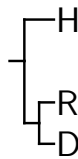


Publieke Samenvatting
NEO project
Active Building Albedo Management



Hoffmann RD

<http://www.h-rd.org>

Dr.ir. M.R. Hoffmann

november 2006

Dit haalbaarheidsproject is uitgevoerd onder de regeling BSE-2005 Nieuw Energie Onderzoek (NEO) en via SenterNovem gesubsidieerd door het Ministerie van Economische Zaken.

Verdere informatie over dit project is op aanvraag verkrijgbaar bij Hoffmann RD.

<http://www.h-rd.org>

© Hoffmann RD

\$Project: neo05 \$; \$Date: Thu, 30 Nov 2006 16:04:20 +0100 \$; \$ProjectVersion: publieke-samenv.1 \$

Inhoudsopgave

Samenvatting	4
1 Inleiding	6
1.1 Doel van het onderzoek	7
1.2 Bereik van het onderzoek	8
2 Achtergrondinformatie	9
2.1 Albedo eigenschappen van bouwmaterialen	12
2.1.1 Stralingskarakteristiek	13
2.2 Methode van albedo modificatie	13
2.2.1 Elektrochrome materialen	14
2.2.2 Thermochrome materialen	15
2.2.3 Photochrome materialen	15
2.2.4 Elektroforese	15
2.2.5 Microencapsulation	16
2.3 Eerdere studies	16
2.4 Gebruik van albedo modificatie	17

3	Modellering	18
3.1	Modelkeuze	19
3.2	Simulatiemethode	19
3.3	Simulaties	20
3.3.1	Gebouwtypen	20
3.3.2	Invoer gegevens	22
3.3.3	Controle regeling	25
3.4	Gevoeligheidsanalyse simulaties	26
3.5	Simulatie resultaten	28
3.5.1	Totaal energiegebruik	31
3.5.2	Energiebalans dak	32
3.5.3	Resultaten gevoeligheidsanalyse	33
4	Constructie en Aansturing	36
4.1	Constructie	36
4.2	Aansturing	37
5	Inventarisatie Regelgeving	38
5.1	Energiegebruik	38
5.2	Veiligheid	39
6	Kosten/baten Analyse	41
7	Conclusies	42
7.1	Conclusies simulaties	43
7.2	Conclusies kosten/baten analyse	44
7.3	Conclusies m.b.t. regelgeving	45
7.4	Alternatieven	45
7.5	Geïntegreerde analyse en beoordeling haalbaarheid	47

8 Aanbevelingen	48
Referenties	48

Samenvatting

Deze rapportage bevat een publieke samenvatting van een haalbaarheidsstudie naar de toepassing van “Active Building Albedo Management” (ABAM). Met subsidie van het Ministerie van Economische Zaken via SenterNovem is onderzoek gedaan naar de haalbaarheid van ABAM.

Active Building Albedo Management behelst het actief aanpassen van de albedo van de buitenkant van (delen van) een gebouw. Daardoor is het mogelijk bij een hoge energievraag voor verwarming de absorptie van zonnestraling te verhogen. Bij een hoge energievraag voor koeling is het juist mogelijk de absorptie van zonnestraling te verlagen, zodat minder energie nodig is voor de koeling van een gebouw. De albedo is een maat voor de gereflecteerde zonnestraling, en is afhankelijk van de kleur van een oppervlak.

Binnen dit haalbaarheidsproject is ten eerste een uitgebreid literatuuronderzoek verricht naar mogelijkheden om de albedo van een gebouw actief te regelen. Daarbij is naar voren gekomen dat het mogelijk is met behulp van microcapsules, gevuld met kleurdeeltjes, de kleur, en daarmee de albedo, van de buitenkant van een gebouw actief te veranderen.

Om tot een oordeel over de effecten van deze kleurverandering op het energiegebruik van gebouwen te komen zijn simulaties met verschillende gebouwtypes gedaan. Uit deze simulaties komt naar voren dat ABAM het energiegebruik kan verlagen. Deze verlaging van het energiegebruik is in relatieve en absolute zin klein. Een gevoeligheidsanalyse van de simulaties heeft laten zien dat betere isolatie een alternatief voor ABAM kan zijn.

De microcapsules kunnen naar menging met een binder vergelijkbaar met een laag verf op de buitenkant van een gebouw worden aangebracht. De aansturing kan worden gerealiseerd door met een horizontaal bewegelijke elektrode een spanningsverschil over de ABAM-laag aan te brengen.

Uit een beknopte inventarisatie van de regelgeving valt op te maken dat ABAM naar

verwachting kan voldoen aan de in Nederland gestelde eisen voor bouwmaterialen. Op het gebied van regelgeving omtrent energiegebruik kan ABAM in principe bijdragen aan het voldoen aan de energieprestatie norm.

Mogelijke alternatieven voor ABAM zijn betere isolatie en/of zonafhankelijke zonwering. Deze alternatieven hebben als voordeel dat zij technologisch verder ontwikkelt zijn en dat zij commercieel verkrijgbaar zijn.

Uit een analyse van de kosten en baten van ABAM op basis van de beschikbare gegevens blijkt dat de kosten van ABAM niet opwegen tegen de baten vanuit financieel oogpunt.

Uit dit haalbaarheidsproject kan op grond van de tot nu toe beschikbare informatie de conclusie getrokken worden dat ABAM technisch haalbaar is. Dat betekent dat met toepassing van huidige, bekende technieken een ABAM opstelling daadwerkelijk gerealiseerd kan worden.

Doordat dit haalbaarheidsproject een theoretische studie betreft, kan geen antwoord op de vraag worden gegeven hoe ABAM zich daadwerkelijk in een installatie gedraagt.

Afgezet tegen de resultaten van hogere isolatie blijkt uit dit haalbaarheidsproject dat het potentieel van ABAM op het gebied van het besparen van het gebruik van energie voor Nederland beperkt is.

Hoofdstuk 1

Inleiding

Het reduceren van het energiegebruik van de bebouwde omgeving heeft prioriteit binnen het Nederlandse energiebeleid en bij de transitie naar een duurzame energiehouding. Dit rapport beschrijft een innovatief idee om de albedo van gebouwen te veranderen en zo energie te besparen. Dit idee is gebaseerd op het veranderen van de reflectie en absorptie van (zonne)straling van een gebouw. Donkere oppervlakken absorberen meer (zonne)straling dan lichte oppervlakken.

Active Building Albedo Management (ABAM) is een nieuw idee dat het mogelijk maakt actief de albedo van (delen van) gebouwen te sturen. Daardoor is het mogelijk verwarmingsenergie te besparen. Doordat lichte oppervlakken juist minder (zonne)straling absorberen, kan op hete dagen juist de koelingsvraag verminderd worden. Daarnaast kan door verandering van de emissie eigenschappen van een oppervlak meer of minder infrarood straling worden afgegeven. Dit kan betekenen dat een gebouw overtollige warmte door “stralings-koeling” af kan geven.

Dit rapport is tot stand gekomen binnen het programma Nieuw Energie Onderzoek (NEO) en voor een belangrijk deel gefinancierd door SenterNovem. Het ministerie van Economisch Zaken beoogt met de subsidieregeling “Besluit subsidies energieprogramma’s” (BSE), waarbinnen NEO valt, energieonderzoek te stimuleren, dat niet-conventioneel en nieuw is en dat kan bijdragen aan een schone, betrouwbare en betaalbare energiehouding (Minister van Economische Zaken, 2005). Het energiegebruik van de gebouwde omgeving is ca. 35-40% van totale energiegebruik in Nederland (bron SenterNovem). Juist in deze sector is besparing mogelijk, doordat door relatief eenvoudige ingrepen het energiegebruik gereduceerd kan worden. Een centrale rol daarbij speelt de Europese Richtlijn energieprestatie van gebouwen (European Commission,

2002, Directive 2002/91/EC of the European Parliament and of the Council of 16 December 2002 on the energy performance of buildings). Deze richtlijn is met ingang van 2006 in alle 25 lidstaten van de Europese Unie verplicht gesteld. Een lager energiegebruik betekent ook een lagere CO₂ uitstoot. Daarmee draagt dit ook bij aan de klimaatdoelstellingen van de Nederlandse regering.

Juist door het relatief grote aandeel de gebouwde omgeving in het Nederlandse energiegebruik is het van belang maatregelen te nemen om het energiegebruik te verlagen. Actieve controle van de albedo van gebouwen is een mogelijkheid om het energiegebruik van de gebouwde omgeving te verlagen. Niet bekend is of deze mogelijkheid technisch en/of economisch haalbaar is. Dit haalbaarheidsonderzoek heeft als doelstelling hierover meer duidelijkheid te verschaffen.

1.1 Doel van het onderzoek

Het doel van dit onderzoek is het beoordelen van de haalbaarheid van het actief aanpassen van de albedo van gebouwen in Nederland voor het besparen van het gebruik van energie.

Daarbij is gekozen voor een specifieke methode van albedo modificatie, namelijk gebruik makend van microcapsules, gevuld met kleurdeeltjes, die door middel van een verfachtig draagmateriaal (binder) op (delen van) een gebouw aangebracht worden.

De vraag is of deze methode het energiegebruik van een gebouw significant kan reduceren en of deze reductie technisch en economisch haalbaar is. Technische haalbaarheid houdt in dat het praktisch mogelijk is deze methode binnen enkele jaren toe te passen. Economische haalbaarheid houdt in dat de toepassing van deze methode niet (of niet aanzienlijk) duurder is dan alternatieven (zie ook sectie 7.4).

Hierbij is op te merken dat het energiegebruik in de huidige situatie voornamelijk wordt bepaald door de verwarming van gebouwen. Het is te verwachten dat in de toekomst airconditioning tot een steeds grotere vraag naar energie leidt. In deze studie is daarom ook het effect van airconditioning meegenomen.

1.2 Bereik van het onderzoek

Het bereik van dit onderzoek bestrijkt een analyse van de haalbaarheid van het idee ABAM. Dit houdt onder andere de volgende deelonderzoeken in:

- Literatuurstudie.
- Inventarisatie van (bestaande) technieken voor de modificatie van de albedo van gebouwen.
- Simulaties om de verandering in energieverbruik te schatten.
- Een gevoeligheidsanalyse voor het schatten van de invloed van verschillende parameters.
- Onderzoek naar de aansturing en constructie.
- Beknopte inventarisatie van regelgeving.
- Kosten/baten analyse.
- Conclusies.
- Aanbevelingen.

Het resultaat van dit rapport is een inschatting van de haalbaarheid van ABAM. Een exacte specificatie van ABAM wordt niet behandeld. Daarvoor zouden onder andere praktijktesten nodig zijn. Zulke testen en een praktijkonderzoek vallen buiten het bereik van deze haalbaarheidsstudie.

Hoofdstuk 2

Achtergrondinformatie

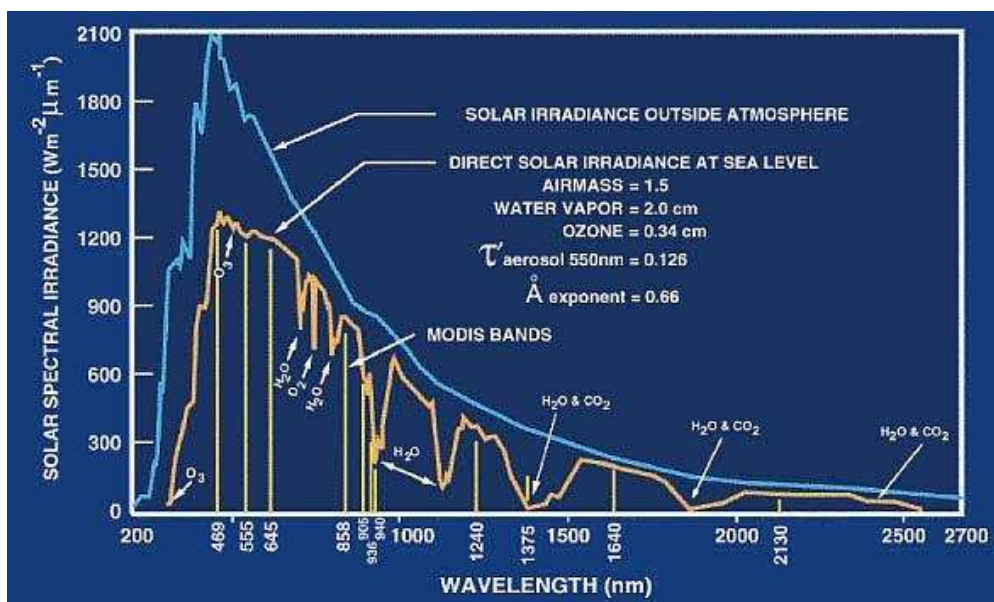
In dit hoofdstuk wordt achtergrondinformatie over het idee ABAM verstrekt. Daarbij is gebruik gemaakt van een uitgebreid literatuuronderzoek, onderzoek met behulp van Internet en informatie afkomstig van commerciële bedrijven. Daarbij wordt ook ingegaan op de context rond albedo modificatie en verschillende methodes daarvoor.

De werking van ABAM is gebaseerd op het principe van absorptie, reflectie en emissie van (zonne)straling van oppervlaktematerialen (figuur 2.1 op de volgende pagina). Daarbij speelt in het bijzonder de absorptie/emissie bij verschillende golflengtes een rol (Monteith and Unsworth, 1990). De *albedo* van een materiaal is gedefinieerd als de over een bepaald bereik van het golfspektrum geïntegreerde gereflecteerde straling. Relevant voor ABAM zijn verder de definitie van absorptie en emissie. *Absorptie* van (zonne)straling is in de context van deze studie gedefinieerd als dat deel van de inkomende (zonne)straling wat niet gereflecteerd wordt (Clarke, 2001). De relatie tussen de albedo en de absorptie is gegeven door:

$$\text{albedo} = 1 - \text{absorptie}$$

In dit rapport wordt vaak de term albedo gebruikt, maar bij berekeningen en numeriek waarden wordt gewerkt met de absorptie. De *emissie* van een materiaal is de ratio van de afgegeven stralingsenergie tot de stralingsenergie afgegeven door een ideaal zwart lichaam bij gelijke temperatuur. Deze emissie is in de praktijk altijd lager dan 1 (Wikipedia, 2006). Bij relatief lage temperaturen (zoals in deze studie) ligt de door emissie afgeven stralingsenergie in het infrarood bereik.

Eerder onderzoek (Simpson and McPherson, 1997) naar de albedo van gebouwen heeft aangetoond dat door het veranderen van de kleur de albedo gestuurd kan worden tussen 0.35 en 0.75. Daarmee is het mogelijk de netto energieabsorptie te sturen. Dit kan



Figuur 2.1: Spectrum van de zonnestraling (bron NASA, public domain).

vertaald worden naar een reductie van de energiebehoefte van gebouwen. Er zijn al materialen beschikbaar die gestuurd de albedo kunnen aanpassen (Yoshizawa, 2004). Te denken valt aan elektronische inkt (E-ink, 2006) of thermochrome materialen. Tot nu toe is weinig onderzoek gedaan naar mogelijke belemmeringen bij het gebruik van deze materialen, zoals de prijs, de albedo eigenschappen, de duurzaamheid en de aansturing. Voor zover bekend zijn tot nu toe alleen experimenten gedaan met thermochrome materialen (Ma et al., 2003).

Voor de voorgestelde toepassing wordt in deze haalbaarheidsstudie onderzocht of een materiaal gebaseerd op microcapsules aan de volgende eisen voldoet: brede range van albedo, goedkoop, eenvoudig aan te sturen, eenvoudig op gebouwen (i.h.b. daken) aan te brengen, voldoen aan veiligheidseisen (brandveiligheid, toxiciteit).

In eerste instantie wordt gedacht aan een verfachtige draagsubstantie (binder) die microcapsules bevat. Door te kiezen voor een verfachtige draagsubstantie kunnen de microcapsules eenvoudig op oppervlakken van gebouwen aangebracht worden, zonder het bouwproces ingrijpend te wijzigen. Microcapsules worden al veelvuldig gebruikt voor het sturen van de kleur van oppervlaktelagen (E-ink, 2006; Granmar and Cho, 2005). Tot nu toe zijn er geen toepassingen bekend, die microcapsules gebruiken om de albedo van gebouwen aan te passen om het energiegebruik te verkleinen. De microcapsules bevatten kleurstoffen en worden door middel van een elektromagnetisch

veld aangestuurd. De oppervlaktelaag zal door middel van geleiding warmte toevoegen of onttrekken aan het gebouw (i.e. het oppervlak waarop ze is aangebracht) afhankelijk van de netto stralingsbalans.

Bestaande technieken voor het aanpassen van de albedo gebruiken vaak panelen, die als een extra laag op een gebouw worden aangebracht. Dit heeft als nadeel dat het bouwproces ingrijpend moet worden gewijzigd, waardoor de kosten hoog zijn. De bestaande technieken gebruiken temperatuurgestuurde chemische reacties (thermochrome materialen). Daardoor wordt bij productie van de materialen voor een vaste temperatuurgrens gekozen waarbij de albedo verandert. Dit heeft als nadeel dat het niet mogelijk is de albedo te sturen afhankelijk van de warmtebehoefte van een gebouw. Het hier voorgestelde ABAM concept ondervangt deze problemen.

Voor toepassingen wordt in eerste instantie gedacht aan gebouwen met weinig dakisolatie en een groot dakoppervlak: winkelcentra en utiliteitsbouw (zoals bijvoorbeeld de IKEA's en Gamma's). In tweede instantie kan worden gedacht aan de gevels van kantoorgebouwen. Dan spelen ook de verticale oppervlakken een belangrijke rol en moet het idee aan hogere esthetische eisen voldoen. Op den duur zijn als derde toepassingsgebied energiezuinige huishoudens mogelijk.

Het is de verwachting dat de markt voor energiezuinige gebouwen in de komende jaren een grote groei zal kennen. Daarbij spelen de reductie van CO₂ emissies en de implementatie van de Europese richtlijn "Energy Performance of Buildings" (European Commission, 2002; ECOFYS, 2004) een belangrijke rol. Voor partijen kan een energiebesparing ook een kostenvoordeel opleveren. Concreet kan in Nederland in eerste instantie aan de nieuwbouw op duurzame bedrijventerreinen worden gedacht. In de toekomst kan de exportmarkt voor dit idee belangrijk worden. Immers, de energiebehoefte voor koeling ten gevolge van geabsorbeerde zonnestraling bij gebouwen speelt in het mediterrane gebied een steeds belangrijkere rol in de totale energiehuishouding (ECOFYS, 2004).

Actieve sturing van de albedo van gebouwen vindt, voor zover bekend, nog niet plaats. Wel is al informatie bekend over het sturen van de stralings-transmissie en reflectie van raamoppervlakken. De technieken die hiervoor gebruikt worden zijn duur in de toepassing en worden niet grootschalig toegepast. Dit komt onder meer door de eis dat raamoppervlakken (gedeeltelijk) doorzichtig moeten zijn.

2.1 Albedo eigenschappen van bouwmaterialen

Het aanpassen van de albedo van oppervlakken van gebouwen wordt al eeuwenlang in de traditionele huizenbouw gebruikt. Als voorbeeld kunnen de wit gekalkte huizen in het Midden Oosten dienen. Ook in de westerse wereld wordt het gebruik van reflecterende daksystemen onderzocht en bevordert. Reflecterende daksystemen zijn daken, waarbij het buitenste oppervlak een relatief grote reflectie van zonnestraling ten opzicht van een standaard donker dak heeft. Enkele demonstratieprojecten worden in de zuidelijke staten van de VS uitgevoerd.

Het gebruik van reflecterende daksystemen wordt in VS bevordert door meerdere programma's van het "Department of Energy" (DOE). Het DOE heeft ook meegewerkt aan de CoolRoofCalculator (Petrie et al., 2001), een on-line adviesstelsel. De CoolRoofCalculator maakt het mogelijk potentiële energiebesparing door het lichtkleurig coaten van daken te berekenen. Het systeem richt zich vooral op besparingen in energiegebruik ten aanzien van airconditioning, omdat dat in de zuidelijke staten van de VS het merendeel van het energiegebruik van gebouwen bepaalt, in tegenstelling tot noordelijke staten waar verwarming bepalend is voor het energiegebruik. Er is zelfs al een project gaande om de regelgeving omtrent gebouwen zodanig aan te passen dat reflecterende daken gestandaardiseerd kunnen worden (Eilert, 2000). Een verder voorbeeld wordt gegeven door een nieuw gebouw van de "Environmental Protection Agency" (<http://www.epa.gov/rtp/new-bldg/environmental/thegreeningcurve-new.pdf>).

Al deze eerder genoemde voorbeelden werken met met daksystemen met een vast gekozen albedo. Voor zover bekend zijn er nog geen praktische ervaringen opgedaan met daksystemen met een variabele albedo. Wel is er al exploratief onderzoek geweest om thermochrome materialen in gebouwen toe te passen (Ma et al., 2002, 2003). Voor zover bekend heeft dat nog niet geleid tot de ontwikkeling van een realistisch prototype.

Verwand aan de hier voorgestelde toepassing is het gebruik van elektrochrome, doorzichtige raamsystemen. Verschillende producten zijn commercieel verkrijgbaar. Vooral door hun relatief hoge prijs worden zij (nog) niet grootschalig toegepast. Het grootste verschil tussen elektrochrome raamsystemen en ABAM ligt in de eis van transparantie van de raamsystemen. Het is de verwachting dat ABAM daardoor eenvoudiger en goedkoper gerealiseerd kan worden.

2.1.1 Stralingskarakteristiek

De stralingskarakteristiek van een oppervlak bepaalt uiteindelijk de netto stralingsbalans. Binnen dit onderzoek wordt onderscheid gemaakt tussen de absorptie en reflectie van zichtbare straling en de absorptie en emissie van infrarood (IR) straling.

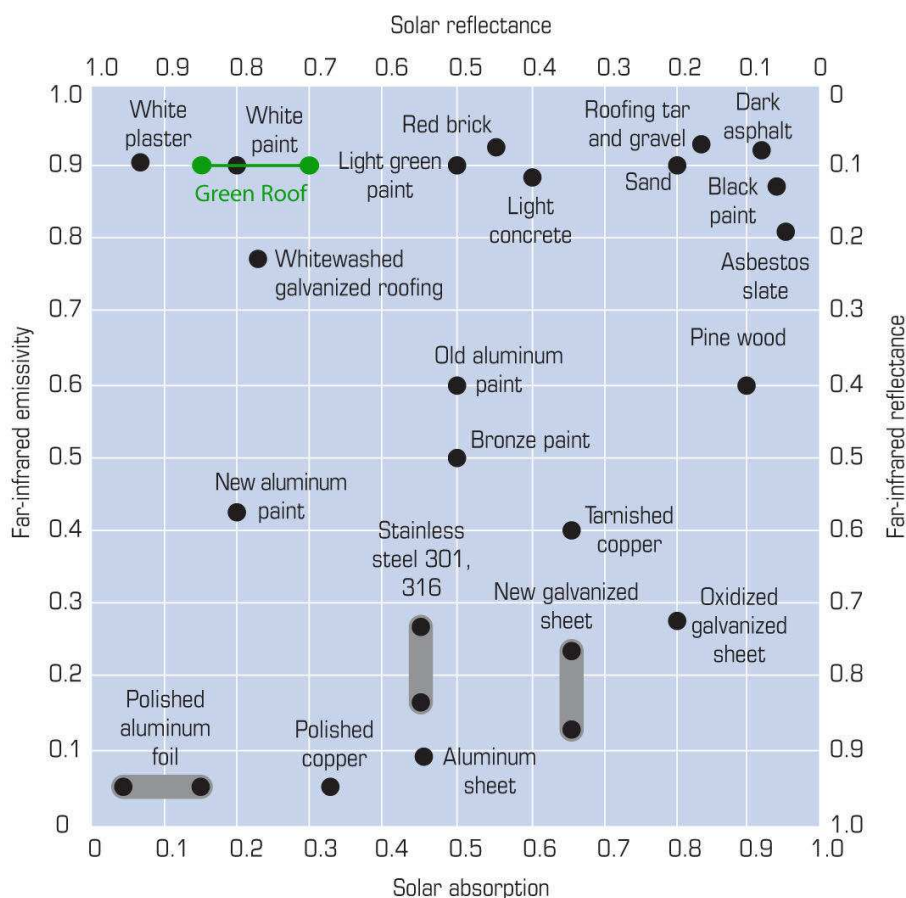
De absorptie en reflectie van zichtbare straling wordt bepaald door de oppervlakte-eigenschappen van een materiaal. Deze absorptie kan relatief eenvoudig worden veranderd door de kleur van het oppervlak of van het materiaal vlak onder het oppervlak te veranderen.

De emissie van infrarood straling wordt in eerste instantie bepaald door de temperatuur van het oppervlak. Daarnaast bepalen materiaaleigenschappen de emissie. Het veranderen van de materiaaleigenschappen die de emissie van een oppervlak bepalen is niet eenvoudig mogelijk (von Ardenne et al., 2005). Als voorbeelden kunnen latex verf en aluminium dienen. Alhoewel ze allebei een lichte kleur hebben, is hun infrarood emissie zeer verschillend. Aluminium panels hebben een infrarood emissie van ongeveer 0.1, terwijl latex verf een infrarood emissie van ongeveer 0.9 heeft (zie figuur 2.2 op de pagina hierna).

Binnen deze haalbaarheidsstudie is ervoor gekozen een materiaal te onderzoeken dat bestaat uit microcapsules en een binder. De absorptie en reflectie van zichtbare straling wordt vooral bepaald door de kleur van het materiaal. Deze kleur kan worden gestuurd door de verffpartikels in de microcapsules. De infrarood emissie hangt daarentegen vooral af van de (oppervlakte) eigenschappen van de binder en wordt derhalve bepaald door de keuze van de binder. Daardoor is de infrarood emissie niet actief te beïnvloeden. Ter vergelijking zijn de absorptie en emissie van verschillende bouwmaterialen weergegeven in figuur 2.2 op de volgende pagina. Wat hierin opvalt is dat vooral metallische oppervlakken een lage infrarood emissie hebben, terwijl de meeste andere materialen een relatief hoge infrarood emissie hebben. Uit onderzoek is gebleken dat het sturen van de infrarood emissie zonder directe behandeling of vervanging van het oppervlaktemateriaal praktisch niet haalbaar is.

2.2 Methode van albedo modificatie

De kleur en daardoor de albedo van een oppervlak kan op verschillende manieren worden veranderd. In het vervolg wordt ingegaan op enkele belangrijke mogelijkheden.



Source: Florida Solar Energy Center

Figuur 2.2: Absorptie en emissie van bouwmaterialen (bron Gaffin et al. (2005)).

Afhankelijk van de onderliggende methode en/of werkwijze kan de volgende classificatie van methodes voor de verandering van de kleur van een materiaal gehandhaafd worden. Deze methodes worden ook beschreven in von Ardenne et al. (2005).

2.2.1 Elektrochrome materialen

Elektrochrome materialen veranderen onder invloed van een elektrisch spanningsverschil hun kleur. Deze systemen worden onder andere al commercieel toegepast in transparante glazen. Om elektrochrome materialen toe te passen is een mogelijkheid vereist het elektrisch spanningsverschil aan te leggen door middel van elektrodes. In de meeste toepassingen worden deze elektrodes direct voor en/of achter het materiaal

aangebracht. Het aanbrengen en aansturen van de elektrodes is vaak een belangrijke kostenfactor.

2.2.2 Thermochrome materialen

Thermochrome materialen veranderen van kleur door invloed van de materiaalt temperatuur. Bij toepassing op daken wordt deze (oppervlakte)temperatuur bepaald door de omgevingstemperatuur, de netto stralingsbalans en eventueel aanwezig dauw (Petrie et al., 2001). Het nadeel van deze materialen is dat het niet direct mogelijk is hun albedo afhankelijk van de binnentemperatuur te sturen, althans als ze op de buitenkant van een gebouw aangebracht zijn.

2.2.3 Photochrome materialen

Photochrome materialen veranderen van kleur ten gevolge van invallende straling. In dit onderzoek wordt verder geen aandacht besteed aan deze materialen, omdat niet verwacht wordt dat zij een relevante bijdrage kunnen leveren aan de doelen van deze studie. Het probleem is dat op bijvoorbeeld een koude, heldere dag het materiaal veel straling ontvangt en daardoor een geringe absorptie verkrijgt. Daardoor wordt veel stralingsenergie gereflecteerd, terwijl er juist een grote behoefte aan energie voor verwarming is.

2.2.4 Elektroforese

Met behulp van elektroforese is het mogelijk de kleur van een materiaal te veranderen. Onder invloed van een elektromagnetisch veld kunnen gekleurde deeltjes zich verplaatsen en daardoor het oppervlak een ander kleur geven. Elektroforese vereist dat er een bepaalde mobiliteit voor de kleurdeeltjes in het materiaal aanwezig is. Daardoor is het noodzakelijk het materiaal, normaalgesproken een vloeistof, in een container te plaatsen (zie ook 2.2.5). Door gebruik te maken van verschillende mobiliteit van de kleurdeeltjes is het zelfs mogelijk gradaties aan te brengen in de kleuren van een oppervlak. Dit principe wordt gebruikt in de microcapsules van E-ink.

2.2.5 Microencapsulation

Microencapsulation is een techniek, waarbij een bepaald (mengsel van) materiaal in een microcapsule wordt ingebracht. Daardoor is het materiaal van de buitenwereld afgesloten en kan het bijvoorbeeld niet uitdrogen of wegvloeien. In combinatie met elektroforese kan dan een kleurverandering van de microcapsules gestuurd worden. Een overzicht van het gebruik van microcapsuletechnieken wordt gegeven in het overzichtsartikel van Yoshizawa (2004). Er zijn ook alternatieve methodes in gebruik voor het veranderen van de kleur van microcapsules. Zo is het bijvoorbeeld mogelijk in plaats van twee types partikelen (zwarte en witte bij E-ink), een zwarte vloeistof met daarin witte (bijvoorbeeld TiO_2 , Titaniumdioxide) partikelen te gebruiken.

2.3 Eerdere studies

Eerdere studies naar het effect van de albedo op de energiehuishouding gebruikten verschillende, maar vast gekozen albedo's voor het kwantificeren van de mogelijke energiebesparing (Simpson and McPherson, 1997). Daaruit blijkt dat zowel de reflectie en adsorptie van zonnestraling overdag een belangrijke invloed heeft, alsook de emissie van thermische energie gedurende de nachtelijke uren. Ook blijkt dat het belangrijk is een evenwicht tussen de isolatie van het gebouw en de albedo te vinden. Verder wordt in deze studies bijzondere aandacht aanbevolen voor ventilatiesystemen, die vlak onder het dak van een gebouw lopen. Deze kunnen de energiehuishouding sterk beïnvloeden en worden ook door de albedo beïnvloedt. Verrassend is dat in deze studie nauwelijks het effect van bijvoorbeeld dauw op de energiebalans van een gebouw wordt onderzocht.

Het Department of Energy (VS) doet onderzoek binnen het zogenoemde "heat islands project" (Akbari et al., 1997). In het "heat islands project" wordt uitvoerig onderzoek gedaan naar het effect van de albedo van daken en het toepassen van verschillende materialen. Hoofdzakelijk richt het "heat islands project" zich op het verhogen van de albedo van gebouwen voor het verlagen van de energieconsumptie door airconditioning. Voor het hier voorgestelde haalbaarheidsproject zijn vooral de studies binnen het "heat islands project" over dakmaterialen van belang, alsook de modelstudies. De conclusies van het "heat islands project" kunnen niet direct in deze haalbaarheidsstudie worden gebruikt, omdat de studies op basis van een vaste albedo zijn uitgevoerd. Daarnaast zijn de berekeningen binnen het "heat islands project" voor een warm klimaat doorgevoerd, waarbij het energiegebruik voor verwarming maar een zeer beperkte rol speelt.

De studie van Haberl and Cho (2004) geeft een meta-analyse van diverse in de V.S. uitgevoerde studies naar deze aspecten. In deze meta-analyse zijn de resultaten van 72 artikelen onderzocht. In vier van de negen artikelen waarin kwantitatieve resultaten voor “white roof systems” gepubliceerd zijn, zijn reducties in de warmteflux door het dak tussen 20% en 72% vermeld.

Daarnaast is er onderzoek uitgevoerd naar de toepassing van thermochrome materialen voor het verminderen van het energiegebruik van gebouwen en het verhogen van het thermisch comfort (Ma et al., 2002, 2003). Dit onderzoek heeft feitelijk alleen aangetoond dat het coaten met een thermochrome materiaal van een gebouw in principe werkt.

Andere, maar in intentie vergelijkbare ideeën, zijn ontwikkeld in het “Climate Adaptive Skins” project (Bokel and van der Voorden, 2005). In dit project wordt getracht de façade van een gebouw actief aan het omgevingsklimaat aan te passen. Dit kan bijvoorbeeld gebeuren door raamoppervlakken automatisch af te dekken. Daardoor is het ook mogelijk het energiegebruik te reduceren.

2.4 Gebruik van albedo modificatie

Albedo modificatie van bestaande gebouwen wordt vooral in de VS toegepast. Daarbij wordt een lichte oppervlaktelaag op een donker gekleurd dak aangebracht. Deze methode van albedo modificatie is dus eenmalig, en er is geen regelmechanisme om actief de albedo te veranderen. Toch wordt door het “Department of Energy” deze vorm van albedo modificatie gepropageerd. Dit heeft te maken met het feit dat in de zuidwestelijke staten van de VS het energiegebruik door airconditioning groter is dan het energiegebruik voor verwarming. Daardoor is het voordelig een dakmateriaal met een hoge albedo te kiezen. De studies van Petrie et al. (2001) en Petrie et al. (2004) tonen met berekeningen aan significante dat besparingen in energiegebruik kunnen worden bereikt. Een ander belangrijk effect is dat het piek-energiegebruik verlaagd wordt.

Ook in de tuinbouw wordt door middel van het witten van kassen de albedo (en de transparantie) van kassen aangepast aan het seizoen en de behoefte van gewassen. Deze methode van modificatie is gebaseerd op het aanbrengen van een extra laag op het glasoppervlak van een kas. Deze laag kan als het nodig is weer verwijderd worden. Praktisch gezien houdt dit in dat het glasoppervlak van de kas gewassen wordt.

Hoofdstuk 3

Modelling

In het kader van dit haalbaarheidsonderzoek is ervoor gekozen de potentie van ABAM door middel van modellering te beoordelen. Daarbij speelde een doorslaggevende rol dat tot nu toe geen prototypen beschikbaar zijn en dat modellering het relatief eenvoudig mogelijk maakt om verschillende parameters te testen en zo onder andere de gevoeligheid van het systeem voor variatie in parameters te beschrijven. Een ander belangrijk aspect is dat ABAM direct kan worden vergeleken met alternatieven. In deze haalbaarheidsstudie is als eenvoudig alternatief het beter isoleren van gebouwen gekozen.

Dynamische simulaties van het energiegebruik van gebouwen worden tegenwoordig (nog) niet bij het standaard bouwproces toegepast, maar zijn al wel in gebruik bij het ontwerp van energiezuinige gebouwen. Deze simulatiemethode neemt ook steeds meer haar intrede doordat steeds strengere eisen aan het energiegebruik gesteld worden (European Commission, 2002; ECOFYS, 2004). Daarbij heeft met name de Richtlijn energieprestatie van gebouwen (Directive 2002/91/EC of the European Parliament and of the Council of 16 December 2002 on the energy performance of buildings) een rol gespeeld. Deze richtlijn is met ingang van 2006 in alle 25 lidstaten van de Europese Unie verplicht gesteld. Bij het kiezen voor de isolatie eigenschappen van de modelgebouwen is dan ook rekening gehouden met de invloed van de EU richtlijn. Een aantal Europese onderzoeksprojecten richt zich op het toepassen en verbeteren van dynamische gebouwsimulatie. Dit rapport is mede gebaseerd op de resultaten van deze eerdere onderzoeken (Melikov et al., 2001; Clarke et al., 1995).

3.1 Modelkeuze

De simulatie van gebouwen kan op verschillende schalen en integratieniveaus plaatsvinden. Voor dit project is ervoor gekozen een bestaand, gevalideerd gebouw-simulatieprogramma te gebruiken. Dit heeft als voordeel dat de resultaten van het programma een belangrijke mate van vertrouwen genieten. Er is gekozen voor ESP-r, versie 10.13 (Clarke, 2001; ESRU, 2002). ESP-r is uitgebreid gevalideerd (Strachan, 2000; Strachan et al., 2005) en kan door zijn open, modulaire architectuur voor een veelvoud aan simulatie-studies voor gebouwen gebruikt worden. Recent heeft ook de Sustainable Buildings and Communities groep, Natural Resources Canada (NRCAN) (Haltrecht et al., 1999; NRCAN, 2006) besloten haar toekomstige simulatie-omgeving te baseren op ESP-r. Een vergelijking van ESP-r met andere gebouw-simulatieprogramma's is gegeven in het vergelijkend onderzoek van Crawley et al. (2005). Daaruit komt naar voren dat ESP-r goed geschikt is voor complexe simulaties.

Het gebouw-simulatieprogramma ESP-r (Clarke, 2001) beschikt over de mogelijkheid actieve oppervlakten van gebouwen te simuleren. Daarvoor bestaan meerdere mogelijkheden. Ten eerste is de mogelijkheid met behulp van "special materials" te noemen (Evans and Kelly, 1996). Tot nu toe is de toepassing daarvan gericht op ramen en fotovoltaïsche cellen. Mogelijk zal in de toekomst daarmee ook actieve albedo controle gemodelleerd kunnen worden. In het huidige model is gekozen voor het "thermophysical property substitution" mechanisme. Dit is een al beproefde optie van het ESP-r programma. De werking is gebaseerd op het door een controlemechanisme gestuurd veranderen van de eigenschappen van de materialen van het gebouw-model.

3.2 Simulatiemethode

De simulatiemethode is gebaseerd op een discretisatie van het model van het gebouw door middel van numerieke technieken (Clarke, 2001). Het simulatieprogramma ESP-r maakt daarbij gebruik van de eindige-differentie en eindige-volume techniek naast standaard technieken voor ordinair differentiaal vergelijkingen. Daarbij wordt gebruik gemaakt van standaard submodellen voor straling, convectie en materialen.

In het kader van dit haalbaarheidsonderzoek is gekozen voor een opzet van de simulaties, die het mogelijk maakt de primaire eigenschappen van albedo modificatie in kaart te brengen. Duidelijk is dat de resultaten een indicatie van de haalbaarheid van albedo modificatie zijn. De resultaten kunnen niet worden gelijk gesteld aan experimenten

met echte gebouwen. Dit komt onder andere doordat in het simulatieproces vereenvoudigingen van de werkelijkheid zijn aangebracht. Daarbij valt vooral te denken aan complexe phenomena zoals dauw en bevochtiging door regen. Hiervoor zijn tot nog toe geen gevalideerde standaard simulatiemethodes beschikbaar.

De modificatie van de albedo is in ESP-r gesimuleerd door gebruik te maken van de "thermophysical property substitution" mechanisme. Dit houdt in dat door een controle algoritme tijdens de simulatie de materiaal eigenschappen van de constructie van het gebouw worden veranderd. In het kader van dit onderzoek zijn de relevante eigenschappen de absorptie van (zonne)straling en de emissie van infrarood straling van het buitenste oppervlak van het gebouw. In casu is ingegaan op modificatie van de stralings-eigenschappen van het dak. De gevoeligheid van de uitkomsten van de simulaties van de relevante parameters zoals isolatie, absorptie en emissie van straling is ook onderzocht (zie hoofdstuk 3.4). Voor doorvoeren van de simulaties voor de gevoeligheidsanalyse zijn voor deze haalbaarheidsstudie automatisch procedures ontworpen, die ESP-r met variabele input oproepen.

3.3 Simulaties

De simulaties zijn doorgevoerd met klimaatgegevens van Amsterdam (ASHRAE, 2001). Als standaard gebouw type is een "single zone building" gekozen. Dit heeft als belangrijk voordeel dat de effecten van albedo modificatie eenduidig en begrijpelijk te kwantificeren zijn. De simulaties zijn doorgevoerd voor een heel jaar, met een tijdstap van 30 minuten. Dit maakt het mogelijk schommelingen in de stralingsbalans van oppervlakken van het modelgebouw relatief nauwkeurig te simuleren.

3.3.1 Gebouwtypen

Voor het ABAM project is het vooral van belang de haalbaarheid van actieve albedo modificatie te beoordelen. Daarom is gekozen voor verschillende, relatief eenvoudige model-gebouwen. Gemeenschappelijk aan deze modellen is dat ze zijn opgebouwd uit een één-zone model. De modellen verschillen in hun opbouw door het al dan niet toepassen van actieve albedo modificatie, de albedo eigenschappen van het dak, en de raamoppervlakken. Daarnaast zijn additionele simulaties doorgevoerd voor de gevoeligheidsanalyse (zie 3.4). Daarbij is ook rekening gehouden met verschillende

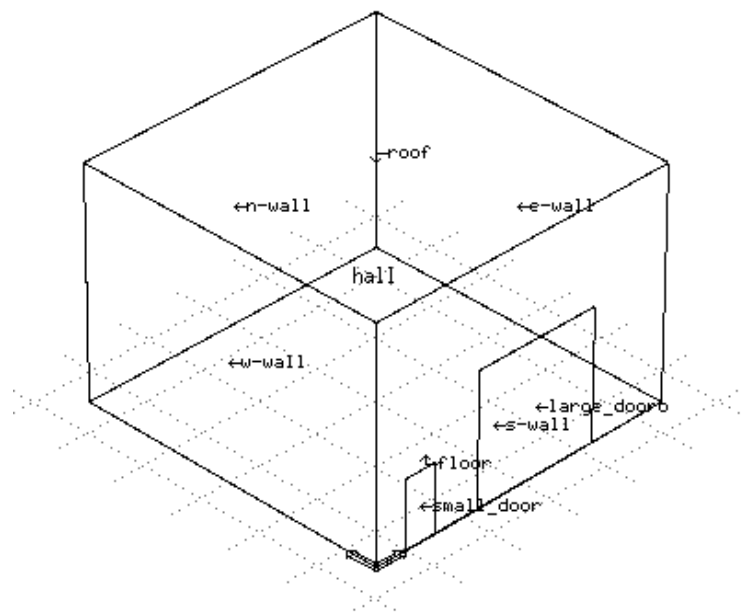
model (afkorting)	gebouwtype
SG-D	Standaard gebouw zonder ramen, zonder albedo controle en met donker dak.
SG-L	Standaard gebouw zonder ramen, zonder albedo controle en met licht dak.
SG-ABAM	Standaard gebouw zonder ramen en met variabele albedo.
SGR-D	Standaard gebouw met ramen, zonder albedo controle en met donker dak.
SGR-L	Standaard gebouw met ramen, zonder albedo controle en met licht dak.
SGR-ABAM	Standaard gebouw met ramen en variabele albedo.

Tabel 3.1: Gesimuleerde gebouwtypen

niveaus van isolatie. Dit is belangrijk omdat het als alternatief voor ABAM het ook mogelijk is gebouwen beter te isoleren.

Zes verschillende gebouwtypen zijn gekozen, zodat het mogelijk is de effecten van het aanpassen van de albedo te bepalen (zie tabel 3.1). Een donker dak betekent een hoge absorptie van zonnestraling en daarmee een lage albedo. Een licht dak daarentegen betekent een lagere absorptie van zonnestraling en een hogere albedo. In het vervolg worden deze gebouwtypen aangeduid met hun afkortingen (zie tabel 3.1), dus bijvoorbeeld SGR-D voor een standaard gebouw met ramen en donker dak. De gebouw modellen zijn gebaseerd op een utiliteitsgebouw, een grote hal. Dit zou bijvoorbeeld als model kunnen dienen voor een gebouwtype zoals een "GAMMA" vestiging. Naast de effecten van verwarming en airconditioning zijn ook de effecten van ventilatie en machines/apparatuur en mensen in het gebouw bij de berekening van de energiebalans meegenomen. Doordat zowel modellen met verschillende vaste albedo (licht en donker dak) en modellen met variabele albedo zijn meegenomen is het mogelijk de effecten van de variabele albedo te scheiden van het eenvoudig veranderen van de vaste albedo van een gebouw.

Een eenvoudige visuele schets van het SG gebouwtype is weergegeven in figuur 3.1 op de pagina hierna. Het gebouwtype SGR is weergegeven in figuur 3.2 op pagina 23. Hierbij is gekozen het raamoppervlak 15% van het oppervlak van de muren te laten beslaan.



Figuur 3.1: Visualisatie van het Standaard Gebouwtipe (SG-D, SG-L, SG-ABAM).

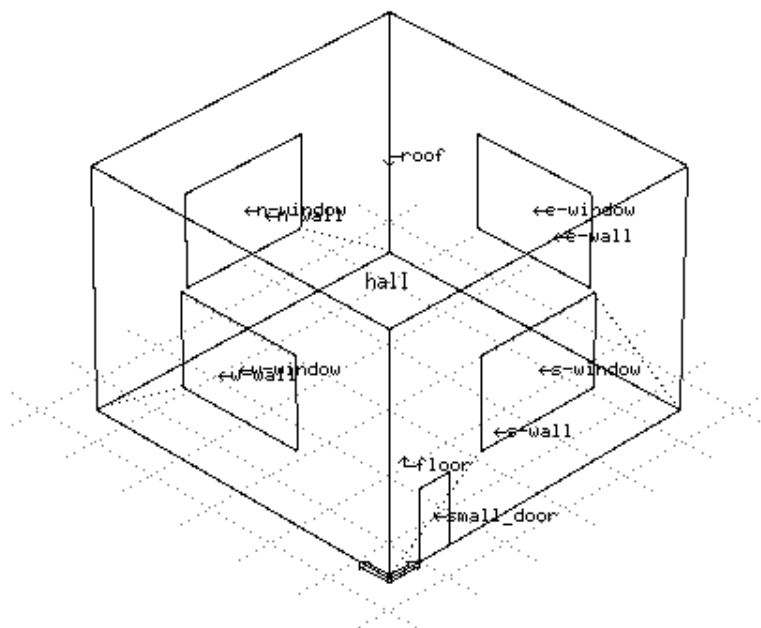
Zoals te zien is de opbouw van de gebouwen eenvoudig gekozen. De centrale ruimte, benoemd "hall", is de enige afgesloten binnenruimte. Openingen naar buiten toe zijn niet transparent (deuren) of wel transparent (ramen). Bij de ABAM modellen heeft het dak actieve albedo controle. De dimensies van het basisoppervlak van het gebouw zijn 10m * 10m zodat het oppervlak 100 m² is.

3.3.2 Invoer gegevens

Als invoer gegevens voor de simulaties zijn vooral de eigenschappen van de bouwmaterialen en het klimaat van belang. In tabel 3.2 op de pagina hierna zijn de relevante waarden voor de warmte-isolatie gegeven.

De constructie van het gebouw is gebaseerd op standaard materialen en constructies zoals deze voorkomen in de databases van ESP-r. Als waarden voor de isolatie zijn de getallen uit het rapport van ECOFYS (2004) aangehouden (tabel 3.2 op de volgende pagina).

Bij de simulaties is ook rekening gehouden met de input van energie door apparatuur/machines en de aanwezigheid van mensen. Daarbij is het schema van tabel 3.3



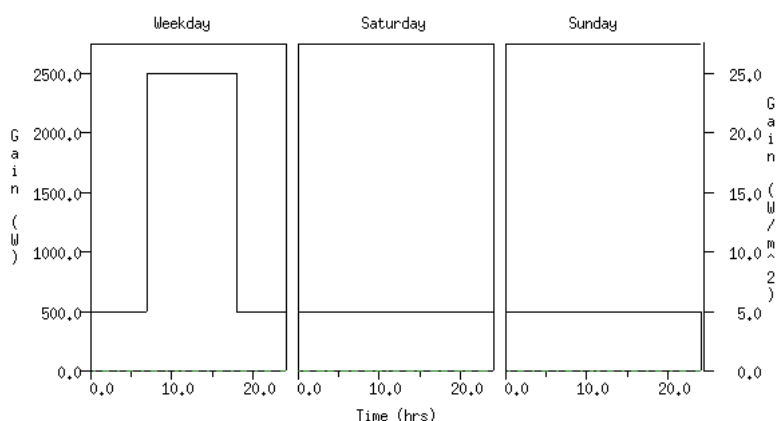
Figuur 3.2: Visualisatie van het Standaard Gebouwtype met Ramen (SGR-D, SGR-L, SGR-ABAM).

onderdeel gebouw	u-waarde ($\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$)
dak	0.25
façade	0.41
bodem	0.44
ramen	1.84

Tabel 3.2: U-waarde voor standaard simulaties ($\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$)

Parameter	Energiegebruik (W/m ²)
basis gebruik	5
gebruik gedurende werktijden (07:00 - 18:00)	20

Tabel 3.3: Basis energiegebruik (W/m²)



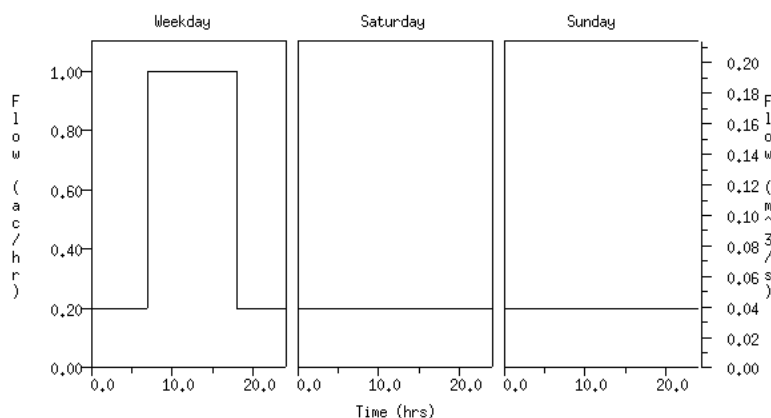
Figuur 3.3: Energieinput door apparatuur/machines en mensen

aangehouden (zie ook figuur 3.3). Dit waarden van dit schema komen overeen met de scenario's die zijn gekozen in het rapport van ECOFYS (2004).

Een andere belangrijke factor die de benodigde energie voor het verwarmen en koelen bepaalt, is de infiltratie van (buiten)lucht door zowel openingen in het gebouw als ook door (geforceerde) ventilatie. In tabel 3.4 is het totale ventilatieschema gedurende werktijden weergegeven (zie ook figuur 3.4 op de pagina hierna voor het ventilatieschema gedurende de hele week).

bron lucht	volume lucht per volume gebouw per uur (1/ h)
infiltratie	0.2
mechanische ventilatie	0.8
totaal	1.0

Tabel 3.4: Ventilatieschema modelgebouwen gedurende werktijden



Figuur 3.4: Ventilatieschema

Parameter	Setpoint (° C)
verwarmen	19.0
koelen	21.0
ABAM regeling	20.0

Tabel 3.5: Klimaatregeling gebouwtypen

3.3.3 Controle regeling

Bij de simulaties is rekening gehouden met klimaatcontrole binnen het gebouw. Naast de effecten van verwarming zijn ook de effecten van koeling meegenomen. Bij verkennende simulaties is gebleken dat albedo modificatie met de microcapsule technologie vooral invloed heeft op de koelvraag, en in mindere mate op de verwarmingsvraag. De controle regeling is gebaseerd op de temperatuur binnen het gebouw, en de bezettinggraad van het gebouw. Tabel 3.5 geeft de verschillende setpoints voor de klimaatregeling weer. De ABAM regeling regelt het veranderen van de albedo van het gebouwoppervlak. Bij een binnentemperatuur hoger dan 20 °C wordt de albedo door middel van het “thermophysical property substitution” mechanisme van ESP-r verhoogd (ESRU, 2002, June 1996 (Printed June 1998)), zodat minder zonnestraling geabsorbeerd wordt. De afstanden tussen de setpoints zijn vrij klein gekozen om tot een comfortabel binnenklimaat te komen. Het tijdschema van de regeling is weergegeven in tabel 3.6 op de pagina hierna. Het veranderen van de albedo wordt ook gestuurd door een controle regeling. Dit mechanisme maakt het mogelijk tijdens de simulatie de constructie van een gebouw gestuurd door de zone temperatuur aan te passen. De werking is gebaseerd op verschillende definities van de constructie van het

Tijd	Klimaatregeling
00:00 - 07:00	Uit
07:00 - 18:00	Aan
18:00 - 24:00	Uit

Tabel 3.6: Tijdsschema klimaatregeling

kleur	albedo	absorptie	IR emissie
licht	hoog	0.6	0.9
donker	laag	0.9	0.9

Tabel 3.7: Albedo eigenschappen

model. In het geval van deze haalbaarheidsstudie zijn twee verschillende dakconstructies gedefinieerd. Deze constructies verschillen alleen in de absorptie c.q. emissie van straling, het isolatieniveau is gelijk blijvend gesteld. De parameters zijn weergegeven in tabel 3.7. Deze waarden van de absorptie en emissie zijn gebaseerd op typische waarden van bouwmaterialen (zie ook figuur 2.2 op pagina 14). In de gevoeligheidsanalyse is verder onderzoek gedaan naar de effecten van variatie van deze parameters. Het is de verwachting dat de ABAM toplaag zich vergelijkbaar gedraagt als bijvoorbeeld latex (Gaffin et al., 2005; Petrie et al., 2001).

3.4 Gevoeligheidsanalyse simulaties

De bovenstaande simulaties geven het effect van albedo controle op het energieverbruik van de gekozen gebouw-modellen weer. Om het effect van de gevoeligheid voor veranderingen in gebouw-parameters te bepalen is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd. Daarbij is rekening gehouden met de volgende parameters: verschillende isolatieniveau's, verschillende absorptie van zonnestraling en verschillende emissie van infraroodstraling.

Door de parameters systematisch te variëren kan een beeld worden verkregen van de gevoeligheid van het ontwerp ten opzichte van de ingestelde numerieke waarden van deze parameters. Tabel 3.8 op de volgende pagina geeft de verschillende simulatie aantallen weer. Per basis model, dat wil zeggen per gebouwtype SG en SGR zijn in totaal 8 simulaties doorgevoerd.

De numerieke waarden voor de parameters van de gevoeligheidsanalyse van de absorptie

simulatie	aantal
basis isolatie met variatie van stralingseigenschappen	3
basis stralingseigenschappen met variatie isolatie (zonder ABAM)	2
totaal	5
<hr/>	
basis simulaties (-D; -L; -ABAM)	3
totaal simulaties	8

Tabel 3.8: Simulaties voor gevoeligheidsanalyse per bouwtype

simulatie type	absorptie	emissie infrarood
-D	0.9	0.9
-L	0.6	0.9
-ABAM-le	0.6	0.8
-ABAM-la	0.5	0.9
-ABAM-ha	0.7	0.9

Tabel 3.9: Numerieke waarden parameters van absorptie en emissie van infrarood gevoeligheidsanalyse.

en emissie van infrarood straling zijn weergegeven in tabel 3.9. Voor de drie extra simulaties is gekozen omdat deze de onzekerheden in de stralings-karakteristiek het meest realistisch weergeven. Een hogere emissie van infrarood dan 0.9 lijkt fysisch niet te worden gerechtvaardigd. Een infrarood emissie lager dan 0.8 lijkt ook niet echt mogelijk met de gekozen technologie.

Voor de gevoeligheidsanalyse met betrekking tot de isolatie is gebruik gemaakt van de gegevens in het rapport van ECOFYS (2004, p. 32). Naast de simulaties met basis isolatie zijn simulaties doorgevoerd zowel met een hogere als ook met een lagere isolatie. De numerieke waarden van de isolatie eigenschappen van de gebouwonderdelen zijn weergegeven in tabel 3.10 op de volgende pagina.

onderdeel gebouw	basis isolatie	hoge isolatie	lage isolatie
	u-waarde (W/m ² K)		
dak	0.25	0.23	0.40
façade	0.41	0.38	0.50
bodem	0.44	0.41	0.50
ramen	1.84	1.68	2.00

Tabel 3.10: U-waarde voor gevoeligheidsanalyse simulaties (W/m² K)

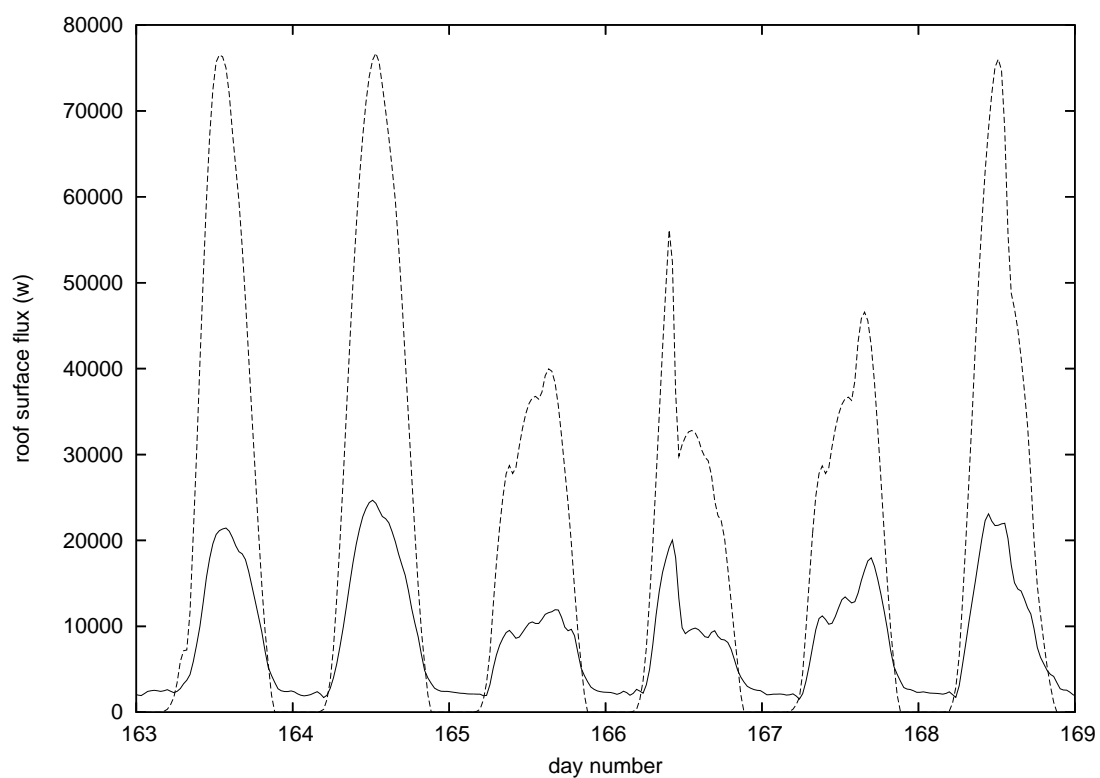
3.5 Simulatie resultaten

In dit deel van het verslag wordt een overzicht gegeven van de resultaten van de simulaties. De nadruk ligt op het bespreken van de waargenomen verschillen in energiegebruik. Daarnaast worden aspecten van de stralingsbalans van het dak besproken.

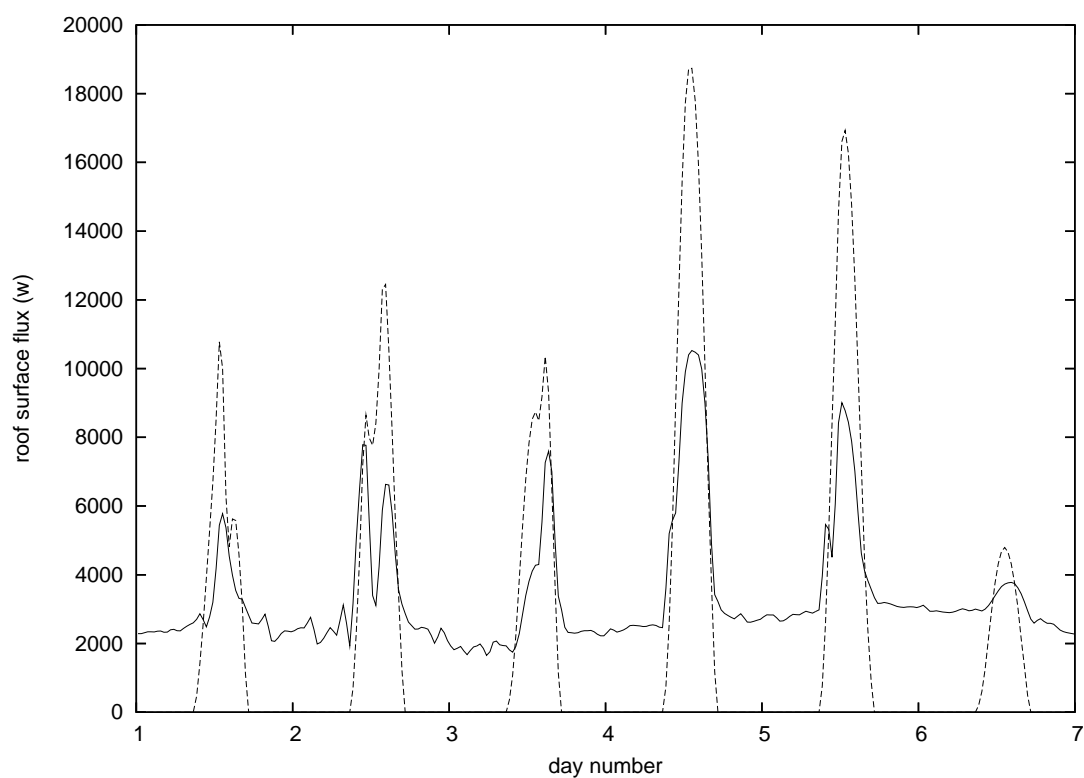
De conclusies en een interpretatie van de simulatie resultaten worden uitgewerkt in hoofdstuk 7.

Doordat de simulaties met een tijdstap van 30 minuten voor een heel jaar zijn doorgevoerd, is het mogelijk de resultaten met een hoge tijdsresolutie te analyseren. Als voorbeeld van hoe de hoge resolutie flux gegevens eruit zien, zie figuur 3.5 op de pagina hierna en figuur 3.6 op pagina 30. In deze figuren is de energieflex van het dak weergegeven. De gegevens hebben betrekking op gebouwtype SG-D als voorbeeld. Figuur 3.5 geeft de emissie van infrarood en de absorptie van zonnestraling in de week van 12 – 18 juni weer. Duidelijk zijn de verschillen tussen een onbewolkte dag (day number 164) en een bewolkte dag (day number 165) te zien. In figuur 3.6 zijn wederom de gegevens over de emissie van infrarood en de absorptie van het dak weergegeven, deze keer voor de week van 1 – 7 januari. In deze data reeks valt duidelijk het effect van bewolking op de emissie van infrarood op day number 2 op. Wat ook opvalt in vergelijking met figuur 3.5 is dat de emissie van infrarood en de absorptie beduidend lager zijn dan in de zomer.

In de volgende secties worden verder de relevante aspecten voor ABAM door middel van jaarlijks geaggregeerde gegevens besproken.



Figuur 3.5: Infrarood emissie (—) en absorptie (- - -) van het dak, model SG-D, 12 - 18 juni (W)



Figuur 3.6: Infrarood emissie (—) en absorptie (- - -) van het dak, model SG-D, 1 - 7 januari (W)

model	verwarming (kWh)	koelen (kWh)	totaal (kWh)
SG-D	8164.99	1170.84	9335.83
SG-L	8244.38	1094.48	9338.86
SG-ABAM	8207.49	1094.49	9301.98
SGR-D	6661.96	5305.64	11967.60
SGR-L	6703.98	5183.22	11887.20
SGR-ABAM	6685.43	5183.55	11868.98

Tabel 3.11: Totaal jaarlijks energiegebruik (kWh)

3.5.1 Totaal energiegebruik

Het totale energiegebruik is de maatgevende factor om tot een beoordeling van de economische haalbaarheid van ABAM te komen. In tabel 3.11 wordt het totale energiegebruik van de gesimuleerde gebouwtypen weergegeven. Wat direct opvalt is dat binnen het gebouwtype SG (standaard gebouw zonder ramen) c.q. het gebouwtype SGR (standaard gebouw met ramen) geen significante verschillen in het totale energiegebruik zijn. Wel is het zo dat de gebouwtypen met actieve albedo controle minder energie gebruiken dan de gebouwtypen zonder actieve albedo controle. Gebouwtype SG-D heeft een jaarlijks totaal energiegebruik van 9335.83 kWh, en gebouwtype SG-ABAM een jaarlijks totaal energiegebruik van 9301.98 kWh. Gebouwtype SGR-D heeft een totaal jaarlijks energiegebruik van 11967.60 kWh, terwijl het totaal jaarlijks energiegebruik van gebouwtype SGR-ABAM 11868.98 kWh is. De verschillen in totaal jaarlijks energiegebruik van de -ABAM gebouwtypes ten opzichte van de -D gebouwtypes zijn voor gebouwtype SG-ABAM ca. 0.4%, en voor gebouwtype SGR-ABAM ca. 0.8%. Deze verschillen zijn echter relatief klein. Wat ook duidelijk is, is dat het grootste effect van ABAM optreedt bij het koelen. ABAM verkleint het energiegebruik voor koelen praktisch zoveel dat een gebouw met ABAM vergelijkbaar is met een gebouw met een vast gekozen lage absorptie (-L gebouwtype). Het effect op het energiegebruik voor verwarming is dat altijd meer energie nodig is dan bij het -D gebouwtype, en minder dan bij het -L gebouwtype. Dit is vooral het gevolg van het feit dat bij gebouwtype -D een (beperkte) opslag van warmte-energie gedurende de avonduren plaats kan hebben. In deze uren is de klimaatregeling uitgeschakeld. Als gevolg daarvan is gebouwtype -D op sommige dagen in de ochtenduren warmer dan gebouwtype -ABAM, en is er minder energie nodig voor het verwarmen van het gebouw

model	absorptie zonnestraling (kWh)
SG-D	87663.76
SG-L	58442.52
SG-ABAM	64001.01
SGR-D	87663.76
SGR-L	58442.52
SGR-ABAM	61855.02

Tabel 3.12: Absorptie van (zichtbare) zonnestraling op het dakoppervlak per jaar (kWh).

bij de start van de werkdag.

Een ander belangrijk aspect is dat de gebouwtypes SGR (standaard gebouwen met ramen) een aanzienlijk hoger energiegebruik voor koelen hebben dan de gebouwtypes zonder ramen (gebouwtypes SG). Dit is direct het gevolg van ingestraalde zonnewarmte. In de wintermaanden is dit juist voordelig voor de energiebehoefte, terwijl daardoor in de zomermaanden juist een hoger energiegebruik resulteert. Als voorbeeld kan het jaarlijks energiegebruik voor koelen van gebouwtype SG-D, 1170.84 kWh, worden vergeleken met het jaarlijks energiegebruik voor koelen van het gebouwtype SGR-D, 5305.64 kWh. Dit jaarlijkse energiegebruik voor koelen is meer dan vier keer zo hoog. De verschillen in jaarlijks energiegebruik voor koelen tussen gebouwtype SG-ABAM, 1094.49 kWh, en het jaarlijks energiegebruik voor koelen van gebouwtype SGR-ABAM, 5183.55 kWh, zijn nog groter. Bij het gebruik van ABAM is het jaarlijkse energiegebruik voor koelen bijna vijf keer zo hoog. Het ligt dan ook voor de hand aandacht te besteden aan mogelijkheden het energiegebruik voor koelen te verlagen. In hoofdstuk 7 en hoofdstuk 8 wordt dan ook ingegaan op zonlichtafhankelijke zonwering.

3.5.2 Energiebalans dak

De stralingsbalans van het dak wordt vooral door de absorptie van zonnestraling in het zichtbare bereik beïnvloedt door ABAM. In tabel 3.12 worden de resultaten weergegeven. Het is duidelijk dat het -ABAM gebouwtype significant minder straling in het zichtbare bereik absorbeert dan de -D gebouwtype.

De in tabel 3.13 op de pagina hierna weergegeven gegevens zijn in feite een verlies van energie van het gebouw. De infrarood emissie van de -ABAM modellen is significant

model	emissie infrarood straling (kWh)
SG-D	45963.44
SG-L	38983.54
SG-ABAM	40128.52
SGR-D	46091.38
SGR-L	39110.93
SGR-ABAM	39775.06

Tabel 3.13: Emissie van infrarood straling van het dakoppervlak per jaar (kWh).

minder dan van de -D modellen. De energiebalans van het dak wordt ook beïnvloed door convectie van omgevingslucht en natuurlijk door infrarood straling en convectie aan de binnenkant van het gebouw. Deze gegevens worden niet verder geanalyseerd, omdat zij geen direct gevolg zijn van ABAM.

3.5.3 Resultaten gevoeligheidsanalyse

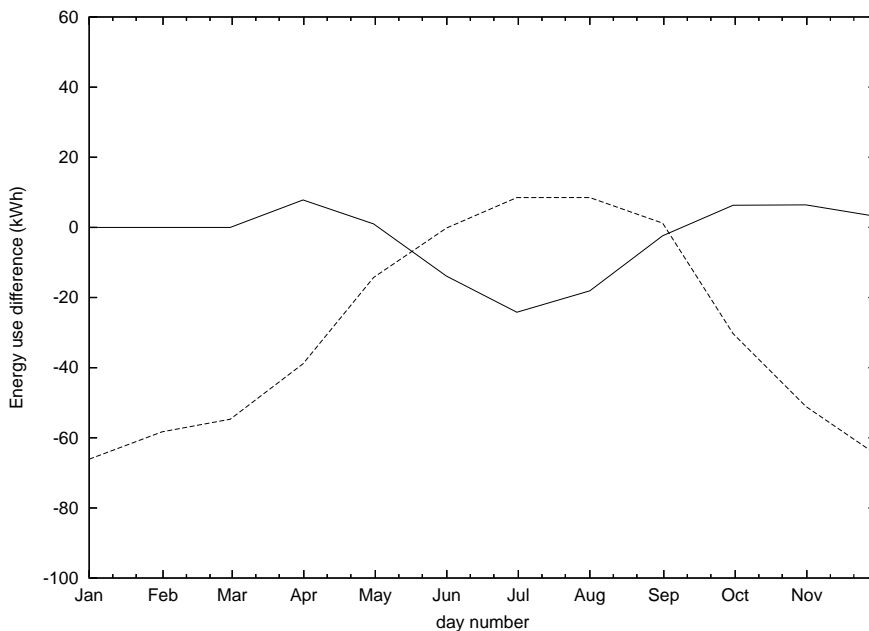
In tabel 3.14 op de volgende pagina worden de simulatieresultaten van de gevoeligheidsanalyse voor de gebouwtypen SG weergegeven. Tabel 3.15 op de pagina hierna geeft deze resultaten voor de gebouwtypen SGR weer. Als maatgevend is hier voor het totale jaarlijkse energiegebruik gekozen. De gebouwtypes -ABAM gebruiken minder energie dan de gebouwtypes -D. Direct valt op dat een hogere isolatie (gebouwtypes -D-hi) het energiegebruik in hogere mate reduceert dan ABAM. In figuur 3.7 op pagina 35 zijn de maandelijkse verschillen in energiegebruik van SG-ABAM en SG-D-hi ten opzichte van SG-D weergegeven. Juist in de wintermaanden heeft gebouwtype SG-D-hi beduidend minder energie nodig, terwijl er in de zomermaanden een licht hoger energiegebruik is. Figuur 3.8 op pagina 35 vergelijkt de analoge gebouwtypes met ramen. De toevoeging van ramen veroorzaakt in de zomermaanden een verhoogde koelingsvraag voor gebouwtype SGR-D-hi. Dit resulteert in een zekere mate van "overheating". In de praktijk houdt dit in dat gebruik moet worden gemaakt van airconditioning.

model	verwarming (kWh)	koelen (kWh)	totaal (kWh)
SG-D	8164.99	1170.84	9335.83
SG-ABAM	8207.49	1094.49	9301.98
SG-ABAM-le (lage emissie)	8197.74	1104.26	9302.00
SG-ABAM-la (lage absorptie)	8222.07	1069.24	9291.31
SG-ABAM-ha (hoge absorptie)	8193.07	1119.77	9312.84
SG-D-hi (hoge isolatie)	7774.81	1200.56	8975.37
SG-D-li (lage isolatie)	9466.12	1147.08	10613.20

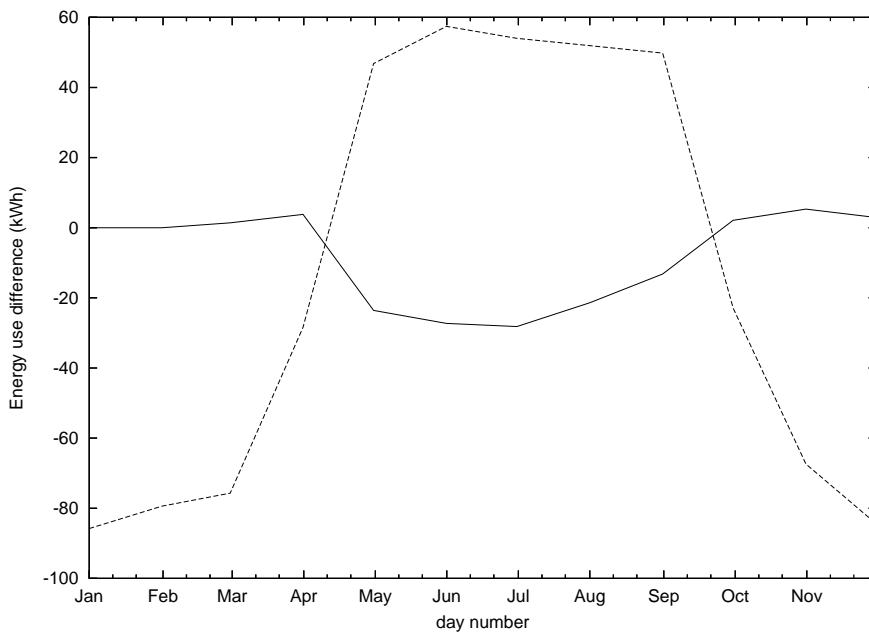
Tabel 3.14: Totaal jaarlijks energiegebruik (gevoeligheidsanalyse), gebouwtypes SG (kWh).

model	verwarming (kWh)	koelen (kWh)	totaal (kWh)
SGR-D	6661.96	5305.64	11967.60
SGR-ABAM	6685.43	5183.55	11868.98
SGR-ABAM-le (lage emissie)	6678.55	5199.92	11878.47
SGR-ABAM-la (lage absorptie)	6693.43	5142.52	11835.95
SGR-ABAM-ha (hoge absorptie)	6677.56	5224.43	11901.99
SGR-D-hi (hoge isolatie)	6179.58	5603.61	11783.19
SGR-D-li (lage isolatie)	7899.07	4758.87	12657.94

Tabel 3.15: Totaal jaarlijks energiegebruik (gevoeligheidsanalyse), gebouwtypes SGR (kWh).



Figuur 3.7: Maandelijke verschillen in energiegebruik SG-ABAM (—) en SG-D-hi (- - -) t.o.v SG-D (kWh)



Figuur 3.8: Maandelijke verschillen in energiegebruik SGR-ABAM (—) en SGR-D-hi (- - -) t.o.v SGR-D (kWh)

Hoofdstuk 4

Constructie en Aansturing

Het idee ABAM vereist het aanbrengen van een additionele oppervlaktelaag op de buitenkant van een gebouw. Deze oppervlaktelaag, die vergelijkbaar is met een laag verf, wordt met een elektromagnetisch veld aangestuurd om een verandering in de albedo te bewerkstellingen. In het vervolg wordt nader ingegaan op deze aspecten.

4.1 Constructie

Als constructie voor ABAM is gekozen voor een methode die het mogelijk maakt de albedo-controlelaag op een bestaande (dak)constructie aan te brengen. De albedo-controlelaag bestaat uit een mengsel van microcapsules met een binder. De binder kan een doorzichtig verfachtig materiaal zijn, te denken valt aan een materiaal op basis van acryl of epoxy. De specifieke selectie van dit materiaal moet gebeuren op basis van praktijktesten en is niet onderwerp van deze haalbaarheidsstudie. Daarbij is ook de kennis van de producenten van binder, zoals bijvoorbeeld Akzo Nobel, van groot belang. De keuze voor een verfachtige laag heeft als voordeel dat geen additionele panelen of andere materialen op het gebouw dienen te worden aangebracht. Daardoor is het mogelijk ABAM relatief eenvoudig in het bestaande bouwproces te integreren. Wel moet worden opgemerkt dat de ondergrond geschikt moet zijn om deze verfachtige laag te kunnen dragen. Daarmee vallen dakconstructies met als bovenlaag bijvoorbeeld grind af. Daarentegen kunnen dakpannen bijvoorbeeld wel als drager dienen. Daarbij is het vrij eenvoudig een bovenlaag te kiezen waarop de binder kan worden aangebracht.

4.2 Aansturing

Voor het veranderen van de kleur van de microcapsules is het noodzakelijk een spanningsverschil door middel van een elektromagnetisch veld aan te leggen. De primaire vraag is dan hoe het elektromagnetisch veld gestuurd kan worden. Daarbij bestaan de volgende mogelijkheden:

1. Het aanbrengen van elektrodes direct op en/of onder de actieve oppervlaktelaag.
2. Het realiseren van een elektromagnetisch veld door een extern mechanisme.

Binnen dit haalbaarheidsonderzoek is gekozen voor de tweede optie. De reden daarvan is dat deze optie het aanbrengen van de oppervlaktelaag significant vereenvoudigt. Zouden ook elektrodes op een oppervlak van een gebouw moeten worden aangebracht, dan zou dit het bouwproces ingrijpend wijzigen en zou het niet mogelijk zijn de oppervlaktelaag vergelijkbaar met een laag verf aan te brengen. Bij de huidige toepassingen van de microcapsules zoals elektronisch papier (E-ink, 2006) en displays (Granmar and Cho, 2005) is juist het aanbrengen en aansturen van de elektrodes een bottleneck.

Onder een extern mechanisme wordt een zich buiten de actieve oppervlaktelaag bevindend mechanisme verstaan. In eerste instantie wordt gedacht aan een systeem met een verrijdbare "boom" die over het dak gaat. Dit is vergelijkbaar met de horizontaal bewegelijke boom van een loopkraan. Dit vereist dat er geen grote obstakels zijn en dat het oppervlak relatief glad is. Bij utiliteitsgebouwen met een relatief groot dakoppervlak, zoals bijvoorbeeld bij gebouwtypes "IKEA" of "GAMMA", is dit vaak zo.

Hoofdstuk 5

Inventarisatie Regelgeving

In verband met het mogelijk toepassen van ABAM is het van belang informatie te verkrijgen over de aspecten van regelgeving die relevant zijn. In dit hoofdstuk wordt een beknopt overzicht gegeven van aspecten van regelgeving waaraan ABAM moet voldoen.

In eerste instantie kan worden gedacht aan regels die betrekking hebben op energie efficiëntie. Daarnaast is het van belang te beoordelen of de stoffen die gebruikt worden niet gevaarlijk zijn. Van primair belang voor de toepassing van ABAM is de regelgeving vastgelegd in het Bouwbesluit. De voorschriften in het Bouwbesluit zijn vastgelegd in de vorm van functionele eisen en prestatie-eisen. Een functionele eis beschrijft het kader van de voorschriften. De prestatie-eis geeft een grenswaarde waaraan minimaal moet worden voldaan. Doordat het Bouwbesluit een kader voor (bijna) alle relevante aspecten van gebouwen vastlegt, is het breed geformuleerd. Dit heeft als gevolg dat de specifieke materialen toegepast in ABAM in deze rapportage worden vergeleken met andere, in het bouwproces toegepaste materialen. In samenhang met het Bouwbesluit moet ook de Europese richtlijn over de energieprestatie van gebouwen worden gezien.

5.1 Energiegebruik

De Europese Unie heeft met de richtlijn “energy performance of buildings” de basis gelegd voor de Nederlandse energieprestatienorm (European Commission, 2002). In het voorjaar van 2006 is deze regelgeving in Nederland van kracht geworden. Toekomstige

gebouwen moeten daaraan voldoen, en ook bij renovatieprojecten moet hiermee rekening gehouden worden. ABAM kan er (wellicht) aan bijdragen deze norm eenvoudiger te halen, doordat door ABAM het energiegebruik kan worden verkleind. Voorwaarde is wel dat ABAM wordt erkend als methode voor het verhogen van de energie efficiëntie van gebouwen. Het energiegebruik van de gebouwde omgeving is ca. 35-40% van het totale energiegebruik in Nederland (SenterNovem, 2004). Daarvan verbruikt de utiliteitsbouw ongeveer een derde en de woningbouw tweederden. Deze getallen maken duidelijk dat ook een relatief kleine potentie van ABAM al een relatief grote absolute reductie van bijvoorbeeld de uitstoot van CO₂ kan bewerkstellingen.

Voor het berekenen van de energie efficiëntie van gebouwen wordt gebruik gemaakt van de gestandaardiseerde bepalingmethode voor de energie prestatie coëfficiënt (EPC). Deze bepalingmethode is vastgelegd in NEN 5128 voor woningbouw en NEN 2916 voor utiliteitsbouw. Daarmee is een methode ontwikkeld voor de integrale beoordeling van het energiegebruik van de bouwkundige onderdelen van een gebouw en de bijbehorende installaties. Feitelijk wordt aan de markt overgelaten hoe de energiezuinigheid in de bouwpraktijk wordt gerealiseerd en welke energiebesparende maatregelen worden ingezet. Daarbij maakt het niet uit welke maatregelen worden getroffen, zolang maar voldaan wordt aan de vereiste energiezuinigheid. Juist doordat de specifieke maatregelen ter verhoging van de energie efficiëntie niet gespecificeerd zijn, is het in principe mogelijk nieuwe methodes zoals ABAM toe te passen.

5.2 Veiligheid

Voor het toepassen van ABAM is het belangrijk te beoordelen of ABAM voldoet aan aspecten van veiligheid. Daarbij zijn in eerste instantie twee aspecten te noemen:

1. Brandveiligheid.
2. Gebruik van gevaarlijke stoffen.

Bij het aspect brandveiligheid kan de binderlaag in combinatie met de microcapsules in eerste instantie vergeleken worden met een "extra" laag verf op het gebouw. Afhankelijk van het type binder (bijvoorbeeld acryl-gebaseerd) kan het materiaal van een ABAM-laag brandbaar zijn. Omdat deze laag op de buitenkant van het gebouw wordt aangebracht, en in het bijzonder op het dak, zijn de eisen aan brandveiligheid minder stringent dan voor materialen aan de binnenkant van een gebouw. Ook speelt

en rol dat de ABAM-laag zeer dun is, in de orde van enkele millimeters. Daardoor is de bijdrage van ABAM aan de brandbaarheid naar verwachting gering. Een definitieve beoordeling van de brandveiligheid kan pas plaatsvinden door middel van praktijktesten en na een definitieve selectie van een specifiek materiaal voor de binder.

Bij het aspect van het gebruik van gevaarlijke stoffen kan de ABAM-laag wederom het beste worden vergeleken met een additionele laag verf op de buitenkant van het gebouw. Aan het gebruik van verschillende types binder worden in de buitenlucht minder stringente eisen gesteld dan aan toepassing binnenshuis. De binder zelf is redelijk inert, en de eisen hebben vooral betrekking op het oplosmiddel van de binder. Dit oplosmiddel is nodig voor het aanbrengen van de ABAM-laag, en vervluchtigt bij het opdrogen. De microcapsules zelf zijn gevuld met een olieachtige substantie, waarin de verfparkels zijn gemengd, en verfparkels. De verfparkels zijn op zich vrij inert en ingekapseld in de microcapsules. De olieachtige substantie is ook afgesloten. Op het gebied van milieuveiligheid kan ervan worden uitgegaan dat ABAM zich wederom vergelijkbaar als een laag verf gedraagt.

Als laatste aspect kan nog de veiligheid van de elektrisch installatie van ABAM worden genoemd. Omdat deze installatie geen significant nieuwe onderdelen bevat, zal dit naar verwachting geen problemen opleveren.

Hoofdstuk 6

Kosten/baten Analyse

De analyse van de kosten en baten is niet opgenomen in de publieke samenvatting van de rapportage.

Hoofdstuk 7

Conclusies

Deelen van de conclusies zijn vertrouwelijk en daarom niet vermeldt in de publieke samenvatting.

In dit hoofdstuk worden de resultaten van de haalbaarheidsstudie ABAM besproken. De conclusies worden per onderwerp in de volgende secties gegeven. Aanbevelingen op basis van deze conclusies zijn onderwerp van hoofdstuk 8.

In het projectvoorstel voor ABAM zijn de beoogde resultaten als volgt opgesteld:

1. Kwantificeren van de mogelijke energiebesparing (door middel van simulaties).
In hoofdstuk 3 is dit deelresultaat gerealiseerd, zie ook sectie 7.1.
2. Schatting van de kosten van het produceren inclusief het aanbrengen van de actieve oppervlaktelaag.
Dit onderdeel is niet opgenomen in de publieke samenvatting.
3. Schatting van de kosten van het produceren en aanbrengen van het aanstuurmechanisme.
Dit onderdeel is niet opgenomen in de publieke samenvatting.
4. Voldoet ABAM in principe aan regelgeving?
Hoofdstuk 5 bevat een beknopt overzicht van de relevante regelgeving, zie ook sectie 7.3.

5. Geïntegreerde analyse met als doel de haalbaarheid te beoordelen.

In dit hoofdstuk worden de bovengenoemde aspecten bij elkaar gebracht en wordt een conclusie getrokken over de haalbaarheid van ABAM, zie in het bijzonder sectie 7.4 en sectie 7.5.

De bovengenoemde deelresultaten worden in hun volgorde besproken, samen met een beknopte verwijzing naar mogelijke alternatieven.

7.1 Conclusies simulaties

In hoofdstuk 3 zijn de besparingen in energiegebruik van gebouwen met ABAM ten opzichte van standaard gebouwen gekwantificeerd in tabel 3.11 op pagina 31. Uit de modelberekeningen en simulaties kan worden geconcludeerd dat ABAM voor een verlaging van het energiegebruik zorgt. Deze verlaging van het energiegebruik in de simulaties is in relatieve en absolute zin klein. Omdat er een zekere onzekerheidsmarge in de simulaties is, is het mogelijk dat de waargenomen verschillen in energiegebruik binnen de onzekerheidsmarge van de simulaties vallen.

Om tot een betere inschatting van de invloed van verschillende numerieke waarden van een aantal belangrijke parameters te komen is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd (sectie 3.4). Uit deze gevoeligheidsanalyse komt naar voren dat hogere isolatie een alternatief voor ABAM is. Het energiegebruik wordt door hogere isolatie in sterkere mate gereduceerd dan door ABAM (zie tabel 3.14 op pagina 34 en tabel 3.15 op pagina 34). Bij de bespreking van de simulatieresultaten is gekozen om ABAM te vergelijken met het beste alternatief. Dat is model met de hoge isolatie. (gebouwtypes SG-D-hi en SGR-D-hi, zie figuren 3.7 op pagina 35 en 3.8 op pagina 35).

Worden de resultaten van de gebouwtypes SG en SGR onderling vergeleken, dan komt naar voren dat gebouwtypes SGR een hoger energiegebruik voor koeling hebben, terwijl hun energiegebruik voor verwarming aanzienlijk lager ligt dan bij het SG gebouwtype. Daaruit kan worden geconcludeerd dat zonlichtafhankelijke zonwering voor een grote verlaging van het energiegebruik kan zorgen. Een onderzoek naar deze aspecten valt buiten de reikwijdte van dit haalbaarheidsonderzoek.

Bij het berekenen van het totale energiegebruik speelt ook de interne warmtegeneratie door bijvoorbeeld aanwezige personen een rol. Daarvoor zijn standaard aannames gebruikt. Het is natuurlijk zo dat als deze aannames veranderen, de absolute waarde van

het energiegebruik verandert. De verschillen tussen de gebouwen met of zonder ABAM zullen dan naar verwachting wel blijven bestaan. Daarnaast zijn de resultaten afhankelijk van de gekozen klimaatregeling en het precieze mechanisme van controle. In dit onderzoek is gewerkt met een relatief eenvoudige "on/off controller". De mogelijkheid bestaat dat geavanceerde controle algoritmes het energiegebruik van gebouwtypes -ABAM in grotere mate kan verlagen.

Nogmaals dient opgemerkt te worden dat deze gegevens betrekking hebben op simulaties. Omdat er geen rekening is gehouden met effecten zoals dauw, regen en vocht is het vooral van belang op de verschillen in de simulatie resultaten te letten. De absolute numerieke waarden zijn zo niet direct vergelijkbaar met werkelijk bestaande gebouwen.

7.2 Conclusies kosten/baten analyse

De kosten/baten analyse in hoofdstuk 6 laat zonder meer zien dat ABAM met de huidige aannames niet rendabel is.

De vraag is of er factoren zijn, die de jaarlijkse cash flow in positieve zin kunnen beïnvloeden, zodat ABAM alsnog rendabel kan zijn. In eerste instantie kan worden gedacht aan hogere energieprijzen. Deze factor zal naar verwachting niet de relatief hoge kosten voor het onderhoud van de ABAM installatie kunnen compenseren. De vraag is dan of het onderhoud van ABAM significant goedkoper kan. Met de huidige kennis is deze vraag negatief te beantwoorden. De onderzochte constructie met een bewegelijke horizontale boom vereist regelmatig onderhoud. Alternatieve externe constructies, dat wil zeggen buiten de ABAM-laag liggende constructies, liggen niet voor de hand. Een andere mogelijkheid om de ABAM-laag aan te sturen is om elektrodes direct onder de ABAM-laag aan te brengen. Dit vereist een aangepast bouwproces en maakt ABAM daardoor moeilijker en duurder toe te passen. Naar verwachting zijn de kosten voor het produceren en installeren van zulke elektrodes hoog. Een ander mogelijk nadeel daarvan is dat deze elektrodes waarschijnlijk niet bestand zijn tegen blikseminslag en daardoor niet kunnen worden toegepast. Als wordt besloten hier verder onderzoek naar te doen moet dit aan dit aspect bijzondere aandacht besteedt worden.

Zijn er dan nog andere mogelijkheden om ABAM rendabel te kunnen toepassen? Als het energiegebruik van een gebouw primair wordt bepaald door airconditioning, zoals in warme klimaten, is het mogelijk dat ABAM alsnog rendabel kan zijn. Hierbij kan ervan worden uitgegaan dat gebouwen met een reflectief daksysteem in gebruik zijn. Een

bijkomend voordeel is dat ABAM de kleur van een gebouw bij een verwarmingsvraag (in de winter) juist donkerder maakt, zodat er een hogere absorptie van zonnestraling is. Dit kan een significante verhoging van het thermisch comfort behelzen, omdat huizen in warme klimaten vaak geen verwarming hebben. In hoofdstuk 8 wordt verder hierop ingegaan.

7.3 Conclusies m.b.t. regelgeving

Uit de beknopte inventarisatie van de regelgeving in hoofdstuk 5 valt op te maken dat ABAM naar verwachting kan voldoen aan de in Nederland gestelde eisen voor bouwmaterialen.

Op het gebied van veiligheid kan een definitieve conclusie pas worden getrokken als een specifiek materiaal voor de binder is gekozen. Dit moet door middel van praktijkproeven en in samenspraak met producenten van binders gebeuren. Omdat al een veelvoud van materialen als binder voor verf in gebruik is, zal dit geen significante problemen opleveren.

Op het gebied van regelgeving omtrent energiegebruik kan ABAM bijdragen aan het voldoen aan de energieprestatie norm. Doordat ABAM bijdraagt aan het verlagen van het energiegebruik, kan ABAM bijdragen aan het verlagen van de EPC. Zoals al in sectie 5.1 vermeldt, is het daarvoor nodig dat ABAM wordt erkend als methode voor het verhogen van de energie efficiëntie van gebouwen.

7.4 Alternatieven

Uit de simulaties in hoofdstuk 3 is duidelijk dat de energiebesparing door ABAM beperkt is. Bij de gevoeligheidsanalyse is één mogelijk alternatief voor ABAM, namelijk betere isolatie meegenomen. Het jaarlijkse energiegebruik van gebouwtype SG-D-hi vermindert ten opzichte van gebouwtype SG-D met 360 kWh (zie tabel 3.14 op pagina 34), en van gebouwtype SGR-D-hi ten opzichte van gebouwtype SGR-D met 184 kWh (zie tabel 3.15 op pagina 34). Deze reductie in het jaarlijkse energiegebruik valt groter uit dan bij ABAM. Daardoor is verbeterde isolatie een aantrekkelijk alternatief voor ABAM.

Een ander mogelijk alternatief is het beter benutten van de ingestraalde zonnewarmte. Als men kijkt naar de energiewinst door instraling van zonnewarmte per jaar

(SenterNovem, 2006, p. 38), dan is duidelijk dat door aangepaste plaatsing van ramen een hoge daling van het energiegebruik kan worden bereikt. Als voorbeeld kan een groter raamoppervlak op het zuiden dienen. Een direct nadeel is dan het thermisch comfort in de zomermaanden daalt, of dat een groter gedimensioneerde koelingsinstallatie nodig is. Een andere optie is het gebruik van zonwering, die afhankelijk van de warmtebehoefte van het gebouw wordt gestuurd. Met zo'n zonlichtafhankelijke zonwering zijn dan significante besparingen op het energiegebruik voor airconditioning te realiseren.

7.5 Geïntegreerde analyse en beoordeling haalbaarheid

1. Uit dit en de voorgaande hoofdstukken blijkt *dat ABAM in principe haalbaar is*. Tegelijk is gebleken dat de verwachte besparing in het energiegebruik in relatieve en absolute zin klein is.
2. Afgezet tegen de resultaten van hogere isolatie is duidelijk dat het *potentieel van ABAM op het gebied van het besparen van het gebruik van energie voor Nederland beperkt is*. Tegelijk kan worden geconcludeerd dat het mogelijk is dat ABAM in een andere klimaatzone een significant hogere bijdrage kan leveren aan het besparen van het gebruik van energie.
3. Uit de voorgaande hoofdstukken kan op grond van de tot nu toe beschikbare informatie de conclusie getrokken worden *dat ABAM technisch haalbaar is*. Dat betekent dat met toepassing van huidige, bekende technieken een ABAM opstelling daadwerkelijk gerealiseerd kan worden. Doordat deze haalbaarheidsstudie een theoretische studie betreft, kan geen antwoord op de vraag worden gegeven hoe ABAM zich daadwerkelijk in een installatie gedraagt. Om de gevolgen van dit gedrag op het energiegebruik in te schatten zijn de simulaties uitgevoerd.
4. In hoofdstuk 6 is een analyse van de kosten en baten van ABAM op basis van de beschikbare gegevens gedaan. Daaruit blijkt dat *de kosten van ABAM niet opwegen tegen de baten* vanuit financieel oogpunt.
5. In dit hoofdstuk (sectie 7.4) zijn twee alternatieven voor ABAM beschouwd. Beter isolatie is waarschijnlijk vanuit financieel oogpunt aantrekkelijker dan ABAM. Zonlichtafhankelijke zonwering kan ook als tweede alternatief voor ABAM worden beschouwd. Deze alternatieven hebben daarnaast het voordeel dat hun technologische ontwikkeling verder is en dat zij commercieel verkrijgbaar zijn.

Hoofdstuk 8

Aanbevelingen

1. Alternatieven voor ABAM verdienen bijzondere aandacht.
 - (a) Verbeterde isolatie verlaagt het energiegebruik van gebouwen, maar door de hogere gebouwtemperaturen in de zomer is relatief veel koeling vereist.
 - (b) Meer aandacht voor raamoppervlakken en hun zonafhankelijke plaatsing in combinatie met zonlichtafhankelijke zonwering heeft een groot potentieel voor besparing van het gebruik van energie.
2. Het potentieel van ABAM wordt met de huidige microcapsule technologie beperkt, omdat de infrarood emissie niet actief te sturen is. Onderzoek naar de mogelijkheden van het veranderen van de infrarood emissie kan mogelijk het effect van ABAM op het besparen van het energiegebruik vergroten.
3. Een verkennend onderzoek naar het toepassen van ABAM in andere klimaten is aanbevolen.
4. Samenwerking met producenten van binders is aanbevolen als praktijktesten met ABAM doorgevoerd worden.
5. Onderzoek naar het potentieel van elektrochrom glas op het besparen van het gebruik van energie van gebouwen, zowel voor verwarming en koelen, als ook voor verlichting wordt aanbevolen.

Referenties

Akbari H., Bretz S., Taha H., Kurn D., and Hanford J. Peak power and cooling energy savings of high-albedo roofs. *Energy and Buildings - Special Issue on Urban Heat Islands and Cool Communities*, 25(2):117 – 126, 1997.

ASHRAE. International weather for energy calculations (IWECC weather files) users manual and cd-rom. accessed on Internet, 2001. URL http://www.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather_data3.cfm/region=6_e

Bert T., De Smet H., Beunis F., and Strubbe F. Numerical simulation of the transport of particles in electrophoretic displays. *Opto-Electronics Review*, 13(4):281 – 286, 2005.

Bokel R. and van der Voorden M. Influence of the facade on the energy demand – an introduction to climate adaptive skins. IBPSA Building Simulation 2005 Conference, 2005.

Clarke J. *Energy Simulation in Building Design*. Butterworth-Heinemann, 2nd edn., 2001.

Clarke J., Hand J., Mac Randal D., and Strachan P. Data decomposition of the ESP-r system, development of a DES interface and the prototyping of an intelligent, integrated building design system within the COMBINE II project. Final Report for project JOU2-CT92-0196, European Commission, 1995.

Crawley D.B., Hand J.W., Kummert M., and Griffith B.T. Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs. Tech. rep., US Department of Energy, Washington, DC, USA; Energy Systems Research Unit, University of Strathclyde, Glasgow, Scotland, UK; University of Wisconsin-Madison, Solar Energy Laboratory, Madison, Wisconsin, USA; National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado, USA, 2005. Available at <http://www.energytoolsdirectory.gov>.

- E-ink. E ink corporation. 6.10.2006 accessed on Internet, 2006. URL <http://www.eink.com/index.html>.
- ECOFYS. Mitigation of CO₂ emissions from the building stock - beyond the eu directive on the energy performance of buildings. Report established by Ecofys for EURIMA & EuroAce, ECOFYS, 2004.
- Eilert P. High albedo (cool) roofs – codes and standards enhancement (case) study. Tech. rep., Pacific Gas and Electric Company, 2000.
- ESRU. *The ESP-r System for Building Energy Simulation – User Guide Version 10 Series – ESRU Manual U02/1*. Energy Systems Research Unit, University of Strathclyde, Glasgow, 2002.
- ESRU. Data model summary ESP-r version 9 series. ESRU Report TR96/2, ESRU, University of Strathclyde, Glasgow, June 1996 (Printed June 1998).
- European Commission. Energy efficiency in buildings. 11.10.2006 accessed on Internet, 2002. URL http://ec.europa.eu/energy/demand/legislation/buildings_en.htm.
- Evans M. and Kelly N. Modelling active building elements with special materials. ESRU occasional paper, ESRU, University of Strathclyde, Glasgow, 1996.
- Gaffin S., Rosenzweig C., Parshall L., Beattie D., Berghage R., O’Keeffe G., and D. B. Energy balance modeling applied to a comparison of white and green roof cooling efficiency. In *Third Annual Greening Rooftops for Sustainable Communities Conference, Awards and Trade Show Washington*. 2005. URL <http://www.greenroofs.net>.
- Granmar M. and Cho A. Electronic paper: A revolution about to unfold? *Science*, 308(5723):785 – 786, 2005.
- Haberl J. and Cho S. Literature review of uncertainty of analysis methods (cool roofs). Tech. Rep. ESL-TR-04/10-04, Energy Systems Laboratory, Texas Engineering Experiment Station, Texas A&M University System, 2004.
- Haltrecht D., Zmeureanu R., and Beausoleil-Morrison I. Defining the methodology for the next-generation HOT2000 simulator. In *Building Simulation 1999*, pp. A-06. International Building Performance Simulation Association, 1999. URL http://www.ibpsa.org/m_bs1999.asp.

- Kuhlmann U. Digitales papier. *c't magazin für computertechnik*, (21):228 – 233, 2006.
- Lienhard P. Electronic paper (electrophoretic display), 2004. URL http://diwww.epfl.ch/~lienhard/materials_for_comm_systems/electronic_paper.pdf. Materials for Communication Systems Course EPFL 2004.
- Ma Y., Xu J., Zhu B., and Wu K. Study of infrared thermal images of chameleon-type building coatings. *Journal of Coatings Technology*, 75(940):43 – 47, 2003.
- Ma Y., Zhang X., Zhu B., and Wu K. Research on reversible effects and mechanism between the energy-absorbing and energy-reflecting states of chameleon-type building coatings. *Solar Energy*, 72(6):511 – 520, 2002.
- Melikov A., Stankov P., Denev J., Clarke J., MacDonald I., Drkal F., and Popiolek Z. Integrated design optimization of building energy performance and indoor environment. Final report for project ERB IC15 CT98 0511, European Commission, 2001.
- Minister van Economische Zaken. Uitvoeringsregeling BSE-2005 nieuw energieonderzoek. *Staatscourant*, (32):12, 2005.
- Monteith J. and Unsworth M. *Principles of Environmental Physics*. Edward Arnold, London, 2nd edn., 1990.
- NRCAN. Sustainable Buildings and Communities, Natural Resources Canada (NRCAN). 5.10.2006 accessed on Internet, 2006. URL http://www.sbc.nrcan.gc.ca/software_and_tools/hot3000_overview_e.asp.
- Petrie T., Atchley J., Childs P., and Desjarlais A. Effect of solar radiation control on energy costs – a radiation control fact sheet for low-slope roofs. In *Proceedings on CD, Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings VIII: Integration of Building Envelopes*, no. paper 146. American Society of Heating, Refrigerating and Airconditioning Engineers, Inc., Atlanta, GA, 2001.
- Petrie T., Wilkes K., and Desjarlais A. Effect of solar radiation control on electricity demand costs – an addition to the doe cool roof calculator. In *Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings, IX International Conference*. 2004.
- SenterNovem. NEO scan gebouwde omgeving. 1.11.2006 accessed on Internet, 2004. URL http://www.senternovem.nl/mmfiles/ScanGebouwde%20omgeving_tcm24-108940.pdf.

- SenterNovem. Kompas energiebewust wonen en werken – cijfers en tabellen 2006. brochure, 2006. URL <http://www.senternovem.nl/kompas>.
- Simpson J. and McPherson E. The effects of roof albedo modification on cooling loads of scale model residences in Tucson, Arizona. *Energy and Buildings*, 25:127 – 137, 1997.
- Strachan P. ESP-r: Summary of validation studies. Technical report, ESRU, University of Strathclyde, Energy Systems Research Unit, Glasgow, Scotland, UK, 2000.
- Strachan P.A., Kokogiannakis G., and MacDonald I.A. Encapsulation of validation tests in the ESP-r simulation program. In *Proc. Building Simulation '05*. Montreal, 2005.
- Vermael S., Neyts K., Stojmenovik G., Beunis F., and Schlangen L. A 1-dimensional simulation tool for electrophoretic displays. In *Fourth FTW PhD Symposium, Faculty of Engineering, Ghent University, December 3, 2003*. 2003. (paper no. 025).
- von Ardenne M., Musiol G., and Klemradt U. *Effekte der Physik und ihre Anwendungen*. Verlag Harri Deutsch, Frankfurt, 3rd edn., 2005.
- Wikipedia. Emissivity. 12.10.2006 accessed on Internet, 2006. URL <http://en.wikipedia.org/wiki/Emissivity>.
- Yoshizawa H. Trends in microencapsulation research. *KONA Powder Science and Technology in Japan*, (22):23 – 31, 2004.