



MOMS-2P und RADARSAT: Neue Sensoren zur stereometrischen Geländemodellerstellung

Johannes Raggam ¹, Karlheinz Gutjahr ², Alexander Almer ³

¹ *Institut für Digitale Bildverarbeitung, Joanneum Research Forschungsgesellschaft, Wastiangasse 6, 8010 Graz*

² *Institut für Digitale Bildverarbeitung, Joanneum Research Forschungsgesellschaft, Wastiangasse 6, 8010 Graz*

³ *Institut für Digitale Bildverarbeitung, Joanneum Research Forschungsgesellschaft, Wastiangasse 6, 8010 Graz*

VGI – Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation **85** (4), S. 267–280

1997

BibT_EX:

```
@ARTICLE{Raggam_VGI_199733,  
  Title = {MOMS-2P und RADARSAT: Neue Sensoren zur stereometrischen Geländemodellerstellung},  
  Author = {Raggam, Johannes and Gutjahr, Karlheinz and Almer, Alexander},  
  Journal = {VGI -- Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation},  
  Pages = {267--280},  
  Number = {4},  
  Year = {1997},  
  Volume = {85}  
}
```





MOMS-2P und RADARSAT: Neue Sensoren zur stereometrischen Geländemodellerstellung

Hannes Raggam, Karlheinz Gutjahr und Alexander Almer, Graz

Zusammenfassung

Seit Herbst 1995 bzw. Frühjahr 1996 sind im Rahmen der kanadischen RADARSAT-Mission einerseits sowie der deutsch-russischen MOMS-Priroda-Mission die aktuellsten Sensoren im Mikrowellen- sowie im optischen Spektralbereich im Einsatz. Sowohl der RADARSAT-Sensor als auch der MOMS-2P-Sensor sind mit der Möglichkeit ausgestattet, unter optimierten Bedingungen Stereobildpaare aufnehmen zu können, mit welchen eine automationsgestützte Ableitung von digitalen Geländemodellen möglich ist. Die dazu notwendige Prozessierungskette wird vergleichend für die optischen und für die SAR-Daten für ein Testgebiet in der Steiermark abgearbeitet. Die Genauigkeiten der abgeleiteten digitalen Geländemodelle werden im Vergleich zu Referenzdaten sowie zu theoretischen Genauigkeitsüberlegungen analysiert und dokumentiert.

Abstract

Since autumn 1995 and spring 1996, respectively, the most recent sensors in the microwave as well as in the optical spectral range are in operation on board of the Canadian RADARSAT-mission on the one hand and of the German-Russian MOMS-Priroda-mission on the other hand. The RADARSAT sensor and the MOMS-2P sensor are equipped with the capability to acquire stereo image pairs under optimized dispositions, which may be used further for the automated generation of digital terrain models. The individual steps of the related processing chain are described for optical data in comparison with SAR-data for a test area in Styria. The accuracy of the digital terrain models being generated is analysed and documented in comparison to reference data as well as theoretical error analyses.

1. Einleitung

In Analogie zur klassischen Photogrammetrie läßt sich aus einem Stereo-Bildpaar der digitalen Fernerkundung eine dreidimensionale Geländeinformation ableiten. Aufgrund der Tatsache, daß die Daten in digitaler Form vorliegen, bietet sich die Möglichkeit der automationsgestützten Ableitung von homologen Punktpaaren und damit eine weitgehend automatische Generierung eines digitalen Geländemodells (DGM) an. Bei den satellitengetragenen Aufnahmesystemen der Fernerkundung erfolgt die Aufnahme von geeigneten optischen wie auch SAR-Stereo-Bildpaaren grundsätzlich unter unterschiedlichen Aufnahmewinkeln zufolge aus dem Nadir verschwenkter Sensoren. Die Entwicklung von Sensoren, welche dafür geeignete Stereobilder liefern, reicht im optischen Bereich von SPOT über JERS bis zur jüngsten MOMS Mission, während im SAR-Bereich der SIR-C-Sensor und eben der kanadische RADARSAT-Sensor mit dieser Möglichkeit ausgestattet sind.

Das Institut für Digitale Bildverarbeitung der Joanneum Research Forschungsgesellschaft beschäftigt sich seit Jahren mit der Möglichkeit der Extraktion von 3-dimensionaler Information aus stereoskopischen Fernerkundungsdaten,

wobei die Ursprünge auf die Auswertung von analogen Bildpaaren von zunächst SAR-Sensoren und später optischen SPOT-Daten zurückgehen [16], [17]. Seit Anfang der 90er-Jahre wurde die vorhandene Expertise auf die Bearbeitung digitaler Bildpaare übertragen [20]. Die damit verbundenen Methoden wurden in das am Institut entwickelte und mittlerweile kommerziell verfügbare Remote Sensing Software Package Graz (RSG) integriert, welches auch laufend an die Anforderungen von neuen Sensoren angepaßt wird [10], [11]. Die jüngsten Neuerungen beziehen sich unter anderem auf die Sensoren MOMS-2P und RADARSAT.

Im Zusammenhang mit der MOMS-Priroda-Mission wird von der österreichischen Arbeitsgruppe für Fernerkundung das globale Projekt MISSION bearbeitet, in dessen Rahmen sich das Institut für digitale Bildverarbeitung mit thematischen Auswertungen der neuen MOMS-2P Daten hinsichtlich Biotopkartierung beschäftigt, welche sich naturgemäß nicht von geometrischen Aspekten trennen lassen.

Für die kanadischen RADARSAT-Daten hat das Institut den Status eines Principle Investigators, welcher primär mit der Möglichkeit verbunden ist, kostenlos Bilddaten von ausgewählten Testgebieten beziehen zu können. Beide Missio-

nen werden im folgenden Abschnitt in einem Überblick näher vorgestellt.

2. Aufnahmesysteme

2.1. Das MOMS-2P-Aufnahmesystem

Nach drei erfolgreichen Weltraumeinsätzen befindet sich der deutsche opto-elektronische Zeilenabtaster MOMS-02 nun seit April 1996 für 18 Monate an Bord der russischen Raumstation MIR im PRIRODA-Modul.

Wie bisher besteht die MOMS-2P Kamera aus einem Stereo-Modul mit den drei panchromatischen Kanälen 5, 6 und 7 und einem Multispektral-Modul mit den Kanälen 1 bis 4 (siehe Abbildung 1 bzw. Tabelle 1). Das Stereo-Modul setzt sich aus drei Zeilenarrays zusammen, welche aus Nadiraufnahme sowie um je 21.4 Grad nach vorwärts bzw. nach rückwärts geneigten Blickrichtungen stammen. Bei der senkrechten Aufnahme des Stereomodus wird eine Bodenelementgröße von 6 x 6 Metern realisiert, während Vor- bzw. Rückblick wie auch die 4 Multispektral-Kanäle eine Pixelgröße von 18 x 18 Metern haben. Bei den bisherigen MOMS-Missionen betrug die nominelle Bildpunktgröße zum Vergleich 4.5 x 4.5 Meter bzw. 13.5 x 13.5 Meter.

Die Vorteile der aktuellen MOMS-Priroda Mission liegen im längeren Beobachtungszeitraum, in der maximal erreichbaren geographischen Breite von $\pm 51.6^\circ$ und im multisensoralen Zusammenspiel der erdkundenden Sensoren im Priroda-Modul. Zur hochgenauen Positionsbestimmung der MOMS-2P Kamera dienen GPS- und Kreiselsysteme.

Aufgrund der sehr hohen Aufzeichnungsdichte können nicht alle Kanäle simultan aufgenommen werden. Dies hat zur Folge, daß verschiedene Betriebsmodi vom Boden aus gesteuert und maximal vier Kanäle in einem Modus aufgezeichnet werden.

Kanal	Modus	Orientierung	Bandbreite	Bodenelement
1	M/S	Nadir	449 - 511 nm	18 x 18 m ²
2	M/S	Nadir	532 - 576 nm	18 x 18 m ²
3	M/S	Nadir	645 - 677 nm	18 x 18 m ²
4	M/S	Nadir	772 - 815 nm	18 x 18 m ²
5	HR	Nadir	512 - 765 nm	6 x 6 m ²
6	Stereo	+21.4°	524 - 763 nm	18 x 18 m ²
7	Stereo	-21.4°	524 - 763 nm	18 x 18 m ²

Tabelle 1: Geometrische und radiometrische Eigenschaften der MOMS-2P-Bildkanäle

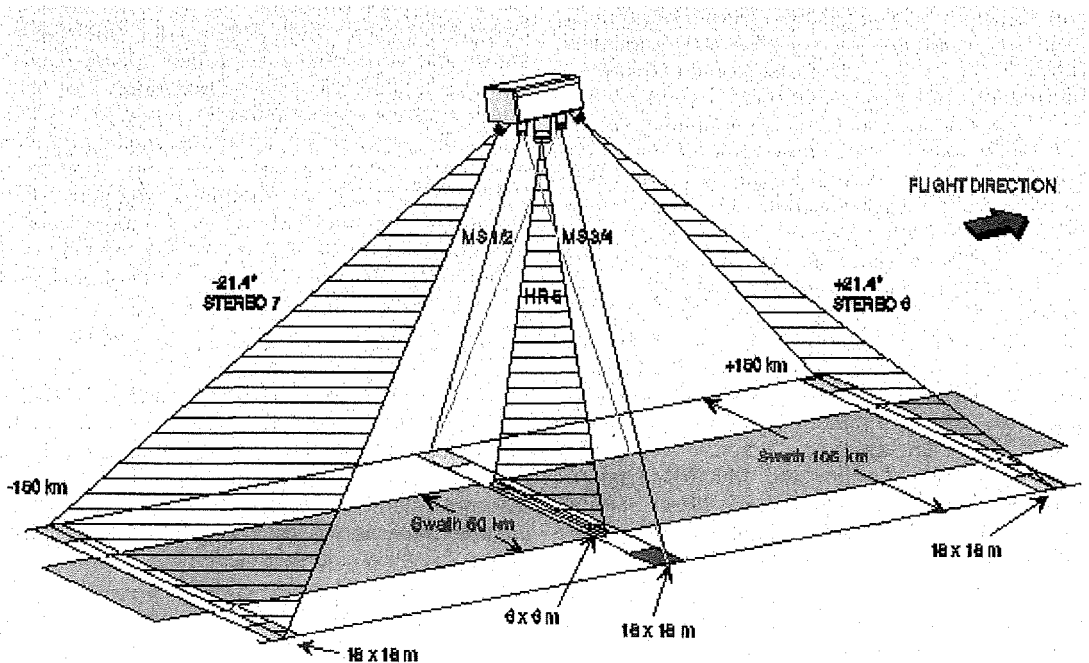


Abb. 1: Aufnahmegeometrie von MOMS-2P (<http://www.nz.dlr.de/moms2p>)

2.2. Das RADARSAT-Aufnahmesystem

Von der Canadian Space Agency (CSA) und dem Canadian Center for Remote Sensing (CCRS) wurde am 4. November 1995 der RADARSAT Erdbeobachtungssatellit gestartet. Die Bahnparameter der in allen drei Achsen stabilisierten Plattform sind in Tabelle 2 zusammengefaßt. Interessant in diesem Zusammenhang ist die Zeit des aufsteigenden Knotens um 18.00 Uhr. Diese späte equatorial crossing time soll Konflikte mit anderen Fernerkundungssatelliten beim Datenempfang der Bodenstationen vermeiden.

Bahnhöhe	798 km
Bahnneigung	98.6°
Bahn	sonnensynchron
Umlaufzeit	100.7 min

Tabelle 2: RADARSAT-Bahnparameter

Wichtigstes Instrument an Bord ist eine synthetische Apertur Radar (SAR) Ausstattung, die im C-Band mit einer Frequenz von 5.3 Ghz sowie einer Wellenlänge von 5.6 cm mißt, wobei die ausgesandte und empfangene Strahlung horizontal polarisiert ist. Das System kann in vielen verschiedenen Modi arbeiten (siehe Tabelle bzw. Abbildung 2). Je nach Aufnahmemodus sowie den Umständen, daß pro Aufnahmemodus noch zusätzlich unter verschiedenen Blickwinkeln gemessen werden kann, ergeben sich naturgemäß auch Unterschiede im Wiederholungszyklus. Durch die Möglichkeit der Aufnahme von RADARSAT-Bildpaaren unter verschiedenen Blickwinkeln ergeben sich im Vergleich z.B. zu den

europäischen ERS-1/2 Sensoren auch verbesserte Möglichkeiten zur stereometrischen Auswertung von RADARSAT-Stereodaten.

Modus	Auflösung R x A [m]	Looks	Streifenbreite	Blickwinkel
Standard	25 x 28	4	100 km	20°-49°
Wide (1)	30-48 x 28	4	150 km	20°-45°
Wide (2)	32-45 x 28	4	150 km	20°-45°
Fine	8-9 x 9	1	50 km	35°-49°
Scan SAR (N)	50 x 50	2-4	305 km	20°-40°
Scan SAR (W)	100 x 100	4-8	510 km	20°-50°
Extended (H)	19-22 x 28	4	75 km	50°-60°
Extended (L)	28-63 x 28	4	170 km	10°-23°

Tabelle 3: RADARSAT-Aufnahmemodi

3. Stereometrische Prozessierungskette

Im folgenden wird die stereometrische Verarbeitungskette, wie sie auch im verwendeten Programmpaket RSG implementiert ist, kurz beschrieben. Diese umfaßt grundsätzlich

- die geometrische Modellierung, d.h. die Herleitung und Optimierung eines parametrischen Abbildungsmodells für die Stereo-Bilddaten;
- die automatische Bildkorrelation zwecks Auffindung einander entsprechender Bildpunkte, welche in der Regel registrierte Bilddaten voraussetzt;
- die DGM-Erstellung mittels Berechnung der entsprechenden 3D-Koordinaten sowie der nachfolgenden Interpolation eines regelmäßigen Raster-DGMs.

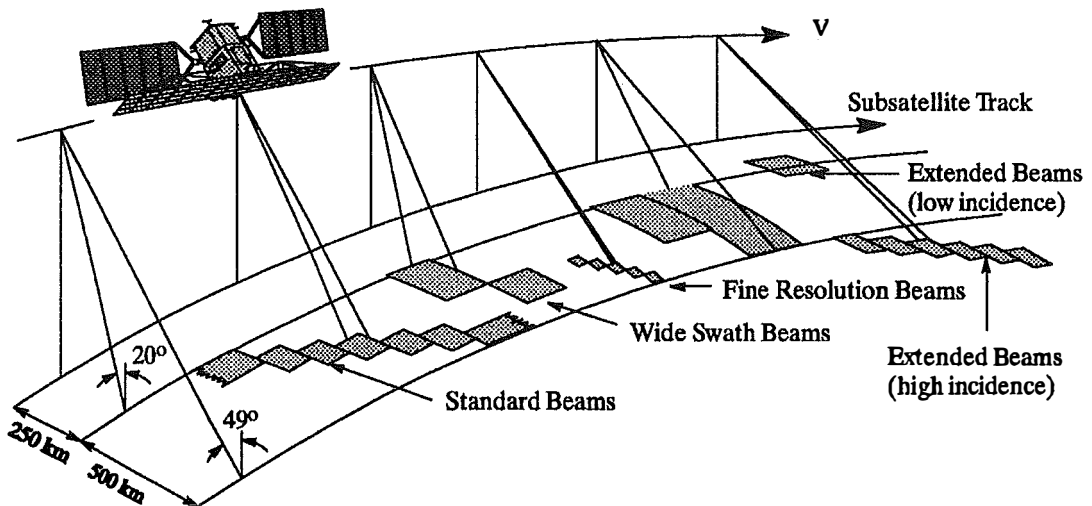


Abb. 2: Aufnahmegeometrie des RADARSAT-Sensors (aus [13])

3.1. Geometrische Modellierung

Die verwendeten Verfahren zur geometrischen Modellierung von Fernerkundungs-Stereodaten wurden am Institut für Digitale Bildverarbeitung in Anlehnung an den in der Photogrammetrie verwendeten Bündelausgleich entwickelt. Die für die Ausgleichung notwendigen, linearisierten Abbildungsgleichungen sind beispielsweise in [18] beschrieben.

Näherungswerte für die parametrischen Abbildungsmodelle werden aus den Headerdaten, welche in der Regel begleitend zu den Bilddaten verfügbar sind, entnommen. Die Ausgleichung selbst erfolgt nach der Methode der kleinsten Quadrate, wodurch letztendlich ein konsistentes Stereomodell entsteht. Im Ausgleichsverfahren selbst können homologe Punkte berücksichtigt werden, die in beiden Bildern gemessen wurden und zu zusätzlichen Bedingungen führen.

Aussagen über die Genauigkeit des Stereomodells können durch Vergleich der gegebenen dreidimensionalen Paßpunktkoordinaten mit den aus dem Stereomodell abgeleiteten Koordinaten getroffen werden. Dies liefert dreidimensionale Residuenvektoren, welche die Stereo-Aufsetzgenauigkeit bzw. die a-priori Stereo-Auswertegenauigkeit repräsentieren.

3.2. Automatische Bildkorrelation

Die Bildkorrelation bildet den „Kern“ der automationsgestützten stereometrischen Geländemodellgenerierung. Dabei wird die Fähigkeit des menschlichen Betrachters, in einem Stereobildpaar homologe Bildpunkte zu identifizieren, durch eine Bildkorrelation im Sinne eines gezielten Vergleiches von Grauwertverteilungen bzw. von Merkmalsvektoren ersetzt. Das Ergebnis der automatischen Korrelation bilden Punktpaare, deren geometrische Differenzen (Parallaxen) durch die Pixelkoordinaten in beiden Bildern definiert sind.

Da die beiden Bilder hinsichtlich Orientierung und Pixel-Auflösung durch die unterschiedlichen Aufnahmewinkel ungleich sind, muß in der Regel in einem Vorverarbeitungsschritt ein Bild an das andere angeglichen werden. In der Photogrammetrie gibt es hierfür die Prozedur des epipolaren Resamplings in eine Kernstrahlengeometrie [3], [4]. In der Fernerkundung genügt eine grobe Registrierung der beiden Bilder in eine pseudo-epipolare Geometrie. Dadurch kann der Suchbereich für die Bildkorrelation wesentlich eingeschränkt und damit die Rechenzeit verkürzt werden, bzw. wird die Bildkorrelation im Falle von

geometrisch sehr unterschiedlichen Daten überhaupt erst ermöglicht.

Weitere Optimierungsmöglichkeiten für die Bildkorrelation sind

- der Aufbau einer Bildpyramide, wodurch nur ein relativ kleiner Suchbereich in der jeweiligen Pyramidenebene abzuarbeiten ist, was einerseits die Sicherheit der Korrelationsergebnisse erhöht und andererseits einen entsprechenden Rechenzeitgewinn bewirkt;
- Korrelation auch in die umgekehrte Richtung (engl.: backmatching) zur Verbesserung der Sicherheit der Korrelationsergebnisse.

Grundsätzlich ist im Programmpaket RSG eine Reihe von Korrelationsmethoden implementiert. Für die vorhandenen Bilddaten wurden hiervon zwei auf völlig unterschiedlichen Ansätzen basierende Korrelationsalgorithmen eingesetzt:

Feature-Vector-Korrelation

Bei dieser Methode wird versucht, die einander entsprechenden Punkte durch Kombination von mehreren Merkmalen (features) – das sind nichts anderes als gefilterte Bilder oder anderweitige Derivate der Ausgangsdaten – aufzufinden. Die resultierenden Feature-Bilder beschreiben dann für jedes Pixel einen Merkmalsvektor im linken bzw. rechten Bild. Für ein im ersten Bild definiertes Referenzpixel wird im zweiten Bild innerhalb eines definierten Suchbereichs versucht, das zugehörige Pixel über die minimale euklidische Distanz der einzelnen Merkmalsvektoren zu finden.

Die Wahl der „richtigen“ Filter, d.h. derjenigen Merkmale, welche die Strukturen der Bilder möglichst gut repräsentieren, und die Gewichtung der einzelnen features gegeneinander erfolgt mittels Tests in Trainingsgebieten der Bilddaten und über Erfahrungswerte des Anwenders.

Dieses Verfahren wurde in der bestehenden Form am Institut für Digitale Bildverarbeitung entwickelt und ist in [15] detaillierter beschrieben.

Produktmomentkorrelation

In der Produktmomentkorrelation erfolgt die mathematische Beschreibung des Korrelationskriteriums durch den Produktmoment-Korrelationskoeffizienten, welcher über eine definierte Matrix von Bildpunkten als die normierte Kreuzkovarianz zwischen diskreten Signalwerten hergeleitet wird. Ergebnis ist ein

Verschiebungsvektor, der die relative Lage zwischen Referenzpixel im ersten Bild und einem Suchpixel im zweiten Bild angibt. Der maximale resultierende Korrelationskoeffizient innerhalb eines Suchbereichs gibt die wahrscheinlichste Lage des dem Referenzpixel entsprechenden Suchpixels an. Die Werte des Korrelationskoeffizienten liegen zwischen +1 und -1, wobei der Wert von +1 nur erreicht wird, wenn die Suchmatrix mit der Referenz- bzw. Mustermatrix ident ist.

Eine ausführlichere Beschreibung dieses Verfahrens ist in [7] oder [9] nachzulesen.

Als Kriterium für die Akzeptanz der Korrelationsergebnisse können demnach in Abhängigkeit des verwendeten Korrelationsverfahrens zum Beispiel der Korrelationskoeffizient, die euklidische Distanz, die Varianz oder die Backmatching-Distanz verwendet werden. Entsprechende Schwellwerte zum Verwerfen von offensichtlichen Fehlkorrelationen müssen allerdings fallabhängig definiert werden.

3.3. DGM-Erstellung

Um die aus der Korrelationsprozedur stammenden Pixelkoordinaten von Punkten in beiden Stereobildern in den dreidimensionalen Raum zu transformieren, ist die Verschneidung der geometriespezifischen Projektionslinien durchzuführen. Bei optischen Sensoren entspricht dieser Vorgang einem Vorwärtsschnitt über Richtungen, während man bei SAR-Abtastern die zwei Radarkreise zu verschneiden hat.

Mit den je 4 für ein Punktpaar vorliegenden Abbildungsgleichungen werden die zugehörigen kartesischen Koordinaten X, Y, Z bestimmt. Das überbestimmte Problem wird durch einen Ausgleich nach kleinsten Quadraten unter Verwendung von linearisierten Gleichungen und Näherungskordinaten gelöst. Als Ergebnis erhält man Koordinatentripel von inhomogen verteilten Punkten im Objektraum bzw. in einer definierten Kartenprojektion.

Die Erstellung eines digitalen Geländemodells kann in Abhängigkeit der Dichte des vorliegenden unregelmäßigen Punkthaufens im Vergleich zur Maschenweite des zu erstellenden DGMs auf 2 Arten erfolgen:

- durch direktes Resampling auf einen regelmäßigen Raster. Hierbei werden für die Punkte des Ergebnis-DGMs die Höhenwerte aus den nächstgelegenen Punkten des unregelmäßigen Punkthaufens nach ausgewählten Vorschriften interpoliert, wobei eventuell verbleibende Löcher durch Interpolation auf-

gefüllt werden können. Dieses Verfahren eignet sich im Falle einer großen Dichte der Eingabe-Punktdaten.

- durch dazwischengeschaltete Dreiecksvermaschung mit nachfolgender Rasterinterpolation. Die Dreiecksvermaschung ist ein mathematischer Prozeß, bei dem eine Menge von Punkten nach dem Verfahren von [6] so durch sich nicht schneidende Linien verbunden wird, daß eine Struktur von angrenzenden Dreiecken entsteht, welche auch eine annähernd gleichseitige Form erhalten [14]. Aus dem Dreiecksnetz können in weiterer Folge die Höhen für die Rasterpunkte eines regelmäßigen DGMs interpoliert werden.

In beiden Methoden können weiterführend noch digitale Filter (Mittelwert- oder Medianfilter) auf das Raster-DGM angewandt werden, um einzelne Höhenfehler zu reduzieren oder unrealistische Geländeinstrukturen zu eliminieren.

Das so erstellte DGM kann dann in weiterer Folge z.B. für die Georeferenzierung von Bilddaten, aber auch für thematische Auswertungen verwendet werden [2].

4. Anwendungsbeispiele

4.1. Testgebiet

Die Überflüge von MOMS-Priroda bzw. RADARSAT, aus welchen die für die gegenständlichen Untersuchungen verwendeten Bilddaten stammen, sind in Abbildung 3 dargestellt.

Demzufolge umfaßt das Testgebiet etwa den Bereich der obersteirischen Mur-Mürz-Furche in der Ost-West Achse von St. Michael bis Kindberg und bis Frohnleiten im Süden. Im Norden wird der Bereich vom Hochschwab, im Süden von der Gleinalm begrenzt.

Die Höhendynamik liegt bei einer durchschnittlichen Höhenlage von etwa 900 m in einer Bandbreite zwischen minimal 400 m und maximalen Höhen von 1900 m.

4.2 Bild- und Referenzdaten

Für die automationsgestützte stereometrische Geländemodellerstellung standen folgende Bilddaten des MOMS-2P-Sensors bzw. des RADARSAT-Sensors zur Verfügung:

Die ersten brauchbaren MOMS-2P-Bilddaten Überflug über Österreich stammen von einem Überflug von MOMS-Priroda vom 14. April 1997. Aus diesem Bildstreifen stammt auch das

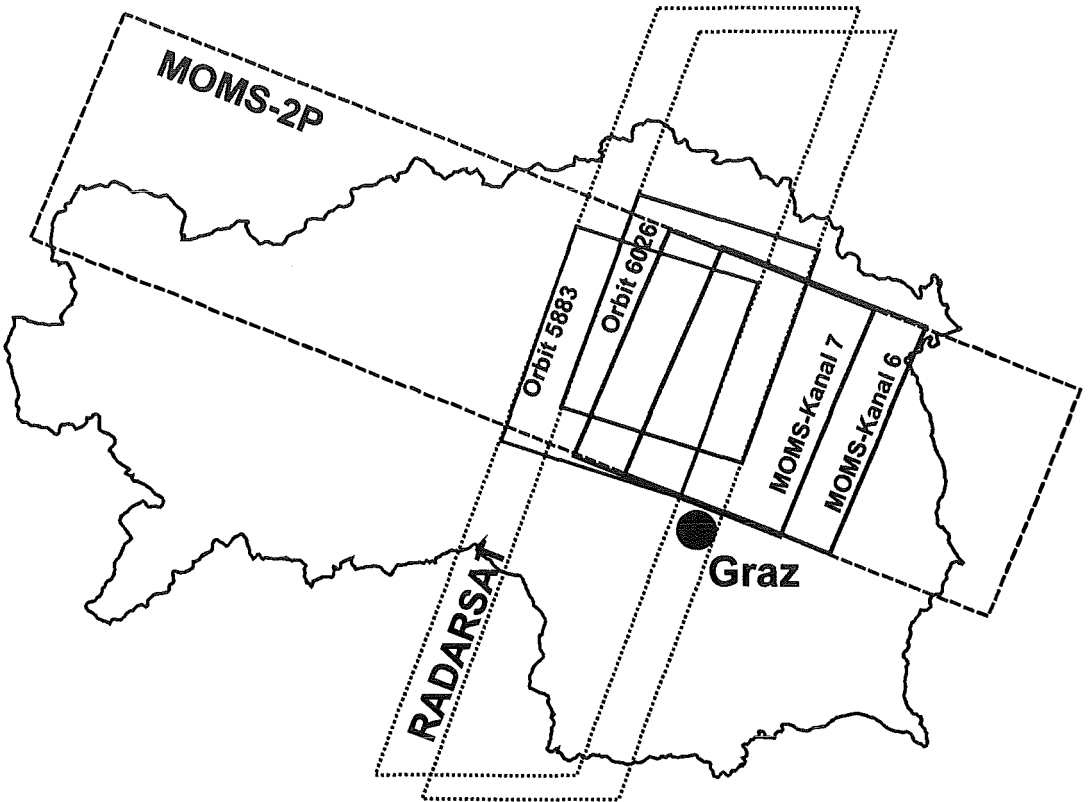


Abbildung 3: Studiengebiet und Überflüge

Parameter	Kanal 6	Kanal 7
Aufnahmedatum	14.04.97	14.04.97
Aufnahmezeit	09:04	09:05
Szenennummer	34	34
Szenenmittelpunkt (Breite/Länge)	47°21'00" N 15°29'02" E	47°24'00" N 15°20'06" E
Blickwinkel	+21.4°	-21.4°
Daten Typ	8 bit	8 bit
Pixelauflösung [m]	18 x 18	18 x 18

Tabelle 4: MOMS-2P Aufnahmeparameter

Parameter	Bild 1	Bild 2
Aufnahmedatum	20.12.96	30.12.96
Aufnahmezeit	04:59	05:08
Orbit	5883	6026
Szenenmittelpunkt (Breite/Länge)	47°17'53" N 15°09'27" E	47°23'57" N 15°15'24" E
Blickwinkel	46.412°	38.338°
Daten Typ	16 bit	16 bit
Pixelauflösung [m]	3.125 x 3.125	3.125 x 3.125

Tabelle 5: RADARSAT-Aufnahmeparameter

hier verwendete Stereo-Bildpaar mit den in Tabelle zusammengefaßten Aufnahmeparametern.

Für die stereometrische DGM-Erstellung aus RADARSAT-Daten standen zwei Bilder im Fine-Resolution-Aufnahmemodus zur Verfügung. In diesem Modus kann in 5 unterschiedlichen Blickwinkel-Bereichen (beams) mit einer Originalauflösung von rund 9 Metern aufgenommen werden. Für das gegenständliche Anwendungsbeispiel standen SGX-Produkte zur Verfügung, welche durch Oversampling um einen Faktor von etwa 3 mit einer nominellen Pixelauflösung von 3.125 Metern ausgeliefert werden. Eine Zusammenstellung der Aufnahmekeendaten für die beiden RADARSAT-Szenen ist in Tabelle 5 zu finden.

Aus Zeit- und Kostengründen und auch wegen der geringeren Genauigkeitsanforderung an den Lagefehler der Paßpunkte aufgrund der vorgegebenen räumlichen Auflösung der Satellitendaten wird in der Regel auf eine in-situ Messung der Paßpunkte, wie sie in der Photogrammetrie üblich ist, verzichtet. Vielmehr werden die Koor-

dinaten der Paßpunkte aus topographischen Karten digitalisiert. Für das gesamte Auswertungsgebiet waren digitale Versionen der Österreichischen Karte 1:50.000 (ÖK50) verfügbar.

Zur Bestimmung des geeigneten Kartenmaßstabes gilt folgende Faustformel [1]:

$$\text{Maßstabszahl} = (5000/3) \times \text{Sensorauflösung [m]}$$

Für die vorliegenden Bilddaten müßten demnach Referenzdaten in größerem Maßstab verwendet werden, um das Genauigkeitspotential vollständig auszuschöpfen. Neben den digitalen ÖK50 stand das ebenfalls am Institut für digitale Bildverarbeitung aus der ÖK50 hergeleitete DGM der Steiermark mit Basisdaten im 3-Bo-gensekunden-Intervall zur Verfügung.

4.3. Datenvorverarbeitung

In Hinblick auf eine einigermaßen erfolgreiche automatische Bildkorrelation von SAR-Daten ist eine entsprechende Vorverarbeitung, insbesondere eine Filterung zur Reduktion der Speckle-Effekte, unumgänglich. Folgende Vorverarbeitungsschritte wurden auf die SGX-RADARSAT-Daten angewandt:

- Verringerung der Datenmenge durch Reduktion von 16bit- auf 8bit-Pixelwerte sowie

durch Reduktion der Pixelgröße um den Faktor 3 durch einfaches Resampling.

- Glättung der Bilddaten durch Low-Pass-Filterung mit einem Fenster von 5 x 5 Pixel.

In Abbildung 4 sind für einen Bildausschnitt die Ausgangsdaten sowie die gefilterten Daten dargestellt. Ein offensichtlicher Unterschied wird erkennbar, da die gefilterten Daten doch wesentlich glatter erscheinen, andererseits aber auch gewisse Detailinformationen – z.B. in verbauten Gebieten – an Schärfe verlieren.

4.4. A-priori Stereo-Kartiergenauigkeit

Die vorhandenen Bilddaten des MOMS-2P-Sensors sowie des RADARSAT-Sensors besitzen eine dynamische Aufnahmegeometrie, die in einem sensorspezifischen parametrischen Ansatz des Abbildungsmodells berücksichtigt wird [19]. Die einzelnen Parameter des Abbildungsmodells wurden in einem Ausgleichsverfahren mittels Paßpunkten verbessert.

Die zu erwartende Stereo-Kartiergenauigkeit kann aus der Differenz zwischen den aus den homologen Bildkoordinaten errechneten Kartenkoordinaten und den in der Karte gemessenen Koordinaten der Paßpunkte bestimmt werden. Für die resultierenden Koordinatendifferenzen in

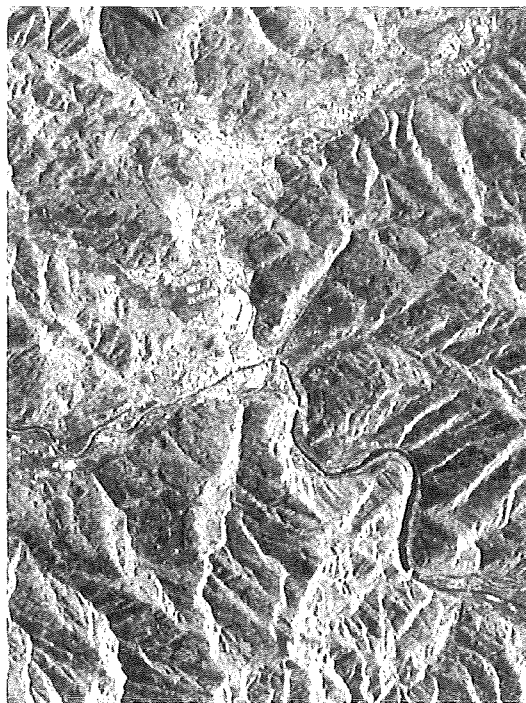
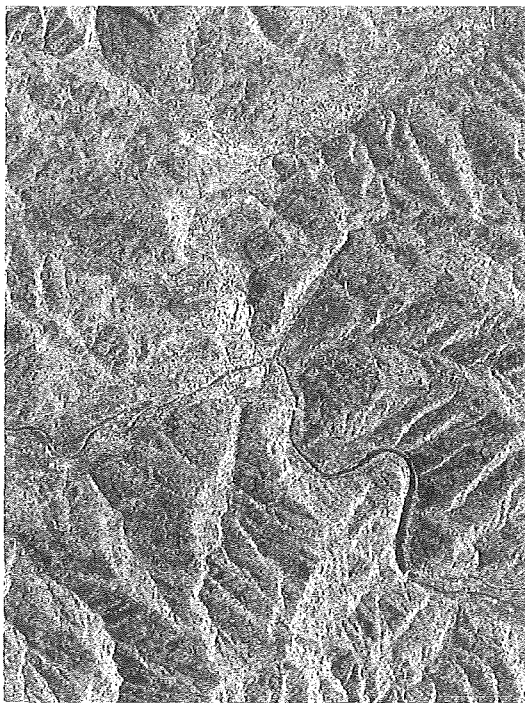


Abb. 4: RADARSAT – Ausgangsdaten (links) und gefilterte Daten (rechts)

Ost (E), Nord (N) und Höhe (H) sind statistische Parameter wie Standardabweichung, Mittelwert, sowie minimale und maximale Werte in Tabelle zusammengestellt. Für MOMS-2P bzw. RADARSAT ergeben sich demnach 23 bzw. 24 Meter als zu erwartender Höhenfehler.

	MOMS-2P			RADARSAT		
	E	N	H	E	N	H
<i>St.Abw.</i>	18.2	12.5	22.8	21.8	23.3	24.1
<i>Mittelwert</i>	-1.5	0.4	-3.2	6.4	-6.1	5.3
<i>Minimum</i>	-41.4	-29.1	-37.3	-37.8	-51.6	-39.5
<i>Maximum</i>	50.2	24.0	65.4	50.9	51.6	50.6

Tabelle 6: Aufsetzgenauigkeit der Stereomodelle

4.5. Numerische Genauigkeitsabschätzung

Mittels numerischer Fehlersimulation kann eine Abschätzung der zufolge von Fehlern in den Pixelkoordinaten resultierenden Ungenauigkeiten in den errechneten 3D-Koordinaten durchgeführt werden. Die „Sensitivität“ der berechneten 3D-Koordinaten zufolge Fehlern von 1 Pixel in along-track (Δx) bzw. across-track (Δy), d.h. in bzw. quer zur Flugrichtung, ist für MOMS-2P sowie für RADARSAT in der Tabelle dargestellt.

Bei vorgegebener Pixelauflösung und Aufnahmekonfiguration ergeben sich bei einem synthetisch eingeführten Fehler von einem Pixel in den MOMS-2P-Bilddaten Lagefehler von 8 Metern und Höhenfehler von bis zu 22 Metern. Im Fall der RADARSAT-Bilddaten ergeben sich zufolge eines 1-Pixel-Fehlers entsprechende Fehler von bis zu 13 Metern in der Lage und von bis zu 11 Metern in der Höhe. Hier ist zu beachten, daß sich diese Werte auf die Originalpixelgröße von nominell 3.125 Metern beziehen.

Fehler	MOMS-2P		RADARSAT	
	$\Delta x = \pm 1$	$\Delta y = \pm 1$	$\Delta x = \pm 1$	$\Delta y = \pm 1$
<i>Bild</i>				
<i>Lage</i>	8 m	8 m	3 m	13 m
<i>Höhe</i>	22 m	0 m	3 m	11 m

Tabelle 7: Lage- bzw. Höhensensitivität der MOMS-2P und RADARSAT-Stereodaten

4.6. Bildkorrelation und DGM-Erstellung

In Hinblick auf die automatische Bildkorrelation wurden zunächst die Stereo-Bilddaten registriert. Die daraus resultierenden Input-Bilddaten für die Korrelation sind für MOMS-2P sowie für RADARSAT in Abbildung 5 bzw. Abbildung 6 dargestellt. Eine alternative Darstellung der Stereobilder zeigt die Abbildung 7 in Anaglyphenform zur 3D-Betrachtung mittels Anaglyphenbrillen.

In den MOMS-Stereodaten sind deutlich einige Wolken auszumachen, während in den RADARSAT-Daten die trotz Filterung doch noch verrauschten Grauwerte sowie die Foreshortening- und Layover-Effekte auf zu erwartende Probleme in der Bildkorrelation bzw. bei der weiterführenden DGM-Berechnung schließen lassen.

Für die Korrelation der MOMS-2P Daten wurde das auf Merkmalsvektoren basierende Verfahren verwendet, welches bereits umfangreich im Zusammenhang mit optischen Daten angewendet wurde. Mit diesem Verfahren wurden im Stereo-Überdeckungsbereich für jedes dritte Pixel die homologen Pixelkoordinaten erfaßt. Aus diesen wurden Kartenkoordinaten in der österreichischen Gauß-Krüger-Projektion errechnet, welche zufolge der Pixelgröße der Eingebilder von 18 Metern demnach einen unregelmäßigen Punktraster mit einer nominellen Maschenweite von 54 Metern ergeben. Mittels dem auf Dreiecksvermaschung beruhenden Verfahren wurde in weiterer Folge ein regelmäßiges digitales Geländemodell mit einer Rasterweite von 25 Metern abgeleitet.

In der Abbildung sind das stereometrisch abgeleitete Geländemodell sowie das Referenz-DGM mit grauwertkodierten Höhen dargestellt, welche im allgemeinen eine gute Übereinstimmung zeigen. Deutlich erkennbar sind allerdings die durch die Wolken verursachten DGM-Fehler. Weiters sind Bergrücken zweimal über das Murtal und einmal auch über den Tyrnauergraben hinweg „zusammengewachsen“. Deutlicher werden Unterschiede der beiden DGMs in der Abbildung erkennbar, welche eine beleuchtete Darstellung dieser Daten zeigt. Hier kommt ein deutliches Rauschen im stereometrisch erstellten DGM zum Vorschein, welches durch eine entsprechende Nachbearbeitung wohl noch reduziert werden könnte. Weiters sind vor allem in den wolkenbedeckten Bereichen vereinzelt grobe Dreiecksstrukturen erkennbar, welche aus falschen bzw. in geringer Dichte vorliegenden Korrelationsergebnissen herrühren.

Hinsichtlich der Einsetzbarkeit des Feature-Vector-Verfahrens und der damit verbundenen sinnvollsten Bild-Features für SAR-Bilddaten sind noch umfangreichere Untersuchungen ausständig. Aus diesem Grund wurde für die RADARSAT-Daten zur automatischen Extraktion von homologen Punkten das Produktmoment-Korrelationsverfahren verwendet, welches sich in den bisherigen Untersuchungen als das für SAR-Daten stabilste Verfahren erwies. Bedingt durch die reduzierten Genauigkeitserwartungen wurde im Überlappungsbereich der Stereo-Bild-

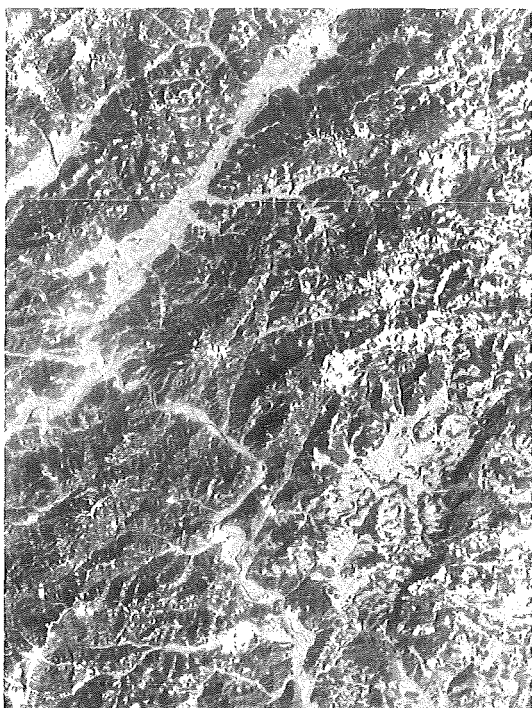


Abb. 5: MOMS-2P-Stereodaten (links: Vorwärtsblick/Kanal 6; rechts: Rückwärtsblick/Kanal 7)

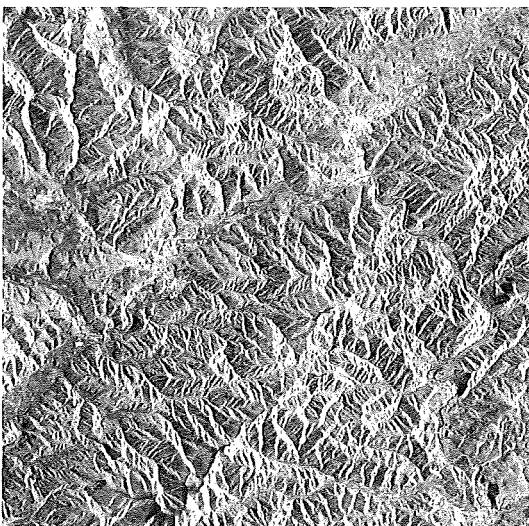
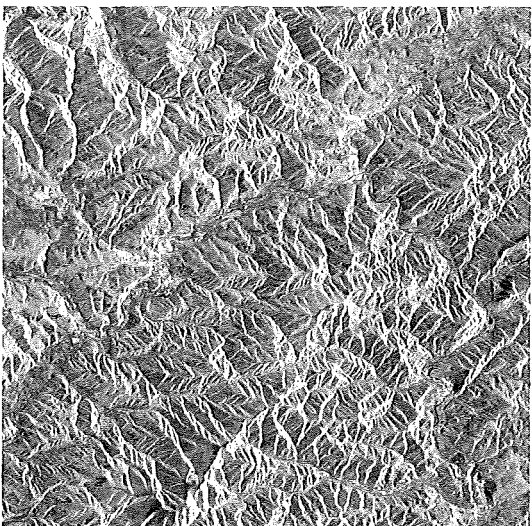


Abb. 6: RADARSAT-Stereodaten (links: Orbit 6026; rechts: Orbit 5883)

daten in diesem Fall nur jedes zehnte Pixel korreliert. Die errechneten Gauß-Krüger-Kartenkoordinaten ergeben somit einen unregelmäßigen Punktraster mit einer nominellen Maschenweite von etwa 90 Metern.

Auch in diesem Fall wurde mittels Dreiecksvermaschung und nachfolgender Rasterinterpo-

lation ein regelmäßiges digitales Geländemodell abgeleitet, wobei hier eine Ausgaberrasterweite von 50 Metern gewählt wurde. Stereometrisch abgeleitetes Geländemodell sowie Referenz-DGM sind in Abbildung 10 dargestellt. In einem ersten visuellen Vergleich dieser Darstellungen sind eine gute globale Übereinstimmung aber

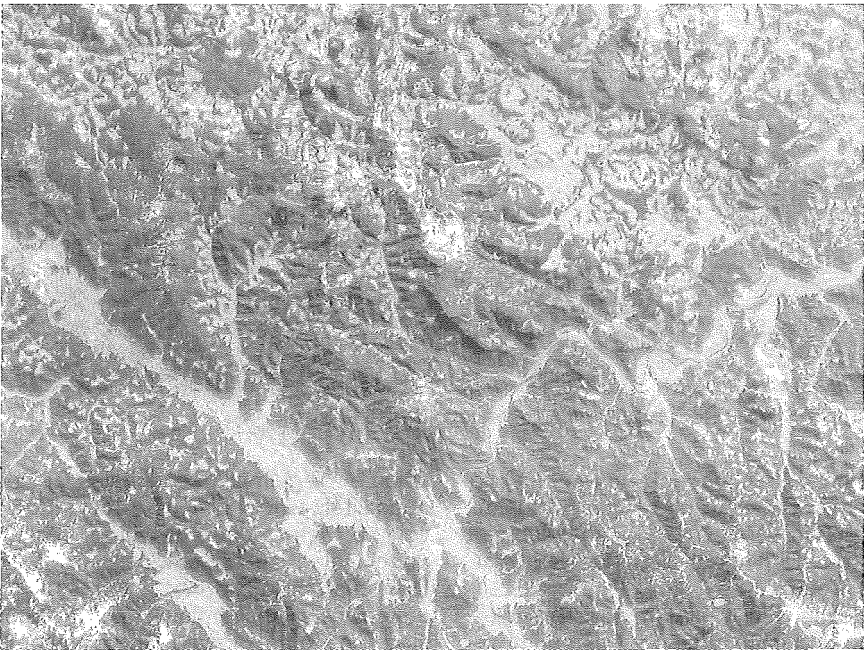
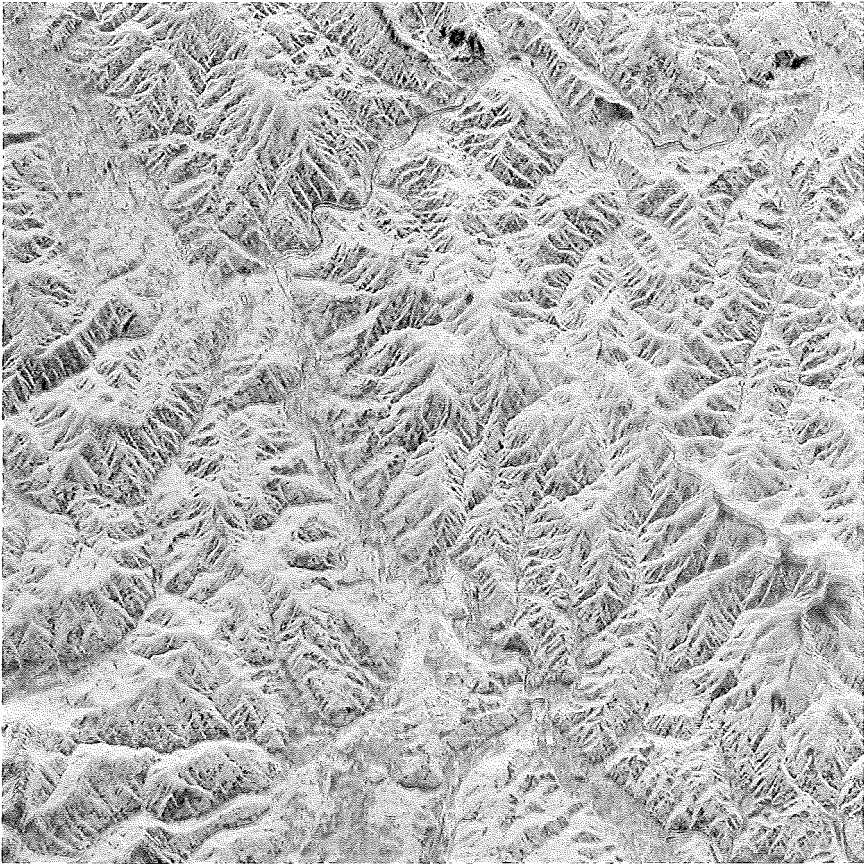


Abb. 7: Anaglyphenbilder der MOMS-2P (links) bzw. der RADARSAT-Stereodaten (rechts)

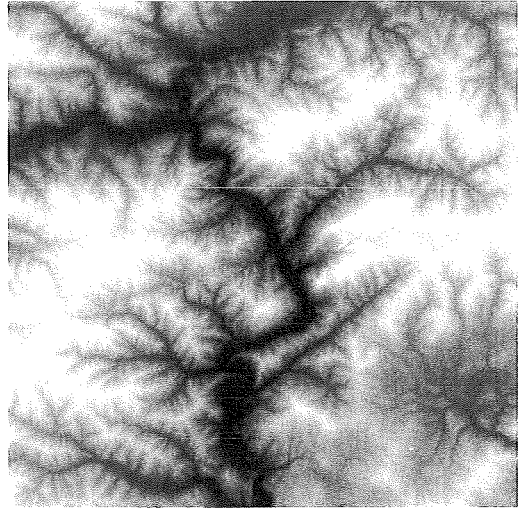
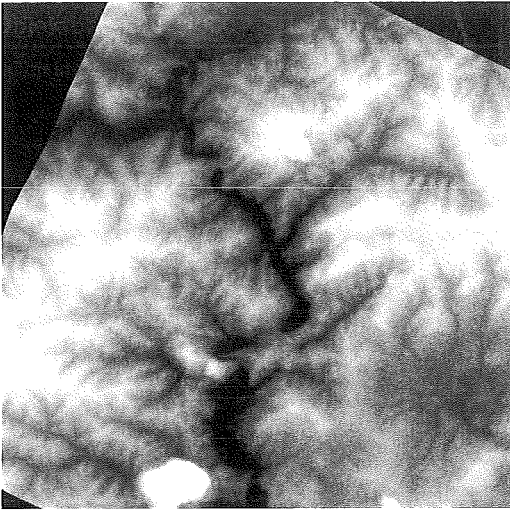


Abb. 8: MOMS-2P – Grauwert-Kodierung von Stereo-DGM (links) und Referenz-DGM (rechts)

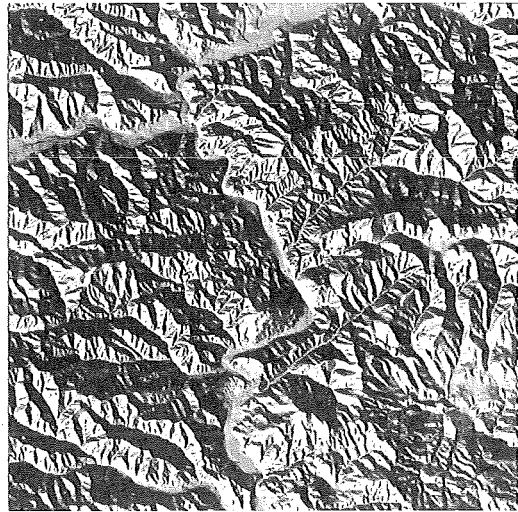
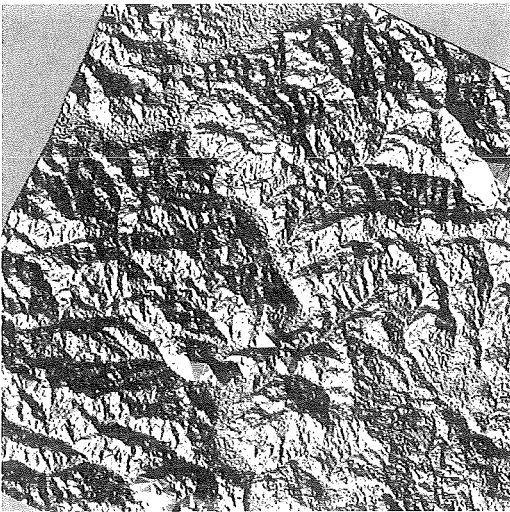


Abb. 9: MOMS-2P – Beleuchtete Darstellung von Stereo-DGM (links) und Referenz-DGM (rechts)

auch einige größere lokale Abweichungen erkennbar. Abbildung 11 zeigt wieder eine beleuchtete Darstellung der beiden Höhenmodelle. Wie bei den MOMS-Ergebnissen wird auch hier das Rauschen im stereometrisch generierten DGM verstärkt erkennbar.

Wie bereits erwähnt, werden Höhenmodelle unter anderem zur Georeferenzierung von Bild-daten benötigt. Als Beispiel ist in der Abbildung das aus den RADARSAT-Stereodaten abgeleitete DGM mit dem geokodierten Bild des Orbits 5883 überlagert in perspektiver Ansicht mit Blickrichtung aus Nordost dargestellt.

Eine detailliertere Beschreibung der RADARSAT-Stereoauswertung ist in [8] zu finden.

4.7. Genauigkeitsanalyse

Die Qualität der abgeleiteten Geländemodelle konnte durch den Vergleich mit den Referenzgeländemodellen global untersucht werden. Die Höhendifferenzen zwischen Stereo-DGM und Referenz-DGM sind für MOMS-2P bzw. RADARSAT in Abbildung 13 dargestellt. Während die Höhendifferenzen für MOMS-2P mit dem Gelände nicht korrelieren, ist dies bei RADARSAT sehr wohl der Fall. Dies ist auf die Glättung des Stereo-DGM durch Median-Filterung zurückzuführen, wodurch die topographischen Strukturen entsprechend abgeflacht und die Höhendifferenzen entlang der Bergrücken bzw. Täler verstärkt werden.

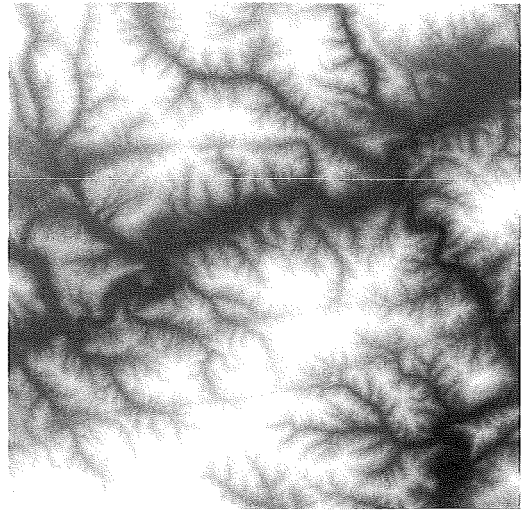
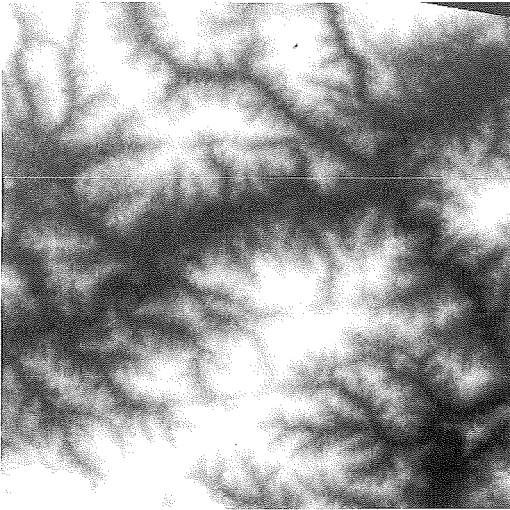


Abb. 10: RADARSAT – Grauwert-Kodierung von Stereo-DGM (links) und Referenz-DGM (rechts)

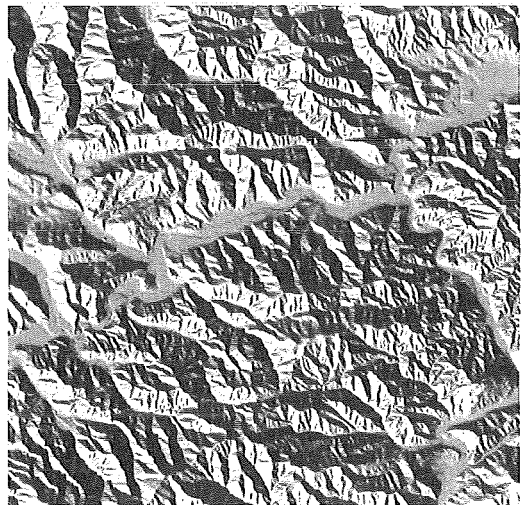
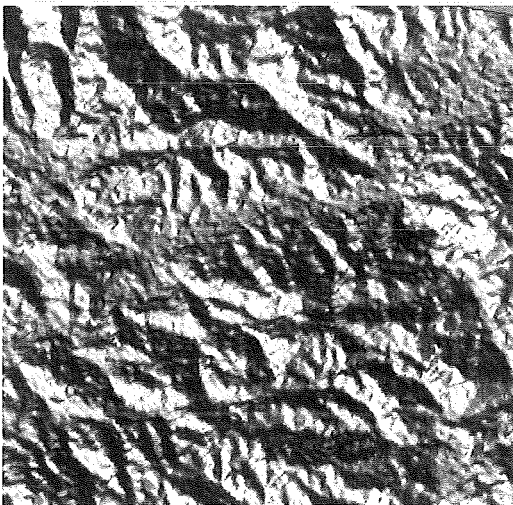


Abb. 11: RADARSAT – Beleuchtete Darstellung von Stereo-DGM (links) und Referenz-DGM (rechts)

Die Höhenabweichungen des aus den MOMS-2P-Bilddaten hergeleiteten DGM liegen im Mittel bei etwa 25 bis 30 Metern, sofern man die durch die Wolkenbedeckung fehlerhaften Bereiche ausschließt. Dieser Wert stimmt recht gut mit der über die Paßpunkte prognostizierten Höhengenaugigkeit von etwa 23 Metern überein (siehe Tabelle). Auch der über numerische Fehlersimulation ermittelte Höhenfehler von 22 Metern zufolge eines Fehlers von einem Pixel im Bild belegt, daß für diese Daten eine bessere Höhengenaugigkeit nur durch flächendeckende subpixel-genaue Bildkorrelation ermöglicht würde, was in der Realität kaum erwartet werden kann.

Für RADARSAT konnte die über die Paßpunkte prognostizierte Höhengenaugigkeit von 24 Metern (siehe Tabelle) nicht gehalten werden und liegt tatsächlich bei etwa 35 Metern. Im Vergleich zur numerischen Fehlersimulation entspricht diese Ungenauigkeit allerdings doch grundsätzlich dem aus einem Fehler von einem Pixel verursachten Höhenfehler von etwa 33 Metern.

Weiters ist im Differenz-Höhenmodell von RADARSAT ein systematischer Trend von links oben nach rechts unten erkennbar. Nach ersten Untersuchungen dürfte dies auf das Nearest-Neighbour-Resamplingverfahren im Rahmen der Bildregistrierung zurückzuführen zu sein,

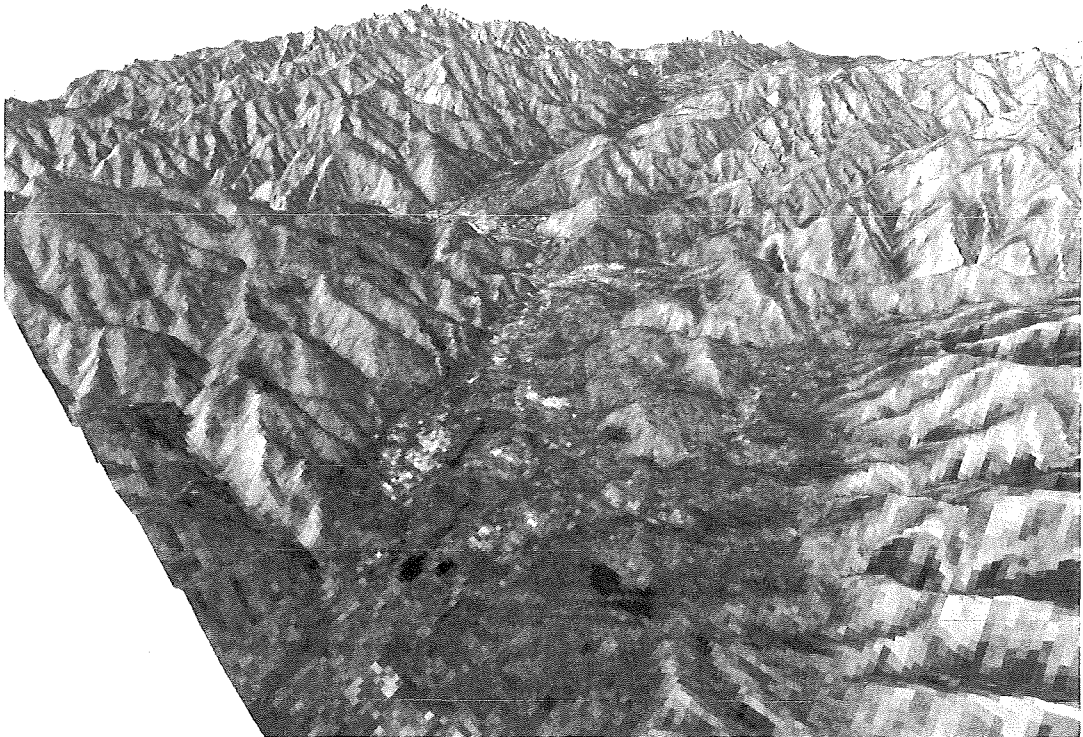


Abb. 12: Perspektive Ansicht eines RADARSAT-Bildes

welche in diesem Zusammenhang offensichtlich unzureichend ist.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Grundsätzlich konnte mit den vorliegenden Ergebnissen die Machbarkeit der automationsge-

stützten DGM-Erstellung aus Daten der aktuellen Sensoren MOMS-2P im optischen sowie RADARSAT im Mikrowellen-Spektralbereich nachgewiesen werden. Die erzielten Genauigkeiten entsprechen in etwa den sich aus a-priori-Ab-schätzungen sowie den geometrischen Rahmenbedingungen ergebenden Erwartungen.

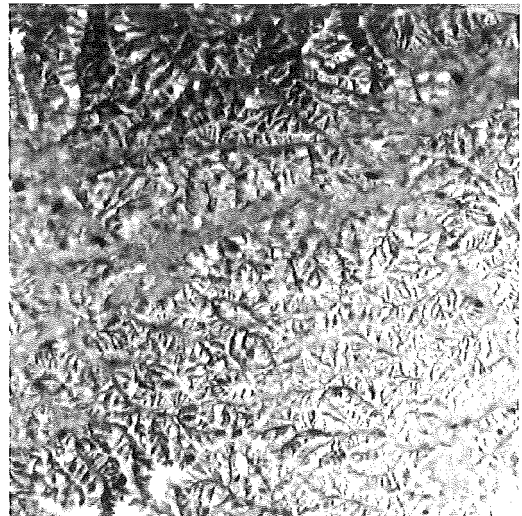
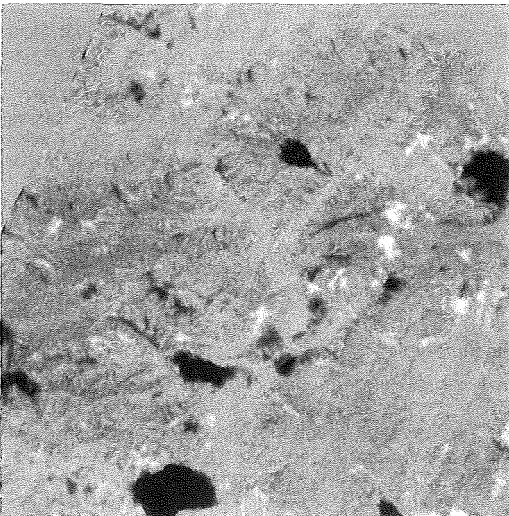


Abb. 13: Differenz-Höhenmodelle für MOMS-2P (links) und RADARSAT (rechts)

In diesem Zusammenhang hat die automatische Bildkorrelation für optische Daten bereits einen hohen Entwicklungsstand erreicht und liefert hier im allgemeinen wenige Fehlerkorrelationen und somit für die Weiterverarbeitung gut brauchbare Ergebnisse.

Für SAR-Bilddaten ist allerdings noch grundsätzlich die optimale Vorverarbeitung der Daten einerseits wie auch das optimale Korrelationsverfahren andererseits auszuloten.

Für RADARSAT sind weitere Untersuchungen dahingehend geplant, inwiefern durch Verwendung der Original-SGX-Bilddaten mit ihrer nominalen Pixelgröße von 3.125 Metern bessere Genauigkeiten im Rahmen der DGM-Herleitung erzielt werden können. Hier dürfte allerdings der Vorteil der höheren Pixelauflösung durch erhöhte Speckle-Effekte aufgehoben werden. Darüber hinaus steigen mit der höheren Bildauflösung naturgemäß auch die Anforderungen an die Qualität der Referenzdaten. Speziell in dem dargestellten Beispiel für MOMS-2P ist es jetzt schon so, daß in einigen Bereichen die Qualität des stereometrisch hergeleiteten DGMs jene des Referenzhöhenmodells zumindest erreichen wenn nicht übertreffen dürfte.

Weiters ist die Akquisition von interferometrischen RADARSAT-Bilddaten geplant, aus welchen ebenfalls Höhendaten abgeleitet werden können. Entsprechende Methoden wurden ebenfalls am Institut für Digitale Bildverarbeitung entwickelt [12] und bis dato in erster Linie auf Bildpaare der ERS-Tandem-Mission angewendet. Ein Vergleich zwischen stereometrisch bzw. interferometrisch hergeleiteten Höhenmodellen aus SAR-Bilddaten ist dann direkt möglich.

Literatur

[1] *Albertz J.*: Digitale geometrische Aufbereitung multisensoraler und multitemporaler Fernerkundungsdaten für die Waldschadensforschung, Abschlußdokumentation Teil A, DLR-Bericht, Oberpfaffenhofen, 1989

[2] *Almer A.*: Geometrische Auswertung von multisensoralen Fernerkundungsdaten, Diplomarbeit Technische Universität Graz, Institut für Angewandte Geodäsie und Photogrammetrie, Abteilung für Fernerkundung, Bildverarbeitung und Kartographie, 1997

[3] *Brandstätter G.*: On the Importance of Projective Geometry for Analytical and Digital Photogrammetric Restitution, Proceedings of the 1990 ISPRS Symposium, Commission VI, Rhodes, 1990

[4] *Brandstätter G.*: Zur relativen Orientierung projektiver Bündel. Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung, Ausgabe 6/91, 1991, Cannes, France, pp. 211-218, November 1992

[5] *Brown R.J., Brisco B., Leconte R., Major D.J., Fischer J.A., Reichert G., Korporal K.D., Bullock P.R., Pokrant H., Culley J.*: Potential Application of Radarsat Data to Agriculture and Hydrology, Quebec, Canadian Journal of Remote Sensing, Volume 19, No. 4, November-December 1993

[6] *Delauny B.*: Sur la sphère vide, Izvestia Akademia Nauk SSSR, Otdelenie Matematicheskii i Estestvennyka Nauk 7, 1934

[7] *Ehlers M.*: Untersuchung von digitalen Korrelationsverfahren zur Entzerrung von Fernerkundungsaufnahmen, Dissertation Universität Hannover, Fachbereich Bauingenieur- und Vermessungswesen, 1983

[8] *Gutjahr K.H.*: Ableitung digitaler Geländemodelle aus SAR-Daten Diplomarbeit, Technische Universität Graz, Institut für Angewandte Geodäsie und Photogrammetrie, Abteilung für Fernerkundung, Bildverarbeitung und Kartographie, 1997

[9] *Haberäcker P.*: Digitale Bildverarbeitung, Grundlagen und Anwendungen, 3. überarb. Auflage, Hanser-Verlag, 1989

[10] *JOANNEUM RESEARCH*: RSG in ERDAS IMAGINE, Tour Guide, Version 2.0, 1997

[11] *JOANNEUM RESEARCH*: RSG in ERDAS IMAGINE, Field Guide, Version 1.0, 1997

[12] *Kenji L.W., Raggam J.*: SAR Interferometry: A Comparative Analysis of DTMs. In International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 31, Part B4, Commission IV, Seiten 442-444, 18. ISPRS-Kongress, Wien, 1996.

[13] *Kramer H.J.*: Observation of the Earth and Its Environment, Survey of Missions and Sensors, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 1996

[14] *Kropatsch W.*: DAF – Ein Programmsystem zur interaktiven Modellierung von Flächen im Raum auf der Basis unregelmäßiger Dreiecksnetze, Report Joanneum Research Graz, Institut für Digitale Bildverarbeitung, 1983

[15] *Paar, G., Pözlleitner W.*: Automatic 3D Elevation Modelling by Pyramid-Based Stereovision Using Remotely Sensed Data. In: Peter Mandl (Ed.): Modelling and New Methods in Image Processing and in Geographical Information Systems, Oldenburg-Verlag, S. 95-110, 1992.

[16] *Raggam H.*: Untersuchungen und Entwicklungen zur Stereo-Radargrammetrie. Dissertation, Technische Universität Graz; DIBAG Bericht Nr. 22, JOANNEUM RESEARCH, Graz, Mai 1985.

[17] *Raggam H., Buchroithner M. F., Mansberger R.*: Relief Mapping Using Non-Photographic Spaceborne Imagery. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 44, No. 1, Seiten 21-36, 1989.

[18] *Raggam H., Almer A.*: Mathematical Aspects of Multi-Sensor Stereo Mapping, Proceedings of 10th Annual IGARSS Symposium, Vol. 3, Washington D.C., 1990

[19] *Raggam H., Almer A., Strobl D., Buchroithner M.F.*: RSG – State-of-the-Art Geometric Treatment of Remote Sensing Data, Proceedings of 11th EARSeL Symposium: Europe: From Sea Level to Alpine Peaks, from Iceland to the Urals, Graz, Austria, July 3-5 1991

[20] *Raggam H., Almer A.*: Assessment of the Potential of JERS-1 for Relief Mapping Using Optical and SAR Data. In International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 31, Part B4, Commission IV, Seiten 671-676, 18. ISPRS-Kongress, Wien, 1996.

Anschrift der Autoren:

Dr. Hannes Raggam, Dipl.-Ing. Karlheinz Gutjahr und Dipl.-Ing. Alexander Almer, alle: Institut für Digitale Bildverarbeitung, Joanneum Research Forschungsgesellschaft, Wastiangasse 6, 8010, Graz.