



Master Thesis

im Rahmen des
Universitätslehrganges „Geographical Information Science & Systems“
(UNIGIS MSc) am Interfakultären Fachbereich für GeoInformatik (Z_GIS)
der Paris Lodron-Universität Salzburg

zum Thema

„Höhenmodelle aus Multi-Date tristereo Pléiades Satelliten Bildern“

vorgelegt von

MSc. Tobias Kugler
105464, UNIGIS MSc Jahrgang 2019

Betreuer:
Dr. Lorenz Wendt

Zur Erlangung des Grades
„Master of Science – MSc“

Zürich, 02.10.2021

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere, diese Master Thesis ohne fremde Hilfe und ohne Verwendung anderer als der angeführten Quellen angefertigt zu haben, und dass die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegen ist. Alle Ausführungen der Arbeit, die wörtlich oder sinngemäß übernommen wurden, sind entsprechend gekennzeichnet.

Signed:

Date:

Danksagung

Die vorliegende Arbeit wäre ohne verschiedene Formen der Unterstützung und Beratung nicht möglich gewesen. Ich bedanke mich an dieser Stelle bei meinem Betreuer Dr. Lorenz Wendt für die Zeit und die vielen Gespräche, die wir zusammen für diese Masterarbeit geführt haben. Die Anregungen, die sich darauf ergaben sowie die Unterstützung haben mir bei der Fertigstellung sehr geholfen. Ausserdem gilt mein besonderer Dank meiner Lebensgefährtin Eleonora Guido, die mich persönlich stark unterstützt hat.

Zusammenfassung

Die automatische Generierung von Höhenmodellen aus hochaufgelösten Satelliten Stereobildern bietet für Hilfsorganisationen die Möglichkeit, die Datengrundlage für ihre Einsätze zu verbessern. Vor allem für städtische Gebiete können Höhenmodelle im Krisenfall für Schadensanalysen an Gebäuden oder zur Schätzung der Bevölkerung genutzt werden. Jedoch sind in den Bildarchiven nicht immer genügend qualitative In-Orbit Stereobilder vorhanden, um die benötigte Szene vor und nach einer Katastrophen akkurat abbilden zu können.

Diese Masterarbeit verfolgt das Ziel, die Auswahlmöglichkeiten an Bildern für die Generierung von Höhenmodellen zu vergrößern. Indem Bilder aus unterschiedlichen Aufnahmezeitpunkten (Multi-Date) miteinander kombiniert werden, soll die Abhängigkeit von In-Orbit Stereopaaren reduziert werden. Dabei wird ein kostengünstiger Ansatz verfolgt, indem nur drei Bilder für die Herstellung der Höhenmodelle verwendet werden.

Für die Masterarbeit stand ein Datensatz von 11 Pléiades Bildern von Port-au-Prince zur Verfügung. Aus diesen Bildern wurden alle 3er-Kombinationen berechnet, in denen keine Bilder vom gleichen Tag oder mit einem Tag Unterschied vorhanden waren. 36 tristereo Bildkombinationen konnten so getestet werden. Für die Generierung der tristereo DEMs wurden anschliessend drei verschiedene Methoden verwendet. Insgesamt wurden 98 tristereo DEMs erzeugt und mit einem Referenzhöhenmodell verglichen. Als Metrik wurde die Completeness und die Accuracy verwendet. Die Completeness wurde als prozentualer Anteil der Pixel mit einem vertikalen Fehler kleiner als ein Meter definiert. Für die Accuracy wurde der RMSE benutzt. Das beste tristereo Höhenmodell erzielte eine Completeness von 43.5% mit einem RMSE von 3.8 Meter.

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung	i
Danksagung	ii
Zusammenfassung	iii
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Literatur	2
1.3 Struktur der Arbeit	3
2 Daten und Software	4
2.1 Pléiades	4
2.2 RPC Koeffiziente	8
2.3 Untersuchungsgebiet	8
2.4 Referenzdatensatz	9
2.5 Software	10
3 Methoden	11
3.1 Bilder und RPC Koeffizienten zuschneiden	12
3.2 Bildkombinationen	13
3.3 Ansatz 1: Tristere DEM mit s2p	13
3.3.1 Die Konfigurationsdatei config.json	14
3.3.2 s2p	15
3.3.3 Outputfehler	16
3.4 Ansatz 2: Mergen nach Rangfolge	16
3.4.1 Stereo DEM Parameter	17
3.4.2 Rangfolge erstellen und mergen	17
3.5 Ansatz 3: Mergen mit dem Median	18
3.6 Co-registrierung	18
3.7 Benchmark	19
4 Resultate	20
4.1 Ansatz 1: s2p	20
4.2 Ansatz 2: Mergen mit Rangfolge	30
4.3 Ansatz 3: Mergen mit dem Median	36
5 Diskussion	41
A Python Scripts	44
A.1 Extract corner coordinates of a feature class	44
A.2 Get image coordinates from latitude and longitude	45
A.3 Combinations of images and their RPC to generate config files for s2p	45

A.4	Convergence angle, sun elevation difference and valid pixel count from xml metadata file	46
A.5	Weighted method to merge 3 DEMs	48
A.6	Interpolate DEMs	49
A.7	Take the median	51
A.8	Benchmark	51
B	Tabellen	56
B.1	Tristere Bildkombinationen	56
B.2	Stereo Bildkombinationen	57
	Literatur	58

Abbildungsverzeichnis

2.1	Footprint der Pléiades Bilder	4
2.2	Der Zusammenhang zwischen dem Incident Angle und dem Viewing Angle	5
2.3	Die Satellit Azimuth (AZ_{sat})	5
2.4	Der Azimuth Angle oder Bildorientierung	6
2.5	Der Incident Angle projiziert auf zwei Ebenen	6
2.6	Skyplot der Pléiades Bilder	7
2.7	Die beiden RPC Funktionen lokalisieren und projizieren	8
2.8	Footprint des Untersuchungsgebietes	9
2.9	DEM des Referenzdatensatzes	10
3.1	Übersicht der Methoden	11
3.2	Workflow für das Zuschneiden von Pléiades Bildern	12
3.3	Effekt der Orthorektifizierung sowie der Berechnung der Bildkoordinaten auf den Bildausschnitt	13
3.4	Die Epipolarlinie für den Punkt X in den rektifizierten Stereobildern.	15
3.5	Pushbroom Sensor und affines Kameramodell	16
3.6	Workflow für das Mergen nach Rangfolge	17
3.7	Workflow für das Mergen mit dem Median	18
4.1	Skyplot der drei besten Bildkombinationen aus Ansatz 1	20
4.2	DEM und Error Image der besten Bildkombination für Ansatz 1	21
4.3	Detailansicht für drei ausgewählte Stellen	22
4.4	Bildkombinationen mit den Bildern vom 17.11.2014 und deren Completeness	23
4.5	Vergleich der beiden besten DEMs aus Ansatz 1	24
4.6	Bildkombinationen mit den Bildern vom 29.04.2015 und deren Completeness	25
4.7	Bildkombinationen mit den Bildern vom 05.07.2013 und deren Completeness	26
4.8	Bildkombinationen mit den Bildern vom 06.07.2013 und deren Completeness	27
4.9	Alle tristereo DEMs aus Ansatz 1	28
4.10	Skyplot der drei besten Bildkombinationen aus Ansatz 2	30
4.11	DEM und Error Image der besten Bildkombination für Ansatz 2	31
4.12	Zusammenhang von Completeness und Grenzwert für gültige Pixel	31
4.13	Die einzelnen stereo DEMs des besten tristereo DEMs für Ansatz 2	32
4.14	Alle tristereo DEMs aus Ansatz 2	34
4.15	Skyplot der drei besten Bildkombinationen aus Ansatz 3	36
4.16	DEM und Error Image der besten Bildkombination für Ansatz 3	37
4.17	Zusammenhang von Completeness und Grenzwert für gültige Pixel	37
4.18	Alle tristereo DEMs aus Ansatz 3	40

Tabellenverzeichnis

2.1	Aufnahmeparameter der einzelnen Pléiades Bilder	7
4.1	Completeness [%], gematchte Pixel [%] und RMSE [m] der besten drei Bildkombinationen für Ansatz 1	21
4.2	Die Stereopaare der Variante A	24
4.3	Die Stereopaare der Variante B	24
4.4	Die Stereopaare der Variante D	25
4.5	Die Stereopaare der Variante E	26
4.6	Die Stereopaare der Variante F	26
4.7	Die Stereopaare der Variante G	27
4.8	Die Stereopaare der Variante J	27
4.9	Die Stereopaare der Variante H	27
4.10	Completeness [%] und RMSE [m] aller tristereo DEMs aus Ansatz 1	29
4.11	Completeness [%] und RMSE [m] der besten drei Bildkombinationen für Ansatz 2	30
4.12	Zusammensetzung der besten drei tristereo DEMs	31
4.13	Benchmark Werte für die einzelnen stereo DEMs für das beste tristereo DEM	32
4.14	Completeness [%] und RMSE [m] aller tristereo DEMs aus dem Ansatz 2	35
4.15	Completeness [%] und RMSE [m] der besten drei Bildkombinationen für Ansatz 3	36
4.16	Gesamtübersicht der Resultate für Ansatz 3	38
4.17	Die Completeness [%] des tristereo DEMs im Vergleich zu den einzelnen stereo DEMs	39
4.18	Die Completeness [%] des tristereo DEMs im Vergleich zu den einzelnen stereo DEMs	39

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Mit der zunehmenden Verfügbarkeit von sehr hochaufgelösten Satellitenbildern, wie z. B. von den Erdbeobachtungssatelliten Pléiades-1A und 1B oder der WorldView-Serie, ist es mittlerweile möglich, digitale Höhenmodelle direkt und vollautomatisch aus Stereobildpaaren zu erstellen (Franchis u. a., 2014; Han u. a., 2020; Krishna, Srivivasan und Srivastava, 2008; Rupnik, Pierrot-Deseilligny und Delorme, 2018). Dank dieser Entwicklung werden diese Daten und ihre Anwendungen auch für Akteure außerhalb des klassischen Spektrums interessant. Insbesondere im humanitären Bereich bieten automatisch abgeleitete Höhenmodelle einen vielfältigen Nutzen. Vor allem Höhenmodelle von städtischen Gebieten sind von Interesse, da sie für Schadensanalysen an Gebäuden oder Bevölkerungsschätzungen genutzt werden können.

Um in Krisensituationen adäquat handeln zu können, spielen schnell verfügbare Daten eine entscheidende Rolle. Oftmals sind jedoch qualitativ hochwertige In-Orbit Stereobildpaare entweder nicht in den Archiven vorhanden oder müssen in einem zeitaufwändigen Prozess beschafft werden (Krauß, D'Angelo und Wendt, 2019). Um dieses Manko zu beheben und die Abhängigkeit von In-Orbit Stereoaufnahmen zu verringern, haben mehrere Arbeiten versucht, Höhenmodelle aus Bildern mit unterschiedlichen Aufnahmezeitpunkten (Multi-Date) oder aus der Kombination von Bildern verschiedener Satelliten (Cross-Sensor) zu erstellen (Facciolo, De Franchis und Meinhardt-Llopis, 2017; Krauß, D'Angelo und Wendt, 2019; Ozcanli u. a., 2015). Während diese Forschungsarbeiten Zugang zu einem enormen Bestand an Bildern hatten (bis zu 200 Bilder pro Standort), haben humanitäre Organisationen nicht das Budget, um diese Anzahl von Bildern zu erwerben.

Aus diesem Grund wurde in dieser Masterarbeit ein kostengünstiger Ansatz untersucht, indem nur drei Bilder für die Generierung eines DEMs verwendet wurden. Da In-Orbit-Tristereoo-Aufnahmen gut funktionieren und in diesem Bereich kein Forschungsbedarf besteht, fokussiert diese Arbeit auf die Verwendung von Bildern von jeweils unterschiedlichen Daten.

Die Masterarbeit befasst sich mit folgenden drei Fragen. Erstens welche Qualität der Höhenmodelle mit Multi-Date Triplets erzielt werden kann. Zweitens wird untersucht, welche Aufnahmekonstellationen die besten Ergebnisse für die vorhandenen Daten liefern. Dabei wird vor allem die Satellite Azimuth (Satelliten Position) und der Incident Angle (Einfallswinkel) der einzelnen Aufnahmen berücksichtigt sowie auf den Convergence Angle (Konvergenzwinkel) der Stereopaare fokussiert. Drittens welcher Ansatz zur Generierung der tristereo DEMs am besten funktioniert. Dabei werden drei verschiedene Ansätze getestet. Im ersten Ansatz wurden die tristereo DEMs automatisch mit der Open Source Software s2p erstellt. Beim zweiten

Ansatz wurden die stereo DEMs zuerst mit einem Qualitätsmass bewertet und anschliessend nach einer Rangfolge gemerget. Im dritten Ansatz schlussendlich wurden die stereo DEMs mit Hilfe des Medians gemerget. Neben diesen drei Fragen, ist ein weiteres Ziel dieser Arbeit, das Verständnis für das Funktionieren der Software s2p.

1.2 Literatur

Für die Rekonstruktion von 3D Objekten aus mehreren Ansichten (Multi-View) gibt es zwei grundlegend unterschiedliche Ansätze im Feld der Computer Vision. Beim Ersten werden aus den verschiedenen Bildern Stereopaare gebildet und diese unabhängig voneinander prozessiert. Die resultierenden Höhenmodelle werden anschliessend gemerget. Beim Zweiten wird die Szene mit Hilfe von 3D Volumen in Form von Voxeln repräsentiert. Für jeden Voxel wird auf Basis der einfallenden Bildstrahlen die Wahrscheinlichkeit für das Vorhandensein einer Oberfläche berechnet (Bosch u. a., 2016).

Ozcanli u. a. (2015) verglichen die beiden Ansätze anhand einem urbanen, einem semi-urbanen sowie einem ländlichen Testgebiet und kamen zum Schluss, dass mit Stereopaaren insgesamt bessere Resultate erzielt werden können. Sie berichten, dass 84% der Pixel im urbanen Testgebiet innerhalb von 3 Metern lagen. Bei einer Fehler-toleranz von 1 Meter waren es immerhin noch ca. 50% der Pixel. Vor allem weisen sie darauf hin, dass der stereo Ansatz im Vergleich zum volumetrischen Ansatz speziell für Gebäudedächer weniger NoData Stellen generiert.

An der IARPA Multi-View Stereo 3D Mapping Challenge wurden 2016 verschiedene Algorithmen, die mit dem stereo Ansatz operieren, gegeneinander verglichen. Der Datensatz dieses Wettbewerbs bestand aus 50 Worldview-3 Bildern von Buenos Aires. Bosch u. a. (2017) entwickelten eine umfassende Benchmark Metrik und verglichen drei der besten IARPA Einsendungen. Für die Analyse wurde die Satellite Stereo Pipeline (s2p) (Franchis u. a., 2014), der RPC Stereo Processor (RPC) (Qin, 2016) sowie eine von Sebastian Drouyer entwickelte Lösung basierend auf der Ames Stereo Pipeline der NASA (ASP) (Shean u. a., 2016) miteinbezogen. Alle diese Programme basieren auf Varianten des Semi-Global-Matching Algorithmus von Hirschmuller (2008). Für den Benchmark wurden die erzeugten Punktwolken aus 10 Bildpaaren gegen einen LIDAR Referenzdatensatz verglichen. Die Completeness wurde als prozentualer Anteil an Punkten mit einem vertikalen Fehler kleiner als 1 Meter definiert. Dabei erreichte s2p einen Completeness Wert von 73.2%, RSP von 69.4% und die ASP einen Wert von 68.7%.

Generell zeigt sich, dass die Qualität der erzeugten DEMs stark variieren kann und von den jeweiligen Aufnahmeparametern abhängt. Neben der Evaluierung verschiedener Stereo-Matching Software, stellt sich daher die Frage, welche Aufnahmeparameter überhaupt zu einem guten Stereopaar führen. Für Pléiades Bilder werden standardmässig von Airbus Angaben zum Einfalls- und Blickwinkel des Satelliten, zur Bildorientierung sowie Angaben zum Sonnenstand geliefert (Airbus, 2012). Eine entscheidende Rolle spielt jedoch der Convergence Angle. Während Krauß, D'Angelo und Wendt (2019) einen optimalen Winkel zwischen 5 und 15 Grad für Pléiades-Aufnahmen angeben, berichten Facciolo, De Franchis und Meinhardt-Llopis

(2017) von einem optimalen Winkel von etwa 20 Grad für Worldview 3-Aufnahmen.

Ausserdem ist der Zeitunterschied zwischen den beiden Bildern ein wichtiger Faktor. Je näher die beiden Bilder beieinander liegen, desto ähnlicher sind die Aufnahmebedingungen - wie zum Beispiel die Beleuchtung - und desto besser lassen sich die einzelnen Pixel stereo-matchen. Je größer hingegen der zeitliche Abstand zwischen den Bildern ist, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass sich städtischen Strukturen wie Gebäude und Strassen durch Bautätigkeit verändert haben. Dadurch wird das Stereo-Matching der Bilder erschwert. Gleiches gilt für jahreszeitliche Einflüsse wie die Vegetationsperioden oder Schnee. Dennoch berichten Facciolo, De Franchis und Meinhardt-Llopis (2017), dass auch für Bilder aus unterschiedlichen Jahren mit gleichem DOY (Day of year) gute Ergebnisse erzielt werden konnten.

Weiterhin berichten Qin (2019) und Krauß, D'Angelo und Wendt (2019), dass auch der Winkel der Sonneneinstrahlung einen Einfluss auf die Qualität hat. Je größer die Differenz zwischen den beiden Bildern ist, desto schlechter ist die Vollständigkeit der generierten DEMs.

Schlussendlich ist es wichtig, dass die Sonnenhöhe ausreichend groß ist, damit sich keine langen Schatten bilden, die sich schlecht matchen lassen (Krauß, D'Angelo und Wendt, 2019).

1.3 Struktur der Arbeit

Die Arbeit ist folgendermassen strukturiert. Zuerst werden die benutzten Pléiades Daten vorgestellt. Es wird auf die verschiedenen Aufnahmeparameter eingegangen und die RPC Koeffizienten erläutert. Anschliessend werden das Untersuchungsgebiet sowie der Referenzdatensatz vorgestellt. Danach werden die Methoden der Masterarbeit dargelegt. Es werden die drei Ansätze erläutert, mit denen die tristereo DEMs erzeugt wurden. Schlussendlich werden die erzielten Resultate präsentiert und in einem Schlusskapitel diskutiert.

2 Daten und Software

2.1 Pléiades

Die für diese Masterarbeit verwendeten Daten bestehen aus 11 panchromatischen Pléiades Aufnahmen von Port-au-Prince, Haiti. Die Bilder stammen von Airbus und wurden vom Departement Geninformatik der Universität Salzburg zur Verfügung gestellt. Die Daten bestehen aus drei Tristereobildpaaren und einem Stereobildpaar. Mit Ausnahme von Bild *20150429_00A* (49.8 km^2) decken die Aufnahmen eine Fläche zwischen 110 km^2 und 120 km^2 ab. Die Bilder wurden zwischen Juli 2013 und April 2015 mit einer räumlichen Auflösung von 70 cm akquiriert.



ABBILDUNG 2.1: Footprint der Pléiades Bilder in Google Earth mit dem Untersuchungsgebiet in gelb

Der Incident Angle sowie die Sun Elevation konnten für die jeweiligen Aufnahmen direkt aus den mitgelieferten Metadaten ausgelesen werden. Der Incident Angle ist der Winkel zwischen der Bodennormalen (Ground Normal) und der Blickrichtung des Satelliten. Je grösser der Incident Angle ist, desto flacher schaut der Satellit auf die Szene. Demnach bedeuten 0° eine Nadiraufnahme. Für Pléiades Bilder bewegt sich der Incident Angle normalerweise zwischen 0° und 33.6° (Airbus, 2012). Abbildung 2.2 zeigt den Zusammenhang zwischen dem Incident Angle und dem Viewing Angle des Satelliten.

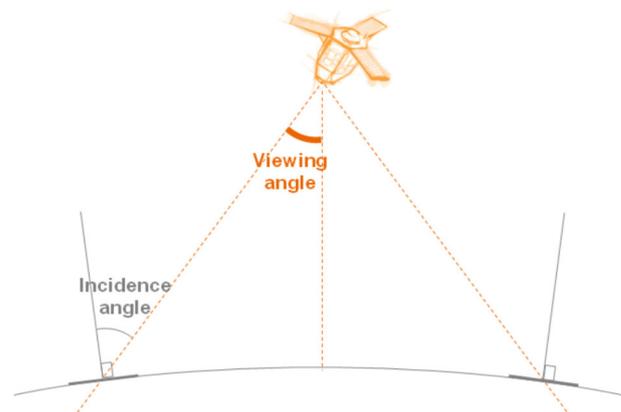


ABBILDUNG 2.2: Der Zusammenhang zwischen dem Incident Angle und dem Viewing Angle. Bildquelle: Telespazio (2019)

Die Position des Satelliten (Satellite Azimuth AZ_{sat}) musste hingegen berechnet werden, da dieser Wert nicht standardmässig in den Metadaten mitgeliefert wird. Die Satellite Azimuth ist der Winkel zwischen dem Nordmeridian und der Linie zwischen einem Bildpunkt (P1) und dem Satelliten Nadirpunkt (P2), wie in Abbildung 2.3 dargestellt.

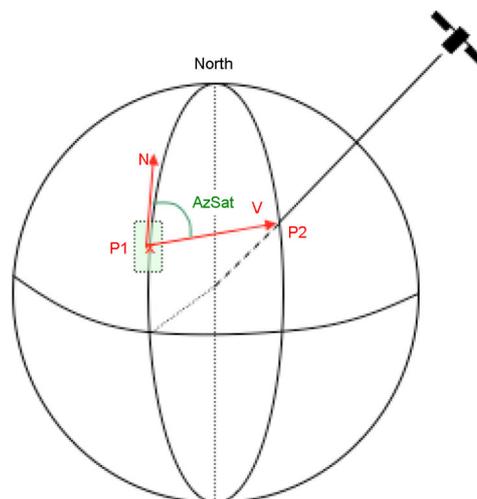


ABBILDUNG 2.3: Die Satellit Azimuth (AZ_{sat}). Bildquelle: Airbus (2012)

Um die Satellite Azimuth zu berechnen, wurde folgende Formel aus dem Pléiades Imagery User Guide (Airbus, 2012) verwendet:

$$AZ_{\text{sat}} = \text{MODULO}(AZ_i - (\text{ATAN2}(\tan(\beta_Y); \tan(\beta_X))); 360)$$

wobei:

AZ_i = Azimuth angle

β_Y = Incident angle across track

β_X = Incident angle along track

Der Azimuth Angle AZ_i entspricht dabei der Bildorientierung und beschreibt den Winkel zwischen dem geographischen Norden und der Aufnahme­richtung des Scanners (image line axis), wie in Abbildung 2.4 dargestellt.

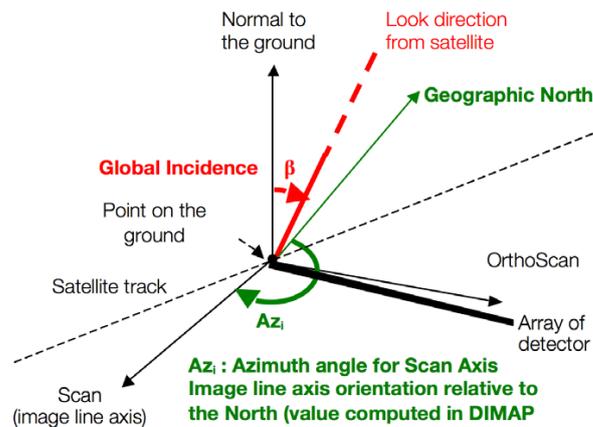


ABBILDUNG 2.4: Der Azimuth Angle oder Bildorientierung. Bildquelle: Airbus (2012)

Der Incident angle across track β_Y sowie der Incident angle along track β_X werden aus dem globalen Incident Angle abgeleitet, indem dieser in zwei Ebenen projiziert wird. Der Incident angle along track β_X ist der Einfallswinkel in Richtung der Bildorientierung (Scan axis) am Boden. Der Incident angle across track β_Y hingegen ist der Einfallswinkel in Richtung der OrthoScan Achse. Abbildung 2.5 stellt den Zusammenhang zwischen den Winkeln dar.

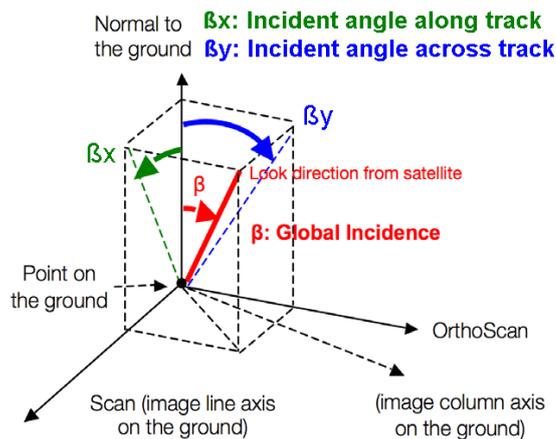


ABBILDUNG 2.5: Der Incident Angle projiziert auf zwei Ebenen. Bildquelle: Airbus (2012)

Tabelle 2.1 gibt eine Übersicht über die verwendeten Aufnahmeparameter.

TABELLE 2.1: Aufnahmeparameter der einzelnen Pléiades Bilder

Short Name	Date	Satellite Azimuth [°]	Incident Angle [°]	Sun Elevation [°]
20130705_001	05.07.2013	234.66	8.43	70.8
20130705_002	05.07.2013	280.17	5.68	70.8
20130705_003	05.07.2013	328.24	8.11	70.8
20130706_001	06.07.2013	128.75	13.55	69.0
20130706_002	06.07.2013	73.34	13.78	68.7
20130706_003	06.07.2013	100.85	12.13	68.8
20141117_001	17.11.2014	243	18.96	50.1
20141117_002	17.11.2014	318.11	17.90	50.0
20141117_003	17.11.2014	274.26	14.90	50.0
20150429_00A	29.04.2015	238.1	6.43	71.9
20150429_00B	29.04.2015	300.62	6.13	71.9

Die beiden Parameter Incident Angle und Satellite Azimuth können mit einem Skyplot aufgetragen werden, um die Aufnahmedingungen der 11 Pléiades Bilder sichtbar zu machen. Die Satellite Azimuth gehen von 0° bis 360° und geben den Standort des Satelliten wieder. Die Werte des Incident Angles gehen von 5.68° bis 18.96°. Gut zu erkennen sind auf Abbildung 2.6 die einzelnen Überflüge mit den In-Orbit Aufnahmen. Aufnahmen mit dem gleichen Datum liegen in derselben Flugbahn und bilden eine Gerade.

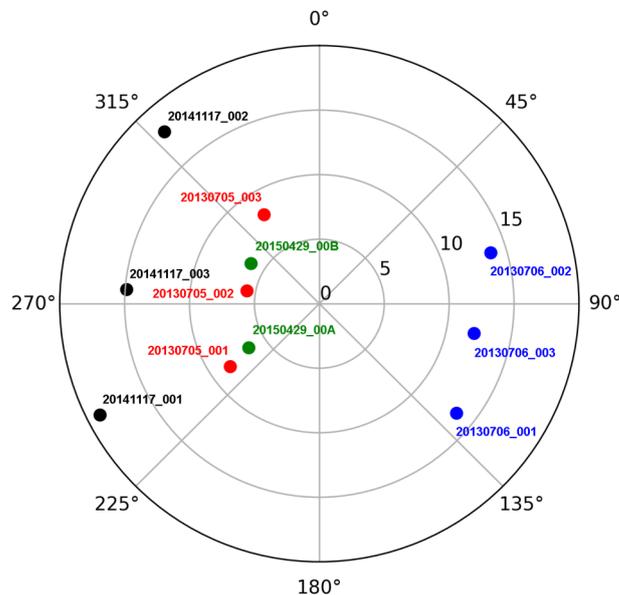


ABBILDUNG 2.6: Skyplot der 11 Pléiades Bilder

2.2 RPC Koeffiziente

Zusammen mit den Bilddaten wurden auch die dazugehörigen Rational Polynomial Coefficients (RPC) geliefert. Die RPC Koeffizienten ersetzen das physische Kameramodell des Satelliten und stellen die Verbindung zwischen den Bildpixeln und dem Terrain dar. Die Werte der inneren und äusseren Orientierung des Satellitensensors werden kodiert und in Form von Polynomen ausgeliefert. Dadurch bleiben photogrammetrische Vorgänge wie die Orthorektifizierung oder die Generierung von Höhenmodellen weiterhin möglich, obwohl das physische Kameramodell für den Anwender verborgen bleibt (Tao und Hu, 2001).

Die 90 Koeffizienten, die in einer xml Datei für jedes Pléiades Bild mitgeliefert werden, ermöglichen das Konvertieren von Bildkoordinaten (x,y) zu Objektkoordinaten (ϕ, λ, h) und zurück. Das Konvertieren von Bildkoordinaten zu Objektkoordinaten wird lokalisieren (RPC_u) genannt. Das heisst, jedem Bildpixel kann zusammen mit der Höhe, eine geografische Länge und eine geografische Breite zugewiesen werden. Die gegenteilige Funktion, also das Konvertieren von Objektkoordinaten zu Bildkoordinaten, wird projizieren (RPC_u^{-1}) genannt. Dabei ergibt ein Koordinatenpunkt auf der Erdoberfläche, der durch die geografische Länge, die geografische Breite sowie der Höhe über dem Referenzellipsoid definiert ist, einen Bildpixel.

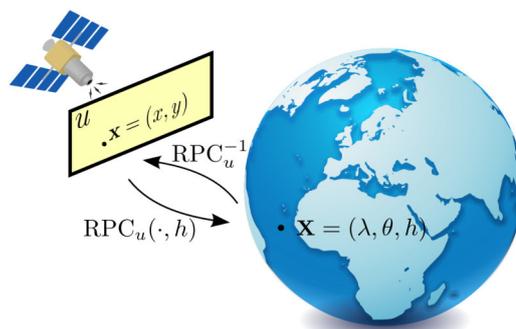


ABBILDUNG 2.7: Die beiden Rpc Funktionen lokalisieren und projizieren. Bildquelle: Facciolo, De Franchis und Meinhardt (2018)

Die beiden RPC Funktionen lokalisieren und projizieren sind nicht genau entgegengesetzt. Der Fehler, der sich im Bereich von 10^{-7} Längen- und Breitengraden bewegt - was etwas 1cm am Boden oder 1/100 Bildpixel entspricht - ist jedoch vernachlässigbar (Facciolo, De Franchis und Meinhardt, 2018).

2.3 Untersuchungsgebiet

Als Untersuchungsgebiet wurde ein flaches Gebiet in der Nähe des Hafens von Port-au-Prince festgelegt (für eine Übersicht siehe Abbildung 2.1). Um die Datenmenge und damit die Prozessierungszeit zu verringern, wurde eine Fläche von 400 x 400 Meter bestimmt. Zum einen reicht diese Grösse vollkommen aus, um die Qualität der tristereo DEMs zu bestimmen. Die Testgebiete des IARPA Multit-View Stereo Wettbewerbs hatten eine vergleichbare Ausdehnung. Zum anderen konnten so

schneller Fortschritte während der Try-and-Error Phase der Methodenfindung erzielt werden .

Das Untersuchungsgebiet besteht im Vergleich zum Rest der Stadt aus grossen, rechtwinkligen urbanen Strukturen. Die Häuser sind in diesem Gebiet von Augenmass geschätzt zwischen 5 und 15 Meter hoch. Das Untersuchungsgebiet wurde so gewählt, um das Stereo-Matching zu erleichtern. Zusätzliche Faktoren, die das Stereo-Matching erschweren könnten, wie zum Beispiel steiles Gelände oder sehr dichte, unstrukturierte Bebauung von Slums, wurden ausgeschlossen.



ABBILDUNG 2.8: Footprint des Untersuchungsgebietes (gelb) in Google Earth. Bilddatum: 01.2013

2.4 Referenzdatensatz

Als Referenzdatensatz stand ein aus zwei Tristereoo-Datensätzen zusammengesetztes Höhenmodell zur Verfügung. Das DEM wurde mit der CATENA multi-stereo processing chain vom DLR (Krauß u. a., 2013) erstellt und basiert auf den gleichen Pléiades Bildern, die auch in dieser Masterarbeit verwendet wurden. Es handelt sich dabei um die beiden Triplets vom 5. und 6. Juli 2013. Dank der nahen zeitlichen Abfolge der Aufnahmen sowie dem beidseitigen Blick auf die Szene ist die Abdeckung fast vollständig. Nur die mittlere Strasse weist einige NoData Stellen auf.

Die Höhenwerte gehen in den negativen Bereich, da sie sich auf den Referenzellipsoid WGS84 beziehen. In Port-au-Prince liegt dieser über der Erdoberfläche. Dadurch ergeben sich die negativen Werte. Da sich die generierten Höhenmodelle in dieser Arbeit ebenfalls auf den Referenzellipsoid WGS84 beziehen, spielten die Negativwerte keine Rolle und mussten nicht angepasst werden. Mit dem Benchmark wurde nur die relative Differenz zwischen dem Referenz DEM und den selber generierten Höhenmodellen gemessen.

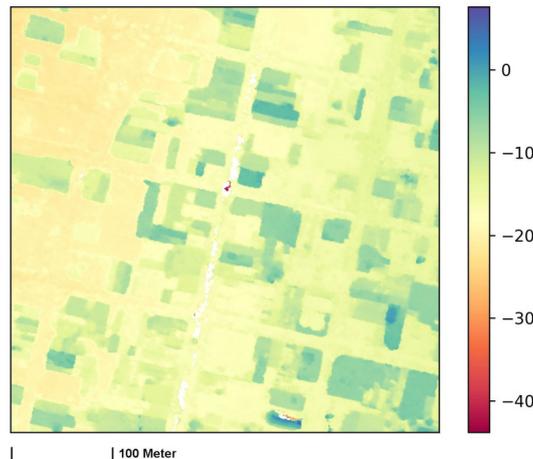


ABBILDUNG 2.9: DEM des Referenzdatensatz. Höhenwerte in Meter

2.5 Software

Für die Erstellung der Höhenmodelle wurde die Open Source Software *s2p* gewählt. *S2p* basiert auf Linux und kann auf Github bezogen werden (github.com/centreborelli/s2p). Der Hauptgrund für diese Wahl war, dass *s2p* im Zusammenhang mit der IARPA Multi-View Challenge von 2016 den ersten Platz belegte. Daher bestand das Bedürfnis, diese Software zu testen und deren Tauglichkeit für Hilfsorganisationen zu evaluieren. Weitere Kriterien für die Wahl von *s2p* waren die anwendungsfreundliche Benutzung sowie den voll automatisierten Ablauf der einzelnen Prozessierungsschritte. Zudem können mit einer Open Source Software zusätzliche Kosten für Lizenzierungen vermieden werden. Die Nachteile von *s2p* sind, dass die Software schlecht dokumentiert ist und bis anhin keine spezifischen Tutorials zur Verfügung stehen.

Neben *s2p* sind verschiedene andere Open Source Programme für die Erstellung von Höhenmodellen aus Stereobildern verfügbar. Qin (2016) entwickelte eine eigene Software. Der RPC Stereo Processor ist jedoch nicht frei zugänglich, sondern kann nur über den Kontakt zum Autor bezogen werden. Weitere Möglichkeiten sind MicMac sowie die Ames Stereo Pipeline (ASP) der Nasa. Diese Software sind um einiges umfangreicher, da sie ein breites Spektrum an photogrammetrischen Tools beinhalten. Dementsprechend ist auch die Anwendung sowie die Einarbeitung komplizierter. Dafür bestehen sowohl für MicMac wie auch für ASP eine relativ breite User Community mit einem aktiven Forum. Zudem sind eine Reihe von Tutorials sowie eine ausführliche Dokumentation vorhanden.

Ansonsten wurde für diese Arbeit hauptsächlich Python verwendet. Einige spezifische Python Module werden an einzelnen Stellen im Kapitel Methoden vermerkt. Die verwendeten Python Scripts mit allen Modulen sind im Anhang A zu finden.

Als einzige proprietäre Software kam ArcGIS Pro vor allem für Visualisierungen zum Einsatz. Daneben wurde Arcpy in einigen Python Scripts verwendet.

3 Methoden

Mit den vorhandenen 11 Pléiades Bildern wurden alle 3er-Kombinationen getestet, in denen keine Bilder mit dem gleichen Datum oder mit einem Tag Unterschied vorhanden sind. Dies soll eine Situation realistisch simulieren, in der nur Mono-Aufnahmen vorhanden sind. Von den 165 möglichen Kombinationen wurden dadurch nur 36 Kombinationen berücksichtigt. Die Herstellung der tristereo DEMs wurde anschliessend mit drei verschiedenen Ansätzen getestet. Im ersten Ansatz wurden die tristereo DEMs direkt mit s2p erstellt. Im zweiten Ansatz wurden die einzelnen stereo DEMs mit Hilfe eine Rangfolge gemerget. Im dritten Ansatz wurde der Median genommen, um die stereo DEMs zu mergen. Anschliessend wurden alle erzeugten Höhenmodelle mit dem Referenzdatensatz co-registriert und mit einem Benchmark die Completeness sowie die Accuracy berechnet. Die Übersicht des gesamten Arbeitsablaufes ist auf Abbildung 3.1 dargestellt.

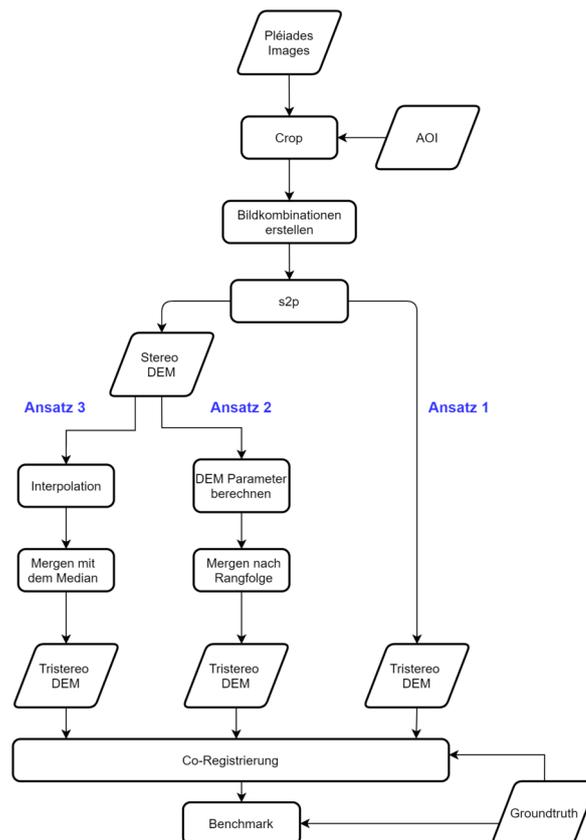


ABBILDUNG 3.1: Die Übersicht der Methoden

3.1 Bilder und RPC Koeffizienten zuschneiden

In einem ersten Schritt wurden die Pléiades Szenen zugeschnitten, um die Prozessierungszeit für die nachfolgenden Schritte zu reduzieren und das Datenmanagement zu vereinfachen. Zusammen mit den tif Dateien mussten auch die dazugehörigen RPC Koeffizienten angepasst werden. Eine detaillierte Übersicht dieses Schrittes ist auf Abbildung 3.2 dargestellt.

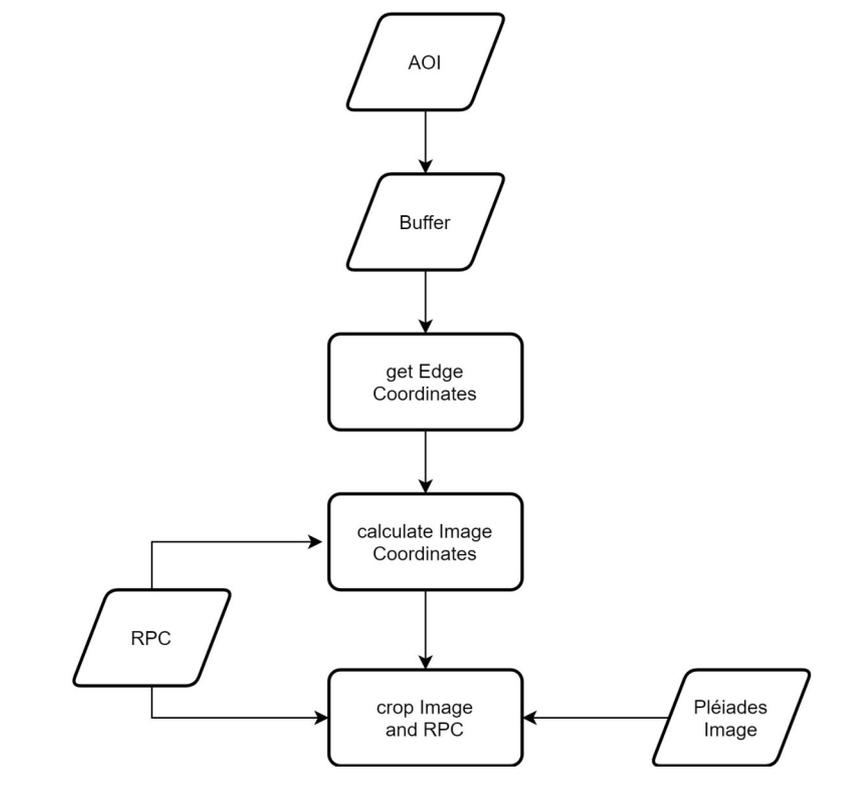


ABBILDUNG 3.2: Workflow für das Zuschneiden von Pléiades Bildern

Es musste zuerst sichergestellt werden, dass ein genug grosser Bildausschnitt vorhanden ist, so dass die Verzerrungen der Orthorektifizierung bei der Erstellung der Höhenmodelle die Abdeckung des Untersuchungsgebietes nicht tangieren. Aus diesem Grund wurde ein Buffer um das Untersuchungsgebiet gelegt und die Pléiades Bilder anschliessend auf diesen Buffer zugeschnitten.

Da die Pléiades Bilder nicht georeferenziert geliefert werden, können sie nicht direkt zugeschnitten werden. Damit für alle Bilder das gleiche Gebiet ausgeschnitten werden konnte, mussten daher für jedes Bild die entsprechenden Bildkoordinaten aus den RPC Koeffizienten berechnet werden. Dazu wurden als erstes die Eckkoordinaten des Buffers mit einem Python Script ausgelesen und als geografische Länge und geografische Breite in einer txt Datei gespeichert (Siehe Python Script Anhang A.1). Die ausgelesenen Eckkoordinaten des Buffers wurden anschliessend für jedes Bild mit Hilfe des RPCM Python Moduls (github.com/centreborelli/rpcm) in die entsprechenden Bildkoordinaten umgerechnet (Siehe Python Script Anhang A.2). Das RPCM Modul ist eine Python Implementation des RPC Kameramodells für optische Satelliten Bilder. Zu beachten ist, dass bei der Umrechnung von geografischen Koordinaten in Bildkoordinaten nicht für alle Bilder die exakt gleichen Bildausschnitte

entstehen. Die entstandenen Abweichungen, die sich in der Reichweite von einigen Pixeln bewegen, konnten aber dank dem vorhandenen Buffer abgefangen werden. Abbildung 3.3 stellt den Zusammenhang schematisch dar.

Die berechneten Bildkoordinaten für das Gebiet des Buffers dienen abschliessend als Input für das Open Source Tool RPC Cropper (github.com/carlodef/rpc_cropper), um die Pléiades Bilder und ihre dazugehörigen RPC Koeffizienten zu schneiden.

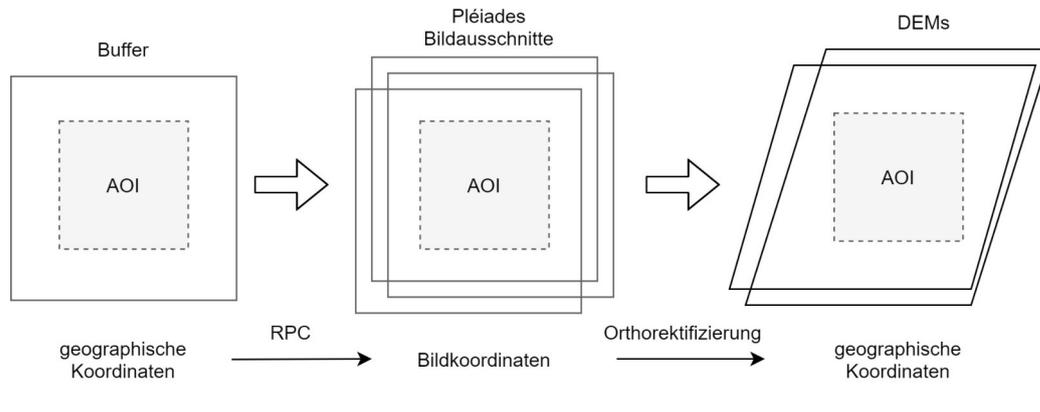


ABBILDUNG 3.3: Effekt der Orthorektifizierung sowie der Berechnung der Bildkoordinaten auf den Bildausschnitt

3.2 Bildkombinationen

In einem zweiten Schritt wurden alle 2er- und 3er-Kombinationen aus den 11 Pléiades Bildern berechnet (siehe Python Script A.3). Alle Kombinationen mit Bildern vom selben Datum oder einem Tag unterschied wurden von Hand gelöscht. Als Resultat blieben sowohl 36 Kombinationen mit drei Bildern als auch 36 Kombinationen mit zwei Bildern übrig (siehe Tabelle B.1 und Tabelle B.2).

3.3 Ansatz 1: Tristereore DEM mit s2p

Nach diesen Vorbereitungsschritten wurden die 36 tristereo DEMs mit der voll automatischen Pipeline s2p erstellt. S2p ermöglicht die Verarbeitung von tristereo Datensätzen, indem die einzelnen Stereopaare unabhängig voneinander berechnet und anschliessend die resultierenden 3D Punktwolken automatisch gemerget werden. Es ist keine vorgängige Bearbeitung der Bilder erforderlich. Die einzig notwendigen Daten sind die beschnittenen Bilder und ihre ebenfalls zugeschnittenen RPC Koeffizienten. Die RPC Koeffizienten können entweder als xml oder txt Datei zur Verfügung stehen oder direkt über den entsprechenden Tag eines GeoTIFFs eingelesen werden. Mit Hilfe einer json Konfigurationsdatei kann s2p über die Command Line mit folgendem Befehl gestartet werden.

```
$ s2p config.json
```

Damit nicht alle 36 tristereo DEMs einzeln ausgeführt werden mussten, wurde der Prozess mit dem nachfolgenden Batch Script automatisiert.

```
#!/bin/bash

for i in /Path/To/ConfigFiles/*.json;do s2p $i

done
```

3.3.1 Die Konfigurationsdatei config.json

In der Konfigurationsdatei werden alle Einstellungen von s2p geregelt. Zum Einen werden die Pfade zu den Bildern und deren RPC Koeffizienten angegeben. Zum Anderem wird der gewünschte Output Ordner definiert. Zudem können zahlreiche weitere Parametereinstellungen getätigt werden. Für Parameter, die nicht explizit in der Konfigurationsdatei definiert werden, wird der Defaultwert aus der config.py Datei von s2p übernommen. Für die Erstellung der tristereo DEMs wurden folgenden Parameter benutzt:

- *full_img : true*. Wenn dieser Parameter auf true gestellt ist, wird das ganze Bild prozessiert. Alternativ kann ein ROI definiert werden.
- *tile_size: 300*. Dieser Parameter bestimmt die Höhe und Breite der Tiles in Pixel. Die Inputbilder werden in dieser Tilegröße unterteilt. Bei Abstürzen von s2p kann die Verkleinerung der Tilegröße helfen. 300 hat sich als guter Wert gezeigt, der keine Abstürze generierte. Werte über 1000 sollten nicht gewählt werden, da mit einer Zunahme der Tilegröße, auch die Abweichung von zwei korrespondieren Pixel auf der Epipolarlinie grösser wird.
- *matching_algorithm: 'mgm_multi'*. Definiert den Stereo-Matching Algorithmus. s2p verwendet eine Weiterentwicklung des bekannten Semi-global Matching Algorithmus von Hirschmüller (Hirschmüller, 2008). MGM steht für More Global Matching (Facciolo, Franchis und Meinhardt, 2015)
- *vertical_margin: 5 and horizontal_margin: 20*. Diese Parameter fügen den rektifizierten Tiles einen Rand an, um schlechten Disparität Schätzungen am Rand Rechnung zu tragen
- *dsm_resolution: 1*. Gib die Auflösung des generierten Höhenmodells in Meter per Pixel an.
- *max_processes: 2*. Definiert die maximale Anzahl von parallelen Prozessen. Mit der Einstellung None wird die verfügbare Anzahl von Cores benutzt. Weil es mit None immer wieder zu Abstürzen kam, wurde dieser Parameter auf 2 runter gesetzt. Gleichzeitig erhöhte sich dadurch die Rechenzeit für ein tristereo DEM von ungefähr 2 min auf 4 min (Microsoft Surface Pro 7 mit 1.8 GHz und 8GB RAM).
- *max_processes_stereo_matching: 2*. Definiert die maximale Anzahl von parallelen Prozessen für das Stereo-Matching im Speziellen. Wenn der Wert auf None gesetzt ist, werden die Werte von *max_processes* übernommen

3.3.2 s2p

Für perspektivische Kameramodelle (pinhole camera model) lassen sich Stereopaare mit Hilfe der Epipolargeometrie¹ rektifizieren. Durch die Rektifizierung kommen zwei korrespondierende Bildpunkte in den beiden Ansichten auf der gleichen Epipolarlinie zu liegen. Dadurch lässt sich die Suche nach korrespondierenden Bildpunkten stark vereinfachen, indem der Suchradius nicht mehr das ganze Bild umfasst sondern sich auf eine Linie reduzieren lässt. Für jeden Bildpunkt X_L in der einen Ansicht liegt der Bildpunkt X_R der anderen Ansicht auf der Epipolarlinie dieses Punktes (Ozcanli u. a., 2015).

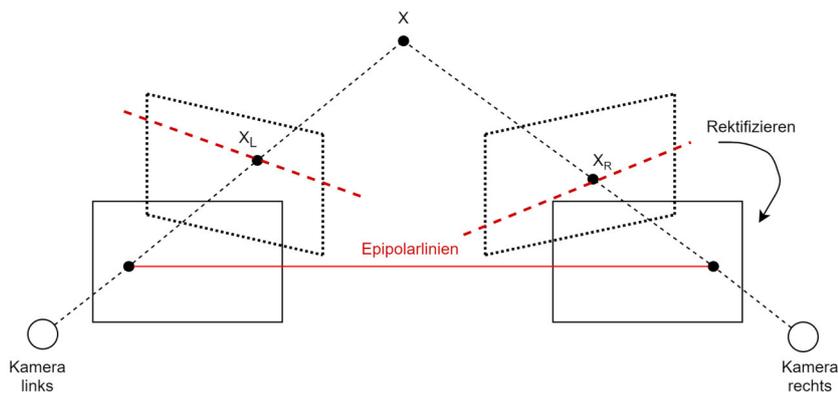


ABBILDUNG 3.4: Die Epipolarlinie für den Punkt X in den rektifizierten Stereobildern.

Bei Satellitenbildern, die mit einem Pushbroom Sensor aufgenommen wurden, ist hingegen eine andere Bildgeometrie vorhanden. Die Epipolarlinien sind bei diesen Bildern gekrümmt und daher lassen sie die Bilder nicht stereo rektifizieren. Um dieses Rektifizierungsproblem von Pushbroom Kameras zu lösen, schneidet s2p die Input Bilder in Tiles. Ausgangspunkt dieser Überlegung ist die Feststellung, dass aufgrund der hohen Flughöhe des Satelliten die Lichtstrahlen lokal nahezu parallel auf den Sensor treffen. Siehe Abbildung 3.5. Daher ist es möglich, für die einzelnen Tiles den Pushbroom Sensor des Satelliten mit Hilfe eines affinen Kameramodells² zu approximieren. Als Konsequenz des affinen Kameramodells können die Epipolarlinien wieder linear dargestellt werden und dadurch lassen sich die Tiles der Pléiades Bilder rektifizieren. Der Fehler dieser Approximation liegt im Bereich von $\frac{1}{10}$ Pixel.

Die Stereorektifizierung von s2p basiert vollständig auf den RPC Koeffizienten. Das Substituieren des physischen Sensormodells mittels RPC Koeffizienten ist jedoch nicht ganz exakt und unterliegt ebenfalls einem Fehler, was dazu führt, dass zwei korrespondierende Pixel auf zwei Bildern nicht auf der selben Epipolarlinie zu liegen kommen und eine Abweichung von einigen Pixeln aufweisen. Normalerweise kann dieser Effekt vernachlässigt werden. Für das Stereo-Matching hingegen sollte die Stereorektifizierung so präzise wie möglich sein. S2p versucht den durch die RPC

¹Die Epipolargeometrie beschreibt die geometrische Beziehung zwischen zwei Bildern, die das gleiche Objekt abbilden (Wikipedia)

²Das affine Modell nimmt eine unendliche Brennweite der Kamera an. Dadurch werden die Lichtstrahlen parallel horizontal. (Nixon und Aguado, 2012).

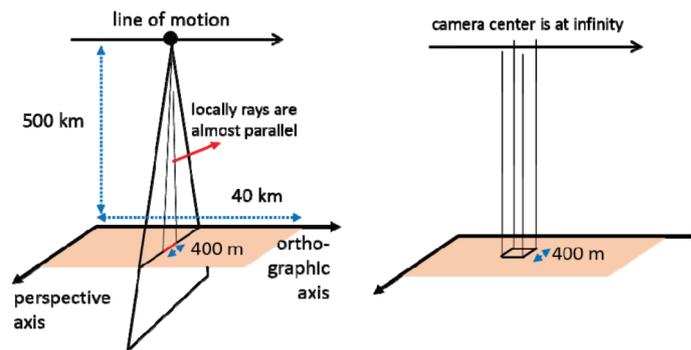


ABBILDUNG 3.5: Links: Pushbroom Sensor mit lokal paralleler Strahlung. Rechts: Das affine Kameramodell. Bildquelle: Ozcanli u. a. (2015)

Koeffizienten verursachten Fehler in einem vorgängigen Schritt zu korrigieren, indem für eines der Bilder eine Translation gesucht wird, die den Fehler minimiert (Franchis u. a., 2014).

Das Stereo-Matching wird anschliessend für jedes Tile mit einer Weiterentwicklung des Semi-global Matching Algorithmus von Hirschmüller durchgeführt. Aus der resultierenden Disparität³ wird danach eine 3D Punktwolke trianguliert. Schlussendlich werden diese Punkte auf ein Raster projiziert, um ein digitales Höhenmodell zu bekommen.

3.3.3 Outputfehler

Von den 36 tristereo Kombinationen ergaben nur 26 einen Output (siehe Tabelle 4.10). Bei den verbleibenden 10 Kombinationen trat ein Fehler auf, so dass kein Höhenmodell berechnet werden konnte. Gemäss Log File scheint der Fehler mit einer fehlgeschlagenen Stereorektifizierung zusammenzuhängen, da für gewisse Tiles keine korrespondierenden Punkte gefunden wurden. Höchstwahrscheinlich ist dieser Fehler auf einen zu grossen Convergence Angle zwischen einem der Stereopaare zurückzuführen. So beinhalten alle fehlerhaften tristereo Kombinationen mindestens ein Stereopaar mit einem Convergence Angle von grösser als 27 Grad.

3.4 Ansatz 2: Mergen nach Rangfolge

Im zweiten Ansatz wurden die 36 stereo DEMs mit s2p erstellt. Wiederum wurde mit Hilfe des oben genannten Batch Scripts die Ausführung der 36 Konfigurationsdateien automatisiert. Danach wurde der Convergence Angle und der Valid Pixel Count als Qualitätsmass berechnet. Mit Hilfe dieser Parameter wurde eine Rangfolge erstellt, um die stereo DEMs zu einem tristereo DEM zu mergen. Dabei wurden jeweils drei Stereopaare zu einem tristereo DEM gemerget (1,2) (1,3) (2,3). Für die tristereo DEMs wurden die gleichen 36 Datumskombinationen wie bei Ansatz 1 verwendet.

³Disparität bezeichnet den horizontalen Versatz eines Punktes auf der Epipolarlinie, der durch die stereo Anordnung der Kameras zustande kommt.

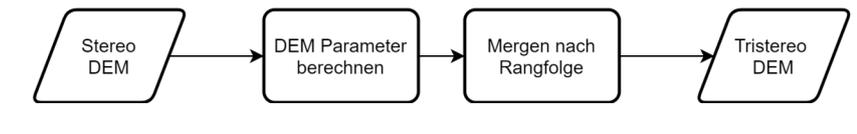


ABBILDUNG 3.6: Workflow für das Mergen nach Rangfolge

3.4.1 Stereo DEM Parameter

Mit Hilfe des Convergence Angles und dem Valid Pixel Count wurde die Vertrauenswürdigkeit beziehungsweise die Qualität der stereo DEMs abgeschätzt (Siehe Python Script Anhang A.4).

Der Convergence Angle konnte mit Hilfe des Across Track Incident Angle (roll,r) und dem Along Track Incident Angle (pitch, p) aus dem Metadatenfile DIMAP.xml der einzelnen Pléiades Bilder berechnet werden. Dabei wurde die Formel aus der Arbeit von Perko u. a. (2018) verwendet:

$$v1 = (\tan(p1), \tan(r1), 1)^T$$

$$v2 = (\tan(p2), \tan(r2), 1)^T$$

$$\delta = \text{acos}((v1 * v2) / (|v1| * |v2|))$$

Der Valid Pixel Count bezieht sich auf die Anzahl vorhandener Pixel und ist ein Mass dafür, wie gut s2p die Stereobilder matchen konnte. Der Wert sagt jedoch nichts über die Lagegenauigkeit der gematchten Pixel aus. Ein Wert von 100 Prozent bedeutet, dass alle Bildpixel des Stereopaars gematcht werden konnten und keine NoData Stellen vorhanden sind. Der Valid Pixel Count wurde mit Hilfe von gdalinfo ermittelt:

```
$ gdalinfo -stats <srcImage>
```

Ausserdem wurde als dritter Metadaten Parameter die Sun Elevation Difference berechnet. Die Werte für die beiden Sonnenstände zur Zeit der Aufnahmen konnten direkt aus den Metadaten ausgelesen werden und mussten nur voneinander subtrahiert werden. Die Idee, diesen Metadaten Parameter als Kriterium für die Qualität eines stereo DEMs miteinzubeziehen, stammt aus dem Artikel von Qin (2019). Sie basiert auf der Annahme, dass je kleiner die Differenz der Sonnenstände ist, desto ähnlicher sind die Lichtverhältnisse auf den Bildern und desto besser können die Stereobilder gematcht werden. Es stellte sich aber heraus, dass keine sinnvollen Rangfolgen damit erstellt werden konnten. Für die vorhandenen stereo DEMS bedeutete nämlich eine grosse Sun Elevation Difference nicht zwingend auch eine schlechte Qualität. Als Kriterium für die Vertrauenswürdigkeit und zum Erstellen einer Rangfolge eignete sich der Valid Pixel Count besser. Der Parameter Sun Elevation Difference wurde daher nicht weiter benutzt.

3.4.2 Rangfolge erstellen und mergen

Anschliessend wurden die stereo DEMs mit einem zweiten Python Script (Siehe Anhang A.5) nach einer einfachen Heuristik geordnet und gemerget. Aus der Literaturrecherche hatte sich ergeben, dass für Stereopaare mit einem Convergence Angle zwischen 5 und 20 Grad gute Ergebnisse zu erwarten sind. Deshalb wurden Stereopaare mit einem Convergence Angle kleiner als 5 oder grösser als 20 Grad für das

Merging nicht berücksichtigt. Die verbleibenden Stereopaare wurden nach dem Valid Pixel Count geordnet.

Schlussendlich wurden die stereo DEMs nach folgendem Prinzip gemerget: Die No-Data Stellen des besten DEMs wurden mit Bildpixeln aus dem zweiten DEM gefüllt. Falls das zweite DEM für den gleichen Pixel ebenfalls einen NoData Wert aufwies, wurde das dritte DEM genommen.

Tabelle 4.14 zeigt die Rangfolge der stereo DEMs für alle tristereo Bildkombinationen. Die meisten tristereo Kombinationen setzen sich nur aus zwei stereo DEMs zusammen, weil das dritte stereo DEM entweder wegen einem ungünstigen Convergence Angle nicht berücksichtigt wurde oder s2p gar kein stereo DEM erstellen konnte. Vier tristereo Kombinationen bestehen sogar nur aus einem stereo DEM, weil die anderen entweder mit s2p nicht erstellt werden konnten oder auf Grund des Convergence Angle aussortiert wurden.

3.5 Ansatz 3: Mergen mit dem Median

Im dritten Ansatz wurden drei stereo DEMs mit Hilfe des Medians zu einem tristereo DEM gemerget. Es wurden wiederum die gleichen 36 Datumskombinationen wie in den vorhergehenden Ansätzen verwendet. Mit dieser Methode traten keine Fehler auf und es konnten 36 tristereo DEMs erstellt werden.

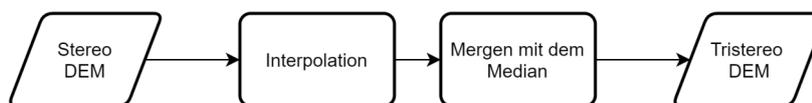


ABBILDUNG 3.7: Workflow für das Mergen mit dem Median

Zuerst musste sichergestellt werden, dass keine NoData Stellen in den generierten Höhenmodellen vorhanden sind, da ansonsten der Median nicht gezogen werden kann. Bei weniger als drei verfügbaren Pixelwerten kann der Median nicht berechnet werden und es gibt eine Fehlermeldung. Die fehlenden Pixel in den einzelnen stereo DEMs wurden mittels Interpolation erzeugt. Dazu wurde das `gdal_fillnodata.py` Script verwendet. Dieser Algorithmus interpoliert für alle NoData Stellen einen Wert mit einer Inverse Distance Weighting Methode. Es wurden keine Iterationen zum Glätten des Resultats durchgeführt (Siehe Python Script im Anhang A.6).

Anschliessend wurde mit Hilfe des `arcpy` Moduls das Median-Höhenmodell berechnet. Dazu wurde das Tool `CellStatistics` verwendet, um auf Pixelbasis den Median aus den drei stereo DEMs zu ziehen (Siehe Python Script im Anhang A.7).

3.6 Co-registrierung

Alle erzeugten Höhenmodelle wurden mit dem Referenz DEM co-registriert. Da sich beide Höhenwerte auf den Ellipsoid WGS84 beziehen sowie beide Datensätze die gleiche Auflösung haben, war keine Anpassung des vertikalen Datums oder ein Resampling erforderlich. Für die Co-registrierung wurde das Python Script `dem_align.py` vom `demcoreg` github repository (github.com/dshean/demcoreg) verwendet. Das Script

basiert auf dem Algorithmus von Nuth und Käab (2011) und wird über die Command Line mit folgenden Argumenten ausgeführt.

```
$ dem_align.py ref_dem.tif src_dem.tif
```

Damit die Co-registrierung für die tristereo DEMs nicht einzeln ausgeführt werden musste, wurde der Vorgang mit Hilfe des folgenden Batch Scriptes automatisiert.

```
#!/bin/bash

#Find all dsm.tif (output of s2p) in directory depth 2

find /PATH/To/DEMs -maxdepth 2 -type f -name dsm.tif -exec sh -c '
    dem_align.py -outdir "$(dirname "$1")" "$2" "$3" sh {} "/Path/To/
    Groundtruth DEM" {} ';' >
```

Für einige Höhenmodelle musste vorgängig mit dem Python Script `replace_ndv.py` die NoData Werte von nan (not a number) zu -9999 geändert werden, damit die Co-registrierung ohne Fehlermeldung durchgeführt werden konnte. Es blieb unklar, warum dieser Effekt nur bei einige Höhenmodelle auftrat und bei anderen nicht. Das Script ist ebenfalls auf github zu finden (github.com/dshean/pygeotools/blob/master/pygeotools/replace_ndv.py).

3.7 Benchmark

Im Benchmark (Siehe Python Script Anhang A.8) wurde die Completeness und die Accuracy der erzeugten tristereo DEMs gemessen, indem sie mit dem Referenz DEM verglichen wurden. Dabei wurde zuerst geprüft, ob die Koordinatensysteme sowie die Auflösung der beiden Höhenmodelle übereinstimmen. Danach wurde das tristereo DEM auf das Untersuchungsgebiet zugeschnitten und vom Referenz DEM subtrahiert.

Die Completeness wurde als prozentualen Anteil der validen Zellen am Gesamtraster bestimmt. Eine Zelle wurde als valide definiert, wenn der vertikale Fehler weniger als 1 Meter in Bezug zum Referenz DEM betrug. Damit folgt diese Masterarbeit Bosch u. a. (2017) und Facciolo, De Franchis und Meinhardt-Llopis (2017), die ebenfalls die Completeness über valide Zellen mit einem maximalen vertikalen Fehler definieren. Im Gegensatz dazu verwenden Krauß, D'Angelo und Wendt (2019) für die Completeness alle Zellen mit einem Wert und schliessen nur die NoData Pixel aus.

Die Accuracy hingegen wurde als RMSE (root mean square error) des vertikalen Fehlers berechnet. Für die Accuracy wurden alle Zellen mit einem gültigen Wert in die Berechnung miteinbezogen. NoData Pixel wurden ausgeschlossen.

4 Resultate

Im folgenden Kapitel werden die Resultate entlang der verschiedenen Ansätze präsentiert. Für das ganze Kapitel wird ein einheitlicher Farbcode verwendet, um das Lesen der Bildkombinationen zu erleichtern. Blau wird immer für das beste DEM verwendet. Rot bezeichnet jeweils das zweitplatzierte und schwarz das drittplatzierte DEM.

4.1 Ansatz 1: s2p

Für Ansatz 1, bei dem die tristereo DEMs mit der Software s2p erstellt wurden, ergaben folgende drei Bildkombinationen die besten Ergebnisse. Abbildung 4.1 zeigt den Skyplot mit den eingezeichneten Bildkombinationen.

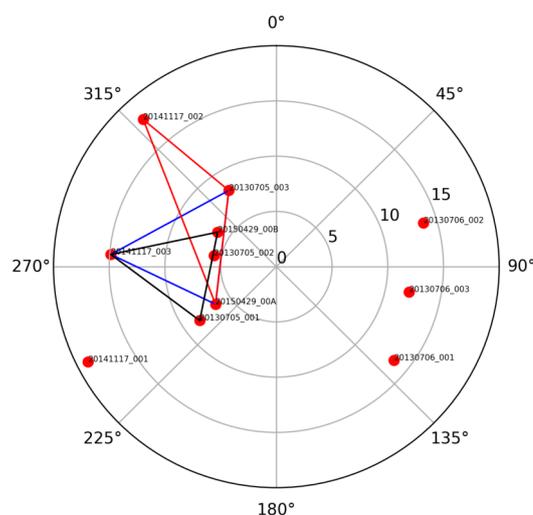


ABBILDUNG 4.1: Die drei besten Konstellationen aus Ansatz 1

Tabelle 4.1 zeigt die Completeness, die gematchten Pixels sowie den RMSE für diese tristereo Bildkombinationen. Das beste tristereo DEM erreichte lediglich eine Completeness von 29.8% validen Pixeln, wobei insgesamt deutlich mehr Pixel (57%) gematcht werden konnten. Der RMSE beträgt um die 3 Meter und ist damit mit anderen Arbeiten vergleichbar (siehe Facciolo, De Franchis und Meinhardt-Llopis (2017)).

Abbildung 4.2 zeigt das beste DEM zusammen mit dem Error Image auf der rechten Seite. Zu erkennen ist, dass vor allem Strassen kaum oder nur schlecht gematcht wurden. Bei den vorhandenen Pixeln ist der Fehler besonders an Hauskanten gross, während die Dächer der Gebäude relativ gut rekonstruiert werden konnten.

tristereoo Bildkombination	Completeness	gematchte Pixel	RMSE
20130705_003-20141117_003-20150429_00A	29.8	57.0	3.0
20130705_003-20141117_002-20150429_00A	29.6	56.7	3.0
20130705_001-20141117_003-20150429_00B	24.9	52.0	3.3

TABELLE 4.1: Completeness [%], gematchte Pixel [%] und RMSE [m] der besten drei Bildkombinationen für Ansatz 1

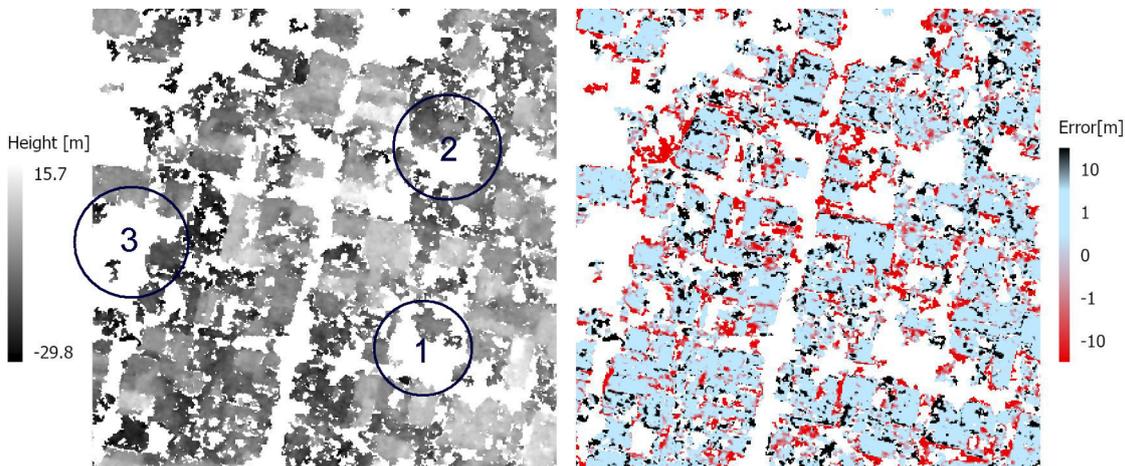


ABBILDUNG 4.2: DEM und Error Image der besten Bildkombination für Ansatz 1

Ausserdem bestehen einige grössere Stellen, die nicht gematcht wurden und zum Teil auf Veränderungen am Boden zurückzuführen sind. Zur Anschauung wurden drei solcher Stellen markiert und in Abbildung 4.3 detailliert dargestellt. Anhand der einzelnen Bilder sind die Veränderungen gut sichtbar.

1) An dieser Stelle hat sich die urbane Struktur im Laufe der Zeit verändert. Auf dem Bild vom 05.07.2013 ist ein längliches Gebäude in der Mitte gut zu erkennen, dass in den beiden späteren Bildern langsam verschwindet. Während auf dem Bild 20141117_003 das Dach bereits nicht mehr vorhanden ist, sind auf dem Bild vom 29.04.2015 nur noch die Grundmauern zu erkennen.

2) Hier handelt es sich um eine Grünfläche, die sich in den unterschiedlichen Bildern verändert. Auf dem Bild vom 05.07.2013 sind offene Stellen in der Bedeckung zu erkennen, während auf dem Bild vom 17.11.2014 die Vegetation den ganzen Platz bedeckt. 5 Monate später auf dem Bild vom 29.5.2015 sind wiederum Wege zu sehen und kleinere Stellen mit offenem Boden. Ebenfalls eine Rolle für das schlechte Matching könnte der grosse Incident Angle von Bild 20141117_003 (14.9 Grad) spielen. Gerade bei Vegetation können sich bei einer flachen Ansicht starke Änderungen in der Erscheinung ergeben, wodurch keine korrespondierenden Pixel gefunden und gematcht werden können.

3) An dieser Stelle handelt es sich um einen Parkplatz. Am 05.07.2013 ist dieser mit Autos voll besetzt, während er auf den anderen Bildern leer ist. Auch hier ist die These, dass sich die Pixel auf Grund des besetzten Parkplatzes zu stark voneinander unterscheiden und so ein Matching verhindern.

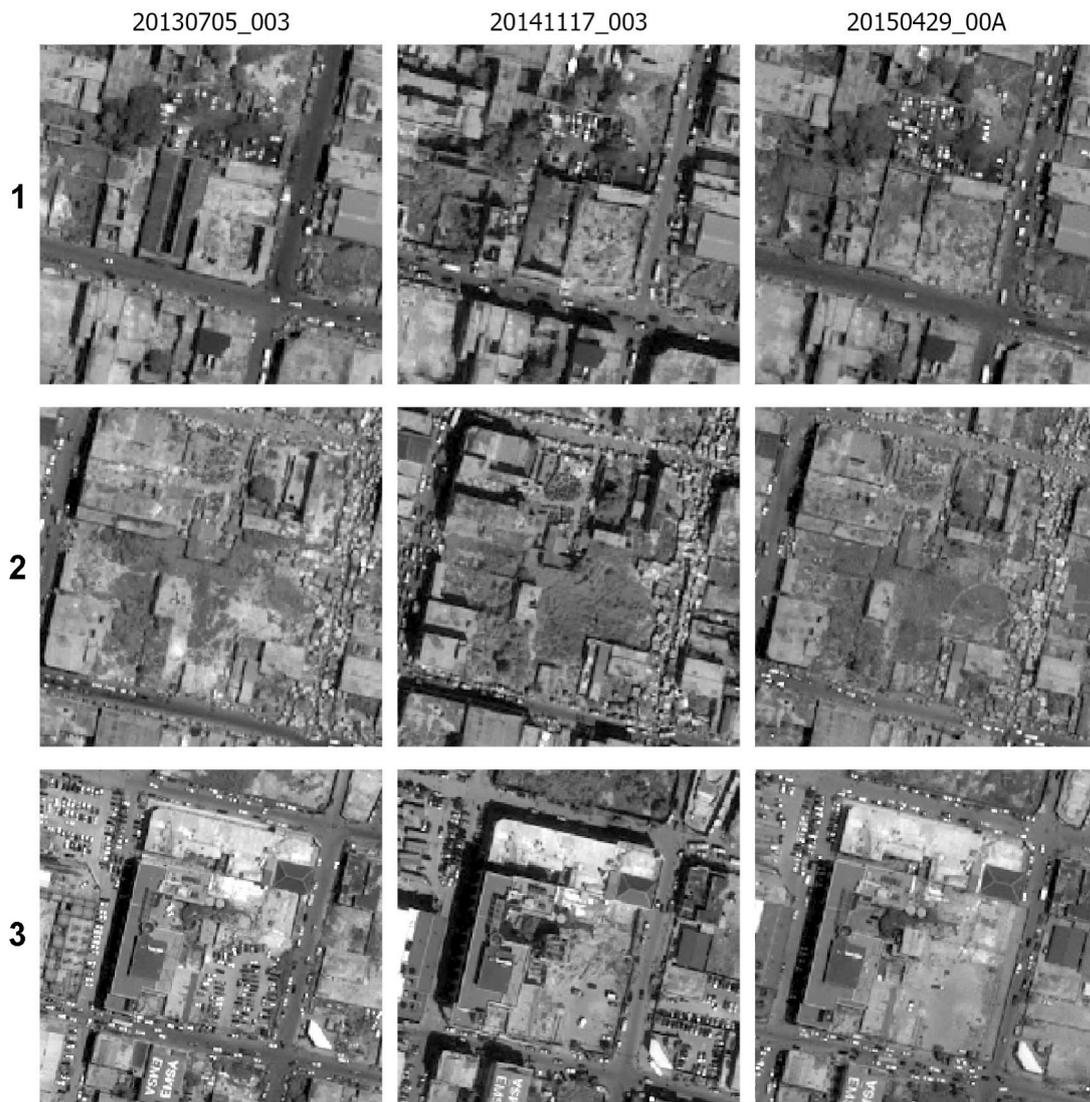


ABBILDUNG 4.3: Detailansicht für drei ausgewählte Stellen

Wie verändert sich nun die Completeness, wenn ein Bild in der besten Aufnahme-konstellation gewechselt wird? Nachfolgend werden systematisch alle Möglichkei-ten durchgegangen. Die verschiedenen Varianten werden jeweils auf einem Skyplot dargestellt. Dazu wird für jede Kombination die Completeness angegeben. Die Aus-gangssituation wird stets mit Variante A betitelt.

Bilder vom 17.11.2014

Zuerst wird auf das Triplet vom 17.11.2014 eingegangen. Abbildung 4.4 zeigt die verschiedenen möglichen Bildkombinationen, wenn ein Bild aus dieser Reihe ge-wechselt wird. Wird anstatt dem Bild 20141117_003 das Bild 20141117_002 verwen-det, ergibt das die Variante B. Mit diese Bildkombination wurde gleichzeitig das

zweitbesten tristereo DEM generiert (siehe Tabelle 4.1). Die Anzahl der gematchten Pixel (57% und 56.7%) sowie die Completeness (29.8% und 29.6 %) der beiden tristereo DEMs sind nahezu gleich, obwohl sich die Position des Satelliten (Satellite Azimuth) im gewechselten Bild deutlich unterscheidet. Die unterschiedliche Aufnahmepositionen scheint somit in diesem Fall nur einen minimalen Einfluss auf das tristereo DEM zu haben.

Anders sieht es mit dem Bild 20141117_001 für die Variante C aus. Ersetzt man das Ausgangsbild 20141117_003 mit diesem Bild, ergibt das eine Fehlermeldung und das DEM kann nicht erstellt werden. Das Problem scheint in dieser Kombination das Stereopaar 20130705_003-20141117_001 zu sein, das auch einzeln mit s2p nicht funktionierte. Der Convergence Angle ist für dieses Stereopaar zwar mit 20 Grad nicht optimal, aber auch nicht zu gross. Andere Kombinationen mit einem grösseren Winkel lieferten durchaus Ergebnisse. Eine Möglichkeit, die das Stereo-Matching verhindern könnte, ist auch hier der grosse Incident Angle von Bild 20141117_001 (18.9 Grad).

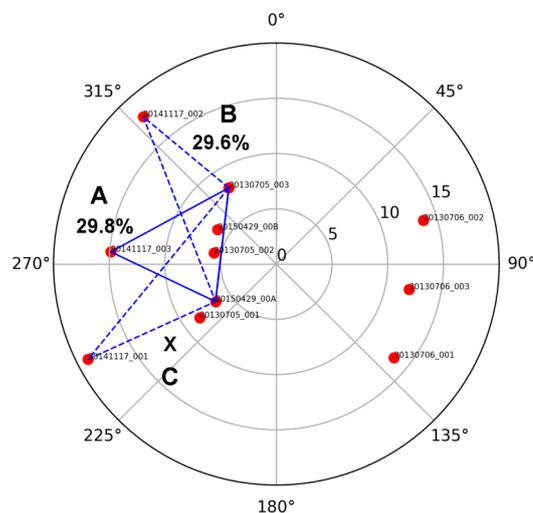


ABBILDUNG 4.4: Mögliche Bildkombinationen mit den Bildern vom 17.11.2014 und deren Completeness

Warum funktionieren dann Variante A und Variante B? Restlos ist das nicht zu klären, weil nicht klar wurde, wie s2p die einzelnen stereo DEMs zu einem tristereo DEM merget. Trotzdem gibt es Anhaltspunkte. Beide tristereo DEMs bestehen nämlich aus Stereopaaren, die alle einen günstigen Convergence Angle aufweisen. Tabelle 4.2 und 4.3 zeigen die Completeness Werte sowie der Convergence Angle der einzelnen stereo DEMs für die Variante A und B. Überraschend ist ausserdem, dass einzelne stereo DEMs eine bessere Completeness aufweisen als das tristereo DEM. Die Komponente ist sozusagen besser als das Gesamtergebnis. So haben die DEMs aus den Stereopaaren 20141117_003-20150429_00A und 20141117_002-20150429_00A eine Completeness von 31.4% und 36% und sind somit um einige Prozente höher als das tristereo DEM.

TABELLE 4.2: Die Stereopaare der Variante A

Stereopaar	Completeness	Convergence Angle
20130705_003-20150429_00A	29.2	10
20130705_003-20141117_003	25.6	12
20141117_003-20150429_00A	31.4	10

TABELLE 4.3: Die Stereopaare der Variante B

Stereopaar	Completeness	Convergence Angle
20130705_003-20150429_00A	29.2	10
20130705_003-20141117_002	24.0	10
20141117_002-20150429_00A	36.0	18

Ebenfalls von Interesse ist, ob die unterschiedlichen Aufnahmekonstellationen von Variante A und B einen Einfluss auf die gematchten Pixel haben. Ein Vergleich der beiden DEMs ergibt jedoch, dass nahezu die gleichen Pixel gematcht wurden. Die verschiedenen Aufnahmepositionen führen nicht dazu, dass mehr oder wesentlich andere Stellen gematcht wurden. Wie schon oben gezeigt, sind viele NoData Stellen auf Veränderungen am Boden auf den drei Bildern zurückzuführen und können demzufolge auch mit anderen Aufnahmewinkeln nicht besser gematcht werden. Abbildung 4.5 zeigt eine Überlagerung der beiden DEMs. Zu sehen sind die wenigen roten Pixel der Variante B (rot), die in der Variante A (blau) nicht gematcht wurden.

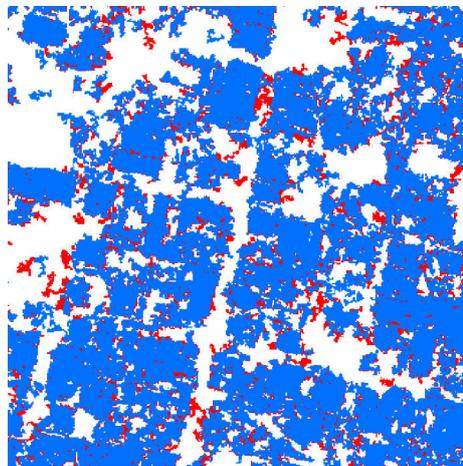


ABBILDUNG 4.5: Vergleich des besten DEMs (Variante A: blau) mit dem zweitbesten DEM (Variante B: rot)

Bilder vom 29.04.2015

Wechselt man das Bild vom 29.04.2015, bleibt nur eine andere mögliche Aufnahmekonstellation. Anstatt dem Bild 20150420_00A kann das Bild 20150429_00B verwendet werden. Der Completeness Wert sinkt in diesem Fall für das tristereo DEM auf 20.4%. Wiederum liegt eine mögliche Erklärung dafür in den Convergence Angle der einzelnen stereo DEMs. Vor allem das Stereopaar 20130705_003-20150429_00B

fällt deutlich ab. Der Convergence Angle ist mit 4 Grad sehr klein und dementsprechend liegt auch die Completeness nur bei 14.5%.

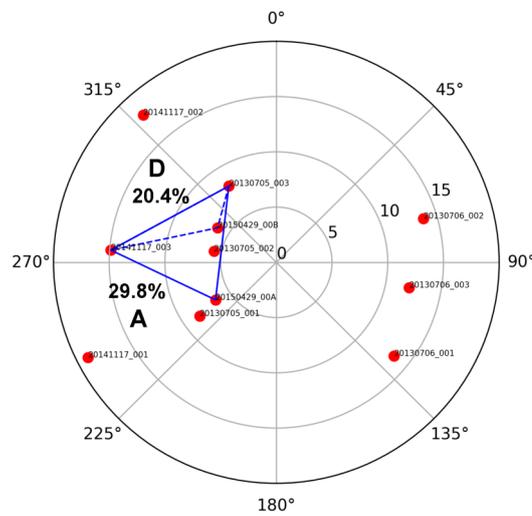


ABBILDUNG 4.6: Mögliche Bildkombinationen mit den Bildern vom 29.04.2015 und deren Completeness

TABELLE 4.4: Die Stereopaare der Variante D

Stereopaar	Completeness	Convergence Angle
20130705_003-20150429_00B	14.5	4
20130705_003-20141117_003	25.6	12
20141117_003-20150429_00B	32.6	10

Bilder vom 05.07.2013

Beim Bild vom 05.07.2013 ergeben sich mehrere Möglichkeiten, da in diesem Fall auch Bilder vom 06.07.2013 verwenden werden können. Abbildung 4.7 zeigt zuerst die Bildkombinationen, die entstehen, wenn die anderen beiden Bilder vom 05.07.2013 für die Auswechslung verwendet werden. In beiden Fällen sinkt dabei die Completeness auf 19.8% für Variante F respektive auf 20.9% für Variante E.

Auch hier zeigt sich wieder, dass jeweils in beiden tristereo DEMs ein Stereopaar mit einem ungünstigen Convergence Angle vorhanden ist. In der Variante E weist das Stereopaar 20130705_002-20150429_00A einen Convergence Angle von nur 4 Grad und eine Completeness von 17.2% auf. In der Variante F hat das Stereopaar 20130705_00A-20150429_00B noch einen kleineren Convergence Angle von 2 Grad und zudem eine deutlich schlechtere Completeness von nur noch 5.2%.

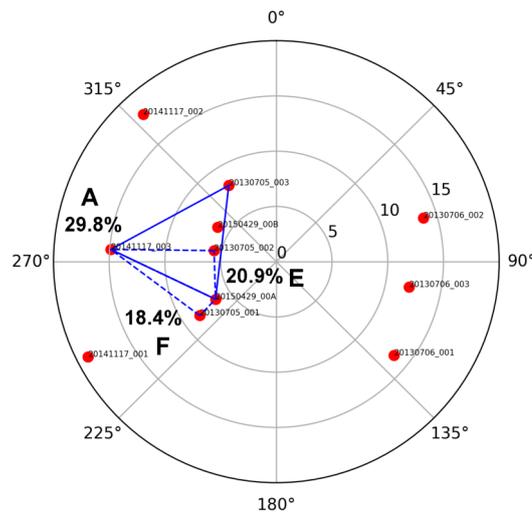


ABBILDUNG 4.7: Mögliche Bildkombinationen mit den Bildern vom 05.07.2013 und deren Completeness

TABELLE 4.5: Die Stereopaare der Variante E

Stereopaar	Completeness	Convergence Angle
20130705_002-20150429_00A	17.2	4
20130705_002-20141117_003	22.7	9
20141117_003-20150429_00A	31.4	10

TABELLE 4.6: Die Stereopaare der Variante F

Stereopaar	Completeness	Convergence Angle
20130705_001-20150429_00A	5.2	2
20130705_001-20141117_003	23.1	10
20141117_003-20150429_00A	31.4	10

In einem zweiten Schritt werden nun die Kombinationen untersucht, die sich ergeben, wenn das Bild 20130705_003 mit einem Bild vom 06.07.2013 ersetzt wird. Abbildung 4.8 zeigt die möglichen Konstellationen auf dem Skyplot. Die Completeness Werte der tristereo DEMs weisen hier grosse Schwankungen auf. Während die Variante G mit dem Bild 20130706_001 eine niedrige Completeness hat (3.2%), ergibt die Variante H mit dem Bild 20130706_003 eine Fehlermeldung. Das tristereo DEM mit dem Bild 20130706_002 hingegen hat eine Completeness von 20.1%. Auffallend ist ausserdem, dass der RMSE bei allen diesen Kombinationen sehr hoch ist. Für die beiden generierten Höhenmodelle wurden Werte von 50 beziehungsweise 65 Metern gemessen.

Im Gegensatz zu den tristereo DEMs weisen die einzelnen stereo DEMs auch hier durchaus sehr hohe Completeness Werte auf. Das Stereopaar 20130706_002-20150429_00A in Variante J zählt sogar zu den Besten überhaupt (37.2%). Es ist daher nicht zu erklären, warum die tristereo DEMs eine so viel niedrigere Completeness haben. Vor allem die Kombination 20130706_001-20141117_003-20150429_00A stürzt regelrecht ab und ist so für weitere Analysen nicht zu gebrauchen. Wiederum fällt aber auf,

dass einzelne Convergence Angle für ein gut funktionierendes Stereo-Matching sehr ungünstig sind. In allen drei Varianten kommen Convergence Angle von 27 beziehungsweise 28 Grad vor. Es deutet sich an, dass s2p nicht damit umgehen kann, wenn einzelne Stereopaare kein gutes Matching ergeben. Ausserdem können so die ergänzenden Informationen, die durch einen anderen Blickwinkel auf die Szene gewonnen werden (in diesem Fall durch das Bild vom 06.07.2013) nicht gewinnbringend verarbeitet werden. Es reicht nicht, wenn zwei der drei Stereopaare gute Ergebnisse liefern.

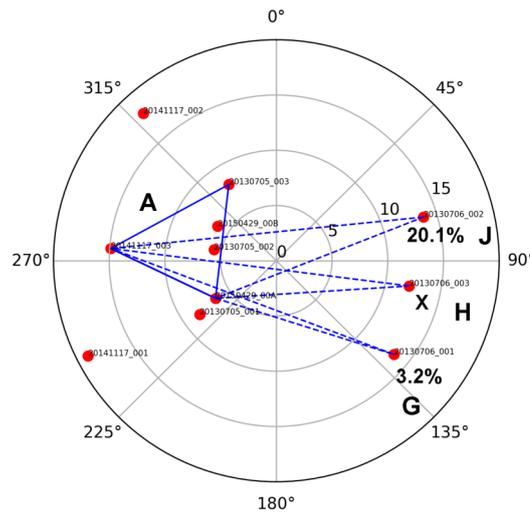


ABBILDUNG 4.8: Mögliche Bildkombinationen mit den Bildern vom 06.07.2013 und deren Completeness

TABELLE 4.7: Die Stereopaare der Variante G

Stereopaar	Completeness	Convergence Angle
20130706_001-20150429_00A	33	17
20130706_001-20141117_003	20.6	27
20141117_003-20150429_00A	31.4	10

TABELLE 4.8: Die Stereopaare der Variante J

Stereopaar	Completeness	Convergence Angle
20130706_002-20150429_00A	37.2	20
20130706_002-20141117_003	11.6	28
20141117_003-20150429_00A	31.4	10

TABELLE 4.9: Die Stereopaare der Variante H

Stereopaar	Completeness	Convergence Angle
20130706_003-20150429_00A	34.6	17
20130706_003-20141117_003	16.0	27
20141117_003-20150429_00A	31.4	10

Abschliessend werden in Abbildung 4.9 alle generierten tristereo DEMs und in Tabelle 4.10 die dazugehörigen Completeness und RMSE Werte gezeigt.

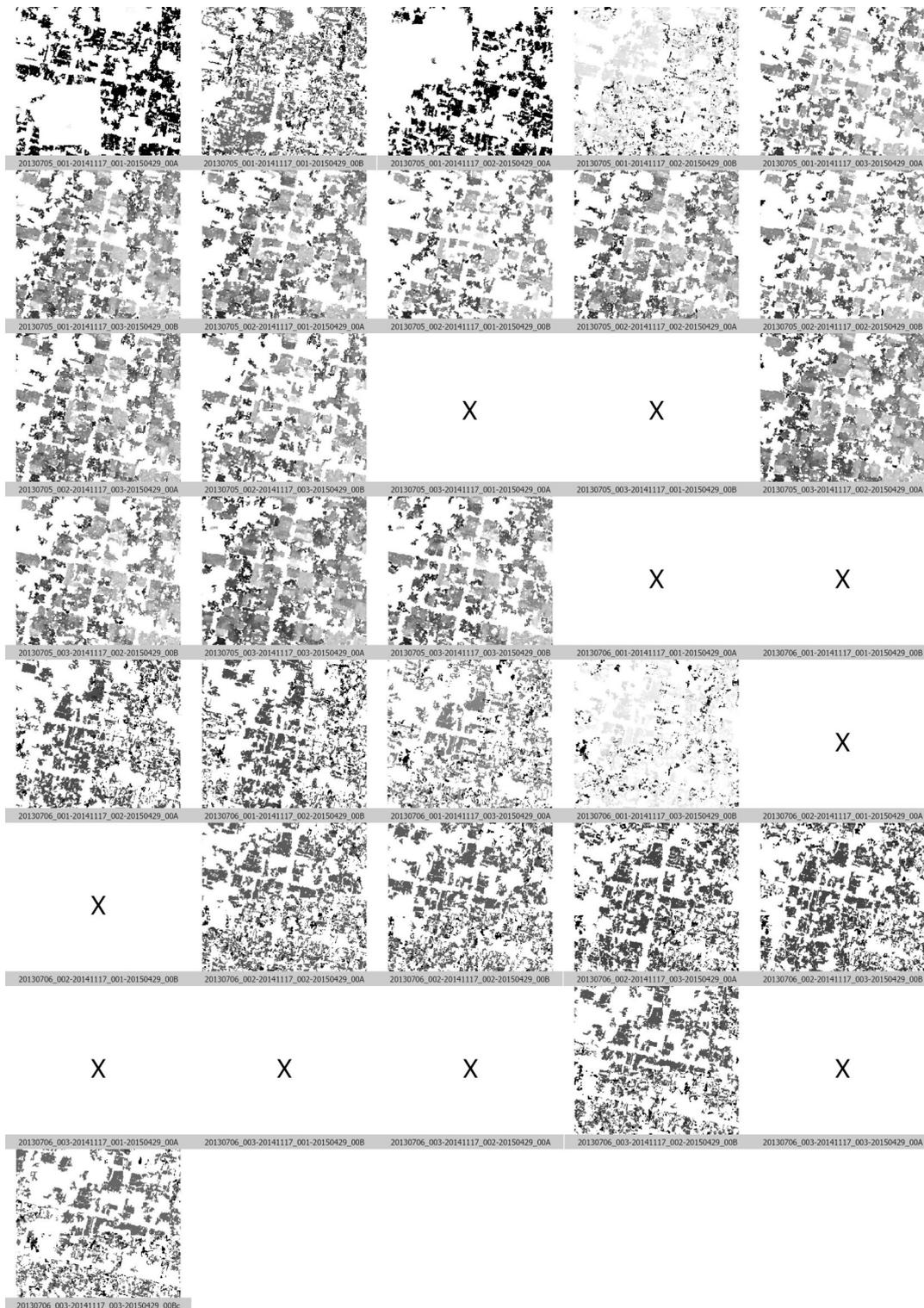


ABBILDUNG 4.9: Alle tristereo DEMs aus Ansatz 1

tristereoo Bildkombination	Completeness [%]	RMSE [m]
20130705_001-20141117_001-20150429_00A	14.1	81.5
20130705_001-20141117_001-20150429_00B	9.2	50.3
20130705_001-20141117_002-20150429_00A	16	48.4
20130705_001-20141117_002-20150429_00B	9.8	53.6
20130705_001-20141117_003-20150429_00A	18.4	2.9
20130705_001-20141117_003-20150429_00B	24.9	3.3
20130705_002-20141117_001-20150429_00A	21.5	3.3
20130705_002-20141117_001-20150429_00B	18.9	2.6
20130705_002-20141117_002-20150429_00A	22.5	3.4
20130705_002-20141117_002-20150429_00B	19.1	3
20130705_002-20141117_003-20150429_00A	20.9	3.5
20130705_002-20141117_003-20150429_00B	18.1	3
20130705_003-20141117_001-20150429_00A	x	x
20130705_003-20141117_001-20150429_00B	x	x
20130705_003-20141117_002-20150429_00A	29.6	3
20130705_003-20141117_002-20150429_00B	20.1	3.2
20130705_003-20141117_003-20150429_00A	29.8	3
20130705_003-20141117_003-20150429_00B	20.4	3
20130706_001-20141117_001-20150429_00A	x	x
20130706_001-20141117_001-20150429_00B	x	x
20130706_001-20141117_002-20150429_00A	16.6	72.9
20130706_001-20141117_002-20150429_00B	3.2	78.7
20130706_001-20141117_003-20150429_00A	3.2	49.6
20130706_001-20141117_003-20150429_00B	14.3	48.8
20130706_002-20141117_001-20150429_00A	x	x
20130706_002-20141117_001-20150429_00B	x	x
20130706_002-20141117_002-20150429_00A	4.3	69.1
20130706_002-20141117_002-20150429_00B	17.4	67.5
20130706_002-20141117_003-20150429_00A	20.1	64.1
20130706_002-20141117_003-20150429_00B	19	65.1
20130706_003-20141117_001-20150429_00A	x	x
20130706_003-20141117_001-20150429_00B	x	x
20130706_003-20141117_002-20150429_00A	x	x
20130706_003-20141117_002-20150429_00B	15.8	71.6
20130706_003-20141117_003-20150429_00A	x	x
20130706_003-20141117_003-20150429_00B	2.9	78

TABELLE 4.10: Completeness [%] und RMSE [m] aller tristereoo DEMs aus Ansatz 1

4.2 Ansatz 2: Mergen mit Rangfolge

Für Ansatz 2, bei dem die einzelnen stereo DEMs aufgrund einer Rangfolge zu einem tristereo DEM gemerget wurden, ergaben folgende drei Bildkombinationen die besten Ergebnisse. Im Gegensatz zu Ansatz 1 sind in diesen Kombinationen auch Bilder vom 07.06.2013 dabei, die das Untersuchungsgebiet von der anderen Seite aufgenommen haben. Bei Ansatz 1 ergaben Bildkombinationen mit diesen Bildern jedoch in der Hälfte der Fälle eine Fehlermeldung, so dass kein DEM berechnet werden konnte.

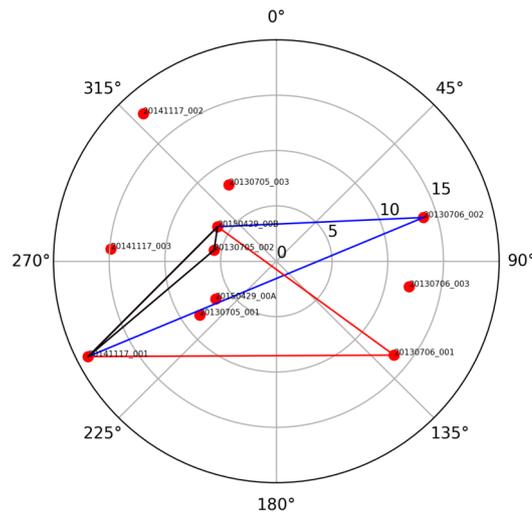


ABBILDUNG 4.10: Die drei besten Konstellationen aus Ansatz 2

Tabelle 4.11 zeigt, dass die Completeness Werte deutlich höher sind als bei Ansatz 1. Die besten drei tristereo DEMs liegen sehr nahe beisammen und weisen Completeness Werte von 39.4% bis 40.8% auf. Der RMSE ist hingegen um einiges schlechter als bei Ansatz 1 und hat einen Werte von 4.7 Metern für das beste tristereo DEM. Gegenüber Ansatz 1 entspricht das einer Verschlechterung um 56%

TABELLE 4.11: Completeness [%] und RMSE [m] der besten drei Bildkombinationen für Ansatz 2

tristereo Bildkombination	Completeness	RMSE
20130706_002-20141117_001-20150429_00B	40.8	4.7
20130706_001-20141117_001-20150429_00B	39.6	4.7
20130705_002-20141117_001-20150429_00B	39.4	5.4

Abbildung 4.11 zeigt das beste tristereo DEM zusammen mit dem Error Image auf der rechten Seite. Das DEM weist zwar eine sehr hohe Abdeckung auf. 90.4% der Pixel haben einen Zellenwert. Bei Gebäudezwischenräumen und Strassen ist der Fehler gegenüber dem Referenzdatensatz jedoch sehr gross. Trotzdem erreicht das DEM eine Completeness von 70%, wenn man einen Grenzwert für gültige Pixel von ± 4 Meter nimmt. Abbildung 4.12 zeigt den Zusammenhang zwischen Completeness und dem angenommenen Grenzwert für gültige Pixel im Benchmark.

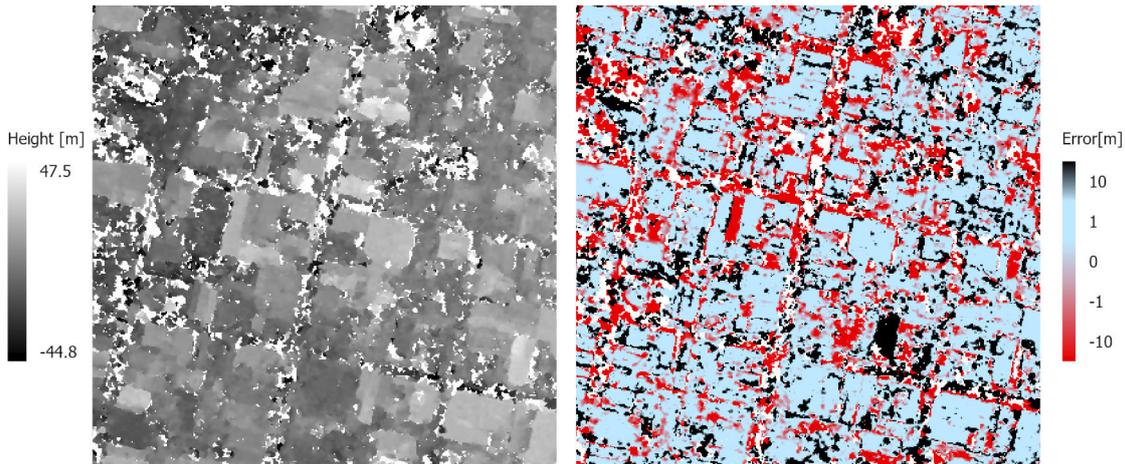


ABBILDUNG 4.11: DEM und Error Image der besten Bildkombination für Ansatz 2

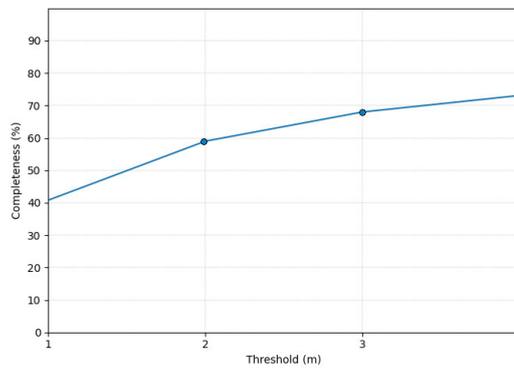


ABBILDUNG 4.12: Zusammenhang von Completeness und dem Grenzwert für gültige Pixel

Wie wirkt sich nun die gewählte Methode auf das Resultat aus? Wie viel konnte mit dem Mergen der stereo DEMs dazu gewonnen werden? Sieht man sich zuerst einmal die Zusammensetzung der besten drei tristereo DEMs an, werden zwei Dinge ersichtlich. Erstens: Die tristereo DEMs bestehen eigentlich nur aus zwei stereo DEMs. Das dritte stereo DEM wurde jeweils nicht für das Mergen berücksichtigt, weil der Convergence Angle bei diesen Stereopaaren ungünstig war. Zweitens: Die drei besten tristereo DEMs haben als Grundlage für das Mergen das gleiche Stereopaar (20141117_001-20150429_00B) auf Rang 1.

TABELLE 4.12: Zusammensetzung der besten drei tristereo DEMs

Rang 1	Rang 2	Rang 3
20141117_001-20150429_00B	20130706_002-20150429_00B	x
20141117_001-20150429_00B	20130706_001-20150429_00B	x
20141117_001-20150429_00B	20130705_002-20141117_001	x

Abbildung 4.13 stellt die Zusammensetzung für das beste tristereo DEMs visuell dar. Die braunen Pixel bilden die Grundlage und stammen vom stereo DEM auf Rang 1. Mit den gelben Pixeln wurden die NoData Stelle aufgefüllt. Sie ergänzen das ersten stereo DEM und stammen von Rang 2.

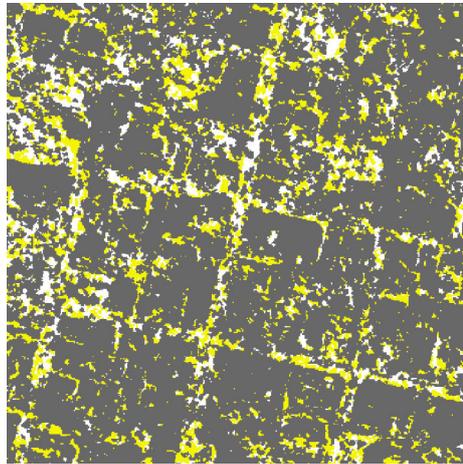


ABBILDUNG 4.13: Zusammensetzung: Braun (Rang 1), Gelb (Rang 2)

Schaut man sich die Benchmark Werte für die einzelnen stereo DEMs aus dem besten tristereo DEM an, ergeben sich folgende Werte. Tabelle 4.13 zeigt die Completeness sowie der prozentuale Anteil der gematchten Pixel für die stereo DEMs auf Rang 1 und Rang 2. Das Δ gibt die Änderung zwischen dem stereo DEM auf Rang 1 und dem tristereo DEM an. Es zeigt die Verbesserung, die durch das Mergen erzielt werden konnte.

TABELLE 4.13: Benchmark Werte für die einzelnen stereo DEMs für das beste tristereo DEM

	Rang 1	Rang 2	tristereo DEM	Δ
Completeness [%]	37.6	33.8	40.8	3.2
gematchte Pixel [%]	77.5	71.2	90.4	12.9

Es zeigt sich, dass beim stereo DEM auf Rang 1 generell schon viele Pixel gematcht wurden. Trotzdem sind durch das Mergen mit dem stereo DEM auf Rang 2 nochmals 12.9% dazu gekommen. Gleichzeitig aber konnte die Completeness nur um 3.2% verbessert werden. Daraus lässt sich schliessen, dass vor allem fehlerhafte Pixel dem tristereo DEM hinzugefügt wurden. Von den hinzugefügten Pixeln haben nur ein Viertel der Pixel auch zur Verbesserung des DEMs beigetragen. Die restlichen Pixel waren im Benchmark nicht valide, da ihre Abweichung gegenüber dem Referenz DEM grösser als 1 Meter war. Damit lässt sich auch erklären, warum der RMSE gegenüber Ansatz 1 gestiegen ist. Die Methode, NoData Stellen eines stereo DEMs mit Informationen eines anderen stereo DEMs zu füllen, hatte nicht den gewünschten Effekt. Die resultierenden tristereo DEMs basieren hauptsächlich auf dem stereo DEM auf Rang 1. Die anderen stereo DEMs auf den nachfolgenden Rängen tragen kaum zur Verbesserung bei, auch wenn diese wie in einigen Fällen eine

bessere Completeness aufwiesen als das stereo DEM auf Rang 1. Diese Schlussfolgerung wird dadurch unterstrichen, dass selbst tristereo DEMs, die aus drei einzelnen stereo DEMs bestehen, keine besseren Completeness Werte aufweisen.

Die Ergebnisse der besten drei tristereo DEMs haben somit weniger mit der Aufnahmekonstellation zu tun, als mehr mit dem guten Funktionieren eines einzelnen Stereopaars - nämlich das Bildpaar 2014117_001-20150429_00B. Dieses Stereopaar erzielte auch den besten Completeness Wert aller stereo DEMs. Und so weisen auch andere Bildkombinationen, die ebenfalls dieses Bildpaar beinhalten, ähnliche hohe Werte Completeness Werte auf, wie die drei besten tristereo DEMs.

Abschliessend werden in Abbildung 4.14 alle generierten tristereo DEMs aus Ansatz 2 und in Tabelle 4.14 die dazugehörigen Completeness und RMSE Werte dargestellt.

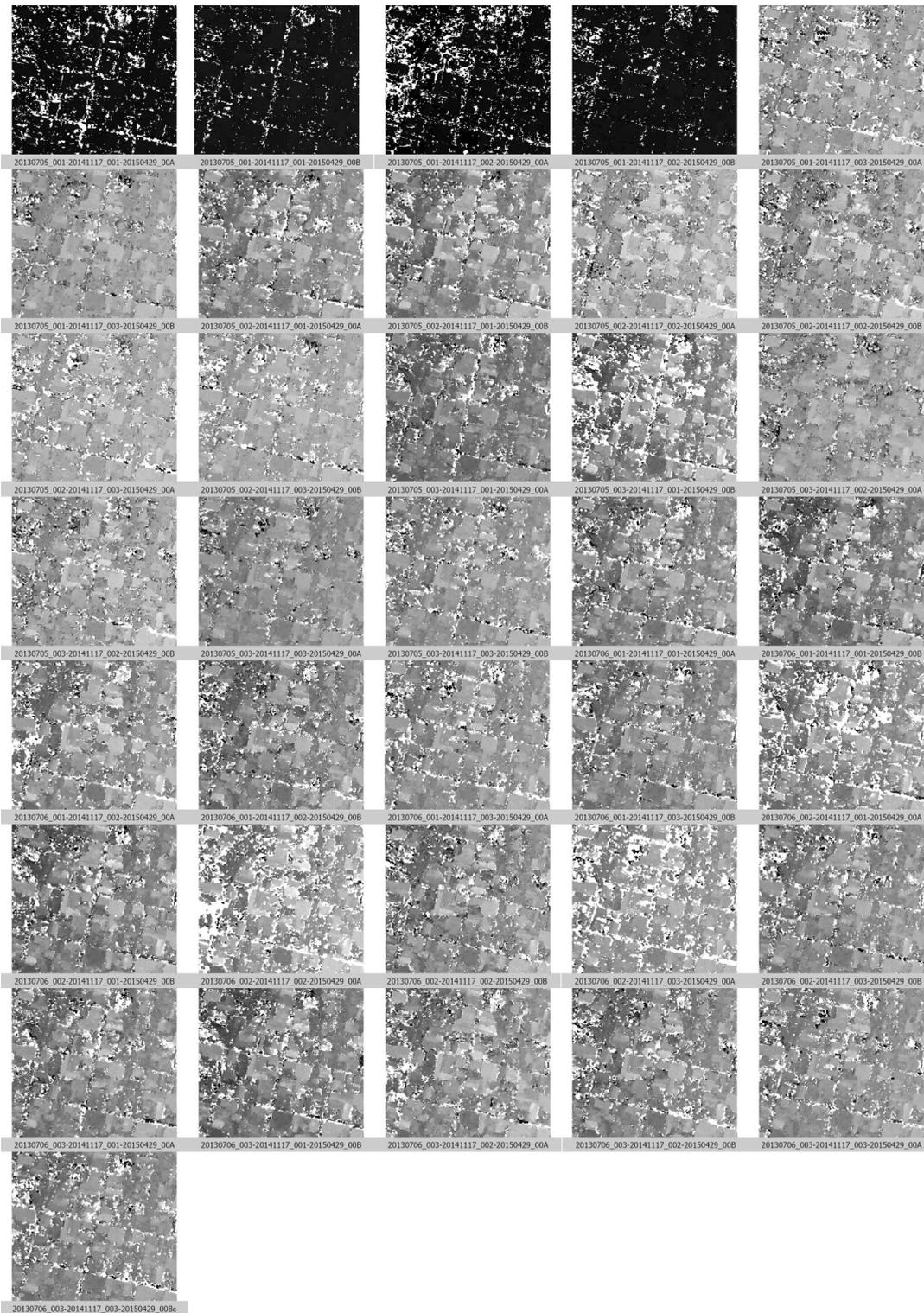


ABBILDUNG 4.14: Alle tristereo DEMs aus Ansatz 2

tristereoo Bildkombination	Rang 1	Rang 2	Rang 3	Completeness [%]	RMSE [m]
20130705_001-20141117_001-20150429_00A	20141117_001-20150429_00A	20130705_001-20141117_001	x	33.1	75.2
20130705_001-20141117_001-20150429_00B	20141117_001-20150429_00B	20130705_001-20150429_00B	20130705_001-20141117_001	38.3	42
20130705_001-20141117_002-20150429_00A	20141117_002-20150429_00A	20130705_001-20141117_002	x	36.7	81.8
20130705_001-20141117_002-20150429_00B	20141117_002-20150429_00B	20130705_001-20150429_00B	20130705_001-20141117_002	34.6	48.7
20130705_001-20141117_003-20150429_00A	20141117_003-20150429_00A	20130705_001-20141117_003	x	31.7	9.4
20130705_001-20141117_003-20150429_00B	20141117_003-20150429_00B	20130705_001-20150429_00B	20130705_001-20141117_003	33.2	9
20130705_002-20141117_001-20150429_00A	20141117_001-20150429_00A	20130705_002-20141117_001	x	34.3	6.4
20130705_002-20141117_001-20150429_00B	20141117_001-20150429_00B	20130705_002-20141117_001	x	39.4	5.4
20130705_002-20141117_002-20150429_00A	20141117_002-20150429_00A	20130705_002-20141117_002	x	36.8	8.3
20130705_002-20141117_002-20150429_00B	20141117_002-20150429_00B	20130705_002-20141117_002	x	34.6	6.9
20130705_002-20141117_003-20150429_00A	20141117_003-20150429_00A	20130705_002-20141117_003	x	31.6	10.5
20130705_002-20141117_003-20150429_00B	20141117_003-20150429_00B	20130705_002-20141117_003	x	32.8	9.7
20130705_003-20141117_001-20150429_00A	20141117_001-20150429_00A	20130705_003-20141117_001	x	32.8	7.4
20130705_003-20141117_001-20150429_00B	20141117_001-20150429_00B	20130705_003-20141117_001	x	37.6	4.1
20130705_003-20141117_002-20150429_00A	20141117_002-20150429_00A	20141117_002-20150429_00A	20130705_003-20141117_002	30.2	9.2
20130705_003-20141117_002-20150429_00B	20141117_002-20150429_00B	20130705_003-20141117_002	x	34.4	7.6
20130705_003-20141117_003-20150429_00A	20141117_003-20150429_00A	20130705_003-20150429_00A	20130705_003-20141117_003	32.1	8.3
20130705_003-20141117_003-20150429_00B	20141117_003-20150429_00B	20130706_001-20141117_003	x	33.7	7.5
20130706_001-20141117_001-20150429_00A	20141117_001-20150429_00A	20130706_001-20150429_00A	x	34.2	5.8
20130706_001-20141117_001-20150429_00B	20141117_001-20150429_00B	20130706_001-20150429_00B	x	39.6	4.7
20130706_001-20141117_002-20150429_00A	20141117_002-20150429_00A	20130706_001-20150429_00A	x	39.1	7.3
20130706_001-20141117_002-20150429_00B	20141117_002-20150429_00B	20130706_001-20150429_00B	x	35.9	5.4
20130706_001-20141117_003-20150429_00A	20141117_003-20150429_00A	20130706_001-20150429_00A	x	34.6	6.9
20130706_001-20141117_003-20150429_00B	20141117_003-20150429_00B	20130706_001-20150429_00B	x	35.2	6.5
20130706_002-20141117_001-20150429_00A	20141117_001-20150429_00A	20130706_002-20150429_00A	x	32.6	5.3
20130706_002-20141117_001-20150429_00B	20141117_001-20150429_00B	20130706_002-20150429_00B	x	40.8	4.7
20130706_002-20141117_002-20150429_00A	20141117_002-20150429_00A	x	x	36	7.2
20130706_002-20141117_002-20150429_00B	20141117_002-20150429_00B	20130706_002-20150429_00B	x	35.4	5.4
20130706_002-20141117_003-20150429_00A	20141117_003-20150429_00A	x	x	31.4	6.7
20130706_002-20141117_003-20150429_00B	20141117_003-20150429_00B	20130706_002-20150429_00B	x	35.2	6.5
20130706_003-20141117_001-20150429_00A	20141117_001-20150429_00A	20130706_003-20150429_00A	x	34.6	5.7
20130706_003-20141117_001-20150429_00B	20141117_001-20150429_00B	20130706_003-20150429_00B	x	39.1	6.9
20130706_003-20141117_002-20150429_00A	20130706_003-20150429_00A	20141117_002-20150429_00A	x	39.2	6.2
20130706_003-20141117_002-20150429_00B	20130706_003-20150429_00B	20141117_002-20150429_00B	x	35.8	7.6
20130706_003-20141117_003-20150429_00A	20141117_003-20150429_00A	20130706_003-20150429_00A	x	35	6.8
20130706_003-20141117_003-20150429_00B	20141117_003-20150429_00B	20130706_003-20150429_00B	x	34.8	8.2

TABELLE 4.14: Completeness [%] und RMSE [m] aller tristereo DEMs aus dem Ansatz 2

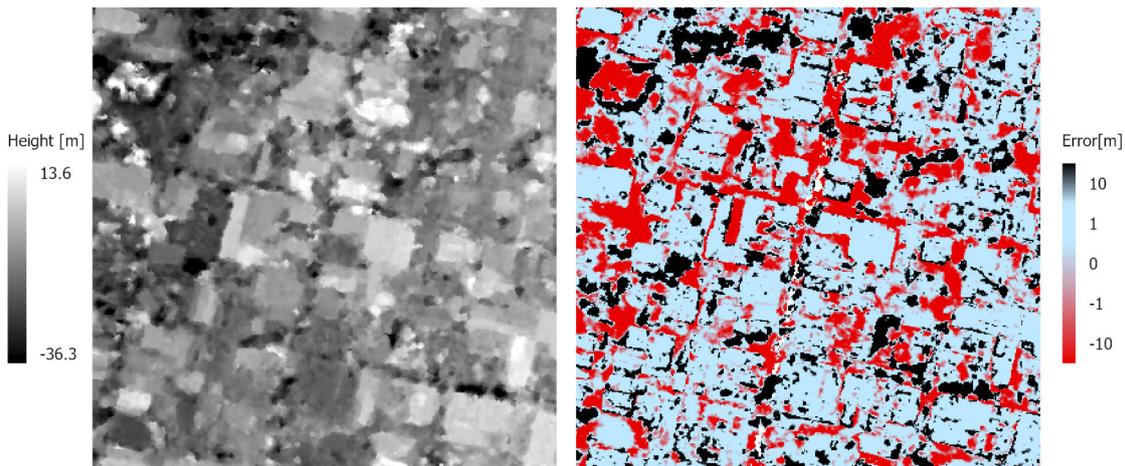


ABBILDUNG 4.16: DEM und Error Image der besten Bildkombination für Ansatz 3

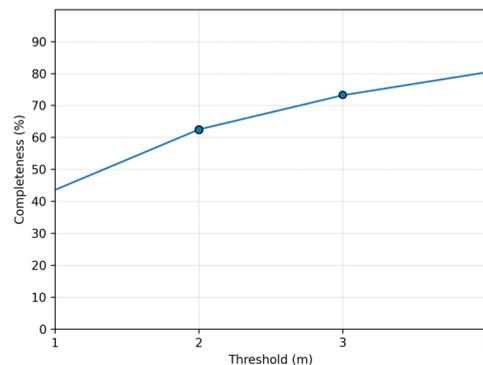


ABBILDUNG 4.17: Zusammenhang von Completeness und dem Grenzwert für gültige Pixel

sind die Bildkombinationen 20130705_003-20141117_002-20150429_00A und 20130705_002-20141117_002-20150429_00A, die mit 40.1% und 39.7% ebenfalls zu den besseren DEMs gehören. Die untere Hälfte besteht hingegen vor allem aus Kombinationen mit Bildern vom 05.07.2013, die Completeness Werte von lediglich zwischen 20% und 37% aufweisen. Im Gegensatz zu Ansatz 1 funktionieren hier somit genau die umgekehrten Bildkombinationen. Bei der Erstellung der tristereo DEMs mit s2p ergaben Bildkombination mit dem Datum 06.07.2013 sehr viele Fehlermeldungen und meistens schlechte DEMs.

Visuell ist nicht zu erkennen, warum die Bilder vom 06.07.2013 hier besser funktionieren als die Bilder vom 05.07.2013. Das deutet darauf hin, dass die Aufnahmekonstellation in diesem Ansatz durchaus eine Rolle spielt. Tristereo Bildkombinationen, bei denen eine Ansicht die Szene von der gegenüberliegenden Seite aufnimmt, ergeben deutlich bessere DEMs als Kombinationen, bei denen alle Bilder die Szene von der gleichen Seite aufnehmen.

TABELLE 4.16: Gesamtübersicht der Resultate für Ansatz 3

tristereoo Bildkombination	Completeness	RMSE
20130706_002-20141117_001-20150429_00B	43.5	3.8
20130706_002-20141117_002-20150429_00A	43.5	4.6
20130706_001-20141117_001-20150429_00B	43.4	4
20130706_003-20141117_002-20150429_00A	42.6	4.9
20130706_002-20141117_001-20150429_00A	42.5	4.1
20130706_001-20141117_003-20150429_00A	42.1	5
20130706_001-20141117_002-20150429_00A	41.5	5.3
20130706_001-20141117_003-20150429_00B	41.4	4.5
20130706_003-20141117_001-20150429_00A	41.2	4.3
20130706_003-20141117_001-20150429_00B	41.1	10.2
20130706_003-20141117_003-20150429_00A	41.1	5.6
20130706_001-20141117_001-20150429_00A	40.7	4.4
20130706_003-20141117_003-20150429_00B	40.6	5.8
20130705_003-20141117_002-20150429_00A	40.1	4.7
20130706_002-20141117_003-20150429_00B	39.9	5.2
20130705_002-20141117_002-20150429_00A	39.7	5.3
20130706_001-20141117_002-20150429_00B	38.7	4.9
20130706_003-20141117_002-20150429_00B	37.4	5.5
20130705_003-20141117_002-20150429_00B	36.8	5.9
20130705_003-20141117_001-20150429_00A	36.7	5.3
20130705_002-20141117_001-20150429_00B	36.2	5.5
20130705_002-20141117_001-20150429_00A	34.4	6
20130705_003-20141117_003-20150429_00A	34.1	5.2
20130705_003-20141117_003-20150429_00B	33.7	8
20130705_002-20141117_003-20150429_00A	33.6	7.5
20130706_002-20141117_002-20150429_00B	32.5	5
20130706_002-20141117_003-20150429_00A	30.6	5.3
20130705_002-20141117_002-20150429_00B	29.5	6.9
20130705_001-20141117_003-20150429_00B	27.3	6.9
20130705_001-20141117_002-20150429_00B	26.5	7.1
20130705_001-20141117_003-20150429_00A	26.4	9.3
20130705_002-20141117_003-20150429_00B	26.3	10.1
20130705_001-20141117_002-20150429_00A	25.4	24.1
20130705_003-20141117_001-20150429_00B	25.2	10.8
20130705_001-20141117_001-20150429_00B	23.1	6.3
20130705_001-20141117_001-20150429_00A	20.9	15.1

Zudem sind die Completeness Werte der tristereo DEMs mit den Bildern vom 06.07.2013 auch höher als die einzelnen Werte der stereo DEMs. Das heisst, es fand eine gewisse Ergänzung oder eine Korrektur von bestehenden Pixelwerten statt. Falsche Pixelwerte wurden durch den Median korrigiert. Tabelle 4.17 zeigt für die besten 5 tristereo DEMs die Completeness Werte der einzelnen DEMs.

Das Gegenteil ist bei Kombinationen mit Bildern vom 5.7.2013 der Fall. Hier verbessern sich die Completeness Werte der tristereo DEMs gegenüber den stereo DEMs nicht oder nur minimal. Viel eher gleichen die Completeness Werte der tristereo DEMs dem Median der stereo DEMs. Tabelle 4.18 verdeutlicht diesen Zusammenhang.

Wie schon bei Ansatz 1 gezeigt wurde, werden bei Ansichten von einer Seite praktisch die gleichen Pixel gematcht. Die einzelnen stereo DEMs ergänzen sich also

TABELLE 4.17: Die Completeness [%] des tristereo DEMs im Vergleich zu den einzelnen stereo DEMs

tristereo DEM	Stereopaar 1	Stereopaar 2	Stereopaar 3
43.5	x	37.6	37.2
43.5	15.6	36.0	33.8
43.4	x	37.6	34.6
42.6	14.4	36.0	37.2
42.5	x	32.6	33

TABELLE 4.18: Die Completeness [%] des tristereo DEMs im Vergleich zu den einzelnen stereo DEMs

tristereo DEM	Stereopaar 1	Stereopaar 2	Stereopaar 3
26.3	22.7	32.6	7.8
25.4	22.4	36	5.2
25.2	x	37.6	14.5
23.1	17.7	37.6	23.1
20.9	17.7	32.6	5.2

nicht. Zudem findet anscheinend auch keine Korrektur der Pixelwerte durch den Median statt. Das heisst, wenn aus einer tristereo Kombination zwei schlechte DEMs resultieren und der Median genommen wird, bleibt das Resultat immer noch schlecht. Allenfalls möglich wäre ein Situation, bei der ein zu tiefer und ein zu hoher Wert durch den korrekten mittleren Wert aufgehoben werden. In der Regel aber kann ein einzelnes gutes stereo DEM das Gesamtergebnis nicht aufwerten.

Als Faustregel lässt sich daraus ableiten, dass es mindestens 2 gute Stereopaare braucht, um mit diesem Ansatz gute Resultate zu erzielen. Dabei ist aber nicht alleine der Convergence Angle der Stereopaare entscheidend. Es sind auch schlechte Bildkombinationen vorhanden, deren stereo DEMs aus günstigen Convergence Angles bestehen. Wichtiger scheint bei dieser Methode der Parameter Satellite Azimuth zu sein, so dass sich die Aufnahmepositionen gegenseitig ergänzen und die Szene von verschiedenen Seiten abbilden können. Dabei spielt es keine Rolle, wenn sich daraus für ein Stereopaar ein zu grosser Convergence Angle ergibt und das generierte DEM mangelhaft ist. Es reicht, wenn die anderen zwei Stereopaare gut funktionieren. Für die Bildauswahl bedeutet dies, dass zuerst ein gutes Stereopaar ausgesucht werden kann. Danach soll das dritte Bild so gewählt werden, dass die Szene von der gegenüberliegenden Seite abgebildet wird gleichzeitig aber zu einem der beiden bestehenden Bildern ein günstiger Convergence Angle besteht.

Zum Abschluss werden in Abbildung 4.18 alle generierten tristereo DEMs dargestellt.

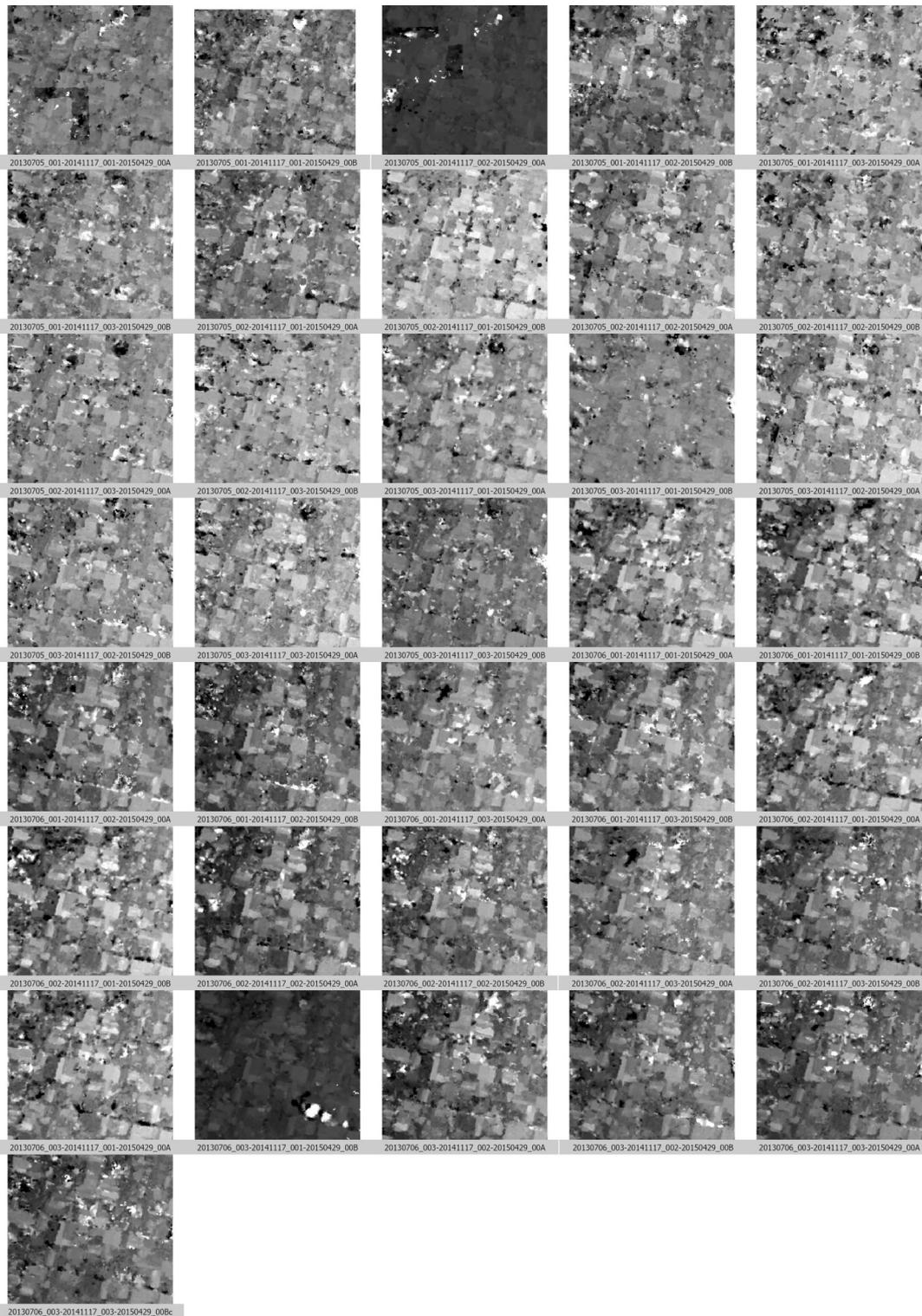


ABBILDUNG 4.18: Alle tristereo DEMs aus Ansatz 3

5 Diskussion

In dieser Arbeit sollte die Frage geklärt werden, inwiefern ein kostengünstiger Ansatz mit drei Bildern zur Generierung von Höhenmodellen erfolgversprechend ist. Dabei wurden keine In-Orbit-Tristereoo-Aufnahmen getestet, sondern Bilder mit unterschiedlichen Daten verwendet. Für drei verschiedene Ansätze wurde die Qualität der generierten DEMs gemessen und die günstigen Aufnahmekonstellationen untersucht.

Die Datenlage bestand aus einer überschaubaren Grösse von 36 generierten Höhenmodellen. Im Vergleich zu anderen Studien, die mit über 1000 Höhenmodellen arbeiteten (siehe Facciolo, De Franchis und Meinhardt-Llopis (2017) und Qin (2019)) ist das sicher ein kleines Sample. Eine begrenzte Computerleistung sowie die verfügbare Zeit liessen eine grössere Datenmenge jedoch nicht zu. Ausserdem hätten die Schwierigkeiten beim Datenmanagement, bei der Prozessierung sowie bei der Auswertung den Rahmen dieser Arbeit gesprengt. Dadurch liessen sich keine statistischen Aussagen über den Einfluss einzelner Aufnahmeparameter treffen, sondern die Resultate basieren hauptsächlich auf qualitativen Schlüssen.

Im Weiteren lagen die Schwierigkeiten der Arbeit darin, dass zum einen der Einfluss des Incident Angles in den Bildkombinationen nicht bestimmt werden konnte. Zum Anderen gelang es nicht, für die Aufnahmekonstellationen eine sinnvolle Metrik zu finden, so dass die 'Dreieckigkeit' der Bildkombinationen quantitativ bestimmt hätte werden können.

Die Ergebnisse der Masterarbeit können folgendermassen zusammengefasst werden:

Ansatz 1: s2p. Die Spannweite der Resultate war ziemlich gross. Während das schlechteste DEM eine Completeness von 2.9% erreichte, wies das beste tristereo DEM eine Completeness von 29.8% auf, wobei deutlich mehr Pixel gematcht wurden (57%). Der RMSE lag mit 3 Metern im Rahmen anderer Forschungsarbeiten. Vor allem Gebäudezwischenräume und Strassen konnten schlecht gematcht werden. Es konnte gezeigt werden, dass viele solcher NoData Stellen auf Veränderungen der baulichen Substanz oder der Vegetation zurückzuführen sind. Da Hilfsorganisationen oftmals in Katastrophen- oder Kriegsgebieten operieren, in denen sich die städtische Struktur in Folge von Zerstörung oder informellen Bautätigkeiten im starken Wandel befindet, ist dieser Faktor in der Gesamtschätzung durchaus wichtig.

Es stachen keine eindeutig bestimmbaren Aufnahmeparameter hervor, die eine gute Aufnahmekonstellationen charakterisieren würden. Trotzdem gibt es verschiedene Anhaltspunkte, die auf eine günstige tristereo Bildkombination hindeuten. So zeigte sich, dass die besten tristereo DEMs aus einzelnen stereo DEMs bestanden, die alle einen günstigen Convergence Angle zwischen 10 und 18 Grad aufwiesen. Bei

Bildkombinationen, die aus stereo DEMs mit sehr grossen oder sehr kleinen Convergence Anglen bestanden, fielen hingegen die Completeness Werte deutlich ab. Daraus lässt sich ableiten, dass s2p tendenziell tristereo Kombinationen bevorzugt, bei denen die Szene von der gleichen Seite aufgenommen wird. Wird nämlich die Szene in einem Bild aus der gegenüberliegenden Seite (Satellite Azimuth - 180°) aufgenommen, so steigt die Wahrscheinlichkeit, dass dadurch ein schlechter Convergence Angle mit den anderen zwei Bildern entsteht.

Überraschend war ausserdem, dass gewisse Stereopaare deutlich höhere Completeness Werte erzielten als die tristereo DEMs. Einzelne Komponenten waren also besser als das Gesamtergebnis. Es konnte nicht geklärt werden, nach welchem Prinzip und mit welchen Algorithmen s2p die stereo DEMs fusioniert. Das ist einer der wesentlichen Limitationen dieser Arbeit. Nichtsdestotrotz stellt sich die Frage für Hilfsorganisationen bei der Verwendung von s2p, ob es sich lohnt, drei Bilder zu kaufen, wenn mit zwei Bildern bessere Ergebnisse erzielt werden können. Die Empfehlung wäre daher, nur die Stereopaare mit s2p zu prozessieren und anschliessend die stereo DEMs mit einer anderen Methode zu mergen. Aus dieser Masterarbeit lässt sich ableiten, dass sich dazu vor allem der Median eignet.

Ansatz 2: Mergen nach Rangfolge. Die Resultate für die generierten Höhenmodelle waren besser als bei Ansatz 1. Das schlechteste tristereo DEM hatte eine Completeness von 31.4%, das Beste erzielte eine Completeness von 40.8%. Die Resultate liegen alle nahe beisammen, da bei dieser Methode die Completeness Werte vor allem vom ersten stereo DEM in der Rangfolge abhängen. 34 der 36 tristereo DEMs basieren auf einem stereo DEM mit Bildern vom 17.11.2014 und vom 29.04.2015, deren Kombinationen alle relativ gut funktionierten. Die Aufnahmekonstellation spielte demgegenüber eine untergeordnete Rolle. Es konnte nämlich gezeigt werden, dass durch das Mergen von stereo DEMs kaum korrekte Pixelwerte hinzugefügt wurden und die Completeness im besten Fall nur um wenige Prozente verbessert wurde. Im Gegenteil, die Mehrzahl der gemergten Pixel war fehlerhaft. Dadurch lässt sich erklären, warum der RMSE auch deutlich höher ist als bei Ansatz 1. Das Mergen von stereo DEMs brachte somit kaum einen Mehrwert, da NoData Stellen nur ungenügend mit zusätzlichen Informationen gefüllt werden konnten.

Ansatz 3: Mergen mit dem Median. Anstatt Information hinzuzufügen und damit NoData Stellen zu füllen wie in Ansatz 2, ist es sinnvoller vorhandene Höhenwerte mit besseren Werten aus anderen stereo DEMs zu korrigieren. Der Median bietet sich dafür an, da er robust gegen Ausreisser ist. Dementsprechend ergab dieser Ansatz die besten Ergebnisse. Das beste tristereo DEM erreichte eine Completeness von 43.5%. Im Gegensatz zu Ansatz 1 genügten hier zwei gute Stereopaare. Neben dem Convergence Angle war insbesondere die Satellite Azimuth von Bedeutung. Bildkombinationen, in denen ein Bild die Szene von der gegenüberliegenden Seite abbildete, zeigten einheitlich bessere Resultate.

Die generierten tristereo Höhenmodelle aus allen 3 Ansätzen erreichten nicht die Qualität, die in anderen Forschungsarbeiten erzielt wurde. Sowohl die Accuracy (RMSE) Werte wie auch die Completeness Werte sind deutlich schlechter. So berichten etwa Facciolo, De Franchis und Meinhardt-Llopis (2017) von Completeness Werten von 80.1% mit einem RMSE von 2.89 m für das beste erstellte Höhenmodell. Da für diese Arbeit die Höhenmodelle aus rund 50 stereo DEMs zusammengesetzt wurden, sind die Ergebnisse nicht direkt miteinander vergleichbar. Als Orientierung für

die erzielte Qualität dient eher die Arbeit von Krauß, D'Angelo und Wendt (2019). Für Höhenmodell aus Multi-Date Stereopaaren berichten sie von Werten bis zu 61%. Im Gegensatz dazu wurde in dieser Arbeit mit s2p für das beste stereo DEM lediglich ein Completeness Wert von 37.6% erzielt.

Was bedeuten die Resultate nun für humanitäre Hilfsorganisationen? Auf den ersten Blick sehen die generierten Höhenmodelle nicht ermutigend aus, um damit Bevölkerungsschätzungen oder Schadensanalysen von Gebäuden durchführen zu können. Die erzielte Qualität der Höhenmodelle ist deutlich niedriger als mit In-Orbit-Tristereoo-Aufnahmen zu erreichen ist. Da es sich bei vielen schlecht gematchten Stellen jedoch nicht um Gebäude, sondern um Vegetation, Strassen und Zwischenräume handelte, könnte eine Gebäudemaskierung die Qualität verbessern. Gebäude und Dächer wurden nämlich um einiges besser rekonstruiert.

Ausserdem sind die Completeness Werte deutlich höher, wenn man den Grenzwert für valide Pixel erhöht. Der Anteil der Pixel innerhalb einem Fehlerbereich von ± 4 Meter lag beim besten Höhenmodell über 80%. Damit kann die Höhe eines Gebäudes und damit die Stockwerke und die Anzahl der Bewohner zumindest grob geschätzt werden.

A Python Scripts

A.1 Extract corner coordinates of a feature class

```

import arcpy
from pyproj import Proj, transform

#Environments variables
arcpy.env.workspace = r"Path\To\Gdb"

#Check if wanted Feature Class is in the above gdb
featureClass = arcpy.ListFeatureClasses()
print ("Folgende Perimeter sind vorhanden:")
for feature in featureClass:
    print (feature)

#Check spatial reference of feature class
aoi = input("Welcher Perimeter?")
desc = arcpy.Describe(aoi)
spatial_ref = desc.spatialReference.name
print(spatial_ref)

#EPSG Code
epsg = desc.spatialReference.factoryCode
print("EPSG Code = {}".format (epsg))

#Reading coordinates
coord_list = []
with arcpy.da.SearchCursor(aoi,['OID@','SHAPE@']) as cursor:
    for row in cursor:
        array1=row[1].getPart()
        for vertice in range(row[1].pointCount):
            pnt=array1.getObject(0).getObject(vertice)
            print ("x = {} y = {}".format(pnt.X,pnt.Y))
            coord_list.append((pnt.X,pnt.Y))

#Convert projected coordinated to latitude and longitude
latLong_list = []
inProj = Proj(epsg)
outProj = Proj('epsg:4326 ')
for x,y in coord_list:
    x1,y1 = x,y
    x2,y2 = transform(inProj ,outProj ,x1,y1)
    print ("Latitude = {} Longitude = {}".format(x2,y2))
    latLong_list.append((x2,y2))

#Write Coordinate to txt file
with open(r"Path\To\Output Folder\%s.txt" %aoi,"w") as f:
    for coord_pair in coord_list:
        f.write(' '.join(str(item) for item in coord_pair) + '\n')

f.write('\n')

```

```

for latLong in latLong_list:
    f.write(' '.join(str(item) for item in latLong) + '\n')

```

A.2 Get image coordinates from latitude and longitude

```

import numpy as np
from rpcm import *

#Pleiades Images
img = r"Path\To\Image"

# RPC file
rpc = rpc_from_rpc_file(r"Path\To\RPC File")

#Top left lat. long. Coordinate (Dezimal Format) of AOI_Buffer
lon = -72.3463052040148
lat = 18.551222571679876
alt = 0

# Geo Coordinates to Image Coordinates x,y
x, y = rpc.projection(lon, lat, alt)
print("x = {} y = {}".format(x, y))

```

A.3 Combinations of images and their RPC to generate config files for s2p

```

import os
import os.path
import json
from itertools import combinations

#AOI
aoi = "AOI_1"

#Images
images = []
for dirpath, dirnames, filenames in os.walk(r"Path\To\ImageFolder"):
    for filename in [f for f in filenames if f.endswith(".tif")]:
        # print (os.path.join(dirpath, filename))
        images.append(os.path.join(dirpath, filename))

#RPC
rpc = []
for dirpath, dirnames, filenames in os.walk(r"Path\To\ImageFolder"):
    for filename in [f for f in filenames if f.endswith(".xml")]:
        # print (os.path.join(dirpath, filename))
        rpc.append(os.path.join(dirpath, filename))

#combine both list to a dictionary
list_combo = zip(images, rpc)
dictionary = dict(list_combo)

#Do the image combinations
imageCombos = list(combinations(images,3))

# write config files
for i in imageCombos:
    configname = "-".join([i[0][98:-4], i[1][98:-4], i[2][98:-4]])

```

```

print(configname)
with open(r"Path\To\OutputFolder\%s\%s" %(aoi, configname) ,
         "images": [{"img": i[0], "rpc": dictionary[i[0]]}, {"img": i[1], "rpc":
                    : dictionary[i[1]]}, {"img": i[2], "rpc": dictionary[i[2]]}],
         "full_img" : True,
         "matching_algorithm": "mgm_multi",
         "horizontal_margin": 20,
         "vertical_margin": 5,
         "tile_size" : 300,
         "disp_range_method" : "sift",
         "msk_erosion": 0,
         "dsm_resolution": 1,
         "max_processes": 2,
         "max_processes_stereo_matching": 2
        }
    json.dump(config, f, indent = 4)

```

A.4 Convergence angle, sun elevation difference and valid pixel count from xml metadata file

```

import math
import numpy as np
import xml.etree.ElementTree as ET
import os.path
import csv
import gdal
import subprocess

#Find all Folders within directory
directory=r"Path\To\2er Kombinationen"
imageCombos= [ item for item in os.listdir(directory) if os.path.isdir(
    os.path.join(directory , item)) ]

#For each Folder, extract Image Names
for stereoPair in imageCombos:
    images = stereoPair.split('-')
    image1 = images[0]
    image2 = images[1]

#For both Images of a stereoPair, extract the acquisition date
date1 = image1.split('_')[0]
date2 = image2.split('_')[0]

#Parse Metadata xml file for both Images
dimap1 = r"\Path\To\ImagesFolder\%s\DIM_%s.XML" %(date1, image1)
dimap2 = r"\Path\To\ImageFolder\%s\DIM_%s.XML" %(date2, image2)

#Set outpath
outpath = directory + '/' + stereoPair

#Read XML File for Image1
tree = ET.parse(dimap1)
root = tree.getroot()

for x in root.iter('Located_Geometric_Values'):
    if x.find('LOCATION_TYPE').text == ('Center'):
        for item in x.iter('INCIDENCE_ANGLE_ACROSS_TRACK'):
            print(item.text)

```

```

        r1 = math.radians(float(item.text))
        #Incident Angles across track roll (r)

    for item2 in x.iter('INCIDENCE_ANGLE_ALONG_TRACK'):
        print(item2.text)
        p1 = math.radians(float(item2.text))
        #Incident Angle along track pitch (p)

    for sun in x.iter('SUN_ELEVATION'):
        print(sun.text)
        sunElv = float(sun.text)

#Read XML File for Image2
tree2 = ET.parse(dimap2)
root2 = tree2.getroot()

for x in root2.iter('Located_Geometric_Values'):
    if x.find('LOCATION_TYPE').text == ('Center'):
        for item3 in x.iter('INCIDENCE_ANGLE_ACROSS_TRACK'):
            print(item3.text)
            r2 = math.radians(float(item3.text))
            #Incident Angles across track roll (r)

        for item4 in x.iter('INCIDENCE_ANGLE_ALONG_TRACK'):
            print(item4.text)
            p2 = math.radians(float(item4.text))
            #Incident Angle along track pitch (p)

        for sun2 in x.iter('SUN_ELEVATION'):
            print(sun2.text)
            sunElv2 = float(sun2.text)

#Convergence Angle calculation
#Define both Vectors
list1 = [math.tan(p1), math.tan(r1), 1]
v1 = np.array(list1)

list2 = [math.tan(p2), math.tan(r2), 1]
v2 = np.array(list2)

#Calculate Angle with the Formular
convergenceAngle = math.degrees(np.arccos((v1.dot(v2))/(np.linalg.
    norm(v1)*np.linalg.norm(v2))))

#print (convergenceAngle)

#Sun Elevation Difference
sunElevationDifference = abs(sunElv-sunElv2)
#print(sunElevationDifference)

# Get Valid Pixel Percentage
demPath = directory + stereoPair + "/" + "dsm.tif"

#Calculate Valid Pixel Percent with gdal via subprocess.call
# cmd = "gdalinfo -stats " + demPath
# subprocess.call(cmd, shell = True)

if os.path.exists(demPath):
    gtif = gdal.Open(demPath)
    band = gtif.GetRasterBand(1)
    meta = band.GetMetadata()
    validPixel = (meta["STATISTICS_VALID_PERCENT"])

```

```

else:
    validPixel = 'No DSM.tif'

#Write output as csv
with open (outpath+ "/metadata.csv",mode = "w",newline="") as f:
    metadata_writer = csv.writer(f, delimiter = ",", quotechar = "'",
        quoting=csv.QUOTE_MINIMAL)

    metadata_writer.writerow (["Stereo Pair","Convergence Angle", "
        Sun Elevation Difference","Valid Pixel Percent"])
    metadata_writer.writerow ([stereoPair,convergenceAngle,
        sunElevationDifference,validPixel])

```

A.5 Weighted method to merge 3 DEMs

```

import os
from itertools import combinations
import arcpy
from arcpy.sa import *

#Find all Folders within directory
directory=r"Path\To\Dems"
imageCombos= [ item for item in os.listdir(directory) if os.path.isdir(
    os.path.join(directory, item)) ]

arcpy.env.overwriteOutput = True

#For each Folder, extract Image Names
for triStereo in imageCombos:
    images = triStereo.split('-')
    image1 = images[0]
    image2 = images[1]
    image3 = images[2]

#Do the image combinations to find the stereopairs
combinationOfTwo = list (combinations(images,2))

#connected each stereopair with '-'
stereoPair1 = combinationOfTwo[0][0] + '-' + combinationOfTwo[0][1]
stereoPair2 = combinationOfTwo[1][0] + '-' + combinationOfTwo[1][1]
stereoPair3 = combinationOfTwo[2][0] + '-' + combinationOfTwo[2][1]

stereoPairList = [stereoPair1, stereoPair2, stereoPair3]

print(stereoPair1)
print(stereoPair2)
print(stereoPair3)

#read all csv metadata file of a stereopair to dataframe
csvList = []

for stereoPair in stereoPairList:
    csvPath = r"Path\To\Stereo-Dems" + "\\\" + stereoPair + "\\\" + "
        metadata.csv"
    df = pd.read_csv(csvPath, index_col=None, header=0)
    if 'No DSM.tif' in df.values:
        continue
    csvList.append(df)

wholeFrame = pd.concat(csvList, axis=0, ignore_index=True)

```

```

#Do the sorting and weighting
angleGood = wholeFrame.loc[(wholeFrame['Convergence Angle'] > 5) & (
    wholeFrame['Convergence Angle'] < 20)]
sortedFrame = angleGood.sort_values("Valid Pixel Percent",ascending
    = False)

#Access the dataframe values, store DEM Path and create arcpy Raster
dem1 = sortedFrame.iloc[0][0]
dem1Path = r"Path\To\Stereo-Dems" + "\\ " + dem1 + "\\dsm.tif"
raster1 = Raster(dem1Path)

if len(sortedFrame.index) >= 2:
    dem2 = sortedFrame.iloc[1][0]
    dem2Path = r"Path\To\Stereo-Dems" + "\\ " + dem2 + "\\dsm.tif"
    raster2 = Raster(dem2Path)

if len(sortedFrame.index) == 3:
    dem3 = sortedFrame.iloc[2][0]
    dem3Path = r"Path\To\Stereo-Dems" + "\\ " + dem3 + "\\dsm.tif"
    raster3 = Raster(dem3Path)

#Do the Merging
outPath = r"Path\To\OutFolder"
mergedRasterOutPath = outPath + "\\ " + triStereo + "\\merged.tif"

#One Raster
if len(sortedFrame.index) == 1:
    raster1.save(mergedRasterOutPath)

#Two Rasters: Take raster1, if Null raster1 take raster2
if len(sortedFrame.index) == 2:
    mergedRaster = Con(IsNull(raster1), raster2, raster1)
    mergedRaster.save(mergedRasterOutPath)

#Three Rasters: Take raster1, if raster1 is null take raster2, if
raster2 is null take raster3
if len(sortedFrame.index) == 3:
    mergedRaster = Con(IsNull(raster1), Con(IsNull(raster2), raster3,
    raster2), raster1)
    mergedRaster.save(mergedRasterOutPath)

#output dataframe: welche Bilder wurden gemerget
csvOut = outPath + "\\ " + triStereo + "\\all_Dems.csv"
csvOutSortet = outPath + "\\ " + triStereo + "\\merged_Dems.csv"

wholeFrame.to_csv(csvOut, index= False, sep='\t')
sortedFrame.to_csv(csvOutSortet, index= False, sep='\t')

```

A.6 Interpolate DEMs

```

import os
import gdal
from itertools import combinations

#Find all Folders within directory
directory=r"E:\Masterarbeit\Pleiades_Daten\16_DEMS_interpolated"
imageCombos= [ item for item in os.listdir(directory) if os.path.isdir(
    os.path.join(directory, item)) ]

```

```
#For each Folder, extract Image Names
for triStereo in imageCombos[3:]:
    images = triStereo.split('-')
    image1 = images[0]
    image2 = images[1]
    image3 = images[2]

#Do the image combinations to find the stereopairs
combinationOfTwo = list(combinations(images,2))

#connected each stereopair with '-'
stereoPair1 = combinationOfTwo[0][0] + '-' + combinationOfTwo[0][1]
stereoPair2 = combinationOfTwo[1][0] + '-' + combinationOfTwo[1][1]
stereoPair3 = combinationOfTwo[2][0] + '-' + combinationOfTwo[2][1]

stereoPairList = [stereoPair1, stereoPair2, stereoPair3]

print(stereoPair1)
print(stereoPair2)
print(stereoPair3)

#Read all Dems, FillnoData and copy to

for stereoPair in stereoPairList:
    #Open Dem with Gdal
    demPath = r"E:\Masterarbeit\Pleiades_Daten\12
        _DEMs_s2p_Port_au_Prince\AOI_1\2er_Kombinationen" + "\\\" +
        stereoPair + "\\\" + "dsm.tif"
    dem = gdal.Open(demPath, gdal.GA_ReadOnly)
    if not dem:
        continue

    #Copy Dem to target folder
    dstPath = r"E:\Masterarbeit\Pleiades_Daten\16_DEMS_interpolated"
        + "\\\" + triStereo + "\\\" + stereoPair + "_fillnodata.tif"

    fileformat = "GTiff"
    driver = gdal.GetDriverByName(fileformat)
    dst = driver.CreateCopy(dstPath, dem, strict = 0)

    #Close dem
    dem = None

    #FillNoData use copied DEM
    dstBand = dst.GetRasterBand(1)
    fill = gdal.FillNodata(targetBand = dstBand, maskBand = None,
        maxSearchDist = 10, smoothingIterations = 0)

    #Close
    fill = None
    dst = None
```

A.7 Take the median

```
import arcpy
from arcpy.sa import *

arcpy.env.workspace = r"Path\To\Interpolated DEMs"

rasters = arcpy.ListRasters()

for raster in rasters:
    print(raster)

outCellStats = CellStatistics(rasters, "MEDIAN", "DATA")

outCellStats.save("median.tif")
```

A.8 Benchmark

```
import arcpy
from arcpy.sa import *
import math
import numpy as np
import sys
import os.path
import matplotlib.pyplot as plt

def benchmark(refRaster, srcRaster):

    ##Check Coordinate System

    crsRef = arcpy.Describe(refRaster).spatialReference.name
    crsSrc = arcpy.Describe(srcRaster).spatialReference.name

    if crsRef == crsSrc:
        print("Coordinate Reference System ok...")

    else:
        print("Coordinate Reference System not equal")
        sys.exit()

    ##Check Cellsize

    srcX = srcRaster.meanCellHeight
    srcY = srcRaster.meanCellWidth

    refX = refRaster.meanCellHeight
    refY = refRaster.meanCellWidth

    if srcX == refX and srcY == refY:
        print("Cellsize ok...")

    else:
        cellSizeXY = u"{} {}".format(refX, refY)
        arcpy.Resample_management(srcRaster, "resample.tif", cellSizeXY,
            "BILINEAR")
        print("Resampling")

    ##Clip source Rasters to Reference Raster
```

```

if arcpy.Exists("resample.tif"):
    srcRaster = Raster("resample.tif")

xmin = refRaster.extent.lowerLeft.X
xmax = refRaster.extent.lowerRight.X
ymin = refRaster.extent.lowerLeft.Y
ymax = refRaster.extent.upperRight.Y

extent = "{} {} {} {}".format(xmin, ymin, xmax, ymax)

arcpy.Clip_management(srcRaster, extent, "dsm_align_clip.tif", "#", "#",
    "#", "MAINTAIN_EXTENT")

## COMPLETENESS

#Raster difference
rasterDiff = refRaster - srcRaster
rasterDiff.save("rasterDiff.tif")

#calculate completeness for 1 meter to 3 meter treshhold
completeness = []
for thresh in range(1,5):

    #reclassify raster difference with treshhold (1 = true, 0 =
        false)
    whereClause = "Value >= -{} AND Value <= {}".format(thresh,
        thresh)
    reclassRaster = Con(rasterDiff, "1", "0", whereClause)
    reclassRaster.save("reclassRaster.tif")

#search cursor for reclassify raster
arcpy.BuildRasterAttributeTable_management("reclassRaster.tif",
    "Overwrite")
with arcpy.da.SearchCursor("reclassRaster.tif", ["VALUE", "COUNT"
    ]) as cursor:
    for row in cursor:
        if row[0] == 1:
            validCells = row[1]

#calculate sum of cells in raster
columns = reclassRaster.width
rows = reclassRaster.height
allCells = rows * columns

#completeness score
score = 100 / allCells * validCells

#completeness list
completeness.append(score)
print ("Completeness Score = {}".format(score))

## ACCURACY

#is NULL source Raster
outIsNull = IsNull("dsm_align_clip.tif")
outIsNull.save("nullRaster.tif")

#count valid cells
arcpy.BuildRasterAttributeTable_management("nullRaster.tif", "
    Overwrite")
with arcpy.da.SearchCursor("nullRaster.tif", ["VALUE", "COUNT"]) as
    cursor:

```

```

    for row in cursor:
        if row[0] == 0:
            validCells = row[1]

#RMSE calculation:
square = rasterDiff*rasterDiff

#sum divided by valid cells
arr = arcpy.RasterToNumPyArray(square, nodata_to_value=0)
sum = arr.sum()

mean = sum / validCells
rmse = math.sqrt(mean)

print("RMSE = {}".format(rmse))

## Write results to txt file

path = arcpy.env.workspace + "\\benchmark.txt"
with open(path,"w") as f:
    for score in completeness:
        f.write("Completeness = " + str(score) + "\n")
        f.write("RMSE = " + str(rmse))

## Plotting

#Threshold – Completeness Plot
plt.plot([1, 2, 3, 4], [completeness[0], completeness[1],
completeness[2], completeness[3]])
plt.xticks(np.arange(1,5,1))
plt.yticks(np.arange(0,100,10))
plt.xlim(1,4)
plt.ylim(0,100)

plt.grid(True,linewidth=0.2, color='grey', linestyle='—')

plt.xlabel("Threshold (m)")
plt.ylabel("Completeness (%)")

plt.savefig(arcpy.env.workspace + "\\Threshold–Completeness.png",
dpi=300)

#Skyplot
#Get the Image dates form the Input Dem
imageCombo = os.path.basename(arcpy.env.workspace)
imageDates = imageCombo.split('-')

#Split parameters dictionary into separates lists to do the plot
azimuth = []
incident = []

for image in imageDates:
    az = parameters[image][0]
    inc = parameters[image][1]
    azimuth.append(az)
    incident.append(inc)

#Circel Calculation
azimuth = [x/180.0* math.pi for x in azimuth]

#Make skyplot
fig = plt.figure()
ax = fig.add_axes([0.1,0.1,0.8,0.8], polar=True)

```

```

ax.set_theta_zero_location("N")
ax.set_theta_direction(-1)
ax.set_rlim(0,20)
ax.set_rticks(numpy.arange(0,20,5))
ax.set_rlabel_position(67.5)

ax.scatter(azimuth, incident, c='r')
ax.set_title("Satellite Azimuth - Incident Angle", va='bottom')

#label the dots with Image Date
for az,el,label in zip(azimuth, incident, imageDates):
    plt.annotate(label,(az,el), fontsize=7)

plt.savefig(arcpy.env.workspace + "\\Azimuth-IncAngle.png", dpi=300)

#Clear current axes and figure
plt.cla()
plt.clf()

#plt.show()

##MAIN

#reference Raster DEM
referenceDEM = Raster(r"E:\Masterarbeit\Pleiades_Daten\50_GroundTruth\
AOI_1\Tristereoo_Catena_Benchmark.tif")

#Outdirection, directory where folders are created and files are put
into
parent_outdir = r"E:\Masterarbeit\Pleiades_Daten\18
_DEMS_benchmark_Port_au_Prince\AOI_1\03_Median"

#Image parameters with date, satellite azimuth and incident angle
parameters = {"20130705_001": [234.66, 8.43],
              "20130705_002": [280.17, 5.68],
              "20130705_003": [328.24, 8.11],
              "20130706_001": [128.75, 13.55],
              "20130706_002": [73.34, 13.78],
              "20130706_003": [100.85, 12.13],
              "20130706_003": [100.85, 12.13],
              "20140920_001": [239.38, 9.18],
              "20140920_002": [320.91, 8.56],
              "20140921_001": [124.69, 12.94],
              "20140921_002": [71.66, 13.77],
              "20141117_001": [243, 18.96],
              "20141117_002": [318.11, 17.9],
              "20141117_003": [274.26, 14.9],
              "20150429_00A": [238.1, 6.43],
              "20150429_00B": [300.62, 6.13]
              }

#Arcpy Settings
arcpy.env.snapRaster = referenceDEM
arcpy.env.overwriteOutput = True

# #For multiple Files, take the Dems from following directory
# for root, dirs, files in os.walk(r"E:\Masterarbeit\Pleiades_Daten\16
# _DEMS_interpolated"):
#     for file in files:
#         if file.endswith("_align.tif"):
#             #Out directory
#             foldername = os.path.basename(root)

```

```
#         os.mkdir(os.path.join(parent_outdir, foldername))
#         arcpy.env.workspace = os.path.join(parent_outdir,
#         foldername)
#         print(arcpy.env.workspace)
#
#         #source Raster DEM
#         sourceDEM = Raster(os.path.join(root, file))
#
#         #Call Benchmark function
#         benchmark(referenceDEM, sourceDEM)

#For single Files
sourceDEM = Raster(r"E:\Masterarbeit\Pleiades_Daten\12
_DEMs_s2p_Port_au_Prince\AOI_1\TEST\20130705_002-20130705_003\
dsm_dem_align\dsm_Tristereo_Catena_Coregistration_nuth_x-1.96_y+2.41_z
-0.15_align.tif")

arcpy.env.workspace = r"E:\Masterarbeit\Pleiades_Daten\12
_DEMs_s2p_Port_au_Prince\AOI_1\TEST\20130705_002-20130705_003\
Benchmark"

benchmark(referenceDEM, sourceDEM)
```

B Tabellen

B.1 Tristereoo Bildkombinationen

Bild 1	Bild 2	Bild 3
20130705_001	20141117_001	20150429_00A
20130705_001	20141117_001	20150429_00B
20130705_001	20141117_002	20150429_00A
20130705_001	20141117_002	20150429_00B
20130705_001	20141117_003	20150429_00A
20130705_001	20141117_003	20150429_00B
20130705_002	20141117_001	20150429_00A
20130705_002	20141117_001	20150429_00B
20130705_002	20141117_002	20150429_00A
20130705_002	20141117_002	20150429_00B
20130705_002	20141117_003	20150429_00A
20130705_002	20141117_003	20150429_00B
20130705_003	20141117_001	20150429_00A
20130705_003	20141117_001	20150429_00B
20130705_003	20141117_002	20150429_00A
20130705_003	20141117_002	20150429_00B
20130705_003	20141117_003	20150429_00A
20130705_003	20141117_003	20150429_00B
20130706_001	20141117_001	20150429_00A
20130706_001	20141117_001	20150429_00B
20130706_001	20141117_002	20150429_00A
20130706_001	20141117_002	20150429_00B
20130706_001	20141117_003	20150429_00A
20130706_001	20141117_003	20150429_00B
20130706_002	20141117_001	20150429_00A
20130706_002	20141117_001	20150429_00B
20130706_002	20141117_002	20150429_00A
20130706_002	20141117_002	20150429_00B
20130706_002	20141117_003	20150429_00A
20130706_002	20141117_003	20150429_00B
20130706_003	20141117_001	20150429_00A
20130706_003	20141117_001	20150429_00B
20130706_003	20141117_002	20150429_00A
20130706_003	20141117_002	20150429_00B
20130706_003	20141117_003	20150429_00A
20130706_003	20141117_003	20150429_00B

B.2 Stereo Bildkombinationen

Stereopaar	Completeness [%]	RMSE [m]	Convergence Angle [°]
20130705_001-20141117_001	17.7	173.4	11
20130705_001-20141117_002	22.4	175.3	19
20130705_001-20141117_003	23.1	9.3	10
20130705_001-20150429_00A	5.2	42.9	2
20130705_001-20150429_00B	23.4	8.8	8
20130705_002-20141117_001	26.3	7.6	15
20130705_002-20141117_002	26.1	6.7	14
20130705_002-20141117_003	22.7	12.2	9
20130705_002-20150429_00A	17.2	14.6	4
20130705_002-20150429_00B	7.8	25.7	2
20130705_003-20141117_001	x	x	20
20130705_003-20141117_002	24	8.4	10
20130705_003-20141117_003	25.6	8.9	12
20130705_003-20150429_00A	29.2	7.1	10
20130705_003-20150429_00B	14.5	17.6	4
20130706_001-20141117_001	x	x	27
20130706_001-20141117_002	15.2	304.4	31
20130706_001-20141117_003	20.6	145.3	27
20130706_001-20150429_00A	33	5.1	17
20130706_001-20150429_00B	33.8	5.1	20
20130706_002-20141117_001	x	x	33
20130706_002-20141117_002	15.6	289.2	27
20130706_002-20141117_003	11.6	324.8	28
20130706_002-20150429_00A	37.2	4.3	20
20130706_002-20150429_00B	33.8	4.9	18
20130706_003-20141117_001	x	x	29
20130706_003-20141117_002	14.4	300.3	28
20130706_003-20141117_003	16	280.3	27
20130706_003-20150429_00A	34.6	5	17
20130706_003-20150429_00B	31.8	12	18
20141117_001-20150429_00A	32.6	5.3	13
20141117_001-20150429_00B	37.6	4.1	16
20141117_002-20150429_00A	36	7.2	18
20141117_002-20150429_00B	34.1	5	12
20141117_003-20150429_00A	31.4	6.7	10
20141117_003-20150429_00B	32.6	6.3	10

Literatur

- Airbus (2012). *Pléiades Imagery - User Guide*. Techn. Ber. Airbus Defence und Space Intelligence, Frankreich.
- Bosch, M. u. a. (2017). „Metric evaluation pipeline for 3d modeling of urban scenes“. en. In: *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLII-1/W1*, S. 239–246. DOI: [10.5194/isprs-archives-XLII-1-W1-239-2017](https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-1-W1-239-2017).
- Bosch, Marc u. a. (2016). „A multiple view stereo benchmark for satellite imagery“. In: *2016 IEEE Applied Imagery Pattern Recognition Workshop (AIPR)*, S. 1–9. DOI: [10.1109/AIPR.2016.8010543](https://doi.org/10.1109/AIPR.2016.8010543).
- Facciolo, Gabriele, Carlo De Franchis und Enric Meinhardt (2018). *Automated 3D Reconstruction from Satellite Images - SIAM IS18 MINITUTORIAL*. URL: <https://gfacciolo.github.io/IS18/> (besucht am 27.07.2021).
- Facciolo, Gabriele, Carlo De Franchis und Enric Meinhardt-Llopis (2017). „Automatic 3D Reconstruction from Multi-date Satellite Images“. en. In: *2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW)*. Honolulu, HI: IEEE, S. 1542–1551. DOI: [10.1109/CVPRW.2017.198](https://doi.org/10.1109/CVPRW.2017.198).
- Facciolo, Gabriele, Carlo de Franchis und Enric Meinhardt (2015). „MGM: A Significantly More Global Matching for Stereovision“. en. In: *Proceedings of the British Machine Vision Conference 2015*. Swansea: British Machine Vision Association, S. 90.1–90.12. DOI: [10.5244/C.29.90](https://doi.org/10.5244/C.29.90).
- Franchis, C. de u. a. (2014). „An automatic and modular stereo pipeline for push-broom images“. en. In: *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences II-3*, S. 49–56. DOI: [10.5194/isprsannals-II-3-49-2014](https://doi.org/10.5194/isprsannals-II-3-49-2014).
- Han, Y. u. a. (2020). „State of the art in digital surface modelling from multi-view high resolution satellite images“. English. In: *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Bd. V-2-2020. ISSN: 2194-9042. Copernicus GmbH, S. 351–356. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-V-2-2020-351-2020>.
- Hirschmuller, Heiko (2008). „Stereo Processing by Semiglobal Matching and Mutual Information“. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 30.2, S. 328–341. DOI: [10.1109/TPAMI.2007.1166](https://doi.org/10.1109/TPAMI.2007.1166).
- Krauß, Thomas, Pablo D’Angelo und Lorenz Wendt (2019). „Cross-track satellite stereo for 3D modelling of urban areas“. In: *European Journal of Remote Sensing* 52.sup2, S. 89–98. DOI: [10.1080/22797254.2018.1551069](https://doi.org/10.1080/22797254.2018.1551069).
- Krauß, Thomas u. a. (2013). „The Fully Automatic Optical Processing System CATENA at DLR“. In: *ISPRS Hannover Workshop 2013*. Hrsg. von C. Heipke u. a. Bd. XL-1/W. ISPRS Archives. Copernicus Publications, S. 177–181. URL: <https://elib.dlr.de/82545/>.
- Krishna, B Gopala, T P Srinivasan und P K Srivastava (2008). „DEM generation from high resolution multi-view data product“. en. In: S. 4.
- Nixon, Mark S. und Alberto S. Aguado (2012). „Chapter 10 - Appendix 1: Camera geometry fundamentals“. In: *Feature Extraction and Image Processing for Computer Vision*. Hrsg. von Nixon Mark S und Aguado Alberto S. Third Edition. Oxford:

- Academic Press, S. 489–518. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-396549-3.00016-1>.
- Nuth, C. und A. Kääb (2011). „Co-registration and bias corrections of satellite elevation data sets for quantifying glacier thickness change“. English. In: *The Cryosphere* 5.1. Publisher: Copernicus GmbH, S. 271–290. DOI: <https://doi.org/10.5194/tc-5-271-2011>.
- Ozcanli, Ozge C. u. a. (2015). „A comparison of stereo and multiview 3-D reconstruction using cross-sensor satellite imagery“. en. In: *2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW)*. Boston, MA, USA: IEEE, S. 17–25. DOI: [10.1109/CVPRW.2015.7301292](https://doi.org/10.1109/CVPRW.2015.7301292).
- Perko, Roland u. a. (2018). „Very High Resolution Mapping with the Pléiades Satellite Constellation“. en. In: *American Journal of Remote Sensing* 6.2, S. 89. DOI: [10.11648/j.ajrs.20180602.14](https://doi.org/10.11648/j.ajrs.20180602.14).
- Qin, R. (2016). „RPC Stereo Processor (RSP) - A software package for digital surface model and orthophoto generation from satellite stereo imagery“. In: *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences III-1*, S. 77–82. DOI: [10.5194/isprsannals-III-1-77-2016](https://doi.org/10.5194/isprsannals-III-1-77-2016).
- Qin, Rongjun (2019). „A critical analysis of satellite stereo pairs for digital surface model generation and a matching quality prediction model“. en. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 154, S. 139–150. DOI: [10.1016/j.isprsjprs.2019.06.005](https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.06.005).
- Rupnik, Ewelina, Marc Pierrot-Deseilligny und Arthur Delorme (2018). „3D reconstruction from multi-view VHR-satellite images in MicMac“. en. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 139, S. 201–211. DOI: [10.1016/j.isprsjprs.2018.03.016](https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.03.016).
- Shean, David E. u. a. (2016). „An automated, open-source pipeline for mass production of digital elevation models (DEMs) from very-high-resolution commercial stereo satellite imagery“. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 116, S. 101–117. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.03.012>.
- Tao, C Vincent und Yong Hu (2001). „A Comprehensive Study of the Rational Function Model for Photogrammetric Processing“. In: *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 67.12, S. 1347–1357.
- Telespazio (2019). *Copernicus data Quality Control - Technical Note - Harmonisation of terms relevant to angles*. Techn. Ber. ESA.



Master Thesis

im Rahmen des
Universitätslehrganges „Geographical Information Science & Systems“
(UNIGIS MSc) am Interfakultären Fachbereich für GeoInformatik (Z_GIS)
der Paris Lodron-Universität Salzburg

zum Thema

„Höhenmodelle aus Multi-Date tristereo Pléiades Satelliten Bildern“

vorgelegt von

MSc. Tobias Kugler
105464, UNIGIS MSc Jahrgang 2019

Betreuer:
Dr. Lorenz Wendt

Zur Erlangung des Grades
„Master of Science – MSc“

Zürich, 02.10.2021