

# Experimentele bepaling van de nauwkeurigheid en efficiëntie van volumemetingen op basis van dronefotografie

Mihai Dehaeze

Studentennummer: 01811618

Promotor: prof. dr. ing. Greet Deruyter

Begeleider: ing. Joachim Vercruysse

Masterproef ingediend tot het behalen van de academische graad van  
Master of Science in de industriële wetenschappen: landmeten

Academiejaar 2022-2023



# Experimentele bepaling van de nauwkeurigheid en efficiëntie van volumemetingen op basis van dronefotografie

Mihai Dehaeze

Studentennummer: 01811618

Promotor: prof. dr. ing. Greet Deruyter

Begeleider: ing. Joachim Vercruysse

Masterproef ingediend tot het behalen van de academische graad van  
Master of Science in de industriële wetenschappen: landmeten

Academiejaar 2022-2023

## Dankwoord

De thesis is het hoogtepunt van de masteropleiding en vormt de overgang naar een baan als ingenieur. De student voert zelfstandig een technisch-wetenschappelijke opdracht uit in zijn/haar specialisatie. Tijdens de uitvoering ontwikkelt de student zijn/haar analytische en probleemoplossende vaardigheden op academisch niveau. Het eindwerk moet de beheersing van handelingen, inventiviteit, originaliteit, vakmanschap en een academische houding aantonen.

De uitvoering van een scriptie en de weg naar het eindresultaat komt niet op individueel vlak tot stand. Hierdoor wil ik van dit moment gebruik maken om verschillende personen en instellingen bedanken.

In de eerste plaats wil ik mijn promotor Prof. Dr. Ing. Greet Deruyter bedanken voor het toekennen van een persoonlijk voorgesteld onderzoeksonderwerp. Daarnaast kon zij, met haar uitgebreide kennis en ervaring, ondersteuning en feedback bieden doorheen het volledige onderzoek. Door de hoge bereikbaarheid van Prof. Deruyter moest ik me minder richten naar de begeleider Ing. Joachim Vercruyse. Niettemin wordt zijn beschikbaarheid en hulp zeer gewaardeerd.

Verder wil ik ook de beoordelingscommissie bedanken; Prof. Dr. Ing. Greet Deruyter, Ing. Joachim Vercruyse en Ir. Hilde Witters; voor het lezen en beoordelen, met hun deskundigheid, van mijn masterproef.

Mijn oprechte dank gaat uit naar de twee ter beschikking gestelde onderzoeklocaties. Zonder deze locaties en aanwezige grondstoffen zou het uitvoeren van dit experimenteel onderzoek onmogelijk zijn geweest.

Ik wil van deze gelegenheid gebruik maken om de Universiteit Gent en in het bijzonder de Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur (FEA) te bedanken voor het mogen volgen van deze opleiding. Het is een grote eer om aan deze universiteit af te studeren als ingenieur.

Als laatste ben ik mijn ouders, vriendin en directe omgeving bijzonder dankbaar. Zonder hun steun, zowel moreel als financieel was het niet mogelijk deze masterproef te volbrengen en te slagen voor de opleiding.

*De auteur(s) geeft (geven) de toelating om deze masterproef voor consultatie beschikbaar te stellen en delen van de masterproef te kopiëren voor persoonlijk gebruik. Elk ander gebruik valt onder de bepalingen van het auteursrecht, in het bijzonder met betrekking tot de verplichting de bron uitdrukkelijk te vermelden bij het aanhalen van resultaten uit deze masterproef.*

2 Juni 2023

*Deze masterproef vormt een onderdeel van een examen. Eventuele opmerkingen die door de beoordelingscommissie tijdens de mondelinge uiteenzetting van de masterproef werden geformuleerd, werden niet verwerkt in deze tekst.*

## Abstract

### **Experimentele bepaling van de nauwkeurigheid en efficiëntie van volumemetingen op basis van dronefotografie**

Mihai Dehaeze

Master of Science in de industriële wetenschappen: landmeten aan de Universiteit Gent

02/06/2023

Drones worden ook binnen de bouwsector steeds meer ingezet voor de acquisitie van 3D data via fotogrammetrie. Hoewel het gebruik van drones voor fotogrammetrie snelle en kostenefficiënte data-acquisitie toelaat voor grote of moeilijk toegankelijke gebieden, worden met de klassieke statische inwinningstechnieken via laserscanning in combinatie met GNSS of totaalstations hogere nauwkeurigheden worden bekomen. Daartegenover staat dat recente softwareontwikkelingen voor fotogrammetrie zich onder andere richten op de verbetering van de nauwkeurigheid van de resulterende puntenwolken, waardoor ze mogelijks de klassieke methoden kunnen vervangen voor bepaalde toepassingen. Het is echter onvoldoende duidelijk in welke mate de bereikbare nauwkeurigheden afhankelijk zijn van de omstandigheden en welke de randvoorwaarden zijn.

In dit proefschrift werden twee, in omvang en reliëf, verschillende volumes ingemeten. Twee data-acquisitie methoden werden toegepast, laserscanning voor een ontwikkelen van een referentiemodel en fotogrammetrie, gebaseerd op luchtfotografie verworven met een drone, als onderzoekmodel. De luchtbeelden werden per terrein ingewonnen onder een variërende vluchthoogte, camerahoek en vluchtpatroon. Vluchthoogtes evenredig met een grondresolutie (GSD) 1, 2 en 3cm/pix werden ingesteld en de camerahoek, t.o.v. de horizon, bedroeg 90°, 75° en 60°. Als laatste werden de beelden onder drie verschillende vluchtpatronen ingewonnen, twee onderling loodrecht enkelvoudige vluchtpatronen en een derde in dubbel rastervorm.

Een hogere resolutie resulteert in nauwkeurigere controlepunten en hogere afwijking op de volumemeting. Een relatieve camerahoek van 90° t.o.v. het in te meten oppervlak vergt de hoogste volume-nauwkeurigheid. Idealiter wordt een dubbel vluchtpatroon ingesteld, waarvan de camera-as tijdens de vlucht wijzigt volgens de helling van het ingemeten oppervlak, samen met een variërende hoogte in functie van het terreinreliëf. Een boven- ondergrens kan bepaald worden o.b.v. een, volgens de afwijking op controlepunten, variërend referentieoppervlak. Gebaseerd op de experimenteel verzamelde data kan met 83% zekerheid aangenomen worden dat het werkelijke volume binnen deze grenzen valt. Fotogrammetrie op basis van luchtfotografie verworven met een drone vormt een efficiënt en nauwkeurig alternatief voor onbegroeide volumebepaling.

## Extended abstract

Het extended abstract is als volgt toegevoegd. De Nederlandstalige versie bevindt zich voor de Engelstalige.

# Experimentele bepaling van de nauwkeurigheid en efficiëntie van volumemetingen op basis van dronefotografie

Mihai Dehaeze

Promotor: Prof. Dr. Ing. Greet Deruyter

Begeleider: Ing. Joachim Verduyts

**Abstract** Drones worden ook binnen de bouwsector steeds meer ingezet voor de acquisitie van 3D data via fotogrammetrie. Hoewel het gebruik van drones voor fotogrammetrie snelle en kosten-efficiënte data-acquisitie toelaat, voor grote of moeilijk toegankelijke gebieden, worden met de klassieke statische inwinningstechnieken via laserscanning in combinatie met GNSS of totaalstations hogere nauwkeurigheidsniveaus bereikt. Daartegenover staat dat recente softwareontwikkelingen voor fotogrammetrie zich onder andere richten op de verbetering van de nauwkeurigheid van de resulterende puntenwolken, waardoor ze mogelijk de klassieke methoden kunnen vervangen voor bepaalde toepassingen. Het is echter onvoldoende duidelijk in welke mate de bereikbare nauwkeurigheidsniveaus afhankelijk zijn van de omstandigheden en welke de randvoorwaarden zijn.

In dit proefschrift werden twee, in omvang en reliëf, verschillende volumes ingemeten. Twee data-acquisitie methoden werden toegepast, laserscanning voor het ontwikkelen van een referentiemodel en fotogrammetrie, gebaseerd op luchtfotografie verworven met een drone, als onderzoekmodel. De luchtbelden werden per terrein ingewonnen onder een variërende vluchthoogte, camerahoek en vluchtpatroon. Camerahoogtes evenredig met een grondresolutie (GSD) 1, 2 en 3cm/pix werden ingesteld en de camerahoek, t.o.v. de horizon, bedroeg 90°, 75° en 60°. Als laatste werden de beelden onder drie verschillende vluchtpatronen ingewonnen, twee onderling loodrecht enkelvoudige vluchtpatronen en een derde in een dubbel rastervorm.

Een hogere resolutie resulteert in nauwkeurigere controlepunten en hogere afwijking op de volumemeting. Een relatieve camerahoek van 90° t.o.v. het in te meten oppervlak vergt de hoogste volumenaauwkeurigheid. Idealiter wordt een dubbel vluchtpatroon ingesteld, waarvan de camera-as tijdens de vlucht wijzigt volgens de helling van het ingemeten oppervlak, samen met een variërende hoogte in functie van het terreinreliëf. Een boven- ondergrens kan bepaald worden o.b.v. een, volgens de afwijking op controlepunten, variërend referentieoppervlak. Gebaseerd op de experimenteel verzamelde data kan met 83% zekerheid aangenomen worden dat het werkelijke volume binnen deze grenzen valt.

Fotogrammetrie op basis van luchtfotografie verworven met een drone vormt een efficiënt en nauwkeurig alternatief voor onbegroeide volumebepaling.

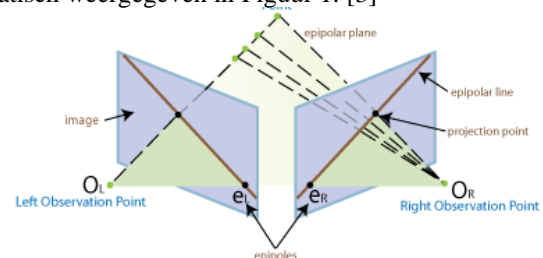
**Sleutelwoorden** Drone · Fotogrammetrie · Acquisitie-parameters

## I. INTRODUCTIE

Drones bieden een ongeziene service om foto's of 3D-gegevens te verzamelen. Ze kunnen een kostenefficiënte oplossing zijn voor een aantal bestaande taken zoals 3D-opmetingen, al dan niet geautomatiseerd repetitieve inspectie en het in kaart brengen van werfverkeer. Ze zijn geschikt voor risicovolle taken te volbrengen, zoals inspectie op hoogte, opmetingen en toezicht in gevaarlijke omgeving. [1]

Minimaal twee foto's zijn nodig om driedimensionale punten van een object te bekomen. Hoe kleiner de onderlinge hoek tussen de posities, des te onnauwkeuriger de bepaling van een punt is. Parallele cameraposities zijn goed voor menselijke stereoweergaven en automatische reconstructie. Convergente cameraposities leiden vaak tot hogere precisie, voornamelijk in de diepte (z-richting bij luchtfotografie). [2]

*Structure from Motion* (SfM) is een techniek waarbij een 3D structuur wordt benaderd op basis van 2D beelden. Het algoritme neemt de eerste camerapositie als oorsprong, de daarop volgende locaties worden berekend o.b.v. gelijke kenmerken of door het traceren van punten. Het Kanade-Lucas-Tomasi algoritme is gebruikelijk voor dichtbij zijnde cameraposities. Voor verdere cameraposities wordt overgegaan tot het principe van overeenkomstige kenmerken. De relatieve positie van de tweede camera kan d.m.v. de fundamentele matrix (F) bepaald worden. Deze matrix geeft de epipolaire geometrie weer van de twee camera's. Het relateert een punt van de ene camera aan een epipolaire lijn in de andere. Het epipolaire vlak, -lijn, punt en projectiepunt zijn schematisch weergegeven in Figuur 1. [3]



Figuur 1: Epipolair vlak, -lijn, -punt en projectiepunt

De fout op een relatie is cumulatief waardoor deze vergroot naarmate het aantal cameraposities stijgt, ook wel drift genaamd. Drift kan gereduceerd worden door cameraposities en 3D-puntlocaties te verfijnen. [3]

Een laboratoriumkalibratie is derhalve niet nodig en nuttig voor het merendeel van de huidige camera-systemen. Het gebruik van ruw beeldmateriaal (RAW) wordt aanbevolen. Het JPG-formaat registreert door compressie echter niet de werkelijke beeldfouten. Hierdoor is een zelf- of in-situ kalibratie voldoende. [4]

Een hoge nauwkeurigheid kan in grote projecten enkel bereikt worden m.b.v. een gemiddeld tot groot aantal GCP's (bv: >3 GCP's / 100 foto's). Het toevoegen van schuine beelden in een verticale dataset of het gebruiken van een grotere overlap en gekruiste vlucht patronen, kan niet tot een hoge nauwkeurigheid leiden indien slechts enkele GCP's worden toegepast. [5]

Er bestaan twee algemene soorten fotogrammetrie: lucht-camera in de lucht) en terrestrische fotogrammetrie (camera



in de hand of op statief). Terrestrische fotogrammetrie met betrekking op objectafstanden tot ca. 200 m wordt ook wel *close-range* fotogrammetrie genoemd. [6] Luchtfotogrammetrie wordt voor karteringstoepassingen, m.b.v. een UAV-platform, door onderzoekers gebruikt. Hierdoor kunnen digitale oppervlaktemodellen (DSM) of digitale terreinmodellen (DTM's) snel, veilig en nauwkeurige gegenereerd worden. [7]

ALS (Airborn Laserscanning Sensor) maakt gebruik van een actief, krachtige, gecollimeerde en monochromatische detectie door puntsensoren met polaire geometrie. Dit gebeurt bij fotogrammetrie passief, door beeld of lineaire sensoren. Coördinaten worden bij ALS direct of gecodeerd verworven, bij fotogrammetrie zijn deze indirect bepaald. De dataset bij fotogrammetrie beschikt over geometrisch en radiometrisch hoogwaardige beelden met multispectrale mogelijkheden waarbij deze bij ALS zonder beeldvorming of over monochromatische beelden van mindere kwaliteit beschikt. ALS biedt dan weer de mogelijkheid om objecten waar te nemen die veel kleiner dan de voetafdruk, zoals openingen door vegetatie, kabels, ...[8]

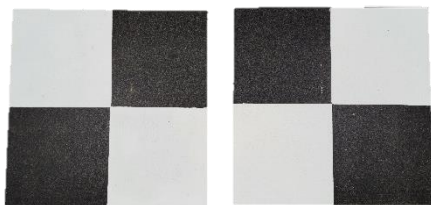
## II. METHODE EN MATERIALEN

Een fotogrammetrisch model vormen is afhankelijk van de ontwikkelde afbeeldingen, deze zijn verworven onder vooropgestelde parameters. Om een onderscheid te vormen tussen acquisitie parameters, werden alle beelden ontwikkeld met eenzelfde platform en camera. De verschillende acquisitieparameters bij eenzelfde volume zijn: opnamehoogte, camera tilt en opnamepatroon (enkelvoudige/ dubbel). Daarnaast werden deze verschillende parameters getest op een tweede, veertig keer groter, volume.

### A. Materialen

Een FC6310 camera, met 1" CMOS 20 Mp sensor, hoekbreedte van 84° en 8,8mm werkelijke brandpuntafstand werd toegepast. De mechanische sluitertijd, ISO-waarde en diafragma worden automatisch bepaald. Het platform is een Phantom 4 Pro, van fabrikant DJI, dat over een drie assige stabilisator beschikt. De gehele configuratie weegt 1388g en maakt gebruik van GPS en GLONASS satellieten om zich, tot ±0,5m verticaal en ±1,5m horizontaal, nauwkeurig te positioneren.

Grondcontrole- (GCP) en controle punten (CP) werden vervaardigd uit bitumen (0,5m x 0,5m). Twee witte vlakken, schuin tegenover elkaar, werden met verf aangebracht waardoor het centraal punt door het hoge contrast vanop hoogte herkenbaar is. Deze werden ingemeten door de Altus NR3 GNSS module van fabrikant Septentrio.



Figuur 2: (Grond-) controlepunten vervaardigd uit bitumen

Een puntenwolk als referentiedataset werd ingewonnen via terrestrische laserscanning. Hiervoor werd de Leica P40, met een nauwkeurigheid op een 3D positie van 3mm op 50m en 6mm op 100m, toegepast.

De modellen werden fotogrammetrisch verwerkt in de software Agisoft Metashape, gebruik makend van twee computer opstellingen. De eerste configuratie, voor het aligneren en georefereren, beschikt over een I7-8550U processor met kloksnelheid 1,80Ghz en 4 kernen, 8GB RAM en NVIDIA GeForce MX150 grafische kaart. De tweede opstelling, voor de overige verwerking, heeft een AMD Ryzen 7 2700x processor met kloksnelheid 3,7 Ghz en 8 kernen, 16GB RAM en NVIDIA GeForce RTX 2060 grafische kaart.

### B. Voorbereiding

De te onderzoeken acquisitieparameters werden als volgt ingesteld. De vluchthoogte bepaalt rechtstreeks de grondresolutie van het model, ook wel GSD genaamd en kan met Vergelijking 1 bepaald worden. De camerahoogtes bedroegen 37,5m, 75m en 112,5m zodat een GSD van 1, 2 en 3cm/pix werd bekomen.

$$GSD = \frac{S_w \cdot H \cdot 100}{F_R \cdot im_w}$$

Vergelijking 1: Grondresolutie o.b.v. camera-eigenschappen

Beide volumes werden ingemeten onder drie verschillende camerahoeken t.o.v. de horizon, verticaal (90°) en tweemaal laag oblique (75° en 60°). Een relatie tussen de volume afwijking en absolute- & relatieve camerahoek werd ook onderzocht.

Drie vluchtpatronen, twee enkelvoudig (A en B) onderling loodrecht en een dubbel raster (C), werden getest. De vluchtsnelheid bij het eerste terrein bedroeg 3m/s, bij het tweede 4m/s. Deze verhoging was essentieel om de data, volgens de beschikbare batterijen, op dezelfde dag te verzamelen. De geautomatiseerde vlucht wordt uitgevoerd door de applicatie Litchi waar de acquisitieparameters werden ingesteld. Ieder model beschikt over 70% zijdelingse en 80% voorwaartse overlap. De verschillende acquisitieparameters zijn weergegeven in Tabel 1.

Tabel 1: Acquisitieparameters per model

Model nr	Resolutie [cm/pix]	Camera tilt [grad]	Vluchtpatroon		
1	1	90°	A		
2	2				
3	3				
4	1	75°		B	
5	2				
6	3				
7	1	60°			C
8	2				
9	3				
10	1	90°	C		
11	2				
12	3				
13	1	75°		C	
14	2				
15	3				
16	1	60°			C
17	2				
18	3				
19	1	90°	C		
20	2				
21	3				
22	1	75°		C	
23	2				
24	3				
25	1	60°			C
26	2				
27	3				

### C. Data-acquisitie

De (grond-) controlepunten worden tweemaal ingemeten, met een minimaal tijdsverschil van 10u, zodat de GNSS locatie bepaald en uitgemiddeld werd door verschillende satellieten. Daarnaast werd de GNSS console naar eenzelfde richting gericht waardoor interne afwijkingen geen invloed uitoefenden op punten onderling maar enkel een transformatie van het model in zijn geheel teweeg bracht.



Figuur 3: Ideale opstelling GCP's (rood) en CP's (blauw)

De vlucht werd in het zicht van de operator uitgevoerd (VLOS) en kon ieder moment gepauzeerd of beëindigd worden. Een missie werd tussenin beëindigd wanneer de batterijspanning onder 30% daalde, om na het wisselen van batterij de vlucht verder te zetten.



Figuur 4: Land- en opstijgopstelling samen met controlepunt

De puntenwolken, ingewonnen met laserscanning werden in een lokaal assenstelsel gescand. Minimaal 3 (grond-) controlepunten werden met een hoge resolutie ( $\pm 1\text{mm}$ ) gescand zodat het model, tijdens de verwerking, geogerefererd kon worden. De resolutie van de  $360^\circ$  scan werd ingesteld zodat het volume over een punt dichtheid van  $\pm 1\text{cm}$  beschikte.

### D. Verwerking

De ruwe data van de (grond-) controlepunten beschikt over de horizontaal- en verticale precisie. Hoe de software deze bepaalt, is niet terug te vinden in fabrikantdocumentatie, wel werd deze toegepast voor het bepalen van de toelaatbare fout. Deze is gelijk aan 2,5 keer de kwadratisch middelbare fout (KMF). De KMF in horizontaal en verticaal vlak wordt bepaald volgens Vergelijking 2. De finale puntlocatie is het gemiddelde van de twee locaties. De afwijking op deze twee locaties werd getoetst aan de toelaatbare fout.

$$\sigma_H = \sqrt{(\sigma_{H1})^2 + (\sigma_{H2})^2}$$

$$\sigma_V = \sqrt{(\sigma_{V1})^2 + (\sigma_{V2})^2}$$

Vergelijking 2: KMF in horizontaal en verticaal vlak

De fotogrammetrische verwerking is voor ieder model identiek. Het aligneren werd met hoge nauwkeurigheid uitgevoerd. Ruis werd verwijderd uit de *sparse cloud* door de punten te behouden dat aan volgende voorwaarden voldeden:

- Projectie nauwkeurigheid:  $\leq 15$
- Reconstructie onzekerheid:  $\leq 50$
- Reproductiefout:  $\leq 0,40$

De dichte puntenwolk werd op medium kwaliteit gegenereerd en het DEM, t.o.v. het Lambert 72 referentie assenstelsel, o.b.v. de dichte puntenwolk.

Ingewonnen puntenwolken werden in de software Cloudcompare geregistreerd, gebruik makend van het ICP (*Iterative Close Point*) algoritme en *align* (puntparen) methode. Eenmaal de puntenwolken onderling geregistreerd waren, werd het model geogerefererd, d.m.v. de ingemeten coördinaten toe te kennen aan de (grond-) controlepunten. De KMF op controlepunten na het refereren werd bijgehouden voor verdere verwerking. De puntenwolkdichtheid werd gereduceerd tot 1cm zodat verwerking in de software Pythagoras mogelijk bleef. Het volume wordt berekend o.b.v. een onderlinge afstand van 1cm tussen de dwarsprofielen.

#### 1) Omzetten ruwe data

Per fotogrammetrisch model werd de werkelijke resolutie, camera tilt, vluchtpatroon, aantal cameraposities en reproductiefout bijgehouden. Daarnaast werd, op de GCP's en CP's, de KMF (kwadratisch middelbare fout) op de x, y, z-waarde genoteerd. Deze konden verder verwerkt worden tot de KMF in horizontaal vlak (xy), totale fout en gemiddelde op meerdere modellen. Indien een andere parameter dan de vluchthoogte werd onderzocht, zijn resultaten weergegeven in functie van de relatieve KMF. Deze werd als volgt bepaald:

$$\text{Relatieve KMF} = \frac{\text{KMF [mm]}}{\text{Resolutie } \left[\frac{\text{mm}}{\text{pix}}\right]}$$

Vergelijking 3: Relatieve KMF

Het af te graven volume werd bepaald samen met de relatieve afwijking, t.o.v. het referentiemodel, op het fotogrammetrisch volume. Op deze 27 volumes werden per terrein mogelijke uitschieters bepaald a.d.h.v. een boxplot. Deze werden bij algemene volumevergelijkingen buiten beschouwing gelaten.

### Grondresolutie

De impact van de resolutie op de volumenaauwkeurigheid werd onderzocht door de volume afwijking van een model weer te geven in functie van de theoretische resolutie en absolute camerahoek.

### Relatieve camerahoek

De twee volumes werden opgedeeld in deelvolumes, afhankelijk van de relatieve camerahoek. De opdeling gebeurde volgens flanken loodrecht op de vliegrichting, zonder zijflanken (evenwijdig met de vliegrichting) te integreren. De relatieve volume afwijking werd weergegeven in een boxplot en uitschieters werden geëlimineerd. De afwijking werd uitgezet in functie van de relatieve camera-

hoek waarmee het model ontwikkeld was. Op deze data werd een exponentiële trendlijn getoetst.

### Acquisitie- en verwerkingstijd

De acquisitie- en verwerkingstijd, excl. uitbijters, kon logaritmisch voorgesteld worden in functie van de relatieve volume afwijking.

### Relatie controlepunten

De boven- en ondergrens op het referentie- en fotogrammetrisch model werd bepaald, door het referentievlak verticaal te variëren, op basis van de RMS (bij het referentiemodel) en de gemiddelde verticale fout op de CP's (bij het fotogrammetrisch model). De werkelijke volume afwijking van het fotogrammetrisch model, samen met de boven- en ondergrens, werd relatief weergegeven t.o.v. het referentievolume en zijn grenzen o.b.v. volgende vergelijking:

$$\Delta V_{\%} = \frac{V_{\text{fotogrammetrisch}} - V_{\text{referentie}}}{V_{\text{referentie}}}$$

Vergelijking 4: Relatieve volume afwijking

## III. RESULTATEN

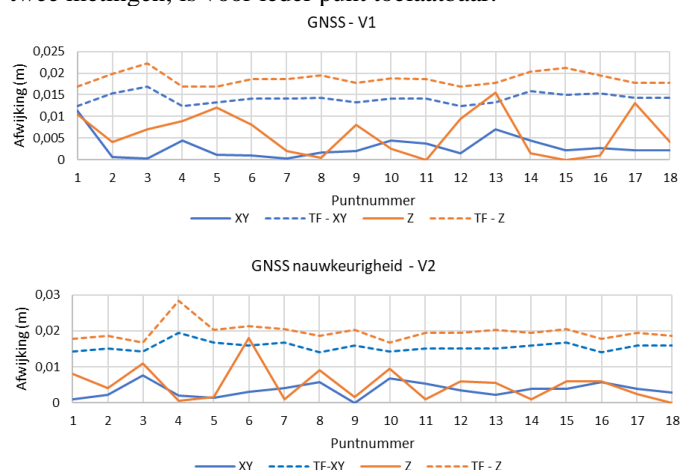
### A. Meteorologische gegevens

Gedurende eerste (V1) meting was het dichtbewolkt met een temperatuur van 16°C. Op 100m hoogte bevond zich een noordoostenwind met snelheid van 17km/u en windstoten tot 29km/u. De geomagnetische stormindex schommelde die dag tussen een waarde van 4 tot 5.

Gedurende tweede (V2) meting was het onbewolkt met een temperatuur van 20°C. Op 100m hoogte bevond zich een noordenwind met snelheid 21km/u en windstoten tot 36km/u. De geomagnetische stormindex schommelde die dag tussen een waarde van 3 tot 4.

### B. (Grond-) controlepunten

Figuur 5 geeft de absolute afwijking en toelaatbare fout, per controlepunt, weer voor beide volumes. De afwijking, op de twee metingen, is voor ieder punt toelaatbaar.



Figuur 5: Afwijking GNSS en toelaatbare fout - V1 & V2

### C. Referentievolume

De kwadratisch middelbare fout, op vier controlepunten rond het eerste volume, bedroeg 0,0159m. Bij het tweede volume konden acht controlepunten geselecteerd worden met

een resulterende KMF van 0,0296m. Het volume, boven- & ondergrens (absoluut en relatief) zijn weergegeven in Tabel 2

Tabel 2: Volume, boven- & ondergrens

Volume	V <sub>netto</sub> [m <sup>3</sup> ]	Bereik [m <sup>3</sup> ]	Relatief bereik [%]
V1	1 073,6	1 067,6 ; 1 076,7	- 0,56% ; 0,29%
V2	45 468,6	45 288,3 ; 45 650,5	- 0,40% ; 0,40%

### D. Fotogrammetrisch model

#### Camerahoek

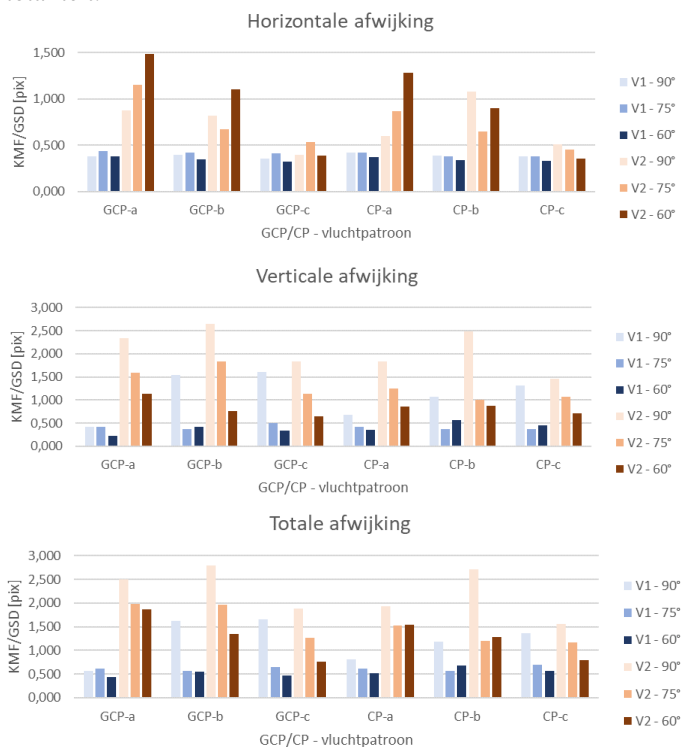
Overstaande flanken beschikken bij het eerste volume nagenoeg over een gelijk helling. Bij het tweede volume was het verschil tussen overstaande flanken te groot waardoor de relatieve camerahoek per flank varieert.

Tabel 3: Relatieve camerahoek o.b.v. flankhelling

Volume	Vluchtrichting	Absolute camerahoek [grad]			Relatieve camerahoek [grad]
		Zuid/west - 90	Noord/Oost - 75	60	
1	A	50,5	65,5	80,5	
	B	23,5	38,5	53,5	
2	A	59 ; 48	74 ; 63	89 ; 78	
	B	5 ; 20	20 ; 35	35 ; 50	

#### Controlepunten

Figuur 6 geeft de relatieve afwijking op GCP's en CP's weer in functie van het vluchtpatroon en absolute camerahoek. Dit zowel in het horizontaal & verticaal vlak als in zijn totaliteit.



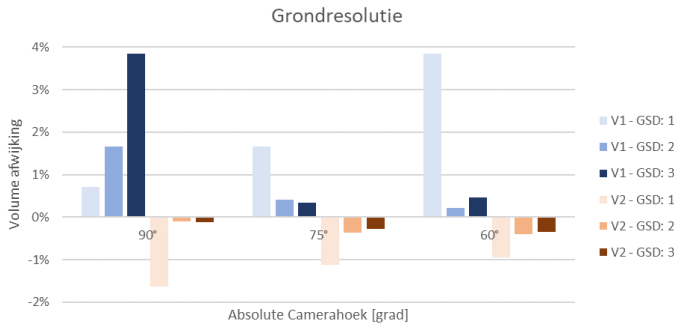
Figuur 6: Relatieve afwijking op CP's

#### 1) Volumemeting

Bij het eerste volume bedraagt de gemiddelde afwijking 0,54% met mediaan 0,31%, waarbij de ondergrens -0,47% en bovengrens 1,01% is. Vier modellen (3, 11, 20 & 21) worden als uitbijter beschouwd. De gemiddelde volumeafwijking bij het tweede volume is -1,65% met mediaan -0,57%. De ondergrens bedraagt -4,11% en bovengrens -0,10%. Vier modellen (1, 4, 10 & 11) worden als uitbijter beschouwd.

## Grondresolutie

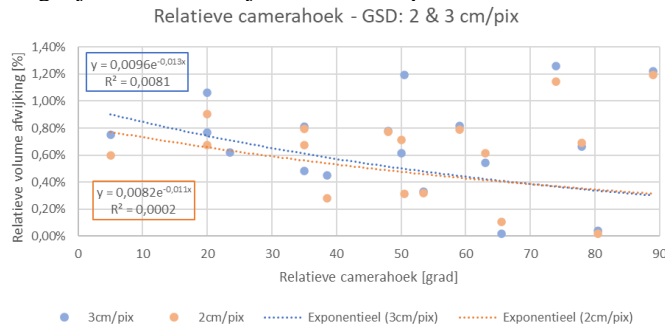
De volume afwijking wordt weergegeven, op Figuur 7, als functie van de grondresolutie bij een dubbel vluchtpatroon (c).



Figuur 7: Volume afwijking in functie van resolutie en absolute camerahoek

## Relatieve camerahoek

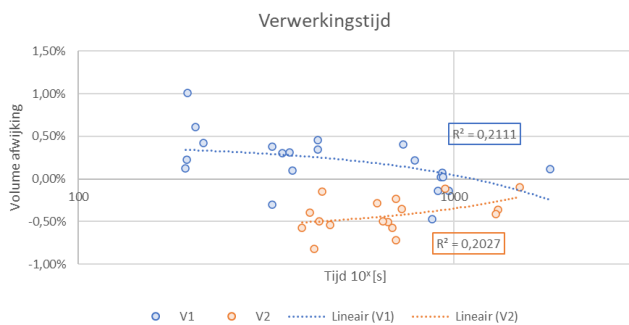
De spreiding bij een lage (1cm/pix) resolutie is tot tien keer groter dan bij een hogere (2-3cm/pix), waardoor het niet mogelijk is een duidelijke trend te bespeuren.



Figuur 8: Relatieve volume afwijking in functie van relatieve camerahoek - GSD: 2 & 3cm/pix

## Acquisitie- en verwerkingstijd

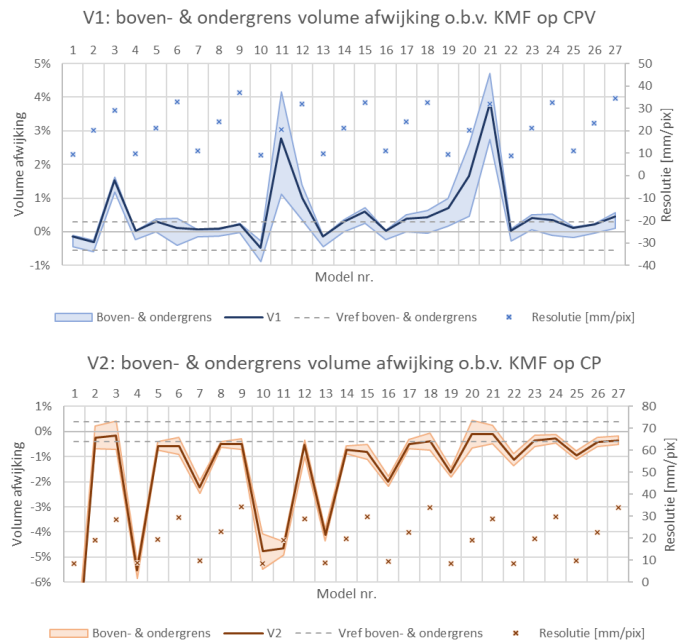
Bij beide volumes werd, de som van de acquisitie- en verwerkingstijd, bij model 19 en 22 als uitschieter beoordeeld. De totaal gemiddelde tijd voor V1 bedraagt 699s met 435s als mediaan. Bij V2 is dit 1472s en 727s respectievelijk. Figuur 9 geeft de volumeafwijking van een model weer in functie van de acquisitie- en verwerkingstijd op logaritmische schaal waarbij de uitbijters geëlimineerd werden.



Figuur 9: Acquisitie- en verwerkingstijd vs. relatieve volume afwijking

## Fout op controlepunten & volume afwijking

Figuur 10 geeft de boven- en ondergrens weer voor de volume afwijking per model, afhankelijk van de gemiddeld verticale fout op de CP's. Voor model 1 bij V2 bedraagt de volume afwijking -10,13%, deze valt buiten het zichtbaar bereik op onderstaande Figuur 10.



Figuur 10: Boven- & ondergrens volume afwijking

## IV. DISCUSSIE

GNSS punten in het horizontaal vlak vertonen, m.u.v. punt 1 bij V1, een gelijkaardige afwijking bij beide volumes. Voor de verticale afwijking is echter geen regelmaat merkbaar en verklaarbaar. Alle ingemeten punten bevinden zicht binnen de toelaatbare afwijking.

De KMF op het tweede referentievolumen is hoger dan bij het eerste, dit valt te verklaren door de omvang van het tweede project waardoor cumulatieve fouten ontstonden.

Het tweede volume ondervond wel enkele moeilijkheden. Door het grote reliëf, met een maximaal hoogteverschil van 27m, kon de nodige overlap bij de laagste camerahoogte (37,5m), niet gegarandeerd worden waardoor beelden, verworven boven het hoogste punt van terrein, niet werden gealigneerd.

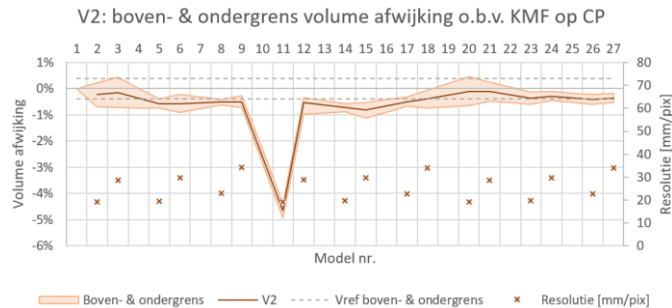
De afwijking op controlepunten, zowel in horizontaal als verticaal vlak, is hoger is bij het tweede volume. Door zijn grotere omvang daalt de GCP dichtheid met 76% waardoor grotere afwijkingen mogelijk zijn. Figuur 6 stelt vast dat de afwijking in het verticaal vlak lager is bij een absolute camerahoek van 75° en 60° dan bij nadir beelden. In het horizontaal vlak, volgens Figuur 45, geldt het omgekeerde, nadir foto's resulteren in een kleinere horizontale afwijking dan tilt-beelden.

In Figuur 7 kan het model V2 met GSD 1cm/ pix nietig verklaard worden door het aligneringsprobleem. Bij een absolute camerahoek van 90° gaat een dalende grondresolutie gepaard met een dalende volumenaauwkeurigheid (gemiddeld van 0,40% tot 1,98%). Voor een tilt-camera geldt het volgende: een dalende grondresolutie gaat gepaard met een stijgende volumenaauwkeurigheid (gemiddeld van 1,89% bij hoge tot 0,36% bij een lage resolutie).

De exponentiële trendlijn is bij een dataset met minder spreiding (GSD 2 & 3cm/pix) betrouwbaarder dan bij een hoger spreiding, zoals bij GSD 1cm/pix. De curve dient louter voor het weerspiegelen van een trend, niet als voorspellingscurve, wegens zijn lage betrouwbaarheid ( $R^2 < 50\%$ ).

Uit Figuur 9 wordt vastgesteld dat een hogere verwerkingstijd gepaard gaat met een hogere nauwkeurigheid. Echter bedraagt dit verschil maximaal 1%.

Figuur 10 stelt een grote volume afwijking vast bij de modellen gebaseerd op een hoge resolutie bij V2, deze modellen ondervonden aligeringproblemen waardoor deze als nietig worden beschouwd en volgende grafiek bekomen wordt:



Figuur 11: Boven- & ondergrens volume afwijking excl. GSD 1cm/pix - V2

Bij het tweede volume vertoont de boven- en ondergrens, van het fotogrammetrisch en referentie model, een overlap bij 15 van de 18 modellen (83%). Model 14 en 15 vallen net buiten de grens (verschil van 0,14%), op model 11 bedraagt het verschil tussen de ondergrens van het referentie en boven grens van het fotogrammetrisch model 3,98%.

In het totaal beschikken 23 van de 27 modellen (85%) bij V1 over een overlap van de buitengrenzen met het referentiemodel. Model 3, 11, 20 en 21 vertonen geen overlap met het referentievolumen, het maximale verschil tussen beide grenzen is 2,44% (model 21) en minimaal 0,17% (model 20). Deze vier modellen werden op de laagste, en op één na laagste, resolutie ingemeten onder een camerahoek van 90°.

## V. CONCLUSIE

Een lagere vluchthoogte brengt een hogere resolutie, hogere nauwkeurigheid op controlepunten en een lagere volumenaauwkeurigheid teweeg. Bij grote reliëfverschillen wordt een variabele vluchthoogte, in functie van de terreinhoogtes, aangeraden.

De hoogst verticale nauwkeurigheid op controlepunten wordt bereikt door een absolute camerahoek, verschillend van 90°, toe te passen. Indien de nauwkeurigheid in het horizontaal vlak prioritair is, geven fotogrammetrische modellen op basis van nadir luchtfotografie de beste resultaten. Wanneer de hoogste nauwkeurigheid op de 3D locatie in zijn totaliteit van een controlepunt gewenst is, geven opnames met een absolute camerahoek, verschillend van 90°, de hoogste nauwkeurigheid.

Een relatieve camerahoek van 90° heeft de hoogste nauwkeurigheid. Idealiter wordt een dubbel vluchtpatroon ingesteld, waarvan de camera-as tijdens de vlucht wijzigt volgens de helling, loodrecht op de vluchtrichting, van het ingemeten oppervlak.

Er kan, rekening houdend met de meest aangeraden acquisitieparameters, een boven- en ondergrens worden bepaald van het ingemeten volume o.b.v. de verticale afwijking op controlepunten. Het verlagen en verhogen van het referentieoppervlak geeft deze grenzen weer. Op basis van de experimenteel verzamelde data kan met 83% zekerheid aangenomen worden dat het werkelijke volume binnen die grenzen valt.

Graag bedankt ik in eerste instantie prof. dr. ing. Greet Deruyter voor de opportuniteit dit onderzoek te mogen uitvoeren en het delen van haar uitgebreide kennis en ervaring in dit onderzoeksveld.

Graag maak ik van de gelegenheid gebruik om de Universiteit Gent en specifiek de faculteit ingenieurswetenschappen en architectuur te bedanken voor het mogen volgen van deze educatieve opleiding. Het is een eer af te studeren als ingenieur aan deze universiteit.

## REFERENTIE

- [1] Dubois, S., Vanhallemont, Y., & De Bouw, M. (2019). Drones ten dienste van de bouwsector: Technologiën, uitdagingen en vooruitzichten. Brussel: WTCB.
- [2] Linder, W. (2006). Digital Photogrammetry - A Practical Course. Düsseldorf: Springer.
- [3] The MathWorks. (2022, december 23). structure from motion. Opgehaald van mathworks: <https://nl.mathworks.com/help/vision/ug/structure-from-motion.html>
- [4] Cramer, M., Przybilla, H.-J., & Zurhorst, A. (2017, September 4-7). UAV CAMERAS: OVERVIEW AND GEOMETRIC CALIBRATION BENCHMARK. The International Archives of the Photogrammetry, pp. 85-92. doi:10.5194
- [5] Sanz-Ablanedo, E., Chandler, J. H., Rodríguez-Pérez, J. R., & Ordóñez, C. (2018, October 9). Accuracy of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) and SfM Photogrammetry Survey as a Function of the Number and Location of Ground Control Points Used. Remote Sensing, p. 1606.
- [6] Aber, J. S., Marzloff, I., & Ries, J. B. (2010). Small-Format Aerial Photography: Chapter 3 - Photogrammetry. Elsevier, pp. 23-39. doi:10.1016/B978-0-444-53260-2.10003-1
- [7] Elkhachy, I. (2021, December). Accuracy Assessment of Low-Cost Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Photogrammetry. Alexandria Engineering Journal, 6, pp. 5579-5590. doi:10.1016/j.aej.2021.04.011
- [8] Baltasvias, E. P. (1999, maart 17). A comparison between photogrammetry and laser scanning. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, pp. 83-94.

# Experimental determination of accuracy and efficiency of volume measurements based on drone photography

Mihai Dehaeze

Promotor: Prof. Dr. Ing. Greet Deruyter

Counsellor: Ing. Joachim Vercruyssen

**Abstract** Drones are also increasingly used within the construction industry for 3D data acquisition via photogrammetry. Although the use of drones for photogrammetry allows fast and cost-efficient data acquisition, for large or hard-to-reach areas, classical static acquisition techniques using laser scanning in combination with GNSS or total stations achieve higher accuracies. On the other hand, recent software developments for photogrammetry are focusing on improving the accuracy of the resulting point clouds, potentially replacing classical methods for certain applications. However, it is not sufficiently clear to what the achievable accuracies are dependent on circumstances and what the boundary conditions are.

In this thesis, two volumes, different in size and relief, were measured. Two data acquisition methods were applied, laser scanning to develop a reference model and photogrammetry, based on aerial photography acquired with a drone, as a research model. Aerial images were acquired per property under varying flight heights, camera angles and flight patterns. Camera heights were set, proportional to ground sample distance (GSD) 1, 2 and 3cm/pix, the camera angle, relative to the horizon, was  $90^\circ$ ,  $75^\circ$  and  $60^\circ$ . At last, images were acquired under three different flight patterns, two perpendicular single flight patterns and a third in a double grid shape.

Higher resolution results in more accurate control points and higher deviation on the volume measurement. A relative camera angle of  $90^\circ$  to the measured surface requires the highest volume accuracy. Ideally, a dual flight pattern is set up, whose camera axis changes during flight according to the slope of the surface being measured, together with varying height as a function of terrain relief. An upper-bottom limit can be determined based on a reference surface varying according to the deviation at control points. Based on the experimentally collected data, it can be assumed with 83% certainty that the actual volume falls within these limits.

Photogrammetry based on aerial photography acquired with a drone provides an efficient and accurate alternative for bare volume determination.

**Keywords** Drone · Photogrammetry · Acquisition parameters

## I. INTRODUCTION

Drones offer an unprecedented service to collect photographs or 3D data. They can be a cost-effective solution for a number of existing tasks such as 3D surveying, automated or non-automated repetitive inspection and mapping construction site traffic. They are suitable for high-risk tasks such as inspection at height, surveying and monitoring in high risk environments. [1]

At least two photographs are needed to obtain three-dimensional points of an object. The smaller the angle between the positions, the more inaccurate the determination of a point is. Parallel camera positions are good for human stereo views and automatic reconstruction. Convergent

camera positions often lead to higher precision, mainly in depth (z-direction in aerial photography). [2]

Structure from Motion (SfM) is a technique in which a 3D structure is approximated from 2D images. The algorithm takes the first camera position as the origin; subsequent locations are calculated based on similar features or by tracing points. The Kanade-Lucas-Tomasi algorithm is common for nearby camera positions. For further camera positions, the principle of corresponding features is proceeded. The relative position of the second camera can be determined using the fundamental matrix (F). This matrix represents the epipolar geometry of the two cameras. It relates a point of one camera to an epipolar line in the other one. The epipolar plane, line, point and projection point are shown Figure 1. [3]

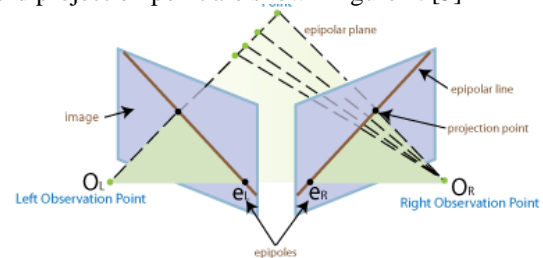


Figure 1: Epipolar plane, line, point and projection point

The error on a correlation is cumulative so it increases as the number of camera positions increases, also called drift. Drift can be reduced by refining camera positions and 3D point locations. [3]

A laboratory calibration is not required and useful for the majority of current camera systems. The use of raw image material (RAW) is recommended. The JPG format does not register actual image errors due to compression. As a result, self- or in-situ calibration is sufficient. [4]

High accuracy in large projects can only be achieved using a medium to large number of GCPs (e.g.  $>3$  GCPs / 100 images). Adding oblique images in a vertical dataset or using larger overlap and crossed flight patterns, may not lead to high accuracy if only a few GCPs are applied. [5]

There are two general types of photogrammetry: aerial (camera in the air) and terrestrial (camera in hand or on a tripod). Terrestrial photogrammetry covering object distances up to about 200 m is also called close-range photogrammetry. [6] Aerial photogrammetry is used by researchers for mapping applications using a UAV platform. It allows digital surface models (DSM) or digital terrain models (DTM) to be generated quickly, safely and accurately. [7]

ALS (Airborne Laserscanning Sensor) uses active, high-power, collimated and monochromatic detection by point sensors with polar geometry. With photogrammetry, this is done in a passive way, by image or linear sensors.

Coordinates are acquired directly or coded in ALS, while in photogrammetry they are determined indirectly. The dataset in photogrammetry has geometrically and radiometrically high-quality images with multispectral capabilities where in ALS it has no imaging or lower-quality monochromatic images. In turn, ALS offers the possibility of observing objects much smaller than the footprint, such as openings through vegetation, cables, ... [8]

## II. METHOD AND MATERIALS

Forming a photogrammetric model depends on the developed images, these were acquired under predetermined parameters. To differentiate between acquisition parameters, all images were developed with the same platform and camera. The different acquisition parameters at the same site are: height, camera tilt and acquisition pattern (single/double). In addition, these different parameters were tested on a second, forty times larger, volume.

### A. Materials

An FC6310 camera, with 1" CMOS 20 Mp sensor, angular width of 84° and 8.8mm true focal length was applied. Mechanical shutter speed, ISO value and aperture are determined automatically. The platform is a Phantom 4 Pro, from manufacturer DJI, which features a three-axis stabiliser. The entire configuration weighs 1388g and uses GPS and GLONASS satellites to accurately position itself, to ±0.5m vertically and ±1.5m horizontally.

Ground control points (GCP) and control points (CP) were made of bitumen (0.5m x 0.5m). Two white surfaces, diagonally opposite each other, were applied with paint, making the central point easily recognisable from height due to high contrast. These were measured by the Altus NR3 GNSS module from manufacturer Septentrio.



Figure 2: (Ground) control points made of bitumen

A point cloud as a reference dataset was acquired through terrestrial laser scanning. For this purpose, the Leica P40, with an accuracy at a 3D position of 3mm at 50m and 6mm at 100m, was used.

The models were processed photogrammetrically in the software Agisoft Metashape, using two computer setups. The first configuration, for aligning and georeferencing, features an I7-8550U processor with clock speed 1.80Ghz and 4 cores, 8GB of RAM and NVIDIA GeForce MX150 graphics card. The second setup, for the remaining processing, has an AMD Ryzen 7 2700x processor with clock speed 3.7Ghz and 8 cores, 16GB RAM and NVIDIA GeForce RTX 2060 graphics card.

### B. Preparation

The acquisition parameters to be investigated were set as follows. The flight height directly determines the ground resolution of the model, also called GSD and can be determined using Equation 1. The camera heights were 37.5m, 75m and 112.5m so a GSD of 1, 2 and 3cm/pix was obtained.

$$GSD = \frac{S_w \cdot H \cdot 100}{F_R \cdot im_w}$$

Equation 1: Ground resolution based on camera properties

Both volumes were measured at three different camera angles, vertical (90°) and twice low oblique (75° and 60°). A relationship between volume deviation and absolute & relative camera angle was also investigated.

Three flight patterns, two single (A and B) perpendicular to each other and a double grid (C), were tested. The flight speed at the first site was 3m/s, at the second 4m/s. This increase was necessary to collect data, according to the available batteries, on the same day. The automated flight is performed by the application Litchi where the acquisition parameters were set. Each model has 70% side and 80% forward overlap. The different acquisition parameters are shown in Table 1.

Table 1: Acquisition parameters by model

Model nr.	Resolution [cm/pix]	Camera tilt [grad]	Flight pattern
1	1	90°	A
2	2		
3	3		
4	1	75°	
5	2		
6	3		
7	1	60°	
8	2		
9	3		
10	1	90°	B
11	2		
12	3		
13	1	75°	
14	2		
15	3		
16	1	60°	
17	2		
18	3		
19	1	90°	C
20	2		
21	3		
22	1	75°	
23	2		
24	3		
25	1	60°	
26	2		
27	3		

### C. Data-acquisition

The (ground) control points are measured twice, with a minimum time difference of 10h, so that the GNSS location was determined and averaged by different satellites. In addition, the GNSS console was pointed towards the same direction so that internal deviations did not affect points among themselves but only caused a transformation of the model in its entirety.



Figure 3: Ideal location GCPs (red) and CPs (blue)

The flight was conducted in the operator's line of sight (VLOS) and could be paused or terminated at any time. A mission was terminated in between when the battery voltage fell below 30%, to continue the flight after changing battery.



Figure 4: Land and take-off setup together with control point

The point clouds, collected by laser scanning were scanned in a local coordinate system. A minimum of 3 (ground) control points were scanned at high resolution ( $\pm 1\text{mm}$ ) so that the model, during processing, could be geo-referenced. The resolution of the  $360^\circ$  scan was set so that the volume had a point density of  $\pm 1\text{cm}$ .

#### D. Processing

The raw data of the (ground) control points has the horizontal and vertical precision. The software's method of determining these cannot be found in manufacturer documentation, although it was applied to determine the tolerated error. This is equal to 2.5 times the root mean square error (RMS). The RMS in horizontal and vertical planes is determined according to Equation 2. The final point location is the average of the two locations. The deviation at these two locations was tested against the tolerated error.

$$\sigma_H = \sqrt{(\sigma_{H1})^2 + (\sigma_{H2})^2}$$

$$\sigma_V = \sqrt{(\sigma_{V1})^2 + (\sigma_{V2})^2}$$

Equation 2: RMS in horizontal and vertical plane

The photogrammetric processing is identical for each model. Alignment was performed with high accuracy. Noise was removed from the sparse cloud by retaining the points that satisfied the following conditions:

- Projection accuracy:  $\leq 15$
- Reconstruction uncertainty:  $\leq 50$
- Reproduction error:  $\leq 0.40$

The dense point cloud was generated at medium quality and the DEM, relative to the Lambert 72 coordinate system, based on the dense point cloud.

Collected point clouds were registered in the Cloudcompare software, using the ICP (Iterative Close Point) algorithm and align (point pairs) method. Once the point clouds were registered among themselves, the model was geo-referenced, by assigning the measured coordinates to the (ground) control points. The RMS on the control points after referencing was stored for further processing. The point cloud density was regressed to  $1\text{cm}$  so processing in Pythagoras software remained possible. The volume is calculated based on a  $1\text{cm}$  spacing between cross sections.

#### 1) Converting raw data

For each photogrammetric model, the actual resolution, camera tilt, flight pattern, number of camera positions and reproduction error were recorded. In addition, on the GCPs and CPs, the RMS (root mean square error) at the x, y, z value was noted. These could be further processed into the RMS in horizontal plane (xy), total error and mean on multiple models. If a parameter other than flight height was investigated, results were presented as a function of relative RMS. This was determined as follows:

$$\text{Relative RMS} = \frac{\text{RMS [mm]}}{\text{Resolution [\frac{mm}{pix}]}}$$

Equation 3: Relative RMS

The volume to be extracted was determined together with the relative deviation from the reference model on the photogrammetric volume. Possible outliers on these 27 volumes were determined per terrain using a boxplot. These were excluded from general volume comparisons.

#### Ground sample distance

The effect of the GSD on volume accuracy was investigated by representing the volume deviation of a model as a function of theoretical resolution and absolute camera angle.

#### Relative camera angle

The two volumes were divided into subvolumes depending on the relative camera angle. The segmentation was done according to flanks perpendicular to the flight direction, without integrating side flanks (parallel to the flight direction). The relative volume deviation was represented in a boxplot and outliers were eliminated. The deviation was plotted as a function of the relative camera angle at which the model was developed. An exponential trend line was tested on these data.

#### Acquisition and processing time

The acquisition and processing time, excluding outliers, could be represented logarithmically as a function of relative volume deviation.

#### Relation with control points

The upper and lower boundaries on the reference and photogrammetric models were determined, by varying the reference plane vertically, based on the RMS (on the reference model) and the mean vertical error on the CPs (for the photogrammetric model). The actual volume deviation of the photogrammetric model, along with the upper and lower



boundaries, was shown relatively to the reference volume and its boundaries based on the following equation:

$$\Delta V_{\%} = \frac{V_{\text{photogrammetrical}} - V_{\text{reference}}}{V_{\text{reference}}}$$

Equation 4: Relative volume deviation

### III. RESULTS

#### A. Meteorological data

During the first (V1) survey it was cloudy with a temperature of 16°C. At 100m altitude, there was a north-east wind with speed of 17km/h and gusts up to 29km/h. The geomagnetic storm index fluctuated between a value of 4 to 5 that day.

During the second (V2) survey, it was clear of clouds with a temperature of 20°C. At 100m altitude there was a north wind with speed 21km/h and gusts up to 36km/h. The geomagnetic storm index fluctuated between a value of 3 to 4 that day.

#### B. (Ground-) control points

Figure 5 shows the absolute deviation and permissible error, for each control point, for both volumes. The deviation, on the two measurements, is tolerable for each point.

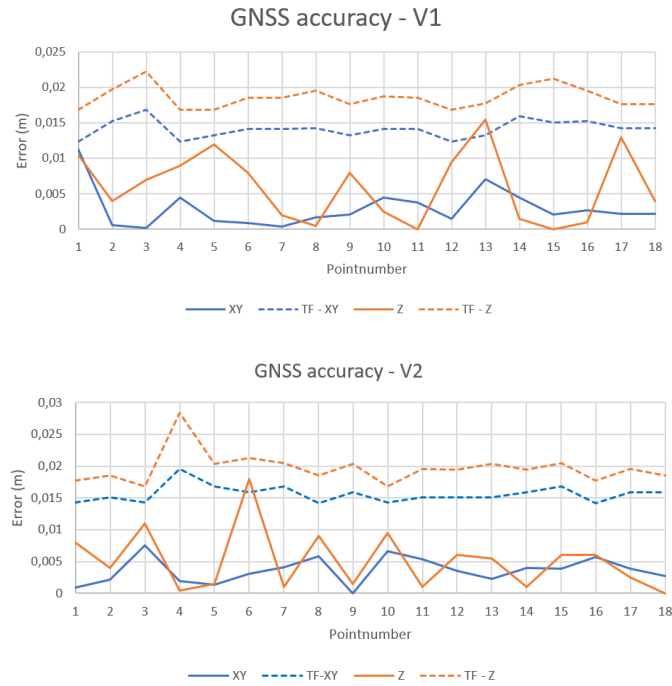


Figure 5: GNSS and tolerable error - V1 & V2

#### C. Reference volume

The root mean square error, at four control points around the first volume, was 0.0159m. At the second volume, eight control points could be selected with a resulting RMS of 0.0296m. The volume, upper & lower boundaries (absolute and relative) are shown in Table 2

Table 2: Volume, upper & lower limits

Volume	$V_{\text{net}}$ [m <sup>3</sup> ]	Range [m <sup>3</sup> ]	Relative range [%]
V1	1 073,6	1 067,6 ; 1 076,7	- 0,56% ; 0,29%
V2	45 468,6	45 288,3 ; 45 650,5	- 0,40% ; 0,40%

#### D. Photogrammetric model

##### Camera angle

For the first volume, opposite slopes have almost an equal inclination. For the second volume, the difference between opposite slopes was too large, causing the relative camera angle to vary for each slope.

Table 3: Relative camera angle based on flank slope

Volume	Flight direction	Absolute camera angle [grad]				Relative camera angle [grad]	
		South/west - North/East					
		90	75	60			
1	A	50,5	65,5	80,5			
	B	23,5	38,5	53,5			
2	A	59	48	74	63	89	78
	B	5	20	20	35	35	50

##### Control points

Figure 6 shows the relative deviation on GCPs and CPs as a function of flight pattern and absolute camera angle. Both in the horizontal & vertical plane and in its totality.

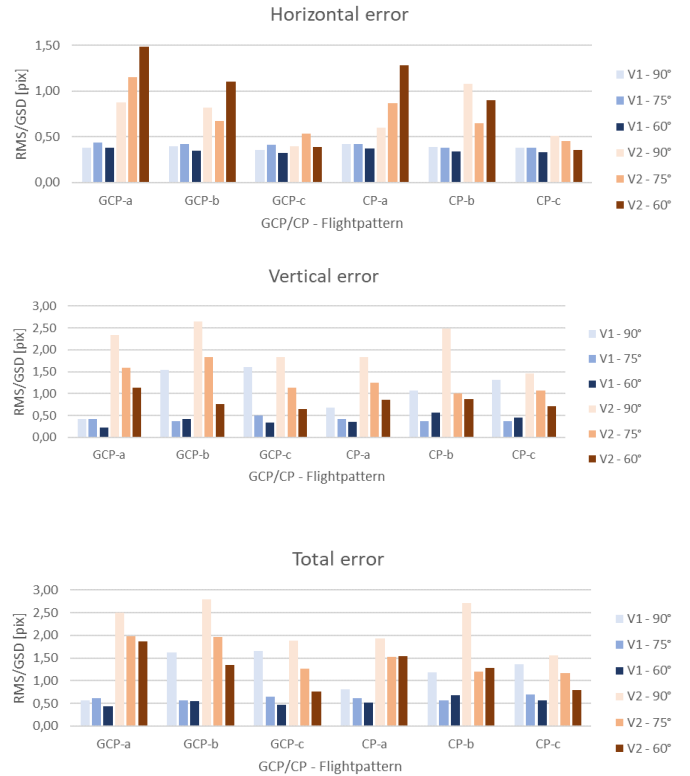


Figure 6: Relative deviation on CPs

##### 1) Measurement of volume

For the first volume, the mean deviation is 0.54% with median 0.31%, where the lower bound is -0.47% and upper bound is 1.01%. Four models (3, 11, 20 & 21) are classified as outliers. The mean volume deviation at the second volume is -1.65% with median -0.57%. The lower bound is -4.11% and upper bound -0.10%. Four models (1, 4, 10 & 11) are classified as outliers.

### Ground sample distance

The volume deviation is shown, on Figure 7, as a function of ground sample distance for a double flight pattern (c).

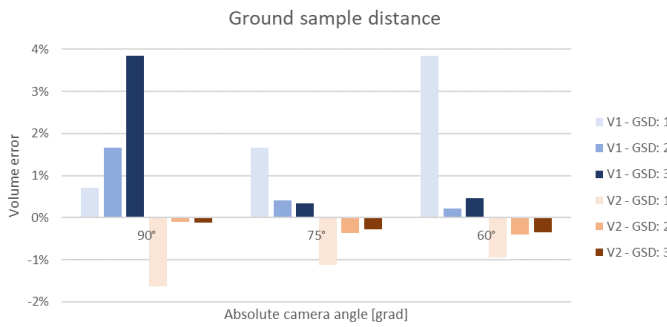


Figure 7: Volume deviation as a function of resolution and absolute camera angle

### Relative camera angle

The scatter at low (1cm/pix) resolution is up to 10 times greater than at higher (2-3cm/pix), making it impossible to detect a clear trend.

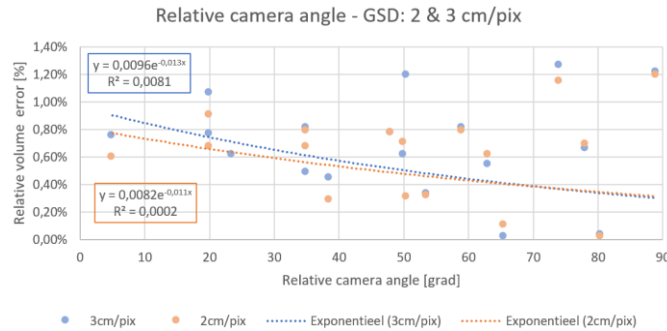


Figure 8: Relative volume deviation as function of relative camera angle - GSD: 2 & 3cm/pix

### Acquisition and processing time

For both volumes, the summation of acquisition and processing time, models 19 and 22 were rated as outliers. The overall average time for V1 is 699s with 435s as median. For V2, it is 1472s and 727s respectively. Figure 9 shows model volume deviation as a function of acquisition and processing time on a logarithmic scale where outliers were eliminated.

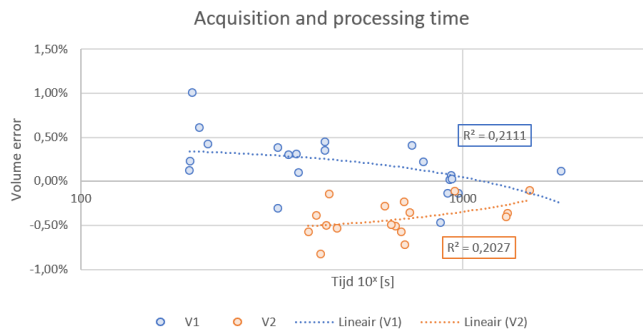


Figure 9: Acquisition and processing time vs relative volume deviation

### Error at control points & volume deviation

Figure 10 shows the upper and lower limits for the volume deviation for each model depending on the mean vertical error on the CPs. For model 1 at V2, the volume deviation is -

10.13%, which falls outside the visible range on Figure 10 below.

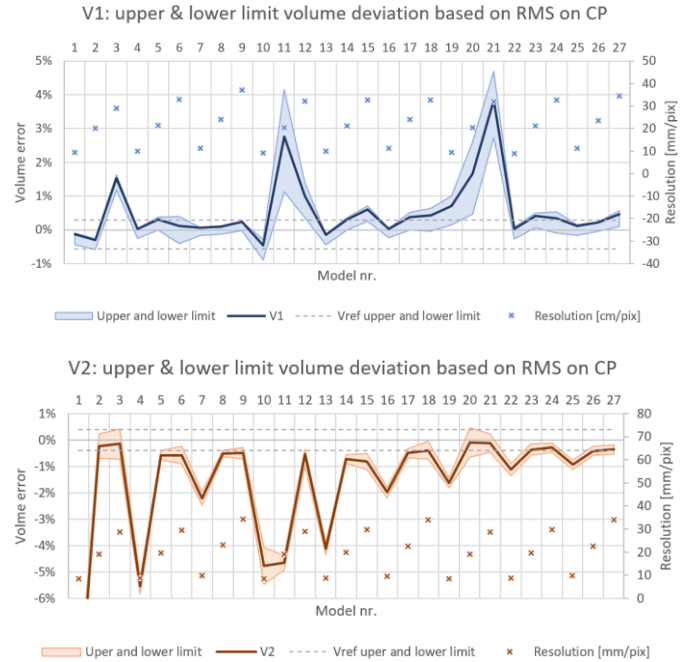


Figure 10: Upper & lower limit volume deviation

## IV. DISCUSSION

GNSS points in the horizontal plane, except for point 1 at V1, show similar deviation at both volumes. For the vertical deviation no regularity is noticeable and explainable. All measured points are within the permissible deviation.

The RMS on the second reference volume is higher than on the first, which can be explained by the size of the second project, which caused cumulative errors.

The second volume did meet some difficulties. Due to the large relief, with a maximum height difference of 27m, the necessary overlap at the lowest camera height (37.5m), could not be guaranteed so images acquired above the highest point of terrain were not aligned.

The deviation at control points, both in horizontal and vertical planes, is higher in the second volume. Due to its larger size, the GCP density decreases by 76%, which allows larger deviations. Figure 6 observe the deviation in the vertical plane is lower at absolute camera angles of 75° and 60° than at nadir images. In the horizontal plane, according to Figure 45, the opposite is true, nadir images result in a smaller horizontal deviation than tilt images.

In Figure 7, the model V2 with GSD 1cm/ pix can be declared invalid due to the alignment problem. For an absolute camera angle of 90°, decreasing ground resolution is accompanied by decreasing volume accuracy (on average from 0.40% to 1.98%). For a tilt camera, the following is true: decreasing ground resolution is accompanied by increasing volume accuracy (on average from 1.89% at high to 0.36% at low resolution).

The exponential trend line is more reliable for a dataset with less scatter (GSD 2 & 3cm/pix) than for a higher scatter, such as GSD 1cm/pix. The curve serves only to reflect a trend, not as a prediction curve, due to its low reliability ( $R^2 < 50\%$ ). From Figure 9, it is observed that higher processing time is associated with higher accuracy. However, this difference is at maximum 1%.

Figure 10 establishes a large volume deviation for the models based on high resolution at V2, these models experienced alignment problems so they are considered null and the following graph is obtained:

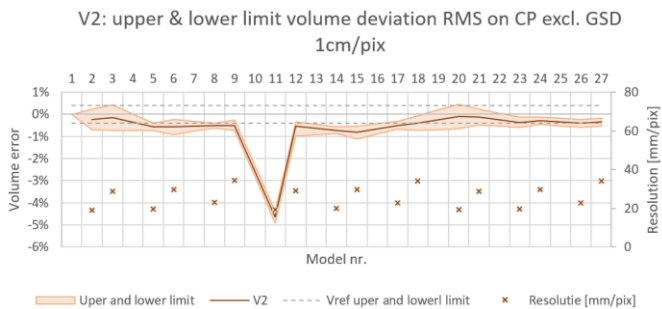


Figure 11: Upper & lower limit volume deviation excl. GSD 1cm/pix- V2

At the second volume, the upper and lower limits, of the photogrammetric and reference models, show an overlap at 15 out of 18 models (83%). Model 14 and 15 fall just outside the boundary (difference of 0.14%), at model 11 the difference between the lower boundary of the reference and upper boundary of the photogrammetric model is 3.98%.

In total, 23 out of 27 models (85%) at V1 have an overlap of the outer limits with the reference model. Models 3, 11, 20 and 21 have no overlap with the reference volume, the maximum difference between the two boundaries being 2.44% (model 21) and minimum 0.17% (model 20). These four models were measured at the lowest, and second lowest, resolution at a camera angle of 90°.

## V. CONCLUSION

A lower flight height brings higher resolution, higher accuracy at control points and lower volume accuracy. For large terrain differences, a variable flight height, as a function of terrain heights, is recommended.

The highest vertical accuracy at control points is achieved by applying an absolute camera angle, different from 90°. If accuracy in the horizontal plane is a priority, photogrammetric models based on nadir aerial photography give the best results. When the highest accuracy on the 3D location of a control point is desired, images with an absolute camera angle, different from 90°, give the highest accuracy.

A relative camera angle of 90° has the highest accuracy. Ideally, a dual flight pattern is set, with the camera axis changing during flight according to the slope, perpendicular to the flight direction, of the measured surface.

Considering the most recommended acquisition parameters, an upper and lower limit of the measured volume can be determined based on the vertical deviation at control points. Decreasing and increasing the reference surface represents these limits. Based on the experimentally collected data, it can be assumed with 83% certainty that the actual volume falls within these limits.

## ACKNOWLEDGEMENTS

First of all, I would like to thank Prof. dr. ing. Greet Deruyter for the opportunity to undertake this research and for sharing her extensive knowledge and experience in this field of research.

I would like to take this opportunity to thank Ghent University and specifically the Faculty of Engineering and

Architecture for allowing me to follow this educational programme. It is an honour to graduate as an engineer at this university.

## REFERENCE

- [1] Dubois, S., Vanhalletmont, Y., & De Bouw, M. (2019). Drones ten dienste van de bouwsector: Technologiën, uitdagingen en vooruitzichten. Brussel: WTCB.
- [2] Linder, W. (2006). Digital Photogrammetry - A Practical Course. Düsseldorf: Springer.
- [3] The MathWorks. (2022, december 23). structure from motion. Opgehaald van mathworks: <https://nl.mathworks.com/help/vision/ug/structure-from-motion.html>
- [4] Cramer, M., Przybilla, H.-J., & Zurhorst, A. (2017, September 4-7). UAV CAMERAS: OVERVIEW AND GEOMETRIC CALIBRATION BENCHMARK. The International Archives of the Photogrammetry, pp. 85-92. doi:10.5194
- [5] Sanz-Ablanedo, E., Chandler, J. H., Rodríguez-Pérez, J. R., & Ordóñez, C. (2018, October 9). Accuracy of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) and SfM Photogrammetry Survey as a Function of the Number and Location of Ground Control Points Used. Remote Sensing, p. 1606.
- [6] Aber, J. S., Marzloff, I., & Ries, J. B. (2010). Small-Format Aerial Photography: Chapter 3 - Photogrammetry. Elsevier, pp. 23-39. doi:10.1016/B978-0-444-53260-2.10003-1
- [7] Elkhachy, I. (2021, December). Accuracy Assessment of Low-Cost Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Photogrammetry. Alexandria Engineering Journal, 6, pp. 5579-5590. doi:10.1016/j.aej.2021.04.011
- [8] Baltasvias, E. P. (1999, maart 17). A comparison between photogrammetry and laser scanning. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, pp. 83-94.

## Inhoudsopgave

Dankwoord .....	I
Abstract .....	III
Extended abstract .....	IV
Lijst met figuren.....	XX
Lijst van tabellen.....	XXI
Lijst van acroniemen en symbolen .....	XXII
1    Introductie.....	1
1.1    Motivatie en probleem omkadering .....	1
1.2    Onderzoekachtergrond .....	1
1.3    Verloop van het onderzoek .....	1
2    Literatuurstudie.....	2
2.1    Europese wetgeving voor onbemande luchtvaartssystemen.....	2
2.1.1    Open categorie .....	2
2.1.2 <i>Specific</i> categorie.....	2
2.1.3 <i>Certified</i> categorie .....	3
2.1.4    Transitie.....	4
2.2    Inzetten van drones voor bouw- en landmeetkundige toepassingen .....	5
2.3    Fotogrammetrie .....	6
2.3.1    Data acquisitie ten behoeve van fotogrammetrie .....	6
2.3.2    Camera positie en brandpuntafstand .....	6
2.3.3    Foto oriëntatie.....	7
2.3.4    Relatieve camerapositie .....	8
2.3.5    SfM.....	8
2.3.6    Randvoorwaarden .....	11
2.3.7    Grondcontrolepunten .....	15
2.3.8    Soorten .....	16
2.4    Laserscanning .....	17
2.4.1    Lasers en licht .....	17
2.4.2    Veiligheid .....	17
2.4.3    Actieve scanners.....	18
2.5    SLAM.....	21
2.6    Vergelijking fotogrammetrie en laserscanning .....	22
2.7    Fotogrammetriesoftwarepakketten.....	25

2.7.1	Hardware voor fotogrammetrische softwareprogramma's.....	25
2.7.2	Case-studie .....	26
3	Probleemstelling.....	28
4	Onderzoeksvragen.....	28
5	Methode en materialen .....	29
5.1	Parameters .....	29
5.1.1	Camera en platform .....	29
5.1.2	Overlap en snelheid.....	30
5.1.3	Vluchthoogte .....	30
5.1.4	Camera tilt .....	31
5.1.5	Vluchtpatroon.....	32
5.1.6	Efficiëntie.....	32
5.2	Vorbereiding.....	32
5.2.1	Controle punten .....	32
5.2.2	Locatie .....	34
5.2.3	Vluchtpatroon.....	35
5.3	Data-aquisitie .....	37
5.3.1	Plaatsen en inmeten van GCP's en CP's .....	37
5.3.2	Uitvoeren van de vlucht .....	37
5.3.3	Laserscan .....	38
5.4	Verwerking .....	38
5.4.1	GCP & CP.....	38
5.4.2	Fotogrammetrie .....	39
5.4.3	Laserscan .....	40
5.4.4	Omzetten ruwe data .....	40
6	Resultaten.....	42
6.1	Meteorologische gegevens .....	42
6.2	GCP & CP.....	42
6.3	Laserscan .....	43
6.4	Fotogrammetrie .....	44
6.4.1	Volumemeting .....	47
7	Discussie .....	52
7.1	Acquisitie .....	52
7.2	Verwerking .....	53
8	Conclusie .....	56

Duurzaamheidsreflectie .....	57
Referenties .....	59
Bijlagen .....	63
Bijlage 1: Overzicht regelgeving .....	64
Bijlage 2: Vluchtpatronen volume 1 .....	65
Bijlage 3: Vluchtpatronen volume 2 .....	68
Bijlage 4: Coördinaten & toelaatbare fout GNSS ingewonnen GCP en CP - $V_1$ & $V_2$ .....	71
Bijlage 6: Ruwe data .....	73
Bijlage 7: Volume afwijking en verwerkingstijd per model .....	75
Bijlage 8: Absolute waarde van de volume afwijking bij een relatieve camerahoek .....	76

## Lijst met figuren

Figuur 1: Heinrich Wild en de C2 camera (Welter, 2022) .....	6
Figuur 2: Verschil tussen perspectief en orthografische weergave (anoniem, 2020).....	6
Figuur 3: Schematische voorstelling foto-oriëntatie (Linder, 2006) .....	7
Figuur 4: Invloed relatieve camerapositie; Links: parallel, Rechts: Convergent (Linder, 2006).....	8
Figuur 5: SfM o.b.v. twee cameraposities (The MathWorks, 2022a).....	8
Figuur 6: Voorstelling epipolair vlak, -lijn, punt en projectiepunt (The MathWorks, 2022a) .....	9
Figuur 7: SfM-MVS (The MathWorks, 2022a) .....	10
<i>Figuur 8: Drift effect, werkelijke en berekende camerapositie (The MathWorks, 2022a) .....</i>	<i>10</i>
Figuur 9: Werkwijze IL-NIQUE methode (Zang, Zang, & Bovic, 2015).....	13
Figuur 10: Impact sluitertijd en diafragma bij slecht belichte omstandigheden (Roncella et al, 2021) 14	14
Figuur 11: "Rolling" sensor (a) en "Global" sensor (b) (Incekara & Seker, 2021).....	14
Figuur 12: (a) Blokconfiguratie (b) corridorconfiguratie (Zhou, Daakir, Rupnik, & Pierrot-Deseilligny, 2020).....	15
Figuur 13: Invloed aantal GCP's op relatieve nauwkeurigheid (Sanz-Ablanedo et al., 2018) .....	16
Figuur 14: Principe triangulatie (Rodriquez-Quinonez, et al., 2014).....	18
Figuur 15: Principe schets pulse based scanner (Takudzwa, 2014) .....	19
Figuur 16: Schematische weergave twee gemoduleerde golven (European Association of Geoscientists & Engineers, 2007).....	20
Figuur 17: Pose graph (Pfungsthorn, 2014).....	21
Figuur 18: Aantal updates per jaar per softwareprogramma (Vercauteren & Lammes, 2021).....	25
<i>Figuur 19: Verwerkingstijd vs. computer hardware – lage resolutie (Pix4d, 2021a).....</i>	<i>26</i>
Figuur 20: Verwerkingstijd vs. computer hardware - standaard resolutie (Pix4d, 2021a) .....	26
Figuur 21: DJI FC6310 (DJI, 2023a) .....	29
Figuur 22: DJI Phantom 4 pro (DJI, 2023b).....	30
Figuur 23: GSD (camerahoogte) [cm/pix].....	31
Figuur 24: Schematische voorstelling te onderzoeken camerahoeken .....	31
Figuur 25: Schematische voorstelling vluchtpatroon: links (A), midden (B) & rechts (C) .....	32
Figuur 26: a) bitumen onbewerkt (links); b) aanbrengen eerste wit vlak (midden); c) finaal kenmerk (rechts) .....	33
Figuur 27: Meest ideale opstelling GCP's (rood) en CP's (blauw) .....	33
Figuur 28: Testlocaties en geozone (Skeyes, 2023).....	34
Figuur 29: Situering volume 1; orhto (links), DEM (rechts).....	34
Figuur 30: Situering volume 2; orhto (links), DEM (rechts).....	34
Figuur 31: Website tool vluchtschema: te fotograferen locaties (links); footprint gecreëerde beelden (rechts) (OpenStreetMap, 2023) .....	35
Figuur 32: Vluchtpatroon geïmporteerd in Litchi (VC Technology Ltd, 2023).....	36
Figuur 33: Altus NR3 GNSS (IndiaMART InterMESH Ltd, 2023).....	37
Figuur 34: Landingsplatform bij volume 1.....	37
Figuur 35: Leica P40 (Leica Geosystems AG - Part of Hexagon, 2023) .....	38
Figuur 36: Verwerkingsparameters a) aligneren (links); b) dichte puntenwolk (midden); c) DEM (rechts) .....	39
Figuur 37: Effectieve locatie controlepunten; links: $V_1$ , rechts: $V_2$ .....	42
Figuur 38: Afwijking GNSS en toelaatbare fout – $V_1$ .....	42
Figuur 39: Afwijking GNSS en toelaatbare fout – $V_2$ .....	43
Figuur 40: Lokalisering CP's voor bepaling KMF referentiemodel: links: $V_1$ ; rechts: $V_2$ .....	43

Figuur 41: Camera-as t.o.v. helling volume 1.....	44
Figuur 42: Camera-as t.o.v. helling volume 2.....	44
Figuur 43: Fout op controlepunten - $V_1$ .....	45
Figuur 44: Fout op controlepunten - $V_2$ .....	45
Figuur 45: Horizontaal relatieve afwijking op controlepunten .....	46
Figuur 46: Verticaal relatieve afwijking op controlepunten.....	46
Figuur 47: Totaal relatieve afwijking op controle punten .....	46
Figuur 48: Verdeling volume afwijking: links: volume 1; rechts: volume 2.....	47
Figuur 49: Impact grondresolutie op volume afwijking .....	47
Figuur 50: Locatie deelvolume - links: $V_1$ ; rechts: $V_2$ .....	48
Figuur 51: Boxplot spreiding volume afwijking bij relatieve camerahoek .....	48
Figuur 52: Relatieve volume afwijking in functie van relatieve camerahoek - GSD: 1cm/pix .....	49
Figuur 53: Relatieve volume afwijking in functie van relatieve camerahoek - GSD: 2 & 3cm/pix.....	49
Figuur 54: Boxplot Acquisitie- en verwerkingstijden – $V_1$ & $V_2$ .....	50
Figuur 55: Acquisitie- en verwerkingstijd vs. relatieve volume afwijking .....	50
Figuur 56: Boven- & ondergrens volume afwijking – $V_1$ .....	51
Figuur 57: Boven- & ondergrens volume afwijking – $V_2$ .....	51
Figuur 58: Impact helling op volumeverschil bij hoogteverschil referentieoppervlak.....	52
Figuur 59: Complicaties tijdens verwerking .....	53
Figuur 60: Boven- & ondergrens volume afwijking excl. GSD 1cm/pix - $V_2$ .....	55
Figuur 61: EUSPA - groene-energie oplossingen binnen de bouwsector (EUSPA, 2021).....	58
Figuur 62: Vluchtpatroon 1a (boven) en 1b (onder) .....	65
Figuur 63: Vluchtpatroon 2a (boven) en 2b (onder) .....	66
Figuur 64: Vluchtpatroon 3a (boven) en 3b (onder) .....	67
Figuur 65: Vluchtpatroon 1a (boven) en 1b (onder) .....	68
Figuur 66: Vluchtpatroon 2a (boven) en 2b (onder) .....	69
Figuur 67: Vluchtpatroon 3a (boven) en 3b (onder) .....	70
Figuur 68: Coördinaten & toelaatbare fout GNSS ingewonnen GCP en CP punten - $V_1$ .....	71
Figuur 69: Coördinaten & toelaatbare fout GNSS ingewonnen GCP en CP punten - $V_2$ .....	72

## Lijst van tabellen

Tabel 1: Transitievoorwaarden toegestane vliegafstand .....	4
Tabel 2: Prestatieniveau terrestrische laserscanning en SfM fotogrammetrie (Wilkinson, et al., 2016) .....	24
Tabel 3: Totale rekentijd per fotogrammetrieprogramma (Vercauteren & Lammes, 2021) .....	27
Tabel 4: Kwantitatief overzicht commerciële fotogrammetriesoftware (Vercauteren & Lammes, 2021) .....	27
Tabel 5: Overzicht modellen met bijhorende acquisitie-parameters .....	36
Tabel 6: Referentievolumen $V_1$ & $V_2$ .....	43
Tabel 7: Absoluut en relatieve camerahoek.....	44
Tabel 8: Numerieke waarden boxplot volume afwijking bij een relatieve camerahoek.....	48
Tabel 9: Europese droneregeling open categorie (Dronedepot, 2022).....	64
Tabel 10: Ruwe data GCP & CP - $V_1$ .....	73
Tabel 11: Ruwe data GCP & CP - $V_2$ .....	74



## Lijst van acroniemen en symbolen

AGL	Above Ground Level
ALS	Airborne Laserscan Sensor
BIQA	Blind Image Quality Assesment
BRISQUE	Blind/ Referenceless Image Spatial Quality Evaluator
BVLOS	Beyond Visual Line of Sight
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
CP	Grondcontrolepunt
DEM	Digital elevation model
DGLV	Directoraat-generaal Luchtvaart
DSO	Direct Sparse Odometry
DTAM	Dense Tracking and Mapping
DTM	Digitaal terrein model
EASA	European Union Aviation Safety Agency
FR-IQA	Full reference IQA
GCP	Check Point
GPS	Global Positioning System
GSD	Ground Sample Distance
ICP	Iterative closest point
ICP	Iterative Closes Point
ICP	Iterative closest point
ILNIQE	Integrated Local Natural Image Quality Evaluator
IMU	Inertial Measurement Unit
INS	Inertial Navigation System
IQA	Image Quality Asssment
KLT	Kanade-Lucas-Tomasi algoritme
KMS	Kwadratisch middelbare fout
LiDAR	Light detection and ranging
LSD-SLAM	Large-Scale Direct SLAM
LUC	Light UAS Operator Certificate
MSE	Mean Square Error
MVG	Multivariate Gaussian
MVS	Multi-View Stereo
NDT	Normal distributions transform
NIQUE	Natural Image Quality Evaluator
NR-IQA	No reference IQA
ORB-SLAM	Oriented FAST and Rotated BRIEF-SLAM
POS	Passive Optical Sensors
PSNR	Peak Signal-to-Noise Ratio
PTAM	Parallel Tracking and Mapping
SfM	Structure from Motion
SLAM	Simultaneous localization and mapping
SSIM	Structural Similarity
SVO	Semi-direct monocular Visual Odometry
TAW	Tweede algemene waterpassing
UAS	Unmanned Aerial System
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
VLOS	Visual Line of Sight
vSlam	Visual simultaneous localization and mapping
Luminantie	Een maat voor de helderheid van de hemel of andere grote lichtgevende oppervlakken.
Odometrie	Het gebruik van data uit bewegingssensors voor het bepalen van positie binnen een tijdsinterval

# 1 Introductie

## 1.1 Motivatie en probleem omkadering

Drones worden, mede door de technologische evolutie, ook binnen de bouwsector steeds meer ingezet voor de acquisitie van 3D data via fotogrammetrie. Hoewel het gebruik van drones voor fotogrammetrie snelle en kostenefficiënte data-acquisitie toelaat voor grote of moeilijk toegankelijke gebieden, worden met de klassieke statische inwinningstechnieken via laserscanning in combinatie met GNSS of totaalstations hogere nauwkeurigheden worden bekomen.

Daartegenover staat dat recente softwareontwikkelingen voor fotogrammetrie zich onder andere richten op de verbetering van de nauwkeurigheid van de resulterende puntenwolken, waardoor ze mogelijks de klassieke methoden kunnen vervangen voor bepaalde toepassingen. Het is echter onvoldoende duidelijk in welke mate de bereikbare nauwkeurigheden afhankelijk zijn van de omstandigheden en welke de randvoorwaarden zijn.

## 1.2 Onderzoekachtergrond

In deze masterproef wordt de impact, van de acquisitieparameters camerahoogte, -tilt en vluchtpatroon, op een volumemeting onderzocht. Verder wordt de variatie in camera tilt en vluchtpatroon gebundeld om de relatie tussen een relatieve camerahoek, hoek tussen het in te meten object en camera-as, en de behaalde volumenaauwkeurigheid te bepalen. Tenslotte wordt de totaal tijd om een model, met bepaalde acquisitieparameters, te genereren weerspiegeld aan de behaalde nauwkeurigheid.

Ondanks uitgebreide onderzoeken binnen het domein fotogrammetrie, op basis van luchtfotografie verworven met een drone, blijven nieuwe gelijkaardige onderzoeken steeds zinvol. De data-acquisitie vindt plaats in een niet gestandaardiseerde buitenomgeving waardoor ieder onderzoek uniek is naargelang zijn omgeving. Daarnaast zijn fotogrammetrische softwarepakketten voortdurend onderworpen aan optimalisatie, dit in combinatie met evoluerende hardware opstellingen, maakte het de laatste jaren mogelijk grotere datasets met een hogere nauwkeurigheid te verwerken.

## 1.3 Verloop van het onderzoek

In dit proefschrift werden twee, in omvang en reliëf, verschillende volumes ingemeten. Twee data-acquisitie methoden werden toegepast, laserscanning voor een ontwikkelen van een referentiemodel en fotogrammetrie, gebaseerd op luchtfotografie verworven met een drone, als onderzoekmodel.

De luchtbeelden werden per terrein ingewonnen onder een variërende vluchthoogte, camerahoek en vluchtpatroon. Vluchthoogtes evenredig met een grondresolutie (GSD) 1, 2 en 3cm/pix werden ingesteld en de camerahoek, t.o.v. de horizon, bedroeg 90°, 75° en 60°. Als laatste werden de beelden onder drie verschillende vluchtpatronen ingewonnen, twee onderling loodrecht enkelvoudige vluchtpatronen en een derde in dubbel rastervorm.

Het eerste deel omvat een literatuurstudie binnen dit onderzoekdomein, waar de methodiek van fotogrammetrie en gelijkaardige onderzoeken wordt besproken. Verder worden de toegepaste materialen ,methode en verwerking doornomen. De resultaten worden onderverdeeld in vier subhoofdstukken: meteorologische gegevens, controlepunten, referentiedataset en fotogrammetrie. Het onderzoek eindigt met een discussie van de resultaten en het vormen van een conclusie.

## 2 Literatuurstudie

### 2.1 Europese wetgeving voor onbemande luchtvaartssystemen

Sinds 31 december 2020 geldt een Europese regelgeving (2018/1139) voor alle lidstaten van de Europese Unie, IJsland, Noorwegen en Zwitserland met als doel de drone-activiteit aan te moedigen en te harmoniseren. Deze nieuwe regelgeving vervangt het onderscheid op basis van doel (recreatief, sportief of commercieel) door een categorisering gericht op het risico verbonden aan een vlucht (Open, Specific, Certified). (mobility, 2022a) Er wordt eveneens een onderscheid gemaakt tussen de UAS (Unmanned Aerial System) exploitant of operator en de piloot (*Remote pilot*). De UAS exploitant is een rechtspersoon of natuurlijke persoon die een of meer UAS exploiteert of bevoegd is te exploiteren. Dit kan een organisatie zijn met veel piloten of één persoon. Gewoonlijk zijn drones eigendom van, en geregistreerd bij, een exploitant. Een piloot is de gezagvoerder die verantwoordelijk is voor een individuele missie. (EASA, 2022)

#### 2.1.1 Open categorie

De open categorie wordt onderverdeeld in subcategorieën (A1, A2 en A3) op basis van de mate waarin over of rond mensen en gebouwen gevlogen wordt. Deze subcategorie is afhankelijk van de klasse van het UAS. Bijlage 1 geeft een overzicht van de subcategorieën en de reglementering geldig vanaf 31 december 2021. (mobility, 2022b)

#### 2.1.2 Specific categorie

Vluchten die niet aan de voorwaarden van de Open categorie voldoen, houden een verhoogd risico in en behoren tot de categorie *Specific*. Dit zijn vluchten hoger dan 120m AGL (*Above Ground Level*), boven mensen, BVLOS (*Beyond Visual Line of Sight*) en *dropping*. Om in deze categorie te vliegen moet de exploitant aan minimaal aan één van onderstaande zaken voldoen, deze worden ondernomen bij het DGLV (Directoraat-generaal Luchtvaart).

- een verklaring afleggen indien de vluchttuitvoeringen voldoen aan één van volgende standaardscenario's;
  - STS-01 - VLOS
  - STS-02 - BVLOS
- verkrijgen van exploitatievergunning op grond van operationele risicobeoordeling;
- verkrijgen van certificaat LUC (*Light UAS Operator Certificate*), die enkel aan een rechtspersoon kan worden afgegeven.

(mobility, 2022c)

##### 2.1.2.1 STS-01

STS-01 – VLOS (*Visual Line of Sight*) boven een gecontroleerde grondoppervlakte in een bevolkte omgeving. Algemeen worden volgende vorderingen opgelegd binnen STS-01.010: (mobility, 2022d)

- UAS moet binnen 120m van het dichtstbijzijnde punt van het aardoppervlak worden gehouden.
- Wanneer het een kunstmatig obstakel hoger dan 105m binnen een horizontale afstand van 50m nadert, mag de maximale vlieghoogte van het onbemande luchtvaartuig op verzoek van de voor het obstakel verantwoordelijke entiteit worden verhoogd tot 15 m boven de hoogte van het obstakel.
- De maximale hoogte van het operationele volume mag niet meer dan 30m de toegestane hoogte, vastgelegd in bovenstaande bepalingen, overschrijden.
- Tijdens de vlucht mag het UAS niet over gevaarlijke goederen beschikken.

Vervolgens wordt het standaardscenario verder ingedeeld in onderstaande bepalingen. Hier verder op ingaan gaat buiten het bestek van dit onderzoek en wordt doorverwezen naar de Europese vordering 2019/947 zelf.

- STS-01.020: UAS vluchten in STS-01
  - Grondrisico buffer, certificaat theoretische bekwaamheid piloot, praktische training piloot voor STS
- STS-01.030: Verantwoordelijkheden van de UAS exploitant
  - Vluchtprocedure, noodplan, extern verleende diensten
- STS-01.040: Verantwoordelijkheden van de piloot
  - Theoretisch kennis examen, praktische vaardigheid opleiding en beoordeling

(EASA eRules, 2022)

#### 2.1.2.2 STS-02

STS-02 – BVLOS met luchtruimwaarnemers boven een gecontroleerde grondoppervlakte in een dunbevolkte omgeving. (mobility, 2022d)

De algemene bepalingen zijn dezelfde als de algemene bepalingen in 2.1.2.1. Vervolgens wordt het standaardscenario verder onderverdeeld in onderstaande bepalingen. Hier verder op ingaan gaat buiten het bestek van dit onderzoek en wordt voor doorverwezen naar de Europese vordering 2019/947 zelf.

- STS-02.020: UAS vluchten in STS-02
  - Vluchtzichtbaarheid, certificaat theoretische bekwaamheid piloot, praktische training piloot voor STS
- STS-02.030: Verantwoordelijkheden van de UAS exploitant
  - Vluchtprocedure, noodplan, extern verleende diensten
- STS-02.040: Verantwoordelijkheden van de piloot
- STS-02.050: Verantwoordelijkheden van de luchtruimwaarnemer

(EASA eRules, 2022)

#### 2.1.3 Certified categorie

Deze categorie richt zich op operaties met het hoogste risiconiveau. De aanpak om de veiligheid van deze vluchten te garanderen zal gelijklopend zijn met de bemande luchtvaart, waardoor bijna alle luchtvaartvoorschriften moeten gewijzigd worden. Momenteel zijn hier nog geen geldende verordeningen voor. De EASA heeft besloten volgende drie zaken aan te pakken:

- Type 1: Internationale vlucht van gecertificeerde vrachtdrones uitgevoerd volgens de instrumentele vluchtregel (IFR) in luchtruimklassen A-C en het opstijgen en landen op luchthavens die onder het toepassingsgebied van het EASA vallen.
  - Bijvoorbeeld een onbemande A320 die een vracht vervoert van Parijs naar New York.
- Type 2: Drone-operaties in stedelijke of plattelandsomgevingen waarbij gebruik wordt gemaakt van vooraf bepaalde routes in luchtruimen waar U-ruimte diensten worden verleend. Dit omvat operaties van onbemande drones die passagiers of vracht vervoeren.
  - Bijvoorbeeld luchttaxi- of pakketbezorgingsdiensten die rechtstreeks naar uw balkon of het dak van uw gebouw of uw voortuin komen.
- Type 3: Zoals in type 2, maar uitgevoerd met een vliegtuig met een piloot aan boord. Eigenlijk wordt verwacht dat dit het eerste type luchttaxi-operaties omvat, waarbij de piloot aan boord is.

#### 2.1.4 Transitie

Voordat de Europese verordeningen volledig in werking treden, wordt een transitieperiode ingelast. Dit om een geleidelijke omschakelijking van de oude (Belgische) naar de nieuwe Europese regelgeving mogelijk te maken.

Indien vluchtuitvoeringen zijn voltooid binnen het Belgisch wettelijk kader was er een transitieperiode voorzien, tot 31 december 2021, dat de omschakeling mogelijk maakt.

UAS zonder klassenlabel (C0-C4) mogen onder voorwaarden gebruikt worden binnen alle subcategorieën van de open categorie tot 31 december 2023. De voorwaarden worden weergegeven in Tabel 1. Vanaf 1 januari 2024 mogen deze bestuurd worden in categorie open A1 (<250g) of A3 (250g-2kg). Indien de risicobeoordeling het toelaat, blijft het mogelijk de UAS te gebruiken in categorie *specific*. (mobility, 2022e)

Sinds 8 december 2022 is de eerste UAS op de markt beschikbaar met een klassenlabel (C1). (DJI, 2022)

Tabel 1: Transitievoorwaarden toegestane vliegafstand

Gewicht UAS	Toegestane vliegafstand
< 500 g	In de buurt van mensen, volgens voorschriften subcategorie A1
< 2 kg	Minimaal 50m afstand van mensen
< 25 kg	Minimaal 150m afstand van woon-, handels-, industrie- of recreatiezones volgens de voorschriften voor subcategorie A3

## 2.2 Inzetten van drones voor bouw- en landmeetkundige toepassingen

Afhankelijk van de situatie kan een meting vanuit de lucht aangewezen zijn. Mogelijke omstandigheden zijn bijvoorbeeld geologische rampen waar toegang vanop het land vaak moeilijk en tijdrovend is. Metingen vanuit de lucht kunnen deze rampen vroegtijdig identificeren, beheren en een aanstuurpunt zijn voor werken vanop het land. (Jinxing, et al., 2021)

Het WTCB bracht in 2019 een haalbaarheidsstudie uit waar de analyse naar de mogelijkheden van drones binnen de bouwsector onderzocht werd. Hieruit kon men algemeen concluderen dat drones een ongeziene service bieden om een groot aantal foto's of 3D-gegevens te verzamelen. Daarnaast is het mogelijk een nauwkeurige 3D-weergave te maken van een volledige site en milieutoezicht uit te voeren vanuit de lucht. (Dubois, Vanhallemont, & De Bouw, 2019)

Vervolgens kunnen drones een kostenefficiënte oplossing zijn voor een aantal bestaande taken zoals 3D-opmetingen, al dan niet geautomatiseerde repetitieve inspecties (bv: visueel & thermografisch) en om verplaatsingen op de werf in kaart te brengen. (Dubois, Vanhallemont, & De Bouw, 2019)

Als laatste kunnen ze bepaalde risico's van taken beperken. Dit is het geval voor inspecties op hoogte, waar geen steigers of veiligheidsschouwen moeten aangebracht worden, opmetingen in gevaarlijke omgeving (chemische verontreiniging, structurele instabiliteit, ...) en het toezien op risicovolle activiteiten in *realtime*. (Dubois, Vanhallemont, & De Bouw, 2019)

De publicatie van het WTCB (Dubois, Vanhallemont, & De Bouw, 2019) haalt volgende voorbeelden van toepassingen aan:

Een eerste voorbeeld is documentatie en communicatie. De drone gebruikt als mediaproductent om de werkelijkheid beter te begrijpen. Dit kan van toepassing komen bij de start van een bouw wanneer de eerste plannen worden uitgewerkt. Dan is informatie van de huidige site van cruciaal belang. Daarnaast kunnen ze iedere bouwfase correct documenteren en fotograferen. Vervolgens is het mogelijk bij erfgoed, wat vaak zeer hoge gebouwen zijn, in te staan voor kwalitatieve visuele ondersteuning. Als laatste binnen deze categorie dienen de foto's, video's of 3D-weergaves voor een krachtig communicatiemiddel.

Daarnaast is inspectie een tweede voorbeeld waarmee bestaande pathologieën gediagnosticeerd kunnen worden. Zo kan een bestek van een dak opgemaakt worden op basis van beelden. Algemeen bieden ze een kostenreductie van kwaliteitscontroles op hoogte. Naast opdrachten tijdens of voor de bouw/ renovatie van gebouwen, kunnen drones zeer snel ingezet worden voor schade te detecteren na rampen of ongevallen.

Als derde zijn geometrische en topografische opmetingen die vormen en afmetingen van een gebouw, een deel ervan of de omgeving nauwkeurig in beeld brengen. Deze vallen onder de noemer precisiemetingen: ontwerp, uitvoering en controle en zijn taken voor landmeter, aannemer en architect. Traditioneel gebeuren deze door een totaal- en/of gps-station. Door middel van fotogrammetrie of laserscan zijn er tal van mogelijkheden op vlak van leverbare informatie. Zo kan iedere baksteen van een muur of iedere steen op een terrein potentieel weergegeven worden in een 3D-model waarbij het mogelijk is de correcte kleur aan toe te kennen. De afgeleverde modellen binnen deze categorie zijn vaak geogerefererde puntenwolken in hoge resolutie, 3D modellen, orthofoto's en geometrische modelleringen (lijntekeningen, 3D-modellen, BIM-modellen).

Als laatste is de toezicht en monitoring een belangrijke toepassingen. Zo kan de aannemer werken in *realtime* opvolgen. Indien het om delicate handelingen gaat kan de coördinatie beter verlopen door zicht te hebben op verschillende perspectieven. Met de vooruitgang van artificiële intelligentie (AI) is het mogelijk automatisch uitvoeringsgebreken op te sporen.

## 2.3 Fotogrammetrie

### 2.3.1 Data acquisitie ten behoeve van fotogrammetrie

In 1851 ontstonden de eerste gedachten om foto's, uit de pas ontwikkelde camera, te gebruiken voor kaartdoeleinden. 50 jaar later werd deze gedachte realiteit en ontstond fotogrammetrie als een langafstandsmeettechniek voor landschappen op basis van analoge beelden. Het duurde tot 1928 wanneer Heinrich Wild de eerste luchtcamera, de C2 alsook afgebeeld op Figuur 1, ontwikkelde voor professionele luchtfotogrammetrie. De daaropvolgende 80 jaar evolueerde de camera steeds verder van analoog tot digitaal, hierdoor konden kaarten sneller en gedetailleerder afgeleverd worden. (Welter, 2022)

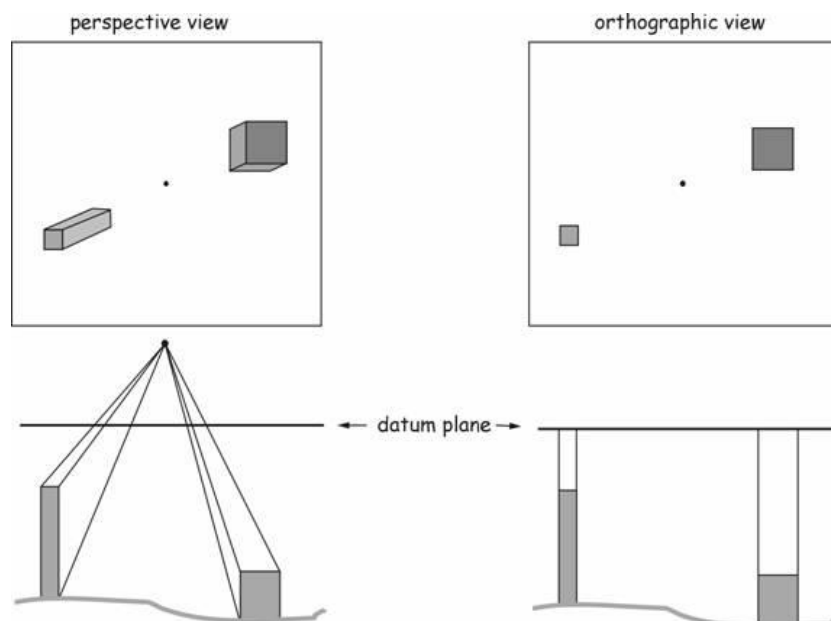


Figuur 1: Heinrich Wild en de C2 camera (Welter, 2022)

De exponentiële technologische vooruitgang leidde tot een evolutie in de industrie waardoor nieuwe kansen beschikbaar kwamen. Bijvoorbeeld *cloud computing*, AI voor de verwerking en evolutie in sensor- (bv: CMOS-sensor) en chiptechnologie als hardware. De stijging in toegankelijkheid ging gepaard met een kostreductie waardoor luchtfotogrammetrie voor een breder publiek mogelijk werd. (Welter, 2022)

### 2.3.2 Camera positie en brandpuntafstand

Een fotografische camera ontwikkelt een beeld te vergelijken met een centraal perspectief. Hierbij bevindt het perspectief centrum zich in het optisch middelpunt van de lens waar de gereflecteerde aardstralen op inslaan. Figuur 2 toont het verschil tussen het perspectief en orthografisch beeld. Het perspectief zelf wordt dan weer bepaalt door de brandpuntafstand. (Lillesand & Krieger, 1994)



Figuur 2: Verschil tussen perspectief en orthografische weergave (anoniem, 2020)

Hoe kleiner de afstand tussen de camera en het object en hoe groter de lenshoek, hoe groter de vervormingen zijn ten gevolge van het centraal perspectief. Omgekeerd, hoe groter de afstand tussen het object en de camera en hoe kleiner de lenshoek, hoe kleiner de vervorming. Indien de camera zich op een oneindige afstand (super telefoto) van het object bevindt, nadert de lenshoek naar nul waardoor de projectie parallel gebeurt en er geen vervormingen zijn. Satellieten benaderen dit principe door op honderden kilometers van het object (voornamelijk aardoppervlak) te bevinden. (Linder, 2006)

### 2.3.3 Foto oriëntatie

Volgens (Linder, 2006) is de positie van de foto is ondubbelzinnig gedefinieerd wanneer de coördinaten van het projectiecenter  $(x_0, y_0, z_0)$ , drie rotatiehoeken  $(\varphi, \omega, \kappa)$  en brandpuntafstand gekend zijn t.o.v. een referentiestelsel. Deze parameters worden weergegeven in Figuur 3. De brandpuntafstand is een constante waarde in functie van de gebruikte lens. In het geval van nadir foto's, bij luchtfotografie, nadert de waarde van  $\varphi$  en  $\omega$  nul. In de praktijk is deze echter nooit exact nul t.g.v. externe invloeden (wind, kleinschalige beweging, ...). De gemiddelde verscaling geldt als volgt:

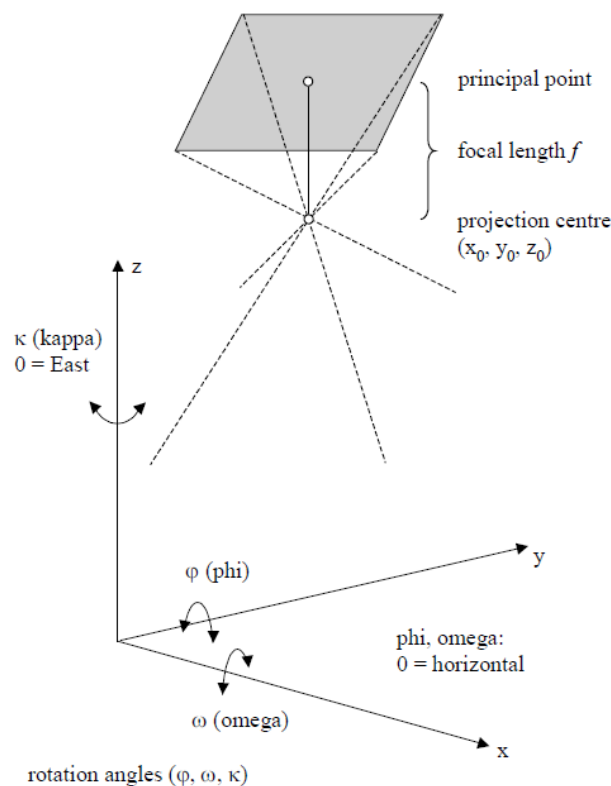
$$M_b = \frac{f}{h_g}$$

Waarbij:

$f$  = brandpuntafstand

$h_g$  = afstand tussen het object en projectiecenter

(Linder, 2006)



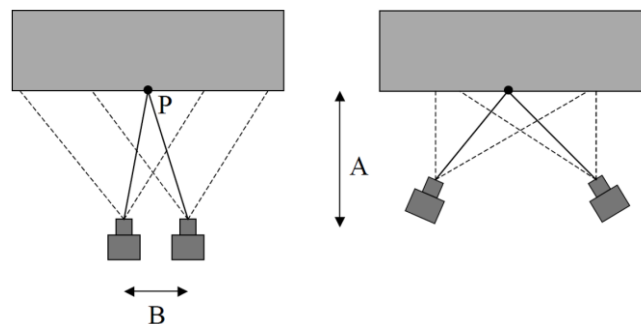
Figuur 3: Schematische voorstelling foto-oriëntatie (Linder, 2006)



### 2.3.4 Relatieve camerapositie

Voor het bekomen van driedimensionale punten van een object, zijn minstens twee foto's nodig van het object. De foto's moeten genomen zijn vanop verschillende posities, parallel of convergent. Het punt P, van Figuur 4, is het snijpunt van  $P' \rightarrow P$  en  $P'' \rightarrow P$ . De nauwkeurigheid van deze bepaling is onder meer afhankelijk van de onderlinge hoek tussen de twee cameraposities, hoe kleiner de hoek des te onnauwkeurig de bepaling van P. (Linder, 2006)

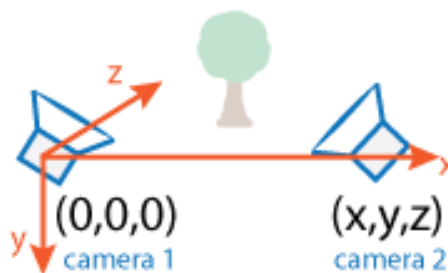
Indien de afstand tussen de camera en het object gelijk is aan A en de afstand tussen de twee cameraposities aan B, stijgt de nauwkeurigheid van de coördinaat P door het vergroten van B. Als hierdoor de overlap tussen beide foto's te klein wordt, moet een convergente camerapositie gekozen worden. Door deze cameraopstelling worden extra perspectief vervormingen gecreëerd. Een parallelle camerapositie is goed voor menselijke stereoweergaven en automatische reconstructie, een convergente leidt vaak tot hogere precisie, voornamelijk in diepte (z-richting bij luchtfotografie). (Linder, 2006)



Figuur 4: Invloed relatieve camerapositie; Links: parallel, Rechts: Convergent (Linder, 2006)

### 2.3.5 SfM

SfM (*Structure from Motion*) is een techniek waarbij een 3D structuur wordt benaderd op basis 2D beelden. In een eenvoudige situatie wordt een object gefotografeerd vanop twee verschillende locaties, zoals in Figuur 5, dit kan door middel van twee camera's of een verplaatsbaar toestel. Het algoritme neemt de eerste camerapositie aan als de oorsprong, de daarop volgende locaties worden berekend. (The MathWorks, 2022a)



Figuur 5: SfM o.b.v. twee cameraposities (The MathWorks, 2022a)

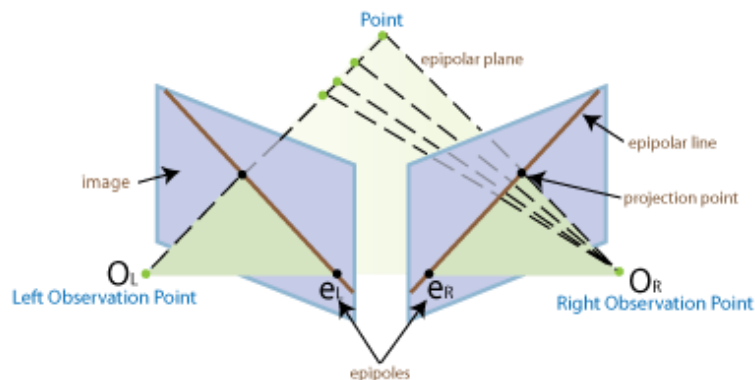
De cameraposities worden bepaald op basis van overeenkomstige punten tussen de afbeeldingen, dit o.b.v. gelijke kenmerken of het traceren van punten. Het Kanade-Lucas-Tomasi (KLT) algoritme is een gebruikelijke techniek voor het traceren van kenmerken voor dichtbij zijnde cameraposities. Eenmaal cameraposities zich verder van elkaar bevinden, wordt het KLT algoritme minder bruikbaar. Hierdoor wordt overgegaan tot het principe van overeenkomstige kenmerken. (The MathWorks, 2022a)

De relatieve positie van de tweede camera kan d.m.v. de fundamentele matrix ( $F$ ) bepaald worden. Deze matrix geeft de epipolaire geometrie weer van de twee camera's. Het relateert een punt van de ene camera aan een epipolaire lijn in de andere. Het epipolaire vlak, -lijn, punt en projectiepunt zijn schematisch weergegeven in Figuur 6.  $F$  is een  $3 \times 3$  matrix van de tweede graad en voldoet aan volgende vergelijking:

$$x'^T F x = 0$$

*Vergelijking 1: Fundamentele matrix*

Waarbij  $x$  de 2D positie van het punt  $X$  (in het 3D model) weergeeft op de eerste en  $x'$  op de tweede afbeelding. (Hartely, 2004)



*Figuur 6: Voorstelling epipolair vlak, -lijn, punt en projectiepunt (The MathWorks, 2022a)*

Volgens Hartely (2004) geeft de fundamentele matrix, zoals eerder vermeld, enkel de onderlinge relatie weer tussen cameraposities. Hierdoor kan een relatief correct model gecreëerd worden, voor een verscaling naar een metrisch en gerefereerd model is de essentiële matrix ( $E$ ) nodig. Deze matrix kan aanzien worden als een toevoeging op de fundamentele matrix voor het normaliseren van de afbeeldingscoördinaten. De essentiële matrix heeft minder vrijheidsgraden (5) en bijkomende eigenschappen in vergelijking met de fundamentele matrix. Door deze extra eigenschappen is het mogelijk de relatieve positie en oriëntatie tussen camera's te bepalen. Beide matrixen worden onderling als volgt beschreven:

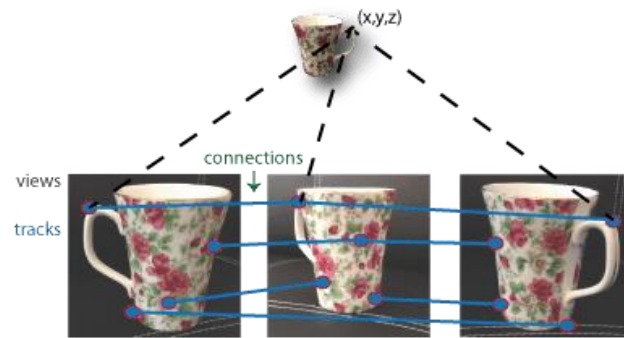
$$E = (K')^T F K$$

*Vergelijking 2: Essentiële matrix*

Waarbij:

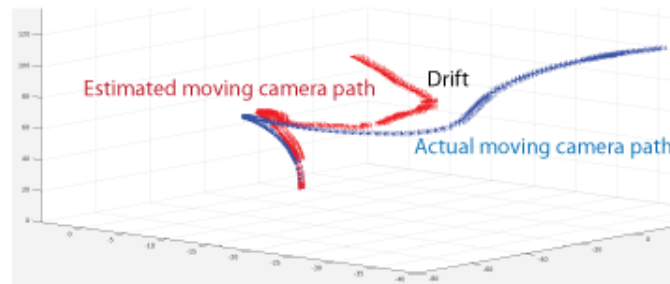
$K'$  en  $K$ : De intrinsieke kalibratiematrixen van de twee afbeeldingen

Indien de SfM methode wordt toegepast op meerder cameraposities spreekt men over SfM-MVS waarbij MVS staat voor "Multi-View Stereo". Deze techniek wordt toegepast voor de fotogrammetrische verwerking van luchtfoto's. Net zoals bij SfM o.b.v. twee beelden, wordt bij SfM-MVS het derde beeld bepaald door de onderlinge relatie met het tweede beeld enzovoort. De relatieve onderlinge verhoudingen moeten vervolgens getransformeerd worden naar een gemeenschappelijk coördinatenstelsel. Gewoonlijk wordt eerst een relatief model gecreëerd t.o.v. een relatief stelstel (bv: t.o.v. de eerste afbeelding) zoals in Figuur 7. Met behulp van de essentiële matrix kan het relatief model getransformeerd worden naar een coördinatenstelsel. (The MathWorks, 2022a)



Figuur 7: SfM-MVS (The MathWorks, 2022a)

Het bepalen van de onderlinge relatie tussen cameraposities gaat gepaard met fouten, dit door onnauwkeurige puntlocatie, ruis en onnauwkeurige kalibratie. De fout op een relatie is cumulatief waardoor deze vergroot naarmate het aantal cameraposities stijgt, ook wel drift genaamd. Het vergroten van de fout in functie van het aantal cameraposities is afgebeeld op Figuur 8 waar de blauwe punten de werkelijke cameraposities weergeeft en de rode de posities tgv drift. Drift kan gereduceerd worden door cameraposities en 3D-puntlocaties te verfijnen. (The MathWorks, 2022a)



Figuur 8: Drift effect, werkelijke en berekende camerapositie (The MathWorks, 2022a)

## 2.3.6 Randvoorwaarden

### 2.3.6.1 Cameraeigenschappen

Bijna alle camera's die gewoonlijk in UAV-toepassingen (Unmanned Aerial Vehicle) worden gebruikt, vertonen aanzienlijke verschillen tussen laboratorium- en testveldkalibraties. Een laboratoriumkalibratie is derhalve niet nodig en nuttig voor het merendeel van de huidige camera-systemen. Het gebruik van ruw beeldmateriaal (RAW) wordt aanbevolen, voornamelijk bij camera's van producent DJI. Het JPG-formaat registreert door compressie echter niet de werkelijke beeldfouten. Hierdoor is een zelf- of in-situ kalibratie voldoende. Uit experimenteel onderzoek bleek dat een in-situ kalibratietest van twee gecombineerde nadirblokken in kruisconfiguratie met een ligt verschillende vlieghoogte de beste resultaten oplevert. (Cramer, Przybilla, & Zurhorst, 2017)

### Afbeeldingskwaliteit

De afbeeldingskwaliteit kan beoordeeld worden met een getalwaarde, o.b.v. IQA algoritme (*Image Quality Assssment*), waaruit het nauwkeurighedsverlies kan bepaald worden t.g.v. laag kwalitatieve afbeelding. Twee categorieën kunnen onderscheiden worden: “*Full reference*” (FR-IQA) en “*No reference*” (NR-IQA) algoritmes. Waarbij de eerste een afbeelding vergelijkt met een referentie afbeelding zonder distorsie en de tweede de afbeelding beoordeeld op basis van de afbeelding zelf zonder een referentie. (Mittal, Moorthy, & Bovic, 2011)

Het “Peak Signal-to-Noise Ratio” (PSNR) algoritme geeft de verhouding weer tussen het maximaal vermogen van een signaal en het aandeel ruis dat de getrouwheid beïnvloed. Voor dit type algoritme is een referentie afbeelding nodig waardoor dit binnen de FR-IQA categorie valt. De gemiddeld kwadratische fout (MSE) en resulterende PSNR wordt als volgt bepaald:

$$MSE = \frac{1}{mn} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} [I(i,j) - M_i(i,j)]^2$$

Vergelijking 3: PSNR gemiddeld kwadratische fout

$$PSNR_i = 10 \log_{10} \left( \frac{MAX_i^2}{MSE_i} \right)$$

Vergelijking 4: Resulterende PSNR

Waarbij:

m en n: De afmetingen (in pixels) van de i<sup>de</sup> afbeelding weergeeft

I: De referentieafbeelding

M: Overige afbeeldingen van lagere kwaliteit dan referentieafbeelding

MAX<sub>i</sub>: maximaal mogelijk aantal pixelwaarden van de referentieafbeelding (I)

(Mittal, Moorthy, & Bovic, 2011)

De “Structural Similatrity” (SSIM) is een methode oorspronkelijk ontwikkeld voor de waargenomen kwaliteit van digitale beelden te voorspellen. Net zoals PSNR behoort ook deze methode tot de FR-IQA categorie. Ook hier worden de beelden dat de beste DSM reconstrueert als referentie aanschouwd hoewel ook deze niet vervormings- en ruisvrij zijn. In tegenstelling tot PSNR, waar de berekening gebaseerd is op absolute verschillen, wordt bij SSIM rekening gehouden met een waarnemingsmodel. Bij dit model wordt een vergelijking van pixelintensiteiten, genormaliseerd door luminantie en contrast, beschouwd. Indien x en y twee corresponderende vensters op het referentie- en onderzocht beeld zijn, wordt de SSIM gegeven door:

$$SSIM = \frac{(2\mu_x\mu_y + c_1)(2\sigma_{xy} + c_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + c_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + c_2)}$$

Vergelijking 5: Originele bepaling van SSIM

Waarbij:

$\mu_x$  en  $\mu_y$ : Gemiddelde waarde van venster x en y

$\sigma_x^2$ ,  $\sigma_y^2$  en  $\sigma_{xy}$ : Elementen van de covariantie matrix voor x en y

$c_1$  en  $c_2$ : Twee constanten voor het stabiliseren van de breuk indien de naar nul nadert

Voornamelijk geldt:

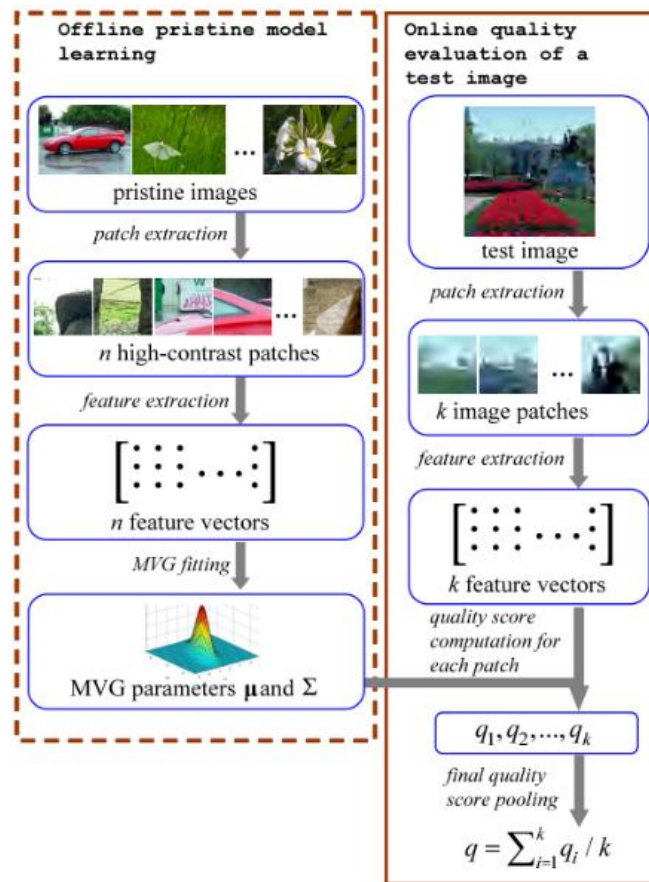
$c_1 = (k_1 MAX_I)^2$  waarbij  $MAX_I$  het maximaal aantal pixels is van afbeelding I en  $k_1 = 0.01$

$c_2 = (k_2 MAX_I)^2$  waarbij  $MAX_I$  het maximaal aantal pixels is van afbeelding I en  $k_2 = 0.03$

(Mittal, Moorthy, & Bovic, 2011)

De "Blind/ Referenceless Image Spatial Quality Evaluator" (BRISQUE) is een blinde beoordeling van de afbeeldingskwaliteit (BIQA) ontwikkeld door Mittal et al. Het is gebaseerd op de veronderstelling dat sommige onderscheidende kenmerken van een beeld een specifiek statistische verdeling moeten hebben waarbij een verstoord resultaat voorkomt ter plaatste van vervormingen. Elk afzonderlijke vervormingsbron wijzigt de verdeling op een andere manier. Het modelleren van een dergelijke coëfficiëntverdeling, rekening houdend met natuurlijke en vervormde beelden, maakt het mogelijk de invloed van vervorming te evalueren en kwantificeren. Eerst wordt een probabilistisch ondersteunende vectorclassificatie (SVC) en een ondersteunend vectorregressie (SVR) model getraind om de waarschijnlijkheid van elke vervorming in het beeld te bepalen. Om daarna de kenmerkstatistieken te correleren met de werkelijke scores voor het oordeel over de beeldkwaliteit. (Mittal, Moorthy, & Bovic, 2011)

De "Integrated Local NIQE" (ILNIQE) is een BIQA, ontwikkeld door Zhang et al. en geïnspireerd op het eerdere werk van Mittal et al. over NIQE. ILNIQE verzamelt statistische kenmerken van een beeld, zoals genormaliseerde luminantie, gradiënten en kleur voor een gedetailleerde beschrijving van elk afzonderlijk statistisch kenmerk, berekend uit een reeks onvervormde beelddelen. Het past de geëxtraheerde informatie toe in een multivariate Gaussian (MVG) model. Dit MVG-model fungeert als referentie om de beeldkwaliteit van een algemeen beeld te analyseren. Om de kwaliteit van een testbeeld te bepalen worden verschillende beelddelen geëxtraheerd. Voor elk beelddeel wordt een gepast MVG-model vergeleken met de referentie MVG. De Algemene beeldkwaliteit is het gemiddelde van alle afzonderlijke scores van de beeldonderdelen. Figuur 9 geeft de werkwijze van deze IL-NIQUE methode weer. (Zang, Zang, & Bovic, 2015). Het is gebruikelijk dat sommige natuurlijke beeldstatistieken door ILNIQE ook geïmplementeerd worden in BRISQUE. Deze laatste wordt zowel getraind op kenmerken van natuurlijke en vervormde beelden. De omgeving wordt meer beïnvloed door het type vervorming om de beoordelaar op af te stemmen. Daar tegenover wordt een grotere flexibiliteit verwacht bij INLIQE, voornamelijk voor vervormingseffecten dat gewoonlijk niet of nauwelijks voorkomen tijdens IQA algoritme training. Dit doordat het algoritme niet vasthangt aan een specifiek vervormingstype. (Roncella, Bruno, Diotri, Thoeni, & Giacomini, 2021)



Figuur 9: Werkwijze IL-NIQUE methode (Zang, Zang, & Bovic, 2015)

## ISO waarde

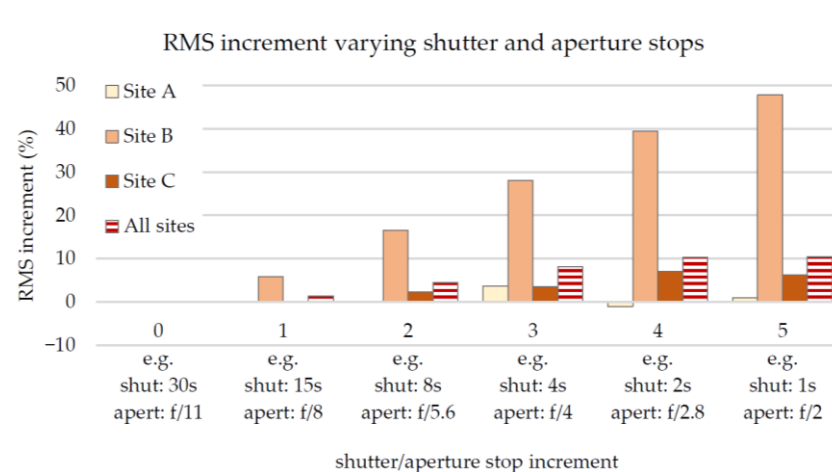
De afkorting ISO staat voor de organisatie, *International Organization for Standardization*, die verantwoordelijk was om de lichtgevoeligheid van de film van een camera uit te drukken volgens een ISO-norm. Vandaag hanteren digitale camera's nog steeds deze normering voor de lichtgevoeligheid van de digitale sensor uit te drukken. (Adobe, 2023)

Door het verhogen van de ISO-waarde, neemt de lichtgevoeligheid van de sensor toe waardoor met minder licht een beeld kan ontwikkeld worden. Hierdoor is ruis waarneembaar wat nadelig is voor de scherpte en detail van het beeld. Omgekeerd, bij een lager ISO-waarde, wordt minder licht opgevangen waardoor contouren beter zichtbaar zijn en minder ruist voorkomt. (Voigt, da Cunha, & Vergara Diaz, 2017)

## Sluiterijd en diafragma

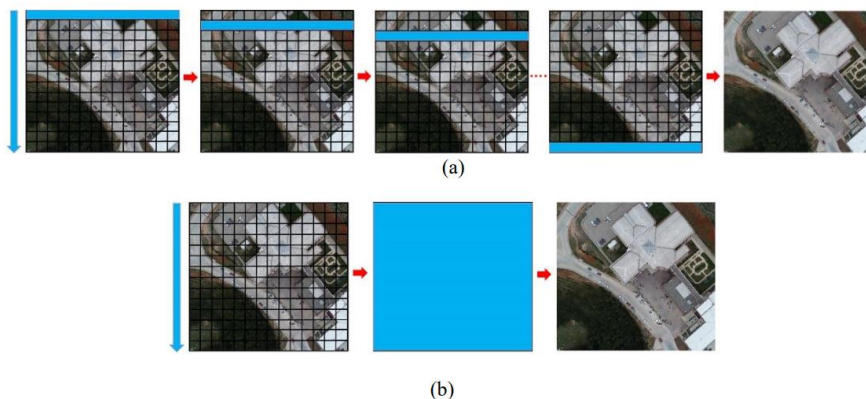
Overdag, in goed belichte omstandigheden, geldt dat het gebruik van een klein diafragma de scherpte van het beeld vermindert.

Bij slecht belichte omstandigheden, zoals 's nachts, blijkt uit onderzoek het tegenovergestelde geldig. Het gebruik van langere sluitertijden en bijgevolg kleinere diafragma's, leidt meestal tot betere resultaten indien de camera en/of te fotograferen beeld niet beweegt. Figuur 10 bewijst deze laatste stelling. Voor luchtfotografie binnen het zichtbaar spectrum, waar de camera veelal wel beweegt, worden dag opnames geprefereerd wegens de vereiste lange sluitertijd bij nachtbeelden. (Roncella, Bruno, Diotri, Thoeni, & Giacomini, 2021)



Figuur 10: Impact sluitertijd en diafragma bij slecht belichte omstandigheden (Roncella et al, 2021)

Onbemande vliegtuigen worden steeds vaker gebruikt voor fotogrammetrische toepassingen. Veel van deze UAV's zijn uitgerust met een CMOS-beeldsensor (Complementary Metal Oxide Semiconductor) en "rolling" sluitmechanisme. Bij een CMOS-sensor wordt de sensor lijn per lijn belicht wat, door een relatieve hoge snelheid van het UAV, tot beeldvervalsingen kan leiden. Bij de tegenhanger, "global" sensor, wordt de sensor op zijn geheel belicht. Een global sensor is algemeen duurder en robuuster waardoor deze niet wordt toegepast in kleine UAV's. Figuur 11 geeft het verschil tussen beide weer. (Incekara & Seker, 2021)



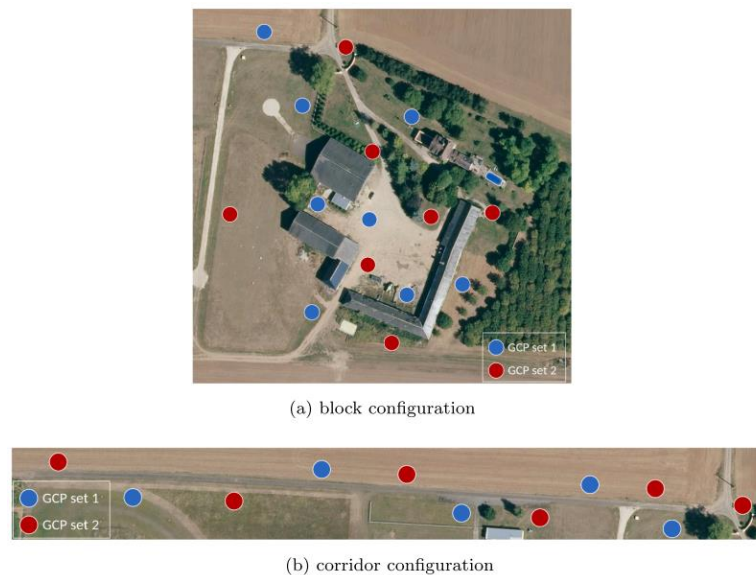
Figuur 11: "Rolling" sensor (a) en "Global" sensor (b) (Incekara & Seker, 2021)

Intussen zijn er tevens UAV's op de markt met een mechanisch sluitmechanisme. Echter is dit niet, zoals vaak geïnterpreteerd, hetzelfde als een *global* sensor. De camera beschikt in meeste gevallen nog steeds over een CMOS-beeldsensor. Bij zowel een lineair *rolling*- als mechanisch sluitmechanisme leest de sensor (indien het een *rolling* lineaire *shutter* is) het beeld lijn per lijn in, maar zijn de vervormingen bij het gebruik van het mechanisch sluitersysteem veel kleiner i.v.m. een lineaire *rolling shutter* en groter i.v.m. "global" sensor. (Incekara & Seker, 2021)

Zhou et al. ontwikkelde twee methodes voor het corrigeren van deze vervormingen. De eerste methode is het kalibreren van de uitleestijd, hierdoor wordt informatie ingewonnen wat vaak niet vrijgegeven is door de fabrikant en kan de beeldvervalsing gecorrigeerd worden.

De tweede is een tweestapsmethode waarin er vanuit wordt gegaan dat tijdens de belichting de verandering van de oriëntatie van de camera verwaarloosbaar is ten opzichte van de verandering van de camerapositie, wat vaak het geval is wanneer de camera op een gestabiliseerde steun is bevestigd. Eerst wordt de camerasnelheid geschat op basis van de resultaten van een eerste aanpassing van het bundelblok. Vervolgens wordt één camerapositie per scanlijn van de beeldsensor hersteld en worden

de beeldwaarnemingen gecorrigeerd. Na toepassing van de correctie voor het “rolling shutter” effect wordt de 3D-nauwkeurigheid met 30-60% verbeterd in blokconfiguratie en 15-25% in corridorconfiguratie. Het verschil tussen beide configuraties is afgebeeld op Figuur 12.



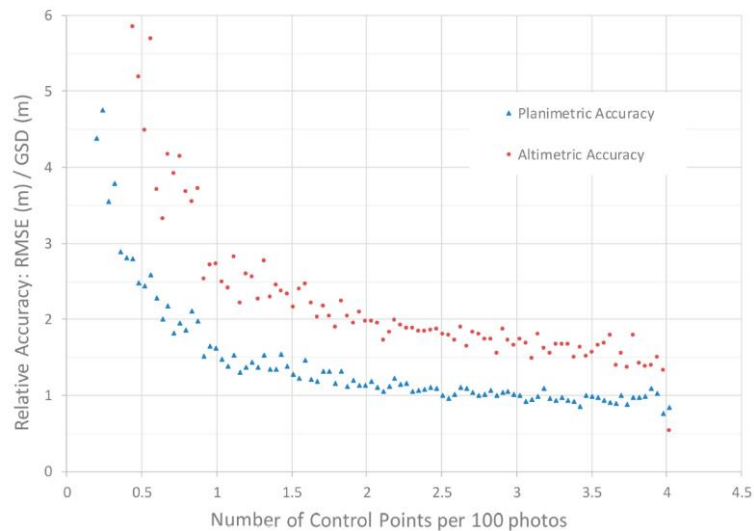
Figuur 12: (a) Blokconfiguratie (b) corridorconfiguratie (Zhou, Daakir, Rupnik, & Pierrot-Deseilligny, 2020)

### 2.3.7 Grondcontrolepunten

Het toepassen van fotogrammetrie op basis van luchtfotografie kan op verschillende methoden, elke methode heeft zijn eigen graad van nauwkeurigheid. Turner, Lucieer, & Watson bereiken een nauwkeurigheid van 65-120cm met resolutie (GSD) 1cm bij het gebruik van een UAV zonder RTK en controlepunten. Datzelfde onderzoek toonde aan dat het implementeren van GCP's de nauwkeurigheid kon vergroten tot 10-15cm. Shahbazi, Sohn, Menard & Théau bekwamen een nauwkeurigheid van 1,55m horizontaal en 3,16m verticaal bij het gebruik van een UAV zonder RTK en GCP's. Mian, et al. maakte gebruik van een hoog kwalitatief intern meetapparaat (IMU) en GNSS ontvanger waarmee het een nauwkeurigheid van 40cm met een resolutie van 0,7cm GSD bekwam. Hugenholtz et al. onderzocht de nauwkeurigheid van een UAV uitgerust met RTK. Zij bekwamen een horizontale nauwkeurigheid gelijkaardig aan deze bereikt met het gebruik van GCP's, verticaal bleek de nauwkeurigheid 2 tot 3 keer groter wanneer GCP's werden gebruikt. Ze concludeerden indien de gewenste verticale nauwkeurigheid groter moest zijn dan 12cm, dat het gebruik van GCP's moet worden verkozen boven een platform met GNSS/RTK. Benassi, et al. stelde vast, bij het gebruik van een gelijkwaardige RTK opstelling, een hoogteligging tot 10cm nauwkeurig kon worden bekomen. Forlani, et al. deed een gelijkaardig onderzoek als Benassi F. et al. en bekwam een hoogteafwijking zonder GCP's van 4,7 GSD en met GCP's slechts 2,5 GSD.

Uit een studie van Sanz-Ablanedo et al. blijkt dat bij het gebruik van slechts enkele GCP's (minder dan 2 per 100 foto's) de kwadratisch middelbare fout 5 keer groter is dan de gemiddelde GSD (Ground Sample Distance). Bij het introduceren van meerder GCP's (>2/100 foto's) daalt de KMF tot 2 keer de gemiddelde GSD van het project. Algemeen geldt dat de verticale vector gemiddeld 2,5 keer groter is dan de horizontale. Deze stellingen worden aangetoond in Figuur 13. Finaal wordt geconcludeerd dat in grote projecten enkel m.b.v. een gemiddeld tot groot aantal GCP's (bv: >3 GCP's / 100 foto's) een grote nauwkeurigheid kan bereikt worden. Het toevoegen van schuine beelden in een verticale dataset of het gebruiken van een grotere overlap en gekruiste vlucht patronen, kan niet tot een hoge nauwkeurigheid leiden indien slechts enkele GCP's worden toegepast. (Sanz-Ablanedo et al., 2018)





Figuur 13: Invloed aantal GCP's op relatieve nauwkeurigheid (Sanz-Ablanedo et al., 2018)

### 2.3.8 Soorten

Er bestaan twee algemene soorten fotogrammetrie: lucht- (met de camera in de lucht) en terrestrische fotogrammetrie (met de camera in de hand of op statief). Terrestrische fotogrammetrie met betrekking op objectafstanden tot ca. 200 m wordt ook wel *close-range* fotogrammetrie genoemd. (Aber, Marzloff, & Ries, 2010)

Iedere vorm heeft zijn toepassingsgebied, soms kunnen meerdere vormen geschikt zijn voor eenzelfde toepassing. Voor de toepassing wordt een onderscheid gemaakt tussen terrestrisch (incl. *close range*) en lucht fotogrammetrie.

#### **Terrestrisch (inclusief *close range*):**

(Luhman, Robson, Kyle, & Harley, 2006) beschrijven in hun onderzoek de meest voornaamste toepassingen en vonden terrestrische fotogrammetrie geschikt in volgende sectoren: Auto-, machine- en scheepsbouwindustrie, lucht- en ruimtevaartindustrie, architectuur, monumentenzorg, archeologie, *engineering*, geneeskunde en fysiologie, forensische wetenschap (inclusief politiewerk) informatiesystemen, natuurwetenschappen.

Hiervan is de architectuur, monumentenzorg en archeologie de eerste sector dat nauw aansluit bij dit onderzoek. Met *close range* fotogrammetrie is het mogelijk volgende zaken uit te voeren: gevelmeting documentatie historisch gebouw, deformatiemeting, reconstructie van beschadigde gebouwen, in kaart brengen van opgravingen en 3D stadsmodellen modeleren.

Daarnaast sluit de engineering met as-built metingen, meting van grote civieltechnische werken, vervormingsmetingen, leiding- en tunnelmetingen en mijnbouw, als tweede sector aan bij dit onderzoek.

#### **Luchtfotogrammetrie**

Voor fotogrammetrische karteringstoepassingen gebruiken onderzoekers UAV-platforms, dat vroeger enkel voor militaire doeleinden werden toegepast, in plaats van traditionele fotogrammetrische methoden. Hierdoor kunnen digitale oppervlaktemodellen (DSM) of digitale terreinmodellen (DTM's) snel, veilig en nauwkeurige gegenereerd worden. (Elkhrachy, 2021)

Daarnaast vindt het zijn toepassing in de geologie, bosbouw, landbouw, ruimtelijke planning, kadaster, milieu, defensie, topografie, cartografie, GIS, archeologie, ...

## 2.4 Laserscanning

### 2.4.1 Lasers en licht

Een toestel dat licht kan opwekken door het gebruik van smalle spectrale banden is een laser, deze straalt typisch licht uit in een laag divergente bundel met een welbepaalde golflengte. Laser is een acroniem voor *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* en ontworpen in 1960 door Theodore Maiman.

Een laserstraal onderscheidt zich met een aantal eigenschappen van licht afkomstig van andere lichtbronnen. Zo wordt deze opgewekt als bundel met een hoge graad van ruimtelijke cohesie en is dit de reden waarom het over een lange afstand gefocust blijft. Verder beschikt deze over een hoge graad van coherentie in de tijd, wat een grote coherentielengte met zich meebrengt. Dit impliceert een duidelijke faseverhouding over relatief lange tijdsintervallen waardoor grote voorplantingsafstanden mogelijk zijn. De combinatie van temporele coherentie met een lange coherentietijd of coherentielengte resulteert in een dichte spectrale bandbreedte. Hierdoor beschikt de laserbundel over een specifieke zuivere kleur (groen, rood of blauw). Lasers bij korte en middellange afstandsmetingen hebben een golflengte van 1064nm tot 532nm en zijn in meeste gevallen lineair gepolariseerd. (3DRiskMapping, 2008)

Daarnaast zijn er enkele eigenschappen, afhankelijk van de toepassing, waar een laserscanner kan over beschikken. Het licht kan zichtbaar zijn maar toch over meer stralen beschikken buiten het zichtbaar spectrum (bijvoorbeeld nabij infrarood). Vervolgens is het mogelijk het licht uit te zenden in de vorm van (ultra) korte pulsen waardoor piekvermogens extreem hoog kunnen oplopen. (3DRiskMapping, 2008)

### 2.4.2 Veiligheid

De coherentie, hoge monochroomheid en mogelijkheid tot extreme vermogens zijn eigenschappen waardoor de laser met zorg behandeld te worden. Hierdoor worden ze geclassificeerd, afhankelijk van golflengte en vermogen, in zeven klassen. Klassen 1, 1M, 2, 2M en 3R zijn geschikt voor opmetingen. (3DRiskMapping, 2008)

1: Veilig bij redelijke en te voorziene gebruikscondities, inclusief het gebruik van optische instrumenten in de buurt van de bundel.

1M: Veilig bij redelijke en te voorziene gebruikscondities, maar kunnen schadelijk zijn indien optische instrumenten worden gebruikt binnen de bundel.

2: Veroorzaken normaliter een knippereffect van de oogleden van de mens wat het oog beschermt. Deze reactie wordt geacht voldoende bescherming te bieden inclusief het gebruik van optische instrumenten in de omgeving van de bundel.

2M: Veroorzaken normaliter een knippereffect van de oogleden van de mens wat het oog beschermt. Deze reactie wordt geacht voldoende bescherming te bieden, maar deze lasers kunnen schadelijk zijn indien optische instrumenten worden gebruikt binnen de bundel.

3R: Potentieel schadelijk als rechtstreeks in de bundel gekeken wordt. Nochtans is het risico lager dan bij klasse 3B lasers.

3B: Schadelijk bij directe blootstelling. Nochtans is het kijken naar reflecties gemiddeld wel veilig. Dit soort laser is niet geschikt voor opmetingen.

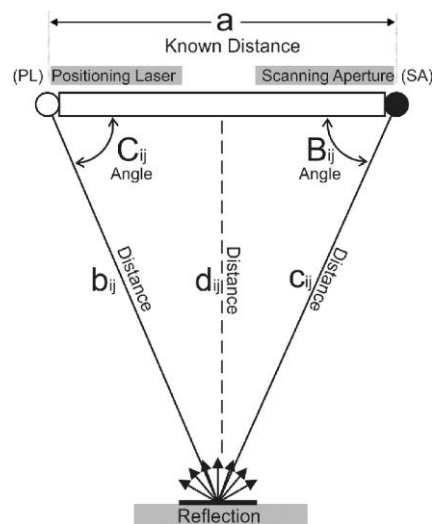
4: Oog- of huidbeschadigingen veroorzaken bij directe blootstelling. Lasers van deze klasse kunnen ook schadelijke reflecties produceren. Lasers van deze klasse zijn niet geschikt voor opmetingen. (IEC, 2001)

### 2.4.3 Actieve scanners

Actieve scanners leggen een voorwerp of omgeving vast door de reflectie te detecteren van een, door hun uitgezonden, gecontroleerde straling. Ze beschikken over een zender en ontvanger waardoor ze per definitie mechanisch complexer zijn dan passieve toestellen. Passieve scanners, zoals de camera voor het ontwikkelen van foto's en besproken in 2.3, sturen zelf geen straling uit maar baseren zich op het detecteren van gereflecteerde straling. De meest gebruikte is zichtbaar licht, daarnaast kunnen ze ook infrarood detecteren. (3DRiskMapping, 2008)

#### 2.4.3.1 Triangulatie

Bij een triangulatie scanner zijn de laserstralen en camera onder een constante hoek opgesteld zodat de driehoek tussen laser, voorwerp en camera gekend is. Dit komt overeen met hoek  $C_{ij}$ ,  $B_{ij}$  en afstand  $a$  op, Figuur 14. De invalshoek  $B_{ij}$  verandert naarmate de afstand tussen het voorwerp en scanner ( $d_{ij}$ ) wijzigt. Vaak wordt een laserlijn toegepast i.p.v. een laserpunt. Deze wordt langsheen het voorwerp geprojecteerd om het in 3D vast te leggen, hierdoor is de hoek  $C_{ij}$  veranderlijk tijdens het meetproces. (3DRiskMapping, 2008)



Figuur 14: Principe triangulatie (Rodriquez-Quinonez, et al., 2014)

Om onzekerheden op de afstandsmeting te beperken kan de afstand tussen voorwerp en scanner gereduceerd worden, dit brengt schaduweffecten met zich mee. Ook kan de basis ( $a$ ) vergroot worden, echter zijn hiervoor fysieke beperkingen en toenemende schaduweffecten. Daarnaast kan een grotere focale lengte van de cameralens onzekerheden beperken, dit ten koste van het gezichtsveld. Als laatste levert een hoger pixelaantal een hogere zekerheid van de meting op. Net door fysieke beperkingen moet dit type inleveren in scanafstand t.o.v. middelmatig- en langeafstand toestellen, tot 10 meter. Wel is het mogelijk een hogere nauwkeurigheid af te leveren, tot enkele micronmeter. (3DRiskMapping, 2008)

Patronen of lijnen werden toegepast om mechanische fixatie te vermijden, zo kan het voorwerp in een keer opgemeten worden. Patronen kunnen eenvoudige lijnpatronen zijn tot ruimtelijk gecodeerd met eventueel een gemoduleerde fase/ frequentie om een hogere nauwkeurigheid te bekomen. Voor ruimtelijk gecodeerde patronen is echte wel een statisch object vereist. (3DRiskMapping, 2008)

### 2.4.3.2 Tijd gebaseerd

Algemeen zijn er twee soorten tijd gebaseerde scanners die beide actief een tijdsmeting tussen twee gebeurtenissen vastleggen, golf (*pulse based*) en fase (*phase based*).

#### **Pulse based**

Bij een *pulse based* scanner wordt de afstand gemeten door het tijdsverschil tussen de uitgaande en inkomende golf te meten, zoals weergegeven op Figuur 15. Men stelt dat de (licht) golf zich voortplant met de lichtsnelheid, zo kan de afstand als volgt bepaald worden:

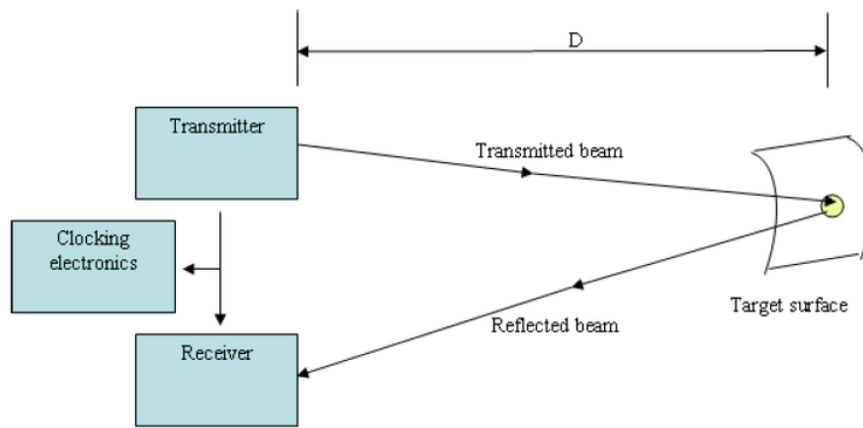
$$D = \frac{c \cdot t}{2}$$

Waarin:

c: snelheid van licht in lucht

t: gemeten tijdsverschil tussen uitgezonden en ontvangen golf

D: afstand tussen scanner en gemeten punt (object)



Figuur 15: Principe schets pulse based scanner (Takudzwa, 2014)

Licht verplaatst zich in vacuüm aan 299 792 458 m/s, in lucht moet hier een correctiefactor (afhankelijk is van de brekingsindex) op worden toegepast. Rekening houdend met deze correctie kan men stellen dat licht 3,33 nanoseconden nodig heeft om zich 1 meter te verplaatsen, deze waarde kan nog verschillen in functie van de plaatselijke luchtdichtheid. Om een nauwkeurigheid van 1mm te bekomen moet de tijdsmeting tot op 3.33 picoseconden nauwkeurig zijn. (3DRiskMapping, 2008)

*Pulse based* scanners voeren laserpulsen uit om objecten punt per punt te detecteren. Hierdoor verandert de positie van de transmitter (zender) door een afbuigingselement. Voor een ondubbelzinnige meting dient de gemeten tijd groter te zijn dan de tijd tussen twee pulsen ( $T_{puls}$ ) zodat de afstand tussen scanner en reflectievlak als volgt wordt uitgedrukt:

$$D > \frac{1}{2} \cdot c \cdot T_{puls}$$

Daarnaast beperkt de frequentie het maximaal simultaan bereik doordat het tijdsverschil tussen uitzenden en ontvangen kleiner moet zijn dan  $T_{puls}$ . Hedendaagse *pulse based* scanners kunnen tot 1 000 000 punten per seconde registreren, zoals de Leica P40 (Leica Geosystems AG, 2023).

De nauwkeurigheid van dergelijk pulserend systeem is hoofdzakelijk afhankelijk van maximaal simultaan bereik dat beperkt is door ruis, onregelmatigheid op de tijdsmeting en nauwkeurigheid klokmechanisme, signaalintensiteit, sensitiviteit detectiemechanisme en snelheid & reproductie van de uitgezonden puls. (3DRiskMapping, 2008)

### Phase based

Een fase gebaseerde scanner zendt een amplitudegemoduleerde golf uit waarna de ontvanger het faseverschil van de teruggekaatste golf meet. Hierdoor is geen ultra nauwkeurig klokmechanisme vereist. Op basis van het faseverschil kan de tijd tussen uitgezonden en ontvangen straal als volgt worden bepaalt:

$$t = \frac{\Delta\phi}{2 \cdot \pi \cdot f_{mod}}$$

Waarbij:

$t$ : time-of-flight

$\Delta\phi$ : faseverschil tussen uitgezonden en inkomende golf

$f_{mod}$ : modulatiefrequentie

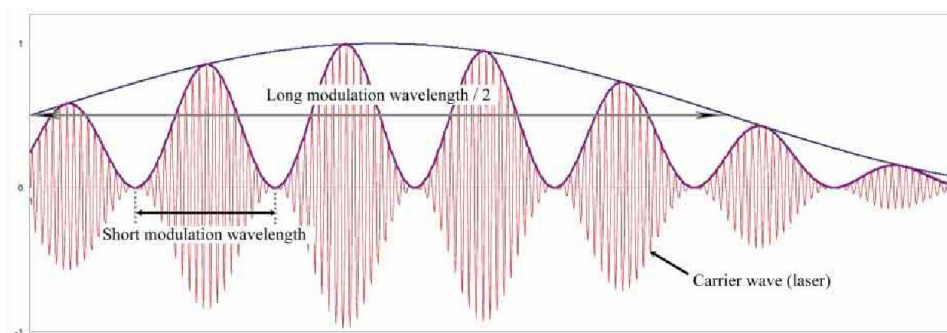
Hieruit kan men de afstand tussen object en scanner afleiden op basis van volgende bepaling:

$$D = \frac{c \cdot t}{2} = \frac{c}{4 \cdot \pi} = \frac{\Delta\phi}{f_{mod}}$$

Ook bij *phase based* scanners is het bereik gelimiteerd tot maximaal een volledige periode van de sinusgolf. Zo kan het maximaal ondubbelzinnig bereik ( $z_{bereik}$ ), in continu golf systeem, als volgt worden beschreven:

$$z_{bereik} = \frac{c}{2 \cdot f_{mod}}$$

Golfpatronen op verschillende frequenties kunnen problemen vermijden bij het vergroten van bereik. Hierbij wordt een gesuperponeerde golf uitgezonden met een lage frequentie (lange golflente), om het voorwerp te lokaliseren, en een hoge frequentie (korte golflente), voor de nauwkeurige meting. Figuur 16 geeft een schematische weergave van twee gemoduleerde golven. Algemeen bekomen fasescanners hogere snelheden en resoluties ten koste van precisie t.o.v. puls scanners. (3DRiskMapping, 2008)

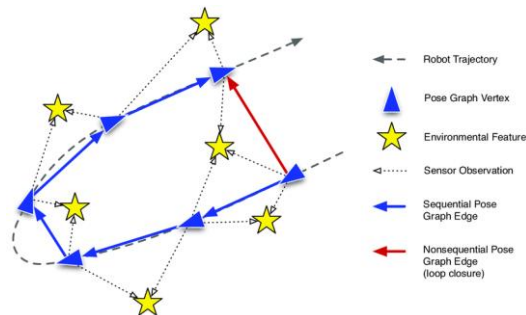


Figuur 16: Schematische weergave twee gemoduleerde golven (European Association of Geoscientists & Engineers, 2007)

De nauwkeurigheid van fasescanners is beperkt door de frequentie van het signaal of modulatie, meetnauwkeurigheid faseverschil, stabiliteit modulatie oscillator, turbulentie in het medium en variërende brekingsindex. (3DRiskMapping, 2008)

## 2.5 SLAM

SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) is een techniek die bijvoorbeeld gebruikt wordt voor geautomatiseerde voertuigen, (*mobile mapping*),.. Via deze methode wordt een kaart ontwikkeld, vaak in ongekende omgeving, waarin het meettoestel zich kan oriënteren. Algemeen deelt men de SLAM technologie in twee delen, een sensor afhankelijk en onafhankelijk. Het eerste deel, sensor afhankelijk, registreert obstakels en lokaliseert zichzelf. Het tweede deel verwerkt de verkregen data tot zogenaamde “pose graph” en kaartinformatie. Een “pose graph” is een grafiek waarbij elke knoop de positie van het meettoestel weergeeft. Nabijgelegen posities zijn verbonden door randen dat de ruimtelijke beperkingen weergeeft, voortvloeiend uit meerdere waarnemingen van datzelfde deel. (The MathWorks, 2022b)



Figuur 17: Pose graph (Pfingsthorn, 2014)

### Visual SLAM

Een eerste methode is vSLAM. Hierbij wordt gebruik gemaakt van beelden, verkregen van camera's en andere beeldsensoren. Dit kunnen zowel eenvoudige, samengestelde en RGB-D camera's zijn. Bij monoculaire SLAM wordt slechts gebruik gemaakt van één camera als sensor, dit bemoeilijkt het bepalen van diepte. Met behulp van duidelijke markeertekens of het samenvoegen van de camera informatie samen met andere sensoren (IMU's) kan dit worden opgelost. vSLAM technologie bevat SfM structuur, visuele odometrie en bundelcorrecties. (Pfingsthorn, 2014)

vSLAM- algoritme kan worden ingedeeld in twee categorieën:

- Grove methode: kenmerkende punten van beelden en het gebruik van algoritmes (PTAM, ORB-SLAM)
- Dichte methode: algemene helderheid van beelden en gebruik van algoritmes (DTAM, LSD-SLAM, DSO en SVO)

### Light detection and ranging SLAM

Een tweede methode is LiDAR SLAM, hierbij wordt primair een laser- of afstandssensor gebruikt. Lasers zijn, vergeleken met andere sensoren, aanzienlijk nauwkeuriger en worden gebruikt voor toepassingen met snel bewegende voertuigen. De verkregen data is in de meeste gevallen een puntenwolk (2D & 3D) met zeer nauwkeurige afstandsmetingen. In het SLAM systeem worden verschillende puntenwolken aan elkaar verbonden m.b.v. ICP (iterative closest point) en NDT (Normal distributions transform) tot een geheel. Het nadeel van puntenwolken is dat deze doorgaans over een lagere dichtheid beschikken en niet altijd over voldoende overeenkomstige kenmerken beschikken t.o.v. beelden. Dit resulteert in een moeilijkheid voor zichzelf te lokaliseren op plaatsen met weinig obstakels.

Daarnaast vergen puntenwolken doorgaans een grotere rekenkracht. Hierdoor moeten processen geoptimaliseerd worden om snelheid te garanderen. Het samenvoegen van deze data met andere meetresultaten, bijvoorbeeld GNSS en IMU-gegevens, kan hiervoor een oplossing zijn.

SLAM technologie wordt tegenwoordig toegepast voor enkele praktische zaken, echter verhinderen verschillende technische uitdagingen een breder toepassingsgebied. Enkele van deze uitdagingen zijn:

- Cumulatieve locatiefouten zorgen voor aanzienlijke afwijkingen van de werkelijke waarden
- Mislukte lokalisatie waardoor de kaartpositie verloren gaat of ongekend is
- Hoge computerkosten voor het verwerken van beelden, puntenwolken en optimalisatie

(Pfungsthorn, 2014)

## 2.6 Vergelijking fotogrammetrie en laserscanning

Baltsavias onderzocht de verschillen tussen fotogrammetrie en laserscanning als meettechniek, waaruit samenvattend volgende conclusies werden getrokken. De belangrijkste verschillen tussen fotogrammetrie en ALS (*Airborn Laserscan Sensor*) zijn:

- passieve vs. actieve, krachtige, gecollimeerde en monochromatische detectie;
- beeld- of lineaire sensoren met perspectivische geometrie vs. doorgaans puntsensoren met polaire geometrie
- volledige gebiedsdekking vs. puntsgewijze bemonstering
- indirecte vs. directe verwerving of codering van 3D-coördinaten
- geometrisch en radiometrisch hoogwaardige beelden met multispectrale mogelijkheden versus geen beeldvorming of monochromatische beelden van mindere kwaliteit
- de mogelijkheid bij ALS om objecten waar te nemen die veel kleiner zijn dan de voetafdruk (kleine openingen onder vegetatie, elektriciteitsleidingen, enz.)

Alle andere verschillen zijn een gevolg van de bovengenoemde.

### Sensor

De variatie van passieve sensors, verder beschreven als POS, is impressionant. Afhankelijk van de toepassing kunnen verschillende sensoren gebruikt worden. Zo is variatie mogelijk in afmeting, formaat, resolutie (geometrisch, radiometrisch en spectraal), opslagmogelijkheid (analoog en digitaal), gewicht, energieverbruik, kostprijs, ... ALS biedt minder variatie en flexibiliteit i.v.m. POS. Bij lasersystemen speelt de temperatuur een groter rol, wegens het grote verlies van energie door opwarming van het toestel verlaagt dit het rendement. Door het hoge energieverbruik is het niet altijd mogelijk een ALS systeem te integreren in een UAV. POS sensoren en fotogrammetrische camera's in het algemeen zijn eenvoudiger, minder complex, betrouwbaardere en goedkoper. (Baltsavias, 1999)

De levensduur van beide sensoren is een onderwerp dat vaak niet besproken wordt. Robuuste luchtcamera's kunnen gebruikt worden voor tientallen jaren in tegenstelling tot lasers waarvan de levensduur afhangt van de operationele temperatuur. Uit het onderzoek van Baltsavias E. werd geconcludeerd dat lasers gemiddeld 10 000 uur operationeel blijven, hedendaagse systemen vertonen vaak grotere levensduur. Echter is dit slechts een richtwaarde en is de levensduur afhankelijk van heel wat verschillende parameters. Daarnaast werd besloten dat ALS systemen, op het tijdstip van het onderzoek (1999), niet concurreren t.o.v. POS op vlak van gelijktijdige multispectrale informatie. (Baltsavias, 1999)

## **Platform**

POS kunnen geplaatst worden in bijna alle mogelijke platformen, van kleine ballonnen tot geostationaire satellieten. ALS zijn eerder gelimiteerd, voornamelijk in hoogte, door de intensiteit van de laser waardoor deze eerder beperkt zijn tot enkele ruimtevaartuigen, helikopters en vliegtuigen. Beide systemen kunnen een beperking geven op de verplaatsingssnelheid, afhankelijk van de systeemspecificaties. (Baltsavias, 1999)

## **GPS/ INS (Inertial Navigation System) integratie**

Bij ALS en niet-gebiedsgebonden POS, zijn GPS/INS systemen noodzakelijk. Bij gebiedsgebonden POS, voornamelijk met het oog op fotogrammetrie, is de integratie van GPS een duidelijke tendens. Bij INS, wat nog steeds een duurere plaatsbepaling is, is het niet noodzakelijk maar kan toegepast worden indien vereist. De frequentie van GPS/INS metingen ligt bij POS vaak lager dan voor een punt sensor. (Baltsavias, 1999)

## **Vlucht planning**

Vluchtplanning voor POS is vaak eenvoudig en voldoende ontwikkeld, waar het bij ALS vaak complexer is. Bij deze laatste zijn er projecten waar er “gaten” zijn tussen de vluchtstroken, dit is hoofdzakelijk het gevolg van een relatief smalle strookbereik van de scanner. Vluchtplanning is hierdoor afhankelijk van het maximale laserbereik zodat deze groter blijft dan de afstand tot het laagste terreinpunt. In moeilijk terrein, zoals valleien, is het daardoor bijna vereist om over een reeds bestaand of ruw DTM te beschikken. POS systemen verzekeren, bij voldoende overlapping in beide richtingen, een stabielere blok geometrie en een overvloed aan gegevens dat gunstig is voor de verwerkingsfase. (Baltsavias, 1999)

## **Vlucht tijd en dekkingsgebied**

De vluchtsnelheid en hoogte is lager bij ALS dan POS. In aanvulling is de bereikte breedte bij POS groter, typische fotogrammetrische camera's hebben een FOV van 75° terwijl ALS typisch een 20-40° scanhoek heeft. Bij eenzelfde vluchtsnelheid, hoogte en zijdelingse overlap, dekt POS (met FOV 75°) een 2.9 keer groter gebied i.v.m. ALS. (Baltsavias, 1999)

## **Toepasbaarheid**

ALS kan theoretisch 24h op een dag toegepast worden, echter verbetert de maximale prestatie radius bij verlaagde achtergrond irradiatie (vooral bij zonlicht). Daarnaast is ALS niet gevoelig voor schaduw van objecten. POS systemen presteren beter wanneer vegetatie bladloos zijn. Vliegen in regen is voor beide systemen mogelijk maar wordt afgeraden. Algemeen is ALS vaker bruikbaar, wat een belangrijk voordeel kan opleveren wanneer een snel resultaat gewenst is. (Baltsavias, 1999)

## **Objectreflectie**

POS dekt meestal het volledig zichtbare licht of zoals bij hyperspectrale sensoren een breedte van enkele nanometers. Terwijl een laser een monochromatische lichtstraal is met een erg smal spectraal bereik. Er zijn intussen lasers op de markt die in meer dan één frequentie of een breed spectraal bereik (100 nm) opereren. Objecten met spectrale karakteristiek dicht bij dat van de laser golflengte, zullen een grotere respons (contrast) vertonen i.v.m. POS. Omgekeerd zullen er objecten zijn met een geringe respons en die bijna of niet gedetecteerd kunnen worden. (Baltsavias, 1999)

Bij POS zijn alle “zichtbare” objecten detecteerbaar en speelt saturatie een minder groot probleem. Lichtreflecties (bv: water) kunnen een probleem zijn bij POS terwijl spectrale reflectie bij ALS problematischer zijn. (Baltsavias, 1999)



## Beeldvorming

De voetafdruk van een laser is ongeveer cirkelvormig en varieert met de scanhoek en topografie. Hierdoor dilt de puntenwolk uit naargelang het gereflecteerd object zich verder bevindt van de ontvanger. Hierdoor is het onmogelijk om met ALS een volledig homogeen gebied zonder gaten te vormen zonder de nodige overlapping. Een gevolg hiervan is dat de bekomen resolutie bij POS vaak groter is dan bij LAS. Een typische laserstraal met 1 mrad divergentie resulteert in een 1m voetafdruk op 1000m hoogte, terwijl een 15 $\mu$ m pixel met een 15cm camera een voetafdruk van 10cm weergeeft. (Baltsavias, 1999)

## Graad van automatisatie

ALS heeft een volgens (Baltsavias, 1999) een hogere graad van automatisatie. ALS ruwe data beschikt impliciet reeds over functies wat bij fotogrammetrie nog moet worden uitgevoerd. Volgens hem is dit één van de redenen waarom de gegevens bij ALS sneller verwerkt kunnen worden.

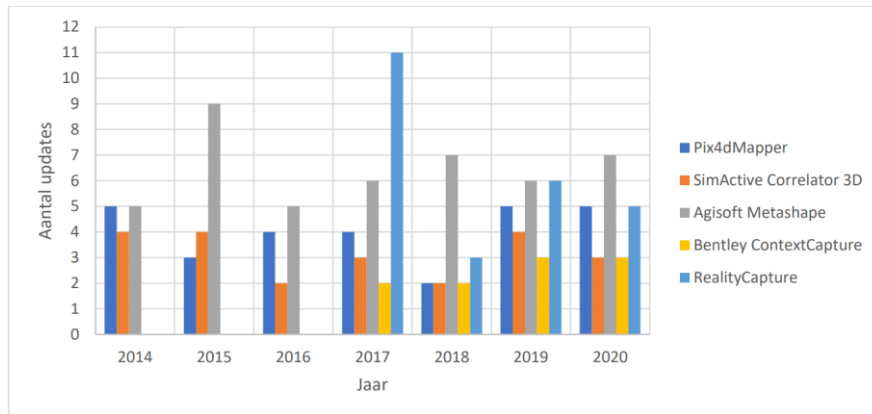
Er dient opgemerkt te worden dat zijn onderzoek dateert uit 1999 waardoor sommige verstellingen verouderd zijn en niet in lijn liggen met de hedendaagse technologieën. Hierdoor wordt ook naar een recentere studie verwezen waar (Wilkinson, et al., 2016) de vergelijking maakt tussen beide technieken op terrestrisch niveau. De concluderende bevindingen zijn weergegeven in Tabel 2

*Tabel 2: Prestatieniveau terrestrische laserscanning en SfM fotogrammetrie (Wilkinson, et al., 2016)*

Omstandigheid	Prestatieniveau terrestrische laserscanning	Prestatieniveau SfM fotogrammetrie
Regen	Laag	Laag
Mist	Laag	Zeer laag
Stof	Gemiddeld	Laag
Sterke wind	Laag	Gemiddeld
Temperatuur < 0°	Laag – gemiddeld	Gemiddeld - hoog
Temperatuur > 40°	Laag	Gemiddeld – hoog
Direct zonlicht op sensor	Hoog	Laag
Weinig tot geen licht	Hoog	Laag
Afstand < 1 m	Laag	Hoog
Afstand > 300 m	Hoog	Laag – hoog (afhankelijk van resolutie en focuslengte)
Objecten met weinig contrast	Gemiddeld – hoog	Laag
Objecten met geometrisch complexe vormen	Hoog	Laag

## 2.7 Fotogrammetriesoftwarepakketten

Tegenwoordig kan de gebruiker kiezen uit meerdere softwarepakketten voor de fotogrammetrische verwerking van de beelden. Dergelijke softwarepakketten, net als hardware computer componenten, evolueren erg snel waardoor beschikbare onderzoeksresultaten mogelijks gedateerd kunnen zijn. Figuur 18 geeft een indicatie hoe vaak een softwarepakket werd bijgewerkt per jaar.



Figuur 18: Aantal updates per jaar per softwareprogramma (Vercauteren & Lammes, 2021)

### 2.7.1 Hardware voor fotogrammetrische softwareprogramma's

De computer hardware, nodig voor het fotogrammetrisch proces, is afhankelijk van tal van factoren. Het aantal foto's en de grootte, gewenste resultaat, verwerkingsniveau, snelheid en budget zijn de meest voor de hand liggende factoren die beslissend zijn in de hardware keuze. De hardwarecomponenten die de grootste sleutelrol spelen in het verwerkingsproces is het *Central Processing Unit* (CPU), *Random Acces Memory* (RAM), *Graphics Processing Unit* (GPU) en harde schijf. (Pix4d, 2021a)

De CPU voert de programmacode van de software uit. De kloksnelheid van de CPU wordt uitgedrukt in hertz (Hz). CPU's worden onderverdeeld in generaties, bijvoorbeeld i3 en i5. Een hogere generatie gaat niet vanzelfsprekend samen met een snellere processor. Het zijn het aantal individuele eenheden, de *cores*, samen met de kloksnelheid die de verwerkingsnelheid bepalen. Het aantal opdrachten dat de CPU tegelijk kan verwerken is afhankelijk van de hoeveel aanwezige *cores* (single, dual, quad, ...). Deze hebben voornamelijk een grote impact bij het verwerken van de puntenwolk tot *mesh* in het fotogrammetrisch proces. (Sophie, 2018)

Het RAM, ook wel het werkgeheugen genaamd, is de plaats waar de CPU tijdelijk bestanden opslaat. Hoe groter de capaciteit van dat werkgeheugen, des te meer processen tegelijk kunnen uitgevoerd worden. Tijdens de fotogrammetrische verwerking heeft dit voornamelijk een impact op de hoeveelheid en grootte van foto's kunnen verwerkt worden. (Simcity, 2019)

De GPU (grafische kaart) is een aanvulling voor de CPU en neemt grafische taken, zoals het renderen van 3D-modellen, over. De communicatie tussen deze twee hardware onderdelen wordt mogelijk door de *Open Graphics Library* (OpenGL). Deze is een *Application Programming Interface* (API) dat de samenwerking mogelijk maakt. Daarnaast is het bij sommige GPU's mogelijk over een *CUDA* (*Compute Unified Device Architecture*) te beschikken. Hierdoor kunnen programma's zowel de CPU als GPU toespreken voor berekeningen. (Intel Corporation, sd)

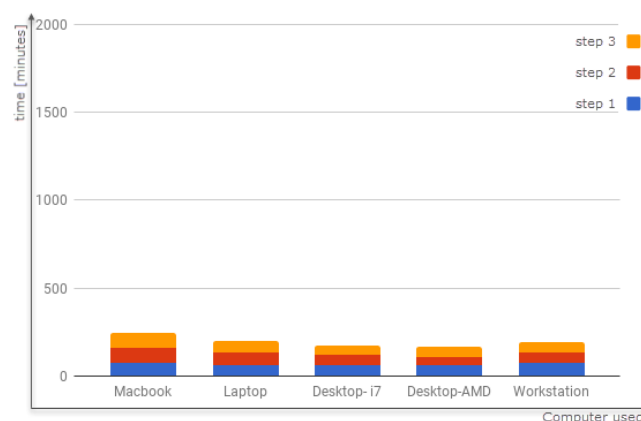
Het extern geheugen dient als opslag van informatie. De op de markt meest voorkomende vormen zijn de *Hard Disk Drive* (HDD), met mechanische werking, en *Solid State Drive* (SSD), op basis van elektrische ladingen en geheugenchips. Deze laatste is normaliter ook een sneller en minder gevoelig voor slijtage.

Het intern geheugen heeft voornamelijk een invloed op de verwerking eenmaal het fotogrammetrisch model, puntenwolk en *mesh* berekend is. (Naessens, 2016)

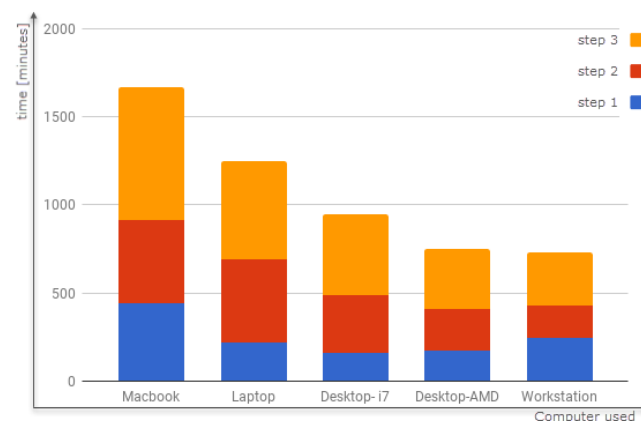
### 2.7.2 Case-studie

Hinge, et al. (2018) onderzocht de werking en resultaten van verschillende softwarepakketten. Volgens hen bestaat geen individueel softwarepakket dat de visualisatie, van zowel zandbanken, bomen, kunstmatige structuren, wegen en veel meer, als meest geschikt kan verwerken. Uit het onderzoek blijkt dat Pix4D en DroneDeploy het meest geschikt zijn voor lokale hoogteverschillen (bomen, gebouwen, stilstaande voertuigen, ...) te verwerken. Agisoft Methashape (toenmalig Agisoft Photoscan) geeft met voorsprong de hoogste resolutie in mesh. EyesMaps3D kan de beste 3D-modellering leveren mits voldoende kennis van de gebruiker wegens de vereiste camerakalibratie, sensorparameters en gerelateerde informatie. Hun nieuw product, eyesCloud3D, zou de software toegankelijker maken voor gebruikers dat niet over diepgaande kennis beschikken.

In een experimentele *case study van Pix4d*, met een dataset van 1248 foto's met 4592x3448 pixel resolutie, werd reeds onderzoek gedaan naar de impact van hardware onderdelen op de verwerkingstijd. Hiervoor deelt men het verwerkingsproces in drie stappen op: initiële verwerking (blauw), puntenwolk en mesh creëren (rood) en een Digital Surface Model (DSM) en orthomosaïc (geel). *Figuur 19* geeft de resultaten weer voor een laag resolutiemodel, *Figuur 20* voor een model met standaard resolutie. De verschillen tussen computer configuraties wordt pas merkbaar eenmaal het model een zekere rekenkracht vergt. (Pix4d, 2021a) Een bijkomende studie, naar de efficiëntie tussen de behaalde graad van nauwkeurigheid in functie van verwerkingslast, zou hier een goede aanvulling zijn.



*Figuur 19: Verwerkingstijd vs. computer hardware – lage resolutie (Pix4d, 2021a)*



*Figuur 20: Verwerkingstijd vs. computer hardware - standaard resolutie (Pix4d, 2021a)*

Als laatste, geeft de studie van Vercauteren en Lammes (2021) een meer gekwantificeerde vergelijking. De casestudie werd uitgevoerd met een Intel Core TM i5-8300H processor van 2,30 GHz, 8 GB RAM en een NVIDIA Geforce GTX 1050TI grafische kaart. Hieruit blijkt de rekentijd van Agisoft Metashape het laagst en van 3D survey het hoogst te zijn. Tabel 3 geeft de rekentijden voor eenzelfde project weer per softwareprogramma.

Tabel 3: Totale rekentijd per fotogrammetrieprogramma (Vercauteren & Lammes, 2021)

Softwareprogramma	Totale rekentijd
Pix4dMapper	3 h 42 min
Bentley ContextCapture	4 h 43 min
Agisoft Metashape	1 h 13 min
RealityCapture	1 h 18 min
3D Survey	6 h 22 min
DroneDeploy	2 h 46 min
Maps Made Easy	1 h 53 min

In het 3D model worden weerspiegelende oppervlakten relatief goed gereconstrueerd, enkel bij RealityCapture is dit minder. Voor kleinere detailobjecten geeft 3D Survey de minste kwaliteit en hoogste ruis weer rond het object. Bentley ContextCapture en RealityCapture zouden de beste resultaten opleveren voor zones met een lagere belichting. Agisoft Metashape vertoont de grootste afrondingen bij rechte lijnen. De nauwkeurigheid van het 3D model wordt daarnaast ook kwantitatief vergeleken door de coördinaten van *targets* in het 3D model te vergelijken met de waarde ingemeten met een totaalstation. Uit Tabel 4 kan worden afgeleid dat Pix4dMapper over de meeste projecties, kleinste tracklength en gemiddelde projectiefout en meeste automatische referentiepunten beschikt. RealityCapture scoort dan weer beter op vlak van de 3D-puntenwolk en model. Algemeen kan vastgesteld worden dat alle vier de programma's een voldoende hoge nauwkeurigheid behalen voor professioneel gebruik. (Vercauteren & Lammes, 2021)

Tabel 4: Kwantitatief overzicht commerciële fotogrammetriesoftware (Vercauteren & Lammes, 2021)

	Eerste verwerkingsstap					3D-puntenwolk en 3D-model			
	Projections	Gemiddelde tracklength	mean projection error	Automatic tiepoints	Fout op GCP's (gem.) (m)	Totaal aantal punten	Nauwkeurigheid 3D-model (XYZ) (m)		
Pix4dMapper	3 588 263	2,939	0,207 pix	1 220 912	0,007	16 491 485	0,012	0,011	0,033
Agisoft Metashape	1 610 174	3,759	0,756 pix	469 934	0,014	17 378 546	0,052	0,045	0,045
RealityCapture	2 095 299	3,264	0,572 pix	641 990	0,011	21 321 842	0,012	0,009	0,021
3D Survey	1 857 498	6,925	0,780 pix	268 236	0,006	19 025 369	0,014	0,009	0,033

Echter dient Tabel 4 met een kritische noot beoordeeld te worden. De verwerking gebeurde met proefversies van de software waardoor niet alle functies volledig beschikbaar waren. Zo was het bij Agisoft Metashape slechts mogelijk 3 GCP's in te voeren voor het modelleren. De modellen bij de andere software werden gemodelleerd o.b.v. 4 GCP's. Er werd al geconcludeerd door Sanz-Ablanedo, Chandler, Rodríguez-Pérez & Ordóñez (2018) dat de hoeveelheid GCP's een invloed hebben op de behaalde nauwkeurigheden.

### 3 Probleemstelling

De technologische evolutie van laatste decennia leidde tot ongeziene nieuwe technieken, waar drones enkele decennia geleden enkel militaire doeleinden had, zijn deze op vandaag niet meer weg te denken in heel wat sectoren. Net door zijn recente intrede & kostreductie samenhangend met een snelle evolutie van soft- en hardware, heerst er nog onwetendheid ondanks zijn reeds professionele toepassing.

Binnen de bouwsector worden drones steeds meer ingezet voor de acquisitie van 3D data via fotogrammetrie. Hoewel het gebruik van drones voor fotogrammetrie snelle en kostenefficiënte data acquisitie toelaat voor grote of moeilijk toegankelijke gebieden, worden met de klassieke statische inwinningstechnieken via laserscanning in combinatie met GNSS of totaalstations hogere nauwkeurigheden bekomen. Daartegenover staat dat recente softwareontwikkelingen voor fotogrammetrie zich onder andere richten op de verbetering van de nauwkeurigheid van de resulterende puntenwolken, waardoor ze mogelijks de klassieke methoden kunnen vervangen voor bepaalde toepassingen. Het is echter onvoldoende duidelijk in welke mate de bereikbare nauwkeurigheden afhankelijk zijn van de omstandigheden en randvoorwaarden.

### 4 Onderzoeksvragen

Het doel van dit onderzoek was de efficiëntie en nauwkeurigheid van de fotogrammetrische volumemeting toegepast op basis van luchtfotografie, verworven met een drone, te bepalen. Daarbij stelden we volgende onderzoeksvragen:

Wat is de impact van de vlieghoogte, camerahoek en vluchtpatroon op de volumenaauwkeurigheid van een fotogrammetrisch model op basis van dronefotografie? Is er een onderling verband tussen deze drie parameters en de volumenaauwkeurigheid?

Wat is de impact van de acquisitie- en verwerkingstijd op de volumenaauwkeurigheid?

Is er een samenhang tussen de nauwkeurigheid op controlepunten, zowel in horizontaal en/of verticaal vlak en volumeafwijking?

## 5 Methode en materialen

### 5.1 Parameters

Het basisprincipe van fotogrammetrie is het modelleren van een 3D model op basis van beelden. Het metrisch maken van dat model wordt mogelijk door het toevoegen van de camerapositie en/of het gebruik van grond controle punten (GCP). Het vormen van het model is volledig afhankelijk van de input afbeeldingen. Om een onderscheid te vormen tussen acquisitie parameters, werden alle beelden ontwikkeld met eenzelfde platform en camera. De verschillende acquisitieparameters bij eenzelfde volume zijn: opnamehoogte, camera tilt, opnamepatroon (enkelvoudige/ dubbel). Daarnaast werden deze verschillende parameters getest op een tweede, veertig keer groter, volume.

#### 5.1.1 Camera en platform

De FC6310 camera van fabrikant DJI, afgebeeld op Figuur 21, beschikt over een 1" CMOS sensor met 20 miljoen effectieve pixels en een hoekbreedte van 84° en 8,8mm werkelijke of 24mm (35mm equivalent) brandpuntafstand. Het diafragma is manueel/ automatisch verstelbaar van F2,8 tot F11. Het diafragmagetal "F" is de verhouding tussen de brandpuntsafstand van de lens en de diameter van de opening. De waarde van een diafragma wordt vaak voorgesteld als  $f/D$ , waar  $f$  de brandpuntafstand en  $D$  de openingsdiameter weergeeft.

Verder beschikt de camera over een ISO-waarde bereik van 100 tot 3200 automatisch en 12800 bij manuele instellingen. Er zijn twee soorten sluitmechanismen aanwezig, elektronisch (8-1/8000s) en mechanisch (8-1/2000s). Zoals reeds aangehaald in 2.3.6.1 is een mechanisch sluitmechanisme niet gelijk aan de robuuste "global" shutter. Wel werd aangetoond dat vervormingen kleiner zijn in vergelijking met de elektronische "rolling" shutter. Mits opnames overdag in goed belichte omstandigheden plaatsvonden werden de camera parameters automatisch bepaald.



Figuur 21: DJI FC6310 (DJI, 2023a)

Afbeeldingen kunnen in verschillende afmetingen gefotografeerd worden, de fotoafmeting waarvan de maximale resolutie mogelijk is, werd gehanteerd. Een beeldverhouding van 3:2 geeft een afbeelding met 5472 x 3648 pixels tot gevolg, hierdoor wordt de volledige sensor (20MP) benut. Het beeld werd in JPEG formaat op een SD-kaart bewaard. De camera werd gemonteerd op een drie- assige stabilisator waardoor de camerahoek tussen een bereik van -90° en +30° controleerbaar was. De vibraties op de gewenste camerahoek bedroegen  $\pm 0,02^\circ$ .

Het platform waaraan de camera gemonteerd was, een Phantom 4 pro (Figuur 22) alsook van fabrikant DJI, weegt 1388g. Zijn maximale vliegsnelheid bedraagt 50km/u in positie modus, 72km/u in sport en heeft een wind weerstand van 10m/s. Het platform maakt gebruik van zowel GPS als GLONASS satellieten om zijn positie te bepalen waardoor het toestel verticaal tot  $\pm 0,5m$  en horizontaal  $\pm 1,5m$  nauwkeurig zijn positie kan bepalen. (DJI, 2023b)



Figuur 22: DJI Phantom 4 pro (DJI, 2023b)

### 5.1.2 Overlap en snelheid

De overlap tussen opeenvolgende beelden bleef tussen alle modellen gelijk zodat andere parameters onderling konden vergeleken worden. Er werd een voorwaartse overlap van 80% en zijdelings 70% gehanteerd. Dit zijn de meest aangewezen waarden, minimaal is dit 75% voorwaarts en 65% zijdelings. (DATUMATE, 2023) Ook Pix4D raadt voor algemene opmetingen 75% voorwaarts en 60% zijdelings aan. Enkel bij landbouw en bos of dichte vegetatie wordt een hogere overlap aangeraden. (Pix4D, 2021b)

Daarnaast was de vluchtsnelheid bij het kleine volume (V1) 3m/s en bij het grote (V2) 4m/s, ongeacht de vluchthoogte. Om de invloed van externe factoren te minimaliseren wordt de data op eenzelfde dag en onder zelfde meteorologische omstandigheden verzameld. Daardoor was een hogere snelheid nodig bij het grote volume. Bij een lagere vluchtsnelheid was het onmogelijk, met de beschikbare accu's, alle vluchten op eenzelfde dag door te voeren.

### 5.1.3 Vluchthoogte

De vluchthoogte bepaalt rechtstreeks de grondresolutie van het model, ook wel GSD genaamd. Net deze laatste is een parameter dat onderzocht werd en kan met Vergelijking 6 berekend worden.

$$GSD = \frac{S_w \cdot H \cdot 100}{F_R \cdot im_w}$$

Vergelijking 6: Bepalen van GSD

Waarin:

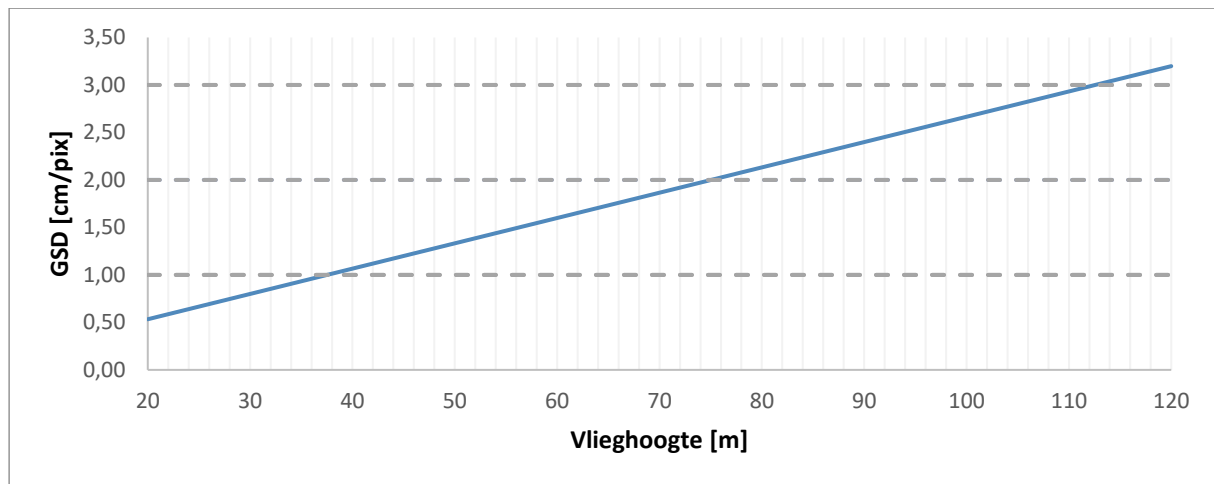
$S_w$ : Sensor breedte van de camera [mm]

$H$ : Vluchthoogte [m]

$F_R$ : Werkelijke brandpuntafstand van de camera [mm]

$im_w$ : Breedte van de afbeelding [pixels]

Figuur 23 geeft de bekomen GSD weer in functie van de camerahoogte specifiek voor camera FC6310. Een GSD van 1, 2 en 3 cm/pix werd bekomen op camerahoogtes 37,5m, 75m en 112,5m respectievelijk, deze resoluties zijn tevens aangegeven in Figuur 23 met grijze streeplijn.

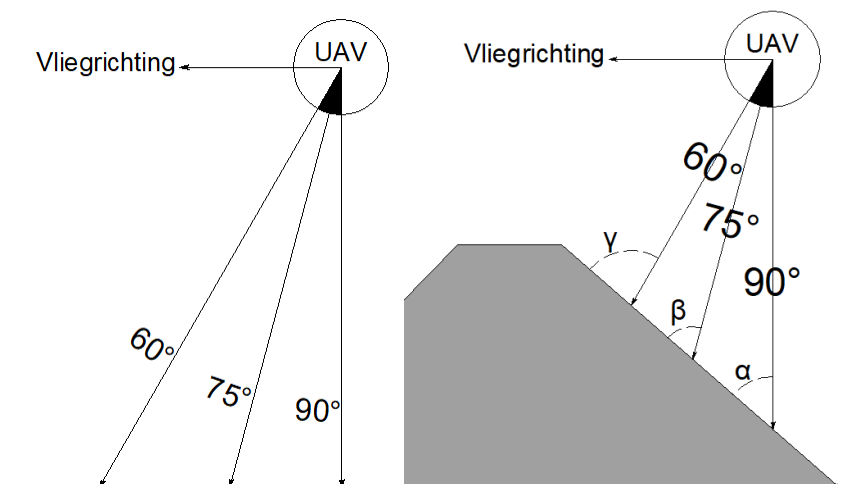


Figuur 23: GSD (camerahoogte) [cm/pix]

#### 5.1.4 Camera tilt

De hoek van de camera t.o.v. de horizon bepaalt het perspectief van een beeld. Sinds de komst en evolutie van analytische verwerking kunnen ook laag oblique beelden gebruikt worden voor een 3D-model te modelleren. Voor horizontale kartering werd reeds aangetoond dat perfect verticale beelden de hoogste nauwkeurigheid bieden. Dit staft de theorie waar een camera, loodrecht op het gemodelleerd vlak, het beste resultaat vertegenwoordigd. Voor het bepalen van volumes waren naast horizontale waarden, ook nauwkeurige verticale gegevens nodig waardoor modellen met camera tilt ontwikkeld werden.

De twee volumes werden ingemeten onder drie verschillende camerahoeken t.o.v. de horizon, verticaal ( $90^\circ$ ) en tweemaal laag oblique ( $75^\circ$  en  $60^\circ$ ), zoals schematisch weergegeven links in Figuur 24. Volgens deze methode was het mogelijk de nauwkeurigheden op punten in het horizontaal en verticaal vlak te beoordelen. Naast de nauwkeurigheid op punten werd deze ook onderzocht op volumes. Bij volumes was het mogelijk deze nauwkeurigheid uit te werken in functie van de ingesloten hoek, tussen de camera-as en helling van het volume ( $\alpha$ ,  $\beta$  en  $\gamma$ ), zoals rechts afgebeeld op Figuur 24. Theoretisch zou deze bij een ingesloten hoek van  $90^\circ$  het beste resultaat leveren. Via deze weg was het mogelijk een potentieel verband tussen camera-tilt, nauwkeurigheid op punten en volume te definiëren.

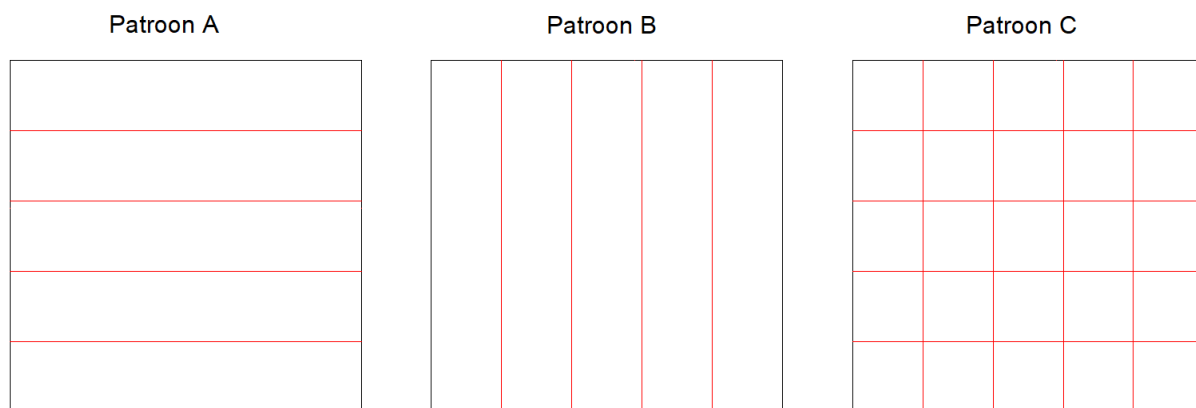


Figuur 24: Schematische voorstelling te onderzoeken camerahoeken



### 5.1.5 Vluchtpatroon

Door de mogelijkheid om tilt beelden toe te passen voor fotogrammetrische verwerking, rees de vraag of het vluchtpatroon hier ook een invloed op heeft. Vlakken, loodrecht op de vliegrichting, van een object komen, enkel bij tilt camera, anders in beeld dan de vlakken evenwijdig met op vliegrichting. Men kan suggereren dat reliëf, loodrecht op de vliegrichting, beter in kaart wordt gebracht dan reliëf evenwijdig op de vliegrichting. Er werden drie verschillende vluchtpatronen onderzocht: twee onderling loodrechte enkelvoudig (A & B) vluchtpatronen en een dubbel (C) raster. Figuur 25 geeft een schematische weergave van de drie patronen weer.



Figuur 25: Schematische voorstelling vluchtpatroon: links (A), midden (B) & rechts (C)

### 5.1.6 Efficiëntie

Naast nauwkeurigheid op punten en volumes, werd de nodige tijd voor elk model te modelleren bijgehouden. Dit betreft zowel de acquisitie- als verwerkingstijd. Zo kon een tijd- en kostenefficiënt model geproduceerd worden in functie van de gewenste nauwkeurigheid, zowel in horizontaal en verticaal vlak als op volumenniveau. De verwerkingstijd is afhankelijk van de soft- en hardware.

De modellen werden fotogrammetrisch verwerkt in de software Metashape, gebruik makend van twee computer opstellingen. De eerste configuratie, voor het aligneren en georefereren, beschikt over een I7-8550U processor met kloksnelheid 1,80Ghz en 4 kernen, 8GB RAM en NVIDIA GeForce MX150 grafische kaart. De tweede, meer rekenkrachtige, opstelling, voor de overige verwerking, heeft een AMD Ryzen 7 2700x processor met kloksnelheid 3,7 Ghz en 8 kernen, 16GB RAM en NVIDIA GeForce RTX 2060 grafische kaart.

## 5.2 Voorbereiding

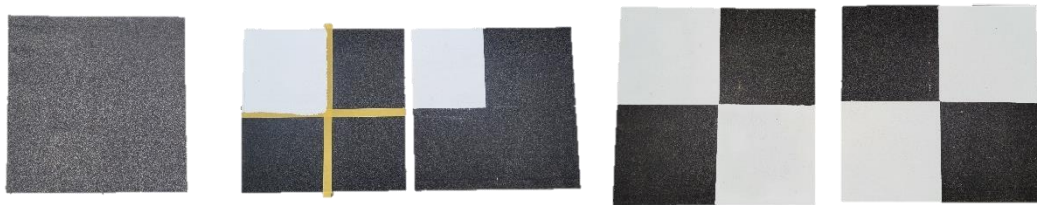
### 5.2.1 Controle punten

Er werden twee types controle punten toegepast: grond controle punten (GCP) en controle punten of *checkpoints* (CP). GCP's werden gebruikt om punten in foto's te verankeren aan een zeer precieze en nauwkeurige locatie op aarde. Deze zijn een fundamenteel onderdeel van het fotogrammetrieproces en waren noodzakelijk om een nauwkeurig te karteren. CP's dienden daarentegen enkel als controlepunten, het is een snelle en gemakkelijke manier om de nauwkeurigheid van het project te controleren nadat het is verwerkt. De werkelijke locatie van dit punt is dus gekend maar werd niet gebruikt voor het metrisch maken, enkel om het verschil tussen de werkelijke en gemodelleerde locatie te kennen.

Zowel GCP's als CP's zijn essentieel voor het verzamelen van gegevens met behulp van drones. Zonder deze punten is er geen manier om de afwijking op de georeferentie van een project te verifiëren. Tijdens de data-aquisitie was er tussen beide geen visueel verschil. Beide punten waren gekenmerkt door hetzelfde grondkenmerk.

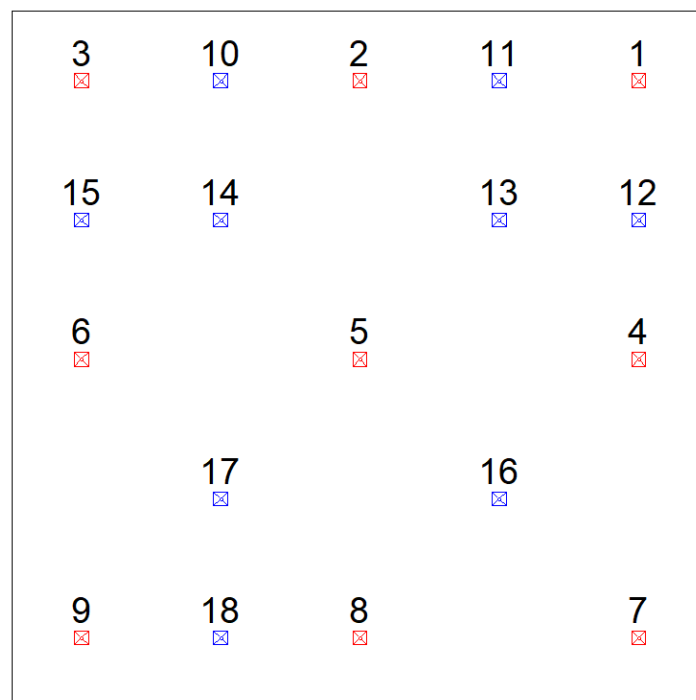
Een GCP en CP moest in vanop de verworven beelden merkbaar zijn, daarnaast moest het mogelijk zijn om vanop het beeld, het ingemeten punt, zo goed mogelijk te benaderen. Hierdoor beschikte het kenmerk over een groot contrast t.o.v. de omgeving en rond het ingemeten punt zelf. Daarnaast mag het kenmerk niet verplaatst worden doorheen de metingen.

De kenmerken waren op twee verschillende sites nodig, waardoor voor een duurzaam en circulaire ontwerp werd gekozen. Vlakken van 50x50cm bitumen (Figuur 26a) werden gekenmerkt (Figuur 26b) met twee witte vlakken (25x25cm). Hierdoor beschikt het kenmerk over voldoende contrast met de omgeving (zwart en wit) en rond het centraal in te meten punt. De finale kenmerken zijn weergegeven op Figuur 26c. Door het gewicht (0,8kg/st) en ruwheid waren de kenmerken niet gevoelig voor windverplaatsingen tijdens de meting en konden ze nadien zonder schade aan de omgeving verwijderd worden.



Figuur 26: a) bitumen onbewerkt (links); b) aanbrengen eerste wit vlak (midden); c) finaal kenmerk (rechts)

Negen GCP's (1-9) werden zo evenredig mogelijk verdeeld over de site, idealiter volgens een patroon zoals weergegeven op Figuur 27 in het rood. De negen overige punten dienden als CP en werden geplaatst op een wel overwogen locatie, bij voorkeur zo benaderend mogelijk zoals de blauwe locaties op Figuur 27. Punten 13, 14, 16 en 17 bevonden zich op een zo ruim mogelijke afstand van alle GCP's, de overige CP's lokaliseerden zich tussenin twee GCP's.

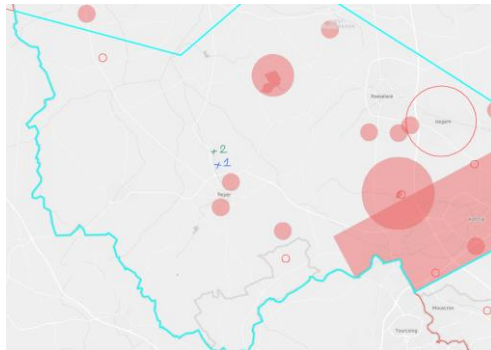


Figuur 27: Meest ideale opstelling GCP's (rood) en CP's (blauw)

### 5.2.2 Locatie

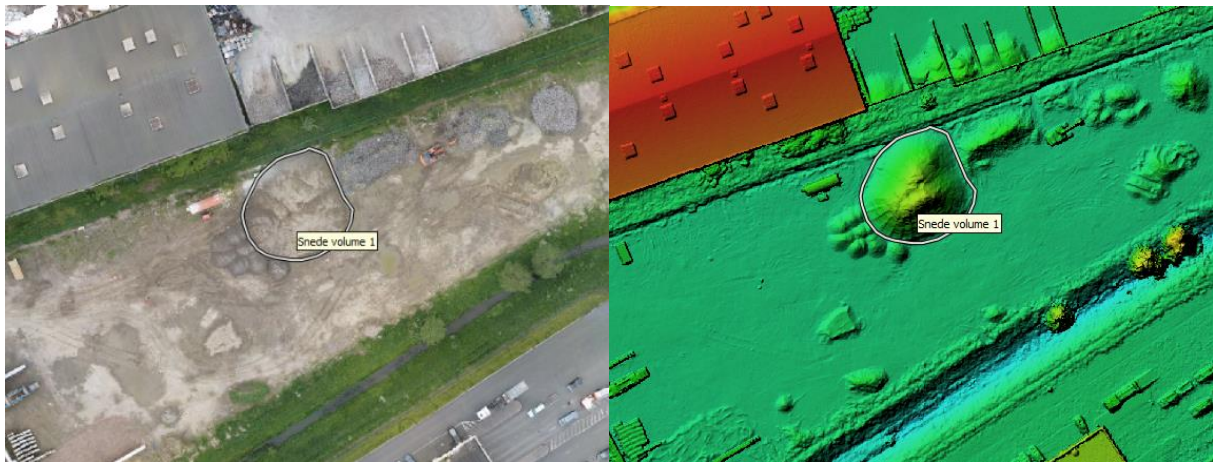
De dronevlucht werd uitgevoerd binnen de open categorie klasse A2 met een UAV zonder CE label (*legacy drone*). Hierdoor was een minimale afstand van 50m tot niet-betrokken personen verzekerd. De operator beschikte over een geldig A2 vaardigheidsbewijs tot 27/09/2027 en nodige BA-verzekering.

Beide locaties bevonden zich in de industriezone te Ieper waar zich de “EBHTA10C\_IEPER HELICOPTER TRAINING AREA” bevond, tevens weergegeven met blauwe contour op Figuur 28. Deze was op het moment van de vluchten gedeactiveerd.



Figuur 28: Testlocaties en geozone (Skeyes, 2023)

Figuur 29 en Figuur 30 tonen een ortho en DEM (*Digital Elevation Model*) foto van het opgemeten gebied samen met een polygoonaanduiding rond het te meten volume.



Figuur 29: Situering volume 1; ortho (links), DEM (rechts)

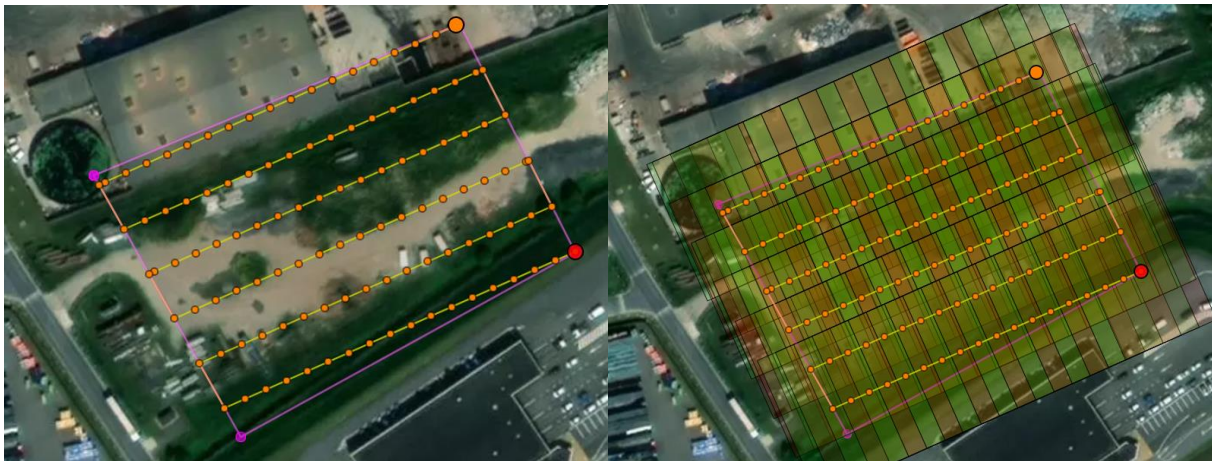


Figuur 30: Situering volume 2; ortho (links), DEM (rechts)

### 5.2.3 Vluchtpatroon

In totaal werden 18 vluchten per locatie uitgevoerd. Met deze 18 vluchten was het mogelijk 27 modellen, ieder met verschillende acquisitie-parameters, te modelleren. Tabel 5 geeft een overzicht van de ontwikkelde modellen, elk met hun bijhorende acquisitie-parameters. Modellen 1 t.e.m. 9 waren opgebouwd op basis van een enkelvoudig vluchtpatroon A, 10 t.e.m. 18 door een enkelvoudig vluchtpatroon B (loodrecht op A) en 19 t.e.m. 27 door een combinatie van A en B, een dubbel raster genaamd C.

Voor het uitvoeren van de vlucht werd een geautomatiseerde vluchtapplicatie gebruikt, Litchi. Echter was het in deze applicatie niet mogelijk rechtstreeks een geschikt vluchtplan, met het oog op de fotogrammetrische toepassing, te ontwerpen. Hiervoor werd naar een externe website uitgeweid die het mogelijk maakt een gebied in te tekenen, camera model, overlap en vluchtsnelheid in te stellen om vervolgens het vluchtpatroon te exporteren naar een, Litchi ondersteunend, csv. bestandstype. Figuur 31 geeft de vluchtplanning in de onlinetool weer waar links de cameraposities zijn weergegeven en rechts de footprint van de te ontwikkelen beelden.



Figuur 31: Website tool vluchtschema: te fotograferen locaties (links); footprint gecreëerde beelden (rechts)  
(OpenStreetMap, 2023)

In de vluchtapp Litchi kon het csv. bestand geïmporteerd en, indien nodig, eventuele aanpassingen doorgevoerd worden. Figuur 32 geeft aan hoe bovenstaand vluchtpatroon in Litchi wordt weergegeven. Op diezelfde afbeelding is zichtbaar dat de vluchtparameters reeds zijn ingesteld zoals gewenst: vluchtsnelheid en -hoogte, foto interval en vluchtstrookafstand overeenkomstig met de overlap en de camerahoek. Tevens geeft de applicatie een indicatieve vluchtduur en -afstand weer.

In Bijlage 2 zijn alle vluchtpatronen terug te vinden voor het eerste (volume 1) en in Bijlage 3 voor het tweede volume (volume 2). Het spreekt voor zich dat de vluchtpatronen 4 & 7 identiek zijn met 1, 5 & 8 met 2 en 6 & 9 met 3. Deze hebben onderling enkel een verschillende camera tilt.

Tabel 5: Overzicht modellen met bijhorende acquisitie-parameters

Model nr	Resolutie [cm/pix]	Camera tilt [grad]	Vluchtpatroon
1	1	90°	A
2	2		
3	3		
4	1	75°	
5	2		
6	3		
7	1	60°	
8	2		
9	3		
10	1	90°	B
11	2		
12	3		
13	1	75°	
14	2		
15	3		
16	1	60°	
17	2		
18	3		
19	1	90°	C
20	2		
21	3		
22	1	75°	
23	2		
24	3		
25	1	60°	
26	2		
27	3		



Figuur 32: Vluchtpatroon geïmporteerd in Litchi (VC Technology Ltd, 2023)

## 5.3 Data-aquisitie

### 5.3.1 Plaatsen en inmeten van GCP's en CP's

De punten werden tweemaal ingemeten, voor en na de UAV data-aquisitie, om zo een minimaal tijdsverschil van 10u tussen beide metingen te verkrijgen. Op deze manier werd de GNSS-locatie bepaald en uitgemiddeld door verschillende satellieten. Daarnaast werd aandacht geschonken aan eenzelfde GNSS richting tijdens het meten. Zo heeft een mogelijke interne afwijking van het GNSS-center geen invloed op de punten onderling maar enkel een transformatie van het model in zijn geheel.

De Altus NR3 GNSS module (Figuur 33), van fabrikant Septentrio, werd gebruikt om de punten in te meten. Deze beschikt over een RTK nauwkeurigheid van 0,6cm + 0,5ppm horizontaal en 1cm + 1ppm verticaal. Daarnaast voldoet het toestel over een CE, FCC6 Class B Part 15 en ISO 9001-2015 certificaat. (Septentrio NV, 2021)



Figuur 33: Altus NR3 GNSS (IndiaMART InterMESH Ltd, 2023)

### 5.3.2 Uitvoeren van de vlucht

Nadat alle GCP's en CP geplaatst en ingemeten waren, werd de vlucht uitgevoerd volgens de Litchi applicatie waarin de gewenste vluchtpatronen waren aangemaakt. Tijdens de vlucht bleef de UAV steeds in het zicht van de operator (VLOS) en kon deze op ieder moment de vlucht pauzeren of beëindigen. Eenmaal de accu capaciteit onder de grens van 30% daalde, werd het vluchtprogramma stopgezet en de UAV manueel tot landing gebracht. Eenmaal het platform over een opgeladen accu beschikte, kon het toestel terug manueel opstijgen om vervolgens de onderbroken missie te vervolledigen of een nieuwe te starten. Figuur 34 geeft ter illustratie de land- en opstijgopstelling weer bij volume 1. Tussen de vluchtpatronen werd een foto van de horizon genomen, zo was er tijdens de verwerking een visueel onderscheid tussen de onderlinge missies.



Figuur 34: Landingsplatform bij volume 1

### 5.3.3 Laserscan

Naast de nauwkeurigheid op controle punten, ingewonnen met GNSS, werd de nauwkeurigheid op het volume bepaald. Een puntenwolk als referentiedataset, ingewonnen via terrestrische laserscanning was hiervoor nodig. Er werd gebruik gemaakt van de Leica P40 (Figuur 35) wegens zijn hoge graad van nauwkeurigheid. Zo beschikt een enkele meting over een nauwkeurigheid van 1,2mm + 10 ppm over het volledig bereik, een hoeknauwkeurigheid van 8" zowel horizon- als verticaal waardoor een 3D positie ingemeten werd met een nauwkeurigheid van 3mm (op 50m) en 6mm (op 100m). (Leica Geosystems AG, 2023)



Figuur 35: Leica P40 (Leica Geosystems AG - Part of Hexagon, 2023)

De puntenwolk werd ter plaatse in een lokaal assenstelsel ingemeten. Minimaal 3 GCP of CP punten werden met een hoge resolutie ( $\pm 1\text{mm}$ ) gescand zodat het model nadien kon gerefereerd worden in hetzelfde assenstelsel als bij de fotogrammetrische verwerking.

Door het uitvoeren van een  $360^\circ$  scan per opstelpositie, was het mogelijk de puntenwolken bij verwerking fijn aan elkaar te refereren. De ingestelde resolutie per scanpositie varieerde zodat het op te meten volume over een punt dichtheid van  $\pm 1\text{cm}$  beschikte. Zo bleef de puntenwolk over een hogere resolutie beschikken i.v.m. deze ingewonnen met de UAV, waar de dichtste (theoretische) GSD  $1\text{cm}/\text{pix}$  bedroeg.

## 5.4 Verwerking

In dit onderdeel wordt de volledig verwerking van ingewonnen data omschreven. Startend bij de grondcontrole- en controlepunten, gevolgd door de fotogrammetrische verwerking. Dan wordt de registratie van puntenwolken en volumeverwerking aangehaald. Als laatste wordt verwerkingsmethode besproken.

### 5.4.1 GCP & CP

Zoals beschreven in 5.3.1 werd ieder punt tweemaal ingemeten. De geëxporteerde data beschikte naast het puntnummer en Lambert 72 coördinaten ook over de horizontale- & verticale precisie, PDOP factor en aantal zichtbare satellieten. Hoe de precisie berekend werd, is niet terug te vinden in fabrikantdocumentatie. Wel werden deze waarden als basis toegepast om de toelaatbare fout (TF), wat gelijk is aan 2,5 keer de kwadratisch middelbare fout (KMF), op de gemiddelde puntlocatie te bepalen. De effectieve locatie van een GCP & CP is het gemiddelde van de twee metingen. De KMF in horizontaal en verticaal vlak werd als volgt bepaald:

$$\sigma_H = \sqrt{(\sigma_{H1})^2 + (\sigma_{H2})^2}$$

$$\sigma_V = \sqrt{(\sigma_{V1})^2 + (\sigma_{V2})^2}$$

Waarvan:

$\sigma_H$  &  $\sigma_V$ : KMF in het horizontaal (H) en verticaal (V) vlak op de gemiddelde meetwaarde

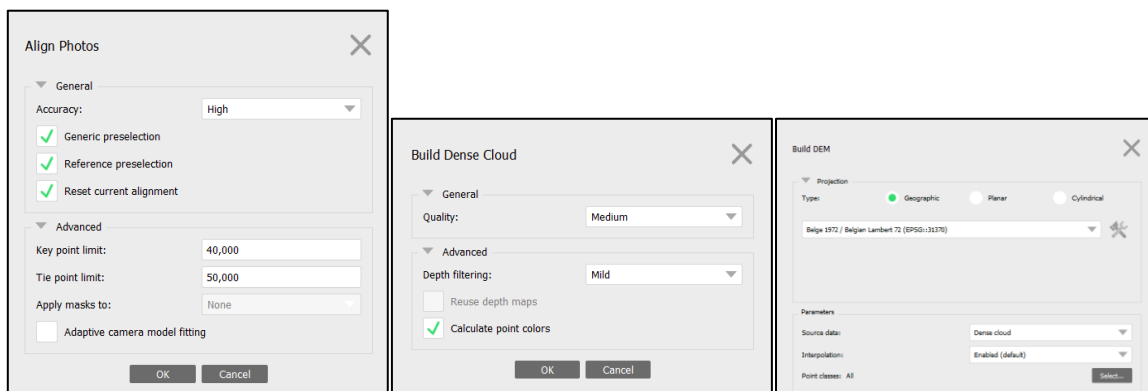
$\sigma_{Hx}$  &  $\sigma_{Vx}$ : KMF in het horizontaal (H) en verticaal (V) vlak op meting x

De werkelijke afwijking tussen de meting en gemiddelde waarde werd getoetst aan de toelaatbare fout. Indien een waarde de TF overschreed, zou de oorzaak onderzocht worden en kon het punt als nietig verklaard worden.

### 5.4.2 Fotogrammetrie

Het fotogrammetrisch proces is voor ieder ontwikkeld model identiek en werd in volgende volgorde toegepast:

1. Aanmaken van project - naam = modelnummer
2. Beelden inladen
3. Aligneren van de beelden
  - a. Parameters weergegeven op Figuur 36a
4. Verwijderen van ruis en onzekerheden tot een bepaald niveau uit de *sparse cloud* met volgend level
  - a. Projectie nauwkeurigheid:  $\leq 15$
  - b. Reconstructie onzekerheid:  $\leq 50$
  - c. Reproductiefout:  $\leq 0,40$
5. Toekennen van markers aan de GCP en CP punten
  - a. Automatische selectie waar mogelijk
  - b. Manueel corrigeren/ toevoegen waar nodig
  - c. Punten 10 t.e.m. 18 instellen als CP
6. Dichte puntenwolk aanmaken
  - a. Parameters weergegeven op Figuur 36b
7. DEM aanmaken
  - a. Parameters weergegeven op Figuur 36c
  - b. Resolutie maximaal volgens dichts puntenwolk
8. Volume bepalen
  - a. Referentieoppervlak inladen (*shape*) waar het volume boven wordt bepaald
  - b. Af te graven volume berekenen
9. Rapport exporteren
  - a. Uitlezen van volledige verwerkingstijd



Figuur 36: Verwerkingsparameters a) aligneren (links); b) dichte puntenwolk (midden); c) DEM (rechts)



### 5.4.3 Laserscan

Mits een licentie, voor de Cyclone register 360 PLUS software van Leica, niet beschikbaar was, werden de puntenwolken via de *opensource* software Cloudcompare geregistreerd. Indien in een scan minder dan 3 GCP's of CP zichtbaar waren, werd deze eerst geregistreerd met een andere scan om vervolgens met voldoende GCP's of CP's te georefereren. De registratie gebeurde met het ICP (*Iterative Closest Point*) algoritme en *align* (puntenparen) methode, zodanig dat een minimale *cloud to cloud* afstand werd bekomen. Eenmaal onderlinge puntenwolken met voldoende nauwkeurigheid geregistreerd waren, werd het volledige model gerefereerd t.o.v. het Lambert 72 referentiestelstel.

De KMF op de controlepunten, na het georefereren, wordt bijgehouden zodat de afwijking op het geregistreerd model gekend was. Deze werd later toegepast tijdens het onderzoek op de volumeafwijking.

Eenmaal het model met gewenste nauwkeurigheid geregistreerd was, werd de afstand tussen punten gereduceerd tot 1cm. Dit was nodig zodat een DTM en volumebepaling met een hoge hoeveelheid dwarsdoorsneden verwerkbaar bleef in de software Pythagoras. Doordat de resolutie van de finale puntenwolk groter of gelijk was aan 1cm, werd het volume bepaald d.m.v. een onderlinge afstand van 1cm tussen de dwarsprofielen.

Volumes werden bepaald t.o.v. hetzelfde referentieniveau zoals bij de fotogrammetrische verwerking. In de Pythagoras software is het mogelijk het aantal of afstand tussen de dwarsprofielen in te geven. Mits de minimale afstand tussen punten 1cm is, werd diezelfde afstand gehanteerd tussen de dwarsprofielen.

### 5.4.4 Omzetten ruwe data

#### GCP en CP

Bij de GCP's en CP's werd het verschil tussen beide metingen grafisch weergegeven t.o.v. de toelaatbare fout. Indien een meting niet bleek te voldoen werd onderzocht of dit kan teruggekoppeld worden aan de PDOP factor, aantal zichtbare satellieten of andere invloedsfactoren.

#### Fotogrammetrisch model

Per fotogrammetrisch model werd de werkelijke resolutie, camera tilt, vluchtpatroon, aantal camerapositionen en reproductiefout bijgehouden. Daarnaast werd, op de GCP's en CP's, de KMF (kwadratisch middelbare fout) op de x, y, z-waarde genoteerd. Deze konden verder verwerkt worden tot de KMF in horizontaal vlak (xy), totale fout en gemiddelde op meerdere modellen. Indien een andere parameter dan de vluchthoogte werd onderzocht, zijn resultaten weergegeven in functie van de relatieve KMF. Deze werd als volgt bepaald:

$$\text{Relatieve KMF} = \frac{\text{KMF [mm]}}{\text{Resolutie } \left[\frac{\text{mm}}{\text{pix}}\right]}$$

Bij beide volumes werden twee dwarsprofielen, evenwijdig met vluchtrichting, gegenereerd. Vervolgens kon de relatieve camerahoek, de hoek tussen camera-as en grondvlak, bepaald worden.

#### Volumemeting

Het af te graven volume werd bepaald samen met de relatieve fout, t.o.v. het referentiemodel, op het fotogrammetrisch volume. Op deze 27 volumes per terrein werden eerst mogelijke uitschieters bepaald a.d.h.v. een boxplot. Deze konden een eerste indicatie geven welke modellen afwijken t.o.v. de gehele dataset. Bij algemene volumevergelijkingen, ongeacht de acquisitieparameters, werden mogelijke uitbijters niet mee opgenomen.

De impact van de resolutie op de volumenaauwkeurigheid werd onderzocht door de volume afwijking van een model weer te geven in functie van de theoretische resolutie en absolute camerahoek.

De twee volumes in zijn totaliteit werden opgedeeld in deelvolumes, afhankelijk van de relatieve camerahoek. De opdeling gebeurde volgens flanken loodrecht op de vliegrichting, zonder zijflanken (evenwijdig met de vliegrichting) te integreren. Per grondresolutie werd het gemiddelde, mediaan, boven- & ondergrens en uitbijters van de volume afwijkingen bepaald. De relatieve volumeverschillen werden uitgezet in functie van de relatieve camerahoek waarmee het model ontwikkeld was. Op deze spreiding van data werd een exponentiële trendlijn berekend.

De som van de acquisitie- en verwerkingstijd werden eerst weergegeven in een boxplot om de gemiddelde tijd, mediaan en grenzen te bekomen samen met mogelijke uitschieters. Vervolgens kon de acquisitie- en verwerkingstijd logaritmisch voorgesteld worden in functie van de relatieve volume afwijking.

Een mogelijke samenhang, tussen de gemiddeld verticale afwijking van de CP's en de relatieve afwijking op het volume, werd onderzocht door eerst de afwijking op het referentievolume te bepalen. De referentievlakken waartussen het volume werd bepaald, werd voor ieder model op een identieke hoogte, t.o.v. TAW, ingesteld. Daardoor is er een lokaal verschil, afhankelijk van de afwijking op de georeferentie, tussen de modellen mogelijk. Dit effect wordt gereduceerd door de referentieoppervlakte in hoogte te variëren, afhankelijk van de gemiddeld verticale KMF op de CP's. Het referentievolume kon vastgelegd worden samen met een boven- en ondergrens. De werkelijke volume afwijking van het fotogrammetrisch model, samen met de boven- en ondergrens, wordt relatief weergegeven t.o.v. het referentievolume en zijn grenzen o.b.v. volgende vergelijking:

$$\Delta V_{\%} = \frac{V_{\text{fotogrammetrisch}} - V_{\text{referentie}}}{V_{\text{referentie}}}$$

## 6 Resultaten

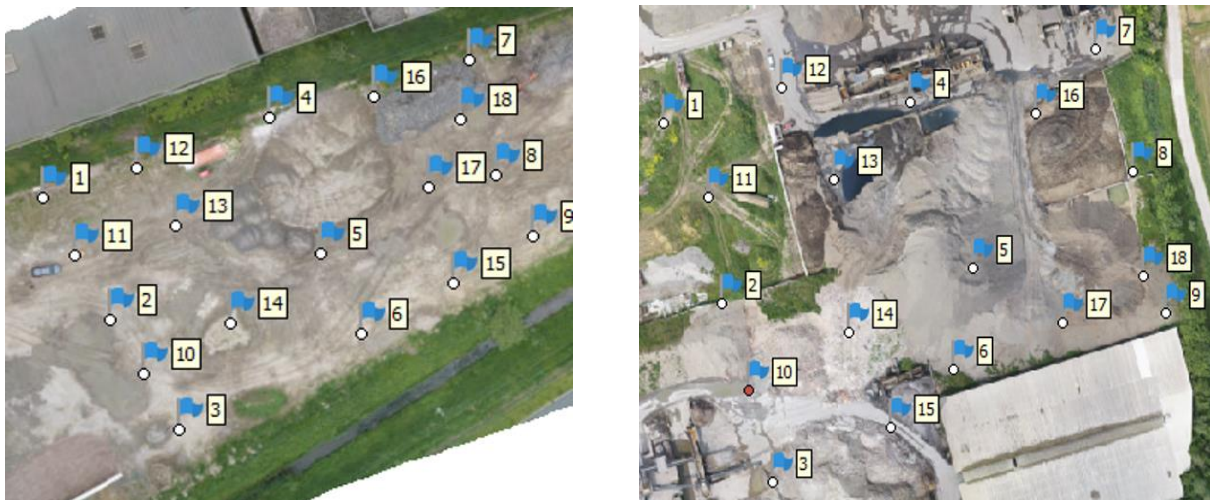
### 6.1 Meteorologische gegevens

Het eerste volume (V1) werd opgemeten op 8 mei 2023 te Ieper, West-Vlaanderen. Gedurende meting was het dichtbewolkt met een temperatuur van 16°C. Op 100m hoogte bevond zich een noordoostenwind met snelheid van 17km/u en windstoten tot 29km/u. De geomagnetische stormindex schommelde die dag tussen een waarde van 4 tot 5.

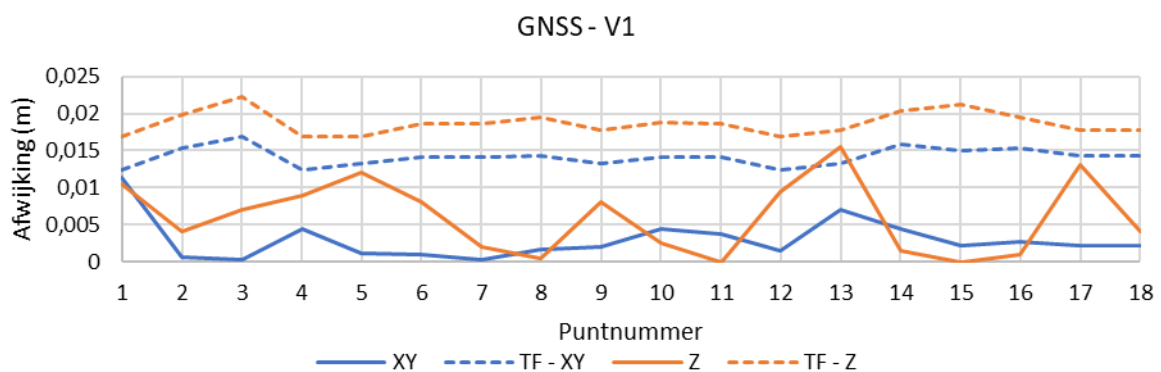
Het tweede volume (V2) werd opgemeten op 14 mei 2023 te Ieper. Gedurende meting was het onbewolkt met een temperatuur van 20°C. Op 100m hoogte bevond zich een noordenwind met snelheid 21km/u en windstoten tot 36km/u. De geomagnetische stormindex schommelde die dag tussen een waarde van 3 tot 4.

### 6.2 GCP & CP

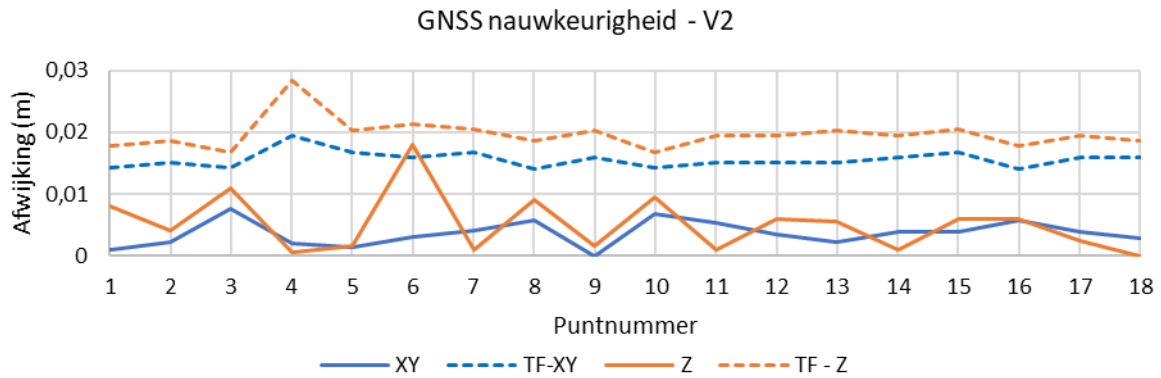
Figuur 37 geeft de locaties weer van de GCP en CP punten genummerd volgens Figuur 27. Links de situering op locatie 1, rechts op locatie 2. Figuur 38 en Figuur 39 tonen grafisch de absolute afwijking en toelaatbare fout op gemiddelde waarde van de twee metingen, in horizontaal (xy) en verticaal (z) vlak, voor beide locaties. De numerieke data werd toegevoegd in Bijlage 4 & 5. Hierbij dient opnieuw vermeld te worden dat de toelaatbare fout bepaald werd op de berekende horizontale & verticale precisie door de verwerkingssoftware. Hoe en op basis van welke data de software deze bepaalt, blijft echter onduidelijk.



Figuur 37: Effectieve locatie controlepunten; links: V<sub>1</sub>, rechts: V<sub>2</sub>



Figuur 38: Afwijking GNSS en toelaatbare fout – V<sub>1</sub>



Figuur 39: Afwijking GNSS en toelaatbare fout – V<sub>2</sub>

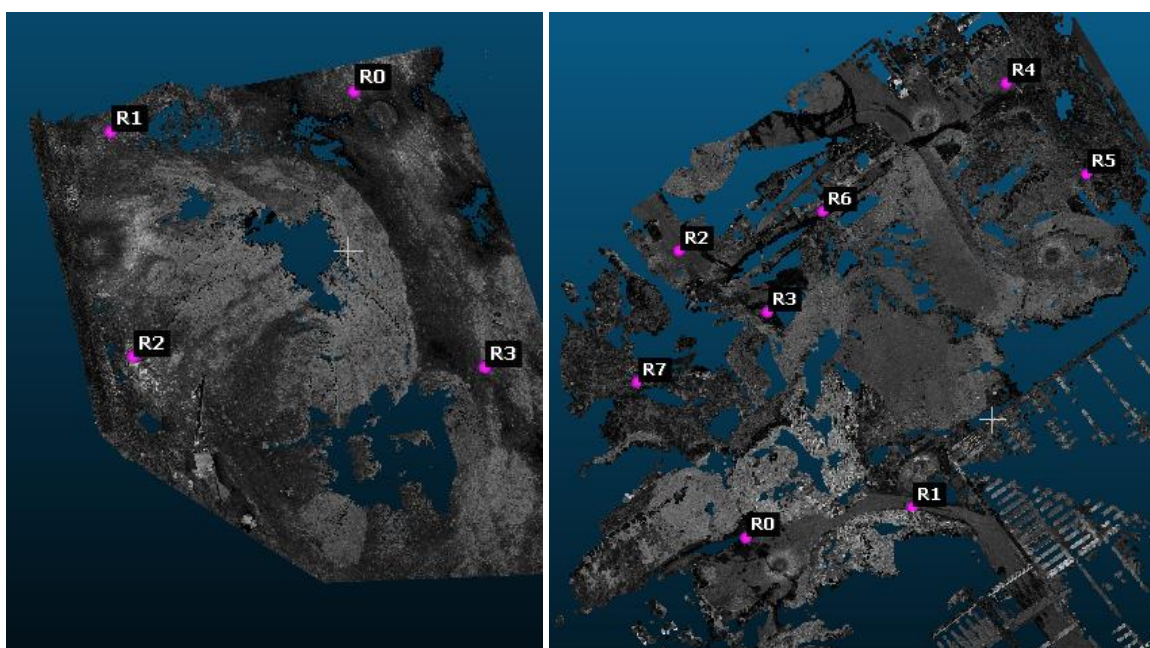
### 6.3 Laserscan

De kwadratisch middelbare fout op vier controlepunten rond het eerste volume bedraagt 0,0159m. Bij het tweede volume konden acht controlepunten geselecteerd worden met een resulterende KMF van 0,0296m. De CP's waarop de KMF werd bepaald zijn weergegeven in Figuur 40. Het eerste volume beschikt over een holte bovenop de berg, doordat de laserscan niet bovenop het volume werd opgesteld werd deze holte niet ingemeten. Voor de volumeverwerking werd de top van de berg hierdoor niet in rekening gebracht. Bij het tweede volume werd een gelijkaardige situatie waargenomen waardoor ook hier een volume tussen twee vlakken werd bepaald.

Volume 1, gelegen tussen 14,309 mTAW (niveau 1) en 18,000 mTAW (niveau 2), bedraagt 1 324,1m<sup>3</sup>. Het tweede volume, tussen 20,000mTAW en 34,000mTAW, is 45 468,6m<sup>3</sup>.

Tabel 6: Referentievolume V<sub>1</sub> & V<sub>2</sub>

Volume	V <sub>boven, niveau 1</sub> [m <sup>3</sup> ]	V <sub>boven, niveau 2</sub> [m <sup>3</sup> ]	V <sub>netto</sub> [m <sup>3</sup> ]	Bereik [m <sup>3</sup> ]	Relatief bereik [%]
V1	1 324,1	250,5	1 073,6	1 067,6 ; 1 076,7	- 0,56% ; 0,29%
V2	48 770,8	3 302,2	45 468,6	45 288,3 ; 45 650,5	- 0,40% ; 0,40%



Figuur 40: Lokalisering CP's voor bepaling KMF referentiemodel: links: V1; rechts: V2

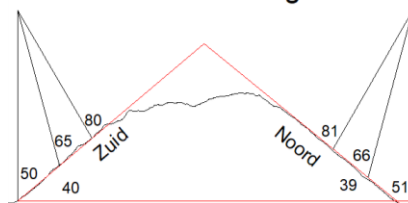
## 6.4 Fotogrammetrie

### Camerahoek

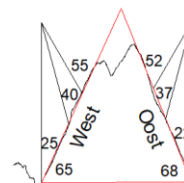
De vlakken van het volume 1 beschikken langs beide zijden van het dwarsprofiel nagenoeg over dezelfde helling, met een maximaal onderling verschil van 3°. Zo werd de relatieve camerahoek bepaald als het gemiddelde van beide zijden. Deze zijn tevens afgebeeld op Figuur 41 en Figuur 42. Bij het tweede volume was het verschil, tussen de bergflanken, te groot om uit te middelen (6-11°). Deze werden afzonderlijk verwerkt en benoemd met een aardrijkskundige naam. De waarden tussen de twee hellingen van de westflank van volume 2 werden uitgemiddeld mist deze 2° onderling verschilden. De relatieve camerahoek, bij een bepaalde absolute hoek, is numeriek weergegeven in Tabel 9.

### Volume 1

Snede // vluchtrichting a



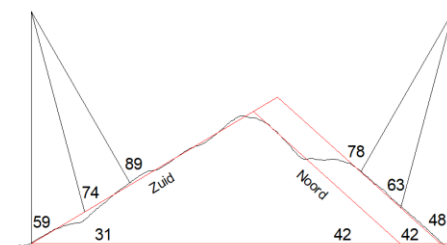
Snede // vluchtrichting b



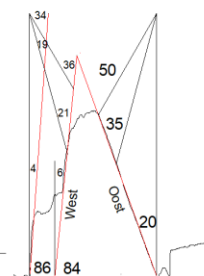
Figuur 41: Camera-as t.o.v. helling volume 1

### Volume 2

Snede // vluchtrichting a



Snede // vluchtrichting b



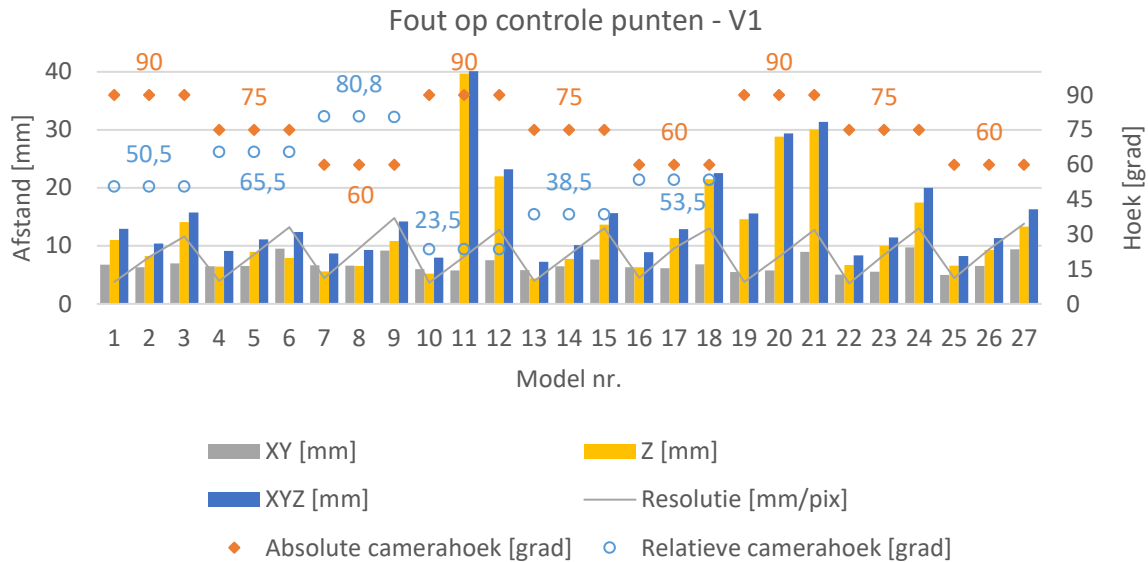
Figuur 42: Camera-as t.o.v. helling volume 2

Tabel 7: Absoluut en relatieve camerahoek

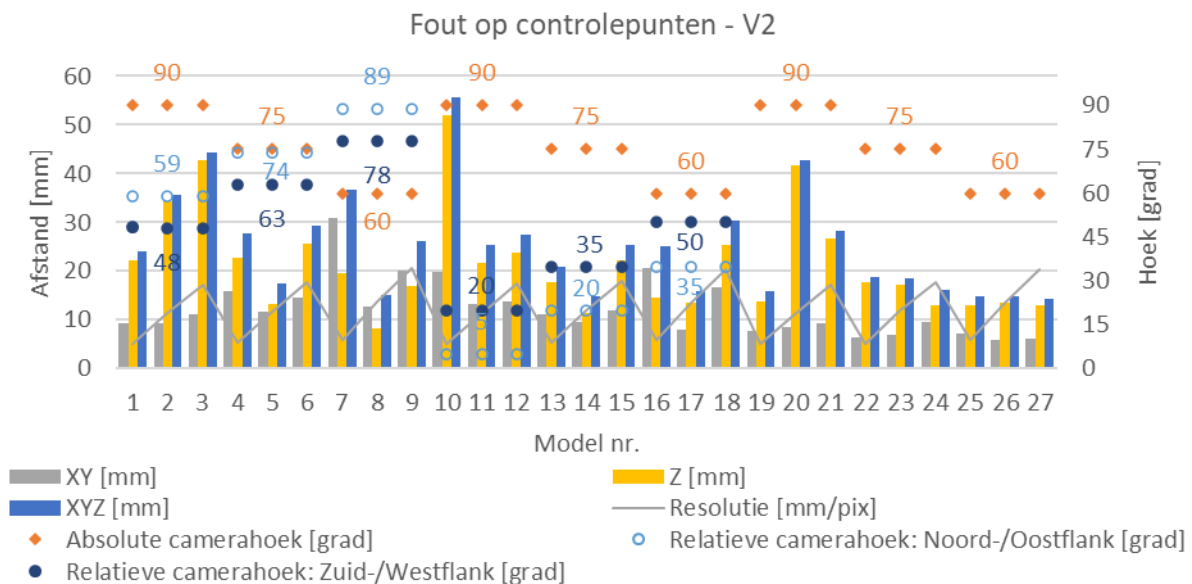
Volume	Vluchtrichting	Absolute camerahoek [grad]				Relatieve camerahoek [grad]	
		Zuid/west – Noord/Oost					
		90	75	60			
1	A	50,5	65,5	80,5			
	B	23,5	38,5	53,5			
2	A	59	48	74	63	89	78
	B	5	20	20	35	35	50

## Controlepunten

De horizontale, verticale en totale afwijking op de controlepunten (CP) t.o.v. de GNSS-coördinaat zijn, voor ieder model, grafisch weergegeven in Figuur 43 en Figuur 44. Naast de afwijking zijn de absolute & relatieve camerahoek en werkelijke resolutie per model merkbaar op diezelfde figuren. Voor de gedetailleerde ruwe data wordt doorverwezen naar Bijlage 6.

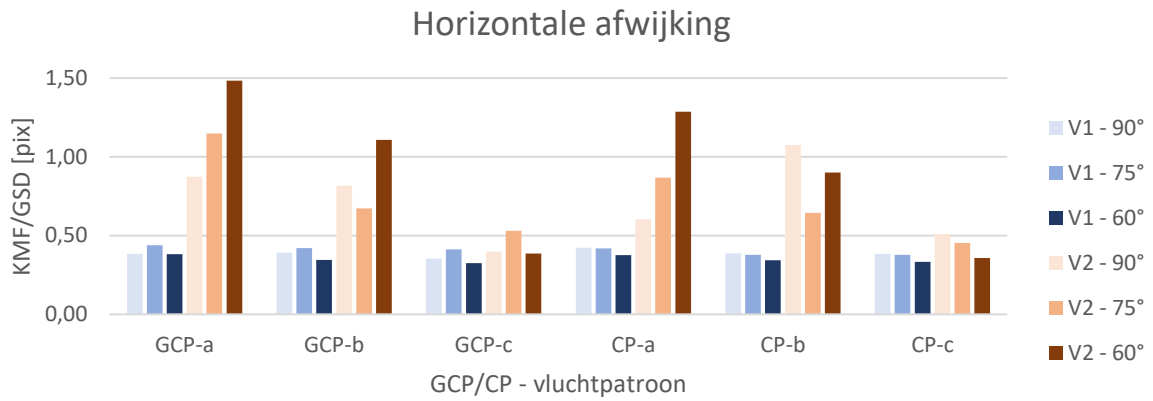


Figuur 43: Fout op controlepunten - V<sub>1</sub>

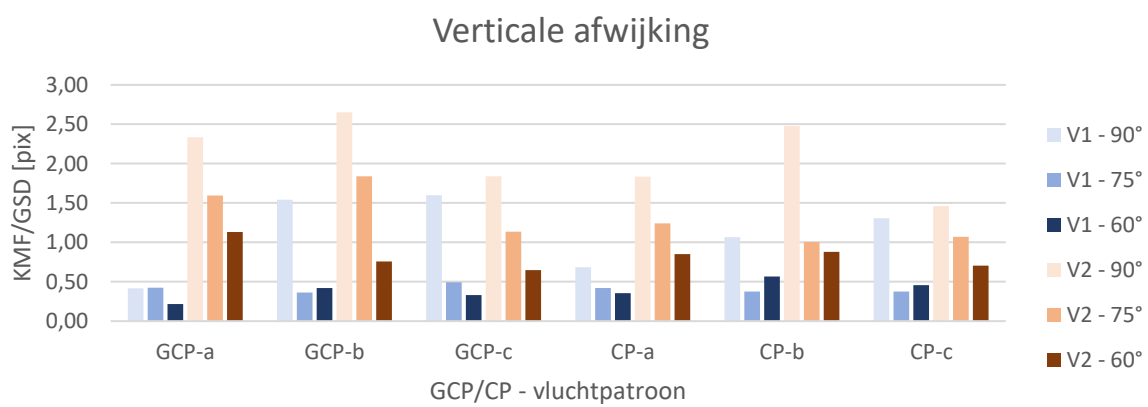


Figuur 44: Fout op controlepunten - V<sub>2</sub>

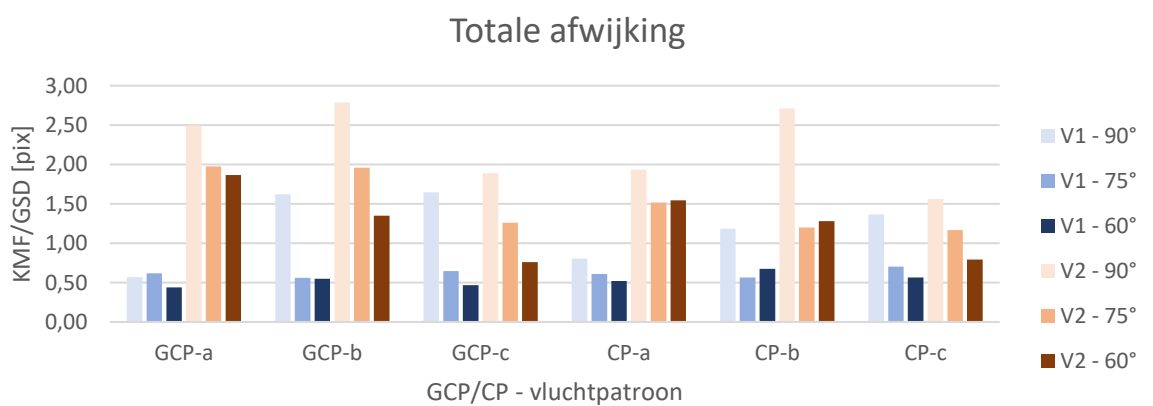
Figuur 45, Figuur 46 en Figuur 47 specificeren zich op de horizontale, verticale en totale relatieve afwijking, t.o.v. de ingemeten punten en in functie van het vluchtpatroon. De afwijking is het gemiddelde van drie modellen waarbij de resolutie varieert. Deze konden uitgemiddeld worden doordat gebruikt werd gemaakt van de relatieve KMF. Beide volumes hebben een verschillende omvang, bij dezelfde hoeveelheid controlepunten, daardoor is de totale dichtheid van controlepunten bij het tweede volume lager (-76%) dan bij het eerste.



Figuur 45: Horizontaal relatieve afwijking op controlepunten



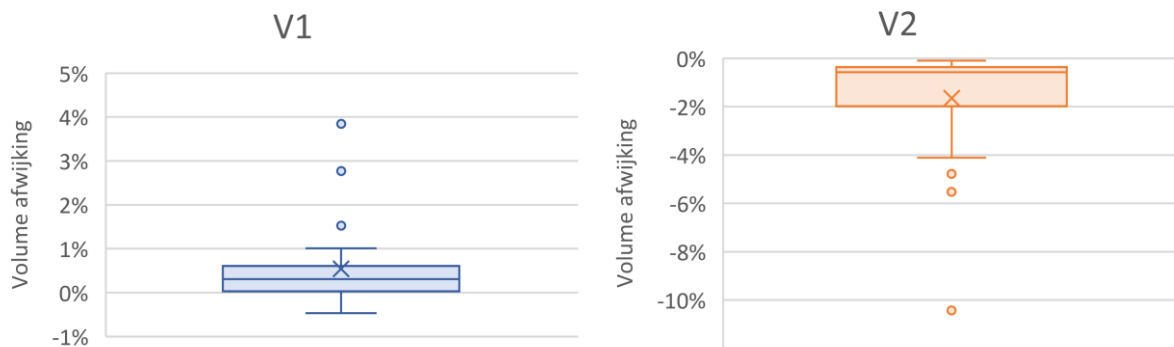
Figuur 46: Verticaal relatieve afwijking op controlepunten



Figuur 47: Totaal relatieve afwijking op controlepunten

### 6.4.1 Volumemeting

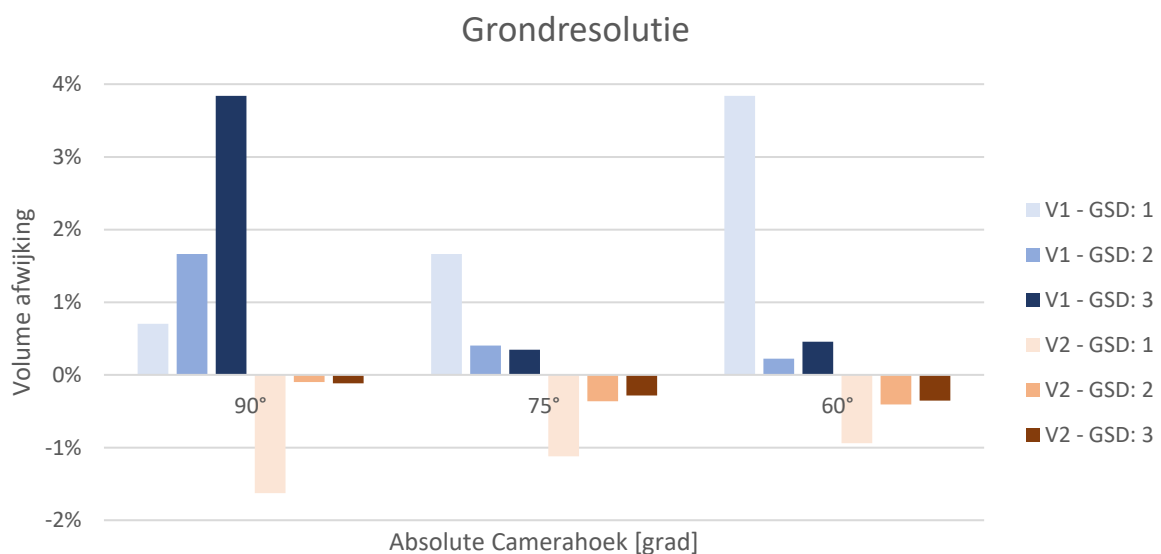
Figuur 48 geeft de verdeling weer voor de volume afwijking, ongeacht de acquisitieparameters. Bij het eerste volume bedraagt de gemiddelde afwijking 0,54% met mediaan 0,31%, waarbij de ondergrens -0,47% en bovengrens 1,01% is. Vier modellen (3, 11, 20 & 21) worden als uitbijter beschouwd. De gemiddeld volumeafwijking bij het tweede volume is -1,65% met mediaan -0,57%. De ondergrens bedraagt -4,11% en bovengrens -0,10%. Vier modellen (1, 4, 10 & 11) worden als uitbijter beschouwd.



Figuur 48: Verdeling volume afwijking: links: volume 1; rechts: volume 2

### Grondresolutie

De volume afwijking wordt weergegeven, op Figuur 49, als functie van de grondresolutie bij een dubbel vluchtpatroon (c). De volume afwijking per model is terug te vinden in Bijlage 7.



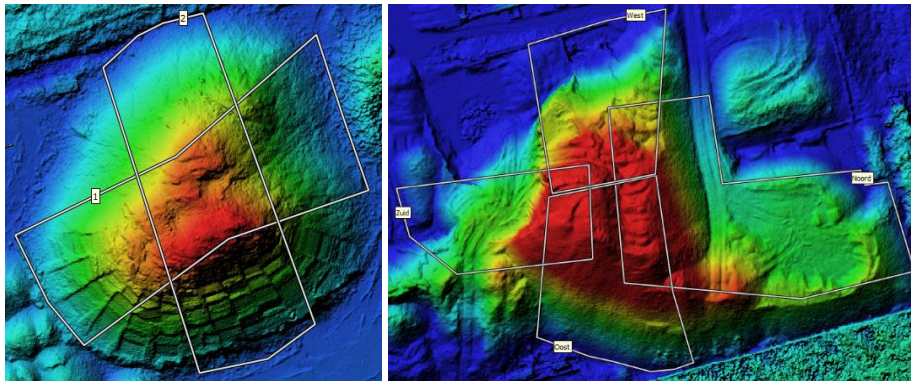
Figuur 49: Impact grondresolutie op volume afwijking



## Relatieve camerahoek

Zoals uit Figuur 41, Figuur 42 en Tabel 7 werd afgeleid, beschikken de overstaande flanken bij volume 1, evenwijdig aan de vluchtrichting, over een gelijke helling. Het volstond twee delen, evenwijdig met de vluchtrichting, als deelvolumen te beschouwen.

Door de variatie in flankhelling, bij het tweede volume, waren vier deelvolumes nodig, waarvan telkens twee overstaand en evenwijdig met de vliegrichting. De deelvolumes werden gekozen zodat de flanken loodrecht op de vluchtrichting maximaal en flanken evenwijdig met de vluchtrichting minimaal waren. De ingetekende grenzen van de deelvolumes zijn weergegeven op .



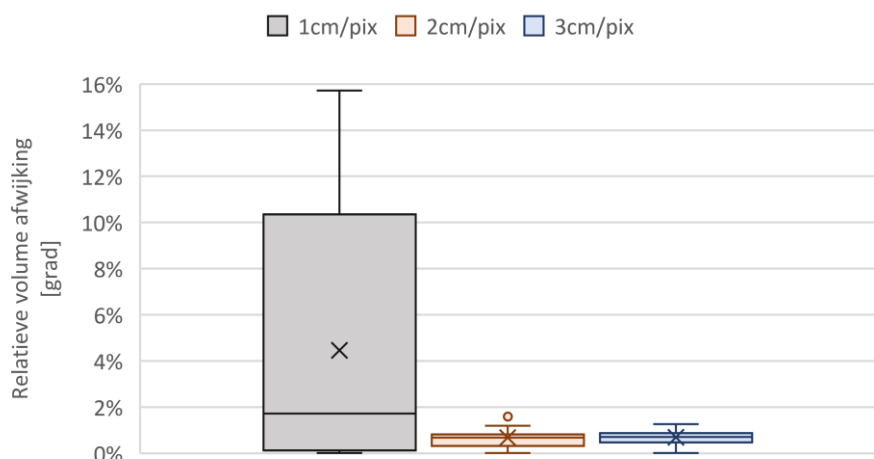
Figuur 50: Locatie deelvolumen - links: V1; rechts: V2

Figuur 51 geeft de verdeling van de volume afwijking, bij een relatieve camerahoek, voor de verschillende grondresoluties weer. De spreiding bij een lage (1cm/pix) resolutie is tot tien keer groter dan bij een hogere (2-3cm/pix). De numerieke waarden zijn voorgesteld in Tabel 8. Uitbijters werden bij verdere vergelijking, in functie van de relatieve camerahoek, niet meegerekend.

Tabel 8: Numerieke waarden boxplot volume afwijking bij een relatieve camerahoek

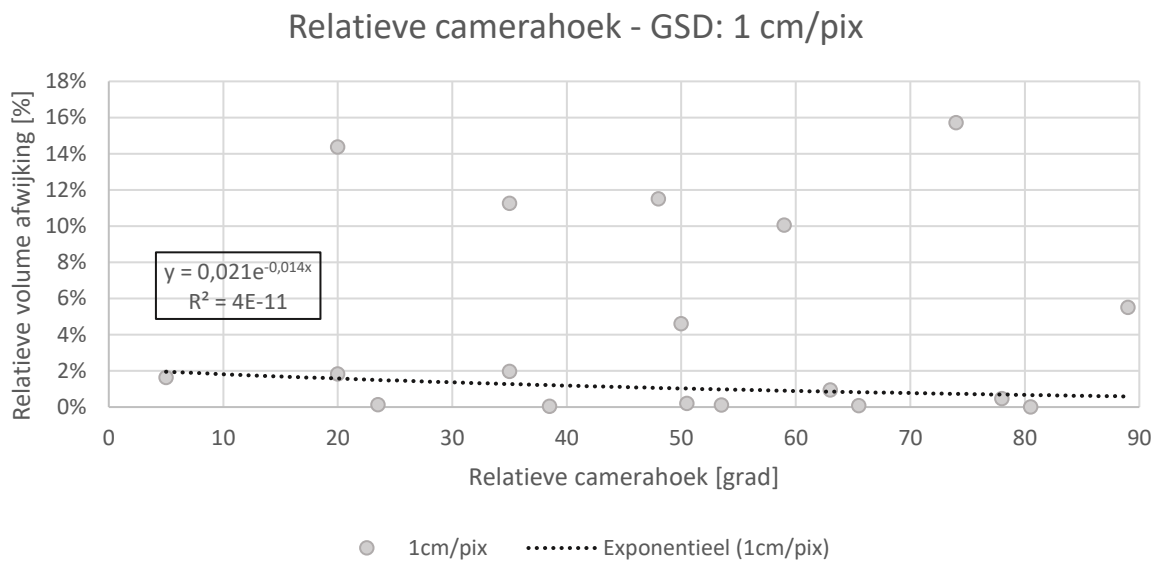
	1cm/pix	2cm/pix	3cm/pix
<b>Gemiddeld [%]</b>	4,47	0,68	0,69
<b>Mediaan [%]</b>	1,73	0,68	0,71
<b>Bovengrens [%]</b>	15,71	1,19	1,26
<b>Ondergrens [%]</b>	0,01	0,02	0,02
<b>Uitbijters [%]</b>	/	1,60	/

### Spreiding volume afwijking bij relatieve camerahoek

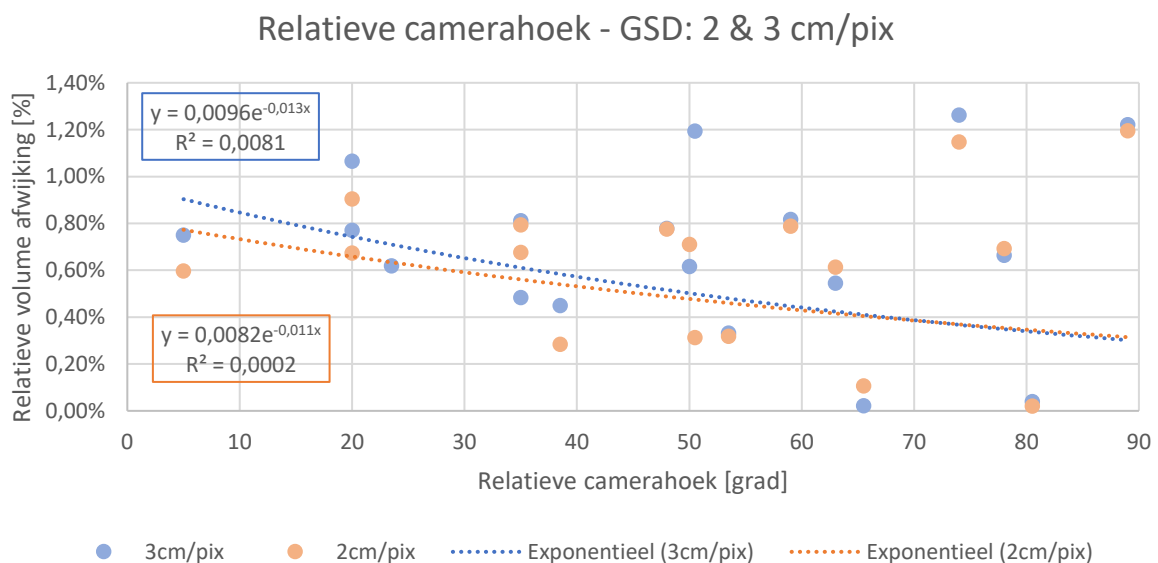


Figuur 51: Boxplot spreiding volume afwijking bij relatieve camerahoek

Figuur 52 en Figuur 53 geven de spreiding en een exponentiële trendlijn weer van de absolute waarde van de relatieve volume afwijking bij een relatieve camerahoek. Bijlage 8 beschikt over numerieke waarden.



Figuur 52: Relatieve volume afwijking in functie van relatieve camerahoek - GSD: 1cm/pix



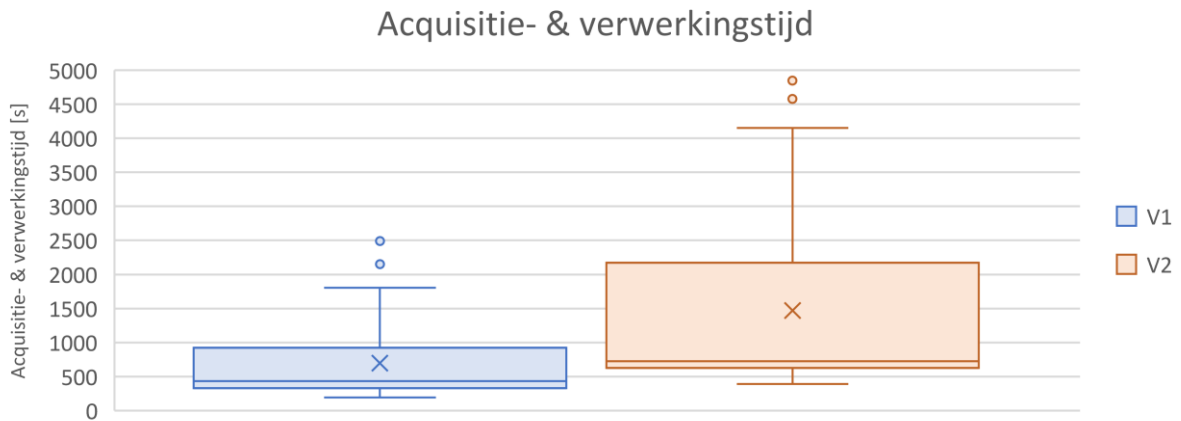
Figuur 53: Relatieve volume afwijking in functie van relatieve camerahoek - GSD: 2 & 3cm/pix

### Acquisitie- en verwerkingstijd

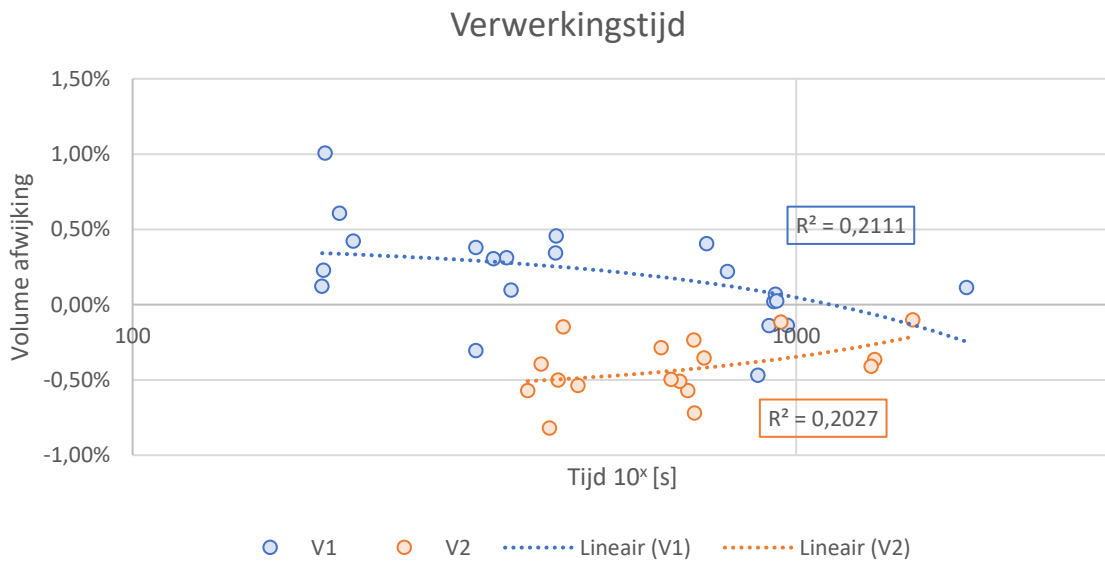
De gemiddelde acquisitie- en verwerkingstijd bij volume 1 bedraagt 699s waarbij de mediaan 435s is, de onder- en bovengrens wordt omsloten door 193s en 1806s. Twee tijdsduren, 2150s en 2492s overeenkomstig met model 19 en 22, kunnen als uitbijter aanschouwd worden.

Gemiddeld bedraagt de acquisitie- en verwerkingstijd bij het tweede volume 1472s met 727s als mediaan. De ondergrens telt 394s en bovengrens 4148s. Twee tijden, 4577s en 4844s, kunnen als uitbijter beschouwd worden, overeenkomstig met model 19 en 22. Een boxplot waarin bovenbeschreven parameters gevisualiseerd wordt, is weergegeven in **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden..**

Figuur 55 geeft de volumeafwijking van een model weer in functie van de acquisitie- en verwerkingstijd op logaritmische schaal waarbij de uitbijters en waarde voor 1cm/pix bij V2 geëlimineerd werden.



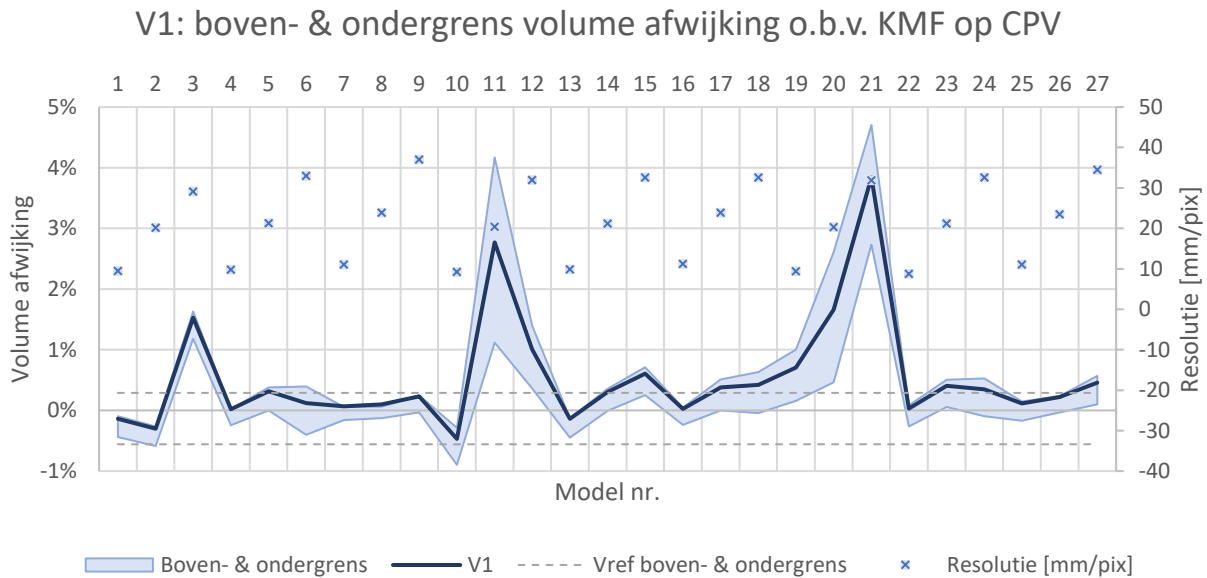
Figuur 54: Boxplot Acquisitie- en verwerkingstijden – V1 & V2



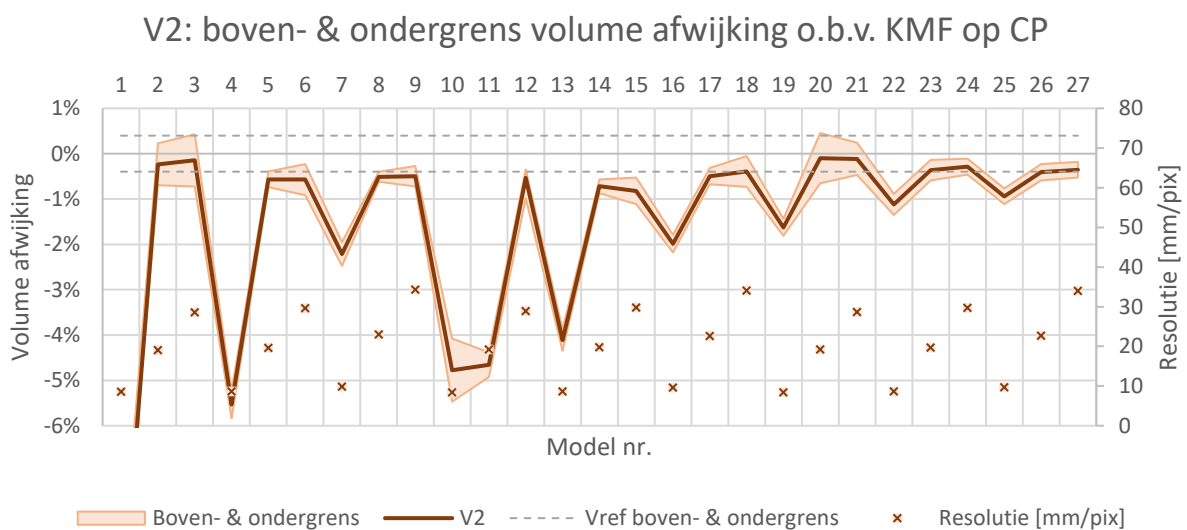
Figuur 55: Acquisitie- en verwerkingstijd vs. relatieve volume afwijking

### Impact afwijking op CP en volumeafwijking

Figuur 56 en Figuur 57 geven de relatieve volume afwijking t.o.v. het referentievolume weer. De boven- en ondergrens, gebaseerd op de KMF van de CP's in het verticaal vlak, zijn per fotogrammetrisch model en voor het referentievolume weergegeven.



Figuur 56: Boven- & ondergrens volume afwijking – V1



Figuur 57: Boven- & ondergrens volume afwijking – V2

## 7 Discussie

### 7.1 Acquisitie

#### Meteorologische gegevens

Beide opmetingen werden in zeer gelijkaardige weersomstandigheden uitgevoerd. Beelden bij het tweede model beschikken over grotere schaduwpartijen. De lichtinval was tijdens beide opmetingen constant door continue bewolking of geen bewolking. Er kan gesteld worden dat beelden, gedurende meting, onder constante omstandigheden ontwikkeld werden. De impact van een geomagnetische storm is voor beide opmetingen gelijkaardig. Deze kan mogelijks een effect hebben op de ingemeten controle punten.

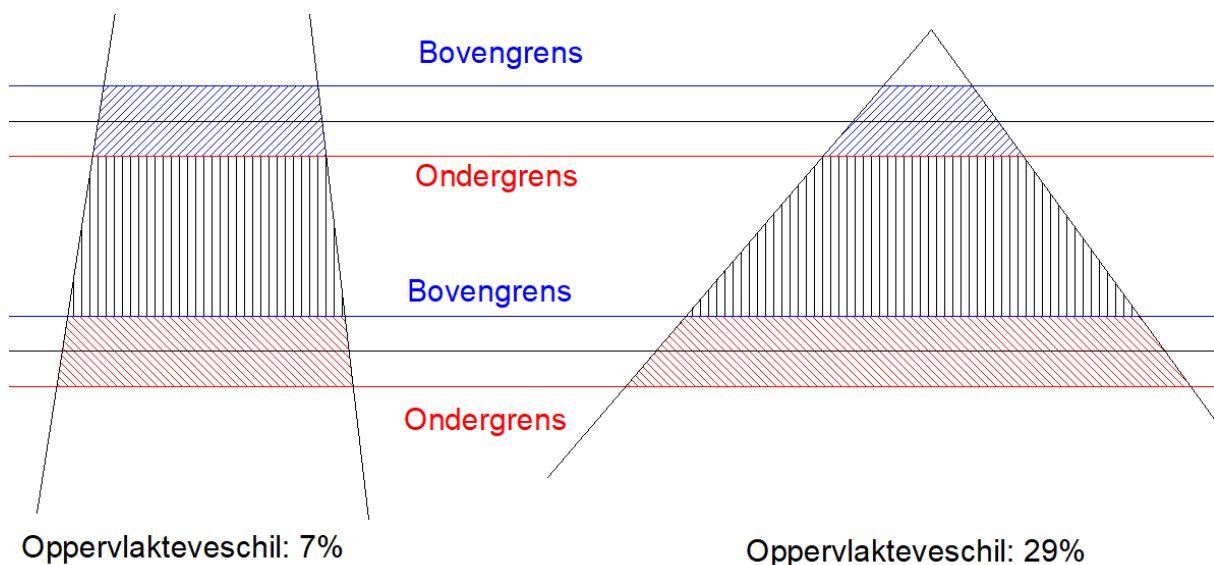
#### GCP & CP

De wijze waarop de software de afwijking op een meting bepaald is ongekend, hierdoor kunnen gegevens onderling vergeleken worden maar niet in zijn totaliteit. Punten in het horizontaal vlak vertonen, m.u.v. punt 1 bij V1, een gelijkaardige afwijking bij beide volumes. Voor de verticale afwijking is echter geen regelmaat merkbaar en verklaarbaar. Alle ingemeten punten bevinden zich binnen de toelaatbare afwijking.

#### Laserscan

De KMF op het tweede referentievolume is hoger dan bij het eerste, dit valt te verklaren door de omvang van het tweede project. Het tweede volume was 40 keer groter waardoor de afstand tussen de scanposities ook groter waren en registratie t.o.v. één basis scan niet meer mogelijk was. Hierdoor ontstonden cumulatieve fouten wat bij het eerste volume niet van toepassing was.

Uitgaande van het basisprincipe bij het verhogen of verlagen van het referentieoppervlak, volgens de KMF op de registratie, kan volgende gesteld worden: Hoe groter de binnenhoek, met een maximum van 90°, tussen de flanken en het referentieoppervlak, hoe kleiner het volumeverschil bij een hoogtewijziging van dat referentieoppervlak. Dit wordt schematisch verduidelijkt, in twee dimensies, op Figuur 58. Dit verklaart de volumereductie (V1: -0,56% & V2: -0,40%) bij een verhoging van het referentieoppervlak en een expansie (V1: +0,29% & V2: +0,40%) bij het verlagen. De steile hellingen bij het tweede volume verklaren de absoluut gelijke reductie als expansie bij het evenredig verhogen/verlagen van het referentieoppervlak.



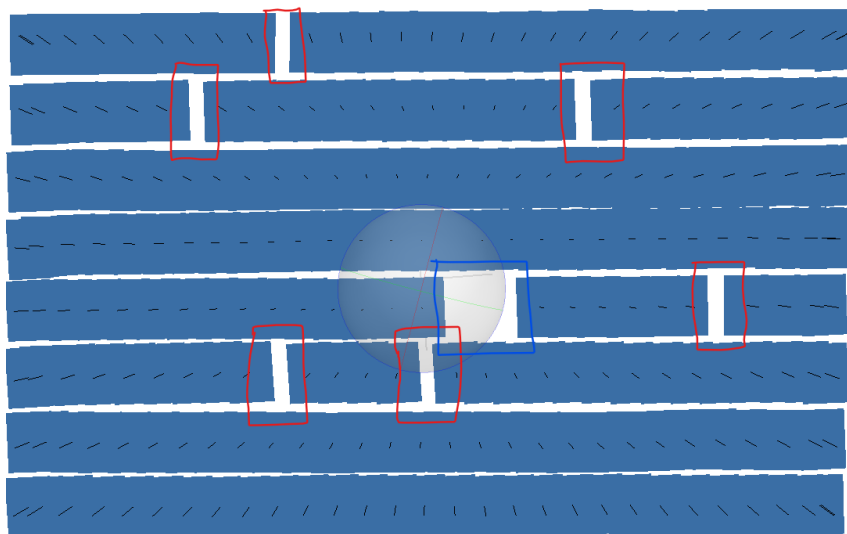
Figuur 58: Impact helling op volumeverschil bij hoogteverschil referentieoppervlak

## 7.2 Verwerking

### Algemeen

Het eerste volume kon zonder complicatie fotogrammetrisch verwerkt worden. Het tweede volume ondervond wel enkele moeilijkheden. Door het grote reliëf, met een maximaal hoogteverschil van 27m, kon de nodige overlap bij de laagste camerahoogte (37,5m), niet gegarandeerd worden. Hierdoor konden beelden, verworven boven het hoogste punt van terrein, niet worden gealigneerd. Een voorwaartse overlap van 80%, bij een grondresolutie van 1cm/pix, kwam bij de gebruikte camera overeen met een onderlinge afstand van 7,30m tussen opeenvolgende beelden. De afstand tussen het platform en hoogste terrein punt bedroeg 10,5m, dit samen met een onderlinge beeldafstand van 7,30m en verticale platformnauwkeurigheid van  $\pm 0,5$ m, wordt een lokale voorwaartse overlap van maximaal 30% bereikt. Dit verklaart de plaatselijke moeilijkheid voor het aligneren. De locatie met niet gealigneerde foto's is weergegeven op Figuur 59 in het blauw. Dit bevindt zich loodrecht boven het hoogste terreinpunt. Dit kan in de toekomst vermeden worden door de vluchthoogte, evenredig met het terreinreliëf, te variëren doorheen de acquisitie.

Daarnaast bleek de tijd, nodig voor het vastleggen en opslaan van een beeld, sporadisch langer dan de tussentijd tussen het vastleggen van opeenvolgende beelden. Dit probleem vond enkel plaats bij het tweede volume, waar de vluchtsnelheid 4m/s en de tussentijd 1,8s bedroeg bij een GSD van 1cm/pix. Bij het eerste volume vond dit niet plaats, mede door zijn lagere vluchtsnelheid (3m/s) en dus hogere tussentijd (2,4s bij GSD 1cm/pix). De ingestelde foto-locaties waar geen foto kon genomen worden, door bovengenoemd fenomeen, zijn weergegeven op Figuur 59 in het rood.



Figuur 59: Complicaties tijdens verwerking

### Controlepunten

Er wordt vastgesteld, mede door Figuur 43 en Figuur 44, dat de afwijking op controlepunten, zowel in horizontaal als verticaal vlak, hoger is bij het tweede volume. Dit valt te verklaren door de grotere onderlinge afstand tussen de punten. Beide locaties beschikten over 9 GCP's en 9 CP's waarbij het eerste terrein over een oppervlakte, omsloten door de buitenste GCP's, beschikt van 3 537m<sup>2</sup>, dit is bij het tweede terrein 14 623m<sup>2</sup>. Dit leidt tot een verschil in GCP dichtheid, 25 GCP's/ha bij V1 en 6 GCP's/ha bij V2, en nauwkeurigheid tussen beide sites.

Gemiddeld kan over beide volumes worden vastgesteld dat een lagere resolutie, een hogere afwijking op de CP's met zich meebrengt. De verticale fout is gemiddeld 2,5 keer groter dan horizontale, dit komt overeen met de vaststelling van Sanz-Ablanedo et al.

Algemeen, o.b.v. Figuur 46, wordt vastgesteld dat de afwijking in het verticaal vlak lager is bij een absolute camerahoek van 75° en 60° dan bij nadir beelden. In het horizontaal vlak, volgens Figuur 45, is namelijk het omgekeerde geldig, nadir foto's resulteren in een kleinere horizontale afwijking dan tilt-beelden. Mits de verticale afwijking groter is dan de horizontale, is deze eerst vernoemde trend ook merkbaar bij de totale relatieve afwijking (Figuur 47).

### **Volumemeting – grondresolutie**

Uit Figuur 49 wordt afgeleid dat, bij een tilt-camera, een dalende grondresolutie (1 → 3 cm/pix) gepaard gaat met een stijgende volumenaauwkeurigheid (gemiddeld van 1,89% bij hoge resolutie tot 0,36% bij een lage). Voor een model op basis van nadir beelden geldt deze redenering bij het tweede volume maar niet bij het eerste.

Een aantal mogelijke verklaringen worden als volgt gegeven. De volume afwijking voor V2 bij een GSD van 1cm/pix kan als nietig verklaard worden door de moeilijkheden tijdens het aligneren van deze modellen. Doordat beelden boven de hoogste terreinpunten niet gealigneerd werden, beschikken deze toppen in het model over weinig tot geen punten.

Mits deze als nietig beschouwd wordt, volgt de volume afwijking, bij een GSD van 2 & 3 cm/pix en een absolute camerahoek van 90° bij V2, dezelfde trend als deze bij het eerste volume. Deze geldt als volgt, een dalende grondresolutie (1 → 3 cm/pix) gaat gepaard met een dalende volumenaauwkeurigheid (gemiddeld van 0,40% tot 1,98%).

### **Camerahoek en vluchtpatroon**

De spreiding en gemiddelde volume afwijking bij een hoge resolutie is veel groter dan bij een lagere. De oorzaak ligt mogelijk bij de moeilijkheid om beelden te aligneren ter plaatste van hoge reliëftoppen. Ondanks de grote spreiding kan een dalende volume afwijking worden vastgesteld naarmate de relatieve camerahoek 90° nadert. De exponentiële trendlijn is bij een dataset met minder spreiding (GSD 2 & 3cm/pix) betrouwbaarder ( $R^2 = 0,02-0,8\%$  t.o.v.  $4 \cdot 10^{-9}$ ). De curve dient louter voor het weerspiegelen van een trend, niet als voorspellingscurve, wegens zijn lage betrouwbaarheid ( $R^2 < 50\%$ ).

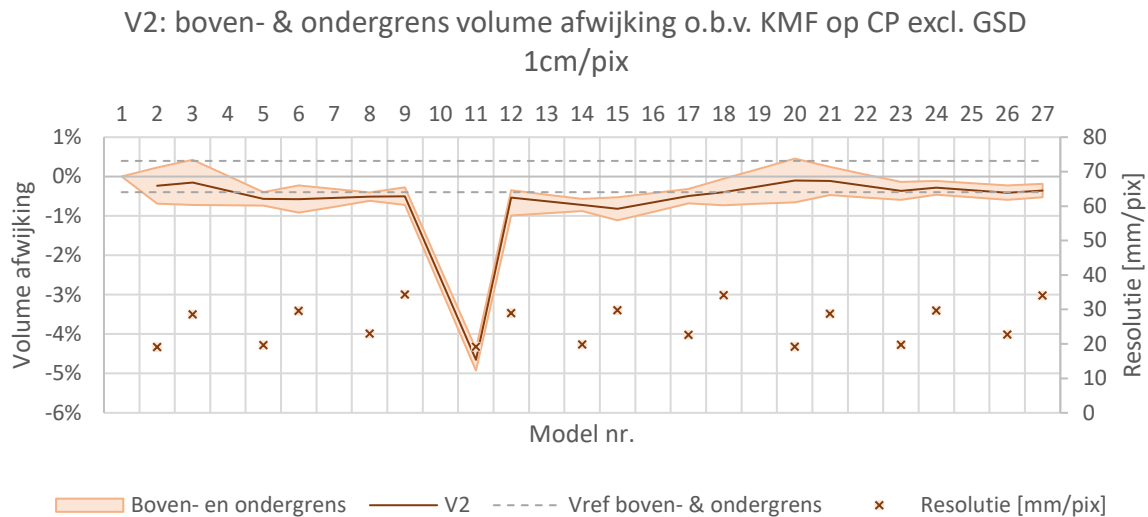
Naar schatting kan een relatieve camerahoek van 90° de volume nauwkeurigheid tot drie keer verhogen t.o.v. een relatieve camerahoek van 0°.

### **Acquisitie- en verwerkingstijd**

De totale acquisitie- en verwerkingstijd is bij het tweede volume hoger dan bij het eerste, door de grotere omvang van terrein waren tot twee keer meer beelden nodig. Uit Figuur 55 kan vastgesteld worden dat een hogere verwerkingstijd gepaard gaat met hogere nauwkeurigheid. Echter bedraagt dit verschil maximaal 1%.

### **Fout op controlepunten & volume afwijking**

Figuur 57 stelt terug een grote volume afwijking vast bij de modellen gebaseerd op een hoge resolutie bij V2. Concreet werden de modellen met nr. 1, 4, 7, 10, 13, 16, 19, 22 en 25 ingewonnen met een grondresolutie van 1cm/pix. De aligneringsmoeilijkheden bij deze modellen werd reeds aangehaald in het begin van de discussie waardoor deze modellen als onbestaand kunnen beschouwd worden en volgende grafiek bekomen wordt:



Figuur 60: Boven- & ondergrens volume afwijking excl. GSD 1cm/pix - V2

Bij het tweede volume vertoont de boven- en ondergrens, van het fotogrammetrisch en referentie model, een overlap bij 15 van de 18 modellen (83%). Model 14 en 15 vallen net buiten de grens (verschil van 0,14%), op model 11 bedraagt het verschil tussen de ondergrens van het referentie en boven grens van het fotogrammetrisch model 3,98%.

Bij Figuur 56 kunnen de modellen o.b.v. een GSD van 1cm/pix wel worden behouden, doordat bij het eerste volume geen moeilijkheden bij het aligneren werd ondervonden. In het totaal beschikken 23 van de 27 modellen (85%) over een overlap van de buitengrenzen met het referentiemodel. Model 3, 11, 20 en 21 vertonen geen overlap met het referentievolume, het maximale verschil tussen beide grenzen is 2,44% (model 21) en minimaal 0,17% (model 20). Deze vier modellen werden op de laagste, en op één na laagste, resolutie ingemeten bij een camerahoek van 90°.



## 8 Conclusie

### **Vluchthoogte**

De vluchthoogte bepaald rechtstreeks de grondresolutie bij eenzelfde camera. Een lagere vluchthoogte brengt een hogere resolutie, hogere nauwkeurigheid op controlepunten en een lagere volumenaauwkeurigheid teweeg. Bij grote reliëfverschillen wordt een variabele vluchthoogte, in functie van de terreinhoogtes, aangeraden.

### **Camerahoek en vluchtpatroon**

De hoogst verticale nauwkeurigheid op controlepunten wordt bereikt door een absolute camerahoek, verschillend van  $90^\circ$ , toe te passen. Indien de nauwkeurigheid in het horizontaal vlak prioritair is, geven fotogrammetrische modellen op basis van nadir luchtfotografie de beste resultaten. Wanneer de hoogste nauwkeurigheid op de 3D locatie in zijn totaliteit van een controlepunt gewenst is, geven opnames met een absolute camerahoek, verschillend van  $90^\circ$ , de hoogste nauwkeurigheid.

Op volumenniveau is de relatieve camerahoek, de hoek tussen het in te meten oppervlak en camera-as, bepalend. Een relatieve camerahoek van  $90^\circ$  heeft de hoogste nauwkeurigheid. Idealiter wordt een dubbel vluchtpatroon ingesteld, waarvan de camera-as tijdens de vlucht wijzigt volgens de helling, loodrecht op de vluchtrichting, van het ingemeten oppervlak.

### **Acquisitie- en verwerkingstijd**

Een hogere acquisitie- en verwerkingstijd resulteert mogelijks in een nauwkeuriger volume. Echter bedraagt nauwkeurigheid op het volumeverschil tussen het snelst en traagst verwerkte model 1%. Verder onderzoek met grotere datasets bij identieke acquisitieparameters is vereist voor een sluitende conclusie.

### **Verband afwijking op volume en controlepunten**

Er kan, rekening houdend met de meest aangeraden acquisitieparameters, een boven- en ondergrens worden bepaald van het ingemeten volume. Het verlagen en verhogen van het referentieoppervlak waar boven/ onder het volume bepaald wordt, evenredig met de gemiddeld verticale afwijking op de controlepunten, geeft deze grenzen weer. Op basis van de experimenteel verzamelde data kan met 83% zekerheid aangenomen worden dat het werkelijke volume binnen die grenzen valt.

### **Efficiëntie**

De acquisitie- en verwerkingstijd voor fotogrammetrische modellen, o.b.v. luchtfotografie verworven met een drone, is lager dan bij terrestrische laserscanning. Plaatselijke holtes op hoogte worden ingemeten waar dit bij terrestrische laserscanning, zonder het toestel op het volume zelf op te stellen, niet van toepassing is. Vervolgens kan gesteld worden dat de boven- en ondergrens van het fotogrammetrisch volume, ingewonnen met de aangewezen acquisitieparameters, de boven- en ondergrens van de terrestrische laserscanning overlapt. Hierdoor kan dit, voor onbegroeide volumemeting, als een efficiënt en nauwkeurig alternatief beschouwd worden.

### **Vooruitzicht**

Verder onderzoek naar de acquisitie- en verwerkingstijden is nodig voor een eenduidig besluit. Daarnaast kan het verschil tussen een constante en terrein gevarieerde vluchthoogte onderzocht worden bij terreinen met grote hoogteverschillen.

## Duurzaamheidsreflectie

Klimaatverandering en milieuverontreiniging vormen een existentiële bedreiging voor Europa en de wereld. Om deze uitdagingen het hoofd te bieden, zal de Europese Green Deal de EU omvormen tot een moderne, grondstoffefficiënt en concurrerende economie om ervoor zorgen dat:

- Geen netto-uitstoot van broeikasgassen tegen 2050
- Economische groei wordt losgekoppeld van het grondstofgebruik
- Geen enkele persoon en plaats wordt vergeten

De Europese Commissie heeft een reeks voorstellen vastgesteld om het klimaat-, energie-, vervoers- en belastingbeleid van de EU geschikt te maken om de netto-uitstoot van broeikasgassen tegen 2030 met ten minste 55% te verminderen ten opzichte van het niveau van 1990. (European Commission, 2019)

Er zijn en zullen veel inspanningen worden ondernomen om deze doelen te bereiken. Onderzoek en kennis zijn essentieel in dergelijke evolutie. Zo kunnen drones gebruikt worden om veranderingen in het natuurlandschap in te meten. Enkele voorbeelden zijn (kust) erosie, bodemdegradatie, krimp van gletsjerijs en veel meer. Daarnaast kunnen ze ingezet worden bij het plannen, ontwerpen en onderhouden van infrastructuur voor hernieuwbare energie, zoals windmolenparken en zonnepanelen. Daar ze een meest geschikte locatie kunnen opsporen en inmeten, inspecties uitvoeren, monitoren van prestaties en mogelijke problemen opsporen.

Vervolgens speelt de mogelijkheid om volumes te bepalen met een drone hier een belangrijke rol in. Zo kunnen ze de hoeveelheid biomassa in bossen of vegetatiegebieden in kaart brengen. Hierdoor kunnen landbeheerders de effectiviteit van hun inspanningen op gebied van herbebossing en natuuronderhoud evalueren. Naast biomassa kunnen ze het totaal volume en dichtheid van dergelijke gebieden in kaart brengen waardoor nauwkeurig de koolstofopslag in kaart kan gebracht worden. Ook op vlak van waterbeheer, waar ze volumes van reservoirs, meren en rivieren kunnen inmeten, creëren ze waardevolle info.

Als laatste en meest toepasbaar op dit onderzoek, is hun bijdrage bij grondstofwinning en mijnbouwbeheer. Bij activiteiten zoals mijnbouw kan het belangrijk zijn om de hoeveelheid gewonnen materiaal, zoals erts of steenkool, te meten. Drones kunnen worden ingezet om nauwkeurige volumemetingen van de afgegraven gebieden te modeleren, waardoor de efficiëntie van de mijnbouwactiviteiten kan worden verhoogd. Dit kan helpen om verspilling tegen te gaan, de milieueffecten te beheersen en naleving van de regelgeving te waarborgen.

Ook bij de uitvoering van dit proefschrift werd rekening gehouden met duurzaamheid. Dit is echter niet altijd in dezelfde mate mogelijk. Het belangrijkste blijft dat de proeven correct en volgens de normen, indien deze van toepassing zijn, worden uitgevoerd. Juist vanwege deze impact is het belangrijk om duurzaam te werken op vlakken die het wel toelaten. Enkele voorbeelden zijn:

- Alle gegevensverzameling, berichtenverkeer, berekeningen en meer gebeurden digitaal, zonder enige papierafdruk.
- De grondcontrolepunten zijn ontworpen zodat deze circulair kunnen gebruikt worden voor andere dronemetingen zonder nalatende schade. Daarnaast is dit een duurzame oplossing voor geverfde merktekens.
- De locaties bevonden zich beide op minder dan 4km van de student zijn vertrekpunt, hierdoor is de uitstoot van verplaatsing verwaarloosbaar. Verplaatsen met een fiets of te voet was niet mogelijk wegens de omvang van de gebruikte toestellen.

- Iedere bijeenkomsten werden online georganiseerd. Dit bespaart de uitstoot van reizen.

Algemene conclusie:

De scriptie en de experimentele testen zijn op een zeer duurzame wijze uitgevoerd. Testen werden uitgevoerd op reeds aanwezige sites waardoor grondverzet, speciaal voor dit onderzoek, niet nodig was. Hierdoor werd geen enkele handeling uitgevoerd met een mogelijke milieu-impact.



*Figuur 61: EUSPA - groene-energie oplossingen binnen de bouwsector (EUSPA, 2021)*

## Referenties

- 3DRiskMapping. (2008). *Theory and practice on Terrestrial Laser Scanning*. Leonarde Da Vinci v.z.w.
- Aber, J. S., Marzloff, I., & Ries, J. B. (2010). Small-Format Aerial Photography: Chapter 3 - Photogrammetry. *Elsevier*, pp. 23-39. doi:10.1016/B978-0-444-53260-2.10003-1
- Adobe. (2023, april 16). *Iso*. Opgehaald van adobe: [https://www.adobe.com/be\\_nl/creativecloud/photography/discover/iso.html](https://www.adobe.com/be_nl/creativecloud/photography/discover/iso.html)
- anoniem. (2020, januari). *Geog 258: Maps and Gis*. Opgehaald van gis.depaul: <https://gis.depaul.edu/shwang/teaching/geog258/lec7.htm>
- Baltsavias, E. P. (1999, maart 17). A comparison between photogrammetry and laser scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, pp. 83-94.
- Benassi, F., Dall'Asta, E., Diotri, F., Forlani, G., Cella, U., Roncella, R., & Santise, M. (2017). Testing accuracy and repeatability of UAV blocks oriented with gnss-supported aerial triangulation. *Remote Sens*, p. 172.
- Cramer, M., Przybilla, H.-J., & Zurhorst, A. (2017, September 4-7). UAV CAMERAS: OVERVIEW AND GEOMETRIC CALIBRATION BENCHMARK. *The International Archives of the Photogrammetry*, pp. 85-92. doi:10.5194
- DATUMATE. (2023). *aerial mapping done right best practices for infrastructure construction projects*. Opgehaald van datumate: [https://www.datumate.com/blog/aerial-mapping-done-right-best-practices-for-infrastructure-construction-projects/#:~:text=Overlap%3A%20the%20drone%20captures%20images,\(70%25%20is%20ideal\)](https://www.datumate.com/blog/aerial-mapping-done-right-best-practices-for-infrastructure-construction-projects/#:~:text=Overlap%3A%20the%20drone%20captures%20images,(70%25%20is%20ideal)).
- DJI. (2022, december 8). *dji issues first c1 drone certificate*. Opgehaald van dji: <https://www.dji.com/newsroom/news/dji-issues-worlds-first-c1-drone-certificate>
- DJI. (2023a). *Phantom 4 pro V2*. Opgehaald van DJI: <https://www.dji.com/be/phantom-4-pro-v2>
- DJI. (2023b). *Phantom 4 pro*. Opgehaald van DJI: <https://www.dji.com/be/phantom-4-pro>
- Dronedepot. (2022, december 20). *europese-drone-wetgeving-2021*. Opgehaald van dronedepot: <https://www.dronedepot.be/europese-drone-wetgeving-2021/>
- Dubois, S., Vanhallemont, Y., & De Bouw, M. (2019). *Drones ten dienste van de bouwsector: Technologiën, uitdagingen en vooruitzichten*. Brussel: WTCB.
- EASA. (2022, December 20). *drone operators pilots*. Opgehaald van easa.europa: <https://www.easa.europa.eu/en/light/topics/drone-operators-pilots>
- EASA eRules. (2022). *Easy Access Rules for Unmanned Aircraft Systems*. European Union.
- Elkhrachy, I. (2021, December). Accuracy Assessment of Low-Cost Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Photogrammetry. *Alexandria Engineering Journal*, 6, pp. 5579-5590. doi:10.1016/j.aej.2021.04.011
- European Association of Geoscientists & Engineers. (2007). Laser scanning – principles and applications. *GeoSiberia 2007 - International Exhibition and Scientific Congress*. Novosibirsk, Rusland: European Association of Geoscientists & Engineers.

- European Commison. (2019, 10 12). *A European green deal*. Retrieved from European Commison: [https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal\\_en](https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en)
- EUSPA. (2021, julie 19). *Building a sustainable future with the power of #EUSpace*. Opgehaald van euspa.europa: <https://www.euspa.europa.eu/newsroom/news/building-sustainable-future-power-euspace>
- Forlani, G., Dall'Asta, E., Diotri, F., Cella, U., Roncella, R., & Santise, M. (2018). Quality Assessment of DSMs Produced from UAV Flights Georeferenced with On-Board RTK Positioning. *Remote Sens*, p. 311.
- Hartely, R. (2004). *Multiple View Geometry in Computer Vision* (Vol. II). Canberra: Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9780511811685
- Hinge, L., Gundorph, J., Ujang, U., Aziri, S., Anthon, F., & Rahman, A. A. (2018, Oktober 10-11). Comparative analysis of 3D photogrammetry modeling software packages for drones survey. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 2019*, pp. 95-100.
- Hugenholtz, C., Brown, O., Walker, J., Barchyn, T., Nesbit, P., Kucharzyck, M., & Myshak, S. (2016). Spatial accuracy of UAV-derived orthoimagery and topography: Comparing photogrammetric models processed with direct geo-referencing and ground control points. *Geomatica*, pp. 21-30.
- IEC. (2001). *Safety of laser products –Part 1: Equipment classification, requirements and user's guide*. International Standard, IEC 60825-1.
- Incekara, A. H., & Seker, Z. D. (2021, December). Rolling Shutter Effect on the Accuracy of Photogrammetric Product Produced by LowCost UAV. *International Journal of Environment and Geoinformatics (IJECEO)*, pp. 549-553. doi:10.30897/ijegeo
- IndiaMART InterMESH Ltd. (2023). *Altus NR3 GNSS Receiver*. Opgehaald van indiamart: <https://www.indiamart.com/proddetail/altus-nr3-gnss-receiver-22417135891.html>
- Intel Corporation. (sd). *What is a GPU?* Opgeroepen op mei 1, 2023, van intel: <https://www.intel.com/content/www/us/en/products/docs/processors/what-is-a-gpu.html#:~:text=Graphics%20processing%20unit%2C%20a%20specialized,video%20editing%2>
- Jinxing, S., Awei, M., Zhongming, L., Mingqiang, S., Xiujun, D., Fei, L., & Shiyang, W. (2021, Oktober 12). Analysis Using High-Precision Airborne LiDAR Data to Survey Potential Collapse Geological Hazards. *Advances in Civil Engineering*, p. 10. doi:10.1155/2021/6475942
- Leica Geosystems AG - Part of Hexagon. (2023). *Leica Scanstation P40 - P30*. Opgehaald van Leica-geosystems: <https://leica-geosystems.com/nl-nl/products/laser-scanners/scanners/leica-scanstation-p40--p30>
- Leica Geosystems AG. (2023). *Leica ScanStation P30/P40 Product Specifications*. Heerbrugg, Zwitserland: Leica Geosystems AG.
- Lillesand, T. M., & Krieger, R. W. (1994). *Remote Sensing and Image Interpretation. 3rd Edition*. New York: John Wiley and Sons.
- Linder, W. (2006). *Digital Photogrammetry - A Practical Course*. Düsseldorf: Springer.

- Luhman, T., Robson, S., Kyle, S., & Harley, I. (2006). *Close Range Photogrammetrie: Principles, techniques and application*. Caithness, Schotland: Whittles Publishing.
- Mian, O., Lutes, J., Lipa, G., Hutton, J. J., Gavelle, E., & Borghini, S. (2016). Accuracy assessment of direct georeferencing for photogrammetric applications on small unmanned aerial platforms. *Remote Sens*, pp. 77-83.
- Mittal, A., Moorthy, A., & Bovic, A. (2011). Blind/ Referenceless Image Spatial Quality Evaluator. *Conference Record of the Forty Fifth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers (ASILOMAR)* (pp. 723-727). Pacific Grove, CA, USA: ASILOMAR.
- mobility. (2022a, december 20). *stappenplan*. Opgehaald van mobiliteit.belgium: <https://mobiliteit.belgium.be/nl/luchtvaart/vliegen-met/drones-uas/stappenplan>
- mobility. (2022b, December 20). *categorie-open*. Opgehaald van mobiliteit.belgium: <https://mobiliteit.belgium.be/nl/luchtvaart/vliegen-met/drones-uas/categorie-open>
- mobility. (2022c, December 20). *categorie-specifiek*. Opgehaald van mobiliteit.belgium: <https://mobiliteit.belgium.be/nl/luchtvaart/vliegen-met/drones-uas/categorie-specifiek>
- mobility. (2022d, december 20). *wat zijn standaardscenarios*. Opgehaald van mobiliteit.belgium: <https://mobiliteit.belgium.be/nl/faq/wat-zijn-de-standaardscenarios>
- mobility. (2022e, oktober 04). *transitie*. Opgehaald van mobiliteit.belgium: <https://mobiliteit.belgium.be/nl/luchtvaart/vliegen-met/drones-uas/stappenplan/transitie>
- Naessens, H. (2016). *Informatica I*. Universiteit Gent, Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur.
- OpenStreetMap. (2023). Opgehaald van ancient: <https://ancient.land/>
- Pfingsthorn, M. (2014, Maart). *Generalized Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) on Graphs with Multi-model Probabilities and Hyperedges*. Pfingsthorn Max. doi:10.13140/RG.2.1.4662.3600
- Pix4d. (2021a). *Hardware case study*. Opgehaald van Pix4d: <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/115003928846-Hardware-case-study>
- Pix4D. (2021b). *How to verify that there is enough overlap between the images - PIX4Dmapper*. Opgehaald van support.pix4d: <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/203756125-How-to-verify-that-there-is-enough-overlap-between-the-images-PIX4Dmapper>
- Rodriguez-Quinonez, J. C., Sergiyenko, O. Y., Preciado, L. C., Tyrsa, V. V., Gurko, A. G., Podrygalo, M. A., . . . Balbuena, D. H. (2014, March). Optical monitoring of scoliosis by 3D medical laser scanner. *Elsevier*, pp. 175-186. doi:10.1016/j.optlaseng.2013.07.026
- Roncella, R., Bruno, N., Diotri, F., Thoeni, K., & Giacomini, A. (2021, Maart 26). Photogrammetric Digital Surface Model Reconstruction in Extreme Low-Light Environments. *Remote Sensing*, p. 1261.
- Sanz-Ablanedo, E., Chandler, J. H., Rodríguez-Pérez, J. R., & Ordóñez, C. (2018, October 9). Accuracy of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) and SfM Photogrammetry Survey as a Function of the Number and Location of Ground Control Points Used. *Remote Sensing*, p. 1606.
- Septentrio NV. (2021). *Altus NR3*. Finland: Septentrio NV.

- Shahbazi, M., Sohn, G., Menard, P., & Théau, J. (2015). Development and evaluation of a UAV-photogrammetry system for precise 3D environmental modeling. *Sensors*, pp. 27493-27524.
- Simmcity. (2019). *Wat is RAM geheugen?* Opgehaald van Simmcity: <https://www.hp.com/us-en/shop/tech-takes/what-is-processor-speed#:~:text=Processor%20cores%20are%20individual%20processing,Random%20Access%20>
- Skeyes. (2023, 05 19). *webviewer*. Opgehaald van geocortex: <https://apps.geocortex.com/webviewer/?app=1062438763fd493699b4857b9872c6c4&locale=en>
- Sophie, S. (2018, December 18). *What is Processor Speed and Why Does It Matter?* Opgehaald van hp: <https://www.hp.com/us-en/shop/tech-takes/what-is-processor-speed#:~:text=Processor%20cores%20are%20individual%20processing,Random%20Access%20>
- Takudzwa, C. (2014). *Remote Sensing Technology in the South African Mining Industry: state-of-the-art, case studies and experiments*. doi:10.13140/2.1.3903.9689
- The MathWorks. (2022a, december 23). *structure from motion*. Opgehaald van mathworks: <https://nl.mathworks.com/help/vision/ug/structure-from-motion.html>
- The MathWorks. (2022b, 12 23). *slam*. Opgehaald van mathworks: <https://www.mathworks.com/discovery/slam.html>
- Turner, D., Lucieer, A., & Watson, C. (2012). An automated technique for generating georectified mosaics from ultra-high resolution Unmanned Aerial Vehicle (UAV) imagery, based on Structure from Motion (SFM) point clouds. *Remote Sens*, pp. 1392-1410.
- VC Technology Ltd. (2023). *hub*. Opgehaald van flylitchi: <https://flylitchi.com/hub>
- Vercauteren, A., & Lammes, J. (2021). *Inzetbaarheid van drones voor bouwkundige toepassingen: vergelijkende studie van fotogrammetriesoftware voor drones*. Opgeroepen op maart 28, 2023
- Voigt, A., da Cunha, T., & Vergara Diaz, V. (2017, Oktober 1). Low Cost Methodology for Images Recording of Arc Welding. *Soldagem & Inspecao*, pp. 346-356.
- Welter, J. (2022, Februari 10). Airborne Photogrammetry: Still Going Strong after 100 Years. *Gim International*.
- Wilkinson, M. W., Jones, R. R., Woods, C. E., Gilment, S. R., McCaffrey, K. W., Kokkalas, S., & Long, J. J. (2016, oktober 17). A comparison of terrestrial laser scanning and structure-from-motion photogrammetry as methods for digital outcrop acquisition. *Geosphere*, pp. 1865-1880. doi:10.1130/GES01342.1
- Zang, L., Zang, L., & Bovic, A. C. (2015). A Feature-Enriched Completely Blind Image Quality Evaluator. *IEEE TRANSACTIONS ON IMAGE PROCESSING* (pp. 2579-2591). Hong Kong: IEEE Signal Processing Society. doi:10.1109/TIP.2015.2426416
- Zhou, Y., Daakir, M., Rupnik, E., & Pierrot-Deseilligny, M. (2020, December 16). A two-step approach for the correction of rolling shutter distortion in UAV photogrammetry. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remot Sensing*, pp. 51-66. doi:10.1016

## Bijlagen



## Bijlage 1: Overzicht regelgeving

Tabel 9: Europese droneregeling open categorie (Dronedepot, 2022)

<b>OPEN CATEGORY: not over assemblies of people; up to 120m AGL*</b> VLOS/EVLOS only, except in follow-me mode within 50m distance from pilot; not drop any material						
Operation		Remote pilot competency	UAS			UAS operator registration
Sub-cat.	Area of operation		class	MTOM / Joule (J)	Main technical requirements (CE marking)	
<b>A1</b> <i>Fly over people</i>	You can fly over uninvolved people (not over assemblies)	<ul style="list-style-type: none"> <li>No minimum age</li> <li>Familiarised with the user's manual</li> </ul>	Privately build	< 250g	Max speed 19m/s	No
	You cannot intentionally fly over uninvolved people.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Minimum age to be set by Member States between 12 and 16</li> <li>Familiarised with the user's manual</li> <li>Online training</li> <li>Online test</li> </ul>	C0 (toy drone)		Max speed 19m/s, max attainable height above the take-off point of 120m, no sharp edges, follow-me within max 50m	
<b>A2</b> <i>Fly close to people</i>	You cannot fly over uninvolved people and need to keep a safe horizontal distance of 30m from them, reduced to 5m when flying in low speed mode	<ul style="list-style-type: none"> <li>Minimum age to be set by Member States between 12 and 16</li> <li>Familiarised with the user's manual</li> <li>Hold a certificate of remote pilot competency after: <ul style="list-style-type: none"> <li>Online training (idem as for cat A1/C1)</li> <li>Online test (idem as for cat A1/C1)</li> <li>Declaring practical self-training</li> <li>Additional cat A2 theoretical knowledge examination</li> </ul> </li> </ul>	C2 (prosumer drone)	< 4kg	Max height above the take-off point of 120m or selectable and visualised height limitation, no sharp edges, mechanical strength, lost-link management, geo-awareness pilot warning, low-speed mode (3m/s); battery warning, max sound power level, be equipped with lights, protected C2 link	Yes + unique SN for identification
<b>A3</b> <i>Fly far from people</i>	You should: <ul style="list-style-type: none"> <li>fly in an area where it is reasonably expected that no uninvolved people will be endangered</li> <li>keep a safe horizontal distance of 150m from residential, commercial, industrial or recreational areas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Minimum age to be set by Member States between 12 and 16</li> <li>Online training (idem as for cat A1/C1)</li> <li>Online test (idem as for cat A1/C1)</li> </ul>	C2 (prosumer drone)	< 4kg	Max height above the take-off point of 120m or selectable and visualised height limitation, no sharp edges, mechanical strength, lost-link management, geo-awareness pilot warning, low-speed mode (3m/s); battery warning, max sound power level, be equipped with lights, protected C2 link	if required by zone of operations
			C3 (professional)	< 25kg < 3m in size	Max height above the take-off point of 120m or selectable and visualised height limitation, mechanical strength, lost-link management, geo-awareness pilot warning, battery warning, max sound power level, be equipped with lights, protected C2 link	
			C4 (aero-model)	< 25kg	No automatic flight, lost-link management	
			Privately build		N/A	

\*: When flying a drone within a horizontal distance of 50m from an artificial obstacle taller than 105m, the maximum height of the operation may be increased up to 15 meters above the height of the obstacle at the request of the entity responsible for the obstacle

Bijlage 2: Vluchtpatronen volume 1



Figuur 62: Vluchtpatroon 1a (boven) en 1b (onder)



Figuur 63: Vluchtpatroon 2a (boven) en 2b (onder)



Figuur 64: Vluchtpatroon 3a (boven) en 3b (onder)

Bijlage 3: Vluchtpatronen volume 2



Figuur 65: Vluchtpatroon 1a (boven) en 1b (onder)



Figuur 66: Vluchtpatroon 2a (boven) en 2b (onder)



*Figuur 67: Vluchtpatroon 3a (boven) en 3b (onder)*

Bijlage 4: Coördinaten & toelaatbare fout GNSS ingewonnen GCP en CP -  $V_1$  &  $V_2$ 

Punt nummer	Meting 1 [m]					Meting 2 [m]					Gemiddeld [m]						
	X	Y	Z	Horizontale precisie	Verticale precisie	X	Y	Z	Horizontale precisie	Verticale precisie	X	Y	$\Delta XY$	$TF_{XY}$	Z	$\Delta Z$	$TF_Z$
1	45157,042	175557,857	13,923	0,007	0,010	45157,037	175557,835	13,944	0,007	0,009	45157,040	175557,846	0,011	0,012	13,934	0,011	0,017
2	45144,092	175579,047	13,683	0,010	0,013	45144,093	175579,048	13,691	0,007	0,009	45144,093	175579,048	0,001	0,015	13,687	0,004	0,020
3	45131,464	175602,488	13,474	0,010	0,014	45131,470	175602,486	13,488	0,009	0,011	45131,467	175602,487	0,000	0,017	13,481	0,007	0,022
4	45209,145	175585,856	13,723	0,007	0,010	45209,140	175585,848	13,741	0,007	0,009	45209,143	175585,852	0,004	0,012	13,732	0,009	0,017
5	45191,626	175576,330	13,887	0,007	0,010	45191,616	175576,335	13,911	0,008	0,009	45191,621	175576,333	0,001	0,013	13,899	0,012	0,017
6	45184,038	175591,516	13,640	0,008	0,011	45184,022	175591,522	13,656	0,008	0,010	45184,030	175591,519	0,001	0,014	13,648	0,008	0,019
7	45224,415	175595,181	13,650	0,008	0,011	45224,410	175595,183	13,646	0,008	0,010	45224,413	175595,182	0,000	0,014	13,648	0,002	0,019
8	45217,224	175606,665	13,637	0,007	0,010	45217,234	175606,666	13,638	0,009	0,012	45217,229	175606,666	0,002	0,014	13,638	0,000	0,020
9	45212,186	175628,871	13,557	0,007	0,010	45212,195	175628,873	13,573	0,008	0,010	45212,191	175628,872	0,002	0,013	13,565	0,008	0,018
10	45150,442	175568,507	13,781	0,008	0,012	45150,445	175568,497	13,786	0,008	0,009	45150,444	175568,502	0,004	0,014	13,784	0,002	0,019
11	45137,567	175591,431	13,593	0,008	0,011	45137,574	175591,437	13,593	0,008	0,010	45137,571	175591,434	0,004	0,014	13,593	0,000	0,019
12	45166,895	175578,356	14,610	0,007	0,010	45166,899	175578,352	14,629	0,007	0,009	45166,897	175578,354	0,001	0,012	14,620	0,009	0,017
13	45156,379	175597,028	13,585	0,008	0,011	45156,373	175597,015	13,616	0,007	0,009	45156,376	175597,022	0,007	0,013	13,601	0,015	0,018
14	45149,110	175608,191	13,599	0,009	0,012	45149,105	175608,183	13,602	0,009	0,011	45149,108	175608,187	0,004	0,016	13,601	0,002	0,020
15	45174,338	175617,791	14,306	0,008	0,012	45174,324	175617,799	14,306	0,009	0,012	45174,331	175617,795	0,002	0,015	14,306	0,000	0,021
16	45204,478	175604,360	13,644	0,007	0,010	45204,464	175604,358	13,646	0,010	0,012	45204,471	175604,359	0,003	0,015	13,645	0,001	0,020
17	45193,937	175621,889	13,601	0,007	0,010	45193,935	175621,894	13,627	0,009	0,010	45193,936	175621,892	0,002	0,014	13,614	0,013	0,018
18	45210,660	175617,463	13,518	0,007	0,010	45210,658	175617,468	13,510	0,009	0,010	45210,659	175617,466	0,002	0,014	13,514	0,004	0,018

Figuur 68: Coördinaten & toelaatbare fout GNSS ingewonnen GCP en CP punten -  $V_1$



Punt nummer	Meting 1 [m]					Meting 2 [m]					Gemiddeld [m]						
	X	Y	Z	Horizontale precisie	Verticale precisie	X	Y	Z	Horizontale precisie	Verticale precisie	X	Y	$\Delta XY$	$TF_{XY}$	Z	$\Delta Z$	$TF_Z$
1	44875,748	176849,910	17,147	0,009	0,011	44875,751	176849,911	17,163	0,007	0,009	44875,750	176849,911	0,001	0,014	17,155	0,008	0,018
2	44895,054	176793,485	17,794	0,009	0,011	44895,056	176793,480	17,802	0,008	0,010	44895,055	176793,483	0,002	0,015	17,798	0,004	0,019
3	44912,357	176737,722	17,911	0,009	0,010	44912,363	176737,705	17,933	0,007	0,009	44912,360	176737,714	0,007	0,014	17,922	0,011	0,017
4	44958,366	176856,044	16,572	0,010	0,017	44958,366	176856,048	16,573	0,012	0,015	44958,366	176856,046	0,002	0,020	16,573	0,000	0,028
5	44979,731	176804,698	38,881	0,010	0,011	44979,720	176804,698	38,878	0,009	0,012	44979,726	176804,698	0,001	0,017	38,880	0,002	0,020
6	44973,146	176772,874	19,573	0,009	0,011	44973,143	176772,881	19,537	0,009	0,013	44973,145	176772,878	0,003	0,016	19,555	0,018	0,021
7	45020,979	176873,040	17,092	0,009	0,010	45020,973	176873,033	17,090	0,010	0,013	45020,976	176873,037	0,004	0,017	17,091	0,001	0,021
8	45033,319	176834,418	18,947	0,008	0,010	45033,311	176834,408	18,929	0,008	0,011	45033,315	176834,413	0,006	0,014	18,938	0,009	0,019
9	45044,686	176790,355	22,415	0,009	0,011	45044,690	176790,354	22,418	0,009	0,012	45044,688	176790,355	0,000	0,016	22,417	0,002	0,020
10	44890,847	176826,499	15,756	0,009	0,010	44890,844	176826,486	15,775	0,007	0,009	44890,846	176826,493	0,007	0,014	15,766	0,009	0,017
11	44904,183	176766,115	15,217	0,009	0,012	44904,183	176766,104	15,215	0,008	0,010	44904,183	176766,110	0,005	0,015	15,216	0,001	0,020
12	44915,547	176861,006	17,130	0,008	0,011	44915,538	176861,001	17,142	0,009	0,011	44915,543	176861,004	0,004	0,015	17,136	0,006	0,019
13	44933,080	176832,116	16,147	0,008	0,011	44933,081	176832,111	16,158	0,009	0,012	44933,081	176832,114	0,002	0,015	16,153	0,006	0,020
14	44937,906	176784,575	22,600	0,009	0,011	44937,891	176784,587	22,598	0,009	0,011	44937,899	176784,581	0,004	0,016	22,599	0,001	0,019
15	44952,204	176754,868	16,226	0,010	0,013	44952,188	176754,864	16,238	0,009	0,010	44952,196	176754,866	0,004	0,017	16,232	0,006	0,021
16	45000,553	176852,570	19,900	0,008	0,009	45000,554	176852,558	19,912	0,008	0,011	45000,554	176852,564	0,006	0,014	19,906	0,006	0,018
17	45009,598	176787,175	27,586	0,009	0,010	45009,594	176787,168	27,591	0,009	0,012	45009,596	176787,172	0,004	0,016	27,589	0,003	0,020
18	45036,966	176801,983	26,627	0,009	0,010	45036,967	176801,977	26,627	0,009	0,011	45036,967	176801,980	0,003	0,016	26,627	0,000	0,019

Figuur 69: Coördinaten & toelaatbare fout GNSS ingewonnen GCP en CP punten - V<sub>2</sub>

Bijlage 6: Ruwedata

Tabel 10: Ruwedata GCP & CP - V1

Model	Werkelijke resolutie [mm/pix]	Camera tilt [grad]		Vluchtpatroon	#camera posities	Reproductie fout [pix]	Control points (RMS) [mm]									Check points (RMS) [mm]													
		Absoluut	Relatief				x	y	xy	$\sigma_{xy}$	$\sigma_{xy,a}$	z	$\sigma_z$	$\sigma_{z,a}$	tot	$\sigma_{tot}$	$\sigma_{tot,a}$	x	y	xy	$\sigma_{xy}$	$\sigma_{xy,a}$	z	$\sigma_z$	$\sigma_{z,a}$	tot	$\sigma_{tot}$	$\sigma_{tot,a}$	
1	9,5	90	50,5	A	92	0,44	4,57	3,86	5,98			6,24			8,65			5,47	4,01	6,78			10,99			12,92			
2	20,2				30	0,46	4,48	4,83	6,59	6,09			6,09	6,90			8,97	9,25		4,35	4,55	6,29	6,69		8,26	11,12		10,38	13,02
3	29,1				16	0,45	3,99	4,07	5,70				8,38			10,14			5,72	4,01	6,99			14,12			15,76		
4	9,8	75	65,5		91	0,42	5,35	4,24	6,83				4,89			8,40			5,54	3,32	6,46			6,43			9,12		
5	21,3				29	0,44	5,01	4,89	7,00	7,83	7,22	7,00	8,91	6,69	9,90	12,00	10,02	4,01	5,17	6,54	7,51	7,23	8,96	7,77	8,86	11,09	10,86	11,54	
6	33				14	0,43	4,77	8,41	9,67				14,83			17,70			8,41	4,46	9,52			7,93			12,38		
7	11,1	60	80,5		89	0,41	5,07	4,10	6,52				4,05			7,68			5,56	3,66	6,66			5,59			8,69		
8	23,9				31	0,44	5,47	4,97	7,39	7,72			3,59	4,25			8,22	8,82		5,29	3,97	6,62	7,49		6,56	7,67		9,32	10,75
9	37				15	0,43	4,82	7,91	9,26				5,12			10,58			4,32	8,12	9,19			10,87			14,23		
10	9,24	90	23,5	B	88	0,40	5,09	4,29	6,66			11,45			13,24			2,70	5,34	5,99			5,23			7,95			
11	20,4				26	0,41	3,86	3,55	5,24	6,11			56,95	29,18			57,19	30,21		3,31	4,73	5,77	6,43		39,69	22,30		40,10	23,76
12	32				11	0,43	4,45	4,62	6,41				19,16			20,20			5,85	4,74	7,53			21,97			23,23		
13	9,88	75	38,5		91	0,39	5,23	5,08	7,28				5,07			8,88			4,88	3,16	5,82			4,37			7,28		
14	21,2				26	0,42	4,77	4,88	6,83	6,90	6,52	6,67	6,80	15,03	9,54	9,76	17,10	2,91	5,82	6,51	6,66	6,51	7,76	8,59	14,64	10,13	11,01	16,52	
15	32,6				15	0,39	4,10	5,15	6,58				8,65			10,87			5,99	4,78	7,66			13,63			15,64		
16	11,2	60	53,5		90	0,38	4,74	4,07	6,25				5,36			8,23			2,81	5,63	6,29			6,31			8,91		
17	23,9				24	0,40	5,07	2,80	5,79	6,56			9,36	9,09			11,01	11,32		4,54	4,16	6,15	6,42		11,33	13,04		12,90	14,78
18	32,6				15	0,39	5,29	5,53	7,65				12,56			14,71			5,00	4,64	6,82			21,47			22,53		
19	9,38	90	nvt	C	180	0,43	4,50	3,62	5,77			15,67			16,70			3,77	3,98	5,48			14,60			15,60			
20	20,3				56	0,46	3,81	4,12	5,61	5,59			39,73	30,92			40,13	31,52		3,59	4,52	5,77	6,75		28,81	24,49		29,38	25,45
21	31,9				27	0,45	3,90	3,70	5,38				37,36			37,74			6,48	6,24	8,99			30,05			31,36		
22	8,81	75	nvt		181	0,51	4,54	4,59	6,45				6,45			9,12			3,34	3,77	5,04			6,69			8,37		
23	21,2				55	0,44	4,47	4,47	6,32	6,53	6,20	8,37	8,79	15,40	10,49	11,01	17,24	3,19	4,53	5,54	6,77	6,83	10,00	11,39	15,20	11,44	13,27	16,90	
24	32,6				29	0,46	3,88	5,62	6,83				11,54			13,41			6,58	7,18	9,74			17,47			20,00		
25	11,1	60	nvt		179	0,41	3,84	3,81	5,41				5,93			8,03			2,97	4,01	4,99			6,58			8,25		
26	23,5				55	0,45	4,57	3,87	5,99	6,48			4,96	6,49			7,77	9,19		4,56	4,65	6,51	6,97		9,29	9,73		11,34	11,97
27	34,5				30	0,45	5,57	5,79	8,04				8,59			11,76			4,25	8,38	9,40			13,33			16,31		

Tabel 11: Ruwe data GCP & CP - V2

Model	Werkelijke resolutie [mm/pix]	Camera tilt [grad]			Vluchtpatroon	#camera posities	Reproductie fout [pix]	Control points (RMS) [mm]										Check points (RMS) [mm]												
		Absoluut	Relatief (Z/W-N/O)					x	y	xy	$\sigma_{xy}$	$\sigma_{xy,a}$	z	$\sigma_z$	$\sigma_{z,a}$	tot	$\sigma_{tot}$	$\sigma_{tot,a}$	x	y	xy	$\sigma_{xy}$	$\sigma_{xy,a}$	z	$\sigma_z$	$\sigma_{z,a}$	tot	$\sigma_{tot}$	$\sigma_{tot,a}$	
1	8,56				A	229	0,37	9,95	8,48	13,07			32,95			35,45			8,60	3,13	9,15			22,14			23,96			
2	19,10	90	59	48		60	0,36	10,09	7,48	12,56	12,72			37,11	34,91			39,18	37,17	8,85	2,98	9,34	9,88		34,35	33,11		35,60	34,60	
3	28,60					32	0,43	9,88	7,68	12,51				34,68			36,87			10,24	4,39	11,14			42,83			44,25		
4	8,67					228	0,36	15,07	10,32	18,27				26,71			32,36			13,55	8,24	15,85			22,81			27,78		
5	19,60	75	74	63		59	0,38	11,40	8,37	14,14	16,91	17,06		13,11	23,55	24,87	19,28	29,17	31,10	10,45	5,02	11,60	13,98	15,03	13,18	20,53	22,83	17,56	24,91	28,49
6	29,60					27	0,42	14,80	10,79	18,31				30,83			35,85			9,58	10,87	14,49			25,59			29,41		
7	9,91					215	0,36	23,74	22,96	33,03				25,43			41,68			20,55	23,10	30,91			19,55			36,57		
8	23,00	60	89	78		59	0,40	10,63	8,19	13,42	21,57			10,87	16,16		17,27	26,97		8,98	8,85	12,61	21,22		8,17	14,86		15,02	25,96	
9	34,30					32	0,42	13,55	12,24	18,26				12,18			21,95			16,26	11,90	20,15			16,86			26,27		
10	8,38				B	233	0,36	11,47	8,06	14,02			51,74			53,61			16,76	10,53	19,79			51,98			55,62			
11	19,20	90	5	20		60	0,46	6,04	5,09	7,90	10,83			24,76	30,30		25,99	32,49		9,66	9,23	13,35	15,65		21,64	32,50		25,43	36,21	
12	28,90					33	0,40	7,37	7,60	10,59				14,40			17,88			9,08	10,39	13,80			23,89			27,59		
13	8,69					235	0,35	7,46	7,68	10,70				28,42			30,37			8,49	7,08	11,05			17,72			20,89		
14	19,80	75	20	35		59	0,35	5,76	5,83	8,19	9,97	12,32		22,59	27,96	23,55	24,03	29,69	27,57	7,33	6,03	9,49	10,86	13,89	11,50	17,14	22,47	14,91	20,35	26,78
15	29,80					31	0,41	7,31	8,22	11,00				32,87			34,66			7,35	9,52	12,03			22,20			25,25		
16	9,62					207	0,33	16,74	17,36	24,12				14,22			28,00			12,74	16,28	20,67			14,44			25,21		
17	22,60	60	35	50		55	0,35	4,65	4,82	6,70	16,17			7,97	12,39		10,41	20,53		4,71	6,55	8,07	15,17		13,61	17,78		15,82	23,79	
18	34,10					30	0,36	11,08	13,80	17,70				14,98			23,18			6,41	15,51	16,78			25,28			30,35		
19	8,42				C	462	0,42	2,69	3,26	4,22			11,27			12,03			4,36	6,33	7,68			13,89			15,87			
20	19,20	90				120	0,43	6,81	3,99	7,89	6,76			57,08	34,34		57,62	35,09		3,86	7,51	8,44	8,48		41,81	27,50		42,66	28,97	
21	28,70					65	0,48	6,87	4,42	8,17				34,67			35,62			5,02	7,85	9,32			26,80			28,37		
22	8,65					463	0,40	5,97	5,97	8,45				17,37			19,31			2,04	6,16	6,49			17,61			18,77		
23	19,70	75	nvt			118	0,43	4,39	4,66	6,40	7,84	7,01		20,22	16,22	19,90	21,21	18,20	21,54	4,09	5,73	7,04	7,69	7,52	17,12	15,94	18,85	18,51	17,82	20,46
24	29,70					57	0,46	6,27	6,01	8,69				11,09			14,09			4,97	8,13	9,53			13,09			16,19		
25	9,72					422	0,37	5,33	4,12	6,73				14,14			15,67			4,10	5,83	7,13			12,94			14,77		
26	22,70	60				114	0,41	4,58	4,50	6,42	6,44			6,48	9,14		9,13	11,32		3,59	4,65	5,88	6,39		13,48	13,11		14,71	14,59	
27	34,00					62	0,43	4,86	3,78	6,16				6,78			9,16			5,09	3,48	6,17			12,91			14,30		

## Bijlage 7: Volume afwijking en verwerkingstijd per model

Model nr.	Volume 1			Volume 2		
	resolutie [cm/pix]	volumeververschil	verwerkingstijd [s]	resolutie [cm/pix]	volumeververschil	verwerkingstijd [s]
1	9,5	-0,137%	970	8,56	-10,428%	2171
2	20,2	-0,304%	329	19,1	-0,233%	701
3	29,1	1,53%	207	28,6	-0,148%	446
4	9,8	0,020%	926	8,67	-5,533%	2195
5	21,3	0,313%	366	19,6	-0,570%	687
6	33	0,122%	193	29,6	-0,571%	394
7	11,1	0,070%	931	9,91	-2,213%	2079
8	23,9	0,097%	372	23	-0,509%	668
9	37	0,229%	194	34,3	-0,499%	438
10	9,24	-0,469%	876	8,38	-4,776%	2359
11	20,4	2,77%	337	19,2	-4,653%	719
12	32	1,007%	195	28,9	-0,536%	469
13	9,88	-0,139%	910	8,69	-4,110%	2264
14	21,2	0,306%	350	19,8	-0,719%	703
15	32,6	0,608%	205	29,8	-0,819%	425
16	11,2	0,025%	935	9,62	-1,986%	1990
17	23,9	0,381%	329	22,6	-0,496%	648
18	32,6	0,422%	215	34,1	-0,394%	413
19	9,38	0,705%	2150	8,42	-1,625%	4844
20	20,3	1,66%	740	19,2	-0,100%	1499
21	31,9	3,84%	457	28,7	-0,115%	949
22	8,81	0,029%	2492	8,65	-1,119%	4577
23	21,2	0,405%	733	19,7	-0,364%	1313
24	32,6	0,345%	434	29,7	-0,285%	626
25	11,1	0,115%	1806	9,72	-0,941%	4148
26	23,5	0,221%	788	22,7	-0,408%	1298
27	34,5	0,456%	435	34	-0,354%	727

## Bijlage 8: Absolute waarde van de volume afwijking bij een relatieve camerahoek

Relatieve camerahoekd [grad]	Relatieve volumeafwijking		
	1cm/pix	2cm/pix	3cm/pix
5	1,63%	0,60%	0,75%
20	14,38%	0,67%	0,77%
20	1,83%	0,90%	1,07%
23,5	0,13%	1,60%	0,62%
35	11,25%	0,79%	0,81%
35	1,96%	0,68%	0,48%
38,5	0,04%	0,28%	0,45%
48	11,50%	0,78%	0,78%
50	4,60%	0,71%	0,62%
50,5	0,20%	0,31%	1,19%
53,5	0,12%	0,32%	0,33%
59	10,05%	0,79%	0,82%
63	0,94%	0,61%	0,54%
65,5	0,08%	0,11%	0,02%
74	15,71%	1,15%	1,26%
78	0,46%	0,69%	0,66%
80,5	0,01%	0,02%	0,04%
89	5,50%	1,19%	1,22%

