

14. Mintrop-Seminar



Arnsberg-Neheim
3. - 6. Mai 1994

PROGRAMM
REFERATE
TEILNEHMERVERZEICHNIS

D. FRITSCH

DREIDIMENSIONALE DATENMODELLIERUNG IN GEO-INFORMATIONSSYSTEMEN FÜR GEOPHYSIKALISCHE ANWENDUNGEN

Zusammenfassung

Während in der Vergangenheit Höheninformationen in Geo-Informationssystemen meist als Sachdaten (Attribute) mitgeführt wurden, verlangt heutzutage die Lösung von vielen Fragestellungen im Umweltbereich, der Geologie, der Geophysik und auch Geodäsie nach einer vollkommen dreidimensionalen Abspeicherung und Aktivierung der Geometriedaten. Dies bedingt eine Erweiterung der derzeit verfügbaren GIS-Datenstrukturen, die zumeist planimetrisch orientiert sind, d.h. die topologischen und thematischen Modelle beziehen sich lediglich auf eine x,y-Geometrie.

Der vorliegende Beitrag stellt verschiedene Datenmodelle vor und gibt ihre Vor- und Nachteile an. Es zeigt sich, daß in vielen Fällen eine getrennte Datenhaltung von Lage und Höhe nicht nur ein pragmatischer, sondern im Sinne der Datenbankperformanz auch eine angemessene Strategie darstellt. Allerdings ist dabei eine leistungsfähige Verknüpfung der beiden Datensätze unerläßlich. Die vollkommen dreidimensionalen Datenbanken können zwar die Geometriedaten mit geringer Redundanz aufnehmen und auch Konsistenzprobleme minimieren, jedoch ist ihr Antwortzeitverhalten derzeit nicht ausreichend.

Als Resultat der Betrachtungen zur dreidimensionalen Datenhaltung wird eine neue geometrische Bezugsfläche für Geo-Informationssysteme eingeführt, die in der Praxis schon seit langer Zeit isoliert eingesetzt wird: Das digitale Geländemodell. Es ist gezeigt, daß die 3D-Randbeschreibung des natürlichen Reliefs als Bezugsfläche zur Modellierung anthropogener und natürlicher Objekte auf und unter der Erdoberfläche dienen kann.

1. Einleitung

Die zunehmende Verdichtung sowie Inanspruchnahme des anthropogenen Lebensraumes bedingt eine sorgfältige Erfassung, Verwaltung, Analyse und Dokumentation der natürlichen Bodenressourcen. Dies hat zum Aufbau von vektororientierten Geo-Informationssystemen (GIS) geführt (R. Bill/D. Fritsch, 1991), deren Geometriedaten sich bisweilen auf die planimetrische Wiedergabe des Parzellarkatasters, die Situation des natürlichen Geländereiefs sowie weitere planimetrische Karteninformationen beschränken. Die Abbildung des Geländereiefs in Form von digitalen Geländemodellen (DGM) ist zwar seit über drei Jahrzehnten Gegenstand umfangreicher Untersuchungen und Entwicklungen in der Photogrammetrie; sie wurde jedoch bisher eher als eine selbständige Sparte mit der ihr eigenen Produktvielfalt gesehen (F. Hochstöger, 1989, H. Ebner, 1990).

Künftige Anforderungen seitens des Umweltschutzes, der Ökologie, der Geologie, der Geophysik, der Geodäsie und der Raumplanung – hier wären noch viele weitere Fachrichtungen aufzuführen – zeigen jedoch, daß das natürliche Geländereief in seiner dreidimensionalen Ausprägung längst nicht mehr isoliert zu sehen ist, sondern in jeder Bodeninventur den ihm angemessenen Stellenwert erhalten sollte. Von daher ist es naheliegend, Geometriedaten der Erdoberfläche in ihrer dreidimensionalen Ausprägung zu erfassen und in den nachgeschalteten Geo-Informationssystemen entsprechend zu verwalten. Dies führt zu einer dreidimensionalen Datenhaltung, die mit den derzeit bestehenden

Konzepten zur Datenstruktur, -speicherung und -zugriff noch nicht ohne weiteres ausgeführt werden kann.

Die Idee, das natürliche Geländereief zu modellieren und in computergestützten Informationssystemen zu berücksichtigen, ist nicht neu: Bereits 1977 wurde dies von B. Makarovic vorgeschlagen; K. Kraus (1983) berichtete über Ansätze und Realisierungen eines *topographischen* Informationssystems. Bisweilen erfolgt die Datenhaltung von Planimetrie und Höhe streng getrennt, was zu verschiedenen Dimensionsbezeichnungen geführt hat (R. Bill/D. Fritsch, 1991) – eine Erweiterung der dort angegebenen Dimensionsüberlegungen kommt zu dem folgenden Resultat: Für einen 2D-Raumbezug (=Planimetrie) mit 2D-Relationen (=Topologie) ergibt sich eine 2D-GIS-Geometrie; der 3D-Raumbezug (x,y,z-Koordinaten) verknüpft durch 2D-Relationen (zwischen Knoten, Kanten und Flächen) führt zur 2,5D-GIS-Geometrie; erst der 3D-Raumbezug verbunden durch 3D-Relationen (zwischen Knoten, Kanten, Flächen und Körpern) ergibt eine 3D-GIS-Geometrie. Das bedeutet, daß alle geometrischen Probleme, die auf einem 3D-Rand gelagert sind und in der Form $z = z(x, y)$ beschrieben werden können, stets mit einer 2,5D-GIS-Geometrie auskommen. Erst komplexere Volumina-beschreibungen erfordern auch eine 3D-Topologie.

Die vollständige Verknüpfung von Lage und Höhe ist derzeit Gegenstand vieler Untersuchungen an Hochschulinstituten. Diese Verknüpfung beschränkt sich jedoch im Sinne der vorher angestellten Überlegungen auf eine 2,5D-GIS-Geometrie, bereits diese kann wesentlich zur Überwindung von Konsistenzproblemen beitragen, wie z.B. das Problem, daß räumliche Geraden durchaus windschief zueinander sein können oder aber sich schneiden müssen, falls sie ein und derselben Bilinearfäche angehören (K. Kraus, 1991); ferner haben Geländekanten vielfach ein planimetrisches Pendant. Zum anderen leistet sie das gewünschte Ergebnis in der Visualisierung: Straßen, Häuser, Flüsse und Seen sind Aussparungsflächen für die Höhenlinien; Verschneidungslinien abgeleitet auf der Grundlage eines DGM bilden die Grundlage vieler Simulationen zur Umweltverträglichkeit von CAD-Modellen mit dem natürlichen Geländereief.

2. Geometrisches Modellieren

Das geometrische Modellieren ist in den meisten Fällen Ausgangspunkt zur Ableitung von neuen Datenstrukturen in Geo-Informationssystemen (R. Bill/D. Fritsch, 1991): Dabei kommen überwiegend *analytische* und *approximierende* Verfahren zur Anwendung. Innerhalb der vektororientierten graphischen 3D-Datenverarbeitung wird grundsätzlich in Knoten, Kanten, Flächen und Körper unterschieden. Eine weitere Unterscheidung zwischen Knoten und Punkten, Kanten und Linien, Flächen und Blöcken kann hilfreich sein, um spezielle Datenstrukturen abzuleiten; an dieser Stelle wird jedoch darauf verzichtet. Somit ergeben sich die folgenden drei wichtigsten Ansätze des CAD, die auch gleichermaßen für Geo-Anwendungen gelten:

1. Das *Kanten- oder Drahtmodell*, welches Objekte durch geradlinige oder gekrümmte Verbindungen von Knoten, die in der Menge V enthalten sind, beschreibt: $E = E(V)$, E bezeichnet die Menge der Verbindungslinien (Relationen). Dieses Modell enthält in der Grundform keine Information über Flächen und Körper. Eine Triangulation an der Erdoberfläche repräsentiert z.B. ein Kantenmodell.
2. Das *Flächen- oder Blockmodell*, welches Objekte durch analytische Beschreibungen oder approximierende Flächen definiert. Im Falle der Approximation werden die Flächensegmente durch Stützinformationen (Stützpunkte, Kanten, Tangenten etc.) sowie Krümmungseigenschaften ermittelt – es gilt: $B = B(E, V)$. Die Menge B gibt die Relationen zwischen den jeweiligen Knoten (V), den Kanten (E) und den Flächen wieder. Ein digitales Geländemodell

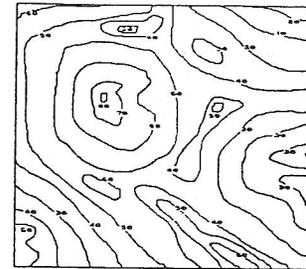
in der Form eines regulären Rasters ist ein solches Flächenmodell – es wird häufig durch die Approximation von Stützpunkten gewonnen.

3. Das *Volumen- oder Körpermodell*, welches Objekte durch Standard- oder Profilkörper oder durch Boolesche Ausdrücke über Primitivzellen angibt, also $K = K(B, E, V)$. K enthält die Relationen zwischen den Knoten (V), Kanten (E), Flächen (B) und Volumensegmenten. Eine zusammenhängende Menge von Voxel stellt i.d.R. ein Volumenmodell dar – es kann durch Approximation von beliebig im Raum verteilten Stützpunkten abgeleitet werden.

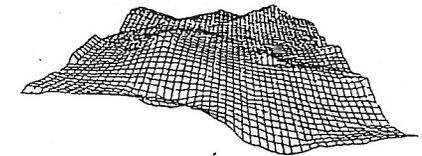
Die funktionale Beschreibung der obigen Modelle zeigt, daß die Dimension der Darstellungsprimitive um jeweils einen Freiheitsgrad reduziert ist. Entsprechend diesen Betrachtungen lassen sich jetzt topologische Grundprimitive (GP) einführen. Es sind dies p Knoten (Punkte) $V_j \forall j = 1, 2, \dots, p$, l Kanten (Linien) $E_k \forall k = 1, 2, \dots, l$ und f Flächen (Blöcke) $B_m \forall m = 1, 2, \dots, f$, mit denen Objekte im \mathbb{R}^3 zu beschreiben sind.

In der Abb. 2.1 finden sich die zuvor genannten Modelle wieder, wobei jedoch das Flächenmodell in einer regelmäßigen und einer unregelmäßigen Struktur dargestellt ist.

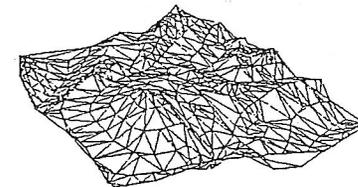
a) Linienmodell



b) Flächenmodell "Raster"



c) Flächenmodell "Dreiecke"



d) Volumenmodell

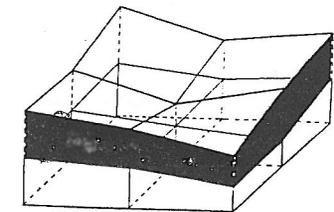


Abb. 2.1: Geländedarstellungen

Es folgt direkt, daß zur hinreichenden Darstellung der natürlichen Topographie-Oberfläche stets die *Randmodelle* 1. und 2. ausreichen, wobei wegen einer effizienten Datenverwaltung und -verarbeitung dem Flächenmodell meist der Vorzug gegeben wird. Zudem kann durch die Überlagerung (Superposition) verschiedener Flächenmodelle das Volumenmodell approximiert werden. Dies hat maßgeblichen Einfluß auf die Datenverwaltung eines DGM: Es zeigt nämlich, daß man in einer raumbezogenen Datenhaltung mit einer *zweidimensionalen* (\mathbb{R}^2) Topologie auskommen kann.

3. Datenstrukturen für digitale Geländemodelle

Zur Ableitung von effizienten Datenverwaltungsstrukturen für digitale Geländemodelle bietet die Rasterdarstellung vermittels Begrenzungsflächen eine gute Möglichkeit, da sich hier metrische und topologische Informationen separieren lassen. Dabei sei angenommen, daß die Objekte zusammenhängend sind.

3.1 Rasterstrukturen

Bei einem regulären Raster ist die Separation von Position und Relation nicht erforderlich, da mittels der Matrix-Organisation dies auf triviale Weise jederzeit vollzogen werden kann.

Zu einer hochqualitativen Darstellung von Topographie-Oberflächen sind vielfach reine Rasterstrukturen unzureichend. Dies ergibt sich aus der Tatsache, daß zusätzliche Flächeninformationen wie Kanten und Einzelpunkte *innerhalb* der Rasterelemente vorliegen können oder aber die Stützpunkte zur Ableitung von Flächenmodellen von vorneherein so verteilt sind, daß sie geomorphologische Knickre repräsentieren. Die Ableitung eines Rastermodells würde dann diesen Anforderungen nur bedingt Rechnung tragen können.

Es besteht daher die Notwendigkeit, die Flächenbeschreibung dieser Vorgabe anzupassen, was zu Dreiecksvermaschungen führt. Wie in H. Ebner/D. Fritsch (1986) aufgezeigt, können Dreiecksvermaschungen auch lokal die Rasterstruktur ergänzen, so daß die Flächenmodelle "Raster" und "Dreiecke" durch ein kombiniertes Modell in der Form von "Raster und Dreiecke" zu ergänzen sind. Auf Grund der unterschiedlichen Datenstruktur kann dieses Modell auch als "hybrides Flächenmodell" (siehe Abb. 3.1) bezeichnet werden, wobei sogar die Rasterweite noch variabel sein kann (H. Ebner, 1990).

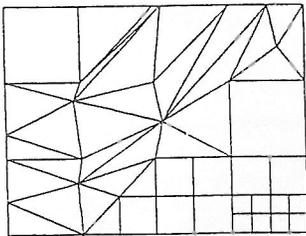


Abb. 3.1: Topologie eines hybriden Flächenmodells

3.2 Dreiecksvermaschungen

Der Aufbau von Dreiecksvermaschungen läßt sich nach der Vorschrift einer Delauney-Triangulation erreichen. Die zweidimensionale Delauney-Triangulation ist ein Flächenmodell bestehend aus Linienabschnitten über einer Punktmenge in der x, y -Ebene. Dabei wird eine maximale Anzahl von Dreiecken angestrebt, deren Seiten sich nicht schneiden. Dies ist zu erreichen, wenn im Umkreis eines jeden Dreiecks kein weiterer Punkt der Stützpunktmenge enthalten ist. Die Triangulation ist geometrisch eindeutig unter der Voraussetzung, daß in der gesamten Stützpunktmenge nicht mehr als drei Punkte auf einem Kreis liegen. Abstandsberechnungen zwischen den Punkten sowie die Prüfung des Gegenwinkels zum kleinsten Punktabstand oder aber Transformationsrechnungen bilden dabei die Konstruktionsgrundlagen. Bezeichnet N die Anzahl der Stützpunkte in der x, y -Ebene, so sind nach D.T. Lee/W.S. Schachter (1980) Rechenoperationen in der Größenordnung $O(N \log N)$ zum

Aufbau der Trigangulation notwendig. Als Erweiterung der Delauney-Triangulation ist die Vorgabe von Punktconstellationen zu sehen, wie z. B. Punkte auf Kanten müssen Dreiecksseiten bilden.

Als Triangulation mit minimalem Gewicht wird die Methode bezeichnet, die innerhalb der unregelmäßig angeordneten Stützpunktmenge eine Triangulation erzeugt, für die die Summe der Dreiecksseiten minimal wird (M. Gerstl et al., 1979). Bezeichnet N wiederum die Anzahl der Stützpunkte, so gibt es $\binom{N}{2}$ mögliche geradlinige Verbindungen in der x, y -Ebene. Werden diese Verbindungen der Länge nach geordnet und alle die Linien ausgeschieden, die eine kürzere schneiden, erhält man die Triangulation mit minimalem Gewicht. Auch bei dieser Triangulationsmethode kann die Anzahl der Rechenoperationen auf $O(N \log N)$ reduziert werden. Um innerhalb des Triangulationsgebiets Bruchkanten oder Strukturlinien zu berücksichtigen, muß die Forderung nach minimaler Summe der Seitenlängen aufgehoben werden. Dabei kann allerdings eine Triangulation angestrebt werden, die unter Berücksichtigung von geomorphologischer Information (Geländekanten, Einzelpunkte) eine minimale Summe der Verbindungslinien besitzt.

Vermittels der hier angegebenen Triangulationen lassen sich Dreiecks-Flächenmodelle oder auch die hybriden Flächenmodelle aufbauen.

Für Überprüfungen der Konsistenz von Dreiecksvermaschungen gilt der Satz von Euler (Dreiecke A, B, C, D, E, F und I bilden dabei eine "zusammenhängende Fläche", der Rest gehört zum Außenraum).

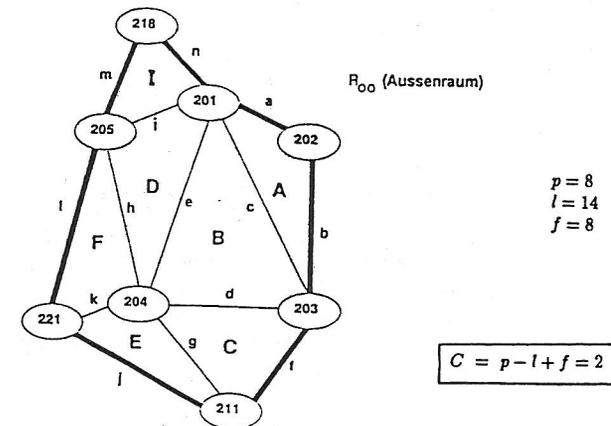


Abb. 3.2: Lokale Dreiecksvermaschung

3.3 Datenorganisationsformen für Begrenzungsflächen

Zu einer effizienten Verwaltung von Begrenzungsflächen sind verschiedene Organisationsformen einsetzbar. Während sich für das Flächenmodell "Dreiecke" topologisch orientierte Verwaltungen auf der Grundlage von Eckpunkten und Verbindungslinien bewährt haben (D. Fritsch, 1991) ist die Organisation von Rastermodellen sehr elegant vermittels Baumstrukturen durchzuführen. Das hybride Flächenmodell ist dabei unter ein Rastermodell zu subsumieren, da auch hier die Flächenverwaltung rein rasterorientiert erfolgen kann. Ferner ist auch eine Rasterorganisation über einem Dreiecks-Flächenmodell denkbar, wenn Nachbardreiecke mitverwaltet werden.

3.3.1 Quadtree-Prinzip Das Quadtree-Prinzip ist eine Erweiterung der Methode der binären Bäume auf zwei Dimensionen (E. Denert/R. Franck, 1977). Es basiert auf einer sukzessiven Zerlegung des Gesamtgebiets der Größe $2^n * 2^n$ (Anzahl der Rasterelemente) in quadratische Teilgebiete. Diese Blockstruktur kann durch einen Binärbaum vom Grade 4 beschrieben werden. Das gesamte Teilgebiet mit seinen $2^n * 2^n$ Rasterzellen bildet dabei die "Astknoten", wobei die Höhe (Niveau) des Baumes durch n vorgegeben ist. Jeder Knoten läßt sich wiederum in 4 Richtungen aufweiten, nämlich NW (Nordwest = 1), NO (Nordost = 2), SO (Südost = 3) und SW (Südwest = 4). Mit der Abb. 3.3 und 3.4 ist die sukzessive Unterteilung eines Flächenmodells "Raster" im Quadtree-Prinzip wiedergegeben

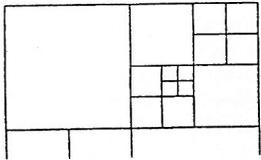


Abb. 3.3: Sukzessive Unterteilung eines Flächenmodells "Raster" im Quadtree-Prinzip

Auf der Basis dieser Unterteilung lassen sich verschiedene Datenverwaltungskonzepte realisieren, die innerhalb eines breiten Spektrums zwischen einer hierarchischen Datenfileverwaltung bis hin zur Verwaltung in relationalen Datenbanken anzusiedeln sind.

Die Verwaltung einer Quadtree-Struktur kann durch verschiedene Datenfiles gewährleistet werden, die entsprechend der topologischen Hierarchie der Abb. 3.4a die Verzweigungsrichtungen der Astknoten zum Inhalt haben können (siehe Abb. 3.4b).

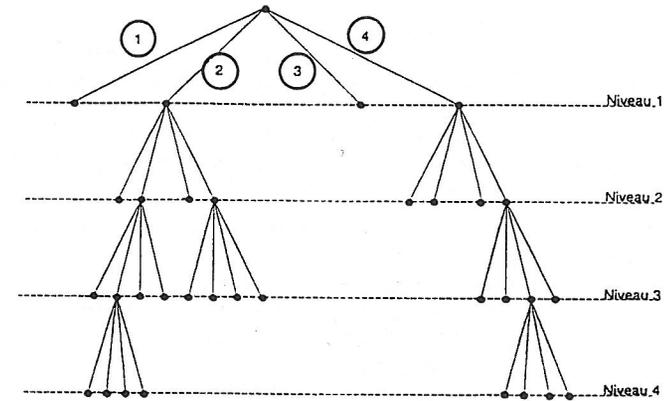


Abb. 3.4a: Die Quadtree-Struktur des Flächenmodells "Raster"

Somit läßt sich die Unterteilung in jeweils 4 neue Teilgebiete anhand der hierarchisch geordneten Datenfiles sehr schnell realisieren. Große Gebiete können effizient verwaltet werden, indem der einzelne Quadtree des 0. Niveaus das Grundelement einer regelmäßigen Gebietsunterteilung sein kann, die im Matrixformat geführt ist. Die Quadtree-Unterteilung ist nicht an Quadrate gebunden – ebenso sind Rechtecke in diesem Modus zu verwalten und als konsistentes Datenhaltungskonzept für eine raumbezogene Datenhaltung einzusetzen. Die Anpassung der Größe der Quadtree-Elemente an die Datendichte wird auch als "Prinzip der dynamischen Zellteilung" bezeichnet.

| Hierarchie | Knoten (Verzweigungen) | Datenfile | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------|---|-----------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|--|---|---|
| 0. Niveau | <table border="1"><tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr></table> | 1 | 2 | 3 | 4 | <table border="1"><tr><td>0</td></tr></table> | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1. Niveau | <table border="1"><tr><td>2</td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr><tr><td>4</td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr></table> | 2 | 1 | 2 | 3 | 4 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | <table border="1"><tr><td>1</td><td>2</td></tr><tr><td>4</td><td></td></tr></table> | 1 | 2 | 4 | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | 1 | 2 | 3 | 4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2. Niveau | <table border="1"><tr><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr><tr><td>2</td><td>4</td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr><tr><td>4</td><td>4</td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr></table> | 2 | 2 | 1 | 2 | 3 | 4 | 2 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | 4 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | <table border="1"><tr><td>2</td><td>2</td><td>2</td></tr><tr><td></td><td>2</td><td>4</td></tr><tr><td></td><td>4</td><td>4</td></tr></table> | 2 | 2 | 2 | | 2 | 4 | | 4 | 4 |
| 2 | 2 | 1 | 2 | 3 | 4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | 2 | 2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 2 | 4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 4 | 4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3. Niveau | <table border="1"><tr><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr><tr><td>4</td><td>4</td><td>3</td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr></table> | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 | 3 | 4 | 4 | 4 | 3 | 1 | 2 | 3 | 4 | <table border="1"><tr><td>3</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td></tr><tr><td></td><td>4</td><td>4</td><td>3</td></tr></table> | 3 | 2 | 2 | 2 | | 4 | 4 | 3 | | | | | |
| 2 | 2 | 2 | 1 | 2 | 3 | 4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | 4 | 3 | 1 | 2 | 3 | 4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | 2 | 2 | 2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 4 | 4 | 3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Abb. 3.4b: Verwaltung der Quadtree-Struktur

3.3.2 Organisationsformen für Triangulationen Das Prinzip der dynamischen Zellteilung kann auch für eine Organisation von Triangulationen gewertet werden. Während in L. Gründig (1988) eine "Divide and Conquer"-Strategie basierend auf D.T. Lee/W.S. Schachter (1980) zum lokalen Aufbau und anschließender Vereinigung von Triangulationen empfohlen wird, wird sich hier lediglich der Verwaltung innerhalb der Quadtree-Struktur (Abb. 3.4) zugewendet. Dazu bieten sich verschiedene Organisationsformen an, auf die im folgenden näher einzugehen ist.

a) Organisation vermittels Nachbardreiecke

Dabei werden die entstandenen Dreiecke in einer Liste erfaßt, die für jedes Dreieck die Eckpunkte sowie Zeiger zu den angrenzenden Dreiecken enthält. Die Nachbardreiecksinformation fällt direkt an. Wird jetzt innerhalb der Triangulierung nach Nachbarschaftsbeziehungen gefragt, um z. B. nachträgliche Punkte oder Linien einzubinden, ist die Information über alle in einem Punkt endenden Dreiecksseiten zur Verfügung zu stellen. Dies ist in einer Organisation nach Dreiecken nicht leicht zu unterstützen, wie an dem Beispiel der Abb. 3.2 zu zeigen ist.

| Dreiecke | Dreiecks-Pkt. | Nachbardreiecke |
|----------|---------------|-----------------|
| A | 201 202 203 | -- B |
| B | 201 203 204 | A C D |
| C | 203 204 211 | B - E |
| D | 201 204 205 | B F I |
| E | 204 211 221 | F - C |
| F | 205 204 221 | D E - |
| I | 201 205 218 | D -- |

Abb. 3.5: Organisation nach Dreiecken

Während für die Dreieckspunkte die zugehörigen Dreiecke noch relativ einfach ermittelt werden können (wobei jedoch der gesamte Datenfile zu durchsuchen ist), sind die Dreiecksseiten nur durch umständliche und dadurch zeitintensive Abfragen zu rekonstruieren.

b) Organisation vermittels Dreieckskanten

Werden die Endpunkte jeder Kante in einer Liste (Datenfile) verwaltet, so können zusätzliche Zeiger die von jedem Dreieckspunkt ausgehenden Kanten miteinander verbinden. Für das mit der Abb. 3.2 gegebene Beispiel ergibt sich die in der Abb. 3.6 wiedergegebene Struktur.

| Kante | Eckpunkte | Zeiger |
|-------|-----------|--------|
| a | 201 202 | c b |
| b | 203 202 | - - |
| c | 201 203 | e d |
| d | 204 203 | g f |
| e | 201 204 | i h |
| f | 211 203 | - - |
| g | 204 211 | k j |
| h | 205 204 | l - |
| i | 201 205 | n m |
| j | 221 211 | - - |
| k | 204 221 | - l |
| l | 205 221 | - - |
| m | 218 205 | - - |
| n | 201 218 | - - |

Abb. 3.6: Organisation nach Dreieckskanten

Der Aufbau der Triangulation läuft jetzt folgendermaßen ab: Die Kante a ist durch einen "Erstzeiger" mit der Kante c verbunden, nach deren Zugriff sich des "Zweitzeigers" der Kante a bedient wird. Nach Aufbau des Dreiecks A (a, b, c) wird die Kante b abgearbeitet, bei der jedoch keine

Zeigerinformation vorliegt und somit direkt nach c weitergegangen wird usw. Dadurch wird jede Kante sequentiell nach Erst- und Zweitzeigern abgefragt.

Somit lassen sich direkt für jede Kante die entsprechenden Dreiecke rekonstruieren, die aus den Endpunkten der Dreieckskante und ihren verzweigten Kanten gebildet werden. Die Numerierung der Dreiecke kann dabei jedoch nicht berücksichtigt werden.

c) Vollständige Organisation von Dreiecken

Entsprechend der Organisation vermittels Nachbardreiecke (Flächenorganisation) und der Organisation vermittels Dreieckskanten (Linienorganisation) können in einer vollständigen Organisation die Dreiecke nach Flächen, Linien, Punkten und zusätzlichen Angaben organisiert sein. Diese Form der Verwaltung von Topologie und Metrik resultiert aus der Randdarstellung des Flächenmodells "Dreiecke". Als zusätzliche Informationen können die Begrenzung des Flächenmodells, Anzahl der Dreiecke, Punktzahl sowie Minimal- und Maximalwerte für die Koordinaten x, y, z gespeichert werden.

Für die in der Abb. 3.2 wiedergegebenen zusammenhängenden Dreiecke A, B, C, D, E, F und I ergibt sich die in Abb. 3.7 wiedergegebene vollständige Organisation basierend auf Dreiecksflächen.

| Zus. Information | | Hülleninformation | | Dreiecksinformation | |
|------------------|-----|-------------------|--|---------------------|-----------------|
| Anzahl Punkte | 8 | Außenpunkt - Nr. | | Dreiecke | Nachbardreiecke |
| Anzahl Außenpkt. | 7 | 201 | | A | B |
| Anzahl Dreiecke | 7 | 202 | | B | A,C,D |
| Min. z - Koord. | ... | 203 | | C | B,E |
| Max. z - Koord. | ... | 211 | | D | B,F,I |
| | | 221 | | E | C,F |
| | | 205 | | F | E,D |
| | | 218 | | I | D |

| Punktinformation | | Koordinaten (Metrik) | | | |
|------------------|-------------|----------------------|-----------|-----------|-----------|
| Dreieck | Punkt - Nr. | Pkt. | x | y | z |
| A | 201,202,203 | 201 | x_{201} | y_{201} | z_{201} |
| B | 201,203,204 | 202 | x_{202} | y_{202} | z_{202} |
| C | 203,204,211 | 203 | x_{203} | y_{203} | z_{203} |
| D | 201,204,205 | 204 | x_{204} | y_{204} | z_{204} |
| E | 204,211,221 | 205 | x_{205} | y_{205} | z_{205} |
| F | 204,205,221 | 211 | x_{211} | y_{211} | z_{211} |
| I | 201,205,218 | 218 | x_{218} | y_{218} | z_{218} |
| | | 221 | x_{221} | y_{221} | z_{221} |

Abb. 3.7: Vollständige Organisation vermittels Dreiecksflächen

In der Abb. 3.8 ist eine vollständige Organisation mit Dreieckskanten dargestellt. Ein Vergleich mit der Organisation nur nach Dreieckskanten zeigt, daß hierbei ebenso die Numerierung der Dreiecke erhalten werden kann, wenn sie zusätzlich Berücksichtigung findet.

| Zus. Information | | | |
|------------------|-----|--|--|
| Anzahl Punkte | 8 | | |
| Anzahl Außenpkt. | 7 | | |
| Anzahl Dreiecke | 7 | | |
| Min. z - Koord. | ... | | |
| Max. z - Koord. | ... | | |

| Hülleninformation | | | |
|-------------------|--|--|--|
| Außenpunkt - Nr. | | | |
| 201 | | | |
| 202 | | | |
| 203 | | | |
| 211 | | | |
| 221 | | | |
| 205 | | | |
| 218 | | | |

| Kanteninformation | | | | |
|-------------------|--------|-----|--------|---|
| Kanten | Punkte | | Zeiger | |
| a | 201 | 202 | c | b |
| b | 203 | 202 | - | - |
| c | 201 | 203 | e | d |
| d | 204 | 203 | g | f |
| e | 201 | 204 | i | h |
| f | 211 | 203 | - | - |
| g | 204 | 211 | k | j |
| h | 205 | 204 | l | - |
| i | 201 | 205 | n | m |
| j | 221 | 211 | - | - |
| k | 204 | 221 | - | l |
| l | 205 | 221 | - | - |
| m | 218 | 205 | - | - |
| n | 201 | 218 | - | - |

| Koordinaten (Metrik) | | | | |
|----------------------|-----------|-----------|-----------|--|
| Pkt. | x | y | z | |
| 201 | x_{201} | y_{201} | z_{201} | |
| 202 | x_{202} | y_{202} | z_{202} | |
| 203 | x_{203} | y_{203} | z_{203} | |
| 204 | x_{204} | y_{204} | z_{204} | |
| 205 | x_{205} | y_{205} | z_{205} | |
| 211 | x_{211} | y_{211} | z_{211} | |
| 218 | x_{218} | y_{218} | z_{218} | |
| 221 | x_{221} | y_{221} | z_{221} | |

Abb. 3.8: Vollständige Organisation nach Dreiecksanten

Eine weitere vollständige Darstellung ergibt sich, wenn nach Flächen, Linien und Punkten geordnet wird (siehe Abb. 3.9)

Ein Vergleich der Organisationsarten von a), b) und c) zeigt, daß ein größerer Aufwand in der Datenorganisation zu leistungsfähigeren Datenhaltungen führt. Während in der CAD-Graphik überwiegend mit den Organisationsformen a) und b) gearbeitet wird, sind in einer raumbezogenen Datenhaltung vollständige Organisationen anzustreben. Der einfachen Fortführung einer vollständigen Organisation nach Flächen, Kanten und Punkten steht ein langsamer Bildaufbau der Triangulation entgegen, während die vollständige Organisation nach Dreiecksanten durch die Verzeigerungen für einen schnellen Bildaufbau sorgt. Hierbei erschweren jedoch die Verzeigerungen die Fortführung.

Da in der raumbezogenen Datenhaltung der Visualisierung von Triangulationen eine eher untergeordnete Rolle zukommt, ist aus Fortführungsgründen die vollständige Organisation nach Dreiecksflächen oder nach Flächen, Kanten und Punkten zu empfehlen.

| Zus. Information | | |
|------------------|-----|--|
| Anzahl Punkte | 8 | |
| Anzahl Außenpkt. | 7 | |
| Anzahl Dreiecke | 7 | |
| Min. z - Koord. | ... | |
| Max. z - Koord. | ... | |

| Hülleninformation | |
|-------------------|--|
| Außenpunkt - Nr. | |
| 201 | |
| 202 | |
| 203 | |
| 211 | |
| 221 | |
| 205 | |
| 218 | |

| Dreiecksinformation | |
|---------------------|--------|
| Dreieck | Zeiger |
| A | a,b,c |
| B | c,d,e |
| C | d,f,g |
| D | e,h,i |
| E | g,j,k |
| F | h,k,l |
| I | i,m,n |

| Kanteninformation | |
|-------------------|---------|
| Kante | Zeiger |
| a | 201,202 |
| b | 202,203 |
| c | 201,203 |
| d | 203,204 |
| e | 201,204 |
| f | 203,211 |
| g | 204,211 |
| h | 204,205 |
| i | 201,205 |
| j | 211,221 |
| k | 204,221 |
| l | 205,221 |
| m | 205,218 |
| n | 201,218 |

| Koordinaten (Metrik) | | | |
|----------------------|-----------|-----------|-----------|
| Pkt. | x | y | z |
| 201 | x_{201} | y_{201} | z_{201} |
| 202 | x_{202} | y_{202} | z_{202} |
| 203 | x_{203} | y_{203} | z_{203} |
| 204 | x_{204} | y_{204} | z_{204} |
| 205 | x_{205} | y_{205} | z_{205} |
| 211 | x_{211} | y_{211} | z_{211} |
| 218 | x_{218} | y_{218} | z_{218} |
| 221 | x_{221} | y_{221} | z_{221} |

Abb. 3.9: Vollständige Organisation nach Flächen, Linien und Punkten

3.3.3 Datenorganisation für hybride Flächenmodelle Entsprechend den vorangegangenen Überlegungen lassen sich Organisationsformen für hybride Flächenmodelle durch die Kombination von Gitterstrukturen mit Triangulationen angeben. Die dominierende Organisation kann dabei eine rasterorientierte Vorgehensweise sein, die innerhalb einer Baumstruktur hierarchisch aufgebaut ist, und auf dem niedersten Niveau die geometrischen Grundelemente Raster und Dreiecke verwaltet. Somit bietet sich das Quadtree-Prinzip für die hierarchische Datenorganisation an (Organisation im

Raster), während die Triangulationen nach Kanten, Flächen oder auch in Kombination (vollständige Organisation) zu verwalten sind.

Die Vorgehensweise einer Datenorganisation für ein hybrides Flächenmodell soll an dem Beispiel der Abb. 3.10 demonstriert werden.

a) Topologie

b) Binärbaum

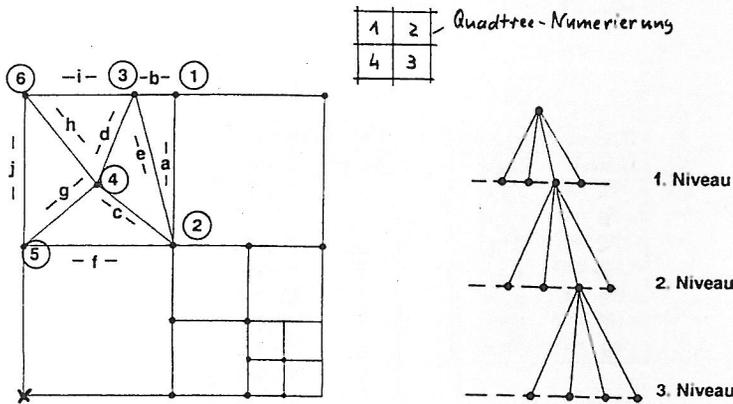


Abb. 3.10: Hybrides Flächenmodell

Dabei sind drei Datenfiles aufzubauen, von denen einer die Zellentopologie und zwei die Metrik wiedergeben (siehe Abb. 3.11). Innerhalb der Zellentopologie kommt man mit einer einfachen Dreiecksorganisation aus, so daß hier die Organisation nach Dreieckskanten gewählt wurde. Dieser File beginnt mit einer Kopfzeile (Header), in der die Zentralpunktposition i, j , die Potenz n und ein Indikator der Quadtreeunterteilung zu finden sind. Die Rastertopologie kann durch die Verzweigung des Binärbaumes wiedergegeben werden.

| i | j | Regionale Metrik | $\Delta x, \Delta y = 200 \text{ m}$ |
|-----|-----|------------------|--------------------------------------|
| | | $z_{i-1,j-1}$ | $z_{i-1,j}, z_{i-1,j+1}$ |
| | | $z_{i,j-1}$ | $z_{i,j}, z_{i,j+1}$ |
| | | $z_{i+1,j-1}$ | $z_{i+1,j}, z_{i+1,j+1}$ |
| | | $z_{i+2,j-1}$ | $z_{i+2,j}, z_{i+2,j+1}$ |

| Zellentopologie | | | |
|-----------------|---------|---------|----------|
| i, j | $3 = n$ | IND = 1 | "Header" |
| 0 | | | |
| 1 | 3 | | |
| 2 | 3, 3 | | |
| a | 1 2 | | b, e |
| b | 1 3 | | -, - |
| c | 3 2 | | d, e |
| d | 3 4 | | i, h |
| e | 4 2 | | g, f |
| f | 5 2 | | -, - |
| g | 4 5 | | -, - |
| h | 6 4 | | j, g |
| i | 3 6 | | -, - |
| j | 6 5 | | -, - |

| lokale Metrik | | | | | |
|---------------------------------------|--------|--------------------------------------|--------|--------------------------------------|--------|
| $\Delta x = \Delta y = 100 \text{ m}$ | | $\Delta x = \Delta y = 50 \text{ m}$ | | $\Delta x = \Delta y = 25 \text{ m}$ | |
| z_{ij} | Zeiger | z_{ij} | Zeiger | z_{ij} | Zeiger |
| z_{11} | 5 | z_{11} | - | z_{11} | - |
| z_{21} | 2 | z_{21} | - | z_{21} | - |
| z_{31} | - | z_{31} | 43 | z_{31} | - |
| z_{41} | - | z_{41} | - | z_{41} | 32 |
| z_{22} | 1 | z_{22} | - | z_{22} | - |
| Pkt. | x | y | z | Zeiger | |
| 1 | , | , | , | 51 | |
| 2 | , | , | , | 21 | |
| 3 | x_3 | y_3 | z_3 | - | |
| 4 | x_4 | y_4 | z_4 | - | |
| 5 | , | , | , | 11 | |
| 6 | , | , | , | $i, j+1$ | |

Abb. 3.11: Datenorganisation im hybriden Flächenmodell

Innerhalb der lokalen Metrik wird mittels der Zeiger sichergestellt, daß die Koordinaten redundanzfrei abgespeichert werden können. Während für die Rasterelemente die x, y -Koordinaten jederzeit rekonstruierbar und daher nicht unbedingt abzuspeichern sind, müssen die Dreieckspunkte vollständig in x, y und z abgelegt werden. Dabei können jedoch Dreieckspunkte mit Rasterpunkten zusammenfallen, was durch die Verzeigerungen zu berücksichtigen ist. Für die Numerierung der Zeiger wurde in der Abb. 3.11 ein Matrix-Modus gewählt, d. h. der Zeiger 51 bei Dreieckspunkt 1 wird durch das Raster der lokalen Metrik bedient (5. Zeile, 1. Spalte).

4. Voxel und Hyper Octrees

Nach den vorangegangenen Überlegungen sind insbesondere für geophysikalische Anwendungen die ebenen Datenstrukturen für die Tiefe zu erweitern. Basierend auf dem Volumenmodell ist eine regelmäßige Unterteilung des zu modellierenden Körpers mittels gleichgroßer Volumenelemente (volumen elements, voxel) möglich. Dies führt zur Verwaltung einer Hypermatrix, deren Aufbau sich an

dem digitalen Geländemodell vom Typ "Raster" orientieren kann. Die Verallgemeinerung der Verwaltung wiederum führt vom Quadtree zum Octree, der nun eine achtfache Unterteilung aufweist. In M.A. o'Conaill (1992) sind erste Erfahrungen wiedergegeben, wenn zur räumlichen Tiefe auch noch die Zeit als 4. Dimension hinzukommt. Dies führt zum sogenannten *Hyper Octree*, der als temporärer Octree aufgefaßt werden kann.

5. Attributsdefinitionen

Der große Vorteil eines Geo-Informationssystems liegt in der Zuweisung von beliebigen Attributen an eine räumliche Position $x, y, (z)$. Eigentlich wird erst dann von einem GIS gesprochen, wenn neben der Geometrie und Topologie auch noch der thematische (semantische) Aspekt eine bedeutende Rolle spielt. Für die Zuweisung von Thematik an eine bestimmte Position gibt es verschiedene Modelle.

5.1 Das Ebenenprinzip

Das Ebenenprinzip ist die älteste Form der Zuweisung von verschiedener Thematik an eine räumliche Position – es ist aus dem Umgang mit Kartenfolien entstanden. Man versteht darunter den Umgang mit separaten Datenebenen, die im weitesten Sinne auch als *Objekte* oder *Objektteile* aufzufassen sind. Die Verknüpfung der Ebenen miteinander erfolgt durch die Metrik (Position), die durch das Koordinatensystem gegeben ist.

Mittels des Ebenenprinzips lassen sich auf eindrucksvolle Weise verschiedene Visualisierungsformen des digitalen Geländemodells genauso wie einer Volumendarstellung kombinieren. Zum Beispiel ergibt die Überlagerung von DGM-Neigungsklassen mit einer DGM-Schummerung eine noch plastischere Visualisierung, als dies schon vorher der Fall war.

5.2 Objektweises Management

Bei dem objektorientierten Management wird die Randbeschreibung mittels Flächen- und Volumenmodellen durch eine abgestufte Hierarchie ergänzt: Objektklasse, Objekt und Objektteil, die der Topologie des entsprechenden Modells "aufgesetzt" werden.

So kann die Objektklasse der Grundstücke ein Grundstück enthalten, das sich aus verschiedenen Flurstücken zusammensetzt oder aber ein Gebäude stellt sich als die Vereinigung von Wohnhaus mit Garage dar. Ein weiteres Beispiel ist die 3D-Beschreibung einer sehr großen zusammenhängenden Fläche, für die zur umfassenden Beschreibung das Rand-(Grenz)polygon durch eine Dreiecksvermaschung zu ergänzen ist.

Häufig wird das objektweise Management mit dem Begriff *objektorientiert* verwechselt, der aus der Sicht der Informatik sehr viel mächtiger ist, als er in der Geodatenhaltung benutzt wird. Neuere Entwicklungen setzen dabei auf die Entwicklung von objektorientierten Datenbanken, die dem Anwender einen sehr einfachen Zugang zum Datenmanagement ermöglichen sollen.

6. Schluß und Ausblick

Der vorliegende Beitrag hat versucht, digitale Geländemodelle und Geo-Informationssysteme zusammenzuführen und einheitliche Datenhaltungskonzepte bereitzustellen. Es zeigt sich, daß die Modellierungsstrategien des CAD miteinander kombiniert werden können - insbesondere die Randbeschreibung mit ihrer einfachen Topologie in Form von Punkten, Kanten und Flächen bildet die Referenz zum Aufsatz von anthropogenen Objekten bzw. zur Modellierung von Tiefenstrukturen. Daraus resultiert eine neue Referenzfläche für GIS: Das natürliche Gelände relief.

Für Anwendungen in der Geophysik kann von diesen Betrachtungen ausgegangen werden. Das DGM wird sich hier schnell seinen Platz erobern, da es die natürliche Referenz der Erdoberfläche darstellt. Die umfangreichen Betrachtungen zur Datenverwaltung sollen natürlich nicht darüber hinwegtäuschen, daß auch die Approximation und Visualisierung von dreidimensionalen Körpern noch lange nicht vollständig gelöst ist. Insbesondere sind dabei häufig inverse Probleme zu lösen, d.h. Meßwerte sind meist nur über indirekte Wege erhalten worden und daher schwer zu interpretieren.

7. Literatur

- Bak, P.R.G, Mill, A.J.B. (1989): Three-dimensional representation in a Geo-Science Resource Management System for the minerals industry. In: Three-Dimensional Applications in GIS, Ed. J. Raper, Taylor and Francis, London.
- Bill, R., Fritsch, D. (1991): Grundlagen der Geo-Informationssysteme, Bd. 1. Wichmann, Karlsruhe, 414 S.
- o'Conaill, M.A., Bell, S.B.M., Mason, D.C. (1992): Developing a prototype 4D Geographical Information System on a transputer array. Lecture Notes EGIS'92, Munich.
- Ebner, H. (1990): Digitale Geländemodelle aus heutiger Sicht. In: Festschrift für Rüdiger Finsterwalder zum 60. Geburtstag, Hrsg. K. Brunner, H. Ebner, Inst. Photogr., Kartogr., TU München, München, S. 51-60.
- Ebner, H., Höbner, R., Würfländer, R. (1990): Integration von digitalen Geländemodellen in Geo-Informationssysteme – Konzept und Realisierung. Nachr. Karten-, Verm. Wes. (NaKaVerm), 105, S. 71-76.
- Fischer, H.S, Krause, M. (1988): Vegetations- und Bodensimulation mit dem Rechner. In: Chip Plus Simulation, Vogel, Würzburg, S. 12-16.
- Fritsch, D. (1990): Towards three-dimensional data structures in Geographic Information Systems. Proceed. EGIS'90, Amsterdam, pp.
- Fritsch, D. (1991): Raumbezogene Informationssysteme und Digitale Geländemodelle. Deutsche Geod. Kommission, Reihe C, Nr. 369, München.
- Fröhlich, H. (1992): Aufbau und Anwendung eines Digitalen Geländemodells. Dümmler, Bonn, 104 S.
- Gerstl, M., Heindl, G., Reinhart, E. (1979): Interpolation and approximation by piecewise quadratic smooth functions. Pres. Paper, IUGG General Assembly, Canberra.
- Gründig, L. (1988): Datenverwaltungskonzepte für typische Aufgaben aus der Ingenieurgeodäsie. Deutsche Geod. Komm., Reihe C, Nr. 336, München.
- Hardy, R.L. (1971): Multiquadratic equations of topography and other irregular surfaces. Journal Geophys. Research, pp. 1905-1915.
- Hein, G.W., Lenze, K. (1979): Zur Genauigkeit und Wirtschaftlichkeit verschiedener Interpolations- und Prädiktionsmethoden. Zeitschr. Verm. Wesen (ZfV), S. 492-505.
- Hochstöger, F. (1989): Ein Beitrag zur Anwendung und Visualisierung digitaler Geländemodelle. Geowiss. Mitt., Verm. Wes. TU Wien, Nr. 34, Wien.
- Kraus, K. (1983): Die Geländehöhendatenbank, Basis eines topographischen Informationssystems. Zeitschr. Verm. Wes. (ZfV), 108, S. 27-33.
- Kraus, K. (1991): The 3rd dimension in Geographic Information Systems. Proceed. 43rd Photogr. Week, Inst. Photogr., Stuttgart Univ., 15, Stuttgart, pp. 167-176.
- Lee, D.T., Schachter, W.S. (1980): Two algorithms constructing a Delaunay-Triangulation. Int. Journ. Comp. Inform. Sciences., 9.

- Makarovic, B. (1977): Digital Terrain Models – A constituent of Geo-Information Systems. Proceed. Symp. Topol. Data Structures for Geographic Information Systems, 1, Cambridge, Mass., pp. 1-21.
- Mayer, H. (1991): Integration von digitalen Geländemodellen in hybride graphische Systeme. In: Geo-Informatik, Hrsg. M. Schilcher, Siemens AG, Berlin/München, S. 119-125.
- Meier, A. (1986): Methoden der grafischen und geometrischen Datenverarbeitung. Teubner, Stuttgart, 224 S.
- Molenaar, M. (1992): A topology for 3D vector maps. Lecture Notes EGIS'92, Munich.
- Raper, J. (1990): Three-dimensional applications in Geographic Information Systems. Taylor and Francis, London.
- Reinhardt, W. (1991): Zur Integration von digitalen Geländemodellen in Geo-Informationssysteme. In: Geo-Informatik, Hrsg. M. Schilcher, Siemens AG, Berlin/München, S. 107-118.
- Steidler, F., Dupont, C., Funcke, G., Vuattoux, C., Wyatt, A. (1986): Digital Terrain Models and their applications in a database system. Proceed. AUTOCARTO London.