

Hightech aus der Luft für Bodendenkmale

Airborne Laserscanning (LIDAR) und Archäologie

Modernste Technologie zur Erforschung längst vergangener Epochen ist für die archäologische Wissenschaft unverzichtbar und findet immer breiter gefächerte Einsatzgebiete. So konnte etwa bereits während der Vorbereitungsphase des DFG-Schwerpunktprogramms zur Erforschung der frühkeltischen „Fürstensitze“ der Geländescan vom Flugzeug aus als eine hochmoderne Methode zur Landschaftsaufnahme eingesetzt werden. Die Heuneburg an der Oberen Donau sowie ein unmittelbar angrenzender Ausschnitt des Donautals wurden auf einer Fläche von 20 km² erfasst. Dies erlaubt zahlreiche Auswertungsmöglichkeiten und eine gezielte Erforschung archäologischer Strukturen im Geländescan.

Jörg Bofinger / Siegfried Kurz / Sascha Schmidt

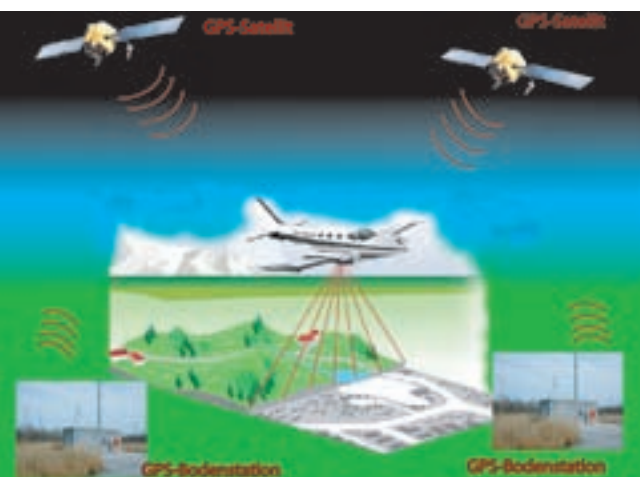
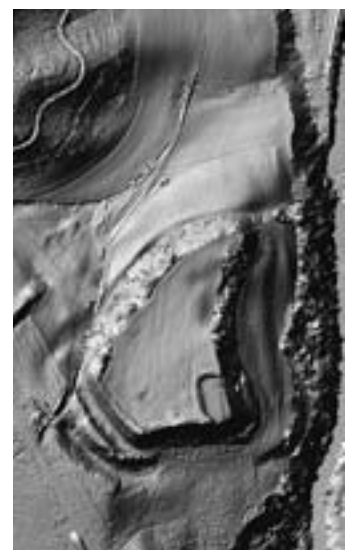
Die Heuneburg – Ein frühkeltischer Fürstensitz in komplexem Umfeld

Eingebettet in eine vielschichtige archäologische Landschaft mit Außensiedlung, Nekropolen, Befestigungswerken und Vorburg gilt die Heuneburg als Paradebeispiel eines frühkeltischen „Fürstensitzes“. Diesem komplexen Umfeld Rechnung tragend, sind die Heuneburg und ihre Außensiedlung auch mit zwei Einzelprojekten im Schwerpunktprogramm „Frühe Zentralisierungs- und Urbanisierungsprozesse. Zur Genese und Entwicklung frühkeltischer Fürstensitze und ihres territorialen Umlandes“ der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) vertreten: Archäologische Feldforschungen zur Untersuchung der Struktur und Ausdehnung der späthallstattzeitlichen Außensiedlung werden von der Universität Tübingen durchgeführt, Ausgrabungen im Bereich der befestigten Vorburg und deren Wall-Graben-Systemen vom Landesamt für Denkmalpflege in

Esslingen. Im Rahmen dieser neuen Forschungsansätze wird auch Fragen nach der Anbindung der Heuneburg an das überregionale Verkehrsnetz nachgegangen. Gleichmaßen stehen Erkundungen zu den weitläufigen Befestigungs- und Grabensystemen von Vorburg und Außensiedlung sowie die Suche nach Furten, Wegtrassen und besonderen Stellen (wie beispielsweise zu vermutende Schiffsländen, Stapelplätzen oder Ähnliches) im Zentrum des Interesses. Dafür war die möglichst detailgetreue Landschaftsaufnahme des Umfelds der Heuneburg eine wichtige Voraussetzung.

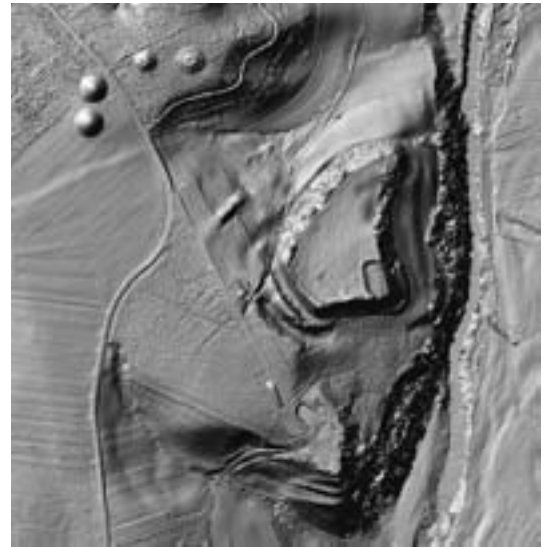
LIDAR – Eine High-Tech-Methode zur Landschaftserfassung

Mittels eines Laserscans der Landschaft, der vom Flugzeug aus bewerkstelligt wird, kann ein hoch auflösendes, aktuelles Abbild der Geländeoberfläche gewonnen werden, das mannigfaltige Möglichkeiten der Darstellung und Auswertung der gemessenen Details bietet. Mit diesem so genannten LIDAR (Light Detection And Ranging)-Geländescan existiert ein Werkzeug zur hochpräzisen Erfassung großer Flächen in relativ kurzer Zeit. Die Geländeaufnahme basiert auf der Aussendung von Laserstrahlen in bestimmten, regelmäßigen Abständen. Dieser „gepulste Laser“ ist im Flugzeugboden installiert und kann von dort mittels eines schnell rotierenden Spiegels einen quer zur Flugrichtung liegenden, bis zu 700 m breiten Geländestreifen abtasten (Abb. 1). Die Laserstrahlen werden vom Erdboden, von der Vegetation und der Bebauung reflektiert. Aus der Berechnung von Winkel und Laufzeit des Laser-

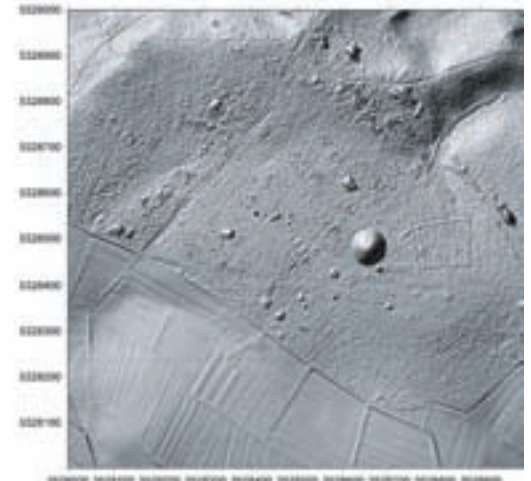


1 Schema zur Methode des flugzeuggestützten Laserscannings (airborne-LIDAR).

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



3 Gegenüberstellung eines Luftbilds (links: Grundlage Google Earth) der Gegend um den „Hohmichele“, nordwestlich der Heuneburg und des Geländescans dieses Areals. Durch rechnerische Verfahren können die Vegetationsdecke entfernt und die archäologischen Strukturen, wie beispielsweise Grabhügel und Viereckschanze sichtbar gemacht werden.



strahls können die Einzelpunkte der Messung im dreidimensionalen Raum erfasst werden. Die Positions- und Höhenbestimmung des Flugzeugs, auf die sich die Geländemessungen beziehen, erfolgt über GPS (Global Position System) sowohl direkt, also bordintern, über Satellitenpeilung als auch über Referenzmessungen zu GPS-Bodenstationen. Über Einstellung des Laserpulses bzw. Geschwindigkeit beim Messflug kann die Punktdichte der Messungen variiert werden. Der Bestimmung und Kontrolle der absoluten Höhenwerte kommt dabei besondere Bedeutung zu und kann auf einen Bereich von wenigen Zentimetern Abweichung eingegrenzt werden. Nach Beendigung des Messfluges können mithilfe unterschiedlicher Rechen- und Interpolierungsverfahren verschiedenartige, digitale Geländemodelle errechnet werden. Im DOM (digitales Oberflächen-Modell) werden in der Geländedarstellung auch Vegetations- und Bebauungsflächen berücksichtigt, im DGM (digitales Gelände-Modell) sind diese Elemente durch rechnerische Verfahren eliminiert und auf ein Abbild der Geländeoberfläche reduziert (Abb. 2). Mittlerweile existiert auf Basis der LIDAR-Technologie eine nahezu flächendeckende Aufnahme

für das Gebiet des Landes Baden-Württemberg. Die Daten sind in unterschiedlichen Auflösungen über das Landesvermessungsamt Baden-Württemberg zu beziehen.

LIDAR und Archäologie – Neue Möglichkeit der Aufnahme und Auswertung am Beispiel der Heuneburg

Neben der Aussicht, bislang unbekannte Fundstellen, etwa einzelne Grabhügel oder Ähnliches, im Gelände identifizieren zu können, sind vor allem die Einsatzmöglichkeiten der LIDAR-Daten im Umfeld bekannter archäologischer Denkmale mannigfaltig. Die plastische, sehr anschauliche Darstellung der Topografie in Form eines „shaded relief“ (schattiertes Graustufenbild) lässt selbst kleinste Details der Oberfläche an den Fundstellen sowie in deren Umgebung erkennen: Für Geländeforschungen und für die Planung von Ausgrabungsaktivitäten können diese Erkenntnisse von großem Nutzen sein. Besonders die Möglichkeiten zur Identifizierung und Lokalisierung von Befestigungswerken, deren Wall- und Grabenanlagen aufgrund der Höhenunterschiede in der Regel gut zu erkennen sind, seien hier erwähnt.

Weiterhin besteht die Chance, etwa alte Verkehrswege oder Landmarken zu visualisieren, diese in ihre landschaftliche Beziehung zur entsprechenden Fundstelle zu setzen und damit eine gute Beurteilungsbasis für die Interpretation der historischen Landschaftsnutzung in einer Siedlungskammer zu schaffen.

Durch den Einsatz des lasergestützten Verfahrens vom Flugzeug aus besteht die Möglichkeit, auch schwer zugängliche und mit dichter, flächiger Vegetation bestandene Geländebereiche zu erfassen und zu dokumentieren. Selbst bei Waldflächen ist die Zahl der Laserstrahlen, die durch das Blätterdach bis auf den Boden gelangen, relativ hoch, sodass auch hier ein recht genaues Abbild der Geländeoberfläche ermittelt werden kann. Gerade in diesem Punkt können die Ergebnisse der „konventionellen“ Luftbildarchäologie entscheidend bereichert werden (Abb. 3). Um das Hindernis der Vegetationsdecke möglichst gering zu halten, werden die Messflüge in der Regel während den Wintermonaten durchgeführt.

Am Beispiel des frühkeltischen „Fürstensitzes“ der Heuneburg sollen im Folgenden einige der Möglichkeiten des Landschaftsscans und des daraus resultierenden hochgenauen Geländemodells aufgezeigt werden.

Nach den extrem trockenen Sommermonaten im Jahr 2003 zeichneten sich vor allem in der Donautalau bei außergewöhnlich tiefem Grundwasserstand deutlich alte Flussschlingen und -arme ab und lieferten einzigartige Voraussetzungen für ihre detaillierte Aufnahme und Kartierung. Für diese Aufnahme bot sich die moderne Methode des LIDAR-Geländescans an. Mit der Erfassung eines Abschnittes des Donautals von 20 km² im Gebiet der Heuneburg wurde ein spezialisiertes Unternehmen beauftragt, das im Oktober 2003 die Befliegung und Datenerfassung durchführte (Abb. 4). Dabei wurde das ausgewählte Terrain aus der Flughöhe von 500 m in einem Raster von 0,5 m aufgenommen. Die Messung der rund 80 Millionen Einzelpunkte erfolgte während eines etwa vierstündigen Flugs. Von jedem dieser Einzelpunkte wurden die x-, y- und z-Koordinaten (Rechts- und Hochwert, sowie Höhe über N. N.) registriert und in das Landesvermessungsnetz eingepasst. Als Ergebnis liegt nun ein hochgenaues, georeferenziertes digitales Geländemodell vor, das am PC weiterverarbeitet und in verschiedenen Varianten dargestellt werden kann (Abb. 5).

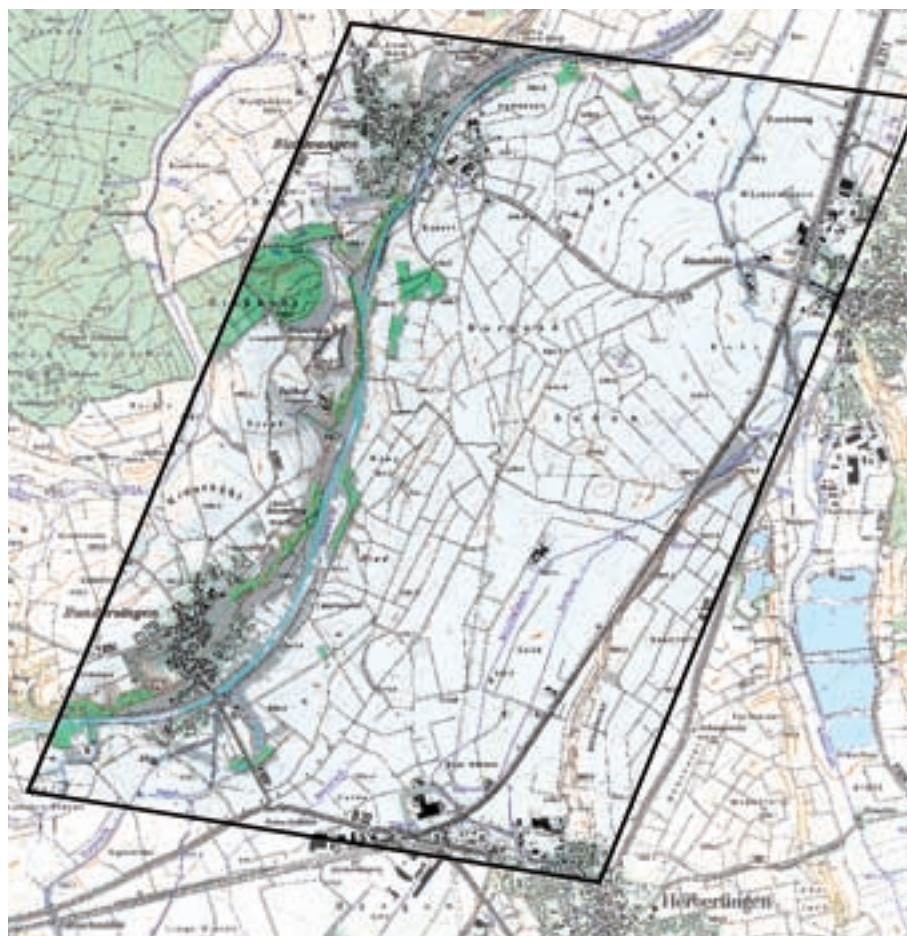
Topografie und Archäologie – Landschaftsnutzung im Geländemodell

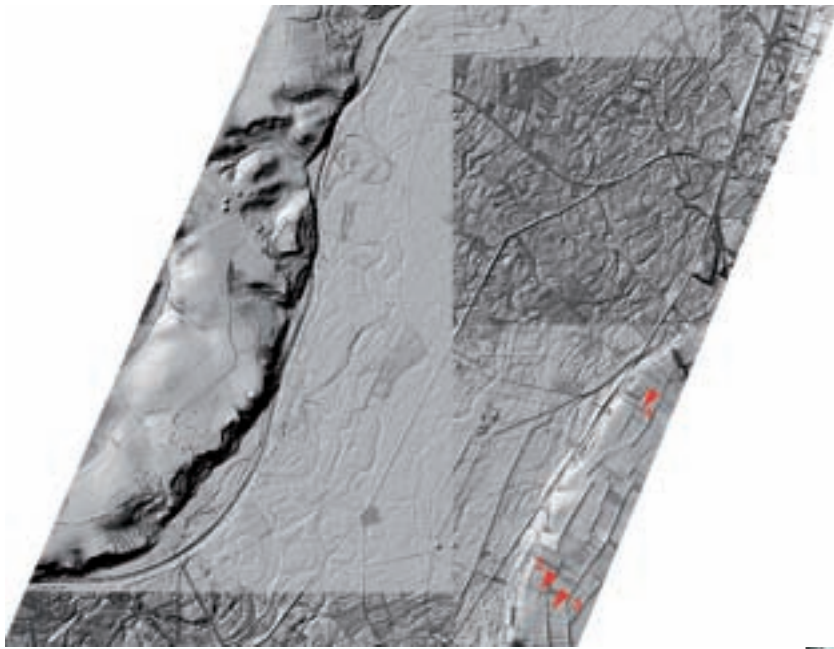
Bei den aktuellen Feldforschungen an der Heuneburg im Rahmen des eingangs erwähnten Schwer-

punktprogramms der Deutschen Forschungsgemeinschaft steht weniger das Plateau der Heuneburg selbst als vielmehr ihr unmittelbares Umfeld und das weitere Umland des frühkeltischen „Fürstensitzes“ im Zentrum des Interesses. Dabei nehmen die Siedlungsstrukturen der Heuneburg-Außensiedlung mit weitläufigen, teils erst ansatzweise erfassten Grabensystemen ebenso einen wichtigen Platz ein wie die Untersuchung der Vorburg-Befestigung und der von ihr umschlossenen Vorburg-Siedlung. Mit beiden erwähnten Untersuchungsschwerpunkten eng verknüpft ist die Frage nach der Anbindung der Heuneburg an das überregionale Verkehrsnetz. Gerade in diesem Zusammenhang ist die Topografie des Donautals, wie sie im LIDAR-Scan abgebildet wird, von besonderer Bedeutung.

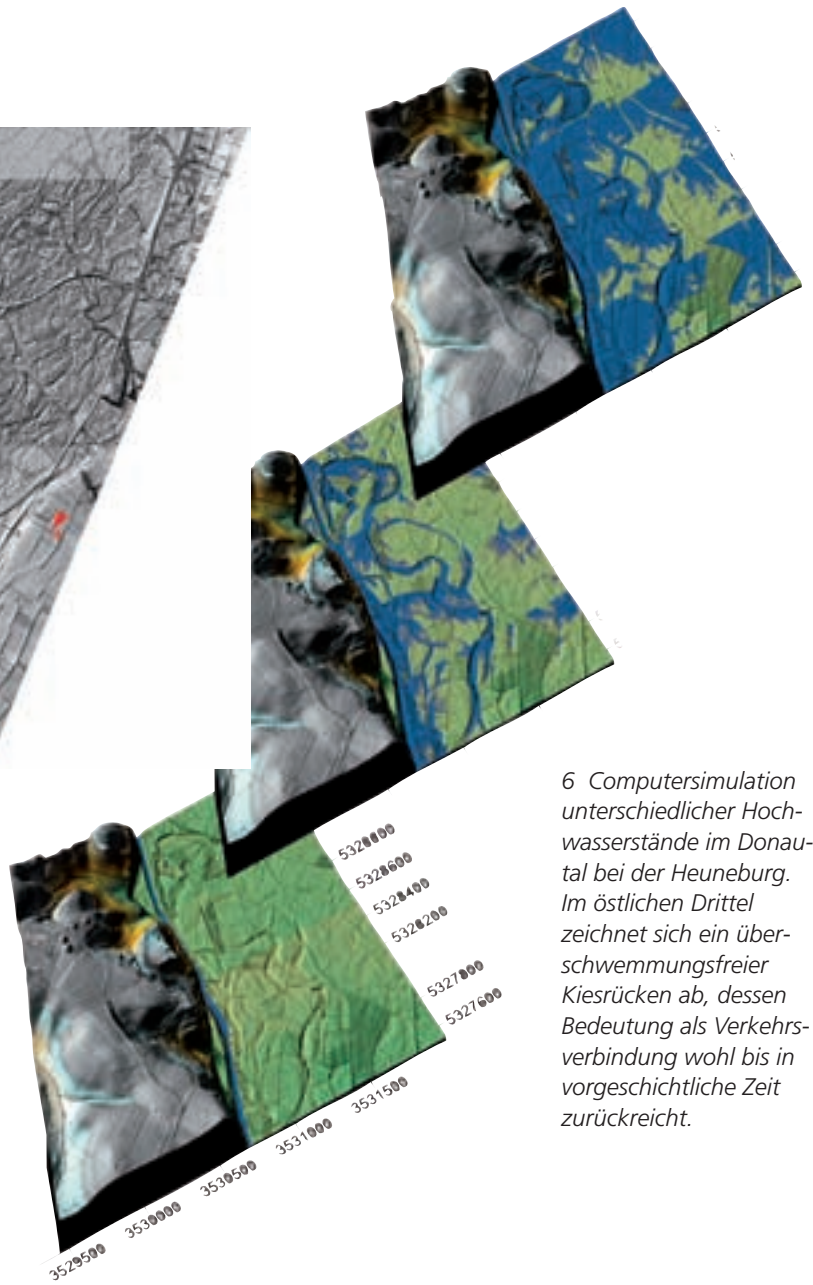
Die Blockdarstellung der Landschaft im Donautal zeigt bei einer Hochwassersimulation am Computer einen auch bei hohem Überflutungsgrad trockenen Kiesrücken im östlichen Drittel der Talau (Abb. 6). Auf dieser Geländerippe verläuft die Trasse der römischen Straße durch das Donautal. Obwohl keine eindeutigen archäologischen Nachweise für eine vorrömische Wegführung auf der schwachen Erhebung vorliegen, scheint es doch sehr wahrscheinlich, dass sich die römischen Straßenbauingenieure an älteren Wegesystemen orientiert haben. Die prähistorische Nutzung der überschwemmungsfreien Zonen im Donautal als Siedlungsgrund und Friedhofsareal belegen eindrucksvoll die Grabhügel der hallstattzeitlichen Bettelbühlnekropole und der benachbart gelegenen Siedlung, die ebenfalls in die frühe Eisenzeit zu datieren ist (Abb. 7).

4 Ausschnitt aus der topografischen Karte TK 50 000 Blatt L7922, Saugau mit Eintrag des durch den LIDAR-Scan erfassten Untersuchungsgebietes im Umfeld der Heuneburg an der Oberen Donau.





5 LIDAR-Scan der Heuneburg mit dem Donautal in ihrer Umgebung mit Markierung möglicher Grabhügel am östlichen Rand des Donautals.



6 Computersimulation unterschiedlicher Hochwasserstände im Donautal bei der Heuneburg. Im östlichen Drittel zeichnet sich ein überschwemmungsfreier Kiesrücken ab, dessen Bedeutung als Verkehrsverbindung wohl bis in vorgeschichtliche Zeit zurückreicht.

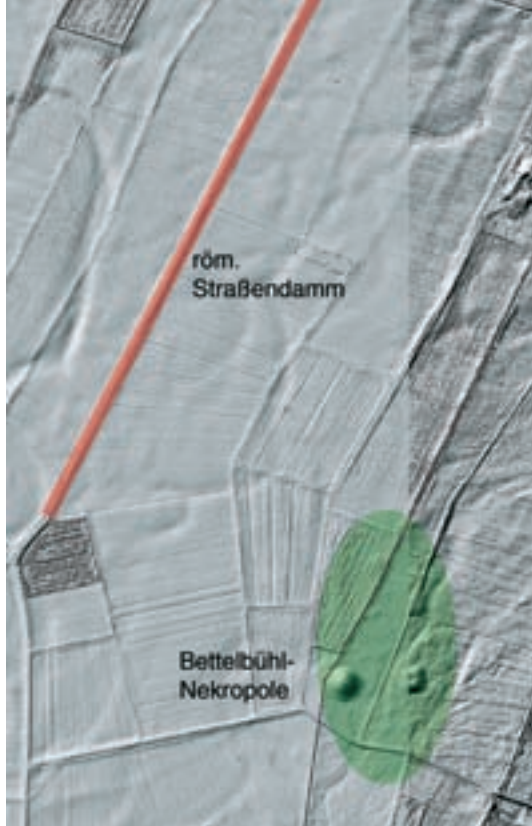
Prospektion und archäologische Ausgrabung

Die Kenntnisse zu Ausdehnung und Verlauf der Wall-Grabenbefestigungssysteme der Heuneburg-Vorburg können mittels des Laserscans in Verbindung mit der Analyse von Luftbildern und dem Einsatz geophysikalischer Prospektionsmethoden zwar ohne Bodeneingriffe deutlich erweitert werden, doch vielfach ist eine archäologische Untersuchung bestimmter Strukturen zu ihrer Identifizierung und vor allem zur verlässlichen Datierung unerlässlich. So konnten gezielte Baggerschnitte zur Klärung der Befundlage in Bereich des Befestigungsgrabens nördlich der Heuneburg und Bohrungen in siedlungsnahen Flusschlaufen mit Mitteln des Förderprogramms „Culture 2000“ der Europäischen Union im Rahmen des Projekts „European Landscapes – past, present and future“ realisiert werden.

Während die Bohrungen erst ansatzweise erkennen lassen, mit welchen geologischen Veränderungen im Lauf der Jahrhunderte und Jahrtau-

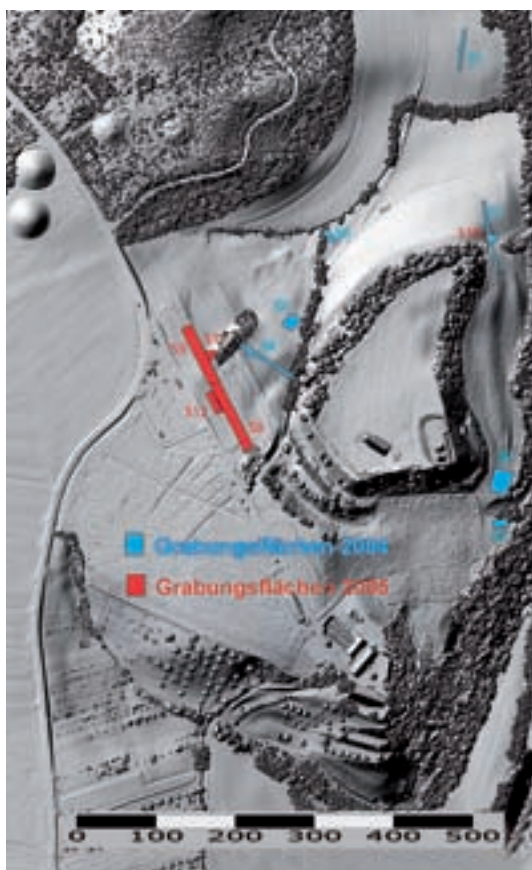
sende auf der Terrasse östlich unterhalb der Heuneburg und vor allem in Donautal selbst zu rechnen ist, ergaben Baggerschnitte durch die Befestigungsgräben bereits konkrete Hinweise über Konstruktion und Alter der Anlagen. Aufgrund außergewöhnlicher Erhaltungsbedingungen war es möglich, unterhalb der Nordspitze der Heuneburg knapp über der Sohle des 7 m tiefen Befestigungsgrabens ein umfangreiches Ensemble verschiedenster Bauhölzer zu bergen, deren hallstattzeitliches Alter (erstes Viertel des 6. Jahrhunderts v. Chr.) mittels dendrochronologischer Datierungen zweifelsfrei belegt werden konnte (Abb. 8). Somit muss auch der Burggraben bereits während der frühen Eisenzeit angelegt worden sein und lässt damit den frühkeltischen „Fürstensitz“ in völlig neuem Licht und bislang unbekannter Monumentalität erscheinen, galten doch die tiefen Gräben im Vorfeld der Burg noch bis vor wenigen Jahren als Elemente eines mittelalterlichen Ausbaus der Heuneburg.

Die Ausgrabungsergebnisse stellen einen wichtigen Ausgangspunkt für den zukünftigen Schutz



der Grabenabschnitte dar. Dank der nun neuen Kenntnis der Feuchtbodenerhaltungsbedingungen wurde deutlich, dass sich der Burggraben im staunassen Bereich entlang der gesamten Nordwestflanke der Heuneburg entlangzieht. Dieses nun neu bekannt gewordene archäologische Quellenreservoir von unschätzbarem wissenschaftlichem Wert kann so in Zukunft gezielt geschützt werden. Die im Laufe der Zeit immer wieder von der Landwirtschaft angelegten Drainagesysteme können stillgelegt bzw. Neuanlagen im Vorfeld verhindert werden.

Aber nicht nur für die Visualisierung naturräumlicher Voraussetzungen und topografischer Gegebenheiten, die für das Verständnis einer Fundstelle in ihrem Umfeld von großem Nutzen sein



kann, bietet das kleinräumige, hochgenaue digitale Landschaftsmodell vielfältige Einsatzmöglichkeiten. Auch für die Planung und Präsentation archäologischer Ausgrabungen existiert mit den Landschaftsscans eine ausgezeichnete Basis. Dies betrifft in erster Linie die Auswahl von Grabungsflächen und deren Darstellung in der Topografie. So ist es beispielsweise ohne allzu großen technischen Aufwand möglich, einzelne Messpunkte oder auch die Grenzen von Grabungsflächen, die mit dem Tachymeter im Landeskoordinatennetz aufgemessen wurden, direkt und koordinatenscharf in den Geländescan zu projizieren und entsprechend darzustellen (Abb. 9).

Das Umfeld der Heuneburg – Grabhügel, Siedlungen und Grabensysteme werden sichtbar

Vor einigen Jahren wurde in der Umgebung der Heuneburg ein längerfristiges Prospektionsunternehmen durchgeführt. In diesem Zusammenhang wurde eine größere Zahl archäologischer Fundstellen entdeckt. Am Beispiel einer Kiesterrasse der Fulgenstadter Platten nördlich von Herbertingen konnte eine ganze Reihe vorgeschichtlicher Siedlungsfundstellen lokalisiert werden, darunter auch solche der Hallstattzeit.

Obwohl im weitgehend ebenen Gelände kein Anhaltspunkt für einen zugehörigen Bestattungsplatz zu erkennen war, zeigte die Reliefdarstellung des digitalen Oberflächenmodells punktförmige Erhebungen (Abb. 5 rechts Nr. 1–3), die kaum anders als künstliche Erdaufwürfe zu interpretieren sind. Dabei drängt sich im Falle von Abb. 5 rechts Nr. 1 der Verdacht auf einen weitgehend verebneten Grabhügel allein schon deshalb auf, weil in seiner unmittelbaren Nachbarschaft hallstattzeitliche Siedlungsreste zum Vorschein kamen.

Allerdings bedürfen vergleichbare Befunde jeweils einer genaueren Überprüfung. Beispielsweise stößt die Erzeugung eines digitalen Geländemodells dann an seine Grenzen, wenn kleine Baumgruppen oder einzelne Bäume bei der Umrechnung des Oberflächenmodells (mit Vegetation) in ein Geländemodell (ohne Vegetation) nur unvollständig eliminiert werden und sich im schattierten Reliefbild von punktförmigen Bodenerhebungen kaum unterscheiden. Allerdings sind es gerade die punktförmigen Bodenerhebungen, die sich im Geländemodell sehr einfach darstellen lassen, weil sie unabhängig von der Beleuchtungsrichtung jeweils eine Sonnen- und eine Schattenseite aufweisen.

Genau darin liegt aber auch der Grund, dass sich ausgedehnte lineare Strukturen nur mit etwas größerem Aufwand zuverlässig und vollständig

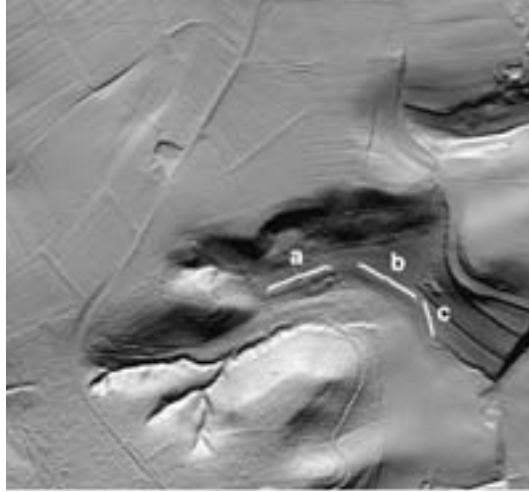
7 Das Areal der Bettelbühlnekropole südöstlich der Heuneburg im Donautal im Geländescan mit der Markierung des römischen Straßendamms.



8 Hallstattzeitliche Bauhölzer im Burggraben der Heuneburg.

9 Darstellung der Grabungsflächen der Grabungskampagnen 2004 und 2005 im Bereich der Heuneburg-Vorburg. Die Eckkoordinaten der Grabungsvermessung wurden direkt in das Landschaftsmodell übernommen.

10 Schattiertes Geländere relief mit Beleuchtung von Norden (links) und Osten (rechts). Der Einfallswinkel der Lichtquelle über dem Horizont beträgt jeweils 35°, das Relief im Bild rechts ist 2,5-fach überhöht.



erfassen lassen. So zeichnet sich in der schattierten Reliefdarstellung nur wenig nördlich der Heuneburg auf der Sohle eines Seitentales der Donau eine zweifach abgewinkelte Struktur ab, die nach ihrem Schattenwurf bei einer Beleuchtung von Norden zunächst von einem Erddamm zu stammen schien (Abb. 10 links). Erst eine Überprüfung im Gelände zeigte dann, dass es sich nicht um einen doppelt abgewinkelten Erddamm, sondern um eine Terrasse mit entsprechend geformter Terrassenkante handelte. Viel entscheidender ist jedoch, dass auf Abb. 10 (linkes Bild) der Westschenkel der Terrassenkante (a) sehr klar, der Mittelabschnitt (b) immer noch ausreichend deutlich, der Südschenkel (c) aber nur noch schemenhaft zu erkennen ist.

Die Ursache liegt in der Richtung des Lichteinfalls. So werfen linear verlaufende Reliefunterschiede bei etwa rechtwinklig dazu auftreffender Lichteinstrahlung deutlich wahrnehmbare Schatten (Abb. 10 links a). Bei zunehmendem Schräglicht werden diese Reliefunterschiede dann immer weiter aufgehellt (Abb. 10 links b), bis sie bei annähernd paralleler Einstrahlung ohne Schattenbildung nahezu vollständig ausgeleuchtet werden (Abb. 10 links c). Das bedeutet in der Konsequenz, dass ausgedehnte (kurvo-)lineare Strukturen – ganz besonders, wenn sie mehrfach abrupt die Richtung ihres Verlaufs ändern – in schattierten Reliefbildern erst durch den Vergleich unter wechselnden Beleuchtungssimulationen mit variierender Höhe des Sonnenstandes, unterschiedlichen Einstrahlungsrichtungen und unter Umständen auch einer stärkeren Überhöhung des Geländes zuverlässig und in vollem Umfang zu identifizieren sind. So ergibt sich die komplette Terrassenkante erst aus der Kombination zweier von Norden bzw. Osten beleuchteten Reliefbilder (Abb. 10 a–c), die noch dazu unterschiedlich stark überhöht wurden. Durch das von Osten einfallende Licht und verstärkt durch die Überhöhung des Reliefs tritt in diesem Zusammenhang auch noch ein Grabenzug in Erscheinung (Abb. 10 rechts Pfeile), der bei einer Beleuchtung von Norden zuvor so nicht erkennbar war (Abb. 10 links).

Unter diesen Bedingungen bietet das digitale Ge-

ländemodell ein sehr leistungsfähiges Werkzeug, um zusammen mit Luftbildern und anderen bildgebenden Verfahren etwa der Geophysik (Geomagnetik, Geoelektrik) auch die Topografie mit ihren oft schwach ausgeprägten Bodenmerkmalen für die archäologische Prospektion nutzbar zu machen.

Die Aufnahme mittels des hochgenauen LIDAR-Geländescans bietet ein großes Potenzial zur Lokalisierung und Analyse unterschiedlichster Geländedenkmale und deren Einbindung in die Landschaft. Gerade am Beispiel der Heuneburg kann gezeigt werden, dass sich Kenntnis und Verständnis des komplexen Systems aus Burgplateau, Vorbürg, Außensiedlung und Nekropolen in Verbindung mit gezielten archäologischen Maßnahmen beträchtlich erweitern lassen. Auf dieser Basis können denkmalpflegerische Konzepte und Pläne entwickelt werden, die nicht nur einzelne Fundstellen, sondern geschlossene archäologische Siedlungskammern zum Gegenstand haben.

Literatur

Jörg Bofinger/Siegfried Kurz/Sascha Schmidt: Ancient Maps – modern data sets: different investigative techniques in the landscape of the Early Iron Age princely hill fort Heuneburg, Baden-Württemberg, in: St. Campana/M. Forte (Hrsg.), From Space to Place. Kongress Rom 2006, BAR Int. Ser. 1568 (Oxford 2006), S. 87–92.

Jörg Bofinger: Archäologische Untersuchungen in der Vorbürg der Heuneburg – Siedlung und Befestigungssysteme am frühkeltischen Fürstensitz an der Oberen Donau, Gemeinde Herberlingen-Hundersingen, Kreis Sigmaringen. Arch. Ausgrabungen Baden-Württemberg 2004, S. 82–86.

Rolf Katzenbeisser/Sven Kurz: Airborne Laser-Scanning, ein Vergleich mit terrestrischer Vermessung und Photogrammetrie. Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation 3/2004, S. 179–187.

Dirk Krause: Frühkeltische Fürstensitze: Ein neues Forschungsprogramm der deutschen Forschungsgemeinschaft am Landesdenkmalamt Baden-Württemberg, in: Denkmalpflege in Baden-Württemberg. Nachrichtenblatt der Landesdenkmalpflege 33/2, 2004, S. 237–245.

**Dr. Jörg Bofinger,
Sascha Schmidt M. A.**
Regierungspräsidium
Stuttgart
Landesamt für Denkmal-
pflege

Dr. Siegfried Kurz
Institut für Ur- und Früh-
geschichte
Universität Tübingen,
Schloss Hohentübingen
72070 Tübingen