

Verbesserung grossflächiger DHMs mittels Fusion

Autor(en): **Papasaika-Hanusch, H. / Schütz, S. / Baltsavias, E.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Geomatik Schweiz : Geoinformation und Landmanagement = Géomatique Suisse : géoinformation et gestion du territoire = Geomatica Svizzera : geoinformazione e gestione del territorio**

Band (Jahr): **109 (2011)**

Heft 9: **Sonderheft**

PDF erstellt am: **11.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-236817>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Verbesserung grossflächiger DHMs mittels Fusion

Für praktisch alle Regionen der Erde existieren mehrere kleinmasstäbliche DHMs. Es fragt sich daher, ob durch die Fusion von zwei (oder mehr) DHMs eine Genauigkeitssteigerung möglich ist. Der Artikel gibt einen kurzen Überblick über einige wichtige grossflächige DHMs und untersucht das Potenzial der Fusion.

Il existe pour pratiquement toutes les régions du monde plusieurs MNT à petite échelle. La question est donc de savoir s'il est possible d'accroître la précision à l'aide de la fusion de deux (ou plusieurs) MNT. L'article donne un bref aperçu de quelques importants MNT de grande surface et examine le potentiel de ces fusions.

Praticamente per ogni regione della terra esistono diversi modelli digitali del terreno in piccola scala. Di conseguenza, è opportuno chiedersi se fondendo due (o più) modelli digitali del terreno sia possibile aumentare la precisione. Quest'articolo fa un spaccato su alcuni importanti modelli digitali del terreno estesi su grande superficie e verifica il potenziale offerto dalla fusione.

H. Papasaïka-Hanusch, S. Schütz,
E. Baltsavias, K. Schindler

Digitale Höhenmodelle (DHMs) sind ein grundlegender Geodaten-Layer. Dieser Artikel konzentriert sich auf *grossflächige* DHMs, also solche, die ganze Länder oder Kontinente abdecken. Zur Zeit sind nur Verfahren der flugzeug- oder satellitengestützten Photogrammetrie und Fernerkundung in der Lage, solche Flächen dicht abzudecken.

Technologien: Die Schätzung digitaler Geländemodelle basiert auf beobachteten Terrain-Punkten. Diese Messungen werden heute hauptsächlich mit drei Verfahren gewonnen. Das *automatische Matching* von Bildpunkten ist die klassische photogrammetrische Methode. Nachteile sind einerseits, dass nur das DOM gemessen werden kann und andererseits, dass in Schlagschatten und untexturieren Bereichen keine zuverlässige Messung möglich ist. Die Anwendung auf optische Satellitenbilder erlaubt es, grosse Flächen abzudecken. *Synthetic Aperture Radar (SAR) Interferometrie* ist in der Satellitenfernerkundung weit verbreitet. Ein wichtiger Vorteil ist, dass die Datenaufnahme auch in der Nacht und bei Bewölkung möglich ist. Der Einsatz verschiedener Wellenlängen erlaubt im Prinzip die Er-

zeugung von DOM (X- und C-Band) und DTMs (L- und vor allem P-Band), jedoch operieren die meisten Sensoren in den kürzeren Wellenlängen und liefern DOMs. Flugzeuggestützte SAR-Interferometrie wird ebenfalls vereinzelt genutzt. *Laser scanning* liefert hohe Punktdichte und Genauigkeit mit geringem Prozessierungsaufwand und hat sich im letzten Jahrzehnt für kleinere Flächen stark durchgesetzt. Ein weiterer Vorteil ist, dass die Laserpulse die Vegetation teilweise durchdringen, so dass mit derselben Aufnahme DOM und DTM erstellt werden können. Aufgrund der hohen Kosten ist es jedoch schwierig, wirklich grosse Flächen abzudecken. Gegenwärtig sind nur einige kleine Länder wie z.B. Holland vollständig erfasst, einige andere, darunter die Schweiz, sind in grossen Teilen abgedeckt.

1. Grossflächige DHMs

Im Folgenden werden einige wichtige DHMs mit grosser Abdeckung besprochen. Nicht behandelt werden solche, die durch Mosaikierung verschiedener Quellen entstanden sind (z.B. GTOPO30). Die Qualität dieser Modelle variiert stark und ist im Wesentlichen die der Basisdaten (z.B. ist GTOPO30 in Europa praktisch identisch mit SRTM).

SRTM (Shuttle Radar Topography Missi-

on) wurde im Februar 2000 vom Space Shuttle aus mit single-pass SAR Interferometrie aufgenommen (Farr et al. 2007). Die C-Band Aufnahme SRTM-C deckt alle Landmassen zwischen 60°N und 56°S ab, es gibt jedoch lokal Löcher. Die X-Band Aufnahme hat grosse systematische Lücken aufgrund einer geringeren Streifenbreite. Die Rasterweite von SRTM-C beträgt 30 m, ausserhalb der USA ist jedoch nur ein 90 m Raster öffentlich zugänglich. Die spezifizierte Genauigkeit (90% Konfidenz) liegt bei 15–20 m. Empirische Untersuchungen belegen, dass diese Genauigkeit weitgehend erreicht wurde.

ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) GDEM wurde mittels Stereo-Matching aus optischen Bildern (sichtbares Spektrum und nahes Infrarot) gewonnen, die zwischen 1999 und 2009 aufgenommen wurden. Alle Landmassen zwischen 83°N und 83°S sind mit einer Rasterweite von 30 m abgedeckt bis auf kleinere Lücken. Die spezifizierte Genauigkeit (95% Konfidenz) beträgt 20 m. Empirische Untersuchungen haben gezeigt, dass die Qualität recht inhomogen ist – in den meisten Kacheln werden die Spezifikationen eingehalten, es gibt jedoch vermehrt Bereiche mit grösseren groben Fehlern und vor allem systematischen Artefakten (Reuter et al. 2009).

Reference3D wird mittels Stereo-Matching aus optischen Bildern des SPOT-5 Satelliten erzeugt, die seit 2002 aufgezeichnet werden. Im Moment ist das DHM für Europa, Afrika, Mittelamerika sowie einige kleinere Regionen verfügbar. Daten sind für fast die gesamten Landmassen vorhanden und werden laufend prozessiert. Ausgeliefert wird eine Auflösung von 30 m, ohne Löcher. Die Genauigkeit von 10–30 m, je nach Geländeneigung, wurde empirisch bestätigt.

NEXTmap. Die Firma Intermap bietet ein DHM für die USA und Westeuropa an, das mittels flugzeuggestützter SAR Interferometrie erzeugt wurde. Die Rasterweite beträgt 5 m, die nominelle Genauigkeit 2 m in der Lage und 1 m in der Höhe, was Untersuchungen zufolge in offenem Terrain erreicht wird.

	SRTM-C	ASTER GDEM	Reference3D	Intermap	TanDEM-X
Aufnahme	02/2000	1999–2009	seit 2002	seit 2004	2011–2013
Technologie	InSAR	Bild-Matching	Bild-Matching	airborne InSAR	InSAR
Abdeckung	60°N-56°S	83°N-83°S	30% Landmassen	USA, Westeuropa	alle Landmassen
Rasterweite	90 m / 30 m	30 m	30 m	5 m	12 m
abs. Z-error@90%	16 m	17 m	10–30 m	1 m	<10 m
rel. Z-error@90%	10 m	-	5–28 m	1 m	<4 m
abs. XY-error@90%	20 m	25 m	15 m	2 m	<20 m
rel. XY-error@90%	15 m	-	8 m	2 m	<3 m
Kosten	gratis	gratis	~10 US\$ / km ²	~30 US\$ / km ²	unbekannt

Tab. 1: Charakteristiken wichtiger grossflächiger DHMs.

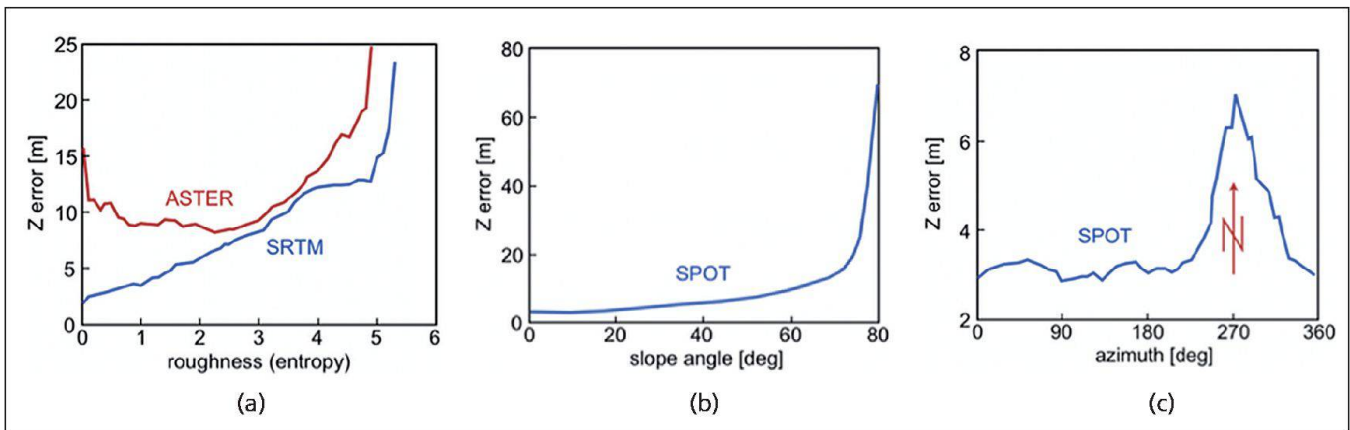


Abb. 1: Zusammenhang zwischen Terrain-Eigenschaften und Höhenfehlern: (a) Der Fehler von SRTM steigt mit zunehmender Rauigkeit, während er anfangs für ASTER sinkt – sehr geringe Rauigkeit heisst oft auch wenig Textur für die Bildkorrelation; (b) Die Fehler von SPOT Reference3D korrelieren mit der Neigung; (c) SPOT überfliegt die Schweiz morgens gegen 10:30, daher gibt es Schatten auf Nordhängen, die zu Zuordnungsfehlern führen.

Weitere DHMs. Mehrere andere Satelliten wurden zur DHM-Erzeugung benutzt, obwohl sie nicht primär dafür gedacht waren, beispielsweise Tandem-Interferometrie mit ERS-1 und ERS-2 und repeat-pass Interferometrie mit ALOS PALSAR. Es entstanden regionale und nationale Höhenmodelle (beispielsweise existiert ein Höhenmodell aus ERS-Daten für die gesamte Schweiz), darüber hinaus gibt es keine systematische Abdeckung. Auch aus hochauflösenden Satellitenbildern wurden DHMs berechnet, aufgrund der Kosten und der Verfügbarkeit der Daten aber nur für kleine Bereiche.

TanDEM-X ist eine Mission, die in naher Zukunft ein wesentlich genaueres globales DHM liefern soll. Die Mission, bestehend aus zwei Satelliten mit X-band SAR Sensoren im Formationsflug (Krieger et al.

2007), ist im Gange und soll im Lauf der nächsten 2.5 Jahre alle Landmassen mit ~12 m Rasterweite abdecken, mit einer Höhengenaugkeit von 10 m absolut, bzw. <4 m relativ.

2. DHM-Fusion

Aus der Liste wird ersichtlich, dass heute mehrere DHMs mit ähnlicher Genauigkeit für praktische jede Region der Erde existieren. Die Frage liegt nahe, ob es möglich ist, aus den bestehenden DHMs eines mit höherer Genauigkeit und/oder Zuverlässigkeit zu erzeugen. Die sauberste Lösung im Sinne der Parameterschätzung wäre, aus allen Rohdaten der verschiedenen Sensoren gemeinsam ein optimales Modell zu berechnen. Praktisch ist dies kaum möglich. Realistischer ist die Alter-

native, die bestehenden DHMs bestmöglich zu fusionieren. Die folgenden Ausführungen beschränken sich auf die Fusion von zwei DHMs.

Entscheidend für eine erfolgreiche Fusion ist es, den Einfluss der beiden DHMs auf das Ergebnis an jedem einzelnen Ort zu bestimmen. Diese Gewichte hängen ab von der relativen Höhengenaugkeit der Eingabe-DHMs und variieren normalerweise innerhalb jedes DHM, anhängig von der Sensortechnologie, dem beobachteten Gebiet und der Prozessierung (z.B. haben Modelle aus SAR-Interferometrie im Stadtgebiet grössere Fehler). Die Gewichte (manchmal als *height error maps* bezeichnet) sind im Prinzip ein Nebenprodukt der DHM-Berechnung, dennoch sind sie oft nicht erhältlich. In diesem Fall kann man versuchen, sie aus

	MEAN	RMSE	MAD	ABSMAX
ALOS	-1.0	19.3	6.6	280.6
SPOT	-1.6	15.4	4.4	349.1
Gew. Mittel	-1.0	10.9	4.1	202.8
sparse rep.	-1.0	10.9	4.2	205.1

Tab. 2: Fusionsergebnisse ALOS – SPOT. Alle Angaben sind Fehler gegenüber Laser-Höhen in (m).

lokalen Eigenschaften der Szene abzuschätzen.

Es gibt mehrere verschiedene mathematische Algorithmen, um zwei Raster-DHMs zu fusionieren. Im Folgenden werden zwei Methoden evaluiert. Die Experimente bestätigen, dass die Wahl der mathematischen Methode keine nennenswerten Unterschiede bewirkt. Die wohl einfachste Methode ist, die beiden DHMs auf dieselbe Rasterweite zu bringen und an jedem Punkt eine neue Höhe mittels gewichteter Mittelung zu berechnen. Dieser Ansatz wird öfters benutzt (z.B. Reinartz et al. 2005, Schultz et al. 1999). Ein alternativer Ansatz, der versucht, auch die lokale Geländeform zu berücksichtigen, basiert auf der Theorie der so genannten *sparse representations*. Dabei wird ein lokales Fenster des DHM als Linearkombination aus wenigen Basis-Fenstern dargestellt. Details sind in (Paspasika et al. 2011) zu finden.

Gewichte: Beide erwähnten Methoden (und auch andere) benötigen Gewichte,

um den Einfluss der beiden Eingabe-Höhen an einem Rasterpunkt zu bestimmen. Leider werden diese Genauigkeiten oft nicht angegeben, daher muss man versuchen, sie aus den Eingabedaten abzuleiten. Eine Analyse der Residuen verschiedener DHMs (gegenüber LiDAR-Referenzdaten) hat ergeben, dass tatsächlich klare Korrelationen zwischen Höhenfehlern und Oberflächeneigenschaften wie Hangneigung und Rauigkeit bestehen – Abbildung 1 zeigt einige Beispiele.

3. Experimente

Als Testgebiet dient ein Bereich um Thun. Verschiedene Arten von Geomorphologie (Seen, Flusstal, Hügel, alpine Berghänge) und Bodenbedeckung (Felder, dichte und weniger dichte Besiedlung, Wald, Fels und Geröll) sind vertreten. Das Gebiet umfasst ca. 12.0 x 17.5 km² und weist Höhenunterschiede bis 1600 m auf.

Testdaten: Es wurden drei verschiedene

DHMs jeweils paarweise fusioniert. Alle DHMs wurden vorgängig ko-registriert, aufgrund der unterschiedlichen Aufnahmezeitpunkte und Eindringtiefen der Sensoren bestehen jedoch systematische Restfehler vor allem im Vegetationsbereich.

SPOT Reference3D, Bodenauflösung 30 m, Aufnahmezeitpunkt 30.09.2002. Die empirische Genauigkeit über das gesamte Testgebiet beträgt 15 m. Da nur Genauigkeiten für drei grobe Neigungsklassen geliefert werden, wurde die Genauigkeit an den einzelnen Rasterpunkten aus der Hangneigung geschätzt.

ALOS/PALSAR DEM, Bodenauflösung 15 m, aus repeat-pass Interferometrie mit dem L-Band Sensor von ALOS, Aufnahmezeitpunkte: master 19.06.2006, slave 04.08.2006, erzeugt durch *sarmap S.A.* Die Genauigkeiten der einzelnen Höhenpunkte, geschätzt aus der Signalkohärenz, wurden mitgeliefert. Die empirische Genauigkeit über das gesamte Testgebiet beträgt 20 m.

ERS-1/2 Tandem DEM, Bodenauflösung 25 m, aus Tandem-Interferometrie mit den C-Band Sensoren von ERS-1 und ERS-2, mehrere Überflüge zwischen 1995 und 1998, erzeugt durch *sarmap S.A.* Auch hier wurden die Genauigkeiten mitgeliefert. Die empirische Genauigkeit beträgt 11 m.

Als **Referenzdaten** dient das DOM-AV von *swisstopo*, mit 2 m Bodenauflösung, aufgenommen 2000 mit einer Punkt-

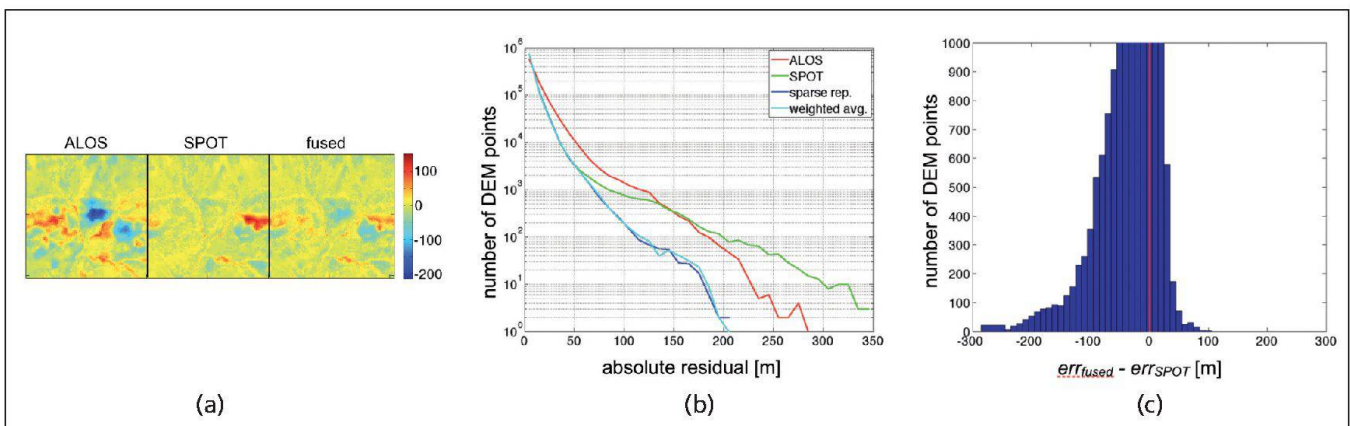


Abb. 2: Fusionsergebnisse ALOS – SPOT: (a) Beispiel für die Reduktion grober Fehler in den Eingabedaten; (b) Histogramme der absoluten Fehler; (c) Fehlerdifferenzen zwischen Fusionsergebnis und SPOT DHM (negative Werte bedeuten Verbesserung).

dichte von 1–2 Punkten / m². Die spezifizierte Genauigkeit beträgt 0.5 m in offenem Terrain und 1.5 m in Vegetation.

Fusion ALOS – SPOT

Das resultierende DHM hat 800x1167 Punkte mit einer Gitterweite von 15 m. Tabelle 2 zeigt quantitative Ergebnisse. Folgende Werte werden angegeben: die mittlere Abweichung (*mean*), der *root mean square error (RMSE)*, die *median absolute deviation from median (MAD)* als robustes Mass für die Genauigkeit ohne grobe Fehler und der *maximum absolute error (ABSMAX)* um die Grösse der groben Fehler zu quantifizieren.

Die Fusion verbessert die Genauigkeit um 29% gegenüber SPOT (bzw. 44% gegenüber ALOS). Abbildung 2(a) zeigt einen beispielhaften Ausschnitt, wo grobe Fehler durch die Fusion grösstenteils behoben werden. Abbildung 2(b) zeigt die Fehlerhistogramme der DHMs aus ALOS und SPOT sowie der fusionierten DHMs mittels gewichteter Mittelung oder *sparse representation* (die *y*-Achse ist zur besseren Lesbarkeit logarithmisch). Die Analyse zeigt, dass die Verbesserung hauptsächlich auf die Unterdrückung grober Fehler zurückzuführen ist: unter 50 m sind die Verteilungen von SPOT und den Fusionsergebnissen ähnlich, d.h. die zufälligen Fehler werden nicht reduziert. Beide Eingabe-DHMs haben jedoch grosse Grobfehler – ALOS insgesamt mehr, SPOT jedoch mehr extreme Fehler >200 m. Bei

	MEAN	RMSE	MAD	ABSMAX
ERS	0.1	10.8	3.1	144.6
SPOT	-1.6	15.3	4.5	345.3
Gew. Mittel.	-1.1	9.6	2.7	131.4
sparse rep.	-1.1	9.6	2.7	131.3

Tab. 3: Fusionsergebnisse ERS – SPOT. Alle Angaben sind Fehler gegenüber Laser-Höhen in (m).

Nutzung derselben Gewichte gibt es keine nennenswerten Unterschiede zwischen den beiden Fusionsalgorithmen. Abbildung 2(c) zeigt, wie sich die Fehlerverteilung gegenüber dem genaueren Eingabe-DHM ändert. Entlang der *x*-Achse sind die Differenzen zwischen den absoluten Höhenfehlern, ($err_{fused} - err_{SPOT}$), aufgetragen. Die Verteilung ist stark in den negativen Bereich verschoben, d.h. durch die Fusion werden wesentlich mehr Höhen verbessert als verschlechtert.

Fusion ERS – SPOT

Das resultierende DHM hat 480x700 Punkte mit einer Gitterweite von 25 m. Tabelle 3 zeigt quantitative Ergebnisse. Die Fusion verbessert die Genauigkeit um 11% gegenüber ERS (bzw. 37% gegenüber SPOT). Abbildung 3(a) zeigt einen Ausschnitt. Abbildung 3(b) zeigt die Fehlerhistogramme der DHMs von ERS und SPOT sowie der fusionierten DHMs. Auch in diesem Fall besteht die Verbesserung in einer Reduktion der Grobfehler >50 m.

Abbildung 3(c) zeigt, wie sich die Fehlerverteilung gegenüber dem genaueren Eingabe-DHM ändert. Wieder werden mehr Höhen verbessert als verschlechtert.

Fusion ALOS – ERS

Das resultierende DEM hat 800x1167 Punkte mit einer Gitterweite von 15 m. Das Experiment illustriert die Grenzen der DHM-Fusion. Die Eingabedaten haben sehr unterschiedliche Genauigkeit (ca. Faktor 2) und sind mit derselben Technologie entstanden (SAR-Interferometrie), daher weniger komplementär. Tabelle 4 zeigt, dass das ERS-DHM nicht signifikant verbessert werden konnte. Eine genauere Analyse bestätigt, dass selbst in Gebieten grosser Neigung und Rauigkeit, wo auch ERS bekanntermassen grobe Fehler aufweist, keine Verbesserung erreicht wurde. Abbildung 4(a) zeigt die Höhenfehler von ALOS, ERS und dem Fusionsergebnis – das Ergebnis ist praktisch identisch mit ERS. Abbildung 4(b) untermauert, dass die gewichtete Mittelung die

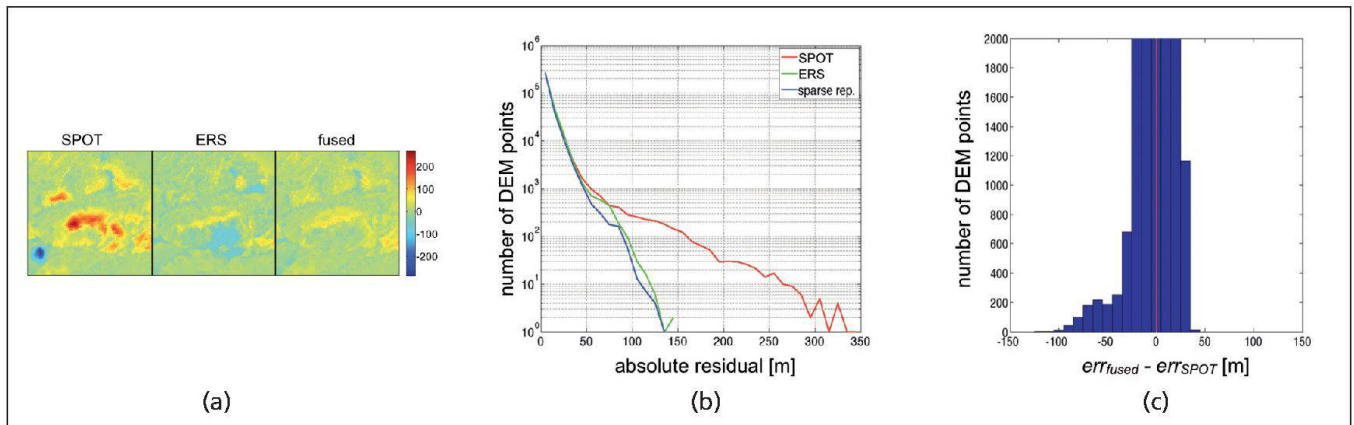


Abb. 3: Fusionsergebnisse ERS – SPOT: (a) Beispiel für die Reduktion grober Fehler in den Eingabedaten; (b) Histogramme der absoluten Fehler; (c) Fehlerdifferenzen zwischen Fusionsergebnis und ERS DHM (negative Werte bedeuten Verbesserung).

	MEAN	RMSE	MAD	ABSMAX
ALOS	-1.0	19.3	6.6	280.6
ERS	0.1	10.8	3.1	159.2
Gew. Mittel	0.1	10.7	3.1	159.3
sparse rep.	0.1	10.7	3.1	156.8

Tab. 4: Fusionsergebnis ERS - ALOS. Alle Angaben sind Fehler gegenüber Laser-Höhen in (m).

Höhen von ERS fast unverändert übernimmt, während die *sparse representation* Methode <10% aller Punkte modifiziert, jedoch ohne eine Verbesserung zu erreichen.

4. Diskussion

Die Experimente zeigen, dass durch DHM-Fusion merkliche Verbesserungen mit vergleichsweise geringem Aufwand möglich sind – in unserer Evaluation bis zu 29% gegenüber dem genaueren Eingabe-DHM. Verringert werden vor allem grobe Fehler, die in allen grossflächigen DHMs nennenswert vorhanden sind. Am günstigsten scheint aufgrund der komplementären Fehlercharakteristik die Fusion von DHMs auf Basis unterschiedlicher Sensortechnologien, z.B. SAR Interferometrie mit optischer Bildkorrelation.

Die Wahl des mathematischen Formalismus für die Fusion ist relativ unkritisch, entscheidend sind möglichst korrekte Gewichte. Es wurde gezeigt, dass brauchbare Gewichte wenn nötig auch aus lokalen geomorphologischen Eigenschaften geschätzt werden können. Das Verfahren benötigt allerdings Trainingsdaten, bestehend aus Geländehöhen mit für die verwendeten Eingabedaten repräsentativer Fehlerverteilung und Referenz-

daten zur Bestimmung der tatsächlichen Fehler.

Es wurde nur die Fusion von zwei Eingabe-DHMs untersucht. Zwar sind die Methoden einfach auf mehrere Eingabe-Datensätze zu erweitern, aber empirische Ergebnisse fehlen. Des Weiteren ist die Verwendung von mehr als zwei Modellen besonders viel versprechend für die Suche nach groben Fehlern. Eine weitere Anwendung, die noch empirisch untersucht werden sollte, ist die Fusion von hochauflösenden photogrammetrischen DHMs mit LiDAR.

Als Fehlermass wurden Höhenfehler bezogen auf genaue Referenzdaten benutzt, weil dieses Mass unabhängig von spezifischen Anwendungsproblemen ist. Für bestimmte Probleme mögen andere Qualitätskriterien wichtiger sein – z.B. kann es das Ziel in bestimmten hydrologischen Anwendungen sein, die Wasserscheiden und Einzugsgebiete zu erhalten, selbst um den Preis grösserer Höhenfehler.

Dank

Wir danken sarmap S.A. und swisstopo für die Bereitstellung der verwendeten Daten und KTI für die finanzielle Unterstützung im Rahmen des Projekts «Synergos».

Anmerkungen:

Farr, T. G., Rosen, P. A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., Kobrick, M., Paller, M., Rodriguez, E., Roth, L., Seal, D., Shaffer, S., Shimanda, J., Umland, J., Werner, M., Oskin, M., Burbank, D., Alsdorf, D. (2007): The Shuttle Radar Topography Mission. *Reviews of Geophysics*, Vol. 45, Issue 2.

Knöpfle, W., Strunz, G., Roth, A. (1998): Mosaicking of digital elevation models derived by SAR interferometry. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 32, Part 4, pp. 306–313.

Krieger, G., Moreira, A., Fiedler, H., Hajnsek, I., Werner, M., Younis, M., Zink, M. (2007): TanDEM-X: A satellite formation for high-resolution SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 45, Issue 11, pp. 3317–3341.

Papasaika, H., Kokiopoulou, E., Baltasavias, E., Schindler, K., Kressner, D. (2011): Fusion of digital elevation models using sparse representations. *Photogrammetric Image Analysis*, München, Deutschland, erscheint 10/2011.

Reinartz, P., Müller, R., Hoja, D., Lehner, M., Schröder, M. (2005): Comparison and fusion of DEM derived from Spot HRS stereo data and SRTM data and estimation of forest heights. *EARSeL Workshop on 3D Remote Sensing*, 10–11 June, Porto, Portugal (on CD-ROM).

Reuter, H. I., Nelson, A., Strobl, P., Mehl, W., Jarvis, A. (2009): A first assessment of ASTER GDEM tiles for absolute accuracy, relative accuracy and terrain parameters. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Vol. 5, pp. 240–243.

Schultz, H., Riseman, E.M., Stolle, F.R., Woo, D.-M. (1999): Error detection and DEM fusion using self-consistency. *IEEE International Conference on Computer Vision*, Vol. 2, pp. 1174–1181.

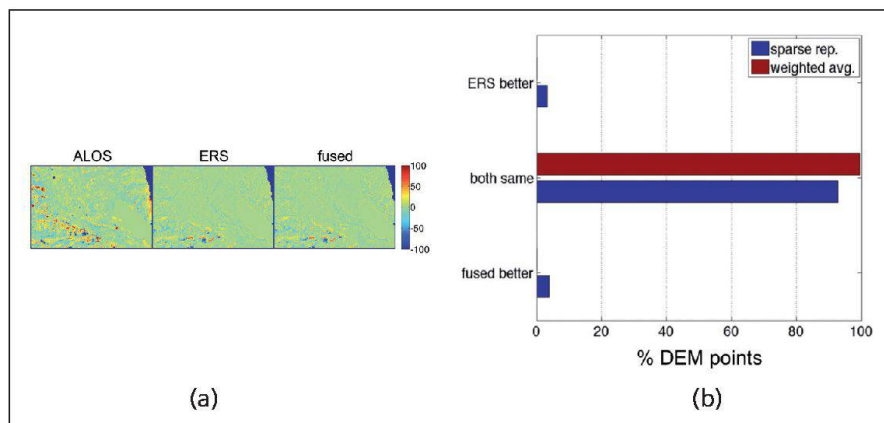


Abb. 4: Fusionsergebnis ALOS – ERS: (a) Keine Verbesserung, das Ergebnis ist im gesamten Testgebiet praktisch identisch mit dem ERS-DHM; (b) die quantitative Analyse bestätigt: es gibt kaum Änderungen gegenüber ERS.

Haris Papasaika-Hanusch
 Stefan Schütz
 Emmanuel Baltasavias
 Konrad Schindler
 Institut für Geodäsie und
 Photogrammetrie
 ETH Zürich
 Wolfgang-Pauli-Strasse 15
 CH-8093 Zürich
 konrad.schindler@geod.baug.ethz.ch
 stephan.schuetz@lunar.ch