Mehrere Terrassen liegen in spitzem Winkel zueinander. Das Gebiet wird bereits auf der Wildkarte bewaldet wiedergegeben, weshalb die Terrassen älter sein müssen. Auf der westlichsten Terrasse sind mehrere Hohlwege zu erkennen. Visualisierung: SVF.

ließ, stellte eine Schwierigkeit dar. Diese hauptsächlich im Wald erhaltenen Strukturen könnten beispielsweise auf Grundstücksgrenzen oder andere, nicht erschließbare Funktionen zurückgehen²⁰⁵.

Terrassenkanten wurden in der Vergangenheit auch als Befestigungselement eingesetzt, um ein befestigtes Plateau mit einer künstlichen Böschung zu schützen (Abb. 50). Eine entsprechende Interpretation ist vor allem dann wahrscheinlich, wenn bei der entsprechenden Fundstelle weitere Befestigungselemente vorhanden sind, die den Bearbeiter auf den Schutz der befestigten Fläche hinweisen.

Auch auf natürliche Weise können Terrassenkanten entstehen. Glaziale Sedimente sind anfällig für Hangfließen, was in den Visualisierungen schwach ausgeprägten, anthropogenen Terrassen sehr ähnlich sehen kann. Flussterrassen können relativ sicher als natürliche Geländemerkmale identifiziert werden.

8.1.8 Geländekante

Als Geländekanten können sich verschiedenste Strukturen im Relief abzeichnen. Der Großteil der erkannten Strukturen ist der Landwirtschaft zuzuweisen. Neben Rebbau²⁰⁶ zeichnen sich vor allem ehemalige Grenzen zwischen Wald- und Ackerflächen als Geländekanten ab, die mit Hilfe alter Karten erkannt werden können.

8.2 Häufigkeit und Verteilung der Strukturtypen

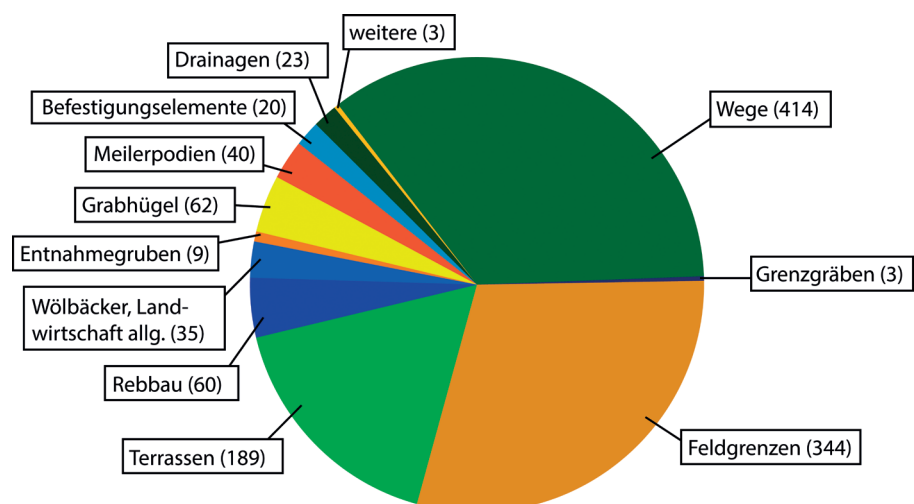
Der Anteil einzelner Strukturtypen an der Gesamtheit der kartierten Geländemerkmale lässt Tendenzen erkennen, welche Strukturen sich häufig in LiDAR-Daten abbilden. Das Untersuchungsgebiet ist mit 51 km² Fläche verhältnismäßig klein und die Verteilung der Strukturen innerhalb des Gebiets unregelmäßig. Zudem ist das Vorhandensein einer Struktur primär von ihrer Er-

stellung und ihrer Erhaltung im Gelände abhängig, was wiederum durch verschiedenste weitere Faktoren wie die Topografie oder den geologischen Untergrund beeinflusst wird²⁰⁷. Die präsentierten Zahlen sind deshalb kritisch zu beurteilen und dürfen nicht auf andere Untersuchungsgebiete übertragen werden. Dennoch lässt der Vergleich der evaluierten Werte einige generelle Beobachtungen zu, welche mit den Ergebnissen der Kartierungen in Baden-Württemberg vergleichbar sind²⁰⁸.

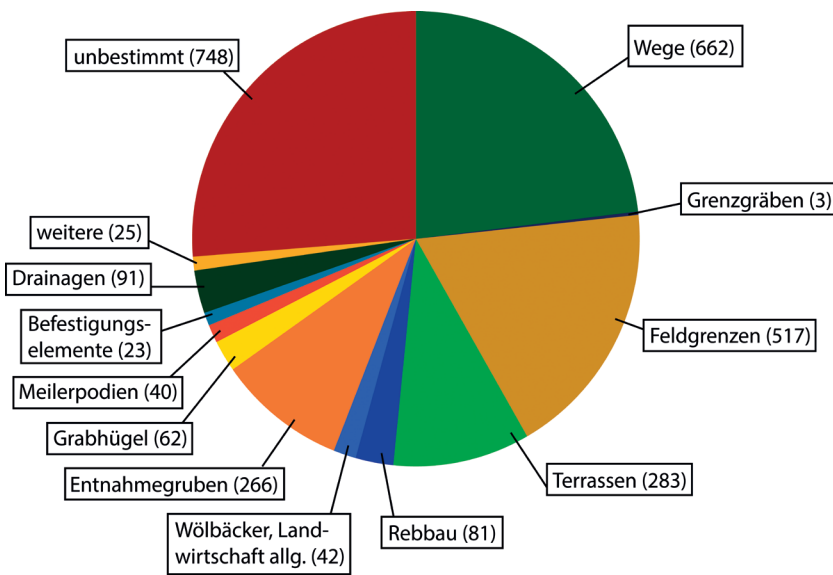
8.2.1 Häufigkeit der Strukturtypen

Abb. 53 zeigt die als Archäologie klassifizierten Strukturen nach Strukturtypen gegliedert. Im Diagramm Abb. 54 wurden zusätzlich noch alle undatierten anthropogenen Geländemerkmale miteinbezogen, da diese ebenfalls archäologischen Ursprungs sein können. Dargestellt ist die Anzahl kartierter Strukturen, nicht die Anzahl Fundstellen²⁰⁹.

- 202 Auf Zehntenplänen eingetragene Rebgebiete zeigen, dass für den Weinanbau auch weniger geeignete Lagen genutzt wurden.
- 203 Befinden sich kartierte Ackerterrassenkanten in einem Gebiet, das bereits seit der Wildkarte bewaldet ist (Abb. 51), sind die Terrassen sicherlich älter.
- 204 Entscheidend sind dabei die Qualität und der Aufnahmezeitpunkt des Fotos sowie die Ausrichtung der Terrasse. Erkennbar sind die Terrassen durch Schattenwurf oder Bäume, die in der steil abfallenden Böschung angepflanzt sind.
- 205 Entsprechende Exemplare wurden deshalb als unbekannt markiert.
- 206 Entsprechende Strukturen wirken auf den ersten Blick wie Terrassenkanten, weisen jedoch nicht zwingend einen horizontalen, sondern teilweise fast vertikalen Verlauf auf. Mit den entsprechenden Geländeeingriffen sollten die Rebflächen möglichst gegen Süden ausgerichtet werden.
- 207 Die Erstellung einer Entnahmegrube hängt beispielsweise vom lokal vorhandenen Rohstoff, von dessen Nachfrage und den Abbauvoraussetzungen ab.
- 208 HESSE 2013, 117ff.
- 209 Eine Befestigung bestehend aus Wall und Graben wurde als zwei Einzelstrukturen kartiert und wird in der Statistik damit doppelt gezählt.



53 Gesamtheit der im Untersuchungsgebiet kartierten archäologischen Strukturen, aufgegliedert nach Strukturtypen.



54 Gesamtheit der im Untersuchungsgebiet kartierten archäologischen und undatierten anthropogenen Strukturen, aufgliedert nach Strukturtypen.

Bei beiden Diagrammen weisen Wege, Feldgrenzen sowie Terrassen einen auffällig großen Anteil an der Gesamtmenge auf. Dies ist nicht weiter verwunderlich, besteht doch bei diesen weitläufigen Geländemerkmale eine erhöhte Chance, dass sich Teile davon bis heute im Relief erhalten haben. Zudem handelt es sich dabei um „zeitlose“ Strukturen, die seit dem Neolithikum immer wieder angelegt wurden²¹⁰. Werden zu den Ackerterrassen und den Feldgrenzen noch die Spuren von Rebbau sowie die unter *Landwirtschaft allgemein* zusammengefassten Geländemerkmale gezählt, so ist knapp die Hälfte aller interpretierbaren Strukturen des Untersuchungsgebiets auf die landwirtschaftliche Nutzung der Landschaft zurückzuführen. Ein weiterer häufiger Strukturtyp ist die Entnahmegrube, die aufgrund ihrer erschwerten zeitlichen Einordnung hauptsächlich als *undatiert* kartiert wurde (Kap. 8.1.2). Alle weiteren Strukturtypen sind in überschaubarer Zahl im Relief überliefert. Vergleichbare Ergebnisse zeigt auch Hesse für seine Kartierungen in Baden-Württemberg²¹¹. Wie derselbe Autor bereits früher festgestellt hat, ist der Großteil der im Relief überlieferten Strukturen auf die Ausbeutung natürlicher Ressourcen zurückzuführen²¹². Dieser Befund hat sich im Untersuchungsgebiet deutlich bestätigt.

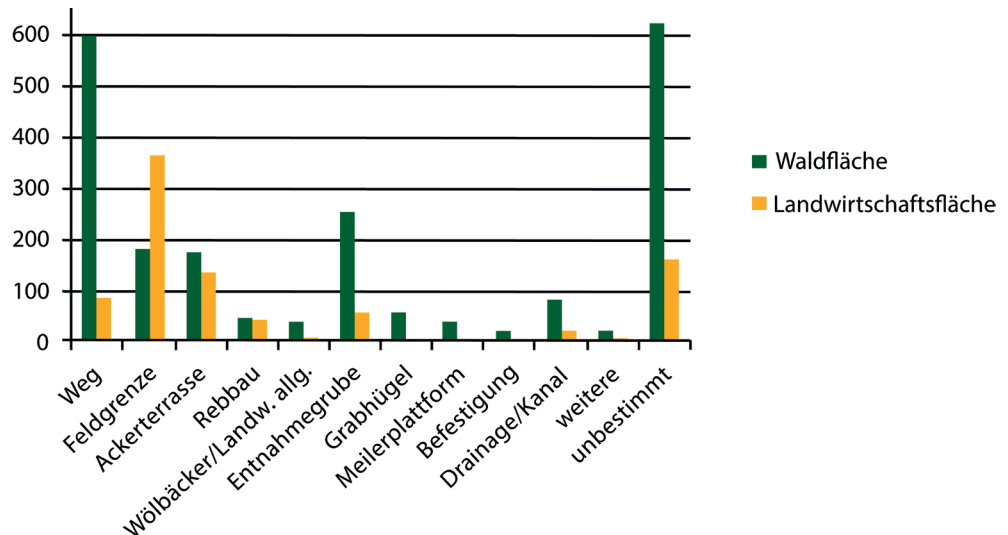
Sicher prähistorische Befunde machen nur einen Bruchteil der Gesamtmenge aus. Dabei handelt es sich um Grabhügel und einige Befestigungen. Die meisten Strukturen werden ein mittelalterliches oder neuzeitliches Alter aufweisen, auch wenn der direkte Nachweis auf Basis der LiDAR-Daten wie bereits besprochen häufig nicht möglich ist (Kap. 7.6). Zurückzuführen ist dieses chronologische Ungleichgewicht auf Erosionsprozesse, denen die jüngeren Strukturen weniger lange ausgesetzt sind²¹³.

8.2.2 Waldflächen versus Ackerland

Aufschlussreich, wenn auch nicht überraschend, ist der Vergleich der kartierten Strukturen auf Ackerland und Waldflächen. Beachtet wurden wie bei der Aufstellung im vorausgehenden Kapitel 8.2.1 die archäologischen, anthropogenen und unsicheren Geländemerkmale. Die landwirtschaftlich genutzte Fläche des Untersuchungsgebiets beläuft sich auf 29,259 km², welcher 15,055 km² Waldfläche gegenüberstehen. Darauf befinden sich 900 beziehungsweise 2146 Strukturen²¹⁴ (Abb. 55). Wird die durchschnittliche Anzahl der Strukturen pro Quadratkilometer berechnet²¹⁵, ergibt dies für Landwirtschaftsflächen 30,9 Strukturen/km² und für Waldflächen 120,2 Strukturen/km². Hauptursache für dieses extreme Missverhältnis sind wie in Kap. 7.5.3.2 bereits angesprochen die Folgen der landwirtschaftlichen Tätigkeit, die zur oberflächlichen Zerstörung und Glättung vieler Strukturen auf Ackerland geführt haben muss. Im Wald wird das anthropogen geschaffene Mikrorelief hingegen durch Überwachsen mit Vegetation besser vor Erosion geschützt²¹⁶.

Abb. 55 zeigt auf, welche Strukturtypen sich im Untersuchungsgebiet auf Ackerflächen abzeichnen. Mit Ausnahme von Entnahmegruben und einigen Kanälen handelt es sich hauptsächlich um positive Geländemerkmale. Speziell hervorzuheben sind Feldgrenzen, die als einziger Strukturtyp auf Landwirtschaftsflächen des Untersuchungsgebiets häufiger vertreten sind als in bewaldetem Gebiet. Terrassen auf Ackerflächen werden zum Teil noch heute in der Landwirtschaft genutzt und haben sich dadurch gut ausgeprägt im Relief erhalten. Eingeebnete Exemplare konnten ebenfalls erkannt werden. Als dritthäufigster Strukturtyp auf Ackerland können alte Wege genannt werden. Wie bereits in Kap. 8.1.6 diskutiert, handelt es sich dabei vor allem

55 Verteilung der kartierten Strukturen auf Wald- und Ackerflächen, aufgliedert nach Strukturtypen.



um wichtige Straßenverbindungen, die häufig auch im IVS verzeichnet sind.

8.2.3 Bereits bekannte Fundstellen

Die Gegenüberstellung von im Fundstellenregister verzeichneten Fundstellen mit den auf Grundlage der LiDAR-Daten kartierten Strukturen erweist sich als schwierig. Dies hat damit zu tun, dass ein Großteil der bekannten Befunde sich nicht mehr im Relief abzeichnen, in besiedeltem Gebiet liegen oder dass es sich um Einzelfunde handelt²¹⁷. Hinzu kommt, dass bekannte Feldgrenzen, Ackerterrassen oder alte Wegsysteme bislang nur vereinzelt im Fundstellenregister der Kantonsarchäologie aufgenommen wurden (Kap. 9.2.2).

Ohne auf die Hintergründe und die oben angesprochenen Faktoren, die zum präsentierten Resultat führten, genauer eingehen zu wollen, soll in diesem Abschnitt das Verhältnis zwischen bekannten Fundstellen

210 FRIES 1995, 135ff.; HAUPT 2012, 172ff.

211 HESSE 2013, 177ff., bes. Abb. 14.8.

212 BOFINGER/HESSE 2011a, 37; BOFINGER/HESSE 2011b, 166.

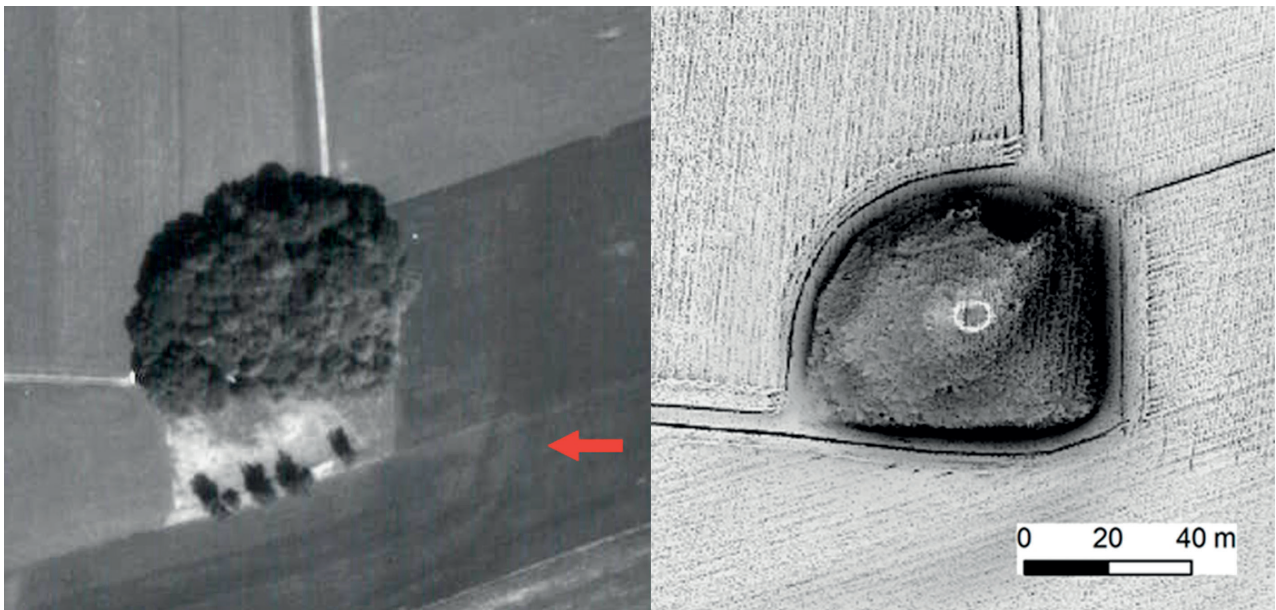
213 DONEUS/BRIESE 2011, 68.

214 Lag eine Struktur auf der Grenze zwischen einem Waldgebiet und Ackerland (z. B. Wege), wurde sie beiden Kategorien angerechnet und damit doppelt gezählt.

215 Angegeben werden die Werte aller kartierten Strukturen unabhängig von ihrer Interpretation.

216 DONEUS/BRIESE 2006a, 100.

217 Vgl. dazu die quantitative Analyse von Hesse für das Bundesland Baden-Württemberg (Hesse 2013, 177).



56 Im Luftbild ist ganz schwach ein doppelter Graben erkennbar (linkes Bild, roter Pfeil). Im LiDAR-Scan (rechts) bildet sich auf dem höchsten Punkt der Erhebung eine Plattform ab. Der Schwarze Fleck im Norden stellt eine wohl moderne Entnahmegrube dar. Visualisierung: SVF.

und neu entdeckten Strukturen in den LiDAR-Daten aufgezeigt werden. Die Daten wurden im GIS erhoben, indem die kartierten Strukturen mit den als Punkte markierten Fundstellen abgeglichen wurden. Von 208 registrierten Fundstellen bilden sich lediglich 21 sicher in den LiDAR-Daten ab. Dabei handelt es sich um Grabhügelnekropolen (10), Befestigungen (5) und Wege (6).

Zusätzlich bilden sich in einigen Fällen Strukturen im Geländemodell ab, die mit bekannten Fundstellen in Verbindung gebracht werden können und diese ergänzen. Auf Orthofotos aus dem Jahr 1981 zeichnen sich beispielsweise Teile eines doppelten Grabens ab, die um eine zwölf Meter hohe Geländeerhebung führen (Abb. 56). Im Geländescan ist dieser nicht als solcher erkennbar. Dafür kann auf dem höchsten Punkt der komplett bewaldeten Erhebung eine ovale Plattform erkannt werden. Es könnte sich hierbei um den Standort einer Motte handeln.

8.3 Zusammenfassung zum Potenzial von LiDAR in der Archäologie

Die obige Aufstellung hat gezeigt, dass LiDAR im Untersuchungsgebiet vor allem in bewaldetem Gebiet ein hohes Potenzial für den Einsatz als Prospektionsmethode aufweist. Mit einer durchschnittlichen Dichte von 120 kartierten Strukturen/km² ist eine gewaltige Menge an Informationen im Relief gespeichert, die jetzt erstmals flächendeckend erschlossen werden kann. Die Chance, dass sich in landwirtschaftlich genutzten Zonen aufgehende archäologische Befunde erhalten haben, ist deutlich geringer. Größtenteils bilden sich Spuren vergangener landwirtschaftlicher Tätigkeit ab. Potenzielle Grabhügel, Befestigungen oder Wölbäcker sind meist so schwach ausgeprägt, dass für eine zuverlässige Einschätzung weitere Abklärungen im Feld oder mit weiteren Prospektionsmethoden wie Magnetik oder Luftbildarchäologie zwingend notwendig sind²¹⁸. Dennoch kann bereits jetzt festgestellt werden, dass LiDAR trotz der schlechteren Erhaltungsbedingungen auch auf landwirtschaftlich genutztem Gebiet eine wichtige Informationsquelle darstellt, mit der viele bislang unbekannte archäologische Strukturen lokalisiert werden konnten.

Der Großteil der kartierten Strukturen wird – vom aktuellen Forschungsstand ausgehend und davon, dass sich aufgrund taphonomischer Prozesse jüngere Geländemerkmale eher erhalten haben als ältere – mittelalterlichen oder neuzeitlichen Alters sein. Mit mehreren Grabhügelnekropolen und mindestens einer (durch Fundmaterial datierten) urgeschichtlichen Befestigung zeichnen sich jedoch auch Fundstellen der Ur- und

Frühgeschichte im Gelände ab. Die Nutzung der zahlreich kartierten Wege und Terrassen kann ebenfalls sehr weit in die Vergangenheit zurückreichen.

Wie bereits angemerkt, dürfen die oben präsentierten Ergebnisse nicht wahllos auf andere Gebiete übertragen werden, da Topografie, Bodenbeschaffenheit, Klima und Landnutzung erheblichen Einfluss auf die Erhaltung archäologischer Strukturen im Relief haben. Aufgrund der vergleichbaren Voraussetzungen dürfen zumindest für das gesamte Schweizer Mittelland ähnliche Resultate erwartet werden.

218 Diese konnten im Rahmen dieser Arbeit nicht vorgenommen werden. Eine umfassendere Beurteilung zum Potenzial von LiDAR auf Ackerflächen des Untersuchungsgebiets bleibt deshalb abzuwarten.

9 LiDAR im Fundstellenmanagement

Wie bereits in Kap. 3.2 angemerkt, werden LiDAR-Daten seit einigen Jahren vermehrt in landschaftsarchäologischen Forschungsprojekten eingesetzt. In der Denkmalpflege werden auf LiDAR-Daten basierende Prospektionsergebnisse im Bereich des Fundstellenmanagements bis jetzt jedoch noch wenig systematisch genutzt²¹⁹. Neben fehlendem Fachwissen zur Auswertung solcher Datensätze mangelt es auch Strategien, wie mit umfangreichen Ergebnissen einer großflächigen LiDAR-Prospektion bestehend aus mehreren tausend kartierten Strukturen verfahren werden soll.

In diesem Kapitel sollen deshalb Möglichkeiten diskutiert werden, wie sich die Prospektionsergebnisse der hier vorgestellten Arbeit ins Fundstellenmanagement eines Denkmalbetriebs einbinden lassen. Die folgenden Ausführungen werden am Beispiel der Kantonsarchäologie Zürich erläutert und nehmen Bezug auf ihre Strukturen des Fundstellenmanagements²²⁰. Dennoch wird der Großteil der Überlegungen allgemein gehalten und kann auch auf andere Denkmalbetriebe übertragen werden. Im Vordergrund steht die effiziente Integration der Ergebnisse aus der LiDAR-Prospektion ins System der Kantonsarchäologie mit dem Ziel, die kartierten Strukturen langfristig zu erhalten und bei konkreter Gefährdung durch ein Bauvorhaben dokumentieren zu können. Es soll daher vorausgehend kurz auf die Arbeitsabläufe im Bereich des Fundstellenmanagements der Kantonsarchäologie Zürich eingegangen werden.

9.1 Fundstellenmanagement der Kantonsarchäologie Zürich

9.1.1 Verwaltung und Schutz archäologischer Befunde

Der Schutz archäologischer Fundstellen wird primär durch das kantonale Planungs- und Baugesetz (PBG) und die zugehörige Natur- und Heimatschutzverordnung (NHV) geregelt²²¹. Das von der Kantonsarchäologie erstellte Inventar potenziell schutzwürdiger Fundstellen basiert auf Archivgrundlagen, die durch Prospektion, Ausgrabungen und Archivrecherchen laufend erweitert und verdichtet werden. Um bei einer Gefährdung eines schutzwürdigen Bodendenkmals durch ein Bauvorhaben rechtzeitig ins Baubewilligungsver-

fahren einbezogen zu werden, wird im vermuteten Perimeter der betreffenden Fundstelle eine *Archäologische Zone* (AZ) definiert. Ist in einer AZ ein Bauvorhaben geplant, leitet die betreffende Gemeinde das Baugesuch an die Baudirektion des Kantons weiter. Als Fachstelle der Baudirektion formuliert die Kantonsarchäologie Auflagen, um für den geplanten Bodeneingriff angemessene Schutz- oder Rettungsmaßnahmen einleiten zu können²²². Diese Auflagen werden von der Baudirektion als (rechtsverbindliche) Verfügung der entsprechenden Gemeinde zugestellt. Welche Hinweise vorliegen müssen, damit ein archäologischer Befund als potentiell schutzwürdig eingestuft und eine AZ erstellt werden kann, wird von der zuständigen Fachperson geprüft und die Entscheidung anschließend von einem Fachausschuss gefällt. Der Kataster der Archäologischen Zonen wird regelmäßig revidiert.

9.1.2 Ereignisse

Alle Ergebnisse archäologischer Tätigkeit (Grabungen, Prospektionsfunde, geophysikalische Messungen, Befunde auf Luftbildern etc.) werden in der Kantonsarchäologie Zürich als einzelne Ereignisse in einer Datenbank dokumentiert. Auf Grundlage dieser Informationen werden Fundstellen (Kap. 9.1.3) erstellt. Eine Fundstelle kann durch ein oder mehrere Ereignisse erforscht worden sein (z. B. mehrere an derselben Stelle durchgeführte Grabungskampagnen). Ein Ereignis kann aber auch Ergebnisse zu mehreren Fundstellen liefern (z. B. großflächiges Prospektionsprojekt mit verschiedenen Einzelbefunden). Für Ereignisse, deren archäologisches Potenzial als gering oder unsicher eingestuft wird, werden keine Fundstellen ausgewiesen.

219 Das bislang größte und in dieser Hinsicht einzigartige Projekt ist die vollständige Kartierung des Bundeslandes Baden-Württemberg (BOFINGER/HESSE 2011a, BOFINGER/HESSE 2011b, HESSE 2013).

220 Für die Erklärungen der internen Strukturen und Abläufe sei P. Nagy, Fachbereichsleiter Urgeschichte/Prospektion sowie R. Wandler, Ressortleiterin Archäologische Projekte der Kantonsarchäologie Zürich, herzlich gedankt.

221 Bes. PBG § 203 und § 204.

222 Dies können baubegleitende Maßnahmen oder eine dem Bauprojekt vorausgehende Ausgrabung sein. Um eine Fundstelle zu schützen, kann ein Baugesuch mit ausführlicher Begründung abgelehnt werden.

9.1.3 Die Fundstelle – Theorie und Praxis

Der Begriff „Fundstelle“ fällt früher oder später in jedem Gespräch, das sich um archäologische Hinterlassenschaften dreht. Die Verwendung des Begriffes ist so selbstverständlich, dass kaum darüber diskutiert wird, was damit gemeint ist. Die Fundstelle dient dem Archäologen dazu, archäologische Relikte räumlich und zeitlich zu gliedern und zu Einheiten zusammenzufassen. Mit anderen Worten handelt es sich um ein administratives, vom Archäologen definiertes Konstrukt, das die Übersicht über die und Verwaltung der archäologischen Befunde gewährleisten soll²²³. Im Fundstellenmanagement der Kantonsarchäologie ist der Schutz eines archäologischen Bodendenkmals direkt mit dessen Ansprache als Fundstelle verknüpft (Kap. 9.1.1). Der Begriff enthält damit in diesem Kontext auch eine qualitative Beurteilung archäologischer Befunde und zeichnet jene aus, die potenziell schutzwürdig sind²²⁴. Im Folgenden soll deshalb kurz auf die Bedeutung des Begriffes „Fundstelle“ im Kontext des Fundstellenmanagements eingegangen werden.

Nach Renfrew und Bahn können Fundstellen als Orte bezeichnet werden, an denen archäologische Funde und Strukturen vorliegen. Vereinfacht ausgedrückt ist eine Fundstelle ein Bereich, in welchem bedeutende Spuren menschlichen Handelns nachgewiesen werden können²²⁵. Die Kantonsarchäologie Zürich stützt sich nicht direkt auf die genannte Definition²²⁶. Sie zeigt jedoch exemplarisch, dass bei der Beurteilung, welche archäologischen Hinterlassenschaften als potenziell schutzwürdige Fundstellen erachtet und geschützt werden sollen, durch die vage Formulierung der Definition relativ viel Spielraum vorliegt. Beschränkte finanzielle Mittel erfordern eine Priorisierung auf einen Bruchteil des gesamten archäologischen Erbes, das betreut werden kann. Welche Hinweise und Merkmale für die Erstellung einer archäologischen Fundstelle erforderlich sind, hängt schlussendlich von den zuständigen Bearbeitern sowie aktuellen Forschungsstrategien und -schwerpunkten ab. Es gibt Befunde, deren Bezeichnung als Fundstelle wohl von keiner Seite angezweifelt wird. Dazu zählen unter anderem Befestigungswerke, Grabhügel, Siedlungsreste oder eine Deponierung. Schwieriger ist die Beurteilung von Einzelfunden, beispielsweise einer Silexpeilspitze, einer Münze oder wenigen Keramikscherben, die in einem Acker an die Oberfläche gepflügt wurden. Dabei kann es sich um zufällige Verlustfunde ohne weiteren Kontext handeln²²⁷, genauso gut können sie jedoch auch der einzige bislang bekannte Anzeiger einer Aktivitätszone wie beispielsweise einer Siedlung oder einer Straße sein. Damit der Kantonsarchäologie genügend Hinweise zur Erstellung einer Fundstelle vorliegen, bedarf ein

solcher Einzelfund häufig weiterer Abklärungen²²⁸ (vgl. Kap. 9.2.1), für die jedoch meist die finanziellen Mittel fehlen. Auch die Ansprache von Befunden auf Luftbildern oder LiDAR-Daten wird ohne klärenden Bodeneingriff und damit ohne direkten Nachweis oft nicht als sicher genug erachtet, um den Befund als Fundstelle auszuweisen.

9.2 Erfassung neuer Fundstellen

Die Einbindung der mit LiDAR entdeckten Strukturen ins beschriebene System des Fundstellenmanagements (Kap. 9.1) ist mit verschiedenen Schwierigkeiten verbunden. Diese sollen im Folgenden besprochen und mögliche Lösungsansätze präsentiert werden. Die Problematik des Begriffes Fundstelle wurde bereits in Kap. 9.1.3 dargelegt.

9.2.1 Sicherheit der Interpretation

Eines der Hauptprobleme bei der Einbindung mittels LiDAR entdeckter Strukturen ins Fundstellenmanagement ist die Sicherheit der Interpretation²²⁹. Analog zu den Ergebnissen aus der Luftbildarchäologie erachtet die Kantonsarchäologie Zürich einen Hinweis aus LiDAR-Daten in der Regel nicht als ausreichend für die Erstellung einer neuen Fundstelle²³⁰ (Kap. 9.1.3). Zudem erschließt sich besonders bei Elementen der Kulturlandschaft (Kap. 9.2.2) die Bedeutung der Strukturen erst in einem größeren Kontext²³¹. Zusätzliche Abklärungen mit Hilfe weiterer Prospektionsmethoden, historischen Quellen oder kleinerer Bodeneingriffe werden vorausgesetzt, um die Sicherheit der Ansprache zu steigern. Erst mit einer verdichteten Informationsgrundlage kann die entsprechende Struktur als Fundstelle registriert werden. Sondierungen zur Überprüfung von potenziellen Strukturen sind aus Kostengründen jedoch nur in Ausnahmefällen realistisch.

Lösungen zu dieser Problematik sind derzeit kaum in Sicht. Zunehmend stellt sich jedoch die Frage, ob der oben beschriebene Ansatz nicht überdacht werden sollte. Prospektionsmethoden wie LiDAR oder Luftbilder, welche die Erforschung archäologischer Relikte ohne Bodeneingriff ermöglichen, werden in Zukunft in zunehmendem Maße verfügbar sein²³². Um das Potenzial dieser Quellen in einem Denkmalamt nutzen zu können, müsste dem Aussagepotenzial dieser Methoden im Vergleich zu Sondierungen oder Ergebnissen von Feldbegehungen mehr Gewicht verliehen werden²³³. Ein Kompromiss zum zwingenden Bodeneingriff könnte eine Intensivierung der Feldbegehungen darstellen, welche auch ehrenamtliche Mitarbeitern durchführen

können. Flächen, die in den LiDAR-Visualisierungen ein hohes archäologisches Potenzial aufweisen, könnten so gezielt abgesucht werden. Die entsprechenden Areale würden bereits während der Auswertung des Geländescans markiert und die Ergebnisse im GIS-Browser intern zur Verfügung gestellt. Auf diese Weise wären die Daten auch für die Routenplanung zukünftiger Luftbildflüge verwendbar.

Eine weitere Schwierigkeit bei der Einarbeitung von Ergebnissen einer LiDAR-Prospektion in eine Fundstellendatenbank ist die Gliederung mehrerer Strukturen zu einer Fundstelle²³⁴. Eine Fundstelle umfasst in der Regel nicht nur eine, sondern mehrere Strukturen. Nahe beieinanderliegende Geländemerkmale können jedoch nicht ohne weitere Abklärungen miteinander in Zusammenhang gebracht und als Fundstelle zusammengefasst werden, da sie auch zeitlich unabhängig voneinander entstanden sein können²³⁵. In manchen Fällen wird man anhand ihrer Lage für einen Zusammenhang der Strukturen argumentieren können wie bei Feldgrenzen, die genau an ihren Enden aufeinandertreffen oder bei mehreren hintereinander angelegten Wall-Graben-Elementen. Für viele kartierte Geländemerkmale ist dies jedoch nicht möglich. Diese Ausgangslage erschwert die Gliederung der Kartierungen. Die Beantwortung der Frage, wie eine kontinuierlich erfassbare Kulturlandschaft (siehe auch Kap. 9.2.2) in ein fundpunktorientiertes Archivsystem integriert werden kann, bleibt eine große Herausforderung des Fundstellenmanagements²³⁶.

9.2.2 Elemente der Kulturlandschaft

Unter *Elemente der Kulturlandschaft* werden in dieser Arbeit anthropogene Strukturen verstanden, die in Zusammenhang mit der Land- und Bodennutzung stehen und sich abseits der „klassischen“ archäologischen Fundstellen wie Siedlungen und Gräberfeldern befinden²³⁷. Es handelt sich dabei um Geländemerkmale, die bei der Produktion von Gütern, dem Abbau von Rohstoffen sowie deren Transport entstanden. Mit LiDAR lässt sich eine ganze Bandbreite solcher Strukturen abbilden. Dazu gehören Relikte landwirtschaftlicher Tätigkeit (Feldgrenzen, Terrassen, Wölbäcker, Kanäle und Drainagen), Spuren ehemaliger Rohstoffgewinnung (Meilerpodien, Materialentnahmestellen, Öfen) oder historische Wegsysteme (vgl. Kap. 8.1).

Mit dem neuen LiDAR-Datensatz lassen sich diese Strukturen erstmals flächendeckend für das gesamte Gebiet des Kantons Zürich fassen. Ihre Kartierung am Computer erfordert im Vergleich zur Aufnahme im Feld nur einen Bruchteil der Zeit. Mit dieser neuen Ausgangslage wäre zu prüfen, ob Elemente der Kulturlandschaft im Rahmen flächendeckender LiDAR-

Prospektion in Zukunft kartiert und ins Fundstellenmanagement einbezogen werden sollen²³⁸. Dass solche Strukturen im Kanton Zürich bislang nur sehr selektiv als Fundstellen erfasst wurden, ist auf mehrere Gründe zurückzuführen. Maßgebend ist sicherlich die fehlende Sicherheit der Interpretation (Kap. 9.2.1) sowie die erschwerte bis unmögliche zeitliche Einordnung. Da die Strukturen meist in Landwirtschaftszonen und Waldgebieten liegen, sind sie eher selten durch Baumaßnahmen gefährdet²³⁹. Zudem handelt es sich um Befunde, bei denen kaum mit Fundmaterial zu rechnen ist, was wiederum ein wichtiges Kriterium zur

223 DUNNEL/DANCEY 1983, 271.

224 Ebenfalls erfasst sind natürlich bereits zerstörte Fundstellen, die durch Ausgrabungen dokumentiert wurden.

225 RENFREW/BAHN 2003, 50.

226 Für die Kantonsarchäologie Zürich ist die Formulierung von Art. 724 im Schweizerischen Zivilgesetzbuch (ZGB) wegweisend: „Herrenlose Naturkörper oder Altertümer von wissenschaftlichem Wert sind Eigentum des Kantons, in dessen Gebiet sie gefunden worden sind.“

227 Spätestens ab dem Mittelalter kann es sich auch um Siedlungsabfall handeln, welcher im Rahmen der Mistdüngung auf Ackerflächen verteilt wurde (Scherbenscheier).

228 Bei ausgewählten Fundgruppen ist die Definition einer Fundstelle auf Basis eines Einzelfundes möglich, beispielsweise bei römischen Münzen.

229 Das Thema wurde bereits eingehender in Kap. 7.5.1 diskutiert.

230 Es gibt sicherlich Ausnahmen für Strukturen, die unzweifelhaft archäologischen Ursprungs sind wie eine Spornlage, die mit einem gut erhaltenen Befestigungsgraben und einem Wall geschützt ist.

231 Beispielsweise wenn Spuren von Ackerbau mit einer Wüstung in Verbindung gebracht werden können. Kann dieser Kontext nicht hergestellt werden, würde dies eine Verwaltung von zahlreichen Einzelstrukturen bedeuten.

232 Die Luftbildarchäologie hat sich im Kanton Zürich bereits zu Beginn der 1990er Jahre etabliert (NAGY 1995, 272ff.).

233 Dieselbe Forderung wurde in Bezug auf die Luftbildarchäologie bereits von BEWLEY (2005, 21) gestellt.

234 In LiDAR-Daten werden keine Fundstellen (zur Definition des Begriffs siehe Kap. 9.1.3), sondern lediglich einzelne Strukturen kartiert.

235 Dieselbe Problematik betrifft auch die Luftbildarchäologie (vgl. WILSON 1982, 190).

236 Vgl. MCNEARY 2014, 80.

237 BOFINGER/HESSE 2011b, 167. In der englischsprachigen Literatur werden sie auch als *off site* oder *non site evidence* bezeichnet (RENFREW/BAHN 2003, 71).

238 Nach den Gesetzesgrundlagen des Bundes und des Kantons Zürich können Elemente der Kulturlandschaft ebenfalls als Schutzobjekte erachtet werden, die geschont werden müssen (z. B. PGB des Kantons Zürich [vgl. Kap. 9.1.1], § 203: „Schutzobjekte sind: d) Vorgeschichtliche und geschichtliche Stätten und ortsgebundene Gegenstände sowie Gebiete von archäologischer Bedeutung.“)

239 Die schleichende Zerstörung archäologischer Befunde durch Erosion und intensive Land- und Forstwirtschaft stellt natürlich ein großes Problem dar, ist aufgrund limitierter finanzieller Mittel jedoch nur in Ausnahmefällen Anlass für Schutzmaßnahmen.

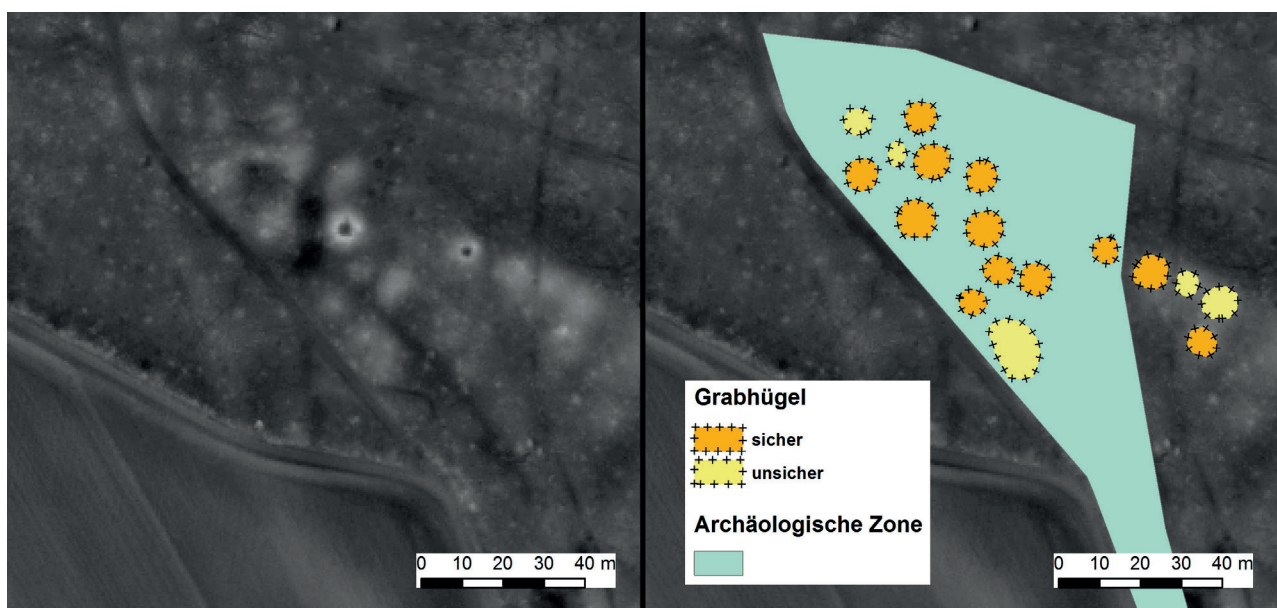
Erstellung einer Fundstelle sein kann (vgl. Kap. 9.1.3). Verglichen mit einem Gräberfeld mit umfangreichen Beigaben werden Strukturen wie Terrassen oder Feldgrenzen deshalb von vielen Archäologen als weniger relevant erachtet. Die meist unklare zeitliche Ansprache sowie die auf den ersten Blick unspektakulären Befunde erschweren insbesondere auch auf politischer Ebene die Rechtfertigung für Maßnahmen zum Schutz dieser Geländemerkmale²⁴⁰.

Zweifellos macht es keinen Sinn, alle Elemente der Kulturlandschaft erhalten zu wollen²⁴¹ oder jede Struktur im Rahmen einer Rettungsgrabung zu dokumentieren. Die Erstellung einer Fundstelle und einer darauf aufbauenden Archäologischen Zone ist damit für den Großteil dieser Strukturen aufgrund der oben genannten Gründe hinfällig. Dennoch sind solche Strukturen wichtiger Bestandteil der Kulturlandschaft und ihre Erfassung essenziell für die Beantwortung verschiedenster landschafts- wie auch siedlungsarchäologischer Fragestellungen. Es ist deshalb wichtig, sie während der Auswertung eines LiDAR-Datensatzes wie auch weiterer Prospektionsmethoden bestmöglich zu dokumentieren und die Ergebnisse der Forschung zugänglich zu machen. Für gut erhaltene Strukturen, die bedeutende Zeitzeugen eines bestimmten Zeitabschnitts und für die Kulturlandschaft einer Region prägend sind, ist zudem zu überlegen, ob diese selektiv unter Schutz gestellt werden sollen. Auf Basis der Ergebnisse der LiDAR-Prospektion könnten prägende Elemente einer Region identifiziert und als (undatierte) schutzwürdige Fundstellen ausgewiesen werden²⁴². Dies würde den Erhalt ausgewählter Elemente der Kulturlandschaft für zukünftige Generationen fördern²⁴³.

Eine weitere wenn auch weniger realistische Möglichkeit, bedeutende Elemente der Kulturlandschaft unter Schutz zu stellen, wäre ein vom Bund erstelltes Inventar. Dies wurde zumindest in kleinem Rahmen für die Verkehrswege mit dem Inventar historischer Verkehrswege (IVS, Kap. 7.4.2.9) bereits gemacht. Kantone und Gemeinden sind vom Bund verpflichtet, bei der Erfüllung ihrer Aufgaben das IVS zu berücksichtigen.

9.3 Ergänzung bestehender Fundstellen

LiDAR-Daten stellen eine hervorragende Grundlage zur Überprüfung und präzisen Georeferenzierung bereits bestehender Einträge der Fundstellendatenbank dar²⁴⁴. Der Einsatz lohnt sich vor allem bei ausgedehnten Strukturen wie Grabhügelnekropolen oder Befestigungen. Je nach Aufnahmezeitpunkt und Objekt sind solche Fundstellen unterschiedlich detailliert erfasst. Dies reicht von einer einzigen, grob geschätzten Punkt-Koordinate bis zur ausführlichen zeichnerischen Dokumentation. Mit LiDAR-Daten können in der Dokumentation fehlende räumliche Informationen mit geringem Aufwand erfasst und die Strukturen dreidimensional vermessen werden. Voraussetzung ist jedoch ein im Umgang mit LiDAR-Daten erfahrener Bearbeiter, der den Aufbau sowie die Vor- und Nachteile der verwendeten Visualisierungen kennt (Kap. 3.3 und 6.3). Die durch die Auflösung der Daten bedingte horizontale Ungenauigkeit ist relativ gering und bringt keinen Nachteil im Vergleich mit einer Aufnahme im Feld. Gerade in bewaldetem Gebiet mit oft schlechtem GPS-Empfang und fehlenden Fixpunkten der amtlichen



57 Grabhügelfeld im DTM (zwei Hügel mit Trichterspuren). Die Archäologische Zone (rechtes Bild) deckt nicht alle Grabhügel ab und muss erweitert werden.

Vermessung sind hochauflösende LiDAR-Datensätze eine gute Alternative für eine präzise Vermessung von Geländemerkmale²⁴⁵. Zudem können die Kartierungen auf Basis eines LiDAR-Datensatzes unabhängig von Witterung und Jahreszeit erledigt werden und liegen bereits als digitalisierter Datensatz vor, der direkt mit der Fundstellendatenbank verknüpft werden kann.

Regelmäßig kommt es vor, dass in LiDAR-Daten zusätzliche, bislang aufgrund ihrer schwachen Ausprägung nicht erkannte Strukturen bekannter Fundstellen zu sehen sind. Als Beispiel kann eine Grabhügelnekropole im Untersuchungsgebiet genannt werden. Neben den bisher bekannten fünf Grabhügeln sind in den LiDAR-Daten zusätzlich sieben sichere und weitere fünf mögliche Grabhügel sichtbar. In diesem Fall hat die Neuentdeckung direkte Auswirkungen auf die Archäologische Zone (Kap. 9.1.1), die der neuen Ausdehnung des Grabhügelfelds entsprechend angepasst werden muss (Abb. 57).

9.4 Archivierung großflächiger Kartierungen

Dieses Kapitel befasst sich mit der Archivierung großflächiger Kartierungen, wie sie auch im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurde. Zweifellos stellt dieses Thema eine der größten Herausforderungen bei der Nutzung von LiDAR-Daten in der Archäologie dar. In der Fachliteratur steht bislang die Erhebung von Daten und deren Auswertung im Rahmen spezifischer Forschungsfragen im Vordergrund. Wie sie anschließend abgelegt und für weitere Arbeitsprozesse zugänglich gemacht werden sollen, wird hingegen nicht diskutiert. Zentral bei dieser Aufgabe ist vor allem eine effiziente Bewältigung und Strukturierung der großen Menge an neu kartierten Geländemerkmale.

Auf welche Weise Daten abgelegt werden sollen, ist abhängig von ihrem Verwendungszweck. Aufgrund des Aufgabenbereichs einer Denkmalpflege ist es naheliegend, dass Prospektionsergebnisse von LiDAR-Daten hauptsächlich im Fundstellenmanagement Verwendung finden. Zu diesem Zweck müssen die Daten in der Kantonsarchäologie Zürich in verschiedenen Situationen greifbar sein, die im Folgenden beschrieben werden.

9.4.1 Erstellen einer Fundstelle

Eines der zentralen Argumente für den Einsatz von LiDAR-Daten im Fundstellenmanagement ist die Entdeckung beziehungsweise Erstellung neuer Fundstellen und die Definition darauf aufbauender Archäologischer Zonen (Kap. 9.1.1). Auch in LiDAR-Datensätzen erkennbare Strukturen wie Befestigungen oder Grabhügel weisen ausreichendes archäologisches Potenzial auf, um

als Fundstelle erfasst zu werden (Kap. 9.1.3). Eine Vorselektion, welche Geländemerkmale sich dafür eignen können, wird idealerweise von der Person vorgenommen, die den LiDAR-Datensatz ausgewertet hat. Diese ist bereits mit dem Datenbestand vertraut und wird am besten abschätzen können, welche Strukturen nach vorgegebenen Rahmenbedingungen der Kantonsarchäologie schützenswert sind²⁴⁶. Am besten wird dieser Arbeitsschritt mit derselben GIS-Software und im selben Projekt ausgeführt, in welchem auch die Kartierungen vorgenommen wurden. Die ausgewählten Geländemerkmale können anschließend mit Karten und Text beschrieben werden. Auf dieser Grundlage entscheidet der Fachausschuss über die Aufnahme der betreffenden Strukturen ins Fundstellenverzeichnis und die Erstellung einer Archäologischen Zone²⁴⁷. Die anschließende Dokumentation der neuen Fundstelle erfolgt nach den bestehenden Richtlinien der Kantonsarchäologie.

240 Vgl. Kap. 9.1.1.

241 Neben dem finanziellen Aspekt würde dies auch zu einer weitgehenden Konservierung der Landschaft führen, die eine Weiterentwicklung derselben stark behinderte. Die Erhaltung von Elementen der Kulturlandschaft ist deshalb nur selektiv möglich (Quasten 1997, 25).

242 Mit Bewertungskriterien für die Selektion von schützenswerten Elementen hat sich Quasten (1997, 25ff.) ausführlich auseinandergesetzt. Zur Bewertung wäre für einzelne Strukturen ein Punktesystem denkbar, nach welchem einer Struktur zu verschiedenen Kriterien wie Erhaltung, kulturhistorische Bedeutung oder Gefährdung Punkte vergeben würden. Ein entsprechendes Schema wurde in der Kantonsarchäologie Zürich kürzlich im Rahmen eines Projekts zur Erstellung von Archäologischen Zonen für historische Verkehrswege entwickelt (freundliche Mitteilung M. Stromer).

243 Der Schutz der Strukturen beschränkt sich auf Maßnahmen, die im Fall eines geplanten Bauvorhabens ergriffen werden können (Kap. 9.1.1). Die schleichende Zerstörung durch intensive Landnutzung (siehe oben sowie Kap. 7.5.3.1 und 8.2.2) kann nur durch eine Einschränkung der Bewirtschaftung verhindert werden. Dies ist mit einer vertraglichen Einigung möglich oder kann mit einer Verfügung durchgesetzt werden. Letztere muss jedoch sehr gut begründet werden können.

244 CORNS/SHAW 2013, 155; Hesse 2013, 173ff.

245 Eine Auflösung des Datensatzes von 0,5 m ist dafür ausreichend. Eine Überprüfung der Kartierungen im Gelände ist je nach Struktur von Vorteil, um durch Vegetation hervorgerufene Bildfehler ausschließen zu können (Kap. 7.4.3.2).

246 Zudem ist zu beachten, dass die Datengrundlage zu diesem Zeitpunkt lediglich aus den Kartierungen und dazugehörigen Attributen besteht. Die Visualisierungen und das DTM als dreidimensionale Abbildung der Struktur sind wesentlicher Bestandteil der Beschreibung. Die Auswahl sollte deshalb von einer Person ausgeführt werden, die für den Umgang mit LiDAR-Daten und GIS die entsprechenden Qualifikationen mitbringt.

247 Denkbar wäre auch eine Zwischenstufe für Strukturen, deren Potenzial für die Erstellung einer Fundstelle und/oder einer AZ nicht ausreichend ist, für die jedoch Prospektionen geplant werden, um eine verbesserte Entscheidungsgrundlage zu erhalten.

9.4.2 Stellungnahme zu Baugesuchen

Neben den explizit als Fundstellen erfassten LiDAR-Befunden stellt sich die Frage zur Schutzmöglichkeit der übrigen Strukturen. Eine gute Ausgangslage bieten bereits bestehende Archäologische Zonen (Kap. 9.1.1). Zufällig innerhalb einer bereits bestehenden AZ (also im Perimeter eines anderen, als Fundstelle ausgewiesenen Befundes) gelegene Strukturen mit zu wenig Potenzial zur Erstellung einer eigenen Fundstelle könnten, obwohl sie nicht als schutzwürdig eingestuft sind, im Rahmen einer Baumaßnahme untersucht und dokumentiert werden. Damit kann auch das Wissen zu Strukturen ausgebaut werden, die sich in LiDAR-Daten abbilden, sich während der Auswertung des Datensatzes jedoch nicht interpretieren lassen.

9.4.3 Zugriff auf die Kartierungen

In Denkmalämtern muss der Zugriff auf die Resultate großflächiger Kartierungen durch verschiedenste Personen unterschiedlicher Qualifikationen gewährleistet werden können. Dies erfordert bereits zu Beginn eines Kartierungsprojekts eine entsprechende Strategie, wie die generierten Daten nach Projektabschluss abgelegt werden sollen.

Für die Bearbeitung der in Kap. 9.4.2 beschriebenen Stellungnahmen und die damit verbundene Beurteilung der jeweiligen Situation darf kein Spezialwissen zum Thema LiDAR vorausgesetzt werden. Zudem sollten die Kartierungen ohne die Verwendung von spezialisierter Software abrufbar sein²⁴⁸. Es gibt verschiedene Möglichkeiten, wie die Ergebnisse der LiDAR-Prospektion ins Archiv der Kantonsarchäologie eingebunden werden können²⁴⁹. Wichtig dabei ist, dass dieser Arbeitsschritt aufgrund der großen Datenmenge mit einem möglichst geringen Arbeitsaufwand durchführbar ist. Eine Möglichkeit wäre es, die kartierten Strukturen des gesamten Untersuchungsgebiets als einzelnes Ereignis (vgl. Kap. 9.1.2) zu erfassen oder nach Gemeinden zu gliedern²⁵⁰. In diesem Fall könnten die Strukturen als mit einer Punktkoordinate versehene Einzelbefunde des Ereignisses abgelegt werden²⁵¹. Über eine Verknüpfung zum GIS-Browser lässt sich die räumliche Verteilung jederzeit grafisch darstellen.

Als Alternative könnten die LiDAR-Kartierungen in einer eigens dafür kreierte Datenbank gespeichert werden, die unabhängig von der Fundstellendatenbank betrieben würde. Die Strukturen und die dazugehörigen Attribute wären im GIS-Browser in einem separaten Layer aufrufbar. Aufwändig bei dieser Variante wäre vor allem die Erstellung und die Pflege der dafür benötigten Datenbank. Ein Link zur Fundstellendatenbank wäre aufgrund des Arbeitsaufwandes eher unrealistisch.

9.5 Zusammenfassung

In Kapitel 9 wurden am Beispiel der Kantonsarchäologie Zürich Probleme und Möglichkeiten diskutiert, wie im Fundstellenmanagement Ergebnisse aus der Untersuchung von LiDAR-Daten genutzt werden können. Die Herausforderung besteht hierbei darin, flächendeckende Kartierungen mit einer großen Zahl kartierter Strukturen in ein bestehendes, fundpunktorientiertes System und dessen automatisierte Prozesse zu integrieren.

Für einen flächendeckenden Einsatz von LiDAR als Prospektionsmethode im Fundstellenmanagement wird ein Umdenken notwendig sein; das Aussagepotenzial von LiDAR-Daten sollte im Vergleich zu Bodeneingriffen trotz geringerer Sicherheit stärker gewichtet werden können und vermehrt als Argument für die Erstellung einer neuen Fundstelle gelten dürfen²⁵². Damit verbunden ist die Gefahr, dass auch die eine oder andere Struktur nicht archäologischen Ursprungs fälschlicherweise als Fundstelle registriert wird²⁵³. Mit der Erfahrung des Bearbeiters und entsprechenden Richtlinien kann diese Fehlerquote jedoch niedrig gehalten werden. Um Kartierungen von LiDAR-Daten im Fundstellenmanagement effizient nutzen zu können, muss dieses Risiko von den Verantwortlichen bewusst in Kauf genommen werden. Letztendlich können damit mehr Fundstellen erstellt werden, die allerdings eine geringere Sicherheit der Interpretation aufweisen. Die positive Folge davon wäre ein verstärkter Schutz des archäologischen Kulturguts²⁵⁴. Die Konsequenz der vorgeschlagenen Maßnahmen ist ein erhöhter Bedarf an Arbeitsressourcen in der Fundstelleninventarisierung, der entsprechend abgedeckt werden muss.

Gute Dienste leistet LiDAR bei der Überprüfung und Ergänzung bereits bekannter Fundstellen, deren Befunde sich im Relief erhalten haben. Mit geringem Aufwand können die Befunde auf ihre Georeferenzierung und Vollständigkeit hin unabhängig von Wetter- und Vegetationsverhältnissen zeitsparend am Bildschirm überprüft werden.

Wie Siedlungen oder Gräberfelder sind auch Elemente der Kulturlandschaft (Kap. 9.2.2) wichtige Zeugen menschlichen Denkens und Handelns. Sie erfordern einen planerischen Umgang mit der Kulturlandschaft, der Rücksicht auf diese Strukturen nimmt²⁵⁵. Beim Definieren der Forschungsstrategie in einer Kantonsarchäologie oder einem Denkmalamt sollten Elemente der Kulturlandschaft deshalb ebenfalls berücksichtigt werden. Mit LiDAR-Technologie lassen sich diese Geländemerkmale zum ersten Mal effizient und flächendeckend erfassen. Dies bietet die Möglichkeit, diese Befunde ins Fundstellenmanagement mit-

einzu beziehen. So könnten prägende Elemente einer Kulturlandschaft erkannt, erhalten oder bei drohender Zerstörung erforscht und nicht zuletzt deren Wahrnehmung in der Öffentlichkeit gestärkt werden.

Die Archivierung und der Zugriff von Ergebnissen einer LiDAR-Prospektion ist abhängig vom Aufbau des Fundstellenmanagements und den Arbeitsabläufen in der jeweiligen Denkmalpflege. Die effiziente Nutzung der Daten erfordert ein Konzept, das auf die bestehenden Strukturen des Fundstellenmanagements aufbaut. Die Prospektionsergebnisse sollten soweit aufbereitet sein, dass ein Zugriff darauf ohne Fachkenntnisse zum Thema LiDAR und soweit möglich ohne Spezialsoftware möglich ist.

248 Beispielsweise steht die in diesem Projekt verwendete GIS-Software ArcGIS aufgrund hoher Lizenzkosten nicht jedem Mitarbeiter der Kantonsarchäologie zur Verfügung.

249 Für die zahlreichen Diskussionen und Anregungen zum Thema sei K. Kruse herzlich gedankt.

250 Vgl. Kap. 9.1.1. Dass für jede Struktur ein separates Ereignis erfasst wird, ist aufgrund der damit verbundenen Administration nicht realistisch.

251 Während der Auswertung des LiDAR-Scans erstellte Attribute können über Kommentarfelder abgelegt werden, was auch die Selektion bestimmter Strukturtypen ermöglicht. Zudem besteht die Möglichkeit, den Datensätzen Visualisierungen in Form von Bilddateien anzuhängen, was jedoch mit zusätzlichem Aufwand verbunden ist.

252 Es ist kaum realistisch, dass bei großflächigen Kartierungen alle Strukturen mit ausreichendem archäologischem Potenzial zur Erstellung einer Fundstelle zeitnah durch einen Bodeneingriff überprüft werden können.

253 Vgl. RISBØL et al. 2013, 4689.

254 COWLEY 2013, 26; OPITZ/COWLEY 2013, 7.

255 SCHENK 1997, 3.

10 LiDAR in der Forschung

Wie bereits angesprochen, können Ergebnisse der LiDAR-Prospektion nebst ihrem Nutzen im Fundstellenmanagement auch eine wichtige Quelle für die archäologische Forschung sein. Aufgrund der in Kap. 3.3.2 genannten Beschränkungen sollten LiDAR-Daten immer in Kombination mit anderen Quellen wie den Ergebnissen weiterer Prospektionsmethoden oder Ausgrabungen eingesetzt werden. In diesem Kapitel wird anhand von zwei Beispielen aufgezeigt, wie sich die Ergebnisse des Untersuchungsgebiets in kleinere Forschungsprojekte einbinden lassen. Dabei handelt es sich nicht um abschließende Auswertungen. Vielmehr soll das Forschungspotenzial der vorgestellten Themen aufgezeigt werden, das sich mit LiDAR als neuer verfügbarer Quellengattung ergibt.

10.1 Kriegsschauplatz aus der Helvetischen Republik

10.1.1 Ausgangslage

In der Flur Hebsack nördlich von Trüllikon spürte ein illegaler Sondengänger in einem Waldgebiet in den Jahren 1988 bis 1990 in mehreren Durchgängen ein umfangreiches Inventar an Militaria aus der Zeit der Koalitionskriege auf. Diese Funde wurden im Laufe der

1990er Jahre zusammen mit zahlreichem weiterem Material anderer Fundorte der Kantonsarchäologie Zürich übergeben. Jede Fundstelle wurde vom Sondengänger mit einer Punktcoordinate erfasst, die den ungefähren Standort der Fundstreuung markiert. Die Lage einzelner Funde wurde nicht dokumentiert.

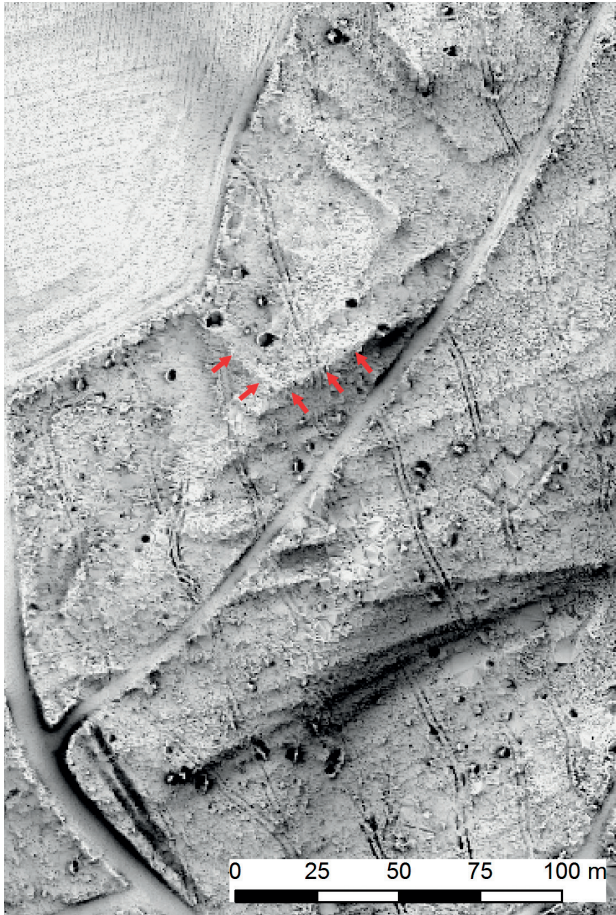
Das Fundmaterial vom Hebsack besteht aus verschiedenen Waffenteilen (Abb. 58), Knöpfen (wovon jeweils mehrere französischen und österreichischen Truppen zugewiesen werden können), Schnallen, russischen Militärabzeichen, mehreren hundert Musketenkugeln und einem stark fragmentierten, russischen Grenadiermützenblech. Die Funde sind nur sehr selektiv restauriert und wurden bislang nicht ausgewertet. Aufgrund des Fundspektrums wird die Fundstelle in der Dokumentation als russischer Wachposten angesprochen.

10.1.2 Befunde im DTM

In den LiDAR-Daten lassen sich im Umfeld der Fundstellencoordinate mehrere unklare Geländemerkmale erkennen. Auffällig ist vor allem eine terrassenartige Struktur (Abb. 59). Anhand der Einbettung der Struktur in der Topografie – sie befindet sich auf einer leichten Spornlage, wobei das Terrain nach Süden und Westen abfällt – kam die Vermutung auf, dass es sich um eine



58 Verschiedene Buntmetallteile von Musketen (Ladestockröhren, Pulverpfanne, Abzugsbügel, Schlossgegenplatte und Messingringe).



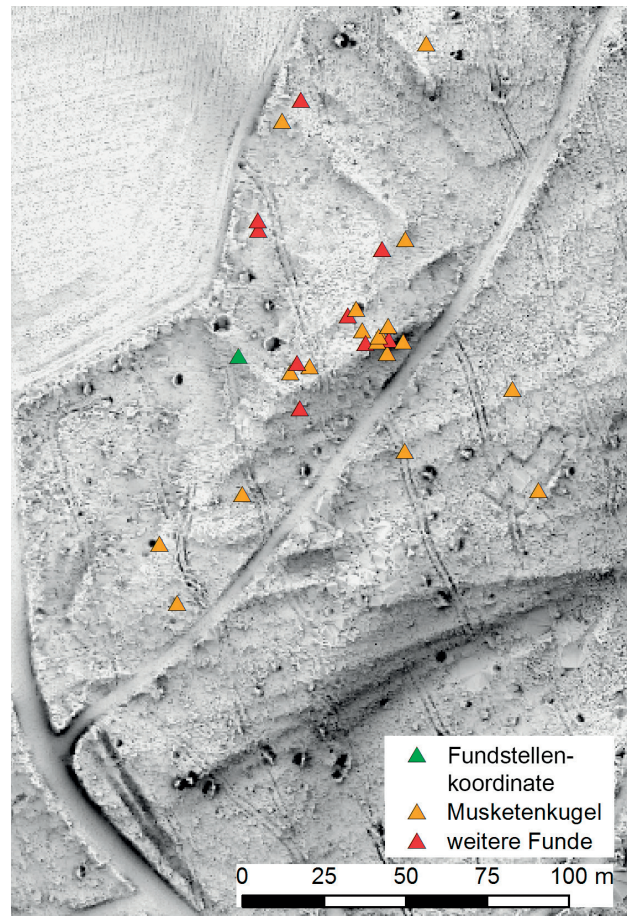
59 Schanze (Visualisierung: SVF).



60 Patronentaschenblech eines russischen Grenadiers.

erodierte Schanze handeln könnte. Um zu erfahren, ob diese Struktur mit dem franzosenzeitlichen Fundmaterial in Verbindung gebracht werden kann, wurde der Ort zusammen mit einem Mitarbeiter der Kantonsarchäologie ein weiteres Mal mit dem Metalldetektor großflächig abgesucht. Dabei entdeckte Funde wurden mit einem Differenzial-GPS eingemessen. Grundgedanke dieses Vorgehens war, dass die Metalldetektoren der 1990er Jahre noch nicht so leistungsfähig waren wie heutige Geräte. In größerer Tiefe liegende Funde sollten deshalb noch im Gelände zu finden sein.

Als Ergebnis kamen 24 Musketenkugeln, fünf Knöpfe, zwei Schnallen, eine Elle sowie das Blech einer Munitionstasche eines russischen Grenadiers zum Vorschein (Abb. 60). Diese Objekte passen gut in das bereits bekannte Fundspektrum²⁵⁶. Die Fundverteilung zeigt, dass ein Großteil des neuen Fundmaterials im direkten Umfeld, besonders entlang der Südflanke der mutmaßlichen Schanze streut (Abb. 61). Dasselbe kann für die zwischen 1988–90 geborgenen Fundstücke erwartet werden²⁵⁷. Die hohe Anzahl gefundener Musketenkugeln ist klarer Anzeiger dafür, dass bei die-



61 Eingemessene Detektorfunde. Entlang der Schanze lässt sich eine Konzentration an Funden, besonders Musketenkugeln, feststellen (Visualisierung: SVF). Grün markiert ist die vom Sondengänger erfasste Punktcoordinate (Anm. 256).

ser Struktur Kampfhandlungen stattgefunden haben. Die Interpretation als Schanze dürfte deshalb mit den vorliegenden Hinweisen als gesichert gelten. 250 Meter südlich der Befestigung fanden sich bei der Erstellung der modernen Straße zudem mehrere Skelette russischer Grenadiere²⁵⁸.

Bei der Schanze handelt es sich um eine sogenannte Flesche. Diese besteht aus zwei Fronten mit Wall und Graben, die in Richtung des Feindes in eine Spitze zusammenlaufen. Es ist ein offenes Feldwerk, das nur in eine Richtung befestigt ist. Die Verteidiger sind in ihrem Rücken nicht geschützt²⁵⁹. Die einfache Ausführung und die geringen Ausmaße sprechen dafür, dass die Befestigung nur temporär und von einer kleineren Einheit genutzt wurde. Die Lage direkt an der Straße wird kein Zufall sein²⁶⁰. Die Ausrichtung der Schanze nach Süden beziehungsweise Südwesten lässt darauf schließen, dass sie zur Verteidigung gegen aus dieser Richtung anrückende Gegner errichtet war.

Da die Schanze nur noch schwach im Gelände erhalten und im Osten durch eine Forststraße sowie im Westen durch stark gepflegte Ackerfläche überlagert wird beziehungsweise zerstört ist, ist ihre ehemalige Ausdehnung nur schwer fassbar. Der Wall ist kaum ausgeprägt. Ein dem Wall vorgelagerter Graben lässt sich nicht mehr feststellen. Möglicherweise wurde aufgrund der vorteilhaften Spornlage der Schanze auf dieses Befestigungselement verzichtet. Organische Hindernisse wie Palisaden könnten im Gelände nur noch durch einen Bodeneingriff festgestellt werden.

10.1.3 Historischer Kontext

Das im Umkreis der Schanze geborgene Fundmaterial stammt aus dem Jahr 1799. Das Gebiet der heutigen Schweiz war zu dieser Zeit einer der Hauptaustragungsorte des zweiten Koalitionskriegs. In mehreren Schlachten standen österreichische und russische Truppen den Heeren Frankreichs gegenüber. Mit Hilfe historischer Quellen kann die Schanze vom Hebsack auf Basis einer Arbeitshypothese mit konkreten Ereignissen dieses Kriegs in Verbindung gebracht werden.

Wann genau die Schanze erstellt wurde, ist nur schwer einzuschätzen. Anhaltspunkte könnten einige Knöpfe österreichischer Soldatenuniformen sein, die bei der Befestigung gefunden wurden. Am 22./23. Mai 1799 setzte der österreichische Heerführer Erzherzog Karl mit 18000 Mann beim Kloster Paradies über den Rhein, wo er einen stark befestigten Brückenkopf errichten ließ (vgl. Abb. 62). Anschließend marschierte er Richtung Zürich²⁶¹. Die bereits erwähnte Straße, neben der die Schanze im Hebsack errichtet wurde, wird eine der Verkehrsachsen gewesen sein, welche das österreichische Heer für seinen Vormarsch nutzte. Die

österreichischen Funde bei der Befestigung könnten dadurch zu erklären sein, dass diese von den Truppen Karls während ihres Vormarsches als Sicherungspositionen angelegt wurde.

Zum Kampfplatz wurde die Schanze jedoch erst einige Monate später. In der Zwischenzeit hatten russische Truppen von den Österreichern die Kontrolle über die Nordschweiz übernommen. Nach der zweiten Schlacht von Zürich am 25./26. September 1799 zogen sich die russischen Truppen unter Korsakow nach der Niederlage gegen die Franzosen über Bülach und Eggenwil nach Norden an den Rhein zurück²⁶². Verstärkt durch bayerische Truppen rückten sie am 7. Oktober vom Brückenkopf beim Kloster Paradies noch einmal gegen die Franzosen ins Zürcher Weinland vor. Den Russen gelang es, ihre Gegner gegen Süden hin abzuweichen. Ein französischer Gegenschlag wurde jedoch noch am selben Tag durchgeführt. In einer verlustreichen Schlacht wurden die Russen wieder zum Brückenkopf zurückgedrängt²⁶³. An diesem Tag wird es beim Rückzug der Russen auch zu Kampfhandlungen bei der Schanze im Hebsack gekommen sein. Durch schriftliche Quellen sind Kämpfe bei den Ortschaften Schlatt, Trüllikon, Rudolfingen und Benken belegt²⁶⁴. Die Befestigung befindet sich genau zwischen diesen Ortschaften (Abb. 62). Zahlreiche russische Funde wie das Munitionstaschenblech sprechen dafür, dass die Russen die Schanze zur Verteidigung gegen die nachrückenden Franzosen besetzten. Französische Knöpfe zeugen von der anschließenden Räumung der Schanze durch die siegreichen Franzosen.

256 Mehrere im selben Durchgang gefundene Eisenobjekte unbekannter Funktion sowie eine Viehglocke können nicht zwingend mit den franzosenzeitlichen Funden in Verbindung gebracht werden.

257 Die vom Sondengänger erfasste Punktkoordinate befindet sich ebenfalls in der Nähe dieser Struktur (Abb. 61).

258 DRACK 1978, 170f.

259 ORTENBURG 1988, 201.

260 Diese Wegverbindung lässt sich bereits auf einem Zehntenplan aus dem Jahr 1764 nachweisen. Im DTM sind östlich der modernen Straße die Fragmente von zwei Hohlwegen noch deutlich erkennbar (Abb. 58).

261 FUHRER 1995, 13ff.; KARL 1814, 322f.

262 FUHRER 1995, 19; KARL 1819, 140.

263 EISELIN 1898, 139ff.; BRUNNER 1921, 11ff.

264 BRUNNER 1921, 11.



62 Ausschnitt der Dufourkarte (Kap. 7.4.2.4). Der Brückenkopf im Paradies befindet sich am südlichen Rheinufer (am oberen Bildrand). Der Standort der Schanze sowie der umkämpfte Straßenabschnitt sind rot markiert.

10.1.4 Fazit

Mit Hilfe des mit LiDAR-Technologie erstellten DTM war es in Kombination mit Neufunden möglich, die bereits bekannten Detektorfunde einem konkreten Befund zuzuordnen. Die Fundumstände, unrestauriertes Fundmaterial und die schlechte Erhaltung der Schanze bieten jedoch nur eine ungenügende Forschungsgrundlage. Die präsentierten Resultate besonders die Einbettung der Schanze in einen historischen Kontext sollen deshalb nur als Arbeitshypothese betrachtet werden, die mit weiteren Ergebnissen (z. B. mit der Auswertung des gesamten Fundmaterials) neu beurteilt werden muss.

10.2 Köhlerei am Stammerberg

10.2.1 Ausgangslage

Bis zur Industrialisierung war Holz im Schweizer Mittelland der wichtigste Energieträger, der in verschiedenen Alltagsarbeiten und -situationen eingesetzt wurde. Zudem waren verschiedene Gewerbe von Holz abhän-

gig. Zu den dörflichen Großverbrauchern gehörten Ziegler, Kalkbrenner und Schmiede²⁶⁵. Letztere nutzten den Brennstoff ausschließlich in Form von Holzkohle. Ihren Eigenbedarf an Kohle produzierten sie meist selbst oder sie stellten dafür einen professionellen Köhler ein, der diese Arbeit übernahm²⁶⁶. Die neuzeitliche Holzkohleproduktion ist im Untersuchungsgebiet bislang kaum erforscht. In alten Karten weisen verschiedene Flurnamen auf Orte ehemaliger Köhlerei hin, so beispielsweise Cholholz oder Cholplatz in der Gemeinde Oberstammheim²⁶⁷.

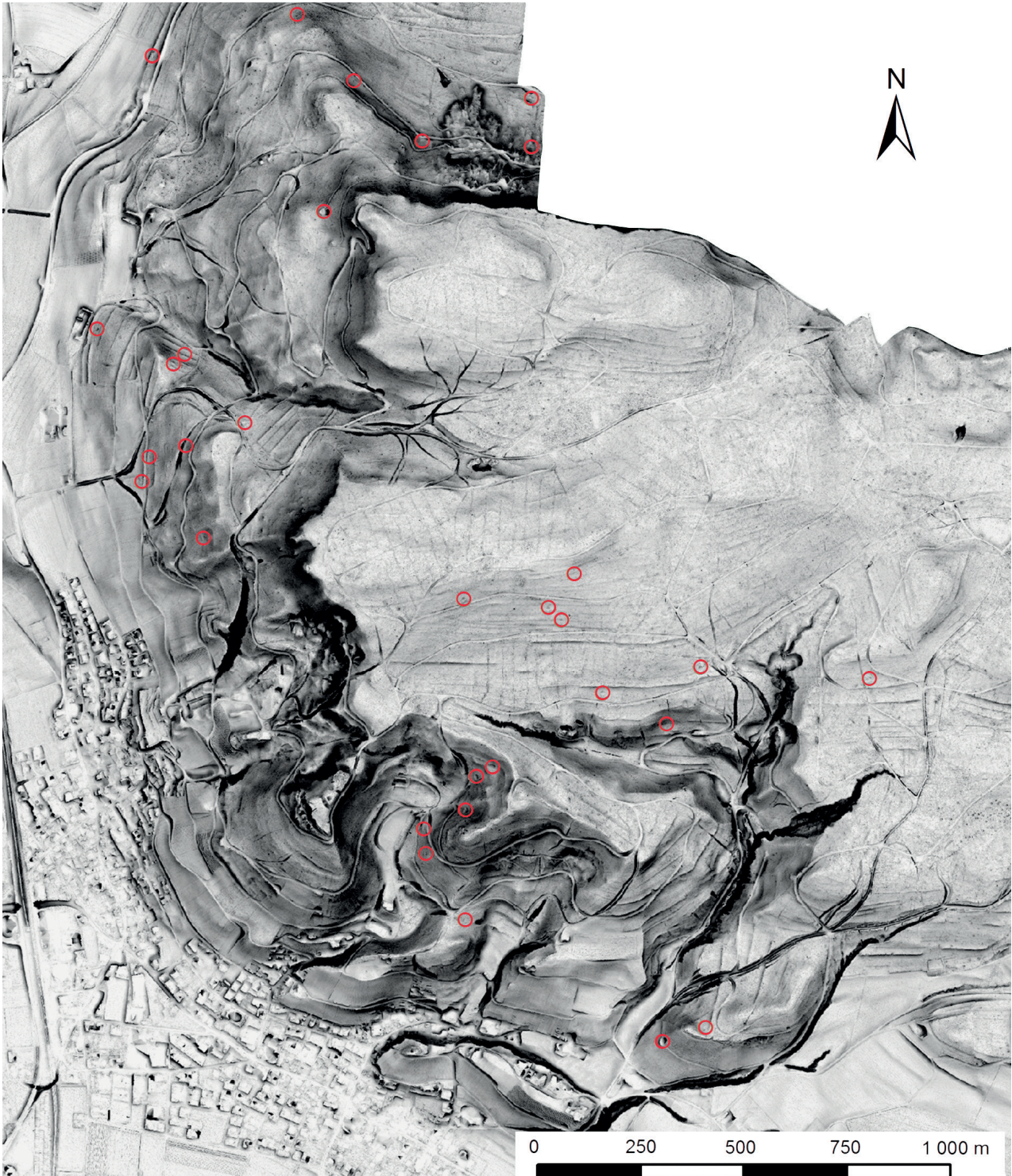
10.2.2 Befunde im DTM

Im Geländemodell können auf dem Gebiet des Stammerbergs (Gemeinden Ober- und Unterstammheim) mehr als dreißig Meilerplattformen nachgewiesen werden. Es handelt sich dabei um runde bis ovale Plattformen in Hanglage von ungefähr 6 bis 15 Metern Durchmesser (vgl. Abb. 45). Sie wurden von Köhlern angelegt, um eine ebene Fläche für den Aufbau der Holzkohlemeiler zu schaffen. Zahlreiche Meilerplattformen am Stammerberg wurden im Feld auf Grundlage von Se-



63 Bohrkern mit holzkohlehaltigem Sediment, entnommen bei einer Meilerplattform.

dimentbohrkernen auf ihre korrekte Interpretation hin überprüft. Anzeiger waren eine auffällig hohe Anzahl an Holzkohlestücken im Bohrkern oder richtiggehende Brandschichten (Abb. 63). An einem Fundplatz konnten direkt auf der Erdoberfläche noch Reste der Löschi nachgewiesen werden, eine Mischung aus Erde, Asche und feinteiliger Holzkohle früherer Meilerbrände, mit der ein Meiler nach außen abgedichtet wird²⁶⁸.



64 Standorte von Meilerplattformen am Stammerberg. Visualisierung: Hillshade.

An manchen Stellen lässt sich ansatzweise eine regelhafte Verteilung dieser Plattformen im Gelände nachweisen (Abb. 64), wie sie beispielsweise aus dem Schwarzwald belegt ist²⁶⁹. Dies deutet auf eine intensive Nutzung des Waldes für die Holzkohleproduktion in diesen Gebieten hin²⁷⁰. Begründet werden kann dies wahrscheinlich zum Teil mit dem steilen Gelände, was den Abtransport geschlagenen Holzes erschwerte und die Köhlerei begünstigte. Zudem ist die Nähe zum Wasser ein wichtiges Kriterium zur Anlage eines Meilers²⁷¹. An dieser Ressource mangelte es an den prospektierten Orten des Stammerbergs nicht; bei der Geländebegehung wurden zahlreiche Quellaustritte festgestellt.

10.2.3 Forschungspotenzial

Die Datierung von Meilerpodien ist eine Schwierigkeit, die sich nicht vollends lösen lässt. Der zeitliche Rahmen, in welchem dieser Strukturtyp im Untersuchungsgebiet auftritt, erstreckt sich vom Hochmittelalter bis etwa 1875²⁷². Eine relativchronologische Einordnung einzelner Meilerplattformen ist möglich, wenn diese ältere Strukturen überlagern. Dies ist bei einigen Terrassen und anderen Landwirtschaftsspuren der Fall. Der Erkenntnisgewinn ist jedoch sehr beschränkt, solange die überlagerte Struktur nicht absolut datiert werden kann. Eine vielversprechende Möglichkeit wären schriftliche Quellen wie Urbare oder dokumentierte Rechtsstreitigkeiten in Kombination mit in diesen Quellen genannten Flurnamen. Eine C14-Datierung wird ebenfalls nicht in jedem Fall die gewünschte Klarheit liefern können²⁷³, würde aber eine grobe zeitliche Einordnung garantieren.

Regelmäßig auf diese gesamte Zeitspanne verteilt, lassen die 33 entdeckten Meilerplattformen des Stammerbergs kaum auf eine übermäßige Holzkohleproduktion schließen, die mehr als den Bedarf zweier Dörfer deckt. Es sollte jedoch bedacht werden, dass bestehende Plattformen in der Regel wiederholt genutzt wurden²⁷⁴. Zudem wird nur ein Bruchteil aller jemals angelegten Köhlerplätze im DTM erkennbar sein. Die Holzkohleproduktion beim Stammerberg wird demnach deutlich höher gewesen sein als es das heutige Bild vermittelt. Was die heute überlieferten Flurnamen Cholholz und Cholplatz (siehe oben) am Stammerberg betrifft, so konnten zumindest im Perimeter im Cholholz mehrere Meilerstandorte festgestellt werden. Dass in der anderen Flur keine Meilerplattformen im DTM sichtbar sind, zeigt, dass mit LiDAR nicht alle ehemaligen Köhlerplätze erfasst werden können. Durch Straßenbau und Forstwirtschaft werden bereits zahlreiche Exemplare zerstört worden sein. Vergleicht man die auf der Wildkarte verzeichnete Waldfläche der beiden Stammheimer Dörfer mit jener der restlichen Gemein-

den, so besitzen letztere deutlich weniger Wald (vgl. auch Luftbild Abb. 7). Es ist deshalb durchaus denkbar, dass mit der Holzkohle vom Stammerberg nicht nur das lokale Dorfgewerbe versorgt wurde, sondern dass der Brennstoff auch in Nachbargemeinden Absatz fand. Die Köhlerei könnte dabei als Nebenerwerb von Bauern oder von professionellen Köhlern ausgeübt worden sein²⁷⁵. Neben der bereits angesprochenen, die Holzkohleproduktion fördernden Ausgangslage würde für diese Vermutung auch sprechen, dass über 80% der Meilerplattformen des Untersuchungsgebiets auf dem Stammerberg festgestellt wurden. Für eine fundierte Beurteilung der Sachlage sind jedoch zwingend schriftliche Quellen notwendig. Leider hat die Geschichtsforschung der Köhlerei im Zürcher Weinland bislang noch zu wenig Beachtung geschenkt²⁷⁶.

265 IRNIGER 1996, 120ff.; MEIER 1986, 141.

266 IRNIGER 1996, 120f. Im Untersuchungsgebiet ist ein Köhler aus dem Schwarzwald belegt, der für den Dorfschmied von Guntalingen köhlerte (FREI-ROHRER 2010, 72).

267 FREI-ROHRER 2007, 61f.

268 ARM 1985, 51.

269 HESSE 2013, Abb. 14.10a.

270 Da sich Holzkohle aufgrund des geringeren Gewichts einfacher als Holz transportieren lässt, darf angenommen werden, dass die Holzkohle im selben Wald produziert wurde, wo auch das Holz geschlagen wurde (PAYSEN 2009, 102). Duhamel du Monceau empfiehlt dieses Vorgehen in seiner Anleitung zum Köhlern aus dem Jahr 1762 (DUHAMEL 1762, 17).

271 DUSS 1978, 7; BRUNHART 1986, 31.

272 Im Hochmittelalter setzt sich diese Meilerform gegenüber dem weniger effektiven Grubenmeiler durch (PAYSEN 2009, 101f.). Das Ende der Holzkohleproduktion wird im Zürcher Weinland durch die Erschließung des Gebiets mit der Bahn markiert. Holz- und vor allem neu Steinkohle konnten so zu günstigen Preisen aus dem Ausland importiert werden (FREI-ROHRER 2007, 61f.).

273 Aufgrund zweier Kalibrierungsplateaus im Spätmittelalter und in der Neuzeit kann die Analyse jedoch nicht in jedem Fall die gewünschte Klarheit bringen (siehe dazu die Datierung verschiedener Meilerstellen von PAYSEN 178ff.).

274 Dafür sprechen die zum Teil massiven Brandschichten und die an einem Fundort festgestellte Löschi, die erst nach mehreren Meilerbränden ihre schwarze Färbung erhält. Nach DUHAMEL (1762, 17f.) erleichtert sich der Köhler in unebenem Terrain die Arbeit, wenn er den Meiler an einer (bereits ausgeebneten) Stelle anlegt, wo bereits einmal geköhlt wurde. Neben der ersparten Arbeit muss damit auch kein neues Stück Wald für die Anlage einer neuen Plattform zerstört werden.

275 IRNIGER 1996, 117ff.

276 Schriftquellen, wie sie von MEIER (1986) für das Zürcher Unterland aufgearbeitet wurden, wurden für das Untersuchungsgebiet noch nicht zusammengestellt.

11 Ausblick

Nach der ersten Verwendung von LiDAR-Daten in der Archäologie im Jahr 2000 hat sich die neue Prospektionsmethode in der Zwischenzeit als wichtige Datenquelle in der Forschung etabliert. LiDAR-Scans werden zunehmend in Fallstudien und Forschungsprojekten unterschiedlichster Fragestellungen und Ziele eingesetzt. Gleichzeitig wird auch die Methodik von LiDAR in der Archäologie laufend verbessert. Dies schlägt sich vor allem in einer hohen Anzahl an verfügbaren Algorithmen nieder, die in den letzten Jahren zur Auswertung von Geländemodellen entwickelt oder aus anderen Fachgebieten adaptiert wurden (Kap.6.3). Viele dieser Algorithmen wurden jedoch noch nicht ausführlich genug getestet und publiziert²⁷⁷. Weitere Tests werden deshalb notwendig sein, um die Vor- und Nachteile einzelner Algorithmen zu prüfen und die Ergebnisse zu publizieren. Handlungsbedarf gibt es auch in der Deklaration der verwendeten Visualisierungen und der Datenqualität bei Vorträgen und in Publikationen. Da die Qualität der Auswertungsergebnisse eines LiDAR-Scans sehr stark von diesen zwei Faktoren abhängt (vgl. Kap. 3.1.3 sowie Kap. 6.1), müssen diese bei der Präsentation eines Projekts zwingend erläutert werden.

Neben der Prospektion neuer Fundstellen könnten LiDAR-Daten in Zukunft auch vermehrt in der Fundstellenüberwachung der Denkmalpflege eingesetzt werden. Benötigt werden dafür mindestens zwei zeitlich aufeinander folgende Geländemodelle desselben Gebietes und mit derselben Auflösung²⁷⁸. Wird das jüngere DTM vom älteren subtrahiert, resultiert daraus ein Differenzmodell, welches Veränderungen des überwachten Geländes im Zeitraum zwischen der Erstellung der beiden Laserscans dokumentiert²⁷⁹. Bei der Umsetzung dieses im Grunde einfachen Ansatzes können jedoch diverse methodische Fehler, welche bei der Verarbeitung der verwendeten Datensätze entstehen, zu Artefakten im Differenzmodell führen.

Eine Herausforderung ist die Georeferenzierung der Datensätze. Durch Ungenauigkeiten beim Messvorgang (vgl. Kap. 2.4.2) und aufgrund unterschiedlicher verwendeter Software bei der Erstellung der Geländemodelle können diese in der Horizontalen wie auch in der Vertikalen in geringem Maße gegeneinander verschoben sein²⁸⁰. Durch leichtes Verschieben des einen DTM relativ zum zweiten, sodass beide Geländemodelle passgenau übereinanderliegen, kann dieser

systematische Fehler behoben werden. Weitere Fehlerquellen sind ungenaue Streifenanpassung (Kap. 5.2) und fehlklassifizierte Punkte. Letztere sind hauptsächlich auf die Vegetationsverhältnisse während der Vermessung des Geländes zurückzuführen. Besonders in älteren DTM, deren zu Grunde liegende Punktwolke mit *discrete return* Systemen erstellt wurden (Kap. 2.3), konnte tiefe Vegetation noch nicht ausreichend von Bodenpunkten unterschieden werden²⁸¹.

Im Kanton Zürich wird der Einsatz von LiDAR zur Fundstellenüberwachung lohnenswert, sobald der neue LiDAR-Datensatz im Rahmen des Projekts *Luftaufnahmen 42*²⁸² voraussichtlich im Jahr 2019 realisiert wird. Erstmals wird es dann möglich sein, Schäden durch die Land- und Forstwirtschaft für den Zeitraum der vergangenen vier Jahre zu quantifizieren. Es ist jedoch zu hoffen, dass in diesem kurzen Zeitraum kaum Veränderungen erfasst werden können, sieht man von gezielten Bodeneingriffen im Bereich archäologischer Strukturen ab.

Um erhebliche erosionsbedingte Veränderungen im Relief fassen zu können, wird eine Überwachung von Fundstellen über einen längeren Zeitraum notwendig sein. Im Rahmen einzelner Fundstellen, die bereits im letzten Jahrhundert mit Luftaufnahmen dokumentiert wurden, ist dies bereits heute möglich. Zum einen kann das Geländemodell mit einzelnen Luftbildern verglichen werden, auf welchen sich archäologische Strukturen unter guten Lichtbedingungen deutlich im Relief abzeichnen²⁸³. Zum anderen ist es möglich, mittels fotogrammetrischer Bildverfahren wie *Structure from Motion* aus sich überlappenden, zweidimensiona-

277 Dazu gehören beispielsweise mehrere Visualisierungsmethoden, die in Hesses *Lidar Visualisation Toolbox* (Kap. 6.1.2) implementiert sind wie *Cumulative Visibility* oder *Multiscale Integral Invariants*.

278 Da jüngere Datensätze oft höher aufgelöst sind, müssen diese deshalb auf die tiefere Auflösung älterer Datensätze heruntergerechnet werden (HESSE 2016b, 2).

279 Ein Abbau archäologischer Substanz würde sich dabei mit negativen Höhenwerten äußern. Positive Werte können bei der Verfüllung negativer Strukturen entstehen.

280 Diese Verschiebung wirkt sich somit auf die gesamte Fläche des daraus berechneten Differenzmodells aus.

281 HESSE 2014; HESSE 2016b, 3ff.

282 Amt für Raumentwicklung 2015, 3.

283 Vgl. dazu CHALLIS et al. 2008, 1057ff.

len Aufnahmen ein Geländemodell zu rechnen. Sind die vorliegenden Luftbilder von ausreichender Qualität und Auflösung, kann mit dem daraus errechneten Oberflächenmodell und dem DTM des LiDAR-Datensatzes ein Differenzmodell erstellt werden (vgl. oben) und so Veränderungen des Bodendenkmals über längere Zeiträume nachvollzogen werden²⁸⁴.

Ein wichtiges Thema, das bislang zu wenig Beachtung findet, ist die Verwendung von Kartierungsergebnissen im Fundstellenmanagement der Denkmalpflege. Die Möglichkeit, großflächige Gebiete zeitsparend und lückenlos zu prospektieren, birgt großes Potenzial, bringt aber auch Probleme mit sich (Kap. 9). Die Erstellung einer Strategie, wie solche Datenmengen effizient genutzt, bewertet und archiviert werden können, sollte deshalb eines der primären Ziele sein, wenn der Einsatz von ALS-Datensätze in einem Denkmalamt in Betracht gezogen wird.

Ein Themenbereich, mit dem sich die Forschung in Zukunft wohl eingehender beschäftigen wird, ist die Entwicklung von Algorithmen zur automatischen Strukturerkennung archäologischer Befunde. Dieser Forschungszweig wird bislang in der archäologischen Fachliteratur nur am Rande behandelt²⁸⁵. Mit der aktuellen Technik können keine Ergebnisse erzielt werden, welche die Qualität einer manuellen Auswertung durch eine spezialisierte Fachperson erreichen. Die Topografie, erosive Prozesse, die Vegetationsbedeckung sowie die Vielfalt an Befunden führen dazu, dass sich archäologische Strukturen in verschiedensten Formen im Relief abzeichnen. Dies erschwert das Definieren von Merkmalen, aufgrund welcher ein Algorithmus vollautomatisch Geländestrukturen selektieren und erkennen soll, erheblich. Mangelnde Flexibilität automatischer Strukturerkennung bringt jedoch nicht nur Nachteile mit sich. Einer der großen Vorteile wird die systematische Erkennung aller Geländemerkmale sein, die den festgelegten Parametern des Algorithmus entsprechen. Im Vergleich dazu werden die Ergebnisse einer Fachperson immer von deren Erfahrungen, situationsbezogenen Entscheiden und nicht zuletzt auch der Tagesform beeinflusst²⁸⁶.

Es ist wichtig zu betonen, dass mit automatischer Strukturerkennung lediglich die Detektion morphologischer Merkmale möglich ist, nicht jedoch deren Interpretation (vgl. Kap. 3.3.2)²⁸⁷. Die Interpretation einer Struktur beruht nicht ausschliesslich auf deren Ausprägung und der Geländesituation, in welche sie eingebettet ist. Informationen aus historischen Karten, schriftlichen Quellen oder Ergebnisse von Feldarbeiten sind wichtige Informationsquellen, die bei der funktionalen

Ansprache von Geländemerkmale hinzugezogen werden sollten (vgl. Kap. 7.4). Eine manuelle Überprüfung und Interpretation automatisch entdeckter Strukturen wird deshalb auch in Zukunft erfahrenes Fachpersonal erfordern. Dies zeigen auch die Ergebnisse erster Untersuchungen, welche die automatische Erkennung archäologischer Strukturen zum Ziel hatten²⁸⁸.

Um verschiedene Strukturformen beziehungsweise die gesamte Vielfalt archäologischer Spuren entdecken zu können, wären eine Vielzahl unterschiedlicher Algorithmen notwendig. Der Aufwand, einen Workflow zu entwickeln und automatisch entdeckte Strukturen manuell zu überprüfen mag für einen ausgewählten Strukturtyp rechtfertigbar sein. Für die Gesamtheit der archäologischen Strukturen wird sich dieses Vorgehen für ein Untersuchungsgebiet mit einer Strukturdichte wie jenes dieser Arbeit (Kap. 8.2) verglichen mit einer komplett manuellen Auswertung jedoch kaum zeitsparend auswirken. Besonders schwach ausgeprägte und unregelmäßige Strukturen werden zudem extrem schwer zu charakterisieren sein, was sich bei der automatischen Erkennung negativ auf die Fehlerquote auswirken wird. Es wird jedoch kaum möglich sein, die vorhandene und stetig zunehmende Flut an Fernerkundungsdaten nur ansatzweise manuell auswerten zu können. Bennett et al. sehen deshalb in der Entwicklung des Bereichs *Computer Vision* eines der wichtigsten Forschungsziele bezüglich der Auswertung von LiDAR-Daten in der Archäologie²⁸⁹. Die geforderten Fortschritte in Kombination mit einer Priorisierung auf gut im Relief erhaltene Strukturen, die eine hohe Detektionsrate und geringe Fehlerquoten erlauben, könnten den Weg ebnen für die Etablierung von automatischer Strukturerkennung in der archäologischen Auswertung von LiDAR-Daten.

284 Detailliertes Vorgehen und erste erfolgsversprechende Resultate in RISBØL et al. 2015.

285 BENNETT et al. 2014, 896ff.; COWLEY 2013, 26f.

286 BENNETT et al. 2014, 898ff.

287 BENNETT et al. 2014, 899.

288 TRIER/PLIØ 2012, 117f. testeten die automatische Erkennung von Gruben in bewaldetem Gebiet. Im Vergleich zur manuellen Auswertung konnten mit dem Algorithmus 95% aller archäologisch relevanten Gruben entdeckt werden. Als großer Nachteil stellte sich jedoch die Fehlerquote heraus, welche die Trefferquote um das Vierfache übertraf. Auch ein Test zur automatischen Erkennung von Grabhügeln zeigte, dass mit automatischer Strukturerkennung der Großteil der bereits bekannten Befunde sowie eine Vielzahl an weiteren, potentiellen Grabhügeln erkannt werden konnte (DE BOER 2005; DE BOER et al. 2008, 80f.). Jedoch erfordert dieser unspezifische Strukturtyp zwingend eine Untersuchung im Feld (Kap. 8.1.1).

289 BENNETT et al. 2014, 900ff.

12 Glossar

ALS (Airborne laser scanning) Flugzeuggestütztes Laserscanning (siehe auch LiDAR).

Archäologische Zone Zone im vermuteten Perimeter einer archäologischen Fundstelle, die das Gebiet markiert, in welchem die Kantonsarchäologie ins Bewilligungsverfahren eines geplanten Bauprojekts einbezogen werden muss (Kap. 9.1).

Azimut Horizontalwinkel. Gemessen wird jeweils ab Norden im Uhrzeigersinn (z. B. hat Osten ein Azimut von 90°).

Digitales Geländemodell (DTM) Dreidimensionale Wiedergabe der natürlichen Erdoberfläche ohne darauf befindlichen Objekten (Gebäude, Vegetation etc.).

Digitales Oberflächenmodell (DSM) Dreidimensionale Wiedergabe der Erdoberfläche mit allen darauf befindlichen Objekten (Gebäude, Vegetation etc.).

Echo Rücklauf eines reflektierten Laserimpulses, der vom Laserscanner aufgezeichnet wird. Da derselbe Laserimpuls auf mehreren Oberflächen reflektiert werden kann, können daraus mehrere, zeitlich nacheinander folgende Echos entstehen.

Ereignis Administrative (forschungsgeschichtliche) Einheit zur Gliederung der Ergebnisse archäologischer Tätigkeit in der Kantonsarchäologie Zürich (Kap. 9.1.1).

Footprint Ausdehnung des Laserimpulses, wenn dieser auf die reflektierende Oberfläche trifft.

Full Waveform-System Technik zur Aufzeichnung der gesamten Wellenform eines Laserimpulses.

Georeferenzierung Zuweisung raumbezogener Referenzinformationen (in der Regel ein Koordinatensystem) zu einem Datensatz.

GIS (Geografisches Informationssystem) Software zur Erfassung, Bearbeitung und Analyse raumbezogener Daten.

GPS (Global positioning system) Satellitengestütztes Navigationssystem zur Positionsbestimmung.

Klassifikation Ergebnis der Klassifizierung (Zusammenfassung von Objekten aufgrund bestimmter Kriterien). Im Zusammenhang mit LiDAR wird mit diesem Begriff in der Regel die Punktklassifikation angesprochen, die Gliederung der Punkte einer Punktwolke in funktionale Klassen (Boden, Gebäude, Vegetation etc.).

Inertiale Messeinrichtung (IMU) Gerät, welches die eigene Beschleunigung und Rotation erfasst.

Intensität Maß für die Energie bzw. Stärke eines reflektierten Laserimpulses (Amplitude).

IVS Bundesinventar der historischen Verkehrswege der Schweiz

Local Dominance (LD) Visualisierungsmethode (Kap. 6.3.9)

LiDAR Light detection and ranging. Fernerkundungsmethode auf Grundlage des Laserscanning

Local Relief Model (LRM) Visualisierungsmethode (Kap. 6.3.8)

Nadirwinkel Winkel zwischen der nach unten verlängerten Senkrechten unter der Erdoberfläche (Nadir) und einem Punkt an oder unter der Erdoberfläche (vgl. Abb. 21).

Punktwolke Ansammlung von (Daten-)Punkten in einem Koordinatensystem, die bei der dreidimensionalen Erfassung einer Oberfläche entsteht.

Rasterdatei Raumbezogene Daten bestehend aus einer Matrix gleich großer Zellen (Pixel), die eine kontinuierliche Oberfläche bilden.

Openness Visualisierungsmethode (Kap. 6.3.5).

Principal Component Analysis (PCA) Visualisierungsmethode (Kap. 6.3.3).

Rückeweg Unbefestigter Forstwirtschaftsweg für schwere Maschinen zum Abtransport gefällter Bäume.

Sky View Factor (SVF) Visualisierungsmethode (Kap. 6.3.6).

Slope Visualisierungsmethode (Kap. 6.3.4).

Structure from Motion Fotogrammetrisches Bildverfahren, mit welchem auf Basis der Parallaxe (scheinbare Verschiebung des Objekts aufgrund der Verschiebung des Beobachters) aus mehreren, aus verschiedenen Positionen aufgenommenen Fotografien desselben Objekts ein 3D-Modell errechnet werden kann.

Strukturtyp Klassifikationseinheit der funktionalen Gliederung kartierter Elemente (z. B. Grabhügel, Feldgrenze, Totholzhaufen)

Trend Removal (TR) Visualisierungsmethode (Kap. 6.3.7).

Vektordatei Raumbezogene Daten, die Objekte anhand von Punkten beschreiben.

Zenitwinkel Winkel zwischen der Senkrechten (Zenit) und einem Punkt an oder über der Erdoberfläche vgl. Abb. 21)

13 Literaturverzeichnis

ACKERMANN 1999

F. Ackermann, Airborne laser scanning – present status and future expectations. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 54, 1999, 64–67.

AKERET 1987

E. Akeret, Das Zürcher Weinland, die Landschaft. In: E. Akeret, *Zürcher Weinland* (Winterthur 1987) 11–22.

ALBERTZ 2009

J. Albertz, Einführung in die Fernerkundung. Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern (Darmstadt 2009).

AMT FÜR RAUMENTWICKLUNG 2015

Amt für Raumentwicklung, Schwerpunkt Luftaufnahmen 42. Raumentwicklung aktuell 2015/2. URL: http://www.are.zh.ch/internet/audirektion/are/de/raumplanung/veroeffentlichungen/_jcr_content/contentPar/publication_2/publicationitems/titel_wird_aus_dam_e_3/download.spooler.download.1441613854140.pdf/201507_Raumentwicklung_aktuell.pdf (22.09.2015)

ARM 1985

J.–P. Arm, *Bodenständige Berufe*. Band II (Lausanne 1985).

AXELSSON 2000

P. Axelsson, DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models. In: D. Fritsch/M. Monelaar (Hrsg.), *Mapping and Geographic Information Systems*. 19th ISPRS Congress, Amsterdam, Niederlande, 16.–23. Juli 2000. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* 33, 2004, Teil B4, 110–117.

BARNES 2003

I. Barnes, Aerial remote-sensing techniques used in the management of archaeological monuments on the British Army's Salisbury Plain Training Area, Wiltshire, UK. *Archaeological Prospection* 10, 2003, 83–90.

BECKER 1998

H. Becker, *Allgemeine historische Agrargeografie* (Stuttgart 1998).

BENNETT ET AL. 2012

R. Bennett/K. Welham/R. a. Hill/A. Ford, A Comparison of Visualization Techniques for Models Created from Airborne Laser Scanned Data. *Archaeological Prospection* 19, 2012, 41–48.

BENNETT ET AL. 2014

R. Bennett/D.C. Cowley/V. de Laet, The data explosion: tackling the taboo of automatic feature recognition in airborne survey data. *Antiquity* 88, 2014, 896–905.

BERALDIN ET AL. 2010

J.–A. Beraldin/F. Blais/U. Lohr, Laser Scanning Technology. In: G. Vosselman/H.–G. Maas (Hrsg.), *Airborne and terrestrial laser scanning* (Dunbeath 2010) 1–42.

BEWLEY 2003

R. Bewley, Aerial survey for archaeology. *Photogrammetric Record* 18, 2003, 273–292.

BEWLEY 2005

R. Bewley, Aerial Archaeology. The First Century. In: J. Bourgeois/M. Meganck (Hrsg.), *Aerial photography and archaeology 2003*. Papers presented during the conference held at the Ghent University, December 10th–12th, 2003, *Archaeological reports Ghent University 4* (Ghent 2005) 15–30.

BEWLEY ET AL. 2005

R. Bewley/S. Crutchley/C.A. Shell, New light on an ancient landscape: lidar survey in the Stonehenge World Heritage Site. *Antiquity* 79, 2005, 636–647.

DE BOER 2005

A.G. de Boer, Using pattern recognition to search LIDAR data for archeological sites. In: A. Figueiredo/G. Leite Velho (Hrsg.), *The world is in your eyes*. CAA2005. Proceedings of the 33rd Conference (2005) 245–254.

DE BOER ET AL. 2008

A. G. de Boer/W. N. H. Laan/W. Waldus/W. K. van Zijverden, Lidar-based surface height measurements: applications in archeology. In: B. Frischer/A. Dakouri-Hild (Hrsg.), *Beyond illustration: 2D and 3D digital technologies as tools for discovery in archeology*. BAR International Series 1805 (Oxford 2008) 76–84.

BOFINGER/HESSE 2011A

J. Bofinger/R. Hesse, Neue Wege der archäologischen Prospektion aus der Luft. Mit Airborne-Laserscanning Bodendenkmalen auf der Spur. *Denkmalpflege Baden-Württemberg – Nachrichtenblatt der Landesdenkmalpflege* 40, 2011, 35–39.

BOFINGER/HESSE 2011B

J. Bofinger, R. Hesse, As far as the laser can reach... – Laminar analysis of LIDAR detected structures as a powerful instrument for archaeological heritage management in Baden-Württemberg, Germany. In: D. C. Cowley (Hrsg.), *Remote sensing for archaeological heritage management*. Proceedings of the 11th EAC Heritage Management Symposium, Reykjavík, 25.–27. März 2010. Occasional publication of the Aerial Archaeology Research Group 3 (Brüssel 2011) 161–172.

BRIESE 2010

C. Briese, Extraction of Digital Terrain Models. In: G. Vosselman/H.-G. Maas (Hrsg.), *Airborne and terrestrial laser scanning* (Dunbeath 2010) 135–167.

BRUNHART 1986

A. Brunhart, Die Köhlerei in Liechtenstein, *Naturkundliche Forschung im Fürstentum Liechtenstein* 7 (Vaduz 1986).

BRUNNER 1924

E. Brunner, Die kriegerischen Ereignisse des Jahres 1799 im Bezirk Diessenhofen. *Beiträge zur Heimatgeschichte, aus den Quellen zusammengestellt* (Diessenhofen 1924).

BSF SWISSFOTO 2015

BSF Swissphoto, *Laserscanning und Orthofoto Kanton Zürich*. Technischer Bericht (Abschluss Lidar) Version 1.6. (2015).

BURGER/BURGE 2015

W. Burger/M. J. Burge, *Digitale Bildverarbeitung. Eine algorithmische Einführung mit Java* (Berlin 2015).

BURROUGH ET AL. 2015

P. Burrough/R. McDonnell/Ch. Lloyd, *Principles of Geographical Information Systems* (Oxford 2015).

CHALLIS 2006

K. Challis, Airborne laser altimetry in alluviated landscapes. *Archaeological Prospection* 13, 2006, 103–127.

CHALLIS ET AL. 2008

K. Challis/Ž. Kokalj/M. Kinsey/D. Moscrop/A. J. Howard, Airborne lidar and historic environment records. *Antiquity* 82, 2008, 1055–1064.

CHALLIS ET AL. 2011A

K. Challis/P. Forlin/M. Kinsey, A Generic Toolkit for the Visualization of Archaeological Features on Airborne LiDAR Elevation Data. *Archaeological Prospection* 18, 2011, 279–289.

CHALLIS ET AL. 2011B

K. Challis/C. Carey/M. Kinsey/A. Howard, Airborne Lidar Intensity and Geoarchaeological Prospection in River Valley Floors. *Archaeological Prospection* 18, 2011, 1–13.

CHALLIS/HOWARD 2013

K. Challis/A. J. Howard, The role of lidar intensity data in interpreting environmental and cultural archaeological landscapes. In: R. S. Opitz/D. C. Cowley (Hrsg.), *Interpreting Archaeological Topography*. Occasional publication of the Aerial Archaeology Research Group 5 (Oxford 2013) 161–170.

CORNS/SHAW 2013

A. Corns/R. Shaw, Lidar and World Heritage Sites in Ireland: Why was such a rich data source gathered, how is it being utilized, and what lessons have been learned? In: R. S. Opitz/D. C. Cowley (Hrsg.), *Interpreting Archaeological Topography*. Occasional publication of the Aerial Archaeology Research Group 5 (Oxford 2013) 146–160.

COWLEY 2013

D. C. Cowley, In with the new, out with the old? Auto-extraction for remote sensing archaeology. In: D. Hookk (Hrsg.), *Papers of the First International Conference on Virtual Archaeology* (2013) 18–30.

CRUTCHLEY 2006

S. Crutchley, Light detection and ranging (lidar) in the Witham Valley, Lincolnshire: an assessment of new remote sensing techniques. *Archaeological Prospection* 13, 2006, 251–257.

- CRUTCHLEY 2009
S. Crutchley, Ancient and modern: Combining different remote sensing techniques to interpret historic landscapes. *Journal of Cultural Heritage* 10, 2009, 65–71.
- CRUTCHLEY 2013
S. Crutchley, Using lidar data – drawing on 10 year’s experience at English Heritage. In: R. S. Opitz/D. C. Cowley (Hrsg.), *Interpreting Archaeological Topography*. Occasional publication of the Aerial Archaeology Research Group 5 (Oxford 2013) 136–145.
- CRUTCHLEY/CROW 2009
S. Crutchley/P. Crow, *The Light Fantastic: Using airborne laser scanning in archaeological survey* (Swindon 2009).
- DENECKE 1997
D. Denecke, Quellen, Methoden, Fragestellungen und Betrachtungsansätze der anwendungsorientierten geographischen Kulturlandschaftsforschung. In: W. Schenk/K. Fehn/D. Denecke (Hrsg.), *Kulturlandschaftspflege* (Berlin/Stuttgart 1997) 35–49.
- DEVEREUX ET AL. 2005
D. J. Devereux/G. S. Amable/P. Crow/A. D. Cliff, The potential of airborne lidar for Detection of archaeological features under woodland canopies. *Antiquity* 79, 2005, 648–660.
- DEVEREUX ET AL. 2008
D. J. Devereux/G. S. Amable/P. Crow, Visualisation of LiDAR terrain models. *Antiquity* 82, 2008, 470–479.
- DONEUS 2013A
M. Doneus, Openness as Visualization Technique for Interpretative Mapping of Airborne Lidar Derived Digital Terrain Models. *Remote Sensing* 5, 2013, 6427–6442.
- DONEUS 2013B
M. Doneus, Die hinterlassene Landschaft. Prospektion und Interpretation in der Landschaftsarchäologie, *Mitteilungen der Prähistorischen Kommission der Österreichischen Akademie der Wissenschaften* 78 (Wien 2013).
- DONEUS/BRIESE 2006A
M. Doneus/C. Briese, Full-waveform airborne laser scanning as a tool for archaeological reconnaissance. In: S. Campana/M. Forte (Hrsg.), *From space to place*. 2nd International Conference on Remote Sensing in Archaeology. Proceedings of the 2nd international workshop, Rom, 4.–7. Dezember 2006. BAR international series 1568 (Oxford 2006) 99–105.
- DONEUS/BRIESE 2006B
M. Doneus/C. Briese, Digital terrain modelling for archaeological interpretation within forested areas using full-waveform laserscanning. In: M. Ioannides/D. Arnold/F. Niccolucci/K. Mania (Hrsg.), *The 7th International conference on Virtual Reality, Archaeology and Intelligent Cultural Heritage* (2006) 155–162.
- DONEUS/BRIESE 2011
M. Doneus/C. Briese, Airborne Laser Scanning in forested areas – Potential and limitations of an archaeological prospection technique. In: D. C. Cowley (Hrsg.), *Remote sensing for archaeological heritage management*. Proceedings of the 11th EAC Heritage Management Symposium, Reykjavík, 25.–27. März 2010. Occasional publication of the Aerial Archaeology Research Group 3 (Brüssel 2011) 60–76.
- DONEUS ET AL. 2008A
M. Doneus/C. Briese/M. Fera/M. Janner, Archaeological prospection of forested areas using full-waveform airborne laser scanning. *Journal of Archaeological Science* 35, 2008, 882–893.
- DONEUS ET AL. 2008B
M. Doneus/C. Briese/T. Kührtreiber, Flugzeuggetragenes Laserscanning als Werkzeug der archäologischen Kulturlandschaftsforschung. Das Fallbeispiel „Wüste“ bei Mannersdorf am Leithagebirge, Niederösterreich. *Archäologisches Korrespondenzblatt* 38, 2008, 137–156.
- DONEUS/KÜHTREIBER 2013
M. Doneus/T. Kührtreiber, Airborne laser scanning and archaeological interpretation – bringing back the people. In: R. S. Opitz/D. C. Cowley (Hrsg.), *Interpreting Archaeological Topography*. Occasional publication of the Aerial Archaeology Research Group 5 (Oxford 2013) 33–50.
- DRACK 1978
W. Drack, Wildensbuch/Hebsack. Fund von Skeletten zweier russischer Grenadiere von 1799. *Zürcher Denkmalpflege* 7, Teil 2, 1978, 170–171.
- DUHAMEL 1775
Duhamel du Monceau, *Die Kunst des Kohlenbrennens oder die Art und Weise, aus Holz Kohlen zu machen*. Aus dem Französischen übersetzt und mit

- Anmerkungen versehen von Johann Heinrich Gottlob von Justi (Königsberg und Leipzig 1775).
- DUNNEL/DANCEY 1983
R. C. Dunnell/W. S. Dancey, The Siteless Survey: A Regional Scale Data Collection Strategy. In: M. B. Schiffer (Hrsg.), *Advances in Archaeological Method and Theory* 6 (New York 1983) 267–287.
- DUSS 1978
J. Duss, *Holzköhlerei am Cholfirst* (Schaffhausen 1978).
- EISELIN 1898
F. Eiselin, Die Gefechte bei Schlatt, Andelfingen und Diessenhofen und die Erstürmung der Stadt Konstanz durch die Franzosen am 7. Oktober 1799. *Schriften des Vereins für Geschichte des Bodensees und seiner Umgebung* 27, 1898, 132–147.
- ESRI 2014
ESRI, *ArcGIS Resources* (2014). URL: <http://resources.arcgis.com/de/help/main/10.2/> (24.09.2015)
- FREI-ROHRER 2007
H. Frei-Rohrer, Vom Höfli, vom Wirth und vo de Höll. Flur- Häuser- und Familiennamen der Gemeinde Oberstammheim (Oberstammheim 2007).
- FREI-ROHRER 2010
H. Frei-Rohrer, Vom Chlooschter, vom Rüütima und vom Hänkerspil. *Geschichte, Flur-, Häuser- und Familiennamen der Dörfer Guntalingen und Waltalingen* (Waltalingen 2010).
- FREY 2008
T. Frey, Der Strukturwandel der schweizerischen Landwirtschaft nach 1850 im Licht der Thünen'schen Kreise. *Traverse* 15, 2008, 31–48.
- FREY/VOGEL 1997
T. Frey/L. Vogel, Und wenn wir auch die Eisenbahn mit Kälte begrüßen ... Die Auswirkungen der Verkehrsintensivierung in der Schweiz auf Demographie, Wirtschaft und Raumstruktur (1870–1910) (Zürich 1997).
- FRIES 1995
J. C. Fries, Vor- und frühgeschichtliche Agrartechnik auf den Britischen Inseln und dem Kontinent. Eine vergleichende Studie, *Internationale Archäologie* 26 (Espelkamp 1995).
- FUHRER 1995
H. R. Fuhrer, Die beiden Schlachten von Zürich 1799, *Schriftenreihe der Gesellschaft für militärhistorische Studienreisen* 14 (Zürich 1995).
- GLUTZ ET AL. 1984
R. Glutz/K. Grewe/D. Müller, *Zeichenrichtlinien für topographische Pläne der archäologischen Denkmalpflege* (Köln 1984).
- HANTKE 1987
R. Hantke, Zur Erdgeschichte des Weinlandes. In: E. Akeret (Hrsg.), *Zürcher Weinland* (Winterthur 1987) 23–67.
- HAUPT 2012
P. Haupt, *Landschaftsarchäologie. Eine Einführung* (Darmstadt 2012).
- HESSE 2010
R. Hesse, LiDAR-derived Local Relief Models – a new tool for archaeological prospection. *Archaeological Prospection* 17, 2010, 67–72.
- HESSE 2013
R. Hesse, The changing picture of archaeological landscapes: lidar prospection over very large areas as part of a cultural heritage strategy. In: R. S. Opitz/D. C. Cowley (Hrsg.), *Interpreting Archaeological Topography. Occasional publication of the Aerial Archaeology Research Group* 5 (Oxford 2013) 171–183.
- HESSE 2014
R. Hesse, Change detection using airborne lidar and photogrammetry: problematic issues. Poster der Konferenz der Aerial Archaeology Research Group, Dublin, Irland, 24.–26. September 2014. URL: https://www.academia.edu/8458114/Change_detection_using_airborne_lidar_and_photogrammetry_problematic_issues (17.09.2015)
- HESSE 2016A
R. Hesse, Visualisierung hochauflösender Digitaler Geländemodelle mit LiVT. In: U. Lieberwirth/I. Herzog (Hrsg.), *3D-Anwendungen in der Archäologie. Computeranwendungen und quantitative Methoden in der Archäologie – Workshop der AG CAA und des Exzellenzclusters Topoi* 2013. *Berlin Studies of the Ancient World* 34 (Berlin 2016) 109–128.
- HESSE 2016B
R. Hesse, Possibilities and challenges in the application of multi-temporal airborne lidar data sets for

- the monitoring of archaeological landscapes. In: W. Börner, S. Uhlirz (Hrsg.), *Proceedings of the 20th Conference on Cultural Heritage and New Technologies 2015* (Wien 2016).
- HESSE/BOFINGER 2015
R. Hesse/J. Bofinger, Large area archaeological mapping and prospection using multiple lidar visualisation techniques: Challenges, results and implications for archaeological research and heritage management. In: A.G. Posluschny, (Hrsg.), *Sensing the Past. Contributions from the ArcLand Conference on Remote Sensing for Archaeology* (Bonn 2015), 60–61.
- HÖFLE/PFEIFER 2007
B. Höfle/N. Pfeifer, Correction of laser scanning intensity data: Data and model-driven approaches. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 62, 2007, 415–433.
- HOLDEN ET AL. 2002
N. Holden/P. Horne/R. Bewley, High-resolution digital airborne mapping and archaeology. In: R. Bewley/W. Raczkowski (Hrsg.), *Aerial archaeology. NATO Science Series 1 337* (Amsterdam 2002) 173–180.
- IRNIGER 1996
M. Irniger, Landwirtschaft in der frühen Neuzeit. In: M. Flüeler-Grauwiler/N. Flüeler (Hrsg.), *Geschichte des Kantons Zürich. Geschichte des Kantons Zürich 2* (Zürich 1996) 66–125.
- KARL 1814
Erzherzog Karl, *Geschichte des Feldzuges von 1799 in Deutschland und in der Schweiz. 1. Theil* (Wien 1814).
- KARL 1819
Erzherzog Karl, *Geschichte des Feldzuges von 1799 in Deutschland und in der Schweiz. Zweiter Theil* (Wien 1819).
- KOKALJ ET AL. 2011A
Ž. Kokalj/K. Zakšek/K. Oštir, Application of sky-view factor for the Visualisation of historic landscape features in lidar-derived relief models. *Antiquity* 85, 2011, 263–273.
- KOKALJ ET AL. 2011B
Ž. Kokalj/K. Zakšek/K. Oštir, Sky-View Factor as a Relief Visualization Technique. *Remote Sensing* 3, 2011, 398–415.
- KOKALJ ET AL. 2013
Ž. Kokalj/K. Zakšek/K. Oštir, Visualisations of lidar derived relief models. In: R.S. Opitz/D.C. Cowley (Hrsg.), *Interpreting Archaeological Topography. Occasional publication of the Aerial Archaeology Research Group 5* (Oxford 2013) 100–114.
- KURZ 2008
G. Kurz, Ein Stadttor und Siedlungen bei der Heuburg (Gemeinde Herberlingen-Hundersingen, Kreis Sigmaringen). Zu den Grabungen in der Vorburg von 2000 bis 2006. In: D. Krausse (Hrsg.), *Frühe Zentralisierungs- und Urbanisierungsprozesse. Forschungen und Berichte zur Vor- und Frühgeschichte in Baden-Württemberg 101* (Stuttgart 2008) 185–208.
- LICHTI/SKALOUD 2010
D. Lichti/J. Skaloud, Registration and Calibration. In: G. Vosselman/H.-G. Maas (Hrsg.), *Airborne and terrestrial laser scanning* (Dunbeath 2010) 83–133.
- MAAS 2010
H.-G. Maas, Forestry Applications. In: G. Vosselman/H.-G. Maas (Hrsg.), *Airborne and terrestrial laser scanning* (Dunbeath 2010) 213–235.
- MÄDER/NAGY 2010
A. Mäder/P. Nagy, Eine hallstattzeitliche Grabkammer aus Oberstammheim-Geeren (ZH). *Archäologie Schweiz* 33.3, 2010, 22–27.
- MCNEARY 2014
R. McNeary, Applications of Airborne LiDAR for Cultural Heritage Management Initiatives in Northern Ireland. In: H. Kamermams/M. Gojda/A. Posluschny, *A Sense of the Past: Studies in Current Archaeological Applications of Remote Sensing and Non-invasive Prospection Methods. BAR International Series 2588* (Oxford 2014) 67–82.
- MEIER 1986
T. Meier, *Handwerk, Hauswerk, Heimarbeit. Nicht-agrarische Tätigkeiten und Erwerbsformen in einem traditionellen Ackerbaugebiet des 18. Jahrhunderts* (Zürcher Unterland) (Zürich 1986).
- MLEKUŽ 2013
D. Mlekuž, Messy landscape: lidar and the practices of landscaping. In: R.S. Opitz/D.C. Cowley (Hrsg.), *Interpreting Archaeological Topography. Occasional publication of the Aerial Archaeology Research Group 5* (Oxford 2013) 88–99.

NAGY 1995

P. Nagy, Luftbildarchäologie im Kanton Zürich – Aufbau und Organisation. In: J. Kunow (Hrsg.), Luftbildarchäologie in Ost- und Mitteleuropa. Aerial archaeology in eastern and central Europe. Internationales Symposium, Kleinmachnow, 26.–30. September 1994. Forschungen zur Archäologie im Land Brandenburg 3 (Potsdam 1995) 271–276.

NOVÁK 2014

D. Novák, Local Relief Model (LRM) Toolbox for ArcGIS. URL: [https://www.academia.edu/5618967/Local_Relief_Model_LRM_Toolbox_for_ArcGIS_UPDATE_2014-10-7_\(17.08.2015\)](https://www.academia.edu/5618967/Local_Relief_Model_LRM_Toolbox_for_ArcGIS_UPDATE_2014-10-7_(17.08.2015)).

NÜESCH 1969

P. Nüesch, Zürcher Zehntenpläne. Die Zehntenpläne im Staatsarchiv Zürich als Quellen geographischer Forschung (Zürich 1969).

OBERLI 1990

A. Oberli, Die Wild-Karte des Kantons Zürich 1852–1868. *Cartographica Helvetica* 2, 1990, 27–39.

OPITZ 2013

R. S. Opitz, An overview of airborne and terrestrial laser scanning in archaeology. In: R. S. Opitz/D. C. Cowley (Hrsg.), *Interpreting Archaeological Topography*. Occasional publication of the Aerial Archaeology Research Group 5 (Oxford 2013) 13–31.

OPITZ/COWLEY 2013

R. S. Opitz/D. C. Cowley, Interpreting archaeological topography: lasers, 3D data, observation, visualisation and applications. In: R. S. Opitz/D. C. Cowley (Hrsg.), *Interpreting Archaeological Topography*. Occasional publication of the Aerial Archaeology Research Group 5 (Oxford 2013) 1–12.

ORTENBURG 1988

G. Ortenburg, Waffe und Waffengebrauch im Zeitalter der Revolutionskriege, Heerwesen der Neuzeit. Abteilung III. Das Zeitalter der Revolutionskriege 1 (Koblenz 1988).

PALMER 2013

R. Palmer, Part II: Mapping the Past. In: C. Musson/R. Palmer/S. Campana (Hrsg.), *Flights into the past*. Occasional publication of the Aerial Archaeology Research Group 4 (Heidelberg 2013) 156–269.

PAYSEN 2009

A. Paysen, Nachhaltige Energiewirtschaft? Brenn- und Kohlholznutzung in Schleswig-Holstein in Mittelalter und früher Neuzeit. Unpublizierte Dissertation, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel (2009).

PFENNINGER 1987

K. Pfenninger, Der Rebbau im Weinland. In: E. Akeret (Hrsg.), *Zürcher Weinland* (Winterthur 1987) 121–126.

POIRIER ET AL. 2013

N. Poirier/R. S. Opitz/L. Nuninger/K. Oštir, Lidar in Mediterranean agricultural landscapes: reassessing land use in the Mauguio. In: R. S. Opitz/D. C. Cowley (Hrsg.), *Interpreting Archaeological Topography*. Occasional publication of the Aerial Archaeology Research Group 5 (Oxford 2013).

QUASTEN 1997

H. Quasten, Grundsätze und Methoden der Erfassung und Bewertung kulturhistorischer Phänomene der Kulturlandschaft. In: W. Schenk/K. Fehn/D. Denecke (Hrsg.), *Kulturlandschaftspflege* (Berlin/Stuttgart 1997) 19–34.

RENFREW/BAHN 2003

C. Renfrew/P. G. Bahn, *Archaeology. Theories, methods, and practice* (New York 2003).

RISBØL 2013

O. Risbøl, Cultivating the ‚wilderness‘ – how lidar can improve archaeological landscape understanding. In: R. S. Opitz/D. C. Cowley (Hrsg.), *Interpreting Archaeological Topography*. Occasional publication of the Aerial Archaeology Research Group 5 (Oxford 2013) 51–62.

RISBØL ET AL. 2006

O. Risbøl/A. K. Gjertsen/K. Skare, Airborne laser scanning of cultural remains in forests: some preliminary results from a Norwegian project. In: S. Campana/M. Forte (Hrsg.), *From space to place*. 2nd International Conference on Remote Sensing in Archaeology. Proceedings of the 2nd international workshop, Rom, 4.–7. Dezember 2006. *BAR International Series* 1568 (Oxford 2006) 107–112.

RISBØL ET AL. 2013

O. Risbøl/O. M. Bollandsås/A. Nesbakken/H. O. Ørka/E. Næsset/T. Gobakken, Interpreting cultural remains in airborne laser scanning generated digital terrain models: effects of size and shape on detec-

- tion success rates. *Journal of Archaeological Science* 40, 2013, 4688–4700.
- RISBØL ET AL. 2015
O. Risbøl/Ch. Briese/M. Doneus/A. Nesbakken, Monitoring cultural heritage by comparing DEMs derived from historical photographs and airborne laser scanning. *Journal of Cultural Heritage* 16, 2005, 202–209.
- SCHENK 1997
W. Schenk, Gedankliche Grundlegung und Konzeption des Sammelbandes „Kulturlandschaftspflege“. In: W. Schenk/K. Fehn/D. Denecke (Hrsg.), *Kulturlandschaftspflege* (Berlin/Stuttgart 1997) 3–9.
- SITHOLE/VOSSELMAN 2004
G. Sithole/G. Vosselman, Experimental comparison of filter algorithms for bare-Earth extraction from airborne laser scanning point clouds. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 59, 2004, 85–101.
- SITTLER 2004
B. Sittler, Revealing historical landscapes by using airborne laser scanning. A 3-D model of ridge and furrow in forests near Rastatt (Germany). In: M. Thies/B. Koch/H. Spiecker/H. Weinacker (Hrsg.), *Proceedings of the ISPRS working group VIII/2. Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment*, Freiburg, 3.–6. Oktober 2004. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* 36, 2004, Teil 8/W2, 258–261.
- SITTLER ET AL. 2005
B. Sittler/R. Siwe/Gültlinger M., Airborne Laser Scanning as a New Remote Sensing Tool for Assessing Historic Landscapes. Generation of a Digital Elevation Model of Ridge and Furrow Fossilized under a Forest near Rastatt (Germany). In: J. Bourgeois/M. Meganck (Hrsg.), *Aerial photography and archaeology 2003. Archaeological reports Ghent University 4* (Ghent 2005) 213–220.
- SITTLER/SHELLBERG 2006+
B. Sittler/S. Schellberg, The potential of LIDAR in assessing elements of cultural heritage hidden under forest canopies or overgrown by vegetation: Possibilities and limits in detecting microrelief structures for archaeological surveys. In: S. Campana/M. Forte (Hrsg.), *From space to place. 2nd International Conference on Remote Sensing in Archaeology. Proceedings of the 2nd international workshop*, Rom, 4.–7. Dezember 2006. *BAR International Series* 1568 (Oxford 2006) 117–122.
- SPONAGEL ET AL. 2005
H. Sponagel/W. Grotenthaler/H. Joisten/D. Kühn/K. J. Sabel, *Bodenkundliche Kartieranleitung* (Hannover 2005).
- STROMER 2007
M. Stromer, *Historische Verkehrswege im Kanton Zürich. Eine Publikation zum Inventar historischer Verkehrswege der Schweiz IVS*, herausgegeben vom Bundesamt für Strassen (ASTRA) (Bern 2007).
- ŠTULAR ET AL. 2012
B. Štular/Ž. Kokalj/K. Oštir/L. Nuninger, Visualization of lidar-derived relief models for detection of archaeological features. *Journal of Archaeological Science* 39, 2012, 3354–3360.
- TRÄCHSEL 1962
M. Trächsel, *Die Hochäcker der Nordostschweiz* (Zürich 1962).
- TRIER/PILØ 2012
Ø. D. Trier/L. H. Pilø, Automatic Detection of Pit Structures in Airborne Laser Scanning Data. *Archaeological Prospection* 19, 2012, 103–121.
- VOSSELMAN/KLEIN 2010
G. Vosselman/R. Klein, Visualisation and Structuring of Point Clouds. In: G. Vosselman/H.-G. Maas (Hrsg.), *Airborne and terrestrial laser scanning* (Dunbeath 2010) 45–81.
- WAGNER ET AL. 2003
W. Wagner/A. Ullrich/C. Briese, Der Laserstrahl und seine Interaktion mit der Erdoberfläche. *Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation* 91, 2003, 223–235.
- WAGNER ET AL. 2004
W. Wagner/A. Ullrich/T. Melzer/C. Briese/K. Kraus, From single-pulse to full-waveform airborne laser scanners: Potential and practical challenges. In: O. Altan (Hrsg.), *Geo-Imagery Bridging Continents. 20th ISPRS Congress*, Istanbul, Türkei, 12.–23. Juli 2004. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* 35, 2004, Teil B3, 201–206.
- WEHR/LOHR 1999
A. Wehr/U. Lohr, Airborne laser scanning – an introduction and overview. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 54, 1999, 68–82.

WILSON 1982

D.R. Wilson, Air Photo Interpretation for Archaeologists (London 1982).

YOKOYAMA ET AL. 2002

R. Yokoyama/Shirasawa Michio/R.J. Pike, Visualizing Topography by Openness: A New Application of Image Processing to Digital Elevation Models. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 68, 2002, 257–265.

14 Verwendete Karten

ALTE LANDESKARTE 1956–65

Bundesamt für Landestopografie swisstopo, 1:25000.
URL auf Metadaten: <http://geolion.zh.ch/geodaten-service/show?nbid-1046> (22.09.2015)

DTM-AV

Digitales Terrainmodell der Amtlichen Vermessung.
Bundesamt für Landestopografie swisstopo. URL auf Metadaten: <http://geolion.zh.ch/geodatensatz/show?nbid-1004> (22.09.2015)

DUFORKARTE

Topographische Karte der Schweiz. Bundesamt für Landestopografie swisstopo, 1:100000, 1845–1865, Blatt IV.

GEOCOVER

Geologischer Atlas der Schweiz. Bundesamt für Landestopografie swisstopo, 1:25000, Vektordatensatz, Blatt 38, Blatt 52. URL auf Metadaten: <http://www.swisstopo.admin.ch/internet/swisstopo/de/home/products/maps/geology/geocover.parsys.75101.downloadList.1533.DownloadFile.tmp/meta.datade.pdf> (22.09.2015)

HISTORISCHE GEWÄSSERKARTE DES KANTONS ZÜRICH

Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft Kanton Zürich. URL auf Metadaten: <http://geolion.zh.ch/geodatenservice/show?nbid-324> (22.09.2015)

INVENTAR DER HISTORISCHEN VERKEHRSWEGE (IVS)

Bundesamt für Strassen (ASTRA), Vektordatensatz. URL auf Metadaten: <http://geolion.zh.ch/geodatensatz/show?nbid-452> (22.09.2015)

KATASTER

Amtliche Vermessung. Amt für Raumentwicklung Kanton Zürich. URL auf Metadaten: <http://geolion.zh.ch/geodatenservice/show?nbid-263> (22.09.2015)

ORTHOFOTOS SWISSIMAGE

Bundesamt für Landestopografie swisstopo. URL auf Metadaten: <http://geolion.zh.ch/geodatensatz/show?nbid-952> (22.09.2015)

LIDAR LASERSCANNING-GEODATEN KANTON ZÜRICH

Amt für Raumentwicklung Kanton Zürich. URL auf Metadaten: <http://geolion.zh.ch/geodatensatz/show?nbid=2618> (22.09.2015)

MESSTISCHBLÄTTER 1920–1950

Amt für Raumentwicklung Kanton Zürich, Messtischblätter der Gemeinden Oberstammheim, Ossingen, Trüllikon, Truttikon, Waltalingen und Unterstammheim.

SIEGFRIEDKARTE 1880

Topografischer Atlas der Schweiz. Bundesamt für Landestopografie swisstopo, Blatt 47 Diessenhofen 1885. URL auf Metadaten: <http://geolion.zh.ch/geodatenservice/show?nbid-1048> (22.09.2015)

SIEGFRIEDKARTE 1930

Topografischer Atlas der Schweiz. Bundesamt für Landestopografie swisstopo, Blatt 47 Diessenhofen 1932, Blatt 48 Stein 1932, Blatt 52 Andelfingen 1932, Blatt 53 Stammheim 1928. URL auf Metadaten: <http://geolion.zh.ch/geodatenservice/show?nbid-1050> (22.09.2015)

WILDKARTE

Topografische Karte des Kantons Zürich. Johannes Wild/Bundesamt für Landestopografie swisstopo, 1:25000. Blatt II Rheinau 1864, Blatt III Stammheim 1863, Blatt VI Flaach 1864, Blatt VII Andelfingen 1862. URL auf Metadaten: <http://geolion.zh.ch/geodatenservice/show?nbid=1380> (22.09.2015)

ZEHNTENPLAN OSSINGEN 1679

Anonym, Eigntlicher Grundriss des von einer hohen Thumb [Dom] Stifft Constanz in Ao 1640 der Statt Winterthur admodierten, in A0 1675 aber von der Statt Zürich mit Consens ermester Thumb Stifft um 18 Guldi an sich gezogenen Ossinger und darzu gehöriger Gysenhard und Langenmoser Zehenden. STAZH Plan Q 240.

ZEHNTENPLAN OSSINGEN 1777

Johannes Müller, Grund Riss des Ossinger Zehendens, gemeiner Stadt Zürich Korn Amt zudienende. STAZH Plan Q 241.

ZEHNTENPLAN TRÜLLIKON 1712

Hans Jakob Lavater [Grundriss des Zehntbezirks von Trüllikon]. STAZH Plan Q 272.

ZEHNTENPLAN TRUTTIKON 1764

STAZH Plan F 11.

ZEHNTENPLAN GUNTALINGEN 1739

P. Joseph [Wech], Obrist Caspar, Geometrischer Grundriss des Zehent Bezirks zu Guntalingen, aufgenommen Ao 1739 von P. Josepho, Procurator des Gottshauses Ittingen, copiert und vervollständigt Ao 1813 von Casp. Obrist. STAZH Plan Q 305.

15 Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1** J. Nyffeler nach OPITZ 2013, Abb. 2.11.
- Abb. 2** DONEUS 2008a, Abb. 1. Mit freundlicher Genehmigung von Ch. Briese.
- Abb. 3–7, 9–12, 16, 18, 22–23, 25–28, 30, 32–33, 38, 40, 44–48, 50–52, 56–57, 59, 61, 64** J. Nyffeler auf Basis Geodaten GIS-ZH (Amt für Raumentwicklung, Kanton Zürich).
- Abb. 8** J. Nyffeler nach BERARDIN et al. 2010, Abb. 1.10.
- Abb. 13–15, 17, 19, 29, 31, 34, 37, 41–43, 53–55, 63** J. Nyffeler
- Abb. 20** Mit freundlicher Genehmigung von K. Kruse.
- Abb. 21** HESSE 2016a, Abb. 3. Mit freundlicher Genehmigung von R. Hesse
- Abb. 24** KOKALJ et al. 2011a, Abb. 3. Mit freundlicher Genehmigung von Ž. Kokalj, ZRC SAZU.
- Abb. 35** J. Nyffeler auf Basis Geodaten GIS-ZH sowie swisstopo. Reproduziert mit Bewilligung von swisstopo (BA17008).
- Abb. 36** J. Nyffeler auf Basis Geodaten GIS-ZH (Amt für Raumentwicklung, Kanton Zürich) sowie Urs Leuzinger, Amt für Archäologie Thurgau, www.archaeologie.tg.ch.
- Abb. 39** MÄDER/NAGY 2010, Abb. 3. Mit freundlicher Genehmigung der Kantonsarchäologie Zürich.
- Abb. 49** J. Nyffeler auf Basis Karte Staatsarchiv, Kanton Zürich.
- Abb. 58, 60** Martin Bachmann, Kantonsarchäologie Zürich.
- Abb. 62** J. Nyffeler auf Basis swisstopo. Reproduziert mit Bewilligung von swisstopo (BA17008).

16 Beilagen

Karte 1 Kartierte Strukturen. Waldflächen werden grün, überbaute Parzellen braun dargestellt. Ausschnitt des Untersuchungsgebiets im Bereich der Gemeinden Ober- und Unterstammheim, M. 1:5000.

Karte 2 *Hillshade* (Lichteinfallswinkel: 30 Grad, Azimut: 315 Grad). Ausschnitt des Untersuchungsgebiets im Bereich der Gemeinden Ober- und Unterstammheim, M. 1:5000.

Karte 3 *Principal Component Analysis* (Lichteinfallswinkel: 10 Grad, Belichtungsrichtungen: 16). Ausschnitt des Untersuchungsgebiets im Bereich der Gemeinden Ober- und Unterstammheim, M. 1:5000.

Karte 4 *Slope*. Ausschnitt des Untersuchungsgebiets im Bereich der Gemeinden Ober- und Unterstammheim, M. 1:5000.

Karte 5 *Positive Openness* (Radius: 10 Meter, Anzahl Richtungen: 16). Ausschnitt des Untersuchungsgebiets im Bereich der Gemeinden Ober- und Unterstammheim, M. 1:5000.

Karte 6 *Negative Openness* (Radius: 10 Meter, Anzahl Richtungen: 16). Ausschnitt des Untersuchungsgebiets im Bereich der Gemeinden Ober- und Unterstammheim, M. 1:5000.

Karte 7 *Sky View Factor* (Radius: 10 Meter, Anzahl Richtungen: 16). Ausschnitt des Untersuchungsgebiets im Bereich der Gemeinden Ober- und Unterstammheim, M. 1:5000.

Karte 8 *Local Relief Model* (Radius: 10 Meter, Filterform: Kreis). Ausschnitt des Untersuchungsgebiets im Bereich der Gemeinden Ober- und Unterstammheim, M. 1:5000.

Karte 9 *Local Dominance* (min. Radius: 5 Meter, max. Radius: 15 Meter, Anzahl Richtungen: 24, Beobachtungshöhe: 1,7 Meter). Ausschnitt des Untersuchungsgebiets im Bereich der Gemeinden Ober- und Unterstammheim, M. 1:5000.

Karte 10 Orthofoto. Ausschnitt des Untersuchungsgebiets im Bereich der Gemeinden Ober- und Unterstammheim, M. 1:5000.

Karten erstellt von auf Basis GIS-ZH (Amt für Raumentwicklung, Kanton Zürich)



University
of Bamberg
Press

Gegenstand dieser Arbeit ist die methodische und praktische Auseinandersetzung mit LiDAR-Daten und deren Einsatz in der Archäologie. Hierzu wurde ein Gebiet von 51 km² Fläche im Kanton Zürich, Schweiz, ausgewertet. Als Basis diente ein digitales Geländemodell, dem ein hochauflösender Airborne Laser Scanning-Datensatz aus dem Jahr 2014 zu Grunde liegt.

Hauptaugenmerk der Arbeit liegt auf der Prüfung, der Verarbeitung und der Auswertung des digitalen Geländemodells. Die dafür verwendeten Visualisierungen und die verschiedenen Arbeitsschritte werden erklärt und auftretende Schwierigkeiten besprochen. Die Ergebnisse dieser Arbeit sollen einerseits dazu dienen, den Einstieg in die Auswertung von LiDAR-Datensätzen zu erleichtern. Andererseits zeigen die Ergebnisse der Auswertung deutlich das Potenzial von LiDAR für die Archäologie des Schweizer Mittellands auf. In einem weiteren Kapitel werden Möglichkeiten diskutiert, wie die Ergebnisse von LiDAR-Kartierungen im Fundstellenmanagement einer Denkmalpflege sowie in der archäologischen Forschung genutzt werden können.



ISBN 978-3-86309-538-3



9 783863 095383

www.uni-bamberg.de/ubp/