

# Dense Matching mit WorldView-4 und Kompsat-3 Bildern

KARSTEN JACOBSEN<sup>1</sup> & UMUT SEFERCIK<sup>2</sup>

*Zusammenfassung: Mit WorldView-4 steht ein zweiter zivil verfügbarer optischer Satellit mit einer Bodenauflösung von 31cm zur Verfügung, der eine Konkurrenz für Luftbilder darstellt. Im Bereich von Istanbul wurde neben einem WorldView-4 Stereomodell auch ein Kompsat-3 Stereomodell, mit 70cm Objektpixelgröße, mit flächenbasierter Bildzuordnung nach der Methode der kleinsten Quadrate und Semi Global Matching (SGM) ausgewertet. Die Auswertung der Kompsat-3 Bilder ist von der Methode und der Art der vorhandenen Bilder abhängig.*

*Die WorldView-4 Aufnahmen sind, entsprechend der von GeoEye bevorzugten Bildgeometrie, auf eine Objektebene konstanter Höhe projiziert und damit geometrisch unproblematisch auszuwerten. Die Bildzuordnung nach der Methode der Kleinsten Quadrate führt zu den bekannten Verwischungen der Höhenmodelle. SGM hat zwar die gleichen Probleme mit Verdeckungen in den engen Straßenschluchten, gibt die Dachformen aber entsprechend der Objektpixelgröße gut wieder, soweit die Dächer nicht durch Bäume überragt werden. Von Kompsat-3 wurden LIR und LIG-Aufnahmen ausgewertet – LIG ist auf das SRTM-DSM bezogen, dessen Berücksichtigung bei der Auswertung nicht vollständig rückgängig gemacht werden konnte.*

## 1 Einleitung

Höhenmodelle, erstellt mit Satellitenbildern, stellen eine ökonomische Lösung dar, die entsprechend der geforderten Genauigkeiten, mit der basierend auf Luftbildern oder Laserscanning konkurrieren kann. Mit einer Objektauflösung von 31cm liegen die WorldView-4-Aufnahmen im Bereich der Luftbilder und können auch aufgrund der Bildqualität damit verglichen werden. Kompsat-3 Aufnahmen haben dagegen eine Objektauflösung von 71cm und damit kann nicht die gleiche Genauigkeit erreicht werden, die linear von der Objektpixelgröße abhängig ist. Mit beiden Weltraumsystemen wurde das Hauptsiedlungsgebiet der Stadt Istanbul aufgenommen für das ein Laserscanning-Höhenmodell (ALS) mit 4m Punktabstand als Referenz vorliegt.

## 2 Problemstellung

Höhenmodelle sind ein grundlegender Bestandteil jedes Geoinformationssystems. Für einige Anwendungen, wie z.B. Unterstützungen im Krisenfall, sind aktuelle Höhenmodelle erforderlich, für die sich Satellitenstereopaare anbieten, da sie eine geringere Vorlaufzeit als Luftbildflüge benötigen. Die Erstellung von Höhenmodellen aus optischen Satellitenbildern ist kein neues Problem und auch die dichte Punktbestimmung mittels Semi Globaler Bildzuordnung (SGM) ist nicht neu (u.a. HIRSCHMÜLLER 2005, HIRSCHMÜLLER 2008, HEINRICHS et al. 2007, ALOBEID et al.

---

<sup>1</sup> Leibniz Universität Hannover, Nienburger Str. 1, D-30167 Hannover,  
E-Mail: jacobsen@ipi.uni-hannover.de

<sup>2</sup> Bülent Ecevit University, Zonguldak, Türkei; E-Mail: UGSefercik@hotmail.com

2010, HAALA 2011). Jedes Projekt hat aber spezielle Herausforderungen, wie die dichte Bebauung und die engen Straßenschluchten von Istanbul, die zu Verdeckungen und Rauschen führen, und die verfügbaren Bildprodukte L1R und L1G der Kompsat-3 Aufnahmen vom März 2017. Die Auswertung von L1G-Aufnahmen wurde bislang nicht publiziert. Die koreanische Welt-raumbehörde KARI vertreibt die Satellitenbilder mit beiden Bildarten. L1R-Bilder entsprechen den geometrisch korrigierten und zusammengesetzten originalen Satellitenbildern (Basic Imagery), während L1G-Bilder auf das SRTM-Höhenmodell mit 3 Bogensekunden Punktabstand projiziert und damit genäherte Orthobilder sind. Die für SGM erforderlichen Epipolarbilder können durch ebene Rotation der L1G-Produkte auf die Basisrichtung des Stereopaars erstellt werden, während L1R-Bilder vorher auf eine Ebene konstanter Höhe, sinnvollerweise im Landeskoordinatensystem, zu projizieren sind. Die mittels L1G erstellten Höhenmodelle führen zu Höhenunterschieden gegenüber dem SRTM-Referenzhöhenmodell. Bei entsprechenden QuickBird-Standard-Aufnahmen, die ebenfalls auf das SRTM Höhenmodell projiziert sind, traten keinerlei Probleme mit diesem Bildtyp auf und es wurden ähnliche Genauigkeiten wie mit QuickBird-Basic-Imagery, die L1R entsprechen, erzielt (JACOBSEN 2006). KARI teilte jedoch mit, dass bei der Definition der SRTM-Höhenmodelle Probleme vorhanden waren. Verschiebungen des SRTM- gegenüber dem ALS Referenzhöhenmodell wurden durch Ausgleichung bestimmt und berücksichtigt.

### 3 Bildorientierung

#### 3.1 Kompsat-3

Wie oben erwähnt, liegt das Kompsat-3 Stereomodell als L1G (genäherte Orthobilder bezogen auf das SRTM 3-Bogensekunden-Oberflächenmodell) und als L1R (zusammengesetzte und um Kalibrierung verbesserte Originalbilder) vor. Epipolarbilder, die für SGM erforderlich sind, können aus L1G-Bildern durch horizontale Drehung auf die Bildbasis erzeugt werden, während L1R-Bilder vor der Drehung auf eine Ebene konstanter Höhe zu projizieren sind, was Orthobildern mit einer konstanter Höhe entspricht. Die Orientierung der L1G- und der L1R-Bilder erfolgt üblicherweise mittels bias-korrigierter rationaler Polynomkoeffizienten. In den Kompsat-3 Bildern wurden 71 Passpunkte bestimmt.

Die Orientierungsgenauigkeiten in den Tabellen 1 und 2 zeigen, dass die Orientierung der L1G-Bilder (projiziert auf das SRTM 3-Bogensekunden-DSM) nicht so gute Ergebnisse liefern, wie die Orientierung der Basic Imagery L1R. Die schlechtere Genauigkeit in Blickrichtung deutet auf Probleme in der Referenzhöhe hin, die sich quer zur Blickrichtung nicht auswirken. Die Auswirkung der Höhenkorrektur durch das SRTM-DSM konnte somit bei der Orientierung nicht vollständig berücksichtigt werden. Das SRTM 3-Bogensekunden-Höhenmodell wurde vor der Orientierung durch Ausgleichung auf das Laserscanning-Referenz-DSM verschoben, ohne diese Verschiebung waren die Ergebnisse der L1R-Orientierungen schlechter. Die Ergebnisse der L1R-Bilder (Basic Imagery) sind deutlich besser und stellen in Relation zu 0.71m Objektpixelgröße (GSD) ein gutes Ergebnis dar. Für das Basis zu Höhenverhältnis von 1:1,23 ist auch die Höhengenaugigkeit der 3D-Orientierung mit  $SZ=1,09m$  zufriedenstellend, während dieses bei der L1G-Lösung mit  $SZ=2,07m$  nicht der Fall ist.

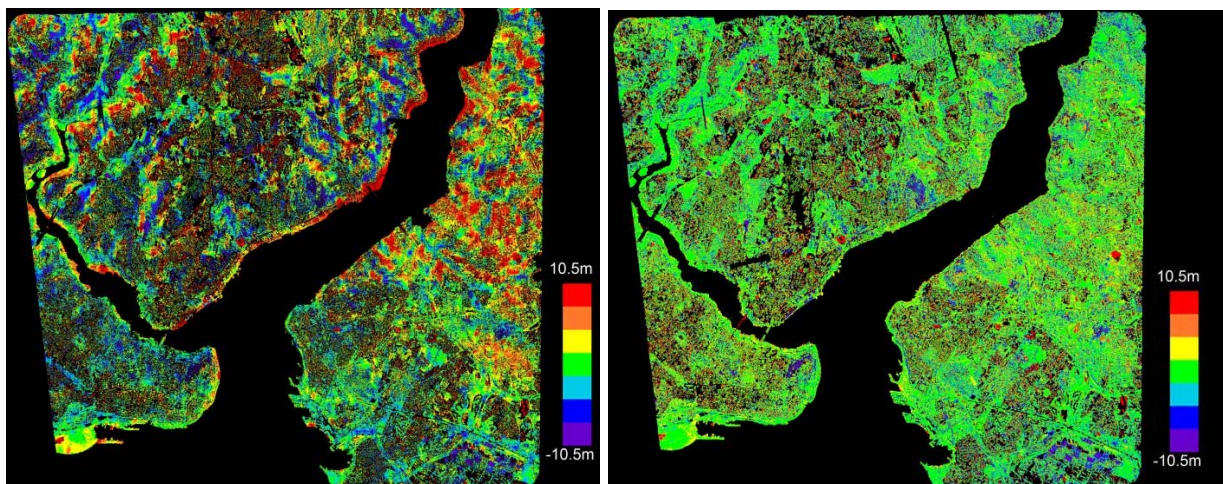
Die Orientierungsprobleme der L1G-Bilder wurden deswegen durch eine flächenbasierte Bildzuordnung nach der Methode der kleinsten Quadrate, untersucht. Als Referenz diente das Laserscanning-Oberflächenmodell mit 4m Punktabstand. Dieser Punktabstand führt bei der dichten Bebauung in Istanbul zu nicht unerheblichen Höhendifferenzen an den Gebäudeumringen und beeinflusst die errechneten Höhengenaugigkeiten nicht unerheblich.

Tab. 1: Genauigkeit der Kompsat-3 L1G Bildorientierung – basierend auf 71 Passpunkten

Einzelbildorientierung L1G				
	SX	SY	In Blickrichtung	Quer dazu
Bild 5935	0.95 m	0.97 m	1.03 m	0.88m
Bild 5820	0.84 m	1.24 m	1.29 m	0.78 m
Dreidimensionale Orientierung				
	SX	SY	SZ	
Stereomodell	0.82 m	0.90 m	2.07 m	

Tab. 2: Genauigkeit der Kompsat-3 L1G Bildorientierung – basierend auf 71 Passpunkten

Einzelbildorientierung L1R (Basic Imagery)				
	SX	SY	In Blickrichtung	Quer dazu
Bild 5935	0.68 m	0.67 m	0.68 m	0.67 m
Bild 5820	0.45 m	0.40 m	0.44 m	0.41 m
Dreidimensionale Orientierung				
	SX	SY	SZ	
Stereomodell	0.53 m	0.55 m	1.09 m	



Höhendifferenzen L1G

Höhendifferenzen L1R

Abb. 1: Farbkodierte Höhendifferenzen der Kompsat-3 Höhenmodelle gegenüber Laserscanning

Die in Abbildung 1 dargestellten Höhenunterschiede zwischen den Kompsat-3 Höhenmodellen und der Referenz verdeutlichen die Probleme der erforderlichen Höhenkorrektur des L1G-Höhenmodells durch das SRTM 3-Bogensekunden Oberflächenmodells. Die in Abbildung 1,

links, deutlichen lokalen Höhendifferenzen in den steileren Lagen bestätigen die von KARI mitgeteilten Probleme mit dem SRTM-Referenzhöhenmodell. Die etwas dunkleren Bereiche in Abbildung 1, rechts, sind Punktausfälle durch Verdeckungen in den dicht bebauten Gebieten. Die lokalen systematischen Höhendifferenzen sind nicht durch Verschiebungen der Höhenmodelle gegeneinander zu erklären – diese wurden untersucht und berücksichtigt. Damit sind die Kompsat-3 L1G-Bilder nicht für dreidimensionale Auswertungen zu empfehlen, auch ihre Lagegenauigkeit ist problematisch. Dieses gilt ausdrücklich nicht für die L1R-Bilder, die unproblematisch auszuwerten sind.

### 3.2 WorldView-4

WorldView-4 Stereobilder werden mit der Geometrie der Standard Imagery vertrieben, die einer Projektion der zusammengesetzten und um die Kalibrierung verbesserten Originalbilder auf eine Ebene konstanter Höhe im Landeskoordinatensystem entsprechen. Üblicherweise wird die Orientierung mittels Rationaler Polynomkoeffizienten (RPC) mit Biaskorrektur durchgeführt. Die verwendeten Bilder vom Juni 2017 haben jedoch eine Größe von 25600×68616 Pixeln, was an die Genauigkeitsgrenze der RPC geht. Für die volle Ausnutzung der Bildgenauigkeit sind Passpunkte erforderlich. Es sind 7 klar identifizierbare Passpunkte mit ausreichender Genauigkeit vorhanden. Eine Biaskorrektur nur mit einer ebenen Affintransformation führte nicht zu Subpixelgenauigkeit, es waren zusätzlich zwei Parameter erforderlich, die die Blickrichtung verbessern. Von den sechs Affinparametern der Biaskorrektur waren allerdings nur zwei beziehungsweise drei Parameter erforderlich, womit letztendlich insgesamt 4 beziehungsweise 5 Biasparameter für die Bildorientierung benutzt wurden. Damit wurde neben der Lagegenauigkeit von 0,4 GSD auch eine Höhengenaugigkeit an den Passpunkten im Subpixelbereich von 0,9 GSD erreicht.

Tab. 3: Genauigkeit der WorldView-4 Bildorientierung

Einzelbildorientierung			
	Unbekannte	SX	SY
Bild 5615	5	0.17 m	0.09 m
Bild 5723	4	0.22 m	0.25 m
Dreidimensionale Orientierung			
	SX	SY	SZ
Stereomodell	0.15 m	0.07 m	0.27 m

## 4 Untersuchung der erzeugten Höhenmodelle

### 4.1 Kompsat-3

Es wurde sowohl ein Höhenmodell mittels flächenbasierter Bildzuordnung nach der Methode der kleinsten Quadrate, als auch mittels SGM erstellt. Die in Abbildung 1 dargestellten Höhendifferenzen basieren auf der flächenbasierten Zuordnung, die mit Ausnahme der Details an Höhengsprüngen, wie Gebäuden, Brücken und Straßendämmen, ein zufriedenstellendes Ergebnis liefern. Die in Abbildung 1, rechts, dargestellten farbkodierten Höhendifferenzen gegenüber dem La-

erscanning Oberflächenmodell aus dem Jahr 2015 zeigen einzelne rote Flecken, die auf Höhendifferenzen von etwa 10m hinweisen. Diese großen Differenzen sind auf Änderungen zwischen dem Zeitpunkt Laserscanaufnahme im Jahre 2015 und der Satellitenbilder im Jahr 2017, wie durch den Bau einer Brücke über das Goldene Horn, eine neue Stadionüberdachung und neue Gebäude zurückzuführen sind. Eine Auswirkung haben auch die Differenzen der Oberflächendefinition in Parkanlagen durch Laserscanner und durch Bildzuordnung von optischen Bildern, die in Abbildung 1 blau erscheinen.

Tab. 4: Vergleich des Kompsat-3 Höhenmodells basierend auf flächenhafter Bildzuordnung mit der Laserscanner-Referenz

<b>L1R</b>	SZ	NMAD	Relatives SZ
Alle Punkte	2.90 m	2.34 m	1.99 m
Für Neigungen < 10%	1.94 m	1.20 m	
Funktion der Neigung	$SZ=2.35m + 1.07m * \tan a$	$NMAD=1.82m + 1.55m * \tan a$	
<b>L1G</b>	SZ	NMAD	Relatives SZ
Alle Punkte	5.40 m	4.80 m	3.60 m
Für Neigungen < 10%	4.45 m	3.60 m	
Funktion der Neigung	$SZ=4.82m + 0.99m * \tan a$	$NMAD=4.19m + 1.39m * \tan a$	



Abb.2: Kompsat-3-Bildausschnitt



Abb. 3: Kompsat-3 Parallaxenbild

Auch der Vergleich der durch flächenhafte Bildzuordnung erstellten Kompsat-3 Höhenmodelle mit Laserscandaten (Tabelle 4) zeigt die Probleme der L1G-Daten, während das Höhenmodell basierend auf L1R-Bildern innerhalb der Erwartung ist. Ein NMAD (Normalized Median Absolute Deviation (HÖHLE & HÖHLE 2009)) von 1,21m für Geländeneigungen < 10% stellt für diese Methode in dem dicht bebauten Gebiet ein zufriedenstellendes Ergebnis dar. Dass die Stan-

Standardabweichung mit 1.94m deutlich höher liegt, ist auf den Einfluss von Höhensprüngen an den Gebäudekanten zurückzuführen, die durch die flächenbasierte Bildzuordnung verwischt werden.

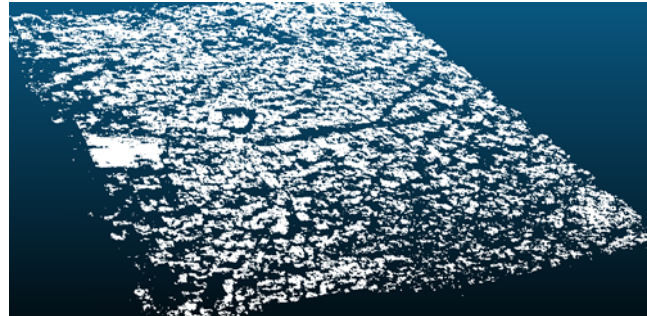
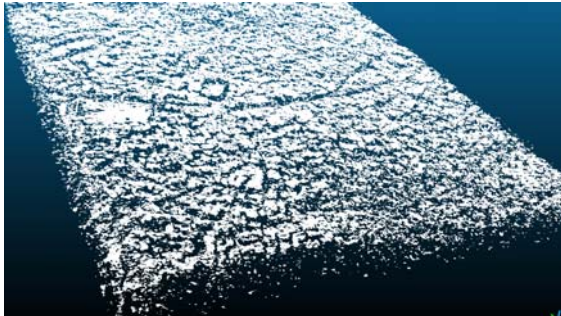


Abb. 4: Originale Punktwolke

Abb. 5: gefilterte Punktwolke

Die Bestimmung der dreidimensionalen Punktwolke durch SGM (Abb. 3-Abb. 5) ist durch die Verdeckungen in den engen Straßenschluchten verrauscht (Abb. 4) und wurde durch einen dreidimensionalen Nachbarschaftsfilter verbessert (Abb. 5). Entsprechend der Objektpixelgröße von 0.71m sind die Dachformen zufriedenstellend erfasst.

Tab. 5: Vergleich des Kompsat-3 Höhenmodells basierend auf SGM mit der Laserscanner-Referenz

L1R	SZ	NMAD	Relatives SZ
Alle Punkte	3.03 m	2.16 m	2.16 m
Für Neigungen < 10%	1.97 m	1.21 m	
Funktion der Neigung	$SZ=2.44m + 0.82m * \tan a$	$NMAD=1.74m + 1.31m * \tan a$	

Die Genauigkeitsmaße der Kompsat-3 L1R Höhenmodelle basierend auf flächenhafter Bildzuordnung und auf SGM (Tabellen 4 und 5), verglichen mit dem Laserscanning-Oberflächenmodell mit 4m Punktabstand, unterscheiden sich nicht wesentlich. Durch das Laserscanning Oberflächenmodell mit 4m Punktabstand kann die dicht bebaute städtische Landschaft (Abb. 2 und 9) nicht ausreichend beschrieben werden. Lediglich das NMAD in Bereichen mit Neigungen unter 10% gibt eine einigermaßen realistische Genauigkeitsangabe, wobei allerdings zu beachten ist, dass der seitliche Gebäudeabstand in dem Untersuchungsgebiet deutlich unter 4m liegt (Abb. 9). Dieses zeigt sich auch bei der Standardabweichung, die deutlich über dem NMAD liegt – eine größere Anzahl von größeren Höhendifferenzen als der Normalverteilung entsprechend, erhöht die Standardabweichung deutlich, während das bei dem auf dem Median basierenden NMAD nicht der Fall ist.

Die ähnlichen Genauigkeiten der flächenhaften Bildzuordnung durch Kleinste Quadrate und von SGM wurden bereits in ALOBEID et al. (2010) festgestellt. Der wesentliche Vorteil von SGM liegt in der korrekten Erfassung von Höhensprüngen, was sich bei der guten Darstellung der Dachflächen und -formen (Abb. 5) zeigt.

## 4.2 WorldView-4

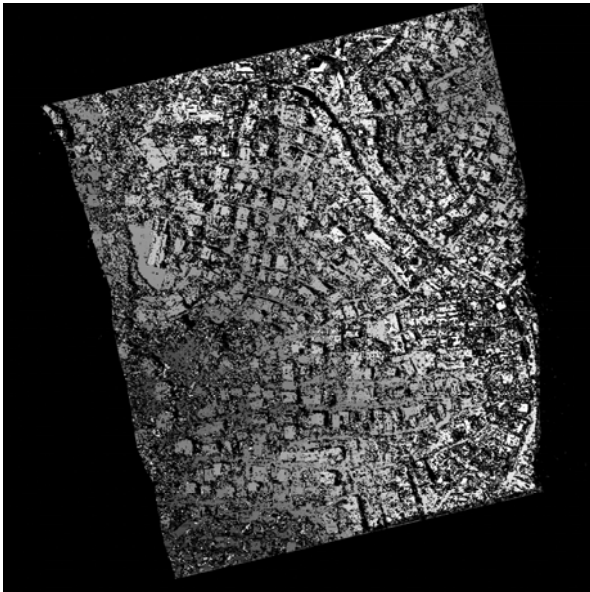


Abb. 6: Ausschnitt aus dem Parallaxenbild SGM Bildzuordnung

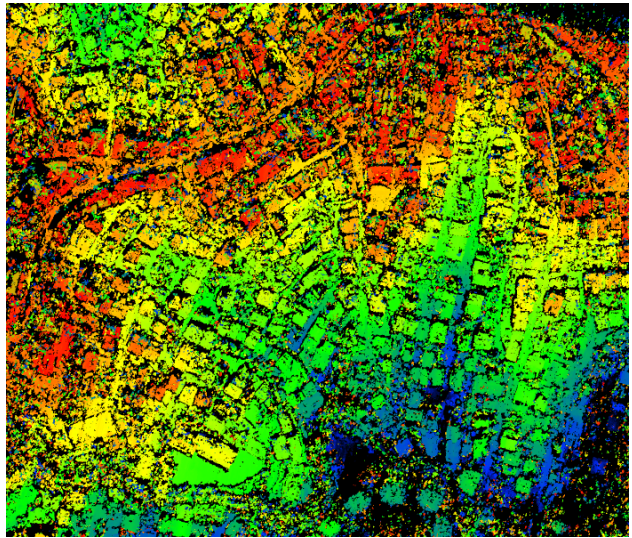


Abb. 7: Farbcodiertes SGM-Oberflächenmodell

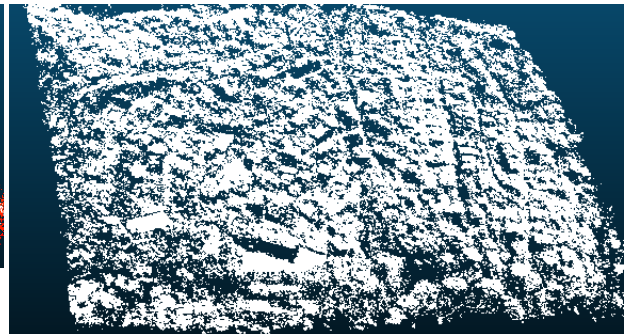
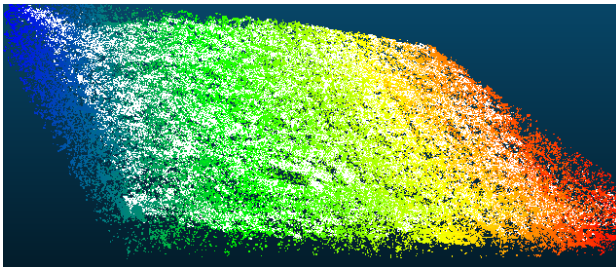


Abb. 8: Punktwolke des Oberflächenmodells erzeugt mit Semi Global Matching. Ausschnitt aus originalem SGM-DHM mit Rauschen (links) und nach Filterung mit Nachbarschaftsfilter (rechts)



Abb. 9: Detail des WorldView-4-Bildes



Abb. 10: Laserscanning-Referenz-Punktwolke



Abb. 11: Farbkodierte Höhendifferenzen

WorldView-4 hat mit 31cm GSD eine Objektauflösung, die teilweise auch bei Luftbildern verwendet wird (Abb. 9). Dementsprechend detailliert sind die durch SGM erzeugten Höhenmodelle (Abb. 7). Wie auch bei den Kompsat-3-Daten zeigt sich allerdings auch, dass ein Referenzhöhenmodell mit 4m Punktabstand in dem extrem dicht bebauten Gebiet nicht ausreicht. Die Gebäudeumrisse können damit nicht genau genug beschrieben werden. Hinzu kommen die Verdeckungen in Orbitrichtung durch das Basis-Höhenverhältnis von 1:1,2 etwa entsprechend einer Verdeckung von 40% der Gebäudehöhe. Quer zum Orbit gibt es nur eine Neigung der Blickrichtung von 3°, wodurch sich die Querverdeckungen in Grenzen halten. Das in Tabelle 6 gezeigte NMAD von 90cm für Geländeneigungen unter 10% entspricht nicht der Genauigkeit der Einzelpunkte, die liegt bei gutem Kontrast in der Größenordnung der Höhengenaugigkeit der Passpunkte von 27cm (Tabelle 3).

Tab. 6: Vergleich des WorldView-4 Höhenmodells basierend auf SGM mit der Laserscanner-Referenz

SGM	SZ	NMAD	Relatives SZ
Alle Punkte	2.10 m	2.02 m	1.02 m
Für Neigungen < 10%	1.18 m	0.90 m	
Funktion der Neigung	$SZ=1.73m + 0.41m * \tan a$	$NMAD=1.48m + 0.72m * \tan a$	

## 5 Schlussfolgerungen

Wie leider häufiger, ist die Bildorientierung der Satellitenbilder nicht ohne Probleme, wenn das Genauigkeitspotential der Auswertungen voll ausgeschöpft werden soll. Die Kompsat-3 L1G-Bilder sind für dreidimensionale Auswertungen nicht zu empfehlen, aber auch die Lagegenauigkeit ist eingeschränkt. Mit den Kompsat-3 L1R-Bildern gibt es dagegen keine Probleme und die erzielten Genauigkeiten entsprechen dem GSD. Die WorldView-4-Aufnahmen sind mit Ausnahme der erforderlichen zusätzlichen Bias-Parameter geometrisch unproblematisch.



Wie bekannt, können durch eine flächenbasierte Bildzuordnung nach der Methode der kleinsten Quadrate nicht die Objekte mit senkrechten Begrenzungen, wie die Gebäude und Brücken, nicht ausreichend scharf bestimmt werden, hier gibt keine Probleme mit der Semi Globalen Bildzuordnung, durch die die Gebäudedächer entsprechend der Objektauflösung gut erfasst werden. Durch das Basis-Höhenverhältnis beider Satellitenbildtypen von etwa 1:1,2 gibt es in dem sehr dicht bebauten Aufnahmegebiet Verdeckungen, so dass die Straßenhöhen nicht überall gut erfasst werden. Hier wäre ein kleinerer Konvergenzwinkel der Aufnahmen von Vorteil. Luftbilder mit höherer Längs- und Querüberdeckung haben den Vorteil, dass die Verdeckungen kleiner sind, die Genauigkeit ist allerdings bei gleicher Objektpixelgröße in der gleichen Größenordnung.

## 6 Literaturverzeichnis

- ALOBED, A., JACOBSEN, K. & HEIPKE, C., 2010: Comparison of Matching Algorithms for DSM Generation in Urban Areas from IKONOS Imagery. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, **76**(9) 1041-1050.
- HAALA, N., 2011: Multiray Photogrammetry and Dense Image Matching, *Photogrammetric Week 2011*, Wichmann Verlag, 183-195.
- HEINRICHS, M., HELLWICH, O. & RODEHORST, V., 2007: ARTIST: Architectural Model Refinement using Terrestrial Image Sequences from a Trifocal Sensor, *Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation*, **2007**(6), 405-414.
- HIRSCHMÜLLER, H., 2005: Accurate and Efficient Stereo Processing by Semi-Global Matching and Mutual Information. *IEEE CVPR*, San Diego, USA, Juni 2005.
- HIRSCHMÜLLER, H., 2008: Stereo Processing by Semi-Global Matching and Mutual Information. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **30**(2), 328-341
- HÖHLE, J. & HÖHLE, M., 2009. Accuracy Assessment of Digital Elevation Models by means of Robust Statistical Methods, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **64**, 398-406
- JACOBSEN, K., 2006: Comparison of Image Orientation by IKONOS, QuickBird and OrbView-3. *EARSeL 2006*, Warsaw, in "New Developments and Challenges in Remote Sensing", edited by Z. Bochenek, Millpress, Rotterdam 2007 ISBN 978-90-5966-053-3, 667-676