

# Elektrisch analogon voor klimaattechnische berekeningen

Ir. P. EUSER

TECHNISCH PHYSISCHE DIENST TNO-TH

## Samenvatting

*Niet-stationaire warmteoverdrachtsverschijnselen in gebouwen kunnen met behulp van elektrische netwerkmodellen eenvoudiger worden berekend dan met analytische rekenmethoden, met een slechts gering verlies aan nauwkeurigheid.*

*Door de Technisch Physische Dienst TNO-TH is een speciaal analogon ontwikkeld voor het berekenen van de te verwachten temperaturen en koelbelastingen in gebouwen, met het oog op te treffen klimaattechnische voorzieningen.*

*In dit artikel wordt het principe van de methode behandeld en worden netwerken voor enige belangrijke warmteoverdrachtsverschijnselen in gebouwen genoemd. Enkele praktijkvoorbeelden worden gegeven.*

## Summary

*Non-steady heat transfer processes in buildings can be calculated by means of electrical network models, much easier than by analytical methods, with small loss of accuracy.*

*At the Institute of Applied Physics TNO-TH a special analogon is developed for indoor climate calculations for summer conditions. This analogon is used in behalf of architects and consulting engineers.*

*A description is given of the principle of the method and of the networks for some main heat transfer phenomena in buildings. Some examples from practice are given.*

## Inleiding

Berekeningen voor het vaststellen van de klimaattechnische voorzieningen van een gebouw voor zomercondities zijn, indien men de analytische oplossingen wil volgen, gecompliceerd. Dit komt omdat de zonbelasting sterk wisselt en omdat de wandconstructies van een vertrek verschillen en veelal uit meerdere lagen zijn opgebouwd. In de praktijk volgt men liever benaderingsmethoden, vooral als geen grote nauwkeurigheid wordt gevraagd.

Bij grote gebouwen met uniforme indeling en vaak grote veelzijdigheid van de eenheden, kan de nauwkeurigheid evenwel een belangrijke rol spelen. Meermalen bleek dat een op nauwkeuriger gegevens gebaseerde oplossing voor de klimaattechnische voorzieningen belangrijke voordelen opleverde ten opzichte van andere overwogen oplossingen.

Voor het uitvoeren van nauwkeurige berekeningen blijkt de hier te bespreken analogonmethode geschikt te zijn. De temperaturen die in de vertrekken zijn te verwachten, zijn voor alle voorkomende buiten- en binnencondities nauwkeurig vast te stellen, evenals de eventuele koelbelastingen.

We bespreken in dit artikel het analogon dat door ons speciaal voor dit doel werd ontwikkeld en dat herhaaldelijk gemodificeerd, nu ongeveer tien jaar in gebruik is.

## Principe en werkwijze

Het analogon berust op de analogie tussen warmtegeleiding — zoals in de wand van een vertrek — en elektrische geleiding, in een materiaal met gelijkmatig verdeelde weerstand en capaciteit.

Beide soorten van geleiding zijn te beschrijven

met dezelfde wiskundige vergelijking. Dit maakt het mogelijk berekeningen over de warmtegeleiding in een materiaal of constructie, te vervangen door metingen aan een elektrisch model. Een dergelijk model (of analogon) wordt opgebouwd uit een netwerk van weerstanden en condensatoren. De elektrische grootheden zoals weerstand, capaciteit, stroom en potentiaal corresponderen respectievelijk met de thermische grootheden warmte weerstand, warmtecapaciteit, warmtestroom en temperatuur. De waarden van de weerstanden en capaciteiten zijn te berekenen uit de eerder bedoelde analoge vergelijkingen en de thermische gegevens van de constructie.

Beuken paste deze analogie voor niet-stationaire geleidingsproblemen het eerst toe.

Ter verduidelijking beschouwen we het geschematiseerde geval van fig. 1. Geschetst is een ruimte die naar buiten wordt begrensd door een eenvoudige glaswand. Van de binnenwanden rekenen we er slechts één mee. Deze is aan de achterzijde volledig geïsoleerd verondersteld. Aan de binnenzijde van het glas bevinden zich jaloezieën.

Op het glasvlak valt zonnestraling. Deze wordt gedeeltelijk geabsorbeerd in glas en jaloezieën, en gedeeltelijk doorgelaten. Het doorgelaten deel wordt geabsorbeerd gedacht in de binnenwand. Het probleem is nu, de verschillende temperaturen te vinden die in dit vertrek bij zonbestraling zullen optreden. Het beschouwde geval is elektrisch voor te stellen met een netwerk van weerstanden en capaciteiten zoals eveneens in fig. 1 is weergegeven. De waarden van de weerstanden en capaciteiten van het netwerk rechts in de figuur, wor-

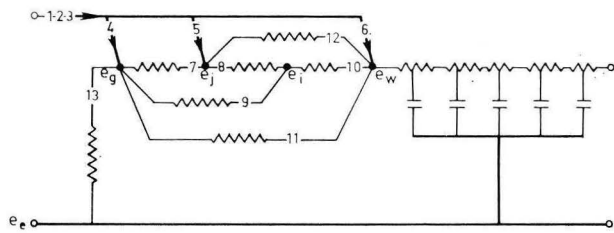
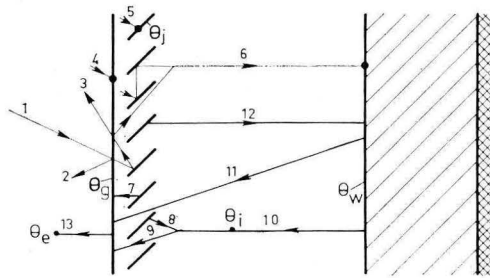


Fig. 1. Elektrisch netwerk voor de warmteoverdracht in een geschematiseerd vertrek.

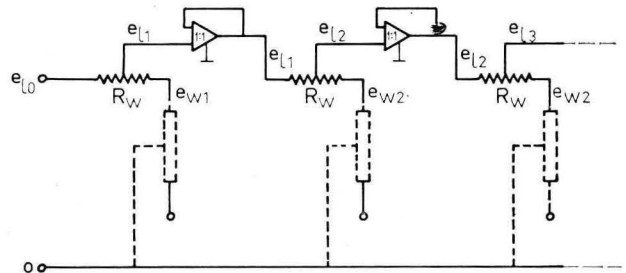
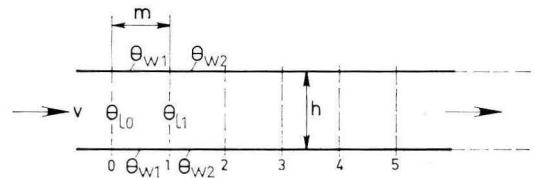


Fig. 2. Een geventileerde spouw en het bijbehorende netwerk.

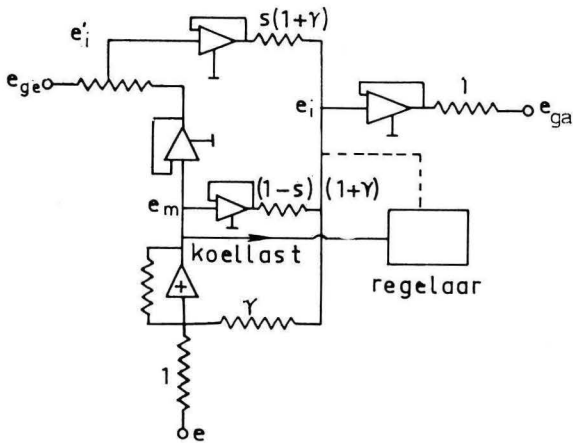
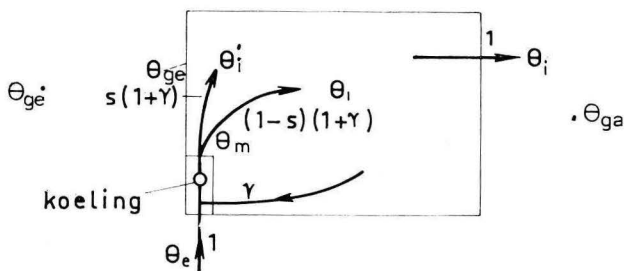


Fig. 3. Netwerk voor de warmte-uitwisseling in een vertrek bij het ventileren, bij gebruik van een inductie-apparaat.

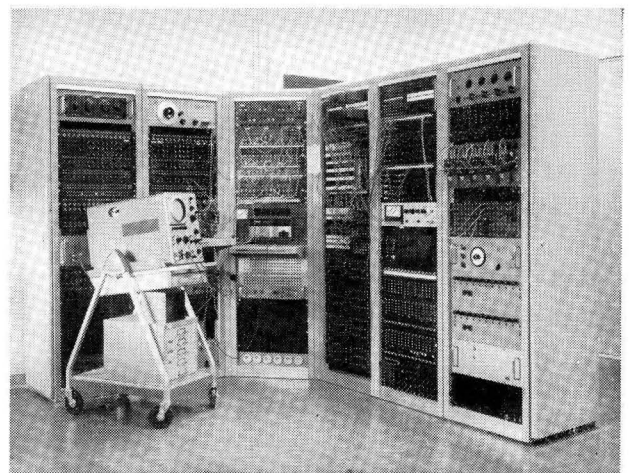


Fig. 4. Het analogon van de Technisch Fysische Dienst TNO-TH.

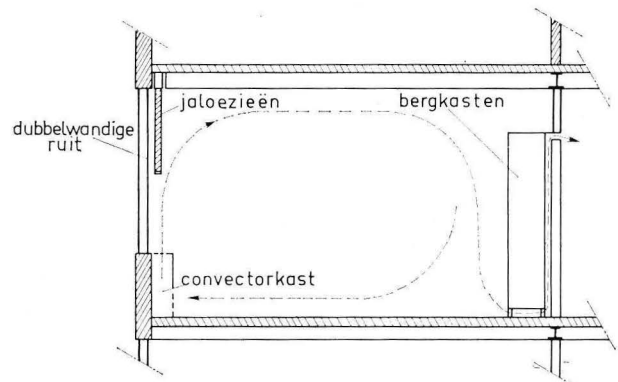


Fig. 5. Eenheidsvertrek uit een hoogbouw.

den bepaald door de waarden van de overeenkomstige thermische grootheden van de binnenwand. De andere weerstanden, links in de figuur, stellen voor: de verschillende overgangsweerstanden voor de warmteoverdracht door straling tussen de verschillende vlakken en door convectie van deze vlakken naar de vertrekklucht, voor het glasvlak ook naar de buitenlucht. De hier in het spel zijnde warmteovergangsweerstanden dienen voldoende nauwkeurig bekend te zijn.

Meestal is dit het geval. De temperatuurafhankelijkheid is zonnodig in rekening te brengen.

Dan dienen verder bekend te zijn de condities waaraan het vertrek wordt blootgesteld, hier de opvallende zonnestraling en hoe deze wordt geabsorbeerd en doorgelaten, alsmede de buitenluchttemperatuur. In het netwerk betekent een geabsorbeerde stralingsstroom een elektrische stroom die moet worden toegevoerd in de desbetreffende knooppunten. Voor de absorptie in glasvlak, jaloezieën en binnenwand zijn deze stromen aangeduid met 4, 5 en 6. Deze moeten dus vooraf worden berekend.

De buitenluchttemperatuur wordt elektrisch voorgesteld door een potentiaal die overeenkomstig de te verwachten buitentemperatuur moet kunnen variëren. Deze potentiaal wordt aangelegd via een weerstand, overeenkomstig de warmteovergangsweerstand aan de buitenzijde van de gevel.

Is aan deze condities in het netwerk voldaan, dan stelt de oplossing zich vanzelf in en kunnen de gevraagde grootheden in de vorm van potentialen en stromen worden gemeten.

Een bijzonderheid van de methode is nog dat de elektrische tijdschaal niet dezelfde behoeft te zijn als de thermische. Relatief langzaam verlopende thermische verschijnselen zijn daardoor in het model versneld voor te stellen, bijv. 24 uur thermisch wordt gereduceerd tot 1 msec elektrisch. De metingen kunnen bij sterke tijdreductie worden verricht met een kathodestraal-oscillograaf. De meetgegevens zijn dan op oscillogrammen vast te leggen. Deze methode wordt door ons gevolgd. Er kan ook met kleinere tijdreducties worden gewerkt. De meetmethodiek is dan anders.

Volgens dit principe zijn volledige netwerken te maken voor één of meer vertrekken.

Soms zijn speciale netwerken nodig. We vermelden in dit verband het netwerk voor de warmteoverdracht in een geventileerde spouw (fig. 2) en het netwerk voor de warmteoverdracht bij koeling met een zg. inductie-apparaat (fig. 3).

De verschillende netwerken, meetschakelingen en bedieningspanelen, die bij veelvuldig gebruik nodig zijn, hebben we in één instrument ondergebracht. In fig. 4 is dit „analogon” afgebeeld. Als bijzonderheid vermelden we dat bij de huidige uitvoering de netwerkjes voor de wandconstructies uitwisselbaar zijn. Dit werkt het handigst. Ook voor de verschillende mogelijke gevel- en zonweringconstructies zijn uitwisselbare eenheden gemaakt. Tijdens het onderzoek is dan de invloed van de overwogen systemen eenvoudig na te gaan. Daar het berekenen van de ingangsstromen (absorptie in de gevel) vrij veel tijd vergde, zijn we

er toe overgegaan deze berekeningen te doen uitvoeren met een computer.

De verdere werkwijze zal duidelijk worden bij de nu te bespreken voorbeelden.

### Praktijkvoorbeelden

Zoals we eerder opmerkten worden de analogonmetingen in hoofdzaak voor de grotere kantoorgebouwen gedaan. Dit ook al vanwege de kosten, die alleen bij grote gebouwen relatief klein kunnen blijven.

De meeste grote gebouwen hebben een uniforme indeling, in welk geval kan worden volstaan met het in model brengen van één vertrek, of van bijvoorbeeld twee tegenover elkaar, aan weerszijden van de gang gelegen vertrekken.

We beschouwen zo'n eenheidsvertrek (fig. 5). De gevel is de bekende vliesgevel, hier met dubbelwandige glasvlakken.

Het vertrek wordt mechanisch geventileerd, waarbij de lucht wordt toegevoerd door middel van inductie-apparaten en afgevoerd onder en achter de bergkasten heen naar de gang. Voor het weren of spreiden van directe zonnestraling worden jaloezieën gebruikt, die zijn aangebracht aan de binnenzijde van het glasvlak. De volgende vragen werden onder meer gesteld: welke binnentemperaturen zijn te verwachten bij zonnig weer in de zomer, welke resultaten zijn te bereiken met opgevoerde ventilatie, hoe groot is de koelbelasting als men er van uit gaat dat de gemiddelde luchttemperatuur niet hoger mag worden dan het dagmaximum van de buitenluchttemperatuur, hoe hoog liggen de uitkomsten indien de jaloezieën aan de buitenzijde zouden worden aangebracht?

Deze vragen konden in numerieke zin worden beantwoord aan de hand van de modeluitkomsten. We geven hierover enige gegevens in fig. 6, 7, 8 en 9. Het volgende bleek. Jaloezieën aan de binnenzijde van het raam geven in dit geval weliswaar een niet geringe temperatuurdaling in het vertrek, maar het temperatuurniveau blijft te hoog. Bij de opvoering van het ventilatievoud (fig. 7) ontstaat eveneens aanmerkelijke verbetering, maar meer dan 10 luchtwisselingen per uur zijn nodig om in de buurt van de behaaglijkheidsgrenzen te komen. Gezien de bij deze ventilatie vergemakkelijkte warmteafgifte van de warme jaloezieën naar binnen, zou een belangrijk kleinere luchthoeveelheid nodig zijn wanneer de luchtafvoer vlak boven de jaloezieën kon plaats vinden. Bij koeling (fig. 8) is het temperatuurniveau vrijwel naar wens in te stellen; te hoge vlaktemperaturen bij het raam kunnen echter nog hinderlijk blijven. Klimaattechnisch bezien is de toestand bij buitenjaloezieën het best. Deze oplossing is evenwel niet steeds zonder meer aan te bevelen gezien de grotere aanschafkosten en het onderhoud. Met behulp van deze gegevens kon worden beoordeeld welke oplossing klimaattechnisch én economisch de voorkeur verdiende. Deze modelmetingen werden enige jaren geleden verricht. Intussen konden, na gereed komen van het gebouw, enige controlemetingen worden gedaan. Deze waren zeer bevredigend.

In fig. 10 is de temperatuurtoestand gegeven voor

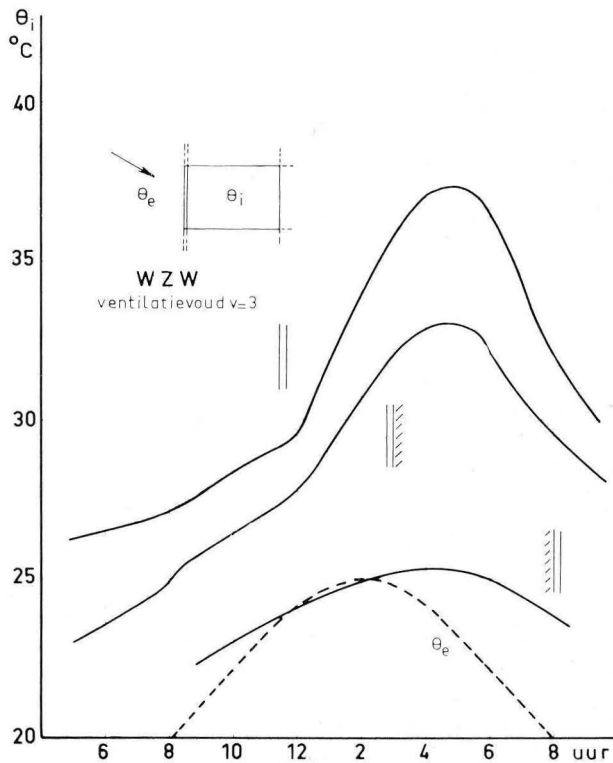


Fig. 6. De gemiddelde luchttemperatuur in een vertrek (WZW, 21 juni) bij toepassing van binnenjaloëzieën resp. buitenjaloëzieën en, ter vergelijking, die bij onafgeschermd glasvlakken.

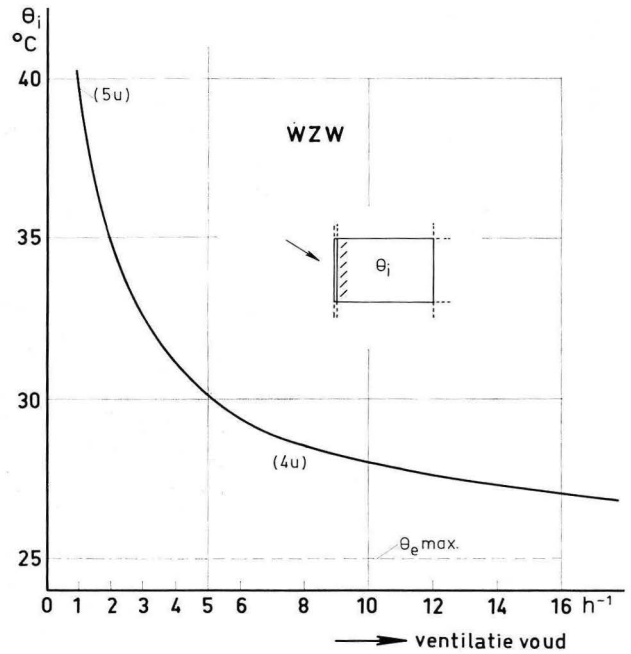


Fig. 7. De maximale gemiddelde luchttemperatuur in het vertrek van fig. 5 (WZW) als functie van de hoeveelheid ventilatielucht.

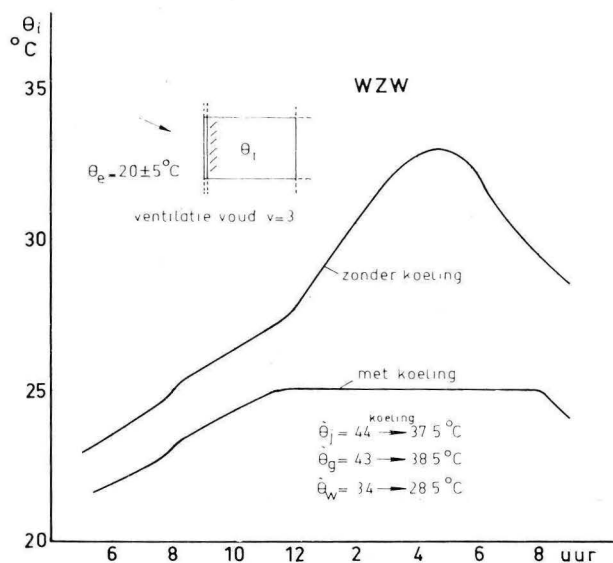


Fig. 8. De gemiddelde vertrekluchttemperatuur bij begrenzing op  $25^\circ\text{C}$ , alsmede de maxima van de belangrijkste vlaktemperaturen:

- $\theta_j$  = jaloëzietemperatuur
- $\theta_g$  = temperatuur binnenglasvlak
- $\theta_w$  = gemiddelde temperatuur overige wandoppervlakken

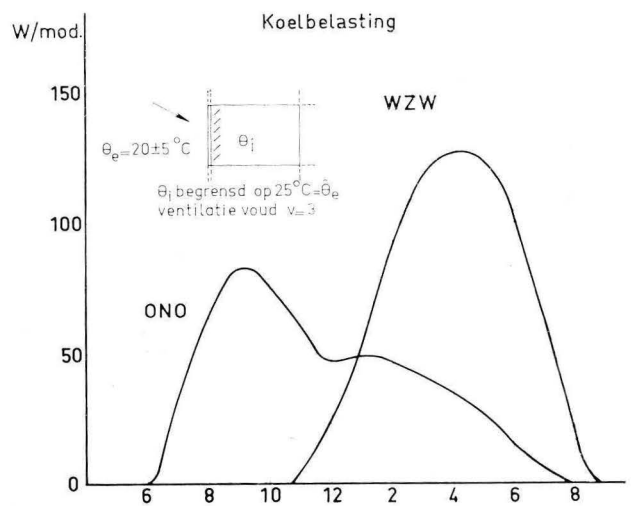


Fig. 9. Het verloop van de koelbelasting aan de WZW-zijde en aan de ONO-zijde bij begrenzing van de gemiddelde luchttemperatuur op  $25^\circ\text{C}$ .

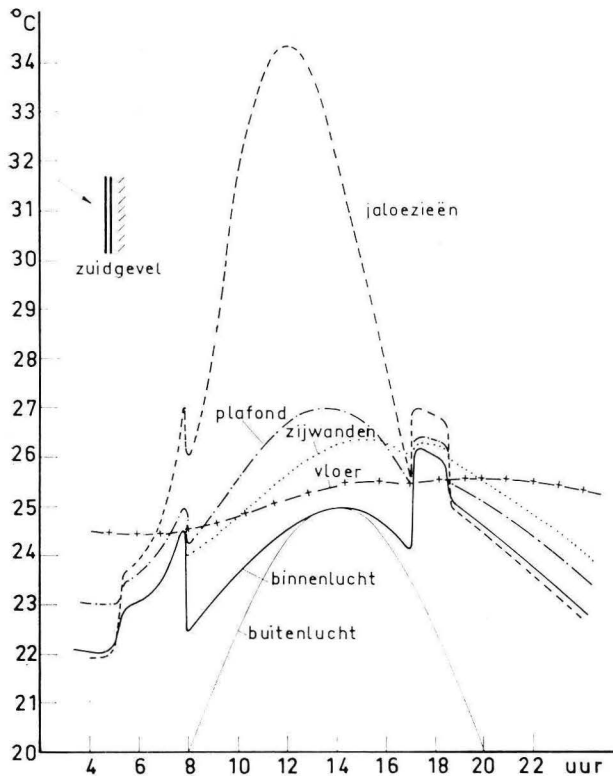


Fig. 10. De binnentemperaturen in een vertrek met oriëntatie zuid, datum 7 september.

een vertrek met oriëntatie zuid, voor 7 september. In dit vertrek werd zodanig gekoeld dat de gemiddelde binnenluchttemperatuur meeliep met de buitentemperatuur. Uit de gegevens van fig. 10 is een vrij nauwkeurig beeld te krijgen over de behaaglijkheidstoestand in dit vertrek.

De besproken uitkomsten hebben betrekking op aanhoudend zonnig weer. Dit is de ongunstigste situatie, zodat aanhouden van deze gegevens een zekere veiligheid inhoudt. Bij korte zonnige periodes, die in ons land vaker voorkomen, wordt de eindtoestand eerst na enige dagen bereikt vanwege de temperatuurtraagheid van het vertrek. Fig. 11 geeft hiervan een voorbeeld. Uitgezet is de vertrekkluchttemperatuur gedurende een aantal dagen bij bewolkt weer, gevolgd door het temperatuurverloop na intrede van een zonnige periode. De kwasi-stationaire toestand wordt hier na ongeveer 5 dagen bereikt.

### Nauwkeurigheid

De nauwkeurigheid van de methode is te stellen op ca. 5%. Bij het hanteren van de uitkomsten speelt verder (evenals bij de gewone berekeningen) een rol de nauwkeurigheid waarmee de gebruikte thermische gegevens van de wandconstructies, de warmteovergangscoefficienten en de reflectie-eigenschappen van de gevel- en zonweringvlakken bekend zijn. De nauwkeurigheid van deze grootheden kunnen we op globaal 10% stellen. Een grotere nauwkeurigheid (5%) vraagt een afzonderlijke bepaling.

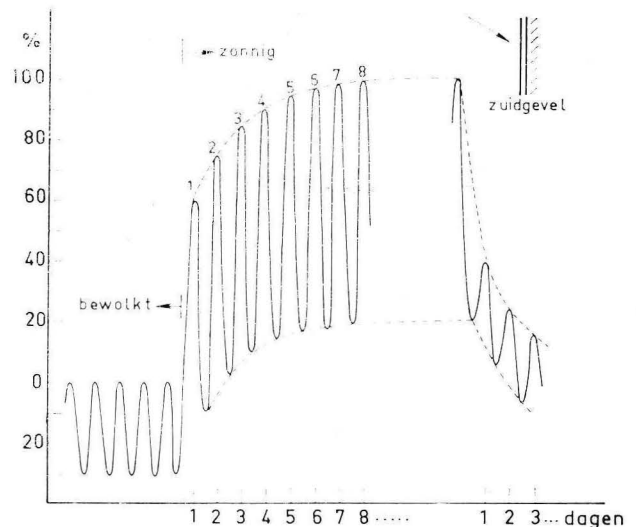


Fig. 11. Het relatieve verloop van de gemiddelde luchttemperatuur in een zeker vertrek tijdens bewolkt weer, afgewisseld door een zonnige periode.

De onnauwkeurigheid in de materiaaleigenschappen en in de andere coëfficiënten komt niet met dezelfde onnauwkeurigheid tot uitdrukking in de uitkomsten.

In dit verband is evenzeer belangrijk de nauwkeurigheid waarmee de randcondities, met name de zonbelasting, zijn na te bootsen; deze is relatief groot, naar schatting enkele procenten.

Bij het hanteren van de uitkomsten is tenslotte van belang — evenals bij de gewone berekeningen — het verschil in de aangehouden condities en de werkelijk optredende. Hier gaat het om de overschrijdingskansen van de aangehouden condities, in het bijzonder die van de buitenluchttemperatuur. Voor de etmaalgemiddelde waarden zijn deze bekend, voor de hogere dagmaxima zijn goede schattingen te maken. Afhankelijk van de te stellen eisen kan een kleiner of groter aantal overschrijdingsdagen per jaar worden toegestaan.

De opvallende zonnestraling bij heldere hemel is vrij goed bekend. Veronderstellen we als (veilig) uitgangspunt aanhoudend zonnig weer, dan omzeilen we de moeilijkheid van de overschrijdingskansen. Desgewenst kunnen echter ook hierover nadere overwegingen aan de conclusies van het onderzoek worden toegevoegd.

### Uitvoering van standaardberekeningen

Tot voor kort vergde een modelonderzoek voor een aantal situaties en mogelijkheden 1 à 2 maanden, afgezien van een vaak onvermijdelijke wachttijd van ongeveer 1 maand. De kosten bedroegen,

bij grote gebouwen, gemiddeld 0,4<sup>0</sup>/<sub>00</sub> van de totale bouwkosten.

Een tijdsduur van enkele maanden is, indien spoedige beslissingen moeten vallen vrij lang. Gaat het om de uitwerking van een bepaalde oplossing dan is deze tijdsduur vaak minder bezwaarlijk. Om aan dit eventuele bezwaar tegemoet te komen is een eenvoudiger meetprocedure ontworpen waarmee de berekeningen sneller worden uitgevoerd, zij het met wat minder grote nauwkeurigheid.

De tijdsduur voor de uitvoering van deze standaardberekeningen behoeft niet meer dan twee weken te bedragen. Ook de kosten zijn minder. Dit is bereikt enerzijds door vereenvoudiging van de bediening van het analogon, anderzijds door gebruikmaking van een computer voor het opstellen van de ingangsgegevens.

Daarnaast blijft ook de tot dusver gevolgde methode mogelijk. Deze verschaft meer gegevens.

Welke methode in een bepaald geval wenselijk is, is afhankelijk van de aard van de gestelde vragen en wordt verder bepaald door de vraag voor wie de gegevens zijn bestemd. Indien de architect in

het beginstadium van het ontwerp op korte termijn een keuze moet doen uit de mogelijkheden van zonwering, kan het doormeten van een aantal systemen het best worden verricht volgens de eenvoudige methode. Als de warmtetechnische adviseur voor een bepaalde situatie, bij reeds vastgelegde bouwkundige gegevens, het binnenklimaat nauwkeurig wil kennen en de eventueel benodigde koelcapaciteit moet weten, dan verdient de niet vereenvoudigde methode de voorkeur. Echter kan de warmtetechnische adviseur ook belang hebben bij een snelle berekening voor minder kosten, bijvoorbeeld als het gaat om minder grote gebouwen.

Welk uitgangspunt ook geldt, het doel is hetzelfde: vooraf te weten of het gebouw een bevredigend binnenklimaat krijgt en hoe op verantwoorde wijze de juiste voorzieningen kunnen worden gekozen. Het hier besproken analogon staat daartoe bij onze Dienst ter beschikking van hen die zijn betrokken bij het ontwerpen van het gebouw en bij het projecteren van de klimaattechnische voorzieningen.