

# Phase Change Materials in betonvloeren – deel II

In het vorige artikel in deze reeks [1] is de experimentele opstelling besproken voor het testen van Phase Change Materials (PCM's) in betonnen vloeren. Dat experimenteel onderzoek toonde aan dat er een constanter binnenklimaat kon worden verkregen: de minimale temperaturen in de boxen met PCM's lagen significant hoger en de maximale temperaturen in de boxen met PCM's lagen significant lager dan de temperaturen in de boxen zonder PCM's. PCM's kunnen derhalve naar verwachting bijdragen aan het reduceren van fossiel brandstofgebruik. Maar hoe moet de experimentele opstelling worden opgeschaald naar het niveau van een werkelijke woning? De latente warmtecapaciteit van de PCM's staat immers in schril contrast tot de grote soortelijke warmtecapaciteit van woningen of betonnen c.q. stenen constructies in het algemeen.

Ir. J. Prins, afgestudeerd student; ir. A.G. (Bram) Entrop, universitair docent Duurzaam Bouwen; prof.dr.ir. A.G. (André) Dorée, hoogleraar Markt- en Organisedynamiek in de Bouwsector; Universiteit Twente, Faculteit Construerende Technische Wetenschappen, Vakgroep Bouw/Infra

In dit artikel zal verder worden ingegaan op het modelleren van het gedrag van PCM's in de boxen en de resultaten van enkele aanpassingen van de experimentele opstelling om de effectiviteit van de PCM's te vergroten. De aanpassingen die zijn gedaan, hebben betrekking op {a} het vergroten van de latente warmtecapaciteit door de plaatsing van gipsplaten met PCM's en {b} het vergroten van de warmte-absorptiecoëfficiënt door het zwart schilderen van de boxen. In het vervolg van dit artikel zal eerst worden toegelicht hoe de thermische impact van PCM's in de boxen is gemodelleerd. De inzichten vanuit het model en de experimenten met de vorige opstelling, hebben geleid tot twee aanpassingen in de

opstelling.

### ■ MODELLERING

Voor het modelleren van het testboxen is gebruik gemaakt van het softwarepakket 'Vensim' [2]. Vensim kan op een visuele manier de dynamiek van complexe systemen weergeven en doorrekenen. Voor het model zijn formules gebruikt uit de thermodynamica en bouwfysica [3]. Kort samengevat neemt het model de weersomstandigheden als input (zonne-instraling en buitentemperatuur). Op basis hiervan ontstaat er flux door wanden van het systeem, waardoor uiteindelijk de binnenlucht wordt opgewarmd. Hierbij zijn de PCM's gemodelleerd als een extra buffer

waarin warmte wordt opgeslagen gedurende een bepaald temperatuurbereik (smeltpunt van de PCM's). Het model is gevalideerd met de gegevens uit de eerste proeven. Op basis van het model konden voorspellingen worden gedaan van de effecten van eventuele aanpassingen in de opstelling. De voorspellingen van het model laten zien dat een toename van de latente warmtecapaciteit met 98% niet leidt tot een constanter binnenklimaat vergeleken met de situatie ervoor. Een verhoging van de warmte-absorptiecoëfficiënt zorgt juist voor een minder constant binnenklimaat in vergelijking met de situatie met een lagere absorptie-coëfficiënt, volgens het model. Gezien de twijfels na de eerste reeks expe-

rimenten omtrent de omvang van de totale latente warmtecapaciteit en de beschikbaarheid van voldoende thermische energie voor het smelten van de volledige voorraad PCM's, was het de vraag of theorie en praktijk met elkaar overeen zouden komen. Vandaar dat deze twee aanpassingen zowel in het model als in de proefopstelling zijn doorgevoerd.

## AANPASSINGEN OPSTELLING

In het vorig artikel over PCM's in betonvloeren [1] is de gebruikte basisopstelling reeds besproken. Als vervolgonderzoek zijn er twee factoren aangepast om te bestuderen of de doelen om met behulp van PCM's een constant binnenklimaat te laten opleveren en om meer fossiele brandstoffen te laten besparen. Gezien de relatief grote soortelijke warmtecapaciteit van werkelijke woningen, zijn op de eerste plaats meer PCM's in de thermische schil gebracht. Om de latente warmtecapaciteit te vergroten is Masterboard toegepast aan de binnenzijde van de muren van de testboxen, die in het eerste artikel [1] ook reeds PCM's bevatten in de betonvloeren. Masterboard [4] is een product, ontwikkeld door BASF en Knauf. Het bevat dezelfde PCM's (Micronal) als toegepast in de betonvloeren van de experimentele opstelling met hetzelfde transitietraject. Op de tweede plaats is getracht bij een gelijkblijvend oppervlak van de boxen waarop zonlicht valt en binnentreedt toch meer thermische energie overdag te absorberen door de buitenzijde van de boxen zwart te schilderen. De omvang van de boxen of de kozijnen was immers relatief moeilijk aan te passen. De kenmerken van de bouwkundige opbouw van de gebruikte boxen in de aangepaste experimentele opstelling zijn te vinden in tabel 1. De variatie in type isolatie, zware cellulair glas isolatie en lichte meerlaagse isolatie, en beglazing, dubbel HR++ glas en drielaags glas, is gehandhaafd. Deze aanpassingen leveren de volgende drie situaties op:

**Situatie 1:** PCM's zijn toegepast in betonvloeren, waarbij er metingen zijn verricht van 4 tot 10 juni 2011;

**Situatie 2:** PCM's zijn toegepast in betonvloeren en in gipsplaten tegen de binnenmuren, waarbij er metingen zijn verricht van 8 tot 14 juli 2011;

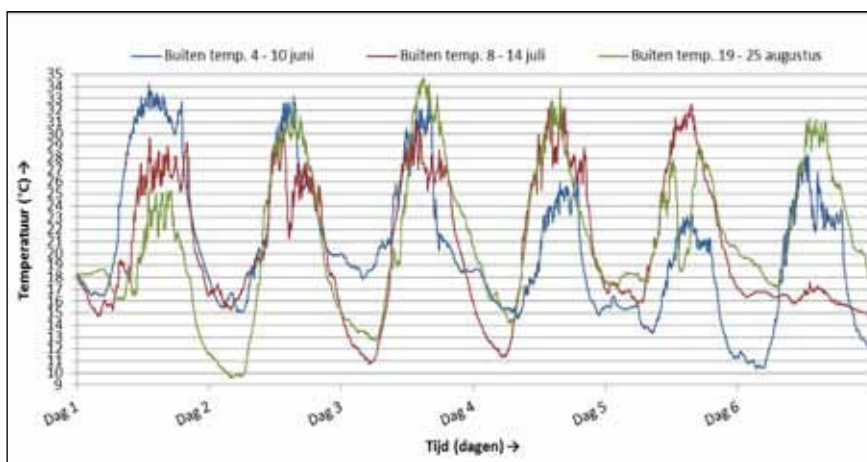
**Situatie 3:** PCM's zijn toegepast in betonvloeren en in gipsplaten tegen de binnenmuren en de buitenzijde van de boxen is zwart geverfd, waarbij er metingen zijn verricht van 19 tot 25 augustus 2011.

De gebruikte experimentele opstelling was in eerste situatie dus gelijk aan de situatie zoals beschreven in het vorige artikel [1], zodat de

Variabele	Symbol	Testbox 1	Testbox 2	Testbox 3	Testbox 4
Isolatie materiaal		Cellulair glas	Cellulair glas	Meerlaags	Meerlaags
Warmteweerstand isolatie <sup>1</sup>	R	$R_1 = 3,8$ (m <sup>2</sup> ·K)/W	$R_2 = 3,8$ (m <sup>2</sup> ·K)/W	$R_3 = 5,6$ (m <sup>2</sup> ·K)/W	$R_4 = 5,6$ (m <sup>2</sup> ·K)/W
Phase Changing Materials vloer		Aanwezig	Afwezig	Aanwezig	Afwezig
Massa PCM's in betonmengsel	$M_{betonPCM}$	5,12 kg	0 kg	5,12 kg	0 kg
Massa van de vloer	$M_{vloer}$	104,23 kg	104,73 kg	104,23 kg	104,73 kg
Massa percentage PCM's		4,9 %	0 %	4,9 %	0 %
Phase Changing Materials wand		Aanwezig	Afwezig	Aanwezig	Afwezig
Oppervlakte gipsplaten	$A_{gipsplac.}$	1,67 m <sup>2</sup>	1,67 m <sup>2</sup>	1,67 m <sup>2</sup>	1,67 m <sup>2</sup>
Latente warmtecapaciteit gips <sup>1</sup>	$C_{gipsplac.}$	551 kJ	0 kJ	551 kJ	0 kJ
Thermische weerstand glas		Hoog	Standaard	Hoog	Standaard
Lichttoetredingsfactor	LTA	71 %	80 %	71 %	80 %
Zontoetredingsfactor	ZTA	39 %	52 %	39 %	52 %
Thermische transmissie coëfficiënt	U	0,5 W/(m <sup>2</sup> ·K)	1,1 W/(m <sup>2</sup> ·K)	0,5 W/(m <sup>2</sup> ·K)	1,1 W/(m <sup>2</sup> ·K)

<sup>1</sup> Waarden zijn overgenomen vanuit productinformatie fabrikant

-Tabel 1- Bouwkundige opbouw van de testboxen in de experimentele opstelling



-Figuur 1- Buitentemperaturen tijdens de drie situaties

werking van sensoren en de apparatuur kon worden gecontroleerd en er wederom een referentiesituatie beschikbaar kwam. Door het toepassen van Masterboard is in de tweede situatie de latente warmtecapaciteit van de twee boxen met PCM's vergroot met bijna 100% van 551 kJ naar 1.114 kJ. De betreffende Masterboard is 15 mm dik. Ter referentie zijn in de twee boxen zonder PCM's uiteraard conventionele gipsplaten gebruikt met eveneens een dikte van 15 mm. In de derde situatie is daarbij de warmte absorptiecoëfficiënt vergroot van circa 0.25 naar 0.95 [5] door de buitenzijde van alle boxen zwart te schilderen.

## ALGEMENE OMGEVINGSCONDIETIES

In het vorige deel werden reeds drie stadia aangegeven waarin PCM's zich kunnen bevinden: volledig ontladen, gedeeltelijk geladen, volledig geladen. Om maximaal gebruik te maken van de PCM's zullen alle microcapsules gedurende een etmaal alle drie de stadia bij voorkeur moeten doorlopen. Aangezien het smelttraject van de gebruikte PCM's ligt tussen 22,1 en 25,2°C, is het wenselijk dat de binnentemperatuur van de opstelling zich tijdens de experimenten heeft bevonden in die

drie stadia, oftewel van ruim onder de 22,1°C tot ruim boven de 25,2°C. Tussen deze temperaturen ligt dan het moment van smelten of stollen. Op basis van de gegevens van het KNMI blijkt dat de temperatuurrange van 22,1 tot 25,2°C in de gemeten maanden juni, juli en augustus moeten kunnen worden bereikt [6]. Dit is ook daadwerkelijk het geval, zoals is te zien in figuur 1 waarin de buitentemperaturen tijdens de drie verschillende situaties is weergegeven.

De maanden tussen de verschillende situaties was nodig om de opstelling klaar te maken en de metingen voor te bereiden voor een nieuwe situatie. Vanwege de beschikbaarheid van meetdata van vrijwel alle sensoren en om de overzichtelijkheid te waarborgen, is ervoor gekozen om alleen data van de genoemde perioden in dit artikel te tonen en nader te analyseren.

## RESULTATEN

De resultaten worden besproken voor de drie verschillende situaties. Aangezien de experimentele opstelling bestaat uit vier boxen die zijn opgedeeld in twee paren op basis van het type isolatie, zullen de resultaten ook paarsgewijs worden behandeld. Hierbij zal

worden gekeken naar de binnentemperatuur van de boxen. Deze binnentemperatuur is het gemiddelde van acht thermokoppels (type T), die op verschillende plaatsen binnen in de box zijn geplaatst.

### Resultaten situatie 1

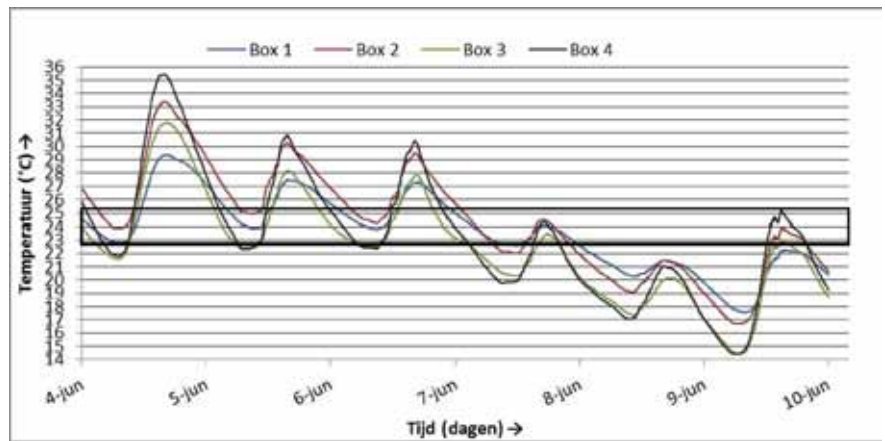
Van 4 tot 10 juni 2011 zijn er metingen verricht voor de eerste situatie 'PCM's toegepast in betonvloer'. De binnentemperaturen van de vier boxen tijdens de gemeten periode zijn weergegeven in figuur 2 (waarbij het kader het smelttraject weergeeft). In deze situatie vertonen zowel Box 2 als Box 4 een groter bereik van de piektemperaturen. Oftewel de boxen die niet uitgevoerd zijn met PCM's, hebben een minder constante binnentemperatuur, vergeleken met de boxen die wel zijn uitgevoerd met PCM's (box 1 en 3). De verschillen in maximale temperaturen halen op de eerste dag waarden van  $4,0 \pm 0,7^\circ\text{C}$  en  $3,7 \pm 0,7^\circ\text{C}$ , respectievelijk voor de boxen met zware en lichte isolatie. Op de tweede dag wordt voor de minimum piektemperatuur een verschil gehaald van  $1,1 \pm 0,7^\circ\text{C}$  voor de zwaar geïsoleerde boxen 1 en 3. Op beide dagen zijn de PCM's volledig geladen, omdat de temperatuur voortdurend de  $22,1 \pm 0,5^\circ\text{C}$  heeft overschreden.

Er is te zien dat de pieken van de temperatuur binnen in de boxen iets later optreden dan de pieken buiten. Dit is te verklaren door de weerstand van de thermische schil. Tussen de boxen onderling zijn nauwelijks verschuivingen van de pieken in de tijd te zien. Hierbij moet worden opgemerkt dat in het vorige deel [1] al geconcludeerd werd dat de thermische geleidingsweerstand van de lichte isolatie het moest afleggen tegen de zware isolatie.

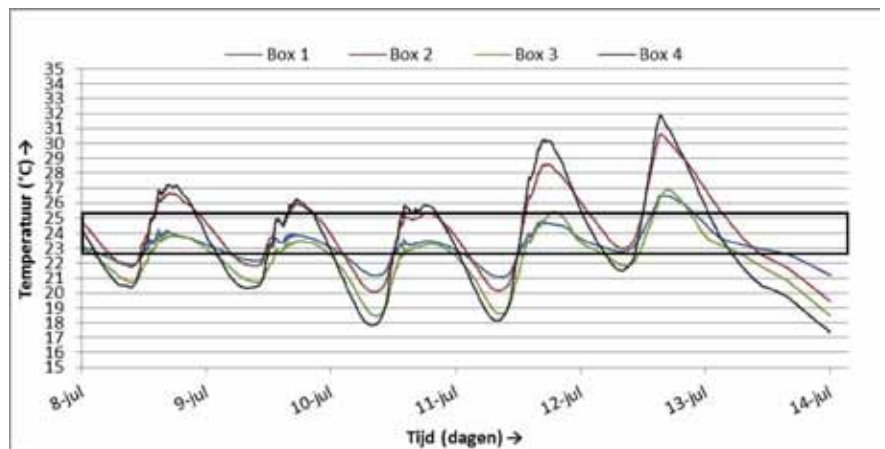
### Resultaten situatie 2

Van 8 tot 14 juli 2011 zijn er metingen verricht voor de tweede situatie 'PCM's toegepast in betonvloer en gipsplaten op de binnenmuren'. In deze situatie is de latente warmtecapaciteit met bijna 100% vergroot. De binnentemperaturen van de vier boxen tijdens de gemeten periode zijn weergegeven in figuur 3 (waarbij het kader het smelttraject weergeeft).

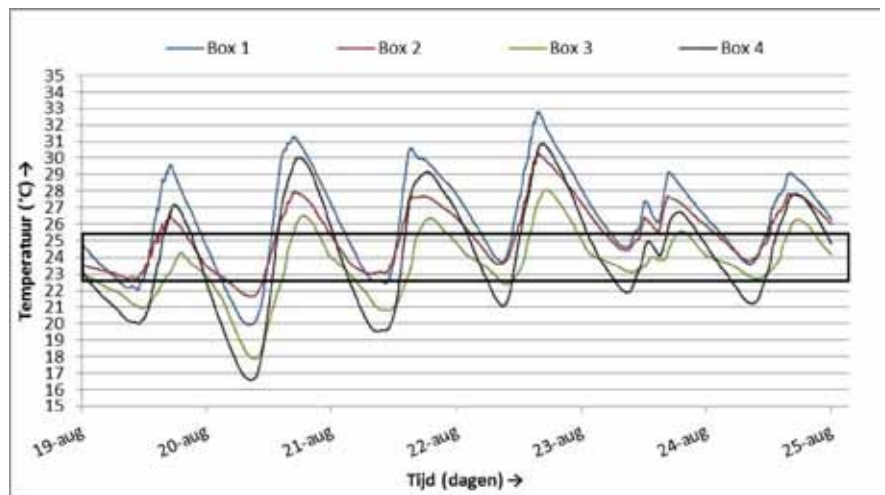
In deze situatie vertonen zowel box B als box D een groter bereik van de piektemperaturen. Dus ook hier hebben de boxen die niet uitgevoerd zijn met PCM's een minder constante binnentemperatuur, vergeleken met de boxen die wel zijn uitgevoerd met PCM's (box A en C). Op de vierde dag halen de verschillen in maximumtemperaturen waarden van  $4,0 \pm 0,7^\circ\text{C}$  en  $5,0 \pm 0,7^\circ\text{C}$  voor respectievelijk de box met zware dan wel lichte isolatie. Op de derde dag wordt voor de minimumtemperatuur een verschil gehaald van  $1,1 \pm 0,7^\circ\text{C}$  en  $0,7 \pm 0,7^\circ\text{C}$  voor respectievelijk de box met de zware



-Figuur 2- Binnentemperaturen van de vier boxen tijdens eerste periode



-Figuur 3- Binnentemperaturen van de vier boxen tijdens tweede periode



-Figuur 4- Binnentemperaturen van de vier boxen tijdens derde periode

en lichte isolatie. Wanneer deze resultaten worden vergeleken met de eerste situatie, is nauwelijks een verschil te zien in terugdringen van de piektemperaturen. In deze situatie is ook te zien dat de pieken van de temperatuur binnen in de boxen iets later optreden dan de pieken er buiten. Tevens zijn er nauwelijks verschillen qua weerbeeld tussen de eerste en tweede situatie, waardoor het wegbliven van

een versterkt effect door meer PCM's niet aan het weer kan worden toegeschreven. Hieruit zou dus geconcludeerd kunnen worden, dat een toename van de latente warmtecapaciteit niet automatisch leidt tot een verbetering (constantere) van de binnentemperatuur. Klaarblijkelijk zit er dus, conform model, een maximum aan het effect van PCM's, wanneer deze in grotere mate worden toegepast.

### Resultaten situatie 3

Van 19 tot 25 augustus 2011 zijn er metingen verricht voor de derde situatie: 'PCM's toegepast in betonvloer en gipsplaten op de binnenmuren en de buitenzijde zwarte geveerd'. In deze situatie is de warmte-absorptiecoëfficiënt vergroot van 0,25 naar 0,95 [3] door de buitenzijde van de boxen zwart te verven. De binnentemperaturen van de vier boxen tijdens de gemeten periode zijn weergegeven in figuur 4 (waarbij het kader het smelttraject weergeeft).

In deze situatie worden op de tweede dag verschillen in maximumtemperaturen gehaald van  $3,4 \pm 0,7^\circ\text{C}$  en  $3,9 \pm 0,7^\circ\text{C}$  respectievelijk voor de boxen met relatief zware en lichte isolatie. Tevens worden op de tweede dag voor de minimumtemperaturen verschillen gehaald van  $1,7 \pm 0,7^\circ\text{C}$  en  $1,0 \pm 0,7^\circ\text{C}$ , wederom voor respectievelijk de boxen met zware en lichte isolatie.

Als deze resultaten worden vergeleken met de vorige situatie is te zien dat de boxen met een vergrote warmte-absorptiecoëfficiënt kleinere verschillen tussen de piektemperaturen laat zien. Dit is te verklaren doordat een vergrote warmte-absorptiecoëfficiënt zorgt voor meer warmte in de boxen met een hogere temperatuurstijging als gevolg. Wanneer wordt gekeken naar de inkomende zonnestraling, dan is deze minder dan in de voorgaande twee perioden. Er kan dus worden verwacht dat wanneer deze gelijk was geweest aan de vorige perioden, de verschillen in piektemperaturen nog kleiner zouden zijn geweest. Echter, doordat in situatie 2 al is aangetoond dat er blijkbaar een overschot aan PCM's aanwezig is, zou dit effect verwaarloosbaar kunnen zijn.

### CONCLUSIES

Van PCM's wordt verwacht dat ze een constanter binnenklimaat kunnen bewerkstelligen en daarmee het gebruik van fossiele brandstoffen kunnen verminderen. De resultaten tonen aan dat dit zeker mogelijk is, maar dat de effectiviteit van de toepassing afhangt van een aantal zaken, zoals klimaat, bouwfysisch eigenschappen van een gebouw maar ook de hoeveelheid en locatie van PCM's.

De voornaamste conclusie is dat PCM's een positieve invloed hebben op het creëren van een constantere binnentemperatuur, omdat de maximumtemperaturen afgevlakt kunnen worden met circa  $4^\circ\text{C}$ . Tevens laat dit onderzoek zien dat er geen eenvoudig antwoord kan worden gegeven op de vraag hoe PCM's het meest efficiënt kunnen worden toegepast. Een uitbreiding van de latente warmtecapaciteit hoeft niet noodzakelijkerwijs te leiden tot een constantere binnentemperatuur. Een toename van bijna 100% van de latente warmtecapaciteit in de boxen laat namelijk geen extra

reductie zien van de piektemperaturen.

Uit het onderzoek blijkt ook dat de werking van de PCM's verschillend is bij andere thermische eigenschappen van de schil van een gebouw. Bij toepassing van PCM's moet dus goed worden nagedacht over de opbouw van de thermische schil qua soortelijke warmtecapaciteit en thermische weerstand. PCM's zullen dan ook niet willekeurig moeten worden toegepast, maar op basis van evenwichtige uitgangspunten en berekeningen tijdens het ontwerpen van het gebouw. Na realisatie zal voorlopig nog monitoring wenselijk blijven om te bekijken of de PCM's de ingeschatte prestaties werkelijk waar maken.

Kortom de PCM's moeten op een slimme manier worden toegepast, waarbij de ontwikkeling van een model uitkomsten kan bieden in het ontwerpproces van gebouwen. Een eerste model is ontwikkeld, waarin verschillende bouwkundige en omgevingsvariabelen werden meegenomen. De ontwikkeling van een model waarin ook een rol is weggelegd voor installaties, zal in de toekomst aanvullende interessante inzichten bieden in de mogelijkheden en onmogelijkheden van PCM in verschillende soorten gebouwen om het binnenklimaat qua temperatuur te verbeteren en fossiele brandstoffen te besparen. Uiteraard is het eveneens nodig om te bekijken in hoeverre PCM's meegenomen kunnen worden in het berekenen van de energieprestatie van gebouwen. Wanneer namelijk door toepassing van PCM's aan de bouwregelgeving op dit gebied kan worden voldaan, zal dit de acceptatie van PCM's in ontwerp- en bouwprocessen vergroten.

### DANKWOORD

Graag willen de auteurs hun dankbaarheid uiten richting BASF, Foamglas, Schüco, en Wissink Sprockers en Schilders voor het beschikbaar stellen van materialen voor de opstelling. AgentschapNL (voorheen Senternovem), prof.dr.ir. H.J.H. Brouwers, ir. Frank Müthing, ing. Axel Lok, Dr.Dipl.-Ing. Martin Hunger en Dr.Dipl.-Ing. Götz Hüsken worden bedankt voor hun kennis en bijdrage in de ontwikkeling van de oorspronkelijke opstelling.

### REFERENTIES

1. Entrop, A.G., Brouwers, H.J.H., Reinders, A.H.M.E., 2012. Phase Change Materials in betonvloeren – deel I: Verwerking en effecten. TVVL Magazine 7/8 2012
2. Ventana Systems, Inc. (2007). Vensim; Ventana Simulation Environment. User's Guide Version 5
3. Prins, J., 2012. Modelling the effects of Phase Change Materials on the energy use in buildings – Paper and Documentation,

Universiteit Twente

4. Knauf, 2006. Micronal® PCM SmartBoard™ 23/26; technical data, material, preparation, jointing, finishing.
5. Castenmiller, C.J.J., TNO Building and Construction, 2004. Surface temperature of wooden window frames under influence of solar radiation. HERON, 49, 339-348
6. KNMI (Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut), 2012. Weercondities per uur en per 24 uur van het weerstation Twente 2001–2010, <http://www.knmi.nl/klimatologie/daggegevens/selectie.cgi>