

3D-laserscannen in de (restauratie)architectuur

In het kader van afstuderen aan:

Hogeschool van Utrecht
Neijenoord 1
3500 AD Utrecht
Faculteit natuur en techniek
Afdeling bouwnijverheid

Begeleiders:

Dhr. P. Brinkman (hoofdbegeleider)
Dhr. C. Hensbergen (2^e begeleider)

Uitgevoerd bij:

Ingenieursbureau Passe-Partout BV.
Nieuwe Gouwe OZ 11b
P.O. box 263
2800 AG Gouda
Tel: 0182-538360 Fax: 0182-571228
e-mail: info@passe-partout.nl
website: www.passe-partout.nl

Begeleiders:

Ir. J. van Doornen (directeur IPP)
Ir. R. de Ronde (directeur MPP)

Uitvoerende partij:

Remco van Diest 1129451
Nic. Stellingwerf 55
4254 ET Sleetwijk
Tel: 0183-302850 / 06-54964407
e-mail: remcovandiest@planet.nl

Ronnie Binneveld 1125251
Hartmanstraat 44
4132 EG Vianen
Tel: 0347-375977 / 06-14961337
e-mail: ronniebinneveld@hotmail.com

Juni 2004

Samenvatting

In het kader van het onderzoek '3D-laserscannen in de (restauratie)architectuur' zijn een aantal literatuurstudies uitgevoerd voor Ingenieursbureau Passe-Partout. Deze studies hebben als doel een naslagwerk te vormen van de beschikbare kennis over het onderwerp, en zal de basis vormen voor ons onderzoek.

De literatuurstudie is onder te verdelen in een studie naar archivering van monumenten en techniek en toepassingsgebieden van de 3D-laserscanner. De basis van de fotogrammetrie zal in dit verslag eveneens aan de orde komen. Het bijwonen van demonstraties/presentaties en het afnemen van interviews geven een objectief beeld, en zullen dan ook voor de verschillende literatuurstudies niet ontbreken.

Een literatuurstudie naar archivering van monumenten is gewenst om een goede indruk te krijgen in de manier van archiveren. Dit is een must om tot conclusies te kunnen komen. Uit deze studie is gebleken dat de nadruk van archiveren van monumenten niet ligt op het meet- en tekenwerk, maar op het aangeven van de bijzonderheden van een gebouw. Het kostenplaatje speelt een belangrijke rol bij de keuze voor een meetmethode. Dit is de reden dat veel projecten tot vandaag aan toe met de hand gemeten worden. Wanneer het niet mogelijk is een meting met de hand te verrichten, wordt gekozen voor toepassing van fotogrammetrie.

Een studie naar 3D-laserscannen is een vereiste. In deze studie zullen de techniek, toepassingsgebieden, invloeden op de nauwkeurigheid, verschillende software programma's en niet te vergeten de ervaringen van de laserscanner in de bouwkunde de revue passeren. De laserscanner kent een aantal goede toepassingsgebieden, in de architectuur is de laserscanner nog niet echt doorgebroken. Eén van de grootste oorzaken hiervan zijn de softwarepakketten. In de software is het nog niet goed mogelijk exacte punten aan te geven om maten te onttrekken, wat de nauwkeurigheid niet ten goede komt. Verder zijn er een aantal punten die van belang zijn voor het maken van een goede, nauwkeurige scan. Om een paar punten te noemen: weersomstandigheden, reflectie, resolutie enz.

Uit de studie naar archivering is naar voren gekomen dat laserscannen zich vooral richt op het werkterrein van de fotogrammetrie. Een korte studie naar deze meetmethode hebben we dan ook meegenomen om de verschillen tussen beide meetmethodes op een rijtje te kunnen zetten. Hieruit kan de conclusie getrokken worden dat fotogrammetrie een zeer kostbare meetmethode is. Er zijn grote nauwkeurigheden te halen, een nadeel echter bij fotogrammetrie is dat diepte bij profileringen niet goed te zien is.

De algemene doelstelling van de proefprojecten is de informatieverschaffing, waaruit conclusies getrokken kunnen worden omtrent de toepasbaarheid van een 3D-laserscanner. Het scannen van de proefprojecten onderzoeken we op nauwkeurigheid, verwerking van de scan in bijbehorende software, kosten en tijd. Deze laatste verdelen we onder in tijd van inmeten en uitwerken omdat de snelle tijd van inmeten één van de sterke punten het laserscannen is. De proefprojecten zijn ingescand met verschillende laserscanners, waardoor een uitspraak gedaan kan worden welk type scanner het best past bij een bepaald project.

Geconcludeerd kan worden dat de laserscanner de minst nauwkeurige meetmethode is bij het vaststellen van kozijnmaten (proefproject Veemhuis). Dit zal zeker niet het geval zijn bij een ander soort meting! Het vaststellen van korte maten in een gevel, zoals kozijnmaten, is met de hand nauwkeuriger te meten. Wanneer de posities van deze verschillende onderdelen gemeten dient te worden zal de laserscanner een veel betere nauwkeurigheid krijgen ten opzichte van metingen met de hand.

Over het algemeen kan gezegd worden dat laserscanners met een beeldhoek het best toegepast kunnen worden voor metingen van exterieur. Wanneer een interieur ingemeten moet worden is een scanner die 360 graden kan scannen het best toe te passen. Voor het meten van complexe objecten zoals ornamenten is naar voren gekomen (proefproject beeld) dat het meten met een short range scanner hier uitermate geschikt voor is.

Scanners gebaseerd op de techniek van faseverschil blijken vele malen sneller te zijn en tot afstanden van twintig meter een goede nauwkeurigheid houden.

Tijdens het onderzoek zijn we tegen een aantal punten gelopen die we qua tijdsplanning niet of niet volledig mee hebben kunnen nemen in ons onderzoek. Nader onderzoek naar schade door laserscannen, archiveren digitaal of op papier en de mogelijkheden van fotodrapen zal zeker interessant zijn.

De techniek van het laserscannen is in ontwikkeling. Wanneer we naar de toekomst kijken, verwachten we dat het scannen op een aantal punten zoals kosten, fotodrapen en type scanners vooruitgang zal boeken. Voor een goede toepassing in de architectuur, zal de verwerking in de software sterk verbeterd moeten worden. Hierbij moet vooral gedacht worden aan het verwerken van de scan tot een model.

Inhoudsopgave

SAMENVATTING	2
INHOUDSOPGAVE.....	3
VOORWOORD	7
1 INTRODUCTIE	9
1.1 ACHTERGROND VAN DE OPDRACHT	9
1.2 OPDRACHTFORMULERING	9
1.3 PROBLEEMSTELLING.....	9
1.4 DOELSTELLING.....	9
1.5 STAPPENPLAN	9
2 LITERATUURSTUDIE ARCHIVERING	10
2.1 INLEIDING	10
2.2 WAT EN WAAROM ARCHIVEREN	10
2.3 BOUWHISTORISCH ONDERZOEK.....	10
2.3.1 Bouwhistorische inventarisatie	11
2.3.2 Bouwhistorische verkenning	11
2.3.3 Bouwhistorische opname.....	11
2.3.4 Bouwhistorische ontleding.....	11
2.3.5 Bouwhistorische deelontleding	11
2.4 INZIEN BOUWHISTORISCHE RAPPORTEN	11
2.5 METINGEN	12
2.5.1 Hoe wordt er momenteel gemeten.....	12
2.5.2 Wat is de nauwkeurigheidseis.....	13
2.6 WAT KAN DE TOEGEVOEGDE WAARDE ZIJN VAN DE 3D-LASERSCANNER?.....	13
2.7 TOEKOMST DIGITAAL ARCHIEF.....	13
2.8 CONCLUSIE LITERATUURSTUDIE ARCHIVERING	14
3 LITERATUURSTUDIE LASERSCANNEN.....	15
3.1 INLEIDING	15
3.2 LASERSCANNEN ALGEMEEN	15
3.2.1 Achtergrond.....	15
3.2.2 Techniek	15
3.2.3 Principe laserscannen	17
3.3 DE NAUWKEURIGHEID VAN LASERSCANNERS	19
3.3.1 Hoek nauwkeurigheid.....	19
3.3.2 Afstandsnauwkeurigheid.....	19
3.3.3 Resolutie	19
3.3.4 Hoek effect.....	19
3.3.5 Reflectie.....	20
3.4 INVLOED NAUWKEURIGHEID WEERSOMSTANDIGHEDEN.....	20
3.4.1 Temperatuur	20
3.4.2 Atmosfeer.....	20
3.4.3 Hinderlijke straling	20
3.4.4 Invloed weersomstandigheden.....	20
3.5 OVERIGE ASPECTEN.....	21
3.5.1 Meetsnelheid.....	21
3.5.2 Afstandsbereik.....	21
3.5.3 Oriëntering	21
3.5.4 Resolutie en puntgrote.....	21
3.5.5 Koppeling van scans.....	21
3.5.6 Digitale camera	22

3.5.7	Transport.....	22
3.5.8	Stroomvoorziening	22
3.5.9	Cyclone software.....	22
3.5.10	Hardware.....	23
3.6	EIGENSCHAPPEN VERSCHILLENDE SOFTWARE	24
3.6.1	Inleiding	24
3.6.2	Pointcloud	24
3.6.3	Polyworks	24
3.6.4	Reconstructor / Surveyor.....	24
3.6.5	QT Sculptor	24
3.6.6	Cyclone.....	25
3.7	WELKE SOFTWARE VOOR WELKE TOEPASSINGSGEBIEDEN	25
3.8	TOEPASSINGSGEBIEDEN	26
3.8.1	Industrie	26
3.8.2	Infrastructuur.....	27
3.8.3	Culturele sector.....	28
3.8.4	Bouwkunde	28
3.8.5	Overige.....	29
3.9	ERVARINGEN MET DE LASERSCANNER IN DE BOUWKUNDE.....	30
3.10	CONCLUSIE LITERATUURSTUDIE LASERSCANNEN.....	31
4	LITERATUURSTUDIE FOTOGRAMMETRIE.....	32
4.1	INLEIDING	32
4.2	TECHNIEK	32
4.3	DE NAUWKEURIGHEID VAN FOTOGRAMMETRIE.....	33
4.4	TOEPASSINGSGEBIEDEN	33
4.4.1	Traditioneel	33
4.4.2	Close range.....	33
4.5	TOEKOMST	33
4.6	ERVARINGEN MET FOTOGRAMMETRIE IN DE BOUWKUNDE	34
4.7	CONCLUSIE LITERATUURSTUDIE FOTOGRAMMETRIE.....	35
5	METEN MET EEN TACHYMETER EN 3D-LASERSCANNER.....	36
5.1	INLEIDING	36
5.2	TACHYMETER	36
5.2.1	Algemeen	36
5.2.2	Metten met een tachymeter	36
5.3	3D-LASERSCANNEN	37
5.3.1	Algemeen	37
5.3.2	Metten met de 3D-laserscanner.....	37
6	PRECISIE VERSCHILLENDE MEETMETHODEN.....	38
6.1	INLEIDING	38
6.2	THEORETISCHE PRECISIE MEETMETHODEN:.....	39
6.2.1	Rolmaat	39
6.2.2	3D-laserscanner.....	40
6.2.3	Tachymeter	41
6.2.4	Laser handafstandsmeter.....	42
6.2.5	Telescoopmaatlat	42
6.3	CONCLUSIE	42
7	PROEFPROJECTEN.....	43
7.1	INLEIDING	43
7.2	DEFINIËREN DOELEN	43
8	VEEMHUIS (ROTTERDAM)	44
8.1	INLEIDING	44

8.2	OMSCHRIJVING MONUMENT	44
8.2.1	<i>Inleiding</i>	44
8.2.2	<i>Omschrijving</i>	45
8.2.3	<i>Waardering</i>	46
8.3	RANDVOORWAARDEN VEEMHUIS	46
8.4	METING	47
8.4.1	<i>Algemeen</i>	47
8.4.2	<i>Vorbereidingen op de meting</i>	47
8.4.3	<i>Staat van het gebouw voor opmeting</i>	47
8.4.4	<i>De meting</i>	47
8.5	RAPPORTEREN BEVINDINGEN VEEMHUIS	48
8.5.1	<i>Inleiding</i>	48
8.5.2	<i>Tijd</i>	48
8.5.3	<i>Kosten</i>	49
8.5.4	<i>Nauwkeurigheid</i>	49
8.5.5	<i>Verwerking metingen</i>	51
8.6	CONCLUSIE	52
8.6.1	<i>Nauwkeurigheid</i>	52
8.6.2	<i>Kosten</i>	53
8.6.3	<i>Algemeen</i>	53
9	SINT JANSKERK TE GOUDA	54
9.1	INLEIDING	54
9.2	OMSCHRIJVING MONUMENT	54
9.2.1	<i>Inleiding</i>	54
9.2.2	<i>Omschrijving</i>	55
9.2.3	<i>Waardering</i>	56
9.3	RANDVOORWAARDEN	56
9.3.1	<i>Nauwkeurigheidseis</i>	56
9.4	METINGEN	57
9.4.1	<i>Inleiding</i>	57
9.4.2	<i>Vorbereiding op de meting</i>	57
9.4.3	<i>Staat van het interieur voor de meting</i>	57
9.4.4	<i>Meting HDS3000</i>	57
9.4.5	<i>Meting iQsun 880 V4</i>	58
9.4.6	<i>Meting Tachymeter</i>	58
9.5	RAPPORTEREN BEVINDINGEN	59
9.5.1	<i>Inleiding</i>	59
9.5.2	<i>Tijd</i>	59
9.5.3	<i>Kosten</i>	59
9.5.4	<i>Nauwkeurigheid</i>	59
9.5.5	<i>Verwerking</i>	61
9.6	CONCLUSIE	62
9.6.1	<i>Nauwkeurigheid</i>	62
9.6.2	<i>Kosten</i>	62
9.6.3	<i>Algemeen</i>	62
10	PROEFPROJECT BEELD	63
10.1	INLEIDING	63
10.1.1	<i>Omschrijving</i>	63
10.2	METING	63
10.2.1	<i>De meting</i>	63
10.3	BEVINDINGEN	64
10.3.1	<i>Inleiding</i>	64
10.3.2	<i>Nauwkeurigheid</i>	64
10.3.3	<i>Verwerking</i>	64
10.4	CONCLUSIE	65

11	PUNTEN VOOR NADER ONDERZOEK.....	66
11.1	SCHADE DOOR LASERSCANNEN	66
11.2	ARCHIVEREN DIGITAAL / PAPIER?.....	66
11.3	MOGELIJKHEDEN FOTODRAPEREN	66
12	TOEKOMST VISIE	67
12.1	FOTODRAPEREN	67
12.2	KOSTEN LASERSCANNEN	68
12.3	SOFTWARE	68
12.4	SCANNERS	68
12.4.1	TOF scanners.....	68
12.4.2	Fase verschil.....	68
12.4.3	Algemeen.....	69
13	CONCLUSIE.....	70
14	LITERATUURLIJST.....	72
15	VERKLARENDE WOORDENLIJST	74
16	BIJLAGEN OVERZICHT	75
16.1	A LITERATUURONDERZOEK 3D-LASERSCANNERS	75
16.2	B MARKTVERKENNING	75
16.3	C PROEFPROJECT KUNSTWERK.....	75
16.4	D PROEFPROJECT VEEMHUIS TE ROTTERDAM	75
16.5	E PRECISIE MEETMETHODEN	75
16.6	F PROEFPROJECT SINT JANSKERK TE GOUDA	76
16.7	G PROEFPROJECT BEELD	76
16.8	H CORRESPONDENTIE	76

Voorwoord

Al eeuwenlang wordt er gebouwd, en dus gemeten. De manier van meten verandert met de komst van nieuwe technieken. Wat vroeger met de hand werd gemeten is achterhaald door de bekende meetinstrumenten zoals waterpassen, theodolieten en total stations. Op dit moment zijn we aangekomen in een tijdperk waarin de 3D-laserscanner zijn intrede aan het doen is. Vooral op gebied van de geodesie en proces industrie wordt deze methode al regelmatig toegepast. Wat betreft de bouwkunde is de laserscanner nog een tamelijk onbekend fenomeen. Dit onderzoek zal zich dan ook richten op het gebruik van de 3D-laserscanner in de bouw. Ook de restauratiewereld zal bij de introductie van een 3D-laserscanner baat kunnen hebben.

Is een dergelijk apparaat nuttig in de bouwkundige (restauratie) wereld ten opzichte van de traditionele methode van inmeten en de voordelen hierbij, zijn de essenties van dit onderzoek.

Naar ons weten is er nooit een gedegen onderzoek geweest naar het gebruik van een 3D-laserscanner in de bouwkundige wereld. Samen met Ingenieursbureau Passe-Partout lijkt het ons een uitdaging om inzicht te krijgen in de mogelijkheden in deze branche.

Uit dit onderzoek willen we de conclusie trekken of een 3D-laserscanner (al) te gebruiken is in de bouw. De nauwkeurigheid en verwerking van de scans, financiële kant en de benodigde tijd zijn factoren die we in het onderzoek meenemen.

In dit verslag staan verwijzingen. Deze zullen aangegeven worden door: [...]. In de literatuurlijst kan terug gevonden worden waar desbetreffende informatie vandaan gehaald is. Citaten worden aangegeven door middel van een voetnoot.

Dankbetuiging

De steun vanuit Ingenieursbureau Passe-Partout heeft ervoor gezorgd dat het onderzoek zonder problemen is volbracht. Speciale dank hierbij gaat uit naar Ronald de Ronde, directeur MPP en Hans van Doornen, directeur IPP voor het continue meedenken en het geven van kritische kanttekeningen. Jurgen Putman van IPP, afdeling laserscannen, willen we bedanken voor de prettige samenwerking.

De bedrijven Cyra Technologies en Pointclouds worden bedankt voor het beschikbaar stellen van de nodige software. Zonder deze software is het niet mogelijk een degelijk onderzoek op poten te zetten.

Daarnaast willen we Ian Farrar van Cyra (Leica) en Rainer Simon, Oliver Bürkler van iQvolution bedanken voor de presentaties en de gemaakte scans.

Zonder interviews zou onze literatuurstudie niet volledig zijn. Hiervoor willen we de volgende personen bedanken:

dhr. de Waal	de Waal fotogrammetrie
dhr. Kooij	bouwhistoricus RdMz
dhr. Reinstra	bouwhistoricus RdMz
dhr. Brinkman	contactpersoon RdMz
dhr. Vilters	directeur I.G.L.

Verder gaat onze dank uit naar Pim Brinkman, docent, contactpersoon bij de RdMz en afstudeerbegeleider van de Hogeschool van Utrecht.

1 Introductie

1.1 Achtergrond van de opdracht

Monumenten in Nederland moeten worden gearchiveerd. Dit wordt gedaan in opdracht van de Rijksdienst voor Monumentenzorg (RdMz) door onafhankelijke bureaus. Een dergelijk bouwhistorisch rapport bestaat uit een analyse van de bouwhistorie met een waardenstelling. Tekeningen zullen worden gebruikt ter verduidelijking. Juist die kant van de restauratie willen we in ons onderzoek naar voren laten komen.

3D-Laserscannen is nog steeds een tamelijk nieuwe techniek. Hoewel het al een aantal jaren bestaat, zijn er nog maar enkele bedrijven in Nederland die deze techniek gebruiken. Het toepassingsgebied richt zich tot op heden voornamelijk op de procesindustrie voor het meten van leidingen en appendages. Op dit moment wordt de 3D-laserscanner sporadisch toegepast in de bouwkunde, omdat de mogelijkheden van het 3D-laserscannen in de bouwkunde nog nooit echt goed zijn onderzocht. Reden te meer om in samenwerking met Ingenieursbureau Passe-Partout de mogelijkheden van de 3D-laserscanner in de bouwkunde te onderzoeken.

In het voorgaande afstudeerjaar zijn er twee studenten geweest (Hogeschool van Utrecht afdeling Geodesie) die onderzocht hebben welk type laserscanner het best past binnen het Ingenieursbureau. Daarbij is een aantal scanners onder de loep genomen, waarbij gelet is op de prestaties en toepassingsgebieden (in de bijlagen zijn een aantal scanners terug te vinden). Ingenieursbureau Passe-Partout heeft uit deze bevindingen een keuze gemaakt in het aanschaffen van een 3D-laserscanner, dit is de HDS2500 geworden.

Dit onderzoek was niet specifiek gericht op toepassing in de bouwkunde. Ingenieursbureau Passe-Partout is daar wel erg in geïnteresseerd, wat ons de mogelijkheid biedt hier onze afstudeeropdracht van te maken.

1.2 Opdrachtformulering

Omdat er nog weinig bekend is over de mogelijkheden van de 3D-laserscanner gaan we in samenwerking met Ingenieursbureau Passe-Partout hiernaar onderzoek doen om meer duidelijkheid te krijgen. We weten al dat de 3D-scans ontzettend gedetailleerd zijn vanwege de hoge punt dichtheid. In dit onderzoek bekijken we hoe goed de scans te verwerken zijn tot bruikbare tekeningen. Door een aantal proefprojecten te scannen en uit te werken, is een goed beeld te vormen omtrent deze nieuwe methode van inmeten. Om een reëel beeld te krijgen, zal er gekeken worden naar de voor- en nadelen ten opzichte van de huidige meetmethoden. Het inmeten en uitwerken willen we dan ook op een aantal manieren uitvoeren. De metingen worden getoetst aan de hand van de volgende punten:

1. tijd;
2. kosten;
3. nauwkeurigheid;
4. verwerking;

1.3 Probleemstelling

Is de 3D-laserscantetechniek bruikbaar in de (restauratie)architectuur?

Omdat bij monumentale objecten veel krommingen en ongelijkheden voorkomen waarbij metingen met de hand tijdrovend zijn, verwachten we dat deze nieuwe techniek zijn steentje kan bijdragen tot het verkrijgen van goede geometrische informatie.

1.4 Doelstelling

Met de resultaten van de verschillende proefprojecten, verwachten we een goed beeld te kunnen vormen voor welke projecten de laserscanner zijn dienst kan bewijzen. Dit kan zijn qua grootschaligheid, maar ook qua complexiteit. Of is de laserscanner überhaupt (nog) niet goed te gebruiken in de (restauratie) architectuur?

1.5 Stappenplan

De hoofdstukindeling van dit verslag is gebaseerd op de chronologische opbouw waarin het onderzoek wordt uitgevoerd. Te beginnen met een literatuurstudie welke de basis vormt voor verder onderzoek. Deze literatuurstudie hebben we onderverdeeld in studie naar archivering en naar de algemene techniek achter 3D-laserscanners, met zijn toepassingsgebieden. De basis van fotogrammetrie zal eveneens aan bod komen in dit verslag. Na deze studie verwachten we aan de hand van een aantal proefprojecten antwoord te kunnen geven op ontstane vragen.

2 Literatuurstudie Archivering

2.1 Inleiding

De RdMz archiveert de nationale monumenten om het culturele erfgoed goed in kaart te brengen. Op deze manier is het mogelijk panden, wanneer deze door brand of andere zaken verloren zijn gegaan, in oude glorie te herstellen.

De huidige manier van inmeten gebeurt veelal met de hand. Dit is een erg tijdrovende methode die door de komst van een 3D-laserscanner aanzienlijk versneld kan worden. Natuurlijk zijn er meerdere factoren die van belang zijn bij de keuze van een meetmethode. Om tot een goed vergelijk te komen, onderzoeken we de verschillende methoden op de volgende punten:

- tijd (inmeten);
- tijd (uitwerken tot tekening);
- (hoge) kosten;
- nauwkeurigheid.

Op deze manier komen de voor- en nadelen van de 3D-laserscanner naar voren waaruit we conclusies trekken. Ook kunnen we de punten van verbetering voor een verdere ontwikkeling van de 3D-laserscanner in de restauratiewereld aangeven.

2.2 Wat en waarom archiveren

Alvorens te kunnen archiveren zal een bouwhistorisch onderzoek verricht moeten worden. Een dergelijk onderzoek richt zich op het historische object in zijn directe omgeving. De kennis die op gedaan wordt uit een bouwhistorisch onderzoek is noodzakelijk om verantwoord om te gaan met oude gebouwen. Het terrein waarop bouwhistorisch onderzoek verricht wordt richt zich niet alleen op de beschermde monumenten die zijn opgenomen op rijks-, provinciale- en gemeentelijke monumentenlijsten, maar de gehele historische bebouwing, van voormiddeleeuws tot en met de jongere bouwkunst.

Bouwhistorisch onderzoek geeft een objectief beeld van de historische waarde van een pand. Aan de resultaten van dit onderzoek worden de eventuele verbouwingsplannen getoetst. Wanneer door verbouwing waardevolle elementen verloren zouden gaan, zal allereerst getracht worden een andere oplossing te vinden. [27]

2.3 Bouwhistorisch onderzoek¹

Bij bouwhistorisch onderzoek voor bouwwerken wordt er onderzoek gedaan naar de geschiedenis van het bouwwerk. Zo wil men de bouw en de verbouwingen die het bouwwerk in de loop der tijd heeft ondergaan proberen vast te leggen. Dit kan een vrij oppervlakkig onderzoek zijn maar dit kan ook vrij diepgaand zijn, afhankelijk van het type onderzoek. We kunnen verschillende vormen van bouwhistorisch onderzoek onderscheiden op grond van de diepgang van de werkzaamheden, het doel en het product.

Onderzoek ten dienste van beheer of beleid:

- Bouwhistorische inventarisatie van gebouwen en structuren in een gebouwencomplex, gebied of beheersportefeuille.

Objectgericht onderzoek meestal als voorbereiding voor een bouwplan:

- Bouwhistorische verkenning, zonodig gevolgd door een
- Bouwhistorische opname of
- Bouwhistorische ontleding.

Objectgericht onderzoek tijdens of na ontmanteling:

- Bouwhistorische (deel)ontmanteling, veelal tijdens uitvoering van een bouwplan.

¹ Richtlijnen Bouwhistorisch Onderzoek; 's-Gravenhage, 25 april 2000

2.3.1 Bouwhistorische inventarisatie

Een bouwhistorische inventarisatie wordt gedaan wanneer bouwwerken of structuren in een gebouwencomplex, gebied of beheersportefeuille moeten worden beoordeeld op monumentale waarden. Dit wordt voornamelijk gedaan ten behoeve van een cultuurhistorisch verantwoord beheer, het ontwikkelen van beleid of het opstellen of herzien van een momentenlijst. Het eindresultaat is een attentie- of signaleringslijst voor een complex, een gebied of een beheersportefeuille, aan de hand waarvan men kan vaststellen welke bouwwerken of structuren mogelijke monumentale waarden bevatten. (Hierbij hoeft geen meetwerk verricht te worden.)

2.3.2 Bouwhistorische verkenning

Een bouwhistorische verkenning is de lichtste vorm van bouwhistorisch onderzoek en wordt vooral gedaan naar aanleiding van een bouw- of restauratieplan. Wanneer men weinig onderdelen met een monumentale waarde vindt kan men ervoor kiezen om af te zien van verder onderzoek. Een bouwhistorische verkenning bevat een bouwhistorische notitie met een korte beschrijving van de karakteristiek van het object, een globale bouw- en gebruiksgeschiedenis met vermoedelijke dateringen en een aanduiding van de belangrijkste monumentale waarden. (Hierbij hoeft geen meetwerk verricht te worden.)

2.3.3 Bouwhistorische opname

Een bouwhistorische opname is een onderzoek van een bouwwerk of structuur, waarbij tenminste de zichtbare onderdelen van de ruimtelijke opbouw, het exterieur en de zichtbare onderdelen van de constructie en de interieurafwerking worden beschreven, geanalyseerd en zomogelijk gedateerd. Daarnaast vindt een literatuuronderzoek en een beperkt archiefonderzoek plaats. Bij archiefonderzoek worden in elk geval oude kaarten, bouwtekeningen en foto's betrokken. Op grond van deze onderzoekgegevens wordt een waardestelling geformuleerd. Het rapport wordt gebruikt ter ondersteuning van een restauratie, verbouwing of herbestemming. (Hierbij hoeft geen meetwerk verricht te worden.)

2.3.4 Bouwhistorische ontleding

Bij een bouwhistorische ontleding worden ook de verborgen bouwsporen in het muurwerk en de draagconstructie blootgelegd en gedocumenteerd. Verder vindt er een gedetailleerde opmeting, een fotodocumentatie en een uitvoerig literatuur- en archiefonderzoek plaats. Vrijwel steeds maakt specialistisch onderzoek deel uit van de ontleding. Wanneer tijdens de sloop onderdelen verloren gaan, worden deze gelijktijdig gedocumenteerd door opmeting en foto's. Het doel is het zo volledig mogelijk vastleggen van de bouw- en gebruiksgeschiedenis van een bouwwerk in al zijn aspecten, meestal ter ondersteuning van beslissingen bij en tijdens restauratie, verbouwing of herbestemming. (Hierbij zal wel meetwerk verricht moeten worden.)

2.3.5 Bouwhistorische deelontleding

Een bouwhistorische deelontleding is het meest uitvoerige en gedetailleerde onderzoek naar een deel van een object. Het doel is het documenteren van constructies en bouwsporen van een gedeelte van een bouwwerk of structuur, die normalerwijze aan het zicht zijn onttrokken door interieur afwerkingen. De rapportage van een bouwhistorische deelontleding bestaat uit een rapport over het betreffende bouwonderdeel met foto's, tekeningen en verklarende tekst. (Ook hierbij zal meetwerk verricht moeten worden.)

2.4 Inzien bouwhistorische rapporten

Na het inzien van een aantal bouwhistorische rapporten (Oranjewoud te Heerenveen en 's Heerenberg Huis Bergh) en een interview met bouwhistorici is ons duidelijk geworden dat de prioriteit van het archiveren zich vooral richt op het aangeven wat er bijzonder is aan het gebouw, de zogenaamde waardestelling die idealiter wordt gebruikt als uitgangspunt bij restauratie. Tekeningen hierbij zijn bedoeld ter verduidelijking.

2.5 Metingen

In een bouwhistorisch rapport zullen tekeningen van het gebouw dienen als onderdeel van de bouwhistorische onderzoeken. Dit is het geval bij de hierboven genoemde bouwhistorische ontledingen en deelontledingen. Dit deel van de archivering is voor ons het meest interessant, en zal ons onderzoek op gericht zijn.

2.5.1 Hoe wordt er momenteel gemeten

Momenteel worden twee methoden van meten toegepast. Bij een niet al te complex gebouw volstaat een meting met de hand. Wanneer gebouwen opgemeten dienen te worden die met de hand niet te meten zijn, wordt er soms beroep gedaan op de fotogrammetrie.

De toepassing van de laserscanner zal zich in de praktijk op dezelfde projecten richten als die van de fotogrammetrie. Dit maakt deze methode als ‘concurrent’ voor de 3D-laserscanner. Een onderzoek naar fotogrammetrie zal om deze reden meegenomen worden in dit verslag.

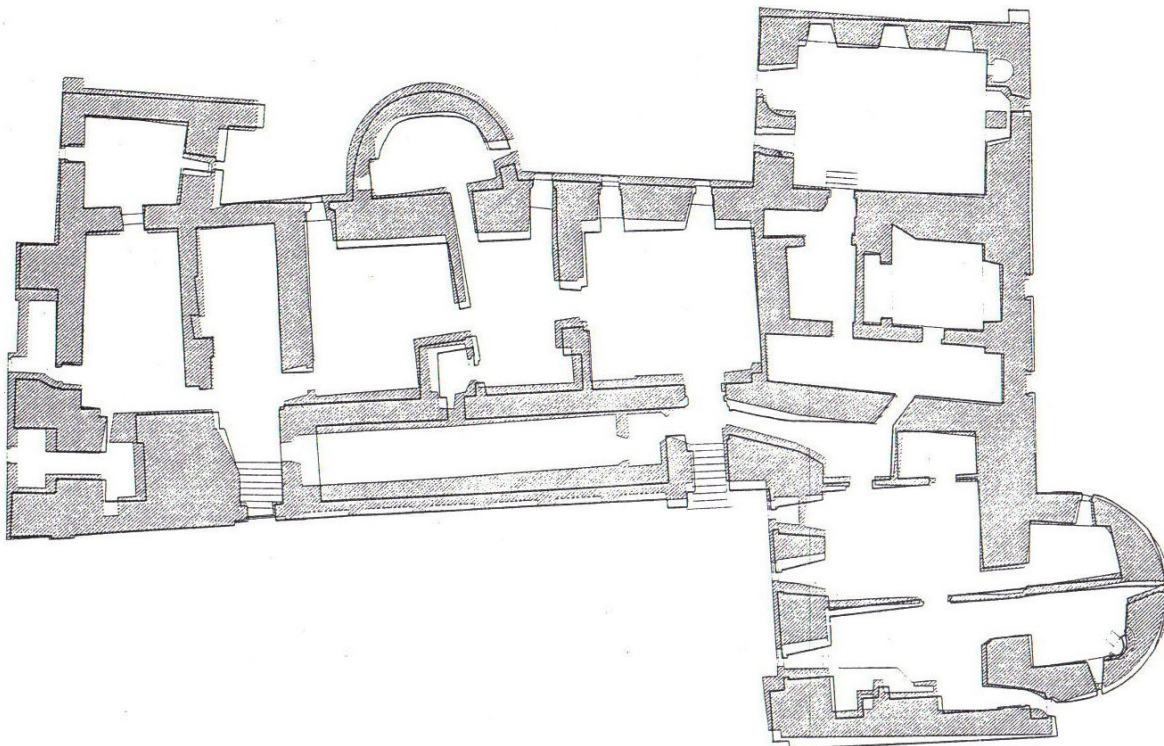
Met de hand

Monumentale bouwwerken worden handmatig op de volgende wijze ingemeten:

Er wordt een schets gemaakt van de in te meten ruimte waarin men alle gewenste maten op kan nemen. Er wordt een coördinatenstelsel vastgelegd waarvandaan alle punten worden ingemeten. De maten zijn te controleren door de diagonalen van de ruimte in te meten. Bij het meten van meerdere ruimten maakt men gebruik van referentiepunten voor de koppeling van het geheel.

Uit een interview met bouwhistorici blijkt dat bij een meting met de hand (antwoord van een specialist) een nauwkeurigheid van 2 mm behaald kan worden.

In de praktijk blijken er echter wel degelijk behoorlijk verschillen te zitten in twee onafhankelijke met de hand genomen metingen. [14]



Figuur 1: Twee afzonderlijke metingen met de hand over elkaar gelegd.

2.5.2 Wat is de nauwkeurigheidseis

De nauwkeurigheidseis die gesteld wordt aan een meting verschilt per project. Hierbij moet in het achterhoofd gehouden worden dat een tekening veelal dient als hulpmiddel voor het archiveren. De nauwkeurigheden die bereikt worden bij metingen met de hand volstaan veelal. Het is dan ook niet nodig om voor metingen in de restauratie een betere nauwkeurigheid te verkrijgen.

Wanneer het gaat om metingen voor complexe objecten zien bouwhistorici wel problemen bij het meten met de hand. Het meten van ornamenten en profileringen met de hand is in de praktijk nauwelijks haalbaar. Dit zal eventueel het werkterrein van een 3D-laserscanner kunnen worden. Ook moeilijk bereikbare punten zullen hieronder vallen.

2.6 Wat kan de toegevoegde waarde zijn van de 3D-laserscanner?

De 3D-laserscanner kan in een zeer kort tijdsbestek zeer veel punten inmeten die vrij nauwkeurig zijn. Dit zijn eigenschappen die de 3D-laserscanner een streepje voor geven ten opzichte van metingen met de hand. Ook kan de scanner overal bij zonder hulpmiddelen als ladders en steigers. Alles wat je kunt zien is te meten. Dit is een beslissend voordeel ten opzichte van traditionele meetmethoden omdat veel historische ruimten fors bemeten zijn (pakhuizen, kerken, silo's e.d.).

Op deze pluspunten van de scanner zullen we ons verder gaan richten om de werkelijke mogelijkheden van de scanner boven water te krijgen, dit valt echter buiten het bereik van deze scriptie.

2.7 Toekomst digitaal archief

Wanneer er gemeten zal worden met de 3D-laserscanner zal de scan digitaal opgeslagen moeten worden om geen gegevens te verliezen. Het is de vraag of het digitaal opslaan van gegevens geen problemen oplevert in de toekomst. Gekopieerde cd's kunnen gegevens op den duur verliezen, en hoe zit het met harde schijven? Ook de software zal problemen kunnen opleveren. Er moet voor gezorgd worden dat oude data in nieuwe software in te lezen is. Naar deze punten zal nader onderzoek verricht moeten worden.

2.8 Conclusie literatuurstudie archivering

De prioriteit van het archiveren richt zich vooral op het aangeven van de bijzonderheden aan een gebouw. Tekeningen hierbij zijn eigenlijk alleen een hulpmiddel. Tot vandaag aan toe wordt het opmeten voor het maken van een tekening met de hand gedaan. Is een object te complex voor een meting met de hand, dan wordt de voorkeur gegeven aan fotogrammetrie.

Alles wat je kunt zien is in te meten. Dit is een groot voordeel ten op zichten van traditionele meetmethoden omdat veel historische ruimten fors bemeten zijn.

De mogelijkheden die de scanner in zich heeft zijn verder niet goed onderzocht. Wanneer gebouwen opgemeten dienen te worden die met de hand niet te meten zijn, wordt er beroep gedaan op de fotogrammetrie. De toepassing van de laserscanner zal zich in de praktijk op dezelfde projecten richten als die van de fotogrammetrie. Dit maakt deze methode als 'concurrent' voor de 3D-laserscanner.

3 Literatuurstudie Laserscannen

3.1 Inleiding

Ons onderzoek richt zich op de mogelijke toepassingen van de 3D-laserscanner in de (restauratie) bouw. Een gedegen onderzoek naar de laserscanner behoort tot de vereisten om hiermee aan de slag te kunnen gaan. Het literatuuronderzoek zal vooral gaan over verschillende toepassingen van de laserscanner op dit moment, de techniek achter het scannen, nauwkeurigheid en invloeden die nadelig zijn voor de nauwkeurigheid.

Verschillende type scanners zijn terug te vinden in de bijlagen A2 tot en met A8.

3.2 Laserscannen algemeen

3.2.1 Achtergrond

De nieuwste ontwikkeling op het gebied van meten is de 3D-laserscanner. Een laserscanner kan worden gezien als een verdere ontwikkeling van het total station (tachymeter).

Laserscannen is zeer geschikt voor het inmeten van complexe objecten. Het conventioneel moeilijk in te meten object wordt vanaf verschillende hoeken gescand. Ingenieursbureau Passe-Partout beschikt over de HDS2500. Bij deze scanner worden 1000 punten in 3 dimensies (3D) per seconden binnen een hoek van 40 x 40 graden gemeten. Door de laserstraal (door verdraaiing in de x en y-richting) het object stapsgewijs af te laten tasten, ontstaat een puntenwolk. Door de enorme hoeveelheid punten lijken de scans op een foto, maar bestaan uit individuele punten met ieder een x-, y- en z- coördinaat. Om de exacte hoeken te bepalen, moeten snijlijnen getrokken worden van een aantal vlakken. [1][15]

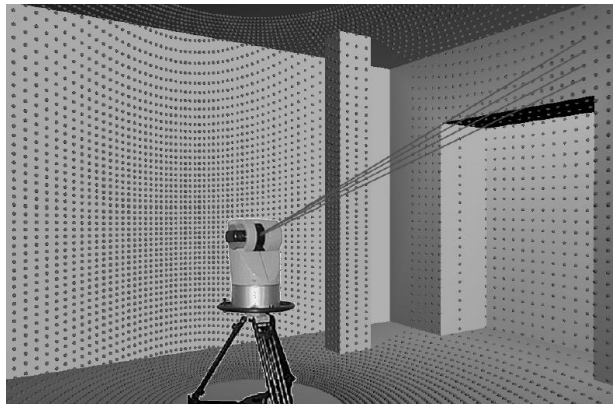
Met deze vorm van meten kan veel tijd en dus kosten bespaard worden en bovendien komt er veel meer informatie vrij dan met een traditionele methode. Ook de archiefwaarde moet worden vermeld. Een scan kan direct of later worden uitgewerkt om informatie te kunnen onttrekken. In de restauratiewereld kan dit gegeven van groot belang zijn omdat sommige objecten 'voor de sloop uit' snel ingemeten moeten worden, de zogenaamde nooddocumentatie.

3.2.2 Techniek

Een laser is een lichtbron die straling uitzendt. Deze straling is in hoge mate monochromatisch en coherent. De straling vormt een nagenoeg evenwijdige bundel, waarin hoge energiedichtheden worden opgewekt.

Monochromatisch wil zeggen dat de straling op een enkele golflengte wordt uitgezonden. Dit is een fundamenteel verschil met alle overige soorten lichtbronnen die licht uitstralen waarin men elektromagnetische straling met verschillende golflengtes kan ontdekken. [1]

Het ²principe berust op het gegeven dat een elektron naar een hogere (onstabiele) baan rond een atoomkern wordt gedwongen. Dit zogenaamde aangeslagen elektron zal er naar streven deze onstabiele toestand te verlaten en terug te keren naar de 'natuurlijke' baan. Hierbij wordt elektromagnetische straling uitgezonden, in de vorm van een foton. Aangeslagen elektronen zullen onder normale omstandigheden op willekeurige momenten terugvallen naar hun 'natuurlijke' baan. Er zal dus in zijn algemeenheid geen gelijkheid in frequentie en fase bestaan tussen de elektromagnetische golven die worden uitgestraald. Een geheel andere situatie ontstaat als een afgeslagen elektron wordt aangestoten door de elektromagnetische golfreën die afkomstig is van een ander elektron dat terugkeert naar zijn normale baan. In dit geval keert het aangeslagen elektron onmiddellijk terug naar zijn normale toestand. Dit betekent dat de terugval in energie teweeg wordt gebracht



² Toepassingsgericht laserscannen van R. Hoddenbach en W. Wagg

Figuur 2: Principe techniek laserscannen

(gestimuleerd) door een andere terugval in energie. De frequentie en de fase van de uitgestraalde elektromagnetische energie zijn daarbij volledig identiek aan deze, die het proces veroorzaakt heeft. Het directe gevolg is dat beide golfverschijnselen elkaar versterken.

Dankzij dit verschijnsel, zal een elektron elektromagnetische straling uitzenden die in fase is en dezelfde frequentie heeft. Dit verschijnsel noemt men het lasereffect en zorgt voor de felle, smalle lichtbundel die uit de laser komt. [1]

De sterkte van de laser is afhankelijk van de gebruikte stoffen. Er zijn twee verschillende normeringen, de Europese IEC 60825 en de Amerikaanse standaard CFR 1040. De kracht van de laser neemt toe naar mate de klasse hoger is. Dit leidt tot een groter risico bij blootstelling aan de laserpuls. [1]

IEC 60825	CFR 1040	Bijzonderheden
Klasse 1,2	Klasse I	Lasers die niet voldoende vermogen hebben om schade te veroorzaken, ook al zouden ze oneindig lang in het oog schijnen.
Klasse 3 R	Klasse II	Lasers die de schadelijke energie niet binnen 0,25 seconden kunnen leveren zijn op zich ook niet gevaarlijk. De straling van de zon is hiermee vergelijkbaar; deze is pas gevaarlijk als bewust de reflex om het oog te sluiten wordt onderdrukt.
Klasse 3 B	Klasse III	Lasers die na een reflectie op een niet-spiegelend oppervlak toch nog voldoende energie terugkaatsen om schadelijk te zijn voor het oog.
Klasse 4	Klasse IV	Lasers die ook bij een diffuse reflectie schade kunnen veroorzaken.

Tabel 1: Overzicht klassen verschillende lasers

3.2.3 Principe laserscannen

Onder de 3D-laserscanners bestaan twee verschillende type scanners die te onderscheiden zijn in de berekening van de afstand, te weten:

- ranging scanners
- triangulatie scanners.

Bij ranging scanners zendt de scanner een signaal of een golf uit dat door het object wordt weerkaatst waarna de scanner deze weer opvangt. Door het tijdsinterval van het signaal of het faseverschil van de golf te meten tussen zenden en ontvangen is de afstand te berekenen.

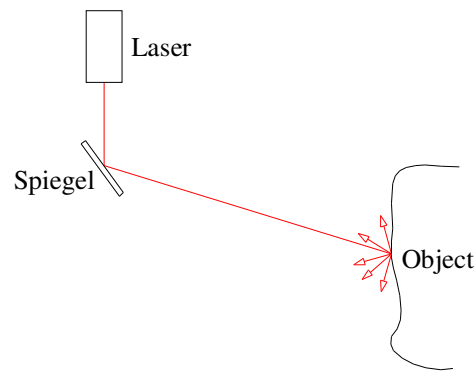
Bij de triangulatiescanners wordt er ook een signaal uitgezonden door de scanner. Dit signaal wordt echter opgevangen door een CCD camera waarmee door middel van de hoek van uit- en inval methode de exacte positie van het object bepaald wordt. Deze scanners worden gebruikt voor korte afstanden en kleine objecten. Ranging scanners worden vooral toegepast bij projecten die van grote afstand gemeten moeten worden.

Ranging scanners

Ranging scanners zijn onder te verdelen naar de verschillende methodes om de afstand te berekenen, de (tof) time-of-flight methode en fase vergelijkingsmethode. Hieronder worden beide toegelicht.

Time-of-flight (tof) van een laserpuls.

Een lasersignaal wordt naar het object gezonden. De afstand tussen de scanner en het reflecterende oppervlak van het object wordt berekend door de tijdsduur tussen het moment van uitzenden en ontvangen van het signaal. Dit principe is bekend van de elektronische tachymeters. Scanners maken gebruik van roterende spiegels om de laserstraal te kunnen sturen (tenminste voor één van de twee hoeken). Ook maken ze gebruik van simpelere algoritmes voor afstandsmetingen die minder nauwkeurig zijn. Typische standaard afwijkingen van afstandsmetingen door scanners liggen rond de orde van enkele millimeters. Omdat de afstanden relatief kort zijn, is deze nauwkeurigheid nagenoeg hetzelfde voor het gehele objectgebied. De drie dimensionale nauwkeurigheid wordt ook beïnvloed door de nauwkeurigheid van het richten van de laserstraal. Weinig onderzoeken over dit probleem zijn tot nu toe gepubliceerd. [2]



Figuur 3: TOF-principe

Fase vergelijkingsmethode

Deze methode is ook goed bekend bij tachymetrische instrumenten. In dit geval wordt de uitgezonden straal gemoduleerd door een harmonische golf en wordt de afstand door het faseverschil tussen de uitgezonden en de ontvangen golf berekend. Vanuit de gebruiker gezien is deze methode niet veel anders dan de time-of-flight methode. Dankzij de meer gecompliceerde signaal analyse zullen de resultaten preciezer zijn. Omdat een goed gedefinieerd terugkerend signaal nodig is, hebben scanners die de fase vergelijkingsmethode toepassen een minder groot bereik. Ook hebben ze de neiging om meer fouten of verdwenen punten te genereren. [2]

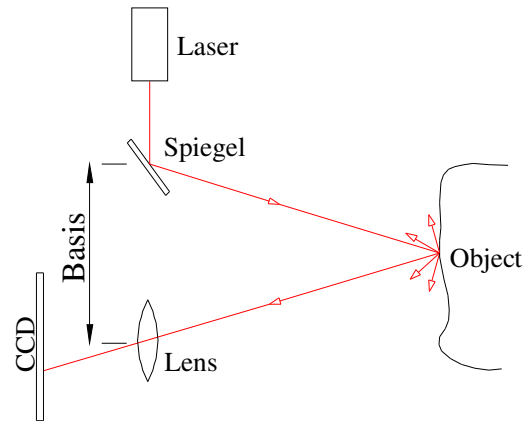
Laserscanners op basis van de fase vergelijkingsmethode zijn vele malen sneller dan bij de time-of-flight methode. Dit kan oplopen tot een factor van 200. Een groot nadeel van deze methode is de nauwkeurigheid. De nauwkeurigheid neemt zeer sterk af wanneer de afstand langer wordt dan 30 meter. Voor metingen over een afstand van 30 meter en verder zal gekozen moeten worden voor de time-of-flight methode.

Triangulatie scanners

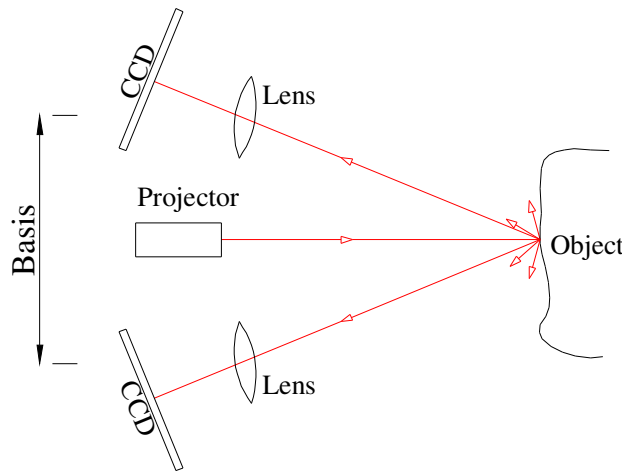
Triangulatie scanners kunnen we verder onder verdelen in scanners met een enkele camera of met twee camera's.

Met enkele camera

Bij dit type scanner wordt een laserstraal weggestuurd naar het te meten object via een constant roterende spiegel. Deze spiegel zit gemonteerd op een basis samen met een CCD camera. Deze camera vangt de laserstralen weer op. Op deze manier kan de positie van het punt bepaald worden in x, y en z coördinaat. Triangulatiescanners worden vooral toegepast voor het meten over korte afstanden en kleine projecten. [2]



Figuur 4: Enkele camera



Figuur 5: Twee camera's

Met twee camera's

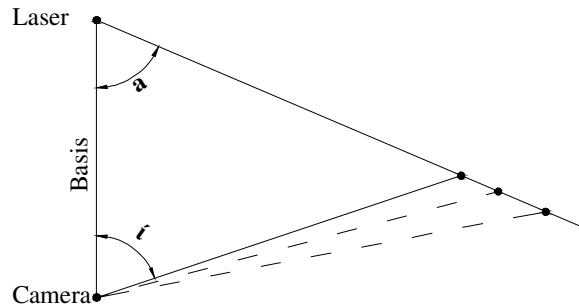
Een variant van het triangulatie principe is het gebruik van 2 CCD camera's. Deze zijn gemonteerd aan beide zijden van de basis. Het punt of patroon dat herkend moet worden wordt gegenereerd door een aparte lichtprojector, die geen meerfuncties heeft. De projectie bestaat uit een verplaatsbaar lichtpunt of lijn. De geometrische oplossing is hetzelfde als die met het één camera principe. [2]

3.3 De nauwkeurigheid van laserscanners

De nauwkeurigheid van de metingen met een laserscanner is van een aantal zaken afhankelijk. Hieronder is een aantal punten genoemd die invloed kunnen hebben op de nauwkeurigheid van de scanner. Met deze punten zal dus rekening gehouden moeten worden wanneer gebruik wordt gemaakt van de 3D-laserscanner.

3.3.1 Hoek nauwkeurigheid

De laserpuls die wordt uitgezonden wordt gereflecteerd door een roterende spiegel die vervolgens de laserpuls doorstuurt naar het object. De hoeksstand van de spiegel wordt gebruikt voor het vaststellen van de punten in 3D-coördinaten. Mocht het zo zijn dat er verschil zit tussen de werkelijke en de gemeten hoeksstand van de spiegel, geeft dit natuurlijk afwijkingen met de werkelijke situatie. Daarom is het van groot belang dat deze spiegel goed gekalibreerd is. [3]



Figuur 6: Invloed hoeknauwkeurigheid

3.3.2 Afstandsnauwkeurigheid

In het geval van de ranging scanner wordt de afstand tussen scanner en object gemeten door middel van het time-of-flight principe. De afstand tussen scanner en object wordt berekend uit de looptijd van het signaal tussen zenden en ontvangen. Ranging scanners geven voor afstanden tot 100 meter ongeveer dezelfde afstandsnauwkeurigheid voor elke afstand. Een afwijking in de afstandsbepaling bij het time-of-flight principe zal dus voor fouten zorgen. Daarom is ook voor dit onderdeel een goede kalibratie van de scanner vereist. [3]

3.3.3 Resolutie

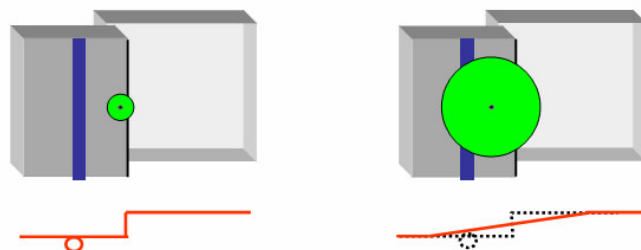
De term resolutie wordt in andere context gebruikt als het gaat om laserscannen. Vanuit de gebruiker gezien beschrijft resolutie de mogelijkheid om kleine objecten of objectgedeeltes te kunnen herkennen. Technisch gezien dragen twee functies van de laserscanner bij aan de mate van detail in de puntenwolk. Dit zijn:

- de kleinste mogelijke hoekverdraaiing tussen twee opeenvolgende punten;
- de grote van de laserpunt zelf op het object.

Bij de meeste scanners kunnen deze onderdelen handmatig worden ingesteld. [3]

3.3.4 Hoek effect

Zelfs wanneer de laserpunt goed gefocust is op een object, heeft deze nog steeds een bepaalde diameter. Wanneer de laserpuls een object op de rand raakt zal slechts een deel van deze puls daar reflecteren. De rest kan gereflecteerd worden vanaf een aangrenzend of een achterliggend oppervlak, of kan geheel niet worden gereflecteerd (wanneer er geen verdere objecten meer zijn binnen het bereik van de scanner). Wanneer een laserpuls voor de helft op twee verschillende oppervlakten wordt gereflecteerd zal het gemeten punt de gemiddelde afstand tussen de twee oppervlakten als coördinaat aannemen.



Figuur 7: Hoek effect

Ranging en triangulatie scanners produceren allebei een variëteit van foute punten door de aanwezigheid van hoeken. De foute punten kunnen meestal gevonden worden op de straal van het reflecterende punt tot het hoekpunt, achter de hoek (vanuit de scanner gezien).

Natuurlijk zijn deze foute punten niet te voorkomen omdat de laserpuls niet gefocust kan worden tot puntgrootte. Aangenomen mag worden dat goed gefocuste lasers betere resultaten opleveren. [3]

3.3.5 Reflectie

Laserscanners moeten vertrouwen op het signaal dat gereflecteerd wordt door de oppervlakte van het ontvangende object in het geval van de ranging scanner en de camera in het geval van de triangulatie scanner. In beide gevallen is het terugkerende signaal afhankelijk van de reflecterende eigenschappen van het objectoppervlak. Objecten met een wit oppervlak zullen sterker signalen reflecteren in tegenstelling tot zwarte oppervlakten die de laserpuls zwak zullen reflecteren. De reflectie eigenschappen van gekleurde oppervlakten zijn afhankelijk van het kleurenspectrum van de laser (groen, rood en infrarood). Glimmende oppervlakten zijn normaal gesproken minder goed vast te leggen. [3]

Het is gebleken dat oppervlakten met een verschillende reflectiecoëfficiënt systematische afwijkingen vertonen op het gebied van afstandsmeting. Voor sommige materialen bereikt het een verschil van een aantal keren de standaard afwijking van een enkele afstandsmeting. Sommige scanners die een soort openingsafstelling bieden, geven fouten in de eerste punten nadat de laserstraal een oppervlakte bereikt heeft van een aanzienlijk andere reflectiecoëfficiënt dan het voorgaande oppervlak. De correcte afstanden worden na een aantal metingen vanzelf veranderd en opgeslagen. Voor oppervlakten die uit meerdere materialen of verschillende verf- of coatingen bestaan, moet men altijd op behoorlijke fouten rekenen. Deze kunnen alleen voorkomen worden door het object tijdelijk met een ander materiaal te coaten dat wel goede reflecterende eigenschappen heeft. In de praktijk zal dit vaak problemen opleveren. Niet alle plaatsen zijn te bereiken, en de kosten zullen een negatieve invloed hebben. [3]

3.4 Invloed nauwkeurigheid weersomstandigheden

3.4.1 Temperatuur

Elke scanner zal alleen goed kunnen functioneren tussen bepaalde temperatuursregio's. Zelfs binnen deze temperaturen kunnen er verschillen ontstaan in de meting. Dit heeft de meeste invloed op de afstandsmeting. Ook moet er opgemerkt worden dat de temperatuur in de scanner veel hoger kan zijn dan die van de buitentemperatuur. Dit komt door de interne verwarming door bijvoorbeeld de straling van de zon. [3]

3.4.2 Atmosfeer

Omdat alleen korte afstanden worden gemeten is de invloed van temperatuursveranderingen en drukverschillen in de atmosfeer op de lichtsnelheid te verwaarlozen. Veel gebruikers geven echter wel aan dat bij metingen in een omgeving waar veel stof of stoom in de atmosfeer aanwezig is, er wel behoorlijke verschillen op kunnen treden. [3]

3.4.3 Hinderlijke straling

Lasers werken in een zeer beperkt frequentie gebied. Hiervoor kunnen filters worden gebruikt om er voor te zorgen dat alleen deze frequentie het ontvangststation kan bereiken. Wanneer de straling van de versturende bron (zonlicht, lampen) sterk is in vergelijking met het signaal, zal er genoeg van deze hinderlijke straling door het filter dringen waardoor de meting zal worden verstoord of zelfs helemaal zal worden belemmerd. [3]

3.4.4 Invloed weersomstandigheden

De afstand wordt bij de time-of-flight methode gemeten door de tijdsduur tussen het moment van uitzenden en ontvangen vast te stellen. Wanneer zich obstakels in de stralingsbaan van de laser bevinden wordt deze laserstraal eerder onderbroken en teruggekaatst. Dit is ook het geval bij regen, hagel of sneeuw. De meting geeft dan punten in het luchtledige aan op de positie waar de laserstraal werd geblokkeerd. Dit fenomeen zorgt voor ruis in een scan die handmatig uit de scan te verwijderen is. Vaak is een beetje ruis niet erg en kan de scan gewoon worden gebruikt doordat veel laserstralen wel doordringen tot het object. De weersomstandigheden moeten wel heel extreem zijn wil de scan in zijn geheel onbruikbaar zijn.

3.5 Overige aspecten

3.5.1 Meetsnelheid

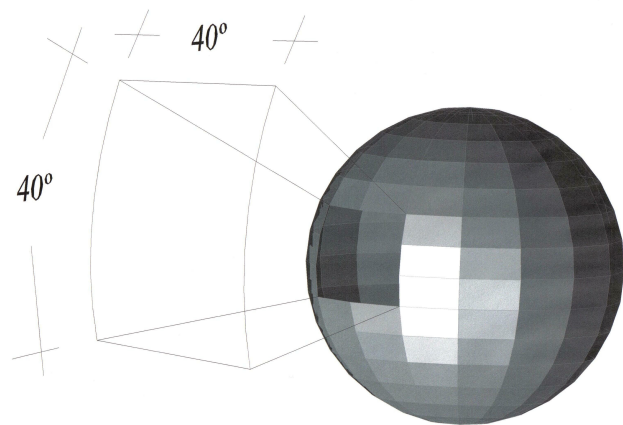
Ondanks de hoge dataverwerking van de scanners kan scannen een tijdrovend proces worden wanneer een hoge mate van nauwkeurigheid wordt vereist. Een hoge resolutie betekent meer punten en dus ook meer tijd. Wanneer een scanner 100 punten per seconde meet, kan dit worden gezien als een langzaam apparaat. Een aantal van 1000 punten per seconde is in veel gevallen voldoende. (Scanners die ruim over de 1000 punten per seconde gaan, zijn al voorhanden.) Men kan echter niet aannemen dat het project hierdoor 10 keer sneller gescand kan worden omdat de basistijd die nodig is voor overzetten van scanner naar een ander opstelpunt voor het opstellen van de scanner en voor het inmeten van referentiepunten niet sneller kan worden uitgevoerd. De tijd die hiervoor nodig is zal dan verhoudingsgewijs meer tijd in beslag nemen. [2]

3.5.2 Afstandsbereik

Het bereik van een scanner moet altijd goed in overweging worden gebracht. Het mogelijke bereik van een scanner is hoogst afhankelijk van de reflectiefactor van het oppervlakte van het in te meten object, van de staat van de atmosfeer en van de invloed stralingen op de scanner. Over het algemeen zijn time-of-flight instrumenten vrij robuust waardoor dit apparaat minder gevoelig is voor de hiervoor genoemde punten. [2]

3.5.3 Oriëntering

Gefixeerde scanners zonder gemotoriseerde assen voor rotatie (camera zicht scanners) hebben een gelimiteerd gezichtsveld. Ze kunnen een typisch gebied scannen van 40° bij 40° graden, dit is ongeveer 0,5 steradiaal (een volledige bol bedraagt 4π of ongeveer 12,6 steradiaal). Scanners met één as bestrijken ongeveer 45° bij 320° of 4,5 steradiaal. Scanners met twee assen (panorama zicht scanners) kunnen overal scannen op een conisch gebied van 30° na ter plaatse van de bevestiging op het statief, dit houdt in een gebied van ongeveer 11,7 steradiaal. Een groot gezichtsveld kan van groot belang zijn in gesloten ruimten waar scanners grote hoeveelheden aan informatie kunnen inwinnen zonder enige aandacht van personeel (in de nacht). [2]



Figuur 8: Gezichtsveld HDS2500

3.5.4 Resolutie en puntgrote

De resolutie is theoretisch een functie van de grootte van de hoek. De metingstraal kan worden verplaatst door verandering van deze hoek. Een meer praktisch bewijs is de grootte van het reflecterende gebied (puntgrote), omdat dit de lokale resolutie zal doen beperken. Wanneer een hoge resolutie vereist is zal er goed moeten worden gecontroleerd hoe goed de straal gefocust is en of er een automatische focus functie wordt gebruikt voor variërende afstanden. [2]

3.5.5 Koppeling van scans

Wanneer meerdere scans vanuit meerdere opstelpunten moeten worden gekoppeld of wanneer een scan moet worden omgezet naar een bestaand coördinatenstelsel is het belangrijk om speciale punten in de gemeten ruimte te hebben die gemakkelijk herkend kunnen worden door de scansoftware. Sommige producenten leveren speciaal ontwikkelde oriënteringspunten zoals bollen of objecten met een hoge reflectiefactor die door de hard- en software worden herkend. Deze oriënteringspunten zijn ook bruikbaar als oriëntering voor tachymeters. [2]

3.5.6 Digitale camera

In enkele scanners is een camera gemonteerd die foto's maakt van de gescande omgeving. De resolutie van de foto's is nog laag en wordt in principe alleen nog maar gebruikt voor het richten van de scanner. Door nieuwe ontwikkelingen zijn er toepassingen ontstaan voor deze afbeeldingen. Namelijk het maken van driedimensionale fotorealistische modellen. Dit gebeurt door de afbeelding te projecteren op het object. [2]

3.5.7 Transport

Ideaal zou zijn wanneer de scanuitrusting klein en licht zou zijn. De meeste lange afstand scanners zijn echter nog vrij groot. Het is dan bijvoorbeeld niet mogelijk om deze als handbagage mee te nemen bij een vliegreis. Men zal dus altijd rekening moeten houden met vervoer, en de tijd die daar aan verbonden zit. [2]

3.5.8 Stroomvoorziening

Scanners die met een accu werken kunnen meer divers worden ingezet dan scanners die afhankelijk zijn van een stroomaansluiting via een kabel. Omdat vaak op plaatsen gescand moet worden waar geen stroom aanwezig is, is een uitrusting met accu van belang. [2]

3.5.9 Cyclone software

Sinds het gebruik van laserscanners over de hele wereld is toegenomen, is er grote vraag gekomen naar een efficiënt management programma dat kan omgaan met de grote puntenwolken die vrij komen uit een gemaakte scan. Leica heeft een programma ontwikkeld waarin gewerkt kan worden met complexe modellen genaamd Cyclone. Dit programma kan gekoppeld worden met Autocad of Microstation. [1]

Bediening van de scanner

De gebruiker heeft de keuze uit verschillende manieren om te bepalen wat er gescand moet worden. Het te scannen gebied kan geselecteerd worden in een digitale foto of globale scan. Er kan worden aangegeven wat de resolutie van de paspunten moeten zijn en de resolutie van de puntenwolk kan worden ingesteld.

Tijdens het scannen kan de gebruiker het proces volgen. Hierdoor is het mogelijk tijdig op te treden bij fouten en kan gekeken worden of alle objecten zijn ingemeten. De software die nodig is om de scanner te bedienen is vaak geïntegreerd in de verwerkingssoftware. [1]

Koppelen van puntenwolken

Het koppelen van puntenwolken is nodig voor de volgende doelen:

- combineren van scans van verschillende standplaatsen tot één gezamenlijke puntenwolk.
- het oriënteren van de scan in een referentiestelsel.

De verschillende scans kunnen op drie verschillende manieren worden samengevoegd.

Bij de eerste methode wordt de standplaats van de scanner ingemeten evenals het oriënteringspunt. Het oriënteringspunt wordt vervolgens door de scanner gescand. Hierdoor is de scan te transformeren naar het gebruikte referentiestelsel. Deze methode is slechts bij enkele scanners mogelijk.

Methode twee maakt gebruik van speciale paspunten. De paspunten worden ingemeten en vervolgens gescand. De software van de scanner herkent de paspunten. Aan de hand van de paspunten kunnen de scans worden gekoppeld. Er is hier sprake van een vrije opstelling. Men spreekt van een vrije opstelling wanneer de meting niet gekoppeld hoeft te worden aan een ander bekend stelsel.

De derde methode is een vrij nieuwe techniek, gebaseerd op het koppelen van overeenkomstige vlakken en objectgeometrie. Hierbij is het niet nodig extra metingen te verrichten. In de software worden de scans globaal over elkaar gelegd, waarna een best mogelijke oplossing wordt gezocht om de scans passend te maken. Opgemerkt moet worden dat er voldoende objectgeometrie aanwezig moet zijn. [1]

Modelleren van primitieven

Gescande objecten bevatten delen van geometrische primitieven zoals, vlakken, cilinders en kegels. Het is mogelijk delen van, of gehele objecten te modelleren met behulp van deze primitieven. Cad-programma's zouden de hulpmiddelen hiervoor moeten bevatten. Standaard Cad-programma's kunnen de grote hoeveelheden punten niet aan. Hiervoor zijn nieuwe pakketten ontwikkeld door de leveranciers van de scanners. De software pakketten voor 3D-scans verschillen aanzienlijk van elkaar als het om uitvoering gaat. Als er een database met primitieven in het software pakket is opgenomen hoeft de gebruiker slechts enkele handelingen uit te voeren. Deze handeling bestaat uit het aanwijzen van punten in het object en het kiezen van de bijbehorende primitieve. In sommige software is er een bibliotheek met voorgedefinieerde objecten aanwezig. [1]

3.5.10 Hardware

Voor een goede verwerking van de scan zal gebruik gemaakt moeten worden van een snel systeem. In de bijbehorende software (Cyclone 4.0) de aanbevolen systeemeisen vermeldt:

Aanbevolen systeem eisen

Processor	2 GHz Pentium IV
Memory	1 GB RAM
Hard Disk	40 GB
Video Card	XGA 1024x768 true color, video card met 3D OpenGL acceleration
Operating System	Microsoft Windows NT 4.0, 2000, XP Professional

Na veelvuldig gebruik van dit programma zijn we tot de conclusie gekomen dat met de minimale systeemeisen niet te werken valt. Met het programma valt het best te werken wanneer we het interne geheugen van het systeem wordt vergroot tot 2 GB RAM. [4]

3.6 Eigenschappen verschillende software

3.6.1 Inleiding

Nieuwe ontwikkelingen in de software zullen nauwlettend in de gaten moeten worden gehouden. Hoe sneller men een gescand object kan verwerken tot een bruikbaar geheel des te goedkoper de techniek zal worden.

De scanner van Ingenieursbureau Passe-Partout werkt met de software van Cylone. Het is voor ons onderzoek van belang dat we ons niet alleen op deze software gaan richten maar ook op andere mogelijke softwarepakketten die mogelijk efficiënter werken.

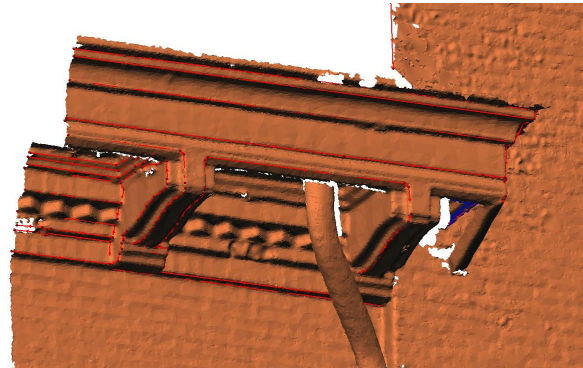
Tijdens het uitzoeken van welke softwarepakketten het meest geschikt zijn voor de architectuur kwamen we uiteindelijk op de internetsite van Riegl. Op deze site kan men precies zien welke software het meest geschikt is in iedere bedrijfstak. De sterke punten van de vijf meest geschikte softwareprogramma's voor de bouwkunde ziet u hieronder.

3.6.2 Pointcloud

Pointcloud ondersteunt de visualisatie van miljoenen punten in AutoCAD. De door de 3D-laserscanner gevonden punten kunnen met de functies van AutoCAD worden bewerkt. De 3D-orbit- en zoomfuncties en de mogelijkheid om bepaalde onderdelen van de puntenwolk te verbergen en te laten zien zorgen voor een goed overzichtelijk verwerkingsprogramma. Met het pointsnap commando kunnen de 3D punten eenvoudig met elkaar worden verbonden. Het verwerken van scans van bestaande situaties, industriële objecten, historische gebouwen, sculpturen en veel meer is mogelijk in elke mate van detail. De puntenwolk kan worden gecombineerd met andere informatie zoals CAD tekeningen, foto's en vloerplannen. Verder draait pointcloud onder de nieuwste AutoCAD versies. [38]

3.6.3 Polyworks

Polyworks biedt veel gebruiksmogelijkheden om 3D data te bewerken. Zo is het mogelijk om snel polygonale modellen met een hoge precisie te creëren van simpele tot ingewikkelde objecten. Ook is het mogelijk om precieze polygonale modellen klaar te maken om snel te kunnen copieren om prototypes te maken, hierbij wordt gebruik gemaakt van de meest geavanceerde polygon verwerkingstechnologieën. Verder biedt de software de mogelijkheid om snel de nauwkeurigheid van prototypes te controleren vergeleken met hun CAD ontwerp. [38]



Figuur 9: Uitwerking goot Veehuis in Polyworks

3.6.4 Reconstructor / Surveyor

Reconstructor / Surveyor wordt gebruikt voor het creëren van precieze en fotorealistische 3D modellen van het interieur en exterieur van gebouwen of andere grote objecten. Het model wordt gecreëerd door gebruik te maken van de data van 3D-laserscanners in combinatie met de data van een digitale camera.

Het is ontwikkeld om te werken met puntenwolken, meshings en reconstructies. Reconstructor verbindt alle digitale beelden met de 3D gegevens en maakt dit samen tot één geheel. Dit proces is beter bekend als fotodraperen. Het resultaat is een fotorealistisch 3D model met een hoge geometrische precisie en visuele kwaliteit. [38]

3.6.5 QT Sculptor

Met QT Sculptor is het mogelijk om de geometrie en textuur van bestaande objecten te reconstrueren met behulp van scans en digitale foto's. Er kunnen exacte 3D modellen worden gemaakt van ingemeten objecten. Ontbrekende onderdelen in de scan kunnen worden aangepast en gemodelleerd. [38]

3.6.6 Cyclone

Cyclone is geschikt voor modelleren en visualiseren van 3D-scans. Cyclone biedt de mogelijkheid voor efficiënt management en het werken aan grote puntenwolken. Door zijn nieuwe objectdatabase is het mogelijk om te werken met complexe modellen. Omdat Cyclone een database is heeft men veel voordelen wanneer er wordt samengewerkt omdat meerdere personen tegelijk in hetzelfde bestand kunnen werken.

Cyclone biedt de mogelijkheid complexe modellen te modelleren. Ook is het mogelijk om gegevens te exporteren naar AutoCad of Microstation. De vernieuwde versie van Cyclone biedt ook de mogelijkheid om gebruik te maken van de techniek fotodraperen.

3.7 Welke software voor welke toepassingsgebieden

Architectuur

In de architectuur is het van belang om hoekpunten te herkennen zodat hiervandaan polylijnen kunnen worden getekend. Ook een goede visualisatie van de scan is van groot belang om te herkennen om welk punt in de scan het gaat.

Softwareprogramma's waarbij de verwerking van de scandata voor de architectuur momenteel het beste is zijn:

- PolyWorks
- Reconstructor / Surveyor
- Pointcloud [38]

Procesindustrie

In deze sector is het eenvoudig modelleren een primaire eis voor de software. Buizen en andere geometrische objecten moeten daarom eenvoudig kunnen worden herkend.

Het verwerken van scandata voor de petrochemie is met de volgende softwareprogramma's het meest geschikt:

- Cyclone
- PolyWorks
- Pointcloud [38]

Archeologie

In de archeologie gaat het vooral om het eenvoudig kunnen modelleren van objecten met veel krommingen en rondingen. Ook een goede visualisatie speelt een belangrijke rol bij het verwerkingsproces.

De volgende softwareprogramma's bieden de beste verwerking voor archeologische objecten:

- PolyWorks
- QT Sculptor
- Reconstructor / Surveyor
- Pointcloud [38]

Een aantal van deze software pakketten hebben we tijdens onze afstudeerperiode mogen gebruiken. Het gebruik van deze pakketten is te gering geweest om aan te kunnen geven welke software het best toegepast kan worden in de verschillende toepassingsgebieden. Bovenstaande informatie is verkregen via de internetsite van Riegl.

3.8 Toepassingsgebieden

3.8.1 Industrie

Proces industrie

De laser is een nauwkeurig meetinstrument dat in grote risicovolle omgevingen al vele malen ingezet is. Het is mogelijk op veilige afstand de metingen te verrichten omdat de metingen contactloos zijn. [8]

Binnen een industriële omgeving is laserscannen uitermate geschikt voor het scannen van installaties, waarna de scan bewerkt kan worden tot een nauwkeurig model. Indien oude as-built plannen niet bestaan of onvoldoende zijn, en het volledig heropmeten van de installatie een te grote en langdurige inspanning lijkt, is laserscannen de ideale oplossing. [8]

Volledige units kunnen met deze technologie in kaart gebracht worden. Wanneer bepaalde onderdelen vragen om een grotere nauwkeurigheid, kunnen die onderdelen met een hogere resolutie gescand worden. De klant kan vooraf aangeven welke onderdelen met een grotere nauwkeurigheid gescand moeten worden. [8]

Een accuraat ruimtelijk digitaal 3D-model is het eindproduct. Dit model kan dienen als basisgegevens voor verder ontwerp of beheer van installaties. Het is formaat onafhankelijk en in te lezen in de meeste teken- en ontwerpomgevingen zoals MicroStation, AutoCad, PDS, PDMS enz. [8]

Scheepsbouw

Grote maritieme objecten

3D-Laserscannen is bij uitstek geschikt voor toepassing in maritieme objecten. Samen met de tachymeter kan nauwkeurig gedetailleerde as-built informatie in de vorm van Cad-objecten geproduceerd worden. [9]

Tegenwoordig nog worden de meeste modificaties en reparaties ontworpen op basis van originele ontwerptekeningen, indien beschikbaar, en zorgvuldig gekozen aanvullende puntmetingen, indien mogelijk. De vorm van de romp kan deel uitmaken van de benodigde informatie. Bepaling van de vorm van de romp vereist een groot aantal gemeten punten, waarvan de meeste niet (eenvoudig) te meten zijn door maatvoerders of landmeters. 3D-laserscannen is de meest voor de handliggende oplossing om de informatiebehoefte te vervullen: contactloos en duizend meetpunten per seconde. [9]

Kleine maritieme objecten

Testmodellen worden vaak kleinschaliger gemaakt om beheerste experimenten uit te kunnen voeren. Ontwerp aanpassingen kunnen dan worden uitgevoerd op basis van de verkregen experiment gegevens in combinatie met theoretische berekeningen. [9]

Nauwkeurige as-built informatie met betrekking tot het model stellen in staat om de berekeningsresultaten te verkrijgen of te verbeteren. Digitaliseren van modellen door middel van 3D-laserscannen levert deze informatie. [9]

DTM's (volumebepalingen)

Voor de bepaling van het volume en de oppervlakte van een zand-, grindberg of werkwand wordt vanuit verschillende punten gescand. De scandata wordt in verschillende softwareprogramma's verwerkt.

De software maakt het mogelijk de scans te koppelen aan elk willekeurig coördinaatsysteem. Tevens is het mogelijk 3D-CADmodellen te genereren uit de metingen, variërend van eenvoudige hoogtelijnen tot complexe vrije oppervlakken en solids. [9]

Digitale terreinmodellen (DTM's) worden gebruikt voor de volgende toepassingen:

- data analyse; drainageberekeningen, landinrichtingsmodellen, milieu management, stadsplanning, bosbouw, enz.
- visualisatie
- simulatie; vluchtsimulatie en calamiteitsimulatie
- hoeveelheden

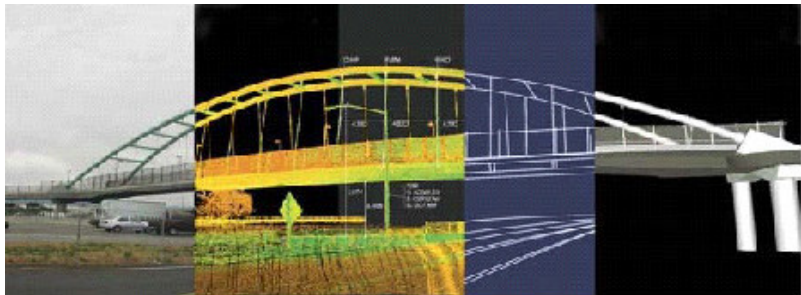
Een toepassing van laserscannen binnen de volumeberekeningen, is de registratie van de schade rond het World Trade Centre in New York. Voor het volledig in kaart brengen van de obstakels is er gebruik gemaakt van luchtfoto's, satellietfoto's en DTM's door middel van de laserscantechniek. Het voordeel van de techniek tegenover de traditionele meetmethoden is evident. De omvang van het gebied, de wens tot een realistisch beeld en de gevaarlijke omstandigheden, zijn een aantal argumenten voor het gebruik van een laserscanner. [9]

Laserscannen is een instrument dat kan worden ingezet voor deformatiemetingen. Door de globale dekking in plaats van enkele specifieke punten, worden lokale vervormingen gedetecteerd. De puntenwolk kan snel worden gemodelleerd tot een TIN met een hoge resolutie. [9]

3.8.2 Infrastructuur

Eén van de grote toepassingsgebieden voor de laserscanner is in de infrastructuur. Vanwege het steeds intensievere gebruik van onze infrastructuur, (wegen, spoorwegen, bruggen, viaducten, enz.) zullen onderhoudswerkzaamheden zich steeds vaker opvolgen, die op hun beurt weer files en vertragingen veroorzaken.

3D-laserscannen biedt een uitkomst bij het meten van deze infrastructurele



Figuur 10: Van foto tot model

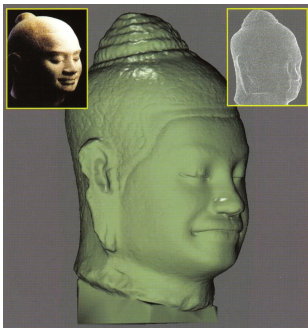
werken. Het verkeer ondervindt geen hinder tijdens de metingen omdat er opgesteld wordt buiten het traject. Het traject hoeft zodoende niet afgezet te worden om bepaalde metingen te kunnen uitvoeren. Het verkeer heeft geen hinder en de meetploeg hoeft niet het traject op, wat wel zo veilig is voor iedereen. [9]

3.8.3 Culturele sector

Met behulp van een 3D-laserscanner kan een virtueel museum worden opgebouwd. Alle mogelijke statische kunstwerken kunnen nauwkeurig worden gescand. De verkregen puntenwolk kan worden omgezet in een digitaal 3D-model van het kunstwerk. Dit model kan door de gebruiker (de bezoeker van het virtuele museum) vanuit alle mogelijke invalshoeken tot in het laatste detail worden bekeken en bestudeerd. [8]

Dit biedt ook mogelijkheden voor de restauratiewereld waarbij ornamenten fijne gedetailleerdheid te vinden is (pinakels, vast meubilair, afwerkingen, detailleringen e.d.).

Het manipuleren van het model kan binnen een eenvoudige viewer of met een geavanceerd CAD pakket. Binnen de



Figuur 12: Uitgewerkt scanmodel

CAD omgeving kunnen archeologen en historici beschadigde of gedeeltelijk verloren voorwerpen en kunstwerken gedetailleerd herstellen, samenvoegen of reconstrueren. [8]

Behalve een puntenwolk waarvan later het eigenlijke model wordt geconstrueerd, registreert de laserscanner ook videobeelden van het kunstwerk. Deze beelden bieden een grote toegevoegde waarde aan het virtuele museum en kunnen zelfs met het model tot één geheel worden samengevoegd. Door het samenvoegen van gescande informatie en de foto's kunnen zeer realistische beelden worden gemaakt. Deze technologie kan gebruikt worden om kunstvoorwerpen te beschermen of replica's aan te maken. [8]



Figuur 11: Scanopstelling beelden

3.8.4 Bouwkunde

3D-laserscannen is een techniek die zeker potentie heeft in de bouwkundige wereld. Een snelle en nauwkeurige winning van data geeft natuurlijk heel veel voordelen ten opzichte van de gevestigde meetmethoden. Ook het genereren van fotorealistische beelden met de software spreekt veel architecten aan. Met deze beelden zouden ze kunnen ontwerpen in bestaande situaties. Momenteel moet men nog ontwerpen met oude tekeningen en AutoCad ontwerpen waar men moet werken met een beperkt aantal gemeten punten. [40]

Voor de RdMz (Rijksdienst voor Monumentenzorg) zou het een uitermate geschikte methode zijn om haar monumentale panden te archiveren. Momenteel wordt er alleen gebruik gemaakt van fotogrammetrie. Deze techniek verschaft veel minder gegevens dan het laserscannen waarbij men ook nog de techniek van het fotodraperen kan gebruiken. [40]

Omdat het 3D-laserscannen een enorm snelle en nauwkeurige techniek is kan het ook gebruikt worden wanneer er snel een archivering gemaakt moet worden. Dit kan bijvoorbeeld het geval zijn wanneer men een archivering wil hebben van een monumentaal pand dat op korte termijn gesloopt moet worden. De scan kan gemaakt worden en op een later tijdstip uitgewerkt worden. [40]

De toepassingsgebieden die hierboven genoemd zijn vragen duidelijk om een 3D-laserscanner met een groot bereik. De Cyclone-software van Leica (voorheen Cyra) is echter intelligenter en kan veel van de visualisaties beter aan. Het nadeel van de HDS2500 is de kleine 40 bij 40 graden scanhoek. Met de introductie van de HDS3000 met een scanhoek van 360 bij 270 graden is dit probleem geheel opgelost. [40]

De toepassingen binnen de architectuur kunnen samengevat worden als:

- complexe metingen door het groot aantal punten en de contactloze inwinning;
- fotorealistisch driedimensionaal beeld voor het ontwerpen in een bestaande situatie;
- archivering cultureel erfgoed.

3.8.5 Overige

Vliegtuigbouw

Ook in de vliegtuigbouw ziet men een heldere toekomst voor de 3D-laserscanner. Op dit gebied is echter nog weinig onderzoek verricht en zijn er weinig opdrachten mee uitgevoerd. De 3D-laserscanner is echter wel zeer geschikt om een vliegtuig in te meten, handmatig zal dit veel meer tijd in beslag nemen.

Misdaad

Momenteel is men aan het kijken of de 3D-laserscantechniek zijn mogelijke toepassing kan gaan vinden in researchewerk. Het kan natuurlijk zeer bruikbaar zijn om bij een ongeluk accuraat het plaats delict op te meten. Sporen kunnen heel duidelijk worden vastgelegd. Bij een moord is een scan van vijftien minuten voldoende om de positie van het slachtoffer en de omgeving exact vast te leggen. Uit de onderlinge afstand van op plaats delict aangetroffen hulzen zou kunnen worden afgeleid welk vuurwapen is gebruikt. Foto's met liniaaltjes worden daarbij overbodig. Bij verkeersongevallen kan de weg veel sneller vrijgemaakt worden als niet eerst alles met behulp van meetlinten moet worden uitgezet. Waarschijnlijk is het kostenaspect momenteel nog een probleem. [10] [11]

Films

Ook ziet men wel een toekomst in de toepassing van de 3D-laserscanner in films voor het maken van special-effects. Met behulp van driedimensionale scans kunnen virtual reality beelden worden gemaakt. Ook kunnen achtergronden voor speelfilms worden gescand. Dit is bijvoorbeeld al gebeurd in de film "starship troupers" van Jan de Bont. [12]

Speleologie

In het uitzonderlijke geval dat er ondergrondse ruimten, zoals grotten moeten worden ingemeten blijkt laserscannen een uitermate geschikte methode. Met de traditionele metingen is het vrijwel onmogelijk om de complexe structuur vast te leggen. De vastlegging van ondergrondse ruimten is een intensieve klus vanwege de vele opstellingen die nodig zijn voor de complete belichting van de geometrie. De conventionele meetmethoden schieten te kort door het gebrek aan duidelijk te definiëren punten in een bovenbeschreven situatie. De volumeberekening van zowel complexe als meer triviale omgevingen is een veld waar laserscannen ingezet kan worden. [13]

3.9 Ervaringen met de laserscanner in de bouwkunde

Tijdens de literatuurstudie naar laserscannen zijn we een aantal mogelijkheden tegen gekomen waarin de 3D-laserscanner kan worden toegepast. Hieruit blijkt ook dat toepassing in de bouwkunde achter is gebleven ten op zichte van andere toepassingsgebieden. Aan de hand van deze literatuurstudie en het interviewen van specialisten op dit gebied (I.G.L.) is een goed beeld te vormen wat betreft de ervaringen op dit moment in de bouwkunde.

Er zijn afbeeldingen te vinden op internet met volledig gemodelleerde gebouwen gemaakt in onder andere de door ons gebruikte Cyclone software. Na enige tijd met de software gewerkt te hebben zijn we tot de conclusie gekomen dat dit een zeer complexe en tijdrovende verwerking is, eigenlijk niet te doen. Deze gedachte wordt onderbouwd in verschillende afgenomen interviews.

Het meten van gevels, en deze verwerken tot 2D-geveltekeningen wordt al wel toegepast in de bouwkundige wereld. Bij de verwerking van de scan wordt dan niet gemodelleerd. Uit de scan worden de verschillende onderdelen die op tekening gezet worden als het ware overgetrokken. Deze methode wordt ook toegepast in de fotogrammetrie. Hierdoor is het resultaat een stuk onnauwkeuriger geworden.

Er is een project uitgevoerd in opdracht van de RdMz op basis van 'no cure no pay' door Delftech. Dit project was het inmeten van een grafmonument. De resultaten waren niet toereikend voor de gestelde eisen. Hierdoor is het gebruik van een 3D-laserscanner in een slechtere positie komen te staan.

Een hoog kostenplaatje maakt de scanner tot een dure methode van inmeten. Ook dit is een reden waardoor de 3D-laserscanner nog niet is doorgebroken in de bouwkundige wereld. Ondanks de hoge kosten die fotogrammetrie met zich mee brengt, wordt voor de complexe projecten alsnog gekozen voor fotogrammetrie.

Arbo technisch is het meten van de laserscanner een groot voordeel. De afstand vermijdt eventuele gevaarlijke situaties, en er hoeft niet gemeten te worden op gevaarlijke hoogtes.

3.10 Conclusie literatuurstudie laserscannen

De mogelijkheden van de 3D-laserscanner heeft zich al op een aantal markten bewezen. Wel is te merken, vooral in de bijgeleverde software, dat het apparaat het meest geschikt is voor toepassing in de procesindustrie. Op het bouwkundige gebied wordt de laserscanner nog zeer sporadisch toegepast. Dit is voor zover bekend te wijten aan het hoge kostenplaatje en de complexe verwerking in de bijgeleverde software.

De techniek gaat met grote sprongen vooruit. Wat eerder moeilijk in te meten en zeer tijdrovend was, is met de komst van een aantal nieuwe scanners eenvoudig en snel in te meten. Vooral de snelheid van inmeten en het bereik van de diverse scanners is met grote sprongen vooruit gegaan.

De inzetbaarheid en nauwkeurigheid, wordt beïnvloed door een aantal punten. De inzetbaarheid is sterk afhankelijk van het transport en de stroomvoorziening. Bij de nauwkeurigheid zal vooral gelet moeten worden dat het apparaat goed gekalibreerd is, en dat het te meten object een goede reflectie heeft. Weersomstandigheden zoals regen en sneeuw zorgen voor een nadelig effect op de scan.

Dat een laserscanner te gebruiken is op heel wat verschillende markten mag duidelijk zijn. In de bouwkundige wereld is het gebruik van de scanner nog gering. Wel zien we goede mogelijke toepassingen. De effectiviteit van de scanner is vooral afhankelijk van de software voor de verwerking van de scan.

4 Literatuurstudie fotogrammetrie

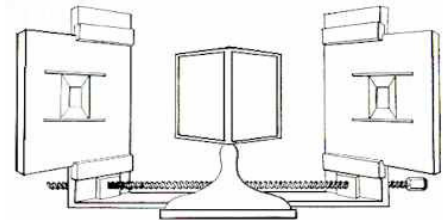
4.1 Inleiding

Tijdens ons onderzoek hebben we een aantal interviews gehouden met verschillende bouwhistorici. Hieruit blijkt dat er al een meettechniek bestaat die zijn toepassing in de restauratiewereld heeft gevonden. Het gaat hier om fotogrammetrie. Om deze techniek te kunnen vergelijken met andere technieken is het van belang om ons hierin te verdiepen in de vorm van een literatuurstudie.

4.2 Techniek

Fotogrammetrie is een methode om met behulp van één of meer fotogrammetrische opnamen van objecten, de afmetingen en de ligging van deze objecten te bepalen. [30]

Wanneer men een foto maakt van een object vervormt men een 3D beeld naar een 2D beeld. Hierdoor verliest men de diepte van het object. Deze diepte kan echter weer worden gereconstrueerd wanneer men vanuit een ander standpunt hetzelfde object nog eens fotografeert. Met de twee foto's samen kan dan een 3D beeld worden gevormd. Deze twee foto's noemt men een stereopaar. [33]



Figuur 13: Spiegel stereoscoop

Een stereopaar is de meeste elementaire vorm waarmee een stereoscopisch beeld kan worden vastgelegd. Het bestaat uit twee afbeeldingen. Een voor het linker oog en een voor het rechter oog. De twee afbeeldingen lijken op elkaar maar bevatten kleine verschillen waaruit onze hersenen een ruimtelijk beeld kunnen vormen. Ieder beeld dient hiervoor afzonderlijk aan het bijbehorende oog te worden aangeboden. [34]

In 1838 is er een apparaat ontwikkeld waarmee met twee tekeningen (stereoparen) een 3D beeld kan worden gevormd. De zogenaamde spiegelstereoscoop werd ontwikkeld door Charles Wheatstone. [35]

In 1844 besloot David Brewster om de stereoscoop toe te passen op de fotografie. Hij maakte een nieuw type stereoscoop uitgerust met lenzen in plaats van spiegels. Hiermee werkte deze stereoscoop op basis van refractie in plaats van reflectie. [35]

Dit apparaat vormt van de twee foto's een samengevoegd beeld door deze met behulp van lenzen op dezelfde wijze te verschalen. Om dit te kunnen doen heb je de positie waar de foto genomen is en de oriëntering van de camera nodig. Dit zijn dezelfde zes onbekenden als de onbekende die we bij de 3D-laserscanner tegenkomen. Bij fotogrammetrie zijn er echter nog meer onbekenden zoals de schaal van de foto, de brandpuntsafstand, de lensvertekening en andere cameraruiz. [30]



Figuur 14: Oude stereoscoop



Figuur 15: Digitale stereoscoop

Wanneer de foto's genomen zijn worden deze aan elkaar gekoppeld door middel van een aantal vaste punten die van te voren zijn ingemeten door bijvoorbeeld een total station. Wanneer de foto's zijn gekoppeld heb je een totaalplaatje waaruit informatie over de maatvoering van het object kan worden gehaald.

De huidige techniek van fotogrammetrie berust nog steeds op deze principes. Er zijn echter wel zaken vereenvoudigd. Een tegenwoordige meting wordt als volgt uitgevoerd:
Er wordt van te voren bepaald waarvandaan de foto's het best genomen kunnen worden.

Men neemt de foto's met twee camera's (een stereopaar) die op een vaste basis staan. Ook worden de foto's met dezelfde brandpuntsafstand genomen om ook deze onbekende te elimineren.

4.3 De nauwkeurigheid van fotogrammetrie

Aan de hand van interviews is naar voren gekomen dat de nauwkeurigheid van deze methode maximaal rond de drie millimeter ligt. Dit kan nog veel nauwkeuriger, de nauwkeurigheid hangt af van de schaal waarmee wordt gefotografeerd. Bij een gevel opmeting op een afstand van tien meter, is theoretisch een nauwkeurigheid te halen van twee millimeter. Fotogrammetrie is dus een vrij nauwkeurige meetmethode.

4.4 Toepassingsgebieden

4.4.1 Traditioneel

Cartografie

Fotogrammetrie is ontwikkeld voor het maken van topografische kaarten. Heel Nederland is op deze manier al in kaart gebracht. Eventuele aanvullingen op de kaarten worden meestal gemeten met een tachymeter. Hierin is dan ook weinig werk meer te vinden.

4.4.2 Close range

Bouwkunde

Fotogrammetrie heeft zich verder gericht op de architectuur. Veel projecten zijn op deze wijze ingemeten en op tekening gezet. In Nederland wordt deze techniek 'nog' niet veel toegepast, dit vanwege het hoge kostenplaatje. Er zijn dan ook weinig bedrijven in Nederland die deze techniek beheersen. Het is ons gelukt een interview te houden met één van de beginners in Nederland op het gebied van fotogrammetrie, dhr. A de Waal. Een aantal van zijn werken is terug te vinden in de bijlage.

Overige

- vormbepaling van schepen ten behoeve van scheepsreparaties;
- deformatie-analyse van voertuigen bij botsingen;
- patroonherkenning in digitale beelden;
- 3D maatvoering van pipinginstallaties in de procesindustrie;
- medische groeianalyses van patiënten. [36]

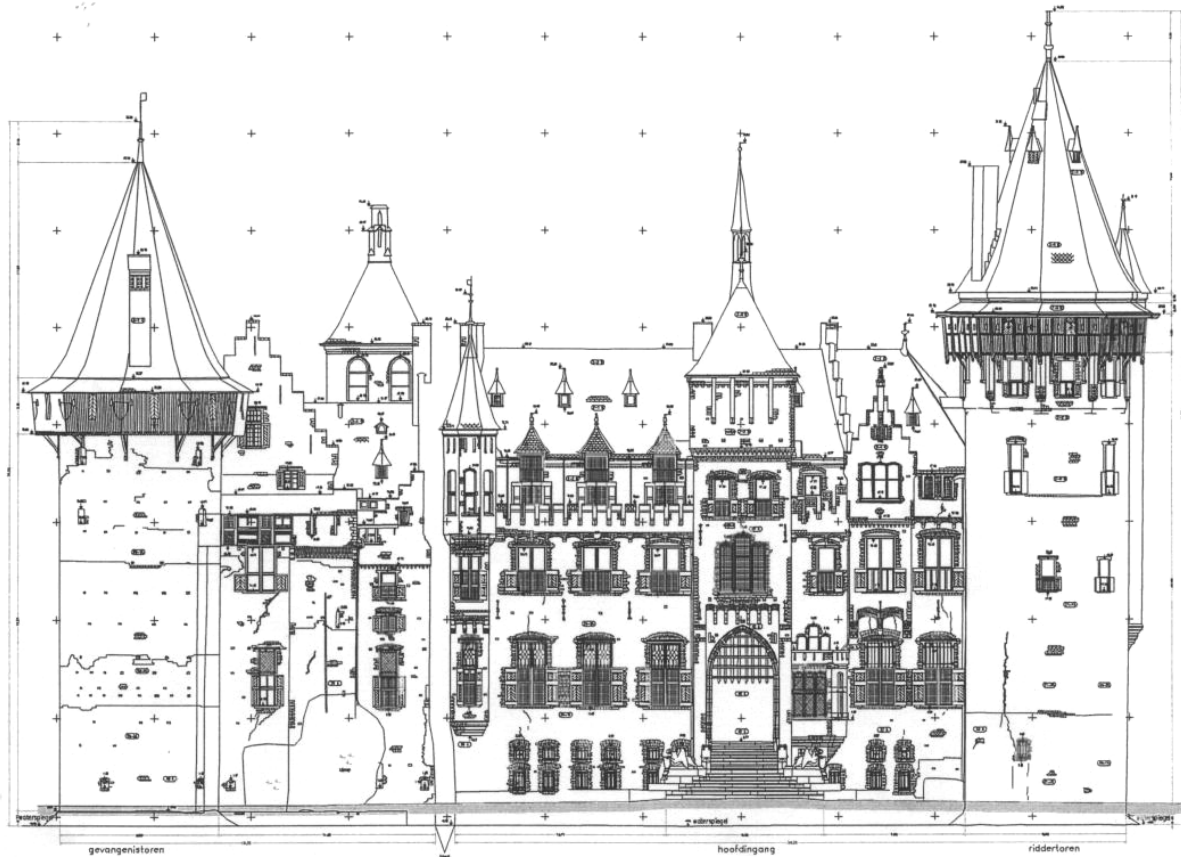
4.5 Toekomst

De techniek van de fotogrammetrie is ver gevorderd en er zijn op korte termijn dan ook geen punten van verbetering te bedenken. Het lijkt er op dat de techniek geen grootschalige ontwikkelingen meer door zal gaan maken.

4.6 Ervaringen met fotogrammetrie in de bouwkunde

In Nederland wordt fotogrammetrie alleen toegepast bij ingewikkelde projecten met veel profileringen. Dit soort projecten is met de hand niet in te meten en verder zijn er weinig alternatieven behalve de 3D-laserscanner. De reden dat het nog maar zo sporadisch wordt toegepast is het kostenplaatje dat aan de techniek hangt. In het verleden zijn enkele grachtenpanden fotogrammetrisch ingemeten door dhr. de Waal. Deze opdracht is niet volledig uitgevoerd doordat de kosten te hoog uitvielen.

Een ander nadeel van de techniek is dat diepte lastig is te herkennen waardoor profileringen en ornamenten niet duidelijk waarneembaar zijn.



Figuur 16: Kasteel De Haar te Vleuten- De Meern

4.7 Conclusie literatuurstudie fotogrammetrie

Fotogrammetrie is een vrij nauwkeurige meettechniek die zeker toegepast kan worden in de restauratiewereld. Een groot nadeel is echter de hoge kosten die de techniek met zich meebrengt.

Wel kan fotogrammetrie gezien worden als een serieuze concurrent van de 3D-laserscanner. Wanneer we naar de toekomst kijken zien we dat de methode van fotogrammetrie volledig doorontwikkeld is terwijl die van de 3D-laserscanner in de kinderschoenen staat. Dit biedt dus perspectief voor de scantechiek, voor de techniek van de fotogrammetrie kan men minder positief zijn.

We verwachten dan ook dat de 3D-laserscanner de rol van fotogrammetrie over gaat nemen in de toekomst. Essentieel hierbij is de verbetering van de software voor verwerking van de scans.

Vergelijkingstabel					
	tijd van inmeten*	tijd van uitwerken*	nauwkeurigheid	kosten	visualisatie
Fotogrammetrie	+	-	++	+	+
3D-laserscannen	++	±	+	±	++

Tabel 2: Vergelijkingstabel fotogrammetrie en laserscannen

*in vergelijking met andere meetmethoden

5 Meten met een Tachymeter en 3D-laserscanner

5.1 Inleiding

Het goed inmeten van objecten met een tachymeter en een 3D-laserscanner vraagt enige handigheid. Tijdens onze proefprojecten hebben we ons deze vaardigheden voor een deel eigen gemaakt. Hieronder is in het kort aangegeven welke stappen doorlopen moeten worden en waar op gelet moet worden wil je tot een goed resultaat komen. Een stukje algemene informatie zal hieraan vooraf gaan.

5.2 Tachymeter

5.2.1 Algemeen

Tachymeters zijn theodolieten met afstandsmeter. Ze hebben nauwkeurigheden in de orde van grootte van tienden van een mm in de afstand (hoekmetingen zijn nauwkeuriger). De beste in zijn soort haalt een nauwkeurigheid van 0,8 millimeter over een afstand van 100 meter en 0,25 millimeter binnen een werkvolume van 10 meter. [19] [20] Een reflectorloze meting zal minder nauwkeurig zijn dan een meting met een prisma.

De tachymeter kan ingezet worden op een groot aantal werkvlakken. Om een paar voorbeelden te noemen in de:

- proces industrie;
- infrastructuur;
- architectuur enz.

5.2.2 Meten met een tachymeter

Om tot een goede meting te komen, is het zeer belangrijk dat het instrument op de juiste wijze opgesteld en gebruikt wordt. Begonnen moet worden met het zuiver waterpas zetten. Dit wordt gedaan door inspelen van het doosniveau. Door na het inspelen van het doosniveau, het buisniveau goed in te spelen, staat het instrument zuiver waterpas. Het buisniveau moet in twee richtingen ingespeeld worden. Dit is te bereiken door na het inspelen van het buisniveau het instrument 90 graden te draaien en nogmaals in te spelen. [25]

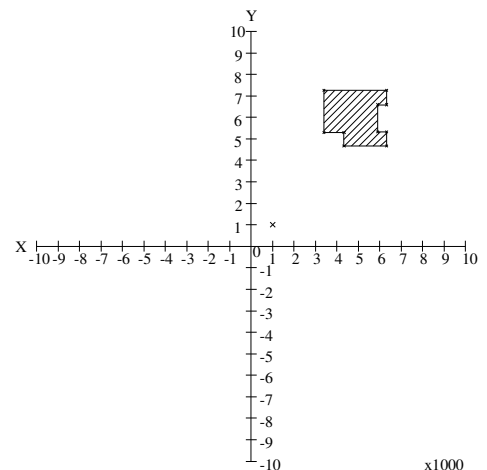
Wanneer het instrument volledig waterpas staat, kan er begonnen worden met de meting. Om de kans op interpretatie fouten te verkleinen, is het verstandig ervoor te zorgen dat alle punten in het positieve veld komen te liggen. Dit is te bereiken door in het instrument aan te geven dat het opstelpunt op 1000, 1000 vanaf de oorsprong ligt. [25]

Door het vast stellen van het 'noorden', wordt in het assenstelsel de y-as bepaald. Wanneer de meting gekoppeld moet worden aan een andere meting, is het verstandig voor dit punt een bekend punt te nemen.

Bij een meting met meerdere opstelpunten, moet er voor gezorgd worden dat de twee opstelpunten aan elkaar gekoppeld kunnen worden. Dit is te verwezenlijken door na het opstellen een tweede opstelpunt in te meten. Wanneer alle punten vanuit opstelpunt 1 zijn gemeten, moet er opgesteld worden op het eerder ingemeten punt. Door in het instrument aan te geven dat het instrument zich bevindt op dit eerder ingemeten punt, worden de twee metingen door de software automatisch gekoppeld. [25]

Benodigheden

- tachymeter (total station);
- prisma;
- een prismastok;
- statief;
- meetspijkers;



Figuur 17: Bepaling assenstelsel t.o.v. object

5.3 3D-laserscannen

5.3.1 Algemeen

Laserscannen levert nuttige informatie en is bovendien visueel bijzonder aantrekkelijk. **Voor het uitwerken van de scans zijn echter een grote mate van deskundigheid en specialistische tools noodzakelijk om uit de scans de informatie te halen die de klant wil.** Dat kan bijvoorbeeld de volumetoename zijn van een zandlichaam of de daadwerkelijke weergave in 3D van een grillig balkenplafond in een historisch gebouw. [15]

Naast het grote aantal meetpunten is met deze meettechniek een aantal minstens zo belangrijke voordelen te behalen. Laserscannen is contactloos meten. Op grote afstand van gevaarlijke meetobjecten die in bedrijf zijn (petrochemische installaties, snelwegen) kan toch een vrij precieze meting worden verricht zonder de gebruikers of eigenaren te storen. [15]

5.3.2 Meten met de 3D-laserscanner

Voordat er gemeten kan worden moeten allereerst de referentiebollen worden geplaatst en ingemeten. Deze moeten tussen de scanner en het gebouw in komen te staan in het 40 bij 40 graden gebied. Om een goede oriëntering te hebben moet er nog een derde referentiepunt worden ingemeten in de hoogte. Dit is te verwezenlijken door een reflectiestrip tegen de gevel te plakken. [16][21]



Figuur 19: Target point

Wanneer een tweede opstelpunt gebruikt moet worden, moet er voor gezorgd worden dat beide opstelpunten gekoppeld kunnen worden. [16]



Figuur 18: Target point

Om de verschillende scans met het juiste coördinatenstelsel te combineren, wordt gebruik gemaakt van 'targets'. Dat kunnen bestaande objecten van de constructie (vlak, cilinder of bol) zijn. Soms is het handig bollen of door Leica ontwikkelde targets te gebruiken die apart aan de constructie worden vastgemaakt. De kwaliteit van de targets bepaalt de nauwkeurigheid van het volledige scanresultaat. De gecombineerde puntenwolk vormt de basis van het 3D-model. [24]

Benodigdheden

- laserscanner incl. statief;
- 2 referentiebollen incl. statieven;
- 1 referentie "sticker";
- accu;
- tachymeter (bij 2 opstelpunten).

6 Precisie verschillende meetmethoden

6.1 Inleiding

Om de precisie van verschillende meetmethoden te kunnen vergelijken, is het noodzakelijk te weten wat de exacte maat is. De exacte maat is niet te meten en te berekenen. Een aantal methodes zijn mogelijk om toch iets kunnen zeggen over de nauwkeurigheid.

Je kunt zeggen dat één bepaalde meetmethode (de meest nauwkeurige) de absolute maat is. In ons geval zou de rolmaat (theoretisch de meest nauwkeurige) hiervoor in aanmerking komen.

Ook is de absolute waarde te bepalen door een wegingsfactor mee te geven aan de verschillende uitgevoerde meetmethoden. Op deze manier is de kans groot dat het gemiddelde ook daadwerkelijk in de buurt van de absolute maat ligt. Dit gemiddelde noemt men het zogenaamde “gewogen gemiddelde”. Deze laatste methode hebben we toegepast.

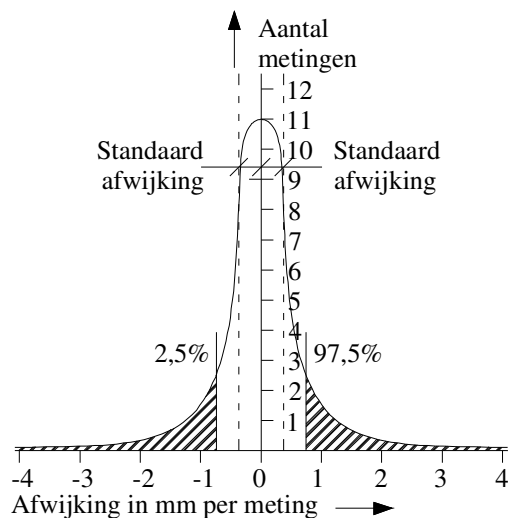
Wanneer de absolute maat bekend is van een gemeten afstand, is de standaardafwijking van de verschillende meetmethoden met de volgende formule te bepalen.

$$s^2 \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}$$

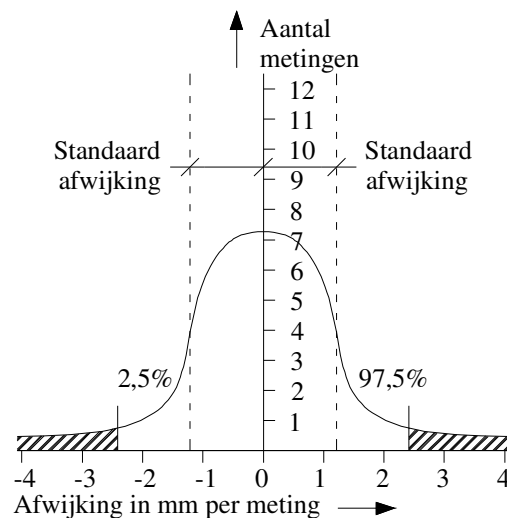
Hierbij is:

- s = standaardafwijking
- n = aantal metingen
- x = waarneming

Van elk meettechniek is een grafiek op te stellen. In deze grafiek zitten ook waarden die relatief ver van de absolute waarde zitten. Dit noemt men ruis. Wij gaan we uit van 5 procent ruis. De grenswaarde van deze vijf procent ruis is te berekenen door de standaardafwijking te vermenigvuldigen met 1,96. Deze waarde is een enkele standaardnormale die veelvuldig wordt toegepast in de statistiek. [18][39]



Figuur 21: Grafiek nauwkeurige methode



Figuur 20: Grafiek minder nauwkeurige methode

6.2 Theoretische precisie meetmethoden:

In totaal hebben we zes verschillende meetmethoden gebruikt voor het opmeten van ons proefproject ‘het Veeenhuis’, te weten:

- rolmaat;
- 3D-laserscanner;
- tachymeter;
- laser hand afstandsmeter;
- telescoop maatlat.

Verderop in het verslag onderzoeken we welke methoden het meest nauwkeurig zijn ten op zichte van traditionele methoden. De nauwkeurigheid van een meetmethode hangt af van de nauwkeurigheid van de gebruikte apparaten en de kans op meetfouten. De theoretische nauwkeurigheid van de bovenstaande apparaten kan berekend worden. De kans op meetfouten is per apparaat verschillend. Deze zijn niet te berekenen, wel is aan te geven bij welke methoden de kansen op meetfouten groter zijn. Verder zullen in de volgende paragrafen het bereik, de bereikbaarheid en weersinvloeden per meetmethode behandeld worden.

6.2.1 Rolmaat

Type: niet van toepassing

Nauwkeurigheid: ± 1 mm (afstand van 10 m ± 2 mm)

Bereik: 0 t/m 10 m

Bereikbaarheid: een rolmaat is goed te gebruiken tot op een hoogte van 2 meter, wanneer men boven deze 2 meter wil meten moeten er hulpmiddelen worden gebruikt (bijvoorbeeld een trap).

Kans op meetfouten: Ook kan men fouten maken met het aflezen en verwerken van de meetresultaten.

Weersinvloeden: de lengte van de rolmaat kan door temperatuursverschillen korter of langer worden. Deze verschillen zijn te verwaarlozen.

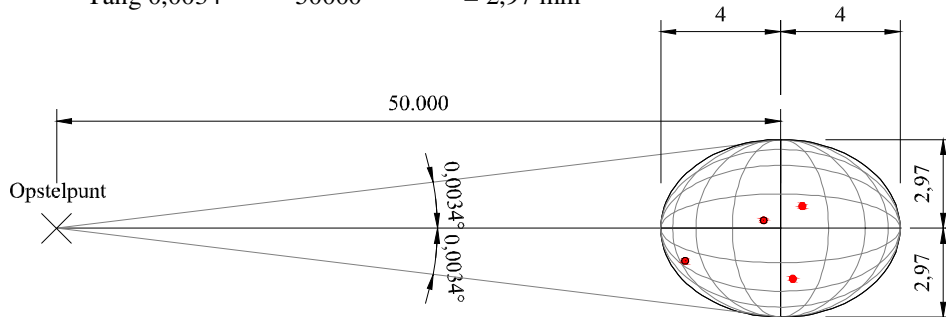
6.2.2 3D-laserscanner

Type: HDS2500 (Cyrax 2500)

Nauwkeurigheid: 4 mm (bij een afstand van ± 50 m)

De nauwkeurigheid van de laserscanner betreffende de afstandsmeting is volgens de documentatie van de HDS2500 ± 4 millimeter. De nauwkeurigheid als het gaat om de hoekmeting is 0,0034 graden. [26] Om hier een afwijking in millimeters voor te krijgen moet men de volgende berekening toepassen:

$$\begin{aligned} \text{Tang } \alpha &= \frac{\text{overstaande}}{\text{aanliggende}} \\ \text{Tang } 0,0034^\circ &= \frac{\text{overstaande}}{50000} \\ \text{Tang } 0,0034^\circ * 50000 &= 2,97 \text{ mm} \end{aligned}$$



Figuur 22: Afwijking 3D-laserscanner

Oftewel de hoekmeting is nauwkeuriger dan de afstandsmeting.

Aangezien de afwijking in de afstandsmeting van 4 millimeter groter is dan die in de hoekmeting van 2,97 millimeter, zullen we de afwijking van 4 millimeter in beide gevallen aanhouden om het enigszins te vereenvoudigen.

Bereik: 1,5 t/m 150 m (boven de 50 m sterke afname van de afstandsnauwkeurigheid)

Bereikbaarheid: een 3D-laserscanner is goed te gebruiken wanneer er voldoende ruimte rondom het gebouw is en wanneer er niet al te veel obstakels in de baan van de opstelpunten tot het in te meten object zijn.

Kans op meetfouten: meetfouten kunnen worden gemaakt wanneer er een fout wordt gemaakt met de koppeling van meerdere metingen, ook kan het opstelpunt niet stabiel genoeg zijn waardoor de scanner hoekmetingfouten maakt.

Weersinvloeden: er kan altijd gemeten worden, de meetkwaliteit gaat echter achteruit wanneer er hevige sneeuw of regenval is. Laserpulsen zullen vroegtijdig worden onderbroken waardoor een aantal punten niet op het te meten object aan- of terug komen. Deze ruis is later in de software gemakkelijk te verwijderen. Ook zullen er fouten in de meting ontstaan wanneer er veel stof in de lucht aanwezig is.

6.2.3 Tachymeter

Type: Sokkia – Serie 030 R

Nauwkeurigheid: 3,1 mm

De Sokkia 030 R is een reflectorloze tachymeter, we hebben voor een reflectorloze tachymeter gekozen omdat veel plaatsen niet of moeilijk te bereiken zijn. Wanneer gebruik wordt gemaakt van een reflectorloze meting, levert de nauwkeurigheid hier wel op in. Tachymeters die werken met infrarood zijn nauwkeuriger.

De maximale afwijking van de tachymeter betreffende de afstandsmeting is volgens de documentatie van de Sokkia 030 R:

$$A = (3 + 2 \text{ ppm} * D)$$

ppm = parts per million

D = meetafstand in millimeters [23]

$$A = (3 + 2 / 1.000.000 * 50.000) = 3,1 \text{ mm}$$

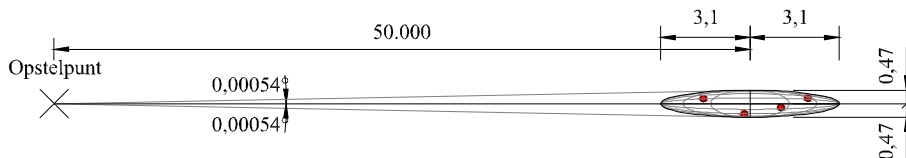
Reflectorloze tachymeters zijn minder nauwkeurig dan wanneer gemeten wordt met een prisma.

De nauwkeurigheid als het gaat om de hoekmeting is 0,00054 graden. Om hier een afwijking in millimeters voor te krijgen moet men de volgende berekening toepassen:

$$\text{Tang } \alpha = \frac{\text{overstaande}}{\text{aanliggende}}$$

$$\text{Tang } 0,00054^\circ = \frac{\text{overstaande}}{50000}$$

$$\text{Tang } 0,00054^\circ * 50000 = 0,471 \text{ mm} \quad (0,471 * 2 = 0,942)$$



Figuur 23: Afwijking tachymeter

Oftewel hoekmeting is nauwkeuriger dan afstandsmeting.

Aangezien de afwijking in de hoekmeting van 0,471 millimeter kleiner is dan die in de afstandsmeting van 3,1 millimeter, zullen we de afwijking van 3,1 millimeter in beide gevallen aanhouden om het enigszins te vereenvoudigen.

Hoekmetingen bij dergelijke instrumenten geeft een lagere nauwkeurigheid, dit is veelal het geval in de bouwkunde.

Bereik: 0,3 t/m 350 m (witte zijde, reflectiviteit 90% reflectorloos)

0,3 t/m 170 m (grijze zijde, reflectiviteit 18% reflectorloos)

Bereikbaarheid: een tachymeter is goed te gebruiken wanneer er voldoende ruimte rondom het gebouw is en wanneer er niet al te veel obstakels in de baan van de opstelpunten tot het in te meten object zijn.

Kans op meetfouten: meetfouten ontstaan wanneer er een fout is gemaakt met de koppeling van meerdere metingen. Wanneer het buisniveau tijdens de meting is veranderd door het verzakken van het instrument, ontstaan eveneens meetfouten doordat er een verkeerde hoek wordt opgeslagen. Ook bestaat er de kans op richtfouten.

Weersinvloeden: regen en sneeuw kunnen er voor zorgen dat de laser vroegtijdig wordt onderbroken waardoor er een foute meting wordt gedaan. Bij metingen met behulp van infrarood geeft dit geen problemen.

6.2.4 Laser handafstandsmeter

Type: Leica – Disto Pro4 a

Nauwkeurigheid: $\pm 1,5$ mm (standaard model ± 3 mm)

Bereik: 0,3 t/m 100 m [22]

Bereikbaarheid: een laser hand afstandsmeter is goed te gebruiken vanaf een hoogte van 2 meter (verticale maat). Muurdammen zijn moeilijk te meten omdat er minimaal één uitstekend vlak nodig is om het signaal te laten reflecteren.

Kans op meetfouten: meetfouten kunnen ontstaan wanneer men de laser hand afstandsmeter niet horizontaal/ verticaal wordt gehouden. Ook kan men fouten maken met het aflezen en verwerken van de meetresultaten.

Weersinvloeden: bij het meten met een laser handafstandsmeter heeft men weinig last van weersinvloeden omdat men met een laser handafstandsmeter meestal binnen meet. Bij meetwerk buiten is de laserstraal bij bepaalde afstanden en ondergronden niet goed te zien. De kans op fouten wordt hierdoor vergroot, of er zal helemaal niet gewerkt kunnen worden.

6.2.5 Telescoopmaatlat

Type: NEDO mEsstronic

Nauwkeurigheid: ± 1 mm

Bereik: 1 t/m 5 m

Bereikbaarheid: de telescoopmaatlat is goed te gebruiken tot op een hoogte van 2 meter. Wanneer men boven deze 2 meter wil meten moeten er hulpmiddelen worden gebruikt (bijvoorbeeld een trap).

Kans op meetfouten: meetfouten kunnen ontstaan wanneer men de telescoopmaatlat niet horizontaal/ verticaal houdt. Ook kan men fouten maken met het aflezen en verwerken van de meetresultaten.

Weersinvloeden: geen last van weersinvloeden.

Specifieke eigenschappen: de telescoopmaatlat zal vrijwel alleen gebruikt worden voor het meten van hoogtes. Muurdammen en kleine muuropeningen zijn vrijwel niet te meten.

6.3 Conclusie

De theoretische precisie van bovenstaande meetmethoden zijn niet te vergelijken met elkaar. De 3D-laserscanner en tachymeter zijn goed in het meten van punten op lange afstanden en zijn minder goed in metingen op korte afstanden. Dit in tegenstelling tot metingen met de rolmaat, laser hand afstandmetingen en telescoopmaatlat. Ieder meetprobleem heeft dan ook zijn eigen oplossing.

De theoretisch meest nauwkeurige meetmethode is in de praktijk dan ook niet altijd de meest nauwkeurige. Bij de verschillende meetmethoden is de kans op menselijke fouten verschillend, die de nauwkeurigheid zal beïnvloeden. Kans op menselijke fouten bij metingen met de hand zijn zeer veel groter, waardoor een theoretisch minder nauwkeurige meetmethode uiteindelijk nauwkeuriger uit kan vallen. Aan de hand van een aantal proefprojecten gaan we dit testen.

7 Proefprojecten

7.1 Inleiding

De essentie van onze opdracht is het onderzoeken van de mogelijkheden voor meetwerk met behulp van de 3D-laserscanner. Naast de literatuuronderzoeken van het archiveren en de 3D-laserscanner, blijven er vragen over die we aan de hand van een drietal proefprojecten willen ophelderen.

De voorbereiding van de proefprojecten was het meest intensief. Er moest rekening worden gehouden met de beschikbaarheid van de scanners, de toegankelijkheid van de projectlocatie, onze eigen planning en die van het ingenieursbureau. Dikwijls is de planning veranderd vanwege deze factoren. Onvoorziene problemen bij een project in Rusland met de laserscanner van Ingenieursbureau Passe-Partout hebben ervoor gezorgd dat deze scanner gedurende twee maanden niet ingezet kan worden voor ons afstuderen. In samenwerking met Passe-Partout zijn we er toch in geslaagd een oplossing te vinden. Helaas hebben we geen mogelijkheid meer weten te vinden een ruimte in te scannen waarbij mensen van de RdMz aanwezig konden zijn. Wel hebben we twee prestigieuze projecten weten te scannen. Het exterieur van het Veemhuis te Rotterdam en het interieur van de Sin Janskerk te Gouda. Een derde proefproject, het inmeten van een beeld was reeds gedaan.

7.2 Definiëren doelen

Per project zal de nuttigheid van de laserscanner verschillen. Het ene project zal meer baat hebben bij een digitale scan terwijl het andere project vanwege zijn omvang genoeg heeft aan een meting met de hand. Door tijd, kosten, nauwkeurigheid en verwerking te vergelijken met een drietal proefprojecten verwachten we te weten welke methode wanneer het best toegepast kan worden.

8 Veemhuis (Rotterdam)

8.1 Inleiding

Ingenieursbureau Passe-Partout heeft in een eerder stadium contact gehad met bouwmaatschappij de BAM Nederland (contactpersoon J. Sluimer) over de mogelijkheid voor het inmeten van het Veemhuis met de 3D-laserscanner. Deze onderhandelingen zijn echter stil komen liggen doordat de gemeente en de monumentenzorg het plan van de architect niet hadden goedgekeurd. Inmiddels is de gemeente wel akkoord gegaan. Alleen monumentenzorg heeft nog enkele bezwaren die naar alle verwachting binnenkort verholpen kunnen worden.

Omdat de plannen stil hebben gelegen biedt dit voor ons de mogelijkheid om in alle rust onderzoek te verrichten naar de mogelijkheden voor het inmeten van het Veemhuis met de laserscanner. We hebben contact gelegd met Bam Nederland (dhr. J. Sluimer) die ons verder heeft begeleid door ons van de nodige informatie te voorzien en ons rond te leiden in het gebouw.

8.2 Omschrijving monument³

8.2.1 Inleiding

Hieronder ziet u de gegevens van het veemhuis.

Monumentnummer: 524321

Provincie: Zuid-Holland
Gemeente: Rotterdam

Plaatselijke aanduiding:

Plaats: Rotterdam
Straat: Lloydstraat
Huisnummers: 30NB001, 30MO001, 30MO002

Kadastrale aanduiding en tenaamstelling:

Kad. Gemeente: Delfshaven
Sectie: G
Nummer: 476

Soort recht: Recht van eigendom
Gerechtigde: Gemeente Rotterdam
Straat: Galvanistraat 15
Woonplaats: 3002 AN Rotterdam

Pakhuis 'St. Job', gebouwd in 1912-14 in Rationalistische stijl aan de westzijde van de toen net aangelegde St. Jobshaven (1908) in opdracht van de N.V. Blaauwhoedenveem (Amsterdam, Rotterdam, Antwerpen), naar ontwerp van de architecten J.J. Kanters en Fr. Eriksson. Zowel de grootte (een veeminrichting met een totale oppervlakte van 19.000 m² en een inhoud van 80.000 m³) als de constructie in gewapend beton met stalen kolommen was voor die tijd in Europa revolutionair.

Het zestig meter lange betonnen silogedeelte, dat zich oorspronkelijk aan de noordzijde in het verlengde van het pakhuis bevond, is in 1987 gesloopt ten behoeve van de bouw van een schakel- en transformatorstation van het N.V. Elektriciteitsbedrijf Zuid-Holland. De drie mobiele elektrische kranen op het dak van het pakhuis zijn niet meer aanwezig, de walkranen zijn vervangen door mobiele kranen en vorkhefrucks en het aantal (mobiele) elevatoren is teruggebracht van drie naar één. In 1952 werd op het noordelijke pakhuis (St. Job II) een dakopbouw gerealiseerd naar ontwerp van architectenbureau Ph. Kanters.

³ Bouwhistorisch opname (basirapport) Lloydstraat 30, Rotterdam Jobsveem, juni 2003, J.A. van der Hoeve en R. Stenvert.

8.2.2 Omschrijving

Pakhuis St. Job, op een rechthoekige plattegrond (130 meter lang en 25 meter diep) opgetrokken met een inwendige constructie van ijzeren kolommen met fundamenteën, wanden en balkons van gewapend beton, gefabriceerd door de Rotterdamse Cementsteenfabriek Van Waning & Co. De vloeren zijn van hout en rusten op houten binten.

Het in totaal twaalf vemen tellende pakhuis, door een brandmuur verdeeld in St. Job I en St. Job II, bestaat uit zes bouwlagen onder een plat dak. Aan de havenzijde bevinden zich op het dak acht hoge, met lood beklede (sheds) met luchtroosters. Het pakhuis heeft een totaal oppervlak van 19.000 m² en heeft vier trappenhuizen, waarvan er twee zijn uitgevoerd met een personenlift. De gevels bevatten betonnen lisenen en friezen en zijn boven een borstwering van donkerrode baksteen opgetrokken in gele baksteen met natuurstenen hoek- en sluitstenen, lateien en vensterdorpels. De licht getoogde rollagen boven de vensters zijn van donkerrode baksteen. De kozijnen van de vensters zijn van hout, gevat in een betonnen raamwerk. De laaddeuren aan de kadezijde zijn van staal, de hijsluiken aan de landzijde van hout. De vensters en deuren zijn voorzien van getoogde bovenlichten. Aan de landzijde lopen de rollagen van de vensters op de begane grond door in een kordonlijst. Tussen de begane grond en de eerste verdieping loopt een smal fries van siermetselwerk.

De voorgevel (aan de landzijde) is verbijzonderd door twee kleine puntgevels: boven de middelste pakhuistravee en boven de laaddeuren van de meest zuidelijke travee. De middelste travee is bovendien iets breder dan de overige traveeën. In het midden van deze travee wordt het pakhuis in tweeën gedeeld door een dikke brandmuur. Op de begane grond bevindt zich links in deze travee een eenvoudige deur geflankeerd door rechthoekige vensters met rechts hiernaast een vensterpartij met een breed venster geflankeerd door twee smalle vensters; alle met licht en getoogde bovenlichten. Deze middelste travee heeft op iedere verdieping een ijzeren balkon met een eenvoudige ijzeren balustrade. Het balkon is toegankelijk via twee smalle deuren geheel links en rechts van het balkon waartussen zich twee smalle vensters bevinden, eveneens met getoogde bovenlichten.

Op de begane grond bevinden zich tien brede, op rails verschuifbare, stalen laaddeuren, met aan weerszijde drie gekoppelde smalle vensters met getoogde bovenlichten. De meest zuidelijke travee is afwijkend geleed en heeft op de begane grond boven de borstwering drie grote rondboogvensters (oorspronkelijk waren dit de deuren) met rustica betonnen vensteromlijstingen. De meest noordelijke travee heeft een eenvoudige deur met bovenlicht en rechts hiervan een smal venster met bovenlicht. De erboven gelegen pakhuizen worden ontsloten door boven elkaar gelegen houten hijsluiken met stalen lateien en zijn per pakhuistravee voorzien van twee smalle, rechthoekige vensters met licht getoogde bovenlichten. De gevel wordt afgesloten door een geprofileerde houten daklijst met bakgoot op klossen en boven de pakhuisluiken stalen hijsbalken.

Aan de havenzijde heeft het pakhuis een vergelijkbare geleding als aan de landzijde, met per travee gekoppelde pakhuisdeuren, geflankeerd door twee smalle vensters met bovenlicht. Een groot verschil met de landzijde is dat hier op de eerste, tweede, derde en vierde verdieping de laadbalkons over de volle breedte doorlopen. De brede onderste twee laadbordessen hebben altenerende uistekende delen rustend op decoratief bewerkte betonnen consoles. De erboven gelegen laadbalkons zijn voorzien van een eenvoudige ijzeren reling. De begane grondverdieping heeft, conform de gevel aan de landzijde, per pakhuistravee een stalen, op rail verschuifbare, laaddeur geflankeerd door drie gekoppelde smalle vensters. Aan weerszijde van de vensterrollagen en boven de laaddeuren loopt een gemetselde kordonlijst. Boven het derde pakhuistravee (van links) is op een betonnen plaat 'St. Job II' te lezen en boven het vierde pakhuistravee (van rechts) 'St. Job I'. Het middelste, bredere pakhuis, waarin zich twee trappenhuizen bevinden, heeft op de begane grond links een dubbele deur met rechts een smal venster met bovenlicht, waarnaast een klein venster ter grootte van het bovenlicht. Deur en vensters zijn aan elkaar gekoppeld door een doorlopende betonnen kordonlijst. Boven de deur bevindt zich een breed driedelig venster met een smal venster ernaast.

Hiernaast op de begane grond een smalle deur met een hoog bovenlicht met rechts ernaast twee smalle vensters met bovenlichten. De bovenliggende verdiepingen in deze middentravee hebben links een dubbele laaddeur met rechts ernaast een smal venster en geheel rechts een smalle deur geflankeerd door twee smalle vensters. De meest zuidelijke travee had oorspronkelijk drie licht getoogde brede deuren, waarvan inmiddels de twee noordelijkste zijn dichtgemetseld.

De zuidelijke zijgevel is op één deur na vrijwel blind. De gevel is verticaal geleed door vijf hoge spaarvelden boven natuurstenen lateien. Bovenin de gevel staat in natuurstenen belettering:

‘N.V. BLAAUWHOEDENVEEM, AMSTERDAM ROTTERDAM ANTWERPEN’

8.2.3 Waardering

Pakhuis 'St. Job', in 1912-1914 gebouwd met gietijzeren kolommen en een gewapend betonnen constructie, van algemeen belang vanwege architectuurhistorische en innovatieve waarde, alsook van belang uit typologisch oogpunt als een van de eerste pakhuizen aan de St. Jobshaven. Het pakhuis bezit een grote ensemblewaarde en neemt bovendien een belangrijke positie in binnen het oeuvre van architect J.J. Kanters.

8.3 Randvoorwaarden Veehuis

Het Veehuis is een oud gebouw, daardoor zijn waarschijnlijk niet alle muuropeningen gelijk. De aannemer wil graag de exacte maat van de muuropeningen weten, zodat hij zijn kozijnmaat daarop af kan stemmen. Mocht het zo zijn dat de muuropeningen sterk verschillen, moet er misschien overwogen worden meerdere kozijnmaten te hanteren. Dit zal ook in detail door extra stelruimte kunnen worden opgelost.

De nauwkeurigheid van de scans en het inmeten, zijn daarbij van groot belang. In overleg met de aannemer hebben we de volgende eisen gesteld aan de opmetingen:

- De maximale afwijking van de muuropeningen ten opzichte van de werkelijkheid, mag maximaal **8** millimeter bedragen.

Om de metingen te kunnen controleren, moeten we wel weten wat de werkelijke maatvoering is van de muuropening. Hoe dit zo goed mogelijk wordt bepaald, is behandeld in hoofdstuk 4, precisie meetmethoden.



Figuur 25: Foto gevel Veehuis



Figuur 24: Scan gevel Veehuis

8.4 Meting

8.4.1 Algemeen

De conclusies voor dit project zeggen verder niet veel over andere projecten. Bij de metingen van het Veehuis ging het voornamelijk om de **maten van de gevelopeningen en niet om de positie van de gevelopeningen** ten opzichte van elkaar. Wanneer dit wel de vraag zou zijn geeft dit qua nauwkeurigheid heel andere resultaten. Dan zouden de tachymeter en de 3D-laserscanner beter scoren.

8.4.2 Voorbereidingen op de meting

Om onze meetdag optimaal te benutten hebben we in samenwerking met dhr. J. Putman een planning opgesteld voor de meting. We hebben een voorstel gedaan wat in te meten. De bedoeling was een kopgevel en aansluitend gedeelten van de zijgevels mee te nemen. Vanwege bouwactiviteiten en andere obstakels was dit echter niet goed mogelijk waardoor besloten is het midden travee in te scannen. Besloten is dit gedeelte van het gebouw op drie manieren in te scannen, van grof tot fijn. De opstelpunten voor het scannen hebben we in overleg met dhr. J. Putman in het werk bepaald.

8.4.3 Staat van het gebouw voor opmeting

Op het moment van inmeten waren er graafwerkzaamheden aan de gang voor de op te meten gevel voor de aanleg van nieuwe riolering. Hierdoor was het niet mogelijk de begane grond geheel in te scannen. De gevel is opgebouwd uit een vrij donkere steen die op bepaalde plaatsen vochtig is waardoor de laser niet goed reflecteert. Dit hindert de meting op enkele plaatsen.

8.4.4 De meting

De meting is uitgevoerd met de HDS2500.

Na aankomst hebben we de opstelpunten voor het inmeten vastgesteld (zie bijlage E1). Na het opstellen worden allereerst de referentieballen geplaatst en ingemeten. Om een goede koppeling te krijgen van de twee opstelpunten is het aan te raden met referentiepunten een driehoek te vormen. Door een referentie sticker op de gevel te plakken hebben we dit bereikt.

Na dit alles kan begonnen worden met de daadwerkelijke meting. Vooraf is besloten dat we de meting willen uitvoeren op drie manieren van fijn naar grof. We zijn begonnen met de meest fijne meting, dit houdt in dat er 4 scans gemaakt moeten worden. Bij deze meting is alleen het bovenste gedeelte van de gevel gescand.

Vervolgens is het zelfde gebied gescand met een minder nauwkeurige punt dichtheid. Hierbij volstonden eveneens 4 scans, maar dan voor de gehele gevel.

Als laatst de minst fijne scan, hiervoor was één scan voldoende voor het inmeten van de gehele gevel.



Figuur 26: Opstelling 1



Figuur 27: Opstelling 2

Na het inmeten van de referentiepunten met de tachymeter kan de scanner op zijn tweede opstelpunt geplaatst worden. Hierbij volgt dezelfde procedure als bij de eerste opstelling met eveneens het inmeten van de referentiepunten met de tachymeter. Het inmeten van de referentiepunten met de tachymeter wordt gedaan om voor een goede koppeling van de referentiepunten te zorgen, en dus een goede koppeling van de opstelpunten te krijgen.

De gevel is tevens opgemeten met de tachymeter. De opstelpunten zijn terug te vinden in bijlage D2. De gegevens van de meetresultaten zijn te vinden in bijlage E2.

8.5 Rapporteren bevindingen Veemhuis

8.5.1 Inleiding

Om een goede vergelijking te krijgen van de verschillende meetmethoden voor het project van het Veemhuis zullen we deze op de volgende punten toetsen:

- Tijd;
- Kosten;
- Nauwkeurigheid;
- Verwerking.

Vervolgens kunnen we een conclusie trekken uit de verkregen bevindingen.

Bij de onderstaande gegevens zijn we er vanuit gegaan dat de metingen zullen plaatsvinden op het moment dat de te meten maten toegankelijk zijn voor de verschillende meetmethoden. Steigerkosten en dergelijke zijn hierin dan ook niet verwerkt.

Om een heldere vergelijking te krijgen zijn reistijden, ploeguren enzovoorts eveneens niet meegenomen. Ditzelfde geldt voor instrumenten die alleen per hele of halve dagen ingezet kunnen worden.

8.5.2 Tijd

Hieronder is de tijd weergegeven die men per meetmethode nodig heeft om het door ons ingemeten geveldeel van het Veemhuis in te meten.

Onderstaande gegevens zijn verkregen na overleg met deskundigen werkzaam bij Ingenieursbureau Passe-Partout.

meetmethode	Tijd inmeten (uren)	bijzonderheden
Met de hand	16	Metten van ramen die te bereiken zijn
3D-laserscanner (grof)	1,5	Twee opstellingen, 1 x scannen per opstelling (2 scans)
3D-laserscanner (middel)	3	Twee opstellingen, 4 x scannen per opstelling (8 scans)
3D-laserscanner (fijn)	9	Twee opstellingen, 16 x scannen per opstelling (32 scans)
tachymeter	5,5	Ervaren meetploegen meten ± 800 punten per dag, wij hadden er 550

Tabel 3: Metingstijd per meetmethode

Bij het meten met de hand zijn veel plaatsen onbereikbaar, in bovenstaande vergelijking zijn we er vanuit gegaan dat er steigers aanwezig zijn. Wanneer dit niet het geval is, is het niet mogelijk dit object met de hand in te meten.

8.5.3 Kosten

Hieronder staan de kosten weergegeven die verbonden zijn aan de verschillende methoden van meten, en de kosten per meetmethode voor het inmeten van het geveldeel van het Veehuis. Deze kosten zijn afkomstig uit de praktijk.

meetmethode	Kosten meetploeg per dag (€)	Bijzonderheden
Met de hand	720	€ 45 / persoon / uur
3D-laserscanner	1.200	incl. surveyor (assistent € 200 / dag extra)
Tachymeter	600	incl. meetploeg (1 man)

Tabel 4: Kosten meetmethoden per dag

meetmethode	Tijd inmeten (uren)	Kosten huur (€)	Bijzonderheden
Met de hand	16	1.440	€ 45 / persoon / uur
3D-laserscanner (grof)	1,5	225	geen assistent nodig
3D-laserscanner (middel)	3	450	geen assistent nodig
3D-laserscanner (fijn)	9	1.350	geen assistent nodig
Tachymeter	5,5	412	incl. meetploeg (1 man)

Tabel 5: Kosten per meetmethode geveldeel Veehuis

8.5.4 Nauwkeurigheid

Per project zal de eis qua nauwkeurigheid anders zijn. Wanneer een project aangenomen wordt, is het van groot belang te weten welke nauwkeurigheid te halen is met welke methode. Aan de hand van dit project hebben we een 5-tal verschillende methoden onderzocht op de nauwkeurigheid. Hieronder is te vinden hoe we dit aangepakt hebben.

Wegingsfactor

Omdat een theoretische nauwkeurigheid in de praktijk nooit te behalen valt hebben we deze waarden herzien. Hierbij is rekening gehouden met onderdelen die de meting beïnvloeden. Met deze herziene waarde hebben we een wegingsfactor per meetmethode samengesteld. De berekening is opgenomen in bijlage E1.

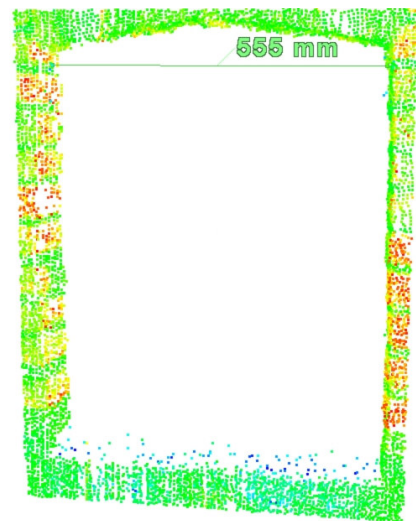
De wegingsfactor voor de verschillende meetinstrumenten zijn hieronder weergegeven:

Rolmaat	17
Laser hand afstandsmeter	16
Telescoop maatlat	14
Tachymeter	13
3D-laserscanner (1)	4,5
3D-laserscanner (2)	4,5

We hebben de laserscanner op twee verschillende manieren verwerkt. Dit houdt in dat de twee verschillende manieren van verwerken samen een wegingsfactor van negen hebben, dus beide vierenhalf.

Gewogen gemiddelde

Met de meetresultaten en de wegingsfactoren is het gewogen gemiddelde per meting te berekenen. De uitwerking hiervan is te vinden in bijlage E2.



Figuur 28: Meting in puntenwolk Cyclone

Gemiddelde afwijking en de standaardafwijking

Wanneer het gewogen gemiddelde per meting bekend is kan de afwijking per apparaat per meting berekend worden. Met deze gegevens en met de berekeningen van 5.1 kun je vervolgens de gemiddelde afwijking en de standaardafwijking bepalen. De uitwerking hiervan staan in bijlage E3. De resultaten zijn hieronder weergegeven.

Rolmaat	
-0,5 mm	Gemiddelde afwijking rolmaat ten opzichte van het gewogen gemiddelde
2,1 mm	Standaardafwijking rolmaat

Laser hand afstandsmeter	
0,9 mm	Gemiddelde afwijking laser hand afstandsmeter ten opzichte van het gewogen gemiddelde
3,0 mm	Standaardafwijking laser hand afstandsmeter

Telescoopmaatlat	
-0,5 mm	Gemiddelde afwijking telescoopmaatlat ten opzichte van het gewogen gemiddelde
2,4 mm	Standaardafwijking telescoopmaatlat

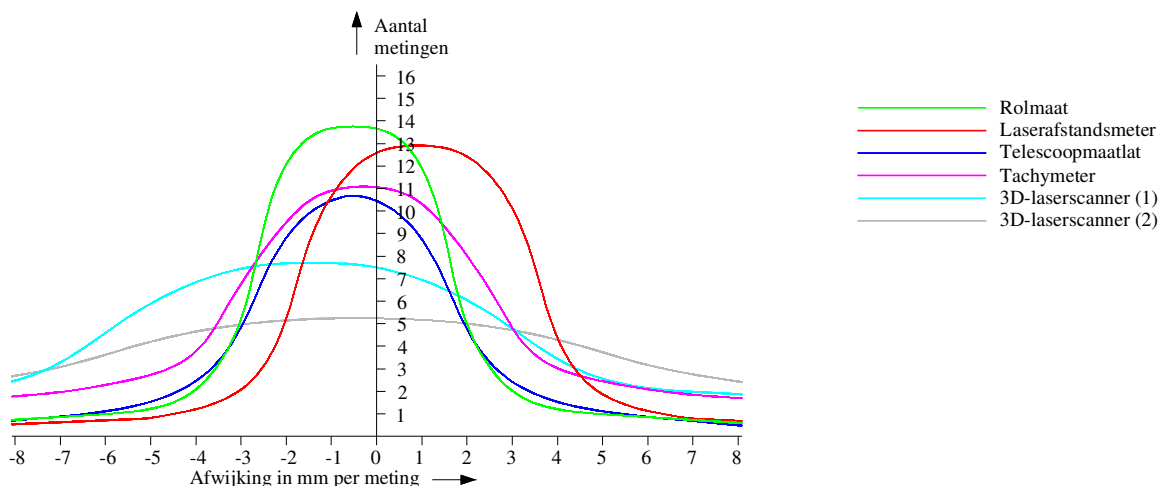
Tachymeter	
-0,3 mm	Gemiddelde afwijking tachymeter ten opzichte van het gewogen gemiddelde
3,5 mm	Standaardafwijking tachymeter

3D-laserscanner (1)	
1,4 mm	Gemiddelde afwijking 3D-laserscanner (1) ten opzichte van het gewogen gemiddelde
4,7 mm	Standaardafwijking 3D-laserscanner (1)

3D-laserscanner (2)	
-0,4 mm	Gemiddelde afwijking 3D-laserscanner (2) ten opzichte van het gewogen gemiddelde
5,7 mm	Standaardafwijking 3D-laserscanner (2)

Tabel 6: Gemiddelde afwijking en standaardafwijking per meetmethode

Om de betekenis van deze waarden wat overzichtelijker te maken hebben we van elke meetmethode een statistiekgrafiek opgesteld. Hieronder zijn de statistiekgrafieken van alle meetmethoden weergegeven.



Figuur 29: Statistiekgrafieken verschillende meetmethoden

Uit deze grafiek is af te leiden dat de metingen van de rolmaat en van de laser hand afstandsmeter de kleinste standaardafwijking hebben. Dit naar verwachting omdat deze twee methoden van meten theoretisch gezien het meest nauwkeurig zijn. In bijlage E4 staan de grafieken van alle meetmethoden afzonderlijk weergegeven.

8.5.5 Verwerking metingen

De uit de metingen verkregen data moet worden verwerkt om er bruikbare informatie uit te verkrijgen. **Iedere meetmethode heeft een sterk verschillende manier van verwerken van de informatie.** De tijd en dus ook de kosten die hiervoor gemaakt gaan worden zullen daarom ook sterk verschillen. Het uitgangspunt voor de verwerking is dat alle noodzakelijke gegevens in AutoCad moeten staan. In dit geval zijn dit voornamelijk de hoofdmaten van de gevelopeningen. Hieronder staat een overzicht van de tijd en de kosten die benodigd zijn voor de verwerking. De uitwerkingen zijn te vinden in bijlage D.

Onderstaande gegevens zijn verkregen na overleg met deskundigen werkzaam bij Ingenieursbureau Passe-Partout.

Meetmethode	Verwerkingstijd (uren)	Kosten / uur	Kosten totaal (€)
Met de hand	8	45	360
3D-laserscanner (1)	5	90	450
3D-laserscanner (2)	3	90	270
Tachymeter	2	45	90

Tabel 7: Kosten verwerkingstijd per meetmethode

Totaalkosten

Voor het 3D-laserscannen is de meting met de middelste nauwkeurigheid aangehouden omdat deze tijdens de verwerking voldoende punten bleek te bevatten. Met deze gegevens komen we op de volgende totaalkosten.

Meetmethode	Kosten meting (€)	Kosten verwerking (€)	Kosten totaal (€)
Met de hand	1.440	360	1.800
3D-laserscanner (1)	450	450	900
3D-laserscanner (2)	450	270	720
Tachymeter	412,50	90	502,50

Tabel 8: Totaalkosten per meetmethode

8.6 Conclusie

8.6.1 Nauwkeurigheid

Allereerst zullen we kijken of onze aanname van de theoretische waarde (zie bijlage E1) juist is geweest. Dit kan op de volgende wijze worden bepaald:

Wanneer we onze praktische standaardafwijking delen door de theoretische standaardafwijking krijgen we voor de verschillende meetmethoden de volgende uitkomsten:

<u>2,13 mm</u>	= 0,71	Rolmaat
3 mm		
<u>2,99 mm</u>	= 0,93	Laser hand afstandsmeter
3,2 mm		
<u>2,37 mm</u>	= 0,64	Telescoopmaatlat
3,7 mm		
<u>3,52 mm</u>	= 0,72	Tachymeter
4,9 mm		
<u>4,66 mm</u>	= 0,95	3D-laserscanner (1)
4,9 mm		
<u>5,72 mm</u>	= 0,81	3D-laserscanner (2)
7,1 mm		

De waarden zitten niet erg ver bij de één vandaan. Dit betekent dat de door ons theoretisch aangenomen standaardafwijkingen de praktische standaardafwijkingen onderbouwen. De theoretisch aangenomen standaardafwijkingen zijn steeds groter dan de uit de praktijk verkregen standaardafwijkingen. Dit geeft aan dat de meettechnieken in de praktijk nauwkeuriger blijken te zijn dan vooraf aangenomen.

De grenswaarden (deze liggen in ons geval op 5 procent) van de verschillende meettechnieken zijn te berekenen door de standaardafwijking te vermenigvuldigen met de standaardnormale (standaardnormale van 5 procent is 1,96). Hieronder zijn de grenswaarden te zien van de verschillende meettechnieken (voor de berekening zie E5):

- Rolmaat 4,2 mm
- Laser hand afstandsmeter 5,9 mm
- Telescoopmaatlat 4,7 mm
- Tachymeter 6,90 mm
- 3D-laserscanner (1) 9,14 mm
- 3D-laserscanner (2) 11,22 mm

Hieruit is af te leiden dat praktisch gezien alleen meten met de laserscanner niet binnen de gestelde grenswaarde van acht millimeter is gebleven. Dit hadden we van te voren van de laserscanner verwacht omdat onze theoretisch aangenomen grenswaarde ook boven de acht millimeter lag. Het meten met een tachymeter is onverwacht toch wel binnen de grenswaarde van acht millimeter gebleven.

Meten met de hand blijft het nauwkeurigste voor het meten van korte afstanden. Wanneer de onderlinge afstand van afzonderlijke punten bepaald dienen te worden is dit echter niet meer het geval. Hier zullen de tachymeter en de laserscanner behoorlijk beter scoren.

De zwakke schakel in het bepalen van maten met de laserscanner zit hem in de verwerking met de software en de nauwkeurigheid van de scan. Met andere of verbeterde software, zal de nauwkeurigheid van de 3D-laserscanner hoger worden. Ook neemt de nauwkeurigheid toe wanneer er met een fijner raster zal worden gescand, omdat het bepalen van de hoek dan nauwkeuriger is.

8.6.2 Kosten

De kosten voor de verschillende meetmethoden blijken anders te zijn dan we vooraf hadden gedacht. Een meting met de hand komt duurder uit dan die van de 3D-laserscanner. De tachymeter blijkt voor dit project de meest goedkope oplossing te zijn wat vooraf wel werd gedacht.

In de toekomst zal dit beeld zich nog verder aanpassen in het voordeel van de 3D-laserscanner. Scannen zal steeds goedkoper worden, terwijl metingen met de hand en met de tachymeter hetzelfde zullen blijven.

8.6.3 Algemeen

Bij deze meting is niets gedaan met de meerwaarde van de scan. De 3D-laserscanner heeft met een eenmalige meting het gehele object in kaart gebracht. Bij het meten met de hand en met de tachymeter bestaat de kans dat er punten vergeten zijn. Ook is de kans op menselijke fouten aanzienlijk kleiner bij het meten met een 3D-laserscanner.

In dit geval is er gemeten met de HDS2500, deze scanner is niet erg snel en daarom al verouderd ondanks dat de scanner slechts één jaar oud is. Wanneer er gemeten zou zijn met een laserscanner gebaseerd op het principe van faseverschil zou de meting vele malen sneller zijn verlopen. De gehele voorgevel (± 100 meter lang) zou in minder dan één dag tijd ingemeten kunnen worden.

9 Sint Janskerk te Gouda

9.1 Inleiding

Om zoveel mogelijk aspecten van de laserscanner mee te kunnen nemen, hebben we in tegenstelling tot het Veeenhuis gekozen tot het inmeten van een interieur. In overleg met dhr. P. Brinkman was gekozen voor het inmeten van de kantine van de RdMz. Hierbij ontstond de mogelijkheid voor het bijwonen van de meting voor mensen binnen de RdMz die hier interesse in hebben. Vanwege onvoorziene problemen moest deze meting verplaatst worden naar een latere datum. Deze nieuw gekozen datum was niet te combineren met de RdMz, waardoor we op zoek zijn gegaan naar een ander project.

Het nieuwe project zal ingemeten worden door twee verschillende scanners. De opvolger van de HDS2500, de HDS3000 van Leica en de iQsun 880 V4 van iQsolution. Gezocht moet dan ook worden naar een project waarbij deze scanners op een aantal punten goed te vergelijken zijn. Dit is te realiseren door te kiezen voor het meten van complexe vormen en structuren.

We hebben gezocht naar een prestigieus project, in de buurt van Gouda. Deze locatie is gekozen vanwege de ligging van Ingenieursbureau Passe-Partout. Na contact gezocht te hebben met de koster van de Sint Janskerk hebben we besloten een gedeelte van het interieur van deze kerk in te meten. Het interieur van de kerk heeft complexe vormen, waardoor de apparaten onderling goed te vergelijken zijn. De koster wilde graag mee helpen, en stelt de ruimte voor ons tot beschikking.

9.2 Omschrijving monument

9.2.1 Inleiding

Hieronder ziet u de gegevens van het Sint Janskerk.

Monumentnummer: 16722

Provincie: Zuid-Holland

Gemeente: Gouda

Plaatselijke aanduiding:

Plaats: Gouda

Straat: Achter de Kerk

Postcode: 2801 JW

Huisnummer: 1

Kadastrale aanduiding en tenaamstelling:

Kad. Gemeente: Gouda

Sectie: C

Nummer: 3476

9.2.2 Omschrijving

⁴Het huidige kerkgebouw dateert grotendeels van voor de brand van 1552. In 1593 werd een verbouwing voltooid, waarbij de St.-Jan de vorm kreeg van een kruisbasiliek. Dit is een kerkgebouw dat een kruisvorm heeft, terwijl het middenschip en het koor evenals de dwarsbeuk (het transept) boven de zijbeuken uitsteken. De kerk heeft houten tongewelven. Een dubbele rij dwarskappen sluit haaks aan op het hoofdgebouw. Door deze constructie konden de vensters bijna tot het dak worden opgetrokken., waardoor een prachtige ruimte- en lichtwerking ontstaan.



Figuur 31: Werktekening op carton

In het begin van de tachtigjarige oorlog koos de stad de kant van Prins Willem van Oranje en in 1573 werd de kerk toegewezen aan de protestanten. De Hervormde Gemeente beheert het kerkgebouw nog steeds. Tweemaal per zondag wordt er een kerkdienst gehouden. In de kerkvloer herinneren vele grafzerken aan de tijd dat er in de kerk werd begraven. Meestal waren dit gegoede burgers. Enkele zeer welgestelden lieten zelfs een grafkapel bouwen. In 1832 vond de laatste begrafenis plaats in de kerk. Het hoofdorgel werd van 1732-1736 gebouwd door orgelbouwer Jacob Francois Moreau; het koororgel van 1975 werd gebouwd door de fa. Leeftang te Apeldoorn. Het kostbare marmeren koorhek met de koperen stijlen dateert van 1782, naar een ontwerp van H.J. Otten Huslij. In de St.-Janstoren bevindt zich een carillon, dat voor een groot gedeelte afkomstig is uit de beroemde zeventien-eeuwse klokkengieterij van de gebroeders Hemony.

⁵Al verscheidene eeuwen is de Grote- of Sint-Janskerk het voornaamste monument van de stad Gouda. Vooral de gebrandschilderde ramen, de zogenaamde "Goudse Glazen", zijn wereldberoemd.

De Sint-Janskerk in Gouda is de enige kerk in de wereld waar zoveel prachtige zestiende eeuwse gebrandschilderde ramen bewaard zijn gebleven. De bouw en de afmetingen van de kerk bleken ook bijzonder gunstig. De 70 glazen beslaan in totaal een oppervlak van 1755 vierkante meters. Zij geven beelden uit een bewogen en belangrijke periode uit onze Vaderlandse en Europese geschiedenis. Ze werden geschonken spoedig na de brand van 1552, namelijk tussen 1565 en 1572. De "sponsors", vorsten, edelen en prelaten lieten zich in het beneden deel van het glas afbeelden, daarmee het volk tonend hoe goed, machtig en vroom zij waren. Zo staan of knielen hier Philips II en zijn vrouw Mary Tudor, Margaretha van Parma, bisschoppen, Gulden Vliesridders en oversten van de Johanniter Orde.

Na een onderbreking van ruim twintig jaar hebben de inmiddels overwegend protestantse bestuurders in Holland in een tiental jaren (1594-1603) de beglazing van de kerk voltooid. Schenkers zijn dan de Staten van Holland, het Hoogheemraadschap van Rijnland, en de vrije steden van Holland die een relatie met Gouda hadden.



Figuur 30: Glas in lood raam

Aan ontwerp en uitvoering van de Glazen hebben vele beroemde glazeniers gewerkt. De bekendste onder hen zijn Dirck en Wouter Crabeth. De oorspronkelijke werktekeningen op ware grootte, de zogenaamde 'cartons', zijn vrijwel alle bewaard gebleven; de kunsthistorische waarde ervan is groot. Zij vormden ook ruim vier eeuwen de grondslag aan de hand waarvan de Glazen konden worden gerestaureerd. De laatste grote restauratie vond plaats tussen 1899 en 1936. In de jaren 1984-1989 vond een bijzondere conservering plaats, waarbij alle Glazen aan de buitenzijde van een extra beschermend glas werden voorzien.

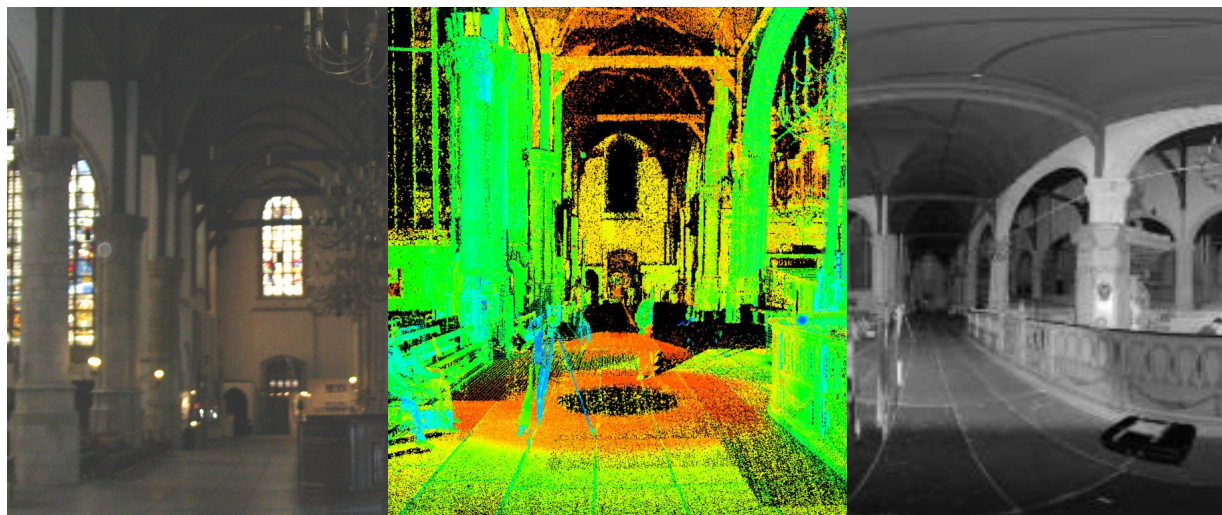
⁴ Citaat uit: www.sintjan.com

⁵ Citaat uit: <http://people.zeelandnet.nl/acoomers/gouda.htm>

9.2.3 Waardering

Omschrijving⁶

GROTE OF ST. JANSKERK (Ned.Herv.) Zeer grote, laat-gotische KRUISBASILIEK. Koor 1485-1510; overige herbouwd na brand in 1552 onder leiding van de bouwmeester Cornelis Frederikszn. Onderbouw toren (XIV(?), zandstenen bovenbouw na 1552, bekroning vernieuwd midden XVII. Tegen de oostelijke vijf zijbeuktraveeën diepe kapellen met puntgevels, welke laatst ook voorkomen aan de kooromgang. Inwendig zuilen met halfronde scheibogen (in de absis spitsbogig) en houten tongewelven. Gebrandschilderde ramen (XVI en XVII o.a. van de gebroeders Dirk en Wouter Crabeth), koorhek (marmer en koper J. Moreau 1736), kansel, doophek en banken Lod. XVI. Orgel met hoofdwerk. Bovenwerk. Rugwerk en vrij pedaal, in 1736 gemaakt door J.F. Moreau. In 1839 ingrijpend verbouwd door N.A. Lohman en Zoon en in 1893 door J.F. Witte. In 1983 gerestaureerd door Leeftang Orgelbouw. Klokkenspel, waarvan 16 klokken gegoten door Pieter Hemony, 1675/76 en de ondergenoemde luidklok van H. Wegewaert, diameter 174,5 cm, die eveneens als beiaard klok dienst doet. Klokkenspel met gelui bestaande uit vier klokken van H. Wegewaert, 1605, diameter respectievelijk 174,5 cm, 149,5 cm, 124,2 cm en 118 cm. Speeltrommel uit 1691 gemaakt door Frederik van den Berg. Op de toren staat een roodkoperen zuidwijzer.



Figuur 32: Foto, scan in Cyclone en scan in iQscene

9.3 Randvoorwaarden

9.3.1 Nauwkeurigheidsseis

Aan dit project is niet direct een nauwkeurigheidsseis gesteld. Het project is ingemeten met twee verschillende laserscanners. Eén op basis van time-of-flight, de ander op basis van faseverschil. Faseverschil is volgens onze literatuurstudie minder nauwkeurig op lange afstanden. Door de data van beide scanners te vergelijken, is dit te controleren.

Daarnaast zijn er een aantal maten met de tachymeter genomen, zodat beide scanners ook met de tachymeter te vergelijken zijn.

⁶ Uittreksel uit de Objecten Data Bank van de RdMz; juni 2004

9.4 Metingen

9.4.1 Inleiding

De Sint Janskerk is ingemeten met twee verschillende typen scanners, te weten:

- iQsun 880 V4
- HDS 3000

In de bijlagen zijn de verschillende systemen beschreven. Het grote verschil tussen beide scanners zit hem in de methode van afstandsmeting. De iQsun heeft een hele snelle scantijd, maar is minder nauwkeurig op langere afstanden ten op zichten van de HDS 3000.

Ingenieursbureau Passe-Partout wil op de hoogte blijven van de ontwikkelingen op het gebied van laserscannen. In dit kader worden presentaties / demo's gegeven met nieuwe apparatuur. Het meten van de kerk hebben we weten te koppelen aan de presentaties / demo's van deze nieuwe scanners.

9.4.2 Voorbereiding op de meting

Als voorbereiding op de meting hebben we een bezoek gebracht aan de kerk om een geschikte plek uit te zoeken voor de opstelling van de laserscanner. De koster deed ons mee dat er op de dag van het scannen ook mensen van de gemeente aanwezig zouden zijn. De kolommen van de kerk zijn 14 jaar geleden ingemeten, en worden die dag opnieuw ingemeten om de verzakking van de kerk in de gaten te houden. Hierbij zou een filmploeg aanwezig zijn. We hebben contact opgenomen met de gemeente en met de meetploeg om te voorkomen dat we elkaar ter plaatse niet in de weg zouden lopen.

9.4.3 Staat van het interieur voor de meting

De vaste inrichting van de kerk hinderde de meting enigszins, dit is opgelost door het kiezen van een aantal opstelplaatsen. De opstelplaats voor het scannen was niet toegankelijk voor het publiek, wat de ruis tot een minimum heeft gereduceerd.

9.4.4 Meting HDS3000

De HDS3000 is het vervolgtype van de HDS2500 waar eerder het Veemhuis mee ingemeten is. Groot voordeel van dit nieuwe type scanner is dat deze 360 graden in het horizontale en 270 graden in het verticale vlak kan scannen. Alleen een gebied van 90 graden onder de scanner kan niet gescand worden. Deze nieuwe mogelijkheid is uitermate geschikt voor het inmeten van een interieur. Een andere nieuwe techniek maakt het mogelijk om te fotodraperen.

Als opstelpunt voor de laserscanner hebben we gekozen voor een positie voor de preekstoel in het midden van de kerk. Het opstelpunt is te vinden in bijlage F1. De meting verliep niet geheel foutloos. De scanner die Dhr. I. Farrar (vertegenwoordiger Leica) bij zich had was het derde geproduceerde model. Daarom hadden we hier niet te maken met een geoptimaliseerde versie. Door een nog onbekende reden liep de scanner na een gedeelte gescand te hebben steeds vast. Na een aantal keer opnieuw opgestart te hebben, is $\frac{3}{4}$ van 360 graden ingescand. Het is maar de vraag of er met deze scan goed gewerkt kan worden. De digitale camera waarmee fotodraperen mogelijk wordt gemaakt werkte eveneens niet, hier hebben we dan ook geen demonstratie van gezien.



Figuur 33: Opstelling HDS3000

Gedurende de meting zijn we geïnterviewd door een journalist van de Goudse Courant. Er zijn een paar foto's genomen, en we hebben kort verteld waar we mee bezig zijn, en de mogelijkheden van laserscannen aangegeven. Het interview is echter nog niet gepubliceerd.

9.4.5 Meting iQsun 880 V4

De iQsun is een scanner die werkt op het principe van faseverschil. Zoals in hoofdstuk 3.2.3 staat aangegeven zijn deze scanners vele malen sneller dan een scanner die werkt op het time-of-flight principe. De iQsun meet 240.000 punten per seconde terwijl de HDS3000 er 1000 meet. Dit betekent dat de iQsun veel minder tijd nodig heeft om een object in te meten. De scanner heeft een bereik van 360 graden in het horizontale en 310 graden in het verticale vlak. Het bereik van deze scanner is 78 meter. De nauwkeurigheid neemt hard af naar mate de afstand groter wordt. De maximale afwijking is twee tot vijf millimeter, afhankelijk van de afstand waarvandaan gemeten wordt.

De vertegenwoordigers van iQvolution dhr. O. Bückler en dhr. R. Simon begonnen de demonstratie met een presentatie over de iQsun. Hier werd met behulp van PowerPoint verteld welke projecten er onder andere gedaan zijn met de iQsun. Hierbij was gelegenheid tot het stellen van vragen.



Figuur 34: Opstelling iQsun 880 V4

Omdat de iQsun erg snel meet, hadden we de mogelijkheid om vanuit meerdere plaatsen te scannen (zie bijlage F3). Hiervoor zijn eerst een aantal koppelpunten in de kerk worden geplaatst. Hiervoor zijn vier plastic bollen en zeven papieren koppelcirkels gebruikt. Na het plaatsen van de paspunten kan begonnen worden met het scannen. De scanner wordt op het statief geplaatst en globaal waterpas gesteld. Het te scannen gebied en de gewenste resolutie werd aangegeven en de scanner begon met scannen. Nadat de eerste scan was voltooid, kon het resultaat op de laptop worden bekeken. Het resultaat leek op een digitale zwart-wit foto 360 graden in het rond. Dit zelfde proces is bij de volgende drie opstellingen herhaald.

Op kantoor zijn de koppelpunten in de scans aangegeven, waardoor de verschillende scans tot één geheel gevormd zijn. De vier scans zijn op deze manier in één coördinatenstelsel komen te liggen.

9.4.6 Meting Tachymeter

Ter controle van de meting heeft E. Groenendijk (landmeetkundige) aardig wat herkenbare punten in de kerk met een tachymeter ingemeten. Dit om de nauwkeurigheid van de andere twee scanners te controleren. Ook de koppelpunten van de meting met de iQsun zijn ingemeten zodat de twee metingen in een CAD model vergeleken kunnen worden.

9.5 Rapporteren bevindingen

9.5.1 Inleiding

Ook dit project zullen we weer op de volgende punten gaan toetsen voor de verschillende meetmethoden:

- Tijd;
- Kosten;
- Nauwkeurigheid;
- Verwerking.

Uit de verkregen gegevens kunnen we dan conclusies gaan trekken.

9.5.2 Tijd

In de onderstaande tabel is te zien hoeveel tijd er nodig is voor een enkele opstelling bij het meten van 32 miljoen punten.

De gegevens zijn gebaseerd op de ervaringen van de metingen in de kerk.

meetmethode	Tijd inmeten (uren)	bijzonderheden
HDS3000	8,89	Zuivere meettijd
iQsun 880 V4	0,045	Zuivere meettijd

Tabel 9: zuivere meettijd per scanner

Wel moet er nog rekening worden gehouden met een half uur voor het opstellen van de laserscanners.

9.5.3 Kosten

Hieronder zijn de kosten voor een enkele dag meten weergegeven. We zijn er hierbij vanuit gegaan dat de meetkosten voor het meten met de iQsun 880 V4 per dag evenveel kost als het meten met de HDS3000. De scanners zijn ongeveer even oud en liggen in dezelfde prijsklasse.

meetmethode	Kosten meetploeg per dag (€)	Bijzonderheden
HDS3000	1.200	incl. surveyor (assistent € 200 / dag extra)
iQsun 880 V4	1.200	incl. surveyor (assistent € 200 / dag extra)

Tabel 10: Kosten per scanner per dag

De kosten die gemaakt worden bij het maken van een enkele scan die 32 miljoen punten bevat brengt voor de verschillende scanners de volgende kosten met zich mee.

meetmethode	Tijd inmeten (uren)	Kosten scannen (€)	Bijzonderheden
HDS3000	9,39	1408,50	geen assistent nodig
iQsun 880 V4	0,545	81,75	geen assistent nodig

Tabel 11: Kosten enkele meting per scanner

9.5.4 Nauwkeurigheid

Het is van groot belang te weten hoe nauwkeurig de verschillende scanners zijn. Om de nauwkeurigheid te meten heeft men een absolute maat nodig om de meting mee te vergelijken. Dit is onmogelijk, daarom hebben wij ervoor gekozen om een nauwkeurige meting met een tachymeter te doen waarmee we de scan van de iQsun kunnen vergelijken. We gaan er gemakshalve dus vanuit dat de meting met de tachymeter de absolute maat is.

Omdat de meting met de HDS3000 mislukt is hebben we hiervoor geen gegevens waarmee we de nauwkeurigheid van de scanner kunnen controleren. We gaan ervan uit dat de HDS3000 eenzelfde nauwkeurigheid heeft als zijn voorganger de HDS2500 omdat de specificaties van beide scanners ongeveer hetzelfde zijn en er gebruik wordt gemaakt van dezelfde techniek. Voor de nauwkeurigheid van de HDS3000 verwijzen we dan ook naar de nauwkeurigheidstest van de HDS2500 uit hoofdstuk 8.4.4..

Hieronder ziet u de nauwkeurigheid van de iQsun in vergelijking met een reflectorloze tachymeter op afstanden binnen de twintig meter:

Meetmethode	Meting 1 (mm)	Meting 2 (mm)	Meting 3 (mm)	Meting 4 (mm)	Meting 5 (mm)	Meting 6 (mm)	Meting 7 (mm)	Meting 8 (mm)
Tachymeter (Sokkia SET2030R3)	9885	9698	8788	9676	9491	9799	9704	8975
Laserscanner (iQsun 880 V4)	9890	9689	8787	9670	9490	9791	9711	8972
Vershil (mm)	5	9	1	6	1	8	7	3

Tabel 12: Vergelijking resultaten meting binnen 20 meter

Hieruit blijkt dat de metingen binnen de centimeter van elkaar blijven. Omdat de reflectorloze meting ook niet de exacte maat is en toch nog een behoorlijke standaardafwijking heeft zoals blijkt uit het proefproject van het Veemhuis, zal de nauwkeurigheid van de iQsun waarschijnlijk nog beter zijn dan in de bovenstaande tabel is berekend.

Omdat de nauwkeurigheid van faseverschil scanners afneemt naarmate de afstand groter wordt zullen we ook enkele metingen boven de twintig meter vergelijken met de meting van de reflectorloze tachymeter. De resultaten kunt u zien in de onderstaande tabel:

Afstand	± 30 meter				± 40 meter			
Meetmethode	Meting 1 (mm)	Meting 2 (mm)	Meting 3 (mm)	Meting 4 (mm)	Meting 5 (mm)	Meting 6 (mm)	Meting 7 (mm)	Meting 8 (mm)
Tachymeter (Sokkia SET2030R3)	8039	10433	6948	16575	19336	19201	46643	48003
Laserscanner (iQsun 880 V4)	8031	10450	6946	16557	19334	19182	46655	48004
Vershil (mm)	8	17	2	18	2	19	12	1

Tabel 13: Vergelijking resultaten meting van 30 tot 40 meter

Hierbij zie je dat de verschillen van de metingen al toenemen tot bijna twee centimeter. Dit geeft toch duidelijk aan dat de nauwkeurigheid van de iQsun naarmate de afstand groter wordt afneemt. Wel zijn de afwijkingen in werkelijkheid waarschijnlijk minder groot omdat de contactloze meting met de tachymeter ook niet optimaal is.

Omdat we toch graag de exacte nauwkeurigheid van de iQsun wilde weten tot twintig meter hebben we een aantal onderdelen in de kerk met de hand nagemeten. Hieronder zijn hiervan de verschillen te zien:

Afstand	± 5 meter				± 10 meter			
Meetmethode	Meting 1 (mm)	Meting 2 (mm)	Meting 3 (mm)	Meting 4 (mm)	Meting 5 (mm)	Meting 6 (mm)	Meting 7 (mm)	Meting 8 (mm)
Handmatig (rolmaat)	2198	2201	2197	2203	2197	2193	2203	2188
Laserscanner (iQsun 880 V4)	2195	2199	2200	2208	2202	2206	2202	2200
Vershil (mm)	3	2	3	5	5	13	1	12

Tabel 14: Vergelijking resultaten meting binnen 10 meter

Afstand	± 15 meter				± 20 meter			
Meetmethode	Meting 1 (mm)	Meting 2 (mm)	Meting 3 (mm)	Meting 4 (mm)	Meting 5 (mm)	Meting 6 (mm)	Meting 7 (mm)	Meting 8 (mm)
Handmatig (rolmaat)	2219	2216	2211	2218	2213	2227	2224	2231
Laserscanner (iQsun 880 V4)	2215	2220	2222	2227	2225	2230	2230	2236
Vershil (mm)	4	4	11	9	12	3	6	5

Tabel 15: Vergelijking resultaten meting van 10 tot 20 meter

In de meeste gevallen blijft het verschil tussen de twee meetmethoden binnen de vijf millimeter. De reden dat dit verschil een enkele keer hoger uitpakt dan deze vijf millimeter is doordat er een te lage scanresolutie is gekozen. Hoe groter de afstand des te verder de puntjes uit elkaar liggen. Er moet tussen de puntjes worden gemeten waardoor er op grotere afstanden eerder fouten kunnen ontstaan. Waarschijnlijk waren alle metingen binnen de vijf millimeter gebleven wanneer er een hogere scanresolutie zou zijn toegepast.

9.5.5 Verwerking

De bestudering van de software om de meetgegevens te verwerken neemt te veel tijd in beslag. Hier hebben we ons dan ook niet verder in verdiept.

In bijlage F hebben we enkele beelden van de puntenwolken van de verschillende verwerkingssoftware geplaatst. We verwachten dat het verwerken van de meetgegevens voor beide scanners een behoorlijk tijdrovende bezigheid zal zijn, met name wanneer men wil gaan modelleren. IQvolution heeft hier een alternatieve oplossing voor bedacht. Zij hebben een bureau opgestart in Bulgarije waar ze mensen hebben getraind om met de verwerkingssoftware te werken. Het uurloon ligt in Bulgarije dermate laag dat hier uiteindelijk behoorlijke kosten mee worden bespaard.

9.6 Conclusie

9.6.1 Nauwkeurigheid

Binnen de twintig meter is de iQsun behoorlijk nauwkeurig ondanks dat het gekozen raster bij dit project niet extreem fijn is. Gemeten punten buiten deze twintig meter kunnen eenvoudig uit de scan worden verwijderd waardoor de minder nauwkeurige punten uit de scans kunnen worden gefilterd. De verschillende scans kunnen later in één model worden gezet door de ingemeten referentiepunten aan elkaar te koppelen.

De nauwkeurigheid van de meetresultaten zal ook nog sterk afhankelijk zijn van de kwaliteit van het verwerkingsprogramma. Het verwerken van de scans is momenteel nog niet gemakkelijk en daarom kunnen hier fouten in de meting door ontstaan. Hier zal in de toekomst dan ook naar verbetering moeten worden gezocht.

9.6.2 Kosten

De snelheid van een laserscanner die berust op de techniek van het faseverschil ligt vele malen hoger dan een meting met een rangingscanner. Een enkele scan zoals wij die maakten met de iQsun nam minder dan drie minuten in beslag, terwijl een rangingscanner hier meer dan een dag over zou doen. Voor een exacte meting van de kerk zijn minimaal vijftien scanopstellingen nodig. Dit zou betekenen dat de HDS3000 meer dan vijftien werkdagen nodig heeft om de gehele kerk in te meten, terwijl de iQsun deze klus in minder dan een dag kan klaren. Dit zal een dermate hoog verschil in kosten met zich mee brengen dat het meten met een faseverschilscanner bij projecten als deze zeker de toekomst heeft.

9.6.3 Algemeen

Jammer genoeg hebben we tijdens de presentatie van de HDS3000 het fotodraperen niet kunnen zien. Deze optie maakt de puntenwolken zeker beter te verwerken doordat de ingemeten punten de kleur van het object krijgen. De scanresultaten van de iQsun zien er in feite uit als een 3D 360 graden zwartwit foto. Ook deze scan is dus goed te verwerken in het softwareprogramma iQscene van iQvolutions, door de overzichtelijke visualisatie.



Figuur 35: 360 graden scan in iQscene

10 Proefproject beeld

10.1 Inleiding

Na een interview te hebben afgenomen bij de RdMz, is ons duidelijk geworden dat vanuit de RdMz de toepassingen van de laserscanner zich momenteel vooral zullen richten op ornamenten. Hierin zitten rondingen die op een andere methode niet goed op te meten zijn. Na overleg met dhr. J. Putman van Ingenieursbureau Passe-Partout zijn we er achter gekomen dat er al een dergelijke meting is verricht, ingemeten door R. Hoddenbach en W. Waggeveld als proefproject voor hun afstuderen.

10.1.1 Omschrijving

Het gaat hier om een replica van één van de terracotta beelden gevonden in Xi'an. Deze beelden zijn gemaakt in opdracht van de keizer van Qin, Qin Shi Huangdi, die van 221 tot 206 voor Christus regeerde. Deze Keizer geloofde in een hiernamaals waarin hij een strijdmacht nodig zou hebben om zichzelf te beschermen. Daarom heeft hij meer dan 7000 levensgrote beelden laten maken van terracotta. Er bestaan beelden van soldaten, boogschutters, generaals en paarden. Ook zijn er restanten gevonden van koetsen en strijdagens. Het bijzondere van deze beelden is dat geen enkel beeld hetzelfde is, ieder gezicht is anders.

Het door ons gescande beeld is een replica van een generaal van het terracotta leger van Qin.



Figuur 36: Terracotta army in Xi'an

10.2 Meting

10.2.1 De meting

De meting is uitgevoerd met de HDS2500 en bestond uit vier opstellingen, van voor, van achter, en van beide zijanten. Ook zijn er vier referentieballen ingemeten om de verschillende scans te kunnen koppelen.

Er is met verschillende nauwkeurigheden gescand. Het gezicht van het beeld is gedetailleerder en is daarom gescand met een hogere scanresolutie. Het beeld als geheel is gescand met een puntafstand van één millimeter op het beeld. Het gezicht is vervolgens nog eens ingemeten met een resolutie van een halve millimeter.

10.3 Bevindingen

10.3.1 Inleiding

Bij de meting van het beeld was het niet zo zeer van belang wat de kosten zouden zijn van een dergelijke meting. Wij wilden uit dit proefproject te weten komen of de meetgegevens geschikt zijn voor archivering en modellering. Daarom zullen we geen tijd en kosten behandelen voor dit proefproject.

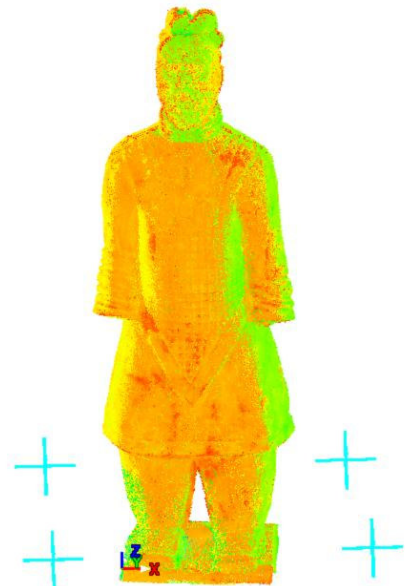
10.3.2 Nauwkeurigheid

Omdat er gemeten is met de HDS2500 (een long range scanner) is de nauwkeurigheid van de afstandsmeting niet optimaal. Hier kan een verschil in zitten van ongeveer vier millimeter. Dit geeft behoorlijke golven in oppervlakten van het beeld. Dit zal problemen geven wanneer men wil gaan modelleren.

Wij hebben enkele doorsneden gemaakt van de scan. Hierbij zet het Cyclone programma lijnen tussen de punten op een van te voren bepaalde doorsnede hoogte. De lijnen die hieruit worden gegenereerd zijn erg golvend door de relatief onnauwkeurige afstandsmeter van de scanner. Deze doorsneden zijn terug te vinden in bijlage G.



Figuur 38: Scanopstelling



Figuur 37: Puntenwolk Cyclone

10.3.3 Verwerking

Voor de verwerking van een dergelijke scan tot een 3D-model zijn er verschillende software programma's beschikbaar. Zelf zijn we niet bezig geweest om ons in het verwerkingsproces te verdiepen. Dit zou een te tijdrovende bezigheid zijn geweest. We weten wel al te vertellen dat het modelleren van een dergelijke scan een tijdrovende klus is. Ook weten we dat de meetgegevens niet geschikt zijn om een goede modellering te maken omdat de afstandsmeting van de scanner te veel afwijkt. Wanneer men een nauwkeurig 3D-model van een gedetailleerd beeld wil hebben zal er voor een andere scanner moeten worden gekozen. In bijlage G zijn verschillende scanafbeeldingen te vinden.

De volgende softwareprogramma's kunnen worden gebruikt voor de verwerking van een scan:

- PolyWorks
- QT Sculptor
- Reconstructor / Surveyor
- Pointcloud

10.4 Conclusie

Omdat de meting is uitgevoerd met een zogenaamde long range scanner is de nauwkeurigheid van de meting niet voldoende om goed te kunnen modelleren. De vlakkere oppervlakten zijn wel te doen maar wanneer er gedetailleerde onderdelen worden gemodelleerd komt men in de problemen.

Hiervoor is een nauwkeurigere scan nodig met bijvoorbeeld een triangulatiescanner van Mensi, de S10 en de S25. Deze scanners hebben respectievelijk een afstandsmeting nauwkeurigheid van 0,21 en 0,60 millimeter. Ook hebben deze scanners een kleine puntgrootte van de laser waardoor een fijn raster kan worden gekozen. Bij een dergelijke scan zal het daarom mogelijk zijn om zeer gedetailleerde vormen te modelleren met een hoge nauwkeurigheid.

Een dergelijke 3D-laserscanner is dan ook zeker toepasbaar voor het archiveren van archeologische beelden. Ook zou een scanner als deze goed kunnen worden toegepast in de restauratie wanneer men ornamenten van een bouwwerk wil meten of archiveren.

11 Punten voor nader onderzoek

11.1 Schade door laserscannen

Laserstralen kunnen schade aanrichten wanneer een interieur of iets dergelijks ingemeten moet worden met oud behang, muurschilderingen enz. Afhankelijk van de sterkte van de laserstraal zal het in te meten object kunnen beschadigen. Potentiële schade is afhankelijk van de sterkte van de laser. De HDS2500 heeft een klasse III laser. Dit houdt in dat de laser na reflectie op een niet-spiegelend oppervlak toch nog voldoende energie terugkaatst om schadelijk te zijn voor het oog. Hierbij moet niet vergeten worden dat de laser een zeer korte tijd 1/1000 van een seconde op één plaatst richt. Naar ons weten is nog geen onderzoek verricht naar eventuele aan te richten schade, en deze zal vanwege de complexiteit ook niet meegenomen worden in ons verslag. Het is echter wel degelijk van belang hierover meer te weten te komen. Een onderzoek hiernaar zal hier meer duidelijkheid over kunnen geven.

11.2 Archiveren digitaal / papier?

Tot vandaag aan toe wordt bij de RdMz alles gearcheveerd op papier. Waarom wordt dit gedaan? Alles is immers digitaal beschikbaar, tekst, foto's en tekeningen. Wanneer de 3D-laserscanner gebruikt zal worden bij inmetingen, zal de scan digitaal gearcheveerd moeten worden om ten allen tijden extra informatie uit de scan te kunnen halen. Die extra informatie is juist het voordeel van een 3D-laserscanner.

11.3 Mogelijkheden fotodraperen

Fotodraperen is een nieuwe mogelijkheid om een digitale scan te koppelen aan een digitale foto. Hieronder is een voorbeeld te zien van een demonstratie scan (HDS3000) die gekoppeld is aan een foto. Over deze methode is zeer weinig bekend, onderzoek hiernaar zou zeer interessant zijn.



Figuur 39: Scan HDS3000 gekoppeld aan digitale foto's (fotodrapage)

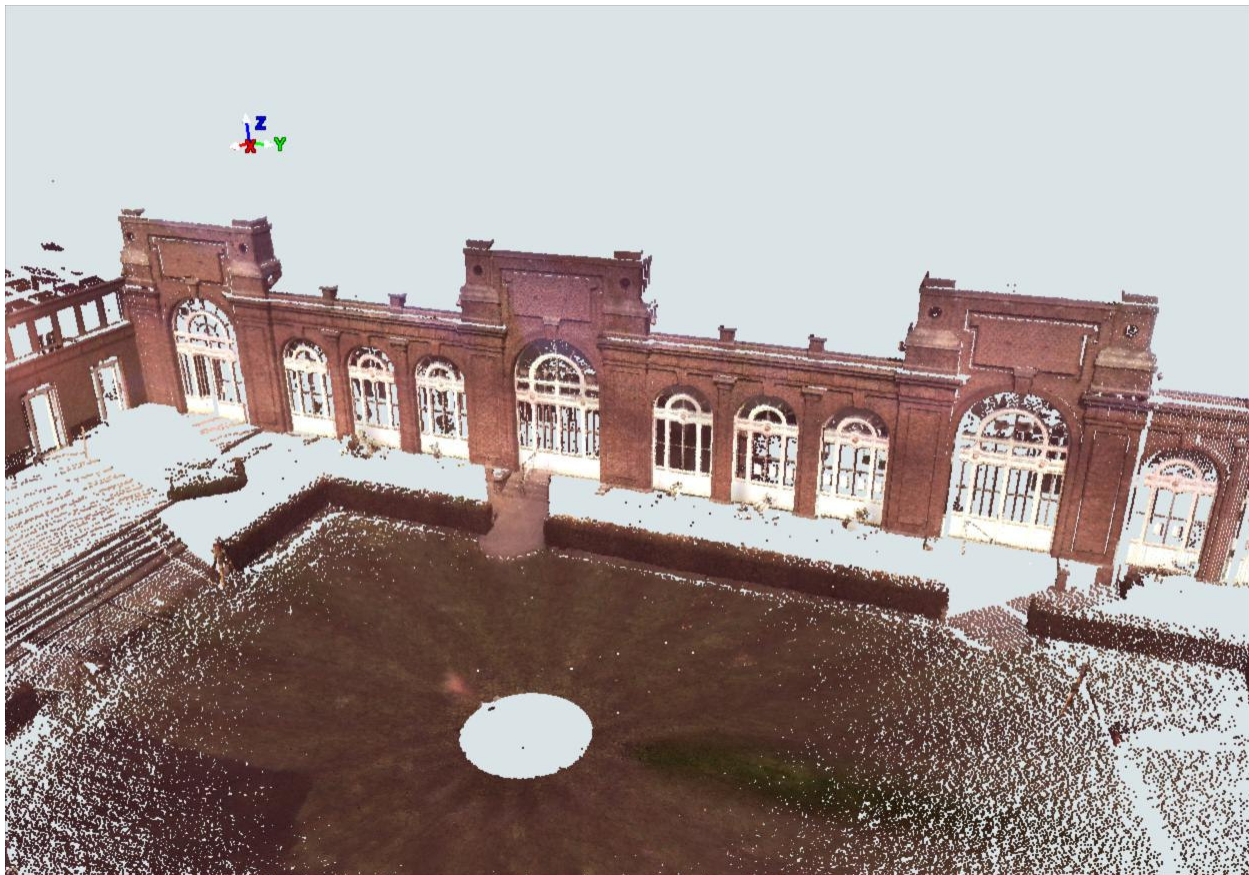
12 Toekomst visie

12.1 Fotodraperen

Als er gebruik wordt gemaakt van een digitale camera met een hoge resolutie is het mogelijk om 3D fotorealistische modellen te creëren. Dit gebeurt door de afbeelding te projecteren op het object. De ingemeten punten krijgen de kleur van de pixels op die positie in de foto. Op deze wijze worden er 3D pixels gecreëerd waardoor men een 3D foto als eindresultaat krijgt.

Er is software beschikbaar waarmee de afbeeldingen geprojecteerd kunnen worden op de meting door gebruik te maken van identieke punten, deze methode is ontwikkeld vanuit een ander perspectief dan de fotogrammetrie. Het resultaat is sneller en geometrisch nauwkeuriger dan wanneer er gebruik wordt gemaakt van fotogrammetrische technieken. Het maken van een fotorealistisch 3D-object is zeer gecompliceerd.

Met deze techniek kunnen niet alleen de gegevens gemakkelijker worden verwerkt, men krijgt er ook prachtig presentatiemateriaal van. Het is van belang dat de techniek verder wordt ontwikkeld zodat het eenvoudiger is om een fotorealistisch 3D-object te creëren. Met een fotorealistisch 3D-object is de realiteit digitaal op een zeer hoog niveau te beleven, wat de 3D-laserscanner als meetmethode een meerwaarde geeft.



Figuur 40: Scan HDS3000 gekoppeld aan digitale foto's (fotodrapage)

12.2 Kosten laserscannen

De kosten van het laserscannen zijn op dit moment te vergelijken met die van fotogrammetrie, en dus aan de hoge kant. Metingen met de hand bij kleine projecten zullen beduidend lager liggen. Wanneer grote objecten opgemeten dienen te worden zal de laserscanner goedkoper worden. Metingen met een tachymeter zullen in alle gevallen goedkoper blijven dan laserscannen, maar hierbij worden maar een beperkt aantal punten ingemeten. Onze verwachting is dat de kosten voor het scannen in de toekomst vele malen lager zullen komen te liggen, dit in tegenstelling tot fotogrammetrie. Wanneer het scannen de markt verder binnen is getreden, en dus vaker toegepast zal worden zullen de kosten dalen. Wanneer de verwerking van de scan in de software geoptimaliseerd zijn, zal dit vele manuren schelen, wat een positief effect geeft op de prijs. Dit laatste punt wordt door iQsolution opgelost door scans uit te laten werken in lage loonlanden.

12.3 Software

De software is zoals eerder aangegeven op dit moment het zwakste schakel voor toepasbaarheid in de architectuur. Dit zal dan ook verbeterd moeten worden wil het scannen in deze sector doorbreken. We verwachten dat dit dan ook zal gebeuren. Vooral het verwerken van de scan tot een model is van groot belang om tot een nauwkeuriger meting te kunnen komen. Op dit moment is het niet mogelijk vlakken te laten snijden waardoor de maatvoering uit afzonderlijke punten gehaald moet worden. Deze punten liggen nooit exact op de hoek waardoor de nauwkeurigheid achteruit gaat. Ook menselijke fouten bij het bepalen van de maatvoering zijn aanzienlijk groter.

12.4 Scanners

12.4.1 TOF scanners

De TOF scanners zijn momenteel nog erg langzaam met een snelheid van 1000 punten per seconde in vergelijking met een scanner gebaseerd op het faseverschilprincipe. Wel heeft dhr. I Farrar van Leica ons verteld dat er wordt gewerkt aan verbetering in de software waardoor de scanner een snelheid van 5000 punten per seconde kan halen. In de praktijk is een hogere snelheid van de scanner van groot belang. Het scannen voor een klant kost veel geld, wanneer de scantijd omlaag gaat dalen de kosten, en zal eerder gekozen worden voor inzet van een laserscanner.

De nauwkeurigheid van de afstandsmeter in een TOF-scanner is momenteel ongeveer vier millimeter wat voor een aantal toepassingsgebieden te veel is. Hierin zullen in de toekomst verbeteringen aangebracht moeten worden.

12.4.2 Fase verschil

De nauwkeurigheid van een faseverschil scanner neemt af naarmate de afstand tot het in te meten object toeneemt. Dit geeft zeker op afstanden boven de twintig meter een veel minder goede nauwkeurigheid op. Deze scanner zal dan ook vooral ingezet worden voor metingen over korte afstanden, dit in tegenstelling tot het TOF-principe.

12.4.3 Algemeen

Weersinvloeden

Over het algemeen werkt elektronica niet bij temperaturen onder de nul, dit is ook zo bij laserscanners. Ook dit is een punt waar verbetering mogelijk is, omdat men ook in de winter moet kunnen meten. Er zou bijvoorbeeld kunnen worden gedacht aan een interne temperatuursregeling.

De meeste scanners zijn niet waterdicht en kunnen daarom ook niet meten bij neerslag. Dit is een groot nadeel omdat er veel inkomsten worden misgelopen in een dag waarin niet gescand kan worden. Ook wanneer de scanner waterdicht zou zijn geeft neerslag nog steeds problemen. Bij hevige sneeuw- of regenval worden namelijk veel van de lasersignalen door de neerslag weerkaatst waardoor veel ruis in de scans ontstaat. Ook wanneer er druppels op de omkapping van de laser liggen ontstaan er meetfouten. Hierdoor ontstaat refractie.

Toekomstvisie

Laserscanners zijn behoorlijk prijzige apparaten en momenteel is er niet één scanner die voor elke toepassing geschikt is. iQvolution heeft de visie om een scanner te bouwen met verschillende componenten. Zo zou er bijvoorbeeld een component zijn om korte afstanden met een hoge nauwkeurigheid te meten en een component om grotere afstanden te meten met een wat mindere nauwkeurigheid. Ook wanneer er een onderdeel in de scanner verouderd of stuk gaat, kan deze gemakkelijk worden vervangen.

13 Conclusie

Aan de hand van de uitgevoerde literatuurstudies is een aantal conclusies te trekken die invloed hebben op mogelijkheden van de laserscanner in de (restauratie) architectuur. Hieronder zijn deze per studie genoemd.

Uit de studie naar archivering is gebleken dat de nadruk van archiveren van monumenten niet ligt op het meet- en tekenwerk, maar op het aangeven van de bijzonderheden van een gebouw. Het kostenplaatje speelt een belangrijke rol bij de keuze voor een meetmethode. Dit is de reden dat veel projecten tot vandaag aan toe met de hand gemeten worden. Wanneer het niet mogelijk is een meting met de hand te verrichten, wordt gekozen voor toepassing van fotogrammetrie.

Uit de studie naar laserscannen blijkt de laserscanner een aantal goede toepassingsgebieden te hebben. In de architectuur is de laserscanner nog niet echt doorgebroken. Eén van de grootste oorzaken hiervan zijn de softwarepakketten. In de software is het nog niet goed mogelijk exacte punten aan te geven om maten te onttrekken, wat de nauwkeurigheid niet ten goede komt. Ontwikkeling van de software is dan ook meer dan welkom. Verder zijn er een aantal punten die van belang zijn voor het maken van een goede, nauwkeurige scan. Om een paar punten te noemen: weersomstandigheden, reflectie, resolutie enz.

Uit de voorgaande studies blijkt dat de laserscanner zich vaak zal richten op hetzelfde werkveld als fotogrammetrie. Beide methoden zijn zeer kostbaar. Wanneer we deze methoden vergelijken op het gebied van snelheid zien we dat de meetsnelheid van laserscannen (zeker met een nieuw type) beduidend hoger ligt. Wanneer we kijken naar de tijd die nodig is voor de verwerking komt de laserscanner ook beter uit de bus. Als het op nauwkeurigheid aankomt zal fotogrammetrie beter zijn. Deze feiten zijn gebaseerd op gehouden interviews. Hierbij geldt wel dat bij een hogere resolutie (langere inmeetijd) een betere nauwkeurigheid haalbaar is. Er zal dus steeds een afweging gemaakt moeten worden tussen inmeetsnelheid en nauwkeurigheid. Toch blijkt fotogrammetrie (voorlopig) nauwkeuriger te zijn. Gelet op ontwikkelingen tussen fotogrammetrie en 3D-laserscannen is fotogrammetrie doorontwikkeld terwijl laserscannen nog in de kinderschoenen staat. Het verschil tussen beide methoden zal dan ook steeds groter worden, wat ten goede komt aan de laserscanner.

De toepasbaarheid van een laserscanner in de (restauratie) architectuur zal verschillen per project. Met behulp van de uitgevoerde projecten hebben we de volgende conclusies omtrent toepasbaarheid getrokken. De toepasbaarheid van de scanner verschilt veel per project, het is moeilijk aan te geven welke projecten wel en niet geschikt zijn voor laserscannen, maar over het algemeen kan aangenomen worden dat metingen waarbij enkele maten uit één geheel gemeten dienen te worden het best handmatig te meten zijn. Wanneer we kijken naar de resultaten van het Veemhuis kunnen we de conclusie trekken dat handmatig meten de meest nauwkeurige methode is, gevolgd door de tachymeter en als laatste de laserscanner. Wanneer deze enkele maten ten opzichte van elkaar in kaart gebracht moeten worden, zal hiervoor de laserscanner het best gekozen kunnen worden.

Om een voorbeeld te noemen, kozijnmaten zijn snel en simpel met de hand te meten, maar bij het meten van kozijnen onderling levert een handmatige meting sterk in op nauwkeurigheid.

Voor metingen over grote afstanden zal een handmatige meting onnauwkeurig worden. Dit komt door koppeling van verschillende metingen. Er is een aantal concurrenten op het werkgebied van laserscannen, namelijk de tachymeter en fotogrammetrie. In onderstaande tabel zijn de verschillende meetmethoden met elkaar vergeleken.

BIJ GROTE PROJECTEN					
Vergelijkingstabel					
	tijd van inmeten	tijd van uitwerken	nauwkeurigheid	kosten	visualisatie
Fotogrammetrie	+	-	++	-	+
3D-laserscannen	++	±	+	±	++
Tachymeter	+	+	+	+	±

Figuur 41: Vergelijkingstabel meetmethode bij grote projecten

Ter verduidelijking, bij het meten van een tachymeter wordt een beperkt aantal punten gemeten. Fotogrammetrie en laserscannen verschillen ten opzichte van de tachymeter op dit gebied. Fotogrammetrie haalt een betere nauwkeurigheid dan de laserscanner, maar visueel als eindproduct is de laserscanner in zijn voordeel. Dit komt door de mogelijkheid een fotorealistische 3D beeld (fotodraperen) te genereren.

Wanneer gekozen wordt voor gebruik van een laserscanner is een aantal verschillende apparaten op de markt die ieder hun eigen specialisatie hebben. Wanneer een interieur ingemeten dient te worden, zal gekozen moeten worden voor een scanner die 360 graden om zijn horizontale as kan draaien. Voor het meten van een exterieur zal gebruik gemaakt kunnen worden van een beeldhoekscanner. Een panoramascanner zal hiervoor ook ingezet kunnen worden. Beeldhoekscanners zullen om die reden naar verwachting in de toekomst verdwijnen. Voor het meten van complexe objecten zoals ornamenten is het nodig een scanner in te zetten die een hoge nauwkeurigheid kan halen. Te denken is dan aan een triangulatiescanner.

Gelet op de grote ontwikkelingen die we verwachten binnen het laserscannen, en de andere meetmethoden die niet of nauwelijks nog ontwikkelingen mee zullen maken, adviseren wij na een aantal jaren een gelijkmatig onderzoek te verrichten.

14 Literatuurlijst

- [1] Hoddenbach, R. en W. Waggeveld, Toepassingsgericht laserscannen
- [2] http://www.i3mainz.fh-mainz.de/publicat/korfu/p05_Boehler.pdf
- [3] <http://scanning.fh-mainz.de/scannertest/results111103.pdf>
- [4] Cyclone 4.0 user's manual
- [5] www,2004, www.zf-laser.com
- [6] www,2004, www.callidus.de
- [7] www,2004, www.leica.com
- [8] www,2004, www.globe.be
- [9] www,2004, www.3dsurvey.nl
- [10] vakkundig tijdschrift: Algemeen Recherche Magazine, Artikel (datum onbekend)
- [11] De Telegraaf: 19 augustus 2000, direct op scherp met 3D laserscan
- [12] vakkundig tijdschrift: Professional surveyor, April 1999, Vol. 19, nummer 3
- [13] vakkundig tijdschrift: Point Of Beginning juli 1999
- [14] dictaat: Historische materialen en constructies inmeten; december 2001
- [15] www,2004, www.vansteen.nl
- [16] www,2004, www.cyra.com
- [17] Lloydstraat 30, Rotterdam Jobsveem, bouwhistorische opname (basisrapport)
- [18] Alberda, ir. J.E., inleiding landmeetkunde; september 1978; Delftse uitgevers maatschappij
- [19] Zondag, N., Bouwmeten; 1^e druk 3^e oplage 2000; uitgever: Stam Techniek
- [20] Zondag, N., Bouwmeten 2; 1^e druk 1995; uitgever: Stam Techniek
- [21] Cyra Basic Training Manual; september 2003
- [22] brochure Leica Disto (the original laser distancemeter)
- [23] brochure Sokkia Serie030R (reflectorloze Total Stations met geïntegreerde SDR Expert functionaliteit)
- [24] Cobouw, Techniek, nummer 139, 25 juli 2000, Laserscannen dé techniek voor digitale 3D-modellen
- [25] Wagenaar, K., Bouwmeten; maatvoeren en uitzetten op de bouwplaats; uitgever: Morks drukkerij
- [26] R. Hoddenbach, W. Waggeveld; Bijlagen toepassingsgericht 3D-laserscannen; juni 2003
- [27] Richtlijnen Bouwhistorisch Onderzoek; 's-Gravenhage, 25 april 2000
- [28] www,2004, www.esrinl.com/index.asp?strUrl=%2Fcontent%2Fevenementen.asp%3Fid%3D90

- [28] interview met ing. B.H.J.N. Kooij en drs. A. Reinstra van de Rijksdienst voor Monumentenzorg.
- [29] interview met dhr. J. Sluimer
- [30] Fotogrammetrie I, TUDelft, faculteit der Geodesie, juli 1983, Prof. Dr. Ir. G.H. Ligterink
- [31] Fotogrammetrie II, TUDelft, faculteit der Geodesie, juli 1987, Prof. Dr. Ir. G.H. Ligterink
- [32] Fotogrammetrie III TUDelft, faculteit der Geodesie, Oktober 1988
- [32] Photogrammetrie und Laserscanning, Thomas Luhman (Hrsg), Herbert Wichman Verlag Heidelberg 2002
- [33] www,2004,<http://www.christoph-zang.de/facharbeit.htm>
- [34] www,2004,<http://www.stereogallery.com/pixel/pages-nl/stereopaar.html>
- [35] www,2004,<http://www.fotobeurs.com/stereo/default.asp?p=geschiedenis>
- [36] www,2004,<http://www.geodelta.com/profile/contentsnl.htm>
- [37] interview met ir. R.A.P.J. Vilters, directeur Instituut Geodesie Limburg (I.G.L.)
- [38] www,2004,http://www.riegl.com/sw_selection/sw_selection_index.htm
- [39] www,2004,<http://www.win.tue.nl/~mjansen/onderwijs/2S970/formularium.pdf>
- [40] www,2004,http://www.ipnb-nl.nl/gldl/ipc_e_tekst/e21b.htm

15 Verklarende woordenlijst

In de verklarende woordenlijst wordt een korte omschrijving gegeven voor kernbegrippen uit dit onderzoek.

3D-Extractor	Verwerkingssoftware voor de Callidus laserscanner
Algoritme	Een set regels in een bepaalde volgorde om een probleem op te lossen
As-built plannen	Plannen die overeenstemmen met de huidige situatie op het terrein.
Callidus	Duitse fabrikant van een type laserscanner
Cloudworx	Software voor de verwerking van de HDS2500 scan
Coherent	Samenhangend
Cyclone	Verwerkingssoftware van het Cyra-systeem
Fotodrapering	Het draperen van foto's over een model of scan
Fotogrammetrie	Puntbepalingsmethode met behulp van (digitale) foto's
LED	Light emitting diode
Mesh	Punten uit een puntenwolk, gekoppeld door lijnen die samen driehoeken vormen
Monochromatisch	Straling die op een enkele golflengte wordt uitgezonden
Paspunten	Corresponderende punten (targets) waar scans op gekoppeld kunnen worden
Pointclouds	Software programma geschikt voor verwerking dat van verschillende scanners
Primitieven	Basisvormen die gebruikt worden om een scan te modelleren
Puntenwolk	Het geheel van scanpunten, per punt is er een x, y en z-coördinaat
Refractie	Lichtbreking die ontstaat doordat licht overgaat tussen media met verschillende dichtheid
TIN	Triangular Irregular Network, een draadmodel van een scan
TOF-principe	Afstandsberekening op basis van tijdsverschil van zenden en ontvangen laserpuls

16 Bijlagen overzicht

16.1 A Literatuuronderzoek 3D-laserscanners

Bijlage A1:	Inleiding laserscanners
Bijlage A2:	Specificatietabel
Bijlage A3:	Imager 5003
Bijlage A4:	Callidus
Bijlage A5:	Mensi GS100
Bijlage A6:	HDS2500
Bijlage A7:	HDS 3000
Bijlage A8:	iQsun 880

16.2 B Marktverkenning

Bijlage B1:	Deelnemerslijst interviews	
	Dhr. Warffemius	RdMz
	Ing. B.H.J.N. Kooij (bouwhistoricus)	RdMz
	Drs. A. Reinstra (bouwhistoricus)	RdMz
	Dhr. J. Sluimer	BAM Nederland
	Dhr. de Waal	De Waal
	Ir R.A.P.J. Vilters	Directeur I.G.L.
Bijlage B2:	Overzicht interviews	

16.3 C Proefproject kunstwerk

Bijlage C1:	Inleiding proefproject kunstwerk
Bijlage C2:	Meetopstelling / gemeten punten
Bijlage C3:	Meetresultaten uit tachymeter
Bijlage C4:	Uitwerking tekening tachymeter

16.4 D Proefproject Veemhuis te Rotterdam

Bijlage D1:	Meetopstellingen 3D-laserscanner
Bijlage D2:	Meetopstelling tachymeter
Bijlage D3:	Tekeningen Veemhuis bestaande en nieuwe situatie VO-B201 Gevelaanzichten Westgevels
Bijlage D4:	Uitwerking tekening tachymeter.
Bijlage D5:	Uitwerking 3D-laserscanner

16.5 E Precisie meetmethoden

Bijlage E1:	Bepaling wegingsfactor
Bijlage E2:	Meetresultaten met berekening gewogen gemiddelde
Bijlage E3:	Bepaling gemiddelde afwijking en standaardafwijking
Bijlage E4:	Statistiek grafieken meetmethoden

16.6 F Proefproject Sint Janskerk te Gouda

Bijlage F1: Meetopstellingen 3D-laserscanner HDS 3000
Bijlage F2: Uitwerking 3D-laserscanner HDS 3000
Bijlage F3: Meetopstellingen 3D-laserscanner iQsun 880 V4
Bijlage F4: Uitwerking 3D-laserscanner iQsun 880 V4

16.7 G Proefproject Beeld

Bijlage G1: Uitwerkingen Beeld

16.8 H Correspondentie

Bijlage H1: Correspondentie

Alle bijlagen zijn eventueel digitaal op te vragen bij Ingenieursbureau Passe-Partout B.V.