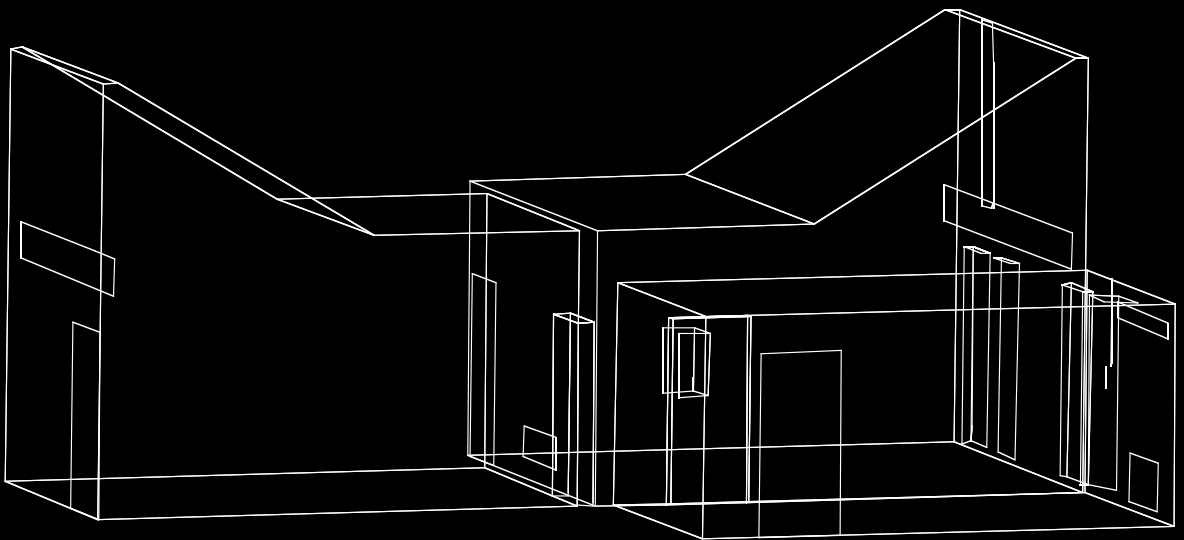
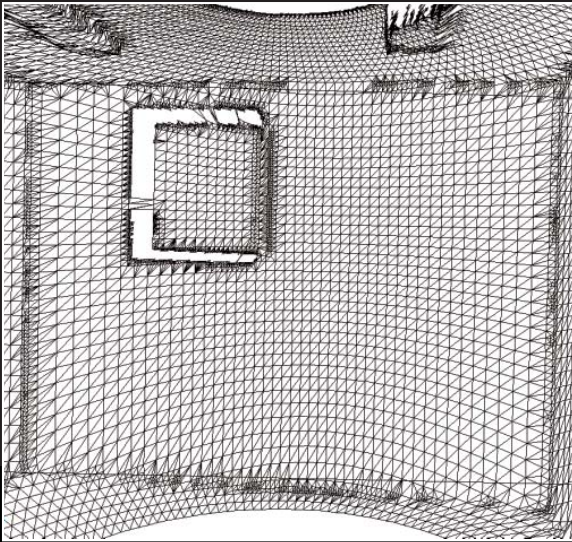
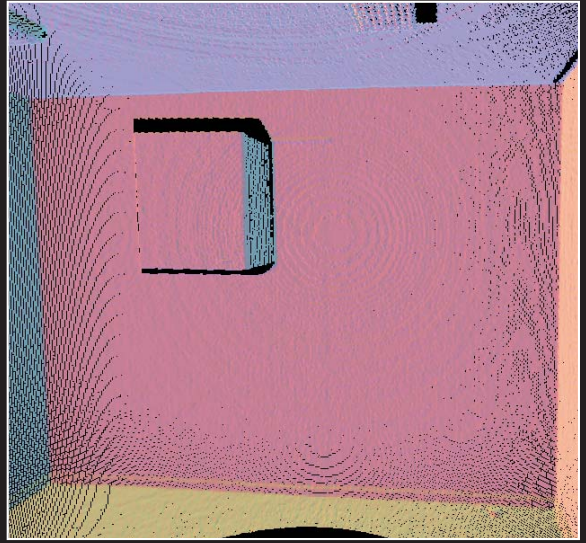


# Terrestrisk laserscanning

## – Indvendig 3D-opmåling



# **TERRESTRISK LASERSCANNING**

## **- INDVENDIG 3D-OPMÅLING**

AFGANGSPROJEKT AF

**GITTE LYSEHØJ**  
**ESKIL KJÆRSHØJ NIELSEN**

LANDINSPEKTØRUDDANNELSEN  
AALBORG UNIVERSITET  
2003

Titel: Terrestrisk Laserscanning  
- Indvendig 3D-opmåling

Projektgruppe: Gruppe L10gi-05

Projektperiode: 3. feb. 2003 – 13. jun. 2003

Hovedvejleder: Carsten Bech

Bivejleder: Joachim Höhle

Sidetal: 148

Oplagstal: 13

Appendiks: 4

Bilag: 20

CD: 1

## SYNOPSIS

Dette afgangsprøjsjekt tager udgangspunkt i terrestrisk laserscanning, herunder indvendig 3D-opmåling af bygninger (Facility management) i forbindelse med renovering af eksisterende bygningerne. Formålet med projektet er at undersøge med hvilken nøjagtighed indvendig 3D-opmåling kan foretages med Systemet Callidus V1-1, og om metoden terrestrisk laserscanning vil være anvendelig til indvendig 3D-opmåling.

Der er opstillet krav for detaljeringsgraden af opmålingen og krav mht. relativ nøjagtighed på 5 mm og absolut nøjagtighed på 15 mm.

Den relative nøjagtighed bliver vurderet på baggrund af tre punktskymodeller, modelleret ud fra samme metode. Det viser sig, at det ikke er muligt at overholde det opstillede krav på 5 mm. Rummenes dimensioner er bestemt med en nøjagtighed på 9,5 mm og øvrige objekter på 15,2 mm.

Den absolutte nøjagtighed bliver ligeledes vurderet på baggrund af tre punktskymodeller. De er genereret ud fra forskellige metoder. Det viser sig at være muligt at overholde kravet mht. den absolutte nøjagtighed ved alle tre metoder på rummenes dimensioner med nøjagtigheder på henholdsvis 8,2 mm, 8,0 mm og 7,6 mm. Men det er ikke muligt at overholde den absolutte nøjagtighed på øvrige objekter, hvor nøjagtigheden er henholdsvis 17,2 mm, 18,6 mm og 15,8 mm. Det er specielt vanskeligt at bestemme dimensioner på mindre objekter, såsom stikkontakter og på objekter, der er sammenfaldende med andre objekter.

Der er undersøgt, om det er muligt at måle i ortofotos med de påkrævede nøjagtigheder. Der er opnået en relativ nøjagtighed på 10,4 mm og en absolut nøjagtighed på 9,5 mm. I ortofotoerne har der til gengæld ikke været problemer med at bestemme mindre objekter og objekter, der er sammenfaldende med andre objekter.

Gruppen finder metoden terrestrisk laserscanning kombineret med terrestrisk fotogrammetri til at være et fornuftigt alternativ til indvendig 3D-opmåling af bygninger.

## ABSTRACT

This master thesis describes possibilities using terrestrial laser scanning – among this facility management in relation to renewal of existing buildings. The purpose of the master thesis is research into what accuracy one can expect with as build documentation when it is carried out with the System Callidus V1-1.

The Project sets up requirement regarding level of detail in the 3D model and requirements for the relative and absolute accuracy of respectively 5 and 15 mm.

The relative accuracy was evaluated on three independent models made of three point clouds. It was not possible to keep the requirements on 5 mm for the relative accuracy. The rooms dimensions had an accuracy on 9,5 mm and 15,2 mm for all other objects.

The absolute accuracy will be evaluated from three models generated of point clusters. The point clusters are transformed into one with different methods. The result from the models was that it is possible keep requirements regarding accuracy on the models dimension for all three methods. The accuracy was respectively 8,2 mm, 8,0 mm and 7,6 mm. It was not possible to keep accuracy regarding all other objects, where the accuracy was 17,2 mm, 18,6 mm and 15,8 mm. It is especially difficult to determine the dimension on smaller objects such as outlets and objects, which is close to other objects.

Furthermore we examine if it is possible to keep the required accuracy using orthophotos instead of laser scanning. Using orthophotos the relative accuracy was 10,4 mm and an absolute accuracy on 9,5 mm. There where no problems determine smaller objects and object close to other objects in the orthophotos.

The group finds terrestrial laser scanning combined with close range photogrammetry a reasonably alternative to existing methods of facility management.

### AALBORG UNIVERSITET

INSTITUT FOR SAMFUNDSUDVIKLING OG PLANLÆGNING

LANDINSPEKTØRUDDANNELSEN

FIBIGERSTRÆDE 11

9220 AALBORG Ø





# Forord

Denne rapport er udarbejdet på Landinspektøruddannelsens 10. semester Geoinformatik 2003 af gruppen 10gi-05. Målgruppen for projektet er hovedsageligt vejledere, censorer og læsere med en landinspektør/fotogrammetrisk baggrund. Der forudsættes, at læseren har et indgående kendskab til landmåling og fotogrammetri.

Kildehenvisninger er angivet med referencen placeret i [ ]. En kildehenvisning kan være placeret både før og efter punktum. Hvis kildehenvisningen er placeret før punktum, dækker den over enten ordet eller sætningen, den står ved. Hvis henvisningen derimod er placeret efter punktum, dækker den over hele afsnittet, den er angivet ved. Kildehenvisninger er opbygget som følgende [Forfatters efternavn, udgivelsesår og evt. side]. Er der anvendt to kilder af samme forfatter og fra samme årstal, benævnes kilderne med et bogstav efter alfabetisk orden efter årstallet – eksempelvis [Jensen, 2002b]. Denne metode vil så vidt muligt anvendes, men til tider vil kildehenvisningerne variere alt efter, om kilden omhandler bøger, forelæsnings, hjemmesider eller artikler. I litteraturlisten er uddybende informationer angivet, om det anvendte kildemateriale.

Rapporten er opdelt i kapitler, der videre er opdelt i fortløbende nummererede underafsnit. Appendiks og bilag forefindes bagerst i rapporten. Appendiks er tiltænkt som supplerende information, hvorimod bilagene er konkrete beskrivelser eller dokumentation for resultater. Der henvises til appendiks og bilag i teksten i form af bogstav – eksempelvis Bilag B. Bilag F til T er indeholdt på cd'en, som er at finde på indersiden af rapportens bagside.

Illustrationer, billeder, skitser mv. er benævnt "Figur", mens tabeller og formler er benævnt henholdsvis "Tabel" og "Formel". De er nummereret med to tal, hvor det første tal henfører til kapitlets nummer, og det andet er en fortløbende nummerering indenfor kapitlet.

Der er udarbejdet en begrebsliste, som indeholder en beskrivelse af de mest anvendte begreber og terminologier i rapporten. Begrebslisten forefindes i kapitel 14.

I rapporten vil vinkler og deslige blive anført i gradtal. Der vil blive anvendt landmålingens terminologi i forbindelse med spredning på en afstand – dvs. at spredning på en afstand defineres som:  $\sigma_{\text{afsnit}} = \sqrt{2} \sigma_{\text{punkt}}$

Til sidst vil gruppen gerne rette en tak til Søren Nørmølle fra Landmålergården A/S for information vedrørende indvendig 3D-opmåling. Ydermere vil gruppen gerne takke Trimble Center Danmark og Landinspektørfirmaet LE 34 A/S for lån af udstyr og herunder specielt takke Jens T. B. Madsen for et godt samarbejde.





# INDHOLDSFORTEGNELSE

<b>1</b>	<b>INDLEDNING</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>PROJEKTOPBYGNING</b>	<b>11</b>
<b>3</b>	<b>FORANALYSE</b>	<b>15</b>
3.1	POLÆR MÅLING MED REFLEKTORLØS TOTALSTATION	15
3.2	TERRESTRISK FOTOGRAMMETRI	17
3.2.1	<i>Traditionel fotogrammetri</i>	17
3.2.2	<i>Panorama fotogrammetri</i>	18
3.3	TERRESTRISK LASERSCANNING	19
3.4	POLÆR MÅLING OG TERRESTRISK FOTOGRAMMETRI KOMBINERET	21
3.5	DIMENSIONS MÅLING	23
3.6	VALG AF METODE	23
3.7	ANVENDELSESOMRÅDE FOR TERRESTRISK LASERSCANNING	25
<b>4</b>	<b>PROBLEMFOMULERING</b>	<b>29</b>
4.1	KRAV TIL DETALJERINGSGRAD	29
4.2	KRAV TIL NØJAGTIGHED	30
<b>5</b>	<b>SYSTEMET CALLIDUS V1-1</b>	<b>31</b>
5.1	LASERSYSTEMET CALLIDUS	31
5.2	SCANNINGSTEKNIK OG SCANNINGSOPLØSNING	32
5.3	LASER OG RETUR SIGNAL	34
5.4	INTENSITET	36
5.5	FORVENTEDE NØJAGTIGHEDER	39
5.6	SAMMENKNYTNING AF PUNKTSKYER	40
5.7	SCANNINGSPROCEDURE	40
<b>6</b>	<b>KONTROL AF SYSTEMET CALLIDUS V1-1</b>	<b>43</b>
6.1	KONTROL AF PLANER MHT. OPLØSNING	43
6.1.1	<i>Opmåling</i>	44
6.1.2	<i>Databehandling</i>	48
6.1.3	<i>Delkonklusion</i>	54
6.2	KONTROL AF PLANER MHT. HÆLDNING	54
6.2.1	<i>Opmåling</i>	55
6.2.2	<i>Databehandling</i>	56
6.2.3	<i>Delkonklusion</i>	63
6.3	KONTROL AF KOMPENSATOR	63
6.3.1	<i>Opmåling</i>	64
6.3.2	<i>Databehandling</i>	64
6.3.3	<i>Delkonklusion</i>	68

<b>7</b>	<b>TESTOMRÅDET LANGAGERVEJ 6</b>	<b>69</b>
7.1	BESKRIVELSE AF TESTOMRÅDET	69
7.2	OPMÅLING	72
<b>8</b>	<b>MODELLERING AF OBJEKTER I TESTOMRÅDET</b>	<b>75</b>
8.1	PROBLEMOMRÅDER VED MODELLERING AF TESTOMRÅDET	76
<b>9</b>	<b>VURDERING AF MODELLERING AF PUNKTSKYMODELLER</b>	<b>85</b>
9.1	MODELLERING I ENKELTE PUNKTSKYER - RELATIV NØJAGTIGHED	86
9.1.1	<i>Kontrol af objekter modelleret ud fra frie kanter</i>	88
9.1.2	<i>Kontrol af objekter modelleret ud fra definerede kanter</i>	89
9.2	MODELLERING I SAMLEDE PUNKTSKYER – ABSOLUT NØJAGTIGHED	91
9.2.1	<i>Sammenknytning vha. Fuzzy Join</i>	92
9.2.2	<i>Sammenknytning vha. tre planer</i>	94
9.2.3	<i>Sammenknytning vha. global transformation</i>	97
9.2.4	<i>Kontrol af objekter modelleret ud fra frie kanter</i>	99
9.2.5	<i>Kontrol af objekter modelleret ud fra definerede kanter</i>	100
9.3	DELKONKLUSION	102
<b>10</b>	<b>ORTOFOTO I TESTOMRÅDET</b>	<b>107</b>
10.1	VURDERING AF ORTOFOTOS	110
10.2	DELKONKLUSION	114
<b>11</b>	<b>KONKLUSION</b>	<b>117</b>
<b>12</b>	<b>PERSPEKTIVERING</b>	<b>121</b>
<b>13</b>	<b>BEGREBSLISTE</b>	<b>125</b>
<b>14</b>	<b>LITTERATURLISTE</b>	<b>129</b>
<b>APPENDIKS A -</b>	<b>GENERERING AF ORTOFOTO I MESH &amp; MAP</b>	<b>133</b>
<b>APPENDIKS B -</b>	<b>GENERERING AF TIN-MODELLER</b>	<b>139</b>
<b>APPENDIKS C -</b>	<b>FORBEDRING AF CALLIDUS SYSTEMET V1-1</b>	<b>143</b>
<b>APPENDIKS D -</b>	<b>FACE LIST</b>	<b>147</b>
<b>BILAG A -</b>	<b>SOFTWARE TIL CALLIDUS SYSTEMET V1-1</b>	
<b>BILAG B -</b>	<b>ICA-FILEN</b>	
<b>BILAG C -</b>	<b>TURBONET OG PCMAAL</b>	
<b>BILAG D -</b>	<b>VURDERING AF KONTROLMÅLING</b>	
<b>BILAG E -</b>	<b>FORVENTET MÅLENØJAGTIGHED I ORTOFOTO</b>	

---

# 1 INDLEDNING

---

Nærværende afgangprojekt tager udgangspunkt i en artikel publiceret i Landinspektøren nr. 5. 01<sup>1</sup>. I artiklen beskriver Søren Nørmølle fra landinspektørfirmaet Landmålergården A/S et udviklingsprogram, som By- og Boligministeriet iværksatte i 1996. Udviklingsprogrammet ”Projekt Renovering” har til formål at effektivisere renoveringer af eksisterende bygninger. Landmålergården A/S har som en del af dette program i samarbejde med arkitektfirmaet Friborg og Lassen, ingeniørfirmaet Rambøll, Foreningen af Rådgivende Ingeniører samt Teknologisk Institut gennemført ”Projekt 207: 3D-opmåling, - anvendelse af 3D-opmåling i byfornyelse”.

Baggrunden for ”Projekt 207” er, at renoveringsopgaver i eksisterende byggeri er op til dobbelt så dyre pr. m<sup>2</sup> som nybyggeri, dette skyldes bl.a., at metoder som præfabrikation og materialestyring kun har været anvendt i begrænset omfang. I dag foregår tilpasning og samling af elementer på selve byggepladsen, hvilket forøger omkostningerne.

Formålet med ”Projekt 207” er at minimere omkostninger ved renoveringsopgaver. En tilstrækkelig indvendig 3D-opmåling af eksisterende bebyggelse vil kunne begrænse omkostningerne, således at det vil være muligt at præfabrikere og samle målsatte elementer f.eks. væg- og vindueselementer inden levering. Det vil ligeledes være muligt at bestille præcise materialelister, således at processerne på selve arbejdspladsen vil kunne forløbe hurtigere. Eksempelvis vil det være muligt for håndværkerne at få informationer om, hvilke vinduer der skal udskiftes, hvilke materialer der skal indkøbes mm..

Ydermere vil opmålingen kunne anvendes til administration og styring af vedligeholdelse i den efterfølgende driftsfase.

Hvis der ses på hvem, der kan have glæde af indvendig 3D-opmåling af bygninger i forbindelse med byfornyelse, kan det blandt andet være følgende interessenter; arkitektfirmaer, ingeniørfirmaer, entreprenører, byggehefter, håndværkere, kommuner og planlæggere. I sidste ende kan det derudover gavne slutbrugere af bygningen dvs. lejere og ejere.

Landmålergården A/S havde til opgave at udvikle en effektiv og brugervenlig metode til 3D-opmåling til landinspektører og til 3D-projektering hos arkitekt- og ingeniørfirmaer. Opgaven resulterede i:

---

<sup>1</sup> Der henvises til [www.lmg.dk/3d](http://www.lmg.dk/3d).

- En logisk metode til indsamling af data<sup>2</sup>.
- En relationsdatabase, som sammenknytter observationsdata med den endelige 3D-model.
- Software til opmåling, beregning, visualisering og formidling af data.

[Nørmølle, 2001]

For, at et sådant system kan fungere optimalt, er det nødvendigt, at alle parter er interesseret i at anvende systemet. Ifølge Søren Nørmølle er der endnu lang vej for, at alle partnere er indforstået med at anvende et sådant system. Systemet har kun været anvendt mellem de centrale interessenter såsom arkitekter, ingeniører og entreprenører jf. Bilag F.

Gruppen har fundet interesse i indvendig 3D-opmåling<sup>3</sup> igennem Søren Nørmølles artikel og ved præsentation af Landmålergårdens opmålingsmetode ved Faglig Møde på Hotel Nyborg Strand 2003<sup>4</sup>. Dette er blot en metode til indvendig 3D-opmåling – det kunne være relevant at undersøge, om der er andre mulige opmålingsmetoder, der kan være anvendelige til netop dette formål. Med erfaringer fra tidligere semestre samt interesse for indvendig 3D-opmåling vil en indledende problemstilling lyde således.

En undersøgelse af mulige opmålingsmetoder til indvendig 3D-opmåling og herunder klarlægge disses stærke og svage sider.

---

<sup>2</sup> Se nærmere afsnit 3.1 vedrørende Landmålergårdens metode.

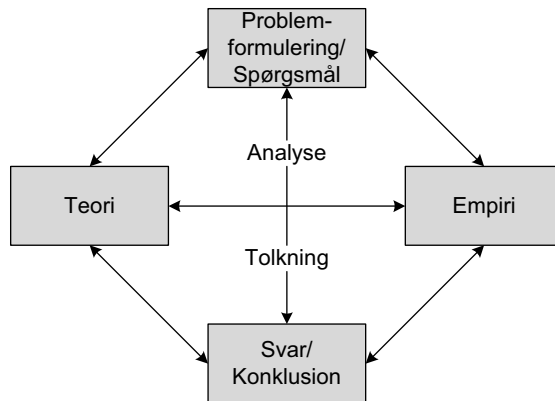
<sup>3</sup> Internationalt betegnelse for indvendig 3D-opmåling-opmåling er facility management.

<sup>4</sup> Fagligt Møde på Hotel Nyborg Strand fandt sted d. 31. jan. til 2. feb. 2003

## 2 PROJEKTOPBYGNING

Projektet er bygget op omkring fire hovedelementer - Problemformulering/spørgsmål, teori, empiri og svar/konklusion jf. [Andersen, 1999].

Elementernes sammenhæng og samspil kan illustreres som nedenstående figur. Koblingen mellem de grundlæggende elementerne består i diverse former for syntese, analyse og tolkning. [Andersen, 1999]



Figur 2.1: Grundlæggende elementer i en videnskabelig proces og deres fælles sammenspil. [Andersen, 1999]

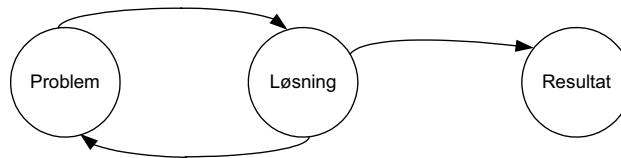
Projektet er et problemorienteret projektarbejde, hvor der vil indgå både teoretiske og praktiske problemer.

Løsning af teoretiske problemer kræver en videntilegnelse, primært for at forstå problemernes natur, men også for at overføre og analysere givne situationer i forhold til problemformuleringen. Den primære videnindsamling sker hovedsagelig gennem litteraturstudier og søgning på internettet, men også gennem korrespondance med relevante personer, der kan have input til projektarbejdet.

Løsning af praktiske problemer vil være anvendelsesorienteret, hvor den allerede tilegnede teoretiske viden anvendes til løsning af disse problemer.

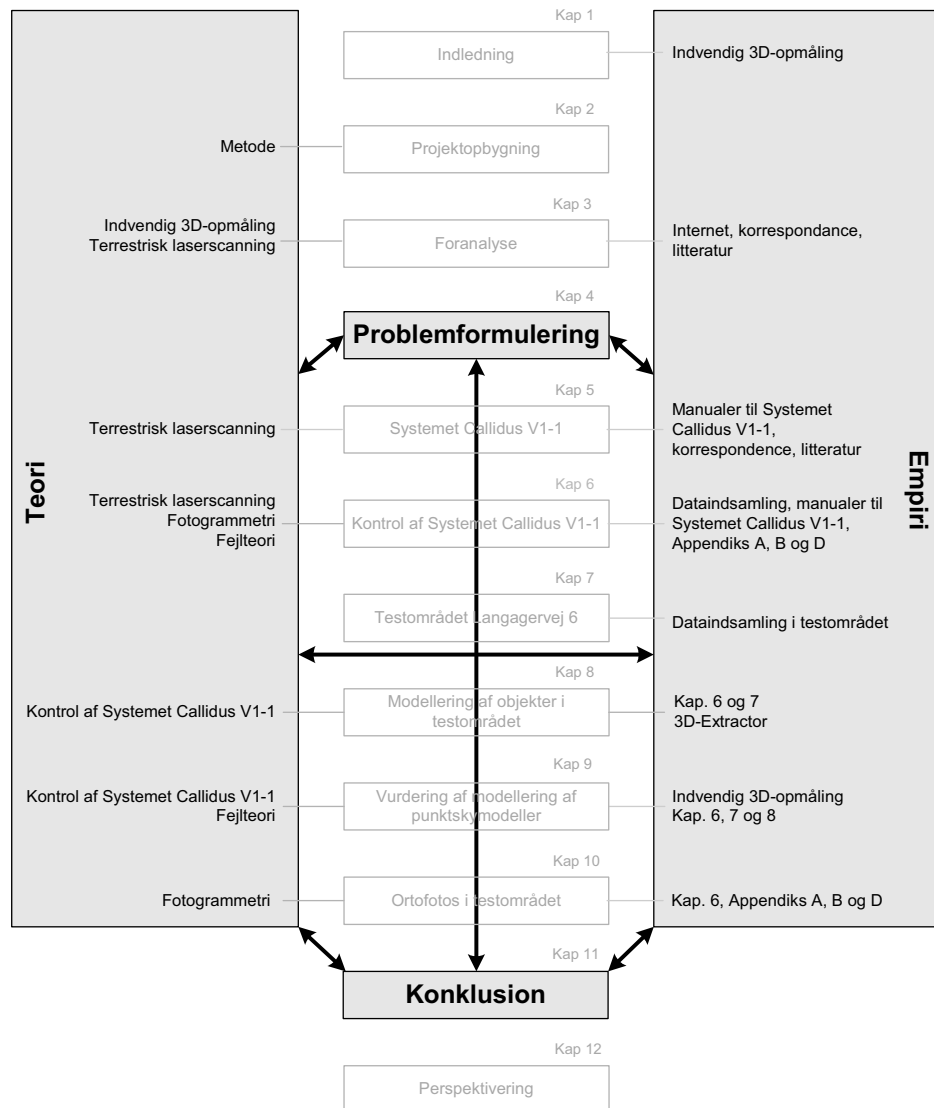
Projektets problemformulering - se nærmere Kapitel 4 - kan umiddelbart defineres som et praktisk problem, hvortil der ønskes en løsning. Men for at svare på problemformulering er det nødvendigt at inddrage teorien for at kunne forstå sammenhænge og problemstillinger.

Projektforløbet er foregået igennem iterative arbejdsprocesser. Som Figur 2.2 illustrerer kan der opstå nye problemer undervejs i forbindelse med løsning af et problem. Løsningen af de nyopståede problemer er med til at give det endelige resultat.



Figur 2.2: Arbejdsgangen i en iterativ arbejdsproces.

Modellen i Figur 2.1 anvendes på de enkelte kapitler i projektet, således at der opnås en struktur for projektet - samspillet mellem projekts fire delelementer og deres indvirkning på hinanden. Enkelte kapitler kan ikke tilpasses i modellen – Kapitel 1 og Kapitel 12. Kapitlernes indpasning i modellen kan ses i nedenstående figur.



Figur 2.3: Ib Andersens projekt model – tilpasset efter dette projekt.

## **SAMARBEJDE MED LANDINSPEKTØRFIRMAET LE34 A/S**

Projektgruppen har haft et samarbejde med Landsinspektørfirmaet LE34 A/S, hvor gruppen har lånt firmaets terrestrisk laserscanner (Systemet Callidus V1-1). Gruppen har haft kontakt med Landinspektør Jens T. B. Madsen, som sidder i firmaets afdeling i Århus – det er primært ham, der arbejder med terrestrisk laser-scanning i firmaet. Med Jens T. B. Madsen har gruppen haft en god emailkorrespondance. Gruppen har til enhver tid kunnet kontakte Jens T. B. Madsen enten pr. mail eller pr. telefon og i løbet af kort tid har Jens T. B. Madsen besvaret vores mail på en konstruktiv måde. Emailkorrespondancen, gruppen har haft med Jens. B. Madsen, kan ses i Bilag F.

Der har været problemer med at få licens og hardwarelås<sup>5</sup> til det software, som hører til laserscanneren. Gruppen lånte laserscanneren i dagene d. 25 marts og d. 26 marts, men fik først licens samt en hardwarelås d. 19 april. Hvad gruppen kunne forstå på Jens T. B. Madsen har der været problemer med at få hardwarelåsen til Danmark. Der findes kun to hardwarelåse til laserscanningssystemet i Danmark, og gruppen har af denne årsag måtte returnere den lånte hardwarelås i cirka en uges tid<sup>6</sup>, da LE34 skulle anvende låsen til en større sag.

Med hensyn til opmåling med laserscanneren havde gruppen regnet med at kunne låne laserscanneren i cirka en uge, men desværre var det kun muligt at låne laserscanneren i to hverdage. Gruppen har flere gange måtte gå på kompromis i forbindelse med opmålingen, hvilket har betydet, at ikke alt ønsket dataindsamling har fundet sted. Det kommer specielt kommer til udtryk ved billedoptagelse og intensitetsoptagelse.

Det har været beklageligt, at gruppen ikke har haft licens til alt fornødent software. Eksempelvis har gruppen ikke haft licens til LMS-Software, hvormed det ikke har været muligt for gruppen at foretage en kalibrering af den ydre orientering af kameraet i laserscanneren – nærmere om dette i Bilag E.

Men udover de ovenstående problemer har samarbejdet ellers gået godt – der er også fordele ved at have kontakt med eksterne partnere i forbindelse med et afgangsprojekt. Der har været et godt samarbejde med Jens T. B. Madsen, hvor gruppen har fået gode konstruktive besvarelser, og der har været gode input fra Jens T. B. Madsen i forbindelse med databehandlingen.

---

<sup>5</sup> Softwaret til Systemet Callidus V1-1 er beskyttet af både en tidsbegrænsning og en hardwarelås.

<sup>6</sup> I perioden d. 10 maj til 15 maj.





# 3 FORANALYSE

Inden der i foranalysen undersøges alternative opmålingsmetoder til indvendig 3D-opmåling er det vigtigt at få klarlagt, hvilke objekter der typisk er interessante at indmåle i forbindelse med byfornyelse. Der bliver hovedsagelig indmålt planer, der tilhører bygningskroppen dvs. vægge, lofter, bærende bjælker og stolper samt dør- og vinduesåbninger. Derudover bør der også indmåles synlig teknik, såsom stik-kontakter og rør. Endvidere kan der indmåles objekter som trapper, fod- og vindueslister jf. Bilag F.

Der synes at være flere opmålingsmetoder, hvormed indvendig 3D-opmåling af bygninger kan foregå. Følgende opmålingsmetoder synes at være interessante at undersøge i denne forbindelse.

1. Polær måling med reflektorløs totalstation
2. Terrestrisk fotogrammetri
  - a. Traditionel fotogrammetri
  - b. Panorama fotogrammetri
3. Terrestrisk laserscanning
4. Kombination af polær måling og terrestrisk fotogrammetri - Fototalstation
5. Dimensionsmåling

Disse opmålingsmetoder vil i det følgende blive præsenteret hver for sig, hvorefter opmålingsmetoderne vil blive sammenlignet. Der vil blive taget stilling til hvilken metode, der er mest fordelagtig, hvilket muligvis kan vise sig at være en kombination af flere opmålingsmetoder.

## 3.1 POLÆR MÅLING MED REFLEKTORLØS TOTALSTATION

Der tages udgangspunkt i en allerede eksisterende opmålingsmetode - Landmålergårds metode<sup>7</sup>. Det grundlæggende princip ved denne metode er, at der beregnes planer til f.eks. vægge, gulve osv. Det er nødvendigt at indmåle 3 punkter pr. plan for at kunne bestemme dets ligning, dog anbefales mindst 5 punkter for på denne måde at få bestemt planet med overbestemmelser, således at pålideligheden kan bestemmes. De anvendte punkter skal være veldefinerede samt jævnt fordelt på planet for på denne måde at opnå den optimale nøjagtighed. En fordel ved denne metode er, at man i marken selv kan afgøre hvilke punkter, der kan anvendes.

Umiddelbart er det en hurtig metode, idet der kun er få punkter, der skal indmåles, men udover opmåling af planerne er det nødvendigt at indmåle et fikspunktsnet, således at facader og indvendige rum kan bestemmes i samme koordinatsystem.

---

<sup>7</sup> Der henvises til [www.lmg.dk/3d](http://www.lmg.dk/3d).

Dette net indmåles med en høj kvalitet. Erfaring jf. Bilag F viser, at en person kan totalopmåle en ejendom i 2-3 etager med et etageareal på 800-1000 m<sup>2</sup> på 8-10 måledage. Herefter vil det tage ca. 2 dage at efterbehandle dataene.

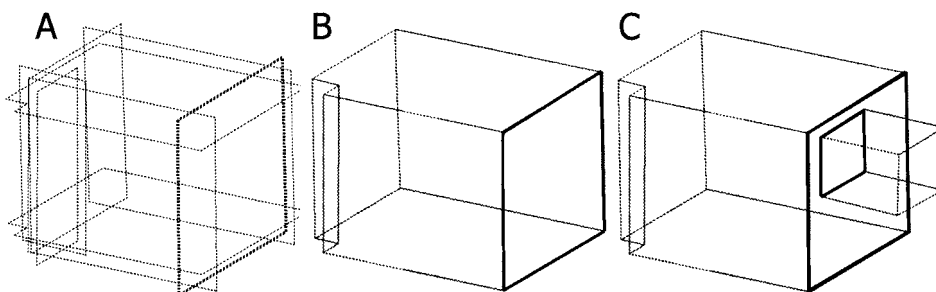
Opmålingsprocessen kan foregå ved to principper.

- Offline-princippet
- Online-princippet

Offline princippet fungerer som almindelig detailmåling med totalstation og med anvendelse af en kodetabel. Ved efterfølgende databehandlingen kan der gennemføres en netudjævning af fikspunktnettet samt beregninger af planer.

Ved online princippet er der til totalstationen tilkoblet en bærbar computer, så det løbende er muligt at foretage netudjævninger og beregninger af planer. En endelig model af et rum kan ses som en samling af prizmer, hvorfor det benævnes en prismemodell. Processen af bearbejdningen kan ses på Figur 3.1, hvor der først bliver dannet planer, dernæst beskæring og til sidst ”sammensættes” naboprismene.

[Nørmølle, 2001]



**Figur 3.1:** Planer opmåles, og de struktureres i prizmer (A). Når alle planer i prismet er målt, kan der beskæres afgrænsende polygoner i planerne (B). Disse polygoner forfines ved sammenskæring af naboprizmer, hvorved der dannes komplekse polygoner (C). [Nørmølle, 2001]

Landmålergården har til metoden udviklet et softwareprogram til opmåling, beregning, visualisering og formidling af data. Dette program foretager bl.a. iterative beregninger af et plan. Det er en stor fordel, at beregningerne foregår løbende i marken - er et plan dårligt bestemt, kan ekstra punkter indmåles med det samme.

Alle oplysninger vedrørende opmålingen bliver gemt i en relationsdatabase, således at data kan genbruges, og der kan indhentes oplysninger om eksempelvis et plans nøjagtighed. Nøjagtigheden af et plan afhænger af det omkransede fikspunktets nøjagtighed, detailmålingens nøjagtighed samt definitionsnøjagtighed.

Fikspunktnettet bestemmes med megen høj nøjagtighed – 1-2 mm.

Detailmålingens nøjagtighed afhænger af antallet af observationer til det målte plan og definitionsnøjagtigheden. Typisk vil man øge antallet af observationspunkter, hvis definitionsnøjagtigheden er lav, dvs. hvis det målte plan har store udsving fra idealfladen. Eksempelvis kan det nævnes, at en væg af mursten har en samlet de-

tailnøjagtighed på 4-12 mm, mens detailnøjagtigheden ved betonbyggeri er nede på 3-6 mm.

Det vil sige, at den samlede nøjagtighed på et plan kan variere mellem 5-14 mm, alt afhængig af det materiale planet består af.

Landmålergården har monteret et digitalt kamera på totalstationen, som skal være med til forbedre metoden. På længere sigt er det meningen, at det skal være muligt at måle i billederne, men indtil videre anvendes kameraet kun til at dokumentere objekter, såsom stikkontakter og rør.

Dette opmålingssystem stiller store krav til opmåleren – mange vurderinger skal foretages i marken. Der stilles krav om, at opmåleren skal have en god rumlig sans og forstå, hvordan prismerne sammenskæres til komplekse polygoner jf. Bilag F.

## 3.2 TERRESTRISK FOTOGRAMMETRI

Inden for fotogrammetrien kan indvendig 3D-opmåling foretages med to opmålingsmetoder.

- Traditionel fotogrammetri
- Panorama fotogrammetri

### 3.2.1 TRADITIONEL FOTOGRAMMETRI

Ved metoden traditionel fotogrammetri skal der anvendes et kamera, paspunkter og udstyr til at indmåle paspunkterne. Paspunkterne, der enten kan være naturlige eller signalerede, har til formål at orientere billederne samt bestemme kameraets position.

Terrestrisk fotogrammetri kan både være digitalt og analogt – kombinationen af en stor udvikling indenfor digitale kameraer, og kraftigt faldende priser på disse, gør, at der hovedsagelig anvendes digitale kameraer i dag. Valget af et digitalt kamera afhænger af specifikationerne af den enkelte opgave. Ønskes der en mindre nøjagtighed, kan der anvendes et amatør kamera, men ønskes der en megen stor nøjagtighed, er det nødvendigt at anvende et professionelt digitalt fotogrammetrisk kamera. Det er desuden vigtigt, at kameraet er kalibreret korrekt.

Indmåling af paspunkter vil ofte foregå med en totalstation, hvor der kan forventes en nøjagtighed på under 5 mm.

På baggrund af erfaringer fra tidligere semestre mener gruppen, at det er muligt med metoden terrestrisk fotogrammetri at opnå en samlet nøjagtighed på under 10 mm på objekt alt afhængig af afstand til objekt, orientering af kameraet, opløsningen i billederne mm. Erfaringen viser, at der kan forventes en nøjagtighed på 1/3 pixelstørrelse ved måling i billederne.

Selve optagelsen af billederne tager ikke mange øjeblikke at gennemføre. Det mest tidskrævende ved denne opmålingsmetode er indmåling af paspunkterne samt den

efterfølgende databehandling, hvor billeder skal orienteres og kameraets position skal bestemmes.

[Lavridsen, 1993] og [Mikhail et. al., 2001]

### 3.2.2 PANORAMA FOTOGRAMMETRI

En anden fotogrammetrisk metode er panorama fotogrammetri, som er en ny metode. Metoden går ud på, at der optages panoramabilleder fra mindst tre forskellige positioner, hvormed de ønskede objekter bestemmes fra mindst tre kamerapositioner. Herefter er det muligt at beregne koordinater til punkter i billederne vha. skæring mellem strålerne fra de forskellige kameraopstillinger.

Det er ikke nødvendigt med paspunkter til denne metode for at orientere billederne. Men hvis billederne ønskes globalt systemorienteret er mindst tre paspunkter påkrævet.

Der skal mindst være tre sammenknytningspunkter i alle panoramabilleder for på denne måde at bestemme optagecentrum for hvert panoramabillede. Der henvises til Figur 3.2 for at se en panoramabilledestribe, hvor sammenknytningspunkter er udpeget.



Figur 3.2: Panoramabilledestribe, hvor sammenknytningspunkterne er udpeget og påtegnet. [Luhmann & Tecklenburg, 2002]

Kameraer til denne opmålingsmetode skal kunne tage panorama-billedstriber på 360° fra én kameraposition.

Der er endnu ikke udviklet software til metoden, men det er under udarbejdelse på University of Applied Sciences i Oldenburg, Tyskland.

Metoden virker ganske anvendelig til indvendig 3D-opmåling af rum bl.a. på baggrund af nøjagtigheden. Der er foretaget forsøg med hensyn til nøjagtigheden af sammenknytningspunkterne, hvor indmåling af sammenknytningspunkterne med totalstation er anvendt som reference. Forsøgene er foretaget med både signalerede og naturlige punkter. Det resulterede i afvigelser fra referencen på 3,3 mm i planet og 0,8 mm i højden ved anvendelse af signalerede paspunkter og 14,1 mm i planet og 2,5 mm i højden ved anvendelse af naturlige paspunkter.

[Luhmann & Tecklenburg, 2002]

Med hensyn til tidsfaktoren er denne lidt svær for gruppen at vurdere. Selve opmålingen vil for så vidt kun bestå af optagelsen af panoramabillederne og en eventuel opmåling af paspunkter, hvis der ønskes systemorienteret koordinater til objekterne. Ved den efterfølgende databehandling er det muligt med det samme at udpege

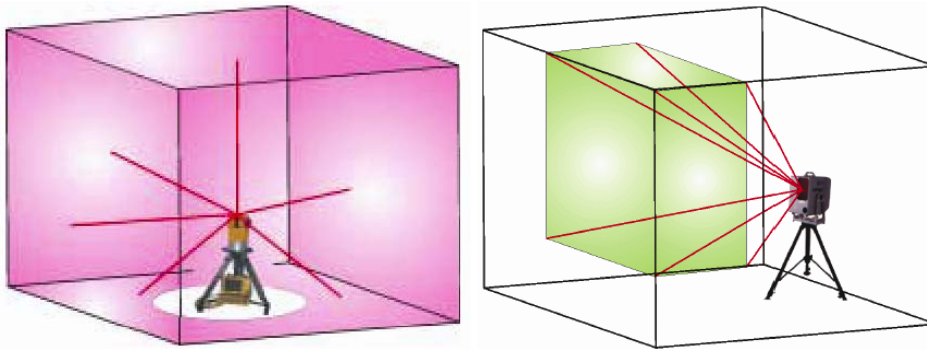
punkter i billederne og beregne afstande. Skal der udarbejdes en 3D-model af rummet vil det naturligvis tage en del længere tid.

[Luhmann & Tecklenburg, 2002]

### 3.3 TERRESTRISK LASERSCANNING

En anden opmålingsmetode, gruppen synes, kan være egnet til indvendig 3D-opmåling er terrestrisk laserscanning. Det er en nyere opmålingsmetode, der har vundet indpas indenfor mange fagområder de senere år.

Der findes to terrestriske laserscannertyper – ”panoramic view scanner” og ”camera view scanner”. Se Figur 3.3. Som figuren viser, vil en ”panoramic view scanner” være at foretrække til indvendig 3D-opmåling af rum, idet denne kan rotere 360° om den ene akse og har en stor scanningsvinkel i den anden akse retning. Dermed kan et rum scannes ind med blot en scanning.



Figur 3.3: Til venstre ses en ”panoramic view scanner” af mærket Callidus og til højre ses en ”camera view scanner” af mærket Cyrax. [Thomas Luhmanns forelæsninger fra d. 12/3 til 15/3-2002]

Opmåling med en terrestrisk laserscanner kan sammenlignes med polær måling med totalstation. Ved en scanning opnås en punktmængde - betegnet punktsky, hvor hvert punkt får tildelt en X-, Y- og Z-koordinat. Derudover tildeler nogle laserscannere en intensitet til hvert punkt.

Hvis flere rum ønskes sammenknyttet kan dette ske vha. af enten sammenknytnings- eller paspunkter, afhængig af om modellen ønskes bestemt i lokalt eller globalt system. Det kan være signalerede punkter såsom refleksmærker og prismer. Sammenknytning af rum kan også ske vha. veldefinerede planer, som punktskyerne har tilfælles. Endvidere kan sammenknytning også ske ud fra en punktskysudjævning, hvor udjævningen forsøger at tilpasse punktskyerne bedst muligt.

En ulempe ved anvendelse af en terrestrisk laserscanner er, at det kan være problematisk at indmåle mindre rum eksempelvis et badeværelse. For det første kan det være problematisk at opstille instrumentet i et lille rum – se nærmere omkring størrelsen af instrumentet i Kapitel 5. For det andet har afstanden mellem laserscanneren og objekt en betydning for nøjagtigheden. For eksempel anbefales, hvis

der ønskes nøjagtighed på millimeterniveau at benytte laserscanneren af mærket Callidus ved afstande 1 m til 30 m og laserscanneren af mærket Cyrax 2500 ved afstande mellem 2,5 m og 50 m [Callidus, 2001a] og [Lysehøj og Nielsen 2003]. Det vil sige, at metoden er begrænset af størrelsen af rummet.

Endvidere er metoden begrænset af mindste objektgenkendelse, hvilket afhænger af den enkelte laserscanner – se Afsnit 5.2 angående mindste objektgenkendelse for det anvendte instrument.

Til de fleste laserscannere medfølger en programpakke, så forskellige geometriske objekter såsom planer, cylindre, bokse mm kan modelleres, hvilket medfører, at det er relativt nemt at modellere objekter. Afhængig af laserscanneren og programpakken vil en færdig model være bestemt med en nøjagtighed på 2-10 mm.

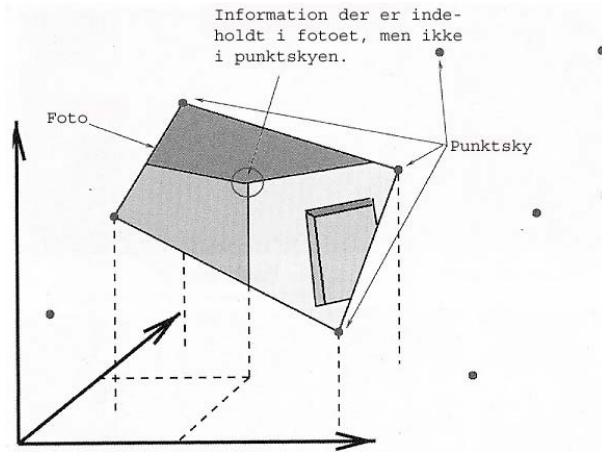
Opmåling med en terrestrisk laserscanner tager ikke lang tid – en scanning tager typisk mellem 2 – 20 minutter alt afhængig af den ønskede scaningsopløsning, dvs. antallet af punkter, der indmåles. Til gengæld er den efterfølgende databehandling mere arbejdskrævende. Ofte siges der, at forholdet mellem opmåling og efterbehandling er 1 til 10, men dette varierer alt efter detaljeringsgraden, dvs. hvad der skal modelleres, og om det er en rutineret bruger af systemet.

Terrestrisk laserscanning er ikke en udbredt opmålingsmetode, hvilket til dels skyldes, at det er en nyere metode. Derudover er det også en store investering for et firma at anskaffe et laserscanningssystem med modelleringssoftware – et sådant system koster normalt mellem 1-2 mio. kr., hvilket er op til næsten 5-10 gange dyrere end den næst dyreste beskrevne metode.

[Lemmens & Van den Heuvel, 2001] og [Lysehøj og Nielsen, 2003]

Det kunne være interessant at kombinere metoderne terrestrisk laserscanning med terrestrisk fotogrammetri. Formålet med at kombinere de to metoder er at generere ortofotos, der kan måles i. Der kan enten anvendes et separat professionelt digitalt kamera, eller et digitalt kamera, der allerede er indbygget i laserscanneren. Valg af dette afhænger af den påkrævede nøjagtighed.

Der synes at være flere fordele ved at kombinere terrestrisk laserscanning med terrestrisk fotogrammetri. For det første opnås der fotodokumentation, for det andet er fotos en hjælp til orientering i punktskyen. Derudover er det muligt at angive objektkoder på billedet, samt at opløsningen i billedet er bedre end i punktskyen. Laserscanneren måler i grid, hvilket betyder, at man ikke kan være sikker på, at der er punkter til alle vigtige objekter, eksempelvis hjørnepunkter. Draperes billeder ned over punktskyen, vil det således blive muligt at måle eksempelvis hjørnepunkter i billederne. Princippet kan ses i nedenstående figur.



Figur 3.4: Viser et eksempel på, at der er information i et foto, som ikke forefindes i en punktsky. De sorte punkter er punkter fra punktskymodellen. [Kern et. al. 2002 s. 112]

De digitale kameraer der på nuværende tidspunkt sidder i laserscannere anvendes til fotodokumentation og til at lette arbejdet med orienteringen i punktskyen. Ved nogle laserscannere er det endvidere muligt at fremstille ortofotos.

### 3.4 POLÆR MÅLING OG TERRESTRISK FOTOGRAMMETRI KOMBINERET

Denne metode er en videreudvikling af Landmålergårdens metode med en totalstation, som en 8. semester gruppe på Landinspektørstudiet 2002 har lavet forsøg med. Det blev forsøgt at optimere Landmålergårdens metode ved at montere et digitalt kamera på en totalstation og derigennem opnå mulighed for at registrere alle synlige detaljer, uden at arbejdsmængden ved opmålingen øges væsentlig – se Figur 3.5. Løsningen blev betegnet som en ”fototalstation” og kan sammenlignes med en fototeodolit udviklet af Wild.



Figur 3.5: Eksempel på fototalstation.  
[Johansen et. al. 2002]

En fordel ved denne metode er, at ønskes der ekstra målinger foretaget udover dem, der er målt i marken kan dette efterfølgende ske ved måling i billederne.

Det er nødvendigt at kende kameraets præcise placering i forhold til totalstationens akser. Dette kan opnås ved at opstille totalstationen i et kendt punkt, have kendskab til kameraets indre orientering samt have kendskab til forskydningsvektoren og rotationer mellem totalstation og kamera. Er dette tilfælde kan kameraets ydre orientering beregnes, og de digitale billeder kan oprettes, hvorefter det er muligt at måle i billederne.

Selve opmålingen med en fototalstation forventes at være ligeså hurtig som Landmålergårdens metode, og hvis der skal måles mange objekter vil fototalstationen formentlig være hurtigere. Til gengæld vil efterbehandlingen tage lidt længere tid, idet de digitale billeder skal oprettes.

Nøjagtigheden på et plan afhænger af, om dette er målt med totalstationen eller med det digitale kamera. Er planet indmålt med totalstation, kan der forventes en nøjagtighed på samme niveau som ved Landmålergårdens metode, og måles planet i billederne afhænger nøjagtigheden af pixelstørrelsen i kameraet, afstand, orientering mv. Erfaringsmæssig kan der forventes en nøjagtighed ved måling i billederne på  $1/3$  pixelstørrelse, men derudover kommer der også et fejlbidrag fra forskydningsvektoren og rotationerne mellem totalstation og kamera. Gruppen, som lavede forsøg med en fototalstation på 8. semester i 2002, opnåede en samlet nøjagtighed på afstande på 41 mm, og her tildeles alene en usikkerhed i måling i billederne på 20-30 mm.

[Johansen et. al. 2002]



## 3.5 DIMENSIONS MÅLING

Indvendig 3D-opmåling kan også foregå ved almindelig dimensionsmåling. Opmålingen kan foregå digitalt med en elektronisk distancemåler eksempelvis en Disto™ eller det kan foregå analogt med stålmålebånd og tommestok. Dimensionerne i et rum kan med disse simple måleinstrumenter indmåles. Måles der fra et punkt til flere punkter, er det ved den senere efterbehandling muligt at bestemme placering af det konkrete punkt. Ønskes der eksempelvis bestemmelse af alle hjørner i et rum, vil det betyde mange målinger på kryds og tværs, og det kan være svært at holde styr på de enkelte målinger. Foretages opmålingen med et stålmålebånd, er man nødsaget til at være to personer, hvilket i princippet ikke er nødvendig ved de øvrige opmålingsmetoder. Til gengæld er udstyret til denne opmålingsmetode i forhold til de øvrige metoder ikke særligt omkosteligt.

Opmålingsmetoden synes ikke være velegnet til flere rum - at skulle danne et sammenhængende net vil være alt for problematisk, og det vil give anledning til store fejlphobninger. Derfor forkastes denne metode til indvendig 3D-opmåling.

Til gengæld vil metoden være anvendelig til supplerende målinger samt kontrolmålinger i forbindelse med andre opmålingsmetoder, idet der på den enkelte måling opnås en god relativ nøjagtighed. Tidsmæssig tager det ikke langt tid at måle et par dimensionsmålinger.

## 3.6 VALG AF METODE

Der er foretaget en undersøgelse af de opmålingsmetoder, der synes at være anvendelige til indvendig 3D-opmåling af bygninger i forbindelse med byfornyelse. Opmålingsmetodernes stærke og svage sider vil i dette afsnit blive klarlagt ved at foretage en sammenligning. Gruppen har opstillet en tabel, hvor opmålingsmetoderne efter forskellige kriterier vil få tildelt en karakter mellem 1 og 5, hvor 1 er den bedste karakter. Ud fra sammenligningen vil gruppen foretage et valg for den opmålingsmetode som gruppen vil arbejde videre med gennem projektet. Dette er ikke nødvendigvis den opmålingsmetode, der synes bedst ud fra tabellen, og det kan endvidere være en kombination af flere af de beskrevne opmålingsmetoder.

Tabellen nedenfor angiver de karakterer, gruppen har givet de forskellige opmålingsmetoder indenfor forskellige kriterier<sup>8</sup>.

---

<sup>8</sup> Der gøres her opmærksom på, at det er gruppens subjektive holdning og udfyldningen af denne tabel afhænger selvfølgelig af hvilken tilgangsvinkel, man har. Det vil sige, at tabellen ikke kan ses som en endegyldig besvarelse.

Opmålingsmetode	Tid for opmåling	Tid til efterbehandling	Nøjagtighed	Pris	Anvendelighed	Sum
Polærmåling	4	1-2	1	2-3	1	9-11
Terrestrisk fotogrammetri	3	3-4	1	2-3	2	11-13
Panorama fotogrammetri	2	3-4	2	1-2	2	10-12
Fototalstation	2-3	3	2	3	2	12-13
Terrestrisk laserscanning	1	2-3	1	5	1	10-11

**Tabel 3.1: Vurdering af metoder.**

Det er ikke muligt ud fra tabellen at sige, hvilken metode der er bedst egnet til indvendig 3D-opmåling. Opmålingsmetoderne har forskellige kvaliteter, der gør dem velegnede. Derudover er der flere faktorer, der spiller ind end de omtalte i ovenstående tabel. Det er bl.a. faktorer som forrentning, afskrivning og økonomi - disse faktorer er ikke med i overvejelserne, da dette projekt omhandler landmåling og ikke økonomiske betragtninger.

Valg af opmålingsmetode afhænger af, hvad der ønskes – eksempelvis ønskes der en hurtig opmålingsmetode med en god nøjagtighed vil terrestrisk laserscanning være at foretrække, det vil til gengæld betyde en stor prismæssig investering. Ønskes derimod en billigere metode vil terrestrisk fotogrammetri eller panorama fotogrammetri være at foretrække, men det vil til gengæld betyde en langsommelig opmåling og efterbehandling.

Den opmålingsmetode, der umiddelbart virker mest anvendelig, er polær opmåling, dvs. Landmålergårdens metode. Denne opmålingsmetode vælger gruppen at se bort fra, idet metoden allerede anvendes til indvendig 3D-opmåling. I stedet vælger gruppen at arbejde videre med terrestrisk laserscanning – som er den opmålingsmetode, hvis der ses bort fra det prismæssige kriterium, der synes at være mest anvendelig til indvendig 3D-opmåling af bygninger ud fra tabellen. Valg af opmålingsmetoden terrestrisk laserscanning skyldes endvidere to grunde.

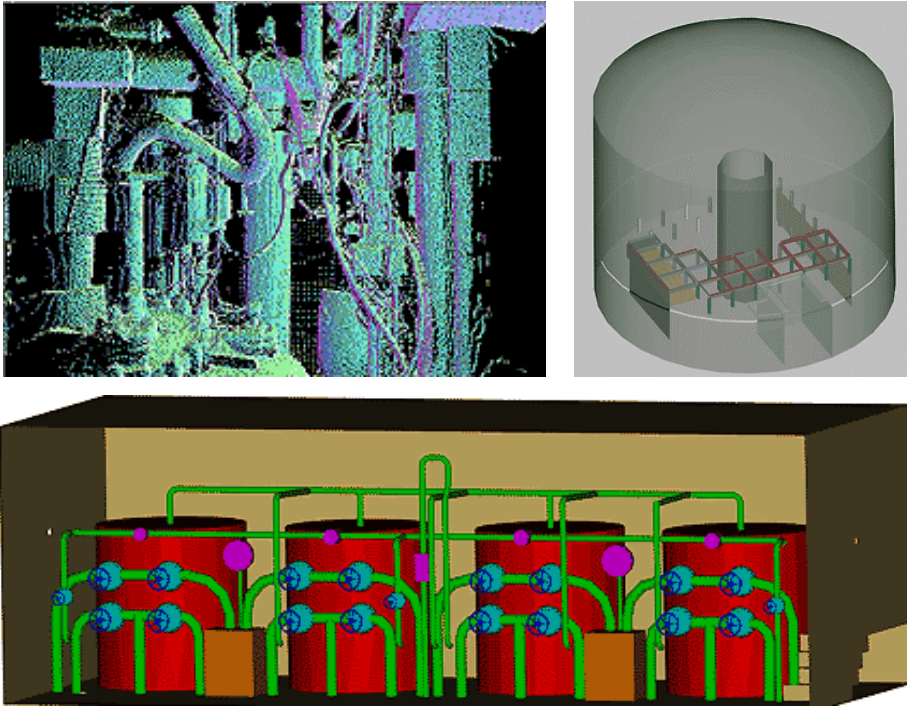
- Ved Nyborgmødet 2003 gav Søren Nørmølle ved hans oplæg omkring Landmålergårdens metode udtryk for, at en alternativ opmålingsmetode til deres metode vil være terrestrisk laserscanning, men at dette ikke var undersøgt endnu.
- Jævnfør studievejledningen kan et afgangprojekt ligge i forlængelse af et projektarbejde fra et af de tidligere semestre og kan bestå i en videreført undersøgelse og opstilling af løsningsforslag inden for et projektområde, ofte 8. eller 9. semesters emne. [Studievejledning, 2003]

Gruppen arbejdede på 9. semester med terrestrisk laserscanning, og afgangprojektet kan derfor ses som en forlængelse af gruppens 9. semester projekt dog med en ny problemstilling. Projektet på 9. semester omhandlede kortlægning af togsinker på baggrund af data indsamlet med en terrestrisk laser-scanner. Der henvises til Bilag S for at se gruppens 9. semester projekt i pdf-format.

## 3.7 ANVENDELSESOMRÅDE FOR TERRESTRISK LASERSCANNING

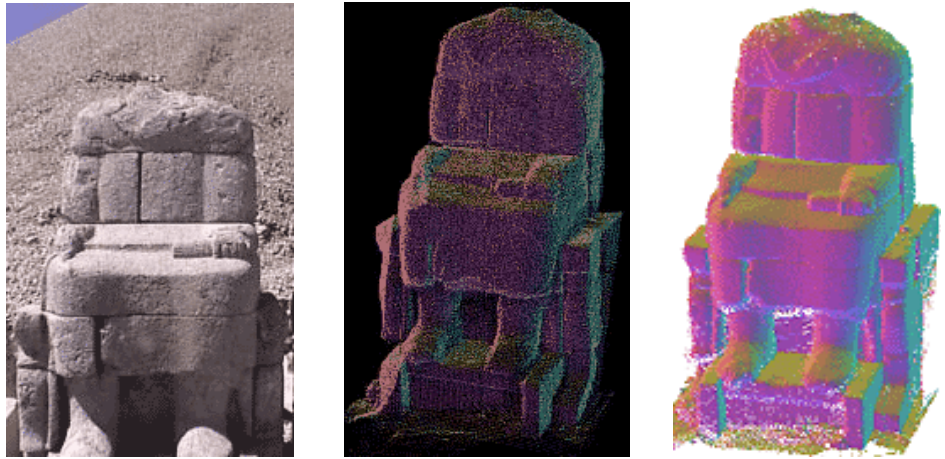
For at give en idé om, hvilke områder terrestrisk laserscanning har vist sig at være brugbar indenfor, er der nedenstående givet nogle eksempler. Der er tale om både inden- og udendørs opmåling.

Der kan blandt andet nævnes industriopmåling. Her er terrestrisk laserscanning fundet anvendelig til registrering og kortlægning af komplicerede rørsystemer, bl.a. inden for kraftvarmeværker og kemiindustrien. Nedenfor kan eksempel på anvendelse af terrestrisk laserscanning ses.



Figur 3.6: Billedet øverst til venstre viser en detaljeret punktsky af et rørsystem. Billedet øverst til højre viser en endelig model af en atomreaktor, og det nederste billede viser en endelig model af et vandforsyningsanlæg. [www.callidus.de].

Terrestrisk laserscanning er endvidere fundet anvendelig indenfor arkæologi- og arkitekturområdet – til rekonstruering af skulpturer, bygningsfacader og lignende. Der henvises til nedenstående eksempler.

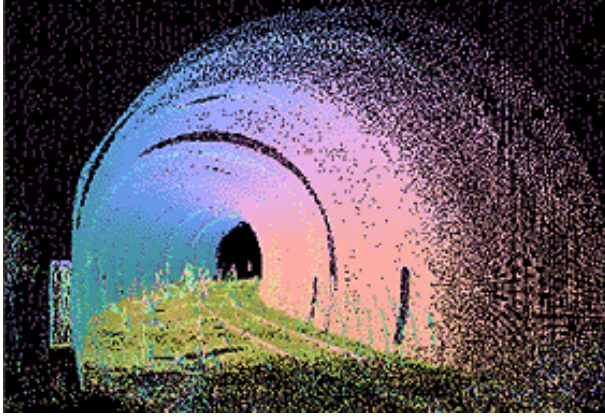


Figur 3.7: Et eksempel på skulptur, der er scannet i forbindelse med arkæologiske udgravninger i Nemrud i Tyrkiet. Til venstre er et billede af skulpturen, i midten punktskyen og til højre den endelige model. [www.callidus.de]



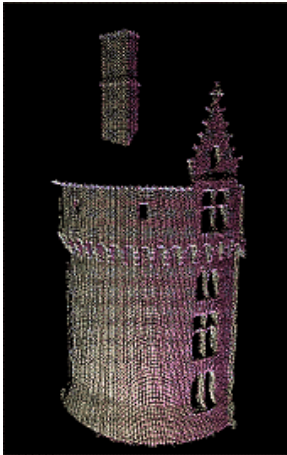
Figur 3.8: Et eksempel på rekonstruktion af en bygningsfacade – til venstre selve billedet, i midten punktskyen og til højre den færdige model for bygningsfacaden. [www.callidus.de]

Det har ligeledes vist sig at være en god og hurtig metode i forbindelse med tunnel- og vejbyggeri. Eksempel på dette ses nedenstående.



Figur 3.9: En punktsky efter terrestrisk laserscanning af en jernbanetunnel i Büttstedt i Tyskland. [www.callidus.de]

Der er lavet forsøg med indendørs og udendørs opmåling af bygninger.



Figur 3.10: Billederne viser eksempel på udendørs og indendørs opmåling med terrestrisk laserscanning. Eksemplet er fra et slot i Frankrig.

Endvidere kan det nævnes, at der er lavet forsøg med at anvende terrestrisk laserscanning i forbindelse med rekonstruktion af bilulykker, produktsimulering, korridoropmåling, rekonstruktion af landskaber eksempelvis ZOO i Wien og opmåling af undergrunden. For nærmere beskrivelse henvises til [www.callidus.de].

[Lysehøj og Nielsen, 2003] og [www.callidus.de]



# 4 PROBLEMFORMULERING

Gruppen arbejdede på 9. semester med en terrestrisk laserscanner af mærket Cyrax 2500 fra Cyra. Dette er en laserscanner af typen ”camera view scanner”. Her fik gruppen et indblik i, hvad denne type er anvendelig til. Gruppen ønsker ligeledes at arbejde med den anden type laserscanner – ”panoramic view scanner” - og der er derfor taget kontakt til LE34, som har en ”panoramic view scanner” af mærket Callidus. Gruppen har lånt deres instrument. På baggrund af dette samt interesse for indvendig 3D-opmåling af bygninger lyder den endelige problemformulering således.

Er opmålingsmetoden terrestrisk laserscanning anvendelig til indvendig 3D-opmåling (facility management) af bygninger i forbindelse med byfornyelse?  
Med hvilken nøjagtighed kan indvendig 3D-opmåling foretages med Systemet Callidus V1-1?

Til at svare på problemformuleringen vil der blive foretaget forskellige tests af instrumentet, og der vil blive foretaget en konkret indvendig 3D-opmåling af tre rum, der svarer til en lejlighed. De tre rum forefindes på Langagervej nr. 6, og der henvises til Afsnit 7.1 for en nærmere beskrivelse.

For at svare på problemformuleringen er der opstillet en række krav til opmålingen. Formålet med dette er at sikre, at det endelige produkt opnår tilfredsstillende kvalitet både, hvad angår nøjagtighed og detaljeringsgrad. Der vil i denne forbindelse blive taget udgangspunkt i Landmålergårdens metode.

- Krav til detaljeringsgrad
- Krav til nøjagtighed

## 4.1 KRAV TIL DETALJERINGSGRAD

Hvad der skal indmåles, afhænger selvfølgelig af den enkelte opgave. I foranalysen er der beskrevet, hvad Landmålergården generelt indmåler.

By- og Boligministeriet<sup>9</sup> har opstillet en liste, *CIS-CAD Vejledning 2000*, over objekter/data, der er relevante at have informationer om i forbindelse med byggesager. Udfra denne liste og udfra hvad Landmålergården indmåler, har gruppen defineret følgende krav til, hvad der skal indmåles.

---

<sup>9</sup> By- og Boligministeriet er nedlagt.

- Indvendige vægflader
- Vindueskarme
- Lofter
- Gulve
- Dørkarme og fodlister
- VVS og el, såsom vandrør og stikkontakter

Endvidere skal der være krav til minimum antal punkter til bestemmelse af et objekt, eksempelvis en vægflade. Der stilles krav om, at objekter skal indmåles med så mange punkter, at det er muligt at modellere objekterne ud fra en udjævning – objekterne skal være pålideligt bestemt. Eksempelvis kan en vægflade bestemmes ud fra 3 punkter, men Landmålergården anbefaler minimum 5 punkter pr. vægflade. For store vægflader skulle dette ikke være et problem ved anvendelse af terrestrisk laserscanning, men der kan opstå problemer ved mindre overflader såsom stikkontakter, da scanningen foretages i grid med konstant vinkel mellem laserstrålerne. Står laserscanneren langt væk fra objektet, kan det betyde stor afstand mellem punkterne. Mindste objektgenkendelse stiller krav til det anvendte udstyr. Nærmere om dette i Afsnit 5.2.

[Nørmølle, 2001] og [CIS-CAD, 2000]

## 4.2 KRAV TIL NØJAGTIGHED

For at terrestrisk laserscanning skal være en fornuftig alternativ opmålingsmetode til Landmålergårdens metode, må denne nødvendigvis være hurtigere eller/og mere nøjagtig. Krav til nøjagtighed kan opdeles i.

- Relativ nøjagtighed
- Absolut nøjagtighed

Med relativ nøjagtighed forstås nøjagtigheden i en enkel punktsky, hvor der er ingen ydre påvirkninger. Nøjagtigheden af et plan afhænger som omtalt i Afsnit 3.1 af, hvad materiale den består af. Væggene består som omtalt i Afsnit 7.1 af enten gips eller beton. På denne baggrund sættes den forventede relative nøjagtighed til at være bedre end 5 mm.

Absolut nøjagtighed skal forstås som nøjagtigheden af den samlede punktskymodel, når flere punktskyer er sammenknyttet. Der sættes et krav om, at nøjagtigheden på en samlet model bør være bedre end 15 mm.



# 5 SYSTEMET CALLIDUS V1-1

Callidus Precision Systems GmbH blev grundlagt i 1990 i den tyske delstat Sachsen-Anhalt. Firmaet beskæftigede sig fra 1990 til 1996 med udvikling og vedligeholdelse af teknisk software. I 1996 ændrede firmaet produktion og har siden beskæftigede sig med udvikling af 3D-laserscanningssystemer. I 2002 indgik Callidus en samarbejdsaftale med Trimble<sup>10</sup>, hvor Trimble fik forhandlingsretten til Callidus systemet. Laserscanningssystemet Callidus forhandles i Danmark, og den første laserscanner er solgt til Landinspektørfirmaet LE 34 A/S.

[[www.callidus.de](http://www.callidus.de)] og [[www.trimblecenter.dk](http://www.trimblecenter.dk)]



Figur 5.1: Laserscanningssystem fra Callidus, laserscanneren er en Callidus V1-1. [Callidus, 2001a]

## 5.1 LASERSYSTEMET CALLIDUS

Et laserscanningssystem fra Callidus, består af en laserscanner, en computer, et stativ og en softwarepakke, se Figur 5.1. Softwarepakken er nærmere beskrevet i Bilag A. Selve laserscanneren vejer omkring 13,0 kg og er ca. 50 cm høj og 30 cm i diameter. Computeren vejer ca. 15 kg og har dimensionerne 45 cm(b) x 31 cm(h) x

---

<sup>10</sup> Trimble Navigation Limited.

20 cm(d). Stativet vejer ca. 10 kg. Det anbefales at anvende laserscanneren ved omgivelsestemperatur mellem 0 °C og 40 °C. Temperaturen i selve laserscanneren bør være mellem 0 °C og 50 °C.

I laserscanneren er der indbygget et elektronisk kompas, således at laserscanneren orienteres mod magnetisk nord, når laserscanneren opstartes. Nøjagtigheden af kompasset afhænger af, om instrumentet er opstillet uden- eller indendørs.

- Indendørs nøjagtighed på kompas:  $\pm 10^\circ$
- Udendørs nøjagtighed på kompas:  $\pm 3^\circ$

Derudover er der monteret en libelle på instrumentet. For, at libellen er anvendelig, er der installeret en dobbeltakselkompensator<sup>11</sup> i laserscanneren. Denne kan kompensere for en hældning på op til  $10^\circ$  med en nøjagtighed på  $\pm 0,025^\circ$ , hvilket svarer til en nøjagtighed på 4 mm på en laserstråle ved en afstand på 10 m mellem laserscanner og objekt. Ved en scanning angiver instrumentet en hældning i X- og Y-retningerne, som laserscanneren automatisk kan kompensere for. På grund af libellen er koordinatsystemet i laserscanneren orienteret i forhold til lodlinien. Det betyder, at der kan måles højdeforskelle direkte i punktskymodellerne i forhold til lodlinien.

Der er på laserscanneren monteret en prismeadapter. Det er således muligt at indmåle laserscannerens position og dermed få orienteret systemet til et kendt koordinatsystem

I laserscanneren er desuden indbygget et digitalt kamera, som bl.a. har til formål at være en hjælp til at identificere objekter i punktskyen under databehandlingen. Det digitale kamera er af mærket Sony CCB-37 EX. En nærmere beskrivelse af billedoptagelse kan læses i Afsnit 5.7.

[Callidus, 2001a]

## 5.2 SCANNINGSTEKNIK OG SCANNINGSOPLØSNING

Callidus laserscanneren er en pulslaserscanner, dvs. at den udsender impulser med faste intervaller. Den benytter målemetoden ”time of flight”. Det vil sige, at afstanden mellem laserscanneren og det reflekterende objekt bliver beregnet ud fra tiden, laserstrålen er undervejs og laserstrålens hastighed (lysets hastighed) [Boehler & Marbs 2002]. Laserscanneren er af typen ”panoramic view scanner”, og den kan scanne  $360^\circ$  horisontalt, og mellem  $30^\circ$  og  $180^\circ$  vertikalt<sup>12</sup>.

---

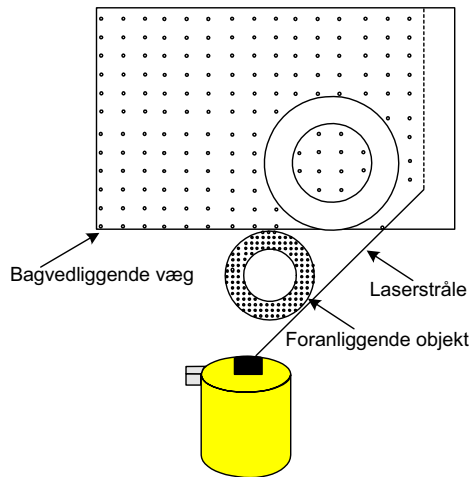
<sup>11</sup> En dobbeltaksel kompensator er det samme som en inklinationsensor.

<sup>12</sup> Hvor  $0^\circ$  er defineret til at pege lodret nedad.

Til at udsende laserstrålen anvendes i det vertikale plan et spejlsystem. Det har ikke været muligt at få oplysninger hvilket spejlsystem, der anvendes i laserscanneren, udover at det er en form for roterende spejle<sup>13</sup>. I det horisontale plan anvendes en servomotor til at flytte laserstrålen.

[Callidus, 2001a]

Laserscanner måler i grid. Gridstørrelse afhænger af scanningsopløsning, indfaldsvinklen og afstanden mellem laserscanner og objekt – jo større afstand jo større bliver gridstørrelsen.



**Figur 5.2: Princippet ved gridstørrelsen. Punkttætheden bliver mindre, jo større afstanden er mellem laserscanner og objekt.**

I Tabel 5.1 kan gridstørrelsen for forskellige scanningsopløsninger ses. Gridstørrelsen er gældende ved 10 meters afstand mellem laserscanner og objekt, og når laserstrålen er vinkelret på objektet. Det kan ses, at laserscanneren har en bedre scanningsopløsning i horisontal retning.

Horisontal \ Vertikal	0,01° [mm x mm]	0,0625° [mm x mm]	0,1250° [mm x mm]	0,2500° [mm x mm]	0,5000° [mm x mm]	1,0000° [mm x mm]
0,2500°	44 x 2	44 x 11	44 x 22	44 x 44	44 x 87	44 x 175
0,5000°	87 x 2	87 x 11	87 x 22	87 x 44	87 x 87	87 x 175
1,0000°	175 x 2	175 x 11	175 x 22	175 x 44	175 x 87	175 x 175

**Tabel 5.1: Gridstørrelserne er gældende ved 10 meters afstand mellem laserscanner og objekt, og når laserstrålen er vinkelret på objektet.**

Arealet af et grid vokser 4 gange størrelse ved en fordobling af afstanden mellem objekt og laserscanner. Sagt på en anden måde afstanden mellem punkterne fordobles.

<sup>13</sup> Gruppen har taget kontakt til Callidus i Tyskland for at få svar på dette, men det blev kun til dels besvaret – se Bilag H.

Jævnfør Afsnit 4.1 er det mindste plan i dette projekt, der skal bestemmes stikkontakter. Stikkontakter har dimensioner på ca. 4 cm x ca. 4 cm. Der skal til hvert plan indmåles min. 3 punkter helst min. 5 punkter for at bestemme et plans ligning. Afstanden mellem laserscanner og objekt i de tre rum kan maksimalt blive 6 m. Ud fra ovenstående tabel skulle det teoretisk set ikke være et problem at få bestemt planer til stikkontakter med overbestemmelse, hvis der anvendes en høj scanningsopløsning i både horisontal og vertikal retning.

### 5.3 LASER OG RETURSIGNAL

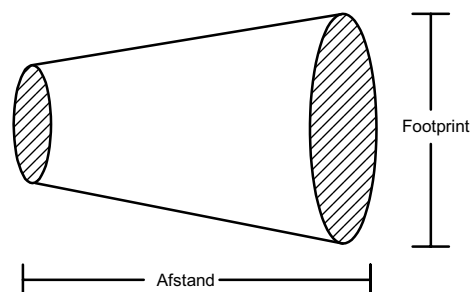
Den anvendte laserstråle i laserscanneren er en type 1, hvilket vil sige, at laserstrålen ikke er skadelig for øjnene. Laserstrålen ligger i det infrarøde område med en bølgelængde på 905 nm. Laserscanneren kan scanne i en max afstand på 150 m i radius, men der anbefales en max radius på 80 m af hensyn til nøjagtigheden og mindste objektgenkendelse.

Inden en scanning foretages skal der angives i hvilken radius, laserscanneren skal indmåle objekter. Der kan vælges, at laserscanneren skal indmåle objekter indenfor en afstand på henholdsvis 32 m, 50 m eller 80 m. Jo større afstand der vælges, desto dårligere vil objekter blive indmålt – indenfor de tre afstande, vil objekter henholdsvis blive indmålt på milli-, centi- eller decimeterniveau. Det er muligt at skifte mellem afstandsintervallerne under en scanning.

[Callidus, 2001a]

Laserlys udbredes kegleformet, hvilket betyder, at en laserstråle rammer et objekt med en vis udbredelse. Udbredelsen er cirkulært og/eller ellipseformet og kaldes et footprint. Størrelsen af footprintet afhænger dels af afstanden mellem laserscanner og objekt og dels af hældningen af det plan, hvorpå laserstråler rammer.

På nedenstående figur kan det ses, at størrelsen på footprintet afhænger af afstanden mellem laserscanner og objekt.



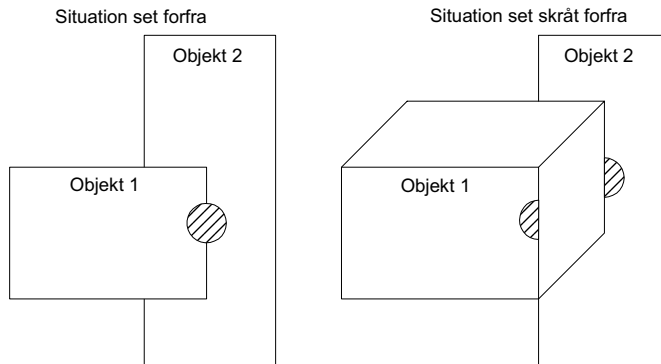
**Figur 5.3: Footprint – størrelsen af footprintet afhænger af afstanden mellem laserscanner og objekt. [Wehr & Lohr, 1999]**

Udbredelsen af footprintet afhænger endvidere af indfaldsvinklen - en lille indfaldsvinkel vil give store og ellipseformede footprints i forhold til, hvis laserstrålen

er vinkelret på objektet. I tilfældet, hvor laserstrålen er vinkelret på objektet, vil footprintet være cirkulært. Et punkt bestemt ud fra store og ellipseformede footprints er dårligere bestemt, end hvis footprintet er cirkulært.

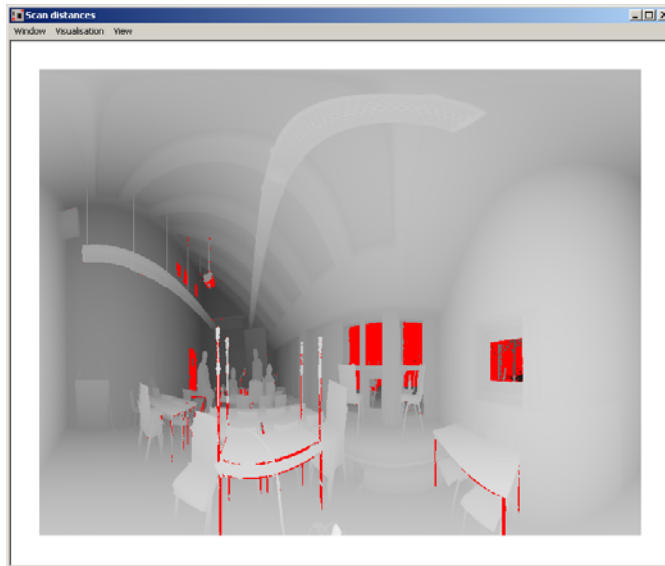
[Lysehøj og Nielsen, 2003]

Da laserstråler udbredes kegleformet, kan det i nogle tilfælde betyde, at et udsendt lasersignal reflekteres fra flere forskellige objekter, hvorved laserscanneren modtager flere retursignaler. Laserstrålen rammer flere objekter, og footprintet deles. Se princippet i opdeling af et footprint i nedenstående figur.



**Figur 5.4: Princippet ved opdeling af et footprint. Figuren er hentet fra [Hellemann og Petersen, 2002].**

Nogle laserscannere registrerer kun det første eller det sidste modtagne signal, andre begge retursignaler, mens andre igen registrerer samtlige retursignaler. Andre laserscannere igen vælger at midle afstanden fra de forskellige dele af footprintet. På den måde vil der blive dannet et fejlagtigt punkt et sted midt mellem objekterne. Her vil det være mere fordelagtigt, hvis laserscanneren vægter, og dermed registrerer det retursignal, som ”indeholder” mest footprint. Callidus registrerer det første retursignal, hvis flere signaler returneres. Men returneres mange små retursignaler fra samme laserstråler, vælger laserscanneren ikke at registrere noget signal jf. Bilag H. Det kan for eksempel være i kurver eller på trapper. På denne måde reduceres antallet af fejlagtige punkter. Objekter, som ikke bliver registreret, bliver visuelt i punktskyen markeret med rødt – se nedenstående.



Figur 5.5: Eksempel på områder, der ikke er målt. Eksemplet er fra Fibigerstræde 11, rum 3 i forbindelse med kontrol af laser-scanneren. De røde klatter indikerer objekter, der ikke er målt.

Koordinatsystemet i Callidus laser-scanneren er et højrehåndskoordinatsystem, hvor Z-aksen er sammenfaldende med lodlinien, og Y-aksen er nordvendt.

## 5.4 INTENSITET

Intensiteten er et udtryk for forholdet mellem den energi, der udsendes ved hver impuls fra laser-scanneren og den energi, der returneres. Sagt på en anden måde, det er et udtryk for, hvor reflekterende det ramte objekt er. Intensitet afhænger af blandt andet objektets materiale, indfaldsvinkel, objektets farve og scanningsafstanden. Intensiteten kan være en hjælp til at identificere et objekt.

Der er foretaget en undersøgelse med en laser-scanner af mærket Cyrax 2400, hvor der er undersøgt størrelsen af intensiteten ved scanning af forskellige materialer. Endvidere er der undersøgt, om objekter reflekterer mere eller mindre afhængig af, om objektet er tørt eller fugtigt. Testene er foretaget med de forskellige materialer, som det ses i Tabel 5.2. Testene er foretaget i henholdsvis 3 m og 50 m afstand. Intensiteten for laser-scanner Cyrax 2400 benævnes med værdier mellem 0 og 1, hvor 1 svarer til 100% refleksion.

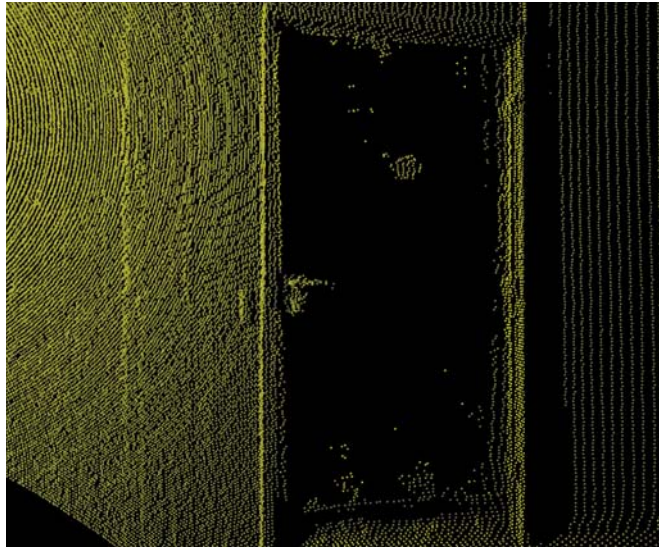
[Lichti & Harvey 2002a] og [Lichti & Harvey 2002b]

Materiale	F = Fugtig T = Tør	Intensitet ved 3m	Intensitet ved 50m
Rød mursten	F	0,25	0,14
	T	0,22	0,12
Kalksten	F	0,39	0,28
	T	0,46	0,25
Hvid Granit	F	0,35	0,22
	T	0,42	0,18
Sort Kul	F	0,17	0,10
	T	0,25	0,13
Beton	F	0,30	0,16
	T	0,25	0,15
Kalkstens blok	F	0,37	0,27
	T	0,36	0,23
Basalt	F	0,30	0,14
	T	0,59	0,13
Rødt ler	F	0,26	0,14
	T	0,29	0,13
Hvid quartz	F	0,32	0,18
	T	0,35	0,18

**Tabel 5.2: Undersøgelse af intensitet. Undersøgelsen er foretaget med en Cyrax 2400 i Australien. Intensiteten benævnes med værdier mellem 0 og 1, hvor 1 er maksimal refleksion. [Lichti & Harvey 2002b]**

Generel kan det siges ud fra tabellen, at intensiteten ved 50 m er halv så stor som ved 3 m. Testen har derudover vist, at mørkt materiale reflekterer dårligere end lyst materiale – materialet sort kul har den mindste intensitetsværdi ved testene. Det er ikke muligt generelt at konkludere om, det er bedst at måle et fugtigt eller vådt objekt – dette kommer an på objektets materiale.

Forsøget er foretaget med en laserscanner med en klasse 2 laserstråle, Cyrax 2400. Callidus laserscanneren har som tidligere omtalt en klasse 1 laserstråle, hvorfor det ikke direkte er muligt at overføre resultaterne fra undersøgelsen til en Callidus laserscanner. Alligevel mener gruppen, at tendenserne fra undersøgelsen kan overføres til en Callidus laserscanner – se et eksempel i nedenstående figur fra gruppens opmåling af testområdet.



Figur 5.6: Udsnit fra en punktsky, som er hentet ind i 3D-Extractor. Det gule illustrerer punkter. Det kan ses, at der ikke er mange på punkter på døren (det sorte plan). Til gengæld er der mange punkter ved siden af døren, som er en hvidmalet betonvæg. På dørens overflade er der ca. 350 punkter, mens der på et tilsvarende udsnit af væggen er ca. 35000 punkter.

På figuren ses tydeligt, at der er markant færre punkter på den sorte overflade (en dør) end på overfladen til venstre, som er en hvidmalet betonvæg. På dørens overflade er der cirka 350 punkter, og ved et lignende udsnit størrelsesmæssig af væggen overflade er der ca. 35000 punkter. Refleksionen fra den sorte overflade er altså væsentlige dårligere end refleksionen fra den hvide overflade.

Der er ikke målt intensitet ved selve opmålingen grundet tidsmæssige årsager - en scanning med intensitetsmåling vil tage ca. dobbelt så lang tid, da laserscanneren skal indmåle scanningsområdet to gange.

I stedet er der optaget billedokumentation til identifikation af det enkelte punkt. Hvert punkt kan få tildelt en farveværdi (RGB-værdi) ud fra pixelerne i det tilhørende billede. Derved opnås et fotorealistisk punktsky.

[Callidus, 2002a]

I nedenstående figur kan der ses et eksempel hvor der er tildelt en RGB-værdi til punkterne.





Figur 5.7: Eksempel, hvor der er tildelt en RGB-værdi til punkterne. Udsnittet er fra en punktsky i rum 5.17 i testområde, som er nærmere omtalt i Afsnit 7.1.

## 5.5 FORVENTEDE NØJAGTIGHEDER

I nedenstående tabel er angivet forskellige specifikationer for laserscanneren, Callidus.

Specifikationer for Callidus Systemet V1-1	
Kompensator	$\pm 0,025^\circ$
Afstandsnøjagtighed	$\pm 5 \text{ mm}^{14}$
Vinkelnøjagtighed, vertikalt	$\pm 0,03^\circ$
Vinkelnøjagtighed, horisontalt	$\pm 0,017^\circ$
Punktnøjagtighed	5 mm
Modellens nøjagtighed	$\pm 3 \text{ mm}$

Tabel 5.3: Nøjagtigheder for Callidus. [Callidus, 2001a]

I manualerne til Callidus er der ikke nærmere præciseret, hvad de enkelte forventede nøjagtigheder er gældende for. Gruppen går ud fra, at de forventede nøjagtigheder er gældende for følgende. Kompensatorens nøjagtighed er den nøjagtighed, Z-aksen bliver kompenseret for i forhold til lodlinien. Afstandsnøjagtighed er gældende for afstanden mellem laserscanner og objekt. Vinkelnøjagtighed er den forventede nøjagtighed på den vinkel, som laserscanneren udsender laserstråler med. Det er værd at bemærke, at der opnås en bedre vinkelnøjagtighed horisontalt end vertikalt, hvor der anvendes spejlsystem til at flytte på laserstrålen. Med modellens nøjagtighed forstås den nøjagtighed, der forventes at være, efter punktskyen er færdigbehandlet, og der er genereret en 3D-model.

<sup>14</sup> Dette er gældende for afstande mellem 1 m og 30 m og ved temperaturer i selve laserscanneren mellem 10 °C og 50 °C .

## 5.6 SAMMENKNYTNING AF PUNKTSKYER

I forbindelse med laserscanning er det nødvendigt at sammenknytte punktskyer. Når der anvendes en Callidus laserscanner, kan sammenknytning foretages ud fra fire metoder i programmet 3D-Extractor.

- Sammenknytning vha. Fuzzy Join.
- Sammenknytning vha. tre planer
- Sammenknytning vha. global transformation
- Sammenknytning vha. visual adjustment

Metoden ”Sammenknytning vha. Fuzzy Join” er en funktion i softwaret, som sætter punktskyer sammen ved en punktskysudjævning. I udjævningen forsøges der at indpasse punktskyerne på bedste vis jf. Bilag G.

Metoden ”Sammenknytning vha. tre planer” er specielt velegnet til regulære rum, som ønskes sammenknyttet. På baggrund af tre veldefinerede fælles planer kan to punktskyer sammenknyttes jf. Bilag G.

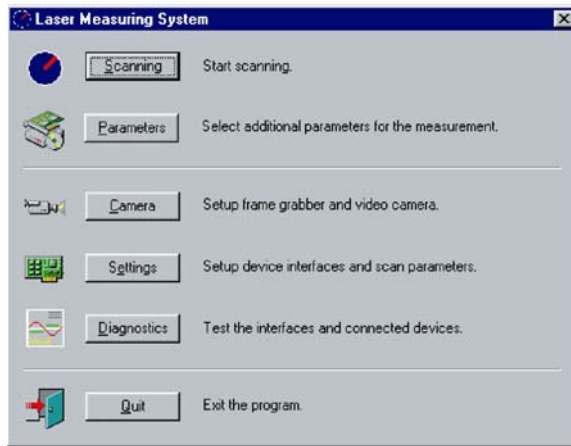
Ved den tredje metode. ”Sammenknytning vha. global transformation” sættes to punktskyer sammen ud fra fælles transformationspunkter. Transformationspunkterne skal være prisme, da laserscanneren kan genkende disse under scanningen. Softwaret beregner en global transformation ved hjælp af laserscannerens koordinatbestemmelse, retning til et prisme samt brugen af kompensatoren jf. Bilag G.

Den sidste metode ”Sammenknytning vha. visual adjustment” er en visuel flytning af en punktsky over i en anden punktsky. Denne metode er dog ikke særlig anvendt i landmålingssammenhæng, da den ikke er særlig præcis. Metoden anvendes oftest som udgangspunkt for en punktskysudjævning jf. Bilag G.

Metoderne er nærmere omtalt i Afsnit 9.2.

## 5.7 SCANNINGSPROCEDURE

En scanning med laserscanneren begynder ved, at softwaret LMS-softwaret på LMS-computeren opstartes.



Figur 5.8: Hovedmenu i LMS-software.

Forinden en scanning sættes i gang er der en række parameter, der skal indstilles. Dette gøres i menuen ”Parameters”. Her defineres foreløbigt navn på scanningen, i hvilke mappe scanningen skal gemmes. Endvidere er der indstillinger for kameraet vedrørende lysforholdene.

I menuen ”Scanning” sættes indstillinger for scanningsopløsning, scanningsnøjagtighed, indstillinger for optagelse med kameraet m.m. Der er to muligheder for billedoptagelser - oversigtsbilleder og detaljerede billeder. Kamerakonstanten for oversigtsbilleder og de detaljerede billeder er henholdsvis 3,009 mm og 11,440 mm. Ved scanningsens begyndelse vælges mellem optagelse af oversigtsbilleder, detaljerede billeder eller begge dele. Udover de to typer billedoptagelser kan der vælges, om der skal tages ekstra billeder, så der opnås overlap – overlap er muligt i vertikal retning.

Når de forskellige værdier er indtastet sættes instrumentet til at scanne. Laserscanneren starter med en initialisering, hvor bl.a. nordretningen findes og hældningen af instrumentet bestemmes. Igennem scanningen kan scanningsprocessen følges på skærmen. Når scanningen er færdig, accepteres opmålingen, og scanningen navngives endeligt. Efterfølgende kan en ny scanning foretages.

De tre midterste menuer i hovedmenuen (Camera, Settings og Diagnostics) er menuer for servicetekniker, f.eks. hvis kameraet skal kalibreres.

[Callidus, 2001b]



# 6 KONTROL AF SYSTEMET CALLIDUS V1-1

Gruppen har foretaget en række kontroller for at teste laserscannerens og softwarets grænser i forbindelse med indendørs opmåling. Gruppen havde, forinden opmålingen fandt sted en række overvejelser, om hvad der kunne være relevant at kontrollere ved laserscanneren, og hvorledes dette skulle finde sted. Blandt andet ønsker gruppen at kalibrere kameraet, idet gruppen vil generere ortofotos. Ligeledes ønsker gruppen at teste laserscannerens kompensator, afstandsmåling samt måling af objekter med forskellige hældninger.

Vedrørende kalibrering af laserscannerens kamera har Jens T. B. Madsen fortalt, at en kalibrering lige er foretaget, og i Bilag B kan kalibreringsrapporten ses med gruppens kommentarer. Desuden kan gruppen ikke selv foretage en kalibrering af kameraet, men den skal foretages af producenten Callidus. Gruppen må antage, at kameraet er kalibreret acceptabelt, således at der kan genereres af ortofotos. Kontrol af afstandsmålingen i laserscanneren viser sig ligeledes, ikke at kunne lade sig gøre efter snak med Jens T. B. Madsen. Dette skyldes, at det kun er retningen, der anvendes ved måling til prismer. Det er ikke muligt i softwaret at angive hvilket prisme og dermed prismekonstant, der anvendes, hvorfor en afstandsmåling formentlig vil blive forkert.

På baggrund af samtale med Jens T. B. Madsen bliver følgende kontroller foretaget.

- Kontrol af måling af planer
  - Opløsning
  - Hældning
- Kontrol af kompensator

Kontrollerne vil i det følgende blive beskrevet enkeltvis, hvor nedenstående punkter vil blive behandlet.

- Kontrollens relevans i forbindelse med 3D-indvendig opmåling af rum
- Opmåling
- Databehandling
- Delkonklusion og herunder vurdering af kontrollen

## 6.1 KONTROL AF PLANER MHT. OPLØSNING

Denne kontrol er udført i Fibigerstræde 11, rum 3. Formålet er at undersøge, hvilken betydning scanningsopløsningen har på bestemmelse af et plans dimensioner. Har det betydning for planets dimension, om der anvendes en lav opløsning eller en høj opløsning – hvis ja i hvor høj grad. Testen har til formål at være en hjælp til

at indikere, hvilken scanningsopløsning, der kan anbefales at anvende til eksempelvis indendørs 3D-opmåling.

### 6.1.1 OPMÅLING

Opmålingen bliver foretaget i rum 3 i Fibigerstræde 11, hvor en opslagstavle indmåles flere gange med forskellige scanningsopløsninger. Der anvendes den samme scanningsvinkel på  $53^\circ$  i horisontal retning for alle scanninger for at opnå en vis lighed mellem scanningerne. Scanningsvinklen i den vertikale retning er ligeledes fast på  $30^\circ$ - $180^\circ$ <sup>15</sup>. Laserscanneren flyttes ikke mellem scanningerne – den står ca. 4,5 m fra tavlen, som hænger på en væg. Figur 6.1 viser et billede af tavlen.



Figur 6.1: Situation af indmåling af tavle.

#### *Valg af gridstørrelse*

Der bliver foretaget fem scanninger – i nedenstående tabel kan scanningsopløsningen i horisontal og vertikal retning samt gridstørrelse for de enkelte scanninger aflæses.

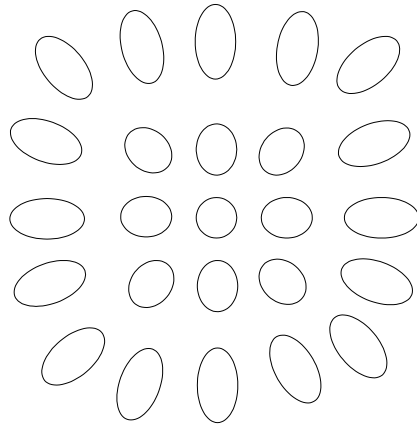
Skan nr.	Opløsning [Hor <sup>o</sup> x Ver <sup>o</sup> ]	Gridstørrelse [mm x mm]
1	0,01 x 0,25	2 x 20
2	0,0625 x 0,25	5 x 20
3	0,50 x 0,25	40 x 20
4	0,50 x 0,50	40 x 35
5	1,00 x 1,00	78 x 78

Tabel 6.1: Scanningsopløsning og gridstørrelse ved de foretagne scanninger.

<sup>15</sup> Hvor  $0^\circ$  er defineret lodret nedad.

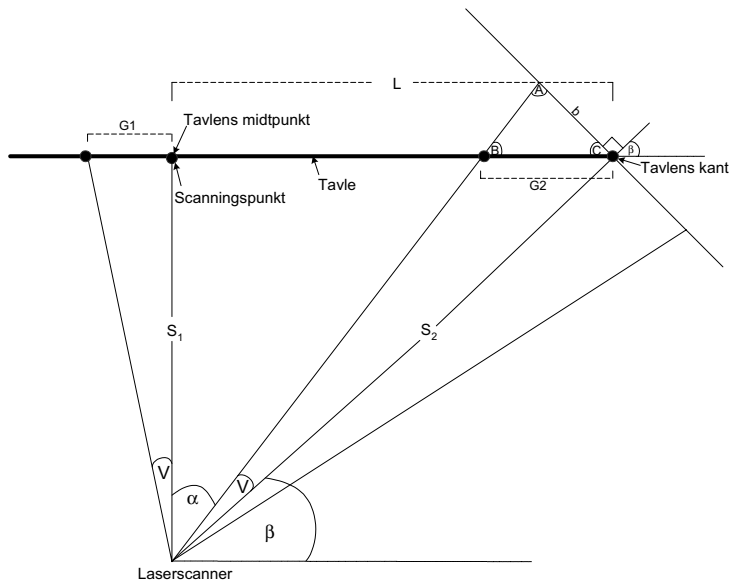
Opløsningskombinationerne er valgt med henblik på at få et bredt udsnit opløsningskombinationerne jf. Tabel 5.1.

Gruppen er klar over, at gridstørrelserne kun er gældende, når laserstrålen rammer vinkelret på tavlens overflade. Gridstørrelsen vil blive større, jo fjernere laserstrålen er fra vinkelret på tavlen. Princippet for footprints udbredelse kan ses på nedenstående figur.



**Figur 6.2: Princip i footprints udbredelse. Princippet er fortegnet og uden måleforhold.**

Gruppen mener dog, at det er rimeligt at antage, at gridstørrelsen på tavlen er tilnærmelsesvis ens. For at bevise dette er der beregnet, hvor meget gridstørrelsen ændrer sig på tavlen ved scanningsopløsning på  $[1,00^\circ \times 1,00^\circ]$ . Tavlen er ca. 1,2 m bred, og laserstrålen står vinkelret på midten af tavlen – se nedenstående skitse.



**Figur 6.3: Gridstørrelse ved tavlens midte og tavlens kant. Figuren er ikke målfast. Størrelserne er nærmere beskrevet i det følgende.**

Afstand fra tavlens midtpunkt til laserscanner,  $S_1$ :

$$S_1 = 4,5 \text{ m}$$

Afstand fra tavlens midtpunkt til tavlens kant,  $L$

$$L = 0,6 \text{ m}$$

Scanningsopløsning,  $V$

$$V = 1^\circ$$

Afstand fra tavlens kant til laserscanner,  $S_2$ :

$$S_2 = \sqrt{(S_1)^2 + (L)^2} = 4,540 \text{ m}$$

Gridstørrelse ved tavlens midte,  $G1$ :

$$G1 = \left[ \tan V \cdot S_1 \times \tan V \cdot S_1 \right] = [0,0785 \text{ m} \times 0,0785 \text{ m}]$$

Vinkel  $\beta$ , se ovenstående figur:

$$\beta = 90 - \tan^{-1} \left( \frac{L}{S_1} \right) = 82,4054^\circ$$

Vinkel  $C$ , se ovenstående figur:

$$C = 180^\circ - 90^\circ - \beta = 7,5946^\circ$$

Vinkel  $B$ , se ovenstående figur

$$B = \beta + V = 83,4054^\circ$$

Afstand  $b$ , se ovenstående figur

$$b = \tan V \cdot S_2 = 0,0792 \text{ m}$$

Vinkel  $A$ , se ovenstående figur

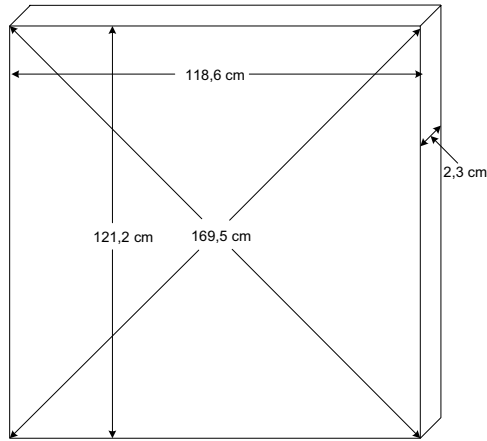
$$A = 180 - B - C = 89^\circ$$

Gridstørrelse ved tavlens kant,  $G2$

$$G2 = \left[ \frac{b}{\sin B} \cdot \sin A \times \frac{b}{\sin B} \cdot \sin A \right] = [0,0797 \text{ m} \times 0,0797 \text{ m}]$$

Gridstørrelsen vil altså maksimalt ændre sig 1,2 mm (0,0797 mm - 0,0785 mm) på tavlen ved anvendelse af opløsningen på [1,00° x 1,00°], hvorfor det synes rimeligt at antage, at gridstørrelsen på tavlen er ens. Som referencen er tavlens dimensioner indmålt med stålmalebånd – se dimensionerne på nedenstående figur.





**Figur 6.4: Tavlens dimensioner, målt med stålmålebånd. Skitsen er ikke målefast.**

#### *Valg af billedokumentation*

Der optages billeder ved hver scanning. Der er som tidligere nævnt to muligheder af billedokumentation – oversigtsbilleder og detaljerede billeder. Følgende er gældende for de to billedokumentationer. Nærmere specifikationer for kameraet kan ses i Bilag B.

Billedokumentation	Kamerakonstant [mm]	Antal billeder Horisontalt	Antal billeder Vertikalt	Pixelstørrelse på CCD-chippen [mm]
Oversigt	3,01	12	3	X = 0,00465
Detaljerede	11,40	40	13	Y = 0,00507

**Tabel 6.2: Billedokumentation for oversigtsbilleder og detaljerede billeder. Antal billeder i horisontalt og vertikalt er maksimalt antal, dvs. for 360° horisontalt og [30°-180°] vertikalt. Der er valgt ikke at afrunde "Pixelstørrelse på CCD-chippen", da værdien er hentet fra ICA-filen.**

Som tidligere nævnt står laserscanneren ca. 4,5 m fra tavlen, og der bliver scannet med en vinkel på 53° horisontal og fra 30° til 180° vertikal. Det giver følgende målforhold, M og pixelstørrelse på objekt – dvs. pixelstørrelse på tavlen – se nedenstående figur.

Billedokumentation	Målforhold M	Pixelstørrelse på objekt [mm]	Antal billeder horisontalt	Antal billeder vertikalt
Oversigt	1 : 1495	X = ca. 7,0 Y = ca. 7,6	2	3
Detaljerede	1 : 395	X = ca. 7,8 Y = ca. 2,0	6	13

**Tabel 6.3: Målforhold og pixelstørrelse på objekt.**

Der vælges at anvende oversigtsbilleder af tidsmæssige årsager. Det vil tage cirka dobbelt så lang tid at foretage en scanning, hvis der vælges at optage detaljerede

billeder<sup>16</sup>, hvilket der ikke synes at være tid til. Billedoptagelserne skal anvendes til generering af ortofotos. Ved generering af ortofotos skal det helst være sådant, at pixelstørrelsen på objektet er mindre end eller i samme størrelsesorden som gridstørrelsen for den punktmængden, der skal anvendes til generering af TIN-modellen. Er det tilfældet, at pixelstørrelsen på objektet er væsentlig større end gridstørrelsen, kan det give problemer, når billedet draperes ned over TIN-modellen. Det vil blive nødvendigt at tilpasse billedet til TIN-modellen, hvormed ortofotoet vil være forvrænget. Dette kan forventes ved scan nr. 1, da gridstørrelsen i punktskyen er mindre end pixelstørrelsen på objektet jf. Tabel 6.1 og Tabel 6.3.

### 6.1.2 DATABEHANDLING

Det vil blive beregnet tavlens dimension ud fra to måder

1. Dannelse af planer - Vektorkortlægning
2. Generering af ortofoto – Rasterkortlægning

Der arbejdedes i de enkelte punktskyer, hvor der vil blive foretaget en sammenligning mellem de beregnede dimensioner og referencens dimensioner.

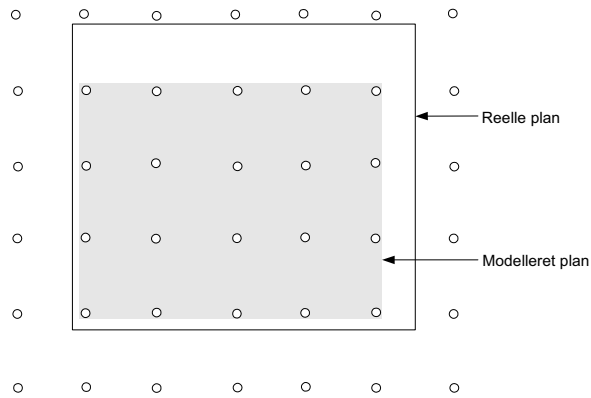
#### DANNELSE AF PLANER

Der anvendes programmet 3D-Extractor til at danne et plan for tavlens overflade. Tavlens overflade er genereret ud fra definerede kanter<sup>17</sup>. Der formodes ikke at være problemer med at modellere planet for tavlens overflade, men derimod større problemer med at bestemme tavlens dimensioner. Dette skyldes, at laserscanneren måler i grid, hvorfor det ikke er sikkert, at kanterne på tavlen er scannet ind. Princippet er vist i Figur 6.5. Derfor kan det forventes, at jo lavere opløsning jo mindre vil planet til tavlen blive i forhold til det reelle plan.

---

<sup>16</sup> I testområdet på Langagervej 6 tog en scanning med optagelse af detaljerede billeder ca. 50 min., mens en scanning med optagelse af oversigtbilleder kun tog ca. 20 min. Cirka 10 min. af henholdsvis de 50 min og 20 min gik med selve scanningen og den øvrige tid går med billedoptagelse.

<sup>17</sup> Se nærmere omkring definerede kanter i Kapitel 8.



**Figur 6.5: Princippet ved scanning af en overflade.**  
 Grundet gridstørrelse vil tavlens overflade blive mindre end det reelle mål. Det grå område indikerer planet, som bliver modelleret, mens rammen omkring er det reelle plan.

Efter, at tavlens plan er modelleret i 3D-Extractor, bliver planet importeret til AutoCad, hvor dimensionerne beregnes. Der beregnes 3D-afstande i AutoCad.

Det kan forventes, at tavlens dimensioner beregnet i AutoCad passer indenfor afstanden to gange gridstørrelsen grundet ovenstående figur. Tavlens dimensioner kan forventes ikke at blive større men mindre end referencen - der er tale om en ensidige fejl. Der henvises til Bilag J for at se de modellerede tavler i dxf-format.

Afgivelser mellem tavlens dimensioner målt i AutoCad og referencen kan ses i nedenstående tabel. Dimensioner målt i AutoCad kan ses i Bilag J.

Scan Nr.	Bred-Top [mm]	BredBund [mm]	Højde V [mm]	Højde Ø [mm]	Diag. 1 [mm]	Diag. 2 [mm]	Opløsning Hor x ver [° x °]	Grovfejlsgrænse [mm x mm]
1	-14	-0	-24	-23	-19	-23	0,01 x 0,25	2 x 40
2	-25	-33	-19	-27	-32	-40	0,0625 x 0,25	10 x 40
3	-76	-73	-27	-16	-58	-75	0,50 x 0,25	80 x 40
4	-80	-79	-8	-33	-62	-76	0,50 x 0,50	80 x 70
5	-76	-73	-83	-93	-117	-111	1,00 x 1,00	156 x 156

**Tabel 6.4: Afvigelse mellem tavlens dimensioner beregnet i AutoCad og tavlens reference.** "BredTop" af bredden af tavlen øverst, "Højde V" er højde af tavlen mod vest osv. "Diag. 1" er forkortelse for diagonal. "Opløsning" er de anvendte scanningsopløsninger. Grovfejlsgrænse" er den maksimale tilladte afvigelse mellem tavlens dimension beregnet i AutoCad og tavlens reference i følge teorien.

Som det kan ses ud fra tabellen, er alle afvigelse negative, hvilket vil sige, at tavlens dimensioner beregnet i AutoCad er mindre end referencen. Afvigelse vokser, når scanningsopløsningen bliver lavere.

Der er en tendens til ved sammenligning af breddedimension med højdedimension i den enkelte scanning, at afvigelse er størst i "højderetningen", hvor opløsningen er lavest. Det er kun tre breddedimensioner, der overskrider grovfejlsgrænsen.

Det har vist sig, at størrelsen af en overflade afhænger meget af scanningsopløsningen – ved den lavest anvendte scanningsopløsning kan afvigelsen fra den reelle dimension være op til 12 cm jf. Tabel 6.4.

### **GENERERING AF ORTOFOTO**

Der er genereret ortofotos. Gruppen ser egentlig ortofoto i forbindelse med terrestrisk laserscanning som supplement til modellering af punktskyer i forbindelse med indvendig opmåling. Det kan blive problematisk at kortlægge mindre objekter såsom stikkontakter i en punktsky. Det er formentlig ikke et problem at danne planet for en stikkontakt, men problemet opstår, når planets dimensioner skal defineres. Her ser gruppen ortofotos som en løsning, hvor der i et ortofoto formentlig kan optages bedre mål til mindre objekter end i punktskyer.

Derudover er det problematisk, at det ikke er muligt at beregne afstande i en modelleret punktsky – det er nødvendigt først at importere modellen til et Cad-program eksempelvis AutoCad for at foretage målinger. For at undgå at eksportere filer til AutoCad, kan der i stedet indlæses et ortofoto, hvori målingerne så kan foretages.

Et ortofoto er et digitalt billede, hvori højdeforskydningsfejlene fra et almindeligt foto er fjernet. For at fjerne disse forskydninger, anvendes en DHM. Det digitale billede draperes ned over DHM. Det er herefter lige så geometrisk korrekt som et almindeligt ”kort”, og der kan derfor optages mål direkte i det.

At måle i de genererede ortofotos er ikke kun at måle i fotoet, dvs. måle 2D-afstande, men der måles også højden i DHM, dvs. at de afstande, der måles i de genererede ortofotos er 3D-afstande.

Egentlig er det ikke i denne kontrol nødvendigt at generere ortofotos, da der er tale om måling af et fladt plan - tavlen. En opretning af fotoet er i princippet nok, hvor der fjernes højdeforskydningerne i fotoet. Alligevel vælges at generere ortofotos, da denne kontrol har til formål at danne grundlag for databehandlingen af testområdet, Langagervej 6.

Generering af ortofotos foretages i programmet Mesh & Map. Første trin i generering af et ortofoto er at generere DHM, dvs. TIN-model. Referenceplanet defineres som væggen bag tavlen. Andet trin er at drapere de optagne billeder over TIN-modellen. Undervejs skal diverse parameter fastsættes – en nærmere beskrivelse af generering af ortofotos kan ses Appendiks A.

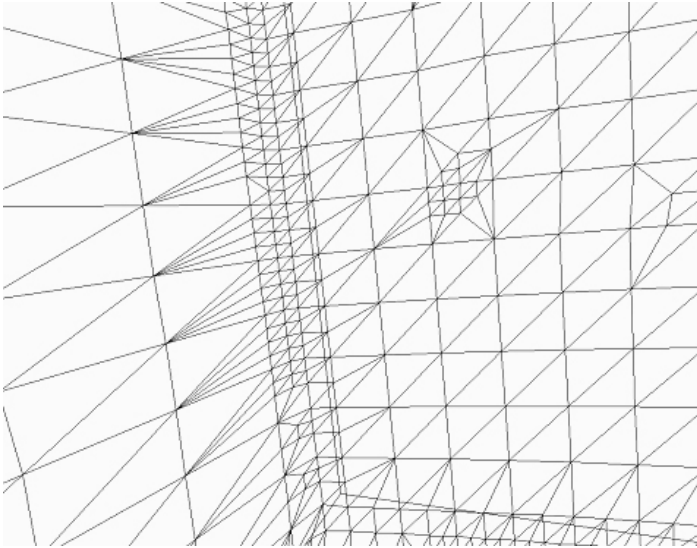
[Callidus, 2002b]

### ***Metode til generering af overflademodel***

Der findes flere forskellige metoder til generering af en overflademodel. Tre af de mest anvendte metoder er følgende:

- Quadtree /Qctree metode
- Delaunay metoden
- Advancing Front metode

Metoderne er yderligere beskrevet i Appendiks B. Der er ikke beskrevet direkte i manualen til Mesh & Map, hvilken metode der anvendes til at generere TIN-modellen. Men udfra et screen dump af en TIN-model genereret i Mesh & Map – se Figur 6.6 og udfra nedenstående citat fra manualen indikeres det, at programmet anvender Quadtree metoden.



**Figur 6.6:** Screen dump af en triangulationsmodel foretaget i Mesh & Map.

*Each scan is first transformed into an initial low-resolution mesh and is then refined until a user-defined accuracy is reached. This approach results into a multi-resolution mesh that is using larger triangles where the object surface has a low curvature and smaller triangles in areas of higher curvature. Another advantage of this approach is that each vertex of the mesh corresponds to a point that was actually measured by the scanner, as opposed to 3D meshing algorithms that often approximate the surface of the scanned object.*

[Callidus 2002b, s. 35]

En TIN-model genereret udfra laserscanningsdata er af ganske god kvalitet, idet den bliver genereret udfra utrolig mange punkter. Tilsvarende er det nødvendigt, at pixelstørrelsen på objektet for de optagne fotos, er i samme størrelsesorden eller mindre end gridstørrelsen i TIN-modellen for ikke at opnå et ubrugeligt ortofoto. To eksempler på ortofotos genereret i Mesh & Map kan ses på Figur 6.7.



Figur 6.7: Screen dumps af ortofotos fra Mesh & Map. Screen dump til venstre er fra scan nr. 1, og screen dump til højre er fra Scan nr. 3.

Som det kan ses er ortofoto fra scan nr. 1 ubrugeligt. Der ses nærmere på gridstørrelsen i TIN-modellen og pixelstørrelsen på objekter for de optagne oversigtsbilleder i nedenstående tabel.

Scan nr.	Gridstørrelse [mm x mm]	Pixelstørrelse på objekt [mm]
1	1 x 20	X = ca. 7,0 Y = ca. 7,6
3	40 x 20	X = ca. 7,8 Y = ca. 2,0

Tabel 6.5: Gridstørrelse og pixelstørrelse i på objekt.

Som det kan ses, er pixelstørrelsen på objektet større i den ene retning end gridstørrelsen ved det første ortofoto. Det er formentligt derfor, at ortofotoet ser mærkeligt ud, som ovenstående figur viser. Havde man valgt at optage detaljerede billeder ved scan nr. 1, havde det formentligt løst problemet.

En anden årsag kunne være, at der er stor forskel på scanningsopløsningen horisontalt og vertikalt ( $0,01^\circ \times 0,25^\circ$ ). Det vil sige, at der er langt mellem punkterne i den ene retning i forhold til den anden retning i TIN-modellen, hvilket betyder, at trekkanterne i TIN-modellen bliver meget spidse. Der er forsøgt at ændre på forholdet således, at forholdet mellem horisontal og vertikal retning bliver mindre. Det vil samtidigt sige, at forholdet mellem den omskrevne og indskrevne cirkel blive mindre – ”Aspect Ratio” Dette er nærmere beskrevet i Appendiks A. Størrelsen ”Aspect Ratio” skal være mellem 0 og 0,5 - Jo tættere på nul, jo mere spids bliver trekkanterne. Standardværdien på ”Aspect Ratio” er 0,05. Der forsøges at sætte denne værdi til 0,25, hvilket resulterer, at trekkanterne i TIN-modellen ikke er sammenhængende. Det skyldes den store forskel på scanningsopløsningen horisontalt og vertikalt. Til gengæld giver det en bedre TIN-model, hvis værdien for ”Aspect Ratio” sættes til 0,01. Flere punkter er dermed med til at bestemme TIN-

modellen, men trekkanterne bliver meget spidse og der er stadig mange huller i TIN-modellen. Der undlades at arbejde videre med værdien 0,01, da gruppen ikke har et belæg for at anvende denne størrelse.

## FORVENTET MÅLENØJAGTIGHED

Forinden der måles i ortofotoerne beregnes den forventede målenøjagtighed ved måling i billederne, således at der kan vurderes, om der er målt som forventet. Ved beregning af en forventet målenøjagtighed er der tre fejlbidrag, der har indvirkning på målenøjagtigheden.

$$(6.1) \quad \sigma_{\text{punkt}}^2 = \sigma_{DHM}^2 + \sigma_{\text{orient}}^2 + \sigma_{\text{def}}^2, \text{ hvor}$$

$\sigma_{\text{punkt}}$  er samlet punktnøjagtighed ved måling i ortofoto

$\sigma_{DHM}$  kan opsplittes i to fejlbidrag - fejlbidrag fra DHM-modellen og fejlbidrag fra radial højdeforskydning i billeder

$\sigma_{\text{orient}}$  er et fejlbidrag fra orientering af kameraet. Orientering af kameraet indeholder både den indre og den ydre orientering.

$\sigma_{\text{def}}$  er fejlbidrag fra definition af punkt i ortofoto

Udledningen af de enkelte fejlbidrag kan ses i Bilag E. I nedenstående indsættes de enkelte fejlbidrag i ovenstående formel.

$$(6.1) \quad \sigma_{\text{punkt}}^2 = \sigma_{DHM}^2 + \sigma_{\text{orient}}^2 + \sigma_{\text{def}}^2 \Leftrightarrow$$

$$\sigma_{\text{punkt}}^2 = (5 \text{ mm})^2 + (10 \text{ mm})^2 + (4 \text{ mm})^2 \Leftrightarrow, \text{ hvor}$$

$$\sigma_{\text{punkt}} = 12 \text{ mm}$$

For at vurdere, om der er målt som forventet, er afstandene i ortofotoene sammenlignet med referencens afstande. Overstående målenøjagtighed er gældende for et punkt. En forventet målenøjagtighed på en afstand må derfor være  $\sqrt{2}\sigma_{\text{punkt}}$ , hvilket giver 17 mm. Det vil sige, at en grovfejlgrænse på en afstand ved måling i et ortofotos kan beregnes til 51 mm.

I nedenstående tabel kan afvigelser mellem referencen og måling i ortofotoerne aflæses. Der henvises til Bilag J for at se output i forbindelse med måling i ortofotoet.

Skannr.	BreddeTop [mm]	BreddeBund [mm]	Højde V [mm]	Højde Ø [mm]	Diag. 1 [mm]	Diag. 2 [mm]	Grovfejlgrænse
2	3	-7	9	-33	-9	-10	±51 mm
3	-15	-33	7	-40	-34	-23	±51 mm
4	-10	-38	9	4	-1	-23	±51 mm
5	0	-15	-58	-78	-47	-51	±51 mm

Tabel 6.6: Afvigelse mellem dimensioner af tavlen jf. referencen og ortofotos.

Som det kan ses, overstiger to afvigelser grovfejlgrænsen. Afvigelser er generelt negative, hvilket indikerer, at afstande målt i ortofotoet er mindre end virkeligheden. Der er en tendens til, at det bliver sværere at måle i ortofotoet jo lavere op-

løsning, der anvendes til DHM. Det illustrerer nedenstående screen dumps i Figur 6.8.



Figur 6.8: Screen dumps fra ortofoto ved henholdsvis Scan nr. 2 og 5. Det kan ses, at det er sværere at måle i Scan nr. 5, hvor DHM er bestemt ud fra en lavere scanningsopløsning.

### 6.1.3 DELKONKLUSION

Formålet med denne test var at undersøge, hvilke betydning scanningsopløsningen har på bestemmelse af et plan. Til at svare på dette spørgsmål er der taget udgangspunkt i indmåling af en tavle. Tavlens dimensioner er beregnet dels ud fra modelleringerne af tavlens plan og dels ud fra ortofotos.

Med hensyn til modellering af planer viser det sig, at scanningsopløsning har stor betydning for et plans dimensioner. Det var forventet, at en afstand ikke vil overstige en afvigelse på mere end 2 gange gridstørrelse fra referencen. Det viser sig også at holde stik i kontrollen, kun tre afvigelser overskrider det forventede.

Måling i et ortofoto afhænger dels af pixelstørrelse, orienteringsfejl, definitionsfejl og fejl fra DHM. Med hensyn til måling af afstande i ortofotoet viser det sig, at kun to afvigelser overstiger grovfejlsgrænsen. Afvigelserne er mere tilfældige end ved den forrige metode, men alligevel er der en tendens til, at der måles dårligere jo lavere opløsning, der er anvendt til generering af en DHM.

Det har desuden vist sig, at der generelt måles bedre i et ortofoto end i en punktsky – Tabel 6.4 og Tabel 6.6 sammenlignes. Afstandene i ortofotoerne er generelt 2-3 gange bedre end i punktskyerne. I kontrollen er der anvendt oversigtsbilleder til at generere ortofotos. Hvis der i stedet var anvendt detaljerede billeder, hvor kamerakonstanten er 4 gange større, vil der kunne forventes endnu bedre målinger af afstande i ortofotoene, og det vil muligvis også betyde, at der kunne måles i ortofoto nr. 1.

## 6.2 KONTROL AF PLANER MHT. HÆLDNING

I denne test vil der blive undersøgt for indfaldsvinklens, afstanden mellem laser-scanner og objekt samt footprintets betydning ved dannelse af planer. Hvilken



indflydelse har det for modelleringsnøjagtigheden, hvis indfaldsvinklen varierer, og hvis afstanden mellem laserscanner og objekt forøges.

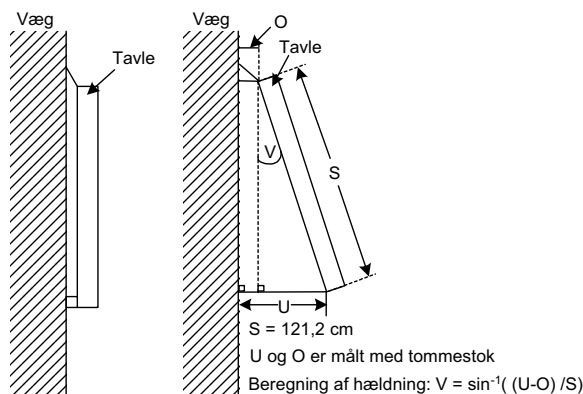
At undersøge planer mht. hældning synes relevant i forbindelse med indvendig opmåling af rum. I praktisk vil det være umuligt at opstille instrumentet således, at enkelte overflader ikke vil blive scannet ind med en spids indgangsvinkel. Det kan være skrålofter, skråvægge, vinduesnicher mv. En spids indfaldsvinkel kan betyde, at laserstrålen vil få et ovalt footprint på objektets overflade, og dermed er punktet dårligere defineret. Det kan også betyde, at noget af laserstrålen ikke returneres til laserscanneren.

### 6.2.1 OPMÅLING

Denne test bliver foretaget i forlængelse med den forgående test, og igen benyttes opslagstavlen i Fibigerstræde 11, rum 3.

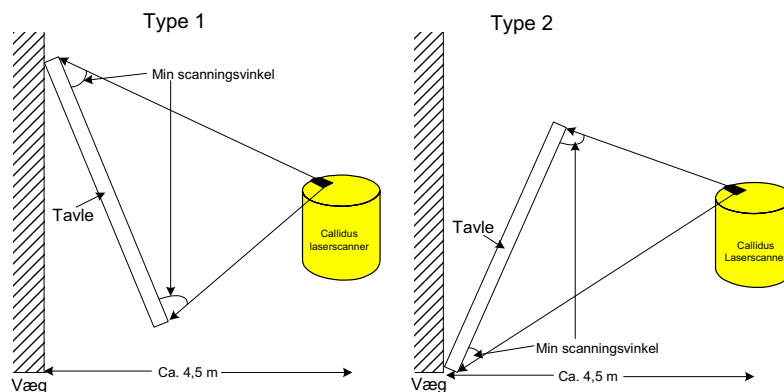
Tavlen bliver indmålt flere gange i en afstand på 4,5 meter, men denne gang med konstant scanningsopløsning på  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ . Dette svarer i normaltildet til en gridstørrelse på ca. 2,0 cm x ca. 2,0 cm. Ved efterbehandlingen er det muligt at foretage en punktreducering, således at gridstørrelsen bliver større. I princippet svarer det til, at afstanden mellem laserscanner og tavle forøges. Der bliver til denne kontrol ikke optaget billeder. Der foretages 8 scanninger med varierende vinkel mellem tavle og væg.

For at beregne en reference til hældningen af tavlen bliver afstanden mellem tavle og væg målt. Hældningen af tavlen kan derefter beregnes ud fra de målte størrelser - se nedenstående figur. Væggen er målt til at være lodret.



**Figur 6.9:** Figuren skal ses som et tværsnit af tavlen og muren. Væggen er målt til at være lodret. Figuren er ikke målfast.

Tavlen bliver vippet på to måder – se nedenstående figur. Ved type 1 hænger tavlen på væggen, mens den ved type 2 står på gulvet. Årsagen til, at tavlen vippes i begge retninger, er, at det ønskes at undersøge, om dette har en betydning for bestemmelse af modellens nøjagtighed.



**Figur 6.10: Princippet ved de to måder, hvordan tavlen bliver vippet. Figuren skal ses som et tværsnit af tavlen og væggen. Figuren er ikke målfast.**

De målte størrelser og beregnede vinkler i forbindelse med referencen kan ses i Bilag K.

## 6.2.2 DATABEHANDLING

Der arbejdes ved denne kontrol i de enkelte punktskyer, hvor et plan for den bagvedliggende væg og et plan for tavlen modelleres i programmet 3D-Extractor. Planerne vil dels blive modelleret ud fra samtlige punkter og dels efter en punktreduktion. Efterfølgende vil vinklen mellem tavle og væg i de enkelte punktskyer blive beregnet i Matlab. Denne vinkel svarer til vinkel  $V$  på Figur 6.9. Herefter kan en sammenligning af vinklen fra referencen og fra beregning i Matlab foretages.

Ydermere vil der blive beregnet indfaldsvinkler på tavlen i de enkelte punktskymodeller.

Et plan dannes i programmet ved en robust udjævning [Callidus, 2002a]. Et eksempel af resultaterne af modellering af to planer kan ses i nedenstående figur. Det er resultaterne fra scanning nr. 4. Øvrige resultater kan ses i Bilag K.

Surface	Id	Output	Deviation	Wrapping	Points
-Plane 001	001	79%	2.17 mm	5.00 mm	4048
-Plane 002	002	71%	2.25 mm	5.00 mm	20333

Figur 6.11: Resultat ved dannelse af to planer. Screen dumpet fra punktsky haeld400.

”Output” er den procentdel af punkterne, der er benyttet til beregning af planet, ud fra de udpegede punkter. Generelt er der anvendt en større procentdel til at modellere tavlen end til væggen. Det kommer for så vidt heller ikke som nogen overraskelse. Ved dannelse af et plan markeres en polygon omkring objektet - tavlen er et veldefineret objekt, mens der på væggen er udluftninger, tavler og lignede, som bliver sorteret fra under udjævningen.

”Deviation” angiver værdien for middelfvigelse i millimeter for de punkter, der er anvendt til at danne planet, dvs. spredning på vægtenheden<sup>18</sup>. I dette tilfælde er størrelserne henholdsvis 2,17 mm og 2,25 mm for tavlen og væggen.

”Wrapping-Indicator” er en toleranceværdi for den maksimale afvigelse fra et punkt til planet. Tolerancen sættes til 5 mm, da dette er den angivne forventet punktnøjagtighed jf. specifikationerne for laserscanneren Afsnit 5.5.

Den sidste kolonne ”Points” indikerer, hvor mange punkter, der i alt er benyttet til at modellere planet, hvorved der gives information om pålideligheden af planerne.

Der ønskes at bestemme dels vinklen mellem tavlen og væg og dels indfaldsvinklen.

## VINKEL MELLEM TAVLE OG VÆG

3D-Extractor giver ingen informationer vedrørende et plans ligning, og det er ikke muligt at bestemme vinklen mellem to planer i programmet 3D-Extractor.

For at bestemme vinklen mellem tavle og væg eksporteres de punkter, der udgør planerne til dxf-format. I de fleste tilfælde er der tale om fire punkter – fire hjørne-

<sup>18</sup> Gruppen går ud fra, at det er spredningen på vægtenheden.

punkter. I dxf-filerne er det muligt at indhente koordinater til punkterne. Vinklen mellem tavle og væg bestemmes ud fra kendskab til planernes normalvektor.

$$(6.2) \quad \cos V = \frac{\mathbf{n}_1 \cdot \mathbf{n}_2}{|\mathbf{n}_1| |\mathbf{n}_2|}, \text{ hvor}$$

V er vinklen mellem tavle og væg

$\mathbf{n}_1$  er normalvektor for tavlen

$\mathbf{n}_2$  er normalvektor for væggen

Normalvektoren for et plan bestemmes ud fra vektorproduktet mellem to vektorer, der ligger i planet.

$$(6.3) \quad \mathbf{n} = \overrightarrow{PR} \times \overrightarrow{PQ}, \text{ hvor}$$

$\mathbf{n}$  er normalvektor  
 $\overrightarrow{PR}$  er en vektor i planet mellem punktet P og R  
 $\overrightarrow{PQ}$  er en vektor i planet mellem punktet P og Q

De eksporterede punkter fra 3D-Extractor har allerede indgået i en robust udjævning, dvs. de eksporterede punkter ligger allerede i samme plan, hvorfor det ikke er nødvendigt at bestemme normalvektorerne ud fra udjævning.

Vinklen mellem tavle og væg beregnes ud fra gruppens matlabscript "vinkplaner.m" se i Bilag K.

Det formodes, at afvigelsen mellem referencens vinkel og vinkel beregnet ud fra matlabscriptet vil stige med forøgelse af vinklen mellem væg og tavle grundet de føromtalte footprints.

I nedenstående tabel kan vinklen mellem væg og tavle ses dels fra referencen og dels den beregnede vinkel ud fra matlabscriptet "vinkplaner.m" ses. Endvidere viser tabellen afvigelsen mellem referencens vinkel og den udregnede vinkel.

Scanningsnr	Reference [ ° ]	Beregnet [ ° ]	Afvigelse [ ° ]
Type 1			
1	0,61	0,72	-0,11
2	2,99	3,14	-0,15
3	8,25	8,38	-0,13
4	15,30	15,14	0,16
5	24,55	24,09	0,46
Type 2			
11	11,18	10,74	0,44
12	14,75	14,32	0,43
13	29,59	29,44	0,15

Tabel 6.7: Reference til hældning ved opløsning 0,25° x 0,25° og de beregnede hældninger fra matlabscriptet "vinkplaner.m". Der henvises til Bilag K for at se nærmere på udregningerne.

Udfra tabellen kan det ses, at hældningen beregnet i matlabscriptet stemmer rimeligt overens med referencen. Det kan ses, at afvigelse bliver lidt større, jo mere tavlen er vippet, hvilket også var forventet.

Men afvigelsen kan ligeså vel skyldes unøjagtigheder fra referencen som fra bestemmelsen af planerne i 3D-Extractor. At der kan være unøjagtigheder ved referencen illustrerer nedenstående. Der tager udgangspunkt i scanning nr. 5, hvor følgende er målt og beregnet.

	U [cm]	O [cm]	V [°]	Middel hældning [°]
Østside	53,3	2,7	24,676	24,546
Vestside	52,8	2,7	24,416	

**Tabel 6.8: Referencens mål og beregninger ved scanning 5. Der henvises til Figur 6.9 for at se, hvad betegnelserne U, O og V står for.**

Der kan være fejl på både måling af U og O. Målingen bliver foretaget med stålmålebånd. I nedenstående korrigeres kun på U, hvor der i alt korrigeres med 1 cm.

U [cm]	O [cm]	Vinkel [°]	Afvigelse [°]
52,8	2,7	24,416	0,000
52,7	2,7	24,365	0,052
52,6	2,7	24,313	0,104
52,5	2,7	24,261	0,156
52,4	2,7	24,209	0,207
52,3	2,7	24,157	0,259
52,2	2,7	24,105	0,311
52,1	2,7	24,054	0,363
52,0	2,7	24,002	0,415
51,9	2,7	23,950	0,466

**Tabel 6.9: Fejl på målinger til referencens vinkler.**

Det vil sige, at måles der blot 1 mm fejl på referencen, svarer det til en fejl på  $0,052^\circ$  på vinklen mellem tavle og væg. En fejl på 1 mm ved scanning nr. 1 svarer til, at afvigelsen mellem referencens vinkel og vinkel beregnet i matlabscriptet halveres/fordobles jf. Tabel 6.7. Det kan ikke udelukkes, at der er aflæsningsfejl på referencen af dels U og O i størrelsesorden på 1 mm. Der er foretaget en måling i begge sider af tavlen, hvorefter der er beregnet en middelhældning, men en fejl på 1 mm kan ikke afvises.

Da det har vist sig, at der formentlig kan være fejl på referencemålingen vil referencen ikke blive anvendt i det videre forløb.

Der er scannet med en opløsning på  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$  samt ved en kort afstand (4,5 m). Ved normaltilfældet svarer dette som tidligere omtalt til en gridstørrelse på 2,0 cm x 2,0 cm. Det vil sige, at tavlens plan er genereret udfra mange punkter, ca.

4000 punkter – se nedenstående tabel. Tabellen indeholder endvidere spredningen på vægtenheden for det modellerede plan ( $\sigma_0$ ).

Scanningsnr	Antal punkter	$\sigma_0$ [mm]
Type 2		
1	4033	2,25
2	3925	2,15
3	4047	2,17
4	4048	2,17
5	4058	2,09
Type 2		
11	3903	2,19
12	3985	2,14
13	3509	2,05

**Tabel 6.10: Antal anvendte punkter til modellering af tavlens plan. Resultaterne er hentet fra Bilag K.**

Ved type 1 hænger tavlen på væggen i højde med laserscanneren og ved type 2 ”står” tavlen på gulvet, hvilket betyder, at laserscanneren scanner ”ned” på tavlen. Det kommer specielt til udtryk ved den sidste scanning af type 2, hvor der er ca. 400 punkter færre end de to øvrige. Men trods det er tavlens plan bestemt ud fra ca. 3500 punkter. Spredningen på vægtenheden forringes ikke, jo større vinklen mellem væggen og tavlen bliver. I øvrigt har det ikke betydning for planets nøjagtighed, om tavlen hælder på ene eller den anden måde.

Det er muligt i 3D-Extractor at reducere antallet af punkter i en punktsky, når en punktsky importeres. Der vælges, at punktreducere maksimalt dvs. at hvert fjerde punkt beholdes i punktskyen. Dette svarer til, at laserscanneren er flyttet 18 m fra tavlen<sup>19</sup>, og der anvendes samme scanningsopløsning.

Ved normaltildfældet kan gridstørrelsen så beregnes til ca. 7,8 cm x 7,8 cm. Tabellen nedenstående viser beregning af vinklerne, afvigelse mellem vinklerne ved afstand mellem tavle og laserscanner på 4,5 m og 18 m, antal punkter samt spredningen på vægtenheden.

<sup>19</sup> Der vil formentlig være et større signaltab, hvis afstanden i praktisk bliver forøget til 18 m.

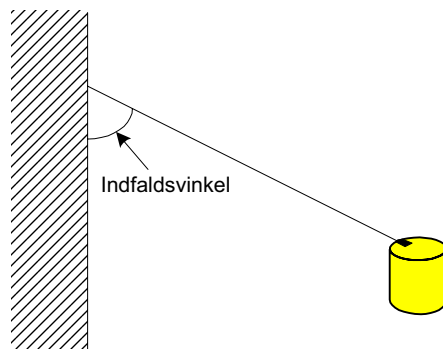
Scanningsnr	Vinkel 1 [°]	Vinkel 2 [°]	Afvigelse [°]	Antal punkter til planet	$\sigma_0 - 1$ [mm]	$\sigma_0 - 2$ [mm]
1	0,72	0,70	0,02	244	2,25	2,11
2	3,14	3,08	0,06	238	2,15	2,16
3	8,38	8,39	-0,01	245	2,17	2,08
4	15,14	15,13	-0,01	245	2,17	2,08
5	24,09	24,09	0,00	254	2,09	2,21
11	10,74	10,72	0,02	231	2,19	2,27
12	14,32	14,31	0,01	244	2,14	2,24
13	29,44	29,31	0,13	226	2,05	2,11

Tabel 6.11: Resultat af vinklen mellem tavle og væg efter punktreducering. ”Vinkel 1” er vinklen beregnet ved en afstand på 4,5 m mellem laserscanner og tavle. ”Vinkel 2” er vinklen beregnet ved en afstand på 18 m mellem laserscanner og tavle. ”Antal punkter til planet” er gældende for planet modelleret ved 18 m mellem laserscanner og tavle.

Efter punktreducering er der ca. 240 punkter til modellering af planet for tavlen, og som det kan ses, er der ikke den store forskel på ”Vinkel 1” og ”Vinkel 2”, og spredningen på vægtenheden har ikke ændret sig. At der ikke er nogen forskel, er i og for sig heller ikke så overraskende. Der skal anvendes mindst tre punkter til at danne et plan og der er efter punktreduceringen stadigvæk over 230 punkters overbestemmelser.

### INDFALDSVINKEL

Egentlig er det ikke vipning af et plan, der er relevant at se på, men derimod indfaldsvinklen. Indfaldsvinklen er defineret som vinklen mellem laserscanner og objekt – se nedenstående figur.



Figur 6.12: Indfaldsvinkel.

I denne kontrol er det indfaldsvinklen mellem tavle og laserscanneren, der er relevant. Indfaldsvinklen beregnes ud fra kendskab til normalvektoren på tavlens plan samt kendskab til retningsvektoren mellem laserscanner og et punkt på tavlen.

Normalvektoren til tavlen er kendt ud fra de tidligere beregninger af vinklen mellem væg og tavle.

En retningsvektor mellem laserscanner og et punkt på tavlen beregnes ud fra, at laserscannerens position er kendt og ud fra et punkt på planet, som tidligere er eksporteret til dxf.

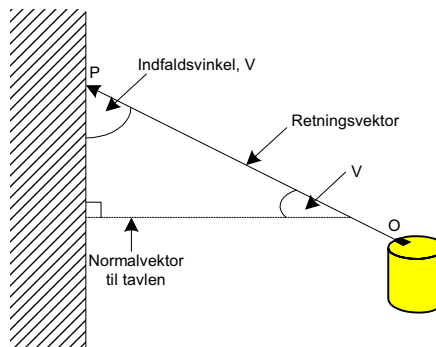
Først beregnes vinklen mellem tavlens normalvektor og retningsvektoren mellem laserscanneren og punktet på tavlen ud fra nedenstående formel.

$$(6.4) \quad \cos V = \frac{\vec{n} \cdot \vec{op}}{|\vec{n}| |\vec{op}|}, \text{ hvor}$$

$V$  er vinklen mellem tavlens normalvektor og retningsvektor mellem laserscanner og punktet, se vinklen grafisk på Figur 6.13

$\vec{n}_1$  er normalvektor for tavlen

$\vec{op}$  er retningsvektor mellem laserscanner og punkt på tavlen, se nedenstående figur



**Figur 6.13: Grafisk illustration af normalvektor til tavlen, indfaldsvinklen, retningsvektor samt vinklen  $V$ .**

For at få indfaldsvinklen skal der trækkes  $90^\circ$  fra vinkel  $V$ . Den absolutte værdi, der herved fremkommer er indfaldsvinklen mellem tavle og laserstråle.

Der er beregnet en indfaldsvinkel til alle tavlens hjørnepunkter samt tavlens midtpunkt<sup>20</sup>. I nedenstående tabel kan indfaldsvinkler ses sammen med spredning på vægtenheden gældende ved 4,5 m.

<sup>20</sup>Til hjælp af beregning af indfaldsvinklen er benyttet hjemmesiden <http://www.aalkatgym.dk/uv/MFK/RumGeometri/vinkel.htm>. 7 maj. Bemærk at indfaldsvinklen ikke er gældende ved 18 meters afstand mellem laserscanner og tavle.



Scan. [nr.]	TopVest [°]	TopØst [°]	BundVest [°]	BundØst [°]	Midtpunkt [°]	$\sigma_0$ [mm]
Type 1						
1	73.3	76.2	77.7	82,6	85.0	2.25
2	71.6	74.1	74.5	84.1	82.8	2.15
3	67.1	69.1	78.4	83.4	77.8	2.17
4	60.7	62.3	78.2	74.4	70.5	2.17
5	53.7	52.4	69.1	66.5	61.2	2.09
Type 2						
11	74.0	76.2	60.1	60.9	69.2	2.19
12	70.8	74.6	56.5	57.5	65.3	2.14
13	55.1	55.1	42.1	42.6	49.1	2.05

Tabel 6.12: Indfaldsvinkel og spredningen på vægtenheden. ”Topvest” er indfaldsvinkel i tavlens øverste hjørnepunkt mod vest, ”TopØst” er indfaldsvinkel i tavlens øverste hjørnepunkt mod øst osv.. Beregning af indfaldsvinklen er foretaget på hjemmehjemmesiden [<http://www.aalkatgym.dk/uv/MFK/RumGeometri/vinkel.htm>] ud fra normalvektoren til tavlens plan og retningsvektor fra laserscanner til punkt på planet. Der henvises til Bilag K for de nærmere beregninger.

Som det kan ses ud fra ovenstående tabel, har det ikke betydning for nøjagtigheden af et plans bestemmelse, om indfaldsvinklen varierer fra 42,1° til 85,0°.

### 6.2.3 DELKONKLUSION

Den gennemførte test har vist, at det ikke har indflydelse på et plans nøjagtighed, om indgangsvinklen er 90° eller 40°. Endvidere er det vist, at det ligeså er uden betydning på et plans nøjagtighed, om afstanden mellem laserscanner og objekt firdobles ved en scanningsopløsning på 0,25° x 0,25°.

## 6.3 KONTROL AF KOMPENSATOR

Denne kontrol har til formål at kontrollere kompensatorens funktionsområde – en undersøgelse af, om kompensatoren reelt kompenserer for de givne hældninger. Ifølge kravspecifikation kan laserscanneren kompensere en hældning på op til 10° med en nøjagtighed på  $\pm 0,025^\circ$ .

Fordelen ved, at der er indbygget en kompensator i laserscanneren, er, at Z-aksen bliver kompenseret til lodlinien. Det betyder, at der kan måles højdeforskelle i forhold til lodlinien.

Dette problem havde gruppen på 9. semester, hvor der blev arbejdet med en laserscanner af mærket Cyrax 2500 – se nærmere Bilag S. Denne laserscanner har ikke en kompensator indbygget, hvormed det ikke er muligt at orientere laserscanneren, således at den ene akse er lodlinien. Problemet blev løst ved at foretage en transformation over kendte punkter.

Viser det sig, at der er sket en vipning af XY-planet i forhold til lodlinien, vil det indikere, at instrumentet ikke har kompenseret, således at Z-aksen er sammenfal-

dende med lodlinien. Dermed vides ikke, hvordan koordinatsystemet er orienteret, og det vil være problematisk at beregne højdeforskellen i forhold til lodlinien mellem to objekter i modellen.

### 6.3.1 OPMÅLING

Testen bliver foretaget i testområdet på Langagervej 6 i rum 5.18. Laserscanneren opstilles midt i rummet, så libellen spiller ind. Laserscanneren står direkte på gulvet, hvorved det er muligt at dreje på fodskruerne<sup>21</sup>. Der foretages en scanning af rummet med en scanningsopløsning  $0,5^\circ$  i begge retninger. Efterfølgende blev laserscanneren vippet med en kendt hældning.

Som reference bliver hældningen målt med en faldmåler liggende på laserscanneren. Denne måling er et groft overslag for hældningen, idet hældningen med en faldmåler kun måles i én retning. Den målte hældning må forventes at blive mindre end den virkelige hældning, som laserscanneren er vippet med. Da referencen kun er et groft overslag for hældningen, vil nøjagtigheden af kompensatoren ikke blive kontrolleret. Der vil blive kontrolleret, om den hældning, som laserscanneren kompenserer for, stemmer rimeligt overens med referencens.

Laserscanneren bliver vippet ni gange, indtil instrumentet har en hældning ifølge faldmåleren på  $13^\circ$ , hvor fodskruerne på laserscanneren er skruet helt i bund.

Når en scanning sættes i gang begynder laserscanneren med at initialisere, hvor bl.a. temperaturen i laserscanneren, laserscannerens placering i forhold til nord (kompassdrejning) og kompensatordata bestemmes. Kompensatordataene opgives i hældninger i X- og Y-retningerne. Kompensatordataene er muligt at indhente ved den senere databehandling.

Idet, der er en libelle på faldmåleren, bliver libellen på laserscanneren kontrolleret ved samme lejlighed. Denne kontrol bliver foretaget ved første scanning, hvor libellen på laserscanneren spiller ind. Faldmåleren placeres på laserscannerens hoved, hvormed faldmålerens libelle sammenlignes med laserscannerens libelle. Laserscannerens hoved bliver drejet rundt. Det viser sig, at libellen på laserscanneren stemmer overens med faldmålerens libelle, og der er intet at bemærke, når instrumentet bliver drejet rundt. Dette er dog kun en kontrol af laserscannerens hoved, og dermed ikke en kontrol af systemet i selve laserscanneren.

### 6.3.2 DATABEHANDLING

I Tabel 6.13 kan kompensatordataene, som laserscanneren skal kompensere for samt hældningerne for referencen ses.

---

<sup>21</sup>Det er ikke muligt at dreje på fodskruerne, hvis laserscanneren står på stativet.

Scanning nr.	Reference [°]	Hældning X [°]	Hældning Y [°]	Max hældning [°]
1	0	0,17	-0,07	0,19
2	3	0,61	-3,58	3,63
3	5	0,62	-4,96	4,99
4	6	0,28	-6,30	6,31
5	7	-0,28	-7,16	7,16
6	8	-1,00	-8,38	8,44
7	10	-1,47	-9,18	9,29
8	12	-3,00	-11,73	12,11
9	13	-3,97	-13,37	13,95

**Tabel 6.13:** Referencens hældninger samt hældninger, som laserscanneren skal kompensere for i X- og Y- retning. Den maksimale hældning er den samlede hældning for X- og Y-retning. Laserscannerens hældninger er hentet i LMS-filer, se Bilag I.

Som det kan aflæses, stemmer hældningerne, som laserscanneren kompensere for, rimelig overens med referencens hældninger. Som ventet er referencen i de fleste tilfælde en anelse mindre.

Faldmåleren er anbragt på laserscanneren, men at kende til laserscannerens hældning er ikke ensbetydende med, at selve systemet i laserscanneren har samme hældning. Derfor synes det relevant at undersøge, om laserscanneren egentlig kompensere for det, den angiver, således at Z-aksen er sammenfaldende med lodlinien. Det vil sige, at der vil blive undersøgt, om laserscanneren kompensere for de hældninger, der er angivet i Tabel 6.13.

Der anvendes programmet 3D-Extractor, hvor der tages udgangspunkt i scanning nr. 1, som antages at være normaltilfældet<sup>22</sup>. De øvrige punktskyer vil blive transformeret med metoden ”Sammenknytning vha. tre planer” over i normaltilfældet.

Der bliver modelleret planer for to vægge samt gulvet i scanningerne, hvorefter de enkelte scanninger bliver transformeret over i scanning nr. 1.

I nedenstående tabel kan resultat fra de enkelte transformationer aflæses. Scanning nr. 1 fastholdes under transformationen – dvs. værdierne i tabellen indikerer, hvor meget den anden punktsky skal roteres i de tre retninger for at være sammenfaldende med normaltilfældet. En transformation i 3D-Extractor bliver angivet som  $mm./m.$  i X-, Y- og Z-retningerne, og gruppen har omregnet værdierne til grader.

<sup>22</sup> Normaltilfældet er i denne sammenhæng, hvor Z-aksen er sammenfaldende med lodlinien.

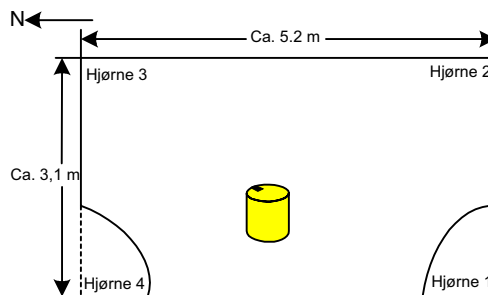
Scanningsnr [nr.-nr.]	X-retning [mm/m]	Y-retning [mm/m]	Z-retning [mm/m]	X-retning [°]	Y-retning [°]	Z-retning [°]	Reference [°]
1-2	1,1	1,1	3,0	0,06	0,06	0,07	3
1-3	1,1	1,0	1,3	0,06	0,06	0,06	5
1-4	0,1	1,1	1,2	0,01	0,06	0,07	6
1-5	0,1	1,2	1,4	0,01	0,07	0,08	7
1-6	1,6	1,1	1,4	0,09	0,06	0,08	8
1-7	1,9	1,6	1,7	0,11	0,09	0,10	10
1-8	2,1	1,4	1,7	0,12	0,08	0,10	12
1-9	2,8	1,8	2,8	0,16	0,10	0,16	13

Tabel 6.14: Resultat ved de enkelte transformationer. Der henvises til Bilag L for dokumentation.

Ud fra ovenstående tabel synes der at være en tendens til, at laserscanneren får sværere og sværere ved at kompensere til normaltildfældet, jo mere instrumentet er vippet. Dette gælder for så vidt i alle tre retninger. Det kommer specielt til udtryk ved de sidste to scanninger, hvor laserscanneren skal kompensere for 12° og 14°. Det er også acceptabelt, da kompensatorens funktionsområde er gældende til og med 10° jævnfør Afsnit 5.1.

Ud fra Tabel 6.14 er det vist, at laserscanneren kompenserer for kompensatordataene, men til at forstærke denne påstand er der yderligere beregnet højdeforskelle i punktskyerne i rummets fire hjørner – mellem hjørnepunkt top til hjørnepunkt bund. Højdeforskellene vil blive sammenlignet med kontrolmålene, der er foretaget med Leica Disto – henvis til Bilag O. Højdeforskellene vil også blive sammenlignet punktskyerne imellem.

På nedenstående figur kan nummereringen af hjørnepunkter ses samt laserscannerens placering i rummet.



Figur 6.14: Nummerering af hjørnerne samt laserscannerens placering. Figuren er ikke målfast.

Ved modellering af rummet vælges det, at planerne til gulvet, væggene og loftet skal beskære hinanden, således at rummet kommer til at udgøre en lukket prismemodel. Punktnøjagtigheden for et indscannet punkt er 5 mm, hvorfor en forventet nøjagtighed på en højdeforskel kan beregnes til  $\sqrt{2}\sigma_p$  hvilket vil sige 7,1 mm. Dette

giver en grovfejlsgrænse for afvigelse mellem en højdeforskel beregnet i 3D-Extractor og en højdeforskel jf. kontrolmåling på ca. 21 mm.

I nedenstående tabel kan afvigelser mellem højdeforskellene beregnet i modellerne og målt jf. kontrolmåling ses. Reference til kontrolmålene kan ses i Bilag O..

Scan nr.	Hjørne 1 [mm]	Hjørne 2 [mm]	Hjørne 3 [mm]	Hjørne 4 [mm]
1	19,8	5,4	17,0	8,8
2	19,2	6,5	16,0	8,7
3	18,7	6,1	18,5	12,1
4	20,0	2,7	16,7	17,9
5	19,3	5,0	14,9	15,1
6	18,4	5,3	15,1	17,7
7	17,8	6,0	14,3	17,6
8	18,1	3,3	13,6	17,7
9	18,0	3,7	11,2	22,9

**Tabel 6.15: Højdeafvigelser mellem rummets højder bestemt ved kontrolmål og måling i model. Beregningerne kan ses i Bilag L.**

Alle højdeforskelle, som er beregnet i modellerne, er mindre end referencens. Kun en enkel afvigelse overstiger grovfejlsgrænsen. Denne er på 22,9 mm og findes i scanning nr. 9, hvor tavlens hældning er størst.

Der er derimod ikke store afvigelser mellem højdeforskellene beregnet i punktskyerne. Tabellen nedenstående viser den maksimale afvigelse mellem punktskyerne ud fra Tabel 6.15.

Hjørne	Max afvigelse [mm]
1	2,2
2	3,8
3	7,3
4	14,1

**Tabel 6.16: Den maksimale afvigelse for højdeforskelle mellem punktskyerne.**

Det tyder på, at laserscanneren kompenserer til den samme reference hver gang. Men om denne reference netop er lodlinien, har ovenstående beregninger ikke vist.

For at undersøge om det netop er lodlinien, Z-aksen kompenseres til, er det nødvendigt at scanne nogle objekter, hvis planer er lodrette f.eks. vægge. Væggene i rum 5.18 er undersøgt, for om de er lodrette, hvilket viser sig at være tilfældet.

Ved kendskab til en vægs normalvektor samt enhedsvektoren til Z-aksen kan et skalarprodukt mellem de to vektorer beregnes. Viser det sig, at skalarproduktet er nær nul, betyder det, at væggenes normalvektor er tilnærmelsesvis vinkelret på Z-aksen. Dette er ensbetydende med, at væggenes plan og Z-aksen er parallelle. Er dette tilfældet, kan det konkluderes, at laserscanneren kompenserer Z-aksen til lodlinien. Beregningerne er foretaget med matlabsriptet ”normal.m” – kildekoden

kan ses i Bilag L. Beregning af skalarproduktet kan ses i nedenstående tabel. Der er foretaget en beregning for de fire vægge i rum 5.18 i alle ni punktskyer.

Scan nr.	Sydvæg	Nordvæg	Vestvæg	Østvæg
1	-0.05018	0.03716	0.03558	-0.01787
2	0.05314	0.03873	0.01302	-0.03199
3	0.05193	0.02979	0.00778	-0.03788
4	0.05161	0.03002	0.00043	-0.04479
5	0.05424	0.03106	-0.00438	-0.05515
6	0.05246	0.03001	-0.01740	-0.05736
7	0.05698	0.02880	-0.02405	-0.07865
8	0.05876	0.01006	-0.03841	-0.06825
9	0.06754	0.00768	-0.04070	-0.07291

**Tabel 6.17:** Skalarprodukt mellem normalvektor for væggs plan og enhedsvektor for Z-aksen. Er skalarproduktet nær nul, er Z-aksen i laserscanneren sammenfaldende med lodlinien. Der henvis til Bilag L for dokumentation af de beregnede skalarprodukt.

Som det kan ses af Tabel 6.17 er skalarproduktet nær nul, hvormed væggenes normalvektor tilnærmelsesvis er vinkelret på Z-aksen. Det kan dermed vurderes, at laserscanneren kompenserer Z-aksen til lodlinien.

### 6.3.3 DELKONKLUSION

Formålet med denne test var at undersøge kompensatorens funktionsområde. Ud fra Tabel 6.13 kan der ses, at kompensatordataene er forholdsvis ens med referencens hældningerne.

Om laserscanneren reelt kompenserer for kompensatordataene er efterfølgende kontrolleret ved dels at foretage transformation af scanningerne over i scanning nr. 1 og dels ved at kontrollere højdeforskelle i de enkelte punktskyer. Ved transformationerne viser det sig, at laserscanneren får sværere og sværere ved at kompensere for kompensatordataene, jo mere laserscanneren er vippet. Men den vinkel, som punktskyerne skal drejes med for at være sammenfaldende med scanning nr. 1, er nær  $0^\circ$  – hvorfor gruppen mener, at laserscanneren kompenserer Z-aksen til den samme reference hver gang. Til at forstærke dette argument er der beregnet højdeforskelle i punktskyerne. Ved sammenligning af højdeforskelle i punktskyerne viser det sig, at afvigelserne er på millimeterniveau, hvilket er med til at forstærke antagelserne om, at laserscanneren kompenserer Z-aksen til sammen reference.

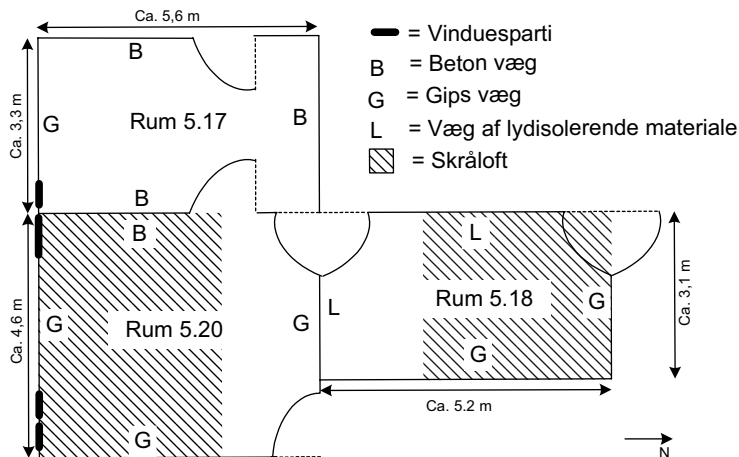
For at få kontrolleret om laserscanneren kompenserer til lodlinien, er der beregnet skalarproduktet mellem væggenes normalvektorer og enhedsvektoren for Z-aksen. Det er vist, at laserscanneren kompenserer Z-aksen til lodlinien. Det betyder, at de højdeforskelle, der beregnes i de enkelte punktskyer, er i forhold til lodlinien.

# 7 TESTOMRÅDET LANGAGERVEJ 6

I dette kapitel vil testområde, Langagervej 6 blive beskrevet. Efterfølgende vil der være en beskrivelse af, hvorledes opmålingen har fundet sted. Selve modellering af punktskyerne og vurderingerne vil blive foretaget i det efterfølgende kapitel.

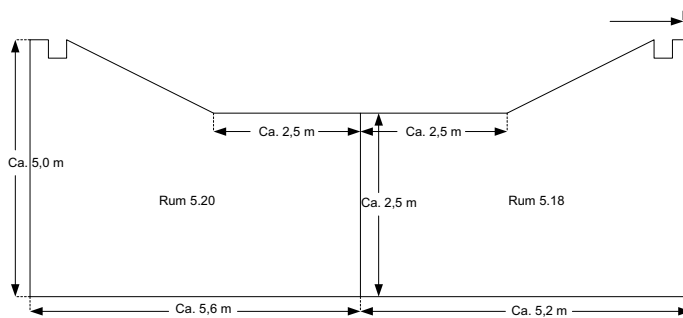
## 7.1 BESKRIVELSE AF TESTOMRÅDET

Testområdet består af tre sammenhængende rum på Langagervej 6, der kan side-stilles med en mindre lejlighed, der skal byfornyes. Bygningen er tømt for alt inventar i forbindelse med, at Universitetet fraflyttede stedet. Det kan minde om en virkelig situation i forbindelse med byfornyelse - dog mangler komplekse rum såsom badeværelse og køkken. En skitse af rummene kan ses nedenstående.



Figur 7.1: Testområdet på Langagervej 6. Foruden vinduespartierne, der er markeret på figuren, er der endvidere et stort glasparti i endevæggen mod nord i rum 5.18 og mod syd i rum 5.20 i væg-gens øverste del – se vinduesparti på Figur 7.5.

Et tværsnit af rum 5.20 og rum 5.18 kan ses nedenstående.



Figur 7.2: Tværsnit af rum 5.18 og 5.20. Skitsen er ikke målfast.

Væggens materiale består enten af gips, beton eller lydisolerende materiale jf. Figur 7.3. Det kan formodes, at det er vanskeligt at bestemme planer for de to vægge, der er beklædt med lydisolerende materiale. Det skyldes, at det lydisolerende materiale er fyldt med små huller, der muligvis kan medføre støj i forbindelse med modelleringen.



Figur 7.3: Til venstre ses et eksempel på en gipsvæg, i midten en betolvæg og til højre en væg med lydisolerende materiale.

Gulvene i alle tre rum er belagt med linoleum. På væggene forefindes forskellige objekter.

Objekttype	Forefindes i følgende rum
Stikkontakt	Alle rum
Telefonstik	Alle rum
Tv/antennestik	Alle rum
LAN-stik	Alle rum
Radiator	Rum 5.17 og 5.20
Blå plade foran radiator	Rum 5.18 og 5.20
Skab	Rum 5.17
Knagerække	Rum 5.17
Ventilationskanal	Alle rum

Tabel 7.1: Objekttyper i testområdet.

Nogle af de forskellige objekttyper kan ses i de følgende figurer.



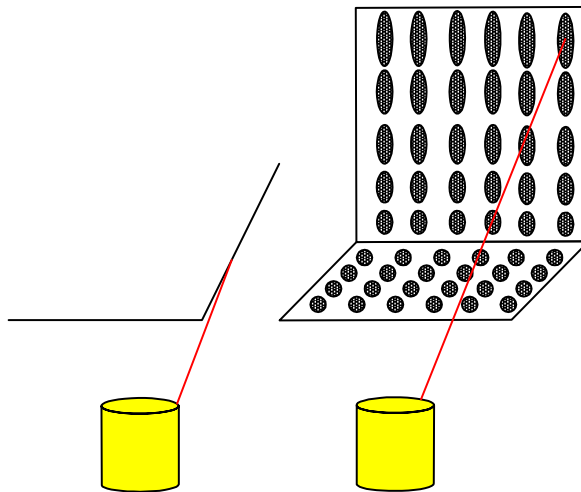
Figur 7.4: Billedet til venstre er nordvæggen i rum 5.18, hvor en blå plade foran en radiator kan ses. Billedet til højre viser nordvæggen i rum 5.17 med skabet.





Figur 7.5: Billedet til venstre viser rum 5.17, hvor en radiator, en ventilationskanal og en knagerække på sydvæggen kan ses. Billedet til højre viser rum 5.20, hvor vinduespartiet i sydvæggen kan ses samt en blå plade foran radiator.

Som tidligere nævnt er der i rum 5.18 og rum 5.20 skrålofter. Dette bør tages med i betragtningerne vedrørende placering af laserscanneren, da en ”forkert” placering af laserscanneren kan betyde, at en del af loftet ikke bliver indmålt, eller at der opstår ovale footprints pga. spidse indfaldsvinkler - se Figur 7.6.



Figur 7.6: Til venstre ses laserscanneren stående under det plane loft og en laserstråle, der rammer skråloftet med en relativ spids indfaldsvinkel. Resultatet ved en spids indfaldsvinkel på skråloftet vil være store ovale footprints, se til højre. Til højre er det nederste plan det plane loft, mens det øverste plan er skråloftet.

Dørene mellem rummene er taget ned for at undgå skygger fra dørene. Gardinerne er ligeledes blevet taget ned for at undgå skygger, dog er gardinerne i de store vinduer foroven ikke taget ned. I Bilag R kan der ses flere billeder fra testområdet.

## 7.2 OPMÅLING

I dette afsnit vil den foretagne opmåling blive beskrevet, det være sig dels med laserscanneren og med totalstationen.

Før opmålingen er det vigtigt at overveje placeringen af laserscanneren, jf. ovenstående afsnit. Samtidig skal man have for øje, at rummene skal sammenknyttes. Som tidligere omtalt er der fire metoder til at knytte punktskyer sammen. Den ene metode ”Sammenknytning vha. visual adjustment”, er kun en visuelt sammenknytning, og vil derfor ikke blive betegnet som en decideret metode. Der henvises til Afsnit 9.2 for nærmere beskrivelse af de fire metoder.

Anvendes ”Sammenknytning vha. Fuzzy Join” til sammenknytning af punktskyer skal min. 20% overlap mellem punktskyerne, der ønskes sammenknyttet. Endvidere bør der være god struktur i fællesområdet. Disse krav stilles for at opnå en vis pålidelighed af sammenknytningen.

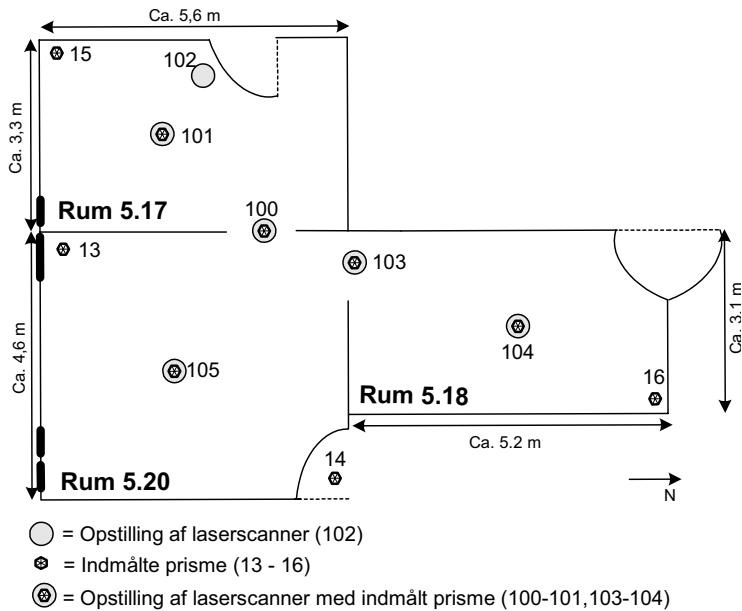
Anvendes metoden ”Sammenknytning vha. tre planer”, skal punktskyerne have min. tre veldefinerede planer tilfælles, hvoraf et skal være tilnærmelsesvis horisontalt.

Anvendes derimod metoden ”Sammenknytning vha. global transformation” til sammenknytning af punktskyer, er det nødvendigt, at der ved scanningen bliver scannet prismer ind. Prismerne har til formål at fungere som transformationspunkter.

[Callidus, 2002a]

Gruppen har i sinde at arbejde med alle tre metoder til sammenknytning af punktskyer.

På figuren nedenstående kan opstillingen af prismerne, som skal fungere som sammenknytningspunkter, samt laserscannerens opstillinger ses.



Figur 7.7: Opstilling af prismer og laserscanneren i testområdet på Langagervej 6.

Prismerne bliver ligeledes indmålt med totalstation. Indmålingen af prismerne er foretaget fra frie opstilliner. De frie opstillinger er knyttet op på et lokalt net. Der henvises til Bilag C omkring nærmere indmåling af prismerne og etablering af det lokale net. Figuren nedenstående viser laserscanneren med et prisme monteret.



Figur 7.8: Laserscanner med prisme monteret. [www.trimblecenter.dk]

Der er ikke påsat et prisme på laserscanneren i opstilling nr. 102. Det vil sige, at opstilling 102 skal sammenknyttes med metoderne "Sammenknytning vha. Fuzzy Join" eller "Sammenknytning vha. tre planer".

De to opstillinger placeret i døråbningerne har til formål at sammenknytte rummene. En af opstillingerne kunne eventuelt undværes, men i gruppens situation, hvor det ikke er muligt at genlåne udstyret, synes det at være bedre at scanne en gang for meget end en gang for lidt.

I rummene er der anvendt forskellige scanningsopløsninger og billedokumentationer. Dette kan ses i nedenstående tabel.

Scanningsnr.	Laserscannerens opstilling jf. Figur 7.7	Scanningsopløsning [hor x ver]	Billeddokumentation	Scanningstid [min]
Sk20-100	105	0,125° x 0,25°	Detaljerede og oversigtsbilleder	47
Sk20-200	100	0,125° x 0,25°	Detaljerede og oversigtsbilleder	38
Sk17-300	101	0,25° x 0,25°	Oversigtsbilleder	20
Sk17-400	102	0,25° x 0,25°	Oversigtsbilleder	11
Sk18-500	103	0,25° x 0,25°	Oversigtsbilleder	15
Sk18-600	104	0,25° x 0,25°	Oversigtsbilleder	17

**Tabel 7.2: Scanningsopløsning, billedokumentation og scanningstid. Scanningstiden er kort ved Sk17-400 grundet, at der ikke bliver indmålt prismen.**

De to første scanninger i rum 5.20 er optaget med en relativ høj scanningsopløsning og med detaljerede billeder. Af tidsmæssige årsager var det nødvendigt at sætte scanningsopløsningen ned og optage oversigtsbilleder i de resterende rum.

# 8 MODELLERING AF OBJEKTER I TESTOMRÅDET

I dette afsnit vil der blive gennemgået, hvorledes objekter er modelleret i testområdet. Herunder vil de problemer, der har været undervejs blive klarlagt, og løsningerne vil blive gennemgået.

Til modellering af testområdet anvendes programmet 3D-Extractor, hvor der bl.a. kan dannes cylindre, planer, kegler mv. Væggene og andre objekters overflader i testområdet bliver modelleret som planer. Planer bliver bestemt ud fra en robust udjævning. Modellering af en overflade herunder planer, kan foretages ud fra to måder:

1. Frie kanter
2. Defineret kanter

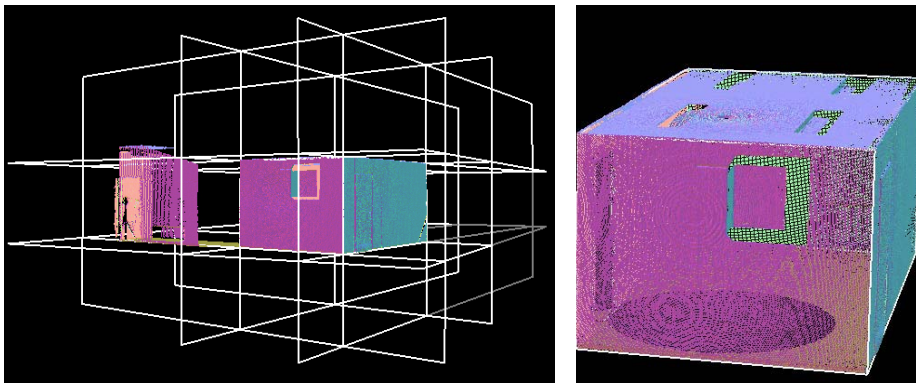
## 1 - Frie kanter

Når planer modelleres ud fra frie kanter vil planerne skære hinanden automatisk. Planernes dimensioner vil blive uendelige store. Denne måde at modellere planer på er især velegnet til regulære rum som f.eks. rum 5.17.

Ved irregulære rum, som f.eks. rum 5.18 og 5.20, hvor der er skrålofter, er det nødvendigt at angive, hvilke planer der skal skære hinanden.

Efterfølgende er det muligt at beskære planerne, således at de danner en lukket prismemodell.

På nedenstående figur kan det ses, hvordan forskellige planer, modelleret ud fra frie kanter, skærer hinanden samt hvordan planerne danner en prismemodell efter, de er beskåret



Figur 8.1: Til venstre vises, hvordan planer skærer hinanden, når planer modelleres ud fra frie kanter. Til højre ses planerne efter, de er tilskåret. Som det kan ses ligner figuren til højre en lukket prismemodell. Eksemplet er fra rum 5.17.

Overflader for rummenes vægge, gulve og lofter bliver modelleret ud fra frie kanter. Disse overflader vil i det videre forløb blive omtalt som rummenes dimensioner.

## 2 - Defineret kanter

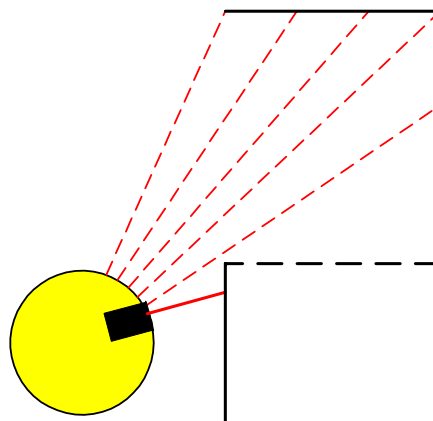
Når et objekts overflade modelleres ud fra definerede kanter, vælges de punkter, som udgør overfladen. Dette gøres ved at tegne en omfangspolygon omkring de punkter, der ønskes anvendt til modellering af objektets overflade.

Metoden er specielt velegnet til objekter, der har velafgrænsede kanter og til objekter, som er sammenfaldende med en bagvedliggende væg. I testområdet er objekter såsom stikkontakter, vinduesnicher, døre og skabe modelleret ud fra definerede kanter.

## 8.1 PROBLEMOMRÅDER VED MODELLERING AF TESTOMRÅDET

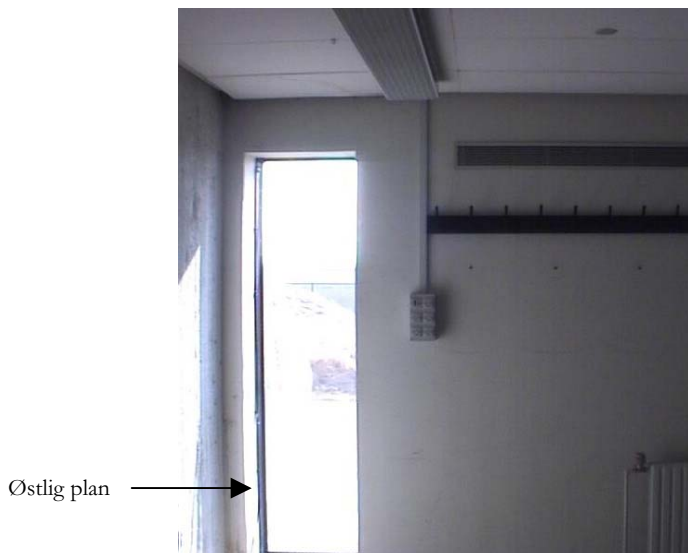
### *Skygge og indfaldsvinkel*

Selv om gruppen har forsøgt at opstille laserscanneren, således at antallet af blinde områder er minimale, vil der altid være skygger og områder, der bliver scannet ind med en relativ spids indfaldsvinkel. Nedenstående figur viser en situation, hvor det er svært at modellere grundet blinde områder.



Figur 8.2: Eksempel på, at der ikke kan dannes pga. skygger. Eksemplet skal illustrere en vinduesniche.

I kontrollen mht. kontrol af et plans hældning, jf. Afsnit 6.2.2 blev det vist, at nøjagtigheden af et plan ikke forringes ved en indfaldsvinkel på ned til  $40^\circ$  ved den anvendte scanningsopløsning. Nogle objekter i testområdet bliver indmålt med en indfaldsvinkel under  $40^\circ$ . Det gør sig specielt gældende ved vinduesnicher. I nedenstående figur er to planer i vinduesnichen bestemt med relative spidse indfaldsvinkler (østplanet og planet over vinduet) og det tredje plan (vestplanet) kan ikke bestemmes pga. et blindt område.



**Figur 8.3:** Rum 5.17 - Den østlige plan og planet over vinduet i vinduesnichen bliver bestemt ud fra relative spidse indfaldsvinkler. Planet mod vest i vinduesnichen er ikke muligt at bestemme. Billedet er optaget af laserscannerens kamera.

Netop dette plan er et af de planer, der er scannet ind med spidse indfaldsvinkler. Det vil sige, at beregning af indfaldsvinkler på dette plan giver et indblik af, hvor små indfaldsvinkler, der er anvendt i testområdet.

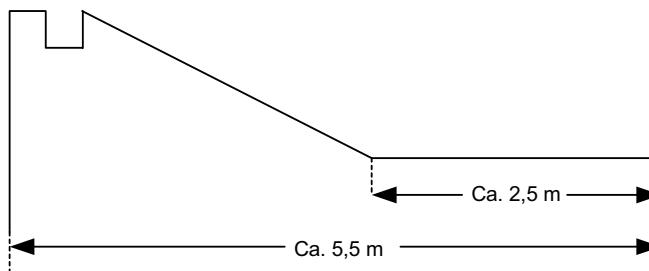
Der beregnes indfaldsvinkler på det østlige plan i vinduesnichen ud fra kendskabet til normalvektoren til planet og retningsvektoren mellem et punkt på planet og laserscanneren. Hvordan selve beregningen foretages, er beskrevet nærmere i Af-snit 6.2.2. Der er beregnet indfaldsvinkler for planets hjørnepunkter samt planets midtpunkt, hvor det viser sig, at indfaldsvinklen varierer fra  $15^\circ$  til  $18^\circ$ .

At nogle planer bestemmes ud fra spidse indfaldsvinkel bliver i nogle tilfælde kompenseret ved, at objektet indmåles fra to opstillinger. I andre tilfælde har gruppen vurderet, at objektets nøjagtighed ikke har stor betydning, og i nogle tilfælde igen er det simpelthen ikke muligt at udgå spidse indfaldsvinkler.<sup>23</sup>

#### *Definition af skråloft*

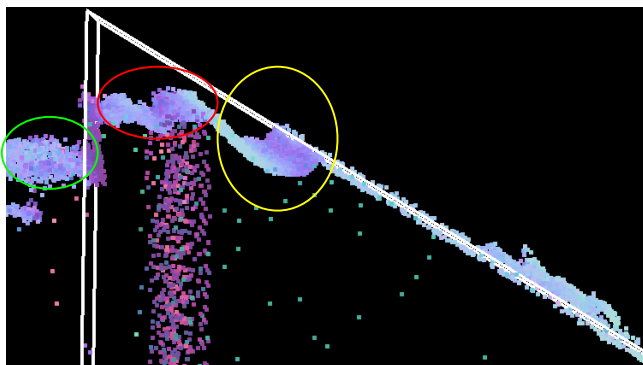
I rum 5.18 og 20 er der som tidligere nævnt skrålofter. I virkeligheden ser lofterne ud som nedenstående figur.

<sup>23</sup> Der kunne også vælges at foretage supplerende målinger med stålmålebånd eller ved at indmåle min. tre punkter på planet med totalstation i forbindelse med indmålingen af prismer, således at planets ligning kan bestemmes. Ved den efterfølgende databehandling i AutoCad kan de supplerende målinger tilføjes i modellen.



Figur 8.4: Tværsnit af loftets virkelige udseende i rum 5.18 og 5.20. Figur er ikke målfast.

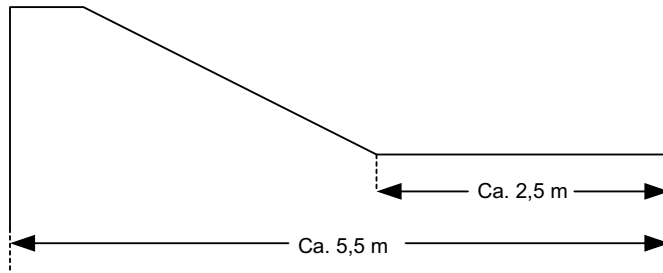
Som det kan ses, går skråloftet ikke helt ud til endevæggen, men der er en ”tap” efterfulgt af et plant loftstykke. I første omgang vælges at modellere skråloftet som nedenstående figur. De hvide streger er modellering af loftet og endevæggen.



Figur 8.5: Tværsnit af skråloft og endevæg - Første forsøg på modellering af skråloftet. De hvide streger indikerer modelleringen af skråloftet og endevæggen. De lyserøde punkter er gardiner. Den grønne ring er støj udenfor vinduet, den røde ring er punkter for det reelle plane loft og den gule ring er punkter for ”tappen”, som er vist på Figur 8.4. Det kan ses, at modellens endevæg bliver for høj i forhold til virkeligheden.

Det viser sig, at højden af endevæggen bliver målt med en fejl på 5-10 cm, når skråloftet bliver modelleret som ovenstående. Gruppen forsøger at danne det lille plane loftstykke med held. ”Tappen” på Figur 8.4 bliver ikke modelleret, da der er for få punkter til at generere denne. Det vil sige, at loftet bliver modelleret som nedenstående figur.





Figur 8.6: Den endelige modellering af loftet. "Tappen" på Figur 8.4 bliver ikke modelleret, da der er for få punkter.

#### Loftvinduer i rum 5.18 og 5.20

Et andet problemområde, som gruppen på forhånd er opmærksom på, er modellering af loftvinduerne i rum 5.18 og 20. Loftvinduet i rum 5.18 kan ses på nedenstående figur.



Figur 8.7: Billede fra rum 5.18 på Langagervej 6. Billedet indikerer problemerne med at modellere loftvinduerne - støj udenfor vinduet og skygger fra gardinerne og pladen under vinduet.

Problemerne skyldes dels, at man ikke har kontrol med laserstrålernes retursignal – nogle signaler returneres korrekt tilbage, andre reflekteres på objekter bagved glaspartiet, hvilket giver et fejlagtigt punkt, og andre igen returnerer aldrig tilbage til laserscanneren. Desuden bliver vindueskarmene skygget henholdsvis af en blå plade i bunden og af gardiner i siderne.

Vinduespartierne i rum 5.18 og 5.20 er derfor ikke modelleret i punktskyer – de udgør et plan sammen med væggen. I rum 5.20 adskiller et vægstykke vinduespartiet i to. Det har været muligt at modellere vægstykket - dog er højden af vægstykket usikkert pga. skygge fra den blå plade.

*Sorte overflader*

Der har været problemer med at danne planer for sorte overflader eksempelvis døre og vindueskarme. Sorte overflader absorberer laserstrålen, således at et svagt signal returneres til laserscanneren. Hvis den sorte overflade dertil er scannet med en spids indfaldsvinkel, er det kun begrænset, hvad der returneres til laserscanneren. Blandt andet på døren i rum 5.17 kommer dette til udtryk - der er stort set kun punkter på døren, hvor der er klistermærke og metal. Situationen kan ses i nedenstående figur.

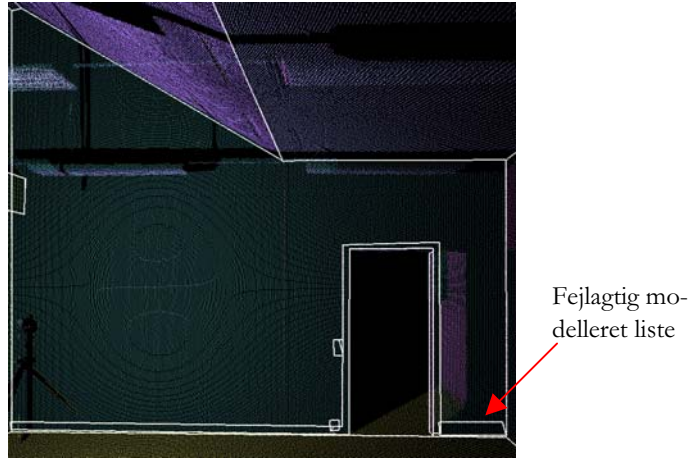


Figur 8.8: Screen dump fra 3D-Extractor, som viser en dør i rum 5.17. Omkring døren (det gule område) er der mange punkter, men på dørens overflade (det sorte område) er der forholdsvis få punkter. På dørens overflade er der cirka 350 punkter og ved et lignede udsnit arealmæssig af væggen overflade til venstre, er der ca. 35000 punkter.

*Lister*

I Afsnit 4.1 er lister blandt de objekter, der ønskes modelleret, men det har vist sig at være vanskeligt. Det er ikke et problem at danne et plan for listerne – problemet består i, at der er besværligt at definere planets kanter. Der er ofte for få punkter på en liste til at beskrive listens forløb, hvorfor det er nødvendigt at bestemme listens forløb ved manuel udpegning i punktskyen. Det er dels meget tidskrævende og ikke specielt præcist. Tolerancen<sup>24</sup> for en listes plan er forsøgt sat op til 10-15 mm for på denne måde at få flere punkter til modellering af listen. Det betyder til gengæld, at der anvendes punkter fra den bagvedliggende væg til modellering af listen. Et forsøg på at generere lister i rum 5.20 kan ses på Figur 8.9, hvor en fodliste er modelleret for stor. Da, det ikke er muligt at modellere fodlister med tilfredsstillende nøjagtighed, er dette udeladt.

<sup>24</sup> Maksimalt afstand for punkter, der er med til at bestemme planet (Wrapping-Indicator.)



Figur 8.9: Modellering af lister. De hvide streger indikerer modellering af kanter herunder lister. Til højre for døren er fodlisten modelleret fejlagtigt, da punkter fra væggen indgår i modelleringen.

### Tolerancer

Der er anvendt forskellige tolerancer til at danne objekter. De anvendte tolerancer er valgt ud fra gruppens vurdering af objektets definitionsnøjagtighed og ”vigtigheden” af objektet. I Tabel 8.1 kan de anvendte tolerancer ses.

Objekt	Tolerancer [mm]
Stikkontakter	15
Vægge, loft og gulve	5
Radiatorer	10
Døråbninger	10
Døre	10
Skab	10
Blå plade	5
Andre objekter <sup>25</sup>	10

Tabel 8.1: Modellerede objekter og deres maksimale tolerancer.

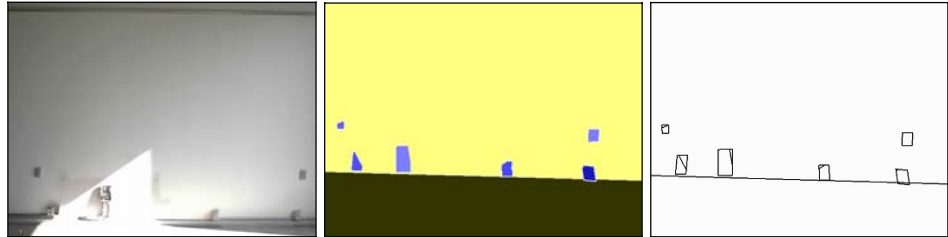
Som det ses ud fra tabellen, er der anvendt en lav tolerance til modellering af rummenes dimensioner, da vægge, gulve og lofter er objekter, som ønskes modelleret med en god nøjagtighed. Der er anvendt samme tolerance til dannelsen af de blå plader, da disse objekter er store og relative velafgrænsede objekter, der er let genkendeligt i punktskyen.

### Stikkontakt

Stikkontakter er de eneste objekter, hvortil der er anvendt en tolerance på 15 mm ved modelleringen. Det skyldes, at det ganske enkelt ikke er muligt at danne dem

<sup>25</sup> Det være sig elskabe, ledningsbokse, vindueskarme mv.

med mindre tolerance<sup>26</sup>. Der er for få punkter til at beskrive planet – størrelsen og hældningen af stikkontakterne er egentlig tilfældig alt efter, hvor mange punkter der er på planet, og hvor punkterne befinder sig på stikkontakten. Se eksemplet på Figur 8.10, hvor det kan ses, at modelleringen af stikkontakterne er misdannet.

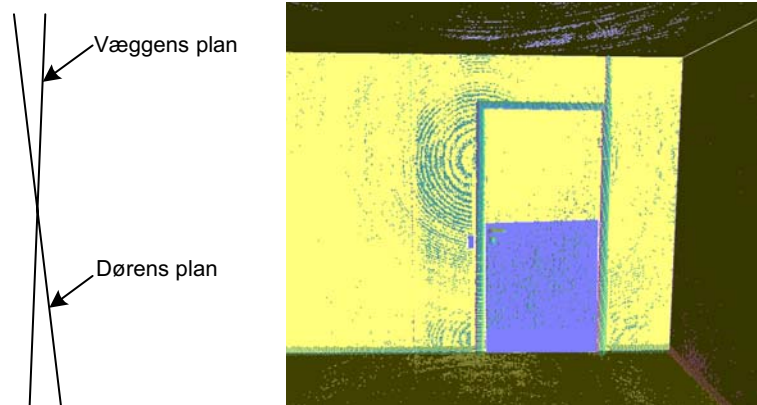


Figur 8.10: Modellering af stikkontakterne på østvæggen i rum 5.20. Til venstre ses et foto af væggen, i midten ses væggen og stikkontakterne som planer, og til højre ses væggen som en trådmodel. Det kan ses, stikkontakternes planer er misdannede.

Som det kan ses, er der problemer med at afgrænse mindre planers dimensioner. En løsning til dette kan være at måle mindre objekter såsom stikkontakter i ortofotos. En anden løsning kunne være at tildele et objekt en attributværdi/kode, som samme med modellen kan eksporteres til andet egnet software.

#### *Objekter sammenfaldende med et bagvedliggende objekt*

Ved modellering af en dør, er dørens overflade stort set sammenfaldende med væggenes overflade. Det kan betyde, at planet for døren kan beskære væggenes plan – se princippet i nedenstående figur.



Figur 8.11: Til højre vises et udsnit af en punktsky i rum 5.17. Det gule plan indikerer væggen, mens det blå plan er på døren. Yderligere er der punkter, der er frasorteret ved udjævningen af planerne til døren og væggen. Døren beskærer væggen, således at kun den nederste del af døren er synlig fra denne vinkel. Den øvre del af døren ligger bag væggen. Til venstre ses et tværsnit af, hvordan væggenes plan og dørens plan beskærer hinanden.

<sup>26</sup> Det er forsøgt at danne stikkontakter med tolerancer på 5 og 10 mm, hvilket ikke er muligt.

Programmet opfatter døren som to objekter, hvis den beskærer væggen. Hvis der vælges at sammenknytte dørens to objekter til et objekt, vil objektet for væggens overflade forsvinde. Det er ikke ønsket.

Gruppen har valgt at lade døren bestå af to objekter, da væggens plan ikke kan undværes. Ved en senere efterbehandling af modellen i AutoCad, kan dette editeres. Princippet gælder for alle objekter, der er sammenfaldende med en væg f.eks. stikkontakter og udluftningskanaler.



# 9 VURDERING AF MODELLERING AF PUNKTSKYMODELLER

Det synes på nuværende tidspunkt relevant at fremhæve, hvordan punktskyerne bliver modelleret, og herunder hvordan vurderingen af punktskymodellerne vil blive foretaget.

Der ønskes at undersøge nøjagtigheden af måling i punktskyer mht.

1. Relativ nøjagtighed
2. Absolut nøjagtighed

## AD 1 - RELATIV NØJAGTIGHED – ENKELTE PUNKTSKYER

Det ønskes at kontrollere den relative nøjagtighed, dvs. måling i punktskymodeller modelleret ud fra én punktsky, som ikke er fejlbehæftet af ydre påvirkninger – f.eks. fejl i forbindelse med transformation af punktskyer. Der er modelleret en punktsky i hvert rum. Følgende punktskyer er modelleret.

Punktskyer
Skan20-100
Skan18-600
Skan17-300

Tabel 9.1: Anvendte punktskyer til vurdering af den relative nøjagtighed.

## AD 2 - ABSOLUTE NØJAGTIGHED – FLERE PUNKTSKYER

Ofte er det nødvendigt at foretage flere scanninger og siden sammenknytte dem for at kunne dække hele det ønskede område. Det gør sig også gældende ved indvendig opmåling af rum, hvis rum ønskes knyttet sammen til en samlet model. Som tidligere omtalt kan programmet 3D-Extractor sammenknytte punktskyer ud fra fire metoder jf. Afsnit 5.6. Tre af metoderne vil blive undersøgt – det være sig følgende;

- Sammenknytning vha. Fuzzy Join
- Sammenknytning vha. tre planer
- Sammenknytning vha. global transformation

Den fjerde metode ”Sammenknytning vha. visual adjustment” vil blive anvendt som en slags forarbejde til metoden ”Sammenknytning vha. Fuzzy Join”.

De tre metoder vil enkeltvis blive anvendt på testområdet, og der vil blive undersøgt med hvilken nøjagtighed, det er muligt at måle i de samlede punktskymodeller – absolut nøjagtighed. I de samlede punktskyer er alle seks punktskyer sammenknyttet.

Vurdering af den relative og absolutte nøjagtighed vil blive foretaget ud fra en sammenligning af afstande målt i punktskyen og kontrolafstande foretaget med en Disto jf. Bilag O. Der antages, at kontrolafstandene ikke er fejlbehæftede – hvilket også synes rimeligt, da kontrolafstandene er bestemt med en spredning på ca. 1 mm jf. Bilag D.

## 9.1 MODELLERING I ENKELTE PUNKTSKYER - RELATIV NØJAGTIGHED

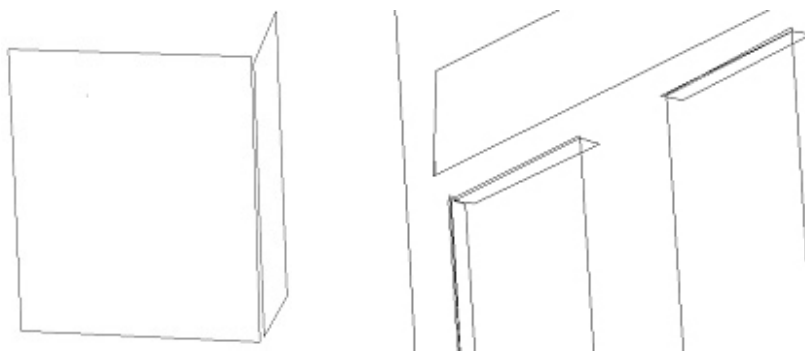
Der er foretaget tre modelleringer, en model i hvert rum. De anvendte punktskyer kan ses i Tabel 9.1.

Rummenes dimensioner er modelleret ud fra frie kanter.

Andre objekter som stikkontakter, udluftningskanaler, vinduesnicher, døre mv. er modelleret ud fra definerede kanter, hvor der manuelt udpeges en omfangspolygon omkring objektet

Når alle objekter er modelleret importeres modellen til AutoCad, hvor afstande beregnes.

Inden beregning af afstande foretages en ”finpudsning” af modellerne i AutoCad. Det skyldes, at planer, der danner et objekt eksempelvis skabet i rum 5.17, ikke nødvendigvis beskærer hinanden. Det gør sig gældende, hvor planerne er bestemt ud fra definerede kanter. Et eksempel er vist i nedenstående figur.



**Figur 9.1:** Eksempler på, hvor der er nødvendigt at foretage en finjustering af en punktskyemodel. To eksempler på, at planer ikke beskærer hinanden, som ønsket. Til venstre vises to planer for skabet i rum 5.17 og til højre vises to vinduesnicher i rum 5.20, som skal ”finpudsnes”.

Efter en ”finpudsning” af modellerne i AutoCad kan der beregnes 3D-afstande. Modellerne kan ses i Bilag P i dxf-format.

Der vælges at behandle rummenes dimensioner, de blå plader foran radiatorerne samt skabet i rum 5.17 samlet. Det skyldes, at rummets dimensioner er modelleret ud fra frie kanter, hvormed der kan forventes en god nøjagtighed. Skabets og de blå



pladers overflader er store og velafgrænsede, hvormed der ligeledes forventes en god nøjagtighed.

Øvrige objekter såsom vinduesnicher, døre, stikkontakter, udluftningskanaler og radiatorer behandles samlet, da disse er ud fra definerede kanter.

*Forventet nøjagtighed for afstande på objekter med frie kanter*

Ifølge kravspecifikationerne for laserscanneren jf. Afsnit 5.5 kan der forventes en punktspredning på 5 mm, hvilket giver en forventet afstandsspredning på 7,1 mm mellem to punkter i modellen.

Det vil sige, at grovfejlsgrænsen for en afvigelse mellem en kontrolafstand og en afstand i AutoCad kan beregnes til  $\pm 21$  mm. Denne grovfejlsgrænse defineres til at være gældende for afstande, der måles på objekter, der er bestemt ud fra frie kanter.

*Forventet nøjagtighed for afstande på objekter med definerede kanter*

Der kan forventes jf. kontrollen i Afsnit 6.1, at en afstand på et objekt bestemt ud fra definerede kanter er max to gange gridstørrelsen mindre end kontrolafstanden. Dette er en toleranceværdi. Det vil sige, at der kan forventes en spredning på  $[1/3 \cdot 2 \cdot \text{gridstørrelse}]^{27}$ . Der er beregnet en gridstørrelse i de tre rum ved den maksimale afstand i rummene og ved normaltilfældet, og derudfra bestemmes en grovfejlsgrænse i de tre rum.

Scan nr.	Opløsning [° x °]	Max afstand [m]	Gridstørrelse [mm x mm]	Spredning [mm]	Grovfejls- grænsen [mm]
Sk20-100	0,125° x 0,025°	5	11 x 11	7,3	±22
Sk17-300	0,25° x 0,25°	4	17 x 17	11,3	±34
Sk18-600	0,25° x 0,25°	4	17 x 17	11,3	±34

Tabel 9.2: Scanningsopløsning, gridstørrelse, spredning og grovfejlsgrænsen i testområdet.

På baggrund af ovenstående tabel sættes en samlet grovfejlsgrænse på objekter, der er bestemt ud fra definerede kanter til  $\pm 34$  mm.

Spredningen for en afstand i AutoCad, og dermed også nøjagtigheden for en punktskymodel kan beregnes således.

$$(9.1) \quad \sigma_{\text{afstand}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{n}} \quad , \text{ hvor}$$

n er antal afstande

$d_i$  er afvigelse mellem kontrolafstand og afstand beregnet i AutoCAD

Hvis ikke andet er anført, vil denne formel være anvendt i det videre forløb til beregning af spredningen på en afstand.

<sup>27</sup> Gruppen er klar over, at det egentlig er en ensidige fejl, men der antages i det videre forløb, at afvigelserne er normalfordelte.

### 9.1.1 KONTROL AF OBJEKTER MODELLERET UDFRA FRIE KANTER

I nedenstående tabel kan det ses, hvor meget afvigelserne mellem kontrolafstande og afstande beregnet i AutoCad varierer i de enkelte punktskyer. Endvidere kan det ses, hvor mange afstande, der er målt i punktskyerne, spredning, grovfejlsgrænsen samt hvor mange afvigelser, der overskrider grovfejlsgrænsen.

Punktsky	Afvigelse 1 [mm]	Antal afstande	Spredning [mm]	Grovfejls- grænse [mm}	Antal afvigelser, der overskrider grovfejlsgrænsen	Afvigelse 2 [mm]
Skand20-100	-26,0 til 11,7	26	8,5	±21	2	-19,8 til 11,7
Skand17-300	-16,1 til 18,8	17	9,7	±21	0	-16,1 til 18,8
Skand18-600	-20,4 til 13,1	23	10,3	±21	0	-20,4 til 13,1

**Tabel 9.3: Resultat af sammenligning mellem kontrolafstande og afstande målt i punktskymodellerne. "Afvigelse 1" er intervallet for alle afvigelser, mens "Afvigelse 2" er intervallet for afvigelserne efter de, der overskrider grovfejlsgrænsen er udtaget. Der henvises til Bilag P for at se beregningerne.**

To afvigelser i rum 5.20 overstiger grovfejlsgrænsen med henholdsvis -26,0 mm og -22,3 mm. Ved at se lidt nærmere på disse afvigelser, er det en højdemåling af væggen i det sydøstlige hjørne og en breddemåling af en væg mellem to vinduer på sydvæggen.

Med hensyn til højdemålingen er der ved kontrolmålingen målt en skrå afstand. Det var ikke muligt at måle en afstand lodret, grundet den blå plade foran radiatoren. Højden i AutoCad er målt lodret – det vil sige, at der sammenlignes to forskellige højder. At højden i AutoCad er mindre end referencens stemmer overens med denne forklaring.

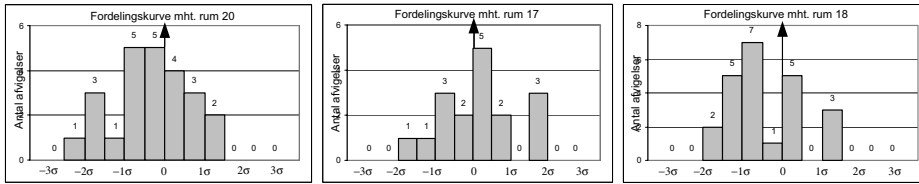
Med hensyn til målingen mellem to vinduer i sydvæggen er der usikkerhed på den beregnede måling pga. definitionsvanskeligheder af vindueskarmene i 3D-Extractor.

Der vælges at udtage de to målinger i det videre forløb.

Spredningen på afstande i punktskymodellen beregnes ud fra de resterende afstande – resultat kan ses i ovenstående tabel. Spredningerne for de tre punktskymodeller er tilnærmelsesvis ens, og en gennemsnitlig spredning på en afstand kan beregnes til 9,5 mm.

Det var forventet at afstandene måles med en spredning på 7,1 mm, hvilket indikerer, at der er målt lidt dårligere end forventet.

For at få et billede af, hvordan afvigelserne fordeler sig, udtegnes et diagram over afvigelserne – et for hver punktsky.



Figur 9.2: Diagrammer over afvigelser ved punktskyerne i henholdsvis rum 5.17, 5.18 og 5.20.

Ud fra diagrammerne kan det ses, at afvigelserne tilnærmelsesvis er normalfordelte<sup>28</sup>. Næsten alle afvigelser ligger indenfor  $[-2\sigma, 2\sigma]$ . Det ser ikke ud til, at der er foretaget systematiske fejl, da diagrammerne ikke er forskudt til enten negativt eller positivt.

### 9.1.2 KONTROL AF OBJEKTER MODELLERET UDFRA DEFINEREDE KANTER

I nedenstående tabel er der foretaget en sammenligning mellem kontrolafstande og afstande i punktskymodellerne. Der er foretaget en samlet sammenligning på baggrund af alle tre punktskymodeller for på denne måde at få et bedre stokastisk grundlag. Det synes rimeligt at gøre, da spredningen på objekter udfra frie kanter er tilnærmelsesvis ens for de tre punktskymodeller.

Objekt	Afvigelse 1 [mm]	Antal afstand	Grovfejls- grænse [mm]	Antal afvigelser, der overskrider grovfejlsgrænsen	Afvigelse 2 [mm]	Spredning [mm]
Vindue	-9,7 til 80,2	10	$\pm 34$	1	-9,7 til 13,4	6,8
Dør	-26,9 til 41,3	12	$\pm 34$	1	-26,9 til 30,1	16,9
Radiator	-51,8 til -10,0	6	$\pm 34$	2	-25,3 til -10,0	-
Udluftningskanal	53,7 til 95,1	4	$\pm 34$	4	-	-
Alle	-51-8 til 95,1	32	$\pm 34$	8	-26,9 til 30,1	15,2

Tabel 9.4: Resultat ved måling i de enkelte punktskymodeller. "Afvigelse 1" er intervallet for alle afvigelser, mens "Afvigelse 2" er intervallet for afvigelserne efter de, der overskrider grovfejlsgrænsen er udtaget. Der henvises til Bilag P for at se beregningerne. "Spredning" beskriver måling i punktskymodellen efter, der er udtaget eventuelle afvigelser, der overstiger grovfejlsgrænsen. For enkelte objekttyper er der ikke beregnet spredning, da grundlaget synes at være for lille.

#### Vinduer

En enkelt afvigelse i vinduesnicherne overstiger grovfejlsgrænsen. Afstanden er et mål af vinduets højde i rum 5.17. Som omtalt i Afsnit 8.1 er der netop ved dette vindue blinde områder pga. laserscannerens opstilling. Netop planer i denne vinduesniche er bestemt udfra relative spidse indfaldsvinkler på  $15^\circ$  til  $18^\circ$ , hvilket kan være årsagen til den store afvigelser. Der vælges at tage afstanden ud i det videre forløb.

<sup>28</sup> Grundlaget er dog en anelse for tyndt jf. Tabel 9.3 til at kunne konkludere dette, men det tyder på, at det gør sig gældende.

### Døre

En enkelt afvigelse overstiger grovfejlsgrænsen. Det er en højdemåling af en dør i rum 5.20 på nordvæggen. Den store afvigelse skyldes formentlig en kombination af en spids indfaldsvinkel, problemer med at definere dørens kant, samt at døren er sort jf. Afsnit 8.1. Afstanden sorteres fra i det videre forløb.

10 ud de 12 afstande er målt større i AutoCad end kontrolafstandene. Dette hænger sammen med vanskeligheder med at definere dørenes karme, når omfangspolygonets tegnes manuelt – punkter fra den bagvedliggende væg indgår i dørens plan, hvorfor afstandene bliver større end kontrolafstandene.

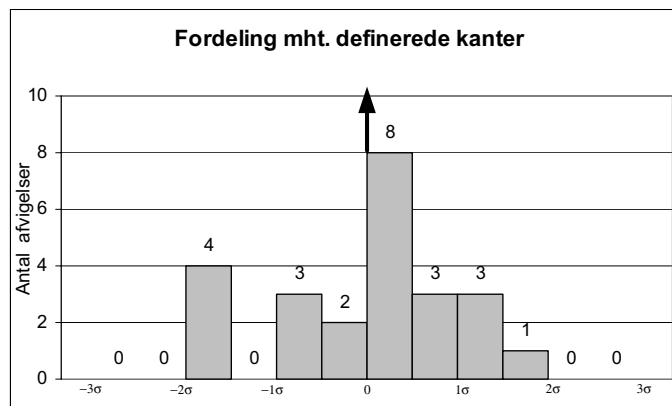
### Radiatorer

Alle afstande i AutoCad er mindre end referencens afstande, og to af dem overstiger grovfejlsgrænsen. At, afstandene er mindre i AutoCad, er også ventet – jf. *at der kan forventes, at objekter bestemt ud fra definerede er to gange gridstørrelse mindre end kontrolafstande*. Afstandene, der overstiger grovfejlsgrænsen, udtages.

### Udluftningskanal

Alle fire afstande på udluftningskanalen i rum 5.17 er målt større i AutoCad end referencen med op til 95 mm. Udluftningskanalen kan ses på Figur 7.5. Udluftningskanalen er sammenfaldende med den bagvedliggende væg. Når omfangspolygonen tegnes, kan det ikke undgås, at punkter fra væggen indgår i omfangspolygonen. Umiddelbart synes det ikke muligt at måle udluftningskanaler i punkttskyer, men et grundlag på fire afstande er for lille til at sige det. En mere præcis måling af udluftningskanaler er formentlig mulig i et ortofoto. Der vælges at tage alle fire afstandene ud.

Der beregnes en spredning ud fra de resterende 24 målinger til 15,2 mm og et diagram af afvigelserne kan ses nedenstående.



Figur 9.3: Diagram over afvigelserne mht. definerede kanter.

15 ud af de 24 afstande er målt større i punktskyemodellerne end kontrolafstandene.

*Stikkontakter*

Det er forsøgt at modellere stikkontakter i rum 5.20 på den østlige væg i alt fem stikkontakter. Der henvises til Figur 8.10 for at se modellering af stikkontakterne på denne væg, hvor det kan ses, at stikkontakternes planer er misdannede. Stikkontakternes dimensioner er målt ca. dobbelt så store i AutoCad end referencens dimensioner jf. Bilag P.

Endvidere er der målt afstande fra stikkontakterne til sydvæggen og fra stikkontakterne til gulvet. Her viser det sig, at 17 ud af 20 afstande er målt mindre i AutoCad end kontrolafstandene. Dette hænger sammen med, at stikkontakternes dimensioner er bestemt for store. Afstandene afviger med op til 156 mm jf. Bilag P. Kontrolafstandene er undersøgt for at være sikker på, at der ikke sammenlignes forskellige afstande, hvilket viser sig ikke at være tilfælde.

Der er flere årsager til, at stikkontakter er bestemt med så store fejlmargener, men hovedårsagerne er

- Få punkter
- Definitionsunøjagtighed

Modellering af stikkontakterne i 3D-Extractor er foretaget ud fra 5-15 punkter. Det burde være nok til at bestemme et plan (min. 3 punkter), men det har også betydning, hvor på stikkontaktens overflade punkterne befinder sig – om det er på selve kontakten eller på ”tænd/sluk-knappen”, dvs. definitionsunøjagtighed. Derudover er der problemer med at definere stikkontakternes kanter, da stikkontakterne er sammenfaldende med den bagvedliggende væg.

Gruppen vurderer, at stikkontakter er for små og undefinerbare objekter til, at de kan måles acceptabelt i en punktsky, og derfor foretages der ikke yderligere på modellering af stikkontakterne i punktskymodeller. Der vil senere blive undersøgt, om måling af stikkontakter kan foretages tilfredsstillende i ortofotos.

## 9.2 MODELLERING I SAMLEDE PUNKTSKYER – ABSOLUT NØJAGTIGHED

Efter at have set på den relative nøjagtighed vil dette afsnit omhandle den absolutte nøjagtighed. Der modelleres en samlet punktsky på baggrund af de seks foretagne scanninger i testområdet ud fra metoderne ”Sammenknytning vha. Fuzzy Join”, ”Sammenknytning vha. global transformation” og ”Sammenknytning vha. tre planer”. Metoderne vil enkeltvis blive gennemgået, hvorefter der vil blive foretaget en kontrol af den absolutte nøjagtighed.

- Beskrivelse af metoden ”Sammenknytning vha. Fuzzy Join”
- Beskrivelse af metoden ”Sammenknytning vha. global transformation”
- Beskrivelse af metoden ”Sammenknytning vha. tre planer”
- Kontrol af absolut nøjagtighed mht. objekter bestemt ud fra frie kanter
- Kontrol af absolut nøjagtighed mht. objekter bestemt ud fra definerede kanter

## 9.2.1 SAMMENKNYTNING VHA. FUZZY JOIN

Sammenknytning af punktskyer vha. denne metode bliver foretaget i programmet 3D-Extractor. Med denne metode foretages en punktskysudjævning, hvor to eller flere punktskyer bliver sammenknyttet. Hvorledes punktskysudjævningen foretages i 3D-Extractor er ikke nævnt i manualen, men det er oplyst, at en lignende metode i programmet Mesh & Map anvender algoritmen *Iterative Closest Point* (ICP). [Callidus, 2002b, s. 29]. Der antages, at den samme algoritme anvendes i 3D-Extractor.

ICP er en metode til at sammenkoble 3D-datasæt. 3D-datasæt behøver ikke i denne sammenhæng at være punkter, men metoden kan også anvendes til sammenkobling af TIN-datasæt, linie-datasæt, overflader mv. Metoden anvender ikke fællespunkter, hvorfor den er velegnet til laserscanningsdata, hvor det ikke altid er lige enkelt at finde sammenknytningspunkter. [Besl & McKay, 1992].

En forudsætning for, at punktudjævningen går godt, er, at der er struktur i 3D-datasættene. Dette skyldes, at ICP tilpasser 3D-datasættene over områder med struktur – jo mere struktur jo bedre vil punktudjævningen blive.

En anden forudsætning for at kunne sammenpasse 3D-datasæt vha. ICP er, at datasættene har ens målestoksforhold, da det i punktskysudjævningen bliver regnet på punkternes fysiske forhold til hinanden i ét koordinatsystem.

En tredje forudsætning for at få algoritmen i gang er, at de datasæt, der ønskes sammenknyttet, passer sammen groft. I 3D-Extractor gøres dette ved at ”flytte” det ene datasæt over i det andet vha. funktionen ”Visual adjustment”. Passer datasættene groft sammen mindskes sandsynligheden for en forkert sammensætning. Derudover nedsættes beregningsmængden, hvilket giver udslag i færre iterationer og er dermed tidsbesparende.

I de senere år er der udviklet metoder med algoritmen ICP, hvorved 3D-datasæt kan sammenknyttes under selve dataindsamlingen. Det kunne være velegnet inden for terrestrisk laserscanning, da det således er muligt i marken at undersøge, om der er nok datadækning af det ønskede opmålingsområde.

[Langis et al, 2001] og [Callidus, 2002b]

Det er en forudsætning for en punktskysudjævning i 3D-Extractor, at der er min. 20% overlap mellem punktskyerne for at opnå en vis pålidelighed af punktskysudjævningen. [Callidus, 2002a]

Efter en punktskysudjævning i 3D-Extractor er det muligt at indhente information vedrørende antal iterationer samt en spredning på vægtenheden ( $\sigma_0$ )<sup>29</sup>. Accepteres punktskysudjævningen er det ikke længere muligt at indhente disse oplysninger.

Det er forsøgt at sammenknytte alle seks punktskyer på én gang, hvilket ikke kan lade sig gøre. Hvorfor er gruppen ikke helt klar over, men det skyldes formentlig en kombination af mangel på struktur og overlap, samt at den visuelle tilpasning ikke er præcis nok.

Med hensyn til struktur er der selvfølgelig ikke meget struktur på de enkelte vægge, men rummene består trods alt af mindst seks store planer i forskellige retninger. Endvidere er der radiatorer, vinduesnicher samt lamper i alle rum.

Gruppen har prøvet at imødegå problemet mht. overlap. Der er foretaget to scanninger i hvert rum for at opnå en overlap i de enkelte rum. To af scanningerne er placeret i døråbningerne mellem rummene for at opnå overlap – jf. Figur 7.7.

Da det ikke er muligt at sammenknytte alle rum på én gang, er det forsøgt at sammenknytte to punktskyer ad gangen, hvilket lykkedes. En tredje punktsky kan herefter sammenknyttes med de to punktskyer, der allerede er sammenknyttet. Denne proces fortsættes, indtil alle seks punktskyer er sammenknyttet i en samlet punktskymodel. Denne metode tager længere tid, end hvis det var muligt at sammenknytte de seks punktskyer på én gang. Selve beregningerne vil tage cirka seks gange længere tid, men de visuelle flytninger af punktskyerne vil være det samme. Samtidig kan det betyde en fejlphobning, da punktskyerne bliver tilføjet én efter én. Resultat af de foretagne punktskysudjævninger kan ses i Tabel 9.5.

Samlet punktsky	Punktsky	Antal iterationer	$\sigma_0$ [mm]
-	Skan20-100	-	-
Skan20-100	Skan20-200	41	3,6
Skan20-100, Skan20-200	Skan18-600	42	3,8
Skan20-100, Skan20-200, Skan18-600	Skan18-500	43	3,9
Skan20-100, Skan20-200, Skan18-600, Skan18-500	Skan17-300	45	4,2
Skan20-100, Skan20-200, Skan18-600, Skan18-500, Skan17-300	Skan17-400	46	4,2

**Tabel 9.5: Resultat af punktskysudjævning ved metoden "Sammenknytning vha. Fuzzy Join". I Figur 7.7 kan en skitse over laserscannerens opstilling i testområdet ses.**

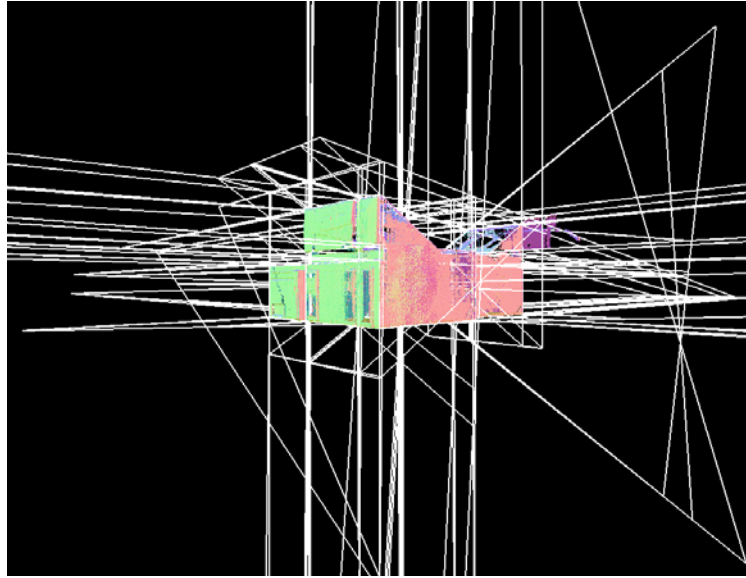
Rummenes dimensioner bliver modelleret ud fra frie kanter. Først bliver det forsøgt at modellere rummenes dimensioner i den samlede punktsky<sup>30</sup>. Som tidligere omtalt i Kapitel 8 vil de modellerede planer, der er bestemt ud fra frie kanter, skærer hinanden. I alt er der 22 planer<sup>31</sup>, der automatiske vil skære hinanden. Planerne skal

<sup>29</sup> Gruppen går ud fra, at det er spredningen på vægtenheden. I programmet er værdien benævnt "End deviation".

<sup>30</sup> Den samlede punktsky benævnes i programmet som "Total/Cluster00". Er en punktsky først kopieret til "Total/Cluster00", er det ikke muligt at flytte den igen.

<sup>31</sup> Seks planer i rum 5.17 og otte planer i henholdsvis 5.18 og 5.20 – dvs. i alt 22 planer.

efterfølgende beskæres, men som det kan ses i nedenstående figur, hvor planerne er modelleret i den samlede punktsky, er det stort set umuligt at holde rede på de enkelte planer. I stedet bliver rummets dimensioner modelleret i de enkelte punktskyer, hvorefter de vil blive kopieret til den samlede punktsky.



Figur 9.4: Eksempel på modellerede planer af rummets dimensioner i den samlede punktsky. I alt er der modelleret 22 planer. Når planer beskærer hinanden dannes nye objekter - i alt er dannet ca. 1500 overflader ud fra de 22 planer.

Øvrige objekter bliver modelleret i den samlede punktsky ud fra definerede kanter.

Når alle ønskede objekter er modelleret i den samlede punktsky importeres modellen til AutoCad. I AutoCad foretages en ”finpudsning” af modellen jf. Figur 9.1, hvor det er muligt. I nogle tilfælde kan en ”finpudsning” betyde, at et plan bliver knyttet sammen med et forkert plan. Hvor dette kan være tilfælde, er det valgt ikke at ”finpudse” modellen. Den endelige model kan ses i Bilag P i dxf-format.

## 9.2.2 SAMMENKNYTNING VHA. TRE PLANER

Der anvendes også programmet 3D-Extractor til denne metode. Metoden er en hurtig metode til at sammenknytte to punktskyer. Den er specielt anvendelig til indvendig opmåling af rum, da vægge, lofter og gulve er planer, der er let genkendelige og godt bestemte.

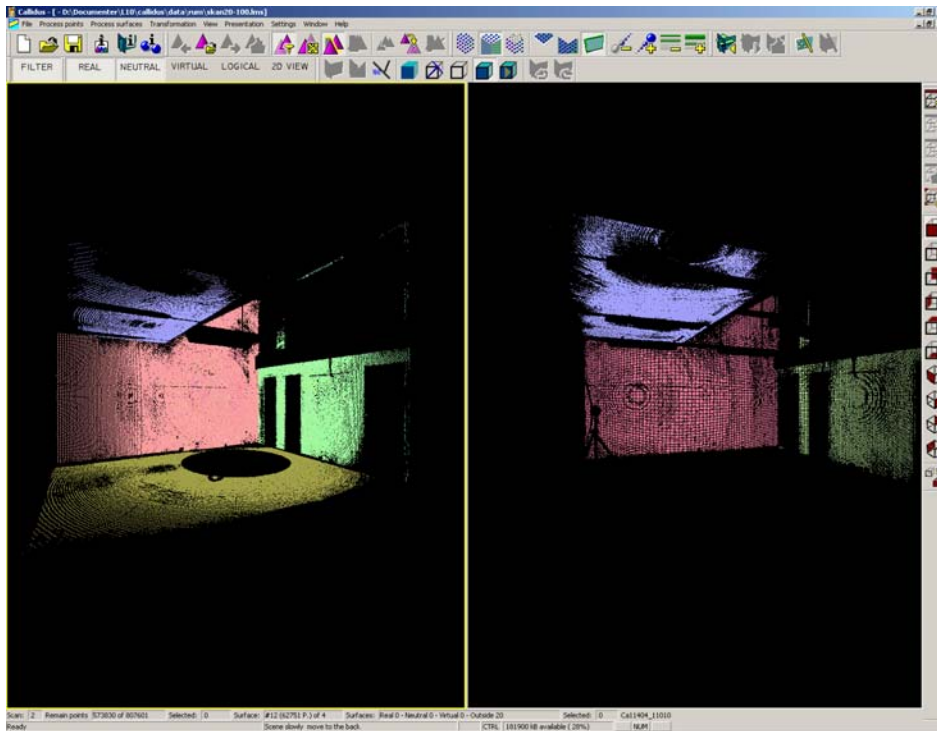
Indledningsvis indlæses de punktskyer i programmet, som ønskes sammenknyttet. Metoden kan kun sammenknytte to punktskyer ad gangen, så ønskes flere end to punktskyer sammenknyttet, må nedenstående foretages af flere omgange.

Tre planer, som de to punktskyer har tilfælles, modelleres. Herefter udpeges hvilken punktsky, der skal fastholdes og hvilken, der skal flyttes. Skærmbilledet kan opdeles som Figur 9.5, og der udpeges de modellerede planer, som punktskyerne



har tilfælles. Et af de tre planer skal være et tilnærmelsesvis horisontalt plan<sup>32</sup> - i gruppens tilfælde gulvet eller loftet.

[Callidus, 2002a]



Figur 9.5: Opdeling af skærmen, hvor det fastholdte scan er til venstre. Farverne indikerer, hvilken retning planerne har i forhold til laserscanneren. Dette eksempel er fra rum 5.20 – skan20-100 (til venstre) og skan20-200 (til højre), hvor to vægge og loftet udgør de tre planer, som sammenknytningen vil ske over.

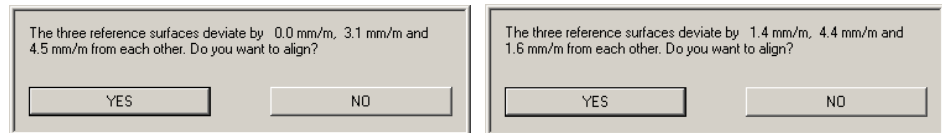
Det er ikke ligegyldigt, hvilken rækkefølge planerne udpeges på.

Hvis samme plan bliver udpeget i begge punktskyer først, vil dette plan blive et referenceplan - drejningen vil blive nul i en af de tre retninger. Det kan også vælges at anvende to referenceplaner.

Hvis der først udpeges to forskellige planer, kan den punktsky, der skal drejes over i den fastholdte punktsky, bevæge sig frit i alle tre akseretninger.

Nedenstående figur anvender samme eksempel som i Figur 9.5. Til venstre er det ene plan fastholdt, og til højre er ingen planer fastholdt. Forskellen kan ses ved, at drejningen omkring førsteaksen er nul i eksemplet til venstre.

<sup>32</sup> Der er ingen forklaring i manualen, hvorfor et af planerne skal være tilnærmelsesvist horisontalt, men gruppen tror, det må have noget at gøre med at definere koordinatsystemet.

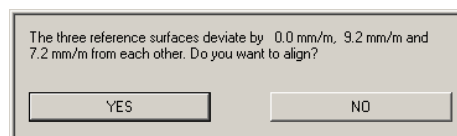


**Figur 9.6: Sammensætning af to punktskyer vha. metoden ”Sammenknytning vha. tre planer”.** Til venstre er de to punktskyer sat sammen ud fra et referenceplan – til højre er punktskyerne sat sammen ud fra fri bevægelighed i alle retninger. Der er anvendt samme eksempel som i Figur 9.5.

Hvis de udregnede drejninger omkring akserne accepteres, godkendes transformationen ved at trykke ”Yes” i Figur 9.6. Ellers annulleres sammenknytningen.

Gruppen vælger at foretage ”Sammenknytning vha. tre planer”, hvor den ”frie” punktsky kan flyttes i alle tre akseretninger, da de tre planer må betegnes at være lige godt bestemt.

En anden grund til, at der fravælges at anvende referenceplaner, er, at en grov fejl nemmere kan ”skjule” sig i transformationen. Til at illustrere dette anvendes ovenstående eksempel igen, hvor der ”fejlagtigt” udpeges gulvet fra skan20-100 og loftet fra skan20-200, som samme referenceplan. Resultat kan ses i nedenstående figur.



**Figur 9.7: Resultat ved en transformation, hvor referenceplaner ”fejlagtigt” er sat forkert sammen. Loftet fra skan20-100 og gulvet fra skan20-200 antages at være samme plan.**

Det kan ses ud fra figuren, at der ikke er noget bemærkelsesværdigt at se på resultatet – det vil sige, at den grove fejl har ”gemt” sig under transformationen. Denne grove fejl er ikke muligt at begå, hvis der ikke anvendes referenceplaner, da programmet vil give en fejlmeddelelse ved transformationen.

Da det ikke er muligt at sammenknytte alle punktskyer på én gang, transformeres to punktskyer først sammen. Efterfølgende kan en tredje punktsky transformeres sammen med en af de to punktskyer i den samlede model. Dette fortsættes, indtil alle seks punktskyer er samlet til en punktsky. Idet punktskyer transformeres én efter én, kan det give anledning til fejlphobning - dette kan give store fejl, hvis der skal sammenknyttes mange punktskyer.

I nedenstående tabel kan resultatet af de foretagne transformationer ses. Skan18-500 er fastholdt i de to første transformationer, Skan20-200 i de to næste og i den sidste transformation er Skan17-400 fastholdt. Kvaliteten af en transformation er angivet i mm/m i X- Y- og Z-retning. Størrelserne fortæller, hvor meget en punktsky skal drejes med for at være sammenfaldende med den fastholdte punktsky. I tabellen er størrelserne endvidere omregnet til grader.

Scanninger	X [mm/m]	Y [mm/m]	Z [mm/m]	X [°]	Y [°]	Z [°]
Skan18-500 - Skan20-100	0,5	0,6	1,0	0,03	0,03	0,06
Skan18-500 - Skan18-600	0,4	2,2	1,9	0,02	0,13	0,11
Skan20-200 - Skan20-100	3,5	0,6	3,6	0,20	0,03	0,21
Skan20-200 - Skan17-400	1,8	2,3	2,3	0,10	0,13	0,13
Skan17-400 - Skan17-300	0,8	0,8	2,0	0,05	0,05	0,12

**Tabel 9.6: Resultat ved sammensætning vha. tre planer. Der er ingen dokumentation for de foretagne transformationer. Det er ikke muligt at indhente informationerne angivet i Figur 9.6 efter transformationen accepteres.**

Som det ses, har gruppen valgt at lade de transformerede punktskyer bevæge sig frit, så der kan ske drejninger i alle tre akseretninger.

Den samlede punktsky bliver modelleret og ”finpudset” på samme måde som den samlede punktsky ved forrige metode. Modellen kan ses i Bilag P.

### 9.2.3 SAMMENKNYTNING VHA. GLOBAL TRANSFORMATION

For at kunne foretage en global transformation, skal der i forbindelse med scanningen indmåles prismer, som er knyttet op på et fælles net. Der henvises til Bilag C for nærmere information af det etablerede net.

Efter en punktsky er indlæst i 3D-Extractor kan retninger til indmålte prismer udtegnes, der kan så vælges hvilket prisme, der skal anvendes til transformationen<sup>33</sup>. Når det ønskede prisme er blevet valgt, kan funktionen ”Global transformation” vælges. Gruppen har forinden indlæst en koordinatfil til prismerne, og koordinater til prisme og laserscanner vælges ud fra koordinatlisten.

Herefter er transformationen egentlig fuldført. Transformationen kan sammenlignes med, at der opstilles i et kendt punkt (laserscannerens position), og der tages en udgangsretning til andet kendt punkt (det fritstående prisme). Som tidligere nævnt anvendes afstandsmålingen ikke. Det er altså ikke en transformation, som i landmålingens forstand f.eks. en 3D-konform transformation. Der bliver egentlig kun foretaget en drejning af XY-planet. Det er kun horisontalretningen, der anvendes - zenitdistancen og afstanden fra laserscanner til prismet bliver ikke anvendt.

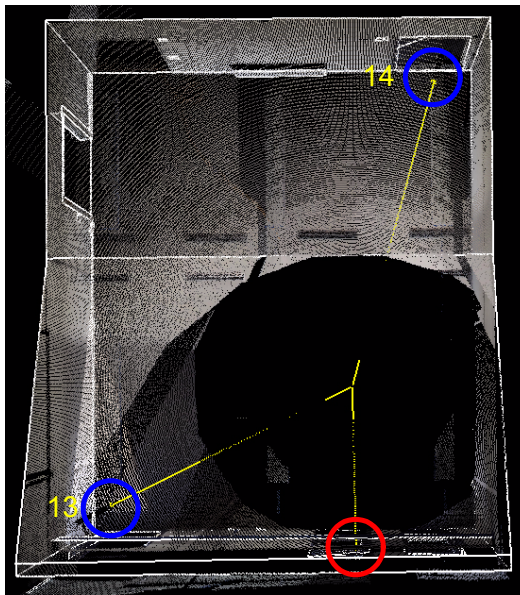
Der synes at være flere ulemper ved denne metode. En ulempe er, at der kan anvendes en forkert koordinat til et prisme uden, at det kan opdages. Der er i realiteten ikke nogle overbestemmelser ved ”transformationen”, da det blot er en drejning i XY-planet.

Metoden synes ikke anvendelige alene, da det kan give anledning til store fejl, da der ikke er overbestemmelser. En global transformation synes kun at have til for-

<sup>33</sup> Der kan kun anvendes et indscannet prisme og prismet på laserscanneren til en global transformation på nuværende tidspunkt. Det betyder at der er ingen overbestemmelser i den globale transformation.

mål at systemorientere en samlet punktskyemodel, efter der er foretaget de forskellige punktskyssammenknytninger med de to andre metoder. Dog har en global transformation den fordel, at punktskyer kan sammenkobles, uden at der skal være overlap eller fælles planer.

Laserscanneren opfatter nogle gange ”fejlagtige” objekter som prisme. Et eksempel fra testområdet kan ses i nedenstående figur, hvor laserscanneren har opfattet noget støj som et prisme.



Figur 9.8: Figuren viser punktsky Skan20-100 set fra loftet. Prismene 13 og 14 er scannet ind (blå cirkel) i denne punktsky. Derudover opfatter laserscanneren noget støj som et prisme (rød cirkel).

Punktskyer bliver en efter en transformeret til det lokale net. Programmet angiver ingen information for den udførte globale transformation, hvilket synes utilfredsstillende. Hvilke prisme, der er anvendt til de forskellige transformationer, kan ses i nedenstående tabel.

Scan nr.	Prisme på laserscanner	Fritstående prisme
Skan20-100	105	13
Skan20-200	100	13
Skan17-300	101	15
Skan18-500	103	16
Skan18-600	104	16

Tabel 9.7: Anvendte prisme ved de globale transformationer. Nummeringen af prismene se Bilag C.

Der er ikke tilknyttet prisme til skan17-400, hvorfor denne scanning sammenknyttes til med Skan17-300 med metoden ”Sammenknytning vha. Fuzzy Join”. Resultat

af denne punktdjævning er efter 34 iterationer en spredning på vægtenheden på 3,5 mm.

Den samlede punktsky er modelleret og ”finpudset” på samme måde som de forrige punktskyer.

## 9.2.4 KONTROL AF OBJEKTER MODELLERET UDFRA FRIE KANTER

I dette afsnit vil der blive foretaget en sammenligning af kontrolafstande og afstande målt i de tre samlede punktskymodeller. Nedenstående tabel viser en oversigt over sammenligningen. Der henvises til Bilag P for at se nærmere på sammenligningerne.

Metode	Afvigelse 1 [mm]	Antal afstande	Spredning [mm]	Grovfejls- grænse [mm]	Antal afvigelser, der overskrider grovfejlsgrænsen	Afvigelse 2 [mm]
Fuzzy Join	-47,0 til 23,9	50	8,2	±21	2	-20,1 til 20,9
Tre planer	-46,0 til 27,3	50	8,0	±21	2	-20,4 til 16,5
Global transformation	-47,4 til 40,1	49	7,6	±21	3	-20,6 til 16,5

**Tabel 9.8: Absolut nøjagtighed. Resultat af sammenligning mellem kontrolafstande og afstande målt i de samlede punktskymodeller. Afstande er målt på objekter modelleret udfra frie kanter. ”Afvigelse 1” er intervallet for alle afvigelser, mens ”Afvigelse 2” er intervallet for afvigelserne efter dem, der overskrider grovfejlsgrænsen er udtaget.**

### *”Sammenknytning vha. Fuzzy Join”*

To afvigelser overskrider grovfejlsgrænsen ved denne metode. Ved at se lidt nærmere på de to afvigelser er det henholdsvis et breddemål af en vægstykke i rum 5.20 (måling 18) og en måling af det plane loft i rum 5.18 (måling 27)

Måling 18 er en afstand fra en dårlig defineret dørkarm til et hjørnepunkt. Karmen er i så dårlig stand, at den kan flyttes med de bare hænder. Der er også problemer med denne måling ved metoden ”Sammenknytning vha. global transformation”. Denne måling udtages pga. en dårlig definerede dørkarm.

Måling 27 er der også problemer med ved de to andre metoder. Det kunne derfor tyde på, at der er fejl på kontrolmålingen. Målingen udtages.

Der beregnes en spredning udfra de øvrige 48 afstande til 8,2 mm

### *”Sammenknytning vha. tre planer”*

To afvigelser overskrider grovfejlsgrænsen – måling nr. 19 og igen nr. 27.

Måling nr. 19 er en måling på sydvæggen i rum 5.20 fra et hjørnepunkt til en vinduesniche. Denne måling ses der bort fra pga. definitionsvanskeligheder af vindueskarmene i 3D-Extractor.

Igen ses der bort fra måling 27.

Der beregnes en spredning udfra de resterende 48 afstande til 8,0 mm

## ”Sammenknytning vha. global transformation”

Tre afvigelser overstiger grovfejlsgrænsen – måling 18, 27 og 38.

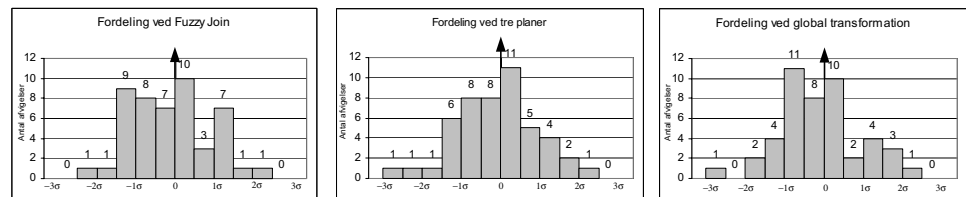
Måling 18 og 27 udtages af samme årsager som tidligere nævnt.

Måling nr. 38 er en afstand målt på et vægstykke fra dørkarm til hjørnepunkt i rum 5.18 - målingen forkastes, da det er problemer med at definere dørkarne i 3D-Extractor jf. Afsnit 9.1.1.

Der beregnes en spredning på 7,6 mm ud fra 46 afstande.

Det var forventet, at afstande i de tre samlede punktskymmodeller kunne måles med en spredning på 7,1 mm. Ud fra Tabel 9.8 kan det ses, at der er målt en anelse dårligere end forventet.

Der er udtegnet et diagram for de tre metoder, der viser fordelingen af afvigelserne – se nedenstående.



Figur 9.9: Diagram over afvigelserne ved de tre anvendte metoder.

Som det ses ud fra diagrammerne, er afvigelserne tilnærmelsesvis normalfordelte. Afvigelserne er cirka ligeligt fordelt mht. positive og negative afvigelser, hvilket indikerer, at der ikke er begået nogen systematiske fejl.

## 9.2.5 KONTROL AF OBJEKTER MODELLERET UDFRA DEFINEREDE KANTER

Der ses på de tre metoder enkeltvis – i nedenstående kan sammenligning mellem kontrolafstande og afstande beregnet i punktskymmodellerne ses. Der henvises til Bilag P for at se sammenligningen.

Objekt	Afvigelse 1 [mm]	Antal afstande	Grovfejls- grænse [mm]	Antal afvigelser der overskrider grovfejls- grænsen	Afvigelse 2 [mm]	Spredning [mm]
<b>Sammenknytning vha. Fuzzy Join</b>						
Vindue	-28,9 til 13,8	19	±34	0	-28,9 til 13,8	12,7
Dør	-31,9 til 50,8	13	±34	2	-31,9 til 32,3	21,5
Radiator	-40,0 til 11,6	8	±34	1	-31,4 til 11,6	16,7
Blå plade, skab	-25,6 til 32,0	22	±34	0	-25,6 til 32,0	18,2
Alle	-40,0 til 50,8	62	±34	3	-31,9 til 32,3	17,2
<b>Sammenknytning vha. tre planer</b>						
Vindue	-48,3 til 22,9	20	±34	2	-33,3 til 22,9	15,4
Dør	-14,9 til 54,6	13	±34	3	-14,9 til 31,5	19,4
Radiator	-49,9 til -10,9	8	±34	6	-32,4 til -10,9	-
Blå plade, skab	-31,7 til 29,2	21	±34	0	-31,7 til 29,2	18,1
Alle	-49,9 til 54,6	62	±34	11	-33,3 til 31,5	18,6
<b>Sammenknytning vha. global transformation</b>						
Vindue	-30,7 til 15,0	17	±34	0	-30,7 til 15,0	14,1
Døre	-28,8 til 38,7	12	±34	3	-28,8 til 31,9	19,3
Radiator	-47,6 til 3,2	8	±34	3	-29,7 til 3,2	-
Blå plade, skab	-57,2 til 35,2	21	±34	5	-28,4 til 17,2	13,9
Alle	-57,2 til 38,7	58	±34	11	-30,7 til 31,9	15,8

Tabel 9.9: Absolut nøjagtighed. Resultat af sammenligning mellem kontrolafstande og afstande målt i de samlede punktskyemodel. Afstande er målt på objekter modelleret ud fra definerede kanter. "Afvigelse 1" er intervallet for alle afvigelser, mens "Afvigelse 2" er intervallet for afvigelserne efter de, der overskrider grovfejlsgrænsen, er udtaget. "Spredning" beskriver måling i punktsky modellen efter, der er udtaget eventuelle afvigelser, der overstiger grovfejlsgrænsen. For enkelte objekttyper er der ikke beregnet spredning, da grundlaget synes at være for lille.

*"Sammenknytning vha. Fuzzy Join"*

To dørmål og et mål på en radiator overskrider grovfejlsgrænsen.

Det ene dørmål er på nordvæggen i rum 5.20 - en afstand, der også var problemer ved i den enkelte punktsky Skan20-100 jf. Tabel 9.4. Det andet dørmål er i rum 5.17 på vestvæggen, hvor dørkarmen ligeledes er dårlig defineret.

Med hensyn til målet på radiatoren er der tidligere i Afsnit 9.1.2 gjort rede for, at radiatorers overflader er svære at definere.

De tre afstande blive ikke medtaget i det følgende, hvor der beregnes en spredning på en afstand ud fra 59 afstande på 17,2 mm.

*"Sammenknytning vha. tre planer"*

11 ud af de 62 afstande overskrider grovfejlsgrænsen.

To mål af vinduesnicher overskrider grovfejlsgrænsen. Målingerne er foretaget i den samme vinduesniche i rum 5.20. Afstandene tages ud pga. vanskeligheder med at bestemme kanter.

Tre mål på døre overskrider grovfejlsgrænsen. Der er tale om de samme afstande, som tidligere nævnt og de fravælges af samme grund.

Seks ud af otte afstande målt på radiatorer overskrider grovfejlsgrænsen. De udtages af samme årsag som tidligere nævnt.

Der beregnes en spredning på afstande ud fra de resterende 51 afstande på 18,6 mm.

*”Sammenknytning vha. global transformation”*

Igen overstiger 11 målinger grovfejlsgrænsen.

Der er tre fejlbehæftede mål af døren i rum 5.20 på nordvæggen, og der er tidligere beskrevet, at der er definitionsproblemer med denne dør. Målingerne indgår ikke i det videre forløb.

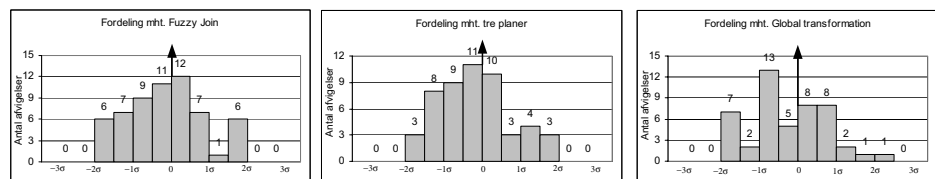
Tre mål på radiatorer overstiger grovfejlsgrænsen – disse udtages af samme årsag som tidligere.

Tre mål på de blå plader og to mål på skabet i rum 5.17 overskrider grovfejlsgrænsen. Målene på de blå plader er alle mindre end kontrolmålene. Disse mål udtages. De to målinger på skabet er dybdemålinger. Planerne til skabets sider er indmålt ved relativt små indfaldsvinkler, hvorfor disse ligeledes udtages.

Der er beregnet en spredning på 15,8 mm ud fra de resterende 47 afstande.

Det var ventet at afstande måles på objekter bestemt ud fra definerede kanter kunne foretages med en spredning på 11,3 mm. Der er ved alle metoder målt dårligere end forventet – cirka 1½ gange dårligere forventet.

En fordeling af afvigelserne kan ses i nedenstående diagrammer.



Figur 9.10: Diagram over afvigelser ved de tre anvendte metoder.

Som det kan ses ud fra ovenstående diagrammer følger afvigelseerne normalfordelingskurver. Det ser ud til, at kurverne er flyttet lidt mod negativ, hvilket vil sige, at der er en tendens til, at afstandene målt i de samlede punktskyemodeller er mindre end kontrolafstandene. Det er også i overensstemmelse med forventningen om at måle maksimal to gange gridstørrelsen mindre end de reelle mål.

## 9.3 DELKONKLUSION

Der vil i dette afsnit blive samlet op på dette kapitel. Der er udregnet spredningerne for afstande beregnet i AutoCad. Disse spredninger karakteriserer hvor nøjagtig, det er muligt at modellere objekter i 3D-Extractor. Der er dels beregnet spredninger i de enkelte punktskyer og i de samlede punktskyer – dvs. en kontrol af den relative og den absolutte nøjagtighed. Den absolutte nøjagtighed er bestemt ud fra



tre metoder – ”Sammenknytning vha. Fuzzy Join”, ”Sammenknytning vha. tre planer” og ved ”Sammenknytning vha. global transformation”. Resultat af nøjagtigheden af punktskymodellerne kan ses i nedenstående tabel.

Skan nr. / metode	Spredning [mm]	Forventet spredning [mm]	Metode
Relativ nøjagtighed – én punktsky			
Skan17-300	9,7	±7,1	Frie kanter
Skan18- 600	10,3	±7,1	Frie kanter
Skan20-100	8,5	±7,1	Frie kanter
Skan17-300, Skan18- 600, Skan20-100	15,2	±11,3	Definerede kanter
Absolut nøjagtighed – flere punktskyer			
Fuzzy Join	8,2	±7,1	Frie kanter
Tre planer	8,0	±7,1	Frie kanter
Global transformation	7,6	±7,1	Frie kanter
Fuzzy Join	17,2	±11,3	Definerede kanter
Tre planer	18,6	±11,3	Definerede kanter
Global transformation	15,8	±11,3	Definerede kanter

**Tabel 9.10: Opsamling af spredningen på afstande foretaget i AutoCad på baggrund af modellering i 3D-Extractor.**

#### *Objekter bestemt udfra frie kanter*

Det var forventet, at afstande på et objekt bestemt ved frie kanter kan bestemmes med en spredning på 7,1 mm – det kan ses udfra tabellen, at det ikke har været muligt hverken i de enkelte punktskymodeller eller i de samlede punktskymodeller. Det vil sige, at det ikke har været muligt at måle som de angivne specifikationer i manualen til Callidus.

Spredningen på afstande målt i de enkelte punktskyer er tilnærmelsesvis ens – det samme gør sig gældende ved de tre samlede punktskymodeller. Der kan beregnes en gennemsnitlig relativ nøjagtighed på ca. 9,5 mm. Nøjagtigheden i de samlede punktskymodeller forbedres med cirka 1,2 mm.

#### *Objekter bestemt udfra definerede kanter*

Der var forventet, at afstande på objekter bestemt udfra definerede kanter kan måles med en spredning på 11,3 mm. Dette viser sig heller ikke at kunne lade sig gøre – der er generelt målt en 1½ gang dårligere end forventet.

#### *Sammenligning objekter bestemt udfra frie og definerede kanter*

Objekter bestemt udfra frie kanter er bedre bestemt end objekter bestemt udfra definerede kanter. Det kommer for så vidt ikke som nogen overraskelse, da objekter udfra frie kanter automatisk tilpasses hinanden, mens objekter udfra definerede kanter skal sammensættes af brugeren selv.

#### *Metodesammenligning*

Metoden ”Sammenknytning vha. tre planer” har for gruppen været den metode, der har været nemmest at anvende samt den hurtigste metode til sammenknytning af de seks punktskyer i testområdet.

Hvis der er mange<sup>34</sup> punktskyer, som skal knyttes sammen, kan det være en fordel at sammensætte punktskyerne i mindre punktskysgrupper. Punktskyerne i de enkelte punktskysgrupper kan sættes sammen med metoderne ”Sammensætning vha. tre planer” eller ”Sammenknytning vha. Fuzzy Join”. Punktskysgrupperne kan efterfølgende transformeres sammen med metoden ”Sammenknytning vha. global transformation”.

Der kan formodes, at der vil ske en fejlphobning ved anvendelse af metoderne ”Sammenknytning vha. tre planer” og ”Sammenknytning vha. Fuzzy Join”, da det kun er muligt at sætte to punktskyer sammen ad gangen. Ved at sætte punktskysgrupperne sammen med globale transformationer kan en eventuel fejlphobning mindskes. Dog skal man være opmærksom på, at en eventuel opmålingsfejl på prismene ikke kan lokaliseres, da der ingen overbestemmelser er ved en global transformation.

En anden fordel ved global transformation er, at scanningerne ikke nødvendigvis behøver at have fælles scanningsområder - blot skal der være indscannet prismen, der er knyttet op på et fælles net.

#### *Vinduesnicher sammenlignet med døre*

Vinduesnicher er generelt bedre bestemt end døre – se nærmere bilag P. Årsagen til dette er, at dørene er sammenfaldende med den bagvedliggende væg, hvormed punkter fra væggen indgår, når omfangspolygon for en dør udtegnes. Dette stemmer overens med, at størstedelen af afstandene på dørene er større end kontrolafstande. En anden årsag til, at vinduesnicherne er bedre bestemt end dørene, er, at der kun er et plan til at modellere en dør. Til at modellere vinduesnicherne omkring et vindue er der ofte 3-5 planer, som bliver tilpasset hinanden i AutoCad.

#### *Objekter sammenfaldende med den bagvedliggende væg*

Stikkontakter og udluftningskanaler, som er sammenfaldende med den bagvedliggende væg, er bestemt større end i virkeligheden. Stikkontakter er generelt bestemt to gange større end deres virkelige mål, hvilket ikke kan accepteres.

#### *Kravspecifikationer til indvendig 3D-opmåling*

I Afsnit 4.2 er der opstillet kravspecifikationer mht. indvendig 3D-opmåling dels for relativ nøjagtighed på op til 5 mm og dels for absolut nøjagtighed på op til 15 mm.

Det har vist sig, at det ikke har været muligt at overholde kravet for relativ nøjagtighed på 5 mm – nøjagtigheden for modellerne, som er modelleret i de enkelte punktskyer, er gennemsnitlig beregnet til 9,5 mm.

Med hensyn til den absolutte nøjagtighed er det muligt at overholde den påkrævede nøjagtighed på 15 mm for objekter, der er modelleret udfra frie kanter. Mere kritisk bliver det at overholde nøjagtighedskravet for objekter, der er bestemt udfra

---

<sup>34</sup> Væsentlige flere end de seks punktskyer gruppen har scannet ind.

definerede kanter. Det er ikke muligt at bestemme disse objekter udfra frie kanter. Eksempelvis vil en dør, som består af et plan blive til en uendelig stor overflade, som ikke kan blive afgrænses vha. andre planer.

Det har vist sig, at der specielt er problemer med at bestemme dimensioner af mindre objekter, såsom stikkontakter samt objekter, der er sammenfaldende med bagvedliggende objekter f.eks. en væg. En løsning til at få mindre og udefinerbare objekter indmålt bedre kan være at måle disse i et supplerende ortofoto. Denne løsning vil blive undersøgt nærmere i det følgende kapitel.



# 10 ORTOFOTO I TESTOMRÅDET

Som afsluttende nævnt i forrige kapitel kan det være problematisk at generere mindre objekter og objekter, der er sammenfaldende med den bagvedliggende væg med en tilfredsstillende nøjagtighed i en punktsky. Det gør sig specielt gældende for objekter bestemt ud fra definerede kanter. En løsning på dette kunne være at måle afstande i ortofotos – denne løsning vil blive undersøgt i dette kapitel.

Til generering af ortofotos anvendes programmet Mesh & Map. Der er genereret ortofotos på baggrund af følgende.

- Fotos, som laserscanneren optager.
- DHM, genereret ud fra en punktsky.

Fotos draperes ned over den genererede DHM. Hvordan genereringen af et ortofoto foretages i Mesh & Map, kan læses i Appendiks A. Der er genereret ortofotos i rum 5.17 og 5.20.

I nedenstående tabel er det muligt at se ud fra hvilke scanninger, der er genereret ortofotos og herunder hvilken scanningsopløsning og billedokumentation, der er anvendt.

Ortofoto	Scanningsopløsning [hor x ver]	Billedokumentation	Antal billeder [hor x ver]
Skan20-100	0,125° x 0,25°	Detaljerede billeder	[40 x 13]
Skan17-300	0,25° x 0,25°	Oversigtsbilleder	[12 x 3]
Skan17-400	0,25° x 0,25°	Oversigtsbilleder	[12 x 3]

**Tabel 10.1: Anvendte scanningsopløsninger og billedokumentationer til generering af ortofotos. "Antal billeder" er max antal billeder.**

Der undersøges følgende i ortofotoene.

1. Nøjagtighed ved måling i et ortofoto
2. Scanningsopløsnings og billedokumentations betydning (sammenligning af "Skan20-100" med "Skan17-300" og "Skan17-400").

For at undersøge ovenstående punkter vil der blive målt 3D-afstande i de enkelte ortofotos, som vil blive sammenlignet med kontrolafstande jf. Bilag O. Det vil sige, at koordinaterne i planet bestemmes ud fra ortofotoet og højden ud fra DHM. Herunder vil der beregnes en spredning på afstande i det enkelte ortofoto, som karakteriserer nøjagtigheden af ortofotoet. Spredningen beregnes ud fra Formel 9.1.

I nedenstående tabel kan forskellige anvendte størrelser for de tre ortofotos ses. Det være sig gridstørrelsen i punktskyen, som anvendes til at generere DHM, anvendte kamerakonstanter til billederne, målforhold samt pixelstørrelse på objektet beregnet ud fra pixelstørrelse i billedet og målforhold.

Scanningsnr.	Gridstørrelse Hor x Ver [mm x mm]	Kamera- konstant [mm]	Max afstand [m]	Målforhold M	Pixelstørrelse på objekt X x Y [mm x mm]
Skan20-100	10,9 x 21,8	11,440	5	Ca.1 : 440	[2,0 x 2,2]
Skan17-300	17,5 x 17,5	3,009	4	Ca.1 : 1330	[6,2 x 6,7]
Skan17-400	17,5 x 17,5	3,009	4	Ca.1 : 1330	[6,2 x 6,7]

**Tabel 10.2: Anvendt gridstørrelse, kamerakonstant, max afstand, målforhold samt pixelstørrelse på objekt.**

Forinden de enkelte ortofotos undersøges vil der blive opstillet et overslag for den forventede målenøjagtighed i et ortofoto. Der tages udgangspunkt i kontrollen jf. Afsnit 6.1.2, hvor der blev foretaget et overslag over forventet målenøjagtighed. Der er tre fejlbidrag, der har indflydelse på en forventet målenøjagtighed.

- Fejlbidrag fra DHM
- Fejlbidrag fra orientering af kamera
- Fejlbidrag fra definitionsnøjagtighed i et ortofoto

### FEJLBIDRAG FRA DHM

DHM er genereret på samme måde som ved kontrollen i Afsnit 6.1.2 og udfra samme parameterindstillinger. Fejlbidraget fra DHM sættes derfor igen til 5 mm ( $\sigma_{DHM}$ ).

### FEJLBIDRAG FRA ORIENTERING

Ved fejlbidrag fra orientering af kameraet anvendes igen erfaringen fra kontrollen jf. Afsnit 6.1.2. Fejlbidraget sættes til 1 pixel<sup>35</sup>. Fejlbidraget er forskellig afhængig af billeddokumentationen ved de enkelte scanninger i rummene. Fejlbidraget i de to vektorkomponenters retninger tilsvarende pixelstørrelse på objekt jf. Tabel 10.2.

$$(10.1) \quad \sigma_{\text{orient}} = \sqrt{X^2 + Y^2} \quad , \text{ hvor}$$

$\sigma_{\text{orient}}$  er fejlbidrag fra orientering af kameraet

X er pixelstørrelse på objekt i X-retningen jf. Tabel 10.2

Y er pixelstørrelse på objekt i Y-retningen jf. Tabel 10.2

En samlet fejlbidrag i rummene er beregnet til nedenstående.

Ortofoto	Fejlbidrag fra orientering [mm]
Skan20-100	3,0
Skan17-300	9,1
Skan17-400	9,1

**Tabel 10.3: Fejlbidrag fra orientering af kameraet.**

<sup>35</sup> Gruppen er godt klar over, at dette er ønsketænkning, da en nøjagtighed på 1 pixel kræver en god kalibrering af kameraet, og gruppen har ingen ide om nøjagtigheden af kalibreringen.

## FEJLBIDRAG FRA DEFINITIONSØJAGTIGHED

Definitionsøjagtigheden blev udregnet i kontrollen jf. Afsnit 6.1.2 ved at måle det samme punkt 20 gange i ortofotoet.

$$(10.2) \quad \sigma_{\text{def}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\text{middel} - V_i)^2}{n-1}} \quad , \text{ hvor}$$

$\sigma_{\text{def}}$  er fejlbidraget fra definition af punkt i ortofoto [mm]

Middel er en beregnet middelværdi på punktet [mm]

$V_i$  er værdien for det aktuelle målte punkt [mm]

$n$  er antal gange punktet er målt

Følgende spredninger blev beregnet.

Scanning nr.	Opløsning Hor x Ver [° x °]	Definitionsøjagtighed på et punkt [mm]
2	0,0625 x 0,25	3,9
3	0,50 x 0,25	4,6
4	0,50 x 0,50	4,8
5	1,00 x 1,00	7,7

Tabel 10.4: Definitionsøjagtighed ved kontrollen Afsnit 6.1.2.

Ud fra definitionsøjagtighederne udregnet for ortofotoene ved kontrollen (jf. Afsnit 6.1.2), vurderes definitionsøjagtigheden for ortofotoene i testområdet.

Ortofoto	Opløsning Hor x Ver [° x °]	Definitionsøjagtighed på et punkt [mm]
Skan20-100	0,125° x 0,25°	4,0
Skan17-300	0,25° x 0,25°	4,5
Skan17-400	0,25° x 0,25°	4,5

Tabel 10.5: Definitionsøjagtighed ved ortofotos i testområdet.

## SAMLET FORVENTET MÅLENØJAGTIGHED

Ud fra fejlbidrag fra DHM, orientering af kameraet og definitionsøjagtighed i ortofotoene er der udregnet en samlet målenøjagtighed for de tre ortofotos ud fra følgende formel – se tabel Tabel 10.6.

$$(10.3) \quad \sigma_{\text{punkt}}^2 = \sigma_{\text{DTM}}^2 + \sigma_{\text{orient}}^2 + \sigma_{\text{def}}^2 \quad , \text{ hvor}$$

Målenøjagtigheden er gældende for et punkt, dvs. målenøjagtigheden for en afstand kan beregnes til  $\sigma_{\text{afstand}} = \sqrt{2}\sigma_{\text{punkt}}$ . Grovfejlsgrænsen for en afstand beregnes som  $3\sigma_{\text{afstand}}$ .

I nedenstående tabel kan den forventede målenøjagtighed for en afstand samt grovfejlsgrænsen ses.

Ortofoto	$\sigma_{\text{afstand}}$ [mm]	Grovfejlsgrænse [mm]
Skand20-100	10,0	30,0
Skand17-300	16	48,0
Skand17-400	16	48,0

Tabel 10.6 Samlet forventet målenøjagtighed.

## 10.1 VURDERING AF ORTOFOTOS

Der er genereret følgende ortofotos

- Ortofoto Skand20-100
- Ortofoto Skand17-300
- Ortofoto Skand17-400
- Ortofoto Skand20-100+Skand20-200 og Ortofoto Skand17-300+Skand17-400

De genererede ortofotos vil enkeltvis blive beskrevet nedenstående ud fra en sammenligning af afstande målt i ortofotoet og kontrolafstande jf. Bilag O.

### ORTOFOTO SKAND20-100

Der er foretaget mål af rummets dimensioner, på stikkontakter, vinduer, døre, radiatorer og plade. En sammenligning med afstande målt i ortofotoet og kontrolafstande kan ses i nedenstående tabel. Der henvises til Bilag Q for at se de foretagne beregninger.

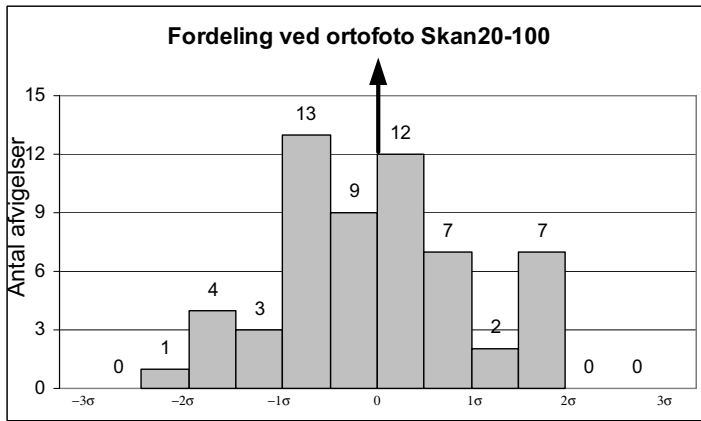
Objekt	Afvigelse [mm]	Antal afstand	Grovfejls- grænse [mm]	Antal afvigelser, der overskrider grov- fejlsgrænsen	Spredning [mm]
Rummets dimensioner	-13,0 til 14,7	20	30,0	0	8,4
Stikkontakter	-16,0 til 10,0	19	30,0	0	7,9
Vinduer	3,5 til 7,0	4	30,0	0	-
Døre	-11,0 til 14,5	11	30,0	0	8,2
Radiator, plade	-6,0 til 12,0	4	30,0	0	-
Alle	-16,0 til 14,5	58	30,0	0	7,9

Tabel 10.7: Resultat ved måling i ortofoto Skand20-100. "Spredning" beskriver måling i ortofoto efter, der er udtaget eventuelle afvigelser, der overstiger grovfejlsgrænsen. For enkelte objekttyper er der ikke beregnet spredning, da grundlaget synes at være for lille.

Enkelte afvigelser mellem afstande i ortofotoet og kontrolafstande oversteg fejlgrænsen. Disse blev genmålt i ortofotoet, og som det kan ses af ovenstående tabel, overstiger ingen afvigelser grovfejlsgrænsen. Som det kan ses i tabellen, har der ikke været problemer med at måle på mindre objekter, der er sammenfaldende med den bagvedliggende væg såsom stikkontakter. Til sammenligning med afstande beregnet på stikkontakter i punktskymodellen skand20-100 varierede afvigelserne fra -75 mm til 156 mm – i ortofotoet varierer afvigelserne fra -16,0 mm til 10,0 mm.

Et diagram med afvigelserne kan ses nedenstående.





Figur 10.1: Diagram med afvigelser mellem kontrolafstande og afstande målt i ortofoto Skan20-100.

Som det ses, følger diagrammet med afvigelserne tilnærmelsesvis en normalfordelingskurve.

### ORTOFOTO SKAN17-300

Objekt	Afvigelse [mm]	Antal afstand	Grovfejlsgrænse [mm]	Antal afvigelser, der overskrider grovfejlsgrænsen	Spredning [mm]
Rummets dimensioner	-13,0 til 11,0	12	48,0	0	8,2
Vinduer	1,5 til 9,5	3	48,0	0	-
Døre	-8,3 til 16,0	3	48,0	0	-
skab	-15,0 til 16,0	6	48,0	0	14,2
Radiator, luftkanal	-52,0 til 8,0	6	48,0	1	7,4
Alle	-52,0 til 16,0	30	48,0	1	9,8

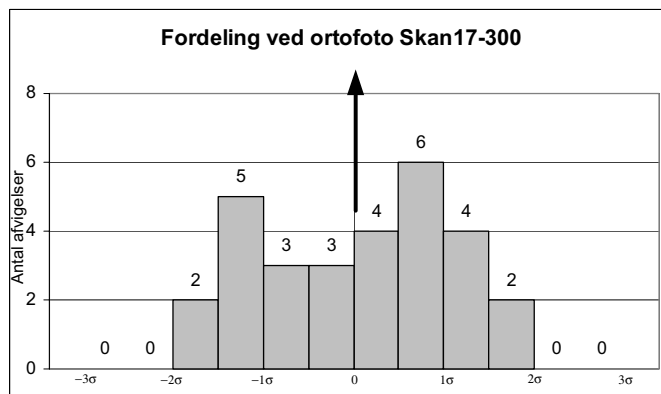
Tabel 10.8: Resultat ved måling i ortofoto Skan 17-300. "Spredning" beskriver måling i ortofoto efter, der er udtaget eventuelle afvigelser, der overstiger grovfejlsgrænsen. For enkelte objekttyper er der ikke beregnet spredning, da grundlaget synes at være for lille.

Ud fra tabellen kan det ses, at en enkelt afvigelse overstiger grovfejlsgrænsen, ellers ligger øvrige afvigelser mellem [-15 mm; 16 mm]. Afstanden med den store afvigelse fra kontrolafstanden er et mål, foretaget af radiatorens bredde. Afstanden tages ud, da der omkring denne radiator har været dårlig dækning i ortofotoet, grundet skygger fra et prismestativ – se nedenstående figur. Spredningen er beregnet på baggrund af de øvrige 29 afvigelser til 9,8 mm.



Figur 10.2: Illustration af problemer med at måle radiatoren i rum 5.17 pga. skygger fra prismestativ.

Der er udtegnet et diagram over afvigelserne nedenstående, og som det kan ses, følger det tilnærmelsesvis en normalfordeling.



Figur 10.3: Diagram med afvigelser mellem kontrolafstande og afstande målt i ortofoto Skan17-300.

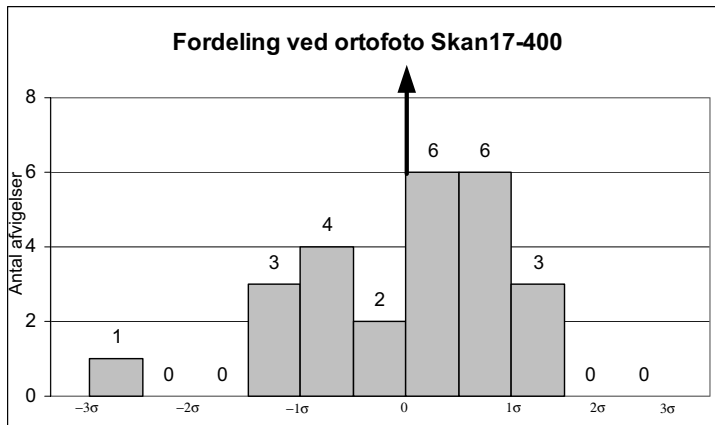
### ORTOFOTO SKAN17-400

Objekt	Afvigelse [mm]	Antal afstand	Grovfejlsgrænse [mm]	Antal afvigelser, der overskrider grovfejlsgrænsen	Spredning [mm]
Rummets dimensioner	-14,0 til 12,0	12	48,0	0	9,7
Vinduer	0,5 til 6,5	3	48,0	0	-
Døre	-41,5 til 14,7	2	48,0	0	-
Skab	-20,0 til -20,0	2	48,0	0	-
Radiator, luftkanal	-11,0 til 13,0	6	48,0	0	10,2
Alle	-41,5 til 14,7	25	48,0	0	13,5

Tabel 10.9: Resultat ved måling i ortofoto Skan 17-400. "Spredning" beskriver måling i ortofoto efter, der er udtaget eventuelle afvigelser, der overstiger grovfejlsgrænsen. For enkelte objekttyper er der ikke beregnet spredning, da grundlaget synes at være for lille.

Der er ingen afvigelser, der overskrider grovfejlsgrænsen, og der beregnes en samlet spredning på 13,5 mm

Et diagram med afvigelse kan ses nedenstående, hvor det kan ses, at afvigelse ligger omkring middelværdien.



Figur 10.4: Fordelingskurve af afvigelser mellem kontrolafstande og afstande målt i ortofoto Skan17-400.

## ANDRE ORTOFOTOS

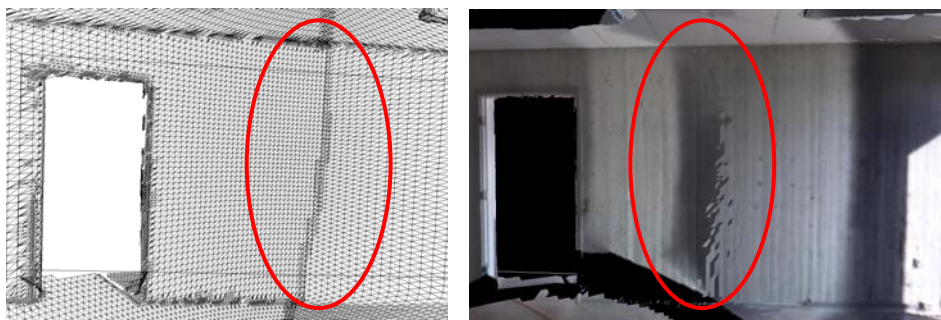
Det er endvidere forsøgt at generere ortofotos ud fra flere scanninger, hvor der er genereret et ortofoto ud fra scanning Skan20-100 og Skan20-200 og et ud fra scanning Skan17-300 og Skan17-400.

Ved generering af et ortofoto ud fra to scanninger bliver scanningerne først sammenknyttet i 3D-Extractor, hvorefter den samlede punktsky importeres til Mesh & Map.

Nu skulle man tro, at det er muligt at generere en DHM ud fra den samlede punktsky, men det er ikke tilfældet. Programmet opfatter det stadig som to punktskyer, som nu ligger i samme koordinatsystem. Det betyder, at programmet genererer to DHM, én for hver punktsky. Programmet foretager beregninger for, hvor den ene DHM er bedre end den anden, dvs. at nogle steder i trekantmodellen er den ene DHM anvendt og andre steder den anden DHM. Hvordan beregninger foretages, er gruppen ikke klar over, men det synes at være problematisk, at der ikke genereres én DHM ud fra den samlede punktsky. Det samme gør sig gældende med billedokumentationen – hvor der er anvendt punkter fra eksempelvis Skan17-300 til at generere DHM, er der også anvendt fotos fra Skan17-300 til at generere ortofotoet.

Der vil nogle steder i trekantmodellen være overlap mellem DHM fra den ene og den anden punktsky. Det betyder samtidigt, at der vil være et overlap af fotoerne fra de to scanninger. Fotoerne bliver nærmest ”presset” sammen – et eksempel kan

ses nedenstående. Det tyder på, at der ikke bliver foretaget en kontrast udjævning mellem billederne.



Figur 10.5: Til venstre ses et udsnit af trekantsmodellen for rum 5.17 af østvæggen. Til generering af trekantsmodellen er der anvendt punktskyerne Skan17-300 og Skan17-400. I udsnittet ses et overlap mellem punktskyerne Skan17-300 og Skan17-400. Til højre ses samme udsnit fra ortofotoet, hvor billeddækning omkring overlappet ser mærkeligt ud. Det kunne tyde på, at programmet ikke foretager en kontrast udjævning mellem billederne. På disse steder i ortofotoet er det stort set umuligt at se, hvor der bliver målt fra.

Der er som sagt genereret et ortofoto udfra Skan20-100 og Skan20-200 og et udfra scanning Skan17-300 og Skan17-400. I ortofotoerne er der igen målt afstande, og disse er sammenlignet med kontrolafstande. Der beregnes en spredning på 9,5 mm i både ortofotoet "Skan20-100+Skan20-200" og i ortofotoet "Skan17-300+Skan17-400". Der henvises til Bilag Q til nærmere beregninger.

Det er egentligt endnu en kontrol af måling i de enkelte ortofotos, da der ikke bliver genereret en samlet DHM udfra den samlede punktsky. Årsagen til, at Mesh & Map ikke opfatter det som en samlet DHM, kan skyldes, at punktskyerne er sammenknyttet i 3D-Extractor. Problemet kan muligvis løses ved at sammenknytte punktskyerne i Mesh & Map, men dette er ikke undersøgt nærmere af tidsmæssige årsager. Der vil derfor ikke blive foretaget yderligere kontrol af de samlede ortofotos.

## 10.2 DELKONKLUSION

Der samles op på de beregnede spredninger i nedenstående tabel, hvorudfra der kan svares på de to tidligere opstillede punkter.

- Nøjagtighed ved måling i ortofoto
- Scanningsopløsnings og billedokumentations betydning

Ortofoto	Spredning [mm]	Forventet spredning [mm]	Scanningsopløsning hor x ver [° x °]	Billeddokumentation
Skan20-100	7,9	10,0	0,125° x 0,25°	Detaljerede billeder
Skan17-300	9,8	16,0	0,25° x 0,25°	Oversigtsbilleder
Skan17-400	13,5	16,0	0,25° x 0,25°	Oversigtsbilleder
Skan20-100 og skan20-200	9,5	10,0	0,125° x 0,25°	Detaljerede billeder
Skan17-300 og skan17-400	9,5	16,0	0,25° x 0,25°	Oversigtsbilleder

**Tabel 10.10: Opsamling på nøjagtighed af måling i ortofotos.**

Som det kan ses ud fra tabellen, er der målt bedre end forventet – ca. en fakta 1,6 ved anvendelse af oversigtsbilleder og en fakta 1,2 ved anvendelse af detaljerede billeder.

Nøjagtigheden varierer i ortofotoene fra 7,9 mm til 13,5 mm. Nøjagtigheden i ortofotoet Skan20-200 er en anelse bedre end i ortofotoerne Skan17-300 og skan17-400. Det var også ventet, da der er anvendt dels en bedre scanningsopløsning og dels bedre billeder i denne scanning. Forskellen er på 2-5 mm i spredning, hvilket ikke synes meget, hvis scanningstiden tages i betragtning. Scanningstiden for scanning Skan20-100 tog ca. 45 min., mens scanningerne Skan17-300 og skan17-400 tog ca. 15 min.

Valg af scanningsopløsning og billeddokumentation mhp. at generere ortofotos afhænger af den ønskede nøjagtighed, men tages scanningstiden i betragtning vil der nok i de fleste tilfælde, vælges en relativ lav scanningsopløsning og oversigtsbilleder, som billeddokumentation.

Det har vist sig, at der ikke er problemer med at måle afstande på mindre objekter såsom stikkontakter og objekter, som er sammenfaldende med en væg, såsom døre i ortofotoerne. Afstande målt på mindre objekter i et ortofoto kan måles med en spredning på under 10 mm.

Som tidligere nævnt er det vanskeligt at måle på mindre objekter i punktskymodelerne, og en løsning på dette kunne være at foretage målinger i et ortofoto. Det har vist sig, at ortofotos vil være et godt supplement til punktskymodeller ved måling af mindre objekter og objekter, der er sammenfaldende med andre objekter. Det er dog stadigvæk ikke muligt at overholde den relative nøjagtighed jf. problemformulering på 5 mm i forbindelse med indvendig 3D-opmåling.

Målingerne i ortofotoerne vil formentlig blive bedre, hvis kameraet var af en bedre kvalitet. Det anvendte kamera, som sidder i laserscanneren, kan sammenlignes med et amatør kamera.



# 11 KONKLUSION

Som skrevet i indledningen, Kapitel 1, har dette projekt taget udgangspunkt i en artikel omhandlende indvendig 3D-opmåling af bygninger. Denne artikel beskriver et system, som Landmålergården A/S har udviklet til indvendig 3D-opmåling, og som vil kunne effektivisere reovering af eksisterende bygninger.

Dette afgangsprøveprojekt omhandlende terrestrisk laserscanning kan ses som en videreførelse af gruppens 9.semester projekt. Gruppen har haft et ønske om at opnå en yderligere viden indenfor dette emne, da gruppen ser denne opmålingsmetode som værende en metode, der i den nærmeste fremtid vil vinde indpas indenfor landmålingsområdet. Gruppen arbejdede på 9. semester med en ”camera view scanner”, hvor gruppen fik dannet sig et indtryk af, hvad denne type laserscanner er velegnet til.

Gruppen ønskede her på afgangsprøvet at arbejde med den anden type laserscanner ”panoramic view scanner”, og der er derfor taget kontakt med Landinspektørfirmaet LE34 A/S, som er det eneste firma i Danmark, der er i besiddelse af en ”panoramic view scanner”. I denne forbindelse er der opstået et samarbejde, hvor gruppen har lånt laserscanningssystemet Callidus V1-1 af Landinspektørfirmaet LE34 A/S.

På baggrund af gruppens interesse for dels indvendig 3D-indvendig opmåling og dels terrestrisk laserscanning lyder den endelige problemformulering således.

Er opmålingsmetoden terrestrisk laserscanning anvendelig til indvendig 3D-opmåling (facility management) af bygninger i forbindelse med byfornyelse?  
Med hvilken nøjagtighed kan indvendig 3D-opmåling foretages med Systemet Callidus V1-1?

Svaret på første del af problemformuleringen er ja – gruppen ser helt klar terrestrisk laserscanning som være anvendelig til indvendig 3D-opmåling af bygninger i forbindelse med byfornyelse. Dog med den forudsætning, at der anvendes en ”panoramic view scanner”.

Gruppen har anvendt Systemet Callidus V1-1 til at svare på problemformuleringen, og dette system synes at være særdeles anvendelig, hvis systemets terrestriske fotogrammetridel bliver kombineret med den terrestriske laserscanningsdel.

Til at besvare problemformuleringens anden del er der indmålt et testområde bestående af tre mindre rum, som kan sidestilles med en lejlighed.

Derudover er der foretaget kontrol af laserscanningssystemet, som også er med til at svare på problemformuleringen. Følgende kontroller er foretaget.

- Kontrol af scanningsopløsning
- Kontrol af hældning
- Kontrol af kompensator

#### *Kontrol af scanningsopløsning*

Med hensyn til kontrol af scanningsopløsningen viser det sig, at scanningsopløsningen har en stor betydning for et objekts dimensioner. Der kan ud fra kontrollen vurderes, at der kan forventes, at et objekts dimensioner er to gange gridstørrelse mindre end objektets reelle dimensioner.

I samme test er der genereret ortofotos på en tavle, hvor det viser sig, at måling i et ortofoto er en faktor 2-3 gange bedre end i en punktskymodel. Denne faktor kan måske blive større, hvis der anvendes en bedre billedkvalitet.

#### *Kontrol af hældning*

Med hensyn til kontrol af hældning af et plans overflade, er et plan scannet ind med forskellige indfaldsvinkler i intervallet mellem 40° og 90°. Det har vist sig, at en ændring af indfaldsvinklen ikke har betydning for nøjagtigheden af planets bestemmelse ved den anvendte scanningsopløsning.

#### *Kontrol af kompensator*

Med hensyn til kontrol af kompensatoren har det vist sig, at kompensatoren fungerer efter hensigten, da Z-aksen i laserscanneren bliver kompenseret til lodlinien.

### **MED HVILKEN NØJAGTIGHED KAN INDVENDIG 3D-OPMÅLING FORETAGES MED SYSTEMET CALLIDUS V1-1**

Svaret på anden del af problemformuleringen bliver besvaret ud fra følgende.

- Relativ nøjagtighed
- Absolut nøjagtighed

Til at give et bud på den relative nøjagtighed er der modelleret en punktskymodel ud fra en scanning i hvert rum, dvs. i alt tre punktskymodeller.

Til at give et bud på den absolutte nøjagtighed er der modelleret en samlet punktskymodel ud fra de seks scanninger. Det er der gjort ud fra tre metoder.

- Sammenknytning vha. Fuzzy Join
- Sammenknytning vha. tre planer
- Sammenknytning vha. global transformation

Svaret på anden del af problemformulering kan ses i nedenstående tabel.



Punktskymodel/metode	Objekter modelleret ud fra frie kanter		Objekter modelleret ud fra definerede kanter	
	Modellens nøjagtighed [mm]	Forventet nøjagtighed [mm]	Modellens nøjagtighed [mm]	Forventet nøjagtighed [mm]
Relativ nøjagtighed				
Gennemsnit af punktskymodeller	9,5	±7,1	15,2	±11,3
Absolut nøjagtighed				
Fuzzy Join	8,2	±7,1	17,2	±11,3
Tre Planer	8,0	±7,1	18,6	±11,3
Global transformation	7,6	±7,1	15,8	±11,3

**Tabel 11.1: Nøjagtigheden af indvendig 3D-opmåling ved anvendelse af Callidus systemet. Der er beregnet en gennemsnitlig relativ nøjagtighed for de tre punktskymodeller (Skan17-300, Skan18-600 og Skan20-100), da de er modelleret på samme måde.**

Som det kan ses, er modellernes nøjagtighed ikke helt som forventet. Det gør sig gældende både for objekter, der er modelleret ud fra frie kanter og objekter modelleret ud fra definerede kanter.

#### *Detaljeringsgrad jf. problemformulering*

For at opfylde de opstillede krav mht. detaljeringsgrad jf. Kapitel 4 skal følgende objekter være indeholdt i punktskymodellen.

- Indvendige vægflader
- Vindueskarme/vinduesnicher
- Lofter
- Gulve
- Dørkarme og fodlister
- VVS og el, såsom vandrør og stikkontakter

Det har været muligt at modellere vægflader, vindueskarme/vinduesnicher, lofter og gulve. Men der har været problemer med at modellere mindre objekter, såsom stikkontakter og objekter, der er sammenfaldende med andre objekter, f.eks. fodlister og døre.

Det har endvidere vist sig at være vanskeligt at modellere objekter, hvis overfladerne er sorte – sorte overflader absorberer laserstrålen, således at et svagt signal returneres til laserscanneren

#### *Nøjagtighedskrav jf. problemformulering*

Der er i problemformuleringen endvidere opstillet følgende krav til opmålingsmetoden.

- Relativ nøjagtighed: Optil 5 mm
- Absolut nøjagtighed: Optil 15 mm

Den relative nøjagtighed er ikke mulig at overholde hverken ud fra objekter, der er modelleret ud fra frie kanter eller ud fra definerede kanter ud fra Tabel 11.1.

Den absolutte nøjagtighed er mulig at overholde på objekter, der er modelleret udfra frie kanter, medens den ikke er mulig at overholde på objekter, der er modelleret udfra definerede kanter.

#### *Metodevalg*

Udfra de tre anvendte metoder til sammenknytning af punktskyer har det for gruppen været metoden ”Sammenknytning vha. tre planer”, der har været nemmest at gå til. Samtidig synes det også at være den mest anvendelig metode til sammenknytning af regulære rum og til mindre opmålingsområder, som det har været tilfældet i testområdet. Metoden alene synes ikke at være anvendelig til større opmålingsområder grundet risiko for fejlphobning.

#### *Ortofoto*

Der er genereret ortofoto, hvor det har vist sig, at der kan måles cirka 1,5 gange bedre i et ortofoto end i en punktskymodel på objekter modelleret udfra definerede kanter. Nøjagtigheden i de genererede ortofotos kan ses nedenstående, hvor det kan ses, at der er målt væsentlig bedre end forventet.

Ortofoto	Ortofotoets nøjagtighed [mm]	Forventet nøjagtighed [mm]
Relativ nøjagtighed		
Skan20-100	7,9	±10
Skan17-300	9,8	±16
Skan17-400	13,5	±16
Absolut nøjagtighed		
Skan20-100+Skan20-200	9,5	±10
Skan17-300+Skan17-400	9,5	±16

**Tabel 11.2: Ortofotos nøjagtighed og forventede nøjagtighed.**

Gruppen ser ortofotos som et godt supplement til punktskymodeller, hvor mindre objekter, sorte objekter samt objekter, der er sammenfaldende med bagvedliggende objekter kan måles. Problemformuleringens krav til detaljeringen kan blive opfyldt ved at foretage supplerende målinger i ortofotos.

Dog er det stadigvæk ikke muligt at overholde den relative nøjagtighed ved måling i et ortofoto. Den absolutte nøjagtighed kan ligesom i punktskymodellerne overholdes.

Gruppen ser på baggrund af dette projekt, at opmålingsmetoden terrestrisk laser-scanning vil være anvendelig til indvendig 3D-opmåling, samt at den vil være en alternativ opmålingsmetode til Landmålergårdens metode. Opmålingsmetoden terrestrisk laser-scanning vil desuden forbedres væsentligt, hvis terrestrisk laser-scanning kombineres med terrestrisk fotogrammetri.

# 12 PERSPEKTIVERING

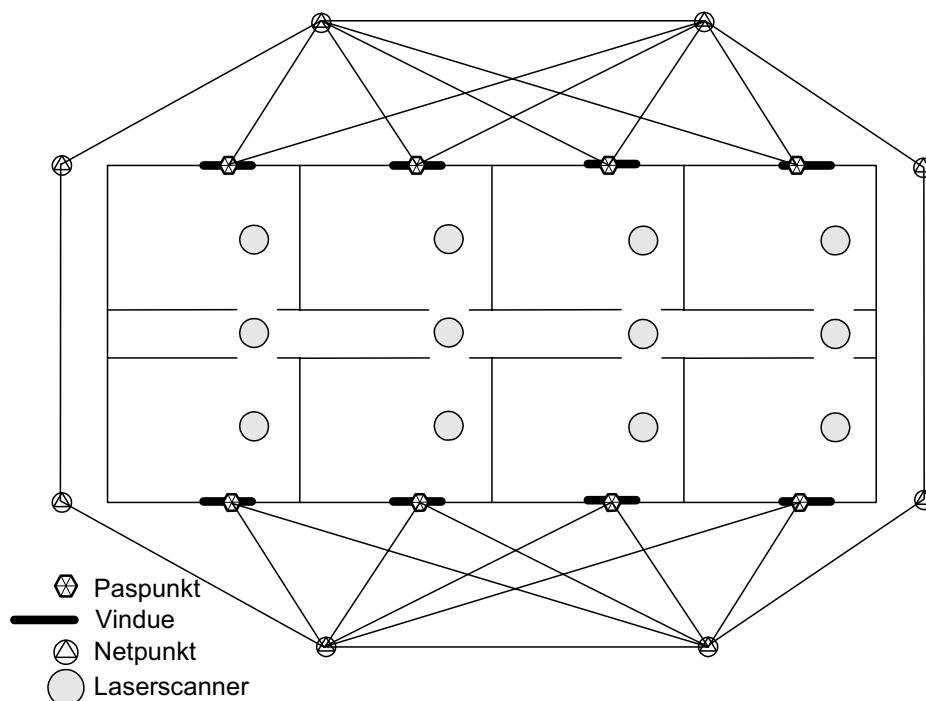
---

Indvendig 3D-opmåling af bygninger (Facility mangement) er et område, hvor der er meget fokus på for tiden. Dette skyldes, at de forskellige interessenter kan begynde at se perspektiver indenfor området. Ved at anvende metoder som præfabrikation og materialestyring kan der opnås besparelser og effektivitet indenfor bl.a. renovering af bygninger.

Der er konkluderet, at Systemet Callidus V1-1 er anvendelig til indvendig 3D-opmåling. Det er dog ikke ensbetydende med, at systemet vil blive anvendt til dette i praksis. Grunden til dette er, at der er andre faktorer, hvilke der ikke i projektet er taget hensyn til, der spiller ind. Der er faktorer som tid, økonomi, udformning af rummene mv.

For, at Systemet Callidus V1-1 kan blive mere konkurrencedygtig til indvendig 3D-opmåling, og derigennem vinde større udbredelse, skal det ud fra gruppens synspunkt foretages en række forbedringer af systemet – dette gælder selve laserscanneren, men også det tilhørende software, se nærmere Appendiks C.

Hvis de forskellige forbedringer, som er beskrevet i Appendiks C, bliver taget til efterretning, vil Systemet Callidus V1-1 i forbindelse med indvendig 3D-opmåling blive effektiviseret væsentligt. Specielt, hvis muligheden vedrørende sammenknytning af punktskyer vha. globale transformationer bliver anvendt sammen med de eksisterende sammenknytningsmetoder dvs. ”Sammenknytning vha. tre planer” og ”Sammenknytning vha. Fuzzy Join”. En fremtidig indvendig 3D-opmåling af bygninger kan se ud som nedenstående figur.



Figur 12.1: Princip ved fremtidens indvendig 3D-opmåling af flere rum. På vinduerne er der påsat paspunkter, således at scanninger indvendig kan knyttes op på det omkringliggende net. Dette kan foregå ved transformationer med overbestemmelser. Punktskyer kan sammenknyttes med metoderne "Sammenknytning vha. tre planer" og "Sammenknytning vha. Fuzzy Join", men også ved transformationer.

Ved at anvende paspunkter på vinduerne undgår man at lave net igennem bygningen, hvorved der spares tid ved indmåling af nettet. Dog bør der nok anbefales at foretage enkelte træk gennem bygningen for på denne måde at styrke nettet.

Princippet kan sammenlignes med Landmålergårdens metode, men ved Landmålergårdens metode trækkes nettet igennem hele bygningen, hvilket ifølge Søren Nørmølle fra Landmålergården A/S er det, der tager lang tid ved deres metode.

Hvis der er tale om flere etager, kan sammenknytning af etagerne ske ved transformation over paspunkterne. Princippet, ved at transformere på denne måde, kan sammenlignes med fotogrammetriens anblokmetode.

Landmålergårdens metode synes at være den metode ud fra de eksisterende, der er bedst egnet til indvendig 3D-opmåling af bygninger. Selv med de forbedringer, der er foreslået i Appendiks C til Callidus systemet, vil der være mange situationer, hvor det er nemmere og hurtigere at anvende Landmålergårdens metode til indvendig 3D-opmåling. I nedenstående tabel er der oplyst nogle situationer, hvor gruppen ser den ene metode mere anvendelig end den anden.

	Landmålergårdens metode	Systemet Callidus V1-1
Regulære rum	X	
Komplicerede rum		X
Rum med ikke plane vægge		X
Høj detaljeringsgrad		X
Lav detaljeringsgrad	X	
Nøjagtighed	X	X
Ikke ryddede rum	X	
Ryddede rum		X

Tabel 12.1: Anvendelse af Landmålergårdens metode og Systemet Callidus V1-1.

Generelt kan det siges, at Landmålergårdens metode er bedre til ”ukomplicerede” opgaver, hvor der skal måles få punkter til at generere rummene. Der, hvor systemet Callidus vil være konkurrencedygtig, er ved opgaver, hvor der kræves meget detaljerede modeller. Men også til opgaver, hvor der ønskes mange små objekter kortlagt. Det kunne f.eks. være stikkontakter, og disse kan kortlægges i et genereret ortofoto.

En anden situation, hvor Systemet Callidus vil være at foretrække, er opgaver, hvor der findes mange komplicerede rum - f.eks. toiletter, køkken mv. Det er rum, hvor der er mange objekter, der kan modelleres som simple geometriske figurer. De er relative nemme at modellere i det tilhørende software, da softwaret indeholder funktioner til dette. Hvis der er objekter, der ikke kan modelleres tilfredsstillende som geometriske figurer, er det relativt let at generere TIN-modeller, hvorefter objekterne kan modelleres på baggrund af disse. Men samtidig skal man have for øje, at de forventede nøjagtigheder, som er angivet i specifikationerne for Systemet Callidus V1-1, er gældende fra 1 m mellem objekt og laserscanner. Derfor kan det blive problematisk at opmåle mindre toiletter og lign. med Systemet Callidus V1-1.

Callidus systemet vil også være at foretrække i bygninger, hvor der ikke er regulære rum, eller hvor væggene ikke kan antages at være plane f.eks. runde<sup>36</sup> eller gamle bygninger. Her vil Systemet Callidus igen have den fordel, da der er indbygget funktioner til at modellere simple geometriske figurer, eller der kan genereres TIN-modeller.

For, at Callidus laserscanneren kan være en fornuftig alternativ metode til indvendig 3D-opmåling, er der en væsentlig faktor, som skal tages med i overvejelserne – nemlig ryddeligheden af rummene. Hvis der er mange uønskede objekter såsom stole og borde, som skygger i forbindelse med opmålingen, vil terrestrisk laser-scanning ikke være at foretrække.

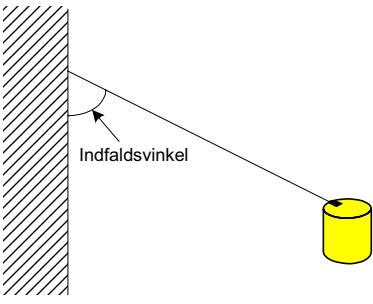
Som det ses, kan der ikke gives et entydigt svar på, hvilken metode der er fremtidens metode. Det er flere overvejelser, der skal tages stilling til fra opgave til opgave før en metode vælges.

<sup>36</sup> Det kunne f.eks. være siloer.

I stedet for vælge mellem metoderne kunne det tænkes, at fremtidens løsning vil være en kombination, hvor styrker fra metoderne anvendes på bedste vis. Et konkret eksempel på dette kan nævnes en 3D-kortlægningsopgave af Nyboder i København. Her blev den indvendige opmåling foretaget med Landmålergårdens metode, hvorimod facaderne blev modelleret ud fra laserscanningsdata.

# 13 BEGREBSLISTE

Begreb	Forklaring
3D-Extractor:	Program i Callidus softwarepakken til bearbejdning af punktskyer.
AutoCad:	Cad-program.
Billeddokumentation:	Optagelse af billeder ved en scanning, det kan være oversigtsbilleder eller detaljerede billeder.
Blinde områder:	Områder, som ikke kan scannes.
Brudlinier:	Supplerende linier i den digital højdemodel. Brudlinier repræsenterer skarpe ændringer i terrænet, f.eks. fod og top af en skrænt.
Camera View Scanner:	En laserscanner, der er begrænset af en scanningsvinkel i både horisontal og vertikal retning.
Callidus:	Producent af 3D-laserscannere.
Cyclone:	Program til en laserscanner af mærket Cyra 2500 til modellering og bearbejdning af laserscannede data.
Cyra:	Producent af softwaret Cyclone og terrestriske laserscannere.
Cyra 2400:	En terrestrisk laserscanner produceret af Cyra og forløberen til Cyra 2500.
Cyra 2500:	En terrestrisk laserscanner produceret af Cyra.
DHM:	Digital Højde Model – en grafisk fremstilling af et terræns højdeforhold.
Disto <sup>tm</sup> :	Elektronisk afstandsmåler produceret af Leica.
DTM:	Digital Terræn Model – en grafisk fremstilling af terrænet. En DTM indeholder flere data om terrænet end en DHM.
Dxf:	Udvekslingsformat til Cad-programmer.
Face List:	Programudvidelse til 3D-Extractor, er specielt velegnet til facility management.
Facility management:	International betegnelse for 3D-indvendig opmåling og kortlægning.
Footprint:	Er laserstrålens diameter på objektet. Footprintets størrelse afhænger bl.a. af indfaldsvinkel og scanningsafstand.
Fototalstation:	Totalstation, hvor der er påmonteret et kamera.

Fuzzy Join:	Funktion til sammenknytning af punktskyer vha. en punktsky-sudjævning i 3D-Extractor.
Global transformation:	Funktion i 3D-Extractor til at systemorientere en/flere punktskyer.
Grid:	Et grid angiver afstanden mellem scannede punkter - horisontalt og vertikalt.
ICA-fil:	Kalibreringsfil til kameraet på Callidus laserscanneren. Denne indlæses på LMS-computeren.
ICP:	<i>Iterative Closest Point</i> . En algoritme, der anvendes til at sammensætte 3D-datasæt uden transformationspunkter.
Indfaldsvinkel:	Definerer vinklen mellem laserstråle og objekt. 
Intensitet:	Er et mål for den mængde energi, som den returnerede laserstråle har. Energimængde afhænger bl.a. af objektets farve, materiale, indfaldsvinkel og scanningsafstand.
LMS-computer:	Computer til Callidus laserscanner.
LMS-software:	Software, der anvendes på LMS-computeren til at styre laserscanneren.
MATLAB:	Program til løsning af matematiske problemer.
Mesh & Map:	Program i softwarepakken til Callidus til behandling af 3D-laserscanningsdata.
Normalvektor:	En vektor, der står vinkelret på et plan. Normalvektoren fremkommer som vektorprodukt mellem to vektorer, der udspænder et plan.
Opløsning:	Vinklen mellem laserstråler i vertikal- og horisontalretning.
Opretning:	En proces, hvorved der fjernes hældningsforskydninger i et foto. Forudsættes et fladt terræn, vil en opretning give et foto ensartet målforhold.
Ortofoto:	Et foto, hvor hældnings- og højdeforskydninger er elimineret.
Overflade:	En overflade beskriver et objekts overflader.



Panoramic view scanner:	En laserscanner, der kan rotere 360° i enten horisontal eller vertikal retning.
Pcmaal:	Et landmålingsprogram.
Plan:	Et plan er en objekttype ligesom en kugle, kegle mv.
Punktsky:	Betegnelsen for en indsamlet mængde punkter i forbindelse med laserscanning. En punktsky kan bestå af en eller flere scanninger.
Punktskymodel:	En model genereret udfra en eller flere punktskyer.
RGB-værdi:	En farves RGB-værdi er sammensat af tre tal mellem 0 og 255. Tallene skrives som regel med kommaer imellem, f.eks. 0, 0, 255. Det første tal angiver værdien af rød (red), det andet af grøn (Green) og det tredje af blå (Blue).
Robust udjævning:	Iterativ udjævning, hvor observationerne vægtes efter residualerne.
Scanningsvinkel:	Vinklen, som laserscanneren opmåler horisontalt og vertikalt.
Skygge:	Område bagved et scannet objekt, som ikke bliver scannet ind.
Støj:	Fejlagtige indscannede punkter.
TIN-model:	Triangular irregular Network. En metode til triangulering over punktsæt.
Triangulation:	Et givent sæt punkter forbindes til et trådnæt af trekanter.
Turbonet:	Program, der udjævner efter mindste kvadraters princip.
Tvangscentrering:	Metode til at mindske centreringsspredningen i forbindelse med netmåling.
Vinduesniche:	Åbning i væg, hvor vinduet er placeret.
Visual adjustment:	Metode til at sammennytte punktskyer i 3D-Etractor. Sammenknytningen sker på øje mål.



# 14 LITTERATURLISTE

- [Andersen, 1999] Andersen, Ib; **Den skinbarlige virkelighed – om valg af samfundsvidenskabelige metoder**; 1. udgave 3. oplag, Samfundslitteratur 1999.
- [Bech og Jensen, 1999] Bech, Carsten og Jensen, Karsten; **Pcmaal-Vejledning**, Laboratoriet for Geoinformatik, Aalborg Universitet, 1999.
- [Besl & McKay, 1992] Besl, Paul J. og McKay, Neil D.; **A Method for Registration of 3-D Shapes**, printed in IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol 14, no. 2 s. 239-256, February 1992.
- [Boehler & Marbs 2002] Boehler, Wolfgang & Marbs, Andreas; **3D Scanning Instruments**, presented at CIPA, Heritage Documentation - International Workshop on Scanning for Cultural Heritage Recording - Corfu, Greece – 2002.
- [Callidus, 2002a] Callidus Precision Systems; **Manual – 3D-Extractor<sup>®</sup>**, 2002.
- [Callidus, 2002b] Callidus Precision Systems; **Reconstructor – Reconstructing the third dimension**, 2002.
- [Callidus, 2001a] Callidus Precision Systems; **Operating Instructions – 3D Laser Measuring System**, 2001.
- [Callidus, 2001b] Callidus Precision Systems; **Manual – LMS Software**, 2001.
- [Callidus, 2001c] Callidus Precision Systems; **Manual – Face List**, 2001.
- [Cederholm, 2000] Cederholm, Peter; **Udjævning**, 2. udgave 1. revision, Aalborg Universitet 2000.
- [CIS-CAD, 2000] By og Boligministeriet; **CIS-CAD vejledning**, By og Boligministeriet, 2000.
- [Edwards & Penney, 1998] Edwards, C. H. & Penney, D. E.; **Calculus with analytic geometry**, 5<sup>th</sup> edition, Prentice Hall, 1998.

- [Fangi et. al. 2001] Fangi, Gabriele; Fiori, Federica; Gagliardini, Gianluca & Malinverni, Eva S.; **Fast and Accurate Close Range 3D Modelling by Laser Scanning System**, presented at CIPA 2001 International Symposium, Surveying and Documentation of Historic Buildings, Monuments, Sites - Traditional and Modern Methods, University of Potsdam, Germany 2001.
- [Hellemann og Petersen, 2002] Hellemann, Morten og Petersen, Michael H.; **Volumenberegning ved terrestrisk laserscanning**, Afgangspjekt på Landinspektøruddannelsen, Aalborg Universitet, 2002.
- [Jacobi et. al. 1989] Jacobi, Ole; Risager, Jørgen og Thiesen, Klaus; **Landmåling – Instrumenter og Metoder**, Institutet for Landmåling og Fotogrammetri, Danmarks Tekniske Højskole, 1989.
- [Jensen, 2002] Jensen, Karsten; **Landmåling i Teori og Praksis**, Laboratoriet for Geoinformatik, Institut for Samfundsudvikling og Planlægning, Aalborg Universitet 2002.
- [Johansen et. al. 2002] Johansen, Rasmus L.; Pedersen, Hans Christian M.; Pedersen, Jacob E.; Thorhauge, Martin og Wind, Kasper M. J.; **Indvendig 3D-opmåling med fototalstation**, Aalborg Universitet, 2002.
- [Johansen og Andersen, 1998] Johansen, Ivar M. og Andersen Øystein; **En innføring i Digital Fotogrammetri til kartleggingsformål**, Norges Landbrukshøgskole, Institut for kartfag, 1998.
- [Kern et. al. 2002] Kern, Fredie; Thomsen, Sven; Mittelstädt, Dirk & Gay Olaf; **Integrierte Auswertung von Laserscanner - und Bilddaten für das Facility-Management**, printet ind Luhmann, Thomas, Photogrammetrie und Laserscanning – Anwendung für As-Built-Dokumentation und Facility Management, Wichmann, s. 107-117, 2002.

- [Langis et al. 2001] Langis, Christian; Greenspan, Michael & Godin, Guy; **The Parallel Iterative Closest Point Algorithm**, 3DIM0: Proceedings of the 3rd International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling, Quebec City, Quebec, Canada, May 28-June 1, 2001.
- [Lavridsen, 1993] Lavridsen, Ole B.; **Fotogrammetri**, 9 udgave, AUC, 1993.
- [Leica, 1994] Leica, **Disto™ -Vejledning**, 1994
- [Lemmens & Van den Heuvel, 2001] Lemmens, Mathias J.P.M. & Van den Heuvel, Frank A.; **3D - Close-range Laser mapping System**, GIM-International, s. 30-33, January 2001.
- [Lichti & Harvey, 2002a] Lichti, D. D. & Harvey, B. R.; **The Effects Of Reflecting Surface Material Properties on Time-Of-Flight Laser Scanner Measurements**, presented at Symposium on Geospatial Theory, Processing and Applications, Ottawa 2002.
- [Lichti & Harvey, 2002b] Lichti, D. D. & Harvey, B. R.; **An Investigation Into The Effects of Reflecting Surface Material Properties On Terrestrial Laser Scanner Measurements**, printed in Geomatics Research No. 76 s. 1-22. June, 2002.
- [Loederman, 2000] Loederman, Jan H.; **Construction Surveyors Cut out by 3D-Scanning?**, printed in GIM-International Volume 14 nr. 10 s. 6-9 October 2000.
- [Luhmann & Tecklenburg, 2002] Luhmann, Thomas & Tecklenburg, Werner; **Bundle Orientation and 3-D Object Reconstruction From Multiplesatation Panoramic Imagery**, presented at ISPRS Symposium Commission V, Korfu 2002.
- [Lysehøj og Nielsen, 2003] Lysehøj, Gitte og Nielsen, Eskil K.; **Terrestrisk laserscanning – Kortlægning af togskeer**, Landinspektøruddannelsen 9. semester, Aalborg Universitet, 2003.
- [Mathworks 2000] The MathWorks Inc, **Matlab – The Language of Technical Computing**, 6<sup>th</sup> edition, The MathWorks Inc, 2000.

- [Mikhail et. al. 2001] Mikhail, E. M.; Bethel, J. S. & McGlone, J. C.; **Introduction to Modern Photogrammetry**, John Wiley & Sons, Inc. 2001.
- [Nørmølle, 2001] Nørmølle, Søren, **3D-opmåling af bygninger**, publiceret i Landinspektøren 2001-05, s. 360-367, 2001.
- [Program Turbo-net, 1991] GeoComp, Inc.; **Program Turbo-net Reference Manual**, GeoComp, Inc., 1991.
- [Rasmussen & Flatman, 2000] Rasmussen, Johnny K. og Flatman, Andrew C.; **Laserscanning – En Kvalitetsvurdering**, Afgangprojekt Landinspektøruddannelse, Aalborg Universitet, 2000.
- [Studievejledning, 2003] **Studievejledning Afgangprojekt**, L-studienævnet Aalborg Universitet, januar 2003.
- [Wehr & Lohr, 1999] Wehr, Aloysius & Lohr, Uwe, **Airborne laser scanning – an introduction and overview**, ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 54 s. 68-82, 1999.
- Hjemmesider**
- [www.lmg.dk/3d](http://www.lmg.dk/3d) Landmålergårdens hjemmeside for 3D-indvendig opmåling.
- [www.callidus.de](http://www.callidus.de) Callidus' officielle hjemmeside.
- [www.aalkat-gym.dk](http://www.aalkat-gym.dk) Aalborg Katedralskoles hjemmeside.
- [www.trimblecenter.dk](http://www.trimblecenter.dk) Trimble Center Danmarks hjemmeside.
- [www.land.auc.dk/pce](http://www.land.auc.dk/pce) Lektor Peter Cederholms hjemmeside, Aalborg Universitet.

# APPENDIKS A - GENERERING AF ORTOFOTO I MESH & MAP

Generering af et ortofoto foretages i programmet Mesh & Map. Processen kan inddeles i tre trin.

- Klargøring af data til generering af TIN-model – Preprocessing
- Generering af TIN-model
- Generering af ortofoto

I det følgende vil de tre delprocesser blive beskrevet, hvor hovedvægten vil ligge på beskrivelse og indstillingen af de forskellige parametre. Der tages udgangspunkt i manualen for Mesh & Map samt gruppens egne indtastninger i programmet ved generering af et ortofoto. Manualens beskrivelse vedrørende generering af ortofoto tilsvare ikke programmet, hvorfor det er vanskeligt at finde ud af, hvilken parameterindstillinger, der er relevante i forbindelse med ortofoto. Mange parameter er ikke beskrevet, og hvad programmet præcis foretager sig ved generering af et ortofoto er en sort boks for brugeren. Det kan betyde, at en eventuel fejl i et ortofoto ikke behøver være fejl i programmet eller databehandlingen, men kan i lige så høj grad skyldes gruppens indtastninger.

## PRE-PROCESSING

Den første delproces, der bliver anvendt, er ”Pre-processing”. Denne proces har til formål at klargøre en punktmængde til eksempelvis generering af en TIN-model. Forberedelse består af en række funktioner, hvori forskellige parametre skal fastsættes. ”Pre-processing” består af følgende funktioner:

- Fill Holes
- Compute Normals
- Compute confidence value
- Edge detection
- Noise Reduction

Kun to af de ovennævnte funktioner anvendes i forbindelse med forberedelse af en TIN-model mhp. at generere et ortofoto – det er ”Edge Detection” og i en vis grad ”Noise Reduction”. Disse to funktioner vil i det følgende blive uddybet, herunder lægges der vægt på de parametre, gruppen har ændret på i forhold til standardindstillingerne.

Parameterindstillinger til de to funktioner kan foretages i tre vinduer.

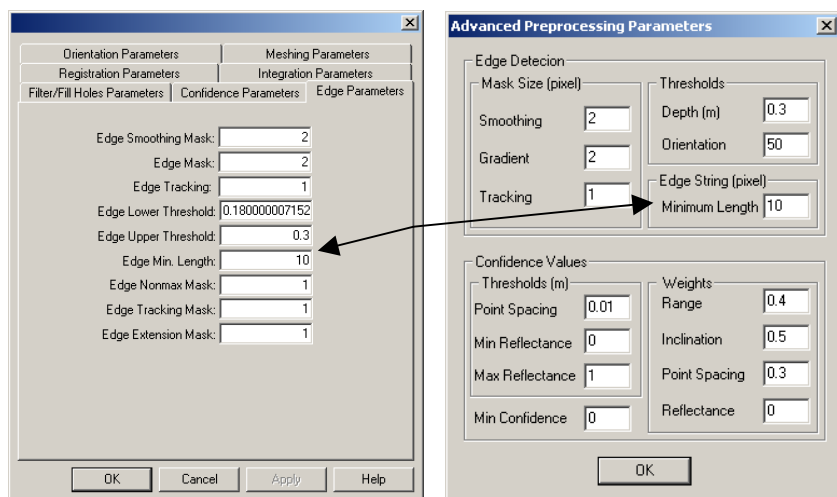
- Pre-processing Parameters
- Advanced Pre-processing Parameters
- Project settings i programmets hovedmenu

Nogle af parametrene kan ændres i flere af vinduerne.

## EDGE DETECTION

Denne funktion er en algoritme, som genererer brudlinier. Brudlinier er vigtigt i forbindelse med generering af en TIN-model, således at der ikke genereres forkerte trekanter i TIN-modellen.

Med denne algoritme - en kantgenerator - bestemmes alle kanter i en punktsky. ”Egde smoothing mask” jf. nedenstående figur er en størrelse for udglatning af kanten og har enheden pixel<sup>1</sup>. De to efterfølgende parameter angiver indstillinger for søgeområdet såsom søgeområdets størrelse, der skal anvendes til at ”finde” kanter. De følgende parametre er indstillinger for grænseværdier for kanterne. Ved gruppens foretagne genererede TIN-modeller er der anvendt standardværdierne i vinduet ”Project settings”.



Figur A.1: Anvendte Egde parameter, fra vinduerne ”Project settings” og ”Advanced Preprocessing Parameters”.

Nogle af parameterindstillingerne i vinduet ”Project Settings” kan ligeledes indstilles i vinduet ”Advanced Preprocessing Parametres”, jf. ovenstående figur. Eksempelvis parameter for ”Egde Minimum Length”, der karakteriserer minimum længden af en kant, før den bliver genereres.

<sup>1</sup> Det undrer gruppen, at flere værdier er angivet i pixelstørrelse, da der er tale om en punktmængde. Gruppen tror, at der menes griddet for punktskyen.



De genererede kanter kan eksporteres til dxf-format, men i gruppens tilfælde vil kantgenereringen blive anvendt i forbindelse med generering af TIN-modellen som brudlinier.

## NOISE REDUCTION

Dette er en funktion, som fjerner støj. Parameter for denne funktion angives i nedenstående figur. Den eneste værdi, der er relevant i forbindelse med TIN-modeller, er ”Smoothing”, som sættes til 2 pixler. Angives en større værdi mindskes indflydelse af støj, men til gengæld vokser sandsynligheden for, at reelle data går tabt.

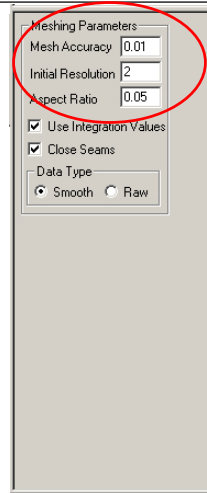
Mask Size (pixel)	
Hole Filling	2
Smoothing	2
Range Gate (m)	
Minimum	1
Maximum	32
Best	10
Confidence Values	
User Factor	1
Advanced >>	

Figur A.2: Hovedmenu.

Når de ovenstående funktioners parametre er indstillet, kan ”Pre-processing” sættes i gang, efter de ønskede scanninger er valgt.

## GENERERING AF TIN-MODEL

Efter den første delproces ”Preprocessing” er gennemført kan TIN-modellen genereres. Til generering af TIN-modellen anvendes Quadtree metoden – se nærmere Appendix B. Igen beskrives kun de størrelser, der er relevante.

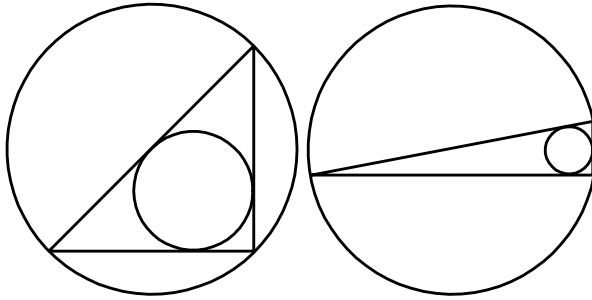


**Figur A.3: Parametre for "Initial Resolution".**

"Initial Resolution" angiver størrelsen af den anvendte opløsning ved den første iteration i algoritmen – størrelsen angives i pixler og kan variere fra 0 til 10. Sættes størrelsen til 0, vil alle punkter i punktskyen blive anvendt. Ved genereringen af TIN-modeller sættes størrelsen til 2 pixler, som også er standard værdien. TIN-modellen er defineret ud fra kvadratblokke på et 2D-grid af scanningen med sidelængden er  $2^n$ , hvor  $n$  er størrelsen af "Mesh Initial Resolution", som ved den første iteration er 2.

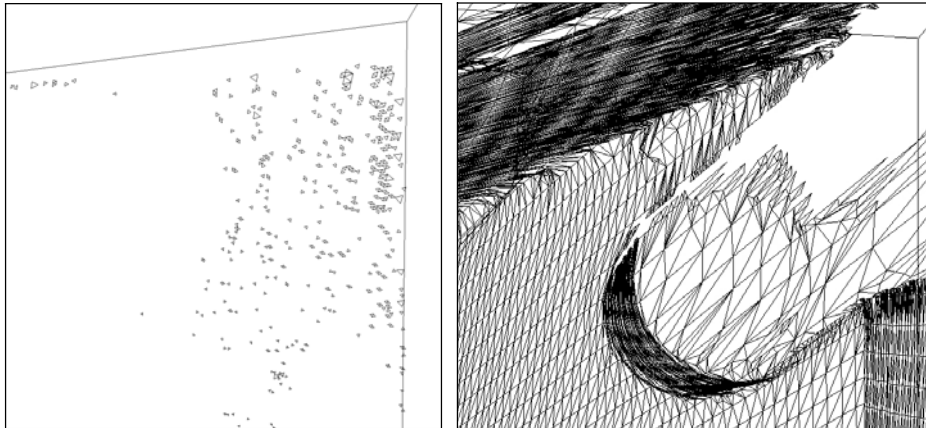
"Mesh Accuracy" definerer afstanden mellem et punkt i den originale punktsky og overfladen i TIN-modellen. Enheden er angivet i meter og skal ligge mellem 0 og 1 - gruppen har anvendt værdien 0,005 m, hvilket svarer til målenøjagtigheden på laserscanneren.

Størrelsen "Aspect Ratio" beskriver størrelsesforholdet mellem den indskrevne og den omskrevne cirkel. Størrelsen beskriver, hvor spids trekantene skal være. Værdien skal ligge mellem 0 og 0,5 og er uden enhed. Jo tættere på nul - jo mere spids bliver trekantene - se nedenstående figur. Gruppen har valgt at anvende standardværdien på 0,05.



Figur A.4: Illustration af Aspect Ratio. Hvor forholdet mellem den indskrevne og omskrevne cirkel. Til venstre er forholdet stort, og højre mindre.

Der er valgt en lav værdi for "Aspect Ratio", hvilket kan virke lidt besynderligt. Det må formodes, at det vil være ønskeligt, at forholdet mellem omskrevne og indskrevne cirkel skal være så lille som muligt, således at der dannes tilnærmelsesvis ligebenede trekkanter. Der blev forsøgt at ændre værdien til 0,25 og 0,49, men dette medførte, at trekkanterne i TIN-modellen er usammenhængende. Det er specielt et problem i de punktskyer, hvor der ikke er ens scanningsopløsning i horisontal og vertikal retninger. Et eksempel på problemet kan ses på nedenstående figur. Anvendes til gengæld værdien 0,001 for "Aspect Ratio", synes TIN-modellen at blive mere sammenhængende, og der er ikke nær så mange "huller" i modellen. Til gengæld bliver trekkanterne i TIN-modellen meget spidse.



Figur A.5: Eksempel på generering af TIN-modeller. Til venstre er værdien for "Aspect Ratio" 0,25 og til højre 0,05. Eksemplet er fra Scan nr. 2 ved kontrol af opløsningen.

Valg af datatype – "Data Type" jf. Figur A.3 - er der valgt at anvende "smooth" data, dvs. udglattede værdier. Dette betyder, at til generering af TIN-modellen anvendes den datamængde, hvori støj og lignede er sorteret fra med funktionen "Noise Reduction". Hvis der i stedet var valgt at anvende "Raw" data, vil der blive anvendt rådata til generering af TIN-modellen.

Efter parameterindstillinger vælges punktskyerne, hvorefter TIN-modellen genereres.

## GENERERING AF ORTOFOTO

Generering af ortofoto bliver foretaget med funktionen ”Texture Mapping”. For at kunne generere et ortofoto skal der vælges en scanningsfil<sup>2</sup>, en billedfil<sup>3</sup> og en TIN-model. Genereringen kan ikke startes, uden disse er valgt. Pixelstørrelse i ortofotoet skal ligeledes vælges – her vælger gruppen at anvende standardværdierne på 1024 pixler x 1024 pixler. Herefter kan billedfilen draperes over TIN-modellen, hvorved ortofotoet er genereret. Der er ikke i manualen beskrevet nærmere, hvordan billedfilen draperes over TIN-modellen

Gruppen har valgt at anvende de optagne billeder fra kameraet i laserscanneren. Det er muligt at anvende et eksternt kamera, men dette har gruppen fravalgt. Dette projekt omhandler en test af laserscannersystemet Callidus V1-1 og dets anvendelighed i forbindelse med indvendig 3D-opmåling, og dermed ikke en test af eksternt udstyr.

Et ortofoto i Mesh & Map består af et ortofoto og DHM. Ved at anvende ortofoto og DHM sammen kan der bestemmes X, Y og Z-koordinater. Dette medfører deslige, at det er muligt at bestemme afstande i 3D.

Måling af afstande i ortofotoet udtegnes i en tekstfil. Filen indeholder koordinater til de to udpegede punkter, DeltaX, DeltaY og DeltaZ, DeltaXY, DeltaXZ, DeltaYZ samt 3D-afstanden mellem de to punkter. Gruppen anvender 3D-afstandene. Afstande, målt i de forskellige ortofotos, kan ses i tekstfilerne i Bilag J og Q.

---

<sup>2</sup> Her vælges den ”rå” punktsky.

<sup>3</sup> Billeder optaget med laserscannerens kamera.

# APPENDIKS B - GENERERING AF TIN-MODELLER

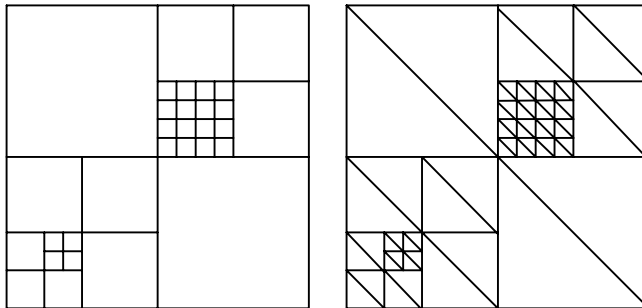
Dette appendiks vil præsentere de tre mest anvendte metoder til generering af TIN-modeller. Det er følgende metoder.

- Quadtree /Qctree metoden<sup>4</sup>
- Delaunay metoden
- Advancing Front metoden

## Quadtree /Qctree metoden

Princippet ved Quadtree/Qctree metoden er at generere TIN-modeller ud fra en hierarkisk opbygning gennem kvadrater/bokse<sup>5</sup>. Et kvadrat opdeles i fire mindre kvadrater (quadtrees), og disse kan igen opdeles osv. En rumlig boks opdeles i otte mindre bokse (octrees), der igen kan opdeles.

For at finde ud, om et kvadrat/boks skal opdeles foretages en rutine, hvor kvadratets hjørnepunkters højder sammenlignes. Viser det sig, at forskellene mellem hjørnerne overskrider en angiven tolerance, bliver kvadratet/boksen yderligere delt op. Overskrider højdeforskellene ikke tolerancen bliver kvadratet/boksen ikke yderligere delt op. Idet det er besværligt at generere højdekurver i firkanter deles kvadraterne derefter op i retvinklede trekkanter. Princippet for quadtree kan ses på nedenstående figur.



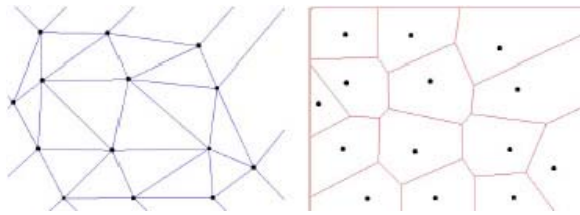
Figur B.1: Princippet ved Quadtree metoden.

<sup>4</sup> Quadtree er betegnelse, når der arbejdes med to dimensioner og Qctree, når der arbejdes med tre dimensioner.

<sup>5</sup> Kvadrater ved to dimensioner og bokse ved tre dimensioner.

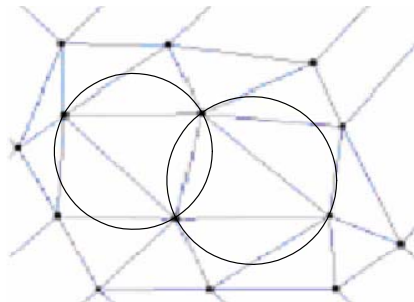
## Delaunay metoden

Ved anvendelse af en TIN-model med Delaunay metoden anvendes enten punkterne i punktskyen eller der dannes ekstra punkter, såkaldte Steiner punkter. Denne metode er den mest anvendte metode til triangulering. To eksempler, hvorpå der er anvendt Delaunay metoden, kan ses nedenstående.



**Figur B.2:** To eksempler på Delaunay metoden. Til venstre er der anvendt eksisterende punkter, og til højre er der anvendt Steiner punkter.

Ved anvendelse af eksisterende knudepunkter ”tegnes” liniestykker fra omkringliggende punkter, således at trekanter genereres, som ovenstående vist. Metoden er karakteristisk ved, at der kan tegnes en omskrevne cirkel omkring tre knudepunkter, således at den enkelte omskrevne cirkel ikke indeholder andre knudepunkter.

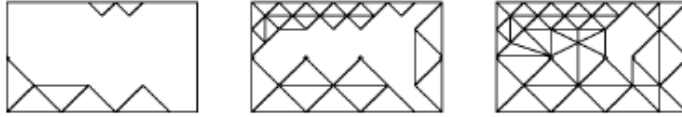


**Figur B.3:** Princippet med omskrevne cirkler. Der er ikke indeholdt andre knudepunkter end de tre knudepunkter, der udgør trekanten, i den omskrevne cirkel.

Ved anden metode bestemmes nye punkter, Steiner punkter, ved at ”tegne” liniestykker mellem eksisterende punkter, hvorefter midtnormalen på liniestykkerne bestemmes. Skæring mellem to midtnormaler er et Steiner punkt.

## Advancing Front metoden

Generering af en TIN-model ved anvendelse af metoden Advancing Front metode opdeles grænserne for TIN-modellen i trekanter (to dimensioner) og tetraeder (tre dimensioner). Trekanterne/tetraederne dannes en efter en, hvor udgangspunktet er grænserne. En fordel ved denne metode er, at der tages udgangspunkt i grænserne, som ofte er problemområder, der kræver specielt interesse. Derefter arbejdes der ind mod midten af punktskyen. Princippet kan ses nedenstående.



Figur B.4: Princippet ved Advancing Front metode.

[Hellemann og Petersen, 2002]





---

# APPENDIKS C - FORBEDRING AF CALLIDUS SYSTEMET V1-1

---

Gruppen har testet Systemet Callidus V1-1, og har i den forbindelse blevet en række erfaringer rigere. Gruppen har gennem disse erfaringer oplevet, at Systemet Callidus V1-1 har nogle mangler. Hvis disse mangler bliver taget til efterretning, kan systemet bliver optimeret væsentligt til indvendig 3D-opmåling. Forbedringerne skal ske dels ved softwaret til systemet og dels ved selve laserscanneren.

## **FORBEDRINGER AF SOFTWARE TIL CALLIDUS SYSTEMET**

Programmet 3D-Extractor, som er det mest anvendte program, er brugervenligt opbygget, og det er relativt nemt for nybegyndere at lære de mest grundlæggende funktioner. Mange standardfunktioner og navigeringen i software er stort set identisk med forskellige Cad-programmer, hvorfor der hurtig opnås en vis rutine. Når det så er sagt, så er der også mange Cad-funktioner, der mangler, før at softwaret er optimalt.

Eksempelvis er det ikke muligt i 3D-Extractor at beregne afstande mellem to objekter, vinkler, og arealer, og snap-funktioner mangler deslige. Da de forskellige funktioner ikke er tilgængelige i Callidus softwaret, er det nødvendigt for brugeren at importere modellen til et Cad-program, hvor dette kan blive foretaget. Dette har gruppen været nødt til at gøre i forbindelse med kontrol af punktskymodellernes nøjagtighed.

For en landinspektør er det relevant at have kendskab til hvilken beregningsmetode, der ligger til grund for de beregnede resultater, således at der kan foretages en vurdering af resultaterne. I softwaren til Callidus er der mange såkaldte ”sorte bokse”, hvor baggrunden for funktionen holdes hemmelig for brugeren – brugeren kan blot benytte sig af funktionen. Det gør sig f.eks. gældende i forbindelse med sammenknytning af punktskyer med metoden Fuzzy Join i 3D-Extractor og i forbindelse med kamerakalibreringen, som Callidus foretager.

Ydermere er dokumentationen, når diverse funktioner er anvendt, yderst mangelfulde eller ikke eksisterende. For brugere, som f.eks. landinspektører og ingeniører, er dokumentation af resultaterne en nødvendighed.

Årsagen til, at der ikke foreligger dokumentation for hverken beregningsmetoder eller for resultaterne ved anvendte funktioner kan selvfølgelig skyldes, at det er fabrikationshemmeligheder, som Callidus vil holde skjulte. En anden årsag kan være, at softwaret oprindeligt ikke er udviklet til landmålingsformål, og den oprindelige målgruppe ikke haft interesse i disse informationer. Grupper tror, at den primære målgruppe oprindeligt har været arkitekter. Dette skyldes, erfaringer fra

arbejde med systemet, men også et interview, som er foretaget af GIM-International. I dette interview, udtaler direktøren for Callidus Precision Systems GmbH, at han mener, at arkitekter vil have stort gavn af system i forbindelse med deres arbejde [Loederman, 2000]. Efter, at Trimble har fået forhandlingsret på Callidus laserscanneren, vil dette formentlig ændres i fremtiden.

Sammenknytning af punktskyer vha. global transformation synes ikke at være en pålidelig metode i landmålingens verden. Ved metoden bliver en punktsky flyttet over i en anden punktsky på baggrund af opstilling i en kendt punkt og en udgangsretning. Der er altså ingen overbestemmelser, hvilket synes utilfredsstillende, og bør derfor forbedres. For det første skal det være muligt at anvende afstandsmålingen, dvs. det skal være muligt at kunne ændre på prismekonstanten. For det andet skal det være muligt at anvende flere prismer til transformationen. I denne forbindelse kan der trækkes en parallel til laserscanneren Cyrax 2500, som anvender specielle refleksmærker som transformationspunkter. Hvad gruppen har forstået på Jens T. B. Madsen, arbejder Callidus med at forbedre metoden global transformation til sammenknytning af punktskyer jf. Bilag G.

Det kunne være fordelagtigt, hvis det er muligt at tegne eksempelvis polylinier i Mesh & Map på et ortofoto, som kunne eksporteres til Cad-programmer. Det kunne være relevant i forbindelse med genereringen af modeller. Større objekter kan modelleres i punktskyerne og mindre objekter kan ”modelleres” i ortofotoet. Modelleringerne foretaget i henholdsvis punktskymodellen og ortofotoet kan så sættes sammen i et Cad-program til en samlet model.

Endvidere kunne det være fordelagtigt, hvis det i et ortofoto var muligt at tildele et udpeget punkt en kode og derefter importere koden til et Cad-program. I Cad-programmet kan punktet få tildelt en signatur svarende til koden.

Vedrørende visualisering af en punktskymodel er det muligt at importere en punktskymodel til softwaret Face list. I dette software er det muligt at tildele objekter attributter og teksturer og derefter eksportere modellen til VRML. Softwaret Face list er en udvidelse til 3D-Extractor. Gruppen har tildelt en enkel punktsky-model teksturer og attributter, og herefter eksporteres modellen som VRML, hvor kun objekternes overflader og teksturer kan ses - se nærmere omkring dette i Appendix D.

## **FORBEDRING AF SELVE LASERSCANNEREN**

Med hensyn til forbedring af selve laserscanneren synes det fordelagtigt, hvis kameraet på laserscanneren er i en bedre kvalitet.

Generelt i forbindelse med ortofoto er der sådant, at kameraet er i en væsentlig bedre kvalitet end DHM. Ved terrestrisk laserscanning er det lige det modsatte – man har en DHM i særdeles god kvalitet, mens kameraet kan sammenlignes med et amatør kamera. I forhold til en laserscanners pris synes det ikke at være et problem

---

at montere et professionelt kamera. Det kan betyde, at der er mulighed for at generere ortofotos i særdeles god kvalitet.

Et andet problem i forbindelse med kameraet er kalibreringen. Det synes utilfredsstillende for brugeren ikke selv at kunne foretage en kalibrering af kameraet. Det er ikke muligt at foretage en kalibrering af den indre orientering, men det er muligt at foretage en finjustering af den ydre orientering. At Callidus selv foretager kalibrering af kameraet, er formentlig ment som en service for brugeren. Hvis Callidus fortsat skal foretage kalibreringen af kameraet, bør der i kalibreringsrapporten være tildelt spredninger på de forskellige parameter, således at brugeren har en formodning om, hvor godt orienteringen er bestemt.

En anden forbedring af laserscanneren, som gruppen anbefaler, er, at det skal være muligt at udpege et scanningsområde, når en scanning skal foretages. Det er muligt at begrænse scanningsområde i den horisontale retning, men ikke i den vertikale retning. I den vertikale retning scannes der altid fra  $30^\circ$  til  $180^\circ$ . Det kan være upraktisk i nogle situationer, at uoverflødige datamængder indsamles – det tager dels ekstra tid, og det tager dels plads på LMS-computereren. Der kan for eksempel løses ved, at laserscanneren først optager et oversigtspanoramabillede, hvorefter det skal være muligt at udpege et polygon i billedet, hvor scanningen skal foretages.

---

<sup>6</sup> Hvor  $0^\circ$  betegnes som pege lodret nedad.

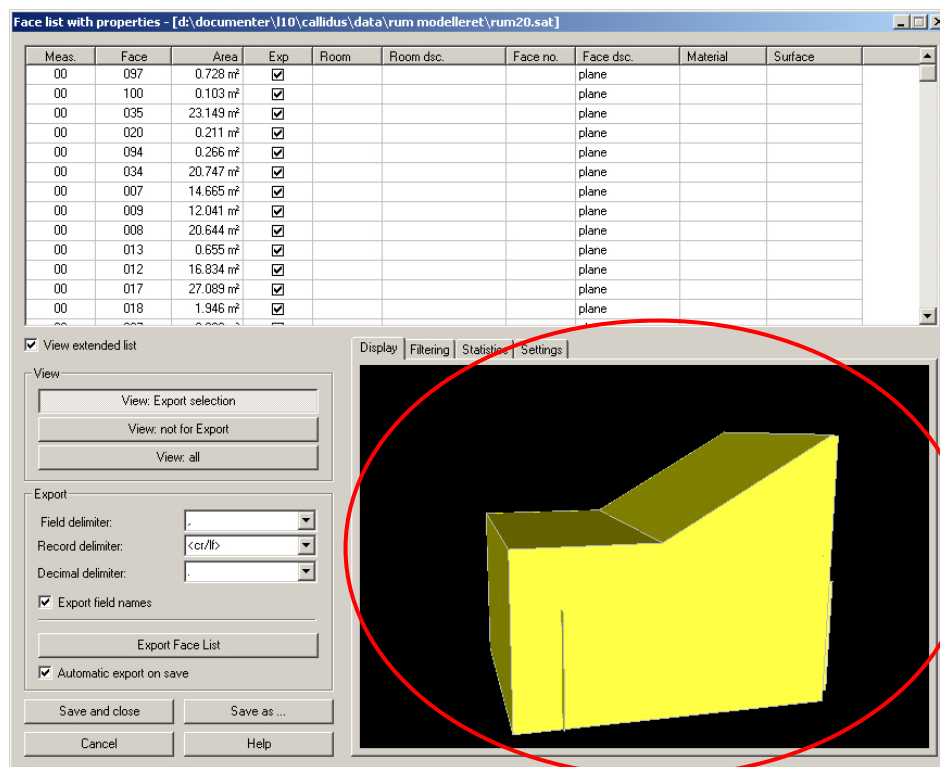


# APPENDIKS D - FACE LIST

Face list er endnu et program i Callidus systemet. Der henvises til Bilag A for at få et overblik over samtlige programmer i Callidus systemet. Face list skal ses som en udvidelse til 3D-Extractor. Efter en punktsky er modelleret i 3D-Extractor er det muligt at importere modellen til Face list, hvor det er muligt at tildele objekterne attributter og give teksturer på objekternes overflader.

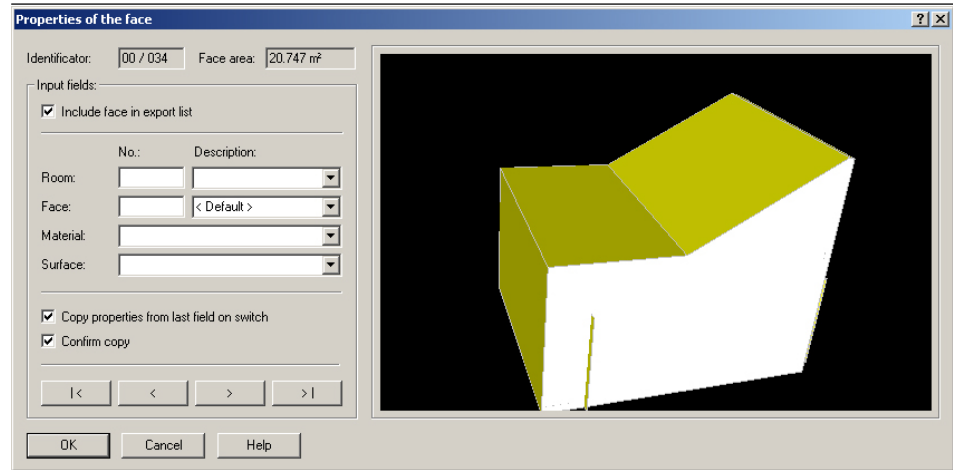
[Callidus, 2001c]

Face list arbejder ikke med punktdata, men med objekter. Når der eksporteres modeller fra 3D-extractor til Face list åbnes et opstartsvindue jf. Figur D.1. Bag opstartsvinduet ligger et arbejdsvindue, som er et forstørret vindue af billedet markeret med en rød ring på Figur D.1. I disse to vinduer foretages alle bearbejdnings i Face list.



Figur D.1: Opstartsvinduet i Face list.

Det er muligt at udpege de overflader, der ønskes benyttet i den videre bearbejdnings. Ved at dobbeltklikke på en udvalgt overflade åbnes et andet vindue, hvor det er muligt at tildele objektet attributter – se nedenstående figur. Det er muligt at vælge nogle standardattributter, men det er også muligt at indtaste egne betegnelser.



Figur D.2: Vinduet hvor der kan ske tildeling af attributter – Screen dump fra rum 20.

Når der tildelt attributter til alle ønskede objekter, kan modellen yderligere bearbejdes ved at ændre på farven på de enkelte objekter eller ved at tildele objekterne teksturer.

Programmet er bygget op på en sådan måde at vælges et standard materiale som attribut får den valgte overflade automatisk den tekstur, der passer til. Desværre er der ikke mange standardiseret attributter og teksturer at vælge imellem, og det synes ikke umiddelbart at være muligt at indlæse nye teksturer i Face list. Hvis der ikke ønskes at anvende de mulige teksturer, kan der i stedet for vælges at tildele overfladen en farve.

Det er muligt at eksportere modellen til forskellige formater bl.a. VRML. Gruppen har forsøgt at eksportere en model fra rum 20 til VRML, hvor overfladerne får tildelt teksturer, se Bilag T.

Gruppen har valgt ikke at fordybe sig mere i Face list, men kan konstatere, at der er en række brugbare funktioner til indvendig 3D-opmåling og facility management.

---

# BILAG A - SOFTWARE TIL SYSTEMET CALLIDUS V1-1

---

Der forefindes flere programmer til Systemet Callidus V1-1. For at lette overblikket vil de i dette bilag blive beskrevet kort.

I softwarepakken forefindes følgende programmer.

- LMS-Software
- 3D-Extractor®
- Face list
- Mesh and map
- Reconstructor
- LMF Film Viewer

## LMS-SOFTWARE

Programmet LMS-Software er beregnet til LMS-computeren, og anvendes under selve laserscanningen. Med programmet styres laserscanneren og scanningsparametre fastsættes, f.eks. scanningsvinkel og scanningsnøjagtighed, hvorefter en scanning sættes i gang. Det er også i dette program, en kalibrering af laserscanneren og kameraet foretages.

## 3D-EXTRACTOR®

Programmet 3D-Extractor anvendes til efterbehandling af de foretagne scanninger. I programmet er det blandt andet muligt at sammenknytte punktskyer, at transformere punktskyer til et globalt system, at danne simple geometriske figurer mv. Det er derudover muligt at eksportere de behandlede data til andre formater f.eks. DXF og VRML.

## FACE LIST

Dette program er en extension til 3D-Extractor. Programmet er beregnet til at give teksturer til objekter f.eks. facader, der er dannet ud fra punktskyer i 3D-Extractor. I programmet arbejdes ikke med de rå punktskyer, men med modeller, der er dannet i 3D-Extractor. Udover at tildele teksturer til objekter er det muligt i dette program at angive attributter til de enkelte objekter. Det kan eksempelvis være attributter vedrørende vægmateriale.

## MESH & MAP/RECONSTRUCTOR

Reconstructor er en nyere version af Mesh & Map, men begge programmer er stadig i brug. Der anvendes den samme manual til de to programmer, som egentlig er til Reconstructor. I programmerne er der indbygget specielle funktioner til anvendelse på punktskyerne. Det er bl.a. funktioner til kantgenerering, generering af ortofotos og TIN-modeller. Generering af ortofotos kan foretages både med fotos optaget med kameraet siddende på laserscanneren og med et eksternt kamera. I programmet anvendes de rå indsamlede punktskyer. Det er også i programmet generelle funktioner til at foretage eksempelvis transformationer og punktskysammenknytninger, ligesom det er muligt at danne planer mm, men disse har gruppen ikke anvendt.

## LMF FILM VIEWER

Dette program anvendes til billederne, som laserscanneren optager ved scanningerne. I programmet kan der indhentes oplysninger vedrørende antal pixler, billedformat mv. Ydermere er der i programmet funktioner til at lave billedmosaikker og panoramaer.



# BILAG B - ICA-FILEN

Dette bilag indeholder ICA-filen, som gruppen har fået tilsendt fra LE34. Der er tilføjet bemærkninger til filens parametre. Råfilen kan ses i Bilag I.

Værdier fra ica-fil	Gruppens bemærkninger
[General] Calibration=1	
[Parameter] IdentGrb=2 IdentCam=4	
HeadCsd=129.6000061035 HeadCrm=0 HeadCmm=0	Forskydningsvektor mellem kameraet og laserscannerens hoved – flytning af kameraets projektiionscentre i forhold til laserscannerens centre [mm]
xDimEffective=576 yDimEffective=720	Aktuelle billedstørrelse i pixelværdier
xDimCCD=582 yDimCCD=752	Den maksimale billedstørrelse i pixelværdier
chipSizeX=2.4000000954 chipSizeY=3.2000000477	Størrelse af CCD-chippen i kameraet i [mm]
<b>Parameter for "wide" vinkel</b>	
Wide_z=0	Oversigtsbilleder
Wide_f=3.0091249943	Kamerakonstant i [mm]
Wide_kappa=0.0097850692	Radial linsefortegning i [mm]
Wide_centreX=219.9735870361 Wide_centreY=244.3417358398	Billedmidtpunkt i kameraet i pixelværdier
Wide_sx=1.22612679 Wide_sy=1	Forholdet mellem billedstørrelsens længde og bredde
Wide_Dpx=0.00465 Wide_Dpy=0.0050655561	Pixelstørrelse i CCD-chippen i X- og Y-retning i [mm]
Wide_comp0=0 Wide_comp1=0 Wide_comp2=0	Rotationsparameter ( $\omega, \phi, \kappa$ ) angivet i [°]
Wide_comp3=0 Wide_comp4=0 Wide_comp5=0	Kameraets position ( $X_0, Y_0, Z_0$ ) i pixelværdier
<b>Parameter for "tele" vinkel</b>	
Tele_z=10071	Detaljerede billeder (x 18 zoom)
Tele_f=11.4399995804	Kamerakonstant i [mm]
Tele_kappa=0	Radial linsefortegningen i [mm]
Tele_centreX=256 Tele_centreY=256	Billedmidtpunkt i kameraet angivet i pixelværdier
Tele_sx=1 Tele_sy=1	Forholdet mellem billedstørrelsens længde og bredde
Tele_Dpx=0.00465 Tele_Dpy=0.0050655561	Pixelstørrelse i x- og y-retning i [mm]
Tele_comp0=0	Rotationsparameter ( $\omega, \phi, \kappa$ ) angivet i [°]

Tele_comp1=0 Tele_comp2=0	
Tele_comp3=0 Tele_comp4=0 Tele_comp5=0	Kameraets position ( $X_0, Y_0, Z_0$ ) i pixelværdier

**Tabel B.1: Kalibreringsdata fra ICA-fil.**

Hvis der regnes en pixelstørrelse ud fra chip-størrelse og ud fra antal pixler jf. ovenstående tabel, så får man ikke den angivne pixelstørrelse i tabellen, hvilket undrer gruppen.

I Tabel B.2 kan Landinspektørfirmaet LE34 A/S finjustering af den ydre orientering ses. Disse parametre er hentet LMF-filerne. Et eksempel på en LMF-fil kan ses i Bilag I.

Wide_comp0=0 Wide_comp1=-1.87 Wide_comp2=-0.29	Rotationsparameter ( $\omega, \phi, \kappa$ ) angivet i [°]
Wide_comp3=0 Wide_comp4=0 Wide_comp5=0	Kameraets position ( $X_0, Y_0, Z_0$ ) i pixelværdier
Tele_comp0=0 Tele_comp1=0 Tele_comp2=0	Rotationsparameter ( $\omega, \phi, \kappa$ ) angivet i grader
Tele_comp3=0 Tele_comp4=0 Tele_comp5=0	Kameraets position ( $X_0, Y_0, Z_0$ ) i pixelværdier

**Tabel B.2: Finjustering af den ydre orientering foretaget af Landinspektørfirmaet LE34 A/S.**

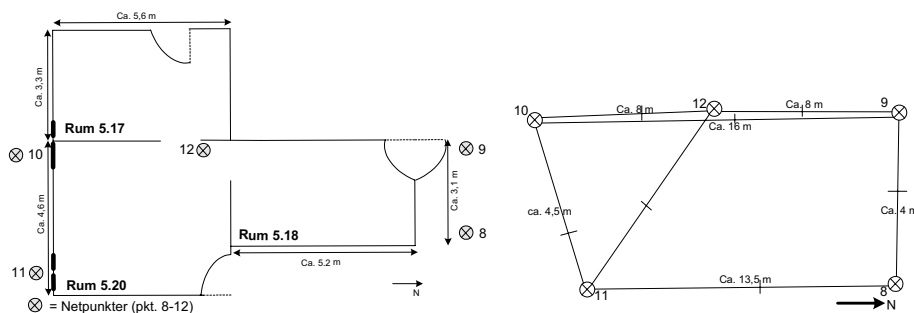
Det undrer gruppen, at der ikke er foretaget nogen finjustering af den ydre orientering for detaljerede billeder.

# BILAG C - TURBONET OG PCMAAL

## ETABLERING AF LOKALT NET

Ved anvendelse af metoden ”Sammenknytning vha. global transformation” til punktskysammenknytning er det nødvendigt at have kendskab til koordinaterne til prismerne på laserscanneren og til de fritstående prismer, som laserscanneren indmåler. For at opnå dette etablerer gruppen et lokalt net, som prismerne knyttes op på. Det lokale net blev etableret forinden opmålingen med laserscanneren fandt sted.

Det lokale net består af fem netpunkter – en placering af netpunkter og en netskitse kan ses nedenstående.



**Figur C.1:** Til venstre ses, hvorledes netpunkter er placeret i testområdet på Langagervej, og til højre ses en netskitse for det lokale net.

Prismerne monteres i fodstykker på stativer til totalstationer. Der anvendes tvangscentrering af stativerne med fodstykkerne. Ved at benytte tvangscentrering kan der gentagne gange monteres prisme/instrument i fodstykket med en nøjagtighed, der forventes at være bedre end 0,25 mm [Jacobi et. al. 1989].

Alle målinger omfatter zenitdistance, horisontalretning og skrå afstand til hvert punkt for at bestemme koordinater i 3D. Til opmålingen benyttes en totalstation af mærket Leica TCA 1800, da man med denne kan foretage automatisk satsmåling. Selve indmålingen af nettet blev foretaget med to eller tre satser<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Gruppen har planlagt at indmåle to satser, men grundet meget korte sigtelængder, ca. 10 m giver totalstationen nogle gange en meddelelse om, at tolerancen for retningerne er overskredet. I disse situationer vælger gruppen at indmåle tre satser. Tidsmæssigt set har det ingen betydning, da der måles med funktionen ”Automatisk satsmåling”.

# TURBONET

Til at bestemme det lokale net anvendes udjævningsprogrammet Turbonet, som estimerer koordinater til de fem netpunkter efter mindste kvadraters metode. Specifikationer for den anvendte totalstation kan ses i nedenstående tabel.

Instrument Leica TCA 1800	
Grundfejl for afstandsmåling ( $\sigma_g$ ):	1,5 mm
Afstandsafhængig fejl ( $\sigma_a$ ):	1,5 ppm
Spredning for zenitdistance ( $\sigma_{zen}$ ):	0,3 mgon
Spredning for en horisontalretning ( $\sigma_{hor}$ ):	0,3 mgon

**Tabel C.1: Specifikationer for Leica TCA 1800.**

Der henvises til Bilag M for at se de rå GSI-filer og for dokumentation af udjævningen.

De indsamlede data – horisontalretninger, zenitdistancer og skrå afstande – kontrolleres for grove fejl, hvilket ikke var tilfældet – se Bilag M.

Idet Turbonet ikke kan indlæse observationer i Leica's GSI-format, opstilles en landfil med netobservationer. Før indtastning i landfilen udregnes middelværdier for horisontalretninger, zenitdistancer og skrå afstande. Disse indtastes i landfilen.

Landfilen indeholder således:

- Middelhorisontalretninger og tilhørende spredninger
- Middelskrå afstanden og tilhørende spredninger
- Middelzenitdistancer og tilhørende spredninger
- Instrumenthøjde og sigteskivehøjde

Turbonet skal have oplyst, hvilket koordinatsystem, der anvendes samt koordinater til et eller flere netpunkter – Turbonet skal have informationer således, at koordinatsystemet lige akkurat er defineret. Af koordinatsystem vælges et lokalt system, hvor akserne er vendt som koordinatsystemet, System 34<sup>2</sup>. Turbonet kan ikke foretage en fri udjævning, men i stedet udføres en minimal fastholdt udjævning. Netpunkt nr. 12 fastholdes, hvorved koordinatsystemets tre translationer er fastlagt. Afstandsobservationerne bestemmer systemet skala. Til at bestemme systemets tre rotationer vælges at definere et dummy punkt (pkt. 99). Dette punkt fastholdes også. Disse oplysninger angives i master.dat-filen.

I landfilen bliver observationerne – horisontalvinkler, zenitdistancer og skrå afstande - tildelt spredninger ud fra nedenstående beregninger.

<sup>2</sup> Ved senere anvendelse af netpunkterne til orientering af punktskyerne vil X-koordinaterne blive indtastet i softwaret med negativt fortegn for at for vendt X-aksen.

Det er ikke muligt i Turbonet at vægte de enkelte horisontalretninger. I stedet angives spredningen på en målt horisontalvinkel for hver opstilling. Tildeling af spredningen på en horisontalvinkel ( $\sigma_{\text{hor}}$ ) kan ske ud fra nedenstående formel.

$$(C.1) \quad \sigma_{\text{hor}} = \sqrt{2\left(\left(\frac{\sigma_r^2}{n}\right) + \left(\frac{\sigma_c \omega}{S_g}\right)^2\right)}, \text{ hvor}$$

$\sigma_{\text{hor}}$  er spredningen på en horisontalvinkel, [gon]  
 $\sigma_r$  er spredningen på en retning, [gon] se Tabel C.1  
 $\sigma_c$  er centreringsspredningen, 0,001 m  
 $S_g$  er den gennemsnitlige sigtelængde, 10 m  
 $\omega$  er 200 gon /  $\pi$   
 $n$  er antal satser, 2-3 satser

Centreringspredningen for både totalstation og prismerne sættes til 1 mm. Grundet de meget korte sigtelængder vil det resultere i store spredninger på horisontalvinklerne. I tre af netpunkterne er der indmålt tre satser og de resterende to netpunkter to satser. Udregningen af spredningen er foretaget med matlabscriptet ”horison.m” udarbejdet af Peter Cederholm – se Bilag M.

Antal satser	$\sigma_{\text{hor}}$
2 satser	0.009 gon
3 satser	0.009 gon

**Tabel C.2: Spredning til horisontalvinkler.**

Spredningen på en zenitdistance ( $\sigma_{\text{ver}}$ ) beregnes ud fra følgende formel.

$$(C.2) \quad \sigma_{\text{zenit}} = \arctan\left(\frac{\sigma_{\Delta H}}{S_{\text{skrå}}}\right), \text{ hvor}$$

$\sigma_{\text{zenit}}$  er spredningen på en zenitdistance, [gon]  
 $\sigma_{\Delta H}$  er spredningen på højdeforskellen, [m]  
 $S_{\text{skrå}}$  er den skrå afstand, 10 m

Spredning på højdeforskellen kan beregnes som nedenstående.

$$(C.3) \quad \sigma_{\Delta H} = \sqrt{\left(-S \sin V\right)^2 \frac{\sigma_v^2}{n_v \omega} + \left(\frac{S^2}{2R}\right) \sigma_{\text{kref}}^2 + \sigma_{\text{ih}}^2 + \sigma_{\text{sh}}^2}, \text{ hvor}$$

$S$  er den målte afstand, [m]  
 $V$  er zenitdistance, [gon], se Tabel C.1  
 $\sigma_v$  er spredningen på den målte zenitdistance målt, [gon]  
 $n_v$  er antallet af målte satser, 2 - 3  
 $R$  er 6386000 m  
 $\sigma_{\text{kref}}$  er spredningen på refraktionskoefficienten, 0,15  
 $\sigma_{\text{ih}}$  er spredningen på instrumenthøjde, 0,0015 m  
 $\sigma_{\text{sh}}$  er spredningen på sigteskivehøjde, 0,0015 m

Udregningen for spredningen på en zenitdistance er foretaget med matlabscriptet ”zenit.m” udarbejdet af Peter Cederholm – se Bilag M, og giver følgende resultat.

Antal satser	$\sigma_{Ver}$
2 satser	0.0135 gon
3 satser	0.0135 gon

**Tabel C.3: Spredning til zenitdistance.**

Ligesom ved horisontalretningerne skyldes de store spredninger de korte sigtelængder.

Spredningen på skrå afstand beregnes ligeledes ud fra en formel – se nedenstående.

$$(C.4) \quad \sigma_{skrå} = \sqrt{\sigma_g^2 + (\sigma_a S 10^{-3})^2 + \sigma_c^2}, \text{ hvor}$$

$\sigma_{skrå}$  er spredningen på en skrå afstand, [m]  
 $\sigma_g$  er grundfejlen for en afstand, [m], se Tabel C.1  
 $\sigma_a$  er den afstandsafhængige fejl, se Tabel C.1  
 $\sigma_c$  er centreringsspredningen, 0,0015 m  
 $S$  er den gennemsnitlige sigtelængde, 10 m

Der er anvendt et matlabscript udarbejdet af Peter Cederholm ”Afstand.m”, se Bilag M, hvilket giver en spredning for en skrå afstand på 0,0018 m.

Resultatet af udjævningen er en spredning på vægtenheden på 1.034, hvilket betyder, at der er målt som ventet. Det overordnede resultat kan ses i nedenstående tabel.

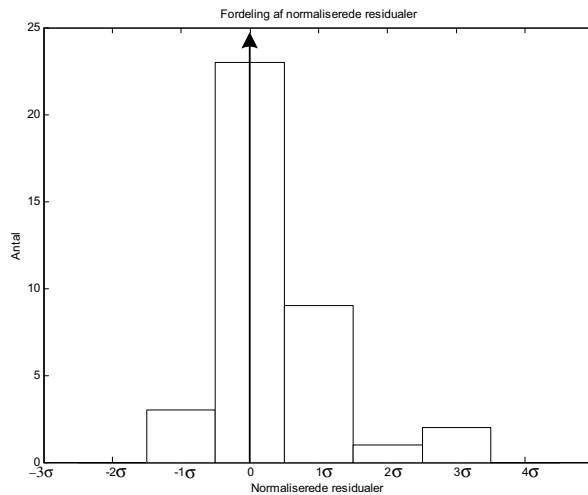
Adjustment Summary	
A-posteriori standard deviation of unit weight SQRT[VtPV/df]	= 1.034
Number of measurements used	= 38
Number measurements rejected	= 0
Total number of measurements	= 38
Degrees of freedom(df)	= 26
Number of singularities	= 0
Chi-Square test prob (alpha)	= .050
Weighted sum of squares	= 27.8
Lower limit Chi-Square test	= 13.8
Upper limit Chi-Square test	= 41.9

**Tabel C.4: Resultat fra udjævning af net i Turbonet.**

I udjævningen er der 38 observationer med 26 frihedsgrader. Netpunkterne er alle bestemt med en spredning bedre end 1,8 mm, hvilket er acceptabelt. En enkelt observation, en zenitdistancen, har et normaliseret residual over 3, men dette vælger gruppen at se bort fra. Et diagram over alle de normaliserede residualer er udtegnet på Figur C.2 ud fra matlabscriptet ”tnetnres.m”<sup>3</sup> udarbejdet af Peter Ceder-

<sup>3</sup> Gruppen har tilpasset matlabscriptet, se Bilag M.

holm. Diagrammet følger tilnærmelsesvis en normalfordelingskurve, og det kan ses, at observationerne er af høj præcision, da normalfordelingskurven er smal med mange observationer omkring 1 gange spredningen.



**Figur C.2: Fordeling af normaliserede residualer fra udjævning i Turbonet.**

Udjævningen blev foretaget med signifikansniveau  $\alpha = 5\%$ . Konfidensintervallet er mellem 13,9 og 41,9 og teststørrelse ("Weighted sum of squares") ligger indenfor konfidensintervallet med størrelsen 27,8. At teststørrelsen ligger indenfor konfidensintervallet betyder, at nulhypotesen accepteres, og at den matematiske model<sup>4</sup> anses for at være defineret korrekt. Udjævningen accepteres, og der foreligger nu koordinater til netpunkterne.

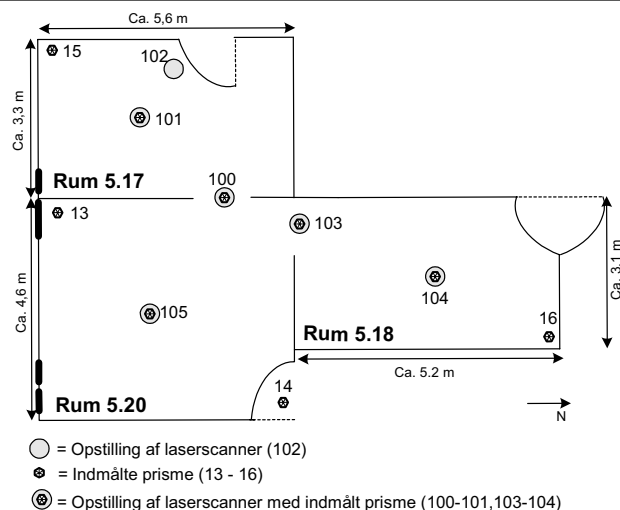
[Cederholm, 2000]

## DETAILPUNKTER - PCMAAL

Som omtalt i Afsnit 7.2 bliver detailpunkterne<sup>5</sup> foruden indmålt med laserscanneren også indmålt med totalstation. Detailpunkterne knyttes op på det lokale net, som er bestemt ovenstående. Placering af prismerne i testområdet kan ses nedenstående.

<sup>4</sup> Den matematiske model består af en funktionel model og stokastisk model.

<sup>5</sup> Her menes de prismer, der sidder på laserscanneren og de fritstående prismer.



Figur C.3: Placering af prismer i testområdet på Langagervej 6.

Indmålingen af prismerne med totalstation er foretaget fra frie opstillinger, for dermed at undgå en fejl på instrumenthøjden. Der er fra hver fri opstilling sigtet til minimum to helst tre netpunkter og optil tre detailpunkter. Indmålingen er sket med 1 sats, hvormed eventuelle systematiske fejl<sup>6</sup> er elimineret. I nedenstående tabel kan det ses, hvordan prismerne på laserscanneren og fritstående prismer er knyttet op på det lokale net.

Fri opstilling	Prisme på laserscanner	Fritstående prisme	Netpunkt
1000	105	13, 14	9, 10, 11
1001	100	13, 14	10, 11, 12
1002	101	14, 15	10, 11
1003	103, 104	16	9, 10, 12

Tabel C.5: Oversigt over indmåling af prismer og netpunkter fra de fire frie opstilliner.

På baggrund af koordinaterne til netpunkterne vil koordinater til detailpunkterne blive bestemt i landmålingsprogrammet Pcmaal. Ved beregning i Pcmaal bliver der midlet mellem 1. og 2. hovedstilling. Der oprettes en koordinatfil (lok-fil) med netpunkternes koordinater. På baggrund af den rå GSI-fil oprettes en observationsfil. GSI-filen, den endelige koordinatfil samt den udarbejdede dokumentationsfil, hvori alle beregninger foretaget i Pcmaal befinder sig, kan ses i Bilag N.

Der bliver ikke korrigeret for tryk og temperatur, da dette ikke vil have indflydelse på korte afstande. Polær detailmåling i en fri opstilling vurderes ud fra de kendte netpunkter i koordinatfilen, dog mindst to. I denne vurdering sammenholdes målestoks faktoren, spredningen på vægtenheden og residualerne med de respektive fejlgrænser.

<sup>6</sup> Det vil sige lovmæssige fejl for totalstationen.



## MÅLESTOKSFAKTOR

Målestoksfaktoren beregnes, som forholdet mellem afstanden S beregnet jf. koordinater fra koordinatfilen og målte afstand. Målestoksfaktoren, k, skal holde sig inden for følgende interval:

$$(C.5) \quad \left(\frac{S}{S+3\sigma_s}-1\right)10^6 < (k-1)10^6 < \left(\frac{S}{S-3\sigma_s}-1\right)10^6, \text{ hvor}$$

S er den længste side i det polygon, der udspændes af de implicerede netpunkter

$\sigma_s$  er spredningen på den målte afstand.

K er målestoksfaktoren

Spredningen på den målte afstand udregnes ved Formel C.4. Centreringsspredningen sættes i dette tilfælde til 3 mm.

I nedenstående tabel kan de enkelte målestoksfaktorer fra dokumentationsfilen samt fejlgrænsen for målestoksfaktoren aflæses.

Opst. Pkt.	S [m]	$\sigma_s$ [mm]	k - 1 [mm/km]	Maks/min afvigelse [mm/km]
1000	8,047	3,4	16	1252
1001	5,403	3,4	-677	1866
1002	7,851	3,4	-1170	1283
1003	12,029	3,4	-222	837

**Tabel C.6: Målestoksændring.**

Som det fremgår af tabellen, er der ingen problemer med at overholde fejlgrænserne.

## SPREDNING PÅ VÆGTENHEDEN OG RESIDUALER

En fri opstilling, der er beregnet i Pcmaal skal ligeledes vurderes i henhold til spredningen på vægtenheden og residualerne i X-, Y-, og Z-retningerne

Spredningen for vægtenheden bør være af samme størrelsesorden som  $\sigma_p$ , som er et skøn for punktspredningen. Punktspredningen sætter gruppen til 2 mm

Residualerne,  $V_x$  og  $V_y$ , angiver afvigelserne på den givne og den målte koordinat i henholdsvis X- og Y-retningen på de anvendte netpunkter. De må ikke overstige  $\pm 3\sigma_p$ , hvilket vil sige  $\pm 6$  mm.

Residualet i Z-retningen må ikke overstige fejlgrænsen  $\pm 3\sigma_{\Delta H}$ , hvor  $\sigma_{\Delta H}$ , er spredningen på højdeforskellen. Spredningen på højdeforskellen beregnes ud fra Formel C.3.

I nedenstående tabel kan resultaterne af residualerne og spredningen på vægtenheden fra dokumentationsfilen ses. Endvidere er fejlgrænserne indført.

Opst.pkt	Sigte til pkt.	V <sub>x</sub> [mm]	V <sub>y</sub> [mm]	Max [mm]	V <sub>z</sub> [mm]	Max [mm]	Spredning på vægtenheden [mm]
1000	9	1	-1	±6	1	±9	3
	10	2	2	±6	-1	±9	
	11	-3	-2	±6	1	±9	
1001	1	-1	1	±6	1	±9	2
	10	-1	-1	±6	1	±9	
	11	4	0	±6	1	±9	
	13	-1	-2	±6	0	±9	
	14	-0	1	±6	-3	±9	
1002	10	-0	2	±6	1	±9	2
	11	-1	-2	±6	2	±9	
	14	1	1	±6	-3	±9	
1003	9	1	1	±6	-1	±9	1
	10	-0	0	±6	1	±9	
	1	-0	0	±6	-0	±9	

Tabel C.7: Residualer og spredning på vægtenheden

Som det kan ses ud fra tabellen, er der ingen residualer, der overstiger fejlgrænsen, og spredningen på vægtenheden er i samme størrelsesorden med punktspredningen. Beregningen af koordinaterne accepteres, og de endelige koordinater til netpunkterne og detailpunkterne kan ses i nedenstående tabel.

Pkt.	Y [m]	X [m]	Z [m]
8	13,891	17,951	10,016
9	10,001	18,038	10,003
10	10,209	2,174	9,772
11	14,011	4,455	9,834
12	10,000	10,000	10,000
13	10,018	5,475	11,303
14	13,709	10,412	11,317
15	6,424	5,472	11,317
16	12,502	16,140	11,303
100	9,621	9,486	11,656
101	8,031	8,924	11,668
103	9,976	10,972	11,653
104	11,500	14,668	11,657
105	12,789	6,869	11,656

Tabel C.8: Endelige koordinater.

# BILAG D - VURDERING AF KONTROLMÅLING

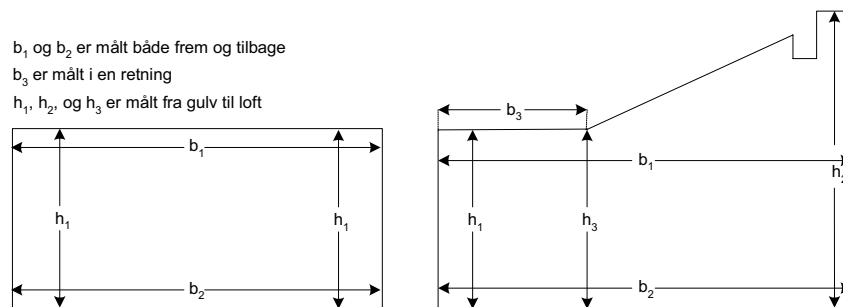
Inden kontrolmålingerne kan anvendes til at vurdere de modellerede laserscanningsdata, vil der blive foretaget en kontrol af kontrolmålingerne og herunder vurdere kvaliteten. Kontrolmålingerne er, hvis ikke andet er oplyst, foretaget med en Disto. Denne har en målenøjagtighed på 3 mm [Leica, 1994].

Der blev ved kontrolmålingen af testområdet indmålt følgende.

- Vægge, gulve og lofter
- Døre
- Vinduesnicher
- Skab, radiatorer, udluftningskanaler og stikkontakter

## VÆGGE

Der er to typer vægtyper i de tre rum. Dette kan ses på nedenstående figur.



Figur D.1: Illustration af målte dimensioner af de to typer vægge i testområdet. Figuren er ikke målfast.

Bredden af væggene bliver indmålt både frem og tilbage foruden  $b_3$ , som kun måles i en retning. Højderne måles fra gulv til loft. Hver dimension er som udgangspunkt målt to gange. Er afvigelsen mellem de to mål større end 3 mm foretages en tredje måling. Det mål, der ligger længst væk fra de andre to, forkastes. Der bliver ved hver måling forsøgt at måle helt ud til kanterne. For at sikre, at der måles vinkelret ud fra væggen anbringes Distoen på en vinkel.

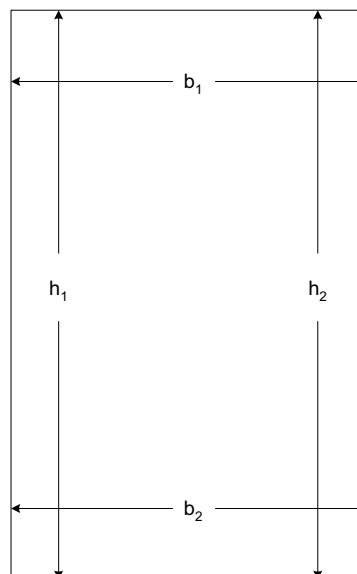
Det var ikke muligt at måle højden af syd-væggen i rum 5.20 og nord-væggen i 5.18. Det er væggene ved skråloftet. Blå plader foran radiatorerne er i vejen for dette. Dette medfører, at der måles i praksis en skråafstand.

Der antages, at væggene er tilnærmelsesvis lodrette, hvormed der sikres, at der måles den samme afstand frem og tilbage. Det viser sig også at være tilfældet i praksis, da der kun er et par millimeter mellem  $b_1$  og  $b_2$ .

Udover, at rummets vægdimensioner bliver indmålt på denne måde, indmåles også bredden af "vægstykker". Der er "vægstykker" såsom væggen mellem to vinduer eller væggen mellem en dør og et vindue. "Vægstykkerne" er indmålt med stålmålebånd.

## DØRE

Dørenes dimensioner bliver indmålt som nedenstående figur.



Figur D.2: Illustration af indmåling af døre og vinduer. Målene bliver foretaget i en retning.

Hver dimension bliver indmålt i en retning to gange. Dimensionerne er defineret fra dørkarm til dørkarm, dvs. at dørkarmene er inkluderet i målingen. Yderligere bliver døråbningerne også indmålt – dvs. uden karmene - mellem rummene 5.20 og 5.17 samt 5.20 og 5.18.

## VINDUESNICHEN

Der er foretaget kontrolmåling af vinduesnicherne ved gulvet - tre i rum 5.20 og et vindue i rum 5.17.

Der kontrolmåles ikke vinduespartierne i endevæggens øvre del i rum 5.20 og 5.18, da de ikke vil blive modelleret. Ved indmåling af rummene med laserscanneren var persienerne trukket for. Vinduerne er indmålt på samme måde som dørene. Derudover bliver dybden i vinduesnicherne også indmålt.

Dimensionerne for skabet i rum 5.17 bliver indmålt med stålmålebånd.

Kontrolmålinger kan ses i Bilag O.

Der beregnes en spredning af dimensionsmålene for bredde af væggene separat. Efterfølgende beregnes en samlet spredning af kontrolmålene foretaget af øvrige dimensionsmål såsom højder af væggene, vinduesnicher og døre samt bredder af vinduerne, døre mm.

### SPREDNING FOR DIMENSIONSMÅL AF VÆGBREDDE

Spredning for dimensionsmål af vægbredden bliver beregnet separat, idet der er kontrolmålt både frem og tilbage - se nærmere Figur D.1. Hver dimension er indmålt 2 gange, disse kontrolmål midles – middelfstanden anvendes til at beregne spredningen ud fra nedenstående formel. Der antages, at spredningen på ”middelfstanden frem” og ”middelfstanden tilbage” er lig med  $\sigma_k$ .

$$(D.1) \quad \sigma_k = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{2n}} \approx 1,15 \text{ mm} \quad , \text{ hvor}$$

$\sigma_k$  er spredningen på et kontrolmål  
 $d_i$  er afvigelse mellem ”middelfstanden frem” og ”middelfstanden tilbage”.  
 $n$  er antal kontrolafstande, i alt 28

Spredningen på et kontrolmål af en vægbredde beregnes til 1,15 mm. Idet væggene bliver indmålt både frem og tilbage uafhængigt<sup>7</sup> må spredningen på et middelkontrolmål af en vægbredde være  $\sqrt{2}$  bedre end de øvrige kontrolmålinger. Det vil sige, at spredningen på et middelkontrolmål er 0,82 mm, hvilket må betegnes som acceptabelt.

Der udregnes en grovfejlsgrænse for afvigelse mellem kontrolmål frem og tilbage for at kontrollere, om nogle kontrolmålinger eventuelt skal udtages – se nedenstående formel.

$$(D.2) \quad d_{\max} = \pm 3\sigma_k = 3,46 \text{ mm} \quad , \text{ hvor}$$

Grovfejlsgrænsen for afvigelsen mellem kontrolmålene afrundes til 3,5 mm. Ingen afvigelser undtagen én – en afvigelse på 4 mm - overskrider grovfejlsgrænser. Der vælges at acceptere, at denne afvigelse overskrider grovfejlsgrænsen, idet det kun drejer sig om en overskridelse på 0,5 mm. Væggene, hvorudfra målene er foretaget, er begge af lydisolerede materiale, dvs. med mange huller, hvilket kan betyde, at en laserstråle kan have ramt en af disse huller. Der konkluderes, at ingen af kontrolmålene er behæftet med grove fejl.

---

<sup>7</sup> Tilnærmelsesvis uafhængigt, idet der anvendes samme instrument til kontrolmålingen, men kontrollen bliver foretaget af to forskellige personer .

**SPREDNING PÅ ØVRIGE DIMENSIONSMÅL**

Spredning på kontrolmål af højden af vægge, vinduer og døre samt bredden af vinduer, ”vægdstyke” og døre kan beregnes ud fra Formel D.1. Hver dimension bliver som tidligere omtalt indmålt to gange. Størrelsen  $d_i$  er nu afvigelse mellem dimensionsmål 1 og dimensionsmål 2. Der er i alt 77 dimensionsmål.

Spredningen er beregnet til 1,07, hvilket må betegnes som værende acceptabelt. Grovfejlsgrænsen for afvigelse mellem dimensionsmål 1 og dimensionsmål 2 udregnes for igen at kontrollere om nogle kontrolmålinger eventuelt skal udtages. Denne beregnes til 3,21 mm. Ingen dimensionsmål afviger mere end 3 mm fra hinanden, hvilke indikerer, at dimensionsmålene ikke er behæftet med grove fejl.

Alt i alt vurderes kontrolmålene til ikke at være behæftet med grove fejl, og ingen kontrolmål er udtaget. Kontrolmålene kan dermed anvendes til at vurdere de modelerede laserscanningsdata.

# BILAG E - FORVENTET MÅLE- NØJAGTIGHED I ORTOFOTO

Dette bilag er lavet i forbindelse med kontrol af laserscanneren mht. opløsningen. Forinden der måles i ortofotoerne, beregnes en forventede målenøjagtighed ved måling i billederne, således, at der kan vurderes, om der er målt som forventet. Ved beregning af en forventet målenøjagtighed er der tre fejlbidrag, der har indvirkning på målenøjagtigheden.

$$(E.1) \quad \sigma_{\text{punkt}}^2 = \sigma_{\text{DHM}}^2 + \sigma_{\text{orient}}^2 + \sigma_{\text{def}}^2, \text{ hvor}$$

$\sigma_{\text{punkt}}$  er samlet punktnøjagtighed ved måling i ortofoto

$\sigma_{\text{DHM}}$  kan opsplittes i to fejlbidrag - fejlbidrag fra DHM og fejlbidrag fra radial højdeforskydning i billeder

$\sigma_{\text{orient}}$  er fejlbidraget fra orientering af kameraet. Fejlbidrag fra orientering af kameraet kan opsplittes i en indre og en ydre orientering

$\sigma_{\text{def}}$  er fejlbidrag fra definition af punkt i ortofoto.

## FEJLBIDRAG FRA TERRÆNMODEL

Fejlbidrag kan opsplittes i fejlbidrag fra DHM og fejlbidrag fra radial højdeforskydning.

### FEJLBIDRAG FRA DHM

Fejlbidrag fra DHM skyldes dels unøjagtigheder ved de enkelte punkter i punktskyen og dels unøjagtigheder ved interpolation af en højde til et vilkårligt punkt mellem punktskyens punkter.

Hvis den digitale højdemodel har en stor maskevidde, dvs. gridstørrelse, kan det blive vanskeligt ved genereringen at opfange detaljerne på overfladen. Ved anvendelse af laserscanningsdata burde dette ikke være et problem, idet en punktsky består af utrolig mange punkter. For eksempel ved Scan nr. 1<sup>8</sup> består af ca. 3.3 mio. punkter. En DHM genereret udfra laserscanningsdata er derfor bestemt med en høj pålidelighed.

Punkter i en punktsky er bestemt med en nøjagtighed på 5 mm. ( $\sigma_p$ )

Ved generering af terrænmodellen sættes en maksimal grænse for højden mellem højdemodellens overflade og punktskyens punkter til 5 mm. ( $3\sigma_h$ ) – se Appendiks A.

---

<sup>8</sup> I forbindelse med kontrol af opløsningen.

Ud fra ovenstående kan et overslag på fejlbidrag fra en DHM beregnes således.

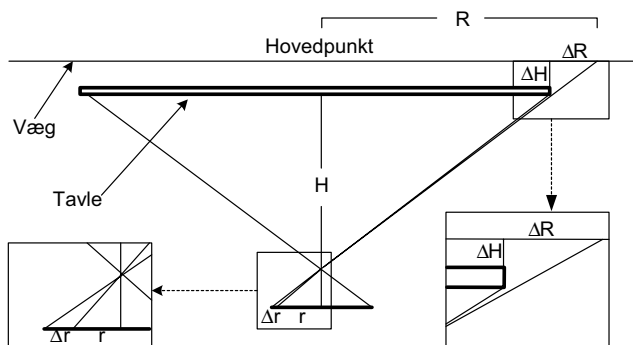
$$(E.2) \quad \sigma_{DTH} = \sqrt{\sigma_p^2 + \sigma_h^2} \Leftrightarrow$$

$$\sigma_{DTM} = \sqrt{(5\text{mm})^2 + \left(\frac{5}{3}\text{mm}\right)^2} = 5,3\text{mm}$$

Fejlbidrag fra DHM vurderes til 5 mm.

## RADIAL HØJDEFORSKYDNING

Målenøjagtigheden afhænger af, hvor der måles i ortofotoet, og af hvor kuperet terrænet er. Hvis diverse objekter rejser sig i terrænet såsom huse og træer, vil der begå en fejl ved måling til disse, som tilsvarende den radiale højdeforskydning. Højdeforskydningen er afhængig af afstanden  $R$  fra hovedpunktet, af  $\Delta H$  samt flyvehøjden,  $H$ . De forskellige parametre kan ses på nedenstående figur.



Figur E.1: Princip i radial højdeforskydning. Figuren skal ses ovenfra. Figuren er stærkt forøget.

Den radiale forskydning beregnes ud fra følgende formel.

$$(E.3) \quad \Delta R = \frac{R \cdot \Delta H}{H} \quad , \text{ hvor}$$

$\Delta R$  er den radiale forskydning på tavlen

$R$  er afstand på tavlen til hovedpunktet

$\Delta H$  er objektets højde

$H$  er flyvehøjde,

Den radiale forskydning er nul nær billedcentrum og vil vokse med afstanden ud til billedkanten.

[Johansen og Andersen, 1998]

Fejlbidraget fra radial højdeforskydning i denne kontrol vælges der at se bort fra, idet fejlbidraget vil være nær nul.



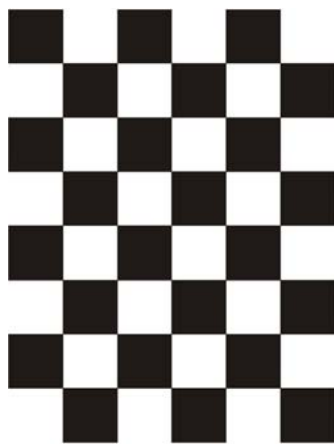
## FEJLBIDRAG FRA ORIENTERING AF KAMERA

Fejlbidrag fra orientering af kamera kan opdeles i indre og ydre orientering. Hvis ikke andet er nævnt, er Online-hjælpen til LMS-software anvendt i det nedenstående.<sup>9</sup>

### INDRE ORIENTERING

Indre orientering består af kamerakonstanten, billedmidtpunktet og linsefortegningsparametre.

En kalibrering af kameraet mht. indre orientering bliver foretaget i fællesskab med brugeren af laserscanneren og af Callidus. Brugeren skal optage billeder af en tavle bestående af et kvadratnet med sorte og hvide felter. Kvadratnettet fås i A3-format med 3 cm tern og A4-format med 4,5 cm tern. Et billede af kvadratnettet kan ses nedenstående.



Figur E.2: Kalibreringstavle.

Brugeren skal optage min 11 billeder af tavlen i forskellige afstande og hældninger. Brugeren sender de optagne billeder til Callidus, som foretager selve kalibrering af kameraet. Hvordan kalibreringen nærmere bliver foretaget, er fabriks hemmeligheder. Callidus tilbagesender en ica-fil, som bl.a. indeholder de beregnede kalibreringsdata for indre orientering. Brugeren indlæser ica-filen i LMS-computeren, hvormed kameraet bliver kalibreret for korrektionsdata for indre orientering.

Gruppen har ikke selv foretaget en kalibrering af kameraet, da dette dels skal foretages af Callidus og dels har LE34 fået foretaget en kalibrering for kort tid siden<sup>10</sup>. Gruppen har fået kalibreringsdataene (ica-fil) udleveret af LE34, ICA-filen kan ses i Bilag B og Bilag I.

---

<sup>9</sup> Gruppen har ikke licens til LMS-softwaret, men kan læse Online-hjælpen i programmet.

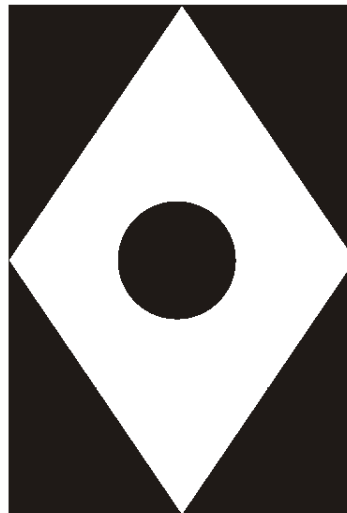
<sup>10</sup> Hvad gruppen har forstået på Jens T. B. Madsen fra LE34, er dette sket ca. 1 måned forinden, gruppen foretog opmålingen.

Det synes utilfredsstillende, at beregning af den indre orientering skal foretages af Callidus og ikke af brugeren selv. Endvidere synes det utilfredsstillende, at Callidus ikke angiver nogen form for spredning på værdierne af den indre orientering – dvs. at brugeren ingen ide har om, hvordan orienteringen er bestemt. Hvad Callidus har foretaget, er en sort boks for brugeren. Det anbefales af gruppen, at brugeren selv skal kunne foretage orientering af kameraet, således at der kendes til kvaliteten af orientering

## YDRE ORIENTERING

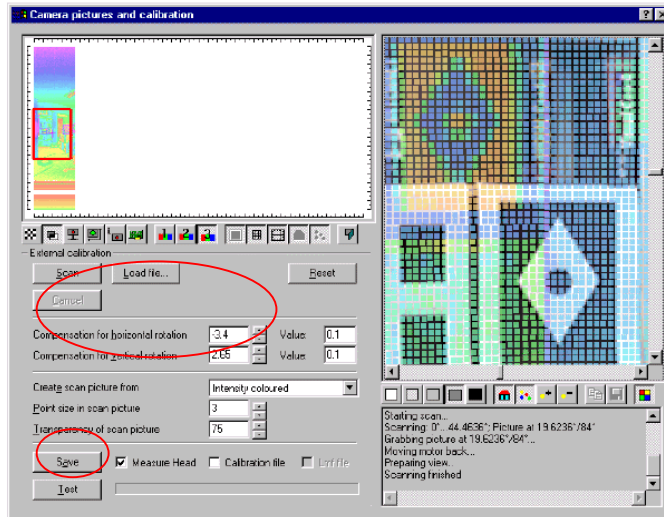
Kalibrering af ydre orientering består af seks parametre – kameraets position ( $x_0$ ,  $y_0$ ,  $z_0$ ) og billedets tre drejninger ( $\omega$ ,  $\varphi$ ,  $\kappa$ ). Sammen med den indre orientering bliver den ydre orientering angivet i ica-filen. Værdier for den ydre orientering i denne ica-fil er standard værdier, hvorfor brugeren selv er nødsaget til at foretage en finjustering. Denne finjustering skal foretages i LMS-softwaret, hvilket gruppen ikke har licens til. Gruppen har derfor ikke kunnet foretage en kalibrering af den ydre orientering, men proceduren for finjusteringen vil nedenstående blive forklaret.

Laserscanneren opstilles foran en specielt tavle med nedenstående figurs udseende, således at tavlen bliver optaget tilnærmelsesvis vinkelret fra kameraet.



**Figur E.3: Tavle til kalibrering af kameraets ydre orientering.**

Ved scanning af tavlen skal der indsamles data vedrørende intensitet, en punktmængde samt billedoptagelse. Efter endt scanning kan der åbnes et vindue, hvor scanningsdataene sammen med intensiteten er transparente på billedet. Vinduet kan ses nedenstående.



Figur: E.4: Screen dump fra LMS help manual. I vinduet til venstre vises scanningsområdet, scanningsdataene er transparente, således at både scanningsdata og billedet kan ses. Vinduet til højre viser ligeså scanningsområdet, hvor der er zoomet ind, så det er muligt at se de enkelte pixler i billedet. I dette vindue kan punktskyen flyttes og roteres visuelt, således at punktsky og billede er sammenfaldende

I ovenstående vindue foretages en visuel flytning af punktskyen, således at punktskyen og billedet er sammenfaldende. Når der er opnået et tilfredsstillende resultat, fremkommer korrektioner for horisontal- og vertikalrotation af kameraet. Finjustering af den ydre orientering gemmes i laserscanneren – ”Measure Head” jf. Figur: E.4. Der kan foretages en kontrol af kalibrering af den ydre orientering ved knappen ”test” i Figur: E.4. Programmet optager et nyt billede, hvor den indre orientering samt finjustering af den ydre orientering anvendes. Billedet vises sammen med scanningsdataene, som gerne skulle være sammenfaldende. Er dette ikke tilfælde, må der foretages en ny finjustering. LE 34 har foretaget en finjustering af den ydre orientering – denne kan ses i Bilag B.

Da, det ikke er muligt at indhente oplysninger vedrørende spredning på orientering af kameraet, beror et forventet fejlbidrag på orienteringen på et skøn ud fra gruppens erfaring omkring flyfotogrammetri og i samråd med vejleder.

Et fejlbidrag fra orientering af kameraet antages til at være 1 pixelstørrelse - tilsvarende et godt resultat i flyfotogrammetrien. I nedenstående tabel er der beregnet et samlet fejlbidrag fra orienteringen af kameraet.

Fejlbidrag i billede [mm]	Målforhold M	Fejlbidrag på objekt [mm]	Samlet fejlbidrag [mm]
X = 0,00465	1495	Ca. 7,0	Ca. 10
Y = 0,00507		Ca. 7,6	

**Tabel E.1:** Fejlbidrag fra orientering af kameraet. Der er anvendt oversigtsbilleder. Størrelserne for "Fejlbidrag i billede" og "Målforhold" er hentet i Afsnit 6.1.1.

## FEJLBIDRAG FRA DEFINITIONSNØJAGTIGHED

Ved måling af et punkt i et ortofoto vil der være usikkerhed på definition af punktet. Vurderingen af definitionsnøjagtigheden for et punkt er foretaget ud fra måling af et punkt min 20 gange i de enkelte ortofotos. Spredningen på et målt punkt beregnes ud fra nedenstående formel.

$$(E.4) \quad \sigma_{Def} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\text{middel} - V_i)^2}{n-1}} \quad , \text{ hvor}$$

$\sigma_{def}$  er fejlbidraget fra definition af punkt i ortofoto i X-, Y- og Z-retning [mm]

Middel er en beregnet middelværdi på punktet i X-, Y- og Z-retning [mm]

$V_i$  er værdien for det aktuelle målte punkt i X-, Y- og Z-retning [mm]

Der beregnes en spredning i henholdsvis X- Y- og Z-retning samt en samlet spredning på definitionen af et punkt. Der henvises til Bilag J for at se udregningerne af de enkelte spredninger.

Scanningsnr.	Spredning i X [mm]	Spredning i Y [mm]	Spredning i Z [mm]	Samlet spredning [mm]
2	1,8	0,2	3,4	3,9
3	2,9	0,7	3,6	4,6
4	3,3	0,4	3,5	4,8
5	6,3	0,5	4,3	7,7

**Tabel E.2:** Spredning på definition af et punkt, målt i ortofoto. Scanningerne er fra kontrollen "Kontrol af planer mht. opløsning".

Det viser sig, at det ikke er muligt at måle i scanning nr. 1, årsagen hertil er beskrevet i Afsnit 6.1.2. Ovenstående tabel indikerer, at det bliver sværere at måle, jo lavere opløsning bliver. Det gør sig specielt gældende i X- og Z-retningen. Y-aksen kan i betragtes som "dybde" i ortofotoet - Y-aksen er tilnærmelsesvis vinkelret med tavlen, og derfor er der en lille spredning i denne retning.

Det viser sig, at det stort set er ligegyldigt, hvilke scanningsopløsning af Scan nr. 2, 3 eller 4, der anvendes, da den samlede definitionsnøjagtighed er stort set ens. Til gengæld fordobles den samlede spredning nærmest ved scanning 5. Det er værd at bemærke ved planlægning af opmåling. En samlet definitionsspredning på et punkt ligger mellem 3,9 mm til 7,7 mm.

Idet dette kun er et overslag over den forventede målenøjagtighed sættes fejlbidrag fra definition til et punkt til 4 mm på baggrund af Scan nr. 2, 3 og 4.

## SAMLET FORVENTET MÅLENØJAGTIGHED

De enkelte fejlbidrag summeres, hvor det antages, at bidragene er uafhængige, hvorfor formel E.1. kan anvendes. Den samlede forventede målenøjagtighed er beregnet til følgende.

$$\begin{aligned} \text{(E.1)} \quad \sigma_{\text{punkt}}^2 &= \sigma_{\text{DTM}}^2 + \sigma_{\text{orient}}^2 + \sigma_{\text{def}}^2 \Leftrightarrow \\ \sigma_{\text{punkt}}^2 &= (5 \text{ mm})^2 + (10 \text{ mm})^2 + (4 \text{ mm})^2 \Leftrightarrow \\ \sigma_{\text{punkt}} &= 12 \text{ mm} \end{aligned}$$

Overstående målenøjagtighed er gældende for et punkt. En forventet målenøjagtighed på en afstand må derfor være  $\sqrt{2}\sigma_{\text{punkt}}$ , hvilket giver 17 mm. Det vil sige, at en grovfejlsgrense på en afstand ved måling i et ortofoto kan beregnes til 51 mm.




# Indholdsfortegnelse på CD


Bilag F  Korrespondance med Søren Nørmølle






Bilag G  Korrespondance med Jens T B Madsen


Bilag H  Korrespondance med Hartmut Fritzsche




Bilag I  Rådata


-  Detailpunkter
-  ICA-fil
-  Lokalnet
-  Scanningsdata





Bilag J  Opløsning

-  Definitionsnøjagtighed
-  DXF-filer
-  Output ved ortofotos
-  Reference og AutoCad
-  Reference og ortofoto

Bilag K  Hældning

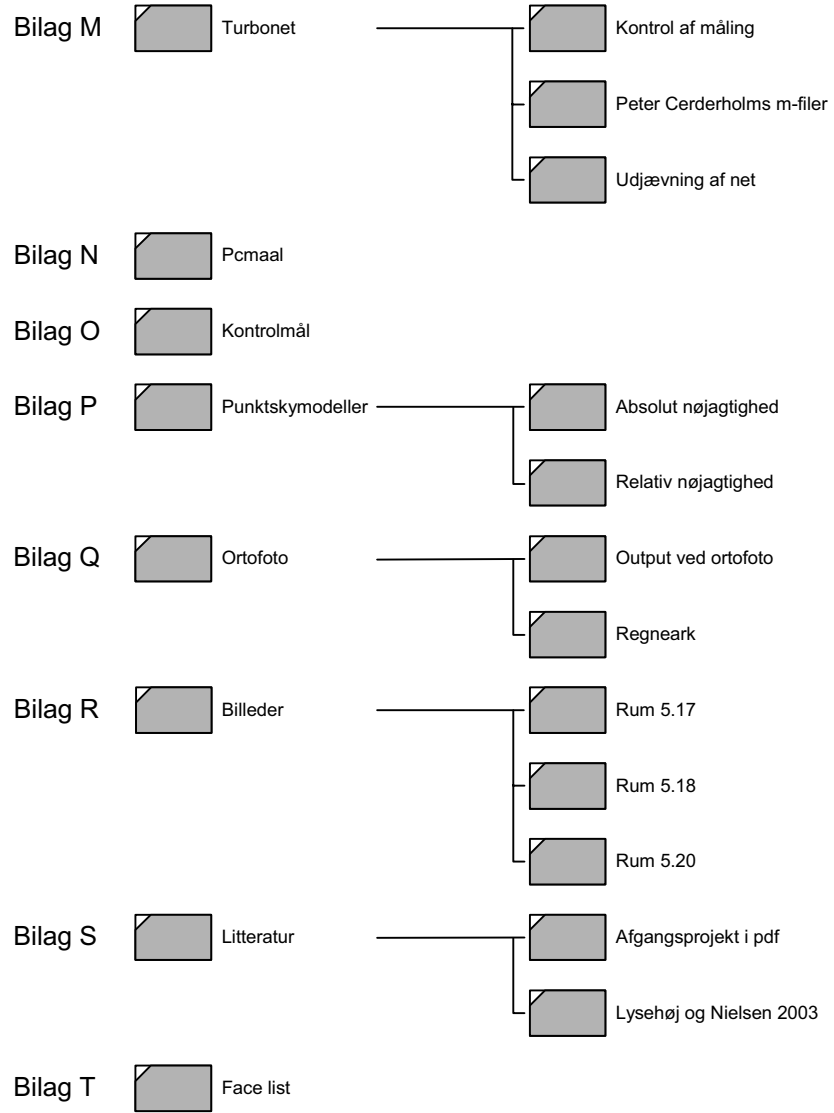
-  Indfaldsvinkel
-  Tavlens hældning reference
-  Vinkel mellem tavle og væg

Bilag L  Kompensator

-  Højdeforskel
-  Normalvektor
-  Reference
-  Transformation

 Fortsættes næste side







Dette afgangsprøje tager udgangspunkt i terrestrisk laserscanning, herunder indvendig 3D-opmåling af bygninger (Facility management) i forbindelse med renovering af eksisterende bygninger. Formålet med prøjet er at undersøge med hvilken nøjagtighed indvendig 3D-opmåling kan foretages med Systemet Callidus V1-1, og om metoden terrestrisk laserscanning vil være anvendelig til indvendig 3D-opmåling.

Der er opstillet krav for detaljeringsgraden af opmålingen og krav mht. relativ nøjagtighed på 5 mm og absolut nøjagtighed på 15 mm.

Den relative nøjagtighed bliver vurderet på baggrund af tre punktskymodeller, modelleret ud fra samme metode. Det viser sig, at det ikke er muligt at overholde det opstillede krav på 5 mm. Rummenes dimensioner er bestemt med en nøjagtighed på 9,5 mm og øvrige objekter på 15,2 mm.

Den absolutte nøjagtighed bliver ligeledes vurderet på baggrund af tre punktskymodeller. De er genereret ud fra forskellige metoder. Det viser sig at være muligt at overholde kravet mht. den absolutte nøjagtighed ved alle tre metoder på rummenes dimensioner med nøjagtigheder på henholdsvis 8,2 mm, 8,0 mm og 7,6 mm. Men det er ikke muligt at overholde den absolutte nøjagtighed på øvrige objekter, hvor nøjagtigheden er henholdsvis 17,2 mm, 18,6 mm og 15,8 mm. Det er specielt vanskeligt at bestemme dimensioner på mindre objekter, såsom stikkontakter og på objekter, der er sammenfaldende med andre objekter.

Der er undersøgt, om det er muligt at måle i ortofotos med de påkrævede nøjagtigheder. Der er opnået en relativ nøjagtighed på 10,4 mm og en absolut nøjagtighed på 9,5 mm. I ortofotoerne har der til gengæld ikke været problemer med at bestemme mindre objekter og objekter, der er sammenfaldende med andre objekter.

Gruppen finder metoden terrestrisk laserscanning kombineret med terrestrisk fotogrammetri til at være et fornuftigt alternativ til indvendig 3D-opmåling af bygninger.

