

# Die Ableitung von Passpunkten aus hochauflösenden Fernerkundungsdaten (ALS und IFSAR) zur Georeferenzierung von Alpenvereinskarten

Armin HELLER

Dieser Beitrag wurde nach Begutachtung durch das Programmkomitee als „reviewed paper“ angenommen.

## Zusammenfassung

Alpenvereinskarten zeichnen sich durch ihren hohen Detaillierungsgrad im Maßstab 1:25.000 insbesondere für Anwendungen im Hochgebirge aus. Sie sind für wissenschaftliche Kartierungen, zur Orientierung, aber auch zur Routenplanung und Digitalisierung von GPS-Routen daher bestens geeignet und werden deshalb anderen Kartenwerken, die meist nur im Maßstab 1:50.000 verfügbar sind, häufig vorgezogen. Einziger Nachteil ist die historisch- und herstellungsbedingte geometrische Verzerrung innerhalb einzelner Kartenblätter. Diese können mit Standardtransformationen bei der Georeferenzierung im Allgemeinen nicht berücksichtigt werden. Spezielle Transformationsmethoden, wie etwa die maschenweise Affintransformation, Spline-Funktionen oder die Transformation mit radialen Basisfunktionen ermöglichen zwar diese Entzerrungen, benötigen hierfür aber eine vergleichsweise hohe Anzahl an Passpunkten. Diese wiederum sind im Hochgebirge, etwa auf Orthophotos, kaum zu erkennen – andere Kartenwerke sind aufgrund des Maßstabes und der damit verbundenen Generalisierung nur bedingt geeignet. In den folgenden Ausführungen werden daher mehrere Möglichkeiten aufgezeigt, wie in dieser speziellen Situation Passpunkte aus ALS-Daten (*Airborne Laserscanning*) und aus IFSAR-Daten (*InterFerometric Synthetic Aperture Radar*) zur Georeferenzierung gewonnen werden können.

## 1 Einleitung

Die heutige Alpenvereinskartographie mit den beiden Standorten in München (Deutscher Alpenverein) und Innsbruck (Österreichischer Alpenverein) blickt auf eine beinahe 150-jährige Tradition zurück. Von den Anfängen 1862 bis heute sind mehrere Entwicklungsstadien der Kartographie durchlaufen worden. In der klassischen Phase (1902 – 1936) waren zunächst aufwändige Geländearbeiten notwendig, um die Erstentwürfe der Karten mithilfe eines Messtisches (Messtischtachymetrie) vor Ort aufzunehmen. Gegen Ende des 19. Jahrhunderts wurde dann dieses Verfahren von der Stereophotogrammetrie abgelöst. In dieser zweiten Phase kam zunächst die terrestrische Stereophotogrammetrie zum Einsatz. Hierbei wurden von zwei überhöhten Standorten aus zwei Bilder aufgenommen, die dann mit einem eigens dafür entwickelten Stereoautographen ausgewertet wurden. Diese Einzelauswertungen mit jeweils unterschiedlichen Entfernungen zwischen Kamera und Gelände wurden dann schließlich zu einem Kartenblatt kombiniert. Lücken und Abschattung mussten mit

anderen Methoden ergänzt oder geschätzt werden. Diese spezielle Aufnahmetechnik erklärt die unterschiedlich starken Verzerrungen innerhalb eines Kartenblattes, die erst beim Übergang ins digitale Zeitalter (Georeferenzierung und Digitalisierung der Karten) zum Problem wurden. Seit etwa 1966, mit Einführung der Luftbildaufnahme (Aerophotogrammetrie), gehören diese geometrischen Inkonsistenzen der Vergangenheit an. (ARNBERGER 1970, AURADA 1962)

Damit nun das gesamte Kartenwerk den heutigen digitalen Anforderungen gerecht werden kann, wurden bereits mehrere Untersuchungen durchgeführt. Hierzu sei auf HELLER (2001) „Die Alpenvereinskarte als Grundlage für geographische Informationssysteme“, PENZKOFER (2001) „Entzerrung und Georeferenzierung von Alpenvereinskarten“ und HELLER (2002) „Georeferenzierung von Alpenvereinskarten mit radialen Basisfunktionen“ verwiesen. Zusammenfassend kann daraus gefolgert werden:

- Die geometrischen Verzerrungen sind nicht nur bei den einzelnen Kartenblättern, sondern auch innerhalb einzelner Kartenblätter nicht vernachlässigbar.
- Der Aufdruck eines UTM-Gitternetzes macht die Karten nur bedingt GPS-tauglich.
- Die normalerweise zum Einsatz kommende affine Transformation oder polynomiale Transformationen liefern keine zufriedenstellenden Ergebnisse.
- Die maschenweise Affintransformation, Spline-Funktionen oder die Transformation mit radialen Basisfunktionen liefern gute Ergebnisse, benötigen aber eine sehr hohe Anzahl an Passpunkten.
- Beschriftungen und Symbole können unter diesen Transformationen sehr in Mitleidenschaft gezogen werden und sollten deshalb nicht transformiert werden.

Damit stellt sich die Frage, wie Passpunkte in ausreichender Zahl gewonnen werden können, um einerseits dem hohen Detaillierungsgrad im Maßstab 1:25.000 zu entsprechen und andererseits keine aufwendigen Geländebegehungen (z. B. GPS-Messungen) durchgeführt werden müssen.

Als Testgebiet für die folgenden Untersuchungen wurde die Alpenvereinskarte „Silvretta-gruppe“ (Nr: 26) gewählt, da für dieses Gebiet alle erforderlichen Grundlagendaten zur Verfügung stehen. Die Karte wurde zwar aus Luftbildern erstellt – für die hier spezifische Fragestellung ist dies aber unerheblich. Als Software kam ArcGIS 10 (ESRI Inc.) und TNTmips 2010 (Microimages Inc.) zum Einsatz.

## 2 Grundlagen

Die Idee besteht nun darin, mithilfe von hochauflösenden Geländedaten über die Höhe homologe Punkte in der Karte und im Geländemodell zu finden und mit der damit verbundenen Lagegenauigkeit dann zusätzliche Passpunkte abzuleiten. Es eignen sich alle markanten Geländepunkte, besonders aber die zahlreichen Höhenkoten. Im AV-Kartenblatt Silvretta stehen damit zu den sonst üblichen Passpunkten zusätzlich über Tausend (!) Punkte zur Verfügung, die weder in anderen Kartenwerken verzeichnet, noch in einem Orthophoto erkennbar sind (siehe Abb. 1).

Zunächst wird das Kartenblatt im Geländemodell positioniert. Dies kann etwa mit einer affinen Transformation erfolgen. In der Folge wird dann versucht mithilfe von Höhenlinien

und den hydrologischen Funktionen (*flow direction, flow accumulation, watershed, identify sinks, stream to feature*, etc.) zusätzliche Passpunkte zu generieren. Eine allfällige Korrektur der Höhenangaben wäre ebenso möglich. Zunächst jedoch zu den bereits erwähnten Transformationsmethoden und den Geländedaten.

## 2.1 Die Transformationsmethoden

In dieser speziellen Situation kommen zur Georeferenzierung nur Transformationsmethoden infrage, die zwischen den Passpunkten eine unterschiedliche lokale Anpassung erlauben. Hier eine kleine Auswahl:

- Die maschenweise Affintransformation (*piecewise affin*): Bei der maschenweisen Affintransformation wird zunächst zwischen den Passpunkten trianguliert und anschließend jede einzelne Dreiecksfacette mit einer affinen Transformation umgerechnet. Diese Methode steht etwa mit TNTmips (Microimages, Inc.) zur Verfügung.
- Die Anpassungstransformation (*adjust*): Auch bei dieser Methode wird eine Polynomtransformation mit einer TIN Interpolation kombiniert. Es wird zunächst eine Polynomtransformation mit zwei Gruppen von Passpunkten durchgeführt. Anschließend erfolgt mithilfe der TIN-Interpolation eine Anpassung der Passpunkte (Quell- und Zielpasspunkte). Diese Transformationsmethode kann etwa mit dem Georeferenzierungstool von ArcGIS (ESRI, Inc.) durchgeführt werden.
- Radiale Basisfunktionen (*radial basis functions*): Bei dieser Methode werden um die Passpunkte „Hütchen-“ oder „Glockenfunktionen“ gelegt und in den Zwischenbereichen ein Ausgleich der Lageverzerrungen vorgenommen. Radiale Basisfunktionen sind an den Passpunkten exakt und stehen etwa mit der Digitalisierungssoftware Didger (Golden Software, Inc.) zur Verfügung.
- Die Spline-Transformation: Die Spline-Transformation optimiert ebenso in erster Linie die lokale Genauigkeit. Die Methode ist der Spline-Interpolation sehr ähnlich: Es werden Polynome, meist vom Grad 3 oder Grad 5, stückweise so zusammengesetzt, dass diese lückenlos und glatt (stetig differenzierbar) ineinander übergehen. Damit ist diese Methode zwangsweise an den Passpunkten exakt. Die Spline-Transformation kann etwa mit ArcGIS (Esri, Inc.) durchgeführt werden.

Für weitere Informationen wird auf die Dokumentation der jeweiligen Softwareprodukte verwiesen.

## 2.2 Airborne Laser Scanning Daten

Die topographische Geländeaufnahme mit flugzeuggestützten Laserscanningssystemen ist heute eines der leistungsfähigsten Verfahren, um digitale Geländemodelle zu erstellen. Mit einer Auflösung von etwa 1 m und einer vertikalen Genauigkeit von 20-30 cm sind diese Geländemodelle heute vielerorts flächendeckend vorhanden und werden besonders wegen der möglichen Unterscheidung des Oberflächenmodells (DOM) und des Geländemodells (DGM) für zahlreiche Fragestellungen eingesetzt. Die Daten für diese Untersuchung wurden vom Landesvermessungsamt Vorarlberg zur Verfügung gestellt.

Für weitere Informationen hierzu siehe etwa ALBERTZ (2009) oder GEIST et al. (2004).

## 2.3 IFSAR-Daten

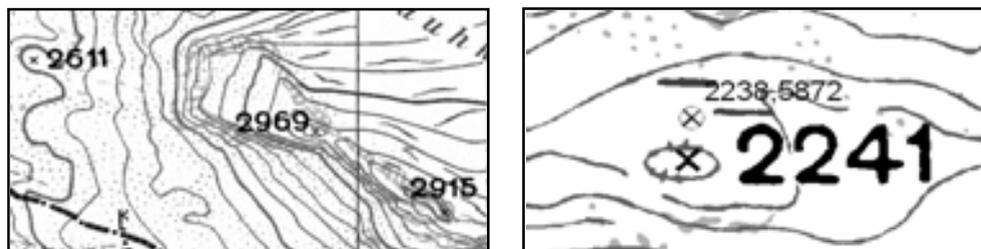
*InterFerometric Synthetic Aperture Radar* (IFSAR) ist ebenso ein aktives, flugzeuggetragenes Fernerkundungsverfahren, bei dem von zwei unterschiedlichen Sensorpositionen aus die Phasenverschiebung des Radarsignals verwendet wird, um die Oberfläche zu rekonstruieren (Radarinterferometrie). Für diese Studie wurden dankenswerterweise die Daten von der Firma Intermap Technologies ([www.intermap.com](http://www.intermap.com)) zur Verfügung gestellt. Das digitale Geländemodell hat eine Auflösung von 5 m, die Lagegenauigkeit wird mit ca. 4 m (x,y) bzw. 2 m (z) angegeben. Die Produktpalette umfasst ein digitales Oberflächenmodell (DOM), ein digitales Geländemodell (DGM) sowie zwei Varianten orthorektifizierter Radar Bilder (Graustufen und Farbe). Die Daten sind flächendeckend für fast ganz Europa erhältlich. Für weitere Informationen siehe (ALBERTZ 2009) und INTERMAP (2010).

## 3 Die Ableitung von homologen Punkten

Für die folgenden Untersuchungen wurden sowohl die ALS-Daten, als auch IFSAR-Daten verwendet und verglichen. Die ALS-Daten wurden zusätzlich zu Versuchszwecken auch auf 5 Meter Auflösung aggregiert.

### 3.1 Methode „Höchster Punkt innerhalb“

Bei dieser Methode hat es sich bewährt, zunächst mithilfe des Geländemodells die Isolinien abzuleiten. Damit die aus dem DGM abgeleiteten Höhenlinien mit denen der Karte möglichst gut übereinstimmen, ist eventuell vorher eine Angleichung der Höhen des Geländemodells vorzunehmen, beziehungsweise zu überprüfen, ob die Höhen der Kartenprojektion (Geoid) mit denen des Geländemodells (eventuell Ellipsoid) vergleichbar sind. Je nach Kartenblatt sind wiederum unterschiedliche Bezugspunkte für das Nullniveau definiert. In Österreich beziehen sich die Kartenhöhen meist auf den Pegel Triest und werden mit GHA (Gebrauchshöhen Adria) bezeichnet. Dieser Nullpunkt für Österreich bezieht sich auf den Mittelwasserstand der Adria in Triest im Jahre 1875 – Referenzpunkt Hutbiegl. Die Abweichung zu den ellipsoidischen Höhen (z. B. UTM – WGS84) betragen in der Silvretta durchschnittlich 49 m.



**Abb. 1:** Höhenkoten in der AV-Karte (links), „höchster Punkt innerhalb – *Highest Point*“ mit dem *Military Analyst* aus den ALS-Daten abgeleitet (rechts)

Um nun im Geländemodell die Höhenkoten der Karte zu finden, leistet der *Military Analyst* (Esri Inc.) von ArcGIS gute Dienste: Innerhalb eines mit der Maus aufgezogenen Rechtecks wird wahlweise der höchste oder niedrigste Punkt in diesem Bereich ermittelt und in einer Shapedatei gespeichert. Ebenso können Höhenlinien zu Polygonen geschlossen werden und anschließend mithilfe der Toolbox (*Highest/Lowest Point by Polygon*) des *Military Analyst* berechnet werden. Es empfiehlt sich jedoch in diesem Fall, die infrage kommenden Höhenlinien zunächst über eine Attributabfrage (Länge und/oder Höhe) zu selektieren.

Zwischen den beiden eingesetzten Geländemodellen zeigen sich hier keine nennenswerten Unterschiede.

### 3.2 Methode „Lokale Extrempunkte“

Lokale Extrempunkte wie Maxima, Minima oder Sattelpunkte können auch aus den Pixelwerten der Nachbapixel erkannt werden: So liegt etwa ein lokales Maximum vor, wenn alle Nachbarn niedrigere Werte besitzen – ein lokales Minimum, wenn alle Nachbarn höhere besitzen. Auf ähnliche Weise können auch Sattelpunkte, Geländekanten etc. erkannt werden. Diese Algorithmen werden normalerweise eingesetzt, um aus einem Rasterdatensatz Punkte mit erhöhtem Informationsgehalt zur Erstellung eines TIN (*Triangulated Irregular Network*) abzuleiten (FOWLER et al 1979). Im vorliegenden Fall wurden die lokalen Extrempunkte mit TNTmips bestimmt und in einem separaten Layer in *normal – maximum – minimum – flat – saddle* etc. klassifiziert: Die IFSAR-Daten liefern dabei viele Höhenkoten, die problemlos zugeordnet werden können. Die ALS-Daten hingegen lassen zu viele Punkte erkennen, sodass eine eindeutige Zuordnung ohne weitere Selektion in aller Regel nicht möglich ist.

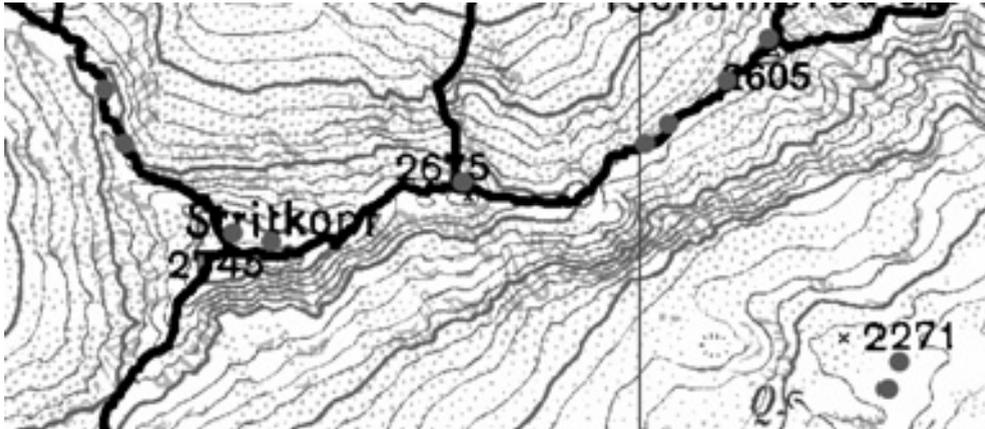
### 3.3 Methode „Einzugsgebiete“

Digitale Geländemodelle können nur dann für hydrologische Fragestellungen eingesetzt werden, wenn sie keine Senken (abflusslose Bereiche), sogenannte *sinks* enthalten. Diese entstehen meist als Artefakte der Interpolation oder durch Ungenauigkeiten bei der Datenaufnahme oder Datenprozessierung. Diese Senken müssen zuerst entweder als Ausnahme deklariert werden (Seen, Dolinen, etc.) oder mit einem entsprechenden Algorithmus (*fill sinks*) bereinigt werden.

Der Ablauf hydrologischer Modellierungen sieht nun vor, dass jede Rasterzelle ihre Abflussrichtung kodiert. In den meisten Programmen ist der sogenannte D8-Algorithmus implementiert: Mit dem *single flow* Algorithmus entwässert jedes Pixel in das tiefstgelegene Pixel aller möglichen acht Nachbapixel. Die Richtung wird dabei nach einem eindeutig definierten System (1-2-3-4-5-6-7-8 oder 2-4-8-16-32-64-128-256) kodiert und als Pixelwert dem neuen Rasterdatensatz zugewiesen. Mithilfe dieser Abflussrichtung kann nun die Abflussakkumulation berechnet werden. Diese richtet den Blick nach oben und legt für jede Zelle fest, wie viele darüber liegende Zellen in sie hineinmünden. Damit werden normalerweise hydrologische Einzugsgebiete abgegrenzt. Als Konsequenz dieser Konstruktion ergibt sich nun, dass Pixel mit einer ganz geringen Abflussakkumulation (null oder eins) an Graten, Kanten, Sättel oder Gipfeln liegen müssen. Diese wiederum sind bevorzugte Geländestellen, die in der Karte mit einer Höhenkote versehen sind.

Hier hat sich gezeigt, dass insbesondere im Laserscan zu viele Pixel infrage kommen. Die Grate werden zwar nachgezeichnet, eine Zuordnung in der Karte ist allerdings wegen der großen Anzahl nur sehr schwer möglich.

Mithilfe der Abflussrichtung können jedoch hydrologische Einzugsgebiete abgegrenzt werden. Diese – eventuell in einen Vektorlayer konvertiert – zeichnen die Geländekanten (*ridges*) nach und sind, mit dem Höhenwert versehen, eine sehr gute Orientierung und für Passpunkte im Bereich von Graten und Geländekanten bestens geeignet.

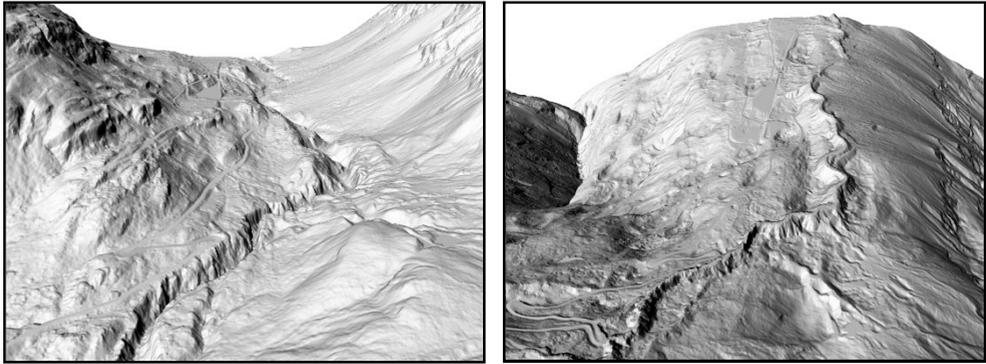


**Abb. 2:** Einzugsgebiete (ALS-Daten) und lokale Maxima (IFSAR-Daten) im Bereich eines Kammverlaufes.

### 3.4 Methode „Inverses Geländemodell“

Höhenkoten in der Karte befinden sich meist an exponierten Stellen im Gelände. Diese sind häufig entlang von Graten, Geländekanten, Gipfeln aber auch sehr oft an kleinen, relativen Erhebungen zur Umgebung zu finden. Hier nun ein alternatives Verfahren wie diese Kuppen noch erkannt werden können:

- Zuerst werden alle Senken gefüllt. Das digitale Geländemodell hat also keine abflusslosen Bereiche mehr.
- Durch Multiplikation mit  $(-1)$  aller Höhenwerte wird das Geländemodell quasi am Meeresniveau gespiegelt, beziehungsweise invertiert.
- Falls negative Höhenwerte Probleme bereiten, kann das digitale Geländemodell bei Bedarf wieder um einen fixen Betrag angehoben werden. In den Alpen sind 5.000 m ausreichend.
- Dieses neu entstandene, sozusagen umgestülpte Geländemodell hat nun wieder zahlreiche Senken – nämlich genau die gesuchten Kuppen und Gipfel, die jetzt mit *identify sinks* gefunden werden können. Da das Geländemodell in seiner x-y-Lage unverändert geblieben ist, sind diese Senken zu den Kuppen lagertreu und können als Passpunkte identifiziert und verwendet werden.



**Abb. 3:** *Hillshade* Geländemodell (links), *hillshade* inverses Geländemodell (rechts)

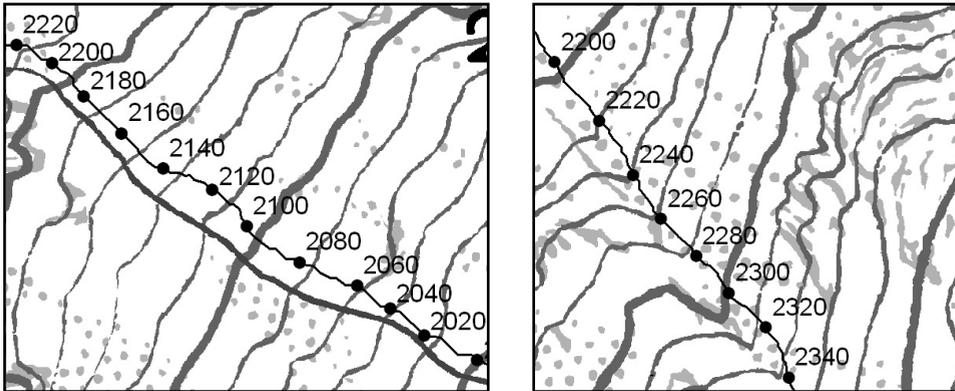
Für diese Methode sind die ALS-Daten weniger geeignet, da aufgrund der hohen Auflösung extrem viele *sinks* gefunden werden und eine Zuordnung in der Karte deshalb nicht mehr möglich ist. Die IFSAR-Daten hingegen klassifizieren sehr viele *sinks* in unmittelbarer Nähe der Höhenknoten. Auch nach einem *resampling* auf 5 m Auflösung ergeben sich bei den ALS-Daten nach wie vor Zuordnungsprobleme in der Karte.



**Abb. 4:** Aus dem inversen Geländemodell abgeleitete *sinks* der IFSAR-Daten (schwarze Pfeile)

### 3.5 Methode „Abflusslinien“

Die Standardfunktionen hydrologischer Modellierungen bieten mithilfe der Abflussakkumulation und eines Schwellenwertes die Möglichkeit, ein synthetisches Gerinnenetz aus einem Geländemodell abzuleiten und in einen Vektorlayer (*stream to feature*) zu konvertieren. Wird dieser nun mit den Höhenlinien des Geländemodells verschnitten, so liegen diese Punkte an den Schnittstellen der Höhenlinien mit den Gerinnen. Diese sind in der Karte ebenfalls sehr gut erkennbar und können als homologe Punkte zur Georeferenzierung herangezogen werden. Das gleiche Verfahren funktioniert auch an Rinnen ohne Gewässer, die am Isoypsenbild in der Karte gut erkennbar sind (siehe Abb. 5).



**Abb. 5:** Schnittpunkte eines Wasserlaufes aus dem DGM mit den Höhenlinien (links). Synthetischer Wasserlauf in einer steilen Rinne (rechts), beide aus ALS-Daten abgeleitet.

In diesem Fall sind die aus dem ALS-Geländemodell abgeleiteten Gerinne, verglichen mit dem Orthophoto, viel präziser als die der IFSAR-Daten. Allerdings können in diesem Fall geringe Abweichungen (25 m entsprechen 1 mm in der Karte) auch akzeptiert werden. Die IFSAR-Daten zeigen hier allerdings kein einheitliches Bild: Vor allem in flacheren Bereichen sind die Abweichungen der IFSAR-Daten nicht mehr akzeptabel (bis zu 100 m). Die aus den ALS-Daten abgeleiteten Gerinne hingegen folgen oftmals auch den Straßen und Wegen und können ebenso nicht ohne Verifizierung übernommen werden.

## 4 Bewertung und Ausblick

Die oben beschriebenen Verfahren bieten mehrere Möglichkeiten, um aus hochauflösenden Fernerkundungsdaten (ALS und IFSAR) Passpunkte zur Georeferenzierung im hochalpinen Gelände gewinnen zu können. Speziell in Situationen, wo diese im Orthophoto und in anderen Kartenwerken nicht erkennbar sind, ist dadurch die Möglichkeit gegeben, lokal unterschiedlichen Transformationsmethoden gerecht zu werden, da diese stets eine hohe Anzahl an Passpunkten benötigen. Die Verfahren eignen sich prinzipiell für alle Datensätze, die lokal unterschiedlich verzerrt sind.

ALS-Daten mit einem Meter Auflösung zeigen, von wenigen Situationen abgesehen, ihre Stärke bei der Ableitung des Gerinnenetzes und der Abgrenzung hydrologischer Einzugsgebiete, bzw. den daraus abgeleiteten Geländekanten. Als lokale Maxima werden allerdings so viele Punkte ausgewiesen, dass eine eindeutige Zuordnung nur schwer möglich ist. Die Lagegenauigkeit von 1 m (das entspricht auf einer Karte im Maßstab 1:25.000 noch 0,04 mm) ist für den hier diskutierten Zweck keineswegs erforderlich. Die aus ALS-Daten abgeleiteten Höhenlinien lassen auch klein strukturierte Geländeformen erkennen und erleichtern die Orientierung.

IFSAR-Daten mit 5 m Auflösung (das entspricht auf einer Karte im Maßstab 1:25.000 noch 0,2 mm) sind für die hier vorliegende Fragestellung in Bezug auf die Lagegenauigkeit völ-

lig ausreichend. Bei den Höhenwerten, auch mit anderen Daten verglichen, sind die ALS-Daten überlegen. Die abgeleiteten Gerinne sind teilweise stark generalisiert, sodass sie für die Passpunktgewinnung nur bedingt infrage kommen. Auch die abgeleiteten Höhenlinien lassen im steilen und stark akzentuierten Gelände keine Kleinformen mehr erkennen. Dies muss nicht unbedingt auf die Auflösung von 5 m zurückzuführen sein, sondern könnte auch eine direkte Folge der Radar-Aufnahmetechnik sein: Bereiche die im Radarschatten liegen, bleiben ohne reflektiertes Signal und müssen mit Daten anderer Herkunft ergänzt werden. Wie diese im Hochgebirge häufig auftretenden Bereiche ergänzt worden sind, ist leider nicht bekannt. Für die Erkennung von lokalen Extrempunkten sind die IFSAR-Daten hingegen bestens geeignet.

Da die hier vorgestellten Methoden nur auf Standardverfahren hydrologischer Ableitungen aus Geländemodellen zurückgreifen, kommt prinzipiell jede Software in Betracht, die diese anbietet. Auch die Möglichkeit im Rahmen der Georeferenzierung von Rasterdaten eine Transformationsmethode zu wählen, die lokal unterschiedliche Verzerrungen berücksichtigen kann, wird in den meisten GIS-Produkten zur Verfügung gestellt.

Da IFSAR-Daten bereits flächendeckend vorhanden sind, ALS-Daten dies bald sein werden, bleibt eigentlich nur noch der Kostenfaktor: Die Kosten von IFSAR-Daten machen etwa ein Drittel der ALS-Daten aus.

## Literatur

- ALBERZ, J. (2009): Einführung in die Fernerkundung – Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern. Darmstadt.
- ARNBERGER, E. (1970): Die Kartographie im Alpenverein. Wissenschaftliche Alpenvereinshefte, 22. München und Innsbruck.
- AURADA, F. (1962): 100 Jahre Alpenvereinskartographie, die Alpenvereinskarte und ihre Entwicklung. In: Arbeiten der Gruppe für Natur- und Hochgebirgskunde und alpine Karstforschung der Sektion Edelweiß des ÖAV, 6/1962. Wien.
- BRUNNER, K. (2001): Topographisch-geodätische Aufnahmeverfahren der Alpenvereinskarten. Wissenschaftliche Alpenvereinshefte, 34, S. 9-18. München.
- DANA, P. H. (1999): Map Projections, Global Positioning System Overview, Coordinate System Overview. Austin. [http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/mapproj/mapproj\\_f.html](http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/mapproj/mapproj_f.html).
- FOGEL, D. N. (2001): Image Rectification with Radial Basis Functions: Application to RS/GIS data Integration. [http://www.ncgia.ucsb.edu/conf/SANTA\\_FE\\_CD-ROM/sf\\_papers/fogel\\_david/santafe.html](http://www.ncgia.ucsb.edu/conf/SANTA_FE_CD-ROM/sf_papers/fogel_david/santafe.html).
- FOWLER, R. J. & LITTLE, J. (1979): Automatic extraction of Irregular Network digital terrain models. SIGGRAPH '79 Proceedings of the 6th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, New York, S. 199-207.
- GARTNER, G. (1998): Die Alpenvereinskartographie – oder Gedanken über den Begriff „Qualität“ in der Kartographie. Wiener Schriften zur Geographie und Kartographie, 11, S. 163-168. Wien.

- GEIST, T., HELLER, A. & STÖTTER, J. (2004): Digitale Geländemodelle aus Airborne Laser Scanning Daten und ihre Anwendung für glaziologische Fragestellungen. In: STROBL, J., BLASCHKE, T. & GRIESEBNER, G. (Hrsg.): *Angewandte Geoinformatik 2004*. Beiträge zum 16. AGIT-Symposium, Salzburg. Wichmann, Heidelberg, S. 163-171.
- GONG, P. (2001): *Remote Sensing and Image Analysis*. <http://www.cnr.berkeley.edu/~gong/textbook>.
- HELLER, A. (2001): Die Alpenvereinskarte als Grundlage für Geographische Informationssysteme. *Wissenschaftliche Alpenvereinshefte*, 34, S. 61-81. München.
- HELLER, A. (2002): Georeferenzierung von Alpenvereinskarten mit radialen Basisfunktionen. In: STROBL, J., BLASCHKE, T. & GRIESEBNER, G. (Hrsg.): *Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XIV*. Beiträge zum AGIT-Symposium 2002, Salzburg. Wichmann, Heidelberg, S. 162-171.
- INTERMAP (Hrsg.) (2010), *Product Handbook V.4.4*, Denver.
- LILLESAND, T. M., KIEFER, R. W. & CHIPMAN, J. W. (2003): *Remote Sensing and Image Interpretation*. New York.
- NAGEL, G. & WELSCH, W. M. (Hrsg.) (1999): *Karten der Berge – Vom Messtisch zur Satellitenvermessung*, Katalog zur Ausstellung des Bayerischen Landesvermessungsamtes und des Deutschen Alpenvereins. München.
- ÖSTERREICHISCHER ALPENVEREIN (Hrsg.) (1999): *Alpenvereinskarte 1:25.000*, Nr. 26, Silvrettagruppe, Wien.
- PENZKOFER, M. (2001): Entzerrung und Georeferenzierung von Alpenvereinskarten. *Wissenschaftliche Alpenvereinshefte*, 34, S. 19-59. München.
- REITER, B. (2008): *Neue Methoden der Alpenvereinskartographie – Datenerfassung bis Kartenerstellung mit ArcGIS*. Diplomarbeit (unveröffentlicht), Innsbruck.
- SCHIRMER, H. (1996): Die Kartographie des Alpenvereins. In: KRETSCHMER, I. & KRITZ, K. (Hrsg.): *Kartographie in Österreich '96* (= Wiener Schriften zur Geographie und Kartographie, 9, S. 88-95). Wien.