



**HÖGSKOLAN  
I GÄVLE**

**INSTITUTIONEN FÖR TEKNIK OCH BYGGD MILJÖ**

**INFALLSVINKELNS PÅVERKAN PÅ  
MÄTRESULTATET VID TERRESTER  
LASERSKANNING**

*Undersökning av ScanStation 2*

*Andreas Berg och Niklas Hermansson*

Juni 2009

Examensarbete 15 hp B-nivå  
Geomatik

**Geomatikprogrammet**  
**Examinator: Stig-Göran Mårtensson**  
Handledare: Yuriy Reshetyuk



## **Förord**

Detta examensarbete för högskoleingenjör på 15 högskolepoäng har utförts på B-nivå och ingår i utbildningen till mätningingenjör inom geomatikprogrammet vid Högskolan i Gävle. Vi vill tacka vår handledare Yuriy Reshetyuk som arbetar som universitetslektor på Högskolan i Gävle för hans stöd och engagemang vid framtagandet av den här rapporten samt under hela examensarbetet. Vi vill också tacka vår programansvarige på geomatikprogrammet, Stig-Göran Mårtensson, som har givit oss en god kunskapsgrund till att genomföra arbetet.

Gävle, juni 2009

Andreas Berg

Niklas Hermansson

## Sammanfattning

Noggrannheten hos mätningar gjorda med en terrester laserskanner påverkas av många faktorer. En viktig faktor som bör undersökas är laserstrålens infallsvinkel. Vårt syfte med den här undersökningen var att kontrollera laserskanner Leica ScanStation 2 vad gäller infallsvinkelns påverkan på punktmolnets noggrannhet. Undersökningen bestod av skanningar från 10–100 m avstånd mot en specialbyggd kub på 1x1x1 m, med infallsvinklar 0–85°, både inomhus och utomhus. Efterarbetet gjordes i programvaran Leica Cyclone där vi registrerade och modellerade våra punktmoln till olika plan. Resultaten visade en tendens att med ökad infallsvinkel till den inskannade kubens yta ändras resultatet av plananpassningen, vilket betyder att ett fel i avstånd uppstått. De slutsatser vi tagit var att det på 10–20 m avstånd uppvisades så små variationer i planinpassningen att infallsvinkels påverkan på precisionen av inpassade plan ligger inom förväntad noggrannhet och kan förbises. Vi såg en liknande trend för längre avstånd, 30–100 m, men felet var större än det förväntade samt att det visade på en viss instabilitet och infallsvinkeln måste tas i beaktning. Extrema infallsvinklar på 80–85° bör undvikas eftersom mätningarna där blir allt för ostabila.

## Abstract

The accuracy of measurements performed with a laser scanner is influenced by many factors. An important factor that should be examined is the angle of incidence of the laser beam. Our aim with this study was to investigate laser scanner Leica ScanStation 2 with regards to what impact the angle of incidence has upon point cloud accuracy. The survey consists of scans from 10–100 m against one specially made 1x1x1 metres cube, with angles of incidence of 0–85°, both indoors and outdoors. The data processing was done in the software Leica Cyclone where we registered and modelled our point clouds. The results of plane fitting showed a tendency that with an increased angle of incidence to the scanned cube's surface, the plane adjustments changed, meaning that an error in distance has occurred. The conclusions we have taken were that at a distance from 10–20 m, such small variations in plane fitting were present that the angle of incidence impact on the precision lies within the expected, and could be overseen. We saw a similar trend for longer distances, 30–100 m, but with a larger error than expected and some instability the angle of incidence must be taken into consideration. Extreme angles of incidence of 80–85° should be avoided since the measurements become far too unstable.

# Innehållsförteckning

Förord .....	I
Sammanfattning .....	II
Abstract .....	II
1 Inledning .....	1
1.1 Bakgrund .....	1
1.1.1 Terrester laserskanning .....	1
1.1.2 Felkällor och noggrannhet .....	1
1.2 Syfte och begränsningar .....	2
1.2.1 Syfte .....	2
1.2.2 Begränsningar .....	2
1.3 Tidigare studier .....	3
2 Material och Metoder .....	4
2.1 Teoretisk bas .....	4
2.2 Metod och genomförande .....	6
2.2.1 Skannern .....	7
2.2.2 Kuben .....	7
2.2.3 Programvaran .....	8
2.2.4 Mätmetod .....	9
2.2.5 Hjälpmedel .....	10
2.3 Efterbearbetning i programvaran .....	11
2.3.1 Leica Cyclone .....	11
2.3.2 Microsoft Excel .....	12
3 Resultat .....	13
3.1 Standardavvikelse för planen .....	13
3.2 Inpassningsfel mellan plan .....	13
3.3 Inpassningsfel mellan sfärer och plan .....	15
3.4 Vinklar mellan planen .....	16
4 Diskussion .....	17
4.1 Standardavvikelsen .....	17
4.2 Inpassningsfelet mellan plan .....	17
4.3 Inpassningsfelet mellan sfär och plan .....	18
4.4 Vinklar mellan planen .....	18
4.5 Slutsatser .....	19
Referenser .....	20



# 1 Inledning

## 1.1 Bakgrund

### 1.1.1 Terrester laserskanning

Terrester laserskanning (TLS), eller markbunden laserskanning, är benämningen på den teknik som med en laser utför avståndsmätningar mot objekt. Interna roterande speglar och servomekanismer fördelar lasern i horisontal- och vertikalled. Avståndsmätningar mot ett objekt resulterar i ett punktmoln bestående av många punkter där en punkt bildar en individuell mätning mot objektet med koordinater i X-, Y- och Z-led. Som en fjärde parameter anges även intensiteten av den återspeglade lasersignalen för varje punkt. Det finns olika avståndsmätningmetoder inom TLS, två av dessa är pulsmätning och fasskillnadsmätning. Vid pulsmätning skickas en laserpuls från skannern till objektet och avståndet mellan instrumentet och den reflekterande ytan beräknas med hjälp av den tid det tar för pulsen att skickas ut, träffa objektet, reflekteras och sedan tas emot (Lichti *et al.* 2002). Vid fasskillnadsmetoden, eller continuous-wave (CW), moduleras den utsända signalen av en harmonisk våg och avståndet beräknas utifrån fasskillnaden mellan utsänd och mottagen signal (Boehler and Marbs, 2002). TLS är en reflektorlös mätmetod vilket innebär att prismor eller andra reflektorer inte används vid mätning med en laserskanner. Metoden är istället beroende av att den reflekterande strålens kvalitet bibehålles utan att ha absorberas av materialet eller spridits vid kontakt av materialet (Lichti *et al.* 2002). De laserskannrar som används idag har blivit smidigare och enklare att använda, men det är fortfarande en hel del utrustning som krävs för att utföra ett skanningsarbete. Förutom själva skannern behöver vi en dator för att hantera skannerns inställningar och till att spara stora mängder data på. Eftersom lasern förbrukar en hel del ström måste även batterier användas, särskilt vid utomhusmätningar där el inte finns framdraget.

### 1.1.2 Felkällor och noggrannhet

Det är många faktorer som påverkar noggrannheten på en mätning utförd med en laserskanner. Felkällor i TLS-mätningar är viktiga att utreda eftersom det kan förändra planerandet och genomförandet vid en mätning. Ett exempel är att om laserskannern har en grön laser så blir resultatet av en skanning på ett rött objekt missvisande eftersom den röda färgen är den grönas komplementfärg och därför reflekteras signalen försvagad

(Swahn, 2008). De fel mätningarna är behäftade med och är viktiga att undersöka närmare beror på bland annat objektets yta, avståndet, väderförhållanden samt infallsvinkeln (Boehler *et al.* 2003). Noggrannheten som utlovas från olika leverantörer av laserskanningsutrustning i deras datablad kan inte generaliseras mellan dem, eftersom de använder olika termer i sina beskrivningar av noggrannhet. En del använder ”precision” eller ”noggrannhet”, andra ”upplösning” eller ”tolerans”, vilket gör att vi som användare själva måste ha koll på vad de menar och vad vi kan förvänta oss för geometrisk kvalitet utav instrumentens mätningar (Staiger, 2005). Erfarenhet visar att även denna noggrannhet inte kan vara att lita på eftersom laserskannrar tillverkas i små upplagor och den kan variera från instrument till instrument och att noggrannheten beror på individuell kalibrering och hur instrumentet har hanterats (Boehler *et al.* 2003). Vad är då noggrannhet? Eftersom de olika leverantörerna inte kan enas i ett gemensamt uttryck att precisera sin noggrannhet så härleder vi denna med hjälp av en definition från Handbok till mätningsskuggörelsen HMK-Ge:S (1996) och den får summera vad som menas med noggrannhet i denna rapport. ”Noggrannhet” och ”precision” är termer som beskriver spridning kring respektive ett sant och det mest sannolika värdet i en mätserie. I en mätserie används ”medelfel” som mått för noggrannheten och begreppet ”standardavvikelse” som ett mått för precisionen HMK-Ge:S (1996, s.14).

## **1.2 Syfte och begränsningar**

### 1.2.1 Syfte

Syftet med det här arbetet är att undersöka laserskanner Leica ScanStation 2 vad gäller infallsvinkelns påverkan på mätresultatet. Efter denna undersökning förväntar vi oss:

1. Presentera data där både infallsvinkeln samt eventuellt avstånd till det inmätta objektet har effekter på våra avståndsmätningar och, som följd, punktmolnets noggrannhet.
2. Lämna rekommendationer angående eventuella begränsningar av infallsvinkeln vid olika avstånd.

### 1.2.2 Begränsningar

Undersökningar genomfördes både inom- och utomhus. Inomhusmätningarna begränsades till 50 m på grund av mätshallens längd, medan utomhus kunde vi mäta upp



till 100 m. Med ett avståndsintervall på 10 m som begränsning fick vi tillräckligt med data till vår undersökning för att kunna göra en god analys av utfallet.

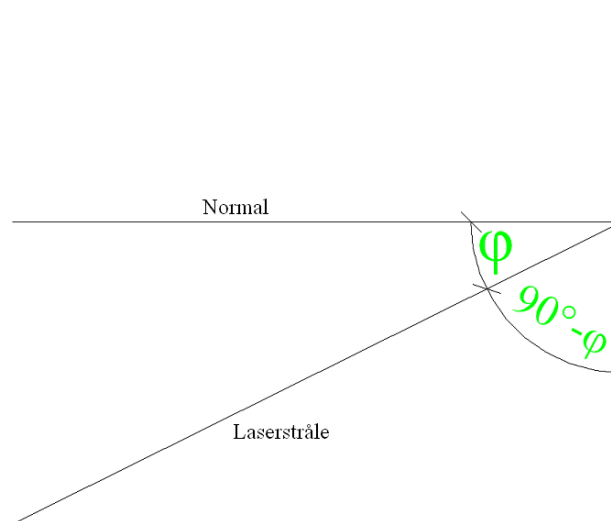
### **1.3 Tidigare studier**

Tidigare studier av infallsvinkelns påverkan på mätresultatet har påvisat avvikelser när vinkeln ökas mot objektet (Mechelke *et al.* 2007; Kersten *et al.* 2008; Soudarissanane *et al.* 2008). I undersökningen av Soudarissanane *et al.* (2008) kom de fram till att infallsvinklar över 60° gav en lägre punkttäthet samt förvrängda och förstörade mätobjekt. En undersökning som utfördes på HafenCity Universitetet i Hamburg och som beskrivs i både Mechelke *et al.* (2007) och Kersten *et al.* (2008) gick ut på att påvisa en eventuell ändring av punktmolnets kvalitet eftersom infallsvinkeln ändras. De skannade en plan stenplatta, monterad i en ram, som kunde vridas runt sitt centrum i den ramen. Fyra riktmärken, sfärer, monterades på den vridbara stenplattan. Eftersom stenplattans vridning inte påverkar sfärernas punktmoln kunde sfärerna användas som referenspunkter för att mäta ut avståndet till stenplattans punktmoln. För att mäta detta avstånd skapade de ett medelvärdesplan av stenplattans punktmoln (Mechelke *et al.* 2007; Kersten *et al.* 2008). Ytterligare en studie är Kersten *et al.* (2005) vars undersökning av olika felkällor på TLS-skannern Mensi GS100 påvisar just de delar som kan ingå och påverka kvaliteten på en laserskanning. Deras undersökning påvisade bland annat att färgen, ytan, materialet och infallsvinkeln tillsammans påverkar kvaliteten på punktmolnet men att de inte kan delas upp efter hur mycket varje faktor påverkar punktmolnet var och en. Kersten *et al.* (2008) drar slutsatsen i sin undersökning att eftersom deras mätningar vid 10 m avstånd med ScanStation 2 uppvisar sådana små variationer (upp till 2 mm) vid olika infallsvinklar kan infallsvinkels påverkan på noggrannheten helt försummas men att ytterligare forskning inom ämnet krävs för att fastslå om detta även gäller för längre avstånd. Vi väljer därför att låta vår undersökning ta vid där Kersten *et al.* (2008) lämnade, genom att försöka efterlikna deras metod samt att implementera den för längre avstånd. Den punkttäthet på 3 mm som användes per 10 m samt det vinkelintervall på 0–85° implementerar vi in i vår metod för avståndsmätningar. Eftersom vår undersökning ska behandla området noggrannhet har vi även studerat detta närmare för att förbättra vår metod. Enligt studier vid Kungliga tekniska högskolan (KTH) angående temperaturdrift (Reshetyuk, 2006) bör skannern värmas upp för att stabiliseras innan skanning utförs.

## 2 Material och Metoder

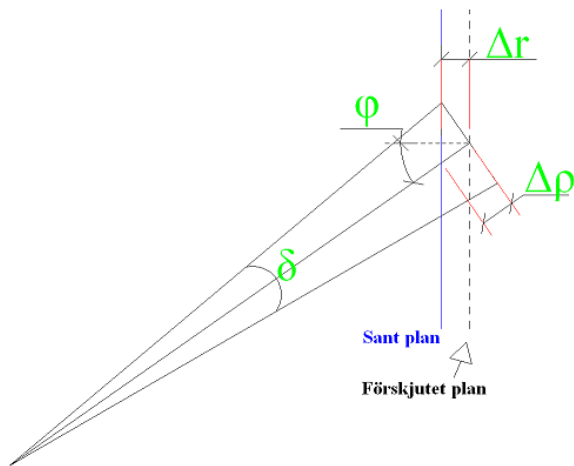
### 2.1 Teoretisk bas

När infallsvinkeln och avståndet till det skannade objektet ökas så förstoras laserns punktstorlek, vilket medför att noggrannheten vid mätningen blir sämre (Lindenberg *et al.* 2005). Detta uttalande måste granskas mer teoretiskt för att kunna förklaras i sin helhet. Avståndsmätningar med en laserskanner är som vi tidigare sagt behäftade med olika fel. Felkällan som vi har studerat i den här undersökningen är just infallsvinkeln ( $\varphi$ ). Med infallsvinkel menas i vårt fall vinkeln mellan den inkommande laserstrålen och normalen till mätobjektet den träffat (figur 1).



Figur 1. Definition av infallsvinkeln,  $\varphi$ .

När en laserskanners signal träffar ett objekt från en icke-normal vinkel kan ett avståndsfel uppkomma (Lichti *et al.* 2005). Detta kan ge oss en felaktig avståndsmätning för till exempel en plan yta som skannats i olika infallsvinklar. Vi har teoretiskt räknat fram vad denna skillnad mellan de olika mätningarna kan vara vid olika infallsvinklar.



Figur 2. Infallsvinkelns påverkan på avståndsmätning.

Uträkningen är rent trigonometrisk och utgår från ekvationen (1) som användes av Lichti *et al.* (2005) för uträkning av avståndsfelet,  $\Delta\rho$ , som en effekt av förändrad infallsvinkel,  $\varphi$ , vid avståndet,  $\rho$  (från skannern till det sanna planet), och med skannerns strålbredd,  $\delta$  (figur 2).

$$\Delta\rho = \frac{\rho\delta}{2\tan\varphi} \quad (1)$$

Eftersom Lichti *et al.* (2005) mäter infallsvinkeln från andra hållet ( $90^\circ - \varphi$ ) jämfört hur vi mäter den (figur 1) måste ekvation (1) anpassas med hjälp av definitionen av tangens för en vinkel. Istället för att multiplicera med  $\frac{1}{\tan}$  för infallsvinkeln så multiplicerar vi istället bara med  $\tan$  och får då ekvation (2) för vår ”korrekta” infallsvinkel.

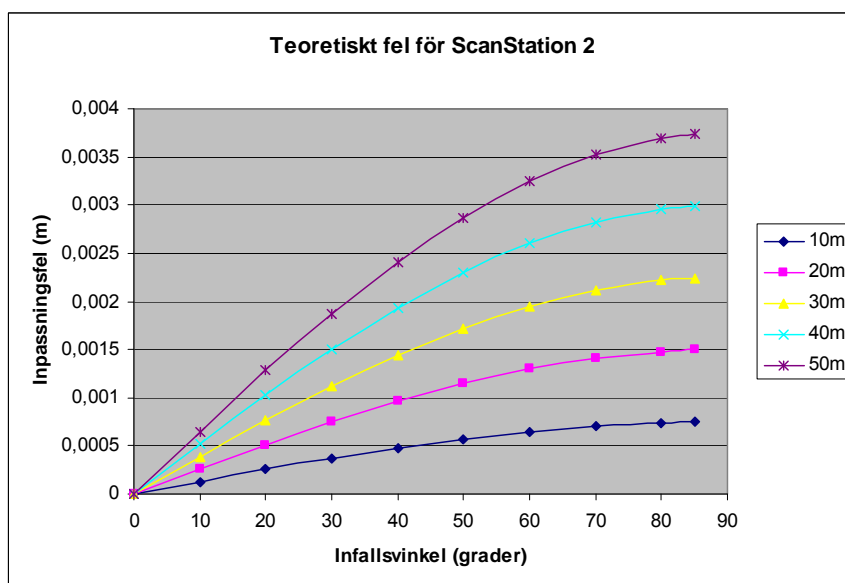
$$\Delta\rho = \frac{\rho\delta}{2} \tan\varphi \quad (2)$$

För att hitta felet i anpassningen mellan det ”sanna” planet till det förskjutna, ett ortogonalt avstånd,  $\Delta r$  (figur 2), krävs ytterligare en anpassning av ekvationen till den slutliga (3) som vi har använt vid beräkningarna av felet till det förskjutna planet i den här undersökningen.

$$\Delta r = \Delta\rho \cos\varphi \Rightarrow \Delta r = \frac{\rho\delta}{2} \tan\varphi \cos\varphi \Rightarrow$$

$$\Delta r = \frac{\rho\delta}{2} \frac{\sin \varphi}{\cos \varphi} \cos \varphi \Rightarrow \Delta r = \frac{\rho\delta}{2} \sin \varphi \quad (3)$$

Det är skillnaden mellan referensytan och övriga ytor som ger inpassningsfelet som undersökningen baseras på. Vi beräknade förväntade inpassningsfel för skanner Leica ScanStation 2, för avstånd 10–50 m och infallsvinklar 0–85°, och resultatet visas i figur 3. Dessa teoretiska inpassningsfel ligger inom skannerns avståndsmättningsnoggrannhet (4 mm) och det grafen visar är att i teorin bör inpassningsfelet öka med en ökning av infallsvinkeln.



Figur 3. Teoretiska inpassningsfel.

## 2.2 Metod och genomförande

Undersökningen har utförts inomhus i den ca 60 m långa mäthallen på Högskolan i Gävles Geodetiska laboratorium placerat på Brynäs och utomhus på en rak och jämn gångbana på campusområdet vid Högskolan i Gävle. Mätningarna har utförts på avstånden 10–100 m och vid infallsvinklarna 0–85°. Genom att vrida själva objektet i olika vinklar och ha skannern stå fast positionerad kan vi jämföra de olika mätresultaten mot varandra i ett gemensamt koordinatsystem och på så sätt påvisa eventuella variationer mellan mätningarna. Avstånden mellan mätobjektet och skannern mättes upp med ett måttband och kontrollerades med en probe-skanning (funktion för en enkel

avståndsmätning i Leica Cyclone) innan varje skanning påbörjades för att säkerställa avståndet vid varje uppställning.

### 2.2.1 Skannern

Den skanner som användes vid undersökningarna av mätobjektet var Leica ScanStation 2 som nyligen har införskaffats till Institutionen för teknik och byggd miljö på Högskolan i Gävle. I tabell 1 finns information om specifikationer för ScanStation 2 (Leica Geosystems, 2009b). Skannern är försedd med inbyggd tvåaxlig kompensator som hjälper att horisontera skannern som en totalstation. Vid skanningen placerades skannern på ett stativ säkrat med en stativstjärna (figur 4).



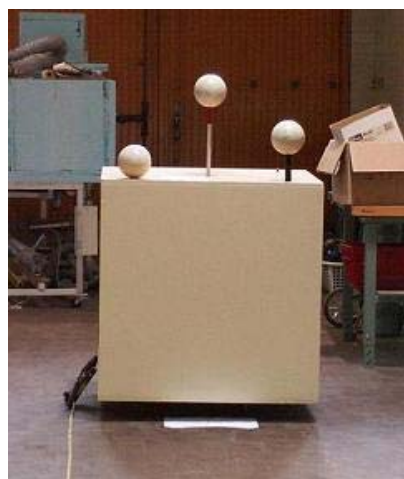
Figur 4. Skanner med stativ.

Tabell 1. ScanStation 2 specifikationer.

Laser	Grön klass 3R
Skanningshastighet	max 50000 punkter/sekund
Strålbredd	0,15 mrad
Avståndsmättningsnoggrannhet	4 mm på 1–50 m
Vinkelmättningsnoggrannhet	60 $\mu$ rad, horisontal och vertikal

### 2.2.2 Kuben

Vår undersökning består av mätningar mot en specialbyggd kub (figur 5) med dimensionerna 1x1x1 m, vilken har fästen för montering av targets, måltavlor (sfärer), på dess ovansida och står på hjul så den kan vridas i önskade vinklar. Kuben har tidigare använts vid undersökningar av olika skannrars noggrannhet (Johansson, 2002). Kubens ytor har olika material och färger. Vi valde att skanna på en vit blank yta eftersom den vita färgen har en bättre reflektans som ger en högre punkttäthet, på grund av ett större antal reflekterande punkter, med minimalt



Figur.5 Kub med tre sfärer som targets.

brus (Clark och Robson, 2004) men även på grund av att den vita färgen har använts i tidigare undersökningar av infallsvinkelns påverkan på skannerns noggrannhet (Kersten *et al.* 2008; Mechelke *et al.* 2007). Att ha många mätpunkter i utgångsläget var ett mål eftersom vi vet att punkttätheten sjunker med ökad infallsvinkel (Lindenbergh *et al.* 2005) och den vita ytan borgar för att vi får punkter även vid de största infallsvinklarna.

### 2.2.3 Programvaran

Programvaran Leica Cyclone 6.0 användes vid skanning, registrering och modellering av kuben. Programvaran distribueras av Leica Geosystems och används för arbeten inom olika laserskanningsprojekt. Leica Cyclone 6.0 har olika moduler, här följer en redogörelse för dem vi har använt i vår undersökning:

- Cyclone SCAN – för skanning
- Cyclone REGISTER – för registrering
- Cyclone MODEL – för modellering

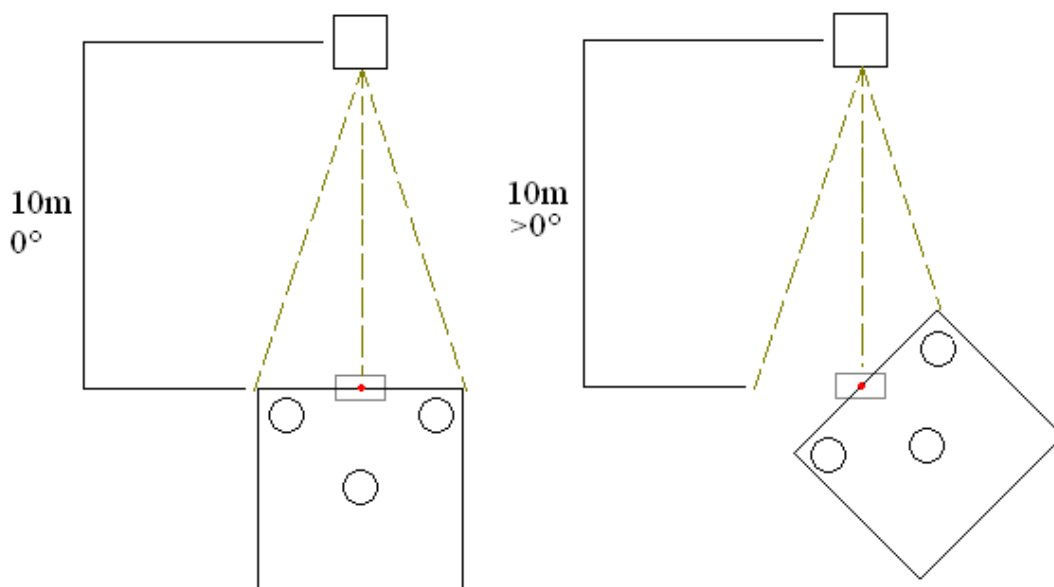
Vid inskanning av ett objekt används Cyclone SCAN, som låter användaren styra skannern. Även inställningar som att precisera ett skanningsfilter (ett intervall av intensitet och avstånd bestäms och alla insamlade punkter utanför detta intervall förkastas) och bestämma skanningens upplösning kan regleras av operatören.

Registreringen, sammanslagning av punktmoln till ett gemensamt koordinatsystem, görs i Cyclone REGISTER som ger användaren tillgång till verktyg som lägger ihop punktmoln med hjälp av riktmärken, targets, eller överlappningar mellan punktmolnen. Efter registreringen kan statistik såsom kvadratmedelfel, RMS-fel, vilket anger hur väl punktmolnen anpassats till varandra, och felen på individuella riktmärken tas fram.

Cyclone MODEL används för konvertering av data till användbar information. Att utifrån punktmoln skapa digitala terrängmodeller (DTM) och modellera byggnader är några exempel på hur Cyclone MODEL kan användas (Leica Geosystems, 2009a).

## 2.2.4 Mätmetod

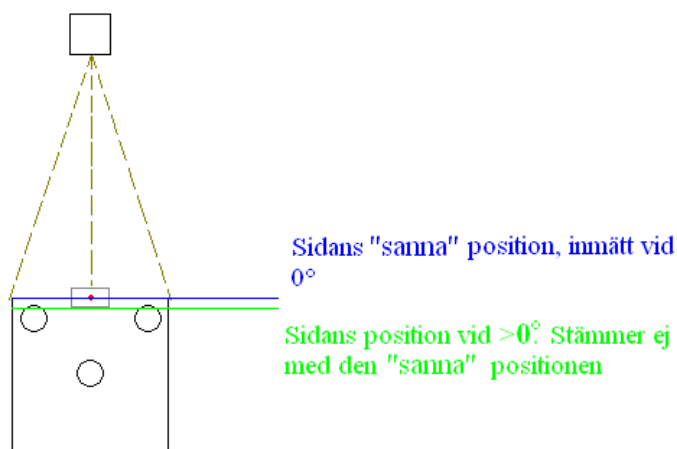
Eftersom vi i vår undersökning försöker se till infallsvinkelns påverkan på kvaliteten av skanningen måste de andra yttre faktorerna som kan påverka minimeras. Vi har därför valt att utföra vår undersökning med så minimal yttre påverkan som möjligt. För att undvika effekter av temperaturdrift lät vi skannern stå och värmas upp i ungefär en timme innan skanning påbörjades. Vid våra inomhusmätningar placerade vi kuben så att ingen eventuell solbelysning via fönster var möjlig och när vi skannade utomhus använde vi paraplyer för att skugga både skannern och kuben. Som en ytterligare åtgärd att minimera felkällor har vi mätt temperaturen både vid inomhus- och utomhusmätningarna. Lufttrycket mättes med en aneroidbarometer vid utomhusmätningarna. Både temperatur och lufttryck fördes regelbundet in i Cyclone SCAN innan skanning utomhus för automatisk korrigering med avseende på dessa. Grundidén med att sfärerna tack vare sin geometri behåller sin position, oavsett vridning, medan däremot den skannade ytan får en eventuell förskjutning i avstånd, på grund av infallsvinkelns påverkan, är vad vi tar med oss till vår metod från Kersten *et al.* (2008). Genom att först skanna den vridbara kuben med tre sfärer monterade på dess ovansida med  $0^\circ$  infallsvinkel (figur 6, vänster) fick vi ett referenspunktmoln att jämföra mot mätningar med  $>0^\circ$  infallsvinkel. Denna skanning upprepades för respektive ny vinkel vi gjorde mätningar på (figur 6, höger).



Figur 6. Kubens och skannerns position vid  $0^\circ$  (vänster) och  $>0^\circ$  (höger).

Genom att anpassa ett plan till respektive punktmoln i programvaran så kunde vi mäta mellan sfärernas centrumpunkter och de olika planen för att urskilja eventuella

inpassningsfel, det vill säga en inbördes skillnad mellan planets "sanna" position och det förskjutna planets position (figur 7), mellan dem. När vi sedan registrerade ihop punktmolnen i mjukvaran i ett gemensamt koordinatsystem gav det oss ytterligare en metod att hitta eventuella inpassningsfel.

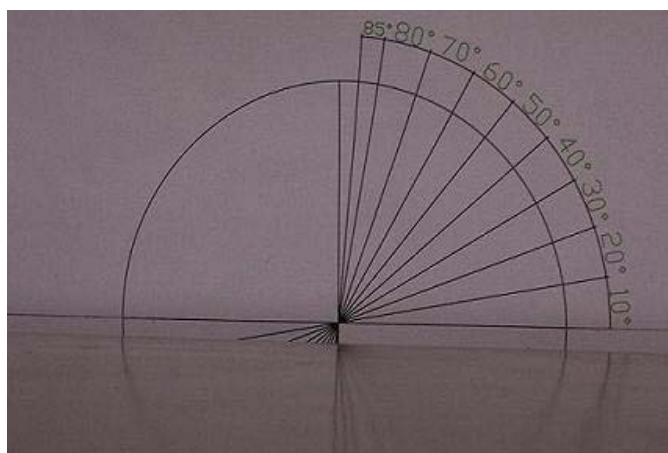


Figur 7. Förklaring till inpassningsfelet.

## 2.2.5 Hjälpmedel

För att ställa in vinkeln på kuben vid respektive skanning skapade vi en gradskiva i programvaran AutoCad 2007 som vi skrev ut på ett A3-papper (figur 8). De olika infallsvinklarnas inställning gjordes manuellt genom att vrida kuben över den på golvet eller marken placerade gradskivan.

Med en barometer uppmättes lufttryck och med en termometer uppmättes luftens temperatur vid skanningarna. Barometern är av märket Negretti & Zambra Ltd med typnummer: M.2606/MB/S och serienummer: 172/61 med vilken vi mätte lufttrycket i mbar med tiondels noggrannhet. Termometern är en vanlig kvicksilvertermometer



Figur 8. Gradskiva i position under kuben.

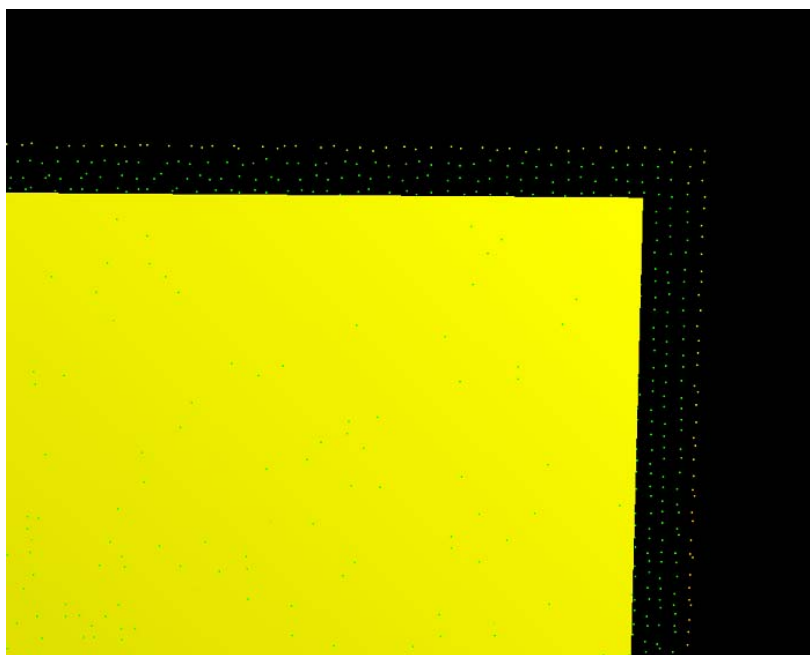
med vilken vi kunde uppskatta temperaturen till halva grader Celsius. Jämförelse av temperaturer från Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut (SMHI) visade ingen skillnad mot termometern så ingen kalibrering ansågs vara nödvändig. Som ytterligare hjälpmedel hade vi två vanliga paraplyer som solskydd för både skannern och kuben samt även ett stålmåttband vid avståndsmätning för kubens placering.



## 2.3 Efterbearbetning i programvaran

### 2.3.1 Leica Cyclone

Med hjälp av programvaran Leica Cyclone gjorde vi efterbearbetning av skanningarna där vi bestämde skillnaderna i avståndsmätningen vi fick fram från de olika avstånden och vinklarna i arbetet. Den inskannade sidan av kuben modellerades till ett plan i Leica Cyclone och för varje vinkel vid varje avstånd modellerades ett plan av respektive punktmoln. För att undvika så kallade edge-effects (kanteffekter) som kunde givit oss felaktiga mätvärden (Johansson, 2002) har vi inte modellerat hela sidan av kuben utan gjort en indragning på några centimeter runt ytterkanten, men ändå försökt ta med så mycket som möjligt av kubens yta (figur 9).



*Figur 9. Exempel på hur vi undvek kantbrus.*

För att kunna mäta avstånden mellan de olika planen och referensplanet (inscannade sidan vid vinkel  $0^\circ$  för varje avstånd) utfördes en registrering per avstånd så alla modellerade plan vid samma avstånd hamnade i ett gemensamt koordinatsystem. I detta registrerade punktmoln utfördes avståndsmätningar från de olika modellerade planen till referensplanet med hjälp av Leica Cyclones mätningssverktyg för att påvisa ett eventuellt inpassningsfel mellan planen. Eftersom alla sfärer inte hamnar på exakt samma position på grund av små anpassningsfel vid registreringen, kan ett omedvetet val ske vid

markering av sfär, vilket innebär att flera mätningar mot samma plan kan visa på olika avstånd. Våra mätningar visade på en skillnad upp till 0,9 mm mellan dem. För att undvika detta mättes avstånden mellan sfärerna och respektive plan i varje punktmoln istället för det registrerade och vi kunde ta fram inpassningsfelet mellan sfär och plan. Med hjälp av funktionen *object info* kunde vi ta fram hur pass väl vi ställt upp kuben vid första uppställningen eftersom vinkeln skulle vara 0°. Från den funktionen fick vi fram planets normalvektor och dess tre komponenter,  $n_x$ ,  $n_y$  och  $n_z$  där  $n_y$  visade avvikelse i ortogonalitet mellan skannern och kuben. För att visualisera  $n_y$  räknades den om till en avvikelse i grader (4). För inomhusmätningen var medelavvikelsen 2,3° och för utomhusmätningen var den 3,1° vilket ger en uppfattning om hur väl vi positionerat kuben. Slutligen användes Leica Cyclone för att ta reda på varje anpassat plans standardavvikelse.

$$\text{Vinkeln i grader} = \arccos(n_y) \frac{180}{\pi} \quad (4)$$

### 2.3.2 Microsoft Excel

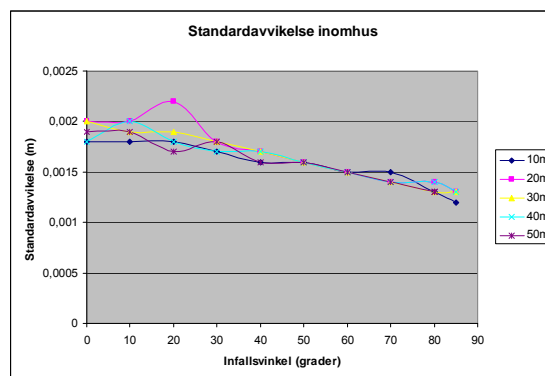
Våra beräkningar av teoretiska inpassningsfel utförde vi i programvaran Microsoft Excel med hjälp av dess trigonometriska funktioner. Vi sammanställde även våra data och skapade graferna där.

### 3 Resultat

Som underlag för våra resultat har vi skanningar från både inomhus- och utomhusmätningar. Inomhus har vi sammanlagt 45 skanningar och utomhus sammanlagt 90 skanningar. Punktmolnens täthet från skanningarna var 3 mm per avstånd och gav tillräckligt med mätpunkter på alla skanningar förutom från avstånden 90 och 100 m vid vinkeln 85° eftersom inga punkter erhöles. De teoretiska värden vi presenterar är uträknade med hjälp av ekvation (3) och jämförs med de uppmätta värdena från våra skanningar. Från vår efterbearbetning i Leica Cyclone presenterar vi resultat av de två olika mätmetoder vi använt för att undersöka våra punktmoln samt en kontroll av dess precision.

#### 3.1 Standardavvikelse för planen

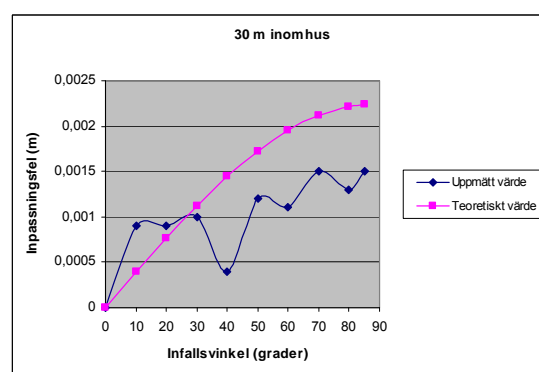
Programvaran gav standardavvikelsen för hur väl planen var anpassade till punktmolnen. Alla plan hade en precision på ungefär 1,5–2 mm (i jämförelse med skannerns angivna noggrannhet på 4 mm) med en avtagande tendens med ökad infallsvinkel (figur 10).



Figur 10. Planens standardavvikelse inomhus.

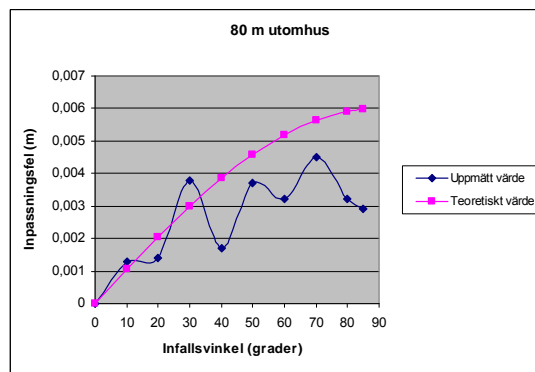
#### 3.2 Inpassningsfel mellan plan

En tendens vi kunde se i våra mätningar var att avståndsmätningen till den inskannade kubens yta ändrades, vilket betydde att ett inpassningsfel kunde ha uppstått, men för ScanStation 2 var felen så små vid korta avstånd att det också kunde vara brus som visades. Resultatet var dock inte helt enligt våra teoretiska beräkningar men en jämförelse (figur 11 och 12) visade på en tenderad stigning av inpassningsfelets kurva med ökad

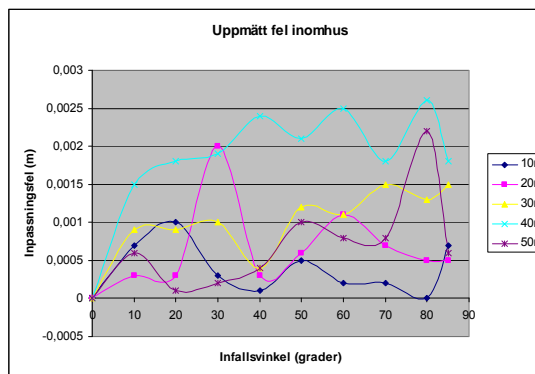


Figur 11. Inpassningsfel, 30 m inomhus.

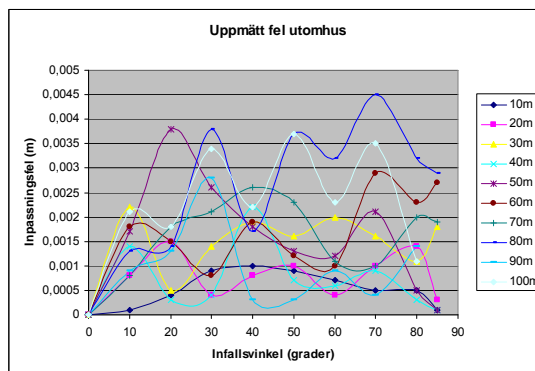
infallsvinkel, men visades alla inpassningskurvor tillsammans (figur 13 och 14) överskuggades denna stigande tendens av oförutsägbara kurvor som mer såg ut att visa oregelbundenhet än någon tendens av något slag. Noterbart är dock att det uppmätta inpassningsfelet inomhus för de modellerade planen låg inom precisionen (2 mm) för infallsvinkeln 0–85° vid avstånden 0–30 m. På avståndet 40 m överskreds precisionen redan vid infallsvinkel 40° medan för 50 m först vid 80° infallsvinkel. För utomhusmätningar låg inpassningsfelet under 2 mm för infallsvinkeln 0–85° vid avstånden 0–20 m. På avståndet 40 m överskreds precisionen vid infallsvinkel 40° medan de flesta resterande överskrider redan vid 30°.



Figur 12. Inpassningsfel, 80 m utomhus.



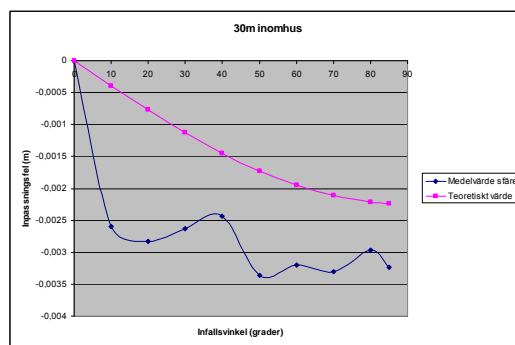
Figur 13. Inpassningsfel, alla avstånd inomhus.



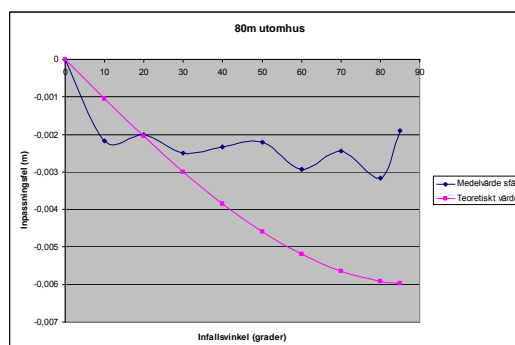
Figur 14. Inpassningsfel, alla avstånd utomhus.

### 3.3 Inpassningsfel mellan sfärer och plan

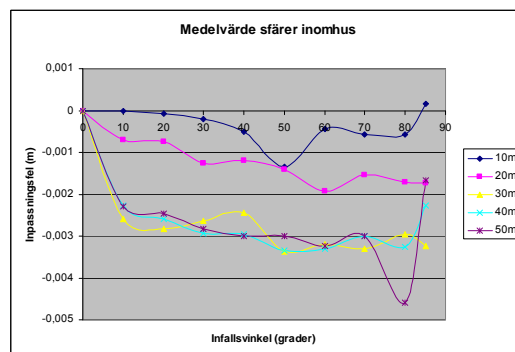
Genom att anpassa ett plan till respektive punktmoln i programvaran så kunde vi i Leica Cyclone mäta avståndet mellan sfärernas centrumpunkter och de olika planen. Resultatet från mätningen presenterades som ett inpassningsfel mellan sfärer och plan. Grafer i figur 15 och 16 visar att felet ökar med ökad infallsvinkel, men inte enligt det som förväntats från teorin. Felen inomhus visas i en gemensam graf över de tre sfärernas inpassningsfel beräknat som ett medelvärde per avstånd (figur 17) och felen utomhus visas på samma vis i figur 18. Inomhusmätningens graf visade på en svag tendens att felet ökade med ökad infallsvinkel. Felet ligger inom precisionen (2 mm) för infallsvinkeln 0–85° vid avstånden 0–20 m. Men vid avstånden 30–50 m överstegs precisionen redan vid 10° infallsvinkel. Noterbart är att på avstånd 50 m blev resultatet ostabilt vid infallsvinkel 80°. Grafen för utomhusmätningarna visade liknande kurvor, där avstånden 0–20 m låg under precisionen för alla infallsvinklar medan de längre avstånden pendlade både över och under precisionen. Även här visade resultaten för längre avstånd vid infallsvinkel 80–85° en instabilitet. Även avståndens påverkan på felet gick att tyda i graferna för inomhusmätningarna och en tendens är att det absoluta felet ökade med ökat avstånd.



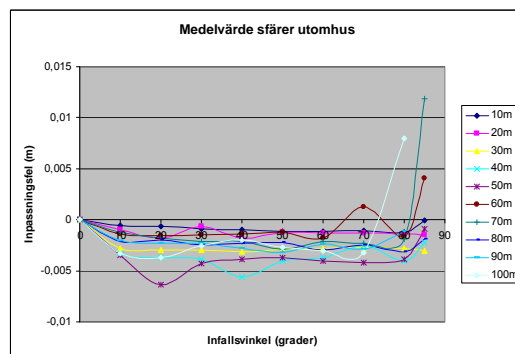
Figur 15. Inpassningsfel, 30 m inomhus.



Figur 16. Inpassningsfel, 80 m utomhus.



Figur 17. Medelvärde för avståndsfel inomhus.



Figur 18. Medelvärde för avståndsfel utomhus.

### 3.4 Vinklar mellan planen

När vi i det registrerade punktmolnet jämförde våra plan mot varandra kunde vi se att de flesta var nästan parallella men att en del av dem skar varandra med en inbördes vinkel på upp till  $0,5^\circ$ . En iakttagelse vi gjorde var att i de fall vi såg att planen skar varandra fanns en tendens att de plan som skannats med högre infallsvinkel hade en mer upprätt vinkel (jämfört mot  $0^\circ$  planet).

Ett exempel (figur 19) är skanning

från 30 m inomhus med

vinkeln  $20^\circ$  (grönt plan till

vänster) jämfört med vinkeln

$50^\circ$  (lila plan till höger) där

vinkeln mellan planen

uppmättes till endast  $0,09^\circ$ .

Men eftersom avståndet

mellan planen var så litet som

0,3 mm så fick den lilla

vinkeln ändå planen att skära

varandra. En matematisk

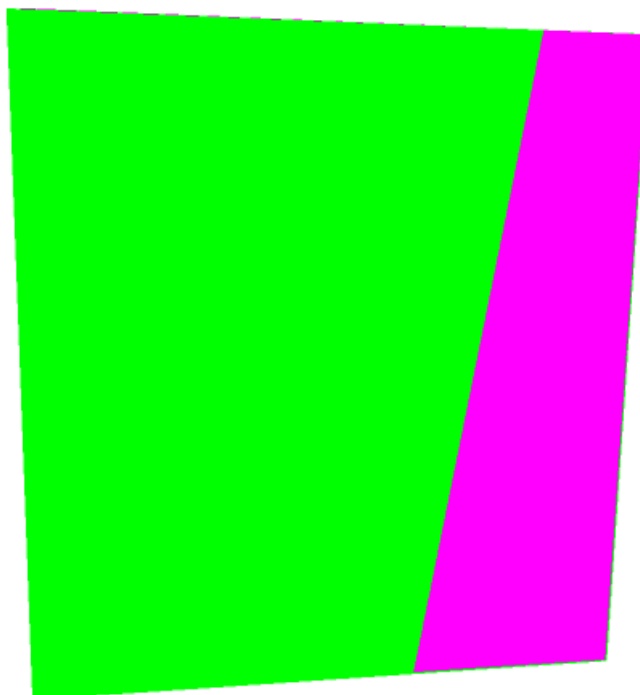
kontroll av detta gav att planen

bör skära varandra ungefär 19

cm från centrum av planen,

vilket stämde med det som visades

grafiskt i Leica Cyclone.



Figur 19. Inskannade plan från 30 m.

## 4 Diskussion

En möjlig anledning till att våra skanningar har så pass små fel även vid stora vinklar kan vara att vi mäter på plan som är modellerade och har en bättre precision än vad skannerns angivna är samt att vi skannat en vit blank yta som ger mycket goda reflektioner och att skanningarna är utförda under stabila förhållanden med minimala yttre påverkningar. Att skydda skannern och kuben från direkt solljus minimerar eventuellt brus och eftersom vi kontinuerligt justerar parametrar som temperatur och lufttryck samtidigt som vi skannar mot en högre reflekterade yta och att vi modellerat plan utan kantbrus ger det oss bra förutsättningar att identifiera infallsvinkelns påverkan på felet. Att skannern är nyinköpt och förmodligen nykalibrerad från leverantören bidrar också till att få en bra kvalitet på resultaten.

### 4.1 Standardavvikelsen

Precisionen på den inskannade ytan förbättrades, något förvånande, eftersom vi antog att även den, på samma sätt som inpassningsfelet, skulle försämrats vid skanning med en högre infallsvinkel (figur 10). Detta resultat ligger dock i linje med tidigare studier där infallsvinkelns påverkan på mätresultaten studerats (Clark och Robson, 2004).

Precisionen presenteras som en standardavvikelse för de modellerade planen och det är den precisionen vi jämför våra mätresultat i diskussionen mot istället för den noggrannhet som anges i skannerns datablad vilken endast avses för avståndsmätningar.

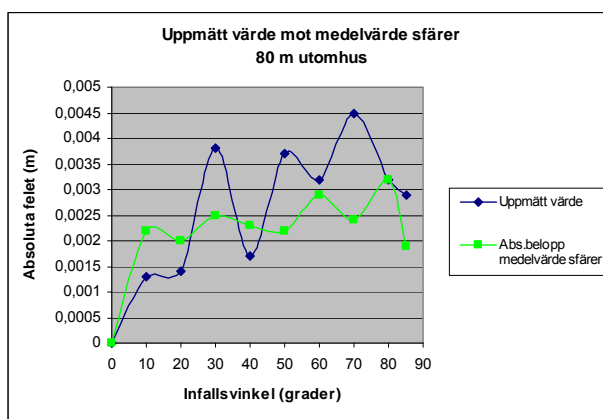
### 4.2 Inpassningsfelet mellan plan

Våra resultat stämmer överens med tidigare forskning. Kersten *et al.* (2008) visade att ett inpassningsfel uppstod men inte större än 2 mm. I vårt fall var inpassningsfelet inom 4,5 mm för alla avstånd och infallsvinklar (figur 14). När vi ska använda våra skanningsresultat till en noggrann modellering bör vi jämföra mot vår uppmätta precision baserad på modelleringar som ligger mellan 1,5 och 2 mm för att få ett bra resultat.

Enligt våra resultat är det bara avstånden upp till 20 m som kan skannas från alla infallsvinklar upp till 85° utan att överskrida precisionen. De resultat vi har från längre avstånd visar på ett ostabilt pendlande runt precisionen utan att ge ett klart svar till någon begränsning. Så en eventuell rekommendation vid noggrann modellering måste begränsas till att skanna från max 20 m så infallsvinkeln inte påverkar resultatet. Om längre avstånd ändå krävs vid en noggrann modellering kan inte precisionen garanteras även om infallsvinkeln begränsas.

### 4.3 Inpassningsfelet mellan sfär och plan

Våra mätningar av inpassningsfel mellan sfär och plan är mer en ytterligare kontroll av inpassningsfelet mellan olika plan än en egen självständig undersökning av felet. Skillnaden på den här metoden är att ingen registrering mellan punktmolnen har gjorts vilket inte ger oss ett fel som följer med från



Figur 20. Jämförelse av inpassningsfelet från två metoder.

registreringen. Detta kan ge oss vissa bättre värden än vad inpassnings-felet mellan olika plan har visat på. Men om vi jämför grafer av det absoluta inpassningsfelet med en graf för inpassningsfelet för en skanning ser vi direkt likheter i dess tendenser och värden (figur 20). Ska vi ge rekommendationer till en begränsning av infallsvinkeln från mätningar av inpassningsfel mellan sfär och plan bör vi även här jämföra mot de inskannade planens precision. Med en infallsvinkel på 0–85° för avstånden 0–20 m är inpassningsfelet mellan sfär och plan mindre än planets precision medan mellan infallsvinkel 0–85° vid avstånden 30–100 m är felet mellan 2–6,4 mm

Det vi ser i mätningarna, till exempel att felet överskrider precisionen redan vid 10° infallsvinkel vid längre avstånd än 20 m, gör att vi har även svårt att komma med rekommendationer utifrån den här metoden förutom för infallsvinklarna 0–85° vid avstånd upp till 20 m som vi också här rekommenderar att skanningar bör hållas inom. Vi ser även här en instabilitet i felet vid längre avstånd med infallsvinkel 80–85°.

### 4.4 Vinklar mellan planen

De variationer vi har fått i avståndsmätningar mellan sfärer och plan är små men visar dock på en liten avvikelse i vinkel mellan planen. Speciellt utmärkande blir det mellan vissa plan som ligger nära varandra när de visas grafiskt. I det exempel vi visar i figur 19 är avståndet 0,3 mm mellan planen och vinkeln mellan dem är endast 0,09° och eftersom dessa avvikelser är små och svåra att förklara kan de ses som orsakade av brus och bör anses försumbara i detta sammanhang.



## 4.5 Slutsatser

För att summera våra olika metoder att bestämma inpassningsfelet till en gemensam slutsats behöver vi sätta dem och deras resultat i relation till varandra. Metoden att mäta från sfärens centrum till respektive plan påverkas inte av registreringens anpassningsfel medan det registrerade punktmolnet har dessa små korrigeringar med sig. Därför anser vi att metoden att mäta från sfär till plan bör vara styrande i vår slutsats angående hur vi ska sätta begränsningarna. Precis som Kersten *et al.* (2008) har dragit slutsatsen att mätningarna på 10 m avstånd med ScanStation 2 uppvisar sådana små variationer i inpassning mellan referensplan och de övriga planen att infallsvinkels påverkan på punktmolnets noggrannhet kan försummas drar vi samma slutsats för avstånden 10–20 m baserat på mätningar mellan sfär och plan. Denna metod visar även att höga infallsvinklar vid längre avstånd bör undvikas. Men även en gemensam slutsats från de bägge metoderna är att extrema infallsvinklar på 80–85° bör undvikas eftersom resultaten både är för bra och för dåliga, vilket får anses som att de är för ostabila för att ingå i noggranna mätningprojekt. Tendensen att felet ökar med ökat avstånd ger oss en vidare spekulering om avstånd upp till 300 m kanske ger ännu större fel redan vid små infallsvinklar. Detta är något som ytterligare bör undersökas i eventuella framtida studier.

Vår stora slutsats blir att om en noggrann modellering skall utföras så bör avståndet till mätobjektet begränsas till cirka 20 m för att utesluta infallsvinkelns påverkan på noggrannheten.

## Referenser

Boehler, W., Bordas Vicent, M. and Marbs, A. (2003) Investigating Laser Scanner Accuracy. *CIPA 2003 XIXth International Symposium*, Antalya, Turkey, 30 September–4 October.

Boehler, W. and Marbs, A. (2002) 3D Scanning Instruments. *Proceedings of the CIPA WG6 Int. Workshop on Scanning for Cultural Heritage Recording*, Corfu, Greece, 1–2 September.

Clark, J. and Robson, S. (2004) Accuracy of Measurements Made With a Cyrax 2500 Laser Scanner Against Surfaces of Known Colour. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXV, Commission IV, Part B4*, pp. 1031–1037.

HMK-Ge:S (1996) *Handbok till mätningkungörelsen, Geodesi Stommätning*. Gävle: Lantmäteriverket.

Johansson, M. (2002) Explorations into the Behaviour of Three Different High-Resolution Ground-Based Laser Scanners in the Built Environment. *Proceedings of the CIPA WG6, Int. Workshop on Scanning for Cultural Heritage Recording*, Corfu, Greece, 1–2 September.

Kersten, T., Mechelke, K., Lindstaedt, M. and Sternberg, H. (2008) Geometric Accuracy Investigations of the Latest Terrestrial Laser Scanning Systems. *FIG Working Week*, Stockholm, Sweden, 14–19 June.

Kersten, T., Sternberg, H. and Mechelke, K. (2005) Investigations into the Accuracy Behaviour of the Terrestrial Laser Scanning System MENSIS GS100. *Proceedings of 7<sup>th</sup> Conference on Optical 3D Measurement Techniques*. Vienna, Italy, 3–5 October.

Leica Geosystems AG (2009a) *Leica Cyclone* (Version 6.0) [Computer Program]. Available at: [http://www.leica-geosystems.com/corporate/en/lgs\\_27054.htm](http://www.leica-geosystems.com/corporate/en/lgs_27054.htm) (Accessed: 27th May 2009).

Leica Geosystems AG (2009b) Leica ScanStation 2 User Manual. Available at: [http://www.leica-geosystems.com/corporate/en/lgs\\_62189.htm](http://www.leica-geosystems.com/corporate/en/lgs_62189.htm) (Accessed: 27th May 2009).

Lichti, D., Gordon, S. and Stewart, M. (2002) Ground-Based Laser Scanners: Operation, Systems and Applications. *Geomatica*, Vol. 56, No. 1, pp. 21–33

Lichti, D., Gordon, S. and Tipdecho, T. (2005) Error Models and Propagation in Directly Georeferenced Terrestrial Laser Scanner Networks. *Journal of Surveying Engineering*. November issue.

Lindenbergh, R., Pfeifer, N. and Rabbani, T. (2005) Accuracy Analysis of the Leica HDS3000 and Feasibility of Tunnel Deformation Monitoring. *ISPRS WG III/3, III/4, V/3 Workshop Laser Scanning 2005*, Enschede, the Netherlands, 12–14 September.

Mechelke, K., Kersten, T. and Lindsteadt, M. (2007) Comparative Investigations into the Accuracy Behaviour of the New Generation of Terrestrial Laser Scanning Systems. *Proceedings of 8<sup>th</sup> Conference on Optical 3D Measurement Techniques*, Vol I, pp. 319–327.

Reshetyuk, Y. (2006) Calibration of Terrestrial Laser Scanners for the Purposes of Geodetic Engineering. *3rd IAG/12th FIG Symposium*, Baden, Austria, 22–24 May.

Soudarissanane, S., Lindenbergh, R. and Gorte, B. (2008) Reducing the Error in Terrestrial Laser Scanning by Optimizing the Measurement Set-up. *ISPRS the XXI Congress, Commission V, Vol XXXVII-B5*, Beijing, China, 3–11 July.

Staiger, R. (2005) The Geometrical Quality of Terrestrial Laser Scanner (TLS). *FIG Working Week & GSDI-8*, Cairo, Egypt, 16–21 April.

Swahn, H. (2008) Noggrannhetskontroll av data och 3D-modell från pulsskanner och fasmätningsskanner. Master's of Science Thesis. *School of Architecture and the Built Environment, Royal Institute of Technology (KTH)*, Stockholm, Sweden.