

# Erstellung eines Höhenmodells aus einem OrbView-3 Stereopaar

KARSTEN JACOBSEN

*Zusammenfassung: Hochauflösende OrbView-3 Weltraumaufnahmen, mit einem Objektpixelabstand von 1m, ermöglichen die Erstellung von Orthofotos bis zum Ausgabemaßstab 1 : 8000. Hierfür sind entsprechend detaillierte Höhen- oder Stadtmodelle erforderlich. Sie lassen sich aus Stereopaaren vom gleichen Sensor erstellen.*

*Ein OrbView-3 Stereobildpaar des Bereiches um die Stadt Zonguldak, Türkei, das vom gleichen Orbit stammt, wurde detailliert untersucht. Die Bildorientierung ist auf eine Standardabweichung von etwa 1,3m beschränkt. Zum einen war die Passpunktidentifizierung in den OrbView-3 Aufnahmen schwieriger, zum anderen ist die innere Genauigkeit offensichtlich etwas schlechter. Die etwas schlechtere Bildqualität kann auf die Überlappung benachbarter Pixel um 50% zurückgeführt werden – die Objektpixelgröße beträgt 2m, der Abstand benachbarter Objektpixelzentren aber nur 1m.*

*Das Höhen-Basisverhältnis des vorhandenen OrbView-3-Bildpaares beträgt 1,4. Nach einfacher Theorie gewährleistet dieses eine gute Höhengenaugigkeit. Eine automatische Bildzuordnung in Stadtbereichen ist aber etwas problematisch – ein Gebäude wird auf der einen Aufnahme mit dem Dach und der nördlichen Fassade, auf dem anderen mit dem Dach und der südlichen Fassade abgebildet. Dieses führt zu Zuordnungsproblemen im Stadtbereich. Für offenes Gelände ist der große Konvergenzwinkel zwischen den Aufnahmerichtungen von Vorteil, nicht jedoch im Waldgebiet. Mit einem deutlich kleineren Konvergenzwinkel konnten mit IKONOS-Aufnahmen besonders im Innenstadtbereich bessere Ergebnisse erzielt werden. Dagegen ist für manuelle Stereoauswertungen ein kleineres Höhen-Basisverhältnis (größerer Konvergenzwinkel) von Vorteil.*

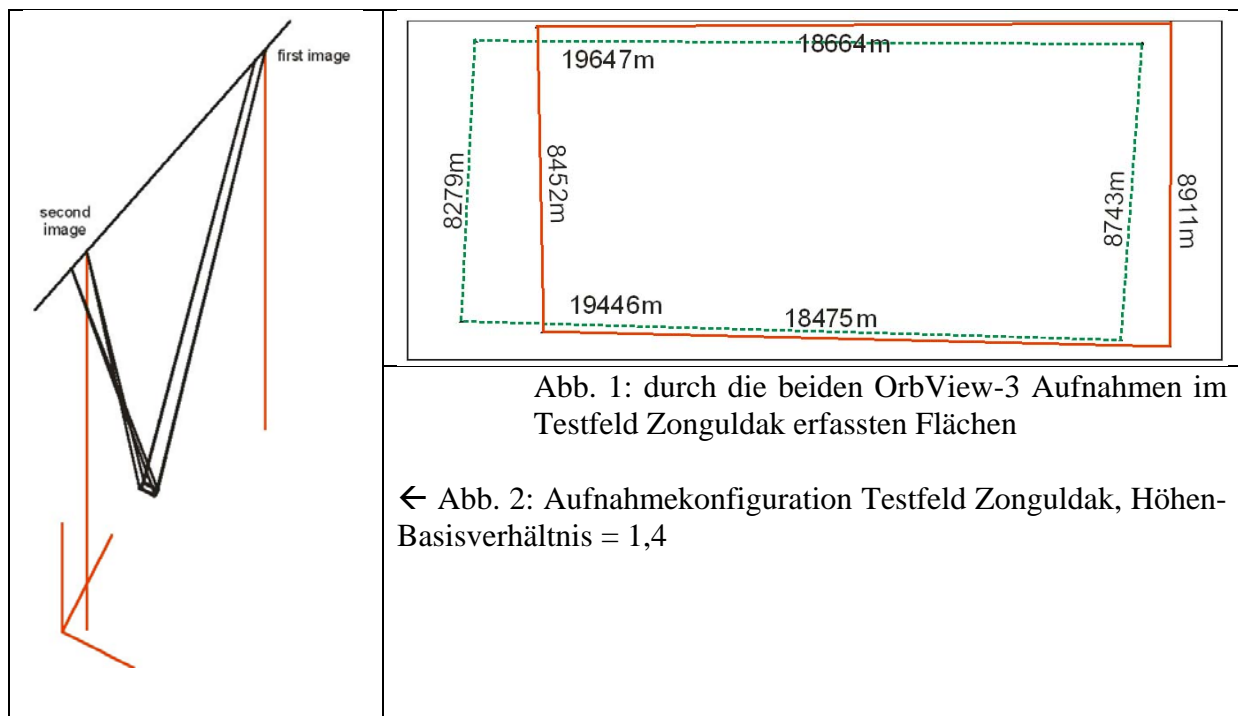
## 1 Einführung

SRTM-Höhenmodelle stehen nahezu weltweit kostenlos zur Verfügung, sie sind jedoch mit einer Rasterweite von 3 Bogensekunden, entsprechend 92m am Äquator, und der durchgeführten Mittelbildung nicht sehr detailliert und weisen besonders im Gebirge Lücken auf. Diese Lücken sind zwar in der Zwischenzeit aufgefüllt worden, allerdings mit teilweise sehr ungenauen Daten, was zu der unangenehmen Situation einer teilweise unbekanntenen Genauigkeit führt. Aus diesen Gründen besteht nach wie vor ein Bedarf an hoch aufgelösten Höhenmodellen mit ausreichender und bekannter Genauigkeit.

Von den sehr hoch auflösenden Weltraumsensoren IKONOS und QuickBird gibt es nur eine begrenzte Anzahl von Stereomodellen. Um die Ausrichtung des Satelliten von einem Objekt auf ein 300km entferntes Objekt zu ändern braucht IKONOS 25 sec, QuickBird 62 sec und OrbView-3 31 sec. Mit den kommenden WorldView-1 und -2 wird dieses auf 10 sec bzw. 9sec verkürzt (McGill 2005). Besonders für QuickBird ist die Aufnahme eines Stereomodells unwirtschaftlich da die 9-fache Beobachtungszeit wie für eine Einzelszene benötigt wird, der Preis für eine Stereoszene dagegen nur beim 2,3-fachen einer Einzelszene liegt. Trotz der für OrbView-3 nur um den Faktor 2 besseren Voraussetzung werden mit OrbView-3 häufiger Stereoszenen aufgenommen.

Ein OrbView-3 Stereomodell des Testfeldes Zonguldak, Türkei, wurde untersucht. Als Referenz liegt ein mit großmaßstäbigen Luftbildern aufgenommenes Höhenmodell mit einer Rasterweite von 10m und einer Genauigkeit von etwa 50cm vor. Die Passpunkte wurden durch GPS-Messung bestimmt. Sie führten bei der geometrischen Untersuchung von QuickBird-Aufnahmen zu Genauigkeiten von geringfügig unter 50cm.

## 2 Orientierung der OrbView-3 Aufnahmen

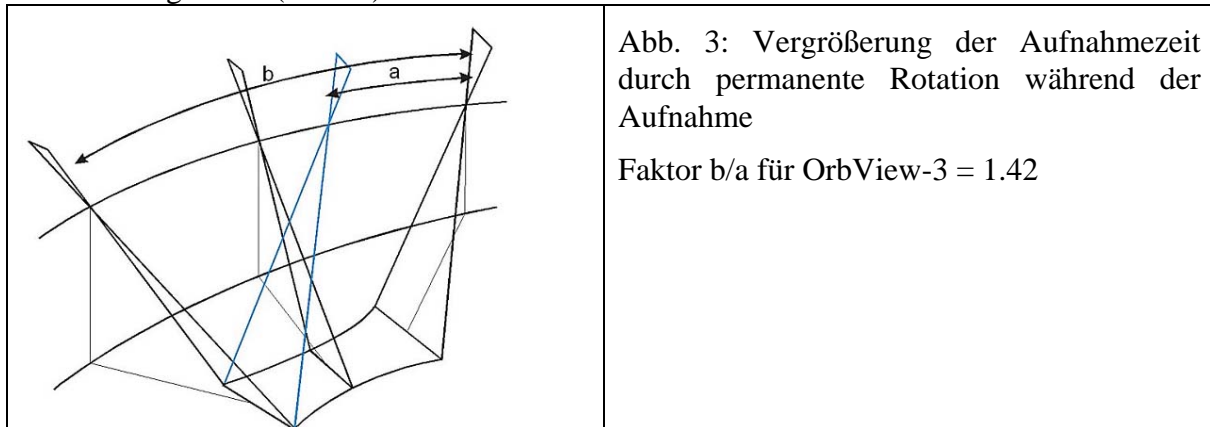


Die Szenen des OrbView-3 Stereopaars vom Testgebietes Zonguldak wurde vom gleichen Orbit aus mit 40 sec Zeitabstand aufgenommen. Die erste Szene wurde im Objektraum vom Osten nach Westen, die zweite Szene vom Westen nach Osten gescannt (Abbildungen 1 und 2). Sie liegen als „Basic Express“, somit als nur radiometrisch und um die innere Orientierung geometrisch verbesserte Originalbilder vor.

Wie die anderen hoch auflösenden optischen Satellitensensoren bestimmt OrbView-3 die Position durch GPS und die Winkel durch Kreisel, die durch Sternkameras unterstützt werden. Damit ist eine direkte Sensororientierung mit einer Genauigkeit von etwa 10m ohne Verbesserung durch Passpunkte gegeben. Die Orientierungsinformation liegt unter anderem als rationale Polynomkoeffizienten (RPC) vor (siehe auch Dial und Grodecki, 2002). Die RPC beschreiben die Bildposition als Funktion der Objektkoordinaten. Eine Berechnung der Objektkoordinaten mit gegebener Höhe kann iterativ erfolgen.

Die Bildorientierung wurde mit den durch Passpunkte verbesserten RPC aber auch zur Kontrolle mit den Näherungsverfahren der direkten linearen Transformation (DLT) und der dreidimensionalen Affintransformation durchgeführt. Die DLT basiert auf dem mathematischen Modell der Zentralprojektion, wobei die innere und die äußere Orientierung gemeinsam mit 8 Unbekannten berechnet werden. Das benutzte mathematische Modell entspricht nicht der Realität – in Orbitrichtung liegt keine Zentralprojektion vor. Wegen der

eingeschränkten Aufnahmezeit muss OrbView-3 die Aufnahmezeit durch permanente Rotation vergrößern (Abb. 3).



Die 3D-Affintransformation benutzt statt der Zentralprojektion das mathematische Modell der Parallelprojektion, was auch nicht korrekt ist. Aus diesem Grund wurde die 3D-Affintransformation um 4 Terme, die die Änderung der Aufnahmezeit beschreiben können, erweitert. Dieses ist für die Bilder geeignet, die auf eine Fläche konstanter Höhe projiziert wurden, wie OrbView-3 Standard, QuickBird OR Standard oder IKONOS Geo. Wie Abbildung 1 jedoch zeigt, ist die durch eine Basic-Szene erfasste Fläche kein Rechteck, weswegen die erweiterte Affintransformation noch um 2 weitere Terme für die Orientierung von Originalbildern ergänzt wurde (Formeln 1a – 1c).

$$x_{ij} = a_1 + a_2 * X + a_3 * Y + a_4 * Z$$

$$y_{ij} = a_5 + a_6 * X + a_7 * Y + a_8 * Z$$

Formel 1a: 3D-Affintransformation

$$x_{ij} = a_1 + a_2 * X + a_3 * Y + a_4 * Z + a_9 * X * Z + a_{10} * Y * Z$$

$$y_{ij} = a_5 + a_6 * X + a_7 * Y + a_8 * Z + a_{11} * X * Z + a_{12} * Y * Z$$

Formel 1b: erweiterte 3D-Affintransformation – für nicht-parallele Blickrichtungen

$$x_{ij} = a_1 + a_2 * X + a_3 * Y + a_4 * Z + a_9 * X * Z + a_{10} * Y * Z + a_{13} * X * X$$

$$y_{ij} = a_5 + a_6 * X + a_7 * Y + a_8 * Z + a_{11} * X * Z + a_{12} * Y * Z + a_{14} * X * Y$$

Formel 1c: erweiterte 3D-Affintransformation für Originalszenen

Zuerst wurden die verschiedenen Orientierungsverfahren durch Einzelbildorientierung miteinander verglichen (Abbildung 4). Hierfür ist die Höhe der Pass- und der Vergleichspunkte erforderlich. Die rationalen Polynomkoeffizienten, die mit der Szene mitgeliefert wurden, wurden im Rahmen einer Bias-korrigierten Auswertung benutzt. Ohne Passpunkte ergaben sich Verschiebungen für beide Szenen in der X-Richtung von -3,6m / -7.1m und in der Y-Richtung von -17,0m / 9,0m. Für die Objektpixelgröße von 1m reicht das nicht aus, es war somit eine Verbesserung mittels Passpunkte erforderlich. Die Bias-korrigierte RPC-Auswertung berücksichtigt im ersten Schritt neben der individuellen Blickrichtung die Objektpunkthöhe. Danach erfolgt eine zweidimensionale Transformation auf die Passpunkte. Mit einer einfachen Verschiebung wurden im Quadratmittel beider Szenen und für X und Y bei Verwendung aller Passpunkte 1,93m Widerspruch erzielt, durch eine ebene Affintransformation verbesserte sich das Ergebnis auf 1,30m. Aus diesem Grund wurden die Untersuchungen mit ebener Affintransformation durchgeführt womit für die Bias-korrigierte RPC-Orientierung mindestens 3 Passpunkte erforderlich sind. Auf die

Höhenverteilung der Passpunkte muss nicht geachtet werden da die Aufnahme­richtung durch die RPC vorgegeben ist. Für DLT und die Affintransformation sind mehr und gut dreidimensional verteilte Passpunkte erforderlich. Wie aus Abbildung 4 ersichtlich, kommt nur die 3D-Affintransformation erweitert für Originalbilder in die Nähe der RPC-Lösung.

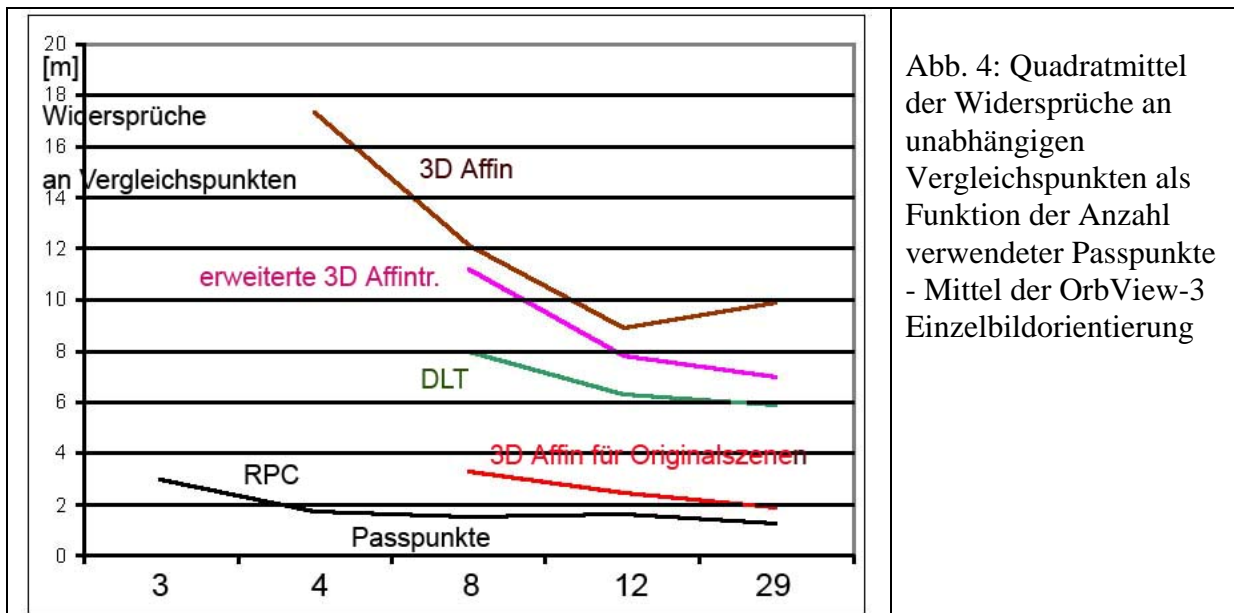


Abb. 4: Quadratmittel der Widersprüche an unabhängigen Vergleichspunkten als Funktion der Anzahl verwendeter Passpunkte - Mittel der OrbView-3 Einzelbildorientierung

Eine dreidimensionale Lösung führte mit allen Passpunkten zu einer Verbesserung von im Quadratmittel 1,26m für X und 1,34m für Y auf 1,00m für X, 1,16m für Y und 1,80m für Z. Das Quadratmittel der Höhenwidersprüche von 1,80m entspricht bei dem Höhen-Basis-Verhältnis von 1,4 einem Quadratmittel der x-Parallaxe von 1,29m. Die etwas besseren Ergebnisse für die Lage als im Falle der Einzelbildorientierung kann durch den Einfluss von ungenauen Höhen oder Höhendefinitionen der Punkte erklärt werden. Insgesamt wurde nicht wie bei IKONOS und QuickBird eine Sub-Pixel-Genauigkeit erreicht. Der Grund hierfür liegt in der etwas schlechteren Bildqualität als bei IKONOS-Aufnahmen gleicher Objekt­pixelgröße. OrbView-3 verfügt nicht über Transfer-Delay and Integration (TDI) Sensoren, die die Energie durch Verschiebung auf die Nachbarzeile bei gleichzeitig weiterer Belichtung über mehrere Zeilen integrieren können. Stattdessen arbeitet OrbView-3 mit gestaggerten Bildzeilen. Die projizierten Pixelgrößen auf der Erde betragen 2m x 2m, benachbarte Pixel überlappen sich um 50%, damit werden scheinbare Objekt­pixelgrößen von 1,0m erzielt, die aber nicht die gleiche Bildqualität wie Originalpixel von 1m x 1m haben können.

### 3 Höhenmodell aus OrbView-3-Aufnahmen

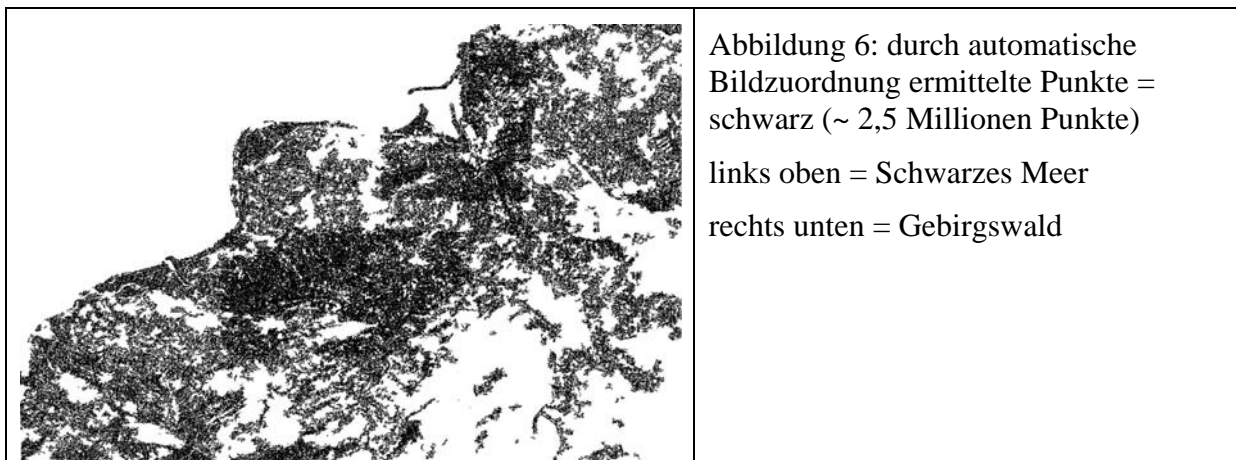
Nach einfacher Theorie hängt die Höhengenaugkeit linear vom Höhen-Basis-Verhältnis ab (Formel 2). Dieses setzt jedoch voraus, dass die Standardabweichung der x-Parallaxe unabhängig vom Höhen-Basis-Verhältnis ist. Für die manuelle Punkt­messung kann das bei gutem Objekt­kontrast und einigermaßen ebenem Gebiet der Fall sein. Für die automatische Bildzuordnung gilt das aber nicht. In steilen Gebieten und besonders in Städten unterscheiden sich die Bilder eines Stereomodells erheblich – die korrespondierenden Aufnahmen können vom selben Gebäude unterschiedliche Seiten abbilden, wie in Abbildung 5 dargestellt.

$$SZ = \frac{h}{b} \cdot Spx$$

Formel 2: Objekthöhengenaugigkeit SZ    h = Aufnahmehöhe    b = Basis  
 Spx = Standardabweichung der x-Parallaxe [Objektpixelgröße]



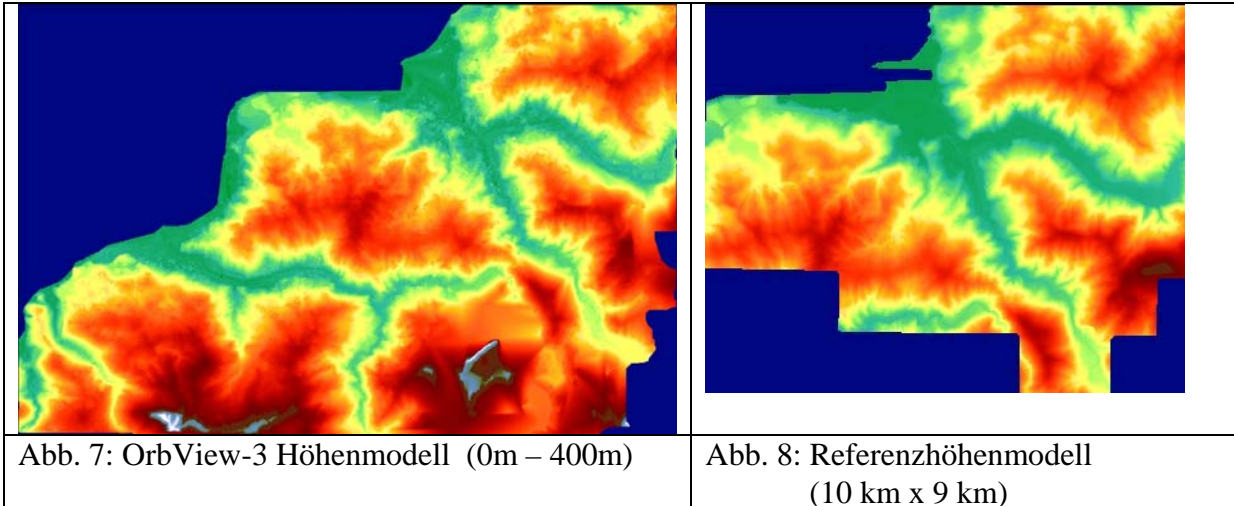
Ähnliche Probleme haben sich auch im Wald ergeben, die Wipfel werden von deutlich unterschiedlicher Richtung aus abgebildet, womit eine automatische Bildzuordnung von Waldgebieten fast unmöglich ist. Hinzu kommt, dass das Testgebiet Zonguldak extrem bewegt ist. Selbst in der Innenstadt sind steile bis senkrechte Partien keine Ausnahme. Aus dem Referenzhöhenmodell ergibt sich eine durchschnittliche Geländeneigung von  $15^\circ$ , aber auch die für die Höhenmodellerstellung noch wichtigere Änderung der Geländeneigung von einer Rasterweite zur nächsten beträgt ebenfalls  $15^\circ$ .



Dementsprechend wurde durch automatische Bildzuordnung nach der Methode der kleinsten Quadrate im Durchschnitt nur etwa 43% aller möglichen Punkte mit einem Korrelationskoeffizienten von mindestens 0,6 akzeptiert. Wie Abbildung 6 zeigt, ist die Punktverteilung sehr unterschiedlich. Die automatische Bildzuordnung versagte fast vollständig in dem Gebirgswald, Probleme ergaben sich aber auch in der Innenstadt und hier besonders in den steileren Lagen, die Geländeneigungen bis zu über  $50\%$  haben. Dagegen sind die Ergebnisse in den flacheren und offenen Gebieten akzeptabel.

Von einem großen Teil des Testgebietes sind Referenzhöhen mit einer Rasterweite von 10m aus einer großmaßstäbigen Luftbildauswertung vorhanden. Das aus dem OrbView-3 Stereomodell erstellte Höhenmodell wurde mit diesem Referenzhöhenmodell verglichen. Vor der Analyse erfolgte eine Überprüfung der Übereinstimmung der horizontalen Lage beider Höhenmodelle, die durch das nicht sehr genau bekannte türkische Datum nicht

selbstverständlich war. Das Datumsproblem wurde durch Verschiebung des Referenzhöhenmodells auf das ED50, das der OrbView-3-Orientierung zugrunde liegt, mittels des hannoverschen Programms DEMSHIFT gelöst. Durch Ausgleichung ergab sich eine Verschiebung von 19,8m in X- und 150,0m in Y-Richtung. Dadurch wurde das Quadratmittel der Höhenunterschiede von 25,6m auf 7,04m reduziert.



Der Vergleich der farbkodierten Darstellung des aus den OrbView-3-Aufnahmen erstellten Höhenmodells mit dem Referenzhöhenmodell ergibt auf den ersten Blick eine gute Übereinstimmung. Im Detail ist das OrbView-3-Höhenmodell deutlich unruhiger und zeigt viele isolierte Erhebungen, bei denen es sich hauptsächlich um Gebäude handelt. Durch die automatische Bildzuordnung wird die sichtbare Oberfläche, also ein digitales Situationsmodell (DSM) und nicht ein digitales Höhenmodell (DHM) erzeugt, welches die Höhe des Erdbodens darstellt. Aus dem DSM kann durch Filterung ein DHM abgeleitet werden.

	Gebiet	SZ	Bias	SZ als $F(\alpha)$	SZ als $F(\alpha)$ ohne Bias
Original-höhenmodell	offen	9,46	-4,54	$6,86 + 11,0 \cdot \tan \alpha$	$5,40 + 12,1 \cdot \tan \alpha$
	Forst	12,31	-5,82	$8,56 + 14,4 \cdot \tan \alpha$	$6,75 + 15,2 \cdot \tan \alpha$
gefiltertes Höhenmodell	offen	8,54	-3,18	$5,13 + 15,6 \cdot \tan \alpha$	$4,37 + 15,7 \cdot \tan \alpha$
	Forst	12,35	-5,22	$8,41 + 15,7 \cdot \tan \alpha$	$7,10 + 15,8 \cdot \tan \alpha$

Tabelle 1: Vergleich des OrbView-3-Höhenmodells mit dem Referenzhöhenmodell

Werte [m]  $\alpha$  = Geländeneigung

Die Genauigkeit des Höhenmodells zeigt, wie üblich, eine lineare Abhängigkeit von der Geländeneigung, weswegen eine Darstellung nach der Koppeschen Formel erforderlich ist. Die Analyse wurde separat für die Waldgebiete und die offenen Gebiete, die überwiegend städtischen Charakter haben, durchgeführt. Das OrbView-3-Höhenmodell zeigt deutliche systematische Fehler (Bias), die im Waldgebiet größer als in den offenen Gebieten sind. Dieses ist auf den Einfluss der Gebäude und der Bäume zurückzuführen. Durch eine Filterung mit dem Hannoverschen Programm RASCOR (Passini et al 2002) verringert sich der systematische Fehler und auch das Quadratmittel der Differenzen in den offenen Gebieten. In den Waldgebieten zeigt sich keine Verbesserung.



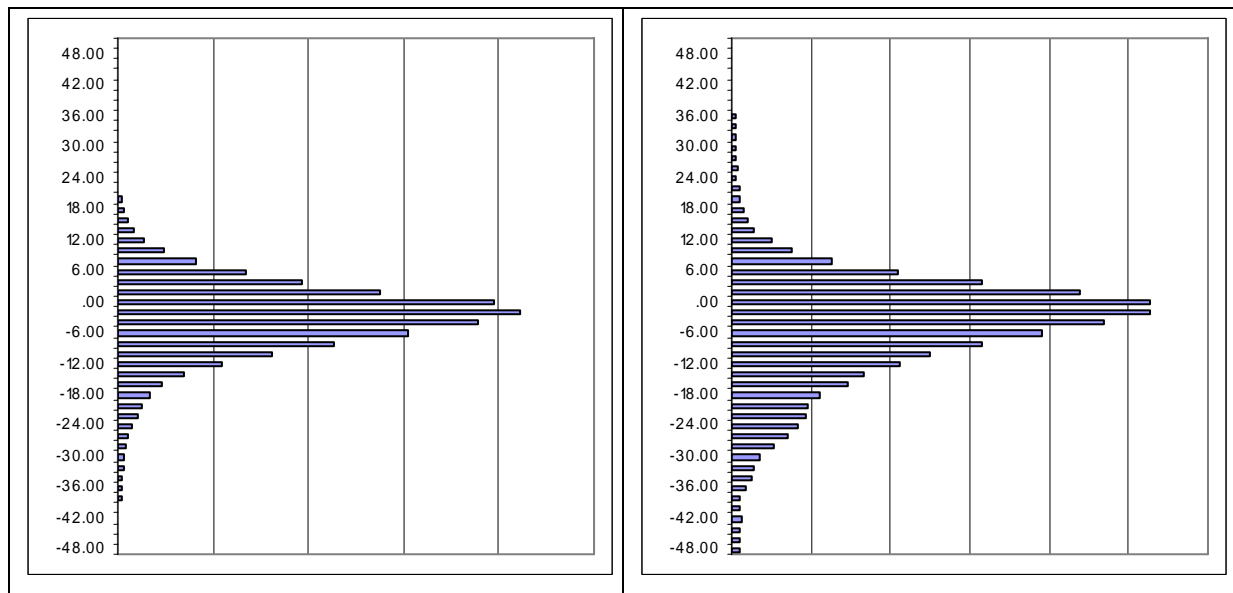


Abb. 12: Häufigkeitsverteilung der Höhenwidersprüche des gefilterten OrbView-3-Höhenmodells links: offene Gebiete rechts: Forst  
negative Höhendifferenzen = OrbView-3-Höhenmodell liegt über dem Referenzhöhenmodell

## 4 Schlussfolgerung

Durch automatische Bildzuordnung eines OrbView-3 Stereopaars konnte ein detailliertes Höhenmodell erstellt werden. Der große Konvergenzwinkel zwischen den Aufnahmerichtungen, der einem Höhen-Basis-Verhältnis von 1,4 entspricht, hat sich als Nachteil für die Bildzuordnung im dicht bebauten Stadtgebiet und in den Gebirgswäldern erwiesen. Mit kleineren Konvergenzwinkeln konnten bessere Ergebnisse erzielt werden (Jacobsen 2006). Die Höhengenaugigkeit von 4,37m für flache, offene Gebiete des gefilterten Höhenmodells entspricht einer x-Parallaxe von 3,1 Objektpixeln. In dem extrem bewegten, dicht bebauten Bereich kann nicht mehr erwartet werden. Außerhalb der problematischen Flächen ist das Ergebnis zufrieden stellend. Würde nur die positive Seite der Häufigkeitsverteilung berücksichtigt, die weitgehend unabhängig von Gebäuden und Bäumen ist, wäre die Höhengenaugigkeit deutlich besser.

## 5 Danksagung

Ich danke Herrn Prof. Dr. Gürçan Büyüksalik, Zonguldak Karaelmas Universität, für die Kooperation.

## 6 Literaturverzeichnis

- DIAL, G., GRODECKI, J., 2002: IKONOS Accuracy without Ground Control, Pecora 15 / Land Satellite Information IV / ISPRS Com. I, Denver 2002
- Jacobsen, K., 2006: Digital surface models of city areas by very high resolution space imagery, EARSeL Workshop on Urban Remote Sensing, Berlin March 2006 (<http://www.ipi.uni-hannover.de>)
- MCGILL, M., 2005: A US Perspective of Phase-2 of High Resolution Satellite Remote Sensing, Eurimage Meeting 2005
- Passini, R., Betzner, D., Jacobsen, K.: Filtering of Digital Elevation Models, ASPRS annual convention, Washington 2002, on CD (<http://www.ipi.uni-hannover.de>)