

Blikstad, Marcus Gimse
Jedrusik, Krzysztof
Nordeng-Lyberg, Kasper Jensen
Skoknes, Jan Inge

Sammenlikning av produksjonsløyper for kombinert bruk av mobil- og bakkebasert laserskanning

Bacheloroppgave i Bachelor i ingeniørfag, geomatikk
Veileder: Urke, Tormod
Medveileder: Sørensen, Vilde Marie
Mai 2022



Blikstad, Marcus Gimse
Jedrusik, Krzysztof
Nordeng-Lyberg, Kasper Jensen
Skoknes, Jan Inge

Sammenlikning av produksjonsløyper for kombinert bruk av mobil- og bakkebasert laserskanning

Bacheloroppgave i Bachelor i ingeniørfag, geomatikk
Veileder: Urke, Tormod
Medveileder: Sørensen, Vilde Marie
Mai 2022

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Fakultet for ingeniørvitenskap
Institutt for vareproduksjon og byggteknikk



Kunnskap for en bedre verden

Oppgavens tittel: Sammenlikning av produksjonsløyper for kombinert bruk av mobil- og bakkebasert laserskanning	Dato: 20.05.2022		
	Antall sider: 74		
	Masteroppgave:	Bacheloroppgave	x
Navn: Blikstad, Marcus Gimse Jedrusik, Krzysztof Nordeng-Lyberg, Kasper Jensen Skoknes, Jan Inge			
Veileder: Urke, Tormod			
Eventuelle eksterne faglige kontakter/ veiledere: Sørensen, Vilde Marie			

Sammendrag:

Det blir i dag brukt en rekke laserskannesystemer for innendørs laserskanning med ulike egenskaper og bruksområder. Stasjonære laserskannere (TLS) kan oppnå svært god nøyaktighet, men dette kommer ofte på bekostning av tid og effektivitet. Mobile laserskannere (MLS) kan ansees som effektive og økonomisk gunstige skannere da de kan samle store mengder data på kort tid. Til tross for en svært effektiv datainnsamling kan dette gå på bekostning av oppnådd nøyaktighet. Oppgavens formål er å undersøke ulike produksjonsløyper med kombinert bruk av MLS og TLS. Ved å sammenligne resultater fra analysen ser man hvilken produksjonsløype som gir best mulig resultat sett i forhold til effektivitet og arbeidsmengde.

For å fremskaffe et datagrunnlag til undersøkelse av problemstillingen bestemte gruppen seg for å skanne deler av H-bygget på NTNU Gjøvik. Ved å studere tegninger av bygget og foreta befaringer kunne metoden planlegges. På denne måten ble skanneomfang, plassering av targets, etablering av fastmerker, og utførelse av polygondrag bestemt. Under planleggingsfasen ble det også utarbeidet lister over hvilke datasett fra de ulike instrumentene som var nødvendig for analysen. Plan for analysen kunne utarbeides etter ferdigstilling av alle enkeltpunktskyer og sammensatte grupperinger (bundles).

Feltarbeidet består av å etablere fastmerker, innmåling av targets, og skanning. Fastmerker etableres med CPOS og totalstasjonsmålinger, og koordinater på targets settes med utjevnedede polygondragmålinger. Skanning av referansepunktsky ble gjort med TLS; Leica RTC360 og skanning av punktskyer for analyse ble gjort med MLS; NavVis VLX.

Referansepunktskyen registreres med en bundle error på 0,0016m og representerer en slags «fasit» som resultater fra analysen sammenlignes mot. I tillegg til referansepunktsky, registreres TLS-punktskyer som skal representere TLS-data i utvalgte områder. Under analysen settes ulike produksjonsløyper opp imot hverandre hvor man sammenligner oppnådd nøyaktighet ved registrering i form av RMSE (Root mean square error). For å utføre analysen brukes 9 punktskyer hvorav 5 er skannet MLS og 4 er skannet med TLS. Det blir analysert 11 produksjonsløyper totalt. Kvaliteten for registreringene gis av den gjennomsnittlige M3C2-distansen mellom registrert MLS- og TLS-punktsky sett imot referansepunktskyen.

11 verdier for M3C2-distansen settes i system, der alle kombinasjoner blir sortert etter antatt krav til forarbeid relatert til targets. Ved å sortere resultatene på denne måten kan man vekte oppnådd kvalitet på registreringen opp mot effektivitet, for å se hvilke produksjonsløyper som gir det beste av begge deler. Etter tolkning av resultatene gitt av de ulike registreringskombinasjonene, er det landet på to produksjonsløyper som vi mener kan bistå til en mer «optimal» arbeidsflyt:

- Produksjonsløype bestående av ikke-georefererte TLS-punktskyer, registrert mot georefererte MLS-punktskyer.
- Produksjonsløype bestående av ikke-georeferert MLS-punktsky registrert mot georefererte TLS-punktskyer.

Stikkord:

SLAM
MLS
TLS
ICP
LiDAR
Registrering
Laser skanning

Forord

Denne bacheloroppgaven markerer slutten på 3 lærerike år på geomatikkingeniørstudiet ved NTNU Gjøvik. Tiden har vært preget av utfordrende men relevante oppgaver slik at man er best mulig forberedt på arbeidslivet som kommer etter ferdig utdanning.

Av forslagene til tema som ble lagt frem var det et forslag fra eksternt oppdragsgiver, Terratec, som ble valgt. Temaet omhandler å finne en produksjonsløype som effektivt supplerer data fra MLS med data fra TLS i områder med behov for høyere nøyaktighet. Oppgaven er utfordrende, og dette sammen med muligheten til å bruke det siste innen TLS og MLS instrumenter i oppgaven var for oss veldig interessant. Terratec bidro også med utlån av instrumenter underveis.

Underveis i oppgaven ble det tatt i bruk mye av det vi hadde lært i løpet av studietiden. Bruk av GNSS i form av CPOS målinger, bruk av totalstasjon i form av satsmålinger og polygondrag, og til slutt laserskanning med både TLS og MLS. Utjevninger og beregning av nye koordinater ble gjort i egnet programvare i landmålingsdelen, og registrering og analyse av punktskyer ble gjort i programvare beregnet for dette formålet. Vår evne til å planlegge ble også utfordret da det er en oppgave som kan løses på mange forskjellige måter.

Vi vil takke veileder Tormod Urke fra NTNU Gjøvik, og eksternt veileder Vilde Marie Sørensen fra Terratec, for gode og konstruktive innspill underveis med arbeidet av oppgaven. For god veiledning med metode for analyse vil vi takke Andras Ladai, førsteamanuensis ved NTNU Gjøvik. Vi vil også takke Terratec for utlån av instrumenter, og NTNU Gjøvik for tilgang døgnet rundt i bygningen som ble skannet.

Gjøvik, 20.05.2022



Underskrifter

Abstract (engelsk)

Today, several different laser scanning systems are used for indoor laser scanning with different properties and area of uses. Terrestrial laser scanners (TLS) may achieve great accuracy, but this can come at a cost of time and efficiency. Mobile laser scanners (MLS) are seen as an efficient tool as they are cost-effective and can collect large amounts of data in a short amount of time. Although they are effective tools for collecting data, they are not as accurate. The purpose of the thesis is to investigate different production pathways with combined use of TLS and MLS. By comparing results from the analysis, one sees which production pathway gives the best possible result in terms of workload and efficiency.

To obtain a data basis for investigating the problem, the group decided to scan parts of the H-building at NTNU Gjøvik. By studying drawings of the building and making inspections, the method could be planned. This way, the scope of scanning, placement of targets, establishment of benchmarks, and execution of traverse were determined. During the planning phase, lists were also prepared of which datasets from the various instruments were necessary for the analysis. A plan for the analysis could be prepared after completion of all single pointclouds and bundles.

The fieldwork consists of establishing survey benchmarks, target acquisition, and laser scanning. Survey benchmarks are established with CPOS and total station measurements, and target coordinates are aquired by doing traverse and adjustment calculations. Scanning of reference point cloud was done with TLS: Leica RTC360 and scanning of point clouds for analysis were done with MLS: NavVis VLX.

The reference point cloud is registered with a bundle error of 0.0016m and represents a benchmark as a standard of comparison against which results from the analysis are compared. In addition to the reference point cloud, TLS point clouds are registered to represent TLS data in selected areas. During the analysis different production pathways are set up against each other where one compares the achieved accuracy when registering in the form of RMSE (Root mean square error). To perform the analysis, 9 point clouds are used, of which 5 are scanned with TLS. A total of 11 production pathways are analyzed.

The quality of the registration is given by the average M3C2-distance between the registered MLS- and TLS-point clouds, and the reference point cloud.

11 values for the M3C2-distance are put in system, where all combinations are sorted by their expected need for preparation work related to the use of targets. By sorting the results in this way, the quality and efficiency may be weighed against each other to find the production pathways that gives the best of both. By interpreting the results given by the different combinations of registration, we find that there are two production pathways that may assist in creating a more “optimal” workflow:

- A production pathway consisting of non-georeferenced TLS-point-clouds, registered with georeferenced MLS-point-clouds
- A Production pathway consisting of a non-georeferenced MLS-point-cloud, registered with georeferenced TLS-point-clouds.

Innholdsfortegnelse

FORORD	IV
ABSTRACT (ENGELSK)	V
INNHALDSFORTEGNELSE	VII
TABELLISTE	XI
1 INNLEDNING	1
2 TEORI	3
2.1 PRINSIPPER FOR LASERSKANNINGSTEKNOLOGI.....	3
2.1.1 <i>Laser</i>	3
2.1.2 <i>LiDAR</i>	4
2.1.3 <i>Intensitet</i>	5
2.1.4 <i>TLS</i>	6
2.1.5 <i>MLS</i>	7
2.2 SLAM.....	9
2.2.1 <i>Visual SLAM</i>	9
2.2.2 <i>Visual Inertial System (VIS)</i>	9
2.2.3 <i>VLX – Algoritme</i>	10
2.2.4 <i>Data filtrering</i>	10
2.2.5 <i>IMU</i>	13
2.2.6 <i>Loop closure</i>	14
2.3 FEILKILDER.....	15
2.3.1 <i>Refleksjon</i>	15
2.3.2 <i>Refraksjon</i>	16
2.3.3 <i>Drift</i>	18
2.3.4 <i>Tracking error</i>	19
2.3.5 <i>Vanskelige omgivelser</i>	20
2.4 GRUNNLAGSDATA	21
2.4.1 <i>Fastmerker</i>	21
2.4.2 <i>GNSS/CPOS</i>	21
2.5 REGISTRERING.....	22
2.5.1 <i>Cloud-to-cloud registrering (C2C)</i>	23
2.5.2 <i>Target-basert registrering</i>	24
2.5.3 <i>Transformasjoner</i>	25
2.6 DATABEHANDLING OG ANALYSE	27

2.6.1	<i>Tynning av punktskyer</i>	27
2.6.2	<i>Punktskynormaler</i>	28
2.6.3	<i>M3C2-algoritmen</i>	29
3	CASE/ MATERIALER	30
3.1	CASE	30
3.2	MATERIALER	30
4	METODE	32
4.1	GRUNNLAGET - DATAINNSAMLING.....	33
4.1.1	<i>Planlegging</i>	33
4.1.2	<i>Etablering av fastmerker</i>	36
4.1.3	<i>Skanning med TLS (RTC360)</i>	37
4.1.4	<i>Skanning med MLS (VLX)</i>	37
4.1.5	<i>Innmåling av targets</i>	38
4.2	DATABEHANDLING	39
4.2.1	<i>Utjevning - polygondrag</i>	39
4.2.2	<i>Rensing, registrering og georeferering av referansepunktsky</i>	40
4.2.3	<i>Registrering av søylepunktskyer</i>	41
4.2.4	<i>Tynning og sammensetting av TLS-punktskyer</i>	42
4.2.5	<i>Oppretting av kjernepunkter for M3C2-analyse</i>	43
4.2.6	<i>Prebehandling av MLS data</i>	43
4.3	ANALYSE	45
4.3.1	<i>Analyseplan</i>	45
4.3.3	<i>ICP-registrering</i>	46
4.3.4	<i>Avviksdeteksjon</i>	46
5	RESULTATER	48
5.1	FASTMERKER.....	48
5.2	UTJEVNING POLYGONDRAK	48
5.3	TARGETS	50
5.4	RESULTAT AV DATABEHANDLING	51
5.5	ANALYSERESULTAT	55
6	DISKUSJON	62
6.1	DRØFTING AV RESULTAT OG METODE	62
6.1.1	<i>Fastmerker</i>	62
6.1.2	<i>Polygondrag</i>	63
6.1.3	<i>Targets</i>	64

6.1.4	<i>Referansepunktsky</i>	64
6.1.5	<i>Søylepunktsky</i>	66
6.1.6	<i>VLX</i>	67
6.1.7	<i>Analyseresultat</i>	68
6.2	DRØFTING AV FAGLIGE UTFORDRINGER.....	72
7	KONKLUSJON	73
	LITTERATURLISTE	75
	VEDLEGG	79

Figurliste

Figur 1. Illustrasjon av prosessen som emitterer laserlys.....	3
Figur 2. Illustrasjon som viser hvordan LiDAR systemer posisjonerer objekt i 3D-rommet. ...	4
Figur 3. Translasjon langs systemets akser(V). Vinkelfart rundt systemets akser(H).	13
Figur 4. Til venstre: Lamberts lov om lysemisjon.	15
Figur 5. Lysbrytning luft-glass-luft.....	17
Figur 6. Eksempel på drift i punktsky fra MLS.	18
Figur 7. Eksempel på tracking error i punktsky fra MLS.	19
Figur 8. Eksempel på svarte og hvite targets.	25
Figur 9. Illustrasjon som viser hvordan M3C2-distanse beregnes	29
Figur 10. Flytdiagram som viser prosessen fra planlegging til analyse.	32
Figur 11. Branntegninger	34
Figur 12. Utjevnet polygondrag vist i GISLINE Landmåling.	49
Figur 13. Punktskyenes områdetilhørighet.....	52
Figur 14. Distribusjon av resultat fra M3C2 analyse mellom SG+B3 og REF.....	60
Figur 15. Distribusjon av resultat fra M3C2 analyse mellom B1+SG og REF.....	61
Figur 16. Tre horisontale tverrsnitt i tre ulike punktskyer	69

Tabelliste

Tabell 1. Forventet oppnådd nøyaktighet for CPOS dekningsområde.....	22
Tabell 2. Datablad Leica Nova MS60 Multistation	30
Tabell 3. Datablad Leica Viva GS16.....	30
Tabell 4. Datablad Leica RTC360.....	31
Tabell 5. NavVis VLX	31
Tabell 6. Utstysliste.	31
Tabell 7. Programvareliste.	31
Tabell 8. Oversikt over nødvendige punktskyer for videre arbeid.....	35
Tabell 9. Manuell koordinatberegning av F3.	36
Tabell 10. MLS feltlogg med grunnleggende info.	37
Tabell 11. Vekting i GISLINE instrumentregister.	39
Tabell 12. Utelatte observasjoner i observasjonstest.	39
Tabell 13. Oversikt over TLS-opstillinger som ble brukt for de ulike søyleområdene.	41
Tabell 14. Oversikt over punktskyer som dekker de ulike søyleområdene.	42
Tabell 15. Data produsert i IVION,.....	44
Tabell 16. Plan for analyse.....	45
Tabell 17. Endelig beregnede fastmerker.....	48
Tabell 18. Verdier som ga utslag i observasjonstest.	48
Tabell 19. Verdier som ga utslag i Indre pålitelighetstest.....	48
Tabell 20. Ny-bestemte koordinater for targets med tilhørende standardavvik.	50
Tabell 21. Beskrivelse av bundles og punktskyer.	51
Tabell 22. Resultat av registrering og georeferering av referansepunktsky.....	52
Tabell 23. Resultat etter registrering og georeferering av søylepunktskyer.....	53
Tabell 24. Oversikt for input og resulterende RMSE oppnådd ved ICP.....	55
Tabell 25. Oversikt for verdiene til M3C2 beregning.....	56

Tabell 26. Sammenstillingsmatrise	57
Tabell 27. Sammenstillingsmatrise	57
Tabell 28. Sammenstillingsmatrise	57
Tabell 29. Avvik sett opp mot krav til forarbeid	70

1 Innledning

Bakgrunn

Oppdragsgiver benytter i dag en rekke skanneinstrumenter, med hver sine styrker og svakheter. NavVis VLX er et svært effektivt instrument for innsamling av punktskydata sammenlignet med tradisjonell TLS. I dag blir det med denne skanneren produsert et produkt med centimeters nøyaktighet som er godt nok for mange bruksområder, som for eksempel FDV, BIM-modellering av eldre bygg og visualisering. For oppdrag med strengere krav til nøyaktighet, må det i dag brukes skannemetoder som er mer tidskrevende av natur som ofte innebærer bruk av TLS, flere targets og større datamengder. I enkelte prosjekter er det kun deler av skanneområdet som krever høy nøyaktighet, og oppdragsgiver ønsker derfor å se om man effektivt ved kombinert bruk av MLS og TLS kan øke nøyaktigheten ved behov, for å skape et bedre produkt samtidig som man beholder effektiviteten gitt av MLS.

Problemstilling

Med dette som utgangspunkt ble oppgavens problemstilling som følger: «Hva er en effektiv produksjonsløype der man kombinerer TLS- og MLS-punktskydata, for å få økt nøyaktighet i utvalgte områder?»

Metode

For å finne svar på oppgaven vil det bli samlet inn skannedata med både TLS og MLS. Georeferert TLS punktsky av hele det skannede området er tenkt brukt som referanse, og forskjellige sammensetninger av punktskyer fra MLS vil bli sammenliknet mot referansepunktsky. MLS data vil bli samlet inn på et utvalg forskjellige måter for å ha et grunnlag for å si noe om hvilken metode som er mest nøyaktig og eventuelt raskest.

Oppgaven ble valgt fordi den er både interessant og utfordrende. Det var utfordrende å finne en god måte å undersøke problemstillingen på, da dette kan gjøres på mange forskjellige måter. Planlegging av alle operasjonene, som etablering av fastmerker, plassering av targets, polygondrag, innsamling av skannedata, og en plan for analyse av innsamlede data var ganske omfattende. Gruppen kom imidlertid frem til en god metode som ble brukt i oppgaven.

Muligheten til å få bruke noe av det nyeste innen TLS og MLS teknologi gjorde i tillegg at oppgaven ble ekstra interessant.

FNs bærekraftsmål

Sett fra et samfunnsmessig perspektiv er FNs bærekraftsmål nummer 9, samt flere av delmålene relevant for denne oppgaven. «*Bygge solid infrastruktur og fremme inkluderende og bærekraftig industrialisering og innovasjon*» (FN-sambandet, 2022) er ordlyden i bærekraftsmålet. Dette beskriver en prosess som geomatikere deltar i hele tiden. Generelt blir nye og mer effektive verktøy, programvarer og metoder tatt i bruk fortløpende. Dersom oppgaven bidrar til økt forståelse for kombinert bruk av MLS og TLS, er dette med på å fremme innovasjon og bidra til en mer solid infrastruktur.

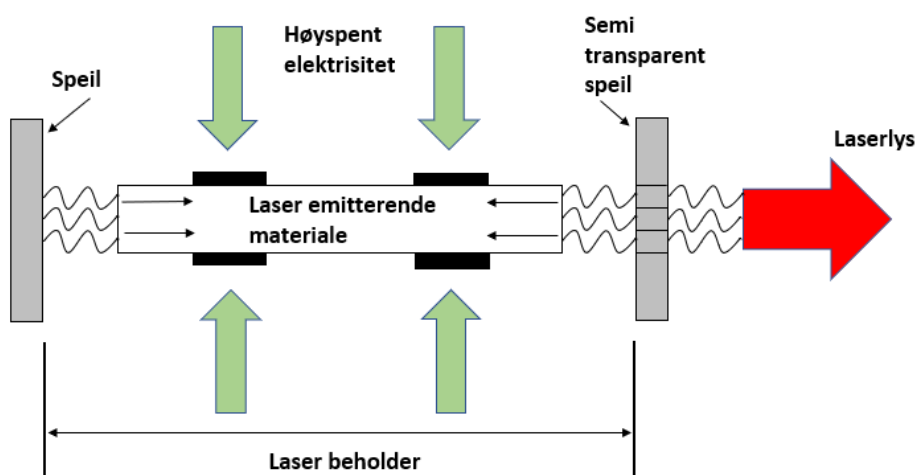
2 Teori

2.1 Prinsipper for laserskanningsteknologi

Laserskanningsteknologi er et verktøy som effektivt samler data fra blant annet objekter, flater bygninger og landskap. Pulsbaserte laserskanningssystemer; også kjent som Time of flight (ToF) laserskannere; observerer innfallsvinkel og tiden det tar for en emittert laserpuls å treffe objektet og returnere til instrumentet for å beregne punktets posisjon. Observasjoner tilføyes en beregnet XYZ-koordinat og kan samles i form av punktskydata (Kowalska, 2020).

2.1.1 Laser

Ordet laser er et akronym og betyr «Light amplification by stimulated emission of radiation». En laser er prinsipielt sett en enhet som inneholder et stykke materiale eller gass, som når utsatt for sterk elektrisitet emitterer lys. De utvalgte materialene eller gassene i en laser skaper lys ved at atomene, molekylene og ionene emitterer lys i det de returnerer fra sin eksiterte energitilstand til sin grunntilstand etter stimulering i form av elektrisitet. I dag brukes laseren på mange områder som krever høy presisjon siden laserstrålen ikke divergerer når den forlater senderen. I tilfeller hvor laseren benyttes i LiDAR-sensorer divergerer den neglisjerbart over større avstander (Campbell og Wynne, 2011).



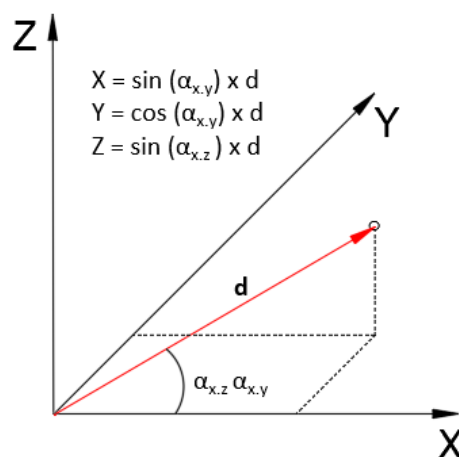
Figur 1. Illustrasjon av prosessen som emitterer laserlys.

2.1.2 LiDAR

Laserskanning er basert på LiDAR fjernmålingsteknikk. LiDAR-sensorer sender energi i et smalt frekvensområde, mottar deretter energi reflektert fra objektet og lager et bilde av det skannede objektet i form av en punktsky. LiDAR-sensorer er aktive, som betyr at de er i stand til å produsere energien som trengs for å skape laserstrålen selv, og dermed er uavhengige av ekstern belysning.

Data som spesifiserer tidspunktet for sending/mottak av laserstrålen, avstand, innfallsvinkel, endringer i frekvensen til signalet eller tiden da strålen ble reflektert, gir en svært nøyaktig estimering av geometrien til objektet. I tillegg, gjennom en serie analyser basert på de ovennevnte parameterne, er det mulig å bestemme f.eks. strukturen til objektets materiale eller temperatur-forskjeller på den skannede overflaten (Campbell og Wynne, 2011).

LiDAR-instrumenter inneholder 3 grunnleggende komponenter. Den første er enheten som genererer og sender laserstrålen. Den andre komponenten er den opto-mekaniske reflektormekanismen, som laserstrålen strømmer gjennom før den forlater instrumentet. En del av energien i laserstrålen flyr tilbake til instrumentet etter refleksjon fra det målte objektet. Denne energien tas imot i instrumentet ved hjelp av den tredje komponenten; laserstrålemottakeren. Mottakeren utfører en analyse av bølgeformen for å bestemme den fysiske karakteristikken av objektets overflate og dets plassering i et tredimensjonalt koordinatsystem (Heritage og Large, 2009).



Figur 2. Illustrasjon som viser hvordan LiDAR systemer posisjonerer objekt i 3D-rommet.

Den geometriske plasseringen til det registrerte punktet, beregnes med å ta hensyn til vektoren som stammer fra midten av instrumentet, som definerer dermed origo til det lokale kartesiske koordinatsystemet, til det registrerte punktet. Vektoren er en matematisk beskrivelse av laserstrålens- retning og lengde. Punktkoordinatene beregnes ved bruk av verdien for tiden laserstrålen brukte på å reise fra instrumentet til innfallspunktet og tilbake til instrumentet (ToF), og vinkelverdiene for laserstrålen som vist i formlene 2.2, 2.3 og 2.4. Avstanden bestemmes ved bruk av lyshastighet konstanten og tidsverdien vist i formel 2.1 (Heritage og Large, 2009).

$$d = \frac{ct}{2} \quad (2.1)$$

$$x = \sin \alpha_h d \quad (2.2)$$

$$y = \cos \alpha_h d \quad (2.3)$$

$$z = \sin \alpha_v d \quad (2.4)$$

Hvor:

- d er avstand fra instrumentets senter til innfallspunktet
- c er lyshastighetskonstanten (299 792 458 m/s)
- t er ToF – Time of Flight
- α_h er horisontal vinkel til emittert laserstråle
- α_v er vertikal vinkel til emittert laserstråle

2.1.3 Intensitet

Laserens returstråle inneholder informasjon om pulsstyrken. Styrken på en returpuls fra hvert enkelt punkt i en lasermåling kalles intensitet. Den er basert på refleksiviteten i overflaten til det målte objektet, og frekvensen i laserstrålen. Refleksiviteten varierer med typen overflate på det målte objektet. Intensiteten kan brukes til å gjenkjenne forskjellige fysiske egenskaper i punktskyen, eller for å erstatte farge fra bilder i et flyfoto. Klassifisering av punktsky er et annet bruksområde (Esri, 2021).

For å identifisere targets er det intensiteten som brukes, og hvordan dette gjøres er beskrevet i kapittel 2.5.2. Intensitetens styrke blir bestemt av objektets overflate og refleksiviteten. Dette er beskrevet i kapitlet om refleksivitet.

2.1.4 TLS

Bakkebasert laserskanning (TLS) er et eksempel på en målemetode som tar i bruk LiDAR teknologi for effektiv innsamling av data. Den første laserskanneren ble oppfunnet og tatt i bruk i 1999, og siden den tid ble etterkommende instrumenter gradvis utviklet, mer kjent og med et bredere spekter av applikasjoner (Heritage og Large, 2009). Denne teknologien benyttes innenfor mange bruksområder i ulike bransjer. Litteraturen presenterer ofte TLS som verktøyet benyttet til å utføre inventar over kulturminner, industrielle installasjoner eller dokumentasjon av den faktiske tilstanden til objekter av interesse. TLS teknologi bidrar i stadig økende grad til anskaffelse av grunnlagsdata, som videre brukes bl.a. til arkitektoniske formål, som prosjektering og modellering av bygninger, eller konstruksjonsmålinger som handler om periodisk måling for å overvåke forvrengninger, spenninger, nedbøyninger og andre type deformasjoner på objekter av interesse (Kowalska, 2020).

De nåværende bakkebaserte laserskannerne kan måle opptil flere millioner punkter per sekund (Kowalska). Dette fører til, at disse instrumentene er i stand til å produsere en mengde data i form av millioner av samlede punkter i et lokalt koordinatsystem. I tillegg har TLS innebygde RGB-kameraer som muliggjør samtidig produksjon av panoramabilder av omgivelsene fra instrumentets perspektiv, senere brukt e.g. til å fargelegge punktskyen. Sammenlignet med deres forgjengere fra det første tiåret av det 21. århundre, hvor lasere utviklet i 2006 kunne måle rundt 500 000 punkter per sekund, kan dette betraktes som en betydelig teknologisk prestasjon (Heritage og Large, 2009).

Nøyaktigheten av dataene som er oppnådd ved bruk av moderne TLS kan anbringes på en millimeterskala, og i tilfeller der eksterne feilkilder, som påvirker målingenes kvalitet reduseres til et minimum, kan standardavviket falle ned til et sub-millimeter-nivå (Kowalska, 2020).

Kowalska viser i sin doktorgradsavhandling til en forskningsartikkel basert på sammenstilling av TLS- og presisjonsnivelleringsmålinger utført på to broer, hvor maksimale forskjellen mellom måleteknikkene var i størrelsesorden 3,4 mm og 0,8 mm (Löhmus *et al.*, 2018).

Til tross for høy målepresisjon og kapasitet til å produsere store datamengder, har TLS-teknologien sine ulemper og begrensninger. Blant annet værforhold, utilgjengelige steder, samt områder hvor operatøren av sikkerhetsmessige årsaker ikke kan foreta skanneoperasjoner. Den tidkrevende data-produksjonsprosessen med mange stasjoner, og dens etterfølgende registrering til en punktsky genererer høye kostnader, noe som gjør at TLS-teknologien ikke alltid er optimal (Nowak, Orłowicz og Rutkowski, 2020).

2.1.5 MLS

Siden den første implementasjonen av LiDAR-systemer, har prosessene knyttet til dem gjennomgått enorm transformasjon og forbedring. Måten data samles inn, lagres, behandles, optimaliseres og brukes på har utviklet seg konsekvent med globalt sett eksponentiell teknologisk utvikling. Denne utviklingen førte i den andre dekadene av 21. århundre til at for øyeblikket forstås teknologien på to måter.

For det første, er det assosiert med muligheten for å skaffe seg en enorm digital punktsky ved bruk av laser- skannere eller profilere festet til en spesiell plattform og montert på en bil, jernbanevogn, eller til og med vannkjøretøy (batymetri). Denne teknikken brukes til å skaffe data for store byområder, lange veistrekninger, jernbanespor eller sjøbunnform.

LiDAR-systemer festet til mekanisk bærer består hovedsakelig av to grunnkomponenter. Dette er posisjonssensorer og kartleggingssensorer (Barber, Mills og Smith-Voysey, 2008). Sensorer som en LiDAR laserskanner eller laserprofilere; som er et alternativ eller et godt supplement til systemet; har for oppgave registrering av data for ett eller flere plan de er rettet mot, for eksempel veier og side terreng, kalles kartleggingssensorer. Antall skannere og profilere kan økes for å øke det skannede området og datamengden.

En annen komponent i systemet er GNSS antennen og dens signalmottaker, som muliggjør kontinuerlig posisjonering av hele systemet i sanntid med en nøyaktighet på 0,03 m i et valgt tredimensjonalt referansesystem. Det tredje grunnelementet i systemet er Inertial Measurement Unit (IMU), som i likhet med GNSS-komponenten kontinuerlig samler inn data om objektet den er festet til. Dens oppgave er å måle inn og beregne data som beskriver akselerasjonene til objektet, og vinkelhastighetene for å bestemme orienteringen og posisjonen til enheten i et tredimensjonalt koordinatsystem. GNSS- og IMU- enhetene klassifiseres derfor som posisjonssensorer (Barber, Mills og Smith-Voysey, 2008).

For det andre er det assosiert med den nyere teknologien, som er mer aktuell for denne bacheloroppgaven. Den lar operatøren eller en robot bære måleinstrumentet suksessivt langs den planlagte måleruten eller rundt objektet av interesse. Teknologien egner seg best til innendørsbruk, derfor blir den knyttet til IMMS akronymet (Indoor Mobile Mapping Systems).

Mobil laserskanning, også kjent som mobil kartlegging eller kinematisk laserskanning, er en teknologi som dukket opp i det andre tiåret av det 21. århundre. Implementeringen av IMMS var mulig på grunn av utviklingen av presise posisjoneringssystemer, høyhastighets laserskanner og utviklingen av SLAM-algoritmen.

Instrumenter av denne typen har en eller flere LiDAR sensorer, og i tillegg hos enkelte produsenter RGB-kameraer som tar panoramabilder i vinkelområde på opptil 360 grader (NavVis, 2022a). Bruken av denne instrumenttypen muliggjør innhenting en enorm mengde data på mye kortere tid enn ved bruk av tradisjonelt bakkebasert laserskanning. Det er mulig takket være SLAM-algoritmen, som kontinuerlig og samtidig bygger et kart over omgivelsen innenfor rekkevidde til instrumentets sensorer, og estimerer posisjonen til instrumentet i dets lokale koordinatsystem (Cadena *et al.*, 2016).

2.2 SLAM

SLAM (Simultaneous Localization And Mapping) teknologien har i de siste to tiårene gjennomgått stor utvikling. Forskere har brukt forskjellige teknikker som skal forbedre roboters evne til selvstyring og navigering uten menneskelig innblanding. God navigering betinger at roboten har et godt bilde av miljøet rundt seg, og en stabil og nøyaktig kartlegging av sin posisjon innenfor dette miljøet. Miljøet, eller kartet som man kan kalle det, består av forskjellige egenskaper som vegger, hindringer etc., og må eksistere for at roboten skal finne sin posisjon og orientering. Genereringen av dette kartet kalles mapping og en robot kan estimere sin posisjon og orientering ved bruk av dette kartet via en lokaliseringsprosess (localization). SLAM teknologien er et veletablert system for å beregne en robots posisjon og orientering, og er essensiell i f.eks. innendørs miljøer hvor GPS ikke kan brukes (Taheri og Xia, 2021).

2.2.1 Visual SLAM

Algoritmenes evne til å spore og matche egenskaper har økt betydelig de siste årene, godt hjulpet av systemenes kamera samt robotisering. I Visual SLAM blir utvalgte punkt sporet fra bilde til bilde i den kontinuerlige strømmen av kamerabilder. Ut fra punktenes bevegelse fra bilde til bilde finner Visual SLAM kameraets bevegelsesretning i rommet. Algoritmen beregner kontinuerlig nye koordinater til de sporede punktene (kartlegging) for så å bruke disse til å bestemme påfølgende posisjon (lokalisering) (Leica Geosystems, 2022).

2.2.2 Visual Inertial System (VIS)

I skanneren Leica RTC360, som er brukt i denne oppgaven, brukes Visual SLAM med 5 innbygde kameraer kombinert med en IMU. Dette systemet kalles Visual Inertial System (VIS). Systemet beregner i sann-tid skannerens posisjon etter hvert som den flyttes fra stasjon til stasjon. Systemet er meget robust og håndterer de fleste utfordrende situasjoner i feltet, enten det er forskjeller i høyde eller gjentakende forflytninger over lengre distanser.

VIS systemet gir hvert ferdig skann den riktige lokasjonen og rotasjonen i feltet, noe som gjør det mulig å linke sammen punkttskyene etter hvert skann. Prosessen tar bare noen sekunder, og er en stor fordel. Punkttskyen som eksporteres fra RTC360 er ferdig registrert, og mye tid er spart da det blir mindre etterarbeid (Leica Geosystems, 2022).

2.2.3 VLX – Algoritme

I matematikk og databehandling er algoritme en nøyaktig og fullstendig beskrivelse av fremgangsmåten for løsning av for eksempel en beregningsoppgave. I et dataprogram er algoritmen uttrykt i et programmeringsspråk (Store norske leksikon, 2020b). Ifølge NavVis, setter algoritmen i VLX sammen data fra systemets sensorer; IMU, RGB kamera, lidar osv., for å bestemme bevegelsens bane etter hvert som bevegelsen går fremover. NavVis sammenlikner det med å gjøre polygondrag innen landmåling. Bevegelsen går framover langs en linje, og det blir tatt målinger fra et antall punkter langs denne linja. Hver gang man flytter fram til neste stasjon brukes de forrige stasjonene til å beregne den nye. Algoritmen gjør disse nøyaktige beregningene et stort antall ganger i sekundet. Man kan si det slik at algoritmen er en sofistikert teknologi som automatisk gjør polygondrag etter hvert som bevegelsen går fremover (NavVis, 2020).

2.2.4 Data filtrering

Utfordringen med SLAM er ofte kalt et «høna og egget»-problem. Det som gjør det utfordrende, er at det blir en gjensidig avhengighet når det skal genereres et kart av miljøet roboten er i. For å estimere sin lokalisering trenger roboten et kart av miljøet rundt seg, men for å generere et kart må den vite sin lokalisering (NavVis, 2022a). For å løse dette problemet er det utviklet forskjellige algoritmer, også kalt filtre, som jobber på litt forskjellige måter. Tilnærminger som bruker sannsynlighetsberegninger, er mest brukt, og er basert på Bayes estimeringsmetode. To av de mest brukte er Partikkelfilter og Kalmanfilter (Taheri og Xia, 2021).

Partikkelfilter

Partikkelfilter er et kraftfullt verktøy som er mye brukt innen SLAM-teknologien. Ideen bak dette går ut på å bruke et sett med partikler for å representere og spore sannsynlighetsdistribusjonen av en stokastisk (beregnet) tilstand. En partikkel er en enkelt verdi tatt ut fra denne sannsynlighetsdistribusjonen, og hver partikkel har sin egen vektning. Denne vektningen representerer sannsynligheten for at verdien er riktig i forhold til sannsynlighetsdistribusjonen. Partikkelfilteret bruker en todelt oppdateringsprosess for å oppdatere partiklene, «prediction - update». I «prediction» steget blir partiklenes nye posisjon estimert ved hjelp av en tilstand-forandrings distribusjon (the state transition distribution). I «update» steget blir vektningen til partiklene oppdatert av en observasjons sannsynlighetsdistribusjon (the measurement probability distribution) (Xiong *et al.*, 2016).

Et eksempel på en tenkt situasjon der partikkelfilter kan tas i bruk er en robot utstyrt med SLAM-teknologi for posisjonering og navigasjon. Roboten lager et kart fra skann som har målte observasjoner til hvert punkt, og har i tillegg innbygde bevegelses-sensorer. Et partikkelfilter bruker denne informasjonen til å forutsi robotens posisjon ved hjelp av sannsynlighetsberegninger. Prosessen kan beskrives i følgende trinn.

1. Det genereres en mengde hypoteser om posisjonen. Disse hypotesene kalles partikler og fordeles jevnt utover hele kartet.
2. Hver partikkel blir evaluert og partikler med avstand nærmest den målte verdien får høyest vektning.
3. Resampling. Det genereres nye partikler basert på vektningen av partiklene i forrige evaluering. Nå har alle partiklene lik vektning, men eksisterer kun i sannsynlige områder. I dette trinnet eksisterer det altså ingen partikler i usannsynlige områder.
4. Data fra robotens bevegelses-sensorer blir lagt til og partiklene får ny posisjon estimert.
5. Ny vektning blir gjort med grunnlag i nye målinger. Igjen er noen partikler mer sannsynlige enn andre og får høyere vektning.
6. Prosessen repeteres fra punkt 3-5 og gir en kontinuerlig sannsynlighetsberegning av robotens posisjon.

Kalmanfilter

Kalmanfilter (KF) er en annen teknikk som bruker sannsynlighetsberegninger til å estimere et mobilt systems tilstand (posisjon og orientering). Som grunnlag for estimeringen brukes data fra sensorer om bord, for eksempel IMU, RGB kamera, Lidar osv. Prosessen foregår i to trinn; Prediction-step og Measurement-update-step.

1. Prediction-step: Data fra bevegelsessensorer brukes til å estimere systemets nåværende tilstand. Denne estimeringen baserer seg på det beste estimatet av den forrige tilstanden og en såkalt «state transition model», som beskriver hvordan systemets tilstand gradvis oppdaterer seg selv.
2. Measurement-update-step: Nye data fra observasjonssensorer brukes til å forbedre den estimerte tilstands-vektoren gjort i første steg. Dette gir det beste estimatet av systemets nåværende tilstand.

Disse to trinnene gjentas fortløpende. Metoden bruker den relative usikkerheten mellom den estimerte tilstanden i step 1, og sensorobservasjonene, til å finne en vektning. En sensor med lav usikkerhet gjør at estimatet blir vektet nærmere sensorens verdier. Motsatt vil en sensor med høyere usikkerhet føre til høyere vektning på den estimerte tilstanden.

Extended Kalman filter

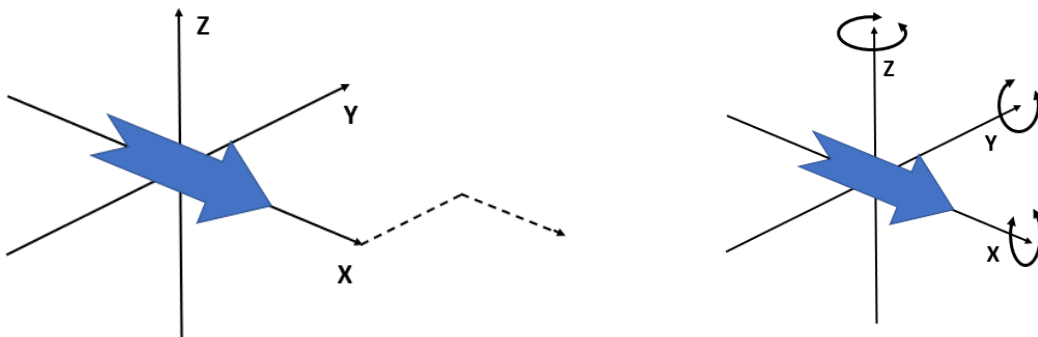
Når KF brukes, blir det gjort to antakelser.

1. Alle modeller er Gaussiske.
2. Alle modeller er lineære.

Hvis vi er i en verden hvor dette er riktig, er KF den optimale estimator, men virkeligheten er ikke slik. De fleste applikasjoner opererer i en ikke-lineær verden, hvor KF ikke kan brukes. Derfor har man utviklet Extended Kalman Filter (EKF). Her blir det gjort en lokal linearisering ved hjelp av Taylor approximering av den ikke-lineære modellen og forvandler den til lineære modeller gitt det nåværende lineariseringspunktet. Dette gjentas for hvert punkt da man vil ha en ny prediksjon til et nytt lineariseringspunkt. Det fungerer som et KF bare at man legger til den lokale lineariseringen (Løvås *et al.*, 2017).

2.2.5 IMU

I områder hvor det ikke er tilgang til satellittsignaler, for eksempel innendørs, er man avhengig av enheter som kan registrere forandring i posisjon og retning på andre måter. Inertial Measurement Unit (IMU) er en slik enhet. Den er sammensatt av flere sensorer. Vanligvis består den av akselerometer, gyroskop og noen ganger et magnetometer. Sensorene gir informasjon om forandringer enten langs eller rundt enhetens X-, Y- og Z-akse. Hver av disse aksene omtales vanligvis som frihetsgrader (DoF), sånn at en IMU med for eksempel et akselerometer og et gyroskop kalles for en 6 DoF enhet. Akselerometeret kalkulerer lineær translasjon langs systemets X-, Y-, og Z-akser som vist i figur 3 venstre.



Figur 3. Translasjon langs systemets akser(V). Vinkelfart rundt systemets akser(H).

Akselerasjon defineres som forholdet mellom endring i fart med hensyn på tid, og er gitt som en vektor med både retning og magnitudo relativt til en referanseramme. Oppgitt i SI-enheter blir det lengde delt på tid².

For å finne den lineære farten \vec{v} integreres den lineære akselerasjonen \vec{a} med hensyn på tid (formel 2.5).

$$\vec{v}(t) = \int_0^t \vec{a}(t) dt \quad (2.5)$$

For å finne den lineære posisjonen \vec{s} integreres den lineære farten \vec{v} mht. (formel 2.6).

$$\vec{s}(t) = \int_0^t \vec{v}(t) dt \quad (2.6)$$

Objektets forskyvning blir på denne måten beregnet og er vist som stiplet linje i figur 3 venstre. Gyroskopet finner systemets rotasjon ved å beregne vinkelfart $\vec{\omega}$ rundt hver av de tre aksene (figur 3 høyre). Vinkelfart $\vec{\omega}$ er endrings hastigheten i vinkelforskyvning og er vist i formel 2.7.

$$\vec{\omega}(t) = \frac{d\theta}{dt} \quad (2.7)$$

For å finne rotasjonsvinkelen $\vec{\theta}$, integreres vinkelhastigheten med antakelse om at starthastigheten er null (Hestnes og Kjeldsberg, 2016) (formel 2.8).

$$\vec{\theta}(t) = \int_0^t \frac{d\theta}{dt} dt \quad (2.8)$$

2.2.6 Loop closure

En mye brukt metode for å korrigere feil er loop closure. Dette gjøres ved at man returnerer til et punkt som er skannet tidligere for å lukke en løkke. SLAM-algoritmen vil da gjenkjenne de overlappende punktene, og ut fra det kalkulere eventuell drift og tracking error. Algoritmen kan deretter gjøre nødvendige korreksjoner. Man kan tenke på loop closure som en automatisk lukking av et polygondrag.

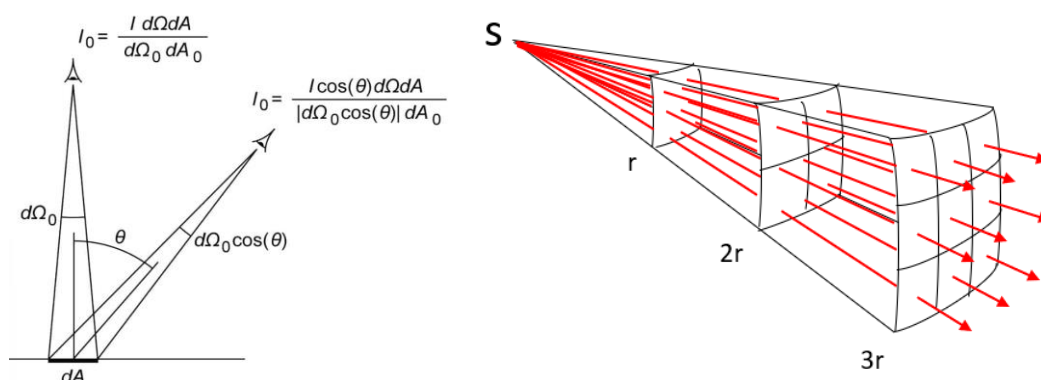
Loop closures kan foretas både horisontalt og vertikalt. Hvis det er to trapper i et bygg, kan man foreta vertikal loop closure ved å skanne opp den ene trappen og ned den andre, for så å komme tilbake til et tidligere skannet punkt (NavVis, 2020).

2.3 Feilkilder

2.3.1 Refleksjon

Når elektromagnetisk stråling treffer en overflate, får man en reaksjon. En av disse reaksjonene er refleksjon. Overflatens form og ruhet sammen med laserstrålens bølgelengde bestemmer refleksjonens natur. Jevne blanke flater reflekterer nesten alt innkommet lys i én retning. I slike tilfeller er refleksjonsvinkelen lik innfallsvinkelen. I menneskeskapte miljøer kan eksempler på slike overflater være speil og metall. I naturen gir en rolig vannoverflate samme effekten.

En grov overflate derimot vil reflektere laserstrålen med spredning i alle retninger. En slik overflate kalles isotropisk. I naturen vil mange overflater, for eksempel gress, ha denne effekten. En perfekt isotropisk reflektor vil ha lik lysstyrke når den observeres fra hvilken som helst vinkel. Johan Heinrich Lamberts lover omhandler dette temaet (Campbell og Wynne, 2011). En av Lamberts lover er loven om lysemisjon (figur 4 venstre). Den sier at lysstyrken i et flatelement dA i en bestemt retning θ er proporsjonal med den tilsynelatende størrelsen av flatelementet når den sees fra denne retningen (Store norske leksikon, 2020a). Loven om lysemisjon er ofte kombinert med den Invers-Kvadratiske Lov (figur 4 høyre). Den sier at observert lysstyrke minker proporsjonalt med kvadratet av distansen fra observatør til kilde (Campbell og Wynne, 2011).



Figur 4. Til venstre: Lamberts lov om lysemisjon. Gjengitt med tillatelse fra Store Norske Leksikon. (Store norske leksikon, 2020b). Til høyre: Den invers-kvadratiske lov. Illustrert etter inspirasjon fra figur i (Campbell et al., 2017).

Figur 4 (høyre) forklarer sammenhengen mellom den Invers-kvadratiske loven og avtakende lysstyrke/intensitet. Flere fysiske egenskaper, for eksempel lysstyrke/intensitet, blir svakere når avstanden øker. Antallet linjer ut fra lyskilden (S) viser den totale lysstyrken/intensiteten som er konstant selv om avstanden øker. Men økende avstand øker imidlertid avstanden mellom linjene og derfor avtar lysstyrken/intensiteten innenfor like store områder i forskjellig avstand til lyskilden. Tettheten mellom linjene, og dermed lysstyrken/intensiteten er omvendt proporsjonal med kvadratet av avstanden fra lyskilden. Grunnen til dette er at overflaten til en kule øker med radiusens kvadrat (Campbell *et al.*, 2017).

Lovene som er nevnt over er aktuelle når det gjelder laserskanning og måling med totalstasjon. Laserstrålens innfallsvinkel og en egnet overflate på det målte objektet er avgjørende for et resultat med god kvalitet. For stor innfallsvinkel og en uegnet overflate gir i dårligste fall ingen returpulser som blir registrert. En annen mulighet er at laserstrålen blir reflektert fra den første overflaten den treffer, fortsetter videre til en annen overflate for så å bli returnert samme vei den kom fra. Denne returen blir så registrert i instrumentet. Ved måling med totalstasjon blir da avstanden til det målte punktet feil. Det samme kan skje ved laserskanning, og her blir dette oppfattet som støy i punktskyen. Et typisk eksempel er laserskanning i områder med vindusflater. Beste kvalitet på resultatet får man når innfallsvinkelen sammenfaller med overflatenormalen (omtalt i kapittel 2.3.2 refraksjon) og overflaten er egnet.

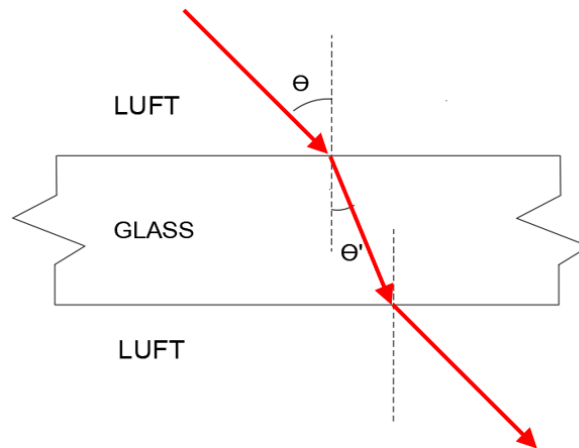
2.3.2 Refraksjon

Refraksjon eller lysbrytning er en annen reaksjon som kan oppstå når elektromagnetisk stråling treffer en overflate. Det vil si at lyset skifter retning når det går fra et medium som leder lys til et annet. Kjente eksempler på dette er for eksempel forstørrelsesglass, der lysbrytningen blir brukt til å forstørre et bilde, og forvrengningen av objekter nedsenket i vann. Lysbrytning oppstår også når lys passerer gjennom luft med varierende temperatur. I slike tilfeller kan objekter sett på lang avstand, observeres som «dirrende», når lysstrålen går gjennom varm luft nær overflaten av for eksempel en parkeringsplass.

Lysbrytningens index (n) er definert som forholdet mellom lyshastigheten i vakuum (c) og lyshastigheten i mediumet (c_n), (Campbell og Wynne, 2011) (formel 2.9):

$$n = \frac{c}{c_n} \quad (2.9)$$

Når lys går inn i et tettere medium går brytningen mot overflatenormalen, vist som stiplet linje vinkelrett på overflaten i figur 5.



Figur 5. Lysbrytning luft-glass-luft.

Den brutte lysstrålens vinkel blir definert av Snells lov, hvor n er brytningsindeksen til mediet lyset kommer fra og n' er brytningsindeksen til det andre mediet. Innfalls- og refraksjonsvinkel er angitt som henholdsvis θ og θ' i forhold til overflatenormalen (Campbell og Wynne, 2011) (formel 2.10).

$$n \sin \theta = n' \sin \theta' \quad (2.10)$$

Figur 5 viser lysets retning når det går fra et medium til et annet, og ut igjen til det første. Lysets vinkel i forhold til overflatenormalen er den samme før lyset går inn i glasset som når lyset har kommet ut av glasset.

Refraksjon kan påvirke resultatene ved laserskanning og måling med totalstasjon. Ved stor temperaturforskjell i luften mellom for eksempel totalstasjonen og et prisme eller et target, kan dette påvirke måleresultatet negativt.

2.3.3 Drift

SLAM teknologien har hovedsakelig to typer feilkilder hvorav den ene er «drift». Dette oppstår som en følge av at alle sensorer har små målefeil. Når sensordata brukes til å beregne ny posisjon med grunnlag i de gamle posisjonene, akkumuleres feilen etter hvert som bevegelsen går fremover. Når dette skjer degraderes nøyaktigheten i den beregnede banen bevegelsen går, og unøyaktigheten går ut over det ferdige resultatet (Steux og El Hamzaoui, 2010).

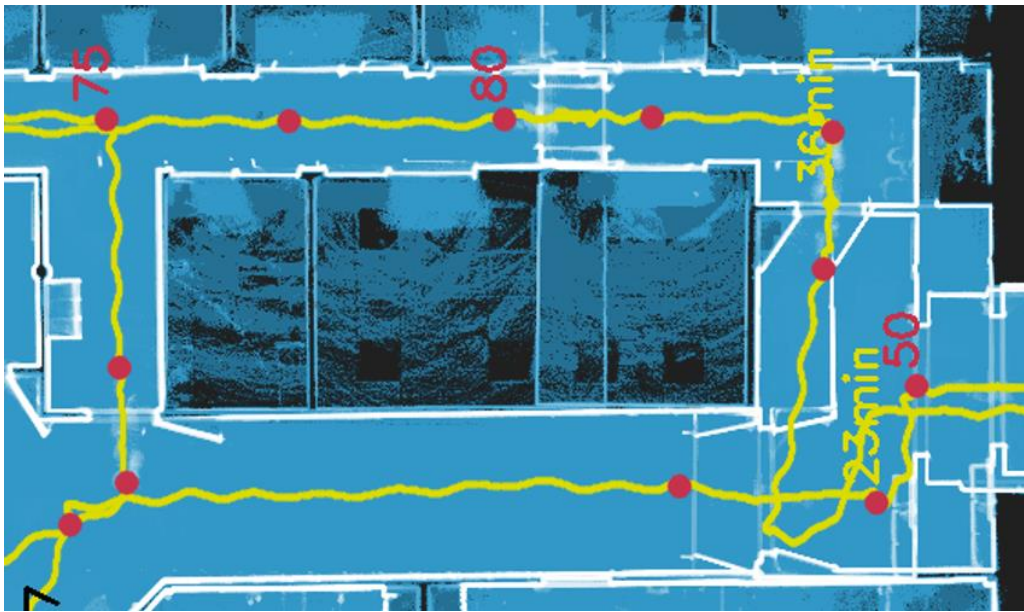
Beregningene gjøres et enormt antall ganger, så selv om hver enkelt sensorfeil er meget liten så blir den merkbar over tid. Eksempel på drift vises i figur 6 og det er tydelig at de veggene ikke flukter med hverandre på returen.



Figur 6. Eksempel på drift i punktsky fra MLS.

2.3.4 Tracking error

Den andre typiske feilkilden ved bruk av SLAM teknologien er «tracking error». Dette skjer når SLAM algoritmen har problemer med å takle miljøet den er i. Lange korridorer, for eksempel, mangler ofte de miljømessige egenskapene som algoritmen bruker til gjenkjenning, og dette kan føre til at systemet mister sin nøyaktige lokalisering (Steux og El Hamzaoui, 2010). Når dette skjer kan det være at algoritmen for eksempel ikke klarer å beregne hvor lang bevegelsen har vært. Eksempel vist i figur 7 under.



Figur 7. Eksempel på tracking error i punktsky fra MLS.

I den øverste korridoren på bildet er det gått fra venstre mot høyre med skanneren. Underveis gjennom korridoren mister algoritmen kontrollen på hvor lang bevegelsen er. Resultatet vises tydelig på høyre side av bildet hvor skanneren møter tidligere skannet område. Veggene fra nytt skann blir avbildet parallelt med vegger fra tidligere skann, men med stor avstand imellom.

2.3.5 Vanskelige omgivelser

NavVis VLX har noen begrensninger som det kan være verdt å ta hensyn til under bruk:

- Ved skanning på små områder der man ikke kan foreta loop closures kan det vurderes å bruke innmålte kontrollpunkter for å bedre nøyaktigheten (Steux og El Hamzaoui, 2010).
- Man bør unngå trange områder slik at avstanden fra skanner til målt objekt blir mindre enn 1 m. Det er ingen fordel å skanne nærmere enn dette, og man øker sjansen for å ødelegge instrumentet.
- Store åpne områder uten tydelig gjenkjennelig geometri bør unngås. Skanneren er designet for bruk i urbane områder.
- Skanneren har en rekkevidde på maks 100 m, og avstander på maks 60 m blir brukt til lokalisering. Skanning utover disse avstandene har derfor ingen hensikt.
- Det er ikke anbefalt å skanne når det regner.
- Skanning på kveldstid er greit så lenge fargeinformasjon ikke trengs, og at man ser nok til å bevege seg trygt.
- Det er mulig å skanne i støvete områder, men utfordringen er at det vil negativt påvirke panoramabildene og kvaliteten på punktskyen. Støvet vil legge seg utenpå kameralinser og skanner (NavVis, 2022b).

2.4 Grunnlagsdata

2.4.1 Fastmerker

For å gjøre arbeid med totalstasjon der objekter skal settes ut ifra et eksisterende koordinatsystem trengs det ett grunnlagsnett eller ett sett fastmerker i området med koordinater definert med datum og projeksjon. Et fastmerke er definert i standard for grunnlagsnett som «*Varig merket punkt, markert med bolt eller annen egnet permanent markering, der horisontale koordinater, høyde, tyngde og/eller andre koordinater er bestemt, eller planlagt bestemt, i et koordinatbasert referansesystem*» (Statens Kartverk, 2009c).

2.4.2 GNSS/CPOS

Global navigation satellite systems (GNSS) er en fellesbetegnelse for globale satellitt-baserte navigasjons- og stedfestingssystemer som kan brukes for å bestemme posisjonen for en satellittantenne hvor som helst på jorden (Statens Kartverk, 2009b). Punktbestemmelse med GNSS utstyr kan gjøres på en rekke metoder med varierende nøyaktighetspotensial og tidsbruk. Krav og detaljer for ulike målemetoder er definert i standard for Satellittbasert posisjonsbestemmelse (Statens Kartverk, 2009b). En metode for innmåling av punkter ved hjelp av GNSS er nettverks RTK (Real Time Kinematic). Det beskrives i standard for satellittbasert posisjonsbestemmelse at metoden benytter seg av et kontrollcenter som tar utgangspunkt i data fra et nettverk av permanente basestasjoner som beregner korreksjonsdata i form av GNSS målinger. Rover (GNSS mottaker) er koblet opp mot kontrollcenteret ved hjelp av internett eller mobilnett og sammenstiller egne GNSS målinger med referansedata fra kontrollcenteret og bestemmer vektoren mellom referansestasjon og rover (Statens Kartverk, 2009b). Denne metoden for satellittbasert posisjonsbestemmelse har et forventet nøyaktighetspotensial på 10-20mm + 1 ppm i grunnriss. Avstandsdel i nøyaktighetspotensialet avhenger av distansen mellom base og rover.

Statens Kartverk tilbyr ulike posisjonstjenester med sitt landsdekkende SATREF- nettverk av basestasjoner. CPOS er en slik tjeneste og opererer som beskrevet i avsnittet over om nettverks RTK. CPOS tjenesten beregner en VRS (virtuell referansestasjon) i nærheten av roveren med data fra SATREF- nettet. Rover oppfatter VRS data på lik linje som en fysisk basestasjon og kan bestemme vektoren mellom dem. Nøyaktigheten som kan oppnås varierer med avstanden mellom basestasjonene. Figuren nedenfor viser tjenestens forventede oppnåelige nøyaktighet ifølge Statens Kartverk (Statens Kartverk, 2021).

Tabell 1. Forventet oppnådd nøyaktighet for CPOS dekningsområde (Statens Kartverk, 2021).

	I områder med ca. 35 km mellom SATREF PGS	I områder med ca. 70 km mellom SATREF PGS
Grunnriss EUREF89	8mm	14mm
Høyde EUREF89 (over ellipsoiden)	17mm	30mm
Høyde NN2000	20mm	36mm

Resultatene er basert på Kartverkets analyser av målinger utført med CPOS. Tallene i tabellen ovenfor er oppgitt for 66% av tilfellene (standardavvik 1 sigma). For å få verdiene for 95% av tilfellene (2 sigma) må du multiplisere med 2.

2.5 Registrering

Dersom man har flere sett med punkter i ulike koordinatsystemer har registreringsprosessen som mål å finne den transformasjonen som best justerer dem til ett og samme koordinatsystem (Pan *et al.*, 2018). Denne prosessen brukes eksempelvis for punktskydata fra ulike oppstillinger av et område, og man kan gjennom ko-registrering binde disse til samme koordinatsystem og eksportere dem ut som en enkelt punktsky. Det finnes en rekke fremgangsmåter og klassifiseringer av metoder for registrering av en punktsky, men det velges her å trekke frem to metoder for registrering, target-basert registrering og cloud-to-cloud (C2C).

2.5.1 Cloud-to-cloud registrering (C2C)

Cloud-to-cloud (C2C) er et begrep som brukes for ko-registrering av to eller flere punkttskyer basert på egenskaper felles for punkttskyene og Iterative closest point (ICP) algoritmer, som matematisk finner beste transformasjon av punkttskyene. C2C metoden for registrering bruker ofte en «coarse-to-fine» (grov-til-fin) strategi hvor det først dannes et utgangspunkt for finjusteringen ved å transformere punkttskyene med egenskapsbaserte registrerings metoder for å så oppnå maksimalt overlapp mellom punkttskyene med ICP algoritmen (Cheng *et al.*, 2018).

Under grov-justeringen benytter man seg av egenskaper felles for punkttskyene. Dette er egenskaper som punkter, linjer og flater som er tydelige og identifiserbare i punkttskyene. Bygningshjørner, bygningskonturer, veikanter, trafikkskilt, fasader og tak/gulv er eksempler på slike egenskaper og omtales som nøkkelpunkter ved registrering. Felles nøkkelpunkter kan ofte identifiseres i programvare og velges manuelt for en rask grov-justering av punkttskyen. Det er også mulig å velge ut slike nøkkelpunkter automatisk ved å benytte algoritmer som «intrinsic shape signature», «3D Harris» og «Local curvature maximum». Nøkkelpunkter velges ut basert på sin geometri, slik at mer representative egenskaper for skyen kan trekkes ut (Pan, 2019). Basert på informasjon tatt ut av nøkkelpunktene kan programvaren videre benytte seg av en rekke algoritmer for å bestemme en grov transformasjon til å sammenstille punkttskyene. En slik transformasjon ansees som en grov registrering siden den tar utgangspunkt i enkelte nøkkelpunkter i punkttskyen i istedenfor hele punkttskyen (Pan, 2019). Denne metoden for å registrere en punkttsky er også utsatt for støy, og det kan være krevende å oppnå tilstrekkelig nøyaktighet om man kun baserer seg på denne metoden (Cheng *et al.*, 2018).

Etter en grov justering av punkttskyen har man dannet grunnlaget for å fin-justere punkttskyen for å finne den best mulige transformasjonen for registrering via en ICP-algoritme. Algoritmen antar et «godt» estimert utgangspunkt og velger ut en mengde punkter som skal «registreres». De korresponderende punktene i den andre punkttskyen identifiseres og det beregnes en transformasjon ved å minimalisere avstanden mellom disse punktene. Denne prosessen gjentar seg og itereres frem til funksjonsverdien konvergerer og forblir konstant. Etter denne prosessen er punkttskyen ferdig transformert og fin-justert (Cheng *et al.*, 2018).

2.5.2 Target-basert registrering

Target-basert registrering er en metode for registrering av punktskyer. Metoden bruker strategisk plasserte targets i skanneområdet og matcher targets felles for punktskyene som skal registreres. For å registrere punktskyer kun ved bruk av targets kreves det minst 3 synlige targets felles for punktskyene, men resultatet av registreringen bedres jo flere targets man har (Brumm, 2020). Targets kan identifiseres og markeres manuelt i punktskyen, men programvare kan også identifisere og finne sentrum av targets ved hjelp av algoritmer som TCE (Target center estimation). Det finnes ulike TCE-algoritmer som baserer seg på blant annet punktenes intensitet, farge-graderinger, symmetri og korrelasjons-basert bilde registrering for å identifisere og finne senter i et target. (Janßen *et al.*, 2019)

Når senter av targets er bestemt, beregner og sammenligner programvaren geometrien mellom dem for å finne transformasjonen som sammenstiller punktskyene. Targets må ikke flyttes mellom skanneposisjoner da de er knyttetpunkter og representerer samme punkt i begge punktskyer. I tillegg til å sammenstille punktskyer til samme lokale koordinatsystem kan targets også brukes for å føre punktskyen over til andre koordinatsystemer. Ved hjelp av totalstasjon kan man sette koordinater på targets slik at punktskyen kan blant annet geo-refereres under registreringen over til et valgt koordinatsystem.

Targets

Targets kan være naturlige gjenkjennelige egenskaper i et skann med skarp geometri som hjørner, kanter, flater etc. Eller de kan være kunstige, definerte figurer som plasseres strategisk i området som skal skannes (3Dscan, 2020). Kunstige targets er gjerne lett gjenkjennelige med sort-hvitt farge og er sjakkbrett-mønstret eller geometriske objekter som sfærer med kjente dimensjoner. Sort-hvite targets kan gjerne skrives ut på papir eller anskaffes som fysiske dedikerte targets som ofte kan monteres og roteres fritt i skanneområdet. Figur 8 viser eksempler på sort-hvite targets brukt for laser skanning.



Figur 8. Eksempel på svarte og hvite targets.

2.5.3 Transformasjoner

En transformasjon er, ifølge standarden Koordinatbaserte Referansesystemer 2.1, «*tilpasning av punkters koordinater i ett koordinatsystem med et gitt datum, til deres koordinater i et koordinatsystem av samme type, med et annet datum*» (Statens kartverk, 2009a). Denne operasjonen utføres med en metode med gitt algoritme. Hvis en transformasjon foregår innenfor det samme datumet, kalles det en translasjon (Skogseth og Nordberg, 2014).

Koordinattransformasjon

For å tilpasse koordinater til et nytt koordinatbasert referansesystem gjøres en koordinattransformasjon. Den mest brukte metoden går ut på å beregne transformasjonsparametrene ved hjelp av et antall punkter som har kjente koordinater i begge referansesystemene. Denne beregningen kan inneholde translasjon og/eller målestokkending og/eller rotasjon. Inneholder transformasjonen alle disse elementene og samtidig er vinkeltro og tredimensjonal, er det en 7-parameter-transformasjon. Er innholdet i beregningen bare en translasjon, er det maksimalt en 3-parameter-transformasjon. Andre formelverk kan også brukes i transformasjoner, men blir ikke omtalt her.

En Helmert-transformasjon er vinkeltro (konform), og benyttes når man i alle retninger har samme målestokk eller målestokkending. Hvis man aksepterer forskjellig målestokk i ulike retninger brukes en såkalt affin transformasjon.

Et eksempel på en transformasjonsformel er den strenge 7-parameter transformasjonsformelen som transformerer fra et datum (F) til et datum (T) (Statens kartverk, 2009a) (formel 2.11):

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{(T)} = \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix} + D \cdot A \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{(F)} \quad (2.11)$$

Hvor:

- T_1 , T_2 og T_3 er translasjoner langs hver av aksene i et rettvinklet kartesisk koordinatsystem
- A er en 3x3 rotasjonsmatrise som er funksjon av rotasjonene R_1 , R_2 og R_3 omkring aksene
- D er målestokkfaktoren.

Det finnes også en forenklet 7-parameter transformasjonsformel. Her må man imidlertid gjøre en forutsetning om at rotasjonene er små for å kunne bruke denne.

Det er viktig å unngå tap av gjeldende siffer i koordinatene under transformasjonen. Derfor må alle parameterne brukt i transformasjonen være oppgitt og bestemt med mange nok gjeldende siffer i utgangspunktet (Statens kartverk, 2009a).

2.6 Databehandling og analyse

2.6.1 Tynning av punktskyer

Punktskyer kan fort bli store og vanskelige å håndtere, så det er ofte behov for å redusere datamengden eller dele opp dataen når det skal behandles. Det er mange metoder for tynning av punktskyer, og metodene varierer blant annet ut fra formål og bruksområde. Ulike programvarer tilbyr ulike metoder og varianter av metoder. Metodene er gjerne former for subsampling, altså at det velges ut et utvalg av de originale punktene, i motsetning til å beregne nye som for eksempel ved interpolering. Subsampling gjør at punkter kan beholde egenskaper som farger, normaler og skalarverdier. Nedenfor beskrives eksempler fra to programvarer.

Programvaren Leica Cyclone 3DR har eksempelvis to metoder for tynning som begge er former for subsampling, kalt «Reduction» (reduksjon) og «Resampling». Reduksjon tynner til spesifisert antall punkter eller prosentandel, og tynningen skjer basert på lokal tetthet slik at man hovedsaklig tynner der det er høyest tetthet. Resampling tynner basert på ønsket tetthet. Man spesifiserer en gjennomsnittlig distanse mellom punktene, og det definerer cellestørrelse på et rutenett som projiseres på punktskyen. For hver celle beregnes det en overflate, og punktet som ligger nærmest overflaten beholdes (Leica Geosystems, 2021a).

I programvaren CloudCompare tilbys det tre typer subsampling, «Random» (tilfeldig), «Spatial» (romlig), og «Octree». Ved tilfeldig subsampling velges antall spesiferte punkter tilfeldig, uten hensyn til tetthet. Romlig subsampling baserer seg på spesifisert tetthet i form av oppgitt minimumsdistanse, og programvaren velger ut punkter slik at ingen punkter er nærmere hverandre enn den oppgitte distansen. Man kan også velge at denne distanseverdien dynamisk bestemmes ut fra verdien i skalarfelt, interpolert fra spesifisert øvre og nedre avstand linærfordelt mellom skalarfeltets ekstremalverdier. Uten å gå i dybden på hva octreedatastrukturen er og hvordan den fungerer kan man forenklet si at octreemetoden for subsampling går ut på å velge nivå på en rekursiv celleinndeling der kun punktet nærmest sentrum av hver celle beholdes. Merk at det i CloudCompare i tillegg til octreesubsampling er en funksjon for octreeresampling, som ikke er subsamplingbasert, og beregner nye punkter i stedet for å velge ut eksisterende (Cloud Compare, 2016).

2.6.2 Punktskynormaler

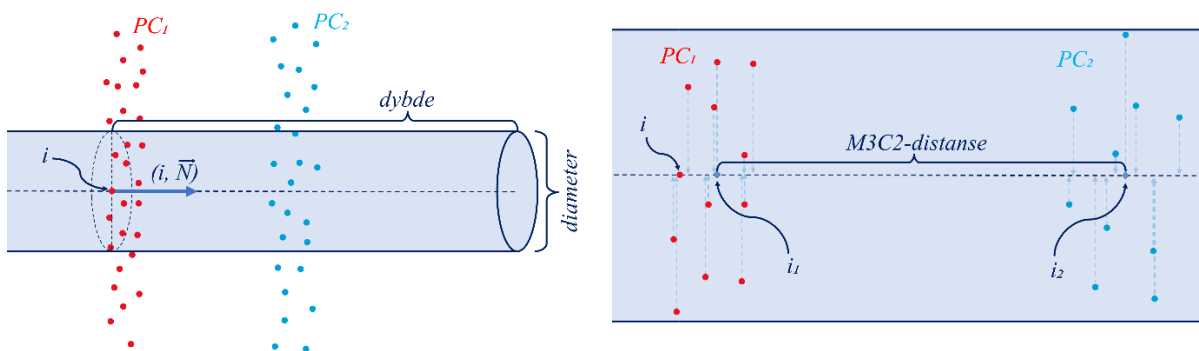
Punktskyer fra avstandsmåling representerer punkter på overflater fra virkeligheten, men orienteringen av overflatene kommer ikke direkte frem i den innsamlede dataen, da punktene i seg selv kun er nulldimensjonale posisjoner. Forholdet mellom et punkt og dets nærliggende nabopunkter gir gjerne informasjon om overflaten punktet ligger på, så ved å beregne normalvektorer basert på estimert lokal overflate får man tilbake informasjonen om overflateorientering. Normalvektorer er vektorer som står normalt (ortogonalt) på lokalt tangentplan. Disse vektorverdiene gir flere fordeler, som for eksempel at det kan benyttes for lettere uthenting av geometri og objektgjenkjenning. De fleste metoder for normalvektorberegning regner ut normaler for hvert enkelt punkt i punktskyen. Noen programvarer, som for eksempel NavVis IVION genererer automatisk normaler som følger med eksporterte punktskyer (Klasing *et al.*, 2009).

I programvaren CloudCompare kan man bruke verktøyet «Compute normals» for å beregne normaler. Det er flere valg for hvordan det skal gjøres, som hva slags lokal overflatemodell som skal forsøkes å tilpasse punktene, hvilke punkter som skal benyttes i tilpassingen for hver beregning, og hvordan orienteringen av hver normal skal bestemmes. En overflatemodell man kan velge er «Quadric» (Andregradsflate). Andregradsflater er overflater som defineres med andregradsligninger, og slike flater egner seg godt for estimering av lokal overflate, spesielt i buede områder. CloudCompare har mulighet for å automatisk foreslå radius for hvilke punkter som benyttes. Et av valgene når det kommer til å bestemme orientering er å bruke minimalt spennetre. Det går ut på at det velges et tilfeldig startpunkt, og orienteringen til normalvektoren her forplanter seg videre til nabopunkter, ved bruk av minimalt spennetre. Man oppgir maksimalt antall nabopunkter per node, i form av k -nærmeste naboer. (Cloud Compare, 2016; Khameneifar og Ghorbani, 2019; Levy, 1995).

2.6.3 M3C2-algoritmen

Multiscale model to model cloud comparison (M3C2) er en metode for å sammenligne to overlappende punktskyer. Metoden går ut på å regne avstand mellom punktskyene langs normalvektor, uten behov for mesh eller raster. Man velger en punktsky som referanse, og avstandsberegningene blir gjort med utgangspunkt i normalene til «Core points» (Kjernepunkter), som kan være alle punkter i referansepunktskyen, men gjerne er et subsamplet utvalg av punktene.

Måten avstanden blir beregnet for hvert kjernepunkt er at det projiseres en sylinder fra kjernepunktet med spesifisert diameter og dybde der sylinderaksen sammenfaller med kjernepunktets normalvektor. Sylinderen projiseres i begge retninger, og dybden er lengden i én retning. Punktene fra hver punktsky som befinner seg i sylinderen projiseres på sylinderaksen, og det beregnes en snittposisjon på aksen for begge punktskyene. Det er avstanden mellom disse snittposisjonene som utgjør M3C2-distansen. Figur 9 illustrerer beregningen av denne avstanden. Det beregnes også andre verdier som konfidensintervaller og standardavvik. Resultatet av en M3C2-analyse er en punktsky bestående av kjernepunktene med skalarfelder for M3C2-distanse og de andre verdiene (Cloud Compare, 2016; Lague, Brodu og Leroux, 2013).



Figur 9. Illustrasjon som viser hvordan M3C2-distanse beregnes mellom referansepunktsky PC_1 og punktsky PC_2 . En sylinder projiseres fra kjernepunkt i langs begge retninger av normalvektor (i, \vec{N}) . Punkter innenfor sylinderen projiseres på sylinderaksen og det regnes ut snittposisjoner for hver punktsky, i_1 og i_2 . Det er avstanden mellom i_1 og i_2 som definerer M3C2-distansen for kjernepunkt i . Denne utregningen blir gjort for alle kjernepunkter.

3 Case/ Materialer

3.1 Case

Skanneobjektet

Objektet som ble skannet er et av de eldste byggene på NTNU Campus Gjøvik, Helvin-bygget, eller H-bygget som det kalles. Siste byggetrinn ble ferdig i 1993 og bygget inneholder i dag hovedsakelig lokaler til sykepleierutdanning med tilhørende kontorlokaler samt forelesningssaler.

Bygget er i tre etasjer og har to trappeoppganger, en i hver ende av bygget. Innvendig har veggene forskjellig tekstur, fra grove murte overflater til glatte malte overflater. Korridorene varierer fra brede til smale, og det er områder med vindusflater. I fem områder har bygget karakteristiske søyler som vi i denne oppgaven har bestemt er områder av spesiell interesse. Alt dette til sammen gjør det til et interessant skanneobjekt.

3.2 Materialer

Utstyrslister

Tabell 2. Datablad Leica Nova MS60 Multistation (Leica Geosystems, 2020).

Leica Nova MS60 Multistation	
Vinkelnøyaktighet Hz og V	0.3 mgon
Avstand	1.5m til >10000m (målt mot prisme) 1.5 til 2000m (andre overflater)
Avstandsnøyaktighet	1mm + 1.5ppm (målt mot prisme) 2mm + 2ppm (andre overflater)

Tabell 3. Datablad Leica Viva GS16 (Leica Geosystems, 2021b).

Leica Viva GS16	
RTK nøyaktighet	Hz 8mm + 1ppm/ V 15mm + 1ppm
CPOS nøyaktighet (33)	Grunnriss EUREF89: 8mm Høyde NN2000: 20mm

Tabell 4. Datablad Leica RTC360 (Leica Geosystems, 2018).

Leica RTC360	
Vinkelnøyaktighet	18"
Avstand	Min. 0.5 – opp til 130m
Avstandsnøyaktighet	1.0mm + 10ppm
3D punkt nøyaktighet	1.9mm @ 10m
	2.9mm @ 20m
	5.3mm @ 40m

Tabell 5. NavVis VLX (NavVis, 2021).

NavVis VLX	
Avstand	Opptil 100m
Punktsky nøyaktighet	6mm i dedikert test i miljø på 500m ²
Punkter pr. sekund	2 x 300 000

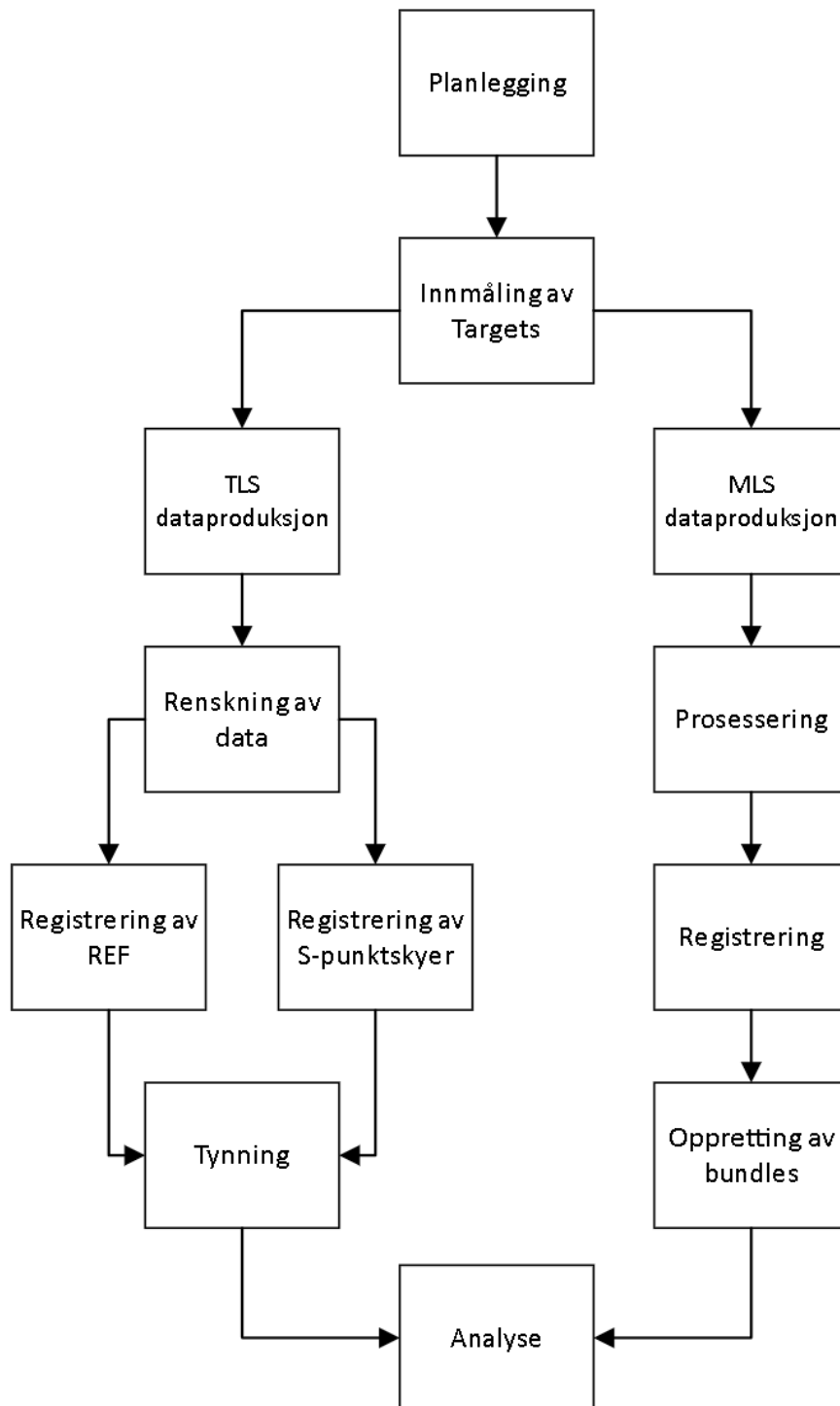
Tabell 6. Utstyrliste.

Annet utstyr	
Stativstjerne	Polmiar
Stativ	Leica GST120-9
Tribrach	Leica GDF321
Tribrach adapter (GNSS)	GRT247
Targets	A4 papirtargets 6 tommer
Leica rundprisme	Leica GPR121

Tabell 7. Programvareliste.

Programvare	
GisLine Landmåling	v. 7.2.1
Leica Cyclone Register 360	v. 2021.1.2
CloudCompare	v. 2.12.1 (Kyiv)
NavVis IVION	v. 10.3
JupyterLab	v. 3.3.2 (med Python 3.9.12 via Conda 4.12.0)

4 Metode



Figur 10. Flytdiagram som viser prosessen fra planlegging til analyse.

4.1 Grunnlaget - datainnsamling

For å sette tall på og utforske problemstillingen trengs det et dokumentert grunnlag å arbeide ut ifra. Det ble bestemt at for å utforske problemstillingen må det dannes fastmerker, targets må måles og bygget må skannes med både MLS og TLS. H-bygget er et stort og komplekst bygg, så hvert steg i feltarbeidet krever mye planlegging, god kommunikasjon og systematisk gjennomførelse. Etablering av grunnlaget ble gjort i følgende rekkefølge og tidsperiode:

- Måling av fastmerker: 24.03.2022 – 31.03.2022
- Skanning av H-bygget: 01.04.2022 – 03.04.2022
- Polygondrag/innmåling og utjevning av targets: 05.04.2022 – 27.04.2022

4.1.1 Planlegging

Grunnet størrelse og kompleksitet var det viktig med en plan og enighet om hvordan man skulle anskaffe tilstrekkelig data for videre analyse av problemstillingen. For dette ble det bestilt branntegninger for det aktuelle bygget (figur 11). I enkelte områder er det avvik mellom branntegningene og det virkelige bygget, men dette ble oppdaget under befaring og tatt hensyn til under planleggingen.

I startfasen ble tegningene brukt for å bestemme områder og ruter som vil bli aktuelt for skanningen, men tegningene hadde størst rolle under planleggingen av polygondraget. Tegningene ble skrevet ut og det ble gjort en grov skisse for oppstillinger og sikt for polygondragene der man sørget for gode siktmuligheter mellom oppstillinger og eventuelle targets. Bygget har begrensede muligheter for å sikte seg ut til targets, men under befaring ble det funnet egnede steder for dette. Polygondragene ble i stor grad planlagt basert på disse stedene. Plantegningene for hver etasje er som vist i figur 11 med de aktuelle søylene merket.



Figur 11. Branntegninger av aktuelt område 1-3.etg. H-bygg. (Gjengitt med tillatelse fra Industribygg Gjøvik AS). Søyleområder angitt med røde sirkler. Øst er til venstre på tegningene.

Etter studering av branntegningene var det tilstrekkelig oversikt over hva man hadde å jobbe med, og det ble laget en oversikt over hvilke data som var ønsket fra de ulike instrumentene. Tabell 8 viser hvilke data som var nødvendig for analysen og hvilket instrument de skaffes med.

Tabell 8. Oversikt over nødvendige punktskyer for videre arbeid.

Databehov		
	Georeferert	Uten georeferering
TLS	Referansepunktsky (REF)	
MLS	Trapp 1 (T1)	1. Etg (U1)
	Trapp 2 (T2)	2. Etg (U2)
	1. Etg (G1)	3. Etg (U3)
	2. Etg (G2)	
	3. Etg (G3)	
	1, 2 og 3. Etg (GSS)	
Oppmåling	Fastmerker	
	Targets	

4.1.2 Etablering av fastmerker

Opprinnelig fastmerkegrunnlag ble delvis forkastet grunnet telehiv og generell forflytning i de etablerte fastmerkene. For å minimere telehivsproblematikken ble følgende gjort basert på eksisterende data:

Først blir det etablert koordinater for fastmerker F3 og F4 med midlede CPOS målinger. Dette er målinger gjort i forbindelse med etablering av det opprinnelige fastmerkegrunnlaget. For å fjerne tvang mellom CPOS-koordinatene blir koordinat og høyde for F3 manuelt beregnet i et Excel-regneark. De manuelle beregningene baserer seg på korrigerede totalstasjonsmålinger gjort fra F4 og retningsvinkel beregnet fra CPOS-målingene. Totalstasjonsmålingene som brukes i beregningene er observasjoner gjort under de fire polygondragene. Beregningene resulterer i fire nye koordinater og høyder for F3, som deretter midles til den nye koordinaten for F3. For å videre minske effekten av telehiv blir det samtidig beregnet nye siktehøyder i F3 for hvert av polygondragene basert på de fire beregningene gjort for etablering av fastmerker. Tabell 9 viser elementer av den manuelle beregningen av koordinat og høyde for F3 samt korreksjon for siktehøyder.

Tabell 9. Manuell koordinatberegning av F3.

Polar beregning									
F4→F3	Rv (°)	Sh	Zjl	Dk	N	E	H	dH	Sh_korr
PD 1:	141,395	1,500	98,997	63,783	1310653,020	109782,184	183,205	0,002	1,502
PD 2:	141,395	1,258	99,240	63,787	1310653,017	109782,187	183,205	0,002	1,260
PD 3:	141,395	1,229	99,267	63,789	1310653,016	109782,188	183,202	-0,001	1,228
PD 4:	141,395	1,297	99,204	63,783	1310653,020	109782,184	183,202	-0,002	1,295
Mid F3:					1310653,018	109782,186	183,203		

De påførte korreksjonene for siktehøyde og den alternative fremgangsmåten i etablering av fastmerker begrunnes ved at man med stor sikkerhet kan påstå at asfaltspikrene har endret sin posisjon i tiden mellom etablering av fastmerker og polygondragsmålingene. Dette diskuteres i kapittel 6.1.1. Tabell 17 viser endelig liste over fastmerker.

4.1.3 Skanning med TLS (RTC360)

Til skanning av referansepunktsky benyttes Leica RTC360. Skanningen ble utført med 112 oppstillinger over et tidsrom på 2 dager. Oppstillingene ble navngitt med skanndato etterfulgt av et inkrementerende tresifret suffiks fra 001 per dag, eksempelvis var skann 010422_001 den første oppstillingen på første skannedag, 1. april 2022. Oppløsningen ble satt til laveste nivå (12mm @ 10m) med unntak av søyle- og trappeområder som er av spesiell interesse som ble skannet med høy oppløsning (3mm @ 10m). I forbindelse med skanningen plasseres umålte targets som i ettertid skal måles og benyttes til registreringen. Det er plassert totalt 52 svarte og hvite papirtargets med diameter på 6 tommer/ 152,4mm i bygget. Targets ble plassert tettere i trappeoppganger og søyleområder som er av spesiell interesse for prosjektet og referansepunktskyen. Problemstillingen ønsker å se TLS og MLS skanninger i kombinasjon med hverandre, og det er utvalgte oppstillinger fra referansepunktsky som benyttes til dette. Det er derfor plassert et godt utvalg targets som gjør en mer fri til å utforske problemstillingen.

4.1.4 Skanning med MLS (VLX)

Skanning med MLS stilte større krav til planlegging under feltarbeidet. Det var utarbeidet en liste med egne datasett for spesifikke områder i bygget som var ønskelig for analysen (tabell 8) der det skulle gjøres skanninger både med og uten targets, og for enkelte datasett ble det også tatt bilder for fargelegging av punktskyen. Det ble ikke satt ut noen nye targets i forbindelse med MLS-skanningen. Under skanningen ble det skrevet en enkel feltlogg med grunnleggende informasjon om hvert skann (tabell 10). Det ble skannet totalt 9 datasett med MLS.

Tabell 10. MLS feltlogg med grunnleggende info.

MLS feltlogg

Område	Metode	Navn på datasett	Start	Slutt	Targets brukt	Tidsbruk
Trapp 1	Med targets	BO_03042022_T1	13:27	13:38	004, 019, 021	11 min
Trapp 2	Med targets	BO_03042022_T2	13:47	14:00	047, 017, 012	13 min
1. Etg	Med targets	BO_03042022_G1	14:14	14:30	001, 019, 011, 012	16 min
2. Etg	Med targets	BO_03042022_G2	14:55	15:24	024, 021, 047, 040	29 min
3. Etg	Med targets	BO_03042022_G3	15:40	16:24	021, 042*, 047, 019, 017	44 min
1. Etg	Uten targets	BO_03042022_U1	18:05	18:20	-	15 min
2. Etg	Uten targets	BO_03042022_U2	18:29	18:57	-	28 min
3. Etg	Uten targets	BO_03042022_U3	19:03	19:33	-	30 min
Hele	Med targets	BO_03042022_GSS	19:56	20:32	001, 006, 046, 048	36 min

Targets brukt for VLX skann 001, 004, 006, 011, 012, 017, 019, 021, 024, 040, 042, 046, 047, 048
Targets markert med stjerne * ble ikke brukt under prosessering

For alle datasett ble det skannet et stykke inn i nærmeste neste etasje, for å sikre tilstrekkelig overlapp mellom punkttskyene under C2C-registreringen. Med unntak av skannet som gikk gjennom hele bygget (GSS) startet og sluttet alle skanninger i samme sted, og alle områder ble målt med overlapp ved retur til startposisjon. For å sikre en god prosessering ble det gjort loop closures (kap. 2.4.8) med jevne mellomrom under skanningen.

4.1.5 Innmåling av targets

For å sette koordinater på targets inne i bygget gjøres det fire polygondrag. Alle dragene ble planlagt og utført med en maks-begrensning på opptil 15 nye oppstillinger.

Med unntak av det første polygondraget som ble startet med en frioppstilling, ble alle drag startet i kjent-punkt F4 og totalstasjonen orientert med kjent baksikt mot F3. Tilsvarende avsluttes hvert drag i F4 med kjent framsikt til F3. For å utføre polygondragene brukes den dedikerte polygondragsappen i totalstasjonen og det måles med automatisk prismesøk og to helsatser mellom hver oppstilling. Som nevnt i kapittel 4.1.1 har bygget begrensede muligheter for sikt ut til fastmerker, men utvalgte steder i bygget egnet seg for dette og det ble gjort sikt herfra for å starte og slutte dragene.

Det ble som nevnt i kapittel 4.1.3, plassert totalt 52 papir-targets rundt i bygget. For innmåling av disse brukes måleappen, og det gjøres kun enkeltsikt i første kikkertstilling mot tilgjengelige targets underveis i hvert drag. Targets 041, 042 og 044 kunne ikke måles da targets ble fjernet fra veggene i tidsrommet mellom skanningen og polygondraget.

4.2 Databehandling

4.2.1 Utjevning - polygondrag

For å skaffe endelige koordinater på targets, importeres fastmerker og alle polygondrag til programvaren GISLINE Landmåling for å gjennomføre utjevning. Statistiske tester som observasjonstest, indre pålitelighet, ytre pålitelighet og tvungen utjevning ble gjort separat for grunnriss og høyde. Tabell 11 viser vektingen satt i instrumentregisteret.

Tabell 11. Vekting i GISLINE instrumentregisteret.

Vekting			
Retning:	0,0003	Avst. Del:	0,0000
Høydeforskjell:	0,002	Avst. Del:	0,001
Avstand:	0,002	Avst. Del:	0,001
Sentrering gr.riss	0,002		
Sentrering høyde	0,002		

Under test av observasjoner blir det utelatt fire observasjoner for å minimere estimerte grovfeil i observasjonene (tabell 12). Gjenstående observasjoner aksepteres, og test for indre- og ytre pålitelighet blir evaluert og akseptert før polygondragene utjevnes og koordinater for targets eksporteres for bruk i videre databehandling. Grunnlagstest kan ikke gjøres da det er gjort sikt til for få fastmerker. Figur 12 viser utjevned polygondragmålinger som vist i GISLINE. Resultater og eventuelle avvik diskuteres i kapittel 6.

Tabell 12. Utelatte observasjoner i observasjonstest.

Observasjonstest – utelatte observasjoner

P1.1→F2
P1.2→P1.3
P1.10→F4
P3.1→F4

4.2.2 Rensing, registrering og georeferering av referansepunktsky

Det ble opprettet en stor referansepunktsky sammensatt av de 112 punktskyene fra oppstillingene med TLS. Hele registreringsarbeidet ble gjennomført i programvaren Register 360. Grunnet den enkle forhåndsregistreringen som ble utført underveis i datainnsamlingen, fulgte det med en rekke koblinger, og det var lite behov for grovtilpassing før videre finregistrering.

For å unngå at ikke-reelle punkter påvirker ICP-algoritmen ble hver enkelte punktsky manuelt renses for de fleste reflekterte og refraksjonerte punktene (se teori 2.3.1 og 2.3.2), samt den groveste støyen. Rensingen ble i hovedsak gjort med to ulike metoder. Metode én, der man inspiserer punktsky fra perspektivet til skannerposisjonen, markerer glassflater og andre gjennomskiktige objekter, og sletter de markerte punktene. På denne måten slettes alle punkter bak det markerte objektet, der laserpulsene enten har beveget seg gjennom eller reflektert av materialet. Metode to, der man inspiserer punktskyen projisert ortogonalt, enten vertikalt ovenfra eller horisontalt fra siden, og markerer og sletter punkter langs med og utfra utsiden av flater som vegger, tak og gulv. Grunnet at all skanning, både med TLS og MLS, ble gjennomført innenfor et kort tidsrom med antatt liten miljøpåvirkning fra oss selv og utenforstående ble ikke punktskyene renses for møblement og andre løse gjenstander.

Mange targets ble automatisk detektert av programvaren ved import. Disse ble alle visuelt kontrollert, og resterende targets ble lagt til manuelt. Targets ble navngitt, og det ble gjort target-matching for å legge til og oppdatere koblinger mellom oppstillinger med tilstrekkelig antall felles targets. Alle targets ble vektet likt.

I tillegg til eksisterende koblinger fra forhåndsregistreringen og koblinger fra target-matching ble det manuelt lagt til koblinger mellom oppstillinger med mer enn 20% overlapp. Det ble totalt 301 koblinger mellom de 112 oppstillingene, hvorav 33 benyttet seg av targets i beregninger. På alle koblinger ble det utført ICP, med grense satt til 5000 iterasjoner. Utenom den økte maksgrensen på iterasjoner var innstillinger for Cloud-to-Cloud satt til programvarens standardverdier (0,002 m søkeradius, maks punktetthet på 30 og normalterskel på 1,000).

For georeferering og kontroll av registrering ble koordinatliste for kontrollpunkter importert, og det ble kjørt kontroll mot targets. Før en kontroll låser programvaren koblingene slik at kontrollen blir gjennomført uten å påvirke optimaliseringen. Koblingene ble låst opp og optimalisert, før en ny kontroll av den siste optimaliseringen. Kontrollen georefererer også punktskyene. Det ble kjørt kontroll mot 146 targets, totalt fra alle ulike oppstillinger.

Ferdig registrert og georeferert punktsky ble eksportert både som fullstendig sammensatt punktsky og som individuelle punktskyer fra hver oppstilling, alle i E57 format.

4.2.3 Registrering av søylepunktskyer

Grunnlaget for punktskyene av de utvalgte søyleområdene er en seleksjon av de TLS-oppstillingene som ble brukt i produksjon av referansepunktskyen. For å spare tid ble de allerede rensede eksporterte oppstillingspunktskyene fra referansepunktskyen benyttet. Disse punktskyene er dermed allerede registrert og georeferert, men dette ble kun benyttet på lik linje som forhåndsregistrering, og denne georefereringen blir ikke benyttet videre. Tabell 13 nedenfor viser hvilke oppstillinger som ble brukt for de ulike søyleområdene. I likhet med referansepunktskyen ble denne registreringen gjennomført i Register 360.

Tabell 13. Oversikt over TLS-oppstillinger som ble brukt for de ulike søyleområdene.

Oppstillingsoversikt			
	Oppstillinger (01)	Oppstillinger (02)	Antall
Søyleområde 1	01, 02, 03, 04, 05	—	5
Søyleområde 2	16, 17, 18	—	3
Søyleområde 3	53	01, 02, 04, 05	5
Søyleområde 4	32, 33, 34, 35, 36	—	5
Søyleområde 5	—	44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 55	11

Kolonne **Oppstillinger (01)** inneholder oppstillinger fra dag 1, og kolonne **Oppstillinger (02)** inneholder oppstillinger fra dag 2.

Det ble benyttet tre ulike metoder for registrering av alle de fem utvalgte søyleområdene. Den første metoden som ble benyttet var å ikke bruke targets, men kun ICP-registrering. Den andre metoden var tilsvarende metode én, men med target-basert registrering uten koordinater, i tillegg til ICP. Siste metode var tilsvarende metode to, men targets ble gitt koordinater for kontroll, georeferering og optimalisering. ST2 ville tilsvart SU2 grunnet manglende targets, så SU2 blir benyttet der ST2 ville blitt brukt.

For hver metode ble det eksportert én sammensatt punktsky per søyleområde, tabell 14 under viser oversikt over punktskyene som ble eksportert.

Tabell 14. Oversikt over punkttskyer som dekker de ulike søyleområdene.

Søyledekkende punkttskyer

	Uten targets	Med targets	Med georeferering
Søyleområde 1	SU1	ST1	SG1
Søyleområde 2	SU2	—	SG2
Søyleområde 3	SU3	ST3	SG3
Søyleområde 4	SU4	ST4	SG4
Søyleområde 5	SU5	ST5	SG5

4.2.4 Tynning og sammensetting av TLS-punkttskyer

Registreringen ble gjort på fullstendige punkttskyer, så for å gjøre dataen mer håndterbar i videre behandling ble punkttskyene tynnet. Merk at det videre i rapporten er de tynnete punkttskyene beskrevet i dette underkapittelet det refereres til med mindre annet spesifiseres. Tynningen ble gjort i programvaren CloudCompare. Det ble brukt romlig subsampling med statisk minimumsavstand, og det er minimumsavstandsverdi som beskrives under.

For referansepunkttskyen ble først alle de individuelle oppstillingspunkttskyene tynnet, men til ulik tetthet. Oppstillinger skannet med høy skannopløsning ble tynnet til 2 mm og oppstillinger med lav skannopløsning ble tynnet til 5 mm. Disse punkttskyene ble deretter slått sammen til én punkttsky. Grunnet overlapp mellom oppstillingene vil denne punkttskyen naturligvis få områder med økt tetthet, så den ble tynnet på nytt med 2 mm tetthet. På denne måten skal man få en punkttsky med øvre tetthet mellom 2 mm og 5 mm. Denne refereres herved til som *REF*.

For søylepunkttskyene ble hver punkttsky tynnet til 2 mm. Da de georefererte søylepunkttskyene (SG1, SG2, SG3, SG4 og SG5) ikke skal registreres mot annen punkttsky eller gjennomgå annen transformasjon ble de like gjerne slått sammen til én punkttsky, videre referert til som *SGx*.

4.2.5 Oppretting av kjernepunkter for M3C2-analyse

Det vil bli kjørt en del M3C2-analyser mot referansepunktskyen, og for å både spare tid og få samme grunnlag for hver analyse ble det opprettet ett datasett med kjernepunkter, i stedet for å kjøre subsampling hver gang. I tillegg manglet det normaler på REF. For kjernepunkter ble det da først generert normaler på REF ved bruk av verktøyet «Compute normals» i CloudCompare. Normalene ble generert med lokal overflatemodell satt til andregradsflate (Quadric), automatisk octree radius og orientering satt til minimalt spennetre med k-nærmeste naboer (knn) satt til 8. Videre ble punktskyen tynnet til 10 mm med romlig subsampling. Dette datasettet blir videre referert til som REF_CorePoints. Tilsvarende operasjon som beskrevet ovenfor ble også gjort for SGx, og resultatet av dette blir videre referert til som SGx_CorePoints

4.2.6 Prebehandling av MLS data

Rådatasettene produsert med VLX laserskanner ble behandlet med sky-basert programvare; NavVis IVION Core, tilgjengeliggjort av TerraTec for vår bacheloroppgaves formål.

Databehandlingsprosessen fokuserte på å skaffe en type punktskyer tilsvarende behovene for videre prosessering presentert i tabell 8. Som et resultat ble det oppnådd 10 punktskyer, rensert for grovstøy, uten betydelige drift- og tracking-error. Noen punktskyer ble registrert i det koordinatbaserte referansesystemet Euref89 NTM10 NN2000 ved hjelp av koordinater oppnådd i utjevningsprosessen.

Prosessering

På grunn av at IVION Core utfører rensing og registrering av VLX-punktskyene automatisk, og ikke krever at operatøren skal forhånds-behandle dataene, ble dataene overført til programvare rett etter overføring av rådata fra instrumentet til datamaskinens lokaldisk. Operatørens eneste jobb er å justere de ønskede parameterne for det prosesserte datasettet.

For hver punktsky, med hensyn til detaljert etterfølgende analyse, ble det valgt en oppløsning på 5 mm. For å presentere resultatet ble panoramabilder inkludert i en av prosesseringsprosessene med tanke på fargelegging av punktsky.

Det ble valgt en prosesseringsstrategi som inkluderer punkter med hensyn til deres avstand fra instrumentet, intensitet og dets beregningskonfidens. Høysikkerhetsstrategien ble valgt ettersom NavVis anbefaler den for trange områder som korridorer og trappesjakter. Strategien

bruker kun punkter i sensorens effektive rekkevidde mellom 10 til 15m, som ganske nøyaktig imiterer situasjonen i den skannede bygningen. Denne strategien tar kun hensyn til punktene med høy konfidens i beregningene, og tar ikke hensyn til områdene der et redusert nivå av punktskytethet ble registrert.

Som nevnt ovenfor, for noen datasett, bruker registreringsprosessen kontrollpunkter med kjente koordinater som har blitt innmålt under skanneoperasjonen. Dette utføres ved å importere tekstfilen med koordinater. Allerede på dette stadiet får operatøren foreløpige resultater av et forsøk på å tilpasse koordinatene fra filen til deres plassering av kontrollpunktet i punktskyen estimert av SLAM-algoritmen under skanning, som muliggjorde eliminering av kontrollpunkter med betydelige store avvik. Siden IVION er en sky-basert programvære, var det mulig å iverksette databehandlingsprosessen samtidig for alle rådatasett.

Registrering av ikke-georeferert MLS data

Resultatet av prosesseringen var 6 georefererte punktskyer og 4 punktskyer posisjonert i IVION sitt lokale koordinatsystem. En punktsky som dekker den første trappesjakten T1 ble valgt for registrering av ikke-georefererte punktskyer. T1 er posisjonert i NTM10 NN2000, og dekker hele trappearealet og gir en tilstrekkelig god overlapp til andre punktskyer både i grunnriss og høyde.

Etter utførelse av registrering for alle ikke-georefererte datasett i IVION-programvaren, ble ytterligere bundles eksportert i E57 formatet. Oppbygning av bundles presentert i tabell 15.

Tabell 15. Data produsert i IVION, samt oppbygning av aktuelle bundles.

Resultatdata fra IVION

Datasett	Punktskyer brukt
UGGSS	—
GSS	—
B1	T1, T2, U1, U2, U3
B2	G1, G2, G3
B3	U1, U2, U3

4.3 Analyse

Aktivitetene knyttet til analysen var delt inn i flere faser. Den primære fasen var grundig planlegging. Analyseplanlegging ble delvis iverksatt i løpet av planleggingen av dataproduksjon. Dette var et veldig viktig aspekt, siden det forsikrer produksjon av datamengde nødvendig til å utføre analyse, og reduserer sannsynligheten for et dataunderskudd.

Det første stadiet for gjennomføring av individuelle analyser var registreringen av den undersøkte punkttskyen til dens referansepunktsky. Deretter ble statistikk beregnet, og resultatene ble visuelt vurdert. Til slutt ble det gjort en analysevurdering av produserte statistiske data for alle utførte beregninger.

4.3.1 Analyseplan

Endelig planlegging av analysen ble iverksatt i prosjektet etter ferdigstilling av alle datasettene. Nøkkelfaktoren for å optimalisere analyseprosessen var opprettelsen av en liste med de individuelle oppsettene, som muliggjorde kontroll, kvalitetssikring og en hensiktsmessig arbeidsstruktur under utførelsen av individuelle beregninger. Den oppnådde analyseplanen er presentert i tabell 16.

Tabell 16. Plan for analyse.

Analyse Plan						
Nr	Ref	Test	ICP Registering	M3C2	M3C2 ->REF	
1	REF	UGGSS	UGGSS→REF	—	UGGSS→REF	
2	REF	GSS	—	—	GSS→REF	
3	REF	B1	—	—	B1→REF	
4	REF	B2	—	—	B2→REF	
5	REF	B3	B3→REF	—	B3→REF	
6	GSS	SU	SU (1, 2, 3, 4, 5)→GSS	SU _x →GSS	(SU _x +GSS)→REF	
7	GSS	ST	ST (1, 3, 4, 5)→GSS, SU2→GSS	ST _x →GSS	(ST _x +GSS)→REF	
8	GSS	SG	—	SG _x →GSS	(SG _x +GSS)→REF	
9	SG	UGGSS	UGGSS→SG _x	UGGSS→SG _x	(SG _x +UGGSS)→REF	
10	B1	SU	SU (1, 2, 3, 4, 5)→B1	SU _x →B1	(SU _x +B1)→REF	
11	B1	ST	ST (1, 3, 4, 5)→B1, SU2→B1	ST _x →B1	(ST _x +B1)→REF	
12	B1	SG	—	SG _x →B1	(SG _x +B1)→REF	
13	B2	SU	SU (1, 2, 3, 4, 5)→B2	SU _x →B2	(SU _x +B2)→REF	
14	B2	ST	ST (1, 3, 4, 5)→B2, SU2-B2	ST _x →B2	(SU _x +B2)→REF	
15	B2	SG	—	SG _x →B2	(SG _x +B2)→REF	
16	SG	B3	B3→SG _x	SG _x →B3	(B3+SG _x)→REF	

4.3.3 ICP-registrering

Som inkludert i analyseplanen ble de aktuelle punktskyene i første omgang registrert mot sine referanseskyer. Denne operasjonen ble utført i CloudCompare med verktøyet Fine registration som bruker ICP-algoritmen. Registreringer av lik natur ble gjort på med like beregningsparametere for å opprettholde konsistensen i beregningene og påliteligheten til de oppnådde resultatene samt deres videre analyse og vurdering. Grunnleggende parametere som ble tatt i betraktning ved implementering av ICP-algoritmen er å definere iterasjonsgrense og å gi anslag på den teoretiske overlappen, samt å angi antall punkter som subsamples for å beregne RMS for hver iterasjon.

Registreringer av enkeltstående TLS-punktskyer mot MLS-punktskyer ble gjort med en teoretisk overlapp på 80%, og for resten ble det gjort enkle visuelle estimat for den enkelte registreringen. For alle ICP-registreringene ble differanse i kvadratisk middelforskjell (RMS) brukt som iterasjonsgrense, med RMS differanse på $1.0e-07$ for de enkeltstående TLS-punktskyene mot MLS-punktskyer, og RMS differanse på $1.0e-06$ for de større registreringene. Samme inndeling ble brukt ved angivelse av antall subsamplede punkter, 500.000 punkter for de enkeltstående TLS-punktskyene mot MLS-punktskyer, og 1.000.000 punkter for resterende.

4.3.4 Avviksdeteksjon

For å finne avviket for avstanden mellom referansepunktskyen og den testede skyen ble beregningsverktøyet M3C2 i CloudCompare brukt med tanke på produksjon av statistisk data. Beregningsprosessen besto av flere trinn. For det første ble det gjort komparative beregninger for å fastslå avviket for den testede skyen i forhold til dens referansesky. Påfølgende ble begge skyene kombinert til én sammensatt punktsky, og benyttet videre for beregninger som bestemte avviket mellom den sammenslåtte punktskyen og REF.

Ytterligere statistiske beregninger ble utført på alle resulterende M3C2-punktskyer, for å produsere foreløpig histogram, standardavvik, middelvei og kvadratisk middel med hensyn til referanseskyen.

På samme måte som for ICP-registrering er parameter- og beregningsinnstillingene for M3C2-operasjoner standardisert for de fleste analyser. I noen analyser måtte parametere og beregningsstrategi tilpasses de aktuelle punktskyene for å optimalisere tiden brukt på å utføre beregningene og ikke minst oppnå mest nøyaktige resultater. Diameter og maksimal dybde ble satt til henholdsvis 0,075m og 0,15 for hver beregningsoperasjon.

Analyse beregninger hvor REF ble brukt som referanse benyttet REF_CorePoints som kjernepunkter. Samme strategi ble tatt i bruk for analyser der en kombinert punktsky bestående av individuelle georefererte søylesområder (SGx) ble tatt som referanse.

Beregninger hvor punktskyene oppnådd ved bruk av MLS og forbehandlet i IVION programvare ble tatt som referanse, var underlagt en annen rutine. For å redusere størrelsen på kjernepunktene ble punktskyene tynnet til 1 cm direkte i M3C2-verktøyet. Denne prosedyren muliggjorde reduksjon av volumet ved samtidig ivaretagelse av de aktuelle normaler, noe som betydelig reduserte tiden programmet trengte for å utføre beregninger.

5 Resultater

I dette kapittelet presenteres resultatene for arbeidet beskrevet i metodedelene. Kapittelet er en samling av tabeller og data, relevant for å svare på problemstillingen.

5.1 Fastmerker

Tabell 17. Endelig beregnede fastmerker.

Fastmerker				
Punkt	N	E	H	3DKK
F3	1310653,018	109782,186	183,203	–
F4	1310691,632	109731,416	183,463	0,006

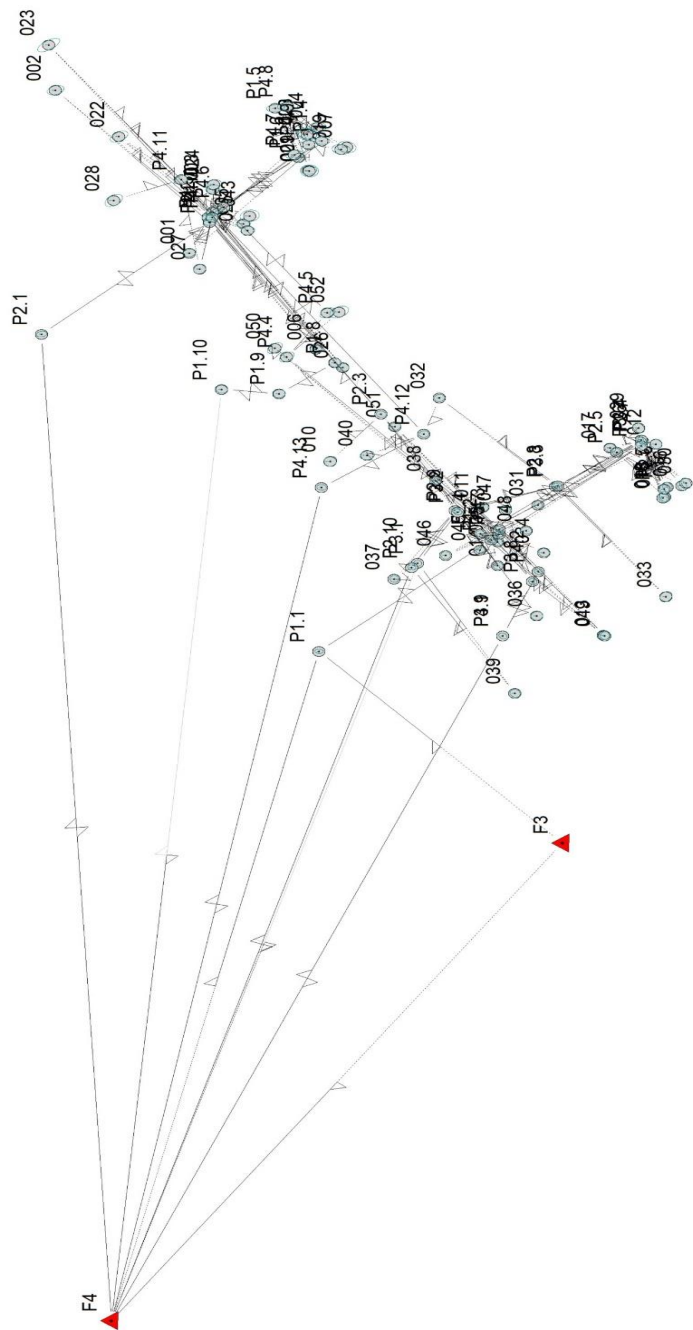
5.2 Utjevning polygondrag

Tabell 18. Verdier som ga utslag i observasjonstest.

Observasjonstest							
Fra	Til	Mnr	D, R, dH	Restfeil	Est. grovfeil	Testverdi	Tabellverdi
F4	F3	4	D	-0,0031	0,0035	3,65*	3,35
F4	F3	5	D	-0,0031	0,0035	3,64*	3,35
P1.3	P1.2	1	D	0,0026	-0,0052	4,14*	3,35
P2.2	P2.3	1	dH	-0,0017	0,0026	3,69*	3,38
P2.10	F4	1	dH	-0,0018	0,0027	3,82*	3,38
* = 1 x Tabellverdi				** = 2 x Tabellverdi	*** = 3 x Tabellverdi		

Tabell 19. Verdier som ga utslag i Indre pålitelighetstest.

Indre pålitelighet						
Fra	Til	Mnr	D, R, dH	Restfeil	Est. grovfeil	Indre pålitelighet
P1.1	F4	2	R	0,00012	-0,00687	-0,01553 *
P1.8	P1.7	1	R	0,00073	-0,02757	-0,05361 *
P2.1	F4	1	R	-0,00015	0,01097	0,01756 *
P2.10	F4	1	R	-0,00002	0,00358	0,01726 *
P3.9	F4	1	R	0,00003	-0,00932	-0,02795 **
P4.1	F4	1	R	-0,00002	0,00461	0,02063 *
P4.13	F4	1	R	0,00001	-0,00183	-0,01444 *
* = 8 x antatt middelfeil			** = 16 x antatt middelfeil		*** = 24 x antatt middelfeil	



Figur 12. Utjevnet polygondrag vist i GISLINE Landmåling.

5.3 Targets

Tabell 20. Ny-bestemte koordinater for targets med tilhørende standardavvik.

Ny-bestemte koordinater for Targets

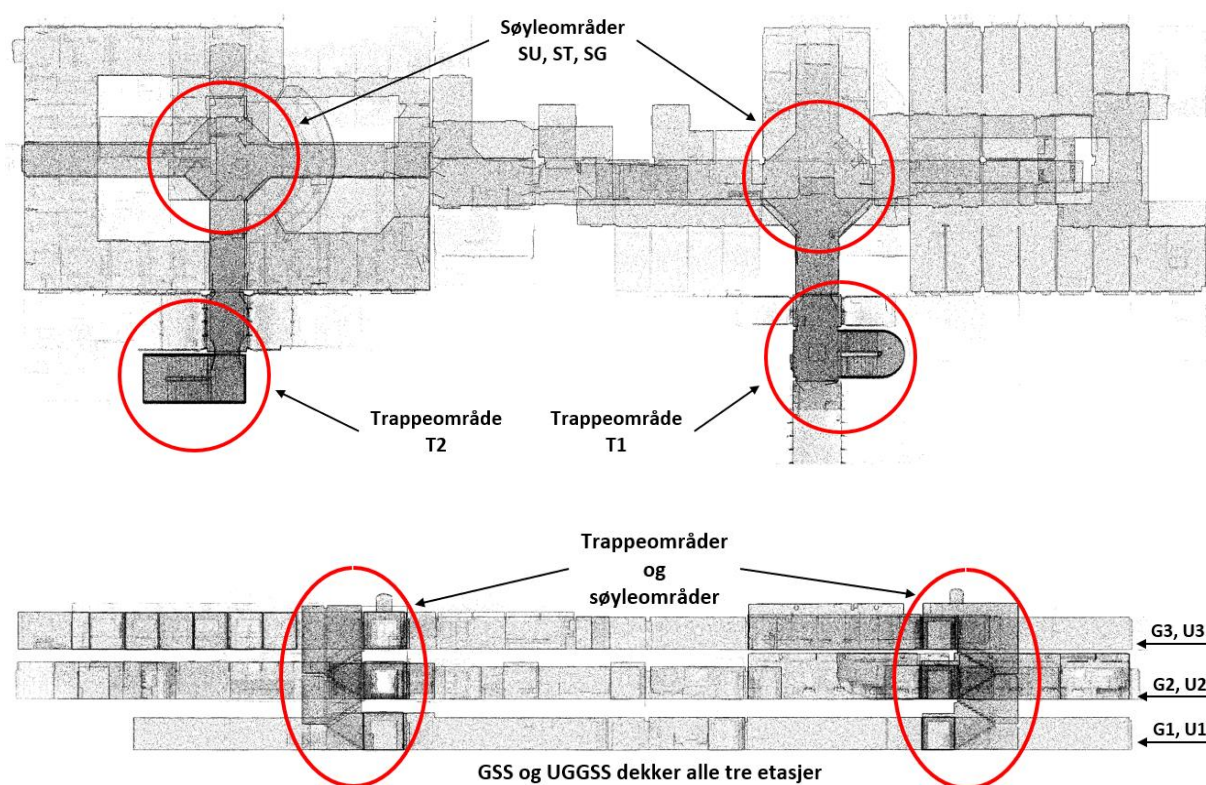
Pkt	N	E	H	sN	sE	sH
001	1310684,955	109844,895	184,149	0,001	0,001	0,001
002	1310696,419	109862,190	184,179	0,001	0,001	0,001
003	1310682,937	109851,671	184,938	0,001	0,001	0,001
004	1310673,993	109858,247	184,865	0,002	0,001	0,001
005	1310680,329	109848,007	184,775	0,001	0,001	0,001
006	1310674,092	109834,658	184,902	0,001	0,001	0,001
007	1310671,486	109856,155	184,675	0,002	0,001	0,001
008	1310674,862	109857,543	186,232	0,002	0,001	0,001
009	1310674,729	109853,692	188,078	0,001	0,001	0,001
010	1310672,897	109822,759	184,197	0,001	0,001	0,001
011	1310659,799	109817,883	184,106	0,001	0,001	0,001
012	1310644,990	109824,596	184,230	0,001	0,001	0,001
013	1310649,482	109804,271	184,870	0,001	0,001	0,001
014	1310658,553	109811,670	184,178	0,001	0,001	0,001
015	1310644,265	109818,981	186,802	0,001	0,001	0,001
016	1310642,775	109820,168	186,905	0,001	0,001	0,001
017	1310648,919	109824,170	188,189	0,001	0,001	0,001
018	1310644,404	109818,863	190,163	0,001	0,001	0,001
019	1310671,947	109855,900	188,234	0,002	0,001	0,001
020	1310674,873	109857,540	189,880	0,002	0,001	0,001
021	1310674,679	109853,619	191,962	0,002	0,001	0,001
022	1310690,978	109857,262	189,228	0,002	0,001	0,001
023	1310697,006	109866,993	187,928	0,002	0,001	0,001
024	1310682,887	109852,159	187,859	0,001	0,001	0,001
025	1310679,965	109847,267	188,033	0,001	0,001	0,001
026	1310671,789	109832,735	187,930	0,001	0,001	0,001
027	1310684,061	109843,184	189,029	0,001	0,001	0,001
028	1310691,436	109850,480	187,933	0,002	0,001	0,001
029	1310646,493	109826,310	191,855	0,001	0,001	0,001
030	1310642,428	109820,441	190,259	0,001	0,001	0,001
031	1310655,088	109818,122	187,938	0,001	0,001	0,001
032	1310663,546	109829,488	188,626	0,001	0,001	0,001
033	1310644,149	109808,365	188,660	0,001	0,001	0,001
034	1310654,598	109813,052	188,566	0,001	0,001	0,001
035	1310658,560	109814,182	189,330	0,001	0,001	0,001
036	1310655,190	109806,336	188,411	0,001	0,001	0,001
037	1310667,409	109810,261	188,682	0,001	0,001	0,001
038	1310663,866	109820,710	188,805	0,001	0,001	0,001
039	1310657,073	109798,089	188,677	0,001	0,001	0,001
040	1310669,731	109823,386	187,811	0,001	0,001	0,001
043	1310679,789	109848,833	192,401	0,002	0,001	0,001
045	1310660,058	109813,342	192,678	0,001	0,001	0,001
046	1310663,017	109812,758	192,425	0,001	0,001	0,001
047	1310657,876	109817,559	191,739	0,001	0,001	0,001
048	1310656,106	109815,395	192,594	0,001	0,001	0,001
049	1310649,371	109804,223	192,415	0,001	0,001	0,001
050	1310677,641	109834,785	191,651	0,001	0,001	0,001
051	1310667,347	109826,455	192,244	0,001	0,001	0,001
052	1310672,136	109838,623	192,485	0,002	0,001	0,001

5.4 Resultat av databehandling

Tabell 21. Beskrivelse av bundles og punktskyer.

Oversikt over oppnådde punktskyer

Punktsky	Instrument	Beskrivelse av punktsky
REF	TLS	Referansepunktsky som dekker hele skanneområdet. Georefererte targets.
T1	TLS	Trappeoppgang øst. Georefererte targets.
T2	TLS	Trappeoppgang vest. Georefererte targets.
G1	MLS	1. etg. Georefererte targets.
G2	MLS	2. etg. Georefererte targets.
G3	MLS	3. etg. Georefererte targets.
U1	MLS	1. etg. Ikke georeferert.
U2	MLS	2. etg. Ikke georeferert.
U3	MLS	3. etg. Ikke georeferert.
B1	MLS	Bundle med T1, T2, U1, U2, U3. Georefererte targets.
B2	MLS	Bundle med G1, G2, G3. Georefererte targets.
B3	MLS	Bundle med U1, U2, U3. Ikke georeferert.
GSS	MLS	Punktsky som dekker hele skanneområdet. Start 1.etg. øst. Slutt 3. etg. vest. Georefererte targets i start og slutt.
UGSS	MLS	GSS. Ikke georeferert.
SU	TLS	Søyleområder. Ikke georeferert.
ST	TLS	Søyleområder. Registrert med targets uten koordinater.
SG	TLS	Søyleområder. Georefererte targets



Figur 13. Punktskyenes områdetilhørighet.

Tabell 22. Resultat av registrering og georeferering av referansepunktsky.

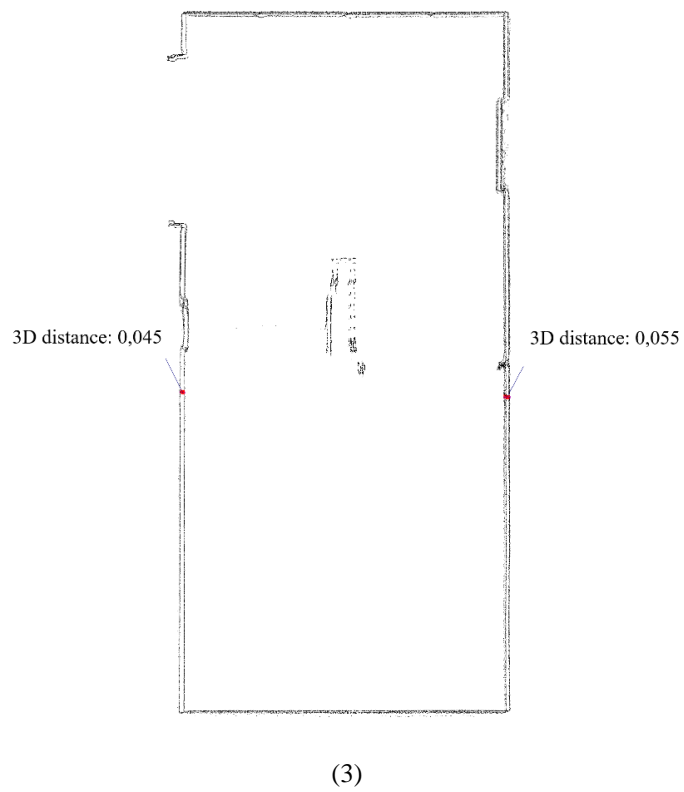
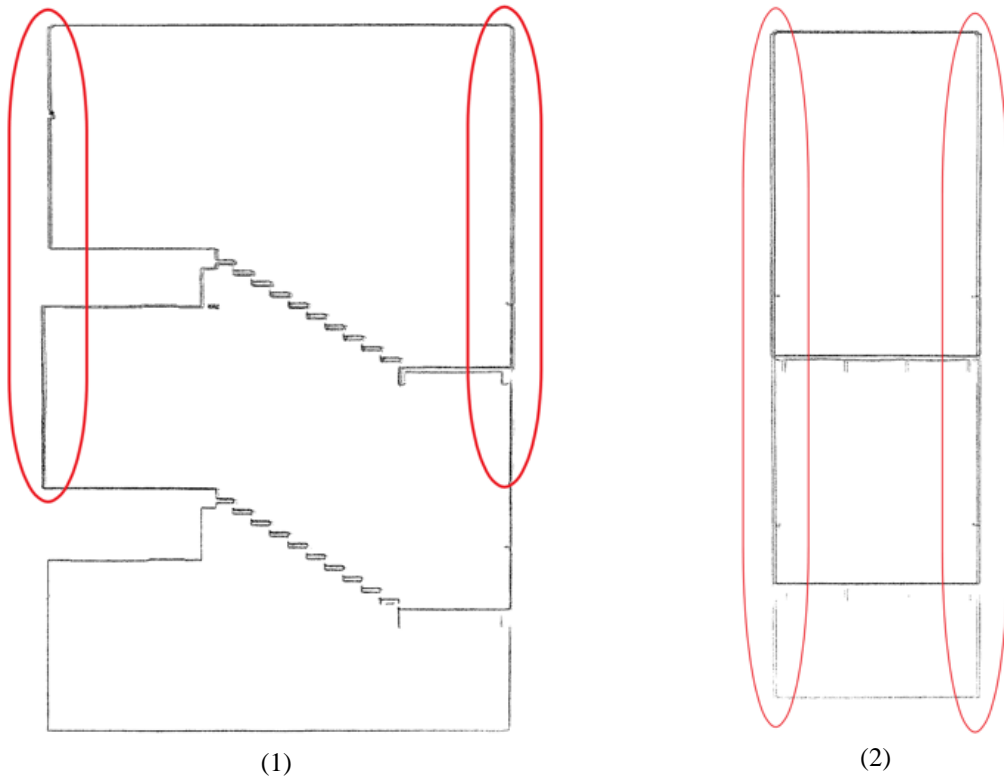
Registrering og georeferering av referansepunktsky

	Snittavvik [m]	ICP-avvik [m]	Targetavvik [m]	Overlapp [%]	Kontrollavvik [m]
Snitt	0,0017	0,0022	0,0011	53	0,0010
Laveste	0,0006	0,0006	0,0002	20	0,0001
Høyeste	0,0055	0,0055	0,0025	96	0,0020
Std. avvik	0,0010	0,0010	0,0005	20 [pp.]	0,0004

Første rad med verdier viser snittverdi for gjennomsnittlig avvik, ICP-avvik, targetavvik og overlapp fra alle koblinger, samt gjennomsnittlig avvik i alle kontrollpunkter. De to neste radene viser henholdsvis laveste og høyeste registrerte verdier. Siste rad oppgir standardavvik av de ulike resultatverdiene.

Tabell 23. Resultat etter registrering og georeferering av søylepunktskyer.

Registrering og georeferering av søylepunktskyer					
Gjennomsnittlig snittavvik [m]					
	Søyleområde 1	Søyleområde 2	Søyleområde 3	Søyleområde 4	Søyleområde 5
SU	0,0014	0,0012	0,0011	0,0017	0,0015
ST	0,0012	—	0,0011	0,0015	0,0012
SG	0,0014	0,0014	0,0014	0,0014	0,0010
Gjennomsnittlig kontrollavvik [m]					
SG	0,0010	0,0010	0,0008	0,0011	0,0009



Figur 14. Presentasjon av forskyvningsavvik til punktskyene U1, U2, U3 i T2 område. U-punktskyene registrert mot T1. Hvor side snitt (1), front snitt (2) og topp snitt (3). Top snitt viser til to utvalgte 3D distansavvik.

5.5 Analyseresultat

Tabell 24. Oversikt for input og resulterende RMSE oppnådd ved ICP registrering utførelse.

ICP-registrering					
Nr.	Referanse	Test	Antall punkter	Teoretisk overlapp [%]	RMSE[m]
1	REF	UGGSS	999999	95	0,0646
5	REF	B3	999999	75	0,0493
6	GSS	SU1	500000	80	0,0480
		SU2			0,0461
		SU3			0,0702
		SU4			0,0908
		SU5			0,1798
7	GSS	ST1	500000	80	0,0477
		SU2			0,0462
		ST3			0,0702
		ST4			0,0897
		ST5			0,1779
9	SG	UGGSS	999999	20	0,0200
10	B1	SU1	500000	80	0,0634
		SU2			0,0586
		SU3			0,0587
		SU4			0,0630
		SU5			0,0571
11	B1	ST1	500000	80	0,0632
		SU2			0,0586
		ST3			0,0585
		ST4			0,0630
		ST5			0,0569
13	B2	SU1	500000	80	0,0605
		SU2			0,0572
		SU3			0,0579
		SU4			0,0581
		SU5			0,0557
14	B2	ST1	500000	80	0,0609
		SU2			0,0575
		ST3			0,0576
		ST4			0,0575
		ST5			0,0555
16	SG	B3	999999	20	0,0222

Tabell 25. Oversikt for verdiene til M3C2 beregning. Gjennomsnittlig avvik, standard avvik, og RMSE oppnådd ved utførelse av statistiske beregninger utført på M3C2 resultatpunktskyene.

Analyse statistikk M3C2

Nr.	Referanse	Test	Gjennomsnittlig avvik[m]	Std.avvik[m]	RMSE[m]
1	REF	UGGSS	0,0008	0,0221	0,0221
2	REF	GSS	0,0002	0,0219	0,0219
3	REF	B1	0,0001	0,0339	0,0339
4	REF	B2	-0,0018	0,0175	0,0176
5	REF	B3	0,0005	0,0210	0,0211
6	GSS	SU	-0,0030	0,0282	0,0284
	REF	SU+GSS	0,0002	0,0265	0,0265
7	GSS	ST	-0,0029	0,0283	0,0285
	REF	ST+GSS	0,0002	0,0270	0,0270
8	GSS	SG	-0,0016	0,0166	0,0167
	REF	SG+GSS	0,0003	0,0171	0,0171
9	SG	UGGSS	-0,0001	0,0199	0,0199
	REF	SG+UGGSS	0,0004	0,0176	0,0176
10	B1	SU	-0,0006	0,0174	0,0174
	REF	SU+B1	-0,0001	0,0323	0,0323
11	B1	ST	-0,0006	0,0174	0,0174
	REF	ST+B1	0,0000	0,0323	0,0323
12	B1	SG	-0,0009	0,0223	0,0223
	REF	SG+B1	-0,0020	0,0258	0,0259
13	B2	SU	-0,0020	0,0165	0,0166
	REF	SU+B2	-0,0002	0,0125	0,0125
14	B2	ST	-0,0020	0,0165	0,0166
	REF	ST+B2	-0,0018	0,0150	0,0151
15	B2	SG	-0,0021	0,0175	0,0176
	REF	SG+B2	-0,0011	0,0137	0,0137
16	SG	B3	0,0001	0,0165	0,0165
	REF	SG+B3	0,0003	0,0178	0,0178

Tabell 26. Sammenstillingsmatrise for resulterende RMSE verdi for M3C2 på MLS data utført mot REF.

RMSE[m] – MLS mot REF (M3C2-distanse)

Ref \ Test	UGGSS	GSS	B1	B2	B3
REF	0,0221	0,0219	0,0339	<u>0,0176</u>	0,0211

Tabell 27. Sammenstillingsmatrise for resulterende RMSE verdi for M3C2 på MLS data utført mot TLS data.

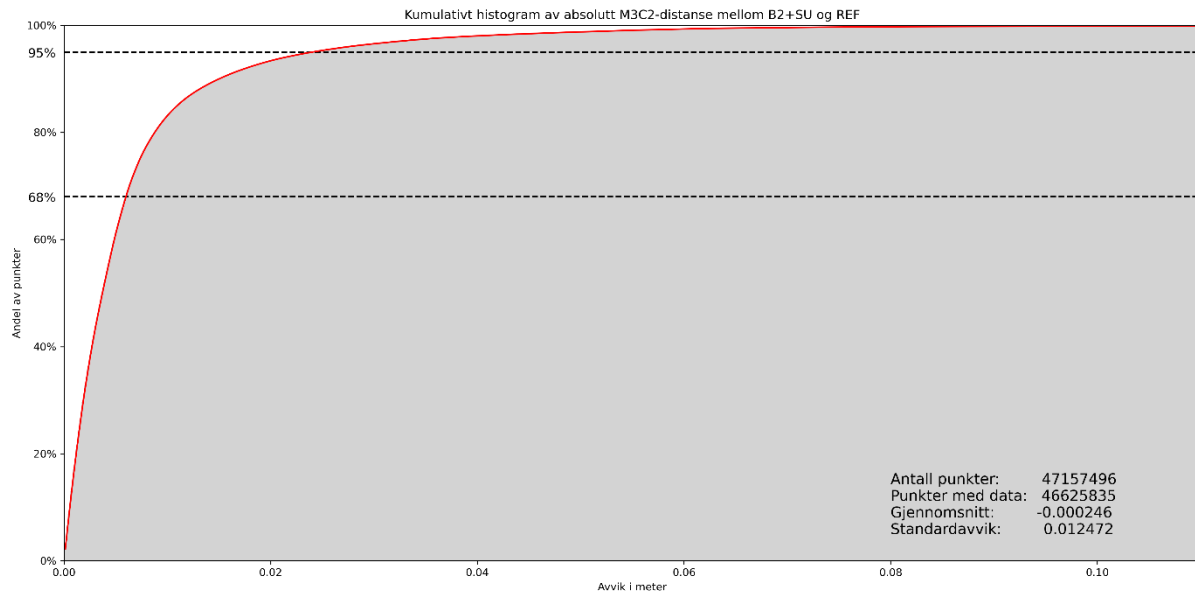
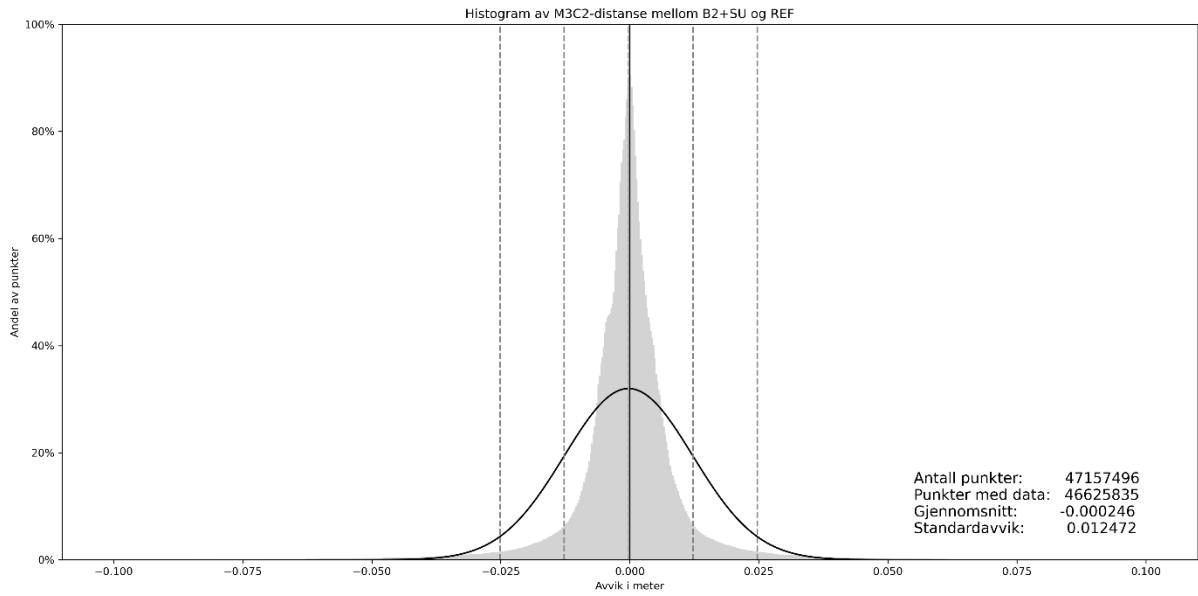
RMSE[m] – TLS mot MLS (M3C2-distanse)

Ref \ Test	SU	ST	SG	UGGSS	B3
B1	0,0174	0,0174	0,0223		
B2	0,0166	0,0166	0,0176		
GSS	0,0284	0,0285	0,0167		
SG				0,0199	<u>0,0165</u>

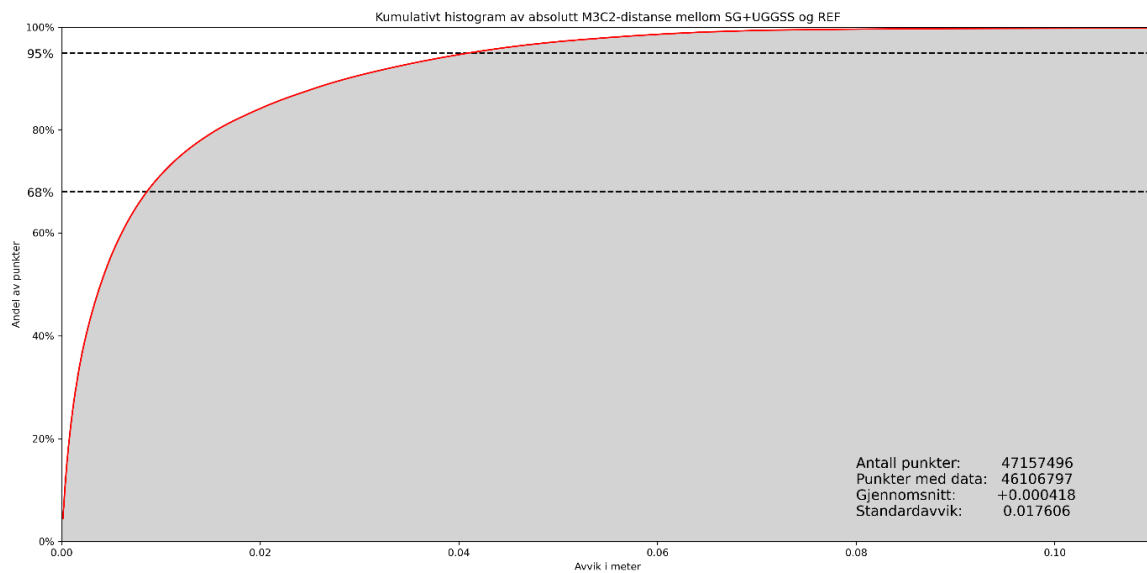
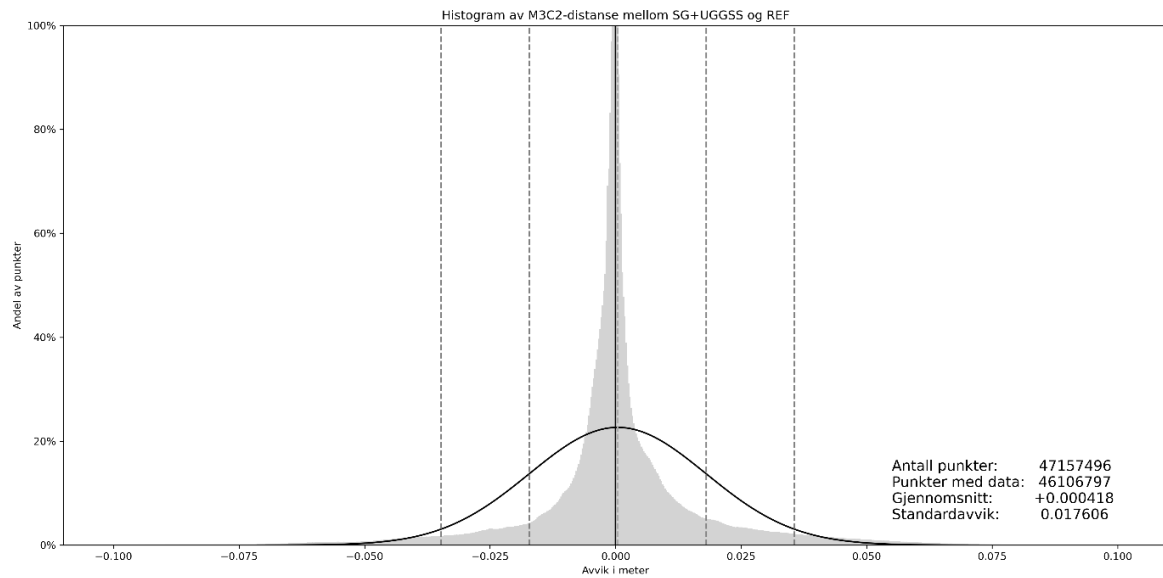
Tabell 28. Sammenstillingsmatrise for resulterende RMSE verdi for M3C2 på sammenslått MLS og TLS data utført mot REF.

RMSE[m] – S sammensatt MLS og TLS mot REF (M3C2-distanse)

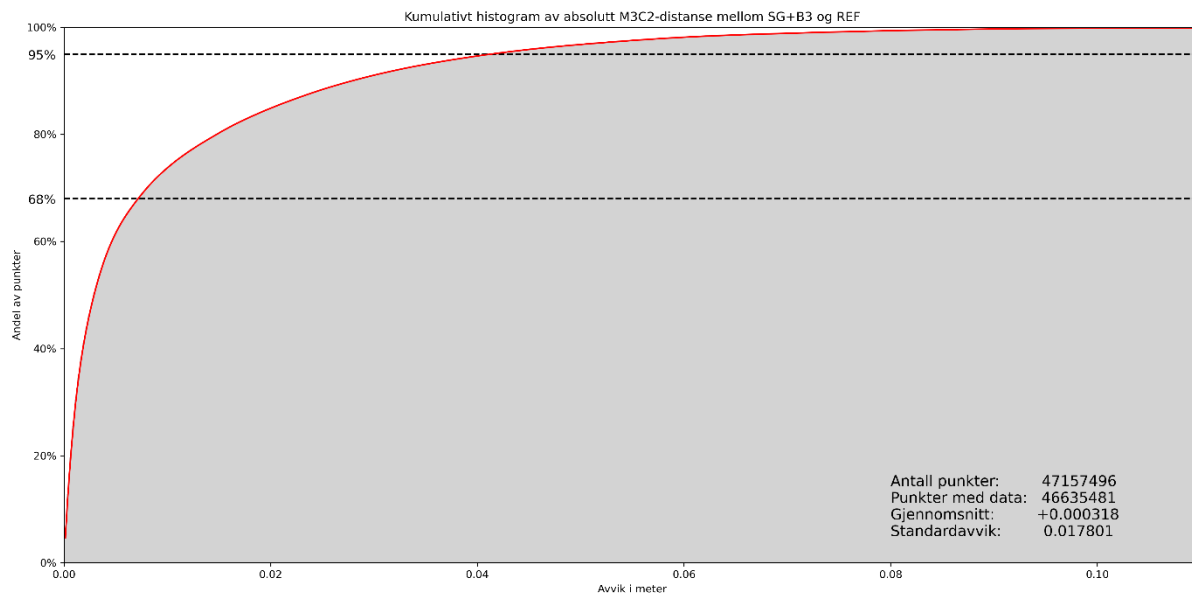
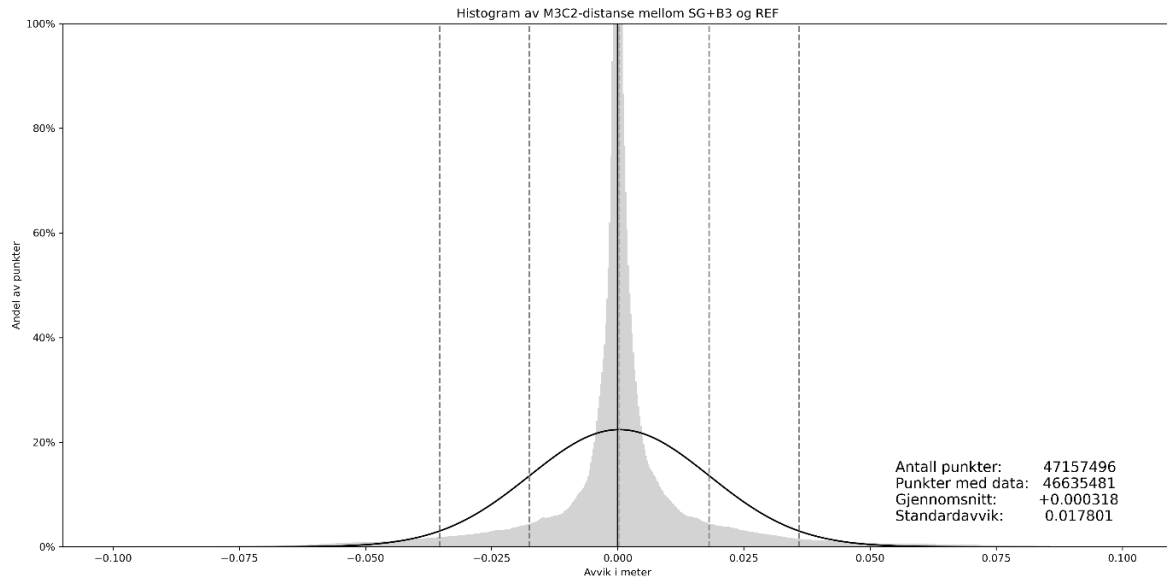
	SU	ST	SG	UGGSS	B3
B1	0,0323	0,0323	0,0259		
B2	<u>0,0125</u>	0,0151	0,0137		
GSS	0,0265	0,0270	0,0171		
SG				0,0176	<u>0,0178</u>



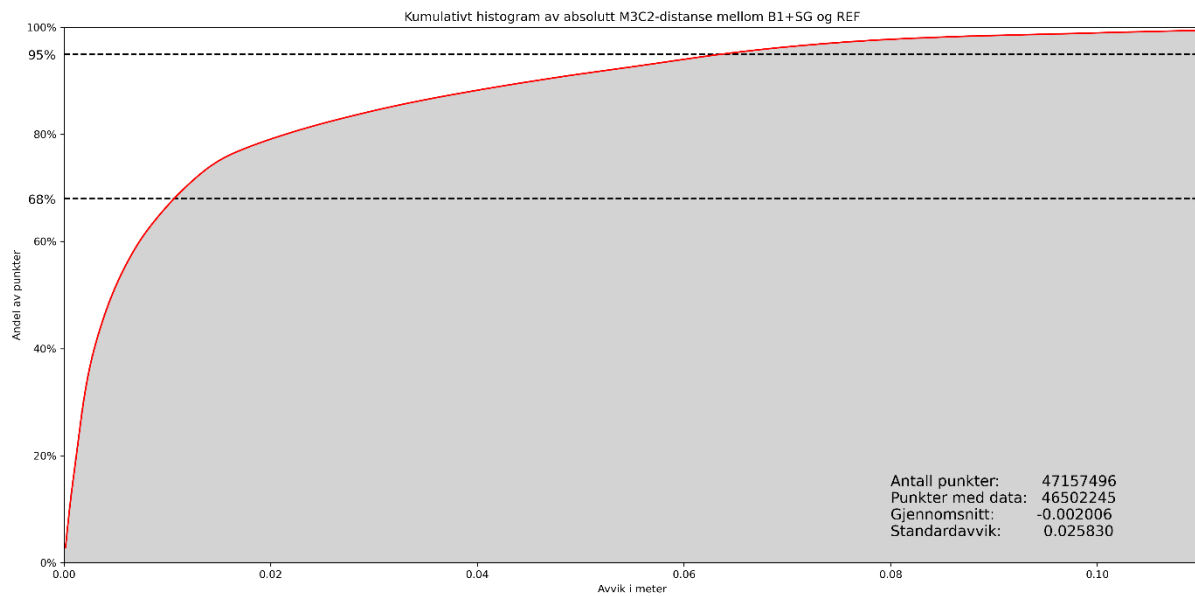
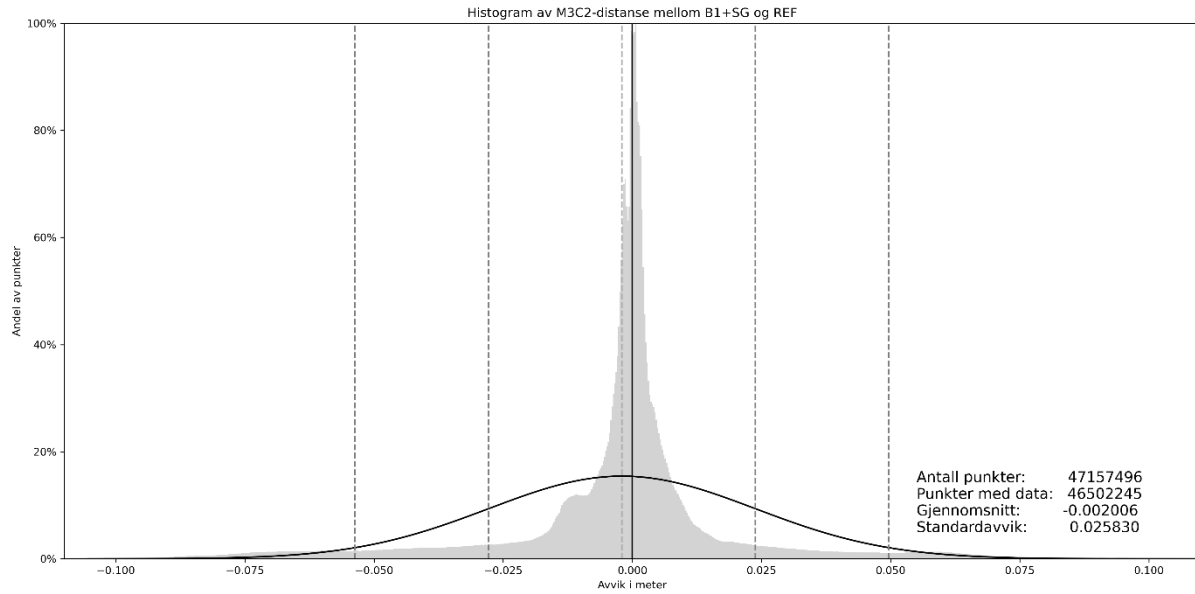
Figur 15. Distribusjon av resultat fra M3C2 analyse mellom B2+SU og REF i form av histogram med normalfordelingskurve (over) og kumulativt histogram av absoluttdistanse (under).



Figur 16. Distribusjon av resultat fra M3C2 analyse mellom SG+UGGSS og REF i form av histogram med normalfordelingskurve (over) og kumulativt histogram av absoluttdistanse (under).



Figur 14. Distribusjon av resultat fra M3C2 analyse mellom SG+B3 og REF i form av histogram med normalfordelingskurve (over) og kumulativt histogram av absoluttdistanse (under).



Figur 15. Distribusjon av resultat fra M3C2 analyse mellom B1+SG og REF i form av histogram med normalfordelingskurve (over) og kumulativt histogram av absoluttdistanse (under)

6 Diskusjon

6.1 Drøfting av resultat og metode

6.1.1 Fastmerker

Opprinnelig fastmerkegrunnlag bestod av fire fastmerker; F1, F2, F3 og F4. Disse var målt med CPOS, og målt i 5 helsatser med totalstasjon mellom seg. For å fjerne tvang ble retningsvinkel $F3 \rightarrow F2$ beregnet basert på CPOS og ny tvangs-fri koordinat for F2 beregnet fra satsmålingene. Tvangsfrie koordinater F2 og F3 ble låst og resterende fastmerker var utjevnet basert på satsmålingene. Dette resulterte da i et godt fastmerkegrunnlag uten tvang.

Under utjevning av polygondrag oppdages avvik i høyde, og etter en lengere analyse av observasjoner og kontrollmålinger mot de etablerte fastmerkene antar man at det har forekommet endringer i fastmerkens høyde underveis i polygondragsmålingene. Høydeforskjellen som vist i tabell 9, antyder at høyden i F3 synker i snitt 1 mm mellom hvert polygondrag. Dette førte til at opprinnelige fastmerker forkastes og nytt fastmerkegrunnlag blir etablert som beskrevet i kapittel 4.1.2. Telehivsproblematikken i fastmerkene hadde størst påvirkning på polygondragene, og for å minimere effekten ble det i tillegg gjort korreksjoner for siktehøyder i F3, for hvert av dragene (Tabell 9). Kombinasjonen av å beregne F3 basert på «enveis-observasjoner» relatert til polygondraget og å korrigere alle siktehøyder for F3 slik at høydene i dragene stemmer overens, ville ikke vært en akseptabel fremgangsmåte dersom solid georeferering opp mot det koordinatbaserte referansesystemet var nødvendig for problemstillingen. Metoden sørger derimot for en akseptabel innbyrdes overenstemmelse i dragene som er viktig for problemstillingen. Fastmerkene kan altså anses som referansepunkter som bidrar til orientering, men det er for liten kontroll for å si noe om kvaliteten opp mot referansesystemet.

6.1.2 Polygondrag

Selv om det er enkelte utslag i observasjonstest (vedlegg: 01_OBS.TEST_2D.DOK, 01_OBS.T_H.DOK) som vist i tabell 18, er gjenværende observasjoner valgt å aksepteres. Observasjoner mellom F4 og F3 som slår ut i avstand antas å ikke påvirke resten av draget i stor grad da dette er sikt mellom to fastmerker i start og slutt. Ettersom polygondraget heller ikke er godt bestemt opp mot det koordinatbaserte referansesystemet, har sikt mellom F4 og F3 størst hensikt i å orientere dragene. Sikt P1.3→P1.2 slår ut i avstand, men må beholdes for å holde draget intakt da sikt P1.2→P1.3 er utelatt. Resterende observasjoner beholdes grunnet akseptabel størrelsesorden.

Ved test for indre pålitelighet (vedlegg: 03_INDR.PÅL_2D.DOK, 03_INDR.PÅL_H.DOK) er det enkelte utslag i retning, men disse observasjonene aksepteres da man i dragene har få overskytende sikt til felles targets mellom disse stasjonene. Det ses delvis bort fra ytre pålitelighet (vedlegg: 04_YTR.PÅL_2D.DOK, 04_YTR.PÅL_H.DOK) da det er få fastmerker og flere ukontrollerbare observasjoner for indre pålitelighet.

For bedre kontroll på dragene i utjevningen så man i ettertid at man gjerne skulle hatt observasjoner til flere fastmerker og mer redundans i målingene, som kanskje ville gitt flere løsninger på telehivsproblematikken, bedre muligheter for optimalisering av draget, og man ville hatt sterkere argumenter for å si noe om kvaliteten. Det var begrensede muligheter for dette grunnet forflytning i fastmerkene. Grovfeil og tvang antas å kunne ha påvirkning for registreringen av TLS-referansepunktskyen da RTC360 har en relativt god 3D-punktnøyaktighet på 1,9mm@10m (tabell 4), men ut ifra de statistiske testene antas eventuelle feil i observasjonene å være av en akseptabel størrelsesorden, og bør ikke påvirke vår evne til å besvare problemstillingen i stor grad da kombinert punktnøyaktighet for instrumentene er i størrelsesorden 1,9 - 6mm (tabell 4, 5).

6.1.3 Targets

Etter utført registrering og analyse ser vi at vi med en bedre plan kunne redusert antall targets. Targets ble ikke brukt i den grad det var tenkt under registreringen og analysen grunnet plassering og sikt. Det var stedvis få felles targets for oppstillinger og det kan tenkes at man ville kunne oppnå tilsvarende kvalitet på registreringen med færre targets. Mer om resultatet av registreringen står senere i diskusjonen. Antallet targets ga derimot stor frihet til å velge ut targets som skulle registreres med MLS.

Ferdig utjevnete targets har som vist i tabell 20, et standardavvik i størrelsesorden 1-2mm. Som diskutert tidligere er det begrenset med kontroll i polygondraget som kan påvirke oppnådd nøyaktighet. MS60 totalstasjon har også en avstandsnøyaktighet på 2mm + 2ppm for prismeløse overflater som kan være med å påvirke den oppnådde nøyaktigheten. Utskrift av targets var bestilt fra et trykkeri, for å sikre tilstrekkelig tykkelse og kvalitet. Hensikten med dette var å hindre eventuelle avvik forårsaket av tynne ark, hvor laserstrålen i enkelte tilfeller kan bryte gjennom papiret og måle flaten bak. Avvik sett i koordinatene for targets ansees å være akseptable, og bør ikke ha noen stor påvirkning for sluttresultatet sett opp mot problemstillingen.

6.1.4 Referansepunktsky

Resultater fra registrering av referansepunktsky som man ser i tabell 21 på side 54 viser avvik med snittverdier i størrelsesorden 1-2 mm. For å kunne si noe om hvor bra eller dårlig dette resultatet er må man vite hva som ligger bak de ulike verdiene.

Snittavvik, ICP-avvik, targetavvik og overlapp er verdier fra enkeltkoblinger i registreringen. ICP-avvik er gjennomsnittlig absoluttavvik mellom punktskyene i koblingen etter ICP-registrering og targetavvik er gjennomsnittet av absoluttavviket for targets brukt i koblingen. Snittavviket er simpelt gjennomsnittet av ICP- og targetavvik. Det kan være greit å merke seg at siden targets kun ble brukt i beregningen av 33 av de totalt 301 koblingene vil snittavvik i de fleste tilfeller her være det samme som ICP-avvik. Overlapp er den prosentvise andelen av punktskyene som overlapper hverandre. Overlappverdiene i seg selv sier ikke direkte noe om kvaliteten på resultatet av registreringen, men forteller hvor egnet oppstillingene og koblingene mellom dem har vært for ICP-registrering, da tilstrekkelig overlapp er essensielt for god registrering. Vi ser i resultattabellen at snittavvik ligger mellom 0,6 mm og 5,5 mm. Snittet av snittavviket ligger på 1,7 mm, og siden standardavviket ikke er større enn 1 mm kan man utlede at det er få avvik i størrelsesorden 5,5 mm. Det er ingen tall i resultattabellen som tyder på store

avvik. Da formålet med denne punktskyen er å være referanse i sammenligning med VLX-punktskyer der produsent oppgir skannenøyaktighet på 6 mm kan man med trygghet si at resultatet fra registreringen er tilstrekkelig for å besvare problemstillingen.

Kontrollavviket er ikke knyttet til koblinger, men til de 146 kontrollmålingene gjort mot targets i de ulike ferdig registrerte oppstillingene. Her er det viktig å ta i betraktning at koblingene ble låst opp og punktskyen ble optimalisert igjen etter innføring av kontrollpunkter og første kontroll. Uten å ha klart å finne noe dokumentasjon fra programvaren på akkurat hva som skjer da tyder det på at koordinatene til targets ble tatt med i betraktning som en betingelse under optimaliseringen, noe som påvirker registreringen. Det kan ses på som en slags tvang som blir innført i beregningene, men siden geometrien innbyrdes i kontrollpunktene er uten tvang og anses som fasit kan man anta at denne påvirkningen generelt er positiv på registreringen fra et globalt perspektiv. Eksperimentering i programvare tyder også på at ikke bare kontrollavviket, men det totale avviket i registreringen går ned med denne metoden. Kontrollavviket kan ved denne metoden ikke lenger anses som en ren kontroll av ICP- og targetregistreringen, men gir tall på hvor godt sluttregistreringen stemmer overens mot kontrollpunktene. Vi ser i resultattabellen at vi har fått et gjennomsnitt av de 146 kontrollmålingene på 1 mm, med standardavvik på 0,4 mm og høyeste avvik på 2 mm. Ser man på tabell 20 som viser standardavvik for innmålingen av targets, ser vi at det ligger på rundt 1-2 mm. På grunnlag av dette tillater vi oss å beskrive kontrollavvikene som meget gode.

Vi ser også at det var relativt få koblinger som benyttet seg av targetbasert registrering. Dette kan blant annet knyttes til at det i de fleste oppstillinger ble skannet med lav oppløsning, som ikke var tilstrekkelig for nøyaktig uthenting av targetsenter i registreringsprogramvare. Økt antall targetbaserte koblinger hadde gitt bedre kontroll over registreringen og registreringsresultatet, men dersom vi hadde skannet med høy oppløsning ville datafangsttid økt betraktelig, og den økte datamengden ville ført til mye mer krevende databehandling. Det er etter vår mening mer enn tilstrekkelig resultat vi har oppnådd med metoden vi brukte, og den potensielle gevinsten ville trolig ikke påvirket evnen til å besvare problemstillingen.

6.1.5 Søylepunktsky

For å kunne si noe om hva som er en effektiv produksjonsløype for kombinert bruk av MLS og TLS må man naturligvis vise til ulike metoder og sammenligne resultatene fra dem. Vi valgte tre ulike metoder for registrering av data i de utvalgte TLS-områdene, ikke bare for å si noe om ulikhetene i registreringen, men for å simulere tre ulike tenkte scenarioer. Selv om grunnlaget for de ulike registreringene var akkurat de samme oppstillingene, simulerer vi altså ulike datainnsamlingsmetoder ved å gjøre registreringen ulikt. Ved å gjøre det på denne måten i stedet for å fysisk gjennomføre ulike datainnsamlinger sparte vi tid under gjennomføringen, men vi mistet muligheten til å få tall om tidsbruk i felt, som kunne tenkes å være verdifulle tall for å kunne si noe om effektiviteten. Da tidsbruk er et aspekt som lett kan påvirkes av svært mange faktorer, som for eksempel erfaring med feltarbeid og lokale utfordringer mener vi derfor at usikkerheten rundt tidsbruk uansett gjør det til et lite verdifullt måleobjekt.

Det var ikke forventet store forskjeller direkte i resultatet fra registreringen, men at eventuelle større forskjeller ville komme frem ved videre analyse. Vi ser i tabell 22 på side 55 at det er små differanser på de gjennomsnittlige snittavvikene, både mellom de ulike registreringsmetodene, men også totalt sett. Største differanse er for søyleområde 5, der det er 0,5 mm differanse. Det er ingen tydelige trender som kan ses fra disse resultatene. På samme grunnlag som i 6.1.4 kan det sies at kontrollavvikene til SG er gode.

6.1.6 VLX

Dessverre var vi ikke i stand til å presentere statistisk dokumentasjon fra MLS-databehandlingsprosessen, inkludert prosessering, georeferering og registreringen i IVION programvaren. Årsaken til manglende dokumentasjon var det uventede tapet av data som fant sted utenfor vår kontroll. Tapet av dataene fra serveren ble først oppdaget på slutten av analysefasen. For å forsøke å gjenopprette dataene ble programvareprodusenten kontaktet for å finne ut muligheten for å gjenopprette dataene fra en eventuell server. Dessverre eksisterer ikke en slik server, noe som følgelig gjorde det umulig å gjenopprette statistiske data. Muligheten for reprosessering og re-registrering av MLS-data ble tatt i betraktning, men denne metoden ble betraktet av oss som uegnet da det ville ført til inkonsekvent data. Vi tror altså at ny databehandling kunne gitt oss resultater for statistiske data med andre verdier enn for de originale dataene som var brukt i analysen, og kunne hatt en upålitelig innvirkning på evalueringen av analyseresultatene.

Denne problematikken kunne vært unngått ved konsekvent etterfølgende dokumentasjonslagring etter hvert som individuell prosessering, georeferering og registrering ble fullført.

For å fastslå påliteligheten til MLS-datakvaliteten, er det brukt resultater av analyser utført på B2 datasettet som dekker hele området til det skannede objektet i forhold til referansepunktskyen se tabell 28 på side 60. Registreringsresultatet mot REF viste seg å være tilfredsstillende, og vi mener at de er innenfor en tilstrekkelig pålitelighetsgrense til å svare på problemstillingen. Samtidig mener vi at mangelen på statistiske data for MLS-databehandling ikke har vesentlig betydning for muligheten for å svare på problemstillingen.

6.1.7 Analyseresultat

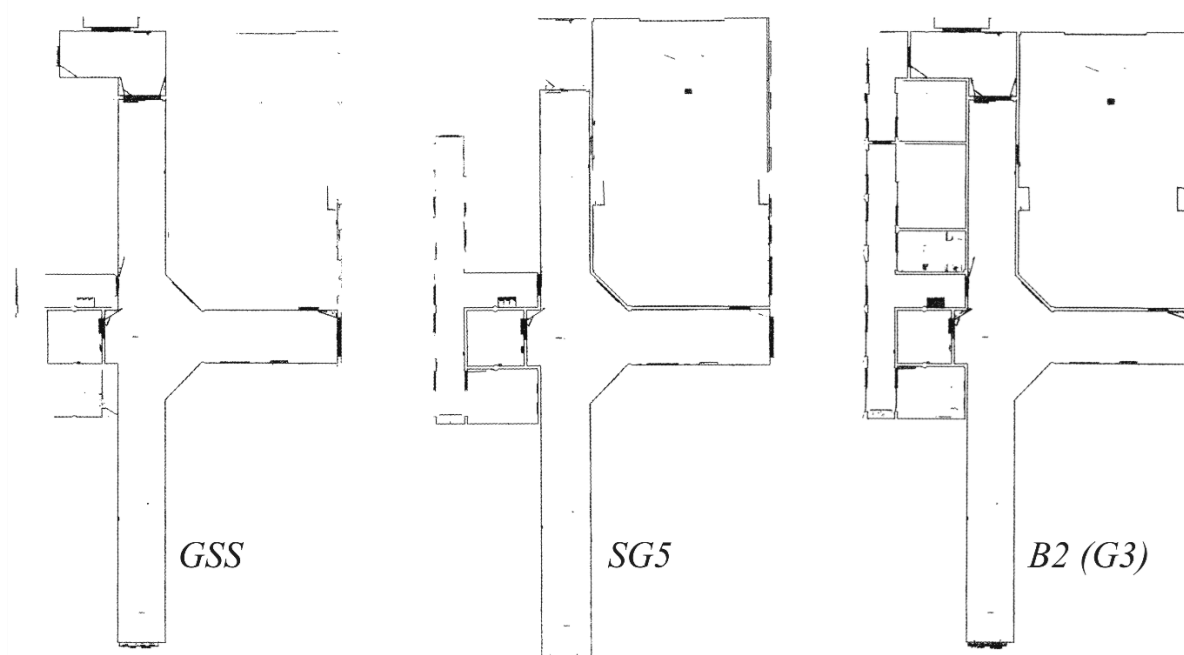
ICP-registreringen

ICP-registreringen gjennomført i analysedelen kan deles i tre kategorier; registrering av ugeoreferert MLS-punktsky mot referansepunktsky, registrering av ugeoreferert MLS-punktsky mot sammensatt georeferert TLS-punktsky og registrering av enkeltstående ugeorefererte TLS-punktskyer mot en georeferert MLS-punktsky. Tabell 23 på side 56 viser en oversikt over de utførte ICP-registreringene. De to første i oversikten, med analysenummer 1 og 5, faller under den førstnevnte kategorien. Formålet med disse registreringene var kun for bruk i M3C2 analysen der rene MLS-punktskyer ble sammenlignet med referansepunktstyken for å kunne direkte sammenligne hvordan ulike VLX-datafangstmetoder og prosessering påvirker resultatet. Analyse 9 og 16 faller under den neste kategorien, og resten faller under siste kategori.

To viktige parametere ved ICP-registrering i CloudCompare er antall punkter som samples per iterasjon, og teoretisk overlapp. Når det gjelder teoretisk overlapp kan det gjerne være behov for å ta enkelte datasetts utforming i betraktning, og å prøve seg frem til man finner optimal verdi. Vi valgte å bruke like parametere for like type registreringer. Dette ble gjort både for å ha samme grunnlag for alle analyser, men også for enkelhets skyld. Om dette var riktig valg diskuteres litt nedenfor.

Det er spesielt to resultater som skiller seg ut med relativt grove avvik i resultattabellen, søyleområde 5 (SU5 og ST5) mot GSS i analyse 6 og 7. Det kan være flere grunner til dette, man ser for eksempel en trend i begge disse analysene med økende avvik fra første etasje (søyleområde 1 og 2), oppover til andre etasje (søyleområde 3 og 4) og videre til tredje etasje der søyleområde 5 ligger. I GSS ble det brukt kontrollpunkter i start og slutt av ruten, og det ble gått fra første til tredje etasje. Da vil det naturlig være høyest avvik i midten av skanneruten, så økningen i avvik fra første til andre etasje gir mening. Den videre økningen til tredje etasje er derimot motsatt av det som forventes, da avviket burde synke igjen. Det tyder på at det er en annen årsak til avviket. I analysene mot B1 og B2 (analyse 10, 11, 13 og 14) ser man ikke dette økte avviket i søyleområde 5, så ved å se på det som skiller GSS fra B1 og B2 bør man kunne finne kilden til avviket. Figur 16 nedenfor viser det samme horisontale tverrsnittet fra tre ulike punktskyer, i søyleområde 5. I midten ser man SG5, som i stor grad tilsvarer SU5 og ST5. Til venstre er GSS, og til høyre er B2. B2 er en bundle sammensatt av tre VLX-datasett: G1, G2 og G3. I tredje etasje er B2 basert på G3. B1 er i tilsvarende område basert på datasettet U3.

Ruten gått i U3 er i stor grad lik den gått i G3. Figuren viser at det er gått en annen rute for GSS enn det som ble gått i B2, da GSS ikke dekker hele det samme området som B2. Man ser at en stor andel av SG5 ikke er med i GSS. En sannsynlig kilde til det store avviket man ser mellom søyleområde 5 og GSS kan da være at ICP-registreringen ble gjennomført med for høy teoretisk overlapp. Ved å tilpasse overlappsverdien for hver enkelt registrering ville man sannsynligvis fått lavere avvik, og det ville representert en mer realistisk prosess.



Figur 16. Tre horisontale tverrsnitt i tre ulike punktskyer som viser søyleområde 5. Til venstre ser man GSS, i midten ser man SG5 og til høyre ser man B2. Man ser at dekningsgraden er lavere i GSS enn i SG5 og B2.

M3C2-analyse

Analysen som i vårt tilfelle ga best resultat for RMSE-verdien er den andre delen av analyse 13 presentert i tabell 25. Beregningene omfattet kombinasjon av SU- og B2-punktskyene, hvor SU ble tidligere i første del av analysen ICP-registrert mot B2. Etter å ha sammenslått punktskyene ble analysen utført mot REF. RMSE-verdien for denne analysen var 12,5 mm med et gjennomsnittlig avvik på -0,2 mm.

Det dårligste resultatet ble oppnådd for analyse nr. 3, utført på B1 mot REF, hvor RMSE-verdien også presentert i Tabell 25 er 33,9 mm for et gjennomsnittlig avvik på 0,1 mm.

For å optimalisere presentasjon av resultatene ble det laget oversiktsmatriser (tabell 26, 27 og 28) for individuelle punktskysammenstillinger under analyseberegningene, hvorfra de enkelte resultatene i analyseprosessen kan leses.

Tabell 29. Avvik sett opp mot krav til forarbeid

	TLS Geo.ref	TLS Targets	TLS uten targets
MLS Geo.ref	(B2+SG):14mm	(B2+ST):15mm	(B2+SU):13mm
MLS Enkelte targets	(GSS+SG):17mm (B1+SG):26mm	(GSS+ST):27mm (B1+ST): 32mm	(GSS+SU):27mm (B1+SU):32mm
MLS uten targets	(UGGSS+SG):18mm (B3+SG):18mm		

Tabell 29 setter data fra analysen opp mot nødvendig forarbeid med å måle inn targets, utplassering av targets eller uten bruk av targets for både MLS og TLS skann. Georeferering krever desidert mest forarbeid og er de minst «effektive» punktskyene å produsere. Plassering av targets uten georeferering krever betydelig mindre forarbeid, men noe planlegging må til. Punktskyer uten targets er de mest «effektive» og krever minst forarbeid. Avvikene som presenteres i tabell 29 er avvikene mellom registrerte data og referansepunktskyen hentet fra tabell 28.

Avvikene for B2 kommer best ut i alle kombinasjoner av MLS og TLS. B2 er registrert med til sammen 12 georefererte targets, og anses som den minst effektive formen for MLS da dette krever plassering og georeferering av targets spredt i alle etasjer. B2 får en jevnt god registrering

uavhengig om søylepunkttskyen er uten targets, med targets eller georeferert. Til tross for mindre avvik er dette også den produksjonsløypen som krever mest forarbeid.

UGGSS er et kontinuerlig MLS-skann av hele bygget, uten bruk av targets og kan anses å være den mest effektive formen for MLS-skann. UGGSS i kombinasjon med SG gir et avvik på 18mm, men krever innmåling og plassering av targets i områder skannet med TLS. Om dette er en effektiv produksjonsløype avhenger av områdets tilgjengelighet for sikt med totalstasjon.

B1 er MLS-skannet som kommer dårligst ut i registreringen sett opp mot referansepunkttskyen med avvik på 26-32mm (tabell 26). B1-bundelen består av georefererte trappeområder og etasjevise skann uten bruk av targets. Det kan for B1 tolkes som at tilpasning av ikke-georefererte MLS punkttskyer mot georefererte T1 punkttskyen faller ikke sammen med motstående T2 i andre enden av bygget gjør denne produksjonsløype sårbar for drift og andre SLAM relaterte feilkilder.

GSS er i likhet med UGGSS et kontinuerlig skann gjennom hele bygget, men er georeferert i start og slutt. I tabell 28 ser man at i kombinasjon med søyleområder får man et avvik på 17-27mm. Av disse er det kombinasjonen med georefererte søyleområder (GSS+SG) som gir best resultat på 17mm (tabell 29). Dette er tett opp imot avviket gitt av UGGSS+SG og antyder at et kontinuerlig skann med MLS av hele bygget uten targets (UGGSS) registrert mot georefererte TLS-skann oppnår nesten samme nøyaktighet for registrering som et kontinuerlig, georeferert MLS skann.

Etter tolkning av tabell 29, kan det tyde på at det er produksjonsløypene med georefererte MLS-skann kombinert med ikke-georeferert TLS-skann (B2+SU), og det ikke-georefererte kontinuerlige MLS-skannet kombinert med georefererte TLS-skann (UGGSS+SG) som oppnår best resultat for registrering, med minst mulig forarbeid. Dette er helt avhengig av byggets struktur da noen bygg med eksempelvis mange vinduer lett kan få sikt inn og måle targets i hjørner for et MLS-skann å georefereres mot, mens i «dype» bygg kan det være beste fremgangsmåte å måle inn targets i spesifikke områder for TLS-skann og registrere etter disse.

Figurene 15 til 18 er utdypende visualisering av utvalgte M3C2-resultater, i form av histogrammer med normalfordelingsgraf lagt over, samt et kumulativt histogram av absoluttdistansen. De utvalgte resultatene er alle kombinasjoner av TLS og MLS sett opp mot REF. For alle de fire vanlige histogrammene ser vi en tydelig samling rundt 0, som viser et hovedvekten av punktene har små avvik, men bredden på normalkurven, altså standardavviket, varierer, og denne visualiseringen bekrefter tolkningene gjort ovenfor.

6.2 Drøfting av faglige utfordringer

Som vist i kapittel 4.1, ble skanning av H-bygget gjort før innmåling av targets. I den opprinnelige planen for datainnsamlingen skulle fastmerker og koordinater for targets være satt i forkant av skanningen. For å gjennomføre skanningen av H-bygget måtte VLX og RTC360 lånes av oppdragsgiver da de var tilgjengelige. Det ble kjent for oss at skannerne var tilgjengelige en kommende helg, og det ble bestemt å utføre skanningen i denne perioden da det var uvisst når skannerne igjen ville bli tilgjengelige. Dette førte til en fremskyndelse av planarbeidet rundt laserskanningen slik at planlegging og innmåling av targets måtte utsettes.

Det ble som nevnt tidligere i diskusjonen en del problematikk angående forflytninger i fastmerkene. Dette kunne mest sannsynlig vært unngått dersom det eksempelvis ble plassert prismer i allerede eksisterende prismefester i området, eller unngått å plassere asfaltspiker i gangfelt med manglende frostsikring.

Når det gjelder MLS-datainnsamlingsprosessen, viser tabell 8 behovet for data som ble definert som minimum for analysen, og tabell 10 viser feltlogg for dataene som ble innsamlet. På et senere tidspunkt av arbeidet ble det funnet ut at mengden produserte data kunne begrenses til seks datasett. Datasettene som kan ekskluderes fra skanneplanen er U1, U2 og U3, som kunne vært produsert under data prosessering i IVION ved å ganske enkelt ikke bruke kontrollpunkter for punktskyregistrering.

Som nevnt i innledningen er FNs bærekraftsmål nr 9 relevant for oppgaven. Å «Bygge solid infrastruktur og fremme inkluderende og bærekraftig industrialisering og innovasjon» (FN-sambandet, 2022) er noe som hører til i en geomatikers hverdag. I oppgaven kom vi frem til resultat som viser hvilken nøyaktighet ulike kombinasjoner av innsamlingsmetoder og punktskyer gir. Dette kan brukes til bedre planlegging og dermed fremme bærekraft.

7 Konklusjon

For å sette svar på problemstillingen er det etablert grunnlagsdata og det er skannet med MLS og TLS. En rekke analyser er gjort på data fra denne prosessen hvor man har sett nærmere på registreringsprosessen for ulike kombinasjoner av MLS- og TLS-punktskyer for å undersøke hvilke produksjonsløyper som kan anses fornuftig, sett opp imot effektivitet og arbeidsmengde. Som følge av vår analyse, er det kommet frem til følgende:

For å si noe om oppnådd kvalitet for registreringen blir punktskyene sett opp mot en veletablert referansepunktsky der det er den gjennomsnittlige M3C2 distansen mellom disse som blir målet for kvalitet. Etter tolkning av resultatene gitt av de ulike registreringskombinasjonene, er det landet på to produksjonsløyper som vi mener kan bistå til en mer «optimal» arbeidsflyt.

Det første eksempelet baserer seg på ikke-georefererte TLS-punktskyer, registrert mot georefererte MLS-punktskyer. De ikke-georefererte TLS-punktskyene består her av individuelle punktskyer som representerer «interesseområder» der det er ønskelig å oppnå «økt» nøyaktighet i punktskyen. Georefererte MLS-punktskyer består av en gruppe georefererte punktskyer som er ko-registrert for å representere hele bygget. Ko-registreringen av disse resulterte i en gjennomsnittlig M3C2 distanse på 13mm, og blir den produksjonsløypen som oppnår «best» kvalitet, men kan være tidkrevende innmåling av targets fordelt i hele bygget.

Det andre eksempelet baserer seg på en sammenhengende, ikke-georeferert MLS-punktsky registrert mot georefererte TLS-punktskyer. Den ikke-georefererte MLS-punktskyen representerer hele bygget som skannet i ett enkelt kontinuerlig skann. Georefererte TLS-punktskyer består av individuelle ko-registrerte punktskyer som representerer «interesseområder» der man vil oppnå «økt» nøyaktighet i punktskyen. Ko-registreringen av disse resulterte i en gjennomsnittlig M3C2 distanse på 18mm, og nådde ikke samme kvalitet som gitt i det første eksempelet, men targets trengs ikke fordeles i hele bygget, men kun i bestemte områder av bygget.

Hvilken produksjonsløype som er mest effektiv avhenger i stor grad av selve skanneobjektet. En produksjonsløype som baserer seg på ikke-georefererte TLS-punktskyer, registrert mot georefererte MLS-punktskyer vil eksempelvis være en effektiv produksjonsløype dersom det skal skannes et bygg med gode siktmuligheter inn til bygget i alle etasjer. Her kan targets fordeles og måles i egnede steder for georeferering av MLS-punktsky og TLS-punktskyer kan skannes i overlappende områder uten bruk av targets.

En produksjonsløype der ikke-georeferert MLS-punktsky registreres mot georefererte TLS-punktskyer kan være gunstig ved skanning av f.eks. «dype» bygg uten gode muligheter for sikt med totalstasjon inn i bygget. Georefereringen av targets og TLS punktsky kan fokuseres til bestemte områder i bygget, mens MLS-punktsky kan enkelt skannes uten bruk av targets.

Det ble ikke gjort noen undersøkelser der MLS- og TLS punktskyer ko-registreres uten noen form for geo-referering. Analysen tar for seg resultater gitt for kombinert registrering av MLS og TLS, sett opp mot nødvendig forarbeid. Analysen går ikke i dybden om oppnådd nøyaktighet på selve punktskyen i interesseområdene der MLS- og TLS-data er ko-registrert. Dette kan være et forslag for videre analyse.

Litteraturliste

3Dscan (2020) *The importance of targets in a laserscanner survey*. Tilgjengelig fra: <http://www.3dscan.it/en/blog/the-importance-of-targets-in-a-laser-scanner-survey/> (Hentet: 14.05 2022).

Barber, D., Mills, J. og Smith-Voysey, S. (2008) Geometric validation of a ground-based mobile laser scanning system, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 63(1), s. 128-141. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2007.07.005>

Brumm, A. (2020) *How to Determine Which Laser Scanning Registration Method is Right for You*. Tilgjengelig fra: <https://engineeringcenter.bnppmedia.com/courses/pob-magazine/how-to-determine-which-laser-scanning-registration-method-is-right-for-you/> (Hentet: 06.05 2022).

Cadena, C. *et al.* (2016) Past, Present, and Future of Simultaneous Localization and Mapping: Toward the Robust-Perception Age, *IEEE transactions on robotics*, 32(6), s. 1309-1332. <https://doi.org/10.1109/TRO.2016.2624754>

Campbell, A. *et al.* (2017) *Inverse square law*. Tilgjengelig fra: https://energyeducation.ca/encyclopedia/Inverse_square_law (Hentet: 07.05 2022).

Campbell, J. B. og Wynne, R. H. (2011) *Introduction to remote sensing*. Guilford Press.

Cheng, L. *et al.* (2018) *Registration of Laser scanning point clouds: A review*. Tilgjengelig fra: https://www.researchgate.net/publication/325293020_Registration_of_Laser_Scanning_Point_Clouds_A_Review (Hentet: 06.05 2022).

Cloud Compare (2016) *Main Page*. Tilgjengelig fra: https://www.cloudcompare.org/doc/wiki/index.php/Main_Page (Hentet: 15.05 2022).

Esri (2021) *What is lidar intensity data?* Tilgjengelig fra: <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/manage-data/las-dataset/what-is-intensity-data-.htm> (Hentet: 06.05 2022).

FN-sambandet (2022) *Industri, innovasjon og infrastruktur*. Tilgjengelig fra: <https://www.fn.no/om-fn/fns-baerekraftsmaal/industri-innovasjon-og-infrastruktur> (Hentet: 15.05.2022 2022).

Heritage, G. og Large, A. (2009) *Laser scanning for the environmental sciences*. John Wiley & Sons.

Hestnes, E. og Kjeldsberg, P. G. (2016) Low Power Inertial Measurement Unit for Internet of Things Applications: NTNU.

Janßen, J. *et al.* (2019) Decreasing the uncertainty of the target center estimation at terrestrial laser scanning by choosing the best algorithm and by improving the target design, *Remote Sensing*, 11(7), s. 845.

Khameneifar, F. og Ghorbani, H. (2019) On the curvature estimation for noisy point cloud data via local quadric surface fitting, *Comput.-Aided Des. Appl.*, 16(1), s. 140-149.

Klasing, K. *et al.* (2009) Comparison of surface normal estimation methods for range sensing applications, i *2009 IEEE international conference on robotics and automation*. IEEE, s. 3206-3211.

Kowalska, M. (2020) *Opracowanie metodyki przetwarzania danych z naziemnego skaningu laserowego w pomiarach kontrolnych obiektów inżynierskich*, Department of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Systems.

Lague, D., Brodu, N. og Leroux, J. (2013) Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon (NZ), *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 82, s. 10-26.

Leica Geosystems (2018) *Leica RTC360 Product Specifications*. Tilgjengelig fra: <https://leica-geosystems.com/products/laser-scanners/scanners/leica-rtc360?msclid=3ff8e930d13311ec915e17c46dcf0cb6> (Hentet: 11.05 2022).

Leica Geosystems (2020) *Leica Nova MS60*

Data sheet. Tilgjengelig fra: <https://leica-geosystems.com/products/total-stations/multistation/leica-nova-ms60?redir=497> (Hentet: 11.05 2022).

Leica Geosystems (2021a) *Help Center*. Tilgjengelig fra: <https://cyclone3dr.leica-geosystems.com/help/2021.2/HelpCenter.html> (Hentet: 15.05 2022).

Leica Geosystems (2021b) *Leica Viva GS16 Data sheet*. Tilgjengelig fra: <https://leica-geosystems.com/products/gnss-systems/smart-antennas/leica-viva-gs16?msclid=b85d64d6d12e11ec981b4c786fec027a> (Hentet: 11.05 2022).

Leica Geosystems (2022) *Visual Inertial System (VIS) Technology*. Tilgjengelig fra: https://leica-geosystems.com/products/laser-scanners/scanners/leica-rtc360/visual_inertial_system_technology (Hentet: 04.05 2022).

Levy, S. (1995) *Quadrics*. Tilgjengelig fra: <http://www.geom.uiuc.edu/docs/reference/CRC-formulas/node61.html> (Hentet: 17.05 2022).

Løhmus, H. *et al.* (2018) Terrestrial laser scanning for the monitoring of bridge load tests—two case studies, *Survey review*, 50(360), s. 270-284. Tilgjengelig fra: https://scholar.google.com/scholar?hl=en&as_sdt=0%2C5&q=Terrestrial+laser+scanning+for+the+monitoring+of+bridge+load+tests+%E2%80%93two+case+studies&btnG=.

Løvås, M. *et al.* (2017) *Increasing the Accuracy of Positioning in Mobile Mapping Systems - A method supported by Simultaneous Localization And Mapping*, NTNU.

NavVis (2020) *How SLAM affects the accuracy of your scan (and how to approve it)*. Tilgjengelig fra: <https://www.navvis.com/blog/how-slam-affects-the-accuracy-of-your-scan-and-how-to-improve-it> (Hentet: 28.04.2022 2022).

NavVis (2021) *NavVis VLX 2nd generation datasheet*. Tilgjengelig fra: <https://www.navvis.com/resources/specifications/navvis-vlx?msclkid=5ff24747d13811eca8acc5b98c83e1a8> (Hentet: 11.05 2022).

NavVis (2022a) *The definitive guide to SLAM & mobile mapping*. Tilgjengelig fra: <https://www.navvis.com/technology/slam> (Hentet: 28.04.2022 2022).

NavVis (2022b) *NavVis Academy*. Tilgjengelig fra: <https://academy.navvis.com/> (Hentet: 01.05 2022).

Nowak, R., Orłowicz, R. og Rutkowski, R. (2020) Use of TLS (LiDAR) for building diagnostics with the example of a historic building in karlino, *Buildings (Basel)*, 10(2), s. 24. <https://doi.org/10.3390/buildings10020024>

Pan, Y. *et al.* (2018) *Iterative Global Similarity Points : A robust coarse-to-fine integration solution for pairwise 3D point cloud registration*. Tilgjengelig fra: <https://arxiv.org/pdf/1808.03899.pdf> (Hentet: 04.05 2022).

Pan, Y. (2019) *Target-less registration of point clouds: A review*. Tilgjengelig fra: <https://arxiv.org/abs/1912.12756> (Hentet: 06.05 2022).

Skogseth, T. og Nordberg, D. (2014) *Grunnleggende landmåling*. 3. Gyldendal.

Statens kartverk (2009a) *Koordinatbaserte referansesystemer Versjon 2.1*. Tilgjengelig fra: <https://kartverket.no/globalassets/geodataarbeid/standardisering/standarder/standarder-geografisk-informasjon/koordinatbaserte-referansesystemer-2.1-standarder-geografisk-informasjon.pdf> (Hentet: 03.05 2022).

Statens Kartverk (2009b) *Standard for satellittbasert posisjonsbestemmelse Versjon 2.1*. Tilgjengelig fra: <https://kartverket.no/globalassets/geodataarbeid/standardisering/standarder/standarder-geografisk-informasjon/satellittbasert-posisjonsbestemmelse-2.1-standarder-geografisk-informasjon.pdf> (Hentet: 03.05 2022).

Statens Kartverk (2009c) *Grunnlagsnett versjon 1.1*. Tilgjengelig fra: <https://kartverket.no/globalassets/geodataarbeid/standardisering/standarder/standarder-geografisk-informasjon/grunnlagsnett-1.1-standarder-geografisk-informasjon.pdf> (Hentet: 03.05 2022).

Statens Kartverk (2021) *Få veiledning om CPOS*. Tilgjengelig fra: <https://www.kartverket.no/til-lands/posisjon/hva-er-cpos> (Hentet: 04.05 2022).

Steux, B. og El Hamzaoui, O. (2010) tinySLAM: A SLAM algorithm in less than 200 lines C-language program, i *2010 11th International Conference on Control Automation Robotics & Vision*. IEEE, s. 1975-1979.

Store norske leksikon (2020a) *Lamberts lov for lysemisjon*. Tilgjengelig fra: [https://snl.no/Lamberts lov for lysemisjon](https://snl.no/Lamberts_lov_for_lysemisjon) (Hentet: 01.05 2022).

Store norske leksikon (2020b) *Algoritme*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/algoritme> (Hentet: 02.05 2022).

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

Xiong, H. *et al.* (2016) A scan matching simultaneous localization and mapping algorithm based on particle filter, *Industrial robot*, 43(6), s. 607-616. <https://doi.org/10.1108/IR-07-2015-0138>

Vedlegg

- Registreringsrapport_REF.pdf
- Registreringsrapport_SU1.pdf
- Registreringsrapport_SU2.pdf
- Registreringsrapport_SU3.pdf
- Registreringsrapport_SU4.pdf
- Registreringsrapport_SU5.pdf
- Registreringsrapport_ST1.pdf
- Registreringsrapport_ST3.pdf
- Registreringsrapport_ST4.pdf
- Registreringsrapport_ST5.pdf
- Registreringsrapport_SG1.pdf
- Registreringsrapport_SG2.pdf
- Registreringsrapport_SG3.pdf
- Registreringsrapport_SG4.pdf
- Registreringsrapport_SG5.pdf

- Kontrollpunktkoordinater.txt

- Fastmerker.KOF

- DOK_GRUNNRISSE
 - o 01_OBS.TEST_2D.DOK
 - o 02_GR.TEST_2D.DOK
 - o 03_INDR.PÅL_2D.DOK
 - o 04_YTR.PÅL_2D.DOK
 - o UTJEVNING_2D.DOK
- DOK_HOYDER
 - o 01_OBS.T_H.DOK
 - o 02_GR.TEST_H.DOK
 - o 03_INDR.PÅL_H.DOK
 - o 04_YTR.PÅL_H.DOK
 - o UTJEVNING_H.DOK

