

## **PCM, het nieuwe bouwen.**

### **Deel 1, Dynamische behaaglijkheid, warmtecapaciteit en sinusresponsies.**

**Harry Schmitz, OC Autarkis bv.  
December 2015.**

*Europa wil rond 2020 energieneutraal bouwen! Als dat al mogelijk is, hoe gaan we dat doen? Blijven we vasthouden aan traditionele bouwwijzen gebaseerd op stationaire normen met centennium oude warmtepompen of slaan we een revolutionaire nieuwe weg in? Deze publicatie, bestaande uit twee delen, toont met de beantwoording van de volgende drie fundamentele vragen, het nieuwe bouwen met PCM.*

- *Blijven we leefzones regelen op een constante setpoint temperatuur?*
- *Gaan we verder met het beter isoleren van de gebouwschil zonder aandacht voor de warmtecapaciteit?*
- *Blijven we water als hoofd energiedrager beschouwen?*

*Middels eenvoudige dynamische berekeningen, gebaseerd op [1], wordt niet alleen kwalitatief maar ook kwantitatief het nieuwe bouwen verduidelijkt. Het eerste artikel behandelt de dynamische behaaglijkheid, de warmtecapaciteit en sinusresponsies en het tweede artikel beschrijft energiedragers, thermische autarkie en het nieuwe ontwerpen, dimensioneren en bouwen.*

*Ergieneutraal bouwen wordt hoofdzakelijk geassocieerd met het beter isoleren van de gebouwschil en met het beter afdichten van kieren en naden en het verder reduceren van het ventilatieverlies inclusief een beoogde substitutie van HR gasketels door elektrische warmtepompen [2,3]. Gebouwen verworden zo tot massaloze thermosflessen met een verschuiving van minder verwarmen naar meer koelen zonder netto energiebesparingen [4]. De bestaande weg kan dan ook niet de weg naar energieneutraal bouwen zijn.*

### **Dynamische behaaglijkheid.**

*P.O. Fanger publiceerde in 1970 zijn boek "Thermal comfort, analyses and applications in environmental engineering" [5]. Dit boek beschrijft een stationair thermofysiologisch model. Het is een nulde orde berekening van de thermische behaaglijkheid van gewicht -, sexe - en hersenloze mensen. De thermische behaaglijkheid wordt beoordeeld aan de hand van een zestal meetbare fysische grootheden. Zijn dissertatie onderzoek fungeert nog steeds als grondslag voor onze thermische behaaglijk normen met de hierop gebaseerde meet en regelalgoritmen. Voornamelijk constante setpoint binnentemperatuur regelkringen.*

*Het model van Fanger is de afgelopen jaren, enigszins geruisloos, ingrijpend gereviseerd. Een eerste psychologische correctie betrof de introductie van seizoensgebonden daggemiddelde adaptieve binnentemperaturen. Ondanks het feit dat mensen circa 90 % van de tijd doorbrengen in kunstmatige leefzones, thuis op het werk en in de auto, kleedt men zich, uit psychologische overwegingen, 's winters nu eenmaal warmer dan 's zomers. Om zich net zo behaaglijk te voelen moeten, bij hetzelfde metabolisme, de zomerse comforttemperaturen hoger zijn dan de winterse. Een tweede psychologische correctie vormde het onderscheid in alfa en beta gebouwen. Alfa gebouwen hebben te openen ramen en de gebruiker heeft meer mogelijkheden om het binnenklimaat te beïnvloeden en om zijn of haar kleding gedrag aan te passen aan de thermische sensatie. In alfa gebouwen mogen de zomerse binnentemperaturen dienovereenkomstig hoger zijn dan in beta gebouwen, die deze beïnvloedings mogelijkheden ontberen [6,7]. Een derde fysiologische correctie vloeide waarschijnlijk voort uit een evolutionair ontwikkeld bioritme van de menselijke kerntemperatuur die 's nacht en 's morgens 1,0 a 1,5 Kelvin lager is dan overdag en 's avonds. De nieuwe ISSO publicatie 74 – 2014 [7] vermeldt dan ook nadrukkelijk dat 'het overdag oplopen van de binnenluchttemperatuur (min of meer parallel aan de buitenluchttemperatuur) als minder hinderlijk en 'natuurlijker' wordt ervaren dan het*

overdag teruglopen (en zelfs het gelijk blijven overdag)'. Al doende is het stationaire model van Fanger voor massalozen mensen zonder psyche de afgelopen 45 jaar gemodificeerd in een dynamische beschrijving van de thermische behaaglijkheid van mensen met massa en geest.

Recent onderzoek aan de universiteit van Maastricht toont verder aan dat vrouwen een warmer binnenklimaat prefereren dan mannen tengevolge van een gemiddeld lager metabolisme [8]. In de toekomst zullen de comfort normen wellicht ook nog sexe – afhankelijk aangepast worden? Verder moet worden vastgesteld dat de adaptieve binnentemperaturen volgens NEN 15251 [6] niet overeenstemmen met de adaptieve binnentemperaturen volgens ISSO publicatie 74 [7]. Ondanks alle aanpassingen blijft het adagium van de thermische behaaglijkheid 'warme voeten en een koel hoofd' onverminderd van toepassing.

**Figuur 1. Seizoensgebonden daggemiddelde adaptieve binnentemperaturen volgens ISSO publicatie 74 [7] en dagelijkse bioritmische leefzone temperaturen tijdens een arctisch koude en een tropisch warme dag.**

**Tabel 1. A en B binnenklimaat kwaliteiten volgens ISSO publicatie 74 [7].**

Omschrijving	Acceptatie	Gebouw	Dagelijkse temperatuur amplitudo	
			Winter [K]	Zomer [K]
A- klimaat	90%	$\alpha$	$\hat{\theta}_i = \pm 1$	$\hat{\theta}_i = \pm 2$
		$\beta$	$\hat{\theta}_i = \pm 1$	$\hat{\theta}_i = \pm 1$
B- klimaat	80%	$\alpha$	$\hat{\theta}_i = \pm 2$	$\hat{\theta}_i = \pm 3$
		$\beta$	$\hat{\theta}_i = \pm 2$	$\hat{\theta}_i = \pm 2$

De overgang van stationaire naar dynamische behaaglijkheid ontwerpcriteria heeft verstrekende gevolgen voor het regelen van leefzones in gebouwen. Zo moet, volgens figuur 1, 's zomers de daggemiddelde adaptieve binnentemperatuur hoger zijn dan 's winters en overdag moet, in overeenstemming met het dagelijkse verloop van de buitentemperatuur en het bioritme van de mens, de binnentemperatuur stijgen, niet sneller dan  $2 \left[ \frac{K}{h} \right]$ , en 's nachts dalen. Leefzones met een klassieke constante stationaire setpointtemperatuur worden dan ook als minder comfortabel beoordeeld. Een dagelijkse dynamisch binnentemperatuur schommeling rondom de seizoen afhankelijke daggemiddelde adaptieve binnentemperatuur vormt het uitgangspunt voor het nieuwe bouwen. Literatuur [7] maakt daartoe hoofdzakelijk onderscheid tussen de binnenklimaat kwaliteiten A en B, waarvoor de temperatuur amplitudo, volgens tabel 1, de onderscheidende parameter vormt. Ook ter voorkoming van tochtklachten is een dynamische binnentemperatuurregeling beter dan een constante setpoint regeling [8].

### **Warmtecapaciteit.**

Figuur 2 toont een thermisch snelreagerend kantoor met bijbehorend processtroom en instrumentatie diagram. Het betreft een beta gebouw. De vloer is belegd met vloerbedekking. Er zijn geen binnenwanden. 30 % van het geveleppervlak bestaat uit ramen. Aangezien beglazing de zwakste schakel voor het transmissie verlies is, is gekozen voor triple glas in koudebrug vrije kunststofkozijnen met goede naad en kierdichtingen. Het betreft een goed geïsoleerde sandwich vliesgevel. Het kantoor is voorzien van een traditioneel klimaatplafond dat op een constante binnentemperatuur wordt geregeld met optimaliserende nachtverlaging in de winter. De bouwmasse is thermisch afgeschermd van de leefzone. De stationaire binnentemperatuur zorgt er voor dat geen voelbare warmte accumulatie mogelijk is in de bouwmasse. Daardoor is zomerse nachtventilatie zinloos. Het kantoor wordt uit overwegingen van energie besparing minimaal geventileerd met toepassing van warmterugwinning en zomerse bypass. De warmte – en koude productie vindt plaats middels omkeerbare elektrische warmtepompen aangesloten op lange termijn warmte en koude opslag in de

bodem. De hoofdoriëntatie is zuid. Een zeer gebruikelijk bouw – en installatie concept voor beta kantoren met een EPC = 0,8 [2].

**Figuur 2. Een goed geïsoleerd thermisch snel reagerend kantoor met het bijbehorende proces stroom en instrumentatie diagram.**

**Kader 1. Tijdconstante en periodetijd van de verstoring.**

Onder verwijzing naar kader 1 geldt voor een dergelijk kantoor dat niet alleen de benutbare warmtecapaciteit klein is en wordt afgeschermd maar ook dat overdag geen warmte accumulatie mogelijk is vanwege de constante setpoint binnentemperatuur regeling. De warmtecapaciteit tendeert dan naar de limietwaarde nul ( $C \rightarrow 0$ ). Dienovereenkomstig wordt de tijdconstante van het kantoor ook nul ( $\tau \rightarrow 0$ ) met als gevolg geen demping en geen tijdvertraging van thermische verstoringen ( $D \rightarrow 1$  en  $\Delta t \rightarrow 0$ ). In een capaciteitloos gebouw zijn de binnentemperaturen gelijk aan de momentane vloer, wand, plafond en meubilair temperaturen en aan de dynamische temperatuur verstoringen ( $\theta_i = \theta_0 = \theta_v$ ). Verstoringen op het binnenklimaat, bijvoorbeeld het inschakelen van de verlichting en de in bedrijf name van computers, worden, dankzij het geringe warmteverlies van de gebouwschil niet meer gedempt maar zijn juist verstrekt direct voelbaar. Louter en alleen vanwege het ontbreken van voldoende warmtecapaciteit. Overeenkomstig figuur 3 regelt het traditionele klimaatplafond de leefzone overdag op een constante binnentemperatuur en 's nachts op een minimale 'beveiligingstemperatuur'. 's Morgens vindt optimaliserende opwarming plaats. Het thermisch snelreagerende kantoor wordt overdag gekoeld (de blauwe arcering in figuur 3) en 's nachts verwarmd (de rode arcering). Het overgrote deel van het jaar functioneert de lange termijn warmte en koude opslag in de bodem niet als een seizoen buffer maar als een dagelijkse warmte capaciteit. 's Nachts en 's morgens verwarmen en 's middags koelen. Zoals duidelijk blijkt uit figuur 3 resulteert een minimalisatie van de benutbare warmtecapaciteit in een maximalisatie van het dagelijkse energiegebruik voor het klimatiseren van leefzones. Het nog beter isoleren van de gebouwschil van een thermisch snelreagerend kantoor leidt alleen nog maar naar een verschuiving van minder verwarmen naar meer koelen, maar geen additionele energiebesparingen meer.

**Figuur 3. Het dagelijkse gedrag van thermisch snel en traag reagerende kantoren.**

Laten we nu eens veronderstellen dat er zoveel thermisch benutbare warmtecapaciteit in het kantoor kan worden geïnstalleerd dat in de limietwaarde deze gelijk wordt aan oneindig groot ( $C \rightarrow \infty$ ). De tijdconstante van de ruimte wordt dan ook oneindig groot ( $\tau \rightarrow \infty$ ) met als gevolg volledige demping ( $D \rightarrow 0$ ) en maximale tijdvertraging ( $\Delta t \rightarrow 6$ ). De binnentemperatuur wordt gelijk aan de gemiddelde vloer, wand, plafond en meubilair temperaturen en aan de gemiddelde temperatuur verstoringen. Uiteindelijk resulteert een stationaire binnentemperatuur. De oneindig grote thermische massa regelt de leefzone op een klassieke constante setpoint temperatuur ( $\theta_i = \theta_0 = \bar{\theta}_v$ ) net hetzelfde als het traditionele klimaatplafond, echter energieloos. Ongeacht de isolatiedikte worden verstoringen op het binnenklimaat maximaal gedempt en in tijd vertraagt en zijn niet meer voelbaar. Dit louter en alleen vanwege de zeer grote warmtecapaciteit. Het betreft een thermisch traag reagerend alfa kantoor. Indien de sommatie van transmissie, infiltratie en ventilatie verliezen zo wordt gedimensioneerd dat overeenkomstig figuur 3, de blauwe arcering gelijk wordt aan de rode, dat wil zeggen de dagelijkse vrije warmtedissipatie is gelijk aan het dagelijkse warmteverlies resulteert thermische autarkie, of te wel een thermisch zelf voorzienende toestand. Het klimaatplafond zal dan niet meer in bedrijf komen met, overeenkomstig de tweede hoofdwet van de thermodynamica, minimale entropie productie. Tussen zeven uur 's morgens en zes uur 's avonds koelt de thermische massa het kantoor en slaat de warmte verliesvrij op voor de nacht. Het kantoor wordt dan door de overdag opgeslagen warmte, in de thermische massa, van zes uur 's avonds tot zeven uur 's morgens verwarmd. De geleverde koel – en verwarmingsvermogens door thermische massa's kunnen bijzonder groot zijn. Kortere verstoringen met een beperkte periodetijd ( $T \rightarrow 0$ ),

bijvoorbeeld een vergadering of een tijdelijke wolk voor de zon, worden volledig gedempt ( $D \rightarrow 0$ ) en maximaal vertraagd ( $\Delta t \rightarrow 6$ ), ongeacht de grootte van de verstoring.

Uit dynamische behaaglijkheid overwegingen moet echter niet te veel thermische massa worden geïnstalleerd. De overmaat aan massa regelt de leefzone op een niet behaaglijke constante binnentemperatuur, dat wil zeggen dezelfde stationaire binnentemperatuur als bij het traditionele klimaatplafond. Overeenkomstig figuur 3 leidt het optimaliseren van de benutbare warmtecapaciteit in een ruimte tot het minimaliseren van het thermische energiegebruik voor het klimatiseren van kunstmatige leefzones. Het alleen maar minimaliseren van de schilverliezen leidt juist tot het maximaliseren van het energiegebruik.

### **Sinusresponsies.**

Naast beton is ook zogenaamd PCM voorhanden als thermische massa. PCM is de afkorting van de Engelse woorden 'Phase Change Material' vertaald als 'fase overgangsmateriaal' [11]. 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 wordt voelbaar gekoeld. 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 wordt verwarmd en het PCM koelt af. Het PCM stolt en gaat over van de vloeibare naar de vaste aggregatietoestand.

**Figuur 4. 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.**

In het thermisch ideale geval vinden fase overgangen plaats bij een constante smelttemperatuur. Het betreft dan latente, niet voelbare, warmte opslag. Alle in de bouw toepasbare PCM's gedragen zich echter thermisch niet ideaal. Dat wil zeggen in plaats van een constante smelttemperatuur bezitten alle PCM's een temperatuurtraject voor smelten en stollen van 4 á 5 [K]. Figuur 4 geeft het thermisch niet ideale smelt – en stolgedrag van een anorganisch zouthydraat weer. De bovenste grafiek representeert de enthalpie in  $\left[\frac{kJ}{kg}\right]$  of gemakkelijker  $\left[\frac{Wh}{kg}\right]$  en de middelste de warmtecapaciteit in  $\left[\frac{kJ}{kg.K}\right]$  of  $\left[\frac{Wh}{kg.K}\right]$ . Beide grootheden als functie van de PCM temperatuur in  $^{\circ}C$ . De warmtecapaciteit is gedefinieerd als de eerste afgeleide van de enthalpie naar de PCM temperatuur  $\left(c_o = \frac{dh_o}{d\theta_o}\right)$ . Dit bij een constante PCM druk. De warmtecapaciteit is de richtingscoëfficiënt van de raaklijn aan de enthalpie curve. De grafieken geven stol – en smelt warmten weer volgens een vijftal wiskundige benaderingsmodellen en volgens gemeten waarden middels de  $T$ -history methode. Ter vergelijking is ook de enthalpie en de warmtecapaciteit van beton weergegeven. Uit de bovenste twee grafieken blijkt dat, ongeacht de wijze van meten of de toegepaste benaderingsmodellen, het PCM zich, binnen het stol – en smelttraject als een voelbare warmtecapaciteit gedraagt. Ondanks het feit dat er een reversibele fase overgang van vast naar vloeibaar plaats vindt is er geen sprake meer van latente warmte accumulatie. Ook duidelijk blijkt dat de benutbare enthalpie van het PCM een functie vormt van de gewenste kwaliteit binnenklimaat A of B, het type gebouw, alfa of beta en het seizoen winter of zomer, met als parameter de toelaatbare dagelijkse binnentemperatuur amplitudo. Een en ander zoals weergegeven in tabel 2. Voor een alfa gebouw onder zomerse omstandigheden met een binnenklimaatkwaliteit B bedraagt de maximaal benutbare enthalpie  $\Delta h_o = 150 \left[\frac{kJ}{kg}\right] = 41,5 \left[\frac{Wh}{kg}\right]$  met een temperatuurtraject voor de fase overgangen van circa  $\Delta\theta_o = 5[K]$ . De gemiddelde warmtecapaciteit bedraagt dan  $\bar{\theta}_o = \frac{\Delta h_o}{\Delta\theta_o} = \frac{41,5}{5} = 8,30 \left[\frac{Wh}{kg.K}\right]$  en ter vergelijking van beton  $0,24 \left[\frac{Wh}{kg.K}\right]$ .

Volgens literatuur [1 en 12] representeren sinusverstoringen van het binnenklimaat de werkelijkheid het beste. De laatste grafiek van figuur 4 geeft sinusresponsies weer van het anorganische zouthydraat en van beton. Een vijftal PCM responsies zijn berekend middels de wiskundige benaderingsmodellen [13] en de zesde responsie is berekend met de meetwaarden. In [14,15] worden berekende sinusresponsies vergeleken met gemeten sinusresponsies. De overeenkomsten zijn, voor bouwkundige toepassingen, acceptabel te noemen.

In ruimten kunnen PCM 's op twee manieren toepassing vinden, namelijk als PCM klimaatvloeren, wanden of plafonds en als inductie of ventilator convectoren. In het eerste geval vindt de warmte overdracht hoofdzakelijk plaats door vrije convectie en straling en in het tweede geval door gedwongen convectie. Beton daarentegen fungeert, zoals in [16] beschreven wordt, doorgaans alleen maar als wand, plafond of vloermassa. Onder verwijzing naar kader 2 wordt in tabel 2 de maximale warmte accumulatie van afgeschermd en niet afgeschermd beton en van PCM toepassingen met vrije convectie met straling en gedwongen convectie, onderling vergeleken met als parameters de binnenklimaat kwaliteit A of B, het type gebouw, alfa of beta en het seizoen, zomer of winter.

## Kader 2. Sinusresponsies van beton en PCM's.

**Tabel 2. PCM versus beton.**

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

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

### Thermische behaaglijkheid klimaatklassen

A	$\hat{\theta}_s = 2[K]$	33	79	113	109	145	$\frac{Wh}{m^2}$
B	$\hat{\theta}_s = 3[K]$	49	119	170	163	218	$\frac{Wh}{m^2}$

### Beta gebouw koelenergie warme zomerse ontwerperperiode

#### Thermische behaaglijkheid klimaatklassen

A	$\hat{\theta}_s = 1[K]$	16	40	57	54	73	$\frac{Wh}{m^2}$
B	$\hat{\theta}_s = 2[K]$	33	79	113	109	145	$\frac{Wh}{m^2}$

\*) 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.

Op grond van tabel 2 kan worden geconcludeerd dat PCM een 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 ventilator convectoren is de maximale warmte opslag in PCM circa 33 % meer dan bij vrije convectie met straling.

Tabel 2 vormt verder een praktische ontwerptool, maar daarover meer in het tweede artikel.

## Kader 1. Tijdconstante en periodetijd van de verstoring.

### Figuur 5. Elektrische analogie van het dynamische gedrag van een kantoor.

De definitie van het getal van Biot voor de thermische massa van een kantoor luidt:

$$Bi = \frac{\alpha_i d_o}{2\lambda_o} \quad (1.1)$$

De formuletekens worden verduidelijkt in de kaders 2 en 3. Indien het getal van Biot kleiner of gelijk is aan één tiende resulteert een lumped sum benadering van de warmte opslag in de thermische massa. Op grond van figuur 5 resulteren de volgende vergelijkingen:

$$\theta_i = \frac{H_e \theta_v + H_o \theta_o}{H_e + H_o} \quad (1.2)$$

En

$$\tau \frac{d\theta_o}{dt} + \theta_o = \theta_v \quad (1.3)$$

Met:

$$\tau = \left(1 + \frac{H_o}{H_e}\right) \tau_o \quad \text{en} \quad \tau_o = \frac{C_o}{H_o} \quad \text{en} \quad \theta_v = \theta_e + \frac{P_i}{H_e} \quad (1.4)$$

Voor een sinus verstoring volgens  $\theta_v = \bar{\theta}_v + \hat{\theta}_v \sin \omega t$  resulteert uit vergelijking (1.3) de respons:

$$\theta_o = \bar{\theta}_v + D \hat{\theta}_v \sin \omega(t - \Delta t) \quad (1.5)$$

Met

$$D = \frac{1}{\sqrt{1+(\omega\tau)^2}} \quad \text{en} \quad \Delta t = \frac{\delta}{\omega} = \frac{\text{invtan}(\omega\tau)}{\omega} \quad (1.6)$$

#### De tijdconstante van het kantoor.

Indien de limiet  $C \rightarrow 0$  dan  $\tau \rightarrow 0$  en  $D \rightarrow 1$  en  $\delta = 0$  zodat  $\Delta t = 0$  en  $\theta_i = \theta_o = \theta_v$ .

Indien echter de limiet  $C \rightarrow \infty$  dan  $\tau \rightarrow \infty$  en  $D \rightarrow 0$  en  $\delta = \frac{\pi}{4}$  zodat  $\Delta t = \frac{\pi}{4\omega}$  en  $\theta_i = \theta_o = \bar{\theta}_v$ .

#### De tijdsduur van de verstoring.

Indien de limiet  $T \rightarrow 0$  dan  $D \rightarrow 0$ .

Indien de limiet  $T \rightarrow \infty$  dan  $D \rightarrow 1$ .

## Kader 2. Sinusresponsies van beton en PCM's.

### Figuur 6 Sinusresponsie van een thermische massa.

Uit kader 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  $\theta_i = \bar{\theta}_i + \hat{\theta}_i \sin \omega t$  is:

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

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

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

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

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

#### 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]
<b>De warmte weerstanden.</b>							
Warmte overdracht	$\alpha_i$	8	8	8	8	12****)	$\left[ \frac{W}{m^2 K} \right]$
Warmteweerstand 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	$\lambda_o$	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	
<b>De belastingtijd</b>							
Periode	$T$	24	24	24	24	24	[h]
Hoekfrequentie	$\omega = \frac{2\pi}{T}$	$\frac{\pi}{12}$	$\frac{\pi}{12}$	$\frac{\pi}{12}$	$\frac{\pi}{12}$	$\frac{\pi}{12}$	$\left[ \frac{1}{h} \right]$
<b>De benutting</b>							
Soortelijke massa	$\rho_o$	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	$m_o = \rho_o d_o$	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	$\left[ \frac{Wh}{m^2 K} \right]$
Warmteweerstand	$R_o = R_o^* + \frac{d_o}{2\lambda_o}$	0,4675	0,1375	0,1375	0,128	0,0861	$\left[ \frac{m^2 K}{W} \right]$
Tijdconstante	$\tau_o = R_o C_o$	45,8	4,0	35,4	8,2	5,6	[h]
Demping	$D = \frac{1}{\sqrt{1+(\omega\tau_o)^2}}$	0,083	0,69	0,11	0,42	0,56	
<b>De maximale warmtestroom (-dichtheid) en benutbare maximale warmtecapaciteit (-dichtheid).</b>							
Maximale warmtestroom	$\frac{P_o}{\theta_s} = D\omega C_o$	2,1	5,2	7,4	7,1	9,5	$\left[ \frac{W}{m^2 K} \right]$
Maximale warmtecapaciteit	$\frac{Q_o}{\theta_s} = 2DC_o$	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.