

Methoden zur automatisierten Suche von Bodendenkmälern in LiDAR-Daten – neues aus Westfalen

M. FABIAN MEYER¹, INGO PFEFFER² & CARSTEN JÜRGENS¹

Zusammenfassung: Die LiDAR-Technologie hat in den letzten Jahren einige Probleme der archäologischen Prospektion gelöst, doch besteht bei der systematischen und effizienten Auswertung der LiDAR-Daten noch immer Forschungsbedarf.

In einem Forschungsprojekt suchen Geographen und Archäologen aus Bochum und Münster daher seit 2015 nach Möglichkeiten, die großen LiDAR-Datenmengen möglichst effizient auszuwerten. Als Methoden kommen derzeit OBIA und Template Matching zur Anwendung. Am Ende einer Erfassung liegen Verdachtsflächen vor, die der Interpretation bedürfen. Diese wird dadurch erleichtert, dass die Flächen danach sortiert sind, wie sehr sie ihrem jeweiligen Idealtyp entsprechen. Auf diese Weise können die interessantesten Flächen zuerst begutachtet und uninteressante zunächst vernachlässigt werden.

1 Einleitung – archäologische Prospektion

Bodendenkmäler sind laut Denkmalschutzgesetz erhaltenswerte Zeugnisse der Kulturgeschichte. Daher ist es ein grundlegendes Interesse der Archäologie, sie zu schützen, zu erhalten und der Öffentlichkeit zugänglich zu machen.

Die dafür nötige, flächendeckende Erfassung wurde in den letzten 15 Jahren durch die LiDAR-Technologie v.a. dadurch revolutioniert, dass sie das Relief auch in vegetationsreichen Gebieten wie Wäldern sichtbar macht – gerade diese Gebiete sind interessant, da Bodendenkmäler unter der relieferhaltenden Wirkung von Vegetation relativ gut erhalten bleiben und zudem seltener durch landwirtschaftliches Gerät überformt werden. Zumindest oberirdische Bodendenkmäler sind damit gut zu erfassen – also solche, die als Reliefanomalie im Gelände vorliegen.

Um die Sichtbarkeit selbst subtiler Strukturen zu verbessern, werden die Laserdaten in Form verschiedenster Visualisierungen für die manuelle Erfassung mit dem geschulten Auge aufbereitet, wobei der Schummerungsdarstellung eine zentrale Rolle zukommt (Abb. 1). Dieses Verfahren bestätigt das Anfang des Jahrtausends für LiDAR vorausgesagte Potential immer wieder eindrucksvoll, indem es selbst in alten Testgebieten neue Strukturen sichtbar macht.

¹ Geographisches Institut – AG Geomatik, Ruhr-Universität Bochum, Universitätsstraße 104 / Etage 3, D-44799 Bochum, E-Mail [matthias.meyer, carsten.juergens]@rub.de

² LWL-Archäologie für Westfalen, Außenstelle Münster, An den Speichern 7, D-48157 Münster, E-Mail ingo.pfeffer@lwl.org



Abb. 1: Landwehr in Dülm in Luftbild und DGM; Quelle: Bezirksregierung Köln 2016 (Hrsg.): TIM-online, <http://www.tim-online.nrw.de>

2 Problemstellung – manuelle und automatisierte Suche

Bei allem Erfolg leidet die Schummerungsdarstellung unter derselben Beleuchtungsproblematik wie Luftbilder, die Bodendenkmäler über Schattenwürfe preisgeben: Strukturen, die parallel zur Beleuchtungsrichtung liegen, werfen keine Schatten. Deswegen wurden verschiedenste Visualisierungen entwickelt, die ohne eine simulierte Beleuchtungsquelle auskommen (Abb. 2, eine vergleichende Darstellung von Visualisierungen findet sich z.B. bei HESSE 2016). Am Ende stehen dennoch die manuelle Erfassung und eine Reihe von möglichen Fehlerquellen, angefangen von der Bildschirmdarstellung über das damit verbundene Übersehen von Verdachtsflächen bis



Abb. 2: Vergleich einer herkömmlichen Schummerungsdarstellung (links) und einer *Difference Map* (rechts) nach Hesse: Links fehlen beleuchtungsbedingt die Hohlwege in NW-SO-Richtung. Rechts sind alle Strukturen gut zu sehen (gelb), da die Visualisierung ohne Beleuchtung arbeitet.

hin zum großen Zeitaufwand. Letzteres wird unter Berücksichtigung der großen Zahl zu erwartender Verdachtsflächen einmal mehr deutlich.

Der Wunsch nach Automatisierung besteht schon seit Langem, weswegen seit etwa zehn Jahren verstärkt Forschungsarbeiten zu diesem Thema entstehen. Seit Mitte 2015 sucht auch das Geographische Institut der Ruhr-Universität Bochum in Kooperation mit der LWL-Archäologie für Westfalen in Münster nach Möglichkeiten, die großen LiDAR-Datenmengen möglichst effizient auszuwerten und potentielle Bodendenkmäler weitestgehend automatisiert zu erfassen. Im Zentrum der Entwicklung steht ein Tool für ArcGIS, mit dem bislang Workflows zur Erfassung vier verschiedener Bodendenkmäler entstanden sind.

3 Methodik - Automatische Erfassung von Bodendenkmälern

Im Kontext automatisierter Erfassung bewegt sich die Oberflächenform von Bodendenkmälern zwischen zwei Polen: Auf der einen Seite kann sie so regelmäßig und einfach sein, dass ein Bodendenkmal nicht von natürlichen und anderen Oberflächenformen unterschieden werden kann (z.B. Grabhügel). Auf der anderen Seite kann sie so speziell sein, dass sich das Bodendenkmal nicht mit Automationstechniken erfassen lässt, weil es unmöglich ist, eine allgemeine Form, sozusagen einen ‚kleinsten gemeinsamen Nenner‘, abzuleiten bzw. diese wiederum so einfach ist, dass sie wieder zu nah am ersten Pol liegt. Letzteres trifft besonders auf Bodendenkmäler zu, die wie z.B. Landwehren aus mehreren einfachen Elementen zusammengesetzt sind: Wird deren gemeinsamer Formenschatz auf die Kombination eines Grabens und eines Walls reduziert, um überhaupt Treffer zu generieren, besteht wiederum eine große Ähnlichkeit zu Entwässerungskanälen auf Feldern.

Für eine automatisierte Erfassung ist daher ideal, wenn ein Bodendenkmal gerade so speziell ist, dass es sich von anderen Formen unterscheidet, sich die verschiedenen Exemplare eines Denkmaltyps untereinander aber möglichst ähnlich und damit gut beschreibbar sind. Ist dieser Sachverhalt nicht gegeben, kann es hilfreich sein, die Exemplare zu gruppieren und getrennt zu klassifizieren. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, Bodendenkmäler über die Lage zu unterscheiden und unpassende Lagen im Vorhinein auszuschließen – bspw. ist es unmöglich, dass sich ein Bodendenkmal unter einer versiegelten oder einer Abbaufäche im LiDAR-Datensatz abzeichnet. Auf die genannten Schwierigkeiten reagieren nicht alle Klassifikationsmethoden in gleicher Weise. Wie sich herausgestellt hat, sind beispielsweise objektbasierte Methoden anfälliger für Störungen als Template Matching-Verfahren (s.u.), da erstere die einzelnen Bestandteile einer Struktur erfassen, während letztere eine Struktur in ihrer Gesamtheit ‚sehen‘. Dies ist bei der Wahl der Klassifikationsmethode zu beachten.

Unabhängig von der Klassifikation liegen am Ende der unten beschriebenen Erfassung Verdachtsflächen vor, die der Interpretation bedürfen. Zwar ist diese auf absehbare Zeit nicht automatisierbar (vgl. SEVARA et al. 2016: 496), doch wird sie dadurch erleichtert und beschleunigt, dass die Verdachtsflächen, dort wo es möglich ist, danach sortiert sind, wie sehr sie ihrem jeweiligen Idealtyp entsprechen. Auf diese Weise können die interessantesten Flächen zuerst begutachtet und uninteressante zunächst zurückgestellt werden. Somit ist das Tool als eine Hilfe zur Erfassung zu verstehen, das Archäologen auf Verdachtsflächen aufmerksam macht und diese vorsortiert.

Die Höheninformationen stammen aus dem LiDAR-Befliegungsprogramm des Landes NRW und liegen als Punktdaten in zwei Varianten vor: Entweder als „DGM1“ mit einem gleichmäßigen 1m-Raster oder als „DGM1L“ mit ungleichmäßig verteilten Messpunkten. Die Klassifikationen wurden in Testgebieten in Nordwest- und Ostwestfalen entwickelt.

Zur Kontrolle der Ergebnisse dienen Referenzdaten aus der Fundpunkt-Datenbank der LWL-Archäologie. Treffer, die in diesen nicht vorhanden sind, werden zunächst als „falsche Treffer“ (*false positive*) bezeichnet. Da die Referenzdaten jedoch aufgrund der anfangs dargelegten Schwierigkeiten bei der Auswertung von Geländemodellen möglicherweise unvollständig sind, kommt zusätzlich das ‚geschulte Auge‘ zum Einsatz. So konnten bereits einige neue Bodendenkmäler identifiziert werden.

Der seit 2015 entwickelte Workflow besteht zurzeit aus den in Abb. 3 dargestellten Schritten. Aus den Rohdaten werden zunächst mit einem GIS-Tool verschiedene Geländemodelle berechnet. Diese werden dann je nach Klassifikationsmethode mit eCognition und OBIA (*object-based image analysis*) untersucht oder mit dem gleichen GIS-Tool und Template Matching weiterverarbeitet. Diese Schritte werden im Folgenden näher beleuchtet.

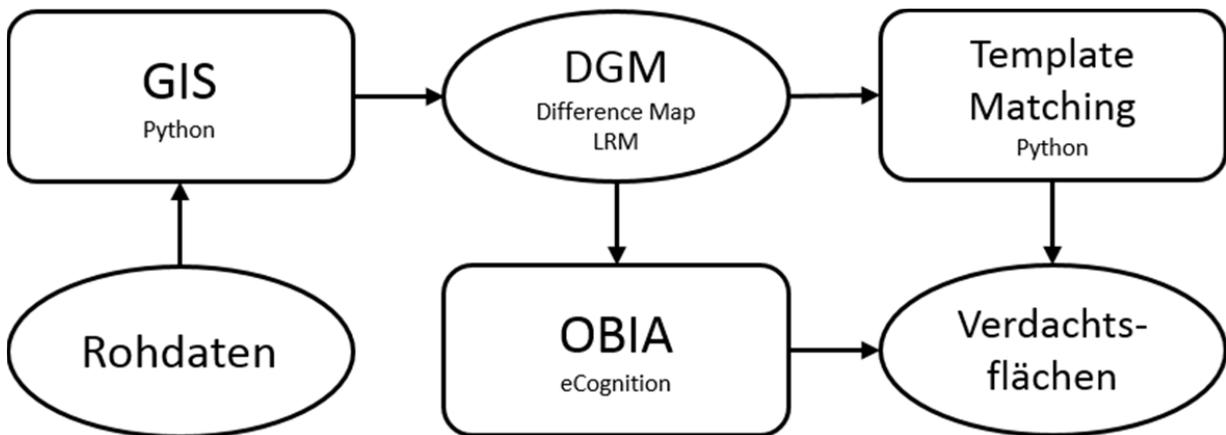


Abb. 3: Gesamtworkflow zur Erfassung verschiedener Bodendenkmäler

3.1 Vorbereitung der Geländemodelle

Die Vorbereitung der Daten geschieht vollautomatisch in einem mit Python programmierten Tool für ArcGIS. Es bietet dem Nutzer alle relevanten Einstellmöglichkeiten und nimmt gleichzeitig die Einstellungen vor, die von den Daten abhängig sind (Abb. 4).

Zunächst benötigt das Tool einen Input-Ordner mit den Datensätzen des gewünschten Untersuchungsgebietes. Dort wird dann eine Geodatabase mit demselben Namen erstellt, die im weiteren

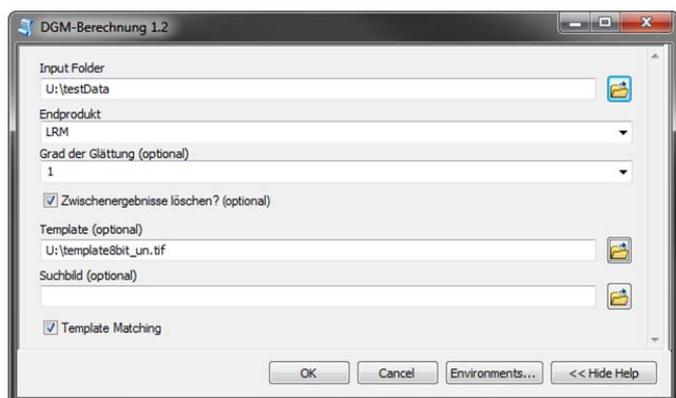


Abb. 4: Benutzeroberfläche des GIS-Tools

Verlauf als Speicherort dient, sodass die Ergebnisse nach den Untersuchungsgebieten sortiert vorliegen. Außerdem wird der Dateipfad auf Leerzeichen überprüft und der Nutzer ggf. darauf hingewiesen, da dies Probleme verursachen kann. Der Name des Ordners wird ebenfalls überprüft – hier werden Leerzeichen jedoch automatisch durch Unterstriche ersetzt.

Als erstes werden die Dateien mit den Koordinatentrios eingelesen und in eine einzige Point Feature Class importiert – das Sammeln der Punkte verhindert bei den späteren DGM-Berechnungen die Entstehung von Kacheln. Dabei wird ebenfalls festgestellt, um welches der beiden möglichen DGM des Landes es sich handelt und den Point Features das passende Koordinatensystem zugewiesen (UTM 6- oder 8-stellig).

Die Aktionen zur Berechnung der DGM richten sich danach, was der Nutzer als Endprodukt wünscht. Der Ablauf bleibt stets der gleiche, doch stoppt das Skript ggf. früher (Abb. 5). Nach dem Import wird ein herkömmliches DGM berechnet, wobei die Berechnungs- bzw. Interpolationsmethode vom Datensatz abhängt. Handelt es sich um den gleichmäßig verteilten Datensatz werden die Point Features zu Rasterzellen konvertiert, was deutlich weniger Rechenaufwand bedeutet als eine IDW-Interpolation der ungleichmäßig verteilten Messpunkte.

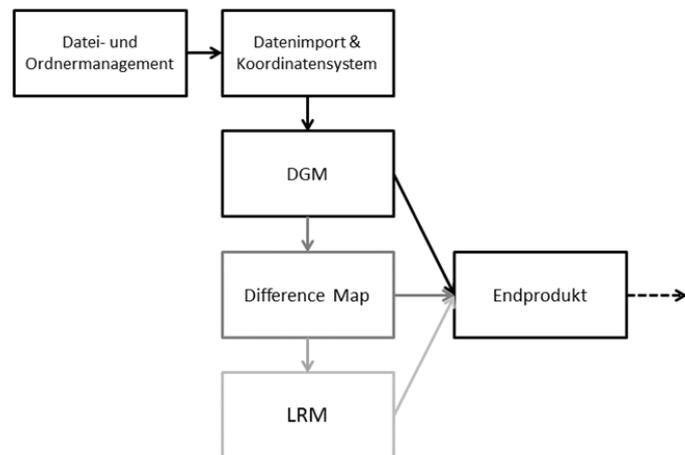


Abb. 5: Teilworkflow des GIS-Tools zur Berechnung der Geländemodelle

Bodendenkmäler lassen sich nur begrenzt in einem einfachen Geländemodell oder einer Schummerungsdarstellung erfassen. Neben dem bereits genannten Nachteil des möglicherweise nicht vorhandenen Schattenwurfs bereiten insbesondere Strukturen in Hanglagen für objektbasierte Klassifikationen Probleme, da die Grenzen der Bodendenkmäler von den Höhenlinien überprägt werden. Daher wird auf die *Difference Map* und das *Local Relief Model* (HESSE 2010) zurückgegriffen, da hier alle Strukturen in der Ebene liegen. Auch das Template Matching profitiert von diesen Visualisierungen, da das Mikrorelief deutlich besser sichtbar ist.

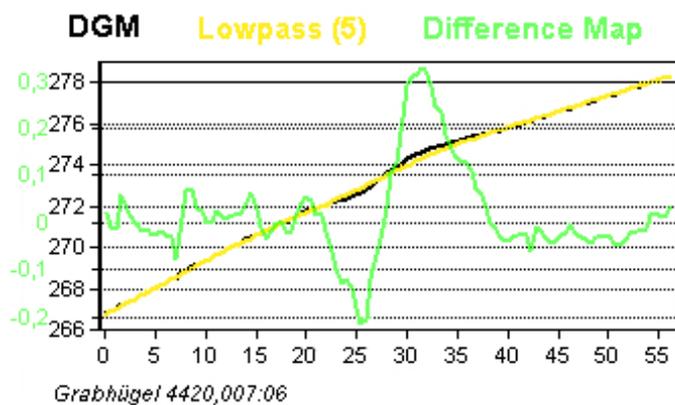


Abb. 6: Profil eines Grabhügels in Hanglage in DGM, 5x geglättetem DGM und Difference Map

Sie entstehen durch ein *Trend Removal*-Verfahren, das kleinräumige Erhebungen und Vertiefungen hervorhebt, indem es das Makrorelief aus dem DGM eliminiert und nur das Mikrorelief übriglässt. Zunächst wird das vorhandene DGM mit einem Tiefpassfilter geglättet, um dieses dann

wieder vom originalen DGM zu subtrahieren, was eine *Difference Map* entstehen lässt. Das LRM geht darüber hinaus, indem es auf Basis der *Difference Map* zusätzlich die Reliefunebenheiten ausstanzt, die Zwischenräume interpoliert und mit den so entstehenden DGM dann erneut subtrahiert. Dies führt zu einem etwas besseren Ergebnis, ist allerdings auch mit deutlich mehr Rechenaufwand verbunden. Unabhängig von der Berechnung wird die Differenz der zwei DGM schließlich visualisiert, wobei die Werte um null mäandrieren und die Amplitude von der Stärke des Tiefpassfilters abhängt (Abb. 6). Zu beachten ist, dass durch das Glätten v.a. an Geländekanten möglicherweise Pseudostrukturen entstehen, die die Klassifikation beeinflussen können (HESSE 2010).

Da es Flächen gibt, in denen keine Bodendenkmäler mehr erhalten sein können, die aber trotzdem gewisse Ähnlichkeiten zu solchen haben, z.B. die Innenflächen erhöhter Kreisverkehre, wird die berechnete Visualisierung mit Daten des digitalen Landschaftsmodells von NRW verschnitten. Aus diesem „Basis-DLM“ wurden einmalig die Flächen extrahiert, in denen Bodendenkmal überhaupt noch vorkommen können und dem Tool beigelegt. Dieser Datensatz entspricht im Wesentlichen den Flächen, die dort als Vegetation gekennzeichnet sind. Auf diese Weise werden Fehlklassifikationen vermieden, die auf der Verwechslung mit anthropogenen Strukturen beruhen (Abb. 7).

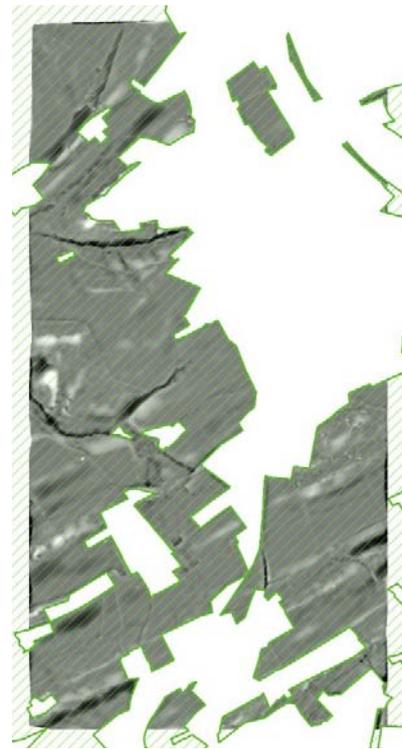


Abb. 7: Local Relief Model, das mittels des Digitalen Landschaftsmodells auf nicht versiegelte Bereiche beschränkt wurde

3.2 Erfassung von Bodendenkmälern mit OBIA

2016 wurde im Rahmen einer Masterarbeit ein Workflow entwickelt, dessen Kern die Software eCognition bildet. Diese sucht mit dem Konzept der objektbasierten Bildanalyse (OBIA, s.u.) in den speziellen Geländemodellen automatisch nach Motten, Grabhügeln und Wölbäckern. Motten, auch Turmhügelburgen genannt, sind mittelalterliche Burganlagen, die i.d.R. aus einem Hügel und einem umlaufenden Graben bestehen, Grabhügel sind Zeugnisse vorgeschichtlicher Bestattungen und beinhalten eines oder mehrere Gräber und Wölbäcker sind historische Ackerfluren, die aus parallel verlaufenden Wällen bestehen (Abb. 8).



Abb. 8: Wölbäcker im Dülmener Wildpark

Bei der objektorientierten Klassifikation werden nicht einzelne Pixel klassifiziert, sondern homogene Bildbereiche (Objekte), die im initialen Schritt der Segmentation erzeugt werden und in diesem Fall den zu suchenden Bodendenkmälern entsprechen. Für die Objekte lassen sich verschiedenste Eigenschaften wie Form, Größe oder der durchschnittliche Pixelwert berechnen. Außerdem stehen die Objekte zueinander in Beziehung, sodass auch Nachbarschaften berücksichtigt werden. Mit denselben Eigenschaften und Nachbarschaftsbeziehungen werden Klassen definiert, die die verschiedenen Bodendenkmäler beschreiben. „Kleine, runde Objekte, die ausschließlich von niedrigeren Objekten umgeben sind“ repräsentieren beispielsweise Grabhügel. „Große, runde Objekte, die von einem Graben umgeben sind“ beschreiben hingegen die Turmhügel von Mottenanlagen und „lange, schmale, runde Objekte, die von höheren Bereichen umgeben sind und neben einem Turmhügelobjekt liegen“ die dazugehörigen Gräben. Passen die Eigenschaften eines Objektes zu denen einer Klasse, wird es ihr zugewiesen.

eCognition bedient sich der berechneten *Difference Map* und greift in Einzelfällen auf das herkömmliche DGM zurück. Der Workflow ist in Form eines *rulesets* gespeichert, das sich in neuen Gebieten mit wenig Aufwand anwenden lässt. Exemplarisch wird im Folgenden der Workflow zur Erfassung von Wölbäckern dargestellt. Es geht dabei nicht darum, jede einzelne Ackerfurche und jede einzelne Kammlinie als solche zu klassifizieren – es reicht vielmehr, einzelne solcher Elemente als Bestandteil einer Flur zu erkennen. Bei dem im Folgenden kurz dargestellten Ansatz werden einzelne Furchen und Kämmen klassifiziert, die sich über ihre Nachbarschaft zu weiteren, gleichen Strukturen als Teile von Wölbackerfluren zu erkennen geben. Das Ergebnis besteht daher aus repräsentativen Elementen, die auf Wölbackerfluren schließen lassen.

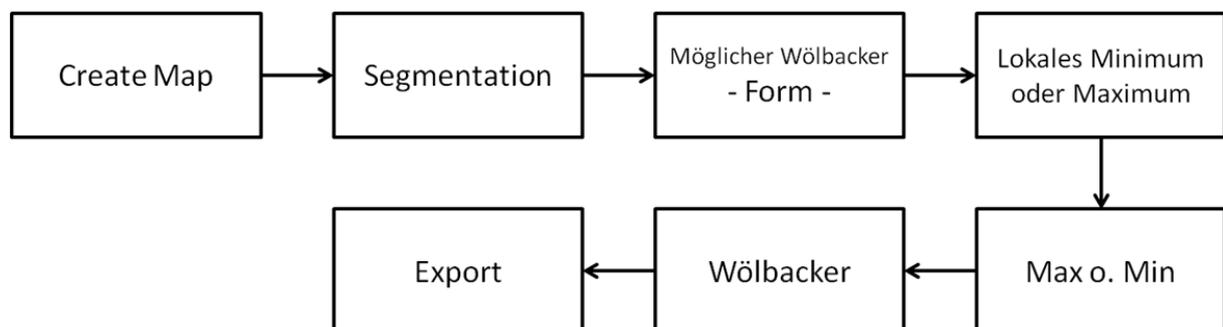


Abb. 9: Workflow in eCognition für die Erfassung von Wölbäckern

Zunächst werden alle größeren Objekte klassifiziert, die eine längliche und schmale Form haben und daher möglicherweise eine Furche oder eine Kammlinie darstellen. Zweitens werden davon alle Objekte klassifiziert, die zu mindestens 80% ein lokales Maximum oder Minimum darstellen. Da dies aus Kontrollgründen gestaffelt geschieht (80, 90, 100), werden die Objekte drittens in einer Klasse gesammelt. Viertens werden dann die Objekte, die von sechs weiteren Objekten derselben Klasse umgeben sind und damit wahrscheinlich Teil einer Wölbackerflur sind, als solche klassifiziert und exportiert (Abb. 9).

3.3 Erfassung von Celtic Fields mit Template Matching

Im Jahr 2016 wurden im Rheinland und in Westfalen sogenannte *celtic fields* entdeckt, die bisher v.a. aus dem nordwesteuropäischen Raum bekannt waren. Diese Strukturen sind teils bereits so stark erodiert, dass sie im Gelände nicht mehr zu erkennen sind. Daher ist deren schnelle flächendeckende Erfassung in Westfalen von großem Interesse.

Celtic Fields sind nach ARNOLD (2011: 439) „Ackerfluren, die mittels breiter und flacher Wälle in mehr oder weniger rechteckige oder quadratische Felder aufgeteilt sind“, „deren Kantenlängen stark schwanken, aber bei 40m kulminieren“. Anfänglich wurden sie in England gefunden und in die vorrömische, dort keltische Zeit datiert, doch stellte sich später mit weiteren Funden in den Niederlanden, Dänemark und Nordwestdeutschland heraus, dass sie von der späten Bronzezeit bis in die römische Kaiserzeit datieren. Daher ist der Name zwar irreführend, hat sich inzwischen aber durchgesetzt. Arnold spricht dennoch konsequenterweise von Irregulären Bank-Senken-Feldsystemen (IBSF, Abb. 10). Grundsätzlich beschreibt Template Matching ein Verfahren zur Suche von Gemeinsamkeiten in Bildern. In archäologischem Kontext wird ein Template, das einer Art ‚mini-DGM‘ eines Bodendenkmals entspricht, in einem DGM gesucht. Dazu wird das Template über das DGM bewegt und an jeder Position (für jedes Pixel) die Übereinstimmung berechnet. Das Ergebnis ist eine *Correlation Map*, deren Pixelwerte den berechneten Übereinstimmungen an der jeweiligen Position entsprechen. Je höher ein Wert, desto höher die Übereinstimmung und damit die Wahrscheinlichkeit, dass es sich tatsächlich um ein Bodendenkmal handelt.



Abb. 10: Celtic Fields unter einem Waldgebiet in Hopsten

Im *Computer Vision*-Bereich ist die Technik bereits seit langem etabliert und dient der Objekterkennung. Einsatzgebiete sind bspw. die Qualitätskontrolle in Fertigungsprozessen, die Gesichtserkennung oder das Erkennen von Verkehrsschildern für das autonome Fahren.

Bereits 2005 verwendete DE BOER Template Matching zur Suche nach Grabhügeln. Diese Methodik hat sich bis heute weiter verbreitet, wurde nach derzeitigem Kenntnisstand in Verbindung mit LiDAR allerdings nur im Kontext von einfachen, z.B. runden und damit in jeder Richtung symmetrischen Objekten eingesetzt (z.B. SCHNEIDER et al. 2015 oder TRIER et al. 2015). Eine erfreuliche Ausnahme stellt VERDONCK (2016) dar, der Template Matching zur Detektion von rechteckigen römischen Hauswandüberresten in GPR-Daten einsetzte. Nicht zuletzt aufgrund der gewissen Ähnlichkeit hinsichtlich der Form ist es umso interessanter, den Transfer auf Celtic Fields in Westfalen zu wagen.

Bei der Annäherung an eine automatisierte Erfassung von Celtic Fields stellte sich das bisherige Vorgehen mit OBIA als wenig erfolgsversprechend heraus. Das Problem liegt darin, dass die nötigen Objekte in keinem der Tests den Wällen der Celtic Fields entsprachen, sobald in irgend-

einer Weise Störungen, z.B. in Form von Entwässerungsgräben, vorlagen. Gleiches gilt für Waldgebiete, in denen stets eine Tendenz zum Bildrauschen besteht.

Aus den vielen Möglichkeiten wurde Template Matching ausgewählt. Diese Technik spricht Bodendenkmäler in ihrer jeweiligen Gesamtheit an und ist damit resistenter gegenüber Störungen, die in der OBIA die Objekte zuverlässig zerschneiden. Zudem wurde sie bereits im archäologischen Kontext verwendet und ist relativ einfach über Python mit einem GIS kombinierbar, so dass kein weiteres Programm benötigt wird.

Das Template Matching für die Suche nach Celtic Fields wurde in das GIS-Tool implementiert, das bereits die Geländemodelle berechnet. Aktiviert wird es durch die entsprechende Checkbox in der Benutzeroberfläche. Das Tool benutzt dann das vom Nutzer eingegebene Template für den Vergleich mit dem berechneten Geländemodell. Da Celtic Fields in verschiedenen Orientierungen und Größen vorliegen, wird das Template schrittweise gedreht und skaliert. Für jede Kombination wird je eine *Correlation Map* berechnet. Gleiches gilt für eine Größenskalierung. Somit entstehen viele verschiedene *Correlation Maps* aus denen schließlich die Verdachtsflächen herausgefiltert werden.

4 Ergebnisse

Die Ergebnisse zeigen, dass alle vier Bodendenkmaltypen grundsätzlich erfassbar und Trefferquoten von 90-100%, je nach Testgebiet und Klasse, möglich, wenn auch nicht selbstverständlich sind. Im Folgenden werden die Ergebnisse der einzelnen Erfassungen vorgestellt.

4.1 Motten

Bei den Motten werden mit einem Algorithmus erfolgreich verschiedene Erhaltungszustände abgedeckt (Abb. 11). Somit ist es möglich, Burgentypen nach Erhaltungszustand bzw. Form zu klassifizieren und zu bewerten. Genaue Trefferquoten wurden nicht berechnet, da die Anzahl der Motten zu gering ist. Dennoch konnte gezeigt werden, wie die OBIA zusammengesetzte Bodendenkmäler erfassen kann. In den Tests trat ein falscher Treffer auf, der nicht durch anpassen der Klassifikationsparameter vermieden werden konnte und außerdem einer Motte sehr ähnlich sieht.

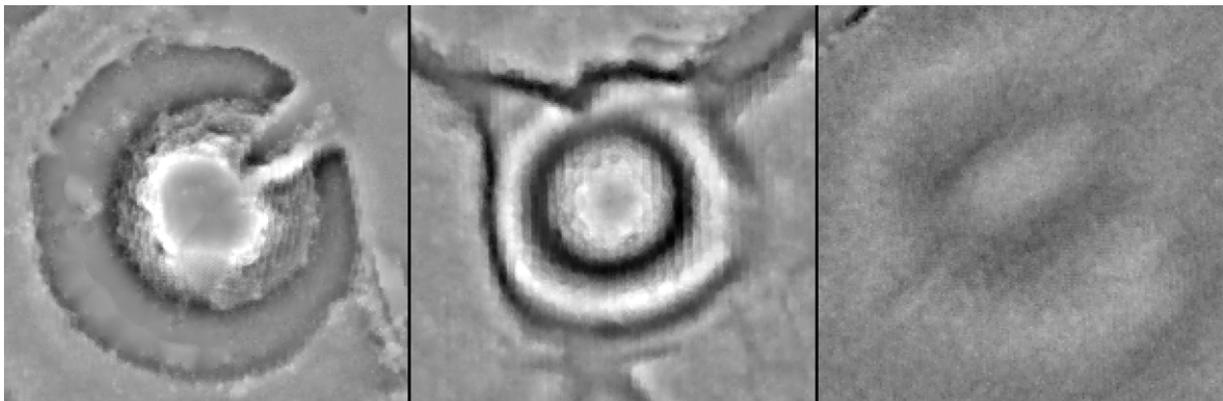


Abb. 11: Verschiedene Erhaltungszustände von Motten, die mit dem Verfahren gefunden werden können

4.2 Grabhügel

Die Grabhügel geben ein sehr diffuses Bild ab. Es zeigte sich, dass hier die Erfassungsgenauigkeit stark von mehreren Faktoren abhängt. Erstens ist dies der Erhaltungszustand – deformierte oder stark erodierte Grabhügel fallen trotz guter Segmentation in weniger idealtypische Klassen. Zweitens sind auch die Segmentation und die Klassifikation mögliche Fehlerquellen, da die Einstellungen zu nicht erkannten und unpassend klassifizierten Verdachtsflächen führen können. Drittens sind Grabhügel sehr einfache Strukturen, die in der Natur und unter anthropogenen Oberflächenformen viele Entsprechungen haben. Verwechslungen sind somit kaum zu vermeiden. Nicht zuletzt ist auch auf die Nachteile der Visualisierungen zu verweisen. Trotz aller Schwierigkeiten wurden bisher unbekannte Grabhügel gefunden und in manchen Gebieten sehr gute Trefferquoten erzielt (Abb. 12). Tabelle 1 zeigt, wie stark sich die angeführten Faktoren auf die Trefferquoten auswirken. Dabei ist zu erwähnen, dass die Zahlen noch ohne das angesprochene Ausstanzen der anthropogen überprägten Flächen zustande kamen, was die Tendenz noch besser verdeutlicht. Im Ibbenbürener Testgebiet ist einerseits ein Steinbruch vorhanden, der in den Visualisierungen viele vermeintliche Kuppen entstehen lässt, andererseits sind die Grabhügel stark erodiert. Im Testgebiet Finnenberg finden sich dagegen weitaus idealere Bedingungen.

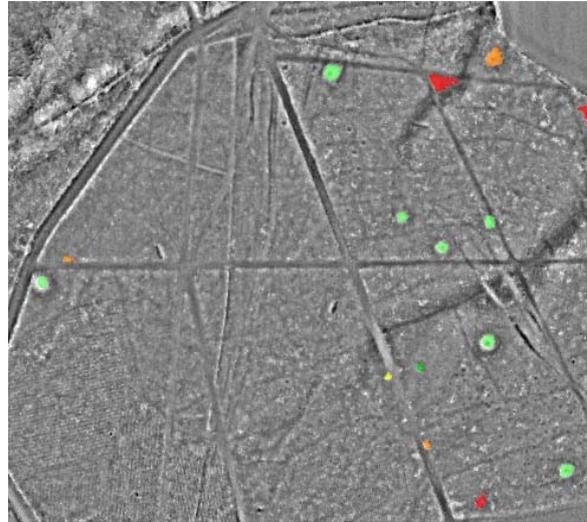


Abb. 12: Ausschnitt eines Testgebietes in Flaesheim nach abgeschlossener Klassifikation. In Grün die idealtypischen Verdachtsflächen, die für eine Interpretation am interessantesten sind. Die Grenzen für die roten, wenig idealtypischen Klassen wurden von realen Grabhügeln abgeleitet. Somit ist nicht ausgeschlossen, dass selbst diese Flächen tatsächlich Grabhügel darstellen

Tab. 1: Klassifikationsergebnisse der Testgebiete Finnenberg und Ibbenbüren im Vergleich

	Finnenberg				Ibbenbüren			
	richtige Treffer	unbestätigte Treffer	gesamt	Trefferquote	richtige Treffer	unbestätigte Treffer	gesamt	Trefferquote
1) ideal	2	0	2	100 %	0	1	1	0 %
2) fast ideal	2	1	3	66,6 %	2	14	16	12,5 %
3) mäßig ideal	2	8	10	20 %	3	21	24	12,5 %
4) wenig ideal	3	24	27	11,1 %	8	97	105	7,6 %
5) nicht ideal	2	59	61	3,2 %	5	201	206	2,4 %
gesamt	11	92	103	10,6 %	18	334	352	5,1 %
nicht erkannt	3 von 14				53 von 71			

4.3 Wölbäcker

Bei den Wölbäckern ist das Ergebnis besser als erwartet. Gerade in flachem Gelände zeigt sich, dass die Klassifikation sehr gut funktioniert (Abb. 13). Es ist dabei fraglich, inwieweit falsche Treffer durch Anpassungen des *rulesets* vermieden werden können, da sie Wölbäckern sehr ähnlich sehen. An Hängen mit hangparallelen Wegen zeigen sich Probleme, da beim Entfernen des

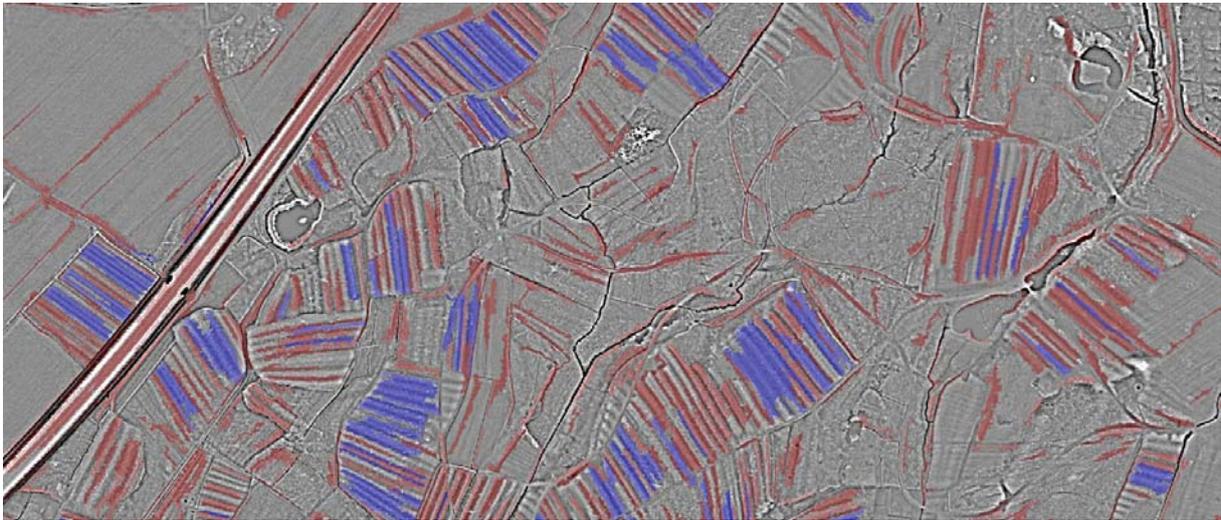


Abb. 13: Klassifikationsergebnis im Wildpark Dülmen. In Blau die erfassten Wölbäckerstrukturen. In Rot weitere Strukturen, die zur Klassifikation der blauen Flächen benötigt werden, für die Interpretation aber nicht von großer Bedeutung sind

Makroreliefs Strukturen entstehen, die in *Difference Map* und LRM Wölbäckern sehr ähnlich sehen – die Verwendung des herkömmlichen DGM kommt im Gegensatz zu den Motten allerdings nicht in Frage.

Die Erfassung der Celtic Fields ist methodisch noch nicht abgeschlossen. Die bereits vorliegenden Testergebnisse sehen aber vielversprechend aus (Abb. 14). Der Vergleich mit Abb. 10 zeigt bereits, dass das Template Matching mit Celtic Fields grundsätzlich funktioniert, da in den Bereichen mit Celtic Fields die höchsten Korrelationen auftreten. Auf diesen Ergebnissen gilt es nun aufzubauen.

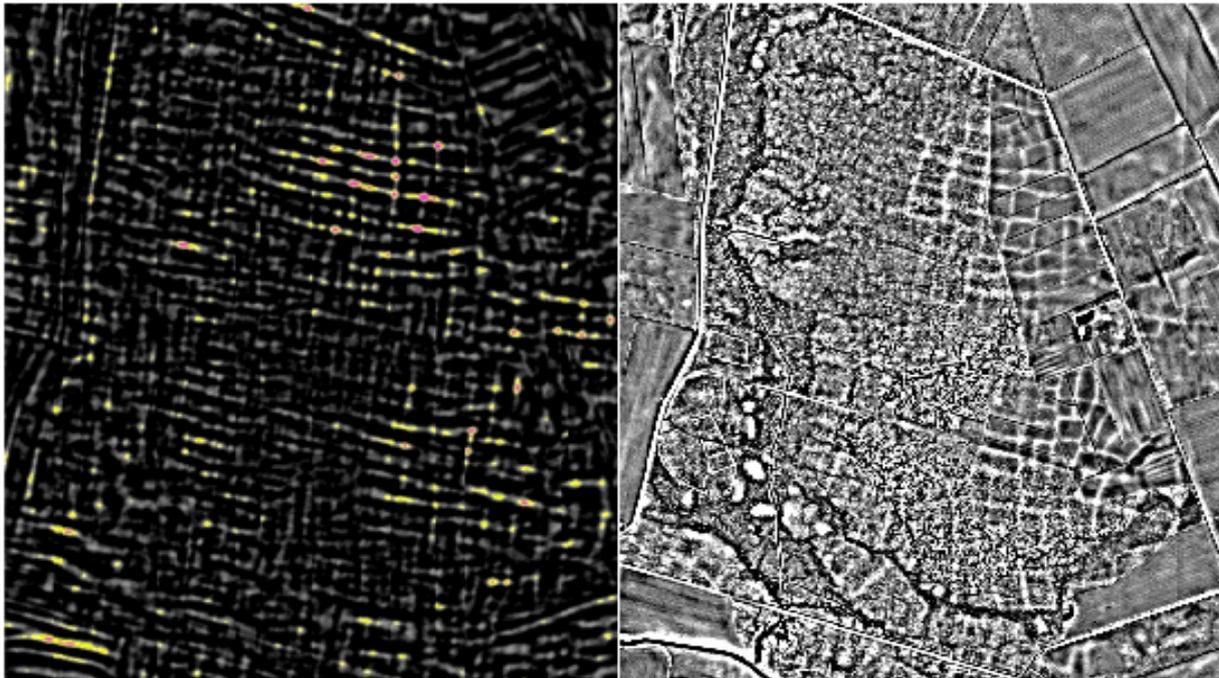


Abb. 14: *Correlation Map* mit eingefärbten Verdachtsflächen (rosa) und weiteren Flächen mit hoher Übereinstimmung zwischen Template und DGM (gelb)

5 Ausblick

Bisher konnte lediglich ein erster Eindruck der Möglichkeiten erlangt werden. Zukünftig könnte daher einerseits die Qualität der Klassifikationen und andererseits der Grad der Automation erhöht werden, was die Methoden für größere Untersuchungsgebiete interessant machte.

Auf Seiten von eCognition könnten die Trefferquoten mit strengeren, feineren und neuen Klassenbeschreibungen verbessert und verschiedene Erhaltungszustände durch mehrere unabhängige Segmentationen abgedeckt werden. Außerdem stellt sich die Frage, ob die Suche nach Motten, Grabhügeln und Wölbäckern nicht auch mittels Template Matching durchgeführt werden kann. Dies würde den Workflow vereinfachen, da alle Funktionen im GIS-Tool gesammelt würden.

Des Weiteren ist die Frage interessant, wie gut sich weitere Daten in die automatisierte Suche integrieren lassen. Interessant sind hier z.B. Satelliten- und Luftbilder im sichtbaren und nicht sichtbaren Bereich, Thermalbilder, Bodenfeuchte-Daten sowie NDVI-Klassifikationen. Möglicherweise lassen sich so Bodendenkmäler von natürlichen Strukturen unterscheiden, die im LiDAR-Scan identisch aussehen.

Nicht zuletzt durch oftmals begrenzte finanzielle Mittel ist auch die Verwendung von Open Source Software-GIS wie QGIS interessant. Dies sollte jedoch nicht auf Kosten der Qualität geschehen, weswegen ein Vergleich kommerzieller und kostenloser System interessant ist. Hinsichtlich des Tools müssten lediglich die ArcGIS-Funktionen ersetzt werden.

6 Literaturverzeichnis

- ARNOLD, V., 2011: Celtic Fields und andere urgeschichtliche Ackersysteme in historisch alten Waldstandorten Schleswig-Holsteins aus Laserscan-Daten. *Archäologisches Korrespondenzblatt*, **41**, 439-455.
- BOER, A. DE, 2007: Using pattern recognition to search LIDAR data for archeological sites. The world is in your eyes. CAA 2005. *Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology. Proceedings of the 33rd Conference*, Tomar, March 2005, Figueriredo, A. & Velho, G. (Hrsg.), 245-254.
- HESSE, R., 2010: LiDAR-derived Local Relief Models – a new tool for archaeological prospection. *Archaeological Prospection*, **17**, 62-72.
- HESSE, R., 2016: Visualisierung hochauflösender Digitaler Geländemodelle mit LiVT. 3D-Anwendungen in Archäologie. *Computeranwendungen und quantitative Methoden in der Archäologie – Workshop der AG CAA und des Exzellenzclusters Topoi 2013*, Lieberwith, U. & Herzog, I. (Hrsg.), Berlin, 109-128.
- SCHNEIDER, A., TAKLA, M., NICOLAY, A., RAAB, A. & RAAB, T., 2015: A Template-matching Approach Combining Morphometric Variables for Automated Mapping of Charcoal Kiln Sites. *Archaeological Prospection*, **22**, 45-62.
- SEVARA, C., PREGESBAUER, M., DONEUS, M., VERHOEVEN, G. & TRINKS, I., 2016: Pixel versus object – A comparison of strategies for the semi-automated mapping of archaeological features using airborne laser scanning data. *Journal of Archaeological Science: Reports*, **5**, 485-498.
- TRIER, Ø, ZORTEA, M. & TONNING, C., 2015: Automatic detection of mound structures in airborne laser scanning data. *Journal of Archaeological Science: Reports*, **2**, 69-79.
- VERDONCK, L., 2016: Detection of Buried Roman Wall Remains in Ground-penetrating Radar Data using Template Matching. *Archaeological Prospection*, **23**, 257-272.