

# HET BETROUWBAAR BEPALEN VAN DE ENERGIEPRESTATIE VAN GEBOUWEN GEBASEERD OP FULL-SCALE DYNAMISCHE METINGEN

## EEN SAMENVATTING VAN DE 'INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, ENERGY IN BUILDINGS AND COMMUNITIES'(IEA EBC) ANNEX 58

**Dit artikel geeft een overzicht van de belangrijkste resultaten van de 'International Energy Agency, Energy in Building and Communities' (IEA EBC) Annex 58 over het betrouwbaar bepalen van de energieprestatie van gebouwen gebaseerd op full-scale dynamische metingen. Bij dit internationale project is veelvuldig gebruik gemaakt van de z.g. 'inverse modeling' methode. Een gedetailleerde toepassing hiervan wordt gepresenteerd. De algemene conclusie is dat er een belangrijke bijdrage is geleverd aan het betrouwbaar bepalen van thermische prestaties van eenvoudige gebouwen. Bij het vervolgonderzoek, in de vorm van een nieuwe Annex, komen complexere gebouwen met gebruikers en installaties aan bod.**



dr.ir. A.W.M. (Jos) van Schijndel, Technische Universiteit Eindhoven, Faculteit Bouwkunde, unit Building Physics and Services



ir. R.P. (Rick) Kramer, Technische Universiteit Eindhoven, Faculteit Bouwkunde, unit Building Physics and Services

### INTRODUCTIE

Het 'International Energy Agency, Energy in Buildings and Communities' (IEA-EBC) is een organisatie die zich bezig houdt met onderzoek en innovatie in de gebouwde omgeving [1]. Het initieert onderzoeksprojecten onder de 26 lidstaten, die er momenteel lid van zijn. Het doel is o.a. samenwerking bevorderen en kennis genereren in de vorm van wetenschappelijke rapporten en samenvattingen voor beleidsmakers. Belangrijke onderzoeksthema's van dit moment zijn: (1) Integrale planning en ontwerpen van gebouwen; (2) Energiesystemen; (3) Gebouwschil; (4) Toepassingen op wijkniveau; (5) Werkelijk energiegebruik van gebouwen. Onder dit laatste thema valt de Annex 58 over het betrouwbaar bepalen van de energieprestatie van gebouwen gebaseerd op full-scale dynamische metingen [2,3].

De opbouw van het artikel is als volgt. In deze paragraaf worden de achtergrond en de doelstellingen van de IEA-EBC Annex 58 behandeld. In paragraaf 2 worden de belangrijkste resultaten gepresenteerd, met deelparagrafen voor iedere deeltaak. Daarna wordt de toepassing van inverse modeling besproken. Tot slot zullen de conclusies worden gepresenteerd.

### Achtergrond van de IEA-EBC Annex 58

In veel landen worden steeds strengere eisen opgesteld door wetgeving op het gebied van energieprestatie van gebouwen. De eisen zijn gebaseerd op het theoretische energieverbruik van gebouwen, zowel van bestaande gebouwen als van gebouwen in de ontwerpfase. Echter, verschillende studies hebben reeds aangetoond dat het werkelijk energieverbruik van gebouwen aanzienlijk kan afwijken van de berekende theoretisch waarde. Een deel van de afwijkingen kan worden toegeschreven aan het

gebruikersgedrag. Dit is tevens één van de belangrijkste onderwerpen van het onderzoek binnen IEA ECBCS Annex 53 [4]. Een ander heel belangrijk deel kan worden toegeschreven aan de onzekerheid in fysische eigenschappen van het gebouw en installaties. Full-scale dynamische metingen aan gebouwen geven inzicht dat de kloof tussen de theoretisch voorspelde en de werkelijke waarde kan verkleinen. Full-scale testen zijn tevens nuttig om de energieprestaties van bouwdeelen en hele gebouwen te onderzoeken, inclusief de invloed van de afwerking. Dit wordt ondersteund door figuren 1 en 2. Figuur 1 laat de invloed van luchtstroming rondom isolatiemateriaal in de spouw door een slechte afwerking goed zien [5]. Ondanks een ontworpen U-waarde die correspondeert met een hoge isolatiewaarde van  $0,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ , is de werkelijke waarde, bekend van full-scale metingen,  $0,8 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Dit betekent een toename van meer dan 300%.

Figuur 2 vergelijkt de ontwerp- en de gemeten waarden van het warmteverlies (W/K) van 18 nieuwbouw woningen in Engeland [6]. Dit laat zien dat bij geen enkele woning de ontwerpwaarde van het warmteverlies wordt behaald. De werkelijke gemeten warmteverliezen zijn in alle gevallen hoger, tot wel 200% van de berekende waarde.

De laatste jaren is het full-scale testen toegenomen op zowel bouwelementen (bijvoorbeeld in Paslink-cellen of in-situ op bouwdeelen) als gebouwen (thermische prestaties en energie-efficiëntie). Het is dus duidelijk geworden dat, tegen de verwachting in, de ontwikkeling van numerieke gereedschappen niet hebben geleid tot het overbodig maken van full-scale metingen. Integendeel, door de grote toename van toegepaste numerieke simulaties is er tegelijkertijd ook een hernieuwde belangstelling voor het

full-scale testen en valideren. Hierbij ligt de focus op de experimentele evaluatie van bouwdeelen. Ook voor bouwdeelen zijn full-scale metingen beschikbaar. Deze zijn echter maar ten dele bruikbaar als het over het complete energieverlies van gebouwen gaat.

Full-scale metingen vereisen een hoge kwaliteit over de gehele meetprocedure, te beginnen met een goede test infrastructuur. Pas als deze aanwezig is, kan een goede profopstelling worden ontworpen. Zodra de vereiste kwaliteit op één van de onderdelen van de methodologie en meetprocedure niet op orde is, kan de uitkomst onnauwkeurig en onbetrouwbaar worden. Dit is de aanleiding geweest om een internationaal project in het kader van het IEA ECBCS te starten. De doelstellingen worden in de volgende paragraaf beschreven.

### Doelstellingen van de IEA-EBC Annex 58

Uit het voorgaande blijkt dat een betere karakterisering en voorspelling van het werkelijke energieverbruik essentieel is. Het kwantificeren van de werkelijke energieprestaties van gebouwen, het valideren van onze rekenmodellen en integratie van nieuwe, geavanceerde innovaties kan alleen effectief worden gerealiseerd door in-situ testen en dynamische data-analyse. Strachan en Baker [7] beschrijven een aantal belangrijke voorwaarden voor succesvolle in-situ metingen: (1) Het opzetten van een goede testomgeving (testcellen of echte gebouwen, nauwkeurigheid van de sensoren en correcte installatie, data-acquisitie software); (2) Een robuust meetprogramma (meetplan, randvoorwaarden voor het testen); (3) Een betrouwbare data-analyse. Hoewel er al meetactiviteiten van gebouwen in-situ plaats vinden, bereiken deze vaak niet de vereiste kwaliteit in een of meer van de bovengenoemde gebieden. Het resultaat is dat de uitkomsten vanuit een wetenschappelijk oogpunt incompleet en/of te onnauwkeurig zijn. De IEA EBC Annex 58 heeft daarom de volgende twee hoofddoelen gesteld:

- Ontwikkel gemeenschappelijke kwaliteitsnormen en procedures voor dynamische full-scale metingen om tot betere energieprestatie analyses te komen;
- Ontwikkel en valideer rekenmodellen voor het karakteriseren en voorspellen van thermische prestaties van bouwdeelen en hele gebouwen.

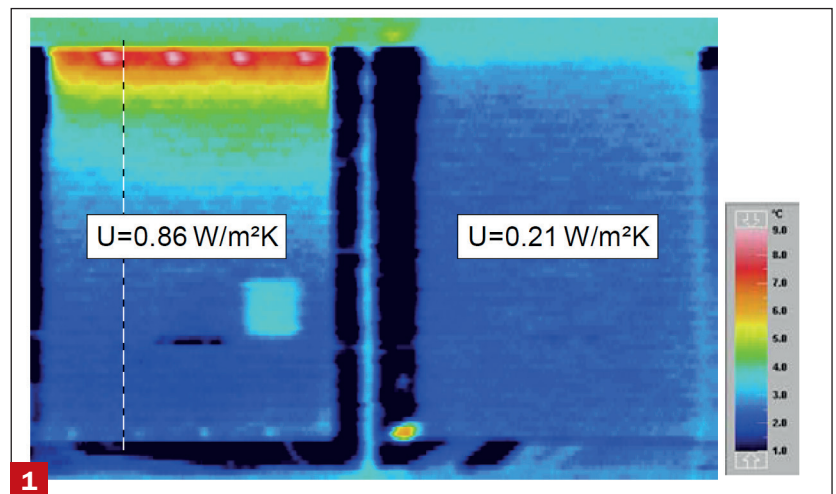
Het uiteindelijke doel van de Annex 58 is derhalve: ‘Het ontwikkelen van de benodigde kennis, gereedschappen en netwerken, ten behoeve van betrouwbare in-situ dynamische metingen en analyse methoden die gebruikt kunnen worden voor het bepalen van de werkelijke energieprestaties van bouwdeelen en gehele gebouwen’. Om dit doel te bereiken zijn een aantal deeltaken (Eng: Subtask) geformuleerd. Deze zijn in Figuur 3 weergegeven.

De deeltaken worden samen met de belangrijkste resultaten in de volgende paragraaf gepresenteerd.

## RESULTATEN IEA ECB ANNEX58

### Inventaris full-scale testopstellingen

Het doel van Subtask 1 (zie figuur 3) was een overzicht en een evaluatie te geven van de huidige in-situ full-scale testopstellingen. Onder een full-scale testopstelling wordt verstaan: opstellingen speciaal gemaakt voor het doen



Infraroodopnamen van de oppervlaktetemperatuur aan de buitenkant van twee goed geïsoleerde spouwmuren in het VLIET-test gebouw van de KU Leuven. De invloed van de afwerking is goed te zien. Links: Slechte afwerking waarbij luchtstroming rondom de isolatie in de spouw waarneembaar is. Rechts: Goede afwerking. De getallen geven de gemeten U-waarde, de berekende waarde is in beide gevallen 0,2 W/m²K

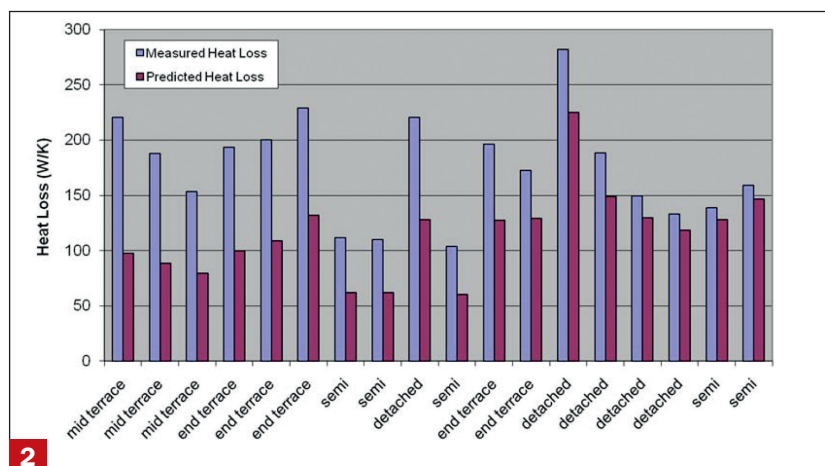
van experimenten, die de energieprestatie van bouwdeelen, installaties en gehele gebouwen onder realistische randvoorwaarden meten. Om dit mogelijk te maken zijn een gecontroleerd binnenklimaat, goed gedefinieerde constructies en kwalitatief hoogwaardige instrumenten noodzakelijk. Dit type opstelling overbrugt het gat tussen precieze laboratorium metingen en het monitoren van de energieprestaties van gebouwen. Het resultaat is een rapport waarin 25 bestaande testfaciliteiten zijn beschreven van diverse instituten wereldwijd [8]. De testopstellingen zijn geïnclassificeerd naar: Doel van opstelling, typering instrumentarium en gebruik, voorbeelden van metingen en analyse methodes. Het rapport is opgedeeld in twee delen: bouwdeel en gebouw.

Een grote groep full-scale testopstellingen heeft tot doel om de energieprestatie van bouwdeelen te meten. Dit gebeurt door het bouwdeel aan de ene kant een stabiel binnenklimaat op te leggen en aan de andere kant het buitenklimaat waar het geheel is gelokaliseerd. De te testen bouwdeelen zijn bijvoorbeeld constructies van diverse materialen waaronder glas, verticale en schuine daken enz. De uitkomsten worden gebruikt om modellen van de energieprestatie te valideren of om de energieprestatie zelf te karakteriseren.

De andere groep bestaat uit complete gebouwen bedoeld voor het meten van de energieprestatie en binnenklimaat onder een variërend buitenklimaat. De geometrie en constructies van dit type gebouw zijn vaak wat eenvoudiger en daardoor beter gedefinieerd in vergelijking met ‘echte’ gebouwen. Dit draagt bij aan het reduceren van de onnauwkeurigheid. Bij deze testfaciliteiten wordt het bewonersgedrag op drie manieren meegenomen: (1) geen bewoners; (2) bewonersgedrag wordt op gecontroleerde wijze als randvoorwaarde gecreëerd door apparaten; (3) daadwerkelijke aanwezigheid van bewoners.

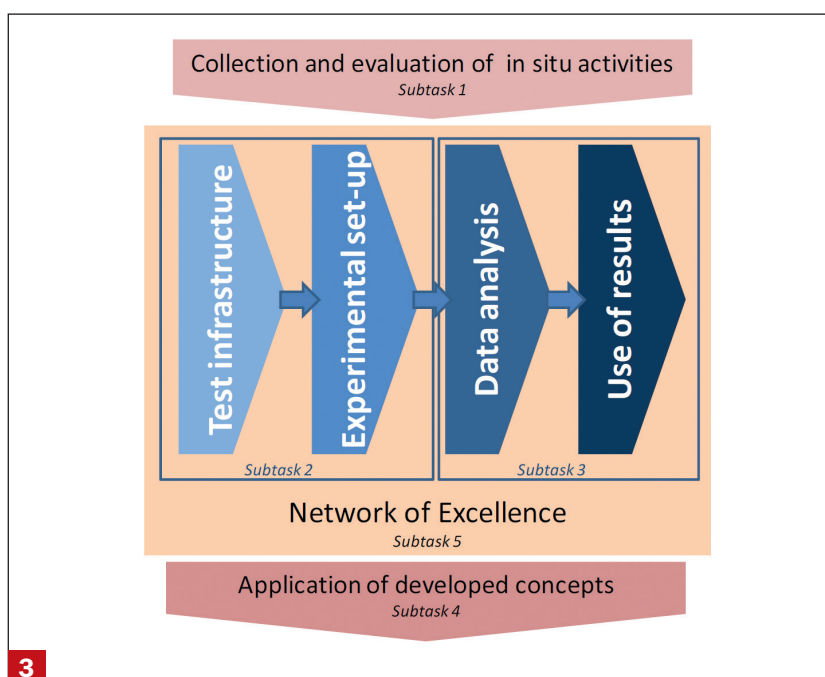
De inventaris is een handig gereedschap voor zowel onderzoekers die zelf opstellingen willen bouwen als producenten die innovatieve bouwdeelen experimenteel willen laten evalueren.





2

Gemeten versus voorspelde waarden van het warmteverlies (W/K) van 18 nieuwbouw woningen in Engeland



3

Een schematisch overzicht van de deeltaken (Subtasks) van de Annex 58. Voor iedere Subtask zijn afzonderlijke rapportages gepubliceerd

### Beslisboom

Eén van de resultaten van Subtask 2 (zie figuur 3) is een stappenplan dat gebruikt kan worden als hulpmiddel bij het selecteren van de juiste meetopstelling en/of apparatuur voor het bepalen van de energieprestatie van bouwdelen en gebouwen. De beoogde gebruikers zijn technici met een academische en/of een industriële achtergrond.

Het stappenplan is geïmplementeerd als beslisboom met een database. De opbouw van het geheel is uitgevoerd en getest door deskundigen van de Annex 58. De beslisboom leidt de gebruiker via een aantal vragen over het gewenste type meting naar informatie over bestaande testprocedures en normen. Indien deze informatie in de database beschikbaar is wordt deze getoond of wordt een verwijzing naar de details van de te verstrekken proef gegeven [9].

### Validatiestudie

Er is een groot gebrek aan hoogwaardige datasets van echte gebouwen (in tegenstelling tot testcellen) die

geschikt zijn voor het valideren van de dynamische thermische simulatieprogramma's. Een evaluatie van de beschikbare testfaciliteiten voor empirische validatie werd uitgevoerd aan het begin van het project. Twee validatie experimenten zijn uitgevoerd: de eerste in de zomer van 2013, de tweede in het voorjaar van 2014. De methodologie van de validatie bestond uit: (1) Experimenteel ontwerp; (2) de ontwikkeling van een gedetailleerde simulatie omschrijving; (3) het uitvoeren van een 'blind validation' door de desbetreffende teams; (4) analyse van de resultaten; (5) een 'open validation' door de teams; (6) analyse. Meer dan 20 teams hebben meegedaan aan deze studie met een heel breed scala aan simulatie- en rekensoftware. Elk experiment omvatte uitgebreide experimentele testreeksen van bijna 2 maanden, om de dynamische respons van de gebouwen volledig te testen. Een samenvatting van de resultaten is gepubliceerd in [10].

### CEN standaardisatie

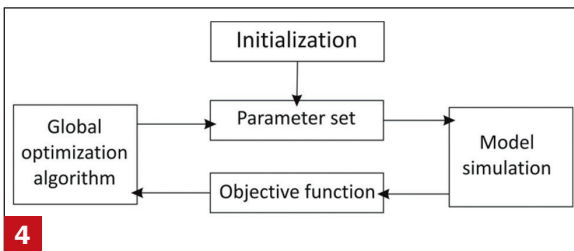
In 2009 werd besloten om een werkgroep (CEN/ TC89/ WG13) in te stellen met als doel het ontwikkelen van een nieuwe norm op het gebied van in-situ testen van gebouwen en bouwdelen. Tot op de dag van vandaag is een dergelijke norm nog niet ontwikkeld. Bestaande normen die een relatie hebben met in-situ metingen zijn:

- ISO 9869 [12]. Het in-situ meten van thermische weerstand en thermische transmissie. Beperkt tot eendimensionale warmtestroom en voor homogene lagen. Het doel is vooral component karakterisering.
- ISO 6946 [12]. Dit is een berekeningsmethode, gebaseerd op eendimensionaal warmtetransport van bouwcomponenten, met uitzondering van deuren, ramen en andere beglazing en vliesgevels. De berekeningsmethode gaat uit van homogene lagen inclusief luchtlagen.

Beide bovengenoemde normen maken gebruik van de ISO 7345 [12]. Deze internationale norm omschrijft fysische grootheden met bijbehorende symbolen en eenheden op het gebied van thermische isolatie. Discussies over mogelijke nieuwe Europese standaarden inzake in-situ metingen van isolatie en energieprestatie lopen dus al vanaf 2009. DYNASTEE (DYNAMIC Simulation, Testing and Analysis of Energy and Environmental performances of buildings) is een netwerk dat al vele jaren betrokken is bij tal van Europese onderzoeksprojecten op het gebied van outdoor testen, analyse en modellering van gebouwen en bouwdelen [11]. Het idee is om de kennis van de Annex 58 te gebruiken voor het ontwikkelen van nieuwe kwaliteitsnormen omtrent dynamische full-scale metingen via het DYNASTEE netwerk. De nieuwste ontwikkelingen zijn te vinden bij [11].

### INVERSE MODELING

Zoals eerder besproken wijkt de gerealiseerde energieprestatie vaak af van de ontwerpwaarde, bijvoorbeeld zoals geïllustreerd in figuur 1. Dit kan verschillende oorzaken hebben, waarvan een slechte afwerking er één is. Het gebruik van standaard modelleer technieken, bijvoorbeeld 'forward modeling', waarbij een model ontwikkeld wordt vanuit de ontwerpwaarden, of vanuit een inventarisatie ter plekke, kan in zo'n geval tot onrealistische simulatieresultaten leiden. Daarom heeft het projectteam van de Annex 58 veel aandacht besteed aan het zogenaamde



4 Kalibratieproces

inverse modelleren, waarbij een model verkregen wordt vanuit meetdata. Meestal worden hiervoor lineaire modellen gebruikt, zoals de state-space vorm. In het Engels worden zowel de termen ‘inverse modeling’ als ‘system identification’ gebruikt.

Het proces van inverse modelleren kent drie hoofdfasen: (i) het model wordt ontwikkeld, maar de waarden van parameters zijn nog onbekend; (ii) metingen worden verricht aan het systeem, bijvoorbeeld een gebouwdeel, of gebouwzone om data te verkrijgen van de inputs en outputs; (iii) modelkalibratie (figuur 4), een iteratief proces waarbij de gemeten inputs worden gebruikt als input voor het model, vervolgens simuleert het model de output, het verschil wordt berekend tussen de gemeten en gesimuleerde output (de objective function), en een optimalisatiealgoritme bepaalt nieuwe parameterwaarden die zouden kunnen leiden tot een beter simulatieresultaat. Dit proces wordt vele malen herhaald totdat het optimalisatiealgoritme geen betere parameterwaarden meer kan vinden.

De parameterwaarden van het model moeten opgevat worden als effectieve waarden: de geïdentificeerde U-waarde uit figuur 1, zou gelijk zijn aan 0,86 W/m<sup>2</sup>K. Dit is de effectieve U-waarde, terwijl 0,2 W/m<sup>2</sup>K de ontworpen waarde is.

Tijdens het IEA EBC Annex 58 project is een Round Robin Test Box gerealiseerd door de KU Leuven, zie figuur 5. De box is voorzien van vele sensoren, waaronder binnenluchttemperatuur op drie verschillende hoogten, oppervlaktetemperaturen van alle wanden zowel binnen als buiten, en warmtestroommeters aan alle wanden. Daarnaast zijn klimaatmetingen verricht, waaronder buitenluchttemperatuur, diffuse en directe zonnestraling, windsnelheden en -richtingen. Verschillende datasets zijn gecreëerd, eerst door BBRI in België, daarna door CIEMAT in Spanje.

Het doel van de Round Robin Test Box was om het huidige algemene competentieniveau vast te stellen van inverse modeling. De exacte constructie van de box was alleen bekend bij de KU Leuven. Vele teams uit verschillende landen hebben inverse modeling toegepast om het dynamische gedrag van de box te kunnen simuleren en de totale UA-waarde [W/K] te kunnen bepalen.

Door de TU/e zijn twee kandidaatmodellen ontwikkeld in state-space vorm, zie figuur 6 A en B. Het 2S6P-model heeft twee states en zes parameters en het 3S9P-model heeft drie states en negen parameters. De states zijn Tw (wandtemperatuur), Ti (binnenluchttemperatuur), en Tint (temperatuur van interne thermische massa zoals verwarmingsapparaat). De parameters:



5 Round Robin Test Box in Almería, Spanje

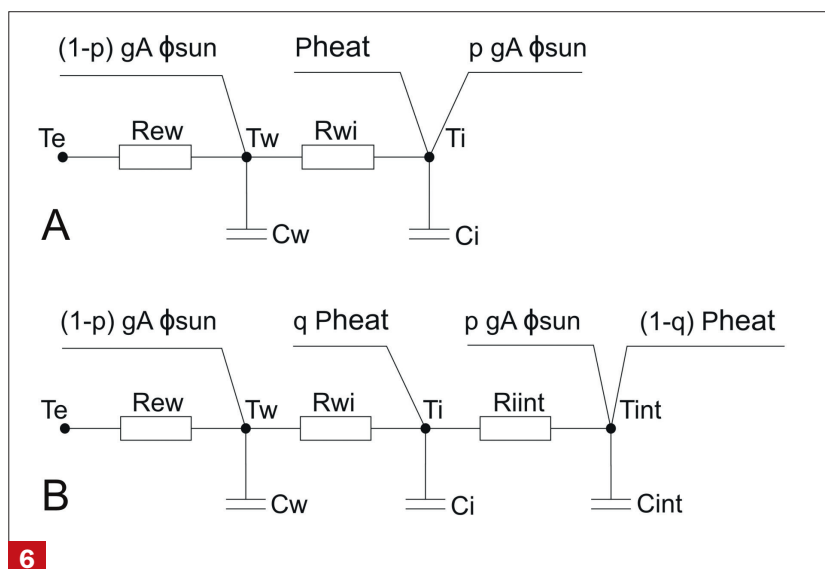
- Rew [K/W] is de warmteweerstand tussen de buitenlucht en de wand inclusief een deel van de wand;
- Rwi [K/W] is de warmteweerstand tussen de wand en de binnenlucht inclusief een deel van de wand;
- Riint [K/W] is de warmteweerstand tussen de binnenlucht en de interne delen;
- Cw [J/K] is de thermische capaciteit van de wanden;
- Ci [J/K] is de thermische capaciteit van de binnenlucht inclusief een klein deel van de wanden;
- Cint [J/K] is de thermische capaciteit van de interne delen;
- gA [m<sup>2</sup>] is de zontoetredingsfactor;
- p [-] is een verdeelfactor voor zonnestraling;
- q [-] is een verdeelfactor voor warmteafgifte door het verwarmingssysteem.

Een globaal optimalisatiealgoritme (PatternSearch, MATLAB) is gebruikt voor de identificatie van de parameters. De resulterende kwaliteit van de simulatie is weergegeven in figuur 7. Het 2S6P-model presteert minder goed dan het 3S9P-model, hoewel de bereikte nauwkeurigheid al moeilijk te evenaren is met forward-modeling. De nauwkeurigheden van de twee modellen zijn gekwantificeerd in tabel 1.

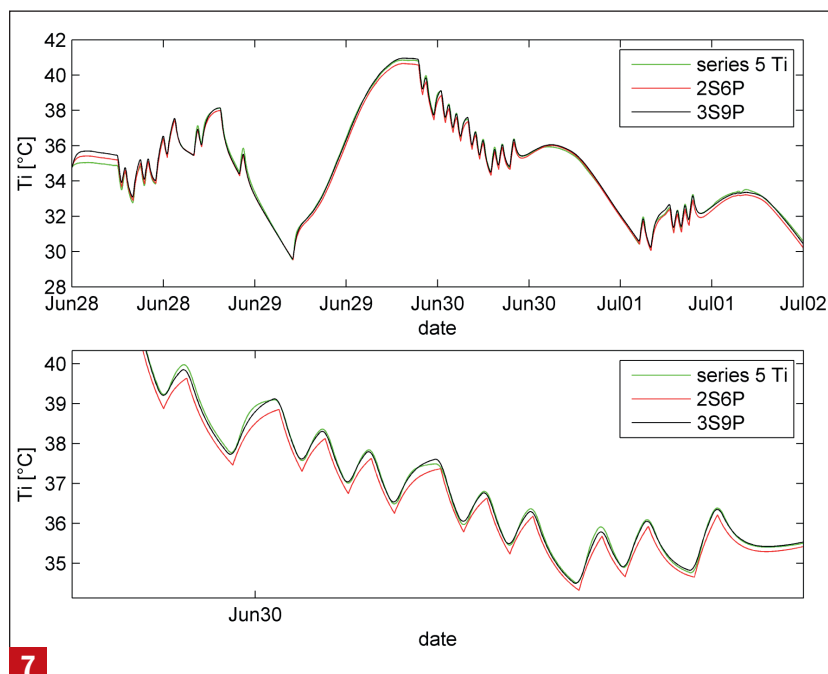
Het 3S9P-model is in staat het dynamische gedrag van de test box zeer nauwkeurig te simuleren. Dit betekent dat de structuur van het model, zoals weergegeven in figuur 6, de werkelijkheid voldoende nauwkeurig benaderd. Doordat de structuur klopt, konden de parameterwaarden dusdanig gekalibreerd worden zodat de invloed van externe factoren, zoals buitentemperatuur en zonnestraling, goed vertaald is naar de binnentemperatuur. ▶

Tabel 1: Simulatiefouten van het 2S6P-model en 3S9P-model uitgedrukt in gemiddelde gekwadrateerd fout (MSE), gemiddelde absolute fout (MAE) en de fitheid (Goodness of fit)

	MSE [°C <sup>2</sup> ]	MAE [°C]	FIT [%]
2S6P model	0,04	0,18	91,93
3S9P model	0,01	0,08	96,38



A) 2S6P-model, en B) 3S9P-model



Gemeten binnentemperatuur (series 5 Ti) vergeleken met simulaties van twee gekalibreerde modellen, weergegeven over een aantal dagen (boven) en een aantal uren (onder)

Naast het simuleren van outputs, kan het inverse modeleren gebruikt worden om de effectieve waarde van parameters te achterhalen, zoals bijvoorbeeld de totale warmteverliescoëfficiënt, de UA-waarde [W/K]. De gekalibreerde UA-waarde van het 2S6P-model is 4,10 W/K en van het 3S9P-model 4,46 W/K. De door de KU-Leuven gemeten UA-waarde is gemiddeld 4,2 W/K, met een onzekerheid van 0,3 W/K. Dus, beide modellen hebben de UA-waarde binnen deze marge voorspeld.

Mogelijke toepassingen van het inverse modeleren: nauwkeurige simulatie modellen genereren in gevallen waarin weinig informatie beschikbaar is over de exacte constructie van het gebouw, bijvoorbeeld monumenten; voorspellende regelingen op basis van een model; fout-diagnose in installatiesystemen door afwijkend gedrag te kunnen vergelijken met voorspeld gedrag.

## CONCLUSIES

Het IEA EBC Annex 58 project over het betrouwbaar bepalen van de energieprestatie van gebouwen gebaseerd op full-scale dynamische metingen, heeft geresulteerd in:

- Betrouwbare procedures voor dynamische full-scale metingen van energieprestaties van gebouwen.
- De ontwikkeling en validatie van rekenmodellen met behulp van inverse modeling, waarmee het mogelijk is thermische prestaties te bepalen van (eenvoudige) gebouwen en bouwdelen.
- Rapportages van de hierboven beschreven resultaten. Met name de inventaris over de full-scale testopstellingen kan zeer nuttig zijn voor producenten van innovatieve bouwconstructies, die hun producten experimenteel willen toetsen.

## Dankwoord

De auteurs zijn de RVO en DYNASTEE zeer erkentelijk voor het mede mogelijk maken van dit artikel. Daarnaast willen de auteurs het gehele Annex 58 team bedanken voor de inhoudelijke bijdragen. ■

## BRONNEN

- [1] International Energy Agency, Energy in Building and Communities (IEA EBC), *Homepage*, bekeken op 1 mei 2016, <http://www.iea-ebc.org>
- [2] IEA EBC, *Annex 58*, bekeken op 1 mei 2016, <http://www.ecbcs.org/annexes/annex58.htm>
- [3] IEA EBC, *Annex 58p project*, bekeken op 1 mei 2016, <http://www.kuleuven.be/bwf/projects/annex58>
- [4] IEA EBC, *Annex 53*, bekeken op 1 mei 2016, <http://www.iea-ebc.org/index.php?id=141>
- [5] Hens, H., Janssens, A., Depraetere, W., Carmeliet, J. and Lecompte, L., *Brick cavity walls: a performance*, 2007
- [6] Wingfield, J., Miles-Shenton, D. and Bell, M., *Comparison of Measured versus Predicted Heat Loss for New Build UK Dwellings – Unpublished Data*, Leeds Metropolitan University, Leeds, UK, 2011
- [7] Strachan, P.A., Baker, P.H., *Outdoor testing, analysis and modelling of building components*, *Building and Environment* 43: 127–128, 2008
- [8] Janssens, A., and Roels, S., *Full-scale test facilities for evaluation of energy and hygrothermal performances*, bekeken op 1 mei 2016, <http://dynastee.info/publications/books/>
- [9] Dastbaz, M., Strange, I. and Selkowitz, S., *Building Sustainable Futures: Design and the Built Environment* ISBN 978-3-319-19347-2, 2015
- [10] Strachan, P., Monari, F., Kersken, M. and Heusler, *IEA Annex 58: Full-scale Empirical Validation of Detailed Thermal Simulation* *Energy Procedia* 78, 2015
- [11] Dynastee, *Homepage*, bekeken op 1 mei 2016, <http://www.dynastee.info>
- [12] ISO <http://www.iso.org>, bekeken op 1 mei 2016