NAAR NETWERKEN VAN PREDICTIVE TWINS VAN DE GEBOUWDE OMGEVING

TNO innovation for life

Auteurs: Arjen Adriaanse, Wouter Borsboom, Rob Roef

Met medewerking van: Diego Allaix, Michel Böhms, Thomas van Dijk, Gerard Gaal, Bart Luiten, Johan Maljaars, Hendrik van Meerveld, Henk Miedema, Joep Paulissen, Willy Peelen, Rizal Sebastian

INHOUD

Inleiding 3

BIM als opstap naar predictive twins 5

Steeds meer meetdata 7

De predictive twin-visie van TNO 8

2 toepassingsgebieden:
1) Vervangings- en renovatieopgave civiele infrastructuur en circulair bouwen 10
2) Energietransitie gebouwde omgeving (gebouwen en wijken) 12

Voorwaarden voor de ontwikkeling en het gebruik van predictive twins 15

Conclusie 16

Eindnoten 17

INLEIDING

De bouw- en infrasector staat voor enorme uitdagingen. Zo staat de sector aan de vooravond van een grote vervangings- en renovatieopgave voor de bestaande civiele infrastructuur[1]. Ook maakt de sector een beweging richting circulair bouwen (doel: in 2050 circulair) en moet de bestaande gebouwde omgeving in 2050 energieneutraal zijn[2].

Een breed gedragen beeld is dat genoemde uitdagingen en bijbehorende aanpassingen aan de gebouwde omgeving alleen gerealiseerd kunnen worden door de intensieve inzet van geavanceerde digitale oplossingen[3]. Digitale oplossingen maken het mogelijk om de productiviteit van de sector te verhogen en veel sneller te innoveren.

Maar hoe gaan digitale oplossingen nu echt het verschil maken bij deze uitdagingen? TNO ziet een cruciale rol weggelegd voor voorspellende digital twins, ofwel **'predictive twins'**[4]. Dit zijn voorspellende digitale replica's van fysieke bouwwerken, zoals bruggen, tunnels, woningen en kantoren. Met deze twins kan het toekomstige gedrag en gebruik van bouwwerken en netwerken van bouwwerken worden voorspeld en beïnvloed. Deze stap naar predictive twins is cruciaal voor een proactieve besluitvorming over bouwwerken en netwerken van bouwwerken, gebaseerd op data, lerende voorspellende modellen en simulaties.

Volgens TNO dragen predictive twins op verschillende manieren bij aan de genoemde uitdagingen:

- Bij de *vervangings- en renovatieopgave* voor de bestaande civiele infrastructuur zullen predictive twins gebruikt gaan worden om de verwachte technische levensduur van civiele kunstwerken en netwerken van civiele kunstwerken op een efficiënte en kosteneffectieve manier te voorspellen. Hierbij wordt rekening gehouden met onder andere de veroudering van kunstwerken en toekomstige veranderende (verkeers)belastingen. Met deze inzichten kunnen onderhoud, renovatie en vervanging op bouwwerk- en netwerkniveau worden geoptimaliseerd.
- Bij de transitie naar een *circulaire bouwsector* kunnen predictive twins niet alleen fungeren als materialenpaspoort van bouwwerken, maar ook als belangrijk hulpmiddel om de technische levensduur en kwaliteit van bouwcomponenten te monitoren en te voorspellen. In de ontwerp- en realisatiefasen van nieuwe circulaire kunstwerken kunnen vraag en aanbod van circulaire bouwcomponenten en materialen daardoor beter op elkaar worden afgestemd. Het gedrag en de technische levensduur van circulaire bouwcomponenten en materialen in nieuwe circulaire bouwwerken kunnen zo ook beter worden aangetoond, wat een belangrijke impuls geeft aan circulair bouwen.

– In het kader van de *energietransitie* bestaande bouw zullen predictive twins worden ingezet om het energiegebruik op gebouw- en wijkniveau te optimaliseren. Door dit energiegebruik te monitoren, te voorspellen en te beïnvloeden is afstemming van energievraag en -aanbod op wijkniveau beter mogelijk, waardoor grote investeringen in verzwaring van het energienet zoveel mogelijk worden voorkomen. Tevens kan de effectiviteit van ontwikkelde renovatie-concepten in de praktijk worden geëvalueerd en kunnen de energieprestaties van nieuwe bouwwerken op basis van die ervaringen beter worden voorspeld en geoptimaliseerd.

In dit position paper wordt verder ingegaan op wat TNO onder predictive twins verstaat en waarom deze belangrijk zijn. Daarnaast gaan we in op de stappen die TNO zet bij de ontwikkeling van predictive twins en welke belangrijke voorwaarden TNO ziet om de brede inzet en het gebruik hiervan haalbaar en betaalbaar te maken.

“PREDICTIVE TWINS ZIJN ZELFLERENDE DIGITALE REPLICA'S WAARMEE TOEKOMSTIG GEDRAG EN GEBRUIK VAN BOUWWERKEN KAN WORDEN VOORSPELD EN BEÏNVLOED.”

BIM ALS OPSTAP NAAR PREDICTIVE TWINS

Een predictive twin lijkt op het eerste gezicht veel gelijkenissen te vertonen met Bouw Informatie Modellen (BIM). Deze kunnen worden gezien als een digitale representatie van de fysieke en functionele karakteristieken van een bouwwerk[5]. De ontwikkelingen die zich de laatste twintig jaar rond BIM hebben voltrokken in de bouw- en infrasector zijn inderdaad een belangrijke opstap naar het werken met predictive twins[6]. Welke, voor een predictive twin relevante, BIM-ontwikkelingen hebben de laatste decennia plaatsgevonden?

Sinds het begin van deze eeuw zien we steeds meer toepassingen van BIM, waarbij wordt gewerkt met 3D-modellen bestaande uit 3D-objecten en de daaraan verbonden informatie over die objecten[7]. Allerlei partijen – variërend van architecten- en ingenieursbureaus, bouwbedrijven en onderaannemers tot toeleveranciers, opdrachtgevers en beheerders – zijn actief bezig met de invoering en toepassing van BIM[8]. Daardoor is er inmiddels veel ervaring opgedaan met het werken en samenwerken met BIM. Dit geldt met name voor de ontwerpfase van bouwprojecten. In de realisatiefase van projecten is het gebruik van BIM beperkter en in de beheer- en onderhoudsfase is het gebruik nog summier te noemen[9]. Wel wordt er steeds meer gekeken naar het gebruik van BIM als gebouw- en materialenpaspoort voor het nemen van ontmanteling- en hergebruikbeslissingen[10].

Gebaseerd op: Bruggen Bouwen met ICT (Adriaanse 2014).[12]

Dat het gebruik van BIM in de beheer- en onderhoudsfase van bouwwerken achterloopt is niet vreemd. Immers, deze fase moet worden gevoed met BIM-gegevens uit de ontwerp- en realisatiefasen van bouwwerken. Veel bouwwerken zijn al jaren geleden gerealiseerd en van deze bouwwerken zijn vanuit de ontwerp- en realisatiefasen vaak geen BIM-gegevens beschikbaar.

De wijze waarop BIM wordt toegepast is ook in beweging. In eerste instantie draaide BIM vooral om het maken van 3D-modellen van bouwwerken. We zien tegenwoordig dat 3D-modellen en 3D-objecten minder centraal komen te staan in de BIM-ontwikkeling. Het gaat steeds vaker om het 'linken' van allerlei soorten data die tijdens de levenscyclus van bouwwerken in allerlei databronnen worden vastgelegd, waaronder 3D-modellen[11]. Denk hierbij ook aan eisen, specificaties, kostengetallen, omgevingsgegevens en beheer- en onderhoudsdata. Zo ontstaan er allerlei combinaties van gegevens die op een bepaald moment tijdens de levenscyclus van bouwwerken van waarde zijn voor partijen in de bouw- en infrasector.

Door deze ontwikkeling – het combineren van datasets die door meerdere partijen zijn vastgelegd – begint de term 'Bouw Informatie Model' wel verwarrend te worden[12]. Een Bouw Informatie Model wordt immers veelal geassocieerd met een 3D-model. Daarom wordt steeds vaker gesproken over 'Bouwwerk Informatie Management': het objectgericht vastleggen, delen en beheren van bouwwerkinformatie gedurende de hele levenscyclus van bouwwerken.

Door de invoering van BIM komt informatie over bouwwerken gedurende de gehele levenscyclus steeds beter op orde. Deze – voor de beheerder veelal 'statische' – informatie wordt steeds vaker gestructureerd vastgelegd en hergebruikt.

Hoewel deze ontwikkeling een zeer positief effect heeft op ontwerp- en realisatiefasen binnen de sector[13], heeft toepassing in andere fasen ook haar beperkingen. Het is voor bijvoorbeeld asseteigenaren en -managers goed om te weten welke gegevens in het verleden zijn vastgelegd over een bouwwerk en het is belangrijk dat die gegevens goed kunnen worden ontsloten. Maar wat is de actuele en verwachte toestand van een bouwwerk (zoals een brug of een gebouw) en hoe wordt dit bouwwerk nu en naar verwachting in de toekomst gebruikt? Daar geeft de geschetste BIM-ontwikkeling slechts beperkt antwoord op.

“BIM GEEFT SLECHTS EEN BEPERKT BEELD VAN HET ACTUELE EN VERWACHTE GEDRAG EN GEBRUIK VAN EEN BOUWWERK.”

STEEDS MEER MEETDATA

De laatste jaren komt er steeds meer 'dynamische' meetdata beschikbaar, zowel over de toestand als het gebruik van bouwwerken. Dit is een belangrijke toevoeging op de eerdergenoemde meer 'statische data', waardoor de actuele toestand en het actuele gebruik van bouwwerken beter kunnen worden beoordeeld.

Zo komt in het kader van *bruggen* steeds vaker dynamische meetdata beschikbaar over bijvoorbeeld verkeersbelastingen, deformaties en scheurvorming door degradatie. Deze data kan worden gecombineerd met andere beschikbare – meer statische – gegevens, zoals de opbouw van de constructie, afmetingen van componenten en gebruikte materiaalsoorten; gegevens die bij constructies die de laatste jaren zijn gerealiseerd vaak via BIM zijn vastgelegd. Voor *gebouwen* geldt hetzelfde: via gebouwbeheerssystemen, energiemeters en aanvullende sensornetwerken verkrijgt men steeds vaker dynamische meetdata over onder meer energieprestaties van installaties, gebruikersgedrag en weercondities. En ook deze informatie kan worden gecombineerd met BIM-gegevens over onder andere het aantal ruimtes en de inhoud van ruimtes.

Genoemde statische en dynamische data zijn in steeds meer situaties beschikbaar en van nut om de toestand en het gebruik van bouwwerken te analyseren. Echter, in veelvoorkomende situaties is de beschikbaarheid van deze data nog steeds onvoldoende. Een asseteigenaar of assetmanager wil namelijk voorspellingen kunnen doen over de toekomstige toestand en het toekomstig gebruik van de bouwwerken waarvoor men verantwoordelijk is. Hoe lang kan een bouwwerk of een onderdeel van een bouwwerk bijvoorbeeld nog mee? Hoe zal het bouwwerk naar verwachting in de toekomst gebruikt gaan worden en wat zijn daarvan de gevolgen? En hoe kan men het specifieke bouwwerk en een netwerk van bouwwerken op basis van die inzichten optimaliseren?

Er is behoefte aan een beslissingsondersteunend systeem waarmee het gebruik en de toestand van bouwwerken en netwerken van bouwwerken kunnen worden voorspeld. Daarmee kunnen beslissingen over het gebruik van bouwwerken, maar ook over onderhoud, renovatie en vervanging van bouwwerken worden geoptimaliseerd.

Dit brengt ons bij de cruciale digitaliseringstap die de bouw- en infrasector volgens TNO moet zetten: *de stap naar netwerken van predictive twins van de gebouwde omgeving*.

DE PREDICTIVE TWIN-VISIE VAN TNO

TNO ziet een cruciale rol voor predictive twins van bouwwerken bij het voorspellen en beïnvloeden van toekomstig gedrag en gebruik van bouwwerken en netwerken van bouwwerken. Maar wat bedoelen we eigenlijk met zo'n predictive twin?

Een predictive twin is een voorspellende digitale replica van een fysiek bouwwerk, zoals een gebouw of een brug. Samen met de predictive twins van andere bouwwerken kan een netwerk van predictive twins ontstaan, bijvoorbeeld van een wijk of van de bruggen in een verkeersnetwerk. Een predictive twin staat in verbinding met zijn fysieke twin, waardoor deze de fysieke twin kan volgen, beoordelen en tot slot kan leren op basis van de informatie die wordt ontvangen. De predictive twin kan worden ingezet om tijdens de levenscyclus van bouwwerken allerlei simulaties en voorspellingen te doen ten aanzien van het toekomstige gedrag en gebruik van de fysieke twin. Met behulp van die inzichten kan de predictive twin beslissingen voorstellen of kan de predictive twin zelfs zelf beslissen en zelf handelingen uitvoeren ten aanzien van de fysieke twin[14].

Als we wat specifieker kijken naar predictive twins zien we dat deze bestaan uit afzonderlijke componenten waar TNO al jarenlang actief aan werkt. Componenten die we in een predictive twin willen integreren[15]:

Informatie & meetdata Bij dit component gaat het om de 'ogen en oren' van predictive twins. Een predictive twin wordt gevoed met zowel statische als dynamische gegevens. Deze gegevens zijn vaak van verschillende partijen afkomstig en hebben een wisselend kwaliteitsniveau.
Het managen van grote datasets en het structureren en combineren van datasets van deze partijen in predictive twins is een omvangrijke uitdaging. Nationale en internationale standaarden voor informatievastlegging en -deling zijn nodig om datasets van partijen die tijdens de levenscyclus van bouwwerken betrokken zijn te kunnen combineren in een predictive twin. In het kader van BIM (met name in de betekenis van Bouwwerk Informatie Management) werd deze noodzaak al sterk gevoeld. Daarom draagt TNO al jaren bij aan de ontwikkeling van nationale en internationale standaarden voor informatievastlegging en -deling in de sector. Doordat een predictive twin zowel BIM-gegevens als dynamische meetdata kan verbinden, speelt de noodzaak voor genoemde standaarden hier nog sterker.

Modellen & leren Dit betreft de intelligentie van een predictive twin. Voorspellende modellen zijn onderdeel van een predictive twin en deze modellen leren op basis van de – al dan niet vertrouwelijke – data waarmee de predictive twin wordt gevoed. TNO werkt al jaren actief aan de ontwikkeling van theoretische, fysische modellen en probabilistische modellen waarmee de praktijk wordt voorspeld en combineert die modellen steeds meer met data en machinelearning-toepassingen om de nauwkeurigheid van voorspellende modellen te verbeteren, de rekentijd van modellen te verkorten en modellen te laten leren van specifieke situaties[16].

Simuleren & beslissen Met dit component kunnen toekomstige situaties worden gesimuleerd op het niveau van bouwwerken en netwerken van bouwwerken, waardoor voorspellingen kunnen worden gedaan en ook mogelijke 'what-if'-scenario's kunnen worden beoordeeld. TNO houdt zich bezig met vragen als: wat zijn de gevolgen van nieuwe innovatieve vervoerssystemen, zoals 'truck platooning' (waarbij vrachtwagens in 'treintjes' over het wegennet gaan rijden) voor de verkeersbelasting en daarmee voor de technische levensduur van bruggen?
Welke effecten heeft het veranderende gedrag van bewoners (bijvoorbeeld door COVID-19) op het energieverbruik van woningen en wijken? En: hoe kunnen we netverzwaring beperken bij de verduurzaming van gebouwen? Predictive twins kunnen niet alleen inzichten leveren, maar in sommige situaties ook handelingen uitvoeren, zoals het veranderen van de starttijden van koeling en verwarming van gebouwen.

TNO zet in verschillende domeinen stappen met de ontwikkeling van predictive twins en netwerken van predictive twins. In het vervolg van de position paper worden twee voorbeelden toegelicht. Het eerste voorbeeld gaat in op het gebruik van predictive twins om de verwachte verkeersbelasting op de Nederlandse weginfrastructuur en de (daarmee samenhangende) technische levensduur van bruggen en netwerken van bruggen te voorspellen. Het tweede voorbeeld behandelt het gebruik van predictive twins om energieprestaties van gebouwen te voorspellen en energievraag en -aanbod op gebouw- en wijkniveau af te stemmen. In beide voorbeelden wordt ingegaan op de stappen die TNO nu zet, het toekomstbeeld dat hiermee wordt nagestreefd en de impact die daarmee wordt gerealiseerd.

“EEN PREDICTIVE TWIN INTEGREERT DRIE COMPONENTEN WAAR TNO AL JARENLANG ACTIEF AAN WERKT: INFORMATIE & MEETDATA, VOORSPELLENDE MODELLEN EN SIMULATIES.”

VERVANGINGS- EN RENOVATIEOPGAVE CIVIELE INFRASTRUCTUUR EN CIRCULAIR BOUWEN

Situatie:
De infrasector krijgt de komende jaren te maken met een enorme vervangings- en renovatie-opgave voor de civiele infrastructuur. Een belangrijke uitdaging ligt bij bruggen en viaducten. Nederland telt in totaal ongeveer 53.000 bruggen en viaducten[17]. Veel van deze civiele kunstwerken zijn na de Tweede Wereldoorlog gerealiseerd – met een bouwpiek in de jaren 60 en 70 – en lopen de komende tientallen jaren tegen het einde van hun ontwerplevensduur.

Het renoveren en vervangen van die kunstwerken kost vele miljarden euro's en levert daarnaast veel verkeershinder op. Er zijn echter vaak nog reserves in het draagvermogen aanwezig, waardoor de werkelijke technische levensduur langer kan zijn dan de ontwerplevensduur. Wat is dan het juiste moment voor onderhoud, renovatie of vervanging? Te vroeg renoveren of vervangen is kostbaar en niet duurzaam, maar te laat in actie komen is vanzelfsprekend ook niet gewenst. En als inderdaad wordt gekozen voor vervangen of renoveren: kunnen componenten en materialen dan worden hergebruikt in nieuwe circulaire constructies?

Een belangrijke vraag voor partijen in de infrasector – zoals asseteigenaren en assetmanagers – is dan ook: hoe neem ik optimale beslissingen over onderhoud, renovatie en vervanging van civiele kunstwerken terwijl ik rekening houd met afwegingscriteria als constructieve veiligheid, verkeershinder, duurzaamheid (inclusief circulariteit) en kosten?

De huidige methoden voor de beoordeling van bruggen en viaducten op basis van inspecties, 'quick scan'-berekeningen en uitgebreide beoordelingen met metingen en eindige elementenmodellen leveren slechts globale inzichten in de technische levensduur of zijn zeer arbeidsintensief en kostbaar om uit te voeren (en daardoor niet breed toepasbaar). Er is behoefte aan nieuwe methoden die op een kosteneffectieve wijze de benodigde inzichten bieden in de technische levensduur van bruggen en viaducten.

Predictive twins van de weginfrastructuur en (netwerken van) bruggen en viaducten:
TNO zet in op het creëren van predictive twins om met beperkte inspanningen en kosten de benodigde voorspellingen te doen over de technische levensduur van bruggen en viaducten. Daartoe worden twee typen van zelflerende predictive twins ontwikkeld: (1) een predictive twin van een wegennet die de verwachte verkeersbelasting op elk punt van het wegennet voorspelt op basis van beschikbare gegevens over verkeersintensiteiten en gemeten belastingen en (2) predictive twins van bruggen en viaducten die de technische levensduur van deze constructies voorspellen. Hierbij zijn verkeersbelastingen op een wegennet ook weer van invloed op de technische levensduur van bruggen en viaducten.

Deze twins geven antwoord op vragen als: 'Welke verkeersbelastingen worden waar in het verkeersnetwerk verwacht, bijvoorbeeld op specifieke bruggen?', 'Welke verwachte technische levensduur heeft een brug en hebben specifieke onderdelen van een brug nog?' en 'Hoe kan ik vervanging en renovatie voor een netwerk van bruggen en viaducten het beste optimaliseren, rekening houdend met criteria als constructieve veiligheid en verkeershinder?'.

Ontwikkeling van een predictive twin van een brug op schaalniveau. De twin leert van de informatie die "real time" wordt verkregen van de belasting en snelheid van het voertuig. Ontwikkeld in samenwerking met het Duitse kennisinstituut BAM.

TNO heeft in 2019 en 2020 verschillende bouwblokken van predictive twins ontwikkeld en vertaald naar cases als de IJsselbrug en de Merwedebrug. Ook is samen met het Duitse kennisinstituut BAM (Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung) een predictive twin ontwikkeld van een brug op schaalniveau.

TNO richt zich in 2021 op het testen en demonstreren van beide typen predictive twins in praktijksituaties, waaronder fieldlabs van specifieke bruggen. De predictive twin-technologie voor verkeersbelastingen (type 1) zal dan zover zijn dat deze in samenwerking met Rijkswaterstaat, provincies en gemeenten doorontwikkeld kan worden voor integratie binnen hun systemen voor beheer en onderhoud van wegen, bruggen en viaducten. Voor de predictive twins van bruggen en viaducten (type 2) wil TNO in 2022 een toolbox hebben gerealiseerd waarmee predictive twins efficiënt kunnen worden gecreëerd. Deze toolbox bevat dan methoden en technieken voor de ontwikkeling van de verschillende componenten van een predictive twin:

- **Informatie & meetdata:** methoden om met een zo beperkt mogelijk aantal metingen de benodigde actuele data te verzamelen over bruggen en viaducten. Deze methoden richten zich ook op het combineren van meetdata met andere beschikbare informatie (zoals BIM-informatie die bruikbaar is in een predictive twin).
- **Modellen & leren:** modellen die de krachten in constructies voorspellen en aangeven hoe schade ontstaat en verloopt in die constructies. Deze modellen leren op basis van data die over de fysieke twin wordt ontvangen. Een belangrijke stap waar nu aan wordt gewerkt is om in eerste instantie ‘eenvoudige’ voorspellende modellen van civiele kunstwerken te ontwikkelen. Die modellen leren vervolgens in specifieke praktijksituaties op basis van informatie die van de fysieke twin wordt ontvangen, bijvoorbeeld vanuit sensoren. De overtuiging is dat de voorspellingen van die modellen uiteindelijk even accuraat zullen zijn als de voorspellingen die anders via veel complexere en kostbaardere modellen waren verkregen.
- **Simuleren & beslissen:** methoden om efficiënt simulaties en scenarioanalyses uit te kunnen voeren. Wat is bijvoorbeeld het effect van nieuwe transportinnovaties (zoals ‘truck platooning’) op de technische levensduur van bruggen?

Impact:
Netwerken van predictive twins van bruggen en viaducten zijn cruciaal bij de vervangings- en renovatieopgave civiele infrastructuur, want zij:
- Maken het mogelijk om onderhoud, renovatie en vervanging van bruggen en viaducten beter te optimaliseren. Dit resulteert in:
  - Minder incidenten met bestaande civiele kunstwerken door betere voorspellingen;
  - Kostenreductie door later en meer geoptimaliseerd vervangen en renoveren;
  - Reductie van verkeershinder door optimalisatie in een netwerk van predictive twins.
- Maken het mogelijk om betere integrale afwegingen te maken over de vervanging en renovatie van bruggen en viaducten op basis van criteria als constructieve veiligheid, verkeershinder, duurzaamheid en kosten.
- Kunnen ontwerpers van nieuwe (circulaire) bouwkunstwerken inzichten leveren in de beschikbaarheid, de kwaliteit en de technische levensduur van componenten in bestaande kunstwerken.

ENERGIETRANSITIE GEBOUWDE OMGEVING (GEBOUWEN EN WIJKEN)

Situatie:
In 2050 moet de complete gebouwde omgeving energieneutraal zijn. Bovendien moeten voor dat jaar alle woningen en utiliteitsgebouwen ‘van het gas af’. Vanwege verschillende redenen is het kunnen voorspellen van energieprestaties van gebouwen en het afstemmen van energievraag en -aanbod op gebouw- en wijkniveau van groot belang:

Ten eerste bestaat er grote behoefte aan inzicht in de effectiviteit van nieuwe energie- en renovatieconcepten voor gebouwen. Het behalen van hoge energieprestaties van gebouwen is sterk afhankelijk van de interacties tussen het gebouw, de gebruiker, de gebouwinstallatie en de omgeving. Beoogde energieprestaties worden vaak niet behaald doordat gebouwen en installaties anders worden gebruikt dan bedacht tijdens het ontwerp of door gebrek aan continue sturing van installaties. Aangezien tegenvallende energieprestaties een ‘showstopper’ zijn voor de energietransitie is het van wezenlijk belang om de beoogde gebouwprestaties te kunnen garanderen op het gebied van energie, maar ook met betrekking tot comfort en binnenluchtkwaliteit.

Ten tweede leidt de energietransitie zowel tot vergrote pieken in de energievraag (door bijvoorbeeld de toepassing van elektrische warmtepompen in gebouwen en de toename van laadpalen voor elektrisch rijden) als tot grotere pieken in het decentrale energieaanbod (bijvoorbeeld door zonnepanelen). Dit gaat resulteren in piekbelastingen in energievraag en -aanbod en daarmee in knelpunten op energienetwerkniveau. Er is behoefte aan oplossingen die het energiegebruik voorspellen en optimaliseren op gebouwniveau, maar – belangrijker

nog – ook energievraag en -aanbod op wijkniveau kunnen balanceren. Dit kan bijvoorbeeld door de warmtepompen voor verwarming en warmtapwater van gebouwen eerder of later te laten starten en zo de piekvraag naar energie te verkleinen[18]. Door verlaging van pieken in energievraag en -aanbod kunnen kostbare investeringen in verzwaring van het energienet zoveel mogelijk worden voorkomen.

Predictive twins van gebouwen en wijken:
TNO zet in op het creëren van predictive twins van gebouwen en wijken. Hiermee wordt het energiegebruik op beide niveaus gemonitord, voorspeld en beïnvloed, waardoor het energiegebruik kan worden geoptimaliseerd en vraag en aanbod van energie beter op elkaar kunnen worden afgestemd.

Van Bouw Informatie Model (BIM) naar lerende voorspellende modellen.

TNO wil voor 2022 een basismethodiek hebben ontwikkeld voor het integraal meten en voorspellen van energieprestaties op gebouw- en wijkniveau met netwerken van predictive twins.
De basismethodiek richt zich op de verschillende componenten van predictive twins die in de hoofdtekst zijn toegelicht:

– **Informatie & meetdata:** het ontwikkelen van methoden om met een beperkte hoeveelheid metingen relevante input voor een predictive twin te verzamelen en om maximaal gebruik te maken van vastgelegde statische informatie (zoals BIM). In ieder geval is energiedata

benodigd. Deze data kan worden verrijkt met data van tussenmeters, thermostaten, installaties en slimme sensornetwerken.
- **Modellen & leren:** TNO ontwikkelt voorspellende modellen op basis van fysica en machinelearning-technieken. Bekende relaties (zoals warmteoverdracht bij isolatie van wanden en gevels) worden beschreven in fysische modellen. Waar mechanismen onbekend zijn, met name bij menselijk gedrag, worden modellen ontwikkeld op basis van dynamische data, kennis van mens-techniek interactie en machinelearning-technieken. Om de privacy van gebruikers van gebouwen te borgen verlaat de dynamische meetdata het gebouw niet. Modellen worden lokaal binnen het gebouw getraind. Alleen de modelparameters die nodig zijn om analyses op wijkniveau uit te kunnen voeren verlaten het gebouw.
- **Simuleren & beslissen:** het ontwikkelen van methoden om (al dan niet geautomatiseerd) beslissingen te nemen over fysieke twins en 'what-if'-analyses uit te voeren over toekomstige prestaties op gebouw- en wijkniveau. Het uitvoeren van simulaties kan plaatsvinden in de gebruiksfase, maar ook al in de ontwerpfase. Zo ontwikkelt TNO samen met partners methoden om in de ontwerpfase van woningbouwprojecten het energiegebruik en de kwaliteit van het binnenmilieu te voorspellen en te simuleren en deze vervolgens in de gebruiksfase te monitoren en te analyseren[19]. Tevens worden methodes ontwikkeld om de instellingen van installaties en het gebruik van energie te beïnvloeden, bijvoorbeeld door het inplannen van het opladen van elektrische auto's en het gebruik van warmtepompen.

De afgelopen jaren zijn al de nodige deelstappen gezet richting de te ontwikkelen basismethodiek. Zo zijn in 2019 voor een aantal woningen predictive twins ontwikkeld die de werkelijke energieprestaties konden benaderen. Het betrof nieuwbouw en gerenoveerde woningen. Hierbij zijn voor een aantal zeer energiezuinige woningen van BAM en Van Wijnen gebouwmodellen ontwikkeld die zijn gekalibreerd met energie- en installatiedata. Bovendien is met Strukton een living lab opgezet waaraan een predictive twin is gekoppeld. Hierdoor was het mogelijk om betere voorspellingen te doen van zowel het energiegebruik als binnentemperaturen. Op basis van deze inzichten kunnen gebouwconcepten worden verbeterd. Het gedrag van bewoners was tot dan toe slechts beperkt meegenomen in voorspellende modellen, maar bleek wel heel bepalend te zijn voor de juiste voorspellingen.

In 2020 zijn voorspellende modellen ontwikkeld voor verschillende gebouwtypen en is uitgebreider gebruik gemaakt van machinelearning in de voorspellende modellen om onder andere beter rekening te kunnen houden met gebruikersgedrag en de privacy en security van gebouwdata. Ook is onderzocht en getoetst in praktijksituaties hoe BIM-informatie die beschikbaar komt gedurende de levenscyclus van bouwwerken gebruikt kan worden om tot betere voorspellingen te komen. Daarnaast is onderzocht hoe de stap kan worden gezet naar schaalbare predictive twins om energieprestatie op gebouwniveau te kunnen voorspellen en daarmee ook energievraag en -aanbod op wijkniveau te balanceren.

Impact:
Netwerken van predictive twins zijn cruciaal bij het realiseren van de energietransitie gebouwde omgeving, want zij:
- Leveren inzicht in de effectiviteit van energie- en renovatieconcepten op het gebied van energie, comfort en binnenluchtkwaliteit.
- Voorspellen de gebouwprestaties op het gebied van energie, comfort en binnenluchtkwaliteit. Het beter voorspellen van de energieprestaties is essentieel bij prestatiecontracten.
- Zijn een belangrijk middel bij het afstemmen van energievraag en -aanbod op gebouw- en wijkniveau.

Uit deze voorbeelden blijkt dat predictive twins in belangrijke mate bijdragen aan het data-gebaseerd optimaliseren van beslissingen over civiele infrastructuur en gebouwen. Dit heeft een grote toegevoegde waarde bij de uitdagingen waar de bouw- en infrasector voor staat gesteld, zoals de vervangings- en renovatieopgave voor de bestaande civiele infrastructuur, de transitie naar circulair bouwen en het energieneutraal maken van de bestaande gebouwde omgeving.

VOORWAARDEN VOOR DE ONTWIKKELING EN HET GEBRUIK VAN PREDICTIVE TWINS

TNO doet op dit moment in verschillende domeinen ervaringen op met de ontwikkeling en het gebruik van (onderdelen van) predictive twins. Op basis van die ervaringen zien we een vijftal belangrijke uitdagingen:

1. EFFICIËNT (HER)BRUIKBARE EN LERENDE PREDICTIVE TWIN-OPLOSSINGEN

Om predictive twins in de praktijk bruikbaar te maken is het van belang dat deze op een efficiënte wijze gecreëerd worden en tegelijkertijd voldoende betrouwbare voorspellingen leveren. Wanneer het erg kostbaar is om een predictive twin te realiseren houdt dit de brede toepassing van deze technologie tegen. TNO werkt daarom actief aan het ontwikkelen van methoden, technieken en toolsets om predictive twins efficiënt te creëren en de bruikbaarheid te toetsen in fieldlabs. Zo werkt TNO nu aan een methode waarmee in korte tijd een predictive twin van een grote brug wordt ontwikkeld. Deze twin leert vervolgens op basis van monitoringsdata. De overtuiging is dat de ontwikkeltijd voor de benodigde voorspellende modellen zo kan worden teruggebracht van één jaar naar één week. Dit zou een grote doorbraak zijn voor de brede toepasbaarheid van predictive twins van bruggen.

2. 'FIT FOR PURPOSE'

Hoewel predictive twins belangrijke toegevoegde waarde gaan leveren in de bouw- en infrasector dreigt ook het gevaar dat technologische oplossingen te uitgebreid zijn voor de behoeften in specifieke situaties. We stellen onszelf constant vragen als: heeft elk type bouwwerk dezelfde geavanceerde predictive twin nodig, met bijbehorende nauwkeurige voorspellende modellen en gedetailleerde datasets? Het is dan ook van belang dat er duidelijkheid wordt gecreëerd over welke vormen van predictive twins er zijn en in welke situaties in de sector deze nuttig en kosteneffectief zijn.

3. VERBINDEN VAN KENNISDOMEINEN

Predictive twins kunnen alleen ontwikkeld worden wanneer experts vanuit verschillende disciplines samenwerken. Domein- en vakkennis van experts op het gebied van bijvoorbeeld civiele techniek en bouwfysica dienen te worden gebundeld met kennis van experts op het gebied van informatiemodellering, monitoringssystemen, mens-techniek interactie en machine-learning. Alleen door experts vanuit die kennisdomeinen gericht samen te laten werken kunnen de benodigde predictive twins worden ontwikkeld.

4. STRUCTUREREN EN VERBINDEN VAN INFORMATIEBRONNEN

In een predictive twin komen gegevens vanuit verschillende informatiebronnen samen die over het algemeen een wisselend kwaliteitsniveau hebben. Het gaat om statische en dynamische informatie die vaak van verschillende partijen afkomstig is. Het omgaan met informatie met een wisselend kwaliteitsniveau en het eenduidig vastleggen, structureren, delen en verbinden van informatie was al een uitdaging in het kader van de BIM-ontwikkeling en is minstens zo belangrijk voor de predictive twin-ontwikkeling. Het bepalen en implementeren van nationale en internationale afspraken en standaarden op sectorniveau[20] is voor predictive twins van groot belang[21].

5. VELE (SAMENWERKENDE) PARTIJEN MET EIGEN BELANGEN EN BEHOEFTEN

De bouw- en infrasector is van oudsher gefragmenteerd en opgedeeld in vele partijen, variërend van architecten- en ingenieursbureaus, bouwbedrijven en onderaannemers tot toeleveranciers, opdrachtgevers en beheerders. Elk van deze partijen werkt vanuit andere belangen en heeft andere behoeften en werkwijzen ten aanzien van predictive twins. Hoe past een netwerk van predictive twins bij die belangen, behoeften en werkwijzen? Welke gebruiksscenario's zijn er voor die partijen? En hoe faciliteert een predictive twin de samenwerking tussen deze partijen in de versnipperde bouw? Het samen met praktijkpartijen uitwerken van predictive twin-gebruiksscenario's (en bijbehorende voordelen) voor partijen in de bouw- en infrasector en het demonstreren van die gebruiksscenario's in field labs, zijn van belang om de praktijkimplementatie de komende jaren te versnellen.

CONCLUSIE

De bouw- en infrasector zet de komende jaren de stap naar netwerken van predictive twins van de gebouwde omgeving. Deze stap is cruciaal voor een meer data-gedreven en proactieve besluitvorming over bouwwerken en netwerken van bouwwerken.
Deze predictive twins zijn een noodzakelijk middel bij het realiseren van belangrijke maatschappelijke uitdagingen waarvoor de bouw- en infrasector staat gesteld. TNO zet momenteel belangrijke stappen richting het geschetste toekomstbeeld en werkt actief aan voorwaarden voor de succesvolle ontwikkeling en toepassing van predictive twins. TNO zal dit de komende jaren, samen met praktijk- en kennispartners, blijven doen om de stap naar netwerken van predictive twins haalbaar en betaalbaar te maken.

“TNO ONTWIKKELT METHODEN EN TECHNIEKEN OM MET BEPERKTE MIDDELEN PREDICTIVE TWINS VAN BOUWWERKEN EN -NETWERKEN TE CREËREN.”

EINDNOTEN

1 Zie bijvoorbeeld de brief aan de Tweede Kamer over de aanpak voor instandhouding van de Rijksinfrastructuur voor de komende jaren, dd. 19 juni 2020 (https://www.rijksoverheid.nl/ministeries/ministerie-van-infrastructuur-en-waterstaat/documenten/kamerstukken/2020/06/19/aanpak-instandhouding-rijksinfrastructuur).

2 Zie bijvoorbeeld De Bouwagenda (www.debouwagenda.com) en het op 28 juni 2019 gepresenteerde Klimaatakkoord (www.klimaatakkoord.nl). Het Betonakkoord heeft zelfs als doelstelling: 100% hoogwaardig hergebruik van vrijgekomen beton in 2030 (www.betonakkoord.nl).

3 Zie bijvoorbeeld:
- EIB (2020). Monitoring Bouwagenda; De voortgang in de periode 2017 t/m 2019. Economisch Instituut voor de Bouw, Amsterdam.
- DigiDealGO (2020). Werken aan de digitale transformatie van onze gebouwde omgeving (Update DigiDealGO maart 2020). DigiDealGO.

4 TNO gebruikt hier de term predictive twins. Dit zijn digital twins die zich specifiek richten op het doen van voorspellingen over het functioneren en het gebruik van bouwwerken. Hiermee zijn predictive twins dus onderdeel van een digital twin. Zie voor een verdere toelichtingen op digital twins voor de bouw- en infrasector bijvoorbeeld:
- Bolton, A., Butler, L., Dabson, I., Enzer, M., Evans, M., Fenemore, T., ... & Pawsey, N. (2018). The Gemini Principles. https://doi.org/10.17863/CAM.32260.
- Brilakis, I., Pan, Y., Borrmann, A., Mayer, H., Rhein, F., Vos, C., ... & Wagner, S. (2020). Built Environment Digital Twinning; Report of the International Workshop on Built Environment Digital Twinning presented by TUM Institute for Advanced Study and Siemens AG. https://publications.cms.bgu.tum.de/reports/2020_Brilakis_BuiltEnvDT.pdf.

5 NBIMS (2007). United States National Building Information Modeling Standard; Version 1 – Part 1: Overview, Principles, and Methodologies. National Institute of Building Sciences.

6 Zie bijvoorbeeld:
- Boje, C., Guerriero, A., Kubicki, S., & Rezgui, Y. (2020). Towards a semantic Construction Digital Twin: Directions for future research. Automation in Construction, 114, 103179.
- Ding, K., Shi, H., Hui, J., Liu, Y., Zhu, B., Zhang, F., & Cao, W. (2018). Smart steel bridge construction enabled by BIM and Internet of Things in industry 4.0: A framework. In 2018 IEEE 15th International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC) (pp. 1-5). IEEE.

7 Adriaanse, A. M. (2014). Bruggen bouwen met ICT. Enschede: Universiteit Twente.

8 Hoewel er hier wel verschil zit in de 'BIM-volwassenheid' van deze typen partijen. Zie bijvoorbeeld:
- Siebelink, S., Adriaanse, A., & Voordijk, H. (2014). BIM-Maturity Sectoranalyse - 2014: Een beeld van de BIM-ontwikkeling in deelsectoren van de bouw- en GWW-sector (https://www.bouwinformatieraad.nl/main.php?cat_id=6&mode=download_cat).
- Siebelink, S., Adriaanse, A., & Voordijk, H. Enquête BIM-maturity 2016: Sectorrapportage (https://www.bouwinformatieraad.nl/main.php?cat_id=6&mode=download_cat).

9 Adriaanse, A. M. (2014). Bruggen bouwen met ICT. Enschede: Universiteit Twente.

10 Zie bijvoorbeeld:
- Honic, M., Kovacic, I., Sibenik, G., & Rechberger, H. (2019). Data-and stakeholder management framework for the implementation of BIM-based Material Passports. Journal of building engineering, 23, 341-350.
- Van den Berg, M. C. (2019). Managing Circular Building Projects. Enschede: University of Twente.

11 Luiten, B., Böhms, M., Alsem, D., & O'Keeffe, A. (2019). Asset information management using Linked Data for the life-cycle of Roads. Delft: CRC Press/Balkema.

12 Adriaanse, A. M. (2014). Bruggen bouwen met ICT. Enschede: Universiteit Twente.

13 ING (2018). ConTech: Technologie in de bouw Bouw digitaliseert volop maar industrialiseert nauwelijks. ING Economisch Bureau, Amsterdam.

14 Zie bijvoorbeeld ook het deelprogramma Digital Twins van het BTIC Kennis- en InnovatieprogrammaDigitalisering(https://btic.nu/wp-content/uploads/2020/05/Digitalisering-DigitalTwins_Kennis-en-innovatieprogramma_BTIC.pdf).

15 TNO hanteert deze 3-deling. Zie voor een gelijksoortige indeling:
- Ye, C., Butler, L., Bartek, C., Iangurazov, M., Lu, Q., Gregory, A., Girolami, M. & Middleton, C. (2019). A Digital Twin of Bridges for Structural Health Monitoring. In 12th International Workshop on Structural Health Monitoring 2019. Stanford University.
- Zhang, C., Xu, W., Liu, J., Liu, Z., Zhou, Z., & Pham, D. T. (2019). A reconfigurable modeling approach for digital twin-based manufacturing system. Procedia CIRP, 83, 118-125.

16 TNO maakt hier gebruik van (a) op fysica gebaseerde modellen, (b) op data gebaseerde modellen en (c) een combinatie van beiden (hybride modellen). Van oudsher worden op fysica gebaseerde modellen ontwikkeld en toegepast. Steeds vaker worden deze gecombineerd met op data gebaseerde modellen, waardoor hybride modellen ontstaan.

17 Het gaat hier om het totaal aantal betonnen, stalen en beweegbare bruggen. Zie: Bleijenberg, A. (2020). Instandhouding civiele infrastructuur; Proeve van landelijk prognoserapport vervanging en renovatie. Bouwagenda.

18 Zie bijvoorbeeld het Horizon2020 project Atelier (https://smartcity-atelier.eu).

19 Zie bijvoorbeeld het Horizon2020 project Sphere (https://sphere-project.eu/pilots/).

20 Dit gebeurt nu bijvoorbeeld via de NTA 8035. Zie: NEN (2020). Semantische gegevensmodellering in de gebouwde omgeving. Nederlandse technische afspraak, NTA 8035:2020. Stichting Koninklijk Nederlands Normalisatie Instituut.

21 Zie bijvoorbeeld de activiteiten van digiGO om onder andere een Digitaal Stelsel Gebouwde Omgeving (DSGO) te realiseren (www.digigo.nu).

CONTACT

Rob Roef
Cluster manager Digitalisation
Senior Business Developer
Buildings, Infrastructure & Maritime
T 088 - 866 24 23
E rob.roef@tno.nl

20-11640 november 2020

TNO innovation for life

TNO.NL