

Ontwikkeling van een simulatieomgeving voor klimaatsystemen

J.K.M. Verdonschot¹, A.W.M. van Schijndel², R.A. Abdoel¹, M.J. Hoenen³, M.H. van der Sar³

Samenvatting

In het kader van het project Climasim is een modellenbibliotheek ontwikkeld waarmee het gedrag van klimaatinstallaties kan worden gesimuleerd. De modellenbibliotheek is gebaseerd op de programmeeromgeving Matlab/Simulink. In de huidige bibliotheek zijn momenteel eenvoudige modellen beschikbaar van een luchtbehandelingsinstallatie, een verwarmingsinstallatie en een installatie met vrije koeling. Deze modellen bevatten submodellen van een luchtkoeler, verwarmers, bevochtiger, mengsectie en transportcomponenten zoals een pomp en ventilator, ventilatorconvactor, droge koeler, koelmachine, ketel, radiatorgroep. Ook is er een eenvoudig gebouwmodel beschikbaar. Hiermee is het mogelijk om het gedrag van een gebouw met een installatie voor koeling en verwarming te simuleren.

De bibliotheek is in eerste instantie voor onderwijsdoeleinden ontwikkeld maar gelijktijdig is zoveel mogelijk de toepasbaarheid voor de beroepspraktijk in ogenschouw gehouden. De modellenbibliotheek is ontwikkeld om het simuleren te vereenvoudigen en heeft op dit moment niet de pretentie om gevalideerde modellen aan te bieden. Dat staat in een mogelijk vervolgtraject op het programma. In dit artikel wordt het gebruik van de modellenbibliotheek toegelicht aan de hand van enkele voorbeelden. Dit zijn:

1. Luchtbehandelingsinstallatie¹

Het maken van een simulatiemodel voor de bepaling van het energiegebruik wordt aan de hand een voorbeeld toegelicht. Daarbij ligt de nadruk op de werkwijze en de mogelijkheden die de Climasim-omgeving hiervoor biedt. Simuleren van installaties dient op een gebruikersvriendelijke wijze te kunnen plaatsvinden. Het streven is dat de gebruiker zonder kennis van Matlab/Simulink een model kan maken. De bibliotheekcomponenten zijn daartoe voorzien van een gebruikersinterface. Het aantal beschikbare modellen is nog vrij beperkt maar door gebruik te maken van een open structuur kan iedereen modellen aanreiken. De modellen moeten een bepaalde structuur hebben waardoor de koppeling tussen diverse modellen mogelijk wordt.

2. 1-zone gebouwmodel²

Het 1-zone gebouwmodel is te gebruiken in de ontwerpfasen van een project. Het simulatiemodel maakt gebruik van een variabele tijdstap, waardoor zelfs processen met kleine tijdconstanten kunnen worden gesimuleerd. Omdat de zon-instraling op een vereenvoudigde wijze wordt verdisconteerd kan met een beperkt aantal invoergegevens worden gerekend. Uit enkele simulatietesten is gebleken dat het model de warmtebehoefte goed berekend en de koeling 30% te hoog inschat.

3. Verwarmingsinstallatie³

Dit is een voorbeeld van een complete installatie die als bibliotheekcomponent beschikbaar is in Climasim. De installatie berekent het energieverbruik van een ketel die als verwarmingsunit voor een radiatorgroep en een luchtverhitter werkt. Het ketelgedrag en het daaruit voortvloeiende rendement worden verrekend tot een jaarlijks energieverbruik. De gebruiker kan door het selecteren van installatieopties verschillende systemen energetisch vergelijken.

4. Vrije en mechanische koeling³

In een serverruimte wordt er door de computers zoveel warmte geproduceerd, dat er ook in de winter gekoeld moet worden. Het model "vrije en mechanische koeling" simuleert het gedrag van een koelinstallatie waarbij via de buitenlucht wordt gekoeld als de buitentemperatuur lager dan 10°C is. In de zomer of bij onvoldoende koudeproductie via vrije koeling, komt de compressiekoelmachine in bedrijf. Het is een eenvoudig model waarmee het energieverbruik van de installatie en de ruimtetemperatuur in het gebouw wordt berekend. Binnen het model bevindt zich een regeling voor het schakelen tussen het zomer- en winterbedrijf. Deze regeling is geprogrammeerd in de Matlab Simulink-tool "Stateflow".

Met de simulatieomgeving Climasim is er een basis gelegd voor een bibliotheek met een open structuur. Aangezien er reeds veel modelbeschrijvingen en specifieke componentmodellen beschikbaar zijn kan de verdere ontwikkeling van een dergelijke simulatieomgeving in een hoog tempo plaatsvinden.

¹ Fontys Hogeschool Werktuigbouwkunde, Eindhoven

² Technische Universiteit Eindhoven, Faculteit Bouwkunde (FAGO)

³ Haagse Hogeschool

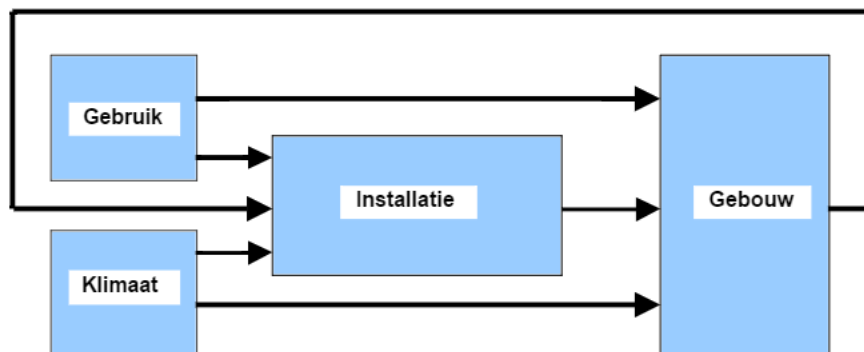
Inleiding

Het ontwerpen van klimaatinstallaties bestaat uit het selecteren van het installatieconcept, het dimensioneren van de installatiecomponenten, het vastleggen van de regelstrategie. In de huidige beroepspraktijk van de installatietechniek wordt vrijwel alleen gebruik gemaakt van statische berekeningen zoals warmteverlies en koellastberekeningen. De installatie wordt gedimensioneerd op de meest extreme bedrijfsomstandigheden. Toch zijn er rekenprogramma's beschikbaar zoals VA114 (in beperkte mate de installaties!), TRNSYS en ESP waarmee het dynamisch gedrag van gebouw en installatie kan worden gesimuleerd. Het gebruik van die programma's is echter tijdrovend vanwege de benodigde invoergegevens en de matig tot slechte gebruiksvriendelijkheid van de programmeeromgeving.

De behoefte aan dergelijke ontwerphulpmiddelen neemt toe vanwege de steeds hogere eisen die worden gesteld aan het comfort en energiegebruik van installatie en gebouw. De toepassing van gebouwbeheersystemen maakt het mogelijk om plaats en tijdafhankelijk te sturen. Het ontbreekt echter aan inzicht en kennis van het gebouw en installatiegedrag onder wisselende omstandigheden. Analyse van het gedrag kan met behulp van dynamische simulaties al in de ontwerpfase plaatsvinden waardoor het mogelijk wordt om gerichte informatie voor energiebeheer aan te reiken [1].

Beschrijving van Climasim

In het project Climasim [zie kader] is een gebruikersvriendelijke programmeeromgeving ontwikkeld waarmee klimaatsystemen kunnen worden gesimuleerd.



figuur 1 Het Climasim-masker

Het hoofdmodel van Climasim ook wel Climasim-masker (zie figuur 1) genoemd, bestaat uit vier hoofdgroepen:

- **Gebruik** Hierin wordt het gedrag van de gebruikers in het gebouw vastgelegd.
- **Klimaat** Hierin worden de benodigde klimaatgegevens gegenereerd.
- **Installatie** Dit blok bevat het installatieconcept.
- **Gebouw** Hier wordt een gebouwmodel geselecteerd.

In het installatie-blok wordt de klimaatinstallatie samengesteld uit een bibliotheek van installatie-componenten of -concepten. Als installatieconcept is momenteel een verwarmingsinstallatie en een koelsysteem met vrije koeling beschikbaar.

Op initiatief van de Haagse Hogeschool is in 1999 met ondersteuning vanuit het Vernieuwingsfonds HBO een 3-jarig project opgestart. In dat project wordt een simulatieomgeving ontwikkeld die specifiek is toegespitst op de installatietechniek. De modulaire opzet van de simulatieomgeving moet het mogelijk maken om het gedrag van klimaatsystemen in combinatie met het gebouwgedrag te simuleren. Het dynamisch simuleren is een krachtig hulpmiddel bij het ontwerpen, optimaliseren en beheren van allerlei installaties.

De installatiecomponenten zoals verwarmers, koelers en bevochtigers zijn in een componenten-bibliotheek ondergebracht. De gebruiker kan de verschillende componenten koppelen en zodoende een complete klimaatinstallatie opzetten. Dit gebeurt in een grafische omgeving door het genereren

van principeschema's. Er is dus weinig programmeerkennis nodig wat de gebruikersvriendelijkheid ten goede komt en nauwelijks inwerktijd vraagt.

Dit laatste is een belangrijk uitgangspunt geweest bij de ontwikkeling. In het onderwijs is een snelle inwerktijd vereist zodat vakinhoudelijke aspecten op de voorgrond blijven. Bovendien is een gebruikersvriendelijk programma motiverend en uitdagend voor studenten.

De beschikbare componentmodellen zijn gebaseerd op relatief eenvoudige zowel statische als dynamische vergelijkingen (1^e orde differentiaal vergelijkingen). Hiervoor is gekozen vanwege inzichtelijkheid, rekentijd en beschikbaarheid. Niet de validatie of gedetailleerdheid van modellen maar juist gebruiksgemak, didactische aspecten en praktische toepasbaarheid voor het onderwijs zijn tot heden de belangrijkste aandachtspunten bij de projectuitvoering geweest. Toch ligt daardoor ook een simulatieomgeving met geavanceerde en gevalideerde modellen binnen handbereik.

Als programmeeromgeving is gekozen voor Matlab/Simulink [2]. Matlab bevat krachtige routines om wiskundige vergelijkingen op te lossen terwijl Simulink een dynamische simulatie-tool is die tevens mogelijkheden biedt om te kunnen voldoen aan de vereiste gebruikersvriendelijkheid.

De Climasim-componentenbibliotheek bestaat uit modelgroepen zoals is weergegeven in figuur 2. De modelblokken zijn hiërarchisch opgebouwd. Dit houdt in dat de gebruiker in principe de mogelijkheid heeft om modellen aan te passen naar eigen inzicht en wensen. De Climasim-modellen hebben een gebruikersvriendelijke interface en zijn voorzien van een help-functie. De uitgangspunten bij het bouwen van de Climasim-bibliotheek waren verder;

- Implementeren van bestaande rekenmodellen
- Complete subsystemen van gebouwen en klimaatsystemen beschikbaar maken
- Afspraken vastleggen voor het maken van simulatiemodellen



figuur 2 Overzicht van de Climasim-bibliotheek

Een gebruiker kan in de Climasim-omgeving op twee manieren een simulatiemodel maken;

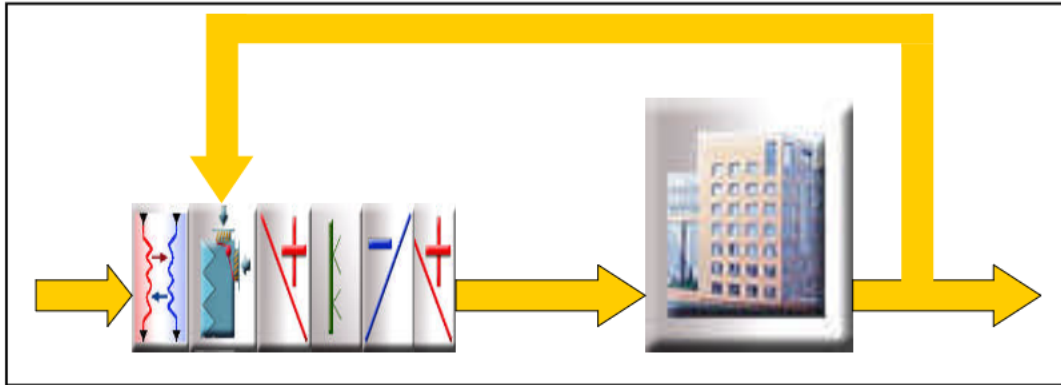
1. Door op basis van een modellenbibliotheek zelf een simulatiemodel te bouwen.
2. Door gebruik te maken van voorgestructureerde Climasim-modellen via een specifiek voor Climasim ontwikkelde gebruikersinterface [3].

De eerste methode zal nader worden toegelicht aan de hand van de luchtbehandelingsinstallatie.

1 Modelvorming van een luchtbehandelingsinstallatie

Aan de hand van een eenvoudige luchtbehandelingsinstallatie zal de simulatiewerkwijze nader worden toegelicht. De voorbeeld-installatie heeft de volgende functies:

- Mengen
- Verwarmen (voor- en naverwarmen)
- Koelen
- Bevochtigen
- Transporteren van lucht en water



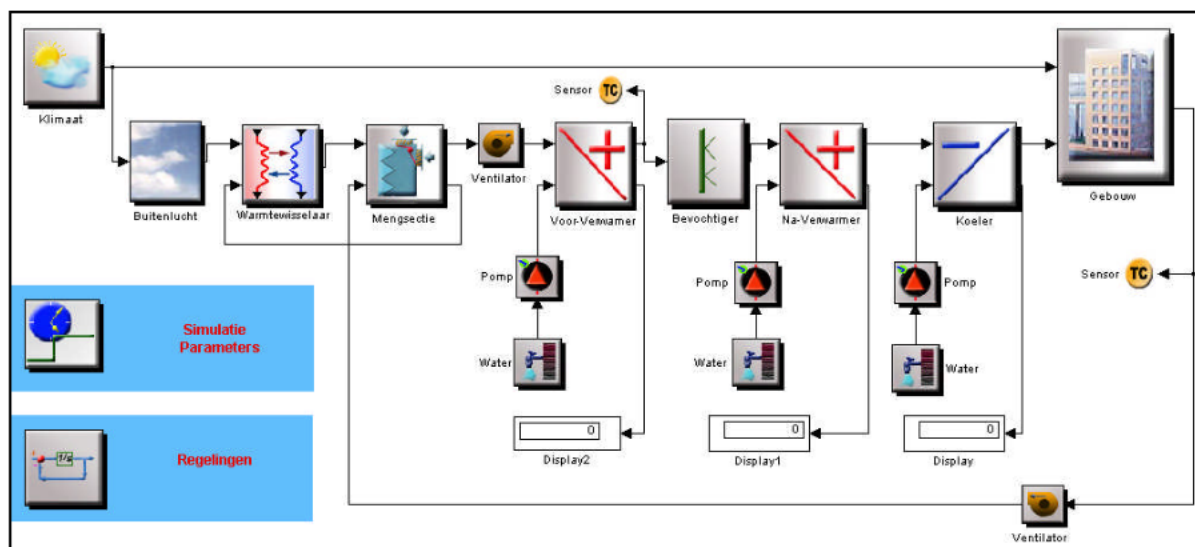
figuur 3 Schema van de luchtbehandelingsinstallatie

Deze klimaatinstallatie verzorgt als all-air systeem de verwarming en koeling van een gebouw of gebouwdeel. In figuur 3 is het prinscipeschema van de installatie gegeven. In de mengsectie wordt buitenlucht met retourlucht gemengd. Vervolgens wordt de lucht voorverwarmd of gekoeld, bevochtigd en indien noodzakelijk naverwarmd tot de gewenste vertrekkluchttemperatuur is bereikt. Dit gebeurt in werkelijkheid op basis van een bepaalde regelstrategie en daartoe bevinden zich in de installatie een aantal regelorganen (driewegkleppen, regelafluiters, pomp, ventilator e.d.) die zijn voorzien van een stuurorgaan (klepstandversteller, toerenregeling, aan/uit-schakelaar). Uit de regelstrategie volgt het ingangssignaal voor het stuurorgaan. Dit resulteert in een bepaalde waterstroom, luchtdebiet of bedrijfsconditie van een component. De regel- en stuurmodellen ontbreken nog in de bibliotheek. Daarom wordt in dit voorbeeld alleen een aan/uit-regeling toegepast.

Het moge duidelijk zijn dat dit voorbeeld geen praktijkinstallatie voorstelt. Het is bedoeld om de werkwijze en functionaliteit van de simulatieomgeving te verduidelijken.

Wanneer de gebruiker de simulatieomgeving (Climasim) opstart, wordt een dialoogvenster in Simulink gepresenteerd. De gebruiker heeft aan een compacte basiscursus Matlab/Simulink voldoende om een model samen te stellen. De voorbeeldinstallatie wordt door klik- en sleep-acties volgens het prinscipeschema getekend in een nieuwmodel-scherm. Dit resulteert in het schema volgens figuur 4. De installatiecomponenten worden als modelblokken weergegeven terwijl de onderlinge samenhang wordt bepaald door de lucht- en waterverbindingen. Dat zijn voorgeschreven vectoren waarin de belangrijkste informatie van de betreffende materiestroom is opgenomen. In feite is hiermee het rekenmodel gebouwd.

Het model bevat naast de luchtbehandelings-componenten en het gebouw ook een blok 'klimaatgegevens' zoals de buitentemperatuur en de zoninstraling. Deze gegevens worden tijdens de simulatie gelezen uit een klimaatbestand. De regeling van de installatie wordt in een apart modelblok "regeling" beschreven terwijl simulatietijd, tijdstap en rekenmethode in het blok "simpara" (zie figuur 4) worden vastgelegd.



figuur 4 Model van een klimaatinstallatie

Invoer en modelstructuur

Om een simulatie te kunnen uitvoeren moet het model worden voorzien van invoerparameters. Om de warmte- en koudeproductie van de luchtbehandelingsinstallatie te kunnen uitrekenen moeten de installatieparameters en gebouweigenschappen worden ingevoerd. Dit zal aan de hand van het verwarmer-model nader worden toegelicht. In figuur 5 is een modelstructuur van de luchtverwarmer weergegeven. Elk modelblok is voorzien van een dialoogvenster. Na een dubbelklik op een modelblok verschijnt dat dialoogvenster met een aantal invoervelden. Zo kan de gebruiker de getalwaarden van benodigde invoerparameters opgeven. Bij de luchtverwarmer is dit het warmtewisselend vermogen (W/K), het luchtvolume (liter), de waterinhoud (liter) en een starttemperatuur (°C). Deze luchtverwarmer is geschikt om het dynamisch gedrag op basis van een lucht- en waterzijdige warmtecapaciteit te voorspellen. Aan het dialoogvenster is ook een help-functie gekoppeld. De helpfunctie bevat een toelichting op de gevraagde invoer. Er is ook een beschrijving van het model. Zie onderstaand kader.

Verwarmermodel

De verwarmers is een tegenstroomwarmtewisselaar waarin warm water zorgt voor de opwarming van relatief koude lucht. De modellering is gebaseerd op de statische warmtewisselaarvergelijkingen [8]. Daarmee wordt de warmte-uitwisseling tussen warm en koud berekend. Het dynamisch gedrag wordt in rekening gebracht met een 1^e-orde ("lumped model") vergelijking voor de uittrede-temperatuur op basis van de statisch overgedragen warmte. Dit vereist de invoer van lucht- en waterzijdige warmtecapaciteiten (MC_{lucht} en MC_{water}).

Voor de statische warmteoverdracht geldt:

$$P_{stat} = \varepsilon \cdot C_{min} \cdot (T_{water,in} - T_{lucht,in})$$

met

C_{min} is de kleinste waarde van C_C .. C_H en C_{max} is de grootste waarde van C_C .. C_H

C_H = warmtecapaciteitstroom van het warme medium (water; $c_{p,water} \cdot \dot{\Phi}_{m,water}$)

C_C = warmtecapaciteitstroom van het koude medium (lucht; $c_{p,lucht} \cdot \dot{\Phi}_{m,lucht}$)

ε is de effectiviteit van de warmtewisselaar, waarvoor geldt:

$$\varepsilon = \frac{1 - e^{-N_{tu}(1+R_C)}}{1 + R_C}$$

met

$$R_C = \text{capaciteitsverhouding, waarvoor geldt: } R_C = \frac{C_{min}}{C_{max}}$$

$$N_{tu} = \text{Number of Transfer Units, waarvoor geldt: } N_{tu} = \frac{UA}{C_{min}}$$

UA = warmtewisselend vermogen (W/K)

De uittrede-temperaturen worden dynamisch berekend met:

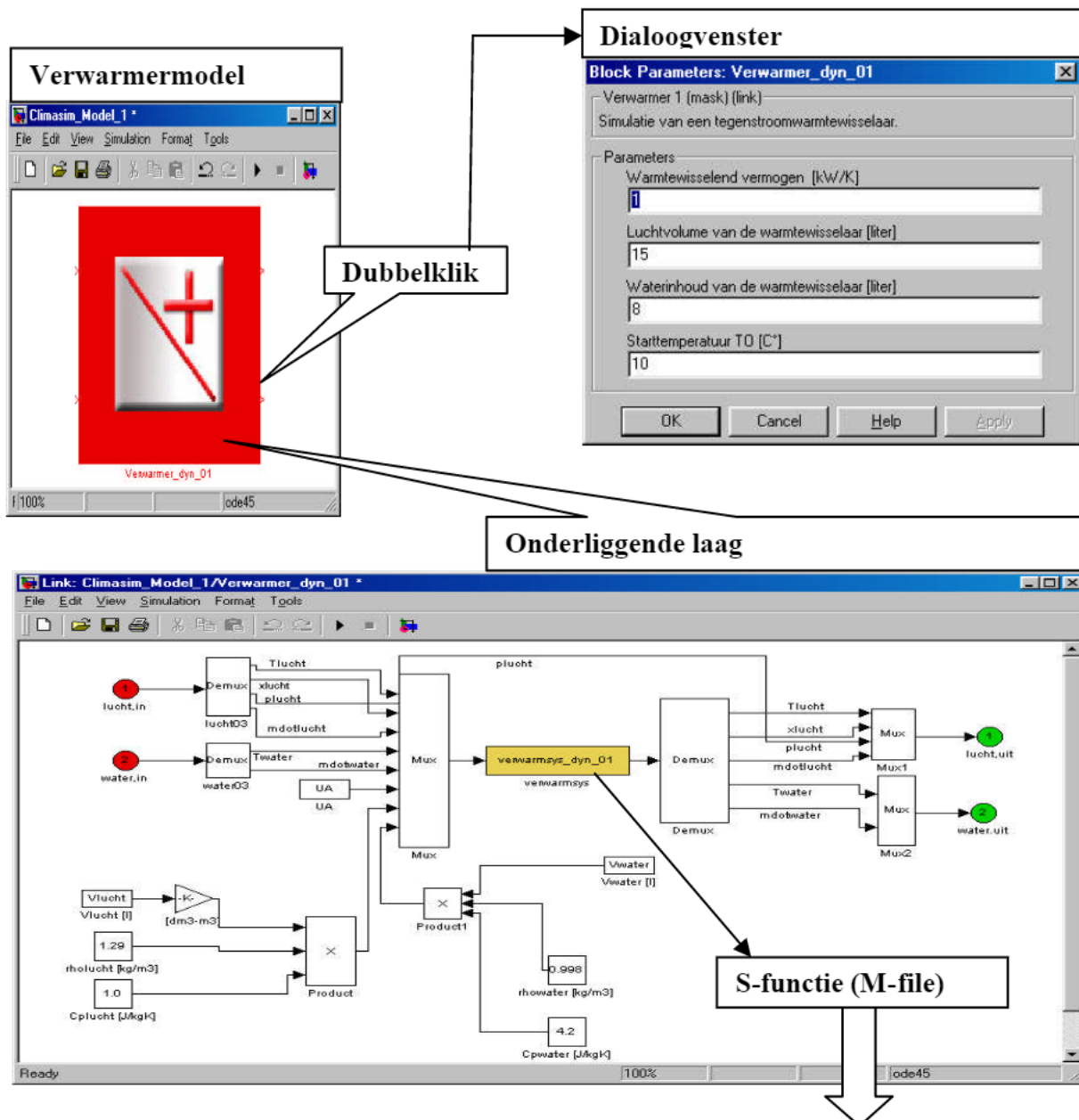
Luchtzijdig:

$$\frac{dT_{lucht,uit}}{dt} = \frac{\dot{\Phi}_{m,lucht} \cdot c_{p,lucht} \cdot \{T_{lucht,in} - T_{lucht,uit}\} + P_{stat}}{MC_{lucht}} \quad (1)$$

Waterzijdig:

$$\frac{dT_{water,uit}}{dt} = \frac{\dot{\Phi}_{m,water} \cdot c_{p,water} \cdot \{T_{water,in} - T_{water,uit}\} - P_{stat}}{MC_{water}} \quad (2)$$

$\dot{\Phi}_{m,lucht}$	= massastroom lucht	[kg/s]
$c_{p,lucht}$	= soortelijke warmte lucht	[J/(kgK)]
$T_{lucht,in}$	= ingaande luchttemperatuur	[°C]
$T_{lucht,uit}$	= uitgaande luchttemperatuur	[°C]
P_{stat}	= statisch warmtewisselendvermogen	[W]
$\dot{\Phi}_{m,water}$	= massastroom water	[kg/s]
$c_{p,water}$	= soortelijke warmte water	[J/(kgK)]
$T_{water,in}$	= ingaande watertemperatuur	[°C]
$T_{water,out}$	= uitgaande watertemperatuur	[°C]



```
function [sys,T0] = verwarmsys_dyn_01(t,T,u,flag,Tstartverwarmer)

persistent Ccold Chot Pv
%Constanten:
Cpw= 4.2; %warmtecapaciteit van het water [kJ/(kg.K)]
Cpl= 1.0; %warmtecapaciteit van de lucht [kJ/(kg.K)]

case 1
    %if flag = 1 , return state derivatives, Xprime
    %if u(3) ~=0 & u(5)~=0 ;
    MCP1=u(3)*Cpl;
    MCPw=u(5)*Cpw;
    Chot=MCPw;
    Ccold=MCP1;
    Tprime(1) = ((Ccold*(u(1)-T(1)))+Pv)/u(7);
    Tprime(2) = ((Chot*(u(4)-T(2)))-Pv)/u(8);
```

figuur 5 De hiërarchische structuur van het verwarmer-model.

In figuur 5 is de gelaagde structuur van het model duidelijk zichtbaar. Op gebruikersniveau heeft de verwarmer twee invoer- en twee uitvoerpoorten. Dit zijn de in- en uitgaande mediumstromen (water en lucht). Daarnaast worden de noodzakelijke thermische eigenschappen van de warmtewisselaar via het dialogovenster ingevoerd. In de laag onder het verwarmer-blok bevindt zich het Simulink-model

voor het berekenen van de systeemparementers op basis van de invoergegevens uit het dialoogvenster.

De kern van het model wordt gevormd door een zogenaamd S-functieblok. De S-functie gebruikt een programma in Matlab-code waarin de hierboven beschreven wiskundige vergelijkingen worden opgelost. De Matlab-code is een aparte file. Daarin zijn volgens een voorgeschreven format, de wiskundige vergelijkingen geprogrammeerd waarmee de dynamische warmte-uitwisseling tussen warm water en koude lucht wordt berekend. Het gebruik van een S-functie heeft de volgende voordelen;

- Overzichtelijker dan de blokstructuur in Simulink bij complexe berekeningen
- Een algoritme is gemakkelijker aan te passen (meer functies beschikbaar)

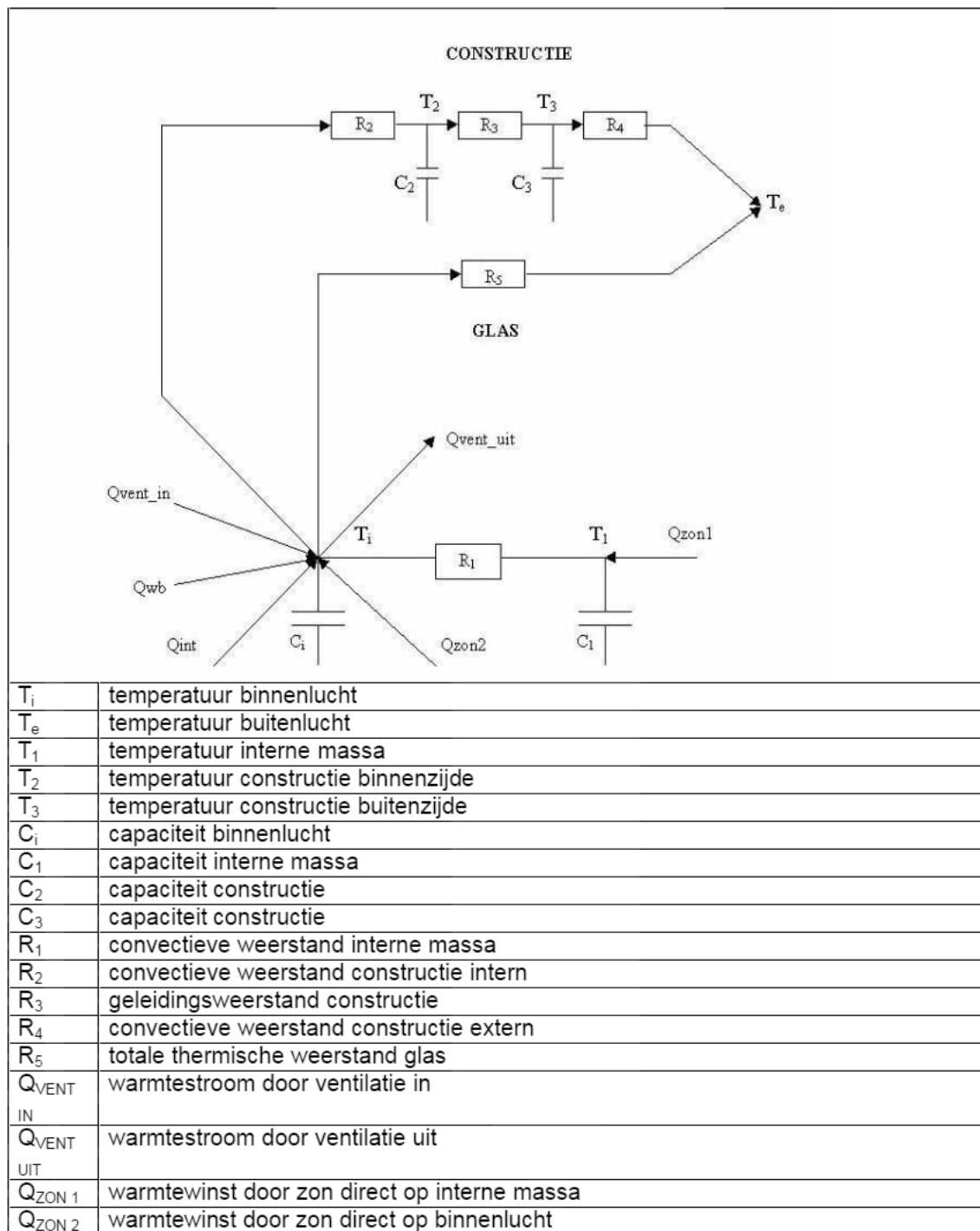
Een gebruiker van de bibliotheek hoeft niet bekend te zijn met de onderliggende lagen van een model. Alleen voor modelbouwers is deze informatie relevant en kunnen zij uitgaande van bestaande modellen, specifieke aanpassingen of uitbreidingen doorvoeren.

Conclusies luchtbehandeling

- Er is een programmeeromgeving in Simulink beschikbaar waarmee op een gebruikersvriendelijke wijze simulatiemodellen voor luchtbehandelingsinstallaties kunnen worden gemaakt
- Een simulatiemodel kan snel vanuit de bibliotheek worden gemaakt
- De programmeeromgeving is flexibel zodat ook specifieke installaties kunnen worden gesimuleerd.
- Het is mogelijk om eigen modellen in te voegen.

2 Een 1-zone gebouwmodel

Er is een 1-zone model van een gebouw ontwikkeld [4], waarbij gegevens worden gebruikt die in de ontwerpfase bekend zijn. Het model is gebaseerd op het analogon zoals is weergegeven in figuur 6.

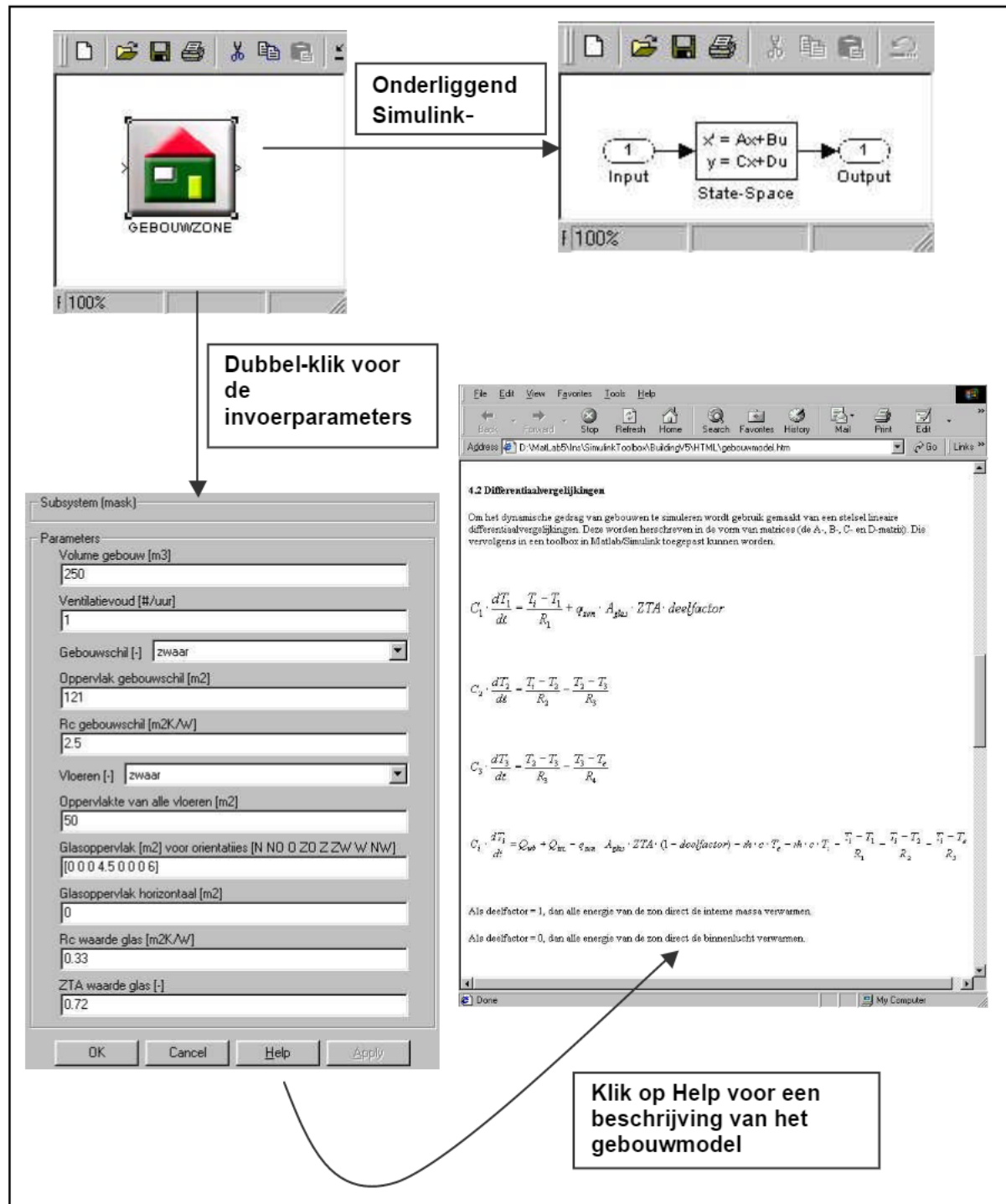


figuur 6 Analogon van een 1-zone model

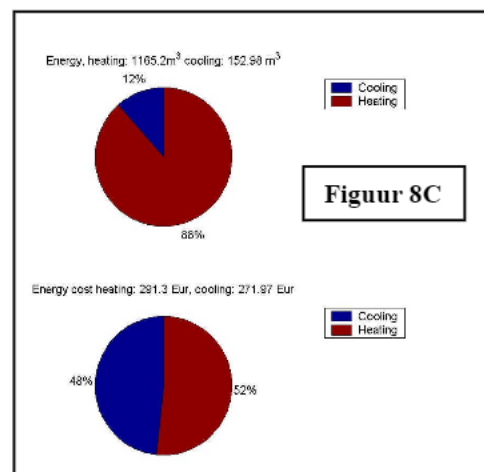
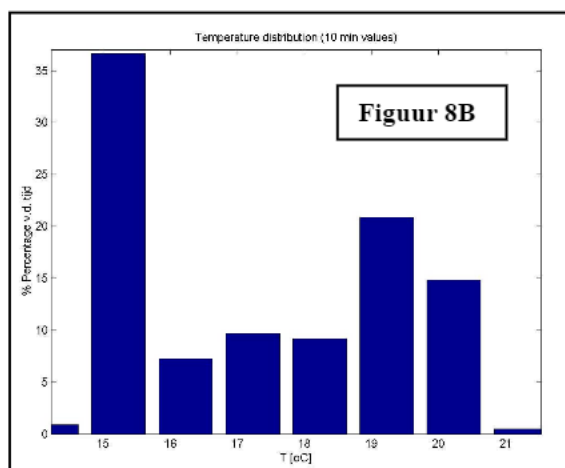
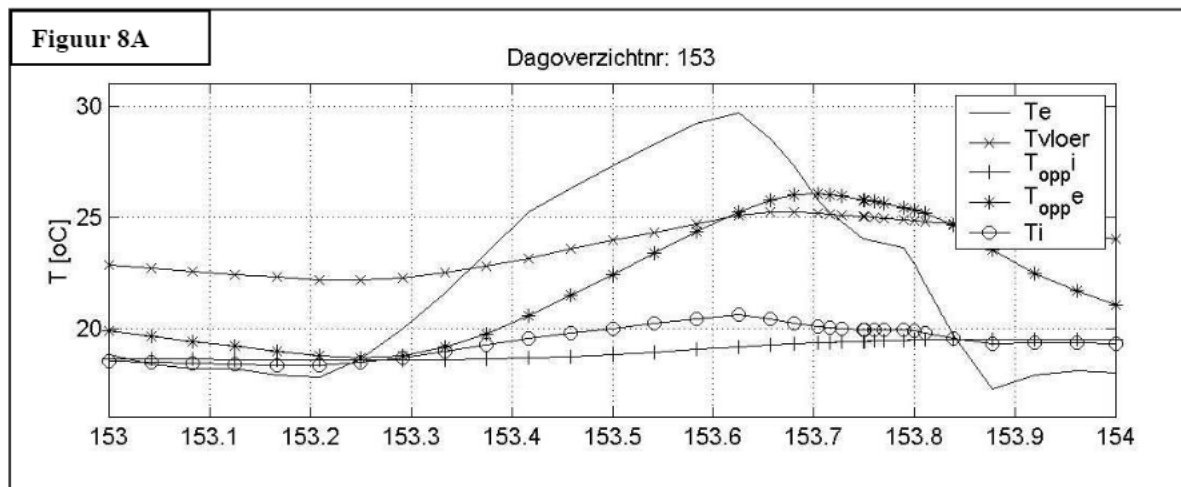
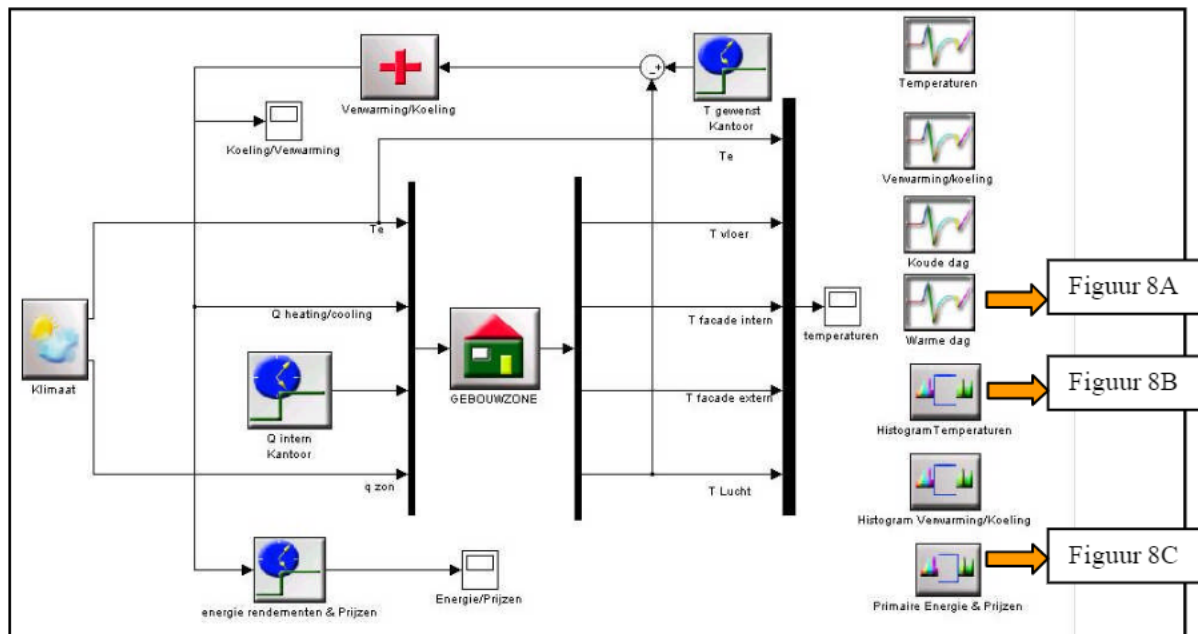
De zoninstraling is in dit gebouwmodel sterk vereenvoudigd. Daardoor kan met beperkte invoergegevens een redelijk betrouwbare simulatie worden uitgevoerd.

Het simulatiemodel heeft de volgende invoergegevens nodig; Buitentemperatuur, horizontale irradiantie, toegevoerd vermogen en interne warmteproductie. De uitvoer kan bestaan uit temperaturen, energiehoeveelheden en kosten. Het temperatuurverloop van de lucht, de interne massa, het interne en externe constructie oppervlak kan grafisch worden weergegeven.

Het analogon is eerst vertaald in een systeem van lineaire differentiaalvergelijkingen, daarna zijn deze vergelijkingen omgezet in een 4-tal matrices en ingevoerd in Simulink met behulp van een 'State-Space' – component. In de help-file van het 1-zone gebouwblok wordt de inhoud van deze matrices beschreven. In is het gebouwmodel weergegeven zoals dat in de Climasim-bibliotheek is opgenomen. De bibliotheek laat toe dat de gebruiker ook de onderliggende submodellen kan inzien en naar eigen inzichten kan wijzigen, terwijl in de help-file de achtergrond van het model wordt toegelicht.



figuur 7 Het 1-zone gebouwmodel met invoervenster en help-file.



figuur 8 Het PI-geregelde 1-zone gebouwmodel met postprocessing

Met het PI-geregelde, 1-zone gebouwmodel kan het temperatuurverloop en de warmte- of koudevraag over een dag grafisch worden weergegeven. Tevens is het mogelijk om een histogram van de luchttemperatuur en een overzicht van de energiekosten te genereren.

Het toegevoerd vermogen naar het gebouw wordt door een PI-regelaar in combinatie met een gewenst temperatuur profiel geregeld. De uitgang van de regelaar is begrensd met een minimale en maximale waarde. Verder zijn tijdsafhankelijke profielen toegepast om de gewenste luchttemperatuur (nachtverlaging, weekend onderbreking), de interne warmtelast (computers, personen) en de energieprijzen (daltarief elektriciteit) in rekening te brengen. In figuur 8 is het complete systeem weergegeven alsmede enkele exemplarische simulatieresultaten.

Ter controle van het model zijn de warmtebehoefte van een referentie doorzonwoning voor een stookseizoen vergeleken met de resultaten van WAVO [5] (een state-of-the-art model ontwikkeld door TU/e), een handberekening en een Novem publicatie. Zie tabel I.

energiehoeveelheden	gebouwmodel [kWh]	WAVO [kWh]	handberekening [kWh]	Novem [11] [kWh]
netto warmtebehoefte	6320	6503	6045	6326

Tabel I. Vergelijking warmtebehoefte

Ook is de koelbehoefte van dezelfde woning vergeleken met WAVO voor de maanden juni, juli en augustus van het jaar 1979:

energie hoeveelheden	gebouwmodel [kWh]	WAVO [kWh]
netto koelbehoefte	2982	2272

Tabel II. Vergelijking koelbehoefte

Uit bovenstaande tabellen volgt dat het model in geval van een doorzonwoning, de warmtebehoefte goed berekent met een afwijking van 5% en de koelbehoefte overschat met 30% ten opzichte van WAVO [5].

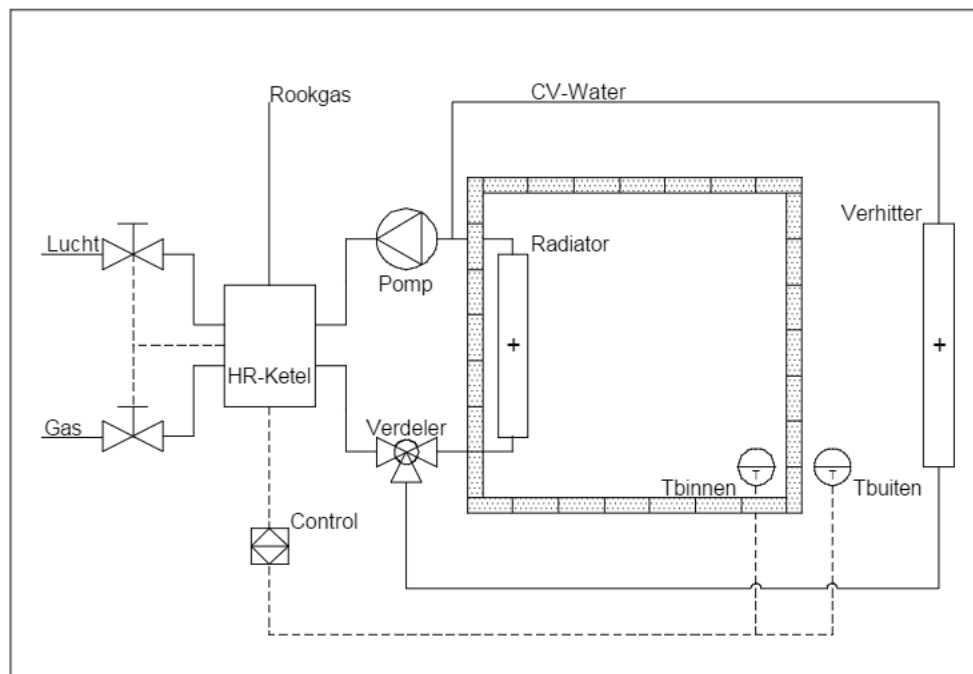
Conclusies gebouwmodel "Climasim"

- Het gebouwmodel is te gebruiken in de vroege ontwerpfase indien de benodigde gebouwparameters zoals weergegeven in bekend zijn.
- De simulatie van het gebouwmodel heeft een variabele tijdstap waardoor deze geschikt is om ook dynamische processen met een kleine tijdconstante (bijvoorbeeld aan/uit schakelen binnen een uur) te simuleren. Daarnaast is het mogelijk om resultaten per tijdperiode (uur) te middelen en uit te voeren naar een bestand zodat op eenvoudige wijze bijvoorbeeld uurwaarden van de warmte- en koelbehoefte kan worden verkregen.
- De zon-instraling is eenvoudig gemodelleerd. Het gevolg is dat de zonnijdrage in de winter lager (orde 5%) is en in de zomer hoger (orde 30%), vergeleken met een perfecte zonnijdrage modellering.
- Het gebouwmodel is gevalideerd voor een eenvoudige geometrie die kan worden benaderd door één enkele zone (doorzonwoning). Het model is niet zonder meer toepasbaar op complexe geometrieën en/of multizone problemen.

3 Een verwarmingsinstallatie

De verwarmingsinstallatie bestaat uit een HR-ketel waarmee warmte wordt geleverd aan een watercircuit zoals is weergegeven in figuur 9. Het warme CV-water geeft warmte af aan een luchtbehandelingssysteem en aan radiatoren in het gebouw.

Het simulatiemodel [9],[10] kan worden gebruikt om de invloed van verschillende installatieparameters op het energieverbruik te bepalen. Hierbij moet gedacht worden aan ontwerpparameters zoals de ingestelde watertemperaturen, de waterinhoud van ketel, leidingsysteem en radiatoren, de wijze van regelen (modulair of aan/uit) en de ketelisolatie.



figuur 9 Principeschema verwarmingsinstallatie

Zoals in figuur 9 is te zien bestaat het verwarmingsinstallatiedeel uit vijf componenten: een ketel, een verdeler, een radiator, een luchtverhitter en een pomp. De instelling van de verdeler bepaalt de warmteverdeling tussen radiator en luchtverhitter. De ketel warmt water op waarna de verdeler een deel van het water afsplitst. Door de radiator wordt aan de warmtevraag van het gebouw voldaan. Vervolgens wordt het retourwater van de radiator en de luchtverhitter weer samengevoegd en naar de ketel teruggevoerd. De pomp zorgt voor de juiste opvoerdruk.

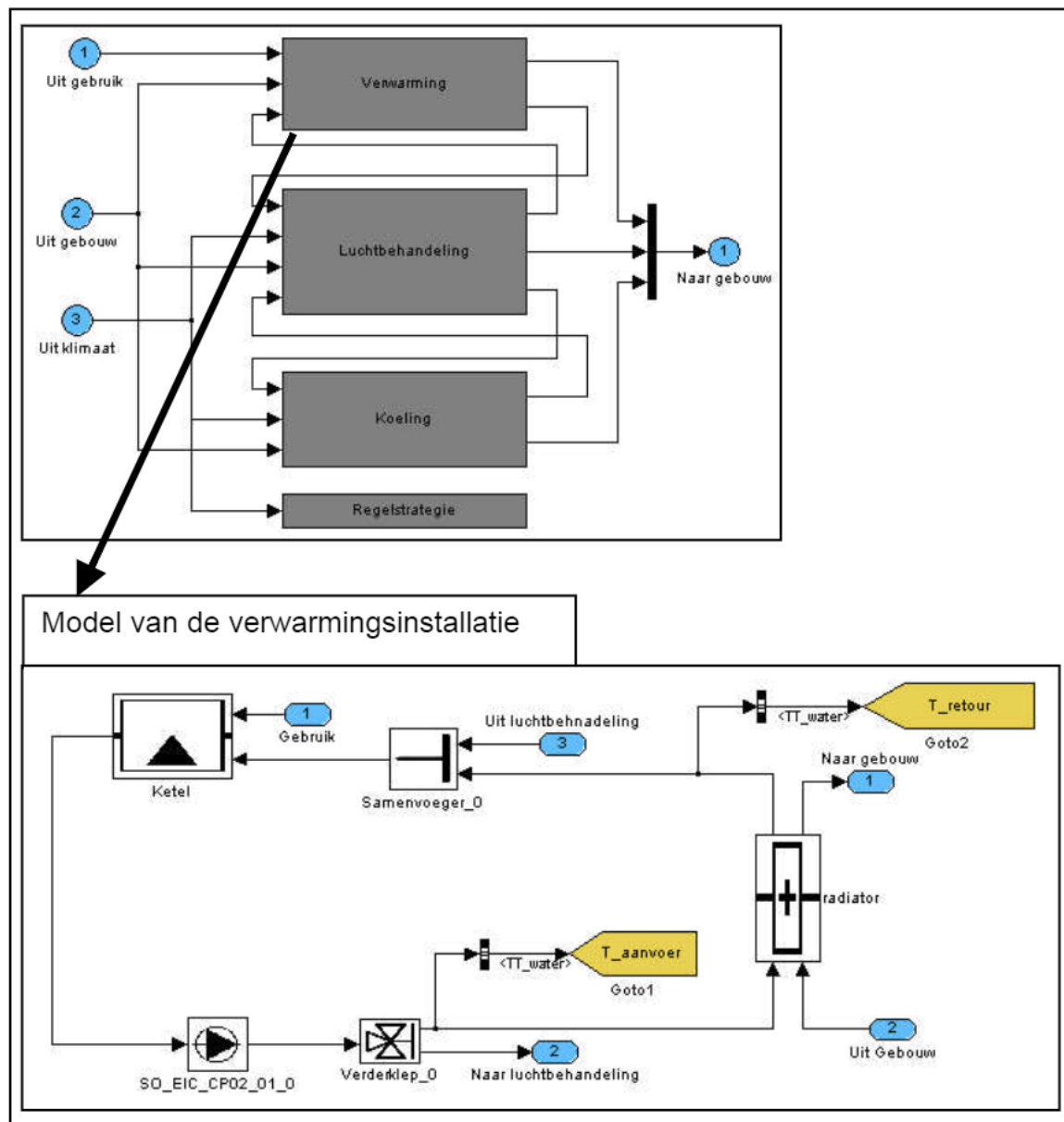
Simulatiemodel

Het rendement van de HR-ketel is afhankelijk van diverse factoren. De uitgangspunten van het model en de wiskundige vergelijkingen zijn via de help-functie opvraagbaar.

De gebruiker dient een aantal karakteristieke parameters in te voeren via een dialoogvenster. Dit zijn de volgende parameters:

- Het nominale ketelrendement
- Stilstandverliespercentage met de daarbijbehorende watertemperatuur; dit is een percentage van het maximale vermogen, wat verloren gaat als de ketel uitschakelt.
- Maximale aanvoertemperatuur
- Maximale retourtemperatuur (gewenst)
- Minimale aanvoertemperatuur
- Maximale ketelvermogen
- Minimale deellast in procenten van het maximale vermogen. Het model simuleert een modulerende ketel. Het percentage geeft aan wat het minimale vermogen is waarop de ketel in bedrijf komt. Een aan/uit-ketel kan worden gesimuleerd door 100% in te vullen als minimale deellast.

In figuur 10 is het simulatiemodel van de verwarmingsinstallatie weergegeven.



figuur 10 Het simulatiemodel in Climasis

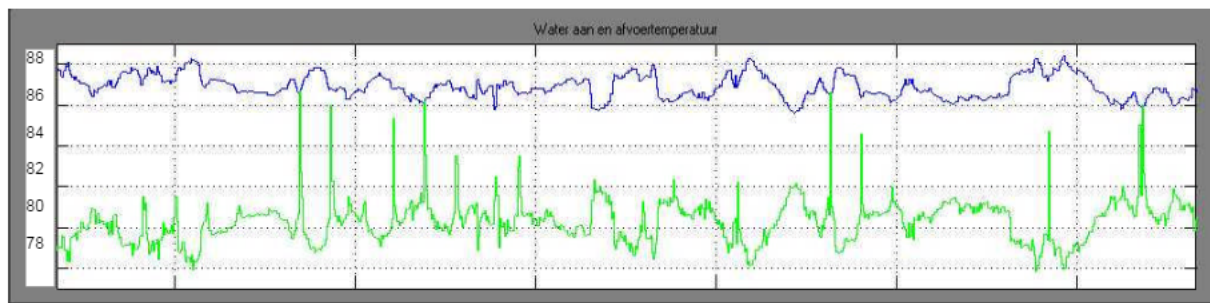
De toepasbaarheid

De gebruiker hoeft bij dit model geen gedetailleerde gegevens in te voeren. Dit maakt het model zeer toepasbaar in het onderwijs. Bij de ketel moet bijvoorbeeld ingevoerd worden wat het vermogen is, de gewenste aanvoertemperatuur en in hoeverre de ketel in staat is zijn vermogen te moduleren. Bij de verdeler moet ingesteld worden hoeveel er afgesplitst moet worden. De radiatorgroep is zodanig gemodelleerd dat altijd aan de warmtebehoefte wordt voldaan.

Voorbeeld van een simulatieresultaat

Door verschillende parameters te veranderen kan inzicht verkregen worden in de werking van een verwarmingsinstallatie en het gebruiksrendement van de ketel. Door de modulaire opbouw kan de verwarmingsinstallatie ook naast andere installatieconcepten worden geplaatst.

Met het simulatiemodel kunnen alle temperaturen en energiestromen in de installatie grafisch worden weergegeven. In figuur 11 is een illustratief voorbeeld van het verloop van de watertemperaturen in de tijd grafisch weergegeven.



figuur 11 Aanvoer- en retourtemperaturen van de ketel als functie van de tijd

Vervolgtraject

Bij de ontwikkeling van dit installatieconcept is nauw samengewerkt met Deerns RI en Imtech. Op dit moment wordt gewerkt aan de afronding van een simulatiemodel van een warmwaterketel, die meer inzicht zal verschaffen in het afkoel- en opwarmgedrag van een warmwaterketel.

Daarnaast is er overleg met Gastec die samen met andere Europese partners Boilsim hebben ontwikkeld. Boilsim is een statisch simulatiemodel van een warmwaterketel. Er wordt uitgezocht hoe dit model op een dynamische manier gekoppeld kan worden aan Climasisim

Conclusies verwarmingsinstallatie

- Er is een modulair model ontwikkeld waarmee het gedrag van een verwarmingsketel kan worden gesimuleerd.
- De gebruikersvriendelijke programmering in Climasisim houdt in dat het model als warmteopwekker ook in andere installaties kan worden gebruikt.

4 Vrije en mechanische koeling

In een serverruimte wordt er door de computers zoveel warmte geproduceerd, dat er niet alleen 's zomers maar ook in de winter gekoeld moet worden. Koudwater wordt door een conventionele compressie koelmachine gemaakt. Dit wordt mechanische koeling genoemd. In de winter zou men gebruik kunnen maken van de buitenlucht. Deze is dan immers koud genoeg. In dat geval wordt er met behulp van een droge koeler koud water gemaakt en dat wordt "vrije koeling" genoemd. Het toepassen van "vrije koeling" leidt tot een lager elektriciteitsverbruik.

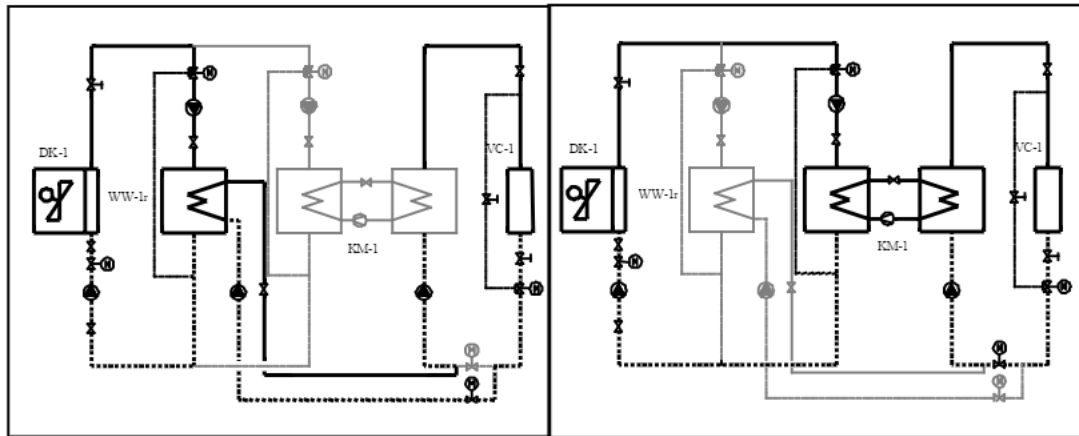
Voor de bepaling van de energiebesparing en voor het optimaliseren van de regeling is een simulatiemodel bijzonder nuttig. Met name de regeling is complexer dan bij een puur mechanisch koelsysteem.

Het simulatiemodel

Het model bestaat uit een droge koeler DK-1, een watergekoelde koelmachine KM-1, een tegenstroom warmtewisselaar WW-1, een ventilatorconvactor VC-1, twee pompen, twee driewegkleppen en twee verzamelende T-stukken. In figuur 12 zijn de principeschema's voor het winter- en zomerbedrijf afgebeeld.

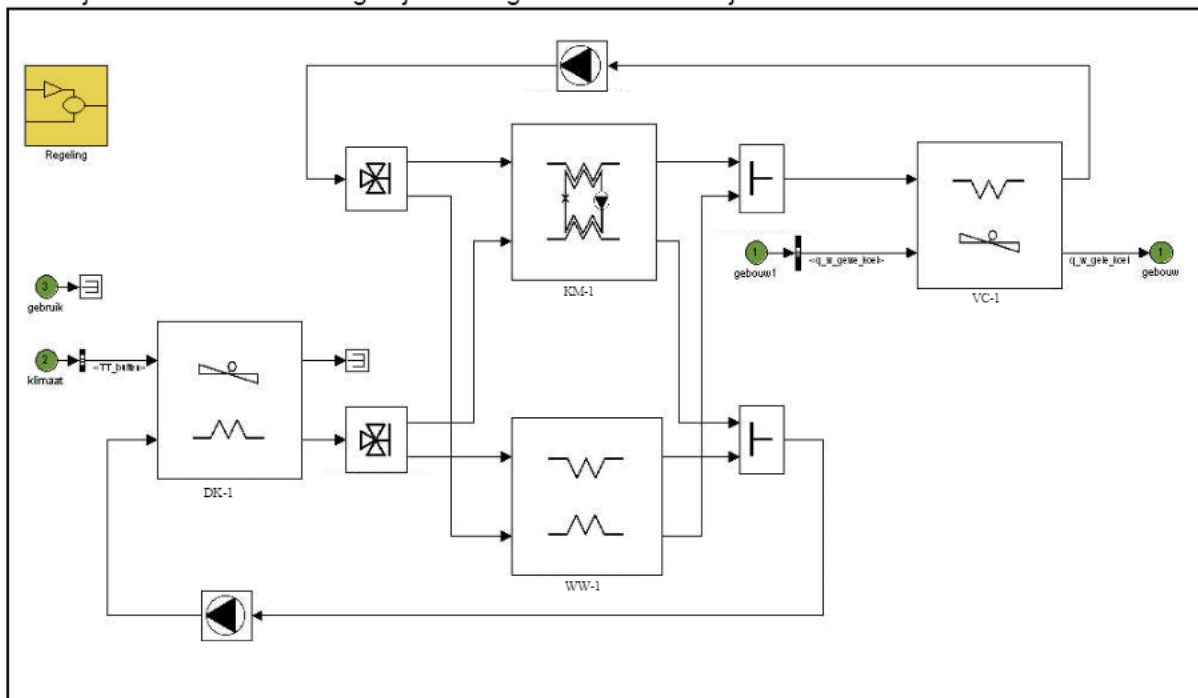
In het zomerbedrijf wordt de warmteproductie in het gebouw met behulp van mechanische koeling afgevoerd. De warmte in het gebouw wordt, via de ventilatorconvactor VC-1, overgedragen aan het koudwater-circuit. Vervolgens draagt het koudwater, via de compressie koelmachine KM-1, zijn warmte over aan het koelwater-circuit. Als laatste geeft het koelwater, via de droge koeler DK-1, zijn warmte af aan de buitenlucht.

In het winterbedrijf wordt de warmteproductie in het gebouw met behulp van vrije koeling afgevoerd. De warmte in het gebouw wordt, via de ventilatorconvactor VC-1, overgedragen aan het koudwater-circuit. Vervolgens draagt het koudwater, via de tegenstroomwarmtewisselaar WW-1, zijn warmte over aan het koelwater-circuit. Als laatste geeft het koelwater, via de droge koeler DK-1, zijn warmte af aan de buitenlucht.



figuur 12 Het principe "vrije koeling"; winterbedrijf (links) en zomerbedrijf (rechts)

In figuur 13 is het simulatiemodel weergegeven. Daarin zijn de componenten zoals beschreven in duidelijk herkenbaar. Dit draagt bij aan de gebruikersvriendelijkheid van het simulatiemodel.

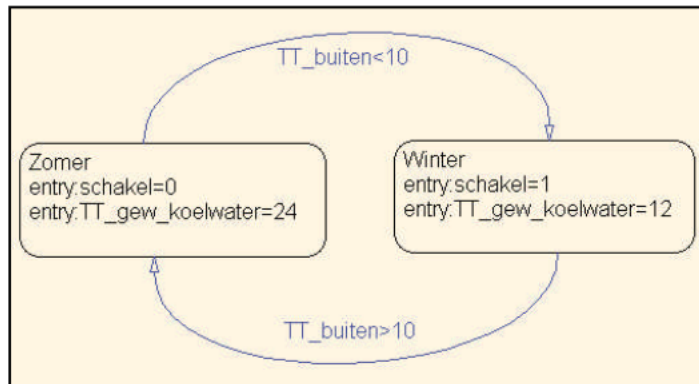


figuur 13 Het simulatiemodel "vrije koeling"

De regelstrategie van vrije koeling

Via het submodel "Regeling" worden de pompen, ventilatoren en driewegkleppen aangestuurd. De regeling schakelt op basis van de buitentemperatuur tussen zomer- en winterbedrijf. Zodoende zorgt deze regeling voor de gewenste temperaturen in de watercircuits.

Deze regeling is in "Stateflow" [7] geprogrammeerd. Daarmee kunnen op een flexibele en gebruikersvriendelijke manier allerlei regelstrategieën worden gerealiseerd. In figuur 14 is de regeling in Stateflow voor het model vrije koeling afgebeeld. Dit is een simpele regeling, het schakelen tussen het winter- en zomerbedrijf gebeurt op basis van de buitentemperatuur. Een regeling bestaat uit een regelaar, een sensor en een actuator. In de simulatieomgeving Climasim kan een sensor als component in de installatie worden geplaatst en kan een lijst met actuatoren worden aangemaakt. In het submodel "Regeling" wordt de regelstrategie en de regelaar vastgelegd.



figuur 14 De "Stateflow"-regeling in het model "vrije koeling"

Toepasbaarheid

Het model is geschikt voor toepassing tijdens het structuurontwerp. De gebruiker hoeft geen gedetailleerde gegevens in te voeren. Wel kan de gebruiker een aantal globale gegevens instellen, zoals:

- het vermogen van de watergekoelde compressie koelmachine
- de COP-waarde van de watergekoelde koelmachine
- het vermogen van de pompen
- het vermogen van de ventilatoren in de droge koeler en in de ventilatorconvactor
- de temperatuurrendementen van de warmtewisselaars
- de gewenste temperaturen van de watercircuits

De installatiecomponenten in het model zijn volledig modulair opgebouwd, de in- en uitgaande parameters zijn voor variabelen in elk component hetzelfde. Dit maakt het mogelijk om installatiecomponenten uit de modellenbibliotheek van Climasim toe te voegen of te verwijderen. Ook kunnen de installatiecomponenten op een andere plaats in het model worden gezet. De gebruiker kan op deze manier zijn eigen installatieconcept bouwen.

Het model zelf is ook modulair opgebouwd. Het model kan als onderdeel in een groter model worden geplaatst. Zo kan dit model voor de koeling naast een model voor verwarming, luchtbehandeling of elektriciteitsvoorziening worden geplaatst.

In het model kunnen alle uitgaande temperaturen van alle installatiecomponenten worden afgelezen. Verder kunnen het energieverbruik van de compressie koelmachine, de pompen en de ventilatoren in de droge koeler en in de ventilatorconvactor worden afgelezen.

Simulatieresultaat

Met het simulatiemodel voor vrije koeling is een voorbeeldberekening uitgevoerd om een keuze te kunnen maken tussen een concept met mechanische koeling en een combinatie-concept met mechanische koeling in de zomer en vrije koeling in de winter. Het gebouw heeft een jaarlijkse koelbehoefte van 43700 MJ. De keuze wordt gebaseerd op het energieverbruik van de installatie en de maximale temperatuur in het gebouw.

1. Mechanische koeling

Dit concept wordt in het simulatiemodel gerealiseerd, door de regeling zodanig aan te passen dat de "vrije koeling" nooit in bedrijf komt. Dit resulteert in een elektriciteitsverbruik van 11300 kWh.

2. Mechanische koeling in de zomer en vrije koeling in de winter.

Als de buitentemperatuur lager dan 10°C wordt, schakelt de installatie over op winterbedrijf (vrije koeling). Dit resulteert in een elektriciteitsverbruik van 9200 kWh.

Het toepassen van vrije koeling bespaart ruim 2000 kWh per jaar, een besparing van ca. 20%. De maximale temperatuur in het gebouw is bij beide concepten even hoog, namelijk 25°C.

Conclusie vrije en mechanische koeling

- Er is een gebruikersvriendelijk model in Climasim beschikbaar dat als complete koelinstallatie op basis van vrije en mechanische koeling kan worden ingezet.
- Het gebruik van Stateflow blijkt een handzame tool te zijn om stuur- en regelacties te modelleren.

Conclusies

- Climasim is een programmeeromgeving waarmee op een gebruikersvriendelijke wijze simulatiemodellen voor klimaatinstallaties kunnen worden gemaakt
- Een simulatiemodel kan snel vanuit de bibliotheek worden gemaakt
- De programmeeromgeving is flexibel zodat ook specifieke installaties kunnen worden gesimuleerd.
- De simulatieomgeving heeft een zodanig open structuur dat vanuit diverse bronnen, programma's kunnen worden ingevoegd.
- De koppeling tussen de verschillende modellen is op Simulink-niveau gestructureerd en er is een basis gelegd voor een bibliotheek.

In de literatuur, bij universiteiten en onderzoeksinstituten en bij ingenieursbureaus zijn reeds veel gevalideerde modellen beschikbaar. De ontwikkeling van een open simulatieomgeving zou in een hoog tempo kunnen plaatsvinden als de inbreng vanuit die partijen gestalte kan krijgen.

Literatuur

- [1] A.C. Taal, Climasim, Het simuleren van klimaatinstallaties, Verwarming en Ventilatie, 2001
- [2] Simulink, Dynamic System Simulation Software; User's Guide, The Mathworks, 1992
- [3] A.C. Taal, Het project Climasim, Stand van zaken, IBPSA-conferentie 2001
- [4] R. Roijackers en A.W.M. van Schijndel, Simulatie van een installatietechnische component: "Simple Building", T8-verslag TU/e Bouwkunde FAGO, 2001-feb
- [5] A.W.M. van Schijndel en M.H. de Wit, A Building Physics Toolbox in Matlab, Proceedings of the 5th Symposium 'Building Physics in the nordic countries, 1999-aug, pp81-88
- [6] B. Rutgers, H. Bastiaanse, Simulatiemodel van een koelinstallatie met vrije- en mechanische koeling, R.I. Smits van Burgst BV, 2000
- [7] Modeling with Stateflow, The Mathworks, 2000
- [8] D. van den Berg, Simulatiemodellen voor klimaatsystemen, Afstudeerverslag Fontys Hogeschool Werktuigbouwkunde, januari 2000
- [9] M.H. van der Sar, Een ketelmodel voor Climasim gekoppeld aan h.e.n.k., Haagse Hogeschool, 30 januari 2001
- [10] G. Hietkamp, Ketel 1, Haagse Hogeschool, 17 september 2001
- [11] Referentie Doorzonwoning, Novem, S01.137 01.91