

# **QUALITÄTSUNTERSUCHUNG UND VALIDIERUNG VON SRTM ITED-2 DATEN IN NIEDERSACHSEN**

**Gefördert durch  
Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)**

**Förderkennzeichen: 50EE9927  
1. Juli 1999 – 31. März 2002**

Schlussbericht  
des  
Instituts für Photogrammetrie und GeoInformation (IPI)  
Universität Hannover  
Prof. Dr.-Ing. Christian Heipke  
Nienburger Straße 1  
30167 Hannover

Bearbeiter: Andreas Koch  
September 2002



# Zusammenfassung

Im Februar 2000 startete die erste weltraumgestützte Mission, welche Single-Pass-Interferometrie einsetzte – die Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). Ziel dieser Mission war es, die Erdoberfläche dreidimensional zu vermessen und einen homogenen und nahezu flächendeckenden Höhendatensatz der Erde zu erstellen. Dabei wurden Antennen zweier unterschiedlicher Wellenlängen eingesetzt: Neben dem Amerikanischen SIR-C war das Deutsch / Italienische X-SAR System an Bord.

Das Ziel des Projektes „Qualitätsuntersuchung und Validierung von SRTM ITED-2 Daten in Niedersachsen“ des Instituts für Photogrammetrie und GeoInformation (IPI) der Universität Hannover war, die Qualität dieser Daten zu bewerten. Die ITED-2 Daten (Interferometric Terrain Elevation Data Level 2) wurden mit Referenzdaten besserer Qualität innerhalb eines sehr gut bekannten Testgebietes südlich von Hannover verglichen (Trigonometrische Punkte und Digitales Geländemodell ATKIS DGM5). Das verwendete Verfahren basiert auf einer räumlichen Ähnlichkeitstransformation ohne Verwendung identischer Punkte und ist vergleichbar mit der absoluten Orientierung eines photogrammetrischen Blockes mit Hilfe eines DGM bzw. eine Erweiterung des Verfahrens zur Digitalen Bildzuordnung nach kleinsten Quadraten. Die 7 Parameter der räumlichen Ähnlichkeitstransformation beschreiben horizontale und vertikale Verschiebungen, Rotationen um die Koordinatenachsen sowie Maßstabsunterschiede zwischen Referenz und SRTM Daten. Die Werte repräsentieren potentiell vorhandene systematische Fehler.

Die Ergebnisse zeigen eine gute Höhengenaugigkeit der SRTM ITED-2 Daten von 3-4 m im offenen Gelände, d.h. in Bereichen, die keine oberhalb des Geländes befindlichen Objekte (Vegetation, Gebäude) enthalten. Die vor dem Start der Mission prognostizierten Werte wurden somit bestätigt. Die SRTM ITED-2 Daten enthalten systematische Lagefehler von maximal 4 m in Ost-West- und 6 m in Nord-Süd-Richtung, wobei die Untersuchungen mit Hilfe des ATKIS DGM5 durchgeführt wurden. Der systematische Höhenfehler beträgt +2,3 m, d.h. die SRTM ITED-2 Daten befinden sich unterhalb des Geländeniveaus. Zusätzlich wurde ein in Orbitrichtung sich ändernder systematischer Höhenfehler ermittelt,

der in etwa eine Amplitude von  $\pm 2$  m aufweist. Siedlungs- und Waldbereiche weisen eine etwas schlechtere Genauigkeit auf.

# Summary

In February 2000 the first spaceborne mission using Single-Pass-Interferometry started – the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). The goal of the mission has been the surveying of the earth surface and the generation of a homogeneous and nearly complete elevation data set of the earth. Two different antennas with different wavelength were used: Beside the American SIR-C the German / Italian X-SAR system was on board.

The aim of the project "Quality assessment and validation of SRTM ITED-2 data in Lower Saxony" of the Institute for Photogrammetry and GeoInformation (IPI) of the University of Hannover has been the assessment of the quality of these data. The ITED-2 data (Interferometric Terrain Elevation Data Level 2) were compared with reference data of higher quality in a well-known test site in the south of Hannover (Trigonometric Points and Digital Terrain Model ATKIS DGM5). The used method is based on a spatial similarity transformation without using any control point information. The method is comparable to the absolute orientation of a photogrammetric block by means of a DTM and is an enhancement of the Least Squares Image Matching method. The 7 parameters of the spatial similarity transformation describe horizontal and vertical translations, rotations around the coordinate axis and scale differences between the reference and the SRTM data. The values represent potentially existing systematic errors.

The results show a good height accuracy of the SRTM ITED-2 data of 3-4 m in open landscape, i.e. in areas without objects lying above the terrain (vegetation, buildings). The prognosticated values before the mission started were verified. The SRTM ITED-2 data contain systematic horizontal errors of maximum 4 m in east-west and 6 m in north-south direction. The investigations were done by using the ATKIS DGM5. The systematic vertical error is +2,3 m, i.e. the level of the SRTM ITED-2 data is below the terrain level. Additionally in orbit direction a kind of changing systematic error was obtained which has nearly an amplitude of  $\pm 2$  m. The accuracy in urban areas and forests is somewhat worth.



# Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung .....	I
Summary .....	III
Inhaltsverzeichnis .....	V
Abbildungsverzeichnis .....	VIII
Tabellenverzeichnis .....	X
Abkürzungsverzeichnis .....	XII
<b>1 Beschreibung des Vorhabens .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Ziele und Aufgabenstellung.....</b>	<b>2</b>
<b>1.2. Voraussetzungen .....</b>	<b>2</b>
<b>1.3. Planung und Ablauf des Vorhabens.....</b>	<b>3</b>
1.3.1 Erster Projektabschnitt .....	4
1.3.2 Zweiter Projektabschnitt .....	7
<b>1.4. Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....</b>	<b>8</b>
<b>2 Beschreibung des Testgebietes und der verwendeten Daten ..</b>	<b>11</b>
<b>2.1. Das Testgebiet .....</b>	<b>11</b>
<b>2.2. Die verwendeten Daten.....</b>	<b>12</b>
2.2.1 Referenzdaten .....	12
2.2.2 Daten der Shuttle Radar Topography Mission .....	15
<b>3 Visuelle Überprüfung der SRTM-Daten .....</b>	<b>19</b>
<b>4 Transformation der SRTM-Daten in das System der Landeskoordinaten.....</b>	<b>23</b>
<b>4.1. Problemstellung .....</b>	<b>23</b>
<b>4.2. Bestimmung der Transformationsparameter.....</b>	<b>24</b>
<b>4.3. Transformation der ITED-2 Digitalen Oberflächenmodelle .....</b>	<b>26</b>
<b>5 Verfahren zur Zuordnung Digitaler Höhendaten – 3D Least Squares Matching.....</b>	<b>29</b>
<b>5.1. Mathematisches Modell.....</b>	<b>30</b>

5.2. <i>Ausgleichung nach kleinsten Quadraten</i> .....	31
5.3. <i>Sonderfall der unbekanntem Translation Z0</i> .....	32
<b>6</b> <b>Beurteilung der Lagegenauigkeit der GTC Radarbilder</b> .....	<b>33</b>
<b>7</b> <b>Beurteilung der Lage- und Höhengenaugigkeit der ITED-2 Daten mittels TP's</b> .....	<b>35</b>
7.1. <i>Beurteilung der absoluten Höhengenaugigkeit unter Verwendung aller TP's</i> .....	35
7.2. <i>Beurteilung der absoluten Höhengenaugigkeit im offenen Gelände</i> .....	38
7.3. <i>Beurteilung der systematischen Lage- und Höhenabweichungen</i> .....	40
<b>8</b> <b>Beurteilung der Lage- und Höhengenaugigkeit der ITED-2 Daten mittels ATKIS DGM5</b> .....	<b>43</b>
8.1. <i>Beurteilung der absoluten Höhengenaugigkeit unter Verwendung des gesamten DGM5 Datensatzes</i> .....	43
8.2. <i>Beurteilung der absoluten Höhengenaugigkeit im offenen Gelände</i> .....	48
8.3. <i>Beurteilung der systematischen Lage- und Höhenabweichungen</i> .....	50
<b>9</b> <b>Beurteilung der Höhengenaugigkeit in Abhängigkeit der Landbedeckung</b> .....	<b>57</b>
9.1. <i>Untersuchung des Gesamtgebietes</i> .....	57
9.1.1 Koordinaten Trigonometrischer Punkte .....	58
9.1.2 ATKIS DGM5 .....	60
9.2. <i>Untersuchung von Teilgebieten</i> .....	63
9.2.1 Wald .....	64
9.2.2 Ackerland .....	68
9.2.3 Grünland .....	70
9.2.4 Gewässer.....	72
9.2.5 Siedlung .....	73
<b>10</b> <b>Untersuchung weiterer genauigkeitsbeeinflussender Faktoren</b> .....	<b>81</b>
10.1. <i>Abhängigkeit der Qualität der SRTM ITED-2 Daten vom lokalen Einfallswinkel</i> .....	81
10.2. <i>Einfluss von Schneebedeckung</i> .....	83
<b>11</b> <b>Vergleich der Qualität der SRTM ITED-2 Daten mit anderen Digitalen Höhendaten</b> .....	<b>85</b>
11.1. <i>Beschreibung der Daten</i> .....	85
11.2. <i>Vergleich der absoluten Höhengenaugigkeit</i> .....	86
<b>12</b> <b>Veröffentlichung der Ergebnisse</b> .....	<b>89</b>

<b>12.1. Publikationen .....</b>	<b>89</b>
<b>12.2. Vorträge und Konferenzen .....</b>	<b>90</b>
<b>Schlussfolgerungen .....</b>	<b>91</b>
<b>Literatur .....</b>	<b>93</b>

# Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1 Das Testgebiet, Ausschnitt aus der Topographischen Karte 1:200.000, nicht maßstäblich .....	12
Abb. 2.2 Referenzdaten, links: ATKIS DGM5, rechts: ATKIS DGM50 .....	14
Abb. 2.3 GTC SAR Bild, aufsteigender Orbit.....	17
Abb. 2.4 SRTM Bilddaten, links: Kohärenzbild, rechts: Bild der lokalen Einfallswinkel ...	17
Abb. 3.1 SRTM ITED-2 Digitales Oberflächenmodell.....	19
Abb. 3.2 Ausschnitte des SRTM ITED-2 Datensatzes, links: Siedlungs- und Waldflächen, rechts: Fluss „Weser“ .....	20
Abb. 4.1 Punkte zur Bestimmung der Transformationsparameter, Untersuchungsgebiet .....	24
Abb. 4.2 Ablaufschema der Transformation der ITED-2 Daten in das System der Landeskoordinaten .....	27
Abb. 6.1 GTC Radarbild, überlagert mit Wasserflächen des ATKIS Basis DLM, Beispiel Maschsee.....	33
Abb. 7.1 Relative Häufigkeitsverteilung der Höhendifferenzen zwischen TP's und SRTM ITED-2 Daten unter Verwendung aller TP's .....	37
Abb. 7.2 Höhendifferenzen zwischen TP's und SRTM ITED-2 Daten .....	38
Abb. 7.3 Relative Häufigkeitsverteilung der Höhendifferenzen zwischen TP's und ITED-2 Daten im offenen Gelände.....	39
Abb. 7.4 Relative Häufigkeitsverteilung der Höhendifferenzen zwischen TP's und ITED-2 Daten nach Durchführung der räumlichen Ähnlichkeitstransformation im offenen Gelände.....	41
Abb. 7.5 Höhendifferenzen zwischen TP's und ITED-2 Daten nach Durchführung der räumlichen Ähnlichkeitstransformation im offenen Gelände.....	42
Abb. 8.1 Relative Häufigkeitsverteilung der Höhendifferenzen zwischen DGM5 und SRTM ITED-2 Daten unter Verwendung des gesamten DGM5 Datensatzes .....	45
Abb. 8.2 Höhendifferenzen zwischen DGM5 und SRTM ITED-2 Daten unter Verwendung des gesamten DGM5 Datensatzes .....	46
Abb. 8.3 Auswirkung des Geländerausens auf das Vorzeichen der Höhendifferenzen .....	46
Abb. 8.4 Höhendifferenzen zwischen DGM5 und SRTM ITED-2, Waldflächen.....	47
Abb. 8.5 Höhendifferenzen zwischen DGM5 und SRTM ITED-2, Wasserflächen.....	48
Abb. 8.6 Relative Häufigkeitsverteilung der Höhendifferenzen zwischen DGM5 und SRTM ITED-2 Daten im offenen Gelände .....	49

Abb. 8.7 Relative Häufigkeitsverteilung der Höhendifferenzen zwischen DGM5 und ITED-2 Daten nach Durchführung der räumlichen Ähnlichkeitstransformation im offenen Gelände.....	51
Abb. 8.8 Höhendifferenzen zwischen DGM5 und ITED-2 Daten nach Durchführung der räumlichen Ähnlichkeitstransformation im offenen Gelände .....	52
Abb. 8.9 Quer zur Orbitrichtung gemittelte Höhendifferenzen, in Orbitrichtung aufgetragen, vor der räumlichen Ähnlichkeitstransformation .....	53
Abb. 8.10 Höhendifferenzen in Orbitrichtung .....	53
Abb. 9.1 Genauigkeitsmaße in Abhängigkeit der Landbedeckung aus Höhendifferenzen zwischen TP's und ITED-2.....	59
Abb. 9.2 Genauigkeitsmaße in Abhängigkeit der Landbedeckung aus Höhendifferenzen zwischen DGM5 und ITED-2 Daten .....	61
Abb. 9.3 Darstellung der einzelnen Testflächen mit einer Größe von 2x2 km <sup>2</sup> , die Testflächen sind durchnummeriert und umrandet.....	63
Abb. 9.4 Testfläche 2, Landbedeckung .....	64
Abb. 9.5 Höhendifferenzen, oben: DGM5 – ITED-2, unten: Photogrammetrisch ermitteltes Digitales Oberflächenmodell – ITED-2, links jeweils vor der Transformation, rechts jeweils nach der Transformation .....	65
Abb. 9.6 a) Gemessene Baumhöhen aus Felderhebungen, b) Baumhöhen errechnet aus Höhendifferenz zwischen DGM5 und SRTM ITED-2 Daten.....	66
Abb. 9.7 Testfläche 4, Landbedeckung .....	67
Abb. 9.8 Höhendifferenzen zwischen DGM5 und ITED-2, links: vor der Transformation, rechts: nach der Transformation .....	68
Abb. 9.9 Landbedeckung der Testflächen 8, 9, 11 und 5 .....	69
Abb. 9.10 Testfläche 7, Landbedeckung.....	70
Abb. 9.11 Testfläche 10, Landbedeckung .....	71
Abb. 9.12 Testfläche 3, Landbedeckung.....	72
Abb. 9.13 Höhendifferenzen zwischen DGM5 und SRTM ITED-2 innerhalb von Gewässern .....	73
Abb. 9.14 Testfläche 1, Landbedeckung.....	74
Abb. 9.15 Höhendifferenzen zwischen DGM5 und ITED-2 im Siedlungsbereich, links: vor der Transformation, rechts: nach der Transformation .....	75
Abb. 9.16 Testfläche 6, Landbedeckung.....	76
Abb. 9.17 Höhendifferenzen oben: DGM5 – ITED-2, unten: Photogrammetrisch ermitteltes Digitales Oberflächenmodell – ITED-2, links jeweils vor der Transformation, rechts jeweils nach der Transformation .....	78
Abb. 9.18 Höhendifferenzen zwischen DGM5 und SRTM ITED-2 im Siedlungsbereich, Gebäude in schwarz dargestellt .....	79
Abb. 10.1 Definition des lokalen Einfallswinkels .....	82
Abb. 10.2 Testfläche mit schneebedeckten Flächen (gelb) und schneefreien Flächen (orange) .....	83

# Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1 Datencharakteristika der SRTM ITED-2 Daten .....	16
Tab. 4.1 Transformationsparameter für Datumsübergang WGS84 – Bessel .....	26
Tab. 7.1 Genauigkeitsmaße aus Höhendifferenzen zwischen TP's und SRTM ITED-2 Daten unter Verwendung aller TP's .....	36
Tab. 7.2 Genauigkeitsmaße aus Höhendifferenzen zwischen TP's und ITED-2 Daten im offenen Gelände.....	39
Tab. 7.3 Transformationsparameter zwischen TP's und SRTM ITED-2 Daten im offenen Gelände und deren Genauigkeit.....	40
Tab. 8.1 Genauigkeitsmaße aus Höhendifferenzen zwischen DGM5 und SRTM ITED- 2 Daten unter Verwendung des gesamten DGM5 Datensatzes .....	44
Tab. 8.2 Genauigkeitsmaße aus Höhendifferenzen zwischen DGM5 und ITED-2 Daten im offenen Gelände .....	49
Tab. 8.3 Ermittelte Transformationsparameter zwischen ATKIS DGM5 und SRTM ITED-2 und deren Genauigkeit .....	50
Tab. 8.4 Korrelationen zwischen den ermittelten Transformationsparametern .....	50
Tab. 8.5 Parameter der Sinusfunktion .....	54
Tab. 9.1 Genauigkeitsmaße in Abhängigkeit verschiedener Landnutzungen, Spalte 1-3: vor der Transformation, Spalte 4-6: nach der Transformation .....	58
Tab. 9.2 Genauigkeitsmaße in Abhängigkeit der Landbedeckung aus Höhendifferenzen zwischen DGM5 und ITED-2 Daten .....	60
Tab. 9.3 Genauigkeitsmaße aus Höhendifferenzen zwischen DGM5 und ITED-2 sowie photogrammetrisch bestimmten Oberflächenmodell (Pho) und ITED-2.....	64
Tab. 9.4 Testfläche 4, Genauigkeitsmaße aus Höhendifferenzen zwischen DGM5 und ITED-2.....	67
Tab. 9.5 Genauigkeitsmaße aus Höhendifferenzen zwischen DGM5 und SRTM ITED- 2 innerhalb von Ackerflächen .....	70
Tab. 9.6 Genauigkeitsmaße aus Höhendifferenzen zwischen DGM5 und ITED-2 im Grünland, Testfläche 7 .....	71
Tab. 9.7 Genauigkeitsmaße aus Höhendifferenzen zwischen DGM5 und SRTM ITED- 2 innerhalb von Grünland, Testfläche 10 .....	72
Tab. 9.8 Genauigkeitsmaße aus Höhendifferenzen zwischen DGM5 und SRTM ITED- 2 innerhalb von Gewässer.....	73
Tab. 9.9 Genauigkeitsmaße aus Höhendifferenzen zwischen DGM5 und ITED-2 im Siedlungsbereich .....	74
Tab. 9.10 Genauigkeitsmaße aus Höhendifferenzen zwischen DGM5 und SRTM ITED-2 im Siedlungsbereich .....	76

Tab. 9.11 Genauigkeitsmaße aus Höhendifferenzen zwischen DGM5 und ITED-2 und photogrammetrisch ermitteltem Oberflächenmodell und ITED-2 in den umliegenden Ackerflächen .....	77
Tab. 10.1 Genauigkeitsmaße in Abhängigkeit des lokalen Einfallswinkels .....	82
Tab. 10.2 Genauigkeitsmaße in Abhängigkeit von Schneeflächen.....	84
Tab. 11.1 Datencharakteristika von SRTM ITED-2, DGM50 und ERS DOM .....	86
Tab. 11.2 Genauigkeitsmaße aus Höhendifferenzen zwischen DGM5 und SRTM, DGM50 und ERS .....	86

# Abkürzungsverzeichnis

<b>ATKIS</b>	Amtliches Topographisches Kartographisches Informationssystem
<b>DGM</b>	Digitales Geländemodell
<b>DGPF</b>	Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung
<b>DLM</b>	Digitales Landschaftsmodell
<b>DOM</b>	Digitales Oberflächenmodell
<b>DTED-2</b>	Digital Terrain Elevation Data Level 2 (Digitale Geländehöhendaten)
<b>IGARSS</b>	International Geoscience and Remote Sensing Symposium (Internationales Geo-Wissenschaften und Fernerkundungssymposium)
<b>InSAR</b>	Interferometric Synthetic Aperture Radar, häufig auch IfSAR genannt
<b>IPI</b>	Institut für Photogrammetrie und GeoInformation
<b>ISPRS</b>	International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (Internationale Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung)
<b>ITED-2</b>	Interferometric Terrain Elevation Data Level 2 (Interferometrische Geländehöhendaten)
<b>LGN</b>	Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen
<b>PI</b>	Principal Investigator
<b>SAR</b>	Synthetic Aperture Radar
<b>SRTM</b>	Shuttle Radar Topography Mission
<b>TP</b>	Trigonometrischer Punkt

# Kapitel 1

## Beschreibung des Vorhabens

Weltweit besteht ein steigender Bedarf an aktuellen Digitalen Höhendaten als Grundlage für Planungen und infrastrukturelle Entwicklungsmaßnahmen (Schmullius et. al 2000). Die Basis für die Erstellung dieser Informationen war traditionell die Photogrammetrie und / oder die terrestrische Vermessung. In den letzten zehn Jahren haben neue Technologien zur Ableitung Digitaler Höhendaten zunehmend an Bedeutung gewonnen. Neben dem Lasermessverfahren ist dies vor allem die SAR-Interferometrie, welche vom Flugzeug oder satellitengestützt bzw. vom Space Shuttle aus eingesetzt wird.

Im Februar 2000 startete die Amerikanische Raumfähre Endeavour zu der Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), um mit Hilfe der SAR-Interferometrie nahezu die gesamte Erdoberfläche aufzunehmen und einen dreidimensionalen Höhendatensatz der Erde zu generieren. Während dieser 11tägigen Mission wurde eine 60 m lange Mastkonstruktion ausgefahren, die es ermöglichte, zwei leicht unterschiedliche Antennenpositionen zu realisieren. Innerhalb der Ladebucht befand sich die sogenannte Primäranterie, die kontinuierlich Radarimpulse aussendete und wieder empfing. Am Ende des Mastes befand sich die Sekundäranterie, die nur die ausgesendeten Radarsignale aufnahm. Somit war es möglich mit Hilfe komplexer Prozessierungsschritte, ein Digitales Gelände- bzw. Oberflächenmodell der Erde abzuleiten. Zwei Systeme waren an Bord - das Amerikanische SIR-C System sowie das Deutsch / Italienische X-SAR System. Während SIR-C aufgrund des eingesetzten ScanSAR-Modus nahezu flächendeckend die kompletten Landmassen zwischen 60° nördlicher und 56° südlicher Breite erfasste, nahm das X-SAR System die Oberfläche nur lückenhaft auf. Die Breiten der Aufnahmestreifen betragen 225 km bei SIR-C bzw. 50 km bei X-SAR. Ergebnis des X-SAR Systems sind sogenannte ITED-2 Daten (Interferometric Terrain Elevation Data Level 2) – Höhendaten mit einer konstanten Gitterweite von 1 Bogensekunde (Bamler, 1999, Hounam & Werner 1999).

Die Höhendaten müssen hinsichtlich ihrer Qualität überprüft werden, um eine Aussage über die Verwendbarkeit dieser Daten in verschiedenen Anwendungsbereichen treffen zu können. Das Institut für Photogrammetrie und GeoInformation (IPI) der Universität Hannover beschäftigte sich mit dieser Fragestellung. Die Daten wurden mit Referenzdaten der Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen (LGN) verglichen. Genauigkeitsmaße wurden abgeleitet, der Einfluss verschiedenartiger Parameter wurde ermittelt. Die Ergebnisse sollten die Grundlage für die Beurteilung eines weltweit durch die SRTM-Mission gewonnenen Digitalen Oberflächenmodells in Bezug zur Qualität des ITED-2 Produktes bilden. Das Projekt war somit Ausgangsbasis für die Beurteilung der Verwendbarkeit dieser Daten in zukünftigen anwendungsbezogenen und kommerziellen Projekten. Ähnliche Untersuchungen für flugzeuggestützte InSAR-Daten wurden von Kleusberg & Klaedtke 1998 sowie für SRTM C-Band Daten von Rosen et. al 2001 vorgestellt.

### **1.1. ZIELE UND AUFGABENSTELLUNG**

Das Ziel des Projektes war es, eine Aussage über die Qualität der SRTM X-SAR Digitalen Oberflächenmodelle zu treffen. Hierzu sollten die Daten innerhalb eines sehr gut bekannten Testgebietes mit Referenzdaten höherer Genauigkeit verglichen werden. Die Referenzdaten, Koordinaten Trigonometrischer Punkte sowie das sehr genaue Digitale Geländemodell ATKIS DGM5, wurden von der Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen (LGN, <http://www.lgn.de>) zur Verfügung gestellt. Es sollte ein Verfahren entwickelt werden, welches Datensätze unterschiedlicher Herkunft und Genauigkeit miteinander vergleicht und als Ergebnis Abweichungen zwischen den Datensätzen in Form von zufälligen und systematischen Fehlern liefert.

Zusätzlich sollte der Einfluss verschiedener Parameter (Landbedeckung, Geländeneigung) auf die Qualität der SRTM ITED-2 Daten untersucht werden, sodass die Ergebnisse die Grundlage für die Beurteilung der ITED-2 Daten in anderen Gegenden der Erde bilden.

### **1.2. VORAUSSETZUNGEN**

Das Projekt wurde am Institut für Photogrammetrie und GeoInformation der Universität Hannover durchgeführt. Innerhalb des Projektes wurde ein Kooperationsvertrag mit der Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen geschlossen, der besagte, dass die verwendeten Referenzdaten kostenfrei zur Verfügung gestellt werden. Zusätzlich wurden das Geoid- und Quasigeoidmodell angeschafft, sodass die ellipsoidischen SRTM ITED-2

Höhendaten korrigiert werden konnten. Um die eventuell nicht gegebene Aktualität des ATKIS Basis DLM zu kompensieren, wurden des weiteren aktuelle Landsat ETM+ Szenen erworben.

Die Untersuchungen wurden mit Hilfe von vorhandener Hard- und Software durchgeführt. Nicht am Institut zur Verfügung stehende Software wurde innerhalb des Vorhabens entwickelt und implementiert.

Die Arbeiten im Projekt wurden von Frau Dipl.-Ing. Sabine Beutner aufgenommen, die bis Ende August 1999 vorbereitende Arbeiten für das Projekt geleistet hat. Zum 1.9.1999 wurde Herr Dipl.-Ing. Andreas Koch in dem Projekt eingestellt, der das Projekt bis zum Abschluss bearbeitet hat. Besondere Tätigkeiten wurden mit Hilfe studentischer wissenschaftlicher Hilfskräfte und Technischen Mitarbeitern durchgeführt. Vor allem bei den zeitgleich zur Mission durchgeführten Feldbegehungen sowie bei einigen Auswertearbeiten kamen wissenschaftliche Hilfskräfte zum Einsatz.

### **1.3. PLANUNG UND ABLAUF DES VORHABENS**

Die zeitliche Durchführung der Arbeiten wich von der ursprünglichen Planung ab, da zum einen die Mission mehrmals verschoben und zum anderen die SRTM Daten später als geplant zur Verfügung gestellt wurden. Dem ursprünglichen Start der Mission im September 1999 sollte eine Bereitstellung der Daten im April 2000 folgen. Tatsächlich fand die Mission im Februar 2000 statt, sodass bereits eine Zeitverzögerung von 4½ Monaten vorhanden war. Die Daten wurden erst im September 2001 bereitgestellt – bereits ein Jahr nach dem ursprünglich geplanten Ende des Projektes. Dieses hatte zur Folge, dass während der ersten Projektphase vom 1.7.1999 bis 30.9.2000 - der eigentlichen Projektlaufzeit - keinerlei Untersuchungen der SRTM Daten durchgeführt werden konnten. Das Projekt wurde kostenneutral verlängert und erhielt eine erneute Finanzierung vom 1.9.2001 bis 31.3.2002. In dieser Phase wurde die Untersuchung der SRTM Daten durchgeführt. Nach Ablauf dieser Zeit war das Projekt beendet.

Die Arbeiten in diesem Vorhaben werden nachfolgend für beide Projektabschnitte, d.h. vor und nach der kostenneutralen Verlängerung, beschrieben.

### **1.3.1 Erster Projektabschnitt**

Der erste Projektabschnitt – die ursprüngliche Laufzeit des Projektes – begann am 1.7.1999 und endete am 30.9.2000. Der Projektplan gliederte sich in sechs Arbeitspakete (AP), die nachfolgend beschrieben werden. Zusätzlich durchgeführte Arbeiten und Entwicklungen enthält der Punkt „SONSTIGES“.

**AP 100** Beschaffung, Vorbereitung der Referenzdaten und Referenzmessungen

**AP 200** Vorerkundung und Feldmessung

**AP 300** Aufbereitung, Prüfung der Referenzdaten und Referenzmessungen

**AP 400** Überprüfung und Integration der SRTM-Daten

**AP 500** GIS gestützte Analyse

**AP 600** Ergebnisdokumentation, Schlussbericht

**SONSTIGES** Zusätzliche Arbeiten und Entwicklungen

#### AP 100 BESCHAFFUNG, VORBEREITUNG DER REFERENZDATEN UND REFERENZMESSUNGEN

Die Referenzdaten wurden nahezu komplett von der LGN zur Verfügung gestellt. Luftbilder wurden innerhalb der ersten Projektphase nicht benötigt, da vor der Auswahl relevanter Gebiete die SRTM ITED-2 Daten visuell überprüft und auf dieser Grundlage kleinere Testflächen ausgewählt werden sollten.

Das Geoid- und Quasigeoidmodell EGG97 wurde vom Institut für Erdmessung der Universität Hannover erworben. Des weiteren wurden zwei Landsat ETM+ Szenen angeschafft, die im September 1999 bzw. im Februar 2000 aufgenommen wurden.

Zur Planung der Feldbegehungen wurde das ATKIS Basis DLM in das Desktop GIS Arcview importiert. Des weiteren wurde das ATKIS DGM 50, die Topographischen Karten TK 25 sowie die DGK 5 für erste vorbereitende Arbeiten herangezogen. Die Karten lagen in digitaler Form vor, sodass diese importiert und georeferenziert werden mussten. Eine detaillierte Beschreibung der Referenzdaten enthält Kapitel 2.2.1. Mit Hilfe der Höheninformationen des DGM 50 und der daraus abgeleiteten Neigung und Struktur des Geländes wurde das Untersuchungsgebiet in verschiedene Geländeklassen eingeteilt, sodass die Auswahl kleinerer

Testflächen erleichtert wurde. Es wurden 20 2x2 km<sup>2</sup> große „Sample Sites“ (Testflächen) ausgewählt, die unterschiedliche genauigkeitsbeeinflussende Faktoren beschreiben. Innerhalb dieser Sample Sites wurden während der Mission die Feldbegehungen durchgeführt.

Die weiteren Referenzdaten - die Koordinaten Trigonometrischer Punkte und das ATKIS DGM5 - wurden aufbereitet. Die TP's wurden vorklassifiziert, d.h. Hochpunkte auf Kirchtürmen und andere Hochziele wurden aus dem Datensatz entfernt. Die einzelnen Kacheln des DGM5 mussten zusammengefasst werden, um komplett mit den SRTM-Daten verglichen werden zu können.

Auf Grundlage der Deutschen Grundkarte 1:5.000 (DGK 5) wurden Feldrisse erstellt, in denen die Ergebnisse des Feldvergleiches eingetragen werden sollten. Um eine einheitliche Bezeichnung und Symbolik der Feldrisse zu gewährleisten, wurde eine Legende erstellt.

#### AP 200 VORERKUNDUNG UND FELDMESSUNG

Auf eine Vorerkundung des Geländes wurde verzichtet, da das Testgebiet bereits vor der Antragstellung erkundet wurde. Zudem war das Untersuchungsgebiet aus vergangenen Projekten bekannt.

Um die Feldbegehungen logistisch einwandfrei durchführen zu können, wurden Anfahrtswege zu den einzelnen Sample Sites mit Hilfe der Topographischen Karten sowie im Privatbesitz befindliche Straßenverkehrskarten erstellt. Die wissenschaftlichen Hilfskräfte wurden eingewiesen und mit den Kartenmaterialien und Feldrissen vertraut gemacht. Ab September 1999 waren die Mitarbeiter „in Bereitschaft“, da der Start des Space Shuttle Endeavour mehrmals verschoben wurde und die Felderhebungen zeitgleich bzw. zeitnah zur Mission stattfinden sollten. Die Vor-Ort-Felderhebungen wurden zeitgleich zur Mission im Februar 2000 durchgeführt, wobei die Geländetopographie mit dem „Inhalt“ der DGK 5 bzw. dem ATKIS Basis DLM verglichen wurde. Abweichungen und Ergänzungen wurden in den Feldrissen eingetragen. Zusätzlich wurden Landbedeckung, Landnutzung, Vegetationshöhe, Bodenfeuchtigkeit, Witterungsverhältnisse und weitere Besonderheiten notiert. Die Eintragungen orientierten sich dabei an einer zuvor erstellten Legende (siehe AP 100), um die spätere Auswertung und Integration ins GIS zu vereinfachen.

#### AP 300 AUFBEREITUNG, PRÜFUNG DER REFERENZDATEN UND REFERENZMESSUNGEN

Die Landsat ETM+ Szenen wurden geokodiert und in das Koordinatensystem der restlichen Referenzdaten transformiert. Es wurde zum einen eine unüberwachte Landnutzungsklassifizierung der ETM+ Szenen durchgeführt, zum anderen wurden die Felderhebungen verwendet, um als Trainingsgebiete für die überwachte Landnutzungsklassifizierung zu dienen. Die Klassifizierungen wurden mit Hilfe beider verfügbarer Szenen erstellt, wobei die Ergebnisse untereinander sowie mit dem ATKIS Basis DLM verglichen wurden.

Die weiteren Referenzdaten wurden visuell und rechnerisch überprüft. Die Digitalen Geländemodelle wurden auf Vollständigkeit sowie untereinander mit Hilfe eines relativen Vergleichs beider Modelle kontrolliert.

#### AP 400 ÜBERPRÜFUNG UND INTEGRATION DER SRTM-DATEN

Da im ersten Projektabschnitt keine SRTM-Daten vorlagen, konnten die SRTM-Daten nicht überprüft und integriert werden.

#### AP 500 GIS GESTÜTZTE ANALYSE

Ebenfalls konnten keine GIS gestützten Analysen durchgeführt werden. Stattdessen wurden Simulationen durchgeführt, sodass dadurch eine Überprüfung der Referenzdaten gegeben war.

#### AP 600 ERGEBNISDOKUMENTATION, SCHLUSSBERICHT

Aufgrund des bereits angesprochenen verschobenen Starts der Mission konnte im ersten Projektabschnitt kein Schlussbericht und keine Ergebnisdokumentation erstellt werden.

#### SONSTIGES ZUSÄTZLICHE ARBEITEN UND ENTWICKLUNGEN

Innerhalb des ersten Projektabschnittes wurden verschiedenartige Programme entwickelt, die es ermöglichten, den späteren Arbeitsablauf der Integration der SRTM-Daten zu vereinfachen und zu beschleunigen.

Zusätzlich wurde ein Verfahren entwickelt, welches verschiedenartige Höhendatensätze miteinander vergleicht. Dieses Verfahren vergleicht die zuvor transformierten ITED-2 Daten mit den Referenzdaten der LGN.

Die Programme wurden mit Hilfe von Testdatensätzen hinreichend kontrolliert, um nach Erhalt der SRTM-Daten einen reibungslosen

Datenimport und eine reibungslose Vorverarbeitung der Daten zu gewährleisten.

### **1.3.2 Zweiter Projektabschnitt**

Die Arbeiten im zweiten Projektabschnitt begannen im September 2001. Die SRTM-Daten wurden dem IPI zur Verfügung gestellt, sodass die eigentliche Untersuchung der Qualität der Daten begonnen werden konnte. Die Arbeiten wurden wiederum in Arbeitspakete eingeteilt, welche nachfolgend aufgelistet und beschrieben werden.

**AP 100** Vorarbeiten, Beschaffung und Vorbereitung der Referenzdaten

**AP 200** Datenaufbereitung und Referenzdatenbeschaffung

**AP 300** Genauigkeitsanalyse

**AP 400** Ergebnisdokumentation und Schlussbericht

#### AP 100 VORARBEITEN, BESCHAFFUNG UND VORBEREITUNG DER REFERENZDATEN

Während der einjährigen Phase, in der keine Finanzierung des Projektes gegeben war, wurden aufgrund der Datenmenge der Referenzdaten diese zum Teil archiviert. Um möglichst schnell auf diese zugreifen zu können, mussten diese erneut zugänglich gemacht werden.

Von den Referenzdaten stand zu diesem Zeitpunkt die Beschaffung der Luftbilder im Maßstab 1:12.000 noch aus. Es wurden zwei Testflächen ausgewählt, in denen Luftbilder einschließlich Orientierungsdaten aus dem Jahre 1999 zur Verfügung standen.

Die Orientierungsdaten wurden konvertiert. Die Luftbilder wurden in analoger Form zur Verfügung gestellt, sodass eine analytische Auswertung der Bilder möglich war.

#### AP 200 DATENAUFBEREITUNG UND REFERENZDATENBESCHAFFUNG

Die SRTM-Daten wurden in das System der Landeskoordinaten transformiert.

In den zwei ausgewählten Testflächen (siehe AP 100) wurde ein Digitales Oberflächenmodell am analytischen Auswertegerät gemessen. Jedes Testgebiet bestand aus vier Stereomodellen, wobei nach Durchführung der Messungen die vier Teilbereiche zusammengefügt wurden.

#### AP 300 GENAUIGKEITSANALYSE

Zu Beginn der Genauigkeitsanalyse wurde die Lagegenauigkeit der GTC Radarbilder untersucht. Dazu wurden an eindeutig identifizierbaren Wasserflächen Differenzvektoren zwischen ATKIS Basis DLM und GTC Bild digitalisiert, aus denen eine mittlere Lageverschiebung in Nord-Süd- und Ost-West-Richtung berechnet wurde.

Es wurden Höhendifferenzen zwischen den Koordinaten der Trigonometrischen Punkte und den ITED-2 Daten sowie zwischen DGM5 und ITED-2 berechnet. Aus diesen Differenzen wurden Qualitätsmaße abgeleitet, die die absolute Genauigkeit der SRTM ITED-2 Daten innerhalb des Untersuchungsgebietes repräsentieren.

Das DGM5 wurde mit Hilfe des ATKIS Basis DLM klassifiziert. Ziel war es, das DGM5 in verschiedene Objektklassen einzuteilen, um innerhalb dieser Klassen weitere Genauigkeitsuntersuchungen durchführen zu können.

Des Weiteren wurden Untersuchungen des Einflusses des lokalen Einfallswinkels durchgeführt, wobei das Gelände mit Hilfe des vom DLR zur Verfügung gestellten Bildes der Einfallswinkel in verschiedene Klassen eingeteilt wurde. Die Untersuchung des Einflusses von Schnee auf die Qualität der Daten konnte nur innerhalb eines kleineren Testgebietes durchgeführt werden, da nur hier die teilweise Abdeckung mit Schnee gegeben war. Die 2x2 km<sup>2</sup> großen Teilflächen wurden mit Hilfe des Desktop GIS Arcview bearbeitet.

Die Ergebnisse der analytischen photogrammetrischen Auswertung wurden ebenfalls in Arcview integriert, sodass innerhalb dieser zwei Teilflächen ein Vergleich zweier Oberflächenmodelle durchgeführt werden konnte. Mit Hilfe des ATKIS Basis DLM und der in das GIS integrierten Felderhebungen konnten detailliertere Untersuchungen innerhalb dieser Teilflächen durchgeführt werden.

#### AP 400 ERGEBNISDOKUMENTATION UND SCHLUSSBERICHT

Die erarbeiteten Ergebnisse wurden in einer Ergebnisdokumentation erfasst. Teilergebnisse wurden dem DLR Oberpfaffenhofen bereitgestellt.

### **1.4. ZUSAMMENARBEIT MIT ANDEREN STELLEN**

Wie bereits erwähnt wurde mit der Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen ein Kooperationsvertrag geschlossen, in dem festgelegt ist, dem

## Beschreibung des Vorhabens

IPI Referenzdaten kostenfrei zur Verfügung zu stellen. Im Gegenzug versprach sich die LGN von dem Projekt primär den Aufbau von Know-How im eigenen Hause.

Des weiteren bestand Kontakt zum Institut für Erdmessung (IfE, <http://www.ife.uni-hannover.de>) der Universität Hannover. Das IfE beschäftigt sich vor allem mit der Modellierung des Schwerefeldes und diente somit als Datenlieferant und fachlicher Berater zu Fragen der Korrektur der ellipsoidischen Höhen.

Beschreibung des Vorhabens

# **Kapitel 2**

## **Beschreibung des Testgebietes und der verwendeten Daten**

### **2.1. DAS TESTGEBIET**

Das Testgebiet mit einer Größe von 50x50 km<sup>2</sup> befindet sich südlich von Hannover. Der nördlichste Teil des Gebietes enthält das Gelände der Weltausstellung EXPO2000. Des weiteren befinden sich die Städte Hildesheim, Hameln und Barsinghausen im Gebiet. Die Fläche ist größer als ein SRTM Streifen, sodass dadurch etwaige Orbitverschiebungen kompensiert werden konnten.

Der Norden ist charakterisiert durch flaches Gelände. Sehr bewegtes Gelände bis hin zu Mittelgebirge kennzeichnet die süd-westlichen Bereiche. Große Waldflächen, aber auch landwirtschaftlich genutzte Flächen, Grünland und urbane Bereiche charakterisieren das Testgebiet. Der Norden enthält verschiedene Wasserflächen, die Weser durchfließt den westlichen Bereich.

Der maximale Höhenunterschied beträgt etwa 450 m. Die nachfolgende Abb. 2.1 stellt das Testgebiet dar.



*Abb. 2.1 Das Testgebiet, Ausschnitt aus der Topographischen Karte 1:200.000, nicht maßstäblich*

## **2.2. DIE VERWENDETEN DATEN**

### **2.2.1 Referenzdaten**

Die Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen (LGN Hannover) hat dem Institut für Photogrammetrie und GeoInformation (IPI) der Universität Hannover Referenzdaten zur Nutzung innerhalb des Projektes „Qualitätsuntersuchung und Validierung von SRTM ITED-2 Daten in Niedersachsen“ zur Verfügung gestellt:

- Koordinaten Trigonometrischer Punkte
- ATKIS DGM5
- ATKIS DGM50
- ATKIS Basis DLM
- Luftbilder im Maßstab 1:12.000

Zusätzlich wurden angeschafft:

- Geoid- und Quasigeoidmodell
- Landsat 7 Satellitendaten

## Beschreibung des Testgebietes und der verwendeten Daten

Im nachfolgenden sollen die Daten näher beschrieben werden.

### KOORDINATEN TRIGONOMETRISCHER PUNKTE (TP)

Trigonometrische Punkte bilden das Grundlagennetz der Landesvermessungen in Deutschland. 1457 Punkte, festgelegt durch Koordinaten X, Y und Z, liegen im Untersuchungsgebiet. Die Genauigkeit wird seitens der Landesvermessung mit 1 bis 2 cm in der Lage sowie 3 cm in der Höhe angegeben. Angaben über die Punktart liegen vor, sodass Hochpunkte (Kirchtürme etc.) vorklassifiziert werden konnten.

### ATKIS DGM5

Das gitterförmige Digitale Geländemodell ATKIS DGM5 liegt mit einer Gitterweite von 12,5 m vor. Zusammen mit Strukturinformationen bildet es ein hybrides DGM. Die Genauigkeit wird mit 0,5 – 1,5 m angegeben, sie ist abhängig von der Geländeneigung. In der Vergangenheit war das Herstellungsverfahren hauptsächlich die analytische Photogrammetrie. Heute wird vor allem das Laserscanner-Verfahren eingesetzt. Ergänzt bzw. kontrolliert werden die Daten durch terrestrische Tachymeteraufnahmen. Die linke Seite der Abb. 2.2 stellt das DGM5 dar, welches innerhalb des Projektes zur Verfügung stand.

4,77 Millionen Punkte bilden den DGM5 Datensatz. Es standen ein etwa 25x25 km<sup>2</sup> großes Gebiet im Süd-Westen des Untersuchungsgebietes sowie weitere etwa 2x2 km<sup>2</sup> große Flächen zur Verfügung. Die Bereiche wurden anhand der Flächencharakteristika ausgewählt, sodass die aus der Literatur bekannten genauigkeitsbeeinflussenden Faktoren sich in den vom DGM5 abgedeckten Bereichen widerspiegeln.

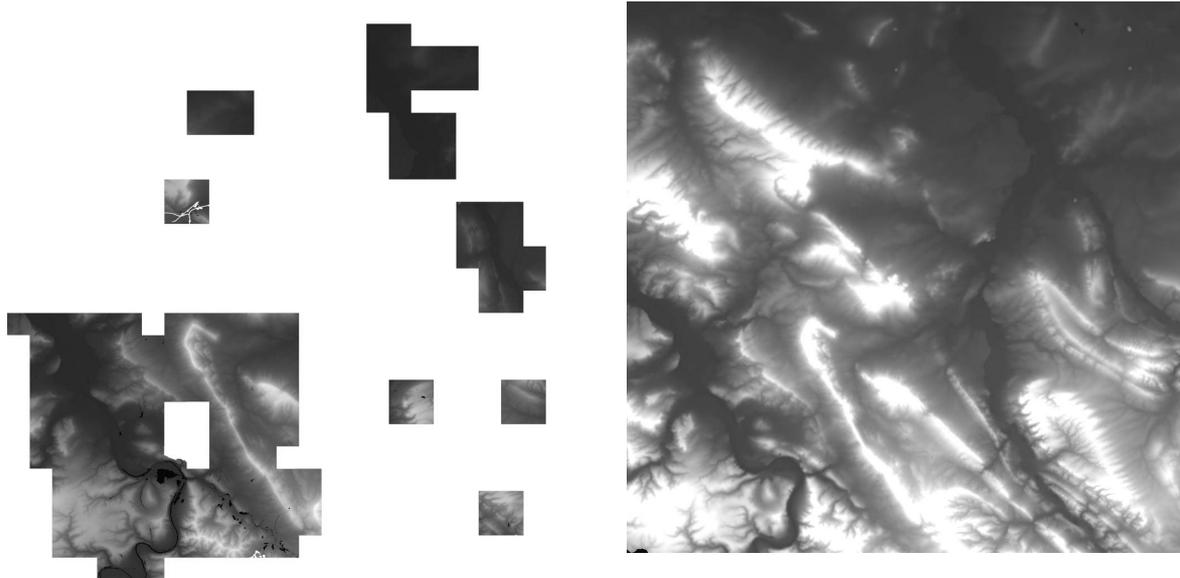


Abb. 2.2 Referenzdaten, links: ATKIS DGM5, rechts: ATKIS DGM50

#### ATKIS DIGITALES GELÄNDEMODELL DGM50

Das ATKIS DGM50 (Abb. 2.2 rechts) liegt flächendeckend vor. Die Gitterweite beträgt 50 m. Die Genauigkeit ist schlechter als die des DGM5, sie beträgt mehrere Meter und kann in gebirgigen Bereichen 10 m übersteigen. Das DGM50 wurde durch die Digitalisierung der Höheninformation der Topographischen Karte 1:50.000 (TK50) abgeleitet. Etwa 1 Million Punkte bedecken das Untersuchungsgebiet.

#### ATKIS BASIS DLM

Das Digitale Landschaftsmodell ATKIS Basis DLM beschreibt die Landoberfläche zweidimensional. Die Topographie wird mit Hilfe von Objekten dargestellt. Die Objekte können punkt-, linien- oder flächenförmig sein. Die Einteilung orientiert sich an dem ATKIS-Objektartenkatalog. Dieser gliedert sich in 7 Objektbereiche, die wiederum Objektgruppen enthalten. Das einzelne Objekt wird durch die Objektart einschließlich spezieller Attribute beschrieben.

#### LUFTBILDER

Es standen Luftbilder aus dem Jahre 1999 zur Verfügung, aufgenommen mit einer Normalwinkelkammer (Kammerkonstante = 305 mm) bei einem Bildmaßstab von 1:12.000. Die Bilder wurden für zwei kleinere Testflächen ausgewählt. Die aus diesem Bildmaßstab ableitbare Lage- und Höhengenaugigkeit beträgt 0,1 m bzw. 0,4 m. Die Bilder lagen in analoger Form vor.

Beschreibung des Testgebietes und der verwendeten Daten

#### GEOID- UND QUASIGEOIDMODELL

Um die ellipsoidischen Höhen zu korrigieren, wurde das Geoid- und Quasigeoidmodell EGG97 (European Gravimetric Geoid / Quasigeoid) angeschafft. Die Daten stehen mit einer Gitterweite von 1x1,5 Bogenminuten (Nord-Süd mal Ost-West) zur Verfügung. Die Geoidundulation innerhalb des Untersuchungsgebietes beträgt 45 bis 47 m. Die Differenz zwischen Geoid- und Quasigeoidmodell im Untersuchungsgebiet beträgt maximal -1,0 bis +0,6 cm.

#### LANDSAT 7 SATELLITENBILDER

Zusätzlich wurden zwei Landsat ETM+ Szenen beschafft, aufgenommen im September 1999 sowie im April 2000. Die Daten bestehen aus 8 Kanäle, wobei ein Kanal panchromatisch, ein weiterer thermal ist.

#### FELDERHEBUNGEN

Zeitgleich zur Mission wurden Felderhebungen durchgeführt. In 20 Testflächen der Größe 2x2 km<sup>2</sup> wurden folgende Parameter ermittelt:

- Landnutzung (Ackerland, Grünland, ...)
- Landbedeckung (vegetationslos, Wintergetreide, ...)
- Höhe der Vegetation
- Bodenfeuchtigkeit (trocken, nass, schneebedeckt)
- Besonderheiten (Metalldach, ...)

Die Testflächen wurden bereits vor der Mission anhand unterschiedlicher Parameter ausgewählt, um die Auswirkungen verschiedener genauigkeitsbeeinflussender Faktoren untersuchen zu können.

### **2.2.2 Daten der Shuttle Radar Topography Mission**

Ergebnis der Mission sind unterschiedliche Datensätze – ein Digitales Oberflächenmodell, Radarbilder sowie weitere nur den Principal Investigators (PIs) zur Verfügung gestellte Daten (Kohärenzbilder, Bilder der lokalen Einfallswinkel).

#### ITED-2 DEM

ITED-2 ist die Abkürzung für „Interferometric Terrain Elevation Data Level 2“. Es handelt sich dabei um digitale Höhendaten, welche mittels Radar Interferometrie generiert wurden. Level 2 kennzeichnet den Rasterabstand der Höhendaten. Die Daten liegen in einem quadratischen Gitter von 1 Bogensekunde vor. Das X-Band

System bildet die Oberfläche aufgrund der sehr kleinen Wellenlänge von 3,2 cm einschließlich Vegetation und Gebäude ab. Es handelt sich demnach um ein Digitales Oberflächenmodell (DOM). Tab. 2.1 fasst die Datencharakteristika zusammen. Die Daten wurden im DTED Datenformat ausgegeben, Datentyp ist Signed 16 Bit. Das Höheninkrement beträgt ein Meter. Es handelt sich um ellipsoidische Koordinaten, die Höhenwerte beziehen sich auf das geozentrische Erdellipsoid WGS84.

Datentyp	Signed 16 Bit
Datenformat	DTED
Höheninkrement	1 Meter
Gebietsbegrenzung	Breite Länge
Nord-Osten	52°30' 10°00'
Süd-Westen	51°45' 9°15'

Tab. 2.1 Datencharakteristika der SRTM ITED-2 Daten

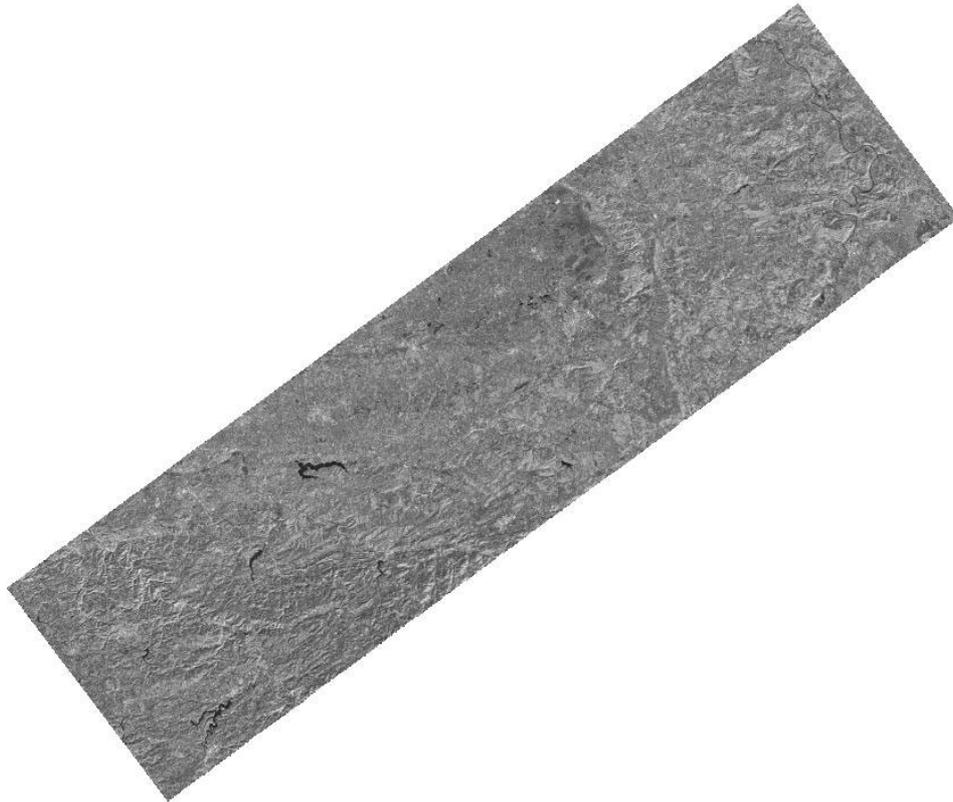
#### GTC SAR BILDER

GTC ist die Abkürzung für geocoded terrain corrected. Es handelt sich dabei um Amplitudenbilder, wobei die SAR Slant Range Geometrie in eine Kartenprojektion transformiert wurde (Geokodierung). Zusätzlich wurde ein Digitales Geländemodell verwendet, um die in der Slant Range Geometrie durch Höhenunterschiede verursachten Abbildungsfehler zu korrigieren (Geländekorrektur). Die Bilder besitzen eine Pixelgröße von 25 m. Die Daten beziehen sich auf die UTM Kartenprojektion, Bezugsellipsoid ist WGS84. Streifen von jeweils 150x50 km<sup>2</sup> werden berechnet, der Datentyp ist Signed 16 Bit. Abb. 2.3 stellt das GTC SAR Bild dar.

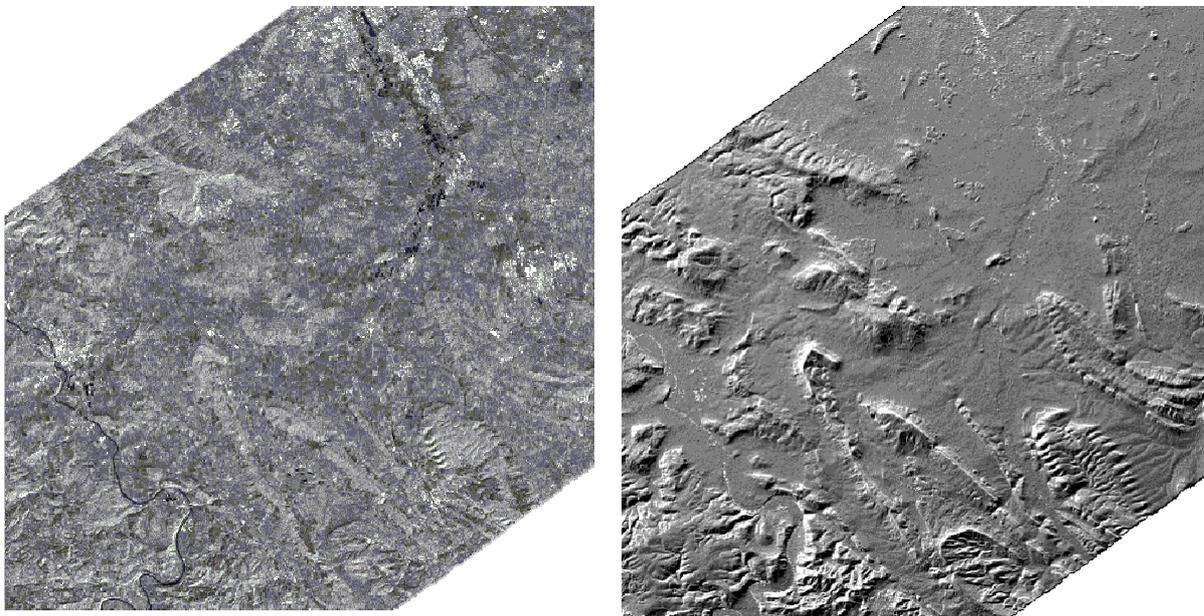
#### KOHÄRENZBILD

Die Kohärenz beschreibt die Abhängigkeit beider Bilder, die für die Herstellung des Digitalen Oberflächenmodells verwendet wurden. Da es sich bei der SRTM Mission um Single-Pass-Interferometrie handelt und somit die Aufnahmen zeitgleich gemacht wurden, liegt im Mittel hohe Kohärenz vor. Das Kohärenzbild (Abb. 2.4 links) stellt die Werte zwischen 0 und 1 dar. 0 bedeutet, dass keine Kohärenz vorhanden ist, der Wert 1 bezeichnet die maximale Kohärenz.

Beschreibung des Testgebietes und der verwendeten Daten



*Abb. 2.3 GTC SAR Bild, aufsteigender Orbit*



*Abb. 2.4 SRTM Bilddaten, links: Kohärenzbild, rechts: Bild der lokalen Einfallswinkel*

Beschreibung des Testgebietes und der verwendeten Daten

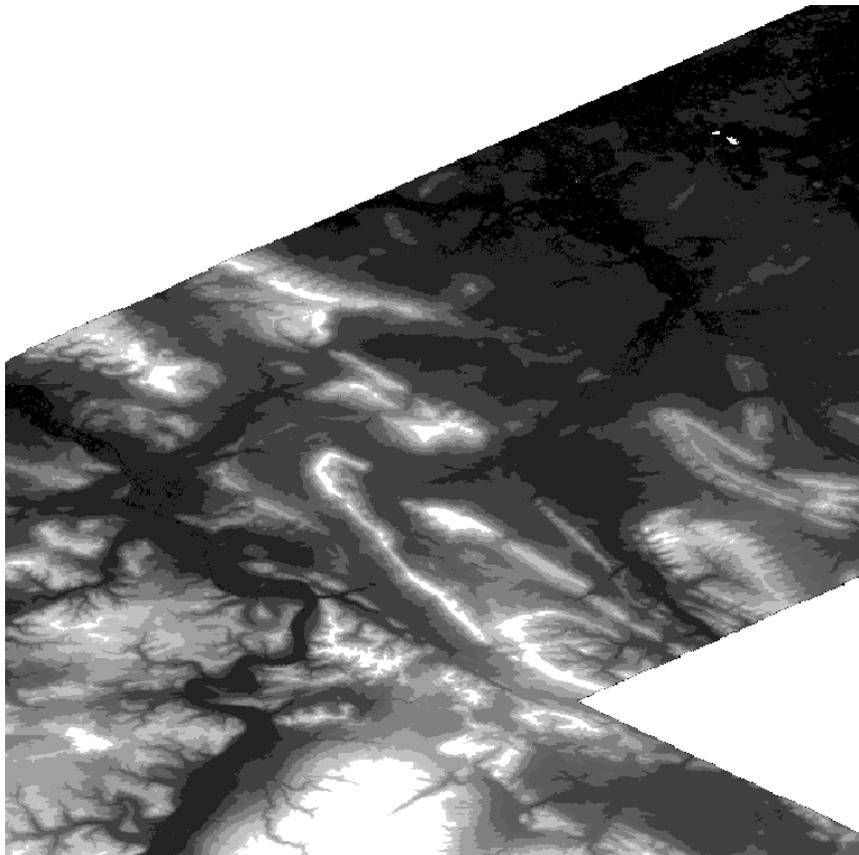
#### BILD DER LOKALEN EINFALLSWINKEL

Das Bild stellt die lokalen Einfallswinkel in Zehntel Grad dar. Die Pixelgröße ist mit den Pixelgrößen der GTC Radarbilder sowie des Kohärenzbildes identisch. Es wird ein Wert pro Fläche der Größe 25x25 m<sup>2</sup> dargestellt.

# Kapitel 3

## Visuelle Überprüfung der SRTM-Daten

Die ITED-2 Digitalen Oberflächenmodelle wurden in Kacheln zu je 901x901 Pixel abgegeben. 9 Kacheln überdecken das Testgebiet, je 3 in Nord-Süd- und 3 in Ost-West-Richtung. Der resultierende Datensatz besteht aus  $2.701 \times 2.701 = 7.295.401$  Pixel, wobei nur 5.508.341 Pixel (75%) mit einem gültigen Höhenwert belegt sind. Ungültige Pixel besitzen den Pixelwert  $-32.767$ .



*Abb. 3.1 SRTM ITED-2 Digitales Oberflächenmodell*

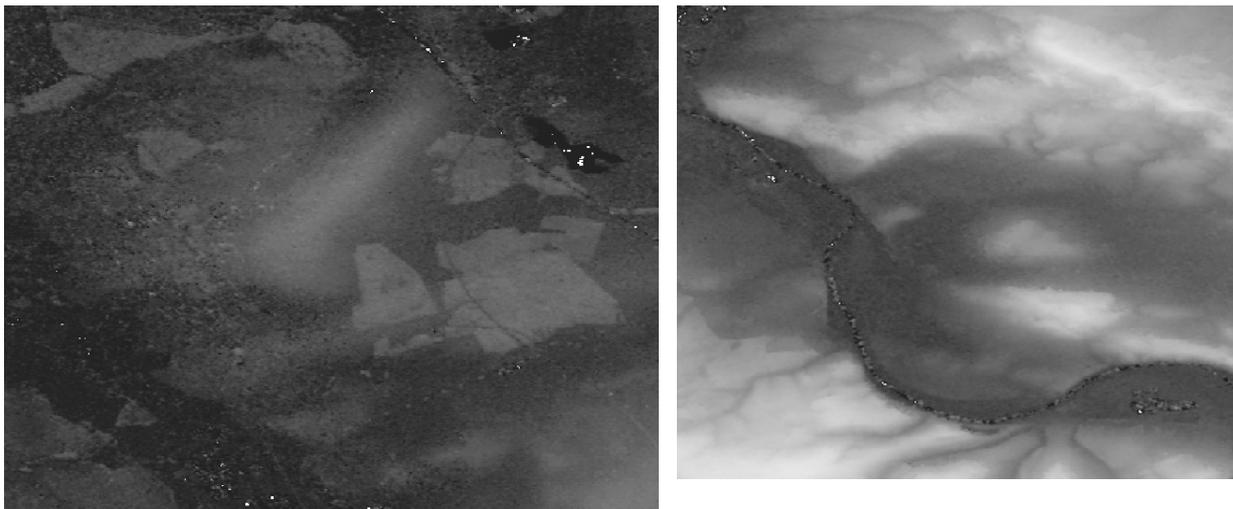
## Visuelle Überprüfung der SRTM-Daten

Der Höhenbereich erstreckt sich von  $-33$  bis  $+588$  m, die Werte sind ganzzahlig und repräsentieren ganze Meter (siehe auch Tab. 2.1).

Abb. 3.1 stellt den ITED-2 Datensatz als grauwertcodiertes Bild dar. Die Geländestruktur, repräsentiert durch charakteristische Gebirgsformen, ist sehr gut wiederzuerkennen.

Die Bilddaten decken ein wesentlich größeres Gebiet ab als das Testgebiet. Streifen zu je  $50 \times 150$  km<sup>2</sup> (senkrecht zur Flugrichtung mal in Flugrichtung) standen zur Verfügung. Es wurden nur die Bereiche detaillierter untersucht, welche das Testgebiet bedecken.

Einzelne Objekte sind kaum zu erkennen. Erst durch Vergrößerung der Ansicht und Verstärkung des Kontrastes ist es möglich, die ITED-2 Daten zu interpretieren. Die nachfolgende Abb. 3.2 zeigt einen Ausschnitt des nördlichen Bereiches. Siedlungs- und Waldumringe können vereinzelt erkannt werden, doch ist der Übergang zu den umliegenden Bereichen teilweise fließend.



*Abb. 3.2 Ausschnitte des SRTM ITED-2 Datensatzes, links: Siedlungs- und Waldflächen, rechts: Fluss „Weser“*

Auf den ersten Blick fällt auf, dass nur die Wasserflächen sehr gut und eindeutig zu erkennen sind. Sie erscheinen sehr dunkel, auch haben die Pixel innerhalb der Wasserflächen keinen einheitlichen Wert. Vielmehr sind Wasserflächen dadurch gekennzeichnet, dass starke Höhensprünge, d.h. starkes Rauschen vorhanden ist. Das Höhenniveau ist in diesem Fall nicht konstant.

Die Pixel des Kohärenzbildes repräsentieren Werte zwischen 0 und 1. Auch dieses Bild bedeckt einen Bereich von  $50 \times 150$  km<sup>2</sup>. Die mittlere Kohärenz im Testgebiet beträgt 0,909. Die niedrigste Kohärenz ist in den Wasser- und Waldflächen sowie

## Visuelle Überprüfung der SRTM-Daten

in den urbanen Bereichen zu finden. Der kleinste Wert beträgt 0,012, der höchste beträgt 0,998. Die Kohärenz steht in direktem Zusammenhang zur Höhengenaugigkeit. Hohe Kohärenz sollte mit hoher Höhengenaugigkeit korrelieren.

Das Bild der lokalen Einfallswinkel stellt Werte in 1/10 Grad dar. Der kleinste Einfallswinkel beträgt  $179 = 17,9^\circ$ , der größte Wert beträgt  $1586 = 158,6^\circ$ , was dem Sensor zugewandtem bzw. abgewandtem Gelände entspricht. Der mittlere Wert im Untersuchungsgebiet beträgt  $55,4^\circ$ .



# **Kapitel 4**

## **Transformation der SRTM-Daten in das System der Landeskoordinaten**

### **4.1. PROBLEMSTELLUNG**

Die SRTM ITED-2 Daten, das GTC Radarbild, das Kohärenzbild sowie das Bild der lokalen Einfallswinkel sind in das Koordinatensystem der Referenzdaten zu transformieren. Die Referenzdaten liegen in der konformen Kartenabbildung Gauß-Krüger bezogen auf das Bessel-Ellipsoid, Datum Potsdam vor. Die Höhen beziehen sich auf Normal-Null (NN) und sind näherungsweise Normalhöhen.

Die ITED-2 Digitalen Oberflächenmodelle sind geographische Koordinaten bezogen auf das geozentrische Erdellipsoid World Geodetic System 1984 (WGS84). Die Höhenwerte sind festgelegt als Abstand über dem Ellipsoid (ellipsoidische Höhe  $h$ ). Sie sind geometrisch definiert. Die Höhenwerte überdecken gitterförmig das Gelände, die Gitterweite beträgt 1 Bogensekunde in Nord-Süd- sowie Ost-West-Richtung. In der Gauß-Krüger Kartenprojektion folgt daraus eine Gitterweite in Ost-West-Richtung von etwa 20 m sowie eine Gitterweite in Nord-Süd-Richtung von etwa 30 m. Die Gitterweite in Ost-West-Richtung ist von der ellipsoidischen Breite abhängig. Diese beträgt für das Untersuchungsgebiet etwa  $52^\circ$ .

Das GTC Radarbild, das Kohärenz- und das Bild der lokalen Einfallswinkel liegen in der Universal Transverse Mercator Projektion (UTM) vor. Bezugsellipsoid ist wiederum WGS84.

Die Transformation der ITED-2 Daten von ellipsoidischen Koordinaten, bezogen auf WGS84, nach Gauß-Krüger, Bessel-Ellipsoid einschließlich Übergang von den geometrisch definierten ellipsoidischen Höhen zu Normalhöhen beinhaltet

verschiedene Transformationsschritte. Die Durchführung der Transformationen geschieht mittels Standardprozeduren der mathematischen Geodäsie.

Der Datumsübergang, d.h. der Übergang von einem ellipsoidischen System in das andere – hier von WGS84 nach Bessel – geschieht mittels räumlicher Ähnlichkeitstransformation (7-Parameter-Transformation). Die Korrektur der ellipsoidischen Höhen wird mit Hilfe des Geoid- bzw. Quasigeoidmodells EGG97 durchgeführt.

#### 4.2. BESTIMMUNG DER TRANSFORMATIONSPARAMETER

Die Transformationsparameter wurden mit Hilfe von zwei Datensätzen hergeleitet. Ziel war es, Parameter in einem lokal begrenzten Gebiet zu benutzen, um eine bestmögliche Transformation zu gewährleisten.

Die Datensätze wurden von der LGN Hannover zur Verfügung gestellt. Dabei handelt es sich um 27 flächenhaft verteilte Punkte, die zum einen als Gauß-Krüger-Koordinaten, zum anderen als geozentrische Koordinaten bezogen auf ETRS'89 vorliegen. ETRS'89 stimmt nahezu mit WGS84 überein, Abweichungen zwischen beiden Systemen können vernachlässigt werden. Abb. 4.1 zeigt die flächenhafte Verteilung der Punkte sowie die Lage des Untersuchungsgebietes (Quadrat), welche bezüglich der Punktverteilung nicht optimal ist.

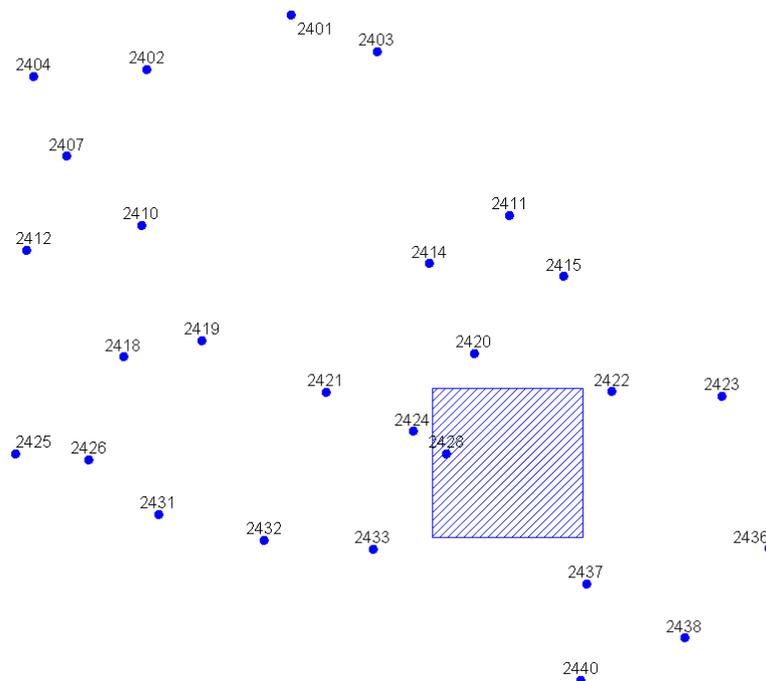


Abb. 4.1 Punkte zur Bestimmung der Transformationsparameter, Untersuchungsgebiet

## Transformation der SRTM-Daten in das System der Landeskoordinaten

Die 7 Parameter wurden mit Hilfe einer Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen ermittelt.

$$\underline{X}_{7,1}^T = [X_0 \ Y_0 \ Z_0 \ \omega \ \varphi \ \kappa \ m] \quad \text{Gl. 4.1}$$

$$\underline{L}_{3 \cdot 27,1}^T = [X_{1,BES} \ Y_{1,BES} \ Z_{1,BES} \ \dots \ X_{27,BES} \ Y_{27,BES} \ Z_{27,BES}] \quad \text{Gl. 4.2}$$

$\underline{X}$  ist der Unbekanntenvektor, dieser enthält die 7 unbekannt zu schätzenden Transformationsparameter.  $\underline{L}$  ist der Beobachtungsvektor, dieser enthält die geozentrischen Koordinaten der 27 identischen Punkte bezogen auf das Bessel-Ellipsoid. D.h. die Gauß-Krüger-Koordinaten sind zuerst in geozentrische Koordinaten zu transformieren. Dieses wird streng mit Hilfe der mathematischen Geodäsie gelöst. Die Anzahl der Beobachtungen n beträgt  $3 \cdot 27 = 81$ . Die Beobachtungen müssen als Funktionen der Unbekannten ausgedrückt werden.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} X_{i,BES} \\ Y_{i,BES} \\ Z_{i,BES} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} + (1+m) \cdot \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_{i,WGS84} \\ Y_{i,WGS84} \\ Z_{i,WGS84} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} + (1+m) \cdot \underline{R}_{\omega\varphi\kappa} \cdot \begin{bmatrix} X_{i,WGS84} \\ Y_{i,WGS84} \\ Z_{i,WGS84} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad \text{Gl. 4.3}$$

Die Rotationsmatrix enthält die unbekannt Drehungen um die Koordinatenachsen, die Rotationsreihenfolge ist  $\omega$ ,  $\varphi$  und  $\kappa$ . Es handelt sich um mitdrehende Achsen.

Die Designmatrix enthält die partiellen Ableitungen der Beobachtungen nach den Unbekannten.

$$\underline{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \frac{\partial r_1}{\partial \omega} X_{i,WGS84} & \frac{\partial r_1}{\partial \varphi} X_{i,WGS84} & \frac{\partial r_1}{\partial \kappa} X_{i,WGS84} & r_1 X_{i,WGS84} \\ 0 & 1 & 0 & \frac{\partial r_2}{\partial \omega} X_{i,WGS84} & \frac{\partial r_2}{\partial \varphi} X_{i,WGS84} & \frac{\partial r_2}{\partial \kappa} X_{i,WGS84} & r_2 X_{i,WGS84} \\ 0 & 0 & 1 & \frac{\partial r_3}{\partial \omega} X_{i,WGS84} & \frac{\partial r_3}{\partial \varphi} X_{i,WGS84} & \frac{\partial r_3}{\partial \kappa} X_{i,WGS84} & r_3 X_{i,WGS84} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \quad \text{Gl. 4.4}$$

Weiterer Rechenablauf:

$$\begin{aligned} \underline{N}_{7,7} &= \underline{A}^T \cdot \underline{P} \cdot \underline{A} \\ \underline{n}_{7,1} &= \underline{A}^T \cdot \underline{P} \cdot \underline{l} \end{aligned} \quad \text{Gl. 4.5}$$

$r_i$  ( $i = 1,2,3$ ) in Gl. 4.4 sind die Zeilen der Rotationsmatrix  $\underline{R}$ .  $\underline{P}$  ist die Gewichtsmatrix, dabei handelt es sich um eine Einheitsmatrix, d.h. alle Beobachtungen gehen mit gleichem Gewicht in die Ausgleichung ein.  $\underline{l}$  ist der gekürzte Beobachtungsvektor,  $\underline{N}$  ist die Normalgleichungsmatrix,  $\underline{n}$  ist der Absolutgliedvektor. Die unbekannt Parameter ergeben sich dann wie folgt:

$$\begin{aligned} \hat{\underline{x}}_{7,1} &= \underline{N}^{-1} \underline{n} \\ \hat{\underline{X}}_{7,1} &= \underline{X0} + \hat{\underline{x}} \end{aligned} \quad \text{Gl. 4.6}$$

Der Vektor  $\underline{X0}$  enthält die Näherungswerte. Die ermittelten Werte ergeben sich nach Tab. 4.1:

	Wert		Wert
X0 [m]	-590.546	X0 [m]	-590.546
Y0 [m]	-71.998	Y0 [m]	-71.998
Z0 [m]	-403.710	Z0 [m]	-403.710
$\omega$ [''']	0.500	$\omega$ [°]	0.000139
$\varphi$ [''']	0.176	$\varphi$ [°]	0.000049
$\kappa$ [''']	3.376	$\kappa$ [°]	0.000938
m [ppm]	-9.204	m [ ]	0.0000092

Tab. 4.1 Transformationsparameter für Datumsübergang WGS84 – Bessel

Die Drehungen beziehen sich auf den Ursprung des geozentrischen Systems WGS84.

### 4.3. TRANSFORMATION DER ITED-2 DIGITALEN OBERFLÄCHENMODELLE

Die ITED-2 Daten wurden mit Hilfe der zuvor bestimmten Transformationsparameter sowie der Standardalgorithmen der mathematischen Geodäsie in Gauß-Krüger-Koordinaten, sowie sich auf Normal-Null beziehende Höhen überführt. Abb. 4.2 stellt den Ablauf der Transformation dar.

## Transformation der SRTM-Daten in das System der Landeskoordinaten

Die ellipsoidischen Höhen  $h$  wurden mittels Geoidundulation korrigiert:

$$H = h - N \quad \text{Gl. 4.7}$$

Gl. 4.7 führt zu orthometrischen Höhen. Der Unterschied zwischen Quasigeoid- und Geoid innerhalb des Testgebietes ist vernachlässigbar, die Differenzen liegen zwischen  $-0.01$  m und  $+0.006$  m (siehe 2.2.1). D.h. die Differenzen zwischen orthometrischen Höhen und Normalhöhen können im Testgebiet vernachlässigt werden.

$$H = h - N \approx H_N = h - \zeta \quad \text{Gl. 4.8}$$

Gl. 4.8 hat nur innerhalb des Untersuchungsgebietes Gültigkeit.

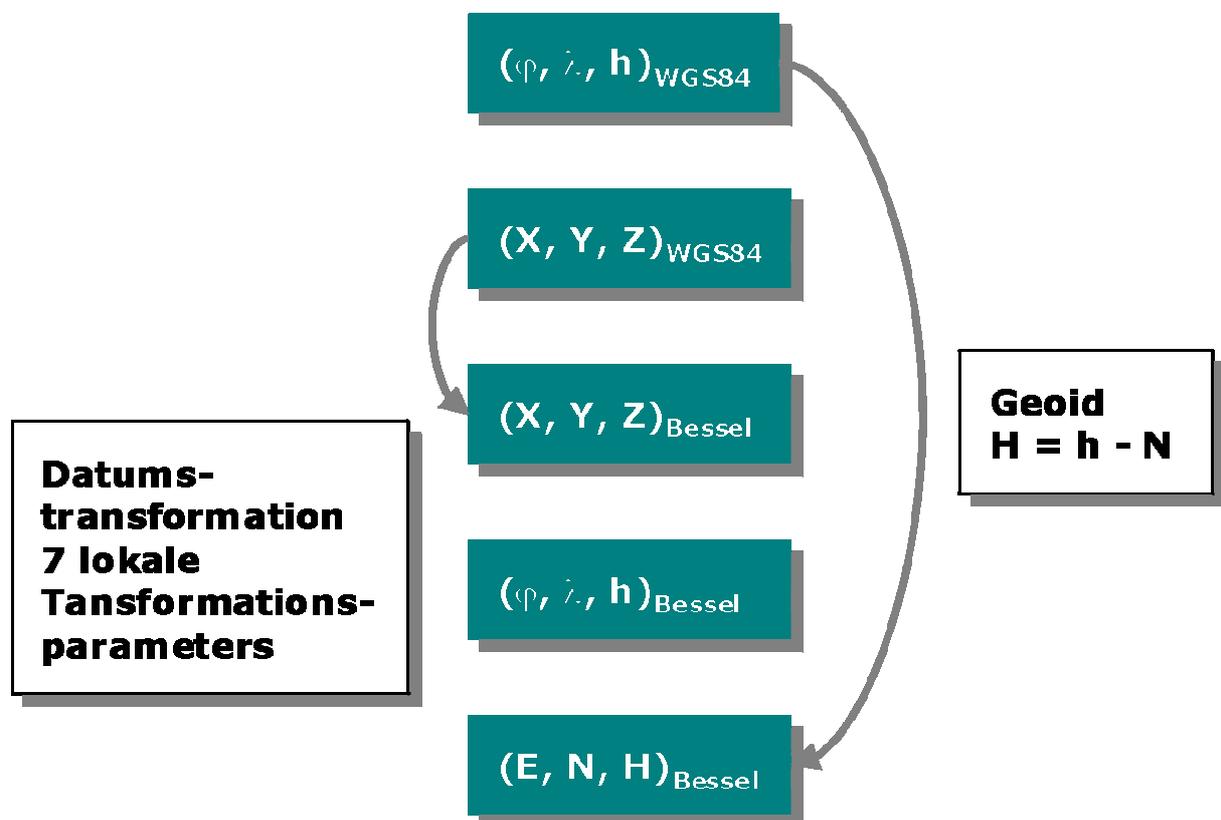


Abb. 4.2 Ablaufschema der Transformation der ITED-2 Daten in das System der Landeskoordinaten



# **Kapitel 5**

## **Verfahren zur Zuordnung**

### **Digitaler Höhendaten – 3D Least Squares Matching**

Um eine Aussage über die Qualität Digitaler Gelände- bzw. Oberflächenmodelle zu machen, werden diese zumeist mit Referenzdaten besserer Qualität verglichen. Ein am IPI entwickeltes Verfahren passt die zu analysierenden Daten – in unserem Fall die SRTM ITED-2 Daten – und die Referenzdaten bestmöglich aufeinander ein. Das Verfahren ist eine Erweiterung des bekannten Verfahrens der Bildzuordnung nach kleinsten Quadraten (Least Squares Matching). Beim Least Squares Matching wird eine Referenzmatrix mit Hilfe einer geometrischen und radiometrischen Transformation auf die Suchmatrix abgebildet. Das innerhalb des Projektes entwickelte Verfahren, auch 3D Least Squares Matching genannt, basiert anstelle der ebenen Affintransformation und der radiometrischen Transformation auf einer räumlichen Ähnlichkeitstransformation (7-Parameter-Transformation). Das Verfahren ist ebenfalls vergleichbar mit der Verwendung eines DGM zur absoluten Orientierung eines photogrammetrischen Blockes (Ebner & Strunz 1988). Ein ähnliches Verfahren wurde von (Schenk et. al 2000) entwickelt.

Die sieben zu bestimmenden Parameter beschreiben systematische Abweichungen der SRTM ITED-2 Daten innerhalb des Untersuchungsgebietes in Bezug zum Referenzdatensatz. Restfehler nach der Durchführung der Transformation können als lokale systematische Fehler oder zufällige Fehler interpretiert werden.

## 5.1. MATHEMATISCHES MODELL

Einzelne Punkte  $P(X, Y, Z)$  enthalten Höheninformation über ein bestimmtes Gebiet. Sie sind durch Koordinaten  $X$ ,  $Y$  und  $Z$  definiert und können zu Vektoren zusammengefasst werden:

$$\begin{aligned} G_1 &= \{P_{11} \ P_{12} \ \dots \ P_{1i} \ \dots \ P_{1n}\} \\ G_2 &= \{P_{21} \ P_{22} \ \dots \ P_{2j} \ \dots \ P_{2m}\} \end{aligned} \quad \text{Gl. 5.1}$$

Der Referenzdatensatz  $G_1$  enthält  $n$  regelmäßig oder unregelmäßig verteilte Punkte.  $G_2$  besteht aus  $m$  Punkten, welche die gleiche physische Oberfläche wie  $G_1$  beschreiben.  $G_2$  ist der zu untersuchende Datensatz, in unserem Fall die SRTM ITED-2 Daten.

Im Idealfall muss die folgende Gleichung erfüllt sein. Die Datensätze sind identisch, es sind keinerlei systematische und zufällige Fehler vorhanden.

$$Z_{1i}(X_{1i}, Y_{1i}) = Z_{2i}(X_{2i}, Y_{2i}) \quad \text{Gl. 5.2}$$

Aufgrund möglicher globaler systematischer Fehler können die zwei Datensätze gegeneinander verschoben sein, sie können gegeneinander gedreht sein und können sich im Maßstab voneinander unterscheiden.

Demzufolge wird eine räumliche Ähnlichkeitstransformation eingeführt:

$$Z_{1i}(X_{1i}, Y_{1i}) = Z_0 + (1 + m) \cdot \underline{r}_3 \cdot \underline{X}_{2i} \quad \text{Gl. 5.3}$$

mit

$$\begin{pmatrix} X_{1i} \\ Y_{1i} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \end{pmatrix} + (1 + m) \cdot \begin{pmatrix} \underline{r}_1 \\ \underline{r}_2 \end{pmatrix} \cdot \underline{X}_{2i} \quad \text{Gl. 5.4}$$

$$\underline{X}_{2i}^T = (X_{2i} \ Y_{2i} \ Z_{2i}); \quad \underline{R}^T = (\underline{r}_1 \ \underline{r}_2 \ \underline{r}_3)$$

Die Punkte  $P_{2i}$  werden mit Hilfe der 7 Parameter einer räumlichen Ähnlichkeitstransformation in das Koordinatensystem des Referenzdatensatzes transformiert.  $Z_0$  ist die Translation in der Höhe,  $(1+m)$  ist der Maßstab. Der Vektor  $\underline{r}_3$  enthält die Rotationen  $\omega$ ,  $\varphi$  und  $\kappa$ , es ist die dritte Zeile der Rotationsmatrix  $\underline{R}$  der räumlichen Ähnlichkeitstransformation. Es wird die

Rotationsreihenfolge  $\omega$ ,  $\varphi$  und  $\kappa$  benutzt. Das Zentrum der Rotation ist das Zentrum des Untersuchungsgebietes.

$Z_{1i}$  auf der linken Seite der Gl. 5.3 ist der korrespondierende Höhenwert des Referenzdatensatzes mit den Lagekoordinaten  $X_{1i}$ ,  $Y_{1i}$ .  $X_{1i}$  und  $Y_{1i}$  werden berechnet, indem die Koordinaten  $X_{2i}$ ,  $Y_{2i}$ ,  $Z_{2i}$  des zu untersuchenden Datensatzes transformiert werden. Die Vektoren  $\underline{r}_1$  und  $\underline{r}_2$  sind die zweite und dritte Zeile der Rotationsmatrix  $\underline{R}$ .  $X_0$  und  $Y_0$  sind die horizontalen Translationen. Um den Höhenwert  $Z_{1i}$  zu bestimmen, muss im Allgemeinen interpoliert werden, z.B. mit Hilfe einer bilinearen Interpolation, da nicht davon ausgegangen werden kann, dass die Positionen der korrespondierenden Höhenwerte übereinstimmen.

## 5.2. AUSGLEICHUNG NACH KLEINSTEN QUADRATEN

Gl. 5.3 und Gl. 5.4 bilden die Basis einer Ausgleichung nach kleinsten Quadraten. Wir führen Höhenwerte  $Z_{2i}$  ( $X_{2i}, Y_{2i}$ ) als Beobachtungen sowie die Parameter der räumlichen Ähnlichkeitstransformation als Unbekannte ein. Es wird davon ausgegangen, dass die Beobachtungen voneinander unabhängig sind und die gleiche Genauigkeit aufweisen. Es wird demnach eine Einheitsmatrix für die Kovarianzmatrix der Beobachtungen eingeführt. Gl. 5.3 und Gl. 5.4 können dann als Beobachtungsgleichungen formuliert werden:

$$v_i(Z_{2i}) = Z_{1i}(X_0 + (1+m)\underline{r}_1 X_{2i}, Y_0 + (1+m)\underline{r}_2 X_{2i}) - (Z_0 + (1+m)\underline{r}_3 X_{2i}) \quad \text{Gl. 5.5}$$

Diese Gleichung ist die fundamentale Gleichung, um die unbekannt Parameter der räumlichen Ähnlichkeitstransformation zu bestimmen. Aufgrund der nicht gegebenen Linearität von Gl. 5.5 muss diese in einer Taylor-Reihe entwickelt werden. Die Unbekannten werden iterativ ausgehend von Näherungswerten bestimmt. Die Designmatrix der Ausgleichung nach kleinsten Quadraten enthält die partiellen Ableitungen der Beobachtungsgleichungen nach den unbekannt Parametern:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial v_i}{\partial X_0} &= \frac{\partial Z_{1i}}{\partial X_{1i}} \\
 \frac{\partial v_i}{\partial Y_0} &= \frac{\partial Z_{1i}}{\partial Y_{1i}} \\
 \frac{\partial v_i}{\partial Z_0} &= -1 \\
 \frac{\partial v_i}{\partial \omega} &= \frac{\partial Z_{1i}}{\partial Y_{1i}} \cdot \frac{\partial Y_{1i}}{\partial \omega} - \frac{\partial Z'_{2i}}{\partial \omega} \\
 \frac{\partial v_i}{\partial \varphi} &= \left( \frac{\partial Z_{1i}}{\partial X_{1i}} \cdot \frac{\partial X_{1i}}{\partial \varphi} + \frac{\partial Z_{1i}}{\partial Y_{1i}} \cdot \frac{\partial Y_{1i}}{\partial \varphi} \right) - \frac{\partial Z'_{2i}}{\partial \varphi} \\
 \frac{\partial v_i}{\partial \kappa} &= \left( \frac{\partial Z_{1i}}{\partial X_{1i}} \cdot \frac{\partial X_{1i}}{\partial \kappa} + \frac{\partial Z_{1i}}{\partial Y_{1i}} \cdot \frac{\partial Y_{1i}}{\partial \kappa} \right) - \frac{\partial Z'_{2i}}{\partial \kappa} \\
 \frac{\partial v_i}{\partial m} &= \left( \frac{\partial Z_{1i}}{\partial X_{1i}} \cdot \frac{\partial X_{1i}}{\partial m} + \frac{\partial Z_{1i}}{\partial Y_{1i}} \cdot \frac{\partial Y_{1i}}{\partial m} \right) - \frac{\partial Z'_{2i}}{\partial m}
 \end{aligned}
 \tag{Gl. 5.6}$$

$Z'_{2i} = Z_0 + (1 + m) \underline{r}_3 X_{2i}$  ist der transformierte Höhenwert.

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  $\partial Z / \partial X$  und  $\partial Z / \partial Y$  abhängen (siehe Gl. 5.6).

Die unbekannt Parameter werden dann mit Hilfe der bekannten Gleichungen der Ausgleichung nach kleinsten Quadraten bestimmt (siehe auch Kapitel Kapitel 4). Die Standardabweichung der Gewichtseinheit ist identisch mit der Standardabweichung der Höhendifferenzen nach Durchführung der Transformation.

### 5.3. SONDERFALL DER UNBEKANNTEN TRANSLATION Z0

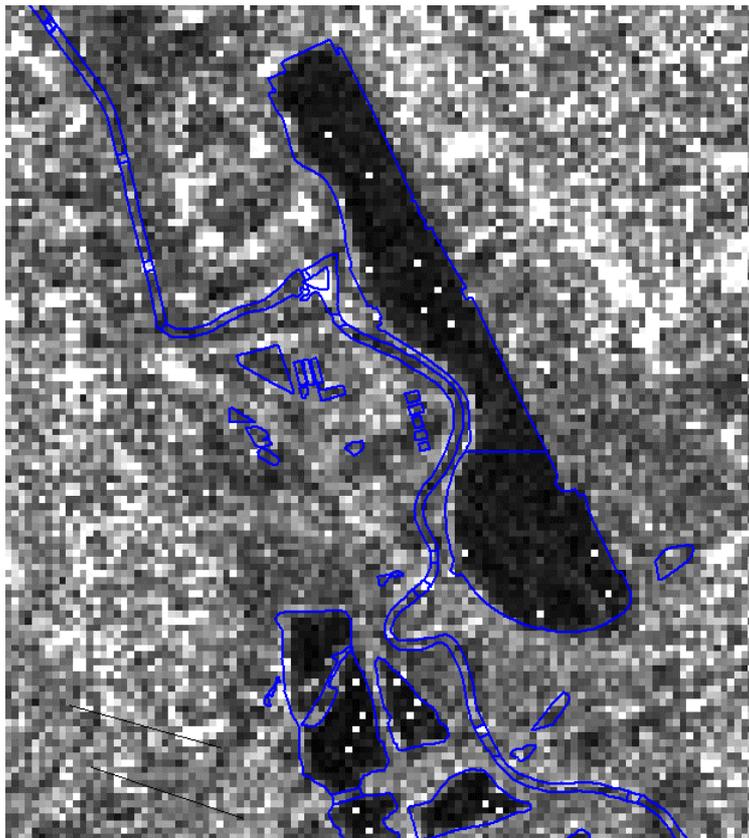
Das Verfahren wurde in der Weise implementiert, dass verschiedene sowie ein unterschiedliche Anzahl unbekannter Parameter gewählt werden können. Wird nur eine vertikale Verschiebung  $Z_0$  geschätzt, vereinfacht sich der Algorithmus. Der zu bestimmende Transformationsparameter  $Z_0$  ist identisch mit dem Mittelwert der Höhendifferenzen zwischen den Datensätzen. Die Beobachtungsgleichungen haben dann die folgende Form:

$$v_i(Z_{2i}) = Z_{1i}(X_{2i}, Y_{2i}) - (Z_0 + Z_{2i}(X_{2i}, Y_{2i}))
 \tag{Gl. 5.7}$$

# Kapitel 6

## Beurteilung der Lagegenauigkeit der GTC Radarbilder

Als erstes wurde das GTC Radarbild ohne Zuhilfenahme von Vorwissen, d.h. ohne Verwendung des ATKIS Basis DLM bzw. der Ergebnisse der Felderhebungen, interpretiert. Einzelne Objekte sollten identifiziert werden, mit deren Hilfe die Lagegenauigkeit dieser Bilder abgeschätzt werden sollte.



*Abb. 6.1 GTC Radarbild, überlagert mit Wasserflächen des ATKIS Basis DLM, Beispiel Maschsee*

Bei Betrachtung des GTC Radarbildes fallen vor alle Wasserflächen auf, welche nahezu schwarz erscheinen. Der nördliche Teil des Testgebietes umfasst den südlichen Bereich von Hannover. Der Maschsee mit seiner charakteristischen Form ist eindeutig zu identifizieren, auch die Ricklinger Kiesteiche sowie die Weser sind sehr gut zu erkennen. Neben den Wasserflächen ist es zwar möglich, Gebiete verschiedenartiger Landnutzung zu erkennen, doch ist es schwierig bzw. unmöglich, eindeutige Grenzen zwischen verschiedenen Objekten festzulegen bzw. die Nutzungsart zu identifizieren. Nur wenige Straßen können erkannt werden.

Auch die Zuhilfenahme von Vorinformation, die Verwendung des ATKIS Basis DLM, bringt keine wesentliche Interpretationsverbesserung. Das ATKIS Basis DLM ist untergliedert in 7 Objektbereiche, die etwa 20 Objektgruppen sowie rund 170 Objektarten enthalten. Die Lagegenauigkeit des ATKIS Basis DLM beträgt nach Angabe der LGN etwa 3 m. Die Daten sind entstanden durch Digitalisierung der Deutschen Grundkarte 1:5.000 (DGK5).

Die gewonnenen Erkenntnisse führten zu einem Vergleich in der Lage zwischen ATKIS Basis DLM als Referenzdatensatz sowie dem SRTM GTC SAR-Bild. Da es nicht möglich war, im SAR-Bild punktförmige Objekte zu identifizieren, wurden entlang der Uferlinien Differenzvektoren digitalisiert, aus deren Komponenten mittlere Verschiebungen in Nord-Süd- (Hochwert) und Ost-West-Richtung (Rechtswert) errechnet wurden. Es wurden nur diejenigen Wasserflächen verwendet, die anhand ihrer charakteristischen Form eindeutig identifiziert werden konnten. Abb. 6.1 stellt den Maschsee in Hannover überlagert mit Vektorinformationen des ATKIS Basis DLM dar.

Die Untersuchungen erbrachten eine mittlere Verschiebung im Hochwert von +18,77 m bzw. +26,65 m im Rechtswert. Diese Werte entsprechen etwas weniger bzw. etwas mehr als einem Pixel, wobei 112 Vektoren in Ost-West- sowie 55 Vektoren in Nord-Süd-Richtung digitalisiert wurden.

Die Ergebnisse konnten nicht zufriedenstellend ermittelt werden, da es schwierig war, eindeutig die Uferlinien zu interpretieren. Restabweichungen können durchaus aufgrund Interpretationsschwierigkeiten entstanden sein.

# Kapitel 7

## Beurteilung der Lage- und Höhengenaugigkeit der ITED-2 Daten mittels TP's

1.068 Trigonometrische Punkte, die das gleiche Gebiet abdecken wie die ITED-2 Digitalen Oberflächenmodelle, befinden sich im Untersuchungsgebiet. Hochziele, d.h. TP's, die sich auf Kirchtürmen oder anderen Bauwerken befinden, wurden vorab aus dem Datensatz entfernt. Die Trigonometrischen Punkte repräsentieren demnach das Gelände.

### 7.1. BEURTEILUNG DER ABSOLUTEN HÖHGENAUIGKEIT UNTER VERWENDUNG ALLER TP's

Die Höhenwerte  $Z_{i,TP}$  der Trigonometrischen Punkte wurden mit den korrespondierenden Höhenwerten  $Z_{i,ITED-2}$  der SRTM ITED-2 Daten verglichen. Da im Allgemeinen die Positionen der TP's nicht mit den Positionen der ITED-2 Gitterpunkte zusammenfallen, muss  $Z_{i,ITED-2}$  aus den umliegenden SRTM-Gitterpunkten interpoliert werden. Es wurde die bilineare Interpolation verwendet. Die Genauigkeitsmaße wurden abgeleitet. Die Höhendifferenzen wurden folgendermaßen berechnet (siehe auch Gl. 5.7):

$$\Delta Z_i = Z_{i,TP} - Z_{i,ITED-2} \quad \text{Gl. 7.1}$$

Tab. 7.1 enthält die Ergebnisse der Untersuchungen:

Anzahl Höhendifferenzen n		1.068
Mittelwert $Z_0$	[m]	+1,38
Standardabweichung s	[m]	±5,57
Standardabweichung $s_{Z_0}$ nach Abzug Mittelwert	[m]	±5,40

Tab. 7.1 Genauigkeitsmaße aus Höhendifferenzen zwischen TP's und SRTM ITED-2 Daten unter Verwendung aller TP's

Der Mittelwert der Höhendifferenzen  $Z_0$  ist positiv, d.h. das Höhenniveau der ITED-2 Digitalen Oberflächenmodelle befindet sich unterhalb des Höhenniveaus der Referenzdaten, den TP's. Die SRTM Daten bewegen sich systematisch unterhalb des Geländes, welches durch die TP's repräsentiert wird. Die Standardabweichung ist mit ±5,57 m relativ gering. Durch die Landbedeckung (Vegetation, Gebäude) verursachte grobe Fehler wurden zu diesem Zeitpunkt nicht berücksichtigt.

Abb. 7.1 stellt die relative Häufigkeitsverteilung der Höhendifferenzen dar. Die horizontale Achse enthält die Höhendifferenzen, welche in 1 m breite Intervalle eingeteilt wurden. Die vertikale Achse enthält die relative Häufigkeit der Höhendifferenzen in %. Auffällig ist, dass sich das Maximum des Histogramms bei +3 m befindet, obwohl der berechnete Mittelwert nur +1,38 m beträgt. Ursache ist der linke Bereich der Graphik. Das Histogramm ist asymmetrisch, der linke negative Bereich enthält Differenzen, die durch Objekte verursacht sein könnten, die sich über dem Gelände befinden (Vegetation, Gebäude). Zwar befinden sich die verwendeten TP's nicht in direkter Nachbarschaft von Gebäuden, sie sind nicht von Bäumen bedeckt, doch können die ITED-2 Daten von benachbarter Vegetation oder benachbarten Gebäuden beeinflusst sein, sodass sich dieser Einfluss auf die Berechnung der Höhendifferenzen bemerkbar macht.

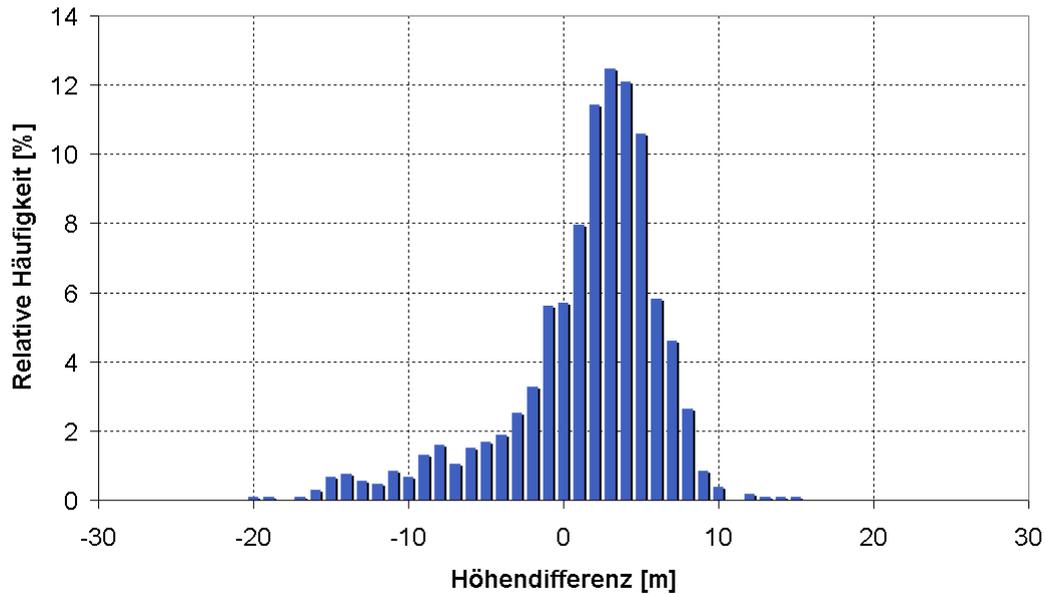


Abb. 7.1 Relative Häufigkeitsverteilung der Höhendifferenzen zwischen TP's und SRTM ITED-2 Daten unter Verwendung aller TP's

Die größten Differenzen betragen  $-58,55$  m bzw.  $+40,19$  m. Diese Werte werden im Histogramm nicht dargestellt. Der minimale Wert befindet sich im Wald, die maximale Differenz liegt im gebirgigen Gelände. Über die Örtlichkeit und die Ursache der maximalen positiven Höhendifferenz kann nichts gesagt werden. Die Position dieses Wertes ist leicht außerhalb des zur Verfügung stehenden ATKIS Basis DLM.

Bei Betrachtung der Höhendifferenzen in der Örtlichkeit (Abb. 7.2) fällt auf, dass negative Differenzen vor allem im Wald (grün dargestellt) sowie in städtischen Bereichen (rot hinterlegt) vorkommen. Stark negative Differenzen sind auch am Waldrand zu erkennen. Im freien Gelände, d.h. zwischen den Wäldern und urbanen Flächen sind nahezu ausschließlich positive Höhendifferenzen berechnet worden. Im süd-westlichen Bereich sind größtenteils positive Differenzen ermittelt worden, der nord-östliche Bereich enthält positive und negative Differenzen. Insgesamt ist eine leicht positive Tendenz der Höhendifferenzen festzustellen, was durch den berechneten Mittelwert  $Z_0$  bestätigt wird. Die SRTM Daten befinden sich systematisch unter dem Geländeniveau.

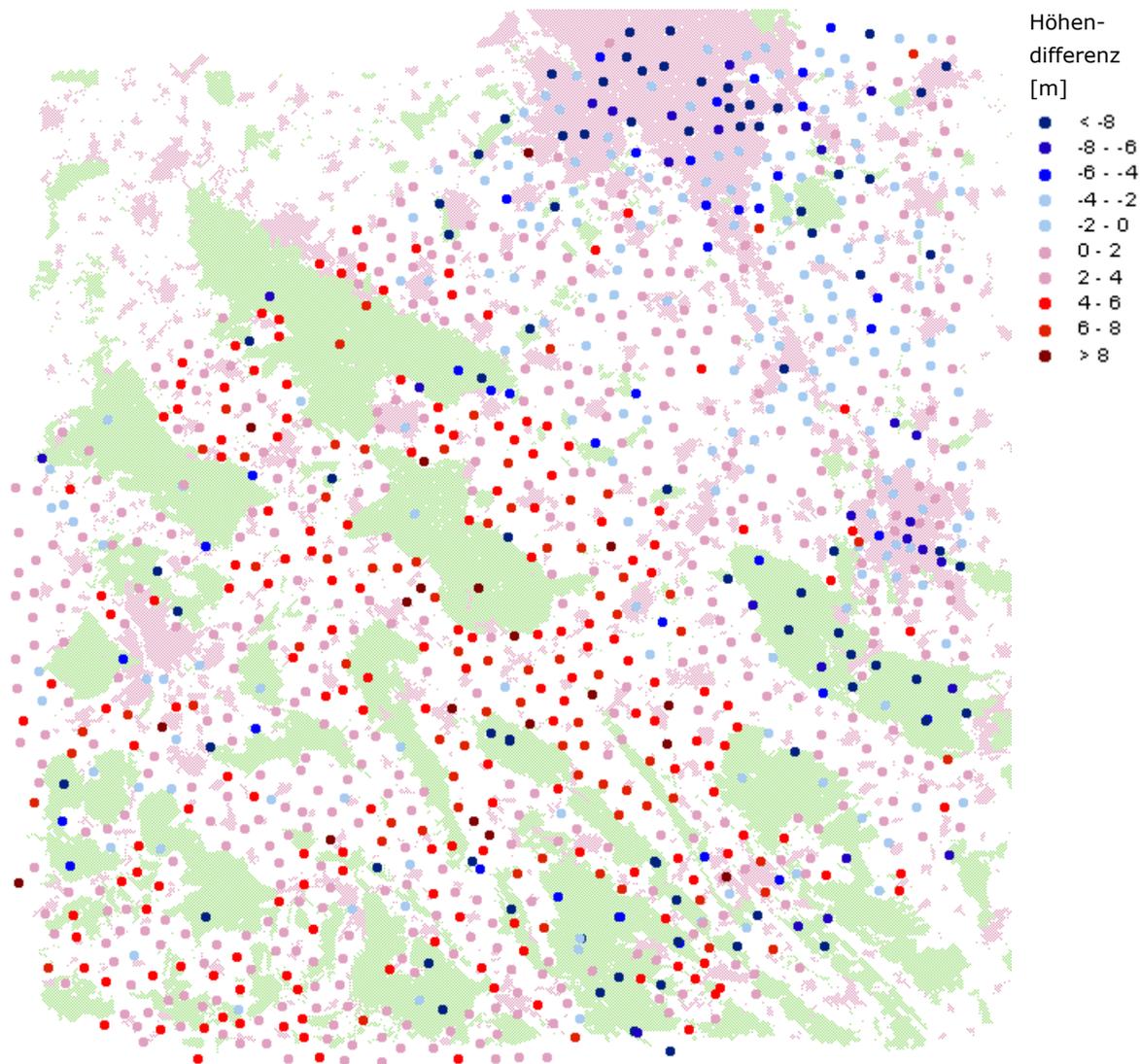


Abb. 7.2 Höhendifferenzen zwischen TP's und SRTM ITED-2 Daten

## 7.2. BEURTEILUNG DER ABSOLUTEN HÖHENGENAUGIGKEIT IM OFFENEN GELÄNDE

Um weitere Untersuchungen im offenen Gelände durchführen zu können, wurde das ATKIS Basis DLM benutzt, um die Trigonometrischen Punkte zu klassifizieren. Nur Höhendifferenzen innerhalb der Objektarten Ackerland, Grün- und Gartenland wurden für die Untersuchungen verwendet. Aufgrund der Jahreszeit, die Mission fand im Februar 2000 statt, können auch die zum Ackerland gehörenden Höhendifferenzen einbezogen werden. Die ITED-2 Daten innerhalb dieser Klasse repräsentieren ebenfalls das Gelände. Von den 1.068 TP's sind 700 Punkte als zum Gelände gehörend klassifiziert worden, d.h. 368 TP's (34 %) wurden eliminiert.

In Analogie zu Abschnitt 7.1 wurden erneut die Höhendifferenzen berechnet und die Genauigkeitsmaße abgeleitet:

Anzahl Höhendifferenzen n		700
Mittelwert Z0	[m]	+3,18
Standardabweichung s	[m]	±4,27
Standardabweichung $s_{z_0}$ nach Abzug Mittelwert	[m]	±2,86

Tab. 7.2 Genauigkeitsmaße aus Höhendifferenzen zwischen TP's und ITED-2 Daten im offenen Gelände

Der Mittelwert Z0 ist erneut positiv und größer als im vorigen Abschnitt. Die Standardabweichung der Höhendifferenzen liegt mit  $\pm 4,27$  m unter dem vorigen Wert.

Die Differenz von 1,80 m zwischen dem Mittelwert Z0 aus diesem und dem vorigen Abschnitt wird wie vermutet durch Vegetation und Gebäude verursacht. Wie die Berechnungen zeigen, wird der Mittelwert ohne diesen Einfluss größer, wie Tab. 7.2 zeigt.

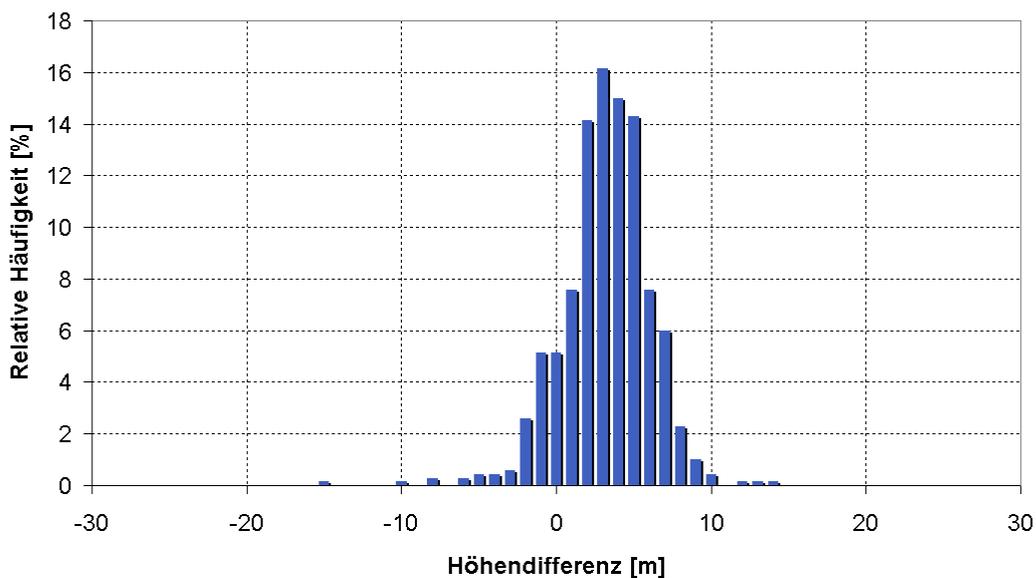


Abb. 7.3 Relative Häufigkeitsverteilung der Höhendifferenzen zwischen TP's und ITED-2 Daten im offenen Gelände

Die relative Häufigkeitsverteilung spiegelt die ermittelten Werte wieder. Das Maximum des Histogramms ist positiv und stimmt mit dem berechneten Mittelwert überein. Es sind nur wenige vom Betrag größere Differenzen vorhanden.

### 7.3. BEURTEILUNG DER SYSTEMATISCHEN LAGE- UND HÖHENABWEICHUNGEN

Bis zu diesem Zeitpunkt wurde ausschließlich untersucht, ob die SRTM ITED-2 Digitalen Oberflächenmodelle einen vertikalen systematischen Fehler enthalten. Weitere systematische Fehler, wie Lagefehler, Verdrehungen und Maßstabsfehler wurden nicht berücksichtigt.

Mit Hilfe des in Kapitel Kapitel 5 beschriebenen Verfahrens und der Einführung von 7 zu bestimmenden Transformationsparametern soll nun untersucht werden, inwieweit die SRTM ITED-2 Digitalen Oberflächenmodelle weitere systematische Fehler enthalten.

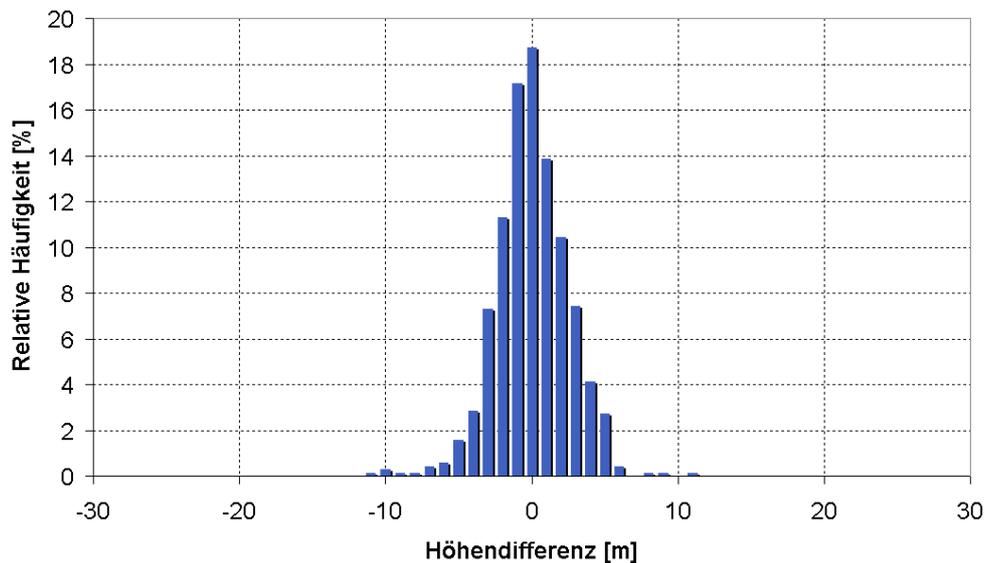
Erneut wurden die 700 im offenen Gelände liegenden Trigonometrischen Punkte verwendet. Alle sieben Parameter einer räumlichen Ähnlichkeitstransformation wurden bestimmt. Tab. 7.3 enthält die Ergebnisse:

<b>X0 [m]</b>	+17,90	<b>s<sub>x0</sub> [mm]</b>	±1554,3
<b>Y0 [m]</b>	-4,05	<b>s<sub>y0</sub> [mm]</b>	±939,4
<b>Z0 [m]</b>	+3,28	<b>s<sub>z0</sub> [mm]</b>	±95,5
<b>ω [gon]</b>	-0,003	<b>s<sub>ω</sub> [mgon]</b>	±0,5
<b>φ [gon]</b>	+0,002	<b>s<sub>φ</sub> [mgon]</b>	±0,3
<b>κ [gon]</b>	-0,017	<b>s<sub>κ</sub> [mgon]</b>	±2,7
<b>m</b>	+23,5·10 <sup>-5</sup>	<b>s<sub>m</sub></b>	±47,9·10 <sup>-8</sup>

Tab. 7.3 Transformationsparameter zwischen TP's und SRTM ITED-2 Daten im offenen Gelände und deren Genauigkeit

Die ermittelte Translation X0 deutet auf einen in Ost-West-Richtung verschobenen SRTM ITED-2 Datensatz hin. Die Translation Y0 ist nur ein Bruchteil des Abstandes der Gitterpunkte der SRTM Höhendaten und ist nahezu vernachlässigbar. Der systematische Höhenfehler Z0 ist vergleichbar mit den Untersuchungen aus Kap. 7.2. Die SRTM Daten bewegen sich unterhalb des Geländes, welches durch die TP's repräsentiert wird. Die Rotationen ω und φ bewirken einen vertikalen Shift von maximal ±1,34 m bzw. ±0,63 m am Rande des Testgebietes, d.h. im Abstand von etwa 35 km vom Mittelpunkt des Untersuchungsgebietes. Der Drehwinkel κ bewirkt Lageverschiebungen von maximal ±6,76 m, der Maßstab verursacht zusätzliche Lageverschiebungen von ±5,87 m. Insgesamt bewirken die 7 Parameter horizontale Verschiebungen von maximal 30 m in Ost-West- und 16 m in Nord-Süd-Richtung. Die maximalen Höhenverschiebungen am Rande des Testgebietes betragen +5,2 m. Die Standardabweichungen der geschätzten Transformationsparameter sind mindestens eine Größenordnung besser als die Parameter selbst, die Korrelationen zwischen den Parametern sind vernachlässigbar. Da es sich bei

dem Algorithmus um ein iteratives Verfahren handelt, wurde als Abbruchkriterium eingeführt, dass die Veränderungen an den Unbekannten kleiner als 1 cm, 1 mgon bzw.  $1 \cdot 10^{-6}$  sein müssen. 15 Iterationen wurden berechnet, als Näherungswerte wurde jeweils Null eingeführt.



*Abb. 7.4 Relative Häufigkeitsverteilung der Höhendifferenzen zwischen TP's und ITED-2 Daten nach Durchführung der räumlichen Ähnlichkeitstransformation im offenen Gelände*

Die Standardabweichung der Gewichtseinheit, d.h. die Standardabweichung der Höhendifferenzen nach Anbringen der Transformation, beträgt  $\pm 2,50$  m. Dieser Wert unterscheidet sich um ca. 0,7 m von dem errechneten Wert bei ausschließlicher Berücksichtigung eines vertikalen systematischen Fehlers  $Z_0$  (siehe Tab. 7.2).

Die relative Häufigkeitsverteilung der Höhendifferenzen nach Durchführung der räumlichen Ähnlichkeitstransformation ist, wie zu erwarten war, annähernd normalverteilt (siehe Abb. 7.4).

Bei Betrachtung der Höhendifferenzen in der Örtlichkeit (Abb. 7.5) fällt auf, dass nur vereinzelt größere Differenzen auftreten. Der Großteil der Höhendifferenzen ist relativ klein.

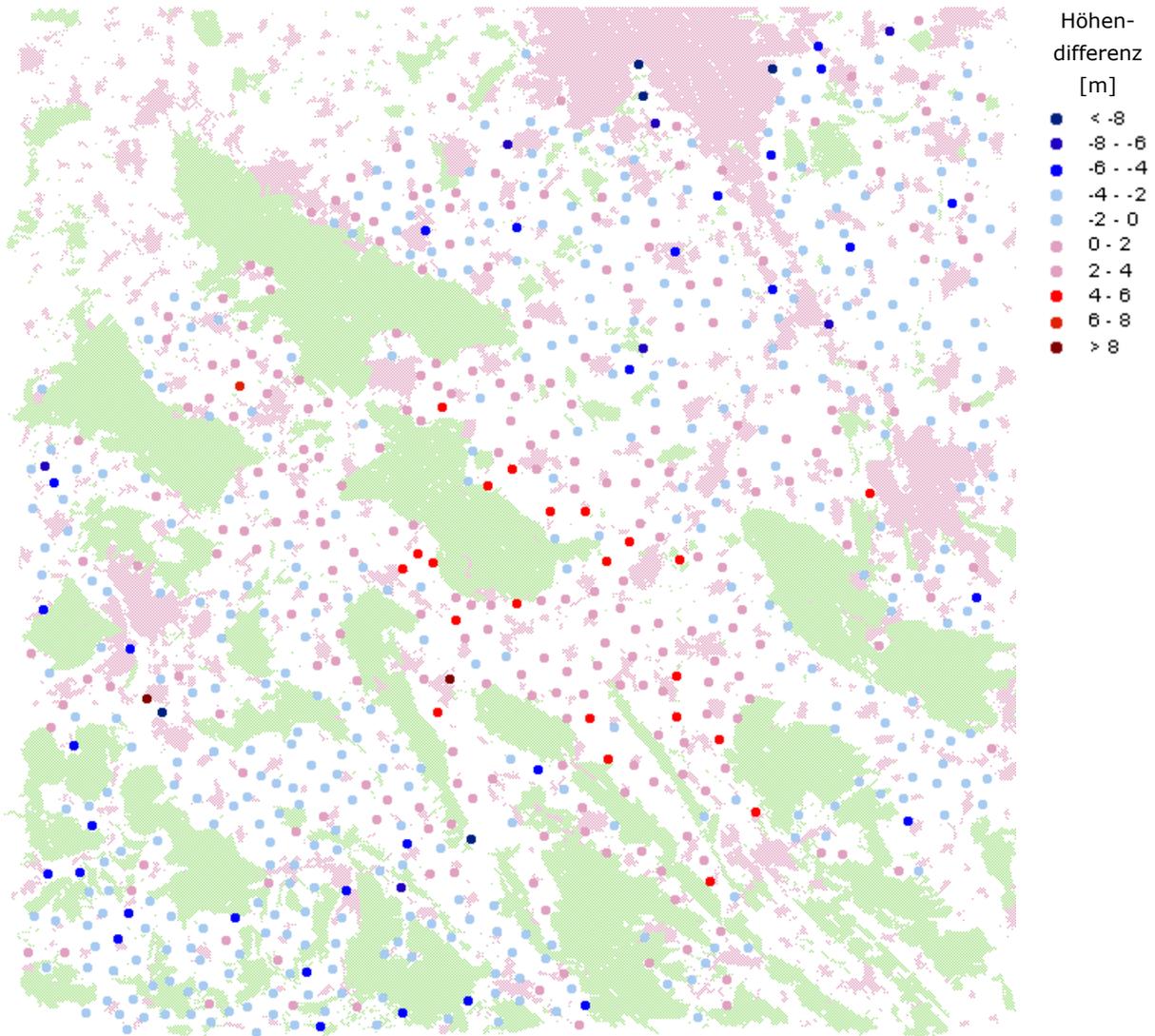


Abb. 7.5 Höhendifferenzen zwischen TP's und ITED-2 Daten nach Durchführung der räumlichen Ähnlichkeitstransformation im offenen Gelände

# Kapitel 8

## Beurteilung der Lage- und Höhengenaugigkeit der ITED-2 Daten mittels ATKIS DGM5

Etwa 4,7 Millionen DGM5 Punkte stehen im Untersuchungsgebiet zur Verfügung. Vor der Mission wurden verschiedene kleinere Testflächen ausgewählt, die unterschiedliche Charakteristika aufweisen (Landbedeckung, Geländeneigung, Exposition zum Sensor). So steht im Süd-Westen des Untersuchungsgebietes das DGM5 für eine Fläche mit einer Größe von etwa 25x25 km<sup>2</sup> zur Verfügung. Des Weiteren liegen kleinere etwa 2x2 km<sup>2</sup> große Teilflächen vor, in denen zeitgleich bzw. zeitnah zur Mission Felderhebungen durchgeführt wurden.

### 8.1. BEURTEILUNG DER ABSOLUTEN HÖHGENAUIGKEIT UNTER VERWENDUNG DES GESAMTEN DGM5 DATENSATZES

Im Gegensatz zu Kapitel Kapitel 7 wurden die Positionen der SRTM ITED-2 Daten verwendet, um die korrespondierenden Höhenwerte des DGM5 Datensatzes aus den umliegenden DGM5 Höhenwerten bilinear zu interpolieren. Die Höhendifferenzen ergeben sich in Analogie zu Gl. 7.1 wie folgt:

$$\Delta Z_i = Z_{i,DGM5} - Z_{i,ITED-2} \quad \text{Gl. 8.1}$$

Aus den errechneten Höhendifferenzen wurden Genauigkeitsmaße abgeleitet. Tab. 8.1 enthält die Ergebnisse:

Anzahl Beobachtungen n		1.234.815
Mittelwert $Z_0$	[m]	-2,63
Standardabweichung s	[m]	$\pm 9,08$
Standardabweichung nach Abzug Mittelwert $s_{z_0}$	[m]	$\pm 8,68$

*Tab. 8.1 Genauigkeitsmaße aus Höhendifferenzen zwischen DGM5 und SRTM ITED-2 Daten unter Verwendung des gesamten DGM5 Datensatzes*

Insgesamt wurden etwa 1,2 Millionen SRTM-Höhen verwendet. Der Mittelwert  $Z_0$  beträgt  $-2,63$  m. Dieser Wert stimmt nicht mit dem vorher ermittelten  $+1,38$  m aus Kapitel Kapitel 7 überein. Die Werte differieren um 4 m. Die Standardabweichungen s bzw.  $s_{z_0}$  der Höhendifferenzen sind mehrere Meter größer als zuvor.

Abb. 8.1 stellt das Histogramm der ermittelten Höhendifferenzen dar, welches nicht symmetrisch ist. Ein großer Anteil der Höhendifferenzen ist stark negativ, das Maximum der relativen Häufigkeitsverteilung befindet sich im positiven Bereich bei  $+3$  m. Eine Klassifizierung der DGM5 Gitterpunkte wurde nicht vorgenommen, d.h. die Ergebnisse enthalten auch durch Vegetation und Gebäude (Geländerausuchen) verursachte Differenzen. Diese sich über dem Gelände befindlichen Objekte sind im SRTM Digitalen Oberflächenmodell enthalten. Im Gegensatz dazu repräsentieren die DGM5 Daten ausschließlich das Gelände. Höhendifferenzen innerhalb dieser Objekte sind demnach negativ.

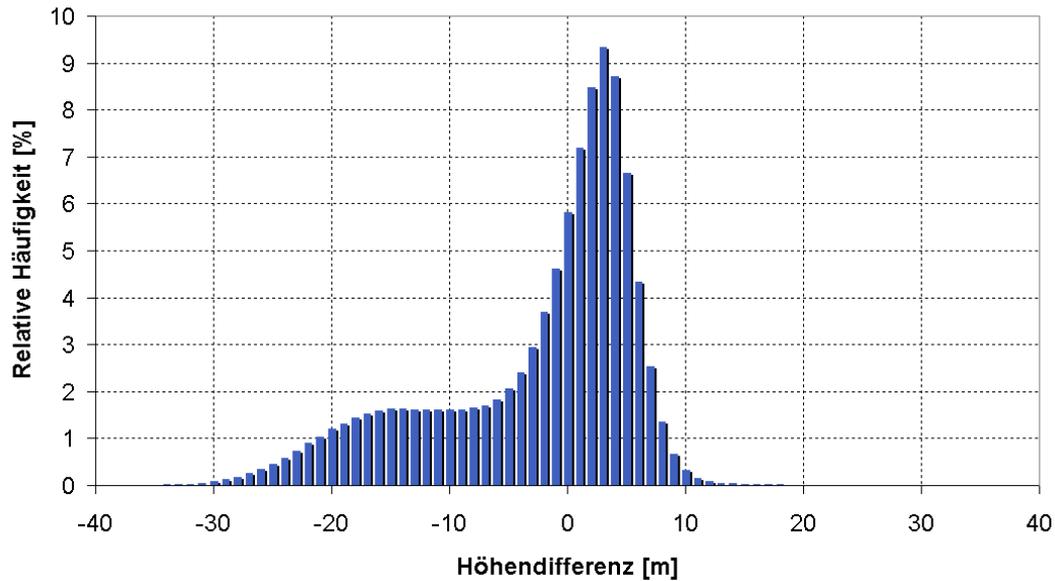


Abb. 8.1 Relative Häufigkeitsverteilung der Höhendifferenzen zwischen DGM5 und SRTM ITED-2 Daten unter Verwendung des gesamten DGM5 Datensatzes

Bei Betrachtung der Höhendifferenzen in der Örtlichkeit (Abb. 8.2) fallen inselartig zusammenhängende Bereiche auf, die stark negative Höhendifferenzen aufweisen. Diese Bereiche stellen Waldflächen dar. Das SRTM Digitale Oberflächenmodell repräsentiert die Oberfläche des Waldes, sodass negative Höhendifferenzen auftreten. Des Weiteren sind zusammenhängende Bereiche mit negativen Differenzen in städtischen Gebieten vorzufinden, so z.B. im Nord-Osten des Testgebietes (südlicher Teil von Hannover) sowie in Hildesheim. Demgegenüber sind die Höhendifferenzen im offenen Gelände vorwiegend positiv. Diese Erkenntnis stimmt mit dem Maximum des Histogramms überein, welches ebenfalls im positiven Bereich liegt. Der im offenen Gelände vorhandene positive systematische Höhenfehler wird durch das Vorhandensein von Vegetation und Gebäude soweit gemindert, dass die Gesamtsystematik negativ wird. Dieses konnte bereits in Kapitel 7 beobachtet werden, doch war dort der Einfluss geringer, da Trigonometrische Punkte nicht innerhalb von Gebäuden und Wäldern liegen.

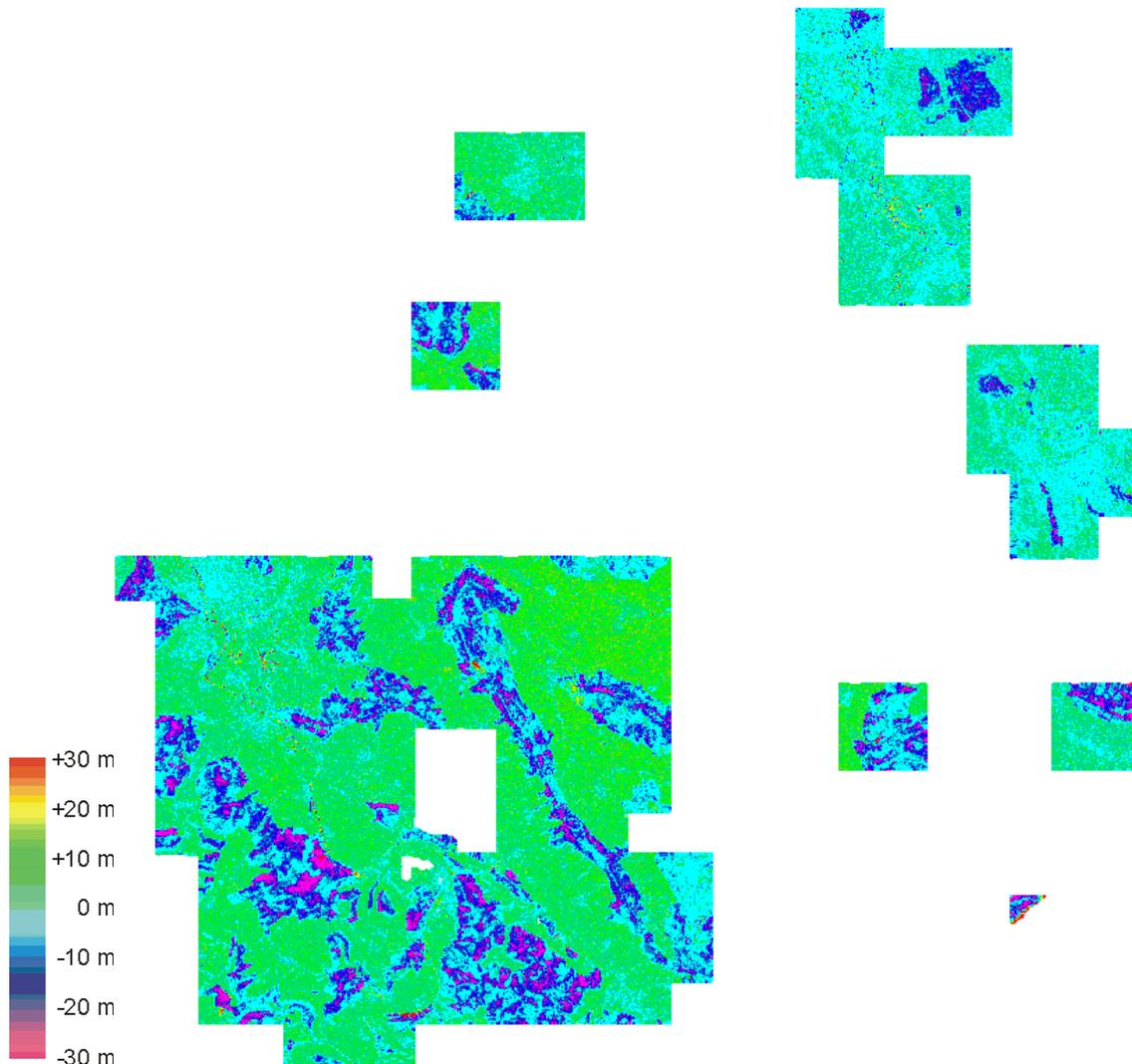


Abb. 8.2 Höhendifferenzen zwischen DGM5 und SRTM ITED-2 Daten unter Verwendung des gesamten DGM5 Datensatzes

Abb. 8.3 stellt den Sachverhalt graphisch dar. Das Höhenniveau der SRTM ITED-2 Daten ist zu gering, sodass im offenen Gelände positive Höhendifferenzen verursacht werden. Demgegenüber können sich aufgrund von Geländerauschen negative Höhendifferenzen ergeben, da die Referenzdaten innerhalb dieser Objekte das Gelände, die ITED-2 Daten hingegen die Oberfläche repräsentieren.

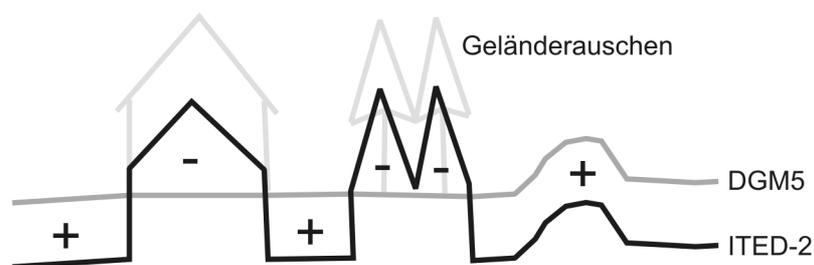


Abb. 8.3 Auswirkung des Geländerauschens auf das Vorzeichen der Höhendifferenzen

Die nachfolgenden zwei Abbildungen stellen unterschiedliche Teilbereiche vergrößert dar. Die Waldbereiche (Abb. 8.4) sind sehr gut aufgrund ihrer Struktur und Kompaktheit wieder zu erkennen. Die Abbildungen wurden mit dem Waldlayer (Objektart 4107) des ATKIS Basis DLM überlagert.

Innerhalb von Wasserflächen (Abb. 8.5) liegen im SRTM Datensatz keine konstanten Höhenwerte vor. Vielmehr enthalten diese Flächen grob fehlerhafte Werte, sodass auch die resultierenden Höhendifferenzen diese Fehler aufweisen. Die ermittelten Höhendifferenzen bestätigen die Aussagen der visuellen Überprüfung der Daten (Kap. Kapitel 3). Die farbcodierten Höhendifferenzen wurden mit den Wasserflächen (Objektbereich 5000) des ATKIS Basis DLM überlagert.

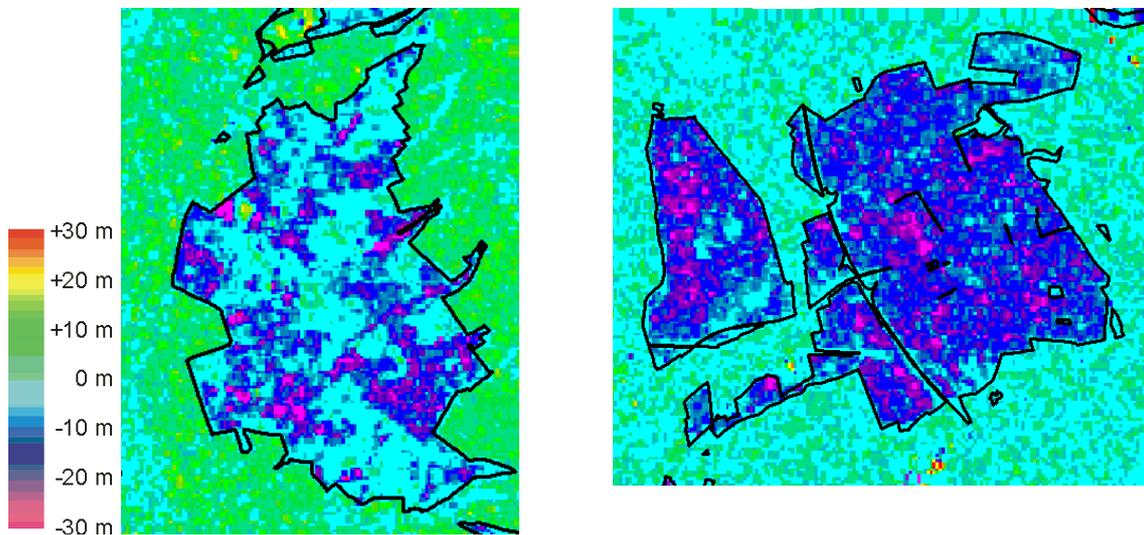


Abb. 8.4 Höhendifferenzen zwischen DGM5 und SRTM ITED-2, Waldflächen.

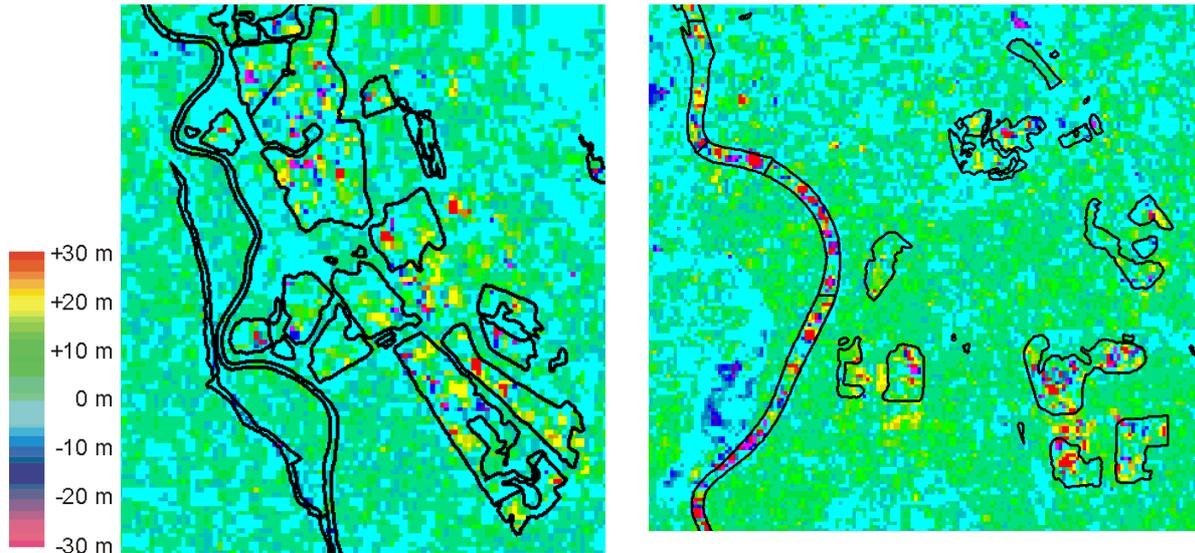


Abb. 8.5 Höhendifferenzen zwischen DGM5 und SRTM ITED-2, Wasserflächen.

## 8.2. BEURTEILUNG DER ABSOLUTEN HÖHENGENAUGKEIT IM OFFENEN GELÄNDE

Wiederum wurde das ATKIS Basis DLM verwendet, um die DGM5 Höhenwerte vorab zu klassifizieren. Von den etwa 1,2 Millionen in Kapitel 8.1 verwendeten Höhendifferenzen blieben etwa 700.000 Differenzen übrig, d.h. 40 % der DGM5 Höhenwerte wurden als nicht zum Gelände gehörend aus dem Datensatz gestrichen. Wie in Kapitel 7.2 und 7.3 wurde das DGM5 innerhalb der Objektarten Acker-, Grün- und Gartenland verwendet. Die Mission fand im Februar 2000 statt, sodass die ITED-2 Daten innerhalb der Ackerflächen ebenfalls das Gelände repräsentieren.

Tab. 8.2 enthält die ermittelten Genauigkeitsmaße. Der Mittelwert  $Z_0$  ist wie erwartet positiv. D.h. der Einfluss der nicht zum Gelände gehörenden SRTM Höhenwerte hat die Systematik gemindert, sodass der vertikale systematische Fehler negativ wurde. Die Standardabweichung der Höhendifferenzen beträgt  $\pm 4,32$  m, nach Berücksichtigung des Mittelwertes verringert sich dieser Wert zu  $\pm 3,44$  m.

Die Unterschiede zu den Ergebnissen im offenen Gelände, welche mit den TP's erzielt wurden (siehe Kapitel 7.2) sind nahezu vernachlässigbar. Die leicht unterschiedlichen Mittelwerte könnten durch Waldränder und Randbereiche von Städten verursacht worden sein.

Größere Unterschiede treten zu den Ergebnissen unter Verwendung der kompletten Referenzdatensätze auf. Hier macht sich bei den Untersuchungen mittels DGM5 vor allem das Vorhandensein der dichten Vegetation und der

urbanen Bereiche bemerkbar. Die TP's liegen grundsätzlich nicht in dichten Wäldern und städtischen Bereichen, sodass die korrespondierenden Höhenwerte des SRTM Datensatzes nur am Rande durch diese Objekte beeinflusst werden und somit weitaus weniger stark negative Höhendifferenzen verursachen.

Anzahl Höhendifferenzen n		669.685
Mittelwert Z0	[m]	+2,62
Standardabweichung s	[m]	±4,32
Standardabweichung $s_{z_0}$ nach Abzug Mittelwert	[m]	±3,44

Tab. 8.2 Genauigkeitsmaße aus Höhendifferenzen zwischen DGM5 und ITED-2 Daten im offenen Gelände

Die nachfolgende Abb. 8.6 stellt die Häufigkeitsverteilung der Höhendifferenzen zwischen DGM5 und ITED-2 im offenen Gelände dar.

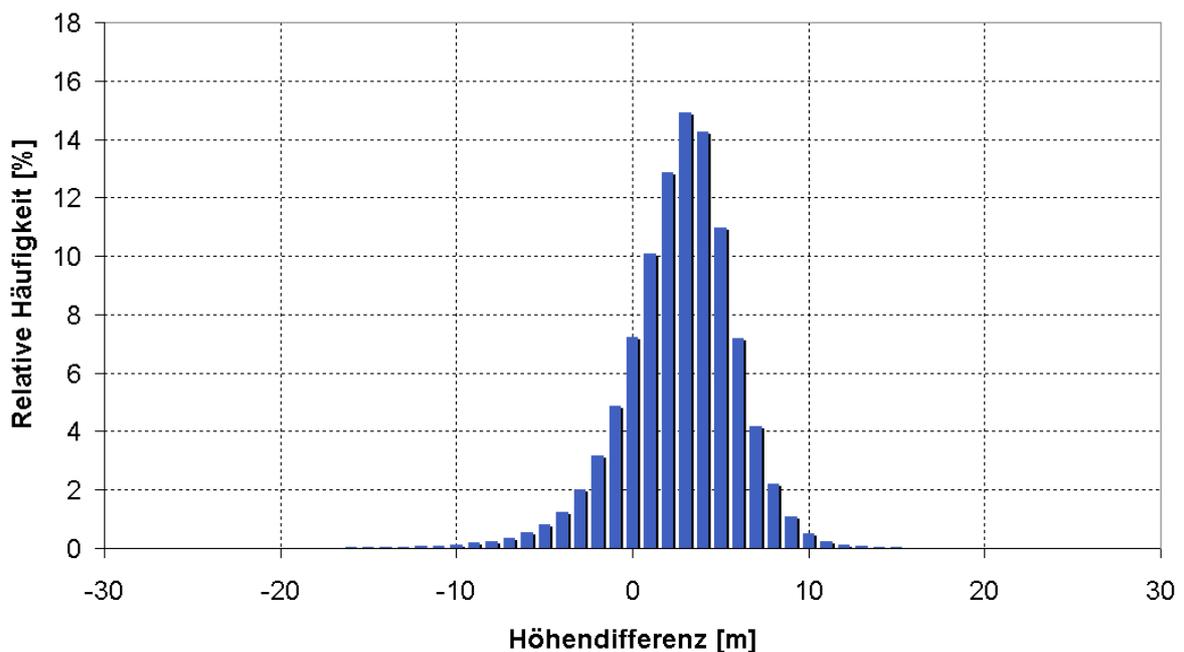


Abb. 8.6 Relative Häufigkeitsverteilung der Höhendifferenzen zwischen DGM5 und SRTM ITED-2 Daten im offenen Gelände

Das Histogramm ist symmetrisch, doch befindet sich der Mittelwert erneut auf der positiven Achse. Das Höhenniveau der SRTM ITED-2 Daten befindet sich unterhalb des Geländes.

### 8.3. BEURTEILUNG DER SYSTEMATISCHEN LAGE- UND HÖHENABWEICHUNGEN

Wie in Kapitel 7.3 werden die 7 Parameter der räumlichen Ähnlichkeitstransformation bestimmt. Erneut werden nur die Referenzdaten des offenen Geländes verwendet. Tab. 8.3 zeigt die Ergebnisse.

<b>X0 [m]</b>	+0,60	<b>s<sub>X0</sub> [mm]</b>	88,8
<b>Y0 [m]</b>	-2,32	<b>s<sub>Y0</sub> [mm]</b>	86,4
<b>Z0 [m]</b>	+2,28	<b>s<sub>Z0</sub> [mm]</b>	4,3
<b>ω [gon]</b>	-0,003	<b>s<sub>ω</sub> [mgon]</b>	0,0
<b>φ [gon]</b>	+0,002	<b>s<sub>φ</sub> [mgon]</b>	0,0
<b>κ [gon]</b>	-0,007	<b>s<sub>κ</sub> [mgon]</b>	0,3
<b>m [ ]</b>	+3,0·10 <sup>-5</sup>	<b>s<sub>m</sub></b>	4,4·10 <sup>-8</sup>

Tab. 8.3 Ermittelte Transformationsparameter zwischen ATKIS DGM5 und SRTM ITED-2 und deren Genauigkeit

Die horizontalen Translationen sind vernachlässigbar. Sie betragen jeweils nur ein Bruchteil des Abstandes der Gitterpunkte des ITED-2 Datensatzes. Der systematische Höhenfehler Z0 ist wiederum positiv und einen Meter kleiner als bei den Untersuchungen mit den Trigonometrischen Punkten. Die Rotationen ω und φ bewirken vertikale Verschiebungen von maximal ±1,22 m bzw. ±0,98 m. Die Rotation κ verursacht Lageverschiebungen von maximal ±2,75 m am Rande des Untersuchungsgebietes, der Maßstab bewirkt Lageverschiebungen von bis zu ±0,76 m. Zusammen resultieren Lageverschiebungen in Ost-West-Richtung von maximal 5,83 m und in Nord-Süd-Richtung von 4,11 m. Die maximalen Höhenverschiebungen am Randes des Testgebietes betragen 4,47 m.

Für die Berechnungen der 7 Parameter wurden 669.466 Höhendifferenzen berechnet, die Standardabweichung der Gewichtseinheit beträgt ±3,29 m. Die ermittelten Transformationsparameter sind nur geringfügig miteinander korreliert, wie Tab. 8.4 zeigt. Sechs Iterationen wurden benötigt, die Näherungswerte haben erneut Null betragen.

	<b>X0</b>	<b>Y0</b>	<b>Z0</b>	<b>ω</b>	<b>φ</b>	<b>κ</b>	<b>m</b>
<b>X0</b>		-0,093	-0,066	0,001	0,005	-0,617	0,280
<b>Y0</b>			-0,080	0,027	0,010	0,389	0,600
<b>Z0</b>				0,230	-0,084	0,017	-0,117
<b>ω</b>					0,548	0,041	0,008
<b>φ</b>						0,002	0,040
<b>κ</b>							0,016
<b>m</b>							

Tab. 8.4 Korrelationen zwischen den ermittelten Transformationsparametern

Die relative Häufigkeitsverteilung der Höhendifferenzen nach Durchführung der räumlichen Ähnlichkeitstransformation ist wie in Kapitel 7.3 annähernd normalverteilt (siehe Abb. 8.7).

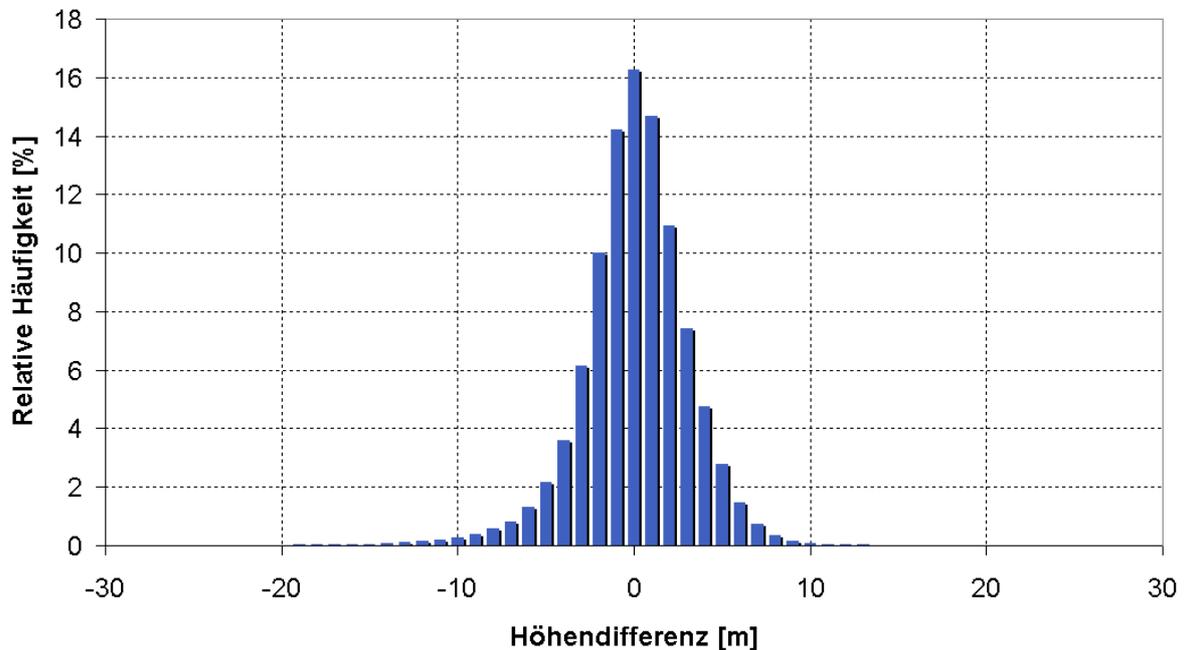


Abb. 8.7 Relative Häufigkeitsverteilung der Höhendifferenzen zwischen DGM5 und ITED-2 Daten nach Durchführung der räumlichen Ähnlichkeitstransformation im offenen Gelände

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Ergebnisse dieses Kapitels mit denen des Kapitels 8.2 nahezu übereinstimmen. Die Bestimmung der 7 Parameter der räumlichen Ähnlichkeitstransformation bewirkt eine leichte Verringerung der Standardabweichung. Der Wert  $Z_0$  weicht nur gering von dem Wert aus 8.2 ab, so dass davon ausgegangen werden kann, dass die Modellierung systematischer Fehler durch die alleinige Einführung des Mittelwertes  $Z_0$  ausreicht. Die weiteren 6 ermittelten Parameter haben einen sehr geringen Einfluss, doch machen sie sich in Flugrichtung und quer zur Flugrichtung durchaus bemerkbar.

Bei Betrachtung der Höhendifferenzen in der Örtlichkeit (Abb. 8.8) fällt auf, dass sich Betrag und Vorzeichen der Differenzen in Orbitrichtung verändern. Im südwestlichen Bereich sind die Differenzen vorwiegend negativ, werden dann im Zentrum des Gebietes positiv, um erneut im Nord-Osten negativ zu werden. Des Weiteren fällt auf, dass nur am Rande von Wäldern und städtischen Bereichen größere Differenzen auftreten. Diese könnten durch Interpolationsfehler verursacht worden sein.



*Abb. 8.8 Höhendifferenzen zwischen DGM5 und ITED-2 Daten nach Durchführung der räumlichen Ähnlichkeitstransformation im offenen Gelände*

Abb. 8.9 gibt die quer zur Orbitrichtung gemittelten Höhendifferenzen vor der räumlichen Ähnlichkeitstransformation wieder. Die horizontale Achse enthält die Entfernung in Orbitrichtung in Kilometer, die vertikale Achse stellt die gemittelten Höhendifferenzen dar. Es fällt auf, dass sich die Systematik verändert, der Streifen könnte in Orbitrichtung geneigt sein, was auch durch die ermittelten Parameter aus Tab. 8.3 bestätigt wird. In Orbitrichtung ist der SRTM Datensatz um 0,003 gon geneigt. Dieser Wert entspricht bei einer Entfernung in Orbitrichtung von 55 km einem Höhenunterschied von  $\pm 2,6$  m. Quer zur

Flugrichtung ist der Streifen ebenfalls um 0,003 gon geneigt. Diese Werte konnten mit Hilfe von  $\omega$  und  $\varphi$  berechnet werden.

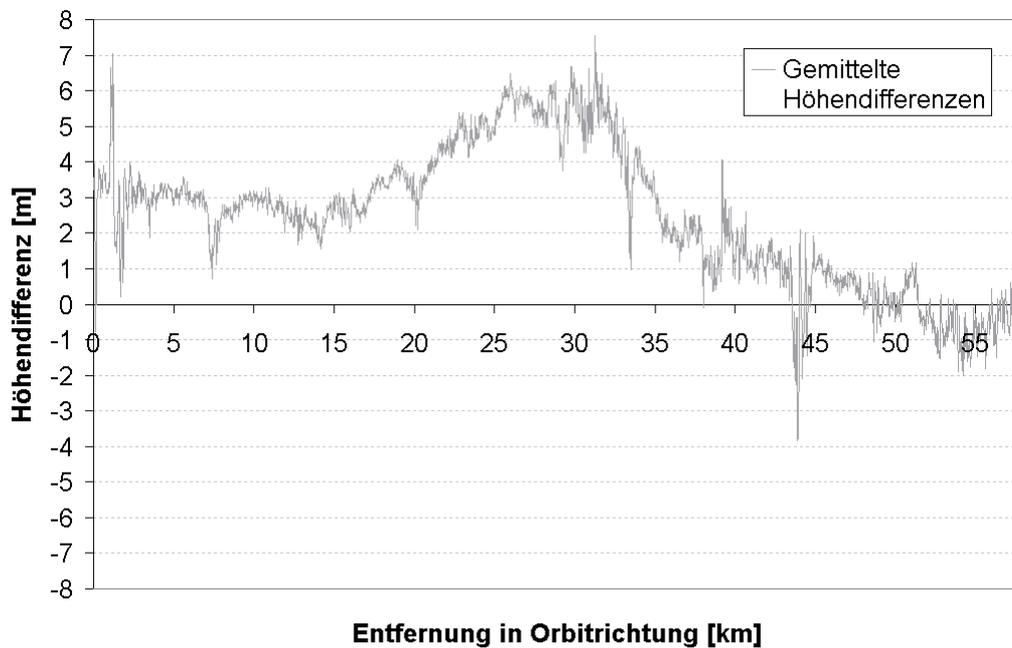


Abb. 8.9 Quer zur Orbitrichtung gemittelte Höhendifferenzen, in Orbitrichtung aufgetragen, vor der räumlichen Ähnlichkeitstransformation

Nach Anbringen der Transformation ist keine weitere Neigung des Streifens in Orbitrichtung erkennbar. Abb. 8.10 stellt die quer zur Orbitrichtung gemittelten Höhendifferenzen nach Anbringen der Transformation graphisch dar.

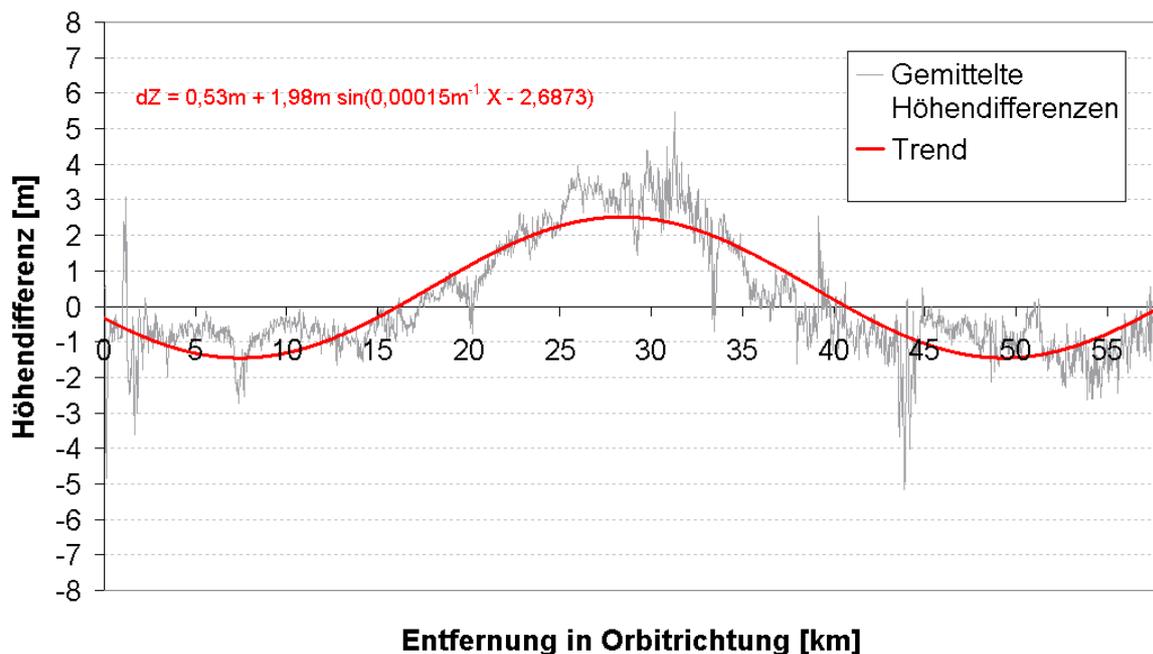


Abb. 8.10 Höhendifferenzen in Orbitrichtung

Die grau dargestellten gemittelten Höhendifferenzen sind im süd-westlichen Bereich des Untersuchungsgebietes leicht negativ, werden dann positiv bis maximal etwa +3 m und gehen dann erneut ins negative über. Der Verlauf kann als sinusförmig interpretiert werden. Um eine Aussage über Wellenlänge und Amplitude der sinusförmigen Funktion machen zu können, wurde mit Hilfe einer Ausgleichung nach kleinsten Quadraten folgende Sinusfunktion geschätzt:

$$dZ = a + b \cdot \sin(c \cdot dX + d) \quad \text{Gl. 8.2}$$

mit

- dZ Höhendifferenz [m]
- a Verschiebung in Y-Richtung [m]
- b Amplitude [m]
- c Frequenz [m<sup>-1</sup>]
- dX Entfernung in Orbitrichtung [m]
- d Phasenverschiebung [rad]

Ergebnis der Berechnungen ist die in Abb. 8.10 rot dargestellte Funktion. Tab. 8.5 enthält die vier ermittelten Parameter.

	Wert
a [m]	+0,53
b [m]	+1,98
c [m <sup>-1</sup> ]	+0,00015
d [rad]	-2,68734

Tab. 8.5 Parameter der Sinusfunktion

Der Parameter a beschreibt die Verschiebung der Sinusfunktion in Y-Richtung. D.h. die Funktion verläuft nicht um den Wert Null sondern ist um 0,5 m in die positive Y-Richtung verschoben. Bei der Ermittlung der 7 Parameter der räumlichen Ähnlichkeitstransformation wird die Summe der Verbesserungen, die gleichbedeutend ist mit der Summe der Höhendifferenzen nach Durchführung der Transformation, zu Null. Bei der Bestimmung der Sinusfunktion gehen die gemittelten Höhendifferenzen als Beobachtungen ein, sodass ein von Null verschiedener Wert a geschätzt werden kann.

Der Wert b ist die Amplitude der Sinusfunktion. Die Höhendifferenzen weisen in Abhängigkeit von der Position in Orbitrichtung maximale lokale systematische Höhenfehler von  $+0,5 \pm 2,0$  m auf.

Die Wellenlänge der Funktion kann mit Hilfe der Frequenz  $c$  berechnet werden. Es ergibt sich:

$$\lambda = \frac{2\pi}{c} \quad \text{Gl. 8.3}$$

Die Wellenlänge ist demnach 41.876 m.

$d$  beschreibt die Phasenverschiebung und beträgt  $-2,68734$  rad, was  $-17.910$  m ergibt. Der Rechtswert des Nullpunktes des lokalen Systems beträgt  $3517480$ .

Die hier gewonnen Erkenntnisse müssen bei der Untersuchung von Teilflächen überprüft werden. Der lokale systematische Höhenfehler ist von der Position in Orbitrichtung abhängig, sodass sich dieser Fehler in den Teilflächen widerspiegeln könnte.



# **Kapitel 9**

## **Beurteilung der Höhengenauigkeit in Abhängigkeit der Landbedeckung**

Um den Einfluss der Landbedeckung auf die Qualität der SRTM ITED-2 Daten zu untersuchen, wurde das ATKIS Basis DLM verwendet, um die Referenzhöhendaten (TP's und DGM5) zu klassifizieren. Die Klassenbildung orientiert sich dabei an dem ATKIS Objektartenkatalog, wobei folgende Klassen gewählt wurden:

- Siedlung
- Straßenverkehr (Plätze)
- Flugverkehr (Flugplatz / Landeplatz)
- Ackerland
- Grünland
- Gartenland
- Wald / Waldrand
- Gehölz
- Gewässer

Der Einfluss der Landbedeckung wurde im Gesamtgebiet sowie in einzelnen kleineren Teilgebieten untersucht.

### **9.1. UNTERSUCHUNG DES GESAMTGEBIETES**

Es wurden zum einen die Koordinaten Trigonometrischer Punkte, zum anderen das ATKIS DGM5 benutzt, um Genauigkeitsmaße in Abhängigkeit der Landbedeckung abzuleiten.

### 9.1.1 Koordinaten Trigonometrischer Punkte

Innerhalb der Landbedeckungsklassen wurden die Höhendifferenzen nach Gl. 7.1 berechnet. Die resultierenden Genauigkeitsmaße enthält Tab. 9.1.

Die Tabelle stellt auf der linken Seite (Spalte 1 bis 3) die Werte vor Anbringen der 7 ermittelten Transformationsparameter dar. n ist die Anzahl berechneter Höhendifferenzen, Z0 ist der Mittelwert der Höhendifferenzen, s ist die absolute Standardabweichung der Höhendifferenzen.

In den Klassen, die von Vegetation und Gebäuden beeinflusst werden, wurde ein negativer Mittelwert Z0 berechnet (Siedlung, Wald, Waldrand). Dieses kann dadurch erklärt werden, dass das Gelände, welches durch die Trigonometrischen Punkte repräsentiert wird, mit der Oberfläche, repräsentiert durch die SRTM ITED-2 Daten, verglichen wird. Die Oberfläche befindet sich über dem Gelände, sodass nach Gl. 7.1 die Höhendifferenz negativ und somit der Mittelwert ebenfalls negativ wird. Zwar befinden sich Trigonometrische Punkte nicht direkt unter Bäumen oder in direkter Umgebung von Gebäuden, doch können die SRTM Daten von benachbarten Waldgebieten und städtischen Bereichen beeinflusst sein. In der Klasse Gehölz ist der Mittelwert positiv, was nicht zu erwarten war, weil auch diese Objektart die gleiche Problematik aufweist. Offensichtlich gelangen die Radarsignale bei der lockeren Bepflanzung bis auf den Boden. Alle anderen Klassen besitzen einen positiven Mittelwert in der Größenordnung von +2,3 bis +3,7 m. Dieser Wertebereich ist etwa mit dem in Kapitel 7.2 ermittelten Wert von +3,2 m zu vergleichen. Dort wurde der Mittelwert im offenen Gelände berechnet. Die ITED-2 Daten befinden sich demnach unterhalb des Geländeniveaus.

	<b>n</b>	<b>Z0</b> <b>[m]</b>	<b>s</b> <b>[m]</b>	<b>n</b>	<b>Z0</b> <b>[m]</b>	<b>s</b> <b>[m]</b>
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
Siedlung	105	-1,82	±5,58	105	-2,70	±4,79
Straße	11	+2,82	±5,34	11	+0,78	±4,49
Flugplatz	1	+2,41		1	-0,24	
Ackerland	568	+3,06	±4,09	568	+1,14	±2,35
Grünland	114	+3,66	±5,21	114	+1,34	±3,50
Gartenland	7	+2,34	±3,25	7	+0,99	±2,00
Wald	113	-5,71	±8,64	113	-7,78	±6,41
Waldrand	68	-1,57	±8,20	68	-3,43	±8,14
Gehölz	9	+1,68	±4,46	9	+0,23	±4,21

Tab. 9.1 Genauigkeitsmaße in Abhängigkeit verschiedener Landnutzungen, Spalte 1-3: vor der Transformation, Spalte 4-6: nach der Transformation

## Beurteilung der Höhengenaugigkeit in Abhängigkeit der Landbedeckung

Die berechneten Standardabweichungen stimmen ebenfalls etwa mit dem Wert aus Kapitel 7.2 überein. Die Klassen Siedlung, Wald und Waldrand besitzen eine etwas schlechtere Genauigkeit.

Die Spalten 4 bis 6 der Tab. 9.1 enthalten die Werte nach Anbringen der 7 ermittelten Parameter einer räumlichen Ähnlichkeitstransformation. Die Transformationsparameter sind in Tab. 7.3 aufgeführt. Diese wurden mit Hilfe der TP's, welche sich im offenen Gelände befinden, ermittelt. Ergebnis ist, dass die Mittelwerte der einzelnen Klassen kleiner werden. D.h. in den Klassen, welche das Gelände repräsentieren, nähern sich die Mittelwerte weiter dem Wert Null. Im Idealfall müsste der Mittelwert gleich Null sein, doch können lokale systematische Fehler oder weitere Restsystematiken dazu führen, dass die Ergebnisse vom Idealfall abweichen. In den Klassen Siedlung, Wald und Waldrand wird der Mittelwert vom Betrag größer. Dieses liegt daran, dass die Transformationsparameter ohne Verwendung der Höhendaten dieser Klassen ermittelt wurden. Das Höhenniveau der SRTM Daten lag vor der Transformation unterhalb des Geländeniveaus. Nach Anbringen der Transformation werden die SRTM Daten angehoben, sodass auch die Oberfläche (Vegetation und Gebäude) angehoben wird und somit größere negative Höhendifferenzen verursacht werden.

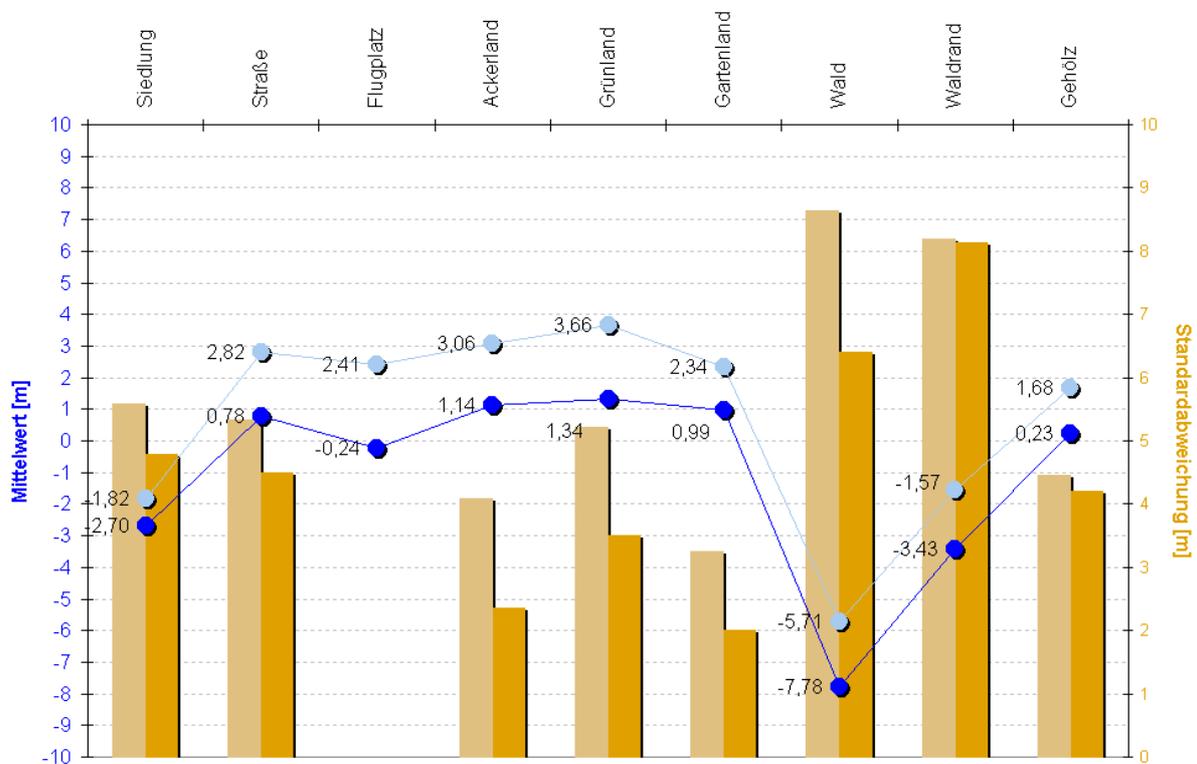


Abb. 9.1 Genauigkeitsmaße in Abhängigkeit der Landbedeckung aus Höhendifferenzen zwischen TP's und ITED-2

Die Genauigkeiten (Spalte 6), d.h. die Standardabweichungen der Verbesserungen nach Anbringen der räumlichen Ähnlichkeitstransformation, werden insgesamt besser. Die Standardabweichungen in den Klassen Ackerland, Grünland und Gartenland sind vergleichbar mit dem Ergebnis aus Kapitel 7.3, wo ein Wert von  $\pm 2,5$  m berechnet wurde. Dieses liegt daran, dass genau diese Klassen bei der Bestimmung der Transformationsparameter verwendet wurden.

Abb. 9.1 stellt die ermittelten Werte noch einmal graphisch dar:

Auf der horizontalen Achse sind die verschiedenen Landnutzungsklassen dargestellt. Die vertikalen Achsen enthalten in blau die Mittelwerte sowie in orange die Standardabweichungen. Die hellblau dargestellten kreisförmigen Symbole stellen die Mittelwerte vor der Transformation dar, die dunkelblauen Symbole kennzeichnen die Werte nach der Transformation. Die Balken entsprechen den Standardabweichungen der Höhendifferenzen. Der jeweils linke orange Balken stellt die absolute Genauigkeit dar, d.h. die Standardabweichung der Höhendifferenzen vor Anbringen der räumlichen Ähnlichkeitstransformation. Der jeweils rechte Balken zeigt die Standardabweichung nach Anbringen der 7 Parameter Transformation.

### 9.1.2 ATKIS DGM5

Tab. 9.2 enthält die Ergebnisse, die bei Verwendung des ATKIS DGM5 erzielt wurden:

	<b>n</b>	<b>Z0</b> [m]	<b>s</b> [m]	<b>n</b>	<b>Z0</b> [m]	<b>s</b> [m]
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
Siedlung	178.889	-1,30	$\pm 5,24$	178.943	-2,98	$\pm 5,70$
Straße	4.142	-2,03	$\pm 6,40$	4.163	-2,73	$\pm 6,61$
Flugplatz	2.692	+1,73	$\pm 4,17$	2.701	+0,38	$\pm 3,58$
Ackerland	557.093	+2,91	$\pm 4,24$	557.047	+0,58	$\pm 2,99$
Grünland	108.440	+1,35	$\pm 4,75$	108.287	-1,07	$\pm 4,55$
Gartenland	10.345	-0,40	$\pm 3,93$	10.352	-1,85	$\pm 4,16$
Wald	353.190	-13,34	$\pm 15,20$	353.190	-16,02	$\pm 17,59$
Gehölz	2.981	-3,50	$\pm 6,22$	2.958	-5,48	$\pm 7,56$
Gewässer	13.549	-1,13	$\pm 11,98$	13.535	-2,75	$\pm 12,22$

Tab. 9.2 Genauigkeitsmaße in Abhängigkeit der Landbedeckung aus Höhendifferenzen zwischen DGM5 und ITED-2 Daten

Es fällt wiederum auf, dass die Klassen, die in den SRTM ITED-2 Daten Vegetation und Gebäude enthalten, vor der Transformation negative Mittelwerte

Z0 aufweisen. Im Gegensatz zu den vorigen Ergebnissen weisen auch die Klassen Gartenland und Straße einen negativen Mittelwert auf. Die Klasse Gartenland enthält auch Kleingärten, d.h. kleinere Gebäude, einzelne Bäume und Büsche sind enthalten, sodass diese Objekte negative Höhendifferenzen verursachen können und somit einen negativen Mittelwert ergeben. Straßen werden in ATKIS linienförmig modelliert, sodass diese Klasse nur größere flächenhafte Plätze enthält. Diese Plätze können auch von einzelnen Bäumen und Büschen bedeckt sein.

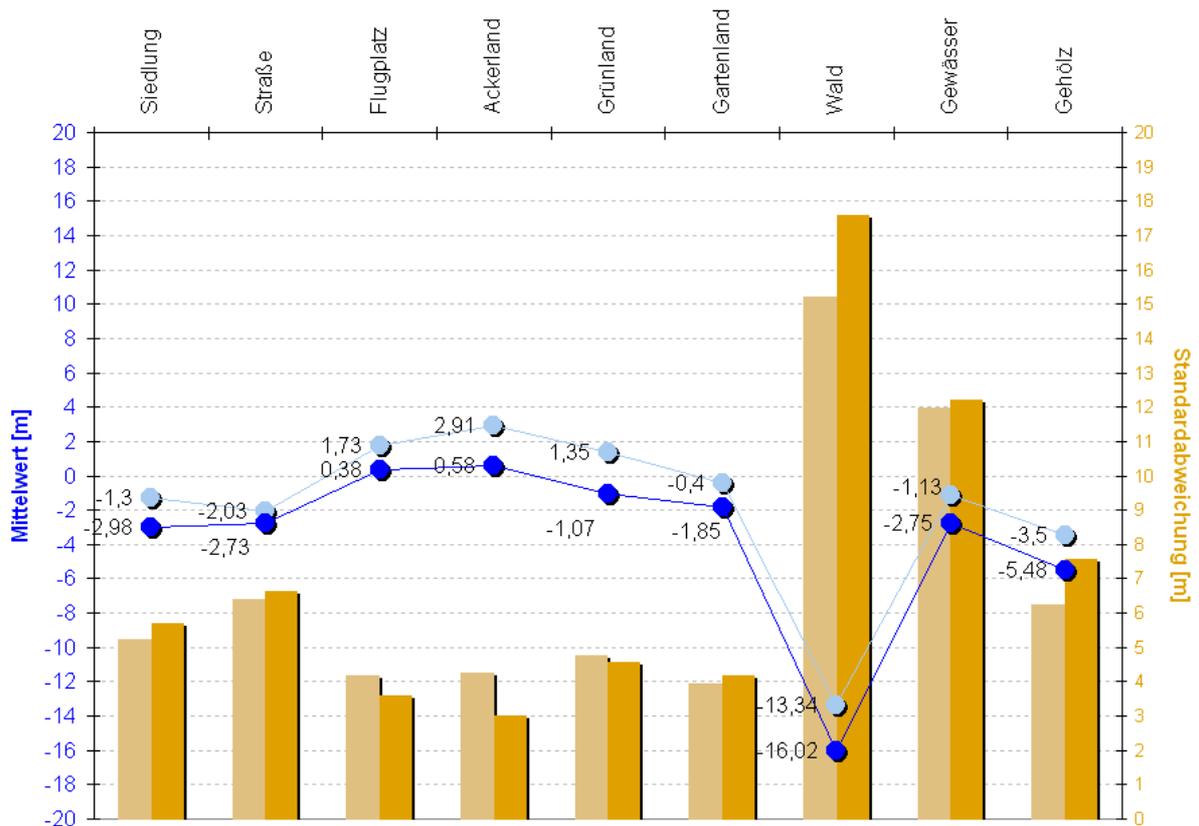


Abb. 9.2 Genauigkeitsmaße in Abhängigkeit der Landbedeckung aus Höhendifferenzen zwischen DGM5 und ITED-2 Daten

Es fällt auf, dass der Mittelwert der Klasse Wald vom Betrag her größer ist als bei den Untersuchungen mit den TP's. Hier werden flächenhafte Bereiche miteinander verglichen. Bei den Untersuchungen mit den Trigonometrischen Punkten waren zwar auch TP's in Waldbereichen vorhanden, doch werden TP's nicht direkt von Bäumen überdeckt. Es handelt sich vielmehr um den Einfluss von angrenzender und umgebender Vegetation. Dieser Einfluss ist natürlich klein im Vergleich zu DGM5 Bereiche, wo flächige Waldgebiete miteinander verglichen werden. Auch die Klasse Gehölz ist ähnlich beeinflusst und weist entsprechende Unterschiede zu den vorigen Untersuchungen auf.

Die Standardabweichungen der Höhendifferenzen verhalten sich ähnlich wie in Kapitel 9.1.1. Die Bereiche, die das offene Gelände repräsentieren, besitzen eine Genauigkeit, die mit dem Ergebnis im offenen Gelände vergleichbar ist.

Nach Durchführung der Transformation sind die errechneten Mittelwerte kleiner als zuvor. Die ITED-2 Daten werden erneut angehoben, sodass sich im offenen Gelände die Werte dem Wert Null nähern. Von Vegetation und Gebäude beeinflusste Bereiche werden ebenfalls angehoben, sodass die Beträge der Mittelwerte in diesem Fall größer werden, da diese Landbedeckungsklassen nicht für die Bestimmung der Transformationsparameter einbezogen wurden.

Die Genauigkeit nach der Transformation ist nur in den Klassen Flugplatz und Ackerland mit den in Kapitel 8.3 errechneten Wert von  $\pm 3,3$  m vergleichbar. Die Klassen Grünland und Gartenland besitzen eine etwas schlechtere Genauigkeit.

Abb. 9.2 stellt die Ergebnisse graphisch dar. Die Darstellung ist identisch mit Abb. 9.1.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Genauigkeit im offenen Gelände mit den ermittelten Ergebnissen aus Kapitel 8.2 vergleichbar ist. Innerhalb von Vegetationsflächen und urbanen Gebieten hingegen ist die Genauigkeit geringfügig schlechter.

## 9.2. UNTERSUCHUNG VON TEILGEBIETEN

Mit Hilfe kleinerer Testflächen wurde der Einfluss der Landbedeckung sowie weiterer „äußerer Einflüsse“ auf die Qualität der SRTM ITED-2 Daten untersucht. Die nachfolgende Abb. 9.3 stellt die Testflächen graphisch dar. Die Flächen wurden durchnummeriert umrandet. Eine Landsat ETM+ Szene vom September 1999 wurde hinterlegt.

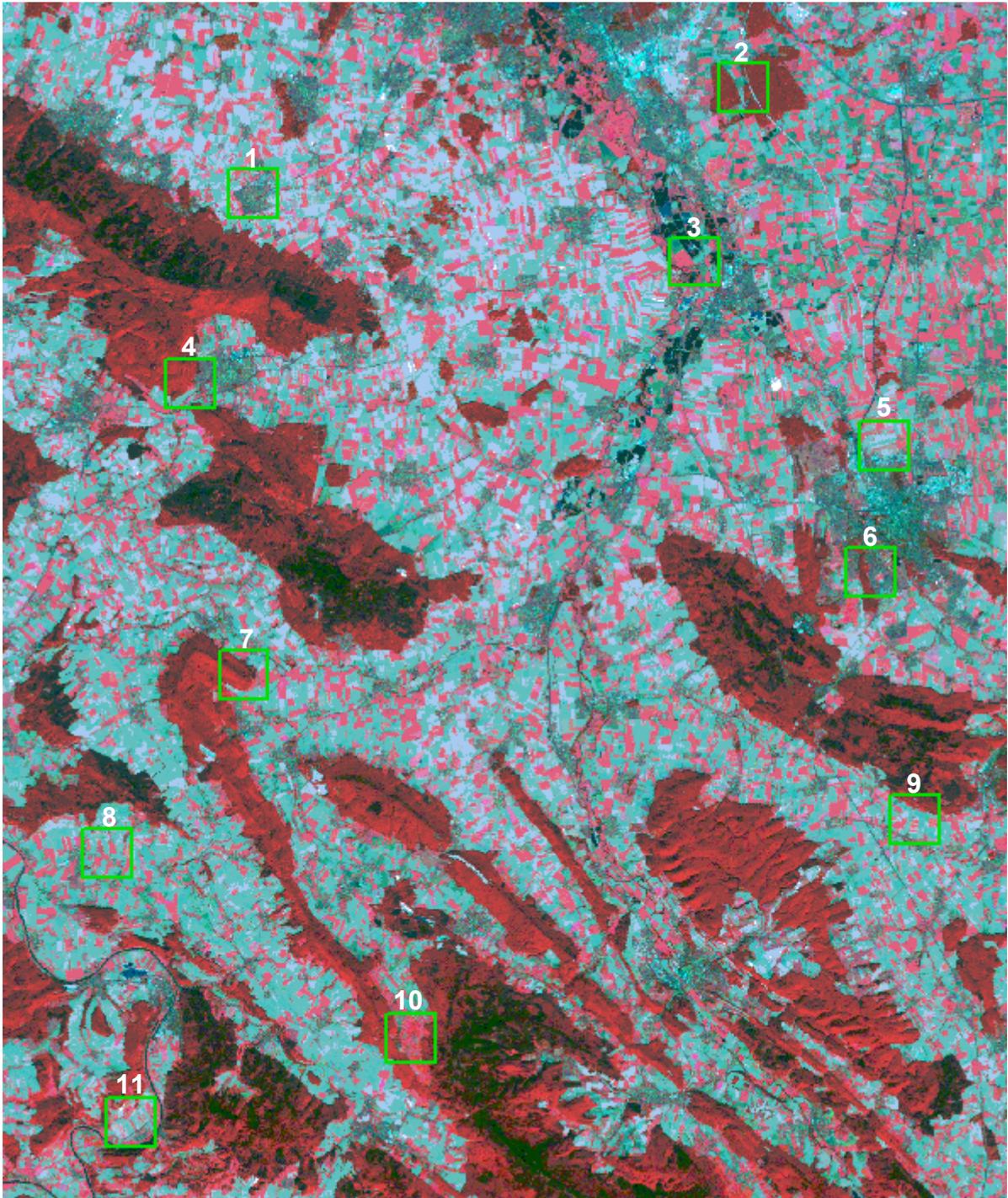


Abb. 9.3 Darstellung der einzelnen Testflächen mit einer Größe von  $2 \times 2 \text{ km}^2$ , die Testflächen sind durchnummeriert und umrandet

### 9.2.1 Wald

Es wurden zwei Waldflächen näher untersucht. Testfläche 2 ist ein Gebiet, welches hauptsächlich mit Laubwald bedeckt ist. Kleinere Grünland- und Ackerlandflächen verlaufen von Nord nach Süd. Des weiteren führt die Autobahn A7 durch die Testfläche. Geländehöhenunterschiede sind nicht erwähnenswert, es handelt sich um flaches Gelände. Abb. 9.4 stellt die Landbedeckung, entnommen aus den Felderhebungen, graphisch dar. Auf die Darstellung der Autobahn wurde verzichtet.



Abb. 9.4 Testfläche 2, Landbedeckung

Es wurden Höhendifferenzen zwischen DGM5 und SRTM ITED-2 vor und nach der räumlichen Ähnlichkeitstransformation berechnet. Zusätzlich wurde ein zu SRTM vergleichbares Digitales Oberflächenmodell mit Hilfe der analytischen Photogrammetrie bestimmt. Die Höhen sind mit  $Z_{\text{Pho}}$  gekennzeichnet. Die Höhendifferenzen zwischen den SRTM Daten und diesem Oberflächenmodell wurden ermittelt, wiederum vor und nach der Transformation der SRTM Daten. Tab. 9.3 enthält die Ergebnisse, die innerhalb der Waldflächen erzielt wurden:

		Vor Transformation	Nach Transformation
$Z_{\text{DGM5}} - Z_{\text{ITED-2}}$	n	4.565	4.557
	Z0 [m]	-17,03	-17,35
	s [m]	±17,45	±17,77
$Z_{\text{Pho}} - Z_{\text{ITED-2}}$	n	4.331	4.331
	Z0 [m]	+3,36	+3,07
	s [m]	±4,86	±4,96

Tab. 9.3 Genauigkeitsmaße aus Höhendifferenzen zwischen DGM5 und ITED-2 sowie photogrammetrisch bestimmten Oberflächenmodell (Pho) und ITED-2

Etwa 4.500 Höhendifferenzen wurden gebildet. Der Mittelwert Z0 beträgt  $-17,0$  m, was nicht weiter verwundert, denn es wird das SRTM Digitale Oberflächenmodell mit dem Referenzgeländemodell DGM5 verglichen. Die Differenzen spiegeln etwa die Baumhöhen wieder. Die Standardabweichung ist aufgrund des vertikalen systematischen Fehlers ebenfalls sehr hoch. Der Unterschied zwischen den Ergebnissen vor und nach der räumlichen Ähnlichkeitstransformation ist sehr gering, denn die 7 Transformationsparameter verursachen im Nord-Osten des Untersuchungsgebietes nur geringe horizontale und vertikale Verschiebungen. Abb. 9.5 oben stellt die Höhendifferenzen vor (linke Seite) und nach der Transformation (rechte Seite) graphisch dar. Visuell sind kaum Unterschiede festzustellen.

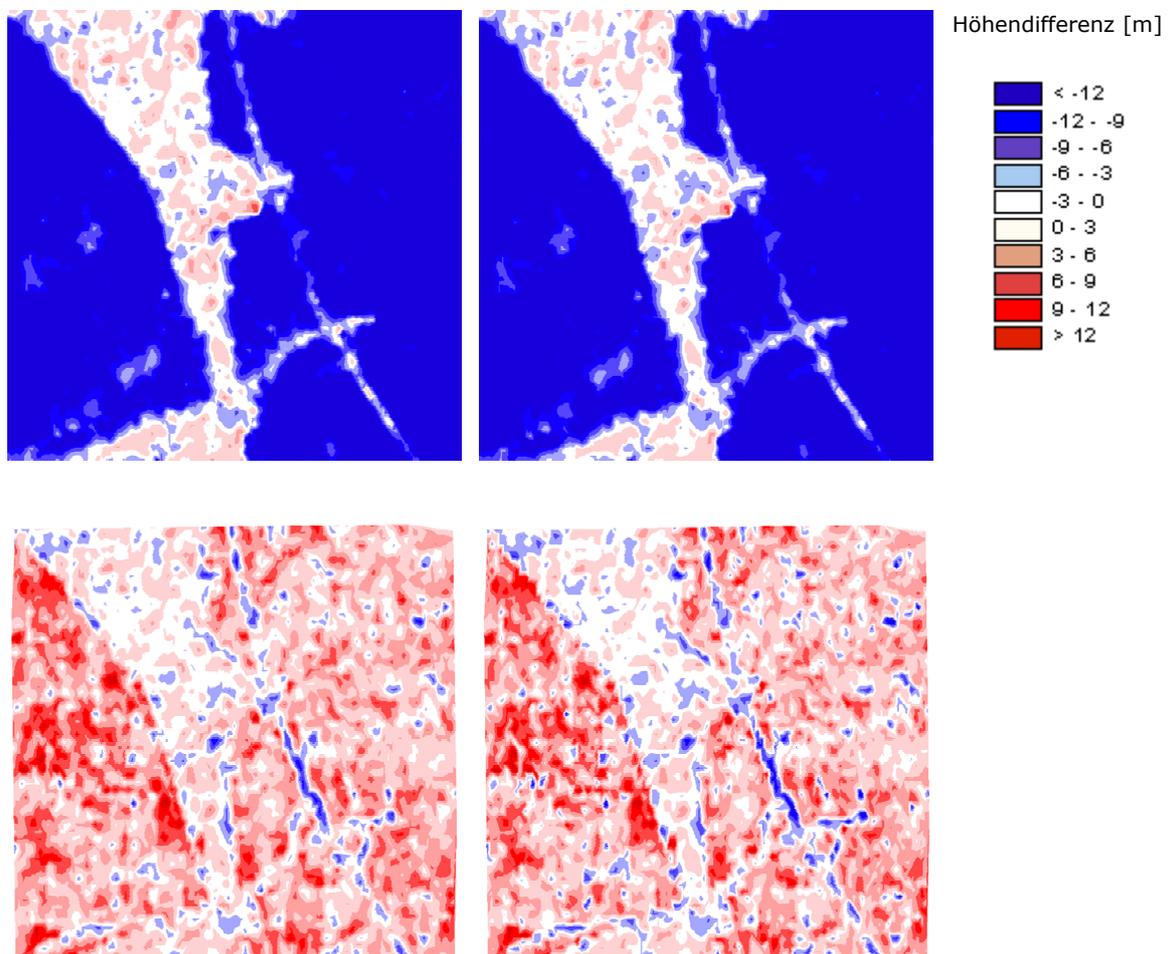


Abb. 9.5 Höhendifferenzen, oben: DGM5 – ITED-2, unten: Photogrammetrisch ermitteltes Digitales Oberflächenmodell – ITED-2, links jeweils vor der Transformation, rechts jeweils nach der Transformation

Der untere Bereich der Tab. 9.3 enthält die Werte, die aus dem Vergleich zwischen dem photogrammetrisch bestimmten Oberflächenmodell und SRTM Oberflächenmodell abgeleitet wurden (siehe auch Abb. 9.5 unten). Die

Mittelwerte vor und nach der Transformation sind positiv, d.h. die SRTM Oberfläche liegt unterhalb der photogrammetrisch ermittelten Oberfläche. Es wäre zu erwarten gewesen, dass bei Berücksichtigung aller systematischer Fehler, d.h. nach der Transformation, der Mittelwert Null werden würde. Eine mögliche Ursache für das Abweichen von Null kann ein Eindringen der kurzwelligen Radarimpulse in die Vegetation sein. Die Mission fand im Februar statt, die Bäume waren nicht belaubt. Die photogrammetrische Erfassung wurde bewusst an der oberen Vegetation durchgeführt, sodass positive Höhendifferenzen auftreten können. Abb. 9.5 zeigt, dass im offenen Gelände die Höhendifferenzen um Null streuen, es ist dort keine Systematik zu erkennen. Nur die Waldbereiche enthalten durch Vegetation verursachte systematische Höhenfehler.

Die in Kapitel 8.3 festgestellte wiederkehrende Systematik in Orbitrichtung ergibt sich rechnerisch im Zentrum des Testgebietes zu  $-0,9$  m. Dieser Wert müsste im Idealfall mit dem Mittelwert übereinstimmen, was allerdings nicht der Fall ist.

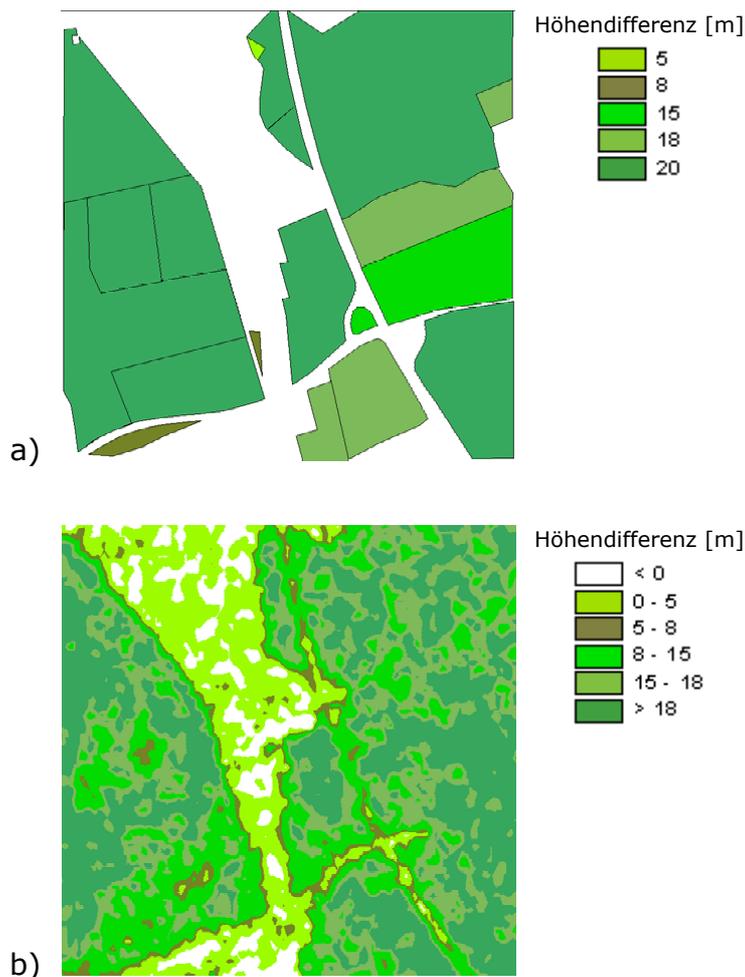


Abb. 9.6 a) Gemessene Baumhöhen aus Felderhebungen, b) Baumhöhen errechnet aus Höhendifferenz zwischen DGM5 und SRTM ITED-2 Daten

Abb. 9.6 zeigt zum einen die bei den Felderhebungen ermittelten Baumhöhen (oben) und zum anderen die aus den Höhendifferenzen zwischen DGM5 und SRTM ITED-2 Daten errechneten Baumhöhen. Bei den Feldbegehungen wurde mit Hilfe eines Baumhöhenmessers repräsentativ für zusammenhängende Baumgruppen die Höhe eines Baumes bestimmt. Aufgrund der Ungenauigkeit dieses Verfahrens und Messung nur einzelner Bäume, wurde die Höhe nur mit einem Höhenintervall von einem Meter ermittelt. Die Abbildung zeigt, dass die Strukturen der Bäume wieder zu erkennen sind. Doch treten lokal durchaus größere Abweichungen auf.

Im Nord-Westen der Testfläche 4 befinden sich Waldflächen, östlich grenzt die Kleinstadt Springe an, eine Eisenbahntrasse durchläuft das Gebiet, Acker- und Grünlandflächen komplettieren im Süden die Testfläche. Abb. 9.7 stellt die Ergebnisse der Feldbegehungen graphisch dar:



Abb. 9.7 Testfläche 4, Landbedeckung

Als Daten standen wie zuvor die SRTM ITED-2 sowie das DGM5 zur Verfügung. Auf eine analytische Erfassung der Oberfläche wurde verzichtet, vereinzelt wurden Baumhöhen während der Felderhebungen gemessen.

		vor Transformation	nach Transformation
$Z_{DGM5} - Z_{ITED-2}$	n	3.668	3.667
Wald	Z0 [m]	-14,30	-16,28
	s [m]	±15,87	±17,68
$Z_{DGM5} - Z_{ITED-2}$	n	1.851	1.841
offenes Gelände	Z0 [m]	+4,38	+2,47
	s [m]	±5,90	±4,63

Tab. 9.4 Testfläche 4, Genauigkeitsmaße aus Höhendifferenzen zwischen DGM5 und ITED-2

Die ersten drei Zeilen der Tab. 9.4 zeigen die Genauigkeitsmaße in den Waldflächen der Testfläche 4. Erneut ist auffällig, dass der Betrag des Mittelwertes relativ groß ist, er korrespondiert mit den gemessenen Baumhöhen. Die Standardabweichungen nehmen ebenfalls erneut sehr große Werte an.

Die unteren drei Zeilen zeigen die Ergebnisse im offenen Gelände. Es wurden die Flächen benutzt, welche bei den Felderhebungen als Acker-, Garten-, Grünland oder Straße erhoben wurden. Auffällig ist hier, dass der Mittelwert nicht Null ist, doch stimmt dieser Wert mit dem aus Kapitel 8.3 berechneten Wert überein, der sich aus der geschätzten sinusförmigen Systematik ergibt. Dieses sind genau +2,5 m. D.h. nach Abzug dieser lokalen Systematik ist kein weiterer systematischer Höhenfehler vorhanden. Eine Berücksichtigung des lokalen systematischen Höhenfehlers würde eine Genauigkeit von  $\pm 3,9$  m zur Folge haben, was etwa mit den in Kapitel 8 ermittelten Werten übereinstimmt.

Die folgende Abb. 9.8 stellt ein farbcodiertes Modell der berechneten Höhendifferenzen dar. Im Gegensatz zu Testfläche 1 sind die Unterschiede vor und nach der Transformation signifikant. Auffällig ist, dass nach der Transformation eine Restsystematik im offenen Gelände vorhanden ist, die durch den berechneten sinusförmigen Verlauf verursacht sein könnte.

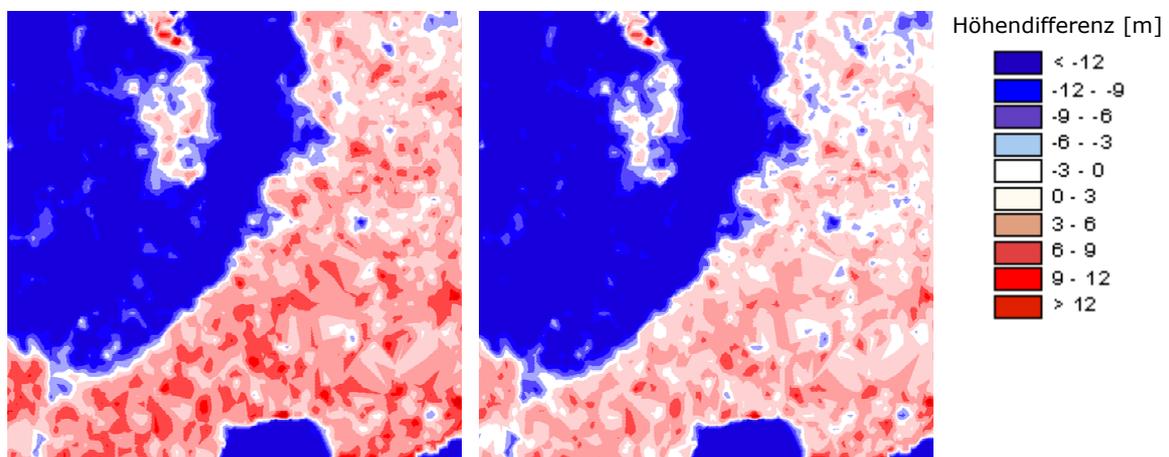


Abb. 9.8 Höhendifferenzen zwischen DGM5 und ITED-2, links: vor der Transformation, rechts: nach der Transformation

### 9.2.2 Ackerland

Vier im Untersuchungsgebiet gelegene Testflächen wurden ausgewählt, die größtenteils landwirtschaftlich genutzte Flächen enthalten. Aufgrund des Missionszeitpunktes ist davon auszugehen, dass die Vegetationshöhe maximal

wenige Dezimeter betrug. Auch innerhalb der Ackerflächen repräsentieren die SRTM Daten das Gelände.

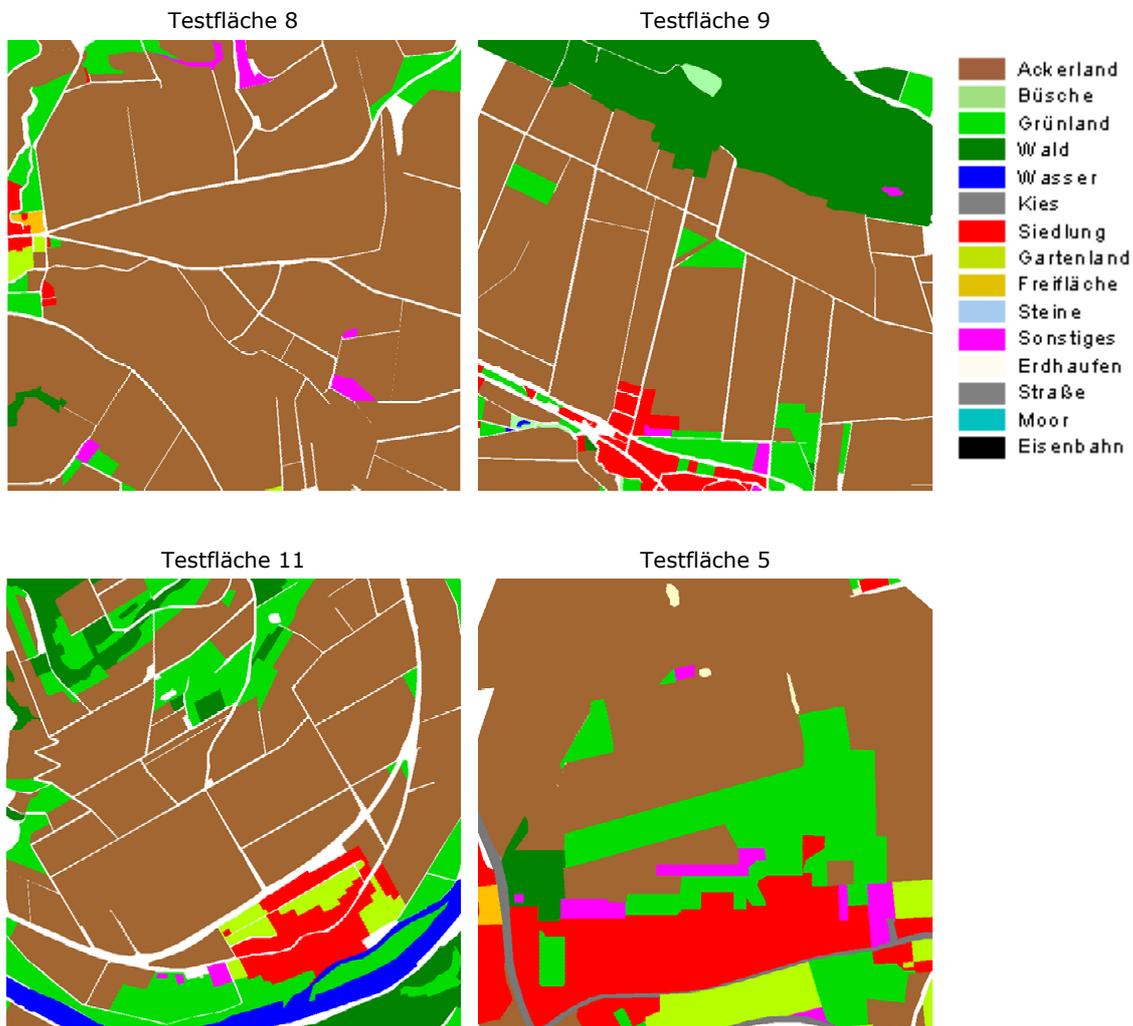


Abb. 9.9 Landbedeckung der Testflächen 8, 9, 11 und 5

Innerhalb der Ackerflächen wurden erneut Höhendifferenzen zwischen DGM5 und SRTM ITED-2 vor und nach der räumlichen Ähnlichkeitstransformation gebildet. Tab. 9.5 enthält die Ergebnisse der Untersuchungen. Auffällig ist, dass die Mittelwerte  $Z_0$  nach der Transformation vernachlässigbar klein sind. Die Unterschiede zwischen den Werten vor und nach der Transformation sind signifikant. Der Vergleich der Mittelwerte  $Z_0$  nach der Transformation mit den durch die Sinusfunktion ermittelten Werten ergibt Differenzen von 0,2 bis 1,6 m. Einige Testflächen sind demnach lokal durch weitere Restfehler beeinflusst, die diese lokalen systematischen Abweichungen verursachen.

Die Standardabweichungen sind sehr niedrig. Wiederum werden die Werte aus Kapitel Kapitel 8 bestätigt. Die größten Werte treten in Testfläche 8 auf.

## Beurteilung der Höhengenaugigkeit in Abhängigkeit der Landbedeckung

Testfläche		vor Transformation	nach Transformation
8	n	6.219	6.208
	Z0 [m]	+3,33	+0,39
	s [m]	±3,86	±3,95
9	n	5.063	5.078
	Z0 [m]	+1,25	-0,57
	s [m]	±2,35	±2,14
11	n	4.179	4.174
	Z0 [m]	+3,10	-0,35
	s [m]	±3,68	±2,00
5	n	4.518	4.518
	Z0 [m]	+1,04	+0,21
	s [m]	±2,78	±2,62

Tab. 9.5 Genauigkeitsmaße aus Höhendifferenzen zwischen DGM5 und SRTM ITED-2 innerhalb von Ackerflächen

### 9.2.3 Grünland

Die nachfolgende Abbildung stellt die Landbedeckung der Testfläche 7 dar:



Abb. 9.10 Testfläche 7, Landbedeckung

Die Testfläche enthält flächenhafte Grünlandbereiche, die an einen Wald angrenzen. Das Gelände besitzt relativ starke Höhenunterschiede.

Innerhalb der Grünlandflächen wurden erneut die Höhendifferenzen zwischen DGM5 und SRTM ITED-2 gebildet. Die nachfolgende Tab. 9.6 enthält die ermittelten Werte.

		Vor Transformation	Nach Transformation
$Z_{DGM5} - Z_{ITED-2}$	n	4.094	4.097
	Z0 [m]	+4,50	+2,14
	s [m]	±5,94	±4,46

Tab. 9.6 Genauigkeitsmaße aus Höhendifferenzen zwischen DGM5 und ITED-2 im Grünland, Testfläche 7

Der Unterschied zwischen den Ergebnissen vor und nach der räumlichen Ähnlichkeitstransformation ist erneut signifikant. Der errechnete Mittelwert Z0 nach der Transformation deutet auf eine vorhandene Restsystematik hin. Dieser Wert stimmt etwa mit dem durch die Sinusfunktion ermittelten Wert überein. Die Funktion ergibt einen lokalen systematischen Höhenfehler von +2,0 m.

Testfläche 10 stellt einen Bereich dar, welcher ebenfalls relativ starke Höhenunterschiede aufweist. Das Gebiet ist von Wald umschlossen, im Norden grenzen einige Ackerflächen an.

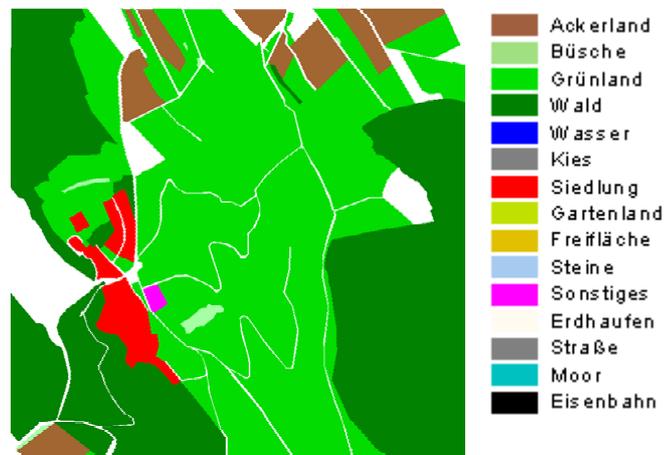


Abb. 9.11 Testfläche 10, Landbedeckung

Die Ergebnisse in Tab. 9.7 zeigen einen vernachlässigbaren lokalen systematischen Höhenfehler von -0,3 m. Dieser Wert stimmt nicht mit dem Wert der berechneten Schwingung überein. Demnach müsste der Wert +,1,2 m betragen. Die Differenz beträgt 1,5 m.

		Vor Transformation	Nach Transformation
$Z_{DGM5} - Z_{ITED-2}$	n	3.126	3.128
	Z0 [m]	+2,29	-0,29
	s [m]	±4,38	±3,75

Tab. 9.7 Genauigkeitsmaße aus Höhendifferenzen zwischen DGM5 und SRTM ITED-2 innerhalb von Grünland, Testfläche 10

## 9.2.4 Gewässer

Um etwas über das Verhalten der SRTM Daten innerhalb oder an Gewässern zu erfahren, wurde eine Testfläche südlich von Hannover in der Nähe von Sarstedt ausgewählt. Diese Testfläche 3 ist charakterisiert durch verschiedene kleine Teiche, eine Kläranlage sowie zwei kleinere Dörfer. Die Leine durchfließt das Gebiet, Acker- und Grünlandflächen vervollständigen die Testfläche. Die nachfolgende Abb. 9.12 stellt die Landbedeckung dar.

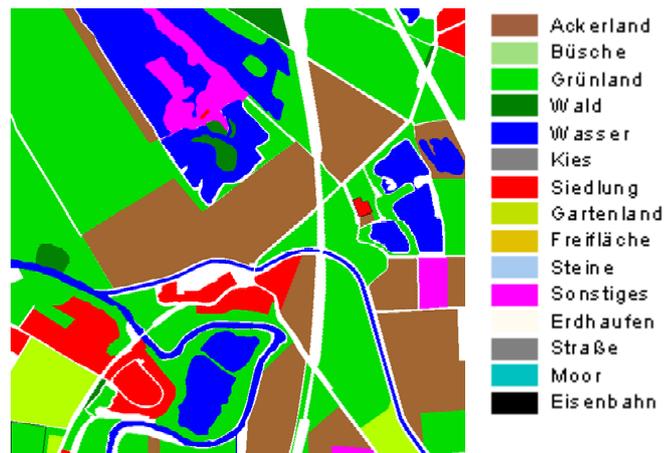


Abb. 9.12 Testfläche 3, Landbedeckung

Innerhalb des offenen Geländes sowie innerhalb der Wasserflächen wurden die Höhendifferenzen gebildet. Zum offenen Gelände zählen die Klassen Ackerland und Grünland. Das DGM5 ist innerhalb von Gewässern aus den umliegenden Höhenwerten des Uferbereiches interpoliert worden.

Die nachfolgende Abb. 9.13 stellt die Höhendifferenzen als farbcodiertes Bild dar. Es fällt auf, dass die Wasserflächen stark variierende Höhendifferenzen aufweisen. Die Werte sind stark negativ und positiv, d.h. sie besitzen keinen konstanten Wert.

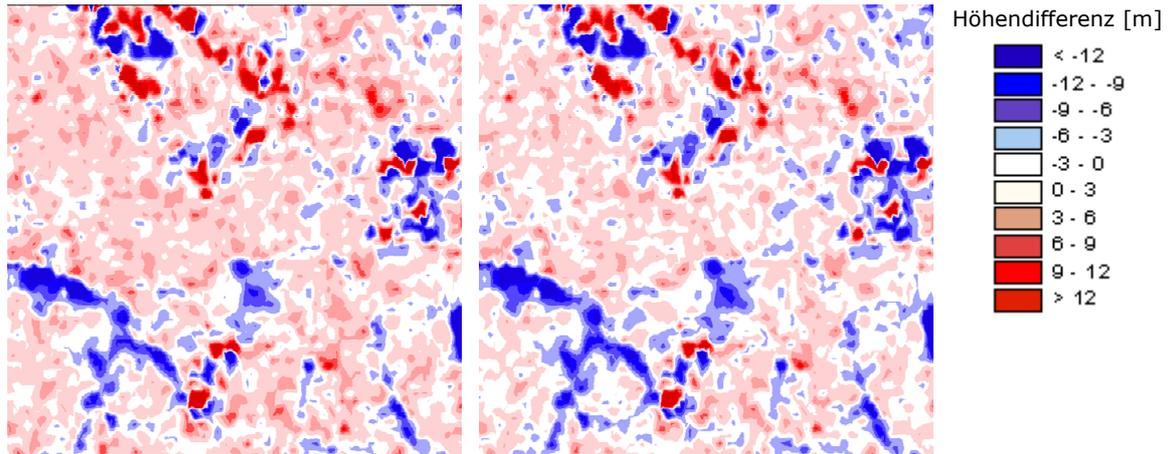


Abb. 9.13 Höhendifferenzen zwischen DGM5 und SRTM ITED-2 innerhalb von Gewässern

Tab. 9.8 enthält die zugehörigen Zahlenwerte:

		vor Transformation	nach Transformation
Z <sub>DGM5</sub> - Z <sub>ITED-2</sub> Gewässer	n	1.031	1.040
	Z <sub>0</sub> [m]	+0,07	-0,63
	s [m]	±10,75	±10,75
Z <sub>DGM5</sub> - Z <sub>ITED-2</sub> offenes Gelände	n	4.066	4.051
	Z <sub>0</sub> [m]	+0,65	-0,15
	s [m]	±3,33	±3,26

Tab. 9.8 Genauigkeitsmaße aus Höhendifferenzen zwischen DGM5 und SRTM ITED-2 innerhalb von Gewässer

Innerhalb der Gewässer ist kein systematischer Höhenfehler vorhanden. Die Standardabweichungen vor und nach der Transformation sind sehr hoch, die maximalen Differenzen betragen -65 bzw. +70 m. Die Höhendifferenzen variieren sehr stark.

Im offenen Gelände liegt der Mittelwert ebenfalls nahe bei Null, obwohl dieser Wert nach der Transformation und unter Berücksichtigung der sinusförmigen Funktion etwa -1,4 m annehmen müsste. Die Genauigkeiten sind wiederum mit den ermittelten Werten aus Kapitel Kapitel 8 vergleichbar.

### 9.2.5 Siedlung

Es wurden zwei Siedlungsbereiche zur genaueren Untersuchung ausgewählt. Die Testfläche 1 befindet sich süd-westlich von Hannover, das Dorf „Wennigsen“

befindet sich zentral im Testgebiet, umrandet von Ackerflächen. Die Höhenunterschiede sind nicht erwähnenswert. Eine Eisenbahnlinie durchläuft von West nach Ost die Testfläche. Abb. 9.14 stellt die Landbedeckung der Testfläche 1 dar.

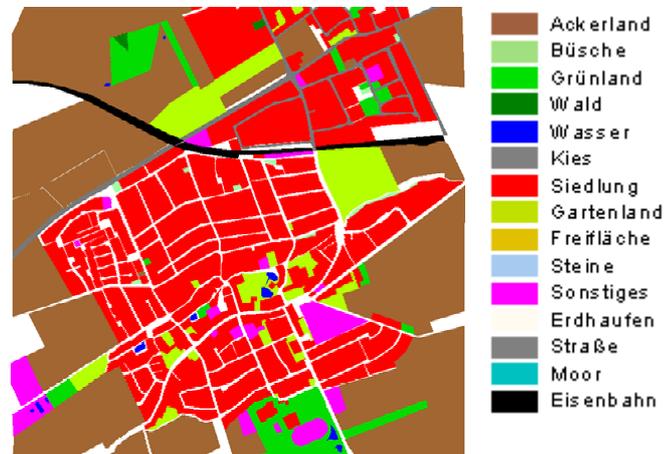


Abb. 9.14 Testfläche 1, Landbedeckung

Die Berechnung der Höhendifferenzen und die Ableitung von Mittelwert und Standardabweichung wurden innerhalb der Klassen Siedlung, Acker-, Grünland und Gartenland durchgeführt (Tab. 9.9). Die Unterschiede zwischen den Ergebnissen vor und nach der räumlichen Ähnlichkeitstransformation sind signifikant. Die ermittelten Transformationsparameter verursachen innerhalb der Testfläche Höhenverschiebungen von +1,4 m.

		vor Transformation	nach Transformation
Z <sub>DGM5</sub> - Z <sub>ITED-2</sub> Siedlung	n	2.419	2.427
	Z <sub>0</sub> [m]	-0,25	-1,64
	s [m]	±2,67	±3,14
Z <sub>DGM5</sub> - Z <sub>ITED-2</sub> Ackerland	n	3.015	3.022
	Z <sub>0</sub> [m]	+2,93	+1,54
	s [m]	±3,91	±3,01
Z <sub>DGM5</sub> - Z <sub>ITED-2</sub> Grünland	n	418	416
	Z <sub>0</sub> [m]	+2,30	+0,96
	s [m]	±4,12	±3,56
Z <sub>DGM5</sub> - Z <sub>ITED-2</sub> Gartenland	n	388	382
	Z <sub>0</sub> [m]	+0,80	-0,53
	s [m]	±2,85	±2,78

Tab. 9.9 Genauigkeitsmaße aus Höhendifferenzen zwischen DGM5 und ITED-2 im Siedlungsbereich

Die Mittelwerte  $Z_0$  der Klassen Acker- und Grünland nach der Transformation stimmen nahezu mit dem Wert der berechneten Sinusfunktion, +1,4 m, überein. Die Klasse Siedlung enthält über dem Gelände befindliche Gebäude, sodass der Mittelwert negativ wird. Doch ist der Einfluss wesentlich geringer als in Wäldern, da Siedlungsflächen auch offenes Gelände zwischen Gebäuden enthalten, sodass der systematische Höhenfehler gemindert wird. Die Klasse Gartenland besitzt ebenfalls einen negativen Mittelwert  $Z_0$ . Dieser lässt sich damit erklären, dass diese Flächen auch Kleingärten mit Gartenhäuser sowie einzelne Bäume enthalten.

Die Genauigkeit innerhalb der Klassen ist sehr hoch und wird nach Berücksichtigung der lokalen Systematik von +1,4 m weiter runtergeschraubt. Sie liegt damit unter den Werten aus Kapitel Kapitel 8.

Abb. 9.15 stellt die Höhendifferenzen in der Örtlichkeit dar. Im Siedlungsbereich fallen die negativen Differenzen auf, die durch Gebäude verursacht werden. Diese Bereiche werden von Differenzen eingeschlossen, die sich nach der Transformation dem Wert Null nähern.

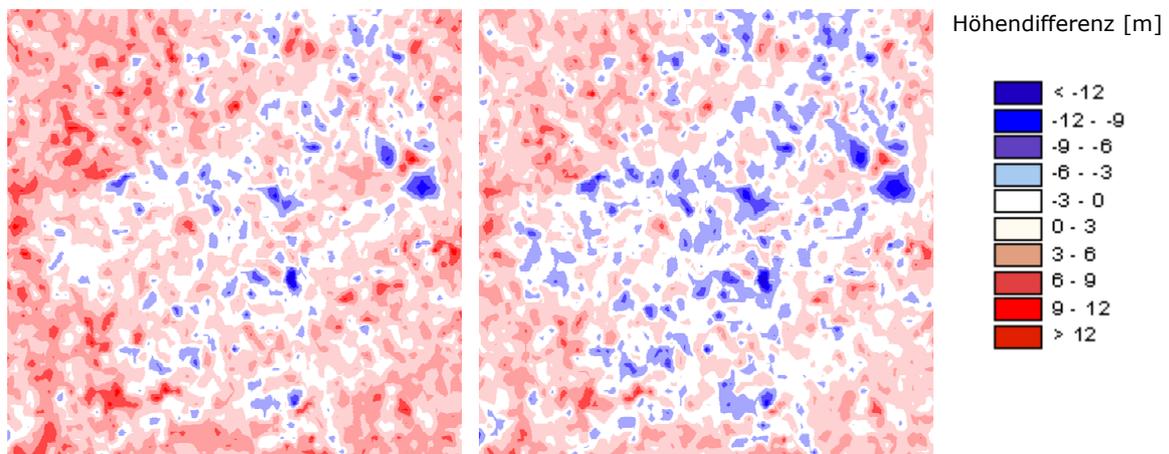


Abb. 9.15 Höhendifferenzen zwischen DGM5 und ITED-2 im Siedlungsbereich, links: vor der Transformation, rechts: nach der Transformation

Die zweite Testfläche, die Siedlung repräsentiert, ist Testfläche 6 (Abb. 9.16). Sie stellt den südlichen Teil der Stadt Hildesheim dar. Durch das Testgebiet läuft von Nord nach Süd ein schmaler Waldstreifen. Der Nord-Osten enthält mehrere Sportplätze, im Süd-Westen befinden sich einige Ackerflächen. Das Gelände ist flach.



Abb. 9.16 Testfläche 6, Landbedeckung

Im Siedlungsbereich wurden die Gebäude digitalisiert, sodass innerhalb der Gebäudepolygone Höhendifferenzen berechnet werden konnten. Freiflächen zwischen den Gebäuden wurden ausgeschlossen. Wie in Abschnitt 9.2.1 wurde ein Digitales Oberflächenmodell mittels analytischer Photogrammetrie bestimmt, die Differenzen zwischen diesem DOM und dem SRTM DOM sowie zwischen DGM5 und SRTM wurden ermittelt. Tab. 9.10 enthält die Ergebnisse:

		Vor Transformation	Nach Transformation
$Z_{DGM5} - Z_{ITED-2}$	n	617	643
	Z0 [m]	-2,33	-3,50
	s [m]	$\pm 3,50$	$\pm 4,33$
$Z_{Pho} - Z_{ITED-2}$	n	580	611
	Z0 [m]	+1,87	+1,60
	s [m]	$\pm 4,00$	$\pm 4,96$

Tab. 9.10 Genauigkeitsmaße aus Höhendifferenzen zwischen DGM5 und SRTM ITED-2 im Siedlungsbereich

Die oberen drei Zeilen zeigen die Ergebnisse, die aus den Differenzen zwischen DGM5 und SRTM ITED-2 abgeleitet wurden. Die negativen Mittelwerte repräsentieren die Gebäudehöhen. 3,5 m ist ein sehr kleiner Wert, der durch Interpolationseffekte verursacht sein könnte. D.h. wenn die korrespondierenden Höhenwerte durch Interpolation berechnet werden, werden auch umliegende Stützpunkte herangezogen, die das Gelände repräsentieren und somit die eigentliche Gebäudehöhe verfälscht.

Der Wert der Sinusfunktion beträgt  $-1,3$  m. Dieser Wert müsste nahezu mit dem Mittelwert der Höhendifferenzen zwischen photogrammetrisch ermitteltem DOM

und ITED-2 nach Durchführung der Transformation übereinstimmen. Es besteht eine Differenz von 2,9 m. Auch diese Differenz könnte durch Interpolationseffekte verursacht worden sein.

Ein Vergleich der umliegenden Ackerflächen erbrachte folgende Ergebnisse (Tab. 9.11):

		Vor Transformation	Nach Transformation
$Z_{DGM5} - Z_{ITED-2}$	n	1.051	1.053
	Z0 [m]	+0,90	-0,33
	s [m]	±2,36	±2,22
$Z_{Pho} - Z_{ITED-2}$	n	714	730
	Z0 [m]	+1,65	+0,28
	s [m]	±2,62	±2,09

*Tab. 9.11 Genauigkeitsmaße aus Höhendifferenzen zwischen DGM5 und ITED-2 und photogrammetrisch ermitteltem Oberflächenmodell und ITED-2 in den umliegenden Ackerflächen*

Nach Durchführung der räumlichen Ähnlichkeitstransformation nehmen die Mittelwerte Z0 sehr kleine Werte an. Der negative Wert -0,3 m könnte durch Vegetation verursacht worden sein, welche maximal eine Höhe von wenigen dm aufweist. Der Vergleich zwischen photogrammetrisch ermittelten Höhenwerten und SRTM ITED-2 führt zur Berechnung eines leicht positiven Mittelwertes. D.h. das Niveau der photogrammetrisch bestimmten Höhendaten befindet sich unterhalb des Niveaus der SRTM Daten. Wird der durch die eingeführte Sinusfunktion berechnete lokale systematische Fehler von -1,3 m berücksichtigt, erhält man eine Differenz von etwa 1,5 m. Das Modell der sinusförmigen Veränderung der lokalen Systematik wird hier demnach nicht bestätigt.

Die Genauigkeit, ausgedrückt durch die Standardabweichung der Höhendifferenzen, ist sehr hoch. Sie liegt unterhalb der in Kapitel Kapitel 8 ermittelten Werte.

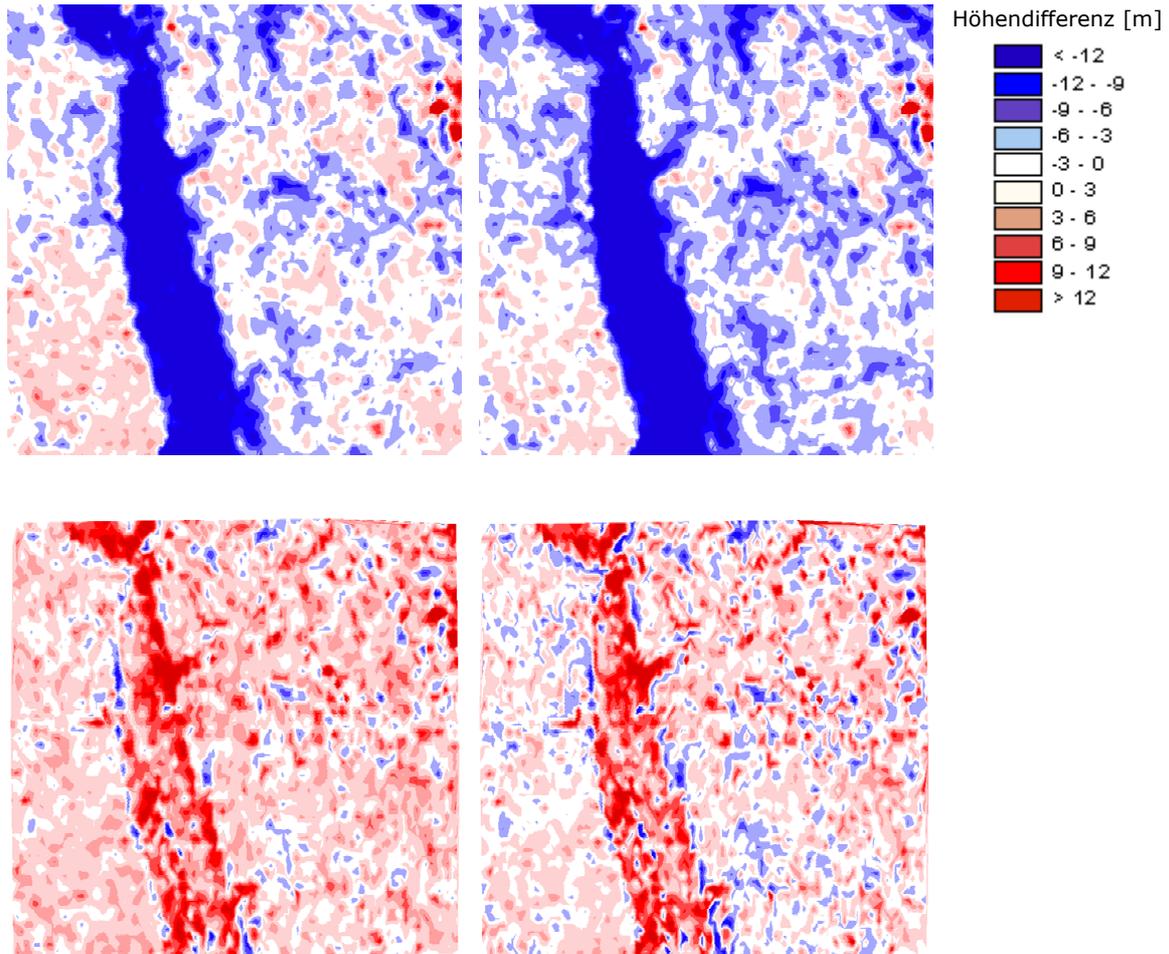


Abb. 9.17 Höhendifferenzen oben: DGM5 – ITED-2, unten: Photogrammetrisch ermitteltes Digitales Oberflächenmodell – ITED-2, links jeweils vor der Transformation, rechts jeweils nach der Transformation

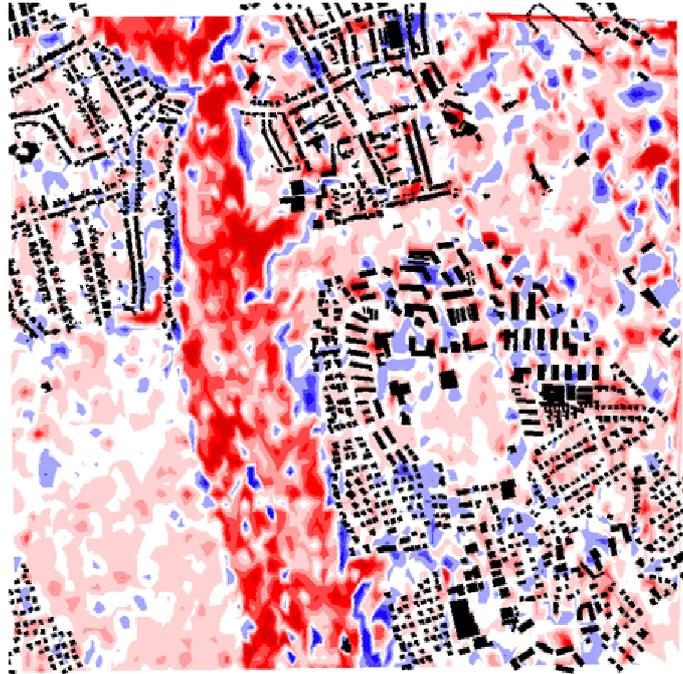
Abb. 9.17 stellt die errechneten Höhendifferenzen graphisch dar. Beim Vergleich des DGM5 mit den SRTM Daten (Abb. 9.17 oben) fallen die zusammenhängenden negativen Differenzen innerhalb des Waldes auf. Auch der Siedlungsbereich weist stark negative Höhendifferenzen auf. Eher positiv sind die Höhendifferenzen zwischen photogrammetrisch ermittelten Höhen und SRTM ITED-2 im Waldgebiet. Dieses bestätigt die Untersuchungen aus Abschnitt 9.2.1, wo festgestellt wurde, dass in Waldbereichen die SRTM Daten unterhalb der oberen Vegetationsdecke liegen.

Die Unterschiede zwischen den Ergebnissen vor und nach der Transformation sind signifikant. Die Auswirkungen der 7 ermittelten Parameter sind deutlich zu erkennen.

Abb. 9.18 stellt die digitalisierten Gebäude dar, wobei die Höhendifferenzen zwischen photogrammetrisch ermittelten Höhen und SRTM Höhen hinterlegt sind.

## Beurteilung der Höhengenaugigkeit in Abhängigkeit der Landbedeckung

Die Gebäudestruktur ist der Darstellung der Höhendifferenzen nicht zu entnehmen. Es ist auffällig, dass blau darstellte Bereiche mit Gebäudebereiche korrespondieren. Doch fallen negative Höhendifferenzen nicht direkt mit den Positionen der Gebäude zusammen. Ursache können wie bereits erwähnt Interpolationsfehler aber auch die Vorverarbeitung der Daten sein, z.B. die Filterung des SRTM Digitalen Oberflächenmodells.



*Abb. 9.18 Höhendifferenzen zwischen DGM5 und SRTM ITED-2 im Siedlungsbereich, Gebäude in schwarz dargestellt*



# Kapitel 10

## Untersuchung weiterer genauigkeitsbeeinflussender Faktoren

Bis zu diesem Zeitpunkt wurde die Landbedeckung als einziger genauigkeitsbeeinflussender Faktor untersucht. Zusätzlich sollen nun zum einen der Einfluss des lokalen Einfallswinkels und zum anderen die Abhängigkeit der Qualität der SRTM Höhendaten von vorhandenen Schneeflächen untersucht werden.

### **10.1. ABHÄNGIGKEIT DER QUALITÄT DER SRTM ITED-2 DATEN VOM LOKALEN EINFALLSWINKEL**

Radar ist ein Verfahren, welches mit Hilfe der Seitensichtgeometrie die ausgesendeten und von der Erdoberfläche reflektierten Signale wieder aufzeichnet. Im Falle des SRTM X-SAR Systems wurden die Signale bei einem mittleren Blickwinkel von  $53^\circ$  ausgesendet, sodass bei ebenem Gelände der lokale Einfallswinkel ebenfalls  $53^\circ$  betragen muss. Abb. 10.1 stellt die Definition des lokalen Einfallswinkels dar. Das Radarsignal wird unter einem bestimmten Winkel ausgesendet und trifft auf die Erdoberfläche. Der Winkel  $i$  zwischen eintreffendem Strahl und Normalenvektor  $\underline{n}$  des Geländes wird als lokaler Einfallswinkel bezeichnet. Je weiter der ausgesendete Radarimpuls vom Nadir entfernt ist, desto größer ist der Einfallswinkel  $i$ .

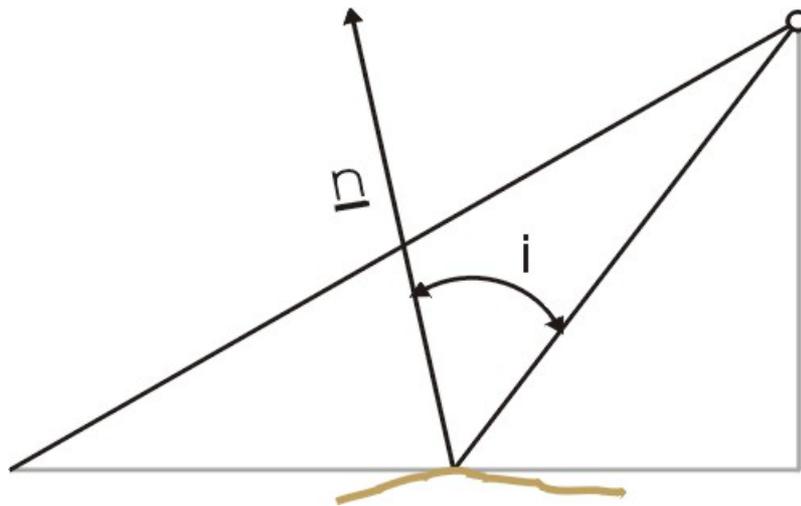


Abb. 10.1 Definition des lokalen Einfallswinkels

Die in Kapitel 8.2 ermittelten Höhendifferenzen wurden in Klassen eingeteilt, die 10° breite Bereiche des lokalen Einfallswinkels repräsentieren. Hierzu wurde das vom DLR zur Verfügung gestellte Bild der lokalen Einfallswinkel verwendet (siehe Abb. 2.4). Die Höhendifferenzen repräsentieren ausschließlich Werte im offenen Gelände, da innerhalb von Vegetationsflächen und urbanen Bereichen der Einfluss des Einfallswinkels durch den Einfluss der Landbedeckung überlagert sein kann und nicht von diesem getrennt werden kann. Innerhalb der 10° breiten Bereiche wurden die Genauigkeitsmaße aus Höhendifferenzen berechnet. Tab. 10.1 enthält die Ergebnisse.

Einfallswinkel [°]	n	Z0 [m]	s <sub>Z0</sub> [m]
20-30	363	0,62	±6,60
30-40	7.346	-0,42	±4,99
40-50	112.731	1,56	±4,10
50-60	778.696	1,70	±3,22
60-70	112.202	0,31	±4,31
70-80	13.519	-1,42	±6,50
80-90	2.940	-1,59	±9,12
90-100	815	-1,10	±10,72
100-110	328	1,11	±13,15
110-120	112	0,35	±13,80

Tab. 10.1 Genauigkeitsmaße in Abhängigkeit des lokalen Einfallswinkels

Die errechneten Mittelwerte der Höhendifferenzen Z0 weisen innerhalb der Klassen keine Tendenz auf. Die Werte variieren sehr stark, eine Korrelation zwischen Einfallswinkel und Mittelwert ist nicht zu erkennen. Die Genauigkeit hingegen ist in der Klasse 50-60° am höchsten, die Standardabweichung s<sub>Z0</sub> ist

am geringsten. Einfallswinkel kleiner als 20 bzw. größer als 120° wurden bei den Untersuchungen nicht berücksichtigt, da der Stichprobenumfang innerhalb dieser Klassen zu gering war.

## 10.2. EINFLUSS VON SCHNEEBEDECKUNG

Während der Mission waren einige Flächen innerhalb des Untersuchungsgebietes schneebedeckt. Bei den zeitgleich zur Mission stattgefundenen Felderhebungen wurde der Feuchtigkeitsgrad der Felder notiert (trocken, nass, schneebedeckt), sodass aufbauend auf diesen Notizen innerhalb einer kleineren Testfläche Untersuchungen durchgeführt werden konnten. Abb. 10.2 stellt die Testfläche graphisch dar. Die schneebedeckten Flächen sind gelb, die schneefreien Flächen sind orange dargestellt. Bei den Flächen handelt es sich ausschließlich um landwirtschaftlich genutzte Flächen, sodass weitere Einflüsse nicht weiter berücksichtigt werden mussten.

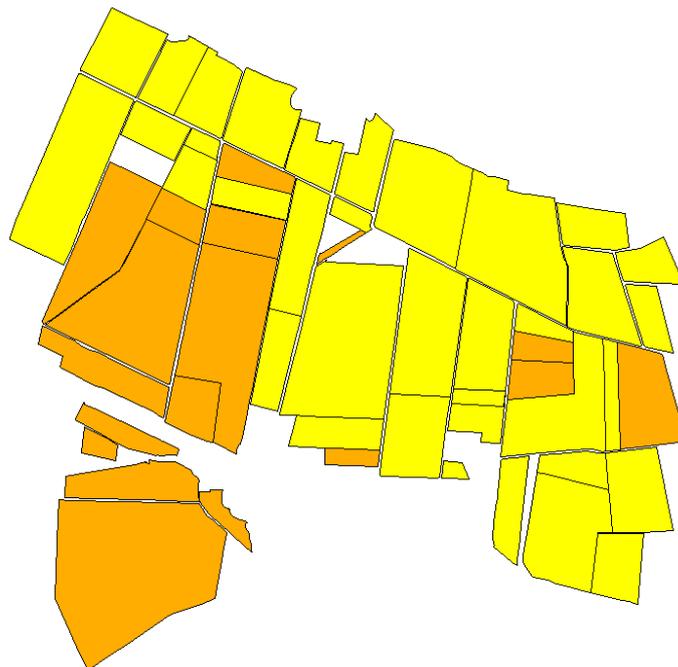


Abb. 10.2 Testfläche mit schneebedeckten Flächen (gelb) und schneefreien Flächen (orange)

Innerhalb der beiden Klassen „schneebedeckt“ und „schneefrei“ wurden die Genauigkeitsmaße aus den Höhendifferenzen zwischen DGM5 und SRTM ITED-2 Daten errechnet. Die nachfolgende Tab. 10.2 enthält die Ergebnisse der Untersuchungen.

## Untersuchung weiterer genauigkeitsbeeinflussender Faktoren

	n	Z0 [m]	s <sub>Z0</sub> [m]
schneebedeckt	3.213	+1,33	±1,92
schneefrei	1.850	+1,10	±2,10

*Tab. 10.2 Genauigkeitsmaße in Abhängigkeit von Schneeflächen*

Etwa 3.200 bzw. 1.800 Höhendifferenzen konnten für die Ermittlung der Genauigkeitsmaße verwendet werden. Die Unterschiede zwischen den Ergebnissen sind nicht signifikant. Die Differenzen zwischen Mittelwert und Standardabweichung innerhalb der schneefreien Flächen und den Werten innerhalb der schneebedeckten Flächen betragen 2 dm. Ein Einfluss der Schneebedeckung ist somit innerhalb dieser Testfläche nicht auszumachen. Ein Problem könnte sein, dass die „Schneedecke“ nicht ausreichend dick war bzw. die Grenzen der Schneebedeckung nicht eindeutig auszumachen waren, sodass es nicht zu klaren Abgrenzungen zwischen den Flächen kommen konnte.

# **Kapitel 11**

## **Vergleich der Qualität der SRTM ITED-2 Daten mit anderen Digitalen Höhendaten**

Die SRTM ITED-2 Daten stellen ein homogenes und qualitativ hochwertiges Digitales Oberflächenmodell dar. Dieses Kapitel vergleicht die Qualität der SRTM Daten mit Daten der LGN (ATKIS DGM50) sowie einem aus ERS Daten abgeleiteten Digitalen Oberflächenmodell.

### **11.1. BESCHREIBUNG DER DATEN**

Das ATKIS DGM50 wurde bereits in Kapitel 2.2.1 beschrieben. Es soll hier noch einmal der Vollständigkeit halber wiederholt werden.

Das DGM50 liegt in rasterförmiger Anordnung vor. Die Gitterkonstante beträgt 50 m in Nord-Süd- sowie Ost-West-Richtung. Das Höhenintervall ist 1 m. Die Lagekoordinaten sind Gauß-Krüger-Koordinaten, die Höhen beziehen sich auf Normal-Null. Das DGM50 wurde durch Digitalisierung der Höheninformation der Topographischen Karte 1:50.000 abgeleitet. Es wird unabhängig vom DGM5 geführt, eine gegenseitige Anpassung der Datensätze fand nicht statt. 1.001.827 Höhenwerte überdecken das Untersuchungsgebiet.

Das aus ERS Daten abgeleitete Digitale Oberflächenmodell liegt in ellipsoidischen Koordinaten vor. Die Daten beziehen sich auf das geozentrische Erdellipsoid WGS84 und sind demnach mit Hilfe des in Kapitel Kapitel 4 beschriebenen Verfahrens in das Landeskoordinatensystem zu transformieren. Die Gitterkonstante beträgt 1 Bogensekunde, das Höhenintervall ist 1 m. Das Untersuchungsgebiet enthält 7.290.000 Höhenwerte. Die Daten wurden laut DLR aus verschiedenen Szenen zusammengesetzt, etwa acht Szenen wurden für den Bereich des Untersuchungsgebietes verwendet.

Tab. 11.1 fasst die Datencharakteristika aller drei Datensätze zusammen:

	<b>SRTM</b>	<b>DGM50</b>	<b>ERS</b>
Gitterkonstante	1 Bogensekunde	50 m	1 Bogensekunde
Höhenintervall	1 m	1 m	1 m
Herstellungsverfahren	Single-Pass-Interferometrie	Digitalisierung der Höheninformation der TK50	Repeat-Pass-Interferometrie
Lagebezug	WGS84	Gauß-Krüger	WGS84
Höhenbezug	WGS84	Normal-Null	WGS84

Tab. 11.1 Datencharakteristika von SRTM ITED-2, DGM50 und ERS DOM

## 11.2. VERGLEICH DER ABSOLUTEN HÖHENGENAUGKEIT

Die Untersuchungen wurden in Analogie zu Kapitel Kapitel 8 durchgeführt, d.h. das ATKIS DGM5 wurde als Referenzdatensatz verwendet. Dabei wurden erneut nur die Bereiche einbezogen, die nicht von Vegetation und Gebäude beeinflusst sind. Nur so ist es gewährleistet, die Datensätze sinnvoll miteinander zu vergleichen, da die Datensätze unterschiedliche Höhen repräsentieren. So repräsentieren die SRTM und ERS Daten Digitale Oberflächenmodelle einschließlich Vegetation und Gebäude. Das DGM50 hingegen stellt ein Digitales Geländemodell dar.

Tab. 11.2 enthält die Ergebnisse der Untersuchungen, wobei folgende Differenzbildung zugrunde lag:

$$\Delta Z_i = Z_{i,DGM5} - Z_{i,j} \quad \text{Gl. 11.1}$$

mit  $j = \text{SRTM, DGM50, ERS}$

	<b>SRTM</b>	<b>DGM50</b>	<b>ERS</b>
Anzahl Beobachtungen n	669.685	157.330	676.190
Mittelwert $Z_0$ [m]	+2,62	-0.02	-0.60
Standardabweichung s [m]	±4,32	±2,92	±3,21
Standardabweichung nach Abzug Mittelwert $s_{z_0}$ [m]	±3,44	±2,92	±3,15

Tab. 11.2 Genauigkeitsmaße aus Höhendifferenzen zwischen DGM5 und SRTM, DGM50 und ERS

Die Untersuchungen zeigen, dass das DGM50 keinen systematischen Fehler aufweist.

## Vergleich der Qualität der SRTM ITED-2 Daten mit anderen Digitalen Höhendaten

Das Höhenniveau der ERS Daten hingegen befindet sich systematisch leicht über dem Höhenniveau des DGM5. Ursache kann sein, dass die ERS Daten nicht das Gelände sondern die Oberfläche einschließlich Vegetation und Gebäude beschreiben. Zwar wurden nur Höhendifferenzen im offenen Gelände berechnet, doch können an Waldrändern und Rändern der urbanen Bereiche Restfehler auftreten, die diese negative Systematik verursachen.

Die Genauigkeit des DGM50 ist geringfügig besser als die der anderen beiden Datensätze.



# Kapitel 12

## Veröffentlichung der Ergebnisse

### 12.1. PUBLIKATIONEN

Im Berichtszeitraum wurden folgende Publikationen veröffentlicht:

KOCH, A., LOHMANN, P., 2000. Quality Assessment and Validation of Digital Surface Models derived from the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). IntArchPhRS, Vol. XXXIII, Amsterdam, Ergänzungs-CD.

KOCH, A., 2000. Genauigkeitsanalyse Digitaler Geländemodelle für die Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung, Band 9, Jörg Albertz, Hrsg., S. 237-244.

KOCH, A., HEIPKE C., 2001. Quality Assessment of Digital Surface Models derived from the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). IEEE 2001 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 9-13 Juli 2001, University of New South Wales, Sydney, Australien.

Die folgenden Beiträge wurden bzw. werden nach Ende des Berichtszeitraumes veröffentlicht:

HEIPKE, C., KOCH, A., LOHMANN, P., 2002. Analysis of SRTM DTM – Methodology and practical results. Journal der Schwedischen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung, Nr. 2002:1, Photogrammetry meets geoinformatics, Anders Boberg, Hrsg., S. 69-80.

KOCH, A., HEIPKE, C., LOHMANN, P., 2002. Analysis of SRTM DTM – Methodology and practical results. Joint International Symposium on Geospatial Theory, Processing and Applications. Kommission IV, Ottawa, Kanada.

KOCH, A., HEIPKE, C., LOHMANN, P., 2002. Analyse von SRTM Digitalen Geländemodellen – Methodik und Ergebnisse. Photogrammetrie • Fernerkundung • Geoinformation, akzeptiert.

## **12.2. VORTRÄGE UND KONFERENZEN**

An den folgenden Konferenzen wurde teilgenommen:

- ISPRS Kongress, Amsterdam, 16.-23. Juli 2000 (Posterpräsentation).
- DGPF Jahrestagung, Berlin, 11.-13. Oktober 2000 (Vortrag, Vortragender: A. Koch).
- IGARSS Symposium, Sydney, 9.-13. Juli 2001 (Vortrag, Vortragender: Prof. Dr.-Ing. C. Heipke).
- SRTM PI-Meeting, Oberpfaffenhofen, 9. Oktober 2001 (Vortrag, Vortragender: A. Koch).
- Festveranstaltung aus Anlass des Ruhestandes von Prof. Kennert Torlegard, Stockholm, 17. April 2002 (Vortrag, Vortragender: Prof. Dr.-Ing. C. Heipke).
- ISPRS Symposium, Ottawa, 9.-12. Juli 2002 (Vortrag, Vortragender: A. Koch).
- Geodätisches Kolloquium der Universität Hannover, Hannover, 19. November 2002 (Vortrag, Vortragender: Prof. Dr.-Ing. C. Heipke, geplant).

# Schlussfolgerungen

Der vorliegende Bericht fasst die wesentlichen Ergebnisse des Projektes „Qualitätsuntersuchung und Validierung von SRTM ITED-2 Daten in Niedersachsen“ zusammen. Das Projekt hatte eine Laufzeit von Juli 1999 bis März 2002, konnte aber aufgrund der langwierigen Prozessierung für etwa 1 Jahr nicht bearbeitet werden.

Innerhalb des Projektes wurde ein Verfahren entwickelt, das es ermöglicht, die Qualität von Digitalen Höhendaten mit Hilfe von Referenzdaten zu vergleichen. Das Verfahren stellt eine Erweiterung der Bildzuordnung nach kleinsten Quadraten (Least Squares Matching) dar und ist vergleichbar mit der absoluten Orientierung eines photogrammetrischen Blockes mit Hilfe eines Digitalen Geländemodells. Ergebnis dieses Verfahrens sind sieben Parameter einer räumlichen Ähnlichkeitstransformation, die potentielle systematische Fehler beschreiben. In einer ersten Phase wurde das Verfahren mit Hilfe von Simulationen und simulierten Daten getestet. Nachdem die SRTM ITED-2 Daten zur Verfügung gestellt werden konnten (September 2001) war es möglich, mit der Qualitätsanalyse der SRTM ITED-2 Daten mit Hilfe dieses Verfahrens zu beginnen.

Die Ergebnisse sind sehr zufriedenstellend. Die Höhengenaugigkeit der SRTM ITED-2 Daten beträgt 3-4 m im offenen Gelände. Die Daten weisen nur sehr geringe systematische Lagefehler auf, die Lageverschiebung beträgt maximal 4 m in Ost-West- und 6 m in Nord-Süd-Richtung. In Orbitrichtung sind die Daten um 0,003 gon geneigt, was etwa 2,5 m bei einer Orbitlänge von 55 km ausmacht. Der vertikale systematische Fehler beträgt +2,3 m. Das Höhenniveau der SRTM-Daten ist zu gering. Eine Begründung für diese Systematik kann nur vermutet werden. Sind die für die Kalibrierung verwendeten Höhen fehlerhaft, so wirkt sich dieser Fehler direkt auf die Ergebnisse dieser Untersuchungen aus. Während zumeist ganze InSAR Orbits von Küste zu Küste kalibriert werden und somit der Ozean als absolute Referenz dient, war der Orbit, welcher die Daten des Untersuchungsgebietes enthält, kürzer. Somit wurde dieser Bereich auf anderer Weise kalibriert. Wenn Gebäude und Vegetation in den für die Kalibrierung verwendeten Bereichen existiert und diese bei der Kalibrierung nicht

berücksichtigt wurde, wird das absolute Höhenniveau der SRTM ITED-2 Daten zu gering, sodass die ermittelten Ergebnisse erklärt werden können. Doch ist diese Erklärung nur eine Hypothese, genauere Informationen über Kalibrierung standen nicht zur Verfügung.

Auffällig ist auch, dass die Höhenfehler, d.h. die ermittelten Höhendifferenzen in Orbitrichtung eine wiederkehrende Schwingung aufweisen, die als sinusförmig interpretiert werden kann. Die Amplitude dieser Schwingung beträgt  $\pm 2$  m, sodass dadurch lokale systematische Fehler auftreten können. Die Wellenlänge dieser Schwingung beträgt etwa 40 km.

Insgesamt weisen die Daten etwa die Qualität auf, die vor dem Start der Shuttle Radar Topography Mission erwartet worden war. Die SRTM ITED-2 Daten stellen im Vergleich zum Digitalen Geländemodell der LGN ein Digitales Oberflächenmodell dar. Über dem Gelände befindliche Objekte, Vegetation und Gebäude, sind in den Daten enthalten. Innerhalb von Wasserflächen haben sich Probleme innerhalb der Datensätze gezeigt. Die Daten besitzen hier sehr große Höhengsprünge. Eine etwas schlechtere Qualität als im offenen Gelände wurde innerhalb von Vegetationsflächen und urbanen Bereichen erreicht.

# Literatur

- Adam, N., Eineder, M., Breit, H., 2001.** *SRTM X-SAR Motion Compensation: Concept and First Assessment of the Interferometric Observation Geometry.* IGARSS 2001, Sydney, Australien.
- Bamler, R., 1999.** *The SRTM Mission – A World-Wide 30 m Resolution DEM from SAR Interferometry in 11 Days.* 47. Photogrammetrische Woche, Universität Stuttgart, S. 145-154.
- Bamler, R., Eineder, M., Breit, H., 1996.** *The X-SAR Single-Pass Interferometer on SRTM: Expected Performance and Processing Concept.* EUSAR'96 – Konferenz, Königswinter.
- Bao, M., Schulz-Stellenfleth, J., Lehner, S., Eineder, M., 2001.** *First results on ocean wave imaging from the Shuttle radar topography mission.* IGARSS 2001, Sydney, Australien.
- Crosetto, M., Crippa, B., 2000.** *Quality Assessment of Interferometric SAR DEMs.* IntArchPhRS (33), Ergänzung B4, Amsterdam, S. 61-68.
- Dowman, I., 2001.** *Airborne Interferometric SAR – A Review of the State of the Art and of OEEPE Activities.* OEEPE workshop on Airborne Laserscanning and Interferometric SAR for Detailed Digital Elevation Models, Stockholm, Schweden, S. 1-10.
- Ebner, H., Strunz, G., 1988:** *Combined point determination using digital terrain models as control information.* IntArchPhRS (27), Commission III, Part B11, 578-587, Kyoto, Japan.
- Eineder, M., Adam, M., Breit, H., Suchandt, S., Holzner, J., Rabus, B., Knöpfle, W., 2001.** *Results from the SRTM Calibration Phase.* ISPRS Workshop "High Resolution Mapping from Space 2001", Hannover.

- Eineder, M., Bamler, R., Adam, N., Breit, H., Suchandt, S., Steinbrecher, U., 2000.** *SRTM / X-SAR Interferometric Processing – First Results*. EUSAR 2000, München, S. 233-236.
- Eineder, M., 2001.** *Interferometric DEMs in Rugged Terrain*. IGARSS 2001, Sydney, Australien.
- Geudtner, D., 1995.** *Die interferometrische Verarbeitung von SAR-Daten des ERS-1*. Dissertation, Forschungsbericht des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt 95-28.
- Hounam, D., Werner, M., 1999.** *The Shuttle Radar Topography Mission*. ISPRS Workshop "Mapping from Space 1999", Hannover.
- Hartl, P., Xia, Y., 1993.** *Besonderheiten der Datenverarbeitung bei der SAR-Interferometrie*. ZPF 6/1993.
- Helwich, O., 1999.** *Basis principles and current issues of SAR Interferometry*. ISPRS workshop "Mapping from Space 1999", Hannover.
- Huadong, G., Changlin, W., 2001.** *The Use of SRTM Data for Visualizing the Mid-Upper Reaches of Yangtze River Area and Dynamic Monitoring of Land Cover Changes*. IGARSS 2001, Sydney, Australien.
- Kleusberg, A., Klaedtke, H.-G., 1998.** *Genauigkeitsuntersuchung für das STAR-3I DHM in Baden-Württemberg*. Forschungsbericht des Instituts für Navigation der Universität Stuttgart.
- Meisner, R., 2001.** *SRTM – 3D-Animationen von Höhenmodellen*. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Mitteilungen 1999-03.
- Ritter, P., 2001.** *SRTM – Nutzung der Daten im Rahmen des DLR AOs*. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Mitteilungen 1999-03.
- Ritter, P., Pác, R., Schmullius, C., Werninghaus, R., 1999.** *Concept of the X-SAR / SRTM Data Utilization*. IGARSS 1999, Hamburg, Band I, S. 610-612.
- Rosen, P., Eineder, M., Breit, H., Gurrola, E., Hensley, S., Knöpfle, W., Rabus, B., Roth, A., Werner, M., 2001.** *SRTM-Mission – Cross Comparison of X and C Band Data Properties*. IGARSS 2001, Sydney, Australien.
- Roth, A., Eineder, M., Rabus, B., Mikusch, E., Schättler, B., 2001.** *SRTM / X-SAR: Products and Processing Facility*. IGARSS 2001, Sydney, Australien.

- Roth, A., Marschalk, U., Knöpfle, W., Rabus, B., Scales, D., Benjes, A., Kosmann, D., 2000.** *SRTM / X-SAR Products and Quality*. EUSAR 2000, München, S. 237-240.
- Schenk, T., Krupnik, A., Postolov, Y., 2000:** *Comparative study of surface matching algorithms*. IntArchPhRS (33), Commission IV, Part B4, 518-524, Amsterdam, Niederlande.
- 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.
- Schwäbisch, M., 1995.** *Die SAR-Interferometrie zur Erzeugung digitaler Geländemodelle*. Dissertation, Universität Stuttgart.
- Selige, T., Ringeler, A., Boehner, J., Conrad, O., Koethe, R., 2001.** *Validation of Grid-Based Surface Reconstruction Techniques Applied to Digital Elevation Models Including the Shuttle Radar Topography Mission*. IGARSS 2001, Sydney, Australien.
- Steinbrecher, U., Bamler, R., Eineder, M., Breit, H., 2000.** *SRTM Data Quality Analysis*. EUSAR 2000, München, S 217-218.
- Werner, C. L., Goldstein, R. M., Hensley, S., Rosen, P. A., Chapin, E., 1998.** *Phase Unwrapping Techniques of SRTM*. EUSAR 98, Friedrichshafen.
- Werner, M., 2001.** *Status of the SRTM data processing: when will the world-wide 30m DTM data be available?* 48. Photogrammetrische Woche, Stuttgart, S. 159-165.
- Werner, M., Häusler, M., 2001.** *X-SAR / SRTM Instrument Phase Error Calibration*. IGARSS 2001, Sydney, Australien.
- Werninghaus, R., 1999.** *Die Shuttle Radar Topographie Mission (SRTM) – Ein Überblick*. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Mitteilungen 1999-03.
- Zink, M., Geudtner, D., 1999.** *Calibration of the X-SAR System on SRTM*. CEOS SAR Workshop, Toulouse, Frankreich.