

# Semantisch korrekte Integration von Digitalem Gelände- und Landschaftsmodell - Verfahren und Ergebnisse

ANDREAS KOCH<sup>1</sup>

*Zusammenfassung: Digitale Landschaftsmodelle (DLM) und Digitale Geländemodelle (DGM) gehören in Deutschland zu den Basisdaten der Landesvermessungen der Länder. Die Integration beider Datensätze führt zu objektstrukturierten Geodaten mit Bezug zur dritten Dimension. Inkonsistenzen zwischen den Daten, verursacht durch Unterschiede in Modellierung und Genauigkeit, können zu einem semantisch inkorrekten Integrationsergebnis führen. So kann es vorkommen, dass Seeflächen kein konstantes Niveau besitzen und Straßen extreme Neigungen und Krümmungen in Fahrtrichtung und quer dazu aufweisen.*

*Dieser Beitrag beschreibt ein Verfahren, welches die semantische Korrektheit eines integrierten DGM-DLM-Datensatzes herstellt. In dem zweistufigen Verfahren werden in einem ersten Schritt die Datensätze auf der Basis einer Triangulation integriert. In einem zweiten Schritt werden Bedingungen formuliert, die die implizite Höheninformation von Objekten beschreiben. In einem Optimierungsprozess werden die Höhen des integrierten Datensatzes verändert, sodass die zuvor definierten Bedingungen eingehalten werden. Das Verfahren wird am Beispiel einer Straße erläutert, Ergebnisse mit synthetischen und realen Daten werden präsentiert.*

## 1 Einleitung

### 1.1 Motivation

Digitale Landschaftsmodelle (DLM) und Digitale Geländemodelle (DGM) gehören in Deutschland zu den Basisdaten der Landesvermessungen der Länder. Das ATKIS Basis-DLM beschreibt die Geländetopographie zweidimensional mit Hilfe von Objekten, die durch Punkte, Linien und Flächen repräsentiert werden. Demgegenüber stellt das ATKIS DGM 5 der Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen (LGN) eine 2,5dimensionale Beschreibung der Geländeoberfläche dar. Die Daten liegen in gitterförmiger Anordnung mit zusätzlichen Strukturinformationen vor. Beide Datensätze werden getrennt voneinander hergestellt. Während das DLM vor allem durch Digitalisierung von Orthophotos entsteht, wird bei der Erstellung des DGM hauptsächlich Laserscanning und Photogrammetrie eingesetzt.

Die Integration beider Datensätze führt zu objektstrukturierten Geodaten mit Bezug zur dritten Dimension. Inkonsistenzen zwischen den Daten, verursacht durch Unterschiede in Modellierung und Genauigkeit, können zu einem semantisch inkorrekten Ergebnis führen. So kann es vorkommen, dass Seeflächen kein konstantes Niveau besitzen und Straßen extreme Neigungen und Krümmungen in Fahrtrichtung und quer dazu aufweisen. Die Wiederherstellung der semantischen Korrektheit, d.h. die Beseitigung von Inkonsistenzen zwischen den Daten, ist daher von großer Bedeutung bei der gemeinsamen Verwendung dieser Daten.

Die Anwendungsbereiche semantisch korrekt integrierter Datensätze sind vielfältig. 2,5D Visualisierungen benötigen konsistente Daten und können wichtig bei Hochwassersimulationen und Katastrophenschutz sein. Auch die verbesserte Herstellung von Orthophotos in Bereichen von nicht modellierten Brückenbauwerken sei hier genannt. Neben den Visualisie-

---

<sup>1</sup> Dipl.-Ing. Andreas Koch, Institut für Photogrammetrie und GeoInformation, Universität Hannover, Nienburger Straße 1, 30167 Hannover, e-mail: koch@ipi.uni-hannover.de

rungen ist es möglich die durch die Herstellung der semantischen Korrektheit verursachten Veränderungen zur Verifikation der Basisdaten zu verwenden.

## 1.2 Stand der Forschung

Die Integration Digitaler Geländemodelle und zweidimensionaler GIS-Daten ist seit mehr als einem Jahrzehnt Gegenstand der Forschung. WEIBEL (1993), FRITSCH & PFANNENSTEIN (1992) und FRITSCH (1991) führen unterschiedliche Formen der Integration ein: Im Falle der *Höhenattributierung* erhält jeder Punkt des GIS-Datensatzes die Punkthöhe als Attribut. Die Nutzung von *Schnittstellen* ermöglicht die Interaktion zwischen DGM-Programm und GIS-System. Die Systeme sind entweder unabhängig voneinander oder DGM-Methoden sind in die Benutzeroberfläche des GIS-Systems integriert. Die *totale Integration* oder *Datenbankintegration* setzt ein einheitliches Datenmanagement innerhalb der Datenbank voraus. Die Geländedaten werden in der Datenbank zumeist in Form eines Triangular Irregular Network (TIN) gespeichert, wobei die Punkte nicht mit den Daten des GIS vermischt sind. Die Zusammenführung der Daten, die Integration, wurde z.B. von LENK (2001), KLÖTZER (1997) & PILOUK (1996) untersucht. Die Verfahren unterscheiden sich in der Reihenfolge des Einführens der 2D-GIS-Geometrie, die Größe der Veränderungen des originären DGM-TIN und die Anzahl Knoten nach Durchführung der Integration. Alle Verfahren haben gemeinsam, dass Inkonsistenzen zwischen den Datensätzen vernachlässigt werden und somit zu einem semantisch inkorrekten Ergebnis führen können. ROUSSEAU & BONIN (2003) beschäftigen sich mit der Integration von 2D linearen Daten (z.B. Straßen, Dämme, Böschungen) und Digitalen Geländemodellen. Dabei werden die linearen Objekte in 2,5dimensionale Flächen unter Verwendung von Höhenattributen des GIS-Datensatzes sowie der Höheninformation des DGM transformiert. Die semantische Korrektheit der Objekte wird überprüft, doch wird bei inkorrekten Ergebnissen die Korrektheit nicht wiederhergestellt. Ein neues DGM wird unter Verwendung der ursprünglichen DGM-Höhen und der 2,5D Objekte des GIS-Datensatzes berechnet.

## 2 Semantik in der Geländemodellierung

Die Objekte des ATKIS® Basis-DLM beschreiben die Geländetopographie zweidimensional mit Hilfe von Punkten, Linien und Flächen. Attribute, die die Größe, Form und Bedeutung der Objekte beschreiben, stellen den ergänzenden geometrischen und semantischen Teil der Objekte dar. So werden z.B. Straßen linienförmig modelliert, die Fahrbahnbreite und die Funktion der Straße (Bundesautobahn, Bundesstraße, usw.) sind Attribute dieses Objektes.

Nur wenige Objekte enthalten Attribute, die einen Bezug zur dritten Dimension haben. Brücken besitzen eine Objekthöhe, der als „Abstand zwischen dem tiefsten Punkt der Erdoberfläche bzw. der mittleren Wasserspiegelhöhe und dem senkrecht darüber liegenden Verkehrsweg“ definiert ist.

Obwohl ein Großteil der Objekte keinen Bezug zur dritten Dimension in Form von Attributen besitzt, ist es dennoch möglich, einen Bezug herzustellen, da einige Objekte implizit Höheninformation enthalten. Diese Objekte sind in Tab. 1 aufgeführt.

Die linke Spalte der Tab. 1 beinhaltet die Beschreibung der Höheninformation der Objekte. Generell kann zwischen drei Objektbeschreibungen unterschieden werden: Objekte, die durch horizontale Ebenen repräsentiert werden, aus zusammengesetzten Teilebenen bestehende Objekte und Objekte, die eine Höhenrelation zu anderen Objekten besitzen.

Straßen und Wege können je nach Gelände unterschiedliche Neigungen und Krümmungen in Fahrtrichtung und quer dazu aufweisen. Doch sind diese Werte erfahrungsgemäß begrenzt. Die Grenzwerte ergeben sich aus der Funktion der Straße. So können Ortsstraßen größere

Neigungen in Fahrtrichtung besitzen als Bundesautobahnen, da die Geschwindigkeit der Fahrzeuge innerhalb von Ortschaften geringer ist.

Beschreibung der Höheninformation	Objekt
Horizontale Ebene	Sportplatz, Rennbahn
Horizontale Ebene, ansteigendes angrenzendes Gelände	Hafen, Kanal, See, Schwimmbad
Zusammengesetzte Teilebenen, begrenzte Neigungen und Krümmungen in Fahrtrichtung	Straße, Weg
Zusammengesetzte Teilebenen, abfallendes Niveau in Fließrichtung, ansteigendes angrenzendes Gelände	Fluss
Höhenrelation zu anderen Objekten	Brücke, Unter- / Überführung

**Tab. 1: Objekte mit impliziter Höheninformation und deren Beschreibung**

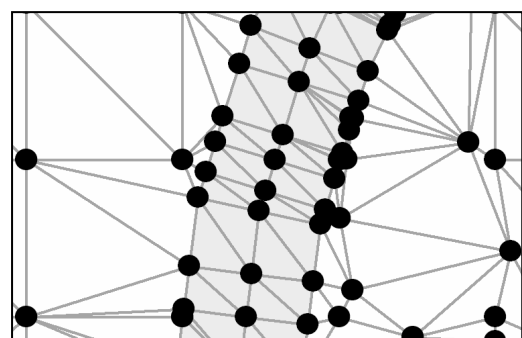
Der Bezug der Objekte zur dritten Dimension ergibt sich aus den Beschreibungen der Tab. 1. Der integrierte DLM-DGM-Datensatz ist semantisch korrekt, wenn die Beschreibung der Höheninformation korrekt wiedergegeben ist.

### 3 Das Verfahren

Das Verfahren ist zweistufig. In einem ersten Schritt werden die Datensätze integriert. Dabei wird auf bestehende Algorithmen zurückgegriffen, die die Integration auf der Basis einer Triangulation durchführen. In einem zweiten Schritt wird die semantische Korrektheit hergestellt. Hierbei werden die Beschreibungen aus Tab. 1 mathematisch in Form von Bedingungsgleichungen und –ungleichungen formuliert. Diese werden einem Optimierungsprozess zugeführt, der die Höhen des integrierten Datensatzes ändert, sodass die Bedingungen eingehalten werden. Nachfolgend werden beide Schritte des Verfahrens exemplarisch am Beispiel einer Straße näher erläutert.

#### 3.1 Integration von DGM und DLM auf der Basis einer Triangulation

Die originären Punkte des Objektes bilden die Mittelachse der Straße. Diese wird mit dem DGM-Dreiecksnetz (DGM-TIN) verschnitten, sodass neue Punkte, so genannte Steiner-Punkte, hinzukommen. Der Grund für die Verschneidung ist, dass an allen Schnittpunkten der Objektgeometrien mit dem Dreiecksnetz Neigungsänderungen auftreten können. Um zu einem späteren Zeitpunkt des Verfahrens eine bestmögliche Anpassung der Straße an das originäre DGM-TIN zu gewährleisten, ist somit eine Hinzunahme dieser Steiner-Punkte erforderlich. Die Mittelachse der Straße wird gepuffert, um aus dem linienförmig modellierten Objekt ein flächenhaftes Objekt zu erhalten. Die Punkte des äußeren Begrenzungs-polygons werden in das bestehende TIN integriert, sodass die Objektgeometrien Bestandteil des TIN sind. Innerhalb der Straße wird das



**Abb. 1: Integrationsergebnis**

bestehende Dreiecksnetz gelöscht und lokal neu trianguliert. Dieses ist erforderlich, um eine Beschreibung der Höheninformation in Form von Bedingungen zu ermöglichen. Abb. 1 stellt das Ergebnis der Integration von DGM und dem DLM-Objekt Straße (hell graue Fläche) dar.

## 3.2 Herstellung der semantischen Korrektheit

Die semantische Korrektheit wird mit Hilfe eines Optimierungsprozesses hergestellt. Hierbei werden die Höhen des integrierten Datensatzes verändert. Die Lagekoordinaten des DLM werden bis zu diesem Zeitpunkt als fehlerfrei angenommen und somit nicht innerhalb des Optimierungsprozesses geschätzt. Die Optimierung basiert auf einer Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen. Es werden so genannte Basisbeobachtungen sowie Bedingungsgleichungen, formuliert mit Hilfe von Pseudobeobachtungen, eingeführt. Bedingungsgleichungen erweitern das Modell, sodass die Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen in das Lineare Komplementaritätsproblem (linear complementary problem, LCP) überführt wird.

### 3.2.1 Basisbeobachtungen

Das Objekt Straße besteht im integrierten Datensatz aus Punkten, die sich auf der Mittelachse befinden (Abb. 2, dunkel grau dargestellt), Punkten des begrenzenden Objektpolygons (hell grau) sowie Punkten des ursprünglichen Digitalen Geländemodells, die sich innerhalb des Objektpolygons befinden (weiß mit schwarzem Rand). Die Höhen dieser Punkte sind unbekannte Parameter des Optimierungsprozesses. Als Basisbeobachtung wird eingeführt, dass die Differenz zwischen originärem und geschätztem Höhenwert verschwinden soll:

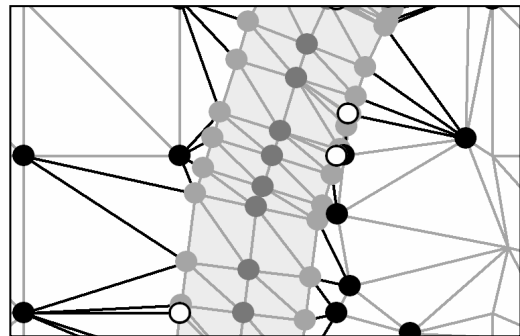


Abb. 2: Basisbeobachtungen, Objekt Straße

$$0 + \hat{v}_i = \hat{Z}_i - Z_i \quad \text{Gl. 1}$$

$Z_i$  ist die ursprüngliche und  $\hat{Z}_i$  die zu schätzende Höhe des Punkte  $P_i$ .  $\hat{v}_i$  ist die Verbesserung der Beobachtungsgleichung.

Des weiteren wird diese Basisbeobachtung eingeführt für Punkte, die sich in direkter Nachbarschaft zu diesem Objekt befinden (Abb. 2, schwarz dargestellte Punkte). Dieses ist der Fall, wenn mindestens eine Dreieckskante dieses Punktes als zweiten Punkt einen Punkt des begrenzenden Objektpolygons enthält.

Diese Dreieckskanten werden zugleich als weitere Basisbeobachtung eingeführt, um eine Verbindung zwischen dem angrenzenden Gelände und dem Objekt herzustellen (Abb. 2, scharze Linien):

$$Z_i - Z_j + \hat{v}_{ij} = \hat{Z}_i - \hat{Z}_j \quad \text{Gl. 2}$$

### 3.2.2 Bedingungsgleichungen und -ungleichungen

Straßen werden, wie in Abschnitt 2 beschrieben, aus geneigten Teilebenen zusammengesetzt. Die Mittelachse wird gepuffert, jeder Punkt der Mittelachse bildet mit den nach der Pufferung

neu hinzugekommenen Punkten der linken und rechten Seite ein Querprofil der Straße, wobei jeweils zwei Querprofile eine geneigte Teilebene aufspannen. Straßen besitzen begrenzte Neigungen und Neigungsdifferenzen. In Fahrtrichtung wird die begrenzte Neigung durch folgende Ungleichung ausgedrückt:

$$s_{Max} \geq \left| \frac{\hat{Z}_n - \hat{Z}_o}{D_{no}} \right| \quad \text{GI. 3}$$

Darin bezeichnen  $\hat{Z}_n$  und  $\hat{Z}_o$  die unbekanntenen zu schätzenden Höhen zweier in Fahrtrichtung aufeinander folgender Punkte.  $D_{no}$  ist die horizontale Entfernung zwischen den Punkten,  $s_{Max}$  bezeichnet die maximal zugelassene Neigung.

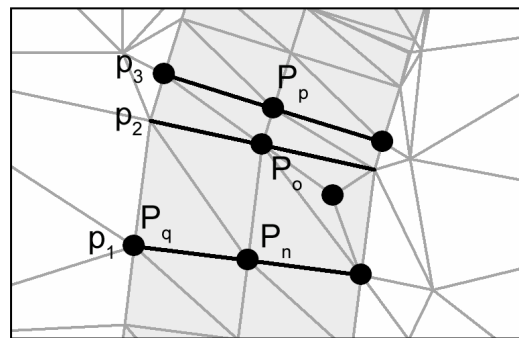
In Analogie zur Neigung der Straße in Fahrtrichtung wird eine maximale Neigungsdifferenz  $ds_{Max}$  zugelassen:

$$ds_{Max} \geq \left| \frac{\hat{Z}_n - \hat{Z}_o}{D_{no}} - \frac{\hat{Z}_o - \hat{Z}_p}{D_{op}} \right| \quad \text{GI. 4}$$

Der Einfachheit halber wird eine Querneigung der Straße vernachlässigt. D.h. Punkte eines Querprofils sollen die gleiche Höhen aufweisen, was durch folgende Pseudobeobachtung ausgedrückt wird:

$$0 + \hat{v}_{nq} = \hat{Z}_n - \hat{Z}_q \quad \text{GI. 5}$$

Hierin bezeichnen  $\hat{Z}_n$  und  $\hat{Z}_q$  Punkte der Mittelachse und der linken Seite bzw. der Mittelachse und der rechten Seite der Straße. Diese Annahme kann nur für die Punkte getroffen werden, die keine originären Punkte des Objektes sind. Grundsätzlich findet an den originären Objektpunkten ein Richtungswechsel in der Ebene statt. Dieser führt in Verbindung mit einem Neigungswechsel dazu, dass das Querprofil in diesem Punkt nicht horizontal sein kann.



**Abb. 3: Bedingungsgleichungen und -ungleichungen bei einer Straße**

Die Punkte, die zu zwei benachbarten Querprofilen gehören, sowie die Punkte zwischen diesen Profilen sollen auf einer Ebene liegen, die durch die Querprofile aufgespannt wird. Diese Bedingung wird durch folgende Beobachtungsgleichung ausgedrückt:

$$0 + \hat{v}_r = \hat{a}_0 + \hat{a}_1 X_r + \hat{a}_2 Y_r - \hat{Z}_r \quad \text{GI. 6}$$

Hierin bezeichnen  $X_r, Y_r$  die Lagekoordinaten eines Punktes  $P_r$ ,  $\hat{Z}_r$  ist die unbekanntene zu schätzende Höhe des Punktes,  $\hat{a}_0$ ,  $\hat{a}_1$  und  $\hat{a}_2$  sind die unbekanntenen Koeffizienten der geneigten Teilebene. Ein Sonderfall ergibt sich wiederum bei Punkten eines Querprofils, wel-

ches nicht horizontal ist. Die äußeren Punkte dieses Profils ergeben sich nach Durchführung des Optimierungsprozesses, indem die benachbarten Teilebenen verschnitten werden. Die Schnittgerade bildet das Querprofil, sodass die Punkte auf dieser Geraden liegen (siehe Abb. 3, Profil  $p_2$ ).

### 3.2.3 Optimierungsprozess

Die Basisbeobachtungen (Abschnitt 3.2.1) und die Bedingungsgleichungen und – ungleichungen (Abschnitt 3.2.2) werden einem Optimierungsprozess zugeführt, welcher auf einer Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen mit zusätzlichen Bedingungsungleichungen basiert. Das stochastische Modell der Beobachtungen (Basisbeobachtungen und Bedingungsgleichungen) besteht aus der Kovarianzmatrix, welche in die Gewichtsmatrix überführt werden kann. Unter der Annahme unkorrelierter Beobachtungen enthält die Diagonale der Gewichtsmatrix die reziproken Genauigkeiten der Beobachtungen. Die Einhaltung der Bedingungsgleichungen wird durch entsprechend hohe Gewichtung der jeweiligen Pseudo-beobachtung erreicht. Die Lösbarkeit des Optimierungsprozesses, d.h. die semantische Korrektheit des Integrationsergebnisses, hängt von der Wahl der Gewichte ab.

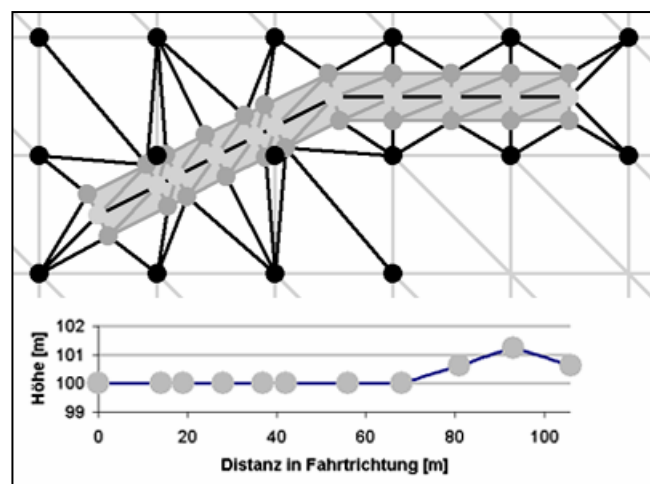
Der Algorithmus wird als Lineares Komplementaritätsproblem (LCP) formuliert, welches mit Hilfe des Lemke-Algorithmus (Lemke, 1968) gelöst wird. Weitere Details zum Algorithmus sind zu finden bei KOCH (2004), das LCP wird detailliert von LAWSON & HANSON (1995), FRITSCH (1985) und SCHAFFRIN (1981) erläutert.

## 4 Ergebnisse

### 4.1 Synthetische Daten

Die Untersuchungen basieren auf einem synthetischen DGM, welches nahezu eine konstante Höhe von 100 m aufweist. Nur eine Gitterlinie mit konstantem Rechtswert ragt aus der Ebene heraus, die Höhe beträgt hier 101,25 m. Die synthetische Straße stellt ein linienförmig modelliertes aus 3 Punkten bestehendes Objekt dar.

Im integrierten Datensatz besteht die Mittelachse der Straße aus 11 Punkten: 3 originäre Punkte sowie 8 durch Schnitt mit dem originären DGM-TIN sich ergebende Punkte. Die Straße wurde gepuffert, sodass das Umringspolygon der Straße aus 22 Punkten besteht, Steiner-Punkte kamen nicht hinzu. Abb. 4



**Abb. 4: Synthetischer Datensatz Straße, oben: Integrationsergebnis, unten: Längsprofil**

oben stellt den integrierten Datensatz dar. Die Punkte der Mittelachse der Straße sind hell grau dargestellt, die des Straßenrandes dunkel grau und die des benachbarten Geländes schwarz. Die Straße enthält 11 Querprofile und wird durch 10 Ebenen repräsentiert. Abb. 4 unten zeigt das Längsprofil, welches sich durch Höheninterpolation an den Positionen der 11 Punkte der Mittelachse ergibt. Der erste Straßenabschnitt von 0 bis etwa 65 m ist horizontal. Es folgt ein zweiter Abschnitt mit einer Steigung von 0,05. Die maximale Höhe beträgt 101,25 m, was dem Rücken des DGM entspricht. Im letzten Abschnitt beträgt die Steigung der Straße -0,05, die maximale Neigungsdifferenz ist 0,1.

Sind die Bedingungsungleichungen (Gl. 3, 4) nach der Integration von DGM und Straße nicht eingehalten, führt die Verwendung gleicher Gewichte für alle Beobachtungsgleichungen (Gl. 1, 2 und 5, 6) innerhalb des Optimierungsprozesses zu Veränderungen der Höhen der Punkte der Mittelachse, der Punkte des Umringspolygons sowie der Punkte außerhalb des Objektes. Die Bedingungsungleichungen werden nach Durchführung des Optimierungsprozesses eingehalten, doch sind nicht mehr alle Querprofile horizontal und die Punkte weisen Abstände von den Ebenen auf. Eine höhere Gewichtung von  $10^4$  der Gl. 1 für die Objektpunkte des Umringspolygons resultiert in eine ausschließliche Veränderung der Höhen der Mittelachse. Das benachbarte Gelände bleibt ebenfalls unverändert. Wird nur Gl. 1 für die Punkte außerhalb des Objektes höher gewichtet ( $10^4$ ), verändern sich die Höhen der Punkte der Mittelachse und die des Umringspolygons. Die Bedingungsungleichungen (Gl. 5, 6) werden auch hier nicht eingehalten.

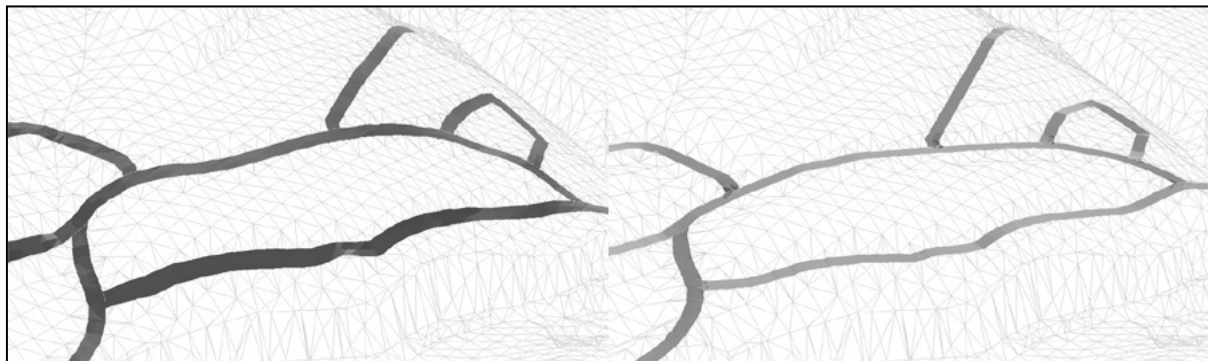
Erst eine höhere Gewichtung der Bedingungsungleichungen (Gl. 5, 6) führt zu einem semantisch korrekten Datensatz. Die Größe der Gewichte bestimmt die Größe der Veränderungen der Höhenkomponenten des integrierten Datensatzes sowie die Größe des beeinflussten Bereiches, d.h. die Größe des Gebietes, wo Höhenänderungen stattfinden. Bereits ein Gewicht von  $10^1$  für Gl. 5 und  $10^2$  für Gl. 6 führt zur Einhaltung der Bedingungen und somit zu einem semantisch korrekten Datensatz. Eine wesentlich höhere Gewichtung von  $10^5$  für beide Gleichungen führt zwar auch zur Einhaltung der Bedingungen, doch sind die Veränderungen und der beeinflusste Bereich wesentlich größer als zuvor. Zusätzlich werden dort Neigungen in Fahrtrichtung erzeugt, wo zuvor horizontales Gelände vorlag.

Demnach spielt die Gewichtswahl eine entscheidende Bedeutung bei der Herstellung der semantischen Korrektheit. Hier ist ein Kompromiss zu finden zwischen der Einhaltung der Bedingungen und der Größe der Veränderungen sowie der Größe des beeinflussten Gebietes.

## 4.2 Reale Daten

Als reale Datensätze wurden das ATKIS DGM 5 sowie Straßen des ATKIS Basis-DLM der Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen benutzt. Das DGM 5 besteht aus Punkten in gitterförmiger Anordnung bei einem Gitterabstand von 12,5 m. Zusätzlich stehen Strukturinformationen zur Verfügung. Die linienförmig modellierten Straßen des Basis-DLM wurden mit Hilfe des Attributs Fahrbahnbreite gepuffert. Abb. 5 links zeigt das Ergebnis der Integration ohne Berücksichtigung der Semantik der Straßen. Die Querneigungen der Straßen stimmen mit der mittleren Hangneigung des Geländes überein, d.h. die Querprofile der Straßen sind nicht horizontal. Die Neigungen und Krümmungen in Fahrtrichtung übersteigen mehrfach die maximal zugelassenen Werte  $s_{Max} = 0,05$  bzw.  $ds_{Max} = 0,01$ .

Die rechte Seite der Abb. 5 stellt das Ergebnis nach Wiederherstellung der semantischen Kor-



**Abb. 5: Integration von ATKIS DGM 5 und Basis-DLM, links: keine Berücksichtigung der Semantik, rechts: mit Wiederherstellung der semantischen Korrektheit**

rektheit dar. Zur Erzielung dieses Ergebnisses wurden 5226 Beobachtungen (Gl. 1, 2 und 5, 6) sowie 1336 Bedingungsungleichungen (Gl. 3, 4) formuliert. 2462 unbekannte Parameter (Höhenwerte und Koeffizienten der geneigten Schrägebenen) wurden geschätzt. Gleichungen 5 und 6 wurden mit  $10^4$  bzw.  $10^3$  gewichtet, um die Einhaltung der Bedingungen zu gewährleisten. Alle anderen Beobachtungsgleichungen erhielten das Gewicht 1. Die semantische Korrektheit ist nach Durchführung der Optimierung gewährleistet. Die maximal zulässigen Neigungen und Neigungsdifferenzen werden nicht überschritten, Abweichungen von den horizontalen Querprofilen und den geneigten Schrägebenen sind vernachlässigbar.

## 5 Literaturverzeichnis

- FRITSCH, D., 1985: Some Additional Information on the Capacity of the Linear Complementary Algorithm. In: E. Grafarend & F. Sanso, Hrsg., *Optimization and Design of Geodetic Networks*, Springer, Berlin, S. 169-184.
- FRITSCH, D., PFANNENSTEIN, A., 1992: Conceptual Models for Efficient DTM Integration into GIS. *Proceedings EGIS'92. Third European Conference and Exhibition on Geographical Information Systems*. München, S. 701-710.
- HEIPKE, C., 1986: Zum Vergleich von 2 Komplementaritäts-Algorithmen. Diplomarbeit der Technischen Universität München, nicht veröffentlicht.
- KLÖTZER, F., 1997: Integration von triangulierten digitalen Geländemodellen und Landkarten. Diplomarbeit des Instituts für Informatik, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, nicht veröffentlicht.
- KOCH, A., 2004: Semantically Correct 2.5D GIS Data – the Integration of DTM and Topographic Vector Data. *Proceedings SDH'04. 9<sup>th</sup> International Symposium on Spatial Data Handling*. Leicester, Großbritannien, angenommen.
- LAWSON, C. L., HANSON, R. J., 1995: *Solving Least Squares Problems*. Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia.
- LEMKE, C. E., 1968: On complementary pivot theory. In: G. B. Dantzig, A. F. Veinott, Hrsg., *Mathematics in the Decision Sciences*, Teil 1, S. 95-114.
- LENK, U., 2001: - 2.5D-GIS und Geobasisdaten - Integration von Höheninformation und Digitalen Situationsmodellen. *Wiss. Arb. Fachr. Verm. Universität Hannover Nr. 244 and DGK bei der Bayer. Akad. D. Wiss. Reihe C, Nr. 546*. Dissertation, Hannover.
- PILOUK, M., 1996: Integrated Modelling for 3D GIS. ITC Publication Series No. 40, Dissertation, Enschede, Niederlande.
- ROUSSEAU, F., BONIN, O., 2003: Towards a coherent integration of 2D linear data into a DTM. *Proceedings of the 21<sup>st</sup> International Cartographic Conference (ICC)*. S. 1936-1942, Durban, Südafrika.
- SCHAFFRIN, B., 1981: Ausgleichung mit Bedingungs-Ungleichungen. AVN, 6/1981, S. 227-238.
- WEIBEL, R., 1993: On the Integration of Digital Terrain and Surface Modeling into Geographic Information Systems. In: *Proceedings 11<sup>th</sup> International Symposium on Computer Assisted Cartography (AUTOCARTO 11)*. Minneapolis, Minnesota, USA, S. 257-266.

## Danksagung

Das diesem Beitrag zugrunde liegende Projekt wurde von dem Landesbetrieb Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen (LGN) gefördert. Auch die für die Untersuchungen verwendeten Daten sind freundlicherweise von der LGN zur Verfügung gestellt worden.