

Genauigkeit der photogrammetrischen Vermessung bei DJI

1. Zielsetzung

In der ingenieurgeodätischen Praxis spielt die Genauigkeit photogrammetrisch erfasster Punktwolken eine zentrale Rolle. Ziel dieses Projekts war es, die Leistungsfähigkeit und Genauigkeit verschiedener Drohnenmodelle bei der Erstellung von 3D-Punktwolken zu untersuchen. Im Fokus standen sowohl Unterschiede durch Kamertechnologie (Global vs. Rolling Shutter) als auch durch das Vorhandensein oder Fehlen eines RTK-Moduls. Auch verschiedene Aufnahmetechniken wurden ausprobiert.

Technischer Hintergrund: Shutter-Arten

- Rolling Shutter (M3T, M4T): Die Bildsensoren lesen zeilenweise aus, wodurch bei Bewegung Verzerrungen auftreten können. Besonders kritisch bei schnellen Flügen – dies führt zu Ungenauigkeiten in der Punktwolke.
- Global Shutter (M3E, M4E): Der Sensor belichtet das gesamte Bildfeld gleichzeitig, wodurch Verzerrungen weitgehend vermieden werden. Dies ist insbesondere bei der photogrammetrischen Vermessung von Vorteil.

2. Testablauf

Die Erhebung zum Vergleich Global/Rolling Shutter fand an vier verschiedenen Tagen statt. Für jedes Modell wurden jeweils vier Flüge mit variierender Flughöhe (20 m und 40 m) und Fluggeschwindigkeit durchgeführt – jeweils minimal (ca. 0,5 m/s) und maximal (> 6 m/s). Dabei wurden Messpunkte auf vier unterschiedlich orientierten Strecken (in x- und y-Richtung) erfasst. Geflogen wurde ausschließlich im Nadir-Modus (senkrecht nach unten).

Die Berechnung der Strecken wurde mit 3D-Survey durchgeführt, die Ergebnisse deckten sich 1 zu 1 mit Messergebnissen in DJI Terra.

Um weitere Erkenntnisse zu Erlangen wurden im Nachgang weitere Versuche durchgeführt und die Messgenauigkeit bestimmt:

- Flug mit bzw. ohne RTK
Um den Einfluss der RTK Daten zu untersuchen wurde mit der M4T ein Flug mit aktivem RTK geflogen und ein Flug ohne RTK (Internetverbindung deaktiviert)

- Flug mit Rolling Shutter bzw Global Shutter:
Um den Unterschied zwischen Rolling und Global Shutter Anwendungsbezogenen zu testen, wurde jeweils ein Flug mit der M3T (Rolling Shutter) und M3E (Global Shutter) durchgeführt. Die Fluggeschwindigkeit betrug 2m/s, die Flughöhe 20m AGL. RTK aktiv.
- Flugplanungen: Ein weiterer Faktor, welcher Einfluss auf die Modellqualität hat, ist das Flugmuster, bzw. Aufnahmeart. Hier wurden verschiedene Varianten ausgetestet:

POI-Flug: Drohne umkreist das Objekt, während sie diesen im Fokus behält

Geneigte Kamera: Hier wurde die Kamera von 90°(senkrecht) auf 75° gestellt. Es wurde jew mit folgenden Modellen geflogen: M3E, M4E, M4T: 20m, 40m; 0,5m/s, max speed. Die Ergebnisse werden mit denselben Parametern aus den 90°-Flügen gegenüberstellt

Oblique-5 Seiten-Flug: Um ein besseres Ergebnis zu erzielen, wurde versucht auf den 4 Seiten des Gebäudes schrägaufnahmen zu erstellen, sowie Aufnahmen von oben für die Überschneidung.

Zeitintervall vs. Distanzintervall: In den Einstellungen kann die Aufnahmeart Distanzintervall oder Zeitintervall gewählt werden. Um zu untersuchen, ob dies eine spürbare Auswirkung auf die Messergebnisse hat, wurde hier jeweils ein Flug mit der M4T in 20m Höhe AGL und 2m/s durchgeführt.

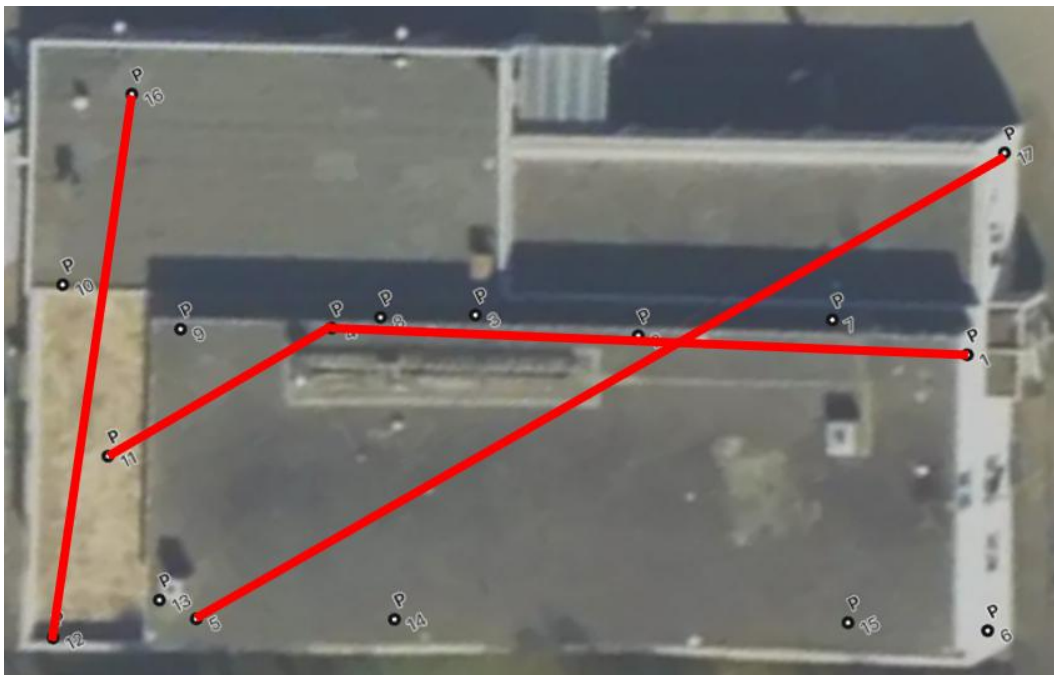
Smart 3D Capture-Modus: Mithilfe des Smart-3D-Modus kann ein umfassenderes Gebäudemodell erstellt werden, indem aus mehr Winkeln im gleichen Abstand zum Objekt aufgenommen wird. Hier betrug der Abstand 12m.

- Genauigkeit der Mini3Pro
Bei der Mini3Pro handelt es sich um eine Drohne aus dem Consumer-Bereich. Diese verfügt über einen Rolling Shutter und hat kein RTK Modul.

Vergleichsstrecken*

[m]	Slope Distance	2D Distance	Height difference
P1, P4	29,144	29,144	0,008
P12, P16	25,48	25,479	0,268
P5, P17	42,997	42,883	3,137
P4, P11	12,392	11,900	3,457

*(Abgemessen mit GNSS-System: Reach RS3, Messgenauigkeit SAPOS 1-2cm)



3. Getestete Drohnenmodelle

Modell	RTK-Modul	Shutter	Modelljahr
M3T	Hier nicht angebaut	Rolling	2022
M3E	Ja, Zulieferer	Global	2022
M4T	JA, DJI	Rolling	2025
M4E	Ja, DJI	Global	2025

4. Ergebnisse

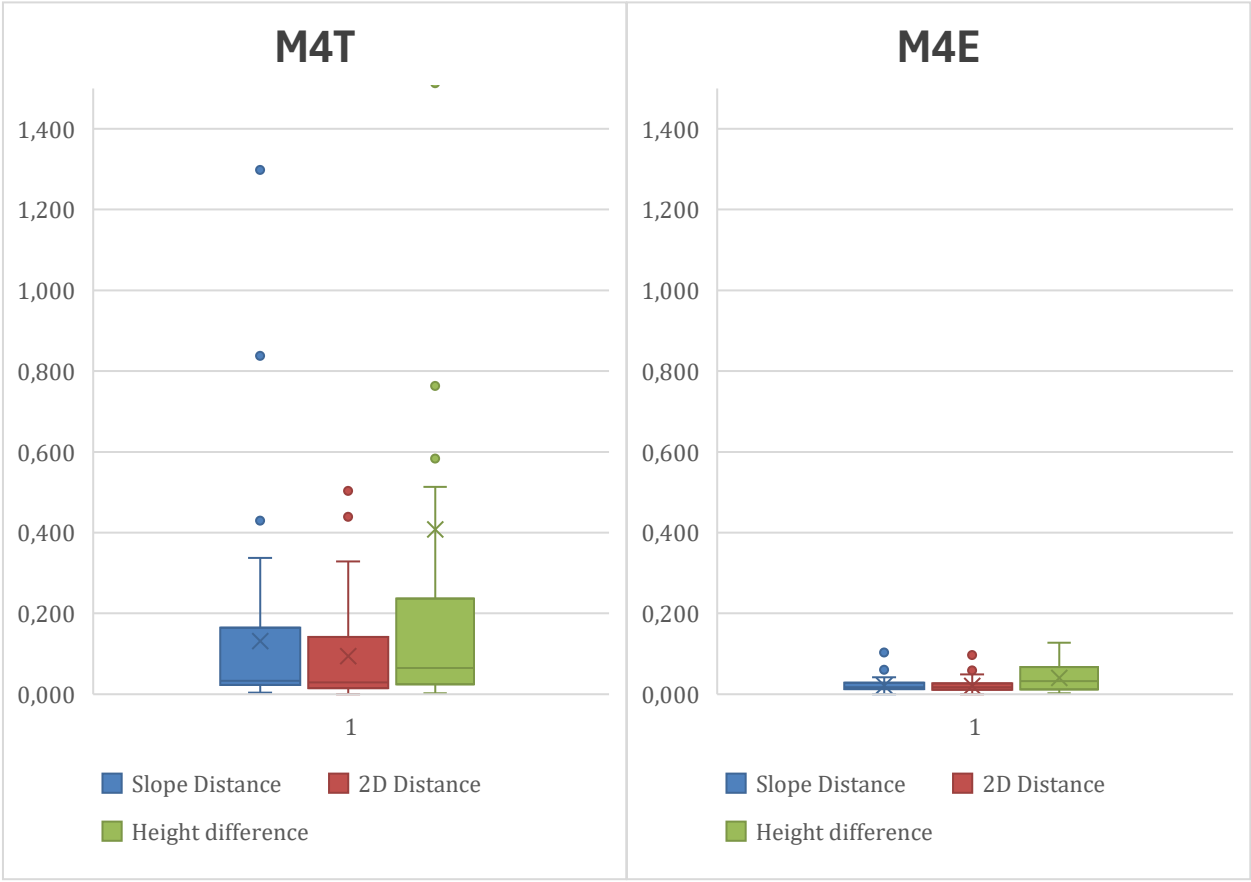
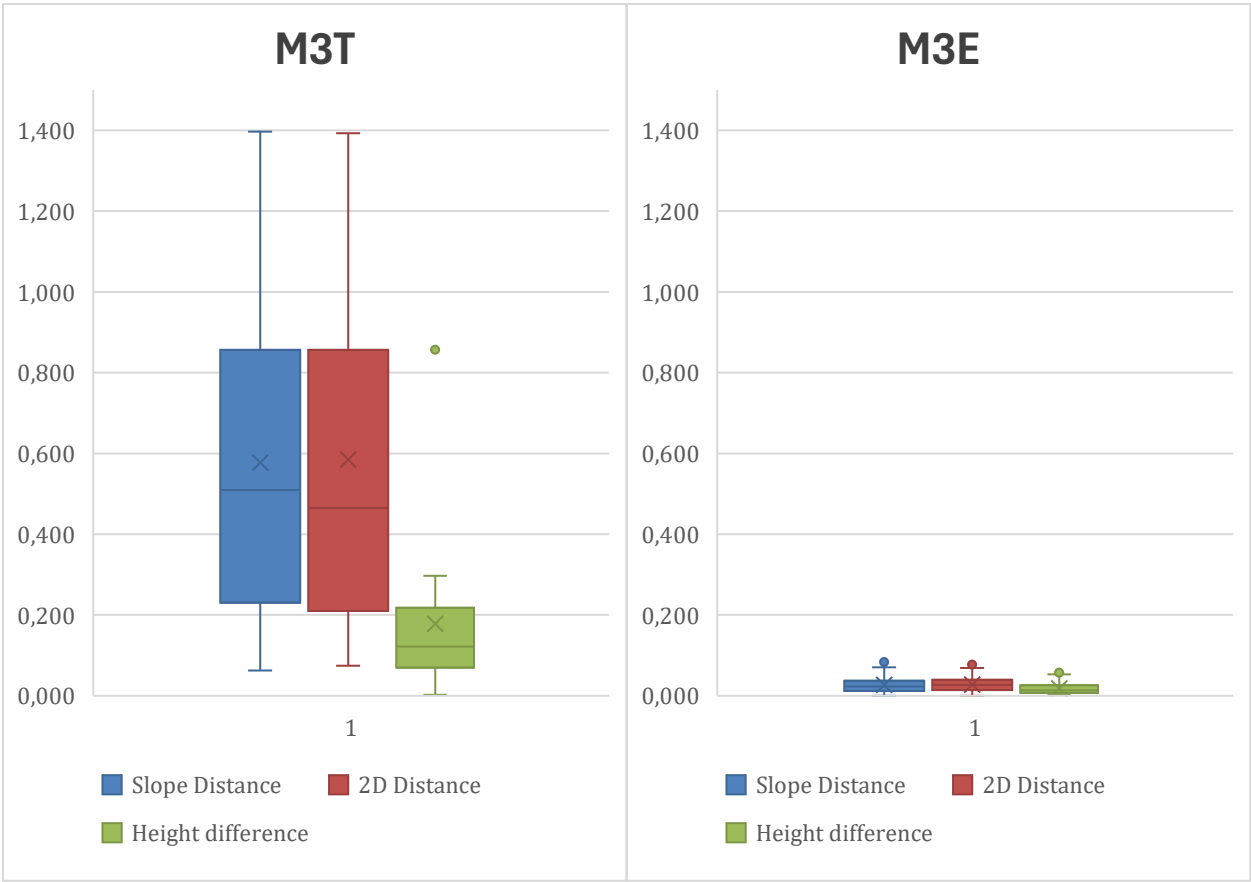
Die Abweichungen wurden für jede Drohne hinsichtlich Schrägdistanzen, 2D-Distanzen sowie Höhenunterschiede ermittelt. Die Ergebniss stellen sich wie folgt dar.

Abweichungen (arithm. Mittelw.)

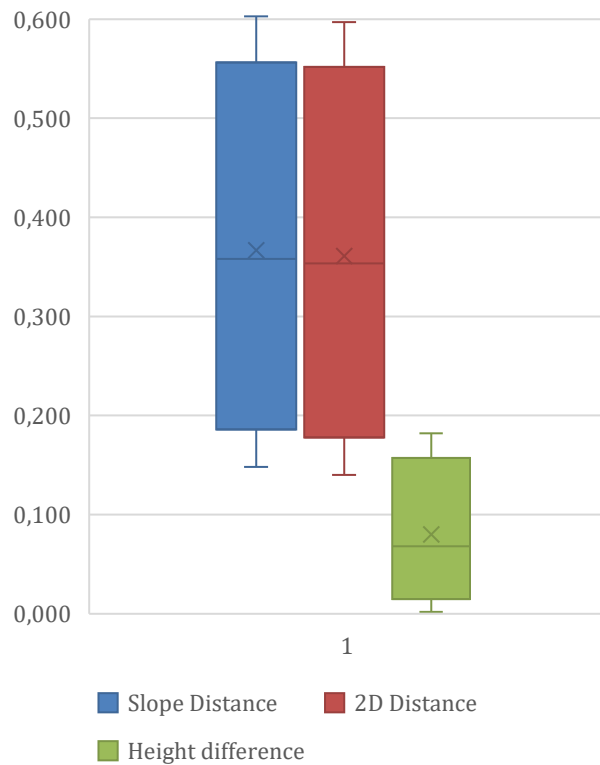
[m]	Slope Distance	2D Distance	Height difference
M3T	0,577	0,585	0,178
M3E	0,027	0,028	0,018
M4T	0,131	0,094	0,408
M4E	0,021	0,020	0,040

Abweichungen (arithm. Mittelw.)

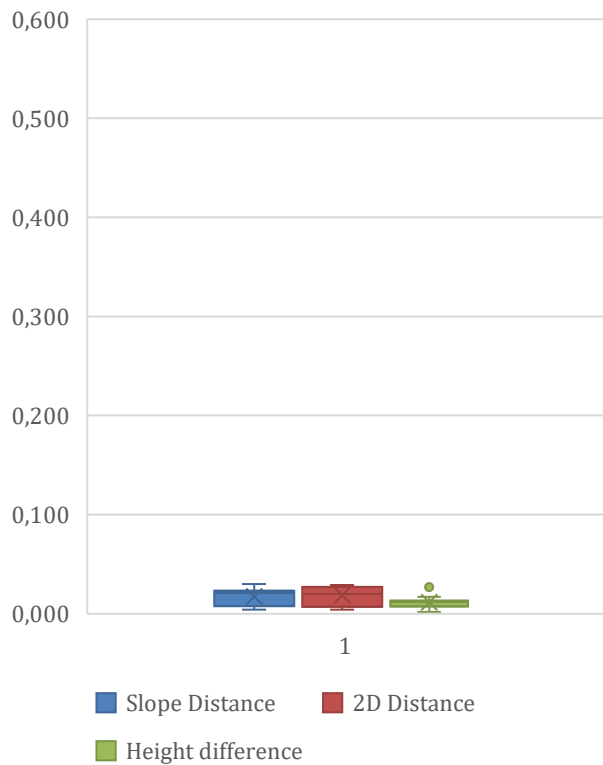
[%]	Slope Distance	2D Distance	Height difference
M3T	2,099	2,137	10,364
M3E	0,097	0,101	1,026
M4T	0,476	0,345	23,770
M4E	0,076	0,074	2,353



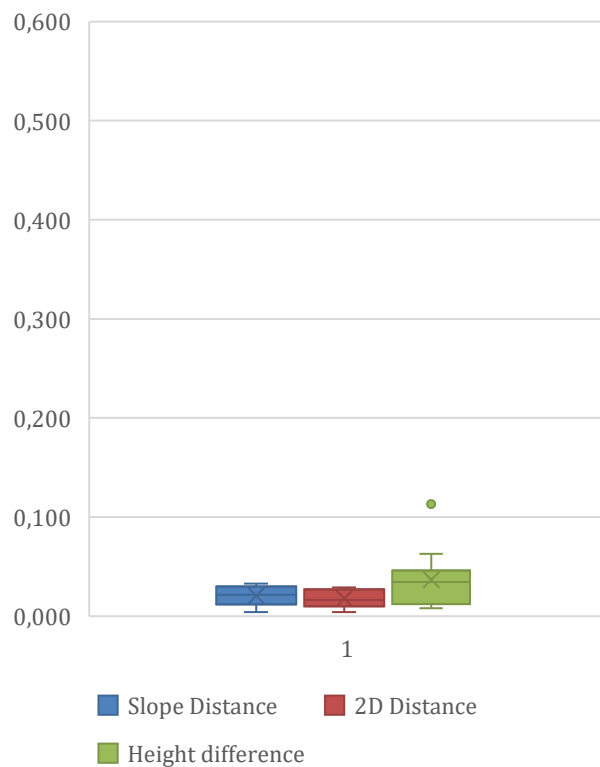
M3T 20m AGL 0.5m/s



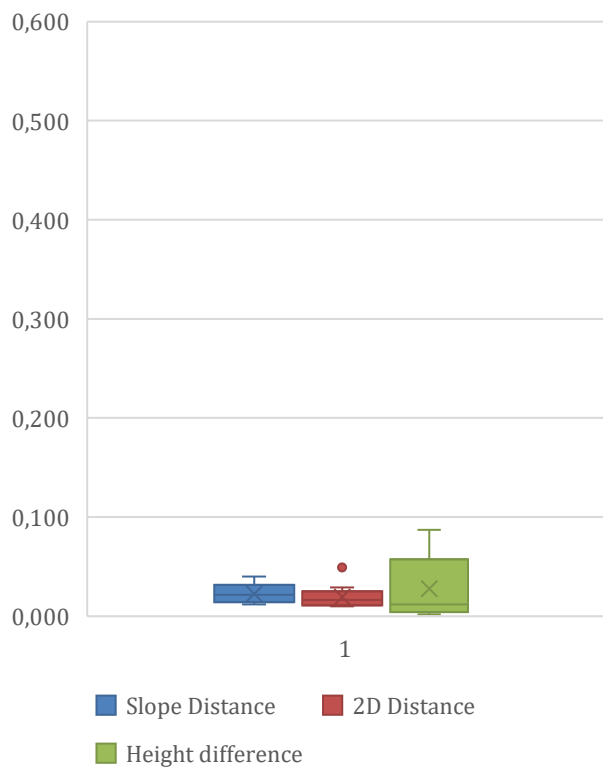
M3E 20m AGL 0.5m/s



M4T 20m AGL 0.5m/s

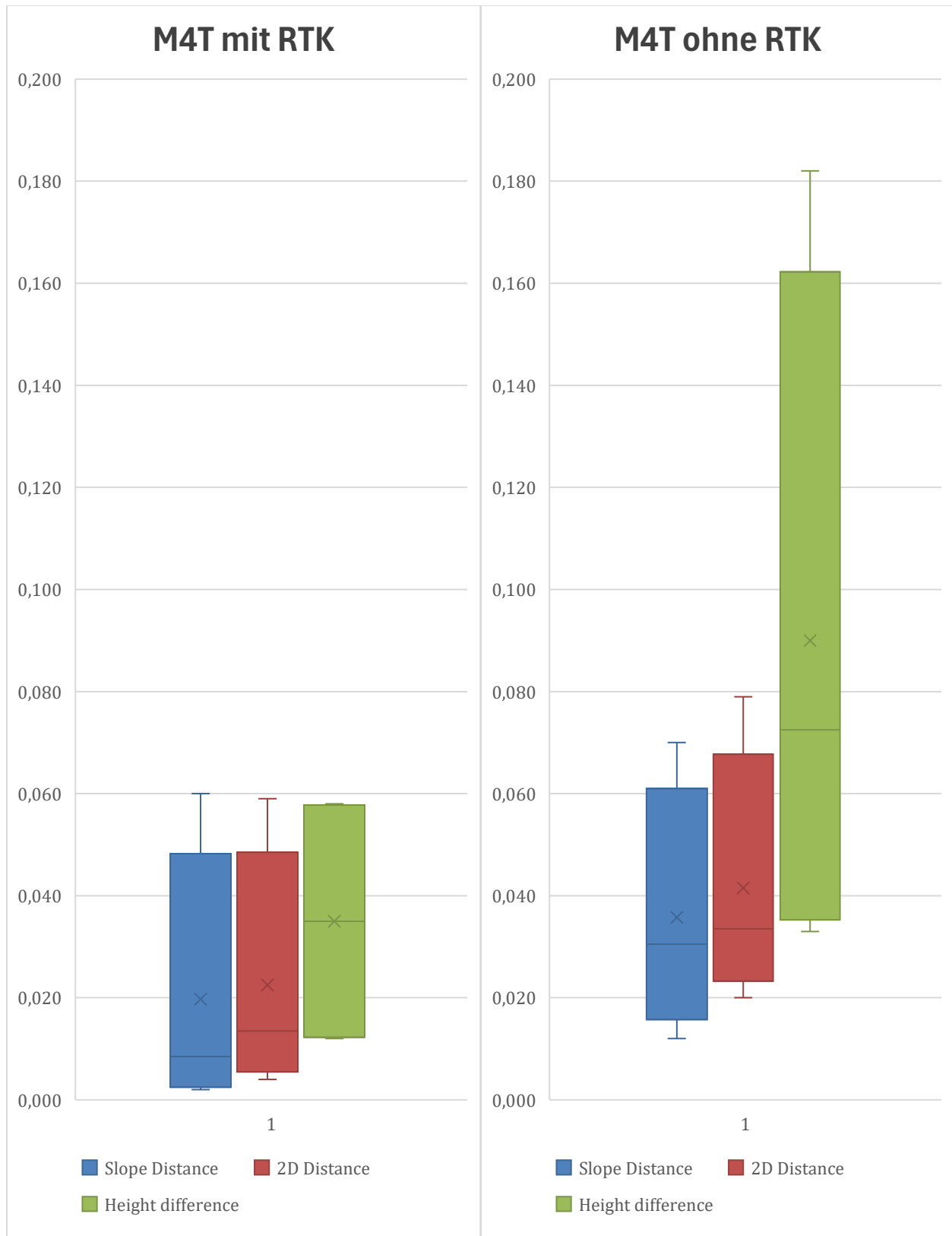


M4E 20m AGL 0.5m/s

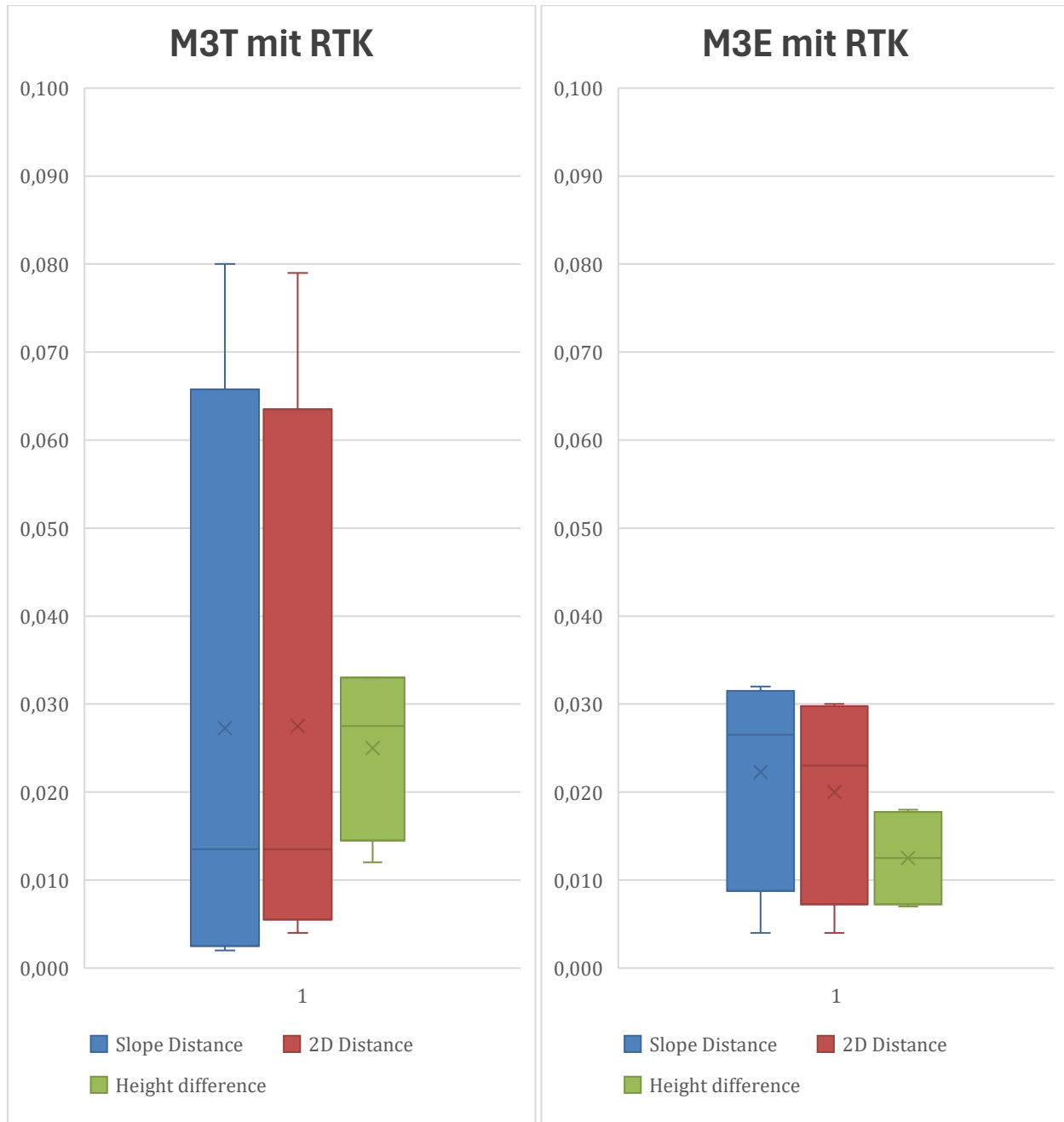


Ergebnisse der weiteren Versuche:

Einfluss RTK



Einfluss Rolling vs. Global Shutter



Abweichungen (arithm. Mittelw.)

[m]	Slope Distance	2D Distance	Height difference
M3T	0,027	0,027	0,025
M3E	0,022	0,020	0,013

Abweichungen (arithm. Mittelw.)

[%]	Slope Distance	2D Distance	Height difference
M3T	0,099	0,101	1,456
M3E	0,080	0,073	0,379

Einfluss Flugplanung

Ein weiterer Faktor, welcher Einfluss auf die Modellqualität hat, ist das Flugmuster, bzw. Aufnahmeart. Hier wurden verschiedene Varianten ausgetestet:

a. POI – FLUG 40m AGL

Abweichungen (arithm. Mittelw.)

[m]	Slope Distance	2D Distance	Height difference
M4T	1,143	1,132	0,134

Abweichungen (arithm. Mittelw.)

[%]	Slope Distance	2D Distance	Height difference
M4T	4,157	4,137	7,773

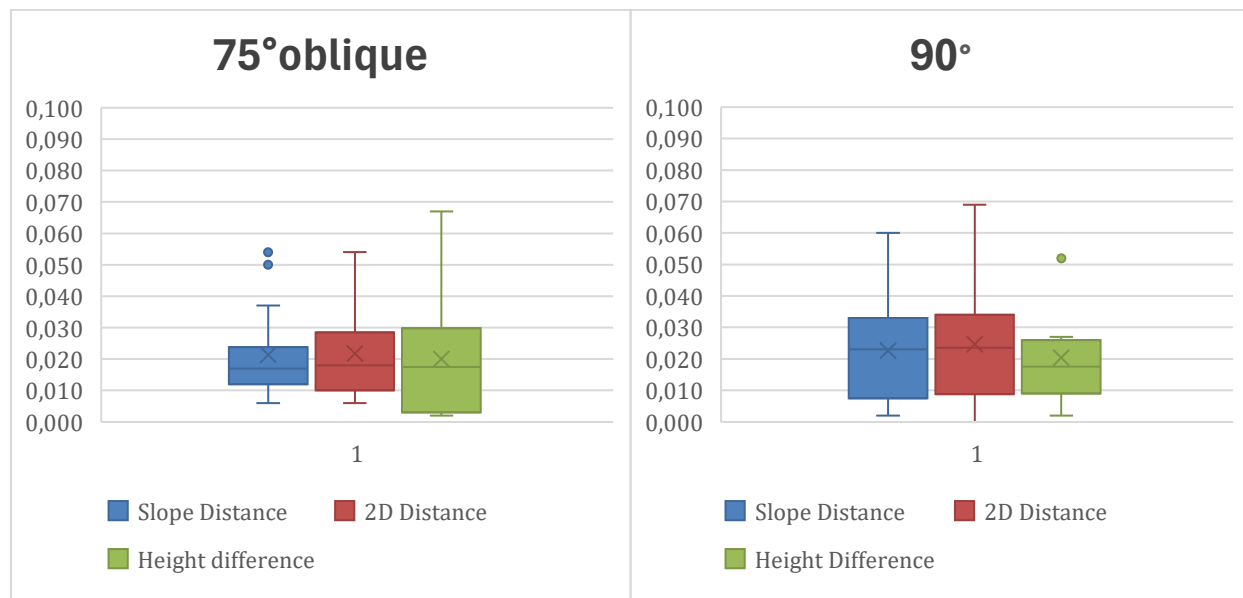
b. Flug mit geneigter Kamera 75°

Abweichungen (arithm. Mittelw.)

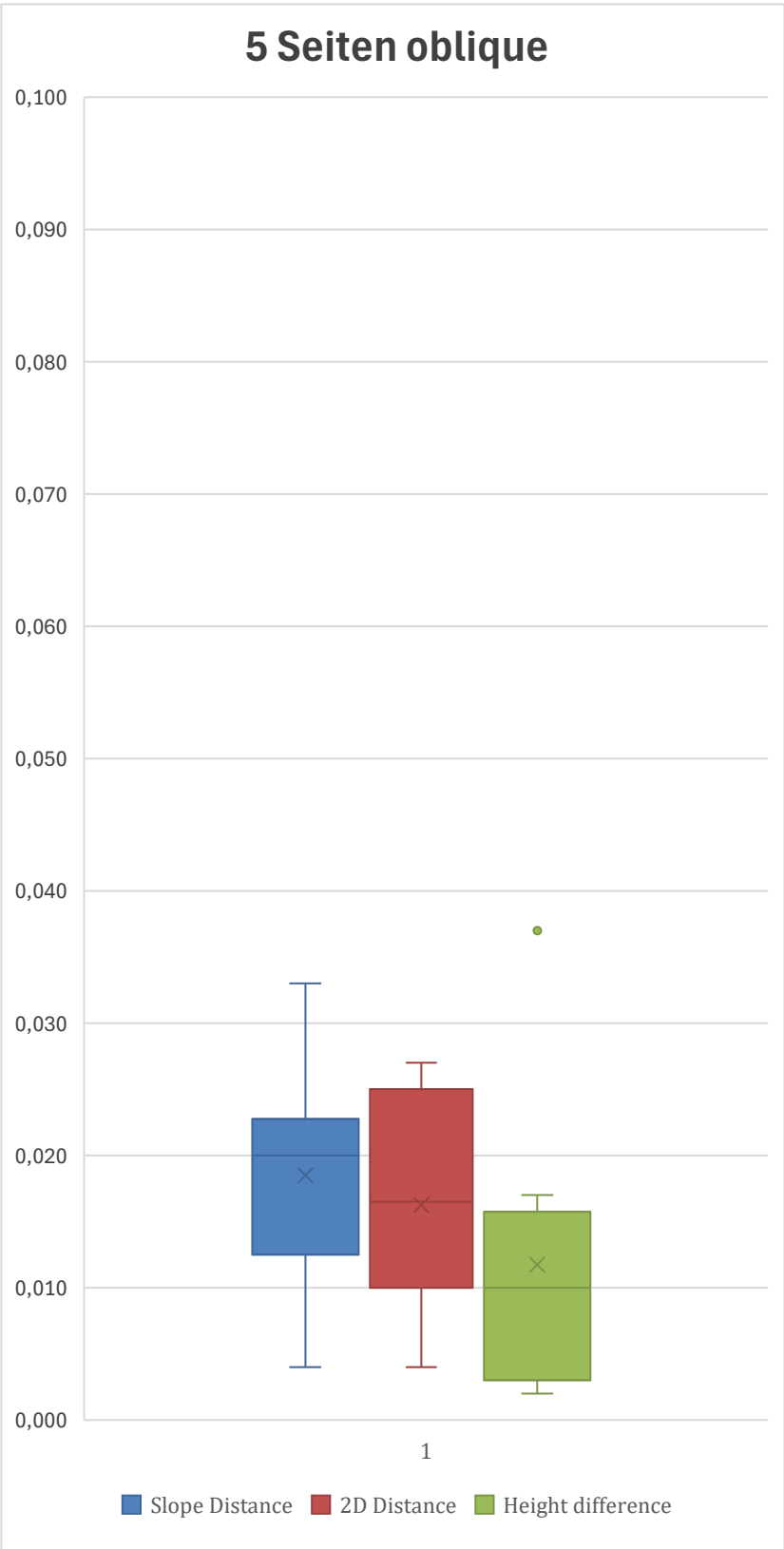
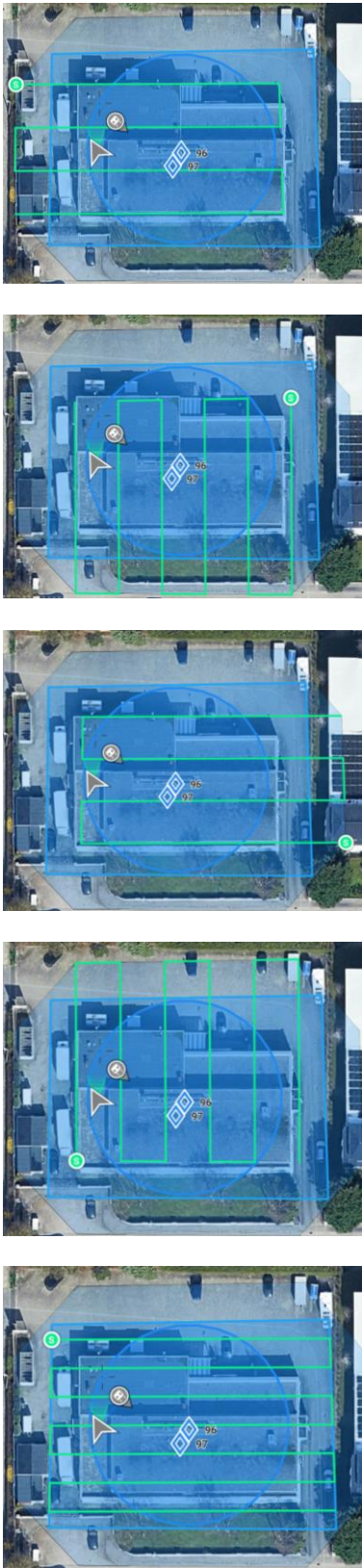
[m]	Slope Distance	2D Distance	Height difference
M3T	0,182	0,224	0,128
M3E	0,021	0,022	0,020
M4T	0,086	0,094	0,064
M4E	0,017	0,015	0,041

Abweichungen (arithm. Mittelw.)

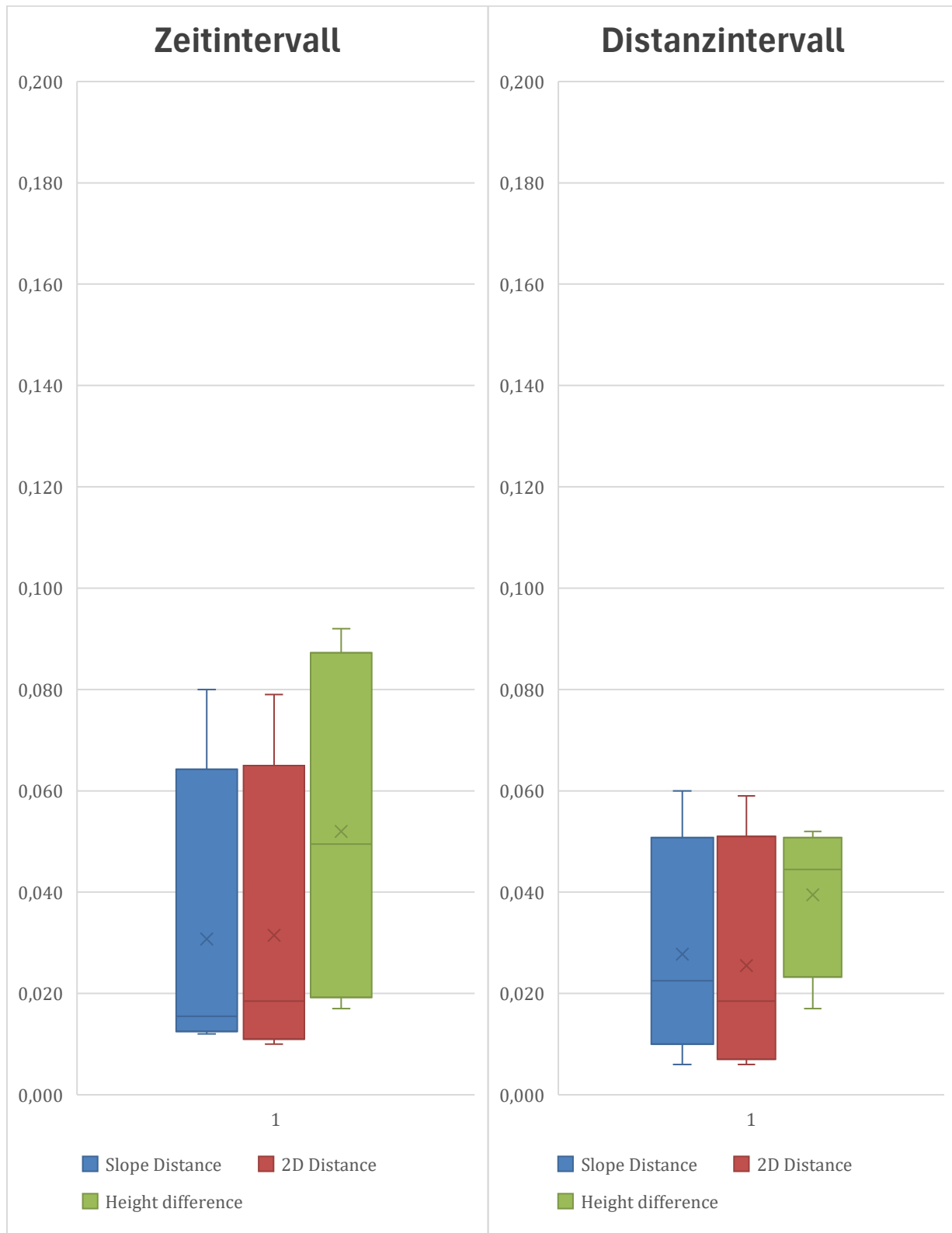
[%]	Slope Distance	2D Distance	Height difference
M3T	0,660	0,818	7,475
M3E	0,078	0,080	1,164
M4T	0,313	0,344	3,741
M4E	0,061	0,056	2,402



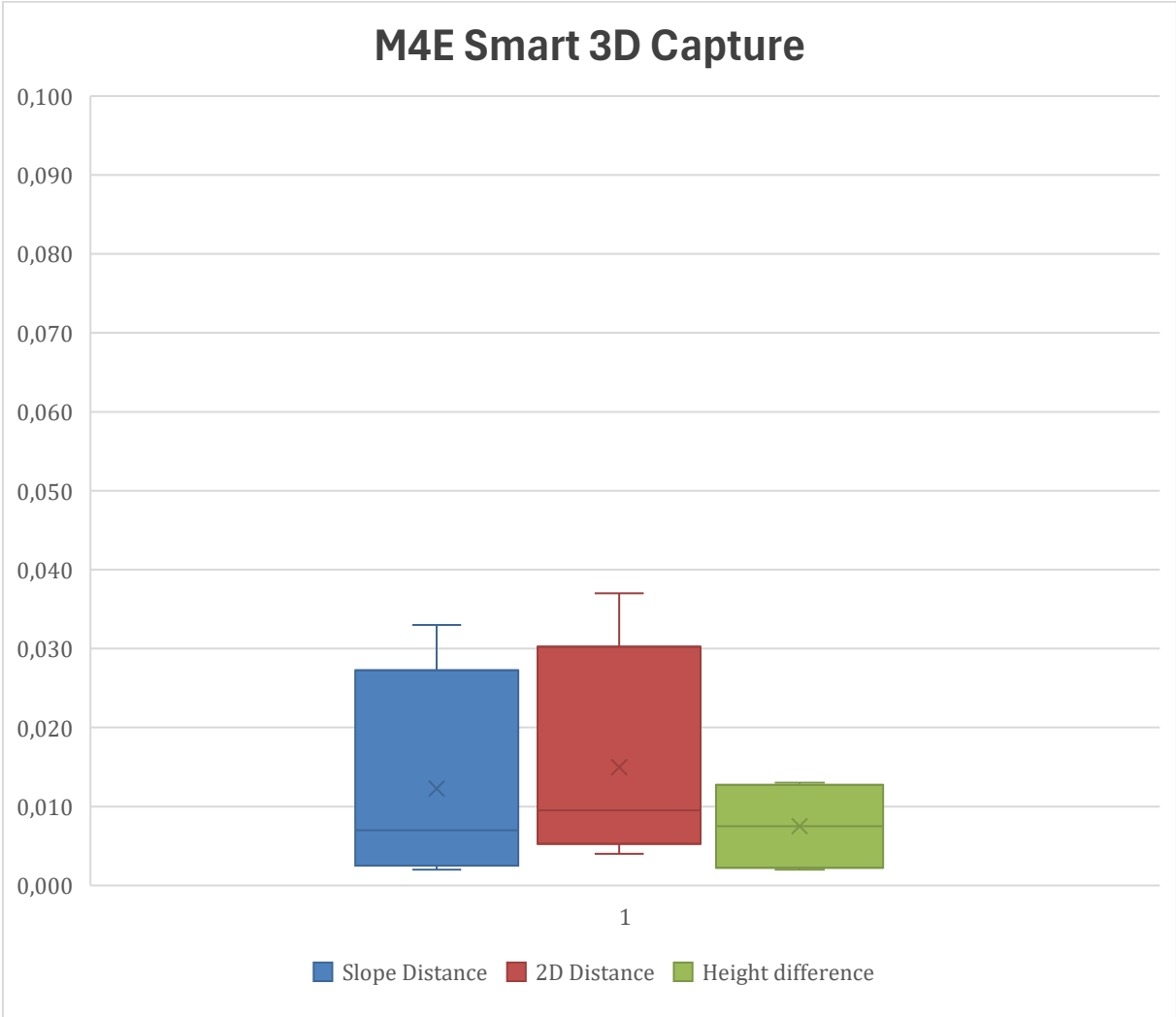
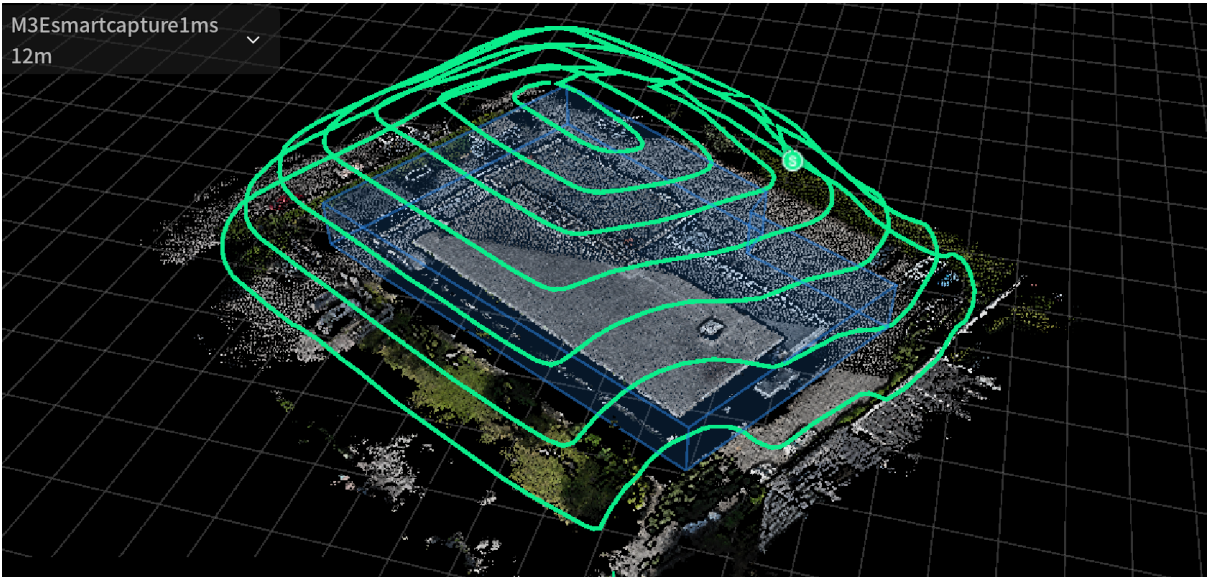
c. Flug mit dem oblique-Modus von fünf Seiten:



d. Umstellung der Bildaufnahme von Zeitintervall auf Distanzintervall



e. Smart 3D Capture-Modus



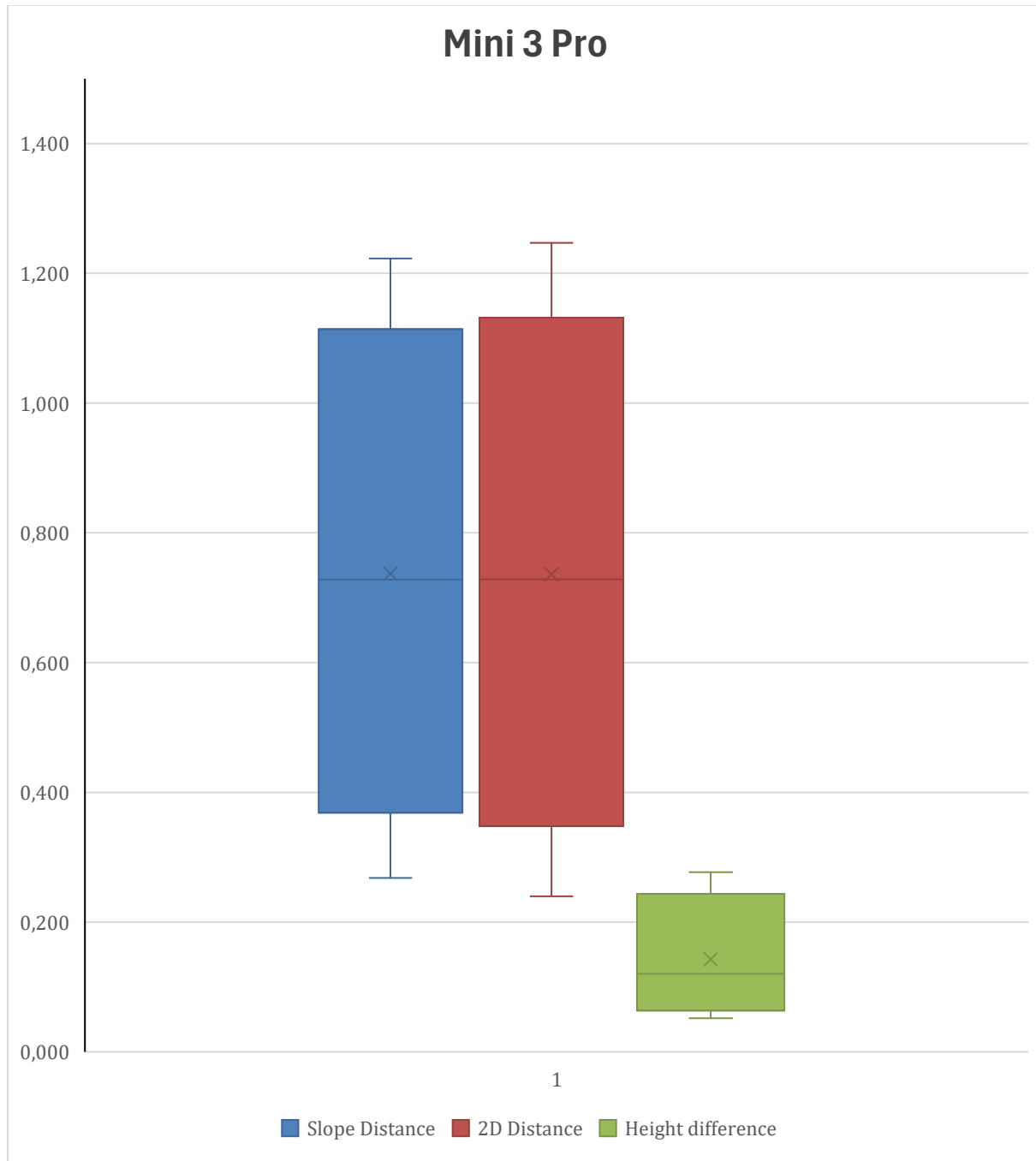
Genauigkeit der Mini 3 Pro

Abweichungen (arithm. Mittelw.)

[m]	Slope Distance	2D Distance	Height difference
Mini 3 Pro	0,737	0,736	0,143

Abweichungen (arithm. Mittelw.)

[%]	Slope Distance	2D Distance	Height difference
Mini 3 Pro	2,679	2,691	8,297



5. Interpretation und Empfehlungen

Die Auswertung der Punktwolkendaten zeigt deutlich, dass sowohl der verbaute Shutter-Typ als auch die RTK-Funktionalität entscheidend zur Qualität der Messergebnisse beitragen. Besonders auffällig sind die Unterschiede in der Messgenauigkeit zwischen Rolling- und Global-Shutter-Drohnen, sowie zwischen RTK-unterstützten und nicht-unterstützten Geräten.

Einfluss des Shutter-Typs

Rolling-Shutter-Kameras (wie in der M3T und M4T) zeigen bei der Vermessung erhebliche Nachteile gegenüber Global-Shutter-Systemen (M3E und M4E). Der Rolling Shutter führt bei Bewegung zu Bildverzerrungen, da die einzelnen Zeilen des Bilds zeitversetzt aufgenommen werden. In Kombination mit Bewegung (z. B. bei schnellen Flügen) entstehen dadurch Geometriefehler in der Punktwolke, die sich in den Streckenmessungen manifestieren. Während die Drohne mit Global Shutter eine Genauigkeit von 3cm hatte, hatte die Drohne mit Rolling Shutter unter gleichen Bedingungen eine Genauigkeit von 8cm.

Einfluss der RTK-Funktion

Die RTK-Funktionalität ist ein weiterer zentraler Faktor für die Messgenauigkeit. Modelle mit integriertem oder externem RTK (M3E, M4E, M4T) zeigen insgesamt deutlich geringere Abweichungen. Aus den Testergebnissen geht hervor, dass Drohnen mit Verbauten RTK-Modul eine konstant hohe Genauigkeit liefern, während Modelle ohne RTK leichte bis sehr starke Abweichungen bis zu 1,4m im Extremfall haben, während die schlechtesten Messungen mit RTK eine Abweichung von 6cm hatten.

Langsamflüge als Kompensationsstrategie

Ein interessanter Befund ergibt sich bei der Betrachtung der Fluggeschwindigkeit: Die M4T, obwohl mit Rolling Shutter ausgestattet, liefert bei sehr langsamen Flügen ($\leq 0,5$ m/s) erheblich bessere Ergebnisse. Die Genauigkeit nähert sich dann der M4E an, da die durch den Rolling Shutter verursachten Bildverzerrungen bei geringerer Bewegung reduziert werden. Dies zeigt, dass bei Rolling-Shutter-Drohnen durch geeignete Flugparameter (geringe Geschwindigkeit, niedrige Flughöhe) gewisse Genauigkeitsreserven aktiviert werden können, sodass diese sich solchen mit Global Shutter annähern. Dennoch bleibt das Ergebnis insgesamt unterhalb der Qualität einer Global-Shutter-Drohne. Vor allem bei größeren Flächen ist, aufgrund der Flugdauer, und dem damit verbundenen Akkuwechsel, ein Langsamflug nicht praktikabel.

Einfluss der Flugplanung

Betrachtet man die Ergebnisse der unterschiedlichen Flugszenarien, lässt sich feststellen, dass die Messergebnisse nie genauer werden als ca. 3cm. Auch wenn die Modelle bei qualitativ hochwertigeren Ansätzen, wie dem Smart-3D-oblique-Flug, oder dem 5 Seiten-oblique-Flug optisch besser sind, haben diese zu keiner spürbaren Verbesserung in Bezug auf die 2D-Messgenauigkeit der hier senkrecht im Raum liegenden Punkte geführt. Die Höhengenaugkeit schnitt hier leicht besser ab. Sehr schlecht schnitt der POI-Flug ab. Die wesentlichen Parameter sind damit Fluggeschwindigkeit, Höhe und gleichmäßige, ausreichende Überlappung. Zum

Erlangen guter Höhengenaugkeit lassen sich Schrägaufnahmen von allen Seiten empfehlen. Eine Genauigkeit, welche besser als 3cm ist, konnte durch hier erwähnte Parameter nicht realisiert werden, es könnte jedoch eine Orientierung mit exakten Passpunkten herangezogen werden.

Global Shutter als klare Empfehlung

Die M3E und M4E, beide mit Global Shutter und RTK ausgestattet, liefern die konstantesten und präzisesten Ergebnisse. Insbesondere die M3E überzeugt durch minimale Abweichungen in der Höhen- und Streckenmessung. Für professionelle Vermessungsanwendungen sind diese Modelle uneingeschränkt zu empfehlen, während Drohnen mit Rolling Shutter bedingt zu empfehlen sind.

Nadir-Flüge und Höhenproblematik

Ein weiterer Aspekt betrifft die Qualität der Höhenmessung. Trotz RTK ist die vertikale Genauigkeit systembedingt schlechter als die horizontale – Abweichungen im Faktor 1,5 bis 3 sind erklärbar durch die physikalischen Limitierungen von GNSS (Global Navigation Satellite System). Zudem wirken sich reine Nadir-Flüge (senkrechte Aufnahmen) negativ auf die Höhengenaugkeit aus, da die geometrische Vielfalt der Aufnahmen begrenzt ist. Schrägflüge haben sich hier positiv auf die Höhengenaugkeit ausgewirkt. Generell lässt sich sagen, dass schräge oder Crossgrid-Flüge die Genauigkeit durch verbesserte Stereogeometrie erhöhen und generell zu empfehlen sind.

Fazit der Interpretation

- Rolling-Shutter-Drohnen sind für hochpräzise Vermessungsaufgaben nur eingeschränkt nutzbar. Besonders bei schnelleren Flügen entstehen massive Verzerrungen.
- Langsame Fluggeschwindigkeiten können den Rolling-Shutter-Effekt deutlich reduzieren und die Messgenauigkeit verbessern, wie bei der M4T beobachtet.
- Global-Shutter-Drohnen mit RTK liefern durchweg die besten Ergebnisse und sind für präzise Höhen- und Streckenmessungen am besten geeignet.
- Flugstrategie und Bildgeometrie spielen bis zu einem gewissen Grad eine entscheidende Rolle für die Qualität der Höhenmessung und sollten bewusst optimiert werden. Extrem detaillierte Flüge sind jedoch für das reine Vermessen nicht unbedingt notwendig.