

Een Autarkische caravan

Capaciteit reduceert het additioneel te installeren koel- en verwarmingsvermogen. Dit resulteert in besparingen op energie en exploitatielasten. Thermisch autarkische leefzones zijn alleen met massa realiseerbaar. Het betreft een principiële discussie, die beslecht wordt door wiskundige bewijsvoering met een eenvoudig dynamisch model aan de hand van een Autarkische caravan. De consequenties van het bewijs zijn verstrekkend. Numerieke simulatiemodellen en meetdata moeten in overeenstemming zijn met het formele bewijs. De wiskundige deductie leidt tot standaardisatie van de gebouwde omgeving. Het Klimagerechtes dimensioneren (zie kader) zal telkens weer leiden tot dezelfde ontwerpbeslissingen, waardoor de wetten van de architectonische esthetica ondergeschikt worden gemaakt aan betaalbare duurzaamheid door klimaattechnici.

Ir. A.H.H. (Harry) Schmitz, technisch directeur Autarkis bv

Waarom zijn naast simulatiemodellen en metingen nog analytische vergelijkingen noodzakelijk? In tegenstelling tot numerieke berekeningen en metingen geven analytische formules de samenhang der dingen logisch weer, zodat het beschouwde systeem kan worden geoptimaliseerd. Analytische vergelijkingen fungeren verder als richting wijzend voor meet- en berekeningsuitkomsten, zeker in het geval van niet gevalideerde modellen. Ten slotte leiden analytische vergelijkingen tot eenduidige architectonische en werktuigbouwkundige ontwerpbeslissingen zonder uitgebreide filosofische voor- en nabeschouwingen. Voor de wiskundig georiënteerde lezer wordt het formele bewijs in kader 1 op de TVVL-website geleverd en de formuletekens beschreven. Kader 2 op website, met concrete berekeningen, is bedoeld voor de meer praktisch georiënteerde lezer.

■ CARAVAN EN IJSTIJD

De figuren 1a en 1b verbeelden een opblaasbare gebouwde omgeving. Op het moment dat de deur van een ruimte wordt geopend start de ventilatie-installatie en wordt de kunstmatige leefzone als een ballon opgeblazen.

Indien geen mensen in het gebouw aanwezig zijn, is de ventilatie-installatie niet in bedrijf en wordt de 'binnen leefzone' weer een duurzame, niet te klimatiseren 'buiten leefzone'. Het tijdloos, pneumatisch opblazen of uitklappen van een ruimte vormt het summum van duurzame airconditioning. De caravan, die ergens oriëntatie onafhankelijk kan worden geparkeerd, fungeert als industriële metafoor voor de oriëntatie afhankelijke duurzame bouw die nog steeds uitgaat van grote ramen op het zuiden en kleine ramen op het noorden.

Aan het eind van de laatste ijstijd, toen de

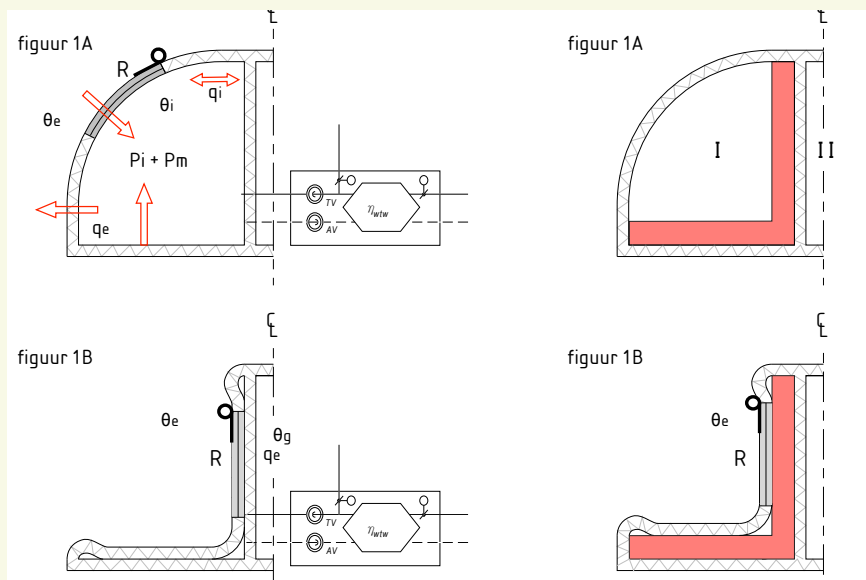
autochtone Homo Sapiens Neanderthalensis verdrongen werd door de allochtone Homo Sapiens Sapiens, werd het klimaat, zonder toedoen van de mens, gelukkig aanzienlijk milder. Maar de nieuwkomer bleef 'binnen

Klimagerechtes dimensioneren is afgeleid van Klimagerechtes Bauen. De doelstelling van Klimagerechtes Bauen is: de realisering van thermisch behaaglijke leefzones in de diverse klimaatregio's met *voornamelijk* bouwkundige middelen, zodat het additionele fossiele brandstofverbruik wordt geminimaliseerd. Klimagerechtes dimensioneren gaat nog net één stap verder, namelijk de realisering van thermisch behaaglijke leefzones met *alleen* bouwkundige middelen.

leefzones' creëren door tijdens de jacht te wonen in tenten met grotten als zomerse en winterse basis. De grotten werden verlicht en zo mogelijk lokaal verwarmd door houtvuren. Tijdens warme zomerse dagen trokken de jagers/verzamelaars zich ook terug in de grotten voor koelte en fungeerde het houtvuur slechts als verlichting tijdens het beschilderen van de rotswanden. Is anno 2012 het ontwerpen van uitklapbare caravans met of zonder thermische massa noodzakelijk?

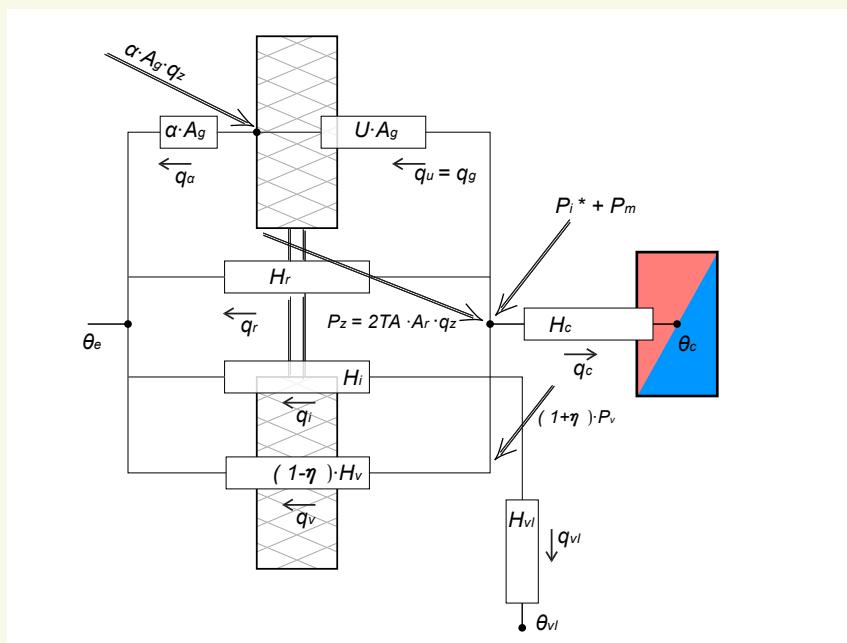
LEEFZONE EN CAPACITEIT

Figuur 2 verbeeldt de warmtestromen in geklimatiseerde leefzones. Overdag valt zonnestraling op de dichte buitenschil en wordt grotendeels geaccumuleerd (q_a). Samen met het transmissieverlies van de leefzone (q_u) wordt de zonnewarmte grotendeels door straling en convectie weer naar buiten afgevoerd (q_e). Omdat de carrosserie van de caravan nauwelijks massa bezit betreft het een stationaire warmtestroom voor de zonbeschenen oppervlakken. Door de niet zonbeschenen oppervlakken treedt alleen maar transmissieverlies op (q_v). Voornamelijk licht, kortgolvlige zonnestraling valt door de ramen in de leefzone en degradeert tot warmte (P_z). De leefzone wordt ook verwarmd door warmtedissipatie van de mens en elektrische apparaten (P_i). Met houtvuur werd de grot lokaal additioneel verwarmd en tegenwoordig wordt de leefzone doorgaans ook nog gekoeld (P_m). Uiteindelijk leidt lokale verwarming en koeling tot transmissie ($q_g + q_r + q_v$), infiltratie (q_i) en ventilatieverliezen (q_v). De warmtedissipatie door de ventilatoren van de ventilatie-installatie zijn verdisconteert in het ventilatieverlies (P_v). Als laatste resulteert nog één warmtestroom, namelijk van en naar een eventuele warmtecapaciteit in de opblaasbare of uitklapbare caravan (q_c). Bij de analytische modelvorming is het getal van Biot van bijzonder belang. Dit getal geeft de verhouding weer tussen de warmteweerstand binnen een thermische massa en erbuiten. Indien dit getal kleiner dan één tiende is zal een 'lumped sum'-benadering de werkelijkheid goed beschrijven. Op grond van deze overweging en met verwaarlozing van de warmtecapaciteit van de binnenlucht resulteert een eerste orde inhomogene differentiaalvergelijking voor de temperatuur van de thermische massa en de binnenlucht. Ter vereenvoudiging van de bewijsvoering wordt verder verondersteld dat de verstoringen slechts bestaan uit een temperatuursprong en een sinusfunctie in plaats van Fourier-reksen. Ook wordt aangenomen dat de buitentemperatuur in fase is met de zonnestraling. Met de bovengenoemde veronderstellingen resulteert als oplossing van de differentiaalvergelijking



- 1a Hotelkamer in gebruik
- 1b Hotelkamer niet in gebruik
- R Raam met buitenzonwering
- H Hotelkamer
- G Gang
- TV en AV Toe en afvoerventilator
- WTW Recuperatieve warmteterugwinning
- By Bypass
- T Thermische massa

-Figuur 1a en 1b- Een goed geïsoleerde periodiek verwarmde en gekoelde opblaasbare hotelkamer



-Figuur 2- De warmtestromen in kunstmatige leefzones met interne massa

voor de temperatuur van de massa casu quo de capaciteit:

$$\theta_c = \bar{\theta} + G(\theta_0 - \bar{\theta}) + D\hat{\theta} \sin \omega(t - t_v) \quad (1)$$

In vergelijking (1) vormt $\bar{\theta}$ de temperatuursprong door bijvoorbeeld het ontsteken van een houtvuur of het aanzetten van het koffieapparaat en $\hat{\theta}$ vormt de temperatuuramplitudo door de combinatie zonnestraling

en buitentemperatuur. De factor G is het geheugen, D de demping en t_v de tijdvertraging door de capaciteit.

HET VERMOGEN

Voor een uitklapbare 'binnen leefzone' in een massaloze caravan geldt voor de warmtecapaciteit een limietwaarde van nul kilogram en dus nul Wattuur of kilojoule, met als consequentie

een verwaarloosbaar kleine tijdconstante. Het gevolg hiervan is geen temperatuuordemping ($D=1$) en geen tijdvertraging ($t_v=0$) meer. Voor een massaloze leefzone geldt ook nog dat de geheugenfactor oneindig klein wordt ($G=0$). Zo'n caravan herinnert zich, bij wijze van spreken, niets meer uit het verleden. Vanwege de verwaarloosbaar kleine warmtecapaciteit transformeert vergelijking (I) in:

$$\theta_c = \bar{\theta} + \hat{\theta} \sin \omega t \quad (II)$$

Vergelijking (II) geeft weer dat een massaloze caravan een verstoring traagheid en dempingloos volgt. Is het buiten koud dan is de caravan zeer waarschijnlijk ook onbehaaglijk koud. Is het buiten warm dan is de caravan zeer waarschijnlijk ook onbehaaglijk warm. Voor het additioneel te installeren verwarming en koelvermogen resulteert dan:

$$P_m = H_e(\theta_i - \theta_s) \quad (III)$$

In formule (III) is θ_s de stook- en koelgrens volgens

$$\theta_s = \theta_e + \frac{P_1^* + P_2}{H_e}$$

en H_e het specifieke transmissie-, infiltratie- en ventilatieverlies. De warmtestroombalans volgens vergelijking (III) had natuurlijk ook direct afgeleid kunnen worden op basis van stationaire overwegingen vanwege het ontbreken van dynamische invloeden door thermische capaciteiten.

■ VEEL MASSA, KLEIN BIOTGETAL

Voor een 'binnen leefzone' met veel massa geldt een limietwaarde voor de warmtecapaciteit die oneindig groot wordt, zodat een oneindig grote tijdconstante resulteert. De consequentie van een zeer grote tijdconstante is maximale tijdvertraging ($t_v=6$) en volledige demping ($D=0$). Voor een caravan met veel massa geldt ook nog dat de geheugenfactor maximaal wordt ($G=1$). Zo'n caravan herinnert zich alles uit het verleden en zal dan ook niet reageren op verstoringen. Vanwege de zeer grote warmtecapaciteit transformeert vergelijking (I) in:

$$\theta_c = \theta_0 \quad (IV)$$

Formule (IV) vormt een bijzonder interessante uitkomst. Deze limietwaarde duidt op latente massa, dat wil zeggen warmteopslag bij een constante temperatuur. Latente-warmteaccumulatie is alleen maar mogelijk bij fase overgangen, in zogenaamde phase change materials (PCM's). De warmtecapaciteit C [Wh/kg.K] transformeert dan in een enthalpiewaarde H [Wh/kg], dat wil zeggen: geen voelbare warmteopslag. Direct wordt dan duidelijk dat beton of betonkernactivering nooit aan deze limietstelling kan voldoen, omdat in beton alleen maar voelbare warmteopslag kan plaatsvinden, waarbij de temperatuur juist niet constant is en blijft. Beton heeft verder als

nadeel een te groot Biotgetal. De temperatuur van het PCM in de caravan wordt, zoals reeds geconstateerd, niet beïnvloed door stoorinvloeden, dan resulteert voor het additioneel te installeren verwarmings- en koelvermogen in een caravan met latente massa:

$$P_m = H_e(\theta_i - \theta_s) - H_c(\theta_i - \theta_0) \quad (V)$$

Door het vergelijken van formule (III) met (V) is wiskundig bewezen dat het additioneel te installeren koel- en verwarmingsvermogen in een caravan met latente massa de waarde $\Delta P_m = H_c(\theta_i - \theta_0)$ [W] kleiner kan zijn dan in een massaloze caravan, mits een correcte smelttemperatuur θ_0 [°C] wordt geïnstalleerd. Als eerste conclusie resulteert: thermische capaciteit reduceert het additioneel te installeren verwarmings- en koelvermogen.

■ BEHAAGLIJKHEID EN LATENTE MASSA

Overeenkomstig NEN 15251 geldt voor een thermische behaaglijkheidsklasse, Romeinse II, een operationele binnentemperatuur van:

$$\bar{\theta}_i = 21,5 + 0,15\bar{\theta}_e \quad (VI)$$

Vergelijking (VI) laat zien dat als het vriest dat het kraakt met een minimale buitentemperatuur van -10 [°C] de temperatuur van de leefzone +20 [°C] moet bedragen, waarbij een tijdelijke onder schrijding tot +19 [°C] acceptabel is. Is het buiten daarentegen tropisch warm met een buitentemperatuur van +30 [°C] dan mag de maximale leefzone temperatuur +26 [°C] bedragen, met een tijdelijke overschrijding tot +27 [°C]. Het adaptieve kledinggedrag van de mens is debet aan deze seizoensgebonden binnentemperaturen. Men kleedt zich nu eenmaal 's winters warmer dan 's zomers. Het lijkt dus alleszins redelijk dat de optimale smelttemperatuur gelijk moet zijn aan een starttemperatuur van $\theta_0 = 21,5$ [°C]. Het maximale verwarmingsvermogen van het PCM bedraagt dan $P_m = H_c(21,5 - 19) = 2,5H_c$ [W] en het maximale koelvermogen $P_m = H_c(27 - 21,5) = 5,5H_c$ [W].

Naast een seizoensmatige temperatuur kent de mens ook nog een dagelijks temperatuurgedrag. Op basis van het bioritme van de menselijke kerntemperatuur moet het 's avonds warmer zijn dan 's morgens en 's nachts. De behaaglijke binnentemperatuur bestaat dan uit een daggemiddelde component ten gevolge van het kledinggedrag en een uurlijkse component ten gevolge van de bioritmische kerntemperatuur. Vanwege de clo-waarde van de kleding is de toegelaten zomerse temperatuuramplitudo groter dan 's winters. Het is nu de kunst zoveel latente massa te installeren dat de winterse en zomerse behaaglijkheidstemperaturen zonder additionele verwarming en koeling direct worden gevolgd.

■ ENERGIEBESPARING

Zoals reeds bewezen resulteert thermische massa in kleinere en dus goedkopere verwarmings- en koelinstallaties. De vraag is dan nog: leidt meer capaciteit ook tot energiebesparingen? De noodzakelijke thermische energie voor het klimatiseren wordt berekend uit het product van geleverd koel- en verwarmingsvermogen met de bijbehorende koel- en verwarmingstijden gesommeerd over een dag, seizoen of jaar. Eén en ander volgens:

$$Q_m = \int_0^T P_m dt \quad (VII)$$

Wat nu in woorden volgt wordt met sinussen bewezen in kader 1 op de website van TVVL. De integraal volgens vergelijking (VII) wordt, in eerste instantie, berekend voor een caravan zonder latente massa. Uit overwegingen van energiebesparing worden Nederlandse gebouwen en dus ook de caravan voorzien van een optimaliserende nachtverlaging. 's nachts wordt de verwarming uitgeschakeld en in de ochtenduren volgt de opwarming naar de gewenste binnentemperatuur. In de loop van de dag, als de interne warmtebelasting toeneemt door zoninstraling en het schilverlies afneemt door hogere dagtemperaturen, wordt de verwarming uitgeschakeld. Na verloop van tijd wordt, vanwege het ontbreken van voldoende warmtecapaciteit de koeling ingeschakeld. Het gevolg zal dus zijn dat een massaloze caravan 's morgens wordt verwarmd en 's middags gekoeld, weliswaar met koudere buitenlucht, maar toch. De toegevoerde warmte energie in de morgen wordt 's middags afgevoerd door verhoogde ventilatie. De ramen van de caravan worden geopend. Als er overdag voldoende latente massa is geïnstalleerd wordt de leefzone gekoeld door warmteopslag in de massa en wordt 's morgens de caravan verwarmd door de geaccumuleerde warmte. De verliesvrije opslag functioneert als optimaliserende opwarming, zodat de additionele elektrische heater en of splitairconditioner niet in bedrijf hoeft te komen. Het mooiste zou zijn dat de binnentemperatuur gelijke tred houdt met de bioritmische kerntemperatuur. Op grond van de bovengenoemde overwegingen vereenvoudigd vergelijking (VII) voor de caravan met PCM tot:

$$Q_m = \int_0^T [H_e(\bar{\theta}_i - \bar{\theta}_s) - H_c(\bar{\theta}_i - \theta_0)] dt \quad (VIII)$$

Omdat de caravan zonder PCM geen thermische capaciteit ($H_c=0$) heeft, resulteert uit vergelijking (VIII):

$$Q_m = \int_0^T [H_e(\bar{\theta}_i - \bar{\theta}_s)] dt \quad (IX)$$

Door het vergelijken van formule (VIII) met (IX) is wiskundig bewezen dat, in een caravan met latente massa, niet alleen het te installeren

koel- en verwarmingsvermogen afneemt maar ook het energiegebruik, en wel met de waarde $\Delta Q_m = \int_0^T H_c(\bar{\theta}_i - \theta_0)dt$ [Wh].

Als tweede conclusie resulteert: thermische capaciteit reduceert niet alleen het additioneel te installeren verwarmings- en koelvermogen maar leidt ook tot energiebesparingen.

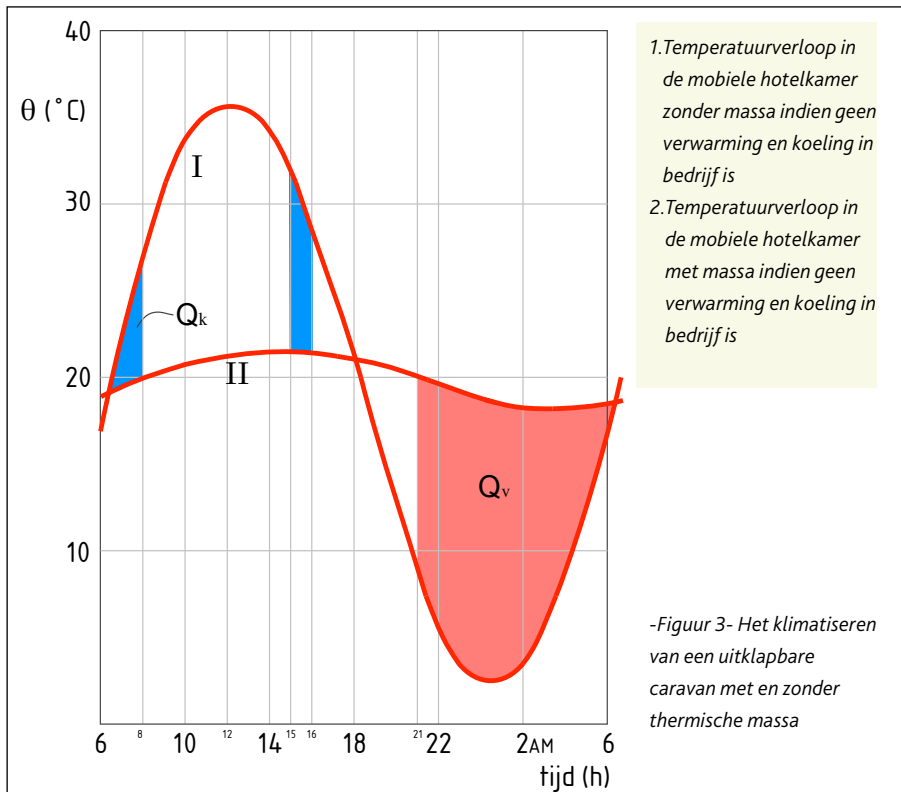
Figuur 3 geeft visueel weer wat in kader 1 op de TVVL-website wiskundig bewezen wordt en in voorgaande verwoord is. In figuur 3 betreft het, in eerste instantie, een uitklapbare massaloze caravan. De kampeerder opent om circa 21.00 uur de deur van de caravan. Op dat moment start de ventilatie-installatie en klapt de caravan uit. Vanwege het ontbreken van thermische capaciteit daalt de temperatuur in de leefzone, tijd- en dempingloos naar de stookgrens. Dit zal de kampeerder doorgaans als onbehaaglijk koud ervaren, zodat de verwarming de goed geïsoleerde caravan traagheidloos opwarmt van de stookgrens naar de gewenste operationele temperatuur. De rest van de nacht moet de caravan verwarmd worden. De zon komt op rond 06.00 uur 's morgens. In de massaloze caravan maakt de zonnestraling zich direct merkbaar waardoor de leefzone 's morgens van circa 06.30 uur tot 08.00 uur additioneel moet worden gekoeld. Dan verlaat de kampeerder de caravan. De ventilatie-installatie schakelt uit en de caravan klapt in. De 'binnen leefzone' wordt weer buitenlucht, die niet verwarmd of gekoeld hoeft te worden. Rond 15.00 uur opent de kampeerder de caravandeur en klapt de massaloze caravan weer uit. De temperatuur schiet direct naar de koelgrens, die als niet behaaglijk wordt ervaren. De koeling komt in bedrijf tot circa 16.00 uur wanneer de kampeerder de caravan verlaat. In figuur 3 is ook de temperatuur van een caravan met latente massa met een smelttemperatuur van 21,5 graden Celsius weergegeven. De kampeerder opent weer om circa 21.00 uur de deur, de ventilatie-installatie start en de caravan klapt weer traagheidloos uit. De verwarming en koeling komt echter niet in bedrijf, omdat de thermische capaciteit de caravan behaaglijk conditioneert. Figuur 3 maakt duidelijk dat de caravan met thermische massa een energiebesparing oplevert ter grootte van $Q_v + Q_k$ [Wh] ten opzichte van een caravan zonder latente massa.

■ THERMISCHE AUTARKIE

Een bijzonder duurzame limietwaarde vormt thermische autarkie, waarvoor geldt:

$$Q_m = 0 \quad (X)$$

Voor een caravan zonder massa is het rechterlid van vergelijking (IX) doorgaans niet gelijk aan nul. Het grootste gedeelte van het jaar vormt de stook- en koelgrens niet de gewenste behaaglijkheidstemperatuur. De auteur



sprekt hier uit eigen ervaring. Ter compensatie van de onbehaaglijke situatie is er in een massaloze autarkische caravan geen additioneel koel- en verwarmingsvermogen aanwezig. Niet in de vorm van een werktuigbouwkundige installatie maar ook niet als thermische massa. Indien thermische autarkie in een massaloze caravan wel dagelijks het geval zou zijn, zouden caravans een overbodige luxe vormen, omdat men dan, het hele jaar door, net zo goed buiten zou kunnen kamperen. Voor de caravan met latente massa zal het rechterlid van vergelijking (VIII) wel dagelijks gelijk aan nul kunnen zijn, omdat voldoende compenserend koel- en verwarmingsvermogen, in de vorm van latente massa, aanwezig is. De volgende interessante vraag is dan: wat zijn de voorwaarden voor Autarkische, zelfvoorzienende, caravans?

■ PERPETUUM MOBILE EN EVOLUTIE

Ondanks het zeer lange geheugen is latente capaciteit geen perpetuum mobile dat onbeperkt warmte levert op een temperatuur niveau θ_0 [°C]. Tijdens stookdagen moet het PCM met warmte worden gevuld en tijdens koeldagen moet de warmte uit het PCM worden gehaald. In een thermische autarkische caravan kan het op- en ontladen niet plaats vinden door een heattetje of airconditioner. Het op- en ontladen moet mede via de carrosserie plaatsvinden. De caravanshil moet hierop worden gedimensioneerd. Op basis van de vergelijkingen (VIII) en (X) en met de substitutie van de stook- en koelgrens, geldt voor

een caravan met voldoende latente massa:

$$\int_0^{T,\Delta t} H_e \left(\bar{\theta}_i - \bar{\theta}_e - \frac{P_1 + P_2}{H_e} \right) dt = \int_0^T H_c (\bar{\theta}_i - \theta_0) dt = 0 \quad (XI)$$

In formule (XI) is θ_i de daggemiddelde operationele binnentemperatuur. Het linkerlid van deze vergelijking geeft aan dat gedurende een ingeslingerde winterse of zomerse ontwerpdag, het schilverlies gelijk moet zijn aan de warmte-dissipatie door zonnestraling, elektrische apparaten en mensen. Het rechterlid van vergelijking (XI) geeft aan dat tijdens een ontwerpdag in het PCM geen netto warmte-opslag of ontlading plaatsvindt. Dat wil zeggen de, overdag, geaccumuleerde koel-energie is 's nachts weer volledig vrijgekomen als verwarmingsenergie. Het PCM fungeert als een verliesvrije warmtebuffer. Als dat het geval is gaat de leefzone functioneren als een thermosfles met massa, die overdag geladen wordt en 's nachts ontladen. Dit kan ook! Op onze breedtegraad schijnt sinds 4,5 miljard jaar overdag de zon en 's nachts niet. Ook al sinds 4,5 miljard jaar is het 's nachts kouder dan overdag, 's zomers en 's winters. Tijdens het stookseizoen, overdag, als het warmer is en de zon schijnt moet voldoende warmte geaccumuleerd worden om daarmee de koudere nacht zonder zonnestraling door te komen. Tijdens het koelseizoen wordt daarentegen tijdens de koudere nachten juist de overvloedige warmte naar buiten afgevoerd. Zodoende moet de leefzone, 's winters en 's zomers, overdag, in een voortdurende staat van koeling gebracht worden zonder beïnvloeding van de thermische behaaglijkheid; 's winters maxi-

maal en 's zomers minimaal. De autarkische caravan is dan ook voorzien van regelbare buitenzonwering. In het stookseizoen wordt de buitenzonwering bij zonsopkomst geopend en gesloten tijdens zonsondergang. In het koelseizoen daarentegen wordt de zonwering overdag juist gesloten en 's nachts geopend. Het betreft een extra geïsoleerde buitenzonwering. De warmteweerstand van het raam is overdag dan ook anders dan 's nachts. Homo Sapiens Sapiens, de allochtone nieuwkomer, heeft zich met het bioritme van de kerntemperatuur aangepast aan het dag/nachtritme. Overdag is de behaaglijke binnentemperatuur warmer dan de smelttemperatuur en 's nachts kouder. Deze evolutionaire aanpassing van het menselijke bioritme aan het dag/nachtritme, van de afgelopen 4,5 miljard jaar, draagt bij aan de realisering van autarkische leefzones.

OPTIMALISEREN

Uitgaande van het linkerlid van vergelijking (XI) wordt de carrosserie van de caravan met latente massa geoptimaliseerd. Vanwege de regelbare geïsoleerde buitenzonwering wordt het dagelijkse transmissieverlies van de ramen gesplitst in een dag- en nachtdeel. Dan resulteert uit (XI):

$$(U_{r,d}G_d + U_{r,n}G_n)A_r + (U_{g,e}A_g + H_{v1} + H_1)G - (F_z Q_z + Q_i^*) = [(1+\eta)P_v - (1-\eta)H_v(\theta_i - \theta_e)]\Delta t \quad (XII)$$

In vergelijking (XII) zijn G_n , G_d en G het aantal graaduren voor de nachttijd, de overdagtijd en een hele dag. Veruit de goedkoopste manier om van een caravan een autarkische thermosfles te maken is te investeren in de verbetering van het temperatuurrendement van de warmteterugwinning in de ventilatielucht. Dit is goedkoper dan extra schilisolatie. Een isotherme luchttoevoertemperatuur tijdens het verwarmingsseizoen vormt het maximaal haalbare. Dit wordt berekend door het rechterlid van vergelijking (XII) gelijk aan nul te stellen. Met

$$f_{\eta} = \frac{\Delta p}{\eta_v \rho c (\theta_i - \theta_e)}$$

bedraagt het minimaal te installeren temperatuur rendement dan:

$$\eta = 1 - f_{\eta} / (1 + f_{\eta}) \quad (XIII)$$

Na de optimalisatie van de warmteterugwinning volgt de optimalisering van het raamoppervlak, ook weer voor het verwarmingsseizoen. Voor de afweging meer of minder raamoppervlak versus minder of meer door de zon beschenen geveloppervlak is de interne vrije warmtedissipatie door mensen, verlichting en elektrische apparaten niet van belang. In formule (XII) geldt dan $Q_i^* = 0$. Transmissieverliezen door de vloer en binnenwanden doen er ook niet toe en vormen voor de berekening van het raamoppervlak adiabatische systeemgrenzen, waarvoor geldt $H_{v1} = 0$.

Hetzelfde geldt voor de luchtinfiltratie met $H_1 = 0$. Het betreft een goed geïsoleerde carrosserie zodat van toepassing is: $aU_{g,e} / \alpha_e \cdot A_z < ztaA_r$, of te wel de warmtedissipatie door de zonbeschenen dichte gevel volgens $aU_{g,e} / \theta_e \cdot A_z Q_z$ is verwaarloosbaar klein ten opzichte van de warmtedissipatie door zoninstraling door de ramen $ztaA_r Q_z$. De factor $Fz = ztaA_r + aU_{g,e} / \alpha_e \cdot A_z$ in vergelijking (XII) reduceert dan tot $ztaA_r$. Met $f_r = A_r / A_g$ en $A_r + A_z = A_g$ vereenvoudigd vergelijking (XII), waarbij het rechterlid door de optimalisering van de warmteterugwinning nul is geworden tot:

$$U_{r,d}G_d + U_{r,n}G_n = zta \cdot q_z \cdot U_{g,e} \cdot G \cdot (1 - f_r) / f_r \quad (XIV)$$

De goedkoopste winterse autarkie vormt maximalisatie van vergelijking (XIV) waardoor de warmteweerstand van het raam wordt geminimaliseerd en zodoende ook de investeringen. Twee situaties doen zich nu voor. De eerste betreft een tussenruimte met slechts één buitengevel. De tweede vormt een vrijstaande caravan met vier buitengevels, een vloer en een dak. Voor een tussenruimte is het warmteverlies van de zonbeschenen buitenschil maximaal, $(\max(U_{r,d}G_d + U_{r,n}G_n))$ indien $f_r = 1$. Dit betekent een 100 % glasgevel voor een tussenvertrek. En, nu opletten, ook voor een Noord gevel!

Voor een vrijstaande caravan ligt de zaak iets gecompliceerder. De factor f_r heeft betrekking op het zonbeschenen buitenoppervlak dat uit vier geveldelen en het dak bestaat. Dit oppervlak is groter dan het vloeroppervlak. Maatgevend voor het stookseizoen zijn bewolkte dagen met alleen diffuse zonnestraling. In het geval van diffuse zonnestraling bedraagt de maximale warmtedissipatie in de caravan $A_{v1} Q_z$, dat wil zeggen nooit meer dan in het vrije veld. De maximale zonnebelasting door de ramen bedraagt daarentegen $zta f_r A_g Q_z$. In het optimale geval zijn de twee vergelijkingen aan elkaar gelijk, zodat voor een vrijstaande caravan geldt:

$$f_r = A_{v1} / zta \cdot A_g \quad (XV)$$

De derde optimalisatie betreft de berekening van de minimale raamkwaliteit. De raamkwaliteit wordt berekend voor $f_r = 1$. Vergelijking (XIV) vereenvoudigd dan tot:

$$U_{r,n}G_n = zta \cdot q_z \cdot U_{r,d}G_d \quad (XVI)$$

Het rechterlid van vergelijking (XVI) geeft nadrukkelijk aan dat de warmtewinst door zonnestraling groter moet zijn dan het transmissieverlies overdag. Het warmte-overschot wordt in de latente massa geaccumuleerd voor nachtverwarming. Uitgaande van deze veronderstelling moet het rechterlid van vergelijking (XVI) groter dan nul zijn. De minimale

raamkwaliteit bedraagt dan:

$$zta / U_{r,d} = G_d / Q_z \quad (XVII)$$

Na optimalisatie van de warmteterugwinning (vergelijking XIII), het raamoppervlak (vergelijking XV) en de raamkwaliteit (vergelijking XVII) volgt als vierde optimalisatiestap de berekening van de extra nachtsisolatie van de buitenzonwering. Tijdens gebruik moet de leefzone thermisch behaaglijk zijn maar als de caravan niet in gebruik is, zijn geen eisen aan de leefzone gesteld, behoudens het vorstvrij houden van het sanitaire koudwater. De nachtelijke isolatiedikte wordt zodoende berekend met interne warmtedissipatie door mensen en elektrische apparaten, waarvoor geldt $Q_i^* \neq 0$. Met de voorwaarde, een isotherme ventilatielucht en de substitutie van $U_{r,n} = \lambda \cdot U_{r,d} / \lambda + d \cdot U_{r,d}$ in vergelijking (XII) volgt na enig rekenwerk voor de optimale isolatiedikte van de buitenzonwering:

$$d = \left(\frac{H_{r,d}G_n}{F_z Q_z + Q_i^* - (H_g + H_{v1} + H_1)G - H_{r,d}G_d} - 1 \right) \frac{\lambda}{U_{r,d}} \quad (XVIII)$$

Als vijfde optimalisatiestap volgt het zomerse nachtventilatie-debiet voor het ontladen van het PCM. Het ontladdebiet wordt berekend voor een zomerse ontwerpdag. Door middel van directe vrije buitenluchtcooling wordt de geaccumuleerde warmte 's nachts uit de leefzone naar buiten afgevoerd. Indien het berekende ontladdebiet groter is dan het noodzakelijke ventilatie-debiet wordt in deze extra ventilatie voorzien door te openen ramen of door een directe buitenluchtaansluiting op het PCM, zodat de gebalanceerde mechanische ventilatie-installatie niet wordt overgedimensioneerd. Uitgaande van vergelijking (XII) geldt dan voor het nachtelijke ontladdebiet: (XIX, zie onderaan deze pagina)

De laatste optimalisatiestap behelst de berekening van de latente warmtecapaciteit. Voor de berekening van de PCM-massa wordt verondersteld dat de caravan zomers overdag gedurende 8 uur dienst doet als kantoor en 's avonds als woning en slaapvertrek. Om acht uur 's morgens gaat het licht aan en start de computer. De warmtedissipatie door mensen, verlichting en computers (P_v) veroorzaken sprongresponsies. Het betreft een tropische ontwerpdag en het weer ($P_v; \theta_e$) resulteert in een sinusresponsie. De dagelijkse binnentemperatuurstijging wordt door de warmteaccumulatie in het PCM begrensd. Tijdens bedrijfstijd moet de sommatie van sprong- en sinusresponsie kleiner zijn dan maximaal toelaatbaar voor het bioritme van de mens. Een ander volgens (zie volgende pagina bovenaan):

$$H_{v,n} = \frac{F_z Q_z + Q_i^* + (1+\eta)P_v \frac{T}{v} - [(H_{g,d} + (1-\eta)H_{v,d})G_d + H_{g,n}G_n + (H_{v1} + H_1)G]}{G_n} \quad (XIX)$$

$$|\Delta\theta_{\text{sinus}}| + |\Delta\theta_{\text{sprong}}| \leq |\Delta\theta_{\text{bio,max}}| \quad (\text{XX})$$

Helaas is niets in het leven ideaal, ook niet de toegepaste fase-overgangmaterialen. Deze smelten en bevriezen niet bij een vaste temperatuur maar met een smelt- en stoltraject van een paar graden Celsius. De enthalpie transformeert dan weer in een warmtecapaciteit.

■ KLIMAGERECHTES DIMENSIONEREN

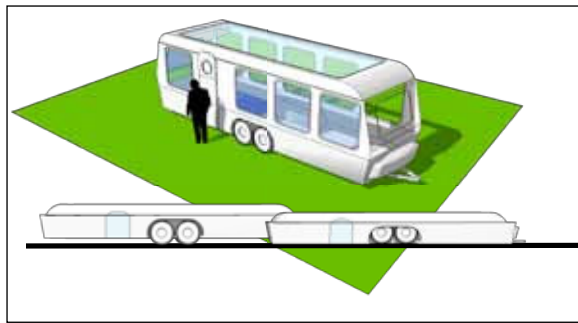
Voor de meer praktisch georiënteerde vakgenoten wordt de uitklapbare autarkische caravan in kader 2 op de TVVL-website Klimagerecht gedimensioneerd. De afmetingen van de caravan bedragen; hoogte en breedte 2,5 m met een lengte van 6 m. Een 0,26 m dik PUR-sandwichpaneel vormt de carrosserie. Het Klimagerechtes dimensioneren van de caravan wordt gerealiseerd door de chronologische berekening van zes optimalisatiestappen, volgens:

1. Het dimensioneren van het temperatuurrendement van de (recuperatieve) warmteterugwinning door toepassing van vergelijking (XIII).
2. Het dimensioneren van het raamoppervlak door toepassing van vergelijking (XV).
3. Het dimensioneren van de minimale raamkwaliteit door toepassing van vergelijking (XVII).
4. Het dimensioneren van de extra nachtisolatie van de regelbare buitenzonwering door toepassing van vergelijking (XVIII).
5. Het dimensioneren van het zomerse ontlad buitenluchtdebiet door toepassing van vergelijking (XIX).
6. Het dimensioneren van de PCM-massa door toepassing van vergelijking (XX).

De berekening van het warmteterugwinrendement, het raamoppervlak, de raamkwaliteit en de isolatiedikte van de regelbare buitenzonwering is gebaseerd op de extreem koude winter van 1963. Deze Elfstedentochtwinter kenmerkte zich door een afwisseling van minder koude dagen met alleen diffuse zonnestraling met koudere dagen met veel directe zonnestraling. Maatgevend blijken de minder koude dagen te zijn vanwege de geringere zonnestraling. De ontwerpwaarden voor de winter bedragen

$$\bar{\theta}_e = -6,0 [^{\circ}\text{C}], \hat{\theta}_e = \pm 2,5 [^{\circ}\text{C}] \text{ en } Q_z = 440 \left[\frac{\text{Wh}}{\text{m}^2} \right]$$

als diffuse globale zonnestraling. Het te installeren zomerse nachtventilatie debiet en de PCM-massa is gebaseerd op een zomerse ontwerpdag volgens NEN 5067. Na het industrieel ontwerpproces middels het 'Klimagerechtes dimensioneren' valt nog maar één vraag te beantwoorden namelijk: moet het een opblaasbare casu quo uitklapbare



-Figuur 4- Een Autarkische caravan die oriëntatie onafhankelijk goed functioneert tijdens de extreem koude winter van 1963 en tijdens een tropisch warme zomer

1. HR-WTW-unit met zomerse bypass. Ventilatielucht debiet 120 m³/h en een temperatuurrendement van de recuperatieve warmteterugwinning van 96%.
2. Een Autarkische PCM-massa van 180 kg en een extra nachtelijk ontladdebiet van 110 m³/h.
3. Regelbare geïsoleerde buitenzonwering bestaande uit PUR schuim met een dikte van 0,19 m of equivalent.
4. Een raamoppervlak ter grootte van 25 m² verdeeld over een zonnedak en ramen in de carrosserie met zta=0,6 en U_r=0,7 W/m²K.
5. De carrosserie bestaat uit een 0,26 m PUR-sandwichpaneel of equivalent, behoudens de vloer. De dikte van de vloer bedraagt maar 0,13 m omdat de caravan na het parkeren 's winters door de wielen gaat maar 's zomers juist niet.
6. 'Echte' 12VDC-motoren op de beide ventilatoren van de HR-WTW-unit met elk een elektrisch vermogen van 20 W, een accu en PV cellen.
7. De geïsoleerde buitenzonwering is tijdens het stookseizoen 's nachts en tijdens het koelseizoen grotendeels overdag gesloten.
8. Indien de caravan niet in gebruik is, is deze 's winters overdag en 's zomers 's nachts opgeblazen.

caravan zijn of niet? Is de caravan 's winters overdag niet in gebruik dan moet de leefzone in combinatie met het PCM functioneren als thermische zonnecollector, zonder beïnvloeding van de thermische behaaglijkheid. Dit kan alleen maar, vanwege de factor $F_r = A_v / zta$. A_g in opgeblazen toestand. Indien de caravan gedurende het verwarmingsseizoen 's nachts niet in gebruik is, moet deze ter voorkoming van warmteverliezen niet uitgekapt zijn. Is de caravan 's zomers overdag niet in gebruik dan is de caravan ter voorkoming van extra warmtebelastingen niet opgeblazen. Gedurende de zomernacht is de caravan weer wel opgeblazen. Uit oogpunt van minimalisatie van het materiaal gebruik heeft een opblaasbare caravan voordelen boven een niet opblaasbare caravan.

■ STANDAARDISATIE

Wiskundig is bewezen dat capaciteit het te installeren koel- en verwarmingsvermogen reduceert en dit resulteert in jaarlijkse energiebesparingen. Die besparingen kunnen zelfs zo ver oplopen dat in combinatie met de optimalisatie van de carrosserieschil een oriëntatie onafhankelijke thermisch autarkische toestand realiseerbaar is. Ook de jaarlijkse onderhoudskosten verminderen dan, want de enige bewegende delen in de zelfvoorzienende leefzone zijn twee zeer kleine centrifugaal ventilatoren in de ventilatieunit en een kleine axiaalventilator voor het PCM. De berekenbaarheid volgens het Klimagerechtes dimensioneren leidt tot

standaardisatie van de gebouwde omgeving. Tijdens het ontwerpproces zijn de berekeningsuitkomsten steeds weer dezelfde. Dit leidt tot dezelfde ontwerpbeslissingen. Dezelfde ontwerpbeslissingen leiden weer tot dezelfde duurzame gebouwde omgeving. We leven nu eenmaal in een tijd dat de bouwwereld zich moet realiseren dat de wetten van de architectonische esthetica ondergeschikt zijn aan de wetten van een duurzame samenleving. De gevel en de thermische massa gaan volgens het Klimagerechtes dimensioneren fungeren als motor voor de airconditioning. In tegenstelling tot literatuur [2] leidt dit wel degelijk tot standaardisatie van de gebouwde omgeving, zoals weergegeven in figuur 4. Figuur 4 is gebaseerd op de ontwerpbeslissingen in kader 2 op de website van de TVVL.



Het gehele artikel inclusief wiskundige deductie is terug te vinden op de TVVL-website. Gebruik de QR-code.

■ LITERATUUR

1. Keller, Bruno, Teubner, B.G.; Klimagerechtes Bauen, Stuttgart 1997.
2. Vaan, C. de, Wiedenhoff, J., en Hensen, J.; De mythe thermische massa; TVVL Magazine, juli-augustus 2010,;
3. www.Autarkis.nl
4. www.tvvl.nl