

## CORONA-Satellitenbilder als Grundlage zur Erstellung Digitaler Höhenmodelle (DHM)

ANGELA ALTMAIER & CHRISTOPH KANY, Bonn

**Zusammenfassung:** Digitale Höhenmodelle (DHM) werden heute verstärkt für Untersuchungen in den Umweltwissenschaften eingesetzt, beispielsweise für Erosions- und Abflussstudien. Die dafür nötigen Luftbilder oder Karten liegen jedoch – teils aus finanziellen Gründen – nicht für alle Gebiete der Erde vor. So ebenfalls nicht für das IMPETUS-Projektgebiet in Marokko. Daher bieten hierfür Stereo-Satellitenbilder des Kamerasystems CORONA mit einer räumlichen Auflösung von 1,8 m eine ausgezeichnete Grundlage. Die Software-Programme IMAGINE OrthoBASE Pro™ oder VirtuoZo 3.2 ermöglichen nun, daraus automatisch Digitale Höhenmodelle zu erstellen, mit einer mittleren Höhenabweichung von kleiner 20 m. Aus den Höhenmodellen und den photogrammetrisch aufbereiteten Daten lassen sich u. a. Orthophotos generieren, die dann beispielsweise für die Erstellung von thematischen Karten oder zur Berechnung von Landnutzungsänderungen über mehrere Jahre verwendet werden können.

**Summary:** *Digital Elevation Models (DEMs) based on CORONA satellite images.* Digital Elevation Models are used for various analysis in environmental science, e. g. for erosion and water studies. Aerial photographs and maps which are necessary for the extraction of DEMs often do not exist, sometimes because of financial reasons. This situation can be found in Morocco concerning the project IMPETUS. Therefore the stereo satellite images of CORONA give a great chance for DEM extraction as they have a ground resolution of 1.8 m. The software programmes ERDAS-Orthobase-Pro and VirtuoZo 3.2 now make it possible to extract DEM automatically of these satellite images with a mean height difference of less than 20 m. These DEMs could be used afterwards to create orthophotos, e. g. to generate thematic maps or land use classifications of several years.

---

### 1 Einleitung

Für viele Fragestellungen der Umweltanalyse und der Umweltwissenschaften sind Digitale Höhenmodelle (DHM) zu einer wesentlichen Grundlage geworden. So bilden sie beispielsweise den Ausgangspunkt für Analysen zu Erosions- und Abflussdynamik, Vegetationsänderung oder Strukturwandel. Dazu kann einerseits die 3D-Sichtweise des Höhenmodells als solche in verschiedenen Software-Programmen ausgewertet werden (z. B. durch digitales Erfassen von Geländekanten). Andererseits können aus Höhen-

modellen und den photogrammetrisch aufbereiteten Bilddaten Orthophotos erstellt werden, die wiederum die Grundlage zu thematischen 2D-Auswertungen und kartographischen Darstellungen bieten. Bei beiden Auswertemethoden des Digitalen Höhenmodells spielt meist die zeitliche Veränderung eine große Rolle: Aussagen von Höhenmodellen oder Orthophotos aus verschiedenen Jahren oder Jahrzehnten können miteinander verglichen werden, beispielsweise von den IKONOS-Satellitenbildern bis zu den 30 Jahre älteren CORONA-Satellitenbildern.

### 1.1 Forschungsprojekt und DHM-Einsatz

Diese genannten Einsatzmöglichkeiten eines DHM sowie das aktuelle Forschungsvorhaben IMPETUS waren technische wie auch ideelle Motivationsgründe für die vorliegende Arbeit. IMPETUS steht dabei für ‚Integratives Management-Projekt für einen Effizienten und Tragfähigen Umgang mit Süßwasser in West-Afrika‘ (IMPETUS 2001 b). Es handelt sich dabei um ein interdisziplinäres und anwendungsbezogenes Forschungsvorhaben, dessen Ziel in der Einrichtung eines nachhaltigen Wassermanagements in Westafrika besteht. Voraussetzungen, Einflussfaktoren und Umsetzungsmöglichkeiten dieses Managements werden beispielhaft an zwei Einzugsgebieten in Westafrika erforscht. Eines der Einzugsgebiete liegt mit dem Fluss Drâa in Süd-Marokko. Es beginnt am Südabhang des Atlasgebirges und erstreckt sich bis in Wüsten-Übergangsgebiete an der marokkanisch-algerischen Grenze (Abb. 1). Motivationsgründe zur Einrichtung des IMPETUS-Forschungsprojektes sind mögliche Wechselwirkungen zwischen den Klimaten Afrikas und Europas mittels atmosphärischer Telekonnectionsprozesse sowie Zu-



Abb. 1: Einzugsgebiet des IMPETUS-Projektes in Marokko (in schwarz) (IMPETUS 2001a, S. 8).

sammenhänge zwischen den langanhaltenden Dürreperioden nördlich und südlich der Sahara. Daher bilden der hydrologische Kreislauf und das Frischwasserdargebot den Ausgangspunkt der Untersuchungen. Dabei besteht ein besonderes Interesse in der Unterscheidung von klimatologischen und sozioökonomischen Einflussfaktoren auf den Wasserkreislauf, ihres Ursprungs und ihrer Auswirkungen.

Für die Forschungsarbeiten fast aller Bereiche dieses IMPETUS-Projektes bieten Digitale Höhenmodelle wiederum eine Analysegrundlage, ähnlich wie sie eingangs allgemein skizziert wurde. Hydrologische wie geologische, meteorologische wie städtebauliche Arbeitsbereiche benötigen Digitale Höhenmodelle als Ausgangspunkt für Studien zu beispielsweise Abfluss-, Erosions- oder Bebauungsänderung.

### 1.2 Neue Methode der DHM-Generierung

Üblicherweise stellen Karten und Luftbilder die Ausgangsmaterialien für die Erstellung von Digitalen Höhenmodellen dar. Für Marokko sind Luftbilder und Kartenmaterialien jedoch kaum vorhanden. Nur für einige Teile des Forschungsgebietes existieren topographische Karten im Maßstab 1 : 100 000 aus den 1960er Jahren. Zu den Ursachen für das Fehlen dieser Grundlagen gehören zum einen finanzielle Probleme, zum anderen sicherheitspolitische Restriktionen. Dennoch ist wachsendes Interesse an GIS- und Fernerkundungsmethoden und der Beginn von Arbeiten in diesen Bereichen in vielen marokkanischen Institutionen festzustellen.

Vor diesem Hintergrund bietet eine neue Methode zur DHM-Generierung große Vorteile: Die DHM-Erstellung mittels der hochauflösenden CORONA-Bilder. Diese Bilder wurden vom CORONA-Satelliten von 1960–1972 im panchromatischen Bereich als Stereo-Bilder mit einer Auflösung von 1,8 m aufgenommen. Sie sind seit 1995 beim USGS (United States Geological Survey) preisgünstig zu beziehen. Besonders für Länder wie z. B. Marokko bieten diese CORONA-Bilder eine Alternative zur her-

kömmlichen DHM-Generierung. Erst wenige Software-Programme machen heute eine Generierung von Digitalen Höhenmodellen aus CORONA-Bildern möglich.

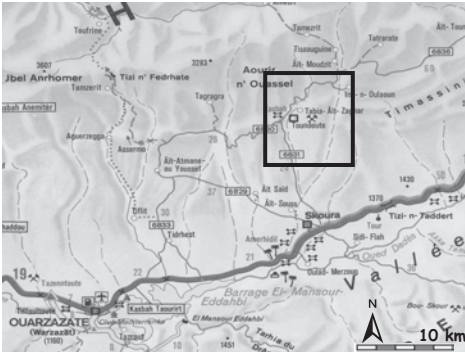
In der vorliegenden Untersuchung wurden daher zwei unterschiedliche Software-Programme, IMAGINE OrthoBASE Pro von ERDAS und VirtuoZo 3.2, für ein Teilgebiet des Drâa-Einzugsgebietes getestet und ihre Ergebnisse bezüglich Genauigkeit und Aufwand evaluiert.

Insgesamt ist eine DHM-Erstellung im Hinblick auf das gesamte IMPETUS-Projektgebiet, das Drâa-Einzugsgebiet, ange-dacht. Da das Drâa-Einzugsgebiet nicht nur große Ausmaße annimmt, sondern auch weit in das Atlasgebirge hineinreicht, steht

demnach bei der Erstellung eines DHM die Berücksichtigung eines großen und komplex strukturierten Gebietes im Vordergrund. Wie sich im Laufe der Arbeit zeigen wird, folgen daraus bestimmte Restriktionen und Voraussetzungen für die Anwendung der Software-Programme. Somit besteht das Ziel, ein DHM für ein möglichst großes Gebiet unter möglichst geringem zeitlichen und finanziellen Aufwand (z. B. nur ein Feldaufenthalt, möglichst geringe, jedoch genaue DGPS-Vermessung) zu erstellen.

### 1.3 Testgebiet

Für erste Tests zur Erstellung eines DHM mit der genannten Software wurde jedoch nur ein kleiner Ausschnitt des Drâa-Einzugsgebietes als Untersuchungsgebiet ausgewählt. Dieses Testgebiet befindet sich am südlichen Abhang des Atlasgebirges wenige Kilometer nördlich des kleinen Ortes Skoura und besitzt eine Größe von ca. 100 km<sup>2</sup> (Abb. 2, 3, 4). Für die DHM-Generierung wurde das Testgebiet in eine Nord- und eine Südhälfte gesplittet, da es auf den Afterward-CORONA-Bildern auf zwei Streifen zu liegen kam (siehe unten). Geologisch befindet sich das Testgebiet im Übergangsbereich vom Hohen Atlas zum Becken von Ouarzazate. Der Hohe Atlas besteht aus einem varizischen Grundgebirgssockel mit einem aufgelagerten mesozoischen Deckge-



**Abb. 2:** Testgebiet Skoura, Marokko (umrahmt) (RV-Verlag o. J.).



**Abb. 3:** Blick in das Testgebiet gegen Norden (Foto: A. Altmaier).



**Abb. 4:** Blick in den Nordteil des Testgebietes gegen Nordosten (Foto: A. Altmaier).

birge und beinhaltet hauptsächlich Sand- und Kalkstein. Das Becken von Ouarzazate zieht sich südlich entlang dieses Hohen Atlas-Gebirges und enthält eine Füllung aus Kalk-, Sand-, Silt- und Tonstein. Aus hydrologischer Sicht gehört das Testgebiet zu einer Region unterdurchschnittlicher Regenmenge. Dadurch ist die natürliche mediterrane Vegetation im Testgebiet nur punktuell vorhanden oder fehlend, eine fluviale Erosion findet kaum statt. Die ackerbaulich genutzten Flussoasen bilden somit den meist einzigen vorhandenen Vegetationsbereich. Entlang dieser Flussoasen lassen sich nur vereinzelt kleine Dörfer in der typischen Lehm-bauweise finden. Für die GPS-Vermessung erwies sich die Vegetationsarmut und die geringe Besiedlungsdichte als Vorteil. Ebenso waren durch die geringe Vegetation und Erosion kaum negative Genauigkeitseinflüsse auf die DHM-Generierung vorhanden (IMPETUS 2001a).

## 2 CORONA – Satellitenbilder und GPS-Vermessung

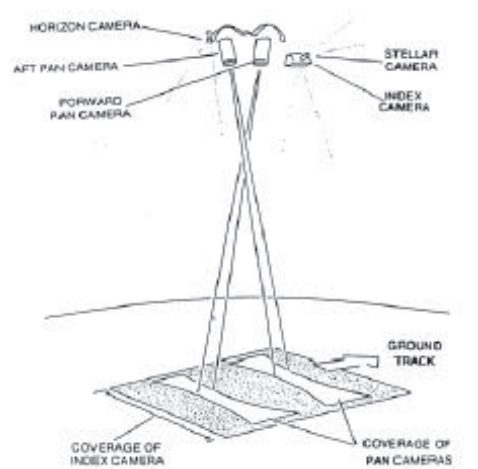
### 2.1 CORONA-Satellitenbilder

Als Datengrundlage der DHM-Erstellung dienen Luftbilder des CORONA-Satelliten. Dieser stellt die erste Generation der US-Foto-Aufklärungs-Satelliten dar, gebaut von der US-Air Force und der US-Central Intelligence Agency (CIA). Der CORONA-Satellit nahm von 1960-1972 panchromatische Stereo-Bilder in einer maximalen Auflösung von ca. 1,8 m aus einer Höhe von 150 km auf (DAY et al. 1998, RUFFNER 1995, McDONALD 1995a, McDONALD 1995b, TRAPPAN et al. 2000). Dazu wurden von zwei Kameras, die in einem 30°-Winkel zueinander geneigt sind, gleichzeitig so genannte Forward- (in 15° gegen Flugrichtung geneigte Kameras) und so genannte Afterward-Bilder (in 15° zur Flugrichtung geneigt) erstellt (Tab. 1, Abb. 5). Anlass der Lancierung des CORONA-Satelliten war die Erforschung strategischer Waffenvorkommen der ehemaligen Sowjetunion. Darüber hinaus dienten die CORONA-Bilder

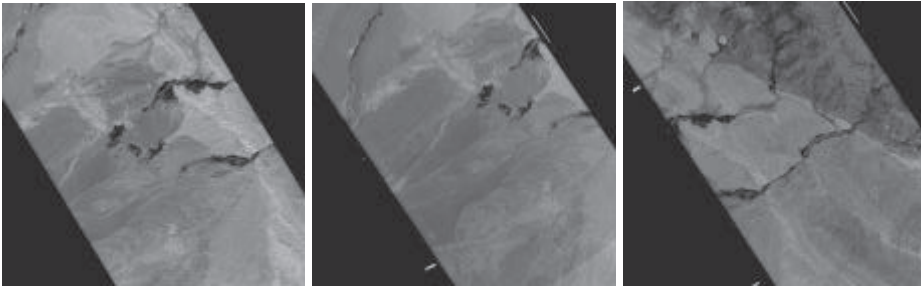
**Tab. 1:** Aufnahmeparameter des CORONA-Satelliten (USGS 2001).

System	CORONA KH-4B
Aufnahmedatum	Mai 1972
Kameratyp	Panchromatisch
Filmbreite	70 mm
Größe des aufgenommenen Gebietes	14 km × 188 km
Brennweite	60,69 cm
Bildauflösung	160 L/mm
Bodenauflösung	1,8 m
Flughöhe	150 km

der Kartenproduktion für das US-Verteidigungsministerium und anderen kartographischen Programmen der US-Regierung. Auf Grund der militärpolitischen Intention lag der Schwerpunkt der CORONA-Aufnahmen im Bereich Osteuropa und Asien. 1995 wurden die verfügbaren CORONA-Bilder von der US-Regierung für den öffentlichen Gebrauch freigegeben und können nun beim USGS erworben werden (USGS 2001). Die Aufnahmen liegen je nach Mission in unterschiedlichen Qualitäten vor. 40% der Bilder sind auf Grund einer starken Bewölkung nur bedingt nutzbar. Die in dieser Arbeit verwendeten CORONA-Bilder entstammen jedoch der letzten CORONA-



**Abb. 5:** CORONA-Kamerasystem (CAMPBELL 1996).



**Abb. 6:** Forward- und Afterward-Corona-Bilder (zweigeteilt) des Testgebietes in Marokko.

Mission, die zu den sehr erfolgreichen gehört und sich durch eine gute Bildqualität auszeichnet. Die benachbarten Filmstreifen überschneiden sich zu ca. 10 % in Nordsüd-Flugrichtung (USGS 2001). Somit ist eine vollständige Abdeckung des überflogenen Gebietes gesichert und eine Weiterverarbeitung benachbarter Filmstreifen möglich. Allerdings treten teilweise geometrische Verzerrungen oder Maßstabsdifferenzen zwischen den Stereopaaren auf (GOOSSENS et al. 2000).

Die verwendeten CORONA-Bilder wurden mit einem Desktop-Scanner in einer Auflösung von 1600 dpi und 2400 dpi für die weitere Verarbeitung gescannt.

Im Forward-CORONA-Bild liegt das gesamte Testgebiet auf einem Filmstreifen, im Afterward-Bild jedoch auf zwei benachbarten Streifen geteilt in Nord- und Südhälfte (ca. 30 % und 70 % der Fläche) (Abb. 6).

## 2.2 GPS-Vermessung

Als zweite Datengrundlage wurde im Projektgebiet eine GPS-Vermessung (Global Positioning System) mit einem Differenziellen GPS des Leica 300-Systems im März 2001 durchgeführt. Die aufgenommenen Daten dienen im Weiteren dem Vergleich für die Abschätzung der Höhenabweichung des automatisch mittels Software generierten DHM. Während der GPS-Vermessung wurden einerseits „Passpunkte“ an markanten Stellen aufgenommen, die anschließend in den Software-Programmen im digitalen CORONA-Bild als Ground Control Points

(GCP) gesetzt werden konnten. Andererseits wurden Hang- und Talkanten eingemessen, um daraus ein „Referenz-DHM“ zu Vergleichszwecken zu erstellen. Diese Einmessung erfolgte sowohl zu Fuß (in 10–20 m Abständen) als auch per Geländewagen (in 50 m Abständen), um eine Erfassung des gesamten Gebietes in relativ kurzer Zeit zu realisieren (Abb. 7, 8). Insgesamt wurden auf diese Weise ca. 5000 Punkte für das gesamte Testgebiet aufgenommen. Die Genauigkeit der Punkte liegt dank des DGPS im Zentimeterbereich. Während sich die Vegetationsarmut als günstig für die GPS-Vermessung erwies, wirkten die Unwegsamkeit des Geländes, welches kaum durch Straßen



**Abb. 7:** Wege der GPS-Vermessung im Testgebiet von Skoura (in schwarz).



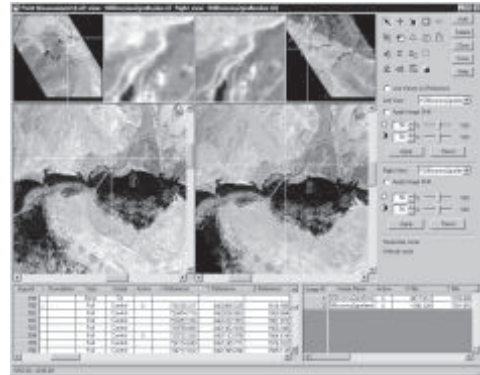
**Abb. 8:** GPS-Aufnahme mit dem DGPS Leica 300 in Marokko (Foto: A. Altmaier).

erschlossen ist, sowie die zeitlichen Restriktionen eher gegenteilig. Für die Aufnahme der Passpunkte mussten markante Stellen gefunden werden, die sich seit der CORONA-Bildaufnahme 1972 nicht verändert haben und somit sowohl heute als auch in den Luftbildern wiederzufinden waren. Dazu eigneten sich am besten Weg- oder Weg-Fluss-Kreuzungen. Da sich das Gebiet jedoch strukturell seit den CORONA-Aufnahmen verändert hat und da gewisse Höhenlagen oder abgelegene Gebiete nur schwerlich zu erreichen waren, konnten nicht in allen Teilbereichen des Testgebietes GCPs aufgenommen oder metergenau in den CORONA-Bildern wiedergefunden werden. Dies erwies sich jedoch in der folgenden DHM-Generierung (Triangulation) mittels Software als eine Grundvoraussetzung. Daher konnten nur bestimmte GCPs für eine erfolgreiche DHM-Erstellung verwendet werden.

### 3 Digitales Höhenmodell und Orthophoto

#### 3.1 Digitales Höhenmodell

Zur automatischen Generierung des DHM wurden alternativ die zwei Software-Programme OrthoBASE Pro von ERDAS und VirtuoZo 3.2 eingesetzt. Auf Grund der oben dargestellten Zweiteilung des After-

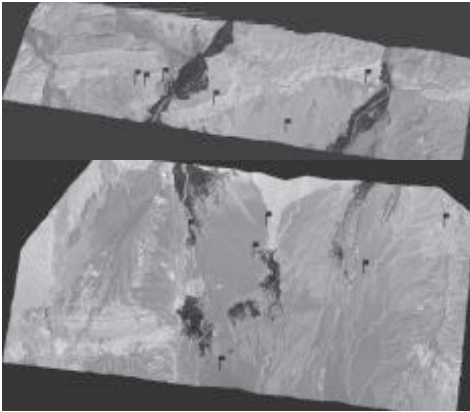


**Abb. 9:** Tie Points und GCPs in der OrthoBASE Pro-Arbeitsfläche.

ward-CORONA-Bildes für das Testgebiet wurden zwei separate DHM, für den Nordteil sowie den Südteil, mit OrthoBASE Pro erstellt und anschließend zu einem Mosaik zusammengefügt.

Der Vorteil der verwendeten Programme für die Auswertung von CORONA-Bildern liegt in der Möglichkeit, mit nur wenigen Kamera- und Bilddaten zu arbeiten. Da von CORONA auf Grund der nicht-metrischen Kamera nur ausgewählte Kamera- und Satellitendaten (z. B. Brennweite) bekannt sind, erlaubt OrthoBASE Pro ein Arbeiten mit der Eingabe von nur drei Parametern: Flughöhe von 150 km, Brennweite von 610 mm und Pixelgröße je nach Scan-Auflösung. In VirtuoZo 3.2 sind keine Input-Parameter erforderlich (SCHMIDT et al. 2001, GOOSSENS et al. 2001).

In OrthoBASE Pro werden nach der Eingabe der Input-Parameter die Forward- und Afterward-CORONA-Bilder eingeladen. Für diese beiden Satellitenbilder gilt es nun, ihre relative Orientierung zueinander und ihre absolute Orientierung zur Erde herzustellen (Abb. 9, HEIPKE 1997). Die relative Orientierung setzt die Bildkoordinaten beider Satellitenbilder in Beziehung. Dazu werden automatisch Tie Points als Verknüpfungspunkte in beiden Bildern gesetzt. Für den Nordteil des Testgebiets setzte OrthoBASE Pro ca. 200 Tie Points, für den Südteil ca. 400, meist gleichmäßig über die Fläche verteilt. Die Tie-Point-Suche erfolgt in



**Abb. 10:** Lage der GCPs im Nord- und Südteil des Projektgebietes.

OrthoBASE Pro automatisch über ein strukturbezogenes relationales Matching-Verfahren, welches auf den Beziehungen zwischen Objekten basiert und keine Orientierungsparameter benötigt (WANG o.J.). Tie Points besitzen nur Bildkoordinaten, ihre Erdkoordinaten müssen im Weiteren in der absoluten Orientierung berechnet werden.

Zur absoluten Orientierung bedarf es der Eingabe von mindestens drei Ground Control Points (GCP): zwei vollständige GCPs mit xyz-Koordinaten und ein GCP mit alleiniger z-Koordinate. Das ergibt insgesamt sieben Werte. Diese sind bei der späteren Orientierungserstellung nötig zur Berechnung von sieben unbekanntem Parametern: dem Maßstabsfaktor (der die Maßstabsdifferenz zwischen Bild- und Erdkoordinatensystem beschreibt), xyz-Koordinaten (welche die Positionsdifferenzen zwischen Bild- und Erdkoordinatensystem definieren) und den drei Rotationswinkeln (die die Rotationsbeziehung zwischen Bild- und Erdkoordinatensystem definieren) (ERDAS 1999). Die GCPs besitzen Erdkoordinaten und stellen so die Beziehung der Satellitenbilder und Bildkoordinaten zur Erdoberfläche her. Im vorliegenden Projekt bedurfte es für den Nordteil sieben GCPs, für den Südteil sechs. Diese wurden nach Lagegenauigkeit in den CORONA-Bildern sowie nach guter Verteilung in möglichst allen

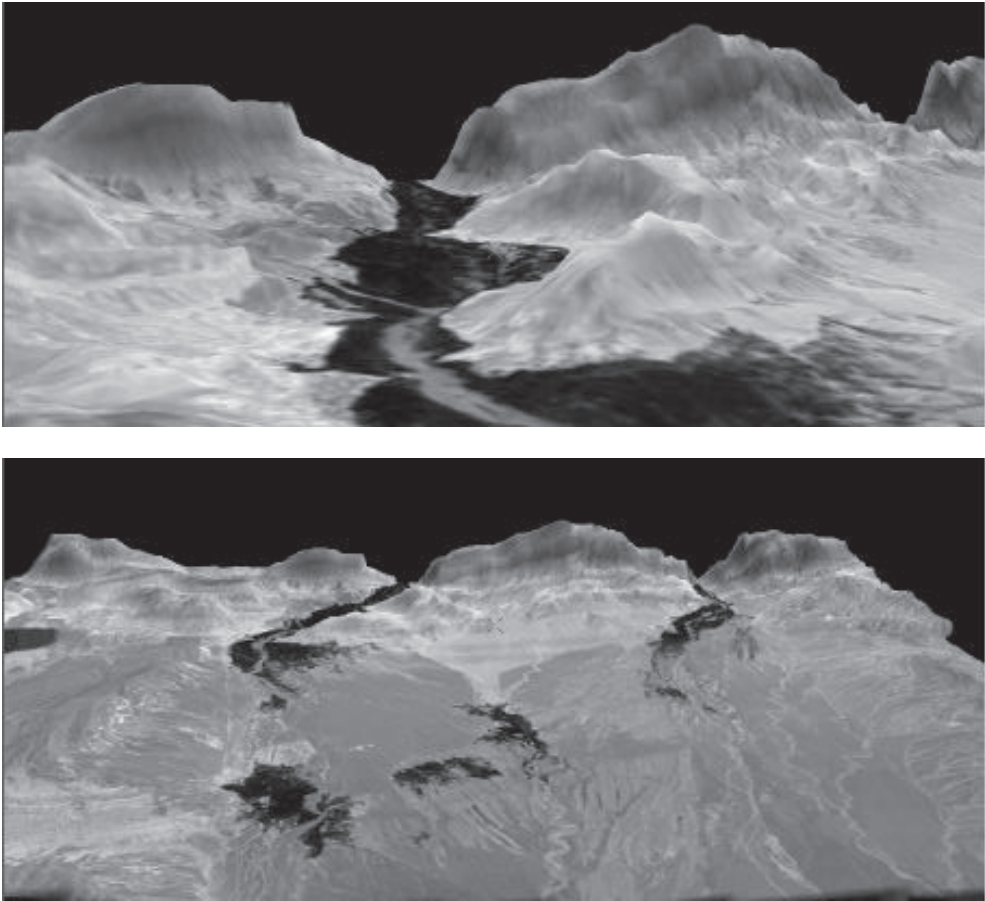
Höhenlagen und Bildbereichen ausgewählt (Abb. 10).

In der folgenden Triangulation berechnet OrthoBASE Pro über Kollinearitätsgleichungen und Parallaxendifferenzen die fehlenden Parameter der externen Orientierung (Brennpunkt und Rotationswinkel), die Erdkoordinaten der Tie Points sowie ein feingliedriges Punktenetz als Grundlage der DHM-Generierung (MIKHAIL et al. 2001). Aus diesem Punktenetz erstellt OrthoBASE Pro durch Interpolation ein Digitales Höhenmodell sowie die zugehörigen Höhenlinien, in ESRI Shapefile- und ASCII-Format (Abb. 11).

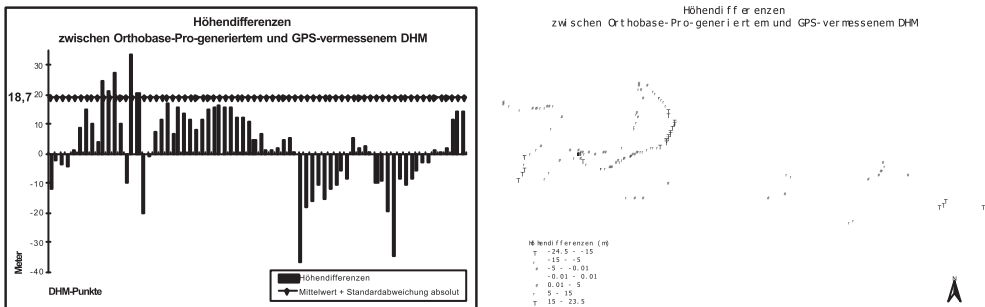
Zur Evaluation der erstellten DHM bezüglich ihrer Genauigkeit in Höhe (z-Richtung) und Lage (x,y-Richtung) wurde ein Vergleich erstellt zwischen dem Höhenmodell der OrthoBASE Pro-generierten Punkten und dem Höhenmodell der GPS-vermessenen Punkte.

Das DHM des Nordteils erreichte nach automatischen Berechnungen von OrthoBASE Pro eine mittlere relative Höhengenaugigkeit von 12,5 m sowie eine Lagegenauigkeit von 2,5 m in x-Richtung und 2,7 m in y-Richtung mit einem Gesamt-RMSE von 0,58. Diese Höhengenaugigkeit konnte durch einen absoluten Vergleich mit den GPS-vermessenen Punkten bestätigt werden: Dazu wurden die Höhenwerte von 113 GPS-vermessenen Punkten mit in der Lage gleichgelegenen OrthoBASE Pro-generierten Punkten verglichen. Die mittlere Höhengenaugigkeit erlangt hierbei 13,5 m (Abb. 12). Die Genauigkeitswerte variieren dabei je nach Bildbereich in Abhängigkeit der Lage der GCPs (Abb. 12): Große Höhenungenauigkeiten entstehen in GCP-entfernten Gebieten (z. B. Ostteil) sowie in Berggebieten mit geringer GCP-Abdeckung (GCPs siehe Abb. 10).

Die Berechnungen für den Südteil ergaben folgende Werte: eine mittlere relative Höhengenaugigkeit von 21,6 m sowie eine Lagegenauigkeit von 4,8 m in x-Richtung und 5,7 m in y-Richtung nach Berechnungen von OrthoBASE Pro. Der Vergleich mit 70 GPS-vermessenen Punkten ergab eine mittlere Höhengenaugigkeit von 18,7 m



**Abb. 11:** Digitales Höhenmodell, erstellt mit OrthoBASE Pro von ERDAS, für das gesamte Testgebiet in Marokko (Mosaik): Gesamtansicht (unten) sowie Blick in den Nordteil (oben).



**Abb. 12:** Mittlere Höhengenaugigkeit des OrthoBASE Pro-generierten DHM für den Nordteil sowie räumliche Verteilung der Höhengenaugigkeit.



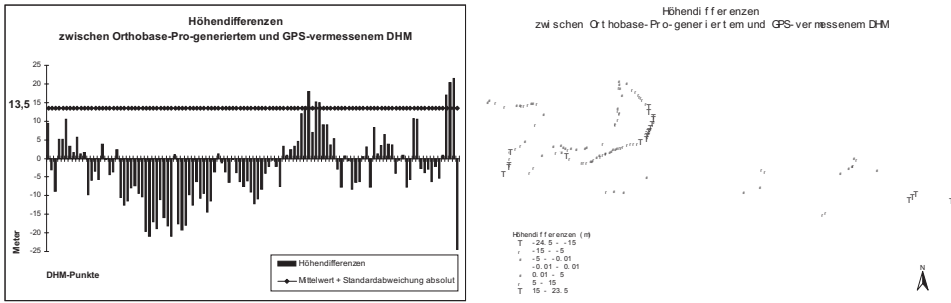


Abb. 13: Mittlere Höhengenaugigkeit des OrthoBASE Pro-generierten DHM für den Südteil sowie räumliche Verteilung der Höhengenaugigkeit.

(Abb. 13). Die etwas geringere Höhengenaugigkeit des Südteil-DHM im Gegensatz zum Nordteil-DHM liegt in der schlechteren GCP-Verteilung im Bezug auf die größere Fläche begründet: in den nicht abgedeckten Bildbereichen steigt die Höhengenaugigkeit auf über 30 m an (Abb. 13, 10):

Die Lagegenauigkeit des OrthoBASE Pro-generierten DHM konnte ebenfalls mit Hilfe eines Anaglyphenbildes, erstellt im ERDAS Stereo Analyst, visuell überprüft werden. Abb. 14 zeigt einen Ausschnitt aus dem Nordwestteil. Gleichzeitig ermöglicht dieses Anaglyphenbild eine 3D-Auswertung,

beispielsweise für Erosions- oder Abflussstudien mit Hilfe des digitalen Erfassens von Geländekanten.

Die mit OrthoBASE Pro erzielten Ergebnisse konnten in einem parallelen Test für den Nordteil mit der Software VirtuoZo 3.2 annähernd bestätigt werden. Das australische Programm verfolgt einen ähnlichen theoretischen und praktischen Ansatz wie OrthoBASE Pro. Im Vergleich mit den GPS-vermessenen Punkten konnte eine mittlere Höhengenaugigkeit von 19 m erreicht werden (Abb. 15, 16).

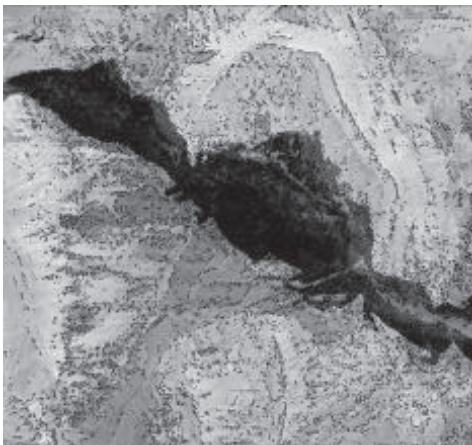


Abb. 14: Anaglyphenbild des OrthoBASE Pro-generierten DHM für den Nordteil (hier nur als sw-Druck).

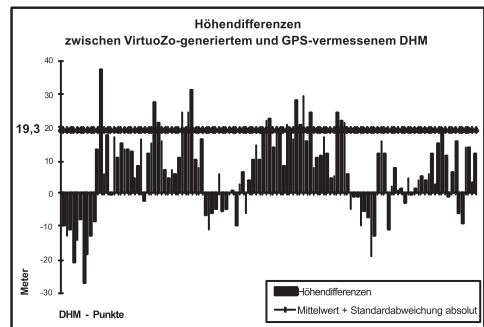


Abb. 15: Höhendifferenzen des VirtuoZo-generierten DHM für den Nordteil.

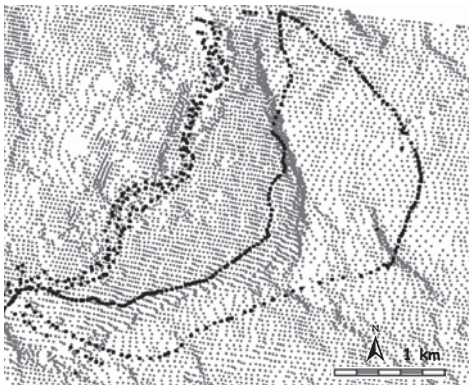


Abb. 16: Mit VirtuoZo 3.2 erstelltes DHM für den Nordteil des Testgebietes.

### 3.2 Abhängigkeit der DHM-Genauigkeit

Insgesamt konnte eine Abhängigkeit der DHM-Genauigkeit von folgenden Faktoren festgestellt werden: der GCP-Verteilung sowie -Genauigkeit und damit der Größe des Gebietes, dem Kontrastreichtum der Luftbild-Scans sowie der Übung und Erfahrung des Anwenders.

Besonders ausschlaggebend erwies sich die Verteilung und Genauigkeit der GCPs. In einem weiteren Test für den Nordteil konnte gezeigt werden, dass bei Konzentration der verwendeten GCPs in nur einem Teilbereich des Bildes für das Restgebiet des DHM sehr große Genauigkeitsabweichungen des generierten DHM von bis zu 60 m entstehen. In einem anderen Beispiel wirkten sich fehlende GCPs in den Bergregionen im Nordteil in einer extremen Lageverschiebung des Höhenzuges aus (Abb. 17). Wie bereits erwähnt, eignen sich außerdem nur metergenau in den CORONA-Bildern wiedergefundene GCPs für eine hochwertige DHM-Erstellung. Ein metergenaues Wiederfinden der GCP-Passpunkte im CORONA-Bild während des Feldaufenthaltes erweist sich jedoch oft als schwierig, da sich Strukturen seit der CORONA-Aufnahme verändert haben oder geeignete markante Punkte in den gering erschlossenen Berggebieten schwer zu finden sind. Zudem müssen



**Abb. 17:** Lageverschiebung des DHM-Höhenzuges (in grau) im Vergleich zu den GPS-vermessenen Punkten (in schwarz).

GCPs aus allen Höhenlagen und Bildbereichen vorhanden sein. Für größere Gebiete sind diese Eigenschaften der GCPs somit mit mehr Aufwand zu erfüllen als für kleinere, es sei denn, es ist nur eine gute bis mittlere Genauigkeit erwünscht.

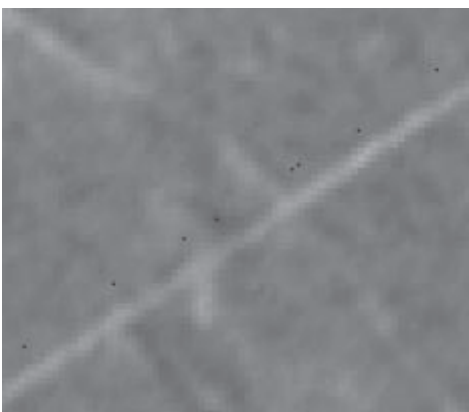
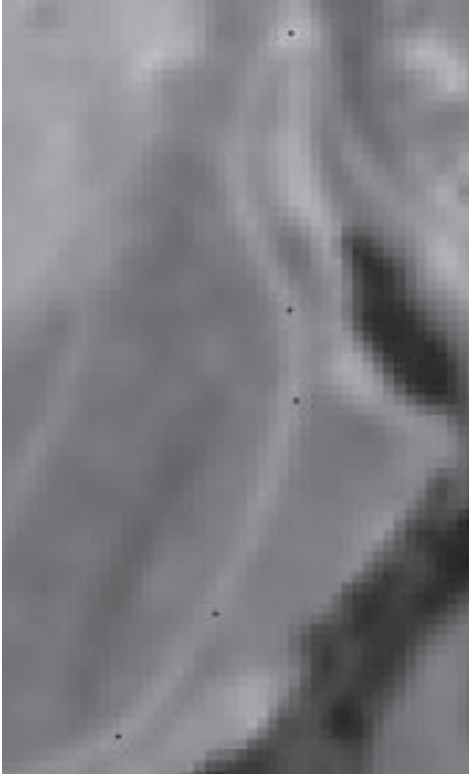
Eine nicht unerhebliche Rolle für die Genauigkeit spielt ebenfalls die Qualität der Satellitenbilder-Scans, vor allem ihr Kontrastreichtum. Es konnte gezeigt werden, dass kontrastärmere Scans die Höhen-genauigkeit an den entsprechenden Stellen negativ beeinflussen.

### 3.3 Orthophotos

Mit der erfolgreichen DHM-Generierung sind die Voraussetzungen geschaffen für die Herstellung eines Satelliten-Orthophotos. Dabei wird das Satellitenbild über das Höhenmodell gelegt und lotrecht (orthogonal) zur Erdoberfläche abgebildet. Diese Orthophotos können sowohl aus den CORONA- als auch aus den IKONOS-Satellitenbildern hergestellt werden und anschließend als Grundlage für räumlich-zeitliche und thematisch-kartographische Analysen im interdisziplinären Einsatz dienen. Die CORONA-Satelliten-Orthophotos wurden in OrthoBASE Pro auf Grundlage der errechneten DHM erstellt. Dies ist ebenfalls für Mono-IKONOS-Satellitenbilder möglich, wenn ihnen ein Image Geometry Model (IGM) mit den nötigen Orientierungsparametern beigefügt ist. Dazu beinhaltet ERDAS 8.5 eine automatische Erkennung dieser von Space Imaging verschlüsselten IKONOS-Orientierungsparameter.

Das Genauigkeitspotenzial der CORONA-Orthophotos konnte durch einen visuellen Vergleich mit den GPS-vermessenen Punkten evaluiert werden. Für den Nordteil kann eine sehr hohe Genauigkeit erreicht werden: Ausgehend von einer aus dem Scanvorgang resultierenden Pixelgröße von ca. 4 m beträgt die Lagegenauigkeit der GPS-vermessenen Punkte ca. ein Pixel (Abb. 18) und damit ca. 4 m. Für den Südteil liegt die Genauigkeit des Orthophotos auf Grund des ungenaueren DHM etwas niedriger: Hier entsteht eine Differenz bezüglich der

GPS-vermessenen Punkte von ca. drei Pixeln und damit eine Genauigkeit von 10–15 m (Abb. 18).



**Abb. 18:** CORONA-Satelliten-Orthophoto, erstellt in OrthoBASE Pro und überlagert mit GPS-vermessenen Punkten: Ausschnitt für den Nordteil (oben) und den Südteil (unten).

#### 4 Resümee

Insgesamt stellen die verwendeten Software-Programme OrthoBASE Pro von ERDAS und VirtuoZo 3.2 eine einzigartige Möglichkeit dar, Digitale Höhenmodelle mit einer guten Genauigkeit ohne Totalvermessung aus CORONA-Bildern zu erstellen. Sicherlich kann dabei das in der dargestellten Arbeit durchgeführte Pilotprojekt in Südmarokko nur als ein Beispiel für den Einsatz der beschriebenen Software-Programme gelten und sollte daher nicht als ihre absolute Wertung angesehen werden. Das Ergebnis ist vielmehr vor dem Hintergrund der eingangs gestellten Zielsetzung zu sehen: möglichst große Genauigkeit bei möglichst geringem Aufwand und sehr großer Gebietsfläche. Diesbezüglich wurde in dieser Arbeit gezeigt, dass mit zwar nicht geringem Aufwand jedoch mittlere bis gute Ergebnisse selbst für größere Gebiete (100 km<sup>2</sup>) erzielt werden können. Die Modellierung des gesamten Projekt-Einzugsgebietes stellt jedoch weiterhin eine Herausforderung dar.

Selbst wenn heutige moderne Methoden wie HRSC und Laser Scanning die Möglichkeiten der DHM-Erstellung stark verbessern, so stellen die CORONA-Bilder dennoch weiterhin für bestimmte Gebiete, vor allem für Entwicklungsländer mit wenig Luftbild- und Kartenmaterial, eine preisgünstige Grundlage zur DHM-Generierung dar.

#### Danksagung

Für die Mithilfe zum Gelingen dieser Arbeit soll an dieser Stelle allen beteiligten Personen, Institutionen und Firmen ein herzliches Dankeschön ausgesprochen werden. Unterstützt wurde diese Arbeit vom BMBF (Projektnummer 07GWK02) und vom MSWF (Projektnummer 514-21200200), insbesondere von Herrn Prof. GUNTER MENZ und Dipl.-Geogr. MICHAEL SCHMIDT (RSRG Universität Bonn). Ein besonderer Dank gilt der Firma GEOSYSTEMS GmbH in Germering für die Bereitstellung der Software sowie der TU München (Herr CZAJA), der Leica-Vertretung Düsseldorf und Mün-

chen, Herrn FUHLBRÜGGE (Geodäsie Universität Bonn) und dem Vermessungsbüro Kany für GPS-Leihgaben und technische Beratung.

## Literatur

- CAMPBELL, J.B., 1996: Introduction to remote sensing. – Taylor and Francis Ltd., London.
- DAY, D.A., LOGSDON, J.M. & LATELL, B., 1998: Eye in the sky, The story of the corona spy satellites. – Smithsonian, London.
- ERDAS (Hrsg.), 1999: ERDAS IMAGINE V8.4 OrthoBase™, Tour Guide. – Atlanta.
- GOOSSENS, R., DE MAN, J. & DE DAPPER, M., 2000: Research to possibilities of Corona-satellite-data to replace conventional aerial photographs in georcheological studies, practised on Sai, Sudan. – In: BUCHROITHNER, M.F., 2000: A decade of trans-european remote sensing cooperation. – Lisse/Netherlands, 257–262.
- GOOSSENS, R., SCHMIDT, M. & ALTMAIER, A., 2001: Extraction of a Digital Elevation Model (DEM) and ortho-images from CORONA KH4B data. – in press, Hannover.
- HEIPKE, C., 1997: Automation of interior, relative, and absolute orientation. – Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, **52**: 1–19.
- IMPETUS (Hrsg.), 2001a: IMPETUS Westafrika – Erster Zwischenbericht 2000. – Köln.
- IMPETUS (Hrsg.), 2001b: [www.uni-koeln.de/globaler-wandel/impetus](http://www.uni-koeln.de/globaler-wandel/impetus) (Juli 2001).
- MCDONALD, R.A., 1995a: CORONA. – Photogrammetric engineering and remote sensing, **61**: 689–720.
- MCDONALD, R.A., 1995b: Opening the cold war sky to the public – declassifying satellite reconnaissance imagery. – Photogrammetric engineering and remote sensing, **61** (4): 385–391.
- MIKHAIL, E.M., BETHEL, J.S. & MC GLONE, J.C., 2001: Introduction to modern photogrammetry. – John Wiley and Sons, Inc., 479 S., New York.
- RUFFNER, K.C., 1995: Americas first satellite program. CIA history staff. – 362 S., Washington.
- RV-VERLAG (Hrsg.), o.J.: World-Länderkarte Marokko 1:800000. – Ostfildern.
- SCHMIDT, M., GOOSSENS, R. & MENZ, G., 2001: Processing techniques for CORONA satellite images in order to generate high-resolution digital elevation models (DEM). – Proceedings of the 21th EARSeL symposium, May 2001, Paris.
- TAPPAN, G.G., HADJ, A., WOOD, E.C. & LIETZOW, R.W., 2000: Use of Argon, Corona, and Landsat imagery to assess 30 years of land resource changes in west-central Senegal. – Photogrammetric engineering and remote sensing, **66** (6): 727–735.
- USGS (Hrsg.), 2001: <http://edcwww.cr.usgs.gov/webglis> (Juni 2001)
- WANG, J., o.J.: Fully Automatic Image Matching. – Atlanta.

## Anschrift der Autoren:

Dipl.-Geogr. ANGELA ALTMAIER  
Geographisches Institut der Universität Bonn  
Privat: Holzbachstr. 13  
D-82110 Germering,  
Tel.: 089-84 81 51 oder 0228-242 20 08  
e-mail: [angelaaltmaier@hotmail.com](mailto:angelaaltmaier@hotmail.com) oder  
[a.altmaier@gmx.net](mailto:a.altmaier@gmx.net)

Vermessungstechniker CHRISTOPH KANY  
Steinweg 32, D-53121 Bonn  
Tel.: 0228-9628397 oder 0171-6120123  
e-mail: [christoph@kany.de](mailto:christoph@kany.de)

Manuskript eingereicht: Oktober 2001  
Angenommen: November 2001