

Klimaat adaptieve kassen

Er leiden verschillende wegen naar energieneutraal, zero-energie of zelfs duurzame energie producerende gebouwen. Eén van deze wegen is het gebruik van klimaat adaptieve gevels (zogenaamd Cabs: Climate Adaptive Building Shells). Van de hierin gebruikte materialen kunnen de thermische en optische eigenschappen op ieder moment aangepast worden aan de buiten- en binnenklimaatomstandigheden. Zo is een optimaal binnenklimaat realiseerbaar bij een minimaal energiegebruik. Een voorbeeld van Cabs is het gebruik van smart glas, waarvan de transparantie dynamisch aangepast kan worden.

Ir. A.C. (Arie) Taal*, dr. L.C.M. (Laure) Itard**,**

*De Haagse Hogeschool, lectoraat Energie en de Gebouwde Omgeving

**TU Delft, Onderzoeksinstituut OTB

Dit artikel behandelt de mogelijkheden voor energiebesparing door het gebruik van klimaat adaptieve kassen gekoppeld aan een 'inverse' controle strategie. Bij een dergelijke strategie worden niet de verwarmings-, ventilatie- en koelinstallaties geregeld op basis van een schil met vaste eigenschappen, maar worden de thermische en optische eigenschappen van de schil direct geregeld (zie ook [1,2,3]).

Energiebesparing in de glastuinbouwsector is zeer belangrijk omdat deze sector bijna 10% van het totale gasverbruik in Nederland voor zijn rekening neemt. In 2020 moeten nieuwe kassen klimaatneutraal zijn in de zin dat ze minder primaire energie moeten gebruiken op jaarbasis dan ze zelf aan duurzame energie kunnen produceren. De gehele sector zou klimaatneutraal moeten zijn in 2050. Veel ontwikkelingen, zoals beter isolerend glas, hoog rendement verlichting en installaties hebben al plaats gevonden en geleid tot substantiële energiebesparing. Een voorbeeld daarvan is de toepassing van gesloten kassen, zonder natuurlijke ventilatie. Vochtigheidscontrole vindt plaats via mechanische koeling, waar-

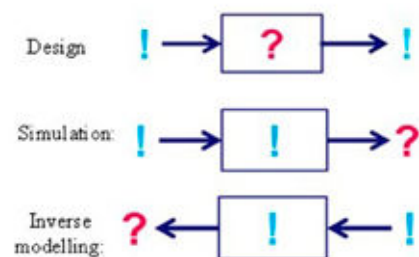
door warmteterugwinning en koppeling aan energieopslag in de grond mogelijk wordt. Desondanks is klimaatneutraliteit nog ver weg. Tot nu toe wordt de kassenschil aangepast door het gebruik van te openen ramen en het gebruik van thermische en lichtschermen. De vraag is of grotere energiebesparingen bereikt kunnen worden door de schil volledig dynamisch te maken.

■ INVERSE MODELING

In een directe simulatie is de input van het model bekend (bijvoorbeeld geometrie, isolatiewaarde) en het model berekent de output (bijvoorbeeld energiegebruik, binnentemperatuur). Bij een inverse simulatie is de output bekend (bijvoorbeeld gewenste binnentemperatuur of een energiescenario zoals zero-energie of energieneutraal) en berekent het model de benodigde input om de gewenste output te bereiken (zie figuur 1). In het 'inverse' model worden de inputvariabelen per uur bepaald: de thermische en optische parameters van de schil kunnen per uur aangepast worden. Op dit moment is dit in de praktijk nog niet echt te

realiseren maar als grote energiebesparingen aangetoond kunnen worden kan het de moeite waard zijn om te werken aan de ontwikkeling van zulke adaptieve materialen.

In het algemeen is het niet mogelijk om een inverse simulatie uit te voeren via het direct oplossen van een set van n vergelijkingen met n onbekenden, omdat er meer dan n onbekenden zijn. Het is daarom noodzakelijk om optimalisatie-algoritmes te gebruiken die de optimale oplossing zoeken te midden van een groot aantal alternatieve inputparameters (zie figuur 2).



-Figuur 1- Inverse modeling (uit [4])

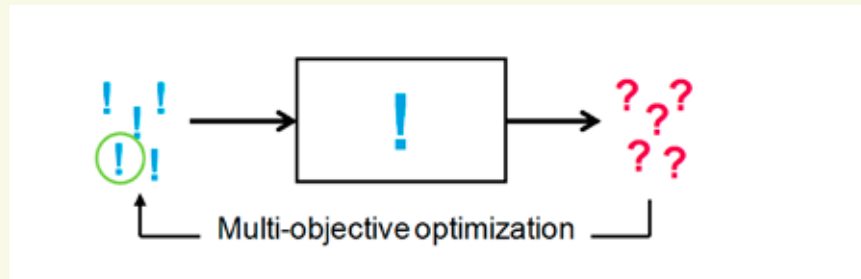
Dit artikel gaat verder in op een simulatie-model gebaseerd op geschikte groeiomstandigheden voor tomaten. Er is rekening gehouden met de invloed van het PAR-deel (Photosynthetic Active Radiation, 400-700 nm) van de zonnestraling. Dit is het deel dat gebruikt wordt door de plant om te groeien. Ook met groeiomstandigheden zoals acceptabel luchttemperatuurbereik, vochtigheid en CO₂-concentratie is rekening gehouden. De inverse simulatie is gebaseerd op een kassenmodel. De simulaties worden gemaakt voor een groot aantal alternatieve inputdata, leidend tot een optimale set of inputparameters.

HET KASMODEL

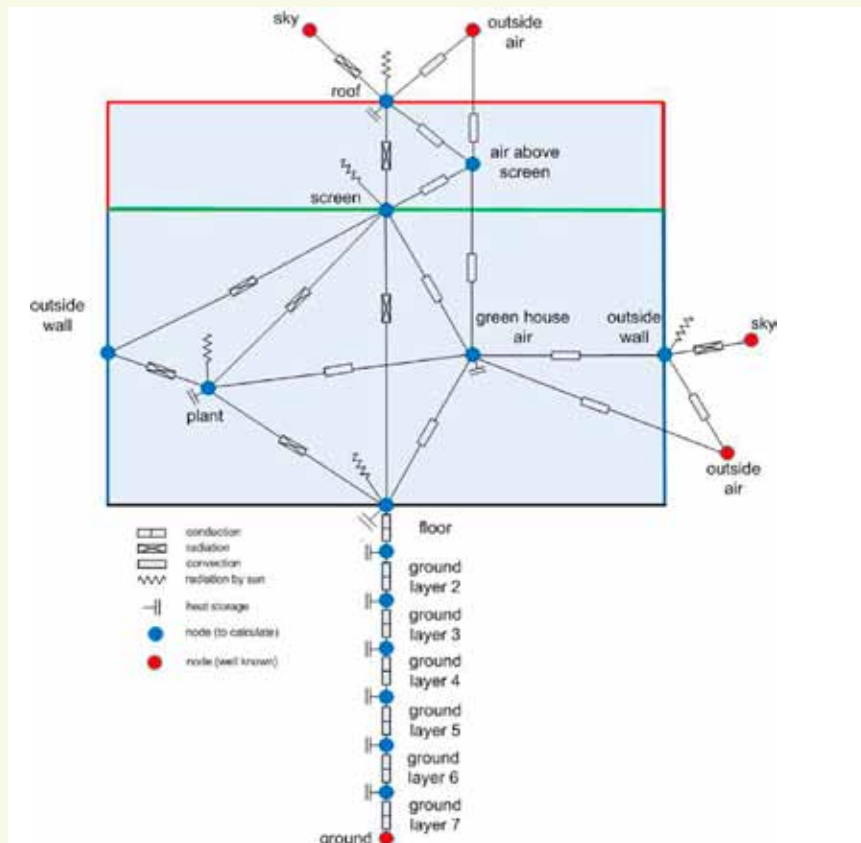
Het doel van dit onderzoek is om de inverse modeling strategie te testen en te bepalen in hoeverre energiebesparing mogelijk is door gebruik te maken van adaptieve eigenschappen. Er is voor gekozen om geen gebruik te maken van zeer gedetailleerde modellen (zoals Kaspro [5]), maar te werken met een simpel en snel, doch voldoende nauwkeurig model. De kas is gemodelleerd in Matlab/Simulink en bestaat uit 16 knooppunten, leidend tot een set van 16 vergelijkingen (zie figuur 3).

De schil bestaat uit het dak en vier buitenwanden. De vloeroppervlakte is 10.000 m² en de afmetingen van de kas zijn 100x100x6 m. Het betreft een plat dak. De vloer is gemodelleerd door rekening te houden met 7 lagen over een totale diepte van 1,5 m. De beperkingen van het model zijn de volgende:

- er wordt alleen rekening gehouden met de horizontale straling op het dak van de kas. Het gaat om een grote, industriële kas, waarbij de totale oppervlakte van de zijwanden klein is ten opzichte van de oppervlakte van het dak.
- De zonnestraling door de zijwanden wordt dus verwaarloosd;
- de tijdsvertraging door warmteaccumulatie in het glas wordt verwaarloosd, omdat het thermische accumulatievermogen van het glas zeer klein is in vergelijking met dat van de grond;
- de warmteoverdrachtscoëfficiënten worden verondersteld constant te zijn binnen de operatieve condities van de kas (dus onafhankelijk van luchttemperatuur en -snelheid). De (optische) transmissie (t) en absorptiecoëfficiënten (a) van het glas worden beschouwd als onafhankelijk van de hoek van de inkomende zonnestraling (de waarden voor diffuus licht worden aangehouden);
- de transmissiecoëfficiënt van het glas voor langgolvlige straling (IR) is verondersteld nul te zijn. De reflectiecoëfficiënt is dan $r=1-a$. De absorptiecoëfficiënt voor kortgolvlige straling heeft de constante waarde van 0.04.



-Figuur 2- Optimalisatie



-Figuur 3- Het kasmodel

Het model bepaalt per uur over een heel jaar of en hoeveel energie benodigd is om de kas op een acceptabele temperatuur te houden. Het model is gevalideerd door de resultaten te vergelijken met resultaten van het Kaspro-model [5]. De verschillen waren minimaal. Daarnaast is het jaarlijks energiegebruik vergeleken met het werkelijk energiegebruik van echte kassen. De vergelijking is gemaakt op basis van groeiomstandigheden voor tomaten [6]:

- binnentemperatuur T: $18 < T < 28$ °C;
- relatieve vochtigheid: $RH < 90\%$;
- CO₂-concentratie > 700 ppm.

De simulatieresultaten geven 860 MJ verwarming per jaar per m² vloeroppervlakte. Dit is in lijn met waarden uit de praktijk en met de simulatieresultaten van Kaspro (806 MJ per jaar per m²). Er wordt dus geconcludeerd dat ondanks zijn beperkingen het model nauwkeurig genoeg is om de effecten van een dynamische kasschil te bestuderen.

OPTIMALISATIESTRATEGIE

De eigenschappen van de grond worden verondersteld niet adaptief te zijn. De volgende glaseigenschappen worden beschouwd als adaptief:

- optische eigenschappen: transmissie-, absorptie- en reflectiecoëfficiënten;
- thermische eigenschappen: geleiding, specifieke warmte en emissiviteit.

Om de simulatie verder te vereenvoudigen wordt de specifieke warmte van het glas niet meegenomen als adaptief parameter. Dit is omdat er verwacht kan worden dat de specifieke warmte een veel kleiner effect op de temperatuur van het glas zal hebben dan de optische eigenschappen. Bovendien lijkt het makkelijker om materialen te ontwikkelen met variabelen optische eigenschappen dan met een variabele specifieke warmte. Een tweede vereenvoudiging wordt gemaakt door emissiviteit en geleiding te combineren in een factor:

de U-waarde van het glas. Uiteindelijk worden dus de volgende adaptieve eigenschappen beschouwd:

Adaptieve U-waarde van de kassenschil

De U-waarde van het glas kan veranderd worden per uur, waardoor de warmte binnen bewaard kan worden wanneer die nodig is en ook verwijderd kan worden wanneer die niet nodig is en een koudevraag zou veroorzaken. In het algemeen is in het Nederlands klimaat de buitentemperatuur in de zomer lager dan de gewenste binnentemperatuur in de kas, waardoor een verhoging van de U-waarde (minder isolatie) leidt tot een kleinere koudevraag. In het tussenseizoen kan verwacht worden dat verwarming en koudevraag elkaar snel afwisselen, waardoor een per uur adaptieve U-waarde tot energiebesparing zou kunnen leiden.

Adaptieve transmissie coëfficiënt

Kortgolvlige straling komt direct van de zon. Aan de ene kant is de zonnestraling, en in het bijzonder de PAR, nodig om de planten te laten groeien. Aan de andere kant kan de kas daardoor oververhit worden, waardoor koeling nodig is. De transmissie-, absorptie- en reflectiecoëfficiënten zijn van elkaar afhankelijk, omdat de optelsom van hun waarden 1 moet zijn. In deze studie gaan wij uit van een constante absorptiecoëfficiënt (dus niet adaptief). Alleen de transmissiecoëfficiënt (en dus de reflectiecoëfficiënt) zijn per uur adaptief. Bij de optimalisatieprocedure wordt voor ieder uur van het jaar bepaald welke set van parameters (U-waarde en transmissie) optimum is, rekening houdend met de temperaturen bepaald in voorgaande uren (met hun eigen set van optimale parameters). Niet berekend wordt of de keuze voor de optimale parameter-set ook een invloed heeft op toekomstige uren (zie ook conclusies). Voor multi-objectieve optimalisatie kunnen genetische algoritmes gebruikt worden [3], maar die leiden niet tot snelle berekeningen. Omdat het optimalisatieprobleem is teruggebracht tot de optimalisatie van twee hoofdeigenschappen, is het mogelijk om rechttoe rechtaan te optimaliseren door simpele iteraties op de U-waarde en de transmissiecoëfficiënt. De combinatie met het laagste energiegebruik wordt dan gekozen. Wanneer er meerdere combinaties mogelijk zijn, wordt de combinatie gekozen die leidt tot de hoogste binnentemperatuur om een te hoge vochtigheid later te voorkomen wanneer de luchttemperatuur omlaag gaat. In de besproken simulaties worden alleen de energievragen voor verwarming en koeling (latent en voelbaar) meegenomen; er wordt geen rekening gehouden met de installaties voor verwarming, koeling, verlichting, ont- en bevochtiging en CO₂-toevoer.

Variant	Warmtevraag [MJ/j.m ² vloer]	Koude vraag [MJ/j.m ² vloer]
Zonder optimalisatie	860	1536
Met adaptieve U-waarde	94	1508
Met adaptieve transmissie	889	440
Met adaptieve U-waarde en transmissie	96	245

-Tabel 1- Jaarlijkse warmte- en koudevraag

RESULTATEN

De U-waarde kan aangepast worden tussen 0 en 5.7 W/m²K. De eerste waarde zal praktisch nooit te bereiken zijn en staat voor een perfect geïsoleerde kas. De tweede waarde is die van blank enkelglas. In de praktijk zullen de tussenliggende waarden bereikt kunnen worden door de warmtegeleiding aan te passen en/of de emissiviteit, die de warmteoverdrachtscoëfficiënt voor straling beïnvloedt. De transmissiecoëfficiënt kan variëren tussen 0 (compleet ondoorzichtig) en 0.775, de waarde voor blank enkelglas met diffuus licht. Voor iedere combinatie van U-waarde en transmissie wordt de energievraag voor verwarming, voelbare koeling en latente koeling berekend. De laatste is benodigd voor ontvochtiging. Tabel 1 geeft de resultaten voor de warmte en koudevraag weer, wanneer de berekening wordt uitgevoerd in 25 stappen voor de U-waarden en 5 stappen voor de transmissie coëfficiënt. Hoe de U-waarden en transmissiecoëfficiënten zich dan uur per uur gedragen, is te zien in figuren 5 tot 8. Het model laat zien dat door de U-waarde per uur te veranderen de warmtevraag gereduceerd kan worden met meer dan 89%. Aan de andere kant heeft de adaptatie van de U-waarde nauwelijks effect op de koudevraag. Omgekeerd zien wij dat door de transmissiecoëfficiënt per uur te veranderen, de koudevraag gereduceerd kan worden met 71%, terwijl het effect daarvan op de warmtevraag heel beperkt is (licht negatief). Door beide parameters te combineren kan 89% bespaard worden op de warmtevraag en 84% op de koudevraag. Naast deze aanzienlijke besparingen hebben adaptieve schillen het voordeel dat de adaptieve parameters gekozen kunnen worden op een dusdanige manier dat de warmte- en koudevragen vooraf bepaalde waarden kunnen aannemen, bijvoorbeeld dat beide dezelfde waarde hebben. Het zou dan makkelijker zijn om energieopslag in de grond te realiseren, omdat de door de regelgeving vereiste balans tussen warmte en koude vanzelf gerealiseerd zou kunnen worden. Figuur 4 laat zien hoe de U-waarde verandert gedurende het jaar.

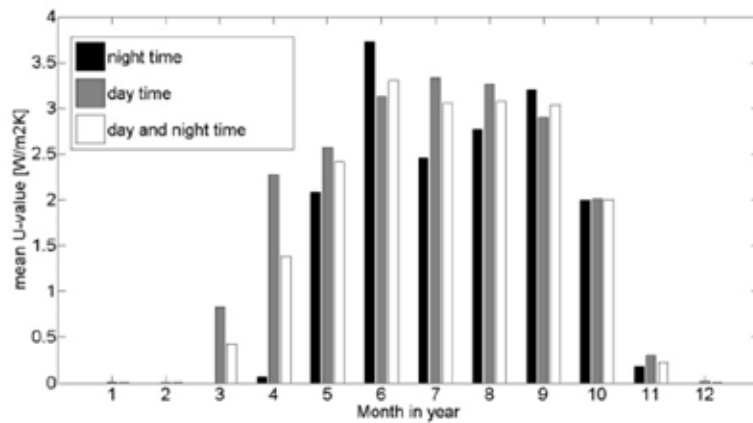
De gemiddelde waarde per maand wordt weergegeven overdag, 's nachts en voor de gehele dag. Het is duidelijk dat in de winter, zoals verwacht, een lage U-waarde wenselijk is om warmte binnen de kas te houden. In de zomer stijgt de U-waarde sterk om warmte toevoer naar buiten mogelijk te maken. Ook zichtbaar is het verschil tussen de optimale waarden overdag en 's nachts, in het bijzonder in maart en april wanneer de buitentemperatuur 's nachts dusdanig laag is dat warmteverliezen voorkomen moeten worden. In figuur 5 worden de uurlijkse variaties van de U-waarden weergegeven voor een paar typische dagen in april. De U-waarde varieert over het gehele bereik tussen 0 ('s nachts) en 5,7 midden op de dag. Natuurlijk zal een U-waarde van nul nooit mogelijk zijn, maar dit geeft aan dat de isolatie maximaal zou moeten zijn tijdens de nacht. De meeste kassen zijn op het moment niet eens voorzien van dubbelglas, wat aangeeft hoe groot de verbeteringspotentieel in de praktijk is. Op dezelfde manier worden de waarden voor de transmissiecoëfficiënt afgebeeld in figuren 6 en 7. Gedurende de nacht heeft de transmissie natuurlijk geen effect (er is geen zonnestraling) en krijgt het de waarde 'zero' toegekend. Zoals verwacht moet in de winter de transmissie hoog zijn om de kas gratis te verwarmen met zonnewarmte, terwijl de transmissie laag moet zijn in de zomer om oververhitting te voorkomen. De detaillering uur per uur laat grote fluctuaties zien gedurende de dag (figuur 7). Het effect van het aantal rekenstappen tussen de minimale en maximale waarden van de U-waarde en de transmissie coëfficiënt is ook bestudeerd. Het laat zien dat het aantal stappen de koudevraag weinig lijkt te beïnvloeden. De invloed op de warmtevraag is groter en meer stappen (dus meer regelmogelijkheden tussen de minimale en maximale waarden) leiden tot een lagere verwarmingsvraag, dus tot een nauwkeurigere bepaling van het optimum.

CONCLUSIES

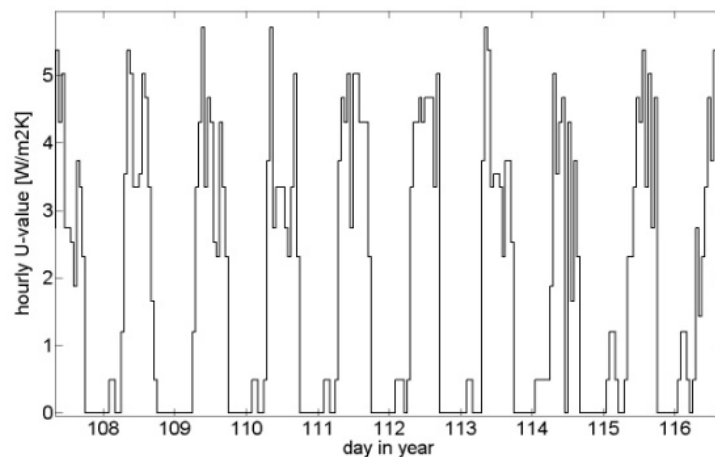
Door de kassenschil per uur adaptief te maken

kunnen grote energiebesparingen (theoretisch) bereikt worden. Daardoor zijn ontwikkelingen op het gebied van dynamisch adaptieve materialen en gerelateerde regelstrategieën een veelbelovende weg naar vergaande energiebesparing, niet alleen voor de glastuinbouw maar ook voor gewone gebouwen. Het model dat is gebruikt heeft beperkingen. Zo berekent dit model het optimum voor een bepaalde uur h, rekening houdend met de temperaturen in het verleden ('backward loop'). Maar het voorspelt niet of deze optimum verandert wanneer rekening wordt gehouden met het effect van de temperatuur op tijd h op toekomstige temperaturen. Daarom zullen in de toekomst de resultaten van dit simpele model vergeleken worden met die van een veel complexer en nauwkeurig model, ontwikkeld bij de TU Eindhoven.

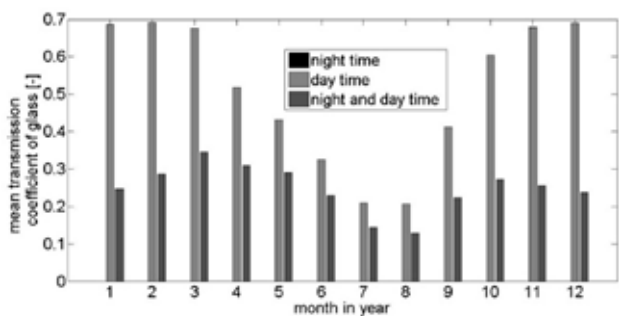
Verder is meer onderzoek nodig naar de gevoeligheid van de energievraag voor veranderingen in de waarden van de adaptieve parameters. Het kan zijn dat grote variaties van sommige parameters leiden tot kleine energiebesparingen terwijl kleine variaties van andere parameters leiden tot grote besparingen. In de toekomst zal ook gezamenlijk met de partners in het project (zie dankwoord) gekeken worden of de regelstrategie uitgebreid kan worden naar de installaties voor verwarming, koeling, verlichting, ontvochtiging, bevochtiging en CO₂-toevoer. Ook werken een aantal van de partners (TU/e, TNO, WUR) aan uitgebreide modellen waarmee ook de plantengroei



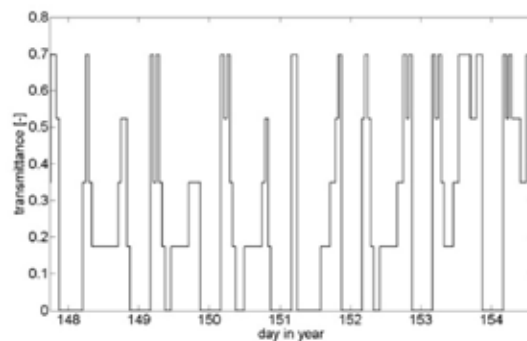
-Figuur 4- Gemiddelde U-waarden van het glas per maand overdag, 's nachts en voor de gehele dag



-Figuur 5- Verandering van de U-waarde van het glas per uur (dagen 108 tot 116)



-Figuur 6- Gemiddelde transmissiecoëfficiënt per maand overdag en voor de gehele dag



-Figuur 7- Verandering van de transmissiecoëfficiënt per uur (dagen 148 tot 154)

gesimuleerd kan worden d.m.v. een fotosynthesemodel. Hiermee kunnen multi-objective optimalisaties uitgevoerd worden waarmee afwegingen gemaakt kunnen worden tussen energiekosten en plantengroei.

DANKWOORD

Onze dank gaat naar AgentschapNL, die dit project volledig financiert en naar de verschillende partners, zonder wie dit project niet gerealiseerd zou kunnen worden: TU/e, TNO, WUR, TUD en Kenlog.

REFERENTIES

- Bakker, L.G, Boer de, B., Wilde de, P.J.C.J., Voorden van der, M. (2009). Climate Adaptive Building Shells: ontwikkeling van gebouw-schillen met variabele, klimaatgestuurde eigenschappen. TVVL Magazine 38(3): 6-11
- Loonen, R.C.G.M., Trcka, M., Cóstola, D. & Hensen, J.L.M. (2011). Prestatiesimulatie van adaptieve gevels. TVVL Magazine 40(2):12-16
- Loonen, R.C.G.M., Trcka, M. & Hensen, J.L.M. (2012). Adaptieve gevels: een verkenning van het potentieel, TVVL Magazine (5):34-36
- Loonen, R.C.G.M., presentatie TU/e in het kader van CAGIM Project. (2011)
- Kaspro simulatie model: <http://www.wageningenur.nl/Expertises-Dienstverlening/Onderzoeksinstituten/wageningen-ur-glastuinbouw/show/Simulatiemodel-Kaspro-1.htm>, last access 22 april 2013
- Swinkels G., Gieling T., Kempkes F., Janssen H., Bruins M., 2011. Interne rapport CAGIM Werkpakket 1. Wageningen University & Research Centre