

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.

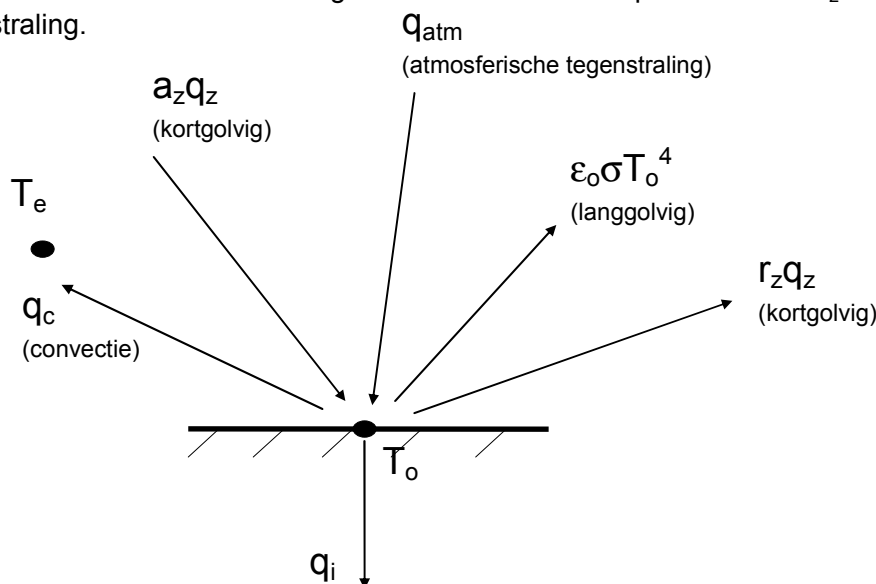
De zonnestraling, die het aardoppervlak treft, bestaat uit een direct deel en een diffuus deel afkomstig van de hemelkoepel door reflectie en verstrooiing door aerosolen.

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 wegooppervlakken).

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.

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

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:

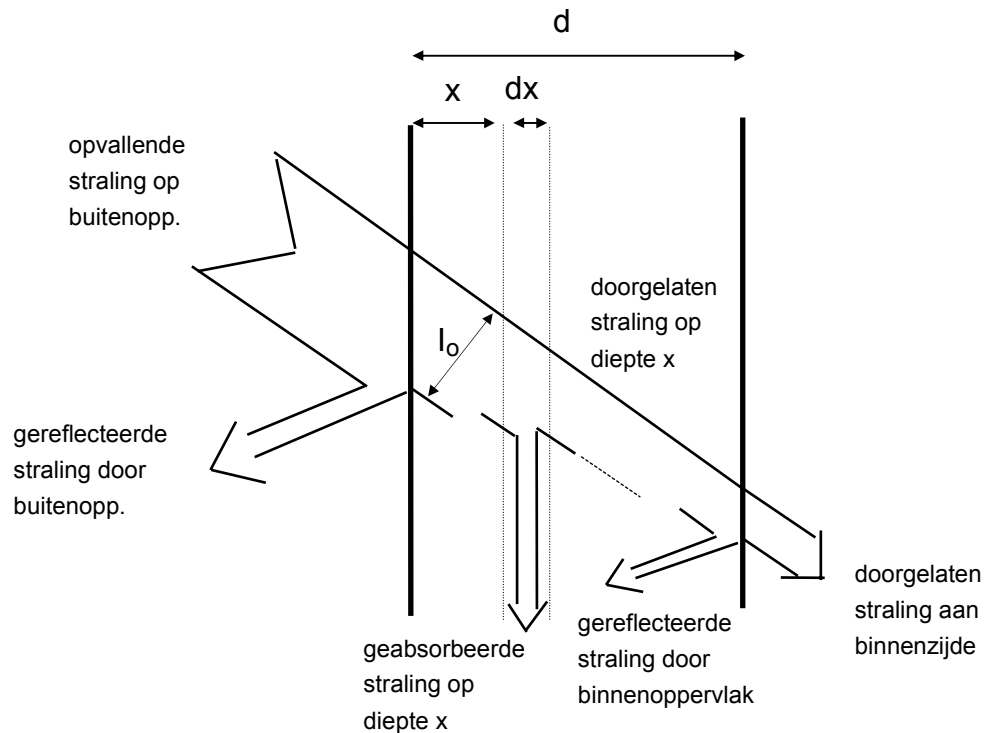
$$I_o - I_D = I_o - I_o e^{-\beta d} = \bar{a} I_o \quad (6a)$$

Waarin:

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

Voor kleine waarden van d geldt:

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

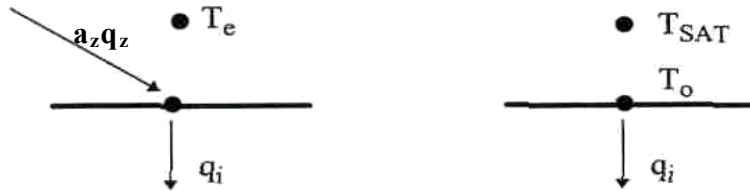


figuur 2. straling door een transparant materiaal

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:

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

Verder geldt:

$$a_z q_z = \alpha_e (T_o - T_e) + q_i \tag{9}$$

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:

$$T_{SAT} = T_e + \frac{a_z q_z}{\alpha_e} \tag{10}$$

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 $24 \text{ }^\circ\text{C}$. De binnentemperatuur T_i is 20°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:

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

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

LITERATUUR

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