

Daglicht en uitzicht / bezonning

Kennisbank Bouwfysica
Auteur: ir. A.C. van der Linden

De gevel en vanzelfsprekend ook de ramen daarin vormen de belangrijkste schakel in het contact met buiten. In de arbeidsregelgeving is opgenomen dat er vanaf de arbeidsplaats “uitzicht moet zijn op een ruimte buiten het gebouw”. Dat het uitzicht daarbij ook enige kwaliteit moet hebben, is duidelijk. Dat geldt uiteraard ook voor woningen, ziekenhuizen, enzovoort. Daarnaast heeft door de ramen uiteraard toetreding van zon- en daglicht plaats. Er wordt onderscheid gemaakt tussen zonlicht (de rechtstreekse stralen van de zon) en daglicht. Daglicht is het licht dat door de gehele hemelkoepel, diffuus, wordt uitgestraald. Toetreding van rechtstreeks zonlicht wordt met name ‘s winters en in de tussenseizoenen zeer gewaardeerd.



figuur 1. direct zonlicht in een ruimte wordt veelal zeer gewaardeerd en vormt een belangrijk element in de architectuur

Echter, in de tussenseizoenen en ‘s zomers kan zoninstraling in vertrekken sterke opwarming van de vertrekken veroorzaken; daarvoor is zonwering nodig.

Voor een goede dagverlichting van vertrekken zijn niet alleen hoge ramen en een lichte afwerking van het interieur van groot belang, maar ook de lichtsterkteverdeling over (de diepte van) het vertrek. Dicht bij de gevel is er over het algemeen veel meer licht dan nodig is; achter in het vertrek veel minder. Als het verschil te groot wordt, is achter in het vertrek toch soms kunstverlichting nodig, terwijl de verlichtingssterkte in feite wel voldoende is. De luminantieverhoudingen zijn dan zo groot, dat het oog niet meer weet waarop het zich moet instellen. “Daglichtsystemen” worden aan allerlei ontwikkelingen onderworpen. Ook de voor het eerst toegepaste “lichtplank” van lang geleden is opnieuw ontwikkeld (zie het voorbeeld in figuur 2).



figuur 2. de "lichtplank" kaatst het licht tegen het plafond waardoor het achter in het vertrek terechtkomt; het onderste deel van het raam heeft een lichtwering, waardoor de lichtverdeling over het vertrek meer gelijkmatig wordt

Daarnaast zijn er ontwikkelingen met lamellenzonwering/lichtwering met een spiegellende zijde, die het licht op de werkplek weren, maar die het licht wel naar boven (naar het plafond) kaatsen. En zo zijn er nog meer bijzondere oplossingen beschikbaar.

Een goede lichtwering is ook nodig om verblinding door helder verlichte raamopeningen te voorkomen (zie figuur 3).



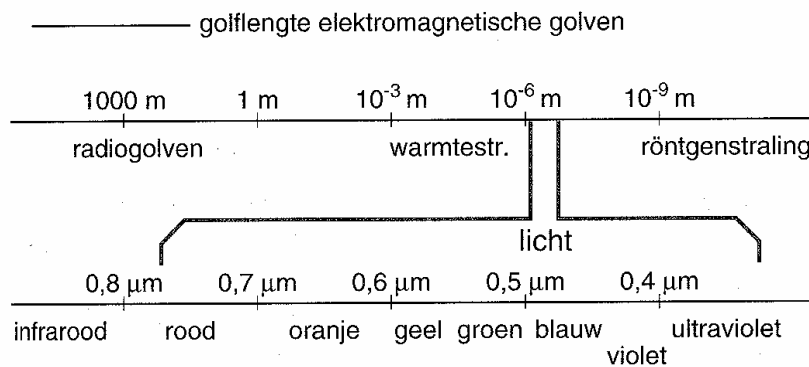
figuur 3. door de grote helderheid van het raam wordt het oog verblind en kunnen andere voorwerpen en mensen in de ruimte niet meer worden waargenomen; zelfs de aanvullende verlichting werkt in dit geval niet voldoende

Licht, basisbegrippen, normen en eisen ten aanzien van verlichting

Kennisbank Bouwfysica
Auteur: ir. A.C. van der Linden

1 Inleiding, basisbegrippen

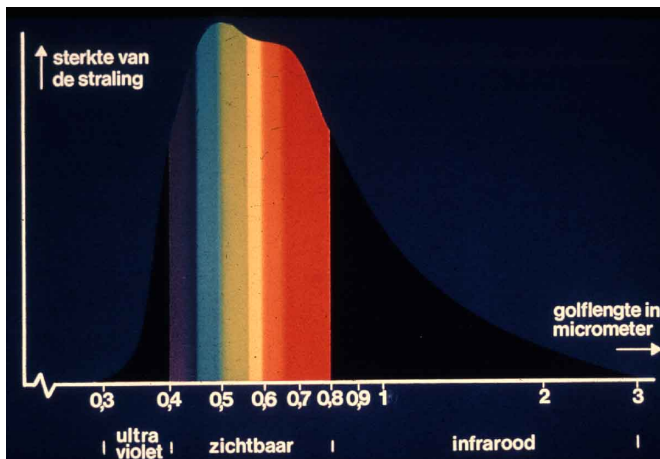
Licht speelt een zeer belangrijke rol in de architectuur. Door invallend zonlicht, door gerichte lampen (museum) ontstaat een levendig beeld. Meer indirect licht geeft een rustiger sfeer. Daarnaast is een goede verlichting van ruimten van belang voor de taken die er moeten worden uitgevoerd. Echter, dat betekent meer dan alleen maar “voldoende” licht. Er moet onder andere ook aandacht worden besteed aan zaken als kleurweergave, helderheidsverschillen en verblinding. Hierna worden vooral alle in dit kader relevante “meetbare” aspecten van licht besproken.



figuur 1. golflengte en eigenschappen van elektromagnetische straling

In het domein van de natuurkunde is licht een elektromagnetische straling, evenals de warmtestraling die men voelt als men een hand voor een warme radiator houdt. Ook radiogolven aan de ene kant en röntgen- en radioactieve straling aan de andere kant behoren tot hetzelfde natuurkundige verschijnsel. Het verschil zit in de golflengte (zie figuur 1). De voortplantingssnelheid is voor al deze golven gelijk, namelijk $0,3 \cdot 10^9$ m/s ofwel 300.000 km/s. Van het gehele spectrum van elektromagnetische straling is ons oog alleen gevoelig voor golflengten van 0,38 tot 0,78 μm ($1 \mu\text{m} = 10^{-6}$ m). Dit zijn ook de golflengten die het sterkst vertegenwoordigd zijn in het stralingsspectrum van de zon (zie figuur 2). In de loop van de evolutie is het menselijk oog uiteraard hierop afgestemd.

Vanaf de kortste golflengte (0,38 μm) tot de langste (0,78 μm) zijn alle kleuren van de regenboog vertegenwoordigd: violet, blauw, groen, geel, oranje en rood. Buiten het zichtbare gebied treft men nog het ultraviolet (bruin worden) en het infrarood (kortgolvlige warmtestraling) aan.



figuur 2. spectrale verdeling van de zonnestraling

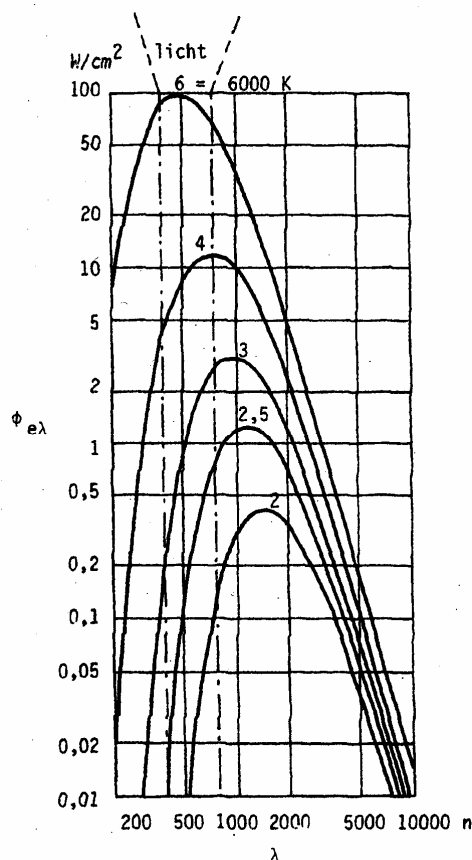
2 Kleur en kleurtemperatuur

Bij verschillende golflengten horen verschillende kleuren (zie figuren 1 en 2). Alle kleuren te zamen, zoals in zonlicht, worden ervaren als wit. Dit geldt ook voor het licht van bij voorbeeld gloeilampen. Men ervaart echter het zonlicht over het algemeen als witter dan het lamplicht. Dit hangt af van de mate waarin de verschillende golflengten in het spectrum vertegenwoordigd zijn. Gloeilampen zijn, evenals de zon, temperatuurstralers. Bij lage temperaturen (radiatoren) wordt uitsluitend warmtestraling uitgezonden. Bij hogere temperaturen komt daar infrarood, zichtbaar licht en zelfs ultraviolet bij (zie figuur 3).



figuur 3. voorbeeld van een temperatuurstraler: pot gesmolten brons; de buitenkant van de pot heeft een lagere temperatuur dan het brons boven de pot

Bij de temperatuur van het oppervlak van de zon (gemiddeld circa 5750 K) ligt de top van de straling midden in het gebied van het zichtbare licht. Bij lagere temperaturen verschuift de top naar de langere golflengten, het rode gebied, en wordt het licht "geler" van kleur. Bij gloeilampen (2700-2900 K) ligt de top van de stralingskromme overigens buiten het zichtbare gebied in het infrarode gebied (zie figuur 4).



figuur 4. golflengte en sterkte van de uitgezonden straling afhankelijk van de temperatuur

De stralingstemperatuur is een maat voor de "sfeer" van het witte licht. Fluorescentielampen (TL-buizen) zijn geen temperatuurstralers en hebben daarom ook vaak een spectrum dat heel anders van vorm is dan dat van bijvoorbeeld een gloeilamp. Moderne fluorescentielampen met een hoge lichtopbrengst hebben een spectrum dat bestaat uit een aantal banden (drie of meer), die gezamenlijk toch als wit licht worden ervaren. Ook voor deze lichtbronnen gebruikt men een (fictieve) stralingstemperatuur om de kleur van het licht aan te duiden. Men spreekt dan van de toegevoegde kleurtemperatuur. Bij de temperaturen passen de volgende benamingen van de lichtkleur: <3300 K warm wit, 3300-5000 K wit, >5000 K koel wit.

De toegevoegde kleurtemperatuur wordt bepaald door het licht van de te onderzoeken lamp te vergelijken met het licht van een zwarte straler. De temperatuur waarbij de lichtkleur van de zwarte straler het meest overeenkomt met de lichtkleur van de te onderzoeken lamp, noemt men de "toegevoegde" kleurtemperatuur.

De kleurtemperatuur zegt echter nog niets over de kwaliteit van de kleurweergave bij het licht van de beschouwde lamp. Immers, een voorwerp met een bepaalde kleur wordt alleen maar met die kleur gezien als in het erop vallende licht die kleur ook voldoende is vertegenwoordigd. Verschillende fluorescentielampen kunnen bij eenzelfde toegevoegde kleurtemperatuur een verschillend spectrum, en derhalve een andere kleurweergave hebben.

3 Kleurweergave-index

Om de kleurweergave te kunnen beschrijven, is de kleurweergave-index R_a ingevoerd. Deze index geeft aan in welke mate de kleurindruk van een aantal monsters, onder het licht van de te onderzoeken lichtbron, overeenstemt met de kleurindruk van dezelfde monsters onder het licht van een referentiebron onder nauwkeurig omschreven omstandigheden. Voor lichtbronnen met een (toegevoegde) kleurtemperatuur < 5000 K is de referentie lichtbron een zwarte straler bij dezelfde temperatuur als de (toegevoegde) kleurtemperatuur van de te onderzoeken lichtbron. Boven 5000 K moet een referentielichtbron worden gebruikt met een spectrale energieverdeling die overeenkomt met het C.I.E. standaard daglicht D (C.I.E. = Commission Internationale de l'Eclairage).

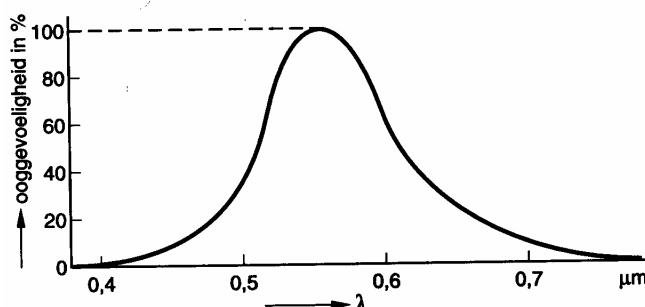
De algemene kleurweergave-index wordt bepaald door de mate van kleurverschuiving zoals die optreedt bij een achttal proefkleuren. Deze algemene index kan worden aangevuld met de kleurverschuiving van nog zes andere kleurmonsters, waarbij van één of meer van de in totaal 14 monsters eventueel nog de individuele kleurweergave-index kan worden gegeven.

Als de kleurweergave-index van twee lichtbronnen overeenstemt, maar de toegevoegde kleurtemperatuur niet, kan de kleurweergave op zich wel verschillen. Bij het vergelijken van twee lichtbronnen moet men dus altijd beide grootheden in beschouwing nemen.

De maximale waarde van de kleurweergave-index is $R_a = 100$. Deze wordt gevonden als er in het geheel geen kleurverschuiving optreedt. De kleurweergave-index van gloeilampen benadert dikwijls het maximum; immers, het zijn temperatuurstralers. Ook met fluorescentielampen zijn zeer hoge waarden haalbaar. Vroeger ging dat ten koste van het rendement, maar met zogenaamde "drie-band" lampen is men erin geslaagd een heel redelijke kleurweergave te bereiken bij een hoog rendement.

4 Grootheden; maten voor de hoeveelheid licht en de verlichting van vlakken

Wanneer men praat over verlichting is men geïnteresseerd in de hoeveelheid zichtbaar licht, niet in de straling die buiten het zichtbare gebied ligt. Echter, omdat het oog niet voor iedere golflengte even gevoelig is, kan men niet volstaan met rechtstreeks de hoeveelheid energie binnen het golflengtegebied van het zichtbare licht te meten. Overigens, de ooggevoeligheid is niet alleen afhankelijk van de golflengte maar ook van de sterkte van het licht. Voor het gebied waarmee men in de bouwfysica te maken heeft, wordt de relatieve ooggevoeligheid weergegeven in figuur 5. Het blijkt dat het oog voor licht met een golflengte van 0,555 μm (geel-groen) maximaal gevoelig is.



figuur 5. gevoeligheid van het menselijk oog bij verschillende golflengten van licht bij gemiddelde omstandigheden in de gebouwde omgeving

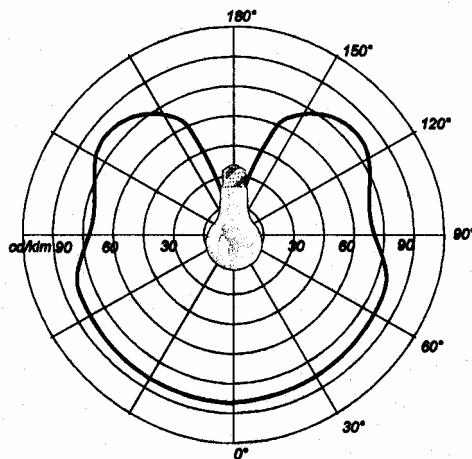
4.1 lichtstroom, lumen (lm)

De grootheden waarin licht wordt gemeten, zijn oorspronkelijk vastgelegd op basis van een visuele helderheidsvergelijking. Hierbij liet men licht vallen op een referentievlak. De verlichtingssterkte van een bekende lichtbron werd gevarieerd (door verandering van de afstand of door filteren) totdat dezelfde helderheidsindruk ontstond als bij de te meten lichtbron. Hierbij werd als standaard lichtbron onder andere een kaars van bepaalde grootte en samenstelling gebruikt. De standaard kaars - gezien als puntbron met een lichtsterkte van een candela - verlichtte een vlak op een meter afstand met een verlichtingssterkte van een lux. Later zijn de verlichtingsgrootheden afgeleid uit de energiestroom die het licht (de elektromagnetische straling) vertegenwoordigt. Naast de lichtsterkte (candela, cd) en de verlichtingssterkte (lux) is daarom ook de lichtstroom ten tonele gevoerd. Onder de lichtstroom verstaat men dat deel van de totale uitgestraalde elektromagnetische straling, dat een menselijk oog als licht ervaart, rekening houdend met de hiervoor gegeven ooggevoeligheid. De lichtstroom wordt uitgedrukt in lumen (lm).

4.2 Lichtsterkte, candela (cd)

De lichtsterkte geeft aan hoe groot de lichtstroom is die in een bepaalde richting wordt uitgestraald. Daarvoor wordt een denkbeeldige bol met een straal van één meter om de (punt)bron aangenomen. Een complete bol beslaat een ruimtehoek van 4π steradianen (sr), een achtsde bol, of andere al dan niet regelmatig gevormde bundel die dezelfde ruimtehoek beslaat is $0,5 \pi$ steradianen groot.

Als voorbeeld wordt in figuur 6 het lichtsterktediagram van een gloeilamp gegeven. Dit diagram is genormeerd op 1000 lm. Als de lamp in alle richtingen evenveel licht zou uitstralen, zou de lichtsterkte in alle richtingen $1000/4\pi = 80 \text{ lm/sr} = 80 \text{ cd}$ bedragen.



figuur 6. polair lichtsterktediagram van een gloeilamp, genormeerd op een totale lichtstroom van 1000 lm

Ook bestaan er lichtsterktediagrammen van armaturen (met daarin een bepaald type lamp). Daaruit kan men bepalen welk soort armatuur voor een bepaald doel het meest geschikt is (algemene verlichting, brede bundel, voorwerp verlichten (spot), smalle bundel, enzovoort. Stel dat de 1000 lm van het voorbeeld in figuur 6 door gebruikmaking van een spiegeloptiek of dergelijke wordt uitgestraald in een ruimtehoek, overeenkomend met 1/8-bolsegment. In dat geval wordt de lichtsterkte achtmaal zo hoog: 640 cd in plaats van 80 cd. Hetzelfde geldt voor de verlichtingssterkte op een vlak op zekere afstand van de lichtbron.

4.3 Verlichtingssterkte, lux

De verlichtingssterkte is de belangrijkste grootheid als het gaat om het uitvoeren van de "oogtaak". De verlichtingssterkte geeft aan hoeveel lumen er op een m^2 valt. De eenheid van verlichtingssterkte is daarom eigenlijk lumen/m^2 , maar deze heeft de eigen naam "lux" gekregen.

4.4 Helderheid en luminantie

Een fel verlicht vlak heeft een grote helderheid. De natuurkundige grootheid die dit beschrijft heet "luminantie". Bij het beschrijven van de lichtsterkte werd uitgegaan van een puntbron. Echter, in werkelijkheid heeft een lichtbron altijd zekere afmetingen. Als al het licht door een relatief klein vlak wordt uitgestraald, is dit veel helderder dan bij een groot oppervlak. De luminantie is in feite de lichtsterkte per oppervlakte-eenheid en wordt uitgedrukt in cd/m^2 .

4.5 Verlichtingssterkte versus luminantie; reflectie

Wat wij waarnemen, is altijd de luminantie van een oppervlak en niet de verlichtingssterkte. We zien alleen het licht dat wordt uitgestraald (lamp, hemelkoepel) of dat wordt gereflecteerd (bureaublad, binnenwanden, gebouwen, bomen). Een goed verlichte zwarte wand blijft donker. Een wand met een zekere kleur reflecteert alleen het "gele" gedeelte van het witte licht. Als er groen licht op een rode wand valt, wordt er niets gereflecteerd. De wand blijft donker.

Voor het beschrijven van de mate van reflectie wordt de reflectiefactor (r) gebruikt. Deze geeft de verhouding aan van de gereflecteerde lichtstroom tot de opvallende lichtstroom. De meeste oppervlakken geven een diffuse reflectie. Dat betekent, dat de luminantie in alle richtingen even groot is. De helderheid van het vlak blijft gelijk, onafhankelijk van de hoek waaronder het vlak wordt gezien. Lichte vlakken (wit pleisterwerk) hebben een reflectiefactor $r = 0,70-0,80$. Als ze oud (en vuil) worden, loopt dit terug tot $r = 0,30-0,60$. Voor baksteen gelden waarden van $r = 0,10-0,30$ (nieuw) en $r = 0,05-0,15$ (oud). Beton zit daar tussenin. Voor een effectieve binnenverlichting zijn lichte kleuren in het interieur aan te bevelen.

5 Eisen te stellen aan binnenverlichting

Voor binnenverlichting van verblijfsruimten zijn er geen rechtstreekse wettelijke eisen in het Bouwbesluit. In het Bouwbesluit wordt alleen wat geregeld voor de daglichttoetreding, maar dit gebeurt in de vorm van een minimaal vereiste daglichtopening in de gevel. Voor arbeidsplaatsen staan dit soort eisen in het Arbobesluit (uitvoeringsbesluit van de Arbowet).

Voor arbeidsplaatsen zegt de wet wel wat over binnenverlichting (Arbobesluit artikel 6.3: Daglicht en kunstlicht):

1. arbeidsplaatsen en de directe toegang daartoe zijn gedurende de aanwezigheid van de werknemers door daglicht, door kunstlicht of door beide voldoende en doelmatig verlicht;
2. het kunstlicht is zodanig aangebracht dat gevaar voor ongevallen is voorkomen;
3. de voor kunstlicht gebruikte kleur mag de waarneming van veiligheids- en gezondheidssignalering niet wijzigen of beïnvloeden.

Deze doelbepalingen worden in de "Beleidsregels arbowetgeving" nader uitgewerkt. Arbeidsplaatsen en de directe toegangen daartoe zijn gedurende de aanwezigheid van de

werknemers voldoende en doelmatig verlicht door daglicht, door kunstlicht of beide, indien is voldaan aan de Nederlandse norm NEN 3087:1997 “Visuele ergonomie in relatie tot verlichting – Principes en toepassingen”.

Met deze norm en de achterliggende regelgeving als basis worden hier globale richtlijnen gegeven zoals die ook door de Rijksgebouwendienst worden gehanteerd (zie www.Rijksgebouwendienst.nl: publicatie Bouwfysische kwaliteit Rijkshuisvesting / september 1999, te downloaden als pdf). Deze publicatie verwijst voor concreet toe te passen verlichtingssterktes naar de norm NEN 1890:1991 “Binnenverlichting – functionele eisen”. De benodigde verlichtingssterkte hangt af van de “kritische detailgrootte” van de oogtaak. Dat betekent, hoe kleiner de zaken zijn die moeten worden waargenomen, des te hoger is de benodigde lichtsterkte. Een globale indeling (uit NEN 3087) is gegeven in tabel 1. Tabel 2 toont het verder uitgewerkte overzicht van de NEN 1890. Deze verlichtingssterkten worden algemeen aangehouden bij het ontwerpen van verlichtingsinstallaties.

Naast de verlichtingssterkte is ook de verhouding van luminanties binnen het gezichtsveld van belang. De verschillen mogen niet te groot zijn, anders weet het oog niet waarop het zich moet instellen. Voor de verhouding van de luminantie van de oogtaak (papier op bureau) wordt over het algemeen aangehouden : directe omgeving (bureaublad) : verdere omgeving (vertrekomwandingen) van 10 : 3 : 1. Luminantieverhoudingen groter dan 10 leiden tot overmatige vermoeidheid en verlies aan waarneming.

Heldere lichtbronnen binnen het gezichtsveld kunnen ook grote problemen veroorzaken. Afhankelijk van de hoek waaronder ze gezien worden ten opzichte van de normale kijkrichting worden in NEN 1890 ook grenswaarden voor de luminantie gegeven. Moderne (kantoor)verlichtingsarmaturen zijn over het algemeen echter uitstekend afgeschermd. Echter, het is zaak hier goed op te letten bij het kiezen van de armaturen.

standaardverlichtingssterkte	toepassing
10 lx tot 200 lx	<i>Oriëntatieverlichting.</i> Verlichting in ruimten die niet of slechts kortdurend als werkruimte worden gebruikt en waar de visuele taak niet moeilijk is. In het algemeen zal plaatselijk een aanvullende werkverlichting nodig zijn voor het lezen van drukwerk of taken met een vergelijkbare detailgrootte.
200 lx tot 800 lx	<i>Werkverlichting.</i> Verlichting in ruimten die geregeld als werkruimte worden gebruikt. De meeste visuele taken kunnen worden verricht in dit gebied van verlichtingssterkten. De hoge niveaus binnen dit gebied dienen te worden toegepast, waar men direct zicht heeft op een binnenruimte met een hogere verlichtingssterkte of in dieper gelegen delen van de ruimte van waar men direct zicht heeft op de hoge lichtniveaus nabij het raam. Ook combinaties van kleine details en zwakke contrasten kunnen vooral ten behoeve van ouderen er toe leiden dat een hoog verlichtingsniveau binnen deze klasse moet worden gekozen.
800 lx tot 3000 lx	<i>Speciale werkverlichting.</i> Verlichting, die als plaatselijke verlichting wordt toegepast voor speciale taken. Vooral bij het vermijden of opwekken van effecten van glans en/of schaduw, die de zichtbaarheid van de taak beïnvloeden, is het plaatselijk karakter van de verlichting gewenst.

tabel 1. overzicht standaardverlichtingssterkten uit NEN 3087

klasse	aard van de verlichting	sub-klasse	typering van de taak	standaardverlichtingssterkte lx	voorbeelden van taken en/of ruimten
I	oriëntatie-verlichting (geen of slechts incidenteel gebruik van de ruimte als werkruimte)	a	waarnemen van grote objecten en beweging van personen	50	opslagruimte parkeergarage
		b	waarnemen van zeer grove details en herkenning van personen	100	gang trappehuis
II	werkverlichting (permanent gebruik van de ruimte als werkruimte)	a	waarnemen van grove details	200	grof constructiewerk, smederij, (werk)magazijn
		b	lezen en schrijven en vergelijkbare details en contrasten	400	kantoor, leslokaal
		c	waarnemen van kleinere details en zwakkere contrasten dan bij II b	800	tekenkamer, fijn montagewerk
III	speciale werkverlichting	a	waarnemen van zeer fijne details en zwakke contrasten op donkere achtergrond	1600	precisiewerk, kadastraal tekenwerk, fijn inspectiewerk
		b	waarnemen aan de grens van het gezichtsvermogen	> 3200	microminiaturisatie operatietafel

tabel 2. standaardverlichtingssterkten voor diverse toepassing uit NEN 1890

Licht, basisbegrippen (verdieping)

Kennisbank Bouwfysica
Auteur: ir. A.C. van der Linden

1 Temperatuurstralers

De sterkte van de elektromagnetische straling die door een lichaam met een zekere temperatuur wordt uitgezonden, wordt weergegeven in de vorm van een energiestroomdichtheid per eenheid van golflengte ($\text{W/m}^2 \cdot \mu\text{m}$). De hoeveelheid straling gesommeerd over het gehele spectrum kan worden bepaald met de “wet van Stefan Boltzman”.

$$q_s = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]$$

In deze fomule is:

q_s	totaal uitgezonden energiestroom in W/m^2
ε	emissiecoëfficiënt
σ	constante van Stefan Boltzman: $56,7 \cdot 10^{-9} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$
T	absolute temperatuur van het oppervlak in K

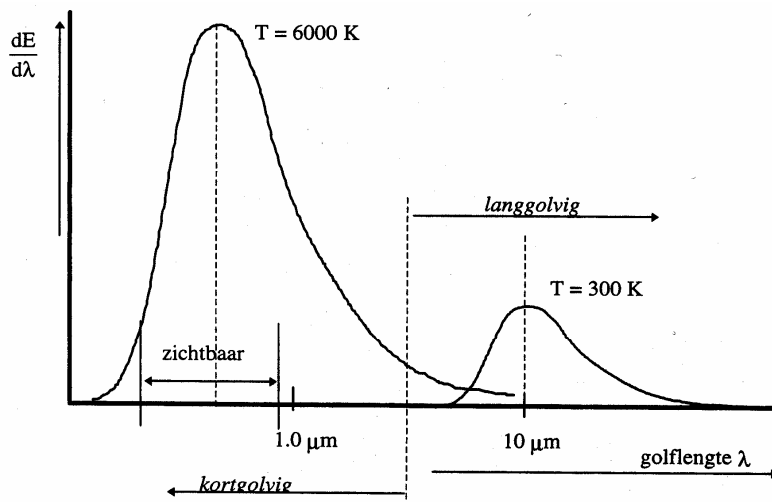
De emissiecoëfficiënt ε is over het algemeen afhankelijk van de golflengte en de temperatuur. Een oppervlak dat de maximale straling uitzendt die bij een bepaalde temperatuur hoort, wordt een “zwarte straler” genoemd. De emissiecoëfficiënt is dan $\varepsilon = 1$.

Met de “wet van Wien” kan worden bepaald bij welke golflengte het maximum van de straling ligt (zie ook figuur 1).

$$\lambda_{\text{max}} \cdot T = 2,898 \cdot 10^{-3} \left[\text{mK} \right]$$

In deze fomule is:

λ_{max}	golflengte waarbij de stralingssterkte het grootst is, in m
T	absolute temperatuur van het oppervlak in K



figuur 1. de golflengte waarbij de stralingssterkte maximaal is, wordt bepaald door de temperatuur van het oppervlak

2 Verlichtingsgrootheden

De grootheden waarin licht wordt gemeten, zijn oorspronkelijk vastgelegd op basis van een visuele helderheidsvergelijking, waarbij men licht liet vallen op een referentievlak. De verlichtingssterkte van een bekende lichtbron werd gevarieerd (door verandering van de afstand of door filteren) totdat dezelfde helderheidsindruk ontstond als bij de te meten lichtbron. Hierbij werd als standaard lichtbron onder andere een kaars van bepaalde grootte en samenstelling gebruikt. De standaard kaars, gezien als puntbron met een lichtsterkte van 1 candela verlichtte een vlak op één meter afstand met een verlichtingssterkte van 1 lux. Later zijn de verlichtingsgrootheden afgeleid uit de energiestroom die het licht (de elektromagnetische straling) vertegenwoordigt. Dat betekent dat de lichtstroom, uitgedrukt in lumen, nu het uitgangspunt is. De lichtsterkte (cd) en de verlichtingssterkte (lux) worden hieruit afgeleid.

2.1 Lichtstroom

Onder de lichtstroom verstaat men dat deel van de totale uitgestraalde elektromagnetische straling dat een menselijk oog als licht ervaart. In formulevorm uitgedrukt, ziet dit er als volgt uit:

$$\phi = 683 \cdot \int_{0,38 \mu m}^{0,78 \mu m} V(\lambda) \cdot [dP / d\lambda] \cdot d\lambda \text{ [lumen]}$$

In deze formule is:

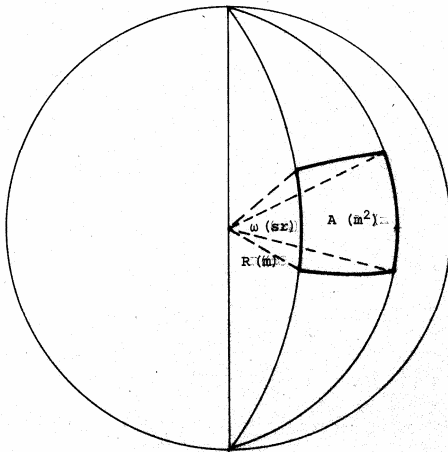
ϕ	lichtstroom in lumen
$V(\lambda)$	spectrale ooggevoeligheid
dP	uitgezonden straling in watt per golflengtegebiedje $d\lambda$

Bij $\lambda = 0,555 \mu m$ is $V(\lambda) = 1$; per definitie geldt daarbij dat 1 watt uitgestraald vermogen 683 lumen oplevert (het fotometrisch stralingsequivalent).

2.2 Lichtsterkte

Het verband tussen lichtsterkte en lichtstroom is als volgt gedefinieerd: "De lichtsterkte (in candela) is de lichtstroom (in lumen) die per eenheid van ruimtehoek (steradiaal) in een bepaalde richting wordt uitgezonden".

Een ruimtehoek is gedefinieerd als het deel dat uit een boloppervlak wordt gesneden (A) gedeeld door de afstand in het kwadraat (R^2) (zie figuur 2).



figuur 2. de definitie van de ruimtehoek

$$\omega = A / R^2 \text{ [sr]}$$

In deze formule is:

ω	ruimtehoek in steradianen (sr)
A	oppervlak dat wordt uitgesneden in m ²
R	afstand in m

De ruimtehoek is niet afhankelijk van de vorm van de uitsnijding die op het boloppervlak wordt gemaakt. Aangezien het oppervlak van een bol gelijk is aan $4\pi R^2$ is een ruimtehoek die de gehele ruimte beslaat gelijk aan 4π steradianen. Uit het voorgaande blijkt ook, dat bij de definitie die het verband tussen lichtsterkte en lichtstroom beschrijft in wezen wordt uitgegaan van een puntvormige lichtbron. Echter, in de praktijk hebben alle lichtbronnen eindige afmetingen. Dit vormt geen probleem zolang de straal van de "denkbeeldige" bol die om de lichtbron wordt geslagen maar vele malen groter is dan de afmetingen van de lichtbron. Het verband tussen lichtsterkte en lichtstroom kan vanzelfsprekend ook anders worden geschreven:

De lumen is de lichtstroom die door een lichtbron met een sterkte van één candela wordt uitgestraald in een ruimtehoek van één steradiaal.

De totale door een lichtbron uitgezonden lichtstroom wordt bepaald volgens:

$$\phi = \int_{\omega} I_{\omega} \cdot d\omega \text{ [lumen]}$$

In deze formule is:

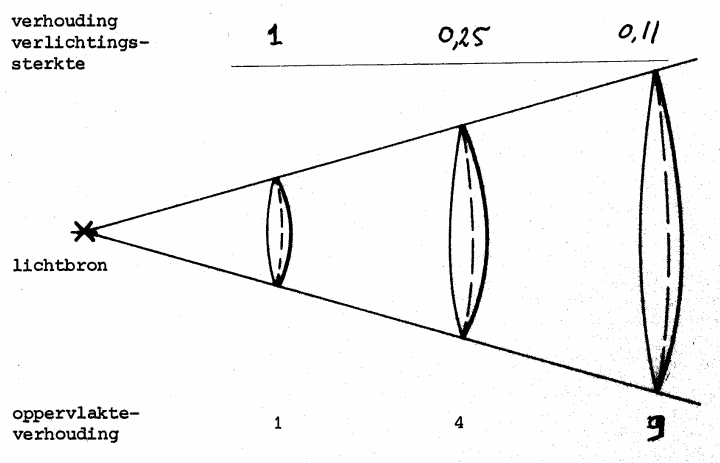
ϕ	lichtstroom in [lumen]
I_ω	lichtsterkte in [cd] in een specifieke richting
ω	ruimtehoek waarin het licht wordt uitgestraald in [sr]

Is bij een lichtbron de lichtsterkte in alle richtingen bekend dan moet om de totale uitgezonden lichtstroom te bepalen de integratie worden uitgevoerd over 4π steradialen. Als de lichtsterkte (I) in alle richtingen even groot is, volgt voor de lichtstroom $\phi = 4\pi \cdot I$ (lumen).

2.3 Verlichtingssterkte E

De verlichtingssterkte E is de opgevangen lichtstroom per eenheid van oppervlakte A. De eenheid is daarmee lumen/m², maar deze heeft een eigen naam "lux" gekregen.

De verlichtingssterkte zal over het algemeen - als de afstand tot de lichtbron groot genoeg is om hem als een puntbron te beschouwen - afnemen met het kwadraat van de afstand (zie figuur 3).



figuur 3. de verlichtingssterkte neemt kwadratisch af met de afstand tot de (punt)bron

Op een meter afstand is het oppervlak dat door een ruimtehoek van 1 sr uit een denkbeeldig boloppervlak wordt uitgesneden 1 m² groot. Bij een lichtsterkte van 1 cd (= 1 lm/sr) is dan de verlichtingssterkte op dit punt 1 m/m² ofwel 1 lux. Op een afstand van twee meter snijdt dezelfde ruimtehoek een viermaal zo groot oppervlak uit. De verlichtingssterkte is dan nog slechts 0,25 lux omdat dezelfde lichtstroom nu door een viermaal zo groot oppervlak gaat.

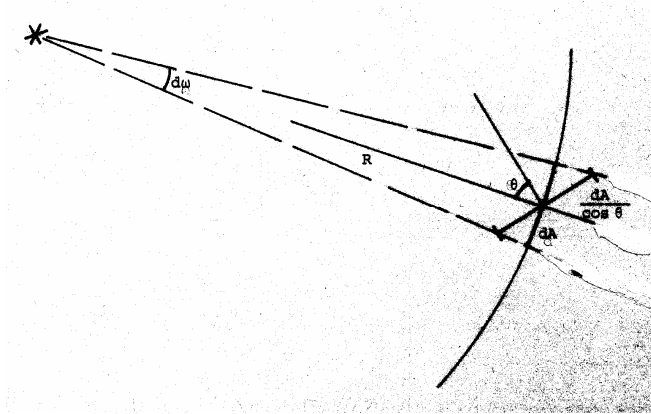
Op een afstand R van een lichtbron bedraagt de verlichtingssterkte:

$$E = I / R^2 \text{ [lux]}$$

Hierin is:

E	verlichtingssterkte in lux (lumen/m ²)
I	lichtsterkte in de betreffende richting
R	afstand tot de (puntvormige) lichtbron in m

Indien een vlak niet loodrecht op de lichtstroom staat, geldt het volgende (zie figuur 4). Op een afstand R van de lichtbron is de verlichtingssterkte op het oppervlakte-elementje dA gelijk aan $E = I/R^2$ lux. Echter, omdat de lichtstroom niet op het oppervlakte-elementje dA valt maar op het grotere elementje $dA/\cos \theta$ is de verlichtingssterkte evenredig lager.



figuur 4. als de lichtstroom onder een hoek op het oppervlak invalt, wordt de verlichtingssterkte lager.

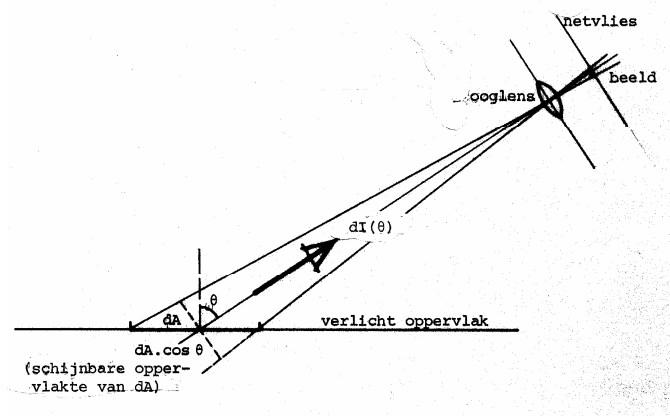
$$E = I \cdot \cos \alpha / R^2 \text{ [lux]}$$

Het zal duidelijk zijn dat een oppervlak van enige uitgestrektheid - dat verlicht wordt door een puntvormige lichtbron van punt tot punt - een andere verlichtingssterkte zal hebben omdat zowel de afstand tot de lichtbron als de hoek waaronder deze gezien wordt, steeds veranderen.

Overigens zegt de verlichtingssterkte niets over de helderheid waarmee een bepaald oppervlak wordt waargenomen. Daarvoor is de mate waarin en de wijze waarop het oppervlak licht reflecteert maatgevend.

2.4 Luminantie en helderheid

De helderheid waarmee een bepaald vlak wordt waargenomen, is een subjectief begrip, bepaald door de fysiologische en psychologische omstandigheden van de waarnemer. Om iets over helderheidsverhoudingen te kunnen zeggen, is de natuurkundige grootheid "Luminantie" (L) ingevoerd (zie ook figuur 5)



figuur 5. grootheden voor het bepalen van de luminantie

De luminantie kan worden beschouwd als de lichtsterkte in een bepaalde richting per eenheid van oppervlakte van een lichtbron of verlicht vlak. In formulevorm ziet de luminantie er als volgt uit:

$$L(\theta) = dI(\theta) / dA \cdot \cos \theta \left[\frac{\text{cd}}{\text{m}^2} \right]$$

Hierbij is $dI(\theta)$ de lichtsterkte zoals die door een oppervlakte-elementje dA wordt uitgestraald in de richting θ . Op het netvlies van het oog wordt een beeldje gevormd waarvan de oppervlakte niet alleen evenredig is met de afstand tot het verlichte oppervlak maar ook vooral met de "schijnbare" oppervlakte van het elementje dA ($dA_{\text{schijnbaar}} = dA \cdot \cos \theta$).

De lichtstroom die het beeldje op het netvlies vormt, is evenredig met de uitgezonden verlichtingssterkte en de afstand van het oog tot het oppervlakte-elementje dA . Het aantal lumen dat per m^2 netvlies wordt ontvangen, is onafhankelijk van de grootte van het oppervlakte-elementje dA en van de afstand hiervan tot het oog. Immers, als de grootte van het oppervlakte-elementje wordt gehalveerd, wordt de uitgestraalde lichtsterkte, dus de uitgezonden lichtstroom in lumen per steradiaal tweemaal zo klein, evenals het beeldje op het netvlies, waardoor het aantal lumen dat per m^2 netvlies wordt ontvangen, gelijk blijft. Als de afstand tussen oog en oppervlakte-elementje wordt verdubbeld, wordt de verlichtingssterkte ten gevolge van het door het oppervlakte-elementje uitgezonden licht ter plaatse van het oog viermaal zo klein. Omdat ook het beeldje op het netvlies viermaal zo klein wordt, blijft de opgevangen lichtstroom (in lumen) per m^2 netvlies ook weer hetzelfde.

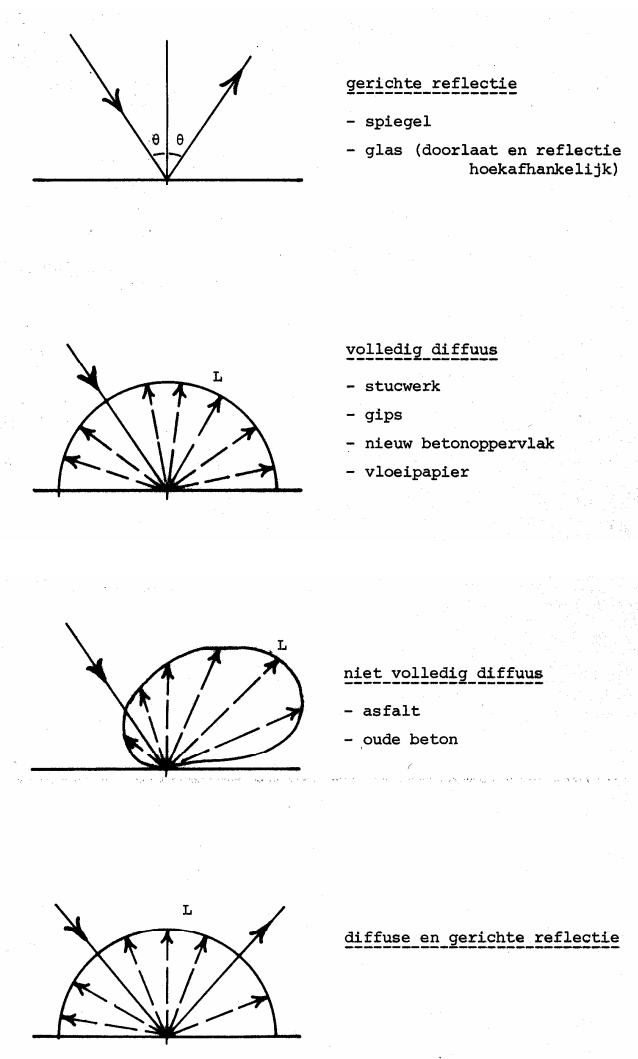
Bij een diffuus stralend of reflecterend vlak is de luminantie in alle richtingen gelijk. Bij grotere hoeken wordt de lichtsterkte weliswaar kleiner, maar de schijnbare oppervlakte wordt evenredig kleiner, zodat de luminantie gelijk blijft.

Voor het subjectieve begrip helderheid geldt een en ander praktisch genomen evenzeer. Vaak worden de begrippen helderheid en luminantie verward. Echter, als men over meetbare grootheden praat, dient men altijd de luminantie te gebruiken.

3 Het verlichte oppervlak

3.1 Diffuus reflecterende of stralende oppervlakken

Een oppervlak straalt "diffuus" licht af als de luminantie in ieder punt van het oppervlak in alle richtingen gelijk is. Een oppervlak kan licht uitzenden door verhitting (gloeende staalplaat), door doorlating (opaalkap van een verlichtingsornament) of door reflectie van opvallend licht. Ingeval van reflectie moet het oppervlak ongeacht de invalrichting van het opvallend licht diffuus licht afstralen. Hieraan voldoen bij benadering stucwerk, gips, nieuwe beton en dergelijke, in tegenstelling tot een spiegel waarbij invallend licht onder dezelfde hoek weer uittreedt; mengvormen zijn ook mogelijk (zie figuur 6).



figuur 6. verschillende wijzen van reflectie

De lichtsterkte die een diffuus stralend oppervlak uitzendt, is maximaal in de richting loodrecht op dit oppervlak. Wanneer de lichtsterkte in een bepaalde richting wordt bekeken, krijgt men weer te maken met de schijnbare oppervlakte.

$$I(\theta) = L \cdot A_{\text{schijnbaar}} = L \cdot A \cdot \cos \theta = I_0 \cdot \cos \theta [\text{cd}]$$

Hierin is:

I	lichtsterkte in de richting θ in cd
I_0	lichtsterkte in cd loodrecht op het vlak
L	luminantie van het oppervlak in alle richtingen
A	oppervlakte in m^2
θ	hoek ten opzichte van de normaal op het vlak

Voor de door een plat vlak (over een halve bol) afgestraalde totale lichtstroom vindt men:

$$\phi = \int_{h.b.} \int_A L \cdot \cos \theta \cdot d\omega \cdot dA = \int_{h.b.} L \cdot A \cdot \cos \theta \cdot d = \pi \cdot L \cdot A \text{ [lumen]}$$

Hierin staat:

h.b. voor "halve bol"
dω voor een ruimtehoek-elementje binnen die halve bol
overige grootheden, zie voorgaande formule

3.2 Reflectiecoëfficiënt

De reflectiecoëfficiënt van een oppervlak is gedefinieerd als:

$$r = d\phi_{\text{gereflecteerd}} / d\phi_{\text{opvallend}}$$

Wanneer de reflectiecoëfficiënt (r) van een bepaald diffuus reflecterend oppervlak bekend is, volgt voor de luminantie:

$$L = \phi / (\pi \cdot A) = r \cdot E / \pi \text{ [cd / m}^2\text{]}$$

Hierin is:

φ opvallende lichtstroom in lumen
A oppervlakte in m²
r reflectiecoëfficiënt
E verlichtingssterkte in lux (lumen/m²)

De laatste formule illustreert duidelijk dat luminantie en verlichtingssterkte geheel verschillende grootheden zijn. De verlichtingssterkte wordt, zoals eerder uiteengezet, bepaald door het opvallend licht; het vlak waarop dit licht valt, oefent hierop geen enkele invloed uit. De luminantie van een vlak - dat wat wij waarnemen - is enerzijds natuurlijk ook afhankelijk van de verlichtingssterkte van het vlak maar anderzijds vooral van de eigenschappen van het vlak, zoals de reflectiecoëfficiënt. Verschillende vlakken hebben bij een zelfde verlichtingssterkte een verschillende luminantie. In tabel 1 is voor een aantal materialen de reflectiecoëfficiënt gegeven.

Overigens hoeft de reflectiecoëfficiënt vanzelfsprekend niet voor alle golflengten gelijk te zijn. Is dit wel zo, dan zal bij opvallend wit licht het vlak bij steeds lager wordende reflectiecoëfficiënt steeds grijzer worden tot zwart toe bij r = 0. Reflecteert het vlak alleen licht van een bepaalde golflengte dan zal het vlak bij wit opvallend licht de bij die golflengte horende "kleur" hebben. Bij rood licht vallend op een groen vlak zal dit vlak zwart lijken (r = 0) voor de golflengte behorend bij rood licht.

reflectiefactoren diverse materialen

materiaal	refl. factor
wit pleisterwerk (nieuw)	0.70 – 0.80
wit pleisterwerk (oud)	0.30 – 0.60
beton (nieuw)	0.40 – 0.50
beton (oud)	0.05 – 0.15
baksteen (nieuw)	0.10 – 0.30
baksteen (oud)	0.05 – 0.15
aluminium (hoogglanzend)	0.80 – 0.85
aluminium (mat)	0.50 – 0.60
donkere houtsoorten	0.10 – 0.30
lichte houtsoorten	0.30 – 0.50
schrijfpapier	0.70 – 0.80

reflectiefactoren kleuren

kleur	reflectie factoren		
	licht	middel	donker
wit	0.80	0.70	-
grijs	0.60	0.35	0.20
zwart	-	-	<0.04
geel	0.70	0.50	0.30
beige	0.65	0.45	0.25
bruin	0.40	0.20	0.07
rood	0.35	0.20	0.10
groen	0.50	0.25	0.12
blauw	0.55	0.25	0.08

tabel 1. reflectiecoëfficiënten van verschillende materialen en bij verschillende kleuren

4 Algemene verlichtingsformule

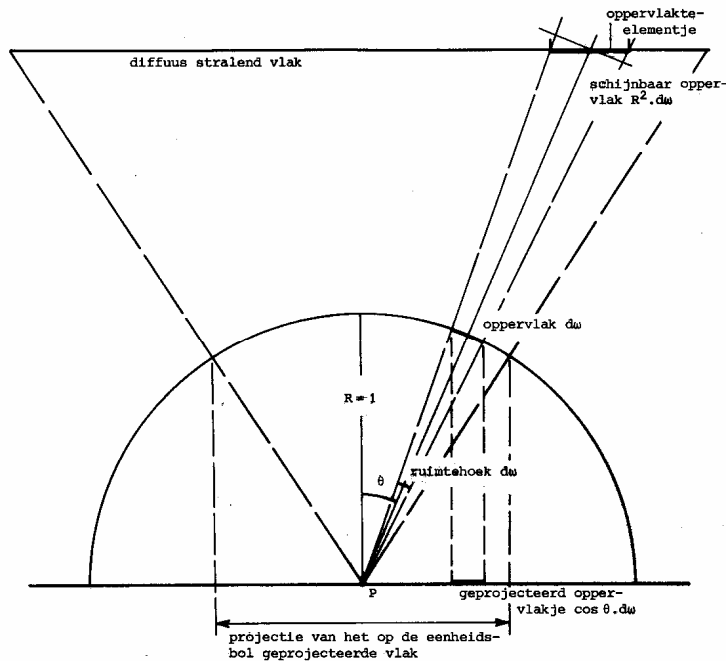
Wanneer lichtbronnen zodanig grote afmetingen hebben dat ze niet meer als puntbron kunnen worden beschouwd, kan men ze voor het berekenen van de verlichtingssterkte in een punt P projecteren op een rond dit punt geslagen eenheidsbol (straal $R = 1$ m) (zie figuur 7). Of een lichtbron nog als puntbron mag worden beschouwd, hangt af van de nauwkeurigheid die men nastreeft. Deze hangt af van de verhouding tussen de grootste afmeting van de lichtbron (a) en de afstand van het verlichte vlak tot de lichtbron (R). De fout die men maakt is:

Bij:

$a = 0,1$. $R = \text{ca } 0,5\%$

$a = 0,2$. $R = \text{ca } 1 \%$

$a = 0,5$. $R = \text{ca } 5 \%$



figuur 7. projectie van lichtbronnen op de "eenheidsbol" en op het grondvlak daarvan

Zolang het diffuus stralende lichtbronnen of diffuus reflecterende vlakken betreft, doet de hoek waaronder het vlak wordt gezien niet ter zake. Immers, de luminantie is in alle richtingen even groot bij diffuus stralende vlakken. Stelt men zich nu het vlak voor verdeeld in zodanige oppervlakte-elementjes dat deze een ruimtehoek $d\omega$ beslaan dan is de schijnbare oppervlakte van zo'n elementje $R^2 \cdot d\omega$ (zie de definitie van de ruimtehoek). De lichtsterkte die wordt uitgestraald in de richting van P bedraagt dan:

$$dI = L \cdot R^2 \cdot d\omega [cd]$$

Hierin is:

dI lichtsterkte uitgestraald in de richting van P
 $R^2 d\omega$ schijnbare oppervlakte van een elementje van het diffuus stralende vlak

In het punt P kan men het oppervlakte-elementje beschouwen als een puntbron die in de richting van P een lichtsterkte dI uitstraalt. De bijdrage in de verlichtingssterkte in punt P hiervan is:

$$dE = \frac{dI \cdot \cos \theta}{R^2} [lux]$$

Ofwel:

$$dE = \frac{L \cdot R \cdot d\omega \cdot \cos \theta}{R^2} = L \cdot d\omega \cdot \cos \theta [lux]$$

Men kan ook het oppervlakte-elementje projecteren op de eenheidsbol rond P. Omdat de ruimtehoek dezelfde blijft, kan men voor dit geprojecteerde vlakje dezelfde luminantie aanhouden bij een schijnbare oppervlakte d (immers, de afstand is $R = 1$ m), zodat

$$dI = L \cdot d\omega [cd]$$

Bij een afstand $R = 1$ m is de bijdrage aan de verlichtingssterkte in P nu:

$$dE = dI \cdot \cos \theta [lux]$$

Ofwel:

$$dE = L \cdot d\omega \cdot \cos \theta [lux]$$

Precies hetzelfde resultaat als boven.

De totale verlichtingssterkte in P vindt men door de bijdrage van alle oppervlakte-elementjes te sommeren:

$$E = \oint_{h.b.} L \cdot \cos \theta \cdot d\omega [lux]$$

In figuur 7 kan men verder zien, dat $\cos \theta \cdot d\omega$ de projectie is op het platte vlak van het vlakje dat de ruimte hoek $d\omega$ uitsnijdt uit de eenheidsbol. Men kan $\cos \theta \cdot d\omega$ de geprojecteerde ruimtehoek noemen ($d\omega_{proj}$), zodat:

$$E = \oint_{h.b.} L \cdot d\omega_{proj} [lux]$$

en bij een gelijkmatig verdeelde luminantie:

$$E = L \cdot \oint_{h.b.} d\omega_{proj} [lux]$$

De verlichtingssterkte in een bepaald punt ten gevolge van een diffuus stralend vlak vindt men dus door dit vlak te projecteren op een rond dit punt geslagen eenheidsbol en vervolgens deze projectie op het boloppervlak weer te projecteren op het grondvlak van de halve eenheidsbol. De oppervlakte van deze projectie vermenigvuldigd met de oorspronkelijke luminantie is de verlichtingssterkte.

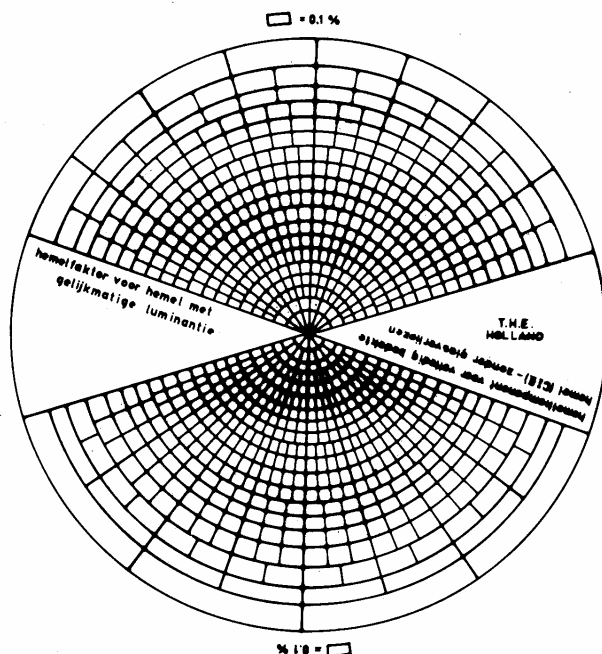
Voor de verlichtingssterkte buiten onder een egale hemel met luminantie L vindt men zo:

$$E = L \cdot \oint_{h.b.} d\omega_{proj} = \pi \cdot L [lux]$$

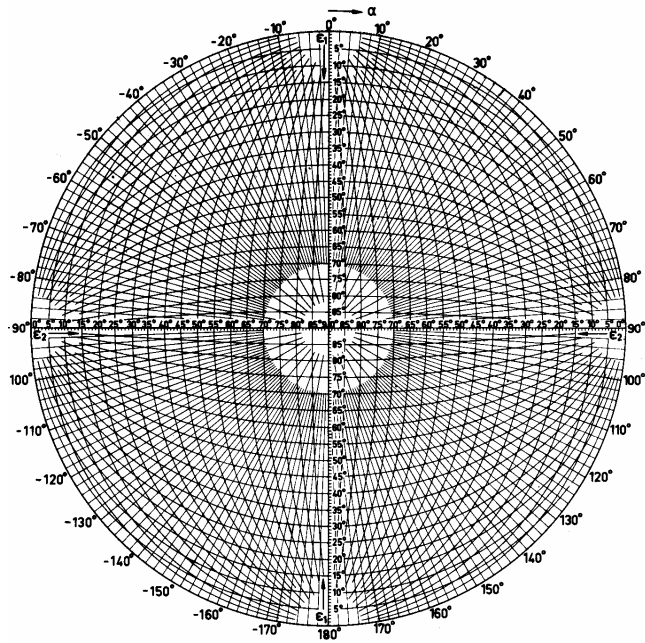
Immers de projecties van alle oppervlakte-elementjes vullen het gehele grondvlak van de halve eenheidsbol en dat is $\pi \text{ m}^2$ groot.

Voor gevallen waarbij de lichtbron willekeurige, eindige afmetingen heeft, is de oplossing minder eenvoudig, maar daarvoor bestaat een aantal goede en gebruiksvriendelijke computerprogramma's, die in de praktijk veelvuldig worden gebruikt.

Het is ook mogelijk om gebruik te maken van een grafische methode om over een enkele situatie snel iets te kunnen zeggen, bij voorbeeld de in het dictaat "Algemene Verlichtingskunde" van de Technische Hogeschool te Eindhoven gegeven methode. Het oppervlak van de eenheidsbol wordt hierbij verdeeld in 1000 vlakjes die - uitgaande van een volledig gelijkmatige verdeling van de luminantie - elk een even grote bijdrage aan de verlichtingssterkte geven. Uiteraard zullen deze vlakjes steeds groter worden naarmate ze lager op de bol liggen. Bij gelijke grootte van de vlakjes zou de in de richting van P uitgezonden lichtsterkte steeds even groot zijn, maar doordat de hoek waaronder het licht invalt steeds meer gaat afwijken van de normaal op het grondvlak, zou de bijdrage aan de verlichtingssterkte steeds minder worden naarmate ze lager op de bol liggen. De projectie van de aldus gevormde vlakjes levert het diagram op dat is gegeven in figuur 8. Met behulp van een tweede diagram ("radiaaldiagram", figuur 9), kan men de projectie van de te beschouwen lichtbronnen intekenen op het grondvlak van de eenheidsbol. Hoe dit precies in zijn werk gaat, wordt besproken bij dagverlichting. Voor het bepalen van de daglichtfactor vormen diagrammen nog altijd een prima methode om een bepaalde situatie te beoordelen. Voor dagverlichting wordt ook gebruik gemaakt van andere dan egale luminantieverdelingen. Het diagram in figuur 8 geeft ook de situatie weer voor een verdeling (C.I.E.) waarbij de luminantie loodrecht boven het beschouwde vlak driemaal zo hoog is als die evenwijdig aan het vlak (de horizon). De bijdrage van de onderste delen van de "eenheidsbol" wordt in die situatie duidelijk minder, die van de hogere delen meer (zie ook het diagram).



figuur 8. diagram ter bepaling bijdrage aan de verlichtingssterkte van oppervlakte-elementjes van de "eenheidsbol"



figuur 9. radiaaldiagram voor het intekenen van de projectie van lichtbronnen op de "eenheidsbol"

Bepaling daglichtfactor en bezonning met radiaaldiagrammen

Kennisbank Bouwfysica

Auteur: ir. A.C. van der Linden

1 Inleiding

De hoeveelheid daglicht die in een bepaald punt in een vertrek terechtkomt, is afhankelijk van een heleboel dingen:

- de grootte en de positie van de raamopeningen;
- de doorlaatbaarheid voor licht van deze openingen (soort glas, vervuiling, etc.);
- eventuele afscherming door tegenoverliggende gebouwen of delen van het eigen gebouw;
- externe reflecties, licht dat gereflecteerd wordt door andere gebouwen, bestrating etc.;
- interne reflecties, licht dat - nadat het is binnengekomen - wordt gereflecteerd door wanden, plafond, etc.

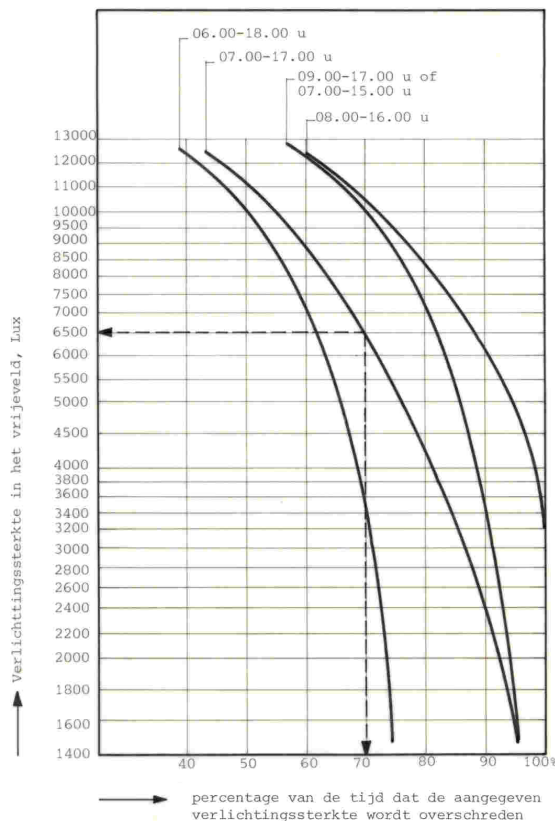
Volgens de algemene verlichtingsformule bepalen alle bijdragen te zamen de verlichtingssterkte binnen. De hoeveelheid binnenkomend licht is echter voornamelijk afhankelijk van het buiten beschikbare licht, dat in ernstige mate in sterkte wisselt. Tevens kan onderscheid worden gemaakt tussen direct licht (gerichte zonnestraling) en diffuus licht, uitgestraald door de hemelkoepel met een zekere luminantieverdeling.

Vanwege het feit dat het lichtaanbod buiten zo sterk wisselt, gebruikt men voor het bepalen van de grootte van de dagverlichting de zogenaamde daglichtfactor d .

Deze geeft de verhouding aan tussen de verlichtingssterkte binnen op een bepaalde plaats en de verlichtingssterkte op het horizontale vlak, op het zelfde moment buiten in het vrije veld.

$$d = \frac{E_{\text{binnen}}}{E_{\text{buiten, vrijeveld}}}$$

Hierbij wordt het directe zonlicht buiten beschouwing gelaten. Er wordt slechts gerekend met het door de hemelkoepel diffuus uitgestraalde licht. Uit metingen is bekend welke lichtsterkte in het vrije veld aanwezig is. Referentiewaarden voor Nederland zijn gegeven in figuur 1.



figuur 1. referentiewaarden voor de verlichtingssterkte in het vrije veld in Nederland
N.B. de gegeven tijden zijn in zonnetijd

Stel dat men in een kantoorgebouw een verlichtingssterkte wil hebben van minimaal 400 lux op het werkvlak, en dat het gebouw zodanig is ontworpen, dat de daglichtfactor $d = 6\%$ is voor een niet te ver van het raam gelegen werkplek. Dat betekent, dat wanneer de verlichtingssterkte buiten daalt onder de $400/0,06 = 6500$ lux de kunstverlichting zal moeten worden ingeschakeld.

Als de bedrijfstijd van het gebouw 8.00 - 17.30 uur is (kloktijd), komt de lijn in de grafiek waarbij 7.00 - 17.00 uur staat hiermee het meest overeen. De lijnen in de grafiek zijn namelijk gegeven voor een bepaalde zonnetijd, zodat de gekozen lijn (in de winter, gemiddeld voor Nederland) geldt voor 7.40-17.40 uur kloktijd.

Een waarde van 6500 lux voor de verlichtingssterkte buiten blijkt 70% van de tijd te worden overschreden. Dit betekent globaal dat gedurende minstens 30% van de tijd de kunstverlichting ingeschakeld zal moeten zijn. Dit komt overeen met ongeveer 700 uur per jaar. Echter, in de praktijk zal het licht vaak langer branden, omdat men vergeet het licht uit te doen als het niet meer nodig is. De moderne regeltechnische mogelijkheden kunnen hierbij een handje helpen.

2 Bepaling van de daglichtfactor

De daglichtfactor wordt gevonden door optelling van:

- de directe bijdrage van het zichtbare gedeelte van de hemelkoepel: de hemelcomponent d_h ;

- de bijdrage ten gevolge van reflectie van licht tegen vanuit het waarnemingspunt zichtbare oppervlakken buiten het raam (de lichtopening): de externe reflectiecomponent d_e ;
- de bijdrage ten gevolge van reflecties van door de lichtopening binnengekomen licht tegen wanden, plafond, etc. in het vertrek: de interne reflectiecomponent d_i .

Daarbij moet rekening worden gehouden met de lichtdoorlatendheid van het materiaal in de vensteropening (glas, zonwering, etc.) en de vervuiling hiervan, lichtonderscheppende onderdelen van het eigen gebouw (luifels en dergelijke) en andere gebouwen.

Eventuele lichtvermindering door een vervuilde atmosfeer komt niet naar voren in de berekening van de daglichtfactor, maar beïnvloedt uiteraard wel de buiten in het vrije veld aanwezige verlichtingssterkte. In ernstig vervuilde gebieden kan de verlichtingssterkte tot minder dan de helft worden gereduceerd ten opzichte van die bij een schone atmosfeer.

2.1 De hemelcomponent, zonder glasverliezen, d_h^*

De directe bijdrage van het uitgestraalde licht vanuit de hemelkoepel kan worden bepaald met behulp van de in module LI-3; "Licht, basisbegrippen (verdieping)" figuur 8 en 9 getoonde diagrammen. Voor de luminantie van de hemelkoepel wordt doorgaans uitgegaan van een verdeling zoals die is vastgesteld door de C.I.E. (Commission Internationale de l'Eclairage) op basis van onderzoek door Moon en Spencer. Deze verdeling is als volgt:

$$L(h) = L(90^\circ) \cdot ((1 + 2 \cdot \cos \alpha) / 3) [cd/m^2]$$

Hierin is:

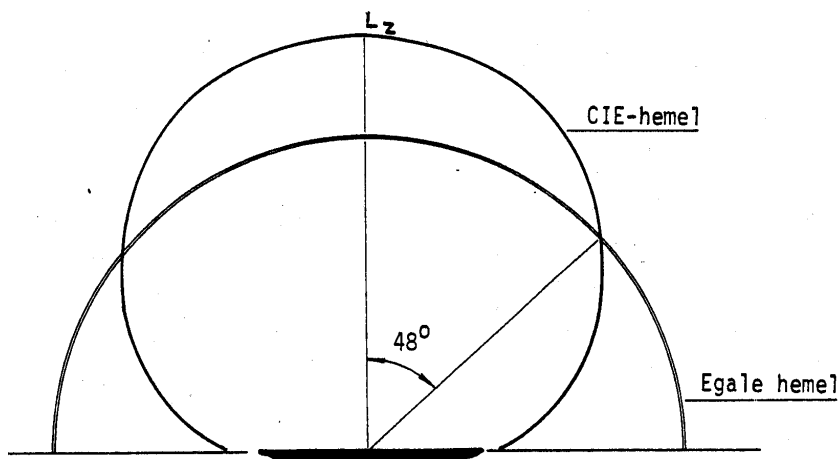
$L(h)$	luminantie van de hemelkoepel op een bepaalde hoogte (hoek h met het horizontale vlak)
$L(90^\circ)$	luminantie in het zenit

Uit metingen is gebleken, dat voor de meeste bewolkingstoestanden deze verdeling ook voor Nederland een goede benadering vormt. Slechts bij een zeer zware, laaghangende bewolking komt de verdeling meer overeen met een egale hemel.

Wanneer voor een hoogte $h = 42^\circ$ de luminantie voor beide verdelingen gelijk wordt gesteld, leveren ze op het horizontale vlak in het vrije veld dezelfde verlichtingssterkte op:

$$E = \pi \cdot L(42^\circ) \text{ lux.}$$

Beide luminantieverdelingen zijn gegeven in figuur 2 en tabel 1.



figuur 2. luminantieverdeling bij een egale hemel en de CIE-verdeling; beide verdelingen leveren dezelfde verlichtingssterkte op het horizontale vlak

h	$L(h)/L(42^\circ)$		$L(h)/L(42^\circ)$
0°	0,43	45°	1,03
5°	0,50	50°	1,09
10°	0,58	55°	1,13
15°	0,65	60°	1,17
20°	0,72	65°	1,20
25°	0,79	70°	1,24
30°	0,86	75°	1,26
35°	0,92	80°	1,27
40°	0,98	85°	1,28
42°	1,00	90°	1,29

Bij een elevatie (h) van 42° is de luminantie van de C.I.E.-verdeling gelijk aan die bij een uniforme verdeling als beide verdelingen dezelfde verlichtingssterkte op het horizontale vlak geven.

tabel 1. getalswaarden bij de CIE-luminantieverdeling

Voor het bepalen van de hemelcomponent worden de lichtopeningen ingetekend in het radiaaldiagram. Hiermee ontstaat een projectie van het deel van de hemelkoepel dat door het raam wordt gezien (zie hiervoor het voorbeeld in bijlage A, figuur A-1 t/m A-4).

Door de Technische Universiteit Eindhoven is een diagram ontwikkeld, dat gebruikt kan worden in combinatie met het radiaaldiagram. Dit "daglichtdiagram" is opgedeeld in een groot aantal vakjes, dat allemaal een gelijke bijdrage (0,1%) aan de verlichtingssterkte op het horizontale vlak geven. Het diagram bestaat in twee uitvoeringen: één voor een egale hemelkoepel en één voor een hemelkoepel met een CIE-luminantieverdeling.

In figuur A-4 kan in het diagram voor een egale hemelkoepel het aantal vakjes worden geteld (daarbij halve vakjes zo goed mogelijk meetellend). Voor het raam worden circa 48 vakjes geteld, voor het dakvenster circa 62. Dat betekent een hemelcomponent (zonder glasverliezen) van $d_h^* = 4,8\%$ respectievelijk $d_h^* = 6,2\%$.

Als het diagram voor de CIE-verdeling wordt gebruikt, komt men op $d_h^* = 3,9\%$ respectievelijk $d_h^* = 7,1\%$; bij elkaar toevallig even veel. Echter, het is duidelijk, dat bij deze luminantieverdeling de bijdrage van het dakvenster groter is en die van het raam kleiner.

2.2 De externe reflectiecomponent de*

Voor de bepaling van de externe reflectiecomponent moet in principe de luminantie van alle vlakken die daglicht in de richting van de beschouwde lichtopening kunnen reflecteren, worden bepaald. Daarna moet de bijdrage van deze reflecties op de verlichtingssterkte binnen worden bepaald. Dit is een tijdrovende zaak en ook moeilijk exact uit te voeren. Daarom wordt - mede omdat de bijdrage aan de totale daglichtfactor meestal vrij gering is - volstaan met de volgende benadering.

Gesteld wordt dat de luminantie van eventuele vanuit het meetpunt door de lichtopening zichtbare obstakels ongeveer 15% is van de hemelkoepel die zich achter deze obstakels bevindt. Dit betekent dus, dat men de externe reflectiecomponent kan bepalen door met behulp van de diagrammen de hemelcomponent te bepalen van het gedeelte van de hemelkoepel dat door obstakels aan het oog wordt onttrokken en de uitkomst te vermenigvuldigen met 0,15.

$$d_e^* = 0,15 \cdot d_h^*$$

Waarin d_h^* de hemelcomponent is van het door obstakels aan het oog onttrokken gedeelte van de hemelkoepel. Als de omringende bebouwing zeer sterk reflecteert (lichte kleur), kan men een iets hogere waarde voor de "reflectie" kiezen dan de genoemde 15%. Maar in die gevallen loont het vaak ook de moeite een nauwkeuriger berekening te maken.

Ook een zeer lichte bodemafwerking kan, via reflectie tegen bij voorbeeld het plafond van een vertrek nog een aanzienlijke bijdrage leveren aan de verlichtingssterkte binnen. Echter, meestal is deze bijdrage te verwaarlozen.

2.3 Verliezen in de lichtopening, factor c

Door het in de lichtopening geplaatste glas (of ander materiaal) en door een eventuele zonweringsconstructie wordt een deel van het opvallende licht gereflecteerd en geabsorbeerd. De factor LTA (lichttoetredingsfactor) geeft aan welk deel van het opvallende licht uiteindelijk in het vertrek terechtkomt.

Voor enkel- en dubbelglas zijn deze:

LTA 0,85 à 0,90 enkelglas

LTA 0,70 à 0,80 dubbelglas

Voor een eventuele roede-indeling (tussenregels en stijlen) in het raam, of voor de invloed van het kozijn als dat in eerste instantie buiten beschouwing is gelaten, kan een reductiefactor c_k worden bepaald uit de verhouding tussen het netto glasvlak en de oppervlakte inclusief kozijn en/of roeden. Wanneer van het kozijn nog weinig bekend is, kan als voorlopige waarde worden aangehouden:

$$c_k = 0,85$$

Door vervuiling kan de lichtdoorlaat nog worden gereduceerd tot 0,9 à 0,5 maal de waarde bij een schone constructie:

$$c_v = 0,9 \text{ à } 0,5$$

Het totaal aan verliezen in de lichtopening wordt op basis van het voorgaande beschreven met de factor c :

$$c = LTA \cdot c_k \cdot c_v$$

2.4 De interne reflectiecomponent

Wanneer licht op een vlak in een ruimte valt, zal dit vlak - afhankelijk van zijn eigenschappen - een deel van het opvallende licht weer reflecteren en op deze wijze weer bijdragen aan de verlichting van andere vlakken (ook het werkvlak) in de ruimte. De berekening hiervan - waarvoor in beginsel de algemene verlichtingsformules (zie module LI-3; "Licht, basisbegrippen (verdieping)") kunnen worden gebruikt, is een complexe zaak. Gelukkig bestaan er computerprogramma's voor de bepaling van de interne reflecties, de resulterende luminanties van de verschillende vlakken in het vertrek en de verlichtingssterkte op het werkvlak. Om zonder rekenwerk toch vast een indruk te krijgen van de grootte van de interne reflectiecomponent d_i kan gebruik worden gemaakt van tabel 2. Deze tabel geeft direct de component d_i in procenten voor verschillende reflectiefactoren voor wand, vloer en plafond, waarbij rekening is gehouden met een gemiddelde situatie voor verliezen in de lichtopening en eventuele belemmeringen, uitgaande van enkelglas. Bij toepassing van andere glassoorten al dan niet met zonweringsconstructies, moet het getal uit de tabel worden gecorrigeerd voor de werkelijke LTA. De tabel geldt voor $LTA = 0,9$. Voor dubbelglas wordt de correctiefactor dus $LTA_{dg}/LTA_{eg} = 0,8/0,9 = \text{ca. } 0,9$. Blijkt uit de berekening dat de bijdrage van d_i bepalend is voor de totale daglichtfactor dan loont het de moeite om de interne reflectiecomponent nauwkeurig te berekenen.

70% plafondreflectie

Verhouding glasopp. tot vloeropp.	Reflektiefactor vloer											
	10%				20%				40%			
	Reflektiefactor wanden											
	20%	40%	60%	80%	20%	40%	60%	80%	20%	40%	60%	80%
1 : 50	-	-	0,1	0,2	-	0,1	0,1	0,2	-	0,1	0,2	0,2
1 : 20	0,1	0,1	0,2	0,4	0,1	0,2	0,3	0,5	0,1	0,2	0,4	0,6
1 : 14	0,1	0,2	0,3	0,5	0,1	0,2	0,4	0,6	0,2	0,3	0,6	0,8
1 : 10	0,1	0,2	0,4	0,7	0,2	0,3	0,6	0,9	0,3	0,5	0,8	1,2
1 : 6,7	0,2	0,4	0,6	1,0	0,2	0,5	0,8	1,3	0,4	0,7	1,1	1,7
1 : 5	0,2	0,5	0,8	1,4	0,3	0,6	1,1	1,7	0,5	0,9	1,5	2,3
1 : 4	0,3	0,6	1,0	1,7	0,4	0,8	1,3	2,0	0,6	1,1	1,8	2,8
1 : 3,3	0,3	0,7	1,2	2,0	0,5	0,9	1,5	2,4	0,8	1,3	2,1	3,3
1 : 2,9	0,4	0,8	1,4	2,3	0,5	1,0	1,8	2,8	0,9	1,5	2,4	3,8
1 : 2,5	0,5	0,9	1,6	2,6	0,6	1,2	2,0	3,1	1,0	1,7	2,7	4,2
1 : 2,2	0,5	1,0	1,8	2,9	0,7	1,3	2,2	3,4	1,2	1,9	3,0	4,6
1 : 2	0,6	1,1	1,9	3,1	0,8	1,4	2,3	3,7	1,3	2,1	3,2	4,9

tabel 2. globale waarden voor de interne reflectiecomponent bij enkelglas ($LTA = 0,9$) en gemiddelde omstandigheden voor verdere verliezen in de daglichtopening en externe reflecties

2.5 Bepaling van de daglichtfactor d ; optellen van de diverse componenten

De daglichtfactor wordt gevonden uit de optelling van de hiervoor berekende componenten.

$$d = d_h + d_e + d_i$$

Ofwel:

$$d = (d_h^* + d_e^*) \cdot c + d_i^* \cdot LTA / 0,9$$

Hierin is:

d_h^*	hemelcomponent zonder glasverliezen
d_e^*	externe reflectiecomponent zonder glasverliezen
c	reductiefactor voor verliezen in de lichtopening ($c = LTA \cdot c_k \cdot c_v$)
d_i^*	interne reflectiecomponent uit tabel 2, inclusief gemiddelde verliezen in de daglichtopening bij een lichttoetredingsfactor $LTA = 0,9$
LTA	lichttoetredingsfactor van het raamsysteem (zie bij voorbeeld figuur 7.11, blz. 125 in het Boek Bouwfysica, ThiemeMeulenhoff)

Gebruik radiaaldiagram en daglichtdiagram

bijlage A

Inleiding

In deze bijlage wordt het intekenen van de projectie van daglichtopeningen op het radiaaldiagram besproken en er wordt getoond hoe daarna met behulp van een daglichtdiagram de hemelcomponent (zonder glasverliezen) in de daglichtfactor bepaald wordt.

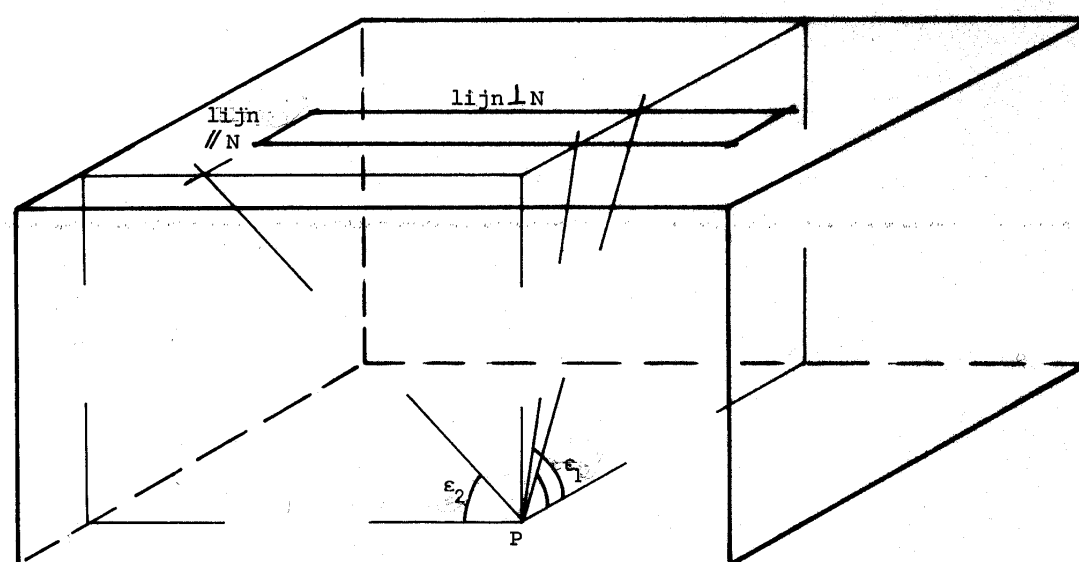
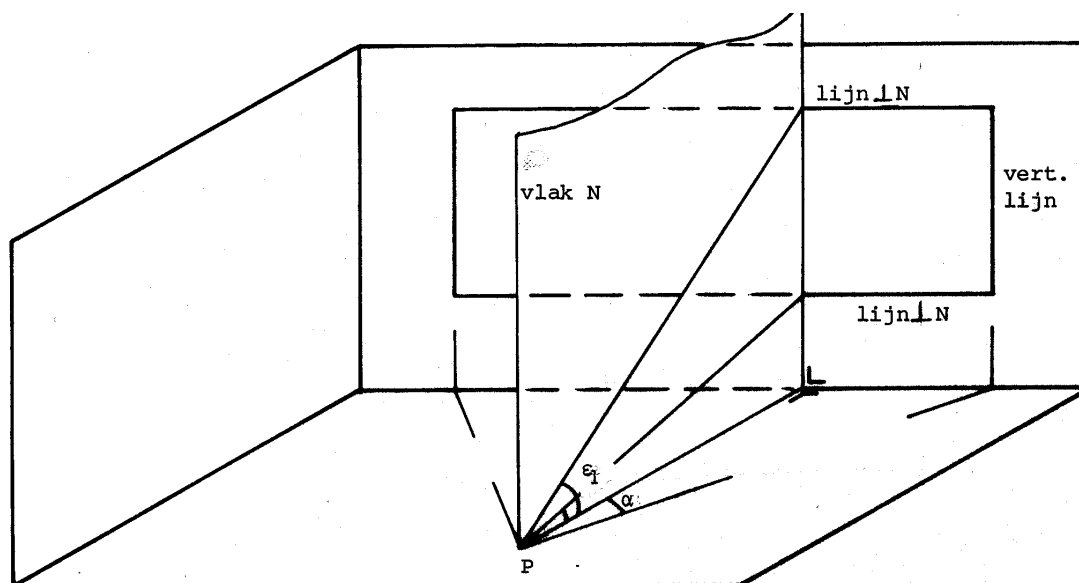
Het radiaaldiagram

Een punt in de ruimte wordt in een bolcoördinatensysteem vastgelegd door azimuth (α), elevatie (ϵ) en de afstand tot de oorsprong (r). De laatste coördinaat (r) gaat verloren bij projectie in een plat (twee-dimensionaal) vlak. In het radiaaldiagram wordt daardoor een punt alleen vastgelegd door elevatie en azimuth. Door de aanwezigheid van een aantal hulplijnen is het in het diagram van afbeelding A-4 mogelijk behalve punten ook lijnen vast te leggen. Dit wordt geïllustreerd aan de hand van een voorbeeld (zie figuur A-1).

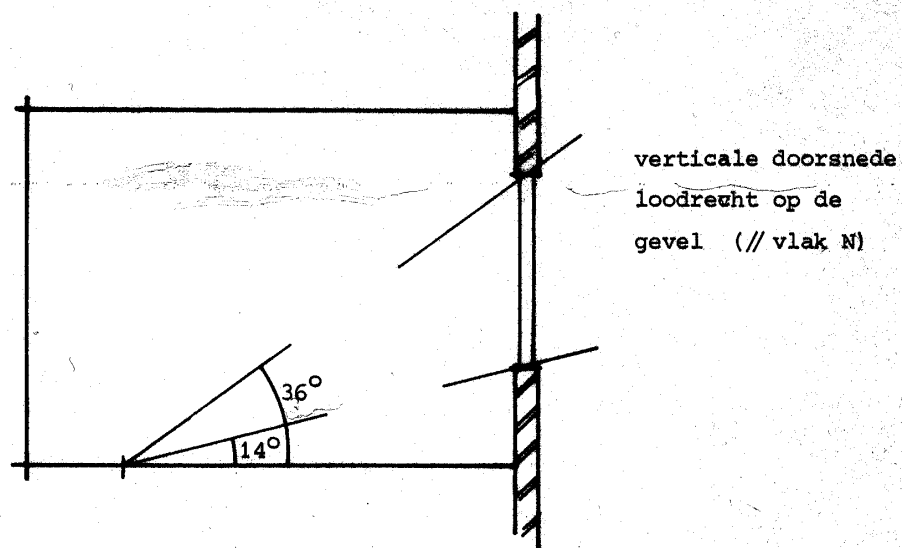
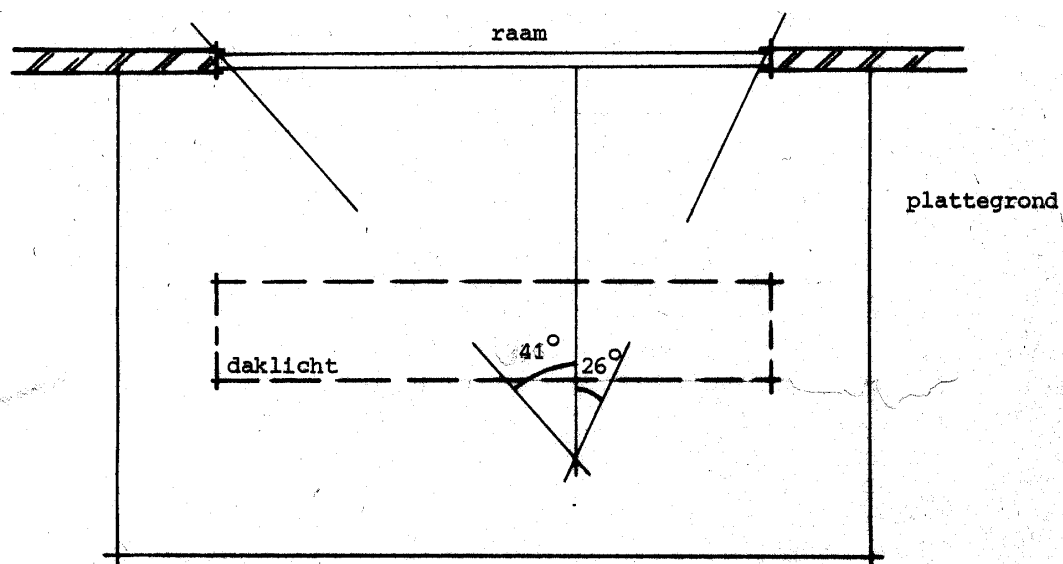
In een vertrek bevinden zich een raam en een daklicht. Voor het bepalen van elevatie en azimuth van de begrenzingen van raam en daklicht wordt een hulpvlak N aangebracht, zodanig dat de begrenzingen van raam en daklicht evenwijdig aan dit vlak of loodrecht erop lopen.

De waarden van α (azimuth), ϵ_1 (lijnen $\perp N$) en ϵ_2 (lijnen $\parallel N$) kunnen op eenvoudige wijze uit de plattegrond en doorsnede van het vertrek worden opgemeten of berekend (zie afbeelding A-2 en A-3). Als de hoeken bekend zijn, kan een en ander worden ingetekend in het radiaaldiagram (zie figuur A-4).

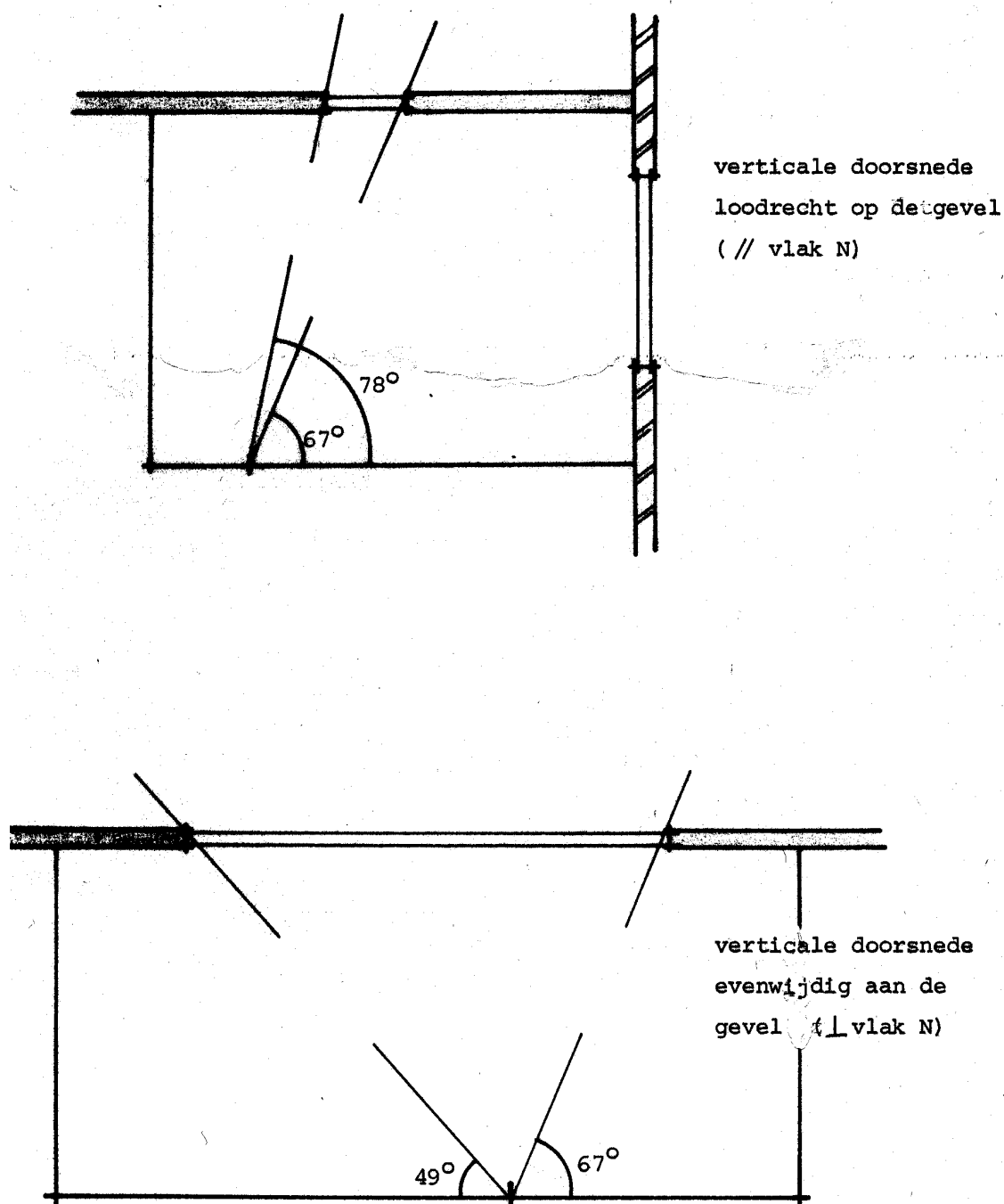
Tot slot kan een transparant daglichtdiagram over de getekende projectie worden gelegd en kan via het tellen van vakjes de hemelcomponent worden bepaald.



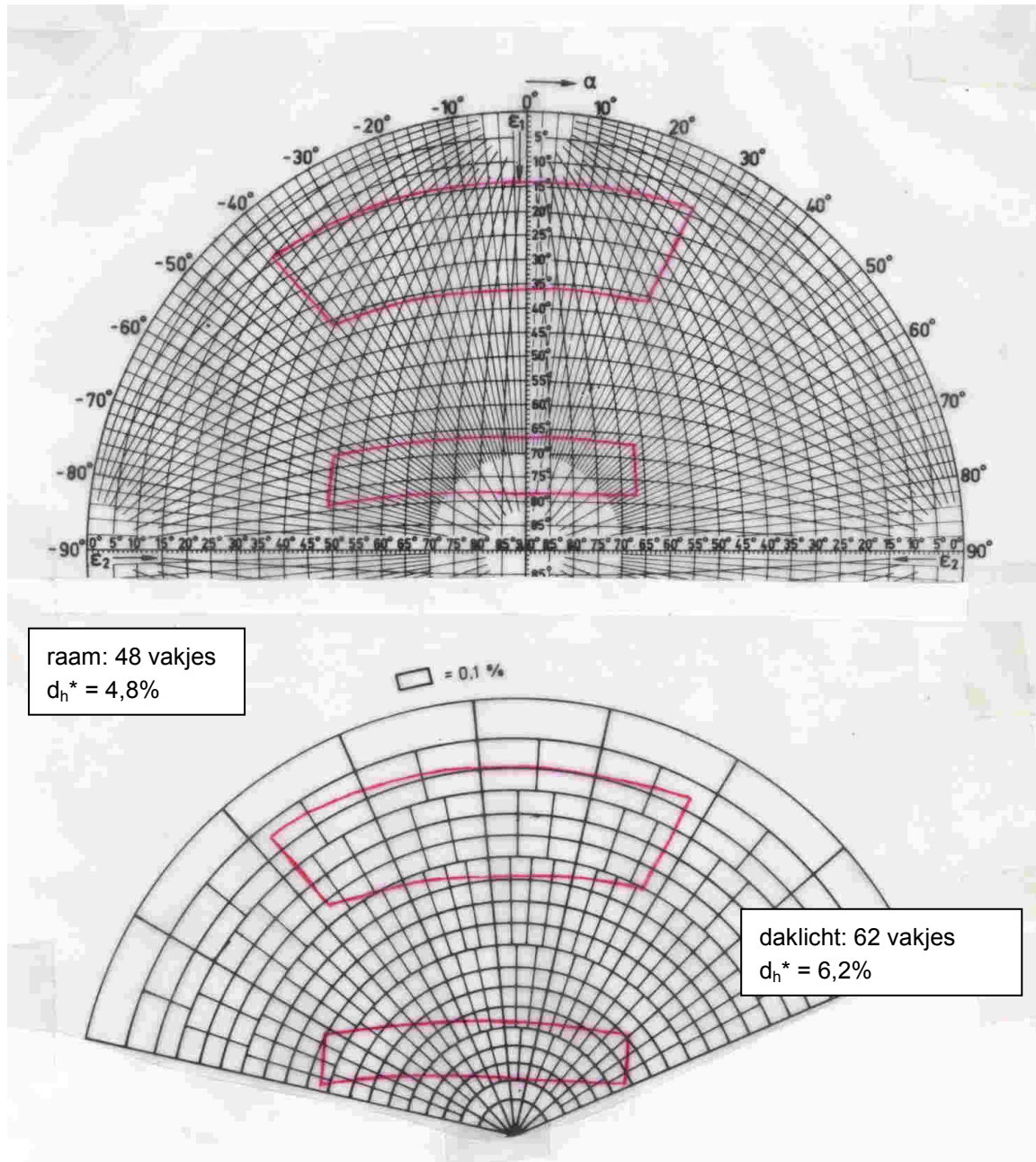
figuur A-1. bepaling azimuth (α) en elevatie (ϵ) van de begrenzingen van vlakken voor projectie in een radiaaldiagram



figuur A-2. bepaling azimuth en elevatie voor het raam uit het voorbeeldvertrek



figuur A-3. bepaling azimuth en elevatie voor het daklicht uit het voorbeeldvertrek



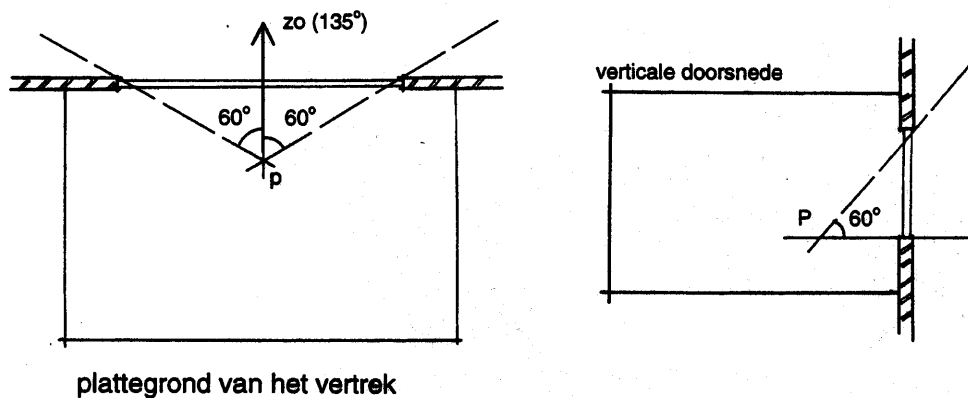
figuur A-4. raam en daklicht ingetekend in radiaaldiagram en diagram ter bepaling van de hemelcomponent bij een gelijkmatige verdeling van de luminantie (egale hemel).

Gebruik radiaaldiagram en zonnebaandiagram

bijlage B

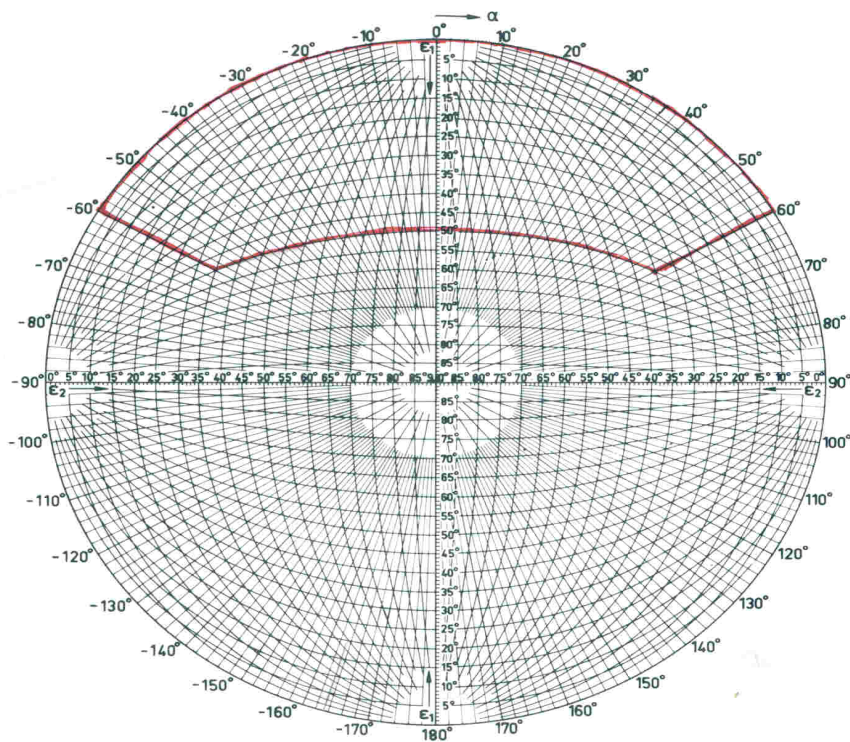
Inleiding

Het zonnebaandiagram kan in combinatie met het radiaaldiagram worden gebruikt om de zontoetreding door een raam te beoordelen. Een en ander wordt duidelijk gemaakt aan de hand van het volgende voorbeeld. Beschouwd wordt de bezonning van een punt P, één meter uit de gevel in het midden van een raam dat in dit voorbeeld op het zuidoosten is georiënteerd.



figuur B-1. bepaling van de hoeken, benodigd voor het intekenen van de projectie van het raam in het radiaal diagram

Het intekenen van het raam op het radiaaldiagram gebeurt op de manier zoals hiervoor beschreven in bijlage A.

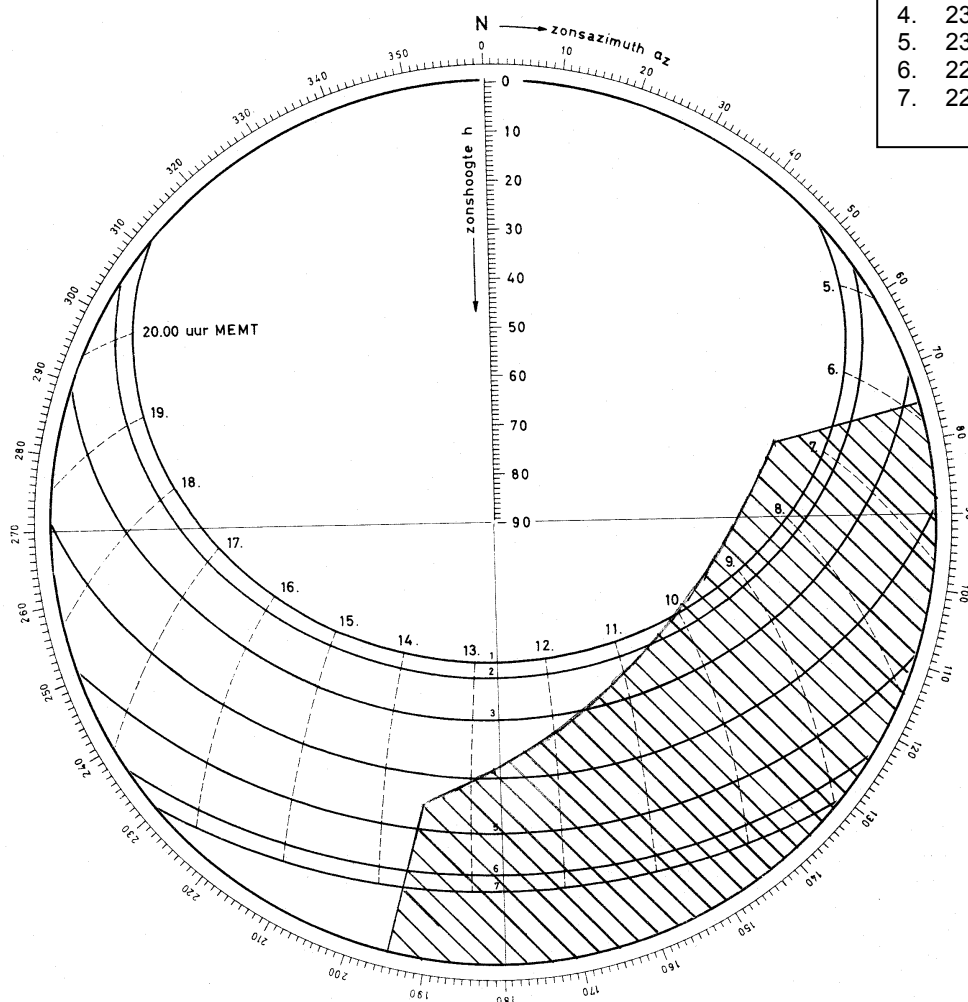


figuur B-2. het raam van figuur B-1 ingetekend in het radiaaldiagram

Nu wordt een transparante versie van het zonnebaandiagram in de juiste richting op het radiaaldiagram gelegd. De bovenkant van het radiaaldiagram (azimut $\alpha = 0^\circ$ voor het intekenen) heeft ten opzichte van de noordpijl een azimuth van 135° ; het raam ligt op het zuidoosten; dit is in figuur B-3 weergegeven. Uit de figuur kan men aflezen dat het punt P op 22 december van 9.00 uur tot 13.45 uur wordt beschenen, op 21 maart en 23 september van 6.35 uur tot 12.55 uur en op 22 juni van 6.40 uur tot 10.05 uur MEMT.

ZONNEBAANDIAGRAM voor 52° N.B.

1. 22 juni
2. 23 juli en 21 mei
3. 23 augustus en 20 april
4. 23 september en 21 maart
5. 23 oktober en 19 februari
6. 22 november en 20 januari
7. 22 december



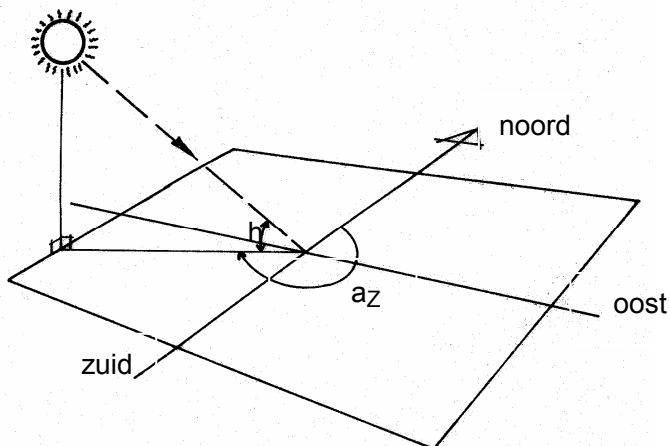
figuur B-3. projectie van het raam uit het voorbeeld van figuur B-1 in het zonnebaandiagram met behulp van het radiaaldiagram

Zonnestraling en zonstralingsgegevens

Kennisbank Bouwfysica
Auteur: ir. A.C. van der Linden

1 Inleiding

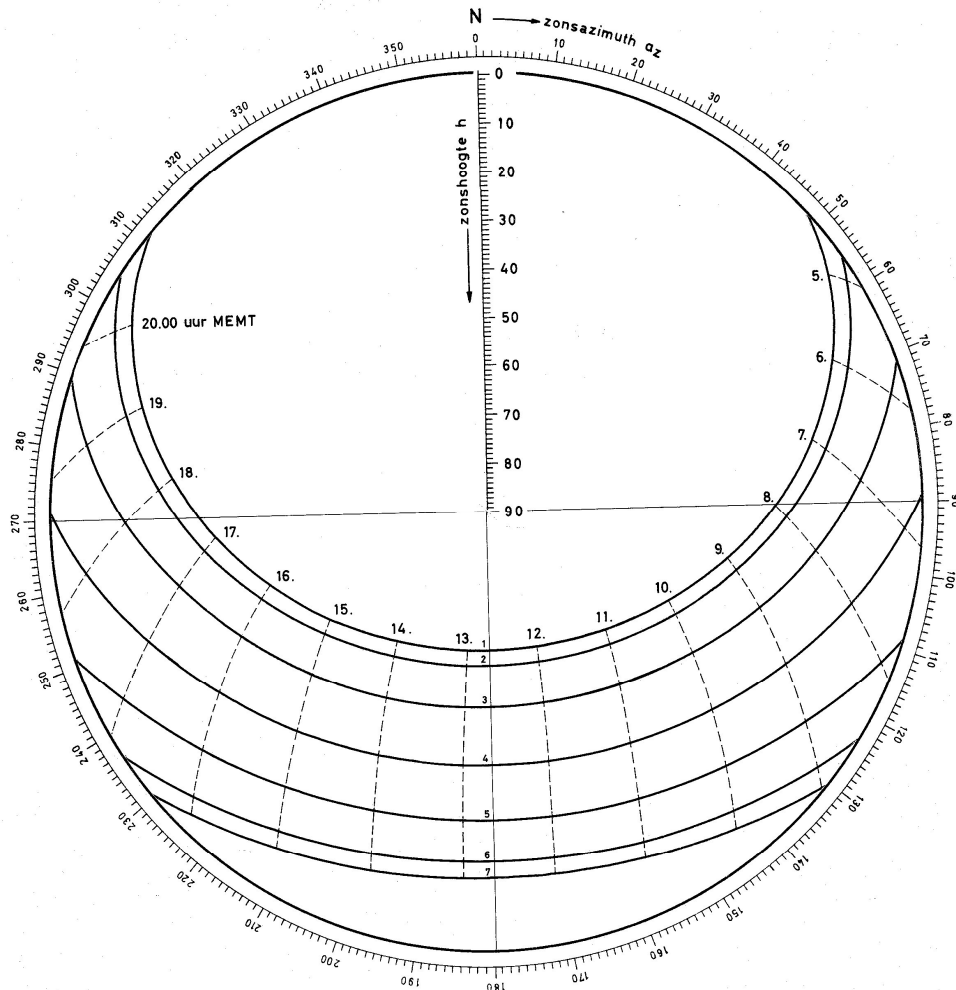
De sterkte van de zonnestraling die op een gevel valt, kan in totaal wel 900 W/M^2 bedragen. Wanneer deze straling ongehinderd binnen kan komen, betekent dit een zeer grote warmtetoevoer tot het vertrek. 's Winters kan dit een welkome positieve post op de warmtebalans betekenen (passieve zonne-energie); zomers kan dit tot onaantvaardbaar hoog oplopende binnentemperaturen leiden. In het voor- en najaar kan een en ander zowel positief, als negatief uitpakken. Hierbij speelt de massa van het gebouw (warmteaccumulatie) een belangrijke rol. De hoeveelheid opvallende zonnewarmte wordt onder andere bepaald door de oriëntatie van de gevel, beschaduwing door andere gebouwen of door delen van het eigen gebouw (luifels en dergelijke). Het gedeelte van deze energie dat het vertrek binnendringt, hangt af van het percentage glas in de gevel, het soort glas en de toegepaste zonwering. Verder kunnen fel door de zon beschenen vlakken grote helderheidsverschillen binnen het gezichtsveld veroorzaken, waardoor het kijken niet altijd even eenvoudig is. Niettemin wordt toetreding van zon in vertrekken onder normale omstandigheden als prettig ervaren. Door de Studiecommissie Grondslagen Woningwaardering zijn in de uitgave Blauwe Reeks nummer 34 (1962) van de Vereniging van Nederlandse Gemeenten aanbevelingen gedaan voor de gewenste zonlichttoetreding bij woningen. Als op 20 januari (en 22 november) tussen 9.00 en 15.00 uur het "normpunt" minstens 3 uur door de zon wordt beschenen, spreekt men van de kwalificatie "goed". Een zonbestraling van minstens 2 uur van het "normpunt" op 19 februari (en 23 oktober) is goed voor de kwalificatie "matig". Het "normpunt" bevindt zich op het midden van de vensterbank, in het binnenvlak van de gevel. Voor fabrieken, werkplaatsen en de bijbehorende kantoren en dergelijke moet - volgens het Veiligheidsbesluit van 1938 - direct zonlicht op de werkplaats worden vermeden. Echter, een nieuwe versie van het Veiligheidsbesluit valt binnen niet al te lange tijd te verwachten. Over dit onderwerp zijn verder geen gedetailleerde en algemeen aanvaarde richtlijnen aanwezig, zodat vaak het persoonlijk inzicht van de ontwerper maatgevend wordt. Hierop én op de manier waarop bezonning (en beschaduwing) kan worden berekend, wordt nader ingegaan in module W-10; "Bezonning en beschaduwing". Module W-11; "Zonwering" behandelt de eigenschappen van diverse soorten zonwering. De module "Het benutten van zontoetreding door het raam" ten slotte geeft een methode om het nuttig effect van zontoetreding ten aanzien van de verwarming te kwantificeren. Echter, eerst worden algemene gegevens over zonnestraling behandeld.



figuur 1. zonnehoogte (h) en azimut (a)

ZONNEBAAN-DIAGRAM voor 52° N.B.

1. 22 juni
2. 23 juli en 21 mei
3. 23 augustus en 20 april
4. 23 september en 21 maart
5. 23 oktober en 19 februari
6. 22 november en 20 januari
7. 22 december



figuur 2. zons hoogte en zonsazimut voor 52° N.B. voor de kenmerkende data

2 Zonstralingsgegevens

Het lijkt logisch een module over zonnestraling en zonstralingsgegevens te beginnen met enkele basisgegevens over de zonnestand, sterkte van de straling, etc.

2.1 Zonshoogte en azimut

In figuur 1 is aangegeven hoe de stand van de zon op een punt op aarde wordt vastgelegd met behulp van zonshoogte en azimut.

De zonshoogte volgt uit:

$$h = \arcsin (\sin \gamma . \sin d - \cos \gamma . \cos d . \cos u) \quad (1)$$

Hierin is:

h	zonshoogte in graden
γ	breedtegraad van de betreffende plaats op aarde voor Nederland 52° NB
d	declinatie van de zon, dat is de hoek tussen de stralingsrichting en het vlak door de evenaar
u	uurhoek waarin het tijdstip op de dag is verwerkt in graden.

De declinatie d wordt via een goede benadering gevonden uit:

$$d = 23,44^\circ \cdot \sin (360^\circ \cdot (283 + n)/365) \quad (2)$$

Hierin is de n de n-de dag van het jaar.

De uurhoek u is om middernacht 0°; daarna neemt hij ieder uur 360/24 15° toe.

$u = t \cdot 15^\circ$, waarin t de tijd is, uitgedrukt in uren zonnetijd.

Het azimut ten slotte volgt uit:

$$a_z = \arcsin (\cos d \cdot \sin u / \cos h) \text{ als } \cos u > \frac{-\operatorname{tg} d}{\operatorname{tg} \gamma}$$

$$a_z = 180 - \arcsin (\cos d \cdot \sin u / \cos h) \text{ als } \cos u < \frac{-\operatorname{tg} d}{\operatorname{tg} \gamma} \quad (3)$$

In figuur 2 is een zonnebaandiagram gegeven waarin voor iedere maand op de aangegeven datum, voor ieder uur zonshoogte en azimut zijn af te lezen.

In het diagram is de tijd aangegeven in uren MEMT in plaats van in zonnetijd of werkelijke tijd. In Nederland geldt als wettige tijd de Middel-Europese-Middelbare-Tijd (MEMT). Deze komt overeen met de gemiddelde zonnetijd voor een geografische lengte van 15° OL (oosterlengte). Aangezien Nederland tussen 3° OL en 7° OL ligt, vindt men de zonnetijd (ZT) door van de kloktijd (MEMT) 48 tot 32 minuten af te trekken.

Immers, iedere 15° lengteverschil betekent een tijdsverschil (ZT) van 1 uur. Echter, gemiddeld kan men uitgaan van 40 minuten voor het gehele land. Tijdens de zomerperiode wordt de klok een uur verschoven, zodat dan het verschil tussen kloktijd en zonnetijd 1 uur en 40 minuten bedraagt.

Winter	kloktijd (MEMT) = ZT + 40 min.
Zomer	kloktijd (zomertijd) = ZT + 100 min.

datum	d	zonsopgang en zonsondergang					
		zonnetijd		MEMT		zomertijd	
		Op	onder	op	onder	op	onder
22 december	-23,44°	8.15	15.45	8.55	16.25	-	-
20 jan. / 22 nov.	-20,15°	7.52	16.08	8.32	16.48	-	-
19 feb. / 23 okt.	-11,47°	7.00	17.00	7.40	17.40	-	-
21 mrt / 23 sept.	0,00°	6.00	18.00	6.40	18.40	7.40	19.40
20 april / 23 aug.	11,47°	5.00	19.00	5.40	19.40	6.40	20.40
21 mei / 23 juli	20,15°	4.08	19.52	4.48	20.32	5.48	21.32
22 juni	23,44°	3.45	20.15	4.25	20.55	5.25	21.55

tabel 1. declinatie (d) en tijdstip van zonsopgang en zonsondergang voor een aantal data

	$q_{dir,n}$ in W/m ² op tijdstip MEMT															
	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
jan	-	-	-	-	87	407	571	641	650	603	474	214	-	-	-	-
feb	-	-	-	45	432	639	737	777	783	755	680	519	194	-	-	-
mrt	-	-	19	420	650	761	818	844	847	830	785	697	517	163	-	-
apr	-	25	412	648	766	831	867	884	887	875	846	792	696	509	162	-
mei	1	329	582	721	800	846	873	887	889	879	857	818	752	639	423	88
juni	129	327	624	732	798	838	862	874	876	867	848	813	758	665	506	239
juli	68	386	599	716	786	828	853	865	867	858	838	802	743	646	472	186
aug	-	180	488	660	753	807	838	853	855	844	819	775	697	559	298	-
sept	-	-	218	532	691	773	817	838	841	826	791	724	598	344	-	-
okt	-	-	-	227	535	687	759	792	796	774	717	598	353	-	-	-
nov	-	-	-	-	219	489	623	679	687	648	546	328	-	-	-	-
dec	-	-	-	-	10	324	507	587	597	544	401	117	-	-	-	-

tabel 2. voor Nederland representatief te achten waarden voor de maximale sterkte van de zonnestraling loodrecht op de stralingsrichting voor de 15^e van iedere maand [1]

maand	a	B	c
januari	900	1129	5,25
februari	958	1104	4,35
maart	968	1067	3,76
april	976	1038	3,34
mei	966	1010	3,09
juni	949	988	2,97
juli	942	983	2,99
augustus	937	991	3,15
september	943	1019	3,49
oktober	939	1063	4,07
november	915	1093	4,68
december	857	1142	5,84

tabel 3. factoren voor het bepalen van de maximale normaalstraling van de zon voor Nederlandse omstandigheden [1]

In de winter staat de zon om 12.40 uur (MEMT) op zijn hoogste punt; in de zomer om 13.40 uur (zomertijd).

De invloed die de verschuiving van de kloktijd ten opzichte van de zonnetijd heeft op de uren dat de zon op is, is weergegeven in tabel 1. Het tijdstip van zonsopgang en zonsondergang is eenvoudig te bepalen door in de formule voor de berekening van de zonshoogte, deze op 0 te stellen. In tabel 1 is tevens aangegeven welke declinatie bij de verschillende data hoort [2].

De gegeven formules geven niet de exacte situatie weer. Immers een jaar is niet precies 365 dagen en de baan van de zon is niet zuiver cirkelvormig. Dit laatste aspect bij voorbeeld zorgt ervoor dat de maximale zonshoogte niet altijd om precies 12.00 uur ZT wordt bereikt. Echter, dit tijdsverschil (tijdvereffening) bedraagt maximaal slechts circa 15 minuten (plus of min). Echter, voor gebruik in de bouwfysische praktijk is de nauwkeurigheid van de gegeven formules groot genoeg.

2.2 Sterkte van de directe zonnestraling

De straling van de zon zoals die de dampkring van de aarde binnendringt, komt niet ongehinderd op het aardoppervlak terecht. Er kan onderscheid worden gemaakt in de vermindering van de straling (absorptie en verstrooiing) door:

- luchtmoleculen (inclusief de ozonabsorptie);
- waterdamp in de atmosfeer;
- zwevende deeltjes (aerosolen, "stof").

In tabel 2 zijn voor Nederland representatief te achten waarden voor de maximale sterkte van de zonnestraling loodrecht op de stralingsrichting gegeven. Deze zijn overgenomen uit [1], waarin ook de aangehouden waarden voor de hierboven genoemde effecten zijn weergegeven.

Voor zonshoogten boven 10° kan de waarde voor deze normaalstraling worden benaderd met de volgende formule:

$$q_{dir,n} = a - b \cdot e^{-c \cdot \sin h} \quad (4)$$

Hierin is:

$q_{dir,n}$	intensiteit normaalstraling in W/m^2
a, b, c	factor te ontleen aan tabel 6.3
h	zonshoogte in graden

Het omrekenen van de normaalstraling naar de straling op het horizontale vlak $q_{dir,h}$ gebeurt met de formule:

$$q_{dir,h} = q_{dir,n} \cdot \sin h \quad (5)$$

Voor een verticaal vlak geldt de formule:

$$q_{dir,v} = q_{dir,n} \cdot \cos h \cdot \cos(a_z - a_v) \quad (6)$$

Hierin is:

$q_{dir,v}$	intensiteit normaalstraling op verticaal vlak in W/m^2
a_z	azimut van de zon in graden
a_v	azimut van het beschouwde vlak in graden

Voor hellende vlakken geldt:

$$q_{dir} = q_{dir,h} \cdot \cos \alpha + q_{dir,v} \cdot \sin \alpha \quad (7)$$

Hierin is:

α hoek die het vlak maakt met het horizontale vlak in graden
 $q_{dir,v}$ straling op een verticaal vlak met dezelfde oriëntatie als het hellende vlak in W/m^2

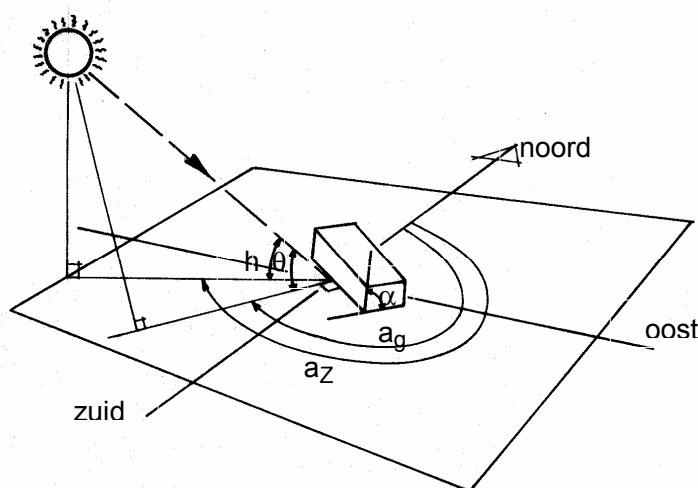
Voor alle vlakken kan men de stralingssterkte berekenen met de formule:

$$q_{dir} = q_{dir,n} \cdot \cos \theta$$

waarin voor de hoek θ = de hoek tussen de stralingsrichting en de normaal op het te beschouwen vlak geldt:

$$\cos \theta = \sin h \cdot \cos \alpha + \cos h \cdot \sin \alpha \cdot \cos(a_z - a_g) \quad (8)$$

Voor de verklaring van de verschillende hoeken (zie figuur 3).



In deze figuur is:

h zonshoogte
 θ invalshoek van de zon op de gevel
 α (eventuele) helling van de gevel
 a_z azimut van de zon
 a_g azimut van de gevel

figuur 3. aanduiding van de verschillende hoeken die van belang zijn bij het berekenen van de sterkte van de zonnestraling op een bepaald vlak

2.3 Sterkte van de diffuse zonnestraling

Volgens [1] kan de sterkte van de diffusie zonnestraling (hemelstraling) op het horizontale vlak worden berekend uit:

$$q_{diff,h} = 1/3 \cdot (q_{dir,o} - q_{dir,n}) \cdot \sin h \quad (9)$$

Hierin is:

$q_{\text{diff.h}}$	diffuse zonnestraling (hemelstraling) op het horizontale vlak in W/m^2
$q_{\text{dir.o}}$	directe zonnestraling loodrecht op de stralingsrichting zoals die aan de buitenkant van de dampkring van de aarde bestaat in W/m^2
$q_{\text{dir.n}}$	directe zonnestraling loodrecht op de stralingsrichting aan het aardoppervlak in W/m^2

Deze formule geeft slechts een redelijke benadering. Echter, een betere is niet eenvoudig te vinden. Het aangegeven verband tussen de diverse factoren is wel goed; de waarde 1/3 blijkt in de praktijk nogal te kunnen variëren.

Uit (9) blijkt - wat men ook in de praktijk waarneemt - dat bij toenemende bedekking van de hemel de directe zonnestraling afneemt maar de diffuse straling daarentegen toeneemt. Immers, er wordt meer straling door de atmosfeer verstrooid. Daarnaast wordt er ook meer straling geabsorbeerd, zodat het totaal aan straling dat het aardoppervlak bereikt wel vermindert.

De extra-terrestrische straling $q_{\text{dir.o}}$ die buiten op de dampkring valt, varieert voornamelijk met de variatie in de afstand tussen zon en aarde.

$$q_{\text{dir.o}} = 1355 \cdot \left[1 - 0,033 \cdot \sin\left(\frac{n-93}{365} \cdot 360\right) \right] \quad (10)$$

Hierin is:

n de n-de dag van het jaar

Voor de diffuse straling op een verticaal vlak is het volgende verband met de diffuse straling op het horizontale vlak afgeleid.

Voor $\cos \theta \leq -0,3$:

$$q_{\text{diff.v}} = (-0,473 + 0,043 \cdot \cos \theta) \cdot q_{\text{diff.h}} \quad (11)$$

Voor $\cos \theta > -0,3$:

$$q_{\text{diff.v}} = (0,560 + 0,436 \cdot \cos \theta + -0,35 \cdot \cos^2 \theta) \cdot q_{\text{diff.h}} \quad (12)$$

Voor hellende vlakken wordt bij benadering gevonden naar analogie van de directe straling:

$$q_{\text{diff}} = q_{\text{diff.h}} \cdot \cos \alpha + q_{\text{diff.v}} \cdot \sin \alpha \quad (13)$$

	Q _{dir,h} in W/m ² op tijdstip MEMT															
	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
jan	-	-	-	4	63	134	180	186	153	88	18	-	-	-	-	
feb	-	-	1	73	182	272	324	332	294	216	110	15	-	-	-	
mrt	-	-	75	208	334	429	483	491	452	369	253	117	12	-	-	
apr	1	75	219	366	495	590	644	652	613	531	412	269	120	13	-	
mei	50	177	326	470	592	682	733	741	704	626	513	375	226	85	5	
juni	91	224	369	507	624	710	758	765	730	656	548	416	272	132	28	
juli	74	204	348	486	-603	690	739	746	711	636	528	396	252	113	18	
aug	16	120	262	404	525	615	666	673	637	559	447	311	166	42	-	
sept.	-	22	136	275	399	492	545	553	515	434	319	182	52	-	-	
okt.	-	-	22	126	242	333	385	393	355	276	166	51	-	-	-	
nov	-	-	-	19	98	176	223	230	196	126	42	-	-	-	-	
dec	-	-	-	-	40	103	145	151	120	61	6	-	-	-	-	

tabel 4. voor Nederland representatieve waarden voor de maximale directe zonnestraling in W/m², op het horizontale vlak voor de 15^e van iedere maand [1]

	Q_{diff,h} in W/m² op tijdstip MEMT															
	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
jan	-	-	-	-	19	51	65	71	72	68	57	33	-	-	-	-
feb	-	-	-	32	54	71	80	85	85	82	75	61	32	-	-	-
mrt	-	-	9	56	77	89	96	100	101	98	92	81	65	30	-	-
apr	-	11	57	79	93	102	109	112	113	110	105	96	84	66	30	-
mei	3	50	75	91	103	112	118	121	121	119	114	106	95	81	61	22
juni	28	63	83	97	109	118	124	127	127	125	120	112	102	88	70	42
juli	20	59	81	96	108	117	124	127	127	125	120	112	101	86	67	35
aug	-	34	68	88	102	112	119	122	123	120	114	105	93	76	48	-
sept	-	-	37	69	86	98	105	109	110	107	101	91	76	51	-	-
okt	-	-	-	36	65	80	89	93	94	90	83	71	49	-	-	-
nov	-	-	-	-	34	60	72	77	78	74	65	45	-	-	-	-
dec	-	-	-	-	7	44	60	67	68	63	51	23	-	-	-	-

tabel 5. voor Nederland representatieve waarden voor de diffuse zonnestraling (hemelstraling) in W/m², op het horizontale vlak, bij helder weer, voor de 15^e van iedere maand [1]

noord	Q_{tot} in W/m² op tijdstip MEMT															
	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
jan	-	-	-	-	11	33	48	56	57	51	40	20	-	-	-	-
feb	-	-	-	8	37	56	70	78	79	74	62	44	19	-	-	-
mrt	-	-	6	39	64	82	95	102	103	98	87	70	47	19	-	-
apr	-	14	60	69	88	106	119	126	126	121	113	95	75	55	51	-
mei	2	155	149	91	106	121	133	139	141	136	126	111	96	122	168	61
juni	100	220	197	101	116	128	139	146	147	143	133	120	106	168	226	160
juli	57	195	178	97	112	126	137	144	144	141	131	117	103	150	203	124
aug	-	80	101	80	98	115	126	134	135	130	119	103	86	77	106	-
sept	-	-	26	54	75	94	107	113	114	109	99	82	61	36	-	-
okt	-	-	-	22	48	67	81	88	90	85	73	56	32	-	-	-
nov	-	-	-	-	20	42	56	63	65	59	47	29	-	-	-	-
dec	-	-	-	-	4	27	42	50	51	45	33	13	-	-	-	-

tabel 6. voor Nederland representatieve waarden voor de totale zonnestraling (q_{dir} + q_{diff} + q_{gr}) op een verticaal vlak georiënteerd op het noorden, voor de 15^e van iedere maand [1]

2.4 Reflectie via het aardoppervlak

Van de op het aardoppervlak vallende straling wordt ook een deel gereflecteerd; dit kan aldus indirect op gevels en dergelijke terechtkomen. Uitgaande van een diffuse reflectie van het grondoppervlak volgt voor de grondreflectie:

$$q_{gr} = \gamma \cdot r \cdot (q_{dir,h} + q_{diff,h}) \quad (14)$$

Hierin is:

q_{gr}	intensiteit grondreflectie in W/m^2
γ	geometrische factor voor het ontvangende vlak ten opzichte van het reflecterende vlak
r	reflectiecoëfficiënt van het oppervlak

Voor een verticaal vlak, uitkijkend op een zich oneindig uitstrekkend horizontaal vlak is $\gamma = 0,5$. Ook voor een gevel liggend aan een vrij groot terrein geldt dit bij benadering.

Voor hellende vlakken kan deze geometrische factor worden vermenigvuldigd met $(1 - \cos \alpha)$ waarbij α de helling van het beschouwde vlak ten opzichte van het horizontale vlak is.

Als gemiddelde reflectiecoëfficiënt van het aardoppervlak kan men $r = 0,2$ aanhouden.

Met het invullen van deze waarden verandert de formule in:

$$q_{gr,\alpha} = 0,1 \cdot (1 - \cos \alpha) \cdot (q_{dir,h} + q_{diff,h}) \quad (15)$$

Hierin is:

$q_{gr,\alpha}$	intensiteit grondreflectie op een hellend vlak in W/m^2
α	hoek die het ontvangende vlak maakt met het horizontale vlak in graden.

Uiteraard kan men met behulp van de zichtfactoren zoals behandeld in het hoofdstuk "Warmteoverdracht door straling tussen bouwdelen" en eventueel andere waarden voor de reflectiecoëfficiënt zelf de juiste waarde van q_{gr} bepalen.

2.5 Overzicht maximale directe en diffuse straling op horizontale en verticale vlakken

In enkele tabellen zijn voor alle maanden (berekend voor de 15e) waarden gegeven voor de zonnestraling, namelijk:

tabel 4.	maximale waarden voor de directe zonnestraling op het horizontale vlak bij helder weer.
tabel 5.	diffuse zonnestraling (hemelstraling) bij helder weer.
tabel 6.	totale zonnestraling (direct, diffuus en gereflecteerd via de grond) voor verticale
t/m 9,	vlakken bij helder weer voor de oriëntaties noord, oost, zuid en west.

oost	Q _{tot} in W/m ² op tijdstip MEMT															
	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
jan	-	-	-	-	89	303	296	174	64	53	41	20	-	-	-	-
feb	-	-	-	60	419	495	403	228	87	76	63	44	19	-	-	-
mrt	-	-	32	479	649	618	476	269	112	100	87	69	46	17	-	-
apr	-	39	494	729	771	687	518	299	135	122	111	93	71	47	17	-
mei	4	381	671	796	791	692	523	309	150	137	125	109	89	66	41	13
juni	144	479	705	796	781	679	515	309	156	143	132	116	96	74	50	25
juli	84	441	685	786	776	678	513	308	154	141	130	113	94	71	47	20
aug	-	221	579	750	763	675	511	278	145	131	118	101	80	57	30	-
sept	-	-	273	608	700	642	490	281	124	111	99	81	59	32	-	-
okt	-	-	-	263	527	547	430	244	98	86	73	55	31	-	-	-
nov	-	-	-	-	213	371	332	192	72	61	48	29	-	-	-	-
dec	-	-	-	-	16	241	260	158	58	47	34	13	-	-	-	-

tabel 7. voor Nederland representatieve waarden voor de totale zonnestraling ($q_{\text{dir}} + q_{\text{diff}} + q_{\text{gr}}$) bij helder weer op een verticaal vlak georiënteerd op het oosten, voor de 15^e van iedere maand [1]

zuid	Q _{tot} in W/m ² op tijdstip MEMT															
	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
jan	-	-	-	-	77	388	607	722	739	656	471	187	-	-	-	-
feb	-	-	-	31	312	563	742	839	854	784	632	404	120	-	-	-
mrt	-	-	9	177	404	607	761	848	861	798	665	476	252	49	-	-
apr	-	6	44	186	380	558	696	776	786	729	610	442	250	74	19	-
mei	1	33	63	137	312	473	598	670	681	628	520	368	195	74	44	13
juni	17	44	72	106	270	422	539	607	616	568	466	323	160	81	52	26
juli	11	40	68	116	282	436	555	624	634	585	481	337	172	79	49	21
aug	-	21	55	162	340	505	633	708	718	666	553	397	220	66	32	-
sept	-	-	34	192	392	579	721	801	814	755	632	457	259	76	-	-
okt	-	-	-	114	364	585	746	838	850	785	646	444	197	-	-	-
nov	-	-	-	-	174	456	655	760	776	699	533	276	-	-	-	-
dec	-	-	-	-	15	317	546	669	685	600	406	110	-	-	-	-

tabel 8. voor Nederland representatieve waarden voor de totale zonnestraling ($q_{\text{dir}} + q_{\text{diff}} + q_{\text{gr}}$) bij helder weer op een verticaal vlak georiënteerd op het zuiden, voor de 15^e van iedere maand [1].

west	Q _{tot} in W/m ² op tijdstip MEMT															
	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
jan	-	-	-	-	11	34	50	60	122	264	319	193	-	-	-	-
feb	-	-	-	8	37	57	71	83	160	351	477	471	214	-	-	-
mrt	-	-	5	37	63	82	97	108	194	412	581	655	566	203	-	-
apr	-	6	38	64	87	106	119	132	220	449	638	754	760	600	203	-
mei	1	32	57	82	102	120	134	145	232	455	643	768	807	730	492	108
juni	16	42	67	89	110	127	139	152	235	450	631	756	801	747	571	263
juli	11	38	63	86	107	124	137	150	233	449	630	752	795	733	540	211
aug	-	20	48	73	96	114	127	140	226	445	627	743	766	655	359	-
sept	-	-	22	51	74	94	108	119	205	424	600	695	661	416	-	-
okt	-	-	-	22	48	68	82	94	174	375	520	555	386	-	-	-
nov	-	-	-	-	20	43	58	68	135	292	374	296	-	-	-	-
dec	-	-	-	-	4	28	43	54	110	235	267	109	-	-	-	-

tabel 9. voor Nederland representatieve waarden voor de totale zonnestraling ($q_{\text{dir}} + q_{\text{diff}} + q_{\text{gr}}$) bij helder weer op een verticaal vlak georiënteerd op het westen, voor de 15^e van iedere maand [1]

LITERATUUR

1. "Zonstralingstabellen, ISSO, publicatie nr. 3, Rotterdam, oktober 1976.
2. "Bezonning", ir. M. van der Voorden, Technische Hogeschool Delft, afdeling Civiele Techniek, Vakgroep Bouwfysica, collegedictaat gc49.I, maart 1980

Bezinning en beschaduwning

Kennisbank Bouwfysica
Auteur: ir. A.C. van der Linden

1 Inleiding

Met behulp van genoemde gegevens over zonshoogte en zonsazimut (zie module W-9; "Zonnestraling en zonstralingsgegevens") kan ook worden bepaald of bepaalde gedeelten van gebouwen of terreinen op een zeker moment in de zon, dan wel in de schaduw liggen en op welke manier de zon een vertrek binnen schijnt.

2 Schaduwlength, schaduwdiagrammen

De lengte van de schaduw die een verticaal geplaatste naald werpt op het horizontale vlak kan eenvoudig worden bepaald (zie figuur 1).

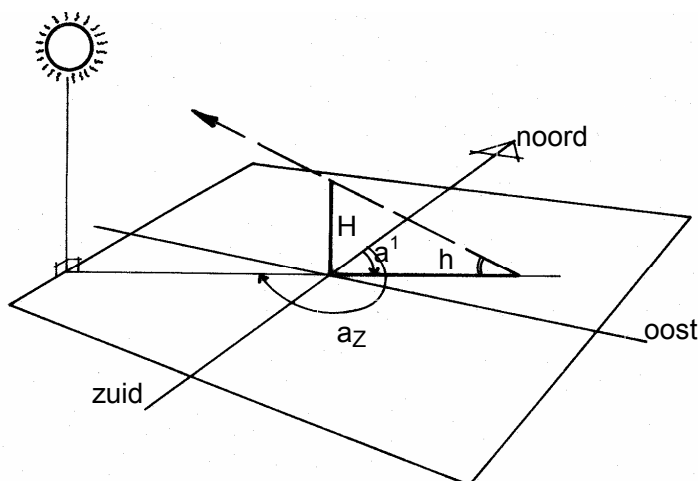
$$l = H \cdot \cotg h \quad (1)$$

Hierin is:

l	schaduwlength in m
H	hoogte van de naald boven het horizontale vlak in m
h	zonshoogte in graden

De richting van de schaduwlijn volgt rechtstreeks uit het zonsazimut

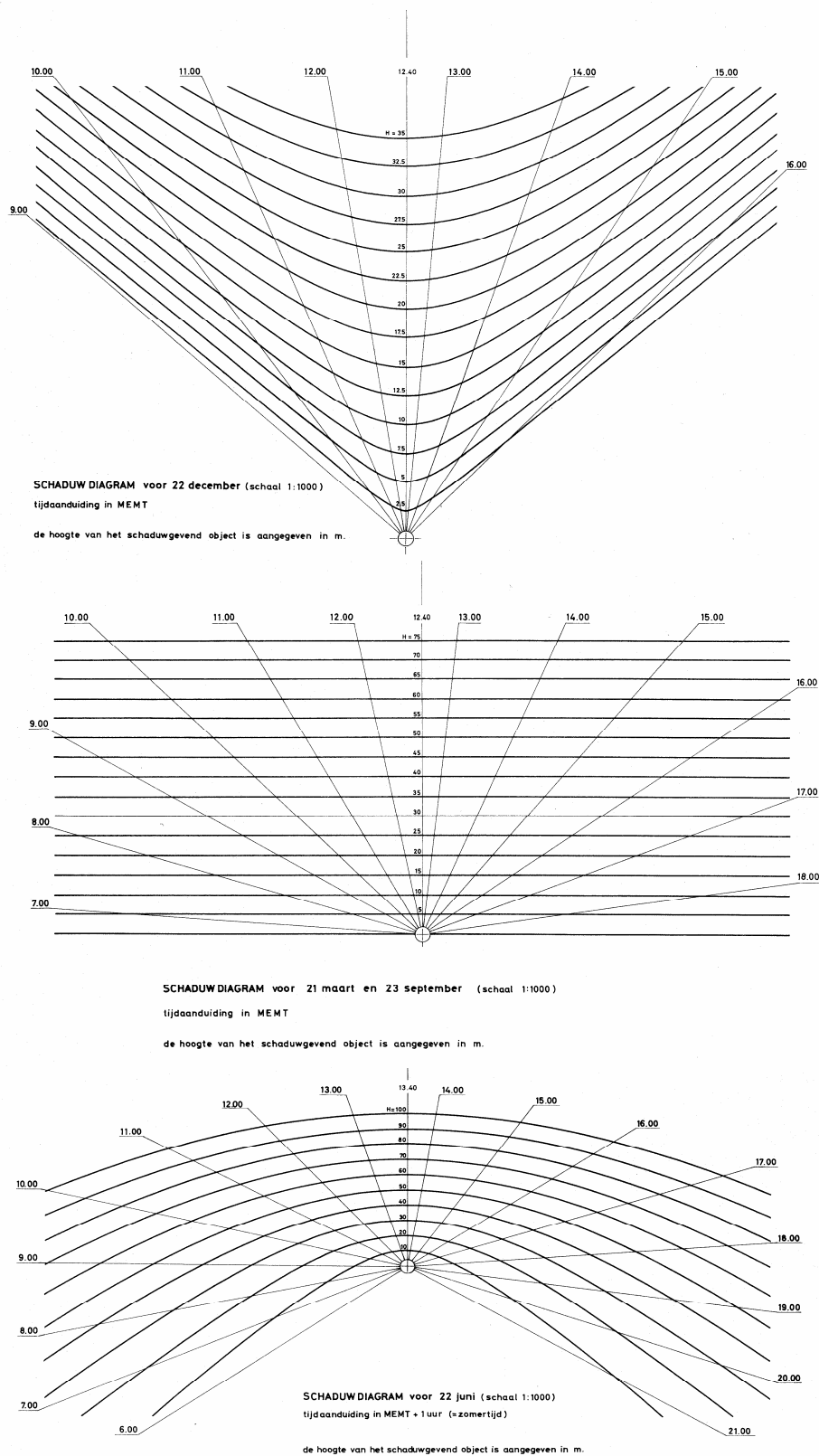
Op basis van deze gegevens kunnen schaduwdiagrammen worden getekend.



In deze figuur is:

h	zonshoogte
a	azimut van de zon
a'	richting van de schaduwlijn
H	hoogte van het schaduwgevend object

figuur 1. bepaling schaduwlength en richting uit zonshoogte h en azimut a

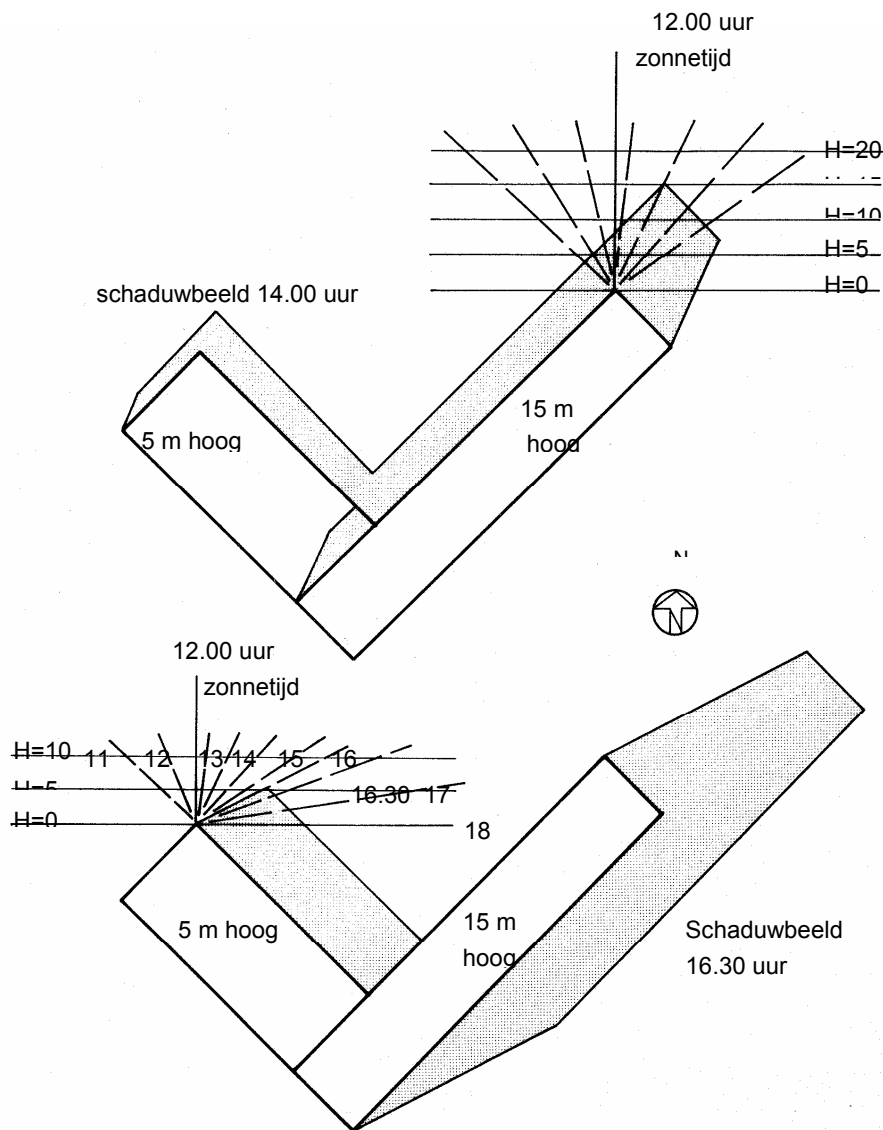


figuur 2-4. diagrammen voor de schaduwlenkte op 22 december, 21 maart/23 september en 24 juni [1] NB: figuren zijn niet op schaal; de transparanten op A4-formaat wel

Als figuur 2 t/m 4 zijn diagrammen gegeven voor de schaduwlengthe op 22 december, 21 maart/23 september en 24 juni. De diagrammen worden gegeven in kloktijd MEMT. Voor de zonnetijd is in de berekening aangehouden $ZT = MEMT - 40 \text{ min.}$ In het diagram voor 22 juni is de zomertijd gebruikt $ZT = MEMT - 100 \text{ min.}$

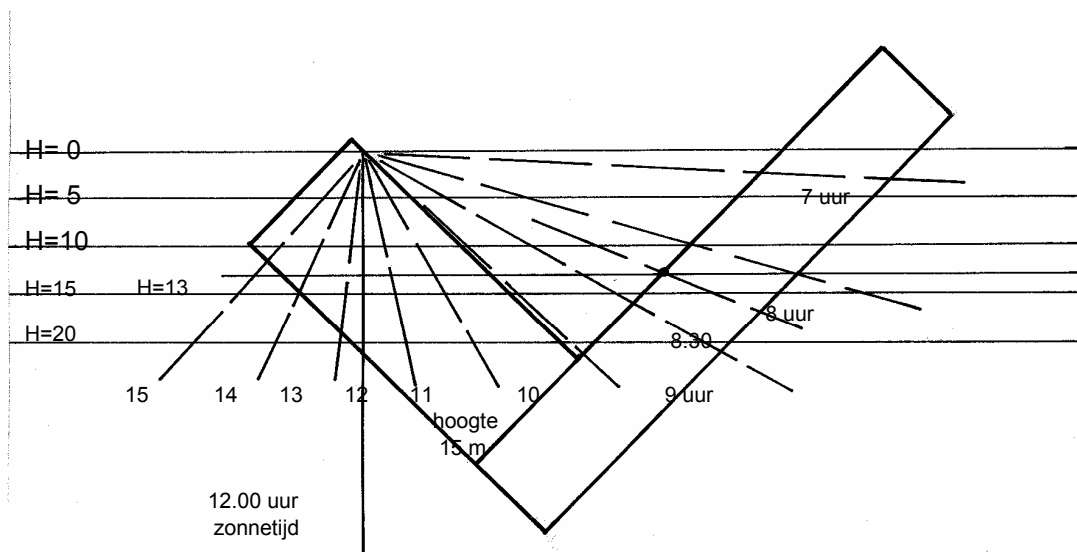
In de diagrammen vindt men lijnen voor verschillende hoogten van het schaduwgevende object. De hierbij aangegeven cijfers passen bij een schaal 1:1000. Bij andere schalen kan men deze cijfers evenredig aanpassen.

In figuur 5 is aangegeven op welke wijze men met behulp van de diagrammen een schaduwbeeld vaststelt. Men bepaalt van ieder hoekpunt van het gebouw de schaduwlengthe. Hiervoor legt men het diagram met de oorsprong op het betreffende hoekpunt en de lijn van 12.00 uur zonnetijd in de richting van de noordpijl. Het schaduwpunt vindt men op de kruising van de lijn die overeenstemt met de hoogte van het gebouw met de bij het gewenste tijdstip behorende lijn. Een en ander werkt heel gemakkelijk als men het diagram op een transparant blad heeft. Met bij voorbeeld een passerpunt kan men dan door het diagram heen op de tekening een merkteken (gaatje) aanbrengen.



figuur 5. voorbeeld schaduwbeplating bij een gebouw met twee vleugels van verschillende hoogte; het schaduwbeeld is bepaald voor 21 maart t/m 23 september voor de tijdstippen 14.00 uur en 16.30 uur MEMT

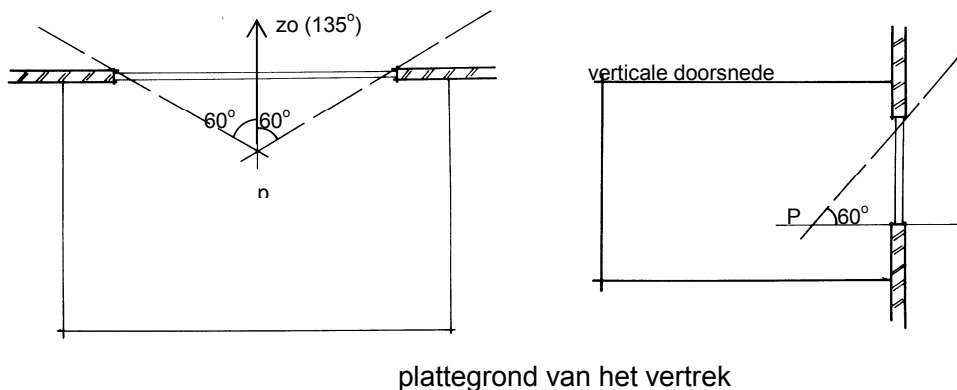
In figuur 6 is aangegeven hoe lang een raam in het lage gebouwgedeelte in de schaduw van het hoge gebouwgedeelte zal liggen. Uitgegaan wordt van de plaats van (het midden van) een raam, 2 m uit de hoek van het gebouw en 2 m boven het maaiveld. Het hoge bouwblok heeft een hoogte van 13 m boven het midden van het raam. De gedeelten van het hoge bouwblok die onder de lijn (in het diagram) van 13 m liggen, werpen schaduw op het raam. De zon komt pas om 8.30 uur over het gebouw heen. Om 10.05 uur schijnt de zon evenwijdig aan de beschouwde gevel. Het beschouwde raam ontvangt op 21 maart en 23 september dus alleen zon tussen 8.30 en 10.05 uur. De rest van de dag ligt het in de schaduw.



figuur 6. bepaling van de tijd gedurende welke het beschouwde raam (2 m boven het maaiveld) in de zon c.q. in de schaduw ligt, geldig voor de data 21 maart en 23 september; het beschouwde raam ontvangt slechts zon vanaf 8.30 uur tot even na negenen

3 Bezonning van een punt in een vertrek

Met een zogenaamd radiaaldiagram is het mogelijk de ruimtelijke omgeving op een plat vlak te projecteren. In zo'n diagram kan men aangeven hoe men bij voorbeeld door een raam, de hemelhoepel ziet. Voor de uitleg van het diagram wordt naar bijlage 1 verwezen.



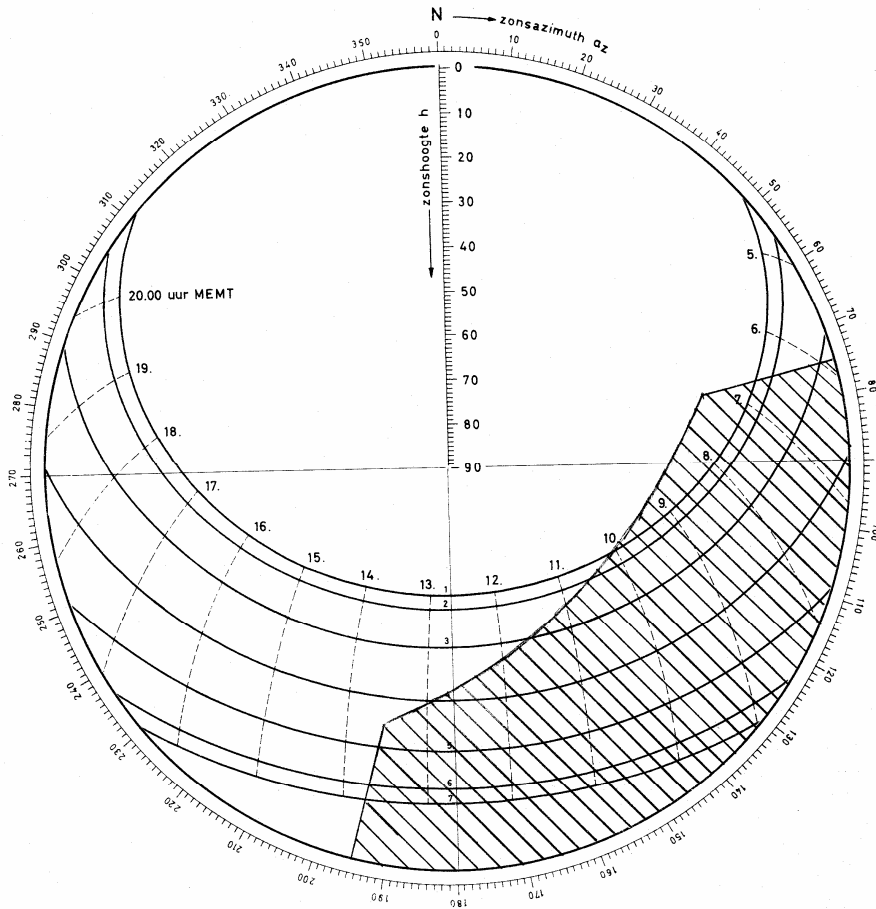
figuur 7. bepaling van de hoeken, benodigd voor het intekenen van de projectie van het raam in een radiaal diagram

In figuur 7 is de plattegrond en een verticale doorsnede van een vertrek gegeven.

Beschouwd wordt nu de bezonning van een punt P, één meter uit de gevel in het midden van het raam dat in dit voorbeeld op het zuidoosten is georiënteerd.

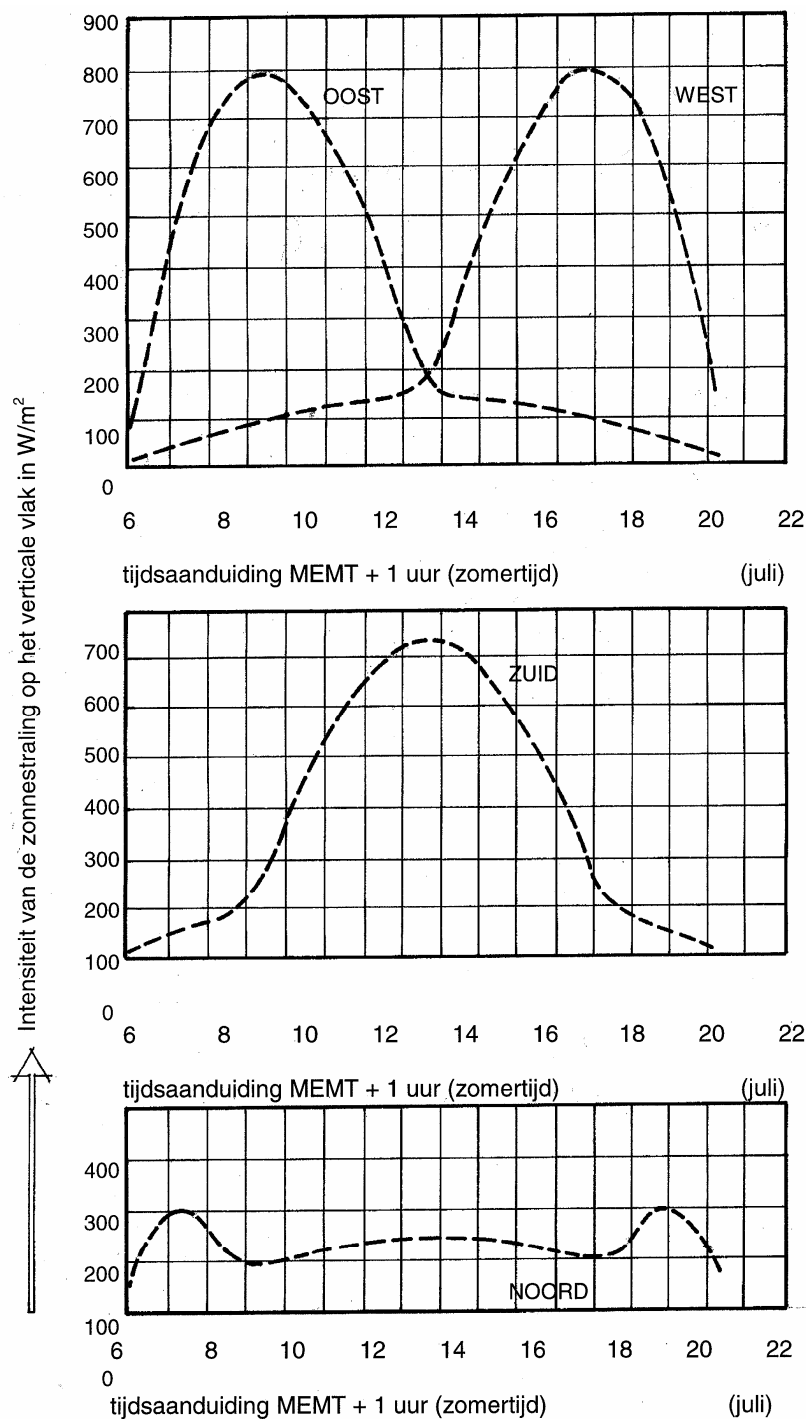
De met behulp van het radiaaldiagram gemaakte projectie is in figuur 8 ingetekend in het zonnebaandiagram; dit is het radiaaldiagram waarin de zonnebanen zijn weergegeven (zie module W-9; "Zonnestraling en zonstralingsgegevens"). Uit figuur 8 kan men zien dat het punt P op 22 december van 9.00 uur tot 13.45 uur wordt beschenen, op 21 maart en 23 september van 6.35 uur tot 12.55 uur en op 22 juni van 6.40 uur tot 10.05 uur MEMT.

ZONNEBAAN-DIAGRAM voor 52° N.B.



1. 22 juni
2. 23 juli en 21 mei
3. 23 augustus en 20 april
4. 23 september en 21 maart
5. 23 oktober en 19 februari
6. 22 november en 20 januari
7. 22 december

figuur 8. projectie van het raam uit het voorbeeld van afbeelding 10 in het zonnebaan diagram van afbeelding 2, met behulp van een radiaaldiagram (zie bijlage 1)

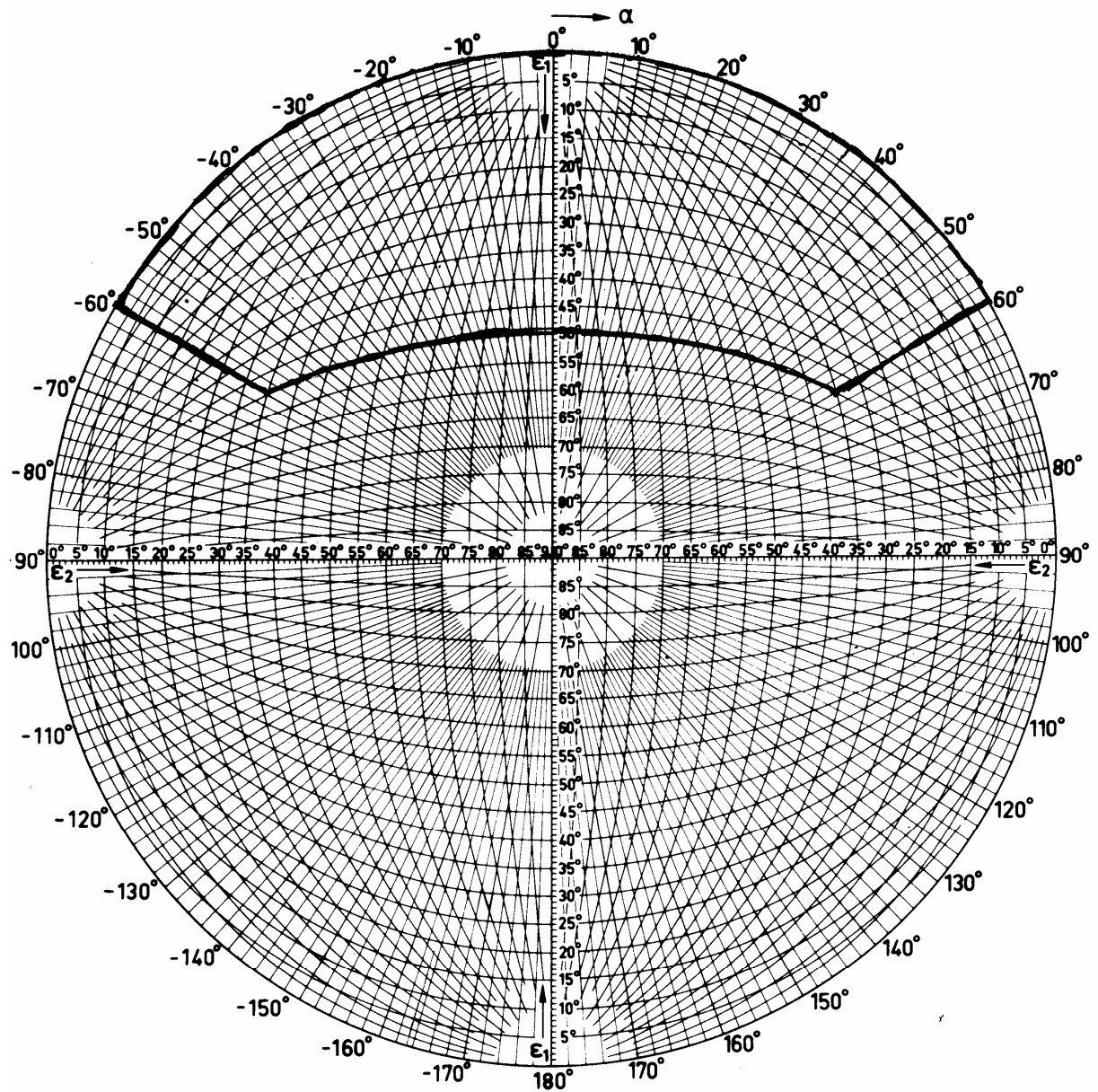


figuur 9. intensiteit van de zonnestraling op een verticaal vlak in de maand juli

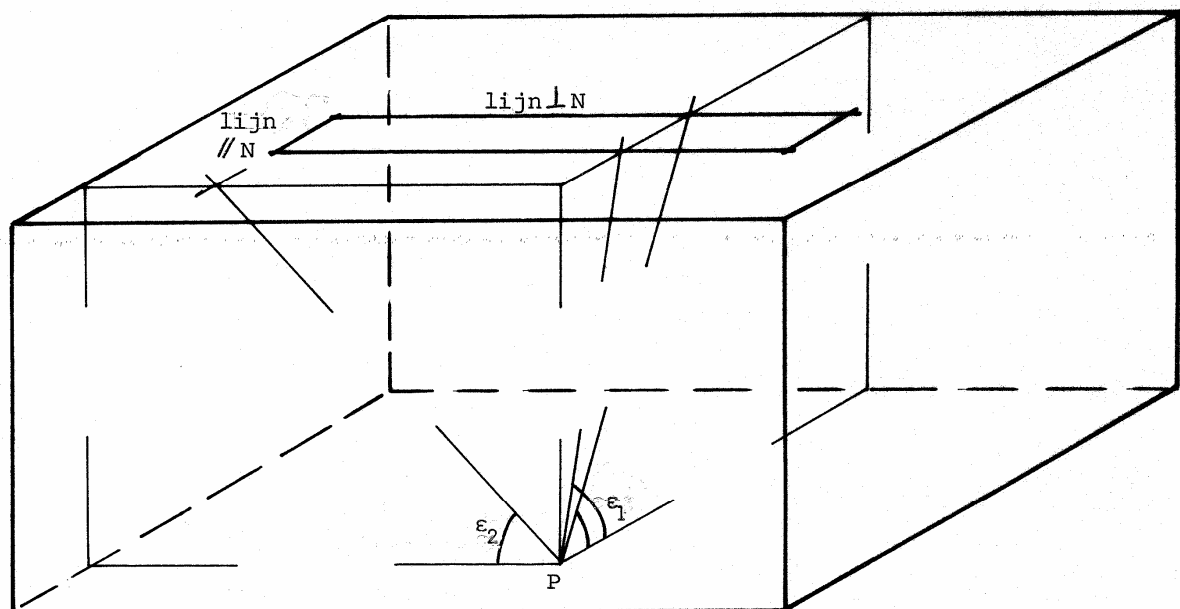
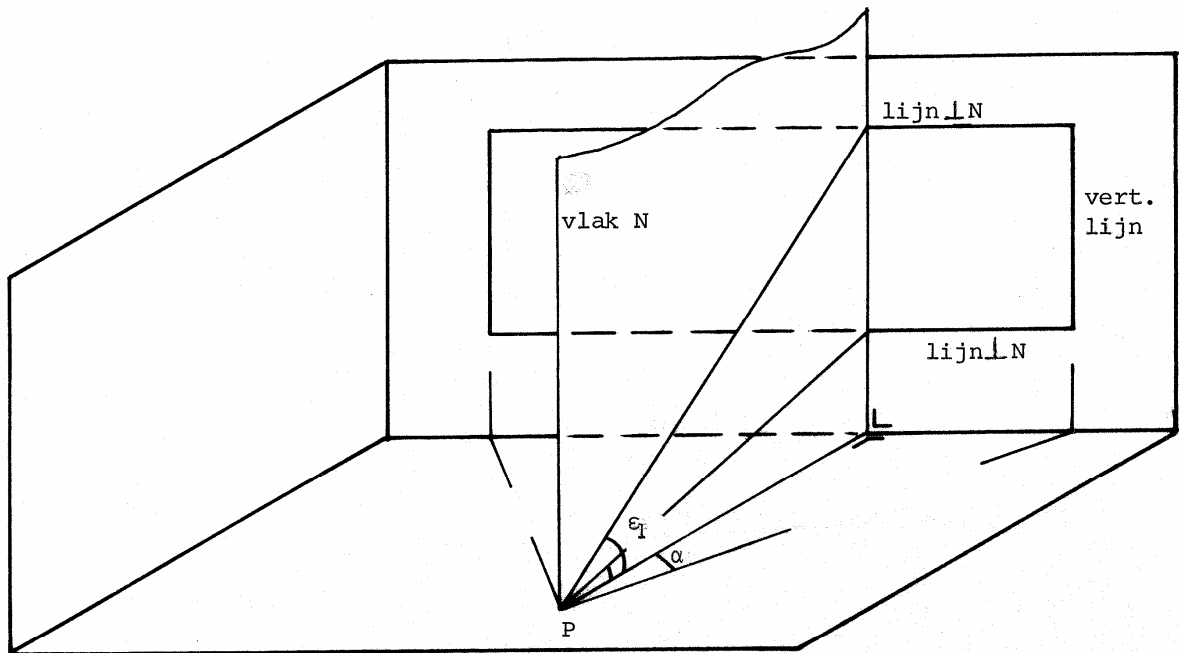
LITERATUUR

1. "Bezonning", ir. M. van der Voorden, Technische Hogeschool Delft, afdeling Civiele Techniek, Vakgroep Bouwfysica, collegedictaat gc49.I, maart 1980

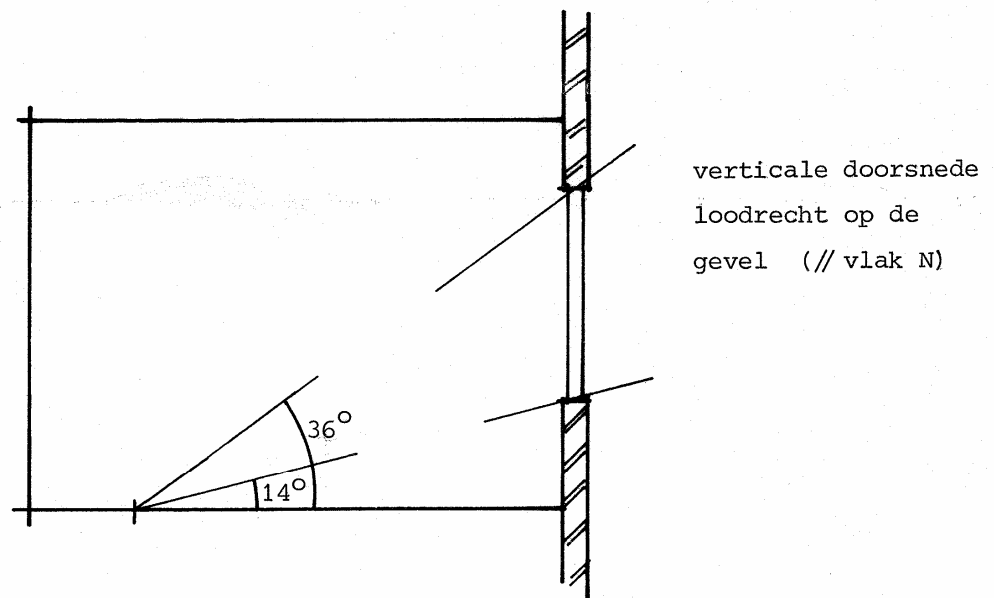
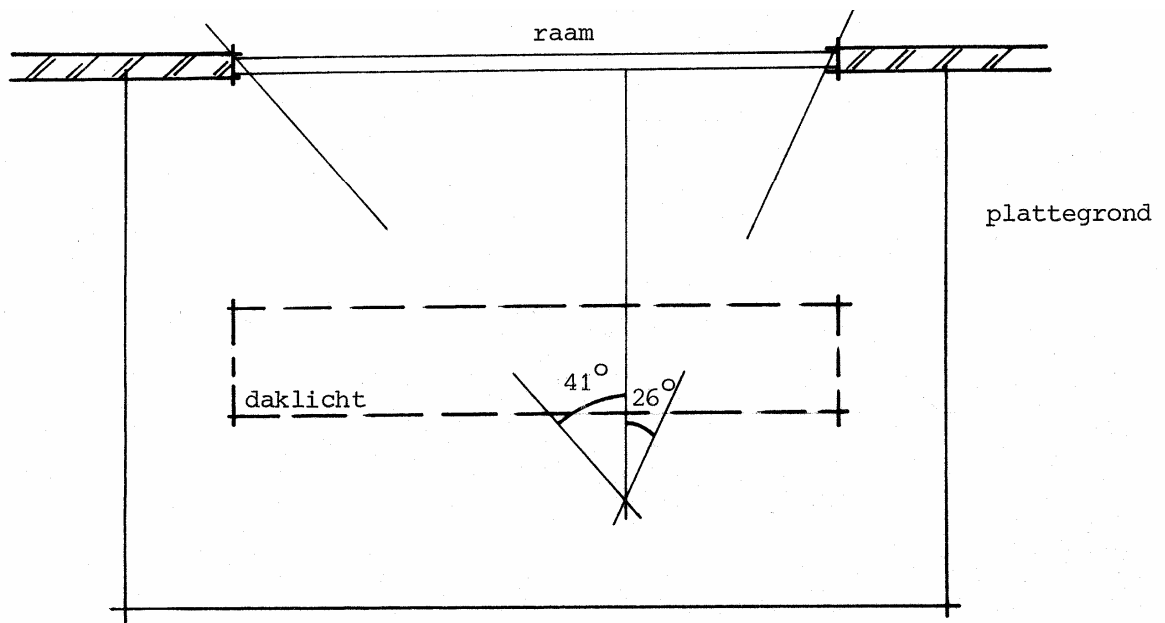
BIJLAGE 1.: GEBRUIK VAN HET RADIAALDIAGRAM VOOR HET INTEKENEN VAN DAGLICHTOPENINGEN



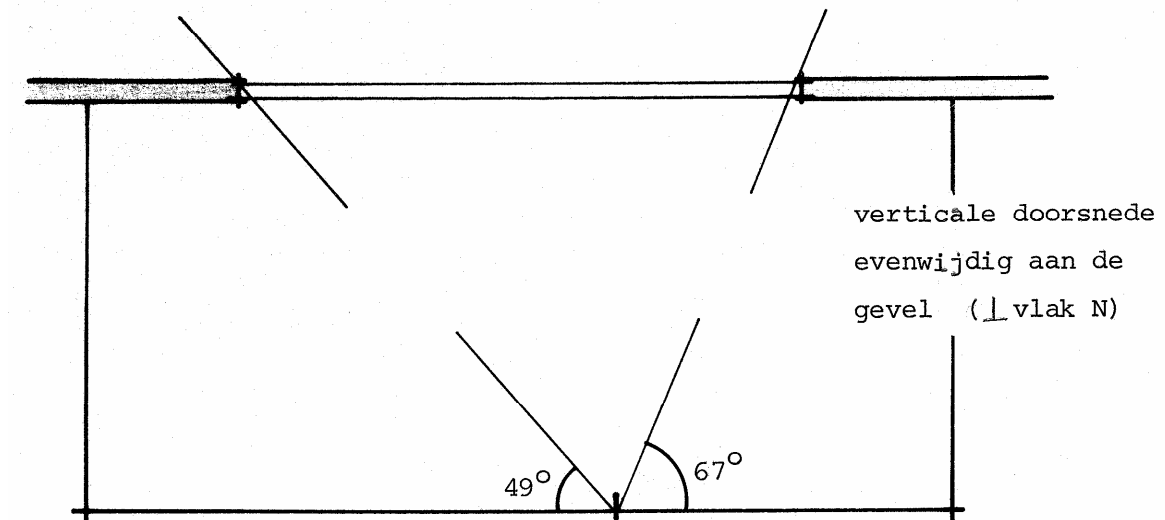
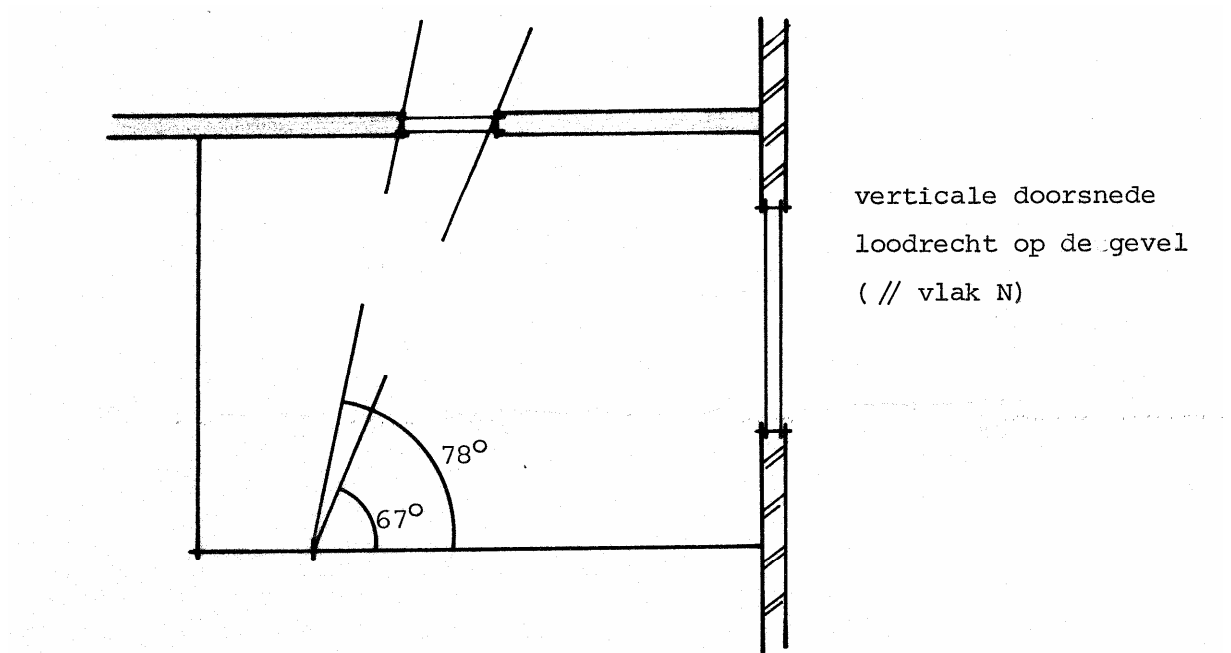
radiaaldiagram voor projectie hemelkoepel; ingetekend is het voorbeeld van de figuren 7 en 8



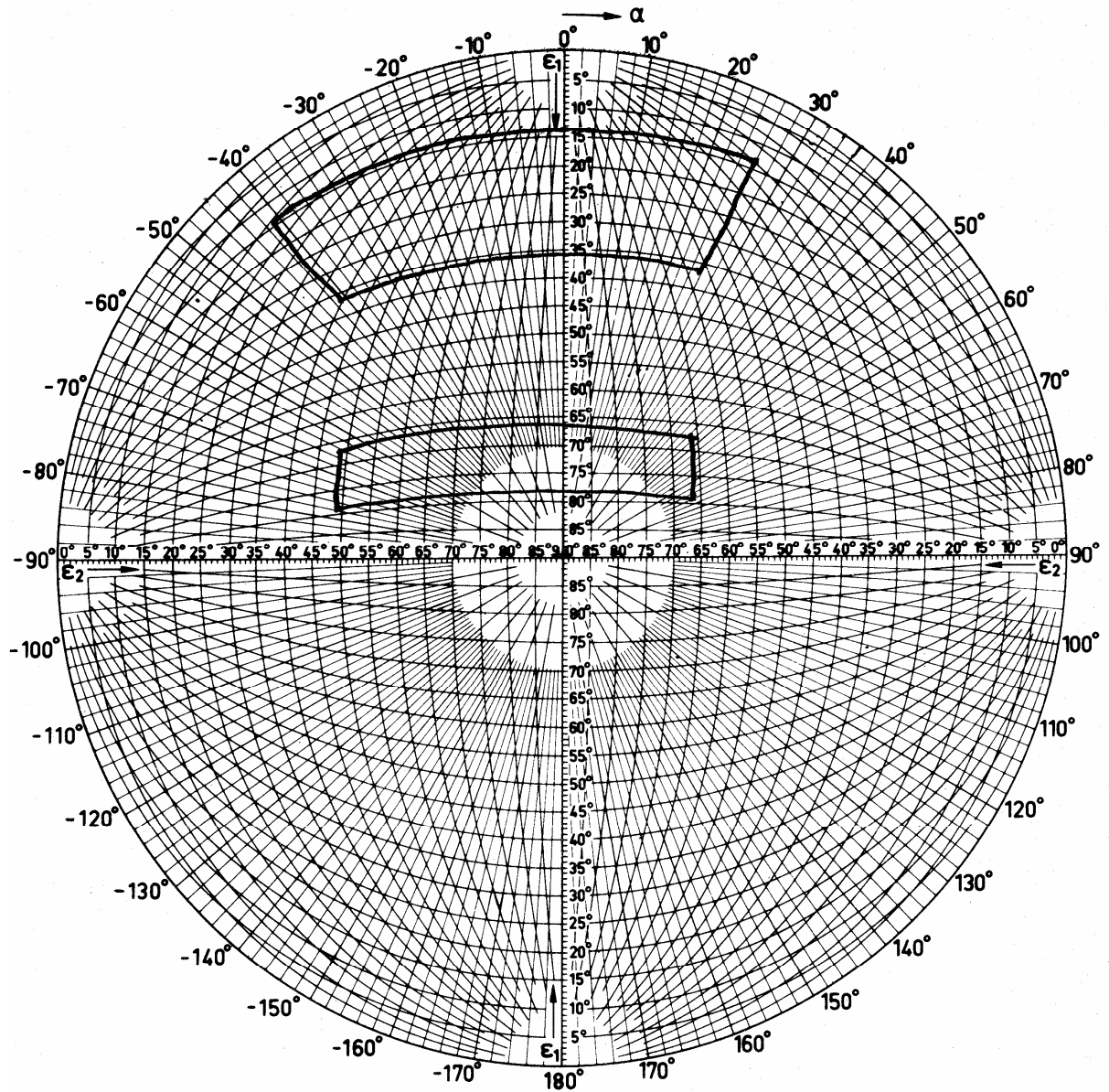
bepaling azimuth (α) en elevatie (ϵ) van de begrenzingen van vlakken voor projectie in een radiaaldiagram



bepaling azimuth en elevatie van het raam van het voorbeeld



bepaling elevaties van de begrenzingen van het daklicht van het voorbeeld



raam en daklicht uit het voorbeeldvertrek van deze bijlage, ingetekend in radiaaldiagram

Zonwering

Kennisbank Bouwfysica
Auteur: ir. A.C. van der Linden

1 Inleiding

In deze module zullen de eigenschappen van de diverse zonweringsystemen worden besproken. Ter inleiding hierop komen eerst de invloed van de oriëntatie, beschaduwing en het broeikaseffect aan de orde.

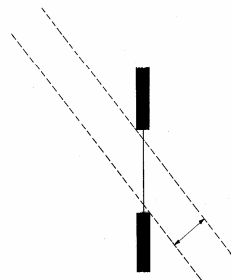
2 Oriëntatie

De intensiteit van de zonnestraling wordt niet alleen bepaald door de direct zonlicht, maar ook door diffuus zonlicht. Dit is zonlicht (daglicht) dat door de atmosfeer wordt verstrooid en via de grond wordt gereflecteerd.

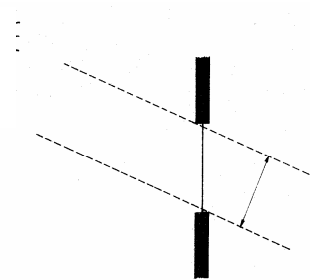
In tegenstelling tot de verwachting is in de zomermaanden (juli) de intensiteit op de west- en oostgevel hoger dan op de zuidgevel. Dit komt doordat de zon - wanneer hij midden op de dag de zuidgevel beschijnt - veel hoger staat, dan wanneer hij op de oost- of westgevel valt (begin en eind van de dag) (zie figuur 1). De intensiteit loodrecht op de richting van de zonnestralen is in beide gevallen vrijwel even groot. Echter, bij hoge zonnestanden is de effectieve opening voor het doorlaten van de directe straling relatief klein. De intensiteit van de zonnestraling berekend per m^2 geveloppervlak (verticale vlak) is dan relatief laag.

Anders wordt het wanneer men de maand september bekijkt. Dan is de zonnestand - ook voor een zuidgevel - veel lager. De zuidgevel ontvangt daardoor een hogere stralingsintensiteit dan in de zomermaanden (zie figuur 2). De westgevel krijgt in dit geval minder straling omdat de zonnestand voor deze gevel heel erg laag is en de intensiteit van de straling nu door de atmosfeer sterk wordt verminderd.

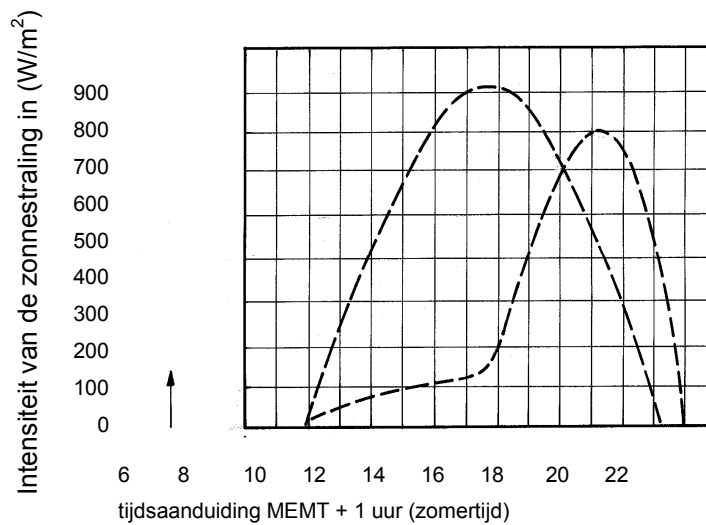
oost en westgevel
lage zonnestand
effectieve glasopening groter



zuidgevel
hoge zonnestand
effectieve glasopening klein



figuur 1. zonshoogte en schijnbaar oppervlak van een raamopening



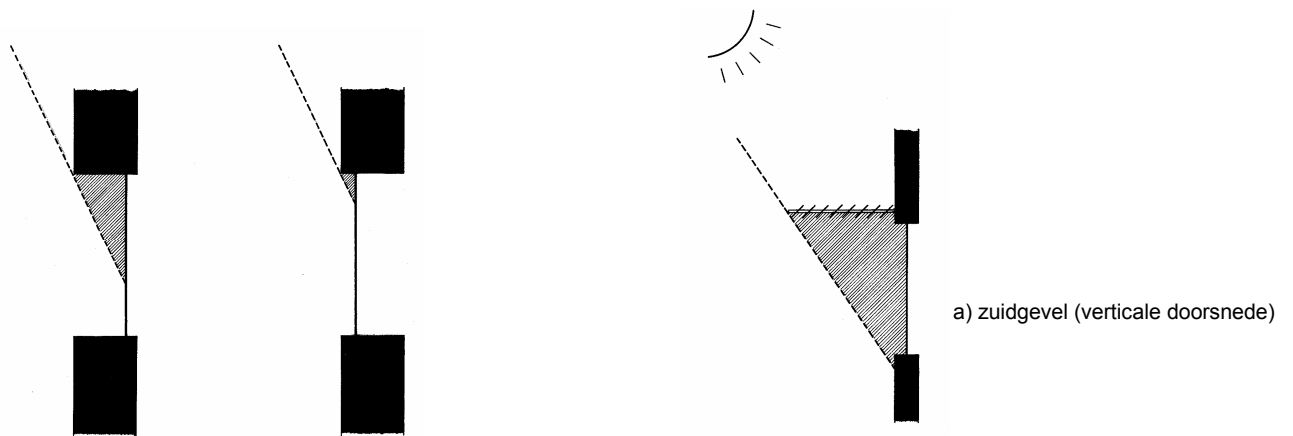
figuur 2. intensiteit totale zonnestraling op zuid- en westgevel in de maand september

Oriëntaties op het westen of zuidwesten geven de meeste problemen. De zonnestraling bereikt de hoge waarden juist op de uren dat ook de buitentemperatuur het hoogst is (in de middag). Overigens moet worden gezegd dat door het invoeren van de zomertijd de situatie gunstiger is geworden dan voorheen. De top van de zonbestraling en daarmee de top van de binnentemperatuur (die wat later optreedt) valt nu (als men over kantoorgebouwen praat) ruim buiten de werktijd. Dit houdt wel in, dat een zonwering ook buiten de kantoor tijd gesloten moet blijven om opwarming van het gebouw te voorkomen. Bij een buitenzonwering wordt automatische bediening dan feitelijk een noodzaak, omdat bij sterke wind de zonwering moet worden opgetrokken om beschadiging te voorkomen. Hetzelfde geldt voor oost- en zuidoostgevels waar de zonwering voor aanvang van de kantoor tijd neergelaten moet zijn om te verhinderen, dat men 's morgens in een al flink opgewarmd vertrek binnenkomt. Door het invoeren van de zomertijd is de "opwarmperiode" overigens wel een uur korter geworden.

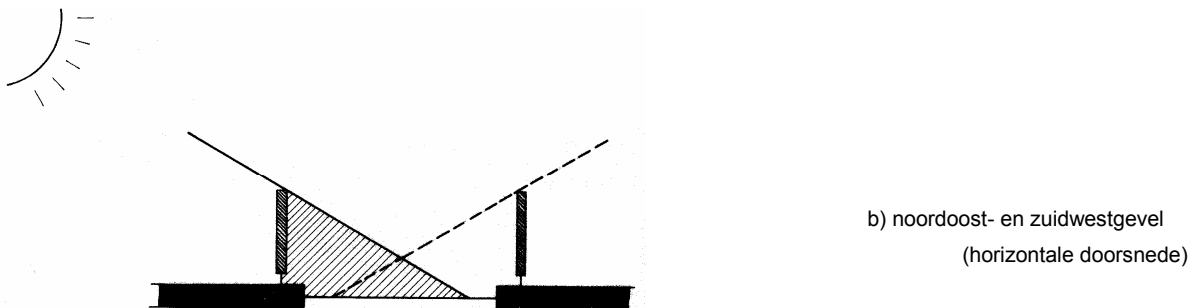
3 Beschaduwning, luifels en dergelijke

Het is duidelijk dat bij het bepalen van de zonbelasting op een gevel ook beschaduwning door andere gebouwen of objecten een rol speelt. Wanneer een gedeelte van een gebouw door de schaduw van een tegenoverliggend gebouw nooit of nauwelijks door de zon wordt beschenen, is een zonwering derhalve niet noodzakelijk.

Ook het ontwerp van de gevel vormt een belangrijke factor bij de zontoetreding. Bij diepliggende ramen ligt een gedeelte van het glas langdurig in de schaduw. Echter, wanneer het glas dicht bij het buitenvlak van de gevel ligt, wordt altijd een groot deel door de zon beschenen (figuur 3).

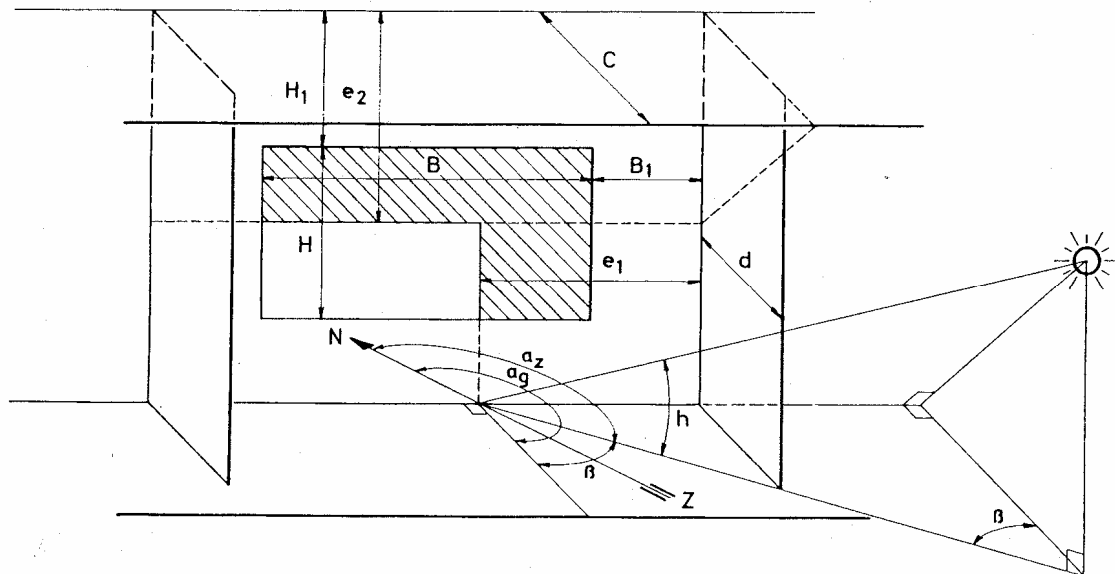


figuur 3. verschil in beschaduwing (zontoetreding) bij wel en niet diepliggende ramen



figuur 4. beschaduwing door luifels en verticale schermen

Ook luifels en verticale schermen kunnen een bijdrage leveren aan de zonwering. Echter, op een west- en oostgevel hoeft men van een luifel, door de lage zonnestanden, geen effect te verwachten. Een luifel is geschikt voor een zuidgevel, waarbij de zon tijdens de zomermaanden hoog aan de hemel staat. Op een noordoost- of een noordwestgevel kan men gebruik maken van verticale schermen omdat de zon hier nooit recht tegenover de gevel staat, maar altijd onder een hoek (figuur 4).



figuur 5. beschaduwning van een raam door uitspringende geveldelen

De mate waarin een raam door horizontale en/of verticale schermen of door de omringende muur bij diepliggende ramen wordt beschaduwd, kan als volgt worden bepaald (zie figuur 5) [1].

De verticale schaduwlengthe die volgt uit:

$$e = c \cdot \tan h' = c \cdot \frac{\tan h}{\cos \beta} \quad (1)$$

Hierin is:

- e verticale schaduwlengthe ten gevolge van een luifel of dergelijke in m
- c lengte waarover het schaduwgevende vlak uitsteekt buiten het beschaduwde vlak in m
- h' zonshoogte geprojecteerd in een vlak loodrecht op de gevel in graden
- h zonshoogte in graden
- β invalshoek van de zon op de gevel, geprojecteerd op het horizontale vlak in graden

De horizontale projectie van de invalshoek van de zon op de gevel wordt bepaald uit:

$$\beta = \alpha_g - \alpha_z \quad (2)$$

Hierin is:

- α_g azimut van de gevel in graden
- α_z azimut van de zon in graden

Als $\beta \geq 90^\circ$ of $\beta \leq -90^\circ$ valt er geen zon op de gevel.

De horizontale schaduwlengthe volgt uit:

$$e_1 = d_1 \cdot \tan \beta \quad \text{als } 0 \leq \beta < 90^\circ \quad (3a)$$

$$e_2 = -d_2 \cdot \tan \beta \quad \text{als } -90^\circ < \beta \leq 0 \quad (3b)$$

Hierin is:

e_1, e_2 horizontale schaduwlengthe als de zon van rechts, respectievelijk van links komt, van buiten gezien in m

d_1, d_2 lengte waarover het schaduwgevende vlak buiten het beschaduwde vlak uitsteekt in m

β horizontale invalshoek van de zon ten opzichte van de normaal op de gevels in graden

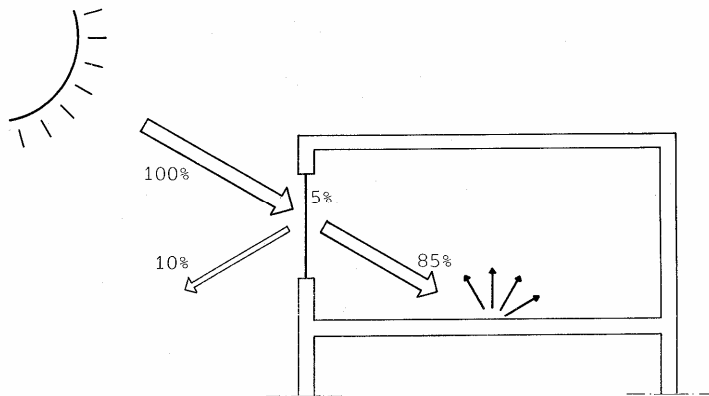
De horizontale schaduwlengthen kunnen overigens ook worden bepaald met behulp "schaduwdiagrammen".

Voor het bepalen van het gedeelte van het raam dat in de schaduw ligt, moeten de schaduwlengthen uiteraard worden verminderd met de afstand tot het schaduwgevende vlak boven en naast het raam H_1 en B_1 of B_2 .

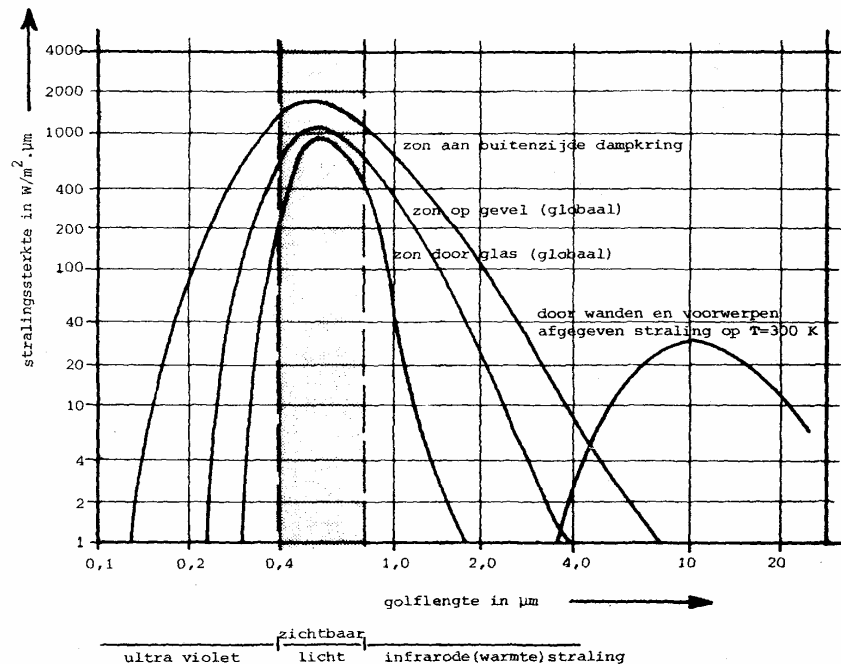
De waarden die voor de berekening van zonshoogte en azimuth nodig zijn, kunnen worden verkregen uit het zonnebaandigram.

4 Broeikaseffect

Normaal enkelglas laat ongeveer 85% van de zonnestraling door, circa 10% (afhankelijk van de hoek van inval) wordt gereflecteerd en ongeveer 5% wordt geabsorbeerd (waardoor het glas warmer wordt) (zie figuur 6).



figuur 6. aanduiding broeikaseffect



figuur 7. verdeling van de energie over de verschillende golflengten, voor zonnestraling en voor warmtestraling in een vertrek

In figuur 7 is aangegeven hoe de zonne-energie is verdeeld over de verschillende golflengten van het licht. Een groot deel van de zonne-energie komt in de vorm van zichtbaar licht op aarde terecht. Een ander deel als infrarode (warmte)straling en een klein deel als ultraviolet (bruin worden).

Wanneer de door het glas doorgelaten straling op wanden, vloeren en voorwerpen in het vertrek valt, worden deze hierdoor verwarmd. De temperatuur die deze vlakken krijgen, is mede afhankelijk van hun massa (warmteaccumulatie). Doordat ze een hogere temperatuur krijgen, gaan ze warmtestraling uitzenden naar de andere wanden en voorwerpen in het vertrek. Echter, het maximum van deze straling ligt bij golflengten van ca 10 μm . Deze golflengten worden door het glas zeer slecht doorgelaten. De warmte is als het ware in het vertrek gevangen. Bij dubbelglas wordt dit effect nog sterker.

5 Zonwerende constructies

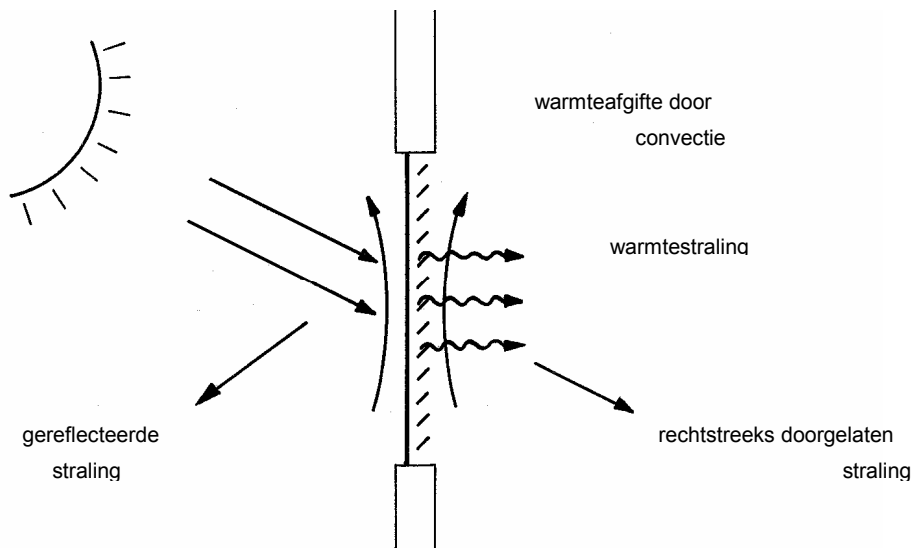
De kwaliteit van een zonwerende constructie kan worden aangegeven met de absolute zontoetredingsfactor (ZTA). Deze factor geeft aan welk gedeelte van de opvallende zonne-energie in het vertrek terecht komt. $ZTA = 0,45$ wil dus zeggen dat 45% van de opvallende zonne-energie in het vertrek komt en 55% buiten blijft.

Een andere factor die moet worden bekeken, is de convectiefactor (CF). Wat die inhoudt, wordt in het hierna volgende stuk over binnenzonwering uitgelegd.

De factor LTA geeft aan hoeveel van de opvallende hoeveelheid zichtbaar licht wordt doorgelaten. Een zo groot mogelijke waarde voor de verhouding LTA/ZTA is gunstig voor de lichttoetreding in het vertrek bij een bepaalde, na te streven warmtewering.

5.1 Binnenzonwering

Door de binnenzonwering wordt een groot deel van de zonnestraling gereflecteerd. Echter, een ander belangrijk deel wordt door de zonwering geabsorbeerd (figuur 8).



figuur 8. belangrijkste energiestromen bij een binnenzonwering

De zonwering heeft slechts een geringe massa, stijgt daardoor snel in temperatuur en gaat warmtestraling uitzenden. Echter, het grootste deel van de warmte wordt convectief aan de lucht afgegeven, als gevolg waarvan de luchttemperatuur in het vertrek snel stijgt, soms zelfs sneller dan in het geval dat de zonwering niet aanwezig zou zijn geweest.

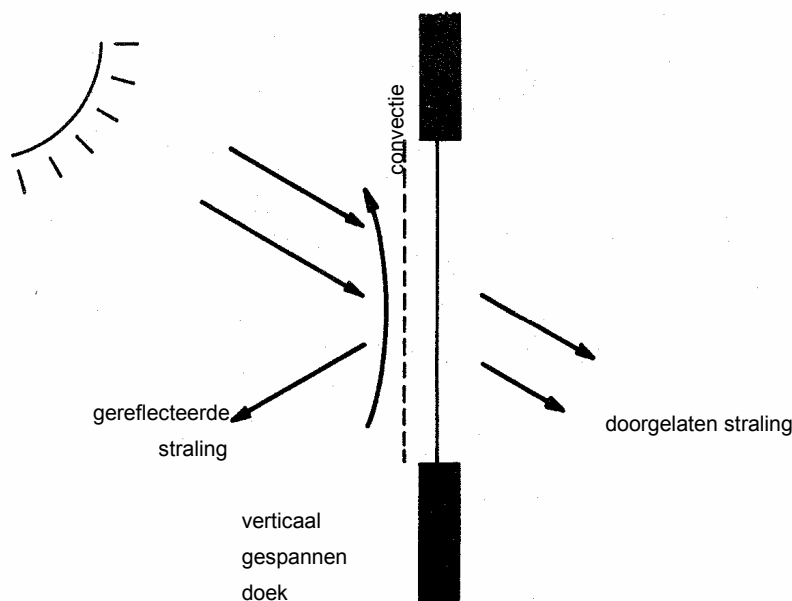
Het deel van de warmte dat als straling binnenkomt, wordt pas met een grote vertraging aan de vertreklucht meegedeeld. Eerst moeten namelijk de omwandelingen van het vertrek en de in het vertrek aanwezige voorwerpen door de straling worden opgewarmd, voordat deze de warmte weer door convectie aan de vertreklucht kunnen afstaan.

Een convectiefactor $CF = 0,50$ betekent dat van de totale hoeveelheid binnenkomende zonnewarmte onmiddellijk 50% door convectie aan de vertreklucht wordt afgegeven. Een hoge convectiefactor is ongunstig met betrekking tot het handhaven van een redelijk verloop van de vertrekluchttemperatuur.

Met binnenzonwering worden zelden betere zontoetredingsfactoren bereikt dan $ZTA = 0,40$ (zie ook tabel 1). Een fijnmazige vitrage heeft overigens ongeveer hetzelfde effect als een lamellen zonwering. Naast lamellen zonwering bestaan ook zonreflecterende gordijnen, weefsels die voorzien zijn van een reflecterend laagje (aluminium). Hierbij is de convectiefactor (CF) vaak lager dan bij lamellenzonwering, zodat de vertrekluchttemperatuur veel minder snel stijgt.

5.2 Buitenzonwering

Bij buitenzonwering wordt een groot deel van de zonnestralen weer gereflecteerd. Een ander (eveneens groot) deel wordt door de zonwering geabsorbeerd, maar door convectie (luchtbeweging, wind) weer aan de buitenlucht afgegeven (figuur 9).



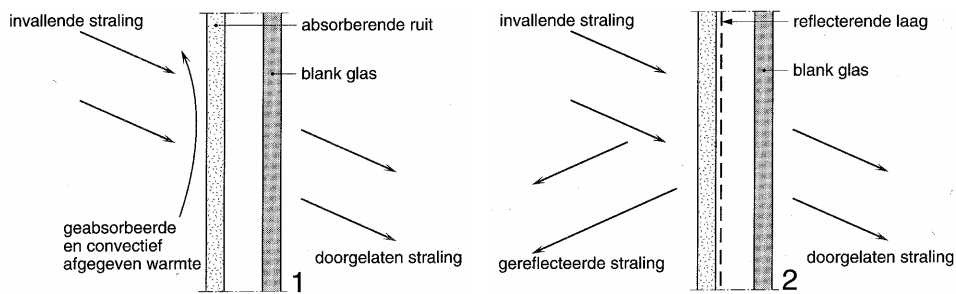
figuur 9. de belangrijkste energiestromen bij buitenzonwering

De zonnewarmte die binnenkomt (10 à 20%) bestaat voor het grootste gedeelte uit rechtstreeks doorgelaten straling, slechts een klein deel komt binnen door convectie en warmtestraling. Alleen met buitenzonwering kunnen zontoetredingsfactoren in de orde van $ZTA = 0,15$ à $0,20$ worden bereikt. Naast lamellenzonwering bestaan nog verticaal gespannen doeken, uitvalschermen, markiezen, rolluiken en vele bijzondere vormen.

In alle gevallen moet men oppassen voor het door (geopende) ramen binnenstromen van aan de zonwering opgewarmde lucht.

5.3 Zonwerend glas

Er bestaan twee hoofdtypen zonwerend glas: absorberend en reflecterend. Meestal worden deze ruiten toegepast in combinatie met een blanke ruit aan de binnenzijde (als prefab dubbelglas) (zie figuur 10). In deze figuur zijn - evenals in de figuren 7, 8 en 9 - slechts de belangrijkste energiestromen met pijlen aangegeven. Bij absorberend glas wordt door een toevoeging (meestal metaaloxiden) een ruit gemaakt die een bijzonder groot deel van de zonnestraling absorbeert. Daardoor wordt de ruit erg warm. Deze warmte wordt door convectie (luchtstroming, wind) afgegeven aan de buitenlucht en voor een klein gedeelte aan de binnenlucht (door straling en convectie).



figuur 10. de belangrijkste energiestromen bij zonabsorberend en zonreflecterend dubbelglas

Een absorberende ruit is donker van kleur. Ook de lichtdoorlating is derhalve gering. De absolute lichttoetredingsfactor (LTA) is meestal nog kleiner dan de zontoetredingsfactor. Bij een warmteabsorberende ruit met een ZTA = 0,45 (wat nog niet eens zo best is) hoort een lichttoetredingsfactor van LTA = 0,35 à 0,40. Dit betekent dat slechts 35 - 40% van het zichtbare licht wordt doorgelaten.

Bij reflecterend glas wordt de zonnestraling voor een heel groot gedeelte rechtstreeks gereflecteerd. Slechts een klein deel wordt geabsorbeerd. De zonnewarmte die binnenkomt, bestaat voornamelijk uit rechtstreeks doorgelaten straling. De reflecterende lagen bestaan meestal uit een opgedampte laag metaal, metaaloxide of een coating. Deze lagen zijn doorgaans vrij kwetsbaar en om beschadiging te voorkomen, worden ze derhalve aangebracht aan de binnenzijde van de buitenruit. Er komen ook reflecterende lagen voor die wel sterk zijn (ingebrand keramisch materiaal enz.) zodat de laag ook aan de buitenzijde kan zijn aangebracht. Met de reflecterende glassoorten zijn toetredingsfactoren tot ZTA = 0,20 mogelijk. De lichttoetredingsfactor is meestal groter dan de zontoetredingsfactor. Bij een ZTA = 0,30 kan de lichttoetredingsfactor nu wel LTA = 0,60 zijn.

Reflecterend glas kan het gebouw een sterk spiegelend karakter geven. Absorberend glas veroorzaakt slechts een meer donkere aanblik van de ruimten. Ook wordt bij beide soorten een bepaald kleureffect waargenomen. Bij het doorkijken van binnen naar buiten treedt meestal een kleurverschuiving op.

Bij veel reflecterende glassoorten heeft de reflectielaag tevens een invloed op de warmteoverdracht door straling. Hierdoor kan de warmtedoorgangscoefficiënt soms aanmerkelijk worden verminderd, tot $U = \text{ca } 1,5 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ toe (voor dubbelglas). Dit is gunstig voor het beperken van warmteverlies door transmissie in de winter. Echter, zomers kan de lagere transmissie tot hogere vertrektemperaturen leiden.

In tabel 1 is voor een aantal zonweringsystemen een indicatie gegeven van de zontoetredingsfactor, de convectiefactor en de lichttoetredingsfactor. Tevens wordt de k-waarde van het systeem gegeven.

raamsysteem	ZTA	CF	LTA	U (W/m ² K)
enkelglas (6 mm), onafgeschermd	0.80	0.01	0.84	5.7
enkelglas, binnenjaloezieën (lichte kleur)	0.45	0.50	0.15	5.4
enkelglas, buitenjaloezieën	0.15	0.05	0.12	4.9
dubbelglas, onafgeschermd	0.70	0.04	0.74	3.2
dubbelglas, binnenjaloezieën (lichte kleur)	0.47	0.55	0.12	3.1
dubbelglas, binnenweefsel – licht	0.50	0.30	0.30	3.0
met opgedampte metaallaag – zwaar	0.30	0.50	0.05	2.9
dubbelglas, buitenjaloezieën	0.12	0.05	0.10	2.8
dubbelglas verticaal gespannen doek - licht	0.20	0.10	0.15	2.8
- zwaar	0.13	0.15	0.05	2.8
dubbelglas, uitvalscherf (niet aaneengesloten)	0.15	0.15	0.14	2.8
dubbelglas, markies	0.11	0.18	0.05	2.8
zonreflecterend dubbelglas - licht	0.45	0.02	0.65	*
- zwaar	0.25	0.05	0.35	*
zonabsorberend dubbelglas - licht	0.45	0.06	0.35	3.2
- zwaar	0.25	0.10	0.10	3.2
dubbelglas met spectraal selectieve coating en aangepaste spouwvulling (warmte-isolatie)	0.65	0.05	0.55	1.6
drievoudig glas	0.57	0.07	0.50	2.2

tabel 1. richtwaarden voor de zonweringsgegevens, de lichttoetreding en de k-waarde voor verschillende raamsystemen, zie ook [2], [3] en [4].

* bij ruiten waarbij de reflectie wordt verkregen door een opgedampte metaallaag aan de binnenzijde van de buitenruit, wordt ook de warmteoverdracht in de spouw beperkt en kan de U-waarde dalen tot 1,8 á 2,0 W/m²K en zelfs tot 1,4 á 1,6 W/m²K als ook nog een andere spouwvulling dan lucht wordt toegepast.

N.B. De in de tabel gegeven waarden moeten worden beschouwd als richtwaarden; specifieke producten kunnen sterk afwijkende eigenschappen hebben. Verder is bij veel constructies (glasvlakken) de hoek van inval van de directe zonnestraling van invloed op de reflectie aan het buitenoppervlak. In deze tabel is uitgegaan van een invalshoek van 45°. Bij jaloezieën is de zonwering daarnaast nog sterk afhankelijk van de lamelstand. In deze tabel is uitgegaan van 45°, dus loodrecht op de zonnestraling.

5.4 Zonwerende folies

Op dezelfde manier als hiervoor bij zonwerend glas beschreven kan men een zekere mate van zonwering bereiken door een folie (met daarin een zonreflecterende laag) op een ruit aan te brengen.

Meestal wordt voor de reflectielaag in de folies een metaal met een betrekkelijk laag smeltpunt, zoals aluminium gebruikt. Dit wordt in een vacuümkamer verdampt, waarbij het neerslaat op de folie. Om te voorkomen dat het aluminiumlaagje corrodeert, wordt hier overheen nog een tweede laagje kunststof gelegd. Aan dit tweede laagje voegt men vaak wat pigmenten toe om de kleur van de folie, in doorzicht, wat aan te passen. Mede hierdoor is de lichtdoorlaat (LTA) van de meeste folies minder gunstig dan bij een goede reflecterende glassoort met dezelfde zonweringseigenschappen (ZTA).

Een andere techniek voor het opbrengen van de reflectielaag is de zogenaamde "sputtering"-methode.

Hierbij maakt men metaalatomen los uit een monster door een bombardement met positieve ionen, opgewekt met behulp van een hoog spanningsveld. Dunnere lagen kunnen zo gemaakt worden, waarvan er diverse lagen over elkaar heen kunnen worden gemaakt.

soort folie	soort glas	ZTA	CF	LTA	U (W/m ² K)
matig zonwerend + isolerend	e.g.	0,30	0,15	0,25	3,7
	d.g.	0,40	0,25	0,20	2,5
sterk zonwerend + isolerend	e.g.	0,15	0,15	0,10	3,7
	d.g.	0,30	0,20	0,08	2,5
sterk isolerend + zonwerend	e.g.	0,30	0,20	0,20	2,9
	d.g.	0,35	0,30	folies	2,3
sterk isolerend	e.g.	0,40	0,25	0,35	2,9
	d.g.	0,35	0,30	0,30	2,3
absorberende folie/coating	e.g.	0,55	0,25	0,25	5,7

tabel 2. globale indicatie van de zonweringeigenschappen, de lichttoetreding en de k-waarde van enkele folies, aangebracht op enkel- en dubbelglas

NB: De eerste vier folies ontleen hun zonwerende en isolerende eigenschappen aan een reflectielaag (opgedampt metaal); in alle gevallen is er van uitgegaan dat de folie aan de binnenzijde van de ruit is aangebracht.

Doordat men onafhankelijk is van het smeltpunt, kan men ook met andere metalen dan aluminium werken, en door het kiezen van verschillende materialen ook kleuren mengen. Deze methode levert reflectielagen op die zeer gelijkmatig van dikte zijn. Mede doordat in de meeste gevallen de afdeklaag kan vervallen, is met deze folies een hogere lichtdoorlaat te bereiken bij een zelfde zontoetredingsfactor. In tabel 2 zijn voor enkele folies waarden van ZTA, LTA en k gegeven.

6 Het bepalen van ZTA en CF

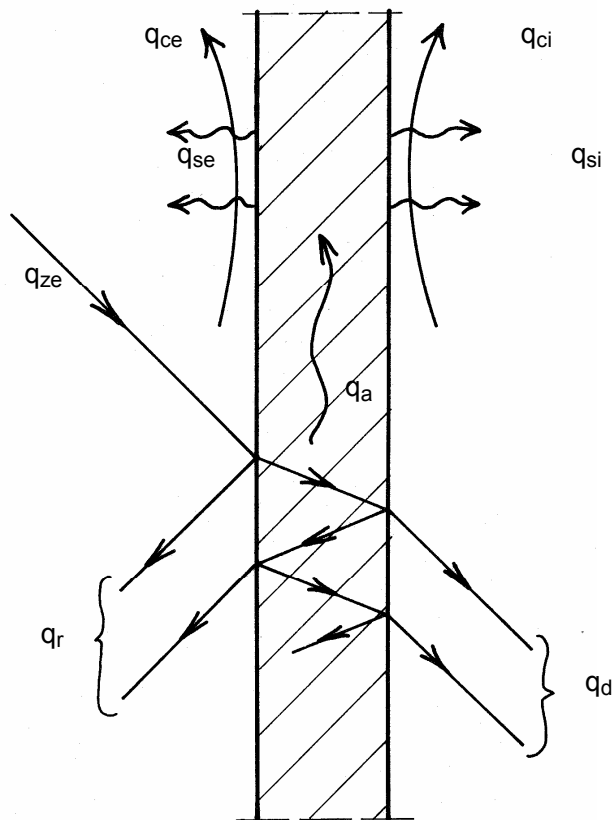
De factoren ZTA, CF en LTA zijn hiervoor al aan de orde geweest. Hier volgen nog eens de juiste definities.

De absolute zontoetredingsfactor ZTA van een raamsysteem volgt uit:

$$ZTA = \frac{\text{binnenkomende zonnewarmte}}{\text{opvallende zonne-energie}}$$

Daarbij wordt onder raamsysteem verstaan de totale constructie; glas en eventuele zonwering of gordijnen, etc.

De binnenkomende zonnewarmte bestaat enerzijds uit rechtstreeks doorgelaten straling en na eventuele interne reflecties doorgelaten straling, anderzijds uit warmte die aan het binnenoppervlak van de constructie door convector en straling aan het vertrek wordt afgegeven. Een en ander wordt nog eens verduidelijkt in figuur 11.



q_r	gereflecteerde straling
q_{ze}	opvallende zonne-energie
q_d	doorgelaten straling
q_a	geabsorbeerde straling
q_{ce}	naar buiten convectief afgegeven warmte
q_{se}	naar buiten afgegeven warmtestraling
q_{ci} en q_{si}	idem, naar binnen

figuur 11. optredende energiestromen bij een raamsysteem, ten gevolge van opvallende zonnestraling.
De absolute lichttoetredingsfactor is gedefinieerd analoog aan de absolute zontoetredingsfactor

Op basis van de in deze figuur getekende energiestromen kan de absolute zontoetredingsfactor als volgt worden omschreven.

$$ZTA = \frac{q_d + q_{si} + q_{ci}}{q_{ze}} \quad (4)$$

De convectiefactor CF geeft aan welk deel van de binnenkomende warmte rechtstreeks via convectie in de vertreklucht terechtkomt.

$$CF = \frac{\text{convectief binnenkomende warmte}}{\text{totaal binnenkomende warmte}} = \frac{q_{ci}}{q_d + q_{si} + q_{ci}} \quad (5)$$

Bij raamsystemen met een hoge convectiefactor zal de vertreklufttemperatuur bij zonbestraling sneller stijgen dan bij raamsystemen met een zelfde ZTA maar met een lage convectiefactor.

7 Het bepalen van de lichttoetredingsfactor

$$LTA = \frac{\text{binnenkomende lichthoeveelheid}}{\text{opvallende hoeveelheid zonlicht}}$$

Hierbij moet bij opvallende en doorgelaten stralingsenergie uiteraard rekening gehouden worden met de ooggevoeligheid.

$$LTA = \frac{\int D(\lambda) \cdot V(\lambda)}{\int E(\lambda) \cdot V(\lambda)} \quad (6)$$

Hierin is:

$D(\lambda)$	doorlatendheid van het raamsysteem bij de verschillende golflengten
$E(\lambda)$	sterkte van het zonlicht bij de verschillende golflengten (spectrale verdeling van de zonne-energie) in W/m^2
$V(\lambda)$	gevoeligheid van het menselijk oog voor de verschillende golflengten in W/m^2 .

Bovenstaande definities zijn duidelijk; echter, zonder nadere omschrijving van de gehanteerde randvoorwaarden heeft men niet veel aan een opgave van een bepaalde ZTA, CF en LTA van een raamsysteem. Er dient eenduidig te worden vastgelegd welke waarden zijn aangehouden voor:

- binnen- en buitentemperatuur;
- hoek van inval van de zonnestraling;
- overdrachtscoëfficiënten voor straling en convectie.

In 1983 is men gestart met een internationaal onderzoekprogramma, dat onder andere ten doel heeft eenduidige, algemeen geaccepteerde randvoorwaarden en methoden vast te stellen bij het bepalen van de thermische eigenschappen van raamsystemen.

In Nederland wordt bij de bepaling van ZTA en CF meestal uitgegaan van een gelijke binnen- en buitentemperatuur en een invalshoek van de zonnestraling van 45° .

$$T_i = T_e = 25^\circ \text{ C}$$

$$\theta = 45^\circ \text{ (hoek van inval, zonnestraling)}$$

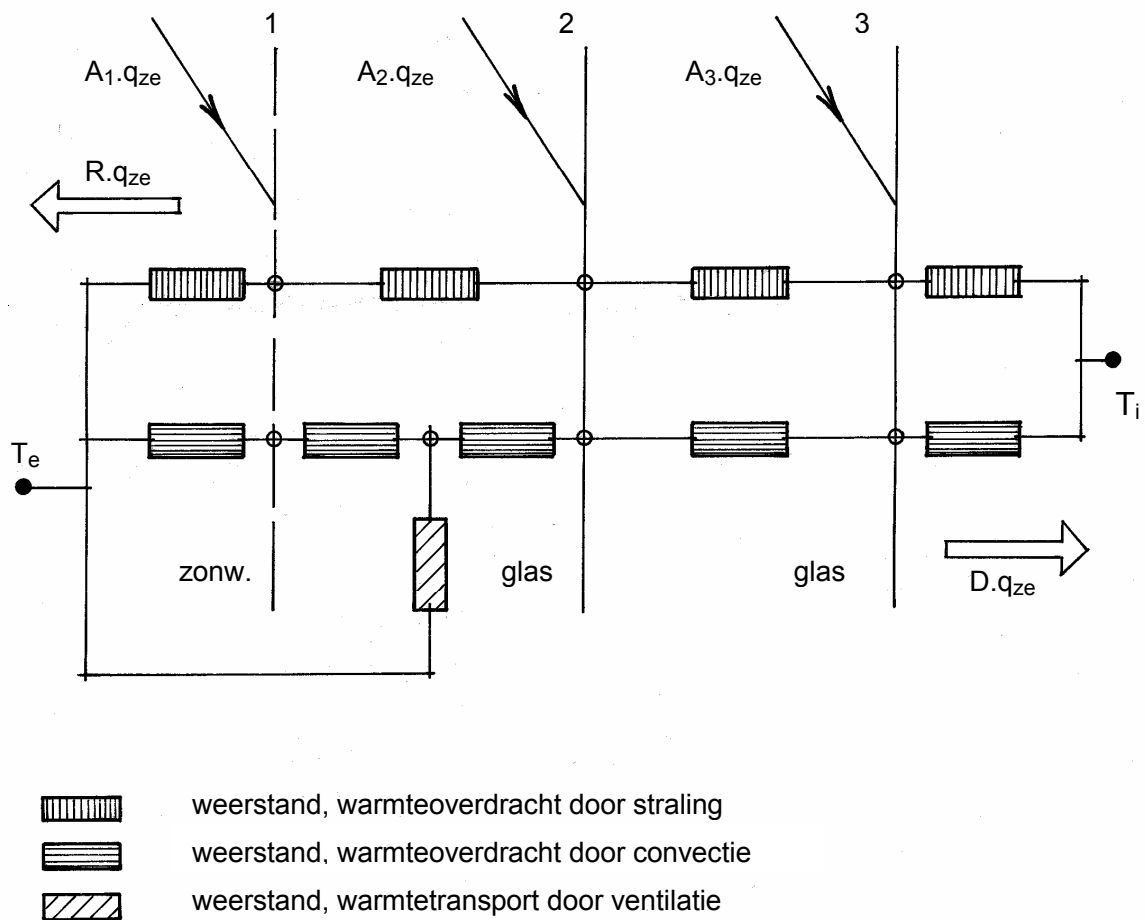
Daarbij worden voor de overgangscoëfficiënten vaak de volgende waarden gebruikt:

$\alpha_{se} = 9 \text{ W/m}^2\text{K}$	$\alpha_{si} = 5,1 \text{ W/m}^2\text{K}$
$\alpha_{ce} = 14 \text{ W/m}^2\text{K}$	$\alpha_{ci} = 2,9 \text{ W/m}^2\text{K}$

Soms moeten andere waarden worden gebruikt als het om oppervlakken met een lagere emissiecoëfficiënt dan normaal gaat of als de luchtbeweging door de vorm of hoedanigheid van het oppervlak anders is dan bij een normaal, vlak, glad oppervlak.

Ook de overdrachtscoëfficiënten in spouwen zijn van veel factoren afhankelijk.

Als regel worden ZTA en CF bepaald via een berekening. Daarbij worden de eigenschappen van de verschillende lagen (reflectie, doorlating en absorptie) gebruikt zoals die uit metingen volgen. In ons land wordt dit onder andere door TNO Bouw gedaan voor door het bedrijfsleven vervaardigde producten. De gebruikte rekenmodellen zien er in principe uit zoals in figuur 12 is gegeven.



- A_1, A_2, A_3 in de diverse lagen (na meervoudige reflectie) geabsorbeerd gedeelte van de opvallende zonnestraling
 R gereflecteerd gedeelte van de zonnestraling
 D doorgelaten gedeelte van de zonnestraling

figuur 12. rekenmodel dubbelglas met buitenzonwering

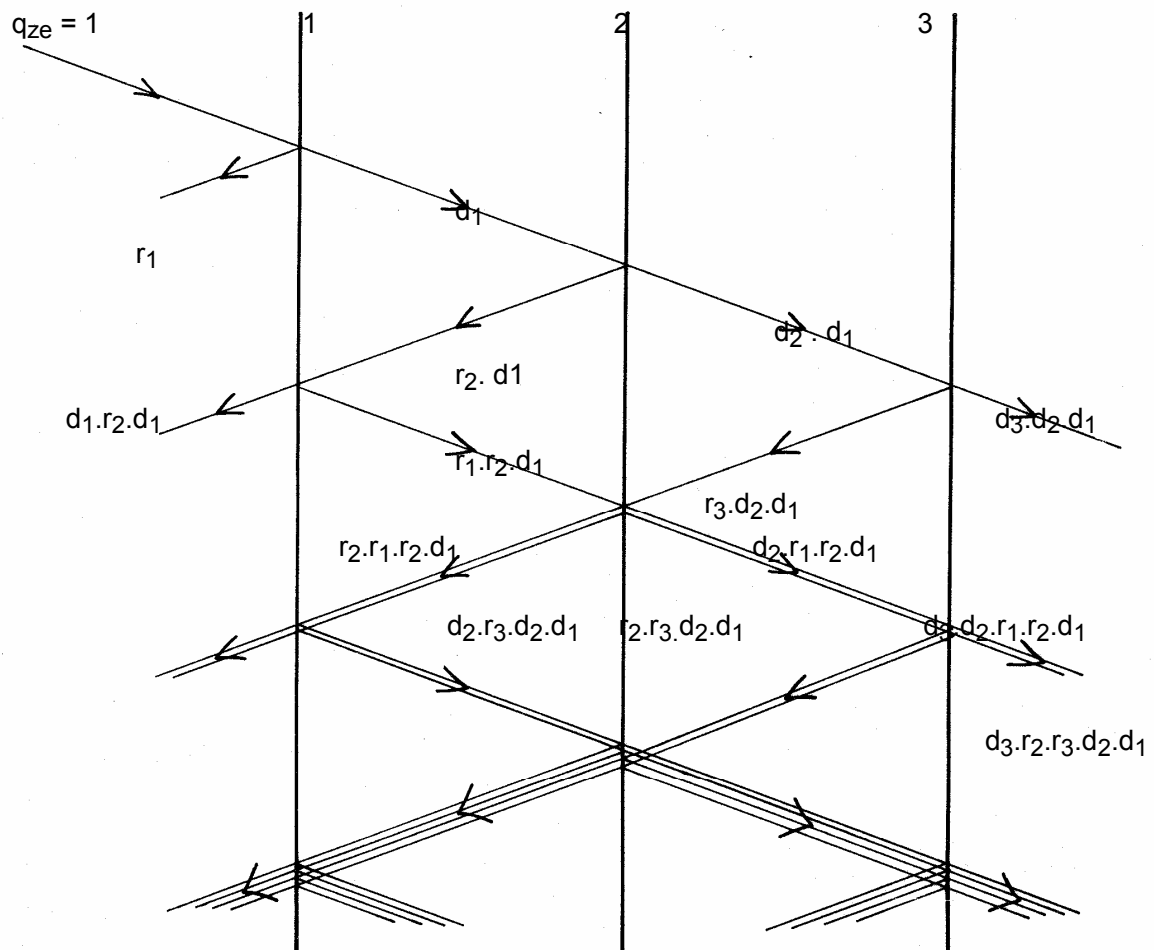
Het getekende model heeft vier knooppunten met onbekende temperaturen, die van de zonwering, de spouw tussen zonwering en glas en de twee ruiten. Voor ieder knooppunt wordt een energiebalans opgesteld. Uit de vier vergelijkingen kunnen de onbekende temperaturen

worden opgelost en daaruit onder andere de warmtestromen q_{si} en q_{ci} die te zamen met q_d ($D \cdot q_{ze}$) de binnenkomende zonnewarmte vormen.

Vooraf moeten nog de absorptiecoëfficiënten A_1 , A_2 en A_3 worden bepaald. Dit doet men door - uitgaande van reflectie, absorptie en doorlating van de verschillende lagen (r , a en d) - een aantal reflecties te volgen (figuur 13). Uit deze berekening volgt tevens de doorlaatcoëfficiënt van het gehele systeem. Hoewel het rekenwerk met behulp van een computerprogramma te natuurlijk gemakkelijker gaat, is het voor systemen met niet meer dan drie lagen ook best met de hand te doen. Als men in het voorbeeld van figuur 13 voor alle drie lagen de waarden $r = 0,1$, $a = 0,1$ en $d = 0,8$ invult, heeft men aan de daar uitgeschreven termen al genoeg als men de bijdragen kleiner dan 0,001 niet meer meeneemt. In dit voorbeeld vindt men dan $A_1 = 0,4$, $A_2 = 0,09$, $A_3 = 0,07$ en $D = 0,52$.

Het bepalen van de lichtdoorlaat LTA kan rechtstreeks via metingen gebeuren omdat men hierbij alleen in de uiteindelijke (na eventuele reflecties) doorgelaten hoeveelheid licht is geïnteresseerd en niet in wat er onderweg op een bepaalde plaats achter blijft.

$$D = d_3 \cdot d_2 \cdot d_1 + d_3 \cdot d_2 \cdot r_1 \cdot r_2 \cdot d_1 + d_3 \cdot r_2 \cdot r_3 \cdot d_2 + \dots$$



$$A_1 = a_1 + a_1 \cdot r_2 \cdot d_1 + A_2 = a_2 \cdot d_1 + A_3 = a_3 \cdot d_2 \cdot d_1 +$$

$$a_1 \cdot r_2 \cdot r_1 \cdot r_2 \cdot d_1 + a_2 \cdot r_1 \cdot r_2 \cdot d_1 + a_3 \cdot d_2 \cdot r_1 \cdot r_2 \cdot d_1 +$$

$$a_1 \cdot d_2 \cdot r_3 \cdot d_2 \cdot d_1 + a_2 \cdot r_3 \cdot d_2 \cdot d_1 + a_3 \cdot r_2 \cdot r_3 \cdot d_2 \cdot d_1 +$$

figuur 13. systemen van meervoudige reflecties, dat de absorptiecoëfficiënten van de verschillende lagen bepaalt en de doorlaatcoëfficiënt van de gehele constructie

LITERATUUR

1. "Koellastberekening voor gebouwen", NEN 5067, Nederlands Normalisatie Instituut, Delft, 1984.
2. "Zonwering bij gebouwen", Stichting Bouwresearch, publicatie 42, Rotterdam.
3. "Zontoetredingsfactoren", ISSO, publicatie 2, Rotterdam, augustus 1975.
4. "Het weren en benutten van zonnewarmte door raamsystemen", Technisch Fysische Dienst TNO/TH, rapport 800.225, Delft, januari 1982.

Het benutten van zontoetreding door het raam

Kennisbank Bouwfysica
Auteur: ir. A.C. van der Linden

1 Inleiding

's Zomers kan zontoetreding door het raam tot hoge (soms zelfs te hoge) binnentemperaturen leiden als er niet een adequate vorm van zonwering wordt toegepast. Echter, gedurende het stookseizoen kan zontoetreding juist zeer welkom zijn als positieve post in de warmtebalans om het gebruik van energie, bij voorbeeld in de vorm van aardgas, om ruimteverwarming te verminderen. Hetzelfde geldt ook voor de onder andere door apparaten en mensen binnen vrijkomende warmte. De beste manier om de invloed van dit soort zaken te berekenen, is door middel van een dynamisch computermodel, waarin alle warmtestromen en de regeling van de installatie worden gesimuleerd. Echter, vooral tijdens de eerste fasen van een ontwerpproces is het nuttig als men kan beschikken over een "handmethode" die redelijk betrouwbare uitkomsten geeft. Ook is het - zeker bij wat kleinere projecten in verband met de kosten - niet altijd mogelijk om van computerberekeningen gebruik te maken. Daarnaast zijn de benodigde soort programma's ook nog niet voor iedereen even gemakkelijk beschikbaar.

2 Benutting zontoetreding

Een van de meest recente "handmethoden" is ontwikkeld door de TNO [1]. Men heeft daarbij op basis van vergelijking van stationaire berekeningen met berekeningen via een dynamisch computermodel factoren afgeleid waarmee de - op de hierna te noemen wijze bepaalde - stationaire warmtebehoefte kan worden gecorrigeerd.

De buitenklimaatgegevens zijn bewerkt voor een aantal perioden op de dag die zich kunnen onderscheiden in gebruik van zonwering en gordijnen of in te stellen binnentemperatuur. Hierbij heeft het gebruik van een woning model gestaan met de volgende invulling van de perioden:

1. Vroege ochtend, zonsopgang tot 07.00 uur, overige parameters bij voorbeeld:
 - thermostaat laag (15 °C);
 - gordijnen gesloten;
 - zonwering omhoog.
2. Dagperiode 07.00 uur of zonsopgang, tot zonsondergang (zie ook periode 4) zonnestraling op de gevel $q_{ze} > 300 \text{ W/m}^2$; overige parameters bij voorbeeld:
 - thermostaat hoog (20-21 °C);
 - gordijnen open;
 - zonwering neer.
3. Dagperiode 07.00 uur of zonsopgang, tot zonsondergang (zie ook periode 4) zonnestraling op de gevel $q_{ze} < 300 \text{ W/m}^2$; overige parameters bij voorbeeld:
 - thermostaat hoog (20-21 °C);
 - gordijnen open;
 - zonwering omhoog.
4. Ochtend/avondperiode, 07.00 uur tot zonsopgang, en zonsondergang tot 23.00 uur; overige parameters bij voorbeeld:

- thermostaat hoog (20-21 °C);
 - gordijnen dicht;
 - zonwering omhoog.
5. Nachtperiode, 23.00 uur tot 07.00 uur of zonsopgang, als deze eerder valt; overige parameters bij voorbeeld:
- thermostaat laag (15 °C);
 - gordijnen dicht;
 - zonwering omhoog.

	0° (noord)			30°			60°		
	h	$\bar{T}_e$	$\bar{q}_{ze}$	h	$\bar{T}_e$	$\bar{q}_{ze}$	h	$\bar{T}_e$	$\bar{q}_{ze}$
1	116	4,2	14,7	116	4,2	22,7	116	4,2	29,9
2	0	-	-	1	10,5	312,0	38	9,0	381,0
3	2067	6,4	61,3	2066	6,4	62,6	2029	6,4	67,1
	90° (oost)			120°			150°		
1	116	4,2	33,2	116	4,2	31,4	116	4,2	25,1
2	140	7,4	452,0	282	7,3	486,6	372	7,4	521,3
3	1927	6,3	69,0	1785	6,3	65,3	1695	6,2	67,1
	180° (zuid)			210°			240°		
1	116	4,2	16,4	116	4,2	14,7	116	4,2	14,7
2	430	8,2	515,6	376	8,6	506,7	284	9,7	477,5
3	1637	5,9	67,3	1691	5,9	70,5	1783	5,9	68,1
	270° (west)			300°			330°		
1	116	4,2	14,7	116	4,2	14,7	116	4,2	14,7
2	155	10,9	452,2	61	12,7	318,0	0	-	-
3	1912	6,0	76,2	2006	6,2	67,7	2067	6,4	64,0
	alle oriëntaties								
4	1325	4,3	-						
5	1580	3,2	-						

tabel 1. aantal uren (h), gemiddelde buitentemperatuur ($\bar{T}_e$ in °C) en gemiddelde opvallende zonnestraling ($\bar{q}_{ze}$ in W/m²) per periode, voor 12 oriëntaties afgeleid uit uurlijkse weergegevens van het KNMI voor het station De Bilt voor het (representatief geachte) stookseizoen 1 oktober 1964 t/m 30 april 1965

Het stookseizoen is 212 dagen = 5088 uren lang.

De gemiddelde buitentemperatuur over die periode is $\bar{T}_e = 4,8$ °C

Indeling van de verschillende dagperioden:

1. Vroege ochtend van zonsopgang tot 07.00 uur.
2. Dagperiode 07.00 uur of zonsopgang tot zonsondergang; zonnestraling op de gevel $q_{ze} > 300 \text{ W/m}^2$.
3. Idem; zonnestraling op de gevel $q_{ze} < 300 \text{ W/m}^2$.
4. Ochtend/avondperiode, 07.00 uur tot zonsopgang als deze later valt, en zonsondergang tot 23.00 uur.
5. Nachtperiode 23.00 uur tot 07.00 uur of zonsopgang, als deze voor 07.00 uur valt.

In tabel 1 zijn de uren binnen de verschillende perioden gegeven en de gemiddelde waarde van buitentemperatuur en zonnestraling over die uren.

In een voorbeeld wordt nu een en ander toegelicht. Hierbij moet men steeds bedenken dat maatregelen die 's winters in verband met energiebesparing nuttig zijn, zomers tot problemen kunnen leiden. Denk hierbij aan (te) veel glas op het zuiden met niet voldoende zonwering. Men zal altijd een evenwicht tussen winter- en zomersituatie moeten nastreven.

Voorbeeld:

Woonkamer met raam op het zuiden; 6 m^2 glas, 10 m^2 geïsoleerde spouwmuur.

Raamsysteem dubbelglas met binnenzonwering en thermisch isolerende luiken aan de buitenkant. Dagtemperatuur $T_{i,d} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, nachttemperatuur (ingesteld) $T_{i,n} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$. Gebruik van zonwering en luiken zoals hiervoor beschreven (waarbij men voor "gordijnen" nu "luiken" moet lezen).

In tabel 2 zijn de U-waarden en zontoetredingsfactoren gegeven.

	U in W/m^2	ZTA
dubbelglas onafgeschermd	3,2	0,7
dubbelglas met binnenzonwering	3,0	0,5
dubbelglas met isolerende luiken	0,6	0,5
geïsoleerde spouwmuur	0,4	0,0

tabel 2. in het voorbeeld van de woonkamer op het zuiden te gebruiken U-waarden en zontoetredingsfactoren

In tabel 3 wordt de berekening gemaakt van de bruto warmtetransmissie (BWT) en de bruto zontoetreding (BZT) voor het glasvlak. In tabel 4 gebeurt hetzelfde voor de spouwmuur.

Voor iedere periode wordt het aantal uren (h), de gemiddelde buitentemperatuur ($\bar{T}_e$) en de gemiddelde zonnestraling ($\bar{q}_{ze}$) afgelezen uit tabel 1. Uit tabel 2 worden de voor die periode van toepassing zijnde U-waarde en ZTA overgenomen. Met behulp van deze gegevens en de op thermostaat ingestelde temperatuur voor de betreffende periode worden BWT en BZT berekend.

In tabel 5 wordt het bruto warmteverlies door ventilatie (BWV) berekend. Uitgegaan wordt van een ventilatie van 120 m³/h voor de dag- en avondperiode, inclusief een infiltratie (door naden en kieren) van 30 m³/h. Het warmteverlies per graad temperatuurverschil volgt hierbij uit:

$$k_v = \rho \cdot c \cdot \dot{V} \quad (1)$$

Hierin is:

k_v	warmteverlies door ventilatie per graad temperatuurverschil in W/K
ρ	soortelijke massa van lucht ca 1,25 kg/m ³
c	soortelijke warmte van lucht 1000 J/kg.K
$\dot{V}$	volumestroom van de ventilatie in m ³ /s.

Voor deze k_v vindt men in het voorbeeld:

$$\text{dag-/avondperiode: } k_v = \frac{1,25 \cdot 1000 \cdot 120}{3600} = 41,7$$

$$\text{nachtperiode: } k_v = \frac{1,25 \cdot 1000 \cdot 30}{3600} = 10,4$$

In tabel 5 wordt het bruto warmteverlies door ventilatie voor de vijf dagperiodes berekend.

	h uren	T_i °C	T_e °C	$\bar{q}_{ze}$ W/m ²	U W/m ² ·K	ZTA -	BWT kWh/m ²	BZT kWh/m ²
1	116	15	4,2	16,4	0,6	0,0	0,8	0,0
2	430	20	8,2	515,6	3,0	0,5	15,2	110,9
3	1637	20	5,9	67,3	3,2	0,7	73,9	77,1
4	1325	20	4,3	0,0	0,6	0,0	12,5	0,0
5	1580	15	3,2	0,0	0,6	0,0	11,2	0,0
Totaal							113,6	188,0

tabel 3. berekening bruto warmtetransmissie (BWT) en bruto zontoetreding (BZT) voor het glasvlak uit het voorbeeld; de meest linkse kolom geeft het nummer van de betreffende dagperiode weer

	h uren	T_i °C	T_e °C	k_v W/K	BWV kWh
1	116	15	4,2	10,4	13,0
2	430	20	8,2	41,7	211,6
3	1637	20	5,9	41,7	962,5
4	1325	20	4,3	41,7	867,5
5	1580	15	3,2	10,4	193,9
Totaal					2248,5

tabel 4. berekening bruto warmtetransmissie (BWT) voor de spouwmuur uit het voorbeeld

	h uren	T _i °C	T _e °C	W, U W/m ² K	BWT kWh/m ²
1	116	15	4,2	0,4	0,5
2	430	20	8,2	0,4	2,0
3	1637	20	5,9	0,4	9,2
4	1325	20	4,3	0,4	8,3
5	1580	15	3,2	0,4	7,5
Totaal					27,5

tabel 5. berekening bruto warmteverlies door ventilatie (BWV) voor de woonkamer uit het voorbeeld

Uit de cijfers die uit de berekening zoals gepresenteerd in tabel 3, 4 en 5 ziet men dat:

- het raam in beginsel, mede door de toepassing van thermisch isolerende luiken, meer energie oplevert dan het verliest;
- het warmteverlies door de spouwmuur vrij klein is;
- het warmteverlies door ventilatie de grootste verliespost is.

Of de warmtewinst door het raam ook daadwerkelijk kan worden benut, hangt af van in hoeverre het vertrek overdag meer opwarmt dan het gewenste niveau van 20 °C en in hoeverre het 's nachts kan afkoelen tot de ingestelde temperatuur van 15 °C. Uiteraard speelt hierin ook de massa van het gebouw een rol, zie figuur 1. Verder is er nog de invloed van de andere warmtebronnen in het gebouw (mensen, verlichting, apparaten, enz.). De grootte van de post bruto interne warmteontwikkeling (BIW) kan men inschatten met behulp van de gegevens uit tabel 6. De gegevens betreffen jaargebruiken. Voor de berekening moeten ze dus worden gecorrigeerd voor de lengte van de periode waarover het gebruik van belang is. Verder zal niet bij alle apparaten de ontwikkelde warmte geheel aan de woning ten goede komen [2].

Voor het voorbeeld wordt hier een totaal van 1250 kWh voor het stookseizoen (212 dagen) aangehouden. De warmtebehoefte van het vertrek die via de verwarmingsinstallatie moet worden toegevoerd, volgt bij de stationaire berekening uit::

$$WB_{\text{stat}} = Q_{\text{uit}} - Q_{\text{in}}$$

Hierin is:

Q_{uit} totale uitgaande warmtestroom (BWT + BWV)

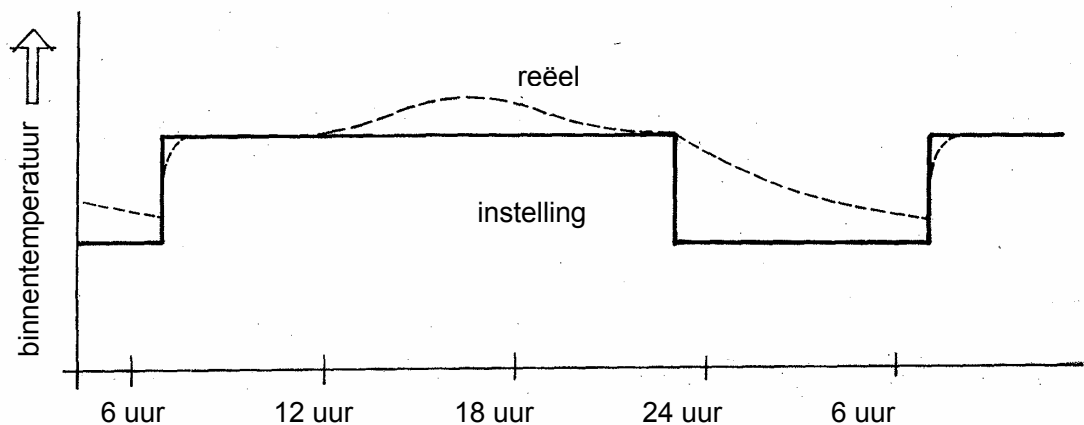
Q_{in} totale inkomende warmtestroom (BZT + BIW)

In het voorbeeld (6 m² glas en 10 m² spouwmuur) zijn de getallen als volgt:

$$\begin{aligned} Q_{\text{uit}} &= BWT_{\text{glas}} + BWT_{\text{spouwmuur}} + BWV \\ &= 6.113,6 + 10.27,5 + 2248,5 \\ &= 6826 + 275 + 2248 = 3205 \text{ kWh} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_{\text{in}} &= BZT_{\text{glas}} + BIW \\ &= 6.188,0 + 1250 = 1128 + 1250 = 2378 \text{ kWh} \end{aligned}$$

$$WB_{\text{stat}} = Q_{\text{uit}} - Q_{\text{in}} = 3205 - 2378 = 827 \text{ kWh}$$



figuur 1. de binnentemperatuur en daarmee de warmtetransmissie naar buiten is overdag (door zoninstraling) en 's nachts (door de traagheid van de gebouwmassa, warmteaccumulatie) veelal hoger dan men op grond van de instelwaarde van de thermostaat zou berekenen

	elektriciteitsgebruik in kWh/jaar	
	normaal	energiezuinig
verlichting	650	550
koelkast	500	325
diepvriezer	700	425
tv-ontvanger	150	75
radio-ontvanger	30	30
stofzuiger	65	65
strijkijzer	30	30
elektrisch fornuis/oven	950	950
diversen	230	230
cv-pomp	500	200
elektrische boiler*	2000	2000
wasautomaat*	400	300
wasdroger*	700	500
afwasmachine*	700	525

tabel 6. richtwaarde voor huishoudelijk elektriciteitsgebruik voor toestellen in normale en in energiezuinige uitvoering en / of bij meer bewust gebruik [3]

* bij deze apparaten verdwijnt het merendeel van de opgewekte energie met het afvalwater in het riool of met de afgewerkte lucht naar buiten

Uit vergelijking van op deze wijze bepaalde stationair berekende warmtebehoeften met de uit berekeningen met een dynamisch computermodeel verkregen waarden zijn correctiefactoren afgeleid, waarmee men de werkelijke dynamische warmtebehoefte redelijk kan benaderen.

$$WB_{\text{stat.gecorr.}} = a \cdot Q_{\text{uit}} - b \cdot Q_{\text{in}}$$

In tabel 7 zijn de waarden voor a en b in diverse situaties gegeven.

Voor het woonvertrek uit het voorbeeld volgt:

bij normale gebouwmassa:

$$WB_{\text{stat.gecorr.}} = 0,87 \cdot 3205 - 0,63 \cdot 2378 = 1290 \text{ kWh}$$

bij zeer geringe gebouwmassa:

$$WB_{\text{stat.gecorr.}} = 0,84 \cdot 3205 - 0,53 \cdot 2378 = 1336 \text{ kWh}$$

1. Zoals blijkt uit het rapport "Zonwering bij gebouwen" van SBR [4] is de invloed van de gebouwmassa betrekkelijk gering. Deze hoeft daarom niet als een aparte parameter te worden ingevoerd. Er kan worden volstaan met een indeling in twee klassen (normaal en zeer licht).

Het geldigheidsgebied van de hiervoor beschreven methode is beperkt tot die situaties waarbij $Q_{\text{uit}} > Q_{\text{in}}$. Dat wil zeggen dat voor gebouwen met grotere bruto winstposten dan verliesposten wellicht andere waarden voor a en b zouden moeten gelden.

Verder kan men voor de binnentemperatuur overdag waarden kiezen tussen 15 en 21 °C.

Voor de instelling van de thermostaat tijdens nachtverlaging moet men in principe altijd de waarde 15 °C kiezen. Het feit dat deze temperatuur niet altijd zal worden bereikt (door de in de bouwmassa geaccumuleerde warmte) is in de correctiefactoren opgenomen.

situatie	a	b
normale gebouwmassa, nachtverlaging tot 15 °C	0,87	0,63
normale gebouwmassa, geen nachtverlaging	0,82	0,63
zeer geringe gebouwmassa, wel of geen nachtverlaging	0,81	0,53

tabel 7. factoren voor het corrigeren van de stationair berekende warmtebehoefte, geldig voor gebouwen met een dagindeling zoals weergegeven bij tabel 1 (woningen)

$$WB_{\text{stat.gecorr.}} = a \cdot Q_{\text{uit}} - b \cdot Q_{\text{in}}$$

LITERATUUR

2. "Zonstralingstabellen", ISSO, publicatie nr. 3, Rotterdam, oktober 1976.
3. "Tussenrapport Maatschappelijke Discussie Energiebeleid", 's-Gravenhage, januari 1983.
4. "Zontoetredingsfactoren", ISSO, publicatie nr. 2, Rotterdam, augustus 1975.
5. "Zonwering bij gebouwen", Stichting Bouwresearch, publicatie nr. 42, Rotterdam.

Zonbestraling en atmosferische straling

Kennisbank Bouwfysica

Auteur: ir. E.H. Tumbuan, prof.ir. J.J.M. Cauberg, Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen, TU-Delft

1 Zonbestraalde niet-transparante oppervlakken

Wanneer een oppervlak aan lucht grenst dan zal de warmtebalans van dat oppervlak zowel convectieve als stralingstermen bevatten. Zoals al eerder is behandeld, kan de warmtestraling in twee gebieden worden onderscheiden, namelijk: kortgolvlige en langgolvlige straling. Bij een buitenoppervlak valt de kortgolvlige zonnestraling op het oppervlak en wordt - indien dit oppervlak niet transparant is - aan het oppervlak geabsorbeerd en gereflecteerd.

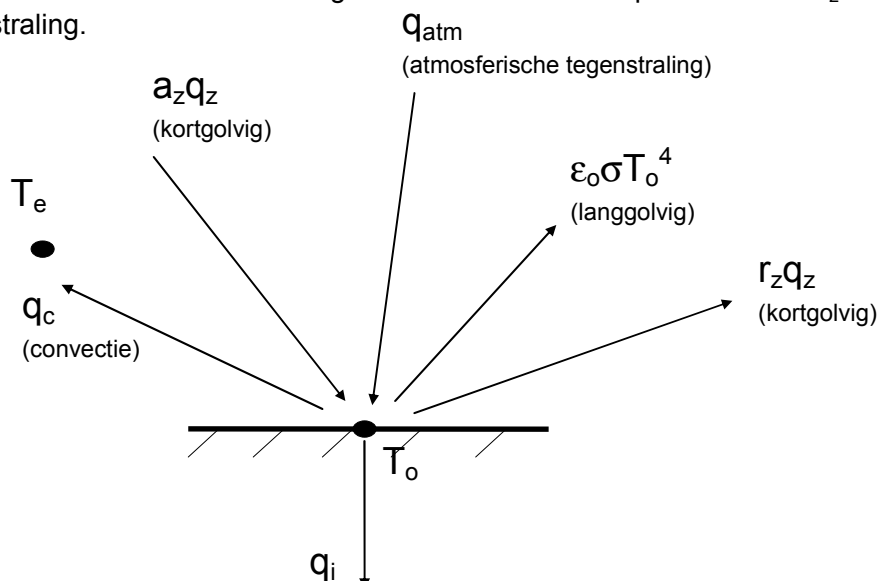
De zonnestraling, die het aardoppervlak treft, bestaat uit een direct deel en een diffuus deel afkomstig van de hemelkoepel door reflectie en verstrooiing door aerosolen.

De temperatuur van het oppervlak met een absorptiecoëfficiënt a_z zal door absorptie van de opvallende straling stijgen, waardoor de eigen uitstraling zal toenemen. Deze oppervlaktetemperatuur zal belangrijk lager liggen dan de zontemperatuur, zodat de golflengten van de eigen straling (zoals in module "Warmteoverdracht door geleiding" is getoond) veel groter zullen zijn dan die van de zonnestraling. Omdat ook de opgewarmde atmosfeer een eigen straling heeft, zal er een langgolvlige stralingsuitwisseling tussen oppervlak en atmosfeer optreden.

In deze module wordt verondersteld dat het beschouwde buitenoppervlak aan de buitenzijde alleen de hemelkoepel "ziet". De parameters in de warmtebalans van het oppervlak zijn dus de convectieve- en stralings-warmteoverdrachtscoëfficiënten α_c en α_s (of de langgolvlige absorptiecoëfficiënten $a_o (= \epsilon_o)$ van het oppervlak) en de kortgolvlige absorptiecoëfficiënten a_z van het oppervlak.

Eigenlijk moet rekening gehouden worden met twee absorptiecoëfficiënten voor de kortgolvlige straling, één voor de directe en één voor de diffuse stralingscomponent van de zonnestraling.

De directe straling is een gerichte bundel bestraling, terwijl de diffuse straling een alzijdige inval heeft. In deze module wordt gerekend met één absorptiecoëfficiënt a_z voor de zonbestraling.



figuur 1. warmtestroomdichtheden aan het oppervlak

In figuur 1 is $r_z q_z$ de zonnestraling die wordt gereflecteerd door het oppervlak en die geen rol speelt in de warmtebalans voor T_o . Deze luidt als volgt:

$$a_z q_z = q_c + q_i + \varepsilon_o \sigma T_o^4 - q_{atm} \quad (1)$$

De laatste twee termen van het rechterlid vormen samen de netto straling q_{netto} van oppervlak naar atmosfeer. Hierin komt de niet-lineaire term met T_o^4 voor. Om de balans te lineariseren, zal de netto-straling nader worden bekeken.

2 Atmosferische tegenstraling q_{atm}

Voor de atmosferische tegenstraling q_{atm} zijn empirische relaties bekend. Brunt [1] bij voorbeeld betreft deze straling op de luchttemperatuur en stelt de grootte afhankelijk van de vochtigheid van de buitenlucht.

$$q_{atm} = \sigma T_e^4 (a + b\sqrt{p}) \quad (2)$$

Waarin:

T_e	temperatuur van de buitenlucht in Kelvin
p	partiële waterdampspanning in Pa, die een maat is voor de vochtigheid
a en b	empirisch bepaalde constanten

Voor een zeeklimaat zijn deze waarden ongeveer $a = 0,55$ en $b = 0,0056$.

De netto-straling kan dus ook worden geschreven als:

$$q_{netto} = \varepsilon_o \sigma T_o^4 - \sigma T_e^4 (a + b\sqrt{p})$$

Of:

$$q_{netto} = \varepsilon_o \sigma T_o^4 - \sigma T_e^4 + \sigma T_e^4 (1 - a - b\sqrt{p}) \quad (3a)$$

Linearisatie van $\varepsilon_o \sigma T_o^4 - \sigma T_e^4$ en invoering van een warmteoverdrachtscoëfficiënt α_s geeft:

$$q_{netto} = \alpha_s (T_o - T_e) + \sigma T_e^4 (1 - a - b\sqrt{p}) \quad (3b)$$

In uitdrukking (3b) herkennen we in de eerste term de netto-straling tussen twee oppervlakken met temperaturen T_o en T_e . De niet-lineaire tweede term kan worden opgevat als een extra uitstraling naar de hemelkoepel. De balans (1) wordt met (3b):

$$a_z q_z = \alpha_c (T_o - T_e) + q_i + \alpha_s (T_o - T_e) + \sigma T_e^4 (1 - a - b\sqrt{p})$$

Of:

$$a_z q_z = (\alpha_c + \alpha_s) (T_o - T_e) + q_i + \sigma T_e^4 (1 - a - b\sqrt{p})$$

Zodat:

$$a_z q_z = \alpha_e (T_o - T_e) + q_i + \sigma T_e^4 (1 - a - b\sqrt{p}) \quad (4)$$

De warmtebalans voor het buitenoppervlak zal dus - wanneer aan de buitenzijde een totale warmteoverdrachtscoëfficiënt α_e wordt gebruikt - de term $\sigma T_e^4 (1 - a - b\sqrt{p})$ bevatten, die als extra uitstraling kan worden opgevat. Later zal worden aangetoond, dat de extra uitstraling voor het Nederlandse klimaat gemiddeld ongeveer 100 W/m^2 groot is. In de nacht wanneer de zonbestraling nul is, speelt de extra uitstraling een grote rol en is de oorzaak, dat oppervlaktetemperaturen lager kunnen worden dan de luchttemperatuur; in een koude periode heeft dit condensatie van waterdamp op het oppervlak tot gevolg met kans op bevriezing (gladde wegoppervlakken).

3 Zonbestraling transparante oppervlakken

Bij een voor zonnestraling transparant vlak zal de opvallende straling voor een deel worden gereflecteerd, gedeeltelijk worden geabsorbeerd en ook gedeeltelijk worden doorgelaten. De absorptie heeft plaats op verschillende plaatsen in het materiaal (zie figuur 2). Reflectie treedt op bij het buiten- en binnenoppervlak (verschil in de brekingsindices van glas en lucht).

In de figuur is de absorptie van straling in een materiaal weergegeven.

Noem de intensiteit van de door het buitenoppervlak doorgelaten deel van de opvallende straling I_o . Ter plaatse van x wordt een hoeveelheid straling geabsorbeerd.

$$d I_x = - I_x dx \quad (5a)$$

met β = de absorptiecoëfficiënt per strekkende meter of extinctiecoëfficiënt, die bij het homogeen veronderstelde materiaal een constante waarde heeft.

Integratie van (5a) geeft:

$$I_x = I_o e^{-\beta x} \quad (5b)$$

zodat de totaal geabsorbeerde hoeveelheid straling over een dikte d is:

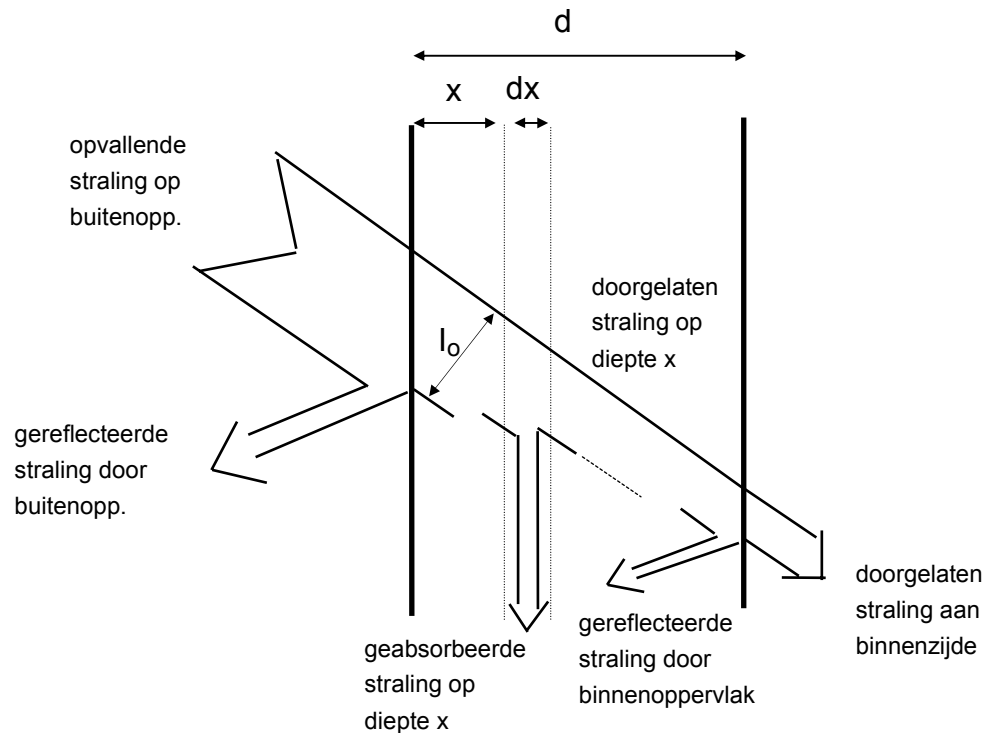
$$I_o - I_D = I_o - I_o e^{-\beta d} = \bar{a} I_o \quad (6a)$$

Waarin:

$$\bar{a} = 1 - e^{-\beta d} \quad (6b)$$

Voor kleine waarden van d geldt:

$$\bar{a} = \beta d \quad (6c)$$

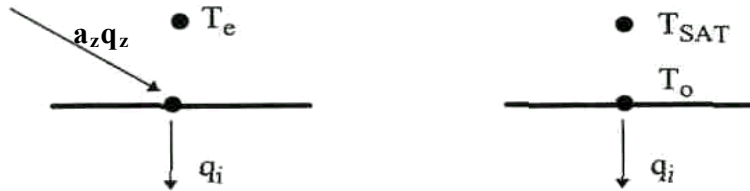


figuur 2. straling door een transparant materiaal

De toegepaste glasdikten zijn relatief klein, zodat (7c) zal gelden. Bij toepassing van een gemiddelde absorptiecoëfficiënt zal het voor een warmtedoorgangsberekening door de geringe warmteweerstand van het dunne glas niet veel uitmaken of de absorptie aan de rand of in het midden van het glas optreedt. Welke golflengten worden doorgelaten, hangt af van de materiaalsoort. Normaal glas bij voorbeeld laat wel de kortgolvlige zonnestraling door, maar geen langgolvlige straling. Normaal glas is niet transparant voor langgolvlige straling. De consequentie daarvan is, dat de doorgelaten zonne-energie na geabsorbeerd te zijn door vlakken achter het glas niet meer als straling door het glas kan worden afgevoerd. De vlakken achter het glas absorberen de doorgelaten (kortgolvlige) zonne-energie en stralen langgolvlige straling naar elkaar en de ruit toe. Het glas absorbeert deze langgolvlige straling nagenoeg aan het oppervlak en straalt eveneens langgolvlige straling terug naar de vlakken achter de ruit. Van dit verschijnsel wordt gebruik gemaakt in de tuinbouwkassen en serres van woningen en is ook de oorzaak van de oververhitting die zomers kan optreden in vertrekken met grote glasvlakken.

4 Zonneluchttemperatuur, Sol Air Temperature (SAT)

Indien de convectie en straling aan een buitenoppervlak worden samengenomen in één overdrachtscoëfficiënt α_e , dan kan soms gebruik worden gemaakt van de zogenaamde Sol Air Temperature of zonneluchttemperatuur SAT. Dit is een fictieve luchttemperatuur die dezelfde in de constructie binnenstromende warmte tot stand brengt als de combinatie van zonbestraling en werkelijke buitenluchttemperatuur (figuur 3).



figuur 3. fictieve luchttemperatuur T_{SAT} bij zonbestraalde oppervlakken

Per definitie:

$$\alpha_e (T_{SAT} - T_o) = q_i \quad (8)$$

Verder geldt:

$$a_z q_z = \alpha_e (T_o - T_e) + q_i \quad (9)$$

Waarin:

α_e	totale warmteoverdrachtscoëfficiënt aan het buitenoppervlak in W/m^2K
a_z	absorptiecoëfficiënt van het oppervlak voor zonstraling (kortgolvig)
q_z	opvallende zonstraling in W/m^2
T_o	oppervlaktetemperatuur in K
T_e	buitentemperatuur in K
q_i	warmtestroom de constructie in, in W/m^2

Substitutie van q uit (8) in (9) levert:

$$T_{SAT} = T_e + \frac{a_z q_z}{\alpha_e} \quad (10)$$

Voorbeeld

Gegeven een buitenwand met $R_c=2,5 \text{ m}^2K/W$ die door de zon wordt beschenen met $a_z q_z = 200 \text{ W/m}^2$. De buitentemperatuur T_e bedraagt $24^\circ C$. De binnentemperatuur T_i is $20^\circ C$. De overdrachtscoëfficiënten zijn $\alpha_e = 20 \text{ W/m}^2$ en $\alpha_i = 8 \text{ W/m}^2$.

Bereken de warmtestroom van buiten naar binnen met en zonder zonstraling.

$$U = 1/(R_c + 1/\alpha_e + 1/\alpha_i) = 1/(2,5 + 1/20 + 1/8) = 0,37 \text{ W/m}^2K$$

Zonder zonstraling:

$$q_i = U(T_e - T_i) = 0,37 (24 - 20) = 1,5 \text{ W/m}^2.$$

Met zonstraling:

$$T_{SAT} = 24 + 200/20 = 34^\circ C$$

$$q_i = U(T_{SAT} - T_i) = 0,37 (34 - 20) = 5,2 \text{ W/m}^2$$

LITERATUUR

1. Brunt, D. and J.R. Quart, Met.Soc. 58 (1932), p 389