

Gedetailleerd gebruikersgedrag in gebouwsimulatie

Er is een globale methode ontwikkeld om realistisch gebouwgebruik in een kantoorgebouw te integreren in een onzekerheidsanalyse voor het energiegebruik. Dit gebeurt via een modulair en stochastisch gedragsmodel. Het gedragsmodel bestaat uit submodellen voor bezetting, gebruik van zonwering, openen van het raam, sturing van het kunstlicht en warmteproductie door kantoorapparatuur. Alle submodellen zijn geselecteerd op basis van een literatuurstudie. Deze methode wordt toegepast in een Monte Carlo-analyse van de onzekerheid door gebouwgebruik op gesimuleerde energiebehoeften van een kantoorgebouw.

Ir. W. (Wout) Parys, prof.dr.ir.-arch. D. (Dirk) Saelens en em.prof.dr.ir.-arch. H. (Hugo) Hens, K.U.Leuven, Afdeling Bouwfysica

INLEIDING

De laatste decennia is er grote vooruitgang geboekt met onderzoek naar dynamische gebouwsimulatie. Dit heeft quasi volgroeide computermodellen opgeleverd van de fysische processen in gebouwen en energiesystemen. Hierdoor zijn gedetailleerde studies te maken van de werking, en dus de energieprestatie, van gebouwen en het bereikte comfort in gebouwen. Het is dan ook logisch dat het gebruik van deze simulatiepakketten is doorgedrongen tot de commerciële wereld.

Echter, het comfort en energiegebruik van een gebouw is niet alleen afhankelijk van het gebouw- en systeemontwerp. Ook de aanwezigheid en controlebeslissingen van de gebruikers zijn belangrijk. Deze complexe interactie wordt in de hedendaagse praktijk van gebouwsimulatie sterk vereenvoudigd door het gebruik van geschatte, deterministische gebruikersprofielen. Op deze manier worden mogelijke adaptieve ingrepen, zoals het openen van een raam, verwaarloosd. De daarmee samenhangende onzekerheid van de

simulatie resultaten wordt zo niet meegenomen. Dit artikel biedt een kader voor zo'n onzekerheidsanalyse.

De eerste stap van een onzekerheidsanalyse voor dynamische gebouwsimulatie is de *onzekerheidsdefinitie*. In deze stap wordt aan elke parameter van de analyse de grootte en waarschijnlijkheidsverdeling van het onzekerheidsinterval toegekend. Deze stap is echter verre van duidelijk. Het doel van dit artikel is daarom het ontwikkelen en toepassen van een methode die een analyse kan uitvoeren van de onzekerheid over het energiegebruik van een gebouw, veroorzaakt door het gebruikersgedrag.

Sinds het begin van de jaren negentig worden, steeds intensiever, onderzoeken uitgevoerd naar de statistische relatie tussen de fysische condities en het gedrag van gebouwgebruikers. Deze onderzoeken concentreren zich vooral op individuele kantoorruimten. Ze hebben geleid tot empirische modellen voor de aanwezigheid in een gebouw en het gebruik van onder andere kunstlicht, zonwering en ramen.

In dit onderzoek worden de meest geavanceerde van deze gedragsmodellen geïntegreerd in een coherent gedragsmodel dat gekoppeld wordt aan een gebouwsimulatiepakket. Om rekening te houden met de reële verandering in gedrag, worden zogenaamd *actieve* en *passieve* gebruikers gedefinieerd [1]. Die 'bevolken' in verschillende verhoudingen het gesimuleerde gebouw. Het resultaat is een realistische spreiding van de te verwachten energievraag.

DE METHODE

Algemeen

In het navolgende worden de submodellen van het ontwikkelde gedragsmodel geselecteerd uit de literatuur. Alle bestaande modellen beschrijven een 'gemiddeld' gebruik van de controle mogelijkheden. Hierdoor wordt het inherente verschil tussen gebouwgebruikers uitgevlakt. Zo zal een hogere natuurlijke verlichtingssterkte leiden tot een grotere kans dat het kunstlicht wordt uitgeschakeld, maar de drempel voor actie zal voor elke gebruiker

anders zijn. Om deze veranderlijkheid te integreren in de methode, worden er representatieve *actieve* en *passieve* gebruikerstypes gedefinieerd voor elke controleoptie.

Als deze twee gebruikerstypen gespecificeerd zijn, kan de onzekerheid over de respectievelijke modelparameter uitgedrukt worden in de verdeling van beide typen over het kantoorgebouw.

Figuur 1 toont een schema van het geïntegreerde gedragsmodel en de koppeling met dynamische gebouwsimulatie. Het submodel voor de bezetting is de kern van het model.

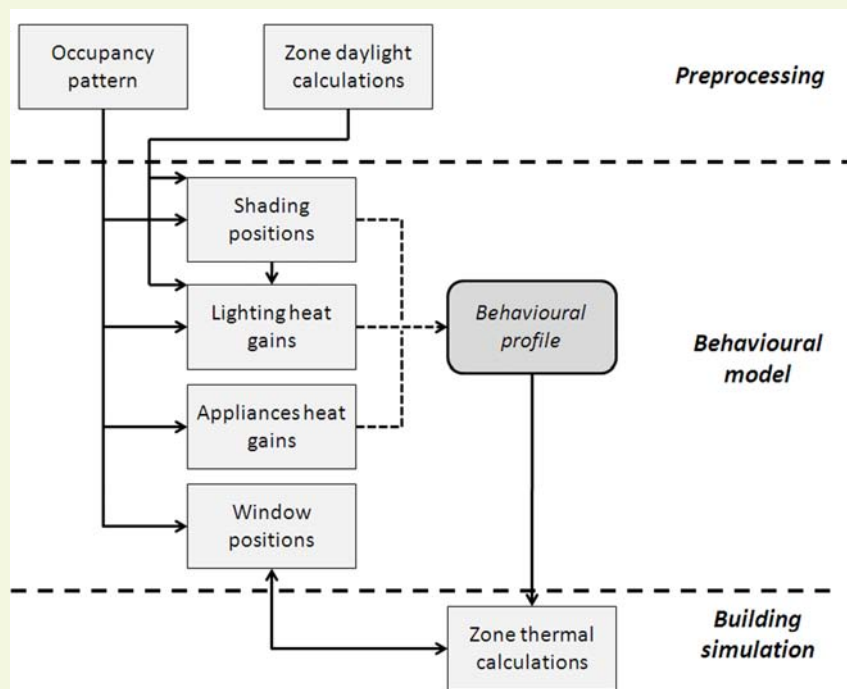
Dit omdat de waarschijnlijkheid dat een controleoptie wordt gehanteerd groter is bij binnenkomst of verlaten dan tijdens bezetting. Er wordt natuurlijk geen controleoptie gehanteerd als het kantoor onbezet is. Het bezettingspatroon wordt tijdens een *preprocessing* stap opgesteld. Ook de verlichtingssterkten door daglicht in het kantoor worden dan berekend voor alle mogelijke standen van de zonwering gedurende de volledige simulatieperiode. Dit gebeurt met de *Daysim* software.

Met de verlichtingssterkte en het bezettingspatroon als invoer, worden dan de posities van de zonwering gesimuleerd. Deze posities worden vervolgens ingevoerd om de werking van het kunstlicht te simuleren. Verschillende regelingen kunnen worden gesimuleerd, bijvoorbeeld manuele controle, daglichtdimmen of aanwezigheidsdetectie. Het volledige gedragsmodel werkt met een tijdstap van vijf minuten. Dan wordt een profiel opgesteld en als input aan het gebouwsimulatiepakket doorgegeven. Dit profiel bevat het aanwezigheidspatroon, de posities van de zonwering, de interne winsten en de warmteproductie door verlichting voor elk tijdstap van de simulatieperiode. De module die het openen van ramen simuleert, wordt *real-time* gekoppeld aan het gebouwsimulatieprogramma, omdat de berekende binnentemperaturen invloed hebben op het eventueel openen van de ramen.

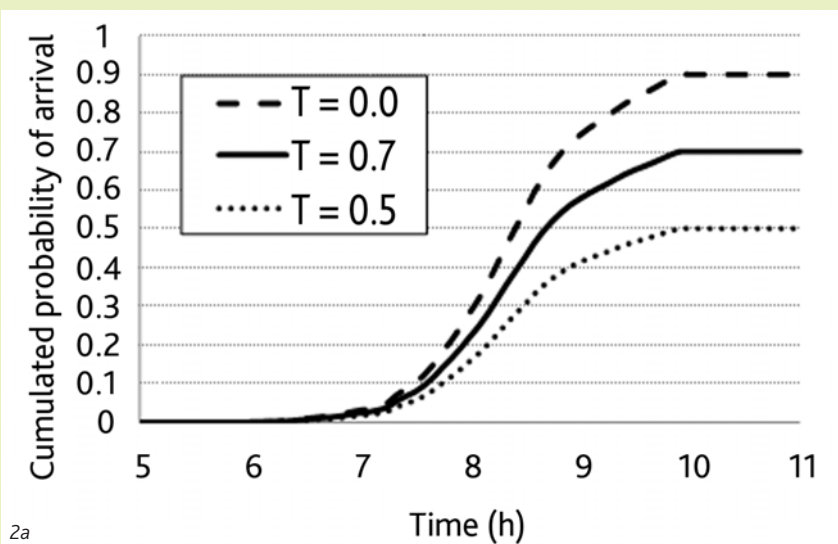
Het model is modulair opgebouwd. Dit heeft enkele voordelen. Zo kan ervoor gezorgd worden dat voor elk geval slechts de modules worden geactiveerd die van toepassing zijn. Het openen van ramen bijvoorbeeld is niet mogelijk in elk kantoorgebouw. Bovendien is het onderzoek naar het gebruikersgedrag een relatief jonge tak en dus geenszins afgerond, zoals ook zal blijken uit de volgende paragrafen. De modulaire structuur leent zich tot uitbreidingen en verbeteringen van submodellen als gevolg van het voortschrijdend onderzoek.

Submodel bezetting

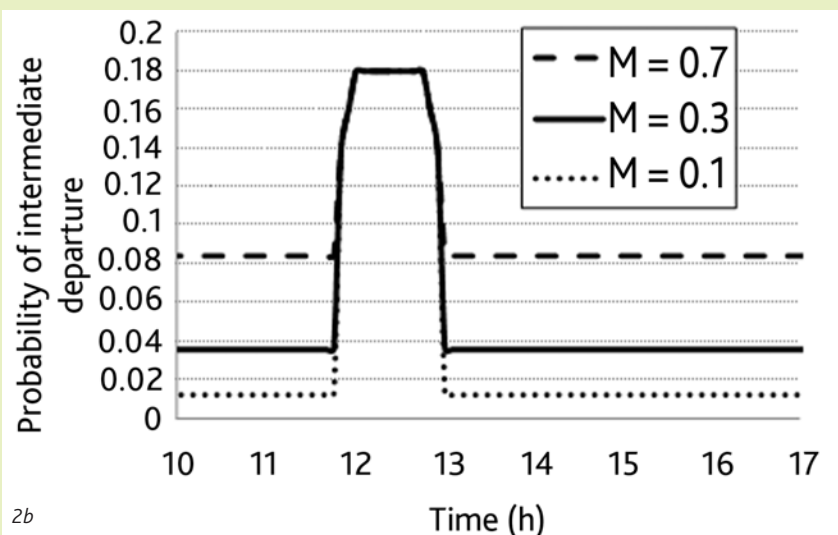
Vele onderzoekers hebben gegevens verzameld over de bezetting in individuele kantoorcellen. De gemiddelde patronen zijn sterk



-Figuur 1- schematisch overzicht van het gedragsmodel en de koppeling met gebouwsimulatiepakketten



2a



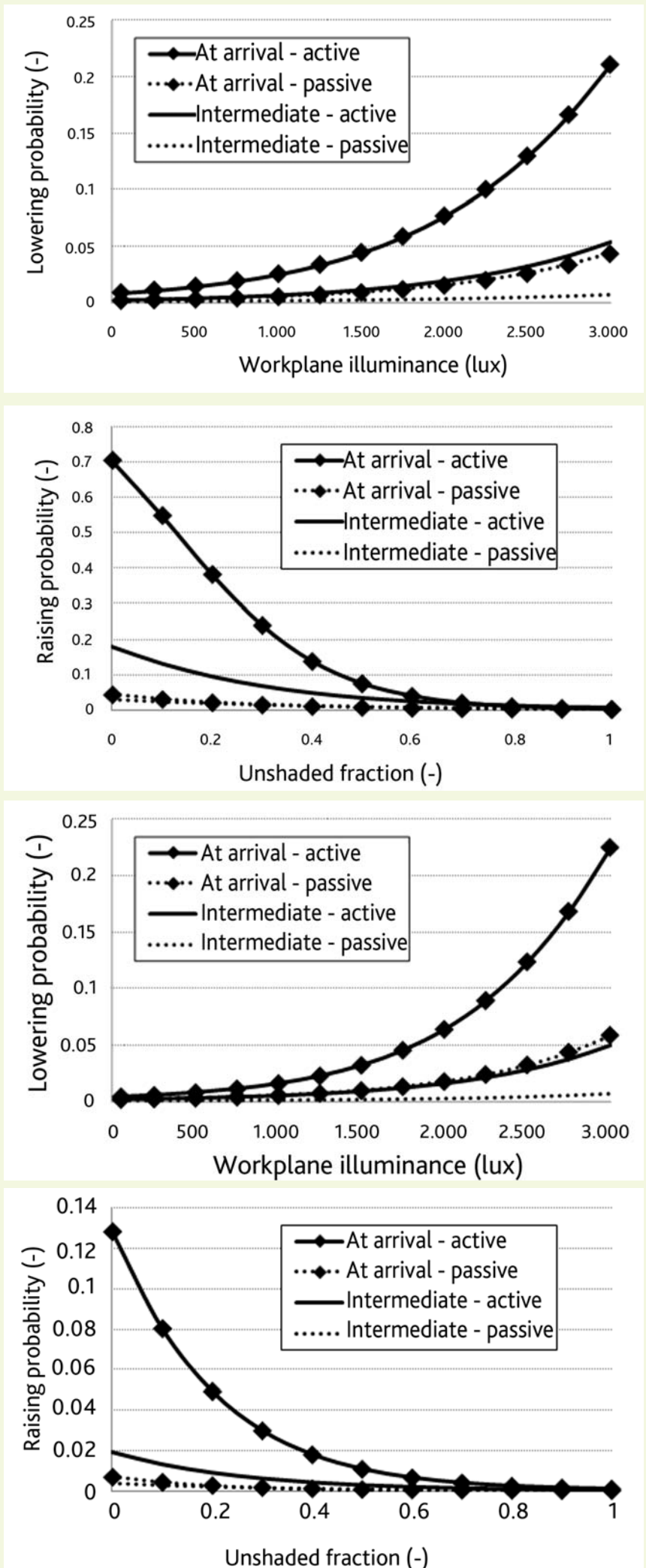
2b

-Figuur 2- a) Cumulatieve waarschijnlijkheid van aankomst voor verschillende waarden van de opkomstparameter T . b) Waarschijnlijkheid van tussentijds vertrek voor verschillende waarden van de mobiliteitsparameter M

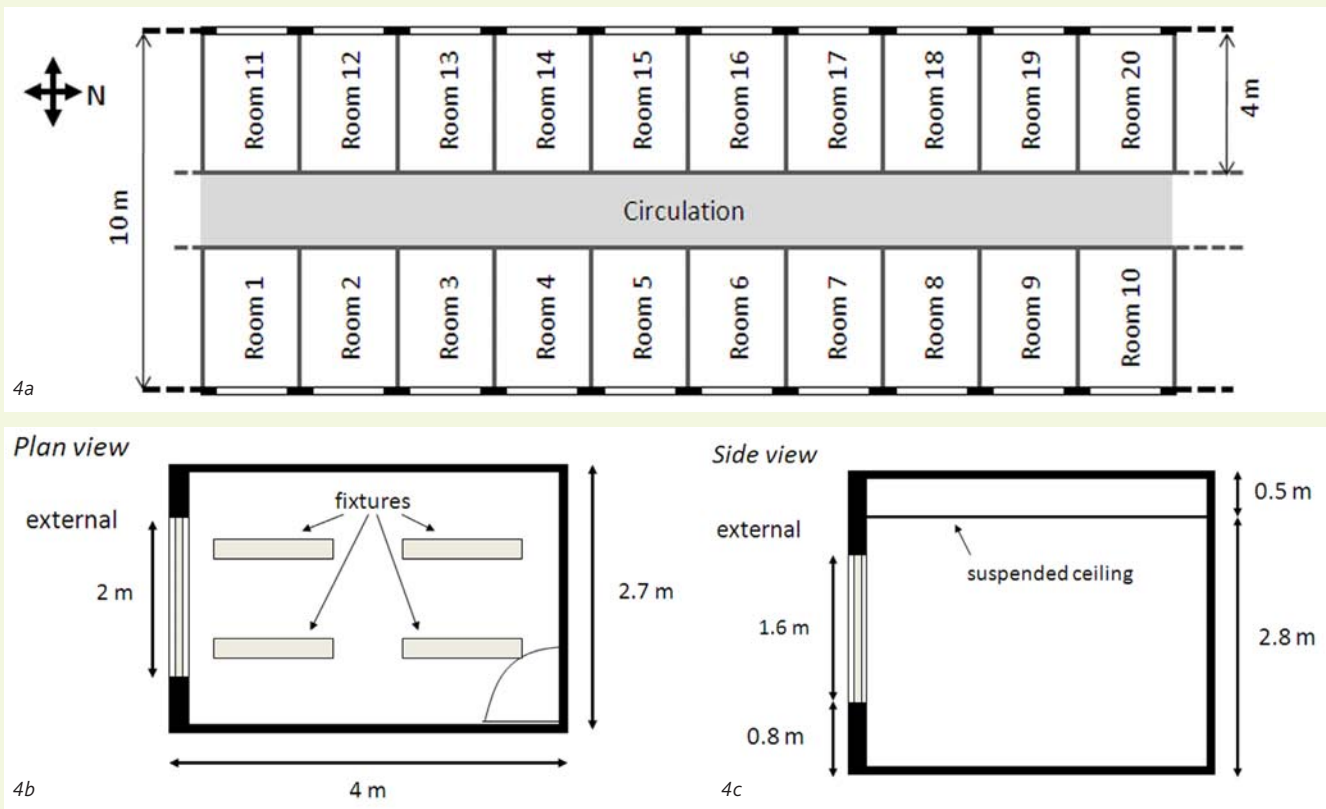
gebouwafhankelijk en bovendien worden grote standaarddeviaties gevonden. Er zijn ook enkele stochastische modellen opgesteld die trachten de opgemeten profielen te simuleren. Het bezettingsmodel uit Lightswitch [2] wordt geselecteerd voor dit onderzoek. Dit is het meest generieke model, dat veel flexibiliteit toelaat. Het is een Markov-model dat bestaat uit drie waarschijnlijkheidscurven in functie van het tijdstip van de dag, namelijk: voor de aankomst, het vertrek en de tussentijdse verplaatsingen. Om enige veranderlijkheid te introduceren, worden twee parameters gedefinieerd: de opkomstparameter T en de mobiliteitsparameter M (figuur 2).

Submodel gebruik zonwering

Er zijn reeds verscheidene studies uitgevoerd naar de manuele besturing van zonweringen. Reinhart en Voss [3] bieden een samenvatting van de bevindingen aan op basis van een uitgebreide literatuurstudie. Uit de verschillende monitorstudies blijkt dat bijna alle auteurs het erover eens zijn dat visueel comfort de belangrijkste stimulus is bij het gebruik van de zonwering, hoewel de fysische grootheden die dit comfort beschrijven vaak verschillen tussen de studies onderling. Verder blijkt ook dat gebouwspecifieke eigenschappen een invloed hebben op de resultaten, zoals het zonwerings-systeem of de manier van bedienen. Hierdoor komt het uitbreiden van deze resultaten naar andere dan de gemonitorde gebouwen onder druk te staan. Er is een gebrek aan validatie en onderlinge vergelijking van de bevindingen. Er zijn reeds enkele stochastische modellen voorgesteld die het gebruik van de zonwering beschrijven. Het meest gedetailleerde is het model van Haldi en Robinson [4], dat gebaseerd is op een dataset over een periode van zeven jaar, weliswaar van slechts één gebouw. Dit model wordt geselecteerd. Het is een Markov-model, met waarschijnlijkheden als functie van de natuurlijke verlichtingssterkte en de positie van de zonwering. Eigenlijk bestaat het uit twee submodellen met verschillende waarschijnlijkheidsfuncties: één bij aankomst in het kantoor en één tijdens aanwezigheid. *Actief* en *passief* gebruik van de zonwering worden gedefinieerd als het 25-percentiel en 75-percentiel van de individuele data (figuur 3). De combinaties van *actief* sluiten en *passief* openen en van *passief* sluiten en *actief* openen van de zonwering zijn het interessantst vanuit het standpunt van de gebouwssimulatie. Deze leiden immers tot een gesloten zonwering gedurende respectievelijk de hoogste en laagste fractie van de tijd. Naar deze combinaties zal verder gerefereerd worden als *passieve* en *actieve* gebruikers.



-Figuur 3- Waarschijnlijkheidsfuncties bij aankomst en tijdens aanwezigheid voor actief en passief gebruik van de zonwering als functie van de belangrijkste, verklarende variabele



-Figuur 4- a) Plattegrond van het kantoorgebouw. b) Plattegrond van één kantoorcel c) Doorsnede van één kantoorcel

Submodel gebruik kunstverlichting

Er is reeds heel wat onderzoek verricht naar het gebruik van kunstverlichting in individuele kantoorcellen. In tegenstelling tot het onderzoek naar het gebruik van zonwering, is er nooit veel onenigheid geweest over de verklarende variabele voor het gebruik van de kunstverlichting. Waarschijnlijkheidsfuncties zijn opgesteld voor het aanschakelen van de kunstverlichting bij aankomst en tijdens aanwezigheid in functie van de natuurlijke verlichtingssterkte en voor het uitschakelen van de kunstverlichting bij het verlaten van het kantoor in functie van de geschatte duur van de daaropvolgende afwezigheid. Deze functies zijn allen gevalideerd in verschillende gebouwen en door onafhankelijke onderzoekers. Ze mogen daarom algemeen worden toegepast. In het *Lightswitch-2002* model [1] zijn deze waarschijnlijkheidsfuncties geïmplementeerd in de submodule voor verlichting. Actieve gebruikers worden getypeerd door de afgeleide waarschijnlijkheden, terwijl *passieve* gebruikers worden gedefinieerd als daglicht-onafhankelijk. Dit wil zeggen dat ze het licht steeds aanschakelen bij aankomst 's morgens en de hele dag aanlaten.

Submodel openen ramen

In de vorige drie decennia zijn verschillende studies uitgevoerd die het manueel openen van ramen in kantoorgebouwen onder de loep namen. Hieruit zijn stochastische modellen afgeleid. Deze zijn in de regel Markov-modellen, waarbij waarschijnlijkheden voor het openen of sluiten van een raam worden

gedefinieerd. Een gewenste vergelijking van de modellen onderling en validatie van die modellen ontbreken echter. De uiteenlopende keuzes van de verklarende variabelen bemoeilijken dit. Hoewel alle modellen impliciet of expliciet uitgaan van het adaptieve principe, dat stelt dat mensen zullen reageren wanneer het comfort verstoord wordt, is er geen overeenkomst over het uitdrukken van thermisch comfort. Sommigen opteren voor de buitentemperatuur, omdat dit een input voor de gebouwsimulatie is. Anderen prefereren de binnentemperatuur, omdat deze rechtstreeks de aanleiding vormt tot eventueel openen of sluiten van het raam.

Het model van Haldi en Robinson [5] wordt in deze methode gehanteerd. Analoog aan het gebruik van de zonwering worden er *actieve* en *passieve* gebruikers gedefinieerd.

Submodel gebruik kantoorapparatuur

De studies die zijn uitgevoerd naar kantoorapparatuur, richten zich op twee onderwerpen: de absolute waarden van interne warmteproductie of het opstellen van diversiteitsprofielen die gemiddelde relatieve waarden geven. In principe lijkt het logisch dat de warmteproductie van kantoorapparatuur gelinkt kan worden aan de bezetting, maar hiernaar is nog geen onderzoek verricht.

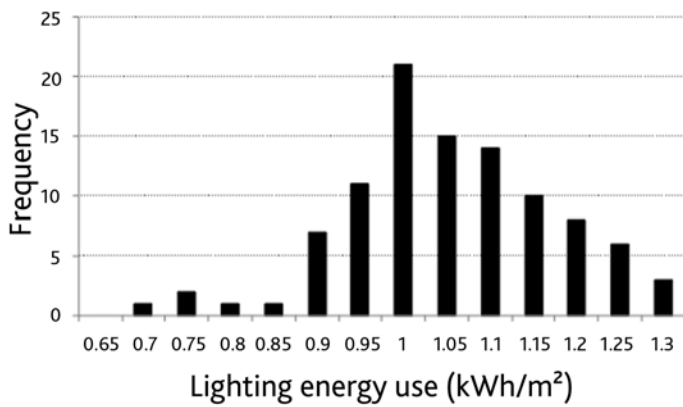
Door het gebrek aan gedetailleerde stochastische modellen, worden de warmteproductie door kantoorapparatuur op een vereenvoudigde manier gemodelleerd. Tussen de eerste aankomst 's morgens en het laatste vertrek 's avonds wordt een constante, gemiddelde

waarde voor de warmteproductie aangenomen.

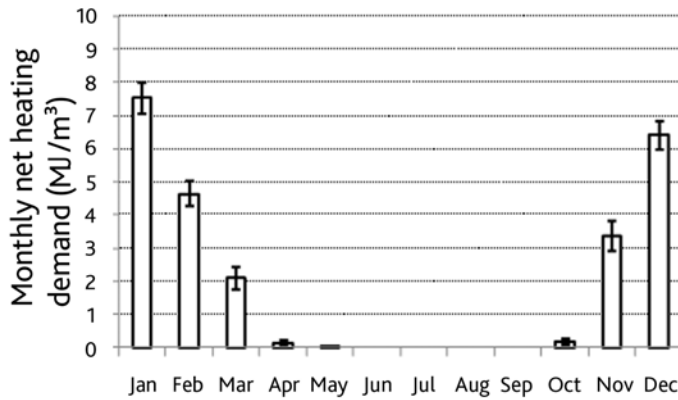
De waarden uit het onderzoek van Wilkins en Hosni [6] worden overgenomen: een gemiddelde van 8.8 W/m^2 en een spectrum van 4.8 W/m^2 tot 11.3 W/m^2 . Na het vertrek 's avonds wordt er verondersteld dat een bepaald percentage van de warmteproductie overblijft, variërend van 20% tot 50% [7].

TOEPASSING

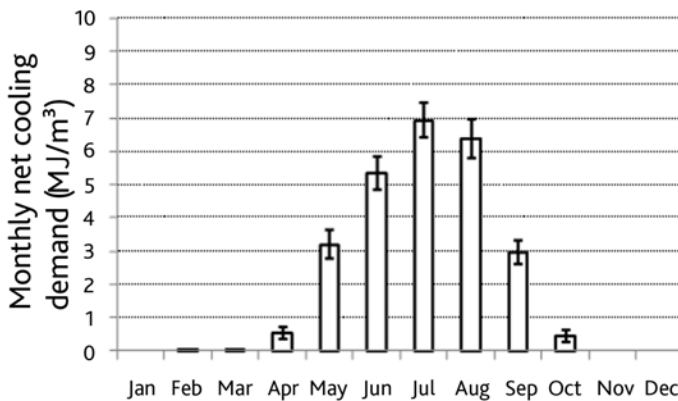
De hoger ontwikkelde methode wordt toegepast in een Monte Carlo-analyse van de energievraag van een typisch kantoorgebouw met individuele kantoorcellen (figuur 4). Deze analyse staat het toe een schatting te maken van de onzekerheid over de energiebehoeften voor verwarming en koeling en het energiegebruik voor verlichting door het gebouwgebruik. In een eerste stap zijn de grootte en verdeling van de onzekerheid op de modelparameters gedefinieerd. Voor elke parameter is een normale verdeling verondersteld. Voor de Monte Carlo-analyse is de gebouwsimulatie herhaald, telkens met nieuwe willekeurige geselecteerde waarden voor de modelparameters (mobiliteit, opkomst, percentage *passieve* gebruikers van zonwering en kunstlicht en interne warmteproductie door apparatuur). De opake geveldelen van het kantoorgebouw hebben een U-waarde van $0.6 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$. Het glaspercentage is ongeveer 40%. De U-waarde van het glas is $1.1 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$, de g-waarde 0.6 en de visuele transmissie is 0.77. Elke kantoorcel was uitgerust met een handbediende externe roldeur (visuele transmissie 0.1, totale trans-



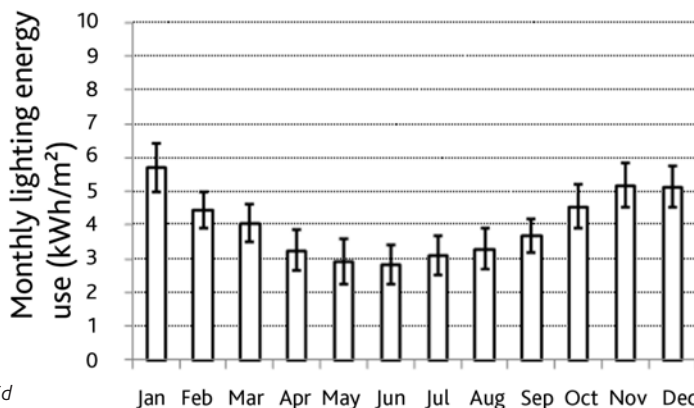
5a



5b



5c



5d

-Figuur 5- Resultaten van de Monte Carlo-analyse: a) Frequentieverdeling van het energiegebruik voor verlichting in december. b) Gemiddelde waarde en standaarddeviatie van de maandelijkse verwarmingsbehoefte. c) Gemiddelde waarde en standaarddeviatie van de maandelijkse koelbehoefte. d) Gemiddelde waarde en standaarddeviatie van het energiegebruik voor verlichting

missie 0.12, totale reflectie 0.44). De hygiënische ventilatie bedraagt $36 \text{ m}^3/\text{h}$ per persoon. Het infiltratievoud is constant verondersteld op 0.1 h^{-1} . De instelwaarden voor verwarming en koeling zijn respectievelijk $20 \text{ }^\circ\text{C}$ en $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Aangezien er actieve koeling is voorzien, was het openen van ramen niet toegelaten. De verwarming, koeling en ventilatie waren in werking tijdens de nominale kantooruren, nl. van 8 tot 18 uur. Het geïnstalleerde vermogen van het kunstlicht was $11 \text{ W}/\text{m}^2$. De besturing ervan gebeurde manueel via een schakelaar bij de deur. De energiegebehoefte is gesimuleerd voor een volledig jaar voor het gematigde klimaat van Ukkel, België. Het kantoorgebouw is gesimuleerd als een multizonegebouw in Trnsys. De *actieve* en *passieve* gebruikers, waarvan de verhoudingen bepaald zijn uit het samplen van de modelparameters, zijn willekeurig verdeeld over de kantoorcellen. Honderd simulaties zijn uitgevoerd, hetgeen boven de aangeraden minimale waarde van 60 tot 80 lgt. De resultaten van de Monte Carlo-analyse zijn weergegeven in figuur 5. Figuur 5a toont de frequentieverdeling van de resultaten van het energiegebruik voor verlichting in december. In principe zou een normale verdeling verwacht worden, maar dit blijkt niet volledig te kloppen. De standaarddeviatie van het energiegebruik voor verlichting ligt tussen 10% en 20% (figuur 5d). Standaarddeviaties voor de verwarmings- en koelbehoefte zijn bescheiden ($<10\%$) in respectievelijk winter- en zomermaanden (figuren 5b en 5c). Maar in de tussenseizoenen is de relatieve onzekerheid van beide zeer groot. Op jaarbasis zijn de standaarddeviaties voor de verwarmings- en koelbehoefte respectievelijk 9% en 10%. Deze resultaten zijn veel bescheidener dan deze eerder zijn gepubliceerd door Hoes et al. [8]. In zijn werk zijn standaarddeviaties van 40% tot 100% voor de koelbehoefte en 20% tot 80% voor de verwarmingsbehoefte gevonden. Echter, slechts één kantoorcel werd hiervoor beschouwd, bezet door ofwel een *actieve* ofwel een *passieve* gebruiker. Dit leidt tot extremere resultaten. Bovendien werd er een veel bredere spreiding op de interne winsten aangenomen.

CONCLUSIE

Dit artikel beschrijft een globale methode om een realistisch gebouwgebruik in een kantoorgebouw te integreren in een onzekerheidsanalyse voor het energiegebruik via een modulair en stochastisch gedragsmodel. Het model behelst zowel de stochastische aard van gebruikersgedrag als de inherente veranderlijkheid van gedrag tussen individuen onderling door het definiëren van representatieve *actieve* en *passieve* gebruikers. De verhouding van

beide typen in het gebouw doet dienst als parameter voor de onzekerheidsanalyse. Het gedragmodel bestaat uit submodellen voor bezetting, gebruik van zonwering, openen van het raam, sturing van het kunstlicht en warmteproductie door kantoorapparatuur. Alle submodellen zijn geselecteerd op basis van een literatuurstudie. Hieruit blijkt dat dit onderzoeksveld nog in volle ontwikkeling is en er grote ruimte is voor progressie. Het voorgestelde concept van *actieve* en *passieve* gebruikers lijkt veelbelovend. Dankzij de helderheid en simpliciteit kan het uitstekend dienst doen als inputparameter voor de onzekerheidsanalyse.

De ontwikkelde methode is toegepast op een praktijkstudie van een kantoorgebouw. Hieruit blijkt dat de invloed van het gebruikersgedrag op de energiebehoefte bescheiden is, al mogen de absolute resultaten van deze studie niet zonder meer voor andere gebouwen gebruikt worden [8]. Deze resultaten staan in contrast met bevindingen uit eerder onderzoek. Dit komt omdat de onzekerheidsanalyse in dit

artikel is uitgevoerd op gebouwniveau.

DANKWOORD

Dit onderzoek is gefinancierd door het Instituut voor de Aanmoediging van Innovatie door Wetenschap en Technologie in Vlaanderen (IWT-Vlaanderen). Deze steun wordt in dank erkend.

REFERENTIES

1. Reinhart, C. (2004). Lightswitch-2002: a model for manual and automated control of electric lighting and blinds. *Solar Energy*, 77, 121-126.
2. Newsham, G., Mahdavi, A., & Beausoleil-Morrison, I. (1995). Lightswitch: a stochastic model for predicting office lighting energy consumption. *Proceedings of the third European Conference on Energy Efficient Lighting*, (pp. 59-66). Newcastle-upon-Thyne.
3. Reinhart, C., & Voss, K. (2003). Monitoring manual control of electric lighting and blinds. *Lighting Research and Technology*, 35, 243-260.
4. Haldi, F., & Robinson, D. (2010). Adaptive actions on shading devices in response to local visual stimuli. *Journal of Building Performance Simulation*.
5. Haldi, F., & Robinson, D. (2009). Interactions with window openings by office occupants. *Building and Environment*, 44, 2378-2395.
6. Wilkins, C., & Hosni, M. (2000). Heat gain from office equipment. *Ashrae Journal*, 33-39.
7. Abushakra, B., Sreshthaputra, A., Haberl, J., & Claridge, D. (2001). Compilation of diversity factors and schedules for energy and cooling load calculations. *Ashrae Research Project 1093-RP*.
8. Hoes, P., Hensen, J., Loomans, M., de Vries, B. & Bourgeois, D. (2009). User behavior in whole building simulation. *Energy and Buildings*, 41, 295-302.

Klimaatvak

Dé vakbeurs voor airconditioning, luchtbehandeling en koudetechniek

Tevens vindt dan Installatie Vakbeurs plaats!

Nu ook in Venray! Installatie Vakbeurs 12, 13 en 14 april 2011

Gorinchem 1, 2 en 3 maart 2011

Openingstijden: 13.00-21.00 uur

Evenementen **HAL**
 ■ HARDENBERG
 ■ GORINCHEM
 ■ VENRAY

Evenementenhal Gorinchem
 Franklinweg 2
 4207 HZ Gorinchem
 T 0183 - 68 06 80
 F 0183 - 68 06 00
 E gorinchem@evenementenhal.nl
 I www.evenementenhal.nl

Ons evenement. UW MOMENT.