

Das Projekt *eva/AT* zur Untersuchung der Genauigkeit der Aerotriangulation im Landessystem

CAMILLO RESSL¹, NORBERT PFEIFER¹, CHRISTINE RESSL² & ANDREAS BAYR²

Zusammenfassung: In diesem Beitrag wird anhand eines GNSS-INS-gestützten Luftbildblocks von 4342 Senkrechtaufnahmen, GSD 20 cm, in 22 Längs- und 5 Querstreifen die Qualität der Aerotriangulation (AT) in der Kartenprojektion in einem alpinen Gebiet untersucht. Die Ergebnisse werden anhand von 169 Kontrollpunkten bewertet und der Genauigkeit gegenübergestellt, die bei der AT in einem unverzerrten Tangentialsystem erhalten wird. Es zeigt sich, dass in beiden Berechnungssystemen dieselben Genauigkeiten erreicht werden können; mit RMS-Werten in (X, Y, Z) von (7, 10, 11) cm. Voraussetzung, um diese Genauigkeiten in der Kartenprojektion erreichen zu können, ist die korrekte Modellierung der Erdkrümmung und der Streckenverzerrung. Beachtet man die Streckenverzerrung nicht, so verschlechtert sich der Z-RMS-Wert in Abhängigkeit von der Höhenverteilung der Passpunkte um 100% bis 300%. In AT-Programmen, die die Streckenverzerrung nicht beachten, kann man durch Anpassung der Höhen der Projektionszentren oder der Kamerakonstante vor der AT das Problem zu einem Teil beheben und RMS-Werte von ca. (10, 11, 15) cm erreichen.

1 Motivation

Das österreichische Bundesamt für Eich und Vermessungswesen (BEV) verfolgt als eine ihrer Aufgaben die topographische Landesaufnahme (BEV 2025a). Im Zuge von Leistungsvergaben werden Befliegung von Luftbildblöcken mit Senkrechtaufnahmen, Prozessierung der Aerotriangulation (AT) und Ableitung eines Orthophotomosaiks von Auftragnehmern durchgeführt. Aus den orientierten digitalen Luftbildern werden im Anschluss im BEV Höhenmodelle via Bildmatching abgeleitet. In der Vergangenheit haben sich bei diesen Höhenmodellen nach dem Vergleich mit anderen Höhendaten unerwartet hohe Differenzen im Bereich von 1 m ergeben (speziell in sehr hohen alpinen Lagen).

Die aus den Luftbildern abgeleiteten Rasterdaten (Orthophotos, Höhenmodelle) sowie stereoskopische Auswertungen werden im System der Österreichischen Landesvermessung (Gebrauchssystem des Militärgeographischen Institutes = MGI, im Folgenden kurz „Gebrauchssystem“ genannt) benötigt. Da das BEV an der effizienten Erzeugung dieser Produkte interessiert ist, wird auch die AT im Gebrauchssystem durchgeführt. Die Lagekoordinaten in diesem System resultieren aus einer Gauß-Krüger-Projektion mit angehängter ortsabhängiger Verschiebung um Homogenisierungsvektoren des GIS-Grids, um diese Koordinaten an die vorhandenen Netzspannungen anzupassen (BEV 2025b). Zusätzlich wird die Höhenkoordinate um das Höhen-Grid verändert, sodass sogenannte Gebrauchshöhen erhalten werden (BEV 2025c).

Es bestand der Verdacht, dass diese unregelmäßigen Veränderungen in Lage und Höhe sich negativ auf die Ergebnisse der AT auswirken. Zusätzlich ist erst seit relativer kurzer Zeit bekannt (RESSL 2001), dass für die korrekte Beschreibung der photogrammetrischen

¹ TU Wien, Department für Geodäsie und Geoinformation, Forschungsbereich Photogrammetrie, Wiedner Hauptstraße 8-10, 1040 Wien, E-Mail: [Camillo.Ressler, Norbert.Pfeifer]@tuwien.ac.at

² BEV – Bundesamt für Eich und Vermessungswesen, Abteilung G2 – Fernerkundung, Schiffamtsgasse 1-3, 1020 Wien, E-Mail: [Christine.Ressler, Andreas.Bayr]@bev.gv.at

Bildgeometrie (Kollinearitätsgleichung) im System einer Kartenprojektion nicht nur die (physikalisch bedingte) Refraktion und die (geometrisch bedingte) Erdkrümmung zu beachten sind, sondern auch die ebenfalls geometrisch bedingte Streckenverzerrung. Während die Wichtigkeit der Erdkrümmung seit jeher bekannt ist und in den meisten Photogrammetrie-Programmen berücksichtigt wird, ist die Streckenverzerrung aber nicht in jeder Photogrammetrie-Software integriert.

Um die Fehlerursache abzuklären und das photogrammetrische Genauigkeitspotenzial der Luftbildblöcke unter Berücksichtigung operationeller und wirtschaftlicher Gesichtspunkte bestmöglich auszuschöpfen, initiierte das BEV in Kooperation mit der TU Wien das Projekt *evalAT*. Dabei wurde die Genauigkeit der Aerotriangulation (AT) im Landessystem mit jener in einem unverzerrten Tangential-System anhand von Kontrollpunkten verglichen.

Der Aufsatz ist wie folgt gegliedert: Nach einer kurzen Wiederholung der theoretischen Aspekte bezüglich Photogrammetrie in der Kartenprojektion (Kap. 2) und einer Beschreibung der verwendeten Daten (Kap. 3), folgen einige Erläuterungen zu den betrachteten Systemen in denen die ATs berechnet werden und zur Gewichtung der Beobachtungen (Kap. 4). Die Ergebnisse, die in den verschiedenen Systemen in unterschiedlichen Berechnungsvarianten erhalten wurden, werden in Kap. 5 erläutert, bevor der Artikel in Kap. 6 mit einer Zusammenfassung endet.

2 Theorie zur Photogrammetrie in der Kartenprojektion

Bei der Anwendung der Kollinearitätsgleichung auf Luftbilder ist – speziell bei größeren Flughöhen – der Einfluss der Refraktion zu beachten (KRAUS 2004, S. 257). Bei der Berechnung in einem (sinnvollerweise konform) projizierten Koordinatensystem (z.B. nach Gauß-Krüger) ist die Erdkrümmung (EK) zu berücksichtigen (KRAUS 1996, S. 170). Die Notwendigkeit dieser physikalisch bzw. geometrisch bedingten Korrekturen sind im Grunde seit Anbeginn der Photogrammetrie bekannt.

Die OEEPE (heute EuroSDR) initiierte 1999 einen Test zur integrierten Sensororientierung, bei dem es den Teilnehmern freigestellt wurde, ob sie die Aerotriangulation in einem Tangentialsystem oder in der Kartenprojektion berechnen (HEIPKE et al. 2002). Die Testteilnehmer, die die Berechnungen in beiden Systemen durchführten, stellten Widersprüche in den Ergebnissen fest, welche sich auf die in der Kartenprojektion vorhandene und bisher in der Photogrammetrie unbeachtete Streckenverzerrung zurückführen lassen; (RESSL 2001), (JACOBSEN 2002).

Basierend auf der aus (RESSL 2001) übernommenen Abb. 1 kann das Problem der Photogrammetrie in der Kartenprojektion wie folgt beschrieben werden. In Skizze (A) ist der Vertikalschnitt durch drei ausgewählte Projektionszentren eines entlang eines Breitenkreises von West nach Ost geflogenen Streifens dargestellt. Das Flugzeug fliegt dabei in konstanter ellipsoidischer Höhe H_f . Die Kamerakonstante sei c , das Bildformat sei s und es handle sich um exakte Senkrechtaufnahmen. Unterwirft man den durch diese Bilder abgedeckten Ellipsoidbereich der Gauß-Krüger-Abbildung, so behebt die bekannte EK (Skizze (B)) den Krümmungsunterschied beim Übergang vom Ellipsoid in die Ebene der Kartenprojektion.

Auf den so „abgewickelten“ Flugstreifen in Skizze (C) wirkt nun die Streckenverzerrung τ , die vom Mittelmeridian der Gauß-Krüger-Abbildung nach Osten bzw. Westen *zunimmt*. Die XY-Lagekoordinaten im Landessystem ergeben sich aus der Kartenprojektion. Die ellipsoidischen Höhen werden aber *unverändert* ins Landessystem als Z-Koordinaten übernommen; d.h. das

Flugzeug fliegt jetzt horizontal in konstanter Höhe H_F über der Kartenprojektionsebene. Es entsteht somit eine *Lage-Höhen-Affinität*, die sich aufgrund der veränderlichen Streckenverzerrung selbst ebenfalls verändert.

Es entsteht somit eine Diskrepanz, die in den Skizzen (D1) bzw. (D2) dargestellt ist: Einerseits sollten die Höhen der Projektionszentren der Bilder gleich groß sein, schließlich wurde in konstanter Ellipsoidhöhe befliegen. Das führt aber dazu, dass die Bildwinkel sich wegen τ und dessen Zunahme nach Osten hin kontinuierlich vergrößern müssen, d.h. das Verhältnis zwischen Kamerakonstante c und Bildformat s müsste sich ändern (Skizze (D1)). Andererseits, wenn dieses Verhältnis konstant bleibt (da ja alle Bilder mit ein und derselben Kamera aufgenommen wurden), müsste die Flughöhe im Landeskoordinatensystem kontinuierlich nach Osten hin zunehmen (Skizze (D2)).

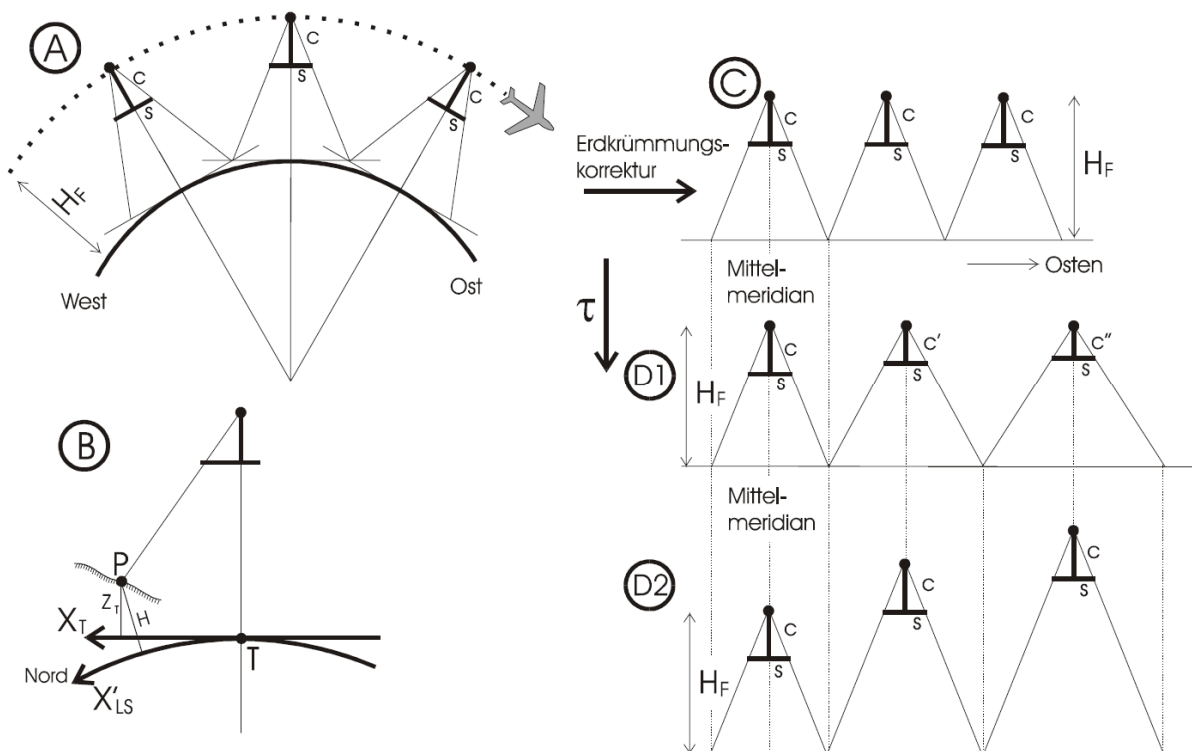


Abb. 1: Ein Flugstreifen und seine Abbildung ins System der Kartenprojektion; entnommen aus (RESSL 2001)

Zusammenfassend entstehen somit drei Probleme, wenn man Photogrammetrie im System der Landesvermessung anwenden will:

- P1) Effekt der Erdkrümmung
- P2) Unterschied zwischen Lage- und Höhenmaßstab (Affinität)
- P3) kontinuierliche Veränderung des Lagemaßstabes im Blockgebiet in lateraler Richtung

Während Problem P1 durch die Erdkrümmungskorrektur in den meisten Software-Lösungen beseitigt wird, werden die Probleme P2 und P3 nicht in jeder Software-Lösung beachtet. Dies hat dazu geführt, dass Behelfslösungen publiziert wurden, die die Streckenverzerrung entweder auf die Kamerakonstante der Bilder anwendet (Skizze D1) oder auf die Höhe der Projektionszentren (Skizze D2) (RESSL 2001; LEGAT 2006). Die erste Methode gilt streng nur bei Senkrechtaufnahmen, die zweite gilt zusätzlich nur bei horizontalem Gelände.

In der AT-Software Orient (KAGER 1989) der TU Wien, die für diese Untersuchung vorwiegend verwendet wird, ist die EK pro Bild in der Weise implementiert, dass die Kollinearitätsgleichung in einem pro Bild im lokalen Fußpunkt zentrierten Tangentialsystem formuliert wird (analog zu Skizze (B)). Im Zuge des erwähnten OEEPE-Tests wurde dieses Tangentialsystem um die von τ verursachte Lage-Höhe-Affinität erweitert. Beide Korrekturen (EK und τ) sind somit im Objektraum formuliert und im Wesentlichen unabhängig von der Geländeform und der Aufnahmerichtung.

Das System der Österreichischen Landesvermessung basiert auf einer Gauß-Krüger-Projektion mit zusätzlichen Adaptionen: Die Lagekoordinaten resultieren aus einer Gauß-Krüger-Projektion mit angehängter ortsabhängiger Verschiebung mittels Homogenisierungsvektoren des sogenannten GIS-Grids, um eine Anpassung an historisch bedingte Netzspannungen durchzuführen (BEV 2025b). Zusätzlich werden anstelle der geometrisch korrekteren Ellipsoidhöhen sogenannte Gebrauchshöhen verwendet, welche eine Annäherung an orthometrische Höhen darstellen und aus den Ellipsoidhöhen durch Anwendung des Geoids und des sogenannten Höhen-Grids resultieren (BEV 2025c).

3 Datengrundlage

Die Untersuchung verwendet eine Auswahl der Bilder des offiziellen Flugblocks „2022260_Zeltweg“, der ein alpines Gebiet mit Geländehöhenbereich 502 m – 2170 m abdeckt. Tab. 1 listet die Kenngrößen und Abb. 2 verortet das abgedeckte Gebiet innerhalb Österreichs. Abb. 3 zeigt die Verteilung der Flugstreifen im Detail.

Tab. 1: Kenngrößen des verwendeten Bildblocks von Senkrechtaufnahmen. (*)
Die Streifenanzahl ist nominell, da manche Streifen in ihrer vollen Ost-West- bzw. Nord-Süd-Ausdehnung über mehrere Tage erfolgen wurden; vergl. Abb. 3

Gebiet	Zeltweg
Lage-Ausdehnung [km]	85 × 41
Bodenpixelgröße [cm]	20
Befliegungszeitraum	7.2022 - 10.2022
Flugmissionen	10
Kamera	UltraCam-Eagle-M3
Brennweite [mm]	100.5
Pixelgröße [μm]	4.000
Sensorggröße [pixel]	26460 × 17004
Basis [m]	480
Streifenabstand [m]	1860
Längs- u. Querüberlappung (Tal, 502 m)	84%/61%
Längs- u. Querüberlappung (Berg, 2170 m)	76%/40%
Anzahl Längsstreifen*	22
Anzahl Querstreifen*	5
Bilderanzahl	4342
Trajektorien-Beobachtung	GNSS & INS

Vom originalen Auftragnehmer standen folgende im Zuge der Operat-Lieferung übermittelten Daten zur Verfügung: GNSS-INS-Trajektorie bezogen auf ETRS89 (geozentrisch) und das österreichische Landessystem MGI (als Gauß-Krüger-Projektion im Meridianstreifensystem M31), weiters Metadaten-Beschreibungen (Flugmission, Kalibrierungsprotokoll, etc.) und das AT-Projektfile (im Meridian M31) der Software Inpho Match AT.

Vom BEV wurden für diese Untersuchung per GNSS 179 Bodenpunkte im Höhenbereich 586 m – 2003 m eingemessen, welche als Pass- und Kontrollpunkte dienen. Für 98 dieser Bodenpunkte wurden GNSS-Wiederholungsmessungen durchgeführt, mit folgenden RMS-Werten für die Differenzen in (X, Y, Z): (2.2, 1.6, 2.3) [cm]. Da während der Befliegung die Trajektorie mittels GNSS und INS beobachtet wurde, ist die Notwendigkeit für Boden-Passpunkte eingeschränkt. Es wurde daher die kleinste sinnvolle Untermenge dieser 179 Punkte als Boden-Passpunkte ausgewählt und zwar in jeder Ecke ein Doppelpasspunkt; vergl. Abb. 3. Die Geländehöhen in diesen vier Bereichen sind: 786 m, 617 m, 578 m, 1257 m. In Antizipation der erwarteten Höhenprobleme wurde zusätzlich ein Doppelpasspunkt in einem besonders hochgelegenen Bereich im Blockinneren (1754 m) hinzugenommen.

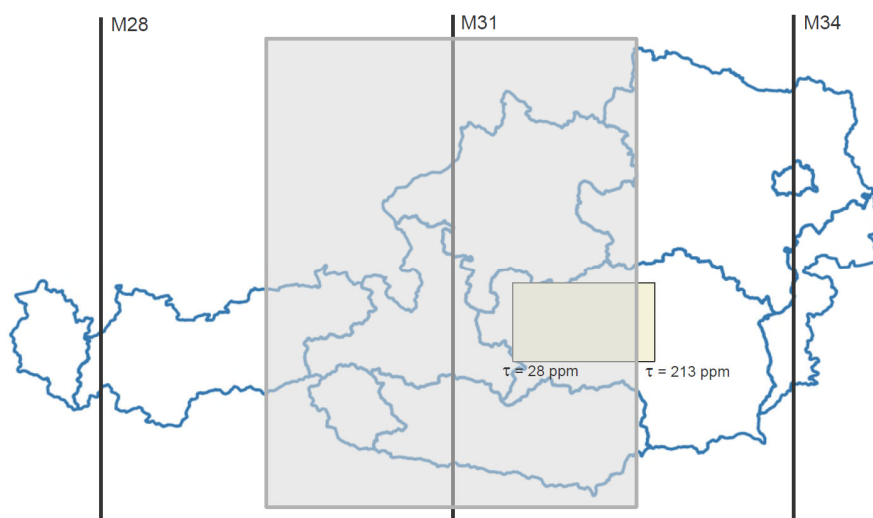


Abb. 2: Abgedeckter Bereich innerhalb von Österreich mit den Mittelmeridianen M28, M31 und M34. Zusätzlich sind für den östlichen und westlichen Blockrand die Streckenverzerrung τ bezogen auf die Projektion M31 angegeben

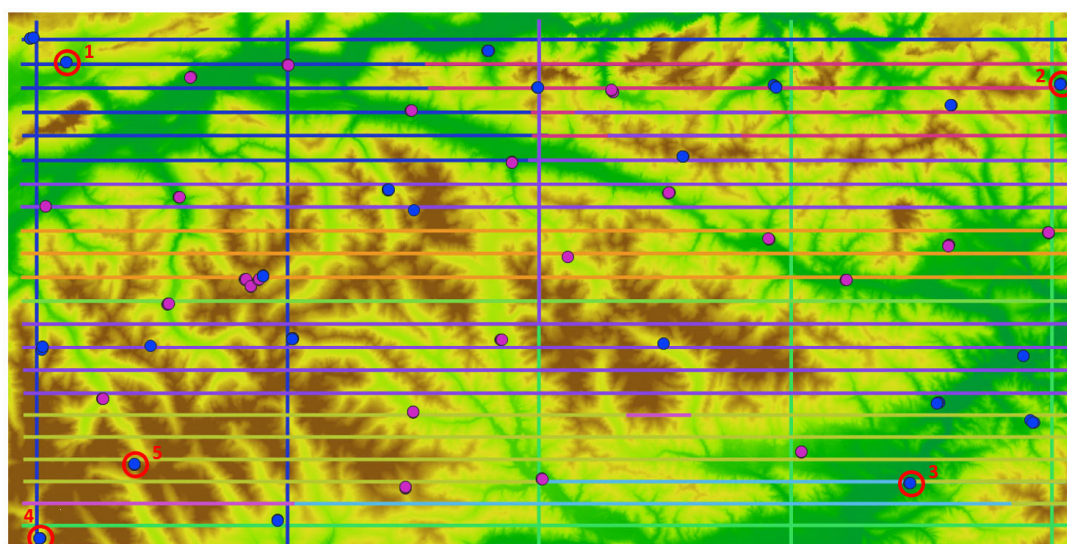


Abb. 3: Verteilung der Längs- und Querstreifen im Block. Die Streifen jeder Flugmission sind in einer anderen Farbe gehalten. Die GNSS-Messpunkte vom BEV sind in blau (RTK-Einzel-messungen) und violett (RTK-Doppelmessungen) dargestellt, die ausgewählten fünf Bereiche mit Doppelpasspunkten in rot. Die Gebrauchshöhen in diesen fünf Bereichen sind: 1: 913 m, 2: 762 m, 3: 603 m, 4: 1341 m, 5: 1787 m. Die Ost-West-Ausdehnung ist 85 km. Hintergrund: farbkodiertes Geländemodell mit Legende: 586 m 2003 m

4 Anmerkungen zu den Aerotriangulationen

Ziel dieser Untersuchung ist die Ermittlung des Genauigkeitspotenzials der AT im Landessystem. Dies wird anhand der Residuen an den Kontrollpunkten ermittelt. Die Referenzgenauigkeit wird dafür anhand einer AT in einem unverzerrten Tangentialsystem bestimmt.

4.1 Berechnungssysteme

Für den Übergang ins österreichische Landessystem werden die bereits aus der originalen Gauß-Krüger-Projektion stammenden ohnehin schon verzerrten Koordinaten mittels GIS-Grid für die Lagekoordinaten und Höhen-Grid weiter verzerrt, was dementsprechend eine zusätzlich reduzierte Genauigkeit erwarten lässt. Das Ausmaß der Genauigkeitsreduktion zeigt der Vergleich mit der Genauigkeit im Tangentialsystem. Um die Effekte all dieser Verzerrungen auf die Genauigkeit bewerten zu können, werden mit dem Programm Orient ATs in verschiedenen Koordinatensystemen durchgeführt (Tab. 2).

Tab. 2: Übersicht der verwendeten Berechnungssysteme

Kürzel	System	Anmerkungen	
TangSys	ETRS89, GRS80	Berührungspunkt/Fußpunkt (14.508°, 47.304°, 0 m)	
GK0	MGI, M31	ohne GIS-Grid	ellipsoidische Höhen
GK1			orthometrische Höhen
GK2			Gebrauchshöhen
GK3		mit GIS-Grid	Gebrauchshöhen

Die Kontroll- und Bodenpasspunkte, sowie die Trajektorienendaten werden unter Beachtung der österreichweiten Standard-Transformation von ETRS nach MGI übertragen (BEV 2025d). Die AT im Tangentialsystem ist die geometrisch korrekteste Variante, weil hier (außer der Refraktion) keine weiteren Verzerrungen zu beachten sind. Die Lösung in diesem System dient auch der Verifikation der Beobachtungsgenauigkeiten anhand einer Varianzkomponentenschätzung (Tab. 3) und der Wahl des Parametermodells (Kap. 5.1). Von den Varianten in der Gauß-Krüger-Abbildung ist die Variante GK0 die geometrisch korrekteste, weil die Lagekoordinaten nicht weiter durch Anwendung des GIS-Grids (Abb. 4) an die vorhandenen Netzspannungen im amtlichen Koordinatensystem angepasst und die aufs Ellipsoid bezogenen Höhen verwendet werden. Die Varianten GK1 und GK2 verzerren sukzessive die Höhen indem das Geoid (für die orthometrischen Höhen) bzw. das Höhen-Grid (für die Gebrauchshöhen; Abb. 5) angewendet werden. Die Variante GK3 verwendet letztendlich auch noch das GIS-Grid und führt somit die AT im Gebrauchssystem der österreichischen Landesvermessung aus.

4.2 Gewichtung der Beobachtungen

Jede AT verwendet die in Tab. 3 gelisteten Beobachtungen mit den angegebenen Genauigkeiten (für die Gewichtung). Diese Genauigkeiten wurden bei der AT im Tangentialsystem mittels Varianz-Komponenten-Schätzung überprüft.

Tab. 3: Verwendete Beobachtungen und deren Genauigkeiten

Bildmessungen	0.2 [pix]
GNSS (Proj.zentren (X, Y, Z))	(5, 5, 5) [cm]
INS (Drehwinkel (ω , ϕ , κ))	(0.001, 0.001, 0.005) [gon]
Passpunkte	(5, 5, 5) [cm]

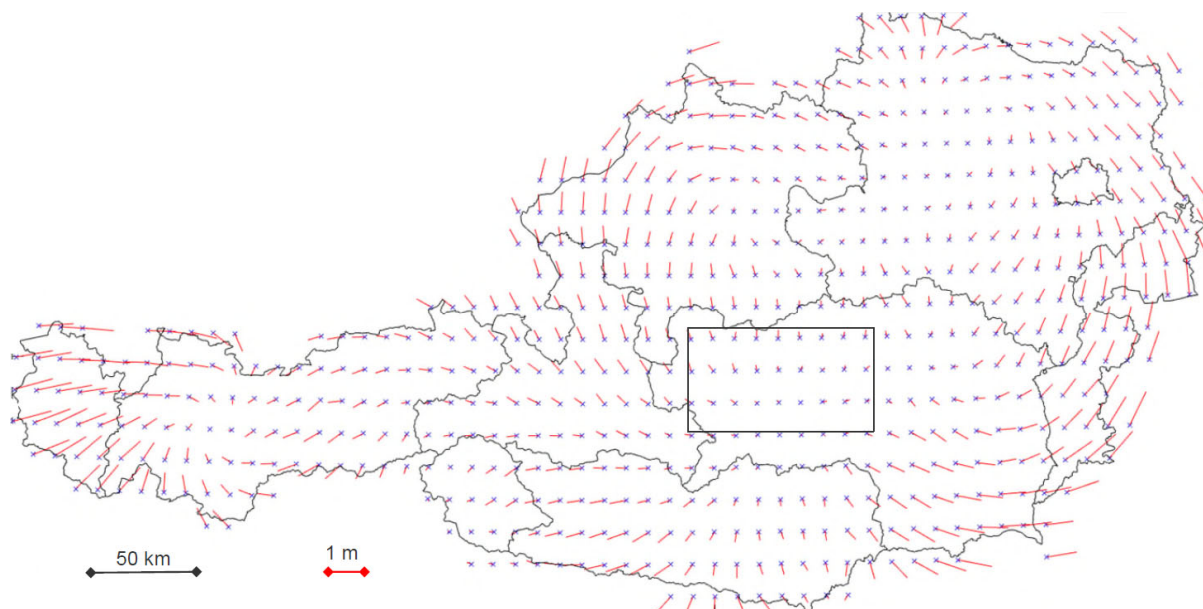


Abb. 4: GIS-Grid in Österreich überlagert mit den AT-Block-Grenzen. Die Veränderungsvektoren sind um den Faktor 15 000 vergrößert

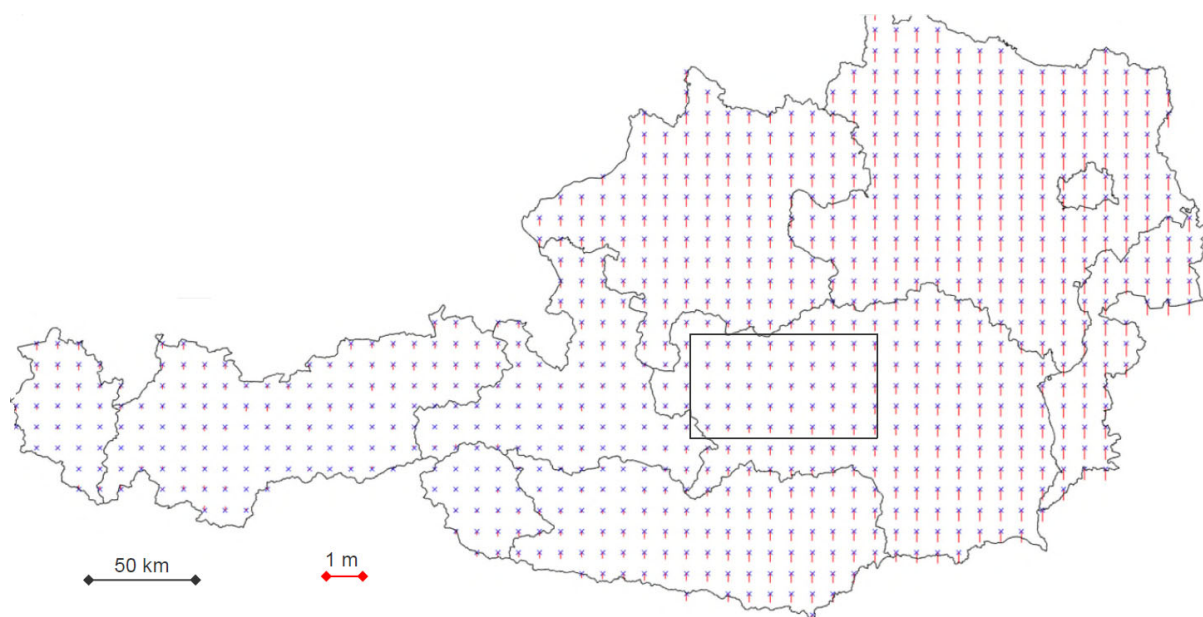


Abb. 5: Höhen-Grid in Österreich überlagert mit den AT-Block-Grenzen. Die Veränderungsvektoren sind um den Faktor 15 000 vergrößert

5 Ergebnisse

Das Programm Orient der TU Wien erlaubt es, die folgenden Korrekturen zu berücksichtigen: Refraktion, Erdkrümmung und Streckenverzerrung τ . Speziell die letzten beiden sind bei einer AT in der Kartenprojektion zu beachten.

Es wurden die Bildmessungen der Verknüpfungspunkte vom gelieferten Inpho-Match-AT-Projektfile direkt übernommen. Aufgrund der Speicherbeschränkung im Programm Orient muss die Anzahl der Verknüpfungspunkte (orig. 228k Objektpunkte) reduziert werden. Jedes Bild wird dafür in ein 3×3 Raster unterteilt und pro Zelle wird der Verknüpfungs- mit der höchsten Vielfachheit übernommen. Jeder so selektierte Verknüpfungspunkt wird gemäß seiner Vielfachheit in den jeweiligen ihn enthaltenden Bildern aktiviert. Das hat zur Folge, dass pro Bild deutlich mehr als 9 Verknüpfungspunkte aktiv sind (letztendlich 7k Objektpunkte). Neben diesen automatischen Verknüpfungspunkten enthalten die Bilder auch die manuellen Messungen der Bodenpass- und Kontrollpunkte. Jedes Bild enthält im Mittel 22 Punkte (Minimum 10, Maximum 45).

5.1 Tangential-System

Nicht selten sind die Messungen der direkten Georeferenzierung (GNSS und INS) gegenüber den geschätzten Werten systematisch versetzt. Die folgenden Ursachen sind dafür häufig verantwortlich: gering unterschiedliche Datumsrealisierungen von GNSS oder Veränderungen in der Montierung der Sensoren im Flugzeug. Diese Veränderungen können für den gesamten Flugblock konstant sein, oder (häufiger) sich mit jeder Flugmission gering ändern (z.B. nach Ein-Ausbau der Sensoren oder Krafteinwirkungen durch Starts und Landungen).

Eine Möglichkeit diese Veränderungen im Zuge der AT zu kompensieren, ist für die GNSS-Messungen eine 3D-Verschiebung zu schätzen (entweder im System der Plattform (Leverarm) oder im übergeordneten System) und für die INS-Messungen eine kleine Korrektur-Rotation (Misalignment). Häufig werden diese Nullpunktsfehler für GNSS und INS unter dem Begriff Mounting-Kalibrierung zusammengefasst. Diese kann gemeinsam für alle Bilder des Blocks bzw. jeder Flugmission, oder gruppiert für alle Bilder jedes Streifens angesetzt werden (wobei Letzteres nur bei Vorhandensein von Querstreifen sinnvoll ist).

Abb. 6 zeigt die GNSS-Residuen nachdem bei der AT im Tangentialsystem eine einzige gemeinsame 3D-Verschiebung (bzw. ein Misalignment) für alle Bilder des Block bestimmt wurde (Block-Mounting). Abb. 7 zeigt die GNSS-Residuen nachdem für die Bilder jedes Streifens eine gemeinsame 3D-Verschiebung (bzw. ein Misalignment) ermittelt wurde (Streifen-Mounting). Die Block-Variante zeigt deutliche Systematiken für einzelne Streifen. Ein Vergleich mit Abb. 3 zeigt, dass sich diese Systematiken zum Teil sehr gut mit den verschiedenen Flug-Missionen überdecken. Bei der Variante mit den Streifen-Mountings ist diese Systematik verschwunden.

In der Varianzkomponenten-Schätzung dieser beiden Varianten ergeben sich entsprechend verschiedene Werte für die geschätzten Genauigkeiten von GNSS und INS; siehe Tab 4. Da somit der Ansatz der streifenweisen Mountings das offensichtlich bessere der beiden Modelle darstellt, wird dieses in allen Varianten verwendet.

Tab. 5 zeigt die Residuen der Pass- und Kontrollpunkte. Man erkennt: Die XY-Residuen der Kontrollpunkte sind bei der Streifen-Mounting-Variante mit 10 PPs besser als 10 cm, was einer halben GSD entspricht. Im Vergleich zu den Bildresiduen von 0.2 Pixel, erscheint das photogrammetrische Genauigkeitspotenzial etwa um den Faktor 2 besser (Tab. 3). Die Abb. 8 zeigt die Residuen-Vektoren. Diese besitzen lokale Systematiken deren Ursache vermutlich in den GNSS-Kontrollmessungen zu suchen ist.

Die Kontrollpunkt-Residuen der Block-Mounting-Variante sind nur gering schlechter (um ca. 3 cm im RMS). Das liegt zum einen daran, dass nur ein geringer Teil der Streifen von den deutlich veränderten Mountings betroffen ist. Zum anderen kompensieren ja gerade die großen

GNSS-Verbesserungen in Abb. 6 diesen Modellfehler (Block- statt Streifen-Mounting) zu einem hohen Prozentsatz; d.h. die vielen Verknüpfungspunkte werden effektiv nur gering verfälscht.

Im Zuge der Untersuchungen im Tangentialsystem hat sich gezeigt, dass die innere Orientierung gemäß Kalibrierungsprotokoll konstant gehalten werden kann.

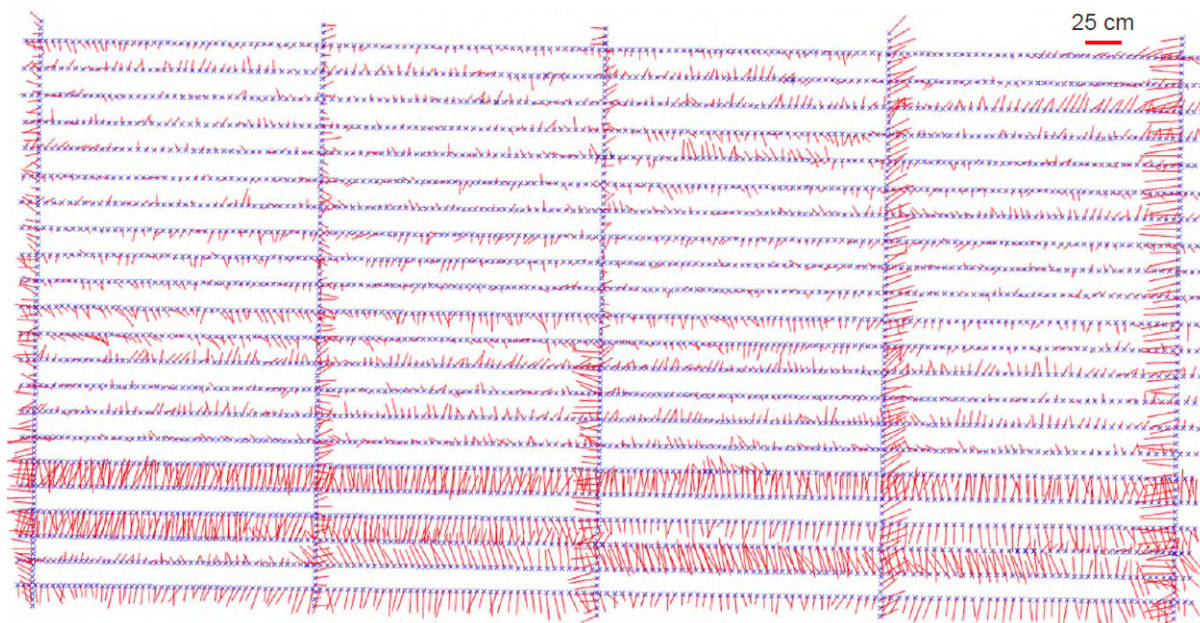


Abb. 6: GNSS-Residuen nach Schätzung einer einzigen Mounting für den gesamten Block

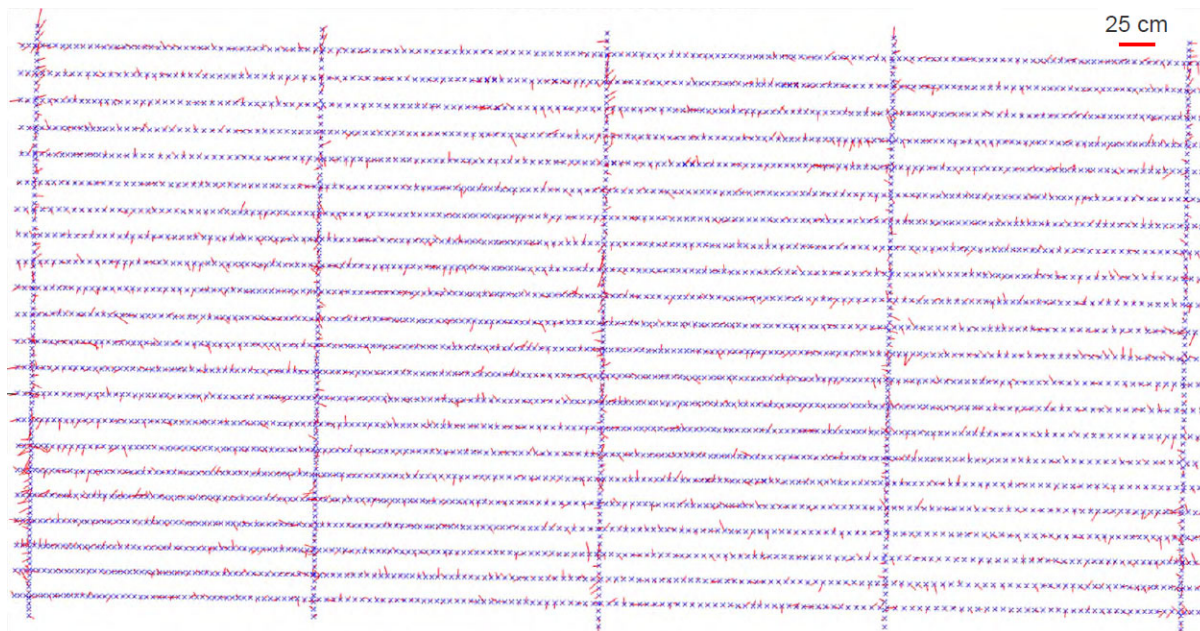


Abb. 7: GNSS-Residuen nach Schätzung der Mounting pro Streifen

Tab. 4: GNSS-INS-Genauigkeiten gemäß Varianzkomponenten-Schätzung für unbekannte Mounting-Kalibrierung pro Block bzw. pro Streifen

Mounting pro	GNSS (Proj.zentren) [cm]	INS (Drehwinkel) [gon]
Block	(9, 12, 10)	(0.003, 0.003, 0.011)
Streifen	(4, 4, 4)	(0.001, 0.001, 0.005)

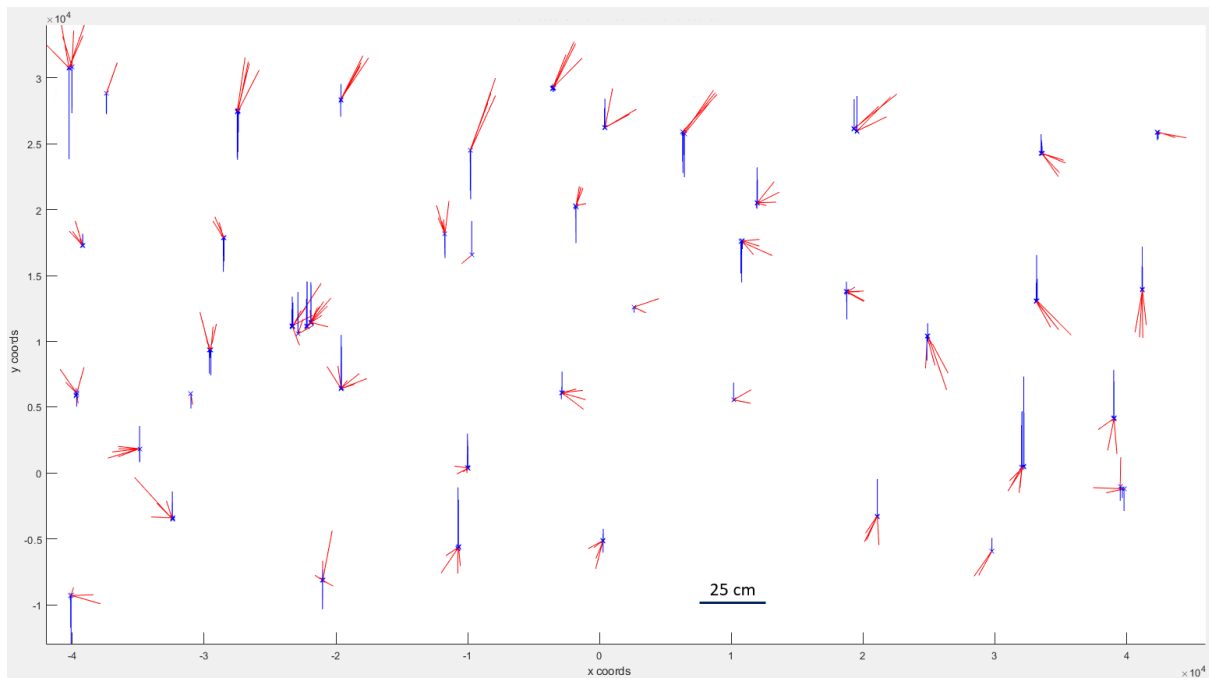


Abb. 8: Residuen an den Pass- und Kontrollpunkten (XY in rot, Z in blau) bei AT im Tangentialsystem der Variante „10 PPs, Streifen“ in Tab. 5

Tab. 5: Residuen der Pass- und Kontrollpunkte bei AT im Tangentialsystem unter Verwendung von Block- bzw. Streifen-Mountings mit 10 Passpunkten

[cm]		10 PPs, Block-Mounting			10 PPs, Streifen-Mounting		
		X	Y	Z	X	Y	Z
Passpunkte (n = 10)	min	-1	-8	-12	-9	-12	-10
	Mittelw.	12	2	0	0	0	0
	Median	13	3	1	2	-1	-1
	MAX	22	16	18	8	12	11
	RMS	15	7	10	6	7	6
Kontrollpunkte (n = 169)	min	-10	-21	-45	-14	-21	-35
	Mittelw.	6	8	2	2	3	1
	Median	5	9	2	3	3	2
	MAX	33	29	40	16	28	34
	RMS	10	12	14	7	10	11

5.2 Gauß-Krüger-Projektion mit ellipsoidischen Höhen

Um die AT in der Gauß-Krüger-Projektion korrekt durchführen zu können, sind (neben der Refraktionskorrektur) die Korrekturen wegen der Erdkrümmung und der Streckenverzerrung zu beachten. Tab. 6 (Spalte „Ref+EK+Tau“) enthält die sich dabei ergebende Residuen-Statistik. Wie der Vergleich mit der entsprechenden Variante im Tangential-System zeigt (Tab. 5, Spalte „10 PPs, Streifen-Mounting“), ergeben sich bei den Pass- und Kontrollpunkten defakto dieselben Residuen-Statistiken.

Um zu zeigen, wie wichtig die Beachtung dieser Korrekturen ist, enthält Tab. 5 auch die Residuen, die man erhält, wenn man jeweils eine der Korrekturen (Refraktion, Erdkrümmung, Streckenverzerrung) nicht beachtet. Bezogen auf den korrekten Zustand mit allen drei Korrekturen verschlechtert sich der Z-RMS der Kontrollpunkte bei Vernachlässigung der Refraktion um 1 cm, der Erdkrümmung um 17 cm und der Streckenverzerrung τ um 12 cm.

Das Verhältnis aller drei Korrekturen ist somit: Ref : Tau : EK = 1 : 12 : 17; bzw. nur auf die beiden Projektionskorrekturen bezogen: Tau : EK \approx 2 : 3.

Tab. 6: Residuen der Pass- und Kontrollpunkte bei der AT in GK mit ellipsoidischen Höhen unter Beachtung aller Korrekturen (EK + Tau + Ref) bzw. wenn jeweils eine Korrektur nicht angewendet wird. Ref = Refraktion, EK = Erdkrümmung, Tau = Streckenverzerrung

[cm]		Ref + EK + Tau			ohne Ref			ohne EK			ohne Tau		
		X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
Passpunkte (n = 10)	min	-9	-13	-8	-9	-15	-7	-9	-18	-17	-9	-11	-31
	Mittelw.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Median	2	-1	0	2	0	0	1	2	-9	3	-3	11
	MAX	8	11	6	9	12	9	8	23	40	5	13	25
	RMS	5	7	4	6	8	4	6	12	20	5	8	21
Kontrollpunkte (n = 169)	min	-15	-21	-38	-15	-20	-37	-16	-28	-46	-14	-20	-51
	Mittelw.	2	3	1	2	3	0	3	-1	4	3	4	6
	Median	2	3	0	2	3	-2	4	0	-2	4	4	10
	MAX	16	30	41	16	31	43	18	36	63	17	32	44
	RMS	6	10	11	6	11	12	7	10	28	7	11	23

5.3 Vergleich aller Gauß-Krüger-Varianten

Die Tab. 7 enthält die Residuen der Pass- und Kontrollpunkte für alle untersuchten Gauß-Krüger-Varianten. Man erkennt, dass alle Varianten bei den Kontrollpunkt-Residuen praktisch gleichwertig sind, wenn alle drei Korrekturen (Refraktion, Erdkrümmung, Streckenverzerrung) beachtet werden. Das gilt speziell auch für die Variante GK3, bei der das GIS-Grid eingesetzt und in Gebrauchshöhen gerechnet wird.

Tab. 7: Residuen der Pass- und Kontrollpunkte bei der AT in den verschiedenen GK-Varianten

[cm]		GK0: ellip. H.			GK1: orthom. H.			GK2: Gebrah.			GK3: GIS+Gebrah.		
		X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
Passpunkte (n = 10)	min	-9	-13	-8	-8	-12	-7	-8	-12	-7	-11	-14	-8
	Mittelw.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Median	2	-1	0	0	-1	1	0	-1	1	-2	0	1
	MAX	8	11	6	11	12	5	11	12	5	19	13	5
	RMS	5	7	4	6	8	4	6	8	4	10	9	4
Kontrollpunkte (n = 169)	min	-15	-21	-38	-17	-22	-34	-18	-22	-32	-25	-21	-34
	Mittelw.	2	3	1	2	4	1	2	4	1	2	3	1
	Median	2	3	0	2	4	1	2	4	1	2	2	1
	MAX	16	30	41	18	33	39	18	34	39	22	29	39
	RMS	6	10	11	7	12	11	7	12	11	8	11	11

5.4 Gauß-Krüger-Varianten ohne Berücksichtigung der Streckenverzerrung

Kapitel 5.2 hat gezeigt, dass der Effekt der Streckenverzerrung in diesem Datensatz ca. zwei Drittel der Erdkrümmung ausmacht. Aufgrund dessen, dass die Streckenverzerrung nicht in jeder kommerziellen Software beachtet wird, zeigt Tab. 8 die Residuen an den Kontrollpunkten, die man mit der Software Orient erhält, wenn die Streckenverzerrung (absichtlich) vernachlässigt wird (nur im System GK3, weil dieses System für das BEV am interessantesten ist (d.h. mit GIS-Grid und in Gebrauchshöhen)).

Tab. 8: Residuen der Pass- und Kontrollpunkte bei der AT mit Orient in GK3 (GIS-Grid, Gebrauchshöhen) aber ohne Beachtung von Tau, in verschiedenen Mounting-Varianten: oM (ohne unbekannte Mounting), BM (Block-Mounting), SM (Mounting pro Streifen), SM_7PPs (Mounting pro Streifen, aber 7 PPs im Tal)

[cm]		GK3 (ohne Tau): oM			GK3 (ohne Tau): BM			GK3 (ohne Tau): SM			GK3 (ohne Tau): SM 7PPs (*)		
		X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
Passpunkte (n = 10) (*n = 7)	min	-2	-4	-64	1	-6	-39	-10	-12	-30	-5	-5	-8
	Mittelw.	4	9	21	13	6	1	0	0	0	0	0	0
	Median	5	11	16	12	5	8	-1	-2	10	-1	0	2
	MAX	13	21	14	27	18	35	16	15	26	7	9	4
	RMS	6	13	33	16	9	25	8	9	21	4	5	4
Kontrollpunkte (n = 169) (*n = 172)	min	-13	-11	-85	-11	-12	-49	-23	-20	-48	-19	-18	-22
	Mittelw.	7	11	-32	7	10	7	3	3	6	8	6	39
	Median	7	11	-31	6	10	9	3	3	9	8	6	41
	MAX	24	35	14	38	29	56	23	31	41	30	34	73
	RMS	9	15	40	11	13	26	8	11	23	12	13	45

Man erkennt, dass im Vergleich zur Referenzlösung (GK3, mit Streckenverzerrung, mit Mounting pro Streifen; letzte Spalte in Tab. 7) der Z-RMS wegen der Vernachlässigung von Tau von 11 cm auf 23 cm steigt aber unbekannte Streifen-Mountings in der AT angesetzt werden.

Würden die GNSS-Projektionszentren ohne Verschiebung in der AT verwendet werden, dann beträgt der Z-RMS sogar 40 cm. Im Vergleich dazu kann der negative Effekt der nicht beachteten Streckenverzerrung zumindest zu einem kleinen Teil durch eine unbekannte Block-Mounting abgefedert werden (Z-RMS = 26 cm). Das ist wieder (wie im Tangentialsystem; Tab. 5) eine Unterschied von ca. 3 cm im Vergleich zur Variante mit Verschiebung pro Streifen (Z-RMS = 23 cm).

Wie viel vom Effekt der Streckenverzerrung durch unbekannte Block- oder Streifen-Mountings kompensiert werden kann, hängt aber auch von der Höhenverteilung der Passpunkte ab. Wählt man statt den bisher höhenmäßig gut verteilten 10 PPs nun 7 PPs in derselben Höhe im Tal, dann erhält man man an den Kontrollpunkten einen Z-RMS von 45 cm; vergl. Tab. 8 Spalte SV_7PPs. Während sonst auch die Residuen der Passpunkte groß sind, sind sie bei dieser höhenmäßig eingeschränkten Variante absolut unauffällig.

Alle bisherigen Ergebnisse (mit und ohne Beachtung der Streckenverzerrung) sind mit der TU-Wien Software Orient erhalten worden. Um diese den Ergebnissen einer kommerziellen Software gegenüberzustellen, werden Berechnungen mit Match-AT (als Teil des ApplicationsMasters) von Trimble/Inpho (in der Version 11.0.7) durchgeführt. Diese Version beachtet die Streckenverzerrung nicht. Im Unterschied zu Orient werden die INS-Beobachtungen der Drehwinkel hier nicht verwendet (weil Rotations-Misalignments in Match-AT nicht für jeden Streifen getrennt bestimmt werden – sondern nur einmal für den gesamten Block). Dafür werden aber alle Verknüpfungspunkte verwendet. Die folgenden Varianten werden mit Match-AT berechnet:

- **Eine unbekannte 3D-Verschiebung pro Streifen.** Damit ist zu erwarten, dass der mittlere Effekt der Streckenverzerrung kompensiert wird.
- **Shift-und-Drift-Ansatz.** Dieser Zugang bestimmt pro Streifen eine unbekannte 3D-Verschiebung (Shift) und zusätzlich eine lineare Änderung derselben (Drift).

- **Eine Anpassung der Kamerakonstante.** Wie in (RESSL 2001) ausgeführt, kann der Effekt der Streckenverzerrung τ durch Veränderung der Kamerakonstante von c in c_τ bei (exakten) Senkrechtaufnahmen (vollständig) kompensiert werden:

$$c_\tau = c/\tau \tag{1}$$

Bei kleineren Blockausdehnungen reicht es für alle Bilder in dieser Weise eine gemeinsame neue Kamerakonstante für alle Bilder zu bestimmen, wobei τ in der Blockmitte ermittelt wird (Problem P2 in Kapitel 2). Bei größeren Blöcken ist aber die Veränderung von τ vom westlichen zum östlichen Blockrand zu beachten (Problem P3). Beim vorliegenden Block ändert sich τ von 28 ppm auf 213 ppm (Abb. 2) deutlich. Deswegen werden die Bilder gemäß des Rechtswerts ihrer Projektionszentren in fünf Gruppen mit eigener neuer Kamerakonstante eingeteilt. Das Inpho-Projekt enthält dann fünf Kameras. Zusätzlich wird auch eine 3D-Verschiebung pro Streifen mitbestimmt.

- **Anpassung von Z_0 .** Alternativ kann der Effekt der Streckenverzerrung bei (exakten) Senkrechtaufnahmen über horizontalem Gelände durch folgende Änderung der Höhe des Projektionszentrums (Z_0) unter Beachtung der mittleren Geländehöhe Z_g kompensiert werden:

$$Z_{0,\tau} = Z_g + \tau \cdot (Z_0 - Z_g) \tag{2}$$

Diese Methode hat den Nachteil, dass sie nur für horizontales Gelände gilt, aber den Vorteil, dass die Blockgröße und somit Problem P3 in Kapitel 2 unerheblich ist, weil Z_0 für jedes Bild über das lokal wirksame τ korrigiert wird. Ein ähnliche Methode wird in (LEGAT 2006) vorgeschlagen. Zusätzlich wird auch wieder eine 3D-Verschiebung pro Streifen mitbestimmt.

Tab. 9: Residuen der Pass- und Kontrollpunkte nach der AT in Match-AT (Version 11.0.7, somit ohne Streckenverzerrung) in GK3 (GIS-Grid, Gebrauchshöhen) in den folgenden Varianten: SV (3D-Verschiebung pro Streifen), SD (Shift-und-Drift), c_τ +SV (Tau-Anpassung in c und 3D-Verschiebung pro Streifen), $Z_{0,\tau}$ +SV (Tau-Anpassung in Z_0 und 3D-Verschiebung pro Streifen)

[cm]		GK3 (MAT11): SV			GK3 (MAT11): SD			GK3 (MAT11): c_τ +SV			GK3 (MAT11): $Z_{0,\tau}$ +SV		
		X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
Passpunkte (n = 10)	min	-14	-14	-37	-10	-28	-15	-14	-15	-9	17	15	7
	Mittelw.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Median	2	3	10	-1	6	1	0	3	0	-1	3	-2
	MAX	11	11	33	13	13	16	12	13	10	17	14	12
	RMS	9	10	26	6	12	11	9	11	6	11	11	6
Kontrollpunkte (n = 169)	min	-28	-25	-56	-24	-24	-65	-29	-27	-34	-32	-26	-35
	Mittelw.	2	1	4	0	2	7	3	1	-1	0	1	-1
	Median	3	1	5	1	1	9	3	0	-3	1	1	-4
	MAX	25	28	50	25	33	53	27	28	36	26	27	31
	RMS	10	11	27	8	12	20	10	11	14	10	11	15

Man erkennt, dass speziell die beiden Lösungen c_τ +SV und $Z_{0,\tau}$ +SV, bei denen Tau durch den Anwender eingebracht wird, den optimalen Kontroll-RMS-Werten (8, 11, 11) [cm] von GK3 in Tab. 7 (letzte Spalte) recht nahe kommen. Greift der Anwender auf die recht einfache Shift-und-Drift Methode zurück, dann verschlechtert sich der Z-RMS grob auf das Doppelte.

Nach Beendigung des Projekts *evalAT* (im Frühjahr 2024) erschien im Herbst 2024 mit der Version 15 eine Variante des ApplicationsMaster, die lt. Manual neben Refraktion und

Erdkrümmung auch „Effekte der Kartenprojektion“ korrigiert (Einstellung *correction model precise*). Mit dieser Version wurden nun nachträglich noch Berechnungen durchgeführt (Tab. 10).

Tab. 10: Residuen der Pass- und Kontrollpunkte nach der AT in Match-AT (Version 15.0.4, Einstellung *correction model precise* mit EPSG 31255), in GK3 (GIS-Grid, Gebrauchshöhen) in den folgenden Varianten: 3x3 VKN (gleiche reduzierte Verknüpfersanzahl wie in Orient), mit allen Verknüpfern, mit allen Verknüpfern und Mitverwendung eines Geoids

[cm]		GK3 (MAT15): 3x3 VKN			GK3 (MAT15): alle VKN			GK3 (MAT15): alle VKN mit Geoid		
		X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
Passpunkte (n = 10)	min	-16	-14	-13	-18	-20	-11	-20	-16	-8
	Mittelw.	-1	-3	-4	-2	-1	-3	-2	-1	-3
	Median	-4	-3	-5	1	0	-6	-1	-1	-5
	MAX	18	12	8	11	20	11	12	15	8
	RMS	11	9	7	11	13	7	12	11	6
Kontrollpunkte (n = 169)	min	-30	-26	-44	-33	-31	-43	-34	-27	-45
	Mittelw.	0	0	-8	0	-2	-7	-1	-1	-7
	Median	0	0	-9	-1	-2	-8	0	0	-7
	MAX	23	28	24	27	24	29	26	26	29
	RMS	10	11	16	10	11	16	10	11	15

Die Ergebnisse mit Version 15 zeigen, dass mit dem *correction model precise* Kontrollpunkt-RMS-Werte erhalten werden, die sehr nahe bei den RMS-Werten der Variante $Z_{0\tau}+SV$ von Version 11 (Tab. 9, letzte Spalte) liegen.

Die Version 15 erlaubt auch ein Geoid beim Projekt-Setup zu definieren (dritte Spalte in Tab. 10). Vermutlich werden damit Korrekturen bzw. Berechnungen in Ellipsoidhöhen realisiert. Dies würde somit nicht mehr streng einer Berechnung im System GK3 (GIS-Grid, Gebrauchshöhen) entsprechen. Der Effekt dieses Geoids ist hier aber ohnehin marginal.

Weiters zeigt sich, dass die Reduktion der Anzahl der Verknüpfungspunkte von ca. 228k auf 7k in Match-AT keinen nennenswerten Unterschied macht und somit auch im Zuge der Orient-Untersuchungen zulässig gewesen ist.

6 Zusammenfassung

Beim Projekt *evalAT*, das BEV und TU Wien gemeinsam durchgeführt haben, wurde anhand eines GNSS-INS-gestützten Luftbildblocks von 4342 Senkrechtaufnahmen in 22 Längs- und 5 Querstreifen die Qualität der Aerotriangulation (AT) in der Kartenprojektion untersucht – in einem alpinen Gebiet (Höhenbereich 586 m – 2003 m). Grundsätzlich ermöglicht die AT in der Kartenprojektion dieselben Genauigkeiten wie die AT in einem unverzerrten System (Tangentialsystem). An den vom BEV mit GNSS gemessenen und verwendeten 169 Kontrollpunkten ergeben sich im Tangentialsystem für (X, Y, Z) RMS-Werte von (7, 10, 11) cm. In Anbetracht der Bodenpixelgröße von 20 cm und einer geschätzten Bildmessgenauigkeit von 0.2 Pixel, wird das photogrammetrische Genauigkeitspotenzial nicht vollständig ausgeschöpft, was auf verbliebene Restsystematiken (vermutlich in den GNSS-Kontrollmessungen) hinweist.

In der originalen Gauß-Krüger-Projektion (d.h. mit ellipsoidischen Höhen und ohne GIS-Grid) ergeben sich diese Werte zu (6, 10, 11) cm. Die AT im Gebrauchssystem der Österreichischen

Landessystem, das aus der originalen Gauß-Krüger-Projektion durch Anwendung von Höhen- und GIS-Grid resultiert, verschlechtert diese Werte nur gering auf (8, 11, 11) cm.

Voraussetzung, um in der Kartenprojektion diese Genauigkeiten erreichen zu können, ist die Beachtung der Erdkrümmung und der Streckenverzerrung, welche in diesem Datensatz ca. 2/3 des Effekts der Erdkrümmung ausmacht. Beachtet man die Streckenverzerrung nicht, so verschlechtert sich der Z-RMS-Wert in Abhängigkeit von der Höhenverteilung der Passpunkte von 11 cm auf 23 cm (im hier betrachteten „günstigen“ Fall) oder sogar auf 45 cm (im „ungünstigen“ Fall, dass alle Passpunkte im selben (Tal-)Niveau liegen).

In AT-Programmen, die die Streckenverzerrung nicht beachten, kann man durch Anpassung der Höhen der Projektionszentren oder der Kamerakonstante vor der AT das Problem zu einem Teil beheben und RMS-Werte von ca. (10, 11, 15) cm erhalten. Auf Basis der Projektergebnisse konnten die Spezifikationen für den AT-Prozess sowie für Pass- und Kontrollpunkte im BEV bereits verbessert werden.

Zukünftige Arbeiten sollten sich auf den nachteiligen Effekt von Höhen- und GIS-Grid konzentrieren. Da deren Auswirkung an anderen Orten in Österreich eine größere Streuung als im betrachteten Datensatz aufweist (siehe Abb. 4 und Abb. 5), kann man vermuten, dass die freien äußeren Orientierungen an diesen Orten weniger Anteile dieser Grids kompensieren als im betrachteten Datensatz. Ein weiteres Untersuchungsthema stellt die korrekte Behandlung der Erdkrümmung und der Streckenverzerrung im Kontext von Schrägaufnahmen dar.

7 Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei der Firma Trimble für die freundliche Bereitstellung einer Testlizenz für den ApplicationsMaster Version 15.

8 Literaturverzeichnis

- BEV, 2025a: Homepage der Abteilung *Fernerkundung* mit Beschreibung des Aufgabenbereichs, <https://www.bev.gv.at/Themen/Fernerkundung.html>, letzter Zugriff 09.04.2025.
- BEV, 2025b: Beschreibung des BEV-Produkts *GIS-Grid*, <https://www.bev.gv.at/Services/Produkte/Grundlagenvermessung/GIS-Grid.html>, letzter Zugriff 09.04.2025.
- BEV, 2025c: Beschreibung des BEV-Produkts *Höhen-Grid plus Geoid*, <https://www.bev.gv.at/Services/Produkte/Grundlagenvermessung/Hoehen-Grid-plus-Geoid.html>, letzter Zugriff 09.04.2025.
- BEV, 2025d: Beschreibung des BEV-Produkts *Transformationsparameter*, <https://www.bev.gv.at/Services/Produkte/Grundlagenvermessung/Transformationsparameter.html>, letzter Zugriff 09.04.2025.
- HEIPKE, C., JACOBSEN, K., WEGMANN, H., ANDERSEN, Ø. & NILSEN JR., B., 2002: Test goals and test set up for the OEEPE test „Integrated Sensor Orientation“. OEEPE Official Publication No. 43 "Integrated Sensor Orientation Test Report and Workshop Proceedings", 11-18.
- JACOBSEN, K., 2002: Transformations And Computation Of Orientation Data In Different Coordinate Systems. OEEPE Official Publication No. 43 "Integrated Sensor Orientation Test Report and Workshop Proceedings", 179-186.

- KAGER, H., 1989: ORIENT: A Universal Photogrammetric Adjustment System. Optical 3-D Measurement Techniques, Grün/Kahmen (Hrsg.), Wichman Verlag, 447-455.
- KRAUS, K., 1996: Photogrammetrie Band 2 – Verfeinerte Methoden und Anwendungen. Verlag Dümmler.
- KRAUS, K., 2004: Photogrammetrie Band 1 – Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen. 7. Auflage, Verlag Walter de Gruyter.
- LEGAT, K., 2006: Approximate Direct Georeferencing in National Coordinates. ISPRS J. Photogram. Rem. Sens. **60** (4), 239–255.
- RESSL, C., 2001: Direkte Georeferenzierung von Luftbildern in konformen Kartenabbildungen. VGI – Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation **89** (2), 72–82.