

Bewertung von SRTM Digitalen Geländemodellen – Methodik und Ergebnisse

ANDREAS KOCH, CHRISTIAN HEIPKE & PETER LOHMANN, Hannover

Zusammenfassung: Im Februar 2000 startete die erste weltraumgestützte Single-Pass-Interferometrie Mission – die Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). Das Ziel dieser Mission war es, einen homogenen Höhendatensatz der Erde mit einer Gitterweite von einer Bogensekunde zu erstellen. Antennen zweier unterschiedlicher Wellenlängen wurden benutzt: Neben dem Amerikanischen SIR-C war das Deutsch/Italienische X-SAR System an Bord.

Dieser Artikel befasst sich mit der Bewertung der interferometrischen Geländehöhendaten, welche mit Hilfe des X-SAR Systems abgeleitet wurden. Diese sogenannten ITED-2 Daten wurden mit Referenzdaten höherer Qualität in einem sehr gut bekannten Testgebiet im Süden von Hannover verglichen. Das verwendete Verfahren ähnelt dem Verfahren der Bildzuordnung nach kleinsten Quadraten und basiert auf einer räumlichen Ähnlichkeitstransformation ohne Verwendung von Passpunkten. Der Algorithmus transformiert die SRTM Daten auf die Referenzdaten und berechnet dabei die sieben unbekannt Parameter, welche horizontale und vertikale Verschiebungen, Rotationen und einen Maßstabsunterschied in Bezug zum Referenzdatensatz beschreiben. Die Transformationsparameter deuten auf potentiell vorhandene systematische Fehler hin.

Der systematische Höhenfehler der SRTM ITED-2 Daten im Untersuchungsgebiet beläuft sich auf +2,3 m, die vertikale Standardabweichung beträgt im offenen Gelände $\pm 3,3$ m nachdem die räumliche Ähnlichkeitstransformation angewendet wurde. Es wurden maximale horizontale Verschiebungen von 4–6 m ermittelt, was nur 20–25% der ITED-2 Gitterweite darstellt.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die ermittelten Ergebnisse besser sind als die vor der Mission prognostizierten. Folglich ist die Qualität der SRTM ITED-2 Daten mehr als zufriedenstellend.

Summary: *Assessment of SRTM Digital Terrain Models – Methodology and Results.* In February 2000 the first spaceborne Single-Pass-Interferometry mission started – the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). The goal of the mission was the generation of a homogeneous elevation data set of the earth with a grid width of one arc-sec. Antennas of two different wavelength were used: Beside the American SIR-C the German/Italian X-SAR system was on board.

This paper deals with the assessment of the interferometric terrain elevation data produced by the X-SAR system. These so-called ITED-2 data were compared with reference data of higher quality in a well-known test site in the South of Hannover. The used method is comparable to the Least Squares Image Matching method and is based on a spatial similarity transformation without using any control point information. The algorithm transforms the SRTM data onto the reference data and calculates the seven unknown parameters which describe horizontal and vertical shifts, rotations and a scale difference in respect of the reference data set. The transformation parameters lead to potentially existing systematic errors.

The systematic height error of the SRTM ITED-2 data inside the test site is +2,3 m, the vertical standard deviation in the open landscape is $\pm 3,3$ m after applying the spatial similarity transformation. Maximum horizontal shifts of 4–6 m were obtained, which correspond to just 20–25% of the grid width of the ITED-2 data.

Summarized it can be stated that the obtained results are better than the predefined before the mission started. Consequently the quality of the SRTM ITED-2 data is satisfying.

1 Einleitung

SAR-Interferometrie (InSAR) ermöglicht die Herstellung eines dreidimensionalen Abbildes der Erdoberfläche. Folglich ist das Hauptprodukt ein Digitales Geländemodell (DGM) oder im Falle von kurzwelligen Systemen ein Digitales Oberflächenmodell (DOM).

Die SRTM Mission (WERNER 2001, ROSEN et al. 2001a) war die erste Mission, welche Single-Pass-Interferometrie welt-raumgestützt einsetzte. Die Hauptantenne des Systems befand sich dabei innerhalb der Ladebucht des Space Shuttle Endeavour, wobei diese Mikrowellenimpulse ausgesendet und empfangen hat. Die Außen- oder Slave-Antenne war am Ende eines 60 m langen ausfahrbaren Mastes befestigt und operierte als reine Empfangsantenne. Der Mast realisierte die interferometrische Basislinie. Zwei unterschiedliche Wellenlängen wurden eingesetzt: Das Amerikanische C-Band System operierte mit einer Wellenlänge von $\lambda = 6,0$ cm, die Wellenlänge des Deutsch/Italienischen X-Band Systems betrug $\lambda = 3,1$ cm. Um globale Abdeckung zwischen 60° nördlicher und 56° südlicher Breite zu erhalten, flog das Shuttle bei einer Flughöhe von 233 km und einer Inklination von 57° . Das C-Band Interferometer operierte in dem sogenannten ScanSAR Modus (BAMLER 1999). Damit war es möglich, 225 km breite Streifen aufzuzeichnen und somit die komplette Erdoberfläche abzudecken.

Die X-Band Antenne operierte bei einem festen Depressionswinkel von 38° , die Streifenbreite betrug 50 km. Der Vorteil des X-Bandes im Vergleich zum C-Band System ist die höhere relative vertikale Genauigkeit, welche durch die kürzere Wellenlänge erreicht wird. Der Nachteil des X-Band Systems ist die nicht gegebene globale Abdeckung. Lücken befinden sich zwischen den Streifen, welche mit größer werdender geographischer Breite kleiner werden.

Das Ziel des Projektes am Institut für Photogrammetrie und GeoInformation (IPI) der Universität Hannover war die Bewertung der Qualität der SRTM X-SAR

Daten. Diese wurde mit Hilfe eines Vergleiches mit Referenzdaten höherer Genauigkeit innerhalb eines sehr gut bekannten Testgebietes untersucht.

Kapitel 2 beschreibt den Algorithmus, der für die Bewertung der SRTM X-Band Daten verwendet wurde. Die Methode basiert auf einer räumlichen Ähnlichkeitstransformation ohne Verwendung identischer Punkte. Einen Überblick über das Testgebiet und die benutzten Referenzdaten wird nachfolgend vorgestellt (Kapitel 3) und die Ergebnisse der Validierung werden in Kapitel 4 und 5 beschrieben. Der Artikel schließt mit einer kurzen Zusammenfassung. Ähnliche Untersuchungen wurden z.B. von KLEUSBERG & KLAEDTKE (1999) für flugzeuggestützte InSAR Daten und von ROSEN et al. (2001b) für SRTM C-Band Daten durchgeführt.

2 Zuordnung Digitaler Geländemodelle – 3D Least Squares Matching

Der entwickelte Algorithmus (KOCH & HEIPKE 2001) stellt eine Erweiterung des bekannten Verfahrens zur Digitalen Bildzuordnung nach kleinsten Quadraten dar (Least Squares Matching). Beim Least Squares Matching wird eine Referenzmatrix mit Hilfe einer geometrischen und radiometrischen Transformation auf die Suchmatrix abgebildet. Das hier vorgestellte Verfahren, auch 3D Least Squares Matching genannt, basiert anstelle der ebenen Affin- und der radiometrischen Transformation auf einer räumlichen Ähnlichkeitstransformation. Das Verfahren ist ebenfalls vergleichbar mit der Verwendung eines DGM zur absoluten Orientierung eines photogrammetrischen Blockes (EBNER & STRUNZ 1988). Ein ähnlicher Algorithmus wurde von SCHENK et al. (2000) entwickelt.

Die sieben Parameter der räumlichen Ähnlichkeitstransformation beschreiben systematische Abweichungen der SRTM Höhendaten innerhalb des Untersuchungsgebietes in Bezug zum Referenzdatensatz. Restfehler nach Durchführung der Trans-

formation können als lokale systematische oder zufällige Fehler interpretiert werden.

2.1 Mathematisches Modell

Einzelne Punkte $P(X, Y, Z)$ mögen Höheninformationen eines bestimmten Gebietes enthalten.

Die Punkte können zu Vektoren zusammengefasst werden:

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

Der Referenzdatensatz G_1 enthält n regelmäßig oder unregelmäßig verteilte Punkte. G_2 enthält m Punkte, welche die gleiche physische Oberfläche beschreiben wie G_1 . G_2 ist der zu untersuchende Datensatz.

Bei Vernachlässigung etwaiger zufälliger und systematischer Fehler wird folgende Gleichung erfüllt:

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

Systematische Fehler können dazu führen, dass beide Datensätze gegeneinander verschoben, um die Koordinatenachsen gedreht sind und/oder unterschiedliche Maßstabsfaktoren besitzen. Folglich wird eine räumliche Ähnlichkeitstransformation eingeführt:

$$Z_{1i}(X_{1i}, Y_{1i}) = Z_0 + (1 + m) \cdot r_3 \cdot \underline{X}_{2i} \quad (3)$$

mit

$$\begin{pmatrix} X_{1i} \\ Y_{1i} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \end{pmatrix} + (1 + m) \cdot \begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \end{pmatrix} \cdot \underline{X}_{2i} \quad (4)$$

$$\underline{R}^T = (r_1 \ r_2 \ r_3)$$

$$\underline{X}_{2i}^T = (X_{2i} \ Y_{2i} \ Z_{2i})$$

Die Punkte $P_{2i}(X_{2i}, Y_{2i}, Z_{2i})$ werden mit Hilfe der sieben Parameter der räumlichen Ähnlichkeitstransformation in das Koordinatensystem der Referenzdaten transformiert. Z_0 ist die Translation in der Höhe, $(1 + m)$ ist der Maßstab. Der Vektor r_3 enthält die Rotationen ω , φ und κ , er repräsentiert die dritte Zeile der Rotationsmatrix \underline{R} der räumlichen Ähnlichkeitstransformation.

Das Zentrum der Rotation ist der Schwerpunkt des Untersuchungsgebietes.

Z_{1i} auf der linken Seite der Gleichung (3) ist der korrespondierende Höhenwert des Referenzdatensatzes mit den Lagekoordinaten X_{1i} , Y_{1i} . X_{1i} und Y_{1i} werden mit Hilfe der Gleichung (4) durch Transformation der Koordinaten X_{2i} , Y_{2i} , Z_{2i} des zu untersuchenden Datensatzes bestimmt. Die Vektoren r_1 und r_2 repräsentieren die ersten zwei Zeilen der Rotationsmatrix \underline{R} . X_0 und Y_0 sind die horizontalen Translationen. Um Z_{1i} zu bestimmen, muss gewöhnlich interpoliert werden, da die Lagekoordinaten X_{1i} und Y_{1i} im Allgemeinen nicht mit den Punkten des Referenzdatensatzes zusammenfallen.

2.2 Ausgleichung nach kleinsten Quadraten

Die Gleichungen (3) und (4) bilden die Basis einer Ausgleichung nach kleinsten Quadraten. Es werden die Höhendifferenzen zwischen den Datensätzen als abgeleitete Beobachtungen eingeführt und die Parameter der räumlichen Ähnlichkeitstransformation als Unbekannte berücksichtigt. Die Beobachtungen werden als unabhängig voneinander angenommen und besitzen die gleiche Genauigkeit, wodurch sich eine Einheitsmatrix als Kovarianzmatrix der Beobachtungen ergibt. Gleichungen (3) und (4) können dann als Beobachtungsgleichungen formuliert werden, wobei für jeden Höhenwert Z_{2i} eine Gleichung aufzustellen ist:

$$\begin{aligned} v_i(Z_{2i}) &= \\ Z_{1i}(X_0 + (1 + m)r_1 X_{2i}, Y_0 + \\ &+ (1 + m)r_2 X_{2i}) - (Z_0 + (1 + m)r_3 X_{2i}) \end{aligned} \quad (5)$$

Die Gleichung ist die fundamentale Gleichung zur Berechnung der unbekannt Parameter der räumlichen Ähnlichkeitstransformation. Aufgrund der nicht gegebenen Linearität von Gleichung (5) ist sie in eine Taylorreihe zu entwickeln. Die Unbekannten werden dann iterativ mit Hilfe von Näherungswerten bestimmt. Die Designmatrix der Ausgleichung nach kleinsten Quadraten enthält die partiellen Ableitungen der Beobachtungsgleichungen nach den unbe-

kannten Transformationsparametern. Es ist zu erwähnen, dass die erläuterte Methode Höhenvariationen innerhalb des Untersuchungsgebietes benötigt, weil – mit Ausnahme von $\partial v_i / \partial Z_0$ – alle partiellen Ableitungen von $\partial Z / \partial X$ oder $\partial Z / \partial Y$ abhängen (siehe Gleichung 6).

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_i}{\partial X_0} &= \frac{\partial Z_{1i}}{\partial X_{1i}} \\ \frac{\partial v_i}{\partial Y_0} &= \frac{\partial Z_{1i}}{\partial Y_{1i}} \\ \frac{\partial v_i}{\partial Z_0} &= -1 \\ \frac{\partial v_i}{\partial \omega} &= \frac{\partial Z_{1i}}{\partial Y_{1i}} \cdot \frac{\partial Y_{1i}}{\partial \omega} - \frac{\partial Z'_{2i}}{\partial \omega} \\ \frac{\partial v_i}{\partial \varphi} &= \left(\frac{\partial Z_{1i}}{\partial X_{1i}} \cdot \frac{\partial X_{1i}}{\partial \varphi} + \frac{\partial Z_{1i}}{\partial Y_{1i}} \cdot \frac{\partial Y_{1i}}{\partial \varphi} \right) - \frac{\partial Z'_{2i}}{\partial \varphi} \\ \frac{\partial v_i}{\partial \kappa} &= \left(\frac{\partial Z_{1i}}{\partial X_{1i}} \cdot \frac{\partial X_{1i}}{\partial \kappa} + \frac{\partial Z_{1i}}{\partial Y_{1i}} \cdot \frac{\partial Y_{1i}}{\partial \kappa} \right) - \frac{\partial Z'_{2i}}{\partial \kappa} \\ \frac{\partial v_i}{\partial m} &= \left(\frac{\partial Z_{1i}}{\partial X_{1i}} \cdot \frac{\partial X_{1i}}{\partial m} + \frac{\partial Z_{1i}}{\partial Y_{1i}} \cdot \frac{\partial Y_{1i}}{\partial m} \right) - \frac{\partial Z'_{2i}}{\partial m} \end{aligned} \quad (6)$$

$Z'_{2i} = Z_0 + (1 + m) r_3 X_{2i}$ bezeichnet den transformierten Höhenwert.

Die unbekannt Parameter werden dann mit Hilfe der bekannten Gleichungen der Ausgleichung nach kleinsten Quadraten berechnet. Die Standardabweichung der Gewichtseinheit stimmt mit der Standardabweichung der Höhendifferenzen nach Durchführung der Transformation überein.

2.3 Spezialfall einer unbekannt Translation Z_0

Der Algorithmus wurde auf die Weise implementiert, dass eine unterschiedliche Anzahl von Parametern eingeführt werden kann. Wird nur eine vertikale Translation eingeführt, kann der Algorithmus vereinfacht werden. Der ermittelte Transformationsparameter Z_0 stimmt mit dem Mittelwert der Höhendifferenzen zwischen beiden Datensätzen überein. Die Beobachtungsgleichung hat dann die folgende Form:

$$v_i(Z_{2i}) = Z_{1i}(X_{2i}, Y_{2i}) - (Z_0 + Z_{2i}(X_{2i}, Y_{2i})) \quad (7)$$

Das Ergebnis des Algorithmus bei Einführung einer vertikalen Translation Z_0 ist vergleichbar mit der Berechnung eines Differenzen DGM.

3 Testgebiet und verwendete Datensätze

Das Ziel des Projektes am Institut für Photogrammetrie und GeoInformation war die Bewertung der Qualität der SRTM X-SAR Höhendaten. Dieses kann erreicht werden, indem die Daten mit Referenzdaten eines sehr gut bekannten Testgebietes verglichen werden.

Das Untersuchungsgebiet des IPI befindet sich südlich von Hannover. Der nördliche Teil ist durch urbane Regionen und flaches Gelände charakterisiert. Der süd-westliche Teil besitzt größere Geländehöhenunterschiede, Wald und landwirtschaftlich genutzte Flächen bedecken diesen Bereich.

Die Größe des Untersuchungsgebietes beträgt 50 km × 50 km. Der maximale Höhenunterschied liegt etwa bei 430 m.

Die erwartete vertikale Genauigkeit der SRTM Höhendaten beträgt mehrere Meter. Folglich wurden hoch genaue Koordinaten von Trigonometrischen Punkten (TP) und das Digitale Geländemodell der LGN (Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen), das ATKIS DGM5 als Referenzdatensätze gewählt, die eine Genauigkeit von bis zu einer Größenordnung besser als die SRTM Daten aufweisen.

Die Lagekoordinaten der TP's sind Gauß-Krüger Koordinaten, die Höhen sind Normalhöhen. Die horizontale und vertikale Genauigkeit beträgt 1–3 cm.

Das DGM5 ist ein Datensatz, welcher die Geländeoberfläche repräsentiert. Die Daten bestehen aus regelmäßig verteilten Punkten mit einer Gitterweite von 12,5 m. Zusammen mit Strukturinformationen (Bruchkanten, markante Geländepunkte, ...) repräsentieren die Daten ein hybrides DGM. Die vertikale Genauigkeit beträgt etwa 0,5 m und ist abhängig von der Geländetopogra-

phie. Das DGM5 bedeckt Teile des Untersuchungsgebietes, 4,7 Millionen DGM5 Punkte sind insgesamt verfügbar.

Die SRTM ITED-2 Daten (Interferometric Terrain Elevation Data Level 2, Abb. 1) repräsentieren aufgrund der kurzen Wellenlänge des X-Band Systems im Gegensatz zum DGM5 die Oberfläche einschließlich Vegetation und Gebäude (Geländeraussehen). Die Daten liegen als ellipsoidische Koordinaten bezogen auf das geozentrische Ellipsoid WGS84 vor. Die Gitterweite beträgt 1 Bogensekunde in beiden Richtungen. Um die Datensätze miteinander zu vergleichen, mussten die ITED-2 Daten in das Koordinatensystem der Referenzdaten transformiert werden. Ein Datumsübergang zwischen den Ellipsoiden WGS84 und Bessel wurde durchgeführt, zusätzlich wurden die ellipsoidischen Höhen mit Hilfe der Geoidundulationen korrigiert. Das Geoid hat eine Abweichung in der Größenordnung von 43–45 m innerhalb des Untersuchungsgebietes. Nach der Transformation liegen die ITED-2 Daten näherungsweise in einem

regelmäßigen Raster vor. Die Gitterweite beträgt in Nord-Süd-Richtung ungefähr 30 m, die Gitterweite in Ost-West-Richtung ist abhängig von der ellipsoidischen Breite. Die ellipsoidische Breite des Untersuchungsgebietes beträgt etwa 52° . Infolgedessen beträgt die Gitterweite in Ost-West-Richtung etwa 20 m. Der zur Verfügung stehende Datensatz enthält 5,5 Millionen Punkte.

4 Beurteilung der Qualität mit Hilfe von Koordinaten Trigonometrischer Punkte

Erste Untersuchungen wurden mit Hilfe von Koordinaten Trigonometrischer Punkte (TP's) durchgeführt. 1.068 TP's waren im Untersuchungsgebiet verfügbar, welche von den SRTM Daten überlagert wurden. Um die vertikale Genauigkeit zu bestimmen, wurden nur diejenigen TP's berücksichtigt, welche nicht in der Nähe von Gebäuden oder Vegetation liegen, da dort die entsprechenden SRTM-Höhen durch Effekte der DGM-Interpolation verfälscht sein können. Um die TP's zu klassifizieren, wurde das ATKIS Basis DLM der LGN verwendet. 368 Punkte wurden in urbanen Regionen sowie innerhalb oder in der Nähe von Wäldern ausgeschlossen, 700 TP's konnten verwendet werden.

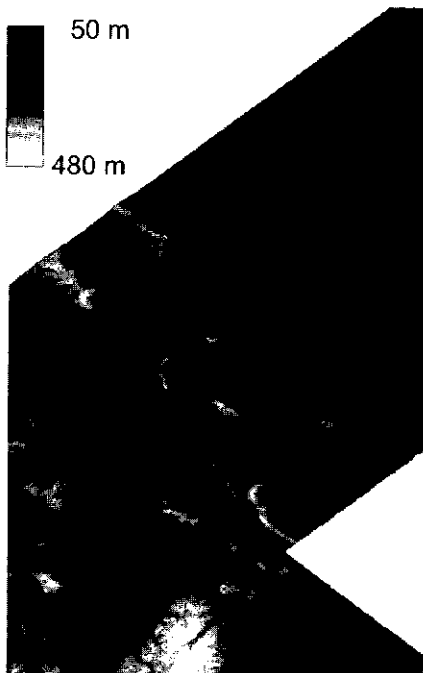


Abb. 1: Das Untersuchungsgebiet, SRTM ITED-2 Daten.

Tab. 1: Qualitätsmaße unter Verwendung aller TP's.

		Werte
Z0	[m]	+ 3,18
s	[m]	$\pm 4,27$
s _{Z0}	[m]	$\pm 2,86$
n		700

Mit Hilfe der Lagekoordinaten der TP's wurden die korrespondierenden Höhenwerte des SRTM ITED-2 Datensatzes ermittelt. Die Höhendifferenzen wurden berechnet und die Qualitätsmaße wurden bestimmt (siehe Gleichung 7). Etwaige Lageverschiebungen, Verdrehungen beider Datensätze gegeneinander oder Maßstabsunterschiede zwischen den Daten wurden vernachlässigt. Tab. 1 enthält die Ergebnisse.

Der positive Wert Z_0 bedeutet, dass das Höhengniveau der SRTM ITED-2 Daten niedriger ist als das der TP's. Der Datensatz enthält einen systematischen Höhenfehler von $Z_0 = +3,2$ m. Die Standardabweichung der Höhendifferenzen s beträgt $\pm 4,3$ m, nach Abzug des Mittelwertes vermindert sich der Wert auf $s_{z_0} = \pm 2,9$ m. Die Ergebnisse deuten auf eine hohe vertikale Genauigkeit der SRTM ITED-2 Daten hin. Die Ursache für die vertikale Systematik könnte in der Kalibrierung des SRTM Datensatzes begründet sein. Ein Höhenfehler in den Daten, welche zur Kalibrierung genutzt wurden, beeinflusst direkt die Ergebnisse der Untersuchungen. Während in den meisten Fällen InSAR Orbits von Küste zu Küste prozessiert und kalibriert werden und somit der Ozean als absolute Referenz vorhanden ist, wurde der Orbit, der die Daten des Untersuchungsgebietes enthält, auf anderer Weise bearbeitet. Existieren Gebäude oder Vegetation in dem für die Kalibrierung verwendeten Gebiet und wurden diese oberhalb des Geländes befindlichen Objekte nicht weiter berücksichtigt, werden die absoluten Höhenwerte des ITED-2 Datensatzes zu klein. Es soll darauf hingewiesen werden, dass diese Hypothese nicht weiter untersucht werden konnte, da keine weiteren Informationen über das Kalibrierfeld und die weiteren Bearbeitungsschritte zur Verfügung standen.

5 Beurteilung der Qualität mit Hilfe des Digitalen Geländemodells DGM5

Bei dem Vergleich der SRTM-Daten mit dem DGM5 wurden die Höhendifferenzen korrespondierender Punkte zuerst unter Vernachlässigung des Einflusses von „Geländerausuchen“ (Gebäude, Vegetation) berechnet und daraus Qualitätsmaße der SRTM Höhendaten abgeleitet. In einem zweiten Schritt wurden nur die Höhendifferenzen verwendet, die sich außerhalb urbaner Regionen und Wälder befinden, und es wurde die Qualität der Daten innerhalb dieses „offenen Geländes“ bestimmt. Der in

Kapitel 2 beschriebene Algorithmus wurde angewendet, wobei sowohl ein als auch alle sieben unbekanntenen Transformationsparameter eingeführt wurden.

5.1 Untersuchungen mit allen DGM5 Höhenwerten

Im Gegensatz zu den Untersuchungen zuvor wurden die Lagekoordinaten des ITED-2 Datensatzes verwendet, um die korrespondierenden Höhenwerte des DGM5 zu bestimmen, wobei der Höhenwert mit Hilfe einer bilinearen Interpolation aus den umliegenden DGM5 Gitterpunkten abgeleitet wurde. Die Höhendifferenzen wurden berechnet und die Qualitätsmaße wurden abgeleitet (siehe Gleichung 7). Die folgende Tab. 2 enthält die Ergebnisse:

Tab. 2: Qualitätsmaße unter Verwendung aller DGM5 Punkte.

		Werte
Z_0	[m]	- 2,63
s	[m]	$\pm 9,08$
s_{z_0}	[m]	$\pm 8,68$
n		1234815

Etwa 1,2 Millionen Höhendifferenzen konnten innerhalb des Untersuchungsgebietes berechnet werden. Der Mittelwert der Höhendifferenzen Z_0 ist negativ. Das bedeutet, dass das Höhengniveau der ITED-2 Daten höher ist als das des DGM5. Dieses Ergebnis widerspricht dem Ergebnis der Untersuchungen unter Verwendung der Trigonometrischen Punkte (siehe Tab. 1). Eine mögliche Ursache kann der Einfluss von Vegetation und Gebäuden sein. Während in Kapitel 4 nur Punkte genutzt wurden, welche nicht durch Geländerausuchen beeinflusst waren, sind hier die Höhenwerte über das gesamte Untersuchungsgebiet verteilt, ebenso in Wäldern und urbanen Bereichen. Die Standardabweichungen s bzw. s_{z_0} sind mit $\pm 9,1$ m bzw. $\pm 8,7$ m relativ hoch, was ebenfalls durch den Einfluss von Geländerausuchen begründet werden kann.

Abb. 2 zeigt den Einfluss des Geländerausuchens auf das Vorzeichen des vertikalen

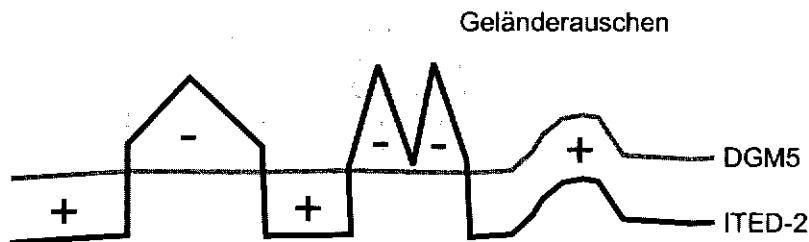


Abb. 2: Auswirkungen eines vertikalen systematischen Fehlers der SRTM ITED-2 Daten auf das Vorzeichen der Höhendifferenzen.

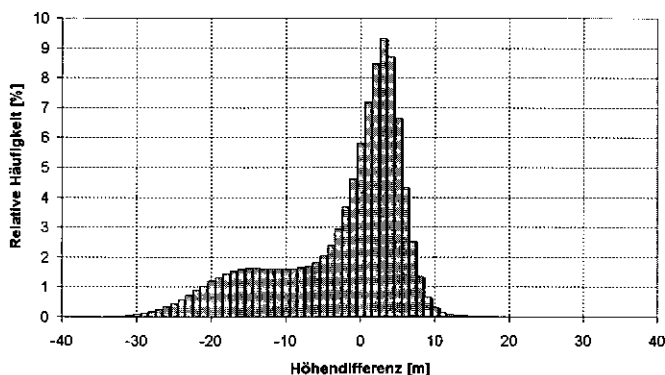


Abb. 3: Relative Häufigkeitsverteilung der Höhendifferenzen zwischen ATKIS DGM5 und SRTM ITED-2.

systematischen Fehlers. Die Abbildung zeigt einen positiven vertikalen systematischen Fehler im offenen Gelände. Das Höhenniveau der ITED-2 Daten ist geringer als das Höhenniveau der Referenzdaten. Zusätzlich lässt das Geländerauschnen das Höhenniveau der SRTM ITED-2 Daten ansteigen und somit negativen Höhendifferenzen hervorrufen und folglich den vertikalen systematischen Fehler verringern. Der Wert Z0 kann somit in Bereichen mit Vegetation und Gebäude negativ werden.

Die relative Häufigkeitsverteilung der Höhendifferenzen (siehe Abb. 3) bestätigt die ermittelten Ergebnisse. Die nicht symmetrische Verteilung wird durch Objekte verursacht, die sich über dem Gelände befinden. Folglich repräsentiert der linke negative Bereich des Histogramms diese Objekte. Zusätzlich ist erkennbar, dass sich das Maximum des Histogramms im positiven Bereich befindet. Das bedeutet, dass der syste-

matische Höhenfehler im offenen Gelände erneut positiv zu sein scheint. Dieses Ergebnis bestätigt die des Kapitels 4.

5.2 Untersuchungen mit DGM5 Höhenwerten im offenen Gelände

Erneut wurde das ATKIS Basis DLM der LGN genutzt, um die DGM5 Höhenwerte zu klassifizieren. Weil die Mission im Februar stattfand, repräsentieren die SRTM Daten in landwirtschaftlichen Regionen in unseren Breiten ebenfalls das Gelände. Die Vegetationshöhen sind vernachlässigbar. Die Höhenwerte innerhalb der Wälder und urbanen Bereiche wurden ausgeschlossen, das sind etwa 500 000 Punkte bzw. 40 % der zur Verfügung stehenden DGM5 Höhenwerte.

Die Ergebnisse (siehe Tab. 3) bestätigen wiederum die vorigen Untersuchungen. Das

Vorzeichen des Mittelwertes Z_0 ist positiv. Der Einfluss von großen negativen Differenzen, die durch Geländerausuchen verursacht werden, ist somit signifikant. Wie zu erwarten war, entspricht der berechnete Mittelwert Z_0 in etwa dem Wert, welcher mit Hilfe der TP's berechnet wurde (siehe Kapitel 4). Die Standardabweichungen sind ebenfalls näherungsweise identisch. Die Ergebnisse zeigen eine hohe Qualität der SRTM Daten.

Tab. 3: Qualitätsmaße unter Verwendung aller DGM5 Punkte im offenen Gelände.

		Werte
z_0	[m]	+ 2,62
s	[m]	\pm 4,32
s_{z_0}	[m]	\pm 3,44
n		669685

5.3 Untersuchungen unter Verwendung des 3D Least Squares Matching Verfahrens

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse präsentiert, die mit dem Algorithmus ermittelt wurden, welcher auf der räumlichen Ähnlichkeitstransformation basiert. Wie in Abschnitt 5.2. wurden nur Höhenwerte im offenen Gelände verwendet. Die Ergebnisse werden in Tab. 4 dargestellt:

Tab. 4: Ermittelte Transformationsparameter.

		Werte
X_0	[m]	+ 0,60
Y_0	[m]	- 2,32
Z_0	[m]	+ 2,28
ω	[gon]	- 0,003
φ	[gon]	+ 0,002
κ	[gon]	- 0,007
m		+ 3,06 · 10 ⁻⁵

Der Wert Z_0 ist mit dem Mittelwert in Tab. 3 vergleichbar. Die horizontalen Verschiebungen X_0 und Y_0 beschreiben systematische Lageverschiebungen zwischen den Datensätzen. Die ermittelten Werte betragen nur einen Bruchteil der SRTM ITED-2 Gitterweite.

Die Rotationswinkel ω und φ verursachen maximale vertikale Verschiebungen von $\pm 1,22$ m und $\pm 0,98$ m am Rande des Untersuchungsgebietes. Der Maßstabsfaktor verursacht maximale horizontale Verschiebungen von $\pm 0,76$ m in beiden Richtungen. Insgesamt führen die sieben ermittelten Transformationsparameter zu maximalen Lageverschiebungen von 6 m in Nord-Süd- und 4 m in Ost-West-Richtung. Die maximale vertikale Verschiebung beträgt 4,5 m am Rande des Untersuchungsgebietes. Die Standardabweichungen der sieben unbekanntenen Transformationsparameter sind eine Größenordnung besser als die Parameter selbst.

669466 Beobachtungen wurden bei den Untersuchungen verwendet. Die Standardabweichung der SRTM Höhendaten, vergleichbar mit s_{z_0} oben, beträgt $\pm 3,3$ m, die vertikale Verschiebung und die Standardabweichung der Höhenwerte, die in diesem Abschnitt präsentiert wird, liegen nahe den Werten aus Abschnitt 5.2. (siehe Tab. 3). Folglich sind die SRTM ITED-2 Daten frei von systematischen Fehlern, welche mit Hilfe der räumlichen Ähnlichkeitstransformation modelliert werden können. Die Einführung eines vertikalen Transformationsparameters ist demnach ausreichend.

6 Weitere Untersuchungen

Die Qualität der SRTM ITED-2 Daten, d. h. die Größe der zufälligen und systematischen Fehler, ist abhängig vom Geländerausuchen. Je größer der flächenhafte Anteil Regionen ist, die Gebäude und Vegetation enthalten, desto größer ist der systematische Höhenfehler und desto größer ist die Standardabweichung der resultierenden Verbesserungen.

Um die SRTM Daten nicht nur in offenem Gelände zu bewerten, sondern auch in urbanen Regionen und Wäldern, wurden zwei kleinere Testgebiete mit einer Größe von 2×2 km² analysiert, indem ein Digitales Oberflächenmodell (DOM) mittels analytischer Photogrammetrie bestimmt wurde. Die photogrammetrischen Messungen weisen eine Höhengenaugigkeit von etwa 0,4 m auf.

Die erste Testfläche befindet sich in Hildesheim. Das Gebiet wird durch einzeln stehende Gebäude mit Gärten sowie Gebäudekomplexe charakterisiert. Die zweite Testfläche besteht vorwiegend aus Laubwald. Zusätzlich sind landwirtschaftlich genutzte Flächen und eine Autobahn im Zentrum des Testgebietes. Es handelt sich um ein Gebiet im Süden von Hannover.

Tab. 5: Qualitätsmaße in urbaner Region und Wald, oberer Bereich: Vergleich zwischen DGM5 und ITED-2, unten: Vergleich zwischen analytisch gemessenem Oberflächenmodell (DOM) und ITED-2.

		urbaner Bereich	Wald-region
DGM5	Z0 [m]	- 5,13	- 13,19
-	s [m]	± 8,46	± 15,18
ITED-2	n	6794	6814
DOM	Z0 [m]	+ 1,05	+ 1,84
-	s [m]	± 5,09	± 4,57
ITED-2	n	6612	6675

Tab. 5 stellt die Ergebnisse des Vergleiches zwischen ITED-2 und Referenz DGM5 sowie ITED-2 und photogrammetrisch ermitteltem Oberflächenmodell dar. Die in Kapitel 5 angegebenen Parameter der räumlichen Ähnlichkeitstransformation wurden angebracht, bevor die Höhendifferenzen berechnet wurden. Folglich sollte der Wert Z0 im unteren Bereich der Tabelle Null sein, da das SRTM Oberflächenmodell sowie das mittels Photogrammetrie erstellte die gleiche Oberfläche repräsentieren. Die Standardabweichung s sollte sich den Ergebnissen aus Kapitel 4 und 5 annähern.

Bei Betrachtung der Ergebnisse unter Verwendung des DGM5 fällt auf, dass beide Regionen durch negative Mittelwerte Z0 charakterisiert sind, denn die Werte sind durch Geländerausachen beeinflusst. Zusätzlich sind die Standardabweichungen sehr groß.

Bei Verwendung des analytisch gemessenen DOM wird der Mittelwert positiv. Das bedeutet, dass die ITED-2 Daten signifikant unter dem analytisch gemessenen Oberflächenmodell liegen (die Werte aus Tab. 4 und

5 müssen addiert werden, um die komplette Verschiebung in der Höhe zu erhalten).

Im urbanen Bereich kann dieses Ergebnis als Interpolationseffekt interpretiert werden: Dort befinden sich einige Punkte auf der Erdoberfläche, die dieses Ergebnis beeinflussen. Im Waldbereich kann es sein, dass das X-Band Signal teilweise in die Vegetationsdecke eindringt (die Mission hat im Februar stattgefunden, folglich haben die Bäume keine Blätter getragen). Auch die Standardabweichungen sind größer als im offenen Gelände. Als Gesamtergebnis dieser Untersuchungen kann zusammengefasst werden, dass in urbanen Regionen und Wäldern die Qualität der ITED-2 Daten geringfügig schlechter ist als im offenen Gelände.

7 Schlussfolgerungen

Dieser Artikel enthält die Ergebnisse der Untersuchung der Qualität der SRTM ITED-2 Daten. Der verwendete Algorithmus basiert auf einer räumlichen Ähnlichkeitstransformation ohne Verwendung von Passpunkten und stellt eine Erweiterung des Verfahrens zur Bildzuordnung nach kleinsten Quadraten dar. Den SRTM Daten wurden Referenzdaten zugeordnet, welche eine bessere Qualität aufweisen. Die ermittelten sieben unbekanntenen Transformationsparameter beschreiben potentiell vorhandene systematische Fehler der SRTM ITED-2 Daten.

Erste Untersuchungen wurden unter Einführung einer vertikalen Verschiebung durchgeführt. Das Vorgehen ist vergleichbar mit der Berechnung eines Differenzen DGM und führt zu Mittelwert und Standardabweichung der Höhendifferenzen. Untersuchungen im offenen Gelände erbrachten einen positiven Mittelwert der Höhendifferenzen von etwa +2,6 m. Folglich liegt das Höhenniveau der SRTM Daten unter dem der Referenzdaten. Eine Begründung dieses Ergebnisses kann die Tatsache sein, dass das SRTM Oberflächenmodell über Land und nicht in den Küstenregionen kalibriert wurde.

Die Standardabweichung der SRTM ITED-2 Daten im offenen Gelände beträgt

$\pm 3,3$ m, nachdem die räumliche Ähnlichkeitstransformation angebracht wurde. Maximale systematische Lageverschiebungen von 4–6 m wurden beobachtet, was 20–25% der SRTM ITED-2 Gitterweite ausmacht. Zusammengefasst kann gesagt werden, dass die Ergebnisse besser sind als die vor der Mission erwarteten. Folglich ist die Qualität der SRTM ITED-2 Daten als sehr gut zu bewerten.

8 Danksagung

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 50EE9927 gefördert. Die verwendeten Referenzdaten wurden freundlicherweise von der Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen (LGN) zur Verfügung gestellt.

9 Literatur

- BAMLER, R., 1999: The SRTM Mission – A World-Wide 30 m Resolution DEM from SAR Interferometry in 11 Days. – In: FRITSCH, D. & SPILLER, R. (Hrsg.), 1999: Photogrammetrische Woche 99. 145–154, Wichmann Verlag, Heidelberg.
- EBNER, H. & STRUNZ, G., 1988: Combined point determination using digital terrain models as control information. – International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Commission III, Vol. 27, Part B11, 578–587, Kyoto, Japan.
- KLEUSBERG, A. & KLAEDTKE, H.-G., 1999: Accuracy assessment of a digital height model derived from airborne synthetic aperture radar measurements. – In: FRITSCH, D. & SPILLER, R. (Hrsg.), Photogrammetrische Woche 99, 139–143, Wichmann Verlag, Heidelberg.
- KOCH, A. & HEIPKE, C., 2001: Quality Assessment of Digital Surface Models derived from the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). – International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Sydney, Australien.
- ROSEN, P., EINEDER, M., RABUS, B., GURROLA, E., HENSLEY, S., KNÖPFLE, W., BREIT, H., ROTH, A. & WERNER, M., 2001a: SRTM-Mission – Cross Comparison of X and C Band Data Properties. – International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Sydney, Australien.
- ROSEN, P.A., HENSLEY, S., GURROLA, E., ROGEZ, F., CHAN, S., MARTIN, J. & RODRIGUEZ, E., 2001b: SRTM C-Band Topographic Data: Quality Assessments and Calibration Activities. International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Sydney, Australien.
- SCHENK, T., KRUPNIK, A. & POSTOLOV, Y., 2000: Comparative study of surface matching algorithms. – International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Commission IV, Vol. XXXIII, Part B4, 518–524, Amsterdam, Niederlande.
- WERNER, M., 2001: Status of the SRTM data processing: When will the world-wide 30 m DTM data be available? – Geo-Informationssysteme, 2001(12): 6–10. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg.

Anschriften der Verfasser:

Dipl.-Ing. ANDREAS KOCH, Institut für Photogrammetrie und GeoInformation, Universität Hannover

Nienburger Straße 1, D-30167 Hannover
Tel.: 0511-762-5289, Fax: 0511-762-2483
e-mail: koch@ipi.uni-hannover.de

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. CHRISTIAN HEIPKE, Institut für Photogrammetrie und GeoInformation, Universität Hannover
Nienburger Straße 1, D-30167 Hannover
Tel.: 0511-762-2482, Fax: 0511-762-2483
e-mail: heipke@ipi.uni-hannover.de

Dr.-Ing. PETER LOHMANN, Institut für Photogrammetrie und GeoInformation, Universität Hannover
Nienburger Straße 1, D-30167 Hannover
Tel.: 0511-762-2486, Fax: 0511-762-2483
e-mail: lohmann@ipi.uni-hannover.de

Manuskript eingegangen: August 2002
Angenommen: August 2002