

# 3D GIS, stadsmodeller och digitala tvillingar

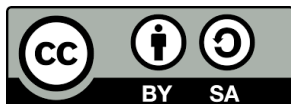
## Föreläsningsanteckningar

### Författare/Organisationer:

Ariana Kubart (Ocellus)

Anders Östman (Novogit)

### Licens



<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>

### Version

Version 1.0

Datum: Mars 2024

### Läranderesultat

I slutet av denna föreläsning förväntas eleven kunna

- Förstå huvudkoncept och olika typer av 3D geografisk modellering
- Förstå principerna för 3D-raster/voxelmodeller
- Beskriv skapandet och fördelarna med reality-mesh-modeller
- Förklara den semantiska delen av stadsmodellerna och skillnader jämfört med grafiska 3D-modeller
- Sammanfatta de viktigaste stegen i skapande av semantiska modeller
- Nämna exempel på befintliga modeller samt på deras möjliga tillämpningar
- Nämna flera sätt på hur 3D-data kan lagras, med fokus på CityGML-kodningar
- Sammanfatta huvuddelarna i CityGML konceptuell modell och hur de kan användas



- Förstå de aspekter av CityGML som är viktiga för konvertering till och från BIM
- Definiera begreppet digitala tvillingar.
- Beskriv karakteristiska egenskaper hos digitala urbana tvillingar

### **Summary**

Föreläsningen introducerar 3D-modellering för stadsplanering och smarta städer. Först presenteras olika metoder för 3D-visualisering, från voxel-modeller till mer avancerade tekniker. Därefter behandlas semantiska stadsmodeller, som bygger på information om objektens relationer och attribut, och deras användning i tillämpningar som smarta städer och digitala tvillingar. Avslutningsvis introduceras 3D-datastandarder, där CityGML beskrivs som en viktig standard för att representera stadens olika aspekter, som geometri och tid. Föreläsningen avslutas med en introduktion till digitala tvillingar, och deras roll i övervakning och styrning av urbana miljöer i realtid.

### **Förväntade förkunskaper**

Inga specifika förkunskaper krävs.

### **Förväntad arbetsbelastning**

48 bilder med kursinnehåll, 11 timmar

### **Ansvarsfriskrivning**

*Finansieras av Europeiska unionen. De synpunkter och åsikter som uttrycks är endast upphovsmannens [upphovsmännens] och utgör inte Europeiska unionens eller Europeiska genomförandeorganet för utbildning och kulturs (EACEA) officiella ståndpunkt. Varken Europeiska unionen eller EACEA tar något ansvar för dessa.*

## Innehåll

Varför 3D? .....	5
Digitala modeller av den byggda miljön .....	6
Inhämtning av 3D-data .....	7
Olika 3D-representationer .....	8
3D-modeller med avancerad grafik .....	9
AEC-industrimodeller .....	10
Geomatiska/GIS-relaterade 3D-modeller .....	11
3D-raster = Voxelmodell .....	12
Reality-mesh stadsmodeller .....	13
Vad är en semantisk stadsmodell? .....	15
Objekt i de semantiska modellerna .....	16
Skapande av stadsmodeller .....	17
3D stad från flygfoton .....	19
Exempel på Helsingfors 3D-modell .....	21
3D stad från laserskanning .....	22
Slutlig 3D-semantisk modell .....	25
Abstraktion i 3D-stadsmodeller .....	26
Exempel på 3D-stadsmodeller .....	27
Tillämpningar av semantiska 3D-modeller .....	29
Analys av solstrålning .....	30
Analys av vindhastighet .....	31
Solsken- och skugganalys .....	32
Andra tillämpningar .....	33
Standardformat för 3D-data .....	34
CityGML-standard .....	35
Konceptuell modell av CityGML .....	36
Klassmoduler i den konceptuella modellen .....	37
Moduler för specifika aspekter .....	38
Datakvalitet .....	39

Kodningar av CityGML .....	40
Inspire 3D-byggnader .....	41
Definitionen av en digital tvilling .....	42
Sammankoppling av fysiska och virtuella världar .....	43
Viktiga komponenter i digitala urbana tvillingar .....	44
Historiska data .....	45
Realtidsdata .....	46
Simuleringar och prognoser .....	47
Driftkontroll.....	48
Digital Twins City Centre (DTCC) i Göteborg (SE) .....	49
Digitala tvillingar i Norrtälje, Karlskrona och Huddinge .....	50
Digitala tvillingar i byggbranschen .....	51
Övervakningsstationer för luftkvalitet.....	52

### Varför 3D?

- Världen är i 3D
- X-, Y- och Z-axeln



Figurer – centrala New York på 2D-karta och som 3D-modell (båda baserade på Open Street Maps)

Bättre förståelse av objektformer och rumsliga relationer

Många analyser är endast möjliga i 3D (t.ex. buller, översvämningar)

### Varför 3D?

Världen är i 3D. Således förbättrar 3D-modellen visualiseringen av den verkliga världen, jämfört med 2D-kartan. 3D-modeller är därmed viktiga komponenter inom både GIS och BIM.

Vi kan se skillnaden i bilden ovanför. Båda visar centrala delar av New York och är baserade på Open Street Map.

Som vi vet har 2D x och y-axeln medan 3D-modellen också har en z-axel, tillsammans med x och y-axeln. Z-axeln visar objektets höjd.

Att lägga till denna tredje dimension hjälper oss att bättre förstå fördelningen av objekt och det rumsliga förhållandet mellan dem. Det finns många analyser som endast är möjliga i 3D-miljö, som buller-, sikt-, skugg- eller översvänningsanalyser.

Byggnader, terräng och infrastruktur kan 3D-modelleras. I den här kursen kommer vi att fokusera på 3D-representationer av den byggda miljön.



## Digitala modeller av den byggda miljön

Olika tekniker för att skapa 3D-modeller

3D-information:

- Geometrisk
- Topologisk
- Semantisk

Abstraktion – begränsa modellens komplexitet, t.ex. inre delar



[https://static.turbosquid.com/Preview/2018/11/07\\_\\_08\\_45\\_37/1.jpgF16C9D5E-43CF-473A-9052-87F6D4FCEF1DZoom.jpg](https://static.turbosquid.com/Preview/2018/11/07__08_45_37/1.jpgF16C9D5E-43CF-473A-9052-87F6D4FCEF1DZoom.jpg)

## Digitala modeller av den byggda miljön

3D-stadsmodeller kan härledas från olika inhämtningsmetoder. Det är därför de kan variera kraftigt i struktur, format och egenskaper (som vi kommer att se senare).

I vilket fall som helst kan 3D-modellerna kombinera en blandning av geometrisk, topologisk och semantisk information.

Den geometriska informationen är beskrivningen av formen.

Den topologiska informationen visar angränsningar och objekts förhållande till varandra.

Den semantiska informationen beskriver attribut och andra objekttegenskaper.

Men i praktiken är det önskvärt att begränsa komplexiteten till endast de aspekter som verkligen behövs för de planerade applikationerna. Ett exempel kan vara att ta bort de inre delarna av byggnaderna, när sådan information inte behövs.

Denna begränsning av komplexiteten brukar kallas för abstraktion.

## Hämta 3D-data

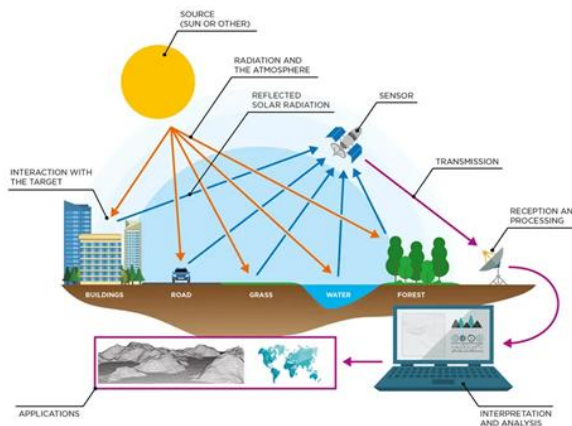
Traditionella metoder – stationära  
laserskannrar

Fjärranalys – laser, radar, mobil  
kartläggning

Fotogrammetri – digitala bilder,  
flygfotografering

Utvinning från 2D-fotavtryck

Konvertering från arkitektoniska modeller



Fjärranalys. Källa: <https://i0.wp.com/geolearn.in/wp-content/uploads/2022/09/Remote-Sensing-Process.jpg>

## Inhämtning av 3D-data

Vi sammanfattar här kort metoderna för att få 3D-data.

För det första finns det de traditionella mätningarna, som att använda stationär laserskanning.

Sedan finns det metoder baserade på fjärranalys, det vill säga reflektioner av elektromagnetiska vågor, inklusive laserskanning (även kallad LiDAR), radar eller mobila kartläggningssystem (som Google-bilar med LiDAR).

Den tredje vanliga tekniken är fotogrammetri, det vill säga rekonstruktion från digitala bilder.

Dessa rådata bearbetas och kombineras sedan för att skapa mer komplexa 3D-objekt.

Förutom detta kan 3D-stadsmodeller konverteras från arkitektoniska ritningar.



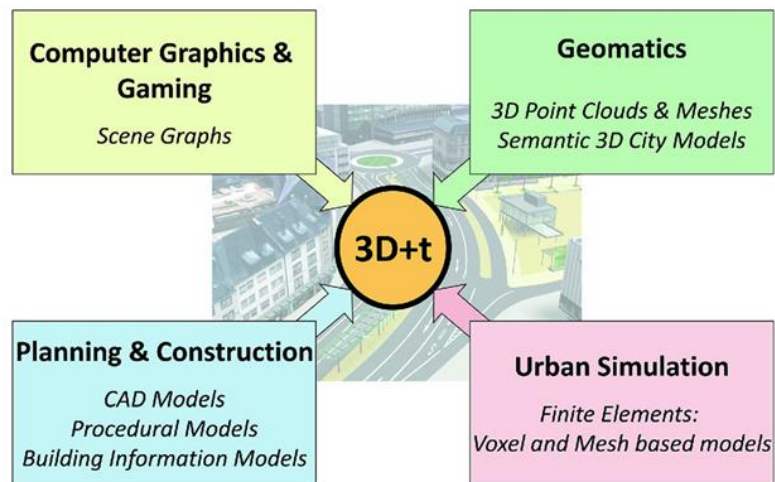


## Olika 3D-representationer

Flera sätt att visa 3D-information

Olika områden och branscher

- Grafiska högupplösta modeller
- Modeller med hög detaljnivå
- GIS-relaterade modeller
- 3D voxel rastrar



Kolbe & Donaubauer (2021): Semantic 3D City Modelling and BIM in: W. Shi et al. (eds.), Urban Informatics, The Urban Book Series

## Olika 3D-representationer

3D-byggnader och stadsmodeller har skapats på flera olika sätt. Dessa sätt skiljer sig åt i fokus, modellstruktur samt utbytesformat, som sammanfattas i figuren.

Vi kan se att det finns visuella modeller med mycket avancerad grafik, mycket detaljerade modeller från AEC (Architecture, Engineering and Construction)-industrin, GIS-relaterade modeller samt 3D-raster.





### 3D-modeller med avancerad grafik

3D-modeller med fokus på  
högkvalitativ visualisering



<https://kartta.hel.fi/3d/mesh/>



[3d-environment-design-for-game-3d-model-low-poly-animated-fbx-uasset.jpg \(2688x1512\) \(cgtrader.com\)](#)

Vanlig som spelmiljö  
Några stadsmodeller

### 3D-modeller med avancerad grafik

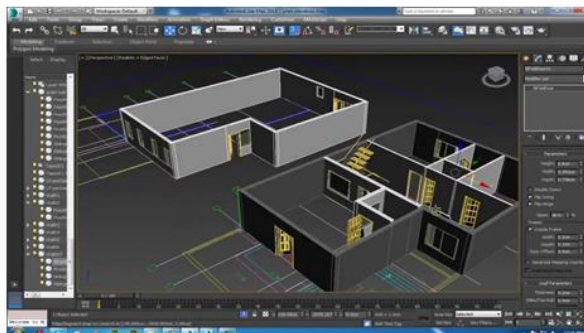
Först kan vi namnge visuella 3D-modeller. De syftar till mycket högkvalitativ 3D-visualisering, men delar inte miljön i enskilda objekt och ger som sådan ingen information om objekttegenskaper.

Sådana modeller utvecklas och används ofta i t.ex. datorgrafik och spel.

Verkliga exempel på visuella modeller är några av stadsmodellerna, till exempel en mesh-modell av Helsingfors, eller modeller av Berlin, Stockholm etc. Vi kommer tillbaka till dessa stadsmodeller senare i kursen.

### AEC-industrimodeller

- Fokus på detaljer
- Småskalig (endast en byggnad)
- Massor av objektinformation
- CAD- och BIM-modeller



Uppåt: 3D-modell i AutoCAD

<https://cougardrafting.com/wp-content/uploads/2020/05/maxresdefault2.jpg>

Vänster: BIM-modell

<https://www.ckvango.com/wp-content/uploads/2015/11/bim-modeling-rendering.jpg>

### AEC-industrimodeller

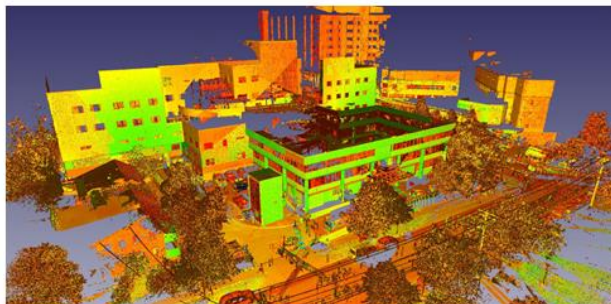
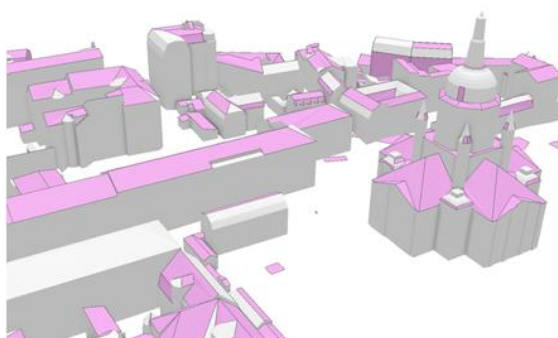
Modeller från AEC-industrin är också mycket grafiska, men deras huvudfokus ligger på detaljer och enskilda objekt. De ger också mycket detaljerad information om objektgeometri och egenskaper, vilket är nödvändigt för planerings- och konstruktionsmål.

Building Information Modeling (BIM, vänster på bilden) tillhör denna kategori och är närmare beskriven i vår tidigare kursmodul (Introduktion till BIM). På bilden finns också en CAD-modell (Computer Aided Design). Även om CAD fortfarande används i AEC, är BIM den senaste tekniken idag.



### Geomatiska / GIS-modeller

- 3D-punktmoln
- 3D-meshar
- Semantiska stadsmodeller – enskilda objekt och egenskaper



Uppåt: punktmoln från laserskanning  
<https://www.laserscanning.com.au/files/2014/04/6736-Image-3.jpg>

Vänster: Stockholms semantiska stadsmodell  
Hämtad från: [Dataportalen \(stockholm.se\)](http://dataportalen.stockholm.se)

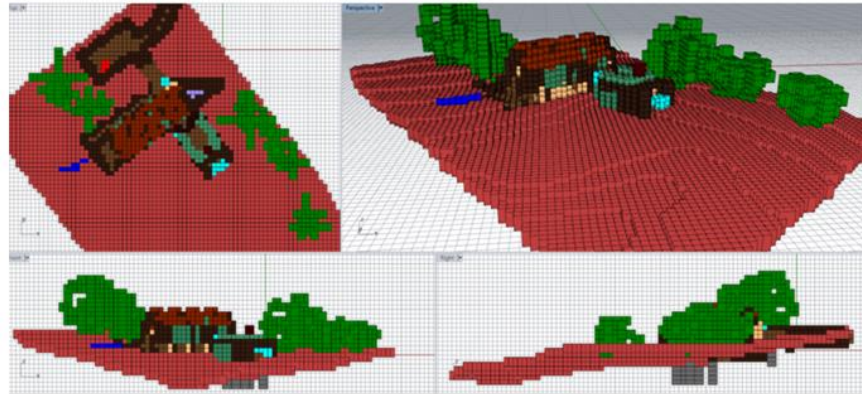
### Geomatiska/GIS-relaterade 3D-modeller

Den tredje domänen för 3D-modellering är den GIS-relaterade.

Den innehåller de typiska 3D-stadsmodellerna, visualiserar 3D-geometrin, 3D-topologin och i bästa fall även tematiska attribut och logiska inbördes förhållanden mellan objekten. Om dessa attribut, det vill säga den semantiska informationen, ingår så kallas modellerna semantiska 3D-stadsmodeller. De semantiska modellerna är huvudfokus för denna 3D GIS-kurs.

### 3D raster = voxelmodell

- Voxel är 3D parallellt med 2D pixel i en rasterkarta
- Voxelmodellerna är 3D-ekvivalenta med 2D-rastrar
- Precision baserat på rutnätets storlek
- Distribution och simulering av kontinuerliga variabler (t.ex. vindhastighet, lufttemperatur)



Från: Ohori, Ledoux och Peters (2020–2022: 3D modelling of the built environment, sida 31

### 3D-raster = Voxelmodell

Sist på vår lista över olika 3D-representationer är 3D-raster, även kallad voxelmodell.

En voxel är 3D motsvarigheten till en 2D pixel i en 2D rasterkarta. Voxelmodellerna är då 3D motsvarigheten till 2D-raster.

Och på samma sätt som 2D-raster är 3D-voxelmodellerna begränsade i sin precision baserat på dess cellstorlek. Att minska cellstorleken kommer att öka precisionen men också leda till att modellen blir större och upptar mycket mer lagringsutrymme.

En viktig fördel med voxlar är att de på ett bra sätt kan representera en tredimensionell fördelning av kontinuerliga variabler (det betyder kvantitativa variabler som kan anta vilket värde som helst inom ett visst intervall). Som exempel kan vi nämna vindhastighet, markfuktighet, luftföroreningar, vattensalthalt etc.

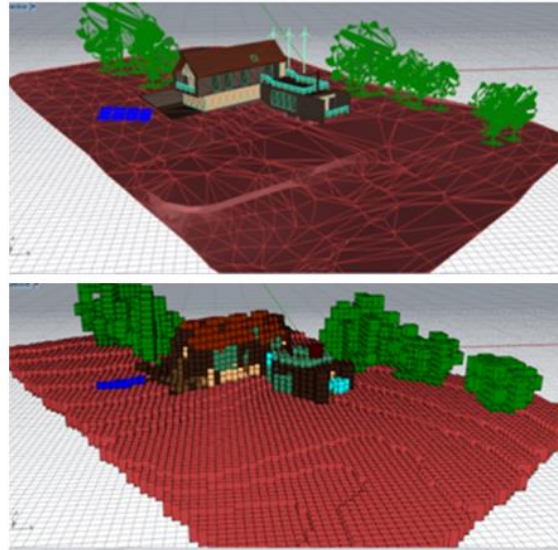


## Reality-mesh stadsmodeller I

Om voxlar inte är lämpliga:

- Uppdelning av ytor i trianglar = meshing
- Fastställda egenskaper, t.ex. minsta vinklar – även ändliga elementmetoden
- Figurer – jämförelse av meshes (övre) och voxlar (nedre) för samma objekt

Från: Otori, Ledoux och Peters (2020–2022): 3D modelling of the built environment, sida 31



## Reality-mesh stadsmodeller

För vissa situationer är voxelmodellen inte optimal och det är bättre att använda mycket detaljerade geometriska och fotorealistiska modeller.

Sådana modeller är baserade på flygfoton, LiDAR-punktmoln eller en kombination av dessa två. Dessa data sammanställs i stadsmodellen med hjälp av specialiserad programvara.

Taket, väggarna och andra ytor kan sedan delas in i trianglar i en process som kallas "meshing". Bilden visar en jämförelse mellan en voxelmodell och en mesh-baserad modell.

## Reality-mesh stadsmodeller II

- Triangulära meshmodeller är snabba och kostnadseffektiva att skapa
- Första generationens stadsmodeller
- Google Earth (engelska)



Uppåt: Reality-mesh av Helsingfors stadsmodell  
Från: Ohori, Ledoux och Peters (2020–2022): 3D modelling of the built environment, sida 91

Vänster: Mesh-baserad modell från Google Earth  
Exempel på Prag, [Google Earth](#)

Denna abstraktion av ytor i trianglar är snabb och kostnadseffektiv. Det är möjligt att skapa sådana geometriska och fotorealistiska modeller för hela städer på ett automatiserat sätt.

Mesh-baserade modeller finns tillgängliga för många städer och kan ofta navigeras fritt genom städernas webbsidor. Även Google Earth använder mesh-modeller som också är fritt tillgängliga.

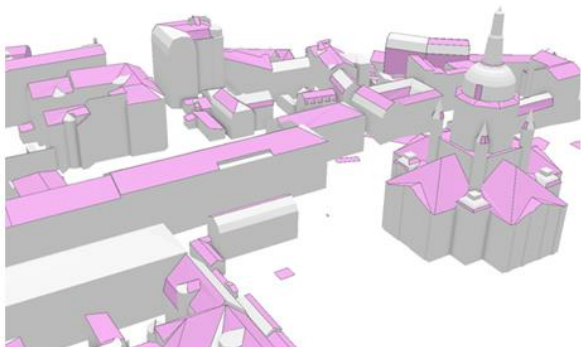
Vi kan säga att den första generationen av 3D-stadsmodeller var reality-mesh modeller. Många applikationer behöver dock inte bara data om ytornas 3D-geometri och deras grafiska egenskaper (som i en mesh-modell).

För många applikationer är det nödvändigt att dela upp modellen i enskilda objekt. Till exempel för att definiera: Det här är ett hus och det här är ett annat hus och det här är ett träd.

Sådana modeller, där verkliga saker karakteriseras som enskilda objekt, kallas "semantiska". I bästa fall har objekten i de semantiska modellerna även specifika egenskaper och definierade förhållanden mellan objekten.

### Vad är den semantiska stadsmodellen?

Modell med framstående objekt som representerar verkliga saker: husen, gatorna, träden och annat



Uppåt: från Helsinki3D\_Kalastama\_Digital\_Twins  
<https://www.hel.fi/en/decision-making/information-on-helsinki/maps-and-geospatial-data/helsinki-3d>

Vänster: Stockholms semantiska stadsmodell  
Hämtad från: [Dataportalen \(stockholm.se\)](https://dataportalen.stockholm.se)

### Vad är en semantisk stadsmodell?

Mycket detaljerade grafiska 3D-stadsmodeller kan automatiskt skapas genom en kombination av närliggande flygbilder. Men dessa mesh-modeller är dock bara "bilder". De ger ingen information om vad en byggnad är, eller en gata eller ett träd, inte heller vilka egenskaper de har.

Man skulle givetvis kunna titta på en mesh-modell och räkna träden på en viss gata eller antal fönster i en byggnad av intresse. Men en dator ser bara serier av trianglar med en textur fäst vid dem. Det är därför som datorn behöver definiera distinkta objekt som representerar verkliga saker: husen, gatorna, träden och andra objekt.

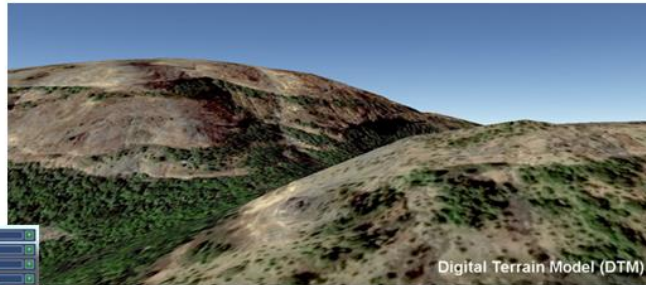
Dessa realistiska objekt är märkta med vad de representerar. De kan även ha attribut associerade till dem och relationer med andra objekt inom ett område.

Dessa strukturerade 3D-modeller med tydligt definierade realistiska objekt kallas de semantiska modellerna.



### Objekt i de semantiska modellerna

- Naturföremål – digital terrängmodell, vegetation, vattenförekomster...



Digital Terrain Model (DTM)



Konstgjorda objekt och växtlighet, Källa: Biljecki et al (2015)  
Applications of 3D City Models: State of the Art Review

Digital terrängmodell, DTM. Källa: <https://pigeonis.in/wp-content/uploads/2017/07/digital-terrain-model-dtm-1024x569.jpg>

- Konstgjorda föremål – hus, broar, gatumöbler...
- Alla objekt kan ha attribut

### Objekt i de semantiska modellerna

De semantiska modellerna är alltså digitala representationer av objekten, deras egenskaper samt interaktioner mellan dem. Föremålen kan vara både naturliga eller skapade av människan.

De naturliga objekten är t.ex. den digitala terrängmodellen (DTM), vegetation eller vattenförekomster.

De konstgjorda konstruktionerna är hus, broar, gator och så vidare, i kombination med mindre föremål som bänkar, soptunnor, trafikljus, lyktstolpar med mera.

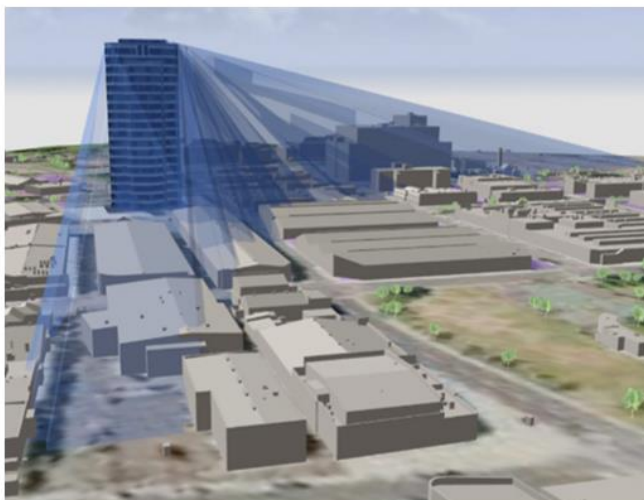
Komplexa objekt bryts vanligtvis ner ytterligare. Till exempel kan ett hus delas upp i olika byggnadsdelar och dessa igen i t.ex. tak, väggar eller markytor.

Väggar kan dessutom innehålla fönster och dörrar. Som vi ser är denna uppdelning hierarkisk (eftersom en byggnad består av delar, som är skapade av väggar, som har fönster).

Objekten kan ha attribut på alla detaljnivåer. Dessa attribut kan ge all relevant information – t.ex. om plats, utseende, tematiska attribut, funktionella aspekter och deras förhållanden till andra objekt, bara för att nämna några.

### Skapande av stadsmodeller I

- 3D-modeller – efterföljare till 2D-kartor
- Möjligt att öka beräkningskapaciteten
- Världen är 3D – 3D-modeller mer realistiska än 2D
- Vissa analyser är inte möjliga i 2D, t.ex. skugganalyser eller luftföroreningar



Shadowcast analys, 3D nödvändigt för det, från: Applications of 3D City Models: State of the Art Review

### Skapande av stadsmodeller

Vi kan se 3D-stadsmodellerna som efterföljare till traditionella 2D-kartor.

Det som har haft betydelse för övergången från 2D till 3D är utvecklingen och det sjunkande priset på både skanningstekniker och datorers prestanda. Eftersom världen är i 3D ger 3D-modellerna mer realistisk information om verkligheten jämfört med 2D-kartor och som tidigare nämnts är vissa analyser endast möjliga i 3D, t.ex. skugg- eller luftföroreningsanalyser.



## Skapandet av stadsmodeller II

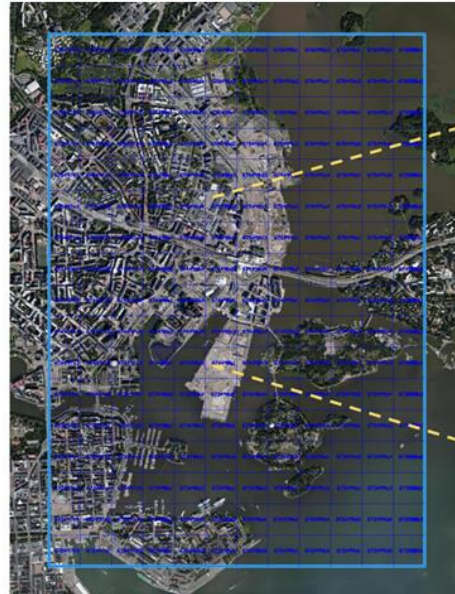
Kombination av

- Flygbilder (fotogrammetri)
- punktmoln (LiDAR)
- 2D-data (cadastres)

Data som sammanställts med hjälp  
av specialiserad programvara

Följt av kontroll och manuell  
justering

Tiling av flygbilder i Helsingfors stadsmodell, från: Projektet Kalasatama digitala tvillingar



Hur skapas sådana 3D-modeller? I allmänhet är modellerna baserade på flygbilder, punktmoln samt 2D-data och helst en kombination av dessa tekniker.

Bilderna kan erhållas genom olika fotogrammetriska tekniker, punktmolnens erhålls från laserskanning (LiDAR) och 2D spatiala data från exempelvis register och förvaltningskartor (kataster).

Från dessa data kan specialiserad programvara generera stadsmodellerna automatiskt. Det kan gå fort och är kostnadseffektivt. Indata måste naturligtvis vara av god kvalitet och korrekt kompatibel med varandra.

Användaren kan också definiera inställningar för generationen av modellen och utgångsmodellerna kan justeras manuellt senare, om det behövs för deras slutliga tillämpning.

Vi ska nu titta på skapandeprocessen av dessa modeller lite närmare och med exempel.



### 3D-stad från flygfoton I

- 2D-bilder från olika synvinklar
- Delvis överlappande
- Automatiskt kombineras och trianguleras



Vertikal och sned flygfotografering (ovanför)  
och bearbetning i nät 250x250 meter (höger)  
Källa: Projektet Kalasatama Digital Twins. Slutrapporten från  
pilotprojektet KIRA-digi, 2019



### 3D stad från flygfoton

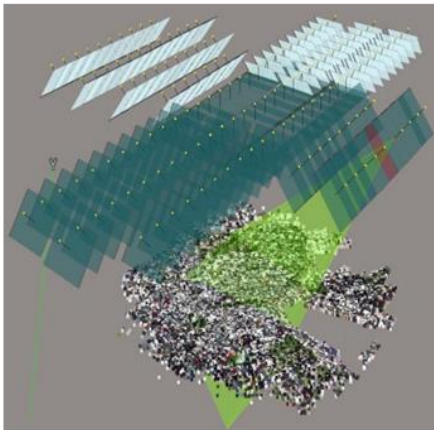
2D-bilder från olika synvinklar kan räcka för att få en mesh-modell.

Rådata består av flera delvis överlappande fotografier av det objekt/område som ska modelleras.



### 3D-stad från flygfoton II

- Kombinering genom att hitta gemensamma egenskaper i de överlappande bilderna (nedan)



- Markkontroll punkter (höger)

Källa: The  
Karasatama Digital  
Twins Project. The  
final report of the  
KIRA-digi pilot  
project, 2019



Dessa data trianguleras sedan automatiskt och flygbilderna binds samman genom att hitta gemensamma punkter i dem.

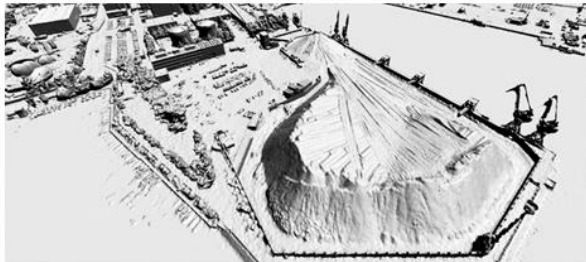
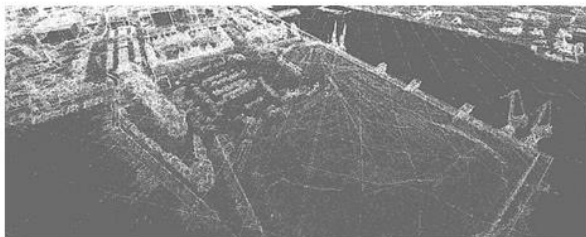
För att förankra 3D-modellen till verkligheten måste man definiera markkontrollpunkter och ange deras X-, Y- och Z-koordinater. Dessa markpunkter representerar platser som är lätt att urskilja, till exempel vägkorsningar. Deras placering måste bestämmas manuellt så att de både täcker och omsluter hela området.

Den resulterande modellen ser mycket realistisk ut, och dess kvalitet kan kontrolleras genom antingen visuell inspektion eller genom att jämföra modellen med laserskanningsdata. Vi kan se ett exempel på Helsingforsmodellen på nästa bild.

### Exempel på Helsingforsmodellen

Tre steg i skapandet:

- 1) punktmoln från flygbilder (höger upp)
- 2) maskmodell utan synliga trianglar (höger ner)
- 3) Slutlig fotorealistisk modell (vänster ner)



Källa: The Kalasatama DT Project

### Exempel på Helsingfors 3D-modell

Bilden visar de tre stegen i skapandet av en Helsingfors mesh-modell baserad på flygbilder.

Den övre högra bilden illustrerar det första steget, dvs. ett punktmoln som erhålls från flygbilderna.

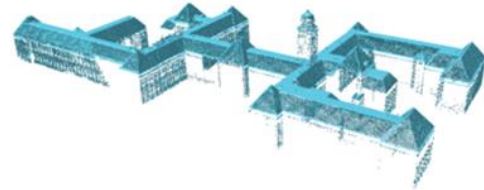
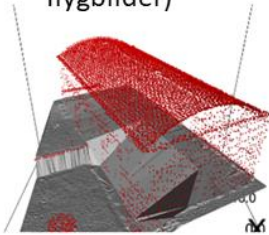
Nästa bild under den första visar mesh-modellen, i detta fall utan de synliga trianglarna.

Den slutliga fotorealistiska modellen, med projicerade flygfoton, visas av den sista bilden nere på vänster sida av bilden.

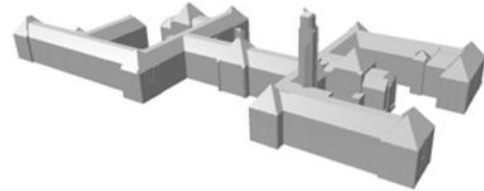
Vi kan se att modellen är mycket realistisk. De enskilda objekten är dock ännu inte definierade.

### 3D stad från laserskanning I

- Mesh-modeller även från punktmoln (höger a) ett punktmoln, (b) rekonstruerad byggnad
- Kan vara fotorealistiskt (nedåt)
- Mindre områden, mer detaljer (jämfört med flygbilder)



(a)



(b)

Källa: 3D Book (vänster),  
<https://www.rock.estate/blog/a-tour-of-3d-point-cloud-processing> (höger)

### 3D stad från laserskanning

Mesh-modeller kan härstamma även från punktmoln från laserskanning. I allmänhet är denna metod lämplig för mindre områden och kan resultera i mer detaljerade modeller, jämfört med den flygbildbaserade metoden.

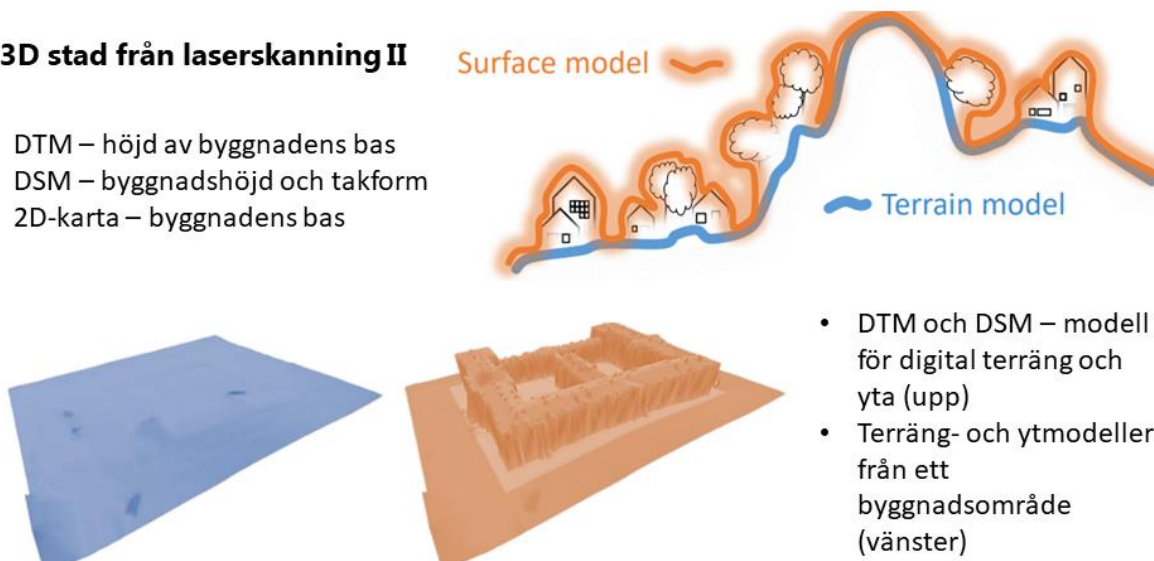
Det är även möjligt att sedan projicera bilder på modellen för att få den att se fotorealistisk ut.





### 3D stad från laserskanning II

DTM – höjd av byggnadens bas  
DSM – byggnadshöjd och takform  
2D-karta – byggnadens bas



- DTM och DSM – modell för digital terräng och yta (upp)
- Terräng- och ytmodeller från ett byggnadsområde (vänster)

Källa: The Kalasatama DT Project

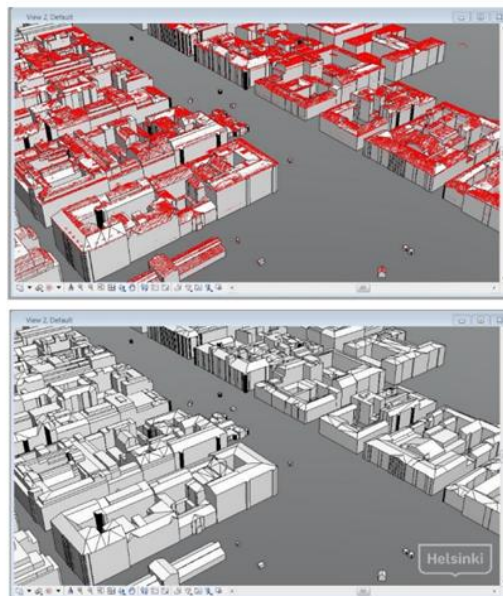
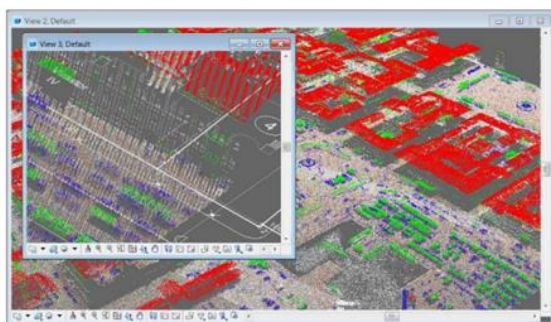
Bra exempel på LiDAR-baserade punktmoln är digitala terrängmodeller, Digital Terrain Model (DTM) och digitala ytmodeller, Digital Surface Model (DSM). Dessa kan ofta hittas fritt tillgängliga för användare och kan användas för att generera stadsmodeller utifrån dem.

Terrängmodellen bestämmer höjden på byggnadens bas. Ytmodellen identifierar höjden på själva byggnaden och takformen, och byggnadens bas finns tillgänglig i 2D-kartor.

Med höjden, taken och basen på byggnader tillgängliga så är det möjligt att identifiera enskilda stadsobjekt samt att konstruera väggarna. Även detta kan bearbetas mer eller mindre automatiskt.

### 3D stad från laserskanning III

Baskarta och punktmoln för ett område (ner)  
Takformer av byggnader från data (höger upp)  
Geometrier av skapade 3D-byggnader (höger ner)



Bilderna ovanför visar processen för att skapa och identifiera objekt, som beskrivs i föregående bild.

Området i exemplet är återigen från Helsingfors 3D-modellen.



## Slutlig 3D-semantisk modell

- Lägg till semantisk info = attribut
- Finns t.ex. i kadaster



Exempel på grafisk semantisk modell av  
Stockholm – centrum och bostadsområde

<https://smartstad.stockholm/2020/03/09/over-100-000-byggnader-i-stockholm-som-3d-modeller-i-stadsbyggnadskontorets-nya-databas/>

## Slutlig 3D-semantisk modell

Efter stegen från de tidigare bilderna genomförts blir en stadsmodell med enskilda objekt klar. Man kan även projicera flygfoton på modellen för att få realistiska fasadutseenden.

Hur en sådan modell ser ut i slutändan kan ses på bilden, detta exempel kommer från Stockholm.

Men för att få en riktig semantisk modell måste vi också lägga till attributen, det vill säga den semantiska informationen. Det kan vara allt från objektägare och användning till antal personer som bor på den angivna adressen. Denna information är tillgänglig i vissa fastighetskartor (kataster), så det är bara att ansluta den till modellen.

### Abstraktion i 3D-modeller

- Ta bort onödiga delar, t.ex. interiörer
- Semantiska modeller – hög abstraktionsnivå, unika ID
- Meshmodeller – låg abstraktion, mindre datorutrymme, snabbare att skapa och läsa, billigare



[Helsinki 3D | City of Helsinki](https://www.hel.fi/en/decision-making/information-on-helsinki/maps-and-geospatial-data/helsinki-3d)

<https://www.hel.fi/en/decision-making/information-on-helsinki/maps-and-geospatial-data/helsinki-3d>

### Abstraktion i 3D-stadsmodeller

Vi har sett att 3D-modellering görs genom en serie abstraktioner av den verkliga världen. Viss information går förlorad, men förhoppningsvis är den återstående informationen mer strukturerad och meningsfull i slutändan.

Abstraktionen kan ta bort onödiga delar beroende på syfte, som exempelvis allt inuti byggnader i en stadsmodell, och kan fungera på olika nivåer.

De semantiska 3D-modellerna är typiska exempel på hög abstraktionsnivå med världen uppdelad i diskreta objekt. Alla dessa objekt bör ha globalt unika identifierare som inte ändras så länge som objektet finns. Detta gör det möjligt att både hålla reda på och uppdatera objekten i olika applikationer.

Mesh-modeller baserade på triangulering representerar lägre abstraktionsnivå, men är snabbare och billigare att skapa. Som diskuterats kan det vara det första steget i 3D-modellering, som kan följas av en semantisk uppdelning senare.

I allmänhet baserades den första generationen av stadsmodellerna på mesh-modeller. Numera uppgraderar vissa städer sina modeller till semantiska som kan agera som grunden för en digital tvilling (Digital Twin). Ju mer en stadsmodell berikas med information, desto mer funktionell och användbar blir dess digitala tvilling. Vi kommer att titta närmare på vad digitala tvillingar är senare.



### Exempel på 3D-stadsmodeller I

- Semantiska modeller - främst offentlig sektor
- Höggrafikmodeller – ofta kommersiella, Open Street Map
- Första gratis modellen – Berlin 2015



[VisualizationBerlin – 3DCityDB Database](#)

### Exempel på 3D-stadsmodeller

Som tidigare nämnts kan 3D-stadsmodellerna ses som efterföljare till traditionella 2D-digitala kartor. Detta framsteg var möjligt tack vare ökningen av både dator- och lagringskraft, eftersom 3D-modellen innehåller betydligt större mängder data jämfört med 2D-kartorna.

De flesta semantiska stadsmodeller skapas och upprätthålls av GIS/kart-avdelningar på kommunal nivå.

Men 3D-stadsmodeller produceras också av kommersiella företag samt av initiativ som Open Street Map-projektet. Dessa är dock ofta grafiska och inte semantiska.

Den första fritt tillgängliga stadsmodellen var Berlinmodellen, som publicerades 2015. Den genererades automatiskt från 2D-kadaster och flygbaserad laserdata, med texturer som automatiskt extraheras från flygbilder.

## Exempel på 3D stadsmodeller II

Många städer  
erbjuder 3D-modeller  
för visning

Data vanligtvis inte  
gratis att ladda ner

Undantag:

[Cities/regions around  
the world with open  
datasets \(tudelft.nl\)](https://tudelft.nl)



Semantisk modell av Zagreb, Kroatien

[ZG3D: 3D model Grada Zagreba \(gdi.net\)](https://gdi.net)

Berlinmodellen är öppet tillgänglig och det finns även andra modeller av olika städer från många länder. Ni kan se en lista över dem från Delft Technical University:

[Cities/regions around the world with open datasets \(tudelft.nl\)](https://tudelft.nl)

Dessa öppna modeller finns i olika format, men endast en minoritet av dem är semantiska.

De flesta större städer skapar sina 3D-modeller nuförtiden. De tillhandahåller dem dock inte gratis, eller åtminstone inte i högre detaljnivå (Level of Detail, LOD).

Svenska exempel på avancerade semantiska modeller är Stockholm och Göteborg.

[Stockholm 3D](#)

[Digital tvilling - Göteborgs Stad \(goteborg.se\)](https://goteborg.se)

Figuren på bilden illustrerar den semantiska modellen av staden Zagreb, Kroatien.

[ZG3D: 3D-modell Grada Zagreba \(gdi.net\)](https://gdi.net)

### Applikationer som använder semantiska 3D-modeller

- Visualisering & stadsplanering (se figur)
- Utsökningar – beror på LOD och detaljen av semantisk information
- Analyser och simuleringar – ge ny semantisk information
- Scenariosimulering



Källa: The Kalasatama DT Project

### Tillämpningar av semantiska 3D-modeller

Det finns många tillämpningar som 3D-stadsmodellerna kan användas till.

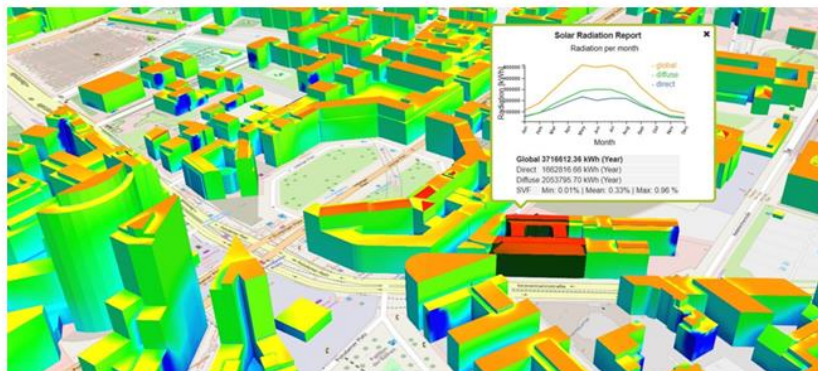
Den första är visualiseringen, både av de befintliga byggnaderna och av de planerade. Detta illustreras av figuren på bilden, som visar en nyplanerad stadsdel i Helsingfors. Detta är mycket användbart i stadsutveckling.

Men man kan få ut mycket mer information från de semantiska modellerna, eftersom alla stadsobjekt kan berikas med tematiska data. Det är möjligt att söka efter specifika data, till exempel: "Hur många lyktstolpar finns på en gata" eller "Hur många fönster i ett hus är riktade mot ett torg" eller "Hur många byggnader förbrukar mer energi än 100 kWh/m<sup>2</sup>/år". Frågorna kan vara så komplexa som den semantiska informationen och detaljnivån tillåter.

Man kan också utföra olika analyser och simuleringar, samt testa olika utvecklingsscenarier på det sättet. Resultaten av sådana analyser kan till och med ge ny semantisk information. Många av analyserna används redan i praktiken men inte i alla städer.



## Analys av solstrålning



[3d-stadmodell\\_solarpotenzialanalyse-aspect-ratio-20-9-3.jpg \(2310x1040\) \(vc.systems\)](#)

Möjlighet till många  
analyser:

- Solenergiproduktion
- Bästa tak för solceller
- % av hushållens förbrukning som täcks av solenergi
- El-kostnad

## Analys av solstrålning

Vi kommer att titta på några konkreta tillämpningsexempel.

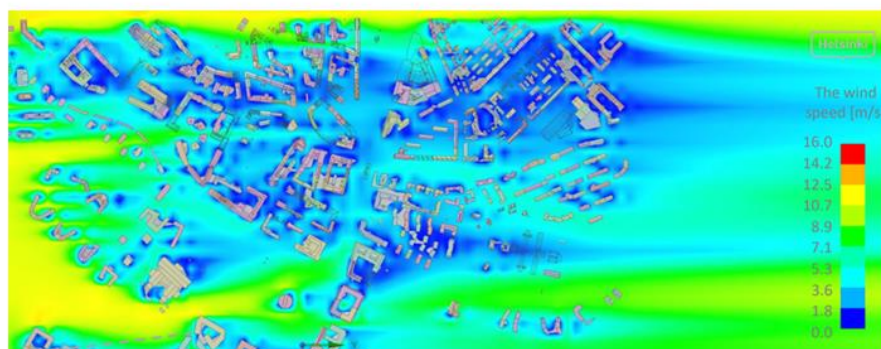
Bilden visar uppskattad solstrålning på tak och fasader i en tysk stad. Från dessa data är det möjligt att beräkna hur mycket solenergi som kan produceras i området, eller vilka tak som är mest lämpliga att montera solceller på.

Om vi vet hur mycket el som hus förbrukar, skulle vi kunna räkna på antal procent av förbrukningen som täcks av solcellerna eller till och med hur mycket pengar ett hushåll kan spara årligen på elräkningar.

Som vi ser kan analyserna vara mycket komplexa, om modellen ger relevant semantisk information.

### Analys av vindhastighet

- Minskning av vindhastigheten i det nyligen planerade grannskapet
- Uppskattning av termisk komfort under varma somrar
- Spridning av luftföroreningar



Stimulering av vindintensiteten på gatunivå i Helsingfors  
Vinden blåser från bildens vänstra sida i 15m/s  
Källa: The Kalasatama DT Project

### Analys av vindhastighet

I nästa tillämpningsexempel är vi tillbaka till Helsingfors, till den nyligen planerade stadsdelen Kalasatama.

Figuren visar hur en stark vind från havet skulle bromsas av de planerade byggnaderna och hur fotgängares vindkomfort skulle vara.

På samma sätt som solstrålningen kan vindhastighet och riktning ge data till många andra analyser. Till exempel kan man räkna termisk komfort och vindkylningseffekt i städer under de varmaste dagarna, vilket är viktigt i städer med ökande maximala temperaturer och dödliga värmeböljor.

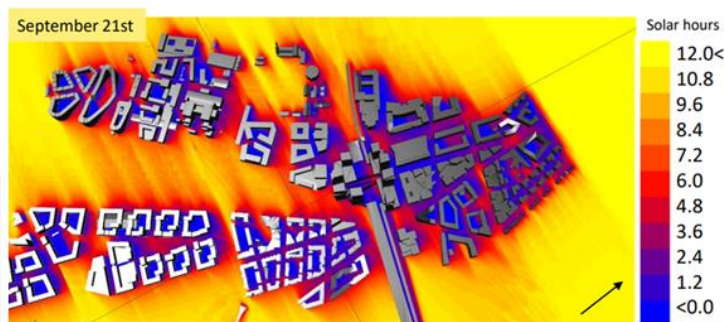
Vindens hastighet och riktning är också avgörande vid simulering av luft- och bullerföroreningar, vilket krävs enligt EU:s buller- och luftkvalitetsdirektiv.

## Solsken- och skugg analys

- Stadsplanering



Källa: The Kalasatama DT Project



- Solsken (upp) och skuggning av planerade byggnader (vänster) vid höstdagjämning
- Liknande beräkningar för vilken tid på året som helst
- Provning av byggnadens utformning och placering

## Solsken- och skugganalys

Nästa exempel är stadsdelen Fiskehamnen i Helsingfors.

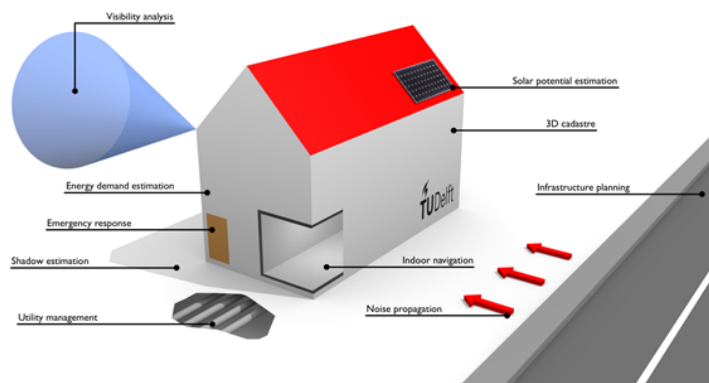
Figuren visar resultaten av solskensanalys och hur skuggorna i de nyplanerade husen kommer att ligga vid höstdagjämningen.

Naturligtvis kan en sådan analys genomföras för vilken tid som helst på året. Den visar vilka gårdar och gator som har mycket lite eller inget solsken under olika årstider.

Det är möjligt att testa olika scenarier för byggnadernas design för att välja den lämpligaste varianten.

### Andra tillämpningar

- Kraftiga regnhändelser och översvämningar
- Digitala tvillingar, smarta städer
- Datakvalitet och harmonisering är grundläggande
- Biljecki et al. (2015):  
Applications of 3D City  
Models: State of the Art  
Review



[Applications of 3D city models | CityJSON](#)

### Andra tillämpningar

En annan viktig tillämpning i stadsplanering är översvämningsanalys, där man kan testa olika scenarier med kraftiga regn och se om staden kommer att översvämmas eller inte. Detta blir allt viktigare eftersom extrema väderhändelser kommer att bli allt vanligare i och med klimatförändringen.

Sedan finns det begreppen Digital Twins och Smart Cities. Tanken är att olika sensorer skulle samla in information i realtid och ge omedelbar feedback på stadens funktioner. Det kan omfatta allt från reglering av trafikstockningar och luftföroreningar till smarta soptunnor som informerar när de blir fulla och behöver tömmas.

Andra tillämpningar är fortfarande i pilotstadiet, som att använda modellerna för navigering och träning av självkörande bilar eller använda VR-glasögon för att möjliggöra en virtuell promenad genom nyligen planerade stadsutvecklingar.

Det finns också många andra tillämpningar. En rapport från 2015 beskriver mer än 100 av dem och är öppet tillgänglig här:

[Applications of 3D city models | CityJSON](#)

Oavsett vilken tillämpning som är av intresse så är det viktigt att veta att förberedande arbete är av stor vikt. Om informationen i modellen är strukturerad på ett konsekvent sätt och innehåller aspekter som verkligen behövs för den tänkta tillämpningen så kan själva simuleringen köras mer eller mindre automatiskt.



### Semantiska 3D-stadsmodeller

- Ge geografisk, topografisk och semantisk information om objekt
- Interaktioner mellan objekt
- Hierarkisk sönderdelning i mindre delar (t.ex. byggnadsväggfönster)
- Kan vara komplex och täcka stora områden



En hel del semantisk information kan läggas till i en 3D-modell  
3D-modell av Nancy, Frankrike, Google Earth

### Standardformat för 3D-data

De semantiska 3D-stadsmodellerna ger geografisk, topografisk och semantisk information om objekt i stadsområden. De semantiska objekten kan spatialt representeras av flera geometrier och i olika detaljnivå (LOD). Vidare kan objekten delas upp i mindre delar på flera detaljnivåer och denna uppdelning är hierarkisk (t.ex. byggnad-vägg-fönster).

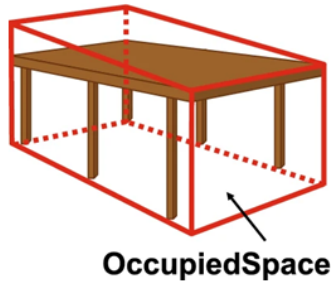
De färdiga 3D-modellerna måste dock lagras någonstans och vara tillgängliga för slutanvändarna. Samtidigt kan de semantiska modellerna vara mycket komplexa och täcka stora områden.

Det innebär att en 3D-geodatabas för en 3D-modell måste kunna hantera både semantisk och geometrisk hierarki, hantera den stora datamängden och tillåta åtkomst, uppdateringar och även sökningar i datamängden.

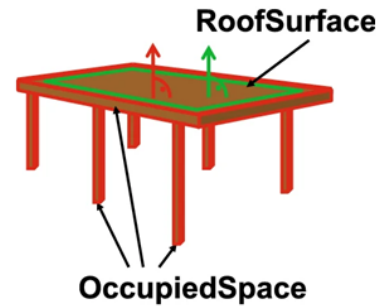
### CityGML-standard

- CityGML är öppen datamodell av Open Geospatial Consortium (OGC)
- Syftar till att representera semantiska 3D-modeller
- Nuvarande version är 3.0, godkänd 2021

#### Carport in LOD1



#### Carport in LOD2/3



Representation av en carport som OccupiedSpace i olika LODs. Från: [CityGML 3.0: New Functions Open Up New Applications](#)

### CityGML-standard

Det finns en öppen datamodell standardiserad av Open Geospatial Consortium (OGC), som syftar till att representera de semantiska 3D-modellerna. Standarden heter CityGML och den nuvarande versionen när detta dokument skrevs är 3.0, godkänd 2021.

OGC's egna definition är: "CityGML är en allmän semantisk informationsmodell för representation av stadsobjekt i 3D som kan delas mellan olika tillämpningar".

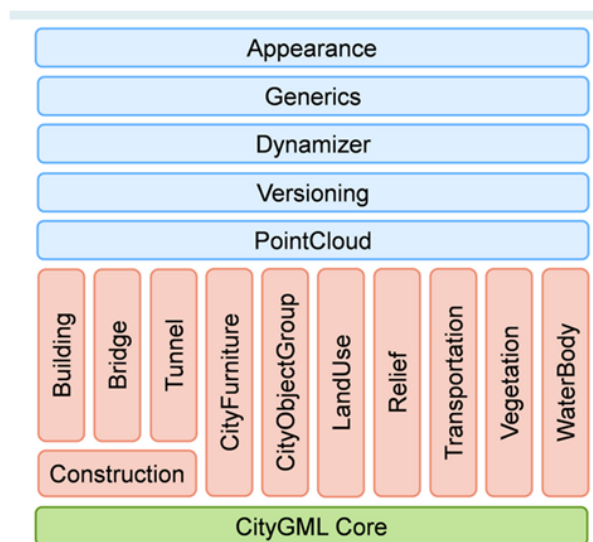
Vi kommer nu att titta närmare på hur det här CityGML-formatet är uppbyggt.

[CityGML - Open Geospatial Consortium \(ogc.org\)](http://ogc.org)

[CityGML 3.0: New Functions Open Up New Applications | PFG – Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science \(springer.com\)](#)

### CityGML konceptuell modell (CM)

- Gemensamma stadsobjekt bör beskrivas på samma sätt i alla modeller
- CityGML definierar klasser av de viktigaste objekten, hur man sonderdelar dem och användbara attribut
- Dessa klasser definieras i CityGML Conceptual Model



CityGML konceptuell modell, [CityGML - Open Geospatial Consortium \(ogc.org\)](http://citygml.org/)

### Konceptuell modell av CityGML

Många objekt, som byggnader, gator eller broar, är vanliga i alla städer. Därför bör de beskrivas på samma sätt i alla modeller. Annars skulle t.ex. "byggnader" kunna kallas "hus" i en annan stad och de skulle inte vara kompatibla med varandra.

Därför definierar CityGML sina egna klasser av de viktigaste objekten, hur de uppdelas till mindre komponenter och ofta några användbara attribut som ska inkluderas. Dessa klasser definieras i CityGML's konceptuella modell.

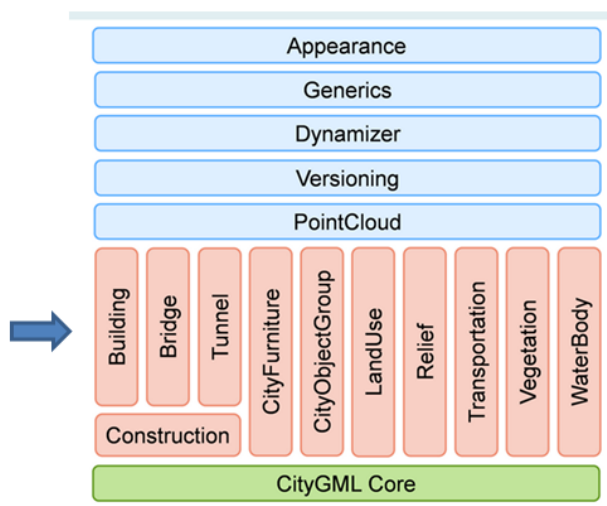
Den konceptuella modellen visualiseras av figuren på bilden.

Den fundamentala delen av den konceptuella modellen är Core-modulen, som visas längst ner i grönt. Core-modulen består av de grundläggande begreppen och komponenterna i en virtuell stad. Därför måste den alltid implementeras i alla 3D-stadsmodeller som använder CityGML.



### Klassmoduler i CM

- Tilläggsklass-moduler, visas vertikalt i rosa
- Modulerna är specifika tematiska klasser av de viktigaste objekten
- Alla tilläggsmoduler behöver inte ingå i en 3D-modell



CityGML konceptuell modell, [CityGML - Open Geospatial Consortium \(ogc.org\)](http://citygml.org)

### Klassmoduler i den konceptuella modellen

Förutom kärnmodulen finns tilläggsklassmodulerna, som visas vertikalt i rosa färg.

Varje tilläggsmodul omfattar en specifik tematisk klass för de viktigaste objekten i en virtuell 3D-stad. Dessa inkluderar konstruktioner, terräng t.ex. i form av DTM (Digital Elevation Model), vattenförekomster och så vidare som visas i figuren.

De tre modulerna Building, Bridge, och Tunnel delar många gemensamma egenskaper och är därför grupperade inom Construction-modulen.

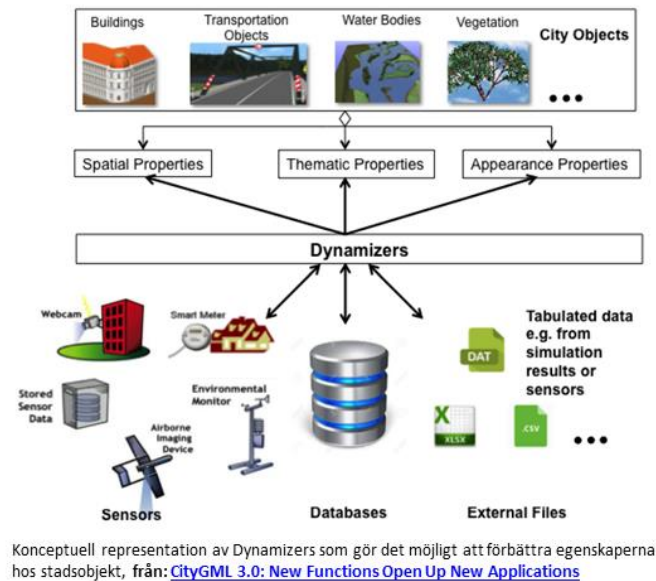
Transportation-modulen definierar klasser för representation av trafikinfrastrukturen. Det gör det möjligt att använda CityGML för trafik- och fordonssimuleringar, navigationssystem samt med väg- och järnvägsanläggningssystem.

En stadsmodell behöver inte inkludera alla klassmoduler. Det räcker med att inkludera de som krävs för modellens specifika tillämpning.

Om en tillämpning till exempel uteslutande arbetar med byggnadsdata räcker det endast med Core-, Construction- och Building-modulerna.

## Specifika aspektmoduler i CM

- De fem blåfärgade vertikala modulerna i CM
- Lägger till specifika modelleringsaspekter, t.ex. texturer, färger, tid, modellversioner...
- Kan användas tillsammans med alla förlängningsmoduler



## Moduler för specifika aspekter

De fem blåfärgade modulerna överst i figuren på förra sidan lägger till specifika modelleringsaspekter. Dessa kan användas tillsammans med alla tilläggsmoduler.

Appearance-modulen representerar t.ex. texturer och färger på stadsobjekt.

PointCloud-modulen gör det möjligt att representera objektgeometri med 3D-punktmoln.

Generics-modulen definierar andra allmänna objekt, attribut och relationer. De allmänna objekten representerar 3D-objekt, som inte omfattas av de andra modellerade klasserna.

Versioning-modulen lägger till koncept för att hantera olika versioner av objekten. Exempelvis om något objekt skulle uppdateras men man vill behålla tidigare information om objektet.

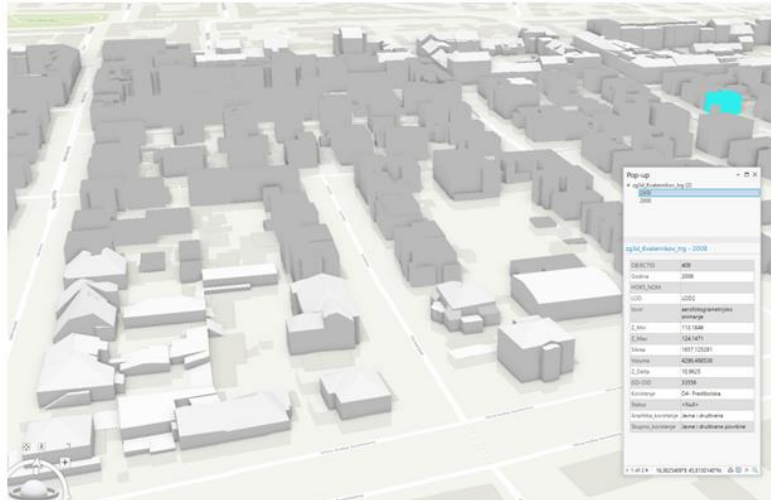
Dynamizer-modulen gör det möjligt att representera objekttegenskaper med tidsseriedata som exempelvis variationen av solstrålningen under en dag.

## Datakvalitet

Stadsmodeller är komplexa stora dataset

Datakvalitet är en avgörande fråga

- Noggrannhet
- Fullständighet
- Användbarhet
- Överensstämmelse
- Unikhet



Semantisk 3D-modell från Zagreb, Kroatien. Skärmdump från ArcGIS Pro.

## Datakvalitet

Stadsmodellerna är mycket komplexa med enorma datamängder och mycket information som kommer från flera olika källor. Därför är datakvalitet en viktig del att ta hänsyn till. Från dåliga data kommer dåliga beslut.

Det finns flera dimensioner av datakvalitet. Dessa dimensioner kan vara av lika eller varierande betydelse, men hänsyn bör tas till alla. När det gäller spatiala data är de viktigaste kvalitetsdimensionerna noggrannhet och fullständighet.

**Positionsnoggrannhet** - Motsvarar de geografiska koordinaterna för en egenskap objektets koordinater i den verkliga världen? Inom samma referenssystem förstås.

**Tematisk noggrannhet** - Representerar data korrekt de klassificeringar associerade med platser eller objekt? Är t.ex. en flod i modellen, en flod i verkligheten?

**Tidsnoggrannhet** - Är uppgifterna aktuella och representerar de verkligheten under önskad tid?

**Topologisk noggrannhet** - Återspeglar det spatiala förhållandet mellan objekt deras position i den verkliga världen?

**Fullständighet** - Finns alla tillgängliga datapunkter i databasen eller saknas något?

Man kan även lägga till ytterligare dimensioner som:

**Användbarhet** - Stämmer uppgifterna överens med slutanvändarnas behov? Är detaljnivån lämplig för ändamålet?

**Överensstämmelse** - Är data synkroniserade i alla datakällor? Finns det några motsägelser?

**Unikhet** - Finns det några dubletter i uppgifterna?



## Kodningar av CityGML

GML – Geography Markup Language

CityGML är namn både för:

- XML-baserad GML-kodning
- konceptuell datamodell

Skapat av Open Geospatial  
Consortium (OGC)

CityGML 3 gör det möjligt att koda  
data i XML, JSON eller  
databasscheman

Three encodings:

- XML-based →



- JSON-based →



- SQL-based →



37

## Kodningar av CityGML

Först bör vi notera att CityGML är namn både för GML-kodning och för datamodellen.

GML står för [Geography Markup Language version 3.1.1 \(GML3\)](#). Det är den utökningsbara internationella standarden för rumsligt datautbyte som utfärdas av [Open Geospatial Consortium \(OGC\)](#) och [ISO/TC 211](#), vilket möjliggör enkel och fri tillgång till hela det internationella samfundet.

CityGML 3 gör det möjligt att koda data i GML/XML, men även i JSON- eller databasscheman.

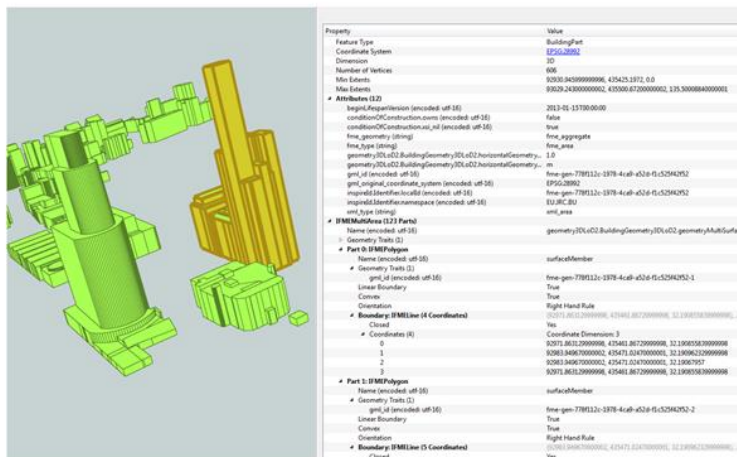
För att utforska en enkel CityJSON-modell, gå till: <https://ninja.cityjson.org/> som är en gratis online JSON-viewer, och ladda upp LoD3\_Railway.city.json, tillgänglig med föreläsningen. Alternativt kan du ladda ner den på: [Dataset CityJSON](#), tillsammans med andra .json-filer.

## Inspire 3D-byggnader

Influerad av CityGLM,  
men förenklad

Sträva efter att garantera  
interoperabilitet mellan  
rumsliga data och tjänster  
från olika EU-länder

Krav i EU-direktiv (t.ex.  
buller och  
energiprestanda)



Inspire Buildings GML visas med Data Inspector. Från: [Converting CityGML to INSPIRE 3D Buildings \(Annex III\) \(safe.com\)](https://www.safe.com/inspire-3d-buildings-annex-iii/)

38

## Inspire 3D-byggnader

CityGML har starkt påverkat modellen för Inspire 3D-byggnader.

Inspire GML innehåller attribut för att stödja Inspires mandat, varav många är gemensamma för andra Inspire-teman.

Inspire Buildings är något förenklat jämfört med CityGML. Till exempel krävs inte fönster och dörrar, delar kan inte ha underdelar och utseendet förenklas.

Inspires dataspecifikation kräver inte insamling av nya data. Syftet är att garantera interoperabilitet mellan rumsliga data och tjänster från olika EU-länder. Detta omfattar krav som rör europeisk rapportering, såsom bullerdirektivet, luftkvalitetsdirektivet eller direktivet om byggnaders energiprestanda.



## Definitionen av en digital tvilling

/ dig·i·tal twin /

*noun*

1. A digital twin is a virtual representation of real-world entities and processes, synchronized at a specified frequency and fidelity.

- Digital twin systems transform business by accelerating holistic understanding, optimal decision-making, and effective action.
- Digital twins use real-time and historical data to represent the past and present and simulate predicted futures.
- Digital twins are motivated by outcomes, tailored to use cases, powered by integration, built on data, guided by domain knowledge, and implemented in IT/OT systems.

Digital Twin Consortium, 2020. <https://www.digitaltwinconsortium.org/initiatives/the-definition-of-a-digital-twin/>

## Definitionen av en digital tvilling

Digitala tvillingar är ett begrepp som man ofta kan stöta på när man arbetar med 3D-data inom GIS och BIM. Det finns flera olika definitioner av digitala tvillingar som formulerats. Den som visas i bilden ovanför kommer från Digital Twins Consortium, en ideell organisation som syftar till att främja utvecklingen och användandet av digitala tvillingar.

Den första meningen är den viktigaste delen av definitionen. I den första delen av meningen anges att en digital tvilling är en virtuell representation av verkliga entiteter (objekt) och processer. En process kan här beskrivas som en serie åtgärder eller steg som vidtagits för att uppnå ett visst mål. Detta innebär att både de fysiska enheterna (t.ex. byggnader, vägar osv.) och olika åtgärder (t.ex. trafikflöden, godkännande av markanvändningsplaner osv.) kan modelleras av en digital tvilling.

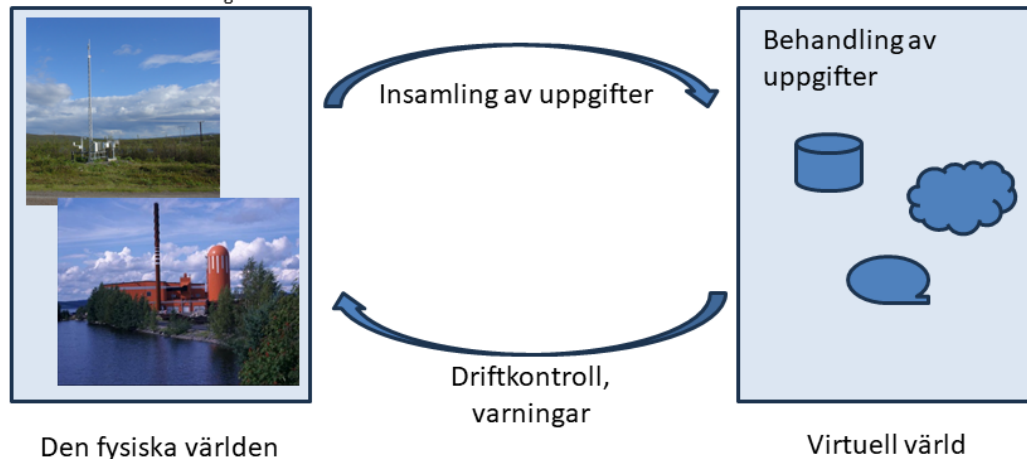
Den andra delen av den första meningen anger att de verkliga entiteterna och processerna och deras virtuella representationer synkroniseras vid en viss frekvens och trohet (grad av exakthet). Detta innebär till exempel att den virtuella representationen uppdateras när förändringar i den verkliga världen inträffar.

De tre punkterna i definitionen beskriver några viktiga egenskaper hos digitala tvillingar. Den andra punkten belyser användningen av realtids- och historiska data för att representera tidigare och nuvarande situationer. Dessutom belyser det också användningen av simuleringar för att förutsäga framtida tillstånd.

I den tredje punktsatsen betonas också användningen av IT/OT-system (Information and Operational Technology). Medan IT-system främst hanterar effektiv datahantering, övervakar OT-system händelser, processer och enheter och gör justeringar i företags- och industriverksamhet.

### Sammankoppling av fysiska och virtuella världar

Källor: smhi.se och vbenergi.se



### Sammankoppling av fysiska och virtuella världar

En digital tvilling består av fyra viktiga delar, nämligen.

1. Entiteter och processer i den fysiska (verkliga) världen
2. Data om de fysiska enheter och processer som förvärfvas, överförs till den virtuella världen.
3. Lagring och bearbetning av förvärfvade data i den virtuella världen
4. Inlämning av varningar och andra kontrollmeddelanden till enheter och processer som verkar i den fysiska världen

## Viktiga komponenter i digitala urbana tvillingar

### Insamling av uppgifter

- Historiska data – inom arkiv (i bästa fall)
- 3D-data – börjar visas men långt ifrån fullständig representation
- Realtidsdata – sensornätverk finns tillgängliga
- Uppgifter om medborgarna – Några pilotstudier har genomförts

### Behandling av uppgifter

- Konstruktion och design – ofta manuell (CAD/BIM, markanvändningsplanering, ...)
- Simuleringar och förutsägelser – används ofta för trafikflöden, dagvatten, vatten och avloppsvatten
- Optimering – särskilda programvarupaket

### Driftkontroll

- OC – används inom trafik- och elsektorena

## Viktiga komponenter i digitala urbana tvillingar

En digital tvilling består av den verkliga världen, den virtuella världen och kommunikationskanaler mellan dessa båda världar.

Uppgifter om den verkliga världens tidigare och nuvarande status kan inhämtas på olika sätt, t.ex. genom skanning av historiska kartor, flygundersökningar, sensornätverk och genom medborgarforskning (där medborgaren är en sensor).

Dessa data överförs sedan till den virtuella världen, där databehandling sker, ibland manuell bearbetning, andra gånger mer automatisk. Många organisationer har lång erfarenhet av databehandling. Trots detta utvecklas många nya uppfinningar kontinuerligt, delvis på grund av ökad tillgång till data.

Resultaten av databehandlingen i den virtuella världen ska sedan kommuniceras tillbaka till den verkliga världen, för genomförande av förändringar. En specifik typ av återkoppling är driftkontroll, där de aktuella aktiviteterna i den verkliga världen styrs (styrs) av operatörer eller programvara.

### Historisk karta över Berlin omkring 1739



Källa: <https://www.exberliner.com/berlin/historical-maps-of-berlin-from-1600-to-1920/>

### Historiska data

Många städer har arkiv med historiska GI-data, ofta i 2D. Mycket gamla historiska kartor tillhandahålls vanligtvis i form av skannade bilder och kan vara tillgängliga för offentliga användare. Dessa kartor berättar historien om det historiska sammanhanget i en stad eller ett land.

Många städer började upprätta urbana databaser redan under 1970-talet eller 1980-talet. Dessa stadsdatabaser var ofta i mycket stor kartläggningsskala (1:400 – 1:1000). Under årens lopp har regelbundna säkerhetskopior av dessa dataset tagits. Dessa dataset lagras ofta i filorienterade system (formfiler, designfiler etc.) på backupmedia. Det är inte vanligt att sådana historiska data finns tillgängliga på nätet, men de ger information om utvecklingen av en stad under de senaste decennierna.



## Luftkvalitetsindex i realtid



Källa: <https://waqi.info/>

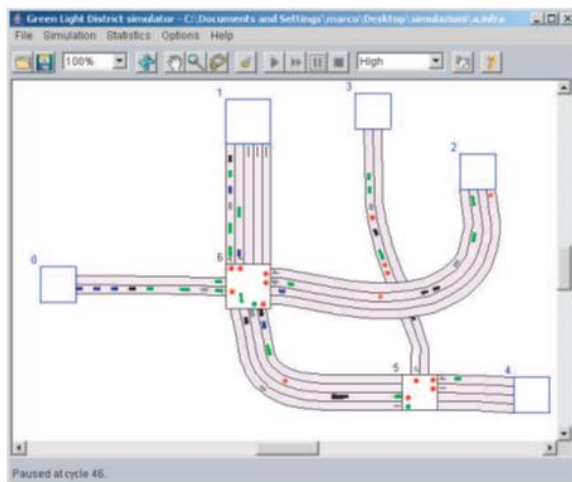
## Realtidsdata

Digitala sensorer har använts under lång tid i olika applikationer. De använde tidigare dedikerade nätverk, men numera används i allt större utsträckning öppna kommunikationsnät. Flera sensornätverk anses dock ha känslig information och är därför skyddade bakom brandväggar etc. Men det finns också en trend att tillåta läsårkomst till sensornätverk av mindre känslig natur.

Bilden visar avläsningar i nära realtid av luftkvalitetssensorer runt om i världen. Avläsningarna uppdateras varje minut, om möjligt.



## Simuleringar och prognoser



Källa: Mamei M, Zambonelli F, 2006. Urban Traffic Control with Co-fields. DOI: 10.1007/978-3-540-71103-2\_14

## Simuleringar och prognoser

Det finns också en mängd olika simuleringsverktyg tillgängliga för vissa typer av prognoser, som trafikflödesprognoser, uppskattning av dagvattenavrinning, kraftnätens kapacitet etc.

En simulering syftar till att testa utfallet av ett scenario, till exempel hur ett trafiksystem kommer att fungera när man bygger en ny väg. Hur kommer trafikbalansen att utvecklas över tid, vilka bullernivåer som kan nås och så vidare. Resultaten av simuleringarna är olika typer av prognoser om den framtida situationen.

Det finns många simuleringsprogram tillgängliga för olika ändamål. Många simuleringsprogram är baserade på agentbaserade modeller, vilket innebär att de olika aktörernas (agenternas) beteenden modelleras. Dessa modeller möjliggör ofta stokastiskt beteende, vilket innebär att aktörerna beter sig annorlunda enligt någon sannolikhetsfunktion. Det finns också simuleringsprogram av mer deterministisk karaktär, vilket innebär att aktörernas (agenternas) beteende följer vissa förutbestämda regler, till exempel vågutbredning i bullersimuleringsmodeller.



## Driftkontroll



Källa: <https://wsdot.wa.gov/travel/operations-services/traffic-management-centers-tmcs>



Källa: <https://cities-today.com/chattanooga-to-trial-energy-saving-adaptive-traffic-control-systems/>

## Driftkontroll

Driftkontroll är ett helt nytt ämne i förvaltningen av stadsrummet. Ordet kontroll ska inte tolkas som att kontrollera något. Istället bör ordet förstås som att vägleda eller styra något.

Många större städer har system för att styra trafikflödet med hjälp av olika sensorer och kameror. En modern trafikledningscentral har vanligtvis många övervakare där trafiksituationen övervakas och kontrolleras (styrs). Andra typer av sensorer kan också användas, till exempel luftkvalitetssensorer.

”Fleet management” som tillämpas av många transportföretag är också en typ av driftkontroll, där körinstruktioner meddelas till forarna för optimering eller hämtning av ytterligare varor.

Elförsörjning är också ett område som kräver en hög nivå av driftkontroll.



## Digital Twins City Center (DTCC) i Göteborg (SE)

- Forskningsprojekt,  
<https://dtcc.chalmers.se/>
  - Stadsplanering och design
  - Arkitektonisk och strukturell design
  - Digitalt byggande
  - Modellering och simulering på distriktsnivå
  - Modellering och simulering på stadsnivå

[https://www.youtube.com/watch?v=9FkXvKvD3OU&embeds\\_referring\\_euri=https%3A%2F%2Fdtcc.chalmers.se%2F&embeds\\_referring\\_origin=https%3A%2F%2Fdtcc.chalmers.se&feature=emb\\_imp\\_woyt](https://www.youtube.com/watch?v=9FkXvKvD3OU&embeds_referring_euri=https%3A%2F%2Fdtcc.chalmers.se%2F&embeds_referring_origin=https%3A%2F%2Fdtcc.chalmers.se&feature=emb_imp_woyt)



## Digital Twins City Centre (DTCC) i Göteborg (SE)

Ett av de mest framstående forsknings- och innovationsprojekten (Research and Innovation, R&I) om digitala tvillingar i Sverige är projektet Digital Twins City Centre i Göteborg. Projektet involverar många olika aktörer från offentlig sektor, privat sektor samt den akademiska världen.

Olika typer av data matas in i den digitala tvillingplattformen. Följaktligen finns det ett stort fokus på datahantering och dataintegrationsfrågor.

Projektet behandlar också olika tillämpningar eller användningsområden av plattformen, såsom stadsplanering och design, arkitektur och strukturell design och digitalt byggande. Slutligen behandlar projektet även olika modellerings- och simuleringstekniker, både på stads- och distriktsnivå.

.

## Digitala tvillingar i Karlskrona, Norrtälje och Huddinge

R&I-projekt som genomförs av svenska kommuner och en arkitekt (Sydväst arkitektur och planering)

- Planering av markanvändning
- Stadsutveckling
- Landsbygdsutveckling

Källa: Digital tvilling och analysverktyg, Smart Built Environment, Rapport U9-2021-17  
<https://www.smartbuilt.se/media/bzcf4q0w/digital-tvilling-och-analysverktyg.pdf>



Figur 1 Karlskrona kommun utvecklar en digital realtidstvilling.

## Digitala tvillingar i Norrtälje, Karlskrona och Huddinge

Ett andra svenskt utvecklingsprojekt om digitala tvillingar involverar tre olika städer (Norrtälje, Karlskrona och Huddinge). Projektet är relativt nystartat, men databehov och förväntade fördelar har identifierats. De förväntade användningsområdena är markanvändningsplanering, stadsutveckling och landsbygdsutveckling.



## Digitala tvillingar i byggbranschen

Källa: buildingSMART International, 2020. Enabling an Ecosystem of Digital Twins.  
<https://www.buildingsmart.org/wp-content/uploads/2020/05/Enabling-Digital-Twins-Positioning-Paper-Final.pdf>



## Digitala tvillingar i byggbranschen

Synen på digitala tvillingar inom BIM-sektorn är något annorlunda. Enligt buildingSMART är ett par tvillingar relaterade till design- och bygghaserna, där designen sker i det virtuella rummet och konstruktionen sker i den fysiska världen. Ett andra par tvillingar är relaterat till den faktiska användningen av anläggningarna, till exempel att människor bor i husen. Det virtuella utrymmet kan hantera energiförbrukning, underhållsbehov och så vidare. Vid någon tidpunkt kan stora ombyggnader behövas, till exempel på grund av nya regler.





### Stationer för övervakning av luftkvaliteten

- Endast PM10-sensor i detta specifika fall
- A/D-omvandlare och sensorstyrenhet i låda
- Vanligtvis GSM-anslutning till åtkomstpunkten i sensornätverket

Bild: Östra Sveriges Luftvårdsförbund.

[https://oslvf.se/matningar\\_och\\_vaderstationer/](https://oslvf.se/matningar_och_vaderstationer/)



### Övervakningsstationer för luftkvalitet

En annan typ av sensorer är luftkvalitetssensorer. Det finns ett globalt nätverk av övervakningsstationer för luftkvalitet som är anslutna till ett nätverk. Varje sensor monteras vanligtvis i en låda och placeras på olika platser av offentliga myndigheter.

Den specifika sensorn som visas på bilden finns i Södertälje. Lådan har i detta fall endast en typ av sensor, nämligen för att mäta PM10-koncentrationen (små partiklar med en diameter mindre än 10 mikrometer). Lådan har också en AD-omvandlare och utrustning för överföring av data via GSM-nätet.