

# Het virtuele gebouw

*In de nabije toekomst zal de intuïtie en de vakkennis van ervaren ontwerpers en bouwers beslist fundamenteel blijven voor het realiseren van succesvolle en complexe bouwprojecten. Er kan in de virtuele wereld echter veel meer worden gedaan om ontwerpers, bouwers en gebouweigenaren te helpen door een aantal van de tijdrovende en kostbare werkzaamheden te vervangen, die op het moment worden geaccepteerd binnen de bedrijfstak.*

*- door P. Bailey, D. Brodtkin, J. Hainsworth, E. Morrow, A. Sedgwick, M. Simpson en A. Simondetti*

**H**et komende decennium zal worden gekenmerkt door de opkomst en de toepassing van een holistische, technologiegedreven benadering van het bouwproces - een revolutie is op komst. Dankzij de nieuwe virtuele technologieën is het mogelijk om meer te vertrouwen op harde feiten dan enkel op ontwerpintuïtie. Het concept van een "virtueel gebouw" zal het voor ontwerpers uiteindelijk mogelijk maken om een volledig geteste gebouwoplossing met vertrouwen te ontwikkelen, niet alleen wat betreft de constructieve mogelijkheden, maar ook op gebied van de operationele prestatie van het gebouw op lange termijn, de hele levenscyclus van het gebouw. Het opkomende virtuele proces wordt essentieel voor ontwerpinnovatie door resultaten voort te brengen die niet hadden kunnen worden voorspeld vóór de komst van deze technologieën. Dit proces zal de huidige meest geavanceerde

technologie van 3D computergestuurd ontwerpen / tekenen (CAD) en bouw informatie modellen (BIM) bevatten en uitbreiden.

## **WAT IS HET "VIRTUELE GEBOUW"?**

Antwoord: een concept waarin alle ontwerp-, constructie-, milieuprestatie- en operationele problemen door gebruik van geïntegreerde computersimulatie zijn gemodelleerd, gevisualiseerd en opgelost, en waarin deze oplossingen kunnen worden geoptimaliseerd. Het virtuele gebouw is bedoeld om belanghebbenden gedurende de hele levensduur van het project op de volgende gebieden te ondersteunen:

- *onderzoek*: een continu ontwikkelend hulpmiddel om nieuwe ontwerp- en constructierichtingen te onderzoeken;
- *communicatie*: voor projectteams mogelijk maken om snel en nauwkeurig te communiceren over ontwerpvormen, functies en de

houding ten opzichte van andere teamgenoten en alle mogelijke andere belanghebbenden;

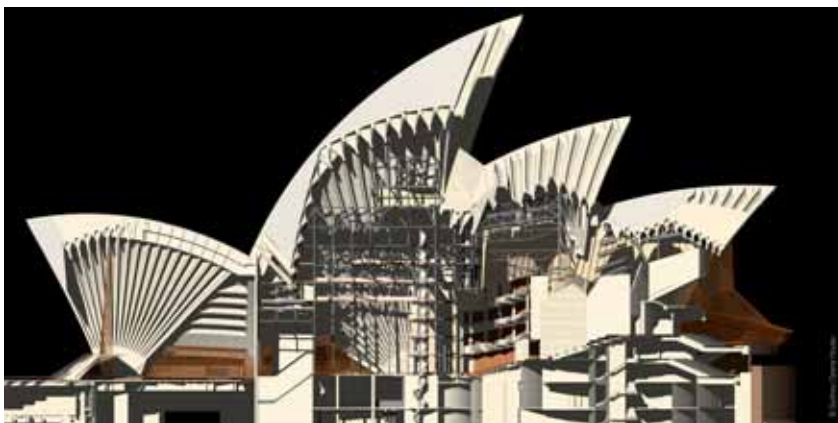
- *integratie*: het verschaffen van een omgeving waarin het ontwerpteam en later *facility management* projectinformatie snel en efficiënt kan uitwisselen en samenvoegen;
- *optimalisatie*: beschikbaar stellen van analysehulpmiddelen die in staat zijn om de prestatie, duurzaamheid en kosten te optimaliseren, zodat doelen op zowel korte- als lange termijn kunnen worden vervuld.

Hulpmiddelen en technieken die in het virtuele gebouw worden gebruikt ontwikkelen zich voortdurend. Dit artikel richt zich op de huidige mogelijkheden voor virtueel ontwerpen in de bouwindustrie, wat is nieuw en *cutting edge*, en wat kan er in de toekomst worden verwacht waardoor de manier waarop we gebouwen ontwerpen zal veranderen.

## **NU**

### **2D tekenen versus 3D modelleren**

Twee-dimensionale tekeningen zijn in de bouwindustrie nog steeds de belangrijkste vorm van contractdocumentatie. Daarnaast zijn deze tekeningen één van de voornaamste oorzaken van conflicten, waarbij wordt geschat dat slechte documentatie jaarlijks miljarden kost aan onduidelijkheden en daarop volgende fouten. De problemen met 2D-documentatie hebben meestal betrekking op een slechte samenwerking en op een gebrekkig detailniveau door de beperkingen van een twee-dimensionale tekening om een complex fysiek object volledig te beschrijven. Dit komt voornamelijk tot uitdrukking bij gebouwen met een complexe geometrie. Daarnaast is de coördinatie tussen de verschillende tekeningen vaak een probleem. 3D modelleren is echter de bouwsteen van het virtuele gebouw, omdat



**3D-model van het Sydney Opera House [Bron: Stuart Bull]**

- FIGUUR 1 -

Voor meer informatie: prof. dr.ir. Joop Paul MBA of ir. Jeroen Coenders, Arup BV. Vertaling van "The virtual building", door ir. P.M. Briggen, werkzaam bij Peutz BV. Bewerkt door ir. Jeroen Coenders

het belangrijke verbeteringen biedt ten opzichte van de conventionele vervaardiging van tekeningen (Figuur 1). Een 3D-model van een gebouw dat vroeg in het proces is gemaakt, dwingt de ontwerper/tekenaar om in drie dimensies en voor alle gedeelten van het gebouw na te denken, en zich uit te spreken over de voorgestelde oplossingen. Het 3D modelleren trekt eigenlijk de samenwerking voorwaarts in het ontwerpproces, door een middel te ontwikkelen dat een drager kan zijn voor echte ontwerpintegratie. Als eenmaal de ruimtelijke indeling en de detaillering zijn opgelost kunnen 2D-tekeningen rechtstreeks worden onttrokken aan het 3D-model. Omdat de tekeningen een afgeleide zijn van het model, kunnen nagenoeg onbeperkte combinaties van doorsneden, plattegronden, gevelaanzichten en isometrieën worden gemaakt in iedere richting. Nog belangrijker is dat de tekeningen volledig met elkaar in overeenstemming zijn, omdat zij een directe weergave zijn van het model. Aan de hand van een 3D-weergave kan het gebouw veel eenvoudiger worden begrepen, niet alleen door de ontwerpdisciplines, maar ook door opdrachtgevers en aannemers. De aanpak van het 3D modelleren is als communicatiemiddel veruit superieur aan 2D-benaderingen en laat al resultaten zien betreffende het vervaardigen van betere producten met minder herstelmaatregelen. Als eenmaal een 3D-basismodel is opgezet zijn de mogelijkheden om deze informatie te ontwikkelen, toe te passen, kritisch te bekijken en aan te vullen oneindig.

## NIEUW

### *Virtuele constructie*

Omdat de dichtheid en complexiteit van gebouwssystemen toeneemt, wordt de ruimtelijke indeling ervan steeds belangrijker bij het vervaardigen van een functioneel en goed geïntegreerd gebouw. Door 3D-modellen van de verschillende ontwerpadviseurs over elkaar te leggen en automatisch met elkaar te vergelijken kan het architectonische en technische ontwerp worden samengevoegd. Dit proces kan worden ondersteund door software die de tegenstrijdigheden in de modellen opspoorst, maar wordt het meest effectief ten uitvoer gebracht op bijeenkomsten waarin de virtuele constructie wordt besproken. Het is mogelijk om de

samenwerking van gebouwcomponenten effectief te visualiseren en beheersen door een virtueel model te maken van deze onderdelen. Daarmee neemt het vertrouwen in het ontwerp toe en neemt de kans op late aanpassingen en botsingen tussen gebouwssystemen op de bouwplaats af.

Dit proces verloopt het meest eenvoudig als alle adviseurs dezelfde software gebruiken. Als dit onmogelijk is, kan data potentieel worden uitgewisseld door gebruik te maken van *Industry Foundation Classes (IFC)* een zogenaamde interoperability standaard voor bouwinformatie [1]. Ook kan software zoals *NavisWorks* [2] worden gebruikt om modellen die zijn vervaardigd met behulp van verschillende softwarepakketten te importeren en te bestuderen, en om virtuele ontwerpbijeenkomsten te ondersteunen. Tijdens het herzieningsproces kan het model worden geroteerd en kan worden ingezoomd op bepaalde onderdelen, die uit het model kunnen worden gehaald en voorzien van opmerkingen. Dan kunnen de taken worden verdeeld, wat resulteert in een Word-document waarin de 3D-aanzichten van het model, van commentaar zijn voorzien. Nauwere gezamenlijke praktijken zouden moeten worden ontwikkeld door gebruik te maken van deze hulpmiddelen. Een voordeel kan het voorkomen van dubbel werk zijn. Arup werkt in het buitenland en in Nederland bijvoorbeeld op het moment samen met toonaangevende architecten om constructieve en architectonische modellen samen te voegen. Dit leidt tot een significante besparing van tijd en kosten voor architecten, omdat zij niet voortdurend de veranderde informatie van de constructie opnieuw hoeven in te voeren in het model.

Tijdens de uitvoering kunnen de modellen van onderaannemers aan het proces worden toegevoegd om meer zekerheid te geven dat alles op elkaar aansluit. Als de onderaannemers nog niet beschikken over 3D-modelleertools kan informatie uit de tweedimensionale tekeningen worden gehaald en in drie dimensies worden ontwikkeld door een modelleerteam. Op deze manier kan volledige 3D-afstemming plaatsvinden door tegenstrijdigheden in de modellen op te sporen, ofwel door de bouw virtueel te simuleren, voordat de werkelijke bouw begint, *Virtual construction*.



**Chemisch laboratorium van de Princeton Universiteit: resultaat van het over elkaar leggen van alle disciplines die betrokken zijn bij de bouw. [Bron: Vincent Fiorenza]**

- FIGUUR 2 -

Dit kan als generale repetitie worden beschouwd voor het bouwproces, waarmee mogelijk kostbare herstelmaatregelen op de bouwplaats voorkomen en waarmee de bouwkosten naar schatting tussen de 2 en 10 % kunnen worden verlaagd.

Een combinatie van de architectonische, gebouwstelsel-, en constructiemodellen en modellen van onderaannemers tot een enkel interactief model dat van alle mogelijke kanten kan worden bekeken levert een erg krachtig middel om het ontwerp te beoordelen. De mogelijkheid om 3D-modellen over elkaar heen te leggen in een virtuele bouwomgeving (Figuur 2) kan een "de eerste keer goed" benadering van het ontwerp, de aanbesteding en het bouwproces bevorderen.

### *Gemeenschappelijke modellen*

De volgende stap die verder gaat dan enkel virtuele constructie is om vanaf het begin van het project een methode te introduceren waarbij gemeenschappelijke modellen worden gebruikt. Dit betekent dat een 3D-model centraal wordt gedeeld met alle leden van het ontwerpsteam. Voor een gedeeld centraal model is het nodig dat er door protocollen wordt overeengekomen wie, wat en op welke manier mag aanpassen in het model en wanneer deze aanpassingen mogen worden bijgewerkt. Het model dient op een centrale server te worden aangeboden die op het kantoor van de opdrachtgever staat, op het kantoor van een van de leden van het ontwerpsteam of bij een gespecialiseerd modelleerbureau dat op het project is aangewezen. Dit proces is slechts getest op een klein aantal projecten dat over de hele

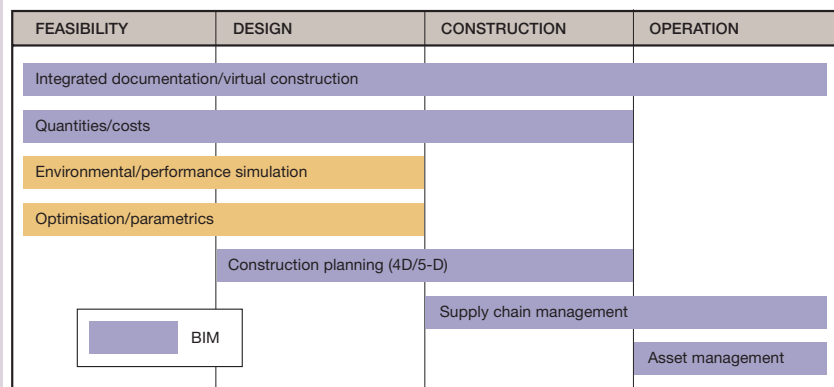
wereld is uitgevoerd. Een voorbeeld waarbij Arup betrokken is geweest, is het One Island East project voor Swire Properties in Hong Kong, dat geheel is ontworpen en vervaardigd door gebruik te maken van het *Digital Project platform*. De opdrachtgever kocht voor het hele ontwerpteam hardware en software om een samenhangende aanpak te garanderen. Een algemene 3D-coördinator was aangesteld om gedurende het hele ontwerp- en bouwproces toezicht te houden op het centrale model. De opdrachtgever ziet dit als een manier om zijn aanpak van alle projecten in zijn portfolio te rationaliseren, met voordelen die terugvloeien in de manier waarop hij zijn bedrijfsmiddelen beheert. Eenvoudiger versies van het centrale model, zoals modelleren met een gecentraliseerde database, zijn al in gebruik. De geëxtrudeerde vormgeometrie van de architect kan bijvoorbeeld met gescripte links voor software-interactie worden samengevoegd met de analytische hartlijngeometrie van de ingenieur, zodat het mogelijk wordt om ontwerp-aanpassingen uitgebreid mee te nemen in één enkel platform van parameters.

De aanpak met een centraal model is in de praktijk nog niet perfect en het ontwerpteam kan dan ook verschillende procedurele problemen verwachten. Maar ondanks dat de aanpak misschien geen ontwerp- en documentatietijd zal besparen, kan worden verwacht dat de inspanning in de bouwfase aanzienlijk wordt beperkt en dat daardoor geld wordt bespaard. Om de voordelen te maximaliseren is voor centraal aangestuurde modellen een verandering vereist in de manier waarop het projectteam werkt, in de nabije toekomst met "master modelers" waarvan wordt verwacht dat zij de leiding nemen over alle ontwerp-informatie van projecten.

### Gebouwinformatie modellering (BIM)

BIM is een hulpmiddel om andere dan de geometrische informatie in een 3D-model op te nemen, waarbij enkele hoofddoelen zijn:

- geautomatiseerde schematisering van kwantiteiten en kosten;
- schematisering van de uitvoering (4D) - voor de planning van bouwactiviteiten;
- schematisering van hoeveelheden en



**Virtuele bouwprocessen omvatten de gehele levenscyclus van een gebouw.**

[Bron: Nigel Whale]

- FIGUUR 3 -

- kosten in de tijd (5D);
- directe vervaardiging - automatiseren van het fabricageproces;
- integratie van de productielijn - automatisering van het aanbestedingsproces;
- beheer van de voorzieningen - om het gebouw te beheren door het model als interface te gebruiken.

Op dit moment blijkt BIM een bruikbaar hulpmiddel te zijn (zoals omschreven door Autodesk) "om te voorzien in een continue en directe beschikbaarheid van informatie over de projectomvang, het bouwschema en de kosten, die van hoge kwaliteit is, betrouwbaar, geïntegreerd en volledig gecoördineerd". De mogelijkheid om dit type informatie te verbinden bestond al in de gemeenschappelijke 3D softwarepakketten, maar een overeenkomst over de wijze waarop data dient te worden geselecteerd en georganiseerd, is nog steeds in ontwikkeling. BIM geeft niet alleen de mogelijkheid om de gehele productielijn verticaal te integreren, maar ook om het ontwerp-team horizontaal te integreren.

### Kwantiteiten en kosten

Het wordt steeds gebruikelijker om de exacte hoeveelheden van materialen of componenten uit de vervaardigde 3D-modellen te halen. Alle benodigde geometrische informatie is al gebruikt om het model op te zetten, dus het is een eenvoudige aanvulling om die informatie in samengevatte vorm uit het model te halen wanneer deze compleet is. Het voordeel van dit alles is dat de handmatige bepaling van benodigde kwantiteiten - vaak gevoelig voor menselijke fouten en schaalfouten kan worden gecontroleerd, of zelfs vervangen.

Als de kwantiteiten eenmaal in een bruikbaar format uit het model zijn

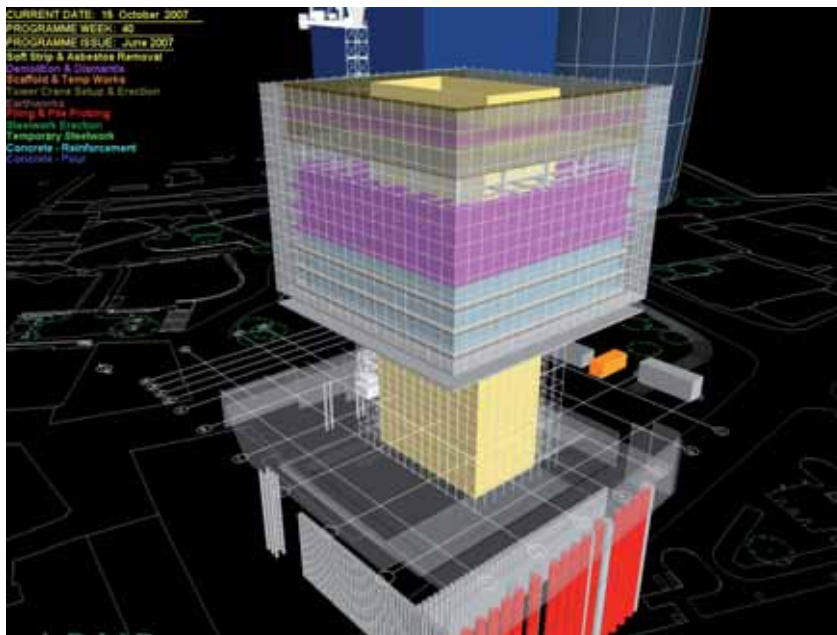
gehaald, wordt het een eenvoudige oefening om de kosten per eenheid toe te voegen aan de vastgestelde kwantiteiten, om te komen tot een representatief kostenplan. Eén van de grote voordelen hiervan is dat nu een snelle beoordeling en herbeoordeling van de kosten mogelijk is als het 3D-model eenmaal is opgezet. Alle mogelijke aanpassingen aan het model en de invloed ervan op de kosten kunnen snel (en automatisch) worden beoordeeld.

### Schematisering van de uitvoering (4D)

Het is duidelijk dat het plannen van een bouwproces erg lastig is. Rapporten uit de bouwindustrie geven de indruk dat materialen slechts met een efficiëntie van 40-60 % worden gebruikt. 4D modelleren is een krachtig nieuw hulpmiddel dat interactieve mogelijkheden biedt voor het visualiseren, vaststellen en repeteren van de bouwvolgorde om meer efficiëntie in het bouwproces te brengen.

"4D" is een acroniem dat is ontwikkeld in de industrie om de toevoeging van de tijdsdimensie aan een 3D-model duidelijk te maken. In andere termen: het 3D-model bevat "objecten" die worden geregeld en gestuurd via de tijdslijn van een Gantt-grafiek [3], bijvoorbeeld gemaakt in MS Project. Het gebruik van de "vierde dimensie" maakt het mogelijk dat de opeenvolging van de objecten wordt beïnvloed door oneindig veel wijzigingen. Als we het projectmanagement willen verbeteren, passen we de Gantt-grafiek aan, en niet de "3D-afbeeldingen" (die simpelweg een bijproduct van het proces zijn).

In de vroege stadia van een tijdskritisch project kan het nuttig zijn om eenvoudige visualisatie / AVI-presentaties te maken van de bouw en het bouw-



**122 Leadenhall Street, Londen, project: 4D-model van de bouw. [Bron: Simon Kerr]**  
- FIGUUR 4 -

proces. Opeenvolgende beelden en animaties van het bouwproces kunnen worden gemaakt om te helpen de informatie op een duidelijke manier te verspreiden.

Verderop in het proces, wanneer meer gedetailleerde schema's benodigd zijn, kan het model worden gebruikt om de complexe volgorde van de bouw te beschrijven, zonder dat vele pagina's met grafieken moeten worden gelezen en begrepen. Het hoofddoel is om de gehele bouwtijd te optimaliseren door de knelpunten en de beperkingen van de bouwplaats bij het faseren van het werk uit te lichten. Het bouwprocesmanagement wordt ondersteund door het werkerrein en de fasering te illustreren die benodigd is om de belangrijkste bouwvraagstukken op te lossen. Het is een uiterst effectief planning- en communicatiehulpmiddel om de invloed van keuzes in de bouw duidelijk te maken aan belanghebbenden of aan overlappende en meerdere onderaannemers. Deze aanpak is door Arup met groot succes toegepast in vele projecten, inclusief de schematisering van de sloopwerkzaamheden voor het Leadenhall Street project in Londen (Figuur 4), en de planning van grote werkzaamheden voor de metrostations Kings Cross en St. Pancras.

### **5D-schematisering**

Als we de automatische bepaling van kwantiteiten combineren met een in de tijdsdimensie uitgebreid 4D-model, voegen we een vijfde dimensie toe, gewoonlijk bekend als "5D". De kracht van 5D-schematisering is dat het daarmee mogelijk wordt om gebruik te maken van de relaties tussen de tijd-

lijnen van de objecten in de 4D-omgeving en daarna om de bijbehorende hoeveelheden of kosten weer te geven op bepaalde punten in de tijd.

In eenvoudige termen: het gevolg van het plaatsvinden van taken (of niet) en de relatie met andere taken, maakt het mogelijk om eindeloze wijzigingen van de benodigde hoeveelheden te onderzoeken op ieder moment. Een aantal voorbeelden hiervan kan zijn, het bepalen van het aantal kubieke meters beton dat in een volgende week volgens een dagrooster dient te worden gestort, of de kosten van verrichte arbeid in een maandelijkse begroting. In een recent winkelcentrumproject had het verplaatsen van de balken in de Gantt-grafiek invloed op het 4D-model en op de 5D-documentatie, waarbij het aantal, de plaats en de beschikbaarheid van parkeerplaatsen op ieder moment gedurende de restauratie werd aangegeven. Dergelijke methoden zijn ideaal wanneer het management zeker wil zijn van de voortgang van een project of voor bepaling van de risico's voor de opdrachtgever en de financiële gevolgen van keuzes. De duidelijke voordelen van 4D en 5D verderop in het proces, tijdens de bouwfase van een project, betekenen dat de selectie van ontwerpadviseurs met de benodigde modelleerdeskundigheid nu belangrijker is dan ooit.

### **Directe vervaardiging**

Het virtuele bouwproces maakt geavanceerde productietechnologieën mogelijk die fabricagedata direct uit 3D-modellen halen door gebruik te maken van numeriek gestuurde computertechnologie (CNC), waarmee de

behoefte en het risico dat verbonden is aan het interpreteren van 2D-tekeningen wordt weggenomen.

Digitale vervaardiging kan worden gebruikt voor routinemontages, maar het kan ook meer complexe vormen en montages mogelijk maken, die niet mogelijk zouden zijn door gebruik van traditionele methoden. Deze technologie wordt op grote schaal gebruikt in de staalindustrie, maar kan ook worden aangepast voor de fabricage van prefab beton. Een recent voorbeeld is de vervaardiging van "The travellers" sculpturen in Melbourne [4] voor de 2006 Commonwealth Games, waarvan geen tekeningen zijn gemaakt. Alle componenten zijn direct vervaardigd uit het 3D-ontwerpmodel en de begeleidende spreadsheets. De potentie om geld en tijd te besparen door het proces van ontwerp tekenen en / of het maken van werktekeningen te elimineren is vanzelfsprekend - een aanwijzing voor de potentie van een "tekenvrije" toekomst, en een belangrijke stap richting het "virtuele gebouw".

### **Beheer van de productielijn**

Door zich in te zetten voor een gezamenlijk ontwerp en planning kan het virtuele gebouwmodel tijdens het bouwproces verder worden aangepast en kritisch bekeken. Vergaderingen met aannemers en onderaannemers waarin het interactieve project wordt beoordeeld, kunnen worden georganiseerd en discussies kunnen worden gedocumenteerd met aanzichten van het model. Door het "oefenen" van het bouwproces bevordert dit de samenwerking tussen de verschillende vakgebieden en helpt het bij het maximaliseren van de voordelen die door de gezamenlijke specialismen worden aangeboden door de onderaannemers. Interactieve modellen die onbeperkt kunnen worden bekeken, worden aan iedereen verstrekt, waardoor een snelle en effectieve visualisatie van het project wordt geboden. Dit helpt onderaannemers onmiddellijk te begrijpen wat van ze wordt gevraagd en vermindert het risicoaspect van hun prijsbepaling in belangrijke mate. Tijdens de vroege fases van een project neigen ontwerpers naar het gebruik van algemene componenten om de bouwsystemen weer te geven. Dergelijke componenten kunnen worden gebruikt om nauwkeurige aanbestede-

dingsinformatie te produceren, maar zullen uiteindelijk worden vervangen door specifieke componenten die de hoofdaannemer en de onderaannemers willen gebruiken in de bouw. Door de objectgeoriënteerde aard van het virtuele gebouwmodel kunnen componenten van een verschillend detailniveau eenvoudig worden toegevoegd of uitgewisseld in iedere fase van het proces. Het virtuele bouwproces maakt het dus mogelijk om alternatieve indelingen en strategieën van bouwsystemen snel en nauwkeurig te modelleren, inclusief een toets op tegenstrijdigheden in het uiteindelijke model en inclusief de plaatsingsprocedures. Het digitale model kan ook worden gekoppeld aan orderinformatie, waarmee het mogelijk wordt om componenten te volgen van productie tot levering, opslag op de bouwplaats en uiteindelijke plaatsing.

#### ***Beheer van voorzieningen en bedrijfsmiddelen***

Het virtuele gebouw is niet alleen bruikbaar tijdens het ontwerp en het bouwproces, maar zal ook snel een bruikbaar hulpmiddel worden voor het beheer van voorzieningen gedurende de gehele levenscyclus van het gebouw. Door componenten in het virtuele gebouw te koppelen aan een database voor het beheer van voorzieningen, kan de gebouwbeheerder de activa beheren en managen door middel van een visuele interface. De database van het virtuele gebouw kan zo worden ontworpen dat deze tekeningen, specificaties en de onderhoudsgeschiedenis van de componenten in het model bevat. Daarmee kan een beheerder van de bedrijfsmiddelen simpelweg op een "ruimte" klikken om hiervan de relevante informatie te vinden. Een andere mogelijkheid is dat de beheerder direct vanuit de database wordt doorgelinkt naar de juiste plaats in het model om een component in kwestie te identificeren, of het model kan worden ingesteld om te waarschuwen voor fouten of gepland onderhoud, of om toezicht te houden op het energiegebruik.

Het proces van het opnieuw bestellen van componenten of het plannen van onderhoud wordt hiermee sterk vereenvoudigd, de beheerder hoeft slechts het onderdeel in kwestie aan te wijzen in het model om alle relevante specificaties op te roepen uit de database. Dit kan in het bijzonder effectief zijn voor

gevelelementen waarin vaak breuk optreedt en waarbij het van belang is dat bij het bestellen wordt gelet op de exacte geometrie en de specifieke prestatie van het element.

#### ***Parametrisch en generatief modelleren***

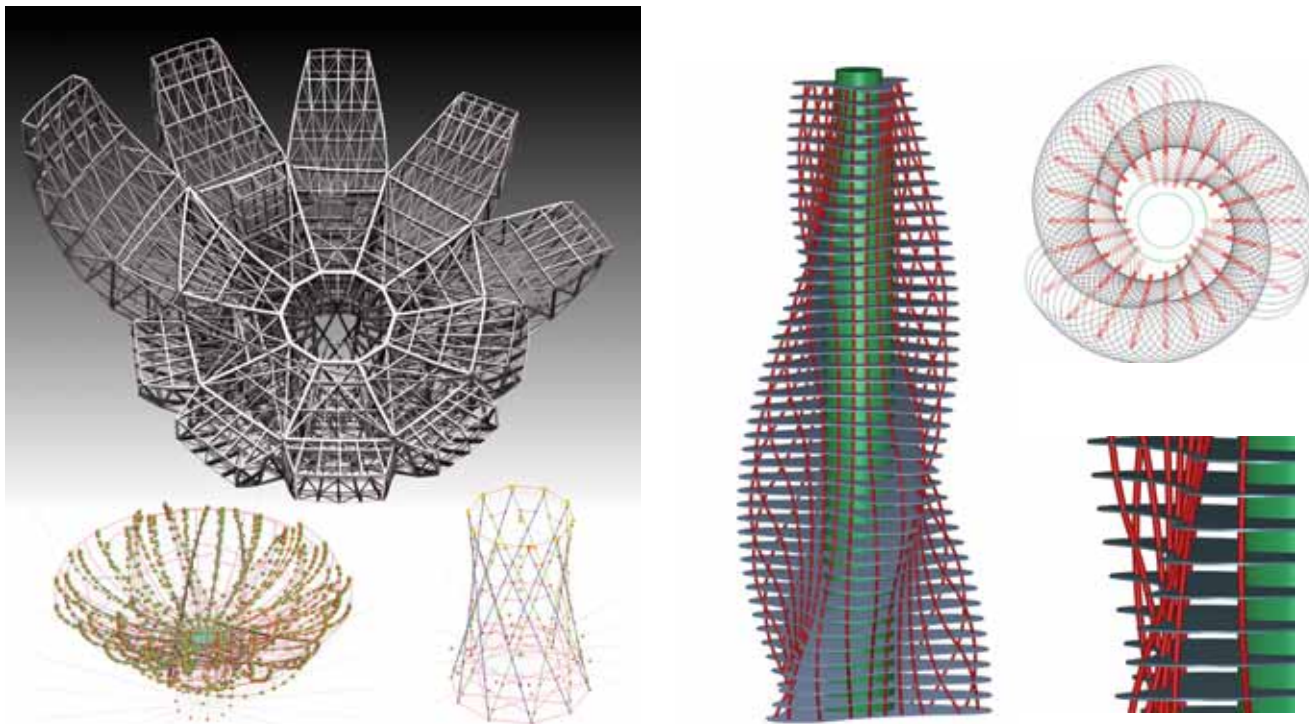
Parametrisch modelleren is een proces waarbij gebruik wordt gemaakt van associatieve modelleersoftware die, volgens Bentley Systems, "de kritische relatie tussen de ontwerpintentie en de geometrie vastlegt en er gebruik van maakt" via scripts, algoritmes en regels. Door de parameters vast te leggen die een gebouw definiëren, dat wil zeggen de geometrische randvoorwaarden, de omgevingsparameters of de materiaalbeperkingen, en de relatie van deze aspecten met de gebouwworm, kan het ontwerpproces worden geautomatiseerd en de ontwerpcyclussen versneld. Ontwerpers worden daarmee in staat gesteld om eindeloze expressie van vorm te onderzoeken die niet willekeurig zijn bepaald, maar juist reageren op de essentiële vereisten van het project. De invloed op het gebouwwontwerp is bevrijdend. Huidige architectuurtrends, zoals (dubbel)gekromde en niet-orthogonale gebouwwormen, worden bijvoorbeeld gedreven door deze pas gevonden kracht van het parametrisch modelleren. Parametrische software bevordert het ontwerp en het uitzetten van niet-orthogonale gebouwwormen in twee opzichten. Allereerst wordt het voor gebruikers mogelijk om de hoofdvorm te bepalen, die vaak te complex is om te ontlenen aan eenvoudige computerprogramma's of scripts. Omdat de vorm wordt bepaald uit een systeem van regels die volgen uit een aantal belangrijke variabelen, kan de vorm snel worden veranderd door de variabelen aan te passen. Op deze manier kan de gebouwworm snel worden getoetst op efficiëntie, esthetiek en prestatie.

Programmeren en het schrijven van scripts worden al lange tijd in verschillende vormen gebruikt, zoals bij het opzetten van geometrie- en analysemodellen, of voor specifieke doeleinden zoals het analyseren van de zichtlijnen van een ontwerp. In het verleden was het schrijven van scripts alleen toegankelijk voor mensen met programmeervaardigheden, maar nu er eenvoudiger programmeertalen zijn, meer compatibiliteit tussen de verschillende talen

en nieuwe programma's die dezelfde principes gebruiken voor het maken van scripts maar de gebruiker voorzien van een grafische interface, is het parametrisch en generatief modelleren voor iedereen toegankelijker geworden. Voorbeelden van commercieel beschikbare parametrische software zijn *Digital Project* van Gehry Technologies [5] en *Generative Components* [6] van Bentley Systems (Figuur 5). Het voorgestelde dak van het nieuwe stadion van het Olympische Park in Melbourne is bijvoorbeeld parametrisch onderzocht om de optimale vorm, prestatie en kosten te vinden door de hoogte van de dakrand te variëren, waardoor een automatische update van de hoofdgeometrie van de rest van het dak werd veroorzaakt. Variatie van de constructie en de gevelelementen kon op die manier worden onderzocht om een optimum te vinden vanuit een financieel- en een visueel standpunt (Figuur 6). Het is niet moeilijk om voor te stellen hoe verschillende gebouwen kunnen worden ontworpen uit een set standaardcomponenten. Een vooraf gedefinieerde serie van gevelelementen kan worden geprogrammeerd om de gebouwgevel automatisch in te vullen bij een verandering van de geometrie, waarbij rekening wordt gehouden met de geometrische- en omgevingsrandvoorwaarden. Ook andere componenten kunnen reageren op de invoer. De ontwerper kan daarna de gewenste combinatie selecteren, afhankelijk van de opdrachtgever, de bouwplaats, de milieueisen en de individuele voorkeuren. Dit biedt grote mogelijkheden voor reproduceerbare of aanpasbare gebouwen zoals scholen en appartementencomplexen, vooral wanneer dit wordt gecombineerd met directe vervaardiging van de componenten.

#### ***Modelleren van de duurzaamheidsprestatie***

De principes van het virtuele gebouw lenen zich voor onderzoek naar verbeteringen in het project door snelle beoordeling en vergelijking van alternatieven voor de prestatie op het gebied van duurzaamheid. Pioniersmethoden duiken op die zullen helpen bij het plannen van een optimaal ruimte-, materiaal- en energiegebruik door het voor teams mogelijk te maken om het optimale duurzame ontwerpresultaat te beoordelen. Deze ontwerpopties



Een sculptueel kunstcentrum en een gedraaid gebouw gemaakt met behulp van Generative Components. [Bron: Matt Clark, John Legge-Wilkinson and Stuart Bull (© Arup + Marina Bay Sands Pte Ltd)]

- Figuur 5 -



Het dak van het rechthoekige stadion van Melbourne, inclusief dakpanelen en constructieve vormen is parametrisch gemodelleerd. [Bron: John Legge-Wilkinson]

- FIGUUR 6 -

kunnen gedurende de hele ontwerpperiode worden aangehouden, met de snelle mogelijkheid om de zich ontwikkelende opties gelijktijdig te schematiseren, analyseren en vergelijken. Een 3D-model biedt nu bijvoorbeeld een centrale database van waaruit verslagen over de naleving voor milieuwaarderingssystemen, zoals LEED [7] in de Verenigde Staten en Green Star [8] in Australië, automatisch worden aangemaakt. Beoordelingen van duurzame ontwerpen kunnen zich richten op een microniveau - bijvoorbeeld energie die is opgeslagen in beton - of op een macroniveau om bijvoorbeeld de leefbaarheid van steden, overbeschadu-

wing of de akoestiek van de openbare ruimte in hele gebieden te bepalen. In beide gevallen kunnen veranderingen en verbeteringen eenvoudig worden geïnterpreteerd door gebruik te maken van visuele en auditieve modellen. In dit opzicht zal er geen ontwikkeling belangrijker zijn dan de integratie van thermische-/energie-, luchtkwaliteit- en daglichtmodellen in een centraal virtueel gebouwmodel. Door gebruik van deze hulpmiddelen kunnen we hopelijk meer duurzame gebouwen opleveren en vertrouwen hebben in de prestatie van deze gebouwen. Kleine stappen zijn al gezet in de richting van de beoordeling van de akoestische prestatie van ruimtes die worden

gedefinieerd door 3D-modellen. Vereenvoudigde modellen kunnen nu worden onttrokken aan een gedetailleerd centraal model voor het testen of het verfijnen van het ontwerp, zoals Arup heeft gedaan bij het modelleren van de verbetering van het Sydney Opera House Opera Theatre. Verdere ontwikkeling van de directe kritische beoordeling van centrale modellen is nodig. Vergelijkbare testniveaus zijn mogelijk voor het modelleren van rook als onderdeel van een complete prestatiegebaseerde benadering van de brandtechnologie. Voor het modelleren van rook kan de geometrie nu direct uit het 3D-model worden gebruikt, waarmee de evacuatie-tijden



**Modelleren van rook in het model van het Sydney Opera House. [Bron: Simon Mabey]**

- FIGUUR 7 -

en de prestatie van de rookbeheersing preciezer kunnen worden bepaald (Figuur 7).

### **Modelleren van steden**

Hele steden kunnen nu worden gemodelleerd om de voordelen van het plan voor de opdrachtgever en de hele gemeenschap te laten zien - een "virtuele stad" van virtuele gebouwen. De bestaande stad wordt gemodelleerd door geografische ruimtelijke informatie te verzamelen, vanuit bestaande informatie of uit lucht- of landfoto's, en door de informatie op te slaan in een handelbaar format. Het virtuele gebouwmodel voor de nieuwe ontwikkeling wordt daarna toegevoegd aan het stadsmodel (Figuur 8), waarin het bereikbaar is voor integratie en beoordeling van nieuwe ontwikkelingen voor planningsdoelstellingen, voor beoordeling van de toegankelijkheid en voor visuele en andere milieubeoordelingen.

### **TOEKOMST**

#### **Real-time analyse**

Op dit moment is ontwerpen een tijdrovend en iteratief proces waarin ontwerpteam bij elkaar komen, alternatieven bedenken en dan vertrekken om die alternatieven te onderzoeken en testen. Een week of twee later komt het team weer bij elkaar en herhaalt het proces zich. Hulpmiddelen worden nu ontwikkeld om het mogelijk te maken om het ontwerp in de ontwerpstudio snel en "real-time" te optimaliseren met het hele ontwerpteam. Computational Fluid Dynamics (CFD) wordt gebruikt om de prestatie van een ruimte te beoordelen, maar tot op heden is het erg tijdrovend om een CFD-model op te zetten en door te rekenen, vaak duurt dit dagen of weken. Maar de rekenkracht en het geheugen van computers ontwikkelen zich snel



**Stadsmodel van Ancoats Village, Manchester. [Bron: Simon Mabey]**

- FIGUUR 8 -

en daarmee ook de mogelijkheid om deze routines op locatie uit te voeren om het ontwerpteam te helpen om de verschillende alternatieven sneller door te werken.

#### **Optimalisatie**

Dit proces maakt gebruik van rekenprocedures om alternatieven te beoordelen en te rangschikken voor het vinden van een optimale set van oplossingen, door de ontwerpintuïtie te ondersteunen in plaats van te vervangen. Ieder aantal parameters in een ontwerp kan worden gevarieerd, inclusief bijvoorbeeld perspectieven, verlichtingssterktes, thermische prestatie en kosten. De optimalisatieprocedures die worden gebruikt zijn afhankelijk van het op te lossen probleem. Procedures worden vaak opgesteld voor optimalisatie van een enkele parameter (bijvoorbeeld het totale staalgewicht), maar het is op het moment gebruikelijker om te proberen om verschillende of concurrerende parameters tegelijk te optimaliseren. In deze gevallen is één proces gebaseerd op "ant colony" optimalisatie. Mieren kunnen de optimale route door onbekend terrein vinden door afgifte van feromonen; vergelijkbaar worden sets van oplossingen ontwikkeld die het beste voldoen aan de gestelde doelen. Ontwerpparameters kunnen worden opgenomen in complexe algoritmes die de set van oplossingen vinden die het beste voldoet aan de doelen die zijn gesteld door het ontwerpteam. Als een set van oplossingen is samengesteld kunnen alternatieve ontwerpen

worden onderzocht door de parameters te variëren in het model. Deze aanpak wordt veel gebruikt in de ruimtevaart- en motorvoertuigenindustrie en begint vat te krijgen op de bouwindustrie. De aantrekkingskracht van optimalisatie voor architecten is dat het een objectieve basis voor het ontwerp geeft, maar het in geen geval een vervanging vormt voor het ontwerpen zelf. Het ontwerpteam en de opdrachtgever moeten het subjectieve proces van selectie en afweging van de parameters leiden. De kracht van deze aanpak is dat projectoplossingen kunnen worden beoordeeld zonder enige aanname van de vorm van het gebouw en dat het vertrouwen wordt vergroot om te komen tot de beste oplossing.

#### **Geïntegreerde 3D-studie van de stad**

Onze opvatting van stedelijke omgevingen wordt kritischer dan ooit in onze zoektocht naar een toekomst met een lage CO<sub>2</sub>-uitstoot en een lage consumptie. Het gebruik van het virtueel modelleren om de interactie tussen alle onderdelen van een stad en de werking van het hele organisme te begrijpen, is een belangrijk gedeelte van deze tocht. Arup neemt de eerste stappen in de richting van een multi-parameter, real-time, kwantitatieve simulatie van stedelijke omgevingen. Het doel is om het proces gedeeltelijk te automatiseren waarin kwantitatieve analytische oplossingen (stadsontwerp, stromen van voertuigen en mensen, akoestiek, verlichting en klimaat) discreet in een samengevoegde real-time interactieve omgeving worden gebracht om het

prestatiegerichte ontwerp te tonen aan ontwerper, opdrachtgever en stadsplanner.

Het proefproject (Figuur 9) onderzocht een gedeelte van de geplande ecologische stad in Dongtan in China. Het proces bracht met zich mee:

- het maken van een 3D geometrisch model voor het stedelijk ontwerp op basis van het stedelijk ontwerp in de GIS database;
- CFD-analyse van de overheersende windstroming;
- analyse van stromen van mensen en voertuigen, waarbij rekening wordt gehouden met het verwachte bestemmingsplan in het masterplan;
- akoestische analyse van de stedelijke ruimte waarbij rekening wordt gehouden met de ontwerpparameters, inclusief het geluid dat wordt geproduceerd door voertuigen en mechanische systemen.

Alle kwantitatieve analyseresultaten zijn daarna geïntegreerd in een enkele omgeving die de gebruiker toestaat om real time te bewegen door de data in de 3D-omgeving en om de resultaten afzonderlijk en in samenhang te bekijken.

Door verdere ontwikkeling kan de interactieve omgeving, naast duurzaamheidsrichtlijnen, worden gebruikt om een haalbaar masterplan op te zetten. Stadsontwerpers, opdrachtgevers en ontwerpers zullen allen beter worden geïnformeerd over de heersende lokale condities en over de invloed van voorgestelde ontwikkelingen. Ontwerpers zullen hun ontwerpen voordragen met het vertrouwen dat de stedelijke omgeving is geoptimaliseerd, ondanks de aanwezigheid van concurrerende parameters. Het proces is een eerste stap in onze zoektocht naar het ontwerp van de duurzame stad van de toekomst.

### ***Immersie (ook wel bekend als virtuele realiteit)***

Op dit moment speelt intuïtie en inzicht een belangrijke rol in het ontwerpproces. Ervaring uit het verleden en jaren van ontwerptraining gaan zitten in het maken van een goed ontwerp met een goede ruimtelijkheid dat, hopelijk, ook goed zal presteren. Zou het niet prachtig zijn om in staat te zijn om de ruimte te ervaren *voordat deze is gebouwd*, om ontwerpkeuzes te verfijnen en om meer zekerheid in het resultaat te krijgen?

Op het meest fundamentele niveau

voorziet een vogelperspectief van het model in enig gevoel voor de ruimte en een idee van de verhoudingen. Dit is een erg bruikbaar hulpmiddel in de huidige praktijk, maar het neemt niet alle zintuigen in beschouwing.

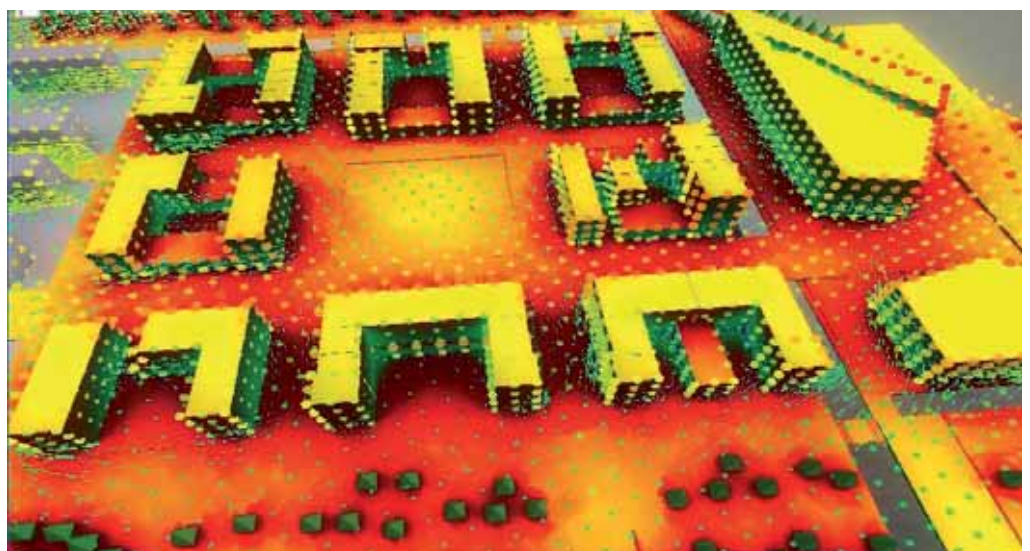
Het is nu mogelijk om een nauwkeurige auditieve indruk van een ruimte te geven door gebruik te maken van akoestische simulatieruimtes zoals het *SoundLab* van Arup. In *SoundLab* kan de akoestische prestatie van een ruimte, door gebruik te maken van surround speakers, worden gedemonstreerd op iedere plaats in de ruimte, met visuele aanwijzingen die door een 3D-model worden gegeven op een scherm. Het wordt daarmee mogelijk om het perspectief en het geluid op iedere zitplaats in een ruimte met een specifieke prestatie te demonstreren. Het in beschouwing nemen van alle zintuigen wordt ook onderzocht door middel van 3D-projecties of een virtuele realiteitsbril, wat enig gevoel van ruimtelijkheid geeft van de ruimte die 3D is gemodelleerd. Deze methode heeft echter enkele tekortkomingen, omdat de huidige technologie van schermen en projectie niet in staat is om de visuele bandbreedte die wordt waargenomen door het menselijk oog nauwkeurig na te bootsen. Dit is een obstakel bij het verkrijgen een werkelijke "realiteit", vooral wanneer het model verschillende schakeringen van licht en donker bevat. Deze hulpmiddelen zijn nog steeds in ontwikkeling en zijn nog lang niet voor iedereen te gebruiken. Er zijn pogingen gedaan om luchttemperatuur en -stroming visueel voor te stellen, zodat zichtbaar

wordt hoe een ruimte zich gedraagt. CFD is hiervoor het huidige hulpmiddel, experimenten om de resultaten 3D voor te stellen zijn tot zover nog niet succesvol gebleken.

Het doel is om te komen tot een ruimte die het uiterlijk en de prestaties op het gebied van geluid, luchtbeweging en temperatuur kan simuleren, waarmee een werkelijke beleving van immersie ontstaat. Dit kan worden bereikt door een doos te maken waarin het gebouwmodel op de binnenwanden wordt geprojecteerd om het staan of lopen in de ruimte in kwestie te simuleren, terwijl surround speakers, ventilatoren, verwarmingstoestellen en airconditioners de geplande omgevingscondities simuleren, direct afkomstig uit het virtuele model (Figuur 10, op de volgende pagina).

### ***Bevolken van virtuele gebouwen***

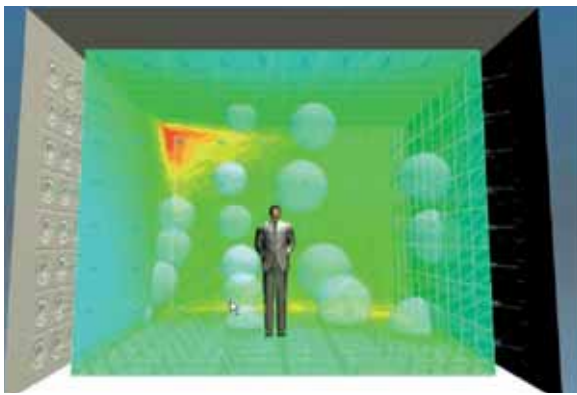
Er bestaat software die het mogelijk maakt om de virtuele gebouwruimte te bevolken door agents, die zijn geprogrammeerd met menselijke gedragspatronen zodat kan worden gekeken hoe zij zullen reageren op de verschillende fysische omgevingen. Een dergelijk programma is *MassMotion* van Arup, een intern gefinancierd onderzoeks- en ontwikkelingsinitiatief dat door personeel in Toronto en New York is ontwikkeld als reactie op de eisen van het Futton Street Transit Center (FSTC) project in New York. Daarna heeft verdere ontwikkeling plaatsgevonden in Toronto met technische input van het personeel van de kantoren in New York, Melbourne, Westborough en San Francisco. *MassMotion* is een



**Geïntegreerd 3D stedelijk demonstratieproject. [Bron: Alvise Simondetti]**

- FIGUUR 9 -





Immersie in een virtuele ruimte, waarmee zicht, geluid en comfort worden gemodelleerd. [Bron: Tristan Simmonds]

- FIGUUR 10 -

compleet nieuwe set van hulpmiddelen, omdat het relatief goedkoop is ontwikkeld in vergelijking met vergelijkbare programma's, ondanks dat de ontwikkelaars commercieel beschikbare 3D-software zoals *Softimage* hebben gebruikt om de ontwikkeling te stroomlijnen en om de bruikbaarheid van de software snel te vergroten. *MassMotion* is ook erg rendabel. *MassMotion* levert uiterst instructieve animaties van voetgangersstromen. Het wordt hier benadrukt dat dit niet alleen animaties zijn, maar het resultaat van een analyse van het cumulatieve effect van de keuzes van de individuele agents. In aanvulling op de animaties levert *MassMotion* tellingen van stromen en van de bezetting, rijlengtes en dichtheidskaarten, wat het ontwerp informeert. Het proces omvat het maken of aanpassen van een 3D-model met alle primaire fysieke en ruimtelijke eigenschappen die zouden worden gevonden in de uiteindelijk gebouwde vorm. Daarna kunnen de agents worden geprogrammeerd om zich te gedragen op een manier die het menselijk gedrag nabootst, bijvoorbeeld door bij een café te pauzeren voor een kop koffie of te stoppen bij een bord met daarop reisinformatie, door een tourniquet of op een roltrap te lopen, gebaseerd op de voorkeur van de bestemming. De agents in het FSTC-model zijn eigenschappen gegeven die volgen uit praktijkonderzoek, zoals de verhouding tussen mannen en vrouwen (omdat vrouwen gemiddeld met een lager tempo en met kleinere passen lopen) en of zij forensen waren (weten waar ze heen gaan) of toeristen (niet zeker waar ze heen gaan). De agents worden dan vrijgelaten om het model te bevolken, waarmee het voor gebruikers mogelijk wordt om te observeren en beoordelen hoe de ruimte presteert. Het resultaat is de mogelijkheid voor een realisti-



Futton Street Transit Centre, New York, *MassMotion* modellering. [Bron: Robert Stava]

- FIGUUR 11 -


sche beoordeling, omdat werkelijke voetgangerssystemen vaak willekeuriger en chaotischer zijn dan eerdere modelleerhulpmiddelen toestonden. De prestatie van de ruimte kan dan worden beoordeeld tegen data van het gebruiksniveau en om knelpunten vast te stellen, en ook voor beoordeling van vluchtwegen. Simulatie van verkeer kan verdere mogelijkheden bieden. De doorbraak met deze technologie is dat het eindeloze mogelijkheden biedt voor het testen van iedere soort ruimtelijke interactie. Het waarschijnlijke succes van plattegronden voor de detailhandel kan er bijvoorbeeld mee worden aangetoond. Sinds de toepassing voor het FSTC is *MassMotion* verder ontwikkeld. Het kan nu een breed gebied van voetgangersactiviteiten simuleren, inclusief noodevacuaties, navigatie door bekendheid met de ruimte of door richtingaanduidende borden, gedrag in gebieden met toegangscontrole, zoals bij toegangspoortjes, en de dynami-

sche reactie op geplande evenementen. Een breed gebied van projecttypes, inclusief treinstations, busstations, luchthavens, maar ook stadia en kantoorstorens wordt nu ontworpen met behulp van *MassMotion*.

#### CONCLUSIE

Het maken van een virtueel gebouwprototype is niet langer een droom voor de verre toekomst. Krachtige hulpmiddelen die het mogelijk maken om de gebouwprestatie gedeeltelijk te simuleren voordat het gebouw daadwerkelijk wordt gebouwd, worden geïmplementeerd in de virtuele gebouwomgeving. Omdat de technologie zich verder ontwikkelt bestaat er een mogelijkheid voor het opzetten van een compleet virtueel gebouw waarin alle eigenschappen en interne relaties op een geautomatiseerde manier kunnen worden getest en begrepen. De uitdaging voor de hedendaagse onroerendgoedsector en de bouwindustrie is om de 3D-technologie die

nu verkrijgbaar is te omarmen en accepteren, om een meer gestroomlijnde, de-eerste-keer-juist benadering van het gebouwontwerp, de constructie en het gebouwbeheer te hanteren.

Vooruitdenkende opdrachtgevers hebben het 3D gebaseerde ontwerp al geaccepteerd. Omdat de technologie verder ontwikkeld is, zijn het de opdrachtgevers die verwachten dat het model vol zit met alle denkbare data-aspecten om ze financiële zekerheid of zekerheid op het gebied van de exploitatie te geven. De virtuele gebouwmodellen die daaruit volgen zullen verstrekende mogelijkheden bieden in het toekomstige management en bedrijfsvoering gerelateerd aan de bouwindustrie. Arup zal een sleutelrol spelen in dit proces. 

#### REFERENTIES

1. <http://cic.nist.gov/vrml/cis2.html#IFC>
2. <http://www.navisworks.com>
3. [http://en.wikipedia.org/wiki/Gantt\\_chart](http://en.wikipedia.org/wiki/Gantt_chart)
4. BAHORIC, J, et al. "The Travelers". The Arup Journal, 42(1), pp32-37, 1/2007.
5. <http://www.gehrytechnologies.com>
6. <http://tinyurl.com/4ag6am>
7. <http://www.usgbc.org>
8. <http://www.gbca.org.au>

#### ACKNOWLEDGEMENTS

De auteurs willen graag de volgende Arup experts danken voor hun belangrijke bijdrage aan dit artikel:

- Amerika:** Matt Clark, Anthony Cortez, David Farnsworth, Vincent Fiorenza, Ken Goldup, Zak Kostura, Murat Kurakas, Robert Stava, Ben Urick
- Australazië:** Peter Bowtell, Stuart Bull, John Legge-Wilkinson, Chris Pynn
- Oost Azië:** Maverick Chan, Kelvin Lam
- Europa:** Francesco Ànselmo, Gavin Davies, Alexej Goehring, Anne-Marie Gribnau, Alejandro Gutierrez, Peter Head, Andrew Jenkins, Scott Kerr, Vahndi Minah, Aston Wisdom, Braulio Morera, Tristan Simmonds, Steve Walker, Neill Woodger, Darren Woolf, Russell Yell.

#### AUTEURS

**Peter Bailey** is een directeur van Arup, leider van de Bouwafdeling van het kantoor in Sydney en lid van de *Global Building Sector Board* van het bedrijf.

**Daniel Brodtkin** is een directeur van Arup en het afdelingshoofd van Edison, New Jersey. Hij is ook de BIM leider voor Amerika.

**John Hainsworth** is een partner in het kantoor van Arup in Sydney en de BIM leider voor Australië.

**Erin Morrow** is een senior consultant computermodellieren bij Arup in het kantoor in San Francisco. Hij heeft de ontwikkeling van het *MassMotion* simulatieprogramma geleid.

**Andrew Sedgwick** is manager van Arup in de 'Buildings London 4 group', ontwerp- en technisch leider van de Bouwafdeling en algemeen leider van de kunst en cultuurzaken.

**Martin Simpson** is een mededirecteur van Arup, werkzaam in het kantoor in Manchester.

**Alvise Simondetti** is een partner van Arup in het *Foresight, Innovation and Incubation* team van Londen. Hij is ook algemeen manager van het netwerk van virtuele ontwerpvaardigheden van Arup.

#### CREDITS

##### **National Aquatic Centre, Beijing**

*Opdrachtgever:* Beijing State-owned Assets Management Co Ltd  
*Architect:* PTW (Australia) & CSCEC & Design

##### **One Island East, Hong Kong**

*Opdrachtgever:* Swire Properties Ltd  
*Architect:* Wong & Ouyang (Hong Kong) Ltd

##### **122 Leadenhall Street, Londen**

*Opdrachtgever:* British Land Co plc  
*Architect:* Richard Rogers Partnership Ltd

##### **Stadion van het Melbourne Olympic Park**

*Opdrachtgever:* Melbourne & Olympic Park Trust  
*Architect:* Cox Architects & Planners

##### **Opknopbeurt van het Sydney Opera House Opera Theatre**

*Opdrachtgever:* Sydney Opera House Trust  
*Architect:* Utzon Architects/Johnson Pilton Walker

##### **Chemisch laboratorium van de Princeton University**

*Opdrachtgever:* Princeton University  
*Design architect:* Hopkins Architects Ltd  
*Uitvoerend architect:* Payette Associates Inc

##### **Marina Bay Sands Integrated Resort, Singapore**

*Opdrachtgever:* Marina Bay Sands Pte Ltd  
*Design:* Architect: Moshe Safde with Aedas

##### **Al Raha tower, Abu Dhabi**

*Opdrachtgever:* Aldar Properties Pjsc  
*Architect:* Asymptote Architecture

##### **Fulton Street Transit Center, New York**

*Opdrachtgever:* Metropolitan Transit Authority Capital Construction New York  
*Architect:* Grimshaw Architects