

Digitale Geländemodelle aus Laserscandaten – neue Herausforderungen und Anwendungsmöglichkeiten in den Geowissenschaften

RÜDIGER KÖTHE

scilands GmbH – Gesellschaft zur Bearbeitung digitaler Landschaften, Goetheallee 11, D-37073 Göttingen, <http://www.scilands.de/>

Schlüsselwörter: Digitale Geländemodelle, Lidar, GIS, Rauschfilter, anthropogene Reliefformen, geomorphometrische Reliefparameter, geomorphographische Karten, Bodenkartierung, Einzugsgebiete, Dolinen

Keywords: digital terrain models, Lidar, GIS, noise filtering, man made terrain features, geomorphometric terrain parameters, geomorphographic maps, soil mapping, drainage basins, dolines.

Kurzfassung

Digitale Geländemodelle (DGM) aus Laserscannungen bilden das Relief der Erdoberfläche in nie gekannter Präzision ab. Dies eröffnet einerseits neue und verbesserte Anwendungsmöglichkeiten in den Geowissenschaften, andererseits stellen sich aber auch neue Herausforderungen an die Aufbereitung der Laser-DGM. Für viele Anwendungen ist es erforderlich, das originale Laser-DGM aufzubereiten, um die Ergebnisse zu optimieren oder eine Berechnung überhaupt erst zu ermöglichen. So werden u.a. innovative Verfahren zum Filtern von Rauschen und anthropogenen Reliefformen, sowie zur Herstellung konsistenter Abflussverhältnisse – eine Grundvoraussetzung für die Ermittlung von Einzugsgebieten – vorgestellt. Die Anwendungsbeispiele für Laser-DGM beziehen sich auf die Ableitung morphometrischer Reliefparameter und die Erstellung von Geomorphographischen Karten zur Unterstützung der Bodenkartierung, die Berechnung von Einzugsgebieten für digitale Fließgewässernetze und die Ermittlung von Dolinen.

Abstract

Digital Terrain Models (DTM) from laser scanning measurements form the relief of the earth's surface in unprecedented precision. This opens on the one hand, new and improved applications in the earth sciences, on the other hand, but also represent new challenges to the pre-processing of laser DTM. For many applications it is necessary to modify the original laser DGM to optimize or to enable calculations. Thus, innovative methods for filtering noise and anthropogenic relief forms, and for the production of consistent discharge conditions - a prerequisite for the determination of catchment areas - are presented. The application examples for laser-based DTM refer to the derivation of morphometric terrain parameters and geomorphographic maps to support soil mapping, the calculation of catchment areas for digital river networks and the identification of dolines. 1. Einleitung

1. Einleitung

Während früher Digitale Geländemodelle (DGM) vorwiegend aus Isohypsen und stereoskopischen Luftbildmessungen abgeleitet wurden, stellen heute – neben Radarentfernungsmessungen – Laserentfernungsmessungen, auch Lidar (Light Detection and Ranging) genannt, die wichtigste Datengrundlage für die Erstellung von DGM dar. DGM aus Laserscannungen bilden gegenüber allen anderen Datenquellen das Relief der Erdoberfläche in bisher nicht gekannter räumlicher Auflösung und Genauigkeit ab. Hieraus ergeben sich einerseits neue und verbesserte Anwendungsmöglichkeiten in den Geowissenschaften, andererseits stellen sich aber auch neue Herausforderungen an die Aufbereitung der Laser-DGM und die eingesetzte Software zur geowissenschaftlichen Analyse. Im Folgenden soll ein Überblick über die Methoden der scilands GmbH zur Aufbereitung der Laser-DGM und zur Inwertsetzung der DGM in den Geowissenschaften vermittelt werden. Alle von uns entwickelten Methoden werden im Rahmen des freien GIS SAGA (<http://www.saga-gis.org/>) entwickelt und eingesetzt.

2. Aufbereitung von DGM aus Laserhöhenmessungen

Für viele Anwendungen in den Geowissenschaften ist es erforderlich, das originale Laser-DGM aufzubereiten, um die Ergebnisse zu optimieren oder eine Berechnung überhaupt erst zu ermöglichen (vgl. 3.1 und 3.2).

2.1 Resampling (Generalisierung)

Eine einfache und oft angewandte Methode der DGM-Aufbereitung ist das Resampling

(Generalisierung), da die räumliche Auflösung bzw. die Datenmenge der Laser-DGM für viele Anwendungen zu hoch ist. Als besonders praktikabel haben sich u.E. Rasterweiten von 2 m für die präzise Berechnung der Bodenerosion, 5 m für die Abgrenzung oberirdischer Einzugsgebiete und 10 m für die Reliefanalyse zur Unterstützung der Bodenkartierung erwiesen. Als Resampling-Verfahren wird von uns i.d.R. eine B-Spline-Interpolation (ein Standard-Modul von SAGA_GIS) eingesetzt. Es wird aber auch an der Realisierung des Lanczos-Verfahrens (LANCZOS 1950) gearbeitet, um die Resampling-Ergebnisse weiter zu verbessern.

2.2 Filtern von Rauschen

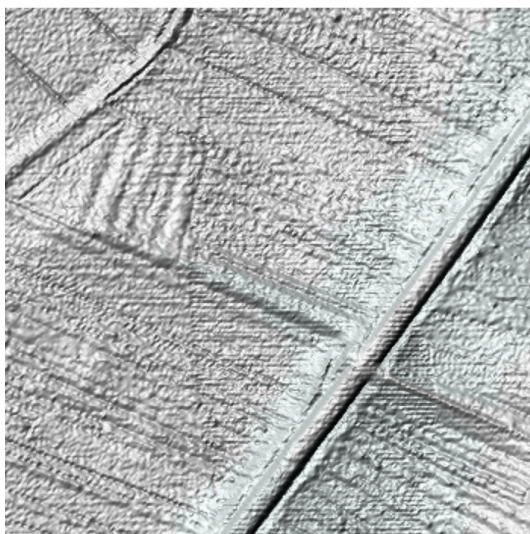
DGM aus Laserhöhenmessungen enthalten ein gewisses „Rauschen“, das sich störend auf viele Auswertungen (z.B. Berechnung der Bodenerosion) auswirkt. Das Rauschen (englisch: noise) ist die zufällige, störende Variation der Höhenwerte in der Nachbarschaft eines gemessenen Höhenwertes, die das eigentliche Signal überlagert. Die Stärke des Rauschens ist von der jeweiligen Oberflächenbeschaffenheit abhängig. Das geringste Rauschen weisen planierte bzw. versiegelte Flächen und Wiesen auf. Auf Ackerflächen nimmt das Rauschen deutlich zu und es ist immer die Bearbeitungsrichtung der Feldmaschinen in Form von Rillen zu erkennen. Das stärkste Rauschen weisen Waldböden auf, wobei berücksichtigt werden muss, dass

in Waldgebieten nur vergleichsweise wenige Bodenpunkte aufgenommen werden können und die Messpunktdichte hier deutlich geringer ist.

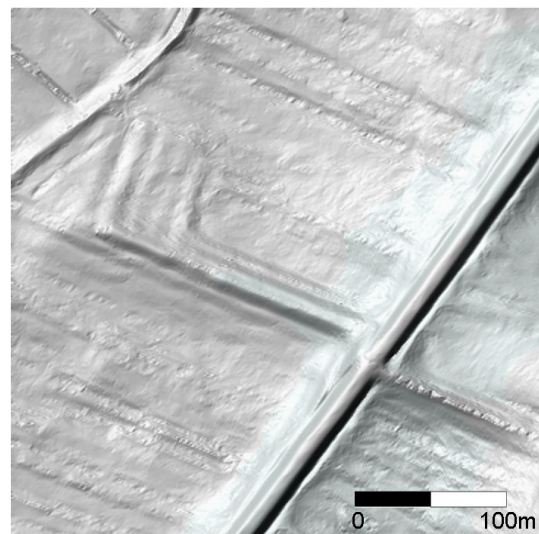
Zum „Entrauschen“ wird ein multidirektionaler Filter eingesetzt, der auf einer Modifikation des Filters von LEE (1980) beruht. Hierbei handelt es sich um einen Rauschfilter, der störendes Rauschen eliminiert und die unter dem Rauschen verborgene (Relief-)Information herausarbeitet. Der Filter ermittelt Streifen in alle Richtungen (multidirektional) um die betrachtete Rasterzelle (Höhenwert). Innerhalb der Streifen wird die Standardabweichung berechnet. Der neu zugewiesene, „entrauschte“ Höhenwert für die betrachtete Rasterzelle wird - gewichtet - aus dem originalen Höhenwert und dem Mittelwert des Streifens mit der geringsten Standardabweichung berechnet. Die Stärke der Filterung kann durch einen Parameter gesteuert werden.

2.3 Anthropogene Reliefformen

Ein Laser-DGM enthält sämtliche anthropogenen Veränderungen der Erdoberfläche. Während Gebäudeflächen bereits von den Herstellern der Laser-DGM identifiziert und anhand der Nachbarhöhen interpoliert werden, erweisen sich insbesondere Verkehrsbauten (z.B. Straßen- und Eisenbahndämme) als problematisch. In Talauen schnüren Dämme z.B. die oberirdischen Einzugsgebiete ab und verfälschen somit die Berechnung von Reliefparametern (z.B. Bodenfeuchte-Index). Eine Grundvoraussetzung



a) originales Laser-DGM, Rasterweite 1m



b) DGM nach der Filterung

Abb. 1 Filtern von Rauschen

für die Reliefanalyse zur Unterstützung der Bodenkundlichen Landesaufnahme (3.1) oder zur Berechnung von oberirdischen Einzugsgebieten (3.2) ist also die Verwendung eines DGM, welches die „natürliche“ Erdoberfläche abbildet. Die anthropogenen Reliefformen müssen also - soweit dies möglich ist - identifiziert und entfernt werden. Für diesen Zweck wurde von der scilands GmbH ein Filter zur Identifikation von anthropogenen Reliefformen (nur Vollformen des Reliefs) entwickelt (vgl. KÖTHE & BOCK 2009). Das Verfahren ist recht komplex und basiert u.a. auf der Erkennung von Dammkronen und der Identifikation von Geländeknicken (als Basis der Dämme). Bei der automatischen Filterung

der anthropogenen Reliefformen werden leider auch natürliche Kleinformen des Reliefs (meist Dünen) erfasst und ggf. größere bzw. komplexe anthropogene Reliefformen (z.B. Autobahnkreuze, große Bahnanlagen) nicht oder nur teilweise erfasst. Aus diesem Grund ist eine manuelle Korrektur der gefilterten anthropogenen Reliefformen erforderlich.

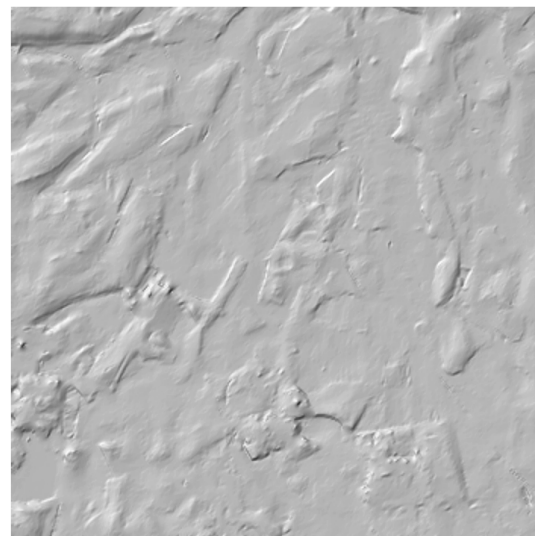
2.4 Weitere Methoden der DGM-Aufbereitung

Herstellung konsistenter Abflussverhältnisse

Alle DGM beinhalten zahlreiche geschlossene Hohlformen, die keinen Abfluss haben. Damit ein DGM „hydrologisch konsistent“ ist, muss es dahingehend aufbereitet werden, dass von jeder



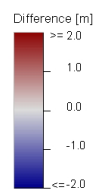
a) DGM mit anthropogenen Reliefformen, 10m Raster



b) DGM nach der Filterung der anthropogenen Reliefformen



c) Differenz der Höhenwerte von Abb. a - b)



Anm.:
DGM mit 10m Rasterweite auf Basis von
Lasermessungen

DGM freundlicherweise zur Verfügung gestellt vom
LGRB Baden-Württemberg

Abb. 2 Anthropogene Reliefformen

Rasterzelle des DGM der Abfluss (hang-)abwärts weitergeführt werden kann. Hierfür werden Sättel hinter den Hohlformen “durchstochen” und somit der natürliche Prozess beim Überlaufen eines Sees nachgebildet. Diese Art der DGM-Aufbereitung ist für viele geowissenschaftliche Auswertungen (z.B. Berechnung oberirdischer Einzugsgebiete, Bodenerosion) zwingend erforderlich. Realisiert wird die Herstellung konsistenter Abflussverhältnisse über die Methode „Deepen Drainage Routes“ des freien GIS SAGA.

Anpassung von DGM an Fließgewässernetze zur Ermittlung oberirdischer Einzugsgebiete

Die Oberflächen (Höhen) von Fließgewässern mit ihrem natürlichen, kontinuierlichen Längsgefälle sind nicht in einem DGM enthalten. Ein DGM weist eigene Fließwege (Talwege) auf, die mit real existierenden Fließgewässern i.d.R. nicht deckungsgleich sind.

Damit digitales Fließgewässernetz und DGM besser aufeinander abgestimmt sind, muss das

DGM angepasst werden. Für die Anpassung des DGM an das Gewässernetz kann ein von uns für diesen Zweck entwickeltes Software-Modul eingesetzt werden, das nicht nur die Rasterzellen der Fließgewässer, sondern einen größeren räumlichen Zusammenhang um die Fließgewässer berücksichtigt.

3. Beispiele für Anwendungen von DGM aus Laserhöhenmessungen in den Geowissenschaften

Im folgenden sollen einige Beispiele die Inwertsetzung von Laser-DGM in den Geowissenschaften mittels von uns entwickelter Methoden veranschaulicht werden. Die unten vorgestellten Anwendungsbeispiele basieren fast ausschließlich auf DGM als Datengrundlage. Zurzeit arbeiten wir auch an der Modellierung von Grundwasserflurabständen, wofür allerdings eine Vielzahl von weiteren Geodaten erforderlich ist.

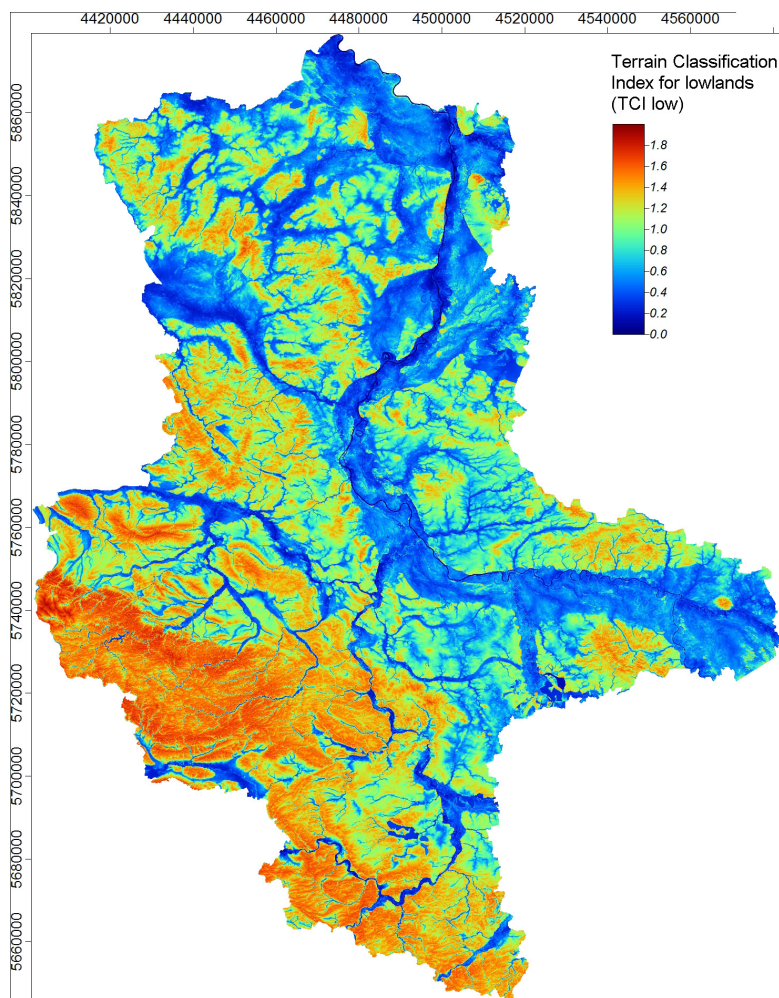


Abb. 3 Kombiniertes Reliefparameter TCI_low für Sachsen-Anhalt, Rasterweite 10m

3.1 Anwendungen in der Bodenkartierung

Ein Schwerpunkt der Arbeiten der scilands GmbH ist die Ableitung morphometrischer Reliefparameter aus DGM und die Erstellung von Geomorphographischen Karten zur Unterstützung der Bodenkartierung.

Morphometrische Reliefparameter und Reliefgerippelinien

Für jede Rasterzelle des DGM lässt sich eine Vielzahl von morphometrischen Reliefparametern berechnen. Neben den Reliefparametern können auch sog. Reliefgerippelinien, wie Tiefenlinien, Kulminationslinien und Neigungsunstetigkeiten (Kanten und Knicke) abgeleitet werden.

Aus den 8 Nachbar-Rasterzellen werden die sog. Lokalen Reliefparameter, wie Neigung, Exposition und die Wölbungen in horizontaler, vertikaler und in Querrichtung sowie die Abflussverteilung (siehe 3.2) berechnet. Für die Berechnung der Komplexen Reliefparameter ist hingegen ein größerer, nicht vorhersehbarer Raumbezug erforderlich. Höhe

über Tiefenlinie, Höhe unter Kulminationslinie, Einzugsgebietsgröße und Bodenfeuchte-Index sind nur einige Beispiele von Komplexen Reliefparameter, die von uns berechnet werden (vgl. BÖHNER & KÖTHE 2003). Den Abschluss bilden die Kombinierten Reliefparameter, die über einfache Formeln aus den Lokalen und Komplexen Reliefparameter berechnet werden. Beispiele hierfür sind die Relative Hangposition (aus Höhe über Tiefenlinie und Höhe unter Kulminationslinie), der Scheitelbereichsindex (aus Relativer Hangposition und Neigung) sowie der Terrain Classification Index for Lowlands (TCI_low) (aus Höhe über Tiefenlinie und Bodenfeuchte-Index). Der TCI_low (Abb. 3) ist z.Zt. unser leistungsfähigster Reliefparameter. Bei Kenntnis der lokalen Gegebenheiten lassen sich aus ihm – insbesondere im Flachland – bereits direkte Schlüsse über die Reliefgenese und den oberflächennahen Untergrund ziehen.

Digitale Geomorphographische Karten (GMK)

Eine GMK (vgl. KÖTHE 1996 und KÖTHE et

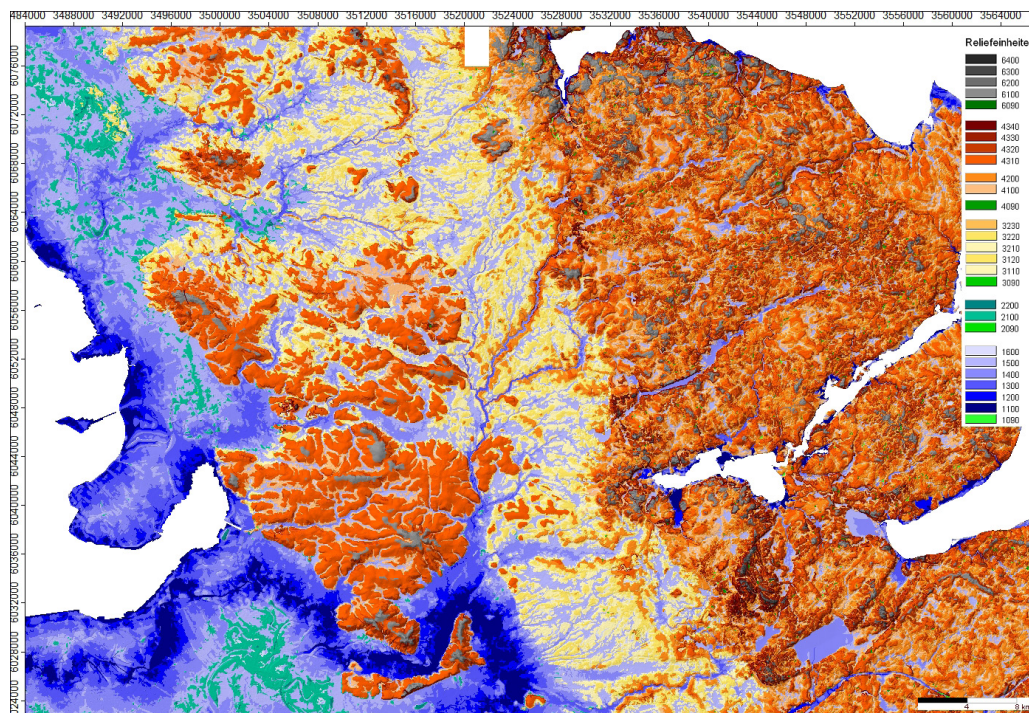


Abb. 4 Ausschnitt aus der Digitalen Geomorphographischen Karte (GMK) von Schleswig-Holstein

Erläuterungen zu Abb. 4: Reliefseinheiten vom Typ

1000 (z.B. 600): Senkenbereiche,

2000: Verflachungen im Bereich der Marschen,

3000: Verflachungen und Terrassen im Bereich der Urstromtäler und Sander,

4000: Verflachungen und flache Hänge im Bereich der Jung- und Altmoränengebiete,

6000: Scheitelpunkte der Jungmoränengebiete

xx90: Geschlossene Hohlformen in der jeweiligen Landschaftseinheit

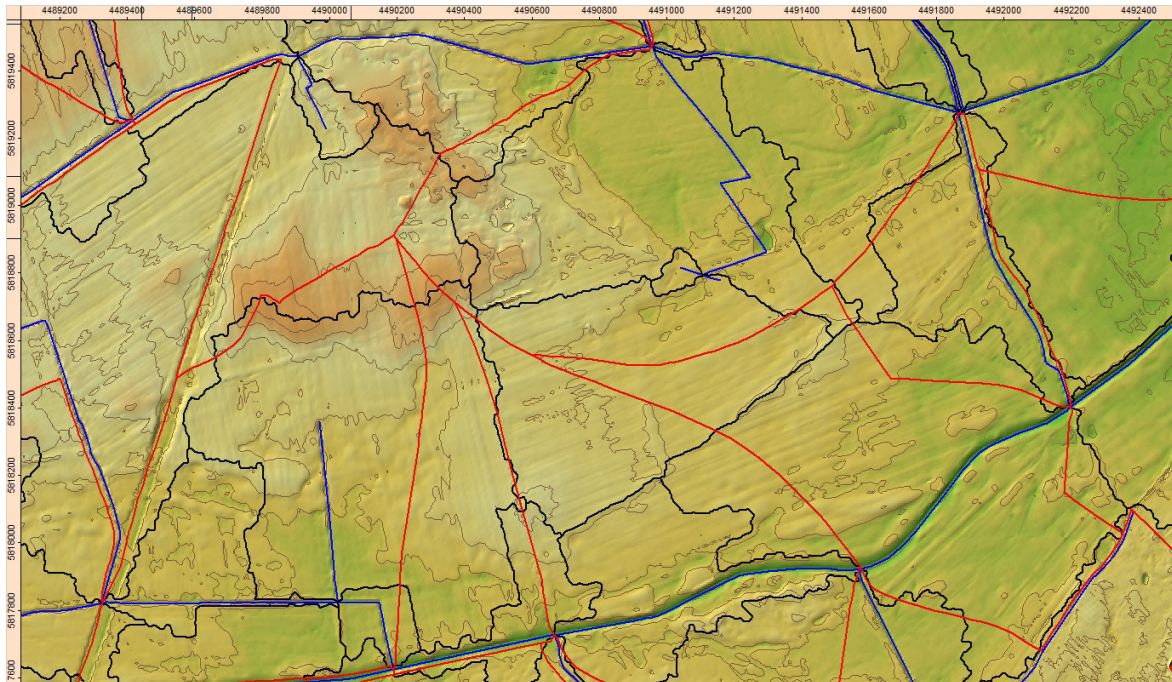


Abb. 5 Vergleich automatisch und manuell abgegrenzte Einzugsgebiete. Detailausschnitt aus dem Gebiet Tanger (Sachsen-Anhalt)

Erläuterungen zu Abb. 5:

rote Linien: manuell abgegrenzte Einzugsgebietsgrenzen (Wasserscheiden),

schwarze Linien: automatisch abgegrenzte Einzugsgebietsgrenzen (Wasserscheiden),

blaue Linien: Fließgewässerabschnitte,

braune Linien: 0,5m-Isopysen aus DGM 5m Rasterweite (ohne anthropogene Reliefformen)

Hintergrundbild: Schummerungsdarstellung DGM 5m Rasterweite (ohne anthropogene Reliefformen), Höhenwerte im Kartenausschnitt zwischen 33m und 36,5m

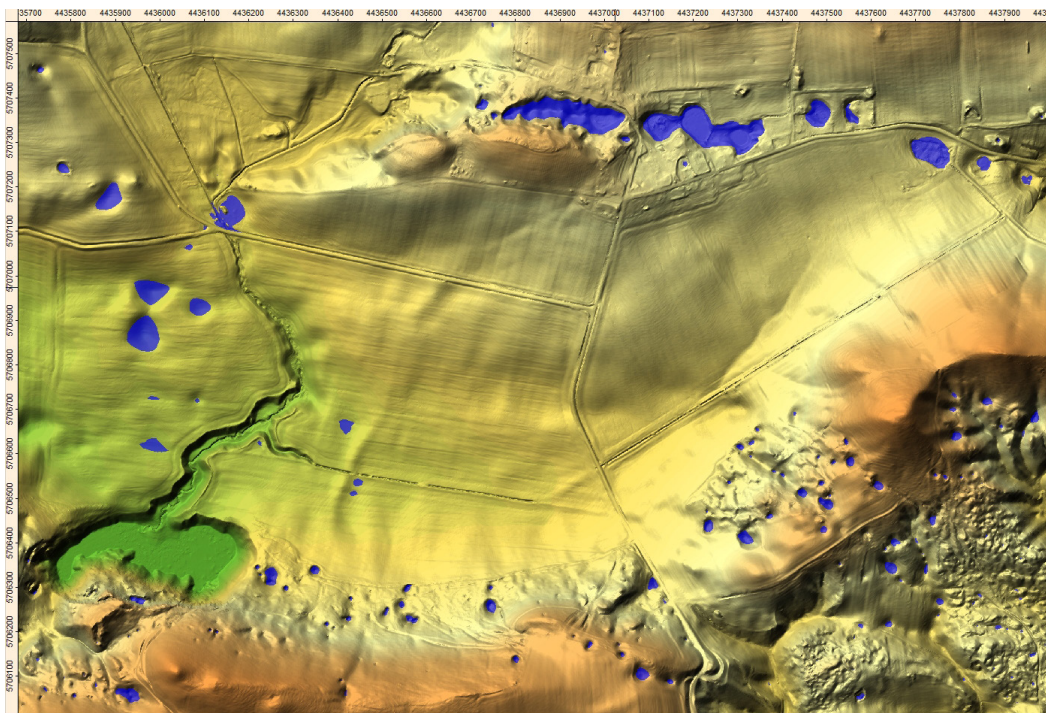


Abb. 6 Automatisch ermittelte Dolinen (blau eingefärbt), Gipskarststreifen im südlichen Harzvorland (Sachsen-Anhalt), Rasterweite des DGM: 1m

al. 1996) gliedert das Relief der Erdoberfläche in morphographische Reliefeinheiten, die möglichst homogene Bedingungen für die Bodenbildung aufweisen. Auf der Basis der oben beschriebenen Reliefparameter und Reliefgerippelinien werden zuerst die übergeordneten Reliefeinheiten Senkenbereiche, Scheitelbereiche, Verflachungen und Terrassen sowie die Hangbereiche ausgewiesen. In einem weiteren Schritt werden diese Reliefeinheiten anhand der morphometrischen Reliefparameter weiter untergliedert. Generell wird angestrebt, anstatt mit starren, mit lokal sich selbst justierenden Schwellenwerten zu arbeiten.

GMK wurden bereits für die Bundesrepublik und die Bundesländer Baden-Württemberg, Brandenburg, Hessen, Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen, Thüringen, Sachsen, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein (siehe Abb. 4) sowie – auf der Basis von Höhenmodellen der Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) – für die Länder Burkina Faso und Kanada erstellt. Die GMK für Sachsen-Anhalt mit 10m Rasterweite auf Basis des landesweiten Laser-DGM ist gegenwärtig in Bearbeitung.

3.2 Anwendungen in der Hydrologie – Ermittlung von Einzugsgebieten

Die oberirdischen Einzugsgebiete werden i.d.R. für sog. Gewässerabschnitte berechnet. Als Gewässerabschnitte werden Teilstrecken von Fließgewässern zwischen den Einmündungen von Nebengewässern bzw. zwischen Quelle und erster Einmündung bezeichnet.

Verglichen mit der aufwändigen Aufbereitung des DGM für die Ermittlung von Einzugsgebieten durch

- Filterung (2.2),
- Eliminierung anthropogener Reliefformen (2.3) und
- Herstellung konsistenter Abflussverhältnisse (2.4)

ist die Berechnung der Einzugsgebiete relativ einfach. Die Basis für die Abgrenzung der Einzugsgebiete stellt ein Oberflächenabflussmodell dar. Das Abflussmodell berechnet für jede Rasterzelle, wie groß das oberhalb gelegene Einzugsgebiet ist. Hierbei wird ein sog. Multiple-Flow-Algorithmus (vgl. FREEMAN 1991) verwendet, der für jede Rasterzelle die Flächenanteile des Einzugsgebietes berechnet, die an die tieferliegenden (max. 8) Nachbar-

Rasterzellen weitergegeben werden.

Zuerst werden die Fließgewässerabschnitte auf das Raster übertragen, d.h. die Rasterzellen in denen ein Fließgewässer liegt, werden als erstes dem Einzugsgebiet des jeweiligen Gewässerabschnittes zugewiesen. Ausgehend von den Rasterzellen, in denen Gewässerabschnitte liegen, werden die höher gelegenen Nachbar-Rasterzellen untersucht. Alle höher gelegenen Nachbar-Rasterzellen, die den größten Teil ihres Einzugsgebietes in die betrachtete Rasterzelle abgeben, werden der Einzugsgebietsfläche (des jeweiligen Gewässerabschnittes) dieser Rasterzelle zugewiesen. Dieses Verfahren wird hangaufwärts solange wiederholt, bis alle Rasterzellen einem Einzugsgebiet (Gewässerabschnitt) zugewiesen wurden. Abbildung 5 zeigt die so ermittelten Einzugsgebiete im Vergleich zu manuell aus Isohypsen abgegrenzten Einzugsgebieten.

3.3 Anwendungen in der Geologie – Beispiel: Ermittlung von Dolinen

Eine relativ einfache Anwendung von Laser-DGM in der Geologie ist die Ermittlung von Dolinen in Karstgebieten. Für die automatische Ermittlung der Dolinen wird im Kern ein Algorithmus von WANG & LIU (2006) verwendet, der automatisch geschlossene Hohlformen in DGM ermittelt, ein Ansatz der methodisch dem Verfahren zur Herstellung konsistenter Abflussverhältnisse (2.4) ähnelt.

Eine manuelle Überprüfung und Korrektur ist jedoch angeraten, da die automatisch ermittelten geschlossenen Hohlformen auch anthropogenen Ursprungs sein können (z.B. kleine Steinbrüche oder Lehmgruben) und sog. Halbdolinen keine geschlossenen Hohlformen sind und deshalb nicht erfasst werden.

4. Literatur

- BÖHNER, J. & KÖTHE, R. (2003): Bodenregionalisierung und Prozeßmodellierung: Instrumente für den Bodenschutz. *Peterm. Geogr. Mitt.*, 147, 2003/3, 72-82, Gotha.
- FREEMAN, T.G. (1991): Calculating catchment area with divergent flow based on a regular grid. *Computers and Geoscience*, Bd. 17, 3, 413-422.
- KÖTHE, R. (1996): Entwicklung eines Systems der digitalen Reliefanalyse für geowissenschaftliche Anwendungen – insbesondere als Element bodenkundlicher Vorhersagemodelle. Abschlussbericht zum DFG-Projekt “Digi-

Relief“ (1989-1993), 94 S. [Geogr. Inst. Univ. Göttingen, unveröff.]

- KÖTHER, R. & BOCK, M. (2009) Preprocessing of Digital Elevation Models - derived from Laser Scanning and Radar Interferometry - for Terrain Analysis in Geosciences. Proceedings of Geomorphometry 2009, Zurich Switzerland, 155-161, Zürich.
- KÖTHER, R. & GEHRT, E. & BÖHNER, J. (1996): Automatische Reliefanalyse für geowissenschaftliche Kartierungen – derzeitiger Stand und Weiterentwicklung des Programms SARA. Arbeitshefte Geologie, 1/1996, 31-37, Hannover.
- LANCZOS, C. (1950): An Iteration Method for the Solution of the Eigenvalue Problem of Linear Differential and Integral Operators. Journal of research of the National Bureau of Standards, 45, 255-282.
- LEE, J.-S. (1980): Digital Image Enhancement and Noise Filtering by Use of Local Statistics. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Volume PAMI-2, 2, 65-168.
- WANG, L. & LIU, H. (2006): An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modelling. International Journal of Geographical Information Science, Vol. 20, No. 2, 193-213.