

Phase Change Materials in betonvloeren – deel I

Er is een experiment uitgevoerd met vier betonnen vloeren in een semi-adiabatische omgeving. Twee vloeren bevatten PCMs en, ter referentie, twee vloeren geen PCMs. De opstelling moest op schaal een woning voorstellen met een raam op het zuiden. De omgevingscondities en de temperatuurontwikkelingen in de vloeren en boxen werden gemonitord. Het experiment moest aantonen in hoeverre PCMs kunnen worden gebruikt voor het passief verwarmen van Nederlandse woningen.

Ir. A.G. (Bram) Entrop, Universitair Docent Duurzaam Bouwen, Universiteit Twente; prof. dr. A.H.M.E. (Angèle) Reinders, Universitair Docent Industrieel Ontwerpen, Universiteit Twente, en Hoogleraar Energie Efficient Ontwerpen, Technische Universiteit Delft

Phase Change Materials (PCMs) bieden de mogelijkheid om thermische energie op te slaan bij een specifieke temperatuur. Zoals de naam van deze materialen reeds doet vermoeden, is deze temperatuur gelijk aan de temperatuur waarop het materiaal smelt dan wel stolt, of verdampt dan wel condenseert. De laatstgenoemde faseovergang zal in dit artikel echter geen rol spelen. Voor specifieke doeleinden kunnen PCMs worden samengesteld met een speciaal ontworpen overgangstemperatuur. Een groot voordeel van de

zogenaamde latente warmtecapaciteit boven de soortelijke warmtecapaciteit is de relatief hoge waarde. Voor water is bijvoorbeeld de soortelijke warmtecapaciteit 4.2 kJ/(kg·°C), terwijl bij bevroering of smelten de latente warmtecapaciteit 334 kJ/kg is [1]. Er is al veel onderzoek gedaan naar de toepassing van PCMs in gebouwen, zowel vanuit bouwkundig als installatietechnisch oogpunt. Inmiddels zijn er al diverse PCM-producten op de markt die kunnen worden toegepast. Eén toepassing was echter nog onderbelicht,

namelijk de passieve toepassing van PCMs in betonnen vloeren. Deze toepassing is bedacht met het idee dat zelfs woningen in een gematigd klimaat als het Nederlandse, nog vrij veel zoninstraling kunnen ontvangen. In de periode 1971-2000 gemiddeld circa 1.000 kWh/(m²·jaar) [2]. Wanneer overdag deze zoninstraling een vloer met PCMs thermisch gezien kan opladen, dan zal bij een dalende omgevingstemperatuur 's avonds deze thermische energie weer vrij worden gegeven en zodoende de behoefte aan warmte via de radiatoren

Variabele	Symbol	Testbox 1	Testbox 2	Testbox 3	Testbox 4
Isolatiemateriaal Warmteweerstand isolatie Waarden gebaseerd op productinformatie van fabrikant	R	Cellulair glas Rc = 3.8 (m ² ·K)/W	Cellulair glas Rc = 3.8 (m ² ·K)/W	Meerlaags Rt = 5.6 (m ² ·K)/W	Meerlaags Rt = 5.6 (m ² ·K)/W
Phase Changing Materials Massa PCMs in betonmengsel Massa van de vloer Massa percentage PCMs	MPCM Mvloer	Aanwezig 5.12 kg 104.23 kg 4.9%	Afwezig 0 kg 104.73 kg 0%	Aanwezig 5.12 kg 104.23 kg 4.9%	Afwezig 0 kg 104.73 kg 0%
Thermische weerstand glas Lichttoetredingsfactor Zontoetredingsfactor Thermische transmissie- coëfficiënt	LTA ZTA U	Hoog 71% 39% 0.5 W/(m ² ·K)	Standaard 80% 52% 1.1 W/(m ² ·K)	Hoog 71% 39% 0.5 W/(m ² ·K)	Standaard 80% 52% 1.1 W/(m ² ·K)

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



-Figuur 1- De vier ontwikkelde testboxen op de zeecontainer op de campus van Universiteit Twente met op de achtergrond het Davis weerstation

reduceren. Er is voor een directe verwerking van PCMs in een betonmix gekozen om aan te sluiten bij de toenmalige lopende onderzoeklijnen van de vakgroep naar duurzame betonmengsels en met de verwachting dat zowel de nieuwbouwmakrt als de renovatiemarkt vrij gemakkelijk kan worden bediend. We voorzien namelijk dat afwerkvloeren de PCMs kunnen bevatten. Deze laag wordt immers beter door zoninstraling opgewarmd dan de onderliggende constructieve vloer.

In dit artikel wordt een experiment uiteengezet, waarbij vier betonnen vloeren in een semi-adiabatische omgeving, zijnde vier geïsoleerde boxen, waren gestort. Twee vloeren bevatten PCMs en, ter referentie, bevatten twee vloeren geen PCMs. De boxen moesten op schaal een woning voorstellen met een raam op het zuiden. De omgevingscondities en de temperatuurontwikkelingen in de vloeren en boxen werden gemonitord. Eerst zal de opstelling worden besproken. In de sectie daarna zullen de algemene condities worden besproken die van toepassing waren tijdens het experiment, voordat een 'cross case analyse' van de temperaturen in de vloeren wordt uitgevoerd. Om het artikel met discussies en conclusies af te sluiten.

■ EXPERIMENTELE OPSTELLING

Net als in diverse andere onderzoeken naar de effecten van PCMs [3, 4, 5, 6] werd ook in dit onderzoek gebruik gemaakt van geschaalde afgesloten omgevingen om de effecten van PCMs te bestuderen. Tabel 1 geeft een paar eigenschappen van de gekozen materialen weer.

■ MATERIALEN EN DIMENSIES BOXEN

De gebruikte PCM is een, in capsules verpakt, mengsel van paraffines, dat verkrijgbaar is onder de naam BASF Micronal DS 5008 X. De capsules zijn ongeveer 0,5 tot 20 μm in doorsnede [7]. De producent geeft aan dat de latente warmtecapaciteit 110 kJ/kg is bij een temperatuur van 23°C. Metingen met behulp van een Perkin Elmer DSC7 tonen echter aan dat deze PCMs eerder een smelttraject hebben dan een smeltpunt en dat de latente warmtecapaciteit iets lager lijkt te zijn [7]. De stollings- en smelttemperatuur liggen op 22,1 en 25,2°C.

Het betonmengsel op basis van Portland cement is zelf-verdichtend. In de referentie mix, waarin geen PCMs zitten, was ter vervanging marmer in poedervorm toegepast. Dit poeder heeft namelijk een soortgelijke omvang

en vorm als de PCM-capsules. Hierdoor kenden beide betonmengsels een soortgelijke verwerkbaarheid (zoals in meer detail beschreven is in [7]).

Elke box had in de basis een kunststof frame met binnenafmetingen van 1.130 mm x 725 mm x 690 mm (l x b x h). In deze vorm was een 50 mm dikke betonvloer aangebracht van 104,2 tot 104,7 kg. De boxen waren geïsoleerd. Twee boxen waren geïsoleerd met een relatief zwaar en hard isolatiemateriaal, namelijk cellulair glas met een dikte van 160 mm en een door de fabrikant vastgestelde warmteweerstand van 3,8 ($\text{m}^2 \text{K}$)/W. Twee andere boxen waren geïsoleerd met juist een relatief licht en flexibel isolatiemateriaal, namelijk een 14-laags isolatiemateriaal van in totaal 20 mm dikte met een door de fabrikant vastgestelde warmteweerstand van 5,6 ($\text{m}^2 \cdot \text{K}$)/W. Voor en na deze meerlaagse isolatie was, conform de voorschriften van de fabrikant, een luchtsponw aangebracht van 20 mm. De buitenzijde van alle boxen was bekleed met 15 mm watervast verlijmd multiplex, die voorzien was van witte verf om de reflectie relatief hoog te laten zijn. Om de PCMs op te laden kan zoninstraling de vloer bereiken via een raam op de zuidzijde in de box. Deze ramen zijn 590 mm x 550 mm (l x h). Twee boxen waren voorzien van dubbelglas

en twee boxen van drielaags glas.

Data-acquisitie

Type T thermokoppels op 14 verschillende locaties hebben in en op de boxen de temperaturen gemeten. Elke seconde werd de temperatuur gemeten en elke vijf minuten werd de gemiddelde waarde van deze 300 metingen per thermokoppel opgeslagen. De data-acquisitie verliep via acht USB TC-08 dataloggers van Pico, die waren aangesloten op twee personal computers waarop met behulp van een Labview-programma de data werd opgeslagen. Tevens werd hier de data opgeslagen van zes zonninstralingssensoren Si-01 TC-T van Mencke & Tegtmeyer, die horizontaal op en in twee boxen zijn geplaatst. Dit was gedaan om het verschil in zonninstralingsintensiteit voor en achter de beglazing te meten. Een Vantage Davis Pro 2 weerstation van Davis Instruments verzamelde gegevens over de buitentemperatuur, zonninstraling, luchtvochtigheid, neerslag en windsnelheid op locatie.

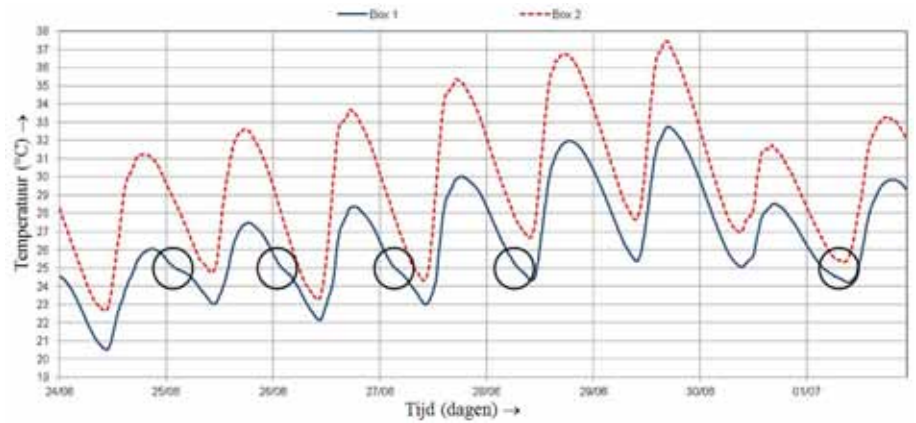
Locatie

De vier boxen waren geplaatst op een zeecontainer (zie figuur 1) waar ze geen last hadden van schaduwwerking door gebouwen, bomen, passerende personen, of andere obstakels. In de zeecontainer stonden de acquisitieapparatuur en de computers opgesteld. De opstelling stond op de campus van de Universiteit Twente aan de westkant van Enschede. De gemiddelde dagtemperatuur en zonninstraling over de afgelopen tien jaar bedroegen in Twente volgens het KNMI respectievelijk 0,1 tot 19,6°C/dag en 0,4 tot 6,3 kWh/(m²·dag) [8].

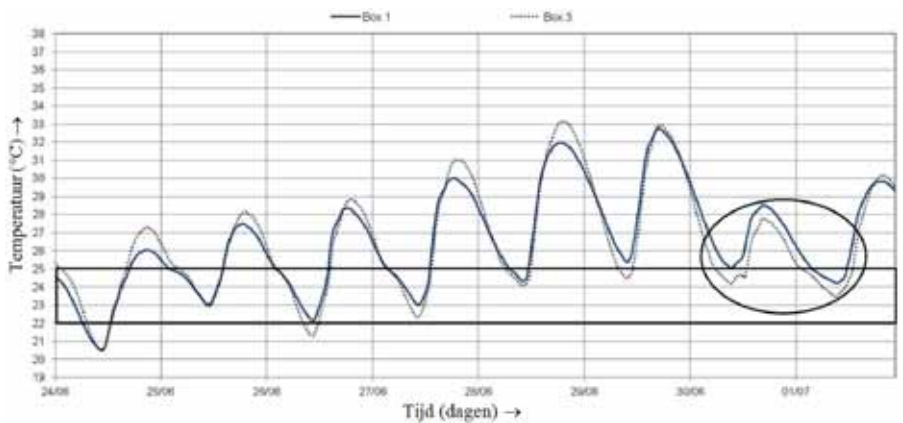
ALGEMENE CONDITIES

Het monitoren van de boxen en de omgeving leidde uiteraard tot een aanzienlijke hoeveelheid data. Om de meest interessante data te filteren, is het van belang te beseffen dat er drie situaties kunnen worden onderscheiden met betrekking tot de aggregatietoestand van de gebruikte PCMs:

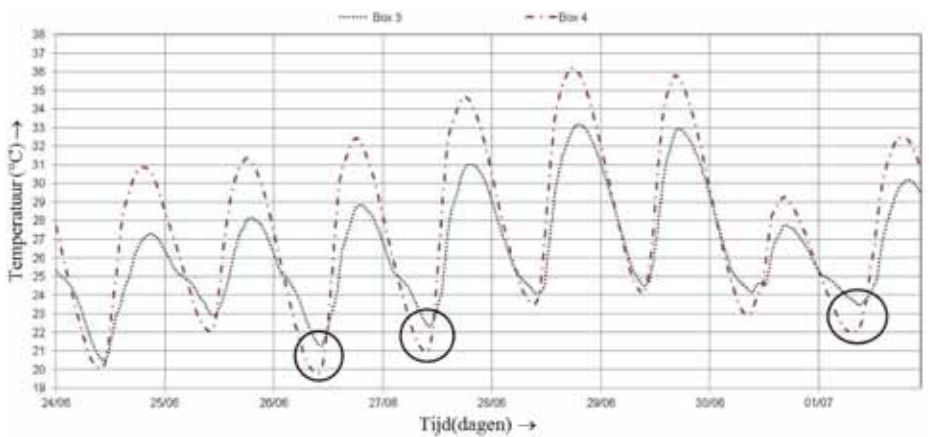
1. de PCM in de vloeren is niet thermisch geladen vanwege lage zonninstraling en omgevingstemperaturen lager dan 22,1°C. De PCMs zijn dus continu gestold;
2. de meeste capsules of zelfs alle PCM in de vloeren is vloeibaar oftewel thermisch geladen, vanwege een aanzienlijke zonninstraling en een omgevingstemperatuur van boven de 25,2°C gedurende de dag. Gedurende de avond en nacht daalt de omgevingstemperatuur onder de 22,1°C, waardoor de meeste capsules of alle PCM weer stolt;
3. de PCM in de vloeren is en blijft thermisch geladen vanwege hoge zonninstraling en



-Figuur 2- Temperatuurontwikkeling in de vloeren van Box 1 en 2 in de laatste week van juni 2010. De cirkels geven het stollingstraject van de PCMs weer.



-Figuur 3- Temperatuurontwikkeling in de vloeren van Box 1 en 3 in de laatste week van juni 2010. Het ovaal geeft weer waar de grote soortelijke warmtecapaciteit van Box 1 zorgt voor hogere vloertemperaturen dan in Box 3.



-Figuur 4- Temperatuurontwikkeling in de vloeren van Box 3 en 4 in de laatste week van juni 2010. De cirkels geven de momenten van relatief hoge minimale temperaturen weer.

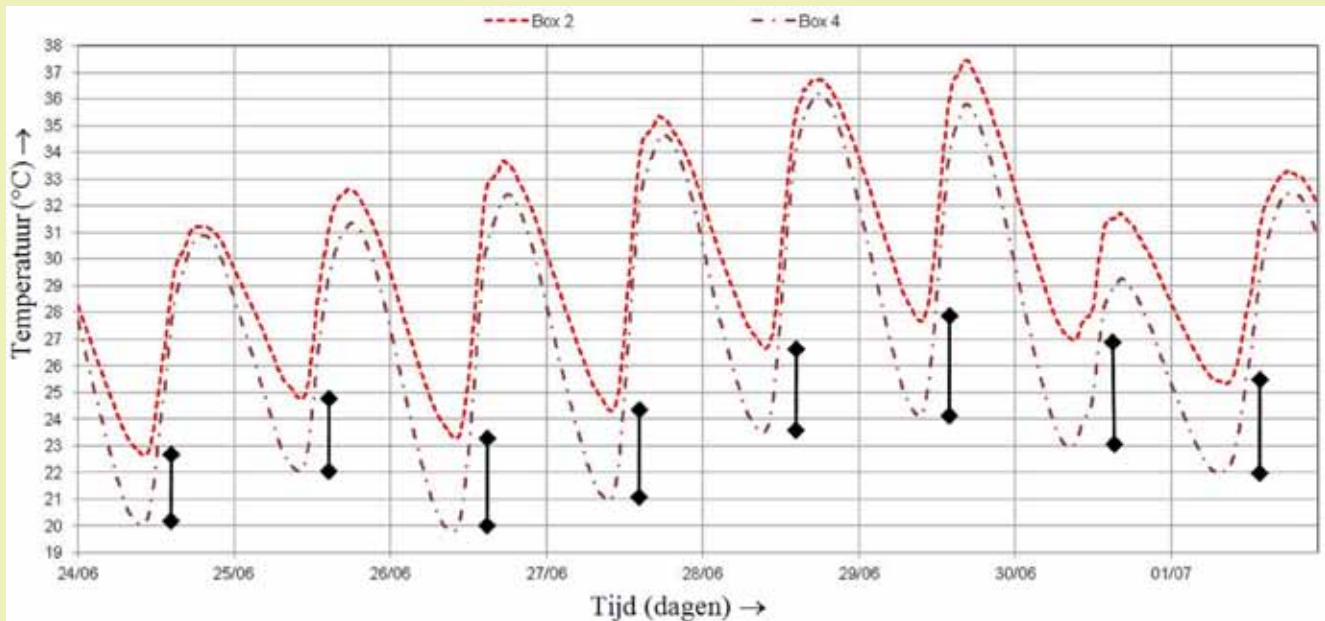
omgevingstemperaturen hoger dan 22,1°C. De PCMs zijn dus continu vloeibaar.

Op basis van de gegevens van het KNMI bleek dat de temperatuurrange van 22,1 tot 25,2°C in de maanden juni, juli en augustus moet kunnen worden bereikt [8]. Uit metingen met behulp van het weerstation op locatie bleek dat in de eerste en laatste week van juni alle drie de genoemde situaties konden

voorkomen. Vanwege de beschikbaarheid van meetdata van vrijwel alle sensoren en om de overzichtelijkheid te waarborgen, is ervoor gekozen om de data van de laatste week in dit artikel te tonen en nader te analyseren in een vergelijking per twee boxen.

RESULTATEN CROSS CASE ANALYSE

Er zijn vier combinaties gemaakt om de



-Figuur 5- Temperatuurontwikkeling in de vloeren van Box 2 en 4 in de laatste week van juni 2010. De lijnen geven het verschil in minimale temperaturen weer.

effecten van bepaalde karakteristieken van de boxen te vergelijken:

1. Box 1 en 2 worden met elkaar vergeleken om te bekijken welke invloed de beglazing en de PCMs hebben, wanneer zwaar cellulair glas als isolatie wordt gebruikt;
2. Box 1 en 3 worden met elkaar vergeleken om te reflecteren op de effecten van lichte dan wel zware isolatie, wanneer een geavanceerde beglazing en PCMs worden gebruikt;
3. Box 3 en 4 worden met elkaar vergeleken om te bekijken welke invloed de beglazing en de PCMs hebben, wanneer lichtgewicht meerlaagse isolatie wordt gebruikt;
4. Box 2 en 4 worden met elkaar vergeleken om te reflecteren op de effecten van lichte dan wel zware isolatie, wanneer een standaard beglazing en geen PCMs worden gebruikt.

Vergelijking box 1 en 2

Tijdens de meetperiode van 24 juni tot 1 juli was de temperatuur van de vloer in Box 2 hoger dan in Box 1. Volgens de specificaties van de producent is van Box 1 de ZTA 13% kleiner dan van Box 2. De gebruikte referentiecellen lijken dit verschil te bekrachtigen, want een gemiddelde zoninstraling van $17,1 \pm 0,9$ W/m² wordt gemeten voor de beglazing in Box 1, terwijl voor de standaardbeglazing in Box 2 een waarde van $28,1 \pm 1,4$ W/m² wordt gemeten. De toepassing van de instralings-sensoren onder een andere hoek dan 90° bij lagere waarden dan 50 W/m² laat zich echter kenmerken door een lagere betrouwbaarheid. Het temperatuurverschil tussen beide boxen

bedroeg in ieder geval $2,3 \pm 0,7$ °C.

In beide boxen zorgde de dikke en zware isolatielaag voor een relatief grote thermische massa, zodat voorkomen wordt dat de temperatuur van de vloeren in de boxen snel stijgt of daalt.

Het verschil tussen de dagelijkse minimum- en maximumtemperaturen van Box 1 was met een waarde van $3,7 \pm 0,5$ °C significant lager dan de waarde voor Box 2. Deze was namelijk $6,2 \pm 0,5$ °C. De afwijkende beglazing kan uiteraard deels dit verschil verklaren, maar het glas was maar 8% van het inwendige transmissieoppervlak.

De PCMs boden een latente warmtecapaciteit van 563 KJ, wat (gezien de soortelijke warmtecapaciteit van beton) kon resulteren in een temperatuurverschil tussen de maximale temperaturen dan wel de minimale temperaturen van de vloeren in Box 1 en 2 van circa 1,7°C.

De relatief stabiele temperaturen in Box 1 ten opzichte van Box 2 kunnen daarom voornamelijk worden toegeschreven aan de toepassing van PCMs en niet aan de betere beglazing.

Vergelijking box 1 en 3

Boxen 1 en 3 hebben beide PCM en een triplebeglazing. Het verschil tussen deze twee boxen zit in de isolatie. In de meetperiode vielen de temperaturen bijna samen. Box 1 had over de meetperiode gemiddeld maar een iets hogere temperatuur dan Box 3. Gezien de mogelijke onnauwkeurigheid van de thermokoppels kan dat temperatuurverschil niet als significant worden bestempeld.

Data van verschillende andere thermokoppels maken het opwarmingsproces van de

box gedurende een dag goed te volgen. Het bleek dat met name in Box 3 de PCMs het in de vroege ochtend mogelijk maken de binnentemperatuur en de vloertemperatuur tijdelijk niet te laten zakken, maar later op de dag komt de temperatuur van de vloer in Box 3 wel lager te liggen dan de vloertemperatuur van Box 1. Uiteraard deden de PCMs in Box 1 ook hun werk, maar de relatief zware thermische massa zorgt ervoor dat de helling van de kromme hier overwegend flauwer is. Op 30 juni en 1 juli was het effect van de PCMs het duidelijkst terug te zien in de data.

Vergelijking box 3 en 4

In deze vergelijking beschikken beide boxen over het lichtgewicht isolatiemateriaal. Box 3 met de PCMs en de goede beglazing had duidelijke lagere maximum- en hogere minimumtemperaturen (zie figuur 3).

Data van de thermokoppel midden in de betonnen vloer van Box 3 sprak van een dagelijks temperatuurverschil tussen minimum- en maximumtemperatuur van $5,5 \pm 0,7$ °C voor Box 3 en van $8,7 \pm 0,7$ °C voor Box 4. Dit verschil kwam erg dicht in de buurt van de berekende en reeds genoemde maximale reductie van 1,7°C van de maximumtemperaturen en de maximale toename van de minimumtemperaturen van 1,7°C.

De mogelijkheid om PCMs op een passieve wijze voor verwarming te gebruiken, komt met name tot uitdrukking op 26 juni, 27 juni en 1 juli. Op deze dagen zijn de minimumtemperaturen, aldus de thermokoppels in de vloer aan de raamzijde, $1,4$ tot $1,5 \pm 0,7$ °C hoger in Box 3 dan in Box 4.

Vergelijking box 2 en 4

In de voorgaande vergelijkingen waren er met name verschillen in de maximumtemperaturen waar te nemen. Wanneer we Box 2 met Box 4 vergelijken, waarbij alleen isolatie het verschil maakt, zien we met name verschillen in de minimale temperaturen. Gemiddeld verschilde de minimale temperatuur $3,5 \pm 0,7^\circ\text{C}$ per dag, wat veel meer is dan de verschillen tussen de maximumtemperaturen van $1,0 \pm 0,7^\circ\text{C}$ per dag. Gedurende de nacht waren de thermische verliezen van Box 4 veel groter dan de verliezen van Box 2. De reflecterende lagen in het meergelaagde lichte isolatiemateriaal leken overdag wel de nodige weerstand te bieden aan de inkomende thermische straling, zo bleek uit de zoninstralingsdata in combinatie met de data van de thermokoppels op de binnenzijde van de box. De thermische geleidingsweerstand van de lichte isolatie moest het echter wel afleggen tegen de zware isolatie.

DISCUSSIES, CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

De experimenten met PCMs in betonnen vloeren moesten aantonen in hoeverre PCMs kunnen worden gebruikt voor het passief verwarmen van Nederlandse woningen. De data uit deze experimenten laat zien dat de toepassing van PCMs in combinatie met een geavanceerd (maar relatief klein) beglazingsstelsel kan leiden tot $11 \pm 2\%$ (in geval van Box 3 en 4) of $16 \pm 2\%$ (in geval van Box 1 en 2) lagere maximumtemperaturen en $7 \pm 3\%$ (in geval van Box 3 en 4) hogere minimumtemperaturen in vergelijking tot vloeren zonder PCMs in een gesloten omgeving met een standaard beglazing (met wederom een relatief klein oppervlak).

Deze resultaten zijn uiteraard bemoedigend, maar de onderzoekers zijn zich er van bewust dat de oppervlakte-inhoud ratio van de gebruikte boxen niet in een zelfde verhouding zijn, als bij een werkelijke woning het geval zal zijn. Een hedendaagse Nederlandse huiskamer is al snel 2.600 mm hoog in plaats van 690 mm. Daarnaast zullen de binnenmuren een veel grotere soortelijke warmte hebben dan de kunststof 'binnenmuren' binnen de thermische schil van de ontwikkelde boxen. Het effect van vijf massaprocent PCMs in een vloer van een echte woning zal vermoedelijk te gering zijn om aanzienlijke hoeveelheden fossiele brandstoffen te kunnen besparen. Het lijkt echter niet verstandig om het pakket van PCM dragend beton te vergroten, aangezien in dat geval de PCMs in de onderste laag beton niet thermisch geladen zullen worden door het zonlicht overdag, of 's nachts volledig ontladen kunnen worden.

De verhouding tussen latente warmtecapa-

citeit en soortelijke warmtecapaciteit speelt eveneens een rol wanneer men de systeemgrens uitbreidt tot en met het isolatiepakket. PCMs hebben in ieder geval qua comfort voor een bewoner een grotere meerwaarde binnen een bepaalde temperatuurrange bij relatief lichte isolatie dan bij toepassing van relatief zware isolatie. Dit wil overigens niet zeggen dat PCMs niet interessant zijn voor sterk geïsoleerde gebouwen met tevens een zware soortelijk warmtecapaciteit.

De laatste discussie betreft uiteraard de temperatuurrange, waarbinnen de gebruikte PCMs hun latente warmtecapaciteit aanbieden. Ondanks dat de analyse van Box 3 en 4 de mogelijkheden van PCMs als passieve verwarmingsvorm aantoont, zijn die hoge minimumtemperaturen voor een gemiddeld Nederlands gezin niet aantrekkelijk. De bij aanvang van het experiment beschikbare PCMs hadden, volgens productspecificaties, een faseverandering moeten ondergaan rond de 23°C . Uit aanvullende metingen bleek dat een temperatuurrange van $22,1$ en $25,2^\circ\text{C}$ een betere specificatie is. Op maar circa vijftig dagen in het jaar wordt in Nederland een temperatuur van 22°C voor minimaal één uur overschreden, tenminste wanneer we ons baseren op de gemiddelde waarden over de afgelopen dertig jaar. Wanneer men een faseverandering op $20,5^\circ\text{C}$ kan laten plaatsvinden, dan wel in een bijbehorende range van 19 tot 22°C , biedt dit veel meer mogelijkheden om werkelijk een aanvullend vorm van verwarming te bieden. Het aantal dagen waarop het een uur of meer minimaal 19°C is, is namelijk een factor 5.6 hoger. De rol van PCMs als passieve koeltechniek neemt dan wel af, maar in een land met een aanzienlijk stookseizoen bieden PCMs dan toch kansen als passieve verwarmingstechniek.

De combinatie met installaties kan worden gemaakt door actief in een zonnecollector de zoninstraling in te vangen en deze thermische energie direct overdag onder de afwerkvloer met PCMs via vloerverwarmingsnet af te geven. Dit zorgt ervoor dat de zoninstraling via het raam tot de vloer in de woning niet hoeft te worden vergroot bij een grotere massa aan PCMs. Oververhitting van de huiskamer kan dan waarschijnlijk gemakkelijker worden voorkomen door de vloer af te sluiten van de zonnecollector.

DANKWOORD

Graag willen de auteurs hun dankbaarheid uiten richting BASF, Foamglas, Schüco, en Wissink Spuiters en Schilders voor het beschikbaar stellen van materialen voor de opstelling. AgentschapNL (voorheen Senternovem) wordt bedankt voor haar kennis en financiële bijdrage

(EOS LT02003). Verder zijn de auteurs tevens dankbaarheid verschuldigd aan prof.dr.ir. H.J.H. Brouwers, ir. Frank Müthing, ing. Axel Lok, dr.pipl.-ing. Martin Hunger en dr.dipl.-ing. Götz Hüsken voor hun bijdrage in het uitdragen, de verslaglegging en het ontwikkelen van de opstelling.

REFERENTIES

1. Verkerk, G., Broens, J.B., Kranendonk, W., Puij, F.J. van der, Sikkema, J.L., Stam, C.W., 1992. Binas, ISBN 90-01-89372-4 Wolters Noordhoff, Groningen
2. KNMI, 2002. Klimaatatlas van Nederland; de normaalperiode 1971-2000, ISBN 90-389-1191-2 Elmar, Rijswijk
3. Kissock, J.K., Hannig, J.M., Whitney, T.I., Drake, M.L., 1998. Early results from testing phase change wallboard. First Workshop for IEA Annex 10 April 1998, Adana, Turkey
4. Cabeza, L.F., Castellón, C., Nogués, M., Medrano, M., Leppers, R., Zubillaga, O., 2007. Use of microencapsulated PCM in concrete walls for energy savings. *Energy and Buildings* 39, 113-119
5. Pasupathy, A., Velraj, R., Seeniraj, R.V., 2008a. Phase change material-based building architecture for thermal management in residential and commercial establishments. *Renewable and Sustainable Energy Review* 12, 39-64
6. Voelker, C., Kornadt, O., Ostry, M., 2008. Temperature reduction due to the application of phase change materials. *Energy and Buildings* 40, 937-944
7. Hunger, M., Entrop, A.G., Mandilaras, I., Brouwers, H.J.H., Founti, M., 2009. The behavior of self-compacting concrete containing micro-encapsulated Phase Change Materials. *Cement and Concrete Composites* 31, 731-743
8. KNMI, 2010. Weercondities per uur en per 24 uur van het weerstation Twenthe 2001-2010, <http://www.knmi.nl>