



Digital Twins en veilige steden

Wat is de waarde van digital twins voor de veiligheid van steden?

2023
Welmoed Ibelings
Impact Coalitie Safety & Security

SAMENVATTING

In dit onderzoek is onderzocht wat digital twins zijn en wat de inzet daarvan voor waarde kan hebben voor steden, specifiek voor veiligheid. Een digital twin is een digitale replica van een object of proces dat bestaat uit hardware (IoT-sensoren), middleware (gecentraliseerde opslagplaat voor data waarin taken als data-integratie, data modellering en data verwerking plaatsvindt) en software (machine-learning modellen). Het is een erg breed concept en wordt daardoor ook op vele verschillende vlakken ingezet. Meerdere sectoren maken er al gebruik van, zoals in de auto-industrie en de bouw. Uit het literatuuronderzoek is gebleken dat digital twins vele kansen bieden. Niet alleen kan het voor meer efficiëntie zorgen, ook vallen zaken als beter onderhoud en het kunnen maken van voorspellingen onder de toegevoegde waarden van een digital twin. Naast het grote aantal kansen zijn er ook zeker een aantal risico's en uitdagingen. Zo is er op dit moment nog een gebrek aan voorschriften en standaarden in de digital twin branche en is het erg relevant om een goede cybersecurity van je digital twin te hebben, omdat het anders mogelijk is voor hackers om toegang te kunnen krijgen tot de twin wat grote gevolgen kan hebben voor de betrouwbaarheid en beschikbaarheid ervan. Bovendien moeten gebruikers altijd hun 'gezonde verstand' blijven gebruiken en niet honderd procent gaan vertrouwen op de twin. Wanneer het gedragsmodel of de algoritme niet juist is van een digital twin, kan op basis daarvan verkeerde beslissingen worden genomen. Uit de interviews kwam eenzelfde soort beeld naar voren. Alle geïnterviewden zagen dat er risico's verbonden waren aan het gebruik van digital twins, maar benadrukten dat de waarde van digital twins groter was. Als antwoord op de onderzoeksvraag kan worden geconcludeerd dat digital twins van grote waarde kunnen zijn voor steden. Niet alleen kunnen digital twins worden ingezet voor stadsplanning, ook veiligheid kan vergroot worden op verschillende vlakken, zoals crowd management en evacuatie doeleinden. Om tot verdere ontwikkeling van digital twins te komen is het wel belangrijk dat er meer samenwerking komt waardoor informatie deling tussen partijen eenvoudiger wordt en digital twins op een meer efficiëntere manier kunnen worden ingezet.

INLEIDING

De digital twin is een technologie die de afgelopen jaren een enorme vlucht heeft genomen (Fortune Business Insights, z.d.). Een digital twin schetst een zo accuraat mogelijk virtueel beeld van een fysiek proces of object. Dit beeld wordt gecreëerd doordat er data uit de werkelijkheid in het model worden gestopt waardoor je een dynamisch digitaal model krijgt van het fysieke object of proces. Een digital twin bestaat uit drie componenten, namelijk uit hardware (IoT-sensoren), middleware (gecentraliseerde opslagplaat voor data waarin taken als data-integratie, data modellering en data verwerking plaatsvindt) en software (machine-learning modellen). Data kunnen real-time worden gevoed waardoor het model samen met voorspellende algoritmes kan worden ingezet voor verkenningen en eventuele voorspellingen. Digital twins worden op dit moment al in vele sectoren ingezet, zoals in de bouw, energieopwekking en de auto-industrie. Maar ook in steden beginnen digital twins een rol te spelen. Hier ligt een link met het smart city concept, waarin steden gebruik maken van ICT om hun functioneren, communicatie en efficiëntie te vergroten. Door middel van het gebruik van beschikbare technologische innovaties binnen een stad kan ook de veiligheid vergroot worden, bijvoorbeeld door inzet van camera's en licht- of geluidssensoren (Impact Coalitie Safety & Security, z.d.). Het benutten van technologische vooruitgang is daarom essentieel voor smart cities en digital twins kunnen daarin een toenemende rol spelen (Shahat, Hyun & Yeom, 2021). De vraag die daarom centraal staat in dit onderzoek is: *Wat is de waarde van digital twins voor de veiligheid van steden?*

Deze vraag zal kwalitatief onderzocht worden met literatuuronderzoek en interviews. Door middel van literatuuronderzoek zal een duidelijk beeld geschetst worden wat digital twins zijn, welke kansen en risico's er bij komen kijken bij de implementatie ervan en op wat voor manieren digital twins in steden kunnen worden ingezet. De interviews zullen hier een extra gelaagdheid aan toevoegen doordat deze zullen laten zien hoe er op dit moment binnen de Nederlandse digital twin branche gekeken wordt naar de waarde en potentie van digital twins op het gebied van veiligheid in steden. Door bewust te kiezen voor verschillende partijen (kennisinstellingen, commerciële bedrijven, politie) wordt er een zo compleet mogelijk beeld geschetst. Hieronder vallen Info Support, Etteplan, Argaleo, Prespective, uCrowds, TNO, Universiteit Wageningen, de Nederlandse politie en Gemeente Rotterdam. Doormiddel van het programma Atlas.ti zullen de interviews gecodeerd worden en zal op basis daarvan een thematische analyse gedaan worden. Hieruit kan worden opgemaakt of digital twins nu al een grote rol spelen binnen het veiligheidsveld en op wat voor manieren ze in steden kunnen worden ingezet.

ANALYSE

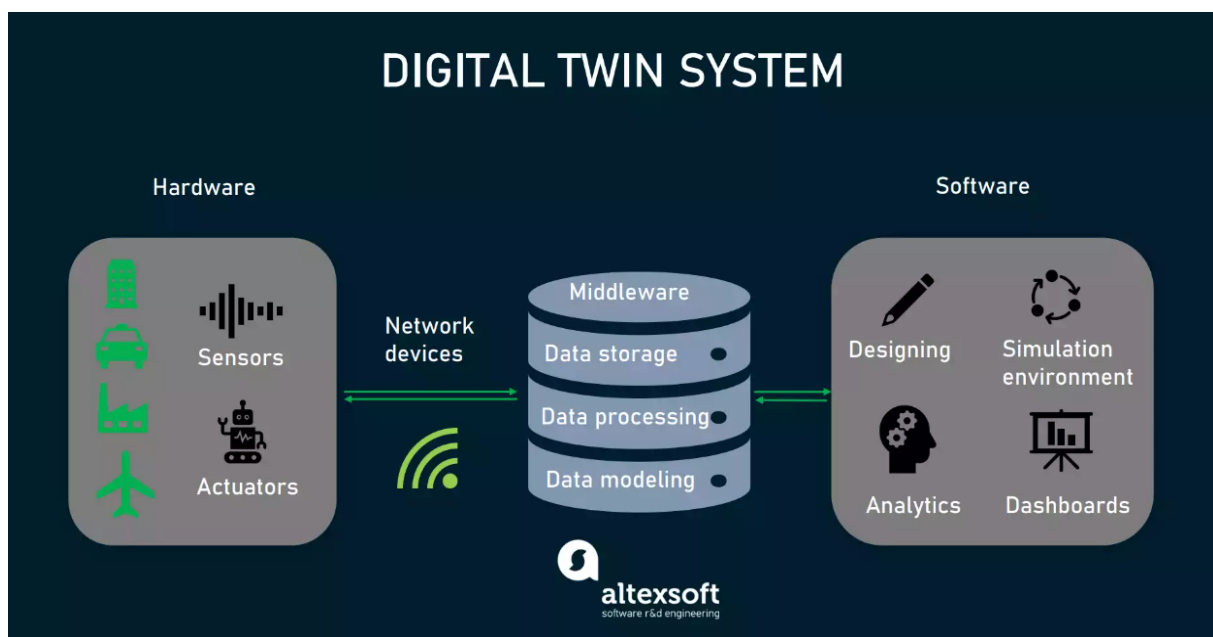
Gedurende het literatuuronderzoek wordt er voornamelijk gelet op literatuur die zich richt op digital twins in het veiligheidsveld zodat het een goede aansluiting heeft met de onderzoeksvraag. Door gebruik te maken van een framework in Excel worden alle bronnen opgedeeld onder de kopjes die behoren tot de drie deelvragen, waardoor er een duidelijk overzicht komt van welke bronnen relevant zijn voor welke vraag. In deze analyse zullen drie deelvragen behandeld worden. Ten eerste zal de vraag 'Wat zijn digital twins?' besproken worden. Hierdoor zal duidelijker worden wat digital twins zijn en op welke manieren ze ingezet kunnen worden. Ten tweede zal de vraag 'Welke kansen bieden digital twins?' geanalyseerd worden. Als laatste zal de vraag 'Welke uitdagingen en risico's brengen digital twins met zich mee?' ontleed worden. Door deze vragen zal een beter beeld geschetst kunnen worden of digital twins in de toekomst een grotere rol kunnen gaan spelen in het vergroten van stedelijke veiligheid.

WAT ZIJN DIGITAL TWINS?

Een digital twin is een zogeheten 'contested concept'. Dit houdt in dat binnen de literatuur niet één standaard definitie wordt gebruikt. De diversiteit van deze interpretaties wordt veroorzaakt doordat elke definitie zich richt op de eigenschappen van de use cases waar digital twins op worden toegepast of voor worden ontwikkeld. Digital twins kunnen ingezet worden voor meerdere doeleinden waardoor de eigenschappen kunnen verschillen en er een ander beeld naar voren kan komen over wat precies een digital twin inhoudt (van der Valk et al., 2018). Ondanks dat digital twins voor meerdere doeleinden gebruikt kunnen worden, bestaat er wel een algemeen beeld van wat het zijn. Simpel gezegd schetst een digital twin een virtueel beeld van een fysiek proces of object. Dit beeld wordt gecreëerd doordat er verschillende soorten data en informatie uit de werkelijkheid in het model worden gestopt waardoor je een virtuele twin krijgt van het fysieke object of proces (VNG, 2022). Een digital twin bevat drie verschillende onderdelen, namelijk hardware onderdelen, software onderdelen en middleware voor gegevensbeheer daartussen (zie Figuur 1). Als eerst heb je de hardware waarin Internet of Things (IoT)-sensoren een belangrijke technologie zijn die digital twins aansturen. Deze IoT sensoren brengen namelijk informatie uitwisseling op gang. Het hardware onderdeel bevat ook aandrijvers die digitale signalen omzetten in mechanische bewegingen, netwerkapparaten zoals routers, edge-servers en IoT-gateways etc. Daarnaast heb je het onderdeel middleware, dat een gecentraliseerde opslagplaat is om gegevens uit verschillende bronnen te verzamelen. Het middleware platform heeft daarnaast als taak om

connectiviteit, dataverwerking, data-integratie en data modellering en -beheer te bevorderen. Als laatste heb je het software onderdeel dat dient als een analyse-engine. Hierin worden observaties omgezet in waardevolle inzichten en dit wordt aangedreven door machine learning-modellen. Ook onderdelen als real-time monitoring, ontwerptools voor modellering en simulatiesoftware behoren tot deze software. Hoe precies een digital twin werkt zou je kunnen beschrijven in zes stappen. Ten eerste vindt er data collectie plaats van een fysiek object en zijn omgeving en dat wordt daarna verzonden naar de gecentraliseerde opslagplaats. Vervolgens wordt deze data geanalyseerd en voorbereid om naar de digital twin te worden gestuurd. Wanneer de data zijn geanalyseerd zal de digital twin deze nieuwe gegevens gebruiken om het fysiek object in real time te kunnen spiegelen waardoor getest kan worden wat er zal gebeuren wanneer er iets in de omgeving verandert. Bij deze stap kunnen AI-algoritmen worden ingezet om het design van het product aan te passen of eventuele problemen op te sporen. Daarna zullen de inzichten van analytici worden weergegeven via het dashboard. Hierdoor kunnen in de volgende stap stakeholders beslissingen nemen op basis van die data uit de digital twin. Het fysieke object of proces kan daardoor in de laatste stap, als het nodig is, worden aangepast (Altexsoft, 2021). Dit proces herhaalt zich constant door een continue stroom aan real-time data waardoor de digital twin continue mee verandert (VNG, 2022).

Figuur 1. De drie onderdelen van een digital twin



Een digital twin is geen nieuw concept. Over de afgelopen jaren heeft het in veel sectoren al een grote rol gespeeld. Zo werden digital twins al in 1960 ingezet op het gebied van lucht- en ruimtevaart. Beroemd is het gebruik van een virtuele versie van de Apollo13, waarin NASA aan elkaar gekoppelde simulatoren, normaal gesproken in gebruik voor de training van astronauten, op aarde gebruikte om oplossingen te vinden voor het veilig laten terugkeren van het beschadigde ruimtevaartuig (Singh et al., 2021). Op zichzelf is een simulator van een ruimtevoertuig geen digital twin in de moderne zin van het woord, maar net als bij digital twins zoals hierboven gedefinieerd was er een virtueel model van het werkelijke fysieke object, waarbij het virtuele model werd gevoed met echte data uit de Apollo 13. NASA-missiecontrollers pasten de simulaties makkelijk aan zodat die zo goed mogelijk overeen zouden komen met de condities in het werkelijke ruimtevaartuig waardoor verschillende scenario's onderzocht konden worden zodat de juiste strategie uiteindelijk gekozen kon worden om de astronauten veilig thuis

te brengen (Ferguson, 2020). Al snel na de inzet van digital twins in de lucht- en ruimtevaart volgden ook andere sectoren (IBM, z.d.):

Tabel 1. Voorbeelden van inzet digital twins in verschillende sectoren

Sector	Uitleg inzet digital twins
Auto industrie	Digital twins worden ingezet in de ontwerp fase om de efficiëntie van de auto te vergroten en de voertuigprestatie te verbeteren.
Stadsplanning	In veel steden is er een enorme toename van bevolking. Dit brengt diverse problemen met zich mee, zoals luchtvervuiling en verkeersopstoppingen. Door ruimtelijke gegevens in 3D modellen te zetten kunnen dit soort problemen in de stad worden gemanaged.
Elektriciteit	Netbeheerders kunnen digital twins gebruiken om het elektriciteitsnet te optimaliseren. Hierdoor kunnen stroomtekorten worden voorkomen.
Bouw/productie	Door middel van digital twins wordt de efficiëntie vergroot van motoren en machines. Ook de belasting door bijvoorbeeld weer of aardshokken op gebouwen kunnen worden berekend.

WELKE KANSEN BIEDEN DIGITAL TWINS?

De verwachting is dat de wereldwijde digital twin marktomvang een groei zal ondergaan (Fortune Business Insights, z.d.). Deze verwacht groei zou eventueel kunnen ontstaan doordat steeds meer bedrijven/organisaties de waarde er van in gaan zien door de verschillende kansen die digital twins te bieden hebben. Zo kan een digital twin worden gebruikt voor het voorspellen van eventuele problemen in het functioneren van zijn fysieke twin. Hierdoor kan bij voorbaat het fysieke product of systeem tijdig aangepast worden waardoor het probleem niet zal plaatsvinden (Singh et al., 2021). Ook kunnen digital twins worden ingezet in de ontwerp fase van een product of systeem waardoor verschillende scenario's getest kunnen worden zodat het product/systeem zo veilig mogelijk kan worden gemaakt voordat het op de markt verschijnt (Visionaize, z.d.).

Niet alleen het veiliger kunnen maken van een product is een groot voordeel voor de design fase, ook kunnen digital twins de design en prototype fase van een product of systeem veel korter maken. Een digital twin staat je namelijk toe om verschillende scenario's te onderzoeken zonder een heel nieuw prototype te hoeven maken. Het wordt hierdoor sneller duidelijk welke aspecten juist en welke aspecten

(nog) niet juist zijn, en op basis van deze informatie kan er snel een beslissing worden gemaakt hoe het fysieke product of systeem er uit moet komen te zien (Singh et al., 2021).

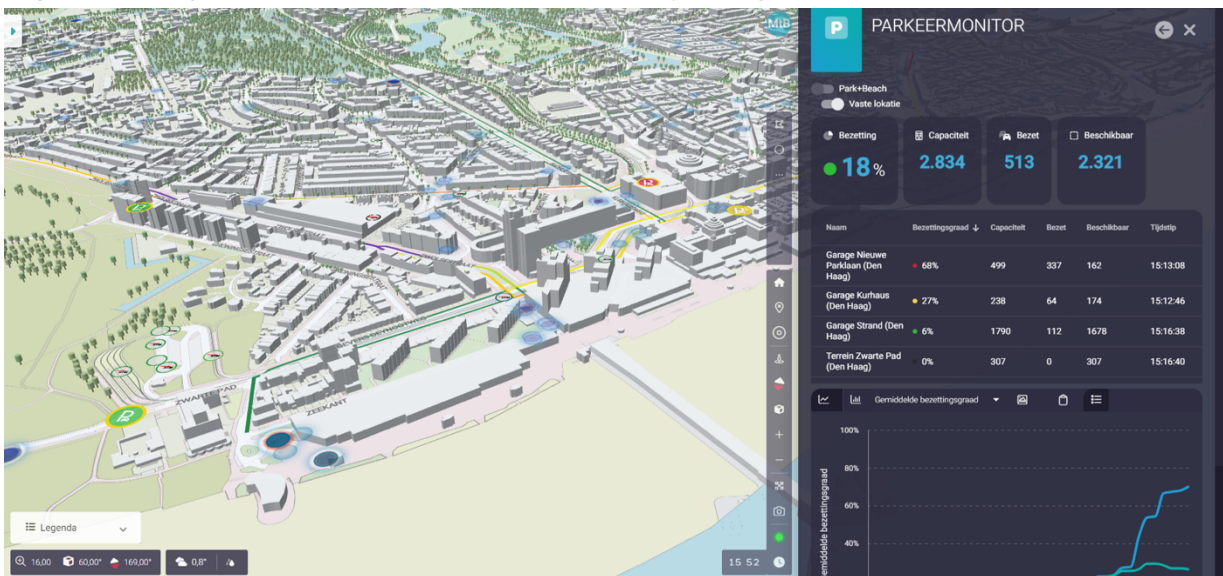
Niet alleen worden digital twins al volop ingezet in fabrieken, ook in steden wordt er al gebruik van gemaakt. In steden is het echter wel lastiger om digital twins in te zetten, doordat een stad veel complexer is dan een enkel systeem of product. De stad is geen automatisch systeem dat gemakkelijk te begrijpen en voorspellen is, maar eerder een levend systeem dat elke dag verandert door ontwikkelingen van economische en politieke activiteiten, sociale en culturele instellingen en fysieke constructies. Ondanks de complexiteit is het mogelijk om een digital twin van een stad te maken. Een virtuele replica van een stad brengt als voordeel met zich mee dat het makkelijker is om alle data die in een stad aanwezig zijn samen te brengen in één model waar gebruik wordt gemaakt van eenzelfde soort dataverzameling. Doordat alle informatie is opgeslagen in één model wordt het eenvoudiger om integraal stadsbeheer uit te oefenen. Ook kan het ontwikkelen van toekomstige plannen in een stad geoptimaliseerd worden doordat verschillende scenario's sneller getest kunnen worden om tot de meest kansrijke/impactvolle uitkomst te komen. Dit alles bevordert informatie deling en draagt bij aan de betrokkenheid van stakeholders bij beleidsontwerpen en stadsplanning (Shahat, Hyun & Yeom, 2021). Steden als Zürich, Helsinki en Wenen maken al gebruik van zo'n digitale replica (Lehtola et al., 2022). De digital twin van Zürich visualiseert de straten, ondergrondse voorzieningen en openbare gebouwen op een hoog detailniveau waardoor besluitvorming wordt ondersteund (Shahat, Hyun & Yeom, 2021). Ook in Nederland worden al digital twins van steden of gedeeltes daarvan gemaakt, zoals het Fieldlab Grootchalige Evenementen Nijmegen. Van de stad Nijmegen is er een digitale replica gemaakt om het organisatie- en veiligheidsproces rondom grote evenementen te optimaliseren. De fysieke wereld is in een 3D-evenemententerrein in kaart gebracht waarin alle relevante voorwaarden, eisen en kaartmateriaal uit meerdere systemen bij elkaar zijn gezet. Een evenementenorganisator kan zo heel efficiënt zijn evenemententerrein inrichten passend bij de nodige vergunningen. Een vergunningsverlener is zo in staat het evenementenplan veel makkelijker te toetsen aan alle voorwaarden (Wijs met Locatie, z.d.).

Een digital twin kan dus een hele stad representeren, maar het kan ook worden gestroomlijnd om specifieke problemen in de stad weer te geven. Een digital twin kan helpen met het in kaart brengen van problemen in een stad, die bijvoorbeeld door de sterke groei van de bevolking (urbanisering) worden veroorzaakt. Als straten van een stad in een virtuele twin worden gezet inclusief een verkeersmodel (gedrag van verkeersdeelnemers en interventies zoals stoplichten) bijvoorbeeld, kunnen verkeersstromingen worden gesimuleerd en kunnen oplossingen om verkeersopstoppingen te voorkomen getest worden (Alexanyan & Tan, 2021). Ook kunnen digital twins van grote waarde zijn voor het verminderen van luchtvervuiling in een stad. Een virtuele twin kan de impact van voorgestelde beleidsinterventies op het gebied van luchtkwaliteit voorspellen. Hierdoor kunnen dus meerdere beleidsinterventies getest worden en gekeken worden welke interventie het meeste effect heeft in het verminderen van luchtvervuiling. Op basis van deze informatie kan dan vervolgens de juiste beslissing worden genomen (Evans, Bannan & Topping, 2022).

Naast dat de inzet van digital twins in een stad bijdragen aan efficiëntere stadsplanning, kan het ook worden ingezet om de veiligheid van steden te vergroten. Neem bijvoorbeeld de Crowd Safety Manager van de Gemeente Den Haag. De Crowd Safety Manager is een digitale 3D kaart gebouwd door het bedrijf Argaleo waarop je kan zien hoe druk het ergens is en hoe druk het ergens gaat worden. Het laat dus het heden zien, maar kan ook voorspellingen doen. Dit is mogelijk doordat het systeem wordt gevoed door verschillende informatiebronnen. Ten eerste is er open data in opgenomen, oftewel basisregistraties zoals kaartgegevens en informatie over gebouwen en de omgeving. Ook zijn mobiliteitsdata een onderdeel van de Crowd Safety Manager. Denk hierbij aan data van het openbaar vervoer en

parkeerdeata. Zoals aangegeven in Figuur 2 is het mogelijk om de actuele bezettingsgraad van parkeergarages rondom Scheveningen te zien in de parkeermonitor. Hierdoor heb je van alle parkeergarages een actueel beeld hoe druk het is. Een bijkomende functie is dat je ook de bezettingsgraad van de parkeergarages in het verleden kan bekijken waardoor je op basis daarvan voorspellingen kan doen hoe druk het wordt. Naast de parkeermonitor die wordt weergegeven in Figuur 2 geeft de figuur ook weer hoe druk het op de weg is op dit moment. Als een weg groen kleurt is het rustig, als het rood kleurt is het druk. Een derde functie die wordt weergegeven op onderstaande afbeelding is de positie van deelmobiliteit, zoals deelscooters en -auto's. Dit geeft een indicatie of deze deelscooters en auto's mogelijk overlast veroorzaken (overvloed aan geparkeerde scooters op wandelroute) en indiceert het daarnaast hoe druk het is (weergegeven in de blauwe cirkels links onder).

Figuur 2. Weergave van mobiliteitsdata in de Crowd Safety Manager



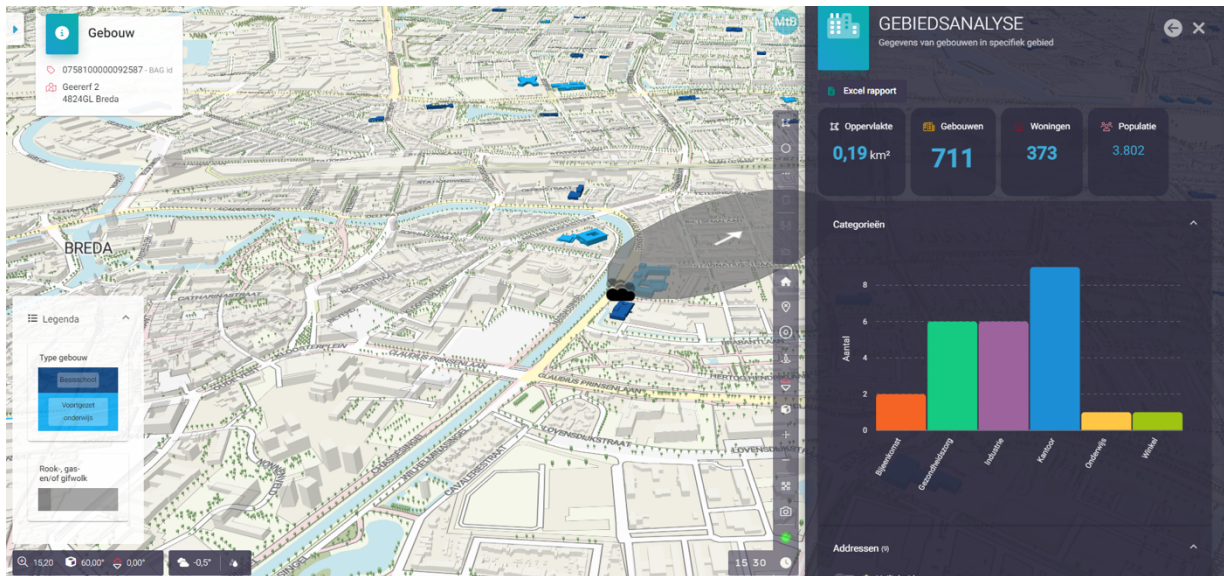
Bron: Argaleo

Naast de mobiliteitsgegevens gebruikt de Crowd Safety Managers ook bezoekersdata dat door GPS-data gemeten wordt. Deze GPS-data komen van anonieme locatiegegevens van app-gebruikers die hebben ingestemd om hun locatiedata te delen. Bezoekersdata worden verder ook mogelijk gemaakt door camera's die op de boulevard van Scheveningen hangen die mensen tellen. Deze data zijn volkomen privacy vriendelijk omdat het aantallen meet en niet videobeelden opslaat. Naast basisregistraties, mobiliteitsdata en bezoekersdata worden gegevens over het weer ook meegenomen in de Crowd Safety Manager. Deze gegevens zijn namelijk een goede indicator of het druk wordt op het strand, want hoe warmer, hoe groter de aantallen bezoekers waarschijnlijk zullen zijn. Deze digitale 3D kaarten zijn enorm relevant voor gemeentes en evenementorganisaties, maar ook voor de politie en hulpdiensten. Door te kunnen voorspellen hoe druk het ergens wordt kunnen partijen, zoals de politie, hier op voorhand op reageren waardoor overlast wordt voorkomen middels eenvoudiger en snellere anticipatie (Crowd Safety Manager, z.d.) (Beukers, 2022).

Naast de digitale replica van Scheveningen, is er ook een digital twin gemaakt van de zes zuidelijke veiligheidsregio's van Nederland. Een verscheidenheid aan aspecten is hierin opgenomen, zoals de straten, parken en gebouwen. Door al deze data te combineren en te analyseren ontstaat een real-time veiligheidsbeeld op basis waarvan risico's binnen de regio tijdig geïdentificeerd kunnen worden. De twin ondersteunt hierdoor de gemeenten binnen de veiligheidsregio's bij veiligheidsvraagstukken. Hierdoor kan er geoefend worden op wat de juiste manier is om op te treden tijdens incidenten en kunnen

plannen ter voorbereiding op het beheersen van crisissituaties gemaakt worden. Wanneer er bijvoorbeeld een brand uitbreekt in een gebouw kan de directe omgeving van dat gebouw snel geanalyseerd worden. Ook kan berekend worden hoe een rook-, gif of gaswolk zich zal verspreiden aan de hand van gegevens van de live windrichting en windkracht. Dit heeft een enorme waarde omdat het bijvoorbeeld kan laten zien of er gebouwen in de buurt zijn die kwetsbaar zijn, zoals scholen waar kinderen aanwezig zijn (zie Figuur 3). Met een muisklik is het mogelijk om een Excel rapport te downloaden dat inzicht geeft in welke gebouwen zich onder de rook-, gif of gaswolk bevinden.

Figuur 3. Weergave van werking digital twin om rook-, gif of gaswolk te analyseren

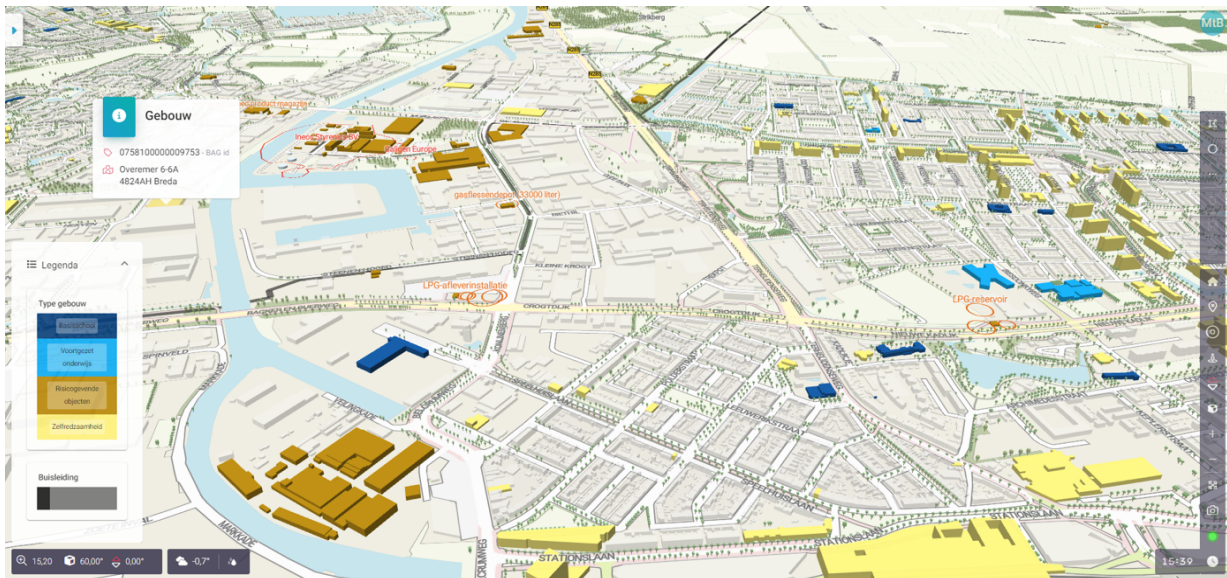


Bron: Argaleo

Legenda: Grijs cirkel: Rook-, gif of gaswolk, Donkerblauwe gebouwen: Basisscholen, Lichtblauwe gebouwen: Middelbare scholen

Ook biedt de digital twin de mogelijkheid om te zien welke panden als risicovol worden bestempeld doordat in die panden gevaarlijke stoffen worden opgeslagen. Bovendien geeft het ook gebouwen weer waar minder zelfredzame mensen in zitten, zoals verpleeghuizen, bejaardenwoningen en crèches (zie Figuur 4). Door al deze mogelijkheden om het gebied en de gebouwen snel te kunnen analyseren, en te kunnen zien waar kwetsbaarheden liggen, is het voor de hulpdiensten veel eenvoudiger om op te treden in zo'n crisissituatie.

Figuur 4. Weergave van risicogeven gebouwen en panden met minder zelfredzame mensen



Bron: Argaleo

Legenda: Bruine gebouwen: Panden met gevaarlijke stoffen, Gele gebouwen: Panden waar minder zelfredzame mensen in zitten

Deze digitale replica is ook enorm handig om evacuatieplannen op te stellen van burgers tijdens een crisis, zoals een explosie of overstroming, doordat het kan berekenen welke vluchtroutes het meest efficiënt zijn. De digital twin van de zes zuidelijke veiligheidsregio's stimuleert tevens de samenwerking tussen verschillende partijen, zoals hulpdiensten, gemeenten, maar ook bijvoorbeeld de Rijkswaterstaat (iBestuur, 2021). Ook andere initiatieven houden zich al bezig met het inzetten van digitale replica's om evacuatieplannen op te zetten voor mensen. Zo wordt het programma SimCrowds gebruikt om een virtuele replica te maken van een locatie. Het is vervolgens mogelijk om verschillend objecten in die locatie neer te zetten en poppetjes over het terrein te laten lopen zodat het duidelijk wordt wat de mogelijke evacuatie routes zijn (uCrowds, z.d.).

Een andere manier waarop digital twins worden ingezet om de veiligheid van mensen te vergroten is door de inzet ervan in rampenbeheer. Wanneer de complete infrastructuur van een stad virtueel in kaart wordt gebracht, zoals de watervoorziening, het elektriciteitsnet en alle wegen, is het mogelijk om met een digital twin hypothetische rampen te creëren en daarmee te kunnen testen waar de infrastructuur zwak is en welke gebouwen of ziekenhuizen bijvoorbeeld getroffen zullen worden. Hierdoor kunnen steden zich beter voorbereiden op noodsituaties. Daarnaast heeft het op deze manier in kaart brengen van de stad ook een enorme waarde voor betere coördinatie van grootschalige rampen dankzij beschikbare real-time informatie. Als een stad wordt getroffen door bijvoorbeeld een tsunami of een aardbeving, dan zijn er hulpdiensten nodig. Een digitale twin biedt een rijk beeld aan informatie, waardoor autoriteiten middelen op een gecoördineerde en efficiënte manier kunnen toewijzen. Een voorbeeld hiervan is Virtual Singapore wat een 3D-platform is waarin informatie van de fysieke infrastructuur is geïntegreerd met informatie over klimaat, demografie, bevolkingsbewegingen en andere factoren. Dit platform kan voor meerdere doeleinden gebruikt worden, maar de Singaporese overheid heeft het onder andere ingezet om noodsituaties te testen. In een wereld die steeds meer te maken krijgt met dreigingen die ontstaan door klimaatverandering, zoals de stijging van de zeespiegel, droogtes, energie tekorten en extreme weersomstandigheden, kan zo'n digital twin van enorme waarde zijn (White, 2018) (Nazir, z.d.).

Op het eerste oog lijkt het dus dat het concept digital twins alleen maar positief is doordat het zoveel kansen biedt. Niet alleen zorgen digital twins voor meer efficiëntie van een proces of product, ook kan het ervoor zorgen dat bij voorbaat problemen geanalyseerd kunnen worden waardoor er een actieplan kan worden opgezet. Zijn digital twins dus een technologie waar we volop op in moeten gaan zetten of liggen er nog dusdanig veel beperkingen of zelfs risico's op de loer dat we hierin nog terughoudend moeten zijn?

WELKE UITDAGINGEN EN RISICO'S BRENGEN DIGITAL TWINS MET ZICH MEE?

Het realiseren van digital twins biedt niet alleen maar kansen, het brengt ook een verscheidenheid aan uitdagingen en risico's met zich mee. De uitdagingen die ontstaan bij het ontwikkelen van digital twins hangen af van de schaal en complexiteit. Er zijn echter wel een aantal uitdagingen te identificeren die voor de gehele technologie gelden. Een van de grootse uitdagingen die geldt voor digital twins is de hoge kosten die verbonden zijn aan de ontwikkeling ervan. Het proces van het ontwikkelen van computermodellen en de simulatie van processen om een digital twin te maken is een arbeidsintensieve en tijdrovende klus. Ook de hardware en software die wordt ingebed in digital twins (sensoren die gegevens verzamelen om ten alle tijden over real-time data te beschikken) draagt bij aan extra kosten. Digital twins zijn dus een grote investering. Het is daarom essentieel dat een organisatie een kosten-baten analyse maakt voordat ze een digital twin ontwikkelen (Singh et al., 2021).

Een andere risico is dat er op dit moment nog een gebrek is aan standaarden en voorschriften binnen de digital twin branche. Het is erg complex om alle organisaties die betrokken zijn bij de ontwikkeling van digital twins te reguleren, doordat het niet eenvoudig is om alle verantwoordelijkheden voor gegevensbeheer van elke partij in elk stadium te identificeren. Ook vereist het delen van data een goede transparante regelgeving om gegevensbescherming te waarborgen. Het hebben van standaarden en voorschriften is dus cruciaal om het proces te rechtvaardigen en gegevensbeveiliging te behalen (Lei, Stoter & Biljecki, 2023). Op dit moment is er wel een framework dat wordt ontwikkeld in de productiesector, namelijk de ISO 23247, ook wel de Digital Twin Manufacturing Framework genoemd. Dit framework richt zich op de richtlijnen en methoden voor het ontwikkelen en implementeren van digital twins. Dit framework is een mooi begin om het gebrek van standaarden en voorschriften te overkomen (International Organization for Standardization, 2021).

Een bijkomend probleem bij de diversiteit van partijen die betrokken zijn bij de ontwikkeling en implementatie van digital twins is dat samenwerking vaak nog complex is, terwijl goede samenwerking juist heel belangrijk is voor de functionaliteit van een digital twin. Doordat er op dit moment nog een gebrek is aan een netwerk voor het delen van data binnen verschillende partijen, zoals tussen particuliere bedrijven, gemeenten en andere openbare instellingen, is er een beperkte hoeveelheid beschikbare data voorhanden, doordat gegevens bij een partij vast blijven zitten. Door samenwerking kunnen verschillende sectoren en hun belangen echter geïntegreerd worden en kunnen gegevensuitwisselingen geoptimaliseerd worden (Lei, Stoter & Biljecki, 2023).

Naast het gebrek aan duidelijke standaarden en betere samenwerking op het gebied van digital twins, zijn er ook zorgen op het gebied van privacy. Wanneer je een virtuele twin van een stad als voorbeeld neemt, als data wordt uitgewisseld tussen diverse stadssystemen en apparaten, is het mogelijk dat gevoelige data, zoals persoonsgegevens, worden gelekt of worden blootgesteld aan misbruik van

gegevens door derden. Op dit moment ontbreekt er een alomvattend beveiligings- en garantiemechanisme dat de gegevenshiërarchie kan definiëren (Lei, Stoter & Biljecki, 2023).

Wanneer je verder inzoomt op de inzet van digital twins in steden, valt het op dat ook daar uitdagingen aanwezig zijn. Steden zijn namelijk enorm complex en bevatten daarom veel data. Het ontwikkelen van een virtuele stad is hierdoor erg lastig omdat er een hoge mate van data-integratie nodig is. Om een virtuele stad te creëren worden meerdere systemen en technologieën gebruikt om real time data te verkrijgen. Stedelijke gegevens zijn daarnaast ook enorm complex door de grote hoeveelheid dynamische activiteiten in een stad. De stad wordt namelijk beschouwd als een levend organisme waarin sociale, ecologische en economische activiteiten in plaatsvinden. Door de heterogene aard van deze data en systemen is de integratie ervan in één model vaak lastig. (Shahat, Hyun & Yeom, 2021) (Lei, Stoter & Biljecki, 2023).

Naast de uitdagingen die virtuele steden met zich mee brengen, schuilt er ook een gevaar in het toenemend vertrouwen op digital twins. Technologieën boeken steeds meer vooruitgang en zorgen ervoor dat processen eenvoudiger te beheersen of beter begrepen worden door de mens. Mensen zijn dus vaak erg positief over het gebruik van digital twins. Hierin schuilt echter een gevaar, omdat hoe meer we op een digitaal systeem vertrouwen, hoe groter de kans is dat er een keer een fout zal optreden. Op dit moment gebruiken we digital twins niet alleen om efficiëntie te vergoten, maar ook om beslissingen te nemen op basis van de informatie van de digital twin. Wanneer het gedragsmodel of de algoritme niet juist is van een digital twin, kan op basis daarvan verkeerde beslissingen worden genomen.

De cybersecurity van digital twins is een ander risico. Wanneer niet de juiste cybersecuritymaatregelen zijn genomen wordt het risico vergroot door de toename van het aanvalsoppervlak dat inherent is aan de gewenste koppelingen met diverse databronnen. Ook kan een digital twin ervoor zorgen dat bepaalde systemen die voorheen niet toegankelijk waren van buitenaf, nu wel blootgelegd worden. Voorheen was de stroomvoorziening in een datacenter bijvoorbeeld alleen toegankelijk voor een technicus die fysiek voor een bedieningsterminal van de stroomvoorziening stond. Door middel van een digital twin van die infrastructuur zou een technicus op afstand de stroomvoorziening kunnen bewaken (dus een voordeel in efficiëntie en proceszekerheid). Dit betekent echter wel dat het voor hackers ook mogelijk zou zijn om toegang te krijgen tot de digital twin, waardoor de hacker ook toegang heeft tot de stroomvoorziening van dat data center (Korolov, 2022).

Dat we steeds vaker beslissingen nemen aan de hand van gegevens van digital twins kan uiteindelijk ook gevaren opleveren voor de fysieke veiligheid van mensen. Digital twins kunnen namelijk worden ingezet om de drukte in de stad te voorspellen, zoals het voorbeeld in Scheveningen. Wanneer het gedragsmodel of de algoritme niet juist is of als er foutieve data in een digital twin zit, kan het lijken alsof het niet druk wordt terwijl dit in werkelijkheid wel zo gaat zijn, zullen er niet bij voorbaat de juiste maatregelen worden genomen om die drukte te voorkomen of in goede banen te leiden. In het ergste geval zou dit kunnen lijden tot verdrukking en gewonden.

Ditzelfde geldt voor het creëren van evacuatieplannen van deelnemers aan evenementen aan de hand van digital twins. Wanneer evacuatieplannen niet kloppen door foutieve data of modellen zal een evacuatieplan niet juist zijn waardoor het volledig mis zou kunnen gaan tijdens een evacuatie (bijvoorbeeld nodig na een terroristische aanslag tijdens een evenement). Het is dus cruciaal dat digital twins goede informatie en proceskennis bevatten, maar ook dat de menselijke factor een belangrijk rol blijft spelen in het nemen van beslissingen. Menselijke ervaring en gezond verstand zullen voorlopig

gebruikt moeten blijven worden, zodat we het risico dat is verbonden aan foutieve beslissingen door een te groot vertrouwen in digital twins kunnen vermijden.

RONDJE LANGS DE VELDEN

Om te kunnen oriënteren hoe er op dit moment in de digital twin branche wordt gekeken naar de inzet van digital twins in het algemeen, maar ook specifiek naar de inzet ervan in steden, zijn er aantal interviews afgelegd met diverse partijen. Om een zo breed mogelijk beeld te schetsen zijn er onder andere een aantal bedrijven benaderd die digital twins maken. Hieronder vallen Info Support, Etteplan, Argaleo, Prespective en uCrowds. Ook twee kennisinstellingen zijn geïnterviewd (TNO en de Wageningen Universiteit). Als laatste is er ook gesproken met publieke partijen die gebruik maken van digital twins, de Nederlandse politie en de Gemeente Rotterdam.

Doormiddel van een thematische analyse worden overkoepelende thema's geïdentificeerd en de interviews teruggebracht tot hun kern. Het programma Atlas.ti is gebruikt om de interviews te analyseren. Voor het overgrote deel is er een deductieve benadering toegepast. Door het literatuuronderzoek wat voorafging werd er al een duidelijk beeld geschetst van wat digital twins zijn, waardoor de thema's al van tevoren opgezet konden worden. Tijdens het codeer proces zijn een aantal codes gevonden die niet van tevoren waren bedacht, waardoor er in dit onderzoek ook deels een inductieve benadering is toegepast. Tijdens het literatuuronderzoek is onderzocht wat de kansen en risico's zijn van digital twins. Hierdoor konden de eerste twee thema's snel worden opgezet, namelijk 'Effectiviteit', waaronder de codes 'Toename efficiëntie', 'Problemen voorkomen' en 'Beteres keuzes maken' vallen, en 'Risico's' waar de codes 'Toegankelijkheid van model' en 'Te veel vertrouwen' bij horen. Een ander belangrijk onderwerp gedurende het literatuuronderzoek en de interviews was wat er allemaal gedaan kon worden met digital twins in verschillende sectoren en wat verbeter punten waren voor toekomstige digital twins. Hieruit is het thema 'Toekomst' ontstaan, waaronder de codes 'Toename in sectoren' en 'Meer samenwerking' vallen. 'Meer samenwerking' is een voorbeeld van een code die past bij de inductieve benadering, aangezien die code is ontstaan gedurende het codeer proces, omdat bleek dat dit een vaak terugkomend onderwerp was. Als laatste is er gekozen voor het thema 'Digitale steden'. Dit is een van de meer brede thema's, het hele onderzoek draait om de inzet van digital twins in steden dus het is belangrijk om te kijken hoe de geïnterviewden tegen de inzet daarvan kijken. Daarom werd de code 'Inzet DT in steden' gevormd. Ook de code 'Inzet in veiligheidssector' behoort tot dit thema, omdat hieruit kan blijken of digital twins al veelal voor veiligheidsredenen worden ingezet en dus kunnen bijdragen aan het vergroten van stedelijke veiligheid. Voor een overzicht van coderingen zie Tabel 2.

Tabel 2. Codebook

Thema	Code	Operationalisering	Voorbeeld
Effectiviteit	1. <i>Toename efficiëntie</i>	<i>Code die beschrijft dat digital twins tot een toename van efficiëntie van een object/systeem kan lijden</i>	<i>'Dus wij kijken naar productie situaties hoe productiesituaties hoe</i>

wij die kunnen verbeteren.'

- | | | |
|-------------------------------|---|---|
| 2. <i>Problemen voorkomen</i> | <i>Code die beschrijft dat digital twins ervoor kunnen zorgen dat problemen in een object of systeem kunnen worden voorkomen</i> | <i>'En als je dat kan voorspellen zie je het ook eerder aan komen en kan je ook eerder ingrijpen.'</i> |
| 3. <i>Betere keuzes maken</i> | <i>Code die beschrijft dat aan de hand van digital twins het vaak makkelijker is om betere keuzes te maken doordat alle opties getest kunnen worden</i> | <i>'Doordat je allerlei inzichten kunt creëren, kun je beter weten wat de effecten kunnen zijn, en daardoor kan je ook beter gaan sturen en besluiten gaan nemen'</i> |

Risico's

- | | | |
|--------------------------------------|---|---|
| 4. <i>Toegankelijkheid van model</i> | <i>Code die beschrijft dat wanneer een model te makkelijk toegankelijk is voor buitenstaanders, dit gevaren kan opleveren voor de functionaliteiten ervan</i> | <i>'als ik in de digital twin ben en de digital twin is zodanig ingericht dat je dat ook besturen kan, dus dat ik vanuit de virtuele wereld kan ik de controle uitoefenen op de fysieke wereld. Omdat het centraal geregeld is, dus als je binnen bent, dan ben je in staat om ook centraal alles te kunnen besturen'</i> |
| 5. <i>Te veel vertrouwen</i> | <i>Code die beschrijft dat wanneer men te veel vertrouwd op digital twins dit gevaarlijk kan zijn doordat het model misschien wel niet altijd juist is</i> | <i>'Ik denk dat dat wel met name wel een beetje het gevaar is, dat we heel snel wel denken in termen van nou, we brengen heel veel data bij elkaar en nou dan</i> |
-

zal dit wel dit betekenen en zal dat wel dat aangeven. Maar daar moet je heel voorzichtig mee zijn.'

Toekomst	6. <i>Toename in sectoren</i>	<i>Code die laat zien dat er in verschillende sectoren een toename van digital twins zichtbaar is</i>	<i>'En daarnaast zullen we gewoon 3D kopieën van voorwerpen van gebouwen zien toenemen.'</i>
	7. <i>Meer samenwerking</i>	<i>Code die beschrijft dat er meer samenwerking op het gebied van digital twins nodig is</i>	<i>'Dus ze zijn drie keer geld aan het verbranden voor het realiseren van datzelfde.'</i>
Digitale steden	8. <i>Inzet in veiligheidssector</i>	<i>Code die de (beperkte) inzet van digital twins in de veiligheidssector beschrijft</i>	<i>'Maar het wordt nu niet op grote schaal ingezet. Dat ben ik absoluut met je eens en dat heeft denk ik wel zijn oorzaak waardoor dat komt.'</i>
	9. <i>Inzet in steden</i>	<i>Code die de inzet en de waarde van digital twins in steden beschrijft</i>	<i>'Dan is het heel fijn ook voor stads, architecten, analoge en verkeersspecialisten dat ze de beschikking hebben over een heel arsenaal aan historische data en gedrag van verkeer stromen in bijvoorbeeld de stad.'</i>

THEMATISCHE ANALYSE

Tijdens het analyseren van de interviews werd al snel duidelijk dat er een grote mate van uniformiteit is. De vier hoofdthema's zijn in alle interviews in grote getalen aanwezig. Zo wordt het belang en de 'Effectiviteit' van digital twins duidelijk besproken. Niet alleen wordt het vergroten van effectiviteit als een groot voordeel gezien, ook de mogelijkheid om voorspellingen te doen en daardoor problemen te

kunnen opsporen wordt als erg belangrijk beschouwd: “Dus eigenlijk met een kopie van wat er nu gebeurt in de werkelijkheid kan je ook dingen gaan voorspellen en met die voorspellingen kan je de werkelijkheid aanpassen (uCrowds, 24 januari, 2023).” “En als je dat kan voorspellen zie je het ook eerder aan komen en kan je ook eerder ingrijpen (Etteplan, 26 januari 2023).”

Ondanks de gedeelde mening over de grote waarde van digital twins werd er ook door iedereen erkend dat er ‘Risico’s’ aanwezig zijn. Het te veel vertrouwen op digital twins en dus keuzes maken die te veel gebaseerd zijn op een digitale replica kan gevaren opleveren wanneer het model niet juist is.

“Mensen zijn vaak te goedgelovig erin en dan gaan ze zeggen ja, maar de twin zegt mij dit. Maar ja jij bent wel de gate keeper om wel nog steeds soort van gezond verstand te hebben en het anker naar de werkelijkheid te zijn” (Prespective, 6 januari, 2023).

Dat een model niet juist is of foutieve data bevat kan worden veroorzaakt doordat de digital twin te makkelijk toegankelijk is waardoor buitenstaanders, misschien wel met kwade bedoelingen, het model kunnen binnentreden. Dit kan grote gevolgen hebben voor de functionaliteiten ervan.

“Als ik in de digital twin ben en de digital twin is zodanig ingericht dat je dat ook besturen kan, dus dat ik vanuit de virtuele wereld kan ik de controle uitoefenen op de fysieke wereld. Omdat het centraal geregeld is, dus als je binnen bent, dan ben je in staat om ook centraal alles te kunnen besturen” (Info Support, 30 december 2022).

Naast dat de thema’s ‘Effectiviteit’ en ‘Risico’s’ besproken werden gedurende de interviews, kwam ook de inzet in steden en de veiligheidssector aan bod. Elke geïnterviewde was het met elkaar eens dat op dit moment de inzet van digital twins in de veiligheidssector nog beperkt is: “Volgens mij worden ze echt bijna helemaal niet ingezet in de veiligheidssector. Ook in de überhaupt smart city, zijn er maar heel weinig echte twins. Wordt wel veel over gesproken. Er wordt heel weinig echt werkelijk toegepast” (TNO, 20 december 2022). Over waarom dit het geval is waren de meningen verdeeld. Sommigen kenden het toe aan de nog relatieve onbekendheid van digital twins, anderen aan veiligheidsredenen:

“En daarnaast is dat digital twin gebruik, is eigenlijk best nieuw. Het is een weg om vrij eenvoudig vanuit verschillende bronnen die informatie bij elkaar te gaan harken, en een digital twin samen te stellen. Maar de politie is niet een organisatie, zoals als je naar de ICT kijkt, die heel makkelijk verschillende bronnen vertrouwt. Er zit best wel wat veiligheidsvraagstukken om externe informatie, om data real time binnen te laden” (Politie, 30 december 2022).

Ondanks de op dit moment beperkte inzet in de veiligheidssector zag men wel de waarde van de inzet ervan in steden voor verschillende doeleinden: “Het is heel nuttig voor de inrichting van de fysieke omgeving, bijvoorbeeld wat gebeurt er als je op een bepaalde plek een gebouw neerzet of weghaalt”. (Universiteit Wageningen, 10 januari, 2023). Ook kijkend naar de ‘Toekomst’ voorspelt iedereen een toename van gebruik van digital twins: “Ik denk wel dat het meer en meer omarmd wordt. Vooral omdat iedereen ook snapt dat het bij elkaar brengen van data steeds makkelijker wordt” (Argaleo, 22 december 2022). Wanneer de vraag werd gesteld wat men ziet als een belangrijk verbeterpunt voor digital twins in de toekomst valt het op dat meerdere partijen voor meer samenwerking pleit. Op het moment is er geen landelijke aansturing en vindt iedereen steeds het wiel opnieuw uit, terwijl wanneer er betere samenwerking zou zijn, digital twins op een veel efficiëntere manier zouden kunnen worden ingezet. “Over dit soort initiatieven zeg ik altijd het samenwerken is misschien wel de basis om sneller tot resultaten te komen” (Info Support, 30 december 2022).”

“Die open data standaarden is wel essentieel om met elkaar uiteindelijk één digital twin te gaan krijgen. Dus dat baart mij nog wel eens zorgen van er is ook geen landelijke sturing hierop. We zien heel veel ontwikkelingen echt vanuit stedelijk perspectief. Maar landelijk zie ik dat eigenlijk niet” (Gemeente Rotterdam, 27 januari 2023).

“We moeten dus naar een eenduidige werkafspraken op data uitwisseling. Dus bijvoorbeeld gemeentes die maken allemaal hun eigen data pakketjes, hun eigen manier van aanleveren. En er is bijvoorbeeld geen landelijke dataset of in ieder geval een landelijke plek waar je op gemeente niveau, waar je je data van de openbare ruimte naartoe stuurt” (Politie, 30 december 2022).

“Wat dan belangrijk wordt voor digital twins in een rits van sectoren is eigenlijk natuurlijk wel standaardiseringsvormen. Dat er vanuit een interface model gekeken wordt naar hoe kunnen we dingen makkelijker overdraagbaar en integreerbaar maken, want anders krijgen we daar met ze alle hoofdpijn over” (Prespective, 6 januari, 2023).

Dus niet alleen op het gebied van meer samenwerking is er uniformiteit tussen de interviews, ook is er een gedeelde grote positiviteit over de mogelijkheden van digital twins. De bijkomende risico's zijn echter wel een zorg en het is dus belangrijk om die goed in acht te nemen. Kijkend naar de inzet van digital twins in steden en in de veiligheidssector ziet men daar ook grote potentie. Digital twins bieden vele, en steeds betere mogelijkheden, en deze kunnen goed van pas komen om te helpen met stadsplanning en veiligheid.

CONCLUSIE

In dit onderzoek stond de volgende onderzoeksvraag centraal: *Wat is de waarde van digital twins voor de veiligheid van steden?* Hiervoor is er een literatuuronderzoek uitgevoerd en hebben er interviews met partijen binnen de digital twin branche plaatsgevonden.

Om een goed beeld te krijgen wat digital twins precies zijn is er gekeken naar hoe binnen de literatuur digital twins worden beschreven en in wat voor sectoren ze ingezet kunnen worden. Hieruit bleek dat een digital twin een erg breed begrip is en op vele verschillende vlakken wordt ingezet. De grote diversiteit van sectoren en de grote inzet van digital twins kan worden verklaard door een breed scala aan kansen, zoals die ook gedurende het onderzoek naar boven kwamen. Zo bleek dat digital twins niet alleen voordelen met zich meebrengen voor virtuele replica's van producten, maar dat het ook goed ingezet kan worden voor diverse processen/systemen in steden.

Ondanks de kansen die digital twins bieden, werd het in de analyse duidelijk dat het gebruik van digital twins niet alleen maar rooskleurig is. Risico's op het gebied van privacy, data integratie en het te veel afhankelijk worden van -of vertrouwen op- digital twins kwam naar voren.

Het doel van de interviews was om te kijken hoe verschillende partijen tegen de inzet van digital twins aankeken. Een erg positief beeld werd er geschetst. Niet alleen zag iedereen de waarde van digital twins in, ook dacht men dat digital twins een grotere rol konden gaan spelen in steden. Een belangrijke limitatie is echter wel dat er maar negen partijen zijn geïnterviewd. Doordat er maar een beperkt aantal is geïnterviewd, kunnen er geen harde conclusies worden getrokken over hoe de gehele digital twin branche, inclusief niet markt partijen zoals de overheid, tegen de inzet van digital twins aankijkt. Tegelijkertijd is er wel een zekere balans tussen de partijen die werden geïnterviewd, inclusief bijvoorbeeld TNO en WUR, zodat de conclusies van deze studie wel degelijk waarde kunnen hebben. Voor een toekomstige studie zou een partij als VNG nog een mooie toevoeging zijn zodat er ook meer duidelijkheid kan worden geschept over hoe verschillende gemeentes tegen de inzet van digital twins aankijken.

Uit het kwalitatieve onderzoek kwam de verwachting dat digital twins een steeds grotere rol gaan spelen op verschillende vlakken. Ondanks een aantal risico's en uitdagingen die overkomen moeten worden, bieden digital twins grote voordelen waardoor waarschijnlijk steeds meer sectoren de waarde hiervan in zullen gaan zien. Verwacht wordt dat de inzet van digital twins in steden een van toegevoegde waarde zal zijn voor stadsplanning doeleinden en veiligheid. Niet alleen zorgen digital twins ervoor dat problemen in een stad goed in kaart kunnen worden gebracht waardoor stadsbestuur ondersteund kan worden, ook kunnen digital twins ondersteuning bieden in het vergroten van veiligheid binnen een stad zoals al wordt aangetoond door verschillende use cases (de digital twin van de zuidelijke zes veiligheidsregio's, Virtual Singapore, SimCrowds, Crowd Safety Manager).

Om tot verdere ontwikkeling te komen van digital twins is het zowel vanuit bedrijfsmatig oogpunt als vanuit efficiënte besteding resources wenselijk dat samenwerking in de digital twin branche wordt bevorderd. Niet alleen zal meer samenwerking tot het makkelijker delen van informatie tussen partijen leiden, ook kan het bijdragen aan het sneller veiliger worden van meerdere steden door hergebruik van modellen die veiligheid helpen voorspellen.

LITERATUURLIJST

- Alexanyan, K., Tan, S. (2021). *Utilizing digital twin technology to optimize city traffic*. Opgehaald van Columbia University Data science institute <https://datascience.columbia.edu/news/2021/utilizing-digital-twin-technology-to-optimize-city-traffic/>
- Altexsoft. (2021). *Digital Twins: Components, Use Cases, and Implementation Tips*. Opgehaald van Altexsoft <https://www.altexsoft.com/blog/digital-twins/>
- Beukers, W. (2022). *Digitale proef met 'Crowd Safety Manager' om beter te anticiperen op drukte in Scheveningen*. Opgehaald van <https://agendastad.nl/digitale-proef-met-crowd-safety-manager-om-beter-te-anticiperen-op-drukke-in-scheveningen/>
- Crowd Safety Manager. (z.d.). *Crowd Safety Manager*. Opgehaald van Crowd Safety Manager <https://crowdsafetymanager.nl/>
- Deng, T., Zhang, K., Shen, Z. J. M. (2021). A systematic review of a digital twin city: A new pattern of urban governance toward smart cities. *Journal of Management Science and Engineering*, 6(2), 125-1.
- Evans, J., Bannan, T., Topping, D. (2022). *Using big data to tackle the air pollution problem*. Opgehaald van The University of Manchester <https://blog.policy.manchester.ac.uk/posts/2022/05/using-big-data-to-tackle-the-air-pollution-problem/>
- Ferguson, S. (2020). *Apollo 13: The first digital twin*. Opgehaald van Siemens <https://blogs.sw.siemens.com/simcenter/apollo-13-the-first-digital-twin/>
- Fortune Business Insights. (z.d.). *Digital Twin Market Size*. Opgehaald van Fortune Business Insights <https://www.fortunebusinessinsights.com/digital-twin-market-106246>
- iBestuur. (2021). *Zuidelijke veiligheidsregio's ontwikkelen digital twin Zeeland*. Opgehaald van iBestuur <https://ibestuur.nl/nieuws/zuidelijke-veiligheidsregio-s-ontwikkelen-digital-twin-zeeland>
- IBM. (z.d.) *How does a digital twin work?* Opgehaald van IBM <https://www.ibm.com/topics/what-is-a-digital-twin>
- Impact Coalitie Safety & Security. (z.d.). *De coalitie voor veilige slimme steden*. Opgehaald van Impact Coalitie Safety & Security <https://veiligesmartercities.nl/de-impact-coalitie-safety-security-icss/>
- International Organization for Standardization. (2021). *Automation systems and integration – Digital twin framework for manufacturing – Part 1: Overview and general principles*. Opgehaald van International Organization for Standardization <https://www.iso.org/standard/75066.html>
- Korolov, M. (2022). *The cybersecurity challenges and opportunities of digital twins*. Opgehaald van CSO <https://www.csoonline.com/article/3682132/the-cybersecurity-challenges-and-opportunities-of-digital-twins.html>
- Lehtola, V. V., Koeva, M., Elberink, S. O., Raposo, P., Virtanen, J. P., Vahdatikhaki, F., & Borsci, S. (2022). Digital twin of a city: Review of technology serving city needs. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 102915.
- Lei, B., Janssen, P., Stoter, J., & Biljecki, F. (2023). Challenges of urban digital twins: A systematic review and a Delphi expert survey. *Automation in Construction*, 147, 104716.
- Nazir, S. (z.d.) *How can digital twins make cities more resilient?* Opgehaald van Huawei <https://www.huawei.com/us/media-center/transform/02/using-digital-twins-to-make-cities-more-resilient>
- Qi, Q., Tao, F., Hu, T., Anwer, N., Liu, A., Wei, Y., Wang, L., Nee, A. Y. C. (2021). Enabling technologies and tools for digital twin. *Journal of Manufacturing Systems*, 58, 3–21.

- Shahat, E., Hyun, C., Yeom, C. (2021). City digital twin potentials: A review and research agenda. *Sustainability*, 13(6), 3386.
- Singh, M., Fuenmayor, E., Hinchy, E. P., Qiao, Y., Murray, N., & Devine, D. (2021). Digital twin: Origin to future. *Applied System Innovation*, 4(2), 36.
- uCrowds. (z.d.). *SimCrowds*. Opgehaald van uCrowds <https://ucrowds.com/simcrowds/>
- Visionaize. (z.d.). *How does a digital twin help improve worker safety?* Opgehaald van Visionaize <https://visionaize.com/blog/how-does-a-digital-twin-help-improve-worker-safety/>
- VNG. (2022). *Trendanalyse #3 – Digital twins*. Opgehaald van VNG <https://vng.nl/artikelen/trendanalyse-3-digital-twins>
- White, T. (2018). *Newcastle's digital twin to help city plan for disasters*. Opgehaald van The Guardian <https://www.theguardian.com/cities/2018/dec/30/newcastles-digital-twin-to-help-city-plan-for-disasters>
- Wijs met Locatie. (z.d.). *Fieldlab Nijmegen*. Opgehaald van Wijs met Locatie <https://www.wijsmetlocatie.nl/inspiratie/fieldlab-nijmegen>