

DEI720005

Evaluatierapport

Digitale [®]evolutie: geautomatiseerde voorbereiding van aardgasloze renovatieprojecten

BW-221201-R-00001-AG
1 december 2022
Revisie 0.01

Evaluatierapport

Digitale @evolutie: geautomatiseerde voorbereiding van aardgasloze renovatieprojecten

Documentnummer BW-221201-R-00001-AG

DEI720005

Opsteller

| | |
|----------|--|
| Naam | Arjan van Driel |
| Telefoon | +31 306305530 |
| E-mail | arjan.van.driel@bam.com |
| Bedrijf | BAM Wonen bv |
| Adres | Marconibaan 2, 3439 MS Nieuwegein Postbus 25, 3430 AA Nieuwegein Telefoon +31 (0)30 630 55 30 www.bamwonen.nl |

© Niets van dit rapport mag worden verveelvoudigd, openbaar gemaakt en / of overhandigd aan derden, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van BAM Wonen bv.

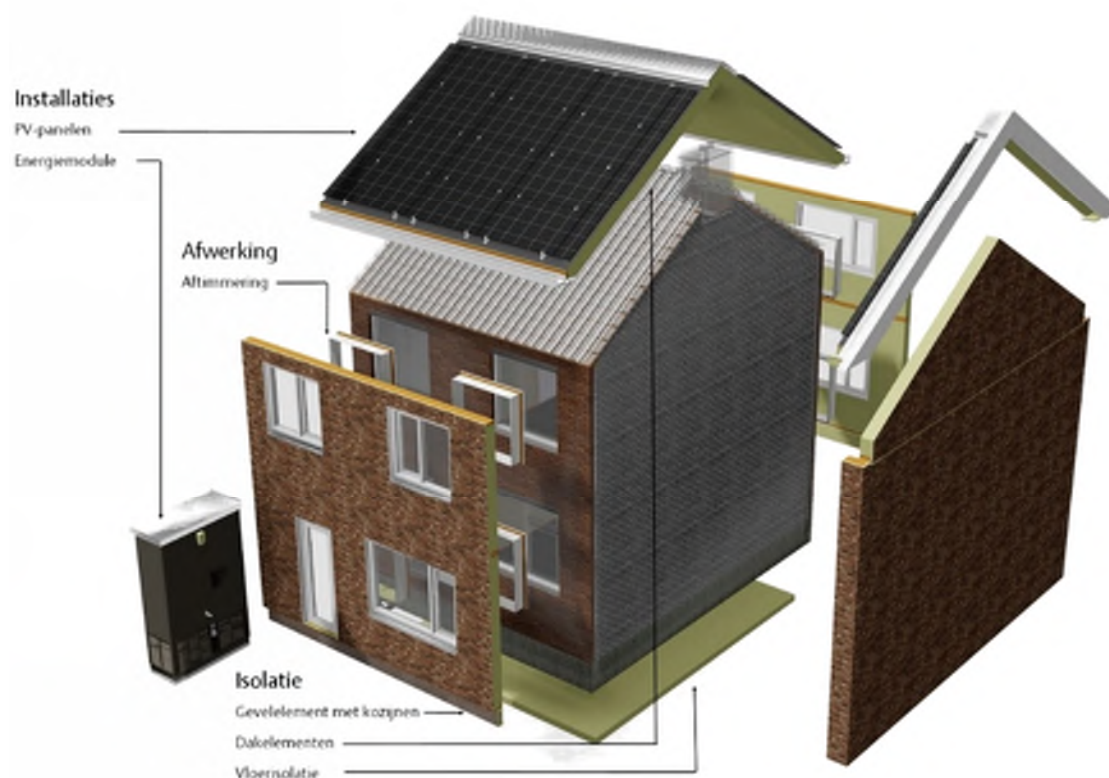
Inhoudsopgave

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 1. | Inleiding | 1 |
| 1.1 | Aanleiding en probleemstelling | 1 |
| 1.2 | Doelstelling | 2 |
| 2. | Opmeten van woningen met een dynamische scanner..... | 4 |
| 2.1 | Van statisch naar dynamisch inmeten..... | 4 |
| 2.1.1 | Laserscanner onder drone | 5 |
| 2.1.2 | LiDAR scanner onder drone..... | 6 |
| 2.1.3 | Fotocamera (fotogrammetrie) onder drone | 7 |
| 3. | Omzetten van de pointcloud in een 3D mesh..... | 10 |
| 4. | Omzetten van een 3D mesh in een gecategoriseerde 3D mesh | 12 |
| 4.1.1 | 2D-methode..... | 13 |
| 4.1.2 | 3D methode | 21 |
| 5. | Omzetten van gecategoriseerde mesh in geparametriseerde 3D- componenten in Revit | 25 |
| 6. | Conclusies..... | 29 |

1. Inleiding

1.1 Aanleiding en probleemstelling

Eén van de manieren om woningen van het gas af te halen is een renovatie tot Nul-op-de-Meter (NOM). Bij NOM-projecten worden de woningen voorzien van een nieuwe buitenschil, die in combinatie met aanpassingen van de installaties ervoor zorgt dat de woningen, bij gelijkblijvend verbruik en over een jaar gemeten, evenveel energie opwekken als een gemiddeld huishouden verbruikt.



Impressie opbouw nul op de meterwoning

De voorbereidingstijd van een gemiddeld NOM-project kostte tot voor kort circa $\frac{3}{4}$ jaar. Om de verduurzaming van woningen in Nederland verder te versnellen, werd naar een kortere voorbereidingstijd gezocht.

De voorbereiding bestaat uit een aantal stappen, waaronder het inscannen en inmeten van de woningen die gerenoveerd gaan worden. Doel hiervan is om een zo goed mogelijk passende voorzetgevel en dak te kunnen ontwerpen die tegen de bestaande gevel en dak worden geplaatst. Hiervoor hanteerde BAM Wonen tot circa 2 jaar geleden een statische 3D-laserscanner. De output is een pointcloud bestaande uit puntjes waarmee het object (de buitenkant van de woning) in een 3D-model wordt afgebeeld. Met de statische scanner konden 9 woningen in één dag worden gescand.

De pointcloud wordt handmatig door een 3D-modellieur omgezet in 3D-BIM-componenten in CAD software (Revit). Met deze 3D-BIM-modellen worden diverse co-makers aangestuurd.

De co-makers maken daar vervolgens weer een vertaling van om hun productieproces van de voorzetgevels, dakelementen en kozijnen aan te sturen.

De wijze van voorbereiden van een renovatieproject, met zowel de statisch kent 2 nadelen:

- Het meten van de te renoveren woningen, het maken van de tekeningen en het omzetten van de gegevens in 3D-BIM-modellen in Revit duurt lang en kost veel capaciteit. Naast het beperkte aantal woningen dat per dag kan worden gescand met de statische laserscanner, is het scannen niet mogelijk bij bepaalde weersomstandigheden, zoals regen en vriesweer. Daarnaast is er ook veel tijd gemoeid met het omzetten van een pointcloud in 3D-BIM-modellen in Revit (ca. 12 weken voor 1 project). Hierbij is de inzet van een (schaarse) BIM-modelleur vereist. Een aantal van deze nadelen geldt trouwens ook voor de dronescan.
- De meetnauwkeurigheid om de huidige gevels op te meten is niet optimaal. Bij missende puntjes in de pointcloud, bijv. doordat er struiken voor het huis staan, wordt geen optimale buitenschil gegenereerd.

Een consortium bestaande uit BAM Wonen, BAM Bouw en Techniek, BAM Materieel en Droneview heeft de wens om tot een snellere en nauwkeurige manier van scannen van de huidige woningen te komen. In combinatie met geautomatiseerde verwerking van de gegevens in Revit en zonder handmatige tussenstappen. Door een slimmere scanmethode te introduceren en de scans automatisch te vertalen naar een 3D-BIM-model van de buitenschil om een woning, kan een deel van de voorbereiding worden gereduceerd tot een minimum. En zo zal men sneller, goedkoper én beter woningen naar aardgasvrij kunnen renoveren. Hierdoor kan de verduurzaming van woningen in Nederland worden opgeschaald.

Probleemeigenaren zijn woningcorporaties en bewoners van woningen die hun huis tot NOM willen renoveren En bouwbedrijven die voor de uitdaging staan om zoveel mogelijk woningen in zo kort mogelijke tijd te renoveren.

1.2 Doelstelling

Doelstelling van het project is het ontwikkelen en valideren van versnellingen in het voorbereidingsproces door een nieuwe werkwijze op basis van het dynamisch inmeten van de bestaande woningen en het automatisch verwerken van deze gegevens tot nieuwe (digitale) gevels met kozijnen.

Het consortium voorziet hierbij 4 nieuwe stappen in de voorbereidingsfase:

- Stap 1: Opmeten van de woningen met een dynamische scanner
- Stap 2: Omzetten van de pointcloud in een 3D mesh
- Stap 3: Omzetten van een 3D mesh in een gecategoriseerde 3D mesh
- Stap 4: Omzetten van gecategoriseerde mesh in geparametriseerde 3D-componenten in Revit

De voordelen van de nieuwe werkwijze zijn:

- Met een dronescanner kunnen er, afhankelijk van de gekozen scanmethode, 30 tot 50 woningen per dag worden opgemeten, in plaats van 9.
- Er hoeft geen handmatige, arbeidsintensieve omzetting plaats te vinden van de scans naar 3D-objecten in Revit ten behoeve van productie van gevels, kozijnen en dakelementen.
- Er zijn minder contactmomenten met bewoners, doordat de scan vanuit de lucht gemaakt kan worden i.p.v. vanuit de achtertuin van bewoners, wat een extra pluspunt is in coronatijden.

- Door de hogere kwaliteit van de beelden kan een nauwkeurigere schil rondom een woning worden gegenereerd.

Hiermee kan het renovatieproces van woningen aanzienlijk versneld worden, met ca. 28 dagen per renovatieproject (project bestaande uit van gemiddeld 40 woningen) en met een hogere kwaliteit. Een NOM-renovatieproject voor 40 woningen duurt nu 150 dagen voorbereiding en 30 dagen voor uitvoering. Dit draagt bij aan het goedkoper, beter en sneller renoveren van woningen tot aardgasloos, waardoor een opschaling mogelijk wordt.



Een drone met een fotocamera scant de woningen

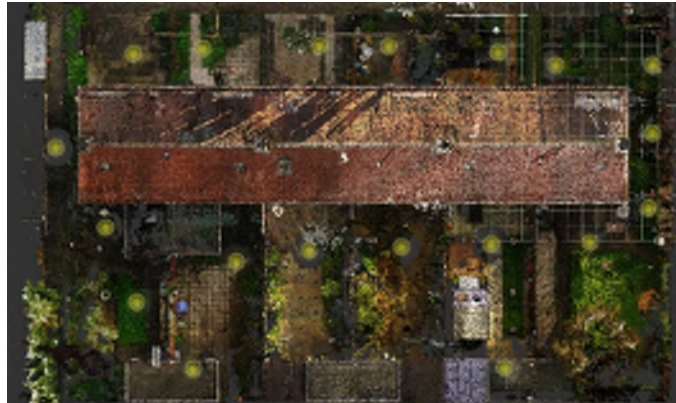
2. Opmeten van woningen met een dynamische scanner

2.1 Van statisch naar dynamisch inmeten

De statische laserscanners die wij gebruik(t)en zijn tot een afstand van ongeveer 350 meter op de mm nauwkeurig. Maar om een blok woningen met een statische laserscanner in te kunnen scannen heb je te maken met meerdere opstelpunten. De opstelpunten kunnen onnauwkeurigheid veroorzaken doordat de software (soms) de data van de verschillende opstelpunten niet exact over elkaar kan stitchen (matchen). Hierdoor hebben wij in de praktijk meestal tussen de 10 en 30 mm afwijking op een woningbloklengte van 30 meter. Ook willen we testen of we met de camera's/scanners onder de drone de afwijking kunnen reduceren of zelfs elimineren.



Een voorbeeld van een statische laserscanner



De gele stippen zijn de opstelpunten

Om het proces van scannen te versnellen hebben we de keuze uit 3 mogelijkheden:

1. Laserscanner onder drone.
2. Lidar-scanner onder drone.
3. Fotocamera (fotogrammetrie) onder drone.

De drone zelf is geen meetinstrument. Drones kunnen we inzetten om meetapparatuur naar de juiste positie te brengen. Aan de drone wordt een camera of soms een laserscanner bevestigd. Daarnaast vervoert de drone ook vaak een GPS- en IMU-systeem (Inertial Measuring Unit). Het IMU-systeem meet voorwaartse-, zijwaartse- en hoogtebewegingen van het toestel en corrigeert daarmee de data.

Professionele dronemetingen worden uitgevoerd door ervaren en gekwalificeerd personeel. De dronepilot moet in het bezit zijn van een vliegbrevet. Daarnaast is er een operator die de camera bedient. De drones worden minutieus voorbereid en vluchtmeldingen worden nauwkeurig bijgehouden. Veiligheid is hierbij zeer belangrijk.



2.1.1 Laserscanner onder drone



Drone met laserscanner

De laserscanner die BAM gebruikt bij het statisch scannen wordt onder een drone gehangen die het gewicht van een grote scanner kan dragen. Alles wat de laser rechtlijnig tegenkomt wordt geregistreerd in de vorm van een puntenwolk (pointcloud). De laserscanner geeft een puntenwolk als resultaat.

De data wordt in principe met dezelfde pixeldichtheid gescand en op dezelfde resolutie als de statische scans. De data (pointcloud) uit een laserscanner onder een drone is altijd zwart-wit. Dit komt doordat de drone vliegt en er niet op dezelfde positie ook foto's kunnen worden gemaakt. De foto's kleuren namelijk de puntjes van de pointcloud in. Ook merkten we dat de pointclouds in grote mate onnauwkeurig waren. Dit wordt met name veroorzaakt doordat de drone met een variabele snelheid vliegt, door de invloed van windsnelheid, windvlagen etc. De puntichtheid speelt een grote rol. Hoe sneller de drone vliegt, hoe minder puntjes per cm². Tijdens de test hadden we verschillende vliegsnelheden getest, maar zelfs de langzame vlucht gaf te weinig puntjes en teveel ruis. Kortom deze methode is niet geschikt om mee door te gaan.

2.1.2 LiDAR scanner onder drone



Drone met LiDAR scanner

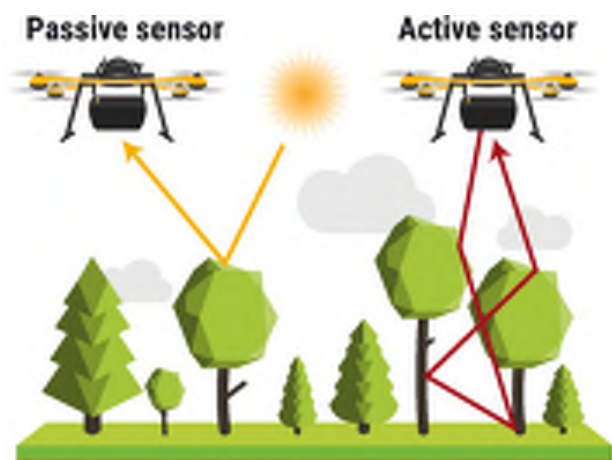
Om vanuit de lucht te kunnen scannen, moet de LIDAR-apparatuur stabiel en stil op een plek kunnen hangen, of met een rechte koers en constante snelheid vliegen. Dat klinkt vanzelfsprekend, maar vraagt om een RPAS toestel met geavanceerde vluchtcontrole en uiterst stabiele vluchteigenschappen. Dit komt neer op systemen die speciaal gemaakt zijn voor civiele en landmeetkundige toepassingen.

De LiDAR scanner gebruikt een andere scanmethode (actieve sensor) waarmee meerdere vlakken zichtbaar worden (er wordt niet rechtlijnig maar telkens onder verschillende hoeken gemeten).

De gevel achter (bijvoorbeeld) bomen wordt hierdoor ook zichtbaar op de scan. De LiDAR scanner is iets minder nauwkeurig dan de 3D laserscanner (de laatste heeft een passieve sensor).

Er zijn diverse drones met LiDAR-scanners op de markt verkrijgbaar. Droneview heeft een scan met een Riegl VUX-1 setup gemaakt.

Conclusie: Ook deze vorm van scannen is (nog) niet goed genoeg om een 3D model op de millimeter nauwkeurig te maken. En dat hebben we wel nodig om later de productie aan te kunnen sturen.



2.1.3 Fotocamera (fotogrammetrie) onder drone

Bij fotogrammetrie gaat het om het interpreteren en het opmeten van beeldmateriaal bij het bepalen en beschrijven van de vorm en afmeting (geometrie) en ligging van objecten. Fotogrammetrie is een techniek die ingezet kan worden om 2D foto's om te zetten naar 3D informatie.



Drone met fotocamera

Om de foto's met behulp van fotogrammetrie om te zetten in 3D informatie, moeten de foto's voldoende overlap hebben. Vaak wordt een percentage van 60% aangehouden. Een vuistregel is dat onderdelen op drie tot vier foto's zichtbaar moeten zijn. Daarnaast heeft ook het weer een grote invloed op dronemetingen. Voor goede foto's dient er voldoende licht te zijn, maar te fel zonlicht kan problemen geven.

Het principe van fotogrammetrie werkt met afstanden en hoeken, maar doet dit op basis van verhoudingen. Het is daarom noodzakelijk om een referentie te maken waardoor dronedata geschaald kan worden.

Om nauwkeurig te meten met de drone en ervoor te zorgen dat er een perfect 3D model gemaakt kan worden, is die uitgerust met een hoge resolutie camera (bijv. 100 MP), sensoren en software. De nauwkeurigheid van het 3D model heeft o.a. te maken met de nauwkeurigheid van de GPS van de drone.

Om de nauwkeurigheid van GPS te verbeteren is er een systeem voorhanden met de naam Real Time Kinematic (RTK). Kort gezegd komt het erop neer dat grondstations (waarvan de positie zeer nauwkeurig bekend is) de foutmarge van het GPS-signaal bepalen en deze doorgeven aan RTK-ontvangers, die dan de eigen metingen corrigeren aan de hand van de referentiemetingen.

De drone met fotogrammetrie hebben we uitvoerig kunnen testen. We hebben gemerkt dat de drone met camera de meeste potentie heeft om door te ontwikkelen. Deze zijn overal verkrijgbaar, goedkoper en worden steeds nauwkeuriger (met behulp van doorontwikkeling van GPS, RTK en IMU-systeem).



Drone met camera (fotogrammetrie)

Veiligheid

Voordat een drone uit de auto wordt gehaald, wordt eerst de omgeving rondom de opstelplaats van de drone afgezet met waarschuwingsborden. Ook wordt vooraf aan de luchtverkeersleiding toestemming gevraagd om te mogen vliegen. Soms wordt er in een laagvlieg gebied gevlogen en moet er contact zijn met de luchtverkeersleiding.

Vliegplan

Enkele dagen voor uitvoering wordt een vliegplan gemaakt waarbij de vliegroutes worden aangegeven op verschillende hoogten. Ook wordt gekeken of er bomen of andere hoge objecten in de buurt staan. Op locatie wordt eerst het vliegplan gecheckt op wijzigingen (hogere bomen of objecten afwijkend van wat digitaal stond aangegeven) voordat de drone de lucht in gaat.

Nauwkeurigheid

Tot en met september 2022 hebben we diverse projecten met de drone ingevlogen. We zijn gestart in Leimuider met 1 blok, om te testen. Op de drone zitten drie RTK-sensoren. Met behulp van een RTK ontvanger weten we de exacte locatie van de foto's. Dat is belangrijk! Zo kunnen we het 3D model nauwkeurig positioneren op dezelfde coördinaten als de Robotic Total Station. En daarmee controleren of het 3D model de juiste schaal heeft.

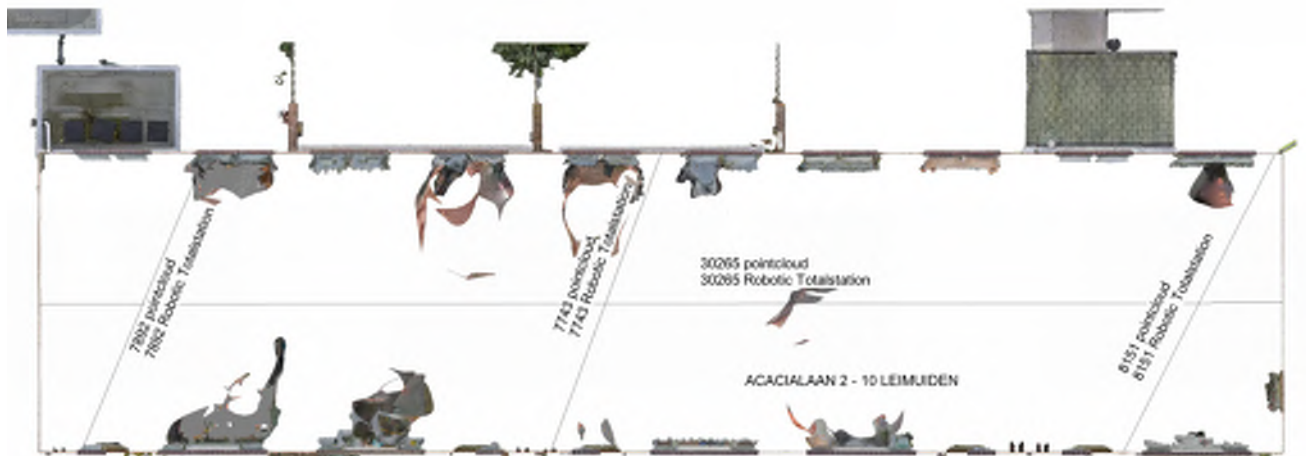


De drie witte schotelletjes op de drone zijn de RTK sensoren



RTK ontvanger

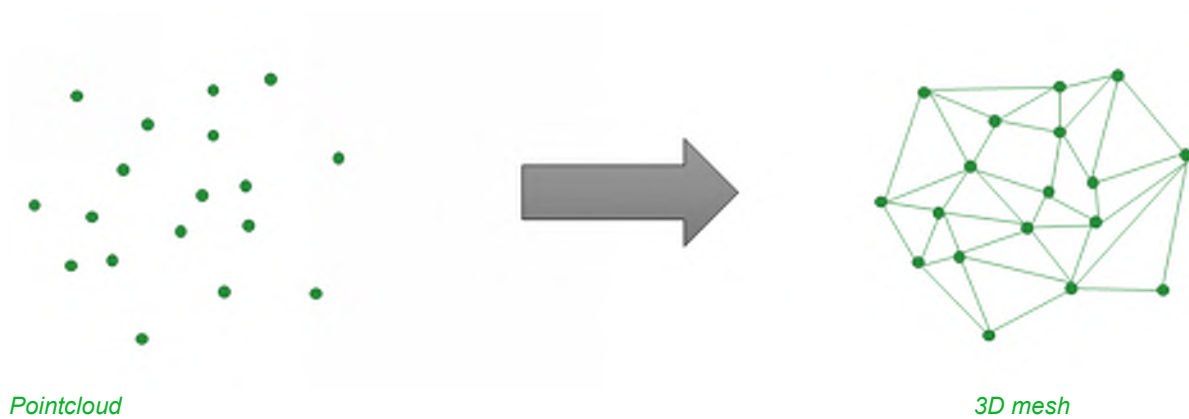
De nauwkeurigheid van het 3D model (pointcloud) controleren we in het softwareprogramma Autodesk Revit. Door de pointcloud in Autodesk Revit te laden kunnen we exact zien wat de afwijkingen t.o.v. de inmeetgegevens van Robot Total Station zijn. En daar zit geen millimeter verschil in. Dat is een fantastisch resultaat!



Bovenaanzicht van een woningblok met daarin de maatvoering van de Robotic Total Station en de maatvoering van de pointcloud. Op elke positie identieke maten, dus is het 3D model op de millimeter nauwkeurig!

3. Omzetten van de pointcloud in een 3D mesh

Een pointcloud bestaat uit een zeer groot aantal (miljoenen tot zelfs miljarden), puntjes die we met een programma kunnen laten omzetten naar vlakken (vectoriseren). Softwarematig worden de punten door middel van lijnen verbonden en ontstaat er een “schil” van het gescande object. Dit noemen we een 3D mesh. We willen graag een 3D mesh maken omdat eventuele bouwkundige gebreken visueel beter zijn te inspecteren en het belangrijkste: een algoritme erop laten rekenen.



Een pointcloud - het 3D model bestaat uit allemaal puntjes



Een 3D mesh – driehoeksvlakjes die met elkaar verbonden zijn

4. Omzetten van een 3D mesh in een gecategoriseerde 3D mesh

Het uiteindelijke doel is dat de kozijnen d.m.v. algoritmen herkend worden. Om de positie en afmetingen van kozijnen te kunnen bepalen, zullen ook de gevels herkend moeten worden. Dat proces wordt categoriseren genoemd.



Voorbeeld van een gecategoriseerde mesh: De kozijnen, gevels en daken zijn herkend

Om de mesh te categoriseren hebben we de keuze uit twee methoden:

- 1) 2D
- 2) 3D

Wij hebben beide methoden getest. De 2D-methode gaat d.m.v. beeldherkenning op foto's. De 3D-methode gaat d.m.v. objectherkenning op een mesh of pointcloud.



2D-methode: objectherkenning op foto's



3D-methode: objectherkenning op een mesh of pointcloud

4.1.1 2D-methode

Bij de 2D-methode hebben we (duizenden) foto's nodig. Daarvoor kunnen we de foto's gebruiken die de camera onder de drone heeft gemaakt.

De eerste stap is het trainen van beeldherkenning. De software zal kozijnen moeten herkennen. Om in de toekomst het algoritme voor andere woningtypen te kunnen inzetten, hebben wij diverse foto's uit verschillende bronnen gehaald.

Nadat het model getraind is (het algoritme genoeg foto's heeft geanalyseerd) hebben we het algoritme op "onze" woningen losgelaten. Ook hebben we het algoritme onderscheid tussen ramen en deuren meegegeven. Het algoritme geeft bij elk kozijn een percentage van herkenning mee. Hoe meer data het algoritme heeft gekregen van de training (= aantal foto's waarop het kozijn te zien is), hoe hoger het percentage.



Herkennen van de ramen en deuren

Nadat het model getraind is, dat wil zeggen dat het algoritme bepaald heeft of het een raam- of deurkozijn betreft, gaat het de hoekpunten ervan bepalen. Daarbij 'ziet' het algoritme eerst nog een randje metselwerk rondom het kozijn. Ook voert het verschillende bewerkingen op het kozijn uit. Een van die bewerkingen is het contrasteren: de vorm van het kozijn wordt dan zichtbaar gemaakt. Na de selectie gaat het algoritme op alle foto's de kaders van de kozijnen tekenen. Dit doet het algoritme alleen bij de negen (hoeken) die zichtbaar zijn.



Het algoritme geeft alleen de lijnen weer als de negge goed zichtbaar is

Als we goed naar de lijnen kijken dan zijn deze soms niet precies op de uiteinden van het kozijn getekend.



De volgende stap is de positie en afmetingen van de kozijnen. Om de coördinaten van een hoekpunt van een kozijn op een foto te kunnen bepalen hebben we de volgende info nodig:

- principal point
- lens distortion
- brandpuntsafstand van de lens
- Jaw, Pitch en Roll
- GPS / RTK gegevens (X,Y,Z – coördinaten)

Principal point

Een foto bestaat uit pixels. De lens die wij gebruiken heeft een sensor van 100 Megapixels. De 100 megapixels kloppen niet helemaal want de afbeelding is $11664 \times 8750 = 102.060.000$ pixels.

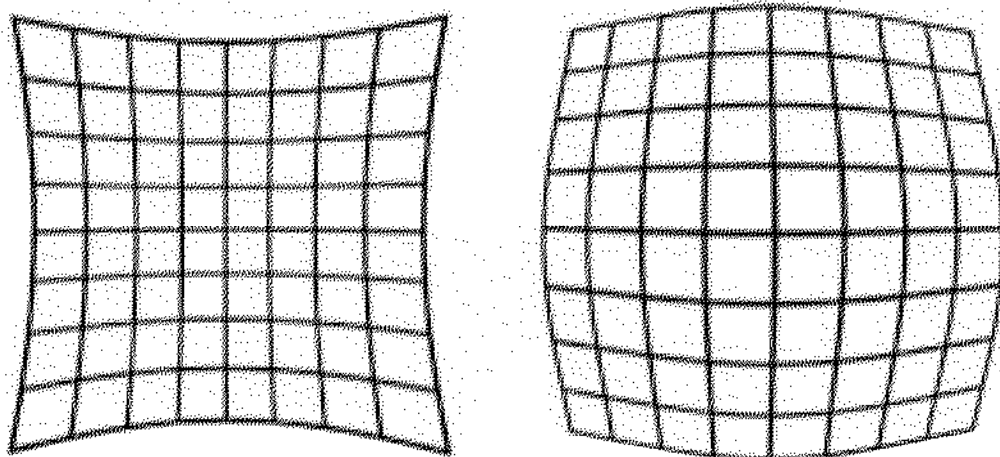
Het principal point zou precies in het midden van een foto moeten liggen. Maar in werkelijkheid is dat niet of nauwelijks haalbaar. Bij onze camera zou het principal point op $11664/2 = 5832$ en $8750/2 = 4375$ moeten liggen. Het is vrijwel onmogelijk om die waarde te halen. Bij onze lens is de afwijking in onderstaande foto in de breedte 11,77 pixels en in de hoogte 47,16 pixels. Deze afwijking is op elke foto anders omdat de afstand van het object tot de sensor steeds verandert. In het vervolg moeten we met deze afwijking rekening houden. De waarden van het principal point kunnen we uit de metadata van de foto halen.



In het midden is het principal point te zien. De andere drie stippen zijn de coördinaten van checkerboards

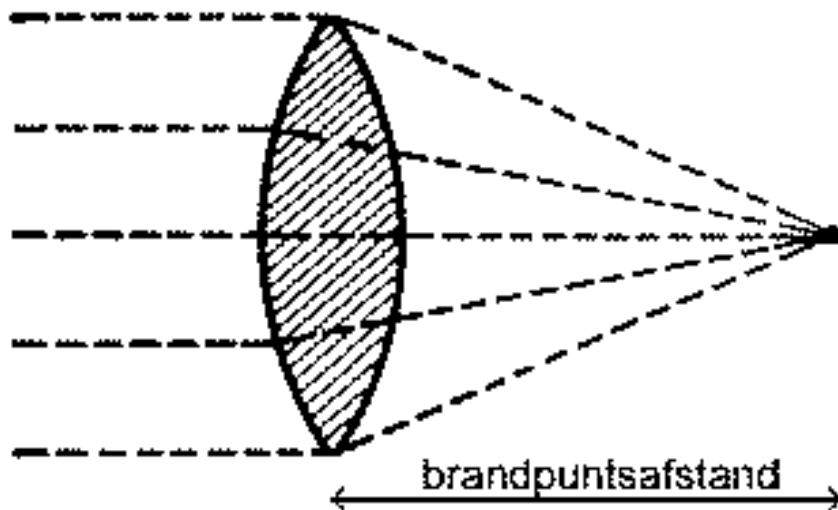
Lensdistortion

Lensdistortion is de afwijking van de lens. Elke lens heeft een afwijking. Soms is de lens te bol of te hol geslepen of niet centrisc. Dit geeft vervorming van het beeld. Deze afwijking kunnen we ook uit de metadata van de foto halen.



Brandpuntsafstand

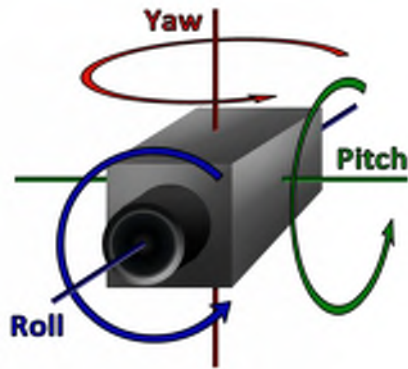
Onze lens heeft een vast brandpuntsafstand van 80 mm. De brandpuntsafstand is de afstand tussen het midden van de lens en het punt waar de invallende lichtstralen weer samenkomen, nadat ze door de lens gebroken zijn. Het punt waar de lichtstralen samenkomen, is de sensor van de camera. De brandpuntsafstand bepaalt de grootte van de beeldhoek én hoe ver je kunt inzoomen. De brandpuntsafstand wordt altijd in millimeters aangeduid.



Als we in de metadata van een foto kijken dan zien we dat onze lens niet een brandpuntsafstand van 80mm heeft maar 80,9157669 mm. Dat geeft vertekening in het perspectiefbeeld.

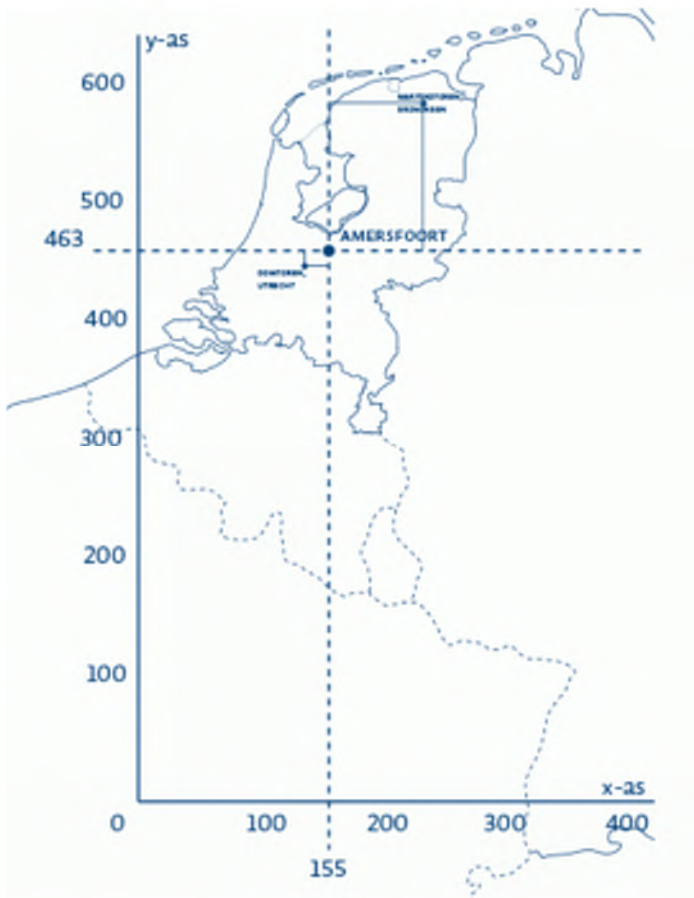
Jaw, Pitch en Roll

De Jaw, Pitch en Roll heeft te maken met de positie van de camera onder de drone. Al deze rotaties moeten we weten om later metingen op de pixels van de foto te kunnen verrichten.



GPS / RTK gegevens (X,Y,Z – coördinaten)

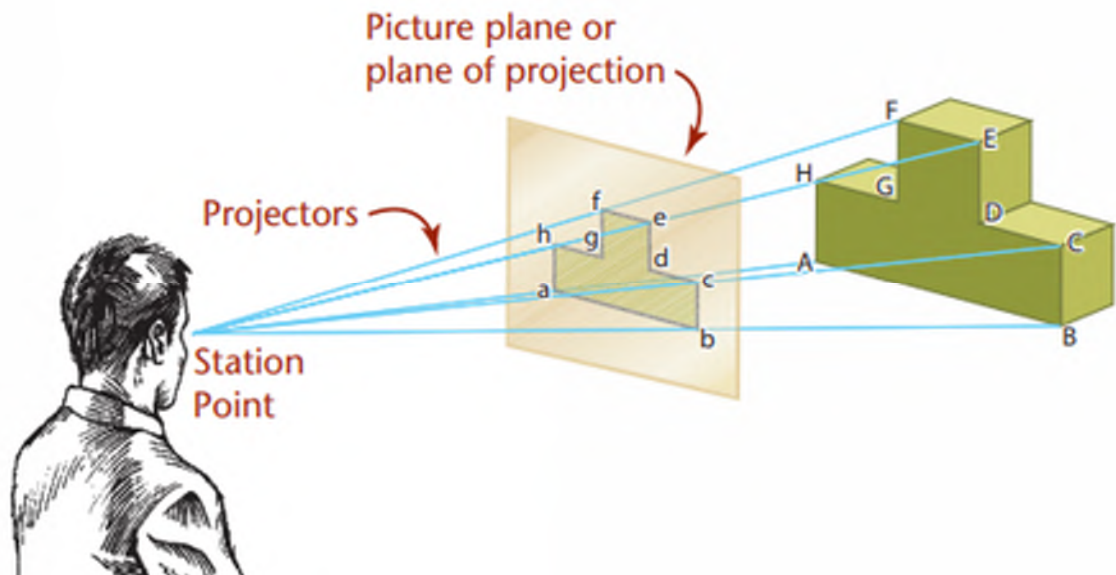
De GPS / RTK gegevens zijn uiteraard ook nodig om het uiteindelijke 3D model goed op ware grootte te krijgen.



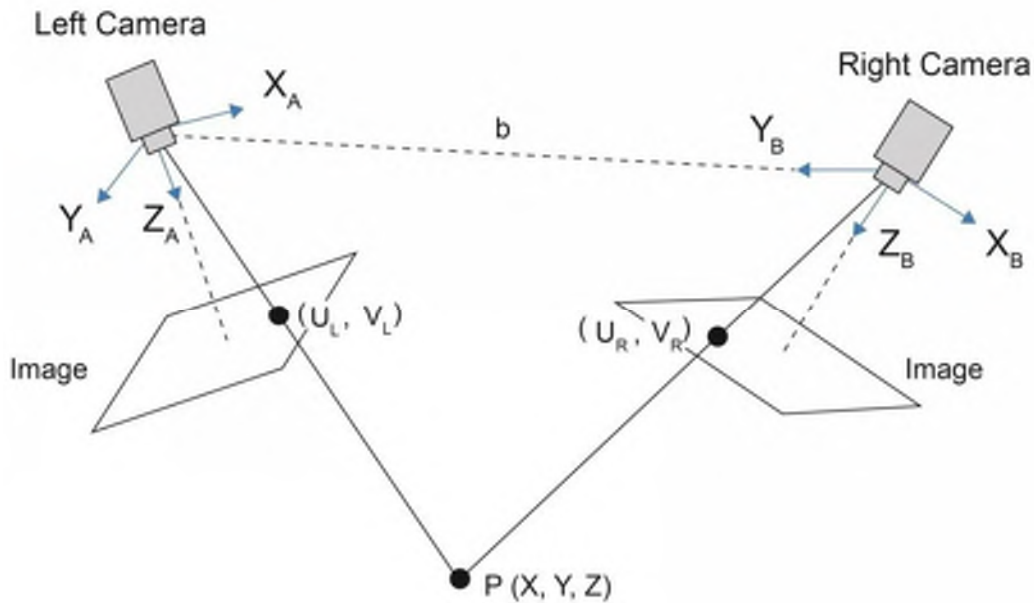
Kaart van Nederland met daarop de GPS schaalverdeling

Berekening

Zodra alle afwijkingen bekend zijn welke hiervoor zijn beschreven, kunnen de onderlinge afstanden op de foto gemeten worden op basis van de pixels. Eén van de opties is om te rekenen met pixelverhoudingen: Op basis van checkerboards kun je berekenen wat de afmetingen van een pixel moeten zijn. Door het tellen van de pixels en vermenigvuldigen met onderlinge afstanden krijg je een afstand. In onderstaand figuur is een persoon (Station Point) aangegeven welke als de sensor van de camera gezien kan worden. Picture plane is de lens. De afstand van Station Point naar Picture plane is de brandpuntsafstand. Het geel/groene object wordt uiteindelijk op de sensor/foto weergegeven. Doordat we alle gegevens weten kunnen we aan de hand van de pixels precies berekenen wat bijvoorbeeld de afstand tussen f en e is.



Doordat er meerdere foto's van hetzelfde object gemaakt worden, kunnen we berekenen en controleren of het gekozen punt exact op dezelfde positie overeenkomt. Een andere methode is om m.b.v. hoeken en vectoren en meerdere afbeeldingen van eenzelfde punt een driehoek berekening uit te voeren, om van 2d naar real world te komen.



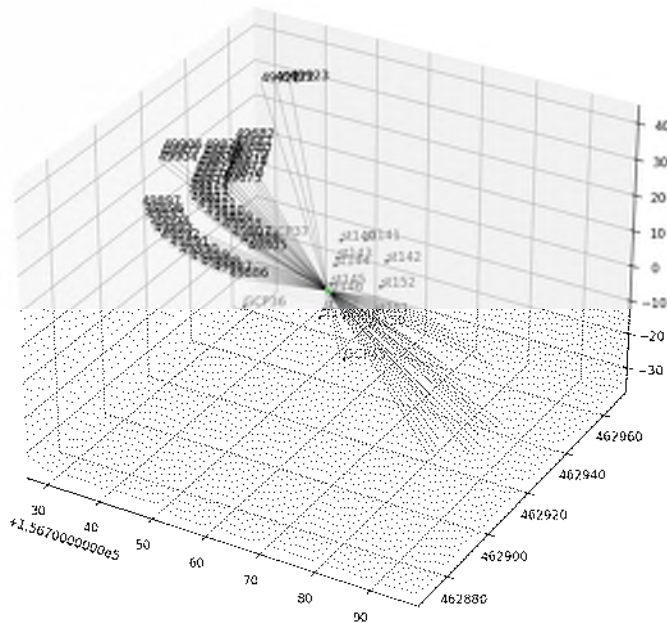
Twee foto's met hetzelfde gekozen punt. Als de berekeningen kloppen, zijn dat exact dezelfde coördinaten.

In onderstaande afbeeldingen hebben we de coördinaten van de checkerboards berekend en in 3D weergegeven. Omdat we met de Robotic Total Station ook de coördinaten hebben gemeten, kunnen we goed controleren of de punten overeenkomen. Tussen de metingen van de Robotic Total Station en de meetpunten op de pixels zaten enkele millimeters verschil.



In het midden van de foto, het 'principal point' en daaronder de drie metingen op de checkerboards

De drone heeft 16 foto's van een checkerboard geschoten. We hebben we de coördinaten van het punt op die foto's laten berekenen. In onderstaande afbeeldingen zijn de waarden daarvan weergegeven. De kleinste afwijking op een foto is 1,1 mm en de grootste afwijking 5,35 mm.



| | |
|-----------------------|----------------|
| Control point "GCP36" | error: 3.47 mm |
| Control point "GCP37" | error: 1.90 mm |
| Control point "GCP43" | error: 2.03 mm |
| Control point "st140" | error: 2.78 mm |
| Control point "st141" | error: 2.50 mm |
| Control point "st142" | error: 2.40 mm |
| Control point "st143" | error: 2.98 mm |
| Control point "st144" | error: 2.36 mm |
| Control point "st145" | error: 3.50 mm |
| Control point "st146" | error: 4.24 mm |
| Control point "st147" | error: 5.13 mm |
| Control point "st148" | error: 3.54 mm |
| Control point "st149" | error: 4.26 mm |
| Control point "st150" | error: 1.10 mm |
| Control point "st151" | error: 2.42 mm |
| Control point "st152" | error: 5.35 mm |

Conclusie

Het betekent dus dat we op een breedte van een kozijn $2 \times 5,35 \text{ mm} = 10,7 \text{ mm}$ afwijking kunnen hebben. Dat is teveel. We zijn met de 2D methode gestopt en met de 3D methode verder gegaan.

4.1.2 3D methode

De 3D methode is een heel andere methode dan de 2D methode. Bij de 2D methode kun je het algoritme laten leren op basis van afbeeldingen. Dat geldt voor de 3D methode niet. Voor de 3D methode hebben we gebruik gemaakt van een pointcloud.

Het algoritme van de 3D methode gaat in verschillende stappen te werk. Het algoritme loopt automatisch deze stappen af.

De eerste stap is het laden van de pointcloud. De pointcloud is vooraf per woningblok opgeknipt.



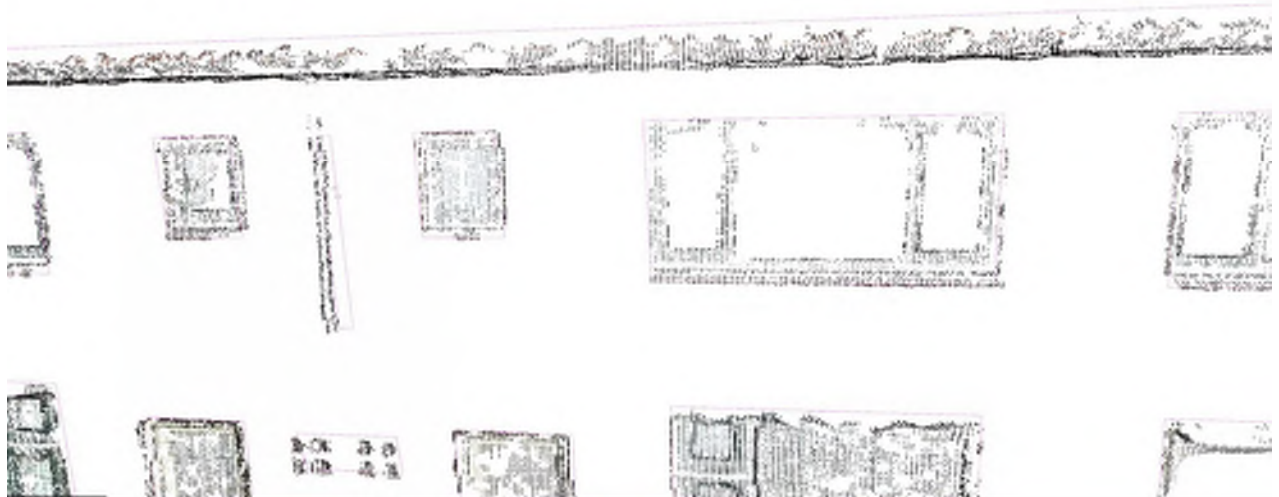
Pointcloud laden

Na het laden gaat het algoritme op zoek naar de gevels. Als het gevelvlak gevonden is gaat het algoritme diepte in het gevelvlak bepalen. Zo worden niet alleen de kozijnen zichtbaar, maar ook hemelwaterafvoeren, goten, postbussen, beplanting etc. De kleuren in onderstaande afbeelding hebben te maken met de hoogte van de objecten t.o.v. het grondvlak.



Diepte bepalen in het gevelvlak

Na het bepalen gaat het algoritme om elk vlak dat in de diepte gevonden is, een kader zetten. Dus goten, hemelwaterafvoeren, kozijnen etc. krijgen allemaal een vlak.



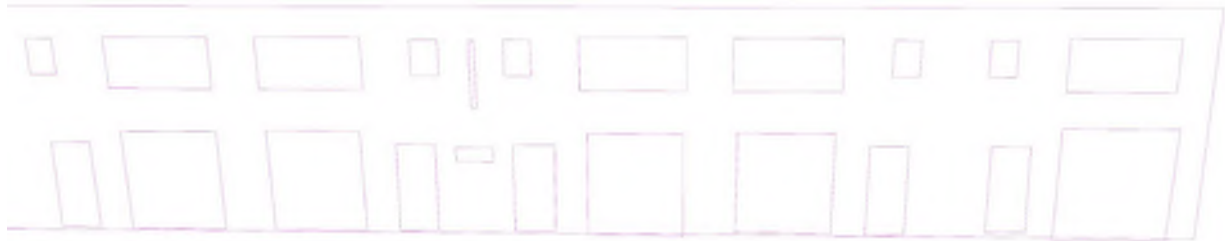
Elk vlak dat in een bepaalde diepte t.o.v. het gevelvlak ligt, krijgt een kader

Na het kaderen worden deze kaders terug op de pointcloud geprojecteerd.



Alle kaders worden op de pointcloud geprojecteerd

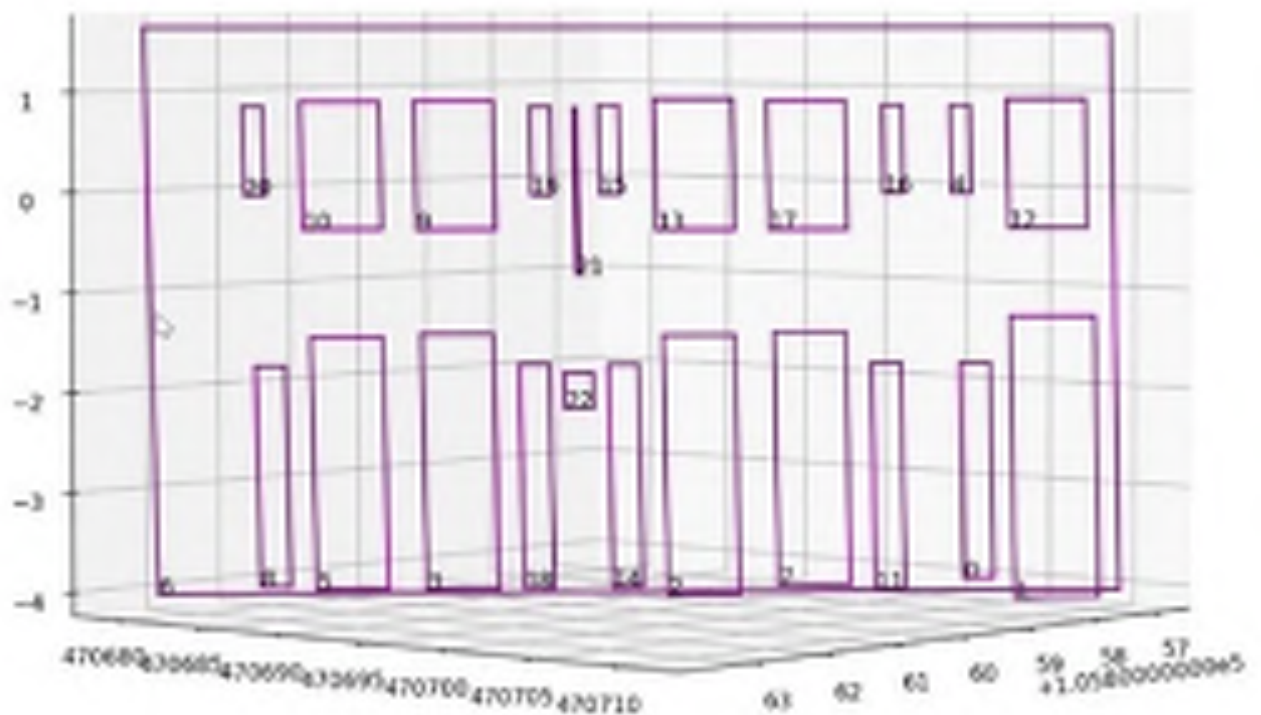
Het algoritme gaat vanaf nu voor elk kader bepalen of het om een kozijn gaat. Om dat te kunnen doen gaat het puur naar de kaders kijken.



Alleen de kaders worden door het algoritme onderzocht

Van alle kaders worden door het algoritme de coördinaten van de hoekpunten bepaald. Deze hoekpunten worden naar een CSV-bestand geëxporteerd.

In het CSV-bestand worden alle kaders genummerd. Die nummering wordt teruggegeven aan de algoritmesoftware.



Elk kader heeft een nummer gekregen

Het algoritme weet nu precies wat een kozijn, deur of waterslag is. Dat laat onderstaande afbeelding zien. De kleuren zijn willekeurig en hebben geen betekenis.



Na het herkennen van ramen, deuren en waterslagen exporteert het algoritme weer een CSV-bestand. In dit CSV-bestand staat naast de nummering ook of het een deur-, een raamkozijn of een waterslag is. Ook de afmetingen van een kozijn, deur of waterslag zijn in het CSV-bestand opgenomen.

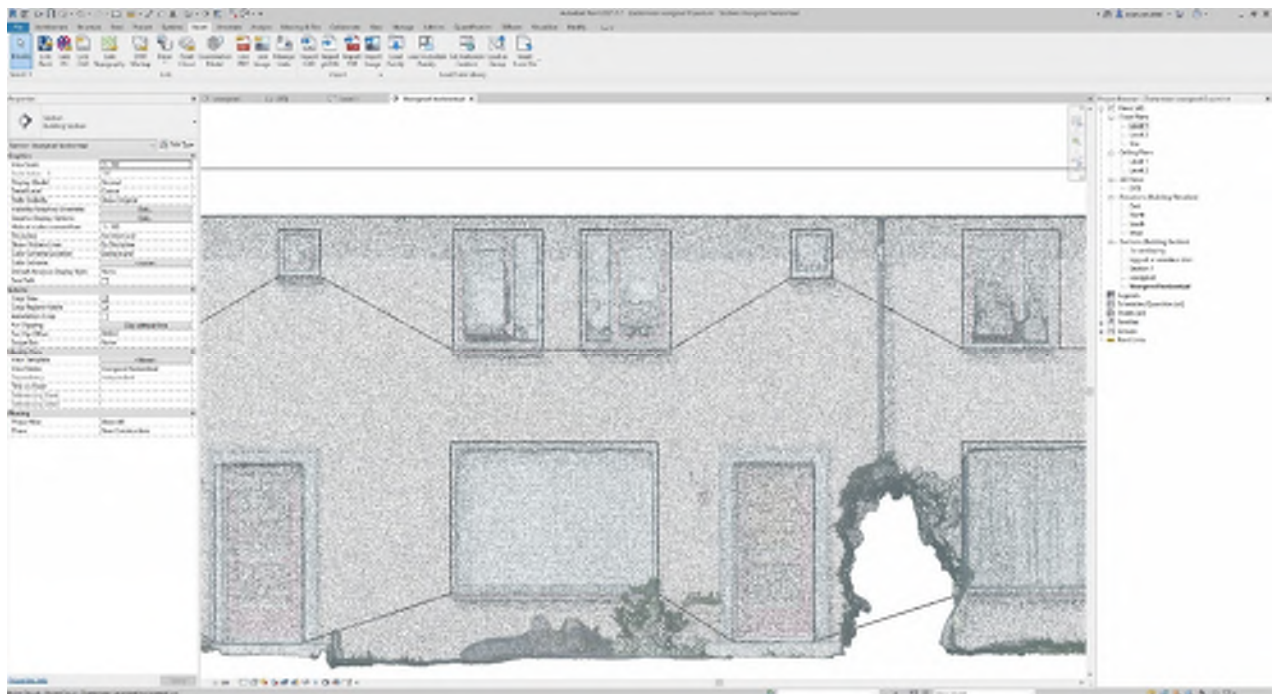
Conclusie

Met de 3D methode is het gelukt om de afmetingen en positie van de kozijnen op de millimeter nauwkeurig te berekenen. Met de 3D methode wordt de stap gemaakt naar het omzetten van gecategoriseerde mesh naar geparametriseerde 3D componenten in Revit.

5. Omzetten van gecategoriseerde mesh in geparametriseerde 3D-componenten in Revit

Het algoritme heeft precies berekend wat een deurkozijn, raamkozijn of waterslag is. Ook de afmetingen zijn bekend en de coördinaten van de hoekpunten van de kozijnen zijn in een CSV-bestand opgenomen. De coördinaten van de hoekpunten van de kozijnen zijn belangrijk om de geparametriseerde componenten te kunnen plaatsen.

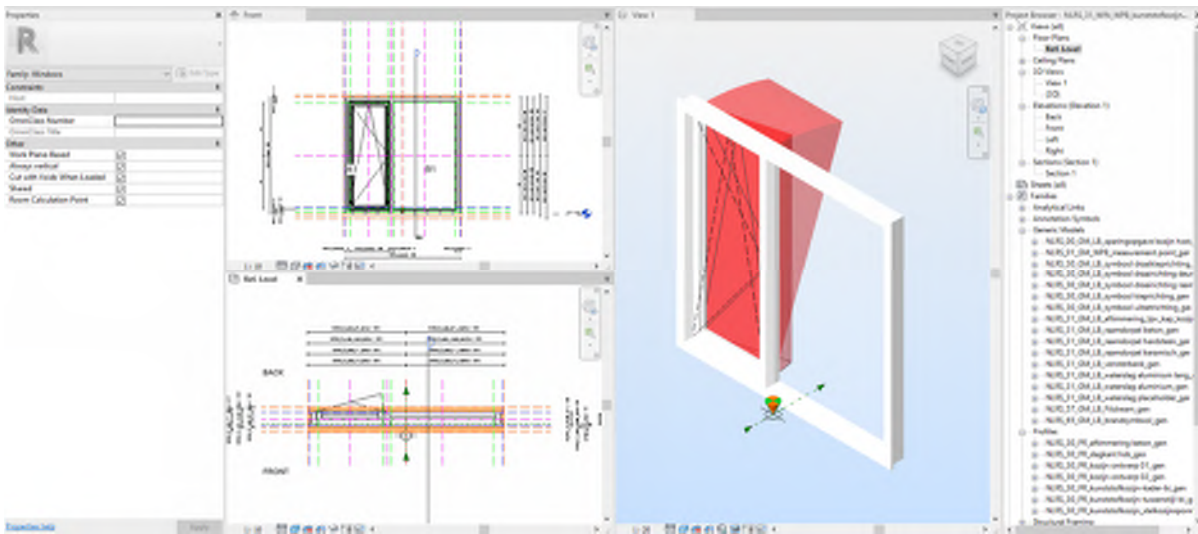
De eerste stap is het inladen van de coördinaten in AutoCAD. In AutoCAD worden tussen de coördinaten polylines gezet. Door het AutoCAD bestand op te slaan kunnen we in Autodesk Revit de tekening van de 3D-polylines ter controle inladen.



De 3D-polylines zijn in Revit over de pointcloud zichtbaar

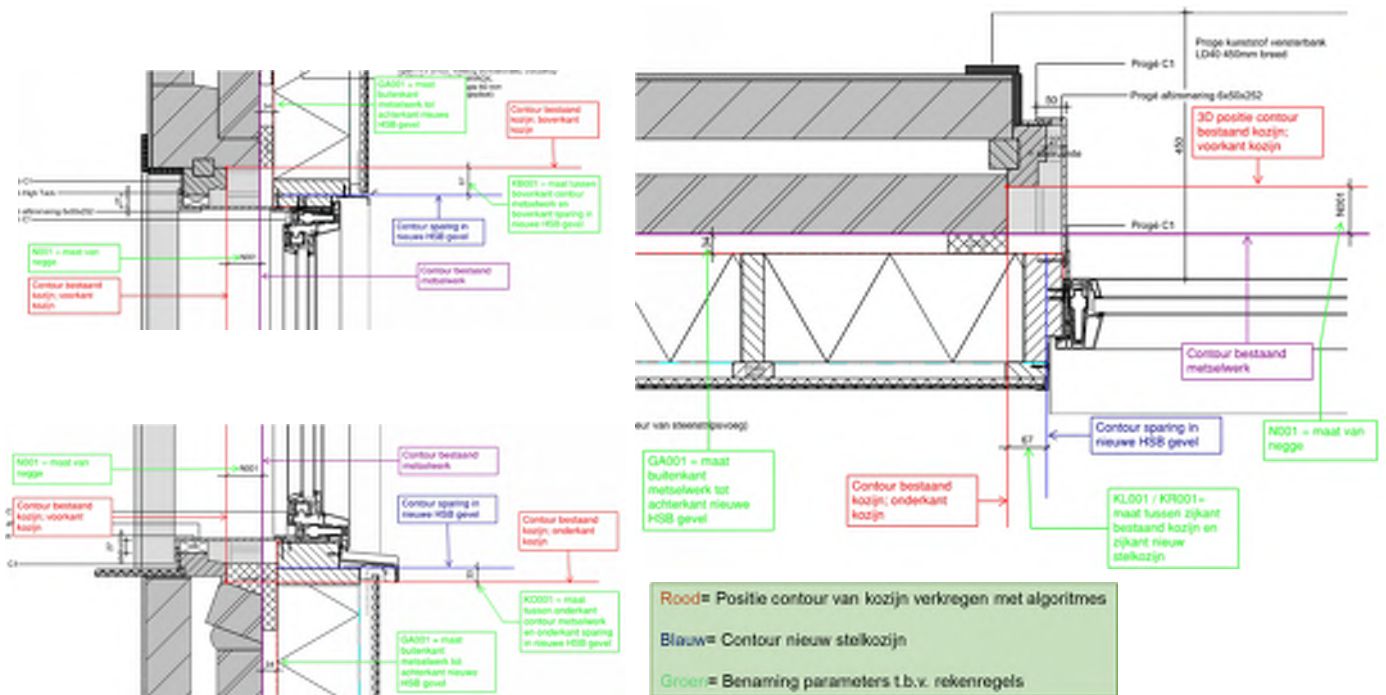
Om de geparametriseerde 3D componenten automatisch op de juiste plaats te zetten, hebben we een Add-In in Revit gebouwd. Een geparametriseerd 3D component is bijvoorbeeld een stelkozijn.

BAM Wonen bv



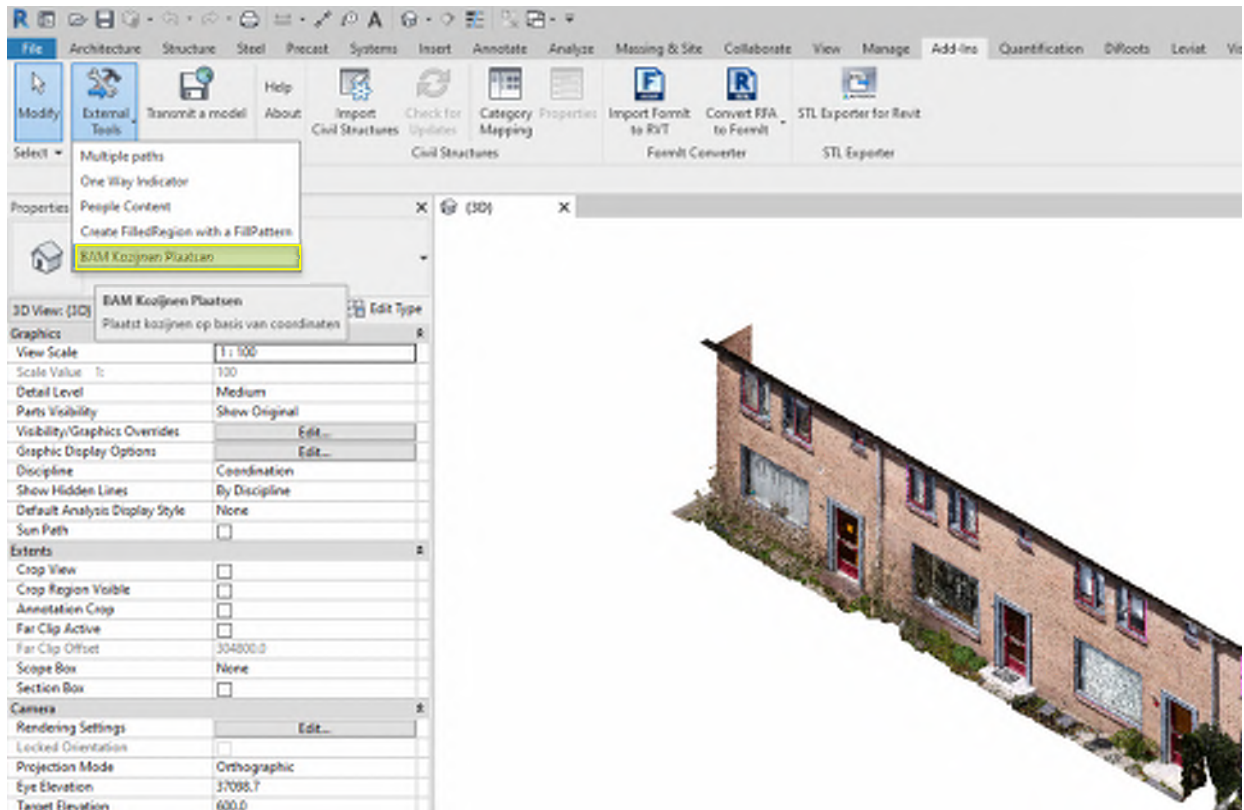
Een stelkozijn als geparametriseerd 3D component

De stelkozijnen moeten op basis van de contouren van de bestaande kozijnen en de parameters t.b.v. de rekenregels op de juiste positie worden gezet.

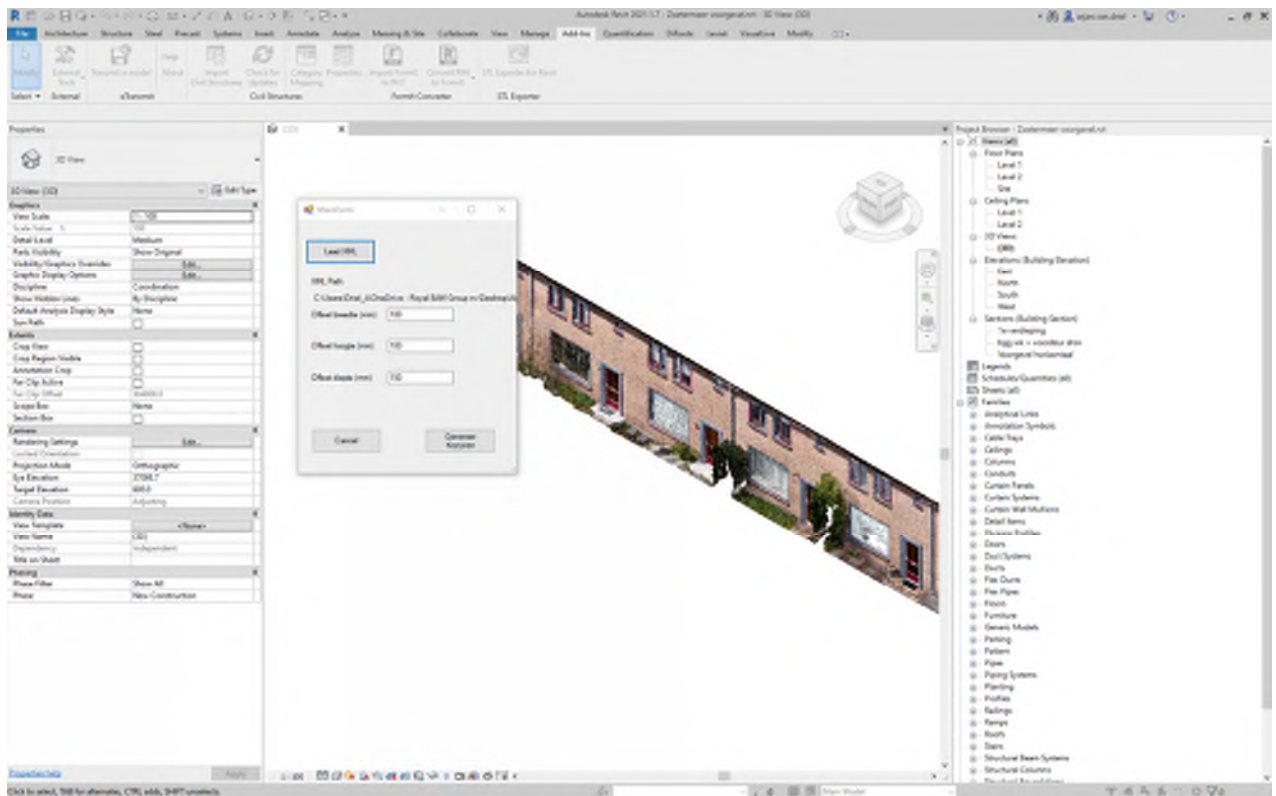


De parameters kunnen in Revit met de Add-In worden aangepast. Het nieuwe stelkozijn moet bijvoorbeeld op een afstand 150 mm t.o.v. het bestaande kozijn geplaatst worden. Naast de afstand in de diepte zijn ook de hoogte en de breedte aanpasbaar.

BAM Wonen bv



De Add-In: Bam Kozijnen Plaatsen



De hoogte, diepte en breedte zijn aanpasbaar

BAM Wonen bv

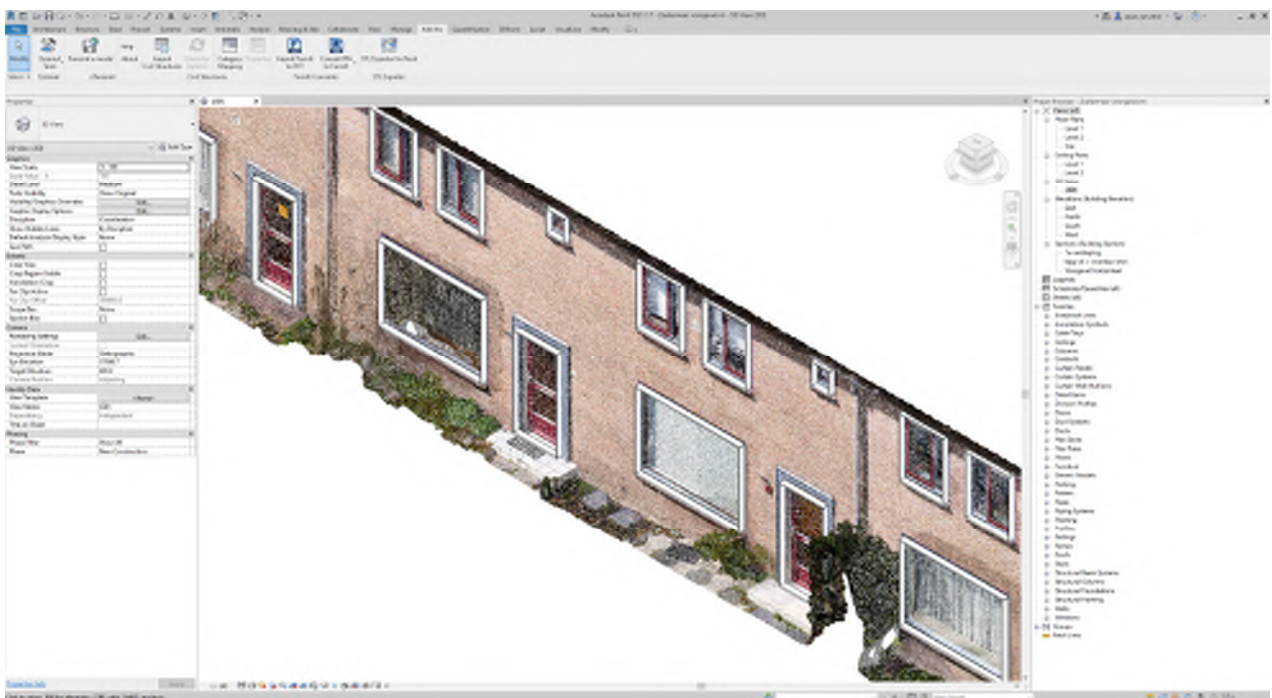
Om de Add-In goed te kunnen laten functioneren, is het CSV-bestand van het algoritme omgezet naar een XML-bestand. Een XML bestand bevat meer structuur dan een CSV-bestand waardoor de Add-In alle stappen netjes kan doorlopen. Door op de knop "Genereer Kozijnen" te drukken staan alle stelkozijnen netjes op positie. De tekening van de stelkozijnen wordt gebruikt door de co-maker van de gevelelementen en van de kozijnen.

```

<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
- <ArrayOfKozijnPosities xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance" xmlns:csd="http://www.w3.org/2001/XMLSchema">
  - <KozijnPositie>
    <Id>60cd147f-7cae-4fa6-b42a-edc29946527e</Id>
    <FacadeLocation>voorgevel</FacadeLocation>
    <LocationNumber>1</LocationNumber>
    <TypeName>Window</TypeName>
    <RevitFamily>NLRS_31_WIN_WPB_stelkozijn_gen</RevitFamily>
    <RevitFamilyType>stelkozija 1x1</RevitFamilyType>
    <Class>F</Class>
    <Width>2504</Width>
    <Height>1804</Height>
    <Surface>4.51735469825728</Surface>
    <BottomLeft>[1.7126337 0.84601529 0.866 ]</BottomLeft>
    <BottomLeftX>1.7126337</BottomLeftX>
    <BottomLeftY>0.84601529</BottomLeftY>
    <BottomLeftZ>0.866</BottomLeftZ>
    <TopLeft>[1.7126337 0.84601529 2.67000008 ]</TopLeft>
    <TopRight>[4.21671046 0.84571494 2.67000008 ]</TopRight>
    <BottomRight>[4.21671046 0.84571494 0.866 ]</BottomRight>
  - <KozijnPositie>
    <Id>cb44abd4-b67c-4238-9632-df75abcd8aba</Id>
    <FacadeLocation>voorgevel</FacadeLocation>
    <LocationNumber>2</LocationNumber>
    <TypeName>Window</TypeName>
    <RevitFamily>NLRS_31_WIN_WPB_stelkozijn_gen</RevitFamily>
    <RevitFamilyType>stelkozija 1x1</RevitFamilyType>
    <Class>A</Class>
    <Width>503</Width>
    <Height>580</Height>
    <Surface>0.293152425</Surface>
    <BottomLeft>[11.92318165 0.84739932 4.66609812 ]</BottomLeft>
    <BottomLeftX>11.92318165</BottomLeftX>
    <BottomLeftY>0.84739932</BottomLeftY>
    <BottomLeftZ>4.66609812</BottomLeftZ>
    <TopLeft>[11.92318165 0.84739932 5.24809804 ]</TopLeft>
    <TopRight>[12.42860014 0.85151918 5.24809804 ]</TopRight>
    <BottomRight>[12.42860014 0.85151918 4.66609812 ]</BottomRight>

```

Voorbeeld van een XML-bestand



Alle stelkozijnen met één druk op de knop netjes op positie geplaatst

6. Conclusies

Allereerst zijn we enorm trots op wat we met het consortium gemaakt hebben en waar we gekomen zijn. Het is fantastisch om te bedenken dat we een kleine twee jaar geleden nog met een statische scanner scanden en alles handmatig in Revit tekenden. We meten nu met een drone de gebouwen in, maken 3D modellen op de millimeter nauwkeurig, hebben een algoritme voor de kozijnen en een Add-In voor Revit om de stelkozijnen op positie te zetten.

Hiermee kan het renovatieproces van woningen aanzienlijk versneld worden. Met ca. 28 dagen per renovatieproject (project bestaande uit gemiddeld 40 woningen). En met een hogere kwaliteit. De voorbereiding van een NOM-renovatieproject van 40 woningen duurt nu 150 dagen en 30 dagen voor uitvoering. Dit draagt bij aan het goedkoper, beter en sneller renoveren van woningen tot gasloos, waardoor een opschaling mogelijk wordt.

Daarnaast kunnen door de versnelling meer woningen in een jaar gerenoveerd worden. Natuurlijk hebben we de nodige tegenslagen gehad. Toen we in het begin met de drone (fotogrammetrie) gingen vliegen was het uitpuzzelen wat de beste vlieghoogte was en de afstand van de drone naar de gevel. We hebben enkele vluchten moeten gebruiken om tot een goed resultaat te komen. Daarna hebben we diverse softwarepakketten getest om de negen rondom de kozijnen zo scherp mogelijk zichtbaar te krijgen. Dit was weer van belang voor het algoritme. Daarvoor was de bepaling van realistische hoeken van metselwerk en kozijnen nodig, om zo tot goede metingen te komen. Het meeste tijd kostte het onderzoek om het algoritme te laten werken op de 2D methode. We hebben veel kennis opgedaan over het dronevliegen, maar vooral over het maken van een algoritme!