

Genauigkeitsanalyse Digitaler Geländemodelle für die Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)

Andreas Koch¹

Abstract: Vom 11. bis 23. Februar diesen Jahres umkreiste die amerikanische Raumfähre Endeavour unseren Planeten und erfasste dabei nahezu die gesamte Erdoberfläche mit Hilfe von Radarsensoren. Innovativ an dieser Mission war der erste Einsatz eines weltraumgestützten Single-Pass-Interferometers, d.h. zweier durch eine Basis von 60m Länge voneinander getrennter Antennen. Neben dem amerikanischen C-Band Antennensystem war das deutsch-italienische X-SAR System an Bord. Die aus den Messungen abgeleiteten Produkte sind Digitale Oberflächenmodelle, welche im Vergleich zu Geländemodellen vereinzelt auf der Vegetation oder auf Gebäuden liegende Punkte enthalten.

Innerhalb der Validierungsphase gilt es, die SRTM-Höhendaten mit Hilfe von Referenzdaten eines gut bekannten Testgebietes zu analysieren. Dieser Artikel befasst sich mit einem Verfahren, welches am Institut für Photogrammetrie und Ingenieurvermessungen der Universität Hannover entwickelt wurde. Es basiert auf der Ableitung von räumlichen Transformationsparametern, mit denen versucht wird, die SRTM-Daten bestmöglich auf die Referenzdaten einzupassen. Der Ansatz zur Bestimmung dieser Parameter ohne Verwendung von Passpunkten ist vergleichbar mit dem Verfahren der absoluten Orientierung eines photogrammetrischen Blockes mit Hilfe eines Digitalen Geländemodells. Die Transformationsparameter geben Hinweise auf potentiell vorhandene systematische Fehler, das Verfahren wird ein Teilergebnis der Genauigkeitsanalyse der SRTM-Daten sein.

1. Einleitung

Dreidimensionale Daten in Form von Digitalen Gelände- und Oberflächenmodellen haben in den letzten Jahren enorm an Bedeutung gewonnen. Gründe dafür sind zum einen die Entwicklung neuer Messverfahren, die es ermöglichen, diese Daten schnell, flächendeckend, relativ kostengünstig und mit hoher Genauigkeit zu erfassen. Zum anderen steigt der Bedarf an diesen Daten, weil die dritte Dimension vielen Anwendungen weitere Möglichkeiten eröffnet. Genannt seien hier geologische und hydrologische Fragestellungen, Kartenerstellung, Telekommunikation, Flugplanung und Navigation (SCHMULLIUS et al., 2000, HOUNAM & WERNER, 1999). Je nach Anwendung werden unterschiedliche Anforderungen an die Genauigkeit der Daten gestellt. Das heißt, die Kenntnis der Genauigkeit der Daten ist von erheblicher Bedeutung.

Zu den innovativen Messverfahren zählt neben dem Laser-Scanner-Verfahren das Interferometrische Synthetic Aperture Radar (InSAR). Dieses Verfahren wurde in den letzten Jahren vielfach vom Flugzeug, aber auch von Weltraumplattformen aus verwendet. Die SRTM Mission war dabei das erste Projekt, welches weltraumgestützt Single-Pass-Interferometrie einsetzte. Neben dem amerikanischen C-Band Antennensystem war das

¹ Andreas Koch, Institut für Photogrammetrie und Ingenieurvermessungen, Universität Hannover, Nienburger Straße 1, 30167 Hannover, Tel. ++49 511 762 5289, E-Mail: koch@ipi.uni-hannover.de

deutsch-italienische X-SAR System an Bord. Die erwartete Genauigkeit der X-SAR Digitalen Oberflächenmodelle beträgt etwa 20m in der Lage sowie 6 bis 8m in der Höhe.

Eine Möglichkeit, Qualitätsmaße der SRTM-Höhendaten abzuleiten, ist der Vergleich mit Referenzdaten eines sehr gut bekannten Testgebietes. Diese Daten können Digitale Geländemodelle sowie die Koordinaten Trigonometrischer Punkte sein (KLEUSBERG & KLAEDTKE, 1999). In diesem Artikel wird ein Verfahren beschrieben, welches durch Einpassung der SRTM-Höhendaten auf diese Referenzdaten versucht, räumliche Transformationsparameter abzuleiten (siehe auch KOCH & LOHMANN, 2000). Der entwickelte Algorithmus ähnelt dem Verfahren der absoluten Orientierung eines photogrammetrischen Blockes mit Hilfe eines Digitalen Geländemodells (EBNER & STRUNZ 1988). Das Verfahren, der mathematische Ansatz sowie die Anforderungen an das Gelände werden beschrieben (Kapitel 2), erste Ergebnisse (Kapitel 3) werden präsentiert. Da bis zu diesem Zeitpunkt keine SRTM Digitalen Oberflächenmodelle existieren, werden nur simulierte Ergebnisse vorgelegt. Weitere Anwendungsmöglichkeiten dieses Verfahrens sowie die Vorgehensweise zur Bewertung dieses Algorithmus werden dargelegt (Kapitel 4).

2. Verfahren zur Zuordnung Digitaler Geländemodelle

Systematische Fehler zwischen zwei Höhendatensätzen können durch die 7 Parameter einer räumlichen Ähnlichkeitstransformation beschrieben werden (Abbildung 1). Die Höhendatensätze sind dabei zum Beispiel in den drei Richtungen der Koordinatenachsen gegeneinander verschoben (Translationen), sie können um die Achsen gegeneinander verdreht sein (Rotationen) sowie sich maßstäblich voneinander unterscheiden.

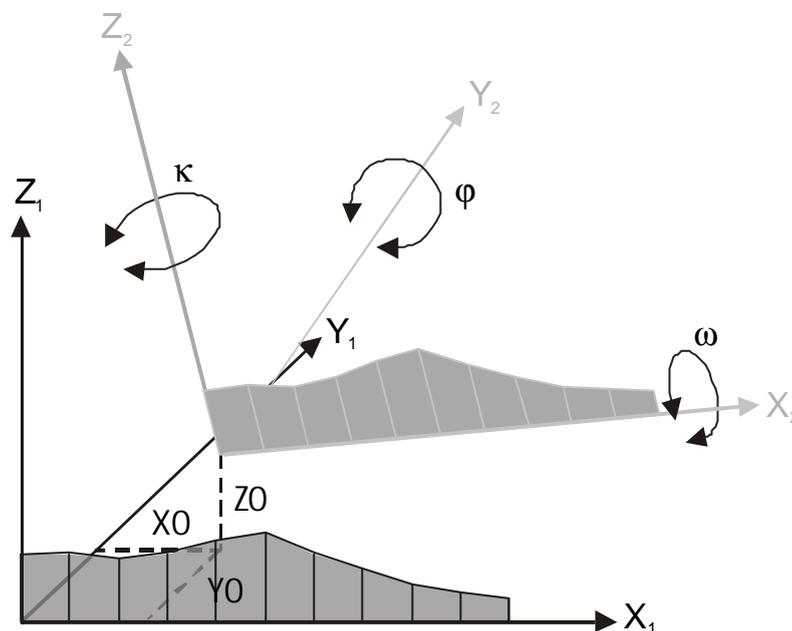


Abb. 1: Prinzip der räumlichen Ähnlichkeitstransformation (Maßstab nicht dargestellt)

Zur Ermittlung dieser Parameter ist es notwendig, Referenzdaten zu verwenden. Diese Daten können Digitale Geländemodelle oder die Koordinaten von Trigonometrischen Punkten sein. Die Referenzdaten sollten dabei eine bekannte Genauigkeit aufweisen, welche mindestens eine Größenordnung besser ist als die der zu analysierenden Daten.

2.1. Mathematisches Modell

Ein Digitales Oberflächen- oder Geländemodell wird beschrieben durch einzelne Punkte P_{ij} , die durch Koordinaten X_{ij} , Y_{ij} und Z_{ij} festgelegt sind. Im Allgemeinen beziehen sich die Koordinaten auf das Landeskoordinatensystem. In der Lage ist dieses häufig das Gauß-Krüger- oder das Universal Transverse Mercator System (UTM). Die Höhen sind zumeist ellipsoidische, orthometrische oder Normalhöhen. In lokal begrenzten Gebieten können diese Koordinaten als Werte eines kartesischen Koordinatensystems aufgefasst werden.

Die Punkte werden zu Vektoren zusammengefasst (Gleichung 1). Der Referenzdatensatz G_1 enthält n Punkte, die rasterförmig verteilt angeordnet sein können. G_2 besteht aus m Punkten, die die gleiche physische Oberfläche beschreiben wie G_1 . G_2 ist der zu untersuchende Datensatz.

$$\begin{aligned} G_1 &= \{ P_{11} \ P_{12} \ \dots \ P_{1i} \ \dots \ P_{1n} \} \\ G_2 &= \{ P_{21} \ P_{22} \ \dots \ P_{2j} \ \dots \ P_{2m} \} \end{aligned} \quad (1)$$

Es gilt nun, eine Funktion zu finden, die eine bestmögliche Einpassung beider Datensätze gewährleistet, und die als Ergebnis die oben erwähnten Parameter einer räumlichen Ähnlichkeitstransformation liefert. Diese Funktion kann durch die Forderung der Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen ausgedrückt werden.

$$\underline{v}^T \cdot \underline{P} \cdot \underline{v} \rightarrow \text{minimum} \quad (2)$$

\underline{v} ist der Vektor der Verbesserungen, \underline{P} ist die Gewichtsmatrix, die bei Einführung gleich genauer unkorrelierter Beobachtungen identisch ist mit der Einheitsmatrix. Die Herleitung der Transformation und der Verbesserungsgleichung wird nachfolgend erläutert.

2.1.1. Geometrische Transformation

Werden jegliche Fehleranteile in den Höhenwerten vernachlässigt, so sollte für jedes korrespondierende Paar von Höhenwerten folgende Gleichung erfüllt sein:

$$Z_{1i}(X_{1i}, Y_{1i}) = Z_{2i}(X_{2i}, Y_{2i}) \quad (3)$$

Aufgrund von systematischen Fehlereinflüssen können die durch die Datensätze repräsentierten Oberflächen gegeneinander verschoben und verdreht sein sowie sich maßstäblich voneinander unterscheiden. Infolgedessen wird eine räumliche Ähnlichkeitstransformation eingeführt, sodass aus Gleichung 3 folgt:

$$Z_{1i}(X_{1i}, Y_{1i}) = Z_0 + (1 + m) \cdot \underline{r}_3 \cdot \underline{X}_{2i} \quad (4)$$

mit

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} X_{1i} \\ Y_{1i} \end{pmatrix} &= \underline{X}_0 + (1 + m) \cdot \begin{pmatrix} \underline{r}_1 \\ \underline{r}_2 \end{pmatrix} \cdot \underline{X}_{2i} \\ &= \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \end{pmatrix} + (1 + m) \cdot \begin{pmatrix} \underline{r}_1 \\ \underline{r}_2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X_{2i} \\ Y_{2i} \\ Z_{2i} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

Die rechte Seite der Gleichung 4 stellt die Beobachtungsgleichung dar. Die Höhen Z_{2i} werden mit Hilfe der zu bestimmenden Parameter in das Koordinatensystem des Referenzdatensatzes transformiert. Z_0 ist die zu bestimmende Translation in der Höhe, $(1+m)$ ist der Maßstab. Der Vektor \underline{r}_3 enthält die Rotationen \underline{w} , \underline{j} und \underline{k} , er stimmt mit der dritten Zeile der Rotationsmatrix \underline{R} der räumlichen Ähnlichkeitstransformation überein.

Z_{1i} auf der linken Seite der Gleichung 4 ist der korrespondierende Höhenwert des Referenzdatensatzes mit den Lagekoordinaten X_{1i}, Y_{1i} . Die Lage wird mit Hilfe der zu bestimmenden Parameter durch Transformation der Koordinaten X_{2i}, Y_{2i}, Z_{2i} des zu untersuchenden Datensatzes 2 bestimmt (siehe Gleichung 5). Die Vektoren \underline{r}_1 und \underline{r}_2 bestehen aus den ersten zwei Zeilen der Rotationsmatrix der räumlichen Ähnlichkeitstransformation. Da die resultierenden Lagekoordinaten X_{1i}, Y_{1i} in der Regel keine natürlichen Zahlen sind, muss der Höhenwert $Z_{1i}(X_{1i}, Y_{1i})$ aus den benachbarten Höhenwerten interpoliert werden, z.B. mit Hilfe einer bilinearen Interpolation.

2.1.2. Verbesserungsgleichung

Die Gleichungen 4 und 5 lassen sich als Verbesserungsgleichung einer Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen formulieren:

$$v_i(X_{2i}, Y_{2i}) = Z_{1i}(X_0 + (1+m)\underline{r}_1 \underline{X}_{2i}, Y_0 + (1+m)\underline{r}_2 \underline{X}_{2i}) - (Z_0 + (1+m)\underline{r}_3 \underline{X}_{2i}) \quad (6)$$

Diese Gleichung stellt die Ausgangsgleichung dar, um die unbekannt Parameter der räumlichen Ähnlichkeitstransformation zu berechnen. Aufgrund der Nichtlinearität von Gleichung 6 muss diese in eine Taylorreihe entwickelt werden. Die Unbekannten werden mit Hilfe von Näherungswerten iterativ bestimmt. Die Linearisierung der Verbesserungsgleichung (Gleichung 6) führt in vektorieller Schreibweise zu:

$$\underline{v} = \underline{A} \cdot \underline{\hat{x}} - \underline{l} \quad (7)$$

Der Vektor \underline{l} enthält die gekürzten Beobachtungen. Die Modellmatrix \underline{A} enthält die partiellen Ableitungen der Verbesserungsgleichungen nach den unbekannt Transformationsparametern. Als Näherungswerte für die Unbekannten werden dabei die Parameter der identischen Transformation gewählt.

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_i}{\partial X_0} &= \frac{\partial Z_{1i}}{\partial X_{1i}} \cdot \frac{\partial X_{1i}}{\partial X_0} \\ \frac{\partial v_i}{\partial Y_0} &= \frac{\partial Z_{1i}}{\partial Y_{1i}} \cdot \frac{\partial Y_{1i}}{\partial Y_0} \\ \frac{\partial v_i}{\partial Z_0} &= -1 \\ \frac{\partial v_i}{\partial \underline{w}} &= \frac{\partial Z_{1i}}{\partial Y_{1i}} \cdot \frac{\partial Y_{1i}}{\partial \underline{w}} - \frac{\partial Z'_{2i}}{\partial \underline{w}} \\ \frac{\partial v_i}{\partial \underline{j}} &= \left(\frac{\partial Z_{1i}}{\partial X_{1i}} \cdot \frac{\partial X_{1i}}{\partial \underline{j}} + \frac{\partial Z_{1i}}{\partial Y_{1i}} \cdot \frac{\partial Y_{1i}}{\partial \underline{j}} \right) - \frac{\partial Z'_{2i}}{\partial \underline{j}} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\frac{\partial v_i}{\partial \mathbf{k}} = \left(\frac{\partial Z_{li}}{\partial X_{li}} \cdot \frac{\partial X_{li}}{\partial \mathbf{k}} + \frac{\partial Z_{li}}{\partial Y_{li}} \cdot \frac{\partial Y_{li}}{\partial \mathbf{k}} \right) \cdot \frac{\partial Z'_{2i}}{\partial \mathbf{k}}$$

$$\frac{\partial v_i}{\partial m} = \left(\frac{\partial Z_{li}}{\partial X_{li}} \cdot \frac{\partial X_{li}}{\partial m} + \frac{\partial Z_{li}}{\partial Y_{li}} \cdot \frac{\partial Y_{li}}{\partial m} \right) \cdot \frac{\partial Z'_{2i}}{\partial m}$$

$Z'_{2i} = ZO + (l + m) \cdot r_3 \cdot X_{2i}$ ist der transformierte Höhenwert.

Die Unbekannten werden durch Auflösung des Normalgleichungssystems ermittelt, sie ergeben sich bei Einführung gleich genauer Beobachtungen zu:

$$\hat{\mathbf{X}} = \mathbf{X}_0 + \hat{\mathbf{x}} \quad (9)$$

mit

$$\hat{\mathbf{x}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \cdot (\mathbf{A}^T \mathbf{l}) \quad (10)$$

Der Vektor \mathbf{X}_0 enthält die Näherungswerte der Unbekannten. Das Verfahren arbeitet iterativ. Da die Beobachtung eine Funktion der Unbekannten ist, verändert sich diese von Iteration zu Iteration.

Wird als einzige Unbekannte die Translation ZO eingeführt, so führt das Verfahren zu einem Sonderfall. Der errechnete Wert ZO ist identisch mit dem Mittelwert der Höhendifferenzen. Die Standardabweichung der Gewichtseinheit stimmt mit der Standardabweichung der Höhendifferenzen überein (Gleichung 11).

$$s_0 = \sqrt{\frac{\mathbf{v}^T \mathbf{v}}{n - u}} = s_{\Delta Z} \quad (11)$$

2.2. Anforderungen an das Gelände

Die Bestimmbarkeit der Transformationsparameter des beschriebenen Verfahrens ist abhängig von dem Gelände, welches durch die Höhendaten repräsentiert wird, sowie von den Höhendaten selbst. Das Gelände wird charakterisiert durch örtliche Höhendifferenzen, Neigungen und deren Orientierung. Die Höhendaten besitzen unterschiedliche Punktabstände in der Lage und enthalten in einigen Fällen Informationen über Geländebruchkanten oder ähnliches. Das bedeutet, dass durch die häufig zufällige Anordnung der Punkte markante Höheninformationen in den Datensätzen nicht bzw. nur in einem der Datensätze enthalten sein können, sodass eine Zuordnung der korrespondierenden Punkte erschwert wird.

Handelt es sich ausschließlich um flaches Gelände (Abbildung 2 oben), das heißt beschreiben die Datensätze nahezu eine Ebene, so ist es nicht möglich, Translationen in der Lage sowie einen Maßstab zu bestimmen. Die Datensätze können gegeneinander verschoben werden, nur die Drehwinkel \mathbf{w} und \mathbf{j} um die Achsen X und Y sowie die Translation ZO können bestimmt werden.

Sind Höhendifferenzen vorhanden und verlaufen diese hauptsächlich in einer Richtung (Abbildung 2 Mitte), so kann zusätzlich der Drehwinkel k ermittelt werden. Eine Lageverschiebung ist nur senkrecht zu der Richtung der verlaufenden Geländeneigungen errechenbar. Auch ein Maßstabsfaktor m kann nicht bestimmt werden.

Erst das Vorhandensein von Höhendifferenzen in allen Richtungen ermöglicht die Bestimmung von 7 Parametern (Abbildung 2 unten).

Generell kann gesagt werden, dass größere Höhenunterschiede sowie in alle Richtungen verlaufende Neigungen die Bestimmung der Parameter vereinfachen.

Erschwert wird die Zuordnung durch lokale systematische Fehler. Ursache dieser Fehler können vorhandene Vegetation, Gebäude oder andere Objekte sein. Auch das Rauschen der Höhendatensätze macht eine Zuordnung der Daten schwieriger, wobei die Glättung der verrauschten Daten Abhilfe schaffen kann.

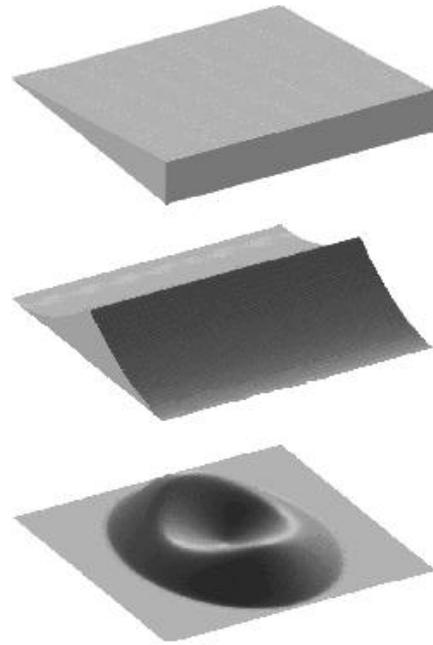


Abb. 2: Geländebeispiele; oben: Ebene, Mitte: in eine Richtung verlaufende Neigungen, unten: Neigungen in alle Richtungen

3. Erste Ergebnisse mit simulierten Daten

Die ersten Ergebnisse wurden mit Hilfe eines Testdatensatzes der Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen (LGN Hannover) simuliert. Bei den Daten handelt es sich um einen Ausschnitt des Digitalen Geländemodells DGM50. Dieses DGM steht neben anderen Höheninformationen für die am Institut für Photogrammetrie und Ingenieurvermessungen der Universität Hannover durchzuführende Validierung der SRTM-Daten zur Verfügung. Das Gebiet mit einer Fläche von $10 \times 10 \text{ km}^2$ beinhaltet recht große Geländeneigungen und befindet sich südlich von Hannover. Der maximale Höhenunterschied beträgt 315 m. Der Datensatz besteht aus etwa 40.000 Punkten (Abbildung 3), die Rasterweite beträgt 50 m.

Aus dem Datensatz wurden Testdaten erzeugt, die um 1000 m in allen drei Koordinatenrichtungen verschoben und um $2,5^\circ$ um die Achsen gedreht sind sowie sich maßstäblich um 1,00001 vom Referenzdatensatz unterscheiden. Diese Werte übersteigen ein Vielfaches der erwarteten systematischen Fehler der Digitalen Oberflächenmodelle der Shuttle Radar Topography Mission. Tabelle 1 enthält die Ergebnisse verschiedener Simulationen. Die erste Spalte enthält die Standardabweichung der simulierten Daten, d.h. die simulierten zu analysierenden Daten wurden zusätzlich unterschiedlich stark verrauscht. Die zweite Spalte enthält die Anzahl benötigter Iterationen, welche der Algorithmus zur Erreichung des Abbruchkriteriums benötigt. Als Abbruchbedingung wurde die Konstanz der zu bestimmenden Transformationsparameter von Iteration zu Iteration eingeführt. 1 cm für die Translationen, $0,001^\circ$ für die Rotationen und 0,0001 ppm für den Maßstab mussten unterschritten werden.

Datensatz σ [m]	Anzahl Iterationen	Schlussabweichung		
		X_0, Y_0, Z_0 [m]	w, j, k [mgon]	m [ppm]
0	11	0.00	0.0	0,00
1	14	0.01-0.12	0.0-0.3	0,02
2	14	0.04-0.11	0.0-1.5	0,00
3	13	0.00-0.21	0.3-2.2	0,01
5	23	0.10-0.33	0.3-4.3	0,00
8	50	0.15-0.64	0.6-6.8	0,02

Tabelle 1: Konvergenzverhalten bei unterschiedlich verrauschten Datensätzen (Parameter des Testdatensatzes: $X_0=Y_0=Z_0=1.000\text{m}$, $w=j=k=2,5^\circ$, $(1+m)=1,00001$)

Die Ergebnisse zeigen, dass bei nicht verrauschten Daten ($\sigma=0$) auch bei sehr großen systematischen Fehlern die Bestimmung der Parameter schnell erreicht wird. Die Abweichungen zu den korrekten Parametern sind Null. Bei zunehmendem Rauschen erhöht sich die Anzahl benötigter Iterationen, die ermittelten Werte weichen um geringe Beträge von den korrekten Werten ab. Auch bei einer Standardabweichung von 8 m, was für die SRTM Höhendaten durchaus als realistisch betrachtet werden kann, werden die Werte gut approximiert. Die Schlussabweichungen betragen 15 bis 64 cm in der Lage sowie etwa einen halben Meter in der Höhe, was durch die Schlussabweichung von 0.6 bis 6.8 mgon in der Rotation hervorgerufen wird.

Weitere Untersuchungen zeigten, dass auch bei noch schlechteren Näherungswerten die korrekten Werte ermittelt werden können. Bei alleiniger Betrachtung von Translationen in X und Y führten selbst Näherungswerte von 2.000m, d.h. ein 40faches der Rasterweite, zum richtigen Ergebnis. Die Ermittlung der Translation in der Höhe ist sehr unkritisch, da diese nur linear in die Modellmatrix eingeht.

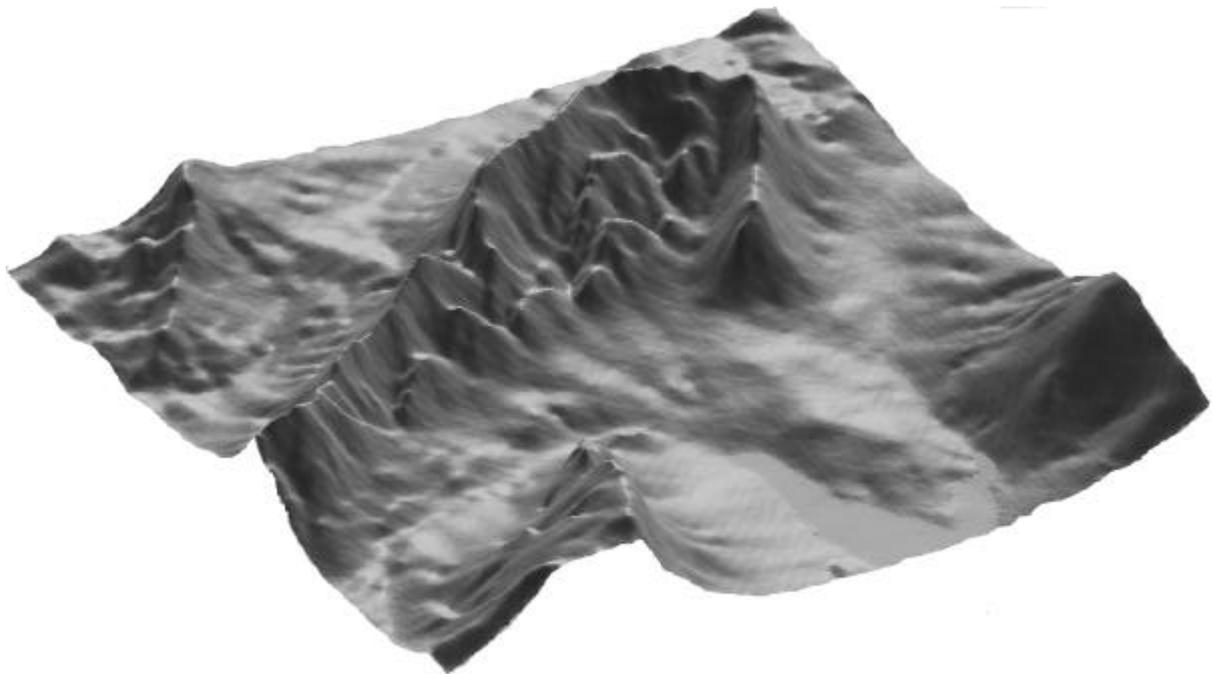


Abb. 3: Testgebiet südlich von Hannover, 5fach überhöht dargestellt

4. Ausblick

Die Problematik, zwei Digitale Höhendatensätze bestmöglich aufeinander einzupassen und Transformationsparameter abzuleiten, ist nicht nur bei Genauigkeitsanalysen von Interesse. Generell kommt dieses Verfahren zum Tragen, wenn Höhendaten unterschiedlicher Herkunft zu kombinieren sind. Historische und aktuell erhobene Daten sollen zum Beispiel miteinander fusioniert werden, wobei eventuell unterschiedliche Sensoren eingesetzt werden (SCHENK et al, 2000). Eine weitere Anwendungsmöglichkeit ist die Einpassung unterschiedlicher DGM Streifen, d.h. die flugstreifenweise Einpassung aufgenommener Geländedaten.

Hinsichtlich der Verwendung und Anwendbarkeit des Verfahrens sind weitergehende Untersuchungen anzustellen. Das Konvergenzverhalten hinsichtlich der Güte der Näherungswerte ist noch detaillierter zu untersuchen. Auch die weitere Untersuchung mit simulierten verrauschten und lokal systematisch beeinflussten Daten ist durchzuführen. Die Abhängigkeit der Bestimmbarkeit der Transformationsparameter von dem Gelände, der Einfluss unterschiedlicher Auflösungen sowie die Anwendbarkeit des Verfahrens für weitere Fragestellungen in zukünftig zu bewerten. Voraussichtlich Ende 2001 werden die SRTM Digitalen Höhenmodelle zur Verfügung stehen, sodass der Algorithmus dann mit realen Datensätzen zum Einsatz kommt, doch sollen zuvor auch andere praktische Daten zur Anwendung kommen.

5. Literaturverzeichnis

- EBNER, H. & STRUNZ, G. (1988): Combined Point Determination using Digital Terrain Models as Control Information. Veröffentlicht in Proceedings of IAPRS, Vol. XXVII, Part B11, S. 578-587, Kyoto.
- HOUNAM, D. & WERNER, M. (1999): The Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). Veröffentlicht in Proceedings of ISPRS workshop "Sensors and Mapping from Space 1999", auf CD, Institut für Photogrammetrie und Ingenieurvermessungen, Universität Hannover.
- KLEUSBERG, A. & KLAEDTKE, H.-G. (1999): Accuracy assessment of a digital height model derived from airborne synthetic aperture radar measurements. Herausgeber: Dieter Fritsch, Photogrammetrische Woche '99, Wichmann Verlag, S. 139-143, Stuttgart.
- KOCH, A. & LOHMANN, P. (2000): Quality Assessment and Validation of Digital Surface Models derived from the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). Veröffentlicht in Proceedings of IAPRS, Vol. XXXIII, Amsterdam.
- SCHENK, T., KRUPNIK, A. & POSTOLOV, Y. (2000): Comparative study of Surface Matching Algorithms. Veröffentlicht in Proceedings of IAPRS, Vol. XXXIII, Part B4, S. 518-524, Amsterdam.
- SCHMULLIUS, C., FLÜGEL, W.-A., FROTSCHER, K., HOCHSCHILD, V. & MÜSCHEN, B. (2000): The Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) and Applications in Europe, Africa and Siberia. Photogrammetrie • Fernerkundung • Geoinformation, Heft 5/2000, S. 361-366.