



3D-opmetingen in het BIM-tijdperk

Vastleggen van de realiteit in hoge resolutie

Oktober 2018



Opgesteld in het kader van C-Tech, de Technologische Dienstverlening in het Brussels Hoofdstedelijk Gewest, een partnerschap van het WTCB in samenwerking met de CBB-H en met de steun van Innoviris.



3D-opmetingen in het BIM-tijdperk

Vastleggen van de realiteit in hoge resolutie

Auteurs

Samuel Dubois, Yves Vanhellemont, Michael de Bouw

Oktober 2018

WETENSCHAPPELIJK EN TECHNISCH CENTRUM VOOR HET BOUWBEDRIJF

WTCB, inrichting erkend bij toepassing van de besluitwet van 30 januari 1947
Maatschappelijke zetel: Lombardstraat 42 te 1000 Brussel

Dit is een publicatie van wetenschappelijke aard. De bedoeling ervan is de resultaten van het bouwonderzoek uit binnen- en buitenland te helpen verspreiden.

Het, zelfs gedeeltelijk, overnemen of vertalen van de tekst van deze publicatie is slechts toegelaten na schriftelijk akkoord van de verantwoordelijke uitgever.



Opgesteld in het kader van C-Tech, de Technologische Dienstverlening in het Brussels Hoofdstedelijk Gewest, een partnerschap van het WTCB in samenwerking met de CBB-H en met de steun van Innoviris.



INHOUD

VOORWOORD.....	4
AFKORTINGEN EN LEXICON.....	5
1. CONTEXT.....	7
1.1 Geometrische opmetingen.....	7
1.2 Opmetingen in hoge resolutie.....	7
2. OVERZICHT VAN DE HD-OPMETINGSTECHNIEKEN.....	11
2.1 Terminologie.....	11
2.1.1 Typologie van de digitale 3D-weergaven.....	11
2.1.2 Het model situeren in de ruimte.....	11
2.1.3 Een betekenis toekennen aan het model.....	13
2.1.4 De aard van het digitale model aanpassen.....	14
2.2 3D-scantechnieken.....	15
2.2.1 Laserscanning (lasergrammetrie).....	15
2.2.2 Fotogrammetrische reconstructie door beeldcorrelatie (FRBC).....	18
2.2.3 Fotogrammetrische reconstructie versus laserscanning.....	21
2.2.4 Andere methoden.....	22
3. DE BELANGRIJKSTE STAPPEN VAN EEN HD-OPMETING OP DE BOUWPLAATS	25
3.1 Definitie van het bestek van de studie en toewijzing van de opdracht.....	25
3.2 Planning van de studie.....	25
3.3 Fase van de opname op het terrein.....	26
3.4 Verwerking van de ruwe gegevens.....	26
3.4.1 Voorbehandelingen.....	26
3.4.2 Kwaliteitscontrole.....	26
3.4.3 Omzettingen van het model en geavanceerde bewerkingen.....	27
3.5 Eindredactie en aanleveren van de <i>deliverables</i>	27
4. HUIDIGE SITUATIE IN DE BELGISCHE BOUWSECTOR	28

5. ANALYSE VAN DE MOGELIJKHEDEN.....	29
5.1 Doelstellingen van een studie met HD-opmeting.....	29
5.1.1 Digitaliseren om het gebouw in de ruimte en/of in de tijd te situeren.....	29
5.1.2 Digitaliseren om een gebouw of een deel ervan te begrijpen.....	29
5.1.3 Digitaliseren om te meten, te diagnosticeren en te beoordelen.....	31
5.1.4 Digitaliseren om te communiceren.....	32
5.1.5 Digitaliseren om te ontwerpen en te produceren.....	33
5.1.6 Digitaliseren om te communiceren.....	33
5.1.7 Digitaliseren om te controleren.....	33
5.2 Eindmodellen en digitale werkstroom.....	34
5.2.1 Eenvoudige toepassingen voor de visualisatie en voor bouwkundige tekeningen.....	35
5.2.2 Geavanceerde toepassingen	38
6. INTEGRATIE VAN SCANS IN EEN BIM-BENADERING.....	41
6.1 Wat is BIM?	41
6.2 Het gebruik van 3D-scans om het BIM-model uit te breiden (<i>scan-to-BIM</i>).....	42
6.3 Vergelijking van de 3D-scan met het BIM-model (<i>scan-versus-BIM</i>).....	44
7. DEFINITIE VAN HET BESTEK VOOR DE LANDMETER DIE VERANTWOORDELIJK IS VOOR DE HD-OPMETING.....	45
8. ANALYSE VAN DE HINDERPALEN.....	47
8.1 Algemene moeilijkheden bij het gebruik van HD-meettechnologieën.....	47
8.2 Hinderpalen bij de uitvoering van een HD-opmeting.....	47
8.3 Enkele regelgevende implicaties.....	49
8.3.1 Veiligheid op de bouwplaats.....	49
8.3.2 Vertrouwelijkheid en privacy.....	50
8.3.3 Rechten, plichten en verantwoordelijkheden.....	50
9. TOEKOMSTIGE ONTWIKKELINGEN.....	51
LITERATUURLIJST	53

VOORWOORD

Ondernemers komen steeds vaker in aanraking met 3D-modellen. Er bestaan inmiddels immers nieuwe technologieën om de werkelijkheid automatisch en zeer volledig te digitaliseren. Dit document geeft eerst een overzicht van de recente ontwikkelingen in geometrische meettechnieken, die samenhangen met de opkomst van de opmeting in hoge resolutie. De technologieën die relevant zijn op de schaal van muren, ruimten en gebouwen worden voorgesteld en vergeleken op basis van duidelijke criteria. Vervolgens worden verschillende mogelijke toepassingen toegelicht, evenals de digitale werkstromen die er noodzakelijkerwijs mee gepaard gaan. Ook de integratie in het BIM-proces als een instrument voor het verzamelen van geometrische informatie en de duidelijke perspectieven omtrent de voordelen voor de betrokken actoren komen aan bod. De risico's die inherent zijn aan het gebruik van deze technologieën worden niet over het hoofd gezien. Ten slotte zullen ook de vooruitzichten inzake technologische ontwikkelingen en de te verwachten impact voor de bouwsector besproken worden.

De bedoeling van deze publicatie is ervoor zorgen dat iedereen een goed inzicht heeft in de mogelijkheden van digitalisering, maar ook in de beperkingen die inherent zijn aan de technieken voor de digitalisering in hoge resolutie (ook 3D-scannings-technologie genoemd). Het doel is eveneens om enkele toekomstperspectieven aan te reiken in verband met de te verwachten ontwikkelingen van deze technologieën en de integratie ervan in de werkmethoden van de bouwprofessionelen.

AFKORTINGEN EN LEXICON

2D/3D

Twee-/driedimensionaal.

BES *Building energy simulation*

Energiesimulatie van gebouwen.

CAD *Computer aided design*

Computerondersteund ontwerp (zie CO).

CAM *Computer aided manufacturing*

Computerondersteunde productie (zie CP).

CFD *Computational fluid dynamics*

Computationale vloeistofdynamica.

CO Computerondersteund ontwerp

Softwareprogramma's die toelaten om objecten te ontwerpen met behulp van een computer door geometrische modellering.

CP Computerondersteunde productie

Softwareprogramma's die toelaten om werktuigmachines aan te sturen aan de hand van numerieke bediening. Deze bediening kan op basis van een 3D-model gedefinieerd worden.

DOF *Depth of field*

Scherptediepte.

FEM *Finite element modeling*

Eindige-elementenmodellering.

FRBC Fotogrammetrische reconstructie door beeldcorrelatie

Digitale methode om een 3D-model in hoge resolutie van een object automatisch te reconstrueren op basis van foto's die genomen werden vanuit verschillende gezichtshoeken.

GIS Geografisch informatiesysteem

GPU *Graphics processing unit*

Grafische verwerkingseenheid.

HAM *Heat, air and moisture*

Warmte, lucht en vocht.

HD *High definition*

Hoge resolutie.

HVAC *Heating, ventilation and air-conditioning*

Productie van warmte, ventilatie en airconditioning.

IMMS *Indoor mobile mapping system*

Mobiel opmetingssysteem voor binnen.

Apparaat voor het opmeten in hoge resolutie dat geïnstalleerd wordt op een rijdend platform in een binnenomgeving.

LIDAR *Light detection and ranging*

Technologie voor het meten van afstanden gebaseerd op de analyse van de eigenschappen van een laserlicht dat naar de zender teruggekaatst wordt.

LOS *Line of sight*
Gezichtslijn.

MEP *Mechanical, electrical and plumbing*
Mechanische, elektrische en sanitaire voorzieningen.

RGB *Red, green, blue*
Rood, groen, blauw.

SFM *Structure from motion*
Categorie van optimalisatiealgoritmen uit de robotica die puntenwolken in lage resolutie genereren op basis van meerdere foto's.

SIFT *Scale invariant feature transform*
Algoritme voor het detecteren van punten van overeenkomst tussen meerdere afbeeldingen.

TLS *Terrestrial laser scanner*
Terrestrische laserscanner.
Digitale opmetingsmethode in hoge resolutie op basis van LIDAR-technologie. Ook wel 'laseraftasting' of 'lasergrammetrie' genoemd.

TOF *Time of flight*
Vliegtijd.

1. CONTEXT

1.1 GEOMETRISCHE OPMETINGEN

‘Opmeten’ betekent een reeks metingen uitvoeren op een gebouw of een terrein met de bedoeling het gebouw of terrein in kwestie geometrisch te karakteriseren, over het algemeen in de vorm van plannen. Voor een groot renovatieproject is het bijvoorbeeld belangrijk om nauwkeurige informatie te verzamelen over de *as-built*-geometrie van het gebouw. Het grootste voordeel van een doorgedreven geometrische opmeting ligt in een aanzienlijke vermindering van de foutenlast op het terrein en de daaruit voortvloeiende kosten. Zo worden mogelijk dure ad-hocbeslissingen beperkt. De documentatie van een bestaand gebouw is echter vaak niet beschikbaar (verloren of onbestaande) of ongeschikt (onaangepaste schaal, niet-bijgewerkte plannen, schetsen die niet in overeenstemming zijn met de werkelijke situatie [P1]).

De traditionele opmetingstechnieken bepalen de positie van discrete punten op het oppervlak van een object door afstanden evenals verticale en horizontale hoeken te meten. Moderne *total stations* zijn volledig geautomatiseerd en kunnen de coördinaten van het gescande object op een computer opslaan voor verdere verwerking. Deze apparaten combineren een digitale theodoliet met elektronische telemetrietechnologieën (bv. GPS). Deze techniek verschaft zeer waarheidsgetrouwe informatie, maar kan omslachtig zijn als een hoge graad van detaillering nagestreefd wordt [L2]. Bovendien is het uiteindelijke resultaat sterk afhankelijk van de uitvoerder, ook al is de techniek op zich intrinsiek nauwkeurig. De uitvoerder moet immers zelf op geselecteerde aandachtspunten op de gevel ‘richten’ en er correct naar verwijzen. Naast deze opmetingsmanier zijn er tegenwoordig geavanceerde driedimensionale meettechnieken verschenen die aan specifieke behoeften kunnen tegemoetkomen.

1.2 OPMETINGEN IN HOGE RESOLUTIE

Alle industriële sectoren kennen belangrijke ontwikkelingen door de digitale technologieën en de enorme mogelijkheden die deze te bieden hebben. Driedimensionale voorstellingen van objecten (3D-modellen) spelen hierin vaak een centrale rol, zowel bij de communicatie, als bij het ontwerp en de productie. De 3D-modellering van gebouwen wordt al door vele actoren gebruikt, maar vooral op kleine schaal in de ontwerpfase en meestal sporadisch (energie-modellering in nieuwbouw, geschetste plannen ...).

In aanvulling op de 3D-modelleringsinstrumenten spelen ook de moderne 3D-scantechnieken een essentiële rol bij de digitalisering ⁽¹⁾ van het bestaande. Momenteel beperkt de opmeting van gebouwen zich niet langer tot het louter opmeten van geometrische punten, maar wordt een uiterst volledige transcriptie van de werkelijkheid beoogd. Het is nu ook mogelijk om de positie van miljoenen oppervlaktepunten van een gebouw (binnen/buiten) of van een van de bouwcomponenten zeer nauwkeurig op te meten (zie afbeelding 1). We mogen dus wel spreken van geometrische opmeting in hoge resolutie (HD) of simpelweg van 3D-scanning. In het kaderstuk (p. 8) wordt een overzicht gegeven van de verschillende benamingen die in de vakliteratuur voorkomen.



Afb. 1 Door opmeting in hoge resolutie kunnen fijne details in gebouwen opgevangen worden (in dit geval metselwerk).

Het is interessant om even stil te staan bij de werking van een laserscanner, een apparaat dat recent zijn intrede deed op de bouwplaats en tevens de voorloper is van HD-metingen in de bouw. Hoewel een *total station* het favoriete meetinstrument van de landmeters blijft, hebben de verbeteringen van de technologieën voor laserscanning de weg bereid voor bijzonder

(1) Weergave van de werkelijkheid in de vorm van een 3D-model.

1. Context

innovatieve geometrische studies. Laserscanners zenden stralen uit die een afstand meten wanneer ze terug naar de bron keren na weerkaatsing door het oppervlak. De huidige technologie maakt het mogelijk duizenden stralen per seconde uit te zenden, wat resulteert in een driedimensionale ‘puntenwolk’ (zie afbeelding 2, p. 9). Elke weerkaatsing die terug opgevangen wordt, wordt ten opzichte van het meetapparaat in de ruimte gelokaliseerd met een nauwkeurigheid tot op de millimeter.

Naast laserscanners bestaan er ook technieken voor automatische fotogrammetrische reconstructies op basis van beelden (zie afbeelding 3, p. 9). Deze innovatieve technieken, die onlangs ontwikkeld werden binnen de methoden voor korte-afstandsfotogrammetrie, vereisen geen andere uitrusting dan een gewoon fototoestel en kunnen het bestaande eveneens omzetten in puntenwolken met een hoge resolutie (zie § 2.2.2, p. 18). Hoewel ze volkomen nieuwe mogelijkheden bieden voor de digitalisering, vooral op het gebied van de textuurweergave, vergen deze nieuwe technieken specifieke vaardigheden, in het bijzonder wat betreft het nemen van de foto’s en de verwerking van de digitale bestanden.

Een relatief recente ontwikkeling in de geometrische opmeting is de opkomst van drones (onbemande luchtvaartuigen). Drones hebben een enorm potentieel, maar werpen ook enkele onbeantwoorde vragen op. Het gaat hier eerder om een ‘meetvector’ dan om een ‘meettechniek’. Deze lichtgewicht luchtvaartuigen (zie afbeelding 4, p. 10) kunnen immers uitgerust worden met meetapparatuur, waardoor men toegang krijgt tot bepaalde delen van het gebouw die met andere middelen moeilijk te analyseren zijn (bv. hoge gebouwen, daken ...). In zijn eenvoudigste vorm kan een drone uitgerust worden met een camera om een groot aantal beelden of video’s van een gebouw te verzamelen. Deze beelden kunnen vervolgens verwerkt worden met behulp van fotogrammetrische technieken. In België is het gebruik van drones gereguleerd via een Koninklijk Besluit [F1], met een inhoud die helaas veel beperkingen oplegt, ook inzake professioneel gebruik.

DE VERSCHILLENDE BENAMINGEN ONDER DE LOEP

De term **3D-digitalisering** is een algemene benaming en verwijst naar het omzetten van gebouwen in 3D-modellen. Naast de technieken om het bestaande vast te leggen maakt 3D-digitalisering ook gebruik van 3D-modellerings-technieken (3D-tekeningen). De term wordt over het algemeen echter gebruikt om te verwijzen naar de eerste categorie hulpmiddelen, namelijk diegene die gebruikt worden om de werkelijkheid automatisch vast te leggen en om te zetten in een virtuele weergave. In dit document gebruiken we de term ook voor deze betekenis.

De benaming **3D-scan** wordt courant gebruikt ter aanduiding van de methoden om 3D-gegevens in hoge resolutie automatisch en rechtstreeks te verkrijgen. De term is afgeleid van de laserscanners die op dit gebied pioniers waren. Strikt gezien sluit de benaming dus bepaalde technieken waarbij de 3D-gegevens niet rechtstreeks verkregen worden uit, bijvoorbeeld de fotogrammetrische reconstructie uit § 2.2.2 (p. 18). De term wordt echter gebruikt in verschillende industriële sectoren en kan algemeen gebruikt worden ter aanduiding van alle methoden om het bestaande al dan niet rechtstreeks om te zetten in 3D. In die zin is het dus een equivalent van ‘3D-digitalisering’. We merken op dat de term ‘3D-scan’ ook kan wijzen op de virtuele weergave die verkregen wordt. Het is dus mogelijk om te zeggen: ‘de landmeter heeft een 3D-scan van het gebouw uitgevoerd’ en ‘de verkregen 3D-scan is erg gedetailleerd’.

Door te spreken van **opmeting in hoge resolutie** van gebouwen benadrukken we de evolutie van de beschikbare benaderingen en technieken voor architecturale (op)meting, die aangedreven werd door de moderne 3D-digitaliserings-technologieën. We mogen echter niet vergeten dat men met de recent gebruikte technologieën veel ruimere gegevens kan vatten dan met de traditionele opmetingen (bv. kleurinformatie). De term ‘HD-opmeting’ heeft echter niet enkel betrekking op dimensionale metingen.

Afhankelijk van de gebruikte definitie kunnen de drie termen sterk op elkaar lijken. Voor het gebruiksgemak zullen we de termen dan ook zonder onderscheid door elkaar gebruiken.

A. Totaalbeeld van het terrein

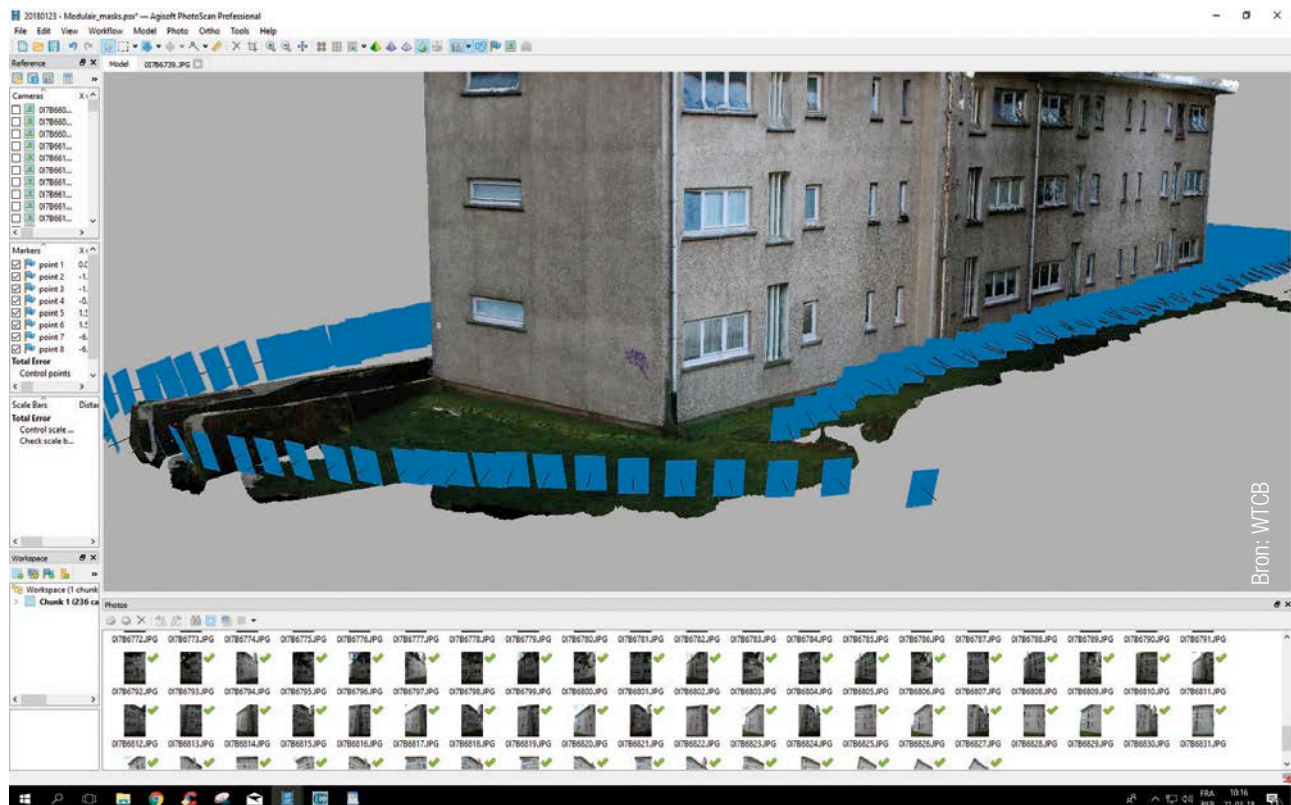


B. Zoom op een deel van het gebouw



C. Zoom op een bouw-element

Afb. 2 Puntenwolk verkregen door middel van een opmeting met een laserscanner (bron van de afbeeldingen: WTCB / bron van het model: De Ceuster).

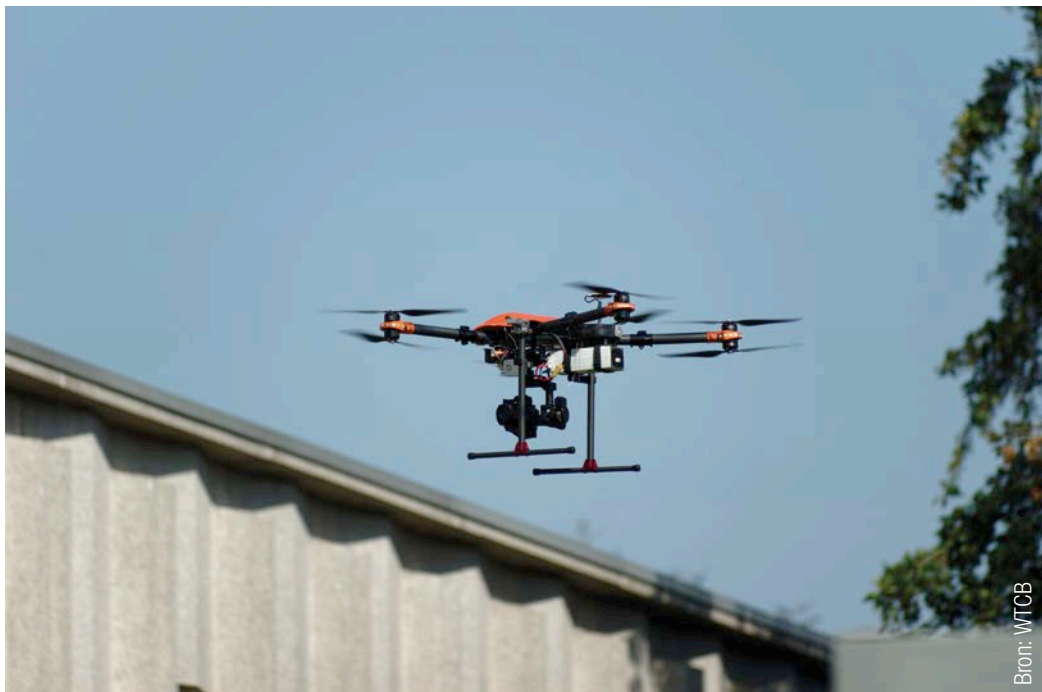


Afb. 3 Reconstructie van een gebouw in de vorm van een puntenwolk op basis van gewone foto's. De blauwe rechthoeken duiden de opeenvolgende posities aan van waaruit de foto's genomen werden.

1. Context

Hoewel de puntenwolken die voortvloeien uit de HD-meetmethoden reeds een zeer krachtige informatiebron vormen, kunnen er tal van digitale verwerkingen op toegepast worden om een breed scala aan afgeleide modellen te genereren. Een veelbelovende toepassing is de omzetting van een 3D-scan naar een BIM-model, dat objecten aan een geheel van metadata verbindt. Net zoals de recente BIM-ontwikkelingen de traditionele ontwerp- en planningstechnieken in vraag stellen, gebeurt dit ook met de klassieke werkmethode door middel van de innovatieve technologieën voor 3D-informatieverwerking. Robotisering, 3D-printing en virtual reality zullen de klassieke aanpak van de bouwsector ingrijpend veranderen. In dit geval vormt de 3D-digitalisering een brug tussen de fysieke en de digitale wereld.

3D-scans worden al in een groot aantal sectoren toegepast. In de architectuur- en bouwsector werden ze echter nog maar vrij recent ingevoerd en de mogelijkheden ervan voor het beheer van renovatie- en/of exploitatieprojecten worden nog niet ten volle benut door de eventuele klanten [R1]. Dit document is bedoeld om de verschillende technieken in detail te beschrijven, de mogelijkheden te benadrukken waarvan deze spelers snel kunnen genieten, om bepaalde hindernissen te voorkomen en om mogelijke toekomstige ontwikkelingen aan het licht te brengen. De nadruk ligt op de methoden op de schaal van een gebouw, hoewel er ook voorbeelden op grotere of kleinere schaal gegeven zullen worden.



Afb. 4 Gebruik van een drone voor de fotogrammetrische opmeting van een gebouw.

2. OVERZICHT VAN DE HD-OPMETINGS-TECHNIKEN

2.1 TERMINOLOGIE

2.1.1 TYPOLOGIE VAN DE DIGITALE 3D-WEERGAVEN

Alvorens de beschrijving van de verschillende HD-opmetingstechnieken aan te vatten, is het noodzakelijk een korte toelichting te geven bij de verschillende types 3D-weergaven. Allereerst maken we een onderscheid tussen 'ruwe' of 'rechtstreekse' 3D-weergaven (afkomstig van 3D-scanners) en 'gebouwde' of 'onrechtstreekse' 3D-weergaven (verkregen door een modellerings- of reconstructieproces op basis van ruwe gegevens). Hoewel de term '3D-model' soms alleen gebruikt wordt voor de tweede categorie, gebruiken we deze in dit document zonder onderscheid om elke driedimensionale representatie van het bestaande in digitale vorm aan te duiden.

De puntenwolk (zie afbeelding 5a, p. 12) is de typische weergave van een 3D-scan. In zijn eenvoudigste vorm is de puntenwolk een tekstbestand dat de geometrische coördinaten van alle punten bevat. Dankzij de moderne technologieën kan informatie over de kleur van het gescande object aan elk ervan gekoppeld worden. Hoewel er andere gegevens verzameld kunnen worden in het bestand, hebben de klanten over het algemeen geen bijkomende informatie nodig [R1]. De geometrische gegevens en kleurgegevens zijn immers het belangrijkste voor de meeste bouwstudies.

Een tweede type 3D-model is een *mesh*, dat wil zeggen een veelvlakig geheel begrensd door hoekpunten en ribben die driehoeken vormen. Het object wordt in dit geval voorgesteld als een continu geheel. De door de verschillende ribben afgebakende oppervlakken kunnen weergegeven worden (oppervlaktemodel, zie afbeelding 5b, p. 12) of niet (draadmodel, zie afbeelding 5c, p. 12). Dergelijke modellen worden vaak verkregen door omzetting van een puntenwolk, gewoonlijk door middel van een algoritme voor 'polygonisering' of 'facettering'.

Geometrische modellen zijn dan weer afkomstig van een modelleringsproces met behulp van primitieve geometrische vormen zoals lijnen, vlakken en cilinders, dat gebruikmaakt van een puntenwolk of van een *mesh* als 'gids' (zie afbeelding 5d, p. 12). De primitieve vormen kunnen ook alleen gesloten volumes zijn, die bijvoorbeeld gegenereerd werden door extrusie. In dat geval spreekt men van een *solid model*. Een dergelijke aanpak genereert modellen die soberder zijn qua design en die lichter zijn, maar zorgt ervoor dat een groot deel van de oppervlakedetails verloren gaat. In zijn ultieme vorm streeft de modelleringsaanpak naar de creatie van 'parametrische objecten' waaraan eigenschappen gekoppeld kunnen worden. Dit vormt de basis voor de creatie van een *Building Information Model* (zie hoofdstuk 6, p. 41).

Naast het 3D-weergavetype is ook het gebruikte bestandsformaat van cruciaal belang. Ten eerste zijn er de zogenaamde 'bedrijfs-eigen' bestandsformaten, specifiek voor bepaalde commerciële software. Het gebruik van dergelijke formaten is niet raadzaam indien het 3D-model gebruikt moet worden door verschillende partijen, omdat ze mogelijk niet compatibel (de medewerkers beschikken bijvoorbeeld niet over dezelfde versie van het softwareprogramma) of onbruikbaar (een van de medewerkers beschikt niet over de softwarelicentie) zijn. De omzetting van een bedrijfseigen formaat in een open formaat (*.las voor een puntenwolk of *.stl voor een *mesh*) is wenselijk om een optimale werkstroom te waarborgen. We merken op dat een dergelijke omzetting meestal alleen uitgevoerd kan worden binnen de commerciële software die overeenkomt met het bedrijfseigen formaat. Bijgevoeg is het aan de acteur die over de commerciële licentie beschikt om deze omzetting uit te voeren. Open formaten worden ondersteund door de meeste softwareprogramma's en beperken het risico op interoperabiliteitsproblemen.

2.1.2 HET MODEL SITUEREN IN DE RUIMTE

Elk punt uit een puntenwolk wordt in de ruimte aangeduid met drie geometrische coördinaten: X, Y en Z. Deze drukken de afstand van een oorsprong (d.i. punt 0,0,0) uit in drie loodrecht op elkaar staande richtingen of 'assen'. Elke puntenwolk wordt dus aangeleverd in een oorspronkelijk referentiekader dat afhankelijk is van de definitie van de oorsprong, de oriëntatie van de assen en de geselecteerde afstandseenheid. Bovendien wordt elke manipulatie van de wolk (translatie, rotatie of schaling) geconcretiseerd door een wijziging van de coördinaten van al zijn punten. Omgekeerd kunnen wiskundige functies toegepast worden op alle punten van het model die bepaalde specifieke geometrische transformaties zullen produceren.

2. Overzicht van de HD-opmetingstechnieken



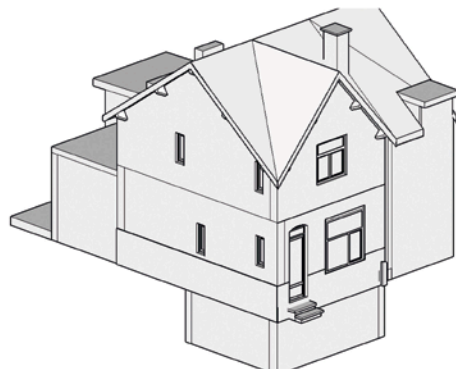
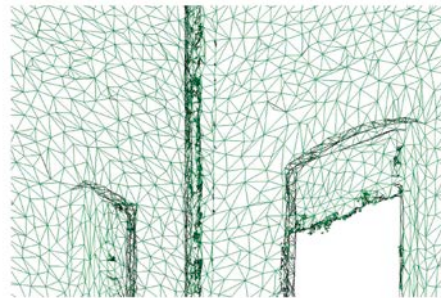
A. Een puntenwolk in hoge resolutie met RGB-informatie



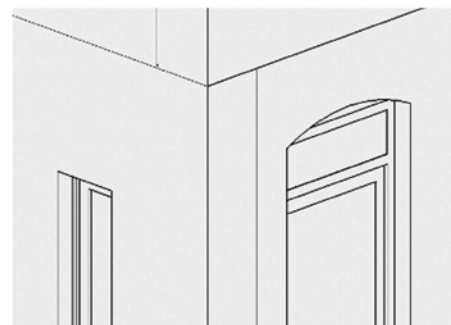
B. Een getextureerd oppervlaktemodel



C. Een draadmodel



D. Een *solid model* uit een parametrische modellering



Afb. 5 Enkele modeltypen (bron van de afbeeldingen: WTCB / bron van het model: De Ceuster).

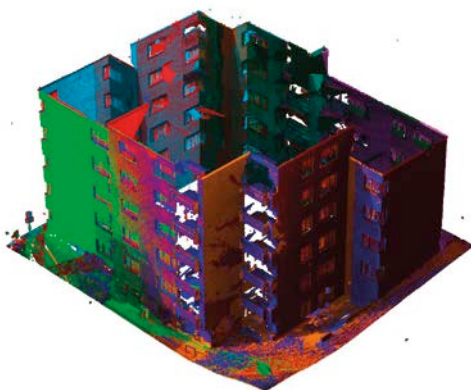
We spreken van ‘georeferentiëring’ wanneer de puntwolken gepresenteerd worden ten opzichte van een referentiekader op de aarde (het ‘absolute’ referentiekader). Elk punt wordt in dat geval beschreven door een lengte- en breedtegraad en een hoogte. Uiteraard is hiervoor naast het scanapparaat ook GPS-technologie nodig. Omgekeerd produceren sommige HD-onderzoekstechnologieën ruwe 3D-modellen die noch correct aangeduid worden in de ruimte (‘willekeurige’ oorsprong en oriëntatie van het model), noch op de juiste schaal. De gebruiker dient in dat geval geometrische transformatiemethoden als naverwerking toe te passen om correcte dimensionale metingen op basis van het model uit te voeren.

De situatie wordt nog ingewikkelder als er meerdere metingen verricht worden op hetzelfde object met een technologie die geen directe georeferentiëring biedt. Hierdoor verkrijgt men verschillende puntenwolken die vanuit verschillende gezichtspunten genomen werden (bv. de verschillende gevels van een gebouw), maar die elk willekeurig georiënteerd zijn in de ruimte. De rol van de landmeter bestaat dan uit het heroriënteren van deze wolken ten opzichte van elkaar. Hij moet er met andere woorden een gemeenschappelijk ruimtelijk referentiesysteem aan toewijzen. Men spreekt dan van ‘uitlijning van de modellen’ of ‘consolidatie’. Meestal gebeurt dit door het opmeten van referentiepunten met behulp van een *total station*. Daartoe kan men verschillende ‘richtpunten’ gebruiken, die op sleutelposities op het op te meten object bevestigd worden (zie afbeelding 6b). De consolidatie kan ook uitgevoerd worden op basis van overlappingszones van verschillende wolken. Deze aanpak vereist dus voldoende overlap. De uitlijning is sterk afhankelijk van de robuustheid van de in de software gebruikte algoritmen.

2.1.3 EEN BETEKENIS TOEKENNEN AAN HET MODEL

De geometrische punten die deel uitmaken van een puntenwolk en de driehoeken die een *mesh* vormen bezitten intrinsiek geen semantische informatie. De punten worden met andere woorden niet ‘gegroepeerd’ volgens bepaalde kenmerken (oriëntatie, hoogte, identiteit ...). De gebruiker dient zelf de punten/driehoeken die bijvoorbeeld deel uitmaken van eenzelfde bouwelement (muur, zuil, raam ...) te groeperen opdat deze tot een bepaalde elementgroep zouden behoren. Dit proces wordt ‘segmentatie’ genoemd. Hoewel handmatige segmentatie een lang en veeleisend proces is, is het vaak een onvermijdelijke stap. Semiautomatische of automatische oplossingen zijn immers nog eerder zeldzaam (zie afbeelding 7, p. 14).

Later tijdens de naverwerking kan men gebruikmaken van groepen van punten (of driehoeken in het geval van een *mesh*) om ‘parametrische objecten’ te tekenen. Denk bijvoorbeeld maar aan de modellering van een kolom met behulp van een cilinder, waarbij de gebruiker naast vormfactoren ook een reeks parameters kan invoeren, zoals het materiaal, de bouwdatum ... Vanaf dan bevinden we ons in een BIM-proces (zie hoofdstuk 6, p. 41) en kunnen we spreken van semantische modellering (zie afbeelding 8, p. 14).



A. Model waarbij de verschillende scans correct uitgelijnd zijn (elke scan is weergegeven door een andere kleur)



B. Voorbeeld van een richtpunt gebruikt bij het uitlijningsproces

Afb. 6 Uitlijning van puntenwolken afkomstig van laserscans (bron van de afbeeldingen: WTCB / bron van het model: De Ceuster).

2. Overzicht van de HD-opmetingstechnieken

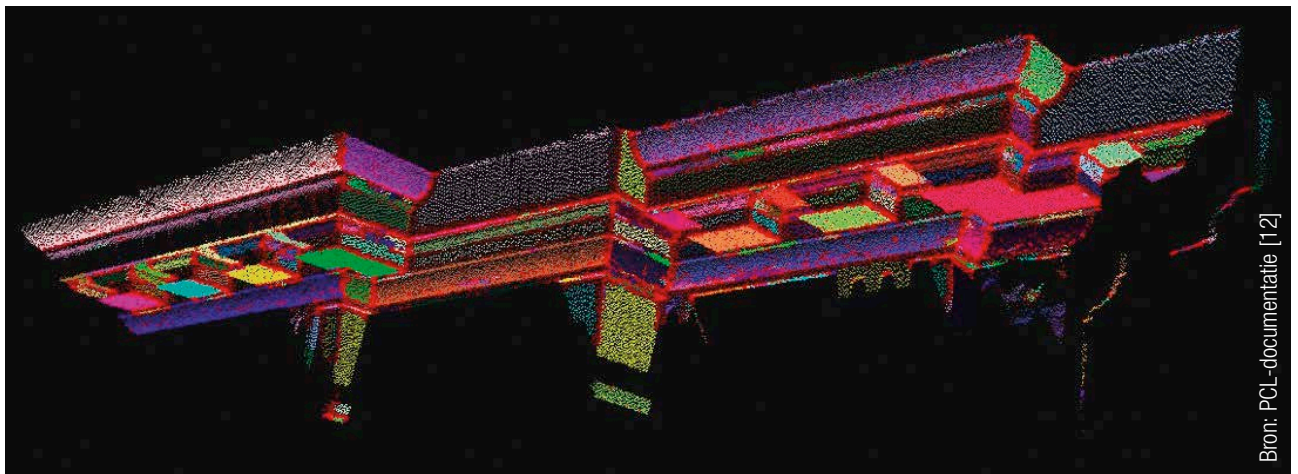
2.1.4 DE AARD VAN HET DIGITALE MODEL AANPASSEN

Digitale informatie is van nature uit zeer aanpasbaar. Zo is het mogelijk om een 3D-model van een bepaald type of formaat in een ander te veranderen. Een veel voorkomende bewerking is de automatische, semiautomatische of handmatige omzetting van een 3D-model in een tweedimensionale CAD-tekening. Het eenvoudigste voorbeeld is de realisatie van een snede doorheen een puntenwolk, op basis waarvan een grondplan in 2D getekend wordt. Op basis van een projectie van een puntenwolk op een vlak kan ook een geveltekening gemaakt worden. De 3D-informatie gaat overigens niet noodzakelijk volledig verloren bij een verandering van 3D in 2D.

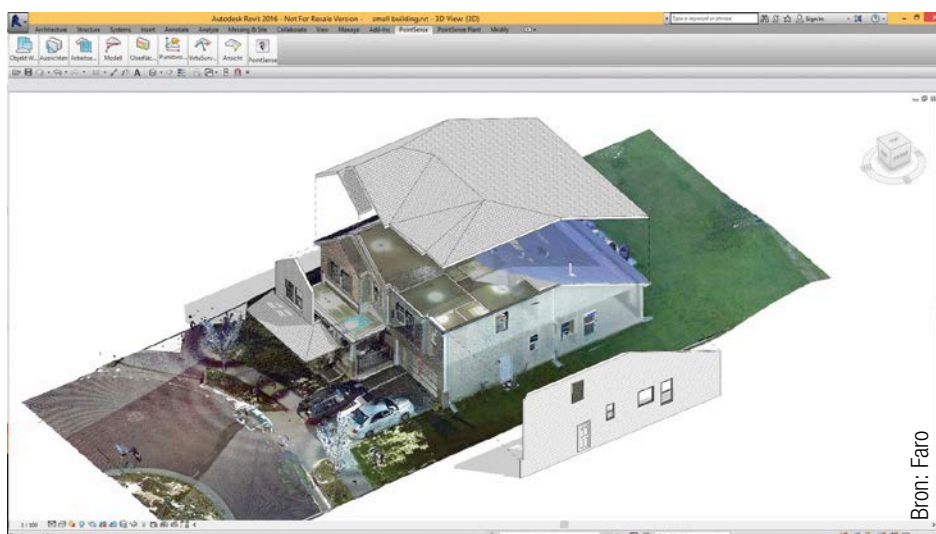
Hierbij onderscheidt men:

- strikt driedimensionale bestanden, waarbij de gebruiker zich in een modelleringsomgeving vrij rondom een object kan bewegen
- bestanden waarin het uitzicht bevroren is, maar die nog steeds driedimensionale informatie bevatten (bv. een georthonormeed aanzicht van een gevel, waarbij de dieptedimensie weergegeven wordt in de vorm van een kleurcode)
- bestanden waarin het uitzicht bevroren is en die alleen 2D-informatie bevatten (bv. een gevelaanzicht).

De omzettingen van het 3D-model zijn essentieel omdat ze de nodige informatie uit een ruwe scan halen. In paragraaf 5,2 (p. 34) worden deze mogelijkheden in detail beschreven.



Afb. 7 Segmentatie van een puntenwolk op basis van een algoritme.



Afb. 8 Semantische modellering van een puntenwolk tot parametrische objecten in een BIM-workflow.

2.2 3D-SCANTECHNIEKEN

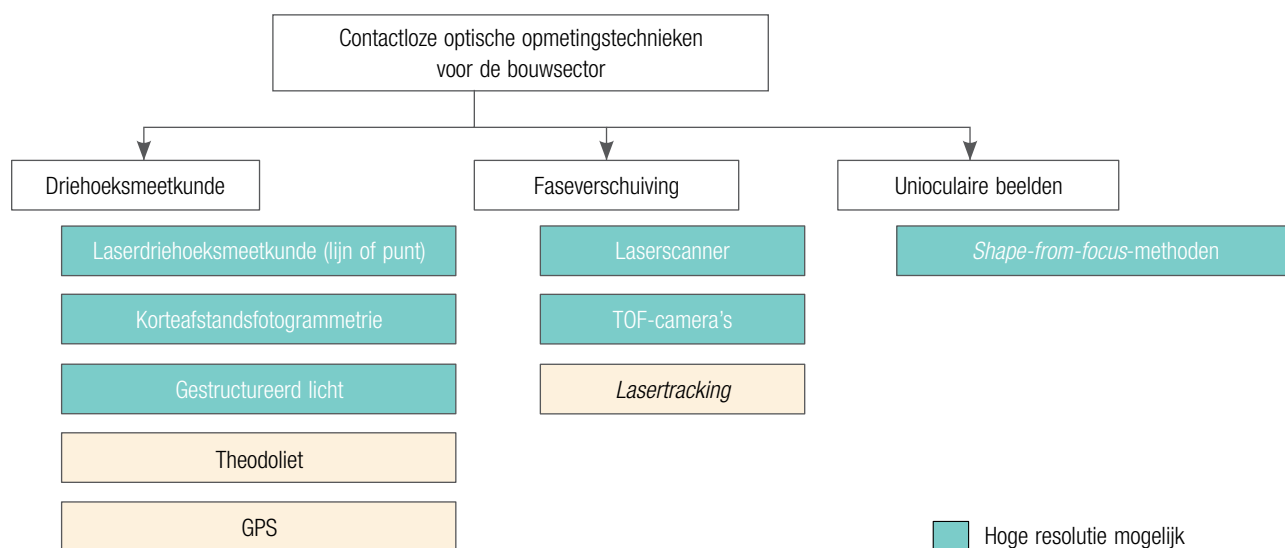
Afbeelding 9 geeft een overzicht van de contactloze 3D-digitaliseringsmethoden, gebaseerd op het lichtspectrum, die toegepast worden in de bouwsector. Men kan in de eerste plaats een onderscheid maken tussen de methoden gebaseerd op driehoeksmetkunde, op een tijdverschuiving (analyse van de *time of flight* van een signaal of een faseverschuiving tussen het uitzenden en ontvangen van een signaal) en op de analyse van opeenvolgende beelden zonder driehoeksmetkunde. Naast deze indelingsmogelijkheid zijn er ook nog andere mogelijk. Zo kunnen we bijvoorbeeld ook een onderscheid maken tussen de technologieën gebaseerd op een actieve sensor (de sensor genereert zelf het meetsignaal, zoals bij laserscanning) en die gebaseerd op een passieve sensor (bv. fotogrammetrische methoden).

Het digitaliseren van een gebouw kan op vele manieren opgevat worden: bepaalde punten van een gevel of een dak opmeten, een binnenruimte in kaart brengen of de ruwheid van een stenen bekleding meten. De resolutie en de vereiste nauwkeurigheid die daarmee gepaard gaan, verschillen eveneens. Voor elk van deze behoeften zal de meest geschikte methode dus ook verschillen.

Tabel 1 (p. 16) geeft een indeling van de meest geschikte technieken volgens de schaalcriteria van het te meten element en de lokalisatie van de meting, of ze nu *in situ* (binnen of buiten) of in een gecontroleerde omgeving uitgevoerd wordt. Zo zal de techniek of voorkeurscombinatie van technieken uiteraard verschillen naargelang men een hele buitenkant van een gebouw *in situ* of een monster van een bouw materiaal in het laboratorium digitaliseert. In dit document zullen we ons vooral richten op de methoden die ter plaatse toegepast kunnen worden op de schaal van een volledig gebouw, namelijk laserscanning en korteaafstandsfotogrammetrie. Andere methoden worden kort behandeld in § 2.2.4 (p. 22).

2.2.1 LASERSCANNING (LASERGRAMMETRIE)

De term laserscanning omvat verschillende meetprincipes, die allemaal gebaseerd zijn op de analyse van het weerkaatste licht van een laserstraal op het oppervlak van een object. Solide elementen op de voorgrond creëren dus noodzakelijkerwijs 'schaduwzones' op de achtergrond en de objecten die zich daarin bevinden, kunnen niet geometrisch waargenomen worden. Om dit soort onzichtbare zones zoveel mogelijk te beperken moet een object vaak opgemeten worden vanuit meerdere posities.



Afb. 9 Contactloze opmetingstechnieken op basis van het lichtspectrum en aangepast aan de bouwsector (TOF = *time of flight*).

2. Overzicht van de HD-opmetingstechnieken

Tabel 1 Overzicht van de meest voorkomende methoden voor de opmeting in hoge resolutie voor de bouw volgens schaalcriteria en de lokalisatie van de meting. De groene vakken stemmen overeen met de domeinen die gedetailleerd aan bod komen in dit document.

	Buitenkant (ter plaatse)	Binnenkant (ter plaatse)	Gecontroleerde omgeving (laboratorium of atelier)
Schaal > 1 m	(gevel, terrein ...) <ul style="list-style-type: none"> laserscanning (zie § 2.2.1) korteaafstandsfotogrammetrie: FRBC (zie § 2.2.2) 	(bv. een kamer) <ul style="list-style-type: none"> laserscanning (zie § 2.2.1) korteaafstandsfotogrammetrie: FRBC (*) (zie § 2.2.2) 	(bv. een prefab gevelement) <ul style="list-style-type: none"> laserscanning korteaafstandsfotogrammetrie: FRBC TOF-camera's
Schaal 0,1 - 1 m	(bv. een bouwdetail aan de buitenkant) <ul style="list-style-type: none"> laserscanning (zie § 2.2.1) korteaafstandsfotogrammetrie: FRBC (zie § 2.2.2) 	(bv. een bouwdetail aan de binnenkant) <ul style="list-style-type: none"> laserscanning (zie § 2.2.1) korteaafstandsfotogrammetrie: FRBC (zie § 2.2.2) TOF-camera's (zie § 2.2.4) 	(bv. in het labo geanalyseerd materiaalblok, klein industrieel prefab element ...) <ul style="list-style-type: none"> laserscanning korteaafstandsfotogrammetrie: FRBC gestructureerd licht TOF-camera's
Schaal < 0,1 m	(bv. ter plaatse geanalyseerde textuur van een gevelsteen) <ul style="list-style-type: none"> korteaafstandsfotogrammetrie: FRBC 	(bv. textuur van een bepleistering) <ul style="list-style-type: none"> korteaafstandsfotogrammetrie: FRBC 	(bv. analyse van de microstructuur van een ter plaatse ontnomen gevelsteen) <ul style="list-style-type: none"> korteaafstandsfotogrammetrie: FRBC <i>shape from focus</i>

(*) De reconstructietechniek op basis van meerdere beelden (zie § 2.2.2) geeft problemen voor elementen met een egale kleur. Voor effen muren of muren met herhaalde motieven wordt deze benadering bijgevolg afgeraden.

Laserscanners kunnen een groot aantal punten per seconde registreren. Elk punt wordt ten minste gedefinieerd door:

- zijn ruimtelijke coördinaten (X, Y, Z)
- een intensiteitswaarde die de intensiteit van de laserpuls die teruggekaatst wordt door het oppervlak van het object weergeeft. De puntenwolk wordt ingekleurd volgens de absorptie van het signaal door de materialen. Een witte muur absorbeert de laserstraal bijvoorbeeld beter dan de bladeren van een boom.

De instrumenten die gebruikt kunnen worden voor de studie van gebouwen zijn statische scanners van het type 'terrestrische laserscanners' (TLS in het Engels voor *Terrestrial Laser Scanners*). Ze worden gewoonlijk gemonteerd op een statief en scannen hun omgeving door rotatie (zie afbeelding 11a, p. 17).

Er bestaan twee categorieën van apparaten op basis van het meetprincipe: *time-of-flight*-systemen en faseanalyse-systemen. De belangrijkste verschillen tussen hun eigenschappen worden weergegeven in tabel 2 (p. 18).

De gebruiker moet gewoonlijk het gezichtsveld en de scanningshoek definiëren. Het gezichtsveld verwijst naar de hoekdekking van de bestudeerde plaats, terwijl de uiteindelijke dichtheid van de punten voortvloeit uit de definitie van de scanningshoek. Merk op dat de kleinst haalbare scanningshoek bepalend is voor de hoekresolutie van de scanner. Als indicatie voor de gebruiker kan het apparaat soms de resultante uitdrukken in termen van het verschil van punt tot punt op een bepaalde afstand (bv. 2 mm/10 m verwijst naar een afstand van 2 mm tussen twee punten wanneer het apparaat geïnstalleerd is op een afstand van 10 m van het te meten object). Afbeelding 11b (p. 17) geeft een voorbeeld van een gebruikersinterface, waarin de gewenste resolutie ingesteld kan worden.



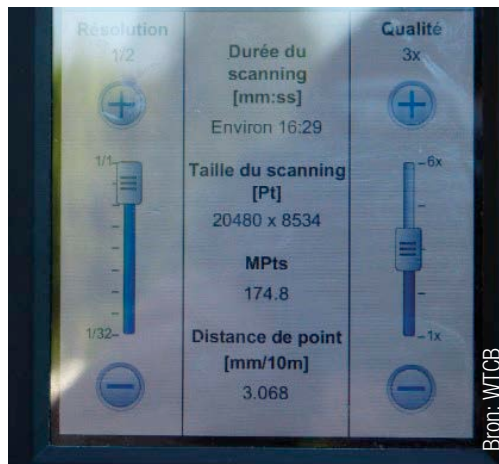
Afb. 10 Laserscanners zijn meetinstrumenten op basis van 'zichtlijnen': de objecten op de voorgrond werpen schaduwzones in de puntenwolk.

2. Overzicht van de HD-opmetingstechnieken

Een puntenwolk uit een TLS kan uiteindelijk een millimeterresolutie bereiken. Het meetprincipe in de vorm van een puntenrooster vereist echter geometrische extrapolaties voor de weergave van de 'hoeklijnen' van een bouwelement, die niet rechtstreeks detecteerbaar zijn (zie afbeelding 12). Hoe verder het gescande oppervlak zich bovendien van de laserzender en hoe schuiner het zich ten opzichte van de laserstraal bevindt, hoe verder de gemeten punten op dit oppervlak van elkaar verwijderd zijn en hoe lager de resolutie dus zal zijn. Voor een groot object zoals een gebouw kan een homogene resolutie bijgevolg enkel gegarandeerd worden door gebruik te maken van meerdere opeenvolgende scanposities (²). Merk op dat het met sommige systemen mogelijk is om gemiddelde metingen uit te voeren, maar het scannen gaat dan trager. De meeste moderne TLS-apparaten zijn ook uitgerust met een standaardcamera waarmee men kleurinformatie kan verkrijgen voor elk punt (RGB-waarden).

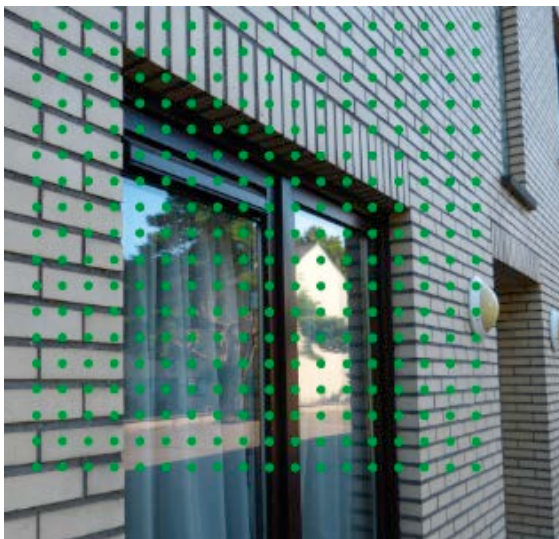


A. Een apparaat op een statief

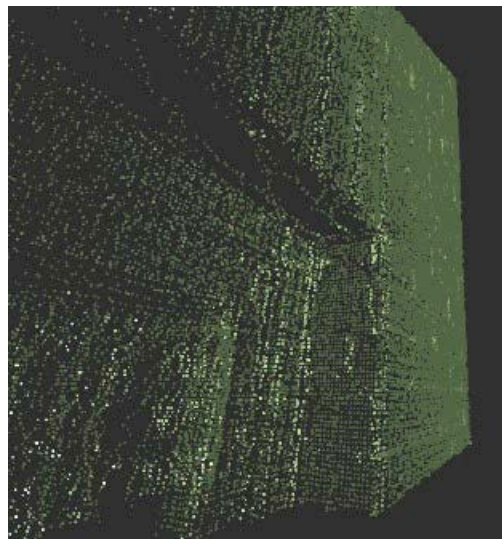


B. Voorbeeld van een instellingsmenu

Afb. 11 Een laserscanner.



A. Meetprincipe



B. Ruwe gegevens

Afb. 12 De hoeklijnen van een object zijn niet rechtstreeks detecteerbaar met een laserscanner (bron van de afbeeldingen: WTCB / bron van het model: De Ceuster).

(²) Wat bovendien de afwezigheid van schaduwzones garandeert.

2. Overzicht van de HD-opmetingstechnieken

In sommige specifieke gevallen kunnen ook mobiele scanners van het type 'IMMS' gebruikt worden (*Indoor Mobile Mapping Systems*, zie afbeelding 13a). Deze worden meestal door de gebruiker gemonteerd op een continu verplaatsbaar platform dat de binnenruimten van een gebouw kan doorkruisen. Grote ruimten kunnen dus snel gescand worden, tot 5000 m² vloeroppervlakte per uur. Het apparaat is voorzien van een systeem dat de meting corrigeert volgens de verplaatsing ervan.

Momenteel zijn dergelijke systemen echter minder nauwkeurig dan statische oplossingen; een nauwkeurigheid van één centimeter is haalbaar [L1]. Er bestaan ook draagbare oplossingen die door de gebruiker verplaatst worden (zie afbeelding 13b), met onmiskenbare voordelen, maar waarvan de doeltreffendheid nog niet voldoende gedocumenteerd is. Voor studies op zeer grote schaal zijn mobiele oplossingen ingebouwd op auto's, helikopters of vliegtuigen ook mogelijk (zie afbeelding 13c). De laserscanning gebeurt continu tijdens de verplaatsing van het voertuig waarvan de positie geregistreerd wordt door een inertiecentrale verbonden met een satellietpositioneringssysteem. De positioneringsgegevens worden vervolgens gebruikt om de lasermetingen te corrigeren. Dergelijke systemen zijn over het algemeen nog steeds zeer groot en zwaar, waardoor ingebouwd gebruik ervan in kleine mobiele vectoren (zoals drones) onmogelijk is.

Tabel 2 Kenmerken van terrestrische laserscanners. Andere kenmerken kunnen beoordeeld worden op basis van gegevens van producten (2). Bron: [J1]

	<i>Time of Flight</i>	Faseverschuiving
Scansnelheid	10.000 - 300.000 punten/s	± 1 miljoen punten/s
Minimumafstand	1 - 5 m	0,3 - 0,5 m
Maximumafstand	300 - 6000 m	80 -180 m
Nauwkeurigheid (lengte)	3 - 5 mm @50 m	2 - 3 mm @50 m
Nauwkeurigheid (hoek)	0,0002 - 0,01 °	0,001 - 0,007 °
Gewicht	10 - 20 kg	5 - 15 kg

2.2.2 FOTOGRAMMETRISCHE RECONSTRUCTIE DOOR BEELDCORRELATIE (FRBC)

Fotogrammetrie is ontstaan in de loop van de tweede helft van de 19e eeuw, niet lang na de uitvinding van de fotografie. Oorspronkelijk werden er manuele metingen uitgevoerd aan de hand van twee beelden, gebaseerd op het principe van de stereoscopie, waardoor de mens het reliëf van zijn omgeving kon beoordelen. De komst van digitale camera's, de evolutie van hun technische specificaties en de ontwikkeling van gespecialiseerde software hebben de mogelijkheden en het onderzoeksgebied van de fotogrammetrie aanzienlijk verbeterd. In enkele jaren tijd heeft er zich een diepgaande verandering van de fotogrammetrische benaderingen voltrokken door van zeer specifieke modelleringstechnieken die een aanzienlijke expertise vereisen over te schakelen op volledig geautomatiseerde reconstructiemethoden die toegankelijk zijn voor een breed publiek [J1].



Bron: Trimble

A. IMMS-oplossing



Bron: Geoslam

B. Draagbare oplossing



Bron: Centre of Excellence in Laser Scanning Research

C. In een voertuig ingebouwde oplossing

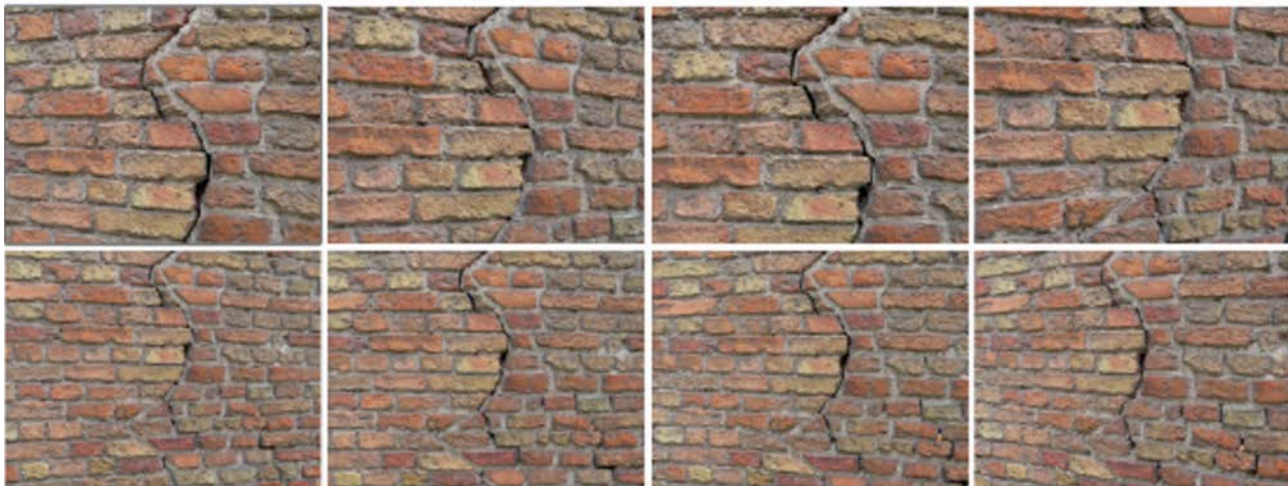
Afb. 13 Mobiele platformen voor laserscanning.

(2) Zie www.geo-matching.com/category/id46-terrestrial-laser-scanners.html

In dit document wordt enkel ingegaan op kortafstandsfotogrammetrie, dat wil zeggen het gebruik van fotografie met een afstand tussen object en camera van minder dan 300 m. We richten ons meer bepaald op een zeer recente 3D-reconstructiemethode op basis van de correlatie van een groot aantal beelden. Deze techniek wordt 'fotogrammetrie op basis van meerdere beelden' of simpelweg '3D-fotogrammetrie' genoemd.

2.2.2.1 Principe

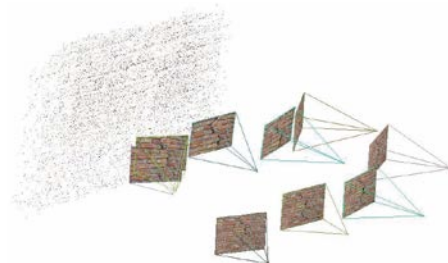
Zoals de naam al doet vermoeden is deze techniek gebaseerd op de automatische exploitatie van meerdere beelden (zie afbeelding 14). De driedimensionale topografie van een object wordt gereconstrueerd op basis van tweedimensionale projecties van het object: foto's vanuit verschillende gezichtspunten. Recente software voor fotogrammetrische reconstructie door beeldcorrelatie (FRBC) laat toe om een gedetailleerde 3D-reconstructie te verkrijgen, die qua resolutie gelijkaardig kan zijn aan de output van een TLS die voorzien is van een fotografische sensor (een puntenwolk 'X, Y, Z, R, G, B').



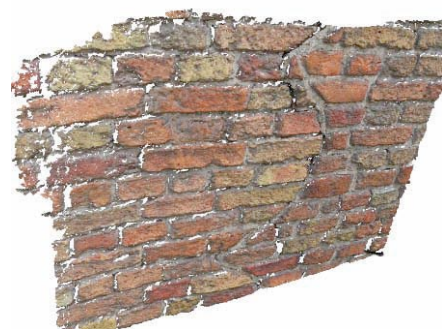
A. Selectie van een reeks foto's van eenzelfde object



B. Automatische bepaling van homologe punten tussen de verschillende foto's van het object



C. Reconstructie van de 3D-geometrie van het object en van de parameters van het fotoestel

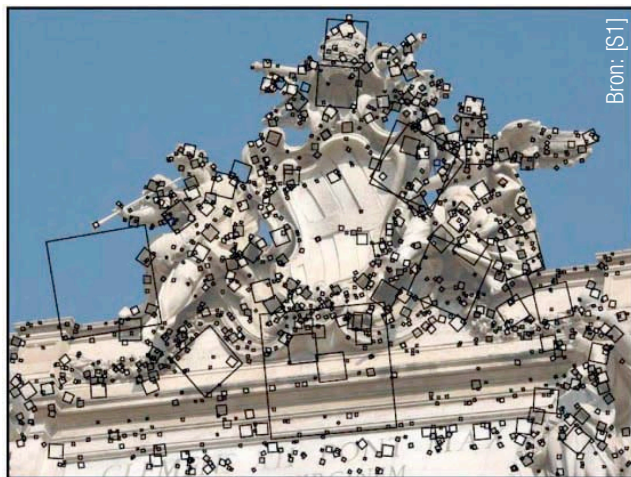


D. Reconstructie in een dichte puntenwolk op basis van de in de vorige stap geschatte parameters

Afb. 14 Principe van fotogrammetrische reconstructie door beeldcorrelatie (bron: WTCB).

2. Overzicht van de HD-opmetingstechnieken

De FRBC-software bepaalt allereerst de ‘verbindingpunten’ of ‘punten van overeenkomst’ tussen de verschillende beelden van het object (zie afbeelding 14b, p. 19). Het gaat hier om eenzelfde zone van het object (bv. een hoek van een baksteen) die een soortgelijke verschijning heeft op meerdere foto's (vooral als de foto's vanuit zeer kleine positieveranderingen genomen zijn). De met elkaar in verband gebrachte punten op de verschillende foto's maken het uiteindelijk mogelijk om het object in de ruimte te ‘situeren’. Met de vorderingen op het gebied van computervisualisatie zijn er recent enkele technieken verschenen om punten van overeenkomst automatisch te detecteren (SIFT-algoritme voor *scale invariant feature transform*, zie afbeelding 15) die de klassieke fotogrammetrieënaderingen sterk verrijkt hebben. Ze maken het mogelijk om met het softwareprogramma een groot aantal beelden automatisch te correleren, terwijl de punten van overeenkomst in het verleden handmatig bepaald moesten worden.

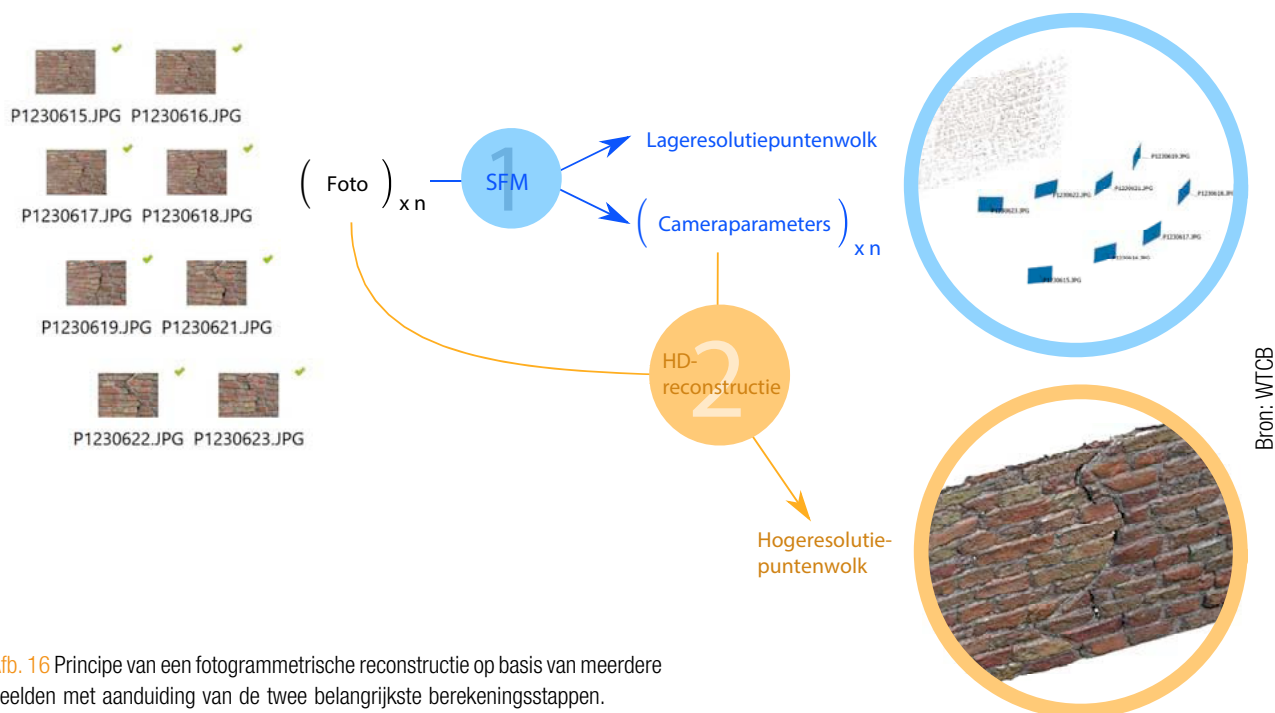


Afb. 15 Automatische bepaling van descriptoren op het beeld door het SIFT-algoritme. Deze zones worden gekoppeld op de verschillende foto's om de driedimensionale geometrie van het object te bepalen.

Het is mogelijk om de opnameparameters (optische parameters van de camera en opnamelocaties) terug te vinden op basis van de posities van de punten van overeenkomst op de verschillende beelden. De foto's worden dus ‘georiënteerd’ in de ruimte. Dit eerste optimalisatieproces wordt SFM (*structure from motion*) genoemd. Ook produceert het een puntenwolk met een lage resolutie die het gefotografeerde object ruw afbakt.

Een tweede optimalisatieproces laat toe om de puntenwolk opnieuw te verfijnen en een reconstructie met veel hogere resolutie te produceren op basis van de kalibratie van de camera's die in de SFM-fase bepaald werd. Deze tweede fase wordt hogeresolutiereconstructie (of *dense image matching*) genoemd. De technieken voor SFM en hoge resolutiereconstructie zijn complementair en niet op dezelfde uitgangspunten gebaseerd: samen maken zij het mogelijk het bestudeerde object in drie dimensies en zeer nauwkeurig te reconstrueren op basis van eenvoudige foto's (zie afbeelding 16).

Nauwkeurige puntenwolken met een zeer hoge dichtheid kunnen dus gemaakt worden op basis van een zeer groot aantal foto's (tot meerdere honderden verwerkte beelden). De moderne softwareprogramma's bieden een hoge mate van automatisering en de gebruiker hoeft niet over een uitgebreide kennis van de fotogrammetrie te beschikken. Er zijn echter een aantal factoren die de kwaliteit van de puntenwolk kunnen beïnvloeden. Een ander niet te verwaarlozen nadeel van de methode is de grote rekenkracht die vereist is voor het berekenen van een puntenwolk op basis van een groot aantal foto's.



Afb. 16 Principe van een fotogrammetrische reconstructie op basis van meerdere beelden met aanduiding van de twee belangrijkste berekeningsstappen.

2.2.2.2 Softwareprogramma's

De methode van de reconstructie door beeldcorrelatie wordt gekarakteriseerd door een zeer omvangrijke berekeningsfase en dus is de keuze en de parametrisatie van het reconstructiesoftwareprogramma van cruciaal belang. Er bestaan veel softwareprogramma's en het is niet altijd gemakkelijk voor de beginnende gebruiker om te bepalen wat de meest geschikte oplossing is.

Er dient een onderscheid gemaakt te worden tussen drie grote typen oplossingen:

1) Vereenvoudigde online of mobiele toepassingen

Dit zijn eenvoudige oplossingen waarbij de berekeningen gemaakt worden via *cloud computing* en waarbij de opties voor de gebruiker beperkt zijn. Veel mensen hebben de technologie van de reconstructie op basis van meerdere beelden ontdekt door middel van de online tool *Autodesk 123D Catch*, die getextureerde *meshes* produceerde en waarnaar vaak verwezen werd in de wereld van het 3D-printen. *Microsoft Photosynth* – dat inmiddels niet meer in gebruik is – is een ander voorbeeld van een door Microsoft ontwikkelde webinterface. De huidige trend lijkt te zijn om deze vereenvoudigde webtools om te zetten in toepassingen voor smartphone/tablet of te integreren in andere software met uitgebreidere functionaliteiten.

Een van de belangrijkste nadelen van deze oplossingen is het 'black-boxaspect', dat het berekeningsproces kenmerkt en waarbij de tussenstappen niet zichtbaar zijn voor de gebruiker. De geboden nauwkeurigheid is jammer genoeg nog ver verwijderd van de nauwkeurigheid die met professionele softwareprogramma's bereikt kan worden. Bovendien is het aantal beelden dat tegelijkertijd verwerkt kan worden soms zeer beperkt.

2) Gratis en *open source* oplossingen

Deze tweede softwaregroep lijkt natuurlijk bijzonder aantrekkelijk voor gebruikers met beperkte financiële middelen. De gebruikersinterface, als er een is, is echter over het algemeen minder intuïtief en het leerproces voor de gebruiker kan lang en veeleisend zijn (een goede kennis van de onderliggende algoritmen en theorieën is vaak vereist).

De gratis software *VisualSFM* werd in 2018 ontwikkeld door C. Wu voor niet-commercieel gebruik en was een van de eerste programma's die de grafische processor van de computer inzetten om de fotogrammetrische berekening te versnellen. De tool is relatief eenvoudig te gebruiken en zeer interoperabel, maar vereist een hoog niveau van theoretisch begrip om optimale reconstructies te verkrijgen. Een voorbeeld van *open source* is *MicMac*, een groep tools die zowel koppeling van de beelden (*TAPIOCA*), oriëntatie (*TAPAS*) als hogeresolutiereconstructie (*C3DC*) mogelijk maken. Het gebruik ervan is echter complex omdat een gebruikersinterface ontbreekt.

3) Commerciële oplossingen

De commerciële oplossingen, het laatste type tools, bieden over het algemeen de beste resultaten inzake 3D-reconstructie, maar vereisen een mogelijk aanzienlijke financiële investering. Tot de commerciële softwareprogramma's die aansluiten bij de stand van de techniek behoren *Agisoft Photoscan*, *Pix4D Mapper*, *Bentley Context Capture* en recenter: *RealityCapture*.

Enkele belangrijke parameters moeten in overweging genomen worden bij het kiezen van een softwareprogramma:

- prijs van de licentie voor permanent gebruik (± € 150 – ± € 10.000)
- opgelegde limieten met betrekking tot de inputbestanden (aantal en grootte van de foto's ...)
- rekensnelheid voor de verschillende reconstructiestappen en optimaal gebruik van de beschikbare rekenhulpmiddelen (multiprocessor, multi-GPU ...)
- mogelijkheid tot gebruik van referentiepunten voor de uitlijning en schaalbepaling en van de automatische herkenning van de referentiepunten
- exportmogelijkheden van de geproduceerde modellen
- mogelijkheid tot het creëren van afgeleide modellen (orthofoto's, *meshes* ...)
- kwaliteit van de bewerking van potentieel problematische zones op de beelden (effen, reflecterende, transparante oppervlakken ...)
- kwaliteit van het textureringsproces
- ...

2.2.3 FOTOGRAMMETRISCHE RECONSTRUCTIE VERSUS LASERSCANNING

Het is interessant om de meest gebruikte methoden voor HD-opmetingen van gebouwen te vergelijken en hun verschillen evenals de verschillende mogelijkheden toe te lichten. TLS blijft de meest betrouwbare methode voor de HD-opmeting van gevels. De aankoop van de apparatuur en de bijbehorende software vormt echter een belangrijke uitgavenpost. Fotogrammetrie kan in sommige gevallen een voordelig alternatief zijn.

2. Overzicht van de HD-opmetingstechnieken

De FRBC-methode wordt momenteel gekenmerkt door beduidende technische beperkingen. Het belangrijkste nadeel is de onvoorspelbaarheid van de uiteindelijke kwaliteit. Deze laatste is immers afhankelijk van vele, soms oncontroleerbare factoren (zie tabel 3). Een goede weergave van het bestaande op basis van fotogrammetrie vereist een doorgedreven voorbereiding van het nemen van de beelden op het terrein en de afwezigheid van problematische oppervlakken op het bestudeerde object. Zo is het bijvoorbeeld moeilijk om een witte binnenmuur te digitaliseren. Ook moet opgemerkt worden dat de berekeningstijd die noodzakelijk is om een 3D-reconstructie op basis van foto's te maken zeer tijdrovend en veeleisend qua IT-middelen kan zijn. Het sorteren van de te gebruiken foto's voor de reconstructie is dus een cruciale stap waarin overtollige foto's of foto's van onvoldoende kwaliteit geëlimineerd moeten worden om een aanvaardbare rekentijd en een bevredigend resultaat te waarborgen. Ook het verbergen van bepaalde ongewenste elementen op foto's (bv. de hemel) kan de rekentijd verkorten en de weergave verbeteren. Wanneer na de berekening blijkt dat bijkomende foto's nodig zijn om een goede reconstructie te garanderen, moet de landmeter een nieuwe opnamesessie uitvoeren. Als de lichtomstandigheden op dat moment anders zijn, moet mogelijk de hele reeks foto's opnieuw gemaakt worden. Het hoeft niet te verbazen dat dit aspect erg hinderlijk kan zijn wanneer er snel een resultaat verwacht wordt.

De initiële materiaalkosten van de FRBC-methode zijn vaak aantrekkelijk in vergelijking met die van een laserscanner. Wanneer er sprake is van het inbouwen van een eventueel heel compact opmetingsapparaat in een mobiele vector, te land of in de lucht, lijken fotografische technologieën bovendien vaak een ideale oplossing. Deze techniek wordt vandaag voornamelijk in verband gebracht met dronevluchten die bijvoorbeeld toegang verschaffen tot zones die moeilijk bereikbaar zijn met een laserscanner (bv. daken). Het is ook de aan te bevelen techniek bij het opmeten van een zeer groot terrein, waarvoor laser-scanning tijdrovend, moeilijk te implementeren en uiteindelijk redelijk duur zou zijn. De compactheid en vervoerbaarheid van de fotografische toestellen vergroten het toepassingsgebied van de mogelijkheden van 3D-reconstructie. De FRBC-methode biedt bovendien ook een zeer hoge textuurkwaliteit en de reële weergave van het object op basis van foto's met een hoge resolutie is veel realistischer dan met de huidige laserscanners [D1].

Het grootste voordeel van de lasergrammetrische methode is de mogelijkheid om een grote hoeveelheid driedimensionale informatie te verkrijgen op rechtstreekse en nauwkeurige wijze en zonder dat er geavanceerde vaardigheden voor het opmeten nodig zijn ⁽⁴⁾ [D1]. De factoren die van invloed zijn op de uiteindelijke 3D-weergave zijn veel minder talrijk dan bij de fotogrammetrische methoden. De aankoopkosten van een laserscanner, hoewel ze in dalende lijn gaan, blijven echter een belangrijke hinderpaal voor sommige actoren. Tabel 4 (p. 23) vergelijkt FRBC met laser-scanning volgens een reeks relevante criteria voor onderzoeken met betrekking tot de bouwsector.

2.2.4 ANDERE METHODEN

Naast laser-scanning en reconstructie op basis van meerdere beelden bestaan er andere 3D-digitaliseringstechnologieën ter ondersteuning van de bestudering van een gebouw of van zijn onderdelen op zeer verschillende schalen, zoals vermeld in tabel 1 (p. 16) (bv. technologieën die op de werkplaats gebruikt kunnen worden om een geautomatiseerd bouwproces te controleren (dimensionale controle)).

Ten eerste zijn er de gestructureerde lichttechnieken, dit is een actieve triangulatiemethode gebaseerd op de projectie van een tweedimensionaal patroon op het oppervlak van het bestudeerde object, dat verbonden is met een camera (zie afbeelding 17a, p. 23). Het patroon, dat een geheel van lijnen, punten of vierkanten vertoont, vervormt wanneer het het object treft,

Tabel 3 Factoren die de nauwkeurigheid van de puntenwolk kunnen beïnvloeden bij de fotogrammetrische reconstructiemethode op basis van meerdere beelden.

Op vlak van het object en de plaats die bestudeerd worden	Op vlak van de camera en de foto's
<ul style="list-style-type: none">• weinig mogelijkheden om afstand te nemen• reflecterende oppervlakken• doorzichtige oppervlakken• uniforme texturen• bewegende lichtbronnen en schaduwen• bewegende objecten op de bestudeerde plek• direct zonlicht• ...	<ul style="list-style-type: none">• lage resolutie van de fotografische sensor• voorwerpen (stof op de lens, lichtkringen ...)• ruis (te hoge ISO, wazig door beweging ...)• ongewenste effecten van een rollende sluiters (rolling shutter)• te lage velddiepte• onvoldoende 'overlap' tussen de foto's• onvoldoende aantal gezichtspunten• ...

⁽⁴⁾ De opmeting van controlepunten via een *total station* terzijde gelaten.

zodat de optische sensor de diepte-informatie kan lezen. Laserlijntriangulatiemethoden kunnen eveneens ingezet worden voor gelijkaardige toepassingen, namelijk de digitalisering van relatief kleine objecten in een gecontroleerde omgeving (bv. kwaliteitscontrole). Dit is een veelgebruikte technologie die gebaseerd is op de productie van een laserlijn (laserbron gericht op een cilindrische lens) die door het oppervlak van het bestudeerde object vervormd wordt en waarvan de vervorming optisch geanalyseerd wordt (zie afbeelding 17b).

Tabel 4 Vergelijking van de methoden.

	Laserscanning	Fotogrammetrische reconstructie door beeldcorrelatie
Nauwkeurigheid (X-, Y-, Z-afmetingen van grote architecturale elementen)	Zeer hoog (millimeter)	Laag tot hoog ⁽¹⁾
3D-textuur (microtopografie van het oppervlak van het object)	Mogelijk met een zeer hoge nauwkeurigheid	Mogelijk met een lage tot hoge nauwkeurigheid ⁽¹⁾ ⁽²⁾
Colorimetrie (RGB)	Mogelijk met sommige scanners	Mogelijk
Prijs (hardware en software)	Duur (tussen € 35.000 en € 100.000)	Aantrekkelijk (tussen € 2000 en € 20.000)
Mogelijkheid tot eenvoudige aanpassing aan een compacte mobiele drager (bv. drones)	Nee	Ja
Vereiste vaardigheden voor de opname ⁽³⁾	Laag	Matig
Vereiste vaardigheden voor de gegevensverwerking	Hoog	Zeer hoog
Opnametijd	Matig	Kort tot lang, afhankelijk van de vereiste nauwkeurigheid
Op schaal zetten	Rechtstreeks bij de opname	Onrechtstreeks bij de verwerking
Termijn van de gegevensverwerking voor de te leveren puntenwolk	Middellang	Lang tot zeer lang, afhankelijk van het aantal te verwerken foto's
IT-middelen (creatie/verwerking van bestanden)	Hoog	Zeer hoog ⁽⁴⁾

(1) Kan lokaal zeer hoog zijn. De nauwkeurigheid van de methode is echter sterk afhankelijk van de kwaliteit van de reeks foto's en de aanwezigheid van problematische oppervlakken op de gevel (bv. reflecterende oppervlakken).
 (2) Ten koste van zware inspanningen en zonder evident controlemiddel voor de juistheid van de resultaten.
 (3) Zonder rekening te houden met de bewerkingen in verband met de latere uitlijning van de modellen (opmeting van de controlepunten).
 (4) De berekening via *cloud computing* kan de vereiste middelen beperken.



A. Gestructureerd licht

Bron: HP

B. Lineaire laser gemonteerd op een mechanische arm



Bron: Nikon

Afb. 17 3D-scanner met actieve triangulatie voor digitalisering in een gecontroleerde omgeving.

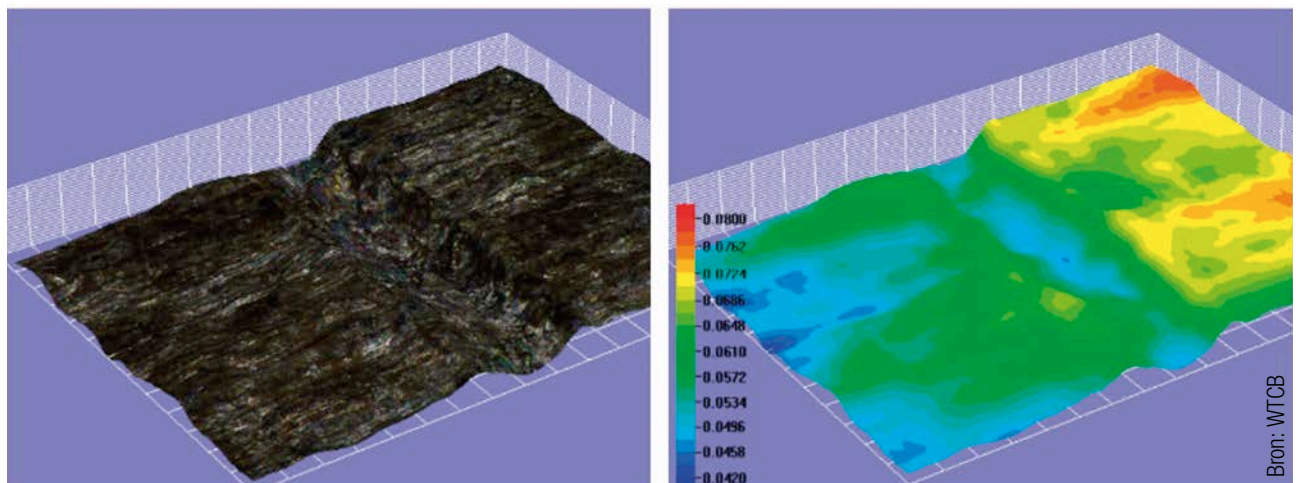
2. Overzicht van de HD-opmetingstechnieken

De *time-of-flight-camera's*, of TOF-camera's, vormen nog een andere categorie van apparaten die het grote voordeel hebben dat ze een driedimensionale weergave in real time maken. Men heeft het soms ook over '3D-camera's', maar ze mogen niet verward worden met bepaalde consumentenproducten die gewoon de mogelijkheid bieden om foto's in reliëf te zetten. We hebben het in dit document immers over apparaten die een reële diepte in kaart brengen op basis van een analyse waarbij verschillende soorten sensoren ingezet worden. Hoewel deze oplossing minder nauwkeurigheid biedt dan laserscannings-technologieën, biedt ze het voordeel om snel een evaluatie ter plaatse te verkrijgen (zie afbeelding 18), op voorwaarde dat te sterke lichtbronnen vermeden worden (gebruik buitenshuis is onmogelijk).

De laatste methode die voorgesteld wordt, maakt gebruik van de focale eigenschappen van een fotografisch objectief om er diepte-informatie uit af te leiden. Dit is de basis van de zogenaamde *shape-from-focus*-methode, die een driedimensionale reconstructie mogelijk maakt door opeenvolgende verplaatsingen van het brandpuntvlak en de bepaling van 'scherpe' zones in elke positie. Op microscopen maakt ze het bijvoorbeeld mogelijk de microstructuur van een materiaalmonster te reconstrueren (zie afbeelding 19).



Afb. 18 3D-scanner met *time-of-flight*-camera voor binnenhuisopnamen in real time.



Afb. 19 *Shape-from-focus*-methode gebruikt op een microscoop: geometrische analyse van een bemonsterd staal.

3. DE BELANGRIJKSTE STAPPEN VAN EEN HD-OPMETING OP DE BOUWPLAATS

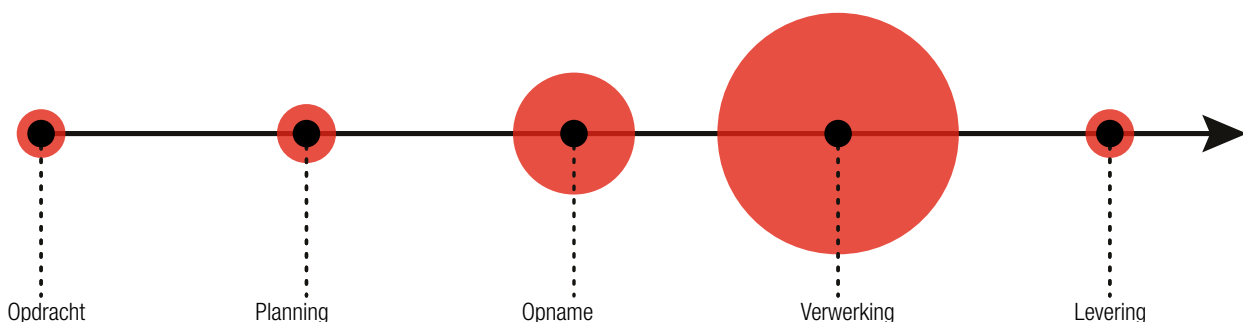
Elk project van opmeting in hoge resolutie bevat idealiter een bepaalde reeks stappen (die beschreven worden in de volgende paragrafen) [H1]. De verantwoordelijken voor de studie dienen elke stap aandachtig te analyseren in het kader van de oorspronkelijke doelstellingen om de uiteindelijke tevredenheid van de gebruikers te maximaliseren. Een inschatting van de vereiste inspanning voor elke stap wordt gegeven in afbeelding 20.

3.1 DEFINITIE VAN HET BESTEK VAN DE STUDIE EN TOEWIJZING VAN DE OPDRACHT

Het gaat erom een behoefte of doelstelling duidelijk te beschrijven in een vorm die begrijpelijk is voor de dienstverleners die verantwoordelijk zijn voor de digitalisering en voor de creatie van de eindproducten. Deze uiterst cruciale stap wordt toegelicht in hoofdstuk 7 (p. 45). Op basis van het bestek en eventuele voorafgaande bezoeken ter plaatse wordt de opdracht toegekend aan de partij die het meest aan de verwachtingen van de klant voldoet.

3.2 PLANNING VAN DE STUDIE

De voor de digitalisering aangewezen dienstverlener identificeert de meest geschikte opmetingsmethode, rekening houdend met de door de klant uitgedrukte behoefte. De specificaties van het te leveren product moeten omgezet worden in technische termen. De dienstverlener heeft dan de verantwoordelijkheid om de nodige administratieve stappen te ondernemen om de toegang tot de op te meten zones te waarborgen, met inachtneming van eventuele veiligheids-, privacy- of vertrouwelijkheidsbepalingen (zie § 8.3, p. 48). Het is vaak noodzakelijk om referentiepunten voor de uitlijning te plaatsen op diverse locaties op het terrein, waarvoor toegang tot binnenruimten vereist kan zijn. Een verkenningsfase op het terrein is soms aangewezen om eventuele hindernissen te identificeren die niet altijd zichtbaar zijn op de plannen of satellietbeelden die beschikbaar zijn op het internet. De aanwezigheid van de klant is eveneens aangewezen om elke mogelijke twijfel in verband met de interpretatie van het bestek weg te nemen [H1]. Vervolgens moet een nauwkeurig plan voor de scanning uitgewerkt worden, dat onder andere de locaties van de opeenvolgende metingen voor elk gebruikt apparaat bevat. Indien men een dichte fotogrammetrische reconstructie op basis van meerdere beelden plant, is het noodzakelijk om vooraf een fotografisch opnameplan op te stellen. De overlap tussen de verschillende foto's en de gekozen gezichtshoeken zullen immers een centrale rol spelen in de kwaliteit van het eindresultaat. Voor opmetingen met mobiele apparaten (zoals drones of IMMS-stations voor binnenruimten), moeten nauwkeurige doorgangsroutes vastgelegd worden.



Afb. 20 Vereiste inspanning voor elke stap van de opmeting. Bron: [R1]

3. De belangrijkste stappen van een HD-opmeting op de bouwplaats

3.3 FASE VAN DE OPNAME OP HET TERREIN

De fase van de opname volgt zodra de meting nauwkeurig gepland is. Het gaat er dan om de vooraf gedefinieerde stappen te volgen en eventuele hinderpalen te omzeilen die eerder geïdentificeerd werden. Indien meerdere mensen tegelijk de opmeting uitvoeren, moet interferentie tussen de partijen voorkomen worden. Bij slechte weersomstandigheden moet de dienstverlener een manier vinden om de opmetingen op een later tijdstip te organiseren en er daarbij voor zorgen dat hij conform blijft met de verkregen vergunningen voor de oorspronkelijke opdracht.

3.4 VERWERKING VAN DE RUWE GEGEVENS

Volgend op de registratiefase is een arbeidsintensieve gegevensverwerking noodzakelijk om nuttige informatie in de vorm van 2D-tekeningen of 3D-modellen te verkrijgen. Deze fase omvat verschillende deelopdrachten.

3.4.1 VOORBEHANDELINGEN

3.4.1.1 Uitlijning van de verschillende puntenwolken (zie § 2.1, p. 11)

Deze stap wordt gewoonlijk uitgevoerd met behulp van gespecialiseerde software. De fabrikanten van laserscanners leveren meestal uitgebreide softwarepakketten waarmee men veel bewerkingen kan uitvoeren, zoals de uitlijning op basis van referentiepunten (soms ‘controlepunten’ genoemd). De ruimtelijke referentie van laserscanners kan soms rechtstreeks verzekerd worden op het terrein, wanneer de exacte positie en oriëntatie van de scanner bij elke opeenvolgende meting bepaald kunnen worden [D1].

De uitlijning van puntenwolken afkomstig uit fotogrammetrie op basis van meerdere beelden wordt uitgevoerd met reconstructie-software, die de mogelijkheid bieden om de puntenwolken op te kuisen en af te stellen op basis van referentiepunten of overlappingsen.

3.4.1.2 Weergave en opkuisen van geassembleerde puntenwolken

De basisbewerkingen op een afgesteld model omvatten ruisverwijdering (afwijkende punten verwijderen), filtering (elementen die niet relevant zijn voor de klant verwijderen), puntenreductie (het totale aantal verminderen via *subsampling* of *resampling* ^(§)) en compressie (de grootte van het bestand verminderen met of zonder verlies van informatie) van de ruwe puntenwolken [D1]. Deze basisbewerkingen kunnen uitgevoerd worden in verschillende softwareprogramma's, waarvan sommige *open source* zijn (bv. *Meshlab*, *CloudCompare* ...).

3.4.1.3 Handmatige, semiautomatische of automatische segmentatie

Het gaat erom de wolk onder te verdelen in coherente kleinere gehelen, volgens een of meerdere criteria, zoals de vorm, het materiaal, de oriëntatie, de ouderdom ... Deze fase is niet altijd noodzakelijk en is afhankelijk van de vereiste eindproducten. Ze vergemakkelijkt in ieder geval het daarna volgende geometrische verwerkingswerk.

3.4.2 KWALITEITSCONTROLE

Een kwaliteitscontroleprocedure is een veiligheidsgarantie die vooral kritiek kan zijn wanneer een hoge nauwkeurigheid vereist is. Jammer genoeg zijn dergelijke procedures nog steeds moeilijk op te zetten en bestaan er weinig aanbevelingen op

(§) Beide ingrepen zijn bedoeld om het totale aantal punten te verminderen. Bij *subsampling* wordt slechts een deel van de bestaande punten behouden, terwijl bij *resampling* een reeks nieuwe punten berekend wordt op basis van de bestaande punten.

dit gebied. Toch is het mogelijk om meer controlepunten te voorzien dan strikt noodzakelijk is voor de uitlijning van de verschillende puntenwolken. Overtallige controlepunten die opgemeten worden in de *total stations* kunnen een betere controle over de juistheid van het model mogelijk maken. We merken op dat een ernstige kwaliteitscontrole een proces is dat betrekking heeft op de gehele metingsopdracht. Zo kunnen voorafgaande controlestappen van de gegevens ter plaatse een eerste schatting opleveren van de kwaliteit van de opmeting. Omwille van de rekentijd die nodig is voor de reconstructie van de 3D-modellen op basis van foto's zijn dergelijke tussentijdse controles moeilijker uit te voeren voor fotogrammetrische opnamen.

3.4.3 OMZETTINGEN VAN HET MODEL EN GEAVANCEERDE BEWERKINGEN

Vanuit een voorverwerkt model zijn vele verdere bewerkingen mogelijk om in de behoeften van de klant te voorzien, zoals:

- omzettingen van een 3D-model type A naar een 3D-model type B (bv. een puntenwolk die omgezet wordt in een getextureerde *mesh* (zie § 2.1, p. 11))
- aanvullende modelleringen (bv. BIM-modellering op basis van een gesemantiseerde wolk)
- combinaties tussen modellen
- omzettingen van 3D-modellen in 2D-weergaven.

Meer details over deze bewerkingen zijn opgenomen in § 5.2 (p. 34).

De verhouding tussen de duur van de opmeting ter plaatse en de bewerking kan sterk verschillen naargelang de gebruikte methode en de vereisten van de analyse. Een veelvoorkomend probleem betreft de manipulatie van de gegevens, die kunnen oplopen tot tientallen gigabytes bij opnamen in hoge resolutie of bij het combineren van meerdere puntenwolken.

3.5 EINDREDACTIE EN AANLEVEREN VAN DE *DELIVERABLES*

Na de verwerkingsfase moet de dienstverlener de gegevens aan de klant leveren in de in het bestek overeengekomen vorm. In sommige gevallen kan de klant aanvullende diensten vragen aan de dienstverlener (bv. bijwerking van de gegevens in de tijd of opzetten van een evolutief platform en/of toegang op afstand voor meerdere actoren). Dergelijke verzoeken moeten uiteraard gespecificeerd worden vanaf het begin van het contract.

4. HUIDIGE SITUATIE IN DE BELGISCHE BOUWSECTOR

Hoewel de technieken voor hogeresolutieopmeting tegenwoordig gemakkelijk op een economisch verantwoorde wijze toegepast kunnen worden, is het gebruik ervan in de bouwsector nog beperkt. Voor renovatieprojecten werken de (project)verantwoordelijken vaak nog met 2D-plannen en -opstanden. De ontwikkeling van de IT-mogelijkheden evenals de diversificatie van de software voor driedimensionale modellen maken het echter mogelijk om steeds meer rechtstreeks en op intuïtieve wijze met 3D-gegevens om te gaan. Deze aanpak vergemakkelijkt ook de exploitatie van een groot aantal gegevens voor het ontwerp en de uitvoering, met name door middel van BIM. Benaderingen die de opmeting in hoge resolutie in een BIM-proces zouden integreren zijn uiteraard momenteel zeker nog niet geschikt voor elk type project. Oordeelkundig gebruik van 3D-scanning, met duidelijke doelstellingen, kan echter bijzonder interessant blijken (zie hoofdstuk 5, p. 29). Het is niettemin van essentieel belang dat de verschillende actoren die moeten samenwerken rond een HD-opmeting de beschikbare tools beheersen. De nadruk moet in het bijzonder gelegd worden op de correcte definitie van de (diensten)bestekken en op de ontwikkeling van kwaliteitscontroleprocedures voor de fasen van de verwerking, de oplevering en het gebruik van 3D-gegevens.

Op industrieel vlak zou het gebruik van 3D-digitaliseringstechnologieën sneller ingang kunnen vinden bij de fabrikanten van hoogtechnologische bouwproducten. Zo hebben sommige actoren reeds het belang ingezien van snelle en accurate digitalisering, of het nu voor de kwaliteitscontrole van bewerkte onderdelen of voor de productie van oplossingen 'op maat' is. De modularisering van bouwelementen wint bijvoorbeeld aan populariteit en de noodzaak om de ontwerp- en uitvoeringsfasen te optimaliseren vindt een geschikt antwoord in het 3D-scanproces.

De opmeting van het erfgoed is nog een domein dat het voortouw neemt op het gebied van het gebruik van 3D-scans. Door de wil en nood tot inzicht in het bestaande – wat inherent is aan disciplines die betrekking hebben op historische gebouwen en monumenten – zijn veel onderzoekers en professionals al vertrouwd met deze moderne digitaliseringstechnieken. De traditionele opmetingstechnieken die in de erfgoedsector gebruikt worden, zijn immers lang en omslachtig. De kwaliteit van de verkregen gegevens door een HD-opmeting evenals de snelheid ervan veranderen de bestaande praktijken momenteel echter ingrijpend. De bijdrage van HD-opmetingen voorafgaand aan de ontwikkeling van weergave- en immersiemodellen is eveneens van cruciaal belang voor de erfgoedsector. In deze sector, waarin het behoud van het bestaande vaak voorafgegaan wordt door een bewustmakingsfase, opent de ontwikkeling van realistische modellen vele perspectieven (virtuele bezoeken, een interactieve inventaris ...). Het CyARK-project ⁽⁶⁾ is een mooi voorbeeld van een dergelijke benadering. Het projectteam wil een 'digitale bibliotheek' maken van werelderfgoedsites met behulp van geavanceerde digitaliseringstechnologieën (zie afbeelding 21) en benadrukt hierbij de didactische waarde ervan.

Kortom, we bevinden ons op een sleutelmoment van de overgang, waarop de mogelijkheden van nieuwe technologieën uit hun voegen barsten en alles mogelijk lijkt. Toch kan het moeilijk zijn om te beoordelen wat redelijkerwijs mogelijk is, gezien het grote aantal technologieën die uiterst aantrekkelijk lijken op papier, maar waarvan de implementatie op ernstige hinderpalen kan botsen.



Afb. 21 Gegevens afkomstig van een laserscan van de fontein van Pirene in Korinthe.

⁽⁶⁾ <http://www.cyark.org>

5. ANALYSE VAN DE MOGELIJKHEDEN

5.1 DOELSTELLINGEN VAN EEN STUDIE MET HD-OPMETING

De digitalisering in hoge resolutie van gebouwen biedt enorme mogelijkheden voor de bouwsector. In eerste instantie betreft dit vooral architecten, aannemers en studiebureaus, maar deze technologie biedt ook veel mogelijkheden voor beheerders op verschillende niveaus (van diegenen die belast zijn met het beheer van één enkel gebouw tot de verantwoordelijken voor hele stedenbouwkundige beleidsplannen). De erfgoedsector vormt uiteraard geen uitzondering, met diverse toepassingen op het gebied van diagnose of gewoon van inventarisatie, zoals hierboven beschreven werd.

Vanuit het oogpunt van de geleverde informatie zit het grote voordeel van 3D-scanning in de ongekende geometrische gedetailleerdheid, met de mogelijkheid om de microgeometrie en de kleur van de gescande oppervlakken te vertalen. Wat het toepassingsgebied betreft, vormt de toegankelijkheid van een hele reeks voordien moeilijk te meten plaatsen een belangrijke ontwikkeling van de moderne opmetingsmethoden. De beperking hierbij ligt nog in de omvang van de apparaten die de metingen uitvoeren en de mogelijkheid om ze op afstand te bedienen. Voorbeelden van de belangrijkste voordelen van een HD-opmeting naargelang het levensstadium van een gebouw of van een wijk zijn opgenomen in tabel 5.

Het is meer bepaald mogelijk om de toepassingen van HD-scans te hergroeperen volgens hoofdthema's, die in de volgende paragrafen achtereenvolgens overlopen worden [H1].

5.1.1 DIGITALISEREN OM HET GEBOUW IN DE RUIMTE EN/OF IN DE TIJD TE SITUEREN

In dat kader dient het HD-model om het bestaan van een gebouw of van een van zijn elementen in zijn context te plaatsen: contextualisering in de tijd (situering op een bepaald moment) en/of in de ruimte (situering binnen een groter geheel), die vooraf kan gaan aan andere meer doorgedreven analyses. Zo is het bijvoorbeeld mogelijk dat men de huidige geometrie van een gebouw wil vergelijken met oude archiefdocumenten. Het gebruik van een digitaal model kan ook dienen als medium om toekomstige ontwikkelingen voor te stellen. In dat geval is er dus ook een wil tot communicatie (zie § 5.1.4, p. 32). Ten slotte kan het HD-model ook gebruikt worden voor de ontwikkeling van een model dat evolueert in de tijd, waarbij opeenvolgende scans in de toekomst gepland worden (bv. weergave van een gebouw in zijn stedelijke omgeving). Men kan ook topologische opmetingen uitvoeren om de bouw van nieuwe vastgoedprojecten voor te bereiden (zie afbeelding 22, p. 30).

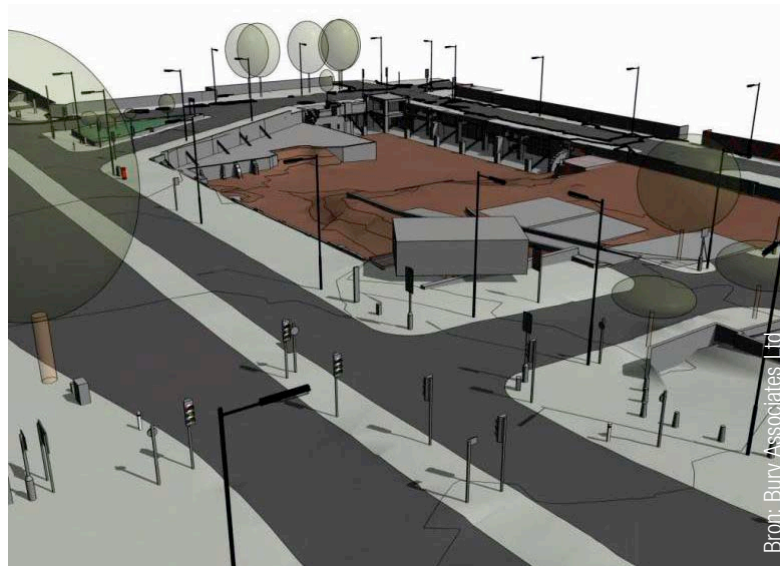
5.1.2 DIGITALISEREN OM EEN GEBOUW OF EEN DEEL ERVAN TE BEGRIJPEN

Een hogeresolutiemodel bevat enorm veel informatie die ineens vastgelegd wordt en vervolgens naar wens geraadpleegd kan worden. De volledigheid van de geometrische gegevens en de mogelijkheid om scans van binnen en buiten te combineren, kan helpen om een bestaand gebouw of een bestaande site beter te begrijpen: indeling van de structuren, de volumes ... (zie afbeelding 23, p. 30). Een 3D-scan maakt het ook mogelijk om afstand te nemen en dus toegang te krijgen tot informatie die misschien niet onmiddellijk zichtbaar is voor de waarnemer ter plaatse. Drones worden bijvoorbeeld steeds meer gebruikt voor de opmeting van archeologische sites (zie afbeelding 24, p. 30).

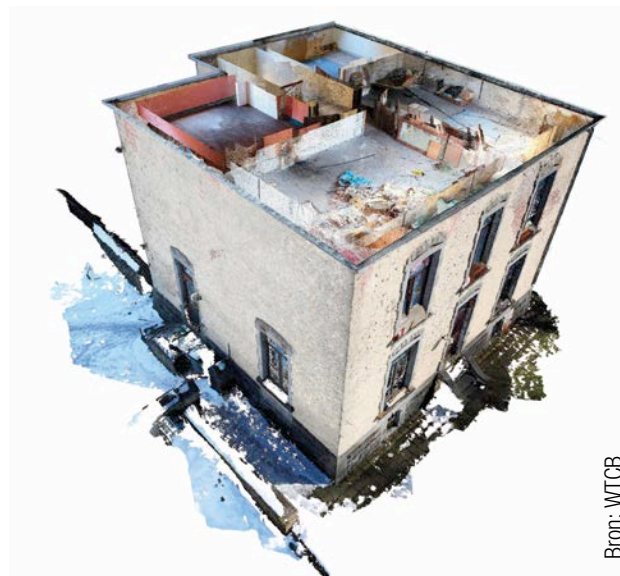
Tabel 5 Voorbeelden van de belangrijkste voordelen van een hogeresolutieopmeting en mogelijke toepassingen naargelang het levensstadium van het betrokken gebouw of de betrokken wijk.

Voor een verbouwing	Tijdens een verbouwing	Tijdens het gebruik
<ul style="list-style-type: none">• verbetering van de beschikbare documentatie over de bestaande toestand (bv. plattegronden, gevelopstanden, oppervlaktetoestanden)• ontwikkeling van een basis voor geometrische meting voor industriële productie• ...	<ul style="list-style-type: none">• controle van het proces van de verbouwing van het gebouw en anticipatie op mogelijke problemen• begeleiding van de teams op de bouwplaats (bv. systemen installeren of verwijderen)• ...	<ul style="list-style-type: none">• verbetering van de beschikbare informatie over de bestaande toestand (bv. systemen)• hulp bij de implementatie van doeltreffende hulpmiddelen voor <i>facility management</i>• uitvoering van de opvolging van een element in de loop van de tijd• ...

5. Analyse van de mogelijkheden



Afb. 22 Modellering van een topografisch BIM-model op basis van een opmeting met de laserscanner.



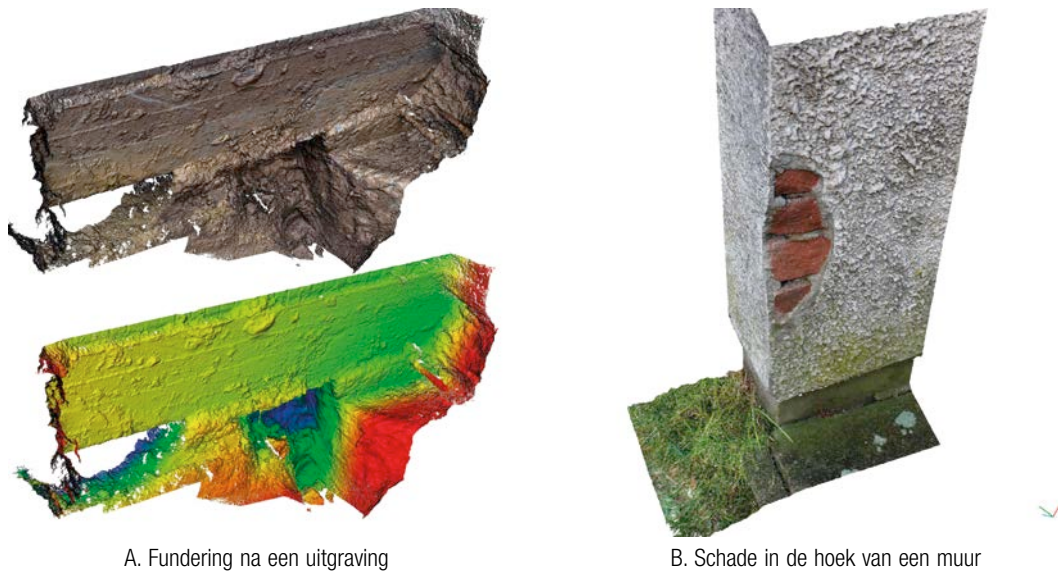
Afb. 23 De combinatie van scans van de binnen- en buitenkant van het gebouw maakt het mogelijk om de geometrie af te leiden met een ongekende mate van volledigheid.



Afb. 24 Gebruik van een drone voor de FRBC-opmeting van een historische site.

5.1.3 DIGITALISEREN OM TE METEN, TE DIAGNOSTICEREN EN TE BEOORDELEN

Hogeresolutieopmetingen worden het meest gebruikt voor deze toepassing. Ten eerste maken de nauwkeurigheid en de volledigheid van de geometrische gegevens het mogelijk om een groot aantal dimensionale metingen uit te voeren, wat veelvuldige verplaatsingen vermijdt. Een expert zou ook verschillende diagnoses kunnen uitvoeren op basis van de HD-opmeting: beoordeling van vervormingen, belichting van pathologieën ... (zie afbeelding 25). Een snelle beoordeling van de voortgang van een project of van materiële schade op een getroffen locatie (zie afbeelding 26) is een ander typisch voorbeeld.



Afb. 25 Digitalisering van architecturale elementen door middel van een fotogrammetrische studie (bron: WTCB).

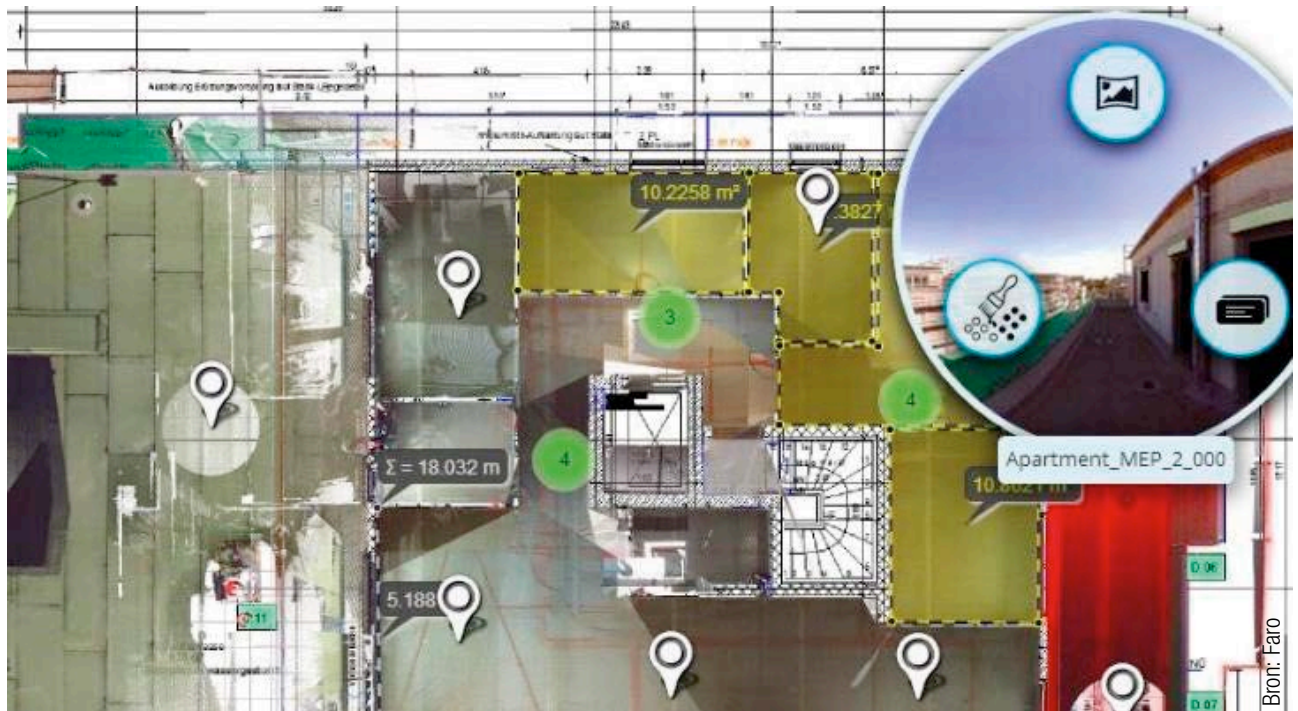


Afb. 26 Studie met een laserscanner voor een snelle beoordeling van schade.

5. Analyse van de mogelijkheden

5.1.4 DIGITALISEREN OM TE COMMUNICEREN

Een 3D-scan vormt een stevige basis voor communicatie omdat het informatie doorgeeft in een natuurgetrouwe driedimensionale vorm die waarneembaar is vanuit meerdere gezichtspunten in de ruimte. Er zijn vele toepassingen voor HD-opmetingen. Waar vroeger de technologische beperkingen leidden tot het gebruik van 2D-voorstellingen van de werkelijkheid, is het nu mogelijk om de communicatiemiddelen tussen actoren te veranderen door ze intuïtiever, realistischer en vollediger te maken via driedimensionale voorstellingen, die mogelijk van aantekeningen voorzien zijn (zie afbeeldingen 27 en 28). Men kan gebruikmaken van het model om een fotorealistisch model van het bestudeerde gebouw, monument of architecturale element te maken.



Afb. 27 Annotatie van een puntenwolk in een platform gericht op communicatie tussen actoren.



Afb. 28 Scan van een binnenruimte om pathologieën te belichten.

5.1.5 DIGITALISEREN OM TE ONTWERPEN EN TE PRODUCEREN

Een nauwkeurige driedimensionale voorstelling van de actuele staat van een gebouw is zeer waardevol voor de ontwerpteam die betrokken zijn bij een renovatietraject. Een veelvoorkomende toepassing is het ontwerp van MEP-systemen (*mechanical, electrical and plumbing*), waarbij een verhoogde prefabricatie mogelijk gemaakt wordt door een beter inzicht in de bestaande ruimten (zie afbeelding 29).

3D-modellen kunnen ook als basis dienen voor een reeks productieprocessen, of het nu gaat om een industriële of meer specifieke productie (bv. voor de restauratie van elementen van historische gebouwen). 3D-printtechnieken kunnen uiteraard van pas komen in deze context, net als vele digitaal gestuurde productietechnieken. Op kleine schaal is het bijvoorbeeld mogelijk dat men een beschadigd architecturaal element wil reproduceren.

5.1.6 DIGITALISEREN OM TE COMMUNICEREN

Een betrouwbare voorstelling van een gebouw of wijk *as built* is een uiterst waardevol resultaat voor beheerders (zie afbeelding 30, p. 34). Een HD-scan maakt het mogelijk om beslissingen te nemen door zich te baseren op een volledige weergave van de zones van belang en eventueel bepaalde aspecten te belichten die niet zichtbaar zijn op tweedimensionale voorstellingen of tijdens eenvoudige bezoeken ter plaatse. In BIM-modellen omgezette scans maken het mogelijk om strategische beslissingen inzake verbouwingen of aanpassingen van de bestaande omgeving te visualiseren. Dergelijke modellen kunnen overigens ook dienen voor de continue exploitatie van een gebouw. Puntenwolken of daarvan afgeleide 3D-modellen zouden in de toekomst ook verschillende administratieve procedures kunnen ondersteunen, zoals vergunningsaanvragen.

5.1.7 DIGITALISEREN OM TE CONTROLEREN

Een nauwkeurige voorstelling van het bestaande maakt het ook mogelijk om bepaalde geometrische aspecten te controleren (bv. een controle op een bouwplaats waar een renovatie uitgevoerd wordt). Op deze manier kunnen eventuele uitvoeringsfouten gemakkelijk geïdentificeerd worden en kan men anticiperen op de gevolgen ervan. Voor grote projecten, waarbij dergelijke verzoeken herhaald worden, kan men ook in een systematisch en regelmatig controleproces voorzien (bv. via een BIM-model dat als referentie dient). De scans bieden bovendien ook de mogelijkheid om na te gaan of de beschikbare documentatie over het bestaande betrouwbaar is (zie afbeelding 31, p. 34). Voor industriële vormen de mogelijkheden van kwaliteitscontrole op de assemblagelijnen nog een laatste duidelijk voorbeeld.

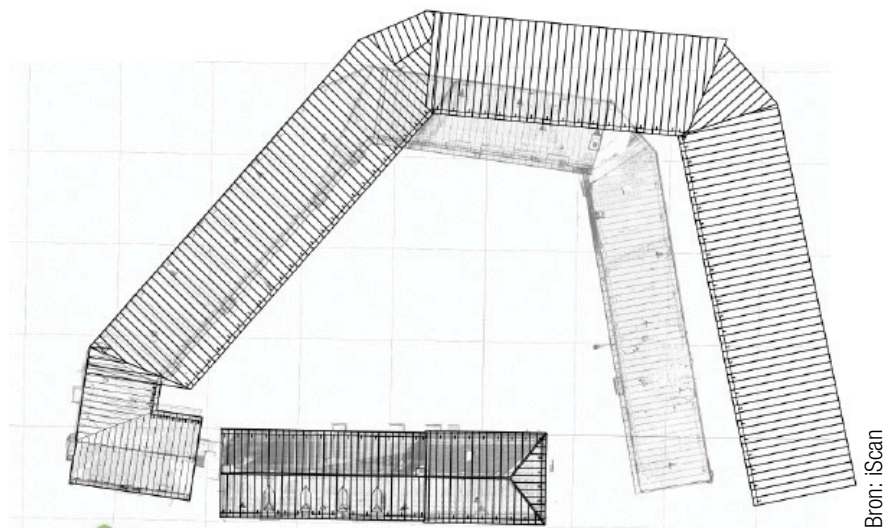


Afb. 29 Prefabricatie van HVAC-systemen op basis van een puntenwolk.

5. Analyse van de mogelijkheden



Afb. 30 Grootschalige studie voor een stedelijke planning.



Afb. 31 Vergelijking tussen een daktracé op basis van de HD-opmeting en de beschikbare documentatie.

5.2 EINDMODELLEN EN DIGITALE WERKSTROOM

Zoals we gezien hebben, bestaan er vele redenen om een beroep te doen op een geometrische studie in hoge resolutie. Dit roept de vraag op welke digitale verwerking mogelijk is op basis van het ruwe bestand van de 3D-scan (een rechtstreeks opgemeten of van foto's afgeleide puntenwolk) om de finale gebruiksdoelstellingen te bereiken.

We onderscheiden twee categorieën van verwerkingen: eenvoudige, die onder de algemene bevoegdheden van landmeters vallen, en geavanceerde, die uitingen van specifieke behoeften zijn waarvoor vaak deskundigen op de grens van verschillende vakgebieden vereist zijn. Een samenvattend schema in de bijlage illustreert de belangrijkste mogelijke routes voor 3D-informatie uit een ruw model.

5.2.1 EENVOUDIGE TOEPASSINGEN VOOR DE VISUALISATIE EN VOOR BOUWKUNDIGE TEKENINGEN

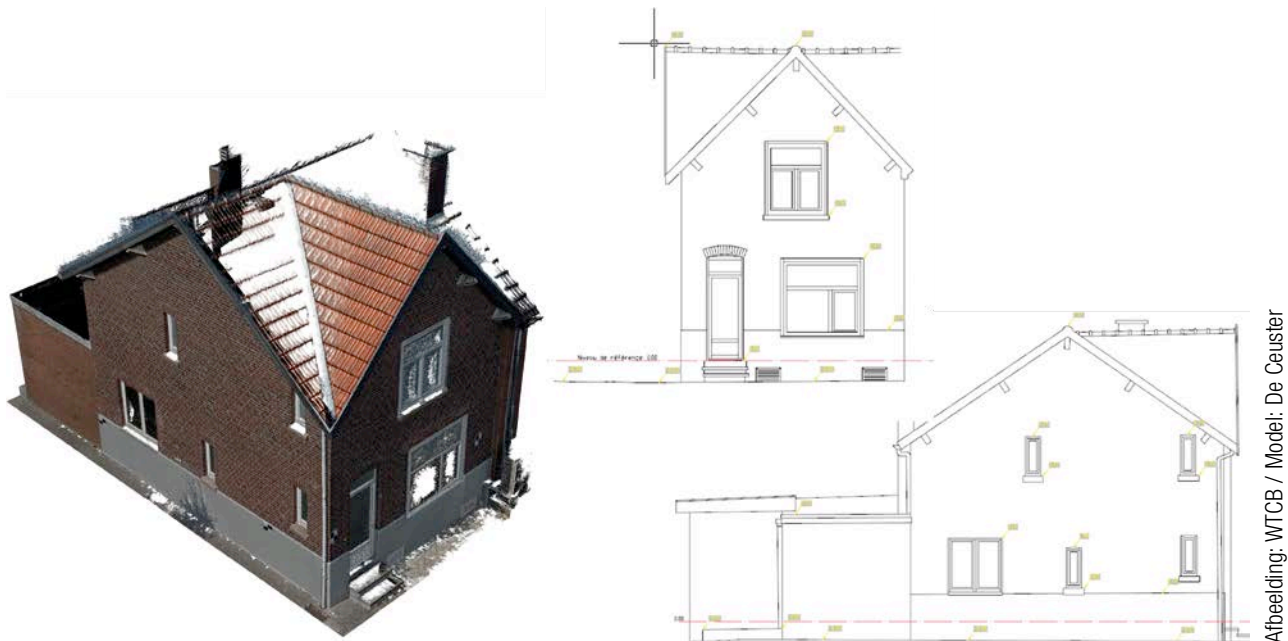
In het proces van de studie of de verbouwing van bestaande gebouwen is de meest voorkomende behoefte het ter beschikking stellen van modellen om de afmetingen op te nemen. Veel actoren zullen overigens niet de door HD-metingen geboden resolutie nodig hebben op elke plek van het gebouw, maar stellen zich tevreden met 2D-tekeningen gemaakt op basis van de puntenwolken (bv. gevelaanzichten, plattegronden en technische doorsneden (zie afbeelding 32)). Voor de tekenaar kan het ook nuttig zijn om te werken op basis van orthofoto's of orthozichten van de puntenwolk. Een orthofoto of orthobeeld is een beeld van een object dat gecorrigeerd wordt om vrij te zijn van vervorming als gevolg van de invalshoek of de gebruikte optiek (orthorectificatie). Het gaat om een vlakke orthogonale projectie van het gefotografeerde object [D1]. Het is vaak mogelijk om dergelijke bestanden in FRBC-software te genereren, wat een van de sterke punten is van de fotogrammetrische benadering.

Een orthoview of orthografisch aanzicht is een orthogonale voorstelling van een 3D-model. Het gaat met andere woorden om een specifiek aanzicht van het model zonder perspectief. In tegenstelling tot orthofoto's, die verkregen worden uit het assembleren van beelden en bijgevolg een zeer hoge ruimtelijke resolutie hebben, is de kwaliteit van orthozichten afhankelijk van het onderliggende model. Wanneer de door een puntenwolk geboden resolutie erg hoog is (zie afbeelding 33, p. 36), kunnen de orthofoto's als hulpmiddel dienen voor een tekening of analyse.

Deze omzetting van 3D-informatie in hoge resolutie in lijntekeningen kan gewoonlijk uitgevoerd worden in digitale tekensoftware (CO of 'CAD' in het Engels), op voorwaarde dat het mogelijk is een puntenwolk te importeren in deze software. Er wordt in dat geval gesproken van *scan-to-CAD*. Het belangrijkste voordeel van een 3D-scan ligt dan in het ter beschikking stellen van een volledig model, dat eenmalig en voorgoed verworven wordt en als leidraad kan dienen voor een 'klassieke' 2D-modelleringsproces. Sommige veelvoorkomende tweedimensionale voorstellingspraktijken zouden echter in de (nabije) toekomst kunnen verdwijnen, wanneer de werkmethoden aangepast zullen zijn aan de moderne 3D-scanningstechnologieën. Tegenwoordig bestaan er al veel toepassingen waarbij CAD-modelleringsproces in drie dimensies opportuun is. De tekenaar gebruikt dan de puntenwolk als hulpmiddel voor de 3D-lijntekening of voor de 3D-modelleringsproces in geometrische basisvormen (bollen, kubussen ...).

Veel fabrikanten van laserscanners bieden softwarepakketten of plug-ins aan voor 2D- of 3D-CAD-tekeningen die het *scan-to-CAD*-modelleringsproces vergemakkelijken (zie afbeelding 34, p. 36). De 3D-CAD-bestanden kunnen dan in een latere fase in een BIM-model geïntegreerd worden.

Sommige actoren hebben alleen de ruwe of licht aangepaste puntenwolk nodig (opgekuiste, ingekleurde wolk, gesegmenteerd



Afbeelding: WTCB / Model: De Ceuster

Afb. 32 Productie van 2D-tekeningen op basis van een HD-opmeting.

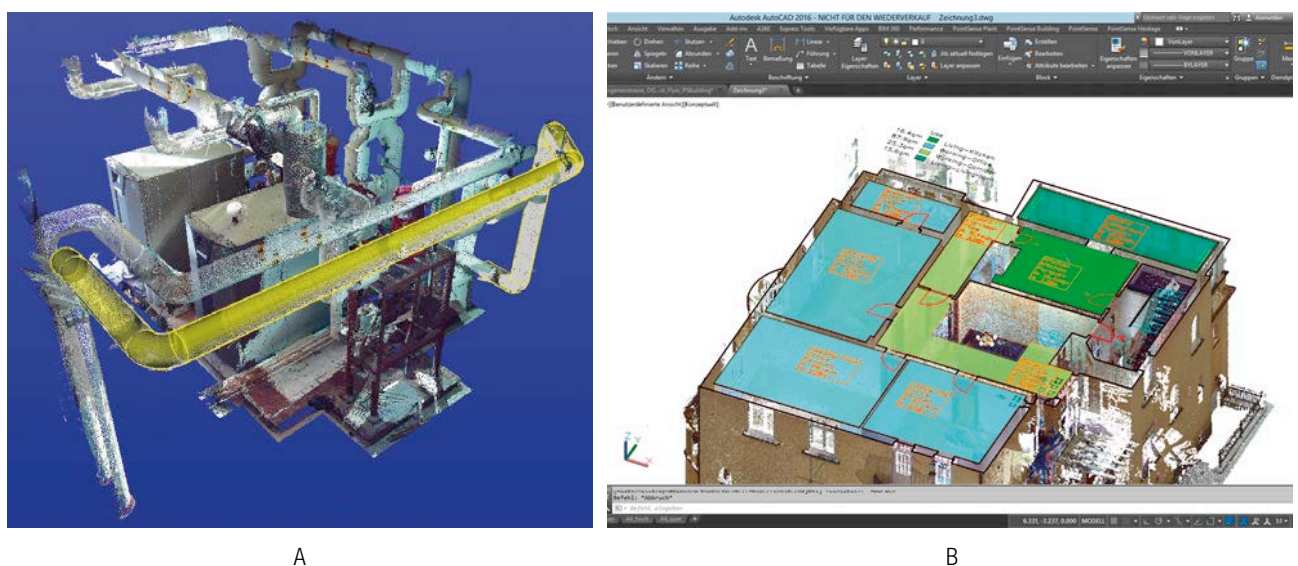
5. Analyse van de mogelijkheden

per puntengroep ...). Voor klanten die niet over de nodige IT-middelen beschikken voor de bewerking van dergelijke, mogelijk zeer zware bestanden bestaat de mogelijkheid om de puntenwolk te hosten op computerservers. De fabrikanten van laserscanners bieden gewoonlijk hostingoplossingen in de cloud aan, met vereenvoudigde softwareprogramma's die niet-ingewijde gebruikers in staat stellen eenvoudig toegang te verkrijgen tot 3D-informatie op afstand en eenvoudige metingen en annotaties uit te voeren (bv. *Leica TruView* of *Faro Webshare*) (zie afbeelding 35, p. 37).

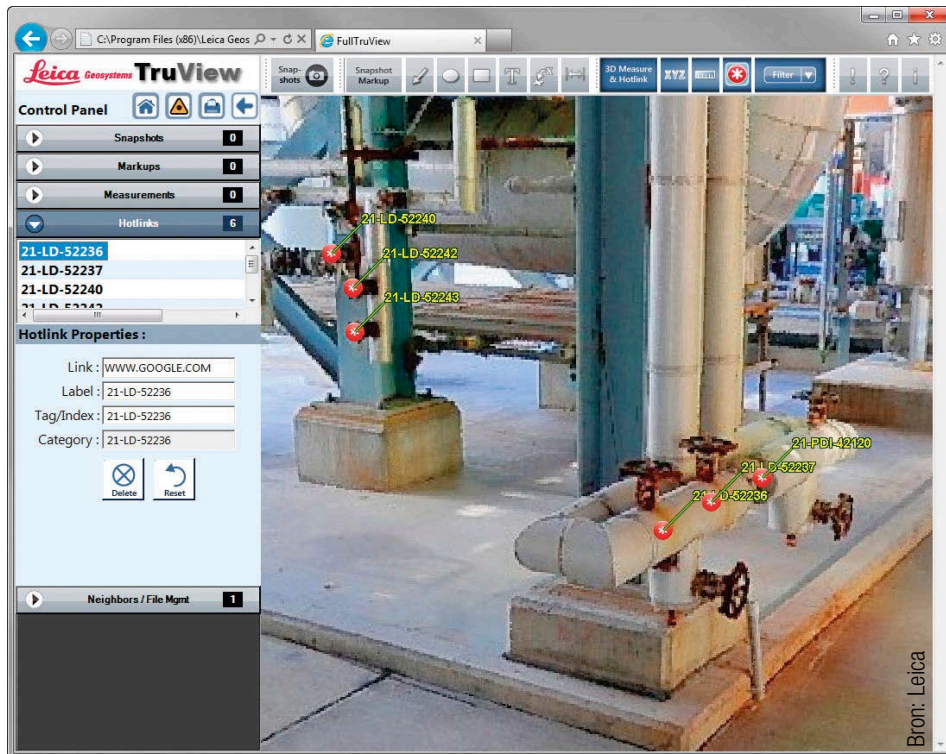
Wanneer vooral een goede visualisatie van het 3D-model gewenst is, is het soms interessanter om een puntenwolk om te zetten in een getextureerde *mesh*. 3D-modelleringssoftwareprogramma's voor multimediatoepassingen zijn immers traditioneel gebaseerd op dergelijke modellen, die het mogelijk maken fotorealistische weergaven te genereren. De transformatie kan automatisch uitgevoerd worden met behulp van algoritmen of handmatig met de puntenwolk als basis voor de polygonale modellering. De modelleerder zal hier goed moeten letten op de texturen die gebruikt worden om 'het model aan te kleden'. De fotogrammetrische methode biedt hier – op zichzelf of in combinatie met laserscanning – een duidelijk voordeel.



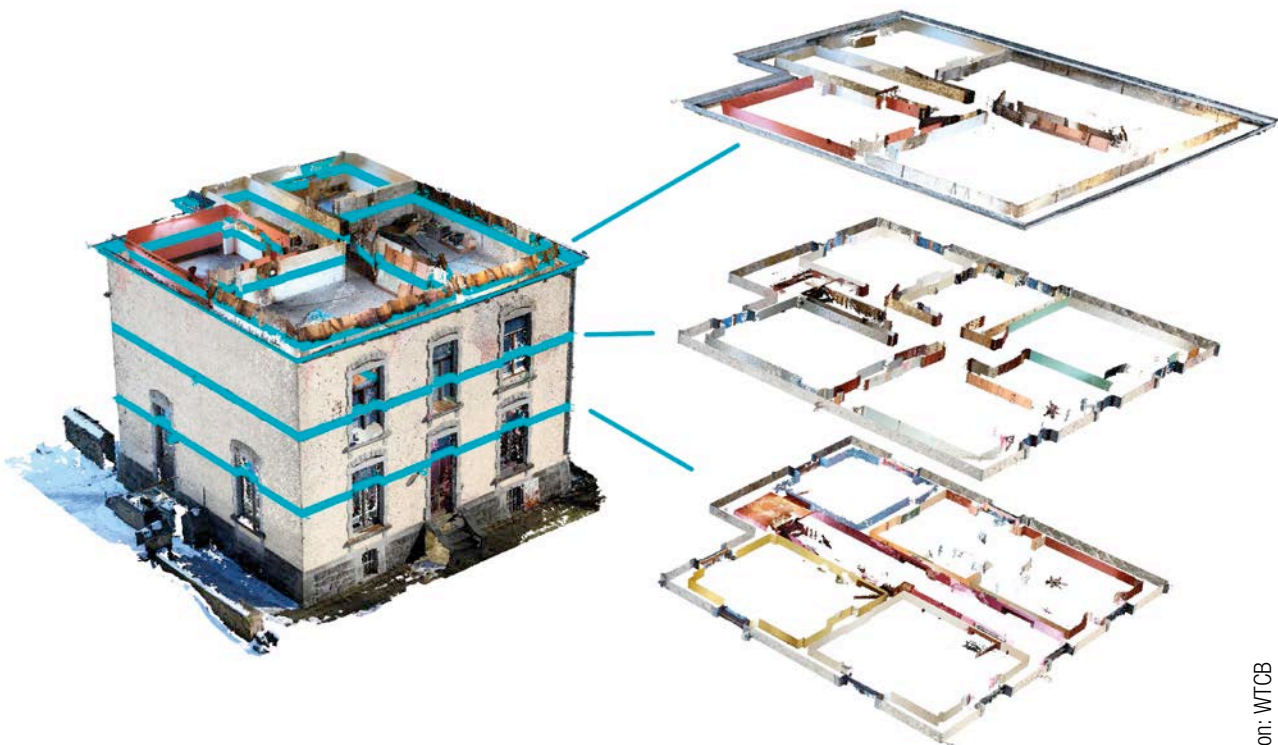
Afb. 33 Ortho-zicht van een puntenwolk met een zeer hoge resolutie afkomstig van de fotogrammetrische methode.



Afb. 34 A. Van 3D-scan naar 3D-CAD-tekening in het softwareprogramma *Trimble Realworks*.
B. Productie van plannen op basis van de puntenwolk in het softwareprogramma *Faro PointSense*.



Afb. 35 Softwareprogramma *Leica TruView* ontworpen voor professionals die puntenwolken willen visualiseren en meten zonder diepgaande kennis van laserscanning, CAD of 3D.



Afb. 36 Doorsnede van een puntenwolk in 'slijffjes' om de grootte te verkleinen en interessante elementen te benadrukken.

5. Analyse van de mogelijkheden

5.2.2 GEAVANCEERDE TOEPASSINGEN

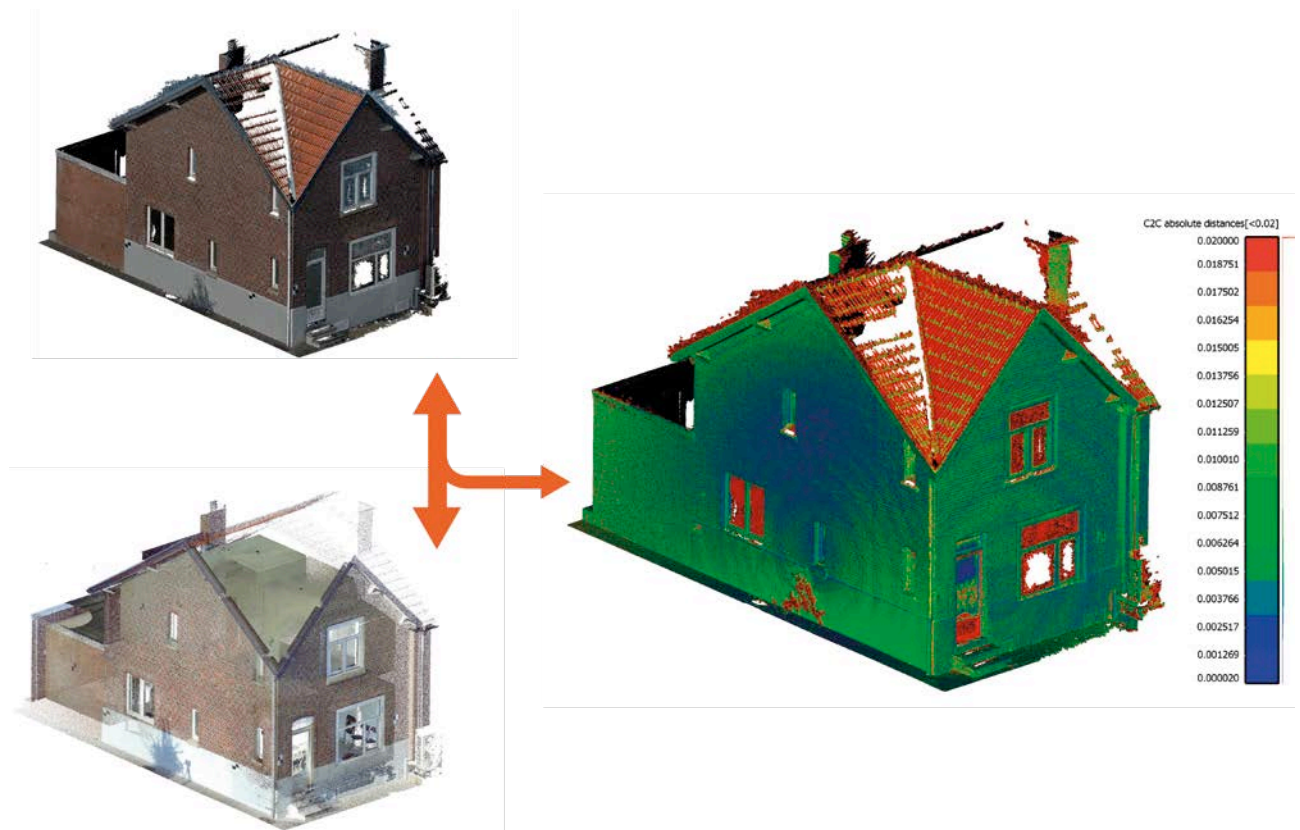
Deze toepassingen gaan gepaard met meer complexe bewerkingen van de puntenwolken. Er bestaan immers veel mogelijke 'werkstromen' om het geschikte eindproduct voor een klant te produceren. Deze paragraaf geeft een overzicht van enkele van deze werkstromen. De uitwerking van BIM-modellen vormt een specifieke toepassing die beschreven wordt in hoofdstuk 6 (p. 41).

5.2.2.1 Confrontatie van 3D-scanning met een referentiemodel (*Scan-versus-CAD* of *Scan-versus-Scan*)

Veel softwareprogramma's voor 3D-modellering of -bewerking van bestanden laten toe om verschillende soorten modellen (puntenwolken, *meshes*, solide objecten ...) tegelijk te importeren. Sommige daarvan beschikken bovendien over hulpmiddelen voor dimensionale analyses. Hiermee is het bijvoorbeeld mogelijk om de afwijking van een 3D-scan ten opzichte van een referentiemodel te bepalen. Deze geometrische referenties zijn eenvoudige basisobjecten zoals vlakken (bv. voor de analyse van de vlakheid van een gevel) of een andere puntenwolk (bv. voor de analyse van de bewegingen van een structuur in de loop van de tijd). Afbeelding 37 toont een voorbeeld van een vergelijking tussen twee puntenwolken, respectievelijk afkomstig uit een opmeting met een laserscanner en een fotogrammetrische opmeting. Softwareprogramma's zoals *CloudCompare* maken het mogelijk elk punt van een wolk in te kleuren naargelang de afstand ervan tot het dichtstbijzijnde punt van een andere wolk.

5.2.2.2 Het gebruik van 3D-scanning voor de productie (*Scan-to-CAM*)

Bedrijven die gebruikmaken van moderne productiemethoden met een doorgedreven automatisering gebruiken nu reeds digitale hulpmiddelen. Snij- en assemblagemachines kunnen gecombineerd worden op volledig geautomatiseerde of semi-geautomatiseerde productielijnen die de productiecapaciteit en de graad van techniciteit van de bouwelementen vereenvoudigen (zie afbeelding 38, p. 39). Deze machines vereisen productiemodellen met een duidelijke en opeenvolgende verplaatsingsvolgorde van het snij- en/of freesgereedschap (machinecommando's).

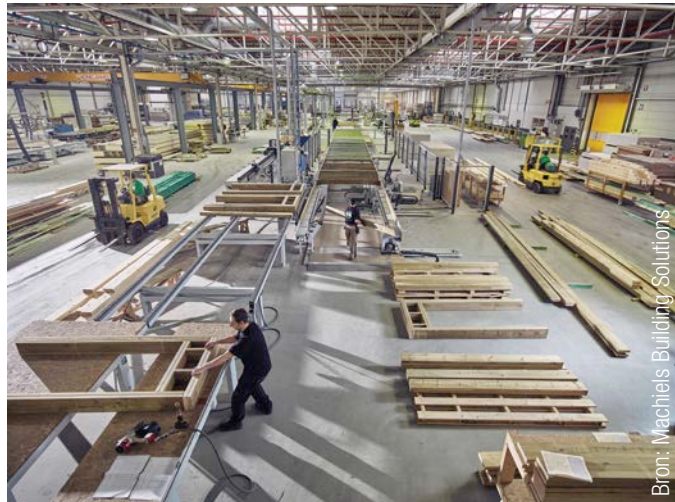


Afb. 37 Afstand van punt tot punt tussen een puntenwolk verkregen door fotogrammetrie (links bovenaan) en een referentiwolk verkregen door lasergrammetrie (links onderaan), aangeduid met een kleurcode.

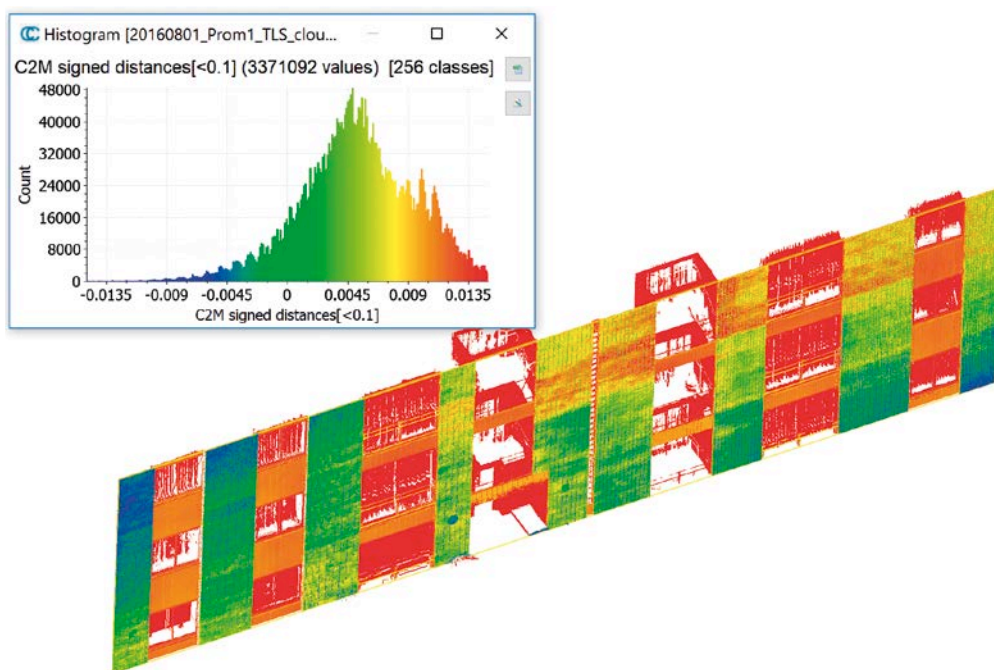
De industrie van prefab gevelelementen profiteert bijvoorbeeld van deze snelle ontwikkelingen onder de impuls van een sterk groeiende markt en is niet langer beperkt tot nieuwbouw. Een complete gids voor de implementatie van dergelijke oplossingen voor de restauratiesector werd opgemaakt tijdens het AIMES-onderzoek in Brussel. Dit is het paradigma van de industrialisering in de bouw, met een versnelling van de bouwfase geassocieerd met een verhoogde kwaliteitscontrole. Dergelijke vooruitgang op het gebied van de industriële machine en het beheer van de bouwplaats gaat uiteraard hand in hand met een grondige evolutie van de IT-middelen.

Het is moeilijk om geprefabriceerde elementen aan te passen op de bouwplaats. Bijgevolg is het waardevol om overzeer nauwkeurige geometrische informatie te beschikken over de bestaande oppervlakken die in contact komen met deze nieuwe elementen. De analyse van de geometrische gegevens van een bestaande gevel kan bijvoorbeeld nuttige achtergrondinformatie bieden voor het ontwerp van een prefab rolluikkast die op de gevel geïnstalleerd zal worden. In de meeste gevallen zal de gevel die in contact moet komen met deze prefab systemen onregelmatigheden vertonen die beschreven kunnen worden via HD-opmeting (zie afbeelding 39). Een grondige studie van deze onregelmatigheden maakt het mogelijk om de aanpassingen op de bouwplaats te beperken en eventuele problemen te voorkomen: programma, kosten en prestaties zijn op deze manier gegarandeerd.

Samengevat zal het geavanceerde gebruik van 3D-scans fabrikanten van geprefabriceerde oplossingen op voorhand in staat stellen om de geometrische context te integreren van bij de aanvang van de vervaardiging van het product. Zo kunnen oplossingen ‘op maat’ ontworpen worden, waarbij de puntenwolk die het bestaande architecturale element beschrijft, gebruikt wordt voor het definiëren van een CP-model van het stuk dat eraan toegevoegd zal worden. CP-modellen verwijzen naar 3D- of 2D-modellen waaraan bewegingsopdrachten voor de machines toegevoegd zijn. Dit is een indirect gebruik van de scans, die als een hulpmiddel bij het ontwerp van het werkstuk fungeren. Het is ook mogelijk om ze rechtstreeks te gebruiken voor bepaalde bouwprocedures. Dit is het geval voor 3D-printing en andere technieken van ‘additieve productie’, die onder meer kunnen dienen voor de reproductie van architecturale elementen (zie afbeelding 40, p. 40).



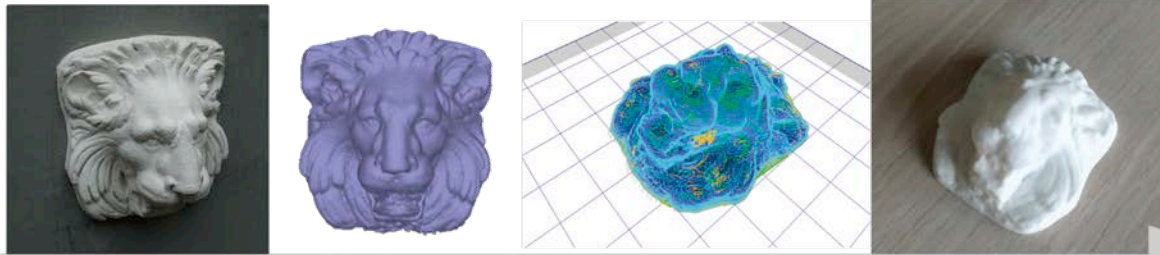
Afb. 38 Semiautomatische productielijn van geprefabriceerde houtskelet gevelpanelen.



Afb. 39 Nuttige output voor de fabrikant van prefab wanden voor renovatie: een weergave van de onregelmatigheden van de bestaande gevel in de vorm van een kleurcode.

Bron: WTCB

5. Analyse van de mogelijkheden



Bron: WTCB

Afb. 40 Reproductie van een architecturaal ornament: productie van een CP-bestand voor een 3D-print op basis van een *mesh*.

5.2.2.3 Het gebruik van 3D-scanning voor digitale simulaties

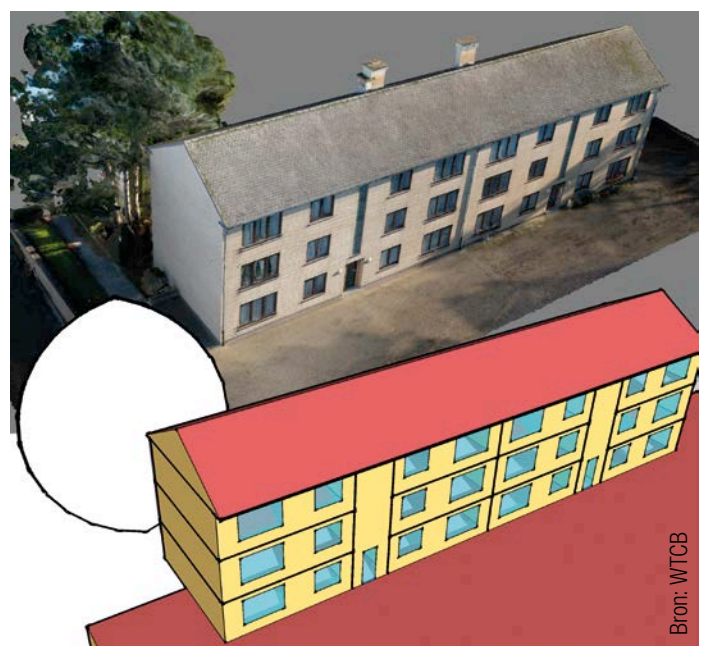
HD-scans kunnen gebruikt worden om vele soorten digitale simulaties uit te voeren. Vaak maken 3D-scans het mogelijk om de implementatie van het geometrische onderdeel dat inherent is aan elke fysieke simulatie te versnellen. De creatie van een BES-model (*building energy simulation*), dat de dynamische simulatie van de warmte-uitwisselingen tussen het gebouw en de omgeving mogelijk maakt, is bijvoorbeeld veel eenvoudiger wanneer men beschikt over geometrische gegevens in hoge resolutie. Het is immers mogelijk om een geometrische modellering uit te voeren van de warmtezones op basis van de puntenwolk of de orthozichten van de puntenwolk (zie afbeelding 41).

Nog geavanceerder is de mogelijkheid om geometrische gegevens in de vorm van een *mesh* direct te gebruiken in eindigelementenmodelleringen. Dit type instrument wordt gebruikt voor de analyse van fysische verschijnselen (structurele analyses, HAM-analyses (*heat, air and moisture*), CFD-analyses (*computational fluid dynamics*) ...) met een hoge ruimtelijke resolutie.

5.2.2.4 Het gebruik van scans voor virtual of augmented reality (*Scan-to-VR/AR*)

Ook het vermelden waard zijn de VR-technologieën (Virtual Reality) die tegenwoordig toegankelijk zijn voor de meeste mensen. Immersieapparaten zijn gepopulariseerd, met name door de opkomst van virtual-reality-headsets tegen een betaalbare prijs. Dergelijke tools bieden nieuwe mogelijkheden om te communiceren over de ontwerp- of beheerkeuzen, gebaseerd op de immersie van de gebruiker in een realistische 3D-omgeving. Maar de mogelijkheden beperken zich niet tot visualisatie. VR-technologieën lijken een vruchtbare bodem voor de verbeelding van ontwikkelaars en de mogelijkheden tot directe interactie met de 3D-omgeving zijn eveneens het vermelden waard. Parallel met virtual reality hebben AR-technologieën (Augmented Reality) ook een belangrijke toekomst in de bouwsector. Het gaat hier om het toevoegen van virtuele informatie aan de reële omgeving door middel van een speciale bril of een tablet/smartphone met een fototoestel.

De omzetting van een puntenwolk in een virtual- of augmented-reality-omgeving zal over het algemeen via de ontwikkeling van getextureerde *meshes* of solid modellen verlopen, die binnen specifieke modelleeromgevingen herwerkt worden. Zoals hierboven vermeld, wordt dit modeltype het meeste gebruikt voor de ontwikkeling van multimediatoepassingen.



Bron: WTCB

Afb. 41 Gebruik van een 3D-scan om gemakkelijk een BES-model te genereren.

6. INTEGRATIE VAN SCANS IN EEN BIM-BENADERING

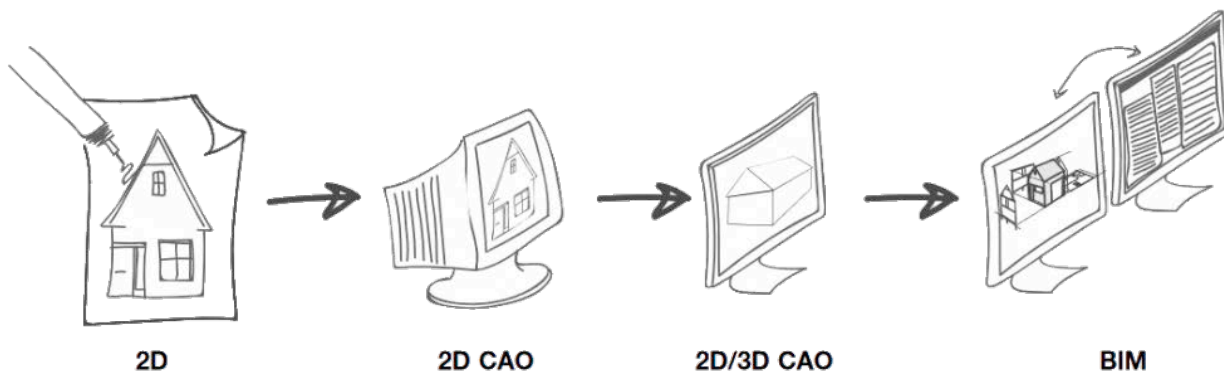
De integratie van 3D-scans in een BIM-proces brengt een revolutie teweeg in de samenwerkingsmechanismen rond een bouwproject. HD-scans kunnen als basis dienen voor de ontwikkeling van BIM-modellen van de bestaande omgeving met als voordeel dat ze uiterst volledige en nauwkeurige informatie verschaffen. Maar deze scans kunnen evenzeer een rol spelen op verschillende momenten in de BIM-werkstroom, inclusief bij nieuwbouw.

6.1 WAT IS BIM? (?)

De term BIM betekent *Building Information Model*, *Building Information Modelling* of *Building Information Management*. Deze drie betekenissen verwijzen naar drie stappen die idealiter naast elkaar zouden moeten bestaan wanneer we het over BIM hebben. Eerst moet een geavanceerd digitaal 3D-model van het gebouw ontwikkeld worden, het 'BIM-model', waarin metagegevens toegevoegd worden aan de geometrische informatie (zie afbeelding 42). Deze vormen samen een gebouw. Aan elk van deze objecten kunnen vervolgens parameters met betrekking tot de samenstelling, prestaties, kosten en duurzaamheid toegewezen worden. Tevens is het mogelijk om relaties tussen objecten of gegevens te implementeren, waardoor een wijziging van één gegeven of object gevolgen heeft voor andere (of zelfs voor een hele reeks) objecten/gegevens. Het BIM-modelleringsproces is dus erg specifiek en vergt meer dan een klassieke 3D-modellering.

Gedurende de hele levenscyclus van een gebouw biedt dit 'intelligente model' bijzonder performante hulpmiddelen voor de betrokkenen. Ze hebben toegang tot rijke en gestructureerde informatie die hen in staat stelt doordachte beslissingen te nemen, rekening houdend met een hele reeks aspecten tegelijk. Dit zorgt voor een beter begrip van de impact van elke beslissing. Het hele interactieproces tussen professionals wordt gewijzigd dankzij de geoptimaliseerde informatieoverdracht. Zo kan bij de bouw van een gebouw het aantal aanpassingen op de bouwplaats aanzienlijk verminderd worden door de grotere inspanningen die geleverd worden om een BIM-model op te zetten in plaats van een 'eenvoudig' 3D-model. Voorafgaand aan de realisatie van een gebouw wordt het volledige bouwproces virtueel uitgevoerd, waardoor potentiële conflicten tussen de verschillende operaties opgespoord kunnen worden. Na de uitvoering kan de informatie uit het BIM-model dienen als ondersteuning voor een optimaal onderhoud van het gebouw, op voorwaarde dat er voordien grondige aandacht besteed werd aan het beheer van de informatie.

Deze 'virtualisatie' van de levensloop van het gebouw, van bouwen tot slopen, gaat gepaard met nieuwe werkdimensies, afhankelijk van het soort gegevens verbonden aan de geometrie van het digitale model: we spreken van 4D, 5D, 6D en 7D. 4D-BIM verwijst naar een model waarin objecten op een tijdlijn gecodeerd worden. Deze aanpak maakt het bijvoorbeeld mogelijk om een virtuele fasering van het bouwproces op te zetten. 5D voegt het gegeven 'kosten' toe aan de parametrische objecten van het model. Werken met een 5D-BIM-model maakt het dus bijvoorbeeld mogelijk om de kosten van een bepaalde bouwphase te ramen. De zesde dimensie heeft betrekking op informatie met betrekking tot de duurzaamheid van een gebouw en integreert bijvoorbeeld gegevens betreffende de energieprestaties van het gebouw. 7D wordt vaak gebruikt om te verwijzen naar modellering gericht op het gebruik van het gebouw tot de afbraak ervan. Dit omvat bijvoorbeeld de informatie betreffende het onderhoud en de configuratie van de systemen.



Afb. 42 De basis van BIM: metagegevens toevoegen aan geometrische informatie.

(?) Zie WTCB-Contact 2017-1

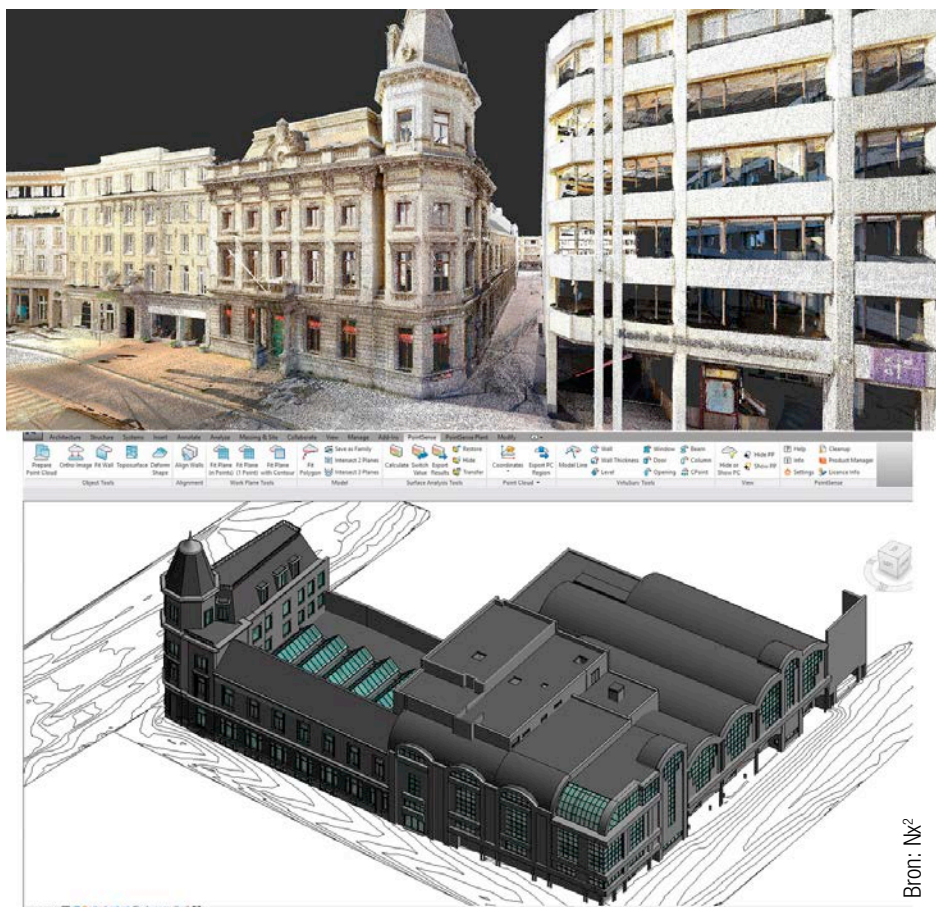
6. Integratie van scans in een BIM-benadering

6.2 HET GEBRUIK VAN 3D-SCANS OM HET BIM-MODEL UIT TE BREIDEN (SCAN-TO-BIM)

Het integreren van nauwkeurige geometrische informatie over het bestaande in een BIM-model werd enorm vereenvoudigd dankzij de ontwikkeling van de 3D-scanningstechnologie. Puntenwolken kunnen op verschillende manieren aangewend worden binnen een BIM-proces.

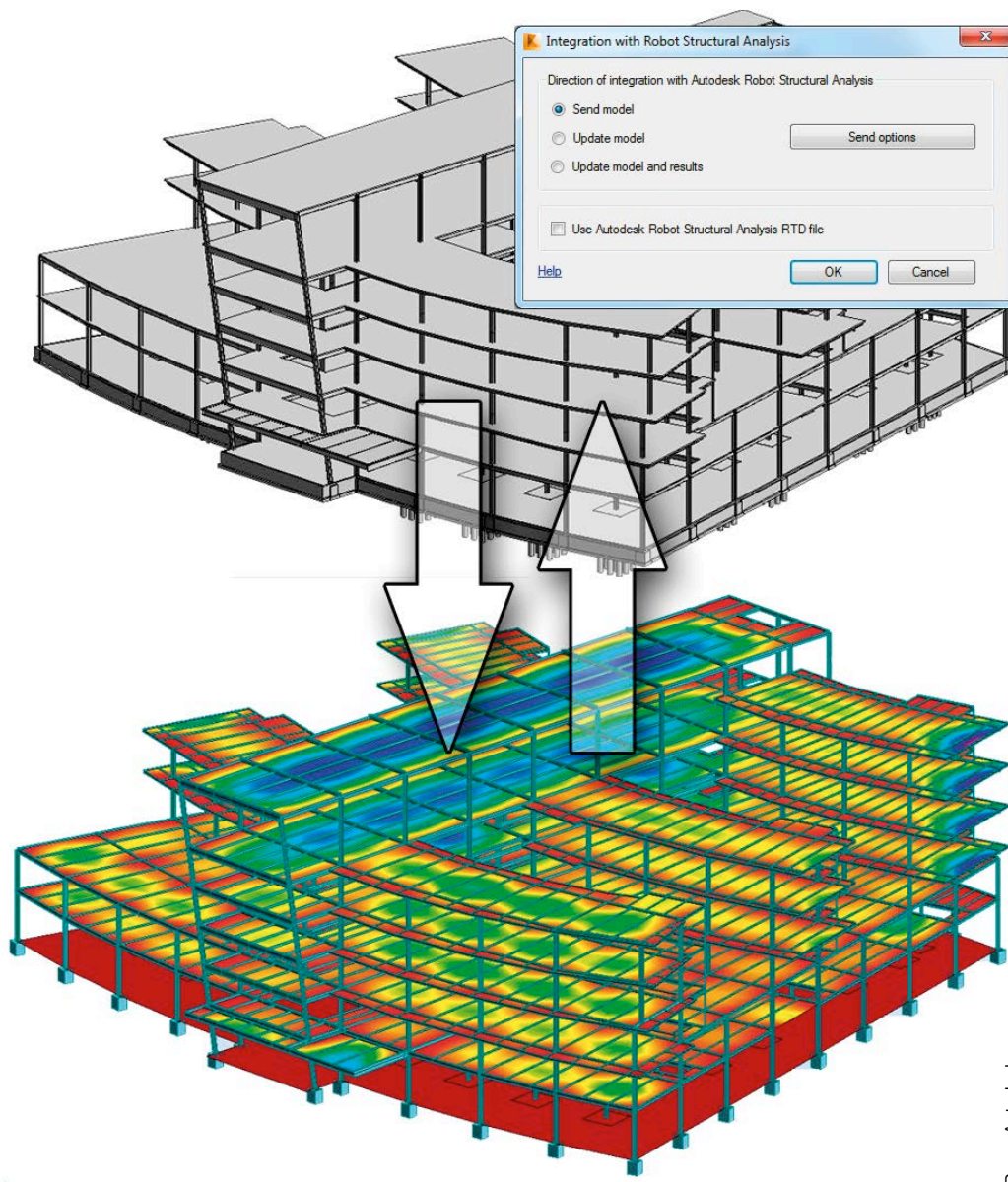
In renovatie openen 3D-scans de weg voor een nauwkeurige en buitengewoon volledige weergave van het gebouw. Deze gegevens vormen een buitenkans voor ontwerpers, die er informatie in vinden die minder dubbelzinnig is dan in de gearchiveerde documentatie in de vorm van 2D-plannen. Vanuit de puntenwolk kan het gebouw volledig opnieuw gemodelleerd worden in parametrische BIM-objecten (zie afbeelding 43). Ondanks de aanzienlijke inspanningen die dit inhoudt, kunnen we de voordelen van BIM benutten voor een renovatieproject (zoals de mogelijkheid tot planning van de werken of geavanceerde digitale simulaties, zie afbeelding 44, p. 43). De verschillende actoren die betrokken zijn bij de inspanningen van de verbouwing beschikken over een volledig parametrisch model dat zo goed mogelijk aansluit bij de realiteit. We merken op dat de digitalisering ook betrekking kan hebben op infrastructuren of op terreinen, waarvan de driedimensionale modellen geïntegreerd kunnen worden in BIM-bestanden die bijvoorbeeld betrekking hebben op de bouw van een nieuw aangrenzend gebouw.

Bovendien is het mogelijk om puntenwolken, het afgeleide parametrische model of eenvoudige lijntekeningen naast elkaar te laten bestaan in specifieke lagen binnen de BIM-software. Als de HD-informatie kritiek is voor een actor (bv. voor de aanpassing van prefab elementen), zal ze op die manier gemakkelijk toegankelijk blijven. De HD-opmeting verschaft immers een veel hoger betrouwbaarheidsniveau dan 2D-plannen. Voor sommige ontwerpteams resulteert dat in een aanzienlijke tijdswinst in de ontwerp-fase. Dit geldt bijvoorbeeld voor teams die HVAC-systemen ontwerpen, waarbij prefab elementen zoals leidingen en ventilatiesystemen beter geïntegreerd kunnen worden in de bestaande omgeving. 3D-scans kunnen ook een rol spelen in andere fasen van het BIM-proces. Ze zijn bijvoorbeeld een krachtig hulpmiddel voor continue archivering in een BIM-model om toezicht op een gebouw te houden of om het *facility management* te vergemakkelijken. Digitaliseringstechnieken kunnen ook erg van nut zijn voor het opzetten van componentbibliotheken. Fabrikanten kunnen dit proces versnellen door hun producten te modelleren op basis van HD-scans gemaakt in hun werkplaatsen.



Afb. 43 BIM-model op basis van een opmeting met de laserscanner. Beide gegevens bestaan naast elkaar in de BIM-software.

Het omzetten van een puntenwolk in een BIM-object kan op verschillende manieren gebeuren (bv. op basis van een handmatig of semiautomatisch *scan-to-CAD*-proces, dat het mogelijk maakt solide objecten te genereren op basis van de puntenwolken (zie § 5.2.1, p. 35)). Men kan deze geometrische objecten dan importeren in de BIM-software om er een BIM-semantisering aan toe te kennen. Interfaces voor BIM-modellering bieden echter meestal de mogelijkheid om puntenwolken rechtstreeks te importeren. De geometrische modellering kan vervolgens in de BIM-software uitgevoerd worden met de puntenwolk als hulpmiddel bij het tekenen van de objecten. Het voordeel is dat de modellering en semantisering (toewijzing van een object-klasse) in een stap uitgevoerd worden. Zoals bij *scan-to-CAD* kan een dergelijke handmatige benadering zeer tijdrovend en arbeidsintensief zijn. Onlangs zijn er daarom specifieke tools ontwikkeld voor een semiautomatische *scan-to-BIM*. We vinden ze terug in de vorm van plug-ins voor de BIM-software (*Faro Pointsense*, *Leica Cloudworkx* ...) of geïntegreerd in de software voor de voorverwerking van puntenwolken (bv. *Trimble Realworks*).

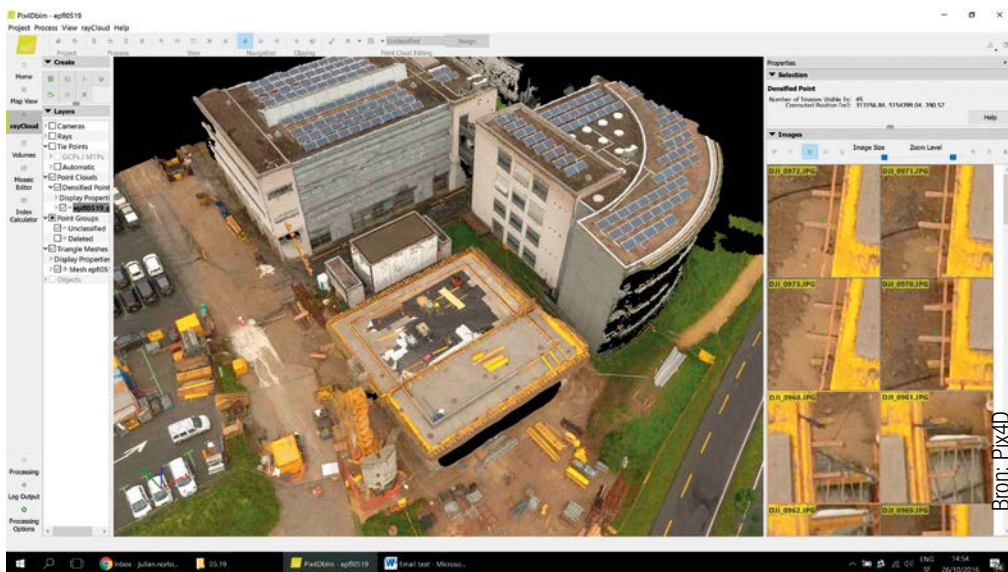


Bron: Autodesk

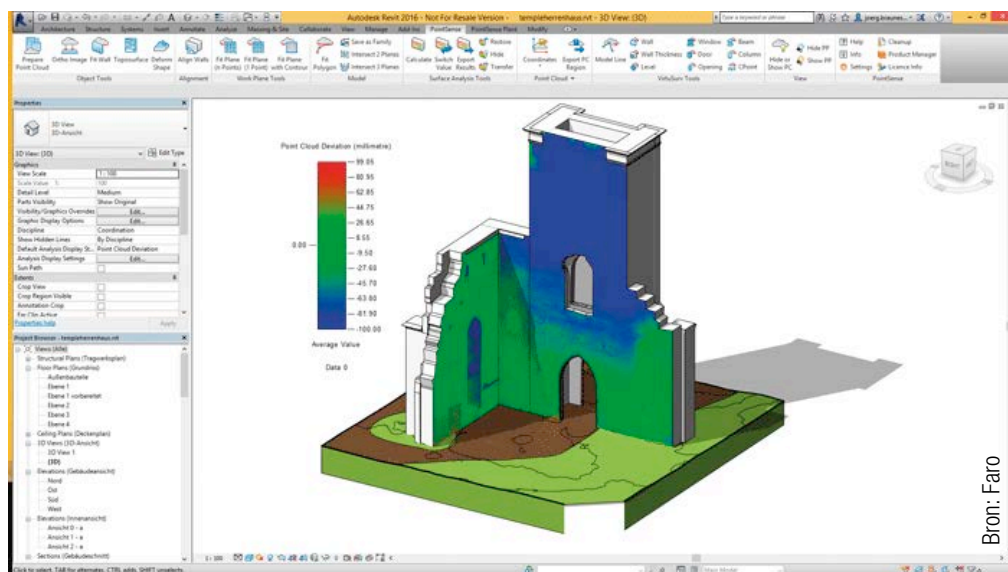
Afb. 44 Structurele analyse op basis van een BIM-model.

6.3 VERGELIJKING VAN DE 3D-SCAN MET HET BIM-MODEL (SCAN-VERSUS-BIM)

De integratie van HD-opmetingen in een BIM-proces beperkt zich niet tot het omzetten van de informatie van een puntenwolk naar BIM-objecten. De scans kunnen ook dienen als krachtige controle-instrumenten, via geometrische vergelijkingsalgoritmen (reeds voorgesteld in § 5.2.2, p. 38). De toepassingen zijn talrijk. Het is bijvoorbeeld mogelijk om de uitvoering van een project te volgen door regelmatige scans te maken (zie afbeelding 45). Door superpositie van het BIM-model op een scan die genomen werd op de bouwplaats, kunnen vergelijkingsalgoritmen de elementen identificeren die reeds uitgevoerd werden en zo een indicatie geven van de voortgang van de werken in combinatie met een 4D-BIM-aanpak [L1]. Het is ook mogelijk om voor de BIM-elementen die geïdentificeerd werden in de puntenwolk een dimensionale controle uit te voeren en zo eventuele afwijkingen ten opzichte van de vereiste toleranties aan het licht te brengen. De verantwoordelijke kan dan eventuele aanpassingsmaatregelen treffen, zonder dat een slechte uitvoering gevolgen heeft voor de volgende stappen. Dergelijke controlemethoden kunnen uiteraard toegepast worden op meerdere momenten in de BIM-keten, bijvoorbeeld intern bij een onderaannemer die zijn eindproduct kan vergelijken met de bijbehorende BIM-component. Op softwaregebied bestaan er specifieke plug-ins waarmee deze vergelijkende verrichtingen uitgevoerd kunnen worden in het BIM-programma (zie afbeelding 46).



Afb. 45 Opvolging van een werf via in de tijd gespreide digitale opmetingen (door een drone) met de mogelijkheid tot vergelijking met het BIM-uitvoeringsmodel.



Afb. 46 Plug-in PointSense voor Autodesk Revit die toelaat om de vlakheidsinformatie – bekomen via een puntenwolk – te vergelijken met een vereenvoudigde voorstelling van het gebouw in de vorm van solide objecten.

7. DEFINITIE VAN HET BESTEK VOOR DE LANDMETER DIE VERANTWOORDELIJK IS VOOR DE HD-OPMETING

Naast de zojuist besproken mogelijkheden is het ook essentieel dat de opdrachtgever duidelijk de doelstellingen van de 3D-digitaliseringsstudie definieert, eventueel in overleg met adviseurs of potentiële dienstverleners. Deze stap is even belangrijk als de verwerking zelf. Een slechte initiële definitie van de doelstellingen vertaalt zich immers noodzakelijkerwijs in een discrepantie tussen de *deliverables* en het geplande gebruik ervan. De toelichting van de doelstellingen van de studie moet de volgende informatie bevatten:

- verwachte geometrische gegevens en/of textuurgegevens
- gewenste IT-modellen en hun kenmerken naargelang het beoogde eindgebruik. Dit omvat ook de volgende aspecten:
 - de eventuele wil om te communiceren, informatie te verspreiden en uit te wisselen rond het te leveren model. Dit punt is belangrijk omdat het bepalend is voor de naverwerkingsfase om het model op te kuisen, te vereenvoudigen, te structureren en eventueel te semantiseren [H1]
 - de mogelijke toekomstige aanpasbaarheid van de modellen (mogelijkheid om op basis van dit model een nieuw model te ontwikkelen). Dit is met name afhankelijk van:
 - ➔ het type en het formaat van het bestand
 - ➔ de afgelegde weg tijdens de ontwikkeling van het model
 - ➔ de in de modellen geïntegreerde bibliotheken
 - ➔ de geolokalisatiemogelijkheden
- de mogelijke bijwerking van het model in de loop van de tijd
- de mogelijke opslag van het model op een gehost platform.

De te bestuderen objecten, volumes en oppervlakken van het gebouw moeten duidelijk omschreven worden, zodat de landmeter een uitgebreid scanplan kan opstellen. Zo kan hij het verkregen model optimaal op de behoeften van de klant afstemmen en de kosten beperken. Enkele veelvoorkomende voorbeelden van zones van belang voor de studie van een gebouw zijn:

- buitenafmetingen van elke gevel (buitenranden en hoeken)
- binnenafmetingen van de vertrekken
- niveau van bepaalde structurele elementen
- geometrie van de daklijsten en dakoversteken
- geometrie van de balkons en andere uitstekende elementen
- exacte situering en afmetingen van de bestaande openingen, binnen en buiten
- oneffenheden in het oppervlak van de voorgevel, kromming en hellende muren
- andere structurele pathologieën (scheuren, ontbrekende elementen ...)
- hoogte van het terrein
- referentiepunten.

De klant moet voor elke zone van belang de gewenste modellen nauwkeurig definiëren. De ruwe gegevens afkomstig van de meetapparatuur kunnen zelden rechtstreeks gebruikt worden en vereisen een verwerkingsfase om bruikbare 3D- of 2D-modellen te verkrijgen. De uiteindelijke 3D-modellen omvatten bijvoorbeeld:

- een of meerdere opgekuiste puntenwolken met een hoge resolutie afkomstig van laserscans (TLS) of van een reconstructie op basis van beelden
- een combinatie van verschillende opgekuiste puntenwolken ⁽⁸⁾ in een enkel projectbestand (puntenwolk met een zeer hoge resolutie)
- een interpretatie of vereenvoudiging van een puntenwolk (bv. gesegmenteerde puntenwolk)
- een *mesh* afgeleid van de ruwe puntenwolk of van de interpretatie ervan, al dan niet getextureerd
- specifieke architecturale elementen gemodelleerd met behulp van geometrische of parametrische elementen uitgelijnd op de opgemeten punten

⁽⁸⁾ Deze ruwe gegevens kunnen zo zwaar zijn dat ze moeilijk te gebruiken zijn op standaardcomputers.

7. Definitie van het bestek voor de landmeter die verantwoordelijk is voor de HD-opmeting

- een *solid model* van de buitenschil op basis van gecombineerde geometrische basisobjecten
- een volledig *solid model* met inbegrip van de binnenruimten
- een BIM-objectmodel dat niet-geometrische metagegevens omvat voor een deel of het geheel van de gescande zone
- een HD-voorstelling van de topografie van de oppervlakte van een gevel of van een gevelement
- ...

De opdrachtgever kan ook een in de tijd evoluerend (bv. voor de verschillende bouwfases) en/of op een cloudplatform gehost model wensen, vooral als de ontwikkeling van een BIM-model vereist is. Indien hij zelf voor de bijwerking zorgt, moet hij hiervoor over de nodige tools beschikken. Indien hij deze taak aan de dienstverlener toevertrouwt, moeten de bijhorende kosten goed geraamd worden.

Beeldbestanden, zoals orthofoto's, vormen een eerste categorie van 2D-output. Andere meer klassieke 2D-modellen zijn lijntekeningen die plannen, doorsneden, gevelaanzichten en constructiedetails omvatten. Deze modellen worden over het algemeen geproduceerd op basis van de voornoemde 3D-modellen of orthofoto's. Ten slotte kan de opdrachtgever meer specifieke tweedimensionale voorstellingen, zoals de afwijking van de gevels of structurele elementen, benodigen.

De te leveren modellen van de studie moeten ook vertaald worden in kwaliteitscriteria die gespecificeerd moeten worden voor elke zone van belang:

- gedetailleerdheid ⁽⁹⁾ (bv. de resolutie van een puntenwolk)
- onzekerheden/aanvaardbare meettoleranties
- betrouwbaarheid bij de detectie van de randen
- textuurweergaveniveau
- ...

Deze criteria stellen de dienstverlener in staat om te bepalen welke techniek of combinatie van technieken het meest geschikt is. De meetnauwkeurigheid en de grootte van het meetgeluid zullen uiteraard doorslaggevend zijn voor geometrische studies die bedoeld zijn om de kwaliteit van een interventie ter plaatse te evalueren (bv. evaluatie van de vlakheid van een vloerplaat). Ten slotte is het belangrijk om de vereiste nauwkeurigheid (in voorkomend geval) voor de absolute geolokalisatie van het model te specificeren.

Natuurlijk kunnen er nog vele andere belangrijke parameters inspelen op de bepaling van de doelstellingen van de studie. De projectplanning en het vrijgemaakte budget voor de geometrische studie zijn altijd beslissend en kunnen de mogelijkheden beperken.

⁽⁹⁾ De gedetailleerdheid heeft een speciale betekenis bij een BIM-model waarbij er sprake is van een LOD-niveau (*level of development* of *level of detail*) voor de verschillende objecten.

8. ANALYSE VAN DE HINDERPALEN

Hoewel er reële mogelijkheden verbonden zijn aan het gebruik van HD-opmetingsmethoden, is het belangrijk rekening te houden met de mogelijke hinderpalen, of het nu gaat om moeilijkheden bij het gebruik van deze technologieën of hinderpalen voor het succes van een specifiek digitaliseringsproject.

8.1 ALGEMENE MOEILIKHEDEN BIJ HET GEBRUIK VAN HD-MEETTECHNOLOGIEËN

Er bestaan verschillende redenen die een speler ervan kunnen weerhouden om het gebruik van 3D-scanningstechnologieën te overwegen:

- goed verankerde werkingsprocedures die moeilijk te veranderen blijken. Het gaat hier om een grondige verandering van de werkingsmethoden, waarbij 3D-informatie op termijn de behoefte aan 2D-voorstellingen in grote mate zal verminderen
- aanzienlijke directe kosten verbonden aan de overgang (opleiding, aankoop van software, onderhoud van databanken ...). Deze kosten kunnen een belangrijke rem zijn voor kleine structuren waarin investeringen op lange termijn een bedreiging kunnen vormen voor het begrotingsevenwicht
- risico's van een overschakeling op nieuwe procedures terwijl de bestaande werkschema's goed werken. Voor dienstverleners en onderaannemers zal het probleem er nochtans in bestaan om in te gaan op nieuwe soorten aanvragen die mogelijk niet compatibel zijn met de bestaande methoden.

8.2 HINDERPALEN BIJ DE UITVOERING VAN EEN HD-OPMETING

Er moet een onderscheid gemaakt worden tussen twee soorten hinderpalen:

- intrinsieke risico's van elke methode, namelijk deze die verbonden zijn aan de technologie zelf, de beperkingen en bijbehorende technische vereisten. Deze groep omvat de externe risico's die niet afhankelijk zijn van menselijke factoren (bv. het weer tijdens de opmeting)
- extrinsieke risico's die betrekking hebben op de technische beheersing van de tools, het goed begrijpen van de mogelijkheden en de aanvaarding van de gevolgen van het gebruik ervan.

Voor beide categorieën zijn er verschillende aandachtspunten verbonden aan elke stap van een HD-digitaliseringsproject (zie hoofdstuk 3, p. 25):

1. definitie van het bestek
2. planning van de studie
3. opmeetfase
4. verwerking van de ruwe gegevens
5. eindredactie en aanleveren van de *deliverables*.

Tabel 6 (p. 48) geeft een overzicht van de risico's voor de opmeting met een laserscanner en met fotogrammetrie. Tabel 7 (p. 49) geeft een samenvatting van de extrinsieke hinderpalen.

Een eerste aandachtspunt, ongeacht de methode, is de afstemming tussen de wil van de klant en de vertaling van deze wil in een nauwkeurig bestek voor de opmeting. Het gaat erom de uiteindelijke doelstelling van de digitaliseringstaak te begrijpen en ze te vertalen in technische specificaties. De communicatie tussen de operator en de opdrachtgever moet dus kunnen verlopen zonder hindernissen in verband met het begrip van de mogelijkheden van de verschillende technieken die beschikbaar zijn bij de operator (die immers vaak de indruk heeft dat de klanten onrealistische verwachtingen hebben omtrent deze mogelijkheden [R₁]). De landmeter moet duidelijk zijn over de technische beperkingen en de klant begeleiden bij het definiëren van een bestek en haalbare doelstellingen. De verantwoordelijkheden en verplichtingen van elke partij moeten absoluut voorafgaand aan de opmeting gedefinieerd worden om ernstige vertragingen te vermijden (zie § 8.3, p. 48). Uit sommige gevallen bleek ook dat het nuttig is om de bewoners te betrekken door de technologie aan hen voor te stellen en een demo te geven om hun bezorgdheid weg te nemen en hen niet te storen bij hun werk of in hun leefruimte [G₁].

We merken op dat laserscanning weinig expertise vereist. Het meest kritieke punt voor de planning is de juiste bepaling van de scanposities om een adequate dekking van de te bestuderen objecten te waarborgen. Fotogrammetrie vereist een meer doorgedreven voorbereiding. Ongeacht de grootte van het te bestuderen gebouw/object is het absoluut noodzakelijk om een

8. Analyse van de hinderpalen

doordachte opnamestrategie uit te werken om nadien een weinig betrouwbare of zelfs onmogelijke reconstructie te vermijden. Bovendien moet de operator de geschikte instellingen van het fotoestel kennen om de beeldkwaliteit te optimaliseren (ISO-parameter op het minimum, kleine opening van het diafragma ...). Bij een mobiele fotogrammetrische opmeting (bv. met een drone) moeten de operatoren de besturing van het voertuig en de bediening op afstand van het fotoestel beheersen. Er bestaan immers specifieke vereisten voor fotogrammetrie (bv. stabiliteit, dekkingsgraad van de foto's ...) die niet noodzakelijk relevant zijn bij meer klassieke studies.

Bij het uitvoeren van een opmeting bestaan er intrinsieke risico's die beide technologieën gemeen hebben, zoals materiële storingen, die willekeurig kunnen zijn of te wijten zijn aan incompatibele omgevingsomstandigheden (trillingen, wind, regen ...). Laserscanners en moderne fotoestellen zijn hoogtechnologische apparaten die niet storingsvrij zijn. Bij een opmeting met een drone zijn nog meer storingsfactoren mogelijk omwille van de ingebouwde communicatiesystemen. Met betrekking tot het bestudeerde object zijn er eveneens een reeks factoren die de kwaliteit van de fotogrammetrische weergave kunnen beïnvloeden (zoals de aanwezigheid van effen texturen of van reflecterende oppervlakken) (zie bv. tabel 3, p. 22). Soortgelijke problemen kunnen ook gelden voor laserscanners, maar in mindere mate.

De mogelijke hinderpalen zijn ook talrijk in de verwerkingsfase. Ook hier zijn er problemen die beide methoden gemeen hebben en andere meer specifieke problemen. Zoals vermeld in § 2.2.2 (p. 18) vereist de fotogrammetrische methode bijvoorbeeld een hoge rekenkracht om de driedimensionale reconstructie uit te voeren. De vereiste IT-configuratie zal ook exponentieel afhangen van het aantal beelden dat tegelijk verwerkt wordt. Voor de uitlijning en de referentie van de puntenwolken moet er voorzien worden in voldoende controlepunten (bv. referentiepunten opgemeten door een *total station*) of moet voldoende overlap van de scans gewaarborgd worden, al naargelang de gebruikte methode. De hinderpalen bij de eindredactie van de *deliverables* zullen afhangen van de complexiteit van de vraag van de klant en van de adequate beschrijving van de verantwoordelijkheden van elke partij om de bijbehorende doelstellingen te bereiken.

Tabel 6 Belangrijke intrinsieke risico's verbonden aan het gebruik van HD-opmetingen.

	Algemene problemen	Specifieke problemen	
		TLS	FRBC
Planning en opmetingsfase op het terrein	<ul style="list-style-type: none"> • ontoereikende stroomvoeding (accu's, toegang tot een netaansluitpunt ...) • materieel defect • slechte ontvangst van een signaal dat nodig is voor een correcte werking (bv. een GPS-signaal) • slecht weer of ongunstig klimaat voor de goede werking van de apparatuur of met risico's op beschadiging (*) • onvoldoende afstand mogelijk 	Gebrek aan stabiliteit van het station vanwege het terrein (onstabiele bodem ...).	<ul style="list-style-type: none"> • niet-aangepast fotoestel • overmatig zonlicht • te veel wind (drones)
Verwerking van de ruwe gegevens	Onnauwkeurigheden te wijten aan het bestudeerde object en de compatibiliteit ervan met de methode (bv. reflecterende of transparante zones van het gebouw).	<ul style="list-style-type: none"> • zeer zware ruwe gegevens • slechte kleurweergave 	<ul style="list-style-type: none"> • onvoldoende beschikbare reken-capaciteit • zeer lange rekentijd • ongelijke kwaliteit van de 3D-reconstructie (bv. effen zone of zone met een herhalend patroon op het bestudeerde object)
Eindredactie en aanleveren van de <i>deliverables</i>	Onvermogen van het beschikbare softwareprogramma om het type en/of formaat van het eindmodel te produceren.		

(*) Sommige recente modellen van laserscanners bieden een betere bescherming tegen weersinvloeden.

Tabel 7 Belangrijke extrinsieke risico's verbonden aan het gebruik van HD-opmetingen.

	Algemene problemen	Specifieke problemen	
		TLS	FRBC
Definitie van het bestek	<ul style="list-style-type: none"> • onvermogen van de klant om zijn behoefte in technische termen uit te drukken • slechte bepaling van de verantwoordelijkheden en rechten • slechte initiële bepaling van de <i>deliverables</i> 		
Planning en opnamefase op het terrein	<ul style="list-style-type: none"> • slechte voorbereiding van de opdracht • moeilijke toegang tot bepaalde zones waarvan de opmeting gepland is • onverwachte obstakels (bv. geparkeerd voertuig) of obstakels waarop niet geanticipeerd werd (bv. dicht struikgewas) • menselijke obstakels (bv. negatieve reactie van een bewoner) 	<ul style="list-style-type: none"> • onverwachte beweging van de scanner door de omringende activiteiten (schokken, trillingen ...) • slechte bepaling van de scanlocaties 	<ul style="list-style-type: none"> • verkeerde instelling van het fototoestel (bv. ISO te hoog) • slechte bepaling van de methodologie voor de opnamen
Verwerking van de ruwe gegevens	<ul style="list-style-type: none"> • geen duidelijke procedure voor de kwaliteitscontrole • moeilijke uitlijning van de scans wegens een slechte dekking of een onvoldoende aantal referentiepunten • onnauwkeurigheden vanwege een verkeerd gebruik van het apparaat (scanner of fototoestel) 	Onvoldoende aantal scans om de zones van belang te dekken.	<ul style="list-style-type: none"> • gebrek aan kennis van de instellingen van de reconstructiesoftware • slechte selectie van de gebruikte foto's voor de reconstructie
Eindredactie en aanleveren van de <i>deliverables</i>	<ul style="list-style-type: none"> • aanvullende gegevens voor de creatie van de gewenste <i>deliverable</i> zijn ontoereikend (*) • gebrek aan afstemming tussen de <i>deliverable</i> en de capaciteit van de klant om deze te gebruiken (wegens de omvang of het formaat ervan) • problemen bij het bezorgen van de gegevens wegens de grote omvang ervan • verkeerd gebruik van het model door de klant door gebrek aan kennis van de mogelijkheden die dit model biedt (*) 		

(*) Dit zijn kritieke obstakels in een BIM-proces.

8.3 ENKELE REGELGEVENDE IMPLICATIES

Om dit hoofdstuk gewijd aan de potentiële hinderpalen voor het gebruik van HD-opmetingen af te sluiten, is het nuttig om even stil te staan bij enkele regelgevende implicaties.

8.3.1 VEILIGHEID OP DE BOUWPLAATS

Op de grond uitgevoerde HD-opmetingen vereisen meestal weinig specifieke veiligheidsmaatregelen met betrekking tot de gebruikte opmetingsapparatuur. De veiligheid van de operatoren op het terrein tijdens de digitaliseringsactiviteit moet echter wel gewaarborgd worden. Bepaalde voorzieningen zijn dan ook vereist: veiligheidsuitrusting, stopzetting van bepaalde werkzaamheden ... Een specifiek punt betreft de risico's van het gebruik van laserlicht voor de huid en de ogen van de operatoren en personen die aanwezig zijn binnen de actieradius van de scanner. In de jaren 70 werd er een classificatie ingevoerd om te bepalen hoe gevaarlijk laserscanners zijn. Deze classificatie telt vandaag zeven klassen: 1, 1M, 2, 2M, 3R, 3B en 4. Het cijfer geeft aan hoe gevaarlijk het systeem is. Momenteel behoren de meeste TLS-opmetingsapparaten tot de klasse 3R. Ze houden met andere woorden weinig gevaar in, op voorwaarde dat ze met zorg gehanteerd worden [1].

8. Analyse van de hinderpalen

Bij het gebruik van drones zijn strengere veiligheidsmaatregelen te voorzien, omdat het inherente risico in theorie veel groter is. Er dient echter op gewezen te worden dat de fabrikanten van drones steeds meer geavanceerde technische verbeteringen aanbieden om een optimale veiligheid tijdens het gebruik ervan te waarborgen. In april 2016 werd het koninklijk besluit met betrekking tot het gebruik van op afstand bestuurd luchtvaartuigen in het Belgisch luchtruim gepubliceerd in het Belgisch Staatsblad. Dit document regelt het gebruik van drones in België en werd opgesteld in overleg met BeUAS (de Belgische Federatie voor de Onbemande Luchtvaart). We herinneren eraan dat het vliegen boven bepaalde zones gewoonweg verboden is. Meer informatie is beschikbaar in een FAQ gepubliceerd in de sectie Mobiliteit van de website Belgium.be [F2].

Bij elk mobiel gebruik, in het bijzonder bij geautomatiseerde verplaatsingen, moet de dienstverlener de veiligheid van personen kunnen waarborgen en dus eventueel voorzien in een tijdelijke toegangsrestrictie tot bepaalde zones in overleg met de opdrachtgever. We wijzen er echter op dat de automatisering van mobiele opmetingssystemen toegang biedt tot gevaarlijke zones zonder dat de operator deze laatste zelf hoeft te betreden. Er is dus eerder sprake van een risicovermindering ten opzichte van de traditionele opmetingen. In alle gevallen met een verhoogd risico adviseren wij de klant om na te gaan of de dienstverlener de nodige verzekeringen afgesloten heeft.

8.3.2 VERTROUWELIJKHEID EN PRIVACY

Door de bestaande omgeving op te meten in een formaat in hoge resolutie worden nieuwe vragen opgeroepen met betrekking tot het copyright en de privacy, en dit zowel met betrekking tot de bewoners van een gebouw als voor gewone voorbijgangers. Dergelijke opmetingen laten immers toe de bestudeerde omgeving weer te geven met een resolutie die het mogelijk maakt personen, activiteiten en alle objecten in het gezichtsveld van het apparaat te herkennen. De kwestie is bijzonder gevoelig wanneer er gebruikgemaakt wordt van een fotografische opmeting. Er moet dus al bij de planning van de opmeting gezorgd worden voor de nodige vergunningen. Hetzelfde geldt voor alle privacyzones rond de opmetingsperimeter. Indien er gevoelige informatie opgemeten wordt, moet de opdrachtgever ervoor zorgen dat eventuele specifieke bepalingen op papier staan. Deze kunnen geheimhouding, veilige computeropslag, beperkte toegang tot de gegevens ... dekken.

8.3.3 RECHTEN, PLICHTEN EN VERANTWOORDELIJKHEDEN

Om het succes van een HD-opmeting te garanderen, is het essentieel de rechten, plichten en verantwoordelijkheden goed te definiëren, zodat de partijen weten wat ze moeten doen en wie verantwoordelijk zal zijn voor de gevolgen van specifieke fouten of nalatigheden [R1]. Er moet ook een akkoord bereikt worden over het mogelijke gebruik van de gegevens door de klant en eventuele derden. De dienstverlener kan bijvoorbeeld de intellectuele eigendom van de opmaak van de modellen behouden en de klant een licentie geven voor een aantal gespecificeerde toepassingen. Deze problematiek staat centraal in de BIM-kwestie, waarin de noties van intellectuele eigendom nog onvoldoende gedefinieerd zijn.

9. TOEKOMSTIGE ONTWIKKELINGEN

In dit volledig digitale tijdperk lijkt het geen twijfel dat de opmetingstechnieken in hoge resolutie zich in de loop van de komende jaren aanzienlijk zullen ontwikkelen, met grote veranderingen op technisch vlak en op het vlak van informatica, maar ook in de werkstroom en de interacties tussen actoren. Vooral als de professionals in de bouwsector erin slagen om zich deze innovatieve methoden eigen te maken en in overleg met hardware- en softwareontwikkelaars werken om hun behoeften en de technische mogelijkheden beter op elkaar af te stemmen.

Allereerst zullen de opmetingstechnieken zelf sterk evolueren. Voor de laserscanners zal het waarschijnlijk gaan om het verbeteren van de kwaliteit van de textuurweergave door middel van de integratie van betere fotografische sensoren of een betere complementariteit met fotogrammetrische technieken. Door de ontwikkeling van minder omslachtige en betaalbare oplossingen zullen de apparaten waarschijnlijk kleiner gemaakt kunnen worden. De eerste in drones ingebouwde laserscanners beginnen trouwens te verschijnen (zie afbeelding 47).

De fotogrammetrische methode voor 3D-reconstructie op basis van meerdere beelden heeft onmiskenbare troeven en zal ongetwijfeld aanzienlijke verbeteringen kennen. Het verbeteren van de nauwkeurigheid van de weergave, het optimaliseren van de rekentijd en de ontwikkeling van video processing vormen de voornaamste werkpijlers. Een groot probleem blijft momenteel de inschatting van de kwaliteit van het eindresultaat vóór de volledige verwerking. Om dit probleem op te lossen, is het wenselijk dat er in de toekomst duidelijke kwaliteitscontroleprocedures gedefinieerd worden. Hoewel ze niet in detail behandeld werden, is het zeker dat technologieën voor digitalisering in real time een aanzienlijke vooruitgang zullen kennen. Ze blijven nu nog te veel beperkt tot binnenomgevingen en hebben vaak een lagere nauwkeurigheid dan vaste scanners, maar hun werkterrein zal zeker uitgebreid worden in de nabije toekomst.

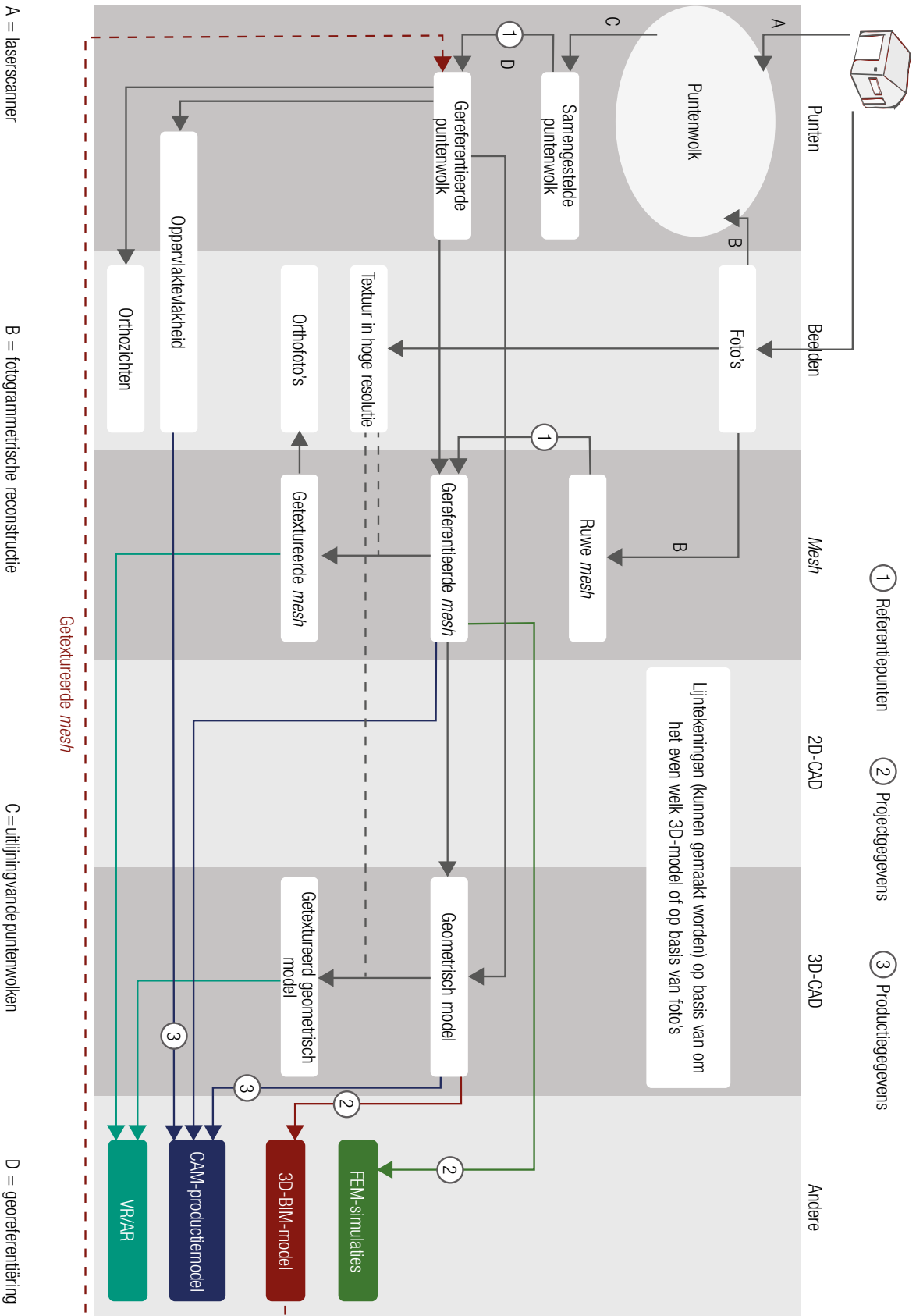
Wat de software voor de bewerking van 3D-bestanden betreft, verwachten we veel vooruitgang in de automatische verwerking van puntenwolken (filtering, segmentatie, semantisering, vergelijking ...). Zoals we gezien hebben, zal BIM een steeds belangrijker plaats innemen in de sector. Het nut van *Scan-to-BIM*-conversie en *Scan-versus-BIM*-algoritmen is duidelijk, ook al moeten er nog inspanningen geleverd worden om het werk dat zeer handmatig en tijdrovend is, te vergemakkelijken. De integratie van de tools zou overigens voortgezet moeten worden met meer softwareoplossingen die de mogelijkheid bieden om meerdere gegevensbronnen samen te bewerken.

Ondanks de vele belichte technische mogelijkheden bestaat het risico dat 3D-technologieën verkeerd gebruikt zouden worden. Dit risico is groter wanneer de technologieën meer algemeen toegankelijk worden, waardoor een betere definitie van de procedures voor het opstellen van bestekken en de mogelijkheden tot kwaliteitscontrole vereist zullen zijn. Daarnaast is een passende begeleiding van de actoren in de bouw uiteraard wenselijk.



Afb. 47 De eerste 'compacte' lasergrammetrieoplossingen ingebouwd in drones.

BIJLAGE: HET 3D-INFORMATIETRAJECT



LITERATUURLIJST

D

Devillers C.

D1 Complémentarité de la photogrammétrie et de la lasergrammétrie pour la modélisation 3D architecturale, Institut d'Enseignement de Promotion Sociale de la Communauté française, 2015.

Dubois S., Remy O. en de Bouw M.

D2 Retrofitting with AIM-ES: Guidelines for using Architectural Industrialised Multifunctional Envelope Systems, CSTC-WTCB-BBRI, 2016. http://www.brusselsretrofitxl.be/wp-content/uploads/2016/07/AIMES_Guidelines_UK_2016.pdf

F

FOD Mobiliteit

F1 Ontdek het koninklijk besluit over het gebruik van op afstand bestuurd luchtvaartuigen (drones) in het Belgisch luchtruim. https://mobilit.belgium.be/nl/nieuws/nieuwsberichten/2016/ontdek_het_koninklijk_besluit_over_het_gebruik_van_op_afstand_bestuurde

F2 FAQ UAV | FOD Mobiliteit. https://mobilit.belgium.be/nl/Resources/publicaties/luchtvaart/pub_luchthavens_faq_drones

G

GSA

G3 GSA BIM Guide series 03 : BIM Guide for 3D imaging, GSA, 2009. <http://www.gsa.gov/portal/content/102282>

H

Héno R. en Chandelier L.

H1 Numérisation 3D de bâtiments : cas des édifices remarquables. London : Hermes Science Publishing, 2014.

J

Jaillet S., Ployon E. en Villemin T.

J1 Images et modèles 3D en milieux naturels, Collection EEDYTEM, nr. 12, 2011.

L

Lamaille G., Lahaye J. en Vandenberghe T.

L1 L'utilisation du Scanning Laser 3D pour la documentation as-built des projets BIM, Rev. Sci. Ing. Ind., nr. 30, 2016.

Larsen K. E., Lattke F., Ott S. en Winter S.

L2 Surveying and digital workflow in energy performance retrofit projects using prefabricated elements, Autom. Constr., vol. 20, nr. 8, 2011.

Luhmann T., Robson S., Kyle S. en Boehm J.

L3 Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging, Photogramm. Eng. Remote Sens., vol. 81, nr. 4, 2015.

P

Petzold F. en Donath D.

P1 Digital building surveying and planning in existing building, E-Des. Archit., 2004.

Point Cloud Library

P2 Documentation Point Cloud Library (PCL). http://pointclouds.org/documentation/tutorials/region_growing_segmentation.php.

R

Randall T.

R1 Client guide to 3D scanning and data capture, BIM Task Group, 2013.

S

Snavely N. en Szeliski R.

S1 Scene reconstruction and visualization from community photo collections, Proceedings of the IEEE, vol. 98, nr. 8, 2010.

Verantwoordelijke uitgever: Jan Venstermans
WTCB, Lombardstraat 42
1000 Brussel

Onderzoekt • Ontwikkelt • Informeert

Het WTCB vormt al meer dan 55 jaar hét wetenschappelijke en technische middelpunt van de bouwsector. Het Centrum wordt hoofdzakelijk gefinancierd met de bijdragen van 85.000 aangesloten Belgische bouwbedrijven. Dankzij deze heterogene ledengroep zijn bijna alle bouwberoepen vertegenwoordigd en kan het WTCB bijdragen tot de kwaliteits- en productverbetering

Onderzoek en innovatie

Een industrietak zonder innovatie is als cement zonder water. Het WTCB heeft er daarom voor gekozen om zijn onderzoeksactiviteiten zo nauw mogelijk te laten aansluiten bij de noden van de sector. De Technische Comit es die de WTCB-onderzoeken sturen, zijn samengesteld uit bouwprofessionelen (aannemers en experts) die dagelijks op het terrein staan.

Met de hulp van verschillende officiële instanties stimuleert het WTCB bedrijven om steeds verder te innoveren. De begeleiding die we aanbieden, is afgestemd op de actuele maatschappelijke uitdagingen en van toepassing op diverse domeinen.

Ontwikkeling, normalisatie, certificering en goedkeuring

Op vraag van overheden of privébedrijven werkt het WTCB ook mee aan diverse ontwikkelingsprojecten (contractresearch). Zo is het Centrum niet alleen nauw betrokken bij de activiteiten van de nationale (NBN), Europese (CEN) en internationale (ISO) normalisatieinstellingen, maar ook bij instanties zoals de Belgische unie voor de technische goedkeuring in de bouw (BUTgb). Al deze projecten geven ons meer inzicht in de bouwsector, waardoor we sneller kunnen inspelen op de noden van de verschillende bouwberoepen.

Informatieverspreiding en steun aan bedrijven

Om de kennis en ervaring die op deze manier vergaard wordt op een efficiënte manier te delen met de bedrijven uit de sector, kiest het Centrum resoluut de weg van de informatica. Onze website is zo opgesteld dat elke bouwprofessional met slechts enkele muisklikken de gewenste WTCB-publicatierreeksen of bouwnormen terugvindt.

Goede informatieverspreiding kan echter niet enkel elektronisch. Een persoonlijk contact is vaak nog steeds de beste aanpak. Jaarlijks organiseert het Centrum ongeveer 650 informatie-sessies en themadagen voor bouwprofessionelen. Ook de aanvragen voor onze afdeling Technisch Advies blijven binnenstromen, met meer dan 18.000 verstrekte adviezen per jaar.

MAATSCHAPPELIJKE ZETEL

Lombardstraat 42, B-1000 Brussel
Tel. 02/502 66 90
Fax 02/502 81 80
E-mail: info@bbri.be
Website: www.wtcb.be

KANTOREN

Lozenberg 7, B-1932 Sint-Stevens-Woluwe
Tel. 02/716 42 11
Fax 02/725 32 12

- Technisch advies – Publicaties
- Beheer – Kwaliteit – Informatietechnieken
- Ontwikkeling – Valorisatie
- Technische goedkeuringen – Normalisatie

PROEFSTATION

Avenue Pierre Holoffe 21, B-1342 Limelette
Tel. 02/655 77 11
Fax 02/653 07 29

- Onderzoek en innovatie
- Vorming
- Bibliotheek

DEMONSTRATIE- EN INFORMATIECENTRUM

Marktplein 7 bus 1, B-3550 Heusden-Zolder
Tel. 011/79 95 11
Fax 02/725 32 12

- ICT-kenniscentrum voor bouwprofessionelen (ViBo)
- Digitaal documentatie- en informatiecentrum voor de bouw- en betonsector (Betonica)

BRUSSELS MEETING CENTRE

Poincarélaan 79, B-1060 Brussel
Tel. 02/529 81 29

BRUSSELS GREENBIZZ

Dieudonné Lef vrestraat 17, B-1020 Brussel
Tel. 02/233 81 10