

# Indoor Positioning: Evaluatie van een commercieel indoor positioning systeem met behulp van radiosignalen

Sibrecht Vandamme, Hans Vergauwen

Promotor: Prof. dr. ing. Greet Deruyter

Begeleider: ing. Dirk Vinckier

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

Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur

Voorzitter: prof. dr. Marc Vanhaelst

Academiejaar 2013-2014





"De auteurs geven de toelating deze masterproef voor consultatie beschikbaar te stellen en delen van 3 de masterproef te kopiëren voor persoonlijk gebruik. Elk ander gebruik valt onder de beperkingen van het auteursrecht, in het bijzonder met betrekking tot de verplichting de bron uitdrukkelijk te vermelden bij het aanhalen van resultaten uit deze masterproef."

Gent, juni 2014

De auteurs,

## **Voorwoord**

Als masterstudenten industriële wetenschappen landmeten aan de Universiteit Gent kregen we de opdracht om onderzoek te voeren naar een landmeetkundig onderwerp. Deze masterproef is het resultaat van hard werk, een goede samenwerking en begeleiding. Het is tevens een bewijsstuk dat aantoont dat wij in staat zijn samen een goed onderzoek uit te voeren, te communiceren en onze verworven kennis te integreren. Alvorens wij begonnen, waren wij reeds geboeid door indoor positionering. Dit werk heeft onze interesse enkel meer aangewakkerd. Tijdens de periode van ons onderzoek hebben wij enorm veel bijgeleerd over indoor positionering op alle gebieden en zijn stilaan overtuigd van de toekomstperspectieven die deze technologie kan bieden.

De verwezenlijking van deze masterproef zou echter niet mogelijk zijn geweest zonder hulp en inzet van volgende personen.

Onze promotor Prof. dr. ing. G. Deruyter voor de uitstekende begeleiding, haar bereidheid om altijd tijd te maken voor al onze vragen en omdat ze van begin tot eind geloofde in ons onderzoek.

De heren Eddy Loux en Johnny Vanbavegem van de firma Colruyt en natuurlijk het bestuur van Colruyt, omdat zij ons deze mooie kans hebben gegeven om ons onderzoek uit te voeren met behulp van hun infrastructuur en expertise.

En als laatste onze familie en vriendin voor hun steun en eindeloos begrip.

## Abstract

(Nederlands)

Positioneren is altijd een belangrijk aspect geweest bij het navigeren door de mens, van in de oudheid tot nu wordt onderzoek gedaan om positiebepaling te verbeteren. Na het onderzoek van positioneren over het aardoppervlak is de logische volgende stap het onderzoek van indoor positionering.

Het abstract geeft een overzicht van de bestaande indoor positionering technieken en systemen. Zo zijn er in eerste instantie de afstands- en hoekbepaling technieken zoals RSSI (Received Signal Strength Indication), TOA (Time Of Arrival), TDOA (Time Difference Of Arrival), DTDOA (Differential Time Differences Of Arrival), RSP (Received Signal Power) en AOA (Angle Of Arrival).

Bij RSSI staat de afname van de uitgezonden signaalsterkte in functie van de afstand tussen de zender en de ontvanger. Voor een afstandsbe­paling met behulp van TOA moeten zender en ontvanger een gesynchroniseerde klok hebben, hierbij kan de ontvanger de TOA bepalen van het inkomende signaal en rechte­reeks de afstand bepalen. De TDOA is gelijkaardig aan TOA, aangezien het ook gebruik maakt van de tijd tussen zender en ontvanger om de afstand te bepalen. De DTDOA bouwt verder op de techniek van TDOA. De RSP methode gebruikt de vertraging van het signaal, ten gevolge van de voortplanting doorheen de ruimte, om de afstand te bepalen. Bij AOA wordt met behulp van een reeks antennes of een directionele antenne de invalshoek van een signaal bepaald. Naast de afstand- en hoekbepaling technieken zijn er een aantal veel voorkomende technieken die worden toegepast bij indoor positionering zoals nabijheid, de triangulatie of driehoeksmeting, trilateratie, de multilateratie en beeldanalyse aan de hand van fingerprinting.

Door gebruik te maken van bovenstaande technieken kan aan de hand van radio-, geluids- of infrarood signalen een indoor positionering systeem worden opgebouwd.

Zo werkt Wi-Fi in de 2,4 GHz band, welke de enige geaccepteerde ISM (Industrial, Scientific, Medical) band is die wereldwijd beschikbaar is. Wi-Fi wordt in bijna ieder gebouw teruggevonden met aanvaardbare signaalsterktes. In tegenstelling tot GPS zijn de Wi-Fi signalen sterk genoeg om door muren te gaan. Om een positie te bepalen kan met behulp van de trilateratie of de fingerprinting methode de positie van een ontvanger bepaald worden. Bluetooth is gelijkaardig aan Wi-Fi, maar ontwikkeld voor kleinere schaal. Veel van de positiebepalingstechnieken zijn dezelfde als Wi-Fi. Het kan tevens verwerkt worden in de kleinste apparaten zoals smartphones, tablets en pda's.

Radio Frequency Identification (RFID) is oorspronkelijk ontwikkeld als een identificatie systeem bestaande uit twee basis componenten: een 'reader' met antenne en een 'tag'. De reader detecteert de aanwezige tags in zijn nabijheid. Hij zendt een radiosignaal uit naar deze tags waarop de tags een

signaal terug sturen met bijgevoegde data voor de *reader*. Iedere *tag* heeft een unieke identificatie, toegevoegd aan de data, waardoor de *reader* de locatie kan bepalen van de verschillende *tags*

Ultra-Wideband (UWB) is ontworpen voor communicatie op korte afstand en werkt met een grote bandbreedte. Een uitgestuurde radiogolf behoort tot UWB als de bandbreedte meer als 500 MHz is. Door legale restricties op de signaalkracht wordt het bereik van UWB gelimiteerd tot minder dan 100 meter. Erkende UWB technologieën werken met signalen met een lage frequentie die de eigenschap hebben om doorheen bouwmaterialen te penetreren zoals beton, glas en hout.

Ultrasonische systemen werken niet met elektromagnetische golven, maar met mechanische golven. Mechanische golven ontstaan door een medium dat trilt of aan het trillen gebracht wordt. Ultrasonische positiebepaling gebruikt de reflectieve afstandsmeting methode waarbij een ultrasonische zendontvanger een echo genereert op het te meten object. Het voordeel van de reflectieve afstandsmeting methode is dat ze geen aparte zenders en ontvangers nodig hebben.

Hiernaast zijn veel systemen in ontwikkeling zoals Locata, dat streeft naar een hoge nauwkeurigheid. De technologie werkt ofwel door het bestaande GNSS met extra terrestrische signalen te versterken of door GNSS compleet te vervangen voor indoor toepassingen. Een ander alternatief is High Sensitive (HS) ontvangers wat ook een vorm van indoor positionering is. Deze “gevoelige” ontvangers kunnen meer signalen ontvangen dan een gewone GNSS ontvanger, waardoor in bossen, mijnen, dichte omgevingen, signalen ontvangen worden.

Een nieuw systeem dat wordt onderzocht, werkt aan de hand van camera's, meer bepaald met behulp van visuele odometrie. Door gebruik van camera's wordt de 3D beweging van het voertuig getraceerd. Visuele odometrie meet enkel relatieve bewegingen op, waardoor het gebruik van externe punten zoals startpunten of gekende punten nodig zijn om de bewegingen te converteren naar absolute wereld coördinaten.

Een tweede nieuw systeem dat nog maar net zijn opmars kent, is indoor positionering met behulp van zichtbaar licht. Voor een geheel verlichte ruimte kan een ontvanger worden ontwikkeld die LOS stralen kan ontvangen van meerdere lichtbronnen. Zichtbaar licht is in bijna alle ruimtes beschikbaar, maar niet iedere bron van licht kan gebruikt worden voor indoor positionering.

Het onderzoek wordt opgedeeld in 17 verschillende configuraties waarbij aantal *locators*, *tag*densiteit, de plaats of onderlinge afstand van de *locators* allemaal kunnen verschillen. De configuraties kunnen vergeleken worden om de verschillende aspecten te onderzoeken die invloed kunnen uitoefenen op de nauwkeurigheid en de precisie bij positionering. Wanneer meerdere rayons voorzien worden van *locators* kunnen deze invloed uitoefenen op andere rayons. Per rayon kan *tag*densiteit, invloed van tijd, onderlinge tussenafstand en configuratie van de *locators*, gebruik van winkelwagentjes met of

zonder personen en invloed van een winkelrek onderzocht worden met behulp van de verschillende configuraties.

Uit deze vergelijkingen kan geconcludeerd worden dat tijd, tagdensiteit, locators in een andere rayon en het gebruik van winkelwagentjes geen invloed uitoefenen op de nauwkeurigheid en de precisie bij positionering. De configuratie van de *locators*, personen en nabijheid van een winkelrek oefenen een invloed uit bij positioneren. Via deze invloeden kan de ideale configuratie betreft nauwkeurigheid en precisie bekomen worden. Configuraties 7, 10, 13 en 15 voldoen niet aan de vooropgestelde nauwkeurigheid van 30 cm maar daarentegen wordt een nauwkeurigheid van 50 cm wel haalbaar.

(English)

Positioning has always been an important aspect of navigating by man. From ancient history to present day research has been done to improve positioning around the globe. After researching positioning on the surface of the earth the next logic step is towards research of indoor positioning.

The abstract gives an overview on the existing indoor positioning techniques and systems. First, there are the ranging techniques and the angle measurement techniques RSSI (Received Signal Strength Indication), TOA (Time Of Arrival), TDOA (Time Difference Of Arrival), DTDOA (Differential Time Differences Of Arrival), RSP (Received Signal Power) en AOA (Angle Of Arrival).

RSSI is the reduction of signal strength in function of the distance between the transmitter and the receiver. Ranging by TOA requires a synchronized clock between transmitter and receiver. The receiver determines the TOA by measuring the time difference between transmission and reception of the incoming signal. The TDOA is similar to the TOA, since it also makes use of the time between transmission and reception in order to determine the distance. DTDOA builds further upon the technique used by TDOA. The RSP method makes use of the delay of a signal, caused by the propagation in space, to determine the distance. AOA uses an array of antennas or a directional antennas to determine the angle of an incoming signal. Besides the ranging techniques and angle measurement techniques there are multiple other techniques which are applied in indoor positioning such as proximity, triangulation, trilateration, multilateration and scene analysis based on fingerprinting.

An indoor positioning system can be built using the methods and techniques described above in combination with the appropriate radio-, sound- or infrared signals.

Wi-Fi operates in the 2,4 GHz bandwidth, this is the only accepted ISM (Industrial, Scientific, Medical) band which is available worldwide. Wi-Fi can be found in each building within acceptable signal strengths. Unlike GPS, Wi-Fi's signal strength is strong enough to penetrate walls. The position of a receiver can be calculated using the trilateration or the fingerprinting method. Bluetooth is very

similar to Wi-Fi, only developed for a smaller scale. The positioning and ranging techniques are the same as Wi-Fi. Bluetooth has the advantage to be incorporated in the smallest devices such as smartphones, tablets and pda's.

Radio Frequency Identification (RFID) was originally developed as an identification system consisting of two components: a 'reader' and a 'tag'. The reader detects the tags in his proximity. The reader sends a radio signal to the tags on which the tags respond with an appropriate signal attached with data for the reader. Every tag has a unique identification attached to the data which allows the reader to determine the locations of the different tags.

Ultra-Wideband (UWB) was developed for short ranged communication working in a large bandwidth. A radio wave is UWB when the bandwidth exceeds 500 MHz. Because of legal restrictions on the signal power, the UWB range is limited to less than 100 meters. Licensed UWB technologies work on low frequencies which have the property to penetrate building materials such as concrete, glass and wood.

Ultrasonic systems work with mechanical waves instead of electromagnetic waves. Mechanical waves are produced by a vibrating medium. The ultrasonic positioning uses the reflective ranging technique, where an ultrasonic transceiver generates an echo on an object which is reflected back. The *advantage* of the reflective ranging technique is that it does not require separate transmitters and receivers.

Besides the systems explained above, there are other systems being researched or in development. One of these systems is Locata which aims at very high accuracy. This technology works in two ways: The technology can amplify the existing GNSS using terrestrial signals or Locata can completely replace the GNSS for an indoor positioning application. Another alternative which can be considered indoor positioning is the use of High Sensitive (HS) receivers. These "sensitive" receivers can receive more signals than an ordinary GNSS receiver. The HS receiver allows the user to receive signals in mines, forests and urban environments.

A new indoor positioning system based on visual odometry is being researched. The 3D movements of a vehicle are traced with the use of camera's. Visual odometry can only measure relative movements, which makes the use of extern points such as starting points or referential points necessary to convert these movements to absolute world coordinates.

Another new system that is booming is an indoor positioning system using visual light. A receiver can be developed which can receive LOS beams from different light sources on the condition the room is well lit. Visual light is available in every room, unfortunately not every type of light source can be used for indoor positioning.



The research is divided into 17 different configurations in which number of locators, tag density, location or distance between locators can all vary. The configurations are used to compare the different aspects that influence the accuracy and the precision of an indoor positioning system. When multiple locators are installed in different shopping isles, the locators can influence measurements in different isles.

In each shopping isle the tag density, influence of time, distance between locators, configuration of each locator, the use of shopping cart with or without persons and the influence of shopping rack can be researched with the use of these different configurations.

From these comparisons it's possible to conclude that time, tag density, locators in a different shopping isle and the use of shopping carts do not influence the accuracy and the precision. The configuration of the locators, persons nearby and a shopping rack have influence on indoor positioning. By analysing these influences, an ideal configuration for high accuracy and high precision can be found. Configurations 7, 10, 13 and 15 do not answer to the proposed accuracy of 30 cm, however if the accuracy is lowered to 50 cm, all configurations meet the proposed terms.

## Inhoudsopgave

Voorwoord .....	4
Abstract .....	5
Inhoudsopgave .....	10
Lijst met afkortingen .....	14
Figurenlijst .....	15
Tabellenlijst.....	18
1 Inleiding .....	19
1.1 Situering .....	19
1.2 Probleem- en doelstelling.....	20
1.3 Opbouw masterproef .....	20
2 Literatuurstudie .....	22
2.1 Indoor positionering technieken .....	22
2.1.1 Afstandsbepaling technieken.....	22
2.1.1.1 RSSI (Received Signal Strength Indication of de ontvangen signaalsterkte) .....	22
2.1.1.2 TOA (Time of arrival) of TOF (Time Of Flight) .....	22
2.1.1.3 TDOA (Time difference of arrival).....	23
2.1.1.4 DTDOA (Differential Time Differences Of Arrival).....	24
2.1.1.5 RSP (Received signal power) of Phase Of Arrival (POA) .....	25
2.1.1.6 AOA (Angle of arrival) of Direction Of Arrival (DOA).....	26
2.1.2 Nabijheid (proximity).....	26
2.1.3 Triangulatie of achterwaartse insnijding in 2D (op basis van hoeken) .....	26
2.1.4 Trilateratie of achterwaartse insnijding in 3D (op basis van drie afstanden) .....	27
2.1.5 Multilateratie .....	28
2.1.6 Beeldanalyse.....	29
2.1.6.1 Fingerprinting .....	29
2.1.7 Hybride technieken .....	32
2.2 Indoor positionering systemen .....	33
2.2.1 Locata .....	33

2.2.1.1	Pseudolites.....	33
2.2.1.2	Locata technologie .....	34
2.2.1.3	Conclusie en toekomstperspectief .....	35
2.2.2	High sensitive GNSS.....	35
2.2.2.1	The repealite system.....	37
2.2.3	Wi-Fi .....	38
2.2.3.1	Wi-Fi afstandsbepaling technieken en positiebepaling .....	38
2.2.4	RFID.....	39
2.2.4.1	RFID afstandsbepaling techniek en positiebepaling .....	40
2.2.5	Bluetooth.....	41
2.2.5.1	Bluetooth afstandsbepaling techniek en positiebepaling.....	41
2.2.6	UWB .....	42
2.2.6.1	UWB afstandsbepaling techniek en positiebepaling .....	43
2.2.7	Ultrasonische systemen .....	43
2.2.7.1	Ultrasonische afstandsbepaling techniek en positiebepaling.....	43
2.2.8	Infrarood Systemen .....	44
2.2.8.1	Infrarood afstandsbepaling techniek en positiebepaling .....	44
2.2.9	Camera's.....	44
2.2.9.1	Terugprojectie .....	46
2.2.9.2	Voorspelling beeld .....	47
2.2.9.3	Conclusie.....	49
2.2.10	Zichtbaar licht .....	49
2.2.11	Samenvattende tabel.....	50
2.2.12	EVARILOS: evaluatie van RF-gebaseerde Indoor positioning systemen.....	53
2.3	Besluit .....	54
3	Gevalstudie Quuppa .....	55
3.1	Quuppa .....	55
	Introductie .....	55
	HAIP Network Centric solution .....	55

Weringsprincipe .....	55
Reikwijdte .....	56
Capaciteit.....	58
Interferentie .....	58
3.2    Probleem- en doelstelling.....	59
3.3    Onderzoeksmethode .....	59
3.3.1    Bepalen van de statistische waarden .....	60
Punt nauwkeurigheid.....	61
Nauwkeurigheid .....	61
Betrouwbaarheidsinterval.....	61
Precisie .....	61
3.4    Onderzoek .....	62
3.4.1    Vorbereiding onderzoek .....	62
3.4.1.1    Lokaal stelsel met grid .....	64
3.4.1.2    Vereffening stelsel.....	64
3.4.1.3    Bepalen karakteristieke waarden.....	65
3.4.1.4    Controle normaal verdeling.....	66
3.4.1.5    Verwerking resultaten .....	68
3.4.2    Resultaten configuraties .....	71
3.4.2.1    Configuratie 1.....	71
3.4.2.2    Configuratie 2.....	73
3.4.2.3    Configuratie 3.....	75
3.4.2.4    Configuratie 4.....	77
3.4.2.5    Configuratie 5.....	79
3.4.2.6    Configuratie 6.....	81
3.4.2.7    Configuratie 7.....	84
3.4.2.8    Configuratie 8.....	86
3.4.2.9    Configuratie 9.....	88
3.4.2.10    Configuratie 10.....	90

3.4.2.11	Configuratie 11.....	92
3.4.2.12	Configuratie 12.....	94
3.4.2.13	Configuratie 13.....	96
3.4.2.14	Configuratie 14.....	98
3.4.2.15	Configuratie 15.....	100
3.4.2.16	Configuratie 16.....	102
3.4.2.17	Configuratie 17.....	104
3.4.3	Vergelijkende onderzoeken.....	106
3.4.3.1	Invloed van locators op een andere rayon .....	106
3.4.3.2	Vershil tag densiteit (schaalbaarheid).....	107
3.4.3.3	Vershil onderlinge afstand locators .....	108
3.4.3.4	Vershil niet geschrant / geschrant.....	112
3.4.3.5	Vershil geen winkelwagentje / met winkelwagentje .....	114
3.4.3.6	Vershil winkelwagentje zonder persoon / winkelwagentje met persoon.....	118
3.4.3.7	Invloed nabijheid winkelrek.....	120
3.4.3.8	Invloed van tijd.....	123
4	Besluit.....	125
5	Discussie.....	128
	Literatuurlijst.....	130

## Lijst met afkortingen

AOA	Angle of arrival
AP	Acces points
DGPS	Differential global positioning system
DTDOA	Differential time difference of arrival
EBM	EVARILOS benchmarking methodology
EVARILOS	Evaluation of RF-based indoor locatlization solutions
GNSS	Global navigation satellite system
GPS	Global positioning system
HAIP	High accuracy indoor positioning
HS-receiver	High sensitive receiver
IEEE	Institute of electrical and electronics engineers
ISM	Industrial, scientific and medical
LOS	Line of sight
MUT	Motion uncertainty tetragon
NLOS	Not in line of sight
PRN	Pseudo random noise
PUT	perspective uncertainty tetragons
RF	Radio frequency
RFID	Radio frequency identification
RP	Reference points
RSP	Received signal power
RSSI	Received signal strength indication
SIG	Special interest group
TDOA	Time difference of arrival
TOA	Time of arrival
UHF	Ultra high frequency
UWB	Ultrawideband
WLAN	Wireless local area network

## Figurenlijst

Figuur 1: Opstelling TOA (eigen bewerking van Fischer,2004).....	23
Figuur 2: Opstelling TDOA (eigen bewerking van Fischer,2004).....	24
Figuur 3: Opstelling DTDOA (eigen bewerking van Fischer,2004).....	25
Figuur 4: Drie antennes bepalen het snijpunt uit drie AOA's.....	26
Figuur 5: Triangulatie .....	27
Figuur 6: Trilateratie .....	28
Figuur 7: Hyperbolisch systeem: punt P ligt op de hyperbool met brandpunten A en B(Deruyter, 2012a).....	29
Figuur 8: De twee fases van fingerprinting: training fase en positiebepaling fase (eigen bewerking van Adalja,2013).....	31
Figuur 9: Frequentie HS-GNSS (eigen bewerking van Mautz,2012) .....	35
Figuur 10: voorbeeld PRN code (Dana, 1997).....	36
Figuur 11: Geen correlatie, ontvanger past een andere PRN code toe dan de code van de satelliet (Dana, 1997; Deruyter, 2012b) .....	37
Figuur 12:Signaal wordt ontdekt door gebruik van dezelfde code(Dana, 1997; Deruyter, 2012b) .....	37
Figuur 13: Frequentie Wi-Fi (eigen bewerking van Mautz,2012) .....	38
Figuur 14: Frequentie RFID (eigen bewerking van Mautz,2012).....	39
Figuur 15: Frequentie Bluetooth (eigen bewerking van Mautz,2012) .....	41
Figuur 16: Frequentie UWB (eigen bewerking van Mautz,2012).....	42
Figuur 17: Frequentie Ultrasonische systemen (eigen bewerking van Mautz,2012) .....	43
Figuur 18: Frequentie IRS (eigen bewerking van Mautz,2012).....	44
Figuur 19: Frequentie Camera's (eigen bewerking van Mautz,2012) .....	44
Figuur 20: Voorbeeld van camerabeeld (links), bijhorende terugprojectie (rechts)(Van Hamme et al.) .....	46
Figuur 21: Camerabeeld links, close-up van enkele geassocieerde PUT's (Van Hamme et al.) .....	47
Figuur 22: Illustratie van het voertuig (links). Het groene gebied correspondeert met het voorspelde traject gebaseerd door de stuurhoek. Het rode gebied toont de mogelijke locatie van het voertuig gebaseerd op de versnelling/remming. Het blauwe gebied en het rode gebied vormen de dubbel transformatie. Rechts: Resulterende MUT's (Van Hamme et al.) .....	47
Figuur 23: Overeenkomst tussen PUT's en MUT's (Van Hamme et al.).....	48
Figuur 24: Positiefout, vergeleken met GPS, met en zonder mapping (Van Hamme et al.).....	48
Figuur 25: 2D plaatsbepaling (Quuppa, 2013).....	56
Figuur 26: reikwijdte (Quuppa, 2013).....	57
Figuur 27: Opstelling winkelwagentje met tag .....	60
Figuur 28 Precisie en nauwkeurigheid (Lena, 2012) .....	62
Figuur 29: Winkelmagazijn met opdeling Test zone .....	63

Figuur 30: Configuratie rayon 1- Locators 1 en 2 geschrinkt geplaatst boven rayon 1.....	63
Figuur 31: Configuratie rayon 2 – Aanduiding grid op de vloer van rayon 2.....	63
Figuur 33: Aanduiding normaalverdeling punt P6X.....	66
Figuur 32: Aanduiding normaalverdeling plot P6Y.....	66
Figuur 34: 95%BI.....	69
Figuur 35: Configuratie 1: Meting 1 = zwart, meting 2 = blauw, meting 3 = paars, HP-radius = rood	71
Figuur 36: Configuratie 2: Meting 1 = zwart, meting 2 = blauw, meting 3 = paars, HP-radius = rood	73
Figuur 37: Configuratie 3: Meting 1 = zwart, meting 2 = blauw, meting 3 = paars, HP-radius = rood	75
Figuur 38: Configuratie 4: Meting 1 = zwart, meting 2 = blauw, meting 3 = paars, HP-radius = rood	77
Figuur 39: Configuratie 5: Meting 1 = zwart, meting 2 = blauw, meting 3 = paars, HP-radius = rood	79
Figuur 40: Configuratie 6: Meting 1 = zwart, meting 2 = blauw, meting 3 = paars, HP-radius = rood	81
Figuur 41: 2D bovenaanzicht fout op de ellips .....	83
Figuur 42: Zijaanzicht foutenellips .....	83
Figuur 43: Configuratie 7: Meting 1 = zwart, meting 2 = blauw, meting 3 = paars, HP-radius = rood	84
Figuur 44: Configuratie 8: Meting 1 = zwart, meting 2 = blauw, meting 3 = paars, HP-radius = rood	86
Figuur 45: Configuratie 9: Meting 1 = zwart, meting 2 = blauw, meting 3 = paars, HP-radius = rood	88
Figuur 46: Configuratie 10: Meting 1 = zwart, meting 2 = blauw, meting 3 = paars, HP-radius = rood .....	90
Figuur 47: Configuratie 11: Meting 1 = zwart, meting 2 = blauw, meting 3 = paars, HP-radius = rood .....	92
Figuur 48: Configuratie 12: Meting 1 = zwart, meting 2 = blauw, meting 3 = paars, HP-radius = rood .....	94
Figuur 49: Configuratie 13: Meting 1 = zwart, meting 2 = blauw, meting 3 = paars, HP-radius = rood .....	96
Figuur 50: Configuratie 14: Meting 1 = zwart, meting 2 = blauw, meting 3 = paars, HP-radius = rood .....	98
Figuur 51: Configuratie 15: Meting 1 = zwart, meting 2 = blauw, meting 3 = paars .....	100
Figuur 52: Configuratie 16: Meting 1 = zwart, meting 2 = blauw, meting 3 = paars, HP-radius = rood .....	102
Figuur 53: Configuratie 17: Meting 1 = zwart, meting 2 = blauw, meting 3 = paars, HP-radius = rood .....	104
Figuur 54: Vergelijking configuratie O2-O12 Nauwkeurigheid.....	106
Figuur 55: Vergelijking configuratie O2-O12 Precisie.....	107
Figuur 56: Invloed Densiteit configuratie O1-O2 Nauwkeurigheid.....	107
Figuur 57: Invloed Densiteit configuratie O1-O2 Precisie .....	108
Figuur 58: Vergelijking configuratie O3,O4 en O5 Nauwkeurigheid.....	109
Figuur 59: Vergelijking configuratie O3, O4 en O5 Precisie.....	110



Figuur 60: Vergelijking configuratie O7,O10 en O11 Nauwkeurigheid.....	111
Figuur 61: Vergelijking configuratie O7,O10 en O11 Precisie.....	111
Figuur 62: Vergelijking configuratie O4-O11 Nauwkeurigheid.....	112
Figuur 63: Vergelijking configuratie O4-O11 Precisie.....	113
Figuur 64: Vergelijking configuratie O5, O6 en O7 Nauwkeurigheid.....	113
Figuur 65: Vergelijking configuratie O5, O6 en O7 Precisie.....	114
Figuur 66: Vergelijking configuratie O11-O13 Nauwkeurigheid.....	115
Figuur 67: Vergelijking configuratie O11-O13 Precisie.....	115
Figuur 68: Vergelijking configuratie O10-O15 Nauwkeurigheid.....	116
Figuur 69: Vergelijking O10-O15 Precisie.....	116
Figuur 70: Vergelijking configuratie O7-O17 Nauwkeurigheid.....	117
Figuur 71: Vergelijking O7-O17 Precisie.....	117
Figuur 72: Vergelijking configuratie O13-O14 Nauwkeurigheid.....	118
Figuur 73: Vergelijking configuratie O13-O14 Precisie.....	119
Figuur 74: Vergelijking configuratie O15-O16 Nauwkeurigheid.....	119
Figuur 75: Vergelijking configuratie O15-O16 Precisie.....	120
Figuur 76: Vergelijking punt 32 en 33 Nauwkeurigheid en Precisie.....	121
Figuur 77: Mutlipath één locator staander.....	121
Figuur 78: Multipath één locator ligger.....	122
Figuur 79: Vergelijking Punt 20 en 21 Nauwkeurigheid.....	123
Figuur 80: Vergelijking Punt 20 en 21 Precisie.....	123
Figuur 81: Invloed tijd op de nauwkeurigheid.....	124
Figuur 82: Invloed tijd precisie.....	124

## Tabellenlijst

Tabel 1: gemiddelde en standaard fout tussen mappen en unmapped traject en gps data (Van Hamme et al.) .....	49
Tabel 2: Samenvattende tabel (Al Nuaimi & Kamel, 2011; Bahl & N. Padmanabhan; Brignone, Connors, Lyon, & Salil, 2005; Deak, Curran, & Condell, 2012; Farid et al., 2013; Gu, Lo, & Niemegeers, 2009; Liu et al., 2007; M. Ni, Liu, Cho Lau, & P. Patil, 2004; Pfeifer & Elias, 2003; Youssef & Agrawala).....	51
Tabel 3: Radius Locator's (Quuppa, 2013).....	58
Tabel 4: Schuine afstand, Verticale Hoek, Horizontale Richting, ter bepaling van coördinaten assenstelsel .....	65
Tabel 5: Vereffende coördinaten totaalstation .....	65
Tabel 6: Vereffende coördinaten stelsel.....	65
Tabel 7: scheefheid en steilheid .....	67
Tabel 8: One-Sample Kolmogorov-Smirnov Test .....	67
Tabel 9: Test voor normaaverdeling .....	67
Tabel 10: Samenvattende tabel resultaten per meting.....	70
Tabel 11: Configuratie 1 .....	72
Tabel 12: Configuratie 2 .....	74
Tabel 13: Configuratie 3 .....	76
Tabel 14: Configuratie 4 .....	78
Tabel 15: Configuratie 5 .....	80
Tabel 16: Configuratie 6 .....	82
Tabel 17: Configuratie 7 .....	85
Tabel 18: Configuratie 8 .....	87
Tabel 19: Configuratie 9 .....	89
Tabel 20: Configuratie 10 .....	91
Tabel 21: Configuratie 11 .....	93
Tabel 22: Configuratie 12 .....	95
Tabel 23: Configuratie 13 .....	97
Tabel 24: Configuratie 14 .....	99
Tabel 25: Configuratie 15 .....	101
Tabel 26: Configuratie 16 .....	103
Tabel 27: Configuratie 17 .....	105

# 1 Inleiding

## 1.1 Situering

Global Navigation Satellite Systems (GNSS) worden wereldwijd gebruikt om een positie te bepalen tot op enkele meter nauwkeurig. Met behulp van een Differential Global Positioning System (DGPS) kan dit zelfs tot op centimeter (zonder ‘post processing’ of naverwerking) of millimeter (mits naverwerking) *nauwkeurigheid*<sup>1</sup>. In Europa en Amerika wordt momenteel hoofdzakelijk gebruik gemaakt van het Amerikaanse Global Positioning System (GPS) en sinds een tiental jaren ook van het Russische GLONASS. Op korte termijn zullen het Europese Galileo (2019) en het Chinese BeiDou (2020) zich bij de groep voegen. Het probleem met GNSS is dat de ontvanger moet “zichtbaar” zijn voor minimum vier satellieten om de vooropgestelde positie nauwkeurigheid te behalen. Open ruimtes vormen voor GNSS geen probleem, wanneer echter de satelliet signalen gedeeltelijk of geheel afgeschermd worden - wat bijvoorbeeld het geval is in bosrijke en dichtbebouwde gebieden of binnen in gebouwen of tunnels - wordt de positiebepaling<sup>2</sup> twijfelachtig of zelfs onmogelijk. Dit omdat de satelliet signalen de ontvanger sterk verzwakt of zelfs helemaal niet bereiken (Adalja, 2013). Dit probleem dient te worden opgelost, ook omdat een groot aantal industriële en commerciële toepassingen hieruit voordeel kunnen halen. Om deze reden is de afgelopen jaren meer interesse voor het realiseren van een systeem voor ‘indoor’ en ‘urban’ (stedelijke) positiebepaling. (Adalja, 2013; Rizos, 2013)

Naast de GNSS ontwikkelingen, ondergingen ook andere vormen van draadloze technologieën en communicatie een snelle evolutie waardoor het gebruik van radiofrequentie signalen interessant wordt voor het ontwikkelen van een ‘indoor positioning’ systeem. *“In general, one of the several existing wireless standards such as Infrared, RFID, Bluetooth or Wi-Fi is chosen as the target standard for indoor positioning.”* (Adalja Disha M, 2013)

---

<sup>1</sup> Nauwkeurigheid en precisie zijn begrippen die vaak door elkaar gebruikt worden waardoor verwarring kan ontstaan. Nauwkeurigheid is de accuraatheid van een meting. De nauwkeurigheid geeft dus aan hoe accuraat de meting is, of met andere woorden, hoe groot de afwijking is tussen de gemeten en ‘werkelijke waarde’. Precisie geeft een maat voor de willekeurige spreiding van meetwaarden rond het gemeten gemiddelde.

<sup>2</sup> Positiebepaling: Dit is het bepalen van een plaats aan de hand van een (numerieke) referentie al dan niet in een coördinatensysteem. Een positiebepaling is ook een lokalisatie, maar lokalisatie is geen positiebepaling.

## 1.2 Probleem- en doelstelling

De probleemstelling die behandeld wordt in dit onderzoek komt voort uit de vraag van Colruyt Group naar een systeem dat toelaat om hun klanten te volgen tijdens het winkelen. Colruyt heeft recent een proefversie aangekocht van het indoor positioneringssysteem Quuppa en wenst daarvan een objectieve beoordeling. De vraag van Colruyt kon opgesplitst worden in drie onderzoeksvragen:

- Welke commerciële indoor positionering systemen zijn nu al op de markt of in ontwikkeling en wat zijn hun eigenschappen op het vlak van de gebruikte techniek, de nauwkeurigheid, de invloed van omgevingsfactoren, het toepassingsgebied, etc.?
- Welke van deze systemen zijn geschikt voor de toepassing die Colruyt vooropstelt?
- Is het Quuppa systeem een goede keuze en wat zijn de randvoorwaarden? Om dit na te gaan wordt onderzoek gedaan om te antwoorden op volgende vragen:
  - o Uitgaand van de keuze die gemaakt werd: wat is de meest ideale configuratie voor wat betreft
    - nauwkeurigheid
    - nauwkeurigheid in combinatie met kostprijs (investeringskost)
  - o Is de vooropgestelde nauwkeurigheid haalbaar?
  - o Welke factoren beïnvloeden de werking van het systeem negatief of positief in het geval van Colruyt en wat is die invloed?

## 1.3 Opbouw masterproef

Het eerste deel van de masterproef bestaat uit een literatuurstudie die een overzicht geeft van indoor positionering systemen en hun eigenschappen. Als eerste worden de technieken besproken die de basis vormen van de verschillende systemen. Bijkomend wordt ingegaan op een veelbelovend maar nog niet operationeel systeem 'Locata'. Daarna worden een aantal reeds operationele systemen besproken namelijk High Sensitive GNSS, Wi-Fi, RFID, Bluetooth, Ultra Wideband, Ultrasonische systemen en Infrarood systemen, telkens mogelijk in combinatie met mobiele ontvangers of zenders zoals smartphones, tablets, pda's, *tags* enz. Daarna worden nog twee nieuwe oplossingen belicht, één met behulp van camera's en de andere met behulp van zichtbaar licht. Als laatste wordt kort Evaluation of RF-based Indoor Localization Solutions (EVARILOS) besproken dat geraadpleegd werd voor het onderzoek.

Het tweede deel van de masterproef is de gevalstudie Quuppa. Bij het onderzoek wordt een evaluatie gemaakt van het Quuppa systeem waarbij rekening wordt gehouden met de toepassing van de firma Colruyt. In een eerste fase worden de eigenschappen en de werking van Quuppa verduidelijkt. In de tweede fase wordt de onderzoeksmethode besproken. In de derde fase volgt het concrete onderzoek. Dit omvat de voorbereiding en de resultaten van de configuraties met elk een resultaat en een besluit.

Uit de resultaten van de configuraties volgen de vergelijkende onderzoeken. Hierin worden volgende zaken vergeleken:

- Invloed van de tijd
- Invloed van de *locator* op een andere rayon
- Verschil tagdensiteit
- Verschil afstand *locators*
- Verschil niet geschrinkt / geschrinkt
- Verschil geen winkelwagentje / met winkelwagentje
- Verschil winkelwagentje / winkelwagentje met persoon
- Invloed nabijheid winkelrek.

Elk van deze onderdelen leidt tot een conclusie. Tenslotte wordt een globaal besluit gegeven, gevolgd door een discussie.

## 2 Literatuurstudie

### 2.1 Indoor positionering technieken

Er zijn zes verschillende technieken die gebruikt worden bij systemen voor indoor positionering namelijk: afstandsbepaling technieken ('Range Measurement Techniques'), triangulatie, trilateratie, multilateratie, beeldanalyse ('scene analysis') en de nabijheid ('proximity'). De combinatie van deze technieken wordt een hybride techniek genoemd. De keuze van techniek heeft invloed op de berekeningssnelheid van de positie en op de nauwkeurigheid afhankelijk van de opbouw van het systeem.(Adalja, 2013)

#### 2.1.1 Afstandsbepaling technieken

Deze techniek bepaalt afstanden en hoeken om hieruit nadien de positie te berekenen. Ze maakt gebruik van de 'Received Signal Strength Indication' (RSSI) of de ontvangen signaalsterkte, 'Time Of Arrival' (TOA), 'Time Difference Of Arrival' (TDOA), 'Differential Time Differences Of Arrival' (DTDOA), 'Received Signal Power' (RSP) en 'Angle Of Arrival' (AOA).(Adalja, 2013; Liu, Darabi, Banerjee, & Liu, 2007)

##### 2.1.1.1 RSSI (Received Signal Strength Indication of de ontvangen signaalsterkte)

De verzwakking of afname van de uitgezonden signaalsterkte staat in functie van de afstand tussen de zender en de ontvanger. Zo kan een ontvanger gelokaliseerd worden met minstens drie referentiepunten, rekening houdend met de corresponderende verliezen van het signaal, die veroorzaakt worden door de voorplanting van het signaal doorheen de ruimte.

Verscheidene empirische en theoretische modellen werden bedacht om het verschil tussen de uitgezonden -en ontvangen signaalsterkte om te vormen tot een afstandsbepaling. *"The RSSI based systems usually need on-site adaptation in order to reduce the severe effects of multipath fading and shadowing in indoor environments."* (Adalja Disha M, 2013).

##### 2.1.1.2 TOA (Time of arrival) of TOF (Time Of Flight)

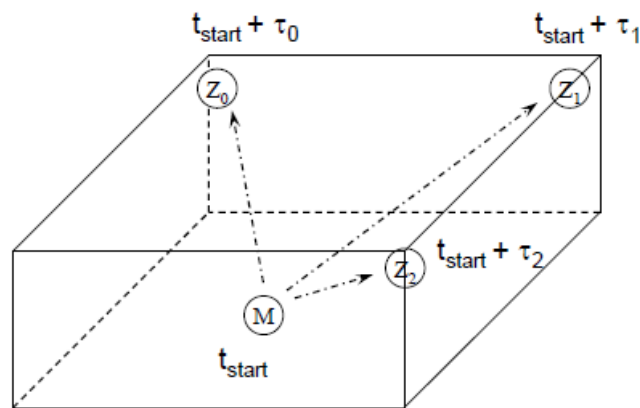
Voor een afstandsbepaling met behulp van TOA moeten zender en ontvanger een gesynchroniseerde klok hebben. Hierbij kan de ontvanger de TOA bepalen van het inkomende signaal en rechtsreeks de afstand bepalen van de zender naar de ontvanger door de TOA te vermenigvuldigen met de voortplantingssnelheid van het licht of het geluid, afhankelijk van het type signaal. Deze techniek is dus sterk afhankelijk van de tijd dat een signaal erover doet van zender naar ontvanger. De uitgezonden signalen moeten ook voorzien worden van een *timestamp*<sup>3</sup> zodat de afgelegde afstand nauwkeurig kan geëvalueerd worden.

---

<sup>3</sup> Timestamp: een timestamp bestaat uit een sequentie van cijfers of gecodeerde informatie die weergeeft wanneer een gebeurtenis heeft plaatsgevonden. Meestal geeft deze dan de datum en tijd van een dag weer tot op enkele halve seconden nauwkeurig. De timestamp wordt vooral gebruikt voor synchronisatie doeleinden.

Als meer dan drie referentiepunten beschikbaar zijn, is een positiebepaling mogelijk, de kleinste kwadraten methode of een van zijn varianten kan gebruikt worden om de positiefout te minimaliseren. Het grootste nadeel van TOA en alle andere afstandsbepaling technieken is dat deze zeer gevoelig zijn voor fouten te wijten aan het verliezen van ‘Line Of Sight’ (LOS), doordat geen enkele manier bestaat om deze fouten te reduceren vanwege reflectie. (Dobbins, Garcia, & Brian; Rison, 2008)

Op Figuur 1 is  $t_{start}$  overal gelijk, aangezien alle klokken tussen zender  $M$  en ontvangers  $Z_0, Z_1, Z_2$  gesynchroniseerd zijn. De tijd dat een signaal erover doet om van zender naar ontvanger te gaan wordt voorgesteld door  $\tau_i$ . Elke  $\tau_i$  wordt vermenigvuldigd met de voortplantingssnelheid om zo de afstand naar elke ontvanger te verkrijgen. (Fischer, Burkhart, & Winkler, 2004)



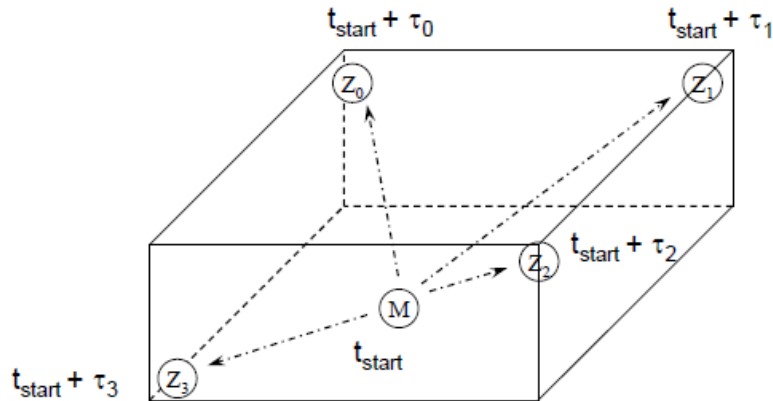
*Figuur 1: Opstelling TOA (eigen bewerking van Fischer, 2004)*

### **2.1.1.3 TDOA (Time difference of arrival)**

De TDOA is een hyperbolisch systeem. Het is gelijkaardig aan TOA, aangezien het ook gebruik maakt van de tijd tussen zender en ontvanger om de afstand te bepalen. Bij TDOA wordt echter gebruik gemaakt van het verschil in tijd waarbij het signaal uitgezonden door een zender aankomt bij minimum drie vaste ontvangers. Deze drie vaste (‘fixed’) ontvangers geven drie TDOA’s en bepalen zo drie hyperbolen waarvan het snijpunt de locatie van de zender geeft. Net zoals bij TOA en alle andere tijd gebaseerde afstandsmetingen moeten de klokken gesynchroniseerd zijn voor een accurate afstandsbepaling. Bij TDOA is enkel synchronisatie tussen de vaste ontvangers vereist omdat de berekening gebaseerd is op hun tijds- en afstandsverschil en niet op de afstand tussen zender en ontvanger. Identiek als bij TOA dient DTOA een vrije line-of-sight te hebben, ook al is dit zelden beschikbaar in indoor omgevingen. (Aatique, 1997; Drake & Dogançy, 2004)

Op Figuur 2 is  $t_{start}$  van elke ontvanger  $Z_0, Z_1, Z_2$  en  $Z_3$  gelijk, aangezien de klokken gesynchroniseerd zijn. De tijd dat een signaal erover doet om van zender  $M$  naar een ontvanger te gaan wordt voorgesteld door  $\tau_i$ .

Het zijn echter de tijdsverschillen tussen de ontvangers onderling, die nodig zijn voor de berekening, aangezien het tijdsverschil via de voortplantingssnelheid van de signalen een maat is voor het verschil in afstand. Onder 2.1.5 Multilateratie wordt een voorbeeld gegeven van een hyperbolisch systeem met behulp van TDOA.(Fischer et al., 2004)



*Figuur 2: Opstelling TDOA (eigen bewerking van Fischer,2004)*

#### **2.1.1.4 DTDOA (Differential Time Differences Of Arrival)**

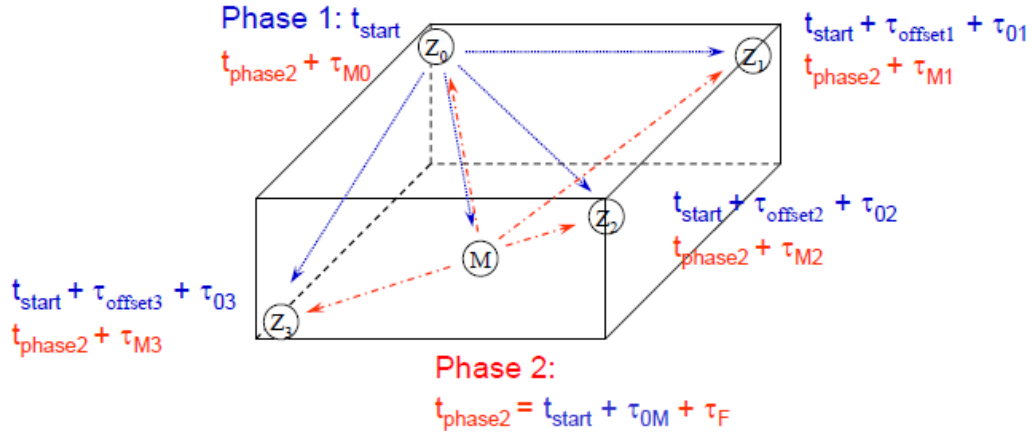
Deze techniek bouwt verder op TDOA. Hier wordt ook gebruik gemaakt van een mobiele zendontvanger<sup>4</sup> op een onbekende locatie en minstens vier ontvangers op een vaste of gekende locatie. Om de afstand van zendontvanger naar ontvanger te bepalen dient de starttijd bij de zendontvanger en de TOA van het signaal op de ontvanger gekend te zijn. Een van de vaste ontvangers wordt gekozen om te initialiseren, deze wordt de master ontvanger genoemd.

De master initialiseert door een verzoek te sturen naar de zendontvanger en de vaste ontvangers. De mobiele zendontvanger reageert op het verzoek met een identiek signaal dat naar alle ontvangers wordt gestuurd. Hierna worden alle gemeten TDOA's van het verzoek en reactie van alle ontvangers verzameld om hieruit de positie van de mobiele zendontvanger te bepalen. De DTDOA heeft als voordeel dat de tijdssynchronisatie van zendontvanger en ontvangers op een goedkopere manier kan worden opgelost omdat op deze manier de klokken niet gesynchroniseerd moeten zijn.(Winkler, Fischer, Grass, & Langerdörfer, 2006)

In fase 1 start het initialiseren door de master, in Figuur 3 wordt de vaste ontvanger  $Z_0$ , beschouwd als master. De master zendt een verzoek naar de andere vaste ontvangers  $Z_1$ ,  $Z_2$ ,  $Z_3$  en naar de mobiele zendontvanger M, dit is einde van fase 1 in Figuur 3. De mobiele zendontvanger M reageert op het verzoek met een identiek signaal dat naar alle ontvangers  $Z_0$ ,  $Z_1$ ,  $Z_2$ ,  $Z_3$  wordt gestuurd, dit is fase 2 van het proces.(Fischer et al., 2004)

<sup>4</sup> Zendontvanger (tranceiver): Samentrekking van zender-ontvanger. Dit toestel kan zowel signalen zenden als ontvangen.





**Figuur 3: Opstelling DTDOA (eigen bewerking van Fischer, 2004)**

**Fase 1 :**  $t_{1Z_i} = t_{\text{start}} + \tau_{\text{offset}_i} + \tau_{Z_0 Z_i}$

**Fase 2 :**  $t_{2Z_i} = t_{\text{start}} + \tau_{\text{offset}_i} + \tau_{Z_0 M} + \tau_F + \tau_{MZ_i}$

Eliminatie van de klokoffset:  $\Delta t_i = t_{2Z_i} - t_{1Z_i} = \tau_{Z_0 M} + \tau_F + \tau_{MZ_i} - \tau_{Z_0 Z_i}$

Tijdsverschillen van de voortplanting:  $\Delta t_{ij} = \Delta t_i - \Delta t_j = \tau_{MZ_i} - \tau_{Z_0 Z_i} - \tau_{MZ_j} + \tau_{Z_0 Z_j}$

Afstandsverschillen:

$$\tau_{MZ_i} - \tau_{MZ_j} = \Delta t_{ij} + \tau_{Z_0 Z_i} - \tau_{Z_0 Z_j}$$

$$\Delta d_{ij} = c \cdot (\tau_{MZ_i} - \tau_{MZ_j})$$

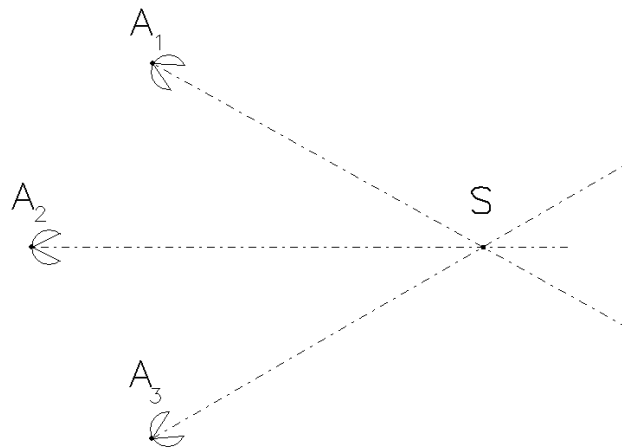
### 2.1.1.5 RSP (Received signal power) of Phase Of Arrival (POA)

De RSP methode maakt gebruik van de vertraging van het signaal om de afstand te bepalen ten gevolge van de voortplanting doorheen de ruimte. De vertraging wordt uitgedrukt als een fractie van de golflengte. Om te werken met RSP moeten de zenders op vaste locaties geplaatst worden en moet vanuit gegaan worden dat deze puur sinusoidale signalen uitzenden. De *lokalisatie*<sup>5</sup> wordt uitgevoerd door gebruik te maken van fasemetingen. Een faseverschilmeting of dezelfde algoritme als bij TOA of TDOA kan hiervoor gebruikt worden. Het nadeel van de RSP methode voor het toepassen bij indoor omgevingen, is dat deze altijd in line-of-sight moet zijn van de zenders om lokalisatiefouten te limiteren. (Adalja, 2013; Liu et al., 2007)

<sup>5</sup> Lokalisatie: Dit is het bepalen van een plaats, symbolisch zonder referentie. Lokaliseren is niet altijd een positiebepaling. Een lokalisatie wordt vaak symbolisch aangegeven zoals ‘in de slaapkamer’ of ‘kantoor 6’ in ‘gebouw 3’.

### 2.1.1.6 AOA (Angle of arrival) of Direction Of Arrival (DOA)

AOA maakt gebruik van een reeks antennes of een *directionele antenne*<sup>6</sup> om de invalshoek van een signaal te bepalen. Indien enkel één AOA meting beschikbaar is, zal de te bepalen locatie van een zender ergens op deze lijn liggen. Als minstens twee AOA metingen beschikbaar zijn van twee antennes op twee verschillende locaties, kan de locatie van de zender bepaald worden op het snijpunt van deze lijnen gedefinieerd door de twee antennes. Meestal worden meer antennes gebruikt om met behulp van de overvloedigheid de nauwkeurigheid van de positie te verhogen. “*Nevertheless, this technique requires complex and expensive equipments and notably suffers from shadowing and multipath reflections.*” (Adalja Disha M, 2013). De methode wordt weergegeven in Figuur 4, de locatie van de zender  $S$  wordt gevonden in het snijpunt van de AOA's afkomstig van de drie antennes  $A_1$ ,  $A_2$  en  $A_3$ . (Peng & Sichitiu; Rozsondai, 2010)



Figuur 4: Drie antennes bepalen het snijpunt uit drie AOA's

### 2.1.2 Nabijheid (proximity)

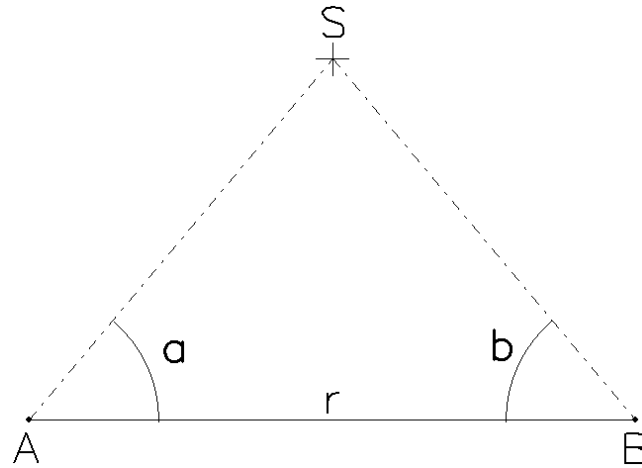
De techniek van de nabijheid ('proximity technique') wordt vooral gebruikt bij RF-gebaseerde systemen. Hier wordt een rooster antennes met vaste locaties gebruikt in gebouwen. Als een mobiele zender gedetecteerd wordt door meerdere antennes, zal de antenne die het sterkste signaal ontvangt, gebruikt worden om de positie van het object te bepalen. Nabijheid maakt gebruik van een zeer zwakke zendkracht. Als een boodschap ontvangen is, weet de ontvanger dat hij in de nabijheid is van de zender. (Adalja, 2013; Liu et al., 2007)

### 2.1.3 Triangulatie of achterwaartse insnijding in 2D (op basis van hoeken)

Een triangulatie of driehoeksmeting maakt gebruik van de eigenschappen van een driehoek. Deze zijn volledig bepaald wanneer één zijde (de basis) en de aanliggende hoeken gekend zijn.

<sup>6</sup> Directionele antenne: Deze antenne straalt met grotere kracht in een of meerdere richtingen waardoor deze beter signalen kan zenden en ontvangen en waarbij de invloed van interferentie wordt verlaagd.

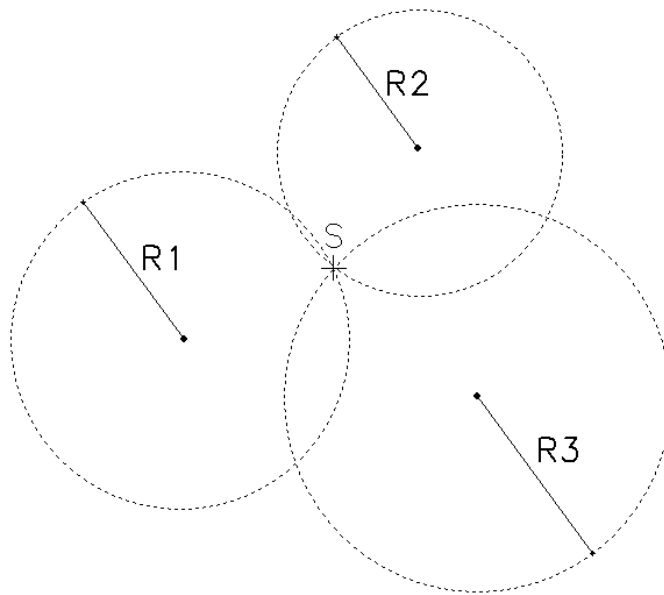
Een triangulatie, geïllustreerd in Figuur 5, bestaat uit het meten van minstens twee invalshoeken  $a$  en  $b$  afkomstig van twee verschillende referentiepunten  $A$  en  $B$  waarvan de onderlinge afstand  $r$  gekend is. De positie stemt overeen met de lijnen die elkaar snijden. (Alberda & Ebbinge, 2003-2006; Liu et al., 2007)



*Figuur 5: Triangulatie*

#### **2.1.4 Trilateratie of achterwaartse insnijding in 3D (op basis van drie afstanden)**

De trilateratie bepaalt de positie van een ontvanger met behulp van drie afstanden afkomstig van drie referentiepunten. Alle punten die op een gekende afstand van een vast punt rusten, liggen op een cirkel in een 2D figuur of op een bol in een 3D figuur, deze afstand is de straal. Als de afstanden tot drie vaste punten gekend zijn, bevindt de ontvanger zich op de snijpunten van de drie bollen of cirkels waarvan de stralen en de middelpunten gekend zijn. Bij 3D bollen worden twee snijpunten bekomen waardoor twee posities mogelijk zijn. Hierbij dient de positie ondubbelzinnig bepaald te worden. In Figuur 6 komt de positie overeen met het snijpunt  $S$  van de drie cirkels met straal  $R_1, R_2$  en  $R_3$ . (Alberda & Ebbinge, 2003-2006; Liu et al., 2007)

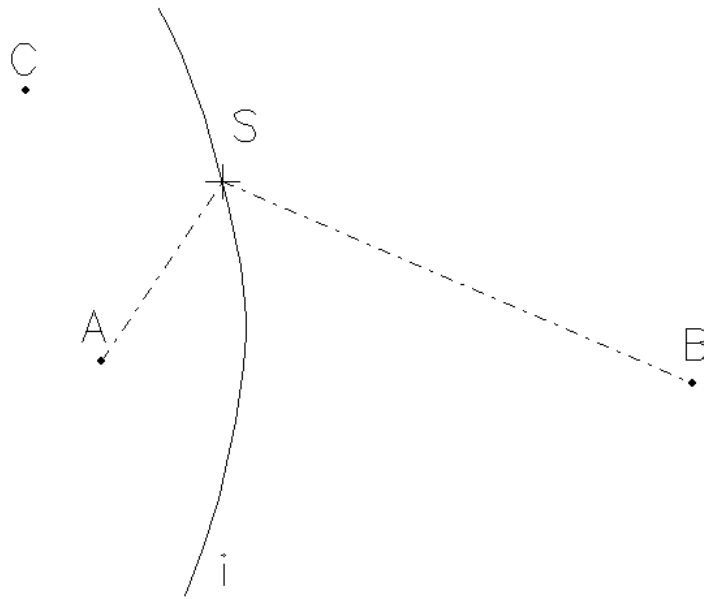


*Figuur 6: Trilateratie*

### **2.1.5 Multilateratie**

Multilateratie is een hyperbolisch systeem waarbij de positie wordt bepaald met behulp van TDOA. Zoals vermeld in 2.1.1.3

TDOA (Time difference of arrival), is het niet nodig om te weten wanneer een signaal werd uitgestuurd, maar telt enkel de synchronisatie tussen de vaste ontvangers. Via een multilateratievergelijking kunnen een oneindig aantal mogelijke punten voor het tijdsverschil worden berekend. Deze punten worden uitgezet als een hyperbool waarop de mobiele zender zich bevindt. De positie van de mobiele zender kan gevonden worden in het snijpunt met een tweede hyperbool. (Deruyter, 2012a)



**Figuur 7: Hyperbolisch systeem: punt P ligt op de hyperbool met brandpunten A en B (Deruyter, 2012a)**

In Figuur 7 stellen A, B en C vaste gesynchroniseerde ontvangers voor en S een mobiele zender. Wanneer uit S een radiosignaal wordt uitgezonden, dan zullen ze over het algemeen op een verschillend tijdstip aankomen in de gesynchroniseerde ontvangers A, B en C. Het tijdsverschil is via de voortplantingstijd van de signalen een maat voor het verschil van de afstand SB en SA. Daar de verzameling van punten die een vast afstandsverschil tot twee vaste punten A en B hebben, wordt een hyperbool *i* verkregen met A en B als brandpunten. S moet zich dus op een bepaalde hyperbool bevinden. Wordt nu een derde vaste punt C toegevoegd, waar eveneens een signaal wordt ontvangen, dan zal op grond van het afstandsverschil tussen SA en SC een tweede hyperbool als positie lijn voor S verkregen worden. Het snijpunt van deze twee hyperbolen levert dus de plaats van S. Bij de verwezenlijking van dit principe worden niet de looptijdverschillen, maar de faseverschillen gemeten. (Deruyter, 2012a)

## 2.1.6 Beeldanalyse

Beeldanalyse is een manier van positioneren waarbij ‘fingerprinting’ wordt gebruikt. Een fingerprint is een signatuur die het ene beeld van de andere kan onderscheiden. Onder beeld wordt verstaan de omgeving met al zijn specifieke eigenschappen en factoren. Met andere woorden, een fingerprint is een uniek kenmerk of collectie van kenmerken van een beeld. Bij fingerprinting wordt de informatie van het beeld verzameld en daarna vergeleken met de reeds bestaande informatie over het beeld dat zich in een database bevindt. (Adalja, 2013; Liu et al., 2007)

### 2.1.6.1 Fingerprinting

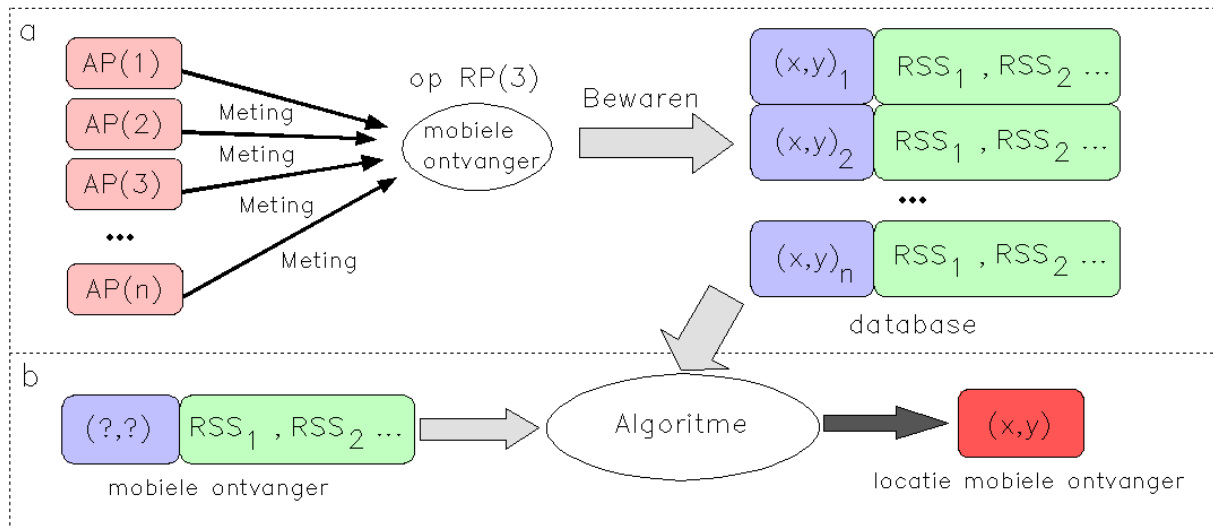
De fingerprinting techniek bestaat uit twee fases: De training fase (offline) en de positiebepaling fase (online). Tijdens de training fase, worden de signaalsterktes van de toegangspunten of ‘access points’ (AP’s) verzameld op vooraf geïdentificeerde locaties, dewelke daarna referentiepunten (RP’s)

genoemd worden. Het doel van deze stappen is het opbouwen van een fingerprinting database die gebruikt wordt in de positiebepaling fase. Omdat de locatie van ontvangers bepaald wordt door de omliggende RP's, moeten deze zo even en homogeen mogelijk verspreid worden in het gebied. In de positiebepaling fase wordt de signaalsterkte van de omliggende AP's nabij de ontvanger vergeleken met de RP's die in een dataset verzameld werden tijdens de training fase, om zo de beste RP te identificeren. De tracking fase maakt gebruik van deterministische of probalistische algoritmes om real-time gemeten signaalsterktes met de signalendata van de RP's overeen te toetsen. (Chan & Sohn; Kaemarungsi & Krishnamurthy, 2004; Winkler et al., 2006)

In Figuur 8 wordt de fingerprinting techniek schematisch weergegeven. In de training fase *a* wordt de fingerprinting database opgebouwd. Om deze database op te bouwen, dienen eerst enkele goed gekozen RP's te worden bepaald. Om de mobiele ontvanger te lokaliseren op een RP, in het voorbeeld *RP(3)*, worden alle signaalsterktes van alle AP's:  $AP(1), AP(2), AP(3), \dots, AP(n)$  gemeten. Uit deze metingen kan de karakteristieke eigenschap van *RP(3)*, bestaande uit de signaalsterktes, worden bepaald.

Daarna worden deze signaalsterktes  $RSS_1, RSS_2, \dots$  bewaard in de database. Dit proces wordt herhaald tot een aantal goed gekozen RP's vastgelegd zijn. (Chan & Sohn; Kaemarungsi & Krishnamurthy, 2004; Winkler et al., 2006)

In de positiebepaling fase *b* meet de mobiele ontvanger de ontvangen signaalsterktes  $RSS_1, RSS_2, \dots$  op een plaats waar het directe positiebepaling nodig heeft. Hierna worden de metingen vergeleken met de data die in de fingerprinting database staat door gebruik te maken van een deterministisch of probalistisch algoritme. De uitkomst is dan de meest waarschijnlijke locatie van de mobiele ontvanger bepaald aan de hand van de fingerprinting database. (Chan & Sohn; Kaemarungsi & Krishnamurthy, 2004; Winkler et al., 2006)



**Figuur 8: De twee fases van fingerprinting: training fase en positiebepaling fase (eigen bewerking van Adalja, 2013)**

Binnen de fingerprinting methode zijn dus twee manieren om een onbekende locatie te bepalen met behulp van een algoritme. De eenvoudigste methode is de deterministische methode, waarbij de gemiddelde signaalsterkte van elke AP gemeten bij elke RP, wordt gebruikt om de fingerprinting database te creëren. (Chan & Sohn; Kaemarungsi & Krishnamurthy, 2004; Winkler et al., 2006)

Aangezien de variatie van de signaalsterkte gemeten bij elk punt groot is, werd als tweede methode de probabilistische methode ontwikkeld om meer nauwkeurige resultaten te bekomen. De verdeling van de signaalsterkte is niet normaal verdeeld. Het verschilt van locatie tot locatie of zelfs als de oriëntatie van de antenne verandert op dezelfde locatie. Vandaar dat vele metingen noodzakelijk zijn. Het neemt meer tijd in beslag om de verdeling van de ontvangen signaalsterkte bij elke RP te bepalen. Bovendien vergroot dit de grootte en rekenlast van de database.

Hoe smaller de *granulariteit*<sup>7</sup> hoe beter, met andere woorden, hoe meer metingen bekomen worden van elk punt, hoe beter. Meer RP's en meer metingen betekenen dat de training fase meer arbeid en tijd in beslag gaat nemen. (Chan & Sohn; Kaemarungsi & Krishnamurthy, 2004; Winkler et al., 2006)

#### 2.1.6.1.1 Deterministische methode

Bij deze methode is de structuur van de fingerprinting database relatief eenvoudig. De eigenschap van de RP wordt enkel bepaald door het gemiddelde te nemen van de signaalsterktes van alle AP's. Om de positie te bepalen met behulp van de database wordt gebruik gemaakt van algoritmes. Het meest eenvoudigste algoritme is de 'nearest neighbour'. (Chan & Sohn; Kaemarungsi & Krishnamurthy, 2004; Winkler et al., 2006)

<sup>7</sup> Granulariteit: Dit is een term die bij het ontwerpen van een database wordt gebruikt, ze geeft aan in welke mate er detail-gegevens van de entiteiten aanwezig zijn. Een lagere granulariteit (grove korreligheid) geeft aan dat er op een zeker niveau minder details worden opgeslagen.

#### 2.1.6.1.2 Probabilistische methode

Terwijl de deterministische methode een redelijke nauwkeurigheid geeft bij lokalisatie, gooit het veel van de informatie weg die in de training fase data zit. Elke fingerprint vat de data samen als de gemiddelde signaalsterkte naar zichtbare AP's, gebaseerd op een sequentie van waarden van de signaalsterkte opgenomen op die locatie. De signaalsterkte op een positie kan echter gekarakteriseerd worden door meer parameters dan enkel het gemiddelde. Zowel de gemiddelde signaalsterkte en de variantie zijn verschillend voor elk AP. De verdeling van de signaalsterkte is ook niet noodzakelijk normaal verdeeld. Het best dient zo veel mogelijk van deze informatie overwogen te worden wanneer vergelijkingen tussen de input en de signaalsterkte map worden gemaakt, om de nauwkeurigheid zo hoog mogelijk te krijgen. (Chan & Sohn; Kaemarungsi & Krishnamurthy, 2004; Winkler et al., 2006)

#### 2.1.7 Hybride technieken

Hybride technieken zijn de combinatie van de vorige technieken om zo de voordelen van meerdere technieken te kunnen gebruiken. (Van Haute et al., 2014)



## 2.2 Indoor positionering systemen

### 2.2.1 Locata

GPS is zeer betrouwbaar in open ruimtes, maar de nauwkeurigheid daalt al snel als de ontvanger niet rechtstreeks in de zichtlijn staat met de satellieten. Iets wat altijd gebeurt binnen in gebouwen, zeer stedelijke omgevingen, steile terreinen of in open mijnen. Hieruit volgt de noodzaak en de verwachting, richting een volgende stap in de navigatietechnologie. (Rizos, 2013)

Locata heeft deze technologie ontwikkeld en blijft hierrond ook onderzoek doen. De technologie werkt ofwel door het bestaande GNSS met extra terrestrische signalen te versterken (zoals in het geval waar te weinig zichtbaarheid is voor betrouwbare GNSS positiebepaling) of door GNSS compleet te vervangen voor indoor toepassingen. Dit soort systeem is een 'hybride systeem'. (Rizos, 2013)

Locata maakt gebruik van een netwerk gesynchroniseerde zendontvangers (transceivers) die positionering signalen uitzenden en die kunnen worden gedetecteerd. Deze zendontvangers vormen samen een netwerk 'LocataNet' genaamd, dat ofwel in samenwerking met GNSS ofwel helemaal onafhankelijk werkt van GPS, om positionering, navigatie en timing te ondersteunen. Eén van de belangrijkste eigenschappen van een LocataNet is dat de tijd gesynchroniseerd wordt, dit laat positiebepaling toe tot op centimeter nauwkeurigheid met behulp van draaggolffasemetingen. Vooraleer dieper wordt ingegaan op de Locata technologie wordt het pseudolite systeem besproken. Ook al is Locata geen pseudolite systeem, het bezit toch een aantal eigenschappen gelijkaardig aan die van een pseudolite. (Rizos, 2013)

#### 2.2.1.1 Pseudolites

Pseudolite is de samentrekking van 'pseudo' en 'satellieten'. Het is een zender die gelijkaardige signalen stuurt als een satelliet, maar dan gevestigd op de grond in plaats van in de ruimte. Deze pseudolites kunnen de *satelliet geometrie*<sup>8</sup> enorm verbeteren. In sommige gevallen kunnen ze zelfs de GPS satellietenconstellatie vervangen. De huidige pseudolites sturen signalen op dezelfde frequentiebanden als GPS (L1: 1575,42 MHz en L2: 1227,60 MHz). Zowel de pseudoafstand als de draaggolffasemeting kunnen met pseudolite signalen worden gemaakt. (Rizos, 2013)

Pseudolites bestonden al sinds de ontwikkeling van het GPS systeem zoals we het nu kennen, het diende om testen uit te voeren met satellieten vooraleer deze in de ruimte werden gestuurd. De laatste twintig jaar zijn heel wat ontwikkelingen gebeurd van de pseudolite technieken en GPS uitrusting, er wordt zelfs gezegd dat pseudolites gebruikt kunnen worden om de beschikbaarheid, betrouwbaarheid, de integriteit en nauwkeurigheid van vele toepassingen te verbeteren.

---

<sup>8</sup> De satelliet-geometrie of hoe deze satellieten t.o.v. elkaar staan, hebben invloed op de nauwkeurigheid.

Helaas hebben uitgebreid onderzoek en vele testen uitgewezen dat pseudolites fundamentele technische problemen meebrengen die zelfs in gecontroleerde omstandigheden (zoals in een laboratorium) moeilijk te overwinnen zijn. (Rizos, 2013)

De uitdagingen zijn om de pseudolites optimaal te situeren, de zendkrachtniveaus te controleren, ‘near-far problemen’<sup>9</sup> te overwinnen, een hoge tijd synchronisatiegraad te bereiken en speciale antennes te configureren. Deze uitdagingen zijn zo goed als onoverkomelijk. Toch zijn al veel prototypes gemaakt en is al veel onderzoek naar deze technologie gedaan in de afgelopen jaren. (Rizos, 2013)

### **2.2.1.2 Locata technologie**

In 2003 nam Locata de eerste stappen om de technische uitdagingen te overwinnen die nodig zijn om een lokaal autonoom replica te maken van GNSS. Het resultaat was een positiebepaling systeem ontworpen om de beperkingen van GNSS en andere pseudolite-gebaseerde systemen op te lossen door gebruik te maken van tijds-gesynchroniseerde zendontvangers of ‘LocataLites’. Een netwerk Locatalites vormt samen een LocataNet. Deze zendt signalen uit die positiebepaling mogelijk maakt tot op centimeter nauwkeurigheid voor een mobiele ontvanger. Het LocataNet vormt dus een nieuwe constellatie van signalen, analoog aan die van GNSS maar dan met speciale eigenschappen. LocataNet heeft geen gegevens van het basisstation nodig, waardoor ook geen draadloze data-link nodig is van basisstation naar de mobiele ontvanger. (Rizos, 2013)

In het eerste ontwerp stuurde de systemen dezelfde L1 C/A code signalen uit als die van GPS, maar deze frequentie voor het zenden van signalen heeft grote beperkingen om vele redenen. De regels omtrent het zenden van L1 verschilt over de hele wereld, maar wereldwijd een licentie te verkrijgen voor het uitzetten van een ‘ground-based’ systeem op L1 is haast onmogelijk. Indien een licentie zou worden toegestaan is het van groot belang dat ervoor wordt gezorgd dat geen degradatie van het GPS signaal ontstaat. Hierdoor zou de functionaliteit van de LocataLites beperkt worden op vlak van zendvermogen, dus ook bereik en penetratie doorheen gebouwen. Het zou ook voor een praktische beperking zorgen, zo zullen meer LocataLites nodig zijn in een LocataNet om ervoor te zorgen dat zich geen interferentie of degradatie voordoet van het GPS signaal. (Rizos, 2013)

In 2005 werd een grote verandering gemaakt aan het eerste ontwerp dat tevens bevestigt dat Locata geen pseudolite is. Het nieuwe ontwerp omvat een gepatenteerde signaalstructuur dat werkt in de ISM band van 2,4835 GHz, ISM staat voor Industry, Scientific and Medical. Door te werken binnen de ISM band, zorgde het nieuwe ontwerp ervoor dat het mogelijk was om te zenden op twee frequenties, elk gemoduleerd met twee ruimtelijk diverse PRN codes (PRN staat voor Pseudo Random Noise).

---

<sup>9</sup> Near-Far probleem: Dit is een situatie waarin de ontvanger sterke signalen ontvangt, waardoor het onmogelijk wordt voor de ontvanger om zwakke signalen te detecteren.

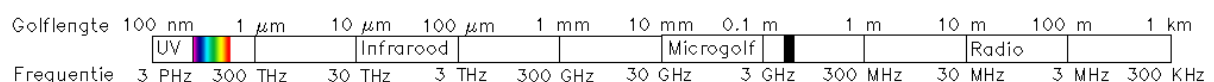
Deze nieuwe signaalstructuur is voordeliger in vergelijking met het vorige systeem dat werkt op de L1 en/of L2 banden. Enkele voordelen van het nieuwe ontwerp zijn:

- De interoperabiliteit met GPS en andere GNSS
- Geen licentie vereist voor gebruik
- De mogelijkheid voor ‘on-the-fly *ambiguity*’<sup>10</sup> oplossing met behulp van ‘dual-frequency’ metingen
- De multipath op pseudoafstandmetingen wordt verzacht door de hogere chipping snelheid van 10 MHz en er is minder last van multipath op de draaggolffase dan GPS/GNSS door het gebruik van een hogere frequentie
- Tijd synchronisatie van alle LocataLites om punt positiebepaling van centimeter nauwkeurigheid te bereiken. (Rizos, 2013)

### 2.2.1.3 Conclusie en toekomstperspectief

Locata kan beschouwd worden als een lokale constellatie vergelijkbaar met een satellietenconstellatie, maar dan opgesteld op de grond. Het is in staat de positie te bepalen waar GNSS dit niet kan en dit tot op hoge nauwkeurigheden. In de komende jaren zullen meer en meer commerciële positionering systemen worden ontwikkeld die in staat zijn de Locata signalen te detecteren. Locata is op dit moment het enige RF-gebaseerde systeem dat weinig beperkingen heeft en kan gebruikt worden tot op afstanden van een aantal honderden meters. Toch zullen nog veel testen en veel onderzoek nodig zijn vooraleer Locata een ‘foutloos’ operationeel systeem kan worden. (Rizos, 2013)

### 2.2.2 High sensitive GNSS



**Figuur 9: Frequentie HS-GNSS (eigen bewerking van Mautz, 2012)**

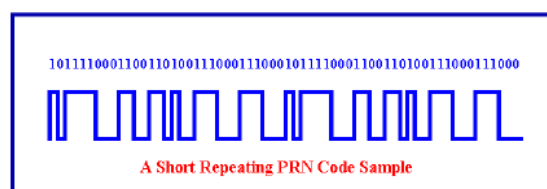
Gebouwen, bomen en diepe putten vormen obstakels voor de line-of-sight tussen de satelliet en de ontvanger. Deze verzwakken de GPS signalen tussen de 10-20 dB. De meeste GPS ontvangers kunnen deze sterk verzwakte signalen niet ontvangen en verwerken. Dit betekent dat deze obstakels de beschikbaarheid van GPS bij deze terreinen sterk verminderd wordt (Wieser, 2006). De HS receiver ontvangt satelliet signalen van de L-band frequentie 1500 MHz (Figuur 9). (Deruyter, 2012b)

<sup>10</sup> Ambiguity: Vooraleer een positie kan berekend worden met behulp van golven dient deze geïnitieerd te worden. Dit betekent dat het gehele aantal golflengten tussen de ontvanger en de zender correct moet worden bepaald. De fase van het gemeten signaal is namelijk een steeds herhalend restant van het complete signaal. Dit principe wordt meerduidigheid of ambiguity genoemd.

Recentelijk zijn ‘High sensitive’ (HS) ontvangers beschikbaar op de markt. Typisch voor deze ontvanger is het ontvangen van signalen die 20-25dB onder de grens van gewone GPS ontvangers liggen. Hierdoor stijgt het aantal ontvangen signalen voor een HS ontvanger ten opzichte van een gewone ontvanger, waardoor HS ontvangers de positie kunnen bepalen in bossen, mijnen, dichte omgevingen, enz.(Wieser, 2006). De signalen die de aarde bereiken, worden verzwakt en vertraagd ontvangen door een ontvanger. De HS ontvanger vangt deze niet op via line-of-sight maar via reflectie door multipath of diffractie. De geassocieerde afstandsfouten zijn opmerkelijk groter dan een afstandsfout bij line-of-sight meting. Deze kunnen variëren van 4-10 meter in gunstige omgevingen en tot meerdere honderden meters in ongunstige omgevingen. Wanneer de gewone ontvanger geen signalen ontvangt, kan de HS ontvanger deze wel ontvangen. Door de grote afstandsfouten moet het algoritme voor HS ontvangers de verschillende variabelen realistisch verwerken om een nauwkeurige positiebepaling te berekenen (Deruyter, 2012b; Wieser, Gaggl, & Hartinger, 2005).

Verzwakte signalen kunnen ook op een andere manier theoretisch worden opgelost. Een simpele oplossing zou het versterken van het uitgezonden signaal zijn. Hierdoor is het ontvangen signaal op aarde ook sterker, waardoor het minder verzwakt en vertraagd wordt door gebouwen, bos en dichte omgevingen. Doordat satellieten op zonnepanelen werken wordt het praktisch niet haalbaar om een nog sterker signaal uit te zenden (Mautz, 2012).

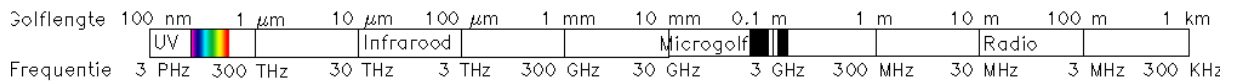
Een andere belangrijke parameter voor het ontvangen van GPS signalen is de signaalruis verhouding (SNR). De SNR wordt gezien als een waarde voor de kwaliteit van een signaal waar ruis aanwezig is. Bij het uitgezonden signaal van de satelliet zit ook een PRN code(Figuur 10). De PRN code is een vooraf gedefinieerde unieke serie van bits die lijkt op de natuurlijke ruis die voorkomt in de atmosfeer. Elke satelliet heeft een unieke PRN code. In de moderne ontvanger is meestal een complete set aanwezig van vooraf berekende PRN codes. De golf komt toe in de ontvanger, waarna de PRN code in de ontvanger heen en weer verschoven wordt (Figuur 11). Op een bepaald moment zal een goede correlatie ontstaan tussen het ontvangen signaal en de PRN code (Figuur 12). Op deze manier stelt de PRN code ons in staat om een heel zwak signaal duidelijk te herkennen. (Deruyter, 2012b)



*Figuur 10: voorbeeld PRN code (Dana, 1997)*



### 2.2.3 Wi-Fi



**Figuur 13: Frequentie Wi-Fi (eigen bewerking van Mautz, 2012)**

Het Institute of Electrical and Electronic Engineering (IEEE) heeft een verzameling standaarden voor draadloze netwerken bepaald en goedgekeurd, waaronder de 802.11b standaard, beter bekend als Wi-Fi. Het werkt met een snelheid van 11 Mb/s en in de 2,4 Ghz band (Figuur 13), dat de enige geaccepteerde ISM (Industrial, Scientific, Medical) band is die wereldwijd beschikbaar is. Het heeft een bereik van 50-100 m (Liu et al., 2007). Oorspronkelijk is Wi-Fi niet gemaakt voor positiebepalingsdoeleinden, toch kan een locatie afgeleid worden uit de opgemeten signaalsterktes van meerdere toegangspunten of 'access points' (AP's). Wi-Fi heeft grote voordelen ten opzichte van andere systemen, zo wordt het in bijna ieder gebouw teruggevonden met aanvaardbare signaalsterktes. Het kan dus in ieder gebouw gebruikt worden als indoor positioneringssysteem zonder dat extra hardware moet worden toegevoegd met als gevolg dat de investeringskosten dalen. In tegenstelling tot GPS zijn de Wi-Fi signalen sterk genoeg om door muren te gaan. Wi-Fi heeft ook enkele beperkingen zoals de invloed van multipath door de aanwezigheid van fysische objecten of interferentie met andere applicaties op 2,4 Ghz ISM band. Het bepalen van een positie neemt vaak veel tijd in beslag. Het leidt tot onnauwkeurigheden aangezien de signaalsterktes ook veranderen doorheen de tijd. (Aida, Noaizon, Elissa, Suhailan, & Engku; Farid, Nordin, & Ismail, 2013; Li, Salter, Dempster, & Rizos)

Om een positie te bepalen is een afstand nodig. De moeilijkheid is om de ontvangen signaalsterktes om te zetten in een afstand. Dit kan op twee manieren. De eerste manier maakt gebruik van het 'Signal Propagation Model' en de informatie van de geometrie van het gebouw of stedelijke omgeving, om de signaalsterktes om te zetten naar een afstandsmeting. Met de kennis van de coördinaten van de AP's kan met behulp van de trilateratie methode de positie van een ontvanger bepaald worden. De tweede manier staat beter bekend als locatie fingerprinting. Het idee achter fingerprinting is het in kaart brengen van locatieafhankelijke parameters van gemeten signalen in gebieden. De locatie-afhankelijke parameter is de 'Received Signal Strength Indicator' (RSSI) bij de AP's of de ontvanger. Deze twee methodes worden verder gedetailleerd besproken. Meer en meer worden Wi-Fi positiebepaling systemen gezien als een gemakkelijke techniek voor indoor omgevingen, of stedelijke omgevingen, overal waar Wi-Fi beschikbaar is. (Aida et al.; Li et al.)

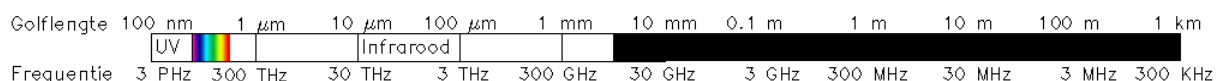
#### 2.2.3.1 Wi-Fi afstandsbepaling technieken en positiebepaling

De meest toegepaste techniek om afstanden te bepalen bij Wi-Fi is de ontvangen signaalsterkte. Het signaal wordt ontvangen en aan de hand van de sterkte wordt de afstand bepaald tussen de zender en ontvanger.

De moeilijkheid bij deze methode is het bepalen van het verval op de sterkte van het signaal bij toenemende afstand en obstakels. Hiervoor wordt het ‘Signal Propagation Model’ gebruikt om de signaalsterktes te converteren naar de afstand tussen de AP’s en de ontvanger. (Aida et al.; Li et al.)

Om de positie te bepalen wordt gebruik gemaakt van de trilateratie of fingerprinting. Om de nauwkeurigheid van de trilateratie methode te verbeteren, werd een hybride methode voorgesteld. Deze methode is gebaseerd op het feit dat in kleine smalle locaties, zoals in een kamer, het propagatiemodel beter kan worden beheerst. Deze methode heeft twee stadia: in het eerste stadium wordt de kleine ruimte gezocht waarin de ontvanger zich bevindt. In het tweede stadium wordt de trilateratie gebruikt om nauwkeurig de locatie van de ontvanger te berekenen. Helaas is deze methode nog altijd slechter dan de fingerprinting methode. Het probleem bij trilateratie blijft het feit dat voortplanting van het indoor radiosignaal te ingewikkeld is, omdat signaalverzwakking ontstaat door de afstand en penetratie doorheen muren en vloeren en het effect van multipath. Ook interferentie van andere signalen vormt een probleem. 802.11b gebruikt dezelfde frequentie band als bij microgolfovens, draadloze telefoons en Bluetooth apparaten. Vandaar dat in de 2,4 Ghz frequentie band, deze apparaten een bron van interferentie kunnen zijn. Verder is er nog de oriëntatie van de antenne van de ontvanger en de beweging van de mensen die zich in een gebouw bevinden, die de signaalsterkte significant kunnen beïnvloeden. Het is extreem moeilijk een correct algemeen model van signalenvoortplanting op te stellen, laat staan één dat compleet samenvalt met situaties uit de echte wereld. Vandaar dat de fingerprinting methode veel interessanter is. (Aida et al.; Li et al.)

## 2.2.4 RFID



**Figuur 14: Frequentie RFID (eigen bewerking van Mautz,2012)**

Radio frequency identification (RFID) wordt al meer dan 50 jaar toegepast in draadloze netwerken. Pas de laatste jaren heeft het meer aandacht gekregen door de vraag naar indoor positionering. RFID is oorspronkelijk ontwikkeld als een identificatie systeem bestaande uit twee basis componenten: een ‘reader’ met antenne en een ‘tag’. De reader detecteert de aanwezige tags in zijn nabijheid. Hij zendt een radiosignaal uit naar deze tags waarop de tags een signaal terug sturen met bijgevoegde data voor de reader. Iedere tag heeft een unieke identificatie toegevoegd aan de data, waardoor de reader de locatie kan bepalen van de verschillende tags. Het radiosignaal, ook radiofrequente straling genoemd, zijn golven in de vorm van elektromagnetische straling met golflengten uiteenlopend van ruwweg duizend kilometer tot een millimeter, dus in het frequentiegebied van enkele honderden Hz tot enkele honderden GHz (Figuur 14). RFID tags kunnen opgedeeld worden in twee categorieën: actieve en passieve tags. Actieve tags werken met behulp van batterijen.

Door de aanwezigheid van de batterij is de kost van de *tag* hoger dan bij passieve *tags* en ook het gewicht zal groter zijn. Een voordeel van actieve *tags* is dat de reikwijdte veel groter is dan bij passieve *tags*. Deze kan tot 30 meter reiken. Passieve *tags* maken gebruik van *inductie*<sup>11</sup> waardoor de aanwezigheid van een batterij overbodig is. De ontvangen radiogolf wekt energie op bij de passieve *tags*, waardoor deze een signaal kunnen terug sturen naar de reader met bijgevoegde data. Hierdoor worden de *tags* lichter en goedkoper. De *tags* maken gebruik van vier verschillende frequentiebanden. Namelijk LF 125 kHz, HF 13,56 MHz, UHF 433 tot 868-915 MHz en microgolffrequentie 2,45 tot 5,8 GHz. (Mautz, 2012)

De drie grootste problemen bij RFID zijn een storingsprobleem tussen de verschillende componenten, de onbekwaamheid in communicatie tussen de verschillende readers en de gelimiteerde capaciteiten van passieve *tags* (Papapostolou & Chaouchi, 2012).

#### **2.2.4.1 RFID afstandsbe­paling techniek en positie­be­paling**

Bij RFID worden vrijwel alle opties RSSI, TOA, TDOA, AOA en nabijheid toegepast om de afstand te bepalen, de ene techniek is al doeltreffender dan de andere, afhankelijk van de omgeving of van de toepassing. (Mautz, 2012)

Zodra afstanden beschikbaar zijn tussen vaste zenders en een ontvanger, waarvan de locatie bepaald moet worden, is het mogelijk om meerdere methodes toe te passen voor de positiebepaling van de mobiele ontvanger. Eén van deze methodes is de reeds besproken fingerprinting, waarbij gebruik wordt gemaakt van een grote database en een training fase. Deze database zit vol met metingen die verzameld worden gedurende de tijdrovende (enkele dagen) training fase (offline). De positiebepaling fase (online) is het positioneren van een mobiele ontvanger. Hier wordt een nieuwe meting vergeleken met waarden uit de database. De opgeslagen metingen, die het meest lijken op de meting van de ontvanger, geven de meest waarschijnlijke locatie. Een nadeel van deze methode is dat de database gevuld moet worden met nieuwe metingen als de omgeving verandert. (Mautz, 2012)

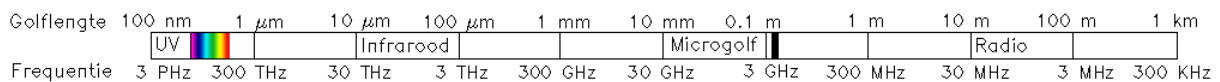
De tweede mogelijkheid is sneller dan fingerprinting en heeft geen offline fase nodig. Deze techniek maakt gebruik van geometrische technieken of statistische methodes. Geometrische technieken gebruiken de geometrie om de positie te bepalen met behulp van minstens drie gemeten afstanden. Als voorbeeld is de geometrische multilateratie, niet te verwarren met trilateratie aangezien deze absolute afstanden gebruikt tot drie of meer referentiepunten of met de triangulatie dat hoeken gebruikt. De trilateratie en triangulatie zijn ook mogelijk, maar bij lokalisatie met behulp van RFID wordt multilateratie het meest toegepast. (Mautz, 2012)

---

<sup>11</sup> Inductie is het natuurkundig verschijnsel waarbij over een geleider een elektrische spanning wordt opgewekt wanneer de geleider zich bevindt in een veranderend magnetisch veld of wanneer een geleider beweegt in een magnetisch veld.



## 2.2.5 Bluetooth



**Figuur 15: Frequentie Bluetooth (eigen bewerking van Mautz, 2012)**

De Bluetooth standaard is een gepatenteerd formaat die door de Bluetooth Special Interest Group (SIP)<sup>12</sup> groep beheerd wordt. Bluetooth technologie is gelijkaardig aan die van Wi-Fi. Het is ook een draadloze netwerk technologie, maar ontwikkeld voor kleinere schaal. Bluetooth werkt net als Wi-Fi in de 2,4 GHz ISM band (Figuur 15), daarom zijn veel van de positiebepalingstechnieken dezelfde als Wi-Fi. In vergelijking met Wi-Fi is de bitsnelheid lager ( $\pm 1$  MB/s) en de reikwijdte korter (10 tot 15 meter). Het grote voordeel aan Bluetooth is dat het overal terug te vinden is. Het is verwerkt in de kleinste apparaten zoals smartphones, tablets en pda's. Bovendien ondersteunt het tal van netwerk services. Nog een voordeel wordt teruggevonden bij het uitwisselen van informatie tussen apparaten, waarbij de Bluetooth technologie een lagere kost heeft, een hoge beveiliging en vereist het een lagere kracht in tegenstelling tot andere systemen. (Adalja, 2013; Bekkelien, 2012; Scheerens, 2012)

*“Bluetooth is designed to support low power wireless communication. Therefore one of its features is power control. This feature allows a transmitter to adjust its strength based on the RSSI received from another device. With this feature transmission strength can either be increased or decreased to ensure the received signal strength is within an optimal range for the receiver. For some Bluetooth devices this may lead to a significant reduction in consumed power, due to the fact that it does not always need to transmit with maximum power output.”* (Daan Scheerens, 2012)

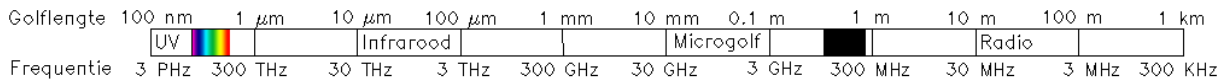
Bluetooth tags zijn kleine ontvangers. Net als elk Bluetooth apparaat heeft elke tag een unieke ID (identificatie). Dit ID kan gebruikt worden om de Bluetooth tag te lokaliseren. De ‘Blue Tag’ is een typische Bluetooth tag. Bluetooth technologie wordt hoofdzakelijk gebruikt voor positiebepaling op kleine schaal, zoals bijvoorbeeld in een kamer of in een warenhuis. (Adalja, 2013; Bekkelien, 2012; Scheerens, 2012)

### 2.2.5.1 Bluetooth afstandsbeeping techniek en positiebepaling

Net als Wi-Fi maakt Bluetooth het meest gebruik van de ontvangen signaalsterkte (RSSI) om de afstand te bepalen. Als positiebepaling techniek gebruikt Bluetooth de trilateratie of de fingerprinting techniek. (Adalja, 2013; Bekkelien, 2012; Scheerens, 2012)

<sup>12</sup> SIP: Bluetooth was oorspronkelijk een codenaam voor een project van de SIP of Special Interest Group dat bestaat uit grote bedrijven zoals Ericsson, Intel en Nokia.

## 2.2.6 UWB



**Figuur 16: Frequentie UWB (eigen bewerking van Mautz, 2012)**

Ultra-Wideband (UWB) is ontworpen voor communicatie op korte afstand en werkt met een grote bandbreedte. In vergelijking met *narrowband*<sup>13</sup> hebben UWB golven een veel grotere frequentie bandbreedte. Een uitgestuurde radiogolf behoort tot UWB als de bandbreedte meer als 500 MHz (Figuur 16) is. Door legale restricties op de signaalkracht wordt het bereik van UWB gelimiteerd tot minder dan 100 meter. Langs de andere kant zorgt dit ervoor dat de UWB niet schadelijk is voor de mens en beperkt het de interferentie met andere ontvangers. In tegenstelling tot RFID, die op een enkele frequentieband werkt, zendt UWB gelijktijdig golven uit over meerdere frequentiebanden. De frequenties van deze golven kunnen lopen van 3,1 tot 10,6 GHz. UWB zendt signalen uit over een veel kleinere tijd dan RFID, hierdoor wordt het makkelijker de signalen te filteren om het correcte signaal te onderscheiden van signalen gecreëerd door multipath. (Adalja, 2013; Bellusci, 2011)

Erkende UWB technologieën werken in dezelfde golflengte van de microgolven waarbij enkel de lage frequentie golven van het UWB signaal de eigenschap hebben om doorheen bouwmaterialen te dringen zoals beton, glas en hout (Konkur et al. 2009). Dit is een zeer belangrijke eigenschap bij indoor positionering aangezien het positiebepaling mogelijk maakt bij not-in-line-of-sight (NLOS) omstandigheden. Langs de andere kant is partiële penetratie niet geschikt voor precieze afstandsmetingen omdat een deel van de signalen gereflecteerd wordt. Het is daarom enorm moeilijk om bij UWB de correcte informatie uit het ontvangen signaal te halen. (Adalja, 2013; Bellusci, 2011)

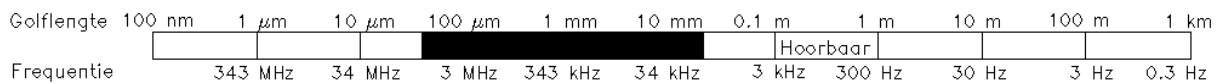
UWB systemen hebben veel voordelen in vergelijking met de traditionele narrowband systemen, zoals hun grote penetratiekracht, lage energieverbruik, hun weerstand tegen multipath effecten, hoge beveiliging, lage complexiteit en hoge accurate positionering enz. Daarom kan UWB technologie toegepast worden bij stationaire indoor of bewegende objecten en het traceren of navigeren van mensen. Het kan ook gebruikt worden voor precieze positiebepaling, bijvoorbeeld voor het bepalen van de locatie van soldaten of het traceren van robots in een fabriek. (Adalja, 2013; Bellusci, 2011)

<sup>13</sup> Narrowband beschrijft een kanaal waarin de bandbreedte van het bericht de bandbreedte van het kanaal niet aanmerkelijk overschrijdt.

### 2.2.6.1 UWB afstandsbepaling techniek en positiebepaling

Bij UWB zijn eveneens meerdere mogelijkheden om de afstanden uit de signalen af te leiden, de meest toegepaste is TOA. Om de positie te bepalen zijn ook meerdere mogelijkheden die vaak worden toegepast met als meest gebruikte de reeds besproken trilateratie, multilateratie of fingerprinting. (Adalja, 2013; Bellusci, 2011)

### 2.2.7 Ultrasonische systemen



**Figuur 17: Frequentie Ultrasonische systemen (eigen bewerking van Mautz, 2012)**

In vergelijking met elektromagnetische golven werken ultrasonische systemen met mechanische golven. Mechanische golven ontstaan door een medium dat trilt of aan het trillen gebracht wordt. Ultrasonische positiebepaling gebruikt de reflectieve afstandsmeting methode waarbij een ultrasonische zendontvanger een echo genereert op het te meten object. Het ultrasone geluidsgebied begint vanaf ongeveer 20 kilohertz en loopt tot 800 MHz (Figuur 17). Het voordeel van de reflectieve afstandsmeting methode is dat ze geen aparte zenders en ontvangers nodig heeft. (Adalja, 2013)

Ultrasonische systemen kunnen een cm tot mm -nauwkeurigheid bereiken, het heeft wel enkele nadelen. Het bereik van dit systeem is 10 m of zelfs minder vanwege de aard van het verval voor dit soort akoestische signalen. Multipath en interferentie tonen ook een groot probleem bij ultrasonische positiebepaling. Het systeem vereist ook veel investeringen aan hardware infrastructuur waardoor de kost voor ultrasonische systemen te hoog is. (Adalja, 2013)

RF signalen worden samen met ultrasonische golven uitgezonden om de ontvanger te activeren. Doordat de snelheid van RF signalen  $10^6$  keer sneller is dan de snelheid van geluid, kunnen de RF signalen gemakkelijk worden uitgefilterd. De grootste invloed op de snelheid van geluid wordt bekomen door temperatuurschommelingen. Bij een maximum reikwijdte van 10 m veroorzaakt een verschil van  $1^\circ\text{C}$  in temperatuur een afwijking van 2 mm op de afstandsbepaling. Hierdoor worden de zendontvangers uitgerust met sensoren die de temperatuurschommelingen automatisch compenseren. Niettemin is de werkelijke temperatuur van het medium tussen de zendontvanger en het object niet gekend, waardoor kleine afwijkingen kunnen ontstaan (Adalja, 2013; Mautz, 2012).

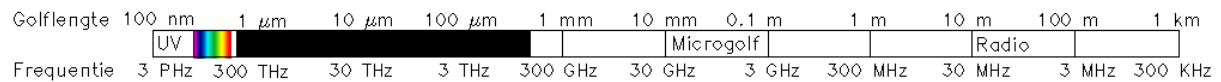
Een kleine fractie van de systemen op geluid werken met hoorbare geluidsgolven.

#### 2.2.7.1 Ultrasonische afstandsbepaling techniek en positiebepaling

De methode van reflectieve afstandsmeting kan gecategoriseerd worden onder het TOA principe. Met behulp van een triangulatie kan de locatie van objecten worden bepaald.

Naast de reflectieve afstandsmeting kan ultrasonische positiebepaling bekomen worden met behulp van een mobiele zender en vaste ontvangers of door een mobiele ontvanger en vaste zenders. De positie van de mobiele zender wordt bepaald met TOA en een multilateratie. (Adalja, 2013)

## 2.2.8 Infrarood Systemen



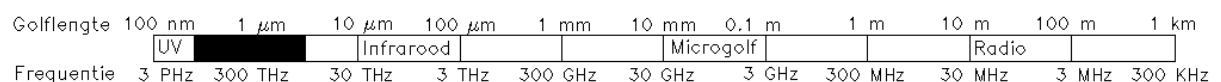
**Figuur 18: Frequentie IRS (eigen bewerking van Mautz,2012)**

Het principe van positiebepaling bij het infrarood systeem (IRS) is een gemoduleerde IR straal emissie die geïdentificeerd wordt door de optische sensor. Deze optische sensor wordt geïnstalleerd in de ontvanger. Hoewel infrarood een simpele structuur heeft, heeft het een lage kost en een relatief hoge nauwkeurigheid in indoor omgevingen. Omdat licht niet door obstakels kan, is infrarood de enige communicatie straal die een vizierlijn vereist. Infrarood of infrarode straling is een voor het oog niet waarneembare elektromagnetische straling, met golflengten tussen ruwweg 780 nanometer en 1 mm dus tussen het (zichtbare) rode licht en de microgolven (Figuur 18). De twee grootste nadelen van indoor positionering met infrarood zijn de korte vizierlijnen en de transmissie afstand (Adalja, 2013; Mautz, 2012).

### 2.2.8.1 Infrarood afstandsbepaling techniek en positiebepaling

De positiebepaling gebeurt aan de hand van vaste infrarood ontvangers of een vaste ontvanger met AOA mogelijkheden en een mobiele zender. De plaatsing van deze vaste ontvangers gebeurt ruimte per ruimte aangezien infrarood stralen niet doorheen muren of objecten kunnen. (Adalja, 2013)

## 2.2.9 Camera's



**Figuur 19: Frequentie Camera's (eigen bewerking van Mautz,2012)**

Huidige navigatiesystemen gebruiken GPS signalen om een voertuig te traceren, dit leidt tot problemen in 'urban' omgevingen. Wanneer het GPS signaal verloren raakt voor meer dan 30 seconden, faalt het GPS systeem om nog de huidige locatie van het voertuig weer te geven. Door meerdere satellieten het luchtruim in te sturen, wordt dit probleem niet aangepakt (Mautz, 2012; Van Hamme, Veelaert, & Philips).

Een mogelijkheid om de locatie van het voertuig te achterhalen, nadat het GPS signaal verloren gaat, wordt bekomen met behulp van camera's, meer bepaald visuele *odometrie*<sup>14</sup> (visual odometry). Door gebruik van camera's wordt de 3D beweging van het voertuig getraceerd. Visuele odometrie meet enkel relatieve bewegingen op, waardoor het gebruik van externe punten zoals start punten of gekende punten, nodig zijn om de bewegingen te converteren naar absolute wereld coördinaten (Mautz, 2012; Van Hamme et al.; Van Hamme, Veelaert, & Philips, 2011).

Tijdens de verschillende onderzoeken werden diverse camera's gebruikt. Zo werden stereo- en omnidirectionele camera's toegepast. Een aantal van deze methoden werden te omslachtig voor personenvoertuigen, ze werden te duur of moeilijk te kalibreren. Uiteindelijk werd een systeem ontwikkeld dat gebruik maakte van een enkele, niet panoramische camera met een standaard lens. Bij testen in gecontroleerde indoor omgevingen werd al een goede prestatie bekomen. Om deze techniek in realiteit te kunnen gebruiken, moet rekening worden gehouden met meerdere obstakels, zoals meerdere voertuigen op de weg of de snelheid die verhoogt waardoor het voertuig meer gaat stampen of rollen. Hierdoor werd de methode aangepast aan deze voorwaarden. (Mautz, 2012; Van Hamme et al., 2011)

*“The key idea of the method is a back projection of image features onto the road which takes into account the uncertainty about the attitude of the vehicle on its suspension. Careful modelling of the uncertainty allows us to eliminate outliers by a voting mechanism and obtain good accuracy. The system uses a single forward-facing camera, and boasts the advantages that it can cope with highly contaminated feature sets and is relatively insensitive to small calibration errors. Several tests have shown the method to be robust to outliers and difficult environments, with useful accuracy up to distances of several kilometres.”* (David Van Hamme, Peter Veelaert and Wilfried Philips, 2013). Doordat gewerkt wordt met relatieve coördinaten kunnen kleine rotatiefouten in het begin leiden tot een grote afwijking in absolute coördinaten. Door het kromtrekken van het traject op een opgeslagen map is geen contact nodig met buitenstaande elementen zoals GPS. Enkel een initieel startpunt en een oriëntatie zijn nodig. Vanaf dit punt wordt elke mogelijke route weergegeven via een boomstructuur. Terwijl de visuele odometrie de volgende beweging schat, wordt de boomstructuur continue geüpdate, zodat elk knooppunt wordt gecorrespondeerd met het dichtstbijzijnde pad naar de weg, waar het knooppunt naar verwijst. De benadering laat elke mogelijke route toe en vindt de best passende positie van het voertuig. De methode laat een vlugge correctie toe van fouten die ontstaan uit onnauwkeurige bewegingsschatting. (Mautz, 2012; Van Hamme et al., 2011) *“The mapping method is shown to be an effective way of limiting positional error for several trajectories up to over 4km.”* (David Van Hamme, Peter Veelaert and Wilfried Philips, 2013)

---

<sup>14</sup> Odometrie is het berekenen van verandering in positie doorheen de tijd aan de hand van data afkomstig van bewegende sensoren. Odometrie wordt vaak gebruikt bij robots om hun huidige positie relatief te berekenen tegenover hun startpunt.

Om een verband te leggen tussen het camerabeeld en de bijhorende terugprojectie wordt gewerkt met coördinaten systemen. Hiervoor worden drie systemen toegepast: 3D wereld coördinaten, 3D camera coördinaten en 2D camera coördinaten. Om van 3D wereld coördinaten naar 2D beeld coördinaten te gaan, worden verschillende matrices gehanteerd. Hieruit volgt een rotatiematrix  $R$ , die bestaat uit drie rotaties, namelijk deinen, stampen en rollen (heave, pitch, roll). Er kan verondersteld worden dat enkel het deinen constant blijft, doordat de vering van het voertuig geen invloed heeft op de richting van het voertuig. De vering heeft wel een invloed op de overige twee rotaties. De rotaties veroorzaakt door het stampen en rollen, vormen een uitdaging bij deze methode. Op Figuur 20 ziet u een voorbeeld van een camerabeeld en zijn bijhorende terugprojectie. (Van Hamme et al., 2011)

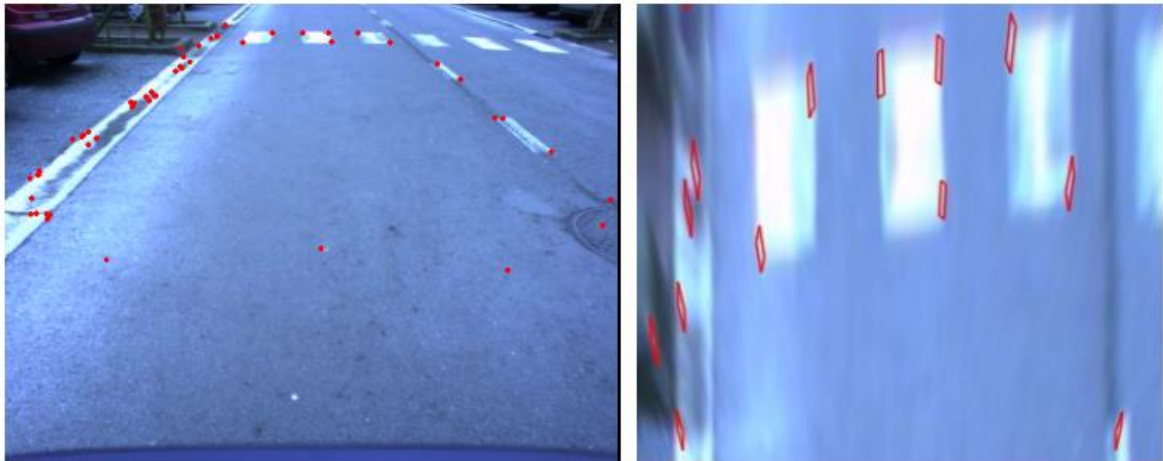


*Figuur 20: Voorbeeld van camerabeeld (links), bijhorende terugprojectie (rechts)(Van Hamme et al.)*

Het idee achter de methode is het volgende: de locatie kenmerken van beeld N-1 zullen worden gebruikt om deze kenmerken te voorspellen voor beeld N. De observatiekenmerken in het camerabeeld N worden benut om een regio te projecteren op het grondplan van beeld N. Waar het voorspelde en geprojecteerde beeld elkaar overlappen, is een mogelijke overeenkomst in de kenmerken. Alle overlappings worden samengevat in een schema om de hoek en de afstand te schatten van de afgelegde weg.(Van Hamme et al.)

### **2.2.9.1 Terugprojectie**

De veranderlijkheid door stampen en rollen wordt een perspectieve onzekerheid (perspective uncertainty) genoemd. Een verandering in stampen en rollen verandert de rotatiematrix waardoor vier punten gehaald kunnen worden, waartussen de extrema van stampen en rollen moeten liggen. De vierhoek die bekomen wordt door de vier punten te verbinden, wordt een perspectieve onzekerheidsvierhoek (perspective uncertainty tetragons, PUT) genoemd. Er bestaat een PUT voor elk kenmerk dat gedetecteerd wordt op het camerabeeld. In Figuur 21 wordt een voorbeeld gegeven van enkele kenmerken en hun bijhorende PUT.(Van Hamme et al., 2011)

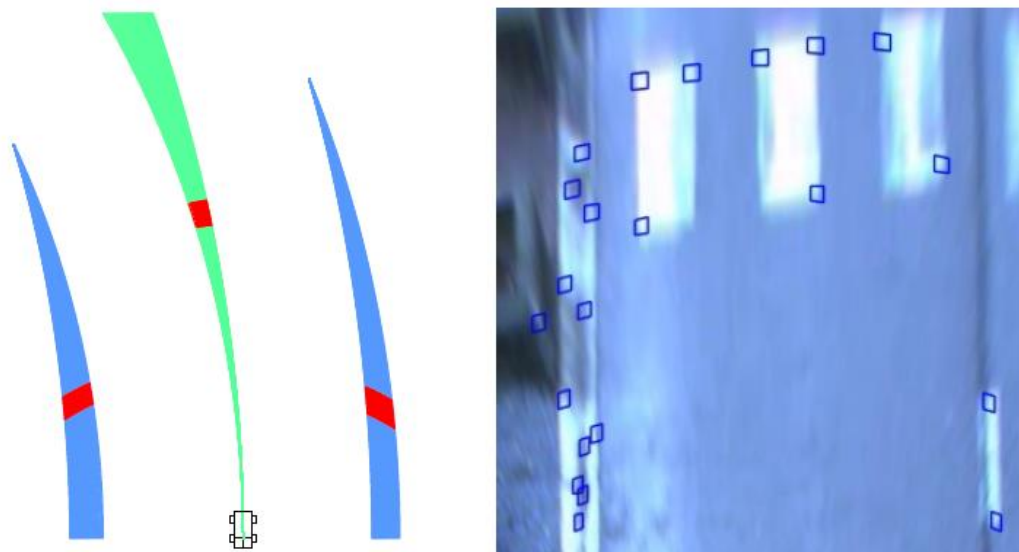


**Figuur 21: Camerabeeld links, close-up van enkele geassocieerde PUT's (Van Hamme et al.)**

*"In Fig.21 that pitch is the main factor contributing to the uncertainty (vertical elongation), while the effect of roll remains limited."* (David Van Hamme, Peter Veelaert and Wilfried Philips, 2013)

#### **2.2.9.2 Voorspelling beeld**

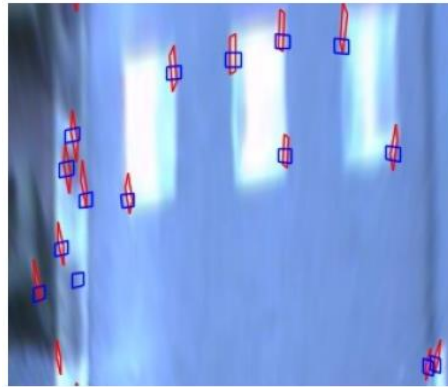
De onbekende invoer van de bestuurder wordt op eenzelfde manier behandeld als stampen en rollen bij terugprojectie. De invoer van de bestuurder bestaat uit twee parameters: versnelling/remming en stuurhoek. Door de gegeven versnelling/remming en stuurhoek tussen de twee vorige beelden wordt de versnelling/remming en de stuurhoek voorspeld tussen het vorige en recentste beeld. Zoals bij terugprojectie wordt een vierhoek voorspeld waartussen deze parameters zullen liggen. Deze vierhoeken worden aangeduid op het grondvlak en worden beweging onzekerheidsvierhoeken (motion uncertainty tetragon MUT) genoemd. Figuur 22 toont een voorbeeld van het voorspelde traject en zijn bijpassende MUT. (Van Hamme et al., 2011)



**Figuur 22: Illustratie van het voertuig (links). Het groene gebied correspondeert met het voorspelde traject gebaseerd door de stuurhoek. Het rode gebied toont de mogelijke locatie van het voertuig gebaseerd op de versnelling/remming. Het blauwe gebied en het rode gebied vormen de dubbel transformatie. Rechts: Resulterende MUT's (Van Hamme et al.).**

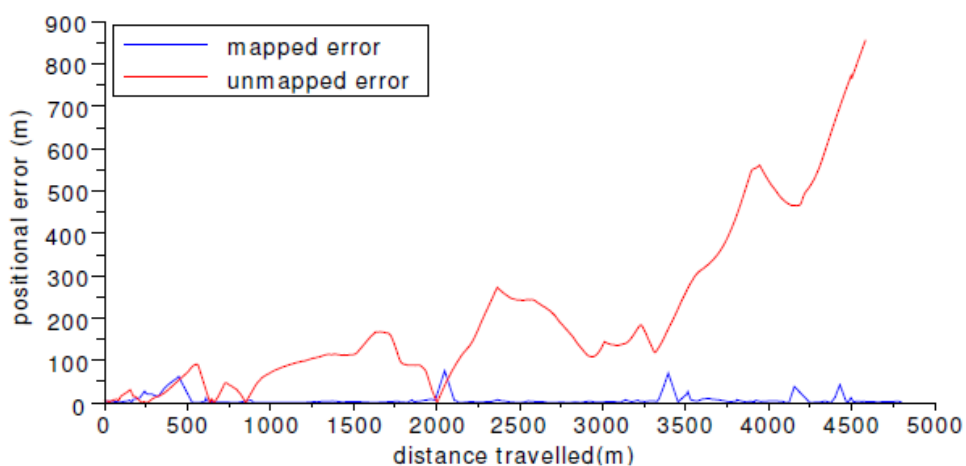


Om een overeenkomst te vinden tussen het voorspelde en geprojecteerde beeld wordt naar de overlapping gekeken tussen de PUT's en MUT's. Eens deze kenmerken corresponderen kan de snelheid en stuurhoek berekend worden. Wanneer deze parameters gekend zijn kan het volledige traject van het voertuig gereconstrueerd worden. Een voorbeeld van deze overeenkomst is te zien in Figuur 23.(Van Hamme et al., 2011)



**Figuur 23: Overeenkomst tussen PUT's en MUT's (Van Hamme et al.).**

Het onderzoek bestond uit zes verschillende trajecten van 500 m tot 4,8 km. Verschillende snelheden en obstakels zoals wegverhoging, andere voertuigen en diverse oppervlakten werden aangehaald. Omdat visuele odometrie enkel de relatieve beweging van het voertuig schat, is het vatbaar voor drift. Drift is een grote absolute positiefout dat toeneemt naargelang de afstand. Deze fout kan worden opgelost door te refereren naar externe bronnen. Doordat er geen GPS verbinding is wordt gewerkt met een offline map, mapping genoemd. Een voorbeeld tussen de fout met en zonder mapping, is te zien in Figuur 24. (Van Hamme et al.)



**Figuur 24: Positiefout, vergeleken met GPS, met en zonder mapping (Van Hamme et al.).**



### 2.2.9.3 Conclusie

In Tabel 1 wordt de gemiddelde positiefout en de standaarddeviatie weergegeven. Waaruit volgt dat deze methode geschikt is voor het gebruik waar GPS het laat nazien. *“It is proven to provide reliable and accurate relative motion estimation on a number of real-world test scenarios. To eliminate drift in absolute world position, we propose a mapping method that uses an offline map to construct a tree of possible trajectories in real time. The combined visual odometry and mapping methods provide typical immediate positional accuracy within 7 m compared to GPS ground truth.”* (David Van Hamme, Peter Veelaert and Wilfried Philips, 2013) Deze methode is echter te onnauwkeurig voor gebruik als indoor positioneringssysteem. Ook het bevestigen van een camera aan elk object waarvan de positie bepaald moet worden, is een enorm werk. In vele gevallen zal de camera groter zijn dan het te bepalen object. (Van Hamme et al., 2011)

**Tabel 1: gemiddelde en standaard fout tussen mappen en unmapped traject en gps data (Van Hamme et al.)**

	Unmapped	Mapped
Mean Positional Error (m)	139,99	6,93
Std of Positional Error (m)	200,08	12,72

### 2.2.10 Zichtbaar licht

Een nieuwe techniek die nog maar net zijn opmars kent, is indoor positionering met behulp van zichtbaar licht. Zichtbaar licht heeft enkele grote voordelen ten opzichte van andere positiebepalingssystemen. Zo zijn in bijna alle ruimtes meerdere lichtbronnen beschikbaar die de volledige ruimte verlichten, maar niet iedere lichtbron kan gebruikt worden voor indoor positionering. Voor een geheel verlichte ruimte kan een ontvanger worden ontwikkeld die Line of Sight (LOS) stralen kan ontvangen van meerdere lichtbronnen (Hyun-Seung, Deok-Rae, Se-Hoon, Yong-Hwan, & Sang-Kook, 2013).

Een nieuwe vorm van verlichting zijn LED lampen, deze bieden nieuwe mogelijkheden voor indoor positionering met behulp van zichtbaar licht. Zo kan LED op een hogere frequentie gemoduleerd worden in vergelijking met conventionele verlichting. Het is duurder maar heeft een langere levensduur, waardoor de plaatsingskost op langere tijd opbrengt. Multipath is een veel voorkomend fenomeen bij indoor positionering waardoor de nauwkeurigheid daalt, maar omdat bij zichtbaar licht het verschil in signaalsterkte tussen het LOS signaal en het multipath signaal groot is, kan het multipath signaal gemakkelijk uitgefilterd worden (Cheok & Yue, 2011).

Vele onderzoeken maken gebruik van RSS om een hoge nauwkeurigheid te bekomen, hiervoor moet het optisch vermogen en de eigenschappen van het optisch kanaal zeer goed gekend zijn. De hoge nauwkeurigheid wordt bekomen in labo condities, waar deze condities in realiteit niet voorkomen. Ook is het optisch vermogen onvoorspelbaar, het varieert in tijd en is afhankelijk van de

eigenschappen van LED en het level van dimmen. Bewegende objecten die de LOS verstoren of welke armatuur wordt toegepast, hebben ook invloed op de nauwkeurigheid bij RSS.

Hierdoor wordt de nauwkeurigheid gelimiteerd voor RSS systemen. TOA kan niet worden toegepast omdat het signaal zeer nauwkeurig gesynchroniseerd moet worden. Hiervoor zijn atoomklokken nodig die de kostprijs van het systeem opmerkelijk doen stijgen. Hetzelfde geldt voor TDOA, TOA en TDOA. AOA is een interessantere methode en biedt meerdere voordelen. LOS blijft een veel voorkomend probleem, ook al staat de ontvanger meestal wel in LOS met meerdere lichtbronnen. Een ander voordeel is de gebruikte nauwkeurige lenzen, deze zijn economisch te produceren waardoor simpele lenzen een nauwkeurige AOA informatie kunnen bekomen (Armstrong Jean, Sekercioglu, & Neild, 2013).

Indoor positionering via zichtbaar licht staat nog in zijn kinderschoenen. Er loopt veel onderzoek naar indoor positionering met behulp van zichtbaar licht, maar momenteel worden hoge nauwkeurigheden enkel bekomen in ideale omstandigheden in het labo. (Armstrong Jean et al., 2013 ; Hyun-Seung et al., 2013)

### **2.2.11 Samenvattende tabel**

In Tabel 2 worden verschillende commerciële indoor positionering systemen met elkaar vergeleken. Er wordt een opsplitsing gemaakt tussen de techniek, systeem, nauwkeurigheid, precisie, reikwijdte, *robuustheid*<sup>15</sup>, kost en of het op de markt verkrijgbaar is of niet. Uit Tabel 2 kunnen verschillende conclusies worden getrokken. De meest voorkomende positiebepalingstechniek is RSS. De grote ontwikkeling van Wireless Local Area Network (WLAN) kan hiervoor een reden zijn. Doordat WLAN's globaal toegepast worden, kan de kost voor een RSS systeem worden gereduceerd. Ook de lage complexiteit van RSS kan een rol spelen om te kiezen voor deze techniek. Doordat RSS de meest voorkomende positiebepalingstechniek is, is WLAN ook het meest voorkomende positiebepalingssysteem. Tussen de nauwkeurigheid en het positiebepalingssysteem kan ook een verband worden teruggevonden. Als WLAN, active RFID, assisted GPS of UHF worden toegepast, wordt meternauwkeurigheid bekomen. Bij Bluetooth en UWB varieert de nauwkeurigheid tussen de meter en de centimeter. Dit kan te maken hebben met de toegepaste positiebepalingstechniek. Bij ultrasound wordt telkens een centimeter nauwkeurigheid bekomen. Daar het positiebepalingssysteem telkens TOA is, heeft dit ook invloed op het kostenplaatje van het systeem. Hierdoor is het verband tussen kostprijs en nauwkeurigheid duidelijk. Hoe hoger de nauwkeurigheid wordt, hoe hoger de kostprijs.

---

<sup>15</sup> Robuustheid: in hoeverre is het systeem gevoelig voor storingen van buitenaf, de robuustheid bepaalt in hoeverre foutieve input doorwerkt op de output. Hoe presteert het systeem in diverse fysische indoor omgevingen onder realistische RF-interferentie omstandigheden? Toelichting: Een indoor positioning systeem met een hoge robuustheid kan normaal functioneren zelfs als sommige signalen niet beschikbaar zijn.

**Tabel 2: Samenvattende tabel**(Al Nuaimi & Kamel, 2011; Bahl & N. Padmanabhan; Brignone, Connors, Lyon, & Salil, 2005; Deak, Curran, & Condell, 2012; Farid et al., 2013; Gu, Lo, & Niemegeers, 2009; Liu et al., 2007; M. Ni, Liu, Cho Lau, & P. Patil, 2004; Pfeifer & Elias, 2003; Youssef & Agrawala)

Naam	Positiebepaling techniek	Positiebepaling systeem	Nauwkeurigheid	Precisie	Reikwijdte	Robuustheid	Kost	Commercieel
Active Badge	TOA	IR	7cm	/	5m	invloed van licht + LOS	Medium	Ja
Active Bats	TOA	Ultrasound	9cm	95% binnen 0,3m	50m	invloed van reflectie + LOS	Hoog	Nee
Cricket	TOA	Ultrasound	2cm	99% binnen 0,3m	10m	invloed van reflectie + LOS	Hoog	In ontwikkeling
DIT	RSS	Wlan	3m	90% binnen 5,12	/	Enkel op 1 bouwlaag	Laag	Nee
Dolphin	TOA	Ultrasound	2cm	/	Kamer	invloed van reflectie + LOS	Hoog	Nee
EIRIS	RSS	UHF + IR	1m	50% binnen 1m	/	Slecht	Medium tot Hoog	Ja
Ekahau	RSS	Wlan	1m	50% binnen 2m	/	Enkel bij 3 of meer AP's	Laag	Ja
Horus	RSS	Wlan	2m	90% binnen 2,1m	10m	Enkel op 1 bouwlaag	Laag	Nee
Landmark	RSS	Active Rfid	2m	50 % binnen 1 m	50m	Slecht	Laag	Nee
Locata	TOA	RF	6mm	/	2-3 km	/	Hoog	In ontwikkeling
Microsoft radar	RSS	Wlan	3-5m	50% binnen 2,5m 90% binnen 5,9m	Kamer	Niet nauwkeurig en niet solide	Laag	Nee
Multiloc	RSS	Wlan	2,7m	50% binnen 2,7m	/	Goed	Medium	Ja (Multilux)

Naam	Positiebepaling techniek	Positiebepaling systeem	Nauwkeurigheid	Precisie	Reikwijdte	Robuustheid	Kost	Commercieel
PinPoint	RTOF	UHF	1m	50% binnen 1m	/	Goed	Laag	Nee
Quuppa	AOA	Bluetooth	0,3 m	/	11m	Goed	Laag	Ja
Robot-based	RSS	Wlan	1,5m	50% binnen 1,5m	/	Goed	Medium	Ja
Sapphire Dart	TDOA	UWB	0,3 m	50% binnen 0,3m	/	Slecht	Medium tot Hoog	Ja
Smartlocus	RSS + RTOF	Wlan + Ultrasound	2-15cm	50% binnen 15cm	/	Goed	Medium tot Hoog	Nee
Snaptrack	TDOA	Assisted GPS	5-50m	50% binnen 25 m	/	Slecht	Medium	Nee
SpotON	RSS	Active Rfid	3 m	/	Kamer	Goed	Laag	Nee
TIX	RSS	Wlan	5,4m	50% binnen 5,4m	/	Goed	Medium	Nee
Topaz	RSS	Bluetooth + IR	2m	95% binnen 2 m	/	Gebruik van Bluetooth en IR voor hogere robuustheid	Medium	Ja
Ubisense	TDOA + AOA	UWB	15 cm	99% binnen 0,3m	/	Goed	Hoog	Ja
WhereNet	TDOA	UHF	2-3m	50% binnen 3 m	20m	Frequentie van de signalen	Laag	Ja
Zigbee	RSS	Wlan	3-5m	/	20-30m	/	Laag	Ja

### **2.2.12 EVARILOS: evaluatie van RF-gebaseerde Indoor positioning systemen**

Er zijn reeds een groot aantal RF-gebaseerde indoor positionering systemen op de markt en hun aantal blijft groeien. Voor de objectieve evaluatie van de robuustheid<sup>15</sup> van de verschillende indoor positioning systemen werd door ‘Evaluation of RF-based indoor localization solutions’ EVARILOS een methodologie ontwikkeld, namelijk de EVARILOS Benchmarking Methodology (EBM). Het gebruik van de EBM garandeert reproduceerbare onderzoeksresultaten in werkelijkheidsgetrouwe scenario’s, onderhevig aan realistische RF-interferentie. Dit maakt het ook mogelijk om de verschillende systemen onderling objectief te vergelijken. (Van Haute et al., 2014)

In tegenstelling tot andere methodes, maakt het EVARILOS handboek niet enkel gebruik van de nauwkeurigheid van het geëvalueerde indoor positionering systeem, maar brengt het ook de robuustheid in aanwezigheid van interferentie mee in rekening. Ook met andere relevante prestatieparameters, zoals complexiteit, kosten en energie-efficiëntie, enz. wordt rekening gehouden. (Van Haute et al., 2014)

De methode van het EVARILOS handboek koppelt de geëvalueerde individuele statistische waarden los van de berekening van de eindscore voor het systeem. Nadat een set metingen verkregen is die nodig zijn voor de berekening van de individuele statistische waarden, geeft het EBM gewichten en grenzen aan elke parameter voor het berekenen van een eindscore. Hierdoor hebben de verschillende individuele statistische waarden elk een andere impact op de eindscore die in overeenstemming zal zijn met de toepassing waarvoor het systeem gebruikt zal worden. (Van Haute et al., 2014)

In deze masterproef worden een aantal elementen van de EVARILOS Benchmarking Methodology gebruikt, maar de methode kan niet volledig toegepast worden wegens ontbrekende gegevens.

### **2.3 Besluit**

Aan de hand van de literatuurstudie en de vergelijkende tabel kan besloten worden dat meerdere systemen in aanmerking komen voor de toepassing die de firma Colruyt vooropstelt. Op vlak van kostprijs en nauwkeurigheid zijn RFID, Wi-Fi en Bluetooth gelijkwaardig, het zijn betaalbare systemen die gemiddelde een nauwkeurigheid halen tussen 0,3 m tot 5 m. Wat betreft radiosignalen is de beste optie een systeem dat werkt in de 2,4 GHz ISM (Industrial, Scientific, Medical) band, dat de enige geaccepteerde ISM band is dat wereldwijd beschikbaar is. Bluetooth en Wi-Fi werken volgens de ISM band. Andere radiosignalen zoals ultrasound en UWB leiden tot een te hoge kostprijs, ook al halen deze een betere nauwkeurigheid. Tevens zijn UWB en ultrasound geen commercieel verkrijgbare systemen en zijn hun nauwkeurigheden enkel bepaald in labo omstandigheden.

Colruyt heeft zelf reeds Quuppa aangekocht als indoor positioneringssysteem. Dit is een Bluetooth systeem dat de positie bepaalt aan de hand van AOA. Het grote voordeel aan Bluetooth is dat de technologie alomtegenwoordig is, het kan verwerkt worden in de kleinste apparaten zoals smartphones, tablets en pda's. Dit biedt extra mogelijkheden voor de toekomstige toepassingen met apparatuur van de klanten zelf, bovendien ondersteunt het tal van netwerk services. Nog een voordeel kan teruggevonden worden bij het uitwisselen van informatie tussen apparaten, waarbij de Bluetooth technologie een lagere kost en een hoge beveiliging heeft en minder energie vereist in tegenstelling tot andere systemen. Uit bovenstaande vaststellingen kan besloten worden dat Quuppa in aanmerking komt voor de beoogde toepassing van Colruyt.

### 3 Gevalstudie Quuppa

#### 3.1 Quuppa

##### Introductie

Quuppa werd opgericht in September 2012 door ingenieurs en wetenschappers die al sedert 2006 indoor positiebepalingssystemen onderzoeken. Quuppa is een indoor positionering systeem dat werkt op een lage spanning en opereert in de 2,4 GHz band. (Quuppa, 2013)

Quuppa voorziet twee oplossingen voor indoor positionering:

- HAIP Network Centric: is ontworpen voor gebruikers die de locatie van een object willen volgen. Dit kan gebruikt worden voor bv.: winkelwagentjes, het volgen van spelers bij een bepaalde sport,... De gemiddelde nauwkeurigheid ligt rond de 0,3 tot 1 meter.
- HAIP Mobile Centric: is ontworpen voor gebruikers die indoor locatie gebaseerde services willen voorzien voor smartphones of tablets. De gemiddelde nauwkeurigheid is ongeveer 10 meter. (Quuppa, 2013)

Beide oplossingen kunnen samen gecombineerd worden, waardoor de nauwkeurigheid van de HAIP Mobile Centric oplossing verbeterd wordt tot het niveau van de HAIP Network Centric oplossing. Zo kunnen winkelwagentjes gevolgd worden, terwijl tegelijkertijd een locatie gebaseerde service aangeboden wordt aan de klanten. (Quuppa, 2013)

##### HAIP Network Centric solution

HAIP Network Centric bestaat uit drie hoofdcomponenten. Een *tag*, een *locator* en een *controller*.

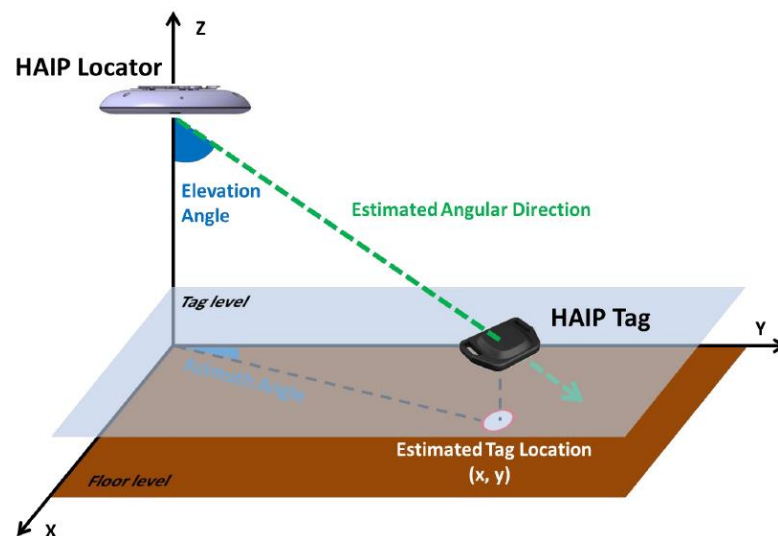
- De *tag* is een kleine radio zender/ontvanger die aan het te positioneren object wordt vast gehecht.
- De *tag*positie en andere data kunnen worden verworven via de web service API aangeboden door de *controller* (Quuppa, 2013)
- De *locator* is een radio zender/ontvanger gebruikt voor het bekomen van de status en de positie van de *tags*. De *locators* worden geïnstalleerd boven het te onderzoeken gebied. Via een ethernet netwerk worden de verschillende *locators* verbonden met de *controller*.
- De *controller* is een server met twee netwerk interfaces. Het werkt als een poort tussen een extern netwerk en het HAIP LAN.

##### Werkingsprincipe

Om de positie te bepalen van objecten wordt gebruik gemaakt van Angle Of Arrival. Door azimut en elevatiehoek samen met de gekende hoogte van de *tag*, kan de positie van de *tag* worden berekend door trigonometrie (zie Figuur 25).

De nauwkeurigheid van de positiebepaling is afhankelijk van de reikwijdte van de *locators* en het aantal *locators* dat de *tag* kan ontvangen. De producent van Quuppa beweert een nauwkeurigheid te kunnen halen van 30 cm. (Quuppa, 2013)

Via AOA kan een 2D of een 3D beeld worden gevormd van het te onderzoeken gebied. Indien de *tags* op winkelwagentjes worden bevestigd, blijft de Z-waarde ook constant, hierdoor kan gewerkt worden met een 2D beeld. Volgens producent van Quuppa mag de hoogte tussen verschillende *tags* variëren tot maximaal één meter om nog een correcte positiebepaling te bekomen in een 2D beeld. (Quuppa, 2013)



*Figuur 25: 2D plaatsbepaling (Quuppa, 2013)*

Om een bewegend object zoals een persoon te onderzoeken, moet de frequentie van de *tag* hoger zijn dan bij een stilstaande *tag*. Wanneer een basketbalwedstrijd wordt voorzien van indoor positionering, om de loopafstand of opstelling van een team te bekijken, worden de *tags* op een frequentie van ongeveer 20 Hz ingesteld. Bij stilstaande objecten kan gewerkt worden met een frequentie kleiner dan of gelijk aan 1 Hz. Hoe minder locatie updates de *tag* moet verzenden of hoe lager de frequentie, hoe langer de levensduur van de *tag*. Voor een frequentie van 1 Hz is de levensduur van een *tag* bepaald op 1 jaar. (Quuppa, 2013)

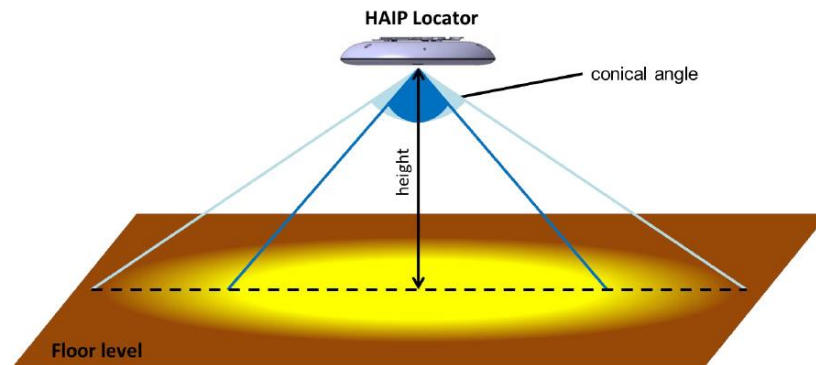
Er kunnen verschillende parameters worden toegevoegd aan het verzonden signaal van de *tag*. Deze parameters kunnen de snelheid, versnelling, temperatuur, batterij status, etc. zijn. (Quuppa, 2013)

### **Reikwijdte**

Voor een optimale werking van Quuppa moeten de *locators* zo hoog mogelijk worden geplaatst en mogen geen objecten het zicht tussen *locator* en *tag* versperren. In de meeste gevallen worden de *locators* aan het plafond bevestigd boven het te onderzoeken gebied. (Quuppa, 2013)



De reikwijdte van een *locator* kan worden vergeleken met het licht van een spot. Het licht zal een kegelvorm maken met het punt in de spot, hierdoor wordt op het grondvlak een cirkel bekomen waar het licht invalt. Hoe hoger de *locator* hangt, hoe groter de cirkel op het grondvlak waarbinnen een nauwkeurige meting kan gedaan worden. (Quuppa, 2013)



**Figuur 26: reikwijdte (Quuppa, 2013)**

De nauwkeurigheid is het hoogst binnen de kegelvormige hoek ('conical angle') van 100 graden. De radius dat wordt bekomen binnen deze kegelvormige hoek wordt beschreven als hoge precisie (HP) radius. Bij een kegelvormige hoek tussen 100 en 130 graden wordt een gereduceerde nauwkeurigheid bekomen (zie Figuur 26). De radius die bekomen wordt bij de gereduceerde nauwkeurigheid wordt RP radius genoemd. Tabel 3 toont aan welke reikwijdte behoort bij welke hoogte van de opgestelde *locators*. In de tabel wordt verondersteld dat de *tag* op één meter hoogte wordt geplaatst. (Quuppa, 2013)

Bij het plaatsten van de *locators* moet rekening worden gehouden met volgende aspecten: (Quuppa, 2013)

- De afstand tussen *locator* en de *tag* mag maximaal 120 meter zijn.
- De *line of sight* tussen de *locator* en de *tag* mag niet onderbroken worden door elektrisch geladen objecten.
- Om een continue hoge nauwkeurigheid te bekomen moeten de gebieden bekomen door een kegelvormige hoek van 100 graden elkaar overlappen per *locator*.
- De oriëntatie van alle *locators* moet in dezelfde richting worden geplaatst.
- Er mag zo weinig mogelijk stampen en rollen optreden.

**Tabel 3: Radius Locator's (Quuppa, 2013)**

Plafond [m]	Hoogte [m]	HP [m]	Radius [m]	RP [m]	Radius [m]	HP [m]	Signaal afstand [m]	RP [m]	Signaal afstand [m]
3		2,4		4,3		3,1		4,7	
5		4,8		8,6		6,2		9,5	
8		8,3		15		11		17	
10		11		19		14		21	
15		17		30		22		33	
20		23		41		30		45	
30		35		62		45		69	

### Capaciteit

Onder capaciteit wordt verstaan hoeveel *tags* actief kunnen zijn op een bepaald tijdstip. Quuppa kan tot 400 locatie updates verwerken per seconde per detectiegebied in een optimaal onderzoeksveld. Het detectiegebied is het gebied waar de *tag* gedetecteerd wordt, maar niet noodzakelijk een nauwkeurige positiebepaling heeft. Hoe lager de frequentie hoe meer *tags* kunnen verwerkt worden. Bijvoorbeeld kunnen duizenden *tags* actief zijn binnen een bepaald onderzoeksveld, maar er kan geen nauwkeurige positiebepaling gemaakt worden voor iedere *tag* als deze allemaal op hetzelfde tijdstip actief zijn. (Quuppa, 2013)

Om de capaciteit te verhogen kunnen twee verschillende stappen worden ondernomen: (Quuppa, 2013)

- Toevoegen van parallel geplaatste *locators*, zodat de capaciteit van het systeem kan verdubbelen.
- Door het reduceren van de zendkracht van de *tags* wordt het detectiegebied verkleind waardoor minder *tags* per *locator* worden gevonden. Om het te onderzoeken gebied volledig te dekken moeten bijkomende *locators* worden geplaatst.

### Interferentie

Met behulp van drie functies wordt interferentie geminimaliseerd: (Quuppa, 2013)

- Door 'connectionless' protocol wordt het aantal verzonden signalen geminimaliseerd. Er is één verzonden signaal nodig om een positie te bepaling van de *tag*. Onder 'connectionless' protocol wordt verstaan "een wijze van communicatie op het internet waarbij informatie tussen twee centrale computers op het netwerk wordt overgedragen zonder enig voorafgaande communicatieverbinding tussen hen" (www.almaany.com)
- De korte duur van de verzonden signalen verkleint de kans op interferentie met andere signalen.
- De verzonden signalen zijn 'narrowband'. Dit zijn de signalen die op de uiteinden van de ISM band werken en waar interferentie met Wi-Fi en Bluetooth minimaal is.

### 3.2 Probleem- en doelstelling

Colruyt heeft op basis van eigen onderzoek gekozen voor Quuppa, maar is het systeem een goede keuze en wat zijn de randvoorwaarden? Om dit na te gaan wordt onderzoek gedaan om te antwoorden op volgende vragen:

- Uitgaand van de keuze die gemaakt werd: wat is de meest ideale configuratie voor wat betreft
  - o nauwkeurigheid
  - o nauwkeurigheid in combinatie met kostprijs (investeringskost)
- Is de vooropgestelde nauwkeurigheid haalbaar?
- Welke factoren beïnvloeden de werking van het systeem negatief of positief in het geval van Colruyt en wat is die invloed?

### 3.3 Onderzoeksmethode

Het onderzoek wordt opgedeeld in 17 verschillende configuraties waarbij aantal *locators*, *tag*densiteit, de plaats of onderlinge afstand van de *locators* allemaal kunnen verschillen. Om de metingen meer waarheidsgetrouw te maken, worden in enkele configuraties (13, 14, 15, 16 en 17) de *tags* op winkelwagentjes bevestigd (Zie Figuur 27).

Elke configuratie wordt op basis van twee doelstelling gekozen. Als eerste wordt getracht een zo hoog mogelijke nauwkeurigheid te bekomen per configuratie. Volgens de producent van Quuppa wordt een nauwkeurigheid bekomen van 30 cm in de HP-radius, deze nauwkeurigheid werd tevens vooropgesteld door Colruyt. Echter is deze nauwkeurigheid verlaagd tot 50 cm na een nieuwe publicatie van technische gegevens (quuppa.com, 2014), daarom wordt in het onderzoek rekening gehouden met beide vooropgestelde nauwkeurigheden.

Als tweede doelstelling dient de configuratie vergelijkbaar te zijn, met behulp van deze 17 configuraties kunnen vergelijkingen worden gemaakt tussen de resultaten (Zie 3.4.3 Vergelijkende onderzoeken). De variabele parameter van elke configuratie worden zorgvuldig gekozen om de configuraties onderling vergelijkbaar te maken, bijvoorbeeld op vlak van onderlinge afstand antennes, de *tag*densiteit, het aantal *locators* etc. Zo kan antwoord gegeven worden op een aantal vragen:

- Heeft een *locator* invloed op metingen in een andere rayon?
- Heeft *tag*densiteit invloed op de metingen?
- Wat is de ideale onderlinge afstand tussen *locators* ?
- Zorgen geschrinkt geplaatste *locators* voor nauwkeurigere metingen?
- Heeft een winkelwagentje invloed op de metingen?
- Heeft een persoon invloed op de metingen?
- Heeft de nabijheid van een winkelrek invloed op de metingen?
- Wat is de invloed van de tijd op de metingen?

Aan de hand van de antwoorden op deze vragen en de resultaten van de configuraties kunnen conclusies worden gevormd rond de ideale opstelling, de haalbare nauwkeurigheid en de negatieve/positieve invloeden op het systeem



*Figuur 27: Opstelling winkelwagentje met tag*

Elke opmeting wordt volgens dezelfde principes uitgevoerd: Met behulp van de Quuppa software worden van elk punt 10 opmetingen gemaakt, deze worden gevolgd door twee controlemetingen (normaal, doorgeslagen) met behulp van het totaalstation. Deze meting wordt herhaald tot ze in totaal 3 maal uitgevoerd werd, m.a.w. tot elk punt 30 maal werd opgemeten met Quuppa.

Bij iedere configuratie wordt een plan opgemaakt. Op dit plan wordt per *locator* de HP radius aangeduid, zodat een visuele controle mogelijk is op de punten. Het plan duidt ook de nummering aan van de *tags*, elk nummer komt overeen met de vaste locatie van een *tag*, deze is hetzelfde voor elk plan (uitgezonderd configuratie 2 en 12 waar de *tags* in rayon 2 liggen).

De resultaten van elke configuratie worden weergegeven in tabellen. Om tot een goede tabel te komen dienen de juiste mathematische formules te worden gebruikt om de gegevens van metingen om te zetten in statistische waarden die betrekking hebben op de prestatie van het systeem zoals nauwkeurigheid en precisie.

### **3.3.1 Bepalen van de statistische waarden**

Het bepalen van de statistische waarden gebeurt met behulp van EVARILOS Benchmarking Methodology. Dit deel overloopt de mathematische formules die gebruikt worden om de gegevens van metingen om te zetten in statistische waarden die betrekking hebben op de prestatie van het systeem. (Van Haute et al., 2014)

### **Punt nauwkeurigheid**

De nauwkeurigheid is een van de belangrijkste statistische waarden bij EBM. Met punt nauwkeurigheid wordt het positieverschil bedoeld. Als meetmethode om de afstand tussen twee punten te bepalen wordt de Euclidische afstandsbepaling gebruikt. Indien de referentiepunten coördinaten  $(x_1, y_1)$  zijn en de gemeten punten  $(x_2, y_2)$ , dan kan het positieverschil berekend worden met: (Van Haute et al., 2014)

$$d = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}$$

Zodra het positieverschil is gevonden, wordt het gemiddelde berekend met volgende formule: (Van Haute et al., 2014)

$$\bar{d} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i$$

### **Nauwkeurigheid**

De nauwkeurigheid is niet hetzelfde als de punt nauwkeurigheid. Voortaan zal voor het hele onderzoek gelden dat de nauwkeurigheid gelijk is aan (het positieverschil + 2x experimentele standaard afwijking), dit voor een betrouwbaarheidsinterval van 95%.

### **Betrouwbaarheidsinterval**

Voor een normale verdeling geldt dat de mogelijke waarden met een betrouwbaarheid van 95% zal liggen tussen min 2 keer de standaardafwijking en plus 2 keer de standaardafwijking.

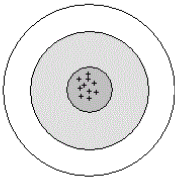
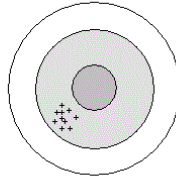
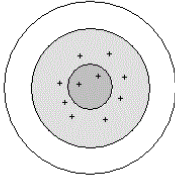
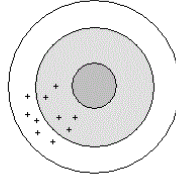
### **Precisie**

De experimentele standaard afwijking bepaalt de precisie.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2}$$

Elke tabel geeft het puntnummer, nauwkeurigheid en precisie weer van elk punt. Tevens worden ze zo opgebouwd, dat deze overeenkomen met het bijhorende plan van de configuratie. Ook de locatie van de punten op het plan en de punten in de tabel komen overeen. Wanneer het 95% BI van een punt binnen een nauwkeurigheid van 50 cm valt, wordt deze lichtgroen aangeduid en donkergroen als deze binnen nauwkeurigheid van 30 cm valt. Hierdoor wordt een visuele controle gecreëerd.

In Figuur 28 wordt de betekenis van, en het verschil tussen precisie en nauwkeurigheid verduidelijkt. Een meting is nauwkeurig indien alle punten rond de werkelijke waarden liggen. Een meting is precies indien alle punten rond dezelfde waarden liggen. Een meting is juist of goed als ze nauwkeurig en precies is.

	Nauwkeurig	Onnauwkeurig
Precies		
Onprecies		

*Figuur 28 Precisie en nauwkeurigheid (Lena, 2012)*

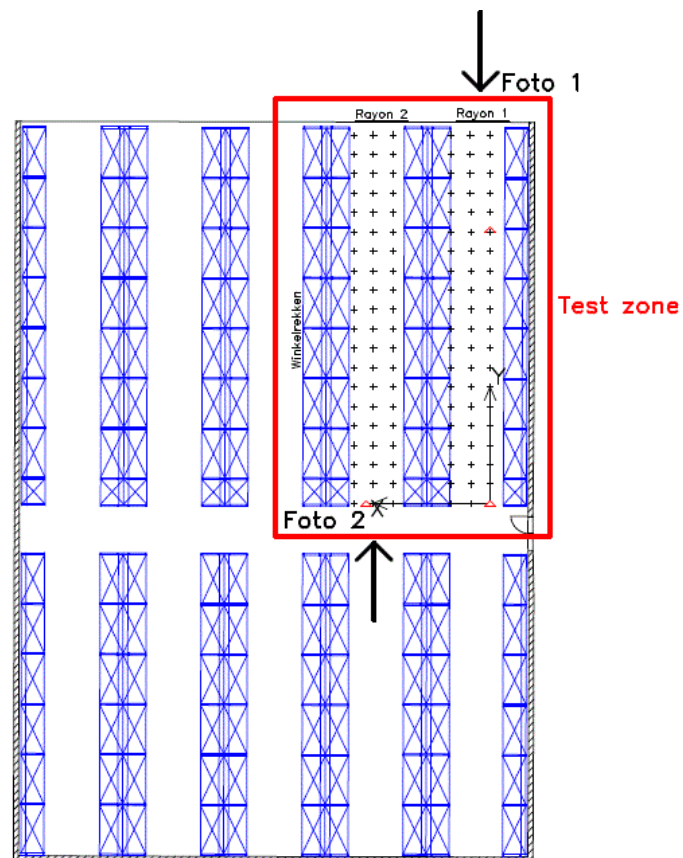
### 3.4 Onderzoek

#### 3.4.1 Voorbereiding onderzoek

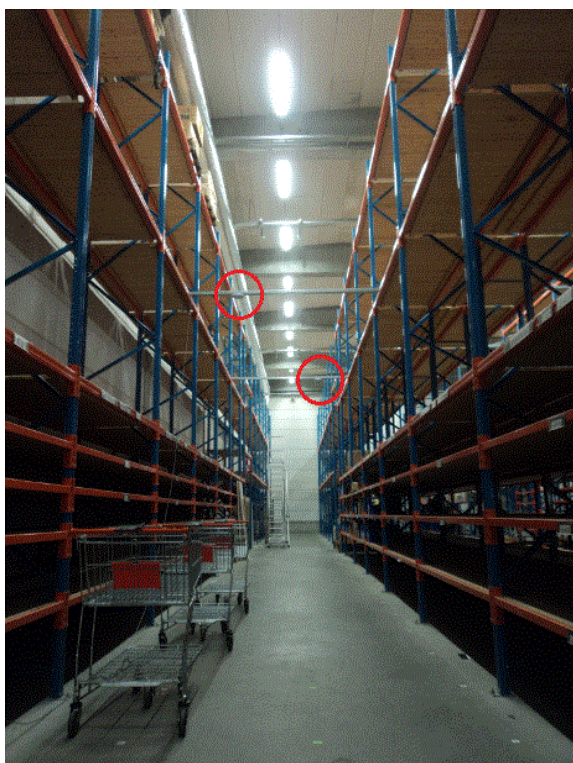
Het onderzoek wordt uitgevoerd in een test zone van  $\pm 300 \text{ m}^2$  (zie Figuur 29) in een leeg winkelmagazijn met behulp van een Quuppa starterkit. Deze test zone werd opgemeten met een totaalstation en ingedeeld in twee rayons: rayon 1 en rayon 2. Afhankelijk van het doel van het onderzoek worden *locators* op verscheidene locaties geplaatst in de rayons. *Locators* dienen zo hoog mogelijk te worden geplaatst. Indien rekening wordt gehouden met de maximale hoogte van een doorsnee winkelmagazijn en de optimale dekking van de te onderzoeken zone, worden de *locators* op een hoogte van  $\pm 4,36 \text{ m}$  geplaatst. Op deze hoogte is de dekking van een *locator*  $\pm 3,6 \text{ m}$  radius voor opmetingen met een hoge nauwkeurigheid.

In de loop van het onderzoek worden de *tags* op het winkelwagentje gemonteerd, de hoogte voor iedere *tag* blijft gelijk. Enkel de x en y coördinaat van de *tags* zullen verwerkt worden, de z-coördinaat blijft voor iedere *tag* gelijk. De *tags* worden voor de eerste configuraties op de grond geplaatst, voor de configuraties met de winkelwagentjes worden de *tags* op  $\pm 1 \text{ m}$  hoogte geplaatst. Een hoogteverschil van 1 m heeft weinig tot geen invloed op het 2D beeld zolang de *tags* zich in de HP radius bevinden volgens Quuppa (zie 3.1 Quuppa).





**Figuur 29: Winkelmagazijn met opdeling Test zone**



**Figuur 30: Configuratie rayon 1- Locators 1 en 2 geschrinkt geplaatst boven rayon 1**



**Figuur 31: Configuratie rayon 2 – Aanduiding grid op de vloer van rayon 2**

#### **3.4.1.1 Lokaal stelsel met grid**

Om opmetingen uit te voeren met behulp van Quuppa en controlemetingen met het totaalstation dient eenzelfde lokaal assenstelsel te worden gekozen waarin met beide meetsystemen gewerkt kan worden. Dit assenstelsel wordt gecreëerd door drie punten die respectievelijk de x en de y –as vormen. Deze as dient vereffend te worden teneinde een zo nauwkeurig mogelijk lokaal stelsel te bekomen. Aan het lokaal stelsel wordt een grid toegevoegd (1x1 m) en uitgezet om visuele controle van opmetingen mogelijk te maken.

De opmeting van het winkelmagazijn en de controlemetingen gebeuren met behulp van een totaalstation Trimble 3M DR2” met volgende specificaties:

Specificaties Trimble 3M DR2” (Trimble, 2010)

##### ***Afstandsmetingen***

*Normaal met behulp van een prisma:  $(10 + 5 \text{ ppm} \times D) \text{ mm}$*

##### ***Hoekmetingen***

*DIN 18723 nauwkeurigheid:  $2''/0,6 \text{ mgon}$*

Rekening houdend met ISO 17123 ("ISO 17123: Optics and optical instruments - Field procedures for testing geodetic and surveying instruments,") en aangezien de metingen gebeuren in een gebouw onder gecontroleerde omstandigheden, wordt er vanuit gegaan dat de atmosferische parameters constant blijven, dus is het niet nodig om de temperatuur of de druk te meten en opnieuw in te stellen bij ieder onderzoek.

#### **3.4.1.2 Vereffening stelsel**

De schuine afstanden, verticale hoeken en horizontale hoeken worden opgemeten om hieruit de vereffende coördinaten te berekenen.



**Tabel 4: Schuine afstand, Verticale Hoek, Horizontale Richting, ter bepaling van coördinaten assenstelsel**

Opstelpunt	Oriëntatie	SA (m)	VH (gon)	HR (gon)
1	1>3	14,123	99,866	0,000
	1>3'	14,123	300,099	199,997
	1>2	6,391	99,638	299,918
	1>2'	6,390	300,270	99,952
2	2>1	6,390	99,975	99,918
	2>1'	6,392	300,050	299,843
	2>3	15,500	100,054	26,913
	2>3'	15,501	299,990	226,953
3	3>2	15,501	99,843	226,977
	3>2'	15,501	300,178	26,983
	3>1	14,124	99,862	199,990
	3>1'	14,124	300,073	0,002

**Sluitfout = 0,001 gon**

**Tabel 5: Vereffende coördinaten totaalstation**

Vereffende coördinaten	x	y
1	500	500
2	493,615	499,994
3	499,995	514,123

De vereffende coördinaten worden getransformeerd naar eenzelfde coördinatensysteem als dat van de Quuppa software.

**Tabel 6: Vereffende coördinaten stelsel**

Vereffende coördinaten	x	y
1	0,000	0,000
2	-6,385	-0,006
3	-0,005	14,123

### **3.4.1.3 Bepalen karakteristieke waarden**

Reactietijd (latency)

Deze waarde omschrijft hoe snel een systeem een update geeft van de positie van de *tags*. Bij Quuppa gebeurt dit elke 0,5 seconden. (Quuppa, 2013)

## Energie-efficiëntie

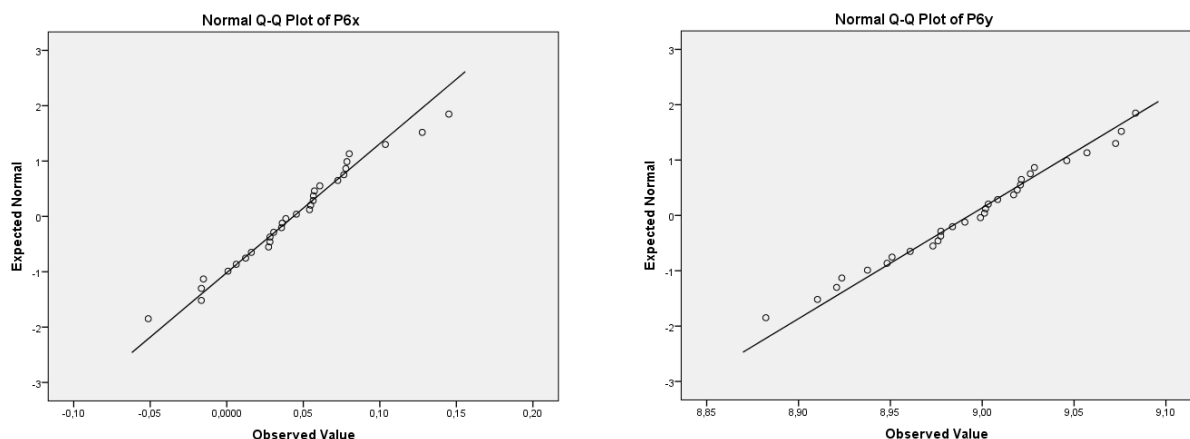
De energie-efficiëntie heeft betrekking op de *tags*, deze werken op batterijen en zijn niet aangesloten op het net. De *tags* werken energie-efficiënt door zichzelf enkel te activeren indien ze bewogen worden. Gedurende het hele onderzoek is bleven alle *tags* functioneren, hiervoor is dus geen waarde beschikbaar. (Quuppa, 2013)

### 3.4.1.4 Controle normaal verdeling

Om resultaten statistisch te onderzoeken, moeten eerst gecontroleerd worden of ze normaal verdeeld zijn. Er kunnen verschillende methoden gehanteerd worden. Deze zijn aan de hand van een grafiek, scheefheid (skewness) en steilheid (kurtosis) en een Kolmogorov-Smirnov. Deze testen worden toegepast op één punt dat 30 maal gemeten werd. Er werd willekeurig gekozen voor punt zes uit configuratie tien. Alle resultaten voor de testen werden bekomen met het programma SPSS.

#### Grafiek

Figuur 32 en Figuur 33 tonen aan dat de verschillende metingen van punt zes voor x en y de normaal verdeling volgen. “Indien de getekende punten duidelijk rond de rechte liggen, zonder een specifieke trend, mag men aannemen dat de gegevens normaal verdeeld zijn”. (Clement, A., A. De Bodt, and T. Van Hecke. 2013-2014)



**Figuur 33: Aanduiding normaalverdeling punt P6X** **Figuur 32: Aanduiding normaalverdeling plot P6Y**

#### Scheefheid en steilheid

In Tabel 7 worden de waarden voor de scheefheid (S) en de steilheid (K) bekomen. “Deze parameter meet de symmetrie van de verdelingsfunctie  $f(x)$ . Een verdeling waarvoor  $-1 \leq S \leq 1$  is ongeveer klokvormig. Als  $S > 1$  of  $S < -1$  dan vertoont de grafiek van de verdelingsfunctie  $f(x)$  een duidelijke scheefheid met staart naar rechts.” (Clement, A., A. De Bodt, and T. Van Hecke. 2013-2014) Uit de gegevens kan geconstateerd worden dat de scheefheid zich tussen -1 en 1 bevindt. Voor de steilheid gelden dezelfde regels. Uit de tabel kan besloten worden dat de waarden gevonden voor de x en y coördinaten normaal verdeeld zijn.

**Tabel 7: scheefheid en steilheid**

		P6x	P6y
N	Valid	30	30
	Missing	0	0
Skewness		,174	-,199
Std. Error of Skewness		,427	,427
Kurtosis		,445	-,266
Std. Error of Kurtosis		,833	,833

#### Kolmogorov-Smirnov test

Via SPSS wordt een Kolmogorov-Smirnov test gedaan. Hier wordt onderzocht of de gegevens normaal verdeeld zijn. Uit Tabel 8 kan geconcludeerd worden dat de gegevens normaal verdeeld zijn. In Tabel 9 wordt de significantie gegeven. Indien de significantie hoger is dan 0,05 kan worden vastgesteld dat de gegevens normaal verdeeld zijn. (Clement, De Bodt, & Van Hecke, 2013-2014)

**Tabel 8: One-Sample Kolmogorov-Smirnov Test**

		P6x	P6y
N		30	30
Normal Parameters <sup>a,b</sup>	Mean	,04359042	8,99313545
	Std. Deviation	,042910185	,049931989
Most Extreme Differences	Absolute	,098	,080
	Positive	,098	,073
	Negative	-,086	-,080
Kolmogorov-Smirnov Z		,537	,441
Asymp. Sig. (2-tailed)		,935	,990

a. Test distribution is Normal.

b. Calculated from data.

**Tabel 9: Test voor normaaverdeling**

	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
P6x	,098	30	,200*	,983	30	,890
P6y	,080	30	,200*	,983	30	,891

\*. This is a lower bound of the true significance.

a. Lilliefors Significance Correction

### 3.4.1.5 Verwerking resultaten

Door de grote hoeveelheid opgemeten punten worden alle resultaten verwerkt tot één tabel per meting. Voor meting 1 bij configuratie 1 zijn deze resultaten terug te vinden in Tabel 10.

De tabellen worden opgebouwd rond de gemiddelden van de opgemeten coördinaten van Quuppa en het totaalstation. Uit deze gemiddelden wordt het verschil op de x –en y-as berekend, het positieverschil, de theoretische en experimentele standaard deviatie en het 95% betrouwbaarheidsinterval. Na de x- en y coördinaten wordt het verschil gegeven tussen de x of y coördinaat van Quuppa en het totaalstation. Uit het verschil tussen x en y kan het positieverschil berekend worden aan de hand van volgende formule (Punt nauwkeurigheid).

$$d = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}$$

Met de verkregen resultaten kan de theoretische standaard deviatie terug gevonden worden voor iedere punt.

$$\sigma_d = \sqrt{\left(\frac{\partial d}{\partial \Delta x}\right)^2 \cdot e_{\Delta x}^2 + \left(\frac{\partial d}{\partial \Delta y}\right)^2 \cdot e_{\Delta y}^2}$$

Hierbij zijn  $e_{\Delta x}$  en  $e_{\Delta y}$  gelijk aan de fout op het verschil op x en op y.

Voor het berekenen van de experimentele standaard deviatie worden volgende formules gebruikt (Punt nauwkeurigheid).

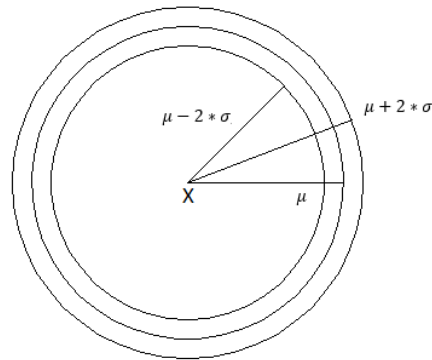
$$\bar{d} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2}$$

De laatste twee kolommen in de tabel zijn de ondergrens en bovengrens van het 95% betrouwbaarheidsinterval. Aan de hand van volgende formule wordt het 95% betrouwbaarheidsinterval berekend.

$$X \in [\mu - 2 * \sigma, \mu + 2 * \sigma]$$

Figuur 34 toont aan wat het 95%BI inhoudt. 95% van de waarden vallen binnen de bovengrens ( $\mu + 2 * \sigma$ ). De waarden die kleiner zijn dan de ondergrens ( $\mu - 2 * \sigma$ ), voldoen ook aan de nauwkeurigheid. Daarom wordt in de tabellen bij de configuraties enkel gewerkt met de bovengrens. Per configuratie wordt een tabel opgemaakt zoals Tabel 10.



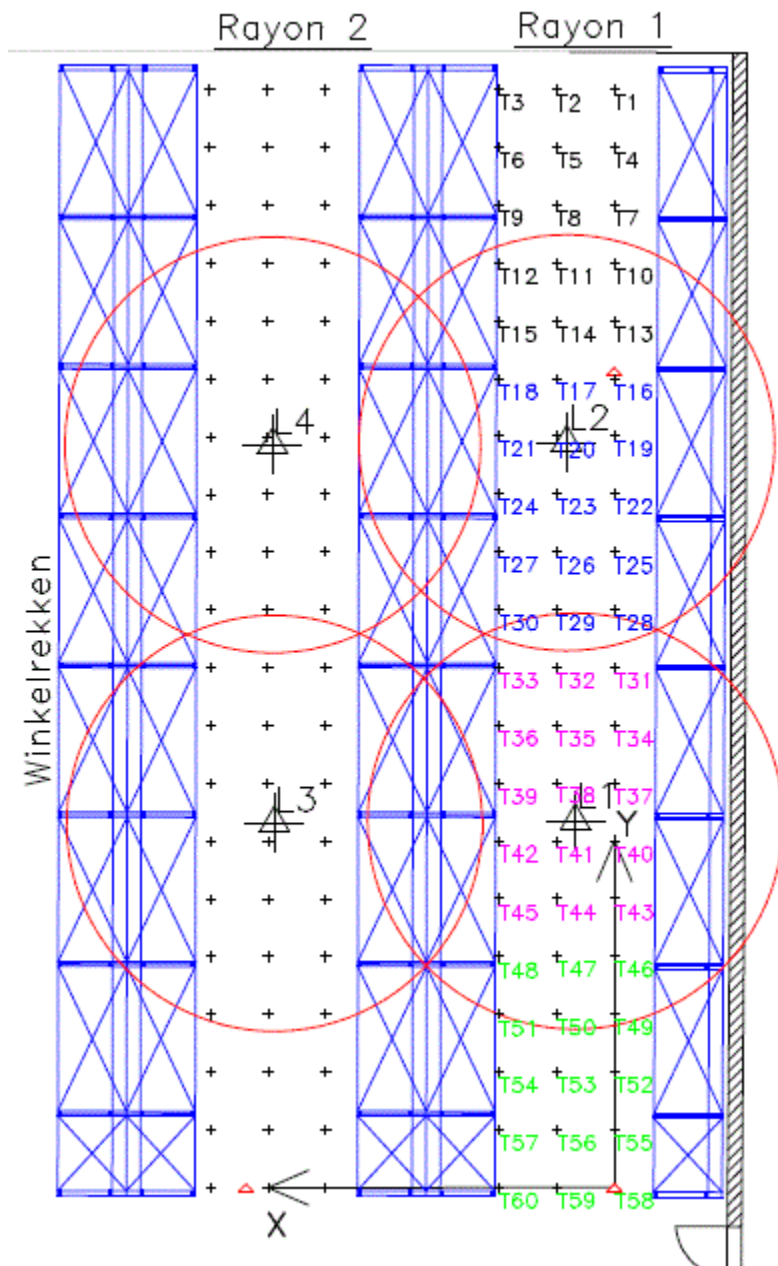
***Figuur 34: 95%BI***

**Tabel 10: Samenvattende tabel resultaten per meting**

Nr.	X_Quuppa (m)	Y_Quuppa (m)	X_Ts (m)	Y_Ts (m)	$\Delta X$ (m)	$\Delta Y$ (m)	$\Delta XY$ (m)	$\sigma_{\text{Theo}}$ (m)	$\sigma_{\text{Exp}}$ (m)	O 95%BI	B 95%BI
1	-0,799	19,329	-0,015	18,998	0,784	0,331	0,851	0,087	0,256	0,34	1,36
2	-0,723	20,535	-1,013	19,003	0,290	1,532	1,559	0,025	0,036	1,49	1,63
3	-2,199	18,830	-2,017	19,016	0,183	0,186	0,261	0,083	0,214	-0,17	0,69
4	-0,707	17,505	-0,006	17,997	0,701	0,492	0,857	0,043	0,106	0,64	1,07
5	-1,039	19,095	-1,016	18,003	0,023	1,092	1,092	0,119	0,319	0,45	1,73
6	-1,714	17,937	-2,019	18,014	0,305	0,076	0,314	0,032	0,071	0,17	0,46
7	-0,053	17,161	-0,003	16,995	0,051	0,166	0,174	0,044	0,100	-0,03	0,37
8	-1,177	17,530	-1,015	17,006	0,162	0,524	0,549	0,051	0,128	0,29	0,80
9	-2,836	18,731	-2,017	17,018	0,819	1,713	1,899	0,181	0,536	0,83	2,97
10	-0,289	15,798	-0,003	16,000	0,287	0,202	0,351	0,048	0,142	0,07	0,63
11	-0,938	16,340	-1,015	16,002	0,077	0,339	0,348	0,031	0,059	0,23	0,47
12	-1,809	15,549	-2,015	16,020	0,206	0,471	0,514	0,063	0,170	0,17	0,85
13	0,037	15,168	-0,006	15,005	0,043	0,163	0,168	0,035	0,077	0,01	0,32
14	-1,572	14,329	-1,009	15,010	0,564	0,681	0,884	0,049	0,138	0,61	1,16
15	-1,904	15,282	-2,012	15,021	0,108	0,261	0,283	0,041	0,085	0,11	0,45

### 3.4.2 Resultaten configuraties

#### 3.4.2.1 Configuratie 1



**Figuur 35: Configuratie 1: Meting 1 = zwart, meting 2 = blauw, meting 3 = paars, HP-radius = rood**

Configuratie 1 wordt uitgevoerd met behulp van 15 tags en vier locators L1, L2, L3 en L4, de locators worden in het midden van hun rayon geplaatst. De densiteit van de tags wordt bepaald op 1x1 m en de onderlinge afstand tussen de locators bedraagt  $\pm 6,5$  m.

## Resultaten configuratie 1

**Tabel 11: Configuratie 1**

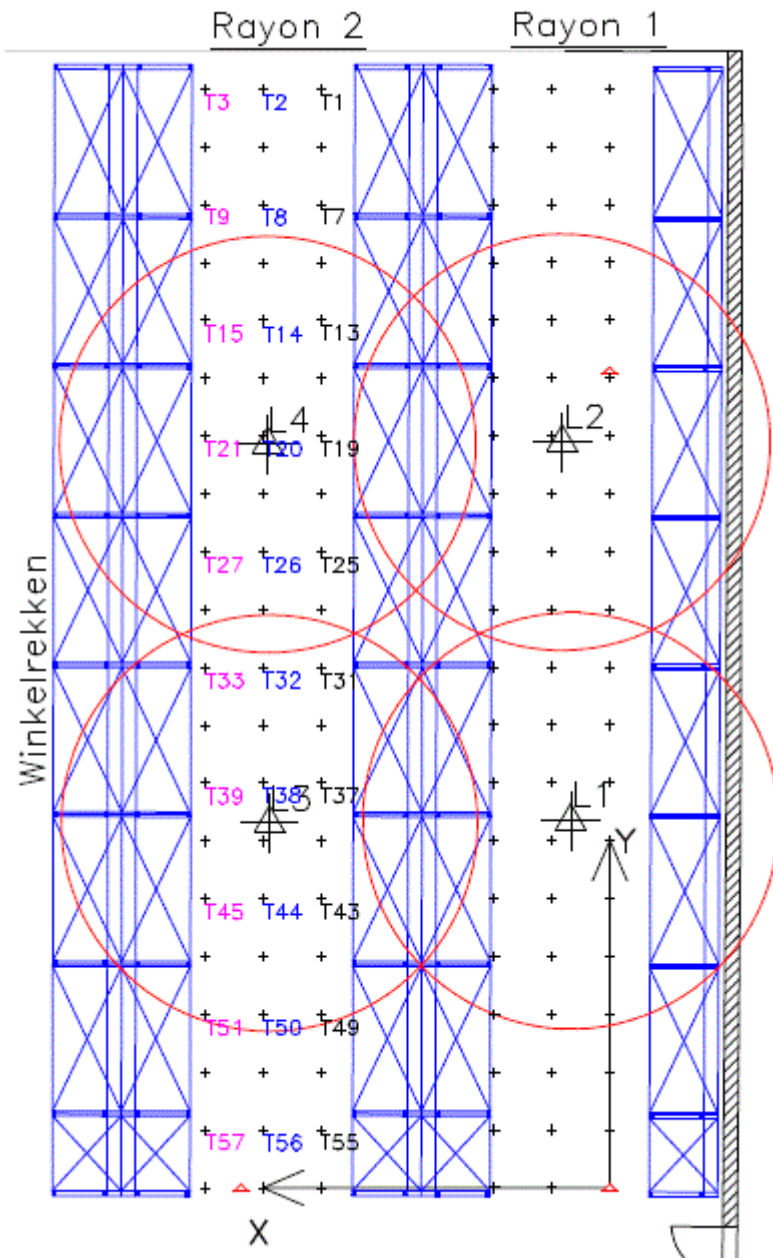
Nr.	$\Delta XY + 2\sigma_{Exp}$ (cm)	$\sigma_{Exp}$ (cm)	Nr.	$\Delta XY + 2\sigma_{Exp}$ (cm)	$\sigma_{Exp}$ (cm)	Nr.	$\Delta XY + 2\sigma_{Exp}$ (cm)	$\sigma_{Exp}$ (cm)
3	68,88	21,41	2	163,18	3,64	1	136,33	25,60
6	45,64	7,12	5	172,99	31,90	4	106,92	10,63
9	297,04	53,59	8	80,42	12,76	7	37,44	10,03
12	85,31	16,96	11	46,57	5,91	10	63,42	14,18
15	45,30	8,52	14	115,94	13,77	13	32,25	7,71
18	40,98	5,31	17	91,65	22,48	16	24,44	7,52
21	65,86	6,09	20	74,65	11,45	19	58,17	7,86
24	77,94	3,99	23	44,49	5,05	22	43,45	4,67
27	43,70	6,65	26	26,93	2,23	25	76,08	16,15
30	52,39	8,52	29	104,23	15,31	28	63,69	6,15
33	91,83	15,93	32	35,55	6,71	31	64,24	8,59
36	47,78	6,97	35	70,78	12,65	34	55,28	10,27
39	42,67	10,97	38	23,50	6,66	37	84,44	10,32
42	47,01	8,89	41	36,15	8,35	40	28,48	9,96
45	51,38	5,76	44	67,78	14,49	43	57,69	11,18
48	68,51	10,16	47	135,02	29,04	46	76,41	7,66
51	56,54	13,92	50	61,43	21,50	49	171,15	38,74
54	294,92	48,69	53	73,17	9,13	52	117,33	26,97
57	164,84	35,48	56	95,57	17,82	55	204,31	35,00
60	327,29	84,69	59	192,51	50,43	58	79,88	36,50

## Besluiten configuratie 1

Bij configuratie 1 voldoen 4 punten aan de vooropgestelde nauwkeurigheid van 30 cm. Deze punten zijn 16, 26, 38 en 40. De punten 16, 38 en 40 bevinden zich dicht bij een *locator*. Het punt 16 bevindt zich tussen twee *locators*, 38 en 40 bevinden zich onder een *locator*. Wanneer de punten dicht bij of tussen twee *locators* liggen is de nauwkeurigheid en de precisie beduidend beter dan de punten die maar één *locator* ontvangen of buiten de HP-radius liggen. De densiteit van de *tags* wordt besproken in punt 3.4.3.2 Verschil *tag* densiteit. Wanneer wordt gekeken naar de HP-radius moeten de punten 10 tot en met 50 binnen de nauwkeurigheid van 30 cm vallen, hier voldoen enkel 4 punten van de 41. Hierdoor voldoet deze configuratie niet aan de voorwaarden van Colruyt.



### 3.4.2.2 Configuratie 2



**Figuur 36: Configuratie 2: Meting 1 = zwart, meting 2 = blauw, meting 3 = paars, HP-radius = rood**

Configuratie 2 maakt eveneens gebruik van *locators* L1, L2, L3 en L4, de *locators* worden in het midden van hun rayon geplaatst. De onderlinge afstand tussen de *locators* bedraagt  $\pm 6,5$  m. Hier wordt gewerkt met 10 *tags* en een densiteit van  $1 \times 2$  m. Deze *tag*densiteit is gelijkaardig met de plaats dat een winkelwagentje inneemt in een rayon.

## Resultaten configuratie 2

**Tabel 12: Configuratie 2**

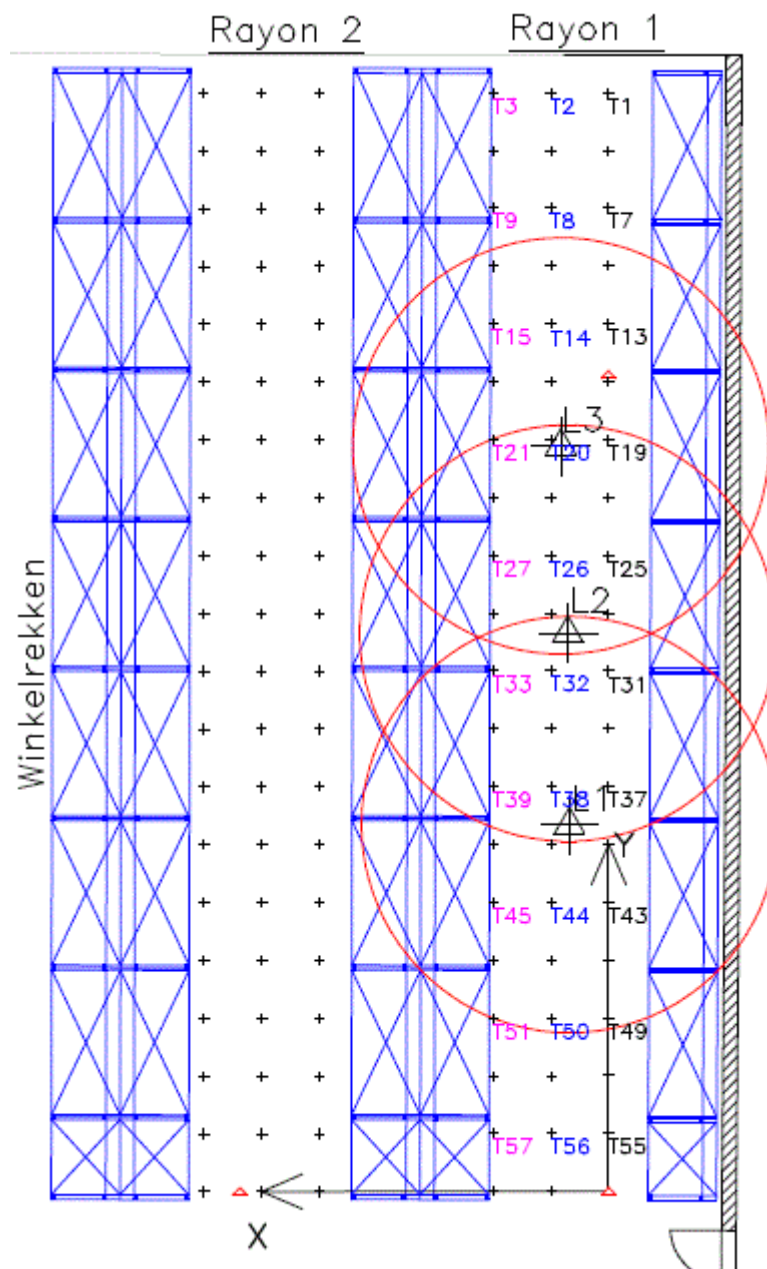
Nr.	$\Delta XY + 2\sigma_{Exp}$ (cm)	$\sigma_{Exp}$ (cm)	Nr.	$\Delta XY + 2\sigma_{Exp}$ (cm)	$\sigma_{Exp}$ (cm)	Nr.	$\Delta XY + 2\sigma_{Exp}$ (cm)	$\sigma_{Exp}$ (cm)
3	103,08	29,46	2	139,60	6,07	1	70,35	25,11
9	69,18	19,56	8	83,94	8,39	7	121,67	35,39
15	78,66	9,68	14	68,31	9,20	13	63,60	11,03
21	63,11	11,63	20	46,08	2,68	19	13,40	2,51
27	80,79	7,62	26	33,13	4,96	25	33,95	3,94
33	59,01	6,23	32	54,71	9,57	31	17,28	3,54
39	55,58	4,04	38	27,09	5,65	37	55,26	7,39
45	57,49	6,13	44	38,92	3,72	43	38,89	5,44
51	94,91	10,54	50	106,89	11,27	49	35,10	7,18
57	195,52	34,54	56	47,11	4,12	55	176,69	46,08

## Besluiten configuratie 2

Er zijn drie punten die voldoen aan de vooropgestelde nauwkeurigheid van 30 cm. Deze punten zijn 19, 31 en 38. Het punt 19 ligt schuin onder *locator* L4 en punt 38 ligt onder *locator* L3. Punt 31 bevindt zich tussen twee *locators* in. Punten 1, 2, 3, 7, 8, 9, 55, 56, 57 liggen buiten de HP-radius van de *locators* en voldoen niet aan de vooropgestelde nauwkeurigheid. De nauwkeurigheid van de punten tussen twee *locators* in en onder de *locator* zijn over het algemeen beter dan de punten verder naar buiten gelegen. Hetzelfde scenario wordt verkregen bij de precisie, de preciezere waarden zijn gelegen onder of tussen twee *locators* in. Punten die zich niet bevinden in een HP-radius van een *locator* hebben een ongeschikte nauwkeurigheid en precisie.

De nauwkeurigheid en precisie dalen naarmate verder van de *locators* weg wordt gegaan. Aangezien slechts 3/30 punten voldoen aan de nauwkeurigheid van 30 cm is deze configuratie niet geschikt voor de toepassing van Colruyt. Zelfs indien de nauwkeurigheid wordt vastgelegd op 50 cm voldoen slechts 10/30 punten.

### 3.4.2.3 Configuratie 3



**Figuur 37: Configuratie 3: Meting 1 = zwart, meting 2 = blauw, meting 3 = paars, HP-radius = rood**

Configuratie 3 maakt gebruik van drie *locators* L1, L2 en L3 en 10 *tags* met een densiteit van 1x2 m. De *locators* worden in het midden van rayon 1 geplaatst. De onderlinge afstand tussen de *locators* bedraagt  $\pm 3,30$  m.

### Resultaten configuratie 3

**Tabel 13: Configuratie 3**

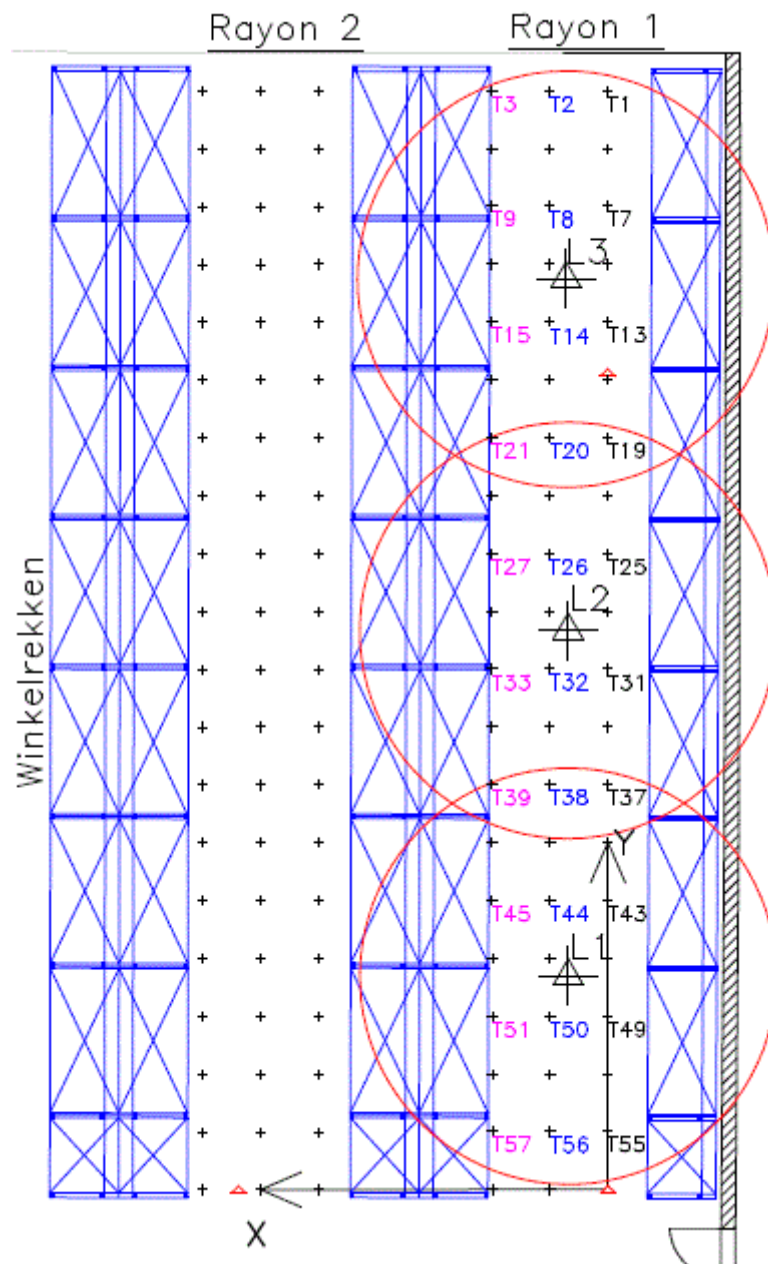
Nr.	$\Delta XY + 2\sigma_{Exp}$ (cm)	$\sigma_{Exp}$ (cm)	Nr.	$\Delta XY + 2\sigma_{Exp}$ (cm)	$\sigma_{Exp}$ (cm)	Nr.	$\Delta XY + 2\sigma_{Exp}$ (cm)	$\sigma_{Exp}$ (cm)
3	51,09	12,32	2	190,30	37,90	1	137,70	48,30
9	271,14	25,65	8	69,65	9,62	7	43,12	4,62
15	51,01	7,48	14	72,65	7,06	13	51,81	9,27
21	58,70	7,17	20	53,41	10,25	19	47,63	3,85
27	19,10	3,56	26	15,22	3,66	25	11,69	3,05
33	44,75	8,91	32	32,78	4,44	31	53,43	6,95
39	26,60	4,78	38	22,69	7,01	37	44,64	7,53
45	34,94	4,80	44	39,46	4,57	43	46,96	5,40
51	21,33	6,21	50	22,40	7,77	49	48,35	12,74
57	41,36	14,00	56	149,26	24,09	55	166,93	34,95

### Besluiten configuratie 3

Er zijn zeven punten die voldoen aan de vooropgestelde nauwkeurigheid van 30 cm. Deze punten zijn 25, 26, 27, 38, 39, 50, 51. Punten 25, 26 en 27 liggen in het midden tussen *locators* L2 en L3, daardoor bevinden ze zich in de dekking van de HP-radius afkomstig van L2 en L3. Punten 38 en 39 bevinden zich schuin of recht onder *locator* L1. Punten 50 en 51 bevinden zich op de rand van de HP-radius. Punten 1, 2, 3, 7, 8, 9, 55, 56 en 57 liggen buiten de HP-radius en voldoen niet aan de vooropgestelde nauwkeurigheid. De nauwkeurigheid van de punten tussen twee *locators* en recht onder de *locator* zijn over het algemeen beter dan punten die van de *locator* weg naar buiten toe gelegen zijn, hetzelfde geldt voor precisie. Punten die zich niet bevinden in een HP-radius van een *locator* hebben de slechtste nauwkeurigheid en precisie.

Hier kan eveneens geconcludeerd worden dat de nauwkeurigheid en precisie dalen naarmate verder van de *locators* wordt gegaan. Aangezien maar 7/30 punten voldoen aan de nauwkeurigheid van 30 cm is deze configuratie niet geschikt voor de toepassing van Colruyt. Indien een nauwkeurigheid van 50 cm wordt vooropgesteld voldoen al 17/30 punten.

### 3.4.2.4 Configuratie 4



**Figuur 38: Configuratie 4: Meting 1 = zwart, meting 2 = blauw, meting 3 = paars, HP-radius = rood**

Configuratie 4 maakt gebruik van *locators* L1, L2 en L3 en 10 *tags* met een densiteit van 1x2 m. De *locators* worden in het midden van rayon 1 geplaatst en hun onderlinge afstand bedraagt  $\pm 6,00$  m.

## Resultaten configuratie 4

**Tabel 14: Configuratie 4**

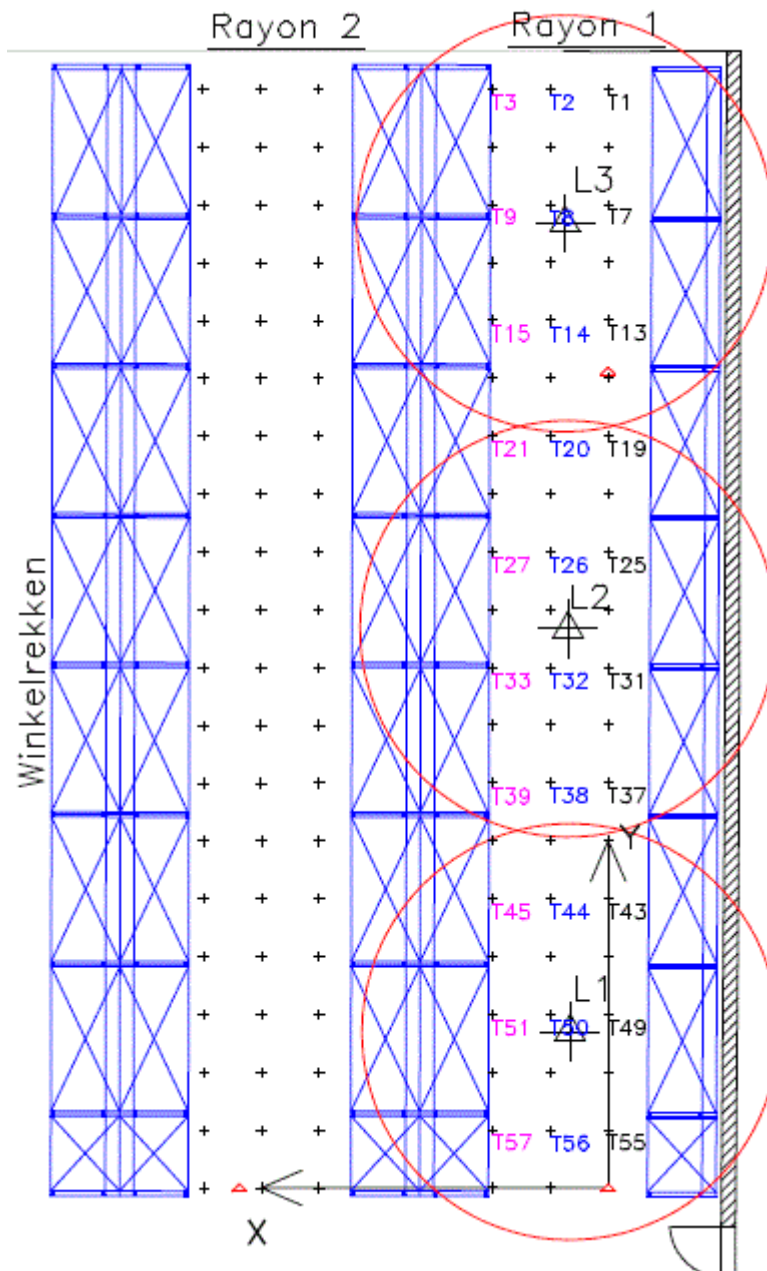
Nr.	$\Delta XY + 2\sigma_{Exp}$ (cm)	$\sigma_{Exp}$ (cm)	Nr.	$\Delta XY + 2\sigma_{Exp}$ (cm)	$\sigma_{Exp}$ (cm)	Nr.	$\Delta XY + 2\sigma_{Exp}$ (cm)	$\sigma_{Exp}$ (cm)
3	70,19	14,14	2	49,88	9,73	1	87,88	12,76
9	34,41	5,95	8	27,81	5,32	7	45,13	8,93
15	22,91	3,57	14	29,78	5,14	13	46,04	4,77
21	35,23	4,15	20	43,21	6,16	19	38,13	2,38
27	18,33	3,39	26	36,51	7,10	25	56,71	2,29
33	28,98	5,81	32	13,47	4,17	31	8,97	1,82
39	31,07	6,38	38	36,64	6,68	37	52,81	4,59
45	28,41	4,89	44	19,06	4,86	43	72,17	9,73
51	24,10	3,57	50	27,36	3,02	49	28,57	4,19
57	39,38	6,34	56	62,29	5,09	55	35,07	12,10

### Besluiten configuratie 4

Er zijn 12 punten die voldoen aan de vooropgestelde nauwkeurigheid van 30 cm. Deze punten zijn 8, 14, 15, 27, 31, 32, 33, 44, 45, 49, 50 en 51. Punten 8, 14 en 15 liggen rond *locator* L3, punten 27, 31, 32 en 33 liggen rond *locator* L2, punten 44, 45, 49, 50 en 51 liggen rond *locator* L1. De nauwkeurigheid van de punten zijn over het algemeen goed aangezien de meeste punten zich in de HP-radius bevinden van minstens één *locator*. De precisie daalt naarmate de punten zich weg van de *locators* naar buiten toe bevinden.

De precisie daalt naarmate verder van de *locators* wordt gegaan. Aangezien maar 12/30 punten voldoen aan de nauwkeurigheid van 30 cm is deze configuratie nog niet geschikt voor de toepassing van Colruyt. Indien een nauwkeurigheid van 50 cm wordt vooropgesteld voldoen 24/30 punten en kan de configuratie in aanmerking komen.

### 3.4.2.5 Configuratie 5



**Figuur 39: Configuratie 5: Meting 1 = zwart, meting 2 = blauw, meting 3 = paars, HP-radius = rood**

Configuratie 5 maakt gebruik van *locators* L1, L2 en L3 en 10 *tags* met een densiteit van 1x2 m. De *locators* worden in het midden van rayon 1 geplaatst en de onderlinge afstand tussen de *locators* bedraagt  $\pm 7,00$  m.

## Resultaten configuratie 5

**Tabel 15: Configuratie 5**

Nr.	$\Delta XY + 2\sigma_{Exp}$ (cm)	$\sigma_{Exp}$ (cm)	Nr.	$\Delta XY + 2\sigma_{Exp}$ (cm)	$\sigma_{Exp}$ (cm)	Nr.	$\Delta XY + 2\sigma_{Exp}$ (cm)	$\sigma_{Exp}$ (cm)
3	69,83	3,25	2	39,34	6,05	1	67,24	8,77
9	23,53	4,79	8	6,80	2,21	7	32,26	6,34
15	27,09	3,72	14	29,18	2,50	13	72,86	9,19
21	21,18	4,50	20	16,69	3,15	19	48,26	8,79
27	10,87	2,36	26	63,54	6,34	25	55,80	8,63
33	31,38	3,16	32	17,80	1,99	31	25,06	3,80
39	9,72	2,91	38	67,70	8,42	37	59,05	9,12
45	25,62	3,28	44	31,93	3,51	43	39,08	3,30
51	28,05	4,35	50	10,46	2,21	49	31,91	5,98
57	54,05	4,79	56	50,57	5,83	55	67,72	16,72

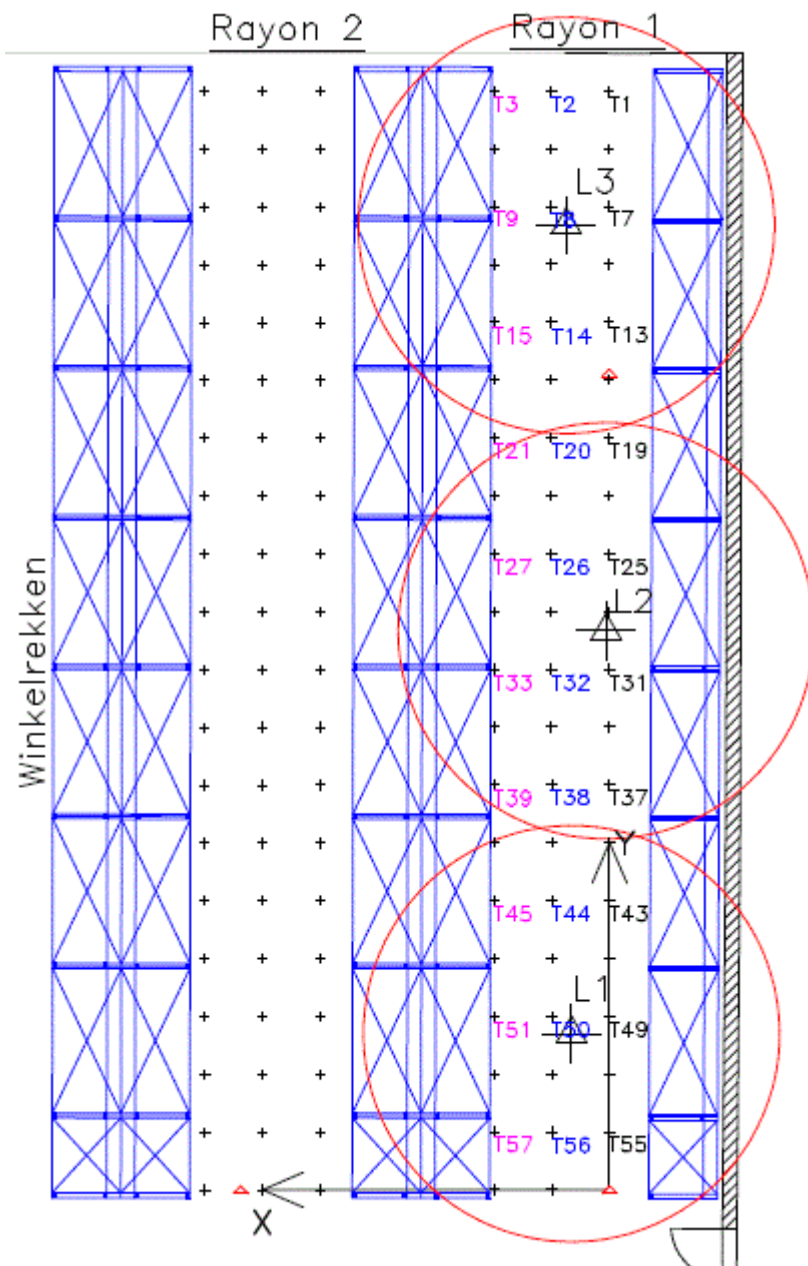
## Besluiten configuratie 5

Er zijn 13 punten die voldoen aan de vooropgestelde nauwkeurigheid van 30 cm. Deze punten zijn 8, 9, 14, 15, 20, 21, 27, 31, 32, 39, 45, 50 en 51. Punt 8 bevindt zich recht onder *locator* L3, punten 9, 14 en 15 bevinden zich onder *locator* L3, punten 20 en 21 bevinden zich op de rand van de HP-radius van *locator* L3 als L2. Punten 27, 31 en 32 liggen rond *locator* L2, punt 39 ligt binnen de HP-radius van *locator* L2, punt 50 ligt recht onder *locator* L1 en punten 45 en 51 liggen rond *locator* L1. Alle punten bevinden zich in een HP-radius. Ook hier daalt de nauwkeurigheid en de precisie voor de punten die verder naar buiten van de *locators* gelegen zijn.

De nauwkeurigheid is over het algemeen goed, reeds 13/30 punten halen de vooropgestelde nauwkeurigheid, de andere punten liggen stabiel, maar de nauwkeurigheid ligt een aantal centimeters hoger. Toch is deze nog niet geschikt voor de toepassing van Colruyt. Indien een nauwkeurigheid van 50 cm wordt vooropgesteld kunnen 20/30 punten voldoen.



### 3.4.2.6 Configuratie 6



**Figuur 40: Configuratie 6: Meting 1 = zwart, meting 2 = blauw, meting 3 = paars, HP-radius = rood**

Configuratie 6 maakt gebruik van *locators* L1, L2 en L3 en 10 *tags* met een densiteit van 1x2 m. De onderlinge afstand tussen de *locators* bedraagt  $\pm 7,00$  m en *locator* L2 werd  $\pm 0,60$  m naar rechts van het midden verplaatst om zo een semi-geschrante configuratie te bekomen.

## Resultaten configuratie 6

**Tabel 16: Configuratie 6**

Nr.	$\Delta XY + 2\sigma_{Exp}$ (cm)	$\sigma_{Exp}$ (cm)	Nr.	$\Delta XY + 2\sigma_{Exp}$ (cm)	$\sigma_{Exp}$ (cm)	Nr.	$\Delta XY + 2\sigma_{Exp}$ (cm)	$\sigma_{Exp}$ (cm)
3	72,91	0,97	2	34,80	1,87	1	41,21	4,10
9	51,41	1,66	8	35,52	1,40	7	27,93	2,15
15	15,61	1,16	14	60,50	1,36	13	43,32	6,81
21	27,43	0,89	20	17,67	1,82	19	63,31	3,46
27	9,54	1,50	26	48,75	1,19	25	17,57	3,52
33	26,48	1,89	32	25,26	2,69	31	11,27	3,11
39	8,65	1,81	38	58,92	1,41	37	61,26	4,97
45	29,04	1,86	44	29,51	1,51	43	44,81	5,70
51	12,18	1,86	50	9,44	1,74	49	42,33	4,98
57	51,39	2,18	56	13,50	1,53	55	20,04	5,37

### Besluiten configuratie 6

Er zijn 16 punten die voldoen aan de vooropgestelde nauwkeurigheid van 30 cm, deze punten zijn 7, 15, 20, 21, 25, 27, 31, 32, 33, 39, 44, 45, 50, 51, 55 en 56. Punten 7 en 15 zijn gelegen rond *locator* L3, punten 20 en 21 bevinden zich op de randen van de HP-radius van zowel L3 als L2. Punten 25, 27, 31, 32 en 33 liggen rond *locator* L2, punt 39 bevindt zich op de rand van de HP-radius van *locator* L2. Punten 44, 45, 51, 55 en 56 bevinden zich rond *locator* L1 en punt 56 bevindt zich recht onder *locator* L1.

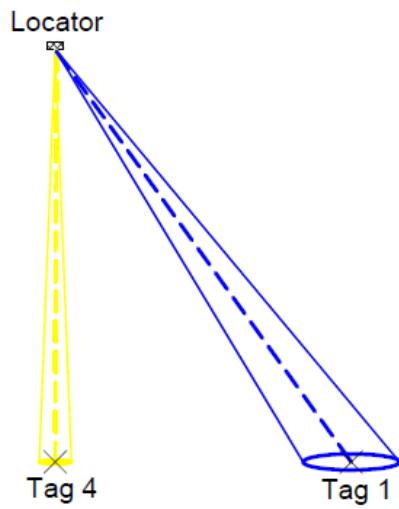
De plaats met de minst nauwkeurige of preciezere waarden wordt hier minder expliciet weergegeven, aangezien alle punten zich in een HP radius bevinden. De nauwkeurigheid is over het algemeen goed, 16/30 punten halen de vooropgestelde nauwkeurigheid van 30 cm en de andere punten een aantal centimeters hoger. De semi-geschrante configuratie geeft een groter aantal stabiele nauwkeurige punten, omdat de fouten gereduceerd worden door kruisende foutenellipsen (Zie hieronder De foutenellips). Indien een nauwkeurigheid van 50 cm wordt vooropgesteld voldoen 23/30 punten.

### De foutenellips

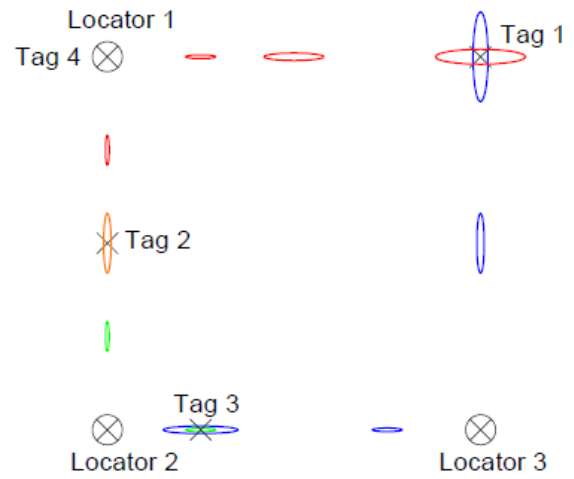
De foutenellips geeft de precisie weer van de opgemeten *tag*, deze wordt groter naarmate de afstand tot de *locator* toeneemt (zie Figuur 42, Figuur 41). Dit komt omdat Quuppa werkt met AOA (2.1.1.6 AOA (Angle of arrival) of Direction Of Arrival (DOA)) en recht onder de *locator* is de fout op de hoek 3° (elevatiehoek). Deze fout vergroot naarmate de positie verder weg van de *locator* bepaald moet worden.

Indien *locators* op eenzelfde lijn staan, wordt deze fout groter. Zoals te zien in Figuur 41 wordt de foutenellips in *Tag 2* en *Tag 3* niet verbeterd omdat ze zich tussen *locators* op een rechte lijn bevinden en elkaar overlappen. Indien de *locators* geschrant staan, kruisen twee foutenellipsen elkaar (zie *tag 1* Figuur 41), waardoor het gebied dat twee ellipsen ontvangt beduidend kleiner wordt.

Hierdoor kan het algoritme de fouten reduceren waardoor de nauwkeurigheid en de precisie verhogen (zie tag 1 Figuur 41, Figuur 42).

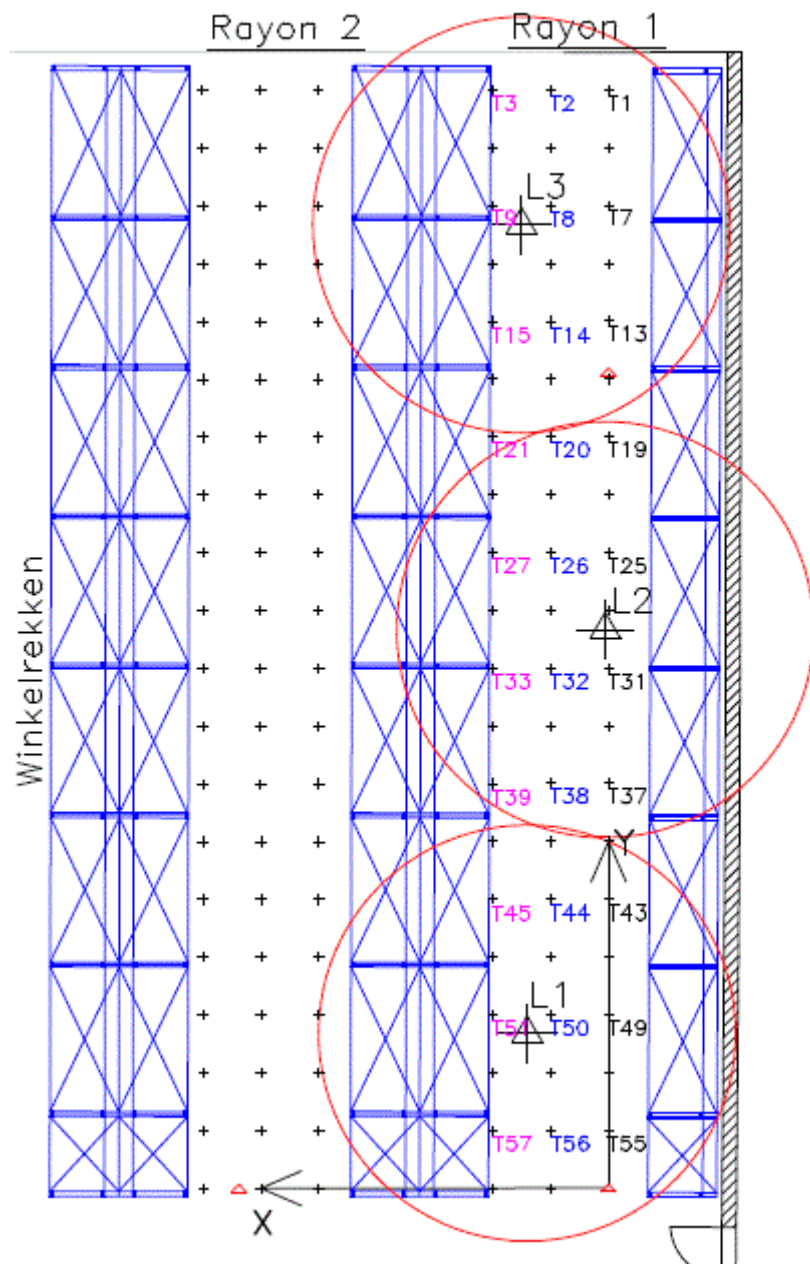


*Figuur 42: Zijaanzicht foutenellips*



*Figuur 41: 2D bovenaanzicht fout op de ellips*

### 3.4.2.7 Configuratie 7



**Figuur 43: Configuratie 7: Meting 1 = zwart, meting 2 = blauw, meting 3 = paars, HP-radius = rood**

Configuratie 7 maakt gebruik van *locators* L1, L2 en L3 en 10 *tags* met een densiteit van 1x2 m. De onderlinge afstand tussen de *locators* bedraagt  $\pm 7,00$  m. *Locators* L1, L2 en L3 staan respectievelijk  $\pm 0,70$  m links,  $\pm 0,60$  m rechts en  $\pm 0,80$  m links van het midden.

## Resultaten configuratie 7

**Tabel 17: Configuratie 7**

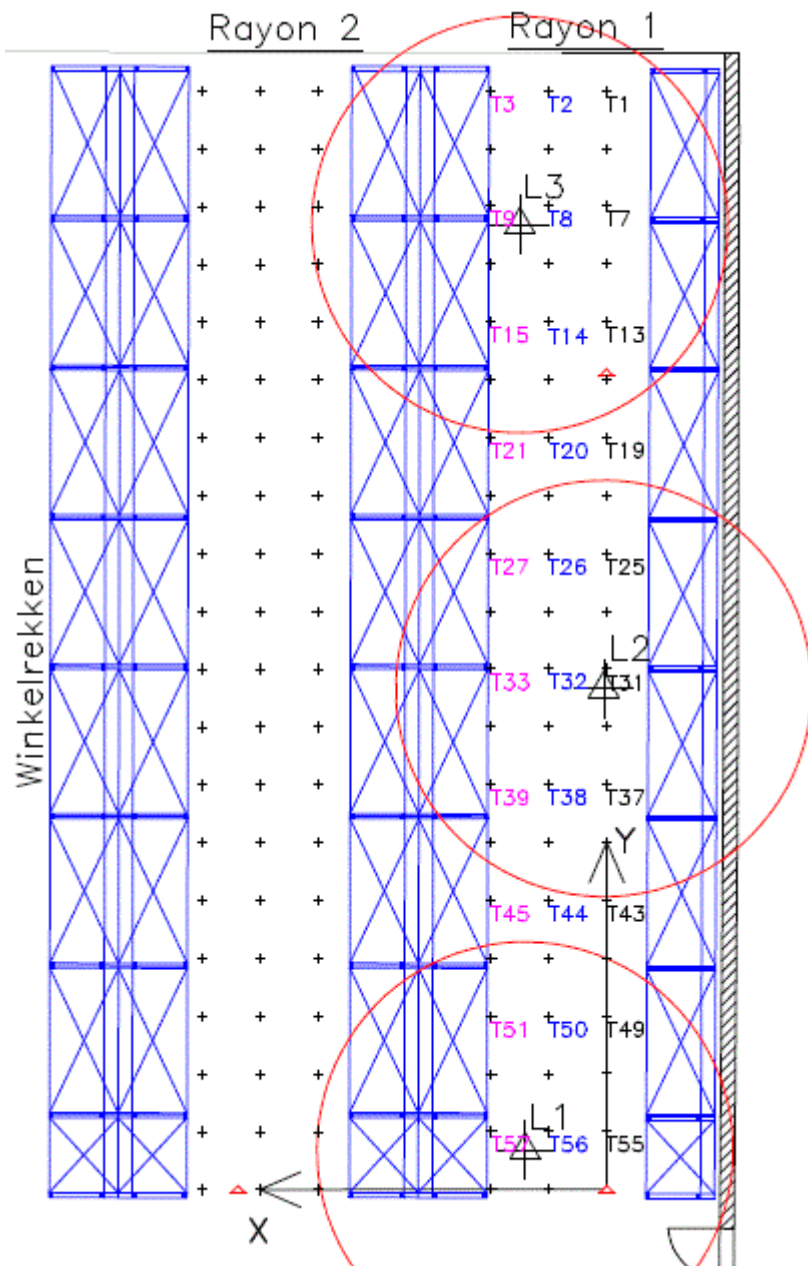
Nr.	$\Delta XY + 2\sigma_{Exp}$ (cm)	$\sigma_{Exp}$ (cm)	Nr.	$\Delta XY + 2\sigma_{Exp}$ (cm)	$\sigma_{Exp}$ (cm)	Nr.	$\Delta XY + 2\sigma_{Exp}$ (cm)	$\sigma_{Exp}$ (cm)
3	26,94	4,18	2	59,44	6,06	1	9,72	3,16
9	29,69	4,46	8	14,14	3,21	7	28,25	2,08
15	24,11	3,48	14	9,61	2,41	13	13,02	2,09
21	19,97	5,32	20	42,46	9,64	19	34,67	3,37
27	31,77	5,36	26	24,11	3,39	25	24,74	6,04
33	30,37	4,92	32	29,16	5,69	31	33,07	5,54
39	58,64	4,78	38	34,77	6,72	37	16,80	3,55
45	27,73	4,24	44	23,05	3,49	43	24,57	4,39
51	81,54	7,21	50	35,00	4,60	49	19,74	3,73
57	30,04	7,79	56	34,70	3,79	55	8,80	4,12

## Besluiten configuratie 7

Er zijn 18 punten die voldoen aan de vooropgestelde nauwkeurigheid van 30 cm, deze punten zijn 1, 3, 7, 8, 9, 13, 14, 15, 21, 25, 26, 32, 37, 43, 44, 45, 49 en 55. Punten 1, 3, 7, 9, 13, 14, 15 liggen onder *locator* L3 en punt 8 bevindt zich recht onder *locator* L3. Punt 21 bevindt zich op de rand van de HP-radiussen van *locators* L3 en L2. Punten 25, 26 en 32 liggen rond *locator* L2 en punt 37 bevindt zich op de rand van de HP-radius van *locator* L2.

Op één uitschieter na (punt 51) hebben alle punten een stabiele nauwkeurigheid die enkele centimeters boven de vooropgestelde nauwkeurigheid van 30 cm ligt. De nauwkeurigheid en precisie zijn stabiel, doordat alle punten zich bevinden in een HP-radius en omdat de geschrante configuratie zorgt dat fouten gereduceerd worden door kruisende foutenellipsen (Zie De foutenellips). Aangezien 18/30 punten voldoen is de configuratie niet geschikt voor Colruyt. Indien een nauwkeurigheid van 50 cm wordt vooropgesteld zijn 27/30 punten geschikt en komt de configuratie in aanmerking.

### 3.4.2.8 Configuratie 8



**Figuur 44: Configuratie 8: Meting 1 = zwart, meting 2 = blauw, meting 3 = paars, HP-radius = rood**

Configuratie 8 maakt gebruik van drie *locators* L1, L2 en L3 en 10 *tags* met een densiteit van 1x2 m. De onderlinge afstand tussen de *locators* bedraagt  $\pm 8,00$  m. *Locators* L1, L2 en L3 staan respectievelijk  $\pm 0,70$  m links,  $\pm 0,60$  m rechts en  $\pm 0,80$  m links van het midden.

## Resultaten configuratie 8

**Tabel 18: Configuratie 8**

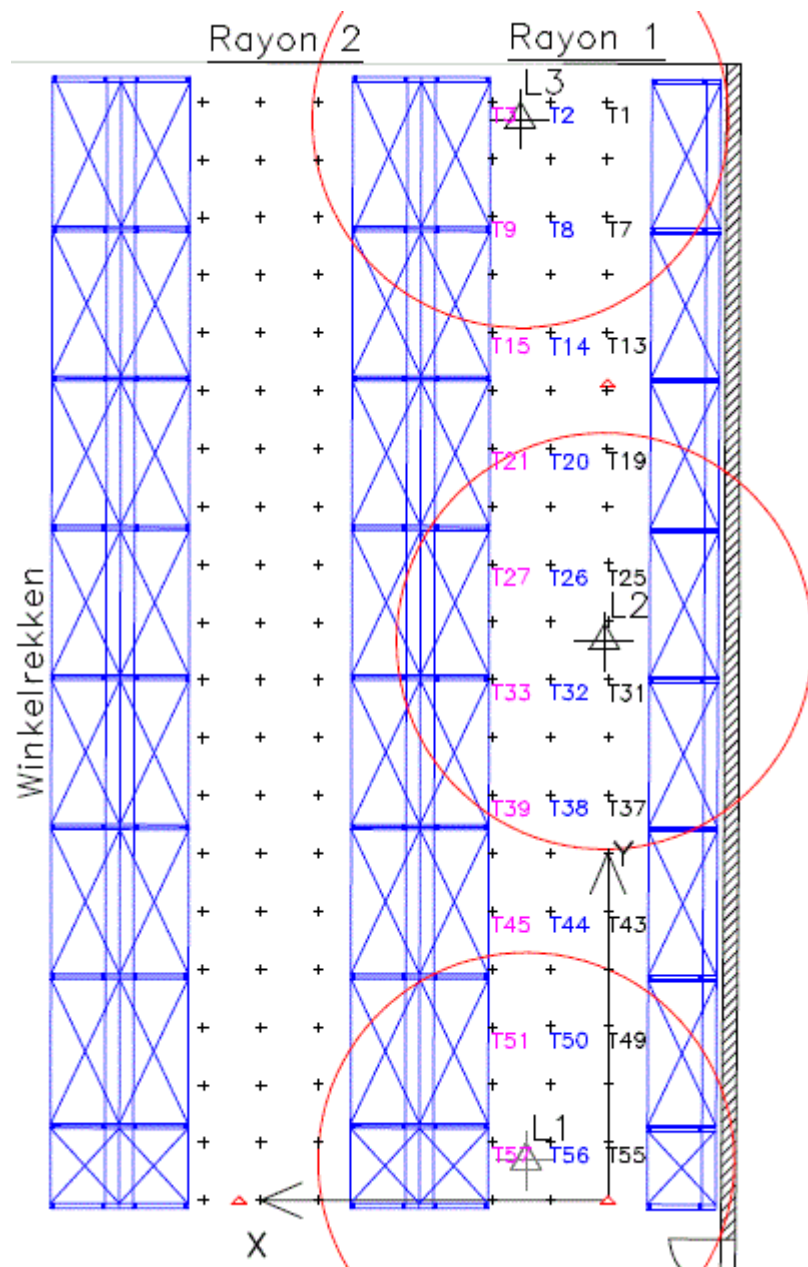
Nr.	$\Delta XY + 2\sigma_{Exp}$ (cm)	$\sigma_{Exp}$ (cm)	Nr.	$\Delta XY + 2\sigma_{Exp}$ (cm)	$\sigma_{Exp}$ (cm)	Nr.	$\Delta XY + 2\sigma_{Exp}$ (cm)	$\sigma_{Exp}$ (cm)
3	15,32	1,62	2	53,73	3,64	1	17,41	2,70
9	14,40	4,19	8	11,32	3,68	7	24,47	3,92
15	19,09	3,13	14	26,81	3,28	13	23,23	4,21
21	46,71	3,56	20	37,01	8,99	19	59,12	6,73
27	60,79	3,33	26	29,15	2,06	25	17,28	2,82
33	42,52	1,78	32	20,21	2,23	31	22,86	3,64
39	13,73	2,97	38	29,39	1,90	37	7,30	2,19
45	50,94	5,72	44	32,80	1,70	43	51,92	6,97
51	27,62	3,07	50	33,56	3,42	49	59,92	5,32
57	34,23	7,28	56	16,96	3,48	55	50,87	5,49

### Besluiten configuratie 8

Er zijn 17 punten die voldoen aan de vooropgestelde nauwkeurigheid van 30 cm, deze punten zijn 1, 3, 7, 8, 9, 13, 14, 15, 25, 26, 31, 32, 37, 38, 39, 51, 56. Punten 3, 7, 8, 13, 14, 15 liggen rond *locator* L3 en punt 9 bevindt zich recht onder *locator* L3. Punten 25, 26, 32, 37, 38, 39 liggen rond L2 en punt 32 bevindt zich recht onder *locator* L2. Punten 51 en 56 liggen rond *locator* L3. Punten 19, 20, 21, 43, 44, 45 bevinden zich buiten een HP-radius en voldoen niet aan de vooropgestelde nauwkeurigheid van 30 cm.

De nauwkeurigheid en precisie zijn over het algemeen stabiel en bevinden zich enkele centimeters boven de vooropgestelde nauwkeurigheid. De geschrante configuratie zorgt dat fouten gereduceerd worden door kruisende foutenellipsen (Zie De foutenellips). Aangezien 17/30 punten voldoen, is de configuratie niet geschikt voor Colruyt. Indien een nauwkeurigheid van 50 cm wordt vooropgesteld zijn 23/30 geschikt.

### 3.4.2.9 Configuratie 9



**Figuur 45: Configuratie 9: Meting 1 = zwart, meting 2 = blauw, meting 3 = paars, HP-radius = rood**

Configuratie 9 maakt gebruik van drie *locators* L1, L2 en L3 en 10 *tags* met een densiteit van 1x2 m. De onderlinge afstand tussen de *locators* bedraagt 9,00 m. *Locators* L1, L2 en L3 staan respectievelijk  $\pm 0,70$  m links,  $\pm 0,60$  m rechts en  $\pm 0,80$  m links van het midden.



## Resultaten configuratie 9

**Tabel 19: Configuratie 9**

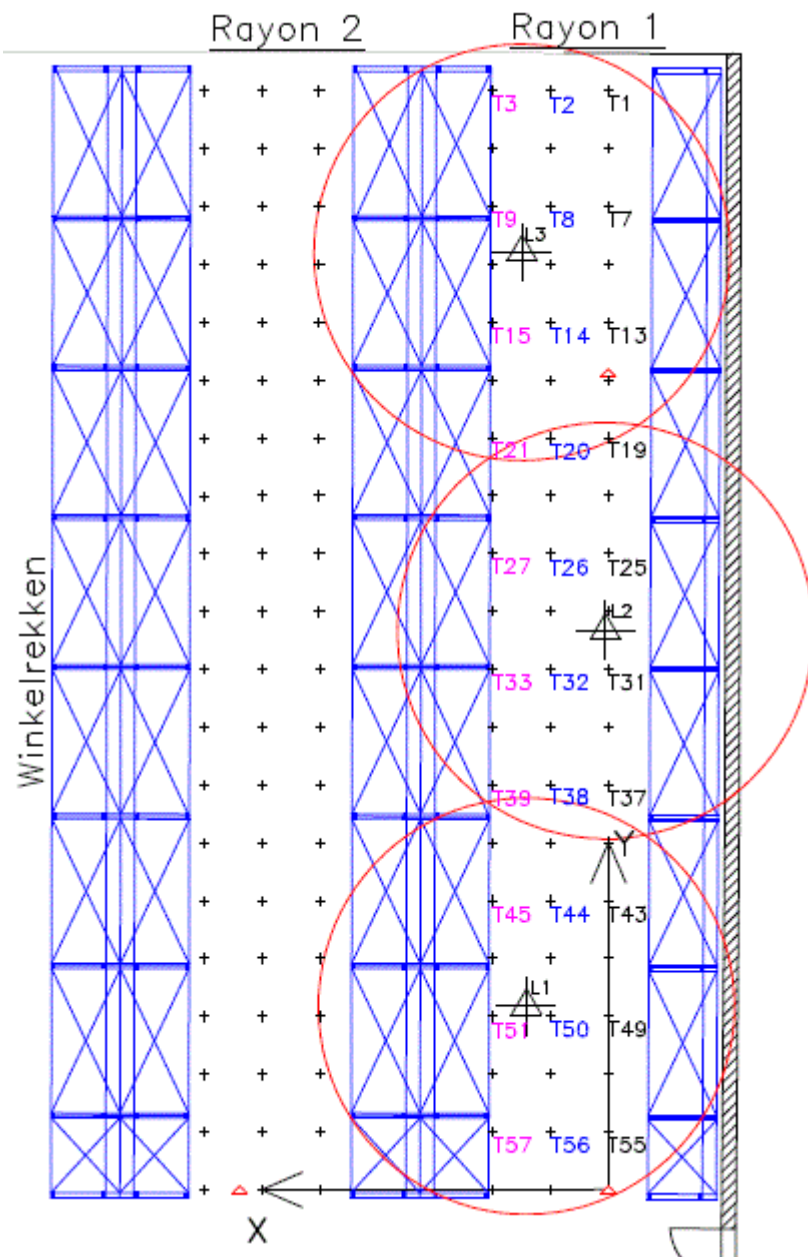
Nr.	$\Delta XY + 2\sigma_{Exp}$ (cm)	$\sigma_{Exp}$ (cm)	Nr.	$\Delta XY + 2\sigma_{Exp}$ (cm)	$\sigma_{Exp}$ (cm)	Nr.	$\Delta XY + 2\sigma_{Exp}$ (cm)	$\sigma_{Exp}$ (cm)
3	38,69	9,60	2	24,46	3,48	1	18,17	4,03
9	32,22	6,39	8	10,33	3,53	7	34,02	4,62
15	103,79	15,54	14	147,90	12,58	13	56,53	9,65
21	40,48	7,54	20	40,58	8,59	19	51,38	4,85
27	23,53	5,84	26	15,06	2,27	25	26,67	6,60
33	42,91	9,05	32	28,07	5,58	31	44,45	4,47
39	22,06	5,46	38	34,27	6,85	37	59,82	7,27
45	38,01	8,01	44	55,54	5,10	43	70,69	6,88
51	50,51	13,70	50	39,63	3,12	49	44,34	3,96
57	35,16	10,67	56	20,03	6,35	55	34,39	12,41

### Besluiten configuratie 9

Er zijn negen punten die voldoen aan de vooropgestelde nauwkeurigheid van 30 cm, deze punten zijn 1, 2, 8, 25, 26, 27, 32, 39 en 56. Punten 1, 2, 25, 26, 27, 32 en 56 liggen dichtbij een *locator* en punten 8 en 39 liggen binnen een HP-radius. De overige punten die binnen een HP-radius liggen, behalen niet de nauwkeurigheid van 30 cm, maar voldoen aan de nauwkeurigheid van 50 cm, dit op punten 19,31 en 51 na. Punten 15,16,17, 43, 44 en 45 vallen buiten een HP-radius.

Hier voldoen 9/30 punten aan de nauwkeurigheid van 30 cm, waardoor deze niet beantwoordt aan de voorwaarden van Colruyt. Bij een nauwkeurigheid van 50 cm voldoen 22/30 punten.

### 3.4.2.10 Configuratie 10



**Figuur 46: Configuratie 10: Meting 1 = zwart, meting 2 = blauw, meting 3 = paars, HP-radius = rood**

Configuratie 10 maakt gebruik van drie *locators* L1, L2 en L3 en 10 *tags* met een densiteit van 1x2 m. De onderlinge afstand tussen de *locators* bedraagt  $\pm 6,50$  m. *Locators* L1, L2 en L3 staan respectievelijk  $\pm 0,70$  m links,  $\pm 0,60$  m rechts en  $\pm 0,80$  m links van het midden.

## Resultaten configuratie 10

**Tabel 20: Configuratie 10**

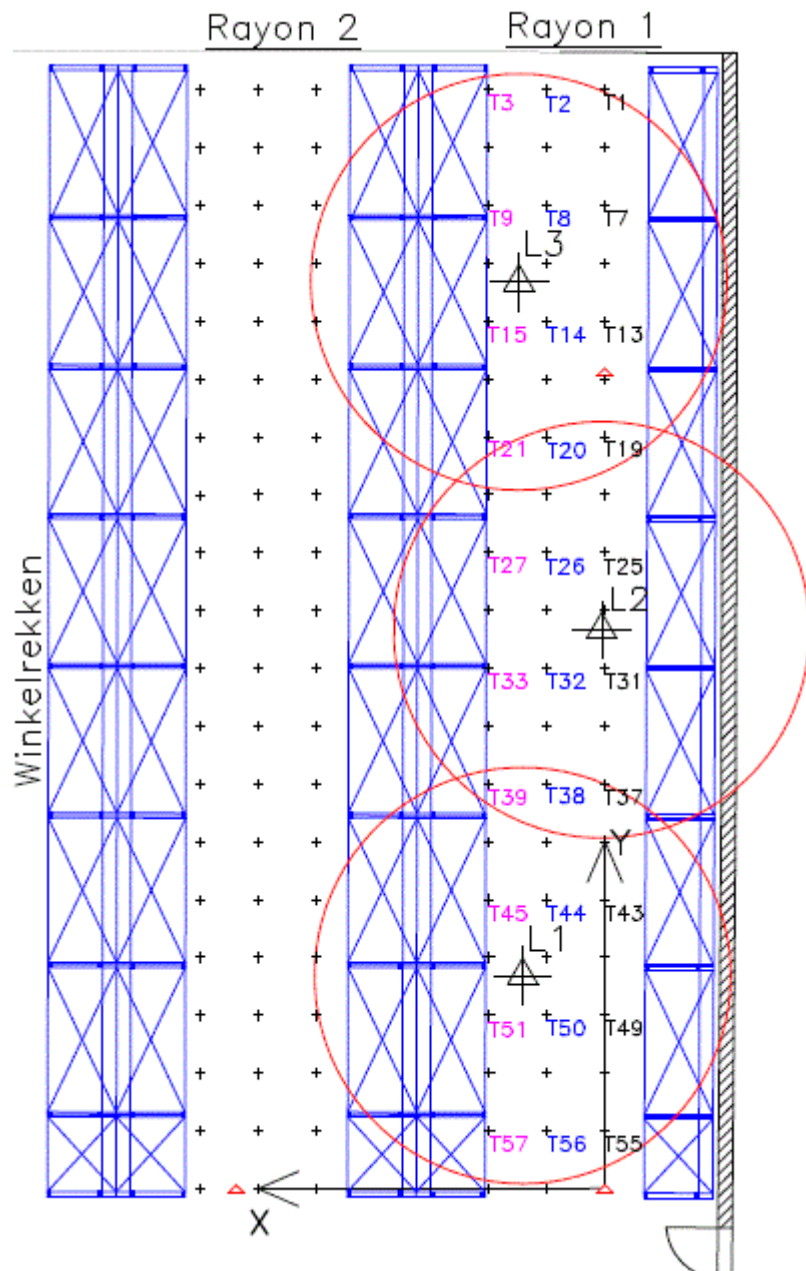
Nr.	$\Delta XY + 2\sigma_{Exp}$ (cm)	$\sigma_{Exp}$ (cm)	Nr.	$\Delta XY + 2\sigma_{Exp}$ (cm)	$\sigma_{Exp}$ (cm)	Nr.	$\Delta XY + 2\sigma_{Exp}$ (cm)	$\sigma_{Exp}$ (cm)
3	47,54	1,90	2	43,14	1,95	1	54,69	9,19
9	29,53	2,60	8	33,53	1,63	7	23,59	5,39
15	10,62	1,47	14	52,64	1,61	13	33,63	4,54
21	18,26	1,67	20	47,60	1,73	19	32,15	3,26
27	34,62	2,16	26	14,71	1,16	25	24,24	3,63
33	29,64	1,71	32	30,52	1,02	31	13,06	3,89
39	37,70	2,08	38	10,78	1,72	37	24,66	3,84
45	27,82	2,31	44	15,21	3,21	43	43,85	4,25
51	23,61	4,70	50	36,47	2,03	49	65,85	1,91
57	36,50	3,72	56	41,75	3,19	55	44,67	5,89

### Besluiten configuratie 10

Er voldoen 13 punten aan de vooropgestelde nauwkeurigheid van 30 cm, deze punten zijn 7, 9, 15, 21, 25, 26, 31, 33, 37, 38, 44, 45 en 51. Punten 7, 9, 25, 26, 31, 33 en 51 liggen dichtbij een *locator*, punten 15, 21, 37, 38, 44 en 45 bevinden zich tussen de *locators*. Doordat alle punten zich bevinden binnen de HP-radius moeten deze voldoen aan de vooropgestelde nauwkeurigheid van 30 cm. Hier voldoen 13/30 punten aan deze voorwaarde. Enkel punten 1, 14 en 49 vallen buiten deze nauwkeurigheid, punt 1 ligt op de rand van een HP-radius en punten 14 en 49 liggen dichtbij een *locator*.

Bij een nauwkeurigheid van 30 cm voldoet minder dan de helft van de punten, waardoor deze configuratie niet in aanmerking komt. Wanneer een nauwkeurigheid van 50 cm vooropgesteld wordt, beantwoorden 27/30 punten.

### 3.4.2.11 Configuratie 11



**Figuur 47: Configuratie 11: Meting 1 = zwart, meting 2 = blauw, meting 3 = paars, HP-radius = rood**

Configuratie 11 maakt gebruik van drie *locators* L1, L2 en L3 en 10 *tags* met een densiteit van 1x2 m. De onderlinge afstand tussen de *locators* bedraagt  $\pm 6,00$  m. *Locators* L1, L2 en L3 staan respectievelijk  $\pm 0,70$  m links,  $\pm 0,60$  m rechts en  $\pm 0,80$  m links van het midden.

## Resultaten configuratie 11

**Tabel 21: Configuratie 11**

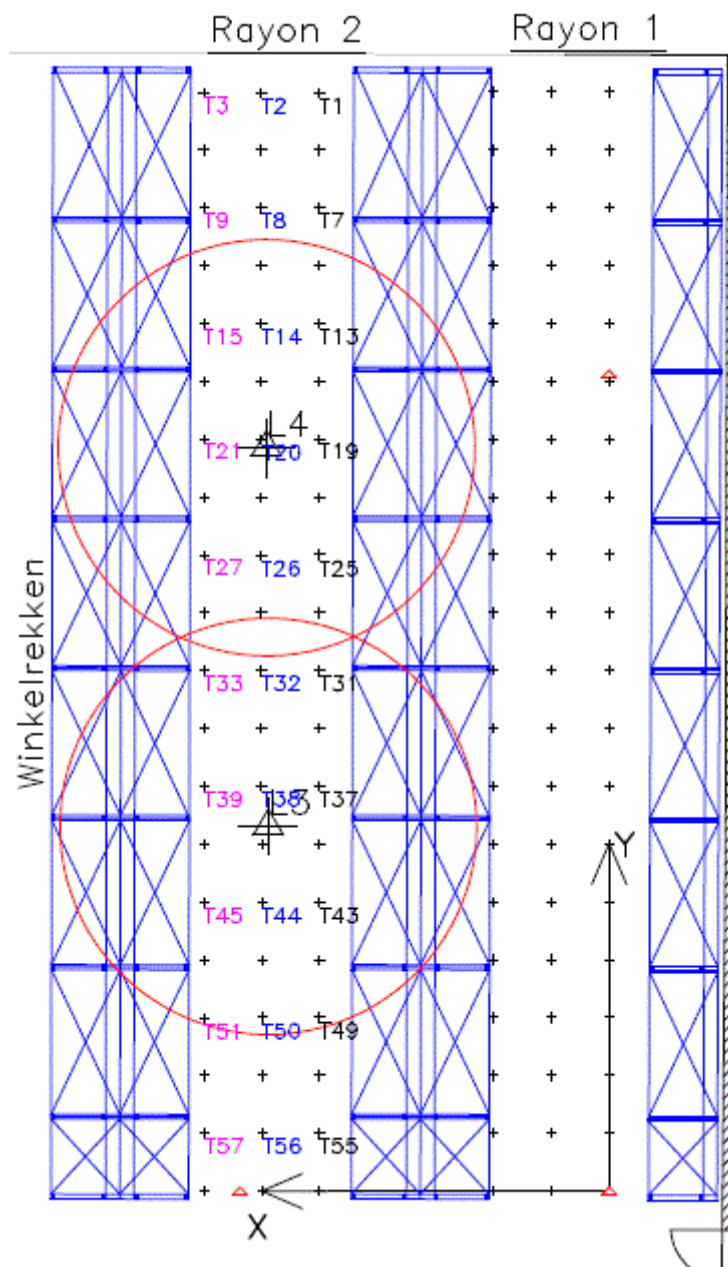
Nr.	$\Delta XY + 2\sigma_{Exp}$ (cm)	$\sigma_{Exp}$ (cm)	Nr.	$\Delta XY + 2\sigma_{Exp}$ (cm)	$\sigma_{Exp}$ (cm)	Nr.	$\Delta XY + 2\sigma_{Exp}$ (cm)	$\sigma_{Exp}$ (cm)
3	27,90	2,07	2	141,34	3,80	1	92,62	9,83
9	43,93	1,32	8	42,60	1,03	7	54,28	4,77
15	6,51	1,03	14	53,20	1,46	13	53,02	3,99
21	23,78	2,26	20	34,19	1,02	19	40,90	1,73
27	31,90	3,35	26	30,29	1,38	25	25,08	3,32
33	30,62	0,78	32	11,18	1,65	31	28,85	2,91
39	30,61	3,12	38	32,89	1,34	37	40,54	4,95
45	23,93	1,29	44	65,53	2,20	43	46,97	4,51
51	13,99	3,54	50	23,94	2,59	49	56,91	5,06
57	30,22	3,24	56	27,13	2,45	55	67,57	10,69

### Besluiten configuratie 11

Tien punten voldoen aan de vooropgestelde nauwkeurigheid van 30 cm, deze punten zijn 3, 15, 21, 25, 31, 32, 45, 50, 51 en 56. Punt 3 ligt op de rand van een HP-radius en punten 15 en 21 liggen rond *locator* L3. Punten 25, 31 en 32 liggen rond *locator* L2 en punten 45, 50 en 51 liggen rond *locator* L1. Punt 56 bevindt zich op de rand van de HP-radius van *locator* L1. De punten met de laagste nauwkeurigheid zijn punten 1, 2, 44 en 55, waarvan drie zich verder weg naar buiten van de *locators* bevinden. De punten met de hoogste nauwkeurigheid 15, 32 en 51 bevinden zich recht onder de *locators*.

Op de buitenste punten na, is de nauwkeurigheid en de precisie goed en stabiel. De punten die niet voldoen bevinden zich een aantal centimeters boven de vooropgestelde nauwkeurigheid. Aangezien 10/30 punten voldoen is de configuratie niet geschikt voor Colruyt. Indien een nauwkeurigheid van 50 cm wordt vooropgesteld zijn 22/30 geschikt.

### 3.4.2.12 Configuratie 12



**Figuur 48: Configuratie 12: Meting 1 = zwart, meting 2 = blauw, meting 3 = paars, HP-radius = rood**

Configuratie 12 maakt gebruik van *locators* L3 en L4, de *locators* worden in het midden van rayon 2 geplaatst. Er wordt gewerkt met 10 *tags* en een densiteit van 1x2 m. De onderlinge afstand tussen de *locators* bedraagt  $\pm 6,50$  m.

## Resultaten configuratie 12

**Tabel 22: Configuratie 12**

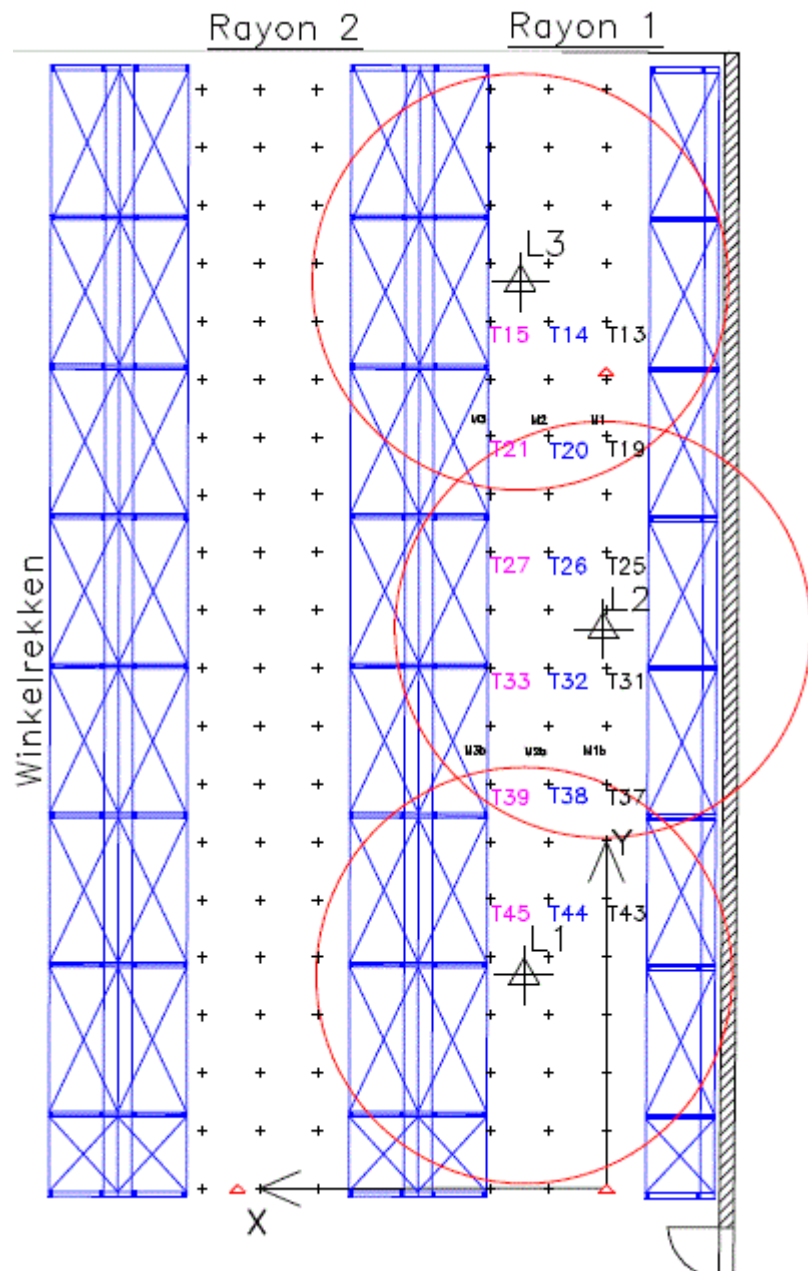
Nr.	$\Delta XY + 2\sigma_{Exp}$ (cm)	$\sigma_{Exp}$ (cm)	Nr.	$\Delta XY + 2\sigma_{Exp}$ (cm)	$\sigma_{Exp}$ (cm)	Nr.	$\Delta XY + 2\sigma_{Exp}$ (cm)	$\sigma_{Exp}$ (cm)
3	90,62	6,22	2	131,29	2,42	1	92,19	16,69
9	75,89	2,68	8	55,27	2,78	7	43,67	9,52
15	64,42	3,12	14	34,84	2,21	13	59,46	12,31
21	36,16	1,67	20	42,01	1,66	19	28,13	6,56
27	51,95	6,86	26	52,38	3,17	25	18,35	5,42
33	42,02	1,46	32	59,13	2,74	31	16,74	5,35
39	24,52	4,15	38	22,93	1,61	37	26,90	8,30
45	73,79	1,29	44	50,31	1,00	43	50,67	5,15
51	128,48	5,95	50	118,68	7,71	49	75,07	0,00
57	197,41	7,26	56	150,06	30,18	55	184,38	0,00

### Besluiten configuratie 12

Zes waarden voldoen aan de vooropgestelde nauwkeurigheid van 30 cm, deze punten zijn 19, 25, 31, 37, 38 en 39. Punten 19 en 25 liggen onder *locator* L3, punten 31, 37 en 39 liggen onder *locator* L2 en punt 38 bevindt zich recht onder *locator* L2. Punten 1, 2, 3, 7, 8, 9, 55, 56, 57 liggen buiten een HP-radius, waardoor deze punten niet voldoen aan de vooropgestelde nauwkeurigheid.

De nauwkeurigheid en precisie dalen naarmate verder van de *locators* weg wordt gegaan. Omdat 6/30 punten voldoen aan de nauwkeurigheid van 30 cm is deze configuratie niet geschikt voor Colruyt. Zelfs indien de nauwkeurigheid wordt vastgelegd op 50 cm voldoen slechts 11/30 punten.

### 3.4.2.13 Configuratie 13



**Figuur 49: Configuratie 13: Meting 1 = zwart, meting 2 = blauw, meting 3 = paars, HP-radius = rood**

Configuratie 13 maakt gebruik van drie *locators* L1, L2 en L3 en 3 *tags* met een densiteit van 1x2 m. De onderlinge afstand tussen de *locators* bedraagt  $\pm 6,00$  m. *Locators* L1, L2 en L3 staan respectievelijk  $\pm 0,70$  m links,  $\pm 0,60$  m rechts en  $\pm 0,80$  m links van het midden. Om de simulatie te verbeteren worden de *tags* bevestigd op winkelwagentjes.



## Resultaten configuratie 13

**Tabel 23: Configuratie 13**

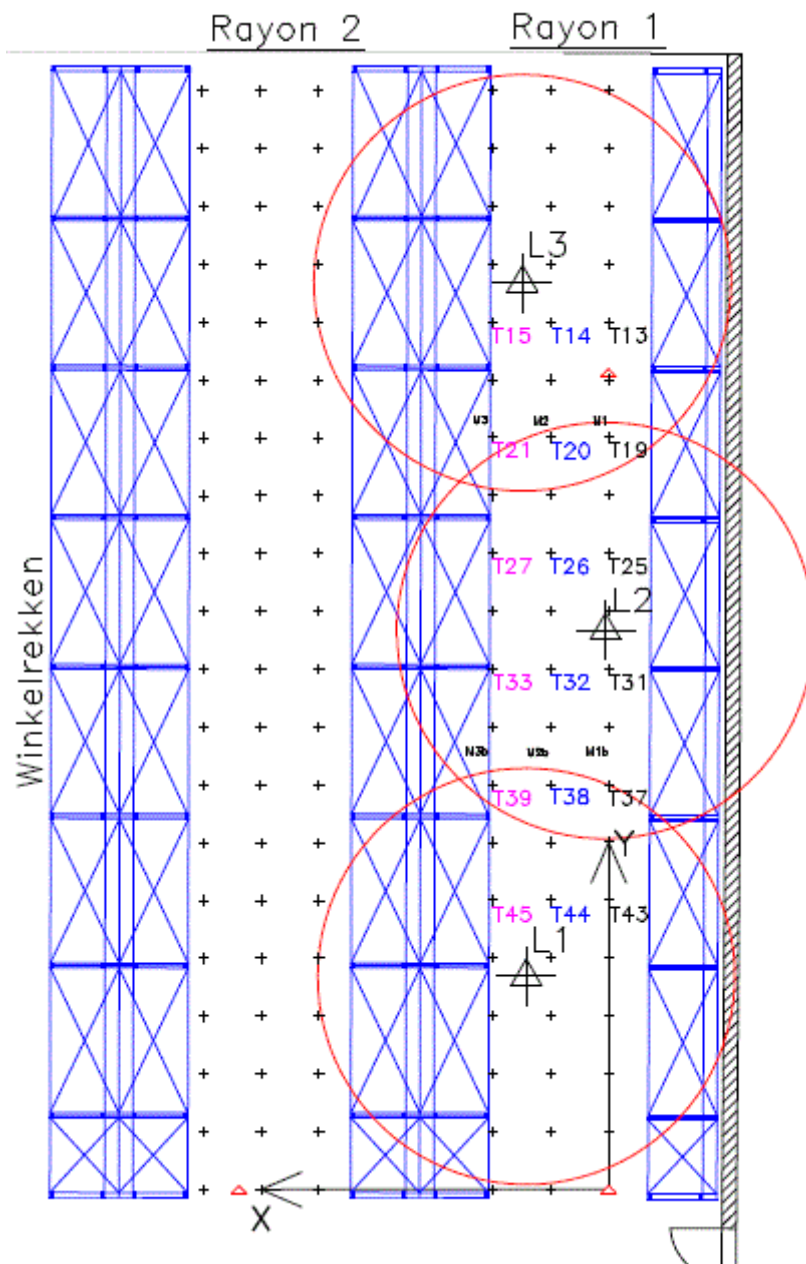
Nr.	$\Delta XY + 2\sigma_{Exp}$ (cm)	$\sigma_{Exp}$ (cm)	Nr.	$\Delta XY + 2\sigma_{Exp}$ (cm)	$\sigma_{Exp}$ (cm)	Nr.	$\Delta XY + 2\sigma_{Exp}$ (cm)	$\sigma_{Exp}$ (cm)
15	20,51	0,61	14	3,78	0,78	13	17,04	2,06
21	69,52	2,09	20	39,81	0,90	19	31,87	1,61
27	23,75	1,73	26	13,74	3,72	25	47,42	1,47
33	15,08	2,25	32	18,72	0,90	31	13,21	1,95
39	22,39	0,74	38	53,37	1,59	37	31,33	1,52
45	28,54	1,17	44	14,16	0,88	43	33,06	1,05

### Besluiten configuratie 13

Er voldoen 11 punten aan de vooropgestelde nauwkeurigheid van 30 cm, deze punten zijn 13, 14, 15, 26, 27, 31, 32, 33, 39, 44 en 45. Punten 13, 14 en 15 liggen onder *locator* L3, punten 26, 27, 31, 32 en 33 liggen onder *locator* L2 en punt 39 ligt in de HP radius van zowel *locator* L2 als L1. Punten 44 en 45 liggen dicht onder *locator* L1. Punten 19, 20, 21, 37 en 38 liggen in de HP-radius van twee *locators*, deze punten voldoen niet aan de vooropgestelde nauwkeurigheid.

Op punten 21 en 38 na, is de nauwkeurigheid en de precisie hoog en stabiel. De punten die niet voldoen, bevinden zich een aantal centimeters boven de vooropgestelde nauwkeurigheid. Omdat 11/18 punten voldoen is de configuratie niet geschikt. Indien een nauwkeurigheid van 50 cm wordt vooropgesteld zijn 16/18 geschikt en kan de configuratie in aanmerking komen voor Colruyt.

### 3.4.2.14 Configuratie 14



**Figuur 50: Configuratie 14: Meting 1 = zwart, meting 2 = blauw, meting 3 = paars, HP-radius = rood**

Configuratie 14 gebruikt *locators* L1, L2 en L3 en 3 *tags* met een densiteit van 1x2 m. De onderlinge afstand tussen de *locators* bedraagt  $\pm 6,00$  m. *Locators* L1, L2 en L3 staan respectievelijk  $\pm 0,70$  m links,  $\pm 0,60$  m rechts en  $\pm 0,80$  m links van het midden.. Om de simulatie compleet te maken worden de *tags* bevestigd op winkelwagentjes, voor elke kar neemt nu een persoon plaats.

## Resultaten configuratie 14

**Tabel 24: Configuratie 14**

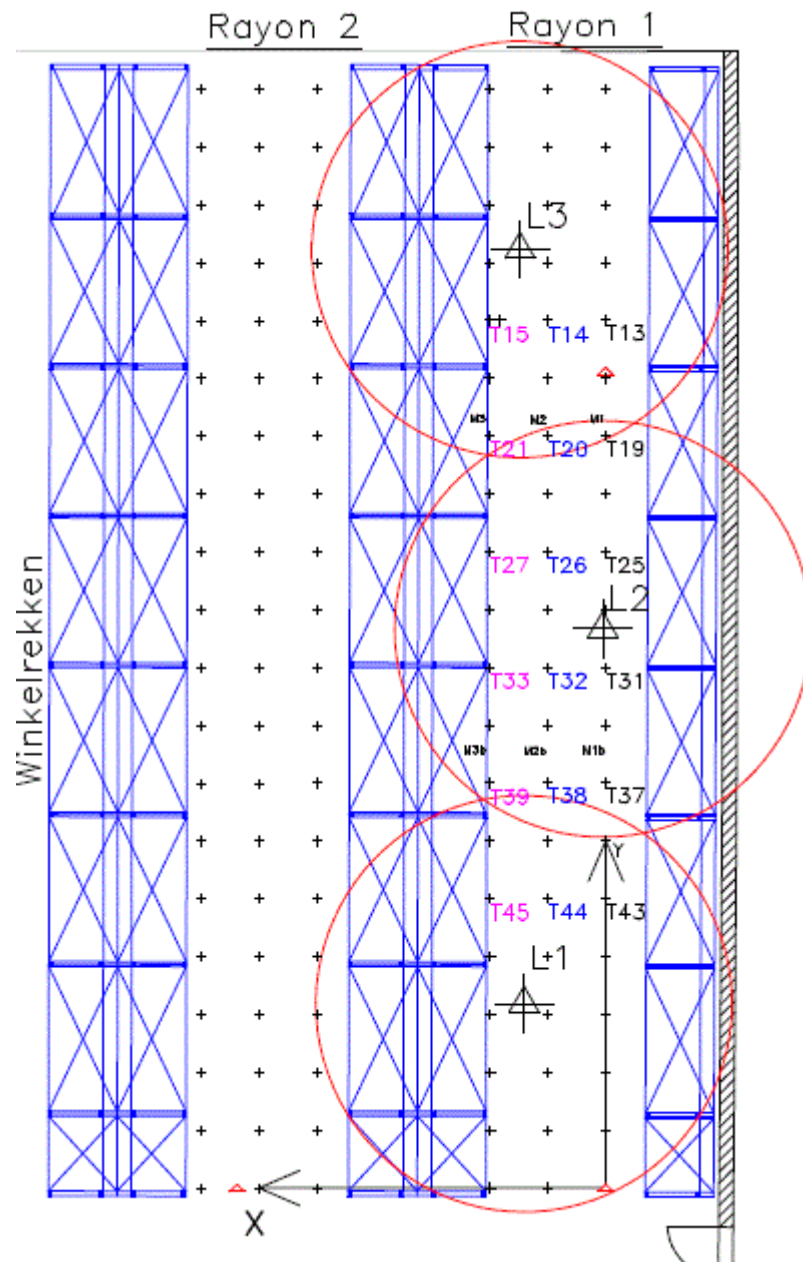
Nr.	$\Delta XY + 2\sigma_{Exp}$ (cm)	$\sigma_{Exp}$ (cm)	Nr.	$\Delta XY + 2\sigma_{Exp}$ (cm)	$\sigma_{Exp}$ (cm)	Nr.	$\Delta XY + 2\sigma_{Exp}$ (cm)	$\sigma_{Exp}$ (cm)
15	29,36	6,20	14	22,81	8,67	13	32,24	9,06
21	32,93	13,86	20	79,51	10,56	19	37,67	14,45
27	77,21	16,63	26	28,52	8,83	25	34,62	8,53
33	28,84	8,08	32	55,84	19,25	31	37,72	8,50
39	106,05	28,75	38	84,11	26,81	37	79,40	30,04
45	24,60	5,23	44	58,53	16,75	43	75,38	18,83

## Besluiten configuratie 14

Vijf waarden voldoen aan de vooropgestelde nauwkeurigheid van 30 cm, deze punten zijn 14, 15, 26, 33, 45. Punten 14 en 15 liggen onder *locator* L3, punten 26 en 33 bevinden zich onder *locator* L2 en punt 45 bevindt zich onder *locator* L1. Punten 19, 20, 21, 37, 38 en 39 bevinden zich in de HP-radius van twee *locators*, toch voldoen deze niet aan de vooropgestelde nauwkeurigheid. Punt 39 dat zich in de HP radius van zowel *locator* L2 als L1 bevindt heeft de laagste nauwkeurigheid.

De nauwkeurigheid en de precisie zijn laag en onstabiel, dit heeft te maken met de absorptie van de RF-signalen door het menselijk lichaam dat leidt tot verliezen van LOS. Aangezien 5/18 punten voldoen is de configuratie niet geschikt. Indien een nauwkeurigheid van 50 cm wordt vooropgesteld voldoen 10/18 punten.

### 3.4.2.15 Configuratie 15



**Figuur 51: Configuratie 15: Meting 1 = zwart, meting 2 = blauw, meting 3 = paars**

Configuratie 15 maakt gebruik van drie *locators* L1, L2 en L3 en 3 *tags* met een densiteit van 1x2 m. De onderlinge afstand tussen de *locators* bedraagt  $\pm 6,50$  m. *Locators* L1, L2 en L3 staan respectievelijk  $\pm 0,70$  m links,  $\pm 0,60$  m rechts en  $\pm 0,80$  m links van het midden. Om de simulatie te verbeteren worden de *tags* bevestigd op winkelwagentjes.

## Resultaten configuratie 15

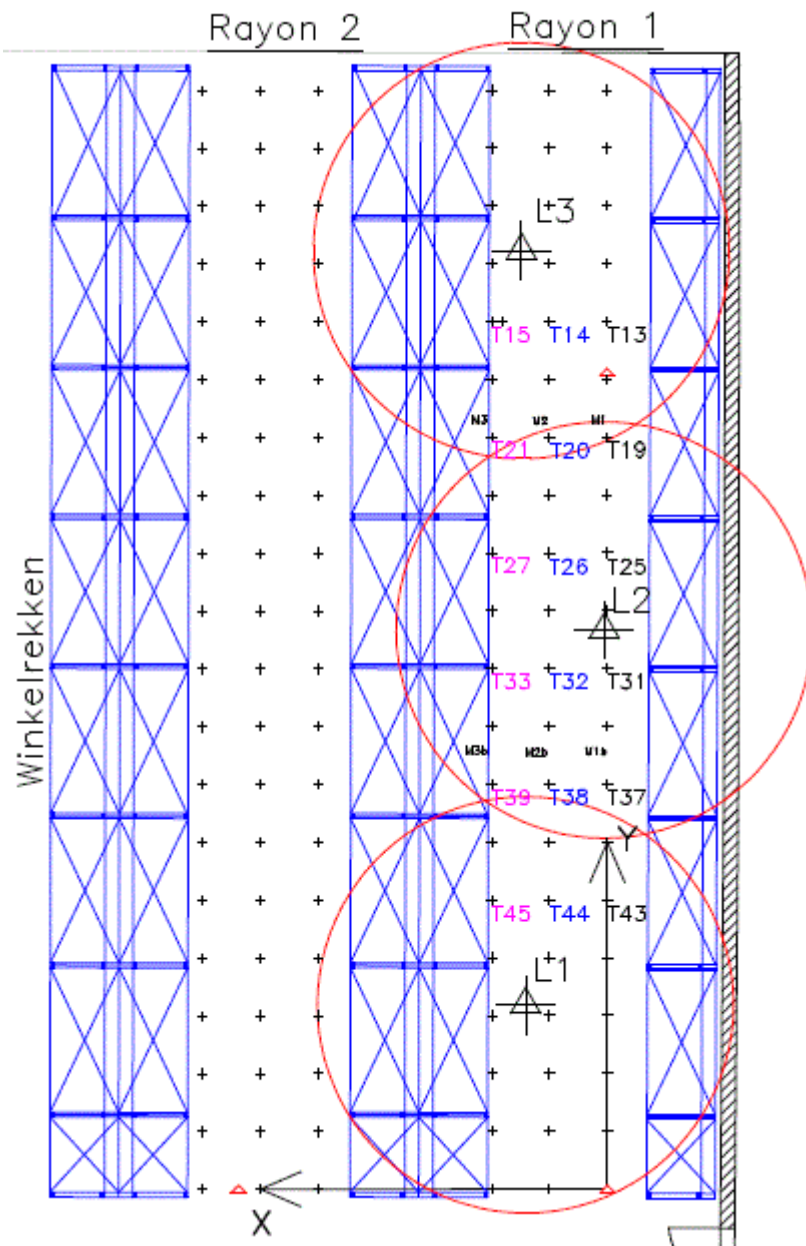
**Tabel 25: Configuratie 15**

Nr.	$\Delta XY + 2\sigma_{Exp}$ (cm)	$\sigma_{Exp}$ (cm)	Nr.	$\Delta XY + 2\sigma_{Exp}$ (cm)	$\sigma_{Exp}$ (cm)	Nr.	$\Delta XY + 2\sigma_{Exp}$ (cm)	$\sigma_{Exp}$ (cm)
15	33,27	1,85	14	19,81	4,33	13	25,60	2,50
21	25,98	3,05	20	30,26	4,07	19	34,25	2,04
27	13,43	2,72	26	18,40	1,58	25	31,11	5,47
33	8,13	2,58	32	42,81	1,95	31	16,12	2,28
39	22,37	1,51	38	26,38	5,80	37	49,12	4,52
45	24,98	2,55	44	33,81	3,08	43	42,39	9,32

## Besluiten configuratie 15

Tien punten voldoen aan de vooropgestelde nauwkeurigheid van 30 cm, deze punten zijn 13, 14, 21, 26, 27, 31, 33, 28, 39 en 45. De punten 13, 14, 26, 27, 31, 33 en 45 bevinden zich dichtbij een *locator* en punten 21, 38 en 39 bevinden zich tussen twee *locators*. De punten die dichtbij de rekken liggen hebben een hogere nauwkeurigheid dan punten die op een grotere afstand van de rekken of in het midden van een rayon liggen. Dit kan ook geconstateerd worden voor de precisie. Wanneer de nauwkeurigheid verlaagd wordt naar 50 cm voldoen alle punten.

### 3.4.2.16 Configuratie 16



**Figuur 52: Configuratie 16: Meting 1 = zwart, meting 2 = blauw, meting 3 = paars, HP-radius = rood**

Configuratie 16 maakt gebruik van drie *locators* L1, L2 en L3 en drie *tags* met een densiteit van 1x2 m. De onderlinge afstand tussen de *locators* bedraagt  $\pm 6,50$  m. *Locators* L1, L2 en L3 staan respectievelijk  $\pm 0,70$  m links,  $\pm 0,60$  m rechts en  $\pm 0,80$  m links van het midden. Om de simulatie compleet te maken worden de *tags* bevestigd op winkelwagentjes, voor elke kar neemt nu een persoon plaats.

## Resultaten configuratie 16

**Tabel 26: Configuratie 16**

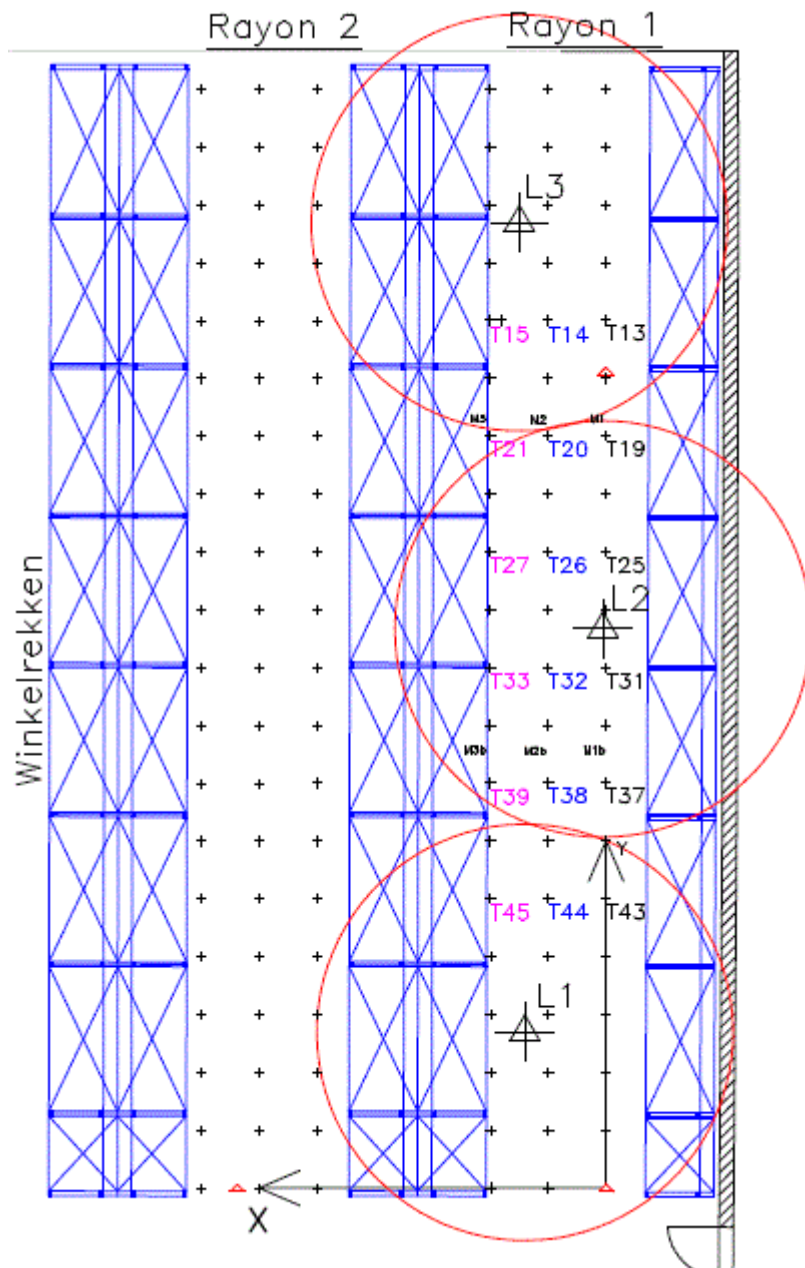
Nr.	$\Delta XY + 2\sigma_{Exp}$ (cm)	$\sigma_{Exp}$ (cm)	Nr.	$\Delta XY + 2\sigma_{Exp}$ (cm)	$\sigma_{Exp}$ (cm)	Nr.	$\Delta XY + 2\sigma_{Exp}$ (cm)	$\sigma_{Exp}$ (cm)
15	35,02	5,31	14	99,80	21,18	13	38,17	5,30
21	54,93	13,59	20	313,88	59,42	19	34,29	8,24
27	71,65	16,50	26	16,84	2,65	25	46,85	13,92
33	82,73	17,98	32	51,10	5,39	31	22,66	5,63
39	49,58	12,16	38	153,80	19,86	37	144,50	22,98
45	22,78	3,28	44	60,60	18,49	43	79,51	19,33

### Besluiten configuratie 16

Drie punten voldoen aan de vooropgestelde nauwkeurigheid van 30 cm. Dit zijn punten 26, 31 en 45. Punten 26 en 31 liggen onder *locator* L2 en punt 45 bevindt zich onder *locator* L3. Punten 19, 20, 21, 37, 38 en 39 bevinden zich in de HP-radius van twee *locators*, toch voldoen deze niet aan de vooropgestelde nauwkeurigheid.

De nauwkeurigheid en precisie zijn niet hoog en onstabiel, dit heeft te maken met de absorptie van de RF-signalen door het menselijk lichaam dat leidt tot verlies van LOS. Aangezien 3/18 punten voldoen is de configuratie niet geschikt. Indien een nauwkeurigheid van 50 cm wordt vooropgesteld voldoen 8/18 punten.

### 3.4.2.17 Configuratie 17



**Figuur 53: Configuratie 17: Meting 1 = zwart, meting 2 = blauw, meting 3 = paars, HP-radius = rood**

Configuratie 17 maakt gebruik van drie *locators* L1, L2 en L3 en 3 *tags* met een densiteit van 1x2 m. De onderlinge afstand tussen de *locators* bedraagt  $\pm 7,00$  m. *Locators* L1, L2 en L3 staan respectievelijk  $\pm 0,70$  m links,  $\pm 0,60$  m rechts en  $\pm 0,80$  m links van het midden. Om de simulatie te verbeteren worden de *tags* bevestigd op winkelwagentjes.



## Resultaten configuratie 17

**Tabel 27: Configuratie 17**

Nr.	$\Delta XY + 2\sigma_{Exp}$ (cm)	$\sigma_{Exp}$ (cm)	Nr.	$\Delta XY + 2\sigma_{Exp}$ (cm)	$\sigma_{Exp}$ (cm)	Nr.	$\Delta XY + 2\sigma_{Exp}$ (cm)	$\sigma_{Exp}$ (cm)
15	34,32	1,72	14	47,06	3,29	13	32,80	1,62
21	67,60	0,56	20	45,13	2,12	19	49,97	0,60
27	30,50	5,97	26	25,76	2,33	25	18,88	6,60
33	22,06	1,95	32	25,34	1,99	31	13,38	3,23
39	51,00	1,44	38	124,78	2,09	37	42,08	1,86
45	19,26	0,88	44	40,55	1,18	43	37,65	0,97

## Besluiten configuratie 17

Zes waarden voldoen aan de vooropgestelde nauwkeurigheid van 30 cm, deze punten zijn 25, 26, 31, 32, 33 en 45. Punten 25, 26, 31, 32 en 33 liggen onder *locator* L2 en punt 45 bevindt zich onder *locator* L1. Alle punten bevinden zich in de HP-radius van een *locator*.

Op punten 21, 38 en 39 na, zijn de precisie en de nauwkeurigheid hoog. De nauwkeurigheid van de punten ligt enkele centimeters boven de vooropgestelde nauwkeurigheid. De geschrante configuratie en het feit dat alle punten in de HP-radius liggen, zorgen voor een hogere nauwkeurigheid en stabiele waarden. Omdat 6/18 punten voldoen is de configuratie niet geschikt. Indien een nauwkeurigheid van 50 cm wordt vooropgesteld zijn 15/18 punten geschikt en komt de configuratie in aanmerking voor de Colruyt.

### 3.4.3 Vergelijkende onderzoeken

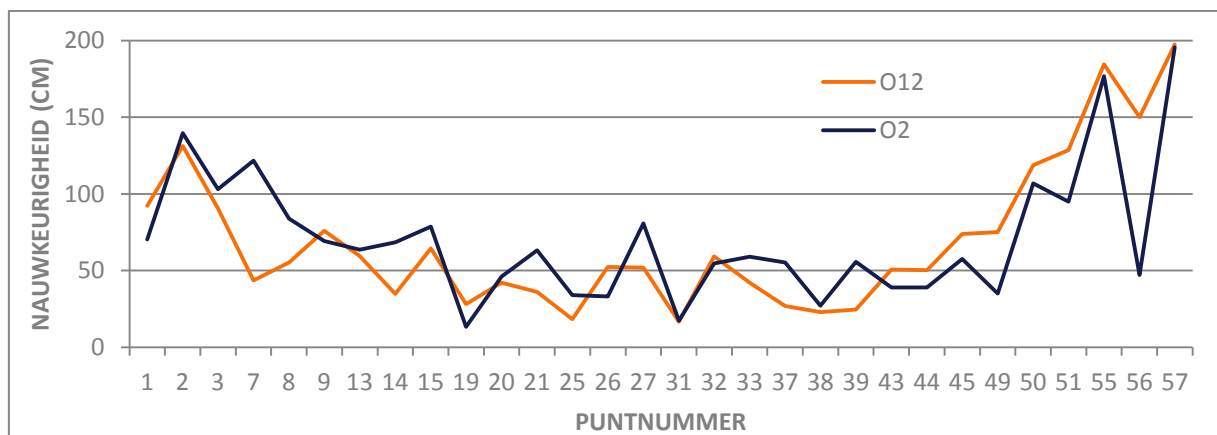
De tabellen werden zo opgebouwd dat ieder puntnummer in een tabel overeenkomt met hetzelfde punt in het onderzoek en het plan van configuratie. Om tot meer besluiten te komen, worden de configuraties onderling vergeleken.

#### 3.4.3.1 Invloed van locators op een andere rayon

Om de invloed van *locators* uit een naastliggende rayon na te gaan wordt een vergelijking gemaakt tussen configuratie 2 en 12. Bij beide configuraties is de onderlinge afstand tussen de *locators*  $\pm 6,50$  m en worden dezelfde punten opgemeten. Bij configuratie 2 werden metingen uitgevoerd met vier *locators* L1, L2, L3 en L4 waarbij L1 en L2 zich in de naastliggende rayon bevinden. Als referentie wordt configuratie 12 gebruikt met enkel *locators* L3 en L4 actief.

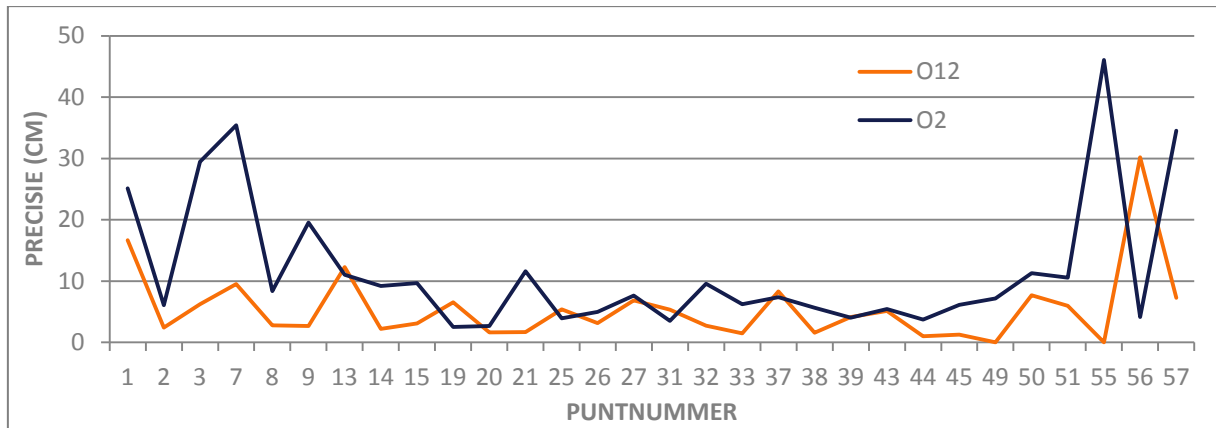
Bij configuratie 2 voldoen 3/30 (10%) punten aan een nauwkeurigheid van 30 cm en bij configuratie 12 voldoen 6/30 (20%) punten. Voor een nauwkeurigheid van 50 cm voldoen 10/30 (33%) punten bij configuratie 2 en 11/30 (37%) punten bij configuratie 12. Het halen van de vooropgestelde nauwkeurigheid is in beide gevallen ongeveer hetzelfde, met de waarden van configuratie 12 enigszins beter.

Het verschil in nauwkeurigheid tussen configuratie 2 en 12 is zeer klein, zoals te zien in Figuur 54 liggen beide grafieken ongeveer over elkaar. Hieruit kan besloten worden dat extra *locators* uit naastliggende rayons weinig of geen invloed hebben op de nauwkeurigheid.



**Figuur 54: Vergelijking configuratie O2-O12 Nauwkeurigheid**

Bij het vergelijken van precisie wordt tot een gelijkaardige conclusie gekomen als bij nauwkeurigheid. Zoals te zien in Figuur 55 liggen ook hier de grafieken ongeveer over elkaar, op een paar uitschieters na. *Locators* uit naastliggende rayons hebben weinig tot geen invloed op de precisie.

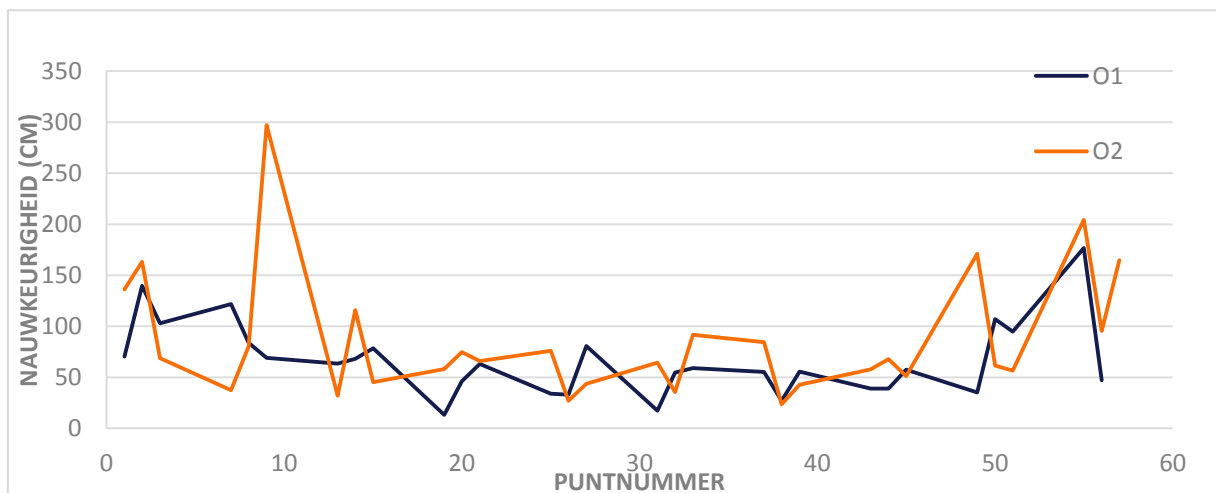


**Figuur 55: Vergelijking configuratie O2-O12 Precisie**

*Locators* L1 en L2 uit rayon 1 hebben weinig tot geen invloed op de metingen in rayon 2. Hieruit kan besloten worden dat de *locators* per rayon ingepland moeten worden.

### 3.4.3.2 Verschil tag densiteit (schaalbaarheid)

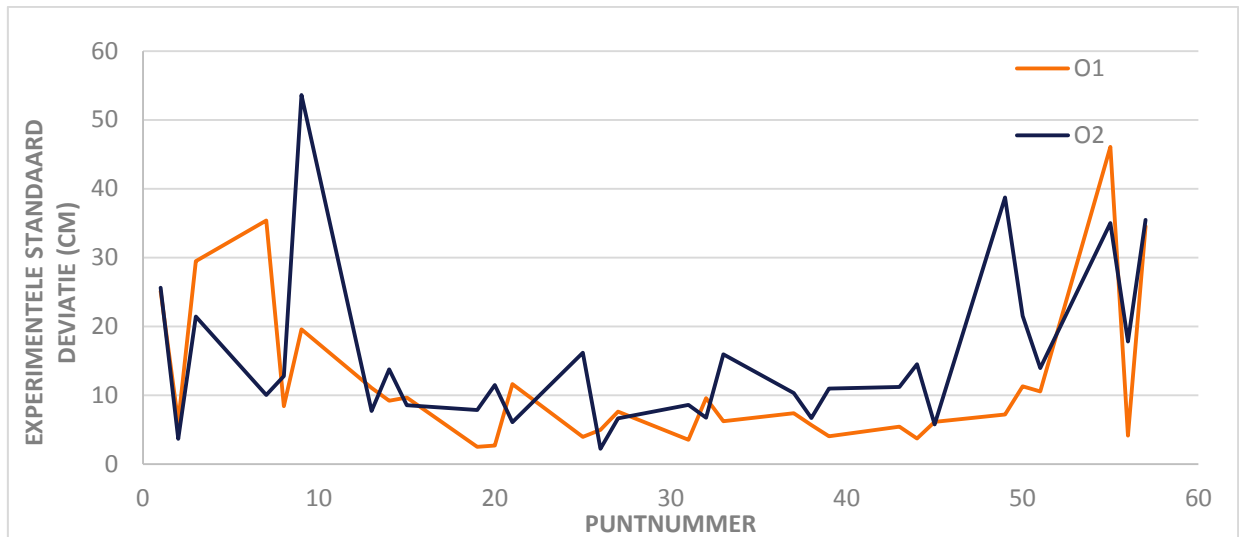
De densiteit is de dichtheid van de ontvangen *tags*. Hoe meer *tags* per m<sup>2</sup>, hoe hoger de densiteit. De invloed van densiteit wordt vergeleken via configuratie 1 en 2, de afstanden tussen de *locators* zijn gelijk. De nauwkeurigheid van de twee configuraties wordt uitgezet op Figuur 56. Het puntnummer bevindt zich op de x-as, de nauwkeurigheid op de y-as. Alle punten van configuratie 2 worden gebruikt en enkel de overeenkomstige punten uit configuratie 1. Uit Figuur 56 kan geconcludeerd worden dat de densiteit geen invloed heeft op de nauwkeurigheid. Beide lijnen liggen dicht bij elkaar, op één uitschieter na. De overige punten uit configuratie 1 hebben geen invloed op de nauwkeurigheid van de punten overeenkomstig met configuratie 2. Ook kan besloten worden dat de nauwkeurigheid lager wordt naarmate de afstand stijgt en de hoeveelheid detecteerbare *locators* daalt.



**Figuur 56: Invloed Densiteit configuratie O1-O2 Nauwkeurigheid**

Op Figuur 57 bevinden de puntnummers zich op de x-as en de experimentele standaard afwijking op de y-as. Zoals in Figuur 56 zijn de puntnummers overeenkomstig tussen de beide configuraties.

Beide lijnen uit Figuur 57 lopen dicht bij elkaar in het midden, waardoor de twee standaarddeviaties geen invloed ondervinden van de overige punten in configuratie 1. In het begin en einde stijgen beide lijnen door de lagere nauwkeurigheid. Hieruit kan geconcludeerd worden dat de overige punten uit configuratie 1 geen invloed uitoefenen. Ook kan besloten worden dat de precisie lager wordt naarmate de afstand stijgt en de hoeveelheid detecteerbare *locators* daalt.



**Figuur 57: Invloed Densiteit configuratie O1-O2 Precisie**

Zoals terug te vinden in 3.1 Quuppa kan Quuppa 400 locatie updates per seconde aan. Dit komt overeen met de conclusie die kan getrokken worden uit Figuur 56 en Figuur 57. Waardoor besloten kan worden dat tagdensiteit geen invloed uitoefent op nauwkeurigheid en precisie.

### 3.4.3.3 Verschil onderlinge afstand locators

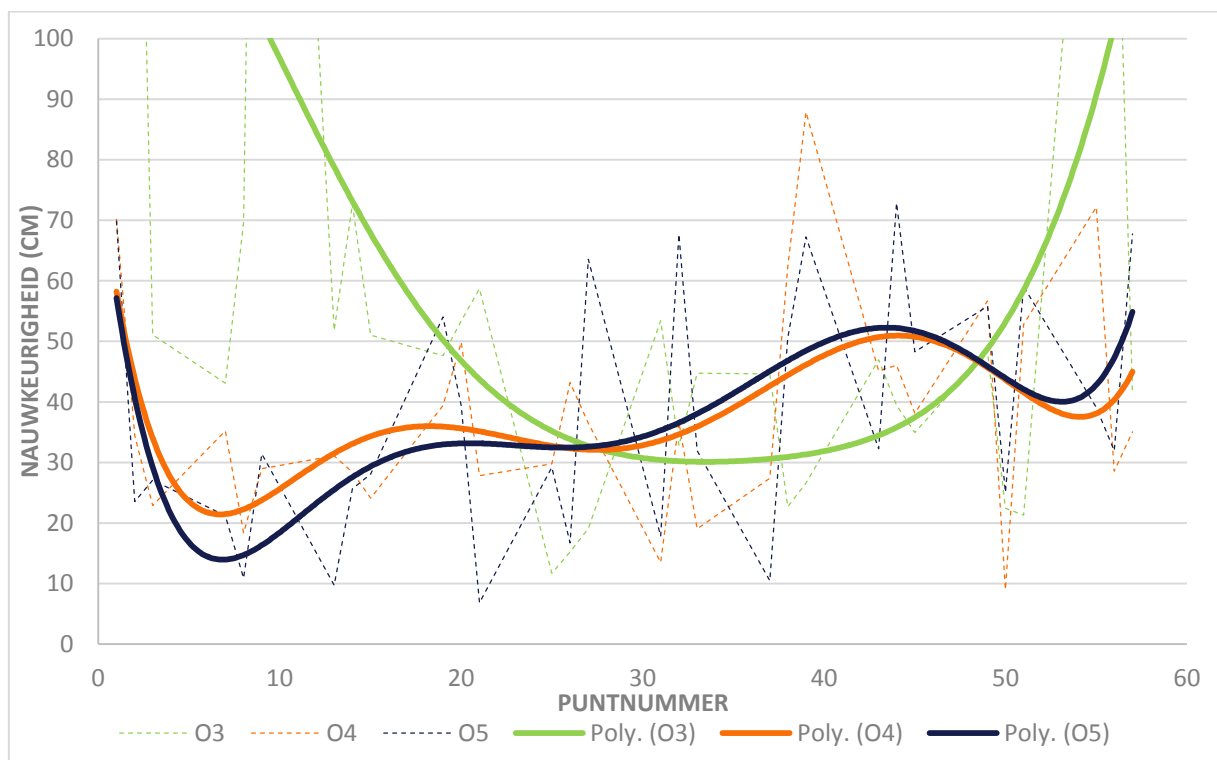
De afstand tussen de configuraties waar de *locators* op één lijn hangen en de configuraties waar de *locators* geschrinkt zijn bevestigd wordt vergeleken. Hier wordt geen rekening gehouden met het aantal punten die binnen de HP-radius vallen. Wanneer punten buiten de HP-radius vallen is de tussenafstand te groot om een volledige dekking van de rayon te bekomen, hieruit wordt onmiddellijk geconcludeerd dat deze configuraties niet voldoen aan de vooropgestelde nauwkeurigheid van 30 cm. Deze configuraties zijn 8 en 9 waar de tussenafstanden respectievelijk  $\pm 8$  en  $\pm 9$  meter zijn.

#### Vergelijking configuratie 3, 4 en 5

Configuraties 3, 4 en 5 worden vergeleken waarbij de *locators* op één lijn hangen, ook worden telkens drie *locators* gebruikt. De tussenafstanden bij configuraties zijn respectievelijk  $\pm 3,3$ ;  $\pm 6$  en  $\pm 7$  meter. Bij configuratie 3 voldoen 7/30 (23%) punten aan de vooropgestelde nauwkeurigheid van 30 cm. Bij configuratie 4 vallen alle punten in een HP-radius en voldoen 12/30 (40%) punten aan de vooropgestelde nauwkeurigheid van 30 cm. Bij configuratie 5 vallen alle punten in een HP-radius en voldoen 13/30 (43%) punten aan de nauwkeurigheid van 30 cm.

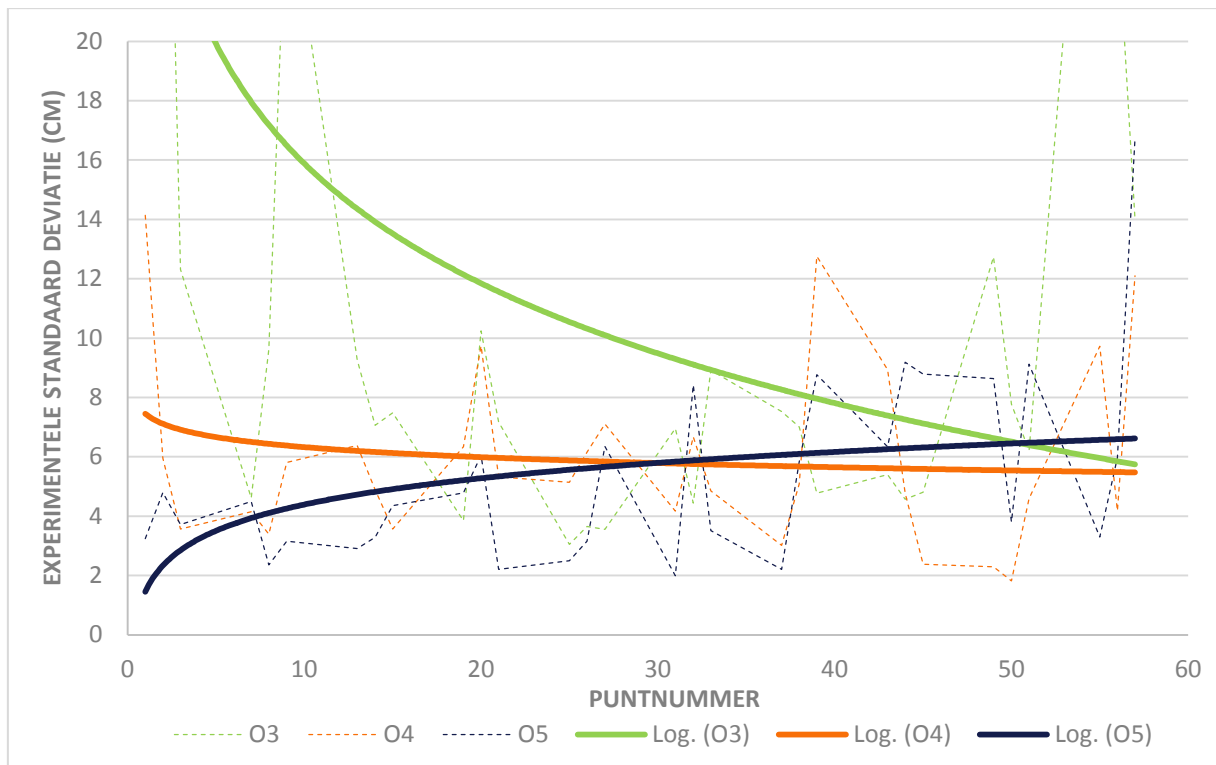
Als een vooropgestelde nauwkeurigheid van 50 cm wordt toegepast, voldoen 17/21 punten (81%) bij configuratie 3, bij 24/30 (80%) punten configuratie 4 en 20/30 (66%) punten bij configuratie 5.

Op Figuur 58 worden de drie configuraties voorgesteld, op de x-as worden de puntnummers aangeduid en op de y-as de vooropgestelde nauwkeurigheid van 30cm. Alle gemeten punten worden op de grafiek vertoond en samengevat door een trendlijn. Aan de hand van de trendlijn kan besloten worden dat configuratie 4 en 5 dicht bij elkaar liggen en nauwkeuriger zijn dan configuratie 3. De punten tussen de *locators* bij configuratie 3 vertonen dezelfde nauwkeurigheid als bij configuraties 4 en 5. Wanneer configuratie 3 wordt toegepast voor een volledige winkel, is er nood aan veel *locators*, waardoor de kostprijs van het systeem verhoogd wordt. Hierdoor komt configuratie 3 niet in aanmerking. Uit de trendlijnen van configuratie 4 en 5 wordt geconcludeerd dat geen verschil optreedt in nauwkeurigheid. Wanneer gewerkt wordt met een vooropgestelde nauwkeurigheid van 30 cm zijn beide configuraties gelijk. Wanneer gewerkt wordt met 50 cm is er duidelijk verschil, configuratie 4 voldoet voor 80% terwijl configuratie 5 voldoet voor 66%.



**Figuur 58: Vergelijking configuratie O3,O4 en O5 Nauwkeurigheid**

In Figuur 59 wordt de precisie vergeleken. Op de x-as bevinden zich de puntnummer en op de y-as de experimentele standaard deviatie. Configuratie 3 heeft de laagste precisie, configuratie 4 en 5 liggen dicht bij elkaar. De punten tussen de *locators* bij configuratie 3 vertonen een hogere precisie dan configuratie 4 en 5. Net zoals bij de nauwkeurigheid zullen de kosten groter worden bij configuratie 3. Via de trendlijnen van configuratie 4 en 5 kan besloten worden dat geen variatie optreedt tussen de precisie.

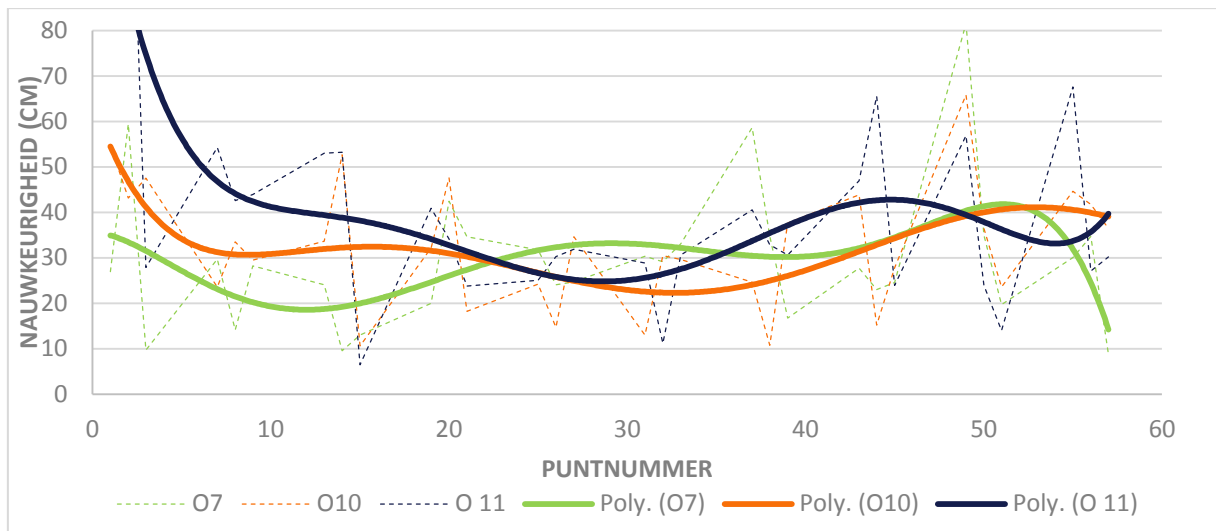


**Figuur 59: Vergelijking configuratie O3, O4 en O5 Precisie**

Vergelijking configuratie 7, 10 en 11

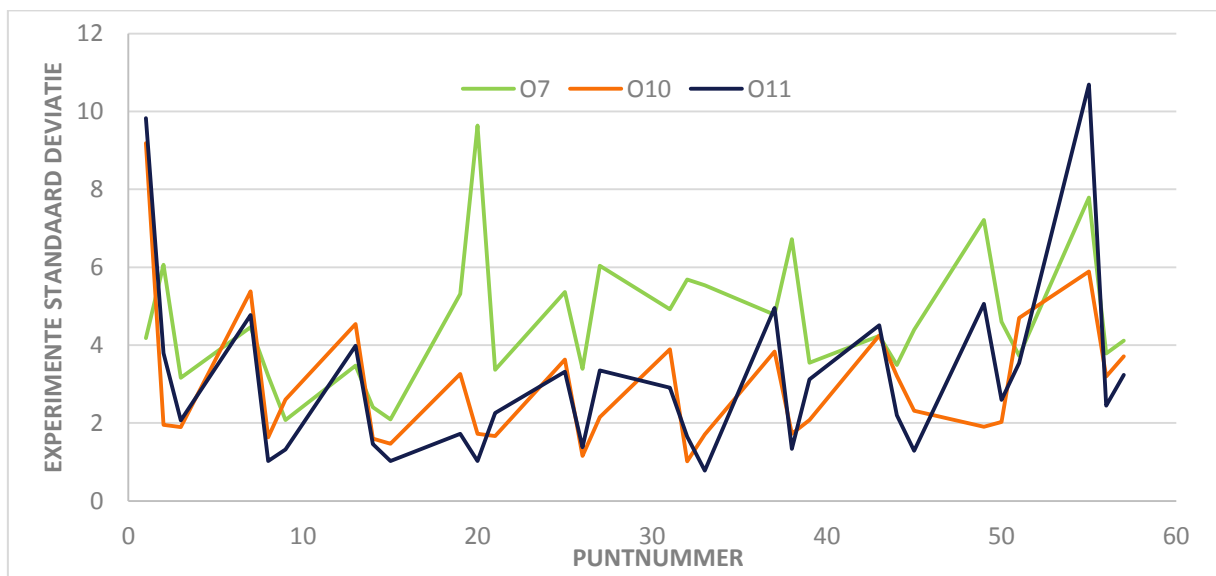
Configuraties 7, 10 en 11 worden vergeleken waarbij de *locators* geschrinkt hangen, telkens worden drie *locators* gebruikt. De tussenafstanden bij de configuraties zijn respectievelijk 7 m, 6,5 m en 6 m. Bij configuratie 7 voldoen 18/30 (60%) punten aan de vooropgestelde nauwkeurigheid van 30 cm. Bij configuratie 10 vallen alle punten in de HP-radius en voldoen 13/30 (43%) punten aan de vooropgestelde nauwkeurigheid van 30 cm. Bij configuratie 11 voldoen 10/30 (33%) punten aan de nauwkeurigheid van 30 cm. Als een nauwkeurigheid van 50 cm wordt vooropgesteld, voldoen 27/30 (90%) punten voor configuratie 7, 27/30 (90%) punten bij configuratie 10 en 22/30 (73%) punten voor configuratie 11. Uit deze gegevens kan geconcludeerd worden dat configuratie 7 het best voldoet aan de vooropgestelde nauwkeurigheid.

Configuraties 7, 10 en 11 worden samengevat in Figuur 60. Hierbij werd een trendlijn gecreëerd per configuratie. Tot puntnummer 20 heeft configuratie 7 een hogere nauwkeurigheid, daarna lopen de trendlijnen van configuratie 7 en 11 door elkaar, maar blijft configuratie 10 het nauwkeurigst tot puntnummer 50. Configuratie 10 blijft nauwkeuriger dan configuratie 11 tot aan puntnummer 50. Opmerkelijk is dat configuratie 10 met een grotere tussenafstand een hogere nauwkeurigheid oplevert dan configuratie 11.



**Figuur 60: Vergelijking configuratie O7,O10 en O11 Nauwkeurigheid**

Wanneer de precisie wordt vergeleken met elkaar in Figuur 61, kan geconcludeerd worden dat de experimentele standaard deviatie hoger ligt dan bij configuratie 10 en 11. Hierdoor verlaagt de precisie. De precisie voor configuratie 10 en 11 overlappen elkaar telkens, waardoor besloten kan worden dat geen verschil wordt waargenomen in precisie.



**Figuur 61: Vergelijking configuratie O7,O10 en O11 Precisie**

Hoe kleiner de afstand hoe beter de nauwkeurigheid en de precisie, zou een logische redenering zijn. Er wordt echter aangetoond uit de resultaten dat configuratie 7 het meeste punten heeft die voldoen aan de vooropgestelde nauwkeurigheid van 30 cm. Bij een vooropgestelde nauwkeurigheid van 50 cm worden dit configuratie 7 en 10. Bij precisie speelt de tussenafstand tot op een bepaalde afstand een rol. Precisie bij configuratie 7 is lager dan bij configuratie 10 en 11 waar deze volgens Figuur 61 op dezelfde lijn liggen.

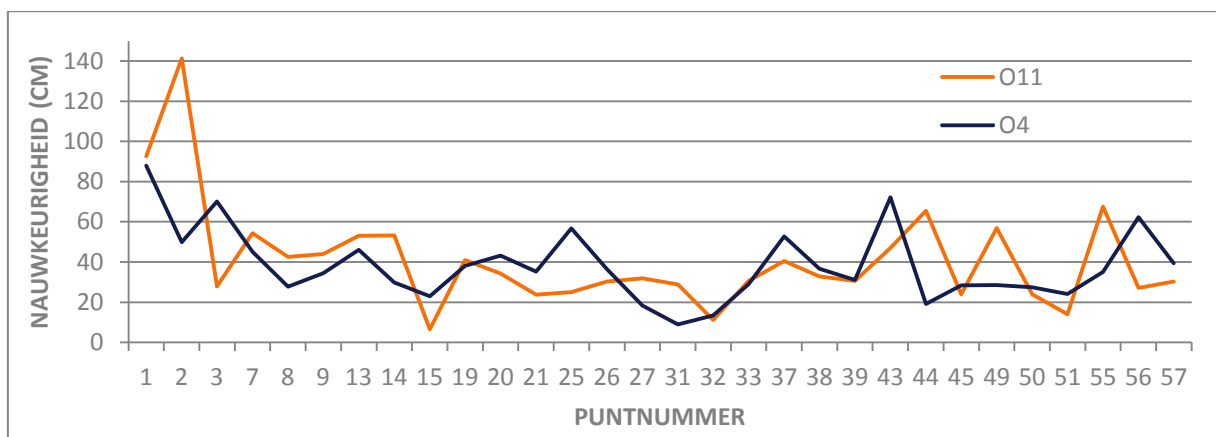
### 3.4.3.4 Verschil niet geschrinkt / geschrinkt

#### Vergelijking configuratie O4 en O11

Er wordt een vergelijking gemaakt tussen de resultaten afkomstig van de niet-geschrante configuratie 4 en de geschrante configuratie 11. Bij beide configuraties is de onderlinge afstand tussen de *locators*  $\pm 6,00$  m en het aantal *locators* drie.

Configuratie 4 heeft 12/30 (40%) punten en configuratie 11 heeft 10/30 (30%) punten die een nauwkeurigheid van 30 cm halen. Voor een nauwkeurigheid van 50 cm voldoen 24/30 (80%) punten bij configuratie 4 en 22/30 (73%) punten bij configuratie 11. Het halen van de vooropgestelde nauwkeurigheid is in beide gevallen bijna hetzelfde.

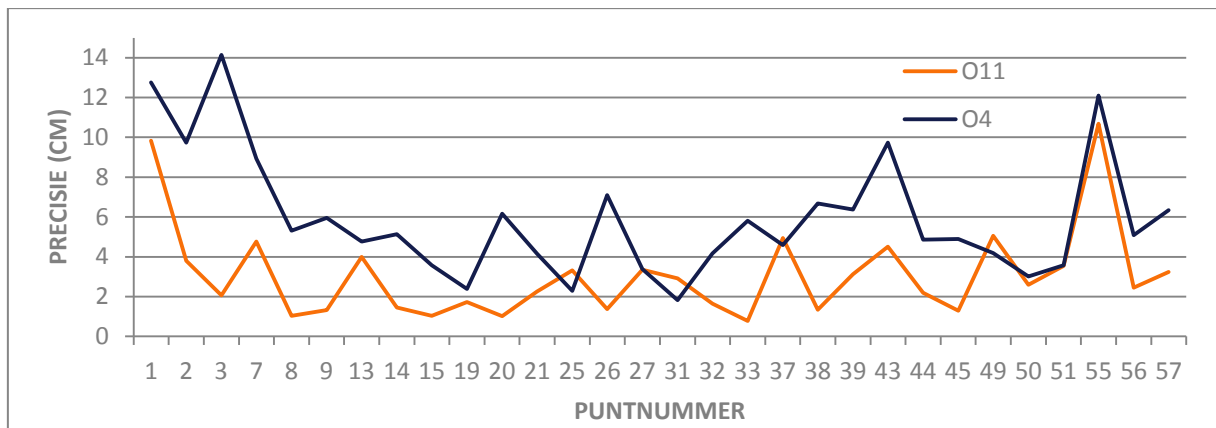
Het verschil in nauwkeurigheid tussen de twee configuraties is, op een uitschieter na bij configuratie 11, minimaal zoals te zien in Figuur 62. Het schranken van configuratie 11 leidt niet tot een hogere nauwkeurigheid.



**Figuur 62: Vergelijking configuratie O4-O11 Nauwkeurigheid**

Indien de precisie van beide configuraties wordt vergeleken, is de geschrante configuratie 11 beduidend hoger dan configuratie 4 (Figuur 63). Het verschil tussen niet-geschrant en geschrant heeft enkel invloed op precisie in deze vergelijking, de verbeterde precisie wordt veroorzaakt door de reductie van de fouten door kruisende foutenellipsen (Zie De foutenellipsen).





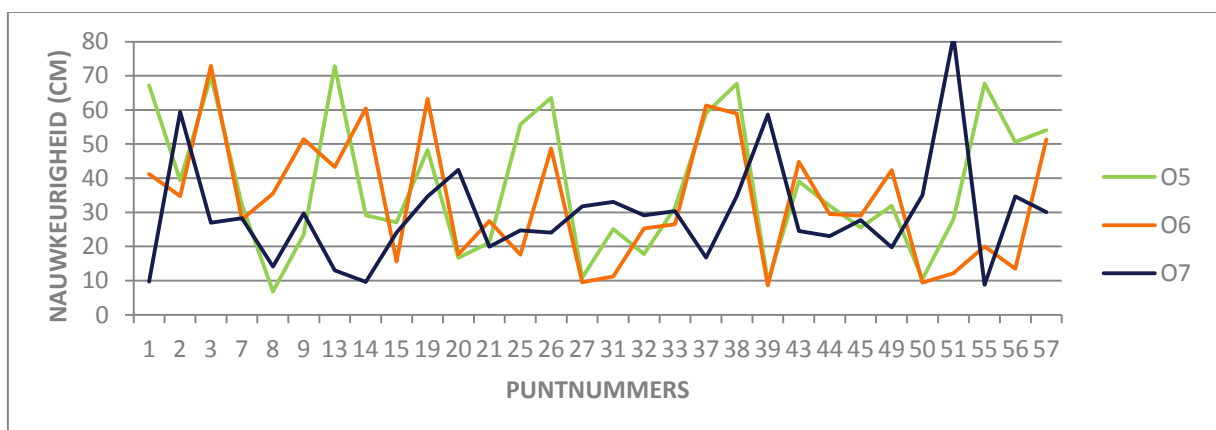
**Figuur 63: Vergelijking configuratie O4-O11 Precisie**

Vergelijking configuraties 5, 6 en 7

Een vergelijking wordt gemaakt tussen de resultaten afkomstig van de niet-geschrante configuratie 5, de semi-geschrante configuratie 6 en de geschrante configuratie 7. Bij alle drie de configuraties is de onderlinge afstand tussen de drie *locators*  $\pm 7,00$  m.

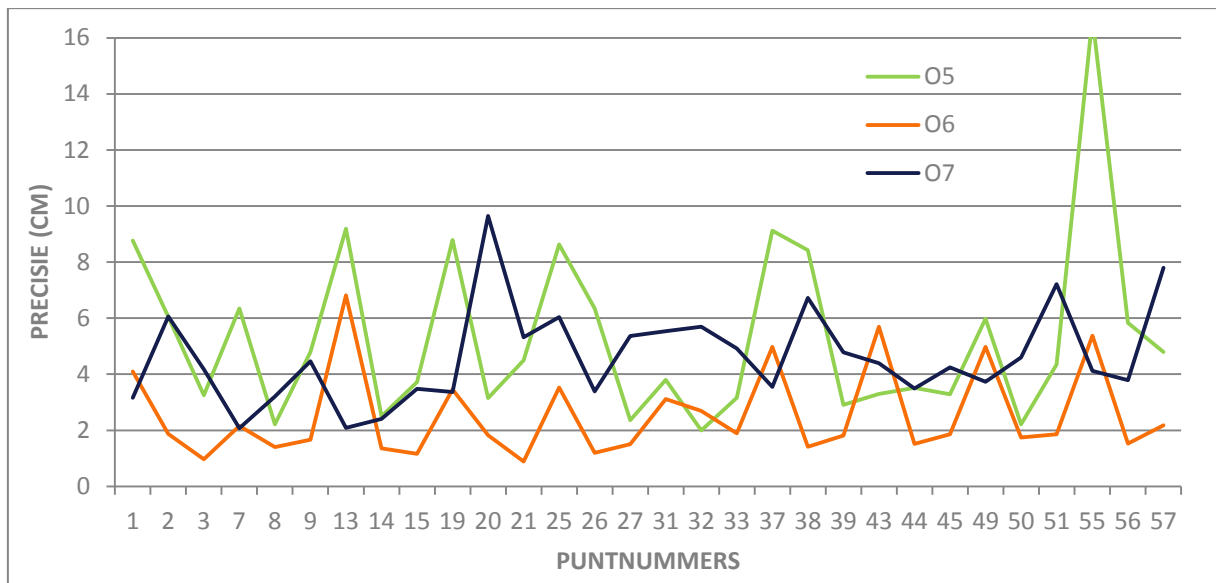
Bij Configuratie 5 voldoen 13/30 (43%) punten, bij configuratie 6 voldoen 16/30 (53%) punten en bij configuratie 7 voldoen 18/30 (60%) punten aan een nauwkeurigheid van 30 cm. Indien een nauwkeurigheid van 50 cm is vooropgesteld, haalt 20/30 (67%) punten het bij configuratie 5, 23/30 (77%) punten bij configuratie 6 en 27/30 (90%) punten bij configuratie 7. Het aantal waarden dat de vooropgestelde nauwkeurigheid haalt, stijgt van een niet-geschrante naar geschrante configuratie.

De nauwkeurigheid van de niet-geschrante configuratie is lager en onstabiel in tegenstelling tot de stabielere waarde afkomstig van de semi-geschrante en geschrante configuratie (Figuur 64).



**Figuur 64: Vergelijking configuratie O5, O6 en O7 Nauwkeurigheid**

Bij het vergelijken van de precisie tussen de drie configuraties heeft semi-geschrant de meest stabiele en precieze punten, daarna volgt geschrant en niet-geschrant (Figuur 65).



**Figuur 65: Vergelijking configuratie O5, O6 en O7 Precisie**

Uit de twee vergelijkingen kan geconcludeerd worden dat het halen van de vooropgestelde nauwkeurigheid van 30 en 50 cm verbetert bij het schranken van de configuratie, dit is duidelijkst te zien in de tweede vergelijking tussen configuratie 5, 6 en 7, waar het bij de eerste vergelijking tussen configuratie 4 en 11 ongewijzigd blijft. Uit beide vergelijking kan geconcludeerd worden dat ook de precisie verbetert bij het schranken van een configuratie.

### 3.4.3.5 Verschil geen winkelwagentje / met winkelwagentje

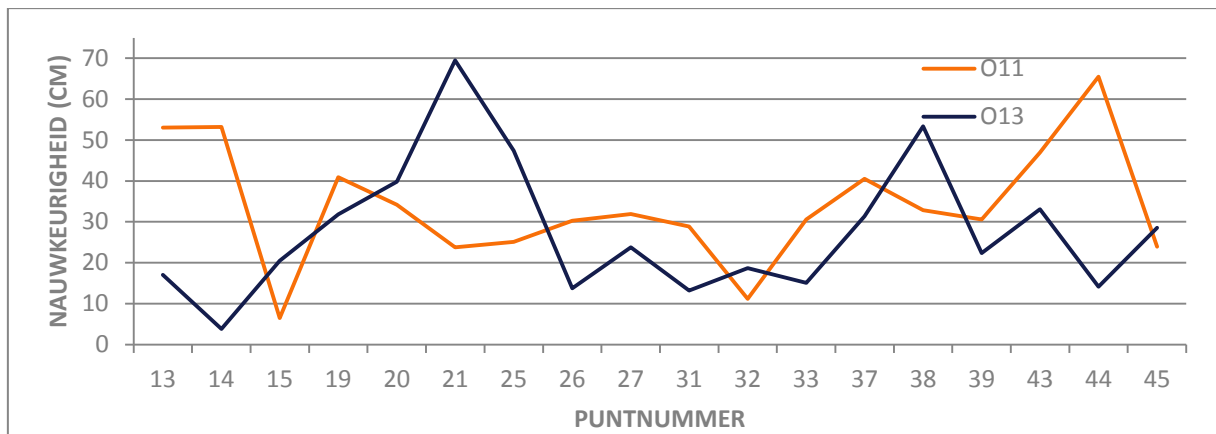
Aan de hand van drie vergelijkingen wordt de invloed van multipath afkomstig van een winkelwagentje onderzocht.

#### Vergelijking configuratie 11 en 13

Om de invloed van multipath afkomstig van een winkelwagentje na te gaan, wordt een vergelijking gemaakt tussen onderzoek 11 en 13. Bij beide configuraties worden drie *locators* gebruikt met onderlinge afstand  $\pm 6,00$  m.

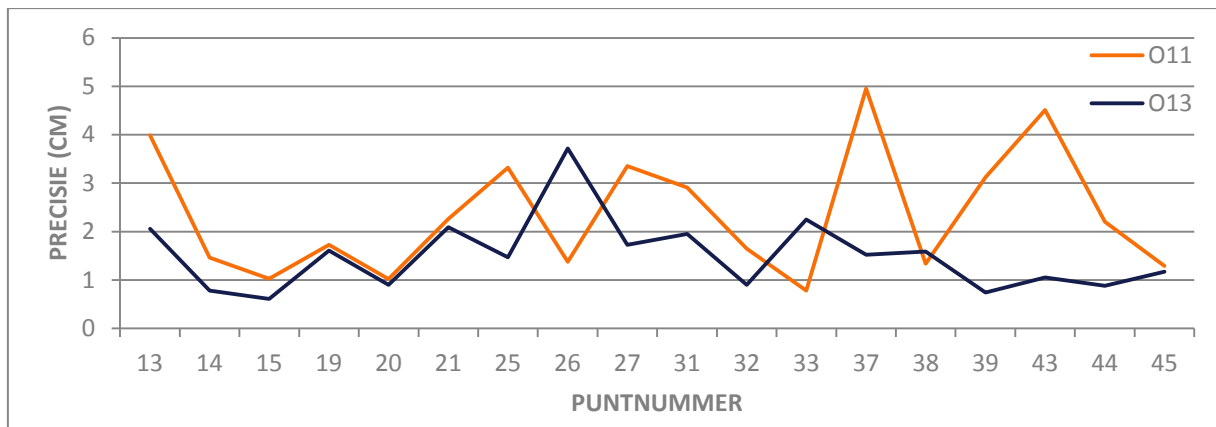
Bij configuratie 11 voldoen 5/18 (27%) punten aan een nauwkeurigheid van 30 cm en bij configuratie 13 zijn het 11/18 (61%) punten. Voor een nauwkeurigheid van 50 cm voldoen 12/18 (67%) punten bij configuratie 11 en 16/18 (89%) bij configuratie 13. Het halen van de vooropgestelde nauwkeurigheid is bij configuratie 13 enigszins beter.

Het verschil in nauwkeurigheid tussen configuratie 11 en 13 is klein en zoals te zien in Figuur 66 liggen de grafieken niet over elkaar, maar worden beide door evenveel uitschieters beïnvloed.



**Figuur 66: Vergelijking configuratie O11-O13 Nauwkeurigheid**

Bij de precisie is een klein verschil tussen de configuraties, zoals te zien in Figuur 67. De precisie van beide configuraties komt ongeveer overeen op een paar uitschieters na bij configuratie 11.



**Figuur 67: Vergelijking configuratie O11-O13 Precisie**

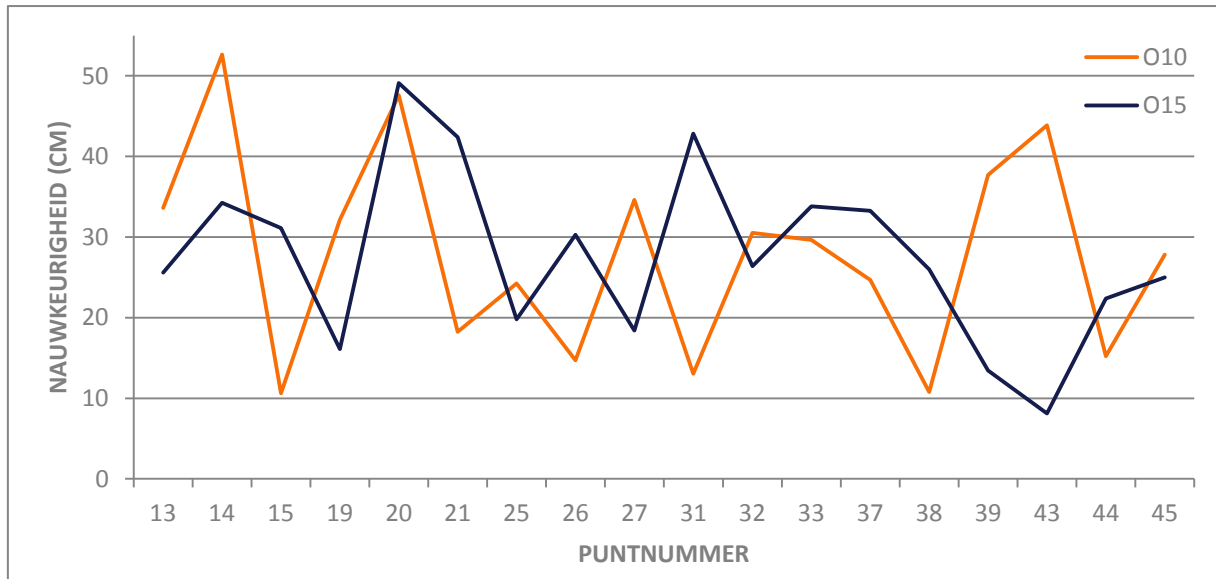
Uit de vergelijking tussen configuratie 11 en 13 kan geconcludeerd worden dat enigszins wel verschillen zijn in het voordeel van de configuratie met winkelwagentje 13, waarbij meer punten preciezer zijn en de vooropgestelde nauwkeurigheid meer wordt gehaald. Toch zijn deze verschillen niet noemenswaardig groot om te concluderen dat winkelwagentjes een positieve invloed hebben op de nauwkeurigheid en de precisie.

#### Vergelijking configuratie 10 en 15

Een tweede vergelijking tussen configuratie 10 en 15 wordt gemaakt. Bij beide configuraties worden drie *locators* gebruikt met onderlinge afstand  $\pm 6,50$  m.

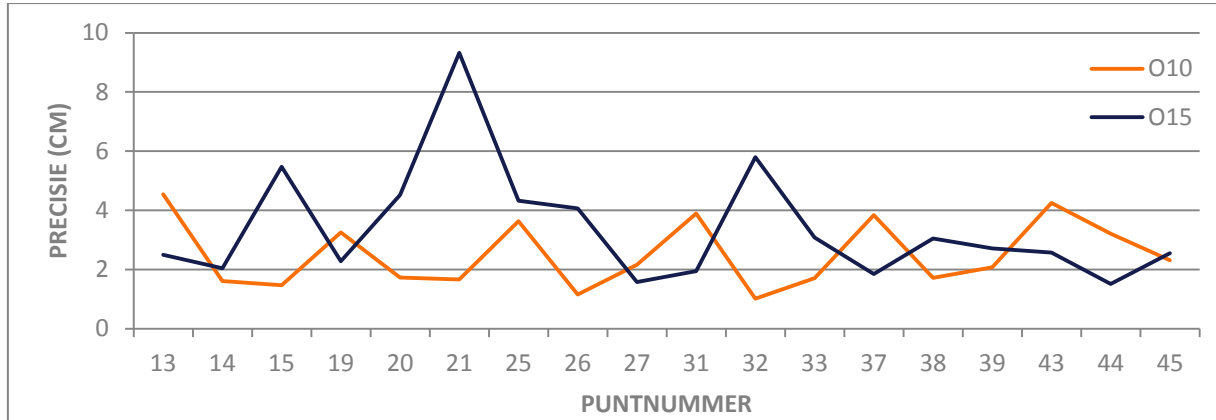
Bij configuratie 10 voldoen 10/18 (56%) punten aan een nauwkeurigheid van 30 cm en bij configuratie 15 zijn het 10/18 (56%) punten. Voor een nauwkeurigheid van 50 cm voldoen 17/18 (94%) punten bij configuratie 10 en voldoen 18/18 (100%) punten bij configuratie 15. Het halen van de vooropgestelde nauwkeurigheid is in beide gevallen ongeveer gelijk.

Het verschil in nauwkeurigheid tussen configuratie 10 en 15 is klein, zoals te zien in Figuur 68 liggen de grafieken niet over elkaar, maar worden beide door evenveel uitschieters beïnvloed.



**Figuur 68: Vergelijking configuratie O10-O15 Nauwkeurigheid**

Als de precisie vergeleken wordt, kan een groter verschil vastgesteld worden, waarbij configuratie 10 stabiel is en minder uitschieters vertoont zoals te zien in Figuur 69.



**Figuur 69: Vergelijking O10-O15 Precisie**

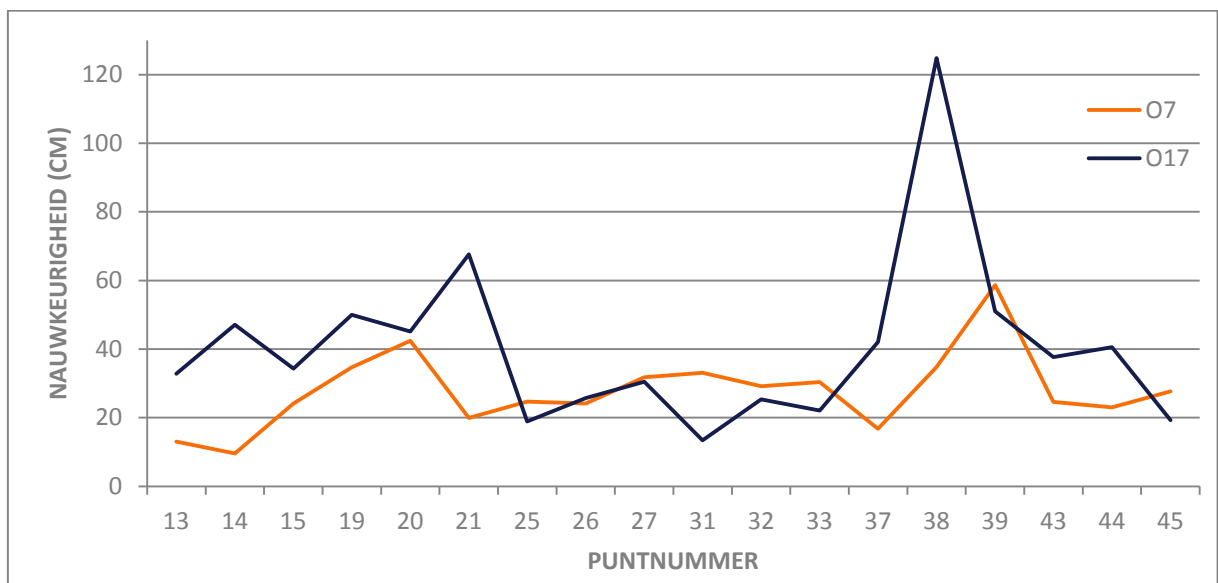
Uit de vergelijking tussen configuratie 10 en 15 kan geconcludeerd worden dat de verschillen klein zijn. In tegenstelling tot Vergelijking configuratie 11 en 13 is in Vergelijking configuratie 10 en 15 de configuratie zonder winkelwagentje preciezer en wordt de vooropgestelde nauwkeurigheid meer bereikt. Ook hier zijn de verschillen niet groot en kan niet besloten worden dat de nauwkeurigheid en precisie beter zijn bij metingen met of zonder winkelwagentje.

### Vergelijking configuratie 7 – 17

Een derde vergelijking tussen configuratie 7 en 15 wordt gemaakt. Bij beide configuraties worden drie *locators* gebruikt met onderlinge afstand  $\pm 7,00$  m.

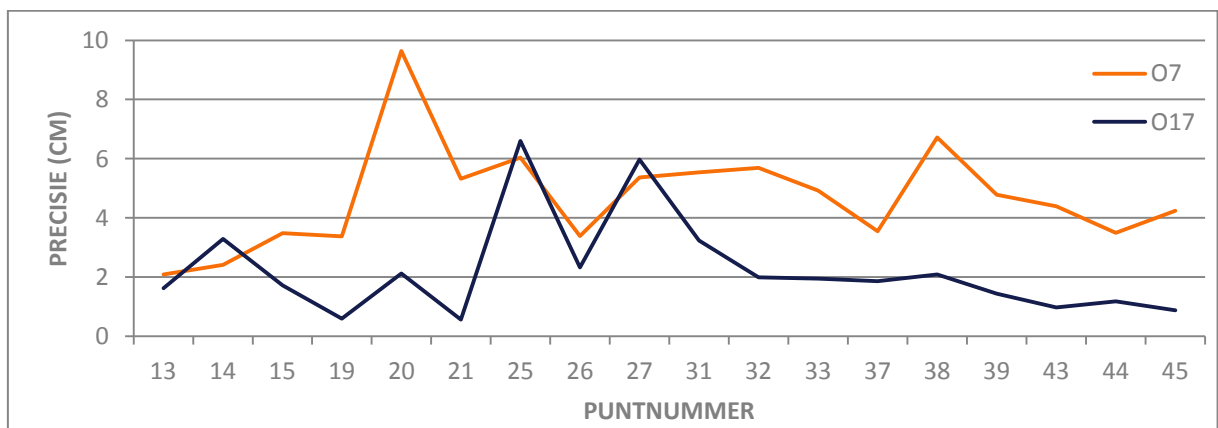
Bij configuratie 7 voldoen 9/18 (50%) punten aan een nauwkeurigheid van 30 cm en bij configuratie 17 voldoen 6/18 (33%) punten. Voor een nauwkeurigheid van 50 cm halen 17/18 (94%) punten bij configuratie 7 en voldoen 15/18 (83%) punten bij configuratie 17. Het halen van de vooropgestelde nauwkeurigheid is voor configuratie 7 enigszins beter.

Er is een verschil in nauwkeurigheid tussen configuratie 7 en 17, zoals te zien in Figuur 70 is de nauwkeurigheid stabielier bij configuratie 7 dan bij configuratie 17.



**Figuur 70: Vergelijking configuratie O7-O17 Nauwkeurigheid**

Indien de precisie vergeleken wordt, is configuratie 17 preciezer. Zoals in Figuur 71 te zien, blijft de gehele lijn van configuratie 17 onder configuratie 7 op twee punten na.



**Figuur 71: Vergelijking O7-O17 Precisie**

Uit alle drie de vergelijkingen kan besloten worden dat weinig tot geen verschil is tussen configuraties met winkelwagentje of zonder winkelwagentje. Er worden telkens kleine verschillen waargenomen die afwisselend de configuratie met winkelwagentje of zonder winkelwagentje bevoordelen.

### 3.4.3.6 Verschil winkelwagentje zonder persoon / winkelwagentje met persoon

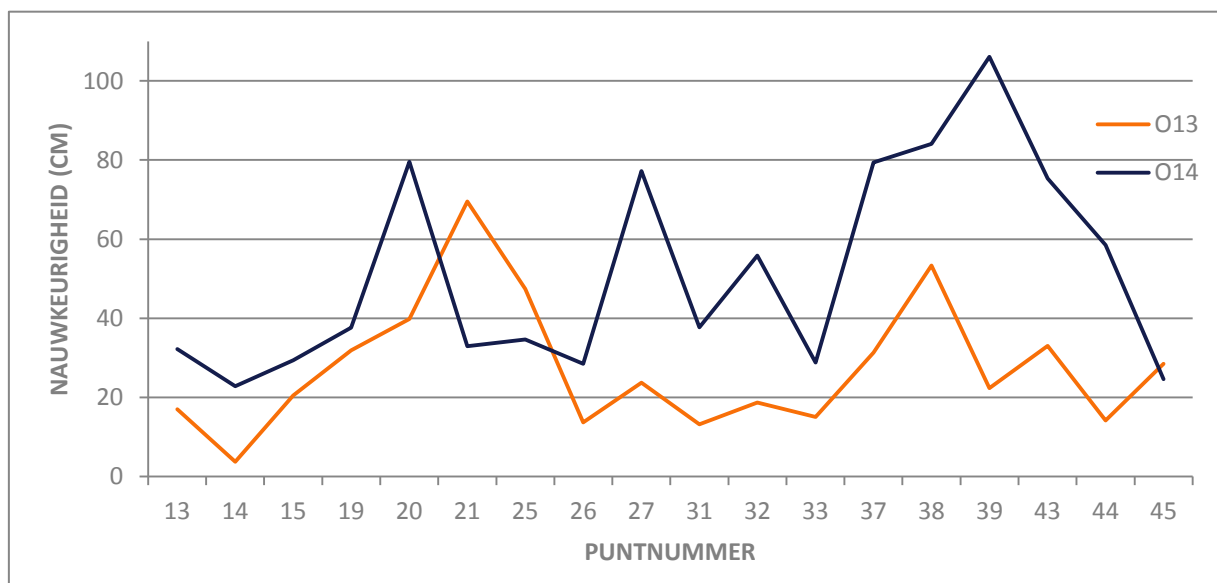
Aan de hand van twee vergelijkingen wordt de invloed van absorptie van radiosignalen, veroorzaakt door personen, onderzocht.

#### Vergelijking configuratie 13 en 14

Er wordt een vergelijking gemaakt tussen configuratie 13 en 14. Bij beide configuraties worden drie *locators* gebruikt met onderlinge afstand  $\pm 6,00$  m.

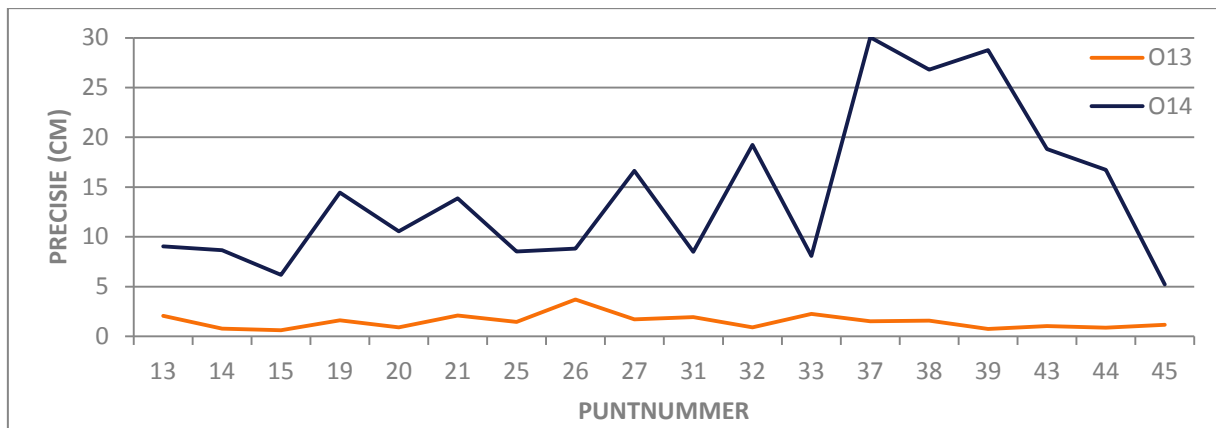
Bij configuratie 13 voldoen 11/18 (61%) punten aan een nauwkeurigheid van 30 cm en bij configuratie 14 voldoen 5/18 (27%) punten. Voor een nauwkeurigheid van 50 cm voldoen 16/18 (89%) punten bij configuratie 13 en 10/18 (56%) punten bij configuratie 14. De vooropgestelde nauwkeurigheid wordt meer behaald bij configuratie 13 zonder persoon.

Zoals te zien op Figuur 72 is het verschil in nauwkeurigheid tussen configuratie 13 en 14 groot. Bijna de hele lijn afkomstig van de configuratie zonder persoon, ligt onder de configuratie met persoon. De absorptie van de signalen door een persoon zorgt voor een vermindering in nauwkeurigheid.



**Figuur 72: Vergelijking configuratie O13-O14 Nauwkeurigheid**

Bij het onderzoeken van de precisie kan hetzelfde worden geconcludeerd, zoals te zien in Figuur 73 is de precisie voor configuratie 13 zonder persoon voor alle metingen hoger en stabielere dan configuratie 14 met persoon.



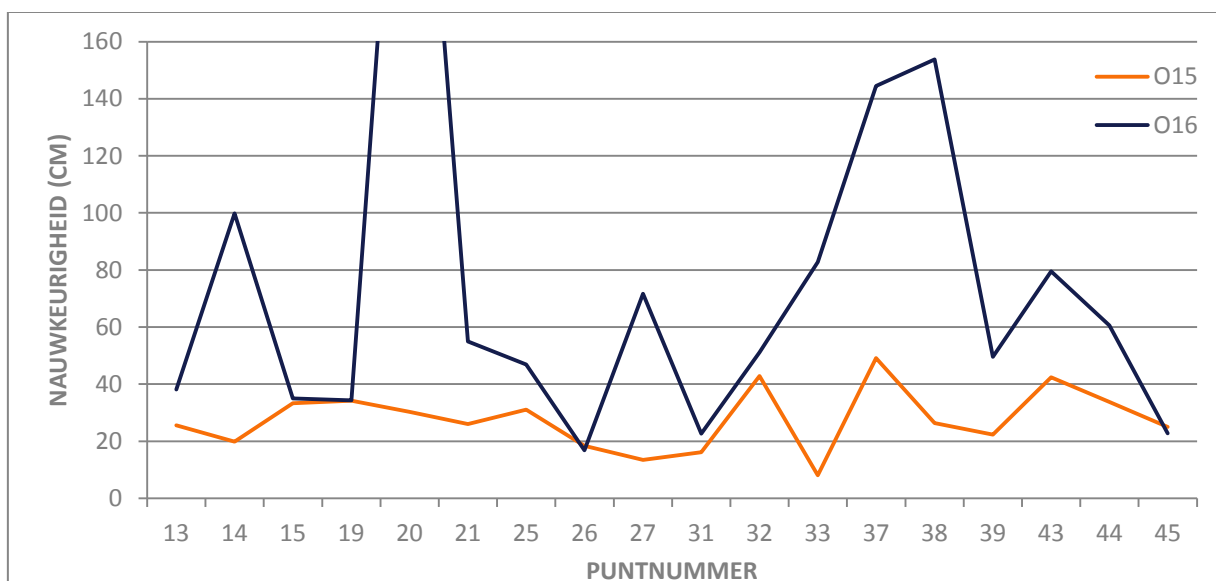
**Figuur 73: Vergelijking configuratie O13-O14 Precisie**

Vergelijking configuratie 15 en 16

Er wordt een vergelijking gemaakt tussen configuratie 15 en 16. Bij beide configuraties worden drie *locators* gebruikt met onderlinge afstand  $\pm 6,50$  m.

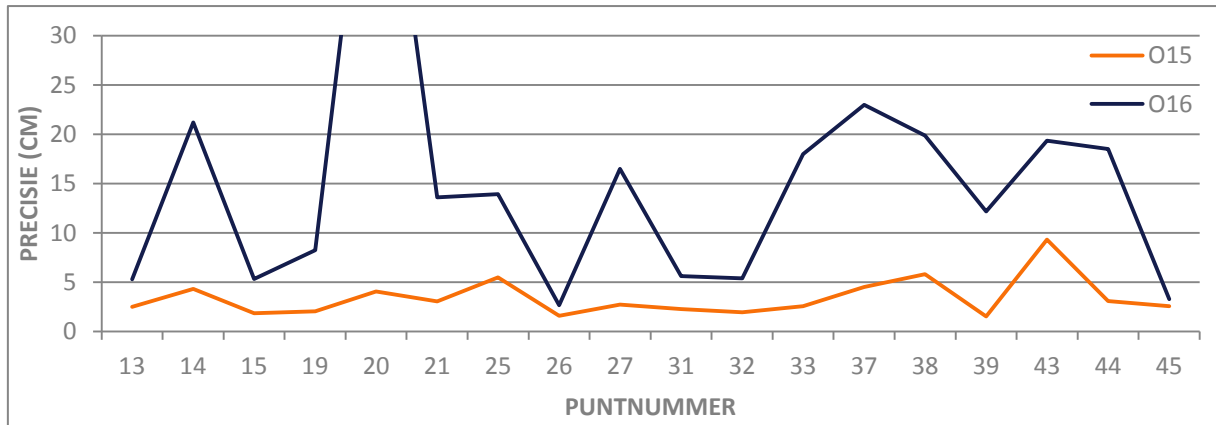
Bij configuratie 15 voldoen 10/18 (56%) punten aan een nauwkeurigheid van 30 cm en bij configuratie 16 voldoen 3/18 (17%) punten. Voor een nauwkeurigheid van 50 cm voldoen 18/18 (100%) punten bij configuratie 15 en voldoen 8/18 (44%) punten bij configuratie 16. Het halen van de vooropgestelde nauwkeurigheden ligt hoger bij configuratie 15 zonder persoon.

Bij configuratie 15 en 16 is het verschil in nauwkeurigheid eveneens groot, zoals te zien op Figuur 74. Bijna de hele lijn afkomstig van de configuratie zonder persoon ligt onder de configuratie met persoon. De absorptie van de signalen door een persoon zorgt voor een vermindering in nauwkeurigheid.



**Figuur 74: Vergelijking configuratie O15-O16 Nauwkeurigheid**

Bij het onderzoeken van de precisie wordt hetzelfde geconcludeerd, zoals te zien in Figuur 75 is de precisie voor de configuratie zonder persoon voor alle metingen stabiel en kleiner dan met persoon.



**Figuur 75: Vergelijking configuratie O15-O16 Precisie**

Uit de twee vergelijkingen kan besloten worden dat personen een grote negatieve invloed uitoefenen op de nauwkeurigheid en de precisie, dit omdat ze een groot deel van de radiosignalen absorberen en de LOS verbreken.

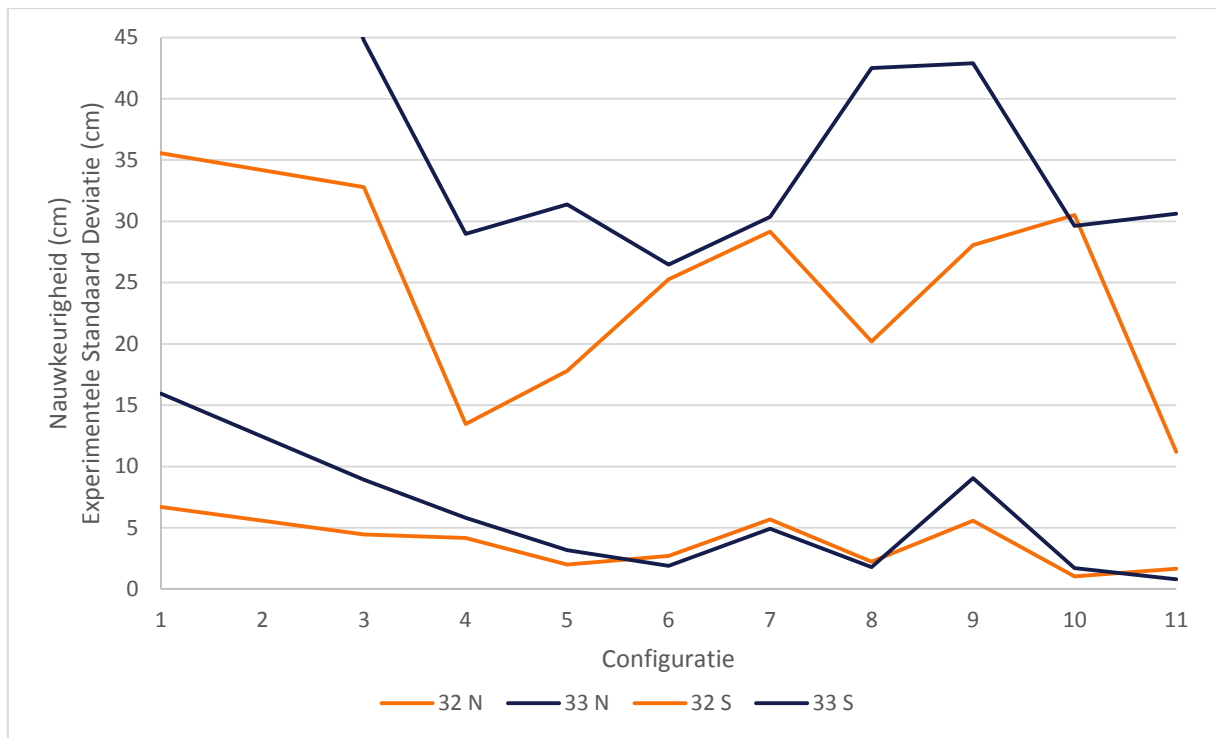
### 3.4.3.7 Invloed nabijheid winkelrek

Om de invloed van het rek in de rayon te onderzoeken, wordt een dwarsdoorsnede genomen van de rayon waar gekende punten liggen. Dit wordt gedaan voor punten die dichtbij één *locator* liggen en punten die tussen twee *locators* liggen en dus op de rand van twee HP-radiussen. De punten 32 en 33 worden gebruikt voor het onderzoek bij één *locator*. Punt 33 ligt dicht bij het rek vóór een staander en punt 32 ligt in het midden van de rayon. De punten 20 en 21 worden gebruikt bij het onderzoek op twee *locators*. Punt 21 ligt dichtbij het rek tussen twee staanders en punt 20 ligt in het midden van de rayon. De afstand tot de *locator* van punt 32 is 4,6 m en de afstand van punt 33 is 4,7 m. Bij punten 21 en 22 is dit verschil klein. Doordat het verschil in afstand verwaarloosbaar is, kan de invloed van het rek onderzocht worden. Enkel de configuraties 1, 3 tot en met 11 worden toegepast. Bij configuratie 2 en 12 wordt een andere rayon gebruikt. Bij configuratie 13 tot en met 17 worden winkelwagentjes gebruikt, waardoor deze configuraties niet van toepassing zijn.

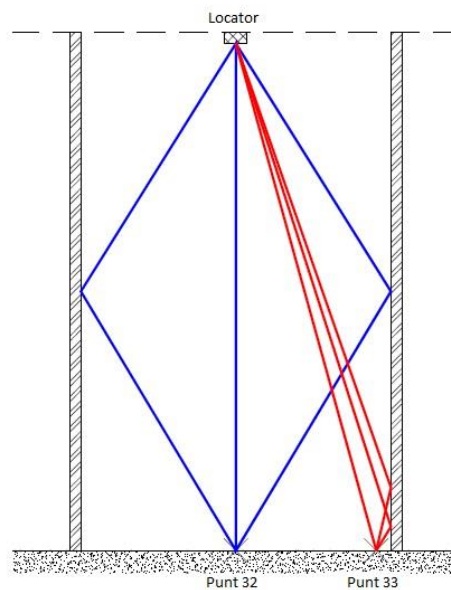
#### Punt 32 en 33

In Figuur 76 worden punten 32 en 33 verwerkt. De bovenste twee lijnen stellen de nauwkeurigheid voor, de onderste twee lijnen stellen de precisie voor. Er kan vastgesteld worden dat punt 32 telkens een betere nauwkeurigheid bekommt dan punt 33. Enkel bij configuraties 6, 7 en 10 liggen de nauwkeurigheden bij elkaar. Voor de precisie lopen de lijnen gelijkaardig. Hieruit kan geconstateerd worden dat het rek geen invloed heeft op de precisie van het punt maar wel een negatieve invloed heeft op de nauwkeurigheid van het punt bij één *locator* configuratie.



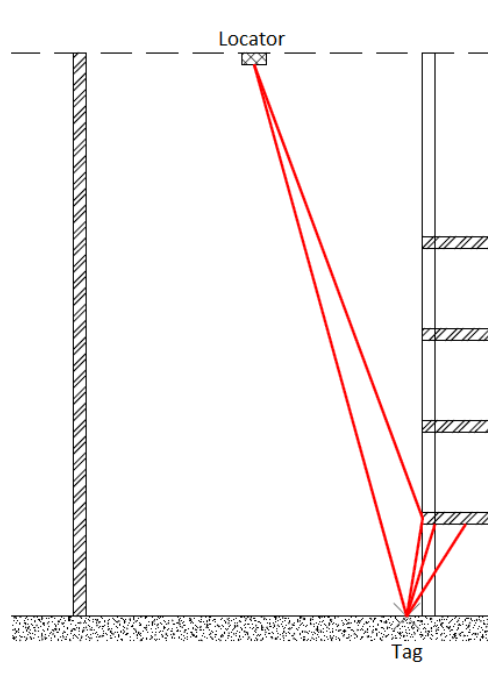


**Figuur 76: Vergelijking punt 32 en 33 Nauwkeurigheid en Precisie**



**Figuur 77: Mutlipath één locator staander**

Punt 33 heeft een lagere nauwkeurigheid dan punt 32, dit kan hoofdzakelijk het gevolg zijn van multipath. Op Figuur 77 is te zien dat een groot tijdsverschil optreedt tussen het signaal (blauw) van punt 32 dat rechtstreeks naar de *locator* gaat of gereflecteerd wordt door het rek. Door dit grote tijdsverschil kunnen de gereflecteerde signalen eenvoudiger worden uitgefilterd. De signalen (rood) van punt 33 hebben een kleiner tijdsverschil en kunnen dus moeilijker gefilterd worden.

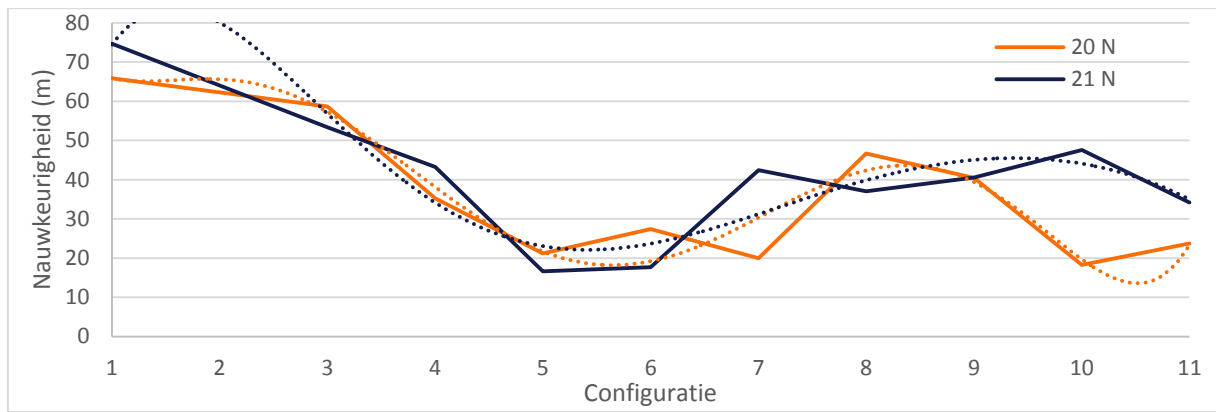


***Figuur 78: Multipath één locator ligger***

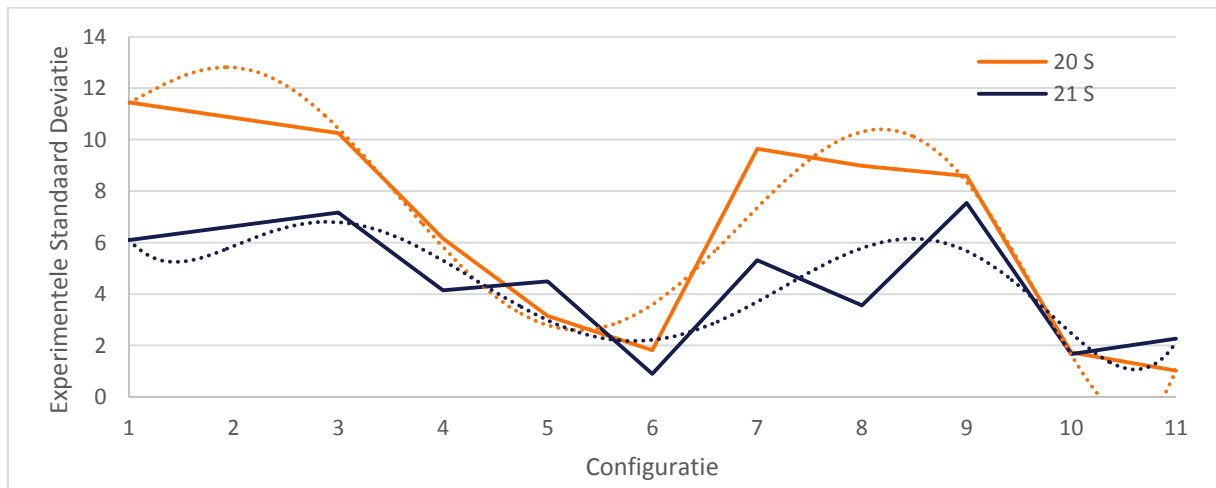
In Figuur 78 bevindt de *tag* zich tussen twee staanders. De rode lijn zijn de signalen uitgezonden door de *tag* om zijn positie te bepalen. Bij Figuur 77 worden vele stralen gereflecteerd door de staander. Hier worden enkel de stralen gereflecteerd door de ligger, waardoor minder invloed is van reflectiviteit.

#### Punt 20 en 21

In Figuur 79 en Figuur 80 worden punten 20 en 21 weergegeven. In Figuur 79 lopen de trendlijnen dichtbij elkaar, enkel bij configuratie 10 is er een verschil. Hieruit kan besloten worden dat het rek geen invloed uitoefent op de nauwkeurigheid. Dit kan voortkomen uit het gebruik van twee of meerdere *locators*. In Figuur 80 is een duidelijk verschil tussen de trendlijnen waarneembaar. De precisie van punt 20 is lager. In tegenstelling tot punt 32 en 33 heeft het rek een positieve invloed op de precisie en niet op de nauwkeurigheid van het punt.



**Figuur 79: Vergelijking Punt 20 en 21 Nauwkeurigheid**

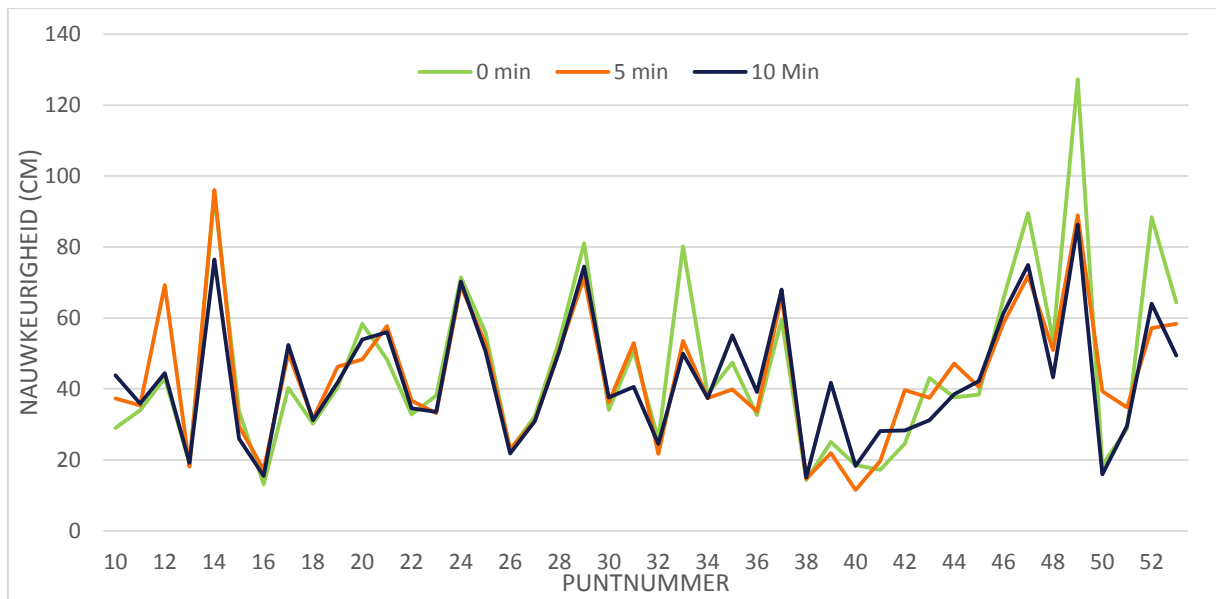


**Figuur 80: Vergelijking Punt 20 en 21 Precisie**

Uit de punten 20, 21, 32 en 33 wordt besloten dat de rekken invloed hebben op de nauwkeurigheid en niet op de precisie, wanneer de punten één *locator* ontvangen. Wanneer de punten binnen de HP-radius liggen van twee of meerdere *locators* treedt geen verschil op in nauwkeurigheid maar verhoogd dit de precisie. De plaats waar de *tag* ligt ten opzichte van een deel van het rek kan ook een invloed hebben op de nauwkeurigheid en precisie. Punt 33 ligt tegen een staander van het rek waardoor meer reflectiviteit kan optreden. Punt 21 ligt tussen twee staanders waardoor een verschil van reflectiviteit kan optreden met punt 33.

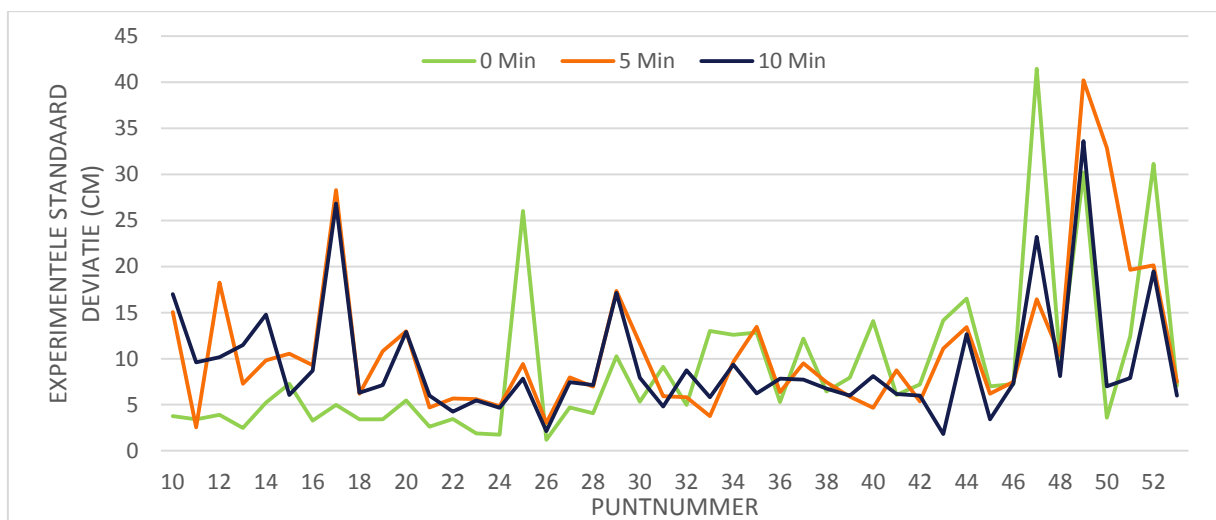
#### 3.4.3.8 Invloed van tijd

Ieder punt uit configuratie 1 werd 30 maal gemeten, telkens in sessies van 10 metingen. De eerste meting werd gedaan onmiddellijk na het plaatsen van de *tags*. Bij de tweede sessie werd vijf minuten gewacht om de *tags* op te meten en bij de derde sessie werd 10 min gewacht. In Figuur 81 wordt de nauwkeurigheid per punt aangetoond voor de drie sessies. Het verschil tussen de drie sessies is minimaal waaruit besloten wordt dat de tijd geen invloed heeft op de nauwkeurigheid.



**Figuur 81: Invloed tijd op de nauwkeurigheid**

In Figuur 82 wordt de Precisie aangetoond voor de drie sessies. De precisie voor 5 min en 10 min blijft gelijk. De precisie van 0 min loopt ook gelijk met 5 en 10 min, maar heeft in punt 25 een uitschieter.



**Figuur 82: Invloed tijd precisie**

Er kan geconcludeerd worden dat tijd geen invloed heeft op de nauwkeurigheid en de precisie.

#### 4 Besluit

Aan de hand van de vergelijkende onderzoeken werden de eigenschappen en mogelijkheden van het Quuppa systeem onderzocht die van belang waren voor de toepassing van Colruyt.

De invloed van de tijd op de nauwkeurigheid en precisie van de metingen werd vergeleken. Hiermee wordt de tijd bedoeld tussen plaatsing en opmeting van een *tag*. Aan de hand van een vergelijking tussen metingen die onmiddellijk werden genomen, na vijf en tien minuten kon worden vastgesteld dat het verschil tussen de drie sessies minimaal was, waaruit besloten werd dat de tijd geen invloed heeft op de nauwkeurigheid of de precisie.

De schaalbaarheid van het systeem, m.a.w. het verschil in *tag*densiteit, is een EVARILOS waarde die werd onderzocht aan de hand van een vergelijking tussen configuratie 1 en 2. Indien een *tag* op een winkelwagentje geplaatst wordt, geeft de *tag*densiteit van 1x2 m een realistischere weergave. De nauwkeurigheid en precisie weken weinig af tussen beide configuraties. Het verschil tussen een *tag*densiteit van 1x1 m en 1x2 m had geen invloed op de nauwkeurigheid of de precisie van een meting. Hieruit volgt dat metingen met verschillende *tag*densiteiten mogen vergeleken worden.

Daarna kon uit een vergelijkend onderzoek tussen configuratie 2 en 12 geconcludeerd worden dat de invloed van *locators* uit een naastliggende rayon onbestaande was, aangezien de waarden van nauwkeurigheid en precisie gelijk en even stabiel bleven tussen beide configuraties. Dit heeft als gevolg dat elke *locator* configuratie en de planning met behulp van Quuppa per rayon bekeken moeten worden in plaats van over meerdere rayons.

In een volgend vergelijkend onderzoek werd de maximale onderlinge afstand tussen *locators* bepaald, waarbij de nauwkeurigheid en de precisie hoog en stabiel bleven. Het verschil in prestatie tussen configuraties met verschillende onderlinge *locator*afstanden is een aspect dat rechtstreeks invloed heeft op het kostenplaatje. Hoe dichter *locators* geplaatst worden, hoe meer *locators* nodig zijn om een volledige winkel te dekken. Uit een vergelijking tussen configuraties 3, 4 en 5 en configuraties 7, 10 en 11 werd geconcludeerd dat de nauwkeurigheid beter werd naarmate de *locators* verder uit elkaar lagen, dit tot een zekere afstand. Dit komt omdat meer punten in de HP-radius van de *locators* vielen. Als *locators* te ver uit elkaar staan of te dicht bij elkaar liggen, vallen bepaalde zones buiten de HP-radius en is de hoge nauwkeurigheid niet meer gegarandeerd. Uit de configuraties kon besloten worden dat een onderlinge *locator*afstand tussen  $\pm 6,00$  m en  $\pm 7,00$  m ideaal was. Daarom dient bij het plaatsen van *locators* rekening te worden gehouden met de HP-radius van elke *locator*. De afstand tussen de *locator* had geen invloed op de precisie.

Naast de afstand tussen *locators* was het schranken een bijkomende configuratie die kon leiden tot een betere configuratie. Het verschil tussen een niet geschrante configuratie en een geschrante configuratie werd onderzocht aan de hand van twee vergelijkingen en dit tussen configuraties 4, 11 en configuraties 5, 6 en 7. Uit beide vergelijkingen kon besloten worden dat de vooropgestelde nauwkeurigheid van 30 en 50 cm vaker behaald werd bij het schranken van de configuratie. Dit was het duidelijkst te zien in de tweede vergelijking in tegenstelling tot de eerste, waar het ongewijzigd bleef. Hetzelfde besluit kon getrokken worden bij de precisie die verhoogde naarmate verder geschrant werd. Geschrante configuraties bekomen preciezere en nauwkeurigere waarden.

Het zoeken van de ideale configuratie waarbij *tags* verspreid over de vloer liggen waren slechts een deel van de simulatie voor de toepassing van Colruyt. Om de simulatie meer waarheidsgetrouw te maken, werden vergelijkingen gemaakt tussen configuraties met *tags* bevestigd op een winkelwagentje en configuraties zonder winkelwagentje. Uit de drie vergelijkingen kon besloten worden dat er weinig tot geen verschil was tussen configuraties met winkelwagentje of zonder winkelwagentje. Er werden telkens kleine verschillen waargenomen die afwisselend de configuratie met winkelwagentje of zonder winkelwagentje bevooroordeelde. De multipath afkomstig van een winkelwagentje was verwaarloosbaar klein, waardoor metingen met of zonder winkelwagentje als gelijkwaardig worden beschouwd.

Indien verder ingegaan werd op het besluit hierboven kon de simulatie nog verder vervolledigd worden door het toevoegen van personen naast het winkelwagentje. Dit is relevant omdat de massa van een persoon inkomende radiosignalen kan absorberen en de LOS verhinderen. Dit onderzoek werd gemaakt aan de hand van vergelijkingen tussen configuratie 13 en 14 en configuratie 15 en 16. Uit de twee vergelijkingen kon besloten worden dat personen een grote negatieve invloed uitoefenden op de nauwkeurigheid en de precisie, dit omdat ze een groot deel van de radiosignalen absorbeerden en LOS verhinderden. Dit besluit wil zeggen dat bij een volledige simulatie van de toepassing van Colruyt het systeem niet voldoet aan de vooropgestelde nauwkeurigheid. Hier kan eenvoudig een oplossing worden gevonden door de *tag* op een andere plaats te bevestigen verder van de persoon, aangezien de *tag* op de kar bij de toepassing van Colruyt zich te dicht tegen een persoon bevindt.

Niet alleen personen kunnen hinder veroorzaken, ook de winkelrekken kunnen invloed hebben op de nauwkeurigheid en de precisie. Om de invloed van het rek in de rayon te onderzoeken, werd een dwarsdoorsnede genomen van de rayon waar gekende punten liggen. Dit werd gedaan voor punten die dichtbij één *locator* lagen en punten die tussen twee *locators* lagen en dus op de rand van twee HP-radiussen. De punten 32 en 33 werden gebruikt voor het onderzoek bij één *locator*. De punten 20 en 21 werden gebruikt bij het onderzoek op twee *locators*. Bij de punten dichtbij één *locator* kon geconcludeerd worden dat het rek geen invloed had op de precisie van een punt, maar wel negatieve invloed had op de nauwkeurigheid van een punt. Bij het onderzoek met punten tussen twee *locators* had het rek een positieve invloed op de precisie maar niet op de nauwkeurigheid.

Om tot de ideale configuratie te komen, werd rekening gehouden met bovenstaande conclusies. De keuze van een beste configuratie leverde meer dan één goed antwoord op. Zo zijn configuraties 7, 10, 13 en 15 de beste configuraties. De onderlinge afstanden van de *locators* ligt tussen 6,00 m en 7,00 m en alle vier de configuraties zijn geschrinkt. Configuraties 7 en 10 werden opgesteld zonder winkelwagentje en configuraties 13 en 15 met winkelwagentje. Omdat reeds besloten werd dat toevoeging van een winkelwagentje weinig tot geen invloed had, mag deze parameter buiten beschouwing worden gelaten.

Punten voldoen aan de vooropgestelde nauwkeurigheid van 30 cm per configuratie:

- configuratie 7 (60%)
- configuratie 10 (43%)
- configuratie 13 (61%)
- configuratie 15 (56%)

Punten voldoen aan de vooropgestelde nauwkeurigheid van 50 cm per configuratie:

- configuratie 7 (90%)
- configuratie 10 (90%)
- configuratie 13 (89%)
- configuratie 15 (100%)

Samengevat zijn de meest ideale configuraties wat betreft nauwkeurigheid en precisie configuraties 7, 10, 13 en 15, deze configuraties bekomen een gunstige combinatie nauwkeurigheid met kostprijs. Een onderlinge afstand van 6,0-7,0 m in een winkel van 1000 m<sup>2</sup> bestaande uit 10 rayons vereist  $\pm 30$  *locators*. De vooropgestelde nauwkeurigheid van 30 cm is niet haalbaar, 50 cm daarentegen is wel haalbaar. De absorptie van signalen door personen bleek een heel storende factor te zijn, deze maakt het halen van een hoge nauwkeurigheid onmogelijk.

## 5 Discussie

De software Quuppa waarmee gewerkt werd, kan op vlak van nauwkeurigheid verbeterd worden. Er werd gestart met het inladen van een *background*, dit was een gedetailleerd plan van de te onderzoeken ruimte. Op het plan werd een assenstelsel aangeduid dat de basis vormt van het onderzoek. In het programma werd een assenstelsel gegeven waarvan de oorsprong niet overeenkomt met het assenstelsel van de *background*. Door de *background* te verslepen worden de twee assenstelsels boven elkaar geplaatst. Wanneer ingezoomd werd op de *background*, om de assenstelsels zo goed mogelijk overeen te laten komen, werden de pixels zichtbaar. Wanneer een *background* werd ingeladen met een hogere resolutie paste de software de achtergrond aan naar een lage resolutie. Wanneer een grote ruimte werd ingeladen, werden de pixels al snel centimeter grootte, waardoor millimeter nauwkeurigheid niet meer mogelijk werd. Een oplossing voor deze onnauwkeurigheid kan de mogelijkheid zijn om *background* in te laden met een hogere resolutie waarbij de resolutie niet verloren gaat door de software. Zo zouden de assenstelsels nauwkeuriger over elkaar kunnen geschoven worden. Indien het mogelijk zou zijn om andere bestandstypes in te laden zoals .dvg, .pyt, etc. en de mogelijkheid bestaat om de assenstelsels te snappen naar elkaar, kan geen fout insluipen bij het laden van de achtergrond.

Wanneer de *locators* in de software ingegeven werden moesten deze nog gecontroleerd worden op stampen en rollen. Dit gebeurde aan de hand van een *focusing locator*, deze werd op een bepaalde horizontale afstand van de *locator* gelegd. De *focusing locator* ontving de signalen van de te onderzoeken *locator*. Manueel werd de locatie van de *focusing locator* ingegeven in de software waarna deze vergeleken werd met het resultaat van de *focusing locator*. Indien deze locaties overeen kwamen, werd deze geaccepteerd en werd een fout weergegeven door de software. Indien de fout te groot was, moest deze handeling opnieuw gebeuren. Hier bleef de fout te groot, waardoor de oriëntatie manueel werd ingegeven.

De invloed van een rek kan nog nader onderzocht worden. Hier werden twee dwarsdoorsnedes gebruikt, waarvan de punten niet dezelfde omgeving hadden. Het ene punt lag bij een staander waardoor meer reflectiviteit kon optreden en bevond zich in een HP-radius van één *locator*. Het andere punt lag tussen twee staanders en lag in de HP-radius van twee *locators*. Om de invloed van het rek nader te kunnen onderzoeken, kunnen beide sneden voor één of twee *locators* worden onderzocht, zodat kan besloten worden of de staander al of niet een invloed heeft. Ook kunnen verschillende rekken worden onderzocht met verschillende producten. Bij ons onderzoek was één soort rek beschikbaar, maar in winkels worden verschillende rekken toegepast. Ook de invloed van de verschillende producten zijn hier niet aanbod gekomen. Wanneer een rek vol staat met metalen blikken, kartonnen dozen of glazen potten, kan de reflectiviteit variëren en kan dit invloed hebben op de nauwkeurigheid en de precisie.



Wanneer de *tags* op winkelwagentjes worden gemonteerd en gebruikt worden tijdens het winkelen, zullen deze *tags* een verplaatsing ondergaan tijdens het positioneren. Een bewegende *tag* zal een andere nauwkeurigheid en precisie hebben dan een *tag* in rust. Hierbij kunnen verschillende snelheden worden onderzocht. Via de software werd samen met Colruyt bekeken of de *tag* goed de traceren persoon volgde, maar daar werden geen opmetingen van genomen.

Om een betere vergelijking te kunnen maken met verschillende indoor positioneringssystemen kan bij ieder onderzoek de methode van het EVARILOS handboek worden toegepast. Dit maakt het ook mogelijk om de verschillende systemen onderling objectief te vergelijken. Enkele aspecten die hier niet onderzocht werden zijn de, de interferentie –en omgevingsrobuustheid.

## Literatuurlijst

- Aatique, M. (1997). Evaluation of TDOA techniques for position location in CDMA systems. Blacksburg, Virginia.
- Adalja, D. M. (2013). A comparative analysis on indoor positioning techniques and systems (Vol. 3, pp. 1790-1796). 2013: International Journal of Engineering Research and Applications.
- Aida, M. N., Noaizon, S., Elissa, N., Suhailan, S., & Engku, F. Indoor position detection using wifi and trilateration technique. Malaysia: University Sultan ZainalAbidin.
- Al Nuaimi, K., & Kamel, H. (2011). A Survey of Indoor Positioning Systems and Algorithms: International Conference on Innovations in Information Technology.
- Alberda, J. E., & Ebbinge, J. B. (2003-2006). *Inleiding landmeetkunde: VSSD*.
- ArmstrongJean, Sekercioglu, A., & Neild, A. (2013 ). Visible Light Positioning: A Roadmap for International Standardization (Vol. December): IEEE.
- Bahl, P., & N. Padmanabhan, V. RADAR: An In-Building RF-based User Location and Tracking System: Microsoft Research.
- Bekkelen, A. (2012). *Bluetooth Indoor Positioning*. University of Geneva.
- Bellusci, G. (2011). *Ultra-wideband ranging for low-complexity indoor positioning applications*. University of Pisa.
- Brignone, C., Connors, T., Lyon, G., & Salil, P. (2005). SmartLOCUS: An autonomous, self-assembling sensor networkfor indoor asset and systems management: HP Laboratories Palo Alto.
- Chan, S., & Sohn, G. Indoor localization using wi-fi based fingerprinting and trilateration techniques for LBS applications (Vol. XXXVIII-4/C26, pp. 5): Internation archives of the photogrammetry.
- Cheok, A. D., & Yue, L. (2011). A Novel Light-Sensor-Based Information Transmission System for Indoor Positioning and Navigation (Vol. 60): IEEE.
- Clement, A., De Bodt, A., & Van Hecke, T. (2013-2014). *Cursus Statistiek*.
- Dana, P. H. (1997). Global Positioning System (GPS) Time Dissemination for Real-Time Applications, Real-Time Systems (Vol. 12, pp. 9-40). Boston: Kluwer Academic Publishers.
- Deak, G., Curran, K., & Condell, J. (2012). A Survey of Active and Passive Indoor Localisation Systems. Ireland: University of Ulster.
- Deruyter, G. (2012a). 3D Data acquisitie. Belgium.
- Deruyter, G. (2012b). Topografie 2: GNSS (pp. 1-70).
- Dobbins, R., Garcia, S., & Brian, S. Software defined radio localization using 802.11-style communications: Worcester Polytechnic Institute.
- Drake, S. P., & Dogançy, K. (2004). Geolocation by time difference of arrival using hyperbolic asymptotes (Vol. 2, pp. 361-364).

- Farid, Z., Nordin, R., & Ismail, M. (2013). Recent advances in wireless indoor localization techniques and system (Vol. 2013, pp. 12). Malaysia: University Kebangsaan Malaysia.
- Fischer, G., Burkhart, D., & Winkler, F. (2004). Bluetooth indoor localization system. Frankfurt, Germany: IHP.
- Geomares. (2014). Seeking Indoor Continuity for GNSS Positioning Solution. from [http://www.gim-international.com/news/positioning/gnss/id7997-seeking\\_indoor\\_continuity\\_for\\_gnss\\_positioning\\_solution.html](http://www.gim-international.com/news/positioning/gnss/id7997-seeking_indoor_continuity_for_gnss_positioning_solution.html)
- Gu, Y., Lo, A., & Niemegeers, I. (2009). A Survey of Indoor Positioning Systems for Wireless Personal networks (Vol. 11): IEEE Communications Surveys and Tutorials.
- Hyun-Seung, K., Deok-Rae, K., Se-Hoon, Y., Yong-Hwan, S., & Sang-Kook, H. (2013 ). An Indoor Visible Light Communication Positioning System Using a RF Carrier Allocation Technique (Vol. 31): Journal of lightwave technology.
- . ISO 17123: Optics and optical instruments - Field procedures for testing geodetic and surveying instruments.
- Kaemarungsi, K., & Krishnamurthy, P. (2004). Modeling of indoor positioning systems based on location fingerprinting: IEEE.
- Lena, D. (2012).
- Li, B., Salter, J., Dempster, A. G., & Rizos, C. Indoor positioning techniques based on wireless LAN.
- Liu, H., Darabi, H., Banerjee, P., & Liu, J. (2007). Survey of wireless indoor positioning techniques and systems (Vol. 37). Pittsburgh: University of Pittsburgh.
- M. Ni, L., Liu, Y., Cho Lau, Y., & P. Patil, A. (2004). Landmarc: Indoor Location Sensing Using Active RFID (Vol. 1, pp. 701-710): Kluwer Academic Publishers.
- Mautz, R. (2012). *Indoor positioning technologies*. Institute of Geodesy and Photogrammetry, Zurich.
- Papapostolou, A., & Chaouchi, H. (2012). Integrating RFID and WLAN for indoor positioning and IP movement detection: Springer Science+Business Media.
- Peng, R., & Sichitiu, M. L. Angle of arrival localization for wireless sensor networks. North Carolina, United States of America: North Caroline State University.
- Pfeifer, T., & Elias, D. (2003). Commercial Hybrid IR/RF Local Positoning System. Germany: University of Leipzig.
- Quuppa. (2013). High Accuracy Indoor Positioning: Quuppa.
- Rison, B. (2008). [www.ee.nmt.edu/~rison/ee389\\_spr08/](http://www.ee.nmt.edu/~rison/ee389_spr08/).
- Rizos, C. (2013). Locata: A positioning system for indoor and outdoor applications where GNSS does not work Canberra, Australia.
- Rozsondai, D. A. C. G. C. M. C. G. F. H. L. S. (2010). <http://kom.aau.dk/group/10gr891/methods/Triangulation/Angulation/ANGULATION.pdf>.
- Scheerens, D. (2012). *Practical indoor localization using bluetooth*. University of Twente.

- Trajkovski, K. K., Sterle, O., & Stopar, B. (2010). Sturdy positioning with high sensitivity GPS sensors under adverse conditions. Ljubljana, Slovenia: University of Ljubljana.
- Trimble. (2010). Trimble M3 DR Series Total Station.
- Van Hamme, D., Veelaert, P., & Philips, W. Communicationless true robust visual odometry.
- Van Hamme, D., Veelaert, P., & Philips, W. (2011). Robust visual odometry using uncentrainly models.
- Van Haute, T., De Poorter, E., Rossey, J., Moerman, I., Handziski, V., Behboodi, A., . . . de las Heras, J. J. (2014). EVARILOS Benchmarking (pp. 70).
- Wieser, A. (2006). High-sensitivity GNSS: the trade-off between availability and accuracy: Gras University of Technology.
- Wieser, A., Gaggli, M., & Hartinger, H. (2005). Improved positioning accuracy with highsensitivity GNSS receivers and SNR aided integrity monitoring of pseudo-range observations. Long Beach, CA: ION GNSS.
- Winkler, F., Fischer, E., Grass, E., & Langerdörfer, P. (2006). An indoor localization system bases on DTDOA for different wireless LAN systems.
- Youssef, M., & Agrawala, A. The Horus WLAN Location Determination System. Maryland: University of Maryland.