

2021 • 2022

Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen  
master in de industriële wetenschappen: bouwkunde

## Masterthesis

Beperken van het drifteffect bij SLAM-scanners

PROMOTOR :

Prof. dr. ir. Ali PIRDAVANI

PROMOTOR :

ing. Bruno VAN BASTELAERE

Stijn Oyen

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële wetenschappen: bouwkunde

Gezamenlijke opleiding UHasselt en KU Leuven



KU LEUVEN



KU LEUVEN

2021 • 2022

Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen  
master in de industriële wetenschappen: bouwkunde

## Masterthesis

Beperken van het drifteffect bij SLAM-scanners

**PROMOTOR :**

Prof. dr. ir. Ali PIRDAVANI

**PROMOTOR :**

ing. Bruno VAN BASTELAERE

**Stijn Oyen**

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële wetenschappen: bouwkunde



**KU LEUVEN**



# Woord vooraf

Deze thesis is het sluitstuk van de gezamenlijke opleiding industrieel ingenieur bouwkunde van de KU Leuven en de UHasselt. Het onderwerp van deze masterproef is voortgevloeid uit de passie voor het landmeten dat tijdens deze opleiding is gegroeid. Graag wil ik een woord van dank richten aan allen die mij gesteund hebben om dit werk te realiseren.

Eerst en vooral wil ik mijn interne promotor Prof. dr. ir. Ali Pirdavani bedanken voor de aangename begeleiding en vlotte communicatie doorheen deze masterproef. Aansluitend wil ik graag een woord van dank richten aan mijn externe promotor ing. Bruno Van Bastelaere voor het aanrijken van dit onderwerp en de deskundige begeleiding gedurende dit onderzoek. Vervolgens hebben Prof. dr. ing. Bram Vandoren en Prof. dr. ir. Hervé Degée mij de kans gegeven om dit eigen onderwerp te mogen onderzoeken in deze thesis, waarvoor dank. Verder wil ik Ruth Moors bedanken voor het gebruik van het totaalstation en de assistentie tijdens de referentiemeting. Tot slot gaat er een woord van dank uit naar mijn familie, vrienden en vriendin voor de steun tijdens dit onderzoek en in het bijzonder naar mijn ouders omdat zij mijn de kans hebben gegeven om deze opleiding succesvol te beëindigen.

Stijn Oyen

7 juni 2022



# Inhoudsopgave

<b>Woord vooraf</b> .....	1
<b>Lijst van tabellen</b> .....	5
<b>Lijst van figuren</b> .....	7
<b>Verklarende woordenlijst</b> .....	9
<b>Abstract</b> .....	11
<b>Abstract in English</b> .....	13
<b>1 Inleiding</b> .....	15
1.1 Situering.....	15
1.2 Probleemstelling.....	16
1.3 Doelstellingen.....	17
<b>2 Literatuurstudie</b> .....	19
2.1 Probabilistische voorstelling SLAM.....	19
2.2 Grafisch model.....	20
2.3 Complexiteit SLAM-probleem.....	21
2.4 Theorema van Bayes.....	23
2.5 Bayes filter.....	24
2.5.1 Markov assumptie.....	24
2.5.2 Afleiding Bayes filter.....	24
2.6 Markov lokalisatie.....	27
2.7 Kalman filter.....	29
2.8 Evolutie landmeetkundige meetapparatuur.....	30
2.9 Terrestrische laser scanning.....	31
2.9.1 Pulsscanners versus Fasescanners.....	32
2.9.2 Statische laser scanners.....	34
2.9.3 Dynamische laser scanning.....	35
2.9.4 Vergelijking SLS en DLS.....	36
2.10 Toepassingen SLAM-scanners in de bouwkundige sector.....	38
<b>3 Materiaal en methode</b> .....	41
3.1 Materiaal.....	41
3.1.1 Opbouw GeoSLAM ZEB Horizon.....	41
3.1.2 Eigenschappen GeoSLAM Horizon.....	42
3.1.3 Referentiekader met totaalstation.....	43
3.1.4 Testgebied.....	44

3.2	Methode .....	45
3.2.1	Testconfiguraties.....	48
<b>4</b>	<b>Resultaten</b> .....	<b>49</b>
4.1	Wiskundig verband.....	49
4.2	Loop closures .....	50
4.3	Features.....	51
4.4	Overzicht toegepaste configuraties.....	52
<b>5</b>	<b>Conclusie</b> .....	<b>55</b>
5.1	Het drifteffect bij SLAM-scanners .....	55
5.2	Toepassingsgebied SLAM-scanners.....	55
	<b>Bibliografie</b> .....	<b>57</b>
	<b>Bijlage</b> .....	<b>61</b>
	Bijlage A: Horizontale en verticale drift per configuratie .....	61

## Lijst van tabellen

Tabel 1: Vergelijkende tabel meetprincipes scantechnieken .....	33
Tabel 2: Eigenschappen Geoslam ZEB-REVO RT en FARO Focus M70 .....	36
Tabel 3: Vergelijkende tabel DLS en SLS .....	37
Tabel 4: Overlap per configuratie.....	50
Tabel 5: Vergelijkende tabel t.o.v. GOA .....	53





## Lijst van figuren

Figuur 1: Drifteffect.....	15
Figuur 2: Loop closure.....	16
Figuur 3: Full SLAM grafisch model .....	20
Figuur 4: Robot in onbekend gebied.....	21
Figuur 5: Blokschema SLAM .....	22
Figuur 6: Complexiteit matching principe SLAM.....	22
Figuur 7: Gekende 1D-omgeving met drie identieke deuren .....	27
Figuur 8: Aanvangssituatie Markov lokalisatie.....	27
Figuur 9: Toename onzekerheid locatie.....	28
Figuur 10: Locatie bepaald met relatief grote overtuiging .....	28
Figuur 11: Kalman filter lokalisatie model .....	29
Figuur 12: Flowchart laser scanning.....	31
Figuur 13: Time of Flight principe .....	32
Figuur 14 Principe Fasescanners .....	33
Figuur 15: Referentiepunten laser scanner .....	34
Figuur 16: Puntenwolk scan bosrijk gebied .....	35
Figuur 17: GeoSLAM ZEB-REVO RT .....	36
Figuur 18: FARO Focus M70.....	36
Figuur 19: Links met SLS en rechts scan met DLS.....	37
Figuur 20: Verschil resolutie SLS (links) en DLS (rechts) .....	37
Figuur 21: Opstelling GeoSLAM Horizon onder drone .....	39
Figuur 22: Opbouw GeoSLAM ZEB Horizon .....	41
Figuur 23: Weerspiegeling weerkaatsende oppervlakken.....	42
Figuur 24: TOPCON 3SRX .....	43
Figuur 25: Gang gebouw D Universiteit Hasselt.....	44
Figuur 26: Referentiemeting totaalstation.....	45
Figuur 27: Startpunten en targets.....	46
Figuur 28: Targets in werkelijkheid (links) en in de puntenwolk (rechts) .....	47
Figuur 29: Configuratie testen.....	48
Figuur 30: Drift horizontaal .....	49
Figuur 31: Drift verticaal .....	49
Figuur 32: Drift horizontaal LC-configuratie.....	50
Figuur 33: Bord uit puntenwolk .....	51
Figuur 34: LC KG + F ten opzichte van ES.....	51
Figuur 35: Samenvattende tabel .....	52
Figuur 36: Drift ES .....	61
Figuur 37: Drift GOA .....	61
Figuur 38: Drift LC KG .....	61
Figuur 39: Drift LC KG + 1 .....	62
Figuur 40: Drift KG LC + 2 .....	62
Figuur 41: Drift KG LC + 3 .....	62
Figuur 42: Drift KG + F.....	63



## Verklarende woordenlijst

BIM	Building Information Model
DLS	Dynamische laser scanning
GNSS	Global Navigation Satellite System
IMU	Inertial Measurement Unit
LiDAR	Laser Imaging Detection and Ranging
MLS	Mobile laser scanning
SLAM	Simultaneous Localization and Mapping
SLS	Statische laser scanning
TLS	Terrestrische laser scanning
TOF	Time of flight



# Abstract

Vanuit de bouwkundige sector is er een grote vraag naar nauwkeurige mobiele scanners waarbij de afwijking van de scans relatief beperkt is ten opzichte van de werkelijke omgeving. Het analyseren van dit drifteffect bij Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) scanners is het hoofddoel van dit onderzoek. Vervolgens wordt er onderzocht hoe het drifteffect in de praktijk kan worden gereduceerd door gebruik te maken van loop closures en features. Tot slot wordt het toepassingsgebied van SLAM-scanners binnen de bouwkunde geanalyseerd.

Om de optredende drift in elke configuratie te bepalen worden er targets geplaatst over de volledige lengte van de site. Vervolgens wordt er een referentiemeting uitgevoerd met een totaalstation om de werkelijke contouren van de site en de locatie van de targets te bekomen. Tot slot kan de drift bij elk target worden bepaald door gebruik te maken van diverse computerprogramma's.

De resultaten tonen aan dat de drift lineair optreedt ten opzichte van het gescande traject. Door gebruik te maken van loop closures, waarbij de overlap 31,1% bedraagt (LC KG + 3), kan het drifteffect gereduceerd worden tot 0,0164%. De grootste reductie van het drifteffect wordt verkregen bij het toevoegen van extra features waarbij de drift slechts toeneemt met 0,0089%. Dit is een vermindering van 63,5% ten opzichte van de meest toegepaste configuratie (GOA). Door deze configuraties in de praktijk toe te passen wordt er een nauwkeurigere scan bekomen waardoor het toepassingsgebied van SLAM-scanners aanzienlijk vergroot.



## Abstract in English

In today's construction industry, there is a high demand for accurate mobile scanners that have a limited deviation in comparison to the real environment. The main objective of this thesis is to analyse the drift effect of these Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) scanners. Next, it is investigated how the drift effect can be reduced by using loop closures and features. A concrete hypothesis is not linked to this subject because this research is unique. Finally, the application potential of SLAM scanners in the construction industry is analysed.

To analyse the occurring drift in each configuration, targets are placed over the entire length of the site. Next, a reference measurement will be performed with a total station to obtain the actual contours of the site and the location of the targets. Finally, the drift at each target can be determined using various computer programmes.

The results show that the drift occurs linearly to the scanned trajectory. By using loop closures, in which the overlap is 31.1% (LC KG + 3), the drift effect can be reduced to 0.0164%. The most significant reduction in the drift effect is obtained when additional features are added. In this case, the drift only increases by 0.0089%. This gives a decrease of 63.5% in comparison to the most unfavourable configuration (GOA). By applying these configurations in practice, a more accurate scan is obtained, which considerably expands the application area.





# 1 Inleiding

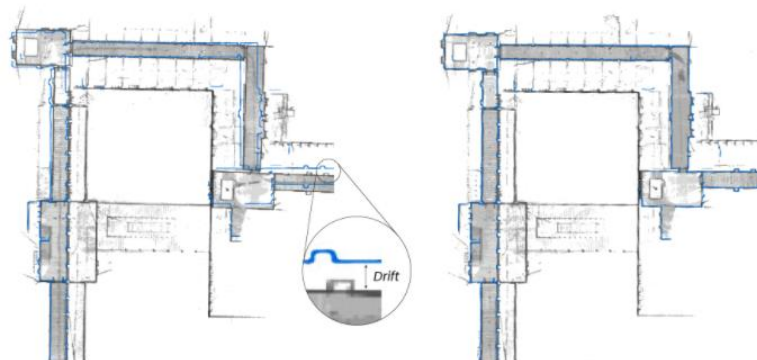
## 1.1 Situering

Deze masterproef vindt plaats in samenwerking met het landmetersbureau Teccon. Zij zijn gelegen in Mariakerke-Gent en hebben ook nog drie andere vestigingen. Deze vestigingen situeren zich in Zandhoven, Fernelmont en Mons. Bij Teccon werkt een team van 50 landmeters die zowel meetwerkzaamheden uitvoeren in België als daarbuiten. Innovatie staat binnen het bedrijf voorop. Zo maakte Teccon al snel gebruik van de eerste 3D-scanningstechnieken die op de markt kwamen [1].

In de landmeetkundige sector wordt mobile laser scanning (MLS) reeds een decennium gebruikt voor het in kaart brengen van onder meer stedelijke omgevingen en bosrijke gebieden. Voor het bepalen van de locatie gebruiken dergelijke scanners het Global Navigation Satellite System (GNSS). Bij MLS gebaseerd op GNSS is het geweten dat de globale nauwkeurigheid sterk wordt gereduceerd indien er signaalverlies optreedt [1], [2].

Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) scanners bepalen hun locatie op een geheel andere manier. Deze SLAM scanners gebruiken geen GNSS maar diverse algoritmes om hun positie te bepalen. Deze algoritmes berekenen door middel van onder meer de inertial measurement unit (IMU) een benaderende locatie waar de scanner zich denkkelijk zal bevinden. Met deze benaderende manier van lokaliseren is het nu wel mogelijk om gebieden met een sterke reductie in GNSS-sigitaal in kaart te brengen [3], [4].

Door gebruik te maken van dergelijke benaderende manier van lokaliseren en mappen zal het bekomen traject een systematisch grotere afwijking vertonen van het werkelijke traject wat de kwaliteit van de gegevens stelselmatig reduceert. Deze afwijking wordt drift genoemd en is weergegeven in figuur 1 [3].



Figuur 1: Drifteffect bij SLAM-scanners [3]

Een reductie van het drifteffect bij SLAM-scanners zou voor de gebruiker een grote vooruitgang betekenen. Door deze afwijking te verkleinen zal een SLAM-scanner ook meer toepasbaar zijn in verschillende meetcases. Dit biedt dan ook de mogelijkheid om de SLAM-scanner te gebruiken in andere contexten.

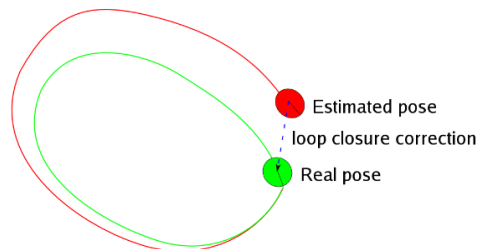
## 1.2 Probleemstelling

Een benaderende manier van lokaliseren en mappen zal aanleiding geven tot een afwijking van enerzijds het werkelijk gevolgde traject van de scanner en anderzijds zal de gegenereerde map, opgesteld uit de meetdata, afwijken van de werkelijke wereld. Grote afwijkingen, onzekerheden en benaderingen zijn bij relatief nauwkeurige meetapparaten natuurlijk uit den boze.

Het onderzoek wordt gevoerd om te achterhalen hoe het drifteffect bij SLAM-scanners zo sterk mogelijk kan worden geminimaliseerd. De hoofdonderzoeksvraag vertaalt dit in het beperken van het drifteffect bij SLAM-scanners. Hierbij wordt de impact van verschillende factoren proefondervindelijk getest om een zo exact mogelijke metingen te bekomen in functie van de verschillende cases.

Bovendien wordt er ook onderzocht wat de mogelijkheden zijn van de gebruiker om de hoeveelheid drift binnen de gewenste perken te houden. Een opmeting exact uitvoeren zonder enige afwijking is fysisch niet mogelijk. Deze masterproef zal dus onderzoeken hoe het drifteffect praktisch beperkt wordt bij verschillende configuraties. Hierbij wordt er gebruik gemaakt van loop closures en features. Wegens de complexiteit en de geheimhouding van de achterliggende algoritmes wordt dit verondersteld als een zwarte doos. In deze masterproef zullen deze algoritmes niet worden onderzocht.

Zoals het woord loop closure aankondigt zal de lus van het bewandelde traject worden gesloten. Deze lus kan worden gesloten door enerzijds het reeds gescande traject nogmaals te doorkruisen of door anderzijds het begin- en eindpunt op dezelfde locatie vast te leggen. Hypothetisch gezien zullen deze loop closures een gunstig effect hebben op de vermindering van de onzekerheid zoals op figuur 2 wordt weergegeven. Hier wordt het begin- en eindpunt op elkaar geplaatst waarbij de berekende locatie wordt gecorrigeerd naar zijn daadwerkelijke locatie.



Figuur 2: Loop closure [5]

In de laatste configuratie wordt bijkomend de invloed van extra features in de omgeving geanalyseerd. Tot slot wordt er op het vlak van innovatie achterhaald wat de mogelijkheden zijn van SLAM-scanners in de bouwkundige sector. Wat is het hedendaags toepassingsgebied van deze scanner en wat zijn de mogelijkheden die momenteel onbenut blijven?

### 1.3 Doelstellingen

De doelstelling van deze masterproef is om het drifteffect dat optreedt bij SLAM-scanners enerzijds zo goed mogelijk in kaart te brengen en anderzijds wordt er beoogd om het drifteffect zo maximaal mogelijk te reduceren door gebruik te maken van verschillende configuraties. Kwantitatieve streefwaarden zijn hier moeilijk aan te koppelen aangezien dit zeer verschillend is van configuratie tot configuratie en de nauwkeurigheid die de gebruiker wenst te bekomen. Vandaar is het vormen van een concreet referentiekader een belangrijk onderdeel van deze masterproef.

Om dit te verwezenlijken wordt er in de literatuurstudie onderzocht wat het complexe SLAM-probleem exact is en hoe dit verschijnsel ontstaat. Als het probleem eenduidig bepaald is spitst het onderzoek zich vervolgens verder toe op de praktische verbetering van het SLAM-probleem. Gedurende dit proces wordt er ook bestudeerd wat het potentieel van de SLAM-scanner binnen de bouwkundige sector is bij de overige onderbelichte of nog onbekende toepassingen.



## 2 Literatuurstudie

### 2.1 Probabilistische voorstelling SLAM

In deze paragraaf worden de fundamentele eigenschappen en kenmerken van SLAM in de robotica toegelicht. Zoals reeds in de inleiding vermeld tracht de robot het SLAM-probleem op te lossen door simultaan zijn locatie en omgeving te bepalen terwijl deze zich door een onbekend gebied voortbeweegt. Om te kunnen achterhalen hoe het SLAM-probleem wordt opgelost worden volgende probabilistische variabelen geïntroduceerd. Deze variabelen worden ingedeeld in twee groepen, voorgesteld als vectoren. Deze vectoren zijn respectievelijk de gegevens en de onbekenden [6], [7], [8], [9].

Bij benadering kan gesteld worden dat de SLAM-algoritmes gevoed worden door een reeks gegevens of inputs van de gebruiker die door de robot worden uitgevoerd. In de robotica leiden deze bevelen meestal tot een verplaatsing van de robot. Bij SLAM-scanners daarentegen ligt dit anders. Hier meet de IMU de versnelling, snelheid, verplaatsing en rotatie van elke beweging die de operator uitvoert op. Vervolgens worden deze inputs opgeslagen in de vector  $u_{1:t} = \{u_1, u_2, u_3, \dots, u_t\}$ . In deze vector  $u_{1:t}$  geeft elke  $u$  een gemeten input op een bepaald tijdstip weer. Daarnaast worden de observaties gelijktijdig gemeten met de laserscanner. Deze observaties worden opgeslagen in de vector  $z_{1:t} = \{z_1, z_2, z_3, \dots, z_t\}$  waarbij elke  $z$  een observatie weergeeft op een bepaald tijdstip [6], [8], [10], [11], [12].

Met deze inputs en observaties zal de SLAM-scanner een benaderende map van de omgeving genereren waarbij simultaan aan dit proces het traject van de robot wordt benaderd. De map wordt voorgesteld met de variabele  $m$ . Het traject van locaties waar de robot zich op elk punt situeerde, wordt beschreven in de vector  $x_{1:t} = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_t\}$ . Waarbij  $x$  staat voor een locatie van de robot [6], [8], [10].

Een belangrijk aspect om te vermelden is het feit dat alle geïntroduceerde variabelen die in het SLAM-algoritme gebruikt worden probabilistisch zijn. Hierdoor zullen de gegevens komende van de inputs en observaties dus altijd een zekere afwijking vertonen. Ondanks dat deze variabelen een zeer hoge nauwkeurigheid hebben, zal er door middel van het opschalend effect een systematisch grotere afwijking ontstaan met als gevolg dat de locatie van de SLAM-scanner en de benaderende map slechts met een beperkte zekerheid bepaald kan worden. De robot zal zich niet op een bepaalde positie bevinden maar ergens in de omgeving van deze positie. Hierdoor worden er twee kansverdelingen geïntroduceerd. Eén kansverdeling van het gevolgde traject en één kansverdeling van de omgeving. De technieken die hiervoor worden gebruikt zijn zeer divers en zijn afhankelijk van de aannames die worden verondersteld in de SLAM-algoritmes. Sommige technieken maken aannames die het SLAM-probleem vereenvoudigen. In deze scriptie wordt in paragraaf 2.7 de Kalman filter besproken die gebruik maakt van een Gaussiaanse distributie [7], [8], [9], [13].

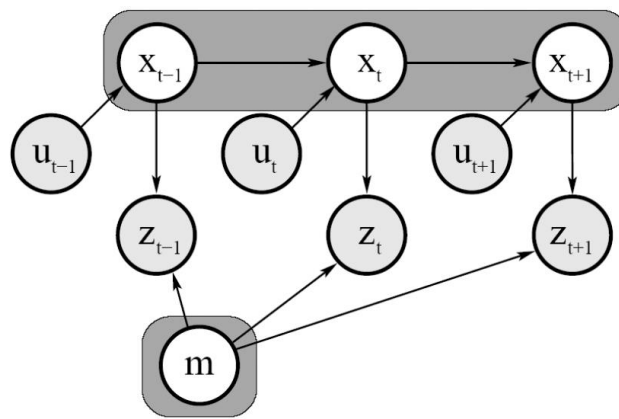
Het SLAM-probleem kan bijgevolg herleid worden tot deze volgende kansvergelijking:

$$p(x_{0:t}, m | z_{1:t}, u_{1:t}) \quad (1)$$

In deze probabilistische vergelijking wordt het benaderend traject van de robot  $x_{0:t}$  en de map  $m$  geschat met gegevens komende van de observaties  $z_{1:t}$  en de commando's  $u_{1:t}$ .

## 2.2 Grafisch model

Het SLAM-probleem kan opgesplitst worden in twee categorieën, online SLAM en full SLAM. Online SLAM houdt enkel rekening met waarnemingen op tijdstip  $t$ . Zodra de verwerking van de gegevens is gebeurd en een schatting van de omgeving en het traject is bekomen worden deze gegevens in een later stadium bij online-SLAM genegeerd. Bij full-SLAM wordt het volledige pad samen met de map bepaald. Dit voert het full-SLAM-algoritme uit door alle voorgaande gegevens in beschouwing te nemen. Dit resulteert achteraf in een significante toename van het rekenwerk. In deze scriptie wordt enkel de full SLAM-vorm beschreven aangezien de GeoSLAM Horizon, die in dit onderzoek wordt gebruikt, op deze wijze functioneert. Het grafisch model van de full SLAM-vorm wordt in figuur 3 weergegeven [7], [8], [14].



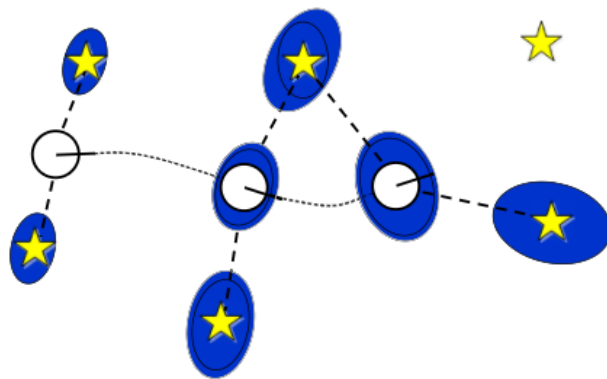
Figuur 3: Full SLAM grafisch model [14]

De huidige positie kan worden voorgesteld als  $x_t$ . Als deze positie wordt geschat moet onder meer de locatie van vorige positie  $x_{t-1}$  gekend zijn. Het is belangrijk dat de positie  $x_{t-1}$  met een zo klein mogelijke onzekerheid wordt bepaald om de huidige positie  $x_t$  zo exact mogelijk te bekomen. De huidige positie zal dus bepaald worden door de vorige positie  $x_{t-1}$  en het commando dat naar de robot wordt gestuurd. Bij SLAM-scanners wordt er zoals reeds aangehaald, geen commando gegeven aan de scanner maar worden de bewegingen met de scanner gemeten door de IMU. De door de IMU gemeten gegevens worden bijgevolg als commando  $u_t$  beschouwd. De positie kan niet exact worden bepaald, maar als het commando nauwkeurig gemeten wordt zal de berekende locatie de werkelijke locatie relatief goed benaderen. De observatie  $z_t$  is bijgevolg ook sterk afhankelijk van de positie van het punt  $x_t$ . Als deze locatie relatief goed is benaderd dan zijn de observaties een goede weergave van de werkelijkheid [6], [7], [14], [15].

## 2.3 Complexiteit SLAM-probleem

Uit vorige paragraaf kan geconcludeerd worden dat er een sterke samenhang bestaat tussen de locatie en het inschatten van de omgeving. Deze variabelen zijn beide onbekend en sterk afhankelijk van elkaar met als doel het inschatten van de omgeving en de locatie van de robot [7], [15].

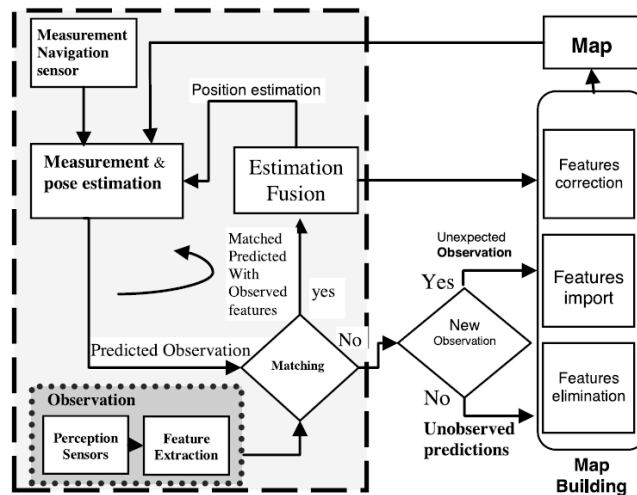
In figuur 4 wordt een robot voorgesteld die zich verplaatst langs een bepaald traject geflankeerd met enkele stervormige markeringspunten. De blauwe gebieden rond de robot en de markeringspunten geven de onzekerheidsgebieden weer waar deze zich denkkelijk zullen bevinden. Bij aanvang is de exacte locatie van de robot gekend. De positie van het markeringspunt zal niet met zekerheid bepaald kunnen worden. Indien de robot zich naar een volgende positie begeeft zal ook een onzekerheid ontstaan over de locatie van de robot met bijgevolg een grotere onzekerheid over de positie van de bijhorende markeringspunten. Door de bewegingen van de robot zal de onzekerheid van de positie van de robot en de onzekerheid van positie van de markeringspunten verhogen [7], [14].



Figuur 4: Robot in onbekend gebied [14]

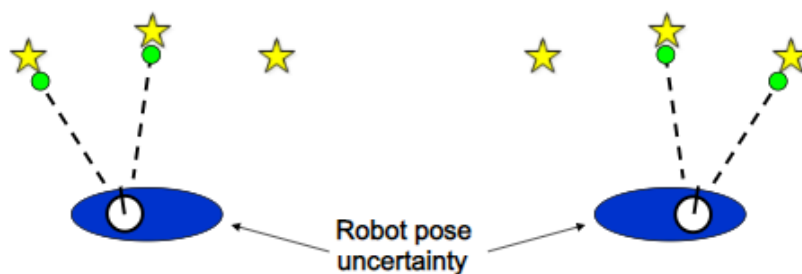
Indien de robot op een andere locatie hetzelfde markeringspunt opnieuw kan inmeten zal er een betere aanname gemaakt kunnen worden omtrent het onzekerheidsgebied van het markeringspunt. De robot heeft in dit punt namelijk een bepaald verwachtingspatroon met betrekking tot het markeringspunt. Indien de observatie een afwijking vertoont ten opzichte van een vorige observatie van het markeringspunt wordt enerzijds de locatie van het markeringspunt geüpdatet maar anderzijds wordt ook de locatie waar de robot zich denkkelijk situeert aangepast. De onzekerheid van de benaderde locatie van de robot wordt hierdoor dus ook gereduceerd. Dit is weergegeven in figuur 4 met een zwarte cirkel. Door deze aanpassing van het onzekerheidsgebied van de locatie van de robot zal bijgevolg het onzekerheidsgebied van de vorige locaties met bijhorende observaties gewijzigd worden. Ter verduidelijking geeft figuur 5 een overzichtelijk blokschema van het besproken SLAM-werkingsprincipe weer [7], [14].





Figuur 5: Blokschema SLAM [6]

In bovenstaande situatie wordt er verondersteld dat de robot de capaciteit heeft om de relatie te kunnen leggen met punten of objecten die de robot in het verleden heeft waargenomen. Indien verschillende punten sterke gelijkenissen hebben met elkaar maakt dit data associatie moeilijker. Dit wordt weergegeven in figuur 6 [7], [14].



Figuur 6: Complexiteit matching principe SLAM [14]

In figuur 6 heeft de onzekerheid van de locatie van de robot een sterke invloed op de data associatie van de robot. De robot associeert in beide gevallen de groene punten met markeringspunten die voordien werden gemeten. Door het significant onzekerheidsgebied kan de robot deze data associatie op twee manieren uitvoeren. Indien de data associatie incorrect gebeurt zal de aanpassing van het onzekerheidsgebied foutief worden toegepast wat leidt tot een onjuist onzekerheidsgebied [7], [14].

## 2.4 Theorema van Bayes

Het theorema van Bayes is een belangrijke statistische bewerking die aan de basis ligt van probabilistische modellen in de robotica. Deze theorie wordt ook toegepast bij SLAM-scanner voor de benaderende lokalisatie van het toestel en de omgeving. De drie belangrijkste eigenschappen van dit theorema worden in de volgende alinea's toegelicht [8], [9], [15].

De eerste belanghebbende eigenschap is de voorwaardelijke kansverdeling. Deze voorwaardelijke kans wordt bepaald door twee elementen, zijnde  $x$  en  $y$ . De kans op  $x$  bij een gegeven  $y$  is hierbij gelijk aan de kans van  $x$  en  $y$  samen gedeeld door de kans op  $y$  [13]:

$$P(x|y) = \frac{P(x,y)}{P(y)} \quad (2)$$

De tweede eigenschap stelt dat de som van alle kansen gelijk is aan één. Deze vergelijking geeft de kans weer dat de robot zich op een bepaalde positie moet bevinden. Deze vergelijking moet bijgevolg gelijkgesteld worden aan één aangezien de robot zich altijd ergens op een bepaalde locatie moet bevinden [13], [16]:

$$\sum_x P(x) = 1 \quad (3)$$

De laatste statistische aanname heeft betrekking op het de marginale kansverdeling. Deze vergelijking geeft weer dat de kans op  $x$  gelijk is aan de som van de kansen op  $x$  en  $y$  over alle posities van  $x$  [13], [16]:

$$P(x) = \sum_y P(x, y) \quad (4)$$

Vervolgens kan uit deze vergelijking gesteld worden dat de kans op  $x$  en  $y$  samen gelijk is aan de kans op  $y$  bij een gegeven  $x$  vermenigvuldigd met de kans op  $y$  [9], [13]:

$$P(x, y) = P(x|y) \cdot P(y) = P(y|x) \cdot P(x) \quad (5)$$

Als deze vergelijking wordt omgevormd naar de kans op  $x$  bij een gegeven  $y$  wordt het theorema van Bayes weergegeven als volgt [9], [13]:

$$P(x|y) = \frac{P(y|x) \cdot P(x)}{P(y)} \quad (6)$$

Deze regel van Bayes geeft de kans weer dat de robot zich op een bepaalde plaats  $x$  bevindt, gegeven de resultaten  $y$ . Dit theorema wordt toegepast bij sensorfusie. Sensorfusie is de techniek om informatie van verschillende systemen met elkaar te combineren. Elk type sensor heeft zijn beperkingen in bepaalde situaties. Zo vertoont een SLAM-scanner onder meer moeilijkheden bij het scannen van weerkaatsende oppervlakken. Door in deze situatie informatie van verschillende sensoren samen te voegen, kunnen er betere resultaten bekomen worden [15], [16], [17], [18].

## 2.5 Bayes filter

Alvorens in volgende paragraaf dieper in te gaan op de Bayes filter wordt eerst de aanname van Markov benaderd. Deze toestandsaanname van het locatieprobleem wordt namelijk direct verwerkt in filter van de Bayes [9], [15].

### 2.5.1 Markov assumptie

De aanname van Markov stelt dat “gegevens uit het verleden onafhankelijk zijn als men de huidige staat van de robot kent” [8, p. 30]. Een belangrijke opmerking hierbij is dat de robot zich bevindt in een ideale situatie. In tegenstelling tot de ideale situatie zijn er in de werkelijke wereld wel verschillende factoren die een invloed hebben op de sensormetingen [8], [13].

Een eerste belangrijke parameter is dat de werkelijke wereld niet statisch is. In de werkelijke wereld situeren zich namelijk altijd dynamische bewegingen. Zoals auto’s en mensen die zich door het invloed gebied van de sensor begeven. Dit heeft een rechtstreeks effect op het localisatieprobleem [8].

Tot slot hebben sensor- en modelleringsfouten een aanzienlijke invloed op de locatiebepaling. De kwaliteit van sensoren met hun bekomen gegevens is zeer divers naargelang het type sensor. Dit heeft enerzijds een significante invloed op de afwijking van de sensordata en anderzijds op de hoeveelheid gegenereerde fouten van de sensoren. Deze metingen worden ingevoegd als input in de modellering waarbij onnauwkeurigheden en benaderingsfouten deze benaderende besturingssoftware bijkomend beïnvloeden [7], [8], [13].

### 2.5.2 Afleiding Bayes filter

De Bayes filter wordt veelvuldig gebruikt in robotica met betrekking tot SLAM waarbij robots hun meest waarschijnlijke positie kunnen bepalen en bijgevolg ook updaten. De Bayes filter wordt onder meer verwerkt in de Kalman filter en de Partikel filter. Deze Bayes filter geeft de basis weer van de berekeningen in het SLAM-probleem [7], [8].

Het doel van de Bayes filter is het bepalen van de positie  $x$  waarin de robot zich bevindt met inputs komende van de observaties  $z$  en de commando’s  $u$ :

$$p(x|z, u) \tag{7}$$

Bij aanvang is omtrent de omgeving nog niets geweten. Als er bijgevolg nog niks geweten is over de omgeving is de verdeling uniform. Door acties en waarnemingen wordt de zekerheid over een bepaalde locatie groter. Een absolute zekerheid waarbij wordt verondersteld dat de robot zich op een bepaalde exacte plaats bevindt is fysisch niet mogelijk. De locatie wordt bijgevolg niet voorgesteld door een punt maar door een waarschijnlijkheidsverdeling. Als de positie niet eenduidig bepaald kan worden introduceert de wiskunde de waarschijnlijkheidsaanname. Deze aanname wordt in het jargon ook wel beschreven als de Belief of kortweg *Bel* [8], [13].

De toestandswaarschijnlijkheid op het huidige tijdstip  $x_t$  kan bepaald worden door een reeks observaties  $z_{1:t}$  en een reeks commando's  $u_{1:t}$  die tot tijdstip  $t$  zijn verzameld:

$$Bel(x_t) = p(x_t | z_{1:t}, u_{1:t}) \quad (8)$$

In een volgende vergelijking wordt het theorema van Bayes toegepast:

$$p(x_t | z_{1:t}, u_{1:t}) = \frac{P(z_t | x_t, z_{1:t-1}, u_{1:t}) \cdot P(x_t | z_{1:t-1}, u_{1:t})}{P(z_t | z_{1:t-1}, u_{1:t})} = \eta P(z_t | x_t, z_{1:t-1}, u_{1:t}) \cdot P(x_t | z_{1:t-1}, u_{1:t}) \quad (9)$$

De noemer wordt eenvoudig vervangen door een constante. In de eerste term staat neergeschreven dat de staat van de omgeving gekend is. Zoals gedefinieerd in sectie 2.5.1 kan volgens Markov verondersteld worden dat als de staat van de omgeving gekend is, alle voorgaande meetgegevens en commando's genegeerd kunnen worden [7], [8].

$$p(x_t | z_{1:t}, u_{1:t}) = \eta P(z_t | x_t) \cdot P(x_t | z_{1:t-1}, u_{1:t}) \quad (10)$$

De tweede term in vergelijking 10 geeft weer wat de huidige staat van het systeem is met de gegeven waarnemingen van de posities uit het verleden, de commando's uitgevoerd in het verleden en op de huidige locatie. Vergelijking 10 wordt door substitutie met vergelijking 8 herschreven als [7], [8]:

$$Bel(x_t) = \eta P(z_t | x_t) \cdot P(x_t | z_{1:t-1}, u_{1:t}) \quad (11)$$

Op de laatste term van vergelijking 11 wordt vervolgens de wet van totale kans toegepast. In deze vergelijking wordt een nieuwe variabele  $x_{t-1}$  ingevoerd. Deze variabele geeft de staat weer op het vorige moment. Er wordt geïntegreerd over  $x_{t-1}$  aangezien er wordt verondersteld dat de variabelen continu zijn [7], [8]:

$$Bel(x_t) = \eta P(z_t | x_t) \int_{x_0}^{x_{t-1}} P(x_t | x_{t-1}, z_{1:t-1}, u_{1:t}) \cdot P(x_{t-1} | z_{1:t-1}, u_{1:t}) dx_{t-1} \quad (12)$$

De aanname van Markov kan toegepast worden op de eerste term binnen de integraal. Alle observaties behalve de laatste observatie mogen bijgevolg buiten beschouwing gelaten worden [7], [8]:

$$Bel(x_t) = \eta P(z_t | x_t) \int_{x_0}^{x_{t-1}} P(x_t | x_{t-1}, u_{1:t}) \cdot P(x_{t-1} | z_{1:t-1}, u_{1:t}) dx_{t-1} \quad (13)$$

In de eerste term binnen de integraal van vergelijking 13 wordt de huidige toestand benaderd als de vorige positie  $x_{t-1}$  is gegeven in combinatie met het huidige commando. Vervolgens kan in de tweede term van vergelijking 13 de aanname van Markov nogmaals worden toegepast. In deze term is de staat van de vorige locatie  $x_{t-1}$  gevraagd. Dan zijn de commando's van de toekomst  $u_t$  irrelevant. Dit resulteert in volgende vergelijking [7], [8]:

$$Bel(x_t) = \eta P(z_t|x_t) \int_{x_0}^{x_{t-1}} P(x_t|x_{t-1}, u_{1:t}) \cdot P(x_{t-1}|z_{1:t-1}, u_{1:t-1}) dx_{t-1} \quad (14)$$

Tot slot kan de tweede term volgens vergelijking 14 herschreven worden als:

$$p(x_{t-1}|z_{1:t-1}, u_{1:t-1}) = Bel(x_{t-1}) \quad (15)$$

De filter van Bayes kan finaal weergegeven worden als:

$$Bel(x_t) = \eta P(z_t|x_t) \int_{x_0}^{x_{t-1}} P(x_t|x_{t-1}, u_{1:t}) \cdot Bel(x_{t-1}) dx_{t-1} \quad (16)$$

Deze vergelijking is een model dat het systeem toelaat om zich te updaten bij elke verandering van de toestand. Indien de staat van de vorige toestand gegeven is en het commando horende bij de huidige staat wordt uitgevoerd waarbij de observaties worden waargenomen, kan de huidige locatie worden bepaald. Bij deze Bayes filters worden zoals reeds beschreven in paragraaf 2.5.1 verschillende aannames gedaan om een ideaalmodel te bekomen [7], [8].

Uit deze filter van Bayes kunnen volgende twee modellen worden geschreven. Enerzijds de voorspellingsstap gegeven in vergelijking 17 en anderzijds de correctiestap gegeven in vergelijking 18:

$$\overline{Bel}(x_t) = \int P(x_t|x_{t-1}, u_{1:t}) \cdot Bel(x_{t-1}) dx_{t-1} \quad (17)$$

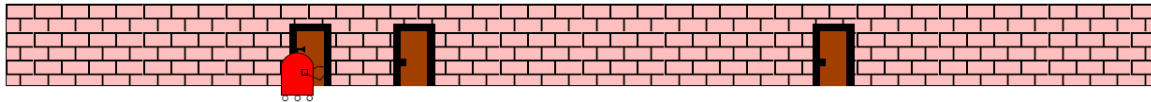
$$Bel(x_t) = \eta P(z_t|x_t) \cdot \overline{Bel}(x_t) \quad (18)$$

De voorspellingsstap schat de locatie  $x_t$  van de robot door gebruik te maken van bewegingsinformatie  $u_t$ . In deze vergelijking is de belief van de locatie van het vorige tijdstip al bepaald. Deze waarschijnlijkheidsaannames kan vervolgens gebruikt worden om het huidige tijdstip de toestand te bepalen is in samenwerking met het commando dat op het huidige tijdstip werd gegeven  $u_t$ . De correctiestap corrigeert de kansverdeling van de voorspellingsstap. In dit model wordt de kans op een omgeving bepaald als er wordt gegeven dat de robot zich op in een bepaalde toestand  $x_t$  bevindt [7], [8], [15].

Bij de SLAM-scanner werkt dit op een analoge manier. De IMU werkt traditioneel op een hogere frequentie. In de voorspellingsstap, waar de IMU-deel van uitmaakt, wordt bijgevolg hoogfrequent uitgevoerd. In deze stap wordt de locatie van de scanner benaderd. De laagfrequente correctiestap wordt bijgevolg minder vaak uitgevoerd. Dit heeft betrekking op de laserscanner die observaties levert aan de correctiestap. Door middel van sensorfusie met de laserscanmeting wordt deze kansverdeling bijgestuurd [15], [18].

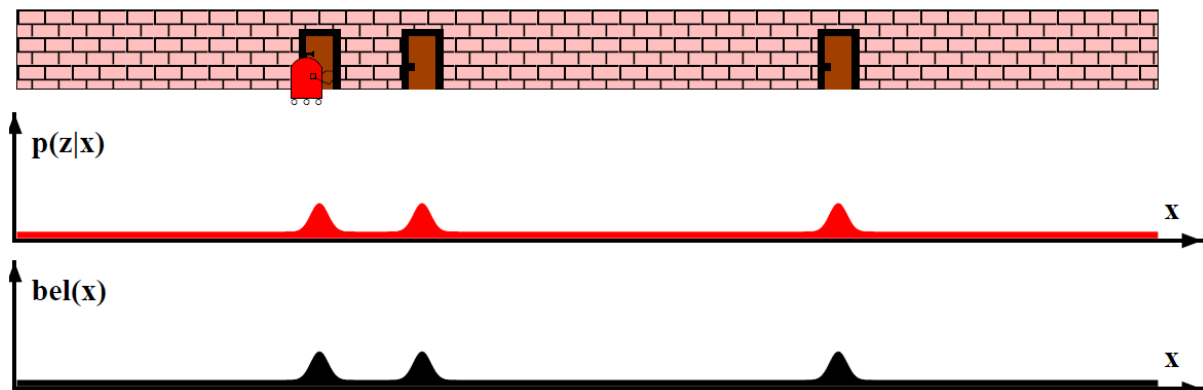
## 2.6 Markov lokalisatie

Bij de Markov lokalisatie tracht de robot zich te lokaliseren in een gekende omgeving waarbij de filter van Bayes wordt toegepast. Hierbij wordt er geen map van de omgeving gemaakt waardoor dit niet onder de noemer SLAM valt. Bij het de lokalisatie volgens Markov worden de kenmerkende objecten uit een reeds opgestelde map gebruikt om de huidige locatie nauwkeuriger te bepalen. In figuur 7 wordt een bekende omgeving weergegeven [7], [8], [9], [13].



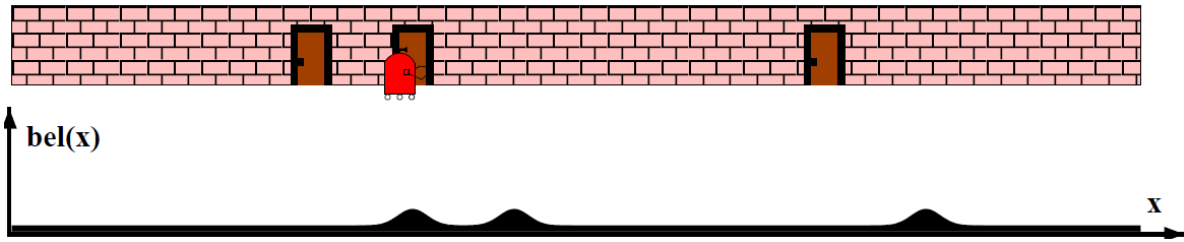
Figuur 7: Gekende 1D-omgeving met drie identieke deuren [8]

Bij aanvang is de overtuiging van de locatie van de robot een uniforme verdeling. De kans dat de robot zich op één bepaalde positie bevindt is op elk punt gelijk. Bijgevolg hebben alle mogelijke locaties waar de robot zich op kan bevinden dezelfde waarschijnlijkheid. Bij dit startpunt neemt de robot een deur waar. De robot weet hierbij niet bij welke deur hij zich bevindt. Volgens de correctiestap van de Bayes filter wordt de aanvangsovertuiging vermenigvuldigd met de kansverdeling met betrekking tot de locatie van de deur. Dit geeft de overtuigingsfunctie  $Bel(x)$  in figuur 8 weer [7], [8], [9], [13].



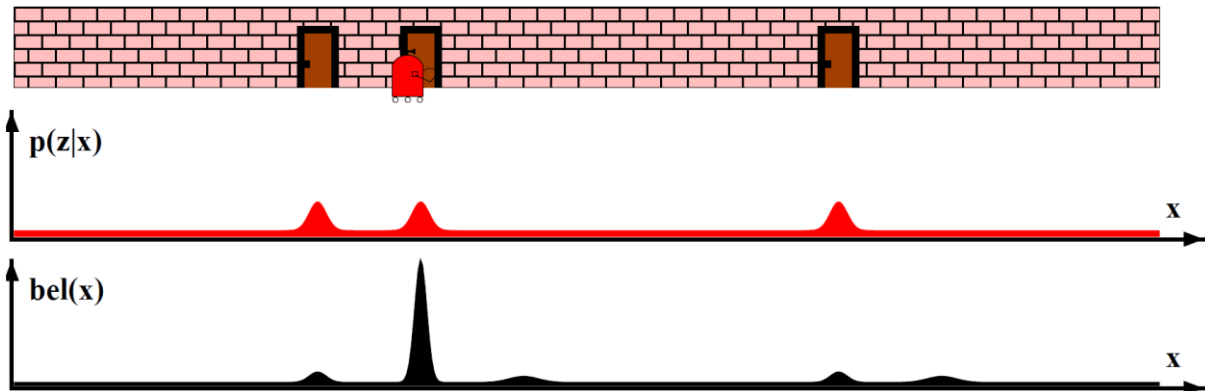
Figuur 8: Aanvangssituatie Markov lokalisatie [8]

Indien de robot zich naar een volgend punt voortbeweegt wordt de overtuiging van de locatie  $t-1$  gebruikt om de nieuwe huidige locatie te bepalen, zoals de filter van Bayes aangeeft. Door de verplaatsing naar een volgende positie neemt de onzekerheid bij de predictiestap toe zoals reeds besproken in paragraaf 2.5.2. De toename in onzekerheid van de overtuiging van de locatie wordt weergegeven in figuur 9 [7], [8], [9], [13].



Figuur 9: Toename onzekerheid locatie [8]

Door het verplaatsen naar een nieuwe locatie neemt de robot een deur waar. Dit wordt weergegeven in figuur 10. De robot weet echter op dat moment nog niet bij welke deur hij zich bevindt. Als de overtuigingsfunctie van figuur 9 wordt vermenigvuldigd met de huidige waarschijnlijkheid zoals de regel van Bayes aangeeft bevindt de grootste waarschijnlijkheid zich bij de tweede deur. De robot kan nu met relatief grote overtuiging zijn positie bepalen [7], [8], [9], [13].

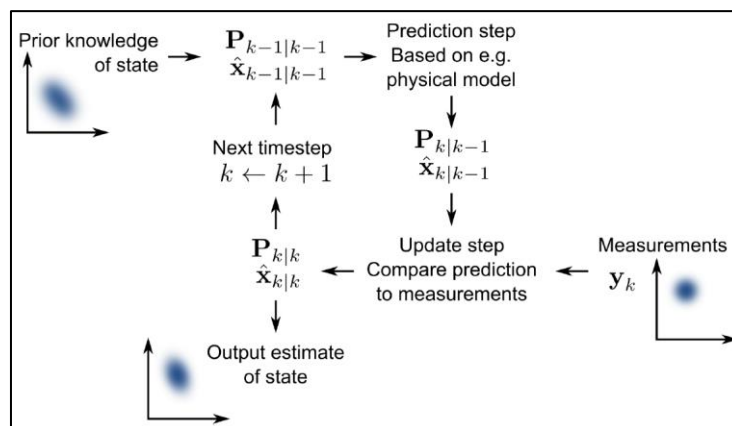


Figuur 10: Locatie bepaald met relatief grote overtuiging [8]

## 2.7 Kalman filter

De Kalman filter is een variant op Bayesiaanse filter en tracht de toestand van een systeem in te schatten. Om deze methode te mogen gebruiken zijn er wel enkele aannames vereist. De aannames stellen dat bij een Kalman filter de kansverdeling Gaussiaanse is en de modellen lineair zijn. Deze lineaire modellen zijn respectievelijk de voorspellingsstap en de correctiestap die reeds in paragraaf 2.5.2 werden besproken [8], [9], [13], [19].

Ruis heeft een grote impact op de nauwkeurigheid van het systeem. Hierin kan een onderscheid gemaakt worden tussen ruis van de IMU en de ruis die optreedt bij metingen van de sensoren. De Kalman filter is een systeem dat met deze ruis kan omgaan. Het principe van de Kalman filter wordt toegelicht met het model dat is voorgesteld in figuur 11 [13], [19].



Figuur 11: Kalman filter lokalisatie model [13]

Zoals reeds aangehaald veronderstelt men bij de Kalman filter een waarschijnlijkheidsverdeling die Gaussiaans is. Om de Gaussiaanse kansverdeling te achterhalen moeten er twee parameters gekend zijn. Dit is de geschatte systeemtoestand  $\hat{\mathbf{X}}$  en de standaarddeviatie die wordt aangeduid met de covariantiematrix  $\mathbf{P}$ . In de correctiestap en predictiestap worden telkens de systeemtoestand en standaarddeviatie berekend [13], [19].

Om de geschatte systeemtoestand en de standaarddeviatie te bepalen maakt de Kalman filter gebruik van verschillende meetinstrumenten zoals de laserscanner en de IMU die elk hun eigen ruisniveau en nauwkeurigheid hebben. Als bijgevolg aan de Kalman filter wordt weergegeven dat een bepaald meetinstrument een hogere nauwkeurigheid heeft dan het ander meetinstrument zal de Kalman filter minder aandacht hechten aan de inputs komende van het meetinstrument met een lagere nauwkeurigheid [13], [15], [19].



## 2.8 Evolutie landmeetkundige meetapparatuur

De essentie van een landmeetkundige opmeting is doorheen de geschiedenis nagenoeg onaangeroerd gebleven. Tijdens de metingen op het terrein werden, en worden er nog steeds hoogtes, hoeken en afstanden gebruikt om de opmeting grafisch te kunnen weergeven met lijnen en coördinaten. De meet- en rekentechnieken maakten doorheen de geschiedenis en meer specifiek de laatste decennia echter wel een significante evolutie mee. Dit uit zich vooral in het aspect van tijdswinst tijdens de meting en vervolgens bij het construeren van de opmeting. De opmeting en het verwerken van deze meetgegevens konden in het verleden verschillende dagen in beslag nemen. Vandaag kan men met de nieuwste meettoestellen, afhankelijk van de omgeving, op enkele uren tot enkele tientallen minuten de volledige opmeting uitvoeren en de meetgegevens verwerken [20].

De traditionele topografie waarbij er relatief exacte metingen werden uitgevoerd met de eerste theodolieten dateert slechts van halverwege de 19ste eeuw. Vervolgens maakte in de 20ste eeuw de traditionele topografie een sterke evolutie mee. De reden hiervoor is vrij voor de hand liggend, namelijk het in gebruik stellen van het satellietstelsel. Deze satellieten maakte het mogelijk om enerzijds de geoides te bestuderen en anderzijds leidden deze satellieten tot het ontstaan van het GNSS. Hierbij kan de locatie bepaald worden door de afstand te bepalen tot minimum 4 satellieten. De integratie van het totaalstation, de opvolger van de theodoliet, met het GNSS-systeem was bijgevolg een vanzelfsprekende evolutie [20].

Het totaalstation heeft gedurende de afgelopen eeuwen dus een aanzienlijke evolutie gekend door de opkomst van het GNSS-systeem en de evolutie in de elektronica. Het principe is wel nog steeds gelijk gebleven met de eerste theodolieten waarbij er nog steeds op een snelle en accurate manier afstanden en hoeken worden ingemeten in een lokaal assenstelsel. De verwerkingstijd achteraf is wel aanzienlijk verminderd waarbij met de huidige generatie one-man-stations de verwerking al gebeurt tijdens het opmeten door middel van codering van de opgemeten punten [20].

Vervolgens wordt er dus een plan bekomen in een lokaal coördinatensysteem. Nu is het ook mogelijk om dit plan om te zetten in het Lambertcoördinatensysteem. Het Lambertcoördinatensysteem is een nationaal algemeen coördinatensysteem van België dat wordt gebruikt voor het samenvoegen van plannen in één assenstelsel. Door gebruik te maken van dit algemeen coördinatensysteem heeft men de mogelijkheid om plannen die in het verleden zijn gemeten en omgezet in Lambert 72, te kunnen samenvoegen. Dit kan onder andere bruikbaar zijn bij het bepalen van grenzen [20].

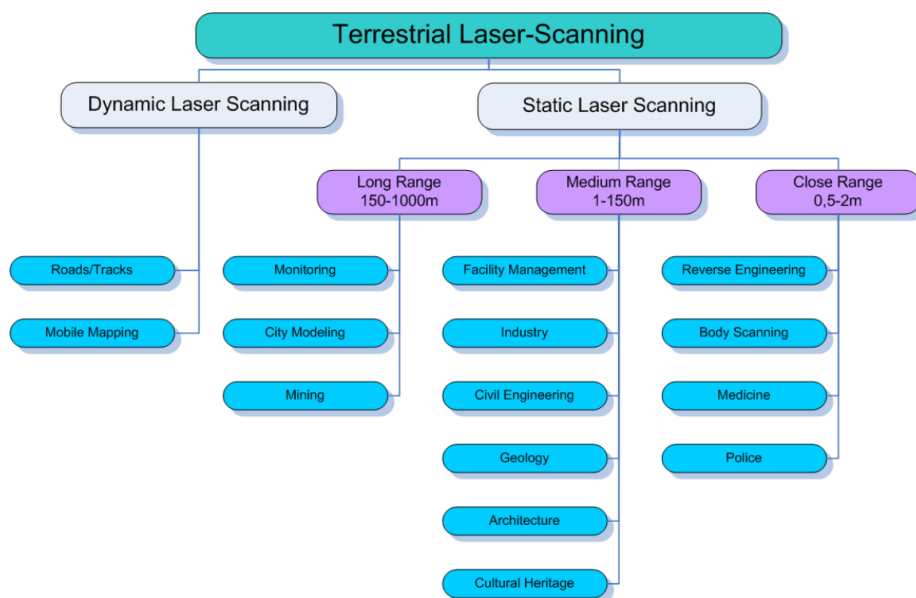
Om een plan van een lokaal coördinatensysteem te kunnen omzetten naar het Lambertcoördinatensysteem moeten er minstens drie punten ingemeten zijn met het GNSS-systeem. Het inmeten van deze punten is enkel mogelijk indien er voldoende satellieten zichtbaar zijn voor het GNSS-toestel. Dit is vooral een probleem in bosrijke gebieden, indoor, in dalen van bergachtige gebieden en in tunnels of mijnen. Sommige GNSS-toestellen zijn voor dergelijke situaties voorzien van een IMU, opgebouwd uit gyroscopen en versnellingsmeters, die ervoor zorgen dat in bepaalde gevallen bij het wegvallen van het GNSS-signaal een benaderende navigatie wordt brekend [20], [21].

## 2.9 Terrestrische laser scanning

In vorige paragraaf werd de evolutie van de landmeetkundige meetapparatuur besproken. In deze paragraaf wordt hier uitgebreid verder op in gegaan met de terrestrische laser scanning (TLS). TLS is een techniek waarbij er een afstand en rotatie tot een object of omgeving wordt opgemeten met laserlicht. Deze technologie wordt in het jargon ook wel Laser Imaging Detection and Ranging (LiDAR) genoemd [20], [22], [23].

Het grote verschil tussen vorige klassieke landmeetkundige meetapparatuur en TLS is de hoeveelheid data die wordt gegenereerd. Het aantal gemeten punten met een TLS varieert tussen de 50.000 en 2.000.000 punten per seconde met een relatief hoge nauwkeurigheid. De hoeveelheid gemeten punten is sterk afhankelijk van het type scanner, hierbij wordt er een onderscheid gemaakt tussen pulsscanners en fasescanners. De afstand en rotatie die bepaald wordt door de TLS ondergaat vervolgens een transformatie naar ruimtelijke coördinaten (X, Y, Z). Enkel de 3D-coördinaten worden vervolgens opgeslagen in het systeem. Voor een grote hoeveelheid 3D-meetpunten, die ook wel een puntenwolk worden genoemd, is er een breed toepassingsgebied weggelegd. TLS heeft niet alleen als voordeel dat er een enorme hoeveelheid data in de vorm van een puntenwolk ter beschikking wordt gesteld, maar ook dat deze data op een behoorlijk korte tijd kan verkregen worden [20], [23], [24].

TLS kan opgesplitst worden in twee categorieën, de statische- en dynamische laser scanningstechniek. Een duidelijk overzicht omtrent deze technieken wordt weergegeven in figuur 12. De statische laser scanning (SLS) is een techniek waarbij de scanner tijdens de opmeting op een vaste positie wordt gepositioneerd. Dynamische laser scanning (DLS) is een techniek waarbij de scanner op een mobile constructie wordt bevestigd en waarbij de positie van de scanner wijzigt tijdens de opmeting. [20], [23].



Figuur 12: Flowchart laser scanning [23]

### 2.9.1 Pulsscanners versus Fasescanners

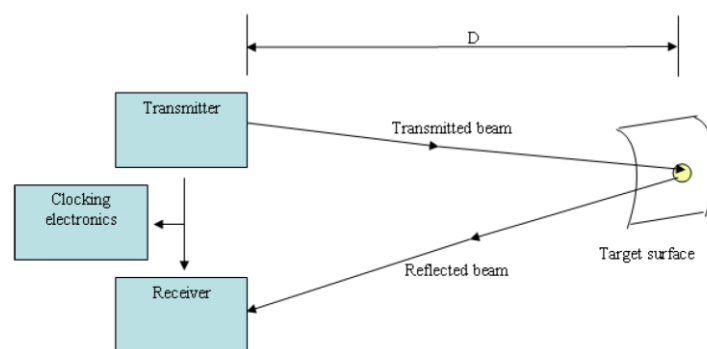
Pulsscanners en fasescanners zijn twee scantechnieken die op een fundamenteel verschillende manier functioneren. Het scanprincipe is echter wel gelijk, hierbij wordt er namelijk door middel van een uitgaande laserstraal en inkomende laserstraal bepaald op welke afstand een punt zich bevindt ten opzichte van het meettoestel [20], [23].

#### Pulsscanners

Het is geweten dat elektromagnetische stralen, waaronder laserstralen, zich voortplanten met een snelheid van 299.792.458 m/s doorheen een vacuüm. Bij Time of flight (TOF) laser scanners wordt het tijdsverschil gemeten tussen het tijdstip waarop de laserstraal bij de transmitter vertrekt, weerkaatst wordt door een oppervlak en vervolgens terug wordt opgevangen door de receiver van de scanner. De afstand waarop het gemeten punt zich bijgevolg bevindt kan bepaald worden met de volgende formule [23]:

$$D = \frac{c \cdot t}{2} \quad (11)$$

In deze vergelijking geeft D de afstand tot het gescande punt weer. De voortplantingssnelheid wordt weergegeven met de letter c, terwijl t de tijd is tussen het uitzenden en het ontvangen van de laserstraal (figuur 13). Op deze manier wordt punt voor punt de omgeving gescand. Aangezien de voortplantingssnelheid van de laserstraal aanzienlijk is, kunnen er met deze techniek 2.000 tot 1.000.000 punten per seconde ingemeten worden. Bijgevolg wordt er gebruikgemaakt van een zeer nauwkeurig klokmechanisme om meetresultaten te bekomen met een deviatie die beperkt kan worden tot 1 mm. Volgens [23] kan er zelfs gesteld worden dat de nauwkeurigheid van deze scantechniek afhankelijk is van het klokmechanisme en heeft de afstand tot het gemeten punt hier slechts een minimale invloed op.

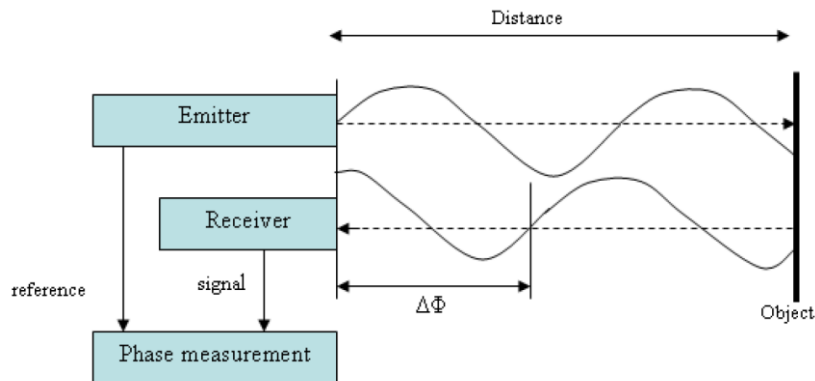


Figuur 13: Time of Flight Principe [23]

De GeoSLAM Horizon, die bij de testen werd gebruikt, functioneert volgens het TOF-principe. Een nauwkeurigheid van 1 mm is met deze scanner niet mogelijk omdat er nog andere factoren een significante invloed hebben op de nauwkeurigheid van de punten. De factoren met de grootste invloed zijn de relatieve positie van de scanner, bij het verzenden en het ontvangen van de puls, en de nauwkeurigheid van het klokmechanisme met bijhorende meetinstrumenten [12], [23], [25].

## Fasescanners

Fasescanners handelen op een geheel andere wijze dan Pulsscanners. Bij deze manier van scannen wordt het faseverschil gemeten tussen een uitgaande laserpuls en een binnenkomende reflectie van deze laserpuls. Hierbij wordt er dus geen tijdsverschil gemeten tussen in- en uitgaande pulsen waardoor er geen klokmechanisme gebruikt wordt. Figuur 14 geeft een schema weer van het werkingsprincipe van de Fasescanner [23].



Figuur 14 Principe Fasescanners [23]

Uit tabel 1 kan waargenomen worden dat de nauwkeurigheid van Fasescanners lager ligt dan van TOF-scanners. Het voordeel van Fasescanners is dat het aantal gemeten punten hoger is. Een overzicht tussen de twee meetprincipes bij statische laserscanners wordt weergegeven in tabel 1 [23], [26].

Tabel 1: Vergelijkende tabel meetprincipes scantechnieken [26]

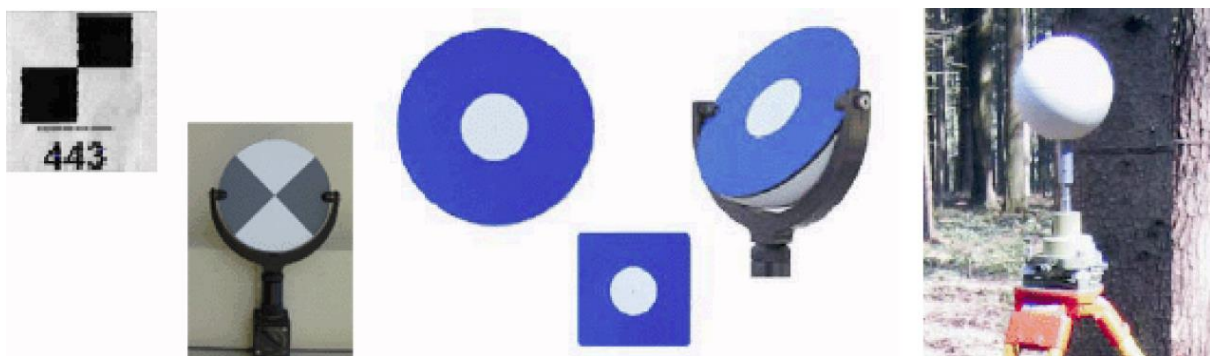
	<i>Time of Flight</i>	Faseverschuiving
Scansnelheid	10.000 - 300.000 punten/s	± 1 miljoen punten/s
Minimumafstand	1 - 5 m	0,3 - 0,5 m
Maximumafstand	300 - 6000 m	80 - 180 m
Nauwkeurigheid (lengte)	3 - 5 mm @50 m	2 - 3 mm @50 m
Nauwkeurigheid (hoek)	0,0002 - 0,01 °	0,001 - 0,007 °
Gewicht	10 - 20 kg	5 - 15 kg

## 2.9.2 Statische laser scanners

Zoals reeds aangehaald is de statische laser scanning (SLS) een techniek waarbij de scanner op een statief wordt bevestigd. Tijdens de scan verandert de locatie niet en wordt de omgeving gescand door de rotatie van het toestel. Met deze techniek kunnen objecten tot op zeer grote afstand (tot 6000 m bij bepaalde type scanners) worden ingemeten. Bij opstellingen waarbij de objecten zich relatief kort bij de scanner bevinden kan een puntenwolk bekomen worden tot op millimeterresolutie, een ideale toepassing voor renovatiedoeleinden. Belangrijk te vermelden is dat alleen de punten die zichtbaar zijn van op de locatie van de scanner worden opgenomen in de puntenwolk. Punten die niet zichtbaar zijn voor de scanner zullen bijgevolg niet zichtbaar zijn op de scan. Het is dus noodzakelijk om voor de opmeting een plan op te maken waar de scanner moet worden opgesteld en hoe de verschillende puntenwolken met elkaar gecombineerd kunnen worden [23], [26], [27].

Het opstellen van een opstellingsplan heeft verschillende voordelen. Het doel van dit opstellingsplan is om een maximale dekking en nauwkeurigheid te bekomen van de omgeving met een minimaal aantal opstellingen. Ten eerste wordt er met een opstelplan voorkomen dat niet alle vlakken of objecten worden opgemeten. Zoals het te dicht opstellen van de SLS tegen een gevel of wand aangezien niet alle raampartijen of daken zichtbaar zijn. Door de SLS verder van de gevel op de stellen zal het scanbereik aanzienlijk toenemen [23], [26], [27].

Vervolgens is het ook van belang om verschillende referentiepunten op de site te plaatsen om achteraf de verschillende puntenwolken eenvoudig met elkaar te kunnen samenvoegen. Om een volledige opmeting te bekomen van een grotere site zijn meerdere strategisch gekozen referentiepunten noodzakelijk. Belangrijk bij het plaatsen van de referentiepunten is om deze over een zo groot mogelijk gebied te verspreiden om de nauwkeurigheid van de meting te bevorderen. Deze referentiepunten kunnen reflecterende of bolvormige elementen zijn tot zelfs eenvoudige papieren referentiepunten zoals weergegeven op figuur 15 [23].



Figuur 15: Referentiepunten laser scanner [23]

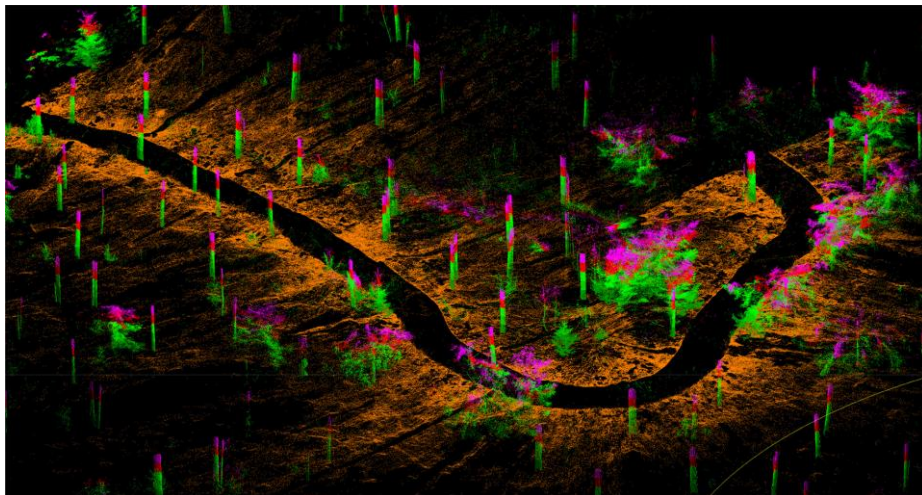
Tot slot belet een opstellingsplan de operator om meer scans uit te voeren dan noodzakelijk. Meer scans resulteert in een puntenwolk met een hogere dichtheid wat niet noodzakelijk wilt zeggen dat de opmeting van hogere kwaliteit is. De nauwkeurigheid verbetert slechts minimaal en de scan- en verwerkingstijd nemen bijgevolg ook sterk toe wat nefast is voor de kostprijs van de opmeting [23], [27], [28].

### 2.9.3 Dynamische laser scanning

Een dynamische laserscanner (DLS) is een mobile laserscanner (MLS) die de omgeving kan scannen terwijl de scanner in beweging is. In combinatie met GNSS beschikt DLS over de mogelijkheid om outdoor grote complexe gebieden op een zeer korte tijd behoorlijk nauwkeurig in kaart te brengen [23].

Veelal is het niet of slecht beperkt mogelijk om indoor de DLS te verbinden met het GNSS-systeem. Dit probleem werd opgelost door SLAM-algoritmes te implementeren waardoor scannen in een indoor gebied nog steeds mogelijk is. De SLAM-algoritmes zijn benaderende modellen waardoor de exacte positie van de scanner en omgeving niet bepaald kan worden. Sterker nog, de afwijking zal in functie van de afgelegde afstand toenemen. Een zeer nauwkeurige meting, zoals bij SLS, zal bij DLS niet mogelijk zijn aangezien deze dus werkt met benaderende algoritmes. Nauwkeurigheden van één tot drie centimeters zijn in functie van het afgelegde traject, wel mogelijk [23], [28].

Echter mag hieruit niet worden afgeleid dat de meer onnauwkeurige DLS een minder groot toepassingsgebied heeft dan de SLS. Voor bepaalde toepassingen zijn minder nauwkeurige scanners die breder toepasbaar zijn wel mogelijk. Doordat deze scanners in beweging zijn is het mogelijk om complexe gebieden, met elementen die het zichtveld van de scanner kunnen beperken, relatief snel (tot 5000 m<sup>2</sup> per uur) in kaart te brengen zoals is weergegeven in figuur 16 [12], [29], [30].





*Figuur 16: Puntenwolk scan bosrijk gebied [30]*

Gedurende dit onderzoek werd er gebruikgemaakt van een DLS die volgens het SLAM-principe functioneert. Vandaar wordt er in deze paragraaf niet dieper ingegaan op de eigenschappen en het toepassingsgebied van een DLS. Hiervoor wordt er doorverwezen naar paragraaf 2.9.4 en 2.9.5.

## 2.9.4 Vergelijking SLS en DLS

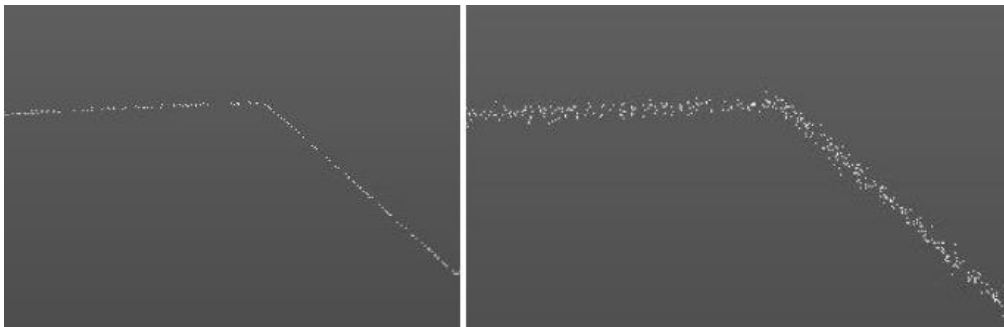
In deze paragraaf worden de twee types TLS met elkaar vergeleken. Dit onderzoek werd recent in 2019 uitgevoerd door J. Brouček aan de technische universiteit van Praag. Voor dit onderzoek werd de ZEB-REVO RT als DLS gebruikt, afkomstig van dezelfde fabrikant (GeoSLAM) als de ZEB Horizon, die in deze masterproef wordt gebruikt. Als SLS wordt er gebruikgemaakt van de FARO Focus M 70. De eigenschappen van beide scanners worden in tabel 2 weergegeven.

Tabel 2: Eigenschappen GeoSLAM ZEB-REVO RT en FARO Focus M70 [31], [32], [33]

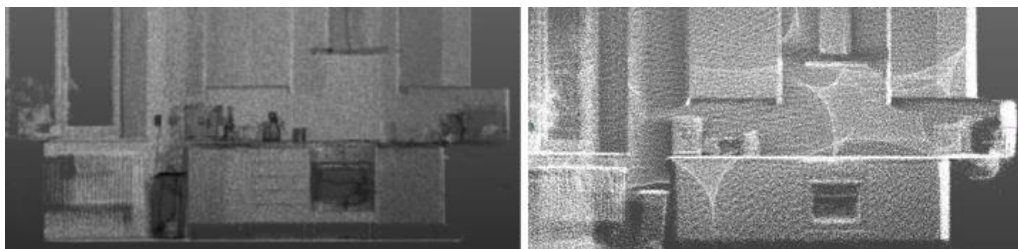
	 <p><i>Figuur 17: GeoSLAM ZEB-REVO RT [31]</i></p>	 <p><i>Figuur 18: FARO Focus M70 [31]</i></p>
Measurement speed (pts/sec):	43200	122000 / 244000 / 488000
Range:	30 m	0.6 – 70m
Ranging error:	±3 mm	±3mm
Field of view (vertical / horizontal):	270° / 360°	300° / 360°
Resolution:	0.625° horizontaal, 1.8° verticaal	0.009° (40,960 3D-Pixel bij 360°) / 0.009° (40,960 3D-Pixel bij 360°)
Scanner Line speed:	100 Hz	97H
Relative Accuracy	1 - 3cm	Niet gespecificeerd



Uit [31] blijkt dat er een significant verschil heerst tussen de accuraatheid van de DLS (GeoSLAM ZEB-REVO RT) en de SLS (FARO Focus M70). De puntenwolk van de DLS geeft een afwijking weer van 3 cm, terwijl de accuraatheid van de SLS beduidend lager ligt met slechts 3 mm. Dit is weergegeven in figuur 19 waarbij eenzelfde oppervlak met beide scanners werd opgemeten. Dit verschil in resolutie is ook zichtbaar in figuur 20 waarbij er een keuken werd gescand met de SLS en de DLS. De puntenwolk van de SLS is veel gedetailleerder dan deze van de DLS. Hierbij is het zelfs mogelijk om verschillende keukenapparaten van elkaar te onderscheiden. In de puntenwolk van de DLS zijn enkel de grove contouren van de verschillende oppervlakken zichtbaar. Hierbij is het moeilijker om de verschillende elementen in de keuken van elkaar te onderscheiden.



Figuur 19: Links scan met SLS en rechts scan met DLS [31]



Figuur 20: Verschil resolutie SLS (links) en DLS (rechts)

Een laatste belangrijk aspect heeft betrekking tot de verwerkingstijd van deze puntenwolken. Uit tabel 3 kan worden afgeleid dat voor eenzelfde configuratie zowel de scantijd als de verwerkingstijd van een dynamische laserscanner beduidend lager ligt dan de scan- en verwerkingstijd van de statische laserscanner. De nauwkeurigheid tussen beide scantypologieën is echter ook aanzienlijk.

Tabel 3: Vergelijkende tabel DLS en SLS [31]

	DLS	SLS
Scantijd (min.)	15	75
Verwerkingstijd (min.)	15	245
Nauwkeurigheid (mm)	10 - 30	1 - 3



Uit de vergelijking tussen SLS en DLS kan er geconcludeerd worden dat enerzijds de scantijd op locatie door de operator fors verminderd wordt door gebruik te maken van een DLS in plaats van een SLS. Daarnaast is de verwerkingstijd van de puntenwolken bij een DLS ook aanzienlijk lager. Dit resulteert in een meer tijds- en kostenefficiënte opmeting door gebruik te maken van een DLS [28], [31].

Alhoewel de verwerkingstijden van een DLS beduidend lager zijn, liggen de nauwkeurigheden van beide scanmethodes relatief ver uit elkaar. De nauwkeurigheid van de SLS (FARO focus M70) bedroeg in deze configuratie 1 tot 3 mm terwijl de nauwkeurigheid van de DLS (GeoSLAM ZEB-REVO RT) een factor 10 groter was met een nauwkeurigheid die lag tussen de 10 en 30 mm voor deze configuratie [31].

Het toepassingsgebied van deze twee verschillende scanmethodes is bijgevolg ook verschillend. Voor verschillende toepassingen zoals archivering van onroerend erfgoed, mijnen of bosrijke gebieden is een meting op millimeternauwkeurigheid minder aan de orde. Anderzijds kan dit voor andere toepassingen wel noodzakelijk zijn zoals bij specifieke renovatiedoelinden. Vandaar is het belangrijk om voor elke opdracht op voorhand de gewenste nauwkeurigheid overeen te komen om nadien voor een gepast meettoestel te opteren [24], [26], [31].

## 2.10 Toepassingen SLAM-scanners in de bouwkundige sector

In deze paragraaf wordt tot slot het toepassingsgebied van SLAM-scanners binnen de bouwkunde nader besproken. Meer specifiek de toepassingen van deze scanners voor, tijdens en na diverse bouwwerken. Vervolgens wordt de integratie met Building Information Model (BIM) aangehaald om tot slot de voor- en de nadelen van deze scanner toe te lichten.

De digitalisering binnen de bouwsector opent een brede waaier aan mogelijkheden voor 3D-scanners. Indien de nauwkeurigheid van SLAM-scanners voldoende wordt geacht kunnen deze scanners worden toegepast om enerzijds meer informatie van een omgeving te verkrijgen en om anderzijds geometrische eigenschappen van deze omgeving te vergelijken met bestaande documentatie.

Hierbij kunnen scanners de architect, aannemer en het studiebureau assisteren in drie fases binnen het bouwproces. Voor de werkzaamheden kan een SLAM-scanner met een relatief hoge resolutie zorgen voor extra documentatie zoals 2D en 3D plannen van de site. Tijdens de werken kan het bouwproces met scans gecontroleerd worden waardoor verschillende partijen op de werf een betere begeleiding verkrijgen. Na de bouwwerken kunnen scans ook nuttig zijn voor het opstellen van een as-built plan en het opvolgen van diverse bouwkundige elementen gedurende hun levensduur. Door sites in verschillende stadia tijdens het bouwproces met scanapparatuur te digitaliseren kan men vroegtijdig anticiperen op fouten die gemaakt zijn tijdens het bouwproces [23], [26].

Om vervolgens een betere samenwerking te garanderen en miscommunicatie tussen verschillende partners te vermijden kan er gebruikgemaakt worden van één overkoepelend BIM-model. In het werkveld wordt vervolgens al snel de term Scan-to-BIM in de mond genomen waarbij men zich voorstelt dat deze omzetting van een scan naar een BIM-model automatisch gebeurt. Dit is een absolute foute veronderstelling, de werkelijkheid is echter tegengesteld. Uit een puntenwolk van miljoenen punten kan de operator vlakken en objecten afleiden. Computerprogramma's bezitten deze vaardigheden voorlopig nog niet. Het is de taak van de operator of de ingenieur om deze meetdata te analyseren en te interpreteren [24], [26].

De operator, die deze niet-automatische verwerking van de puntenwolk uitvoert, botst in de praktijk vaak op verschillende hinderpalen. Om van een puntenwolk een BIM-model te genereren zijn verschillende al dan niet-commerciële computerprogramma's noodzakelijk. Deze programma's gebruiken veelal hun eigen bestandsformaat waardoor de compatibiliteit in het gedrang komt. Dit maakt het verwerkingsproces voor de operator enerzijds moeilijker maar anderzijds ook tijdrovender en duurder aangezien diverse computerprogramma's noodzakelijk zijn [26].

Het toepassingsgebied van SLAM-scanners binnen de bouwkunde spreidt zich ook verder uit tot het archiveren van cultureel erfgoed, mijnschachten en ruïnes waarbij een millimeterresolutie vaak niet aan de orde is. Verder is de nauwkeurigheid van SLAM-scanners ook vaak een deal-breaker zoals bij renovatiewerken het geval is. Hierbij kan er gedacht worden aan het rooveren van gevels van beschermd erfgoed of het restaureren van gewelven in grote religieuze gebouwen. In deze contexten wordt er eerder geopteerd voor meer nauwkeurige SLS [12], [23].

Er wordt verwacht dat innovatie binnen de landmeetkundige sector zich verder zal voortzetten in de ontwikkeling van nieuwe opmetingstechnieken en in de ontwikkeling van de huidige omslachtige computermodellen. Opmetingen met drones die gebruik maken met LiDAR scantechnologie worden aanzienlijk meer gebruikt zoals is weergegeven in figuur 12. Hierbij worden de scans gelinkt met targets om een puntenwolken te verkrijgen tot op GNSS-nauwkeurigheid. Het belang van BIM-modellen zal in de toekomst verder toenemen waardoor ouderwetse handmatige en tijdrovende verwerkingsprogramma's misstaan bij deze reeds veel verder geëvolueerde meettechnieken [26].



*Figuur 21: GeoSLAM Horizon in combinatie met een drone [12]*



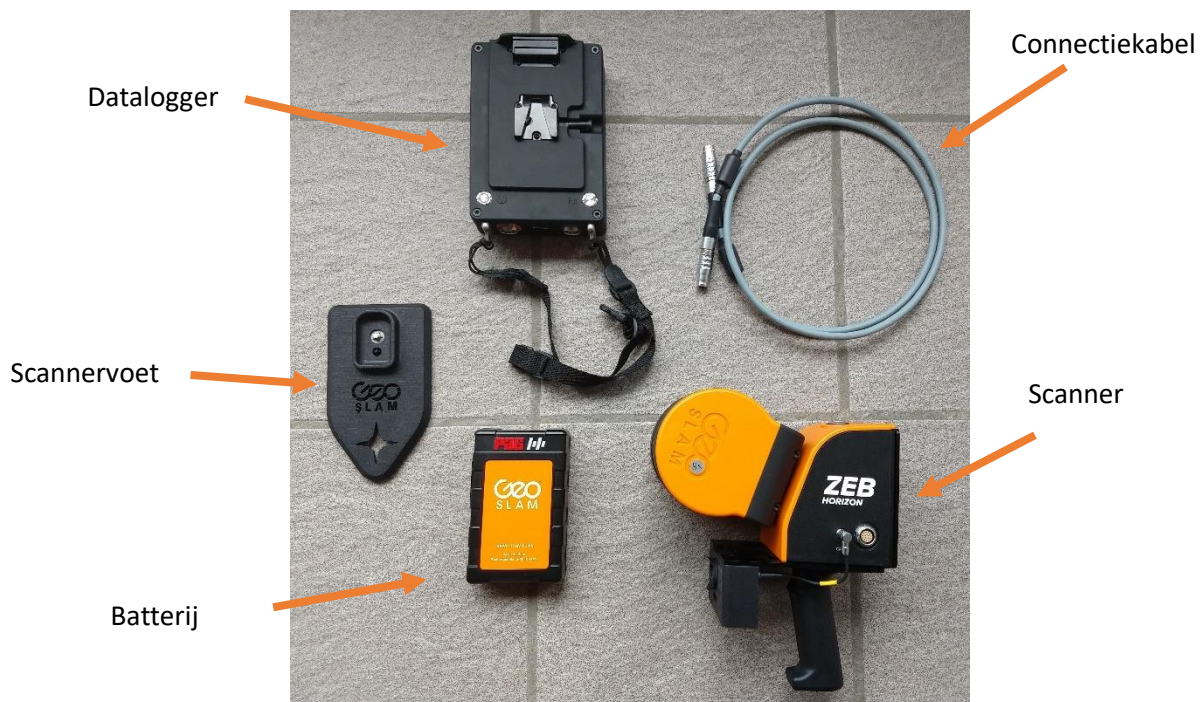
### 3 Materiaal en methode

#### 3.1 Materiaal

In deze paragraaf wordt eerst de opbouw van de scanner (GeoSLAM ZEB Horizon) besproken waarna er dieper wordt ingegaan op de eigenschappen van deze scanner. Nadien wordt de referentiemeting met het totaalstation (TOPCON Sokkia 3SRX) toegelicht. Tot slot wordt het testgebied van dit onderzoek besproken.

##### 3.1.1 Opbouw GeoSLAM ZEB Horizon

De GeoSLAM ZEB Horizon is opgebouwd uit vijf verschillende componenten die zijn weergegeven in figuur 22. Eerst wordt met een kliksysteem de batterij op de datalogger geplaatst. Daarna wordt de scannervoet met een bout bevestigd aan de scanner. Vervolgens wordt aan de datalogger de schouderband bevestigd zodat de datalogger tijdens het scannen op de schouder gedragen kan worden. Tot slot wordt de scanner bevestigd aan de datalogger met de connectiekabel.



Figuur 22: Opbouw GeoSLAM ZEB Horizon

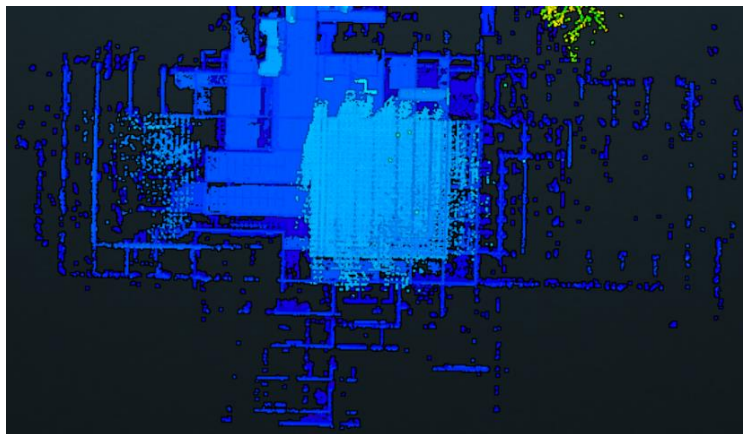
### 3.1.2 Eigenschappen GeoSLAM Horizon

Een goede scantechniek is essentieel voor een goede en nauwkeurige meting. Zoals aangegeven in paragraaf 2.9.2 is niet alleen de manier van uitvoering van een scan belangrijk maar ook het opstellen van een goed scanplan om betrouwbare resultaten te bekomen. De belangrijkste principes worden vervolgens toegelicht.

Het scanbereik van de GeoSLAM Horizon reikt tot 100 meter van het toestel. De densiteit en de nauwkeurigheid van de gegenereerde puntenwolk neemt echter wel af als de omgeving zich op een behoorlijke afstand van de scanner bevindt. Een relatief betrouwbare puntenwolk kan bekomen worden als de afstanden worden beperkt tot 40 meter. Anderzijds is het belangrijk bij het scannen van kleine ruimtes dat er een minimumafstand van 0,4 m wordt aangehouden [25].

Vervolgens is het noodzakelijk om de DLS zo stabiel mogelijk te houden gedurende het scantraject om een puntenwolk van mindere kwaliteit te voorkomen. Dit is een logisch gevolg aangezien de IMU de locatie van de scanner moeilijker kan bepalen.

Het scannen van een omgeving met veel bewegende objecten is nefast voor de nauwkeurigheid van de puntenwolk. Indien mogelijk worden deze scans best uitgevoerd met zo weinig mogelijk beweging in het scangebied. Vervolgens heeft de scanner ook moeilijkheden met reflecterende oppervlakken zoals weerspiegelende metalen oppervlakken, ramen en wateroppervlakken. De laserstralen worden door deze oppervlakken weerkaatst wat leidt tot een puntenwolk met veel ruis. De producent raadt aan om indien mogelijk deze oppervlakken te bedekken om dit ongunstig gevolg te vermijden. Dit verschijnsel is weergegeven in figuur 23 waarbij de weerkaatsing van de raampartijen duidelijk zichtbaar is [25].



*Figuur 23: Weerspiegeling weerkaatsende oppervlakken*

### 3.1.3 Referentiekader met totaalstation

De referentiemeting werd uitgevoerd met de Sokkia 3SRX van TOPCON (Figuur 24). Dit toestel heeft een hoeknauwkeurigheid van 1" en een afstandsnauwkeurigheid van 1 mm + 2 ppm volgens ISO17123-3 en ISO17123-4. Dit geeft een relatief nauwkeurige opmeting die geschikt is als referentiekader voor de testen met de SLAM-scanner. Voor het inmeten van de vaste punten werd er gebruikgemaakt van een mini-prisma [34].



*Figuur 24: TOPCON Sokkia 3SRX*

Tijdens de opmeting van de gang was het niet mogelijk om uit één opstelling de volledige gang op te meten. Vandaar werd het totaalstation op verschillende plaatsen opgesteld. Elke opstelling genereert een eigen relatief assenstelsel. Vervolgens werden de verschillende relatieve assenstelsels van de verschillende opstellingen samengevoegd in één globaal assenstelsel. Dit werd gedaan door gebruik te maken van de Helmer-transformatie in het verwerkingsprogramma Pythagoras.

Deze transformatie is enkel mogelijk indien er bij elke opstelling 3 vaste punten worden ingemeten. Door deze transformatie wordt een opmeting in één assenstelsel bekomen. Deze vaste punten zijn weergegeven in figuur 26 met een rood bolletje. Echter is het wel aangewezen om meer dan drie vaste punten in te meten per opstelling mocht er één vast punt een afwijking vertonen. Bij deze samenvoeging in één assenstelsel werden als het ware de verschillende opstellingen opgehangen aan de vaste punten. Vandaar is het belangrijk om vanop elke standplaats minstens drie of meer al gemeten vaste punten te kunnen inmeten om de gemeten punten vervolgens bij het samenstellen van het plan te kunnen samenvoegen.

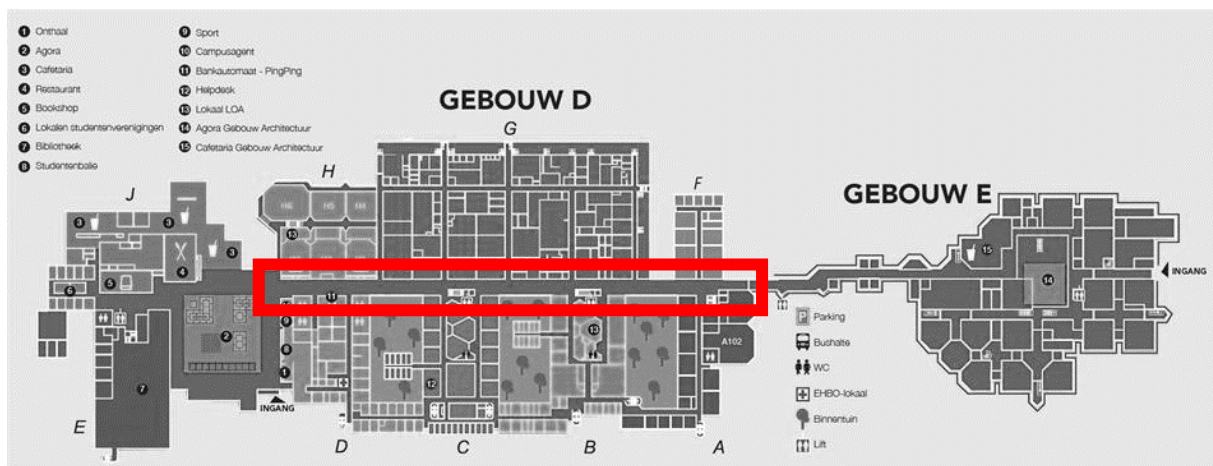


### 3.1.4 Testgebied

Voor de bepaling van het drifteffect van de GeoSLAM Horizon werd een geschikt testgebied gezocht. Uit de literatuurstudie bleek dat de grootste drift zal optreden in een langwerpige monotone omgeving. Mogelijke testgebieden zijn bijgevolg: tunnels, autosnelwegen, ondergrondse mijnen, maar ook gangen en schoorstenen.

Daarnaast moest dit testgebied een aanzienlijke lengte en een beperkte breedte hebben waarbij de omgevingsinvloeden, zoals dynamische objecten, gering zijn. Daarenboven moest het ook een veilige omgeving zijn voor de operator om de testen te kunnen uitvoeren. De configuratie die het best aan deze voorwaarde voldeed zijn grote lange gangen in openbare gebouwen.

Na het onderzoeken van verschillende geschikte gangen werd er geopteerd om de testen uit te voeren op de site van de Universiteit Hasselt. Meer bepaald in het hoofdgebouw (gebouw D) op de campus te Diepenbeek. In dit langwerpig gebouw bevindt zich een gang van 193 m lang en 5 tot 6,5 m breed. Deze gang verbindt de cafetaria en de campus architectuur (gebouw E) met elkaar. Figuur 25 geeft een grondplan weer van de gang in dit gebouw.

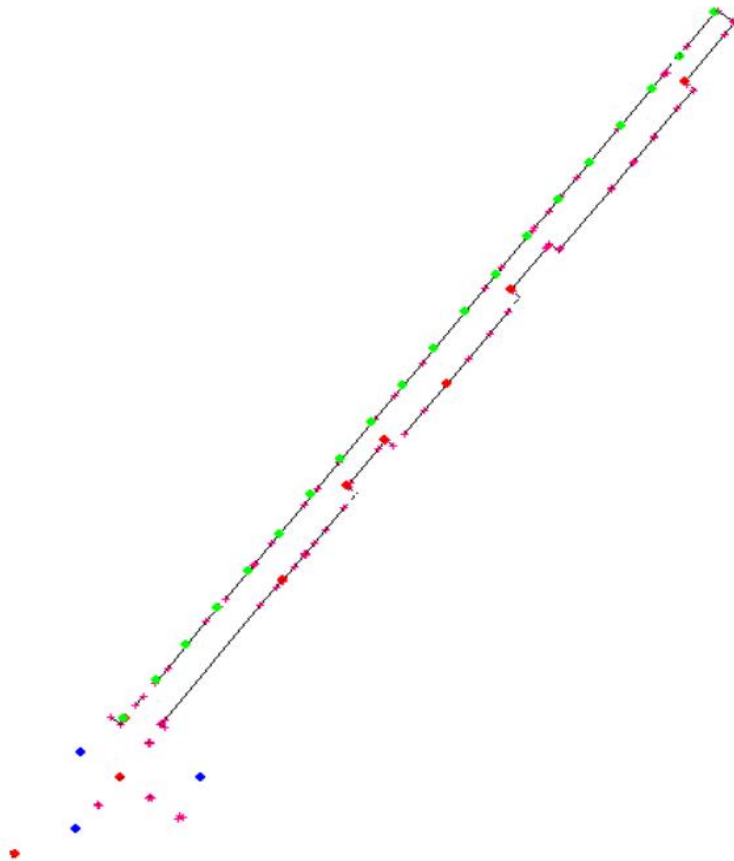


Figuur 25: Gang gebouw D Universiteit Hasselt [35]

De scans werden 's avonds uitgevoerd, meer bepaald van 20u tot 22u, om nadelige invloeden van passanten in deze gang te minimaliseren. Deze gang heeft verder ook relatief goede monotone eigenschappen wat deze omgeving een goed testgebied maakt.

## 3.2 Methode

De methode om het drifteffect te bepalen en te reduceren werd uitgevoerd door gebruik te maken van verschillende configuraties. Dit wordt verder toegelicht in paragraaf 3.2.1. Hierbij werden de scans van de GeoSLAM Horizon vergeleken met de referentiemeting die werd uitgevoerd met het totaalstation. De referentiemeting met het totaalstation wordt weergegeven in figuur 26.



*Figuur 26: Referentiemeting totaalstation*

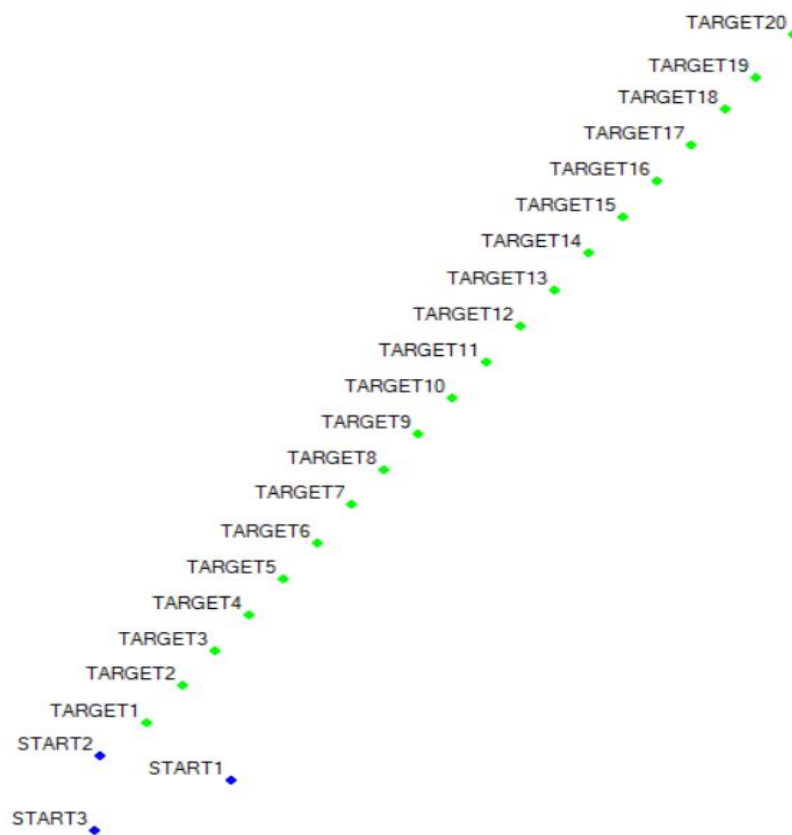
In figuur 26 wordt een uittreksel weergegeven van de referentiemeting die werd bekomen door de verschillende opstellingen met het totaalstation samen te voegen in Pythagoras. In deze figuur zijn verschillende kleuren en vormen van punten en lijntypes weergegeven, met elk hun specifieke betekenis.

Tijdens de opmeting werd er aan elk punt een code meegegeven. Met deze code is het nadien mogelijk om de verschillende gemeten punten te identificeren en de opmeting te kunnen reconstrueren. De roze kruisjes op bovenstaande figuur geven de gemeten 2D punten weer van de contouren van de gang. Door deze punten in Pythagoras in de laag 2D\_Gemeten\_punten te zetten was het mogelijk om het profiel van de gang te bekomen. De ronde rode punten op figuur 26 geven de vaste punten weer. Zoals reeds aangehaald in de vorige paragraaf werden deze gebruikt om de verschillende opstellingen van het totaalstation aan elkaar te kunnen koppelen.



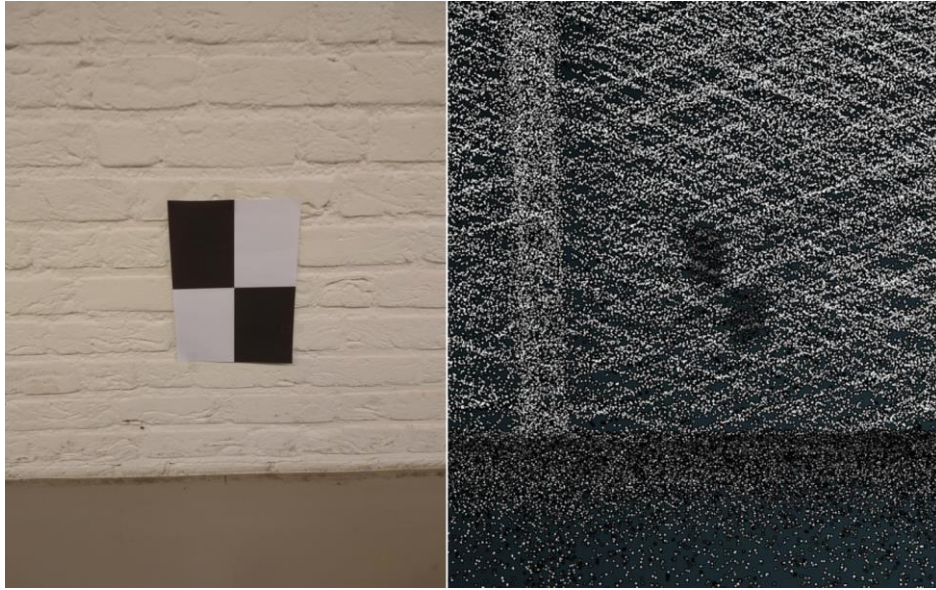
Op figuur 26 en 27 zijn ook drie ronde blauwe punten zichtbaar. Deze punten geven de startpunten weer en hebben de code START meegekregen. Zowel de scans als de referentiemeting bevinden zich in hun eigen relatieve assenstelsel. Om de scans en de referentiemeting met elkaar te kunnen vergelijken moeten beide metingen in éénzelfde assenstelsel worden weergegeven.

Het samenvoegen van de verschillende assenstelsels in één assenstelsel is mogelijk door gebruik te maken van 3 startpunten die zowel door het totaalstation als de scanner werden ingemeten. Het inmeten met het totaalstation gebeurde op een analoge manier zoals voor de overige punten. Meer bepaald door het miniprisma tegen deze startpunten te houden en deze vervolgens in te meten met het toestel. Het inmeten van de startpunten met de GeoSLAM Horizon gebeurde op een geheel andere manier. Eerst werd het toestel op zijn vast startpunt, tussen de drie startpunten, opgestart en vervolgens werden de startpunten ingemeten door de scanner 10 seconden met zijn scannervoet exact tegen deze startpunten te houden. In deze scannervoet is een inkeping voorzien om dergelijke startpunten of referentiepunten in te meten. Deze inkeping in de scannervoet is ook weergegeven in figuur 22.



Figuur 27: Startpunten en targets

Om tot slot de twee metingen met elkaar te vergelijken, die zich nu in eenzelfde assenstelsel bevinden, werden er om de 10 m en op 40 cm van de grond, aan de linkerzijde van de gang targets opgehangen. Hierdoor kan de drift tussen de scans en de referentiemeting om de 10 m bepaald worden. De targets moeten niet zoals de startpunten worden ingemeten als referentiepoint aangezien deze targets zichtbaar zijn in de puntenwolk. Hierbij dient de puntenwolk bij de nabewerking te worden ingesteld op intensiteit. Figuur 27 geeft aan de linkerzijde de werkelijke targets weer. Aan de rechterzijde wordt het target uit de puntenwolk weergegeven.

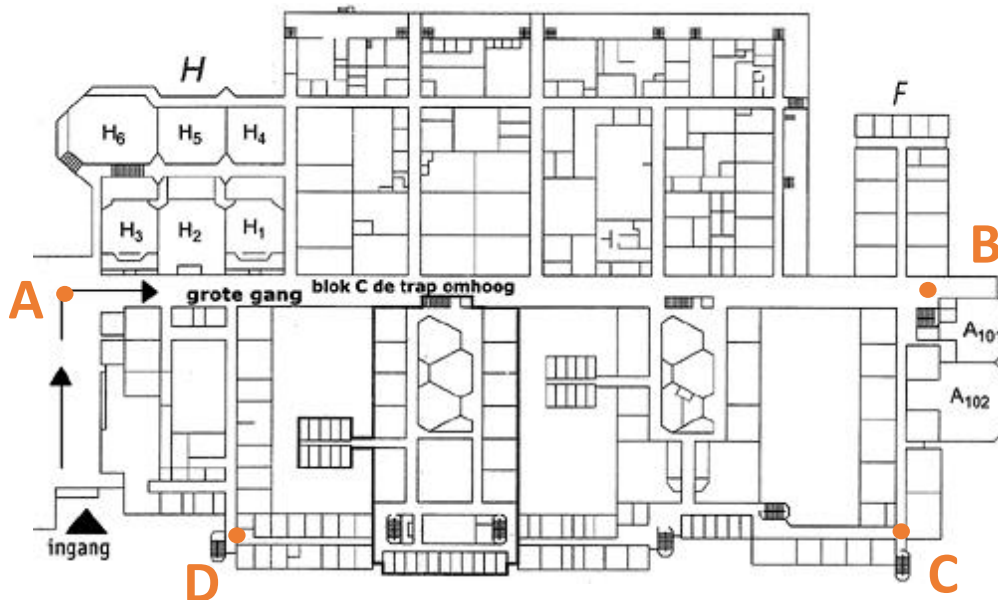


*Figuur 28: Targets in werkelijkheid (links) en in de puntenwolk (rechts)*

Vervolgens werden de puntenwolken ingeladen in GeoHUB. Elke puntenwolk moet eerst in deze software worden geïmporteerd om deze vervolgens te kunnen bewerken. Het verwerken van puntenwolken vond plaats in Terrasolid. In deze software werd het middelpunt van elk target, dat is weergegeven aan de rechter kant van figuur 28, aangeduid met een cirkel. Als deze targets zijn aangeduid werden deze aanpassingen in de puntenwolk opgeslagen in een DWG-file. Daarna was het mogelijk om beide metingen in eenzelfde assenstelsel te importeren in AutoCAD 2022. Tot slot werden de twee verschillende 3D-coördinaten van elk target, respectievelijk de referentiemeting en de scan, geëxporteerd naar Excel om hier de drift waar te nemen tussen de werkelijke locatie van het target en de gescande locatie van het target.

### 3.2.1 Testconfiguraties

Om de optredende drift te bepalen in functie van de gescande afstand werden er verschillende configuraties uitgevoerd. Deze configuraties worden toegelicht door middel van figuur 29.



Figuur 29: Configuratie testen

De scans die werden uitgevoerd om het drifteffect te bepalen voor de verschillende configuraties startte op punt A. Op dit punt werd een markering aangebracht om geen invloed te ondervinden op de metingen door op een andere locatie te starten. Het inmeten van de startpunten, die zijn weergegeven in figuur 27, vonden ook altijd in eenzelfde volgorde plaats om eventuele afwijkingen te voorkomen.

De uitgevoerde configuraties zijn:

- Einde stop (ES), waarbij de scan werd gestart in punt A en gestopt in punt B nabij de schuifdeuren van de afdeling Architectuur (Blok E).
- Gang op af (GOA), hierbij startte de scan in punt A. Vervolgens werd er naar punt B gewandeld om nadien weer in punt A de scan te beëindigen.
- Loop closure kleine gang (LC KG), is een configuratie waarbij het traject van punt B naar punt A wordt afgelegd via punten C en D. Vervolgens werden er binnen deze configuratie de invloeden van loop closures toegepast. Respectievelijk:
  - LC KG + 1, waarbij er nabij de eerste trappenkoker een loop closure werd toegepast;
  - LC KG + 2, met een tweede loop closure nabij de tweede trappenkoker;
  - LC KG + 3, hierbij werd er tot slot nog een derde en laatste loop closure toegepast aan de andere zijde van de gang in de zijgangen van het testgebied;
- LC KG + F, in deze laatste configuratie werden er in de gang om de 20 m extra elementen geplaatst.

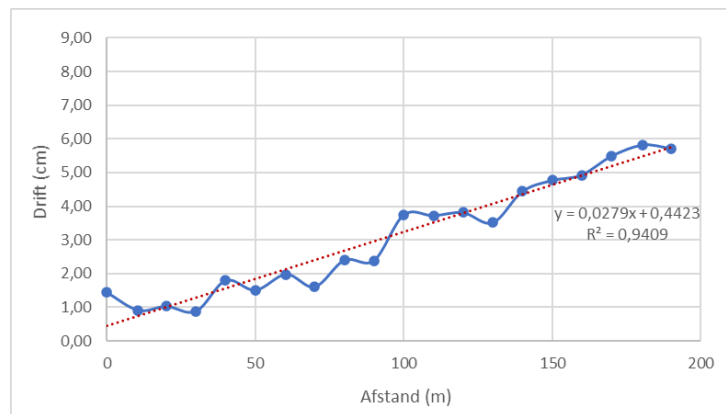
## 4 Resultaten

In deze paragraaf worden de resultaten van de verschillende configuraties besproken. De gemiddelde optredende drift van elke configuratie in respectievelijk de horizontale en verticale richting wordt opgenomen in Bijlage A.

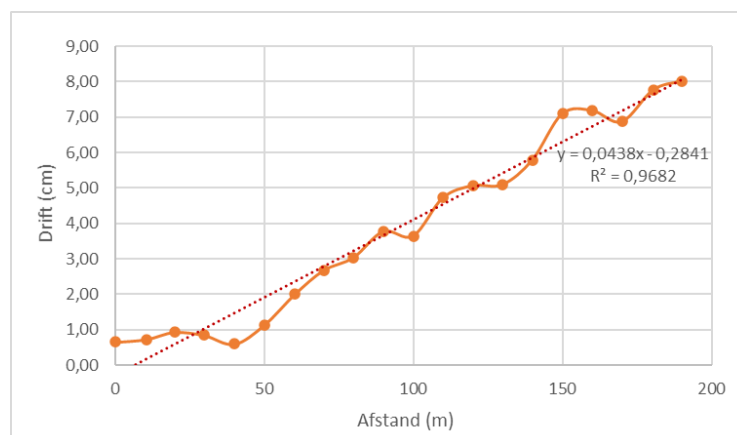
De hoofdonderzoeksvraag van deze masterproef heeft betrekking tot het onderzoeken van de hoeveelheid drift in functie van de gescande afstand. Vervolgens wordt er toegelicht hoe het drifteffect kan worden gereduceerd en hoeveel deze reductie bedraagt bij elke configuratie.

### 4.1 Wiskundig verband

Het wiskundig verband van de optredende drift in functie van de afstand wordt bepaald met de configuratie ES. In deze configuratie werd er geen loop closure uitgevoerd waardoor het drifteffect hier niet door belemmerd wordt. Figuur 30 geeft de drift weer die horizontaal optreedt en figuur 31 geeft de drift weer die verticaal optreedt.



Figuur 30: Drift horizontaal (ES)

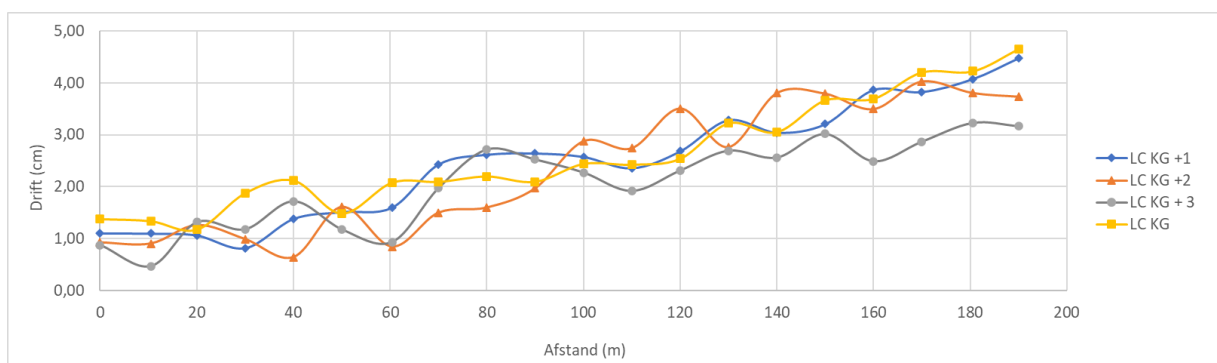


Figuur 31: Drift verticaal (ES)

De trendlijn van figuur 30 en 31 geeft een lineair verband weer. De determinatiecoëfficiënt van deze trendlijnen bedragen respectievelijk 0,9409 voor de horizontale drift en 0,9682 voor de verticale drift. Uit deze uiterst hoge waarde van de determinatiecoëfficiënt kan worden afgeleid dat de drift in horizontale en verticale richting lineair optreedt. Hierbij dient opgemerkt te worden dat de drift niet uit de oorsprong start. Er is al een bepaalde afwijking bij aanvang van de scans aanwezig. Het is namelijk onmogelijk, zoals uit de literatuurstudie blijkt, om een punt met absolute zekerheid te bepalen. Nadien treedt er een lineair verloop op. Verder geven deze figuren weer dat de drift in de verticale richting sterker toeneemt dan in de horizontale richting. Het drifteffect in het verticaal vlak bedraagt 40,0% meer dan de optredende drift in het horizontale vlak.

## 4.2 Loop closures

In deze configuratie wordt er onderzocht wat de invloed is van loop closures op de drift. De invloed van deze loop closures wordt onderzocht door middel van vier subcategorieën. Aangezien het testgebied niet toeliet om loop closures in het verticaal vlak toe te passen, wordt enkel de invloed op het horizontaal vlak geanalyseerd. Figuur 32 geeft de drift in het horizontaal vlak voor de verschillende subcategorieën.



Figuur 32: Drift horizontaal LC-configuratie

In tabel 4 wordt weergegeven hoeveel percent van het traject dubbel wordt gescand door middel van de loop closures.

Tabel 4: Overlap per configuratie

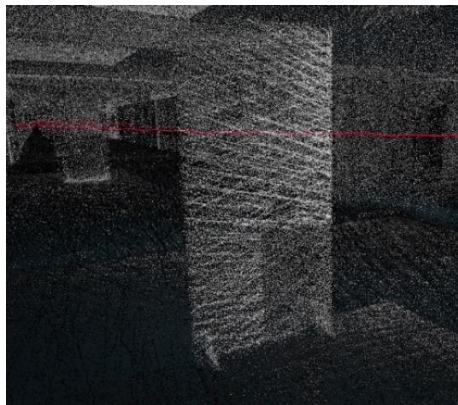
Configuratie	Lengte gang	Overlap	
		Lengte	Procent
LC KG	193 m	0 m	0,0%
LC KG + 1	193 m	18 m	9,3%
LC KG + 2	193 m	36 m	18,7%
LC KG + 3	193 m	60 m	31,1%

Uit figuur 32 en tabel 4 kan enerzijds worden waargenomen dat de reductie van het drifteffect tussen LC KG en de configuraties LC KG + 1 en LC KG + 2, waarbij de overlap 9,3% en 18,7% bedraagt, respectievelijk 4,3% en 7,1% zijn. De invloed van de overlap van deze configuratie is dus beperkt

waarneembaar in de reductie van de drift. Anderzijds bij LC KG + 3 waarbij er een overlap is van 31,1% is de hoeveelheid drift gereduceerd met 32,3% ten opzichte van LC KG.

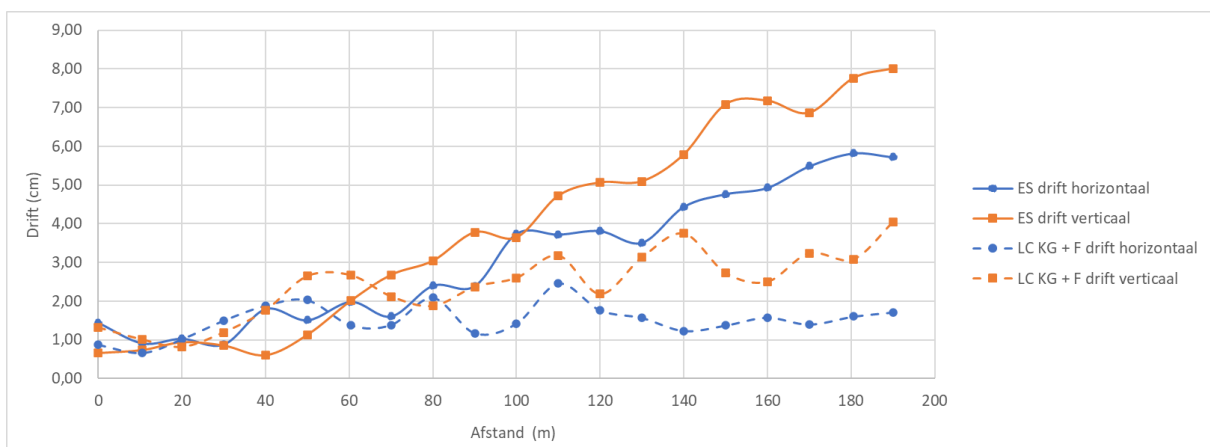
### 4.3 Features

In deze laatste configuratie wordt de invloed van features op het drifteffect onderzocht. Hiervoor werden er borden van één meter breed en twee meter hoog om de 20 meter in de gang geplaatst. Figuur 33 geeft een voorbeeld van een bord dat zichtbaar is in de puntenwolk. De rode lijn geeft in deze figuur het traject van de scanner weer.



Figuur 33: Bord uit puntenwolk

Figuur 34 geeft de resultaten van deze configuratie weer. Hierbij worden als referentie de resultaten van de configuratie ES aan toegevoegd.



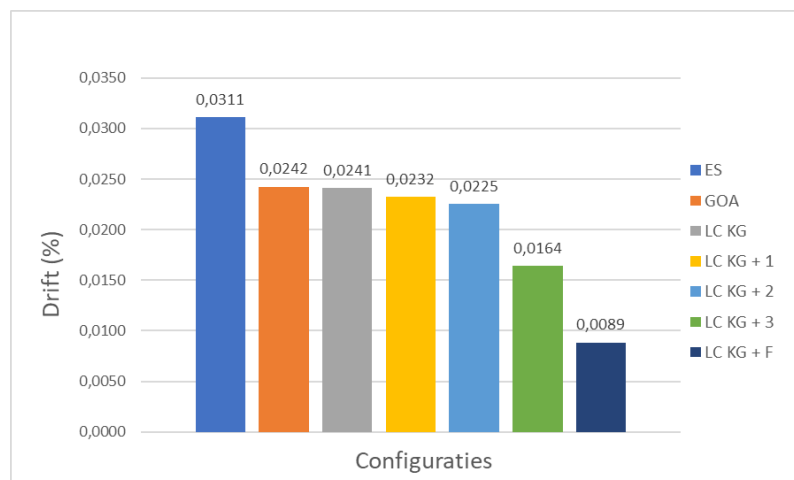
Figuur 34: LC KG + F ten opzichte van ES

Figuur 34 geeft een significant verschil weer tussen ES en LC KG + F. De hoeveelheid drift kan in het horizontale vlak worden gereduceerd met 70,1% ten opzichte van configuratie ES. Ook de drift die

verticaal optreedt kan worden gereduceerd met 50,5%. Tot slot kan er ook worden waargenomen dat het drifteffect in het verticaal vlak significanter toeneemt dan de drift in het horizontale vlak. Meer specifiek is het drifteffect in het horizontaal vlak bij de configuratie LC KG + F slechts 57,7% van de drift in het verticaal vlak.

#### 4.4 Overzicht toegepaste configuraties

Een duidelijk overzicht van de procentuele optredende drift van elke configuratie wordt weergegeven in figuur 35.



Figuur 35: Drift per configuratie

Figuur 35 geeft duidelijk weer dat de optredende drift procentueel het grootst is bij ES en het kleinst is bij LC KG + F. De drift bij configuratie LC KG + 3 is ook aanzienlijk minder dan bij configuraties GOA, LC KG, LC KG + 1 en LC KG + 2. Deze configuraties zijn relatief gelijklopend en bevinden zich eerder op een plateau.

De eerste configuratie (ES) is de configuratie waarbij de drift beduidend meer toeneemt. In vergelijking met configuratie GOA, waarbij het begin- en eindpunt eenzelfde punt vormen, resulteert dit in een toename van de drift met 28,2%. Dit is weergegeven in tabel 5.

Vervolgens geeft figuur 35 weer dat er slechts een verschil waarneembaar is tussen GOA en LC KG van 0,6%. De drift treedt in beide configuraties nagenoeg even snel op. Voor de scanner is er dus duidelijk geen verschil als het traject, dat terug naar het beginpunt gaat, al dan niet door een reeds bekende of onbekende omgeving wordt afgelegd. Beide configuraties resulteren in een gelijklopende hoeveelheid drift.

Verder wordt de invloed van loop closures geanalyseerd. De invloed van één loop closure, met overlap van 9,3% van de lengte van de gang, is gering. Deze overlap resulteert slechts in een reductie van de drift van 4,3%. Ook de invloed van een tweede bijkomende loop closure heeft een beperkte invloed op een bijkomende reductie van de hoeveelheid drift, met een vermindering van respectievelijk 7,1% t.o.v. GOA. Hierbij wordt er een overlap gerealiseerd van 18,7%. Een duidelijk gunstig effect op de

optredende drift is zichtbaar bij configuratie LC KG + 3. In deze sub configuratie kan een betekenisvolle reductie van 32,3% behaald worden. Hierbij bedraagt de overlap 31,1%.

Tabel 5: Vergelijkende tabel t.o.v. GOA

Configuratie	Overlap	Drift
ES		+28,2%
GOA		
LC KG	0,0%	-0,6%
LC KG + 1	9,3%	-4,3%
LC KG + 2	18,7%	-7,1%
LC KG + 3	31,1%	-32,3%
LC KG + F		-63,5%

Tot slot wordt de meest gunstige configuratie (LC KG + F) aangehaald. De invloed van de bijkomende features hebben een zeer grote impact op het drifteffect. De drift neemt in deze configuratie slechts toe met 0,0089%. In vergelijking met de configuratie GOA kan met deze methode een reductie van het drifteffect met maar liefst 63,5% worden behaald.





## 5 Conclusie

In deze thesis wordt het drifteffect onderzocht dat optreedt bij SLAM-scanners in een zeer ongunstige omgeving. Het opzet van dit onderzoek was enerzijds om meer inzicht te krijgen in het fenomeen drift en hoe deze drift accumuleert in een relatief lange gang. Het bepalen van het wiskundig verband tussen de drift en het gescande traject is hierbij het hoofddoel. Anderzijds wordt er onderzocht wat de invloeden zijn van belangrijke parameters zoals de loop closures en features op de reductie van de drift en hoeveel deze bedragen. In de literatuurstudie wordt het ontstaan van het drift fenomeen toegelicht samen met de verschillen tussen SLS en DLS. Tot slot werd er met een open visie gekeken naar het toepassingsgebied van SLAM-scanners in de bouwsector.

### 5.1 Het drifteffect bij SLAM-scanners

Het wiskundig verband tussen de drift en de gescande afstand wordt bepaald met de configuratie ES. Bij deze configuratie zijn er geen loop closures toegepast waardoor het drifteffect hier niet door wordt belemmerd. Uit de relatief grote waarde van de determinatiecoëfficiënt van deze trendlijnen in het horizontaal en verticaal vlak kan geconcludeerd worden dat het drifteffect in beide richtingen lineair optreedt.

Om de invloed van loop closures en de samenhangende overlap te bepalen werd er gebruikgemaakt van verschillende subcategorieën met elk een verschillend percentage overlap. Hieruit kan worden geconcludeerd dat er geen noemenswaardig verschil waarneembaar is tussen GOA en LC KG. De drift treedt in beide configuraties nagenoeg even snel op. Voor de scanner is er dus duidelijk geen verschil als het traject door een reeds bekende of onbekende omgeving wordt gesloten. De reductie van het drifteffect tussen GOA en de configuraties LC KG + 1 en LC KG + 2, waarbij de overlap respectievelijk 9,3% en 18,7% bedraagt, is ook beperkt met 4,3% en 7,1%. Bij LC KG + 3 is er wel een significante reductie van het drifteffect zichtbaar. Door een overlap van 31,1% te voorzien kan de hoeveelheid drift gereduceerd worden met 32,3% ten opzichte van GOA.

De meest veelbelovende configuratie is LC KG + F. De invloed van de bijkomende features heeft een zeer gunstige impact op het reduceren van het drifteffect. De accumulerende drift in deze configuratie is slechts 0,0089%. In vergelijking met configuratie GOA kan deze methode leiden tot een reductie van het drifteffect met maar liefst 63,5%. In een volgend onderzoek kan deze meest gunstige configuratie verder worden benaderd door hierbij de tussenafstand van de panelen en de afmetingen van deze panelen te laten variëren.

### 5.2 Toepassingsgebied SLAM-scanners

Statische en dynamische scanners gaan in een sterk evoluerende bouwkundige sector alleen maar aan belang toenemen. SLAM-scanners bieden hierin de mogelijkheid om snel en relatief nauwkeurig een schat aan data te verkrijgen die in elke fase van het bouwproces zijn nut kan bewijzen. Kenmerkend hieraan is dat de scantechnologie al in een verder stadium is ontwikkeld dan de software die nodig is om deze data te verwerken. Nauwkeurigheden tot op millimeterniveau zijn met de benaderde SLAM-technologie niet mogelijk.

Hieruit blijkt dat het toepassingsgebied van SLAM-scanners zich meer toespitst op projecten waarbij relatief grote sites relatief snel tot op centimeternauwkeurigheid in kaart gebracht moeten worden, zoals bij bepaalde renovatiewerken en BIM-modellen. Alvorens komt de taak van de operator en de ingenieur naar voren om de nauwkeurigheid van de SLAM-scanner voor elke specifieke opdracht te kunnen inschatten om vervolgens aan de gewenste nauwkeurigheid te voldoen.

Tot slot zullen verdere ontwikkelingen in dit digitale tijdperk leiden tot een sterke doorontwikkeling van DLS, waardoor deze technologie een steeds belangrijkere plaats zal innemen in de bouwsector. De handmatige en tijdrovende bewerking van de data misstaat momenteel nog naast een reeds veel verder geëvolueerde scantechnologie. Wie weet leiden de integraties van toekomstige tools dan toch voor een volledig autonome Scan-to-BIM-conversie?

## Bibliografie

- [1] Teccon, „Teccon landmeters-experten,” Teccon, 2019. [Online]. Available: <https://teccon.be>. [Geopend 10 oktober 2021].
- [2] A. Kukkoab, „Graph SLAM correction for single scanner MLS forest data under boreal forest canopy,” *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 132, p. 20, 2017.
- [3] S. Higgins, „NavVis,” NavVis, 21 januari 2020. [Online]. Available: <https://www.navvis.com/blog/how-slam-affects-the-accuracy-of-your-scan-and-how-to-improve-it>. [Geopend 10 oktober 2021].
- [4] A. Spanò en G. Sammartano, „Point clouds by SLAM-based mobile mapping systems,” *Applied Geomatics*, p. 23, 2018.
- [5] S. Bazeille, „Loop Closure Detection,” ENISTA ParisTech université, 2004. [Online]. Available: <http://cogrob.ensta-paris.fr/loopclosure.html>. [Geopend 28 Oktober 2021].
- [6] H. Taheri en Z. Chum Xia, „SLAM; definition and evolution,” Engineering Applications of Artificial Intelligence, Computer Science and Engineering department, Nanjing University of Science and Technology, China, 2020.
- [7] C. Stachniss, „SLAM Course,” AIS, University of Freiburg, 2013.
- [8] S. Thrun, W. Burgard en D. Fox, Probabilistic robotics [cursus], Freiburg: University of Freiburg, 2000.
- [9] N. Correll, Introduction to autonomous robots, Boulder: University of Colorado, 2016.
- [10] G. Grisetti, R. Kümmerle, C. Stachniss en W. Burgard, „A Tutorial on Graph-Based SLAM,” *IEEE Intelligent transportation systems magazine*, nr. 31, p. 13, 4 februari 2011.
- [11] H. Durrant-Whyte en T. Bailey, „Simultaneous Localization and Mapping: Part 1,” *IEEE Robotics & Automation Magazine*, vol. I, nr. 1, pp. 99-108, 2006.
- [12] GeoSLAM, „GeoSLAM,” 1 januari 2021. [Online]. Available: <https://geoslam.com/solutions/zeb-horizon/>. [Geopend 15 oktober 2021].
- [13] E. Demeester, „Autonomous mobile robots,” Gezamenlijke opleiding Industriële Ingenieurswetenschappen UHasselt & KU Leuven, Diepenbeek, 2021.
- [14] E. Todt, „Mobile Robotics,” Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brazilië, 2019.
- [15] E. Demeester, Interview, *Toelichting principes SLAM*. [Interview]. 21 oktober 2021.
- [16] J. Lievens en G. Vanroelen, Theoriecursus Kansrekenen en statistiek, Xod Diepenbeek: Gemeenschappelijke opleiding industriële ingenieurwetenschappen UHasselt en KULEuven, 2020.
- [17] R. Van Hooijdonck, „Met sensorfusie en andere next-gen tech kunnen autonome voertuigen straks in alle weersomstandigheden rijden,” Richard van Hooijdock, 4 maart 2019. [Online]. Available: <https://blog.richardvanhooijdonk.com/nl/met-sensorfusie-en-andere-next-gen-tech->

kunnen-autonome-voertuigen-straks-in-alle-weersomstandigheden-rijden/. [Geopend 22 oktober 2021].

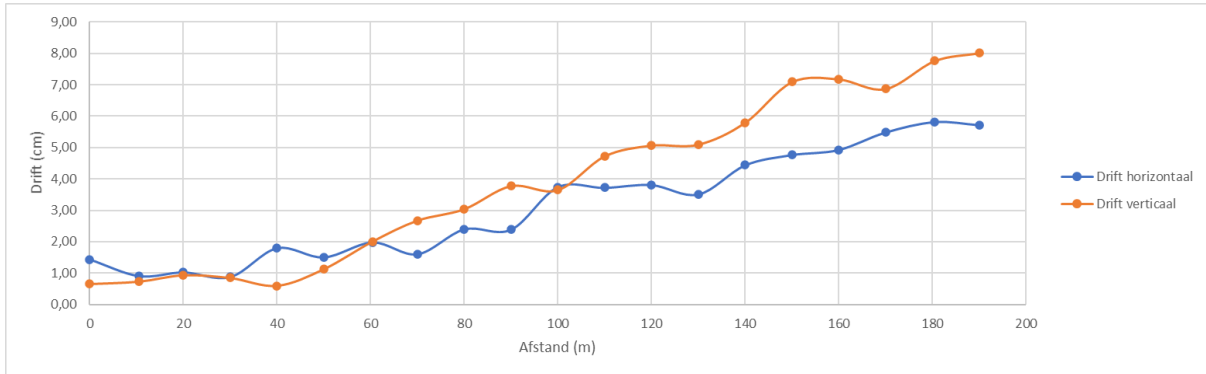
- [18] D. Van Hamme, „Imec Artikelen,” Imec, 10 mei 2019. [Online]. Available: <https://www.imec.be/nl/artikelen/sensorfusie-zorgt-voor-huwelijk-tussen-radar-en-camera>. [Geopend 14 december 2021].
- [19] G. Welch en G. Bishop, „An Introduction to the Kalman Filter,” Department of Computer Science, University of North Carolina at Chapel Hill, 2006.
- [20] R. Moors en P. Vannitsen, *Bouwpraktijk 1: Topografie [cursus]*, Diepenbeek: Gemeenschappelijke opleiding industriële ingenieurwetenschappen UHasselt en KULeuven, 2020.
- [21] A. Norhafizan, A. R. G. Raja en K. Nazirah, „Reviews on Various Inertial Measurement Unit,” *International Journal of Signal Processing Systems*, vol. 1, nr. 2, p. 583, 2013.
- [22] H. Roh, J. Jeong, Y. Cho en A. Kim, „Accurate Mobile Urban Mapping via Digital Map-Based SLAM,” *MDPI*, vol. 1, nr. 16, pp. 1-24, 2016.
- [23] Vlaamse Leonardo Da Vinci Agentschap v.z.w., *Theory and practice on Terrestrial Laser Scanning*, Europa: 3D RiskMapping, 2008.
- [24] Hartman Pelser, „3D scannen basics,” 1 december 2019. [Online]. Available: <https://pelsershartman.nl/>. [Geopend 10 oktober 2021].
- [25] GeoSLAM, „GeoSLAM ZEB Horizon User Manual,” 2020. [Online]. Available: <https://geoslam.com/>. [Geopend 10 oktober 2021].
- [26] WTCB, „3D-opmetingen in het BIM-tijdperk,” oktober 2018. [Online]. Available: <https://www.wtcb.be/publicaties>. [Geopend 20 oktober 2021].
- [27] C. Costantino, D. Prati, G. Predari en C. Bartolomei, „3D laser scanning survey for cultural heritage, a flexible methodology to potimize data collection,” *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 2, nr. 1, pp. 821-828, 2020.
- [28] Z. Robert, B. Michael, G. Kelly, J. Zbigniew, J. Emily en R. Jonathan, „Efficiently capturing large, complex cultural heritage sites with a handheld mobile 3D laser mapping system,” *ScienceDirect*, vol. 1, nr. 15, pp. 670-679, 2013.
- [29] G. Sammartano en A. Spanò, „Point clouds by SLAM-based mobile mapping systems: accuracy and geometric content validation in multisensor survey and stand-alone acquisition,” *Appl Geomat*, vol. 3, nr. 17, pp. 317-339, 2018.
- [30] A. Kukko, R. Kaijaluoto, H. Kaartinen, V. Lehtola, J. Anttoni en H. Juha, „Graph SLAM correction for single scanner MLS forest data under boreal forest canopy,” *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 1, nr. 132, pp. 199-209, 2017.
- [31] J. Brouček, „Comparing mobile laser scanning and static terrestrial scanning,” Department of Special Geodesy: Section Geodesy and Mine Surveying, The Czech Technical University in Prague, Czech Republic, 2019.

- [32] GEOSlam, „GEOSlam ZEB-REVO RT User Manual,” 2017. [Online]. Available: <https://geoslam.com/solutions/zeb-revo-rt/>. [Geopend 15 oktober 2021].
- [33] FARO®, „FARO® Focus Laser Scanner,” 9 augustus 2021. [Online]. Available: [https://knowledge.faro.com/Hardware/3D\\_Scanners/Focus/Technical\\_Specification\\_Sheet\\_for\\_the\\_Focus\\_Laser\\_Scanner](https://knowledge.faro.com/Hardware/3D_Scanners/Focus/Technical_Specification_Sheet_for_the_Focus_Laser_Scanner). [Geopend 15 oktober 2021].
- [34] Topcon Positioning Systems Inc., „Operator's manual Sokkia Series SRX Trimble Geospatial,” Topcon, 2021. [Online]. Available: [https://eu.sokkia.com/sites/default/files/sc\\_files/downloads/srx\\_e\\_13th14.pdf](https://eu.sokkia.com/sites/default/files/sc_files/downloads/srx_e_13th14.pdf). [Geopend 3 december 2021].
- [35] UHasselt, „UHasselt Leslocatie,” UHasselt, 2022. [Online]. Available: <https://www.uhasselt.be/nl/info-voor/studenten/lessen-en-examens/leslocaties>. [Geopend 8 Maart 2022].

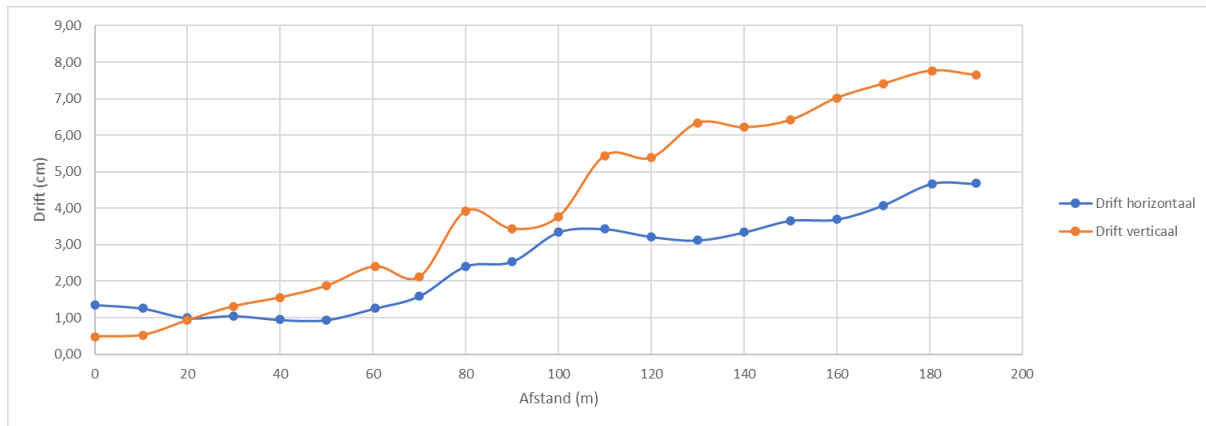


# Bijlage

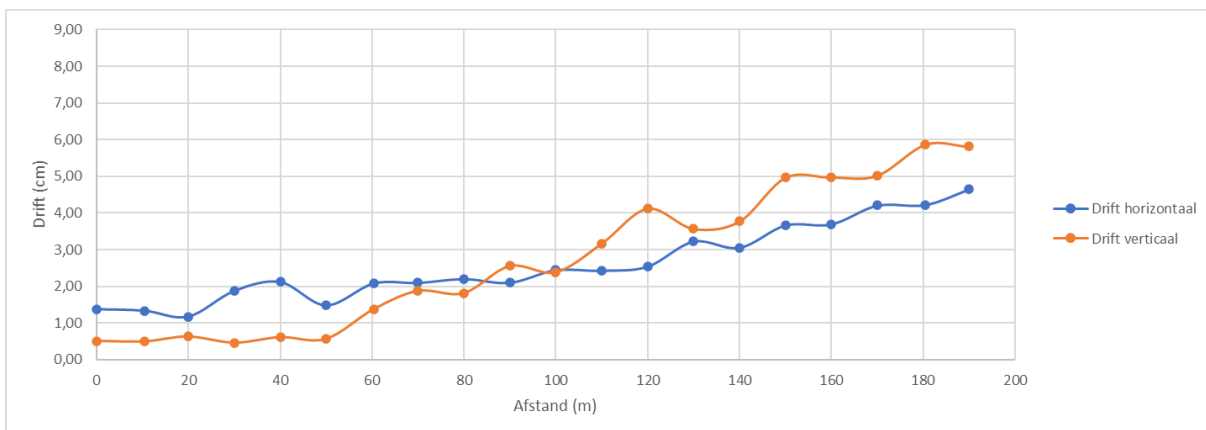
## Bijlage A: Horizontale en verticale drift per configuratie



Figuur 36: Drift ES

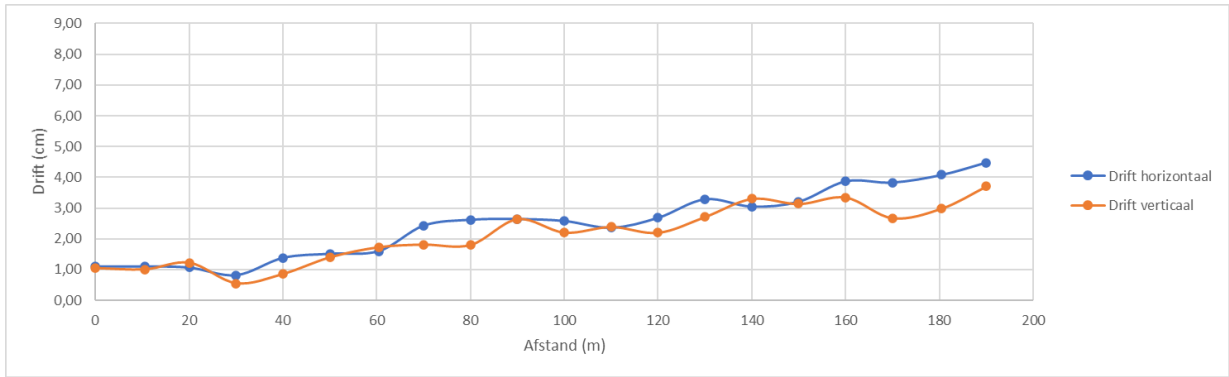


Figuur 37: Drift GOA

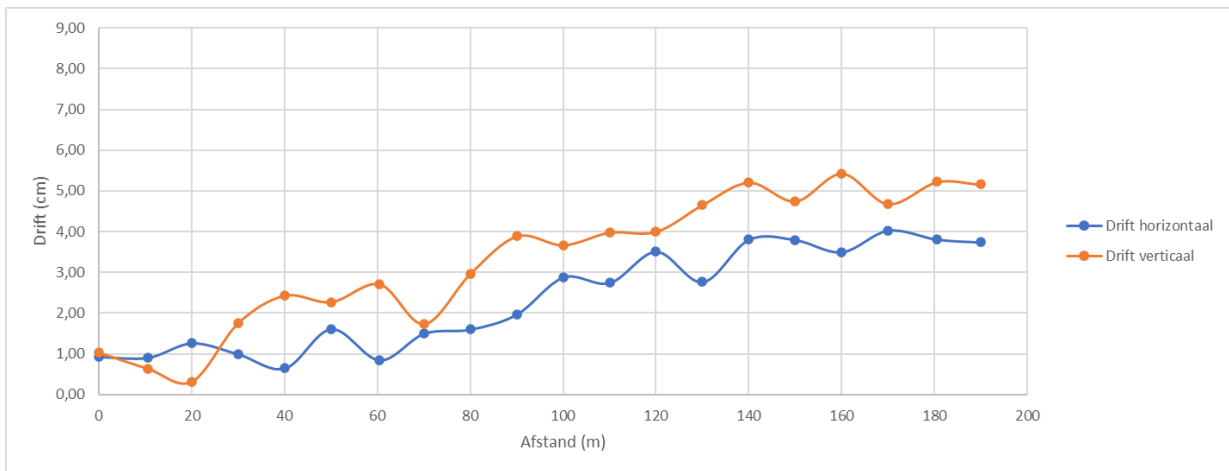


Figuur 38: Drift LC KG

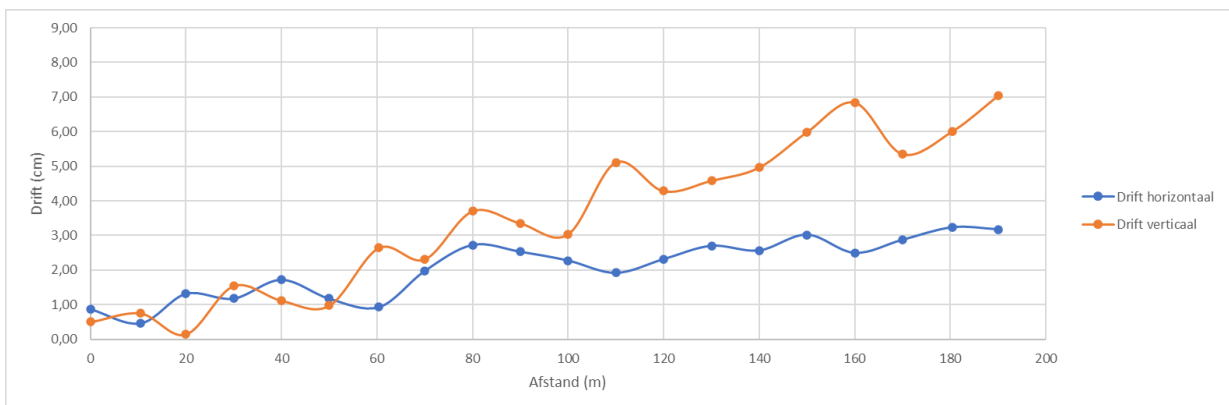




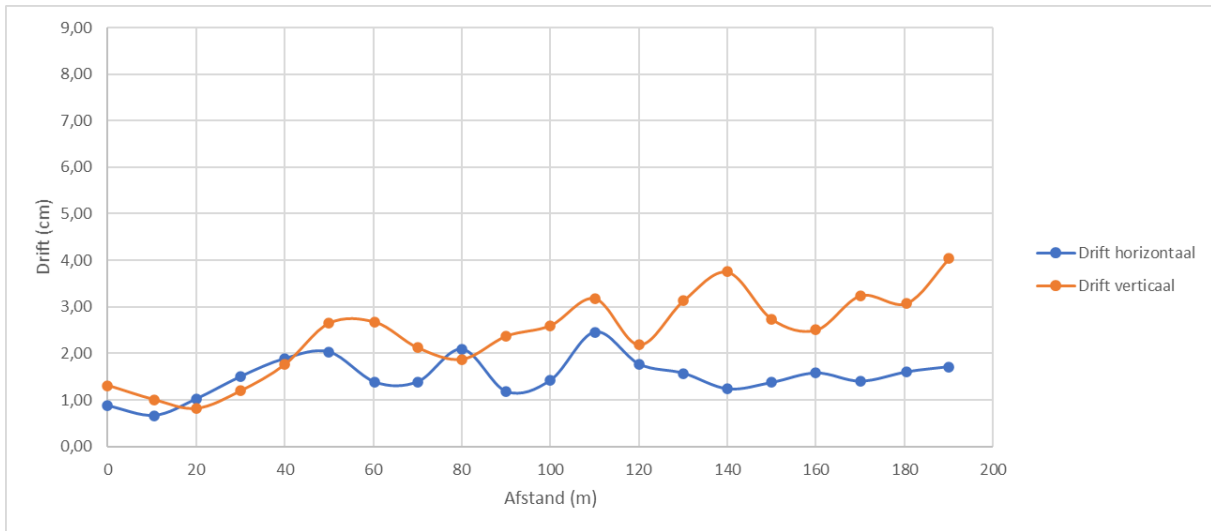
Figuur 39: Drift LC KG + 1



Figuur 40: Drift KG LC + 2



Figuur 41: Drift KG LC + 3



Figuur 42: Drift KG + F