

# Comforthinder, input bij simulatie van bewonersgedrag

Gebouwen gebruiken meer energie dan wordt voorspeld. Deels komt dit door bewonersgedrag. Realistischer simulatie van bewonersgedrag, op het gebied van energiegebruik in gebouwen, opent de mogelijkheid om gebouwen en hun energie-installaties zo te ontwerpen, dat ze prettiger zijn om in te wonen/werken terwijl ook het werkelijke energiegebruik lager is. Thermisch discomfort, een dynamische versie van Fanger's PPD, wordt hier voorgesteld om er, via een markov-proces en een 'task list', bewonersgedrag mee te simuleren.

Hans Phaff, TNO Bouw en Ondergrond

## ■ MEER ENERGIE DAN VOOR- SPELD

Juist energiezuinige gebouwen halen in de praktijk vaak niet hun voorgerekende energiegebruik. Daarvoor is een aantal oorzaken aan te wijzen, zoals bouw- en installatiefouten, bijvoorbeeld natgeregende muurisolatie die naar beneden is gezakt, en een WTW op lange ongeïsoleerde aanzuigleidingen.

Luchtlekken door de spouw kunnen de effectieve isolatiewaarde sterk verminderen. Bijna de helft van de ventilatielucht in gebouwen stroomt via de lekken naar binnen en naar buiten [1]. Het buitenblad van de gevel bevat vaak 3 tot 10 keer zoveel lek als de schil in zijn geheel. Er stroomt veel lucht door een spouw. Veel woningen hebben, voor geluidsisolatie, een woningscheidende spouw. Aan de afdichting daarvan bij de gevel worden geen eisen gesteld. Daarmee is er een 'half' open verbinding van buiten via het buitenblad, door

de isolatiedeken, de woningscheidende spouw, aan de andere gevel of via het dak weer naar buiten. Koude buitenlucht en een heel groot ongeïsoleerd oppervlak van de woningscheidende wand zijn het gevolg.

Overigens ontstaat er in de ongeïsoleerde woningscheidende spouw een rondlopende luchtstroom. Ter hoogte van het midden van de woonkamer gaat warmere lucht in de woningscheidende spouw omhoog richting dak. Afgekoeld zakt de lucht wat meer naar de voor- en achtergevel in de woningscheidende spouw naar beneden, en de kringloop is rond. Zo wordt warmte van de woonkamer via dak en gevels naar buiten getransporteerd. Het is dus zinvol deze spouw bijvoorbeeld per verdieping van een afdichting (schuim/buisisolatie) te voorzien. Dit verhoogt helaas wel de kans op geuroverlast van woning tot woning. Kanaalplaatvloeren sluiten vervolgens aan op deze spouw en vergroten de invloedssfeer van

de koude buitenlucht.

Op tekening zijn de 3D-hoeken in een ontwerp vaak niet goed te zien, en ontbreken daar afdichtingen bij muur/dakbeschoot etc. Dit zijn allemaal holle ruimten waar onbedoeld veel buitenlucht doorheen kan stromen. Afkitten aan de binnenbetimmering maakt wel dat het luchtlek nog kan voldoen, maar de isolatie is voor een deel al 'kortgesloten'.

Tocht als gevolg van luchttoevoer bij de gevels, treedt in goedgeïsoleerde gebouwen eerder op, omdat het vermogen van de verwarmingselementen kleiner is en ze steeds vaker zijn uitgezet. Er is dan minder warmte om koude lucht te mengen.

Regen op poreuze (stenen) buitenbladen houdt deze lang vochtig (het regent 1/7<sup>e</sup> van de tijd en mogelijk blijven de muren de helft van de tijd vochtig). Dat vocht moet verdampen en voor een deel wordt deze warmte aan de woning onttrokken, omdat de temperatuur van het

buitenblad in de richting van de nattebol-temperatuur daalt. Die ligt een paar graden onder de buitenluchttemperatuur. Dit is een aspect dat in de meeste gebouwsimulatiemodellen niet wordt meegenomen. Nu is het wel zo dat bij betere isolatie, deze verdampingswarmte voor een groter deel door zon en langsstrijkende buitenlucht wordt geleverd.

Een aantal energiegebruikposten is gekoppeld aan (te) eenvoudige installaties. Als alleen de woonkamer wordt verwarmd, met een cv-ketel op zolder, is het overall rendement van gas vaak minder dan 50 % door leidingverliezen onderweg. Dat is natuurlijk niet allemaal puur verlies, maar toch warmte die op onbedoelde plaatsen vrijkomt. Erger is het als alleen een werk/studeerkamer wordt verwarmd, waarvoor de thermostaat in de woonkamer op 20 °C is ingesteld. Met gebruik van thermostaatkranen wordt deze situatie regeltechnisch wat beter, maar door de leidingverliezen levert een met thermostaatkranen geregeld systeem hogere stookkosten op.

## ■ BEWONERSGEDRAG

Naast hoger ingestelde temperaturen bijvoorbeeld om tocht te compenseren, is het door bewoners openzetten van ramen de andere grote invloed op het energiegebruik. Ook in de winter worden grote ramen van slaapkamers nog frequent gebruikt en staan soms uren open. Het idee is vaak: "De verwarming staat uit, dus kost het geen energie." Het verwarmingselement in een slaapkamer is vaak in de orde van grootte van 1 kW, maar door de afgifte van warmte vanuit de vloer, wanden en plafond kan door een groot raam enkele uren lang een warmtestroom van bijvoorbeeld 5 kW stromen. Die afgekoelde wanden zullen vervolgens vanuit de rest van de woning met de kamer zelf weer moeten worden opgewarmd. Bij een korte steekproef bleek dat in recent gebouwde woningen met balansventilatie (een systeem dat juist bedoeld is om bij gesloten ramen voldoende verse lucht in elke kamer te leveren), ook in de winter uren lang klappen en grote ramen open blijven staan. Of dat nou een invloed is van negatieve berichtgeving zoals over Vathorst, of het gevolg van onvoldoende waargenomen frisheid en te hoge temperatuur (?) van de kamerlucht, is onbekend. Als onbegrip en onbedoeld 'verkeerd' gebruik van gebouw en installaties een grote energieverliespost leveren, dan is er een markt voor een 'genie'. Een combinatie van handheld, touchpad, als een ebook met 3G-netwerk, universele afstandsbediening, samen met 'slimme meter technologie' en identificatie van alle apparaten in het gebouw. Als deze 'genie' vervolgens ook alle raam- en deurstanden, vergeten radiatorventielen en dergelijke

meet, dan kan de 'genie' de bewoner advies en uitleg geven. En uitleg bij foutmeldingen, storing, interpretatie van handleidingen, tips van gebruikersgroepen, of eerder zelf gevonden toetsenvolgorde. Via de IR-output kan de bediening van apparaten worden voorgedaan. Advies voor vervanging en aankoop van nieuwe energiezuinige, betere apparaten is ook mogelijk. Omdat al deze technieken in snel tempo op ons af komen, zal ook deze apparatuur met enig bijsturen wel spoedig verschijnen.

## ■ SIMULATIE VAN ENERGIE-GEbruIK

Tot nu toe wordt in gebouwsimulatiemodellen en bij de energieprestatiecoëfficiënt (EPC) berekeningen, gebruik gemaakt van tijdschema's, in de programma's vaak 'schedules' genoemd. Bijvoorbeeld voor open ramen de standen per kwartier, opgedeeld in een aantal categorieën voor woningen, woningen met balansventilatie en voor kantoren. En schedules per bewonerstype (werkende, verzorgende partner, kind, schoolgaand kind, etc.) voor de kamer waar in ze verblijven. Er zijn schedules voor een aantal temperatuurtrajecten, gemiddeld is in een woning 120 cm<sup>2</sup> raam open bij buitentemperaturen onder de 5 °C, 440 cm<sup>2</sup> van 5 tot 10 °C en 1950 cm<sup>2</sup> boven de 10 °C. Het nadeel van het gebruik van schedules is, dat ze geen rekening kunnen houden met varianten van het gebouw, en ook geen reacties van bewoners op het ontstane binnenklimaat geven, bijvoorbeeld op zonnige warme dagen en koude regenachtige dagen.

Een oplossing in deze starheid van de gebouwsimulatiemodellen wordt gezocht in een probabilistische rekenmethode. Deze gaat verder dan alleen bewonersgedrag, en probeert alle invoer van het gebouwsimulatiemodel binnen de veronderstelde spreiding en met de verdeling ervan, te variëren. Voorzichtigheid is geboden, want bij een complexmodel met veel variabelen wordt de combinatie van variaties al snel heel groot, en grote modellen rekenen nog niet zó snel dat dan binnen afzienbare tijd een oplossing wordt gevonden. Alleen rekenen aan de belangrijkste variabelen zal uitkomst moeten brengen. Als ook in de tijd stochastische variabelen worden gebruikt, moet de berekening aan elke bouwvariant vele honderden malen worden herhaald om tot een geconvergeerde gemiddelde waarde te komen, zodat ook de uitkomsten van dichtbij elkaar liggende bouwvarianten nog kunnen worden vergeleken. Keuze van de juiste invoer is het devies, en kan veel stochastische omzwervingen overbodig maken.

Hier kiezen we voor een wat andere aanpak op het gebied van bewonersgedrag in de vorm van een markov-proces.

Het bewonersgedrag waar we hier in geïnteresseerd zijn, is alleen het gedrag dat het energiegebruik van het gebouw beïnvloed. Bijvoorbeeld welke ruimten worden verwarmd, de instelling van thermostaat, raamstanden, zonwering, gordijnen, binnendeuren en bewonersactiviteiten binnen de woning.

## ■ MARKOV-PROCES

Een markov-proces, genoemd naar de Russische wiskundige Andrej Markov (1856-1922), is een stochastisch 'proces' waarbij de huidige 'toestand' van het proces de kans bepaalt dat het proces in een volgende, afwijkende, toestand zal komen.

We maken een gedachtevoorbeeld voor bewonersgedrag, namelijk voor het openen en sluiten van ramen. Stel: voor een raam in een slaapkamer is de kans dat het tussen 8 en 9:00 uur wordt geopend 0.3, ofwel dat gemiddeld drie van de tien gesloten ramen open zullen gaan. Het proces is dan het raam, de toestand het dicht of open zijn van het raam en 0.3 is de markov-coëfficiënt of kans. Wat we hier doen, is uit een lange meetreeks per tijdsinterval, uit de wijzigingen van raamstanden bepalen wat de kansen op een verandering zijn, de markov-coëfficiënten. Dit klinkt allemaal goed uitvoerbaar, maar het voorbeeld is wat te simpel. Zo neemt het aantal benodigde coëfficiënten bij werkelijke simulaties heel snel toe. Bijvoorbeeld voor meer dan een stand per raam, per 10 minuten op een dag, wekdagen en weekend, verschillende raamtypen, bouwtype, installatietype en weersafhankelijk, loopt de markov-matrix al gauw op tot meer dan 10<sup>10</sup> elementen. Voor sommige combinaties zal er te weinig data zijn. Er moeten allerlei schattingen en correcties worden uitgevoerd. Het mag duidelijk zijn dat dit een immense klus wordt en snel tot fouten zal leiden. Het zou helpen als we een slimmere manier vinden om gedrag te simuleren, we proberen een combinatie van een 'flexibele task list', comforthinder en twee markov-processors.

## ■ TASK LIST

Stel dat elke bewoner een task list heeft. Dit is een lijst van zaken, handelingen die per dag/week op een aangegeven tijd met een onzekerheidsmarge, soms in een specifieke kamer, zouden moeten worden uitgevoerd. Bepaalde taken hebben een scherp aangegeven begin- en eindtijd, andere kunnen verschuiven of op een andere dag worden uitgevoerd. De task list lijkt erg op de 'schedules', met als verschil dat de list niet direct wordt gebruikt maar met een opgegeven onzekerheidsmarge flexibel in gedrag (het uitvoeren van een handeling) wordt omgezet.

## HINDER, THERMISCH DISCOMFORT, PPD

We nemen aan dat alle verdere wijzigingen (ramen, thermostaat, zonwering, kleding, handelingen etc.) ontstaan door een zekere mate van hinder, het is te warm of te koud, onfris, tocht, etc. Daarvoor bestaat de term PPD (percentage of dissatisfied persons in a group) uit het comfortmodel van Fanger [3,4,5]. Het mooie is dat vrijwel alle variabelen via dit model van Fanger zijn te sluisen. Uit het gesimuleerde gebouw volgen per kamer temperaturen, warmtestraling, luchtstromen, vochtigheid. Gaat een raam open dan berekent het gebouwsimulatiemodel de dalende binnentemperatuur en de toenemende luchtsnelheid in de kamer en dat beïnvloedt vervolgens de PPD. Per task uit de list volgt het kleding- en activiteitsniveau van personen. Het enige aspect dat niet in het model van Fanger zit is de tijdafhankelijkheid. De dynamische overgang van een persoon die van een koude in een warme ruimte komt, van buiten naar binnen en omgekeerd. Daarom is recentelijk door TNO een routine DFanger geschreven, die de dynamische aspecten aan Fanger's model toevoegt. Temperatuuradaptatie is een latere aanvulling op Fanger's model, vergelijkbaar met de ATG (Adaptieve TemperatuurGrenswaarden). Het blijkt dat in gebouwen zonder airconditioning 's winters de temperatuur van 23.5 °C naar 20 °C mag zakken en mensen dit nog als comfortabel beoordelen, terwijl 's zomers met ramen open, temperaturen soms van 23.5 °C richting 28 °C mogen oplopen als het buiten erg warm is [2]. Hierin schuilt een zeer aanzienlijk besparingspotentieel:

- Per graad lager stoken wordt circa 10 % op de energiekosten bespaard.
- Voor koelenergie gaat dit nog harder. Als pas bij een 1 graad hogere temperatuur de koeling aan moet, neemt de warmtestroom af (kleiner temperatuurverschil en iets hoger rendement van de koelmachine), maar nog sterker neemt het aantal uren af dat de koeling per jaar aan moet. Het effect is een reductie van de jaarlijkse koelenergie van ongeveer een factor 2.5 per graad verhoging van het setpoint van de koeling.

De twee stappen, hinder en task list zijn aangegeven in figuur 2, het gebouw simulatiemodel. Door de PPD zodanig te dempen dat daarin de juiste 'temperatuurhistorie' zit, mag de kans dat een bewonersactie volgt op de PPD, als markov-proces worden beschouwd.

De PPD wordt genormeerd tot PPDn:  $PPDn = (PPD - 5) / 95$ , met als bereik 0,1.

De simulatie van het markov-proces, per bewoner, werkt als volgt en wordt per tijdstap éénmaal doorlopen:

Input: PPDn 0,1 en tijdstap dt (s)

Eerst wordt pMarkov, de markov-kans op een Actie berekend. Dit is de kans dat binnen de tijdstap van dt seconde een actie zal volgen, die is erg klein voor kleine PPDn en nadert tot 1 als PPDn naar 1 gaat:

$$pMarkov = dt \cdot PPDn \cdot 0.00005^{(1-PPDn)}$$

(zie figuur 3).

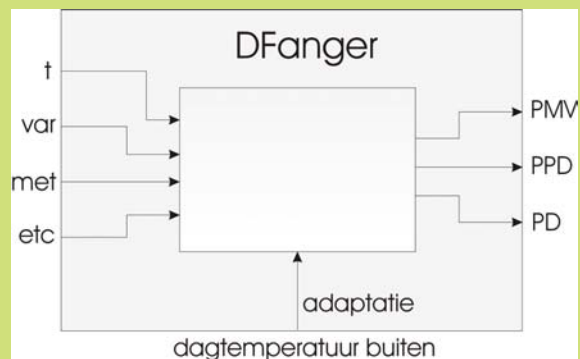
Vervolgens wordt pMarkov vergeleken met r, een random getal tussen 0 en 1. Als  $r < pMarkov$  dan volgt een Actie, anders niet.

Laten we een voorbeeld nemen waarbij PPDn=0.4 (PPD=43 % van de personen in een groep zijn ontevreden over het thermisch klimaat). De tijdstap, dt is 1 s. pMarkov is nu bijna  $0.001 (4 \cdot 0.00005^{(1-0.4)}) = 0.00105$ . Dit betekent dat er een kans is van 1 op 1.000 dat in een tijdstap van 1 s een actie zal volgen. Voorlopig zijn dit geschatte waarden omdat er weinig onderzoek naar deze reactietijden is gedaan. In de tussentijd kan het model worden gefit zodat het gebruik van de voorzieningen (ramen, zonwering etc.) overeenkomt met bekende gegevens.

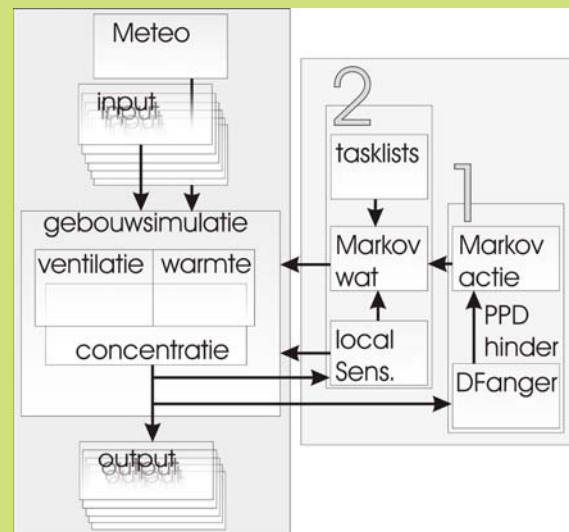
Naast het mechanisme van task list en discomfort zijn vermoedelijk nog een aantal voorwaarden nodig voor een realistisch gedrag, zoals het lager zetten van de thermostaat als men de woning verlaat etc. Of het terugzetten van de thermostaat als de PMV naar nul nadert, in plaats van te wachten tot discomfort ontstaat.

## WELKE ACTIE VOLGT?

Zoals bij figuur 2 is uitgelegd, start de markov-actie de tweede stap. Deze 'kijkt' eerst naar de PMV (koud-warm) en voert voor de betreffende bewoner, en dus de kamer waar deze verblijft en de huidige taak, een lokale gevoeligheidsanalyse naar mogelijkheden om tot een koelere of warmere toestand te komen. De gebouwsimulatie is dan even onderbroken, de mogelijkheden worden doorgerekend in termen van de temperatuurverandering, tijdstapconstante (hoe snel de temperatuurverandering wordt bereikt) en mogelijke penalty's voor energiegebruik of geluidhinder, onbescherme



-Figuur 1- In DFanger volgt PPD met enige vertraging, die afhankelijk is van de condities. De dynamische respons van de PPD is in DFanger zo berekend dat daarin de benodigde thermische historie van de bewoner zit: bijvoorbeeld de mate waarin de persoon is opgewarmd of afgekoeld.



-Figuur 2- Overzicht van het model. Links een gebouwsimulatiemodel. Rechts de toegevoegde tweetraps procedure. Stap 1 berekent voor elke bewoner per tijdstap de PMV en PPD. Een markov-proces bepaalt uit de PPD of er in die tijdstap een actie volgt. Stap 2 wordt alleen gestart als er een actie is en berekent afhankelijk van de DFanger PMV een local sensitivity. De tweede markov bepaalt 'wat' de actie is (thermostaat, ander kledingniveau, raam, zonwering, alternatieve task uit de task list, etc.). Persoonlijke voorkeur wordt hierbij als weegfactor verdisconteerd. Ook als Stap 1 niet tot een actie leidt, kan het tweede markov-proces de bewoner sturen op basis van de task list.]

ligging, inbraakgevoeligheid, etc. De tweede markov-processor kiest dan één van de mogelijkheden of een combinatie daarvan, waarbij de kans dat de meest effectieve maatregelen worden gekozen het grootst is. Bij dit proces kan ook een persoonlijke voorkeur worden meegewogen, waarbij de kans op favoriete maatregelen met een factor wordt vergroot. Als voorbeeld in figuur 5 een simulatie van een persoon die van buiten lopend een warm gebouw binnen gaat. De nog niet eerder genoemde variabelen in figuur 5 zijn:

- 'met' is de index voor het metabolisme (inspanningsniveau) die bij wandelen 3 is, bij traplopen bijna 6 en zittend licht werk in de kamer 1.2;
- 'iclo' is de kleding index, buiten 3, een dikke winterkleding, binnen 0.88;
- 'var' is de luchtsnelheid, waarin ook de

loopsnelheid is verdisconteerd. Deze luchtsnelheid vermindert ook iclo: meer lucht stroomt door de kleding.

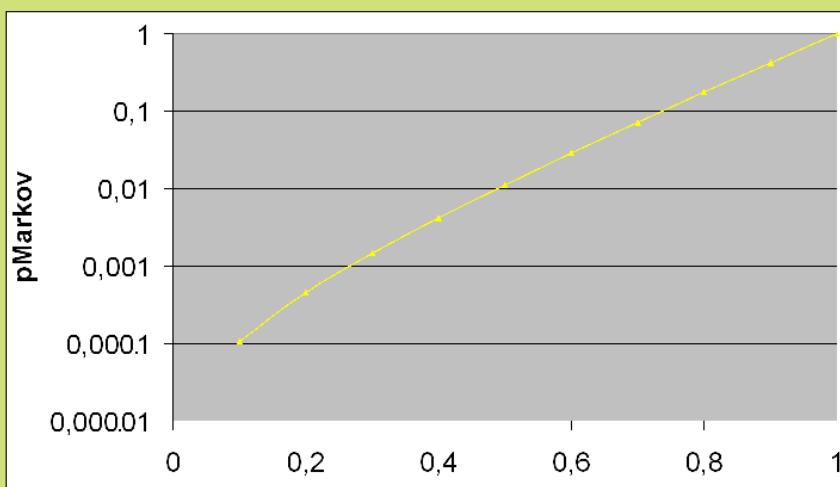
Direct na binnenkomst wordt de winterjas los gedaan (iclo gaat van 3 naar 2). Lopend door de warme gangen, vier verdiepingen de trap op, de PPD loopt op. Aangekomen in de kamer waar de jas uit gaat, volgt de eerste actie: raam open. Dan daalt de temperatuur en is de luchtsnelheid iets verhoogd, de PMV daalt. Als de persoon is afgekoeld, de PMV is iets negatief geworden, volgt de tweede actie, het raam gaat weer dicht. Hierna lopen de temperaturen op en de PMV blijft dicht bij nul (neutraal).

## VERDERE MODELONTWIKKELING

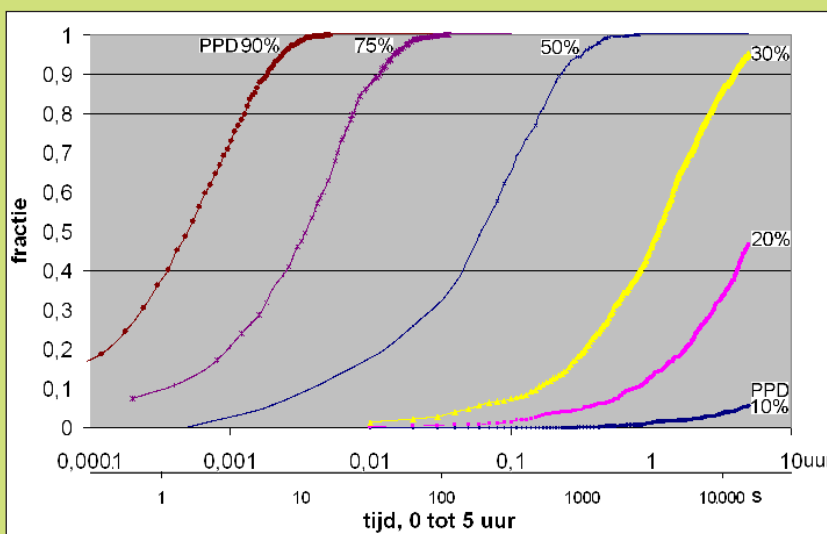
Zowel het DFanger-model als de markov-processors zijn nog in ontwikkeling en zullen verder worden aangepast aan literatuurgegevens en comfort-lab experimenten. Het lijkt niet onmogelijk om niet-lineair andersoortige discomfords, zoals geluidhinder (straatlawai en open ramen, geluid van de installatie), geurhinder, verkeerde verlichting (samen met zonwering) en uitzicht, en buiten windhinder, op te tellen bij de PPD. De methode kan ook worden gebruikt om in bestaande gebouwen oplossingen te zoeken voor problemen. De verwachting is dat simulatiemodellen zo een betere sensor krijgen voor het ontwerp van gezonde, prettige gebouwen die werkelijk veel energie besparen, waarbij de mens meer centraal staat en de techniek iets meer 'in dienst van'.

## LITERATUUR

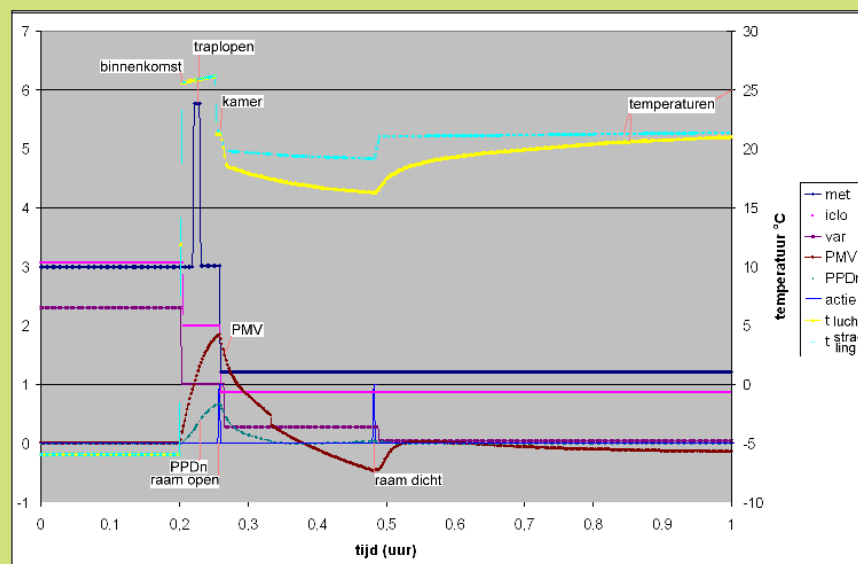
- Gids W.F. de, op 't Veld P.J.M. Onderzoek naar ventilatie in relatie tot gezondheidsaspecten en energiegebruik voor een representatieve steekproef van het Nederlandse woningbestand. TNO Bouw/Cauberg Huygen. TNO-rapport 2003-GGI-R064. Delft: 2004.
- Richard De Dear, Ph.D. The theory of thermal comfort in naturally ventilated indoor environments; "The pleasure principle". International Journal of Ventilation, ijvent.org.uk: 2009.
- Fanger P.O., "Calculation of thermal comfort: introduction of a basic equation". 1967.
- Fountain Marc E., Ph.D. Charlie Huizenga. Using the ASHRAE THERMAL comfort MODEL, An ASHRAE Special Publication. ASHRAE Research Project 781-RP, Atlanta USA: 1997.
- NEN-EN-ISO 7730  
Klimaatomstandigheden. Analytische bepaling en interpretatie van thermische behaaglijkheid door berekeningen van de PMV en PPD-waarden en lokale thermische behaaglijkheid, Delft: NEN, 2005.



-Figuur 3- 'pMarkov Actie' bij dt=1 s als functie van PPDn.



-Figuur 4- Markov Acties in het programma voor enkele waarden van de PPD, telkens 1.000 keer berekend in een simulatie van 0 tot 5 uur. De Acties die volgen zijn cumulatief in een genormeerd histogram gezet en hier als fractie (0..1) geplot. Als op een bepaald tijdstip de fractie 1 is, dan is in alle 1.000 berekeningen een actie opgetreden. De reactietijd is de tijd waarbij de kans op een actie 0.5 is (fractie=0.5). Bij PPD=90 % is dit iets meer dan 1 s, Bij PPD=50 % ongeveer 3 minuten en bij 20 % iets meer dan 5 uur. Bij een PPD van 10 % is maar weinig kans op een actie, na 5 uur is in 60 van de 1.000 berekeningen (6 %) een actie opgetreden.]



-Figuur 5- Simulatie van een persoon die bij koud weer een warm gebouw binnenkomt, als actie wordt een raam open gezet.