

Ein 2.5D-GIS-Datenmodell durch Integration von DGM und DSM mittels Triangulationen – theoretischer und praktischer Vergleich von Algorithmen und ihrer Ergebnisse

ULRICH LENK & CHRISTIAN HEIPKE, Hannover

Zusammenfassung: Der Artikel untersucht verschiedene bestehende Ansätze zur Integration von triangulierten Geländemodellen (triangular irregular networks, TIN) und Digitalen Situationsmodellen (DSM) zur Ableitung eines integrierten Datenmodells. Es wird ein neuer Ansatz vorgestellt, der gegenüber den bestehenden Ansätzen explizit alle geometrischen Kombinationsmöglichkeiten berücksichtigt (DSM-Punkte auf TIN-Kanten und partielle Kollinearitäten zwischen Kanten des TIN und des DSM). Dieser hat darüber hinaus algorithmische Vorteile, da er bestehende topologische Strukturen in den Eingangsdatenbeständen nutzt. Eine geometrische Analyse der Ergebnisse zeigt, dass die neue Vorgehensweise (wie auch zwei der drei vorher diskutierten Ansätze) zu redundanten Daten im Ergebnis führt. Es werden daher das Datenmodell mit minimaler Anzahl von Knoten vorgestellt sowie Algorithmen, mit denen dieses berechnet werden kann. Es wird exemplarisch ein Vergleich der entstehenden Datenvolumina gegeben.

Abstract: *A 2.5D GIS data model by integrating DTM and 2D GIS data via triangulations – theoretical and practical comparison of algorithms and their outputs.* The article investigates several existing methods to integrate triangulated irregular networks (TIN) with digital situation models (2D GIS data). A new method is introduced which in contradistinction to existing methods considers all possible geometric combinations between input data sets (2D points on TIN edges, partial collinearity between edges of input data sets, degenerated quadrilaterals with a triangle as its convex hull). Besides these features, the new procedure has algorithmic advantages as it utilises existing topologies explicitly. A geometric analysis reveals that the new algorithm leads to redundant data (as indeed do two of the three other discussed methods). Therefore, the data model with minimal number of nodes is introduced as well as algorithms to compute it. Examples are given to highlight resulting data volumes of the different approaches.

1 Einleitung

Ein gegenwärtiger Forschungsschwerpunkt in der Geoinformatik ist die Weiterentwicklung der Datenmodelle von Geo-Informationssystemen (GIS) durch Berücksichtigung der Höhenkomponente. Bisher wird diese in GIS i. allg. als Digitales Geländemodell (DGM) getrennt von der Lageinformation (2D-Situationsmodell, d. h. Digitales Situationsmodell, DSM; vgl. HAKE & GRÜNREICH 1994) modelliert. Ein Beispiel ist das Amtliche Topographisch-Kartographische Informationssystem (ATKIS; AdV 1989), bei dem die Erdoberfläche zweidimensional in diskrete Objekte eingeteilt und

durch die Objektbereiche 1000–5000 und 7000 modelliert wird, während das Relief zur Beschreibung der Geländeform durch das DGM und weitere Zusatzinformationen im Objektbereich 6000 modelliert wird.

Während die Entwicklung von 3D-Datenstrukturen häufig im Zusammenhang mit 3D Stadtmodellen thematisiert wird, ist die landesweite 2.5D-Modellierung der Landschaft seltener Gegenstand der Forschung. Dabei ist gerade diese vor dem Hintergrund der Kompatibilität mit den bestehenden Geobasisdatenbeständen und der damit einhergehenden Investitionssicherung interessant.

Zwei Formen der 2.5D-Integration werden von LENK (2001) untersucht und bewertet. Dabei handelt es sich zum einen um das Verfahren auf der Grundlage von Polynomflächenobjekten, das eine Verallgemeinerung der heute bei GIS-Analysen üblichen Höhenschichtobjekte darstellt. Mit letzteren wird das Relief auf der Grundlage von Höhenlinien in Schichten diskretisiert. Polynomflächenobjekte erweitern diesen Ansatz, indem als Funktionen für Objekte nicht nur konstante Höhen (Polynome 0.-ten Grades), sondern auch höhere Polynome zugelassen werden. Das andere kritisch betrachtete Verfahren beruht auf Triangulationen. Die Untersuchungen in LENK (2001) zeigen, dass das Verfahren mittels Triangulationen gegenüber dem mit Polynomflächenobjekten Vorteilen aufweist, da es sich besser in bestehende Verfahren der Datenerfassung, der raum- und zeitbezogenen Datenmodellierung und -verwaltung, der Analyse sowie der Visualisierung einfügt. Diese Eigenschaften sind für Polynomflächenobjekte nur eingeschränkt gegeben. Dieser Beitrag beschränkt sich daher auf die Integration von DSM und DGM mittels Triangulationen.

2 Grundlagen

2.1 Terminologie

Einige Termini wurden bereits in Abschnitt 1 genutzt und sollen nun noch näher spezifiziert werden. Unter einem 2.5D-Modell wird die eindeutige Zuweisung eines Höhenwertes zu einer Lagekoordinate verstanden. Dies ist gegenüber dem 3D-Modell eine Einschränkung, da mit letzterer Form auch multiple Höhenwerte möglich sind, wie sie z. B. für Stadtmodelle (vertikale Wände, Überbauungen, Brücken, Tunnel etc.) notwendig sind. Unter einem DSM wird das Digitale Situationsmodell verstanden, mit dem die Landschaft rein zweidimensional dargestellt wird. Dem gegenüber steht das Digitale Landschaftsmodell (DLM), mit dem hier die höherdimensionale Modellierung der Landschaft gemeint ist. Häufig werden die Begriffe DSM und DLM synonym verwendet (z. B. HARBECK 2000), hier werden

die Begriffe jedoch getrennt voneinander betrachtet, um die Unterschiede bzgl. der Dimensionalität der Ansätze zu betonen.

2.2 Voraussetzungen aus der digitalen Geländemodellierung mittels Triangulationen

Grundlagen der Geländemodellierung mittels Triangulationen bzw. Delaunay-Triangulationen (DT) und bedingten (constrained) Delaunay-Triangulationen (CDT) finden sich in den Standardlehrbüchern der GIS-Literatur bzw. den Lehrbüchern der algorithmischen Geometrie. Insbesondere die CDT ist für die Berechnung integrierter Modelle wichtig. Einen ausgezeichneten Überblick zu Triangulationen i. allg. und DT geben BERN & EPPSTEIN (1995). Aus dem Bereich der Geländemodellierung finden sich bei KRAUS (2000) umfangreiche Darstellungen und Monografien, z. B. die Arbeiten von SCHNEIDER (1998), AUMANN (1994) oder BUZIEK (1994).

Ein wichtiger Algorithmus, der für die Integration von DSM und DGM verwendet wird, ist das inkrementelle Einfügen eines Punktes in eine bestehende Triangulation. Entsprechende Verfahren werden z. B. von DE BERG et al. (1997) vorgestellt. Ein einzufügender Punkt kann in ein Dreieck, auf eine bereits bestehende Kante oder, falls es sich nicht um geometrisch disjunkte Punktmenge handelt, auf einen existierenden Punkt fallen. Ein Punkt, der zusätzlich in eine Triangulation eingefügt wird, wird auch Steinerpunkt genannt (BERN & EPPSTEIN 1995).

2.3 Simpliziale Komplexe

Der Ansatz der objektstrukturierten Landschaftmodellierung mittels Dreiecken ist auch unter dem Stichwort der Simplizialen Komplexe bekannt. Diese bilden ein theoretisches Fundament, das nicht auf 2 bzw. 3 Dimensionen beschränkt ist. Für jede Dimension gibt es ein minimales Objekt, welches Simplex genannt wird. Für die Dimension 0 ist dies der Punkt, der 0-Simplex. Entsprechend stellt eine Kante zwischen zwei 0-Simplexen einen 1-Simplex dar und

ein Dreieck einen 2-Simplex. Objekte, die aus mehreren Simplexen zusammengesetzt sind, werden Simpliziale Komplexe (SK) genannt. Das bedeutet, dass ein Dreiecksnetz ein 2-simplizialer Komplex (2-SK) ist und ein räumlicher Körper, der aus Tetraedern zusammengesetzt ist, einen 3-SK darstellt. Für weitere grundlegende Definitionen wird auf entsprechende Literatur der Topologie verwiesen (z. B. DIECK 2000, JÄNICH 1984). Im Zusammenhang mit GIS werden SK u. a. von WORBOYS (1995) oder EGENHOFER et al. (1989) behandelt. 3D-Modellierungen mit SK werden von PILOUK (1996) und BREUNIG (2000, 1996) vorgestellt, wobei BREUNIG (2000) auch temporale Aspekte berücksichtigt.

2.4 Allgemeines integriertes Datenmodell

Das allgemeine Datenmodell, das mit einer dreiecksbasierten Modellierung der Landschaft verbunden ist, wird mit Abb. 1 in der Unified Modeling Language (UML, BOOCH et al. 1998) beschrieben. Ein punktförmiges Objekt wird einem Knoten (0-Simplex) im integrierten Modell zugeordnet. Ein linienförmiges Objekt wird durch eine oder mehrere Kanten (bzw. 1-SK) und ein flächenhaftes Objekt durch ein oder mehrere Dreiecke im Datenbestand, d. h. 2-SK, repräsentiert. Der Einfachheit halber wird hier auf weitere Beziehungen wie Überführungsrelationen, wie sie z. B. im ATKIS-Datenmodell enthalten sind, verzichtet. Erweiterungen sind ohne Probleme möglich und sollen daher hier nicht ausgeführt werden.

3 Bestehende Ansätze zur Berechnung eines integrierten Modells

3.1 Anforderungen an ein integriertes Modell

Berücksichtigt man, dass die Eingangsdaten DSM und DGM mit einer gewissen Genauigkeit erhoben wurden, so muss bei einer Integration der beiden Datensätze gesichert sein, dass sich die Qualität der Modellierung nicht verschlechtert. Das bedeutet, dass die Form der 2D-Geometrien erhalten bleiben muss bzw. diese in einem integrierten Modell enthalten sein müssen und die Geländeoberfläche, die durch das DGM beschrieben wird, darf sich hinsichtlich ihrer geometrischen Form durch den Integrationsprozess nicht verändern. Man kann in letzterem Fall von der Forderung nach der Invarianz der Oberflächenform sprechen.

3.2 Das Verfahren von PILOUK (1996)

PILOUK (1996; s. a. PILOUK & TEMPFLI 1993) beschreibt sein Verfahren zur Berechnung eines integrierten Modells wie folgt, wobei die Darstellung vereinfacht und nur unter den Aspekten der 2.5D-Modellierung wiedergegeben wird:

- a) Strukturierung von 2D-Daten räumlich begrenzter Objekte.
- b) Bezug von Geländedaten im Gitter- oder TIN-Datenformat.
- c) Interpolation der Höhenkoordinate für jeden Knoten in den 2D-Daten, der noch keine Höheninformation besitzt.

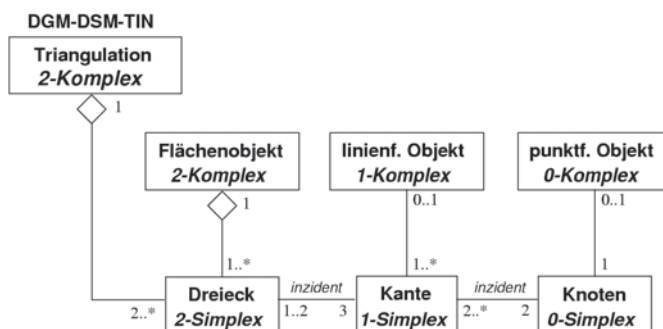


Abb. 1: 2.5D-GIS-Datenmodell mittels Simplizialer Komplexe.

- d) Falls es sich bei den Geländedaten um ein Gittermodell handelt, wird dies nun in ein TIN überführt, ggf. kann eine Datenreduzierung durchgeführt werden.
- e) Bildung der Vereinigungsmenge der Knoten des TIN mit den Knoten der 2D-Daten.
- f) Alle 2D-Objekte werden durch bedingte Triangulation in das TIN integriert, wobei die Kanten der 2D-Daten als Bedingungen in die Triangulation eingeführt werden.

Das Ergebnis ist eine objektstrukturierte 2.5D-Modellierung der Erdoberfläche durch 2-SK.

3.3 Der Ansatz von KLÖTZER (1997)

Das Verfahren von KLÖTZER (1997) bzw. KLÖTZER & PLÜMER (1997) wurde vor dem Hintergrund der Arbeiten von PLÜMER & GRÖGER (1997) entwickelt, die einen landkartenbasierten Ansatz der Modellierung von Geodaten diskutieren. Im Gegensatz zu den analogen Medien der Kartographie handelt es bei den „Landkarten“ dort um zweidimensionale grafentheoretische Konstrukte zur Geodatenmodellierung, die hier nicht weiter diskutiert werden (vgl. PLÜMER & GRÖGER 1997).

KLÖTZER (1997) erweitert das Konzept der Landkarte auf der Grundlage von Triangulationen um die Höhenkomponente und fordert, dass die Oberflächenform des DGM-TIN durch die Integration der Landkarten nicht verändert werden darf (vgl. Abs. 3.1). Seine Vorgehensweise dabei ist wie folgt:

- a) Inkrementelles Einfügen aller Knoten der Landkarte in das DGM-TIN unter Wiederherstellung der DT.
- b) Einrechnen der Kanten der Landkarte in das DGM-TIN unter Berechnung von Schnittpunkten (Steinerpunkten) zwischen den bereits bestehenden Kanten im TIN und den Landkartenkanten. Das Delaunaykriterium (DK) ist nach dem Einfügen der Punkte nicht mehr gültig, da eine Überprüfung des DK unterbleibt.

Unglücklicherweise ist durch die Wiederherstellung der DT in Schritt a) ein Verfahrensfehler gegeben, da durch diese Wiederherstellung eine Veränderung der Oberflächenform des DGM-TIN an den Enden der Landkartenkanten verursacht wird. Falls jedoch die Überprüfung des DK unterbleibt, so handelt es sich um ein Verfahren, das der von KLÖTZER (1997) gestellten Anforderung der Invarianz der Oberflächenform an eine Integration entspricht. Daher wird diese Vorgehensweise bei der weiteren Diskussion als das korrigierte Verfahren nach KLÖTZER (1997) bezeichnet.

Ein ähnliches Verfahren der Einrechnung von Geometrien in einen 2-SK wird von EGENHOFER et al. (1989) beschrieben, wobei diese nur ein 2D-Datenmodell diskutieren und nicht eine Erweiterung bestehender 2D-Datenstrukturen um die Höhenkomponente verfolgen. Daher soll hier auf dieses Verfahren nicht weiter eingegangen werden, es wird in LENK (2001) ausführlich diskutiert.

3.4 Das Verfahren von ABDELGUERFI et al. (1997)

Ein weiteres Verfahren der Integration von 2D-Geoinformation mit TIN stellen ABDELGUERFI et al. (1997) vor. Ihre Arbeiten bewegen sich vor dem Hintergrund, dass für die Modellierungs- und Simulationsarbeiten der US-Streitkräfte deren bisher verwendetes ebenenbasiertes Datenaustauschformat Vector-Product-Format (VPF) als nicht mehr ausreichend eingestuft wird. Sie stellen einen erweiterten Ansatz, das Extended-Vector-Product-Format (EVPF) vor. Dabei wird jedem flächenhaften Objekt (polygon) eine Anzahl von Dreiecken zugewiesen. Ihre Vorgehensweise ist wie folgt (ABDELGUERFI et al. 1997):

- a) Bestimmung der Dreiecke, die Punkte des jeweiligen Objektumrings enthalten.
- b) Verschneidung des Objektes mit diesen Dreiecken. Es entstehen ein oder mehrere Teilpolygone auf der Grundlage der DGM-TIN-Kanten.
- c) Polygontriangulation der entstehenden Teilpolygone (child polygons) mit einem Verfahren, das bei O'ROURKE (1998) beschrieben wird.

3.5 *Diskussion der bestehenden Ansätze*

Berücksichtigt man, dass die Forderung der Invarianz der Geländeoberfläche durch die Integration von DSM und DGM-TIN erfüllt werden soll, so muss das Verfahren von PILOUK (1996) für diesen Zweck kritisch betrachtet werden. Durch das Einführen der DSM-Kanten als bedingte ungeteilte Kanten kann es zu deutlichen Veränderungen in der Oberflächenform kommen, wie leicht an einem Beispiel dargestellt werden kann. Angenommen, eine Straße durchquert ein Tal in Querrichtung und als Knoten gibt es nur Punkte auf den angrenzenden Bergrücken. In diesem Fall wird das Tal durch den Algorithmus von PILOUK (1996) von einem neu entstandenen Damm geteilt werden. Durch das Verfahren von PILOUK (1996) wird nur gesichert, dass die 2D-Geometrien in dem integrierten Modell repräsentiert sind, die Oberflächenform des Geländes verändert sich jedoch. Die Vorgehensweise von PILOUK (1996) kann nur zum Ziel führen, wenn DGM und DSM gemeinsam bereits als 2.5D-DLM, z. B. photogrammetrisch erfasst werden. In diesem Fall ist jedoch keine Integration mehr notwendig.

Das korrigierte Verfahren nach KLÖTZER (1997) und die Vorgehensweise von ABDELGUERFI et al. (1997) erfüllen dem gegenüber die Forderung nach der Invarianz der Oberflächenform, da bei ihnen die DSM-Kanten durch existierende TIN-Kanten geteilt werden, allerdings haben sie algorithmische Defizite und berücksichtigen nicht explizit alle geometrischen Kombinationsmöglichkeiten, die sich bei der Integration von DSM und DGM-TIN ergeben können. Diese Restriktionen werden im Folgenden detaillierter ausgeführt.

3.5.1 *Spezielle geometrische Konstellationsmöglichkeiten*

Eine Situation, die bei der Integration von DGM-TIN und DSM auftreten kann, ist die partielle Kollinearität von Kanten in den Eingangsdatensätzen. Dies impliziert, dass Knoten sich an geometrisch identischen Po-

sitionen in der Ebene befinden können bzw. ein Knoten auf eine bestehende Kante des jeweils anderen Datensatzes fallen kann. Weiter können degenerierte Vierecke auftreten, deren konvexe Hülle ein Dreieck bildet. Insbesondere die geometrische Identität von Punkten ist ein Fall, der in der algorithmischen Geometrie kaum erwähnt wird, da die Ansätze dort von disjunkten Punkten in der Ebene ausgehen. Diese Fälle werden bei KLÖTZER (1997) nicht berücksichtigt bzw. vom Ansatz her ausgeschlossen. Die Vorgehensweise von ABDELGUERFI et al. (1997) ist hier in ihrer Stabilität und Robustheit direkt abhängig von der Implementierung der Verschneidungsoperation. Falls diese Fälle nicht berücksichtigt werden, kann es zu fehlerhaften Ergebnissen kommen.

3.5.2 *Algorithmische Aspekte*

Neben den Aspekten der Robustheit der Ansätze zeigen die Verfahren algorithmische Defizite, da alle bisher existierenden Ansätze der Integration von DGM-TIN und DSM die existierenden Datenstrukturen nicht für eine effiziente Vorgehensweise nutzen. KLÖTZER (1997) fügt zunächst alle Knoten der Landkarte in das DGM-TIN ein, bevor die Integration der Landkartenkanten erfolgt. Hierfür muss die Zugriffsdatenstruktur im Dreiecksnetz entsprechend häufig genutzt werden. Die räumliche Zugriffszeit im Dreiecksnetz stellt das Hauptunterscheidungsmerkmal bei inkrementellen Einfügeoperationen dar, da das beeinflusste Gebiet für einen einzufügenden Punkt für alle verschiedenen Verfahren gleich ist. Über räumliche Suchverfahren in Dreiecksnetzen berichten u.a. DEVILLERS et al. (2001) und DEVILLERS (1997). Durch das Einfügen eines Punktes einer Linie in ein Dreiecksnetz ist mindestens ein Dreieck bekannt, das sich in der Nähe des nächsten Punktes der Linie befindet. Dieses Dreieck kann als guter Startwert für eine topologische Wanderung im Dreiecksnetz (vgl. DEVILLERS et al. 2001) genutzt werden, um schnell ohne Nutzung der räumlichen Zugriffsdatenstruktur des Dreiecksnetzes den Einfügeort des nächsten Punktes der Linie

im Dreiecksnetz zu finden. Dabei wird dann die existierende Linientopologie der DSM-Geometrie sowie die Topologie des vorhandenen Dreiecksnetzes vorteilhaft genutzt.

Beim Ansatz von ABDELGUERFI et al. (1997) verhält sich dies anders, da die Autoren eine ganz unterschiedliche Vorgehensweise nutzen. Zunächst werden alle Dreiecke bestimmt, in denen die Punkte des Umringes von einem Objekt liegen. Es ist nicht näher bekannt, wie dies vorgenommen wird. Allerdings muss hier eine initiale räumliche Zuordnung von Dreiecken zu dem zu verschneidenden Objekt erfolgen. Für eine effiziente Berechnung einer Verschneidung muss weiter vor der eigentlichen Verschneidung eine Sortierung der Daten erfolgen, z. B. in aufsteigender Richtung einer Koordinatenlinie, damit die Verschneidung mit einem ausgabesensitivem Verfahren berechnet werden kann (vgl. DE BERG et al. 1997). Da nunmehr die Knoten entlang einer Koordinatenlinienrichtung bearbeitet werden, kommt es auch hier nicht zu einem Einsatz der existierenden Topologien im Dreiecksnetz bzw. in der 2D Geometrie. Das bedeutet, dass die klassische Verschneidung eines Dreiecksnetzes mit flächenhaften 2D Geometrien hinsichtlich ihrer Effizienz kritisch betrachtet werden muss.

4 Ein neuer Algorithmus zur Integration von DGM und DSM

Aus diesen Erkenntnissen heraus wurde ein neuer Algorithmus entwickelt, der sich gegenüber den bekannten Ansätzen durch die konsequente Nutzung existierender Topologien beim Einrechnen von 2D Geometrien in ein TIN hervorhebt. Zusätzlich berücksichtigt er alle geometrischen Kombinationsmöglichkeiten, die beim Zuordnen von zwei unabhängig erhobenen Datensätzen auftreten können.

4.1 Grundlegendes Prinzip

Das grundlegende Funktionsprinzip des Ansatzes ist in Abb. 2 dargestellt. Das Gebiet um einen eingefügten Punkt (Abb. 2, Ort 9) wird durch die inzidierenden Dreiecke in Sektoren eingeteilt. Durch Berechnung der Determinanten, die aus dem Anfangspunkt A und dem Endpunkt B einer Kante und einem dritten Punkt C berechnet wird, kann ermittelt werden, ob sich C links, rechts oder auf der Kante A-B befindet (O'ROURKE 1998). Im ersten Fall ist die Determinante größer Null, im zweiten Fall kleiner Null und im dritten Fall identisch Null. Aus der Kombination der möglichen Ergebnisse liegt_links, liegt_rechts und liegt_auf der drei Determinanten, die mit den gerichteten Kanten des Dreiecks jeweils

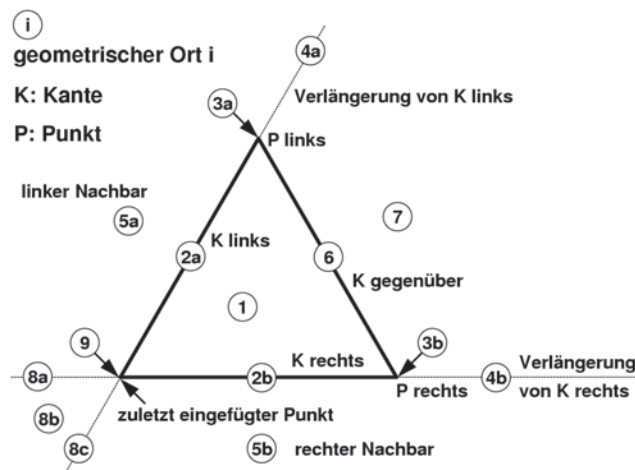


Abb. 2: Schema des radial-topologischen Algorithmus.

mit dem nächsten einzufügenden Punkt C der Linie berechnet werden, kann somit bestimmt werden, in welchem der 9 prinzipiell möglichen geometrischen Örter (mit Unterfällen) sich der Einfügeort des Punktes C befindet. Falls er nicht im Sektor des Dreiecks liegt, mit dem die Determinanten berechnet wurden, rotiert das Verfahren um den aktuellen Punkt und testet den zu prüfenden Linienpunkt mit einem der adjazierenden Dreiecke (Fälle 5a/b und 8a/b/c). Da die Fortbewegung im Dreiecksnetz (und auch die Rotation um den Punkt) die Topologie des TIN nutzt, wird der Algorithmus hier als radial-topologischer Algorithmus (RTA) bezeichnet. Mit ihm können stückweise lineare Geometrien in ein Dreiecksnetz eingerechnet werden, indem dieses entlang der Geometrien traversiert wird. Dabei wird die Höhe der 2D-Punkte bzw. der berechneten Schnittpunkte zwischen 2D-Geometrien und bestehenden Dreieckskanten (Fall 7, es wird ein Schnittpunkt mit der Kante gegenüber berechnet) linear im TIN interpoliert. Falls eine partielle oder vollständige Kollinearität zwischen dem aktuell einzufügenden Liniensegment 9-C und Kanten im DGM-TIN existiert, wird diese mit dem beschriebenen Verfahren aufgedeckt bzw. beim Einrechnen des Liniensegmentes berücksichtigt (Fälle 2a/b, 3a/b und 4a/b). Im Fall 1 befindet sich der Punkt C im inzidierenden Dreieck selber und im Fall 6 auf der Kante, die dem zuletzt eingefügten Punkt in dem Dreieck gegenüberliegt.

4.2 Geometrische Analyse

Bei der grundlegenden Erläuterung des RTA wurde nur ein einzelnes Dreieck, der entsprechende Sektor, betrachtet. Nun soll anhand von Abb. 3a) untersucht werden, wie sich der RTA bei der Navigation im TIN verhält. Eine DSM-Geometrie tritt von Nordosten in ein DGM-TIN-Dreieck ein. Die Punktnummern wurden in der Reihenfolge des Einfügens vergeben, diese kann anhand von Abb. 2 nachvollzogen werden.

Zunächst wird Punkt 1 als Eintrittsschnittpunkt zwischen der DSM-Geometrie und dem DGM-Dreieck angelegt. Danach wird Punkt 2 als Knickpunkt der DSM-Geometrie eingefügt und im Anschluss Punkt 3 als Schnittpunkt zwischen der Kante, die beim Einfügen von Punkt 1 angelegt wird, bestimmt. Entsprechend ergeben sich die Punkte 4, 5 und 6. Die Punkte 1 und 6 werden als Schnittpunkte der DSM-Kante mit den Kanten des originären Dreiecks berechnet und sind damit zur morphologischen Beschreibung der DSM-Geometrie notwendig. Die Punkte 2 und 4 stellen Knickpunkte dar, die zur lagemäßigen Beschreibung der DSM-Geometrie erforderlich sind. Nur die Punkte 3 und 5 sind weder zur Tessellation der Ebene noch zur morphologischen Beschreibung des Geländes notwendig, sie stellen daher redundante Daten dar. Ein mögliches redundanzfreies Ergebnis ist mit Abb. 3b) gegeben.

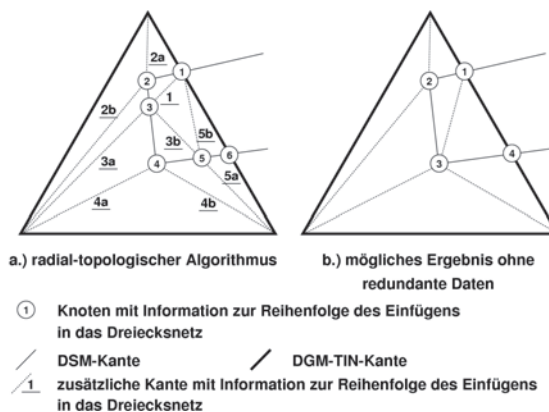


Abb. 3: Geometrische Analyse des radial-topologischen Algorithmus.

5 Das Datenmodell mit minimaler Anzahl von Knoten und seine Berechnung

5.1 Datenmodell

Aus den oben dargestellten Untersuchungen ist ersichtlich, dass ein Steinerpunkt im Modell mit minimaler Anzahl von Knoten nur eingeführt werden darf, wenn er als Schnittpunkt zwischen der einzufügenden DSM-Geometrie und einer Kante des originären DGM-TIN berechnet wird. Ein Schnittpunkt mit Kanten, die im Verlauf des Einrechnens der DSM-Geometrie gebildet werden, ist nicht zulässig. Die Anzahl der Knoten ist auf diese Art eindeutig festgelegt.

Abb. 4 beschreibt das entsprechende Datenmodell in der UML. Die Schnittpunktbedingung der Steinerpunkte ist als {and}-Bedingung zwischen den inzidierenden Kanten eingeführt. Das DGM-TIN wird zur morphologisch qualitativ hochwertigen Geländemodellierung als CDT berechnet, das integrierte Modell (DGM-DSM-TIN) wird als integrierte CDT (ICDT) bezeichnet.

5.2 Algorithmen zur Berechnung des minimalen Modells

Prinzipiell ist bei der Entwicklung eines Verfahrens zur Berechnung der ICDT zwischen direkten und indirekten Verfahren zu unterscheiden. Ein möglicher Algorithmus zur direkten Berechnung der ICDT ist mit dem Verfahren von ABDELGUERFI et al. (1997) gegeben. Es gelten die oben angegebenen Restriktionen hinsichtlich der Berücksichtigung möglicher geometrischer Konstellationen und der algorithmischen Effizienz des Ansatzes.

Nachdem der RTA als effizientes Verfahren der Integration von DSM und DGM vorgestellt wurde, liegt es nahe, diesen hinsichtlich seiner Eignung für eine Modifikation zu untersuchen. Bei der direkten Berechnung ist ein Problem, dass der Anfangspunkt einer DSM-Geometrie i. allg. nicht auf die Kante eines Dreiecks des DGM-TIN fällt. Zur Vermeidung redundanter Information muss beim Auftreffen der DSM-Geometrie auf eine Kante des DGM-TIN überprüft werden, ob vorher redundante Knoten berechnet wurden. Diese müssten dann gelöscht werden. Für den Fall, dass

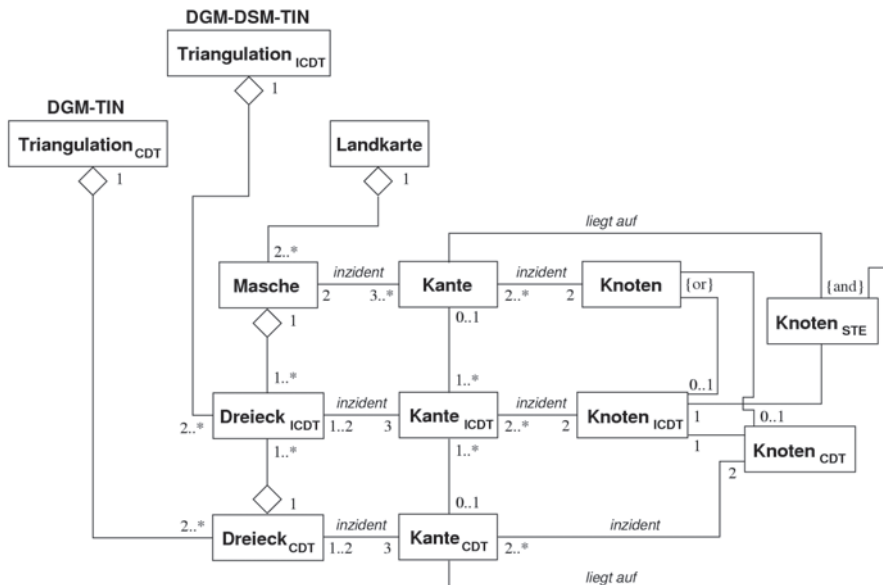


Abb. 4: Das Datenmodell mit minimaler Anzahl von Knoten als UML-Diagramm.

die DSM-Geometrie in dem zu verlassenden Dreieck ihren Startpunkt hat, muss die hineinragende DSM-Teilgeometrie beim Löschen erhalten bleiben, damit nach Abschluss der Integration die DSM-Geometrie vollständig im integrierten Modell enthalten ist. Im weiteren Verlauf kann dann mit dem einfachen RTA fortgefahren werden, wobei immer beim Verlassen eines Dreiecks des originären DGM-TIN getestet werden muss, ob vorher redundante Knoten gebildet wurden, ggf. müssen sie gelöscht werden. Dies kann dadurch erfolgen, dass aus der originären DSM-Teilgeometrie und dem DGM-TIN-Dreieck in Verbindung mit den Schnittpunkten zwischen diesen die lokale Dreiecksvermaschung mit einer Polygontriangulation redundanzfrei berechnet wird. Die Behandlung der Teilgeometrien an den Enden ist jedoch nur mit einer aufwändigen Datenstruktur und der Berücksichtigung von etlichen Sonderfällen möglich.

Eine andere Möglichkeit ist mit einem indirekten Verfahren gegeben. Zunächst wird mit dem RTA ein Zwischenmodell berechnet, aus dem im Anschluss redundante Daten entfernt werden. Zu löschende Knoten werden bei der Berechnung des Zwischenmodells als solche markiert, wenn bei der Berechnung eines Schnittpunktes (Abb. 2, Fall 7) die $\{and\}$ -Bedingung in Abb. 4 nicht eingehalten wird, oder sie müssen anderweitig durch Kollinearitätstests gefunden werden. In beiden Fällen wird das Zwischenmodell zum Löschen entlang der DSM-Geometrien traversiert. Wenn das Löschverfahren auf einen zu löschenden Punkt trifft, wird einmal um diesen rotiert, um die inzidierenden geometrischen Elemente in Puffern zu speichern. Nach dem Löschen des Punktes werden beide Seiten der wiederhergestellten (Teil-)Kante mit einer Polygontriangulation neu vermascht. Dabei ist zu berücksichtigen, dass es in dem Polygon auf Grund der Berechnung von Schnittpunkten entlang einer DSM-Kante zu kollinearen Punkten kommen kann. Sie können unter Verwendung von Determinanten (s. o.) identifiziert werden. Entsprechend muss das Polygontriangulationsverfahren in der Lage sein, eine gültige lokale

Dreiecksvermaschung unter Beachtung der Kollinearitäten zu erzeugen. Das Verfahren berechnet das minimale Modell, wobei für jede linienhafte DSM-Geometrie die räumliche Zugriffsdatenstruktur des TIN genau zweimal genutzt wird. Demgegenüber benötigt der einfache RTA nur einen räumlichen Zugriff für jede DSM-Geometrie bzw. bei dem korrigierten Verfahren nach KLÖTZER (1997) erfolgt ein räumlicher Zugriff für jeden DSM-Punkt (also auch für die Knickpunkte), bevor die Anfangspunkte von DSM-Kanten erneut aufgesucht werden müssen, damit die Integration der DSM-Kanten in das integrierte Modell erfolgen kann.

6 Ergebnisse von Testrechnungen

Tab. 1 enthält numerische Ergebnisse zu Testrechnungen, die für ein Gebiet in der Leineau südlich von Hannover durchgeführt wurden. Der korrigierte Algorithmus von KLÖTZER (1997) wurde nicht direkt in seiner beschriebenen Form implementiert, sondern auf der Grundlage des RTA, wobei vor dessen Anwendung alle Punkte des DSM inkrementell eingefügt und alle weiteren Steinerpunkte mit dem RTA berechnet wurden. Mit dieser Vorgehensweise ergibt sich das Ergebnisdatenvolumen des korrigierten Ansatzes von KLÖTZER (1997, wobei auf Grund der Verwendung des RTA im zweiten Schritt alle geometrischen Konstellationsmöglichkeiten berücksichtigt werden, s. o.). Eine grafische Wiedergabe der Daten und Modelle erfolgt in den Abb. 5

Tab. 1: Eingangsdatsätze und integrierte Modelle für das Testgebiet Leine.

Datensatz	Knotenanzahl absolut
DSM	947
DGM-TIN	1103
Minimales integriertes Modell	3143
Integriertes Modell mit dem RTA	3863
Integriertes Modell mit dem korrigierten Verfahren nach KLÖTZER (1997)	3985

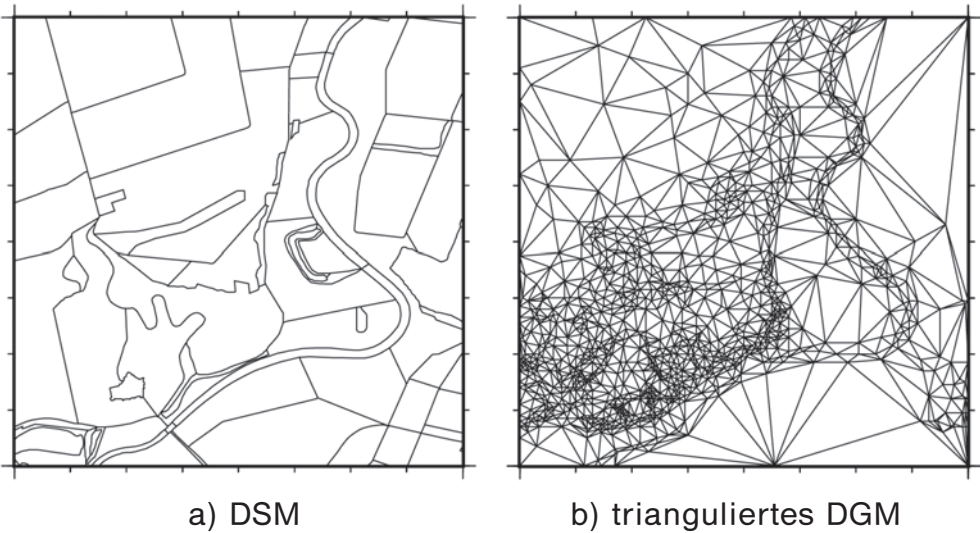


Abb. 5: DSM und DGM Eingangsdaten für Testrechnungen im Leinegebiet südlich von Hannover.

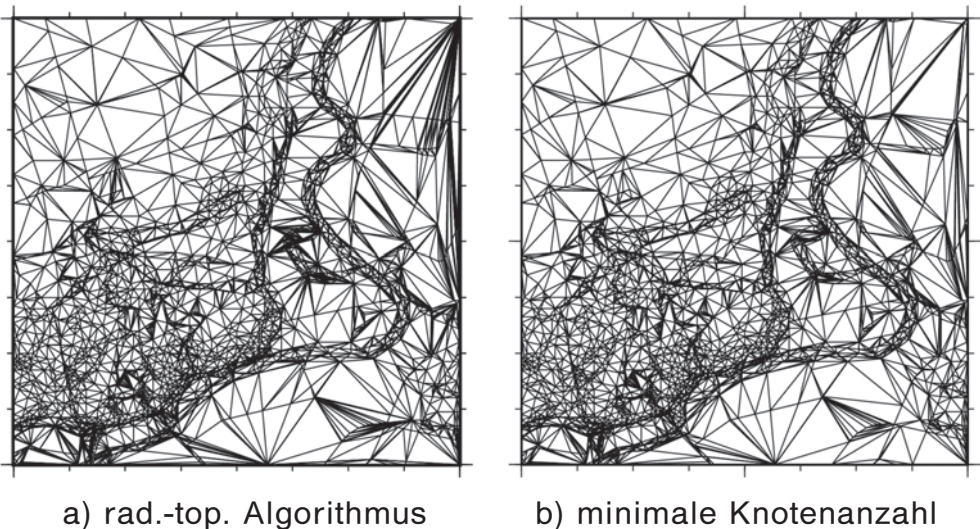


Abb. 6: Morphologisch identische integrierte Modelle: Ergebnis mit dem RTA und das Modell mit minimaler Anzahl von Knoten.

und 6. Auf eine Abbildung des Ergebnisses mit dem korrigierten Ansatz nach KLÖTZER (1997) wird verzichtet, da die Unterschiede zum Ergebnis des RTA auf Grund der großen Punktzahl visuell kaum wahrnehmbar sind. Bei dem verwendeten DSM handelt es sich um Geometrien, die auf der Grundlage des ATKIS-DSM25/1 entstanden. Die unterschiedliche Dichte der Punkte

in den integrierten Modellen zeigt sich besonders bei großen Dreiecken des DGM-TIN (unten bzw. rechts oben in den Abbildungen) und im Bereich des Leinealtarms in der Mitte der Abbildungen.

Bei den Ergebnissen in Tab. 1 zeigt sich, dass das redundante Datenvolumen des RTA nahezu 20% erreichen kann. Bei weiteren Beispielen in LENK (2001) ergeben

sich teilweise noch größere Redundanzen. Durch das Einfügen aller DSM-Punkte vor der Integration der DSM-Kanten steht bei der Berechnung von weiteren Steinerpunkten eine maximale Anzahl von Kanten als Schnittpunktskandidaten zur Verfügung, daher erzielt der korrigierte Algorithmus von KLÖTZER (1997) das maximale Datenvolumen in dem Beispiel.

7 Schlussfolgerungen und Ausblick

Es wurden verschiedene Wege zur Berechnung von integrierten triangulierten Landschaftsmodellen aufgezeigt sowie deren Ergebnisse verglichen. Es zeigt sich, dass es bedingt durch die verwendeten Algorithmen zu einer hohen Redundanz im integrierten Modell (mehr als 20%) kommen kann. Daher wird die Verwendung des redundanzfreien Modells empfohlen.

Verfahrensbedingt handelt es sich bei den beschriebenen Vorgehensweisen um Methoden, die ähnlich wie eine Verschneidung von Geodaten arbeiten. Bisher wurde eine geometrisch-semantische Konsistenz der Daten vorausgesetzt. Ggf. sollte in einer Erweiterung der beschriebenen Ansätze daran gedacht werden, hier eine Überprüfung der Daten während der Integration vorzunehmen. Denkbar sind z. B. Neigungsschwellwerte für Straßen, damit diese im Modell überhaupt befahrbar sind. Zusätzlich sollte zur weiterführenden Datenreduktion eine mögliche Redundanz in den Eingangsdaten (DGM und DSM) berücksichtigt werden (vgl. LENK, 2001).

Dank

Die hier vorgestellten Untersuchungen wurden mit Mitteln aus dem Stipendienprogramm der Deutschen Bundesstiftung Umwelt, Osnabrück, gefördert. Bei den verwendeten topographischen Daten handelt es sich um ATKIS-DGM5 und DSM25/1 Daten der Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen (LGN), die freundlicherweise zur Verfügung gestellt wurden.

8 Literatur

- ABDELGUERFI, M., COOPER, E., WYNNE, C. & SHAW, K., 1997: An Extended Vector Product Format (EVPF) suitable for the representation of three-dimensional elevation in terrain databases. – *Int. J. Geographical Information Science*, **11** (7): 649–676.
- AdV (Hrsg.), 1989: ATKIS-Gesamtdokumentation. – Hannover, Bonn.
- AUMANN, G., 1994: Aufbau qualitativ hochwertiger digitaler Geländemodelle aus Höhenlinien. – Diss., TU München, DGK, Reihe C, Nr. 411, München.
- DE BERG, M., VAN KREVELD, M., OVERMARS, M. & SCHWARZKOPF, O., 1997: *Computational Geometry – Algorithms and Applications*. – Springer Verlag, Berlin, Heidelberg u. a.
- BERN, M. & EPPSTEIN, D., 1995: *Mesh Generation and Optimal Triangulation*. – In: DU, D. Z. & HWANG, F. K. (Eds.), 1995: *Computing in Euclidean Geometry*. – (2nd Edition), Lecture Notes Series on Computing, Vol. 4: 47–123, World Scientific, Singapore, New Jersey, London, Hong Kong.
- BOOCH, G., RUMBAUGH, J. & JACOBSEN, I., 1998: *Unified Modeling Language User Guide*. – Addison-Wesley, Reading, Massachusetts u. a.
- BREUNIG, M., 2000: *On the way to Component-Based 3D/4D Geoinformation Systems*. – Lecture Notes in Earth Sciences 94, Springer Verlag, Berlin.
- BREUNIG, M., 1996: *Integration of Spatial Information for Geo-Information Systems*. – Lecture Notes in Earth Sciences 61, Springer Verlag, Berlin.
- BUZIEK, G., 1994: *Analyse und Optimierung hydrografischer Punktfelder als Grundlage der Modellierung des Unterwasserreliefs*. – Wiss. Arb. d. Fachr. Vermess. d. Uni. Hannover Nr. 197, Diss., Universität Hannover.
- DEVILLERS, O., 1997: *Improved Incremental Randomized Delaunay Triangulation*. – Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique (INRIA), Sophia Antipolis, France, Rapp. de rech. no 3298.
- DEVILLERS, O., PION, S. & TELLAUD, M., 2001: *Walking in a Triangulation*. – Inst. Nat. de Recherche en Informatique et en Automat. (INRIA), Sophia Antipolis, France, Rapport de recherche no 4120.
- DIECK, T., 2000: *Topologie*. – Walter de Gruyter, Berlin, New York.
- DU, D. Z. & HWANG, F. K. (Eds.), 1995: *Computing in Euclidean Geometry*. – (2nd Edition), Lecture Notes Series on Computing, Vol. 4,

- World Scientific, Singapore, New Jersey, London, Hong Kong.
- EGENHOFER, M. J., FRANK, A. U. & JACKSON, J. P., 1989: A Topological Data Model for Spatial Databases. – Proc. First Symp. SSD'89, Santa Barbara, CA, USA, 271–286.
- HAKE, G. & GRÜNREICH, D., 1994: Kartographie. – Walter de Gruyter, Berlin.
- HARBECK, R., 2000: Das topographische Geoinformationssystem ATKIS – Stand und Entwicklung aus Sicht der AdV. – DVW-Schriftenr. 39/2000:9–21, Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart.
- JÄNICH, K., 1984: Topologie. – Springer Verlag, Berlin.
- KLÖTZER, F., 1997: Integration von triangulierten digitalen Geländemodellen und Landkarten. – Unveröff. Diplomarbeit, Inst. f. Informatik, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität, Bonn.
- KLÖTZER, F. & PLÜMER L., 1997: Homogene Verknüpfung des digitalen Geländemodells mit ATKIS-DLM-Daten. – Vortrag 34. Sitzung der AG „Automation in der Kartographie (AGA)“ am 7./8.10.1997 an der TU Dresden.
- KRAUS, K., 2000: Photogrammetrie, Bd. 3, Topographische Informationssysteme. – Dümmler Verlag, Köln.
- LENK, U., 2001: 2.5D-GIS und Geobasisdaten – Integration von Höheninformation und Digitalen Situationsmodellen. – Wiss. Arb. Fachr. Vermess. Univ. Hannover Nr. 244 und Deutsche Geodät. Komm. bei der Bayer. Akad. d. Wiss., Reihe C, Nr. 546. Diss., Univ. Hannover, im Druck.
- O'ROURKE, J., 1998: Computational Geometry in C. – 2nd Edition, Cambridge University Press, Cambridge, New York.
- PILOUK, M., 1996: Integrated Modelling for 3D GIS. – PhD Thesis, ITC Publ. Series No. 40, Enschede, The Netherlands.
- PILOUK, M. & TEMPFLI, K., 1993: An integrated DTM-GIS data structure: a relational approach. – In: Proceedings 11th Internat. Symp. on Computer Assisted Cartography (AUTOCARTO 11), Minneapolis, Minnesota, USA, 278–287.
- PLÜMER, L. & GRÖGER, G., 1997: Achieving Integrity in Geographic Information Systems – Maps and Nested Maps. – GeoInformatica 1 (4): 345–367.
- SCHNEIDER, B., 1998: Geomorphologisch plausible Rekonstruktion der digitalen Repräsentation von Geländeoberflächen aus Höhenliniendaten. – Geoprocessing Series Vol. 35, Dissertation, Universität Zürich.
- WORBOYS, M. F., 1995: GIS – A Computing Perspective, Taylor & Francis, London.

Anschriften der Verfasser:

Dipl.-Ing. ULRICH LENK, PgDipHS
 Institut für Kartographie und Geoinformatik
 Universität Hannover
 Appelstr. 9A, D-30167 Hannover
 Tel.: 0511-762-3589, Fax: 0511-762-2780
 e-mail: Ulrich.Lenk@ikg.uni-hannover.de

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. CHRISTIAN HEIPKE
 Institut für Photogrammetrie und GeoInformation,
 Universität Hannover
 Nienburger Str. 1, D-30167 Hannover
 Tel.: 0511-762-2482, Fax: 0511-762-2483

Manuskript eingereicht: Dezember 2001
 Angenommen: Dezember 2001