

# Afgifte – koeling – nauwkeurige berekening en simulatie

Kennisbank Bouwfysica

Auteurs: dr.ir. Peter van den Engel, Martine Verhoeven, ir. Leo de Ruijsscher, ir. John van der Vliet

## 1 Inleiding

De warmte- en koelbehoefte van ruimten kan met “dynamische” of “stationaire” methoden worden berekend. Bij dynamische methoden wordt met behulp van wiskundige beschrijvingen van de eigenschappen van een ruimte - een fysisch model - nagegaan hoe die ruimte reageert op in de tijd variërende omstandigheden. Bij stationaire berekeningen wordt verondersteld dat de omstandigheden constant zijn en worden de dynamische effecten in rekening gebracht door tabellen te gebruiken waarin die effecten zijn verwerkt. Meestal wordt de warmtebehoefte zo berekend. Voor de bepaling van de koelbehoefte worden steeds vaker dynamische methoden gebruikt. Tot nu toe zijn alleen stationaire methoden in NEN-normen vastgelegd.

Bij het architectonische ontwerpproces gaat het er m.b.t. de klimaatregeling vooral om inzicht in de orde van grootte te verkrijgen. Welke afmetingen krijgen de installaties en hoeveel ruimte is nodig voor inbouw van centrale installaties, distributie-installaties en eindapparaten? De benodigde inbouwruimte wordt primair bepaald door het toe te passen klimaatregelsysteem en dat systeem is weer afhankelijk van het verwarmings- en koelvermogen dat nodig is om de ruimten in het gebouw op de gewenste temperatuur te kunnen houden. De gebouwwontwerper beperkt zich met de systeemkeuze meestal tot het detailniveau van een Voorlopig Ontwerp, waarbij globale berekeningen volstaan. De in NEN-normen beschreven stationaire methoden, zoals die door installatieontwerpers worden toegepast, zijn daarvoor te gedetailleerd. Wel vormden ze de basis voor de ontwikkeling van meer op het architectonische ontwerpdoel afgestemde globale berekeningen.

Met dynamische berekeningen is de invloed van het warmteaccumulerend vermogen van ruimten beter na te gaan dan met stationaire methoden. Dat geldt ook voor de invloed van de sterk wisselende meteorologische omstandigheden omdat bij dynamische berekeningen gebruik wordt gemaakt van reële waarden voor zonnestraling, wind en temperatuur. Omdat differentiaalvergelijkingen moeten worden opgelost - wat slechts numeriek kan - is voor dynamische berekeningen een computer nodig. Een goed voorbeeld van een voor dit doel bruikbaar computerprogramma is VA114 van de Vereniging tot Automatisch Berekenen van Installaties in gebouwen (VABI).

Bij het door TNO ontwikkelde VA114-programma moeten de geometrische en fysische eigenschappen van de ruimte, het verwarmings- en koelvermogen van de installatie, de gebruikstijden van de ruimte en de interne belasting door personen, verlichting en apparatuur als gegeven worden ingevoerd. Het programma berekent voor elk uur van een op te geven meteorologisch jaar de binnentemperatuur en het energiegebruik en geeft een overzicht van het aantal uren dat de binnentemperatuur in dat jaar een op te geven waarde over- of onderschrijft. Een berekening met het programma wordt om die reden ook wel “temperatuuroverschrijdingsberekening” of kortweg TO-berekening genoemd. Door “trial and error” is met het programma een koelvermogen te vinden waarvoor geldt dat in jaar  $x$  een binnentemperatuur  $y$  niet meer dan  $z$  uren wordt overschreden. In de beginperiode, toen deze methode in Nederland populair werd, nam men twee temperatuurgrenzen  $y_1$  en  $y_2$  die

respectievelijk niet meer dan  $z_1$  en  $z_2$  uur mochten worden overschreden. Later werd voorgesteld om één temperatuurgrens  $y$  te nemen en elk uur dat de berekende temperatuur deze grens overschrijdt te vermenigvuldigen met een waarde die afhankelijk is van de mate waarin  $y$  wordt overschreden. Dit werd de “Gewogen Temperatuur Overschrijding” of GTO-berekening genoemd. Recent is bedacht dat de waarde  $y$  afhankelijk is te stellen van de effectieve temperatuur van de buitenlucht in de periode voorafgaand aan het te berekenen tijdstip en van de aanwezigheid van te openen ramen, de ATG of “Adaptieve Temperatuur Grenswaarde”. Koelvermogens die met TO-, GTO- en ATG-berekeningen zijn bepaald wijken onderling af van de vermogens die uit stationaire berekeningen volgen. De verschillen zijn te verklaren uit het gebruik van verschillende overschrijdingscriteria en verschillende meteorologische gegevens.

Een veel gestelde ontwerp vraag is: welke vorm, thermische eigenschappen en gebruik moet een gebouw krijgen om met natuurlijke koeling te kunnen volstaan. Beantwoording van deze vraag is met TO-berekeningen en varianten daarop mogelijk. Ook is met deze berekeningen na te gaan welk effect vorm, thermische eigenschappen en gebruik hebben op de energieconsumptie van het gebouw. Evident is dat natuurlijke koeling eerder mogelijk is en het energiegebruik beperkter naarmate een milder meteorologisch jaar en hogere waarden voor  $y$  en  $z$  worden genomen. Helaas bestaat er anno 2004 geen consensus over deze waarden en het te gebruiken meteorologisch jaar om te kunnen spreken van een gebouw met een "redelijk comfort". Sommige ontwerpers koppelen - voor het voldoen aan een bepaalde gebouwprestatie - hoge  $y$ - en  $z$ -waarden aan het meteorologisch gemiddelde jaar 1964-1965. Voorspelbaar is dat gebouwen die niet meer dan deze prestatie kunnen leveren tijdens warmere jaren, zoals 1994 of 1995 waren, een groot deel van de tijd onbehaaglijk warm en door velen onaanvaardbaar gevonden zullen worden. Een bijkomend nadeel is dat niet is te controleren of een gebouw de berekende prestatie ook werkelijk levert. Zo is het bijna ondoenlijk om een jaar lang te meten en vervolgens onmogelijk om uit de meetgegevens af te leiden of in jaar  $x$  aan de criteria  $y$  en  $z$  wordt voldaan omdat ieder jaar, meteorologisch gezien, uniek is. De jaren verschillen niet alleen in het aantal uren dat luchttemperatuur, zonnestraling, windsnelheid en luchtvochtigheid bepaalde waarden hebben, ook het verloop van die waarden verschilt terwijl juist dat verloop een grote invloed heeft. Zo laat een periode van 4 dagen met een bepaalde hoge buitentemperatuur meer uren overschrijding en een hogere maximale binnentemperatuur zien dan twee perioden van 2 dagen met dezelfde buitentemperatuur.

Dynamische berekeningen zijn vooral geschikt om na te gaan welke invloed bouwkundige en installatietechnische ontwerpkeuzes hebben op het binnenklimaat en het energiegebruik. NEN 5067 biedt die mogelijkheden niet, wel is met deze norm op gestandaardiseerde wijze de koelbehoefte te berekenen die ontstaat na 5 warme dagen met 75% van de maximaal mogelijke intensiteit van de zonnestraling. Tijdens de ontwikkeling van de norm was er consensus over het redelijk comfortabele binnenklimaat dat ontstaat als een klimaatinstallatie aan deze prestatie beantwoordt. Betrekkelijk eenvoudig is te controleren of deze prestatie ook werkelijk wordt geleverd, namelijk door na te gaan of de vertrektemperatuur na 5 warme dagen aan de gestelde temperatuureis voldoet.

Het maken van dynamische berekeningen met programma's zoals VA-114 vraagt de kennis van een ervaren installatieontwerper en de routine van een regelmatige gebruiker van het programma. Daarom is dit programma niet direct geschikt voor gebruik door architecten en andere bouwkundige ontwerpers. Onderzocht is hoe VA114 zodanig inzetbaar kan worden

gemaakt dat architecten hun ontwerp zelf *globaal* kunnen optimaliseren wat betreft comfort en energiegebruik. Voor dat doel is een interface ontwikkeld waarmee de voor het architectonisch ontwerp relevante parameters kunnen worden beïnvloed. Dit heeft geresulteerd in het programma ORCA.

Voor het vaststellen van de warmte- en koelbehoefte van een gebouw, het bijbehorende binnenklimaat en het energiegebruik wordt in de advieswereld veelvuldig gebruik gemaakt van gebouwsimulatieprogramma's. Bij de faculteit Bouwkunde van de TU-Delft worden o.a. de simulatieprogramma's ORCA, VA114, CAPSOL en TRNSYS gebruikt.

Het programma CAPSOL is meer bouwfysisch geïntereerd dan VA114 en heeft o.a. een transparante numerieke uitvoer.

Met TRNSYS kunnen veel verschillende installatiecomponenten, zoals energieopslag, worden beoordeeld. Ook kunnen temperatuurregelingen gedetailleerd worden nagebootst.

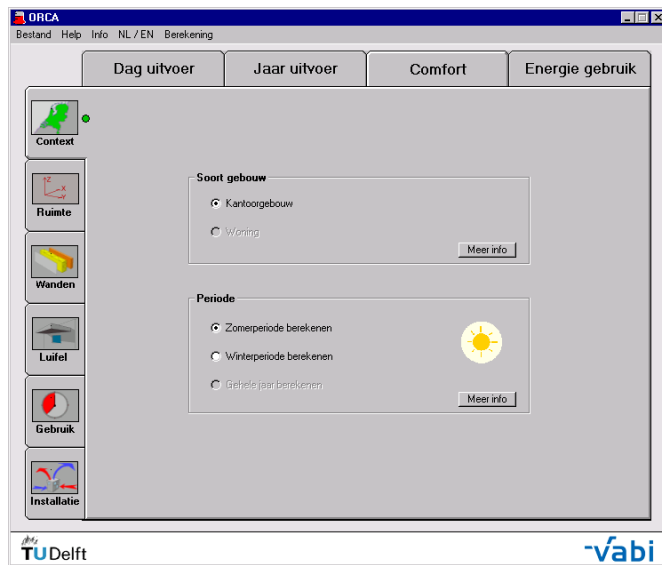
VA114 in de "uniforme omgeving" (Windowscherm) heeft als voordeel dat een gebouw ruimtelijk zichtbaar op het scherm kan worden ingevoerd. Als een gebouw eenmaal is ingevoerd kunnen met dezelfde invoer ook andere berekeningen (warmteverlies, ventilatie, verlichting, EPN, enz.) worden gedaan.

## 2 Gebruiksmogelijkheden van ORCA

### 2.1 Toelichting op het programma

In hoofdstuk 1 is het VA114-programma van de VABI (Vereniging tot Automatisch Berekenen van Installaties in gebouwen) genoemd als een programma waarmee het thermisch gedrag van ruimten met bepaalde eigenschappen en een gegeven gebruik goed is na te gaan. Het programma is ontwikkeld voor installatieontwerpers. Het gebruik vraagt deskundigheid op het gebied van klimaatregeling en vraagt routine. Om ook andere ontwerpers, waaronder architecten, de mogelijkheid te bieden om snel na te gaan welke effecten bepaalde ontwerpkeuzen hebben op de binnentemperatuur en het energiegebruik is "ORCA" ontwikkeld. Het programma heeft een aantal eenvoudige invoer- en uitvoerschermen en het gebruikt de rekenkern van VA114. Deze paragraaf geeft een toelichting, de volgende paragrafen gaan in op het gebruik en de gebruiksmogelijkheden van ORCA.

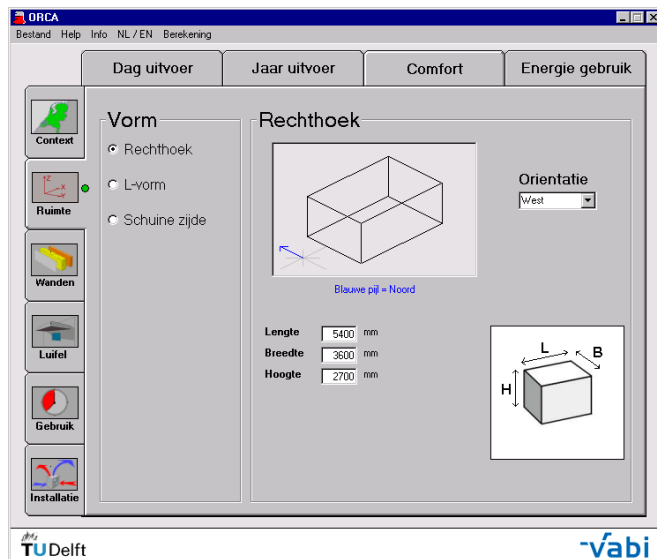
ORCA opent met het invoerscherm "**Context**" (figuur 1).



figuur 1 ORCA, invoerscherm "Context"

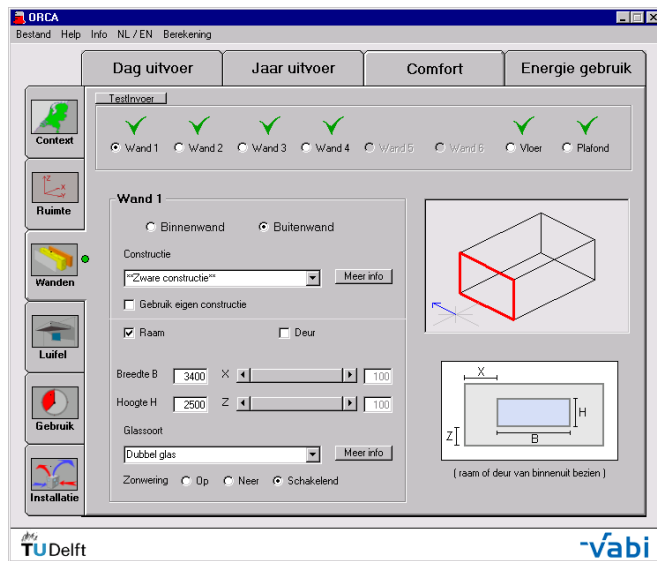
Hiermee kan de gebouwfunctie en de te berekenen periode (zomer of winter) worden opgegeven. Op het moment dat deze tekst werd geschreven kon alleen "kantoorgebouw" als functie worden gekozen.

Het invoerscherm "**Ruimte**" (figuur 2) vraagt om de vorm van de ruimte (rechthoek, L-vorm of een schuine zijde) en om de oriëntatie en afmetingen van de ruimte.



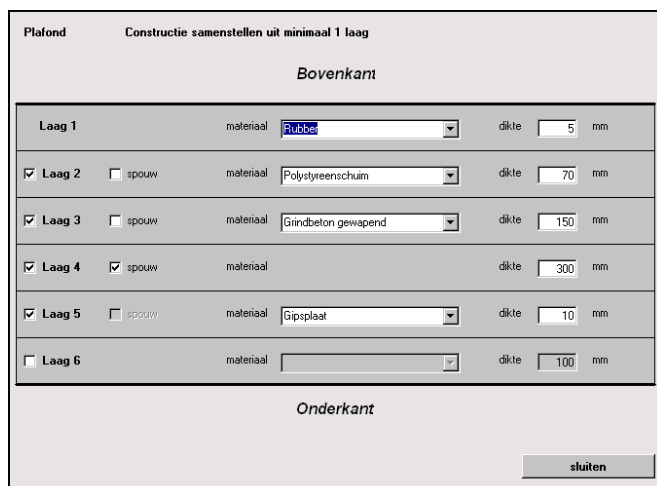
figuur 2 ORCA, invoerscherm "Ruimte"

Met het invoerscherm "**Wanden**" (figuur 3) kunnen de gegevens van wanden, vloer en plafond worden ingevoerd.



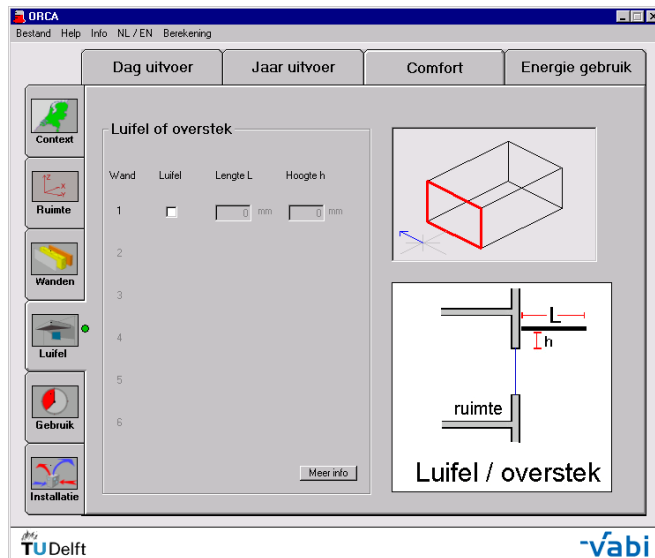
figuur 3 ORCA, invoerscherm "Wanden"

Van wanden moet de functie worden aangegeven (binnenwand of buitenwand), de constructie (keuze uit aantal varianten of via “eigen constructie” op apart scherm het materiaal en de dikte van de lagen), aanwezigheid van een raam of deur (aanvinken), waarna afmetingen en plaats in de wand moeten worden ingevoerd. Van ramen moet de glassoort worden aangegeven (keuze uit verschillende soorten) en of de zonwering “op” (geen zonwering), “neer” of “schakelend” is. Ook moet via dit scherm de functie van de vloer (verdieping of begane grond) en de constructie worden aangegeven (keuze uit aantal varianten of via “eigen constructie” op apart scherm het materiaal en de dikte van de lagen). Ten slotte moet van het plafond de functie (verdieping of dak) en de constructie worden opgegeven (keuze uit aantal varianten of via “eigen constructie” op apart scherm het materiaal en de dikte van de lagen, zie figuur 4). Zit in het dak een raam dan moeten daarvan de afmetingen, glassoort e.d. worden opgegeven.



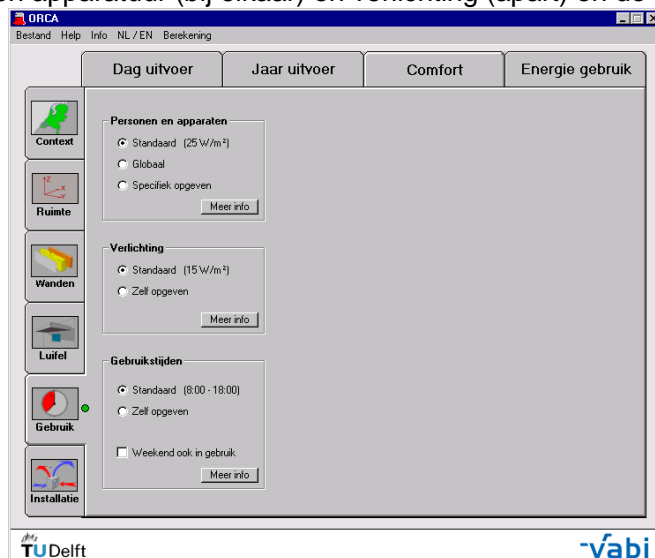
figuur 4 ORCA, invoerscherm "Eigen constructie"

Met het invoerscherm “**Luifel**” (figuur 5) kan de aanwezigheid van een luifel worden aangegeven (aanvinken), waarna de lengte van het overstek en de hoogte boven het raam moeten worden ingevoerd.



figuur 5 ORCA, invoerscherm "Luifel"

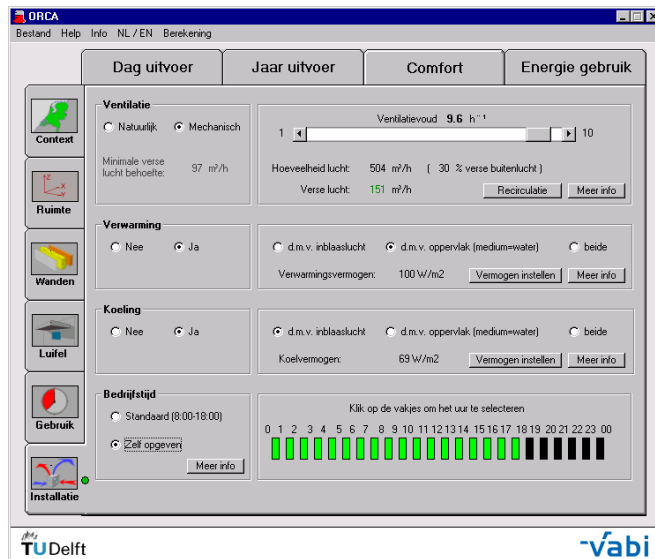
Het scherm “**Gebruik**” (figuur 6) is voor het invoeren van de interne belasting door personen en apparatuur (bij elkaar) en verlichting (apart) en de gebruikstijd.



figuur 6 ORCA, invoerscherm "Gebruik"

Bij **personen en apparatuur** is keuze mogelijk uit “standaard” ( $25 \text{ W/m}^2$ ), “globaal” (kiezen uit “lichte”, “gemiddelde” of “zware” belasting) en “specifieke belasting” (aantal mensen en apparaten opgeven). Bij **verlichting** kan worden gekozen uit “standaard” ( $15 \text{ W/m}^2$ ) en “zelf opgeven” (armaturen “inbouw”, “vrijhangend” of “opbouw” en wel of niet schakelende verlichting). Bij inbouwarmaturen kan worden aangegeven of ze worden afgezogen (luchtafvoer uit de ruimte geheel of gedeeltelijk via de armaturen. *Dit kan alleen bij inbouwarmaturen in een verlaagd plafond*). Bij **gebruikstijden** kunnen de dagelijkse tijden worden opgegeven waarin de ruimte door personen wordt gebruikt en de apparatuur en verlichting zijn ingeschakeld. Bij “standaard” is de gebruikstijd 08.00 - 18.00 uur, bij “zelf opgeven” verschijnt een balk waarop de betreffende uren kunnen worden aangeklikt. Bij “gebruikstijden” kan ook worden aangegeven of de ruimte in het weekeinde in gebruik is.

Via het scherm “**Installatie**” (figuur 7) kunnen gegevens betreffende ventilatie, verwarming en koeling worden ingevoerd.



figuur 7 ORCA, invoerscherm "Installatie"

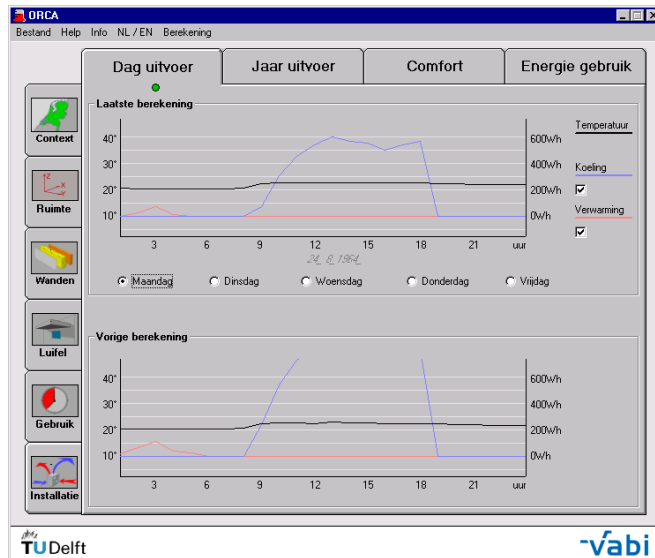
Bij **ventilatie** kan worden gekozen uit natuurlijke en mechanische ventilatie. Bij "natuurlijke ventilatie" wordt standaard gerekend met 2-voudige ventilatie. Bij keuze "mechanische ventilatie" verschijnt een schuifbalk waarmee het ventilatievoud tussen 1 en 10 kan worden ingesteld. Door aanklikken van "recirculatie" verschijnt een scherm waarop met een schuifbalk het percentage verse lucht kan worden ingesteld.

Wordt **verwarming** gekozen dan moet worden aangegeven of dit luchtverwarming ("d.m.v. inblaasluucht"), stralingsverwarming (d.m.v. oppervlak) of een combinatie van beide is. Bij elke keuze kan het verwarmingsvermogen worden ingesteld. Na aanklikken van "vermogen instellen" verschijnt een scherm met "onbeperkt vermogen" en "verwarmingsvermogen instellen". Bij "verwarmingsvermogen instellen" verschijnt een schuifbalk met instelmogelijkheden.

Wordt **koeling** gekozen dan kan dit luchtkoeling ("d.m.v. inblaasluucht"), stralingskoeling (d.m.v. oppervlak) of een combinatie van beide zijn. Bij elke keuze verschijnt na aanklikken van "vermogen instellen" een scherm met "onbeperkt vermogen" en "koelvermogen instellen". Bij "koelvermogen instellen" verschijnt een schuifbalk. *Let op dat bij luchtkoeling het koelvermogen afhankelijk is van de ventilatiehoeveelheid en de hoogte van de ruimte. Het programma verandert bij natuurlijke ventilatie luchtkoeling in stralingskoeling met een vermogen van maximaal  $60 \text{ W/m}^2$ .*

Bij **bedrijfstijd** kan worden aangegeven wanneer de ventilatie, verwarming en koeling in bedrijf zijn. Bij "zelf opgeven" verschijnt een balk waarop de bedrijfsuren zijn aan te klikken. *De bedrijfstijd kan een grote invloed op de temperatuuroverschrijding en het energiegebruik hebben.*

Als voldoende gegevens zijn ingevoerd en een uitvoerscherm wordt aangeklikt gaat ORCA rekenen. Het scherm "**daguitvoer**" toont het verloop van de vertrektemperatuur en het vermogen voor koeling en verwarming van een te kiezen dag (figuur 8).



figuur 8 ORCA, uitvoerscherm "Daguitvoer"

Voor de zomerperiode zijn dit de werkdagen uit de week van 24 augustus 1964, bij de winterperiode uit de week van 21 december 1964. Deze weken zijn te beschouwen als een "gemiddeld warme" en "gemiddeld koude" week uit het gemiddelde jaar 01-04-1964 tot 31-03-1965. Als na aanklikken van een invoerscherm en wijziging het scherm "daguitvoer" opnieuw wordt aangeklikt volgt een nieuwe berekening en verschuiven op het scherm de resultaten van de vorige berekening naar beneden.

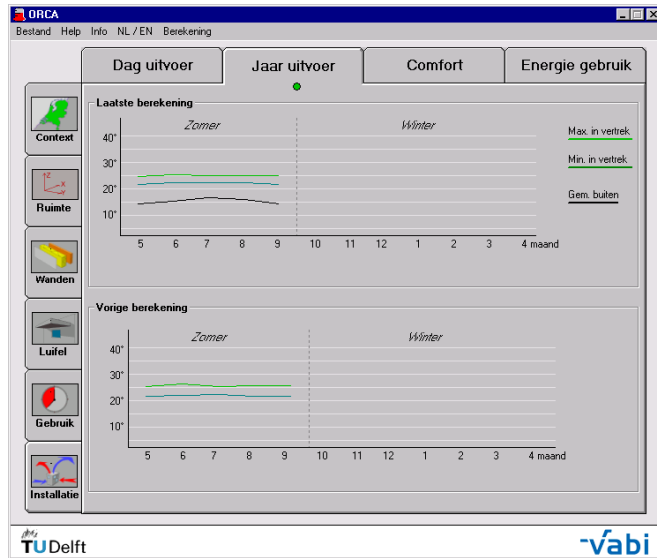


In tabel 1 wordt nader aangegeven welke temperaturen in de in ORCA berekende warme week voorkomen:

tabel 1 meteorologische waarden in 34e week van 1964 (“warme” week)

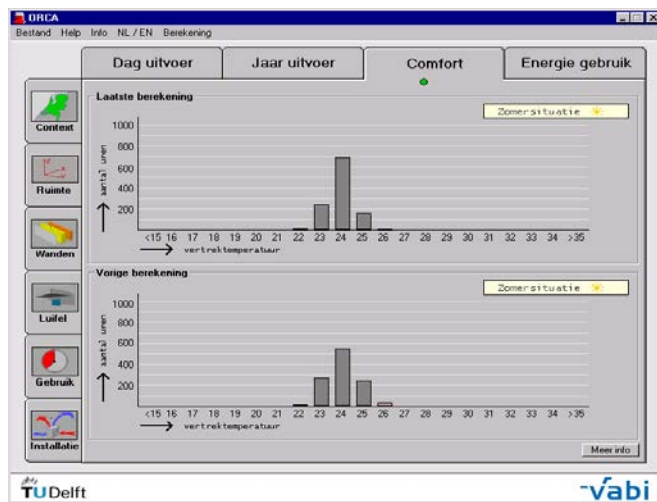
| uur   | maandag    |          |       | dinsdag    |          |       | woensdag   |          |       | donderdag  |          |       | vrijdag    |          |       |
|-------|------------|----------|-------|------------|----------|-------|------------|----------|-------|------------|----------|-------|------------|----------|-------|
|       | $\theta_e$ | $R_{gh}$ | $v_w$ | $\theta_e$ | $R_{gh}$ | $v_w$ | $\theta_e$ | $R_{gh}$ | $v_w$ | $\theta_e$ | $R_{gh}$ | $v_w$ | $\theta_e$ | $R_{gh}$ | $v_w$ |
| 1     | 10,0       | 0        | 1,4   | 17,5       | 0        | 4,4   | 15,9       | 0        | 3,0   | 16,3       | 0        | 1,0   | 16,0       | 0        | 2,0   |
| 2     | 9,8        | 0        | 1,3   | 17,0       | 0        | 4,0   | 15,8       | 0        | 2,6   | 15,6       | 0        | 1,2   | 15,2       | 0        | 2,0   |
| 3     | 11,3       | 0        | 1,7   | 16,9       | 0        | 3,6   | 15,7       | 0        | 2,7   | 15,6       | 0        | 1,2   | 15,7       | 0        | 2,3   |
| 4     | 11,8       | 0        | 2,1   | 17,0       | 0        | 3,4   | 15,8       | 0        | 2,7   | 15,5       | 0        | 1,5   | 15,8       | 0        | 2,7   |
| 5     | 12,5       | 0        | 2,8   | 16,9       | 0        | 3,0   | 15,2       | 0        | 2,7   | 16,3       | 0        | 1,8   | 15,3       | 0        | 2,1   |
| 6     | 13,0       | 9        | 3,2   | 16,8       | 3        | 2,4   | 16,0       | 30       | 2,7   | 16,4       | 21       | 2,0   | 16,0       | 26       | 3,3   |
| ----- |            |          |       |            |          |       |            |          |       |            |          |       |            |          |       |
| 7     | 14,0       | 66       | 3,6   | 16,9       | 16       | 2,7   | 17,8       | 160      | 2,4   | 18,9       | 130      | 2,2   | 17,1       | 108      | 4,0   |
| 8     | 15,1       | 95       | 4,0   | 17,2       | 58       | 2,9   | 20,5       | 307      | 3,2   | 20,9       | 270      | 2,2   | 18,2       | 231      | 4,2   |
| 9     | 16,5       | 186      | 4,8   | 17,5       | 125      | 3,4   | 23,2       | 440      | 3,2   | 23,7       | 412      | 2,9   | 19,2       | 293      | 4,2   |
| 10    | 17,4       | 230      | 6,0   | 17,9       | 121      | 3,7   | 25,1       | 557      | 3,4   | 26,0       | 532      | 2,7   | 20,7       | 354      | 4,0   |
| 11    | 18,1       | 138      | 5,4   | 18,1       | 125      | 3,5   | 26,8       | 636      | 3,3   | 28,0       | 625      | 3,2   | 22,0       | 401      | 3,8   |
| 12    | 19,1       | 220      | 6,0   | 18,1       | 75       | 3,3   | 28,4       | 669      | 3,8   | 29,8       | 674      | 3,6   | 23,3       | 455      | 3,5   |
| ----- |            |          |       |            |          |       |            |          |       |            |          |       |            |          |       |
| 13    | 18,5       | 139      | 5,3   | 19,3       | 190      | 3,5   | 29,8       | 674      | 4,0   | 30,9       | 669      | 4,2   | 24,4       | 455      | 1,8   |
| 14    | 18,2       | 92       | 5,1   | 21,7       | 551      | 3,5   | 30,5       | 640      | 4,1   | 31,1       | 621      | 4,2   | 24,8       | 403      | 1,9   |
| 15    | 17,7       | 63       | 5,3   | 23,0       | 587      | 3,7   | 31,0       | 557      | 3,4   | 30,1       | 522      | 4,3   | 22,3       | 175      | 2,2   |
| 16    | 18,0       | 50       | 4,9   | 23,4       | 435      | 3,3   | 30,7       | 444      | 2,5   | 29,6       | 407      | 4,4   | 21,3       | 117      | 2,1   |
| 17    | 18,4       | 49       | 4,0   | 22,9       | 307      | 2,6   | 29,8       | 298      | 2,2   | 26,8       | 275      | 3,0   | 21,6       | 195      | 2,0   |
| 18    | 17,7       | 3        | 4,2   | 21,6       | 160      | 2,1   | 27,7       | 147      | 1,4   | 23,1       | 130      | 2,6   | 20,6       | 104      | 1,4   |
| ----- |            |          |       |            |          |       |            |          |       |            |          |       |            |          |       |
| 19    | 17,9       | 0        | 6,3   | 18,8       | 30       | 1,3   | 24,2       | 30       | 1,0   | 20,2       | 26       | 2,0   | 18,6       | 3        | 1,1   |
| 20    |            |          |       |            |          | 17,8  |            | 0        |       | 6,3        | 16,5     |       | 0          | 1,3      |       |
|       |            |          |       |            |          | 21,2  |            | 0        |       | 0,7        | 18,6     |       | 0          | 2,0      |       |
|       |            |          |       |            |          | 18,0  |            | 0        |       | 1,3        |          |       |            |          |       |
| 21    | 17,7       | 0        | 6,0   | 16,2       | 0        | 1,3   | 19,2       | 0        | 1,0   | 17,6       | 0        | 2,0   | 18,4       | 0        | 2,6   |
| 22    | 17,7       | 0        | 5,5   | 15,7       | 0        | 1,5   | 18,1       | 0        | 1,0   | 16,7       | 0        | 2,0   | 17,4       | 0        | 3,2   |
| 23    | 17,3       | 0        | 5,0   | 16,7       | 0        | 2,3   | 16,8       | 0        | 0,2   | 17,0       | 0        | 2,1   | 17,0       | 0        | 3,2   |
| 24    | 17,2       | 0        | 4,0   | 16,7       | 0        | 2,5   | 16,7       | 0        | 0,9   | 16,7       | 0        | 2,1   | 17,0       | 0        | 2,8   |

Het scherm “jaaruitvoer” (figuur 9) geeft voor de gekozen periode het verloop van de maximale vertrektemperatuur, de minimale vertrektemperatuur en de gemiddelde buitentemperatuur.



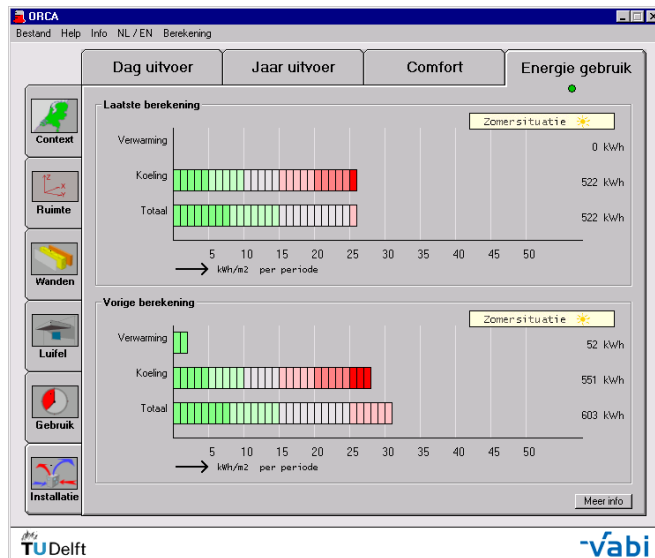
figuur 9 ORCA, uitvoerscherm "Jaaruitvoer"

Het scherm “**comfort**” (figuur 10) geeft in een staafdiagram het aantal uren dat de vertrektemperatuur bepaalde waarden heeft. De staafjes zijn lichtblauw voor temperaturen onder 18°C ( $PMV < 0,5$ ), grijs voor waarden tussen 18 en 25°C ( $-0,5 < PMV < 0,5$ ), roze voor waarden tussen 25 en 28°C ( $0,5 < PMV < 1,0$ ) en rood voor temperaturen boven 28°C ( $PMV > 1,0$ ).



figuur 10 ORCA, uitvoerscherm "Comfort"

Het scherm “**energiegebruik**” (figuur 11) geeft rechts de waarden in kWh voor verwarming en koeling apart en voor het totaal. Dit is het energiegebruik voor de ruimte als geheel. De horizontale balken geven het energiegebruik per m<sup>2</sup> vloeroppervlakte weer. De kleur van de balk is een indicatie voor de mate waarin aan de EPN (Energie Prestatie Norm) wordt voldaan.



figuur 11 ORCA, uitvoerscherm "Energiegebruik"

## 2.2 Optimalisatie van een ontwerp met ORCA

Met ORCA kan worden berekend welke temperatuur in een ruimte ontstaat en wat het energiegebruik is. Een ruimteontwerp kan worden geoptimaliseerd door aspecten te variëren. Om te weten wat de grootste invloed heeft is het aan te raden om, bij de eerste keer dat ORCA wordt gebruikt, een gevoeligheidsanalyse te maken. Dat kan door van een referentievertrek steeds één aspect te wijzigen, zoals grootte van de ramen, type beglazing of zwaarte van de constructie. Is de uitkomst niet wat je ervan verlangt, bij voorbeeld omdat het in de ruimte te koud of te warm wordt, wijzig dan de klimaatregeling om een aanvaardbare uitkomst te krijgen. Er zijn oefeningen om hierbij te helpen, zie de webpagina's van Installaties op de TU-Delft-Bouwkunde-site. Zie ook de volgende paragrafen.

## 2.3 Optimalisatie van natuurlijke koeling met ORCA

Een veel gestelde ontwerpvrage is: "Welke vorm, thermische eigenschappen en gebruik moet een gebouw krijgen om met natuurlijke koeling te kunnen volstaan?" Het antwoord is: Om te beginnen moet de luchtverversing voldoende zijn. Afhankelijk van de bezetting is hiervoor 1- à 2-voudige ventilatie nodig. Bij een standaard bezetting van 1 persoon per 10 m<sup>2</sup> wordt met 2-voudig gerekend. Is de temperatuur buiten **lager** dan binnen dan kan natuurlijk worden gekoeld door met buitenlucht te ventileren, maar niet meer dan 10-voudig vanwege tocht. Is de temperatuur buiten **hoger** dan binnen dan moet de ventilatie worden beperkt tot het minimum voor luchtverversing. Dit klinkt logisch, toch ventileren mensen anders: ze zetten ramen open als ze het warm hebben en zijn zich zelden bewust van het werkelijke effect of van ventilatievouden.

Bij de dynamische berekeningen die begin jaren '90 werden gemaakt om het comfort en het energiegebruik van verschillende klimaatregelsystemen te vergelijken werd aangenomen dat bij natuurlijke koeling, ongeacht de buitentemperatuur, overdag altijd ten minste 2-voudig wordt geventileerd (raam op een kier) en 5-voudig als de binnentemperatuur >24°C is (mensen zetten het raam dan verder open). Voor nachtventilatie werd 0,5-voudig aangenomen. Bij veel gebouwen mogen om veiligheidsredenen de ramen 's nachts niet open blijven waardoor meer natuurlijke nachtventilatie dan 0,5-voudig niet mogelijk is. Overigens is

5-voudige natuurlijke ventilatie slechts mogelijk als de te openen ramen ten minste 5% van de geveleppervlakte beslaan. Dit is een vuistregel.

#### 2.4 Bepaling energiegebruik met ORCA

Op het moment dat deze tekst werd geschreven gebruikte ORCA alleen de gegevens van het meteorologisch “gemiddelde” jaar 1964-1965. Het berekende energiegebruik is - over een langere periode gezien - gemiddeld als via het invoerscherm “**Gebruik**” gemiddelde waarden zijn opgegeven voor de interne belasting door personen, apparaten en verlichting. De ruimten van een kantoorgebouw worden niet altijd volledig gebruikt. Afhankelijk van het type organisatie ligt het gemiddelde gelijktijdige gebruik tussen 60 en 80% van het maximaal mogelijke gebruik.

#### 2.5 Bepaling warmte- en koelbehoefte met ORCA

Met ORCA kan door middel van “trial and error” het verwarmings- en koelvermogen worden bepaald waarmee een ruimte aan - zelf te kiezen - klimaateisen kan voldoen. Toen deze tekst werd geschreven rekende ORCA alleen met gegevens van 1964-1965 (locatie weerstation De Bilt), een jaar waarin geen extreem koude of warme perioden voorkwamen. Van de klimaatregeling van gebouwen wordt verwacht dat ze ook bij een wat extremer buitenklimaat voldoende kunnen verwarmen of koelen. In Nederland komen temperaturen voor tussen min 23 en plus 37°C. NEN 5066 noemt voor de warmtebehoefte een ontwerp-buitentemperatuur van min 10°C. In NEN 5067 is geen ontwerp-buiten-temperatuur aangegeven, in de praktijk wordt vaak 28°C (en 60% RV) aangehouden. Min 10°C en plus 28°C worden gemiddeld minder dan 0,4% van de tijd (35 uur per jaar) onder- respectievelijk overschreden, zie tabel 2 en 3.

De laatste jaren worden de zomers warmer en vochtiger en de winters zachter. Bij de kust zijn in de winter de buitentemperaturen aanzienlijk hoger dan in het binnenland. De resultaten van de berekening gebaseerd op 1964-1965 moeten daarom met de nodige voorzichtigheid worden gehanteerd.

tabel 2      deel van de tijd dat de buitentemperatuur beneden een bepaalde waarde komt

| < °C | %      | uur/jaar |
|------|--------|----------|
| -20  | 0,0067 | 0,58     |
| -15  | 0,048  | 4,2      |
| -14  | 0,078  | 6,7      |
| -13  | 0,113  | 9,9      |
| -12  | 0,173  | 15       |
| -11  | 0,266  | 23       |
| -10  | 0,397  | 35       |
| -9   | 0,57   | 50       |
| -8   | 0,82   | 72       |
| -7   | 1,12   | 98       |
| -6   | 1,50   | 132      |
| -5   | 2,05   | 180      |
| -4   | 2,8    | 245      |
| -3   | 3,7    | 322      |
| -2   | 4,9    | 431      |
| -1   | 6,6    | 582      |
| 0    | 8,9    | 781      |

tabel 3      deel van de tijd dat een bepaalde buiten- en binnentemperatuur wordt overschreden bij  $\Delta\theta = 3\text{ °C}$ 

| $\theta_e$<br>> °C | $\theta_i$<br>> °C | %     | uur/jaar |
|--------------------|--------------------|-------|----------|
| 25                 | 28                 | 1,3   | 117      |
| 26                 | 29                 | 0,9   | 82       |
| 27                 | 30                 | 0,6   | 56       |
| 28                 | 31                 | 0,4   | 35       |
| 29                 | 32                 | 0,24  | 21       |
| 30                 | 33                 | 0,14  | 13       |
| 31                 | 34                 | 0,079 | 7        |
| 32                 | 35                 | 0,044 | 4        |
| 33                 | 36                 | 0,016 | 1,4      |
| 34                 | 37                 | 0,006 | 0,5      |

Om met ORCA de **warmtebehoefte** te bepalen, moet via het invoerscherm “**Gebruik**” de interne belasting door personen, apparatuur en verlichting worden geminimaliseerd omdat een ruimte ook zonder interne belasting op temperatuur moet kunnen worden gebracht en gehouden. Op dit moment kan met ORCA de interne belasting niet nul maar wel zo klein mogelijk worden gemaakt. De belasting door verlichting kan worden geminimaliseerd door “zelf opgegeven” inbouwarmaturen op te geven en “afgezogen” aan te vinken. De belasting door personen en apparaten kan nul worden gemaakt door deze belasting als “specifiek” op te geven. Omdat nu nog met de gegevens van 1964-1965 wordt gerekend kan, als benadering voor koudere jaren, een verwarmingsvermogen worden gezocht waarbij de vertrektemperatuur niet lager wordt dan de in tabel 4 aangegeven minimale waarden plus 2°C.

tabel 4 ruimtetypering

| Type | Wat van de ruimte wordt verwacht  | temperatuur °C                                   |                | luchtsnelheid  |
|------|---|--|----------------|--|
|      |   | min.   | max.           | m/s  |
| A    | bescherming tegen regen en wind<br>(voorbeeld: abri)  | --   | --             | --   |
| B    | bescherming tegen regen en wind, vorstvrij<br>(voorbeeld: wachtruimte station)  | 5  | --             | --   |
| C    | acceptabel voor lopende personen met kleding afgestemd op het buitenklimaat<br>(voorbeeld: winkelpassage)                                   | 10   | $\theta_e + 5$ | < 0,5  |
| D    | acceptabel voor zittende personen met kleding afgestemd op het buitenklimaat, tijdelijk verblijf<br>(voorbeeld: overdekt terras)            | 12   | $\theta_e + 5$ | < 0,5  |
| E    | acceptabel voor lopende personen met kleding afgestemd op het seizoen<br>(voorbeeld: verkeersruimten in gebouw)                             | 15   | $\theta_e + 5$ | < 0,5  |
| F    | acceptabel voor zittende personen met kleding afgestemd op seizoen, verblijf max. 15 minuten<br>(voorbeeld: koffiehoek in kantoorgebouw)    | 15   | $\theta_e + 5$ | < 0,25   |
| G    | acceptabel voor zittende personen met kleding afgestemd op seizoen, verblijf max. 45 minuten<br>(voorbeeld: kantine)                        | NV <sup>1)</sup><br>MV                           | 18<br>18       | $\theta_e + 3$ <sup>2)</sup><br>25 (90%) <sup>3)</sup> |
| H    | acceptabel voor niet plaatsgebonden, zittende personen met kleding afgestemd op seizoen, verblijf enige uren (voorbeeld: bibliotheek)       | NV<br>MV   | 20<br>20       | $\theta_e + 3$<br>25 (90%)                             |
| I    | acceptabel voor personen die lichte lichamelijke arbeid verrichten in aangepaste kleding, verblijf meerdere uren (voorbeeld: laboratorium)  | NV<br>MV   | 18<br>18       | $\theta_e + 3$<br>24 (90%)                             |
| J    | acceptabel voor personen die middelzware arbeid verrichten in aangepaste kleding, verblijf meerdere uren (voorbeeld: constructiewerkplaats) | NV<br>MV   | 15<br>15       | $\theta_e + 3$<br>23 (90%)                             |
| K    | comfortabel voor niet plaatsgebonden, zittende personen met kleding afgestemd op seizoen, langdurig verblijf (voorbeeld: woonkamer)         | NV   | 20             | $\theta_e + 3$<br>< 0,25                               |
| L    | comfortabel voor plaatsgebonden, zittende personen met kleding afgestemd op seizoen, langdurig verblijf (voorbeeld: kantoorvertrek)         | NV<br>MV   | 20<br>20       | $\theta_e + 3$<br>25 (95%)                             |
| M    | beschermen van vochtgevoelige voorwerpen of of goederen (voorbeeld: museum, magazijn)   | eisen afhankelijk van materialen                 |                |  |
| N    | bescherming van temperatuur- en vochtgevoelige processen (voorbeeld: plantenkas)  | eisen afhankelijk van proces, stoffen of product |                |  |

<sup>1)</sup> verschillende eisen voor natuurlijke ventilatie (NV) en mechanische ventilatie (MV)

<sup>2)</sup> dit zijn rekenwaarden bedoeld voor stationaire berekeningen

<sup>3)</sup> percentage jaarlijkse verblijfstijd dat de ruimtetemperatuur beneden deze temperatuur moet blijven, bij ruimten zonder te openen ramen is het beter om geen overschrijding toe te staan

Voor het bepalen van de **koelbehoefte** moet via het invoerscherm “**Gebruik**” reële maximale waarden voor de belasting door personen, apparatuur en verlichting worden opgegeven. Tabel 5 laat zien met welke buitentemperatuur  $\theta_e$  in °C, globale straling op het horizontale vlak  $R_{gh}$  in  $W/m^2$  en windsnelheid  $v_w$  in m/s ORCA in een “warme” week rekent. De temperaturen en intensiteiten van de zonnestraling zijn minder hoog dan gedurende de 5 warme dagen waarop de tabellen uit NEN 5067 zijn gebaseerd. Omdat nu nog met de gegevens van 1964-1965 wordt gerekend kan, als benadering voor warmere jaren, een koelvermogen worden gezocht waarbij de vertrektemperatuur niet hoger wordt dan de in tabel 4 aangegeven maximale waarde. Bij ruimten zonder te openen ramen is het beter om geen hogere vertrektemperatuur toe te staan dan 1 à 2°C onder de in tabel 4 genoemde maximale waarde. *Let op dat het koelvermogen dat op deze manier wordt gevonden niet gelijk is aan de “koelbehoefte” zoals die met een stationaire berekening wordt bepaald. Zie de volgende paragraaf voor verdere uitleg.*

## 2.6 Bepaling systeemkeuze met ORCA

Voor een systeemkeuze moet het verwarmings- en koelvermogen worden bepaald waarbij de vertrektemperatuur niet beneden een minimale respectievelijk maximale waarde komt. Hierbij moet rekening worden gehouden met de interne belasting door personen, apparatuur en verlichting welke bij het zoeken van het verwarmingsvermogen nul moet zijn en bij het zoeken naar het koelvermogen een - voor het ruimtegebruik - reële waarde moet hebben. Zie wat hierover in de vorige paragraaf is gezegd.

Toen deze tekst werd geschreven was het niet mogelijk om het vermogen voor het centraal op temperatuur brengen van de ventilatielucht (in de luchtbehandelingskast) en het vermogen voor het op temperatuur brengen van de ruimte (met het eindapparaat) afzonderlijk te beschouwen. Is de temperatuur buiten hoger dan binnen dan gebruikt ORCA een deel van het opgegeven vermogen voor koeling van de ventilatielucht en is het resterende deel - dus minder dan wat is opgegeven - beschikbaar voor koeling van de ruimte. Is de temperatuur buiten lager dan binnen dan is meer vermogen - dan wat is opgegeven - beschikbaar voor koeling van de ruimte. Het verschil is in beide gevallen het in de buitenlucht aanwezige koelvermogen (“vrije koeling”). Vergelijking van de resultaten van ORCA en een stationaire koelbehoefteberekening is hierdoor niet reëel. Om toch een indruk te krijgen zijn de resultaten van een voorbeeldkantoor als gegeven ingevoerd, zie de invoerschermen figuur 1 t/m 7.

Het voorbeeldkantoor betreft een “zwaar” kantoorvertrek ( $SWM = 80 \text{ kg/m}^2$ ) met dubbel glas (verschillende percentages van de geveleppervlakte) en verschillende typen zonwering (zie voor nadere uitleg handberekening § 2.7.). Uit de resultaten op basis van de handberekening blijkt dat het vertrek met een interne belasting van  $40 \text{ W/m}^2$ , buitenzonwering en 30 en 90% glas een koelbehoefte heeft van respectievelijk 51 en  $69 \text{ W/m}^2$ . Tabel 5 geeft aan dat een lucht/water-systeem (bij voorbeeld ventilatorconvector) of een lucht+water-systeem (bij voorbeeld VAV + koelplafond) hiervoor geschikte systemen zijn.

tabel 5 Specifiek koelvermogen in W/m<sup>2</sup> vloeroppervlakte van verschillende systemen en combinaties van systemen bij verschillende ruimtehoogten

| systeem                             | ventilatievoud | ruimtehoogte in meter                      |      |       |               |               |               |               |
|-------------------------------------|----------------|--|------|-------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|                                     |                | h <sup>-1</sup>                            | 2,4  | 2,7   | 3,0           | 3,5           | 4,0           | 5,0           |
|                                     |                | $\Delta\theta = 6\text{ }^{\circ}\text{C}$ | 8 °C | 10 °C | 12 °C         | 12 °C         | 12 °C         | 12 °C         |
| A VAV of CAV <sup>1)</sup>          | 3              | 15 <sup>2)</sup>                           | 20   | 30    | 40            | 50            | 60            | 70            |
| „                                   | 4              | 20   | 30   | 40    | 55            | 65            | 80            | 95            |
| „                                   | 5              | 25   | 35   | 50    | 70            | 80            | 100           | 120           |
| „                                   | 6              | 30   | 45   | 60    | 85            | 95            | 120           | 145           |
| B kwelventilatie <sup>3)</sup>      | 8              | -  | 30   | 35    | <sup>4)</sup> | <sup>4)</sup> | <sup>4)</sup> | <sup>4)</sup> |
| C inductie / fan-coil               | 10             | 50   | 75   | 100   | 140           | 160           | 200           | 240           |
| D plafondkoeling <sup>5)</sup>      | -              | 60   | 60   | 60    | 60            | 60            | 60            | 60            |
| E vloerkoeling <sup>5)</sup>        | -              | 20   | 20   | 20    | 20            | 20            | 20            | 20            |
| F zuivere verdringing <sup>6)</sup> | 250            | 800  | 900  | 1000  | 1150          | 1350          | 1500          | 2000          |
| A + D                               | 2              | 70   | 75   | 80    | 90            | 90            | 100           | 110           |
| „                                   | 3              | 75   | 80   | 90    | 100           | 110           | 120           | 130           |
| „                                   | 4              | 80   | 90   | 100   | 115           | 125           | 140           | 155           |
| „                                   | 6              | 85   | 100  | 100   | 140           | 155           | 180           | 205           |
| B + D                               | 8              | -  | 80   | 85    | <sup>4)</sup> | <sup>4)</sup> | <sup>4)</sup> | <sup>4)</sup> |
| C + D                               | 10             | 90   | 100  | 100   | 140           | 160           | 200           | 240           |

<sup>1)</sup> Voor “volledig lucht”-systemen (A) tot 6-voudige ventilatie. Bij hogere ventilatievouden zijn deze systemen economisch niet verantwoord.

<sup>2)</sup> Bij de cursief gedrukte waarden is met natuurlijke koeling te volstaan.

<sup>3)</sup>  $\Delta\theta$  max. 4 °C, bij hogere ruimten - afhankelijk van de ruimtefunctie - eventueel meer.

<sup>4)</sup> Hiervan is onvoldoende bekend.

<sup>5)</sup> Deze systemen toepassen in combinatie met een systeem waarmee geventileerd wordt.

<sup>6)</sup> Toepassing alleen in bijzondere ruimten.

Het temperatuurverschil waarmee gekoelde lucht aan de ruimte kan worden toegevoerd is maximaal 8°C (zie tabel 6) wat bij een koelvermogen van 51 en 69 W/m<sup>2</sup> resulteert in respectievelijk 7- en 9,6-voudige toevoer.

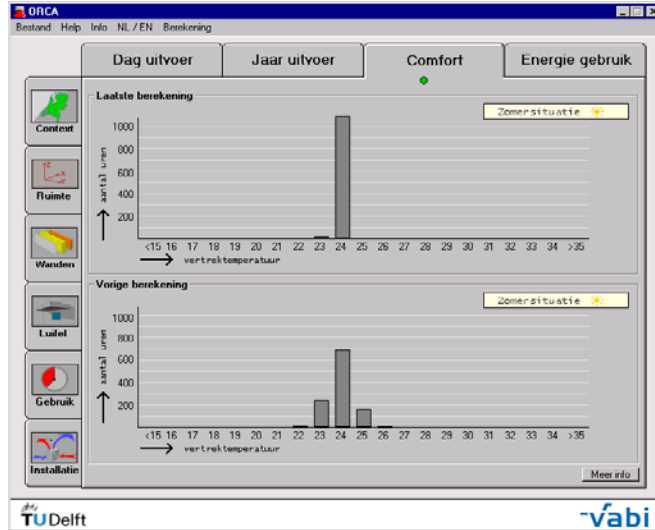
tabel 6 maximaal temperatuurverschil bij toevoer van gekoelde lucht

| hoogte van de ruimte | $\Delta\theta$ |
|----------------------|----------------|
| m                    | °C             |
| 2,4                  | 6              |
| 2,7                  | 8              |
| 3,0                  | 10             |
| 3,5                  | 12             |
| 4,0                  | 15             |

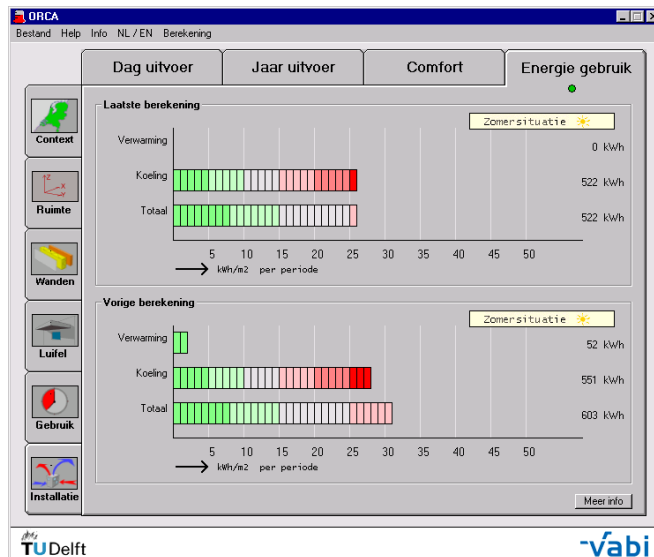
Deze hoeveelheden zijn in ORCA ingevoerd met, als benadering voor een lucht/water-systeem, 150 m<sup>3</sup>/h verse lucht (3-voud). Als bedrijfstijd is 0-18 uur genomen. De uitvoerschermen 8 t/m 11 geven de resultaten met “laatste berekening” voor 30% glas en “vorige berekening” voor 90% glas. Figuur 10 laat zien dat de vertrektemperatuur nauwelijks hoger wordt dan 25°C en dus dat een lucht/water-systeem een goede systeemkeuze is. Bij 2-voudige ventilatie en stralingskoeling (met het zelfde koelvermogen) en een standaard



bedrijfstijd van 8-18 uur laat ORCA bij 30% glas een vrijwel constante vertrektemperatuur van 24 °C zien (figuur 12, "laatste berekening") en een 9% lager energiegebruik (figuur 13, "laatste berekening").



figuur 12 ORCA, uitvoerscherf "Comfort"

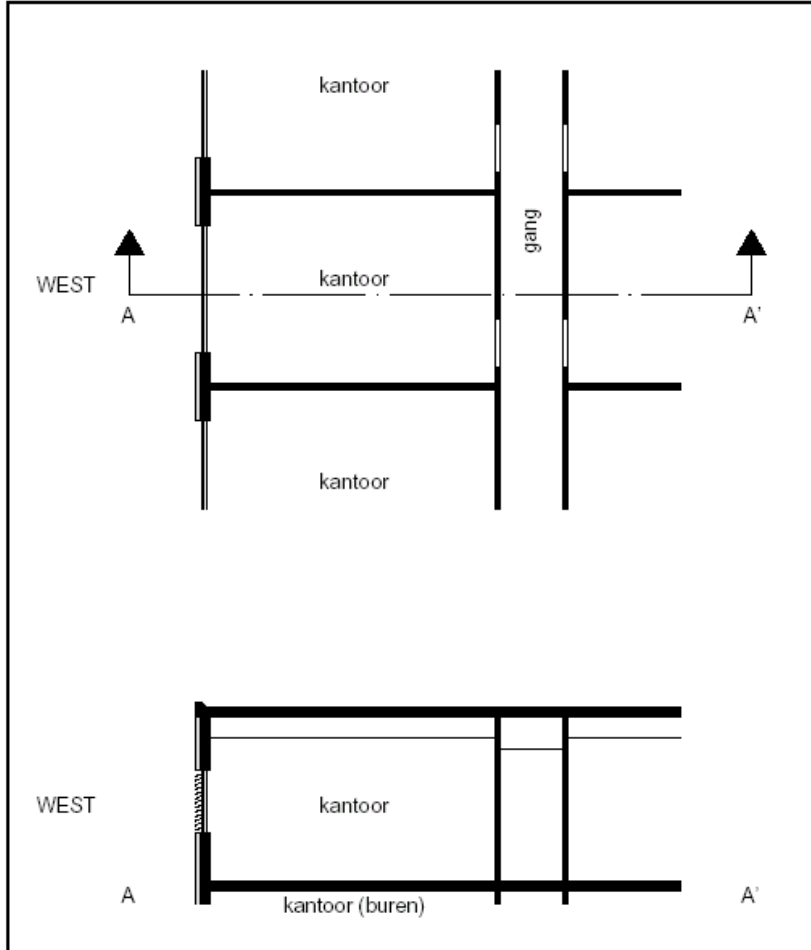


figuur 13 ORCA, uitvoerscherf "Energiegebruik"

Afgaand op de zomerperiode betekent dit dat stralingskoeling met een koelplafond een betere systeemkeuze is. *Zou het vermogen van het koelplafond met een grotere bandbreedte en gerelateerd aan de buitentemperatuur worden geregeld (nu niet mogelijk met ORCA) dan zou dit tot meer spreiding van de vertrektemperaturen, minder koelvermogen en een lager energiegebruik leiden.*

## 2.7 Nadere toelichting handberekening koelbehoefte voorbeeldkantoor

Voor dit voorbeeld wordt een tussenvertrek op de bovenste laag van een kantoorgebouw genomen, zie figuur 13.



figuur 14 Kantoorvertrek

Het betreft een gebouw met vrij veel massa ( $SWM=80 \text{ kg/m}^2$ ). De borstwering heeft een massa van  $300 \text{ kg/m}^2$ . Het dak bestaat uit beton met verlaagd plafond. De oriëntatie van het vertrek is West. Verdere gegevens zijn:

|                           |   |
|---------------------------|---|
| netto hoogte              | 2,7 m   |
| gevel breedte             | 3,6 m   |
| vertrekdiepte             | 5,4 m   |
| glasoppervlakte           | $2,9 \text{ m}^2$ (30% van inw. geveloppervlakte) |
| glassoort                 | dubbel glas                                       |
| zonwering                 | buitenzonwering (jaloezieën)                      |
| bezetting                 | 2 personen, 100% aanwezig                         |
| verlichting               | TL-verlichting met luchtafvoer                    |
| apparatuur                | 1 PC/persoon                                      |
| ontwerp-binnentemperatuur | $25 \text{ }^\circ\text{C}$                       |
| ontwerp-buitentemperatuur | $28 \text{ }^\circ\text{C}$                       |
| infiltratie               | 0,3-voud  |

Omdat de oriëntatie West is, treedt de maximale belasting op om ongeveer 16 uur zonnetijd (zie tabel 7).

tabel 7 convectieve warmte t.g.v. zonnestraling ( $q_{conv}$ )

| oriëntatie  | tijdstip <sup>1)</sup><br>maximum | zonwering   | "lichte" bouw                                | "zware" bouw                                 |
|-------------|-----------------------------------|-------------|--|--|
|             |                                   |             | SWM=50 kg/m <sup>2</sup><br>W/m <sup>2</sup> | SWM=80 kg/m <sup>2</sup><br>W/m <sup>2</sup> |
| Noord       | 13                                | binnen      | 140  | 130  |
|             |                                   | buiten/geen | 110  | 100  |
| N-O         | 8                                 | binnen      | 490  | 460  |
|             |                                   | buiten/geen | 330  | 240  |
| Oost        | 9                                 | binnen      | 680  | 650  |
|             |                                   | buiten/geen | 470  | 350  |
| Z-O         | 10                                | binnen      | 650  | 610  |
|             |                                   | buiten/geen | 450  | 340  |
| Zuid        | 13                                | binnen      | 560  | 530  |
|             |                                   | buiten/geen | 400  | 310  |
| Z-W         | 16                                | binnen      | 650  | 620  |
|             |                                   | buiten/geen | 460  | 360  |
| West        | 16 <sup>2)</sup>                  | binnen      | 650  | 620  |
|             |                                   | buiten/geen | 440  | 340  |
| N-W         | 16 <sup>2)</sup>                  | binnen      | 350  | 340  |
|             |                                   | buiten/geen | 240  | 200  |
| Horizontaal | 13                                | binnen      | 800  | 760  |
|             |                                   | buiten/geen | 590  | 480  |

<sup>1)</sup> zonnetijd

<sup>2)</sup> werkelijke tijdstip is later en heeft geen betekenis omdat dit buiten de dagelijkse gebruikperiode van de ruimte valt

Om de invloed van het type zonwering en grotere ramen na te gaan worden de berekeningen herhaald voor binnenzonwering en glaspercentages van 60 en 90%. De koelbehoefte bij 30 % glas en ZTA = 0,15 is:

$$\begin{aligned}
 \Phi_{z,gl} &= z \cdot A_{gl} \cdot ZTA \cdot q_{conv} = 1 \cdot 2,9 \cdot 0,15 \cdot 340 = & 148 \text{ W} \\
 \Phi_{tr,gl} &= U \cdot A_{gl} \cdot (\theta_e - \theta_i) = 3,0 \cdot 2,9 \cdot (28 - 25) = & 26 \\
 \Phi_{z,w, borstw} &= a \cdot A_{wi} \cdot q_w = 0,7 \cdot (2,7 \cdot 3,6 - 2,9) \cdot 1,9 = & 11 \\
 \Phi_{z,w, dak} &= 0,7 \cdot 3,6 \cdot 5,4 \cdot (-3,9) = & -53 \\
 \Phi_{inf} &= 0,3 \cdot 3,6 \cdot 2,7 \cdot 5,4 \cdot 1,2 \cdot 1000 \cdot (28-25) / 3600 = & 16 \\
 \Phi_p &= 2 \cdot 80 = & 160 \\
 \Phi_l &= 5 \cdot 3,6 \cdot 5,4 = & 97 \\
 \Phi_a &= 2 \cdot 100 = & \underline{200} \\
 \Phi_k &= & \underline{605 \text{ W}}
 \end{aligned}$$

De specifieke koelbehoefte is:

$$\Phi_{k,sp} = \Phi_k / A_{vl} = 605 / (3,6 \times 5,4) = 31 \text{ W/m}^2$$

## 2.8 Systeemkeuze bij mechanische koeling

Uit tabel 5 blijkt dat voor deze specifieke koelbehoefte een VAV-systeem een geschikte keuze is, omdat dit systeem ten minste een even groot specifiek koelvermogen kan leveren. Uit deze tabel is verder af te leiden dat voor een ruimtehoogte van 2,7 m met een VAV-systeem een ventilatievoud van ruim 4 nodig is. Deze uitkomst is als volgt te verifiëren.

Wordt de ruimte gekoeld met lucht van 17 °C ( $\Delta\theta = 8$  °C, zie tabel 6), dan moet met dit systeem een hoeveelheid lucht worden toegevoerd van:

$$q_v = \Phi_k / (\rho \cdot c \cdot \Delta\theta) = 605 / (1,2 \cdot 1000 \cdot 8) = 0,063 \text{ m}^3/\text{s} = 227 \text{ m}^3/\text{h}$$

Dit komt overeen met een ventilatievoud van:

$$n = q_v / V = 227 / (3,6 \times 5,4 \times 2,7) = 4,3 \text{ h}^{-1}$$

Dit is goed. De praktijk laat zien dat bij luchtkoeling het ventilatievoud bij voorkeur niet beneden de 2 moet liggen om een slechte luchtverdeling - met te grote temperatuurverschillen in de "leef-zone" - te voorkomen. Meer dan 10-voud geeft kans op tocht.

## 2.9 Natuurlijke ventilatie

Zou de ruimte op natuurlijke wijze worden gekoeld, dan is de benodigde ventilatie en de oppervlakte van de raamopeningen te berekenen door uit te gaan van een temperatuurverhoging van 3 °C. Hieruit volgt een luchthoeveelheid van:

$$q_{v,nv} = \Phi_k / (\rho \cdot c \cdot \Delta\theta) = 605 / (1,2 \cdot 1000 \cdot 3) = 0,17 \text{ m}^3/\text{s}$$

Het daarbij behorende ventilatievoud is:

$$n_{nv} = q_{v,nv} \cdot 3600 / V = 0,17 \cdot 3600 / (3,6 \times 5,4 \times 2,7) = 11,6 \text{ h}^{-1}$$

Dit is voor verblijfsruimten te hoog en kan tot tochtklachten leiden. Zou toch worden besloten om deze ruimte natuurlijk te koelen dan zou - uitgaande van een gemiddelde lichtsnelheid van 0,2 m/s bij luchttoevoer en afvoer via hetzelfde raam -, daarvoor een totale oppervlakte aan raamopeningen nodig zijn van:  $A_{tot} = 2 \cdot q_v / v = 2 \cdot 0,17 / 0,2 = 1,7 \text{ m}^2$ .

## 2.10 Invloed glaspercentage en type zonwering op koelbehoefte

Bij andere glaspercentages en binnenzonwering vinden we koelbehoefte en ventilatievouden zoals in het volgende overzicht (tabel 8). Hieruit blijkt dat hoge glaspercentages in combinatie met binnenzonwering dramatische gevolgen heeft voor de koelbehoefte en daarmee voor de systeemkeuze, zeker als je bedenkt dat een ventilatievoud van meer dan 10 tot tochtklachten kan leiden.

tabel 8 invloed glaspercentage en type zonwering op koelbehoefte

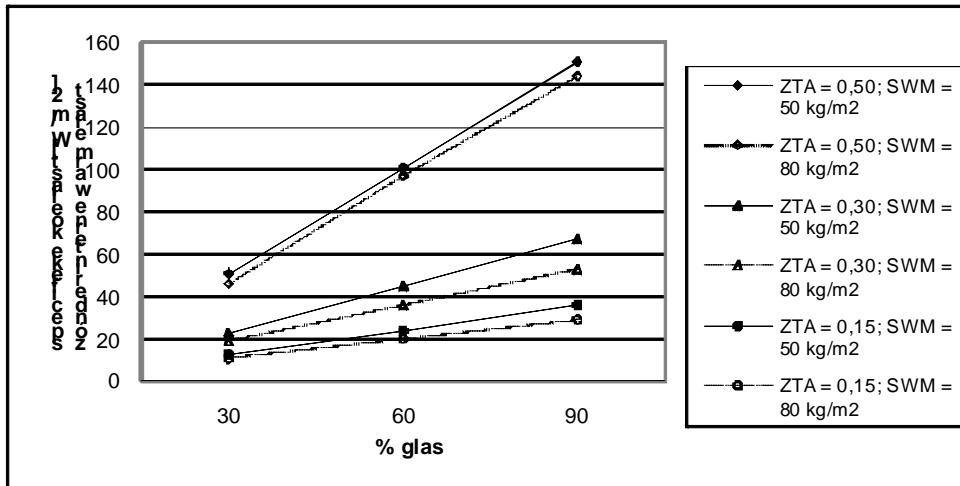
| glaspercentage --->                                      | <b>buitenzonwering</b> |            |            | <b>binnenzonwering</b> |             |                      |
|--|------------------------|------------|------------|------------------------|-------------|----------------------|
|  | <b>ZTA = 0,15</b>      |            |            | <b>ZTA = 0,5</b>       |             |                      |
|  | <b>30</b>              | <b>60</b>  | <b>90</b>  | <b>30</b>              | <b>60</b>   | <b>90</b>            |
| $\Phi_{z,gl}$  | 148                    | 296        | 444        | 899                    | 1798        | 2697 W               |
| $\Phi_{tr,gl}$   | 26                     | 52         | 78         | 26                     | 52          | 78                   |
| $\Phi_{z,w}$ (borstw)                                    | 11                     | 7          | 2          | 11                     | 7           | 2                    |
| $\Phi_{z,w}$ (dak)                                       | -53                    | -53        | -53        | -53                    | -53         | -53                  |
| $\Phi_{inf}$   | 16                     | 16         | 16         | 16                     | 16          | 16                   |
| $\Phi_p$   | 160                    | 160        | 160        | 160                    | 160         | 160                  |
| $\Phi_l$   | 97                     | 97         | 97         | 97                     | 97          | 97                   |
| $\Phi_a$   | 200                    | 200        | 200        | 200                    | 200         | 200                  |
| -----  |                        |            |            |                        |             |                      |
| $\Phi_k$   | <b>605</b>             | <b>775</b> | <b>944</b> | <b>1356</b>            | <b>2255</b> | <b>3197 W</b>        |
| $\Phi_{k,sp}$  | 31                     | 40         | 49         | 70                     | 116         | 164 W/m <sup>2</sup> |
| -----  |                        |            |            |                        |             |                      |
| $n_{koeling}$ ( $\Delta\theta=8\text{ }^\circ\text{C}$ ) | 4,3                    | 5,5        | 6,7        | 9,7                    | 16,1        | 22,9 h <sup>-1</sup> |
| $n_{nv}$ ( $\Delta\theta=3\text{ }^\circ\text{C}$ )      | 11,5                   | 14,7       | 17,9       | 25,9                   | 42,9        | 60,9 h <sup>-1</sup> |

### 2.11 Invloed op systeemkeuze

Uit het voorgaande overzicht en tabel 5 blijkt dat een VAV-systeem een verantwoorde keuze is, mits buitenzonwering wordt toegepast en het glaspercentage niet meer is dan ca. 60%. Bij toepassing van 90% glas is een inductie- of een ventilatorconvectorsysteem nodig. Ook voldoet de combinatie VAV + koelplafond. Verder blijkt uit tabel 5 dat bij 30% glas met binnenzonwering ten minste een inductie- of een ventilatorconvectorsysteem nodig is. Bij meer dan 30% glas en binnenzonwering is er geen systeem dat voor een comfortabel binnenklimaat kan zorgen.

### 2.12 Invloed glaspercentage, type zonwering, interne belasting en specifiek werkzame massa

De interne warmtebelasting is in dit voorbeeld totaal 23,5 W/m<sup>2</sup>. Voor een kantoorgebouw dat de opdrachtgever zelf gaat gebruiken, kan dit een reële waarde zijn. Bij een kantoorgebouw voor "de markt" met onbekende bezetting of bedoeld voor flexibel gebruik wordt meestal met een interne belasting van 40 W/m<sup>2</sup> gerekend. Voor het kantoorvertrek uit het voorbeeld zijn meer berekeningen gemaakt met verschillende interne belastingen, glaspercentages, typen zonwering en specifiek werkende massa's. De resultaten - uitgedrukt in specifieke koelbehoefte - zijn in figuur 14 grafisch en in tabel 9 in tabellarisch weergegeven.



figuur 14 invloed glaspercentage, zonwering en specifiek werkende massa op koellast

tabel 9 invloed glaspercentage, zonwering en specifiek werkende massa op koelbehoefte

|  |                                 | <b>buitenzonwering zonwerend glas binnenzonwering</b> |           |           |           |                  |           |           |           |                  |                  |           |           |
|--|---------------------------------|---|-----------|-----------|-----------|------------------|-----------|-----------|-----------|------------------|------------------|-----------|-----------|
|  |                                 | <b>ZTA = 0,15</b>                                     |           |           |           | <b>ZTA = 0,3</b> |           |           |           | <b>ZTA = 0,5</b> |                  |           |           |
| <b>interne<br/>belasting<br/>W/m<sup>2</sup></b> | <b>SWM<br/>kg/m<sup>2</sup></b> | <b>glas% --&gt;</b>                                   |           |           |           |                  |           |           |           |                  |                  |           |           |
|  |                                 | <b>30</b>   | <b>60</b> | <b>90</b> | <b>30</b> | <b>60</b>        | <b>90</b> | <b>30</b> | <b>60</b> | <b>90</b>        | <b>30</b>        | <b>60</b> | <b>90</b> |
| 0  | 50                              | 13  | 24        | 36        | 23        | 45               | 67        | 51        | 101       | 151              | W/m <sup>2</sup> |           |           |
|  | 80                              | 11  | 20        | 29        | 19        | 36               | 53        | 46        | 97        | 144              |                  |           |           |
| 20   | 50                              | 33  | 44        | 56        | 43        | 65               | 87        | 71        | 121       | 171              |                  |           |           |
|  | 80                              | 31  | 40        | 49        | 39        | 56               | 73        | 66        | 117       | 164              |                  |           |           |
| 35   | 50                              | 48  | 57        | 71        | 58        | 80               | 102       | 86        | 136       | 186              |                  |           |           |
|  | 80                              | 46  | 55        | 64        | 54        | 71               | 88        | 81        | 132       | 179              |                  |           |           |
| 50   | 50                              | 63  | 74        | 86        | 73        | 95               | 117       | 101       | 151       | 201              |                  |           |           |
|  | 80                              | 61  | 70        | 79        | 69        | 86               | 103       | 96        | 147       | 194              |                  |           |           |