

Verarbeitung und Anwendung digitaler Geländemodelle im Bereich der Geographie

Summary

Digital terrain models (DTMs) today are a major component of geographic information systems (GIS). They support the analysis and display of phenomena related to the topography of the earth's surface. Thus, DTMs are mainly used in the environmental sciences and in natural resources management, as well as in engineering and planning applications.

This article intends to present an introduction and overview of the techniques of digital terrain modeling and their application in GIS. DTM processing is regarded as a sub-system of a GIS, with a range of functions similar to that of the main system, yet utilizing specific tools (i. e. algorithms and data structures) tailored to the particular requirements of surface models. Following a brief review of the components of a DTM system some examples of applications of DTMs will be presented. The article is concluded with a discussion of major directions for future research.

1. Einführung

Digitale Geländemodelle (DGM) finden in der geographischen Datenverarbeitung seit mehr als drei Jahrzehnten Verwendung. Mittlerweile haben sich Geländemodelle zu einem wichtigen Bestandteil geographischer Informationssysteme (GIS) entwickelt. In einem GIS bieten DGM die Möglichkeit, Phänomene oder Prozesse, die mit der Topographie der Erdoberfläche oder anderer Oberflächen in Beziehung stehen, zu modellieren, zu analysieren oder darzustellen.

Ein DGM im engeren Sinne kann vereinfacht als eine digitale Beschreibung eines Teils der Erdoberfläche verstanden werden. Da überhängende Stellen in der Natur verhältnismäßig selten auftreten, werden topographische Oberflächen digital meist als Felder (d. h. als Oberflächenmodell mit eindeutigen z-Werten über x und y) abgebildet. Ein DGM ist deshalb üblicherweise eher ein sogenanntes 2.5D-Modell als ein dreidimensionales Modell. Erweiterungen, die die Modellierung von überhängenden Stellen und Verwerfungen zulassen, werden meist nur von anwendungsspezifischen Systemen (etwa solchen zur Modellierung geologischer Oberflächen, siehe z. B. McCULLAGH 1988) angeboten.

Einige Autoren bevorzugen den Begriff «digitales Höhenmodell», falls durch das digitale Modell nur das Relief beschrieben wird, da der Begriff «Gelände» neben der Höhe der Geländeoberfläche auch oft noch weitere Attribute der Landschaft impliziert (vergl. BURROUGH 1986: 39). Obwohl dieses Argument an sich richtig ist, verwen-

den wir absichtlich den Begriff «digitales Geländemodell», da wir die Möglichkeit der Aufnahme zusätzlicher Landschaftsattribute (z. B. Angaben zu geomorphologischen Formen) zur Verbesserung der digitalen Beschreibung der Geländeoberfläche nicht grundsätzlich ausschließen möchten (weitere Begründung siehe WEIBEL und HELLER 1991). Wir möchten auch darauf hinweisen, daß die Methode der digitalen Geländemodellierung ebenso auf die Modellierung anderer einwertiger Oberflächenphänomene (z. B. geologische Horizonte, Luftdruckflächen oder Bevölkerungsdichten) übertragen werden können. Wir werden uns jedoch in diesem Text auf die Behandlung topographischer Oberflächen beschränken.

Wie eingangs erwähnt wurde, bildet die Fähigkeit zur Modellierung von Relief und geländeabhängigen Prozesse einen wichtigen Bestandteil heutiger geographischer Informationssysteme. Die Erzeugung und Verarbeitung digitaler Oberflächenmodelle weist strukturell sowie hinsichtlich einiger Grundverfahren einige Ähnlichkeit mit der Verarbeitung zweidimensionaler geographischer Daten auf. Da aber topographische Oberflächen eine wesentlich andere Struktur aufweisen als planimetrische Daten, unterscheiden sich die für die digitale Geländemodellierung verwendeten Datenmodelle und Algorithmen zum Teil recht stark von den entsprechenden Verfahren für ebene Elemente. Die Geländemodellierung kann daher als ein Subsystem eines GIS aufgefaßt werden, mit ähnlicher Funktionalität wie das Hauptsystem, jedoch mit spezifischen Werkzeugen.

In der Folge werden wir in einem ersten Abschnitt kurz auf die Bestandteile und den Aufbau eines solchen DGM-Systems eingehen. Danach versuchen wir, anhand einiger ausgewählter Beispiele die Vielfalt der Anwendungsmöglichkeiten von DGM aufzuzeigen. Abschließend wird auf die wesentlichen Punkte und Trends in der Forschung um DGM eingegangen.

2. Komponenten eines DGM-Systems

Der folgende Abschnitt soll einen kurzen Einblick in die technische Basis der digitalen Geländemodellierung lie-

fern. Die Datenquellen und der Aufbau von DGM nehmen dabei im Verhältnis zum Rest einen verhältnismäßig breiten Raum ein. Wir sind der Meinung, daß es für Benutzer von DGM-Daten (wie überhaupt allgemein digitaler Daten) wichtig ist, sich bewußt zu sein, wie die Datengrundlage, auf der man operiert, erstellt wurde. Eine detailliertere und umfassendere Diskussion der Bestandteile eines DGM-Systems – einschließlich einer Fülle weiterführender Literatur – bieten WEIBEL und HELLER (1991) oder auch McCULLAGH (1988).

2.1. Datenquellen und Aufbau von digitalen Geländemodellen

Zur Erzeugung eines DGM müssen zunächst Grunddaten erfaßt werden, aus denen dann ein Oberflächenmodell konstruiert werden kann. Diese Grunddaten werden als Punkte, Linien (z. B. Bruchkanten) oder Flächen (z. B. Aussparungsflächen, in denen kein DGM konstruiert werden soll) digitalisiert. Für die Qualität des resultierenden DGM ist die Wahl der Datengrundlagen und der Erfassungstechniken von grundsätzlicher Bedeutung. Daten, die zum Aufbau eines DGM verwendet werden, sollten aus Positionsmessungen (x/y/z) und – wann immer möglich – aus zusätzlicher Information über strukturelle Elemente der Erdoberfläche (Tal- und Kammlinien, Bruchkanten sowie weitere Diskontinuitäten der Oberfläche) bestehen. Weitere mögliche Eingabewerte beziehen sich beispielsweise auf die Genauigkeit der Messungen, die geomorphologische Relevanz der einzelnen Datenelemente und andere mehr. Grundsätzlich wird ein DGM um so genauer, desto umfassender die erfaßten Grunddaten die Form und die Eigenschaft (z. B. den Formenschatz) des Geländeausschnitts beschreiben. Es versteht sich jedoch von selbst, daß für reale Projekte die geforderte Datengenauigkeit gegenüber den gegensätzlichen Faktoren Effizienz der Aufnahmemethode, Kosten und Zeitaufwand abgewogen werden muß. Zurzeit werden die meisten DGM-Grunddaten mittels dreier alternativer Methoden erfaßt: terrestrische Vermessung (sehr genau, jedoch zeitaufwendig), halbautomatisierte oder automatische Photogrammetrie (je nach Methode mittlere bis hohe Genauigkeit sowie mittlere bis hohe Aufnahmegeschwindigkeit) und die Digitalisierung von kartographischen Dokumenten, z. B. Höhenlinienplänen (deckt schnell große Flächen ab, jedoch mit beschränkter Genauigkeit). Daneben gelangen auch Spezialmethoden wie Radar- oder Laserhöhenmessung oder Sonar (für untermeerische Topographie) zum Einsatz. Neuere Methoden wie die terrestrische Vermessung mittels Global Positioning System (GPS) oder die Laser- und Radarhöhenmessung unterliegen noch der Entwicklung, dürften aber bald vermehrt Verwendung finden und allenfalls angestammte Methoden ablösen.

Die terrestrische Vermessung wird meist nur für kleine Projekte (z. B. für Baustellen) beigezogen. Photogrammetrie dagegen kann von größeren Bauprojekten bis zum landesweiten Geländemodell eingesetzt werden.

Die photogrammetrische Erfassung sollte eigentlich die bevorzugte Methode zur Gewinnung von Geländedaten sein, da bei ansprechender Aufnahmegeschwindigkeit die Messungen mit guter Genauigkeit vorgenommen werden können und sie üblicherweise eine räumliche Verteilung aufweisen, die sich nach der Struktur des Geländes richtet. Für diese Technik sind aber hohe Investitionen (Befliegung, Auswertegeräte) sowie gut ausgebildete Fachkräfte nötig, so daß für größere Projekte (die auch für Geographen interessant sind) Photogrammetrie heute meist nur unterstützend verwendet wird.

Die hauptsächlich verwendete Methode zur Herstellung landesweiter DGM durch nationale topographische Ämter (so auch durch das Bundesamt für Landestopographie) ist heute (noch) die Digitalisierung von Karten. Allerdings stellen sich bei der Verwendung digitalisierter Höhenkurven einige Probleme. Zunächst können sich durch die kartographische Bearbeitung der Basiskarten schon erhebliche Fehler eingeschlichen haben. Auch ist die Verteilung der Datenpunkte ungünstig, da über die Form der Gebiete zwischen den Höhenkurven wenig Aufschluß besteht. Dies kann vor allem in flachen Gebieten, in denen die Kurven weit voneinander entfernt sind, zu Schwierigkeiten bei der nachfolgenden Erzeugung von Höhenmodellen führen. Über weitere Vor- und Nachteile der einzelnen Aufnahmemethoden sowie die einschlägige Literatur zum Thema informiert der Text von WEIBEL und HELLER (1991).

Nach ihrer Aufnahme liegen die Geländedaten als Einzelpunkte (Koten, Massenpunkte), Linien (z. B. Bruchkanten) sowie Polygone (z. B. Aussparungsflächen) vor. Um für eine Oberflächenmodellierung zugänglich zu sein, müssen diese Grundmessungen nun in eine geeignete Struktur überführt werden: die topologischen Beziehungen zwischen den Elementen müssen aufgebaut werden, und es müssen Interpolationsmodelle zur Modellierung der Oberflächengestalt eingeführt werden. So wird das eigentliche digitale Geländemodell erzeugt. Als Datenstrukturen für die Beschreibung der Form von Oberflächen bieten sich verschiedene Modelle an: regelmäßige Rechteckgitter, unregelmäßige Dreiecksvermaschungen, Höhenlinien, Profile, mathematische Funktionen (z. B. Trendflächen) usw. Eine detaillierte Diskussion der Vor- und Nachteile der einzelnen Strukturen wird durch PEUCKER (1978) und MARK (1979) vorgenommen. Es besteht heute in der Forschung wohl ein Konsens darüber, daß keine einzelne Datenstruktur für jede Anwendung optimal ist. Es müssen daher Verfahren bereitgestellt werden, die die Umwandlung verschiedener Datenstrukturen untereinander erlauben (siehe 2.2.). Es ist auch wichtig, daß die einzelnen Strukturen in ein Datenmodell vereinigt werden, das eine flexible und anpassungsfähige Arbeit mit DGM erst ermöglicht. Ein solches Modell ist in WEIBEL und HELLER (1990) beschrieben.

Die überwiegende Mehrheit der heutigen DGM verwenden als Datenstruktur entweder das regelmäßige rechteckige Gitter (oder kurz Gitter) oder die unregelmäßige Dreiecksvermaschung (englisch «triangulated irregular network» = TIN).

Gitter können auf verschiedene Weise erzeugt werden: auf direktem Wege aus einer Datenerfassung in Gitteranordnung, durch Interpolation aus unregelmäßigen Stützpunkten oder durch Verdichtung/Verdünnung bestehender Gitter-DGM (resampling). In Gittern kann dank der regelmäßigen Anordnung der Punkte in rechteckigen Zellen die Datenstruktur als Matrix abgebildet werden, was große Vorteile schafft. Die topologischen (Nachbarschafts-)Beziehungen zwischen den Punkten sind in der Matrix implizit enthalten und müssen weder explizit berechnet noch gespeichert werden. Da die Matrixstruktur der Struktur von Rechnerspeichern entspricht, sind Algorithmen für die Bearbeitung von Gitter-DGM verhältnismäßig einfach. Andererseits hat die regelmäßige Punktanordnung auch zur Folge, daß sich Raster in der Punktdichte nicht an die Komplexität des Geländes anpassen können. Um das Gelände in einer genügenden Genauigkeit beschreiben zu können, ist eine hohe Punktdichte nötig, was eine große Datenmenge und eine Vielzahl von überflüssigen Punkten erzeugt. Auch ist die Speicherung von Geländekanten in reinen Gittermodellen unmöglich; dies wird erst durch Erweiterungen des Modells möglich (z. B. KÖSTLI und SIGLE 1986).

TIN-Modelle basieren auf Dreieckselementen. Diese werden durch Dreiecksvermaschung (auch Triangulation genannt) der durch die Geländedatenerfassung aufgenommenen Datenpunkte erzeugt. Dies bedeutet, daß TIN-Modelle grundsätzlich direkt auf den ursprünglichen Datenpunkten aufbauen, ohne weitere Interpolation. Falls terrestrische Vermessung zur Grunddatenerfassung benutzt wurde, kann dadurch die Vermaschung der Dreiecke schon festgelegt sein, ansonsten wird meist eine mathematische Methode zur Triangulation verwendet. Das heute gebräuchliche Verfahren ist die sogenannte Delaunay-Triangulation, mit Erweiterungen zum Einfügen von Geländekanten und Aussparungsflächen (Methode siehe z. B. PREPARATA und SHAMOS 1985, GUIBAS und STOLFI 1985, HELLER 1990). TIN-Modelle können auf einfache Weise Strukturelemente aufnehmen und können sich dank der variablen Punktdichte gut an die Beschaffenheit des Reliefs angleichen. Für eine hinreichend genaue Beschreibung der Geländeformen sind so weniger Punkte nötig als im Gitter. Wegen der unregelmäßigen Punktanordnung müssen allerdings die Nachbarschaftsbeziehungen der Punkte und Dreiecke explizit errechnet werden (und gespeichert) werden. Dies macht Algorithmen für die Behandlung von TIN-Modellen ungleich komplexer als die entsprechenden Verfahren für Gitter. Dreiecksvermaschungen können auch als Basis zur Interpolation von Gittermodellen dienen (vgl. z. B. HELLER 1990). Dies ist heute wahrscheinlich auch ihr häufigster Verwendungszweck in geographischen Anwendungen.

Heute werden in geographischen DGM-Projekten überwiegend Gittermodelle verwendet. Zum einen liegt dies wohl daran, daß viele Daten (z. B. aus der Fernerkundung), die mit dem DGM verknüpft werden sollen, ebenfalls als Gitter (d. h. Raster) vorliegen. Daneben liegt dies wohl auch an der algorithmischen Einfachheit der Ra-

sterverarbeitung. Es muß jedoch darauf hingewiesen werden, daß Gittermodelle große Probleme mit der Modellierung von Geländediskontinuitäten bekunden und allgemein wegen ihrer regelmäßigen Datenverteilung eine hohe Genauigkeit eher vortäuschen als wirklich besitzen. Gittermodelle sind deshalb vor allem bei Anwendungen, die auf Geländekanten sensibel sind (z. B. fluviale Geomorphologie, Hydrologie usw.), mit Vorsicht einzusetzen.

Zwei wichtige Methoden im Bereich der Erzeugung von DGM – Interpolation und Triangulation – werden hier nicht näher behandelt. Die Beschäftigung mit den Grundlagen dieser Verfahren sei jedoch dringend ange raten, falls einmal der Aufbau eines eigenen DGM ansteht. Einen Einstieg in die Thematik bietet beispielsweise der Text von HELLER (1990).

2.2. Die Aufgabenbereiche der Geländemodellierung

Ein umfassendes System für digitale Geländemodellierung sollte Funktionen in fünf wesentlichen Bereichen anbieten (vgl. WEIBEL und HELLER 1990, 1991):

- DGM-Generierung
- DGM-Manipulation
- DGM-Interpretation
- DGM-Visualisierung
- DGM-Anwendung

Die *Generierung* von DGM dient der Erfassung der Grunddaten sowie dem Aufbau der Beziehungen zwischen den Datenelementen zur Erzeugung eines DGM (Modellkonstruktion). Die Funktionen zur Datenerfassung sind dabei nicht unbedingt DGM-spezifisch: Daten können mittels Vermessungs-, Photogrammetrie- oder Digitalisierungsmodulen beliebiger Systeme erfaßt werden. Es gibt nur wenige Erfassungsverfahren, die ausschließlich für DGM entwickelt wurden (z. B. automatische Extraktion von DGM aus digitalen Stereobildern) und die DGM auf direktem Wege zu erzeugen versuchen. Üblicherweise werden erst in der Modellkonstruktion besondere Algorithmen benötigt, die das eigentliche Oberflächenmodell erstellen. Diese umfassen eine Palette verschiedener Interpolations- und Triangulationsverfahren, die die adäquate Behandlung von verschiedenartigen Relieftypen und Daten aus verschiedenen Quellen erlauben.

Die *Manipulation* von Geländemodellen hat die Veränderung und Verfeinerung von DGM sowie die Erzeugung von abgeleiteten Modellen zum Inhalt. Prozeduren zur Manipulation von DGM sind von grundlegender Bedeutung für die Anpassungsfähigkeit eines DGM-Systems, da sie es ermöglichen, Änderungen an einem Modell vorzunehmen und es schrittweise an die Erfordernisse einer spezifischen Anwendung heranzuführen. Dazu sind zunächst einmal Funktionen zum interaktiven Editieren von DGM notwendig (Hinzufügen/Entfernen von Punkten und Linien, Änderung von Höhen usw.). Interaktivität ist hier wichtig, um die Kontrolle über das Ergebnis zu wahren. Ebenfalls benötigt werden Verfahren, die es er-

lauben, benachbarte Modelle aneinanderzufügen (joining) oder Daten verschiedener Quellen zu mischen (merging). Mittels Prozeduren zur Filterung von DGM (z. B. «ATM filtering» nach HELLER 1990) können redundante Datenpunkte aus DGM eliminiert werden. So kann das Datenvolumen eingeschränkt werden. Filterverfahren erlauben auch eine Vorstufe in Richtung Generalisierung von DGM für die kartographische Visualisierung. Eine weitere Gruppe von Manipulationsfunktionen besteht aus Methoden zur Umwandlung von Datenstrukturen: beispielsweise kann die Umwandlung von TIN zu Gitter durch Interpolation erreicht werden, die Konversion von Gitter zu TIN durch das Verfahren des «ATM filtering» (HELLER 1990).

Die *Interpretation* bezweckt die Analyse von DGM oder ganz allgemein die Extraktion von Information aus DGM. Dieser Aufgabenbereich ist im Kontext geographischer GIS-Anwendungen wohl am wertvollsten. Die aus einem DGM extrahierte Information kann in weiterführenden GIS-Modellen (z. B. in Bodenerosions- oder Abflußprognosemodellen) mit weiteren Daten verknüpft werden. Die Interpretationsfunktionen kann man in drei Kategorien einteilen. Zunächst sind dies die für geographische Fragestellungen wesentlichsten Verfahren der geomorphometrischen Analyse: sie umfassen Methoden zur Berechnung gängiger Maße (Handneigung, Exposition, Konvexität, Reliefenergie usw., vgl. Abb. 1 b, c) sowie zur Beschreibung und automatischen Erkennung von lokalen Formen des Reliefs (z. B. von sog. oberflächenspezifischen Punkten, Tal- und Kammlinien, Einzugsgebieten von Gewässern usw.). Eine weitere Gruppe von Funktionen dient der Qualitätsprüfung von DGM und schließt Verfahren zur Erkennung und Verbesserung von Meßfehlern in DGM sowie zur Berechnung von Qualitätsmaßen (RSME usw.) ein. Die dritte Kategorie von Interpretationsprozeduren wird vor allem in planerischen Anwendungen und im Ingenieurwesen benutzt. Sie hat Funktionen zur Berechnung der Geländeteile, die von einem bestimmten Punkt aus eingesehen werden können (Sichtbarkeitsanalyse), zur Ermittlung von Schlagschatten des Geländes (Abb. 1 d) sowie für Profilberechnungen und volumetrische Berechnungen zum Inhalt.

Die *Visualisierung* von Geländemodellen beinhaltet die Darstellung von DGM und davon abgeleiteter Information. Sie dient der Kommunikation von Ereignissen von Modellierungsschritten an den Benutzer und bildet die wichtigste Schnittstelle des DGM-Systems gegen außen. Visualisierung kann auch – neben der quantitativen Form der DGM-Interpretation – der visuellen Interpretation von DGM dienen. Verschiedenste Grundfunktionen sind möglich: verschiedene Arten der Erzeugung von Höhenlinien, analytische Schummerung (Abb. 1 a), Orthophotos, Blockdiagramme, Panoramen usw. Zusätzlich können diese Grundverfahren erweitert werden: beispielsweise durch Überlagerungen zweidimensionaler Objekte auf orthographische oder perspektivische Ansichten von DGM, interaktive Manipulation perspek-

tivischer Darstellungen (L'ÉPLATTENIER 1987), photorealistische Geländedarstellung (KANEDA et al. 1989) oder Animation (z. B. für Flugsimulation). Ein Thema, das in zunehmenden Maße auch im Bereich der Geländedarstellung Bedeutung erlangt, ist die Generalisierung (vgl. WEIBEL 1989).

Die *Anwendung* von DGM hat die Nutzung von DGM und die Entwicklung geeigneter Anwendungsmodelle für DGM in spezifischen Gebieten (z. B. Planung, Ressourcenverwaltung, Vermessung und Photogrammetrie, Geomorphologie usw.) zum Ziel. Die DGM-Anwendung bildet gleichsam den Rahmen für die Geländemodellierung: jede spezifische Anwendung stellt ihre besonderen Anforderungen an die Verfahren der Generierung, Manipulation, Interpretation und Visualisierung von digitalen Geländemodellen. Dies gilt sowohl in funktionaler Hinsicht als auch bezüglich anderer Erfordernisse an DGM-Systeme wie Effizienz, Datenvolumen, Sicherheit und andere mehr. Aufgabe des Anwendungsbereichs ist nun einerseits die Abklärung der Anforderungen bestimmter Disziplinen, die dann in die Konzeption neuer Verfahren einfließen können. Daneben muß auch die Evaluation von neu entwickelten Funktionen für die Belange verschiedener Anwendungen betrieben werden (z. B. wie können neue pseudo-realistische Visualisierungsverfahren für die Raumplanung verwendet werden?). Sehr wesentlich ist auch die Entwicklung neuer Prozeß- und Verwendungsmodelle in den Anwendungsdisziplinen, die auf DGM-Funktionen aufbauen. Hier werden in Zukunft wohl Simulationsmodelle (Abflußmodelle, Lärmausbreitung, mikroklimatische Untersuchungen, Windflußmodelle usw.) verstärkt an Bedeutung gewinnen. Vor allem dynamische Simulationen, bei denen sich die Form des Reliefs verändern kann (z. B. Simulation der Entwicklung geomorphologischer Formen) stellen hohe Anforderungen.

Die einzelnen geschilderten Aufgabenbereiche eines DGM-Systems bilden weder isolierte Module ohne Querbeziehungen noch eine strikte sequentielle Prozeßkette mit enger Zielsetzung. Die Ableitung von Produkten aus einem DGM ist kein Einbahnprozeß, sondern das Resultat verschiedener voneinander abhängiger Modellierungsschritte. Beispielsweise kann ein DGM durch bestimmte Manipulationsprozeduren (z. B. Filterung) verändert worden sein. Das Resultat kann danach entweder visualisiert oder quantitativ analysiert werden. Die Visualisierung und/oder Interpretation geben über die Qualität der erfolgten Filterung Aufschluß; diese Resultate können auch einen weiteren Filterungsschritt unterstützen (beispielsweise können so neue Schwellenwerte gefunden werden). Die einzelnen Modellierungsschritte lassen so eine Evaluation von vorhergehenden Maßnahmen zu und unterstützen eine iterative Arbeitsweise in der Modellierung. Dies gilt vor allem für Visualisierungs- und Interpretationsfunktionen.

Für ein umfassendes DGM-System ist es deshalb auch unerläßlich, daß alle Aufgabenbereiche gleichmäßig stark abgedeckt werden. Nur spezialisierte Systeme kön-

nen sich eine Einschränkung der Funktionalität leisten. Beispielsweise werden sich Systeme zur DGM-Erzeugung auf Funktionen der Generierung und der Manipulation sowie auf limitierte Visualisierungsprozeduren beschränken können.

3. Einige Anwendungen von digitalen Geländemodellen

DGM können in einer breiten Palette von Anwendungen zum Einsatz gelangen. Dies wird aus den in Abbildung 1 gezeigten Produkten der Geländemodellierung ersichtlich. Die Schummerung aus Abbildung 1 a) beispielsweise läßt sich in der kartographischen Reliefdarstellung oder ganz allgemein in der DGM-Visualisierung verwenden. Hangneigung und Exposition (Abb. 1 b und c) haben ihre Bedeutung in der Bodenkunde (z. B. Erosion), in der Geomorphologie, Geobotanik (Standorte), Agrarwirtschaft (Bestimmung der Qualität landwirtschaftlicher Nutzflächen) und vielen anderen Gebieten. Resultate einer Beschattungsanalyse (Abb. 1 d) können beispielsweise Modelle für die Standortwahl von baulichen Objekten oder für Glaziologie oder Geobotanik (Ausaperungsstudien) unterstützen. Gemeinsam ist allen aus DGM abgeleiteten Produkten, daß sie sowohl für verschiedene Anwendungen verwendbar sind als auch mit verschiedenster Information verbunden werden können. Deshalb erfolgen Anwendungen von DGM heute in der Regel im Kontext von Gesamt-GIS.

WEIBEL und HELLER (1991) bieten in ihrem Text eine Übersicht, die die funktionalen Anforderungen verschiedener Anwendungen an DGM-Systeme zeigt. Um einen Eindruck der Breite des Einsatzspektrums von DGM zu vermitteln, seien einige mögliche Anwendungen genannt (vgl. auch BURROUGH 1986, GUGAN und HARTNALL 1989): Produktion von Orthophotos, topographische Kartographie (Höhenkurven, Schummerung usw.), thematische Kartographie (Kombination Relief und thematische Variablen), Straßenbau, Vorbereitung und Planung von Bauvorhaben (Dämme, Staumauern, Tagbau usw.), Standortwahl für Betriebe, Erosionspotentialmodelle, Überwachung von Einzugsgebieten (z. B. Vorwarnung bei Hochwasser oder Chemieunfällen), hydrologische Entwässerungsmodelle, Modellierung von Überflutungen durch Erhöhung des Meeresspiegels, Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP), geometrische und radiometrische Korrektur von Fernerkundungsbildern, Unterstützung der Bildklassierung in der Fernerkundung, geologische Interpolation und Kartierung (z. B. in der Exploration von Bodenschätzen), Modelle der Bodenphysik, Studien zur Eignung von Nutzpflanzen, Geobotanik, Modelle für Windfluß und die Verbreitung von Schadstoffen, reliefabhängige Interpolation klimatischer Variablen, Archäologie (Ermittlung potentieller Fundstellen, Stratigraphie), Flugsimulation, Ermittlung von Radarschatten und andere mehr. In der Folge sollen einige wenige DGM-Anwendungen eingehender erwähnt werden. Die Auswahl dieser Beispiele erfolgt ohne Anspruch auf Repräsentativität.

Die Visualisierung von Geländedaten ist heute einer der wesentlichsten Gründe zum Einsatz von DGM in der Planung. Sie kann z. B. zur Darstellung geplanter Bauvorhaben verwendet werden (BURROUGH 1986), verkommt aber manchmal auch zur effektvollen Überzeugungshilfe für schlecht informierte Entscheidungsträger (Politiker, potentielle Kunden usw.). KANEDA et al. (1989) beschreiben ein besonders eindrückliches Verfahren zur Erzeugung quasi-realistischer Gelände- und Objektansichten. Bei dieser Technik wird die spektrale Information digitalisierter Luftaufnahmen auf ein perspektivisch abgebildetes DGM projiziert, wobei für bewaldete Gebiete besondere Höhen- und Texturkorrekturen angewandt und Objekt- und Geländeschlagschatten abgebildet werden. Die Berechnung von Schlagschatten (shadowing, ROGERS 1985) des Geländes oder von Objekten (z. B. Brücken, Hochhäuser) hat neben der graphischen auch eine rein analytische Bedeutung (Abb. 1 d). Es kann so ermittelt werden, welche Gebiete zu bestimmten Zeiten in den Schatten zu liegen kommen.

Im Ingenieurwesen wird heute wohl praktisch ausschließlich die digitale Form der Geländedarstellung (Höhenlinien, Profile, perspektivische Abbildungen usw.) benutzt. In der Kartographie hingegen hat die digitale Reliefdarstellung noch keine überragende Bedeutung erlangt, sieht man von einigen wenigen Versuchen zur Verwendung automatischer Schummerung für topographische Karten ab (SCHOLZ 1987, ELVHAGE 1989). Heute erfolgt die Visualisierung von DGM allgemein nur in großen Maßstäben und in kleinen Geländeauschnitten. Dies hat verschiedene Gründe: es existieren erst wenige großflächige DGM hoher Qualität, die Algorithmen zur Behandlung umfangreicher Modelle fehlen noch, und vor allem fehlen Verfahren zur automatischen kartographischen Reliefgeneralisierung (wie sie bei kleineren Maßstäben nötig wäre). Automatisch erzeugte Geländeansichten können aber auch einfach als Konstruktionsgrundlage für eine weitere manuelle Überarbeitung verwendet werden. Besonders gut zeigen dies einige Abbildungen im Artikel von FURRER et al. (1987), für die Blockdiagramme automatisch erzeugt wurden, um nachher manuell die vergletscherten Flächen verschiedener spätglazialer Rückzugsstadien einzutragen.

Die oben erwähnte Schattenberechnung kann auch in der Glaziologie oder Geobotanik zur Ermittlung der möglichen Besonnungsdauer verwendet werden. PEIPE et al. (1978) erwähnen daneben weitere Anwendungen von DGM in der Gletscherkunde: die Berechnung von Profilen zur Ermittlung von Aufhöhung/Einsinken an bestimmten Stellen durch Vergleich von DGM verschiedener Zeitpunkte; die Ableitung von Höhenänderungen durch numerische Integration von DGM verschiedener Zeitpunkte zur Bestimmung des Massenhaushalts einer Gletschers; Produktion von Orthophotokarten von Gletschern; Berechnung von Hangneigung und Exposition, z. B. für die Bestimmung des Verlaufs von Fließlinien des Eises oder der Beträge der einfallenden direkten Sonnenstrahlung; sowie die projektive Transformation von

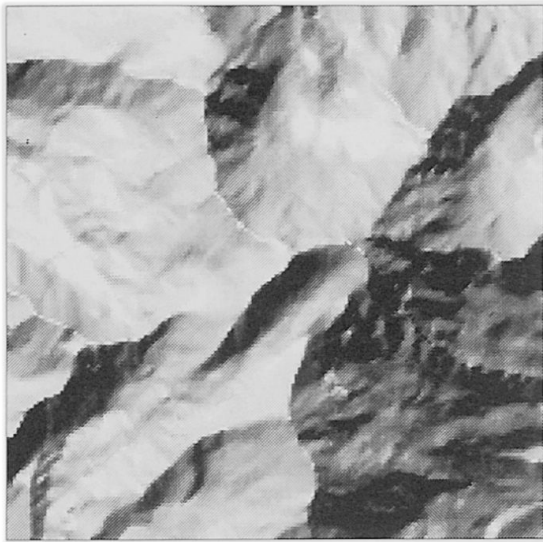


Abb. 1a

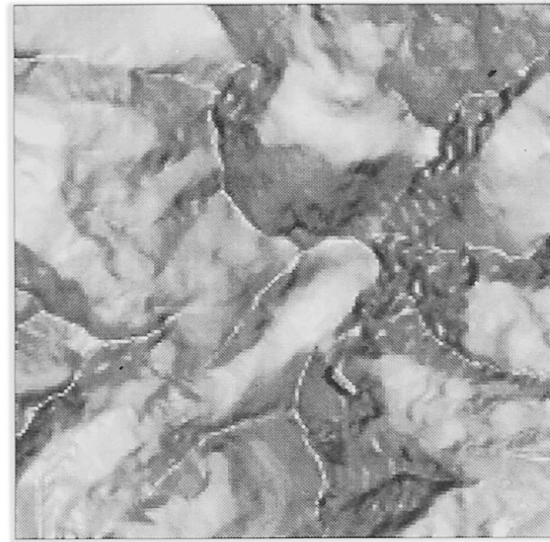


Abb. 1b

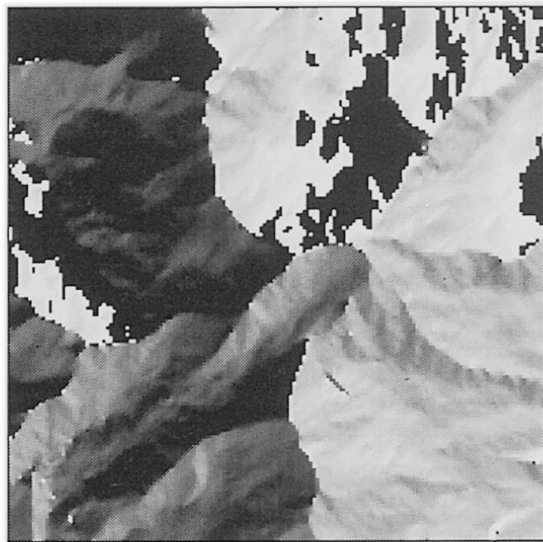
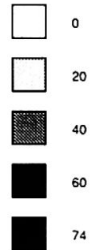


Abb. 1c

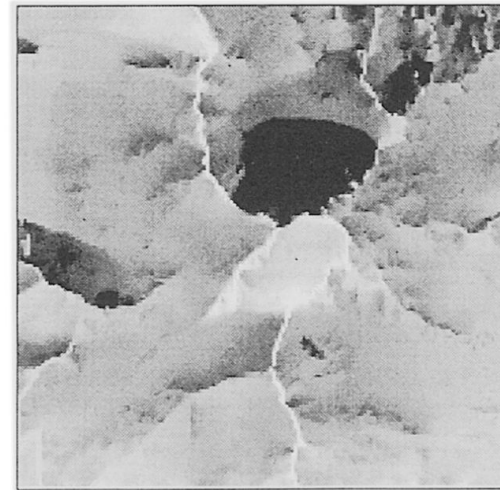
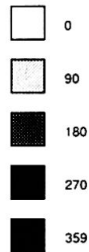


Abb. 1d

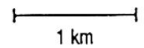
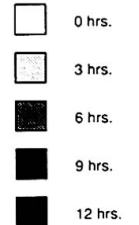


Abb. 1 Beispiele von Produkten, die sich aus digitalen Geländemodellen ableiten lassen. a) Analytische Schummerung des Geländemodells. b) Hangneigung in Grad. c) Exposition in Grad. d) Beschattungsdauer in Stunden für den 21. März in der Zeit zwischen 6.00 und 18.00 (unter Mithilfe von V. Antunes, FH Karlsruhe). Ausschnitt 4 × 4 km im Raum Fletschhorn (VS). Gitterförmiges DGM mit 25 m Maschenweite.

Geländedaten aus dem DHM 25, reproduziert mit Bewilligung des Bundesamtes für Landestopographie vom 16.10.1990.

DGM-Punkten in photographische oder digitale Darstellungen eines Gletschers zur Übertragung von Bildetails (z. B. Altschneelinie, Firngrenze usw.). Heute werden DGM auch vermehrt für rein numerische Modelle der Glaziologie eingesetzt, beispielsweise für die auf den Gesetzen der Eisphysik basierende numerische Rekonstruktion von Gleichgewichtslinien und Oberflächen von Paläo-Gletschern (SCHILLING und HOLLING 1981). In der geomorphologischen Forschung finden heute – neben dem Einsatz von DGM zur quantitativen Beschreibung und Erkennung von Reliefformen – auch vermehrt Simulationsmodelle auf DGM-Basis Verwendung. Ein Beispiel davon sind Modelle, die geomorpho-

logische Prozesse (z. B. Erosion, Denudation) in numerische Prozeduren umsetzen und so die Entwicklung der Geländeoberfläche zu simulieren versuchen. Das Modell von KELLEY et al. (1988) umfaßt die Simulation der Entstehung von Flußnetzen auf einer anfänglich unerozierten Oberfläche zufolge fluviatiler Erosion. Ein Initial Einzugsgebiet besteht aus einem Fluß auf einer leicht geneigten Oberfläche. Aufgrund empirischer Modelle für Gewässererosion verzweigt sich dieser Fluß iterativ zu einem verästelten Gewässernetz. Aus diesem Netz wird interpolativ ein DGM erzeugt, das die erodierte Geländeoberfläche nach Ablauf einer gewünschten Anzahl von Iterationsschritten abbildet. MUSGRAVE et al. (1989)

stellen ein Modell vor, das zunächst eine quasi-stochastische Oberfläche erzeugt und auf dieser Basis dann die physikalischen Prozesse simuliert. Die Modelle dieser Prozesse sind zum Teil empirisch gestützt, teilweise auch rein intuitiv. Die fluviatile Erosion wird dadurch simuliert, daß iterativ «Material» entlang der Falllinie verschoben wird. Die thermische Verwitterung wird als einfacher Relaxationsprozeß simuliert, der, die Hangneigungen zwischen benachbarten Punkten, die über einem bestimmten Schwellenwert liegen, angleicht.

Die Untersuchung hydrologischer und erosiver Prozesse ist für viele Fragestellungen von größter Wichtigkeit. Daher gehören Abfluß- und Erosionsmodelle wohl zu den verbreitetsten quantitativen Verwendungen von DGM. Interessant ist zunächst die Ermittlung des Einflusses von Umwelteingriffen oder korrektiven Maßnahmen wie Kahlschlägen, Trockenlegungen oder Aufforstungen auf die Erosionsgefährdung. Dazu wird das DGM und daraus abgeleitete Information (Hangneigung, Exposition sowie Größe der entwässerten Fläche) mit weiteren erosionsrelevanten Daten (Bodenporosität, -feuchte, -sättigung usw.), die meist aus Feldmessungen stammen, sowie mit Niederschlagsdaten zu einem Erosionsmodell (z. B. ANSWERS, USLE) verbunden (ROO und HAZELHOFF 1988, FLACKE et al. 1990). Werden nicht nur statisch Erosionspotentiale für jede Zelle eines DGM berechnet, sondern das Fließen des Wassers über die Geländeoberfläche auch verfolgt, so können auch andere für den Umweltbereich wichtige Fragen untersucht werden, beispielsweise der potentielle Weg von Gewässerverschmutzungen oder die zu erwartende Abflußmenge an bestimmten Stellen (SILFER et al. 1987, BAND 1989).

Über Sinn und Zweck der genannten Anwendungen kann wohl teilweise zu Recht diskutiert werden. Wie andere Methoden der räumlichen Datenverarbeitung läuft auch die Geländemodellierung oft Gefahr, ausschließlich zur Symptombekämpfung eingesetzt zu werden (z. B. in der UVP oder Umweltbeobachtung). Es ist daher wichtig, daß die technische Lösung auch durch das organisatorische (politische) Umfeld mitgetragen wird, so daß die neue Technik auch grundsätzliche Wirkung erzielen kann.

4. Schwerpunkte zukünftiger Forschung im Bereich Geländemodellierung

Heutige und zukünftige Anwendungen von DGM stellen immer höhere Anforderungen bezüglich der Funktionalität und Leistungsfähigkeit der DGM-Systeme. In diesem abschließenden Abschnitt möchten wir deshalb im Sinne eines Ausblicks kurz einige der wesentlichen Punkte zukünftiger Forschung im Bereich Geländemodellierung streifen.

Allgemein ist eine stärkere Integration von DGM-Systemen mit GIS für zweidimensionale Daten zu beobachten. Die Zeit der monolithischen DGM-Programme ist wohl vorbei. Die Integration von DGM-Systemen mit 2D-Sy-

stemen schafft viele Vorteile: Grund- und Hilfsfunktionen des GIS können verwendet werden, die Gelände-Grunddaten können in der Datenbank des GIS verwaltet werden, Produkte der DGM-Interpretation können im GIS mittels Funktionen der Polygon- und Netzanalyse weiterverarbeitet und mit anderen 2D-Daten verbunden werden usw. Die Integration von DGM und GIS bedeutet aber nicht unbedingt, daß alle DGM-Daten in der GIS-Datenbank verwaltet werden. Typischerweise werden heute nur die Grunddaten (Datenpunkte, Kanten usw.) in der Datenbank gehalten, während die eigentlichen DGM aus Effizienzgründen in gesonderten Dateien stehen. Wichtig ist jedoch vor allem, daß die Datenbestände gegen außen als integriert erscheinen. Auch sollte die Integration die Bedienung und die Benutzerschnittstelle, die ein möglichst einheitliches Gesicht haben sollte, einschließen.

GIS-Projekte erreichen langsam «realistische» Größenordnungen, d. h. sie beginnen sich mit sehr großen Datenmengen zu beschäftigen. Dies gilt auch für den DGM-Bereich, wo Modelle mit einigen hunderttausend Datenpunkten bald keine Seltenheit mehr sein werden. In beinahe jedem industrialisierten Land werden heute Projekte verfolgt, die die Schaffung landesweiter DGM zum Inhalt haben. Diese riesigen Datenmengen, die durch Projekte solcher Größenordnung erzeugt werden, können vorläufig nur dadurch gehandhabt werden, dass man sich mit einer blattweisen Organisation behilft (oft müssen sogar noch die einzelnen Kartenblätter in weitere Teilmodelle unterteilt werden). Die Folge davon ist, daß Resultate solcher zerstückelter DGM jeweils nur gesondert für die Einzelmodelle berechnet werden können, um nachher mühsam zusammengefügt zu werden. Daher ist für die Arbeit mit sehr großen Datenmengen die Entwicklung von plattenspeicherbasierten Algorithmen unerlässlich (z. B. für Triangulation und Interpolation). Solche Verfahren würden zwar ebenfalls eine Aufteilung des Gesamtmodells vornehmen (ein Teilmodell wäre typischerweise so groß, daß es sicher in den Hauptspeicher des verwendeten Rechners paßt), jedoch wäre diese Aufteilung (tiling) nach außen hin transparent. Das heißt, jede Unterregion würde einzeln verarbeitet, danach automatisch mit den benachbarten Modellen zusammengefügt und als Gesamtmodell auf den Plattenspeicher geschrieben, ohne daß von diesen Vorgängen von außen her etwas sichtbar würde (HELLER 1990). Erst mittels solcher Verfahren wird es beispielsweise möglich sein, großräumige Simulationen mit hochaufgelösten DGM durchzuführen.

Zukünftige DGM-Systeme sollten einen «explorativen» Arbeitsstyl besser unterstützen. Bei der Geräteentwicklung ist ein rasanter Zuwachs an Leistung und Funktionalität zu beobachten. Dadurch wird die Echtzeitmodellierung von DGM immer realistischer. Ein solcher Ansatz wird jedoch von der algorithmischen Entwicklung einiges erfordern: während sehr viele der Visualisierungsfunktionen nun durch die Hardware abgedeckt werden, werden die Algorithmen der Modellgenerierung

und -manipulation weiterhin softwaregestützt bleiben und müssen daher stark verbessert werden.

Der Bedarf an Verfahren zur Extraktion von Information aus Geländemodellen wird weiter zunehmen. Dadurch erhält die Interpretation von DGM eine zentrale Rolle. Interpretationsalgorithmen werden in zweierlei Hinsicht benötigt: neben ihrer direkten Verwendung für die Extraktion von Information für GIS-Anwendungen braucht es sie auch in indirekter Form zur Unterstützung anderer Methoden der Geländemodellierung (z. B. für reliefabhängige Interpolation oder zur Erkennung der wesentlichen Strukturen für eine Visualisierung). Dazu müssen adaptive Verfahren entwickelt werden, die fähig sind, Reliefformen und ihre Charakteristiken aus DGM beliebiger Struktur (Gitter, TIN, Höhenlinien usw.) zu erkennen. Zurzeit sind die meisten Interpretationsalgorithmen noch auf Gitter-DGM ausgerichtet, obwohl diese wegen ihrer regelmäßigen Punktanzahl und der damit verbundenen diskreten Geometrie nur mäßige Resultate liefern können. Es ist daher wichtig, daß entsprechende Verfahren auch für die andern DGM-Strukturen (zumindest TIN) verbessert werden.

Ein weiterer Schwerpunkt der Forschung muß die Entwicklung von Verfahren sein, die es erlauben, die Qualität von Geländemodellen zu bestimmen. Die Grundfrage, die sich für viele Benutzer (nicht nur im DGM-Bereich) immer wieder stellt, ist die folgende: «Ist das von mir verwendete Modell zur Lösung meiner Problemstellung geeignet?» Das heißt, welche Bedingungen müssen erfüllt sein, damit man ein DGM als «gut» bezeichnen kann. Die Qualität eines Modells bezieht sich nicht nur auf die Genauigkeit der Datenelemente, sondern auch auf deren Dichte und Verteilung sowie auf die Vollständigkeit der Beschreibung der strukturellen Charakteristika des Reliefs. Es gibt zwar Aufnahmeverfahren, die bei der Datenerfassung eine Evaluation der notwendigen Punktdichte und Anordnung zulassen (z. B. die photogrammetrische Methode des «progressive sampling», MAKAROVIC 1973). Doch was tun, wenn man die Erfassung seiner Daten nicht selbst durchgeführt hat? Herkömmliche Verfahren der Fehlerbestimmung (Residuen, RMSE usw.) richten sich vor allem nach der rein geometrischen Genauigkeit, nicht aber nach der geomorphologischen Plausibilität und Konsistenz der Modellbildung. Es kann nämlich durchaus vorkommen, daß die einzelnen Messungen für ein DGM sehr genau sind, jedoch die Verbindung zum DGM (durch Interpolation oder Triangulation) grobe Fehler für die dazwischenliegenden Gebiete einführt. Es müssen daher zum einen Verfahren gefunden werden, die auch diese Fehler ohne großen Aufwand erkennbar machen, zum andern sollten standardisierte Prozeduren zur Qualitätskontrolle geschaffen werden, die es einzelnen Benutzern erlauben, die Güte der von ihnen verwendeten Modelle selbst zu ermitteln.

Visualisierung setzt sich aus zwei Prozessen zusammen (UPSTILL 1990): aus der Modellierung und Auswahl relevanter Elemente für die Darstellung (scene description, Bildbeschreibung) und aus deren wirkungsvoller Abbildung (scene rendering). Für die Belange des zweiten Be-

reichs kann vom stetigen Fortschritt der Computergraphik profitiert werden: neu entwickelte, standardisierte Darstellungsschnittstellen für das 3D-Gebiet wie «RenderMan» (UPSTILL 1990) werden es erlauben, «scene descriptions» zur Sichtbarmachung einfach einem schlüsselfertigen System zu übergeben. Das heißt, daß sich die Forschung im GIS-Sektor vor allem auf Methoden zur Erzeugung geeigneter Bildbeschreibungen konzentrieren sollte, während die eigentliche Darstellung von spezialisierter Rendering-Software oder sogar -Hardware erledigt würde.

Eine der wesentlichen Fragestellungen im Bereich der Bildbeschreibung ist die kartographische Generalisierung von Geländemodellen. Es ist wichtig, daß der Grad an Detail von DGM-Visualisierungen an den gewählten Bildmaßstab angepaßt werden kann. Die Frage der Automatisierung der Generalisierung kann als eines der brennendsten Probleme der geographischen Datenverarbeitung betrachtet werden. Für die Reliefgeneralisierung wird ein dynamisches System unabdingbar sein. Verschiedene untereinander verbundene Modellierungsoperationen müssen in einem iterativen Prozeß eingesetzt werden können: die Erkennung der wesentlichen topographischen Strukturen; deren Vereinfachung, Überarbeitung und Visualisierung; die Evaluation des Resultats; sowie eine allfällige iterative Verbesserung. Bestehende Verfahren der Reliefgeneralisierung (wie auch anderer kartographischer Elemente) sind immer noch ziemlich beschränkt. BRASSEL und WEIBEL (1988) geben eine Übersicht; WEIBEL (1989) stellt konkrete Verfahren vor.

Die Entwicklung effizienterer und anpassungsfähigerer Algorithmen für verschiedene Belange der Geländemodellierung wird es den Benutzern von DGM-Systemen erleichtern, die geeigneten Methoden und Datenstrukturen zur Lösung ihrer Fragestellungen zu gebrauchen. Zukünftige Systeme werden sich über einen hohen Grad an Integration (sowohl der einzelnen Funktionen untereinander als auch mit den Funktionen des 2D-GIS) sowie eine große Transparenz in der Handhabung auszeichnen. Es wird so möglich sein, Probleme mittels konzeptionell eingängiger Operationen zu formulieren, anstatt an bestimmte Datenstrukturen oder Systemeigenheiten gebunden zu sein. Statt auf die Erzeugung bestimmter Produkte (z. B. Hangneigung, Höhenlinien) beschränkt zu sein, lassen sich dann verschiedenste Informationen aus einem Geländemodell ableiten und in Vernetzung bringen. So kann der Schritt vom sequentiellen Denken und Vorgehen zu einer integrativ-interaktiven Arbeitsweise vollzogen werden. Die Problemstellung rückt so in den Mittelpunkt, technische Besonderheiten in den Hintergrund.

Verdankungen

Ein Teil der hier beschriebenen Arbeiten (Heller, L'Eplattenier, Weibel) wurde durch Beiträge des Schweizerischen Nationalfonds zur Förderung wissenschaftlicher Forschung unterstützt (2.391-0.84, 2.082-0.86 und 20.5.516.88).

Literatur

- BAND, L.E. (1989): A Terrain-Based Watershed Information System. *Hydrological Processes*, Vol. 3: 151–162.
- BRASSEL, K.E. und WEIBEL, R. (1988): A Review and Framework of Automated Map Generalisation. *International Journal of Geographical Information Systems*, Vol. 2, No. 3: 229–244.
- BURROUGH, P.A. (1986): *Principles of Geographic Information Systems for Land Resources Assessment*. Oxford University Press.
- ELVHAGE, C. (1989): New Maps with Conventional Terrain Representation Using New Techniques. *Proceedings XXIV Konferenz der IKV, Budapest, 17–24 August 1989*, in Vorbereitung.
- FLACKE, W., AUERSWALD, K. und NEUFANG, L. (1990): Combining a Modified Universal Soil Loss Equation with a Digital Terrain Model for Computing High Resolution Maps of Soil Loss Resulting from Rain Wash. *CATENA*, Vol. 17, No. 4/5: 383–397.
- FURRER, G., BURGA, C., GAMPER, M., HOLZHAUSER, H.-P. und MAISCH, M. (1987): Zur Gletscher-, Vegetations- und Klimageschichte der Schweiz seit der Spätleiszeit. *Geographica Helvetica*, 42. Jg., H. 2: 61–91.
- GUGAN, D.J. und HARTNALL, T.J. (1989): Applications of Digital Terrain Modelling Systems within a GIS. *Proceedings GIS/LIS '89, Orlando FL*, Vol. 2: 771–780.
- GUIBAS, L. und STOLFI, J. (1985): Primitives for the Manipulation of General Subdivisions and the Computation of Voronoi Diagrams. *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 4, No. 2: 74–123.
- HELLER, M. (1990): Triangulation Algorithms for Adaptive Terrain Modeling. *Proceedings of the Fourth International Symposium on Spatial Data Handling: 163–174, Zurich*.
- KANEDA, K., KATO, F., NAKAMAE, E. und NISHITA, T. (1989): Three Dimensional Terrain Modeling and Display for Environmental Assessment. *Computer Graphics (SIGGRAPH '89 Proceedings)*, Vol. 23, No. 3: 207–214.
- KELLEY, A.D., MALIN, M.C. und NIELSON, G.M. (1988): Terrain Simulation Using a Model of Stream Erosion. *Computer Graphics (SIGGRAPH '88 Proceedings)*, Vol. 22, No. 4: 263–268.
- KÖSTLI, A. und SIGLE, M. (1986): The Random Access Data Structure of the DTM Program SCOP. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 26 (B4).
- L'ÉPLATTENIER, R. (1987): Ein interaktives System zur Darstellung und Analyse von Blockdiagrammen. *Diplomarbeit, Geographisches Institut der Universität Zürich*.
- MAKAROVIC, B. (1973): Progressive Sampling for Digital Terrain Models. *ITC Journal*, Jg. 1973, H. 3: 397–416.
- MARK, D.M. (1979): Phenomenon-Based Data Structuring and Digital Terrain Modeling. *Geo-Processing*, Vol. 1: 27–36.
- McCULLAGH, M.J. (1988): Terrain and Surface Modelling Systems: Theory and Practice. *Photogrammetric Record*, Vol. 12, No. 72: 747–779.
- MUSGRAVE, F.K., KOLB, C.E. und MACE, R.S. (1989): The Synthesis and Rendering of Eroded Fractal Terrains. *Computer Graphics (SIGGRAPH '89 Proceedings)*, Vol. 23, No. 3: 41–50.
- PEIPE, J., REISS, P. und RENTSCH, H. (1978): Zur Anwendung des digitalen Geländemodells in der Gletscherforschung. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glaziologie*, Bd. 14, H. 2: 161–172.
- PEUCKER, T.K. (1978): Data Structures for Digital Terrain Models: Discussion and Comparison. *Harvard Papers on Geographic Information Systems*, Vol. 5 (Proceedings First International Advanced Study Symposium on Topological Data Structures for Geographic Information Systems, durchgeführt 1977).
- PREPARATA, F.P. und SHAMOS, M.I. (1985): *Computational Geometry: an Introduction*. New York: Springer Verlag.
- ROGERS, D.F. (1986): *Procedural Elements for Computer Graphics*, New York.
- ROO, A.P.J., de, und HAZELHOFF, L. (1988): Assessing Surface Runoff and Soil Erosion in Watersheds Using GIS Technology. *Proceedings EUROCATO 7: 172–183*.
- SCHILLING, D.H. und HOLLING, J.T. (1981): Numerical Reconstructions of Valley Glaciers and Small Ice Caps. In: DENTON und HUGHES (Hrsg.): *The Last Great Ice Sheets: 207–219*.
- SCHOLZ, D.K. (1987): Automated Generation of Shaded Relief in Aeronautical Charts. *Technical Papers 1987 ASPRS/ACSM Annual Convention*. Vol. 4: 212–219.
- SILFER, A.T., KINN, G.J. und HASSETT, J.M. (1987): A geographical Information System Utilizing the Triangulated Irregular Network as a Basis for Hydrologic Modeling. *Proceedings Auto-Carto 8, Baltimore MD: 129–136*.
- UPSTILL, S. (1990): *The RenderMan Companion: a Programmer's Guide to Realistic Computer Graphics*. Reading MA: Addison-Wesley.
- WEIBEL, R. (1989): *Konzepte und Experimente zur Automatisierung der Reliefgeneralisierung*. Diss. Universität Zürich, Geopressing Reihe, Vol. 15, Zürich.
- WEIBEL, R. und HELLER, M. (1990): A Framework for Digital Terrain Modelling. *Proceedings of the Fourth International Symposium on Spatial Data Handling: 219–229, Zurich*
- WEIBEL, R. und HELLER, M. (1991): Digital Terrain Modelling. In: MAGUIRE, D.J., GOODCHILD, M.F. und RHIND, D.W. (Hrsg.): *Geographical Information Systems: Principles and Applications*. London: Longman, erscheint Frühsommer 1991.