

Een terugblik op simulatie van gebouwprestaties

Toen ik een tiener was, zijn we in Nederland overgestapt van kolen en stadsgas naar aardgas. Dit leidde tot meer thermisch comfort in woningen, maar het resulteerde ook in een hoger verbruik van fossiele brandstoffen. Er ontstonden echter al snel zorgen over het milieu en de behoefte aan energiebesparing, ingegeven door gebeurtenissen zoals de energiecrisis van 1973 en de noodzaak om de klimaatverandering tegen te gaan. Dit was voor mij en veel andere onderzoekers de belangrijkste motivatie om me te concentreren op het verbeteren van gebouwprestaties en de overgang naar hernieuwbare energiebronnen.

Uiteraard is energiegebruik slechts een middel om het echte doel van een gebouw te bereiken: beschermen tegen invloeden van buitenaf en zorgen voor een comfortabel en gezond binnenmilieu. Naarmate het bewustzijn van gezondheid en welzijn toeneemt, is er een groeiende verschuiving naar het prioriteren van de kwaliteit van het binnenmilieu in plaats van alleen energie-gerelateerde prestaties.

De bouwsector staat voor verschillende andere uitdagingen, zoals het grote aantal belanghebbenden, het zorgen voor duurzame en aanpasbare structuren en het omgaan met unieke ontwerpen en bouwprocessen. Om deze uitdagingen het hoofd te bieden, zijn innovatieve bouwoplossingen nodig. Deze oplossingen moeten grondig worden geanalyseerd om te begrijpen hoe ze het best kunnen worden geoptimaliseerd en geïntegreerd in bestaande of nieuwe gebouwen, met name met het oog op de langere termijn.

Het uiteindelijke doel is om een duurzame gebouwde omgeving te creëren zonder CO₂-emissies, waarbij het binnenmilieu is geoptimaliseerd voor gezondheid, comfort en/of productiviteit. Om dit te bereiken is samenwerking nodig tussen verschillende technische en niet-technische disciplines.

In mijn ogen kan gebouwprestatie modellering en simulatie hierbij een efficiënte en effectieve rol spelen [Hensen en Lamberts 2019]. Modellering is het maken van een

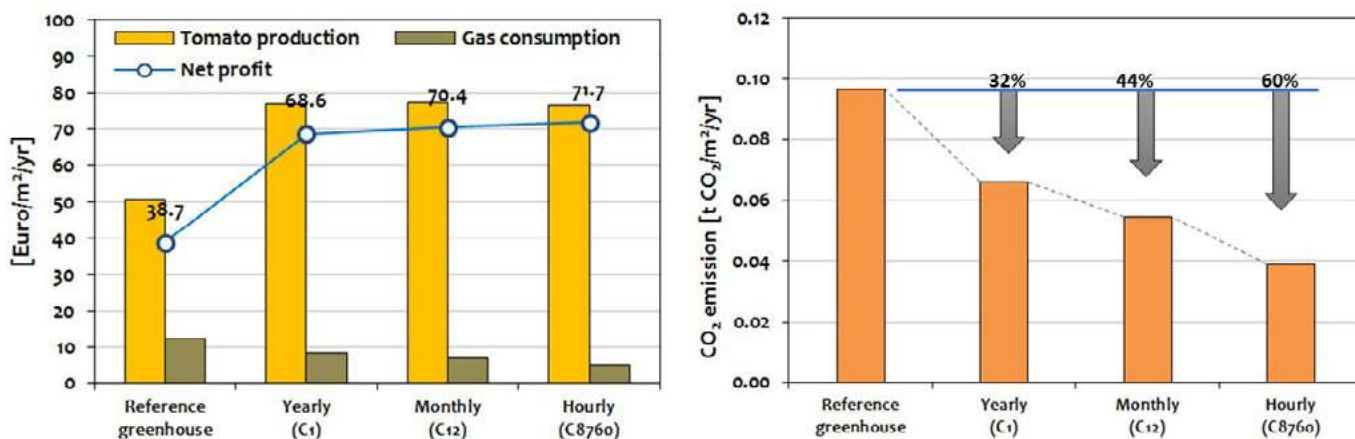
vereenvoudigde computer gebaseerde representatie van een echt systeem, waarbij gefocust wordt op de – voor de betreffende vraag - essentiële aspecten terwijl irrelevante details worden uitgesloten. Simulatie is het toepassen van zo'n model om het gedrag van het echte systeem in de toekomst te voorspellen. Modellering en simulatie is een krachtig hulpmiddel voor analyse en begrip, maar je kunt er niet rechtstreeks oplossingen of antwoorden mee genereren.

Modellering en softwarefuncties

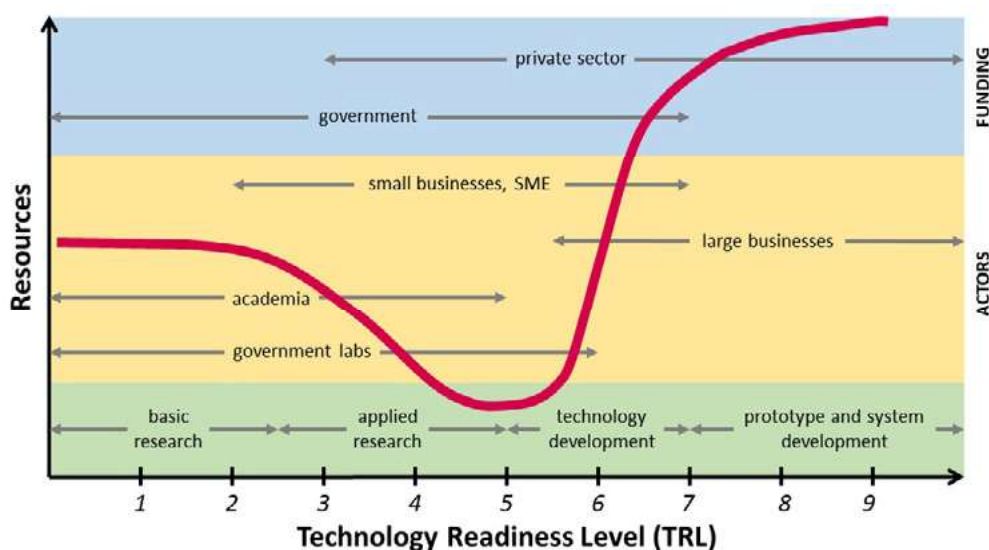
Onderzoek en ontwikkeling van simulatie van gebouwprestaties is in de zestiger jaren van de vorige eeuw begonnen en was aanvankelijk vooral gericht op modellering en softwarefuncties. De aandacht is echter verschoven naar het verbeteren van de effectiviteit van gebouwprestatiesimulatie gedurende de verschillende fasen van de levenscyclus van een gebouw. Laten we enkele toepassingen waaraan we gewerkt hebben, kort introduceren.

Gebouwsimulatie maakt het mogelijk om 'wilde' ideeën te verkennen, zoals het dynamisch aanpassen van de thermische en optische eigenschappen van tuinbouwkassen op basis van weers- en gewasvereisten. Hoewel het in de werkelijkheid nog niet mogelijk is, stellen simulaties ons in staat om deze eigenschappen te variëren en de potentiële impact op energiebesparing en hogere gewasopbrengst in te schatten.

Ontwikkelingen in de materiaalwetenschappen biedt kansen voor nieuwe gebouwschiltechnologieën, zoals vacuümisolatie en fase-overgangsmaterialen (pcm, phase change materials). Gebouwprestatie-simulatie kan helpen bij het oplossen van uitdagingen in de overgangsstadia van onderzoek en ontwikkeling door prestatieoptimalisatie en inzicht te bieden in efficiënte integratie in gebouwen. Slim energieglass is bijvoorbeeld een technologie, die LCD-materialen combineert met raam-geïntegreerde PV-cellen om snel reagerend, zelfvoorzienend schakelbaar glas te creëren. Door de hoeveelheid daglicht en zoninstraling, -absorptie en -reflectie te regelen, kunnen deze ramen energieprestatie en comfort verbeteren.



Figuur 1: Voorspelde gewasproductie, gasverbruik en CO₂-uitstoot voor een generieke referentiekas; een waarin de optische en thermische eigenschappen constant zijn of gedurende het jaar worden geoptimaliseerd voor tomatenproductie (C1) of waar optische en thermische eigenschappen kunnen veranderen en per maand (C12) of per uur (C8760) worden geoptimaliseerd. Kosten en winst zijn gebaseerd op prijzen van 2015. [Aangepast van Lee et al. 2019]



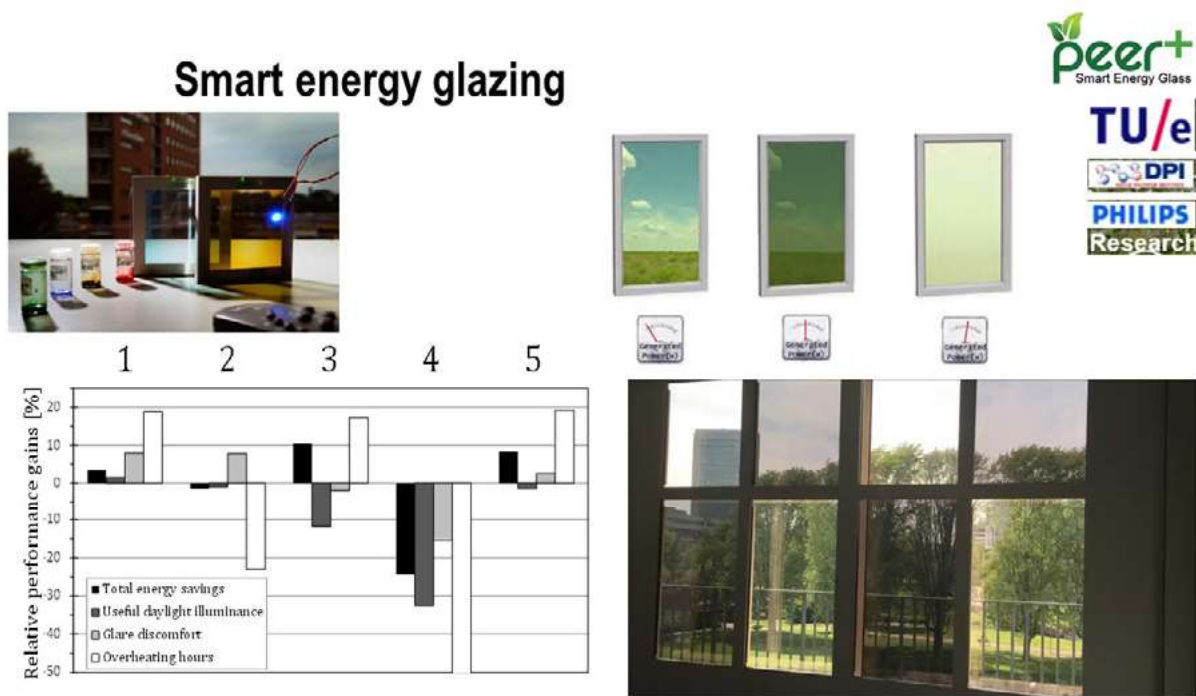
Figuur 2: Beschikbaarheid van middelen voor de ontwikkeling van nieuwe producten bij verschillende TRL's. Gebouwsimulatie kan helpen de kloof in het midden te overbruggen, waarnaar soms wordt verwezen als "The Valley of Death". [Loonen 2018]

In dit geval zijn we al met simulatie begonnen in de vroege R&D-fases (TRL 2-3), toen de technologie alleen beschikbaar was in de vorm van kleinschalige monsters. We voorspelden de prestaties van het hele gebouw in termen van comfort en energiebesparingspotentieel onder een reeks bedrijfsomstandigheden en gebruiksscenario's voor gebouwen. Op basis van deze informatie werden benchmarks vastgesteld en specifieke ontwikkelingsdoelen op materiaalniveau geschetst.

Simulatie van gebouwprestaties wordt ook ingezet, wanneer ontwerpers twijfelen

over bepaalde (innovatieve) ontwerpkenmerken van gebouwen. Het kan worden gebruikt voor risicoanalyse en optimalisatie van mitigerende maatregelen. In die zin zijn we bijvoorbeeld betrokken geweest bij het beoordelen van de prestaties van dubbele huidgevels, het dimensioneren van koeling in historische gebouwen, het voorspellen en voorkomen van tocht in ondergrondse treinstations en het analyseren van binnenmilieu en condensatierisico's in unieke structuren zoals tropische dierentuinpaviljoens.

Afgezien van risicoanalyse, is het meest voorkomende gebruik in de dagelijkse praktijk het controleren van de naleving van bouwvoorschriften.



Figuur 3: Smart energy glazing voorspelde prestaties. Opties 1-5 betreffen verschillende regelstrategieën. [Aangepast van Loonen et al. 2014]

Optimalisatie onder onzekerheid

Een zeer interessante toepassing is optimalisatie onder onzekerheid, die relevant is bij bijvoorbeeld robuuste energiezuinige renovatie van woningen. Onzekerheden in de werking van gebouwen en externe factoren zoals gebruikersgedrag, klimaatverandering, energieprijzen, beleidswijzigingen etc. zijn van invloed zijn op toekomstige gebouwprestaties. Dit resulteert in mogelijke prestatieafwijkingen tijdens bedrijf ten opzichte van de prestaties die in de ontwerpfase zijn voorspeld. De waarschijnlijkheid van het optreden van deze onzekerheden is meestal onbekend en daarom zijn scenario's essentieel om de prestatiebestendigheid van gebouwen te beoordelen. Daarom is een niet-probabilistische scenario-analyse ontwikkeld om robuuste ontwerpen te identificeren. Maximale prestatiespijt (performance regret), berekend met behulp van de minimax-methode, wordt gebruikt als de maatstaf voor de robuustheid van de prestaties. In deze aanpak is het gewenste robuuste ontwerp gebaseerd op optimale prestaties en prestatierobuustheid.

Neem het geval van een eengezinswoning uit 1992, die moet worden gerenoveerd tot netto nul-energie door extra isolatie voor vraagvermindering en PV-panelen voor energieopwekking. De investeringskosten zijn

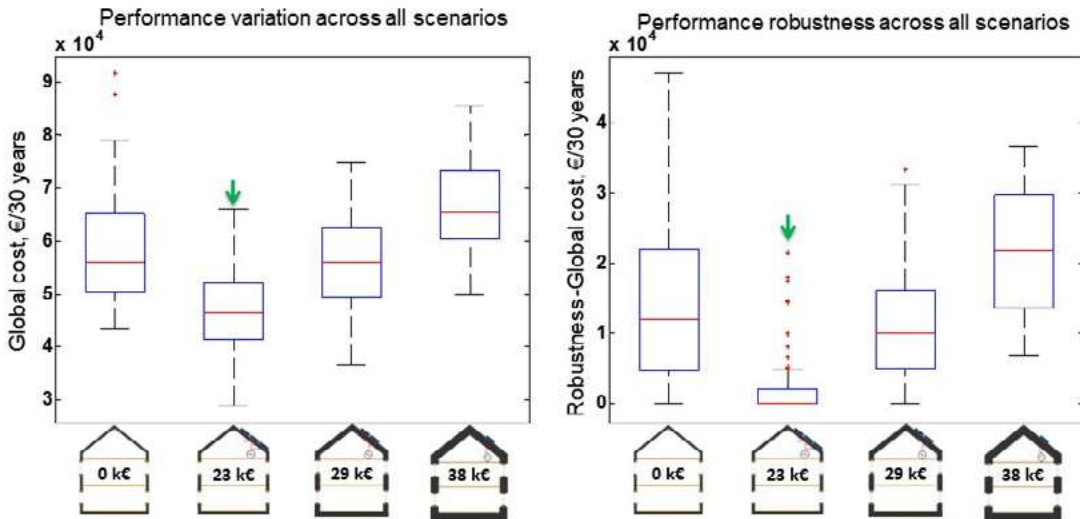
afhankelijk van het isolatieniveau en het aantal PV-panelen. De voorkeursoplossing hangt af van het standpunt van de belanghebbenden. Ervan uitgaande dat huiseigenaren waarschijnlijk het meest geïnteresseerd zijn in investerings- en exploitatiekosten, zouden ze waarschijnlijk de voorkeur geven aan de oplossing met niet zoveel extra isolatie, maar met een vrij groot aantal PV-panelen. Echter, voor de overheid zal CO₂-emissiereductie belangrijker zijn. Uit de resultaten blijkt duidelijk dat de oplossing met meer isolatie in die context effectiever zou zijn.

Gebouwsimulatie wordt ook ingezet voor toepassingen in de operationele fase. Door computationele en fysieke processen te integreren, kunnen met cyber-fysieke systemen regelstrategieën worden getest en geoptimaliseerd zonder de activiteiten in de echte wereld te verstoren. Verdere ontwikkeling van deze aanpak zou kunnen leiden tot zogenaamde digital twins, die fysieke systemen combineren met digitale kopieën om het gedrag van echte producten in realtime te voorspellen.



Global cost

- Cost of investment, replacement and operational
- Calculated for period of 30 years – service life span of energy systems



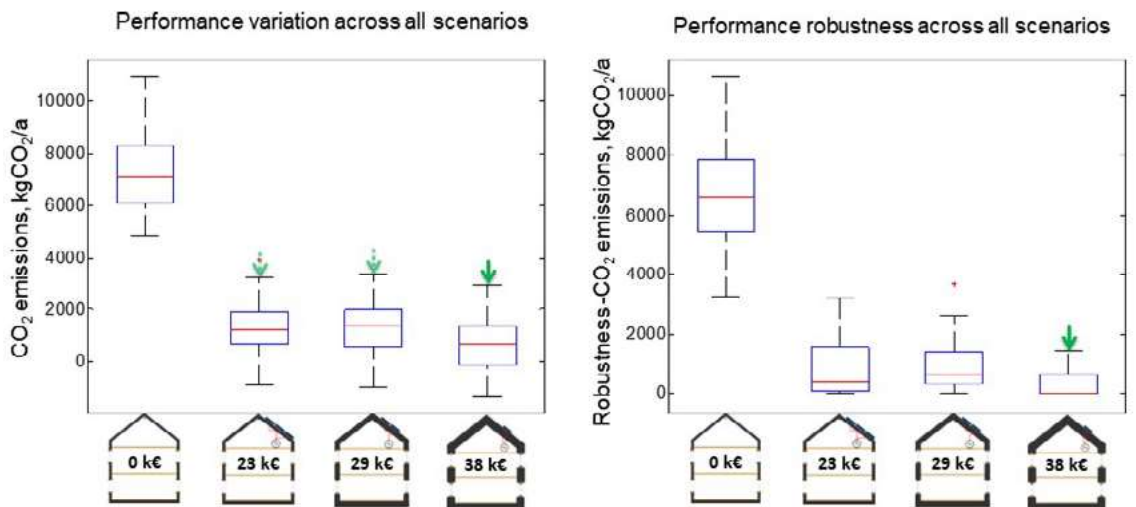
Figuur 4: Voorspelde globale kosten voor verschillende renovatiepakketten gericht op jaarlijkse netto nul-energie voor een huis uit 1992, uitgaande van een breed scala aan bewonersgedrag en klimaatveranderingsscenario's. De rechter grafiek toont robuustheid in termen van spijt (= prestatieverschil tussen de overwogen oplossing en de best presterende oplossing voor een bepaald scenario). [Aangepast van Kotireddy et al. 2018]



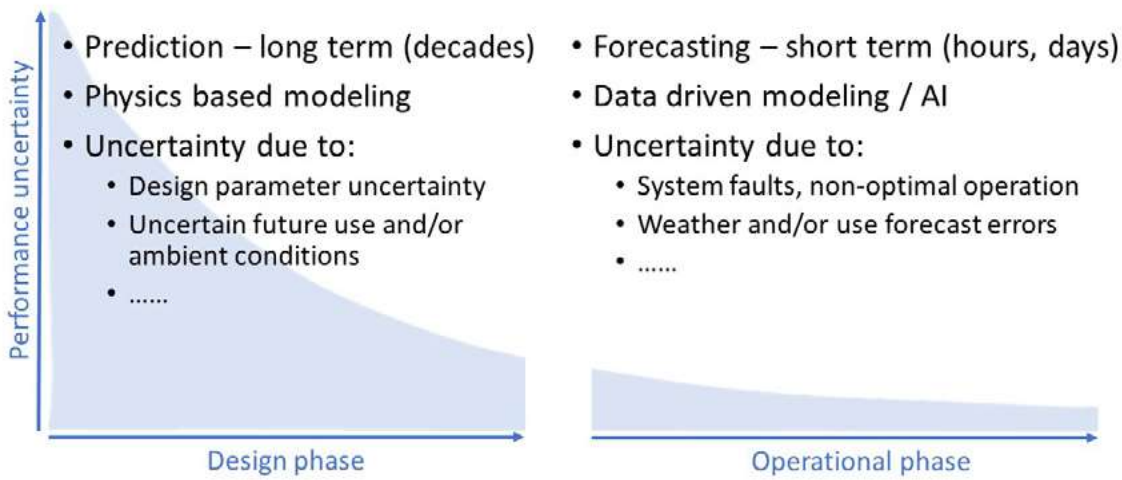
CO₂ emissions

$$CO_2 \text{ emissions} = \text{Energy consumption} \times EF - \text{Energy generation} \times EF$$

- EF = CO₂ emission factor
- Embodied emissions are not taken into account



Figuur 5: Voorspelde CO₂-emissied voor verschillende renovatiepakketten gericht op jaarlijkse netto nul-energie voor een huis uit 1992, uitgaande van een breed scala aan bewonersgedrag en klimaatveranderingsscenario's. De rechter grafiek toont robuustheid in termen van spijt (= prestatieverschil tussen de overwogen oplossing en de best presterende oplossing voor een bepaald scenario). [Aangepast van Kotireddy et al. 2018]



Figuur 6: Belangrijkste verschillen in prestatieonzekerheid als gevolg van simulaties in de ontwerp- of exploitatiefase van een gebouw.

Als het gaat om het optimaliseren van energiegebruik in gebouwen, zijn er aanzienlijke verschillen tussen de ontwerpfase en de operationele fase. Ontwerpkeuzes zijn van grote invloed op (de range van) het voorspelde energiegebruik. Het achteraf aanpassen van een gebouw is veel moeilijker dan het later updaten van energiebeheerssoftware.

Tijdens de ontwerpfase moeten we rekening houden met een breed scala aan ontwerpopties, onzekere toekomstige omstandigheden en een lange tijdshorizon. Omdat er voor nieuwe innovatieve oplossingen nog geen prestatiegegevens zijn, moeten we op fysica gebaseerde deterministische modellen gebruiken in plaats van op data gebaseerde methoden.

Zodra een gebouw is opgeleverd, komen echte prestatiegegevens beschikbaar. Deze gegevens kunnen worden gebruikt voor op data en andere op kunstmatige intelligentie gebaseerde modellerings- en simulatiebenaderingen. De relevante tijdshorizon is daarbij veel korter dan tijdens het ontwerp (denk aan uren en dagen in plaats van decennia). Gebruik en randvoorwaarden zijn "bekend". Daarom zijn afwijkingen tussen het voorspelde en het werkelijke energieverbruik waarschijnlijk toe te schrijven aan systeemfouten of een niet-optimale werking. Typische toepassingen zijn dus foutdetectie en -diagnose, slim onderhoud en regeling-optimalisatie.

Kwaliteitsborging

Kwaliteitsborging is cruciaal bij op simulatie gebaseerde beslissingen. De kwaliteit van de simulatieresultaten hangt

in de eerste plaats af van de juistheid van het model en de invoerparameters; Met andere woorden, kloppen de voorspelde getallen? Meestal niet, wat resulteert in de zogeheten prestatiekloof. Dit verschil tussen voorspelde en werkelijk gemeten energieprestaties wordt veroorzaakt door problemen tijdens de ontwerpfase (zoals: modelbeperkingen, aannames van inputparameters); de bouw- en inbedrijfstellingsfase (bijvoorbeeld: constructiefouten, verschillen tussen veronderstelde en werkelijke materialen, componenten en systemen); en de exploitatiefase (zoals: systemen die niet goed werken en/of verschillen tussen verondersteld en daadwerkelijk gebouwgebruik).

Energielabelberekeningen gaan grotendeels voorbij aan al deze onzekerheden. Energielabels zijn niet bedoeld om het toekomstige energiegebruik aan te geven en mogen daarom niet als zodanig worden geïnterpreteerd.

Aangezien energiesimulatie van gebouwen zich nu op het niveau bevindt waar integratie van onzekerheids- en gevoeligheidsanalyse mogelijk is, zouden de resultaten altijd moeten worden gepresenteerd met onzekerheidsmarges en bij voorkeur ook met gevoeligheidsanalyse-uitkomsten.

De kwaliteitsborging van resultaten voor op simulatie-gebaseerde beslissingen hangt af

van veel meer dan alleen de fysieke correctheid van het model. De kwaliteit van het eindresultaat (dat wil zeggen: de relevante uitkomsten voor de besluitvormer) kan alleen worden "gewaarborgd" wanneer het gebaseerd is op kwaliteitsborging tijdens elke stap van een simulatiestudie. Dit begint met de relevantie en specificatie van de probleemformulering.

Vanaf eerste fase beginnen

De voorbeelden hierboven zijn gebaseerd op reële vragen van verschillende belanghebbenden. Afhankelijk van de vraag en door wie is een andere benadering nodig. Het is niet eens altijd de beste aanpak om modellering en simulatie te gebruiken - soms kan het probleem worden opgelost door gezond verstand of zou het beter zijn om fysieke experimenten te gebruiken.

Het is cruciaal om vanaf de eerste fase te beginnen met validatie, verificatie en testen en hiermee door te gaan gedurende alle stappen van een simulatiestudie. De procedures om dit te doen zijn bekend uit andere onderzoeksgebieden (bijvoorbeeld operations research), maar ze worden niet vaak gebruikt in ons vakgebied. Aangezien we dit al vele jaren aan onze studenten leren, is het hopelijk slechts een kwestie van tijd voordat het wel gemeengoed gaat worden.

Gedegen domeinkennis is van het grootste belang om de kwaliteit van simulatieresultaten en conclusies te waarborgen. Tegenwoordig komt modellering en simulatie al in het primaire en secundaire onderwijs aan bod. Daarom kunnen onze simulatiecursussen en studentenprojecten zich richten op specifieke modellerings- en simulatievaardigheden voor bouwprestaties, samen met kennis over principes, aannames, beperkingen, wanneer te gebruiken en wanneer niet.

Het vermogen om geldige informatie te kunnen scheiden van onjuiste informatie is een zeer belangrijke vaardigheid. Geloofwaardigheid als professional hangt af van de waarde van de informatie die wordt gebruikt en gecommuniceerd. Het leren waarborgen van de kwaliteit van simulatieresultaten is dus een overkoepelend doel en uitermate belangrijk, omdat slechte kwaliteit of verkeerde informatie ernstige gevolgen kan hebben voor de gebouwde omgeving en het menselijk welzijn.



Auteur: Em. prof. dr. ir. Jan Hensen

De uitdagingen waarmee de gebouwde omgeving wordt geconfronteerd, vereisen intelligente individuen gewapend met de juiste kennis en slimme benaderingen. Simulatie van bouwprestaties is een essentieel hulpmiddel in ons streven naar betere gebouwen. Ik hoop het belang van dit veld en het potentieel dat het biedt voor het creëren van duurzame en efficiënte structuren te hebben overgebracht.

Dit is een samenvatting van het afscheidscollege van Jan Hensen 'Building Performance S(t)imulation' op 21 april 2023 bij de Technische Universiteit Eindhoven.

Voor meer info:

Video: <https://youtu.be/aAG8EdVieH0>

Boek: <https://research.tue.nl/en/publications/building-performance-stimulation>

Referenties

1. Hensen, J.L.M. and Lamberts, R., ed., 2019. "Building Performance Simulation for Design and Operation; Expanded second edition", Routledge. <https://doi.org/10.1201/9780429402296>
2. Kotireddy, R.R., Hoes, P. & Hensen, J.L.M., 2018. A methodology for performance robustness assessment of low-energy buildings using scenario analysis. Applied Energy, 212: 428-442. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.12.066>
3. Lee, C., Hoes, P.-J., Costola, D. & Hensen, J.L.M., 2019. Assessing the performance potential of climate adaptive greenhouse shells, Energy, 175: 534-545. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2019.03.074>
4. Loonen, R.C.G.M., Singaravel, S., Trcka, M., Costola, D. & Hensen, J.L.M. 2014. Simulation-based support for product development of innovative building envelope components, Automation in Construction, 45, 86-95. <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2014.05.008>
5. Loonen, R. C. G. M., 2018. Approaches for computational performance optimization of innovative adaptive façade concepts, doctoral dissertation, Built Environment. Technische Universiteit Eindhoven. https://research.tue.nl/files/102239772/20180906_Loonen.pdf