

Erstellung großflächiger Höhenmodelle und Vergleich mit anderen Daten

KARSTEN JACOBSEN¹

Zusammenfassung: Es wird ein Überblick über die Möglichkeiten zur Erstellung von Höhenmodellen mit optischen und Radaraufnahmen aus dem Weltraum gegeben. Die sensorbedingten Eigenschaften der Höhenmodelle werden erläutert und es erfolgt ein Vergleich mit großflächigen bis weltweit vorhandenen und angekündigten digitalen Oberflächenmodellen (DOM).

Mit den hochauflösenden optischen Weltraumbildern lassen sich DOM für flache Gebiete mit Systemgenauigkeiten (relative Standardabweichung) in der Größenordnung von einem Objektpixel erstellen. Mit flächenbasierten Bildzuordnungen ist ein Punktabstand der DOM in der Größenordnung von drei Objektpixeln sinnvoll; bei Semi-Global-Matching kann wegen der pixelbasierten Zuordnung ein Objektpixelabstand von einem Pixel gewählt werden. Radaraufnahmen haben den Vorteil der Unabhängigkeit von der Wolkenbedeckung weswegen sie sich besonders für großflächige Höhenmodelle eignen, sind aber bei abrupten Höhenunterschieden, wie sie in Städten und Gebirgen auftreten, durch layover beeinträchtigt.

1 Einleitung

Digitale Höhenmodelle werden für viele Anwendungen benötigt und sind ein Grundbestandteil der meisten Geoinformationssysteme. Ihre Bestimmung mittels Luftbildphotogrammetrie oder Laserscanneraufnahme ist zeitaufwendig und damit teuer. Nicht in jedem Fall ist die höchste Genauigkeit und Auflösung erforderlich, so dass unter Umständen auf die nahezu weltweiten, kostenlosen Höhenmodelle zurückgegriffen werden kann. Eine höhere Auflösung und Genauigkeit wird mit dem TanDEM-X Höhenmodell ab 2014 vorhanden sein oder bereits jetzt mit dem TanDEM-X intermediate DEM. Von diesem DHM zu den Ergebnissen der Luftbildphotogrammetrie gibt es einen gleitenden Übergang durch hochauflösende optische Satellitenbildstereomodelle. Die erzeugten Höhenmodelle unterscheiden sich nicht nur durch den Punktabstand und die allgemeine Genauigkeit, die verschiedenen Sensoren haben unterschiedliche Eigenschaften, die spezielle Charakteristika der erstellten DHM hervorrufen.

2 Höhenmodelle aus optischen, hochauflösenden Satellitenbildern

Mit den Bildern von WorldView-1, WorldView-2 und GeoEye-1 stehen zurzeit Satellitenbilder mit einer Bodenauflösung von bis zu 0,5m zur Verfügung. Mit den angekündigten Satelliten GeoEye-2, WorldView-3 und Cartosat-3 wird die Bodenauflösung in absehbarer Zeit auf 31cm bis 34cm verbessert werden. Nicht nur die Bodenauflösung, auch die Aufnahmekapazität hat sich erheblich gesteigert (Abb. 1). Heute haben die hochauflösenden Satelliten insgesamt nicht

1) Dr. Karsten Jacobsen, Leibniz Universität Hannover, Nienburger Str.1, 30167 Hannover; E-Mail: jacobsen@ipi.uni-hannover.de

nur theoretisch, sondern auch praktisch eine um mehr als den Faktor 10 gesteigerte Aufnahmekapazität als vor vier Jahren, wodurch sich die Zeit von der Beauftragung bis zur Aufnahme der Satellitenbilder deutlich verringert hat.

Alle hochauflösenden optischen Satelliten sind heute flexibel – durch Drehung des ganzen Satelliten wird die Aufnahme­richtung geändert, womit die Erstellung von Stereomodellen innerhalb von etwa 90 Sekunden möglich ist. Die früheren Probleme der Objektänderung von einer zur nächsten Aufnahme bestehen damit nicht mehr, was die automatische Bildzuordnung erheblich verbessert. Die beiden WorldView-Satelliten und Pleiades sind mit control moment Kreiseln statt mit reaction Kreiseln ausgestattet, wodurch sie sich erheblich schneller drehen können als die anderen Satelliten (Abb. 2), damit ist die Voraussetzung zur Erstellung von Stereo- oder auch Multistereoaufnahmen erheblich verbessert. Aus diesem Grund wurde mit WorldView-1 und -2 im Jahr 2011 eine sehr viel größere Fläche stereoskopisch aufgenommen als mit IKONOS und GeoEye-1 (GOURDINE 2012). Wegen der langsameren Drehung von GeoEye-1 und IKONOS ist die Erstellung von Stereoaufnahmen nicht sehr wirtschaftlich. Die künftigen sehr hoch auflösenden optischen Satelliten werden aus diesem Grund mit control moment Kreiseln ausgestattet sein.

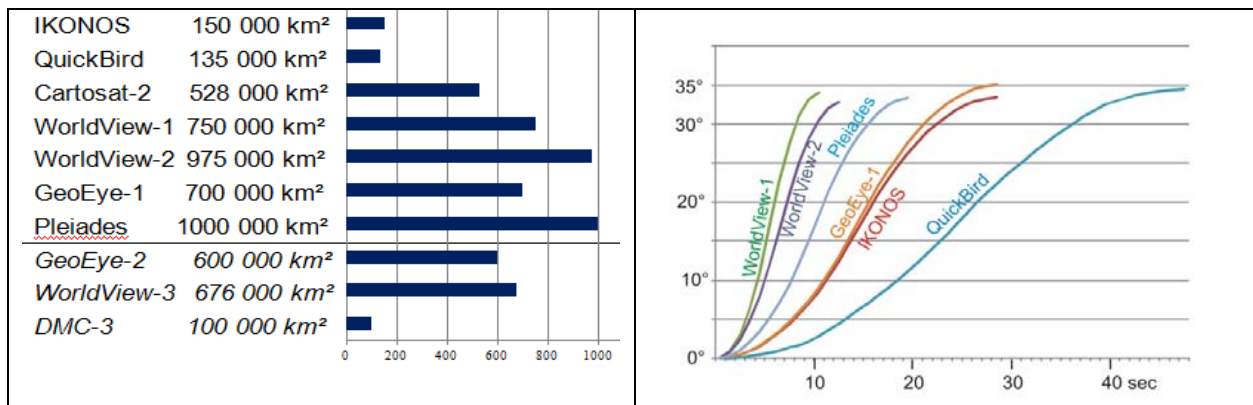


Abb. 1: Theoretische Aufnahmekapazität hochauflösender optischer Satelliten je Tag

Abb. 2: Zeit für die Aufnahme­richtungsänderung optischer Satelliten

Mit WorldView-2 wurden am 6. Juni 2011 innerhalb von 92 Sekunden drei sich teilweise überlappende Stereobilder des Schwarzmeerküstenbereichs in der Nähe von Istanbul aufgenommen (Abb. 3) um damit Höhenmodelle zu erstellen da die amtlichen Höhenmodelle wegen großflächigen Bodenabbaus nicht mehr aktuell waren (BÜYÜKSALIH ET AL. 2012). Die Szenenorientierung mit bias-korrigierten rationalen Polynomkoeffizienten basierte auf Passpunkten, die für Luftbildaufnahmen mit 10cm Objektpixelgröße erstellt wurden. Dementsprechend war die Identifizierung der Passpunkte in den WorldView-Aufnahmen schwierig und es wurde im Durchschnitt eine Standardabweichung der Orientierung von etwa einem Objektpixel (50cm) erreicht. Durch Bildzuordnung nach der Methode der kleinsten Quadrate basierend auf einer Kombination von Bildpyramiden mit Regionswachstum wurden drei sich teilweise überlappende Höhenmodelle erstellt. In den Waldgebieten musste die Toleranzgrenze für die Bildzuordnung auf 0,4 gesenkt werden um eine ausreichende Anzahl von Objektpunkten zu erhalten, das wirkte sich kaum auf die Genauigkeit gegenüber einer Toleranzgrenze von 0,4 aus. Wie das Beispiel eines Qualitätsbildes (Abb. 4) zeigt, sind die

Korrelationskoeffizienten der Bildzuordnung stark von der Bodenbedeckung abhängig. Für offenes Gelände und dementsprechend auch die Straßen ist der Korrelationskoeffizient mit 0,95 bis 1,0 am größten.



Abb. 3: links: überlappende WorldView-2 Aufnahmen rechts: Aufnahmeconfiguration der 3 Stereokombinationen

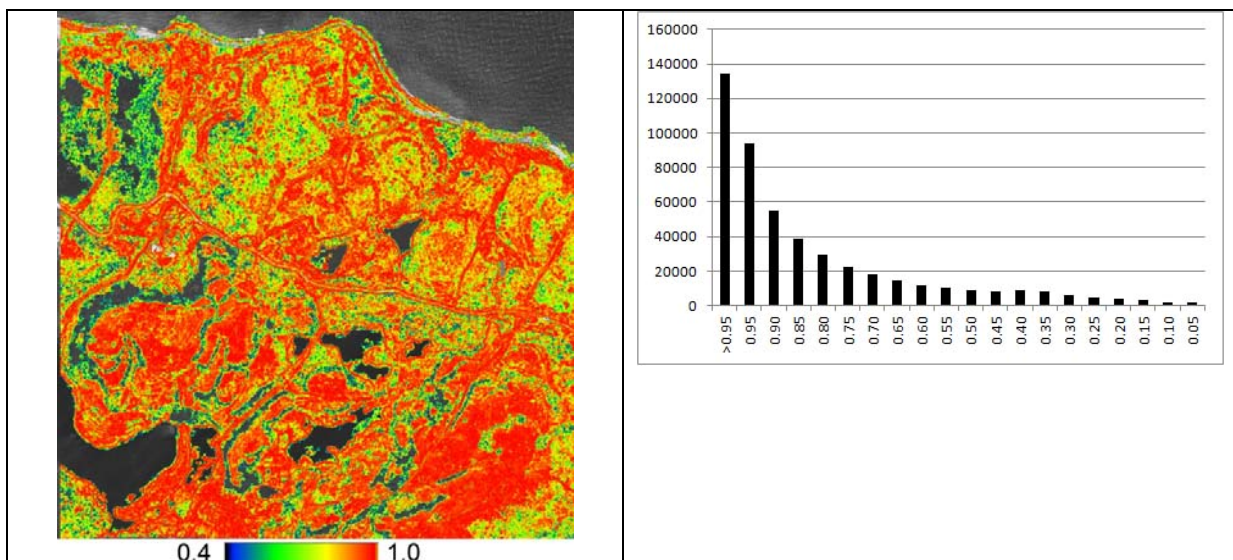


Abb. 4: links: Qualitätsbild (Größe der Korrelationskoeffizienten) der Kleinste-Quadrate-Bildzuordnung der WV-2-Aufnahme überlagert dem WV-2-Bild rechts: entsprechende Häufigkeitsverteilung der Korrelationskoeffizienten

Die in Abbildung 4 nicht durch zugeordnete Punkte mit einem Korrelationskoeffizienten größer als 0,4 (grauer Hintergrund) erfassten Flächen sind überwiegend Wasserflächen, teilweise aber auch Waldgebiete.

Die DOM in den Überlappungsbereichen der Stereomodelle wurden unabhängig voneinander erstellt – sie basieren auf unterschiedlichen Passpunkten und sind in den jeweils beiden Modellen nicht lageidentisch, erfordern für einen Vergleich somit eine Interpolation. Das Quadratmittel von 411.354 Widersprüchen der überlappenden DOM ergibt: $SZ = 0.74m + 0.55m * \tan(\text{Geländeneigung})$. Da die Fehleranteile beider überlappenden Höhenmodelle gleich sind, folgt daraus als Standardabweichung der Höhenpunktbestimmung durch ein WV-2 Modell in flachem Gelände von $SZ = 0,52m$, was etwa einer Objektpixelgröße entspricht. Die Widersprüche gegenüber dem Referenzhöhenmodell sind deutlich größer, was auf den Einfluss von Vegetation,

Bodenabbau, Gebäuden, aber auch eine begrenzte Genauigkeit des Referenzhöhenmodells zurückzuführen ist. Für offenes Gelände ergibt sich im Quadratmittel ein Widerspruch von $SZ = 1,72m + 0,93 * \tan(\text{Geländeneigung})$ und nach Filterung von Punkten, die nicht der Geländeoberfläche entsprechen, $SZ = 1,44m + 0,85 * \tan(\text{Geländeneigung})$. Ein Teil der Widersprüche ist auf verbliebene Einflüsse der Vegetation und von Gebäuden zurückzuführen, das Referenzhöhenmodell entspricht aber auch nicht der für ein Höhenmodell aus Bildern mit 0,5m Objektpixelgröße erforderlichen Qualität eines Referenzhöhenmodells.

Eine relative Standardabweichung der DOM in flachen Bereichen von etwa einer Objektpixelgröße ist typisch für die automatische Bildzuordnung optischer Satellitenstereobilder, sie wurde auch mit SPOT HRS (5m Objektpixelgröße) (Jacobsen 2004), Cartosat-1 (2,5m Objektpixelgröße) (Jacobsen 2006) und IKONOS (1m Objektpixelgröße) sowie GeoEye-1 Stereomodellen (0,5m Objektpixelgröße) (Alobeid et al. 2010) erreicht. Die relative Genauigkeit ist identisch mit der absoluten wenn ausreichend genaue Passpunkte vorhanden sind. Ohne Passpunkte ist die absolute Lagerung der Genauigkeit von der direkten Sensororientierung abhängig. Die in Tabelle 1 angegebenen Herstellergenauigkeiten wurden durch eigene Untersuchungen bestätigt. Allgemein wird die Genauigkeit mit CE90 (circular error 90% Wahrscheinlichkeit) angegeben. Bei Normalverteilung der Ergebnisse ist die Standardabweichung der Objektkoordinatenkomponente SX oder SY gleich $CE90 / 2,146$. Die begrenzte Orientierungsgenauigkeit des Stereosatelliten Cartosat-1 kann durch In-Flight-Kalibrierung auf etwa 30m verbessert werden, für operationelle Anwendungen werden die Cartosat-1-Modelle allerdings meist auf das SRTM-Höhenmodell durch Ausgleichung verschoben, womit die absolute Genauigkeit der SRTM-Höhenmodellagerung in der Größenordnung von 3m für die Höhe und 10m für die Lage erreicht wird. Eine Korrektur der absoluten Höhenlage ist mit Profilpunkten des Lasersatelliten ICESat möglich, die eine Standardabweichung von 0,2m bis 0,3m haben. Wegen des ICESat Fußabdruckdurchmessers von 170m erfordert eine derartige Höhenkorrektur in den Bereichen der ICESat-Profilpunkte ein ausreichend ebenes Gebiet. Eine Blockausgleichung überlappender Modelle verbessert die Orientierungsgenauigkeit (D'ANGELO, REINARTZ 2012).

Sensor	SX = SY	CE90
IKONOS	7m	15m
QuickBird	9m	19m
Orbview-3	12m	25m
WorldView-1	2m	5m
WorldView-2	2m	5m
GeoEye-1	2m	5m
Pleiades	2m	3m
Cartosat-1 / mit in-flight Kalibrierung	93m / 30m	200m
KOMPSAT-2	37m	80m

Tabelle 1: Genauigkeit der direkten Sensororientierung optischer hochauflösender Satelliten

3 Höhenmodelle aus Satellitenradarbildern

Synthetische Apertur Radaraufnahmen (SAR) sind wie die optischen Bilder ebenfalls bildhafte Darstellungen der Rückstrahlungsintensität, allerdings in einem deutlich anderen

Wellenlängenbereich (Tabelle 2). Optische Bilder separieren die Objektpunkte nach der Richtung aus der die Strahlung kommt, während bei SAR-Aufnahmen nur die Komponente in der Flugrichtung richtungsabhängig ist, ist die Komponente quer zur Flugrichtung von der Entfernung Antenne zum Objekt abhängig.

Band	X	C	L	P
Wellenlänge	2,4 – 3,75 cm	3,75 – 7,5 cm	15 – 30 cm	77 – 136 cm
Höhe im Wald	DOM	DOM	nahezu DHM	DHM

Tabelle 2: Für Höhenbestimmung bedeutsame Radarwellenlängenbereiche

Für SAR-Bilder und die Erstellung von Höhenmodellen werden hauptsächlich X-, C-, L- und P-Band eingesetzt (Tabelle 2). Je kürzer die Wellenlänge und die Pulsdauer, desto besser ist die Detailerkennbarkeit. Umgekehrt kann mit den längeren Wellenlängen L- und P-Band Vegetation weitgehend durchdrungen werden, während mit dem X- und C-Band wie bei den optischen Aufnahmen digitale Oberflächenmodelle erstellt werden.

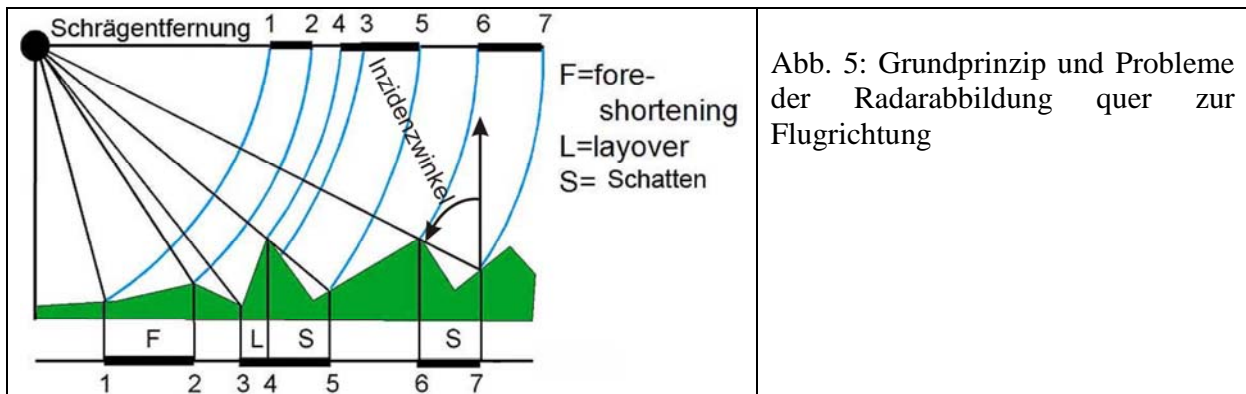


Abb. 5: Grundprinzip und Probleme der Radarabbildung quer zur Flugrichtung

SAR-Aufnahmen werden mit Inzidenzwinkeln (Abb. 5) zwischen 20° und 65° aufgenommen. Ein großer Inzidenzwinkel hat den Vorteil einer besseren Bodenauflösung, vergrößert aber Sichtschattenbereiche und die Signalüberlagerung des sogenannten Layover (Bereich L in Abb. 5). Im Gebirge und in städtischen Bereichen ist ein Layover nicht vermeidbar und führt zu Auswertelücken, die bei Gebieten, die mehrfach erfasst werden, durch unterschiedliche Inzidenzwinkel und die unterschiedliche Aufnahme­richtung des aufsteigenden und des absteigenden Orbits zumindest verkleinert werden.

Wie bei optischen Bildern werden zur Höhenbestimmung mit SAR-Bildern zwei Bilder benötigt, da aus den 2 Dimensionen eines Bildes keine 3 Dimensionen des Objektkoordinatensystems ermittelt werden können. Eine Höhenbestimmung ist durch interferometrisches SAR (InSAR) mit einer kurzen Basis durch Vergleich der Phasendifferenz der von zwei Antennen aufgenommenen Rückstrahlung oder durch Radargrammetrie mittels Bildzuordnung zweier mit großer Basis aufgenommener Bilder möglich. InSAR mit X- und C-Band benötigt zeitgleich erstellte Aufnahmen da bei Zeitunterschieden die Rückstrahlung durch die Vegetation zu unterschiedlich ist, so dass es zu Dekorrelationen kommt. Bei L- und P-Band kommt die Rückstrahlung hauptsächlich vom Boden, womit auch SAR-Aufnahmen mit Zeitunterschieden durch InSAR ausgewertet werden können. Zurzeit ist aber kein zivil verfügbarer Satellit mit L-

oder P-Band im All, was sich erst mit dem für 2013 vorgesehenen Start von ALOS-2 ändern wird.

Für die Erstellung großflächiger Höhenmodelle ist eine InSAR-Aufnahmekonfiguration von erheblichem Vorteil, wie es bei der nur 11 Tage dauernden SRTM-Mission war, mit dem ein nahezu weltweites Höhenmodell erstellt wurde. Zurzeit wird mit TanDEM-X, das aus den in naher Konfiguration fliegenden zwei SAR-Satelliten des DLR besteht, ein weltweites Höhenmodell, das TanDEM-X Global DEM aufgebaut, das ab 2014 verfügbar sein soll.

Das TanDEM-X Global DEM wird von ASTRIUM vertrieben werden. Es wird eine Punktdichte von 0,4 arcsec (~12m am Äquator) haben. Das Deutsche Fernerkundungsdatenzentrum (DFD) des DLR gibt folgende Genauigkeiten des TanDEM-X-Höhenmodells an (Huber et al 2012):

absolute Lagegenauigkeit: $CE_{90} < 10\text{m}$, entsprechend $SX, SY < 4.7\text{m}$

absolute Höhengenaugigkeit: $LE_{90} < 10\text{m}$ ($SZ < 6\text{m}$)

relative Höhengenaugigkeit innerhalb einer $1^\circ \times 1^\circ$ Masche für Geländeneigungen von kleiner gleich 20%: $LE_{90} < 2\text{m}$, entsprechend $SZ < 1,2\text{ m}$ und für Geländeneigungen mit einer Neigung größer als 20%: $LE_{90} < 4\text{m}$, entsprechend $SZ < 2,4\text{ m}$

Wobei die absolute Genauigkeit durch Blockausgleichung und Einpassung auf ICESat-Höhenpunkte verbessert wird, womit die absolute Höhengenaugigkeit nur als Spezifikation angesehen werden muss und in der Regel deutlich besser sein wird.

Die Probleme der SAR-Bilder mit Layover sollen in den Gebirgsregionen durch Mehrfachaufnahme verringert werden.

Die italienische COSMO SkyMed Satellitenkonfiguration hat keinen Tandem-Flug, weswegen mit ihnen Höhenmodelle durch Radargrammetrie erstellt werden, was weltweite Höhenmodelle weitgehend ausschließt (CAPALDO ET AL. 2010).

4 Vergleich der Höhenmodelle

Zurzeit ist nur das GMTED 2010 als vollständig weltweites, kostenloses Höhenmodell im Internet verfügbar. Das GMTED 2010 ist mit 30, 15 und 7,5 arcsec Punktabstand (~230m am Äquator) vorhanden. Es basiert zu 70% auf SRTM-Daten. Als Nachfolgemodell des GTOPO 30 ist es durch die deutlich bessere Genauigkeit und Homogenität des SRTM-Höhenmodells dominiert und weist deutlich bessere morphologische Details auf.

Nahezu weltweite, kostenlose Höhenmodelle sind das InSAR SRTM-Höhenmodell, das auf der Shuttle Radar Topography Mission vom Februar 2000 beruht und das ASTER GDEM, das aus allen verfügbaren Höhenmodellen des optischen Stereosatelliten ASTER zusammengestellt wurde.

Das SRTM Höhenmodell wurde gegenüber der ersten Version um Ausreißer verbessert und es wurden Lücken gefüllt. Lücken tauchen, wie bei InSAR-Höhenmodellen üblich, durch Layover im Gebirge und auch in trockenen Sandwüsten auf in denen es keine Rückstrahlung gibt. Meist wurden Höhen aus dem Reference 3D (SPOT High Resolution Stereo) zur Lückenfüllung benutzt. Außerhalb der USA sind die SRTM Höhenmodelle nur mit einer Rasterweite von 3 arcsec (~92m am Äquator) vorhanden, es gibt allerdings eine Diskussion die Höhenmodelle auch mit 1 arcsec verfügbar zu machen.

Die erste Version des ASTER GDEM hatte vor Mittelung der Ergebnisse die einzelnen ASTER Höhenmodelle nicht optimal einander zugeordnet, wodurch morphologische Details verloren gingen. Dieses wurde mit der zweiten Version GDEM2, die seit Oktober 2011 verfügbar ist,

verbessert, außerdem wurden weitere Höhenmodelle zur Genauigkeitssteigerung hinzugefügt. Eine weitere Verbesserung durch zusätzliche Höhenmodelle ist in Arbeit und soll als GDEM3 im Laufe des Jahres 2013 in das Internet gestellt werden (Urai et al. 2013). Trotzdem sind die Genauigkeiten des ASTER GDEM etwas heterogen (Abb. 6 links), da die Anzahl der benutzten Bilder je Objektpunkt stark variiert. Als Mittelwert von 12 Testgebieten ergab sich eine Standardabweichung der Höhe von $SZ = 12,4m - 0,15 * \text{Bilder/Punkt}$. Dementsprechend weist ein Einzelmodell eine Genauigkeit von 12,1m auf, was bei den 15m Bodenauflösung der ASTER-Bilder 0,8 Objektpixeln entspricht. ASTER GDEM hat den Vorteil einer Rasterweite von 1 arcsec (~30m am Äquator).

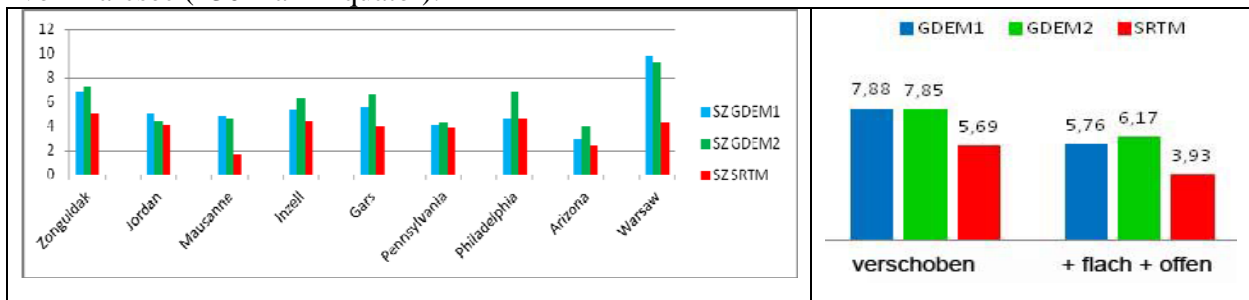


Abb. 6 Höhengenaugigkeiten von SRTM und ASTER GDEM, rechts: Mittel über alle Testgebiete

In den in Abb. 6 dargestellten, weltweit verstreut liegenden Untersuchungsgebieten, die stark unterschiedlichen Charakter aufweisen, zeigten sich Lagefehler der Höhenmodelle in der Größenordnung von 10m bis 30m, außerdem ist wie bei praktisch allen Höhenmodellen eine Abhängigkeit der Genauigkeit von der Geländeneigung vorhanden, die mit der Koppeschen Formel $SZ=A + B*\tan$ (Geländeneigung) gut modelliert werden kann. Für flaches Gebiet, das nicht durch Vegetation gestört ist, zeigt das ASTER GDEM eine Standardabweichung von etwa 6m und das SRTM Höhenmodell eine von etwa 4m.

Nicht nur die Genauigkeit und Rasterweite der Höhenmodelle, auch die morphologischen Details sind von Bedeutung. In Abbildung 7 ist deutlich der Einfluss der Rasterweite der zugrunde liegenden Höhenmodelle zu sehen. Mit den durchschnittlichen 80m Rasterweite des SRTM C-Band Höhenmodells sind Details der Höhenlinien nicht erfassbar. Das ist bei dem SRTM X-Band Höhenmodell, das vom DLR mit 1 arcsec Rasterweite verfügbar ist, allerdings große Lücken zwischen den Aufnahmestreifen hat, erheblich besser. Deutlich ist die morphologische Verbesserung vom ASTER GDEM1 zum GDEM2 erkennbar. Selbstverständlich sind mit den durchschnittlich 201m des GMTED2010 nicht die Details erkennbar, wie mit den anderen Höhenmodellen.

Weitere großflächige, allerdings kommerzielle, Höhenmodelle gibt es mit NEXTMap World 30, PlanetObserver Global 90m DEM, Reference 3D, NEXTMap und EURO-MAPS 3D. NEXTMap World 30 fusioniert SRTM mit 3 arcsec Punktabstand und ASTER GDEM zu einer Rasterweite von 1 arcsec. Außerdem werden systematische Höhenfehler durch ICESat Höhenpunkte verbessert. Das PlanetObserver Global 90m DEM bietet keinen besonderen Vorteil gegenüber dem SRTM Höhenmodell nachdem dessen Lücken gefüllt wurden. Basierend auf Bildern des High Resolution Stereo (HRS) auf SPOT5 (5m Objektpixelgröße in Orbitrichtung) wurden von ASTRIUM von etwa 40% der Landfläche Höhenmodelle mit einer Rasterweite von 1 arcsec durch Bildzuordnung erstellt. Die Standardabweichung der Höhe wird für Geländeneigungen bis 20% mit 6m, für Geländeneigungen >20% bis 40% mit 11m und für

Geländeneigungen >40% mit 18m angegeben. Damit liegt die Genauigkeit im flachen Gelände bei 1,2 Objektpixelgrößen.

Intermap Technologies erstellte auf eigene Rechnung von Westeuropa, den USA und Teilen anderer Länder ein lückenloses Höhenmodell durch Flugzeug-InSAR mit X-Band aus 10,4km Höhe mit einem Inzidenzwinkel zwischen 35° und 55°. Diese Höhenmodelle mit einer Rasterweite von 5m weisen die SAR-typischen Probleme in Städten und Gebirge auf, weswegen die Standardabweichung der Höhe allgemein für 40% mit <0,6m, für weitere 40% mit 0,6 bis 1,8m und für 20% mit größer als 1,8m angegeben wird.

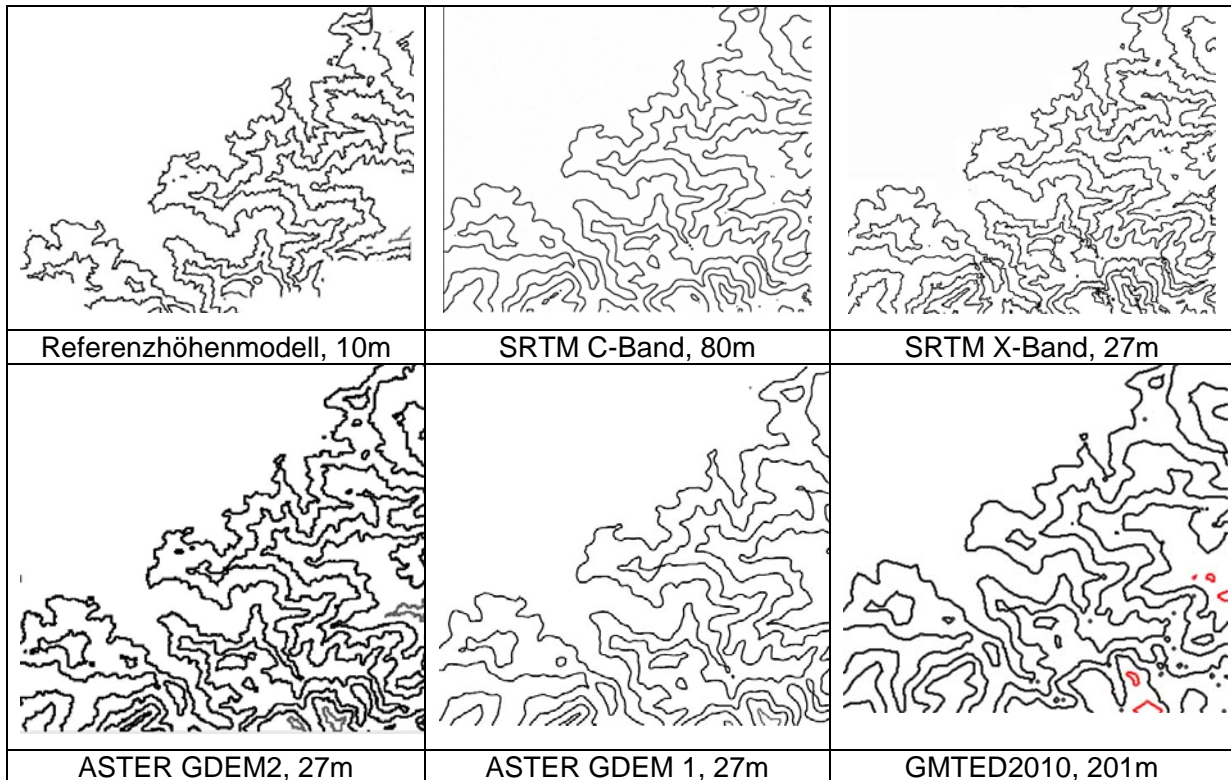


Abb.7: Höhenlinien basierend auf den verschiedenen Höhenmodellen mit Angabe der Rasterweite

Seit 2007 betreibt Euromap in Kooperation mit dem DLR eine Empfangsstation in Neustrelitz mit der Bilder des Stereosatelliten Cartosat-1 aufgenommen werden. Bis jetzt ist der gesamte Einzugsbereich von Neustrelitz fast lückenlos mit ein- bis dreifacher Überdeckung durch Cartosat-1 Stereomodelle aufgenommen. In Zusammenarbeit mit dem DLR wurde das EURO-MAPS 3D aus Cartosat-1 Stereobildern erstellt. Da Cartosat-1 eine eingeschränkte Genauigkeit der direkten Sensororientierung von etwa 200m hat, wurden die Cartosat-1 Höhenmodelle auf das SRTM-DOM eingepasst, wobei eine intern im DLR verbesserte Version des SRTM-Höhenmodells verwendet wurde, das die systematischen Höhenfehler von bis zu 4m mittels ICESat-Daten verbessert hat. Das DLR (D'ANGELO, REINARTZ 2012) ist jetzt dazu übergegangen die Cartosat-1-Szenenorientierungen durch sehr große Blöcke gemeinsam auf das SRTM-Höhenmodell zu orientieren um systematische Orientierungsfehler zu minimieren und durch die Szenenverknüpfung Modellanpassungsprobleme zu vermeiden. Die automatische Bildzuordnung erfolgt durch Semi-Global-Matching (SGM) (Hirschmüller 2008) um auch feine Objektdetails zu erfassen. SGM kann plötzliche Höhenunterschiede, wie sie in Städten und Gebirgen auftreten,

pixelgenau erfassen. Der Vorteil liegt vorwiegend in den morphologischen Details, wogegen die Höhengenaugkeit durch SGM nur geringfügig verbessert wird (Alobeid et al. 2010). Damit ist eine Rasterweite von 5m möglich. Euromap gibt die Lagegenaugkeit allgemein mit $SX=SY=4,6m$ und die Höhengenaugkeit mit $SZ \ll 6m$ an, wobei Uttenthaler et al. 2010 die absolute Genauigkeit innerhalb Europas für die Lage mit $SX=SY=3,1m$ und für die Höhe mit $SZ=3,1m$ angibt. Als relative Standardabweichung werden 2,5m genannt, was mit eigenen Untersuchungen (Jacobsen 2006) übereinstimmt.

5 Schlussfolgerungen

Sowohl mit optischen als auch mit Radaraufnahmen im X- und C-Band werden Höhenmodelle der sichtbaren Oberfläche und nicht des Bodens erstellt. Nur in teilweise offenen Gebieten kann durch Filterung ein DHM erzeugt werden. Nur mittels länger welliger SAR-Aufnahmen kann die Vegetation durchdrungen werden und somit die Höhe des Bodens bestimmt werden – mit Ausnahme der Gebäude. Durch flächenbasierte Zuordnung optischer Weltraumbilder, aber auch durch SGM, kann eine relative Höhengenaugkeit von etwa einer Objektpixelgröße erreicht werden. Diese Genauigkeit bezieht sich allerdings auf die sichtbare Oberfläche und nicht den Boden und gilt nur für flaches Gebiet da die Höhengenaugkeit deutlich von der Geländeneigung abhängig ist. Die absolute Genauigkeit ist von der Sensororientierung abhängig. Sind Passpunkte vorhanden, kann die absolute Genauigkeit mit der relativen Genauigkeit übereinstimmen. Dieses bezieht sich auf die Höhe, aber auch die Lage. Mit Lageverschiebungen der Höhenmodelle ist ohne Verwendung von Passpunkten zu rechnen. Die erreichte hohe Qualität der direkten Sensororientierung erlaubt für viele Anwendungen deren direkte Verwendung. Ist die direkte Sensororientierung nicht genau genug, kann durch Blockausgleichung für einen Verband von Höhenmodellen die relative Genauigkeit auf ein größeres Gebiet ausgedehnt werden und es ist eine Einpassung auf vorhandene Daten, wie das SRTM DOM und ICESat Höhenpunkte möglich. Dieses gilt sowohl für optische als auch SAR-Daten.

Durch optische Stereosatelliten oder InSAR-Aufnahmekonstellationen können großflächige Höhenmodelle erstellt werden, wie das ASTER GDEM, das SPOT HRS Reference 3D oder die großflächigen Cartosat-1 DOM, SRTM und das kommende TanDEM-X Höhenmodell zeigen. SAR-Bilder haben den Vorteil, dass sie nicht von der Wolkenbedeckung beeinträchtigt werden, somit können in kürzerer Zeit als mit den optischen Bildern große Flächen erfasst werden. Die Genauigkeit der Höhenmodelle ist von der Bodenauflösung abhängig, was sowohl für SAR als auch die optischen Daten gilt. Durch Mehrfachaufnahme kann die Genauigkeit gesteigert werden, was besonders für das ASTER GDEM gilt, aber auch bei TanDEM-X zutrifft. Auch die morphologischen Details sind von der Bodenauflösung abhängig, hier haben für Feinstrukturen die optischen Stereomodelle Vorteile, besonders wenn die Auswertung auf dem pixelbasierten SGM beruht.

Die kostenlos verfügbaren Höhenmodelle GMTED 2010, SRTM und ASTER GDEM haben alle eine beschränkte Genauigkeit und Auflösung, auch wenn dieses durch verbesserte Versionen gesteigert wurde und noch wird. Eine höhere Genauigkeit und Auflösung ist nicht kostenlos verfügbar.

6 Literaturverzeichnis

- ALOBID, A., JACOBSEN, K., HEIPKE, C., 2010: Comparison of Matching Algorithms for DSM Generation in Urban Areas from IKONOS Imagery, PERS 76(9). pp. 1041-1050
- D' ANGELO, P., REINARTZ, P., 2012: DSM based Orientation of Large Stereo Satellite Image Blocks, IntArchPhRS Vol XXXVIII-B1, pp 209 - 214
- BÜYÜKSALIH, G., BAZ, I., ALKAN, M., JACOBSEN, K., 2012: DEM Generation with WorldView-2 Images, IntArchPhRS Vol XXXVIII-B1
- CAPALDO, P., CRESPI, M., FRATARCANGELI, F., PIERALICE, F., 2010: Radargrammetric application with COSMO-SkyMed imagery: definition and implementation of an orientation model for Spotlight stereo pairs, EARSeL Symposium Paris, 2010
- GOURDINE, R., 2012: Competitive Overview, WorldView User Meeting, München 2012, <http://www.spaceimagingme.com/LinkClick.aspx?fileticket=g4Z2t9ICNZM%3D&tabid=172>
- Hirschmüller, H., 2008. Stereo Processing by Semiglobal Matching and Mutual Information, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 30(2): 328-341
- Huber M., Gruber, A., Wendleder, A. Wessel, B., Roth, A., Schmitt, A., 2012: The Global TanDEM-X DEM: Production Status and first Validation Results, IntArchPhRS Vol XXXVIII-B7
- JACOBSEN, K., 2004: DEM Generation by SPOT HRS, ISPRS Congress, Istanbul 2004, Int. Archive of the ISPRS, Vol XXXV, B1, Com1, pp 439-444
- JACOBSEN K., 2006: ISPRS-ISRO Cartosat-1 Scientific Assessment Programme (C-SAP) Technical report - test areas Mausanne and Warsaw, ISPRS Com IV, Goa 2006, IntArchPhRS Vol. 36 Part 4, pp. 1052-1056
- Urai, M., Tachikawa, T., Fujisada, H., 2012: Data Acquisition Strategies for ASTER Global DEM Generation, IntArchPhRS Vol XXXVIII-B4, pp 199-202
- Uttenthaler, A., Angelo, P., Reinartz, P., Hass, T., Carl, S., Barner, F., 2010: A Concept for a Standardized DSM Product Automatically Derived from IRS-P5 Cartosat-1, http://www.euromap.de/pdf/A_Concept_for_a_standardized_DSM_product_automatically_derived_from_IRS-P5_Cartosat-1.pdf