

# Optimalisatie gebouwontwerp met een robustheidsindicator

Tijdens het ontwerpproces van een gebouw kunnen optimalisatiealgoritmen worden gebruikt om ontwerpbeslissingen te ondersteunen. De laatste jaren staat het gebruik van optimalisatiealgoritmen in de belangstelling bij veel onderzoeksgroepen. De algoritmen worden gebruikt om te zoeken naar ontwerpvarianten met de best mogelijke gebouwprestaties. Dit artikel laat zien hoe onzekerheden in de randvoorwaarden (bijvoorbeeld veranderend gebruikersgedrag) kunnen worden meegenomen in een gebouwoptimalisatie door middel van een robustheidsindicator.

Ir. P. (Pieter-Jan) Hoes<sup>1,2</sup>, dr.dipl.-ing. M. (Marija) Trcka<sup>2</sup>, prof.dr.ir. J.L.M. (Jan) Hensen<sup>2</sup>, ir. B. (Bauke) Hoekstra Bonnema<sup>3</sup>; 1.Materials innovation institute (M2i), 2.Technische Universiteit Eindhoven, 3.Tata Steel Construction Centre

In het ontwerpproces bestaat een optimalisatieprobleem vaak uit het tegelijkertijd optimaliseren van meerdere gebouwprestatie-indicatoren. Deze prestatie-indicatoren kunnen echter met elkaar conflicteren. We willen dan bijvoorbeeld het energiegebruik verlagen, terwijl we ook het thermisch comfort willen verhogen. Het is daardoor onmogelijk om één ontwerpvariant aan te wijzen als de 'best presterende' variant. Er zal een reeks varianten worden gevonden die een compromis vertonen tussen de conflicterende indicatoren. Dit wordt 'multi-objective optimization' genoemd [1].

De compromis-varianten zijn per definitie even 'goed' en worden Pareto-optimaal genoemd. Dit betekent dat een verbetering in één prestatie-indicator altijd leidt tot een verslechtering van een andere prestatie-indicator. Een ontwerpteam zal één variant moeten kiezen uit deze Pareto-optimale varianten (Pareto-varianten). Het team moet daartoe een afweging maken tussen het belang van de verschillende prestatie-indicatoren: hoe

belangrijk vinden wij thermisch comfort ten opzichte van energiegebruik? Deze afweging kan worden ondersteund door zogenaamde multicriteria-analyses.

In dit artikel laten we echter een methode zien die gebaseerd is op de robustheid van de gebouwprestaties. Prestatierobustheid wordt gedefinieerd als de mate waarin een gebouw veranderingen kan opvangen in omgevingsfactoren, bijvoorbeeld een veranderend klimaat of veranderend gedrag van de gebouwgebruikers. Om gebouwprestaties te waarborgen is het belangrijk hiermee rekening te houden tijdens het ontwerpproces. De voorgestelde beslissingsmethode rangschikt de Pareto-varianten naar de mate van prestatierobustheid. Het ontwerpteam kan nu kiezen voor de meest robuust presterende ontwerpvariant.

## ■ ROBUUSTHEIDSINDICATOR

De prestatierobustheid wordt onderzocht door de gevoeligheid van de gebouwprestaties te onderzoeken voor veranderde omgevingsfactoren. Deze veranderingen worden

gerepresenteerd door middel van onzekerheidsscenario's. Elke ontwerpvariant wordt gesimuleerd met deze scenario's. De spreiding in de waarden van de prestatie-indicatoren dient als robustheidsindicator.

## Prestatie-vectorlengte

In dit onderzoek optimaliseren de onderzoekers het gebouwontwerp op basis van twee prestatie-indicatoren. De relatieve standaarddeviatie (RSD) van de twee indicatoren wordt gebruikt om een vector te beschrijven (figuur 1): *de prestatie-vector*. De lengte van deze vector kwantificeert de robustheid van de ontwerpvariant: hoe korter de vector, hoe robuuster de variant. Daarom wordt de *prestatie-vectorlengte* gebruikt om de ontwerpvarianten te rangschikken naar de mate van prestatierobustheid.

## Prestatie-vectorhoek

De hoek die de *prestatie-vector* maakt geeft informatie over het robustheidsevenwicht tussen de twee prestatie-indicatoren. Een

hoek van 45° geeft aan dat de RSD's (en dus de robuustheid) van beide indicatoren gelijk is. Een hoek die niet gelijk is aan 45° geeft aan dat de RSD van één van de indicatoren groter is dan die van de andere (figuur 1). Het ontwerpteam kan de hoek  $\alpha$  (figuur 1) en de bijbehorende impact van de RSD op de prestatie-indicatorwaarden gebruiken om te kiezen tussen twee varianten met dezelfde *prestatie-vectorlengte* ( $R$ ). In het artikel voor Building Simulation 2011 [2] laten we zien dat elke Pareto-variant een specifieke  $\alpha$ -waarde heeft die de voorkeur verdient boven andere waarden. Deze zogenaamde voorkeurs  $\alpha$  is afhankelijk van de positie van de variant op het Pareto-front. Het artikel laat zien hoe deze voorkeurs  $\alpha$  kan worden berekend. De ontwerpvariant met het kleinste verschil tussen  $\alpha$  en de voorkeurs  $\alpha$  wordt gezien als de te prefereren variant.

## ■ ONZEKERHEDEN

De robuustheidsindicator kan op twee manieren worden toegepast in het optimalisatiealgoritme. Zo kan de robuustheidsindicator alleen voor de Pareto-varianten worden berekend na afloop van de optimalisatie. Hierdoor neemt het algoritme dus geen onzekerheden mee tijdens het zoeken naar de Pareto-varianten. Er kunnen echter ook onzekerheden worden geïntroduceerd tijdens het optimalisatieproces; dan worden alle ontwerpvarianten geëvalueerd met onzekerheden. Het doel van het algoritme is vervolgens om de gemiddelde waarden van beide prestatie-indicatoren te minimaliseren.

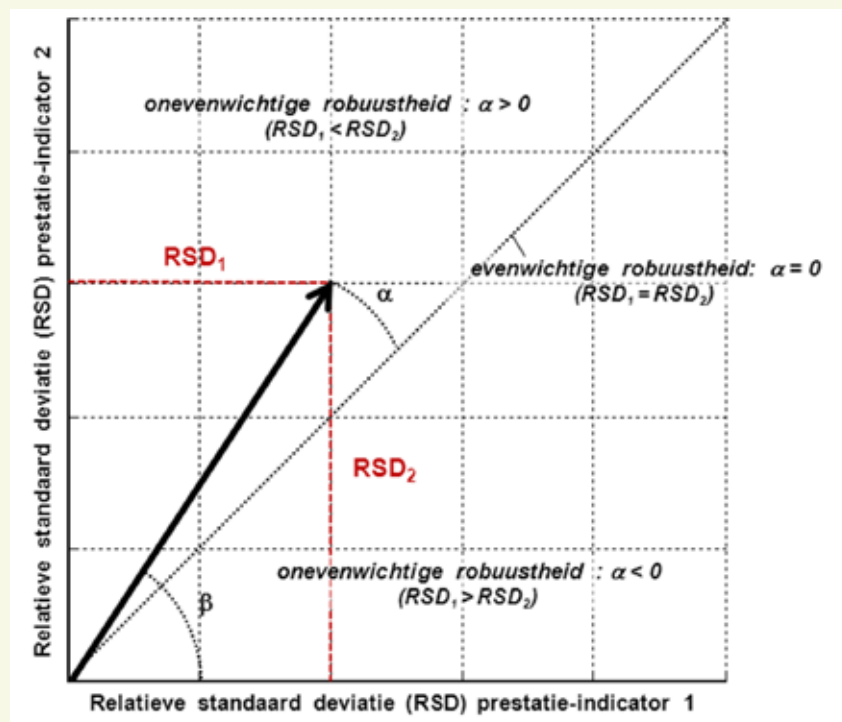
Uit het onderzoek blijkt dat de eerste methode kan leiden tot varianten die niet-optimaal presteren onder de onzekerheden. Daarnaast levert de tweede methode een grotere diversiteit aan varianten met een uniformere verdeling over het Pareto-front. De volgende paragraaf toont de resultaten van een case study waarbij de tweede methode is toegepast.

## ■ CASESTUDY

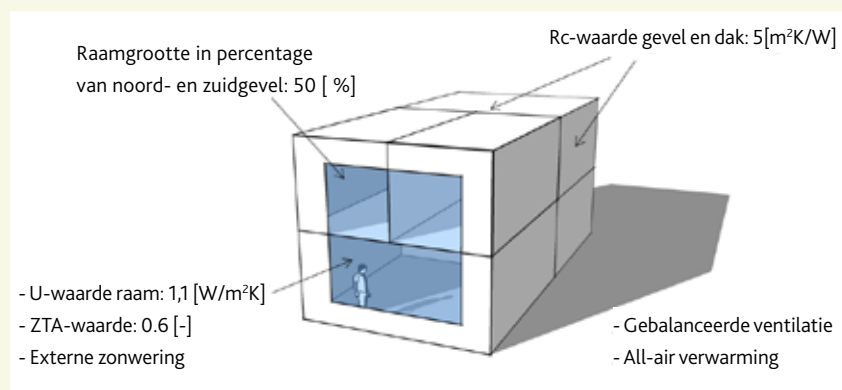
In deze casestudy is het ontwerp van een woning geoptimaliseerd, alleen voor de lenteperiode. Het algoritme zoekt naar de optimale combinatie van raamgrootte en thermische massa. Toegepast wordt het NSGA-II optimalisatiealgoritme [1]. De woning is gesimuleerd met het gebouwprestatiesimulatieprogramma ESP-r [3].

### Woning

De woning is gelegen in Nederland en bestaat uit vijf ruimten (zie figuur 2). De noord- en zuidgevel zijn voorzien van ramen. De woning wordt verwarmd door middel van een all-air



-Figuur 1- Voorbeeld van een prestatie-vector. De vectorlengte is een maat voor de robuustheid en de hoek  $\alpha$  geeft het robuustheidsevenwicht aan



-Figuur 2- Woning casestudy

systeem. De zuidgevel is voorzien van buitenzonwering. Tijdens de wintermaanden is de zonwering opgetrokken om optimaal gebruik te maken van de zon. Twee bewoners gebruiken de begane grond van 18:00 tot 24:00 uur en de eerste verdieping van 0:00 tot 8:00 uur. Meer details over de casestudy worden gegeven in [2].

### Ontwerpvariabelen

Het optimalisatiealgoritme kan de raamgrootte veranderen in 25%, 50% of 90% van de noord- en zuidgevel. Het algoritme kan de thermische massa van het gebouw variëren door de dichtheid te veranderen van de mate-

rielen die thermisch gekoppeld zijn met het binnenklimaat.

### Prestatie-indicatoren

De gebouwprestatie is beoordeeld aan de hand van twee prestatie-indicatoren: de warmtevraag (in kWh/m² voor de gesimuleerde lenteperiode) en de gewogen temperatuuroverschrijdingsuren (GTO-uren). De GTO-uren zijn gewogen met een functie die afhankelijk is van de PPD en zijn vervolgens gesommeerd voor de simulatieperiode.

### Onzekerheidsscenario's

Recente onderzoeken laten zien dat

gebouwprestaties erg gevoelig kunnen zijn voor veranderingen in het gedrag van de gebouwgebruikers [4, 5]. Bovendien blijkt het voorspellen van dit gebruikersgedrag erg lastig te zijn, waardoor deze voorspellingen een grote onzekerheid vertonen [4]. Deze gevoeligheid en onzekerheid zorgen ervoor dat gebruikersgedrag een interessante en belangrijke parameter is om mee te nemen in een robuustheidsonderzoek. Deze casestudy richt zich daarom op de prestatierobuustheid voor gebruikersgedrag.

Het gedrag van de gebruikers wordt gedefinieerd aan de hand van verschillende inputparameters (setpoints, ventilatievoud en interne warmtelasten). Voor deze inputparameters zijn enkele mogelijke waarden gedefinieerd (zie tabel 1). De onzekerheidsscenario's bestaan uit combinaties van deze waarden.

## Resultaten

Een uitgebreide beschrijving van de resultaten is te vinden in [2]. In het scatterplot van figuur 3 zijn de prestatie-vectoren van alle Pareto-varianten weergegeven. Deze resultaten zijn gevonden na 100 generaties met een populatiegrootte van 10. De drie meest robuuste ontwerpvarianten en de minst robuuste variant zijn aangegeven met nummers (oplopend van meest robuust naar minder robuust). Voor deze oplossingen is tussen haakjes de *prestatie-vectorlengte* ten opzichte van de meest robuuste variant gegeven.

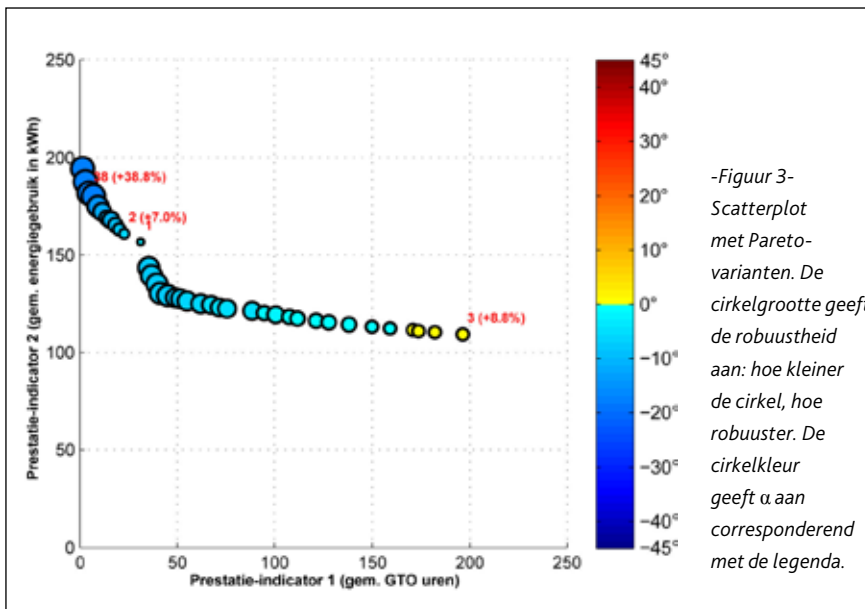
De meest robuuste ontwerpvariant (nummer 1) heeft een R van 1.61. Deze variant heeft een gemiddeld energiegebruik van 157 kWh en een gemiddeld aantal GTO-uren van 31. De variant bestaat uit een raamgrootte van 25% en een lage thermische massa voor alle ruimten. Het verschil in de R van nummer 2 en 3 is 2%. Wanneer dit verschil te klein wordt geacht, dan kunnen de varianten worden gerangschikt naar het absolute verschil tussen  $\alpha$  en de voorkeurs  $\alpha$  (figuur 4). Dan blijkt variant 3 (groene kleur) de voorkeur te krijgen boven variant 2 (oranje kleur).

## CONCLUSIE

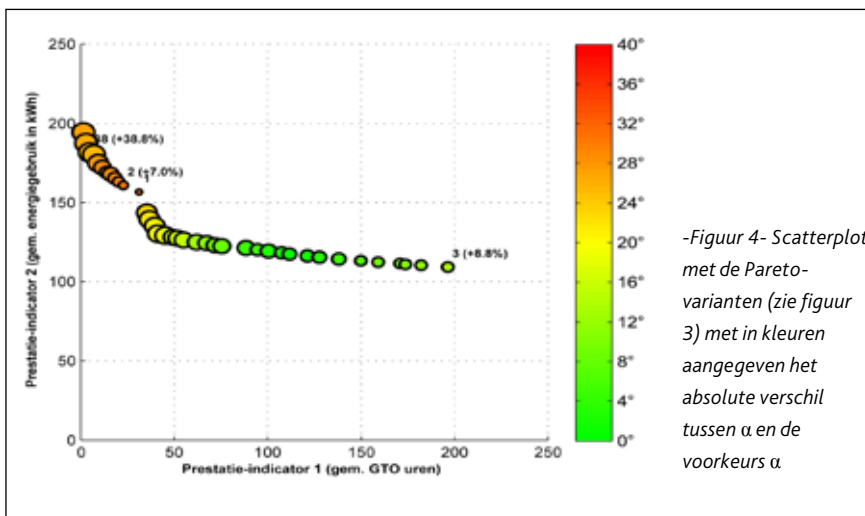
De robuustheidsindicator geeft het ontwerp-team meer informatie over de prestaties van de ontwerpvarianten op het Pareto-front. Zonder deze indicator zal het team geneigd zijn om te kiezen voor varianten op het 'kniepunt' van het Pareto-front (dit levert een evenwichtige trade-off tussen de prestaties). Met behulp van de robuustheidsindicator kan het ontwerp-team zien of dit wel echt de beste varianten zijn. Het team kan met de indicator zoeken naar een robuust presterende oplossing die wellicht aan één van de uiteinden van het

	Low	Mid	High
Temperatuur bij aanwezigheid [°C]	20	21	22
Temperatuur bij afwezigheid [°C]	13	14	15
Interne warmtelasten [W/m <sup>2</sup> ]	2	4	6
Ventilatie [dm <sup>3</sup> /s p.m <sup>2</sup> ]	0,8	1,0	1,2

-Tabel 1-  
Parameters voor  
onzekerheids-  
scenario's



-Figuur 3-  
Scatterplot  
met Pareto-  
varianten. De  
cirkelgrootte geeft  
de robuustheid  
aan: hoe kleiner  
de cirkel, hoe  
robuuster. De  
cirkelkleur  
geeft  $\alpha$  aan  
corresponderend  
met de legenda.



-Figuur 4- Scatterplot  
met de Pareto-  
varianten (zie figuur  
3) met in kleuren  
aangegeven het  
absolute verschil  
tussen  $\alpha$  en de  
voorkeurs  $\alpha$

Pareto-front ligt.

## DANKBETUIGING

Dit artikel beschrijft enkele resultaten van een lopend promotieonderzoek. Dit onderzoek is uitgevoerd onder projectnummer M811.08319 in het kader van het onderzoeksprogramma van het Materials innovation institute M2i ([www.m2i.nl](http://www.m2i.nl)).

## LITERATUUR

1. Deb, K., Meyarivan, T., Pratap, A., Agarwal, S. (2002) - A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II - IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 6(2), pp. 182-197.

2. Hoes, P., Trcka, M., Hensen, J.L.M., B. Hoekstra Bonnema (2010) – Optimizing building designs using a robustness indicator with respect to user behavior – Proceedings of Building Simulation 2011, pp. 1710-1717, Sydney, November 2011.
3. Clarke, J.A. (2001) – Energy simulation in building design – second edition, Oxford, Butterworth-Heinemann.
4. Macdonald, I.A. (2002) - Quantifying the effects of uncertainty in building simulation – Ph.D. thesis, University of Strathclyde.
5. Hoes, P., Hensen, J.L.M., Loomans, M.G.L.C., Vries, B. de, Bourgeois, D. (2009) - User behavior in whole building simulation - Energy and Buildings, 41(3), pp. 295-302.