

PCM, het nieuwe bouwen, deel 2

Europa wil in 2020 energieneutraal bouwen! Maar hoe gaan we dat doen? Blijven we vasthouden aan traditionele bouw- en installatietechnieken, voornamelijk gebaseerd op stationaire normen en centennium oude warmtepompen, of slaan we een revolutionaire nieuwe weg in? Dit is het eerste artikel uit een serie van drie over PCM, het nieuwe bouwen.

Ir. H. (Harry) Schmitz, OC Autarkis bv

Deze serie artikelen gaat in op de volgende drie fundamentele vragen over het nieuwe bouwen met PCM:

1. Blijven we leefzones regelen op een constante stationaire setpoint binnentemperatuur?
2. Gaan we verder met het beter isoleren van de gebouwschil zonder aandacht voor de warmtecapaciteit?
3. Blijven we water als belangrijkste energiedrager beschouwen?

Eenvoudige dynamische berekeningen, gebaseerd op [zie lit.1, deel 1], verduidelijken niet alleen kwalitatief maar ook kwantitatief het nieuwe bouwen. Het eerste artikel behandelde dynamische behaaglijkheid en warmtecapaciteit; dit tweede artikel sinusresponsies, energiedragers en autarkische leefzones en het derde artikel het nieuwe ontwerpen, dimensioneren en bouwen.

In het eerste artikel is vastgesteld dat een dynamische regeling van de binnentemperatuur, in lijn met het dagelijkse bioritme van de mens en met seizoensgebonden dag-gemiddelde adaptieve binnentemperaturen, comfortabeler is dan klassieke regelingen met constant setpoints. Verder is geconstateerd dat thermisch zware gebouwen comfortabeler en energiezuiniger zijn dan thermisch lichte gebouwen.

SINUSRESPONSIES

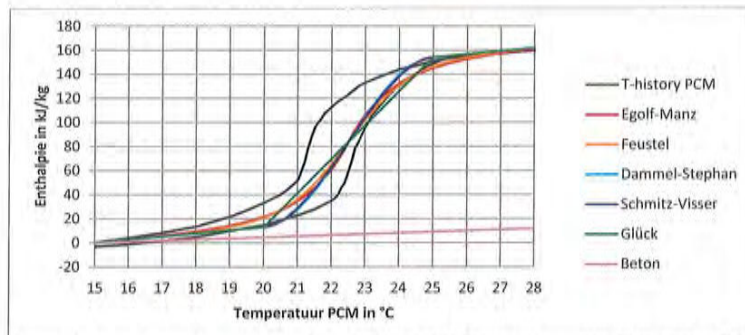
Naast bouwmaterialen zoals beton is ook PCM voorhanden als thermische massa. PCM is de afkorting van het Engelse 'Phase Change Material', vertaald als 'fase overgangsmateriaal' [1]. Indien de omgevingstemperatuur hoger is dan de smelttemperatuur treedt een warmtestroom op van de omgeving naar het PCM. Het PCM warmt op en de omgeving

koelt af. Het PCM smelt en gaat over van de vaste naar de vloeibare aggregatie toestand. Indien de omgevingstemperatuur lager is dan de smelttemperatuur treedt een warmtestroom op van het PCM naar de omgeving. De omgeving warmt op en het PCM koelt af. Het PCM stolt en gaat over van de vloeibare naar de vaste aggregatietoestand.

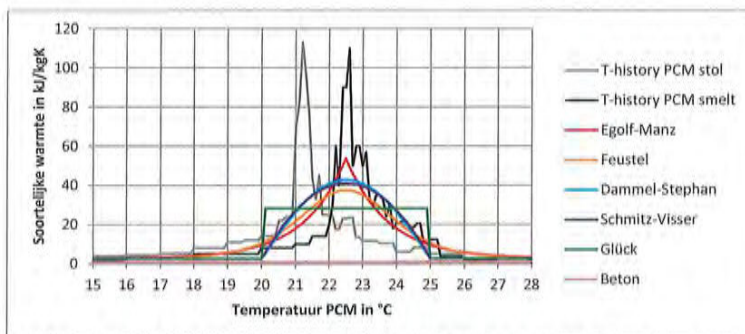
In het thermisch ideale geval vindt de fase-overgang plaats bij een constante smelttemperatuur. Het betreft dan latente, niet voelbare, warmte accumulatie. Echter alle toepasbare PCM's in de bouw gedragen zich thermisch niet ideaal. Dat wil zeggen in plaats van een constante smelttemperatuur bezitten alle PCM's temperatuurtrajecten voor smelten en stollen van 3 tot 5 [K]. Figuur 1 geeft het thermisch niet ideale smelt- en stolgedrag van een anorganisch zouthydraat weer. De verticale as van de bovenste grafiek van figuur 1

representeert de enthalpie in [kJ/kg] of gemakkelijker in [Wh/kg] als functie van de smelttemperatuur in [°C] op de horizontale as. De enthalpie is een maat voor de warmte inhoud van een (bouw-)materiaal. De verticale as van de middelste grafiek in figuur 5 representeert de warmtecapaciteit in [kJ/kg.K] of [Wh/kg.K] ook weer als functie van de smelttemperatuur. De warmtecapaciteit wordt gedefinieerd als de eerste afgeleide van de enthalpie naar de PCM temperatuur ($c_p = dh_p/d\theta_p$) bij een constante druk. De warmtecapaciteit is de richtingscoëfficiënt van de raaklijn aan de enthalpiecurve. Ondanks het feit dat er een fase-overgang van vast naar vloeibaar optreedt blijkt uit de bovenste twee grafieken dat, ongeacht de wijze van meten of berekenen het PCM zich, binnen het stol- en smelttraject niet gedraagt als een latente, dus niet voelbare, thermische massa maar als een voelbare warmtecapaciteit net zoals alle andere bouwmaterialen. In het ideale geval met een constante smelttemperatuur zou de warmtecapaciteit oneindig groot zijn geweest en een 'verticale raaklijn' aan de enthalpiecurve vormen. De bovenste twee grafieken van figuur 1 geven stol- en smeltenthalpieën weer volgens een vijftal wiskundige benaderingsmodellen en volgens een T-history gemeten waarde. Ter vergelijking is ook de enthalpie en de warmtecapaciteit van beton weergegeven.

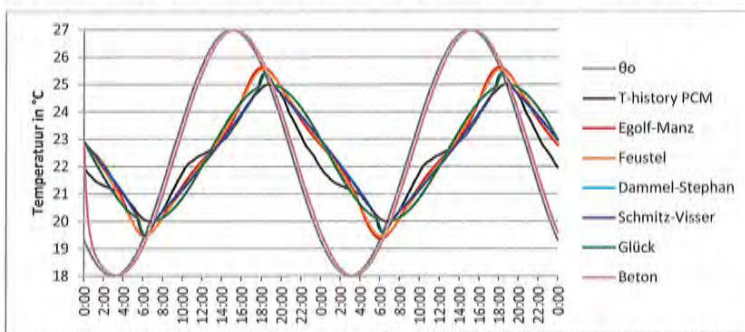
Overeenkomstig het eerste artikel leidt een dagelijks sinusvormig verloop van de binnentemperatuur, in lijn met het bioritme van



Deze grafiek geeft de enthalpiecurves ten gevolge van de PCM temperatuur weer. Bij het model van Feustel is uitgegaan van $\beta = 0,3414$.



Deze grafiek geeft de bijbehorende soortelijke warmte ten gevolge van de PCM temperatuur weer.



Deze grafiek geeft de PCM temperatuur weer van alle modellen gedurende twee cycli ten gevolge van de verstoring van de omgeving.

-Figuur 1- Enthalpie, warmtecapaciteit en sinusresponsies van een anorganisch PCM zouthydraat berekend middels een vijftal wiskundige modellen en gemeten T-history waarden. Het PCM wordt vergeleken met beton.

Omschrijving	Beton		Anorganisch PCM.		
Afscherming	Ja*)	Nee	Nee	Nee	Nee
Warmte overdracht	VC+S **)	VC+S**)	VC+S**)	VC+S**)	GDC ***)
Paneeldikte	0,170	0,050	0,020	0,005	0,005
Specifieke massa	408	120	31	7,8	7,8
Specifieke warmteaccumulatie (kader 1)	16,3	39,7	56,6	54,3	72,5 ****)
					$\left[\frac{\text{mJ}}{\text{m}^2} \right]$

In een Alfa gebouw de maximale koude accumulatie tijdens een warme zomerse ontwerpperiode alsook in een Alfa en Beta gebouw de maximale warmte accumulatie tijdens een koude winterse ontwerpperiode.

Thermische behaaglijkheid klimaatklassen

A	$\theta_s = 2[K]$	33	79	113	109	145
B	$\theta_s = 3[K]$	49	119	170	163	218
						$\left[\frac{\text{Wh}}{\text{m}^2} \right]$

Beta gebouw koelenergie warme zomerse ontwerpperiode

Thermische behaaglijkheid klimaatklassen

A	$\theta_s = 1[K]$	16	40	57	54	73
B	$\theta_s = 2[K]$	33	79	113	109	145
						$\left[\frac{\text{Wh}}{\text{m}^2} \right]$

*) Afscherming van de thermische massa door een extra weerstand bijvoorbeeld een gesloten systeemplafond of vloerbedekking.

**) Dit is voornamelijk vrije convectie met straling.

***) Dit is gedwongen convectie in een inductie of ventilator convector.

****) Huidige generatie PCM inductie en ventilator convectoren.

-Tabel 1- Benutbare warmtecapaciteiten voor een periode tijd van 24 uur van beton en PCM

de mens, tot het meest behaaglijke binnenklimaat. De onderste grafiek van figuur 1 geeft dan ook een zevental sinusresponsies weer. Een zestal van een anorganisch zouthydraat en ook eentje van beton. De PCM responsies

zijn berekend middels een vijftal wiskundige benaderingsmodellen [2] en de zesde responsie is gebaseerd op meetwaarden. De maximale enthalpie van een anorganisch zouthydraat bedraagt circa $h_o = 150 [kJ/kg] =$

$41,5 [Wh/kg.K]$. Met een temperatuurtraject voor smelten en stollen van circa $\Delta\theta_o = 5 [K]$ bedraagt de gemiddelde warmtecapaciteit dan $co = \Delta h_o / \Delta\theta_o = 41,5/5 = 8,30 [Wh/kg.K]$ met ter vergelijking van beton $0,24 [Wh/kg.K]$. In [3 en 4] zijn berekende en gemeten sinusresponsies onderling vergeleken. De berekende responsies correleren goed met de gemeten responsies en zijn acceptabel te noemen voor bouwkundige toepassingen.

In ruimten kunnen PCM's op twee manieren toepassing vinden, namelijk als PCM klimaatvloeren, wanden of plafonds en als inductie- of ventilatorconvectoren. In het eerste geval vindt de warmteoverdracht hoofdzakelijk plaats door vrije convectie en straling en in het tweede geval door gedwongen convectie. Belangrijk om te controleren is dat alle sinusresponsies op elkaar lijken, ongeacht de meet- of berekeningsvorm van het pcm.

De warmtecapaciteiten van bouwmaterialen en PCM's zijn alleen maar te benutten in leefzones met een behaaglijke dynamische binnentemperatuur regeling met als parameter een maximaal toelaatbare dagelijkse binnentemperatuur amplitudo. Zo is het regelen van betonkernactivering op een klassieke constante setpointbinnentemperatuur net zo zinloos als het dragen van water naar de zee. Volgens het eerste artikel moeten 'warmtecapaciteiten' niet meer worden gedimensioneerd op warmtestromen maar warmtehoeveelheden. De benutbare enthalpieën van bouwmaterialen en PCM's vormen zodoende een functie van:

- de gewenste binnenklimaatkwaliteit, A of B;
- het type gebouw, alfa of beta;
- de dagelijkse belastingduur;
- de jaargetijde, winter of zomer;
- de warmte overdracht van de leefzone naar de massa, al dan niet afgeschermd met vrije convectie en straling of gedwongen convectie.

Met behulp van kader 1 is in tabel 1 de maximaal benutbare warmte accumulatie berekend van thermische bouwmassa's onder diverse randvoorwaarden met een periodetijd van 24 uur.

Op grond van tabel 1 kan worden geconcludeerd dat PCM een veel betere warmte-accumulator is dan verdicht gewapend beton. Meer in het bijzonder valt te concluderen:

- bij vrije convectie met straling is de maximale warmte-accumulatie in een anorganisch zouthydraat een factor 20 groter dan in niet afgeschermd beton;
- bij gedwongen convectie, in de huidige generatie PCM inductie en ventilatorconvectoren, is de maximale warmteopslag in PCM circa 33% meer dan bij vrije convectie met straling.

Uit artikel 1 resulteert voor de thermische massa:

$$\tau_o \frac{d\theta_o}{dt} + \theta_o = \theta_i \quad (2.1)$$

Op grond van vergelijking (2.1) bedraagt de stationaire sinusresponsie van de massa op de binnentemperatuur verstoring volgens $\theta_i = \bar{\theta}_i + \hat{\theta}_i \sin \omega t$ i

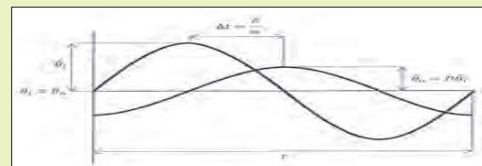
$$\theta_o = \bar{\theta}_i + D\hat{\theta}_i \sin \omega \left(t - \frac{\delta}{\omega} \right) \quad (2.2) \quad (2.2)$$

Op tijdstip $t = \frac{\delta}{\omega}$ bedraagt de maximale warmtestroom (-dichtheid) van de massa:

$$\frac{P_o}{\bar{\theta}_i} = \frac{C_o}{\bar{\theta}_i} \frac{d\theta_o}{dt} = \omega DC_o \quad (2.3)$$

En de maximale warmtecapaciteit (-dichtheid) van de massa:

$$\frac{Q_o}{\bar{\theta}_i} = \frac{1}{\bar{\theta}_i} \int_{\frac{\delta}{\omega}}^{\frac{\delta}{\omega} + \frac{\pi}{\omega}} P_o dt = 2DC_o \quad (2.4)$$



-Figuur 2- Sinusresponsie van een thermische massa.

De responsies van thermische massa's.

De uitgangspunten.

Omschrijving		Beton	Beton	PCM	PCM	PCM	
Afscherming		Ja	Nee	Nee	Nee	Nee *)	
Type warmte overdracht		VC+S **)	VC+S **)	VC+S **)	VC+S **)	GC ***)	
Paneeldikte	d _o	0,170	0,050	0,020	0,005	0,005	[m]

De warmte weerstanden.

Warmte overdracht	α _i	8	8	8	8	12****)	$\left[\frac{W}{m^2 K} \right]$
Warmte weerstand afscherming	R _a	0,3	0	0	0	0	$\left[\frac{m^2 K}{W} \right]$
Externe warmte weerstand	R _o [*] = $\frac{1}{\alpha_i} + R_a$	0,425	0,125	0,125	0,125	0,083	$\left[\frac{m^2 K}{W} \right]$
Warmtegeleiding	λ _o	2,0	2,0	0,8	0,8	0,8	$\left[\frac{W}{m K} \right]$
Getal van Biot	Bi = $\frac{d_o}{2R_o \lambda_o} \leq 0,100$	0,100	0,100	0,100	0,025	0,038	

De belastingtijd

Periode	T	24	24	24	24	24	[h]
Hoekfrequentie	ω = $\frac{2\pi}{T}$	$\frac{\pi}{12}$	$\frac{\pi}{12}$	$\frac{\pi}{12}$	$\frac{\pi}{12}$	$\frac{\pi}{12} \left[\frac{1}{h} \right]$	

De benutting

Soortelijke massa	ρ _o	2.400	2.400	1.550	1.550	1.550	$\left[\frac{kg}{m^3} \right]$
Dikte	d _o	0,170	0,050	0,020	0,005	0,005	[m]
Thermische massa	m _o = ρ _o d _o	408,0	120,0	31,0	7,8	7,8	$\left[\frac{kg}{m^2} \right]$
Specifieke Warmtecapaciteit	c _o	0,24	0,24	8,3	8,3	8,3	$\left[\frac{Wh}{kg K} \right]$
Warmtecapaciteit	C _o = m _o c _o	97,9	28,8	257,3	64,7	64,7	$\left[\frac{Wh}{m^2 K} \right]$
Warmte weerstand	R _o = R _o [*] + $\frac{d_o}{2\lambda_o}$	0,4675	0,1375	0,1375	0,128	0,0861	$\left[\frac{m^2 K}{W} \right]$
Tijdconstante	τ _o = R _o C _o	45,8	4,0	35,4	8,2	5,6	[h]
Damping	D = $\frac{1}{\sqrt{1+(\omega\tau_o)^2}}$	0,083	0,69	0,11	0,42	0,56	

De maximale warmtestroom (-dichtheid) en benutbare maximale warmtecapaciteit (-dichtheid).

Maximale warmtestroom	$\frac{P_o}{\bar{\theta}_i} = \omega DC_o$	2,1	5,2	7,4	7,1	9,5	$\left[\frac{W}{m^2 K} \right]$
Maximale warmtecapaciteit	$\frac{Q_o}{\bar{\theta}_i} = 2DC_o$	16,3	39,7	56,6	54,3	72,5	$\left[\frac{Wh}{m^2} \right]$

*) Afscherming van de thermische massa door een extra weerstand bijvoorbeeld een gesloten systeemplafond of vloerbedekking.

**) Dit is voornamelijk vrije convectie met straling.

***) Dit is gedwongen convectie in een inductie of ventilator convector.

****) Huidige generatie PCM inductie en ventilator convectoren.

-Kader 1- Sinusresponsies van beton en PCM's

Tabel 1 vormt verder een praktische ontwerp-tool, maar daarover meer in het derde artikel.

ENERGIEDRAGERS

PCM's evenals alle andere bouwmaterialen zijn geen perpetuum mobile en zij zijn ook niet in staat om uit de exergiewaarde van een energiestroom thermische conversies te realiseren zoals een ketel warmte uit een gasstroom en een koelmachine koude uit een elektriciteitsstroom produceert. PCM's zijn, dan ook, niet in staat tot verlaging van de daggemiddelde binnentemperaturen in ruimten. Het zijn daarentegen wel bijzonder adequate warmtecapaciteiten. Thermische pieken en dalen worden adequaat gedempt en in tijd vertraagd. Voor aanpassing van de daggemiddelde binnentemperaturen aan de gewenste adaptieve binnentemperaturen zijn additionele energiedragers

noodzakelijk; hiervoor kan gekozen worden uit koudemiddelen, water of lucht. Tot dusverre wordt water als de betere energiedrager beschouwd met evidente voordelen in de EPC-berekeningen. In literatuur [3] is een kwantitatief beslissingscriterium afgeleid om voor het transport van warmte (of koude) van A naar B te kiezen uit water of lucht. In kader 2 wordt dit beslissingscriterium nader toegelicht aan de hand van het transport van 18 [kW] koude over een afstand van 36 [m]. Uit dit vergelijking blijkt dat lucht een energetisch gunstiger transportmedium is dan water.

AUTARKISCHE LEEFZONES

Overeenkomstig de tweede hoofdwet van de thermodynamica treedt bij elk niet reversibel proces entropieproductie op, of te wel onomkeerbare (energie)verliezen. Alle processen in

de bouw zoals verlichten, computergebruik, ventileren, koken, het leven zelf, verwarmen en koelen functioneren alleen maar onder de voorwaarde van noodzakelijke warmtedissipatie. Warmtedissipatie, dat wil zeggen verlies van benutbare energie, is dus altijd aanwezig. Maar het verwarmen en koelen van gebouwen zijn de enige processen waarbij de exergie verliezen compenseerbaar zijn door de noodzakelijke warmtedissipaties van de overige processen, mits voldoende warmtecapaciteit voorhanden is. Het ultieme ontwerpdoel betreft dan ook thermisch autarkische leefzones. 's Winters door de noodzakelijke warmtedissipatie van de overige processen en zomers door koelere nachtelijke ventilatie-lucht. Op grond van de tweede, die in tegenstelling tot de eerste hoofdwet, onverbiddelijk is met betrekking tot de omzetting van

Kwantitatieve bepaling voor de keuze om voor het transport van warmte (of koude) van A naar B te kiezen uit water of lucht: (volgens literatuur [3]:)

$$\bar{v}_l \leq 3,1 \left(\frac{\Delta\theta_l}{\Delta\theta_w} \right)^{0,2} \bar{v}_w \quad (1)$$

Waarin:

$\bar{v}_l \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$	De gemiddelde luchtsnelheid in verwarming of koelluchtkanalen.
$\bar{v}_w \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$	De gemiddelde watersnelheid in verwarming of koelwaterleidingen.
$\Delta\theta_l [\text{K}]$	Het temperatuurverschil tussen lucht toe – en afvoer.
$\Delta\theta_w [\text{K}]$	Het temperatuurverschil tussen water toe – en afvoer.

Indien bij het dimensioneren van luchtkanalen in vergelijking met waterleidingen voldaan wordt aan ongelijkheid (1) is lucht een betere energiedrager dan water. Aan de hand van een voorbeeld uit [4] met betrekking tot traditionele plafond inductie convectoren wordt het beslissingscriterium toegelicht. Bij een binnentemperatuur van 26[°C] bedraagt de uittredende luchttemperatuur van de secundaire koelbatterij 20[°C] met een bijbehorend temperatuurtraject van het koelwater van 17 naar 19[°C]. De gemiddelde luchtsnelheid in de kanalen wordt bij deze uitgangspunten gedimensioneerd op $\bar{v}_l \leq 3,1 \left(\frac{26-20}{19-17} \right)^{0,2} \bar{v}_w = 3,9\bar{v}_w$. Waarbij $\bar{v}_w$ de gemiddelde watersnelheid in de alternatieve koelwaterleidingen is. Uit geluid overwegingen bedragen de maximale watersnelheden in aftakkingen $0,5 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$ en in hoofdleidingen $2,0 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$. Indien nu de luchtkanalen voor de aftakkingen worden gedimensioneerd op $\bar{v}_l \leq 3,9 \times 0,5 = 1,9 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$ en de hoofdkanalen op $\bar{v}_l \leq 3,9 \times 2,0 = 7,7 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$ is lucht beter dan water en kan het secundaire waterzijdige koelvermogen van de traditionele inductie convectoren beter vervangen worden door primaire ventilatielucht koeling. In tabel 1 worden primaire hoofd koelluchtkanalen vergeleken met secundaire hoofd koelwaterleidingen.

Secundair voelbaar koelvermogen	$P_g = \frac{\pi}{3} \Delta\theta_g = \frac{\pi \times 6}{3} \times 6 = 450 \left[\frac{\text{W}}{\text{stuk}} \right]$
Totaal secundair voelbaar koelvermogen	$P_{st} = 40 \times 450 = 18 \text{ [kW]}$
Transportafstand	$l = 36 \text{ [m]}$
Koelwaterleidingen	Draadpijp volgens NEN 3257 middel / DIN 2394
Koelluchtkanalen	Verzinkte spiraalgewonden felsnaad luchtkanalen volgens NEN – EN 1506.

De fysische grootheden.

Omschrijving.

	Koelwater	Koellucht
Soortelijke massa	$\rho_w = 1.000 \rho_l = 1,2 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$	
Warmtecapaciteit	$c_w = 4.200 c_l = 1.000 \left[\frac{\text{J}}{\text{kg.K}} \right]$	
Viscositeit	$\nu_w = 1 \times 10^{-6}$	$\nu_l = 15 \times 10^{-6} \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right]$
Wandruwheid	$\epsilon_w = 0,045 \times 10^{-3} \epsilon_l = 0,150 \times 10^{-3} \text{ [m]}$	
Pomp/ ventilatorrendement	$\eta_w = 0,8 \eta_l = 0,6$	

De berekening.

Medium snelheid zie tekst	$2,07,7 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$	
Temperatuurtraject	$19 - 17 = 226 - 20 = 6 \text{ [K]}$	
Water en luchtdebiet	$\frac{18.000}{1.000 \times 4.200 \times 2} = 2,14 \times 10^{-3} \quad \frac{18.000}{1,2 \times 1.000 \times 6} = 2,5 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]$	
Minimale inwendige diameter	$\sqrt{\frac{4 \times 2,14 \times 10^{-3}}{\pi \times 2}} = 0,037 \quad \sqrt{\frac{4 \times 2,5}{\pi \times 7,7}} = 0,642 \text{ [m]}$	
Praktische diameter keuze	$\emptyset = 1 \frac{1}{4} \Rightarrow d_w = 0,036 \text{ DN} = 710 \Rightarrow d_l = 0,710 \text{ [m]}$	
Werkelijke mediumsnelheid	$\frac{2,14 \times 10^{-3}}{0,25 \times 0,036^2} = 2,1$	$\frac{2,5}{0,25 \times 0,710^2} = 6,3 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$
Getal van Reynolds	$\frac{2,1 \times 10^{-6}}{1 \times 10^{-6}} = 75.600 \quad \frac{6,3 \times 0,710}{15 \times 10^{-6}} = 298.200$	
De wrijvingscoëfficiënt	$\left(-2 \log \left(\frac{0,045}{3,72 \times 36} + \frac{5,74}{756000^{0,901}} \right) \right)^{-2} = 0,024 \quad \left(-2 \log \left(\frac{0,150}{3,72 \times 710} + \frac{5,74}{298.200^{0,901}} \right) \right)^{-2} = 0,016$	
Wrijvingsverlies	$0,024 \times \frac{36}{0,036} \times 0,5 \times 10^3 \times 2,1^2 = 52,92 \times 10^3$	$0,016 \times \frac{36}{0,710} \times 0,5 \times 1,2 \times 6,3^2 = 19 \text{ [Pa]}$
Elektrisch vermogen	$\frac{2,14 \times 10^{-3} \times 52,92 \times 10^3}{0,8} = 142 \quad \frac{2,5 \times 35}{0,6} = 80 \text{ [W]}$	
Transport efficiëntie	$\text{COP}_w = \frac{\text{koelvermogen}}{\text{Elektrisch vermogen}} = \frac{18.000}{2 \times 142} = 63 \text{ COP}_l = \frac{\text{koelvermogen}}{\text{Elektrisch vermogen}} = \frac{18.000}{2 \times 80} = 119$	

Volgens tabel 2 bedraagt de Coëfficiënt Of Performance (COP) van het koudetransport over een afstand van 36 meter voor een voelbaar koelvermogen van 18 kiloWatt door koelwater (aanvoer plus retour) 63 en door koellucht 119. Het koudetransport door koellucht is circa 90 % efficiënter dan door koelwater. Meer primaire ventilatielucht in plaats van minder secundair koelwater levert naast een efficiënter energietransport ook een betere binnenluchtqualiteit op, dat wil zeggen, gezondere leefzones. In het Europese klimaat is het ook nog eens zo dat directe vrije buitenlucht koeling, zeker in goed geïsoleerde gebouwen energie efficiënter is dan indirecte vrije buitenlucht koeling middels koelwater, koudemiddelen en drycoolers. Er moet dan ook geconstateerd worden dat All – air systemen, in het verleden veelvuldig toegepast, in de EPC berekeningen ten onrechte slechter worden beoordeeld dan All – water (op zijn Engels uitspreken) systemen.]

-kader 2- kwantitatief beslissingscriterium

(bruikbare) exergie in (niet bruikbare) anergie, is een betere ontwerpdoelstelling; maximaal entropie reducerend bouwen met als ultiem ontwerpcriterium thermisch autarkische, dus zelf voorzienende leefzones.

Een goed geïsoleerd massaloos beta-kantoor, zoals beschreven in het eerste artikel met een duurzame elektriciteitsvoorziening door bijvoorbeeld brandstofcellen, windturbines en/ of photovoltaïsche zonnecellen is, misschien ondanks het feit dat het wellicht een energieneutraal gebouw is, een minder gezond, thermisch behaaglijk en duurzaam gebouw dan een alfa-kantoor met voldoende thermische massa en ventilatielucht als hoofdenergiedrager. Dit omdat de exergie verliezen van het thermisch traag reagerende alfa-kantoor geringer zijn dan van een thermisch snel reagerend kantoor. Het energieneutrale traag reagerende alfa-kantoor

kan namelijk voorzien worden van een kleinere duurzame elektriciteitsproductie-installatie. In plaats van energieneutraal bouwen in 2020 kan de Europese bouwdoelstelling beter worden aangepast in 'maximaal entropie reducerend bouwen met thermisch autarkische leefzones in 2020'.

CONCLUSIES

PCM is de beste warmte accumulator voor kunstmatige leefzones en sinusresponsies van bouwmaterialen vormen een adequaat ontwerp hulpmiddel voor de berekening van de benodigde warmtecapaciteit in leefzones. Lucht is in goed geïsoleerde traag reagerende gebouwen een betere energiedrager dan water en koudemiddelen. De EPC berekening moet zo worden aangepast dat 'all air'-systemen energiezuiniger zijn dan 'all water'-systemen.

De Europese gemeenschap moet de ontwerpdoelstelling 'energieneutraal bouwen in 2020' aanpassen in 'maximaal entropiereducerend bouwen in 2020 met zo mogelijk autarkische leefzones'.

LITERATUUR

1. www.autarkis.nl
2. De nieuwe ISSO publicatie PCM.
3. Is water echt een betere energiedrager dan lucht, H. Schmitz, V&V+, juni – 2015
4. Meet -, regel – en energie – illusies, H. Schmitz, V&V+, mei – 2013
5. PCM koeling met een minimale COP van 139, H. Schmitz, RCCK&L, april – 2014
6. PCM koeling met een minimale COP van 1.260, H. Schmitz, RCCK&L, mei – 2014
7. PCM vermogen, warmte, massa en capaciteit, H. Schmitz, V&V+, november – 2014