HÖGSKOLAN
I GÄVLE

AKADEMIN FÖR TEKNIK OCH MILJÖ

Avdelningen för datavetenskap och samhällsbyggnad

Punktmolnskvalitet hos två SLAM-baserade laserskannrar

En jämförelse mellan NavVis VLX3 & CHCNAV RS10 mot Leica RTC360

Alice Aretorn & Waldemar Sundin

2025

Examensarbete, Grundnivå (kandidatexamen), 15 hp
Lantmäteriteknik
Lantmätarprogrammet, teknisk inriktning

Handledare: Marianne Berg
Examinator: Mohammad Bagherbandi

Sammanfattning

Syftet med denna studie är att utvärdera punktmolnskvaliteten från två SLAM-baserade laserskannrar, NavVis VLX3 och CHCNAV RS10, i jämförelse med ett referenspunktmoln insamlat med den statiska skannern Leica RTC360. Fokus ligger särskilt på förekomsten av drift och andra kvalitetsparametrar såsom medelavvikelse, standardosäkerhet och RMS, samt visuella egenskaper i punktmolnet.

Studien genomfördes i en L-formad inomhuskorridor på SWECO i Gävle. Måltavlors koordinater inhämtades med Leica Nova MS60. Referenspunktmolnet registrerades och samtliga punktmoln anslöts till ett lokalt stomnät. Två anslutningsförfaranden tillämpades för SLAM-skannrarna: en med minsta antal nödvändiga utgångspunkter och en med alla inmätta utgångspunkter. Därefter genomfördes statistiska analyser (medelavvikelse, standardosäkerhet och RMS) samt en visuell kvalitetskontroll.

Resultatet visar att punktmolnet från NavVis VLX3 har lägre RMS i 3D (0,0064 m med alla utgångspunkter) jämfört med CHCNAV RS10 (0,0162 m), vilket indikerar en högre punktmolnskvalitet hos NavVis VLX3. Skillnaderna mellan SLAM-skannrarnas punktmoln och referenspunktmolnet minskade vid användning av fler utgångspunkter i anslutningen, vilket också minskade drift. Visuell granskning av punktmolnen bekräftade att NavVis VLX3 hade bättre fullständighet och mindre brus än CHCNAV RS10.

Slutsatsen är att båda SLAM-skannrarna presterar tillfredsställande i kontrollerad inomhusmiljö, men NavVis VLX3 uppvisar generellt bättre punktmolnskvalitet. Användning av fler utgångspunkter vid anslutning rekommenderas starkt för att minska felkällors inverkan på resultatet.

Nyckelord: Terrester laserskanning, SLAM, punktmolnskvalitet, drift, Leica RTC360, NavVis VLX3, CHCNAV RS10

Abstract

The purpose of this study is to evaluate the point cloud quality from two SLAM-based laser scanners, NavVis VLX3 and CHCNAV RS10, in comparison with a reference point cloud collected using the static scanner Leica RTC360. The focus is particularly on the evaluation of drift and other quality parameters such as mean deviation, standard deviation, and RMS, as well as the visual characteristics of the point clouds.

The study was conducted in an L-shaped indoor corridor at SWECO in Gävle. The coordinates for the targets were collected using a Leica Nova MS60 and point clouds were registered and georeferenced using software specific to each scanner. Two georeferencing methods were tested for the SLAM scanners: one using the minimum number of required reference points, and another using all reference points. Statistical analyses (mean deviation, standard deviation and RMS) were carried out, along with a visual quality assessment.

The results show that the NavVis VLX3 has a lower RMS (0.0064 m with all reference points) compared to the CHCNAV RS10 (0.0162 m), indicating a higher point cloud quality from the NavVis VLX3. The differences between the point clouds from the SLAM scanners and the reference point cloud decreased when more reference points were used during the georeferencing process, which also reduced drift. Visual inspections confirmed that NavVis VLX3 offered better completeness and less noise than CHCNAV RS10.

The conclusion is that both SLAM scanners perform satisfactorily in a controlled indoor environment, but the NavVis VLX3 generally provides better point cloud quality. Using a greater number of control points during georeferencing is strongly recommended to reduce sources of error such as drift and thereby enhance the quality of the point cloud.

Keywords: Terrestrial laser scanning, SLAM, point cloud quality, drift, Leica RTC360, NavVis VLX3, CHCNAV RS10

Förord

I och med detta examensarbete avslutar vi nu vår treåriga utbildning på Lantmätarprogrammet, teknisk inriktning. Examensarbetet motsvarar en kandidatuppsats på C-nivå, 15 högskolepoäng, och har genomförts under de sista tio veckorna på utbildningen.

För att ha gjort detta examensarbete möjligt vill vi rikta ett stort tack till SWECO som hjälpt till med utrustning och personal med expertis inom området. Ett speciellt tack till Magnus Svensson på SWECO i Gävle som har varit till stor hjälp under genomförandet av metoden. Vi vill också rikta ett tack till vår handledare Marianne Berg från Högskolan i Gävle och vår externa handledare Yuriy Reshetyuk från SWECO. Med handledarnas hjälp har vi kommit framåt i arbetet samt att dem har bidragit med användbara idéer och insikter under arbetets gång.

Alice Aretorn

&

Waldemar Sundin

Gävle, juli 2025

Innehållsförteckning

Sammanfattning i
Abstract iii
Förord iv
Innehållsförteckning vi
1 Introduktion 1
1.1 Bakgrund 1
1.2 Syfte och frågeställningar 2
1.3 Avgränsningar 3
2 Teori 4
2.1 Terrester laserskanning (TLS) 4
2.1.1 Projektplanering 4
2.1.2 Registrering och georeferering 5
2.1.3 Osäkerheter och kvalitetskontroll 6
2.2 Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) 7
2.2.1 Principer för SLAM-skanning 7
2.2.2 Gångmönster 7
2.2.3 Inertial Measurement Unit (IMU) 7
2.2.4 Visuell Simultaneous Localization and Mapping (VSLAM) 8
2.3 Kontroll av punktmolnskvalitet 9
2.3.1 RMS-värde 9
2.3.2 Medelavvikelse och standardosäkerhet 9
2.3.3 Visuell kontroll av fullständighet, geometrisk noggrannhet och brus 9
2.4 Tidigare studier med mätinstrumenten 10
2.4.1 Leica RTC360 10
2.4.2 NavVis VLX3 11
2.4.3 CHCNAV RS10 11
3 Metod 12
3.1 Studieområde 12
3.2 Utrustning 15
3.2.1 Leica RTC360 15
3.2.2 NavVis VLX3 16
3.2.3 CHCNAV RS10 17
3.2.4 Leica Nova MS60 18
3.3 Programvaror och dess tillämpning 19
3.4 Inmätning av måltavlornas koordinater 20
3.5 Laserskanning 21
3.5.1 TLS med Leica RTC360 21
3.5.2 SLAM-skanning med NavVis VLX3 och CHCNAV RS10 22
3.6 Bearbetning av mätdata 24
3.6.1 Registrering av referenspunktmoln (Leica RTC360) 24

3.6.2 Anslutning och rensning av punktmoln 24
3.6.3 Punktmolnsjämförelse 27
3.7 Analys av mätdata (RMS, medelavvikelse och standardosäkerhet) 28
3.7.1 Visuell kontroll av fullständighet, geometriska noggrannhet och brus 32
4 Resultat 33
4.1 Punktmoln 33
4.2 Anslutningskontroll av referenspunktmoln 34
4.3 Punktmolnsjämförelse och drift 35
4.3.1 NavVis VLX3 35
4.3.2 CHCNAV RS10 40
4.4 Ytterligare kvalitetsparametrar: Fullständighet, geometrisk noggrannhet och brus 46
4.4.1 Leica RTC360 46
4.4.2 NavVis VLX3 47
4.4.3 CHCNAV RS10 48
5 Diskussion 49
5.1 Metod 49
5.1.1 Planering 49
5.1.2 Genomförande 49
5.2 Resultat 52
5.2.1 Medelavvikelse, standardosäkerhet och RMS 52
5.2.2 Ytterligare kvalitetsparametrar: Fullständighet, geometrisk noggrannhet och brus 53
5.3 Drift 54
5.4 Övriga felkällor 55
5.5 Användarupplevelse 56
6 Slutsatser 57
6.1 Framtida studier 58
Referenser 59
Bilaga A: Koordinater för inmätta utgångspunkter A1
Bilaga B: Avvikelser mellan SLAM-punktmolnen och referenspunktmolnet B1

1 Introduktion

1.1 Bakgrund

Det blir allt vanligare att skapa digitala representationer av objekt för att bilda sig en uppfattning om hur verkligheten ser ut runt om oss. Digitala tvillingar och digitala modeller av verkligheten används inom många områden och har många tillämpningar (Reshetyuk, 2017). Det finns en stor efterfrågan på digitala underlagsmaterial i 3D inom såväl samhällsplanering och bygg- och anläggningsbranschen, som inom industrin. Oftast används olika typer av fotogrammetriska metoder eller laserskanning för att framställa dessa modeller. Terrester laserskanning (TLS) är fördelaktigt på många sätt men har vissa begräsningar, framför allt när det gäller tiden som krävs för att utföra arbetet.

På senare tid har framsteg gjorts inom mobil laserskanning och Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) -teknik, vilket har öppnat nya möjligheter för snabb och flexibel datainsamling. SLAM tillåter insamling av punktmoln medan enheten är i rörelse, vilket gör det möjligt att kartlägga större områden på avsevärt kortare tid. Trots det står SLAM-skannrar inför utmaningar som ackumulerade fel (drift) och varierande kvalitet vid skanning i olika miljöer. Det är därför av stor vikt att noggrant utvärdera kvaliteten hos punktmoln som genereras av SLAM-baserade laserskannrar, för att förstå deras praktiska tillämpbarhet.

I Nationalencyklopedin (NE, u.å.) är drift i mätningssammanhang definierat som ”i mätinstrument ändring under mätningens gång i avläsningen, beroende på instrumentets egenskaper och inte på någon förändring hos den uppmätta storheten”. Tillämpning av begreppet i SLAM-sammanhang (NE,u.å) syftar då till att det är instrumentets egenskaper som bidrar till drift och inte förändringar i dess omgivning. Dessa egenskaper innefattar bland annat fysiska komponenter som Global Navigation Satellite Systems-(GNSS) mottagare och Inertial Measurement Unit (IMU), men omfattar även mjukvaror och algoritmer, som exempelvis SLAM-algoritmer.

Inom SLAM-baserad datainsamling utgör drift- och spårningsfel de primära källorna till systematiska avvikelser (NavVis, 2020). Driftfel uppstår på grund av förekomsten av osäkerheter i insamlat data, vilket i sin tur är en viktig del som det tas hänsyn till vid positionsberäkning med en SLAM-algoritm. Eftersom sensorerna i instrumenten baserar sina avståndsmätningar på mätdata som innehåller oundvikliga felkällor, introduceras därigenom systematiska fel i den genererade modellen (NavVis, 2020). Det är emellertid inte möjligt att kvantifiera driftskomponenten från andra felkällor vid kvalitetsanalys av punktmoln. Följaktligen kan vare sig omfattningen av drift eller dess andel i den totala punktmolnsosäkerheten kvantifieras med säkerhet.

Spårningsfel uppstår när algoritmen möter svårigheter att lokalisera sig i miljöer med låg visuell eller geometrisk variation, exempelvis långa och monotona korridorer. I dessa fall begränsas algoritmens förmåga att åter identifiera tidigare observerade miljöegenskaper, vilket leder till lokaliseringsfel (NavVis, 2020).

Utöver drift och spårningsfel förekommer även navigationsrelaterade osäkerheter, vilka är kopplade till operatörens genomförande av datainsamlingen samt till val av slinga (HMK – Terrester laserskanning, 2021). Dessa osäkerheter kan reduceras genom en noggrant planerad insamlingsstrategi. Metoder såsom multipla passager (multipass) över samma område eller användning av slutna slingor har visat sig vara effektiva för att öka robustheten och minska felkällors påverkan vid SLAM-baserad mätning (Zhao et al., 2024).

1.2 Syfte och frågeställningar

Syftet med studien är att med hjälp av ett referenspunktmoln, insamlat med Leica RTC360, undersöka kvalitetsskillnaderna mellan punktmolnen som är inmätta med de två SLAM-skannrarna NavVis VLX3 och CHCNAV RS10. Studien syftar till att analysera förekomsten av drift i de SLAM-genererade punktmolnen, samt att undersöka hur antalet utgångspunkter påverkar de resulterande punktmolnen. Punktmolnens visuella egenskaper kommer dessutom att analyseras.

För att uppfylla studiens syfte ska följande frågeställningar besvaras:

- Vilka skillnader går att se i punktmolnens kvalitet gällande de statistiska parametrarna medelavvikelse och RMS, i jämförelse med referenspunktmolnet?
- Går det visuellt att upptäcka hur drift utvecklas i punktmolnen?
- Vid anslutning av punktmolnen, hur påverkar antalet utgångspunkter resultatet?

1.3 Avgränsningar

Till denna studie har avgränsningar vidtagits på grund av den utsatta tidsramen och det valda studieområdet. För att förbättra osäkerheten i de insamlade punktmolnen hade det varit fördelaktigt att upprepa datainsamlingen minst två gånger, på grund av tidsramen för studien gjordes inte det. En annan avgränsning är att datainsamlingen görs inomhus i en kontrollerad miljö. Andra felkällor som ytors reflexivitet och skanningars infallsvinklar har fråntagits uppmärksamhet i denna studie. Valet av antalet mätinstrument är begränsat till den terrestra laserskannern Leica RTC360 som har SLAM-funktion och de mobila SLAM-skannrarna NavVis VLX3 och CHCNAV RS10. Resultatet baseras på dessa tre skannrar vilket bör beaktas vid generalisering av resultatet.

2 Teori

2.1 Terrester laserskanning (TLS)

Reshetyuk (2017) beskriver att TLS är en typ av avbildning av verkligheten i 3D. Med hjälp av TLS kan objekt som byggnader, träd och vägar avbildas och en trovärdig representation av verkligheten skapas. Framtagandet av data sker genom att mätinstrumentet ställs upp på lämplig plats vid objektet som ska avbildas. Instrumentet skickar därefter ut en laserstråle mot objektet. När laserstrålen återvänder till instrumentet, genom reflektionen från objektet, registreras avstånd och vinklar till den mätta punkten på objektet. Även information om mängden energi som återvänder till instrumentet lagras (Reshetyuk, 2017). När hela objektet är inskannat kommer alla mätta punkter att bilda ett punktmoln och punktmolnet är sedan slutprodukten som används vid framställning av exempelvis 3D-modeller (Chen et al., 2017).

2.1.1 Projektplanering

Enligt HMK – Terrester laserskanning (2021) bör ett TLS-projekt bestå av följande tre huvudsteg:

- **Planering:** Projektets tidsplan och ansvarsfördelning fastställs. Val av skanningsmetod och utrustning görs utifrån krav och förutsättningar som arbetsmiljö och terräng.
- **Fältarbete:** Innan skanning kontrolleras mätutrustning och stomnät. Vid behov justeras instrument eller kompletteras stomnätet. Konnektionspunkter och kontrollpunkter identifieras, och måltavlor ställs upp om nödvändigt. Efter skanning vid varje uppställning görs en preliminär kontroll av punktmolnets täckning och överlappning.
- **Efterbearbetning:** Punktmolnet registreras och georefereras/ansluts, med kontroller där inmätta kontrollpunkter jämförs med motsvarande punkter i punktmolnet. Slutligen dokumenteras resultaten och de genomförda kontrollerna för slutrapporten till beställaren.

2.1.2 Registrering och georeferering

Som Szrek et al. (2024) fastslår är punktmolnsregistrering och georeferering av det registrerade punktmolnet ett tidskrävande, men nödvändigt steg vid punktmolnsbearbetning i ett TLS-projekt. I HMK – Terrester laserskanning (2021) finns det grundliga beskrivningar och riktlinjer på hur båda dessa processer bör gå till.

HMK – Terrester laserskanning (2021) beskriver punktmolnsregistrering som en process där två eller fler punktmoln (lika många punktmoln som antalet skanningsuppställningar) passas ihop och samlas i ett och samma koordinatsystem, det interna tredimensionella skannersystemet. Skribenten lyfter därefter de två vanligaste metoderna för punktmolnsregistrering, moln-till-moln- och objektbaserad registrering. Vid moln-till-moln-registrering matchas motsvarande formationer som är synliga i respektive punktmoln, medan vid objektbaserad registrering matchas tydliga naturliga objekt eller uppsatta måltavlor.

Vid signalbaserad registrering krävs minst fyra gemensamma punkter i punktmolnens övertäckningsområde, exempelvis måltavlor. Vid moln-till-moln registrering används alla överlappande punkter, med några valda punkter som referens (HMK – Terrester laserskanning, 2021).

Vid objektbaserad registrering matchas objekt mellan punktmoln, vilket kräver att objekten modelleras och orienteras i tre vinkelräta dimensioner, exempelvis en dörr, ett tak eller en vägg (HMK – Terrester laserskanning, 2021).

Georeferering av punktmoln, även kallat anslutning i HMK – Terrester laserskanning (2021), innebär att samtliga punkter i ett punktmoln transformeras/passas in i ett externt kartografiskt referenssystem. De externa referenssystem som vanligtvis tillämpas i Sverige är SWEREF 99 TM, eller någon av de tolv lokala projektionszonerna i plan och RH 2000 i höjd. Punktmolnet som genererats kan också anslutas till ett lokalt stomnät om syftet med skanningen fortfarande uppfylls. Alltså, när georefereringsprocessen är slutförd i ett laserskanningsprojekt har alla punkter i ett punkmoln, som ursprungligen är definierade i ett internt system.

2.1.2.1 Olika förfaranden vid anslutning av punktmoln

Y. Reschetiuk (personlig kommunikation, 13 maj 2025) beskriver två olika tillvägagångssätt för att ansluta ett punktmoln med hjälp av utgångspunkter (stödpunkter/kontrollpunkter/ kända punkter). Den första metoden går ut på att tillämpa minsta antalet nödvändiga utgångspunkter för anslutningen. Vid applikation för punktmoln är det minsta antalet utgångspunkter tre, eftersom punktmoln infinner sig i tre dimensioner och behövs då positionen i samtliga tre riktningar låsas fast i åtminstone lika många kända punkter. Detta medför att förhållandet mellan punkterna i punktmolnet näst intill är desamma som innan anslutningen, men att felkällor som exempelvis drift kan få en betydande påverkan på resultatet.

I verkligheten är det dock ändamålsenligt att begränsa inflytandet av sådana felkällor på resultatet. Y. Reschetiuk (personlig kommunikation, 13 maj 2025) beskriver vidare att felkällornas inflytande kan begränsas genom att använda fler inmätta utgångspunkter vid anslutningen, för att få en överbestämning. Det inskannade punktmolnet passas då in mot fler än tre utgångspunkter, vilket leder till att förhållandet mellan respektive punkt i punktmolnet förändras för att behålla en bra relation till utgångspunkternas position. Detta har till följd att framkomsten av drift och övriga felkällor minskar i det resulterande punktmolnet.

2.1.3 Osäkerheter och kvalitetskontroll

Vid TLS-mätning uppstår osäkerheter, vilka Reschetiuk (2017) och Chen et al. (2017) delar in i fem kategorier: instrumentrelaterade (exempelvis registrering av laserstrålen), objektrelaterade (albedo/reflektans), skanningsgeometri (avstånd/vinkel mellan objekt och instrument), miljöfaktorer (exempelvis solljus, regn och vibrationer) samt registrering (minst 30 % överlapp krävs mellan uppställningarna).

De två huvudsakliga osäkerheterna som det behövs vetskap om vid ett laserskanningsprojekt är lokal- och absolut lägesosäkerhet. Lokal lägesosäkerhet beskrivs i HMK – geodatakvalitet (2017) som den interna osäkerheten i geodata som är lokalt sammankopplade. Samtidigt som absolut lägesosäkerhet återges som positionsavvikelsen i georefererade data i förhållande till det externa referenssystemet. I HMK – Terrester laserskanning (2021) förklaras vidare att i laserskanningsprojekt tillsätts den lokala lägesosäkerheten vanligtvis en högre prioritering än den absoluta lägesosäkerheten. Detta eftersom det oftast anses vara av större vikt att insamlat laserdata har låg inbördes lägesosäkerhet, det vill säga att respektive punkt i punktmolnet har ett noggrant läge i förhållande till varandra, i jämförelse med punktmolnets läge i det externa referenssystemet.

Mulahusić et al. (2018) konkluderade att det bästa sättet att kvalitetskontrollera spatiala data, i detta fall punktmoln, är genom att använda inmätta kontrollpunkter som inte deltar i anslutningen. Dessa tydligt markerade punkter används vid statistiska analyser/kvalitetskontroll av insamlat laserdata, antingen genom att beräkna avvikelser i enskilda punkter, medeltalet av samtliga avvikelser eller den kvadratiska medelavvikelsen (RMS) (HMK – Terrester laserskanning, 2021).

2.2 Simultaneous Localization and Mapping (SLAM)

2.2.1 Principer för SLAM-skanning

Enligt Szrek et al. (2024) innebär SLAM-skanning att laserskanning genomförs med en mobil Light Detection and Ranging-(LiDAR) enhet, som tillämpar SLAM-teknik för att estimera enhetens position under skanningsprocessen. Allt eftersom laserskannern samlar in punkter och enhetens kamerasensorer tar bilder extraheras tydliga formationer i den omkringliggande miljön för att utföra kartläggning av skannerns omgivning. Baserat på denna kartläggning, samt kompletterande positionsdata från en IMU, beräknar SLAM-algoritmen den mobila enhetens position (Szrek et al., 2024). Taheri & Xia (2021) beskriver att kartan är en uppsättning av olika funktioner som beskriver den avbildade miljön, som exempelvis hinder, landmärken eller väggar. Allt eftersom enheten förflyttas och samlar in punkter och tar bilder för omgivningens representation, ökar omfattningen av områdets kartläggning. Detta genom att sammansluta de tydliga formationerna i punktmolnet från olika positioner/synvinklar (Szrek et al., 2024).

2.2.2 Gångmönster

För att motverka felkällor är det viktigt att tänka på gångmönstret vid skanningstillfället. Multipass innebär att användaren passerar samma område minst två gånger. Därmed skannas samma område in vid fler än ett tillfälle och från olika synvinklar (Zhao et al., 2024), vilket medför att systemet själv kan positionsbestämmas och punktmolnet blir stabilare. Ytterligare en fördel med multipass är att data som skannats in från olika riktningar också kan användas till att beräkna vinkelfel (HMK, 2021).

Slutna slingor är i stället en metod där användaren går sin valda slinga och inte behöver passera samma ställe flera gånger (Taheri & Xia, 2021). En sluten slinga skapas när skanningens startposition passeras en gång till innan skanningen avslutas, vilket leder till att slingan blir stängd och punktmolnet blir stabilare (HMK, 2021).

2.2.3 Inertial Measurement Unit (IMU)

Enligt Castanheiro et al. (2024) är en IMU en enhet som med hjälp av accelerations- och vinkelhastighetsmätningar kan estimera enhetens position och inriktning. En

fördel med IMU är att det inte krävs någon åtkomst till signaler från externa enheter för att genomföra mätningar. En IMU har dessutom en hög uppdateringshastighet vilket är fördelaktigt för dynamiska tillämpningar, exempelvis vid integrering med SLAM-algoritmer. Idag är majoriteten av SLAM-skannrarna på marknaden utrustade med en IMU. Castanheiro et al. (2024) menar att detta beror på att IMU har framstått som ett bra komplement till den GNSS-enhet som oftast är monterad i SLAM-skannrarna och som är beroende av GNSS-signaler.

Castanheiro et al. (2024) förklarar vidare att positions- och inriktningsuppskattning med IMU dock ställs inför ett antal utmaningar. En betydande felkälla är drift, det vill säga ackumulation av fel över tid. Utöver drift kan navigationsrelaterade felkällor, som snabba riktnings- och accelerationsförändringar, påverka det slutgiltiga resultatet. Externa faktorer kan likaså tillföra fel i accelerations- och vinkelhastighetsmätningarna som en IMU-enhet genomför. Dessa externa faktorer kan bland annat vara skillnader i temperatur och magnetiska störningar. Genom att utföra lämpliga kalibreringsförfaranden kan inflytandet av dessa externa faktorer minimeras.

2.2.4 Visuell Simultaneous Localization and Mapping (VSLAM)

VSLAM är en metod där positioneringen av laserskannern i skanningsområdet görs genom kameror, eller sensorer som motsvarar kameror (Chen et.al., 2022). Anledningen till att skannern inte använder sig av punktdata som den samlar in för sin positionering, är att det skulle bli alldeles för mycket information att hantera. Därför är det istället kameror runt om instrumentet som tillsammans lokaliserar dess position med hjälp av gemensamma punkter/objekt. Enligt Al-Tawil et al. (2024) uppkommer det fel i samband med hur miljön utformar sig, vanligtvis vid enformiga/homogena ytor som exempelvis en lång korridor med plana vita väggar. För att undvika detta fel kan ett större antal konnektionspunkter tillämpas.

2.3 Kontroll av punktmolnskvalitet

2.3.1 RMS-värde

Med hjälp av inmätta referensmått, till exempel kontrollpunkter (koordinater) eller avstånd, kan den kvadratiska medelavvikelsen (RMS) beräknas. Kontrollpunkterna och dess referenskoordinater bör bestämmas med en metod som garanterar att dess lägesosäkerhet är bättre än en tredjedel av den efterfrågade lägesosäkerheten i punktmolnet (HMK – Teknisk Rapport, 2014). I detta sammanhang kan den inmätta kontrollpunkten anses ha sanna koordinatvärden, på grund av dess avsevärt låga osäkerhet i jämförelse med punkter i punktmolnet. RMS-värdet som beräknas visar hur stor spridningen är kring det ”sanna” värdet (det vill säga det inmätta referensmåttet) (HMK – Geodatakvalitet, 2017; Di Stefano et al., 2021).

2.3.2 Medelavvikelse och standardosäkerhet

Bortsett från RMS är medelavvikelse och standardosäkerhet ofta förekommande statistiska storheter för kontroll av punktmoln. Medelavvikelsen i ett dataset visar den genomsnittliga avvikelsen mellan inmätta värden och referensvärden. En analys av beräknad medelavvikelse kan fastslå om systematiska fel är närvarande i genomförda mätningar (Štroner et al., 2025). Standardosäkerhet i ett dataset är måttet för hur mycket vardera individuellt inmätt värde avviker från datasetets medelvärde. Genom analys av standardosäkerhet kan den ansvarige erhålla värdefull information angående variationen i insamlat data. Standardosäkerhet möjliggör snabba men väl grundade slutsatser i en osäkerhetsanalys av olika dataset (Zhao et al., 2024).

2.3.3 Visuell kontroll av fullständighet, geometrisk noggrannhet och brus

Förutom de kvantitativa storheterna som nämnts i föregående avsnitt kan även vissa kvalitativa aspekter vara av intresse vid kvalitetskontroll av punktmoln. Granskning av ett punktmolns fullständighet säkerställer att hela den skannade ytan är representerad i punktmolnet. Det genomförs med en visuell kontroll, i syfte att garantera att det inte finns några luckor eller områden utan data i punktmolnet. Detta kan framstå om exempelvis objekt i omgivningen har skymt skannerns ”siktlinje” under skanningen (Štroner et al., 2025).

Likt undersökningen av punktmolnens fullständighet genomförs granskningen av den geometriska noggrannheten med en visuell kontroll. Under kontrollen utvärderas hur väl formationerna i punktmolnet representerar de geometriska objekt som skannades in från verkligheten (Kersten & Lindstaedt, 2022).

Brus i punktmoln innefattar en kombination av slumpmässiga och systematiska fel i punktmolnet. Det vill säga oönskade avvikelser av registrerade punkters position i relation till det inskannade objektets position i verkligheten. Granskning av förekomsten av brus i punktmoln genomförs med en visuell kontroll av insamlat mätdata. Därefter rensas tydligt avvikande punkter bort (Štroner et al., 2025).

2.4 Tidigare studier med mätinstrumenten

2.4.1 Leica RTC360

Eng och Matsson (2020) jämförde två laserskannrar, Leica Scanstation P40 och Leica RTC 360 3D, i syfte att utvärdera SLAM och indirekt georeferering av punktmolnsdata. I studien har en byggnad skannats in och georefererats till SWEREF 99 16 30 och RH 2000 med hjälp av den nationella geoidmodellen SWEN17_RH2000. Skribenterna valde att använda kontrollpunkter i metoden, för att möjliggöra analys av punktmolnsjämförelsen i Leica Cyclone.

Resultatet innehöll granskning av detaljrikedom, RMS-värden för avvikelsen mellan punktmolnen, koordinatvärden i plan och höjd för kontrollpunkterna samt utvärdering av SLAM. Resultatet visar att detaljrikedomen hos objektet avbildas tydligare med RTC360 än P40 och speciellt på de svarta områdena på objektet. RMS-värdena skiljde med 0,002 m i 3D, där P40 hade lägre lägesosäkerhet på 0,013 m i jämförelse med RTC360, vars lägesosäkerhet var 0,015 m (Eng & Mattson, 2020).

Resultatet av studien visar att RMS-värdena är något lägre med P40 men att den totala detaljrikedomen i RTC360 var bättre. SLAM-algoritmen kom i denna studie inte att visa sig speciellt tydligt och kräver ytterligare studier för generalisering. Eng & Matsson (2020) drar därför slutsatsen utifrån studien att RTC360 har flera fördelar och är en skanner att rekommendera.

2.4.2 NavVis VLX3

I artikeln skriven av Gharineiat et al. (2024) har SLAM-skannrarna NavVis VLX2 och BLK2GO jämförts, där syftet med studien är att studera skannrarnas noggrannhet. Studien genomfördes både inomhus och utomhus samt att fyra olika typer av jämförelser användes vid analysen (moln-till-moln, moln-till-mesh, mesh-till-mesh och kantdetekteringstavla). Referensdata är insamlat med både totalstation och den statiska skannern Z+F Imager 5016.

Resultatet av studien visar att noggrannheten är större inomhus (5 mm) än utomhus (10 – 60 mm) samt att moln-till-moln-jämförelsen gav den bästa noggrannheten. Gharineiat et al. (2024) beskriver i sin slutsats att SLAM-skannrar är effektiva för att samla in bra data utifrån noggrannheten, flexibiliteten och skanningshastigheten av de två SLAM-skannrarna som använts i studien.

2.4.3 CHCNAV RS10

Ngoc Quang et al. (2024) har genomfört en fallstudie där den handhållna SLAM-skannern CHCNAV RS10 har jämförts med kontrollmätningar i ett GNSS-RTK-nätverk, med korta avstånd mellan de inmätta kontrollpunkterna. Syftet med studien var att bedöma om det är ändamålsenligt att använda CHCNAV RS10 för 2D- och 3D-mätningsändamål. Studieområdet beskrivs som ett 1 ha stort, öppet och relativt plant utrymme. 108 kontrollpunkter mättes in med GNSS-RTK och analysen grundades på jämförelse av dess inmätta höjdvärden och höjder från det inskannade punktmolnet. Dessutom gjordes visuella observationer i punktmolnet för att styrka diskussion av erhållna resultat.

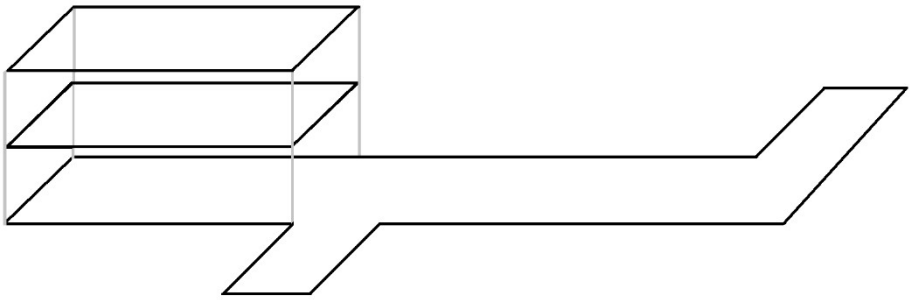
Av de 108 jämförelser som genomfördes skiljde 46,6 % av punkterna ≤ 0,010 m, 80,56 % ≤ 0,020 m, 90,74 % ≤ 0,030 m, 98,15 % ≤ 0,040 m, 99,07 % ≤ 0,050 m och 100 % skiljde mindre än 0,060 m. De 2 punkterna som avvek mest (> 0,040 m) menar Ngoc Quang et al. (2024) beror på dess position i studieområdet, där den ena var svåråtkomlig för SLAM-skannern och den andra delvis undanskymd för GNSS-signaler. Standardavvikelsen i höjd för samtliga 108 kontrollpunkter beräknades till 0,016 m.

Slutsatsen som drogs av Ngoc Quang et al. (2024) var att CHCNAV RS10 är tillämpbar för 2D- och 3D-mätningsändamål. Detta anser skribenterna eftersom resultatets höjdnoggrannhet når upp till dagens standard gällande datakvalitet, samt att punktmolnets höga upplösning möjliggör klassificering och diverse visuella observationer.

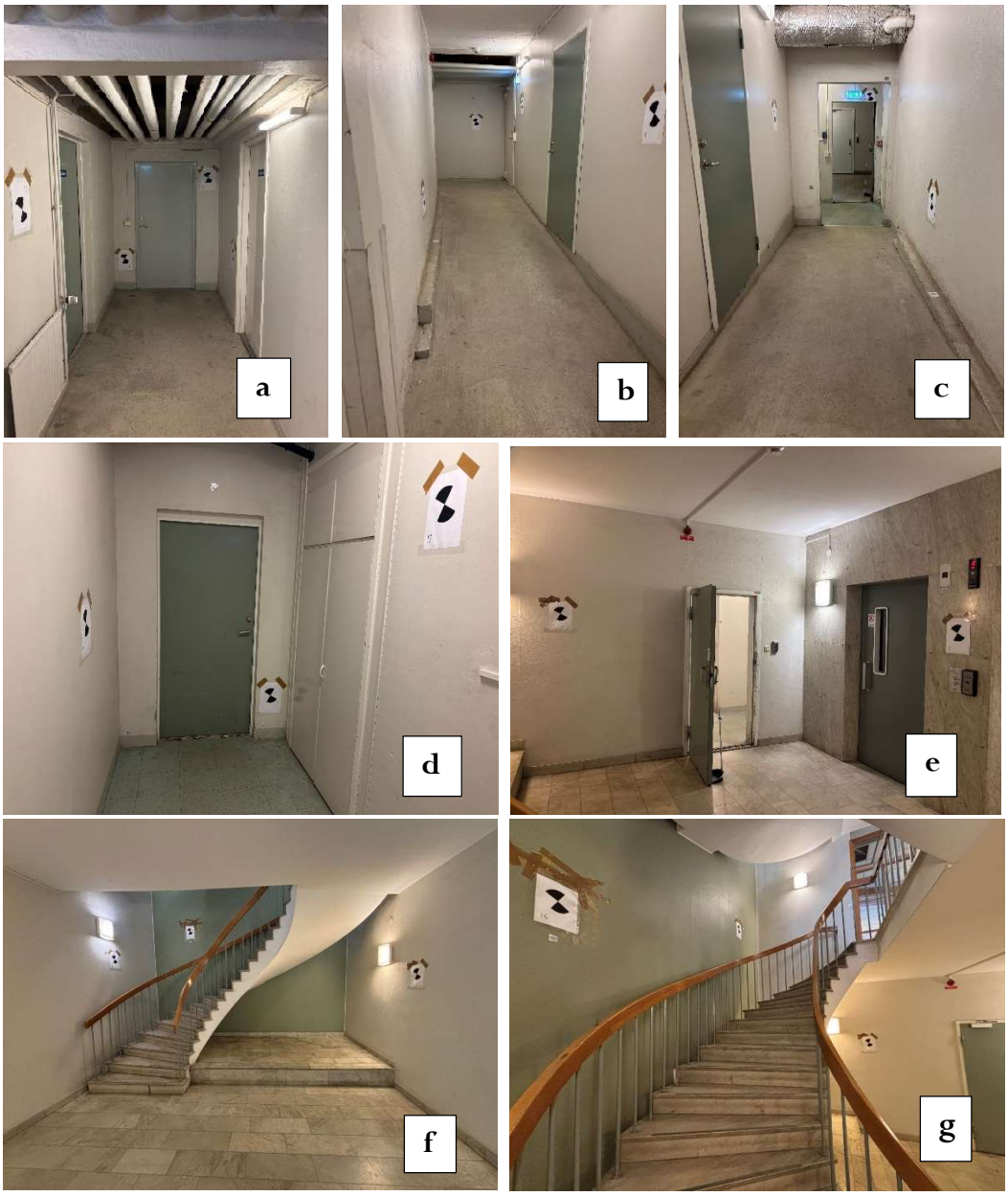
3 Metod

3.1 Studieområde

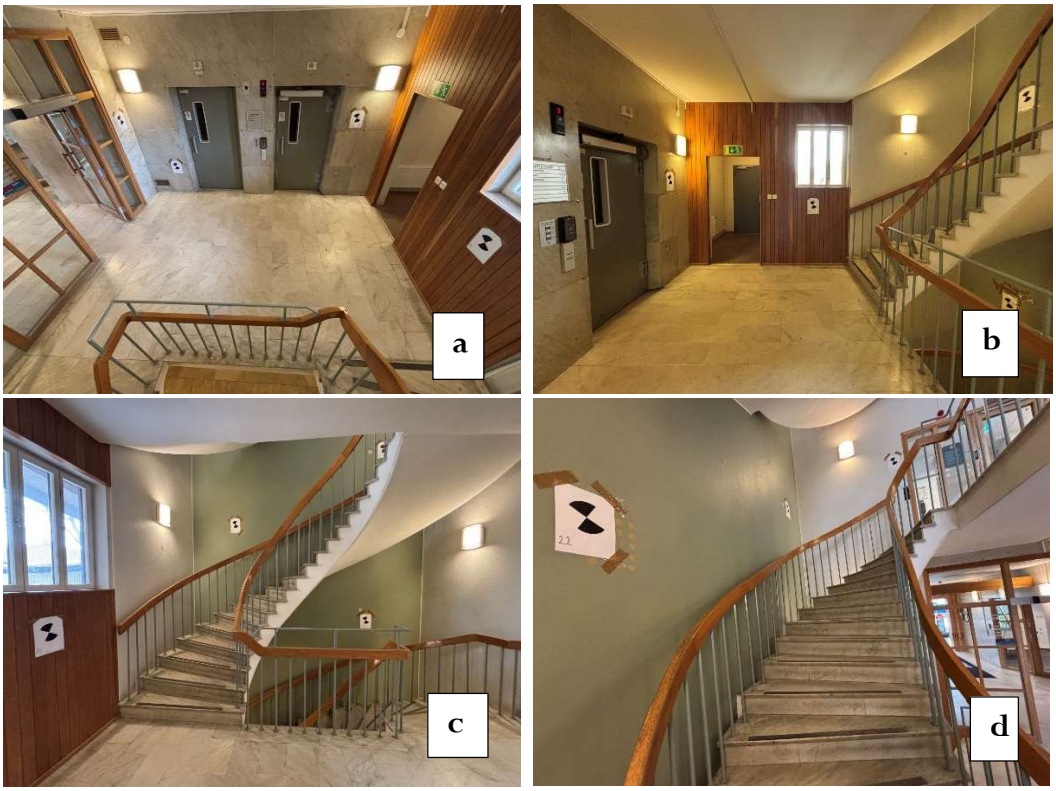
Denna studie har genomförts på SWECO i Gävle. Studieområdet är ca 140 kvadratmeter och utgörs av en L-formad källarkorridor som mynnar ut i ett trapphus och sträcker sig två våningar upp, se figur 1, 2, 3 och 4. Studieområdets väggar, golv och tak består av olika material och som bilderna visar i figur 2 utgörs det av betong, trä, gips och blanka stenytor. Området består av trånga och vissa svåråtkomliga ytor vilket är en prövande utmaning för skannrarna i studien, då laserskannrar generellt inte är lika bra på nära håll som på längre avstånd.



Figur 1. Studieområdets planlösning.



Figur 2. Bild a – g visar våning 1 av studieområdet samt fördelningen av måltavlor. (Privata bilder).



Figur 3. Bild a – d visar våning 2 av studieområdet samt fördelningen av måltavlor. (Privata bilder).

Figur 4. Bild a och b visar våning 3 av studieområdet samt fördelningen av måltavlor. (Privata bilder).

3.2 Utrustning

3.2.1 Leica RTC360

Den första laserskannern som användes var den stationära enheten Leica RTC360, se figur 5. Denna skanner har ett FOV på 360° i horisontalled och 300° i vertikalled. Förutom LiDAR-sensorn har instrumentet även en IMU-, altimeter- och GNSS-sensor, samt en kompass. Laserskannern har ett inbyggt kamerasystem med tre 36 MP kameror. Med denna skanner kan upp till två miljoner punkter samlas in per sekund, på ett maximalt avstånd av 130 meter. Den lägsta lägesosäkerheten som är möjlig att uppnå i det resulterande punktmolnet är 1,9 mm på 10 meters avstånd (Leica, 2018).

Figur 5. Den stationära laserskannern Leica RTC360.

3.2.2 NavVis VLX3

Den andra laserskannern som användes var den mobila enheten NavVis VLX3, se figur 6. Denna skanner har med sina två LiDAR-sensorer ett ”field of view” (FOV) på 360° i både horisontal- och vertikalled. Förutom LiDAR-sensorerna har instrumentet även en IMU-sensor och fyra inbyggda 20 megapixel (MP) kameror. Med denna skanner kan nästan 1,3 miljoner punkter samlas in per sekund, på ett maximalt avstånd av 50 meter. Den lokala lägesosäkerheten som är möjlig att uppnå i det resulterande punktmolnet är 5 mm (NavVis, 2024).

Figur 6. Den mobila laserskannern NavVis VLX 3.

3.2.3 CHCNAV RS10

Den tredje laserskannern som användes var den handhållna enheten CHCNAV RS10, se figur 7. Denna skanner har ett FOV på 360° i horisontalled och 30° (±15°) i vertikalled. Förutom LiDAR-sensorn har instrumentet även en IMU- och GNSS-sensor. Laserskannern har ett inbyggt kamerasystem med tre 5 MP kameror. Med denna skanner kan upp till 640 000 punkter samlas in per sekund, på ett maximalt avstånd av 120 meter. Den möjliga punkttätheten i det resulterande punktmolnet är 2 cm och en RMS på mindre än 5 mm är möjligt för den absoluta lägesosäkerheten i både horisontal- och vertikalled (CHCNAV, 2024).

Figur 7. Den handhållna laserskannern CHCNAV RS10.

3.2.4 Leica Nova MS60

Multistationen Leica Nova MS60, se figur 8, har använts för att etablera utgångspunkter för anslutning och referenskoordinater för anslutningskontroll, i det lokala stomnätet. Detta instrument kan uppnå en noggrannhet på 0,3 mgon för vinkelmätningar, samt 1 mm + 1,5 ppm för avståndsmätningar mot prisma och 2 mm + 2 ppm för reflektorlösa avståndsmätningar. Instrumentet kan mäta avstånd längre än 10 km mot ett prisma och upp till 2 km reflektorlöst (Leica, 2020).

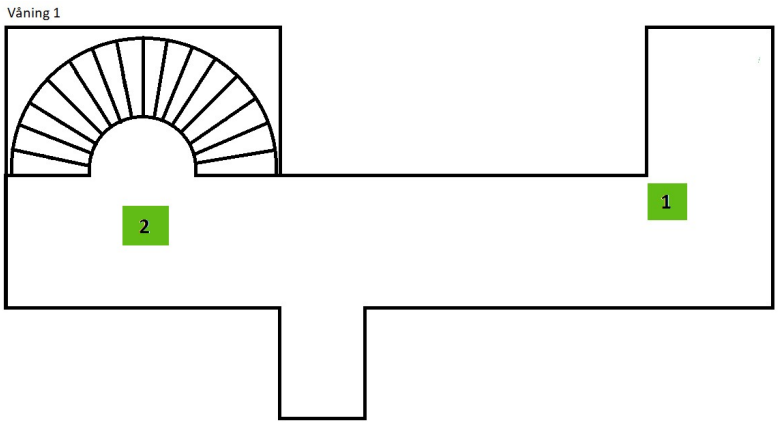
Figur 8. Multistationen Leica Nova MS60.

3.3 Programvaror och dess tillämpning

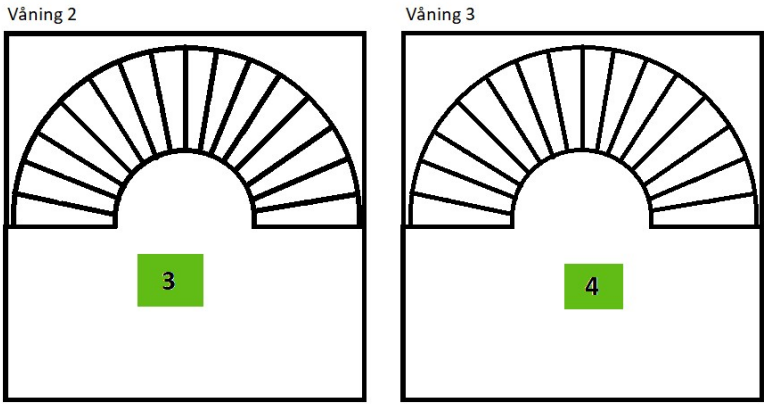
- **Cyclone 360 REGISTER PLUS –** Registrering av punktmolnet från Leica RTC360.
- **NavVis IVION** – Anslutning av punktmolnet från NavVis VLX3 till det lokala stomnätet.
- **CHCNAV CoPre** – Anslutning av punktmolnet från CHCNAV RS10 till det lokalt etablerade stomnätet.
- **Cyclone Core –**Anslutning av punktmolnen från Leica RTC360 till det lokala stomnätet.
- **Cyclone 3DR –** Anslutningskontroll av referenspunktmolnet från Leica RTC360, rensning av samtliga punktmoln samt genomföring av jämförelse mellan punktmolnen.
- **SBG geo –** Exportering av måltavlornas koordinater till en txt-fil för vidare tillämpning.

3.4 Inmätning av måltavlornas koordinater

28 måltavlor (se figur 2,3 och 4) placerades ut på väggarna i studieområdet, väl utspridda i plan och höjd. Samtliga 28 måltavlor kom att användas vid registreringen av referenspunktmolnet. Med hjälp av ett befintligt lokalt stomnät genomfördes fyra fristationsetableringar, se figur 9 och 10, där 15 måltavlor mättes in (5 per våningsplan) med multistationen Leica Nova MS60. Måltavlorna mättes in reflektorfritt mot måltavlornas pappersyta, i en helsats per punkt. De 15 inmätta måltavlorna kom att användas i de två anslutningsförfarandena, vid anslutning av samtliga punktmoln.



Figur 9. Tillämpade uppställningar i nummerordning på våning 1, inmätt med Leica Nova MS60.

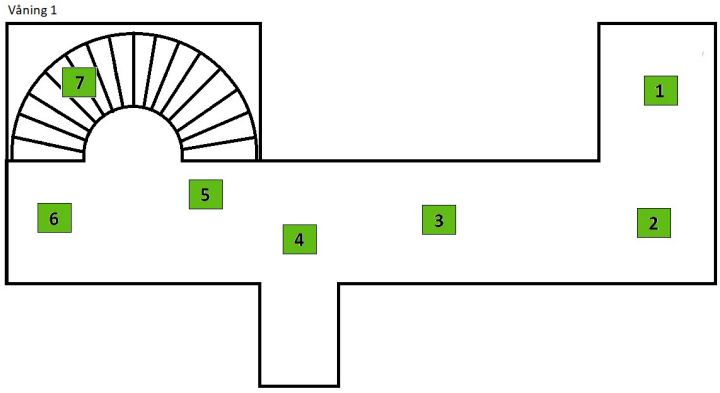


Figur 10. Tillämpade uppställningar i nummerordning på våning 2 och 3, inmätt med Leica Nova MS60.

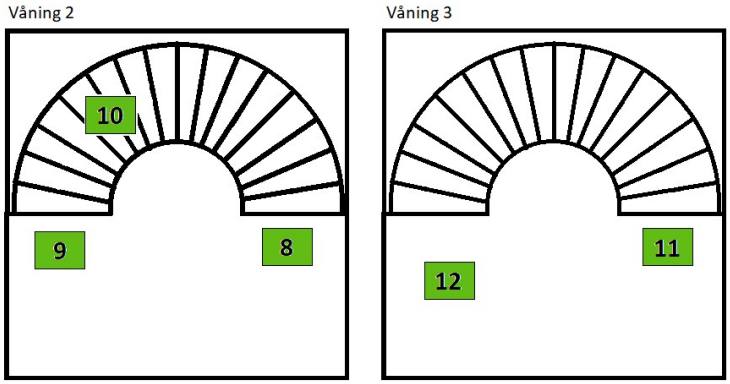
3.5 Laserskanning

3.5.1 TLS med Leica RTC360

Vid användning av Leica RTC360 gjordes tolv uppställningar och positionerna visualiseras i figur 11 och 12. Vid skanningen kompletterades de 28 måltavlorna med 6 flyttbara måltavlor, se figur 13. Anledningen till att flyttbara måltavlor användes var för att säkerställa att det fanns tillräckligt med konnektionspunkter i överlappen mellan två efterföljande uppställningar vid registrering av punktmolnet (minst 4 vid måltavleregistrering enligt HMK – Terrester laserskanning, 2021). Övertäckningen mellan två efterföljande uppställningar kontrollerades i handenheten efter respektive skanning, för att säkerställa att den var minst 30 %.



Figur 11. Tillämpade uppställningar i nummerordning på våning 1, vid skanning med Leica RTC360.



Figur 12. Tillämpade uppställningar i nummerordning på våning 2 och 3, vid skanning med Leica RTC360.

Figur 13. Flyttbar måltavla av Leica.

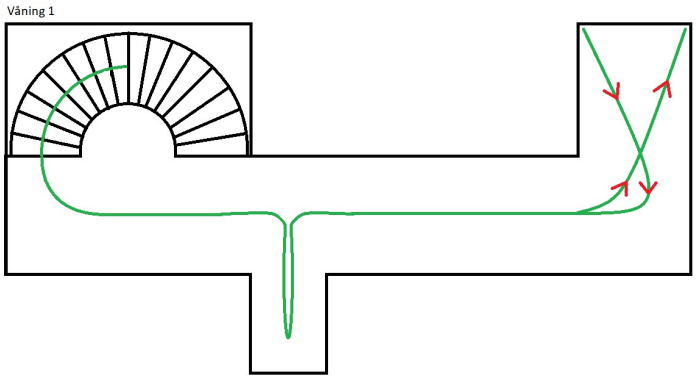
3.5.2 SLAM-skanning med NavVis VLX3 och CHCNAV RS10

Vid uppstart av NavVis VLX3 ställdes den först på golvet för att starta den automatiska kalibrering, vilket tog ett par minuter. Efter kalibreringen placerades skannern på användarens axlar med de två ”axelkuddarna” som stöd för att hålla den på plats. Det bälte som medföljdes placerades runt midjan på användaren för att göra det mer ergonomiskt för användaren och för att underlätta en stabilare skanning. Därefter påbörjades skanningen av studieområdet. Koordinater för alla tillgängliga måltavlor kom att mätas in under skanningens gång. Skannern hakades då ifrån sin hållare i bältet för att sedan med hjälp av en markering på instrumentets nedre insida placeras i centrum av måltavlan, för att slutligen mäta in koordinaterna för måltavlans centrum.

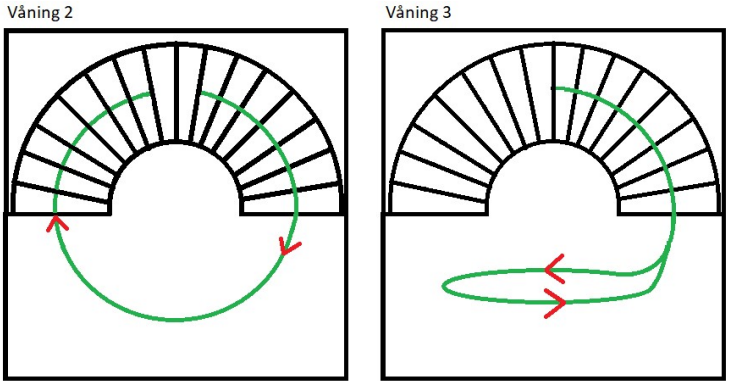
För att påbörja skanningen med CHCNAV RS10:an placerades skannern först på golvet i den medföljda ställningen för att starta den automatiska kalibrering, vilket tog ungefär 10 sekunder. Efter kalibreringen påbörjades skanningen och skannern lyftes upp från golvet av användaren för att sedan fortsatt skanna in studieområdet. Koordinater för tillgängliga måltavlor kom att mätas in under skanningens gång. På botten av skannern finns en markering som placerades i centrum på måltavlan, skannern mätte därefter in måltavlans koordinater.

3.5.2.1 Gångmönster

Gångmönstret som tillämpades med de mobila enheterna NavVis VLX3 och CHCNAV RS10 var en sluten slinga med multipass-karaktärsdrag. Användaren rörde sig längst samma väg i studieområdet, tills i slutet där slingan slöts, se figur 14 och 15. Anledningen till att detta gångmönster valdes var på grund av studieområdets förutsättningar, med trånga utrymmen och homogena ytor i framför allt korridoren.



Figur 14. Tillämpad slinga på våning 1, vid skanning med SLAM-instrument.



Figur 15. Tillämpad slinga på våning 2 och 3, vid skanning med SLAM-instrument.

3.6 Bearbetning av mätdata

3.6.1 Registrering av referenspunktmoln (Leica RTC360)

En signalbaserad registrering gjordes för referenspunktmolnet (med hjälp av både de flyttbara måltavlorna och de som var utplacerade på väggarna) i programvaran Cyclone REGISTER 360 PLUS. Centrum på alla synliga måltavlor (konnektionspunkter i vardera uppställnings punktmoln) markerades manuellt. Programmet definierade sedan centrum utefter kontrasten mellan de svartvita elementen. Därefter skapades länkar mellan efterföljande uppställningar. I detta skede kontrollerades överlappen mellan samtliga uppställningar för att säkerställa en övertäckning på minst 30 % mellan två intilliggande uppställningar (HMK – Terrester laserskanning, 2021), ingen vidare registreringskontroll genomfördes. När registreringen slutfördes exporterades det sammansatta homogena punktmolnet som en e57-fil, för att senare öppnas upp i Cyclone Core.

3.6.2 Anslutning och rensning av punktmoln

3.6.2.1 Leica RTC360

Av de 28 måltavlorna som sattes upp i studieområdet användes de 15 inmätta måltavlorna som utgångspunkter vid anslutning av referenspunktmolnet. För att bestämma hur många av de 15 inmätta måltavlorna (se koordinater i bilaga A) som skulle användas som utgångspunkter i anslutningen gjordes ett test med olika antal utgångspunkter. För att därmed kunna se hur kvaliteten på anslutningen förändrades beroende på antalet utgångspunkter som användes. Först användes alla 15 i anslutningen, för att därefter ta bort en utgångspunkt per våning. Detta utefter rekommendationen från HMK – Terrester laserskanning (2021) att minst en kontrollpunkt ska finnas per våningsplan om skanning sker i en byggnad. Valet av vilka utgångspunkter som togs bort berodde på utgångspunkten i frågas placering i punktmolnet. De som befann sig i ytterkanten av punktmolnet bevarades för att behålla god täckning av hela studieområdet. När de första tre utgångspunkterna tagits bort blev det ingen nämnvärd skillnad på anslutningens kvalitet. Ytterligare en utgångspunkt per våningsplan togs då bort (nu totalt 6), men inte heller då påverkades anslutningens kvalitet nämnvärt. När ännu en punkt per våningsplan togs bort märktes en större skillnad i anslutningens kvalitet. Därför användes dessa 3 utgångspunkter i anslutningen för att bibehålla god kvalitet. Totalt användes alltså 9 av de 15 inmätta måltavlorna som utgångspunkter för att ansluta punktmolnet till det lokala stomnätet.

Efter genomförd anslutning gjordes en ny e57-fil för att kunna öppna upp den i Cyclone 3DR. Där rensades punktmolnet och överflödiga punkter togs bort. För att kontrollera anslutningens kvalitet markerades centrum på de resterande 6 måltavlorna in och användes som kontrollpunkter, se dess koordinater i tabell 1. Kontrollpunkterna från punktmolnet jämfördes därefter med koordinaterna som mättes in med multistationen. Efter anslutningskontrollen användes det anslutna punktmolnet som referenspunktmoln vid jämförelserna med SLAM-skannrarnas punktmoln.

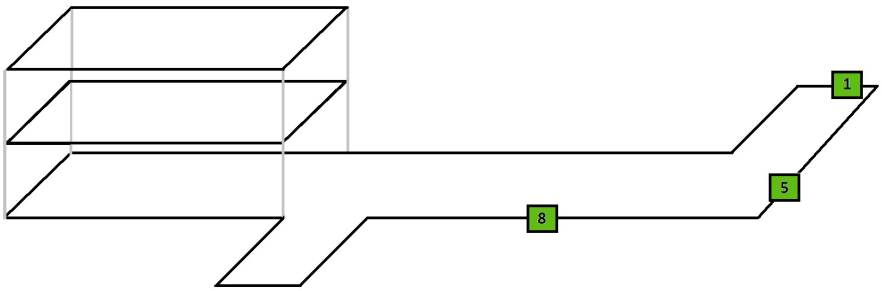
Tabell 1. Kontrollpunkternas koordinater från referenspunktmolnet som samlades in med Leica RTC360.

ID	x_{RTC} (m)	y_{RTC} (m)	z_{RTC} (m)
T1	1010,7245	1006,5156	10,4071
T8	1006,5657	1000,2523	9,9675
T17	1001,4891	1004,0741	12,2671
T20	999,9179	998,2566	13,0748
T23	1001,7513	1004,1452	15,6230
T26	999,7671	998,2144	16,5068

3.6.2.2 NavVis VLX3

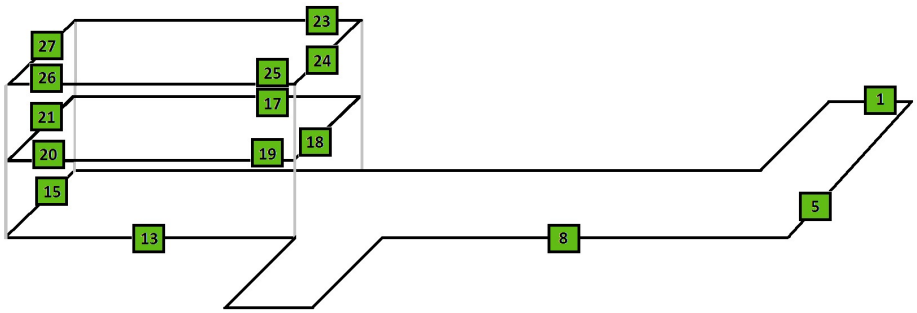
Eftersom punktmoln insamlat med en SLAM-skanner är direkt sammansatt utesluts registreringsfasen. Punktmolnet anslöts i programvaran NavVis IVION av en mätningsingenjör på SWECO. Två anslutningar genomfördes i enlighet med de förfaranden som beskrevs i avsnitt 2.1.2.1. En anslutning med minsta antalet nödvändiga utgångspunkter (3) och en anslutning med alla inmätta utgångspunkter (15). Båda metoderna gjordes för att möjliggöra analyser kring förekomsten av drift i punktmolnet (se avsnitt 4.3.1).

De tre utgångspunkter som tillämpades för anslutning med minsta antalet nödvändiga utgångspunkter var 1, 5 och 8 (se figur 16). Punktmolnet kom sedan att importeras till Cyclone 3DR för att rensas likt punktmolnet från Leica RTC360, för att slutligen användas i punktmolnsjämförelsen.



Figur 16. Ungefärlig position av de inmätta utgångspunkterna 1, 5 och 8 som användes vid anslutningen med minsta antalet nödvändiga utgångspunkter, av punktmolnet från NavVis VLX3.

I figur 17 visualiseras de ungefärliga positionerna av de 15 inmätta utgångspunkterna som har använts för anslutning enligt det andra förfarandet (anslutning med alla inmätta utgångspunkter).

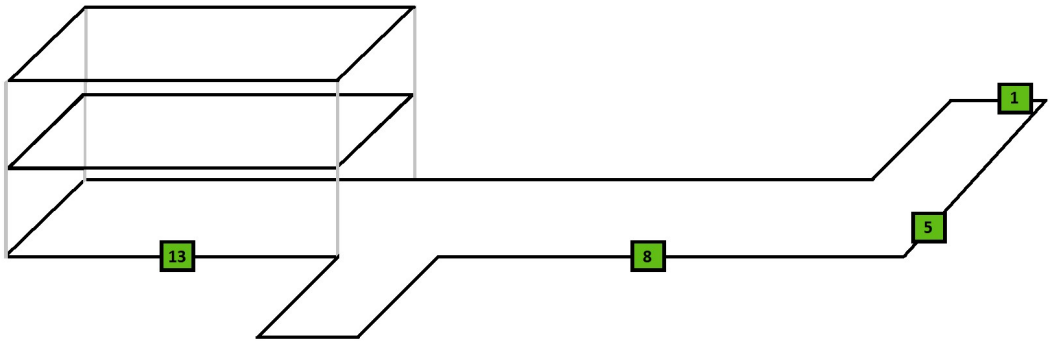


Figur 17. Ungefärlig position av samtliga inmätta utgångspunkter som användes vid anslutningen med alla utgångspunkter, av punktmolnet från NavVis VLX3.

3.6.2.3 CHCNAV RS10

Likt NavVis VLX3 genomfördes ingen registrering av punktmolnet. Eftersom det genererade punktmolnet endast gick att öppna i programmet CHCNAV CoPre, som har begränsad åtkomst, skickades datainsamlingen till en mätningsingenjör på SWECO som genomförde två anslutningar i enlighet med förfarandena i avsnitt 2.1.2.1.

Till skillnad från NavVis VLX3 som anslöts med tre utgångspunkter anslöts CHCNAV RS10 med fyra utgångspunkter. Anledningen till att punktmolnet inte kunde anslutas med tre utgångspunkter var för att programvaran CHCNAV CoPre krävde fyra utgångspunkter för anslutning. Där av kommer anslutningen med minsta antalet utgångspunkter att adderas med den utgångspunkten som ligger närmst de andra tre, vilket är utgångspunkt nummer 13, se figur 18. Anslutningen med alla utgångspunkter är dem samma som NavVis VLX3, se figur 17.



Figur 18. Ungefärlig position av de inmätta utgångspunkterna 1, 5, 8 och 13 som tillämpats vid anslutning, i plan.

3.6.3 Punktmolnsjämförelse

I Cyclone 3DR tillämpades ”cloud vs cloud”-jämförelse mellan respektive SLAM-skanners punktmoln och referenspunktmolnet som är inmätt med Leica RTC360. I syfte att jämföra punktmolnen valdes, i programvaran, först vilket av dessa som skulle vara referenspunktmoln och sedan vilket som detta skulle jämföras med. Innan jämförelsen påbörjades valdes den maximala avvikelsen till fem centimeter, delvis för att förkorta processeringstiden men främst för att utesluta brus och grova fel. När jämförelsen genomfördes färgsattes punktmolnet utefter hur stor avvikelse respektive punkt hade gentemot referenspunktmolnet. Avvikelseintervallen som sattes visas i tabell 2.

Tabell 2. Avvikelseintervall för visualisering av punktmolnsjämförelse.

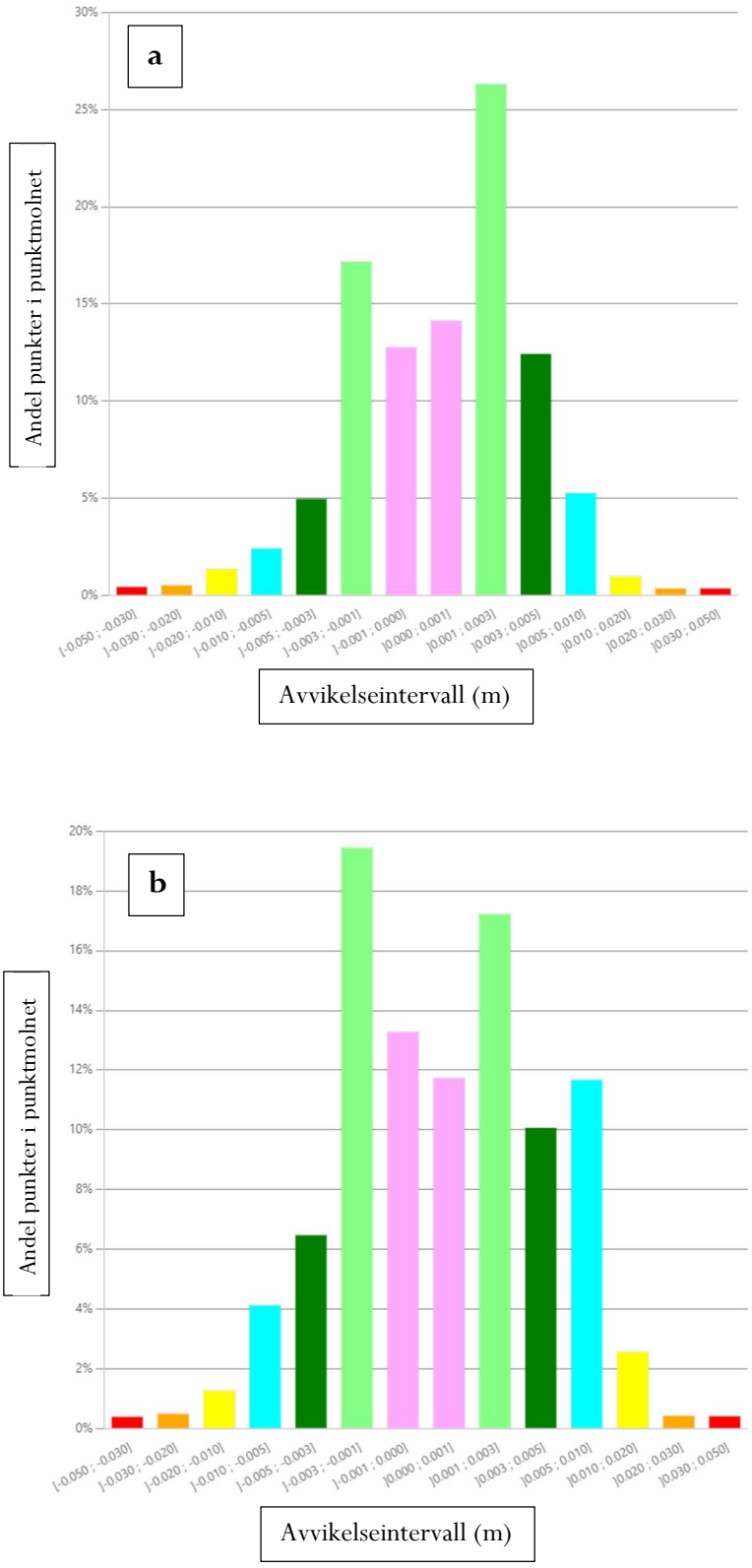
Korrelerande färg i punktmolnsjämförelser	Intervall (m)
Röd	-0,050 – -0,030; 0,030 – 0,050
Orange	-0,030 – -0,020; 0,020 – 0,030
Gul	-0,020 – -0,010; 0,010 – 0,020
Blå	-0,010 – -0,005; 0,005 – 0,010
Mörkgrön	-0,005 – -0,003; 0,003 – 0,005
Ljusgrön	-0,003 – -0,001; 0,001 – 0,003
Rosa	-0,001 – -0,000; 0,000 – 0,001

3.7 Analys av mätdata (RMS, medelavvikelse och standardosäkerhet)

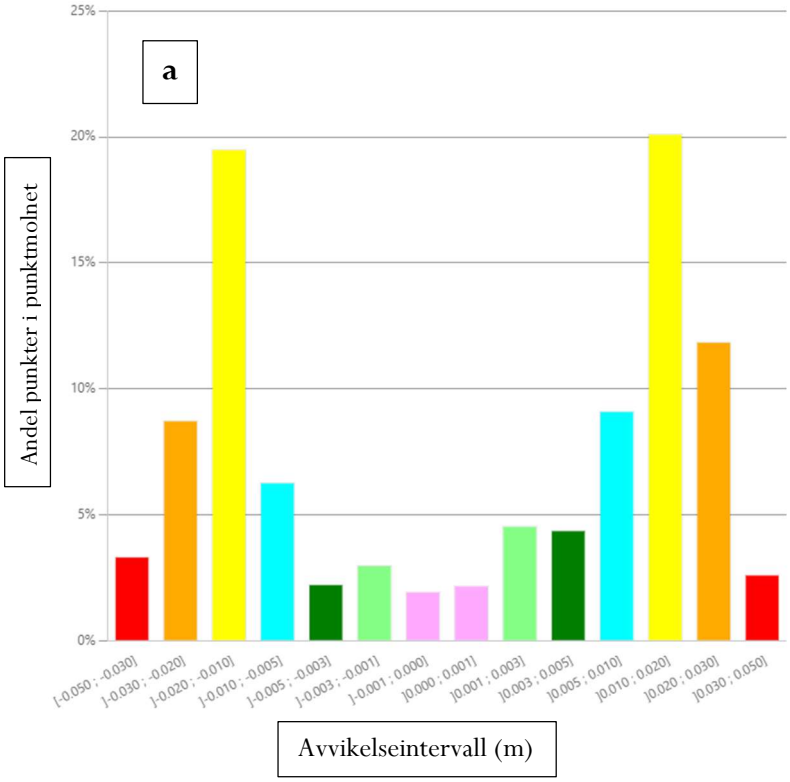
Efter databearbetningen analyserades spridningen kring referensvärdena (från Leica RTC360) för punktmolnen från respektive SLAM-skanner, med beräkningar av RMS i Excel. I statistikrapporterna från punktmolnsjämförelserna förekom medel- och standardosäkerhet, medan information om RMS saknades. För att beräkna RMS valdes slumpmässiga punkter ut i punktmolnet och fördelningen av antalet punkter i respektive definierat avvikelseintervall (se tabell 2, samt figur 19 och 20) beräknades med formel 1. Detta för att ge en rättvis representation av fördelningen av avvikelser i punktmolnen från punktmolnsjämförelserna. Vid tillämpning av formel 1 förutsätts att 50 punkter extraheras och används för vidare analys. För att n ska vara ett heltal avrundas det resulterande värdet uppåt till nästkommande heltal, vilket leder till att det slutgiltiga antalet punkter blir något högre än 50.

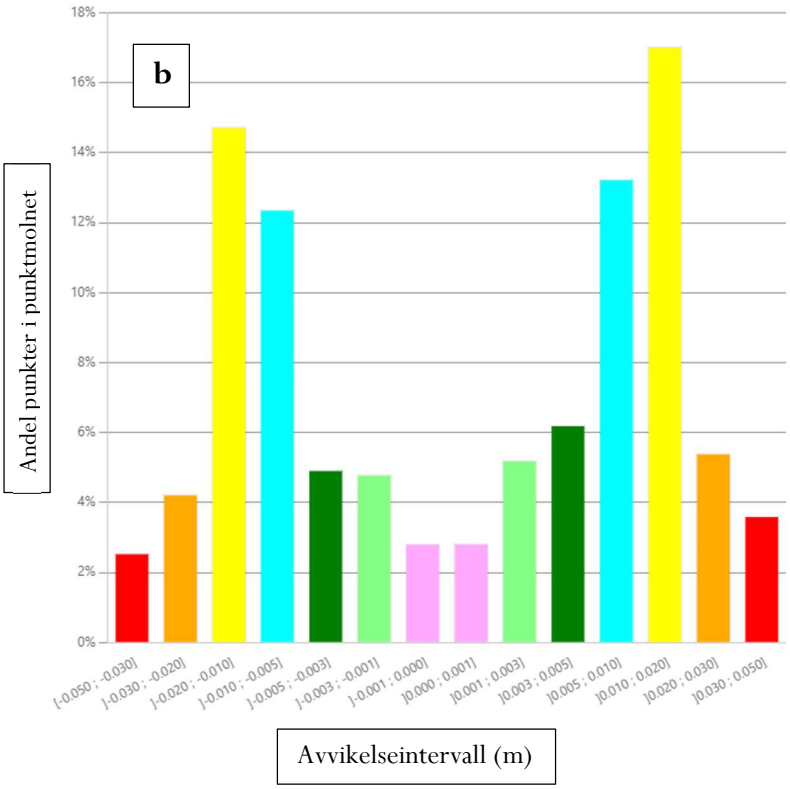
$$n = 50 \times \frac{x_t}{100}, \tag{1}$$

där n är antalet punkter som representerar avvikelseintervallet, x är andelen punkter i procent som är inom avvikelseintervallet, och t är avvikelseintervallet i fråga.



Figur 19. Histogram som visar fördelningen av punkter i respektive avvikelseintervall i procent, från punktmolnsjämförelsen mellan NavVis VLX3 (ansluten med a: alla utgångspunkter, b: tre utgångspunkter) och Leica RTC360.





Figur 20. Histogram över fördelningen av punkter i respektive avvikelseintervall i procent, från punktmolnsjämförelsen mellan CHCNAV RS10 (ansluten med a: alla utgångspunkter, b: fyra utgångspunkter) och Leica RTC360.

Med resultatet av beräkningarna från formel 1 mättes punkter in i programmet Cyclone 3DR i respektive jämförelsepunktmoln. Mätningen resulterade i avvikelser i x-, y- och z-led, samt i 3D för respektive inmätt punkt. Tabeller sammanställdes i Excel (se bilaga B) och beräkning av RMS i samtliga led och 3D genomfördes i Excel enligt formel 2, 3, 4 och 5.

$$RMS_x = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^{n}(x_t - x_t^0)^2}{n}}, \tag{2}$$

där x_t är det inmätta värdet, x_t^0 är referensvärdet, *n* är antalet värden och *t* är ID-numret för kontrollpunkten i fråga (Zhao et al., 2024).

$$RMS_y = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^{n}(y_t - y_t^0)^2}{n}}, \tag{3}$$

där y_t är det inmätta värdet, y_t^0 är referensvärdet, *n* är antalet värden och *t* är ID-numret för kontrollpunkten i fråga.

$$RMS_z = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^{n}(z_t - z_t^0)^2}{n}}, \tag{4}$$

där z_t är det inmätta värdet, z_t^0 är referensvärdet, *n* är antalet värden och *t* är ID-numret för kontrollpunkten i fråga.

$$RMS_{3D} = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^{n}[(x_t - x_t^0)^2 + (y_t - y_t^0)^2 + (z_t - z_t^0)^2]}{n}}, \tag{5}$$

där *n* är antalet värden och *t* är ID-numret för kontrollpunkten i fråga.

Medelavvikelse och standardosäkerhet beräknades inte i Excel. Dessa parametrar redovisades direkt i statistikrapporterna som skapades i samband med att punktmolnsjämförelserna genomfördes i Leicas programvara Cyclone 3DR. I resultatdelen av denna studie redovisas kopior av dessa statistikrapporter (se avsnitt 4.3.1.1 och 4.3.2.1).

3.7.1 Visuell kontroll av fullständighet, geometriska noggrannhet och brus

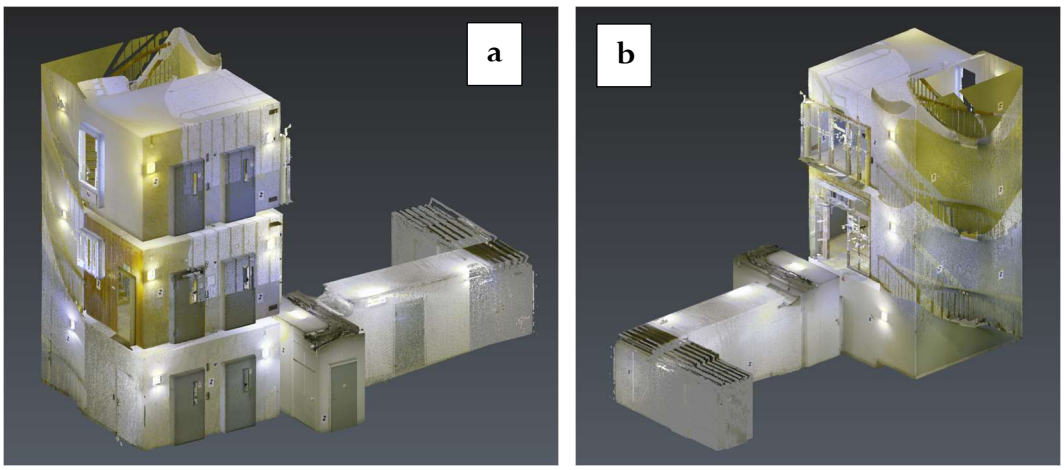
Efter att den kvantitativa statistiska analysen är slutförd påbörjades en kvalitativ visuell kontroll av samtliga punktmoln. I den visuella kontrollen kom punktmolnens fullständighet, geometriska noggrannhet och förekomsten av brus att granskas. Gällande fullständighet kontrollerades det om det fanns luckor närvarande, eller om data saknades i något av punktmolnen.

Angående punktmolnens geometriska noggrannhet granskades det hur precisa punktmolnen var på att representera objekt i verkligheten. Dessa objekt användes även för kontroll av brus i punktmolnen, där närvaron av slumpmässiga och systematiska avvikelser i punktmolnen översågs.

4 Resultat

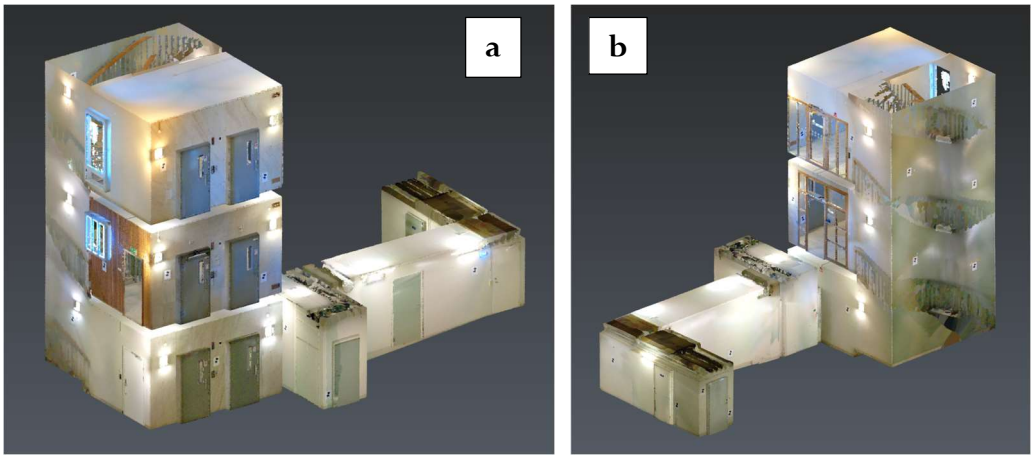
4.1 Punktmoln

I figur 21 visas referenspunktmolnet av det inskannade studieområdet, som samlades in med Leica RTC360.



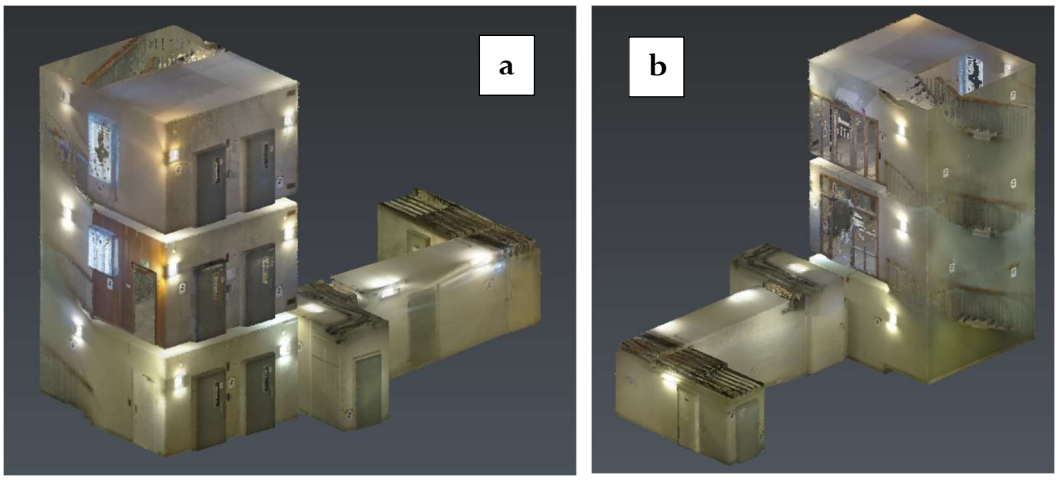
Figur 21. a och b visar referenspunktmolnet som samlades in med Leica RTC360.

Figur 22 visar punktmolnet som skannades in med NavVis VLX3.



Figur 22. a och b visar punktmolnet som samlades in med NavVis VLX3.

I figur 23 visas resultatet av det inskannade punktmolnet med CHCNAV RS10.



Figur 23. a och b visar punktmolnet som samlades in med CHCNAV RS10.

4.2 Anslutningskontroll av referenspunktmoln

Tabell 3 visar avvikelserna i x-, y- och z-led, samt i 3D mellan punktmolnet insamlat med Leica RTC360 och de inmätta referenskoordinaterna med Leica Nova MS60. Resultatet visar att avvikelser i x-led varierar mellan 0,0006 m och 0,0018 m. I y-led varierar avvikelserna mellan 0,0006 m och 0,0069 m. I z-led varierar avvikelserna mellan 0,0004 m och 0,0057 m. Slutligen varierar avvikelserna i 3D mellan 0,0026 m och 0,0090 m.

Tabell 1. Avvikelser i x-, y- och z-led samt i 3D mellan referenspunkterna, inmätta med multistationen Leica Nova MS60, och kontrollpunkterna, från punktmolnet insamlat med Leica RTC360.

ID	Δx (m)	Δy (m)	Δz (m)	$\Delta 3D$ (m)
T1	0,0010	0,0069	0,0057	0,0090
T8	0,0018	0,0036	0,0004	0,0040
T17	0,0006	0,0006	0,0026	0,0027
T20	0,0008	0,0009	0,0023	0,0026
T23	0,0015	0,0024	0,0032	0,0043
T26	0,0018	0,0020	0,0039	0,0047

Med hjälp av avvikelserna i tabell 3 beräknades därefter medelavvikelsen och RMS i respektive led och i 3D. Som tabell 4 visar ligger medelavvikelserna samt RMS av avvikelserna på millimeternivå i respektive led och i 3D, mellan 0,0013 m och 0,0050 m.

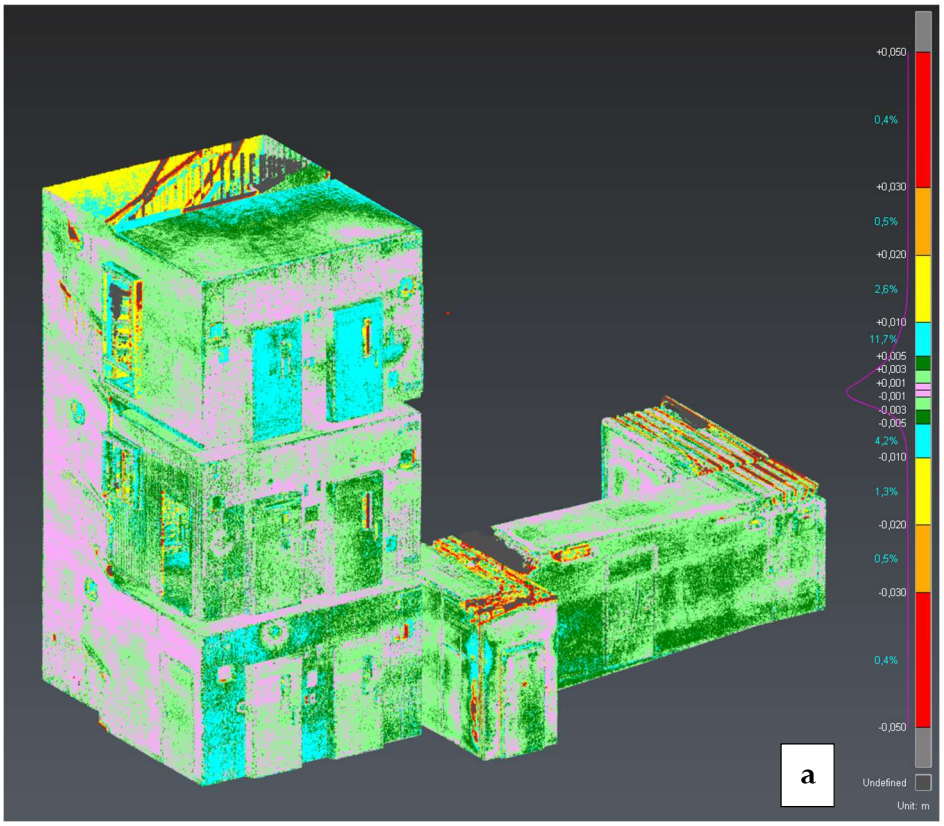
Tabell 2. Medelavvikelse och RMS i x-, y- och z-led samt i 3D mellan referenspunkterna, inmätta med multistationen Leica Nova MS60, och kontrollpunkterna, från punktmolnet insamlat med Leica RTC360.

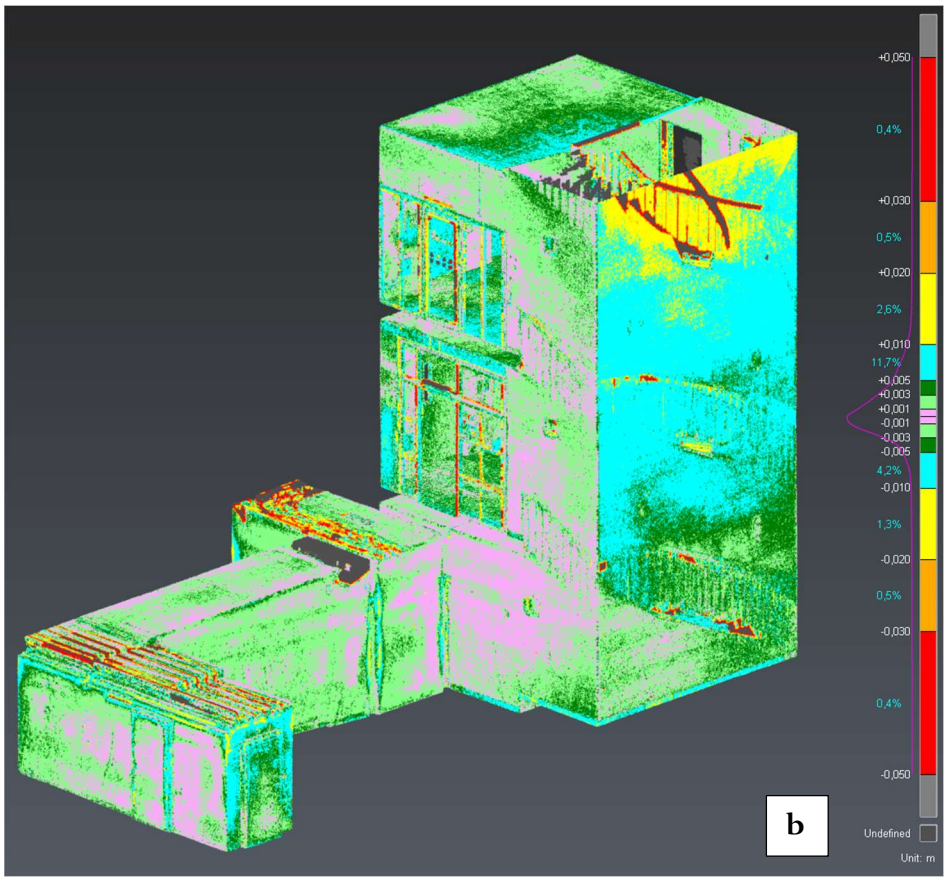
	Medelavvikelse (m)	RMS (m)
x	0,0013	0,0013
y	0,0027	0,0035
z	0,0030	0,0034
3D	0,0046	0,0050

4.3 Punktmolnsjämförelse och drift

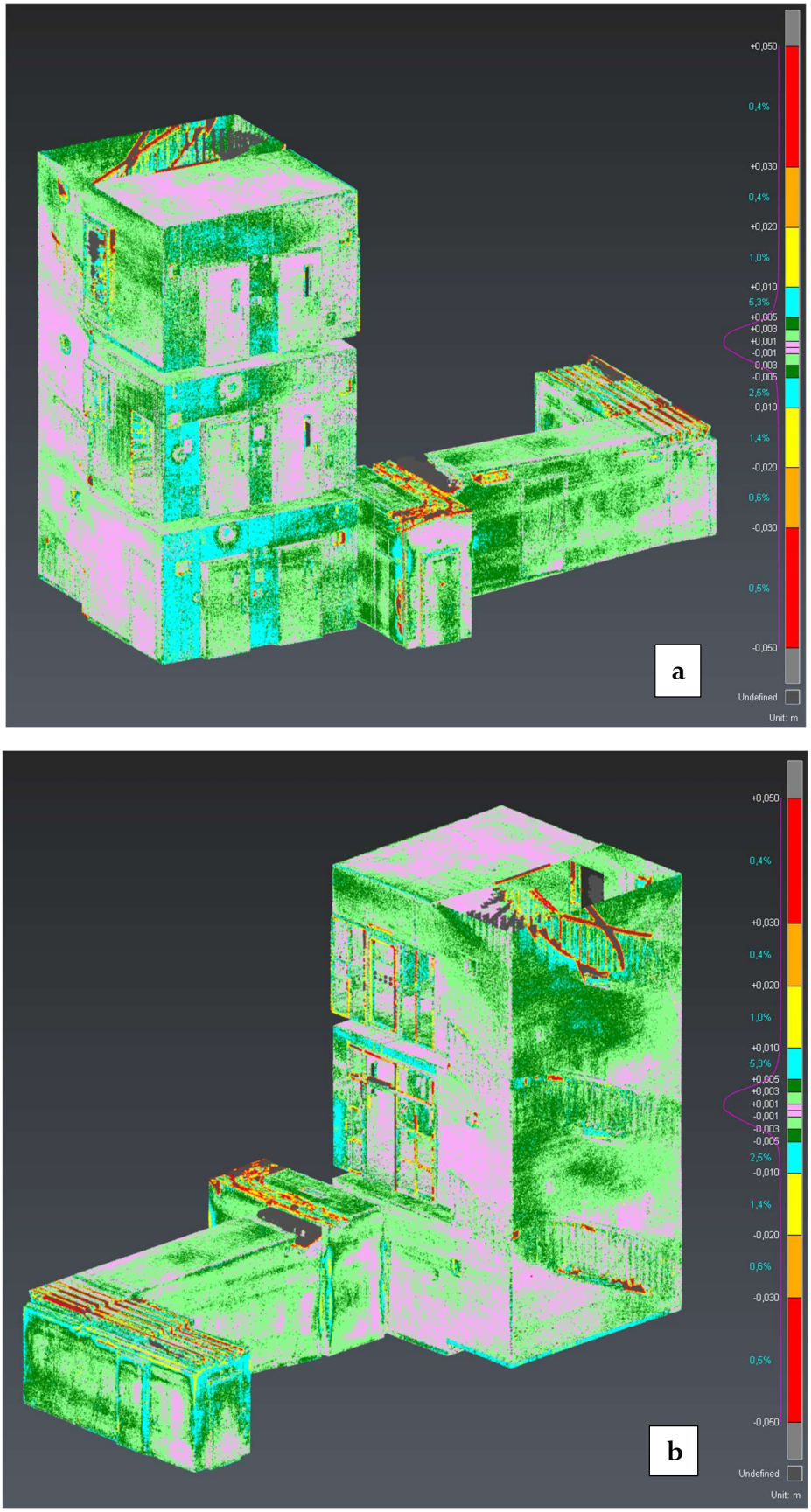
4.3.1 NavVis VLX3

Resultatet av punktmolnsjämförelsen mellan punktmolnet från NavVis VLX3 som anslutits med minsta antalet nödvändiga utgångspunkter (1, 5 och 8) och referenspunktmolnet från Leica RTC360 visas i figur 24. I figur 25 visas därefter resultatet från punktmolnsjämförelsen mellan punktmolnet från NavVis VLX3 som anslutits med alla inmätta utgångspunkter och referenspunktmolnet från Leica RTC360. Färgsättningen på punktmolnet beror på hur mycket respektive punkt i punktmolnen från NavVis VLX3 avviker från referenspunktmolnet, se teckenförklaringar till höger i bild eller tabell 1.





Figur 24. a och b visar resultat av punktmolnsjämförelsen mellan punktmolnet från NavVis VLX3 som anslutits med minsta antalet nödvändiga utgångspunkter och referenspunktmolnet från Leica RTC360, med färgade punkter beroende på dess avvikelse (se teckenförklaring till höger i bild).



Figur 25. a och b visar resultat av punktmolnsjämförelse mellan punktmolnet från NavVis VLX3 som anslutits med alla inmätta utgångspunkter och referenspunktmolnet från Leica rtc360, med färgade punkter beroende på dess avvikelse (se teckenförklaringen till höger i bild.

Genom att visuellt jämföra figur 24 a och 25 a går det att se hur fördelningen av avvikelser skiljs åt mellan de båda anslutningsförfarandena. I figur 25 a (som anslutits med samtliga 15 utgångspunkter) ses en jämnare fördelning av avvikelsernas storlek, i jämförelse med figur 24 a (som anslutits med minsta antalet nödvändiga utgångspunkter).

Storleken på avvikelserna visar en ökande trend i figur 25 a (som anslutits med minsta antalet nödvändiga utgångspunkter), med mindre avvikelser i närhet till utgångspunkterna (till höger i bild) och generellt större avvikelser desto längre ifrån dessa en kommer (till vänster i bild). Detta påvisar förekomsten av ett ackumulerat fel (drift) i punktmolnen, som ökar med avståndet från utgångspunkterna som tillämpats i anslutningen.

4.3.1.1 Medelavvikelse och standardosäkerhet

I samband med punktmolnsjämförelsen mellan referenspunktmolnet och de båda punktmolnen från NavVis VLX3 genererades statistikrapporter i Cyclone 3DR, se tabell 5. I tabellerna redovisas hur många punkter som ingått i beräkningarna, medelavvikelse och standardosäkerhet, maximum- och minimumavvikelse, samt avvikelser vid samtliga kvartiler. Resultaten i tabellerna som är av störst intresse är medelavvikelserna och standardosäkerheterna, på grund av dess korrelation till studiens frågeställningar. För punktmolnet från NavVis VLX3 som anslutits med minsta antalet nödvändiga utgångspunkter är medelavvikelsen 0,0008 m och standardosäkerheten är 0,0061 m. Medelavvikelsen för punktmolnet som anslutits med alla utgångspunkter är 0,0006 m och standardosäkerheten 0,0056 m.

Tabell 3. Tabell ur statistikrapport från Cyclone 3DR innehållande bland annat medelavvikelse och standardosäkerhet från punktmolnsjämförelserna mellan punktmolnen från NavVis VLX3 och referenspunktmolnet från Leica RTC360.

	3 utgångspunkter	**15 utgångspunkter**
Antalet punkter	18 706 271	18 734 005
Medelavvikelse	0,0008 m	0,0006 m
Standardosäkerhet	0,0061 m	0,0056 m
Definierad gräns för minimumavvikelse	-0,05 m	-0,05 m
Första kvartil	-0,0016 m	-0,0012 m
Andra kvartil (median)	0,0003 m	0,0007 m
Tredje kvartil	0,0030 m	0,0025 m
Definierad gräns för maximumavvikelse	0,05 m	0,05 m

4.3.1.2 RMS

I tabell 6 och 7 visas resultaten av beräkningen (i enlighet med formel 1 i avsnitt 3.7) av antalet punkter (n) som ska representera respektive avvikelseintervall vid beräkning av RMS.

Tabell 6. Resultat av beräkning av antalet punkter (n) som ska representera respektive avvikelseintervall vid beräkning av RMS för skillnaden mellan punktmolnet från NavVis VLX3 som anslutits med minsta antalet nödvändiga utgångspunkter och referenspunktmolnet från Leica RTC360.

Avvikelseintervall (m)	Andel (%)		Antal punkter (decimaltal)		Antal punkter (n)
-0,050 – -0,030; 0,030 – 0,050	0,88	=	0,44	≈	1
-0,030 – -0,020; 0,020 – 0,030	0,99	=	0,495	≈	1
-0,020 – -0,010; 0,010 – 0,020	3,89	=	1,945	≈	2
-0,010 – -0,005; 0,005 – 0,010	15,87	=	7,935	≈	8
-0,005 – -0,003; 0,003 – 0,005	16,62	=	8,31	≈	9
-0,003 – -0,001; 0,001 – 0,003	36,74	=	18,37	≈	19
-0,001 – -0,000; 0,000 – 0,001	25,09	=	12,545	≈	13
∑	100		50,04		53

Tabell 7. Resultat av beräkning av antalet punkter (n) som ska representera respektive avvikelseintervall vid beräkning av RMS för skillnaden mellan punktmolnet från NavVis VLX3 med alla utgångspunkter och referenspunktmolnet från Leica RTC360.

Avvikelseintervall (m)	Andel (%)		Antal punkter (decimal)		Antal punkter (n)
-0,050 – -0,030; 0,030 – 0,050	0,88	=	0,44	≈	1
-0,030 – -0,020; 0,020 – 0,030	0,96	=	0,48	≈	1
-0,020 – -0,010; 0,010 – 0,020	2,41	=	1,205	≈	2
-0,010 – -0,005; 0,005 – 0,010	7,77	=	3,885	≈	4
-0,005 – -0,003; 0,003 – 0,005	17,49	=	8,745	≈	9
-0,003 – -0,001; 0,001 – 0,003	43,57	=	21,785	≈	22
-0,001 – -0,000; 0,000 – 0,001	27	=	13,5	≈	14
∑	100		50,04		53

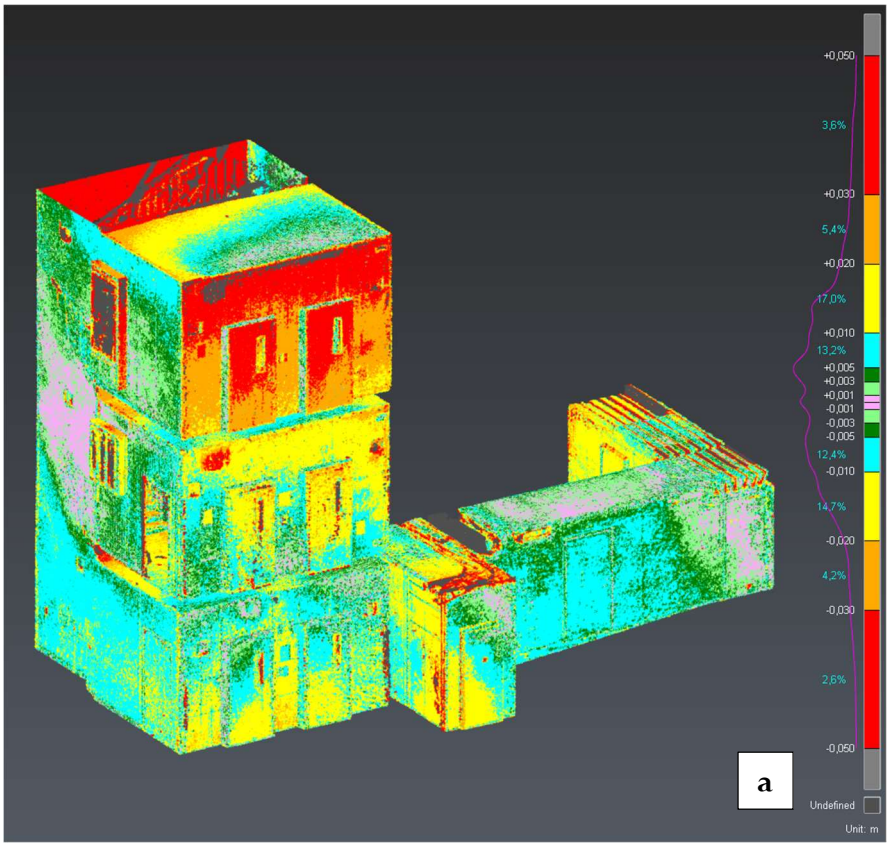
I tabell 8 redovisas resultaten från beräkningar av RMS i x-, y-, och z-led samt i 3D, för skillnaden mellan referenspunktmolnet och de båda punktmolnen från NavVis VLX3. För punktmolnet som anslutits med minsta antalet nödvändiga utgångspunkter (3) beräknades RMS i 3D till 0,0070 m och för punktmolnet anslutet med alla utgångspunkter (15) beräknades det till 0,0064 m.

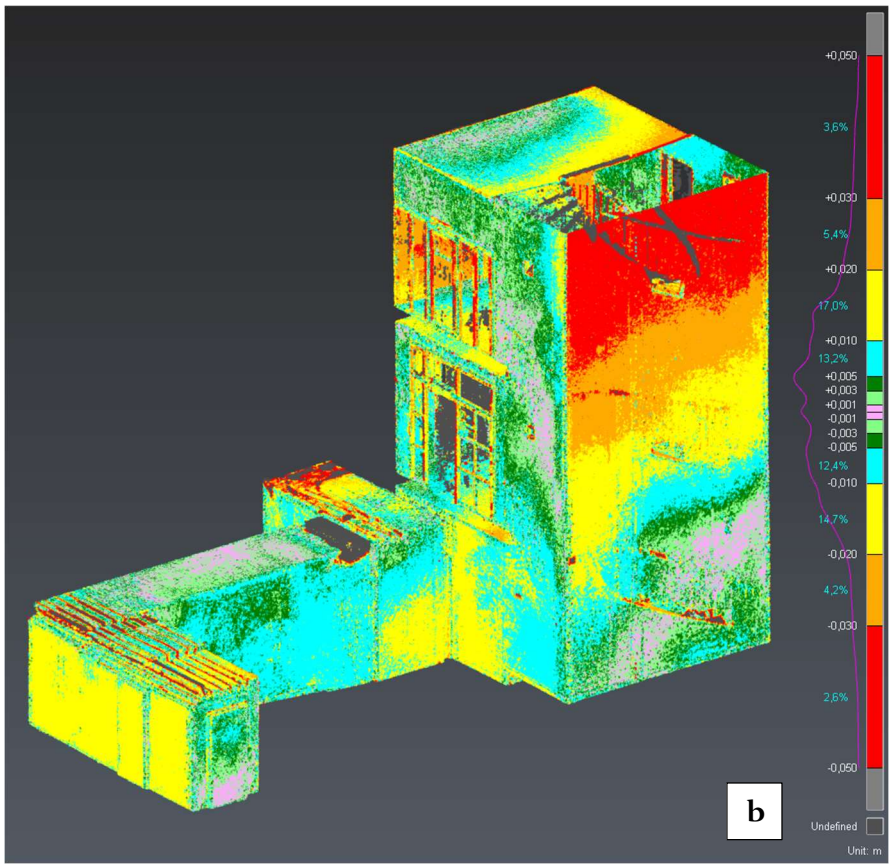
Tabell 8. Resultat av RMS i x-, y-, och z-led samt i 3D för skillnaden mellan punktmolnen från NavVis VLX3 och referenspunktmolnet från Leica RTC360.

	3 utgångspunkter (m)	15 utgångspunkter (m)
x	0,0029	0,0046
y	0,0063	0,0042
z	0,0014	0,0014
3D	0,0070	0,0064

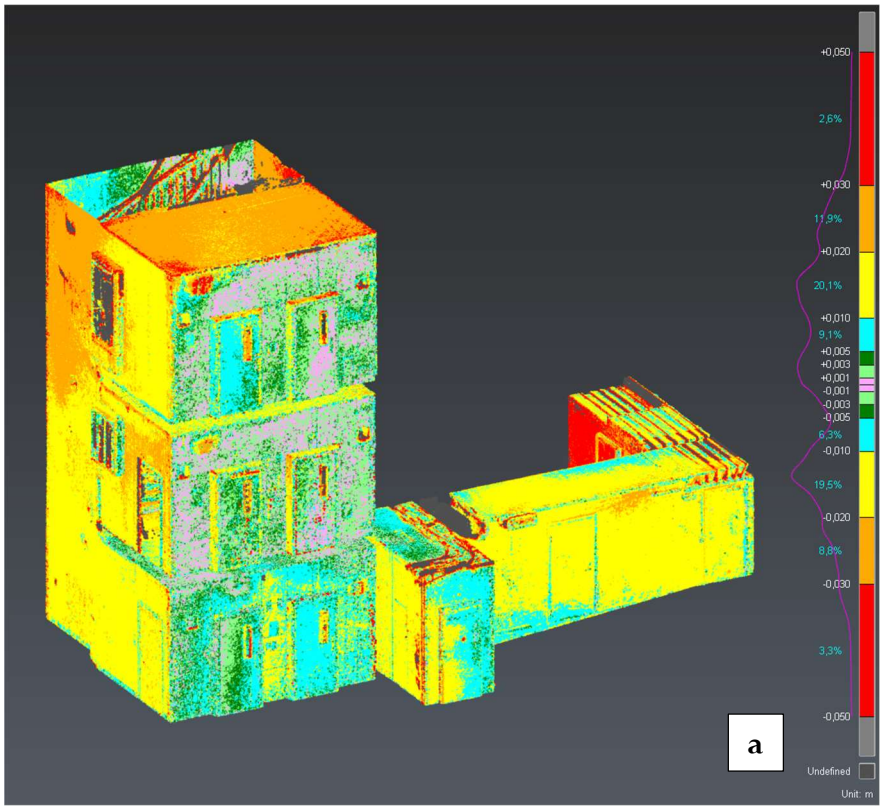
4.3.2 CHCNAV RS10

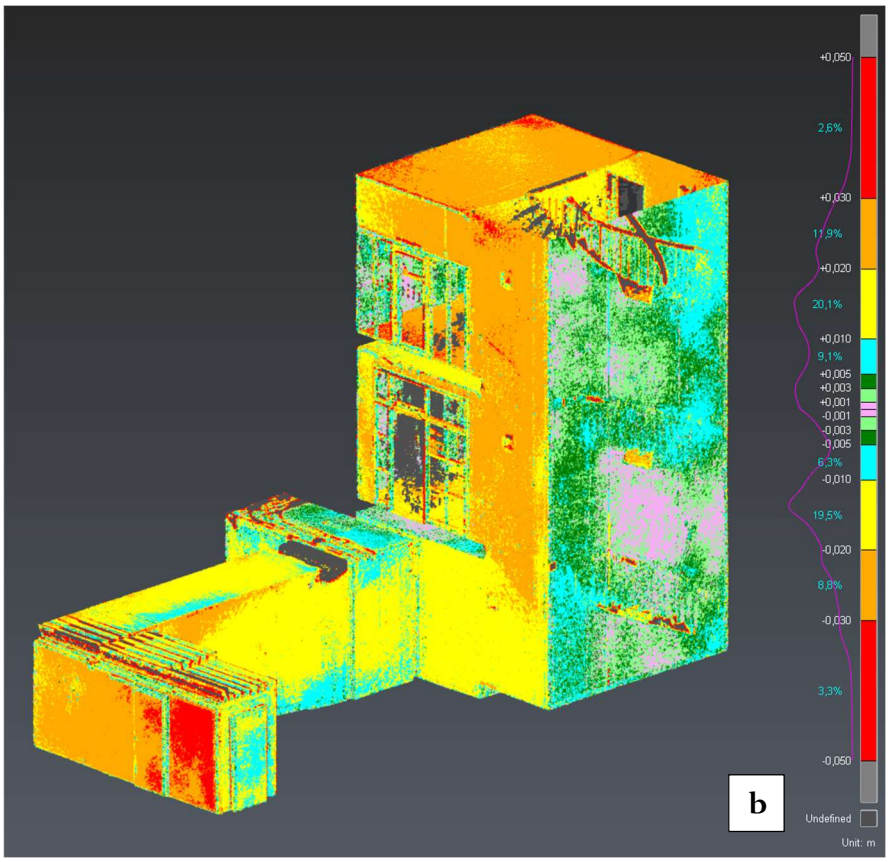
Resultatet av punktmolnsjämförelsen mellan punktmolnet från CHCNAV RS10 som anslutits med minsta antalet nödvändiga utgångspunkter (1, 5, 8 och 13) och referenspunktmolnet från Leica RTC360 visas i figur 26. I figur 27 visas därefter resultatet från punktmolnsjämförelsen mellan punktmolnet från CHCNAV RS10 som anslutits med alla inmätta utgångspunkter och referenspunktmolnet från Leica RTC360. Färgsättningen på punktmolnet beror på hur mycket respektive punkt i punktmolnen från CHCNAV RS10 avviker från referenspunktmolnet, se teckenförklaringar till höger i bild eller tabell 1.





Figur 26. a och b visar resultat av punktmolnsjämförelsen mellan punktmolnet från CHCNAV RS10 som anslutits med minsta antalet nödvändiga utgångspunkter och referenspunktmolnet från Leica RTC360, med färgade punkter beroende på dess avvikelse (se teckenförklaringen till höger i bild).





Figur 27. a och b visar resultat av punktmolnsjämförelse mellan punktmolnet från CHCNAV RS10 som anslutits med alla inmätta utgångspunkter och referenspunktmolnet från Leica RTC360, med färgade punkter beroende på dess avvikelse (se teckenförklaringen till höger i bild).

Genom att visuellt jämföra figur 26 a och 27 a går det att se hur fördelningen av avvikelser skiljs åt mellan de båda anslutningsförfarandena. I figur 27 a (som anslutits med samtliga 15 utgångspunkter) ses en jämnare fördelning av avvikelsernas storlek, i jämförelse med figur 26 a (som anslutits med minsta antalet nödvändiga utgångspunkter).

Storleken på avvikelserna visar en ökande trend i figur 27 a (som anslutits med minsta antalet nödvändiga utgångspunkter), med mindre avvikelser i närhet till utgångspunkterna (till höger i bild) och generellt större avvikelser desto längre ifrån dessa en kommer (till vänster i bild). Detta påvisar förekomsten av ett ackumulerat fel (drift) i punktmolnen, som ökar med avståndet från utgångspunkterna som tillämpats i anslutningen.

4.3.2.1 Medelavvikelse och standardosäkerhet

I samband med punktmolnsjämförelsen mellan referenspunktmolnet och de båda punktmolnen från CHCNAV RS10 genererades statistikrapporter i Cyclone 3DR, se tabell 9. I tabellerna redovisas hur många punkter som ingått i beräkningarna, medelavvikelse och standardosäkerhet, maximum- och minimumavvikelse, samt avvikelser vid samtliga kvartiler. Resultaten i tabellerna som är av störst intresse är medelavvikelserna och standardosäkerheterna, på grund av dess korrelation till studiens frågeställningar. För punktmolnet från CHCNAV RS10 som anslutits med minsta antalet nödvändiga utgångspunkter är medelavvikelsen 0,0011 m och standardosäkerheten är 0,0149 m. Medelavvikelsen för punktmolnet som anslutits med alla utgångspunkter är 0,0010 m och standardosäkerheten 0,0172 m.

Tabell 9. Tabell ur statistikrapport från Cyclone 3DR innehållande bland annat medelavvikelse och standardosäkerhet från punktmolnsjämförelserna mellan punktmolnen från CHCNAV RS10 och referenspunktmolnet från Leica RTC360.

	4 utgångspunkter	**15 utgångspunkter**
Antalet punkter	3 951 329	3 995 028
Medelavvikelse	0,0011m	0,0010m
Standardosäkerhet	0,0149m	0,0172m
Definierad gräns för minimumavvikelse	-0,05 m	-0,05 m
Första kvartil	-0,0085m	-0,0131m
Andra kvartil (median)	0,0013m	0,0022m
Tredje kvartil	0,0105m	0,0145m
Definierad gräns för maximumavvikelse	0,05 m	0,05 m

4.3.2.2 RMS

I tabell 10 och 11 visas resultaten av beräkningen (i enlighet med formel 1 i avsnitt 3.7) av antalet punkter (n) som ska representera respektive avvikelseintervall vid beräkning av RMS.

Tabell 10. Resultat av beräkning av antalet punkter (n) som ska representera respektive avvikelseintervall vid beräkning av RMS för skillnaden mellan punktmolnet från CHCNAV RS10 som anslutits med minsta antalet nödvändiga utgångspunkter och referenspunktmolnet från Leica RTC360.

Avvikelseintervall (m)	Andel (%)		Antal punkter (decimal)		Antal punkter (n)
-0,050 – -0,030; 0,030 – 0,050	6,18	=	3,09	≈	4
-0,030 – -0,020; 0,020 – 0,030	9,65	=	4,825	≈	5
-0,020 – -0,010; 0,010 – 0,020	31,78	=	15,89	≈	16
-0,010 – -0,005; 0,005 – 0,010	25,63	=	12,815	≈	13
-0,005 – -0,003; 0,003 – 0,005	11,16	=	5,58	≈	6
-0,003 – -0,001; 0,001 – 0,003	10,01	=	5,005	≈	6
-0,001 – -0,000; 0,000 – 0,001	5,67	=	2,835	≈	3
∑	100		50,04		53

Tabell 11. Resultat av beräkning av antalet punkter (n) som ska representera respektive avvikelseintervall vid beräkning av RMS för skillnaden mellan punktmolnet från CHCNAV RS10 som anslutits med alla utgångspunkter och referenspunktmolnet från Leica RTC360.

Avvikelseintervall (m)	Andel (%)		Antal punkter (decimal)		Antal punkter (n)
-0,050 – -0,030; 0,030 – 0,050	5,99	=	2,995	≈	3
-0,030 – -0,020; 0,020 – 0,030	20,64	=	10,32	≈	11
-0,020 – -0,010; 0,010 – 0,020	39,65	=	19,825	≈	20
-0,010 – -0,005; 0,005 – 0,010	15,42	=	7,71	≈	8
-0,005 – -0,003; 0,003 – 0,005	6,65	=	3,325	≈	4
-0,003 – -0,001; 0,001 – 0,003	7,57	=	3,785	≈	4
-0,001 – -0,000; 0,000 – 0,001	4,16	=	2,08	≈	3
∑	100		50,04		53

I tabell 12 redovisas resultaten från beräkningar av RMS i x-, y-, och z-led samt i 3D, för skillnaden mellan referenspunktmolnet och de båda punktmolnen från CHCNAV RS10. För punktmolnet som anslutits med minsta antalet nödvändiga utgångspunkter beräknades RMS i 3D till 0,0145 m och för punktmolnet anslutet med alla utgångspunkter beräknades det till 0,0162 m.

Tabell 12. Resultat av RMS i x-, y-, och z-led samt i 3D för skillnaden mellan punktmolnen från CHCNAV RS10 och referenspunktmolnet från Leica RTC360.

	4 utgångspunkter (m)	**15 utgångspunkter (m)**
x	0,0077	0,0109
y	0,0101	0,0086
z	0,0070	0,0082
3D	0,0145	0,0162

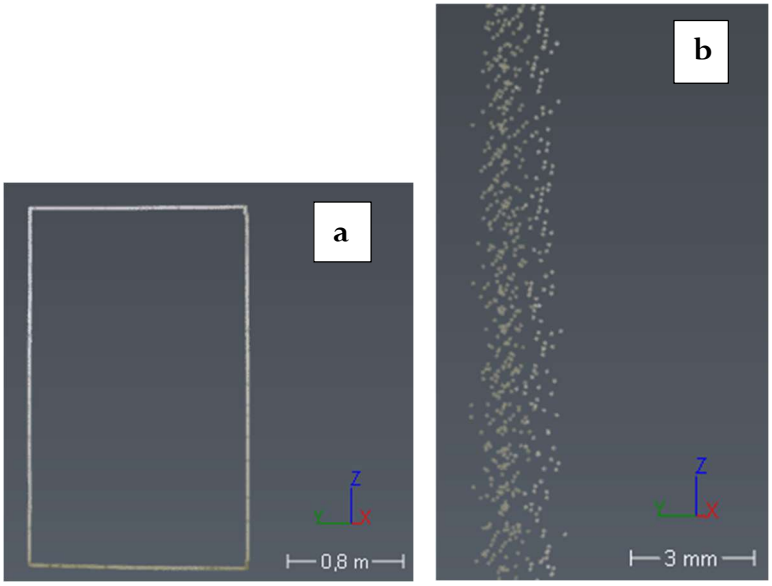
	4 utgångspunkter (m)	**15 utgångspunkter (m)**
$\mathbf{RMS_x}$	0,0077	0,0109
$\mathbf{RMS_y}$	0,0101	0,0086
$\mathbf{RMS_z}$	0,0070	0,0082
$\mathbf{RMS_{3D}}$	0,0145	0,0162

4.4 Ytterligare kvalitetsparametrar: Fullständighet, geometrisk noggrannhet och brus

4.4.1 Leica RTC360

Punktmolnet som skannades in med Leica RTC360 håller hög standard när det kommer till punktmolnets fullständighet. Luckor i punktmolnet är endast närvarande där det inte var möjligt för skannern att ”se”, exempelvis undersidan av trappan på nedersta våningen.

Angående geometrisk noggrannhet och förekomsten av brus i punktmolnet håller även det en hög standard. Med hög punkttäthet och minimalt med brus uppfattas ytor i punktmolnet som uniforma och enhetliga. Hörn och kanter i punktmolnet urskiljs dessutom som skarpa och väl i överensstämmelse med verkligheten.
I figur 28 uppvisas ett tvärsnitt av en korridor från punktmolnet som skannades in med Leica RTC360. I figur 28 b ges en indikation av förekomsten av brus vid skanning mot en plan yta. Med stöd av skalstocken kan väggens tjocklek uppskattas till ungefär 3 mm, vilket dessutom ger en indikation till vad som kan förväntas avseende brus vid skanning med Leica RTC360.

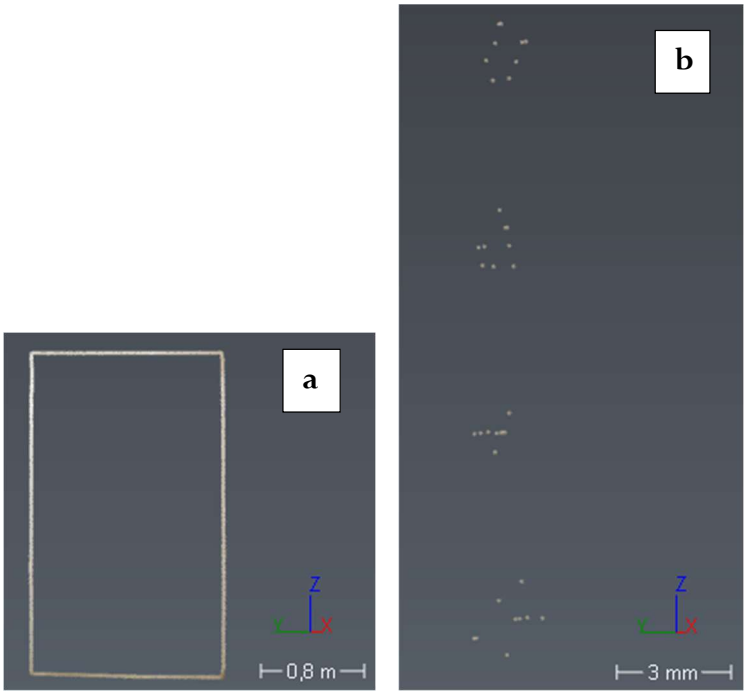


Figur 28. Tvärsnitt av en korridor i punktmolnet från Leica RTC360. a visar hela tvärsnittet och b visar in-zoomad del av vägg i korridoren.

4.4.2 NavVis VLX3

Punktmolnet som skannades in med NavVis VLX3 håller relativt hög standard när det kommer till punktmolnets fullständighet. Luckor i punktmolnet är sällsynta och är främst närvarande där det inte var möjligt för skannern att ”se”.

Angående geometrisk noggrannhet och förekomsten av brus i punktmolnet håller även det en hög standard. Punktmolnet har så pass hög punkttäthet att ytor fortfarande uppfattas som uniforma och enhetliga, främst på grund av den begränsade förekomsten av brus. Hörn och kanter i punktmolnet urskiljs dessutom som skarpa och i överensstämmelse med verkligheten. I figur 29 uppvisas ett tvärsnitt av en korridor från punktmolnet som skannades in med NavVis VLX3. I figur 29 b ges en indikation av förekomsten av brus vid skanning mot en plan yta. Med stöd av skalstocken kan väggens tjocklek uppskattas till ungefär 3 mm, vilket dessutom ger en indikation till vad som kan förväntas avseende brus vid skanning med NavVis VLX3.

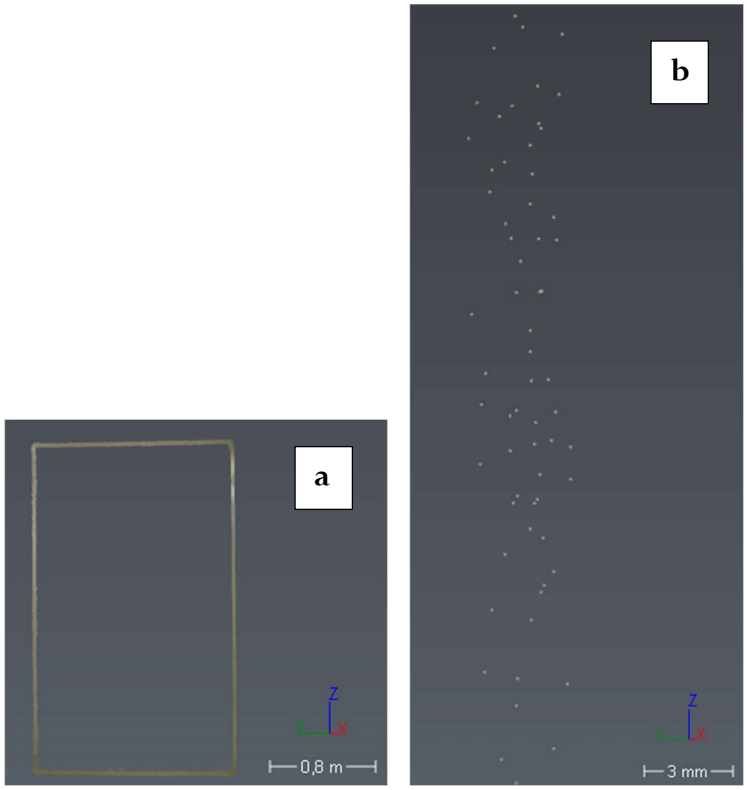


Figur 29. Tvärsnitt av en korridor i punktmolnet från NavVis VLX3. a visar hela tvärsnittet och b visar in-zoomad del av vägg i korridoren.

4.4.3 CHCNAV RS10

Punktmolnet som skannades in med CHCNAV RS10 håller en bra standard när det kommer till punktmolnets fullständighet. Luckor i punktmolnet är sällsynta och är främst närvarande där det inte var möjligt för skannern att ”se”.

Angående geometrisk noggrannhet och förekomsten av brus i punktmolnet håller det en godtycklig standard. Punktmolnet har så pass hög punkttäthet att ytor fortfarande uppfattas som uniforma och enhetliga, främst på grund av den begränsade förekomsten av brus. Hörn och kanter i punktmolnet urskiljs som relativt skarpa och väl i överensstämmelse med verkligheten. I figur 30 visas ett tvärsnitt av en korridor från punktmolnet som skannades in med CHCNAV RS10. I figur 30 b ges en indikation av förekomsten av brus vid skanning mot en plan yta. Med stöd av skalstocken kan väggens tjocklek uppskattas till strax över 3 mm, vilket dessutom ger en indikation till vad som kan förväntas avseende brus vid skanning med CHCNAV RS10.



Figur 30. Tvärsnitt av en korridor i punktmolnet från CHCNAV RS10. a visar hela tvärsnittet och b visar in-zoomad del av vägg i korridoren.

5 Diskussion

5.1 Metod

5.1.1 Planering

Vid planering av metodval diskuterades utförandet av metoden främst utifrån hur studieområdet var utformat. Innan alla mätningar genomfördes med skannrarna undersöktes studieområdet utifrån hur det var tänkt att skannrarna skulle stå eller röra sig. Studieområdet består av smala korridorer och korta avstånd utifrån vad som generellt rekommenderas vid laserskanning. Valet av detta studieområde var också för att utsätta skannrarna för utmaningar som just trånga utrymmen, homogena ytor och förflyttning i höjdled i form av trappor.

Planering av stationsuppställningar med Leica RTC gjordes för att försäkra att så många måltavlor som möjligt kunde ses från respektive uppställning. Ett beslut togs att använda ytterligare flyttbara måltavlor under insamlingen av data med Leica RTC360. Anledningen till det var för att säkra registreringen av punktmolnet så att åtminstone 4 måltavlor finns med i övertäckningszonen (HMK – Terrester laserskanning, 2021), men även för att stärka registreringen genom att skapa överbestämningar.

Den slinga som de personburna skannrarna rörde sig i planerades således att slingan avsågs att gå längs mitten av studieområdets ytor. Anledningen till det var för att hålla störst och jämnast möjliga avstånd mellan skannrarna och omgivningen under datainsamlingen.

5.1.2 Genomförande

5.1.2.1 Anslutning

Anledningen till att två anslutningar gjordes för respektive SLAM-skanner, en med minsta möjliga antalet utgångspunkter och en med alla inmätta utgångspunkter, var för att kunna studera driften i punktmolnen. I verkligheten är målet att motverka drift så mycket som möjligt, vilket kan göras genom att ansluta punktmolnet med ett högre antal utgångspunkter. För att kunna studera hur avvikelserna skiljer sig åt mellan dessa förfaranden genomfördes en anslutning med endast de tre första utgångspunkterna (1, 5 och 8) för NavVis VLX3 och de fyra första utgångspunkterna (1, 5, 8 och 13) för CHCNAV RS10. Vid det andra utförandet anslöts punktmolnet istället med alla inmätta utgångspunkter.

5.1.2.2 Jämförelse av anslutningsförfaranden med NavVis VLX3

Resultaten av punktmolnsjämförelserna med de båda anslutningsförfarandena med NavVis VLX3 (figur 24 och 25) går att visuellt jämföra med varandra för att kunna studera hur punktmolnens kvalitet skiljs åt. Den tolkning som gjordes utifrån resultaten är att det blir en generell förbättring över hela det inskannade området när anslutningen genomförs med alla utgångspunkter gentemot minsta antalet nödvändiga utgångspunkter. Anslutningen med alla utgångspunkter resulterade i en större andel punkter med en avvikelse ± 0,003 m, i jämförelse med det andra förfarandet. I tabell 6 och tabell 7 går det att se hur fördelningen av andelar skiljer sig åt procentuellt mellan de olika anslutningarna.

5.1.2.3 Jämförelse av anslutningsförfaranden med CHCNAV RS10

Resultaten från punktmolnsjämförelserna mellan de två anslutningsförfarandena, utförda med CHCNAV RS10 (se figur 26 och 27) möjliggör en kvalitativ analys av hur val av anslutningsmetod påverkar punktmolnets geometriska noggrannhet och rumsliga stabilitet. Resultaten av punktmolnsjämförelserna med CHCNAV RS10 visade att då anslutning med alla utgångspunkter nyttjades genererades ett högre RMS-värde i 3D, jämfört med anslutning baserad på det minsta antalet utgångspunkter.

För båda anslutningsförfarandena har en större andel punkter en avvikelse inom intervallet -0,010 till -0,020 och 0,010 till 0,020 meter, i jämförelse med NavVis VLX3. Den procentuella fördelningen av andelar mellan respektive metod framgår i tabell 9 och 10. Det är dock viktigt att notera att anslutningen med minsta antalet utgångspunkter är anslutet med fyra och inte tre utgångspunkter. Hade anslutningen genomförts med tre utgångspunkter hade resultatet troligtvis följt mönstret som NavVis VLX3 påvisar. Alltså att det totalt sätt hade blivit bättre resultat vid användning av alla utgångspunkter vid anslutning, i jämförelse med minsta antalet utgångspunkter.

5.1.2.4 Tillämpning av anslutningsförfaranden

Resultaten mellan de båda anslutningsförfarandena har ingen markant skillnad i varken medelavvikelse, standardosäkerhet eller RMS. De något lägre värdena som resultatet för anslutning med alla utgångspunkter visar för NavVis VLX3, tyder på att punktmolnet i sin helhet får något bättre kvalitet vid det förfarandet gentemot minsta antalet nödvändiga utgångspunkter. Resultaten visade dessutom att avvikelserna fördelades mer jämnt över hela området vid anslutning med alla utgångspunkter, medan avvikelserna vid anslutning med minsta antalet nödvändiga utgångspunkter uppvisade en stegrande trend, med mindre avvikelser vid de utgångspunkter som tillämpades vid anslutningen och större avvikelser längre bort i punktmolnet.

I skarpt läge skulle vi därför rekommendera att genomföra anslutningar av punktmoln med samtliga inmätta utgångspunkter. Det resulterande punktmolnet får då en jämnare fördelning av avvikelser, på grund av att det förfarandet reducerar driftens och övriga felkällors påverkan på resultatet. Genom att begränsa felkällors inverkan kommer det slutgiltiga punktmolnet avbilda en mer verklighetstrogen bild av det inskannade området, samt att avvikelserna i punktmolnet blir mer homogena.

5.1.2.5 Kontroll av anslutning

Gällande anslutningskontroll finns det en tabell i HMK - Terrester laserskanning (2021) i bilaga C.2, som kan användas för att kontrollera kvaliteten på ett punktmolns anslutning. Vid tillämpning av denna tabell kontrolleras skillnader mellan kontrollpunkters positioner i punktmolnet med dess respektive inmätta koordinater, för att därefter beräkna bland annat RMS och standardosäkerhet vilket i sin tur jämförs mot beräknade toleranser. Denna tabell används dock framför allt i sammanhang där det är ett stort studieområde med ett stort antal kontrollpunkter (i HMK:s exempel 16 punkter). I denna studie användes sex kontrollpunkter och enligt HMK - Terrester lasersanning krävs det då endast en kontroll av grova fel, men det beslutades ändå i denna studie att beräkna RMS och medelavvikelse i syfte att uppskatta referenspunktmolnets kvalitet. Dessutom finns det inget utomstående krav på lägesosäkerhet och därmed ingen standardnivå att förhållas till. Tabellen i fråga kom därmed inte att användas i denna studie.

5.2 Resultat

5.2.1 Medelavvikelse, standardosäkerhet och RMS

Det vanligaste anslutningsförfarandet som används är när samtliga utgångspunkter nyttjas. Därav är det av störst intresse att jämföra dessa resultat för att hjälpa beslutstagande gällande vilket instrument som ska användas vid framtida projekt, där krav på kvalitet är avgörande.

Gällande punktmolnsjämförelsen mellan NavVis VLX3 (anslutet med samtliga utgångspunkter) och referenspunktmolnet beräknades medelavvikelsen till 0,0006 m, till skillnad från punktmolnsjämförelsen med CHCNAV RS10 (anslutet med samtliga utgångspunkter) där medelavvikelsen beräknades till 0,0010 m. Skillnaden mellan dessa medelavvikelser (0,0004 m) visar att punktmolnens kvalitet endast har en obetydlig skillnad i detta avseende, med tanke på instrumentens specifikationer som indikerar en högre lägesosäkerhet.

Vid jämförelsen av punktmoln mellan NavVis VLX3 (anslutet till samtliga utgångspunkter) och referenspunktmolnet, beräknades standardosäkerheten till 0,0056 m. Vid jämförelse med CHCNAV RS10 (även det anslutet till samtliga utgångspunkter) beräknades standardosäkerheten till 0,0172 m. Den observerade skillnaden i standardosäkerhet, 0,0116 m, tyder på att NavVis VLX3 uppvisar en markant högre noggrannhet i detta avseende.

Efter genomförd punktmolnsjämförelse mellan NavVis VLX3 (där samtliga utgångspunkter användes vid anslutningen) och referenspunktmolnet, beräknades RMS-värdet för 3D-avvikelser till 0,0064 m. Motsvarande jämförelse för CHCNAV RS10, även det anslutet till samtliga utgångspunkter, resulterade i ett RMS-värde på 0,0162 m. Den observerade skillnaden mellan dessa RMS-värden, 0,0098 m, indikerar att NavVis VLX3 uppvisar en avsevärt högre noggrannhet i detta sammanhang.

Punktmolnsjämförelsen visar att NavVis VLX3 generellt presterar bättre än CHCNAV RS10 när det gäller kvaliteten på det resulterande punktmolnet. Även om skillnaden i medelavvikelse är oväsentlig, uppvisar NavVis VLX3 tydligt bättre resultat i både standardosäkerhet och RMS-värde. Detta tyder på att NavVis VLX3 genererar mer precisa och verklighetstrogna punktmoln jämfört med CHCNAV RS10, när samtliga utgångspunkter tillämpats vid anslutning.

5.2.1.1 Jämförelse med tidigare studier

Som resultatet för NavVis VLX3 visar ligger avvikelserna i punktmolnen som anslutits med minsta antal och alla utgångspunkter i linje med resultatet från studien genomförd av Gharineiat et al. (2024). Den tidigare studien har fått ett resultat upp mot 5 mm i noggrannhet och i denna studie har vi fått ett resultat som ligger kring 6 mm i standardosäkerhet och RMS i 3D. Anslutningen med alla utgångspunkter ha något bättre värden i standardosäkerhet och RMS, medelavvikelse ligger dock under 1 mm hos de olika anslutningarna.

I studien som genomfördes av Ngoc Quang et al. (2024) visar resultatet att standardosäkerheten för CHCNAV RS10 ligger på ungefär 16 mm. Resultatet från den nutida studien indikerar också en standardosäkerhet runt 16 mm, för båda anslutningsförfarandena. Dock är det viktigt att belysa att resultatet från den tidigare studien bara avser standardosäkerheten för höjdskillnader, medan den nutida studien avser standardosäkerheten för avvikelser i 3D.

5.2.2 Ytterligare kvalitetsparametrar: Fullständighet, geometrisk noggrannhet och brus

Gällande fullständigheten i punktmolnen håller samtliga laserskannrar en bra standard. Det finns näst intill inga luckor i något av punktmolnen, vilket tyder på att samtliga skannrar registrerar alla för instrumenten synliga objekt i verkligheten, till det resulterande punktmolnet. Resultatet visar också att de enstaka luckor som är närvarande i de resulterande punktmolnen endast är belägna i områden där det var omöjligt för skannrarna att se. Att områden som undersidan av trappan på nedersta våningen skulle saknas i punktmolnen var efter de förväntningar som bildades innan skanningarna påbörjades.

När det kommer till geometrisk noggrannhet och förekomsten av brus i punktmolnen anses samtliga laserskannrar även här hålla en bra standard. Det går dock att särskilja dem i detta anseende och på så vis rangordna instrumenten. Den terrestra laserskannern Leica RTC360 bedöms ligga i framkant i jämförelse med de två SLAM-skannrarna. Dess punkttäthet och den låga förekomsten av brus ligger till grund för det ställningstagandet. Vid jämförelse av tvärsnitten i figur 28, 29 och 30 går det att urskilja hur tätt punkterna sitter i relation till varandra och uppskatta förekomst av brus i punktmolnen. Väggarna i punktmolnen från Leica RTC360 och NavVis VLX3 uppskattas vara ungefär 3 mm tjocka, medan CHCNAV RS10 bedöms vara något grövre (upp mot 4 eller 5 mm).

Utifrån resultaten kan skannrarna rangordnas således att Leica RTC360 är den skanner som genererar bäst kvalitet. Eftersom den inte ska jämföras mot någon annan skanner utan bara användas som referenspunktmoln kommer den inte att rangordnas i detta fall. Utifrån punktmolnens kvalitet rangordnas NavVis VLX3 före CHCNAV RS10 utifrån dess fullständighet, geometriska noggrannhet och brus.

5.3 Drift

En av de största felkällorna som uppkommer vid laserskanning med SLAM-skanner är drift. Driften är en felkälla som inte går att undgå, men det finns metoder att tillämpa för att minimera dess påverkan på data. Exempelvis kan multipasses användas, eller att flera utgångspunkter tillämpas vid anslutning. För att sedan göra en anslutning av det inskannade punktmolnet till ett redan befintligt koordinatsystem. Det är dock viktigt att notera att ingen av dessa metoder helt kan eliminera drift, utan endast reducera dess inverkan på resultatet.

Vad som är känt är att driften är ett ackumulerat fel. Det vill säga att felet ökar med tiden, alltså att ju längre skanningen pågår desto mer drift uppstår. Avståndet från startpunkten är också en faktor till ackumulation av drift. Eftersom drift inte går att kvantifiera men att det fortfarande är närvarande kan dess påverkan på punktmolnet inte uteslutas och måste därför hanteras som en integrerad del av osäkerhetsanalysen vid databehandling. För att säkerställa kvaliteten på SLAM-data krävs därför en medvetenhet om driftens påverkan, samt en konsekvent tillämpning av kompensatoriska åtgärder i både fält- och efterbearbetningsstadierna.

I resultatet av denna studie går det att visuellt observera förekomsten av drift. Detta genom att jämföra figurerna av punktmolnsjämförelserna i avsnitt 4.3.1 och 4.3.2. Där går det att se att avvikelsernas storlek har en generellt ökande trend i punktmolnen som anslutits med minsta antalet nödvändiga utgångspunkter. Detta påvisar att ett ackumulerat fel (drift) är närvarande i dessa punktmoln. I figur 26 är detta extra tydligt, där syns en gradvis ökning av avvikelsernas storlek i trapphuset (tydlig gradvis ökning från ”gula” till ”orangea” och slutligen till ”röda” avvikelser).

Denna studies resultat visar även att det finns en tillämpbar metod för att begränsa driftens inverkan på det slutgiltiga punktmolnet. Detta genom att använda fler utgångspunkter vid anslutningen av punktmolnet. Vid visuell jämförelse av avvikelsernas fördelning i punktmolnen (se avsnitt 4.3.1 och 4.3.2) syns en tydlig skillnad mellan anslutningsförfarandena. Anslutning med ett större antal utgångspunkter visar en jämnare nivå av avvikelser gentemot referenspunktmolnet. Anslutning med minsta antalet nödvändiga utgångspunkter resulterade likväl i en större spridning av avvikelser (lägre avvikelser nära utgångspunkterna och större avvikelser längre ifrån).

Vid praktisk tillämpning är det därav mer förmånligt att tillämpa ett större antal utgångspunkter vid anslutning. Detta eftersom det vid majoriteten av uppdragen är mer förmånligt att ha ett punktmoln med en jämnare nivå av avvikelser, än ett punktmoln med i princip ingen avvikelse i ena änden och mycket stora avvikelser i den andra.

5.4 Övriga felkällor

Eftersom drift förekommer i samband med skanning blir det också ett problem vid användningen av IMU. Användningen av IMU blir komplicerad då externa faktorer konstant påverkar dess sätt att navigera instrumentet. I denna studie utsätts IMU för prövning då instrumenten rör sig i ett någorlunda homogent utrymme samt att instrumentet rör sig i höjdled vilket är än mer utmanande för IMU. Detta är viktigt att ha till kännedom hos SLAM-skanning och att vid användning av instrument röra sig långsamt och inte göra hastiga rörelser som användare.

Ett problem som uppstod i samband med inskanningen var för hög reflektans på objekten inom studieområdet. Eftersom studieområdet är i en kontorsbyggnad som är i bruk fanns inte möjligheterna att täcka ytor eller ändra dess utseende, som vi med tidigare kunskap visste skulle vara nödvändigt för att det inte skulle generera felaktig reflektans. Det vill säga glasfönster och blanka ytor som stenväggarna. Felen kom att synas i punktmolnen, men de största grova felen kunde i efterhand redigeras bort med hjälp av funktioner i programvaran Cyclone 3DR. Efter att de punkter som varit felplacerade rensades bort kunde punktmolnet sedan användas för fortsatt arbete.

Ett bekymmer som uppstod under insamling av data var människor som kom med i punktmolnet under inskanningstillfället. Att helt undvika människor var svårt eftersom studien genomfördes i en lokal som tillhör ett kontor samt en tandläkarmottagning. För att reducera bort människor ur punktmolnet skannades ytan om som täcktes från en annan vinkel och därmed blev ytan täckt.

5.5 Användarupplevelse

NavVis VLX3 var enkel att använda och med hjälp av bärbältet blev ergonomin bättre då det hjälpte till att fördela vikten över hela kroppen och inte bara axlarna. En utmaning med instrumentet var när den skulle passera trängre utrymmen som exempelvis dörrposter. Då behövde den som bar instrumentet böja sig i en obekväm vinkel men fortsatt gå med rak rygg, vilket inte alltid var så lätt.

CHCNAV RS10 var under denna studie att föredra utifrån den ergonomiska aspekten. Den var smidig att hantera i de trängre utrymmena och lätt att bära runt på. Under längre tid kan det dock bli påfrestande för hand och handled med att bära instrumentet och därför rekommenderas det att använda dess medföljande bärsele.

När det kommer till effektivitet och tidsåtgång tog det med Leica RTC360 ungefär en och en halv timme att skanna in och ungefär 25 minuter att skanna in med vardera SLAM-skanner.

6 Slutsatser

Syftet med studie har varit att med hjälp av ett referenspunktmoln, insamlat med Leica RTC360, undersöka kvalitetsskillnaderna mellan punktmolnen som blivit inmätta med de två SLAM-skannrarna NavVis VLX3 och CHCNAV RS10. Studien syftade också till att analysera förekomsten av drift i de SLAM-genererade punktmolnen, samt att undersöka hur antalet utgångspunkter har påverkat de resulterande punktmolnen.

Baserat på resultatet av denna studie går det i jämförelse med referenspunktmolnet att se en försumbar kvalitetsskillnad i medelavvikelse hos SLAM-skannrarna. Där samtliga utgångspunkter använts vid anslutningen har NavVis VLX3 en medelavvikelse på 0,0006 m och CHCNAV RS10 0,0010 m, från referenspunktmolnet.

Utifrån referenspunktmolnet har SLAM-skannrarnas punktmoln som anslutits med alla utgångspunkter en standardosäkerheten på 0,0056 m med NavVis VLX3 och en standardosäkerhet på 0,0172 m med CHCNAV RS10.

I denna studie går det att se en kvalitetsskillnad i RMS hos de olika SLAM-skannrarna i jämförelse till referenspunktmolnet. Där samtliga utgångspunkter användes vid anslutningen uppnår NavVis VLX3 ett RMS-värde på 0,0064 m i 3D. CHCNAV RS10 uppnår ett RMS-värde på 0,0162 m i 3D.

Baserat på vad denna studie resulterat i och vad tidigare forskning säger går det att visuellt identifiera drift i ett punktmoln. Drift är ett ackumulerat fel och det går inte att urskilja vad som är drift från andra felkällor. För att motverka drift i punktmoln kan en anslutning med alla utgångspunkter tillämpas, vilket leder till en mer jämn fördelning av avvikelser över punktmolnet.

Utifrån detta går det att dra slutsatsen att driften har en påverkan på resultaten, men att det samtidigt finns en tillämpbar metod för att motverka dess inverkan på det resulterande punktmolnet.

6.1 Framtida studier

För framtida studier hade det bland annat varit intressant att:

- Studera hur resultaten hade blivit om liknande studie hade genomförts i studieområde med andra förutsättningar, exempelvis utomhus och komplexa miljöer som exempelvis ett industriområde.
- Kolla om studiens resultat hade blivit annorlunda om studien hade genomförts över en större yta, exempelvis i en längre korridor.
- Utvärdera hur resultaten hade blivit om studien hade genomförts med andra laserskannrar.
- Studera hur resultatet hade skiljt om punktmolnen hade blivit jämförda med hjälp av måltavlor som kontrollpunkter, i stället för att jämföra hela punktmoln.
- Studera drift med hjälp av kontrollpunkter som inte använts vid georeferering/anslutning.

Referenser

Al-Tawil, B., Hempel, T., Abdelrahmen, A., & Al-Hamadi, A. (2024). A review of visual SLAM for robotics: evolution, properties, and future applications. *Frontiers. 11*. https://doi.org/10.3389/frobt.2024.1347985

Castanheiro, L. F., Tommaselli, A. M. G., Hyyti, H., & Kukko, A. (2024). Experimental assessment of IMU data processing techniques for a backpack mobile laser scanning system. *ISPRS Archives, XLVIII-3-2024,* 57 – 62. https://isprs-archives.copernicus.org/articles/XLVIII-3-2024/57/2024/

CHCNAV. (Augusti 2024). RS10 Innovative Surveying SLAM Solution. https://chcnav.com/dam/jcr:178bef30-05f5-4c8f-805c-23e70510d399/RS10(32-lines)_DS_EN.pdf

Chen, X. Yu, K. Zhang, G. Hua, X. Wu, H., & An, Q. (2017). Precision estimation of the angular resolution of terrestrial laser scanners. *Wiley. 32* (159). 276-290.12200. https://doi.org/10.1111/phor.12200

Di Stefano, F., Chiappini, S., Gorreja, A., Balestra, M., & Pierdicca, R. (2021). Mobile 3D scan LiDAR: a literature review. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 12(1), 2387–2429. https://doi.org/10.1080/19475705.2021.1964617

Eng, R & Matsson, M. (2020). *Utvärdering av SLAM och indirekt georefering av punktmolnsdata: En jämförselse mellan de två laserskannrarna Leica Scanstation P40 och Leica RTC 360 3D*. [Examensarbete, Högskolan i Gävle]. DiVA. https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:hig:diva-32669

Gharineiat, Z.; Tarsha Kurdi, F.; Henny, K.; Gray, H.; Jamieson, A.; Reeves, N. Assessment of NavVis VLX and BLK2GO SLAM Scanner Accuracy for Outdoor and Indoor Surveying Tasks. Remote Sens. 2024, 16, 3256. https://doi.org/10.3390/rs16173256

Kersten, T. P., & Lindstaedt, M. (2022). Geometric accuracy investigations of terrestrial laser scanner systems in the laboratory and in the field. Applied Geomatics, 14, 421-434. https://doi.org/10.1007/s12518-022-00442-2

Lantmäteriet (2017). Geodatakvalitet. https://www.lantmateriet.se/sv/geodata/hmk---handbok-i-mat--och-kartfragor/

Lantmäteriet (2014). Teknisk rapport 2014:1. https://www.lantmateriet.se/globalassets/om-lantmateriet/var-samverkan-med-andra/hmk/tekniska-rapporter/hmk_tekn_rapport_2014-1.pdf

Lantmäteriet (2021). Terrester laserskanning. https://www.lantmateriet.se/sv/geodata/hmk---handbok-i-mat--och-kartfragor/

Leica. (2020). Leica Nova MS60 Data Sheet. Direct Industry. https://pdf.directindustry.com/pdf/leica-geosystems/leica-nova-ms60-ds-en/14324-964090.html

Leica. (2018). Leica RTC360 3D Reality Capture Solution Data Sheet. Direct Industry. https://pdf.directindustry.com/pdf/leica-geosystems/leica-rtc360-3d-reality-capture-solution-data-sheet/14324-761555.html

Makhubela, J. K., Zuva, T., & Agunbiade, O. Y. (2018). A Review on Vision Simultaneous Localization and Mapping (VSLAM). 2018 International Conference on Intelligent and Innovative Computing Applications (ICONIC), Mon Tresor, Mauritius. https://doi.org/10.1109/ICONIC.2018.8601227

Mulahusić, A., Tuno, N., Gajski, D., & Topoljak, J. (2018). Comparison and analysis of results of 3D modelling of complex cultural and historical objects using different types of terrestrial laser scanner. Survey Review, 52(371), 107–114. https://doi.org/10.1080/00396265.2018.1528758

Nationalencyklopedin. (u.å.). *Drift*. https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/drift-(instrument-)

NavVis. (21 Juli 2020). *How SLAM affects the accuracy of your scan (and how to improve it).* https://www.NavVis.com/blog/how-slam-affects-the-accuracy-of-your-scan-and-how-to-improve-it

NavVis. (8 juli 2024). NavVis VLX 3 Specifications. NavVis Knowledge Base. https://knowledge.NavVis.com/docs/NavVis-vlx-3-specifications

Ngoc Quang, V., Van Hien, L., & Hoa Pham Thi, T. (2024). Study on the Application of Simultaneous Localization and Mapping Solution for Surveying Tasks: A Case Study of RS10 3D Handheld SLAM. *Journal of Materials and Engineering Structures, 11*(4), 449-458.

Reshetyuk, Y. (2017). Terrester laserskanning. E-bok, ISBN 978-87-403-1645-2, BookBoon. https://bookboon.com/premium/reader/terrester-laserskanning

Štroner, M., Urban, R., Křemen, T., Braun, J., Michal, O., & Jiřikovský, T. (2025). Scanning the underground: Comparison of the accuracies of SLAM and static laser scanners in a mine tunnel. Measurement, 242, del A, artikel 115875. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.115875

Szrek, A., Romańczukiewicz, K., Kujawa, P., & Trybała, P. (2024). Comparison of TLS and SLAM technologies for 3D reconstruction of objects with different geometries. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1295, artikel 012012. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1295/1/012012

Taheri, H., & Xia, Z. C. (2021). SLAM; definition and evolution. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 97, artikel 104032. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2020.104032

Trimble. (2025). Trimble S5. https://geospatial.trimble.com/en/products/hardware/trimble-s5

Urban, R., Štroner, M., Braun, J., Suk, T., Kovanič, L., & Blistan, P. (2024). Determination of Accuracy and Usability of a SLAM Scanner GeoSLAM Zeb Horizon: A Bridge Structure Case Study. Applied Sciences, 14(12), artikel 5258. https://doi.org/10.3390/app14125258

Zhao, Y. L., Hong, Y. T., & Huang, H. P. (2024). Comprehensive Performance Evaluation between Visual SLAM and LiDAR SLAM for Mobile Robots: Theories and Experiments. Applied Sciences, 14(9), artikel 3945. https://doi.org/10.3390/app14093945

Bilaga A: Koordinater för inmätta utgångspunkter

Tabell A 1. Inmätta måltavlors koordinater i det lokalt etablerade stomnätet

ID	$x\ (m)$	$y\ (m)$	$z\ (m)$
T1	1010,7235	1006,5225	10,4128
T5	1011,9598	1002,3768	10,0802
T8	1006,5675	1000,2559	9,9679
T13	1001,5792	998,6956	9,9222
T15	998,3524	1001,8095	10,4183
T17	1001,4897	1004,0747	12,2697
T18	1003,7289	999,5196	13,1186
T19	1003,1838	999,1391	12,1292
T20	999,9171	998,2557	13,0771
T21	998,7868	1000,3684	12,6342
T23	1001,7528	1004,1428	15,6262
T24	1003,0097	1002,4520	16,4226
T25	1003,2123	999,1379	15,2676
T26	999,7653	998,2124	16,5107
T27	998,4986	1000,4386	15,3761

Bilaga B: Avvikelser mellan SLAM-punktmolnen och referenspunktmolnet

Tabell B 1. Skillnader mellan punktmolnet från NavVis VLX3 som anslutits med minsta antalet nödvändiga utgångspunkter och referenspunktmolnet från Leica RTC360, som tillämpats vid beräkning av RMS (se avsnitt 4.3.1.2).

ID	$\Delta x\ (m)$	$\Delta y\ (m)$	$\Delta z\ (m)$	$\Delta 3D\ (m)$
Rosa1	0	0,0001	0	0,0001
Rosa2	0,0004	0	-0,0006	0,0007
Rosa3	0	0	0	0
Rosa4	0,0005	-0,0002	-0,0001	-0,0006
Rosa5	0,0003	0,0005	0,0005	-0,0007
Rosa6	-0,0003	0,0006	0,0001	0,0007
Rosa7	0	0	0	0
Rosa8	0	0	0	0
Rosa9	0,0006	-0,0005	0,0002	-0,0008
Rosa10	-0,0003	0	-0,0001	0,0003
Rosa11	-0,0005	-0,0004	-0,0004	-0,0007
Rosa12	-0,0004	0,0001	0,0005	-0,0006
Rosa13	0,0008	0	0,0003	0,0008
LjusGrön1	0,0025	-0,0006	0,0004	0,0026
LjusGrön2	0,0005	0,0017	0,0012	-0,0022
LjusGrön3	0,0001	-0,0020	0,0014	-0,0025
LjusGrön4	-0,0023	-0,0009	0,0001	-0,0024
LjusGrön5	0,0003	-0,0012	-0,0001	-0,0012
LjusGrön6	0,0005	0,0024	0,0005	0,0025
LjusGrön7	0	0	-0,0025	0,0025
LjusGrön8	0,0024	0,0010	-0,0008	-0,0027
LjusGrön9	-0,0010	0,0020	-0,0006	-0,0023
LjusGrön10	0,0003	0,0018	0,0001	0,0018
LjusGrön11	0,0017	0,0004	-0,0002	-0,0018
LjusGrön12	0,0005	-0,0019	-0,0006	0,0021
LjusGrön13	-0,0014	0,0006	-0,0001	-0,0015
LjusGrön14	-0,0012	-0,0001	0,0011	-0,0016
LjusGrön15	-0,0016	0,0013	0,0007	0,0022
LjusGrön16	0	0,0022	0,0011	0,0024
LjusGrön17	0,0012	0,0007	-0,0005	0,0015
LjusGrön18	-0,0013	-0,0002	0,0014	0,0020
LjusGrön19	-0,0012	-0,0004	-0,0001	-0,0012
MörkGrön1	-0,0027	0,0035	0,0011	-0,0045
MörkGrön2	-0,0002	0,0031	0,0007	-0,0032
MörkGrön3	0	0,0042	0,0003	0,0042
MörkGrön4	0,0007	-0,0038	0,0006	-0,0039
MörkGrön5	-0,0033	0,0012	0,0005	-0,0036
MörkGrön6	-0,0032	-0,0011	-0,0002	-0,0034
MörkGrön7	-0,0036	-0,0009	0,0001	0,0037
MörkGrön8	0,0013	-0,0002	0,0030	0,0033
MörkGrön9	-0,0030	-0,0009	-0,0016	0,0035

ID	$\Delta x\ (m)$	$\Delta y\ (m)$	$\Delta z\ (m)$	$\Delta 3D\ (m)$
Blå1	0,0010	0,0086	0,0005	-0,0087
Blå2	0,0017	0,0061	0,0004	0,0063
Blå3	0,0025	0,0052	0,0020	0,0062
Blå4	0,0016	-0,0071	0,0014	0,0074
Blå5	0,0027	-0,0056	0,0003	-0,0062
Blå6	0,0079	0,0006	0,0013	-0,0081
Blå7	0,0014	0,0056	0,0022	0,0062
Blå8	0,0025	-0,0083	0,0004	0,0087
Gul1	0,0051	-0,0126	0,0018	-0,0137
Gul2	0,0075	-0,0073	0,0003	-0,0104
Orange1	0,0034	0,0215	-0,0071	0,0229
Röd1	-0,0126	0,0314	0,0009	-0,0338

Tabell B 2. Skillnader mellan punktmolnet från NavVis VLX3 som anslutits med alla utgångspunkter och referenspunktmolnet från Leica RTC360, som tillämpats vid beräkning av RMS (se avsnitt 4.3.1.2).

ID	$\Delta x\ (m)$	$\Delta y\ (m)$	$\Delta z\ (m)$	$\Delta 3D\ (m)$
Rosa1	-0,0003	0,0002	-0,0001	0,0004
Rosa2	0,0001	0	0,0001	0,0002
Rosa3	0	0	0	0,0001
Rosa4	0,0001	0,0001	0,0001	0,0002
Rosa5	-0,0001	-0,0001	0	0,0002
Rosa6	-0,0002	-0,0004	-0,0008	0,0009
Rosa7	-0,0003	0,0001	-0,0005	0,0006
Rosa8	0,0001	-0,0001	0	0,0001
Rosa9	0,0004	-0,0004	0	0,0006
Rosa10	-0,0003	-0,0002	0,0004	0,0005
Rosa11	-0,0003	0,0001	0,0004	0,0005
Rosa12	0	0	0	0
Rosa13	0,0001	0	-0,0001	0,0002
Rosa14	0	0	0	0
LjusGrön1	-0,0004	0,0002	0,0018	0,0018
LjusGrön2	-0,0002	0,0015	0,0002	0,0015
LjusGrön3	-0,0005	0,0016	-0,0005	0,0017
LjusGrön4	0,0022	0,0001	0,0005	0,0022
LjusGrön5	-0,0005	0,0014	0,0010	0,0018
LjusGrön6	0,0001	-0,0010	0,0014	0,0018
LjusGrön7	0,0018	0,0003	0,0008	0,0020
LjusGrön8	0,0014	-0,0004	-0,0007	0,0016
LjusGrön9	0,0007	0,0009	-0,0017	0,0020
LjusGrön10	-0,0017	0,0009	-0,0004	0,0020
LjusGrön11	-0,0018	-0,0006	0,0005	0,0019
LjusGrön12	-0,0001	0,0003	-0,0017	0,0018
LjusGrön13	-0,0020	-0,0006	-0,0009	0,0023
LjusGrön14	0,0004	0,0009	0,0004	0,0011
LjusGrön15	-0,0005	0,0012	-0,0014	0,0019
LjusGrön16	0,0001	0,0001	-0,0018	0,0018
LjusGrön17	-0,0019	-0,0005	0,0022	0,0029
LjusGrön18	0,0010	0,0006	0,0013	0,0017
LjusGrön19	-0,0004	-0,0001	0,0015	0,0016
LjusGrön20	0,0008	-0,0028	0,0006	0,0029
LjusGrön21	0,0002	0	-0,0024	0,0024
LjusGrön22	-0,0002	-0,0002	-0,0029	0,0030
MörkGrön1	0,0046	0,0004	0,0003	0,0047
MörkGrön2	0,0025	0,0003	0,0017	-0,0030
MörkGrön3	0,0001	0,0033	0,0008	0,0034
MörkGrön4	-0,0011	0,0031	0,0012	-0,0035
MörkGrön5	0,0023	-0,0015	-0,0027	0,0038
MörkGrön6	0,0048	0,0006	0,0003	0,0048
MörkGrön7	-0,0005	0,0034	0	0,0034
MörkGrön8	0,0012	-0,0047	0,0008	0,0049
MörkGrön9	-0,0037	-0,0001	-0,0005	0,0038

ID	Δx (m)	Δy (m)	Δz (m)	$\Delta 3D$ (m)
Blå1	-0,0020	0,0064	-0,0014	0,0068
Blå2	-0,0022	0,0055	-0,0015	0,0061
Blå3	0,0009	-0,0002	-0,0050	0,0051
Blå4	-0,0027	0,0049	0,0003	0,0056
Gul1	-0,0036	0,0112	-0,0006	-0,0117
Gul2	-0,0054	0,0129	0,0033	0,0144
Orange1	-0,0181	-0,0117	0,0015	0,0217
Röd1	-0,0250	0,0180	0	0,0310

Tabell B 3. Skillnader mellan punktmolnet från CHCNAV RS10 som anslutits med minsta antalet nödvändiga utgångspunkter och referenspunktmolnet från Leica RTC360, som tillämpats vid beräkning av RMS (se avsnitt 4.3.2.2).

ID	$\Delta x\ (m)$	$\Delta y\ (m)$	$\Delta z\ (m)$	$\Delta 3D\ (m)$
Rosa1	0,0003	-0,0002	0	-0,0003
Rosa2	0,0002	-0,0003	-0,0002	0,0004
Rosa3	0,0003	-0,0003	0	-0,0004
LjusGrön1	0,0001	-0,0023	-0,0003	0,0023
LjusGrön2	-0,0007	0,0027	0,0003	-0,0028
LjusGrön3	-0,0008	0,0023	-0,0013	-0,0027
LjusGrön4	0,0005	-0,0026	-0,0008	0,0028
LjusGrön5	-0,0016	0,0008	0,0001	-0,0018
LjusGrön6	0,0014	0,0020	-0,0004	0,0024
MörkGrön1	-0,0022	0,0027	0,0009	0,0035
MörkGrön2	-0,0017	0,0030	0,0004	-0,0035
MörkGrön3	0,0024	0,0012	-0,0015	-0,0031
MörkGrön4	0,0037	0,0009	0,0006	0,0039
MörkGrön5	0,0001	0,0041	0,0003	0,0042
MörkGrön6	0,0002	0,0034	0,0010	0,0035
Blå1	0,0008	0,0061	0,0014	0,0063
Blå2	0,0081	0,0036	0,0026	0,0093
Blå3	0,0018	0,0047	0,0010	0,0052
Blå4	0,0041	0,0077	0,0017	0,0089
Blå5	0,0019	0,0024	0,0093	0,0097
Blå6	0,0016	0,0077	0,0012	0,008
Blå7	0,0065	0,0019	0,0007	0,0068
Blå8	0,0020	0,0030	0,0053	0,0064
Blå9	0,0051	0,0077	0,0031	0,0097
Blå10	0,0080	0,0032	0,0004	0,0086
Blå11	0,0022	0,0091	0,0015	0,0095
Blå12	0,0009	0,0064	0,0006	0,0065
Blå13	0,0021	0,0073	0,0006	0,0076
Gul1	0,0116	0,0002	0,0018	0,0118
Gul2	0,0167	0,0054	0,0006	0,0175
Gul3	0,0130	0,0041	0,0022	0,0138
Gul4	0,0001	0,0012	0,0102	0,0103
Gul5	0,0029	0,0123	0,0006	0,0126
Gul6	0,0039	0,0001	0,0173	0,0177
Gul7	0,0011	0,0010	0,0123	0,0124
Gul8	0,0037	0,0121	0,0010	0,0127
Gul9	0,0025	0,0104	0,0010	0,0107
Gul10	0,0017	0,0118	0,0012	0,012
Gul11	0,0013	0,0017	0,0165	0,0167
Gul12	0,0002	0,0003	0,0145	0,0145
Gul13	0,0023	0,0138	0,0001	0,014
Gul14	0,0042	0,0110	0	0,0118
Gul15	0,0129	0,0024	0,0005	0,0131
Gul16	0,0002	0	0,0103	0,0103

ID	Δx (m)	Δy (m)	Δz (m)	$\Delta 3D$ (m)
Orange1	0,0002	0,0011	0,0246	0,0247
Orange2	0,0005	0,0001	0,0251	0,0251
Orange3	0,0054	0,0258	0,0027	0,0265
Orange4	0,0058	0,0215	0,0029	0,0224
Orange5	0,0248	0,0038	0,0025	0,0252
Röd1	0,0342	0,0004	0,0077	0,0351
Röd2	0,0071	0,0304	0,0016	0,0313
Röd3	0,0118	0,0302	0,0023	0,0325
Röd4	0,0054	0,0305	0,0021	0,0310

Tabell B 4. Skillnader mellan punktmolnet från CHCNAV RS10 som anslutits med alla utgångspunkter och referenspunktmolnet från Leica RTC360, som tillämpats vid beräkning av RMS (se avsnitt 4.3.2.2).

ID	$\Delta x\ (m)$	$\Delta y\ (m)$	$\Delta z\ (m)$	$\Delta 3D\ (m)$
Rosa1	0,0004	0,0001	0,0002	0,0004
Rosa2	0,0003	-0,0001	0,0001	-0,0003
Rosa3	0	0,0002	-0,0001	-0,0003
LjusGrön1	0,0016	0,0020	0,0013	0,0029
LjusGrön2	0,0007	0,0019	0,0002	0,0020
LjusGrön3	0,0008	0,0013	0,0009	0,0017
LjusGrön4	0,0004	0,0024	0,0001	0,0024
MörkGrön1	0,0001	0,0010	0,0049	0,0050
MörkGrön2	0,0008	0,0006	0,0037	0,0039
MörkGrön3	0,0003	0,0029	0,0007	0,0030
MörkGrön4	0,0004	0,0038	0,0008	0,0039
Blå1	0,0009	0,0087	0,0002	0,0088
Blå2	0,0019	0,0091	0,0009	0,0093
Blå3	0,0022	0,0088	0,0013	0,0092
Blå4	0,0020	0,0004	0,0058	0,0061
Blå5	0,0011	0,0079	0,0003	0,0080
Blå6	0,0030	0,0078	0,0008	0,0084
Blå7	0,0013	0,0066	0,0004	0,0068
Blå8	-0,0011	0,0049	0,0008	0,0051
Gul1	0,0028	0,0146	0,0001	0,0149
Gul2	0,0025	0,0012	0,0119	0,0122
Gul3	0,0024	0,0015	0,0137	0,0140
Gul4	0,0011	0,0001	0,0147	0,0147
Gul5	0,0005	0,0026	0,0110	0,0113
Gul6	0,0037	0,0120	0,0021	0,0128
Gul7	0,0050	0,0127	0,0006	0,0136
Gul8	0,0013	0,0126	0,0019	0,0128
Gul9	0,0171	0,0053	0,0014	0,0180
Gul10	0,0045	0,0097	0,0017	0,0108
Gul11	0,0025	0,0005	0,0142	0,0144
Gul12	0,0009	0,0007	0,0147	0,0148
Gul13	0,0175	0,0039	0,0010	0,0180
Gul14	0,0136	0,0022	0,0004	0,0137
Gul15	0,0175	0,0058	0,0032	0,0187
Gul16	0,0024	0,0019	0,0105	0,0109
Gul17	0,0015	0,0006	0,0126	0,0127
Gul18	0,0158	0,0046	0,0016	0,0165
Gul19	0,0034	0,0131	0,0023	0,0137
Gul20	0,0016	0,0011	0,0150	0,0151

ID	Δx (m)	Δy (m)	Δz (m)	$\Delta 3D$ (m)
Orange1	-0,0267	-0,0090	-0,0015	0,0282
Orange2	-0,0229	-0,0061	-0,0006	0,0237
Orange3	-0,0052	0,0208	-0,0020	0,0215
Orange4	-0,0207	0,0076	0,0002	0,0220
Orange5	0,0063	-0,0014	0,0203	0,0213
Orange6	-0,0256	-0,0083	-0,0004	0,0269
Orange7	-0,0218	-0,0045	-0,0007	-0,0223
Orange8	-0,0217	-0,0039	0,0037	-0,0223
Orange9	0,0017	0,0014	0,0232	-0,0233
Orange10	0,0210	0,0031	0,0009	0,0212
Orange11	0,0040	0,0206	0,0018	0,0210
Röd1	-0,0305	-0,0100	0,0012	0,0321
Röd2	0,0048	0,0004	0,0297	0,0301
Röd3	0,0091	-0,0344	-0,0043	-0,0358