

Neue Wege der archäologischen Prospektion aus der Luft Mit Airborne-Laserscanning Bodendenkmalen auf der Spur

Der klassischen Luftbildarchäologie verdankt die archäologische Denkmalpflege in Baden-Württemberg eine Vielzahl von Neuentdeckungen, die sich vor allem im offenen Gelände zu erkennen gaben. Nachdem nun seit einigen Jahren die Landschaft mit Lasertechnologie aus der Luft abgetastet und erfasst werden kann, bieten sich für die archäologische Prospektion neue faszinierende Möglichkeiten, auf diese Weise auch in Waldgebieten Bodendenkmale zu lokalisieren. Da die Vegetationsdecke mit rechnerischen Verfahren entfernt werden kann, führt der „Blick durch das Blätterdach“ zu neuen Erkenntnissen über archäologische Hinterlassenschaften in Baden-Württemberg.

Jörg Bofinger/Ralf Hesse

Die ersten Schritte mit der neuen Technologie

Beim ersten 3D-Geländescan, der im Jahr 2003 für die archäologische Denkmalpflege in Baden-Württemberg angefertigt wurde, stand der frühkeltische Fürstensitz Heuneburg an der Oberen Donau im Zentrum des Interesses. An diesem Beispiel konnten erste Erfahrungen gesammelt und Einsatzmöglichkeiten für archäologische Fragestellungen erprobt werden (vgl. hierzu Nachrichtenblatt 3/2007).

Während der ersten Jahre der Verwendung von Laserscandaten für archäologische Fragestellungen in Baden-Württemberg lag der Fokus zunächst vor allem auf einzelnen Fundstellen oder Geländedenkmalen. Als Beispiele sind etwa Grabhügelnekropolen oder der Obergermanisch-Raetische Limes zu nennen, wo nach gezielten Befliegungen detaillierte Beobachtungen und Auswertungen allein auf Basis der visuellen Analyse von Graustufenreliefbildern durchgeführt wurden.

In den Jahren zwischen 2000 und 2005 wurde im Auftrag der staatlichen Landesvermessung Baden-Württemberg die gesamte Oberfläche des Bundeslandes mit der neuen Laserscan-Methode erfasst. Dank entsprechender Rahmenvereinbarungen steht dieser komplette Datensatz der Landesdenkmalpflege für wissenschaftliche und denkmalpflegerische Zwecke zur Verfügung.

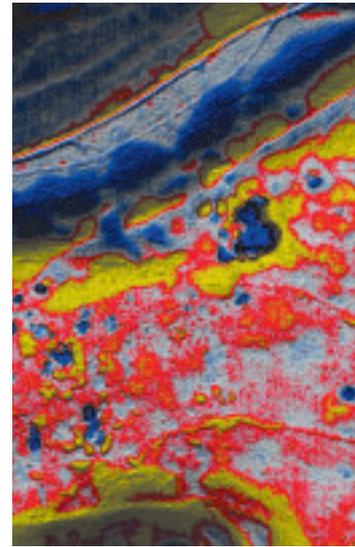
Damit existieren hervorragende Voraussetzungen für eine flächendeckende Auswertung des Bestands auf archäologische Denkmale und Kulturlandschaftselemente. Um eine Analyse dieser enormen

Datenmenge in absehbarer Zeit zu ermöglichen, wurde im Rahmen eines Projektes des Landesamts für Denkmalpflege ein Verfahren zur computer-gestützten Auswertung des digitalen Geländemodells entwickelt und zunächst in zwei großen bewaldeten Testregionen erprobt (s. u.).

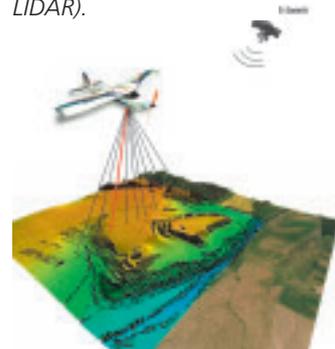
LIDAR – Die Methode

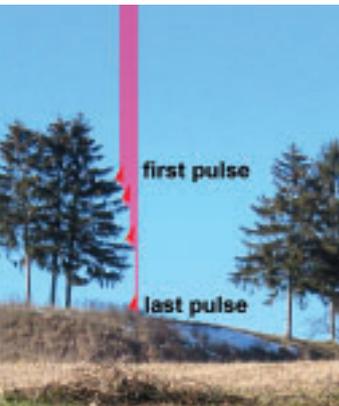
Das Kürzel LIDAR steht für „Light Detection and Ranging“, auch als ALS (Airborne-Laser-Scan) bezeichnet. Damit ist hier die Laser-Abtastung der Erdoberfläche von einem Flugzeug, Helikopter oder einem anderen Fluggerät aus gemeint. Ein gepulster Laserstrahl wird ausgesendet und die Laufzeit von der Aussendung des Impulses bis zum Empfang des rückgestreuten Impulses gemessen. Daraus kann die Entfernung zwischen Flugzeug und rückstreuendem Objekt berechnet werden. Gleichzeitig wird die präzise Position und Lage des Flugzeugs mittels GPS ermittelt (Abb. 1).

Von jedem emittierten Laserimpuls kann ein Teil von der Erdoberfläche selbst, aber auch zum Beispiel von Vegetation reflektiert werden. Durch Auswertung des ersten und letzten reflektierten Signals (first pulse – last pulse) beziehungsweise des gesamten zeitlichen Verlaufs des reflektierten Signals (full waveform) kann in der Prozessierung der Daten zwischen Erdoberfläche und Vegetation unterschieden werden (Abb. 2). Aus den so gefilterten Punktwolken-Daten können „Digitale Oberflächenmodelle“ (DOM) mit Bebauung und Vegetation sowie „Digitale Geländemodelle“ (DGM) der eigentlichen Oberfläche erstellt werden (Abb. 3).



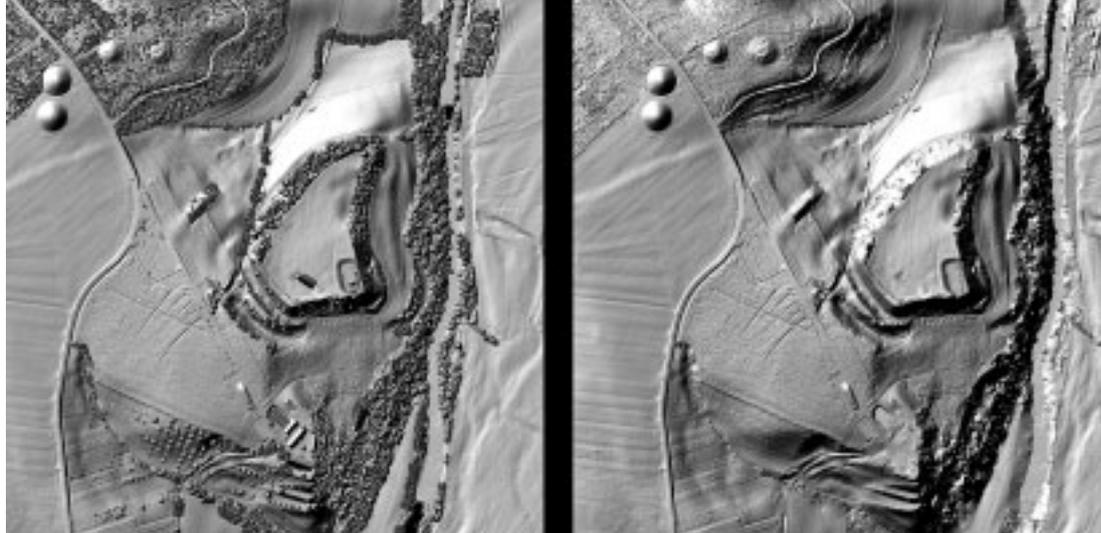
1 Schema zur Methode des flugzeuggestützten Laserscannings (Airborne-LIDAR).





2 Schema der Laserabtastung von Geländeoberflächen: Der „first pulse“ wird von der Geländeoberfläche bzw. der Vegetation oder Bebauung reflektiert. Aus diesen Punkten wird das digitale Oberflächenmodell (DOM) berechnet. Nur aus den „last pulse“-Messungen wird das digitale Geländemodell (DGM, DTM) erstellt.

3 Geländeausschnitt im Bereich der Heuneburg in der Darstellung mit Vegetation und Bebauung (DOM, links) und als reines Oberflächenabbild (DTM, DGM, rechts).



Die räumliche Auflösung der LIDAR-Daten der Landesvermessung liegt momentan meist bei etwa 1 m, die Höhengenaugigkeit im Zentimeter- bis Dezimeterbereich. Bei Bedarf kann durch höhere Abtastrate, geringere Flughöhe und langsamere Fluggeschwindigkeit eine höhere Auflösung erreicht werden.

Die hohe Auflösung und Genauigkeit sowie die „Durchdringung“ der Vegetation sind für archäologische Anwendungen von besonderer Bedeutung, da hierdurch potenziell auch stark erodierte Bodendenkmale selbst unter Wald entdeckt werden können, die sich nur durch kleine Höhenunterschiede von der Umgebung abzeichnen.

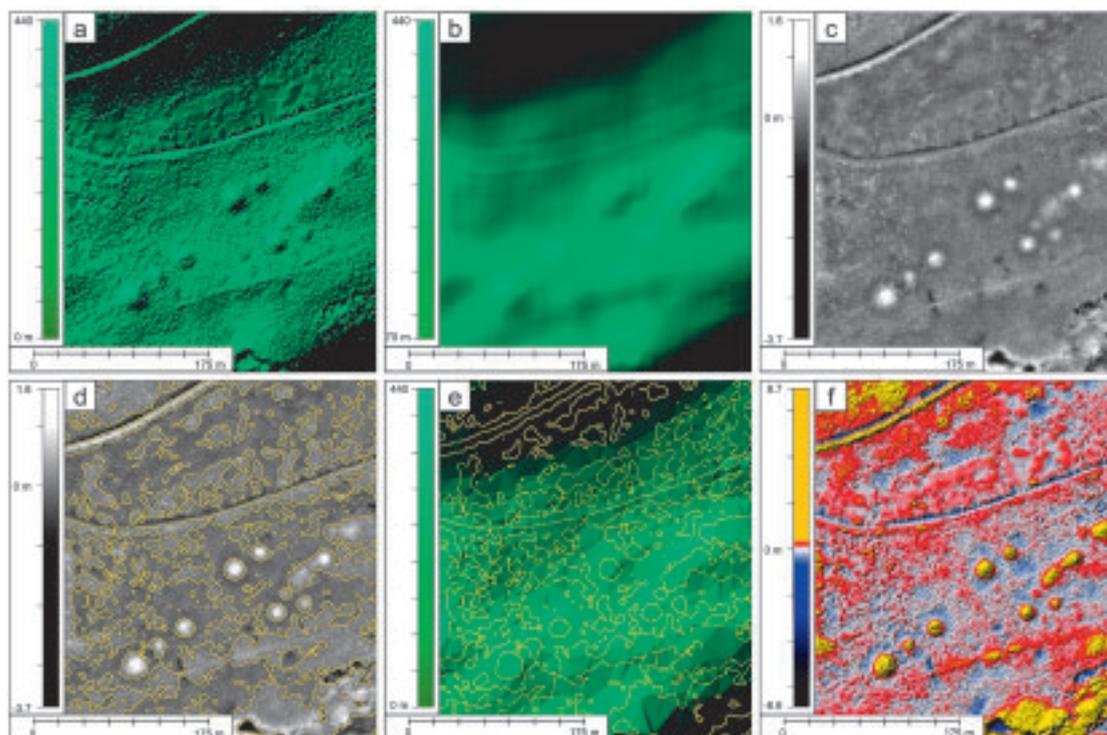
Bei einer rein visuellen Interpretation des DGM mit simulierter Beleuchtung ist allerdings die Sichtbarkeit von Bodendenkmalen oft stark von der gewählten Himmelsrichtung und Höhe der Lichtquelle abhängig. Das bedingt einerseits einen hohen Arbeitszeitaufwand und macht andererseits die Erfassung von Bodendenkmalen unsicher und subjektiv. Abwandlungen, insbesondere durch

automatisch den lokalen Hangneigungen angepasste Beleuchtungsberechnungen, sind sehr rechenzeitaufwendig und liefern – zumindest für archäologische Fragestellungen – nur geringfügig verbesserte Visualisierungen.

Das digitale Geländemodell – Analyse-möglichkeit in der dritten Dimension

Digitale Geländemodelle enthalten lediglich Höheninformationen der Erdoberfläche, und potenzielle archäologische Befunde zeichnen sich in der Regel – unter anderem aufgrund von Erosion – durch sehr geringe Höhenunterschiede ab. Von Interesse sind also kleinräumige topografische Oberflächenstrukturen, die geringe Höhenunterschiede gegenüber ihrer Umgebung aufweisen. Weniger interessant in diesem Zusammenhang – wenn auch als Kontextinformation unabdingbar – sind die großräumigen Landschaftsformen. Das Ziel der LIDAR-Datenverarbeitung für die archäologische Prospektion ist hier also die Hervorhebung

4 Datenverarbeitungsschritte zur Erstellung eines Feinreliefmodells (LRM): (a) DGM, berechnet aus Punktwolke; (b) mittels digitaler Filter geglättete Oberfläche des DGM; (c) Höhendifferenzkarte von DGM und geglättetem DGM; (d) Grenzen zwischen positiven und negativen Reliefanomalien; (e) Bereinigung des geglätteten DGM; (f) farbdifferenzierte Darstellung des LRM.



kleinräumiger, flacher Strukturen gegenüber den großräumigen Landschaftsformen.

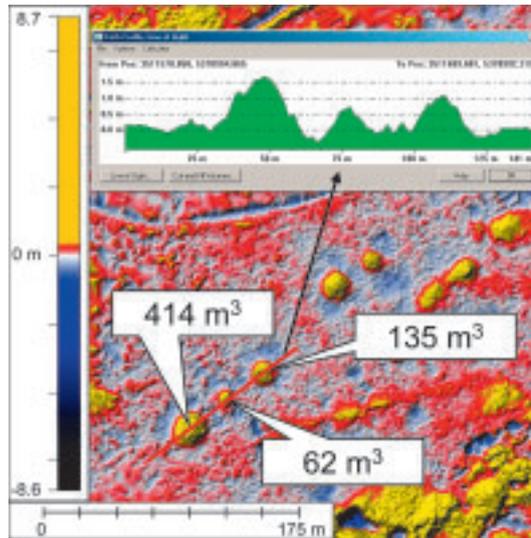
Solche kleinräumigen Strukturen können mit rechnerischen Verfahren aus dem DGM extrahiert werden (Abb. 4), indem man die Oberfläche mittels digitaler Filter glättet und diese geglättete Oberfläche vom ursprünglichen Geländemodell subtrahiert. Kleinräumige Erhebungen erscheinen in einer neuen Darstellung somit als positive Werte, Vertiefungen als negative Werte.

Dieses Vorgehen mit dem geschilderten Ergebnis hat für rein visuelle Anwendungen gegenüber der konventionellen Visualisierung den Vorteil, dass nun kleinräumige Erhebungen und Vertiefungen besser dargestellt werden können. Für metrische Anwendungen, also zur Messung von relativen Höhenprofilen oder Volumenbestimmungen, ist das Ergebnis dieses Bearbeitungsschrittes jedoch nicht geeignet, da relative Höhenunterschiede nicht realistisch wiedergegeben werden. Daher sind weitere Datenverarbeitungsschritte erforderlich. Hierbei dienen die Umrisse der kleinräumigen positiven und negativen topografischen Anomalien als Schablone, um diese Anomalien aus dem DGM auszuschneiden. Eine erneute Differenzbildung zwischen DGM und dem auf diese Weise bereinigten Höhenmodell hat ein realistischeres digitales Modell lokaler Höhenanomalien (Lokales Reliefmodell, LRM) zum Ergebnis. Hier können nun zum Beispiel Höhenprofile erstellt und Volumenberechnungen mit wenigen Mausklicks durchgeführt werden (Abb. 5).

Schönbuch und Südschwarzwald – Neue Fundstellen im Wald

Im ersten Schritt der praktischen Anwendung wurden mit Schönbuch und Südschwarzwald zunächst zwei bewaldete Testgebiete im Zentrum und im Süden Baden-Württembergs ausgewählt (Abb. 6). Im ca. 600 km² großen Forstgebiet des Schönbuchs zwischen Böblingen und Tübingen waren vor Beginn der LIDAR-Auswertung rund 2000 archäologische Fundstellen bekannt. Hier konnte die Zahl an Verdachtsflächen um rund 25 Prozent vergrößert werden. Beeindruckender noch fallen die Zahlen für das zweite Testgebiet im Südschwarzwald aus. Dort wurden die LIDAR-Daten im Bereich zwischen Lörrach und westlichem Bodensee auf einer Fläche von rund 2500 km² ausgewertet und die Zahl an Verdachtsflächen konnte um das Zehnfache erhöht werden.

Die große Mehrheit der erfassten Fundstellenkategorien und Kulturlandschaftselemente lässt sich auf die Ausbeutung natürlicher Ressourcen zurückführen, insbesondere in Form von Holzkohleproduktion (Meilerpodien), landwirtschaftlicher Produktion (Wölbäcker und terrasierte Hänge) so-



5 Feinreliefdarstellung der Grabhügelgruppe Dürrenberg bei Kirchentellinsfurt, Kreis Reutlingen, mit Höhenprofil und Hügelvolumen.

wie Bergbau (Pingen und Steinbrüche). Als wichtige Elemente einer Kulturlandschaft verdeutlichen sie eindrucksvoll die landschaftsprägende Rolle des Menschen in seiner Umwelt. Spuren ehemaliger Transport- und Handelsverbindungen sind in Form von Hohlwegen regional häufig. Darüber hinaus wurden eine große Zahl potenzieller Grabhügel sowie einige Befestigungsanlagen aus unterschiedlichen vor- und frühgeschichtlichen Epochen sowie aus dem Mittelalter und der Neuzeit identifiziert (Abb. 7).

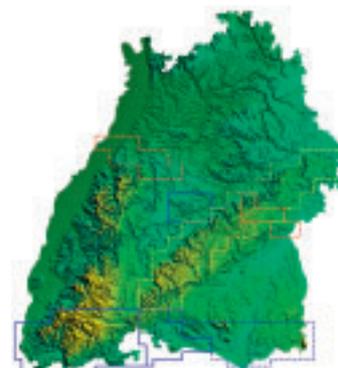
In den ersten Monaten der Projektlaufzeit seit Mai 2009 wurde der beschriebene Ablauf der Datenverarbeitung auf der Grundlage vorangegangener Arbeiten weiterentwickelt, implementiert und getestet. Eine Herausforderung des Projekts war es, die großen Datenmengen effizient zu bearbeiten. Aus diesem Grund wurden neben der Umsetzung der eigentlichen Datenverarbeitung Benutzeroberflächen zur effizienten Verwaltung und Bearbeitung der Daten entwickelt.

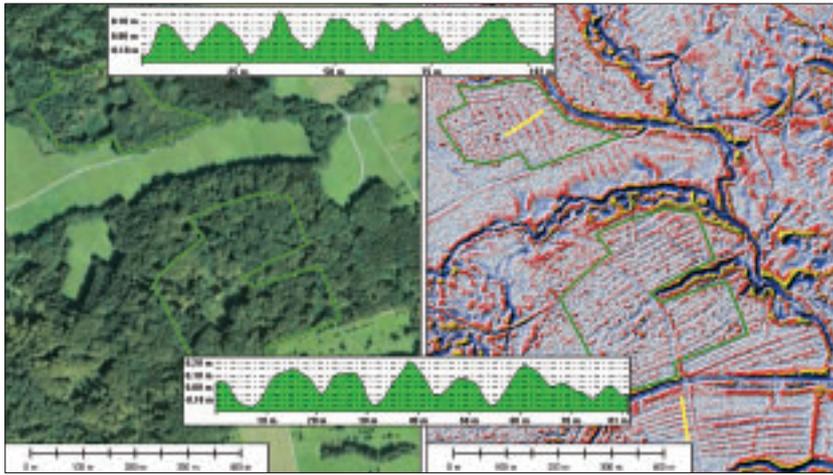
Grabhügelfelder und Pingen – Kulturlandschaftselemente aus allen Zeiten

Besonders eindrucklich lassen sich die Möglichkeiten der LIDAR-Auswertung von kleinräumigen Reliefunterschieden, die auf menschliche Aktivitäten zurückzuführen sind, am Beispiel einer Grabhügelgruppe von Inzlingen, Kreis Lörrach, darstellen. Während im Satellitenfoto zunächst keinerlei Hinweise auf vorgeschichtliche Grabhügel im Wiesengelände zu erkennen sind, erlaubten besondere Witterungsbedingungen und letzte Schneereiste zum Zeitpunkt einer Luftaufnahme die Lokalisierung einzelner Hügel. Erst die entsprechend aufbereiteten, auf das lokale Relief bezogenen LIDAR-Daten zeigen deutlich die Lage der einzelnen Hügel der kleinen Nekropole an (Abb. 8).

Als Hinweis auf ein Pingenfeld im Wald bei Dettighofen-Albführen, Kreis Waldshut, kann die Kon-

6 Karte des Landes Baden-Württemberg mit Eintrag der Testregionen und der weiteren Untersuchungsgebiete.





7 Kulturlandschaftselemente und Kulturdenkmale im Geländescan:

- (a) Wölbäcker unter Wald bei Walddorfhäslach, Kreis Reutlingen;
- (b) frühneuzeitliche Befestigungsanlagen bei Bad Säckingen, Kreis Waldshut.

zentration zahlreicher regelmäßiger, runder Vertiefungen in enger Nachbarschaft interpretiert werden (Abb. 9).

Selbstverständlich kann häufig auf Basis der LIDAR-Daten nur festgestellt werden, dass zwar anthropogene Elemente in der Landschaft vorhanden sind, eine genauere Ansprache und Einordnung ist allerdings ohne Überprüfung im Gelände kaum möglich. Hierin freilich unterscheidet sich die LIDAR-Analyse nicht von der konventionellen Luftbildarchäologie. In der Regel kann jedoch entschieden werden, ob es sich bei den im LIDAR-Bild erscheinenden Strukturen um Kulturlandschaftselemente handelt. Das Alter der Befunde ist in den meisten Fällen ohne zusätzliche Informationen, die direkt am Boden oder aus weiterführenden Quellen gewonnen werden müssen, zunächst nicht näher zu bestimmen.

Problematisch für die visuelle Interpretation kann es weiterhin sein, wenn anthropogene Reliefanomalien durch natürliche Unebenheiten überlagert werden: Eine starke virtuelle Glättung am Computer schließt zwar größere Objekte mit ein, verursacht aber auch größere Überlagerungen durch natürliche konvexe und konkave Formen (z. B. Hangkanten, Bergkuppen, Talsohlen), wobei es durchaus zu Fehlinterpretationen kommen kann. Aus diesem Grund können während der ersten Phase der Analyse auch zunächst lediglich Verdachtsflächen umrissen und markiert werden.

- 8 Vorgeschichtliches Grabhügelfeld bei Inzlingen, Kreis Lörrach, in unterschiedlichen Aufnahmen:** (a) Google-Earth Satellitenbild; (b) Archäologisches Luftbild, bei dem bestimmte Witterungsfaktoren einzelne Grabhügel anzeigen; (c) DGM in Graustufenreliefdarstellung; (d) Feinreliefdarstellung, in dem die Hügel als rote Erhebungen zu erkennen sind.

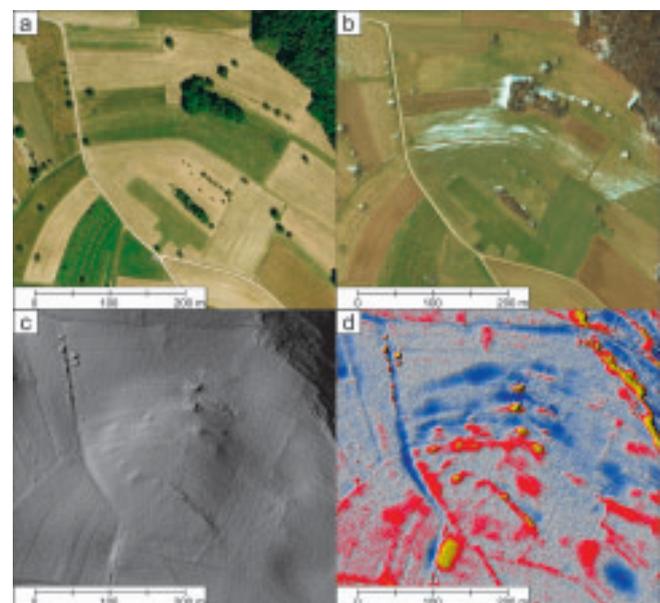
Bedeutung für die Denkmalpflege

Mithilfe von LIDAR ist erstmals überhaupt eine flächendeckende Prospektion einschließlich der Waldgebiete möglich. Die Ergebnisse dieser Prospektion sind von großer Bedeutung für die Denkmalpflege, da sie durch die Einbindung in die archäologische Fundstellendatenbank als Planungsgrundlage für die Vorbereitung von archäologischen Forschungsprojekten oder im Rahmen von Voruntersuchungen für geplante Bauprojekte wie zum Beispiel Erschließung von Baugebieten oder



Pipeline- und Bahntrassen genutzt werden können. Gleichzeitig zeigt sich, dass der Blick vom „Einzeldenkmal“ auf ganze „Denkmallandschaften“ geweitet werden kann, da nun beispielsweise die Funktion ganzer Gruppen von Denkmalen in ihrer Kulturlandschaft erkennbar wird, wie etwa ein Verteilungsmuster von Holzkohlemeilern in einem bestimmten Landschaftsabschnitt verdeutlichen kann. Auch werden künftig vermehrt ausgedehnte Denkmalkomplexe unsere Kenntnis der Nutzung einer Kulturlandschaft in unterschiedlichen Epochen vergrößern, da Wegesysteme, Wölbäckeranlagen usw. in ihrer gesamten Ausdehnung über größere Räume hin erfasst und beschrieben werden können.

Aus den genannten Gründen wäre natürlich eine Überprüfung aller Verdachtsflächen im Gelände zur endgültigen Verifizierung wünschenswert, was aber flächendeckend sicherlich in absehbarer Zeit kaum zu leisten sein wird, denn hochgerechnet auf die gesamte Fläche Baden-Württembergs sind aus der LIDAR-Prospektion rund eine viertel Million oder mehr Verdachtsfälle zu erwarten. Dagegen steht für anlassbezogene Begehungen, etwa im



Falle einer bevorstehenden Baumaßnahme, ein umfangreicher Datenbestand im Datenbanksystem der Landesdenkmalpflege zu Verfügung, der dann gezielt überprüft werden kann.

Ausblick

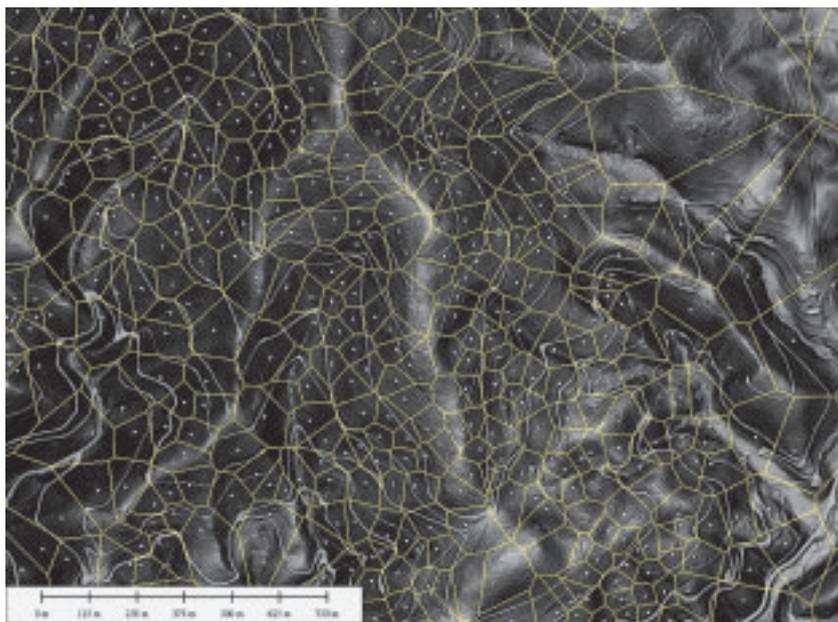
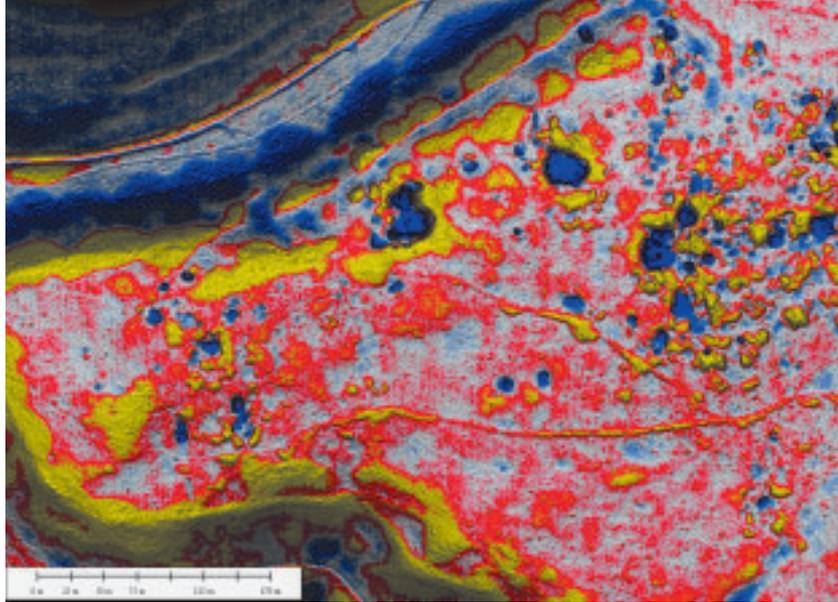
Mithilfe der beschriebenen Datenbearbeitung und -verwaltung ist man in der Lage, in relativ kurzer Zeit eine enorme Zahl von archäologisch relevanten Verdachtsflächen und -objekten zu identifizieren. Da die Prospektion mittels LIDAR im Gegensatz zu anderen Prospektionsmethoden flächendeckende Aufnahmen weitgehend unabhängig von der Vegetationsbedeckung erlaubt, eröffnen sich hier auch neue Möglichkeiten der Auswertung so gewonnener Daten. Als Beispiele seien Analysen räumlicher Verteilungsmuster, Nachbarschaftsbeziehungen und Einzugsgebiete genannt – Methoden, die einen möglichst repräsentativen oder vollständigen Kenntnisstand zur Lage der vorhandenen Bodendenkmale im untersuchten Gebiet voraussetzen. Abbildung 10 zeigt die Abgrenzung der hypothetischen Einzugsgebiete von Meilerpodien im Südschwarzwald, die auf Basis der Verteilung der einzelnen Fundpunkte berechnet werden konnten.

Eine weitere Problematik, mit der man sich nur auf der Grundlage eines möglichst flächendeckenden und repräsentativen Wissensstandes sinnvoll befassen kann, ist die Frage nach der archäologischen Aussagekraft bisheriger Funddichtekarten. Die Korrelation zwischen der Dichte archäologischer Fundstellen und heutiger Bebauungsdichte in Baden-Württemberg ist hoch – aber warum? Zeigt sich hier ein seit Jahrtausenden bis heute wirkender oder auch gewissermaßen vererbter Einfluss von Siedlungsgunst und -ungunst? Oder spiegelt sich hier lediglich der Einfluss der historischen und heutigen Siedlungsdichte auf die Forschungsintensität und die Fundwahrscheinlichkeit wider? Die flächendeckende Prospektion mittels LIDAR wird helfen, die Wissenslücken in den heute nur relativ dünn besiedelten Regionen und in den Waldgebieten zu schließen.

Dem Credo der Denkmalpflege – „wir können nur schützen, was wir kennen“ – ist hinzuzufügen: Wir können die Schutzwürdigkeit eines einzelnen Objektes nur auf der Grundlage eines möglichst umfassenden Wissensstandes über möglichst viele Objekte beurteilen. Erste Ergebnisse deuten dabei bereits auf regional hohe Befunddichten hin.

Literatur

J. Bofinger/R. Hesse: Der Einsatz von Airborne Laser-scanning zur Entdeckung von archäologischen Geländedenkmalen, in: J. Bofinger/M. Merkl (Hrsg.), Mit



Hightech auf den Spuren der Kelten. Begleitheft zur gleichnamigen Sonderausstellung. Archäologische Informationen aus Baden-Württemberg, Heft 61 (Esslingen 2010) 70–89.

R. Hesse: Landesweite archäologische Prospektion mittels LIDAR: Erste Ergebnisse, in: Archäologische Ausgrabungen in Baden-Württemberg 2009 (Stuttgart 2010) 41–45.

J. Bofinger: Flugzeug, Laser, Sonde, Spaten – Fernerkundung und archäologische Feldforschung am Beispiel der frühkeltischen Fürstensitze (Esslingen 2007).

J. Bofinger/S. Kurz/S. Schmidt: Hightech aus der Luft für Bodendenkmale – Airborne-Laserscanning (LIDAR) und Archäologie. Nachrichtenblatt der Denkmalpflege Baden-Württemberg 36, 153–158.

9 Pingengeld bei Dettighofen-Albführen, Kreis Waldshut, in der Feinreliefdarstellung, bei der die Vertiefungen der Pingengänge als blaue „Anomalien“ dargestellt sind.

10 Auf Basis der flächigen Kartierungen können bestimmte Wirtschaftseinheiten und Einzugsgebiete, wie etwa hier bei einem Holzkohlemeilerrevier bei Malsburg-Marzell, Kreis Lörrach, rekonstruiert werden.

Dr. Jörg Bofinger

Regierungspräsidium Stuttgart
Landesamt für Denkmalpflege

Dr. Ralf Hesse

Regierungspräsidium Stuttgart
Landesamt für Denkmalpflege