

CORONA-Höhenmodelle und Orthofotos

KARSTEN JACOBSEN¹ & ROLF RÜDIGER LUDWIG²

Zusammenfassung: Für Stadtentwicklungsprojekte in Bangladesh werden Orthofotos und Höhenmodelle aus der Zeit vor etwa 50 Jahren benötigt als Grundlage einer geomorphologischen Kartierung und um die frühere Lage der Wasserläufe berücksichtigen zu können. Beides ist zur Einschätzung der Baugrundstabilität und Gebietsdrainage erforderlich. Alte Unterlagen sind nicht vorhanden, weswegen auf CORONA-Satellitenbilder zurückgegriffen werden musste. CORONA Bilder wurden mit einer Panoramakamera auf Dünnschichtfilm im Format von ~75cm x 5,5cm aufgenommen, womit die Bildgeometrie schwierig ist. Aus diesem Grund wird in der Literatur nur von der Auswertung von Bildausschnitten berichtet. Für das Projekt war aber die Auswertung der ganzen Filme erforderlich, was eine intensive Analyse und Berücksichtigung von systematischen Bildfehlern erforderte. Die absolute Standardabweichung der Orthofotos konnte so mit etwa 10m bis 15m realisiert werden. Um die gute relative Höhenbestimmungsgenauigkeit von etwa 3m auch absolut zu erreichen wurden die Höhenmodelle auf das frei verfügbare TDM90 DSM eingepasst.

1 Einleitung

Bangladesch weist weltweit eine anhaltend sehr hohe Urbanisierungsrate auf. Dhaka ist beispielsweise seit 1975 um das 35-fache gewachsen und nimmt weltweit eine Spitzenposition ein. Neubaugebiete entstehen zunehmend in Niederungen auf mehrere Meter mächtigen künstlichen Sandaufschüttungen um die Hochwassergefahr zu minimieren. Hinweise auf ehemalige Gewässer und Niederungen werden damit verdeckt. Für die Stadtplanung ist deren ehemalige Lage, die sich in dem Hochwassergebiet seit 1972 stark verschoben hat, jedoch von großer Bedeutung, da hier erhöhter Gründungs- und Konstruktionsaufwand zu erwarten ist. Unzureichend Planung von Straßendämmen behindert die natürliche Drainage. Alte Luftbilder und Höhenmodelle sind nicht verfügbar. Es bieten sich vorhandene CORONA-Aufnahmen an (MCDONALD 1997). CORONA KH-4B Stereopaare vom April 1972 decken den für ein Vorhaben der bangladeschisch-deutschen technischen Zusammenarbeit interessierenden Bereich ab. Die amerikanischen CORONA-Aufnahmen aus der Anfangszeit der Satellitentechnik sind eine häufig genutzte Möglichkeit um Informationen über alte Zustände preisgünstig zu erhalten. CORONA-Aufnahmen wurden ursprünglich primär für Objektinterpretationen eingesetzt, mit etwas Aufwand sind aber auch geometrische Auswertungen möglich.

2 CORONA Kamera und Bildaufnahme

Die CORONA KH-4B-Aufnahmen mit einer Panoramakamera mit 610mm Kammerkonstante (Abb. 1) aus etwa 154 km Höhe haben für die damalige Zeit eine hervor ragende nominelle Objektauflösung entsprechend der vom USGS verwendeten 7 µm Pixelgröße der gescannten Fotos von 1.77 m in der Bildmitte bis 2.18 m in Y-Richtung und 2.69 m in X-Richtung an den Bildenden, entsprechend im Flächenmittel etwa 2,0 m. Eine Kantenanalyse (JACOBSEN 2008) ergab eine effektive Objektauflösung,

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

² Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe; D- 30655 Hannover E-Mail: r.ludwig@bgr.de

die etwa 10% über der nominellen liegt. Nur die letzten etwa 2 cm an den Bildenden sind wegen deutlich unscharfer Abbildung nur eingeschränkt brauchbar.

CORONA KH-4B hat eine vorwärts und eine rückwärts gerichtete Panoramakamera mit einem Nadirwinkel von jeweils etwa 15° (Abb. 1), was zu einem Basis-Höhenverhältnis des Stereomodells von 1: 1.85 führt.

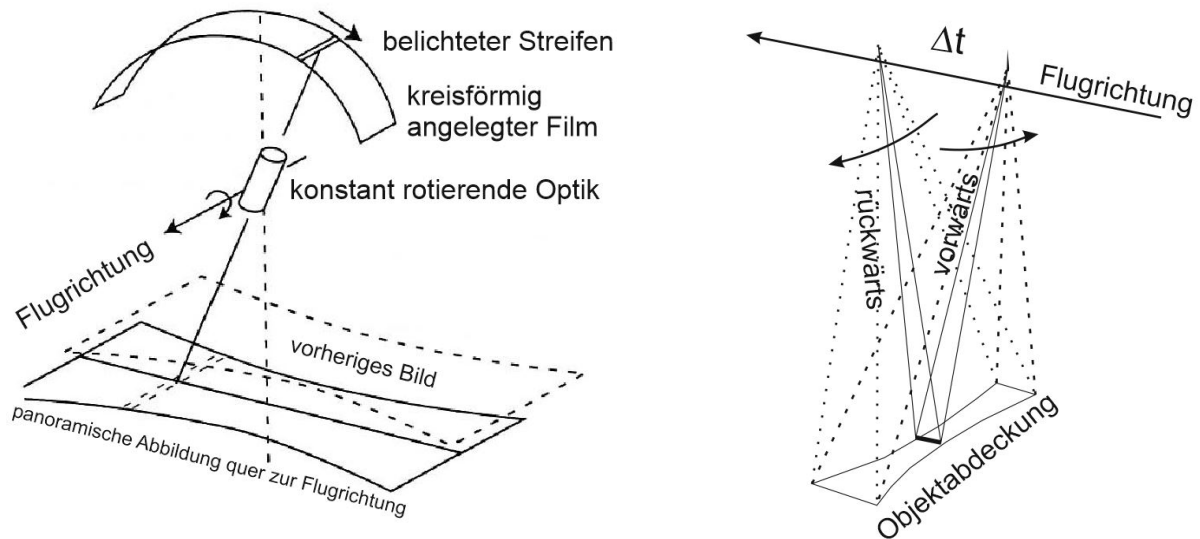


Abb.1: Abbildungs- und Aufnahmeprinzip von CORONA KH4B

Aus etwa 154 km Höhe wird durch eine Panoramaaufnahme von $75\text{cm} \times 5,5\text{cm}$ eine Fläche von $220\text{ km Länge} \times 14\text{ km Breite}$ in der Bildmitte und etwa 17km am Bildende erfasst. Benachbarte Bilder überdecken sich geringfügig in der Bildmitte und bis zu 40% an den Bildenden. Die zu einem Stereopaar zusammengefügt, korrespondierenden Vorwärts- und Rückwärtsaufnahmen überdecken sich in Flugrichtung nur zu etwa 90% (Abb. 2), womit im mittleren Bereich benachbarter Bilder eine Lücke zwischen den erstellten Höhenmodellkombinationen verbleibt, die durch eine schmale Stereokombination des Vorwärtsbildes des vorangegangenen Stereopaars und des aktuellen Rückwärtsblickes geschlossen werden kann.



Abb. 2: Durch ein Stereopaar mit den vier Bildteilen der Aufnahmen erfasste Fläche

CORONA-Bilder werden mit $7\text{ }\mu\text{m}$ Pixelgröße in 4 überlappenden Teilen gescannt (Abb. 2). Es ist erforderlich, dass die Bildteile mit Hilfe von Verknüpfungspunkten durch eine Ähnlichkeitstransfor-

mation zusammengesetzt werden da auch leichte Rotationen durch die mechanische Anlage der Bilder im Scanner vorhanden sind. Die Auswirkung der geneigten Aufnahmerichtungen ist besonders an den nicht parallelen Bildenden in Abb.2 erkennbar.

Wegen des Filmformats von etwa 75 cm quer zur Flugrichtung und 5,5 cm in Flugrichtung sind Bildverbiegungen zu erwarten. Bildverbiegungen lassen sich durch die Seitenlinien in Filmlängsrichtung kontrollieren (Abb. 3).

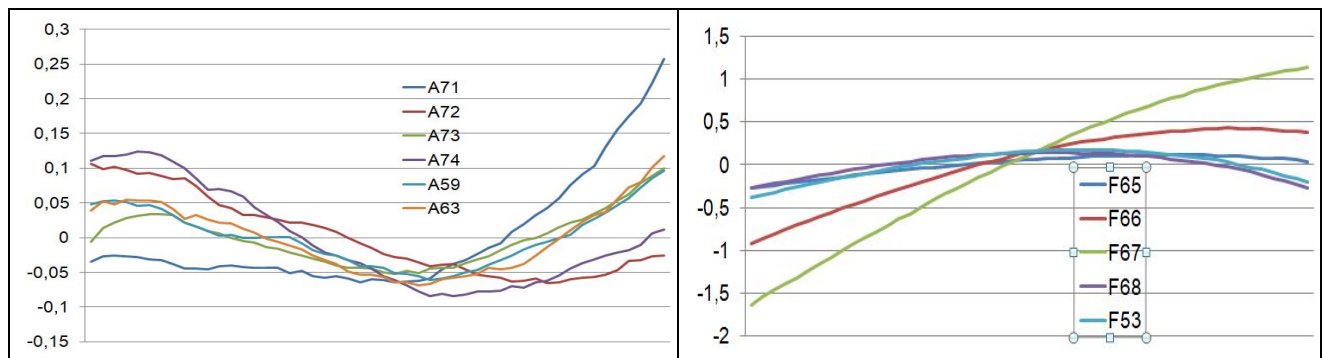


Abb. 3: Seitenlinienkorrektur von Rückwärtskamera- (A) und Vorwärtskameraaufnahmen (F) [mm]

Die Bildverbiegungen haben einen klaren Trend. Mit einer Pfeilhöhe von etwa 0,2 mm bzw. 0,5 mm, entsprechend etwa 30 bis 70 Pixeln, sind sie nicht vernachlässigbar. In Abb. 3 fällt auf, dass die Verbiegungen ähnlich, aber nicht identisch sind; sie unterscheiden sich deutlich durch eine Rotation obwohl die Bildkoordinaten auf die beiden Markierungen der Bildmitte an den Bildenden transformiert wurden. Solche leichten Rotationen werden durch die äußere Orientierung ausgeglichen. In einigen Bildern fehlten diese Markierungen, die Rahmenmarken entsprechen, die dann mittels der Bildbegrenzungen in y-Richtung rekonstruiert wurden. Die Seitenlinien kamen für die Rekonstruktion nicht infrage da sie an den Bildenden nicht mehr erkennbar sind.

3 Bildorientierung

Panoramaaufnahmen (Abb. 1) haben nur quer zur Scanrichtung eine perspektivische Geometrie. Da viele Programme zur Auswertung auf zentralperspektiver Geometrie basieren, ist es sinnvoll, die Panoramageometrie auf zentralperspektive Geometrie umzurechnen. Eine Projektion vom mittleren Projektionszentrum über die kreisförmige Lage des Bildes auf eine Tangentialebene ist wesentlicher Teil der Umrechnung, berücksichtigt aber nicht die Bewegung des Projektionszentrums über die 0,39 sec Scanzeit entsprechend 3050m im Orbit. Wegen des kleineren Bildmaßstabs an den Bildenden führt dieses zu einer leicht S-förmigen Deformation der in den Objektraum projizierten Bildachse (DOWMAN et al. 2012: 103ff; SCHNEIDER et al. 2001). Zwar ist die Umdrehungsgeschwindigkeit der CORONA-Optik bekannt, CORONA-KH-4B war jedoch mit einer Vorwärtsbewegungskompensation durch eine kontinuierliche Aufnahmerichtungsänderung ausgestattet (AUERMANN 2015), die den Einfluss der Bewegung des Projektionszentrums im Objektraum verringerte und praktisch eine Berechnung der leicht S-förmigen Deformation nicht ermöglichte. Die exakte Bildgeometrie der auf eine Tangentialebene projizierten CORONA-Bilder konnte somit nur durch Selbstkalibrierung bestimmt werden. Durch die Aufnahmezeit von 0,39 sec ist eine Auswirkung einer Satellitenrotation auf die

Bildgeometrie nicht auszuschließen, außerdem kann die kreisförmige Lage des Films zu individuellen Anlagefehlern führen, womit nicht vorausgesetzt werden kann, dass die Bildgeometrie unverändert bleibt. Für die vorwärts und die rückwärts blickenden Kameras wird sie ohnehin unterschiedlich sein. Die Bildgeometrie kann somit nur mittels einer ausreichenden Anzahl von Passpunkten bestimmt werden. Die Passpunkte wurden in Google Earth bestimmt. Aus der Auswertung einer Reihe von höher aufgelösten Satellitenaufnahmen durch einen der Autoren ist bekannt, dass bei Google Earth mit einer Objektpunktgenauigkeit von in der Regel besser als 2 m zu rechnen ist, was für die CORONA-Aufnahmen mit etwa 2 m Objektpixelgröße ausreichend ist. Das größere Problem ist ohnehin die Identifizierung von unveränderten Punkten in den CORONA-Aufnahmen, die in Google Earth erkennbar sind. Seit 1972 hat sich das Projektgebiet in Bangladesh stark verändert. Es haben sich nicht nur die Ströme teilweise um Kilometer verschoben, auch das Straßennetz hat sich stark verändert. Im Innenbereich von Städten gibt es noch die geringsten Veränderungen, allerdings sind heute wegen des stark angewachsenen Baumbestands viele Kreuzungen in den Satellitenbildern nicht mehr erkennbar. Andere Kreuzungen sind heute stark abgerundet und die Straßen haben sich verbreitert, wobei nichtmehr erkennbar ist, wo die Straße früher lag. Selbst bei Eisenbahnen gibt es das Problem, dass heute zwei Spuren, statt früher eine Spur, vorhanden sind und sich die Bahnübergänge stark verändert haben. Die wenigen Brücken, die früher vorhanden waren, sind häufig durch breitere ersetzt worden. Es ist somit sehr zeitaufwändig geeignete Passpunkte zu finden und die Genauigkeit der Identifizierung ist beschränkt.

Trotz dieser Probleme konnten zwischen 50 und 90 Passpunkte je Bild gefunden werden. Im Bereich der großen Ströme gibt es allerdings teilweise 5 km breite Bereiche in denen keine unveränderten Objekte vorhanden sind.

Die Orientierung und Berechnung von Objektkoordinaten erfolgte in einem tangentialen Koordinatensystem zum Erdellipsoid da bei 220 km abgedecktem Bereich eine Erdkrümmungskorrektur der Bildkoordinaten nicht akzeptable Restfehler zweiter Ordnung erzeugt.

Die Abbildungen 4 bis 7 zeigen die systematischen Bildfehler basierend auf den Passpunkten der Einzelbilder. Die Widersprüche an den Passpunkten wurden gefiltert um die Auswirkung von Ausreißern zu reduzieren. In y-Richtung erfolgte eine lineare Ausgleichung zur Füllung von Lücken da die Punkte mit gleichem x-Wert gleichzeitig aufgenommen wurden (Abb. 1, links) und somit dynamische Effekte ausgeschlossen werden können. In der x-Richtung wurden Lücken durch lineare Interpolation benachbarter Spalten gefüllt.

Die so ermittelten systematischen Bildfehler der Abbildungen 4 bis 6 zeigen eine gewisse Ähnlichkeit, wie auch zu den folgenden 3 Bildern, deren systematische Bildfehler hier nicht gezeigt werden. Ab dem sechsten Bild ändern sich die systematischen Bildfehler, wie auch Abb. 7 zeigt. Basierend auf 10 Bildern und insgesamt 720 Widersprüchen an Passpunkten ergeben sich die in Abb. 8 gezeigten Werte.

Ohne eine Vorkorrektur haben die räumlichen Rückwärtsschnitte einen Gewichtseinheitsfehler von etwa 63 μm bis 90 μm , im Mittel etwa 80 μm . Bei 7 μm Pixelgröße entspricht das 11,4 Pixeln oder etwa 23 m im Objektraum. Das ist nicht die Genauigkeit, die von anderen Satellitenbildern bekannt ist, bei denen mit sehr guten und klar identifizierbaren Passpunkten etwa eine Standardabweichung von einem Pixel erreicht werden kann. Diese Ergebnisse stimmen mit denen in (SCHNEIDER et al. 2001) in China erreichten überein, wo ohne o.a. Vorkorrektur an 16 Passpunkten Standardabweichungen in X von 27.6 m, in Y von 19.7 m und in Z von 14.2 m erzielt wurden. Es muss bei CORONA berücksich-

tigt werden, dass die Passpunktidentifizierung schwierig ist und es wegen des langen Filmformates, sowie der dynamischen Aufnahme geometrische Probleme gibt.

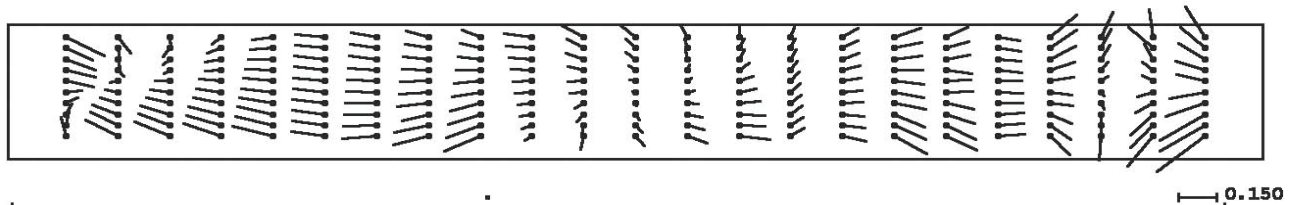


Abb. 4: Systematische Bildfehler, Rückwärtskamera, Bild 63, 49 Passpunkte, Vektormaßstab [µm]

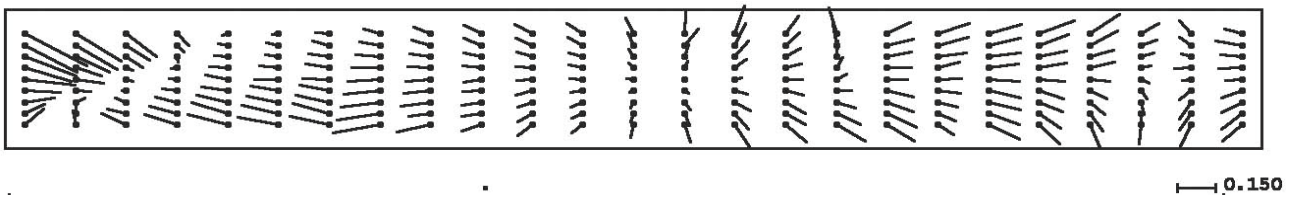


Abb. 5: Systematische Bildfehler, Rückwärtskamera, Bild 64, 80 Passpunkte, Vektormaßstab [µm]

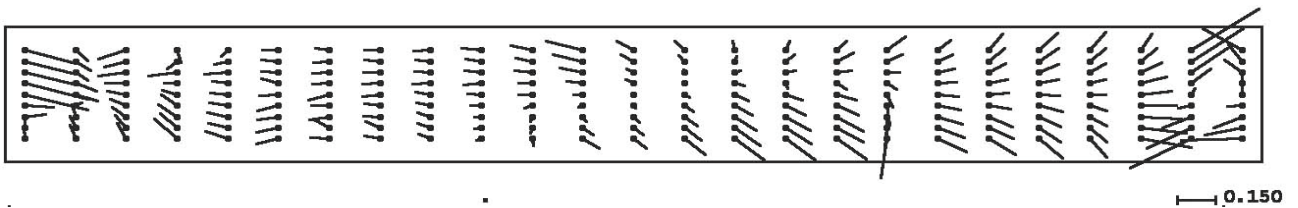


Abb. 6: Systematische Bildfehler, Rückwärtskamera, Bild 65, 79 Passpunkte, Vektormaßstab [µm]

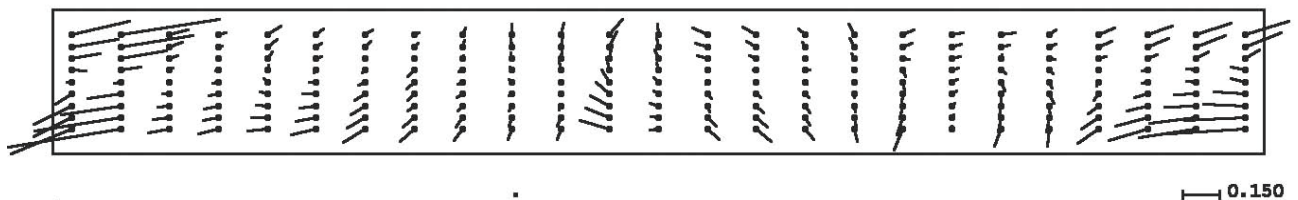


Abb. 7: Systematische Bildfehler, Rückwärtskamera, Bild 74, 72 Passpunkte, Vektormaßstab [µm]

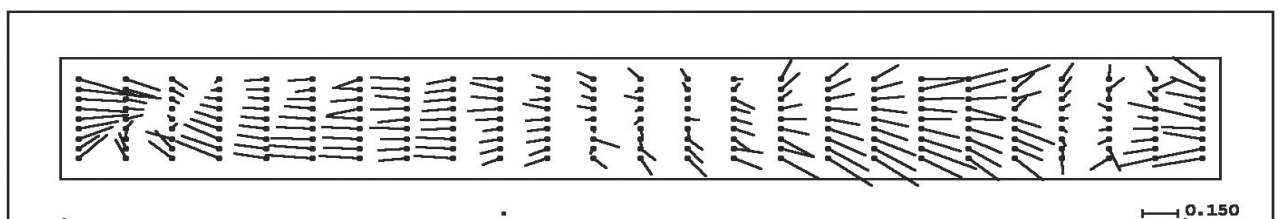


Abb. 8: Mittlere systematische Bildfehler, Rückwärtskamera, basierend auf 10 Bildern mit insgesamt 720 Passpunkten

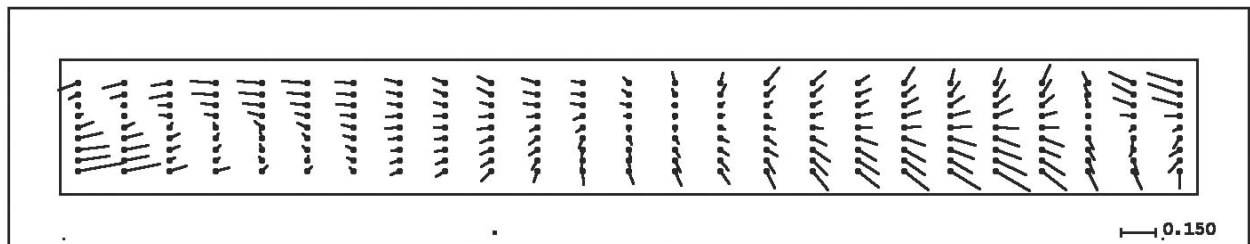


Abb. 9: Mittlere systematische Bildfehler, Vorwärtskamera, basierend auf 10 Bildern, 720 Passpunkte

Aus den Abbildungen 4 bis 8 zeigt sich klar, dass die systematischen Fehler in der x-Richtung etwa doppelt so groß sind wie in der y-Richtung, was sich durch die Seitenlinienkorrektur (Abb. 3) erklären lässt, die nur für die y-Koordinaten Korrekturwerte liefern. Besonders an den Bildenden zeigen sich Verdrehungen des Abbildungsschlitzes (Abb. 1 links) und in x-Richtungen systematische Fehler, die durch ungleichmäßige Scangeschwindigkeit oder nicht exakte kreisförmige Lage des Films erklärt werden können. Eine S-förmige Deformation ist nicht erkennbar.

Durch eine Vorkorrektur der um die Seitenlinienkorrektur und panoramische Umrechnung berechneten perspektiven Bildkoordinaten mit den in den Abbildungen 8 und 9 dargestellten mittleren Bildkoordinatenerbesserungen verbesserte sich die Genauigkeit des räumlichen Rückwärtsschnittes von im Mittel $80\mu\text{m}$ auf etwa $60\mu\text{m}$, entsprechend 8.5 Pixel oder 17 m. Bei zusätzlicher perspektiver Anpassung auf die Passpunkte der Teilbilder konnte für die mittleren beiden Teilbilder mit einer Objektpixelgröße von 1.77 m eine Lagegenauigkeit von etwa 10 m erreicht werden. Für die äußeren Teilbilder, die größere Objektpixel von bis zu 2.18m in Y-Richtung und 2.69 m in X-Richtung haben und auch im Bereich der Bildenden eine schlechtere Bildqualität zeigen, reduziert sich die Standardabweichung der Lage auf etwa 15 m.

4 Erstellung von digitalen Oberflächenmodellen

Das Basis-Höhenverhältnis des Stereomodells von 1: 1.85 ist für die Erstellung von Höhenmodellen gut geeignet. Da im Projektbereich im Jahr 1972, im Gegensatz zu heute, relativ wenige Bäume vorhanden waren, werden in dem digitalen Oberflächenmodell (DOM) die Geländeoberfläche und die Gebäude gut erfasst. Wegen der Grauwertvariationen durch das Filmkorn und der im Gelände nicht vorhandenen klaren Kanten ist eine semiglobale Bildzuordnung nicht sinnvoll und es wurde eine flächenbasierte Bildzuordnung nach der Methode der kleinsten Quadrate eingesetzt. Dieses war auch erforderlich da die zugeordneten Bildfenster durch die perspektive Abbildung gegeneinander geschert sind, was in Abb. 10 an der rechten Seite erkennbar ist. Die Höhen wurden für jedes dritte Pixel bestimmt, entsprechend einem Objektpunktabstand von etwa 6m. Die vorliegenden Bilder waren nicht immer optimal gescannt und erforderten für einzelne Teilbilder eine Wallis-Filterung um überhaupt noch den Bildinhalt erkennen zu können. Trotzdem waren die Bildzuordnungsergebnisse nicht schlecht. Mit Ausnahme der Wasserflächen hatten etwa 50% der zugeordneten Bildfenster einen Korrelationskoeffizienten von größer als 0.9 (Abb. 10).

Die landwirtschaftlich genutzten Flächen weisen teilweise keine hohen Kontraste auf, was sich in Abb. 10 durch die gelben Bereiche zeigt. Die nicht vollständige Überdeckung des Vorwärts- und des Rückwärtsbildes ist in Abb. 10 am unteren Bildrand erkennbar. Die linke Seite von Abb. 10 entspricht der

Mitte des vollständigen CORONA-Bildes, hier ist die nicht stereoskopisch überdeckte Fläche größer als auf der rechten Seite, wo die Objektpixel größer als in der Bildmitte sind. Durch Satellitenrotationen fällt dieser nicht überdeckte Bereich in einigen Stereobildern deutlich größer aus.

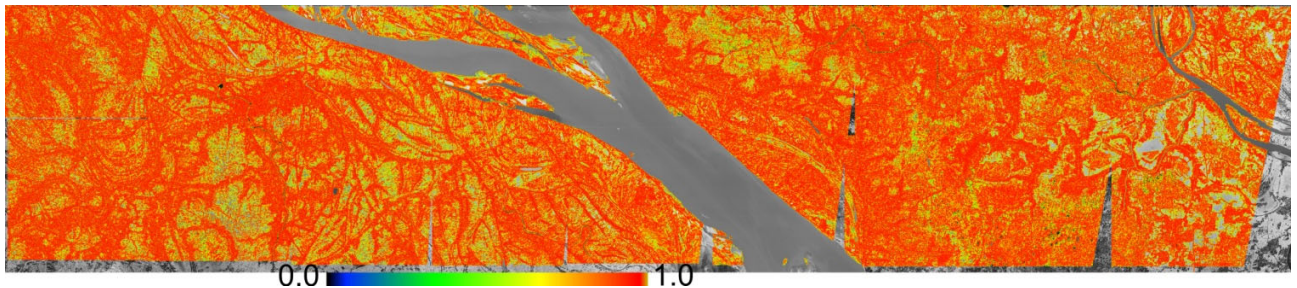


Abb. 10: Farbkodierte Korrelationskoeffizienten, einem CORONA-Teilbild überlagert; ~ 70 km × 20 km

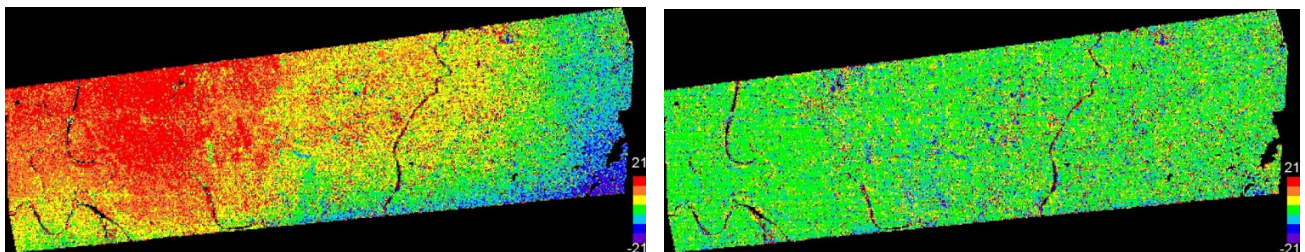


Abb. 11: Farbkodierte Höhendifferenzen CORONA-DOM gegen TDM90 im Bereich der Stadt Dhaka, Links: ursprüngliches CORONA-DOM, rechts: CORONA DOM nach Anpassung auf das TDM90; Farbskala von -21 bis +21m

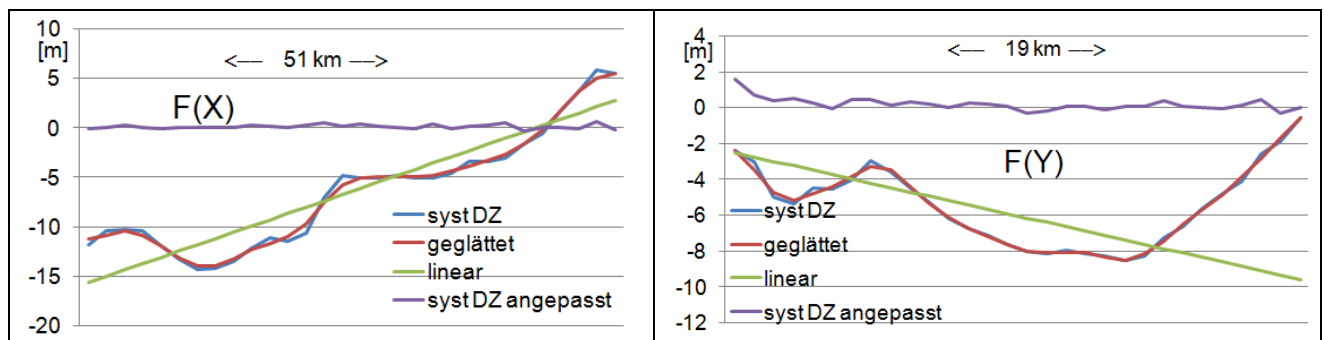


Abb. 12: Systematische Höhendifferenzen CORONA-DOM gegen TDM90 als Funktion von X und Y

Abb. 11 zeigt farbkodierte Höhendifferenzen zwischen dem CORONA DOM und dem TDM90 DOM. TDM90 ist das frei verfügbare TanDEM-X (WorldDEM) DOM, reduziert auf etwa 90m Rasterweite (ALDOSARI & JACOBSEN 2019). Es ist zur Zeit das frei verfügbare DOM mit der höchsten Genauigkeit und erreicht in flachen Gebieten eine Standardabweichung von bis zu 1m. Die linke Seite der Abb. 11 zeigt die ursprünglichen Höhendifferenzen, die in dieser Größenordnung nach den obigen Ergebnissen der Orientierungsuntersuchungen zu erwarten waren. Der Verlauf der systematischen Höhenfehler als Funktion von X und Y ist in Abb. 12 gezeigt. Neben einer Neigung - in Abb. 12 mit linear gekennzeichnet - sind lokale Abweichungen vorhanden. Die offensichtlichen lokalen systematischen Höhenfehler des CORONA DOM wurden durch Anpassung des CORONA DOM auf das TDM90 beseitigt.

Dafür wurden alle Höhendifferenzen zwischen CORONA und TDM90 berechnet und für die Anpassung das gleitende Mittel aller Höhendifferenzen im Bereich von $\pm 500\text{m}$ Abstand als Korrektur an den jeweiligen CORONA-DOM-Punkt angebracht. So wurden die morphologischen Details des CORONA-DOM erhalten und die systematischen Fehler beseitigt, wie die farbkodierten Höhendifferenzen in Abb. 11 rechts und die angepassten systematischen Höhendifferenzen als $F(X)$ und $F(Y)$ in Abb. 12 zeigen.

Vor der Anpassung an TDM90 gab es im obigen Beispiel ein Bias von -7.67m und eine Standardabweichung von 8.46m . Die relative Standardabweichung benachbarter Höhenpunkte im Abstand bis zu 50m beträgt 3.65m . Nach der Anpassung auf TDM90 reduzierte sich der Bias auf 0.12m , die Standardabweichung auf 4.64m und die relative Standardabweichung auf $3,02\text{m}$. In Relation zu etwa 2m Objektpixelgröße und dem Basis-Höhenverhältnis von $1:1.85$ entspricht das einer Standardabweichung der x-Parallaxe von $1,2$ Pixeln bzw. für die relative Genauigkeit $0,82$ Pixel, was als sehr gutes Ergebnis bezeichnet werden kann. Durch die Anpassung auf TDM90 war auch keine Höhenanpassung benachbarter CORONA DOM erforderlich.

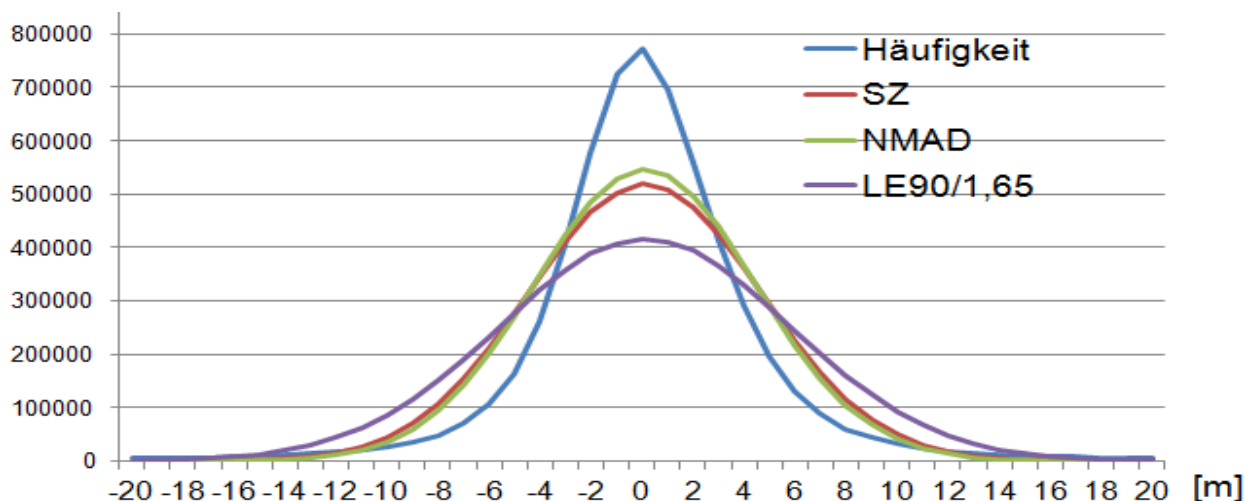


Abb. 13: Häufigkeitsverteilung der Höhenwidrsprüche CORONA DEM nach Anpassung auf TDM90 gegen TDM90 DOM, und Normalverteilung basierend auf NMAD, SZ und normiertem LE90

Die Häufigkeitsverteilung der Widersprüche des angepassten CORONA DOM gegenüber TDM90 zeigt keine Auffälligkeiten. Wie üblich ist die Häufigkeit im zentralen Bereich größer (ALDOSARI & JACOBSEN 2019), NMAD basierend auf der Normalverteilung passt besser mit der Häufigkeitsverteilung überein als die von SZ und besonders die des normierten LE90. LE90 ist nur durch die 10% größten Differenzen bestimmt, wodurch es stark von lokalen Abweichungen, hervorgerufen durch Gebäude und Bäume, bestimmt ist.

Wie oben angemerkt, überdecken sich die Bilder der Vorwärts- und der Rückwärtskameras nicht vollständig (Abb. 2). Dadurch gibt es Lücken zwischen benachbarten Höhenmodellen, die durch die kreuzweise, schmale Überdeckung des Bildes der Vorwärtskamera des nördlichen Nachbarbildes und des Rückwärtsbildes des aktuellen Bildes geschlossen werden können (Abb. 14).

Das in Abb. 14 gezeigte Beispiel liegt etwa in der Mitte von CORONA-Bildern und hat Objektpixelgrößen von unter 2m . Hier waren die Lücken zwischen benachbarten Standardstereomodellen aus der

Vorwärts- und der Rückwärtskamera etwa 2km breit und mussten durch kreuzweise Bildkombinationen geschlossen werden. Die Flächen ohne Höhenwerte im oberen Teil von Abb. 14 sind auf Überflutungen zurückzuführen. Die DOM-Kombination in Abb. 14 überdeckt etwa 66 km × 34 km und enthält 67 Millionen Höhenpunkte.

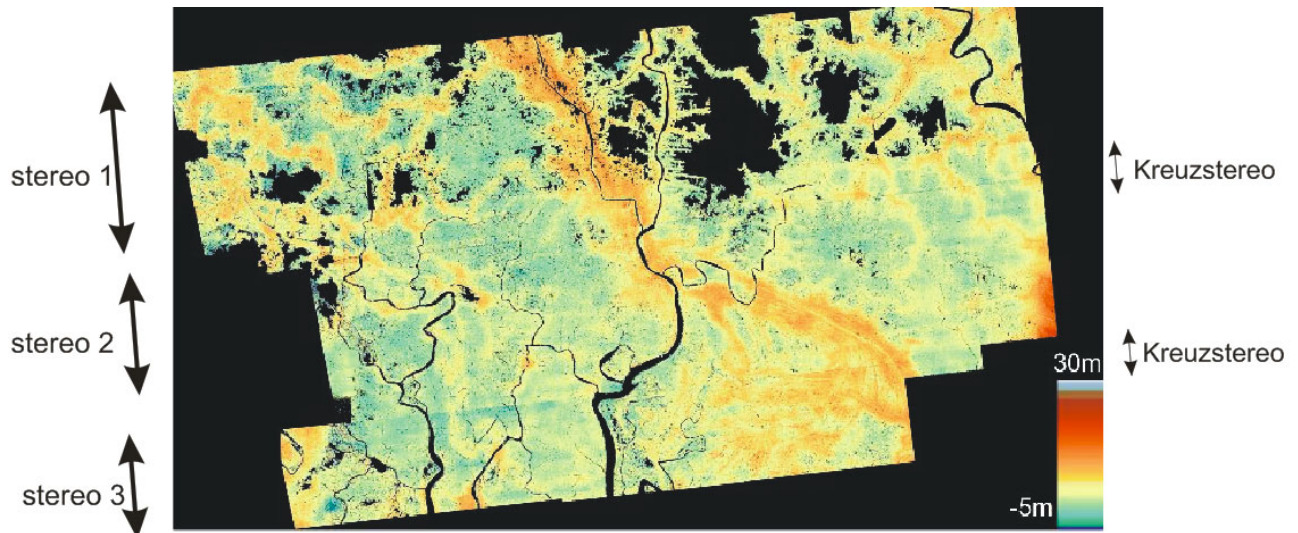


Abb. 14: Schließung von Lücken benachbarter Stereopaare durch kreuzweise Bildkombinationen – farbkodierte Höhendarstellung des Höhenbereichs von -5 m bis 30 m

5 Erstellung von Orthofotos

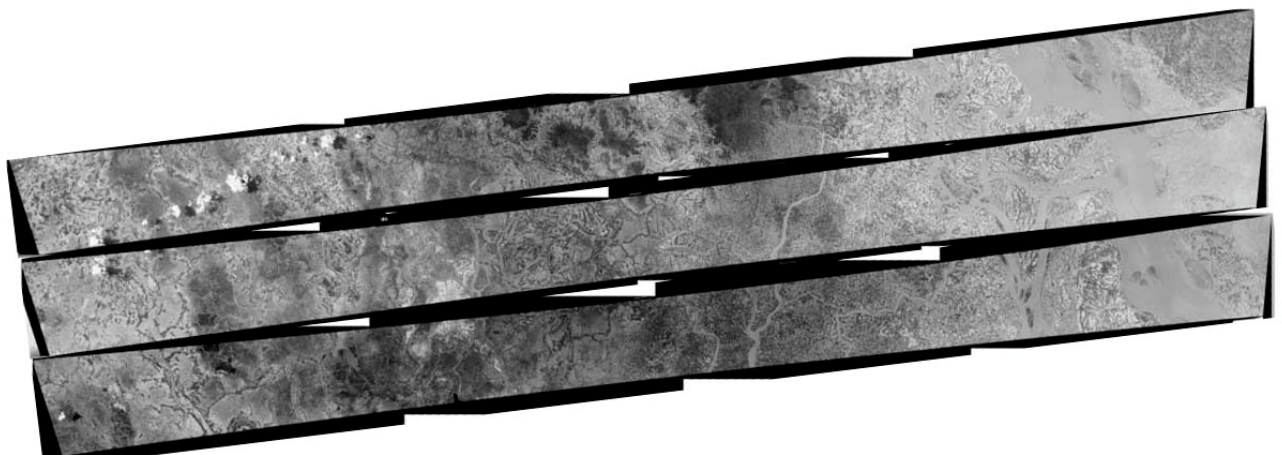


Abb. 15: Drei nebeneinander gelegte CORONA-Orthofotokombinationen – bestehend aus jeweils 4 Teilbildern

In den erstellten Höhenmodellen sind die aktuellen und früheren Wasserläufe gut erkennbar. Ergänzt wird es durch Orthofotos, die weitere Informationen liefern. Wie für die Erstellung der Höhenmodelle hat auch bei der Orthofotogenerierung berücksichtigt zu werden, dass die Bildorientierung in einem tangentialen Koordinatensystem vorliegt, das Ergebnis aber im nationalen Koordinatensystem gebraucht wird. Die Transformation vom vorgegebenen Orthofotopixel mit der Punkthöhe in geographi-

sche, geozentrische und tangentielle Koordinaten unter Berücksichtigung der systematischen Bildfehler, der panoramischen Umrechnung, der Seitenlinienkorrektur, mit der Bildorientierung in den korrespondierenden Bildpunkt zur Zuordnung der Grauwerte ist zeitaufwändig, aus diesem Grund wird mit Bildausschnitten gearbeitet deren Eckpunkte vollständig transformiert werden. Innerhalb der Bildausschnitte wird eine ebene Perspektivtransformation benutzt um die anderen Pixel umzurechnen. Auf diese Weise kann ein Orthofoto von einem CORONA-Teilbild mit 33000×12000 Pixel auf einem normalen Laptop innerhalb von 2 Minuten erstellt werden. Das CORONA-Vorbereitungsprogramm schätzt die Eckkoordinaten des Bildes im nationalen Koordinatensystem ab um den Bereich für das zu erstellende Orthofoto wählen zu können.

Die Orthofotos werden separat für die 4 Bildteile eines CORONA-Bildes erstellt. Von Teilbild zu Teilbild gibt es keine Anpassungsprobleme da die Bildorientierung für das jeweils kombinierte CORONA-Gesamtbild berechnet wird. Da aber die Orientierung, einschließlich aller erforderlichen Korrekturen, für jedes Gesamtbild separat berechnet wird, gibt es Anpassungsprobleme zwischen Orthofotos benachbarter Bilder im Bereich der zuvor genannten, abgeschätzten Standardabweichung von etwa 10m im Mittelteil und 15m an den Bildenden. Diese Widersprüche werden durch lokale Nachbarschaftsanpassung gelöst. In Abb. 15 ist erkennbar, dass die Orthofotostreifen mit etwa 14,9 km in der Mitte schmaler sind als mit etwa 18,3 km am Bildende entsprechend der Objektpixelgröße in Y von 1,77m bis 2,18m. Für die Orthofotos wurden 2 m Pixelgröße gewählt, dementsprechend ist die Bildqualität am Bildende kaum bemerkbar geringer, nur die extremen Bildenden des CORONA-Gesamtbildes sind wegen Unschärfen im Originalbild nicht so gut.

Es wurden Orthofotos für alle im Projektbereich vorhandenen CORONA-Bilder berechnet, aber Höhenmodelle nur für die engeren Bearbeitungsbereiche, somit konnten diese Höhenmodelle nicht für die Orthofotos verwendet werden. Das Gesamtgebiet ist allerdings sehr eben, so dass das TDM90 DOM ohne Probleme für die Orthofotoerstellung benutzt werden konnte. In weiten Bereichen reichte auch eine konstante Höhe aus.

6 Fazit

CORONA KH-4B Aufnahmen von 1972 stellen, mit etwa 2 m Objektpixelgröße und stereoskopischer Überdeckung, eine optimale Quelle für die Rekonstruktion des Zustands von vor 48 Jahren dar, wenn keine anderen Unterlagen vorhanden sind. Die Geometrie der CORONA Fotos von ca. $75 \text{ cm} \times 5.5 \text{ cm}$ entspricht nicht unbedingt der von Messbildern, aber mittels der Seitenlinien und einer höheren Anzahl von Passpunkten, die von Google Earth stammten, konnte im mittleren Bereich der CORONA-Bilder eine Standardabweichung der Lage von etwa 10 m und im Bereich der Bildenden etwa 15 m erreicht werden, was für den Zweck des Projekts ausreichte. Die geometrischen Probleme stimmen mit denen in (SCHNEIDER et al. 2001) in China erreichten überein. Die Auflösung und das Basis-Höhenverhältnis von 1:1.85 führten zu einer relativen Standardabweichung der Höhe von etwa 3m, womit Flussläufe gut identifiziert werden konnten. Die von den Bilddeformationen beeinflussten absolute Höhenwerte konnte durch eine Anpassung auf das TDM90 DOM verbessert werden. Damit bleiben die morphologischen Details der CORONA-Höhenmodelle erhalten und die absolute Höhengenaugigkeit entspricht etwa 4 m bis 5 m. Mit diesem Verfahren konnten so Genauigkeiten der erstellten Produkte erreicht werden, die nicht weit von denen der mit Messbildern vergleichbarer Objektauflösung zu erzielen sind.

Die für die Handhabung der CORONA-Bilder erforderlichen Programme mussten, mit Ausnahme der Mess- und Bildzuordnungsroutinen, speziell erstellt werden, da kommerzielle Programme nicht die erforderlichen Schritte ermöglichten.

Mit 10 Stereopaaren konnten für etwa 25% der Landesfläche von Bangladesh Orthofotos erstellt werden, die für die heutige Stadtplanung von Bedeutung sind, da sie Bereiche problematischen Baugrunds anzeigen.

7 Literaturverzeichnis

- ALDOSARI, A. & JACOBSEN, K., 2019: Quality of Height Models Covering Large Areas. PFG – Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation **87**(4), 177-190, <https://link.springer.com/article/10.1007/s41064-019-00072-11>.
- AUELMANN, R.R., 2015: Corona KH-4B Satellites. <http://ftp.uni-koeln.de/pc/basp/Auelmann.pdf>, letzter Zugriff Dez. 2019.
- DASHORA, A., LOHANI, B. & MALIK, J., 2007: A repository of earth resource information – CORONA satellite programme. Current Science **92**(7), 2007.
- DOWMAN, I., JACOBSEN, K., KONECNY, G. & SANDAU, R., 2012: High Resolution Optical Satellite Imagery. Whittles Publishing, ISBN 978-184995-045-6.
- JACOBSEN, K., 2008: Tells the number of pixels the truth? – Effective Resolution of Large Size Digital Frame Cameras. ASPRS 2008 Annual Convention, Portland.
- MCDONALD, R.A., 1997: CORONA between the Sun & the Earth. ASPRS 1997, ISBN I-57083-041-X.
- SCHNEIDER, T., JACOBSEN, K., SEITZ, R. & FÖRSTER, B., 2001: Remote Sensing Based Parameter Extraction for Erosion Control Purposes in the Loess Plateau of China. High Resolution Mapping from Space 2001, Hannover, <https://pdfs.semanticscholar.org/1a86/53f9ff997c164e2f2572bdf6b6f8e7d33fe6.pdf>, letzter Zugriff Feb. 2019.