



TECHNIEK
EN MANAGEMENT

Warmtetransport en thermische isolatie

Deel I Basistheorie

Docent ir. E.R. van den Ham

Gebaseerd op Klimapedia Modulen W1 t/m W 21

Auteurs o.a.:

Ir. A.C. van der Linden

Ir. P. Erdtsieck

Ir. R. van Herpen

Inhoud

1. Stationair warmtetransport via geleiding, convectie en straling
2. Warmteoverdracht door geleiding
3. Warmteoverdracht door convectie
4. Warmteoverdracht door straling
5. Stralingstemperatuur
6. Warmteoverdracht door straling tussen bouwdeelen
7. Het bepalen van zichtfactoren
8. Zonbestraling en atmosferische straling
9. Thermische isolatie
10. Warmteoverdracht in een luchtgevulde spouw
11. Temperatuurverloop in een constructie
12. Koudebruggen
13. Regelgeving thermische isolatie

1. Stationair warmtetransport via geleiding, convectie en straling

1.1.0 Inleiding

Warmte kan worden gezien als “inwendige energie”.

Inwendige energie die in alle materie is opgeslagen, is de som van de kinetische en de potentiële energie van de moleculen. Als de temperatuur van een lichaam stijgt, stijgt ook de inwendige energie:

- De kinetische energie van de moleculen neemt toe. In een vaste stof gaan de moleculen intenser trillen. In een vloeistof of gas, waar ze niet aan hun plaats gebonden zijn, neemt ook de snelheid van de moleculen toe.
- De potentiële energie neemt toe. De afstand tussen de moleculen wordt groter, wat vooral telt in een vaste stof omdat daar de aantrekkingskracht tussen de moleculen groot is. Vergroting van de potentiële energie betekent dat het lichaam uitzet.

De intensiteit waarmee moleculen trillen, is een maat voor de temperatuur van het betreffende lichaam. Bepalen we met een kwikthermometer de temperatuur van een lichaam, dan wordt een deel van de inwendige energie van het lichaam overgedragen op het kwik. De kwikmoleculen gaan intenser trillen en de potentiële energie neemt toe: het kwik zet uit. De mate van uitzetting is af te lezen van een schaal en geeft de temperatuur (T) aan, bij voorbeeld in graden Celsius ($^{\circ}\text{C}$). Deze eenheid wordt in het vervolg gebruikt om de temperatuur aan te geven. In navolging van internationale afspraken wordt voor de aanduiding van temperatuurverschillen de eenheid Kelvin gebruikt (K).

1.1.1 Warmtetransport tussen voorwerpen, vlakken enzovoort.

Tussen twee voorwerpen, zoals vlakken, is voortdurend sprake van warmte-uitwisseling (warmtetransport). Er is sprake van warmte-uitwisseling tussen de mens en zijn omgeving, maar bij voorbeeld ook tussen een gebouw en de omgeving. Het transport van warmte heeft gewoonlijk tegelijkertijd op drie verschillende wijzen plaats: door geleiding, door convectie en door straling.

Warmtetransport heeft alleen plaats als er een temperatuurverschil is. De richting waarin de warmte zich beweegt, is hierbij altijd van een hogere naar een lagere temperatuur (Tweede wet van de thermodynamica). De eenheid waarmee de hoeveelheid energie, in dit geval warmte, wordt uitgedrukt is de joule (J). De warmtestroom (warmtehoeveelheid per tijdseenheid) wordt uitgedrukt met J/s wat gelijk is aan watt (W).

In deze module wordt alleen ingegaan op warmtetransport onder stationaire (gelijkblijvende) omstandigheden. Het gaat hierbij bij voorbeeld om het warmtetransport door een constructie, waarbij de externe omstandigheden langdurig hetzelfde zijn. Er wordt hierbij geen rekening gehouden met de opslag van warmte in een constructie of met een tijdelijke zonbelasting van een constructie.

1.2.0 Warmtetransport door geleiding

Transport van warmte kan plaatshebben doordat moleculen elkaar aanstoten en zo inwendige energie doorgeven. Dit gebeurt in vaste stoffen waar de moleculen op hun plaats blijven, maar ook in gas of vloeistof waar de moleculen niet aan hun plaats gebonden zijn. Deze vorm van warmtetransport noemen we geleiding.

In een vaste stof is geleiding de enige vorm van warmtetransport. Geleiding komen we in het dagelijks leven overal tegen. Als de vloer waarop we staan koud is, dan zullen onze voeten op den duur ook afkoelen, zelfs als we schoenen dragen. De warmte stroomt van onze voeten door de zool van onze schoenen (geleiding) naar de koude vloer.

Bij gas en vloeistof treedt bij temperatuurverschil naast geleiding ook altijd convectie op (stromingstransport). Vergeleken met het warmtetransport door convectie is in lucht het warmtetransport door geleiding klein. Over het algemeen zelfs zo klein dat warmtetransport door geleiding in lucht wordt verwaarloosd.

1.2.1 Rekenregels voor de praktijk

Zoals bij alle vormen van warmtetransport stroomt warmte door geleiding van een plaats met een hogere naar een plaats met een lagere temperatuur. De grootte van de warmtestroom is evenredig met het temperatuurverschil tussen de punten (of vlakken) waartussen de warmte stroomt. Daarnaast wordt de grootte van de warmtestroom bepaald door de geleiding en de dikte van het materiaal tussen de beide punten. De warmteoverdracht wordt weergegeven door de warmtestroomdichtheid voor geleiding (q_g). In formulevorm:

$$q_g = (\lambda / d) \cdot (T_1 - T_2) \quad [W/m^2]$$

Hierbij is:

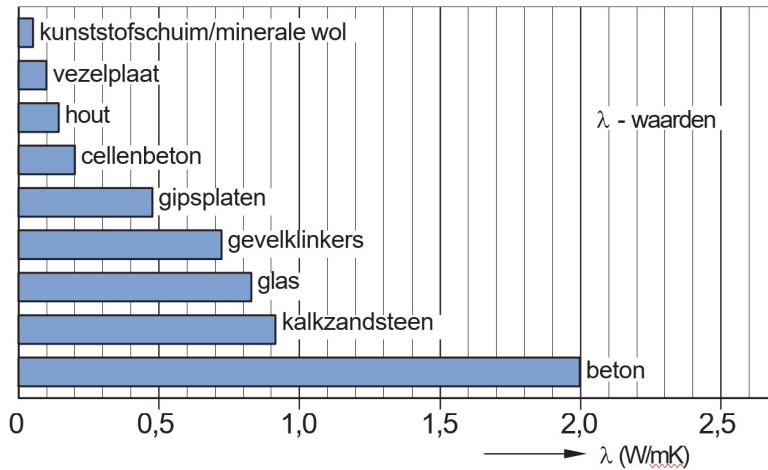
q_g	warmtestroomdichtheid voor geleiding [W/m^2]
λ	warmtegeleidingscoëfficiënt [W/mK]
d	afstand waarover de warmtestroom plaatsheeft
$T_1 - T_2$	temperatuurverschil tussen de punten [K]

De warmtegeleidingcoëfficiënt ($\lambda = \text{lambda}$) geeft de mate aan waarin een materiaal warmte geleidt. Hoe hoger de λ , des te beter geleidt het materiaal warmte. Een grote λ betekent dat het materiaal een slechte warmte-isolator is. Hout heeft bij voorbeeld een lage λ , dus geleidt slecht en is een goede warmte-isolator. In tegenstelling tot metaal, dat een hoge λ heeft en dus een slechte warmte-isolator is. De dimensie van λ is W/mK .

De betekenis van deze grootte wordt hierdoor duidelijker: De hoeveelheid warmte die per seconde per vierkante meter bij een temperatuurverschil van 1 Kelvin over een lengte van 1 meter wordt getransporteerd. De warmtegeleidingcoëfficiënt geeft dus aan hoe groot het vermogen van een materiaal is om warmte te geleiden.

De warmtegeleidingcoëfficiënt van een materiaal kan in een laboratorium worden bepaald. De warmtegeleidingcoëfficiënten blijken enigszins temperatuurafhankelijk. Voor het temperatuurbereik waarmee we in de bouwfysica rekenen, wordt λ over het algemeen temperatuurafhankelijk aangenomen. De warmtegeleidingcoëfficiënten van bouwmaterialen lopen zeer sterk uiteen. Zo bedraagt de λ voor aluminium circa $200 W/mK$, voor gewapend beton $2 W/mK$, voor hout $0,15 W/mK$ en voor isolatiemateriaal $0,03$ à $0,04 W/mK$. De

warmtegeleidingcoëfficiënt van beton is dus ruim tienmaal zo groot als die van hout en ruim vijftigmaal zo groot als die van de meeste isolatiematerialen. De warmtegeleidingcoëfficiënt van aluminium is 5000 maal zo groot als die van de meeste isolatiematerialen.



figuur 1. enkele materialen met bijbehorende λ .

1.3.0 Warmtetransport door convectie

Wanneer een voorwerp van plaats verandert, heeft hierdoor transport plaats van de warmte die in dat voorwerp is opgeslagen. We spreken dan van warmtetransport door convectie. Deze vorm van warmtetransport komen we vooral tegen in gassen en vloeistoffen. De moleculen kunnen zich hierin vrij bewegen en met dat bewegen wordt warmte getransporteerd. Als de bewegingen willekeurig zijn en de gemiddelde snelheid gelijk is aan nul, heeft er geen warmtetransport door convectie plaats. Als sprake is van een duidelijke stromingsrichting, dan heeft per saldo warmtetransport plaats. In de bouwfysica speelt met name warmtetransport door de stroming van lucht een belangrijke rol.

1.3.1 Rekenregels voor de praktijk

In deze module wordt alleen ingegaan op warmtetransport door convectie, voor zover dat van belang is om het warmtetransport door een constructie te kunnen berekenen.

Warmtetransport door convectie komt bij een constructie voor ter plaatse van de overgang van lucht en constructie. Stel, de oppervlaktetemperatuur van een wand is hoger dan de temperatuur van de omringende lucht. De lucht vlakbij de wand (het grensvlak) zal door geleiding warmer worden. Als deze lucht vervolgens wordt afgevoerd, heeft daarmee warmtetransport plaats. De grootte van de warmtestroom (warmtestroomdichtheid) wordt bepaald door het temperatuurverschil tussen de constructie en door de snelheid van de langsstromende lucht. We spreken van de warmtestroomdichtheid door convectie (q_c). In formulevorm:

$$q_c = \alpha_c \cdot (T_1 - T_2) \quad [\text{W/m}^2]$$

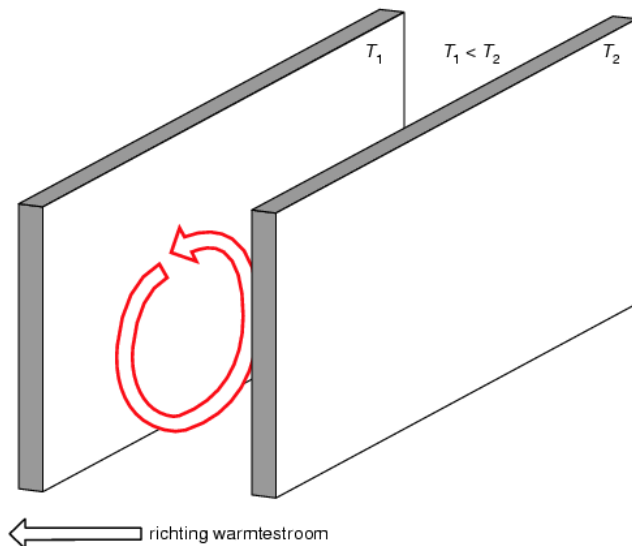
Hierbij is:

- q_c warmtestroomdichtheid door convectie [W/m^2]
- α_c warmteovergangcoëfficiënt voor convectie [$\text{W/m}^2\text{K}$]
- $T_1 - T_2$ temperatuurverschil tussen de langsstromende lucht en de muur [K]

De gegeven formule voor de warmtestroomdichtheid door convectie (q_c), is een sterke vereenvoudiging van de werkelijkheid. Niettemin kan de formule goed gebruikt worden voor het berekenen van bijvoorbeeld de warmteweerstand van een constructie.

De warmteovergangscoefficiënt (α_c) in de formule geeft de warmteovergang aan. α_c is met name afhankelijk van de snelheid van de langsstromende lucht. Voor buiten, waar de luchtsnelheid langs de constructie in het algemeen groot is, wordt bij eenvoudige berekeningen uitgegaan van $20 \text{ W/m}^2\text{K}$ voor de winterperiode en $15 \text{ W/m}^2\text{K}$ voor de zomerperiode. Een temperatuurverschil tussen de constructie en de langsstromende lucht van 5 K zorgt in de winter voor een warmtestroomdichtheid van 100 W/m^2 . Voor binnen kan bij eenvoudige berekeningen uitgegaan worden van een α_c van 2 à $2,5 \text{ W/m}^2\text{K}$.

De warmteovergangscoefficiënt wordt uitgedrukt in $\text{W/m}^2\text{K}$. In woorden: de warmtestroom (W) per m^2 oppervlak bij een temperatuurverschil van 1 K .



figuur 2. warmtetransport van het ene oppervlak naar het andere

1.4.0 Warmtetransport door straling

Behalve door geleiding en convectie kan warmteoverdracht ook plaatshebben door straling. Aan het oppervlak van elk voorwerp warmer dan 0 K ($-273 \text{ }^\circ\text{C}$) wordt inwendige energie omgezet in elektromagnetische stralingsenergie. De energiestroom die op deze wijze een voorwerp verlaat (zgn. emissie = uitstraling), neemt toe als de temperatuur van het betreffende lichaamsoppervlak toe neemt. Door de emissie van straling wordt warmte aan het oppervlak onttrokken. De mate van emissie wordt bepaald door de oppervlaktetemperatuur van het voorwerp dat straalt en de zogenaamde emissiefactor ($\epsilon = \text{epsilon}$). De emissiefactor heeft een waarde groter dan 0 en kleiner dan 1 . Hoe kleiner de emissiefactor, hoe kleiner de stralingsuitwisseling.

De meeste materialen hebben een emissiefactor die in de buurt van de $0,9$ ligt. Gladde metaaloppervlakken kunnen een veel lagere emissiefactor hebben. Zo hebben bijvoorbeeld gepolijst aluminium of metaal een emissiefactor van circa $0,05$. Hiervan wordt gebruik gemaakt in zogenaamde HR-beglazing. Dit is dubbele beglazing, waarop aan de spouwzijde van de

binnenste glasplaat een uiterst dunne laag metaal is opgedampt. Door deze metaallaag (lage emissiefactor) wordt de stralingsuitwisseling tussen de beide glasbladen verminderd.

1.4.1 Absorptie van stralingsenergie

De straling die door gebouwdelen wordt geëmitteerd, ligt in het infrarood gebied en is dus onzichtbaar. Dit warmtetransport is niet materiaalgebonden zoals dat bij geleiding en convectorie het geval is en is dus ook in vacuüm mogelijk. Een voorbeeld hiervan is zonlicht dat de aarde via het heelal bereikt. Als de straling een oppervlak treft, zal er deels absorptie plaatshebben. De stralingsenergie wordt bij absorptie in warmte omgezet.

Zoals blijkt uit het voorgaande is voor warmteoverdracht via straling zowel emissies als absorptie nodig. De mate waarin opvallende straling wordt geabsorbeerd, wordt uitgedrukt met de absorptiefactor (α). De absorptiefactor (α) is gelijk aan de emissiefactor (ϵ).

1.4.2 Rekenregels voor de praktijk

Warmtetransport door straling komt bij een constructie voor ter plaatse van de overgang van lucht en constructie. Stel, de oppervlaktetemperatuur van een scheidingsconstructie is lager dan de oppervlaktetemperatuur van een ander oppervlak waarmee het vlak straling uitwisselt. De constructie zal dan minder straling emitteren dan absorberen. Er is sprake van een warmtestroom naar het oppervlak van de constructie. De warmtestroom is evenredig met het temperatuurverschil tussen de beide oppervlakken. Analoog met de overdracht bij warmteoverdracht door convectorie, spreken we van de warmtestroomdichtheid door straling (q_s).

In formulevorm:

$$q_s = \alpha_s \cdot (T_1 - T_2) \quad [W/m^2]$$

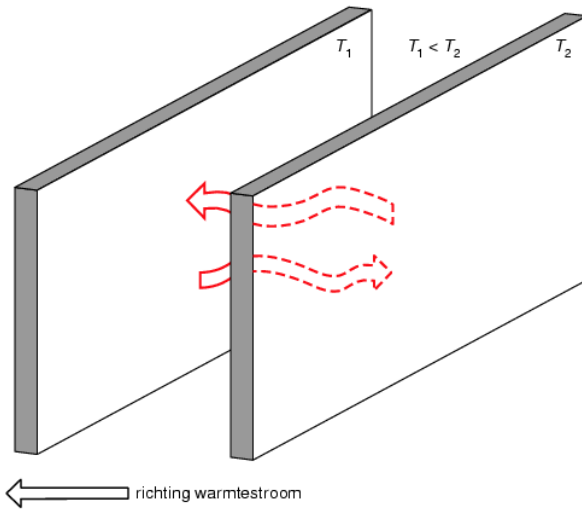
Hierbij is:

q_s warmtestroomdichtheid door straling [W/m^2]

α_s warmteovergangscoefficiënt voor straling [$W/m^2 K$]

$T_1 - T_2$ temperatuurverschil tussen de beide oppervlakken [K]

De gegeven formule voor de warmtestroomdichtheid door straling (q_s), is een sterke vereenvoudiging van de werkelijkheid. Niettemin kan de formule (evenals de formule bij convectorie) goed gebruikt worden voor het berekenen van bij voorbeeld de warmteweerstand van een constructie. De warmteovergangscoefficiënt (α_s) in de formule is afhankelijk van de emissiefactor van het oppervlak en van de temperatuur. Voor eenvoudige berekeningen wordt uitgegaan van $5 W/m^2K$.



figuur 3. warmtetransport van het ene oppervlak naar het andere

De stof die in deze module wordt behandeld vormt de basis voor het berekenen van de warmteweerstand en de warmtedoorgangscoefficient van een constructie.

2. Warmteoverdracht door geleiding

2.1 Inleiding

Wanneer een constructie door de zon wordt bestraald en/of als er een temperatuurverschil over een constructie aanwezig is, zal er naar en door de constructie warmtetransport optreden. Om enig inzicht te krijgen in het mechanisme van het warmtetransport door een constructie en van een constructie naar zijn omgeving zullen eerst de verschillende manieren worden behandeld hoe warmtetransport kan plaatshebben, namelijk door:

- geleiding;
- convectie;
- straling.

2.2 Warmteoverdracht door geleiding

Volgens Fourier kan voor de warmtestroomdichtheid q geschreven worden als:

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}$$

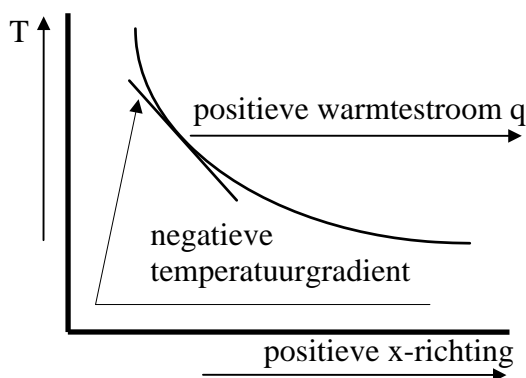
Waarin:

λ warmtegeleidingscoëfficiënt in [W/mK]

$\frac{\partial T}{\partial x}$ temperatuurgradiënt in [K/m]

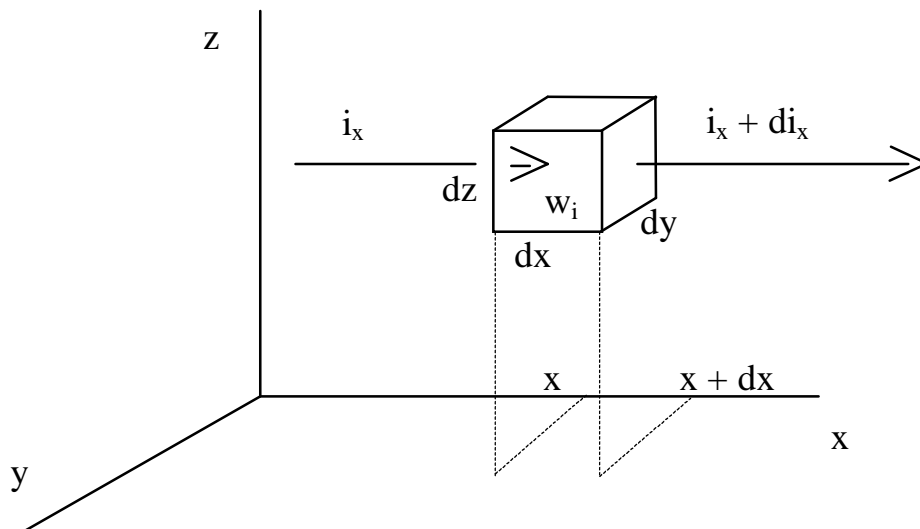
q warmtestroomdichtheid in [W/m²]

Warmte stroomt van een hoge naar een lage temperatuur, dus bij een negatieve temperatuurgradiënt ontstaat een positieve warmtestroomdichtheid in de positieve x-richting door het mintekenen in de definitie op te nemen (zie figuur 1).



figuur 1. positieve warmtestroom bij negatieve temperatuurgradiënt

Het temperatuurverloop in een vast medium zal over het algemeen van plaats tot plaats verschillen en variëren in de tijd. Om genoemd temperatuurverloop te kunnen berekenen, wordt eerst de differentiaalvergelijking afgeleid, die het warmtetransport beschrijft. Beschouw hiervoor een klein volume-element $dx \cdot dy \cdot dz$. in figuur 2:



figuur 2. warmtebalans in x-richting bij een elementair volume deeltje

Wanneer de wet van behoud van energie op dit elementje wordt toegepast, dan luidt de energiebalans in woorden:

De verandering van de warmte-inhoud van een volume-element per tijdseenheid = de netto toevoerstroom van warmte door geleiding + de warmteproductie per tijdseenheid in het element. (1)

De verandering van de warmte-inhoud kan worden geschreven als $\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} dx \cdot dy \cdot dz$, waarin de dichtheid ρ in $[\text{kg}/\text{m}^3]$ en de soortelijke warmte c in $[\text{J}/\text{kgK}]$ zijn. We beperken ons tot materialen met constante dichtheid en soortelijke warmte.

De netto-toevoerstroom van warmte door geleiding is het verschil in warmtetoevoer en warmteafvoer door de begrenzingen van het volume-element.

Door het linkervlak van het volume-element (zie figuur 1) wordt een hoeveelheid warmte

toegevoerd: $i_x = q dy \cdot dz = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} dy \cdot dz [\text{W}]$, terwijl door het rechter zijvlak wordt afgevoerd:

$$i_{x+dx} = i_x + di_x = i_x + \frac{\partial i_x}{\partial x} dx = -\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx \right) dy \cdot dz$$

De netto-toevoerstroom is het verschil $di_x = i_x - i_{x+dx} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx \cdot dy \cdot dz$

Voor de y- en z-richting kunnen voor de netto-toevoer analoge uitdrukkingen worden verkregen.

Als de warmteproductie per tijdseenheid en per eenheid van volume w_i $[\text{W}/\text{m}^3]$ wordt genoemd, dan bedraagt de warmteproductie per tijdseenheid in het element: $w_i dx \cdot dy \cdot dz$ $[\text{W}]$.

De verkregen termen ingevuld in de vergelijking in woorden (1) en na deling door $dx \cdot dy \cdot dz$ levert de complete partiële differentiaalvergelijking voor de niet-stationaire warmtegeleiding in een vast medium met eventuele warmteproductie:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + w_i \quad (2)$$

Indien $w_i = 0$ en λ constant mag worden verondersteld, vereenvoudigt de formule (2) zich tot:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad \text{of}$$

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (2a)$$

Formule (2a) wordt de “differentiaalvergelijking van Fourier” genoemd.

2.3 Temperatuurvereffeningscoëfficiënt

De grootte a uit (2a) wordt de temperatuurvereffeningscoëfficiënt of thermische diffusieiteit genoemd.

$$a = \frac{\lambda}{\rho c} \quad [m^2/s]$$

Waarin:

λ	warmtegeleidingscoëfficiënt in W/mK
ρ	dichtheid in kg/m ³
c	soortelijke warmte in J/kgK

De temperatuurvereffeningscoëfficiënt is een maat voor de verhouding tussen de grootte van de warmtegeleiding en de grootte van de energieopslag en geeft zodoende weer hoe goed of hoe slecht de temperatuur in het materiaal wordt vereffend.

Voor aluminium en hout zijn de temperatuurvereffeningscoëfficiënten respectievelijk circa $9 \cdot 10^{-5}$ en $1 \cdot 10^{-7}$.

Een houten steel van een pan zal dus minder snel warm worden dan een aluminium steel.

In deze module zullen ééndimensionale warmtetransporten worden beschouwd.

De differentiaalvergelijking wordt dan:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (2b)$$

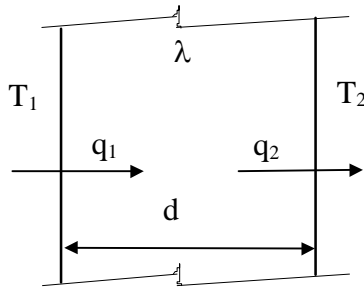
Wanneer ook nog de toestand stationair, dus tijdonafhankelijk, wordt verondersteld, dan wordt

verkregen $\frac{d^2 T}{dx^2} = 0$, zodat $\frac{dT}{dx} = \text{constant}$.

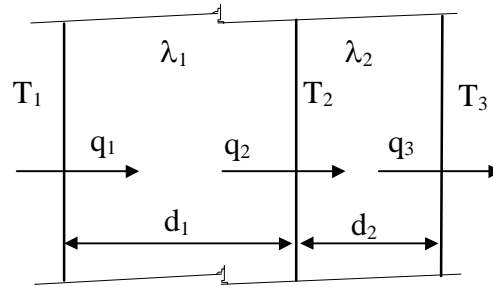
Het temperatuurverloop in stationaire toestand verloopt dus lineair in de plaats en de warmtestroomdichtheid $q = -\lambda \frac{dT}{dx}$ heeft - omdat er geen warmtebronnen aanwezig zijn - overal dezelfde waarde.

2.4 Warmteweerstand

In onderstaande figuur 3 is een materiaal gegeven met een dikte d .



figuur 3. monolithische wand



figuur 4. samengestelde wand

Met oppervlaktetemperaturen T_1 en T_2 en de eis dat de warmtestroomdichtheid constant moet zijn, dus $q_1 = q_2$ volgt :

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx} = -\lambda \frac{T_2 - T_1}{d} = \lambda \frac{T_1 - T_2}{d} = \frac{T_1 - T_2}{R} \quad [\text{W/m}^2]$$

waarin met R , in analogie met de elektriciteitsleer, de warmteweerstand van een materiaal met dikte d wordt ingevoerd:

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad [\text{m}^2\text{K/W}]$$

In figuur 4 is een constructie geschetst bestaande uit twee verschillende materialen. Ook hier geldt $q_1 = q_2 = q_3 = q$, zodat:

$$q = \frac{T_1 - T_2}{R_1} = \frac{T_2 - T_3}{R_2} = \frac{T_1 - T_3}{R_1 + R_2}$$

In stationaire toestand mogen bij een samengestelde constructie de warmteweerstanden worden opgeteld, $q = \frac{\Delta T}{\Sigma R}$.

De volgende tabel geeft ter illustratie de grootte orde van warmtestroomdichtheden van een geïsoleerde en ongeïsoleerde betonconstructie bij een temperatuurverschil van 15 K over de randen.

	d [m]	λ [SI]	R [SI]	q [W/m ²]
beton	0,20	2,0	0,1	150,0
isolatie	0,08	0,04	2,0	7,5
beton + isolatie	0,28		2,1	7,1

tabel 1. invloed van isolatie op warmtestroom door een betonnen wand

De warmtestroomdichtheid van de geïsoleerde constructie wordt in hoofdzaak bepaald door de warmteweerstand van de isolatie.

3. Warmteoverdracht door convectie

3.1 Inleiding

Wanneer een constructie door de zon wordt bestraald en/of als er een temperatuurverschil over een constructie aanwezig is, zal er naar en door de constructie warmtetransport optreden.

Om enig inzicht te krijgen in het mechanisme van het warmtetransport door een constructie en van een constructie naar zijn omgeving zullen eerst de verschillende manieren worden behandeld hoe warmtetransport kan plaatshebben, namelijk door:

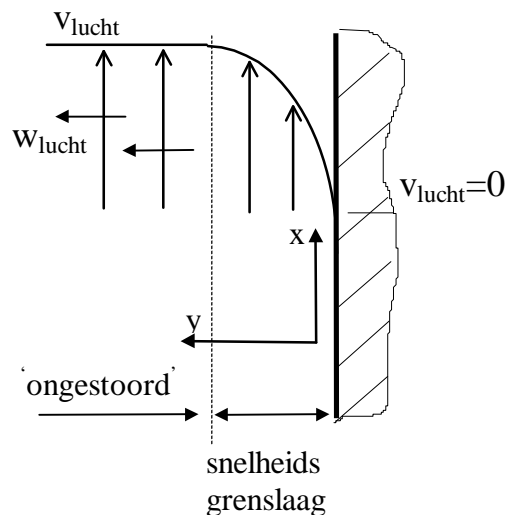
- geleiding;
- convectie;
- straling.

3.2 Warmteoverdracht door convectie

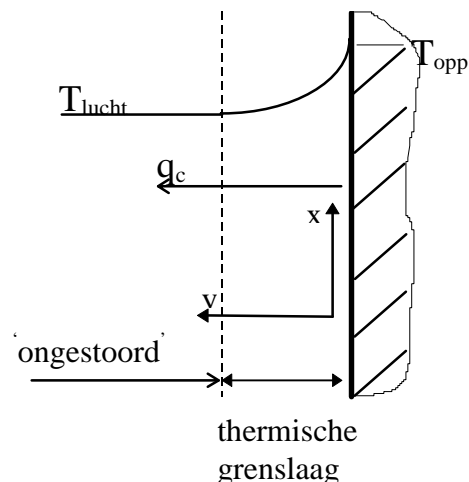
Wanneer een oppervlak aan bij voorbeeld het medium lucht of water grenst, zal - indien er een temperatuurverschil tussen het oppervlak en het medium bestaat - uitwisseling van warmte tussen medium en oppervlak plaatshebben.

In de figuren 1a en 1b is een situatie geschetst, waarbij lucht langs een warmere wand stroomt. Langs de wand vormt zich een grenslaag. Aan de rand van deze grenslaag is de snelheid gelijk aan die van de ongestoorde stroming, terwijl aan de vaste wand de snelheid gelijk aan nul zal worden (figuur 1a).

Het warmtetransport is vergelijkbaar met het impulstransport, zodat er ook een thermische grenslaag ontstaat, waarin de temperatuur in de ongestoorde stroming overgaat in de temperatuur van de vaste wand (figuur 1b).



figuur 1a. snelheidsverloop nabij een wand



figuur 1b. temperatuurverloop nabij een wand

Voor de volledigheid worden zonder afleiding de benaderde energie- en impulsvergelijking voor een stationaire stroming in de grenslaag gegeven, waarbij geldt: $w/v \ll 1$.

$$\text{Energievergelijking: } \frac{\partial(vT)}{\partial x} + \frac{\partial(wT)}{\partial y} = a \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (1a)$$

$$\text{Impulsvergelijking: } \frac{\partial v^2}{\partial x} + \frac{\partial(wv)}{\partial y} = \nu \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \quad (1b)$$

Hierin zijn:

v	luchtsnelheid evenwijdig aan de wand
w	luchtsnelheid loodrecht op de wand, $w/v \ll 1$
ν	kinematische viscositeit van lucht
a	temperatuurvereffeningscoëfficiënt (thermische diffusiteit) van lucht

Het linkerlid van de energievergelijking (1a) geeft het convectief transport door de stroming weer van energie, waar de temperatuur T een maat voor is, terwijl het rechterlid het moleculair transport (geleiding) voorstelt in de richting loodrecht op de wand.

Analoog aan het energietransport is het linkerlid van de impulsvergelijking (1b) het convectief transport van de impuls in de hoofdstromingsrichting x , waarvoor de snelheid v een maat is. Het rechterlid stelt weer het moleculair transport voor (diffusie) van impuls loodrecht op de wand.

Als de verhouding ν/a (het zogenaamde kental van Prandtl: $Pr = \nu/a$) tussen de kinematische viscositeit en de temperatuurvereffeningscoëfficiënt van het stromende medium groot is, zal de moleculaire diffusie van impuls dieper de stroming indringen dan het warmtetransport. Het kental van Prandtl is dus een maat voor de verhouding tussen de dikten van de snelheids- of impuls grenslaag en die van de thermische grenslaag. Voor lucht is $Pr \approx 0,72 (\approx 1)$ en zijn beide grenslaagdikten van dezelfde grootte orde.

Voor $Pr = 1$ ($\nu = a$) zijn de energie- en impulsvergelijking 1a en 1b identiek in T en v , en is de impuls grenslaag gelijk aan de thermische grenslaag.

Het warmtetransport van de wand naar de ongestoorde stroming wordt behalve door de fysische eigenschappen van het stromend medium door de snelheid van de stroming en de temperatuurgradiënt in de grenslaag bepaald.

Om dit warmtetransport op eenvoudige wijze te kunnen karakteriseren, wordt een convectieve warmteoverdrachtscoëfficiënt α_c ingevoerd en is het warmtetransport van wand naar stromend medium als volgt gedefinieerd:

$$q_c = \alpha_c (T_{\text{opp}} - T_{\text{med}})$$

Waarin:

α_c	convectieve warmteoverdrachtscoëfficiënt in W/m^2K
T_{opp}	oppervlaktetemperatuur in K
T_{med}	temperatuur van het stromende medium in K

Er is onderscheid te maken tussen twee vormen van convectie:

- gedwongen convectie;
- vrije convectie.

Bij gedwongen convectie is er sprake van een opgelegde stroming langs een oppervlak. Voorbeelden hiervan zijn de warmteoverdracht van de buitenoppervlaktetemperatuur van

gevels naar de buitenlucht bij enige wind en de warmteoverdracht van lucht in ventilatiekanalen naar de pijpwand.

Voor gedwongen convectie kan (voor buitenoppervlakken van gebouwen) worden aangehouden:

$$\alpha_c = 5,8 + 4 \cdot v \quad \text{voor } v < 5 \text{ m/s} \quad (18)$$

en

$$\alpha_c = 7,14 \cdot v^{0,78} \quad \text{voor } v > 5 \text{ m/s} \quad (19)$$

met

α_c warmteoverdrachtscoëfficiënt voor convectie
 v luchtsnelheid

Vrije convectie treedt op als de luchtbeweging alleen wordt veroorzaakt door het temperatuurverschil tussen oppervlak en medium en er geen opgelegde stroming is. Heel vaak heeft men te maken met een combinatie van vrije en gedwongen convectie. Wanneer de door een groot temperatuurverschil opgewekte stroming groot is ten opzichte van de opgelegde stroming overheerst de vrije convectie. Denk hierbij aan de convectieve warmteoverdracht van een radiator. De luchtsnelheid in de kamer is klein, zodat de luchtsnelheid langs de radiator wordt bepaald door de opstijgende warme lucht ten gevolge van het grote temperatuurverschil tussen radiatoroppervlak en omringende lucht.

Voor vrije convectie is het temperatuurverschil van belang, maar ook de afmetingen van het oppervlak waarlangs de lucht stroomt. Hiervoor kan worden aangehouden, voor: verticale wanden:

$$\alpha_c = 1,45 (\Delta T/H)^{0,25} \quad (20)$$

Plafond, vloer; warmtetransport van boven naar beneden:

$$\alpha_c = 0,6 \Delta T^{0,25} \quad (21)$$

Plafond, vloer; warmtetransport van beneden naar boven:

$$\alpha_c = 1,5 \Delta T^{0,33} \quad (22)$$

Hierin is

H hoogte van de wand [m]

ΔT temperatuurverschil tussen wand en lucht [K]

Weliswaar wordt er over convectief transport gesproken, maar in het proces speelt ook de warmtegeleiding een rol. In de hierboven gedefinieerde α_c zijn dus beide mechanismen samengenomen. Meestal is de luchtsnelheid zo groot, dat het convectief warmtetransport het transport door geleiding overheerst ($\lambda_{\text{lucht}} = 0,023 \text{ W/mK}$).

Alleen bij zeer lage luchtsnelheden (bij vrije convectie ten gevolge van kleine temperatuurverschillen) wordt het warmtetransport in lucht bepaald door de geleiding.

Grootte-orden:

- “geen” of weinig wind (binnencondities) $\alpha_c \approx 0,5$ tot 3 SI
- gemiddelde wind buiten $\alpha_c \approx 20$ SI
- storm $\alpha_c \approx 200$ SI

4. Warmteoverdracht door straling

4.1 Inleiding

Wanneer een constructie door de zon wordt bestraald en/of er een temperatuurverschil over een constructie aanwezig is, zal er naar en door de constructie warmtetransport optreden. Om enig inzicht te krijgen in het mechanisme van het warmtetransport door een constructie en van een constructie naar zijn omgeving zullen eerst de verschillende manieren worden behandeld hoe warmtetransport kan plaatshebben, namelijk door:

- geleiding;
- convectie;
- straling.

4.2 Warmteoverdracht door straling

Elk oppervlak straalt een hoeveelheid warmte uit, die wordt bepaald door zijn temperatuur. Volgens de “wet van Stefan-Boltzmann” bedraagt deze straling:

$$E = \varepsilon \sigma T^4$$

Waarin :

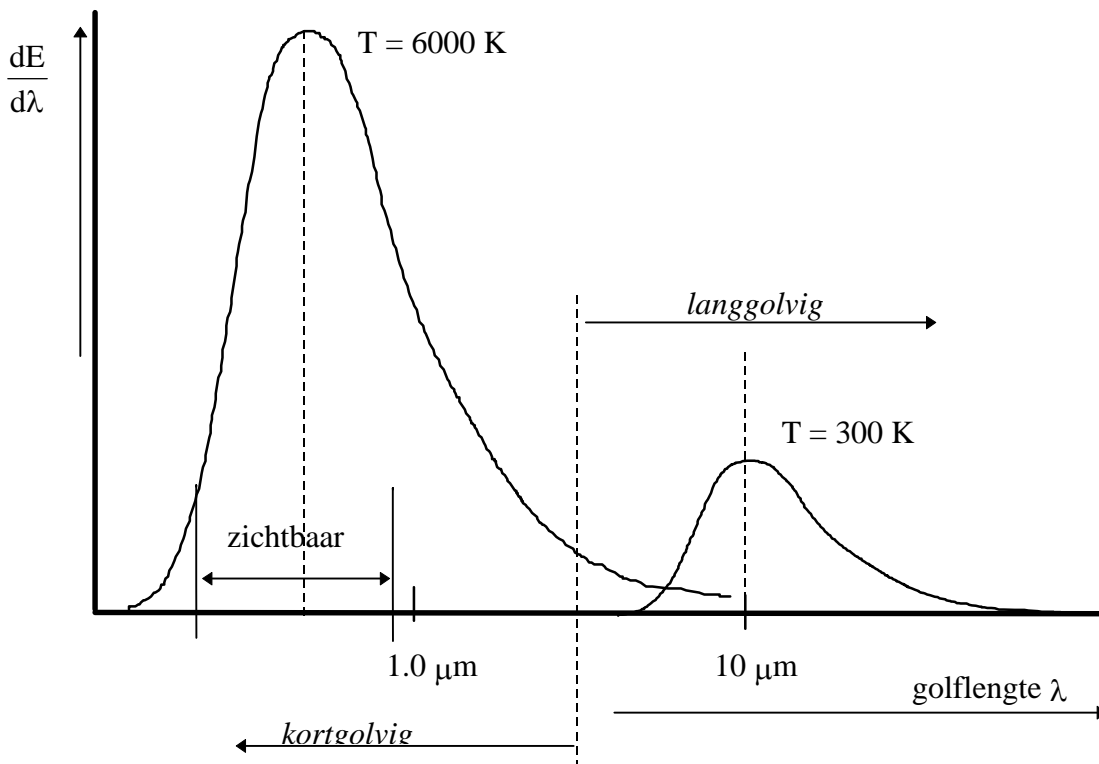
E	stralingswarmtestroomdichtheid per golflengte in [W/m ²]
σ	constante van Stefan-Boltzmann, gelijk aan $5,67 \cdot 10^{-8}$ [W/m ² K ⁴]
ε	emissiecoëfficiënt van het oppervlak [-]
T	temperatuur van het oppervlak in [K]

De emissiecoëfficiënt ε is over het algemeen een functie van de golflengte λ en de temperatuur. Een oppervlak dat de maximale straling uitstraalt die bij zijn temperatuur hoort, noemen we een “zwarte straler” en heeft dus een emissiecoëfficiënt $\varepsilon = 1$.

We beperken ons in deze module slechts tot twee soorten straling, namelijk de kortgolvlige straling (zonnestraling) en de langgolvlige straling met golflengten $> 3 \mu\text{m}$ (zie figuur 1). In deze figuur is de verdeling van de stralingswarmtestroomdichtheid per golflengte gegeven.

In de twee golflengtegebieden nemen we voor de emissiecoëfficiënt ε van elk gebied een constante waarde aan, maar die voor beide gebieden verschillend kunnen zijn.

We spreken dan van “grijze” stralende oppervlakken, waarvan de totale straling dus kleiner is dan de zwarte straler van dezelfde temperatuur.



figuur 1. stralingswarmtestroomdichtheid per golflengte

De plaats van het maximum van de spectrale verdeling voldoet volgens Wien aan de relatie $\lambda_{\max} T = 2,898.10^{-3} \text{ mK}$.

Voor de zonnestraling (kortgolvig, $T \approx 6000 \text{ K}$) is $\lambda_{\max} \approx 0,5 \mu\text{m}$, terwijl voor kamertemperaturen (langgolvig, $T \approx 300 \text{ K}$) $\lambda_{\max} \approx 10 \mu\text{m}$ is. Een deel van de zonnestraling is zichtbaar (licht). De straling bij kamertemperaturen is alleen voelbaar.

Volgens de “wet van Kirchoff” is de emissiecoëfficiënt ε gelijk aan de absorptiecoëfficiënt a , dat wil zeggen, dat het oppervlak even veel straling kan absorberen als emitteren. In het algemeen wordt de opvallende straling op een oppervlak gedeeltelijk gereflecteerd, geabsorbeerd en doorgelaten, zodat voor beide golflengtegebieden geldt:

$$a + r + t = 1$$

Waarin:

- a absorptiecoëfficiënt
- r reflectiecoëfficiënt
- t doorlatingscoëfficiënt

Een zogenaamde zwarte straler heeft een $\varepsilon = a = 1$, reflecteert niets en laat geen straling van de bijhorende golflengte(n) door. Vandaar dat hij zwart wordt genoemd (een zwarte kleur absorbeert al het opvallende licht).

4.2.0 Emissiefactor

De emissiefactor (ε) heeft een waarde die groter dan 0 en kleiner dan 1 is. De waarde hangt af van:

- de temperatuur van een lichaam;
- het materiaal van een lichaam;
- de gesteldheid van het oppervlak.

De meeste bouwmaterialen hebben een emissiefactor die in de buurt van de 0,9 ligt. Met name zeer gladde metaaloppervlakken kunnen een veel kleinere emissiefactor hebben. Zo heeft gepolijst aluminium een emissiefactor van circa 0,05. Hiervan wordt gebruik gemaakt in zogenaamd HR-glas. Dit is dubbel glas waarop aan de spouwzijde van de binnenste glasplaat een uiterst dunne laag metaaloxide is aangebracht. Door deze metaallaag wordt de stralingsuitwisseling tussen de twee glasbladen verminderd.

Materiaaloppervlak	ε
edelmetalen, gepolijst	0,02
aluminium, gepolijst	0,05
menselijke huid	0,80
verf	0,90
papier, hout, aardewerk	0,92
gips, marmer, stucwerk	0,93
glas	0,94
beton	0,95

tabel 1. enkele emissiecoëfficiënten van materiaaloppervlakken, voor het temperatuurgebied van 273 K tot circa 400 K.

4.2.1 Absorptiefactor

De hoeveelheid stralingsenergie die een oppervlak per m^2 treft, wordt de irradiantie (E) van het oppervlak genoemd. De eenheid is W/m^2 . Een deel van de straling kan door het oppervlak geabsorbeerd worden, een ander deel gereflecteerd en de rest doorgelaten. De corresponderende fracties worden achtereenvolgens de absorptiefactor (α), de reflectiefactor (ρ) en de doorlatingfactor (τ) genoemd. Hierbij geldt dat:

$$\alpha + \rho + \tau = 1$$

Een oppervlak met een temperatuur T zal dus energie verliezen door emissie van straling ($\varepsilon \sigma T^4$) en energie winnen door absorptie (αE).

Stel de opvallende straling is afkomstig van een zwarte straler met dezelfde temperatuur als die van het oppervlak, dan geldt:

$$E = \sigma T^4$$

Het netto warmteverlies per m^2 door straling is dan:

$$\varepsilon \sigma T^4 - \alpha E$$

of, anders geschreven:

$$\varepsilon \sigma T^4 - \alpha \sigma T^4$$

Nu kan er volgens de tweede wet van de thermodynamica geen warmtestroom zijn zonder temperatuurverschil. Dus zal moeten gelden:

$$\varepsilon = \alpha$$

De gelijkheid staat bekend als de wet van Kirchhoff. Omdat bouwkundige oppervlakken bij normale temperaturen een emissiefactor van ca. 0,9 hebben, zal dus voor langgolvlige straling de absorptiefactor ook circa 0,9 zijn.

Bouwkundige materialen zijn overigens niet transparant voor langgolvlige straling, dat wil zeggen $\tau = 0$. Pas op, dit geldt ook voor glas. Glas is net zo ondoorzichtig voor langgolvlige infrarode straling als triplex voor licht. De eigenschappen voor langgolvlige straling zijn dus met de emissiefactor meestal volledig bekend:

$$\alpha = \varepsilon; \quad \rho = 1 - \varepsilon; \quad \tau = 0.$$

Let op dat voor kortgolvlige straling, zoals (zon)licht, deze factoren doorgaans andere waarden zullen hebben.

Voorbeeld 1

Een plat dak ($\varepsilon = 0,9$) heeft een oppervlaktetemperatuur aan de buitenzijde van 2°C .

Gevraagd:

De warmtestroom die 's nachts wordt afgegeven in de vorm van straling per m^2 dakoppervlakte in de volgende gevallen:

1. onbewolkte hemel met een irradiantie van 100 W/m^2 .
2. bewolkte hemel, met een wolkendek ($\varepsilon = 0,9$) van 0°C .

Uitwerking:

1. Warmtestroom door straling onbewolkte hemel:

$$\begin{array}{r} \text{Emittantie dak: } 0,9 \times 5,67 \times 10^{-8} \times (275)^4 = \quad 292 \quad \text{W/m}^2 \\ \text{Absorptie dak: } 0,9 \times 100 = \quad \quad \quad \underline{90} \quad \text{W/m}^2 \\ \text{Warmtestroom door straling :} \quad \quad \quad 202 \quad \text{W/m}^2 \end{array}$$

2. Warmtestroom door straling bewolkte hemel:

$$\begin{array}{r} \text{Emittantie dak: } 0,9 \times 5,67 \times 10^{-8} \times (275)^4 = \quad 292 \quad \text{W/m}^2 \\ \text{Absorptie dak: } 0,9 \times 0,9 \times 5,67 \times 10^{-8} \times (273)^4 = \quad \underline{255} \quad \text{W/m}^2 \\ \text{Warmtestroom door straling :} \quad \quad \quad 37 \quad \text{W/m}^2 \end{array}$$

4.3 Langgolvlige en kortgolvlige straling

Zoals in het voorgaande is aangegeven, zijn de eigenschappen van bouwmaterialen voor langgolvlige (warmte)straling en kortgolvlige straling (bij voorbeeld licht) niet gelijk. Zo weerkaatst een donker oppervlak minder licht dan een licht oppervlak, ook al is het oppervlak (materiaal en structuur) voor het overige gelijk. Dientengevolge zullen ook de absorptiecoëfficiënten voor licht verschillen. De absorptiecoëfficiënten (en

emissiecoëfficiënten) voor langgolvlige warmtestraling zijn niet kleurafhankelijk en in beide gevallen gelijk.

Voorbeeld 2

1. Een conventionele radiator (90/70 °C) heeft meestal een lichte kleur. Om de effectiviteit van de warmte-afgifte te vergroten, besluit men deze zwart te verven. Heeft dit zin?
2. Een bouwkundige zonnecollector, opgebouwd (van buiten naar binnen) uit een glasplaat, een luchtpouw en een met water gevuld collectoroppervlak, heeft doorgaans een zwarte kleur. Heeft dit zin?

Uitwerking:

1. Een radiator geeft zowel convectieve warmte als stralingswarmte af. Dit is langgolvlige straling, die afhankelijk is van materiaal en oppervlaktestructuur, doch niet van de kleur van het oppervlak. Een witte en zwarte radiator zullen voor stralingswarmte dezelfde emissiecoëfficiënt bezitten. Het heeft dus geen zin om een lichte radiator zwart te verven.
2. In een zonnecollector gaat het erom zonlicht om te zetten in warmte. Een donker oppervlak is dus zinvol, aangezien hierdoor zoveel mogelijk zonlicht wordt geabsorbeerd. Uiteraard zal met de opwarming van het collectoroppervlak de stralingswarmte vanaf dit oppervlak toenemen. De glasplaat op de collector voorkomt echter dat deze warmte verloren gaat. Hoewel de glasplaat voor kortgolvlige straling (zonlicht) goed doorlatend is, is deze voor langgolvlige warmtestraling vrijwel ondoorlatend. De warmte wordt als het ware opgesloten in de collector.

Vanwege de verschillende eigenschappen van glas voor kortgolvlige straling en langgolvlige straling is er in de zomerperiode een risico van oververhitting in vertrekken met op het zuiden georiënteerde raamopeningen aanwezig. Het zonlicht wordt door het glas in de raamopeningen betrekkelijk goed doorgelaten. Het achterliggende vertrek warmt hierdoor op. Aangezien het glas echter voor warmtestraling ondoorlatend is, blijft deze warmte opgesloten in het vertrek. Oververhitting is in de zomerperiode dan ook goed mogelijk.

Om die reden zijn glastypen ontwikkeld die minder zonlicht doorlaten, een lagere zontoetredingsfactor (ZTA) bezitten. Dit wordt gedaan door een metaalfilmje op het glas aan te brengen. Zonlicht wordt hierdoor voor een deel opgevangen en omgezet in warmte, voordat het in het vertrek terecht komt. Figuur 2 illustreert dit.



figuur 2. elektrisch analogon van een glasblad, waarop aan de buitenzijde een metaalfilmje is aangebracht. Hierdoor wordt een deel van het opvallende zonlicht geabsorbeerd (αE_z), waardoor een verhoging van de temperatuur van het glasblad optreedt.

Zoals uit figuur 2 blijkt, is het gevolg van dergelijk zonwerende beglazing dat het glasvlak toeneemt in temperatuur en warmer wordt dan de omgeving. Het glas kan dus, als gevolg van

de thermische belasting, sterk uitzetten. Hiermee moet in de detaillering rekening gehouden worden.

Het probleem kan enigszins worden ondervangen door glas toe te passen met een lagere absorptiecoëfficiënt en dit te compenseren met een hogere reflectiecoëfficiënt. Immers, ook voor zonlicht geldt:

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad \text{ofwel: } \alpha + \rho = 1 - \tau.$$

Hierin is:

- α : absorptiecoëfficiënt
 ρ : reflectiecoëfficiënt
 τ : transmissiecoëfficiënt (doorlatendheidscoëfficiënt)

Zonwerend glas met een relatief hoge absorptiecoëfficiënt lijkt doorgaans iets donkerder dan normaal glas, maar komt voor het overige hiermee goed overeen. Zonwerend glas met een relatief hoge reflectiecoëfficiënt ziet er daarentegen spiegelend uit.

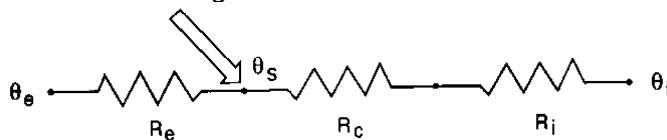
Voorbeeld 3

Een op het zuiden geöriënteerde gevel van steens metselwerk ($d=210$ mm) is aan de buitenzijde mat zwart geverfd. De zon staat pal zuid, waarbij de directe irradiantie op het verticale vlak 430 W/m^2 bedraagt. De diffuse straling op een horizontaal vlak bedraagt 150 W/m^2 . De binnenluchttemperatuur is 18 $^{\circ}C$, de buitenluchttemperatuur is 0 $^{\circ}C$. De warmtegeleidingscoëfficiënt van baksteenmetselwerk bedraagt $1,0$ $W/(m.K)$.

1. Teken het elektrisch analogon.
2. Hoe hoog wordt de oppervlaktetemperatuur van de muur onder de gegeven omstandigheden aan de buitenzijde?

Uitwerking:

1. Elektrisch analogon:



irradiantie op de gevel:	direct:	430	W/m^2
diffuus:	75	W/m^2	(=0,5 x 150)
<u>totaal:</u>	<u>505</u>	<u>W/m^2</u>	
$R_e = 0,04$	$\theta_e = 0$ $^{\circ}C$		
$R_i = 0,13$	$\theta_i = 18$ $^{\circ}C$		
$R_c = 0,21$			

2. Warmtebalans in θ_s :

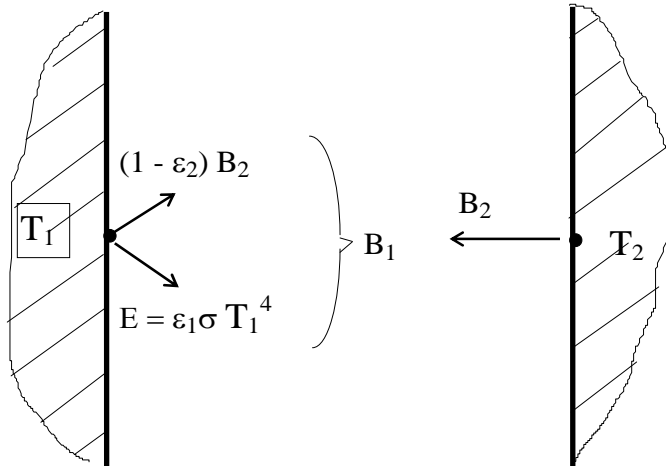
$$(0 - \theta_s) / 0,04 + (18 - \theta_s) / 0,34 + 505 = 0.$$

$$\theta_s = 20,0$$
 $^{\circ}C$.

4.4 Stralingsuitwisseling tussen twee grijs stralende oppervlakken

In figuur 2 zijn twee oppervlakken weergegeven met temperaturen T_1 en T_2 en emissiecoëfficiënten ε_1 en ε_2 .

De oppervlakken emitteren, respectievelijk: $E_1 = \varepsilon_1 \sigma T_1^4$ en $E_2 = \varepsilon_2 \sigma T_2^4$.



figuur 2. stralingsuitwisseling tussen twee grote, grijs stralende oppervlakken

Van het oppervlak 1 vertrekt behalve de eigen straling E_1 ook de gereflecteerde straling afkomstig van oppervlak 2. Evenzo geldt voor oppervlak 2, dat de totale uitgezonden straling de eigen straling E_2 plus de gereflecteerde straling afkomstig van 1 is.

Noem de totale uitgezonden straling van de oppervlakken respectievelijk: B_1 en B_2 .

De netto-straling tussen de oppervlakken is dan gelijk aan

$$q_s = B_1 - B_2. \quad (1)$$

Nu is:

$$B_1 = E_1 + (1 - \varepsilon_1) B_2 \quad (1a)$$

$$B_2 = E_2 + (1 - \varepsilon_2) B_1. \quad (1b)$$

Substitutie van 1b in 1a geeft :

$$B_1 = E_1 + (1 - \varepsilon_1) E_2 + (1 - \varepsilon_1)(1 - \varepsilon_2) B_1$$

Of:

$$B_1 = \frac{E_1 + (1 - \varepsilon_1) E_2}{1 - (1 - \varepsilon_1)(1 - \varepsilon_2)}$$

Evenzo:

$$B_2 = \frac{E_2 + (1 - \varepsilon_2) E_1}{1 - (1 - \varepsilon_1)(1 - \varepsilon_2)}$$

$$\text{Substitutie in (1) levert: } q_s = \frac{E_1 + (1 - \varepsilon_1) E_2 - E_2 + (1 - \varepsilon_2) E_1}{1 - (1 - \varepsilon_1)(1 - \varepsilon_2)}$$

Na enig rekenwerk volgt: $q_s = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2 \sigma T_1^4 - \varepsilon_1 \varepsilon_2 \sigma T_2^4}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 - \varepsilon_1 \varepsilon_2}$

Of :

$$q_s = \varepsilon_{\text{res}} \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (2a)$$

Waarin:

ε_{res} resultierende emissiecoëfficiënt

$$\frac{1}{\varepsilon_{\text{res}}} = \frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \quad (2b)$$

Veel bouwmaterialen zijn thermisch (langgolvlige straling) als bijna “zwart” te beschouwen en hebben een emissiecoëfficiënt $\varepsilon > 0.9$. De uitdrukking voor de resultierende emissiecoëfficiënt ε_{res} vereenvoudigt zich dan tot

$$\varepsilon_{\text{res}} = \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 \quad (2c)$$

Bij kleine temperatuurverschillen kan (2a) worden gelineariseerd tot:

$$q_s = \alpha_s (T_1 - T_2) \quad (3)$$

Dit wordt beschreven in de volgende paragraaf.

4.5 Gemiddelde overdrachtscoëfficiënt voor straling

Voor de stralingsoverdracht tussen twee wanden wordt meestal in analogie met convectieve warmteoverdracht uitgegaan de formule:

$$q_s = \alpha_s \cdot (T_1 - T_2) \quad (1)$$

Waarin:

q_s	warmtestroom van vlak 1 naar vlak 2 in W/m^2
α_s	warmteoverdrachtscoëfficiënt voor straling in W/m^2K
T_1	stralingstemperatuur wand 1 (of gemiddelde van omhullenden in de ruimte) in K
T_2	oppervlaktetemperatuur van wand 2 in K

De waarde van α_s kan als volgt bepaald worden.

Voor de stralingsoverdracht tussen twee grote, oneindige vlakken respectievelijk de situatie waarbij een vlak het andere vlak geheel omhuld ($\varphi_{12} = 1$) is theoretisch af te leiden:

$$q_{12} = \frac{\varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2}{\varepsilon_1 - \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 + \varepsilon_2} \cdot (q_{sz1} - q_{sz2}) \quad (2)$$

Waarbij:

$$q_{sz1} = \sigma T_1^4$$

$$q_{sz2} = \sigma T_2^4$$

Dit is ook te schrijven als:

$$q_s = \varepsilon_{res} \cdot \sigma \cdot (T_1^4 - T_o^4) \quad (3)$$

Waarin:

σ constante van Stephan Boltzman
 ε_{res} resulterende emissiecoëfficiënt

$$\frac{1}{\varepsilon_{res}} = \frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1$$

Een uitdrukking voor α_s wordt gevonden door (1) gelijk te stellen aan (3):

$$\alpha_s = \varepsilon_{res} \cdot \sigma \cdot \frac{(T_1^4 - T_2^4)}{T_1 - T_2} = 2 \cdot \varepsilon_{res} \cdot \sigma \cdot (T_1^2 + T_2^2) \cdot \frac{T_1 + T_2}{2} \quad (4)$$

Met $T_{gem} = (T_1 + T_2)/2$ kan dit worden geschreven als

$$\alpha_s = 2 \cdot \varepsilon_{res} \cdot \sigma \cdot \left[\left(T_{gem} + \frac{\Delta T}{2} \right)^2 + \left(T_{gem} - \frac{\Delta T}{2} \right)^2 \right] \cdot T_{gem} = 4 \cdot \varepsilon_{res} \cdot \sigma \cdot T_{gem}^3 \cdot \left[1 + \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta T}{T_{gem}} \right)^2 \right] \quad (5)$$

Indien $\frac{\Delta T}{T_{gem}} \ll 1$, waarvan in de bouw bijna steeds sprake is, gaat de uitdrukking over in:

$$\alpha_s = 4 \cdot \varepsilon_{res} \cdot \sigma \cdot T_{gem}^3 \quad (6)$$

In de bouwpraktijk heeft de temperatuur over het algemeen een waarde van circa 300 [K]; voor (6) geldt dan:

$$\alpha_s = 6 \cdot \varepsilon_{res} \quad (7)$$

4.6 Convectie en straling

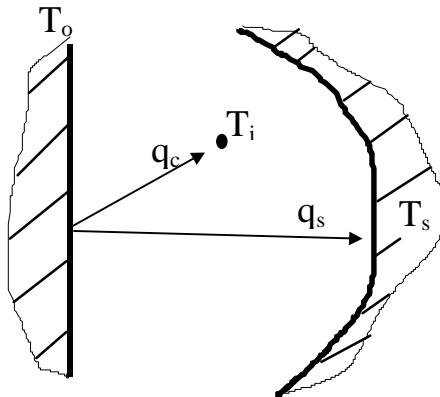
In veel gevallen zijn de warmteoverdrachtscoëfficiënten voor convectie en straling samen te voegen tot één warmteoverdrachtscoëfficiënt α . Dit doet zich voor bij de warmteoverdrachtscoëfficiënten α_i aan de binnenzijde en α_e aan de buitenzijde van een constructie, die de scheiding vormt tussen binnen en buiten. De warmteoverdrachtscoëfficiënt aan de buitenzijde α_e komt in een andere module aan de orde. In deze module wordt de warmteoverdrachtscoëfficiënt alleen aan de binnenzijde α_i beschouwd. In figuur 3 wordt de gevel geschematiseerd tot een vlak met een temperatuur T_o en de wanden, vloer en plafond, waarvan gemakshalve is aangenomen dat zij allemaal dezelfde temperatuur bezitten tot een vlak met temperatuur T_s .

Tussen de oppervlakken met temperaturen T_o en T_s heeft warmteoverdracht door straling plaats, terwijl tussen het oppervlak met T_o en de lucht met T_i convectieve warmteoverdracht optreedt.

De totale warmtestroomdichtheid die het vlak met T_o verlaat, kan worden geschreven als:

$$q_{i,tot} = q_c + q_s = \alpha_c(T_o - T_i) + \alpha_s(T_o - T_s) \quad (5)$$

De warmtetransmissie door straling kan ook worden uitgedrukt als functie van het temperatuurverschil T_o tussen en de luchttemperatuur T_i met: $q_s = \alpha_s^{eff}(T_o - T_i)$.



figuur 3. convectieve- en stralingsoverdracht tussen twee oppervlakken

Hierin is een effectieve warmteoverdrachtscoëfficiënt voor straling ingevoerd, die gelijk is aan:

$$\alpha_s^{eff} = \alpha_s \frac{T_o - T_s}{T_o - T_i}$$

Indien T_s gelijk is aan T_i dan wordt $\alpha_s^{eff} = \alpha_s$.

De uitdrukking voor de totale warmtestroomdichtheid, die het oppervlak verlaat, luidt dus:

$$q_{i,tot} = \alpha_c(T_o - T_i) + \alpha_s^{eff}(T_o - T_i)$$

Of:

$$q_{i,\text{tot}} = \alpha_i (T_o - T_i) \quad (6)$$

Met:

$$\alpha_i = \alpha_c + \alpha_s^{\text{eff}}$$

Wanneer het oppervlak met de temperatuur T_o wordt omsloten door vlakken die elk een andere temperatuur bezitten, moet worden gewerkt met een gemiddelde stralingstemperatuur $T_{s,\text{gem}}$. Het zou te ver voeren om in deze module hierop in te gaan. Een eerste benadering voor de waarde van de gemiddelde stralingstemperatuur wordt verkregen door de temperaturen over de oppervlakken te middelen.

Dus:

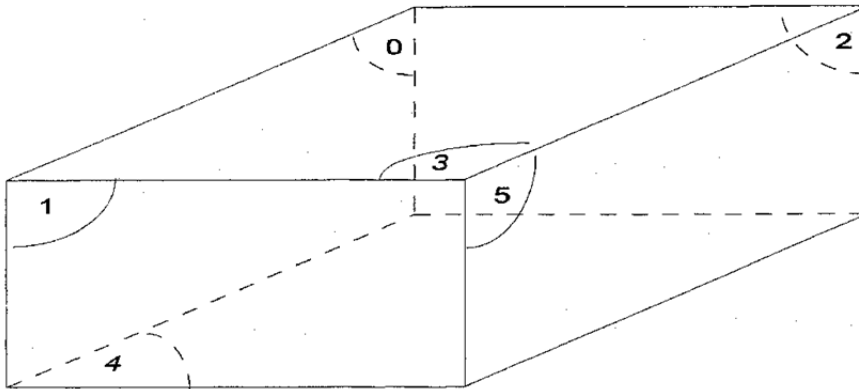
$$T_{s,\text{gem}} = \sum_{i=1}^n \frac{A_i \cdot T_i}{A_{\text{totaal}}}$$

5. Stralingstemperatuur

5.1 Berekenen stralingstemperatuur

Voor het berekenen van de gemiddelde stralingstemperatuur op een bepaalde plaats in een vertrek heeft men zichtfactoren nodig voor een punt (bolvormig elementje) ten opzichte van een vlak. Onder andere voor het bepalen van de thermische behaaglijkheid is de gemiddelde stralingstemperatuur van belang. De gemiddelde stralingstemperatuur is gedefinieerd als de temperatuur van een fictief, "zwart" vlak ($\varepsilon = 1$) dat het te beschouwen punt (vlak) geheel omsluit ($\phi = 1$), waarbij de totale warmtestroom door straling die het te beschouwen punt of vlak ontvangt, gelijk is aan die in de werkelijke situatie.

Als voorbeeld dient een van de wanden van een vertrek. Deze wordt geheel door de andere omsloten (zie figuur 1).



figuur 1. de zes wanden van een vertrek

De emissiecoëfficiënt voor alle vlakken wordt $\varepsilon = 1$ genomen ("zwart").
De warmteoverdracht van vlak 1 naar de overige wanden is:

$$q_{tot} = \sigma \cdot A_1 \cdot \sum_{i=2}^{n=6} \phi_{1i} \cdot (T_1^4 - T_i^4) \quad (1)$$

Hierin is:

A_1	oppervlakte van vlak 1 in m^2
ϕ_{1i}	zichtfactoren van vlak 1 t.o.v. de overige vlakken i
T_i	temperatuur van de verschillende vlakken in K
T_1	temperatuur van vlak 1 in K

Nu worden de vijf wanden van het vertrek vervangen door één fictief "zwart" vlak met een temperatuur T_s dat eveneens vlak 1 aan de binnenzijde zodanig omsluit, dat de totale netto warmtestroom van 1 naar dit fictieve vlak gelijk is aan de warmtestroom van 1 naar de 5 werkelijke wanden.

T_s stelt hierbij de gemiddelde stralingstemperatuur voor. De zichtfactor van vlak 1 naar dit fictieve vlak is gelijk aan 1, zodat:

$$q_{tot} = \sigma A_1 \cdot 1 \cdot (T_1^4 - T_s^4) \quad (2)$$

Gelijkstellen van de vergelijkingen (1) en (2), waarbij door $\sigma \cdot A_1$ kan worden gedeeld, levert op:

$$T_1^4 - T_s^4 = (\phi_{12} + \phi_{13} + \phi_{14} + \phi_{15} + \phi_{16}) \cdot T_1^4 - \phi_{12} T_2^4 - \phi_{13} T_3^4 - \phi_{14} T_4^4 - \phi_{15} T_5^4 - \phi_{16} T_6^4$$

Omdat de resterende 5 wanden vlak 1 geheel omsluiten, is de som van de zichtfactoren $\sum \phi_{1i} = 1$ en volgt hieruit voor T_s :

$$T_s^4 = \phi_{12} T_2^4 + \phi_{13} T_3^4 + \phi_{14} T_4^4 + \phi_{15} T_5^4 + \phi_{16} T_6^4 \quad (3)$$

Substitutie van de gemiddelde stralingstemperatuur uit (3) in (2) levert de totale warmtestroom door straling. Vergelijking (3) is voor relatief lage temperaturen te lineariseren door van Kelvin over te gaan op graden Celcius.

Omzetten van de temperatuur van Kelvin in graden Celcius middels substitutie van $t_i = T_i - 273$, $i=2..6$ in (3) levert na deling door 273^4 en verwaarlozing van hogere graadstermen in $(t_s/273)$.

$$t_s = \phi_{12} t_2 + \phi_{13} t_3 + \phi_{14} t_4 + \phi_{15} t_5 + \phi_{16} t_6 \quad (4)$$

Met:

t temperatuur in °C

De uitdrukkingen (3) en (4) die zijn afgeleid voor een vlak dat geheel omgrend is door zwarte vlakken, kunnen ook toegepast worden bij de berekening van de stralingsuitwisseling tussen een voorwerp dat geheel door andere omsloten wordt, bij voorbeeld door een oven in een ruimte of een menselijk hoofd in een vertrek.

Hoewel de formules zijn afgeleid voor zwarte vlakken $\varepsilon = 1$, bieden ze ook voldoende nauwkeurigheid voor andere vlakken, mits het merendeel van de wanden als overwegend zwart kan worden beschouwd ($\varepsilon \geq 0,85$)

In gevallen met zeer kleine verschillen tussen de diverse wandtemperaturen, zoals bij inpandige ruimten, kan men de gemiddelde stralingstemperatuur ook redelijk benaderen door de wandtemperaturen eenvoudig naar oppervlak te middelen.

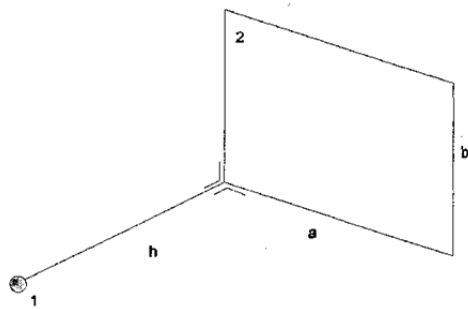
$$t_s = \frac{\sum_j A_j \cdot t_j}{\sum_j A_j} \quad (5)$$

Echter, zodra er een vlak met een sterk afwijkende temperatuur ($\Delta T > 10$ [°C]) zich dichtbij het punt of vlak bevindt waarvoor de stralingstemperatuur wordt bepaald, gaat dit niet meer op. In deze definitie (5) is de gemiddelde stralingstemperatuur onafhankelijk van de plaats van het ontwerp, wat principieel onjuist is. Immers, het maakt uit of men dichtbij of ver van een koud raam af staat.

Voor het bepalen van de gemiddelde stralingstemperatuur op een willekeurige plaats in een vertrek kan men zich in dat punt een bol-oppervlak van willekeurig kleine afmetingen voorstellen, dat warmtestraling uitwisselt met alle wanden van het vertrek. Ook voor zo'n bolvormig elementje (punt) respectievelijk een oneindig klein vlakje zijn zichtfactoren afgeleid.

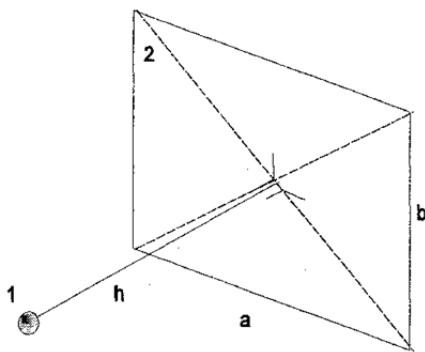
De figuren 2 t/m 5 geven voor verschillende situaties de formules voor φ_{12} weer.

Voor punten of oppervlakte-elementjes die niet precies boven het hoekpunt van een rechthoekig vlak zijn gelegen, kan de zichtfactor analoog aan de in figuur 1 (zie module W-14; "Het bepalen van zichtfactoren") gegeven methode worden bepaald uit de geometrische factoren van een aantal hulpvlakken.



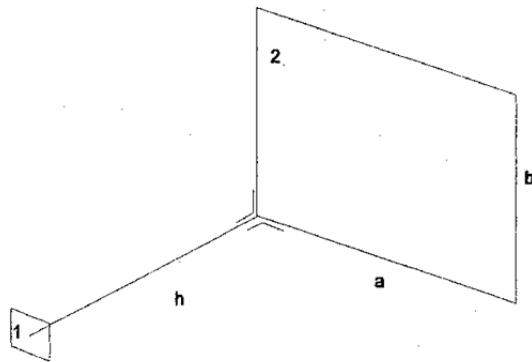
$$\varphi_{12} = \frac{1}{4\pi} \cdot \text{arctg} \frac{a \cdot b}{h \cdot \sqrt{a^2 + b^2 + h^2}}$$

figuur 2. bolvormig elementje (punt) gelegen boven een hoek van een rechthoekig vlak



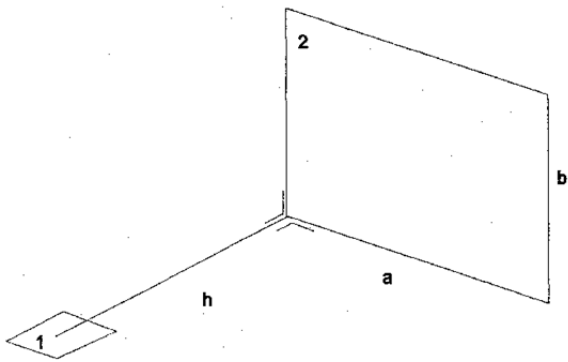
$$\varphi_{12} = \frac{1}{\pi} \cdot \text{arctg} \frac{\frac{a}{2h} \cdot \frac{b}{2h}}{\sqrt{\left(\frac{a}{2h}\right)^2 + \left(\frac{b}{2h}\right)^2 + 1}}$$

figuur 3. bolvormig element midden boven vlak



$$\varphi_{12} = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{\frac{a}{h}}{\sqrt{\left(\frac{a}{h}\right)^2 + 1}} \text{arctg} \frac{\frac{b}{h}}{\sqrt{\left(\frac{a}{h}\right)^2 + 1}} + \frac{\frac{b}{h}}{\sqrt{\left(\frac{b}{h}\right)^2 + 1}} \text{arctg} \frac{\frac{a}{h}}{\sqrt{\left(\frac{b}{h}\right)^2 + 1}} \right]$$

figuur 4. evenwijdig vlakje boven hoek



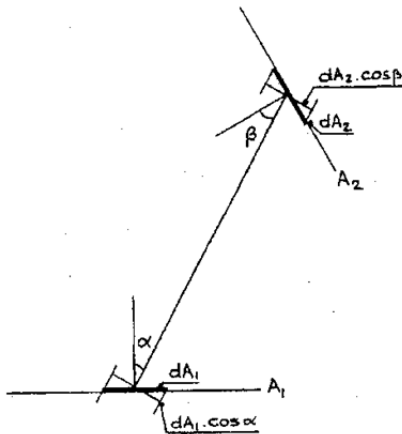
$$\varphi_{12} = \frac{1}{2\pi} \left[\operatorname{arctg} \frac{b}{h} - \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{a}{h}\right)^2 + 1}} \operatorname{arctg} \frac{b}{\sqrt{a^2 + h^2}} \right]$$

figuur 5. vlakje loodrecht boven hoek ander vlak

6. Warmteoverdracht door straling tussen bouwdelen

6.1 Warmtestraling tussen willekeurig geplaatste, eindige vlakken

De stralingsoverdracht tussen eindige vlakken is aanzienlijk moeilijker te berekenen dan de stralingsuitwisseling tussen oneindig grote evenwijdige vlakken. Men dient hiervoor te bepalen welk deel van de door één van de vlakken uitgezonden straling daadwerkelijk op het andere terecht komt. In figuur 1 zijn twee willekeurige vlakken getekend. Op oppervlak A_1 ligt het oppervlakte-elementje dA_1 en op oppervlak A_2 het elementje dA_2 .



figuur 1. uitwisseling van stralingswarmte tussen twee willekeurige vlakjes (zwarte stralers)

De afstand tussen de elementjes is r . De hoek die de verbindinglijn tussen beide oppervlakte-elementjes maakt met de normaal op de vlakken is $\alpha = \theta_1$ respectievelijk $\beta = \theta_2$.

Analoog aan het uitzenden van licht door een lichtbron kan voor de warmtestraling bij diffuus stralende oppervlakken ook een intensiteit I en een luminantie L gedefinieerd worden:

	intensiteit I	luminantie L
licht	$\text{Cd} = \text{lm}/\text{sr}$	$\text{Cd}/\text{m}^2 = \text{lm}/(\text{sr} \cdot \text{m}^2)$
warmte	W/sr	$\text{W}/(\text{sr} \cdot \text{m}^2)$

tabel 1. analogie tussen licht (kortgolvlige straling) en warmtestraling (langgolvlige straling)

Beschouwd wordt nu de straling die wordt uitgezonden door elementje dA_1 naar dA_2 ; randvoorwaarde hierbij is dat de vlakken diffuus stralen en reflecteren.

Elementje dA_1 straalt per oppervlakte-eenheid een totale hoeveelheid warmte uit in de erboven liggende halfruimte die gelijk is aan:

$$P = \sigma \cdot T_1^4 \quad (1)$$

Met:

- P uitgestraalde energie per oppervlakte eenheid in W/m^2
 σ constante van Stefan Boltzmann = $5,67 \cdot 10^{-8}$ in $\text{W}/\text{m}^2\text{K}^4$

T_1 absolute temperatuur van het oppervlak in K

Vanwege het uitgangspunt van een diffuus stralend vlak geldt ook dat $P = \pi L$. Hiermee wordt de luminantie:

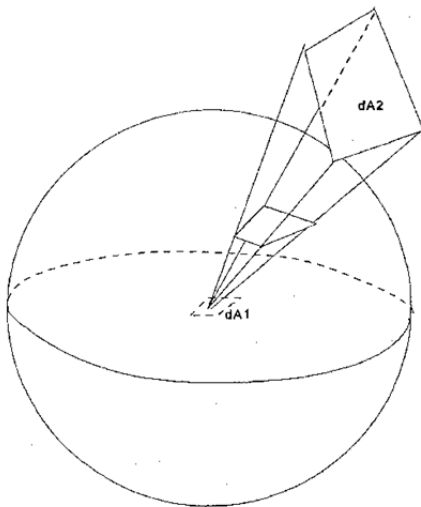
$$L = \frac{P}{\pi} = \frac{1}{\pi} \sigma \cdot T_1^4 \quad (2)$$

De intensiteit van de door dA_1 in de richting met hoek α uitgezonden straling volgt uit (zie ook figuur 1).

$$I_\alpha = L \cdot dA_1 \cdot \cos \alpha \quad (3)$$

De hoeveelheid straling van dA_1 die terechtkomt op dA_2 is de stralingsintensiteit van elementje 1, vermenigvuldigd met de ruimtehoek die door het oppervlakte-elementje dA_2 wordt omsloten gezien vanuit dA_1 .

Een ruimtehoek is gedefinieerd als het deel dat uit een boloppervlak op afstand r wordt gesneden, gedeeld door deze afstand in het kwadraat. Als het oppervlakte-elementje niet in dat denkbeeldige boloppervlak ligt omdat het niet loodrecht op de straal van de bol ligt, moet het eerst op de bol worden geprojecteerd (zie figuur 2). Men moet rekenen met het "schijnbaar" aanwezige oppervlak.



figuur 2. projectie van een willekeurig vlak dA_2 op een bol rond vlak dA_1

dA_1 ziet het oppervlak dA_2 onder de ruimtehoek:

$$d\omega = \frac{dA_2 \cdot \cos \beta}{r^2} \quad (4)$$

De warmtestroom van dA_1 naar dA_2 is gelijk aan:

$$dq_1 = L dA_1 \cdot \cos \alpha \cdot d\omega = \frac{1}{\pi} \cdot \sigma T_1^4 \cdot \frac{\cos \alpha \cdot \cos \beta}{r^2} \cdot dA_1 dA_2 \quad (5)$$

Op dezelfde manier is te schrijven voor de warmtestroom van vlakje dA_2 die terechtkomt op dA_1 :

$$dq_2 = L dA_2 \cdot \cos \beta \cdot d\omega = \frac{1}{\pi} \cdot \sigma T_2^4 \cdot \frac{\cos \alpha \cdot \cos \beta}{r^2} \cdot dA_1 dA_2 \quad (6)$$

De netto straling van dA_1 naar dA_2 is als er geen sprake is van reflectie, dat wil zeggen als er uitgegaan wordt van zwarte stralers met $\varepsilon = 1$:

$$dq_{12} = \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4) \cdot \frac{1}{\pi} \cdot \frac{\cos \alpha \cdot \cos \beta}{r^2} \cdot dA_1 dA_2 \quad (7)$$

De netto warmtestroom van A_1 naar A_2 bedraagt:

$$q_{12} = \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4) \cdot \frac{1}{\pi} \iint \frac{\cos \alpha \cdot \cos \beta}{r^2} \cdot dA_1 dA_2 \quad (8)$$

De geometrische zichtfactor φ_{12} is gedefinieerd als:

$$A_1 \varphi_{12} = \frac{1}{\pi} \iint \frac{\cos \alpha \cos \beta}{r^2} \cdot dA_1 dA_2 \quad (9)$$

Op dezelfde wijze kan men voor de straling die door A_2 wordt uitgezonden in de richting van A_1 eenzelfde formule afleiden:

$$A_2 \varphi_{21} = \frac{1}{\pi} \iint \frac{\cos \alpha \cos \beta}{r^2} \cdot dA_1 dA_2 \quad (10)$$

Blijkbaar geldt:

$$A_1 \varphi_{12} = A_2 \varphi_{21} \quad (11)$$

De zichtfactor φ_{12} geeft als het ware aan hoe het ene oppervlak door het andere wordt gezien.

Als alle straling van vlak 1 op vlak 2 valt, is de zichtfactor gelijk aan 1. Dat wil zeggen dat vlak 1 alleen vlak 2 "ziet".

Deze configuratie doet zich voor als:

- beide vlakken evenwijdig en oneindig groot zijn;
- vlak 1 geheel door vlak 2 wordt omsloten.

In alle andere gevallen is de zichtfactor < 1 .

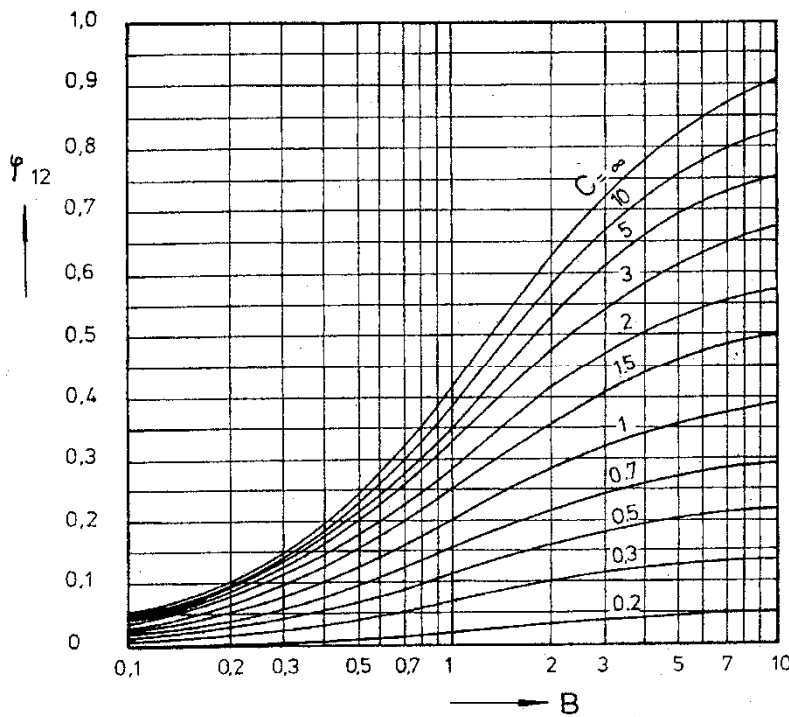
Er zijn in de literatuur voor verschillende geometrische configuraties waarden voor de zichtfactor te vinden. Zo geven figuur 3 en 4 de zichtfactor tussen twee evenwijdige vlakken respectievelijk twee loodrecht op elkaar staande vlakken (zie ook module W-14; Het bepalen van zichtfactoren).

Indien niet wordt uitgegaan van zwarte stralers maar van een emissiefactor ϵ_1 voor het oppervlak A_1 respectievelijk ϵ_2 voor het oppervlak A_2 dan is de stralingsoverdracht als volgt te beschrijven: De netto stralingsoverdracht tussen de twee vlakken is het verschil tussen de hoeveelheid straling die beide vlakken van de door het andere vlak geëmitteerde straling uiteindelijk (na vele reflecties) absorberen.

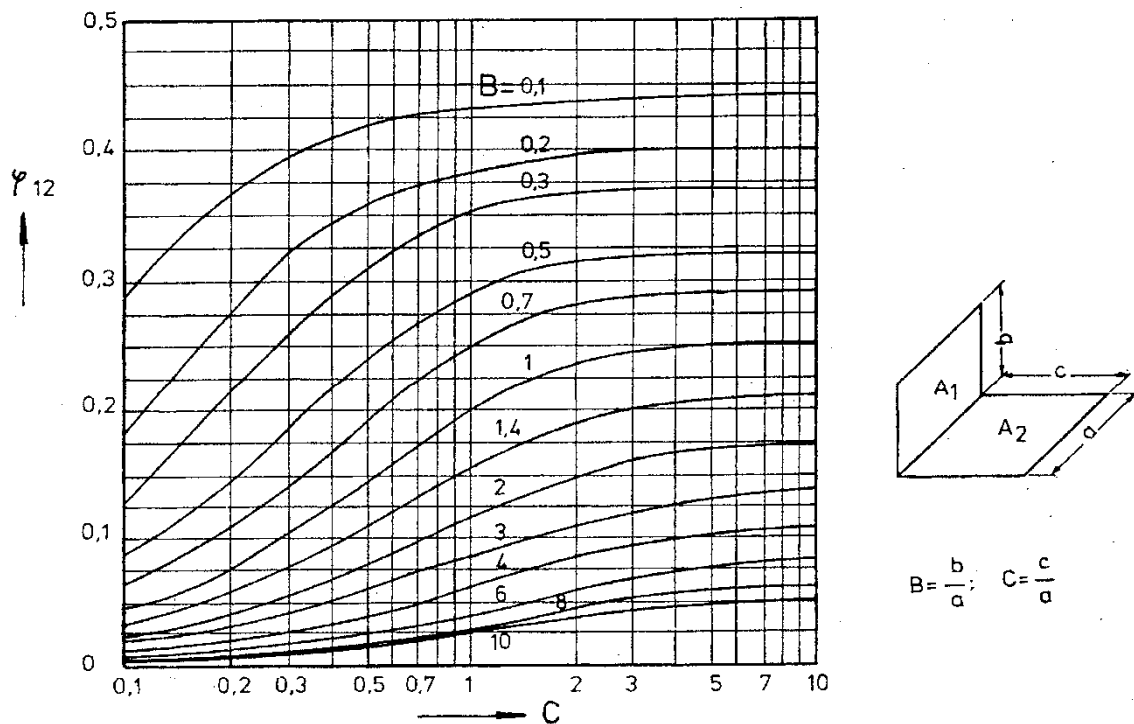
De straling die vlak 1 emitteert gaat de volgende weg:

A_1 emitteert	$\epsilon_1 q_{sz1} \cdot A_1$
A_2 ontvangt hiervan	$\epsilon_1 q_{sz1} \cdot A_1 \cdot \phi_{12}$
A_2 reflecteert hiervan	$(\epsilon_1 q_{sz1} \cdot A_1 \cdot \phi_{12}) \cdot r_2$
A_1 ontvangt hiervan	$(\epsilon_1 q_{sz1} \cdot A_1 \cdot \phi_{12}) \cdot r_2 \cdot \phi_{21}$
A_1 reflecteert hiervan in totaal	$r_1 \cdot (\epsilon_1 q_{sz1} \cdot A_1 \cdot \phi_{12}) \cdot r_2 \cdot \phi_{21}$
A_2 ontvangt hiervan	$r_1 \cdot (\epsilon_1 q_{sz1} \cdot A_1 \cdot \phi_{12}) \cdot r_2 \cdot \phi_{21} \cdot \phi_{12}$
enz.	

waarbij $q_{sz1} = \sigma T_1^4$



figuur 3. blikfactor tussen twee evenwijdige vlakken



figuur 4. blikfactor tussen twee vlakken loodrecht op elkaar

Totaal wordt door vlak A_2 de volgende straling van vlak A_1 geabsorbeerd:

$$\begin{aligned}
 q_{12;a} &= \varepsilon_2 \cdot (\varepsilon_1 q_{sz1} A_1 \phi_{12} + \varepsilon_1 q_{sz1} A_1 \phi_{12} \cdot r_2 \cdot \phi_{21} \cdot r_1 \cdot \phi_{12} + \dots) \\
 &= \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 q_{sz1} A_1 \phi_{12} \cdot (1 + r_2 \cdot \phi_{21} \cdot r_1 \cdot \phi_{12} + r_2^2 \cdot \phi_{21}^2 \cdot r_1^2 \cdot \phi_{12}^2 + \dots)
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

De uitdrukking tussen de haken in formule 12 is een oneindige reeks die kan worden gesommeerd, zodat:

$$q_{12;a} = \frac{\varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 \cdot q_{sz1} \cdot A_1 \cdot \phi_{12}}{1 - r_1 \cdot r_2 \cdot \phi_{12} \cdot \phi_{21}}
 \tag{13}$$

Voor de hoeveelheid die vlak 1 uiteindelijk absorbeert van de door vlak 2 geëmitteerde straling kan eenzelfde uitdrukking als (13) worden gevonden. De netto stralingsoverdracht volgt uit het verschil van deze twee:

$$q_{12} = q_{12;a} - q_{21;a}$$

Na invullen van formule (13) en $r=1-\varepsilon$ volgt hieruit:

$$q_{12} = \frac{\varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 \cdot A_1 \cdot \phi_{12}}{1 - (1 - \varepsilon_1) \cdot (1 - \varepsilon_2) \cdot \frac{A_1}{A_2} \cdot \phi_{12}^2} \cdot (q_{sz1} - q_{sz2})
 \tag{14}$$

Waarbij:

$$q_{sz1} = \sigma T_1^4$$

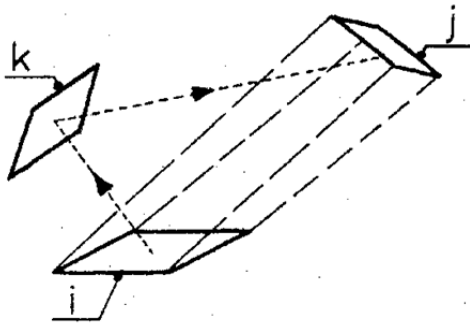
$$q_{sz2} = \sigma T_2^4$$

Voor de meeste bouwmaterialen geldt $\varepsilon > 0,85$. In dat geval maakt men slechts een beperkte fout als de formule (14) vereenvoudigd wordt tot:

$$q_{12} = \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 \cdot A_1 \cdot \phi_{12} \cdot (q_{sz1} - q_{sz2}) \quad (15)$$

6.2 Stralingsoverdracht in een ruimte

Formules (14) en (15) gelden alleen als er geen andere reflecterende wanden (globaal met $\varepsilon < 0,5$) aanwezig zijn. Als dit wel het geval is, zal een deel van de door vlak A_1 uitgezonden straling ook via reflectie tegen andere wanden op A_2 terechtkomen (zie figuur 5). De invloed kan normaliter beperkt worden tot het in rekening brengen van de eerste reflectie.



figuur 5. stralingsuitwisseling via reflectie tegen een derde wand

Beschouw nu weer de twee platte vlakken 1 en 2 en een willekeurig plat vlak k met een reflectiefactor r_k :

Vlak 2 absorbeert nu totaal van vlak 1:

$$q_{12;a} = \varepsilon_1 \cdot q_{sz1} \cdot A_1 \cdot \phi_{12} \cdot \varepsilon_2 + \varepsilon_1 \cdot q_{sz1} \cdot A_1 \cdot \phi_{1k} \cdot r_k \cdot \phi_{k2} \cdot \varepsilon_2 \quad (16)$$

Voor n -vlakken wordt dit:

$$q_{12;a} = \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 \cdot q_{sz1} \cdot (A_1 \phi_{12} + \sum_{k=3}^n A_1 \phi_{1k} r_k \phi_{k2}) \quad (17)$$

De sommatieterm bevat $(n-2)$ termen omdat bij platte vlakken voor $k=1$ en $k=2$ de termen ϕ_{11} en ϕ_{22} gelijk aan nul worden. Omgekeerd absorbeert vlak 1 van vlak 2 totaal:

$$q_{21;a} = \varepsilon_2 \cdot \varepsilon_1 \cdot q_{sz2} \cdot (A_2 \phi_{21} + \sum_{k=3}^n A_2 \phi_{2k} r_k \phi_{k1}) \quad (18)$$

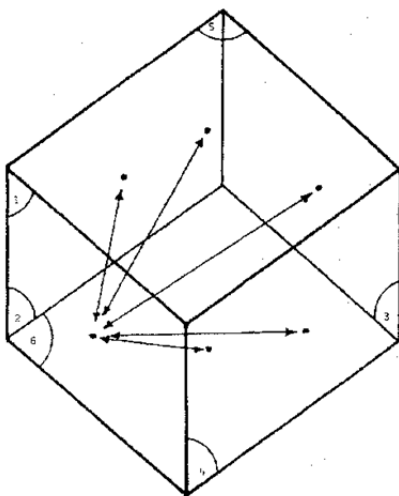
Verder geldt formule (11) nog steeds, zodat de sommatie-termen in de formules (17) en (18) aan elkaar gelijk zijn. Daarmee wordt de uiteindelijke netto straling van vlak 1 naar vlak 2:

$$q_{12} = \varepsilon_1 \varepsilon_2 (A_1 \phi_{12} + \sum_{k=1}^n A_2 \phi_{1k} r_k \phi_{k2}) (q_{sz,1} - q_{sz,2}) \quad (19)$$

of algemeen gesteld:

$$q_{ij} = \varepsilon_i \varepsilon_j (A_i \phi_{ij} + \sum_{k=1}^n A_i \phi_{ik} r_k \phi_{kj}) (q_{sz,i} - q_{sz,j}) \quad (20)$$

In het geval van zwarte stralers hoeft geen rekening te worden gehouden met straling die via andere vlakken dan de twee beschouwde wordt gereflecteerd en kan volstaan worden met de stralingsuitwisseling tussen alle wanden onderling, twee aan twee te beschouwen (zie figuur 6).



figuur 6. uitwisseling van straling van vlak i met de overige vlakken in een vertrek

Als een vlak volledig door een vlak wordt omsloten, bij voorbeeld zoals bij twee concentrische bolvormige die "alleen elkaar zien", is de zichtfactor $\phi = 1$. Hetzelfde geldt voor de twee oneindig grote, evenwijdige vlakken. Bij een vlak dat volledig door een aantal andere vlakken wordt omsloten, zoals een van de wanden van een vertrek, is de som van de zichtfactoren van dit vlak naar de omsluitende vlakken gelijk aan:

$$\sum \phi_{ij} = 1 \quad (21)$$

Voor het in figuur 6 getekende voorbeeld geldt:

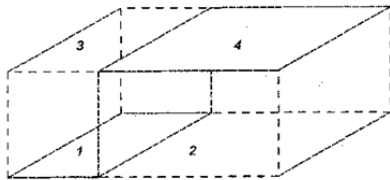
$$\phi_{12} + \phi_{13} + \phi_{14} + \phi_{15} + \phi_{16} = 1 \quad (22)$$

7. Het bepalen van zichtfactoren

7.1 Grafische methode

Het bepalen van de zichtfactor voor twee willekeurige vlakken is geen eenvoudige zaak. In principe moet een viervoudige integraal opgelost worden. De oplossingen kunnen analytisch worden uitgeschreven. Dit leidt zelfs voor de meest eenvoudige gevallen al tot zeer omvangrijke formules.

Op basis van de exacte analytische oplossing is voor een groot aantal standaardgevallen grafieken opgesteld met behulp waarvan de zichtfactoren bepaald kunnen worden. Een tweetal van deze grafieken is als figuur 3 en 4 opgenomen in module W-13; "Warmteoverdracht door straling tussen bouwdeelen".



figuur 1. twee niet tegenover elkaar liggende parallele vlakken

De zichtfactor tussen de vlakken 1 en 4 van figuur 1 die niet tegenover elkaar liggen, kan met behulp van de basisgrafiek voor parallele vlakken van figuur 3 (zie module W-13; "Warmteoverdracht door straling tussen bouwdeelen") als volgt worden bepaald: breng twee denkbeeldige vlakken aan waarin de twee beschouwde vlakken zijn opgenomen (1+2 en 3+4). Voor deze vlakken kan de zichtfactor $\phi_{1+2 \rightarrow 3+4}$ bepaald worden. Het is duidelijk dat de aldus gevonden waarde moet worden gecorrigeerd: de warmteoverdracht tussen de vlakjes 1 en 3 en de vlakjes 2 en 4 moet ervan worden afgetrokken. Dat gaat als volgt:

$$A_1 \cdot \phi_{1 \rightarrow 4} = (A_1 + A_2) \cdot \phi_{1+2 \rightarrow 3+4} - A_1 \cdot \phi_{1 \rightarrow 3} - A_2 \cdot \phi_{2 \rightarrow 4} - A_2 \cdot \phi_{2 \rightarrow 3} \quad (1)$$

$\phi_{1+2 \rightarrow 3+4}$, $\phi_{1 \rightarrow 3}$ en $\phi_{2 \rightarrow 4}$ zijn eenvoudig uit de grafiek te bepalen. Dit geldt niet voor $\phi_{2 \rightarrow 3}$.

Echter, uit symmetrie overwegingen geldt:

$$A_2 \cdot \phi_{2 \rightarrow 3} = A_3 \cdot \phi_{3 \rightarrow 2} = A_1 \cdot \phi_{1 \rightarrow 4} \quad (2)$$

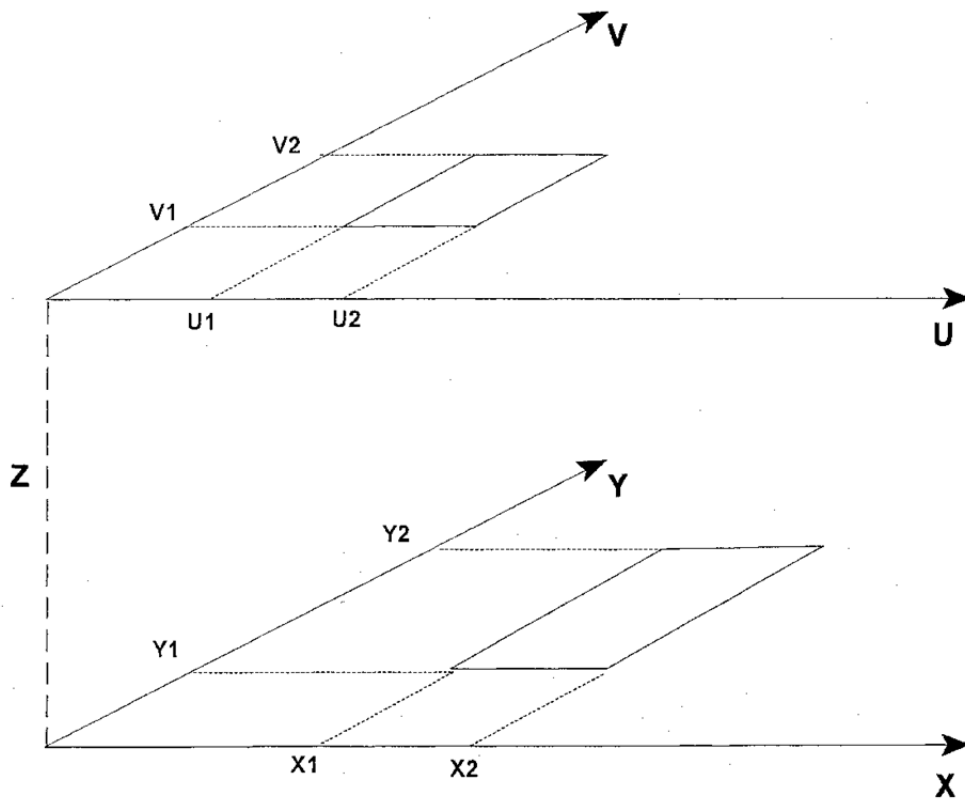
zodat:

$$\phi_{1 \rightarrow 4} = \frac{1}{2 \cdot A_1} \cdot [(A_1 + A_2) \cdot \phi_{1+2 \rightarrow 3+4} - A_1 \cdot \phi_{1 \rightarrow 3} - A_2 \cdot \phi_{2 \rightarrow 4}] \quad (3)$$

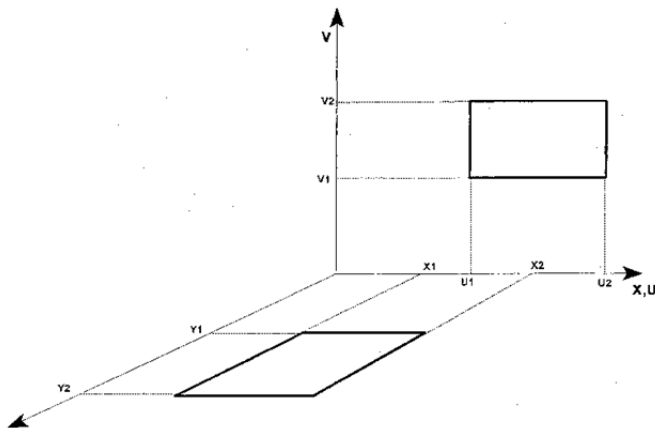
7.2 Analytische methode

7.2.1 Zichtfactoren tussen eindige vlakken

Het bepalen van de zichtfactoren via grafieken en “zichtfactoren algebra” is vrij veel werk. Ook is de nauwkeurigheid niet zo groot maar wel de kans op vergissingen. Hierna worden formules gegeven voor het bepalen van geometrische factoren tussen evenwijdige of loodrecht op elkaar staande rechthoekige vlakken van willekeurige vorm. In figuren 2 en 3 is aangegeven hoe de coördinaten die in de formule worden gebruikt, moeten worden bepaald.



figuur 2. aanduiding van coördinaten voor bepalen van zichtfactor tussen twee evenwijdige rechthoekige vlakken



figuur 3. aanduiding van de coördinaten voor het bepalen van de zichtfactor tussen twee loodrecht op elkaar staande rechthoekige vlakken

Voor onderling evenwijdige vlakken geldt (zie figuur 2):

$$\begin{aligned}
 F(x, y, u, v) &= (u-x) \cdot \sqrt{z^2 + (v-y)^2} \cdot \operatorname{arctg}\left(\frac{u-x}{\sqrt{z^2 + (v-y)^2}}\right) \\
 &+ (v-y) \cdot \sqrt{z^2 + (u-x)^2} \cdot \operatorname{arctg}\left(\frac{v-y}{\sqrt{z^2 + (u-x)^2}}\right) \\
 &- 0,5 \cdot z^2 \cdot \ln\left[\frac{z^2 + (v-y)^2 + (u-x)^2}{z^2 + (v-y)^2}\right]
 \end{aligned} \tag{4}$$

Voor onderling loodrechte vlakken geldt (zie figuur 3).

$$\begin{aligned}
 F(x, y, u, v) &= 0,25 \cdot [(u-x)^2 - (y^2 + v^2)] \cdot \ln[(u-x)^2 - (y^2 + v^2)] \\
 &+ (u-x) \cdot \sqrt{y^2 + v^2} \cdot \operatorname{arctg}\left(\frac{u-x}{\sqrt{y^2 + v^2}}\right)
 \end{aligned} \tag{5}$$

Met deze voor de situatie van de vlakken verschillende formules $F(x, y, u, v)$ kan de zichtfactor tussen de deelvlakken in het x, y - respectievelijk u, v -stelsel als volgt worden berekend:

$$\begin{aligned}
 \phi_{x,y \rightarrow u,v} &= \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot (x_2 - x_1) \cdot (y_2 - y_1)} \cdot [F(x_1, y_1, u_1, v_1) \\
 &- F(x_2, y_1, u_1, v_1) - F(x_1, y_2, u_1, v_1) + F(x_2, y_2, u_1, v_1) \\
 &- F(x_1, y_1, u_1, v_2) + F(x_2, y_1, u_1, v_2) + F(x_1, y_2, u_1, v_2) \\
 &- F(x_2, y_2, u_1, v_2) - F(x_1, y_1, u_2, v_1) + F(x_2, y_1, u_2, v_1) \\
 &+ F(x_1, y_2, u_2, v_1) - F(x_2, y_2, u_2, v_1) + F(x_1, y_1, u_2, v_2) \\
 &- F(x_2, y_1, u_2, v_2) - F(x_1, y_2, u_2, v_2) + F(x_2, y_2, u_2, v_2)]
 \end{aligned} \tag{6}$$

8 Zonbestraling en atmosferische straling

8.1 Zonbestraalde niet-transparante oppervlakken

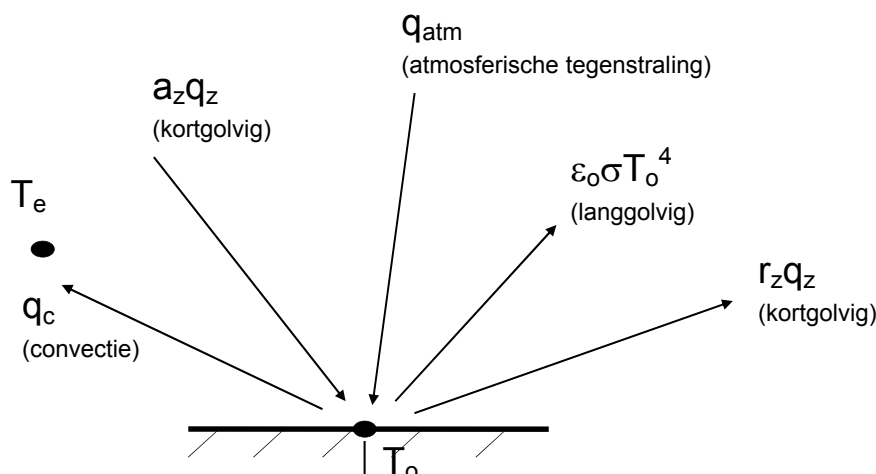
Wanneer een oppervlak aan lucht grenst dan zal de warmtebalans van dat oppervlak zowel convectieve als stralingstermen bevatten. Zoals al eerder is behandeld, kan de warmtestraling in twee gebieden worden onderscheiden, namelijk: kortgolvlige en langgolvlige straling. Bij een buitenoppervlak valt de 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:

$$a_z q_z = q_c + q_i + \varepsilon_0 \sigma T_o^4 - q_{atm} \quad (1)$$

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.

8.2 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:

$$q_{netto} = \varepsilon_0 \sigma T_o^4 - \sigma T_e^4 (a + b\sqrt{p})$$

Of:

$$q_{netto} = \varepsilon_0 \sigma T_o^4 - \sigma T_e^4 + \sigma T_e^4 (1 - a - b\sqrt{p}) \quad (3a)$$

Linearisatie van $\varepsilon_0 \sigma T_o^4 - \sigma T_e^4$ 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).

8.3 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:

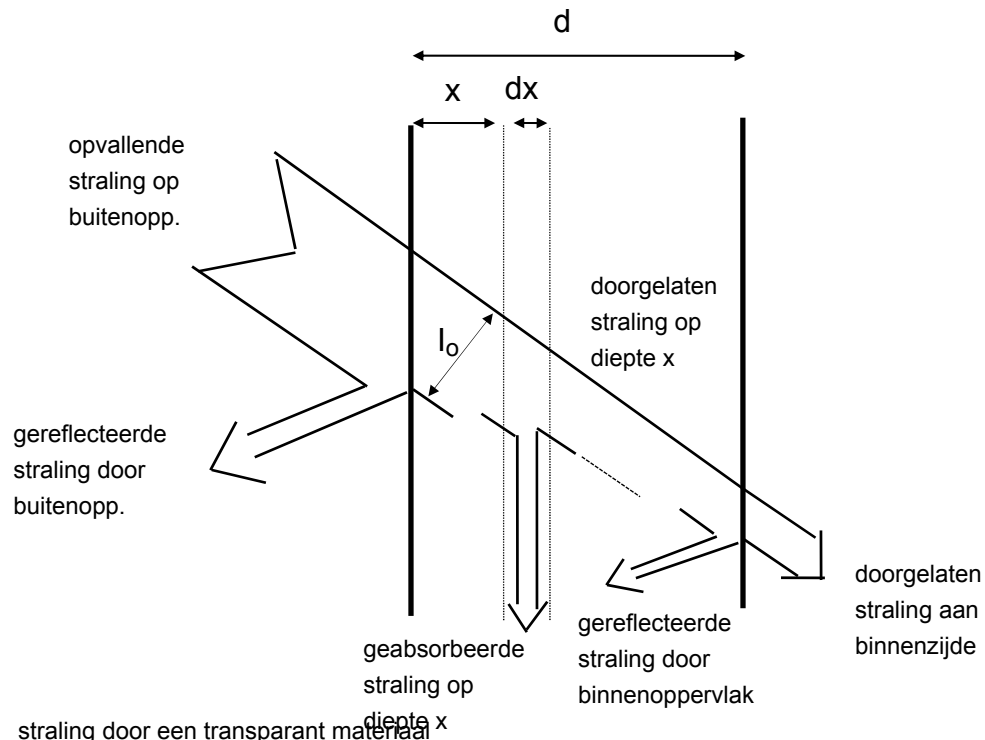
$$I_o - I_D = I_o - I_o e^{-\beta d} = \bar{a} I_o \quad (6a)$$

Waarin:

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

Voor kleine waarden van d geldt:

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

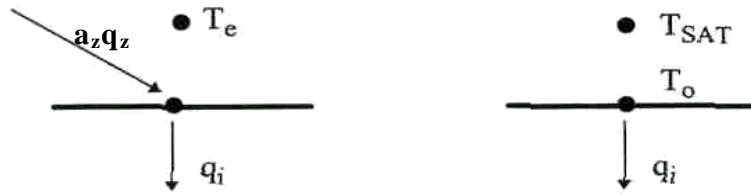


figuur 2. straling door een transparant materiaal

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.

8.4 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 $24 \text{ }^\circ\text{C}$. De binnentemperatuur T_i is $20 \text{ }^\circ\text{C}$. 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:

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

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

9. Thermische isolatie

9.1. Het belang van thermische isolatie

De afgelopen tientallen jaren is met wisselend succes getracht om het energiegebruik van woningen en utiliteitsgebouwen zoals kantoren, ziekenhuizen en dergelijke te verminderen. De grootste besparing is hierbij zonder twijfel gerealiseerd met het thermisch isoleren van daken en muren, en het plaatsen van thermisch isolerende beglazing.

In nieuwe gebouwen worden tegenwoordig standaard goed isolerende beglazing en geïsoleerde gevels en daken geplaatst. De hoeveelheid aardgas die nodig is voor de verwarming van een nieuwbouw tussenwoning is hierdoor sinds 1980 flink gedaald. Was in 1980 nog 1500 à 2000 m³ aardgas nodig voor ruimteverwarming, momenteel is 500 à 900 m³ aardgas veelal voldoende.



figuur 1. omgekeerd dak; de isolatieplaten (geëxtrudeerd polystyreenschuim) worden los op de dakbedekking gelegd en bedekt met grof grind of tegels ter bescherming tegen zonlicht (ultraviolet) en tegen afwaaien (extra figuur pagina 12)

Bij bestaande woningen is nog steeds veel werk te verzetten. Uit het onderzoek “Kwalitatieve Woningregistratie ’94 – ’96” blijkt, dat in 1995 de helft van de daken en gevels van de bestaande woningen geïsoleerd was. Dit betekent dat in 1995 circa 170 miljoen m² spouwmuur en circa 150 miljoen m² hellend dak nog niet geïsoleerd was. In de bestaande utiliteitsbouw heeft nog relatief weinig na-isolatie plaats. Onder druk van nieuwe regelgeving zal dit over enige tijd veranderen. In de wet milieubeheer wordt nu al ingegaan op de “energiezorgplicht” van bedrijven. Dit is de plicht voor bedrijven om bij hun bedrijfsvoering aandacht te besteden aan het minimaliseren van energiegebruik.

Thermisch isoleren is meer dan energie besparen

Bij het ontbreken van thermische isolatie of bij zeer matige isolatie kunnen klachten ontstaan over het binnenklimaat. In het gebouw wordt het te koud of te warm en de gebruikers voelen zich niet behaaglijk. Omdat een onbehaaglijke situatie ook een gevolg kan zijn van bijvoorbeeld onvoldoende daglicht of te veel lawaai, spreken we in het kader van dit onderwerp over thermische isolatie en thermische behaaglijkheid.

Men kan spreken van een thermisch behaaglijke situatie, wanneer de gebruiker zich niet bewust is van een koude- of een warmtegevoel. In veel situaties is een te lage of te hoge luchttemperatuur de oorzaak van de klachten, maar ook andere fysische omgevingsvariabelen kunnen de oorzaak zijn, zoals:

- een te hoge luchtsnelheid bij een relatief lage luchttemperatuur (met name bij nek of voeten is men hier gevoelig voor);
- een te koude of te warme vloer;
- de aanwezigheid van een groot en slecht geïsoleerd raam.

Voor het garanderen van een thermisch behaaglijke situatie is een gelijkmatige verdeling van de isolatie over gevels, daken en vloeren van groot belang. Daarnaast spelen ook aspecten als luchtsnelheid en de activiteit van de gebruikers een belangrijke rol.



figuur 2. thermische isolatie bij de bouw van de Koninklijke Bibliotheek in Den Haag

9.2 Aandachtspunten bij thermische isolatie

Een dik pakket isolatiemateriaal is belangrijk om het energieverlies door de gebouwschil (vloeren, gevels en daken) te beperken. Echter, bij het verbeteren van de thermische isolatie komt meer kijken dan alleen het toepassen van een dik isolatiepakket. Het effect van isolatiemateriaal op het binnenklimaat hangt bij voorbeeld af van de plaats van het materiaal. De effectiviteit van de aangebrachte isolatie wordt bepaald door de aansluiting van het materiaal onderling en van de vochtigheid van het materiaal.

De plaats van het isolatiemateriaal

Isolatiemateriaal kan worden aangebracht aan de buitenzijde van de constructie, aan de binnenzijde van de constructie en in de constructie zelf. De plaats van het materiaal heeft bij gelijke dikte en materiaalkeuze geen (wezenlijke) invloed op het warmteverlies door de constructie. De plaats is wel van invloed op het te verwachten binnenklimaat.

Isolatie aan de buitenzijde van de constructie

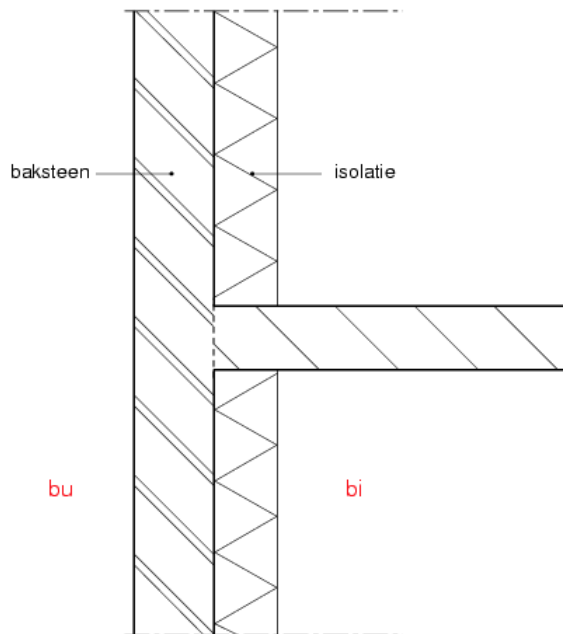
Het aanbrengen van isolatiemateriaal aan de buitenzijde is mogelijk bij zowel gevels, vloeren als daken. Het isoleren van gevels aan de buitenzijde gebeurt in Nederland nog weinig. In bij voorbeeld Duitsland wordt de zogenaamde “buitengevelisolatie” wel op grote schaal toegepast. Hierbij wordt aan de buitenzijde van de gevel isolatie aangebracht, die vervolgens wordt afgewerkt met een stuclaag. Voor het oog ontstaat hierdoor een uiterlijk dat past bij een steenachtige constructie. Buitengevelisolatie brengt een aantal belangrijke voordelen met zich mee:

- Bij een steenachtige constructie wordt deze beschermd tegen grote temperatuurverschillen. Hierdoor zal het materiaal minder uitzetten (bij stijgende temperatuur) en krimpen (bij dalende temperatuur). De kans op schade aan de constructie neemt hierdoor af.
- De ruimten in een gebouw worden niet door een isolatielaag gescheiden van de (draag)constructie. Daardoor is bij een steenachtige constructie meer massa aanwezig, dat zorgt voor een veel gelijkmatiger temperatuurverloop in het gebouw. Denk hierbij aan oude panden waar het, onder andere door de enorme massa, in de zomer koel blijft.
- Bij renovatie van een gebouw gaan gevelisolatie en een esthetische upgradering van de gevel hand in hand. Omdat in wezen een nieuwe huid om het gebouw wordt gemaakt, worden de slechte plekken in de gevel verbeterd zowel wat betreft de thermische isolatie als wat betreft het uiterlijk. Bij monumentale of gezichtsbepalende panden, is het toepassen van buitengevelisolatie vaak niet mogelijk.

Isolatie aan de binnenzijde van de constructie

Isolatie aan de binnenzijde is mogelijk bij vloeren, gevels en daken, maar wordt het meest toegepast bij de renovatie van gebouwen. Door aan de binnenzijde materiaal aan te brengen, zijn geen wijzigingen aan de buitenzijde van het gebouw nodig. Dit is vooral van belang bij de renovatie van karakteristieke panden, waar wijzigingen aan de buitenzijde vaak niet zijn toegestaan.

De voordelen zoals genoemd bij isolatie aan de buitenzijde gelden niet bij isolatie aan de binnenzijde. Op zich hoeft dat niet altijd nadelig te zijn. In een gebouw dat slechts incidenteel wordt gebruikt, heeft het ontbreken van massa als voordeel dat het gebouw in veel kortere tijd kan worden opgewarmd, omdat niet een zware steenachtige constructie mee opgewarmd hoeft te worden. Een duidelijk nadeel van isolatie aan de binnenzijde is de noodzakelijke doorbreking van de isolatielaag, bij voorbeeld op die plaatsen waar binnenwanden aansluiten op de gevel. Een plaats waar geen isolatie kan worden aangebracht, noemen we een koudebrug, omdat hier plaatselijk veel meer warmte naar buiten stroomt. In paragraaf 2.4 wordt op hoofdlijnen ingegaan op de problematiek rond koudebruggen.

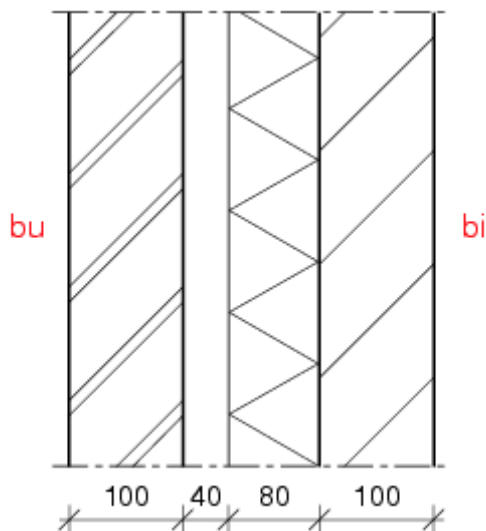


figuur 3. horizontale doorsnede van de aansluiting van een binnenwand op een massieve muur met isolatie aan de binnenzijde

isolatie in de constructie

Een voorbeeld van een gevel met isolatie in de constructie is de in Nederland veel toegepaste geïsoleerde spouwmuur. Een dergelijke constructie bestaat van binnen naar buiten gezien uit:

- een gemetseld binnenblad van circa 100 mm;
- een isolatiepakket van ten minste 80 mm;
- een spouw van ten minste 20 mm (tegenwoordig meestal 40 mm);
- een gemetseld buitenblad van circa 100 mm.



figuur 4. horizontale doorsnede van een spouwmuur

De geïsoleerde spouwmuur heeft (een deel van) de voordelen van buitengevelisolatie. Daarnaast is het bij deze constructie mogelijk om aan de buitenzijde het metselwerk zichtbaar

te laten, wat in Nederland nog altijd erg populair is. Om constructieve redenen is het noodzakelijk om het gemetselde binnenblad en het gemetselde buitenblad aan elkaar te verbinden. Deze verbinding wordt gemaakt met zogenaamde spouwankers. Spouwankers hebben als nadeel dat sprake is van kleine koudebruggen. Daarnaast is de lengte van de spouwankers en daarmee de dikte van het isolatiemateriaal beperkt. Als de gewenste of verplichte isolatie toeneemt, ligt het dan ook voor de hand dat buitengevelisolatie in populariteit zal toenemen.

De keuze van het isolatiemateriaal

Verreweg de meeste isolatie wordt aangebracht in de vorm van platen. Bij het isoleren met isolatieplaten is het van belang dat de platen onderling goed aansluiten. Op plaatsen waar het materiaal niet goed aansluit, ontstaan namelijk lekken waar de warmte uit het gebouw stroomt. Omdat via deze lekken ook warmte uit de directe omgeving van het lek wordt weggetrokken, is de invloed van de lekken relatief groot.

Zachte isolatiematerialen, zoals minerale wol, zijn enigszins indrukbaar waardoor het relatief eenvoudig is om de platen onderling goed te laten aansluiten. Bij harde isolatieplaten van bijvoorbeeld Polystyreenschuim (PS) zijn kleine onvolkomenheden moeilijker op te vangen.

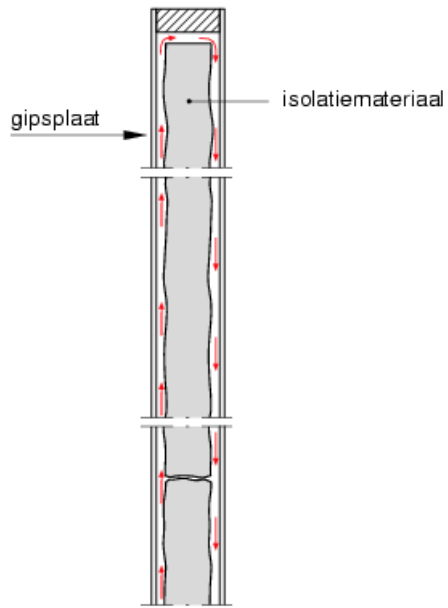
Bij het berekenen van de warmteweerstand van een constructie moet rekening worden gehouden met de invloed van naden, vocht, koudebruggen, bouwfouten enzovoort.

isolatieplaten moeten goed aansluiten

Wanneer verticale isolatielagen niet goed aansluiten, kunnen zoveel kieren en spleten ontstaan, dat er een gestage luchtstroom op gang komt. In het uiterste geval stijgt warme lucht hierbij aan de warme kant van de isolatie op en zakt door afkoeling aan de koude zijde weer naar beneden. Het spreekt voor zich dat hierdoor ongewenste afkoeling plaatsheeft aan de warme zijde van het isolatiemateriaal.

Bij horizontale isolatielagen kan hetzelfde effect optreden als aan de bovenzijde van de isolatielaag een lagere temperatuur heerst dan aan de onderzijde. De warme lucht aan de onderzijde van het materiaal heeft de neiging te stijgen, terwijl de koude lucht aan de bovenzijde juist wil dalen.

Een goed aaneengesloten isolatiepakket dat goed tegen de constructie aansluit, voorkomt luchtstroming rond het isolatiemateriaal. Als zich aan beide zijden van de isolatielaag een luchtspouw van meer dan 5 mm bevindt, wordt de warmteweerstand van de betreffende laag gehalveerd (NEN 1068; "Thermische isolatie van gebouwen – Rekenmethoden").



figuur 5. luchtconvectorie rondom de isolatieplaten



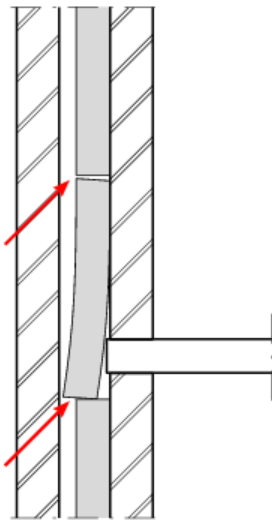
figuur 6. de kwaliteit van isoleren laat soms sterk te wensen over

Het voorkomen van vochtproblemen

Voor een blijvend hoogwaardige thermische isolatie van de gebouwschil is het belangrijk dat de warmte-isolerende eigenschappen van het isolatiemateriaal in de loop van de tijd niet afnemen. De belangrijkste oorzaak voor het afnemen van deze eigenschappen is het vochtig worden van de isolatie. Vochtoppeenhoping wordt voorkomen door een juiste keuze van het isolatiemateriaal en door het voorkomen van een oneigenlijke vochtbelasting.

Concreet betekent dit:

- Voorkom lekkages en vochtdoorslag bij gevels en daken. Voor gevels is een goede bescherming tegen regen van belang om de isolatie droog te houden. Bij gemetselde buitenspouwbladen zal altijd enig vocht binnendringen. Isolatiematerialen die de spouw volledig vullen, horen hiertegen bestand te zijn. Echter, bij de toepassing van isolatieplaten kunnen vochtbruggen ontstaan doordat de platen onderling niet goed aansluiten of door valspectie op de platen.
- Voorkom vochtophoping onder in de spouw bij spouwmuren door een goede afvoer voor regenwater te maken.
- De luchtvochtigheid in kruipruimten is vaak zeer hoog. Bij de na-isolatie van vloeren boven een kruipruimte wordt daarom de toepassing van isolatiemateriaal dat geen vocht opneemt, aanbevolen. Bij buitengevelisolatie is bijzondere aandacht nodig bij de detaillering ter plaatse van de aansluitingen op ramen en dergelijke.



figuur 7. verticale doorsnede van een geïsoleerde spouwmuur met vochtbruggen

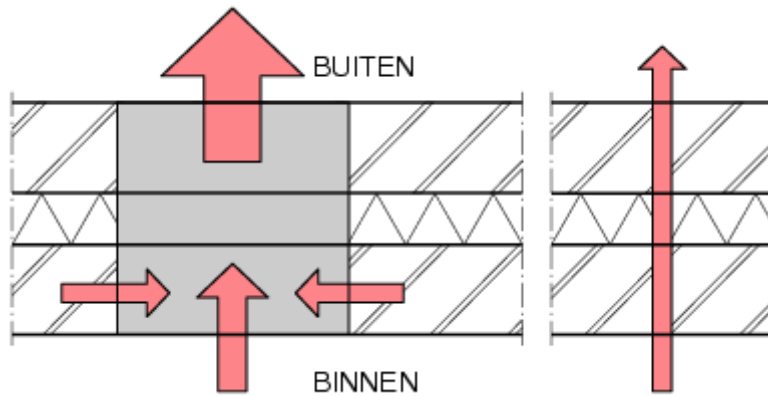
- Voorkom condensatie van vocht in het materiaal. Gedurende het grootste deel van het jaar heeft vochttransport plaats van binnen naar buiten. Om te voorkomen dat vocht zich ophoopt in de constructie, moet een constructie aan de warme zijde (vaak de binnenzijde) meer vocht tegenhouden dan aan de koude zijde (vaak de buitenzijde).



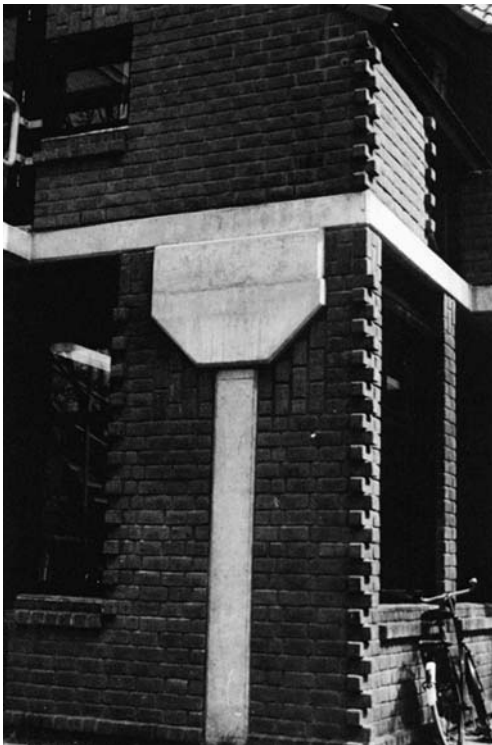
figuur 8. niet direct de meest geschikte wijze om isolatiemateriaal op zijn plaats te houden!

Het voorkomen van koudebruggen

Koudebruggen zijn plekken in een constructie waar meer warmte naar buiten weglekt dan op andere plaatsen. Het gaat hierbij om plekken waar de isolatielaag dunner is dan op andere plaatsen of waar de isolatielaag plaatselijk helemaal afwezig is. Koudebruggen kunnen bijvoorbeeld constructiedelen zijn die van binnen naar buiten doorsteken, maar ook spouwankers in een spouwmuur. Behalve dat koudebruggen leiden tot energieverlies kunnen ze ook gezondheidsrisico's met zich meebrengen, doordat op (ernstige) koudebruggen op den duur vaak schimmelvorming optreedt. De sporen van deze schimmels veroorzaken vervuiling van de binnenlucht en klachten bij de gebruikers.



figuur 9. extra groot warmteverlies bij koudebrug door zijlingse aanvoer van warmte



figuur 10. betonkolom en vloerrand die koudebrug vormen

Wanneer de isolatie toeneemt, wordt de invloed van koudebruggen naar verhouding steeds groter. De toenemende isolatie van gebouwen maakt het dan ook noodzakelijk om steeds meer aandacht te besteden aan het voorkomen van koudebruggen. Bij zwaar geïsoleerde constructies vormen koudebruggen belangrijke thermische lekken, die tientallen procenten extra warmteverlies kunnen veroorzaken. In module W-7 “Koudebruggen, berekenen van f-waarden onder stationaire condities” wordt ingegaan op verschillende soorten koudebruggen.

9.3 Thermische isolatie bij nieuwbouw en bij renovatie

Bij nieuwbouw kan gemakkelijker een hoog isolatieniveau worden gerealiseerd, dan bij bestaande bouw. Grotere isolatiedikten zijn bij nieuwbouw eenvoudiger toe te passen en thermische lekken door koudebruggen zijn eenvoudiger te voorkomen.

Het toepassen van grotere isolatiedikten is het eenvoudigst bij daken. In principe is elke gewenste dikte toepasbaar zonder ingrijpende constructieve consequenties. Bij gevels is dat minder gemakkelijk en kan het interessant zijn over te gaan op andere bouwconstructies dan gebruikelijk. Bij isolatiedikten van meer dan 120 – 150 mm wordt het aantrekkelijk om van de gebruikelijke spouwmuurisolatie over te stappen op buitengevelisolatie of bij voorbeeld houtbouw (houtskeletbouw). Als de voorkeur uitgaat naar een steenachtige gevelconstructie, is buitengevelisolatie een optie. Bij buitengevelisolatie is bijzondere aandacht vereist voor de detaillering van aansluitingen met andere bouwdeelen (ramen, deuren, enzovoort) en de bevestiging van bouwelementen zoals balkonhekken of hemelwaterafvoeren.

Optimale isolatiedikte

De economisch optimale isolatiedikte is moeilijk te geven, omdat die sterk afhangt van de levensduur van de constructie en de ontwikkeling van de energieprijzen. Vast staat dat voor een goed isolatieniveau bij woningbouw een grotere isolatiedikte toegepast moet worden dan minimaal vereist volgens het Bouwbesluit.

In een deel van de bestaande bouw is nog helemaal geen thermische isolatie aanwezig. Met uitzondering van zeer ingrijpende renovaties, ligt bij na-isolatie het niveau dat wordt nagestreefd, lager dan bij nieuwbouw. De toegepaste isolatiedikte wordt bij renovatie vaak niet gebaseerd op een energetisch ideale situatie, maar bepaald door de praktische mogelijkheden en de financiële ruimte. Voor gevels geldt dat na-isolatie van spouwmuren in veel gevallen het goedkoopst is. De dikte van het isolatiemateriaal is uiteraard beperkt tot de spouwbreedte. Vaak is dit niet meer dan 50 mm. De warmte-isolerende eigenschappen van na-isolatiematerialen voor spouwen is geringer dan van isolatiemateriaal in plaatvorm. De warmteweerstand van nageïsoleerde spouwmuren is daarmee bij gelijke isolatiedikte ongunstiger dan de warmteweerstand van andere isolatieconstructies.

Isolatiemaatregelen zijn in de bestaande bouw vaak onderdeel van de technische exploitatie. Door isolatiemaatregelen te combineren met onderhoud kan vaak met een kleinere investering worden volstaan. Voorbeelden hiervan zijn:

- Vochttopzuiging in de begane grondvloer kan in een aantal situaties worden opgelost door deze aan de onderzijde te isoleren met een gesloten isolatielaag.
- Een grauwe gevel van betonelementen kan door toepassing van buitenisolatie een facelift krijgen. Dit komt de marktwaarde en de eventuele verhuurbaarheid ten goede.



figuur 11. isolatie van een muur aan de buitenzijde
Voor de isolatielaag komen technisch gezien zowel minerale wol als kunststofschuim in aanmerking. De afwerking heeft plaats door middel van pleisterwerk - al dan niet met kunsthars toevoeging - met een wapening van glasweefsel of metaalgaas. De verschillende oplossingen hebben uiteraard hun eigen milieukwaliteit.

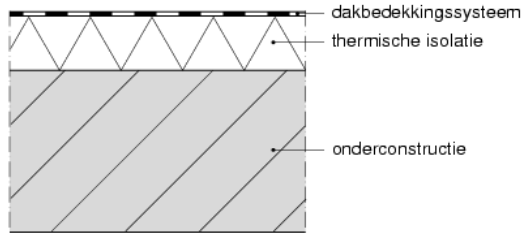
- Isolatiemaatregelen kunnen de kwaliteit van het binnenmilieu verbeteren, doordat bij voorbeeld schimmelvorming op koudebruggen door na-isolatie wordt opgelost.
- Na-isolatie van het dak kan de thermische behaaglijkheid zowel in de zomer als in de winter verbeteren.



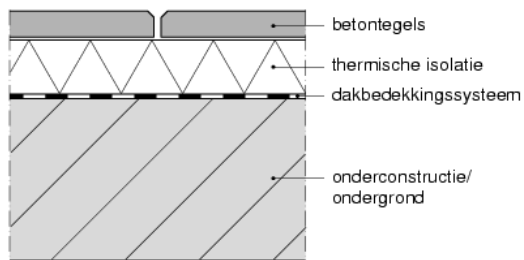
figuur 12. na-isolatie van een pannendak met speciale polystyreenschuim-elementen

EXTRA FIGUREN

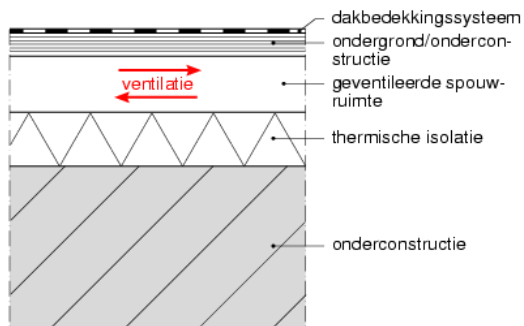
Ad figuur 1:



1 warm dak



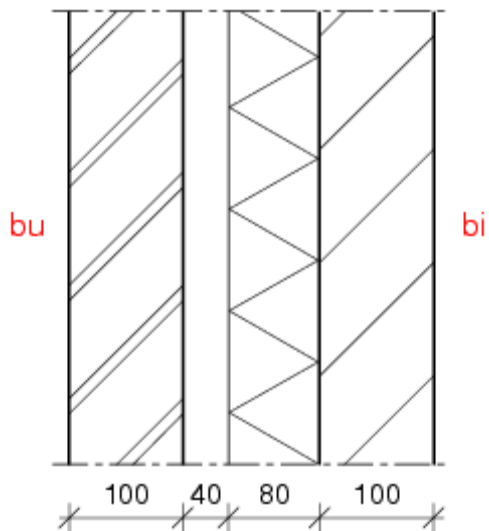
2 omgekeerd dak

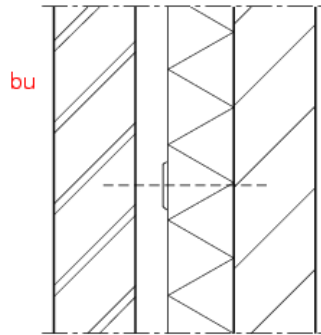


3 koud dak

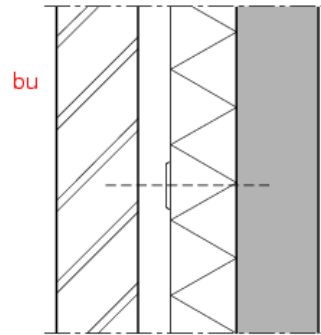
Enkele daktypen

Ad figuur 4:

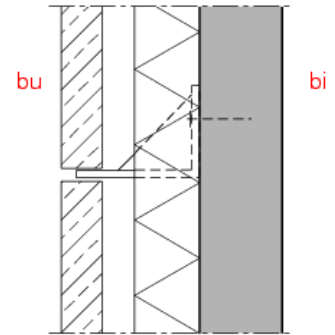




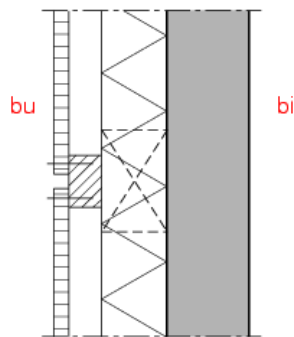
1 gemetselde spouwmuur
2 bladen baksteen



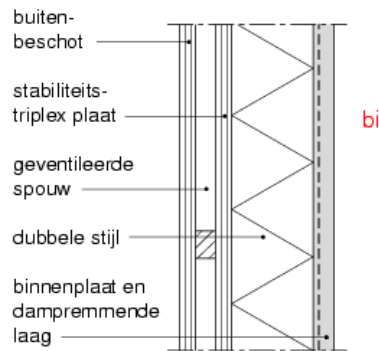
2 spouwmuur met
betonnen binnenblad



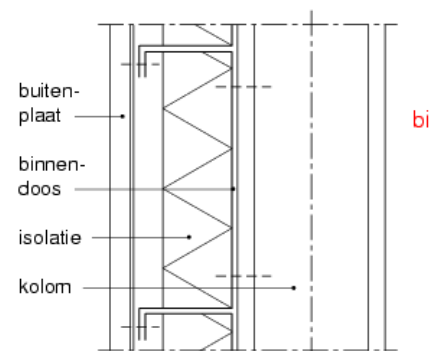
3 betonnen binnenblad en
natuursteen bekleding



4 betonnen binnenblad met
lichte bekledingsplaat

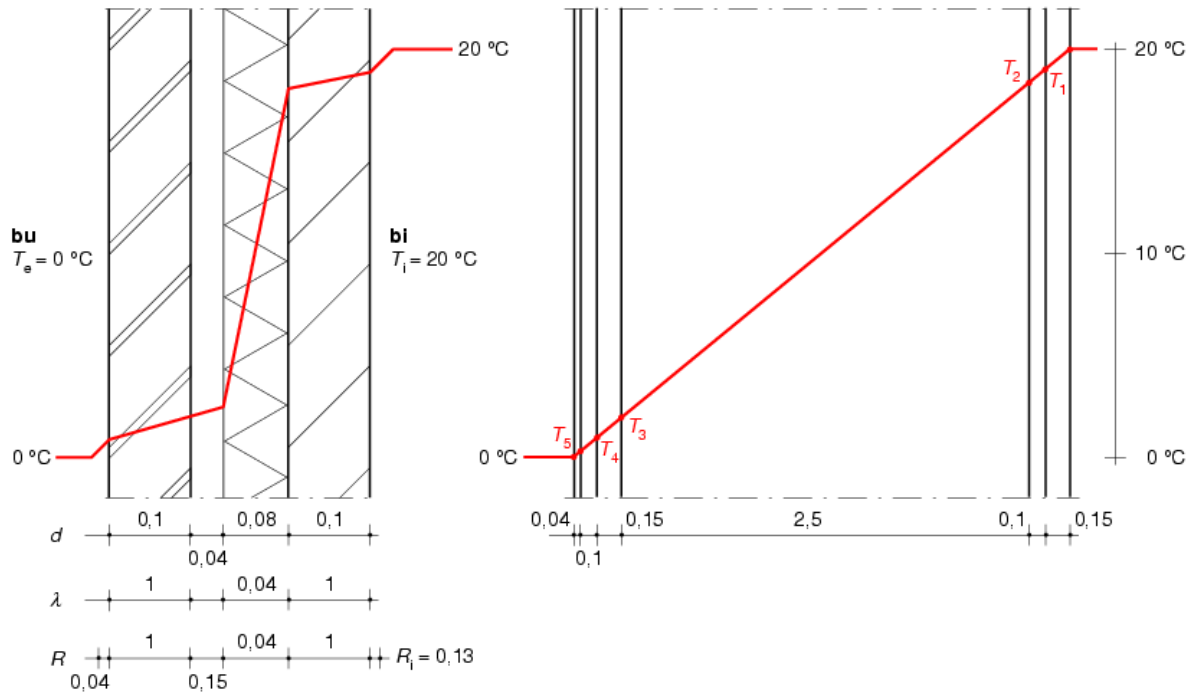


5 houtskeletbouwgevel



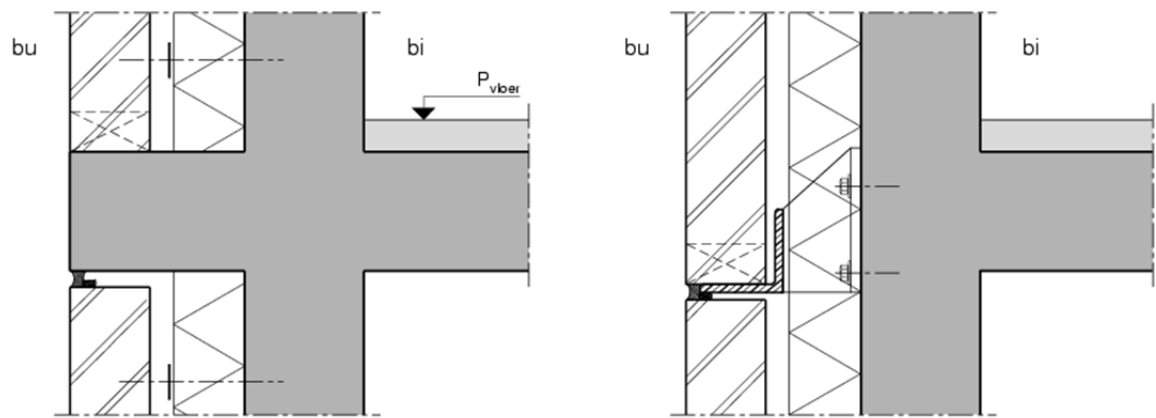
6 stalen gevelprofiel
op staalskelet

Principegevelsconstructie



Spouwmuur, warmteweerstand en temperatuurverloop

Ad figuur 9:



1 oude constructie vormt koudebrug

2 slechts geringe koudebrug

Oude en nieuwe constructie van opvang van gevelmetselwerk ten behoeve van dilatatie

10. Warmteoverdracht in een luchtgevulde spouw

10.1. Warmteoverdracht in een luchtgevulde spouw

Wat de warmte-isolatie betreft, is de luchtspouw op te vatten als een “laag” met een bepaalde warmteweerstand. In ongeventileerde of zwak geventileerde spouwen spelen bij de warmteoverdracht van T_1 naar T_2 twee mechanismen een rol: de warmteoverdracht door convectie en de warmteoverdracht door straling (zie figuur 1).

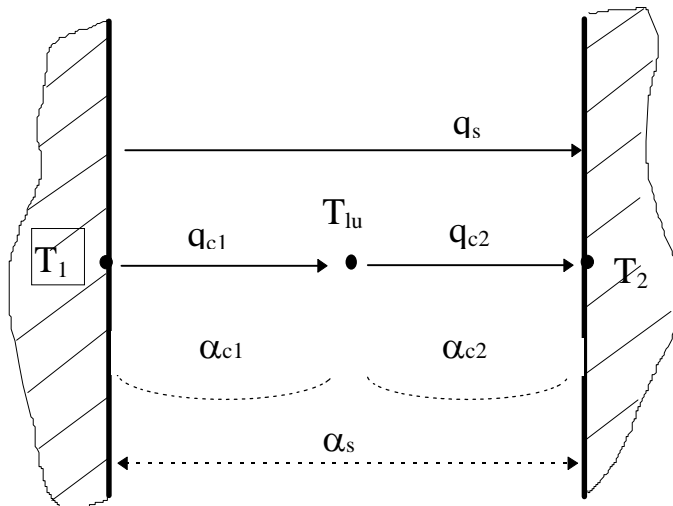
Convectie

Convectief wordt van T_1 naar de spouwlucht met T_{lu} een hoeveelheid warmte overgedragen:

$$q_{c1} = \alpha_{c1}(T_1 - T_{lu})$$

en van T_{lu} naar T_2 :

$$q_{c2} = \alpha_{c2}(T_{lu} - T_2) \quad (1)$$



figuur 1. warmtestroomdichtheden in een luchtgevulde spouw

Omdat de spouw als ongeventileerd of als zwak geventileerd wordt beschouwd, is de luchtuitwisseling van de spouw met buiten nul of te verwaarlozen. Warmtetransport naar de lucht buiten de spouw heeft dus alleen plaats door de spouwbladen. De convectief overgedragen warmte van T_1 naar T_{lu} in de stationaire toestand is dan gelijk aan de convectief overgedragen warmte van T_{lu} naar T_2 en geldt $q_{c1} = q_{c2} = q_c$, zodat:

$$\alpha_{c1}(T_1 - T_{lu}) = \alpha_{c2}(T_{lu} - T_2)$$

Waaruit:

$$T_{lu} = \frac{\alpha_{c1}T_1 + \alpha_{c2}T_2}{\alpha_{c1} + \alpha_{c2}}$$

(Het bovenstaande geldt ook voor de niet-stationaire toestand wanneer de *warmtecapaciteit* van de spouwlucht wordt verwaarloosd.)

Substitutie van T_{lu} in (1) levert:

$$q_{c1} = \frac{\alpha_{c1}\alpha_{c2}}{\alpha_{c1} + \alpha_{c2}}(T_1 - T_2) = q_c$$

Of:

$$q_c = \alpha_{c.res}(T_1 - T_2) \quad (2)$$

Met:

$$\alpha_{c.res} = \frac{\alpha_{c1}\alpha_{c2}}{\alpha_{c1} + \alpha_{c2}}. \text{ Voor } \alpha_{c1} = \alpha_{c2} = \alpha_c \text{ is } \alpha_{c.res} = \frac{\alpha_c}{2}.$$

Straling

De gelineariseerde stralingswarmteoverdracht is:

$$q_s = \alpha_s(T_1 - T_2)$$

Spouwweerstand

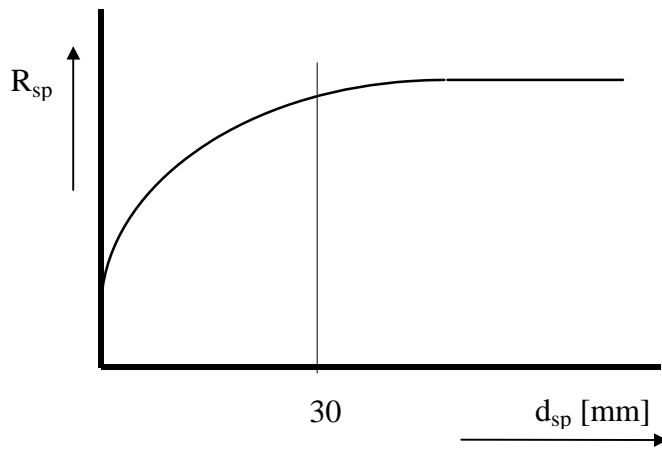
De totale warmteoverdracht van T_1 naar T_2 wordt dan:

$$q_{tot} = \alpha_{c.res}(T_1 - T_2) + \alpha_s(T_1 - T_2) = \alpha_{sp}(T_1 - T_2)$$

$$\text{De warmteweerstand voor de spouw is: } R_{sp} = \frac{1}{\alpha_{sp}} = \frac{1}{\alpha_{c.res} + \alpha_s} \quad (3)$$

In de zwak geventileerde spouw wordt de convectieve warmteoverdracht door vrije convectie bepaald. Bij niet al te smalle spouwen is een reële waarde voor convectieve warmteoverdrachtcoëfficiënt $\alpha_{c.res} = 1 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Bij zeer smalle spouwen zal de vrije convectie worden onderdrukt en zal er zeer weinig luchtbeweging zijn, zodat de warmtegeleiding in de lucht het convectieve transport overheerst en de warmteoverdracht dus door geleiding en straling wordt bepaald. Bij toenemende spouwbreedten daarentegen speelt de vrije convectie een steeds grotere rol. In figuur 2 is de spouwweerstand als functie van de spouwbreedte getekend. Vanaf spouwbreedten van meer dan 50 mm neemt de spouwweerstand een constante waarde aan.



figuur 2. de spouwweerstand als functie van de spouwbreedte

11. Temperatuurverloop in een constructie

11.1. Temperatuurverloop in een constructie

De warmteweerstand van een (uitwendige) scheidingsconstructie is opgebouwd uit de warmteweerstand van de afzonderlijke materiaallagen. Een eventuele luchtspouw wordt daarin feitelijk ook als materiaallaag beschouwd. Wanneer de warmteweerstand (R_c) van een constructie bekend is, is ook de totale warmteweerstand lucht-op-lucht (R_l ; rekening houdend met de overgangsweerstanden aan de binnenzijde en de buitenzijde van de constructie) bekend. Hieruit volgt automatisch de warmtedoorgangscoefficiënt ($U = 1/R_l$). Bij een gegeven temperatuurverschil over de constructie kan dan de warmtestroomdichtheid berekend worden:

$$q = U (T_i - T_e) \quad [W/m^2]$$

Bij een vast temperatuurverschil over de constructie is de warmtestroomdichtheid door elke materiaallaag in de constructie even groot. Immers, als dat niet het geval zou zijn, zou er geen energiebalans zijn en zou de constructie van binnen opwarmen of afkoelen.

De warmtestroomdichtheid door een constructie kan ook geschreven worden als:

$$q = (T_i - T_e) / R_l \quad [W/m^2]$$

$$q = (T_{o,i} - T_{o,e}) / R_c \quad [W/m^2]$$

Hierin is:

$T_{o,i}$:	binnenoppervlaktetemperatuur
$T_{o,e}$	buitenoppervlaktetemperatuur
T_i	binnenluchttemperatuur
T_e	buitenluchttemperatuur

Zo kan dus ook de warmtestroomdichtheid (q) door materiaallaag m geschreven worden als:

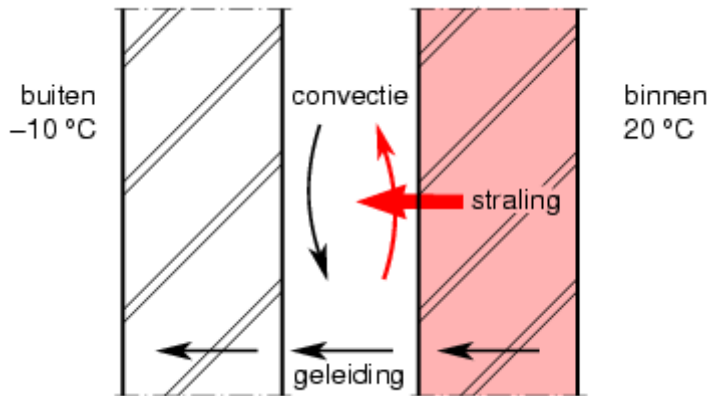
$$q = \Delta T_m / R_m \quad [W/m^2]$$

Hierin is:

ΔT_m	temperatuurverschil over de materiaallaag
R_m	warmteweerstand van de materiaallaag

De warmtestroomdichtheden zijn door elke materiaallaag even groot. De temperatuursprong over een materiaallaag is dus evenredig met de warmteweerstand van de betreffende materiaallaag. Daarmee ligt het temperatuurverloop in een constructie vast.

Voor de ongeïsoleerde spouwmuurconstructie van figuur 1 bedraagt de U -waarde $1,54 \text{ W/(m}^2\text{K)}$. Bij een binnenluchttemperatuur van $20 \text{ }^\circ\text{C}$ en een buitenluchttemperatuur van $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ is de warmtestroomdichtheid dan $46,2 \text{ W/m}^2 (= 30 * 1,54)$. De warmtestroomdichtheid door het binnenspouwblad is uiteraard even groot. Dit resulteert in een temperatuurverschil over het binnenspouwblad van $\Delta T_m = q R_m = 46,2 * 0,15 = 6,9 \text{ }^\circ\text{C}$.

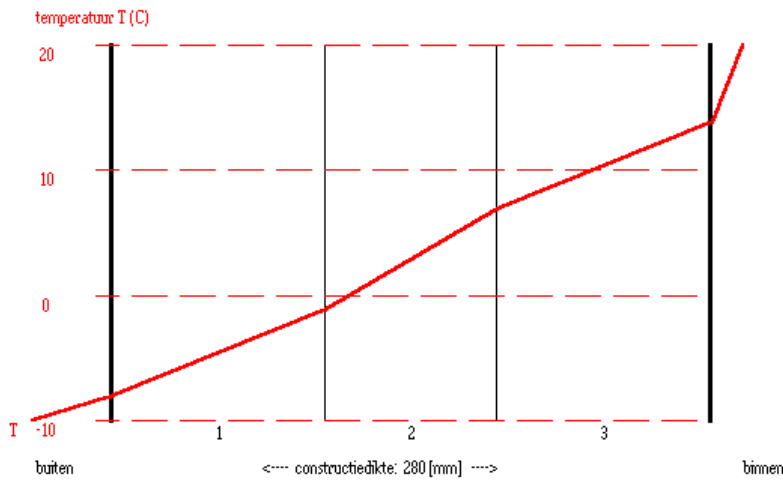


figuur 1. warmtestromen door een ongeïsoleerde spouwmuur; de warmtestroom is door elke constructielaag even groot

Voorbeeld 1

In de tabel is de berekening gegeven van het temperatuurverloop in de constructie van Figuur 1. Voor de warmteweerstand van de ongeïsoleerde spouw is 0,18 m²K/W aangehouden (niet of zwak geventileerde luchtlaag conform NEN 1068). De warmteweerstand van de totale constructie komt hiermee op 0,48 m²K/W. De binnenluchttemperatuur bedraagt 20 °C, de buitenluchttemperatuur is -10 °C.

materiaal	R_m [m ² K/W]	ΔT [K]	T [°C]
(binnenlucht)			20
binnenovergang	0,13	6,00	
binnenoppervlak			14,00
3. metselwerk	0,15	6,92	
Materiaalscheiding			7,08
2. ongeïsoleerde spouw	0,18	8,31	
materiaalscheiding			-1,23
1. metselwerk	0,15	6,92	
buitenoppervlak			-8,15
buitenovergang	0,04	1,85	
(buitenlucht)			-10
<i>totaal</i>	0,65	30,0	

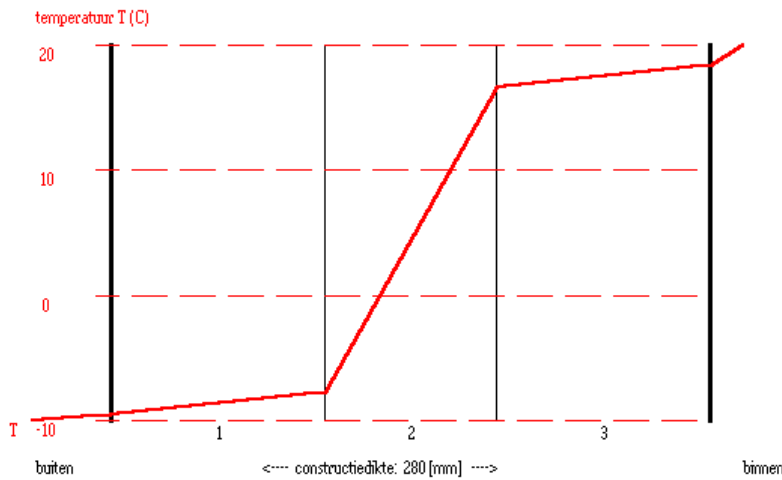


figuur 2. temperatuurverloop in de ongeïsoleerde spouwmuurconstructie van voorbeeld 1

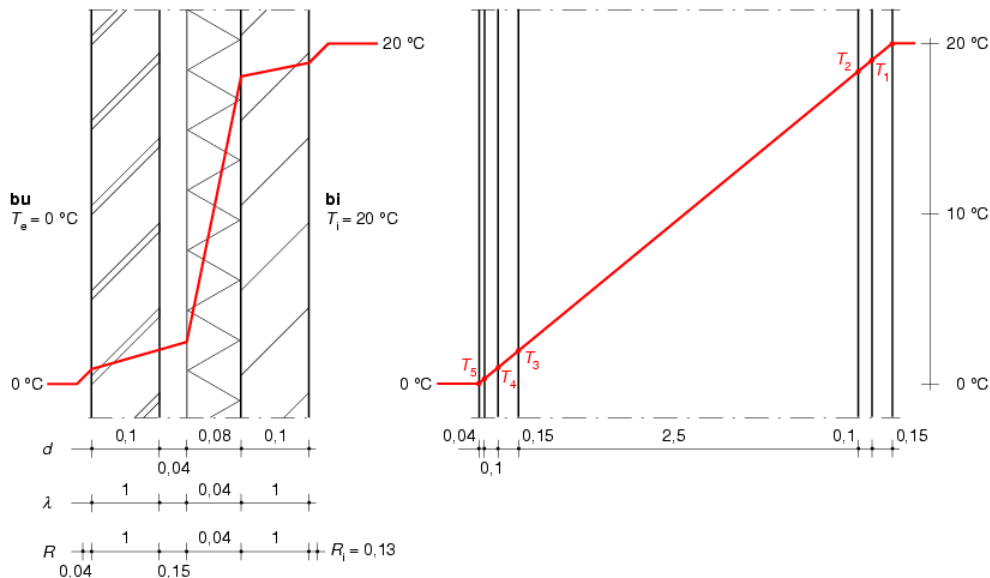
Voorbeeld 2

In de tabel is de berekening gegeven van het temperatuurverloop in de constructie van Figuur 1, waarbij in de spouw nu isolatie is aangebracht met een warmteweerstand van $2,0 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ (80 mm isolatie met $\lambda = 0,04 \text{ W/(m.K)}$). De warmteweerstand van de totale constructie komt hiermee op $2,30 \text{ m}^2 \text{ K/W}$. Een warmteweerstand voor de totale constructie van $R_c = 2,50 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ wordt bij de gegeven spouwbreedte bereikt wanneer de warmtegeleidingscoëfficiënt van de isolatie $\lambda = 0,036 \text{ W/(m.K)}$ bedraagt.

materiaal	$R_m \text{ [m}^2\text{K/W]}$	$\Delta T \text{ [K]}$	$T \text{ [}^\circ\text{C]}$
(binnenlucht)			20
binnenovergang	0,13	1,58	
binnenoppervlak			18,42
3. metselwerk	0,15	1,82	
materiaalscheiding			16,60
2. geïsoleerde spouw	2,0	24,29	
materiaalscheiding			-7,69
1. metselwerk	0,15	1,82	
buitenoppervlak			-9,51
buitenovergang	0,04	0,49	
(buitenlucht)			-10
<i>totaal</i>	2,47	30,0	



figuur 3. temperatuurverloop in de geïsoleerde spouwmuurconstructie van voorbeeld 2



Spouwmuur, warmteweerstand en temperatuurverloop

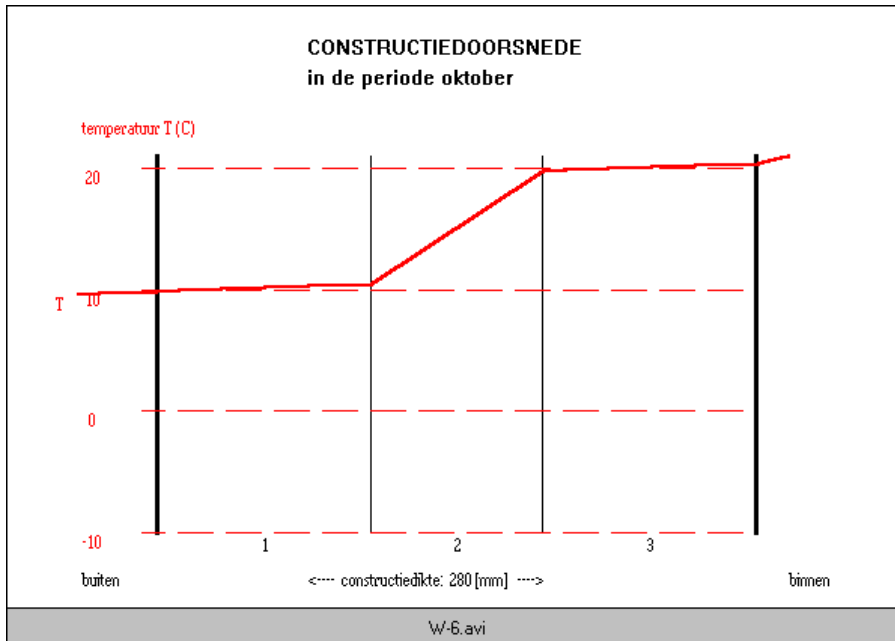
figuur 4. nog een voorbeeld van het temperatuurverloop door een geïsoleerde spouwmuurconstructie (luchtspouw niet geheel gevuld met isolatiemateriaal).
 In de linker doorsnede is horizontaal de dikte van de constructie uitgezet, in de rechter doorsnede is dit de warmteweerstand. Het temperatuurverloop is evenredig met de warmteweerstand.

In de voorgaande voorbeelden is het temperatuurverloop weergegeven bij vaste randcondities over de constructie. Wanneer de randcondities (binnenlucht- en buitenluchttemperaturen) variëren, kan niet met een stationaire berekening worden volstaan, omdat dan de warmtecapaciteit van de materiaallagen een rol gaat spelen. Dit is het vermogen van de materiaallagen om warmte op te nemen of af te staan, als een tijdelijke warmtebuffer.

De warmtebuffering speelt vooral een rol bij relatief kortdurende fluctuaties. In een etmaalcyclus (dag-/nachtsituatie) is deze rol nog duidelijk merkbaar. De warmtebuffering heeft in dat geval invloed op de energiebalans. In een week- of maandcyclus speelt de

warmtebuffering vrijwel geen rol meer. Met week- respectievelijk maandgemiddelde binnen- en buitenluchttemperaturen mag dus stationair worden gerekend.

De constructie uit voorbeeld 2 is in de AVI-clip van figuur 5 doorgerekend met Nederlandse maandgemiddelde buitenluchtcondities. De gemiddelde binnenluchttemperatuur is constant verondersteld op 21 °C. In de constructiedoorsnede wordt in tijdstappen van een maand het temperatuurverloop weergegeven (rode lijn).



figuur 5. het temperatuurverloop door de spouwmuurconstructie bij maandgemiddelde Nederlandse klimaatcondities.

11.2. Praktijkwaarden warmtegeleidingscoëfficiënt van isolatiematerialen

Isolatiematerialen zijn opgebouwd uit losse of aaneengesloten cellen, waarin zich lucht of een ander gas bevindt. Doordat de cellen niet of slechts beperkt zijn verbonden, staat de lucht in de cellen stil. Hierdoor wordt de warmtegeleidingscoëfficiënt van stilstaande lucht benaderd. De warmtegeleidingscoëfficiënt van (stilstaande) lucht bedraagt $\lambda = 0,025 \text{ W/mK}$. Voor de meest gangbare traditionele isolatiematerialen ligt de warmtegeleidingcoëfficiënt tussen 0,035 en 0,055 $\text{W}/(\text{m.K})$.

Als uitgangspunt voor de berekening van de warmteweerstand kan niet de in het laboratorium bepaalde λ -waarde worden gebruikt. Deze waarde (λ_D) is gemeten in droge toestand van het materiaal, zonder rekening te houden met de veroudering ervan. In de praktijk zijn de λ -waarden minder goed dan deze λ_D . Ook de uitvoering speelt hierin nog een rol. Er kunnen naden tussen de isolatieplaten aanwezig zijn. Bij een omgekeerde dakconstructie kunnen de isolatieplaten op de dakbedekking zelfs in een waterfilm van hemelwater liggen.

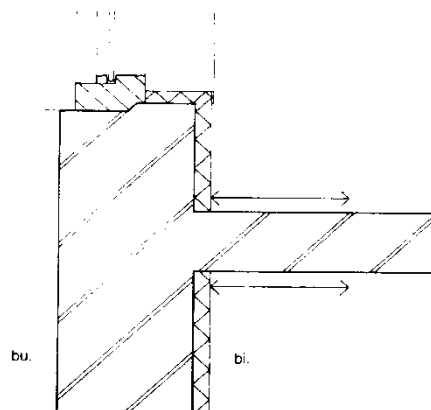
Om met de vocht- en verouderingsinvloeden rekening te houden, wordt een rekenwaarde (λ) gebruikt. Hiervoor moet de λ_D worden vermenigvuldigd met een factor die afhankelijk is van het type materiaal.

12. Koudebruggen, berekenen van F-waarden onder stationaire condities

12.1. Wat is een koudebrug?

Wanneer een constructie die aan de buitenlucht grenst niet op alle plaatsen dezelfde isolatiewaarde heeft, is er in principe sprake van een zogenaamde koudebrug. Dit is ook het geval indien het buitenoppervlak groter is dan het binnenoppervlak, zoals bij tweedimensionale hoekaansluitingen (lijnvormig: b.v. dakranden, funderingsranden, aansluiting kopgevel/langsgevel) of driedimensionale hoekaansluitingen (puntvormig: bij voorbeeld aansluiting dak/langsgevel/kopgevel). Immers, hierdoor treedt plaatselijk een grotere warmtestroom naar buiten op dan in de omringende constructie, waardoor aan de binnenzijde een lagere oppervlaktetemperatuur ontstaat.

Misschien zou het dan ook beter zijn om van een “warmtebrug” te spreken vanwege de plaatselijk grotere warmtestroomdichtheid. Desondanks wordt van een koudebrug gesproken. Deze naam vindt zijn oorsprong in de lagere oppervlaktetemperatuur aan de binnenzijde. Indien de binnenoppervlaktetemperatuur ter plaatse van een koudebrug lager is dan de dauwpuntstemperatuur van de binnenlucht zal condensatie op de constructie optreden.



Voorkomen van de koudebrug:

- de isolatie aan de buitenkant van de gevel aanbrengen.

Voorkomen van problemen t.g.v. de koudebrug:

- de isolatie over een gedeelte van de binnenwand, aan weerszijden, laten doorlopen (ca. 1000 mm). Men moet alert zijn op het verleggen van het koudste punt. Het toepassen van afschotplaten is een goede oplossing die tevens visueel acceptabel is.
- dampremmende laag aan binnenzijde van het isolatiemateriaal van condensvorming te voorkomen.

figuur 1. horizontale doorsnede: aansluiting binnenwand op een aan de binnenzijde geïsoleerde gevel (renovatie-oplossing); de pijlen geven het risicogebied aan.

Condens op bouwmaterialen kan aanleiding geven tot aantasting van (aansluitende) materialen, vervuiling, schimmelvorming etc.. Daarbij geven ruwe en poreuze oppervlakken (bij voorbeeld schuurpleister, voegen van betegelde wanden) eerder aanleiding tot schimmelgroei dan gladde oppervlakken, aangezien “oppervlakteschimmels” hun voedingsbron meestal vinden in de verontreiniging op dit oppervlak. Daarnaast zijn ook vooral zwak zuur reagerende minerale ondergronden (bij voorbeeld gipspleister, spuitpleister) gevoelig voor schimmelgroei. Dit geldt ook voor hout en behang. Bovendien is bij hout het risico aanwezig op houtaantastende schimmels. Deze gebruiken het hout als voedingsbodem en tasten daarmee de houtstructuur zodanig aan dat dit zijn constructieve eigenschappen verliest (houtrot). Alkalische ondergronden (beton en kalkzandsteen) zijn minder gevoelig voor schimmelvorming.

Condensvorming op (enkel)glas is in principe toelaatbaar, mits er voor een goede afvoer van het condenswater wordt gezorgd.

Overigens is het voor het ontstaan van oppervlakteschimmels niet altijd noodzakelijk dat oppervlaktecondensatie optreedt. Of er schimmelgroei ontstaat, hangt voornamelijk af van de relatieve luchtvochtigheid van de binnenlucht, direct voor het oppervlak. Indien de relatieve luchtvochtigheid van de binnenlucht direct voor een oppervlak gedurende langere tijd 85% of meer bedraagt, zal in het materiaal of in eventuele vervuiling op het oppervlak het evenwichtsvochtgehalte zodanig zijn dat schimmelgroei kan optreden.

12.2. Koudebruggen, eisen en bepalingsmethode

12.2.1. Eisen

In het Bouwbesluit is een prestatie-eis opgenomen aan de thermische kwaliteit van scheidingsconstructies uit oogpunt van wering van vocht en allergenen in de vorm van een temperatuurfactor. De temperatuurfactor (f) is een dimensieloze grootheid op een schaal van 0 tot 1 en is als volgt gedefinieerd:

$$f = \frac{(T_{io} - T_e)}{(T_i - T_e)} \quad [-]$$

Waarin:

T_i	binnenluchttemperatuur	[°C]
T_{io}	binnenoppervlaktetemperatuur	[°C]
T_e	buitenluchttemperatuur	[°C]

In het Bouwbesluit wordt een ondergrenswaarde van de temperatuurfactor geëist van $f=0,65$ in verblijfsgebieden van woningen, woongebouwen en logiesgebouwen en van $f=0,50$ in verblijfsgebieden van overige gebouwfuncties.

In deze grenswaarden is rekening gehouden met het voorkomen van zowel oppervlaktecondensatie (wering van vocht) als schimmelvorming (wering van allergenen).

12.2.2. Bepalingsmethode

Normblad NEN 2778 is door het Bouwbesluit aangewezen als bepalingsmethode voor de temperatuurfactor. In dit normblad is de rekenmethode met de bijbehorende randvoorwaarden en uitgangspunten voor het uitvoeren van thermische berekeningen aan koudebrugdetails beschreven.

Kort samengevat dienen de volgende randvoorwaarden (overgangscondities) gehanteerd te worden:

Binnenzijde:

$\theta_i = 18\text{ }^\circ\text{C}; \quad \alpha_i = 2\text{ W}/(\text{m}^2\text{K});$ vanaf vloerniveau tot 1,5 m boven vloerniveau.
 $\theta_i = 18\text{ }^\circ\text{C}; \quad \alpha_i = 4\text{ W}/(\text{m}^2\text{K});$ boven 1,5 m boven vloerniveau;
 3-vlaks buitenhoeken in een kubus van 0,5 x 0,5 x 0,5 m;
 een strook van 0,25 m rond kozijnen en ramen.
 $\theta_i = 18\text{ }^\circ\text{C}; \quad \alpha_i = 7,7\text{ W}/(\text{m}^2\text{K});$ beglazingen.

Buitenzijde:

$\theta_e = 0\text{ }^\circ\text{C}; \quad \alpha_e = 25\text{ W}/(\text{m}^2\text{K}).$

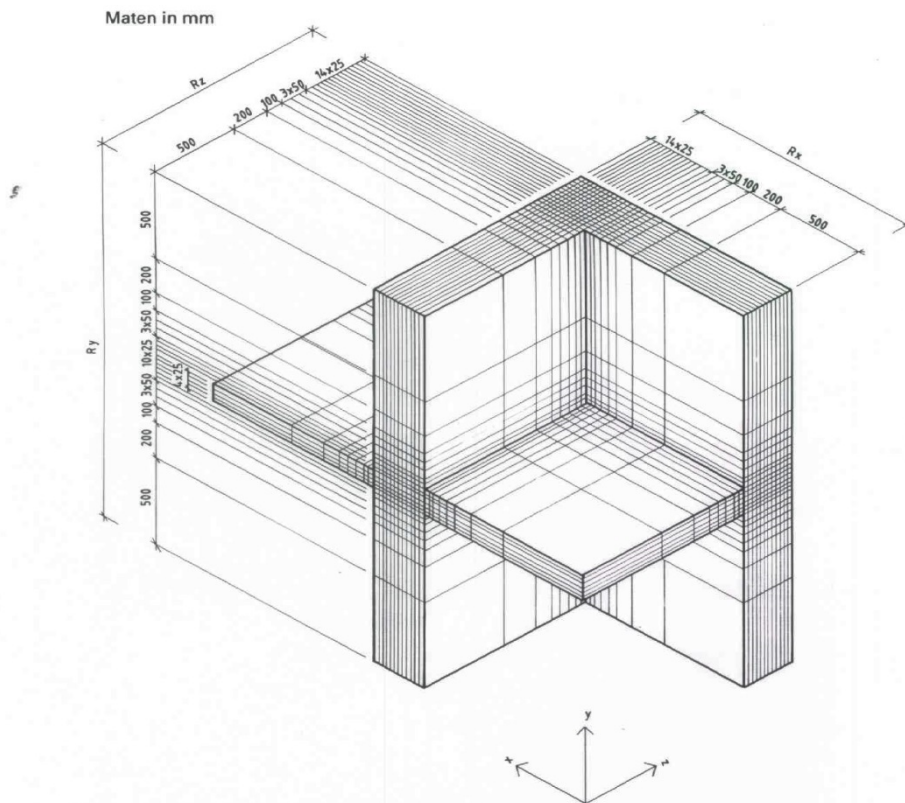
Grond:

$\theta_g = 10\text{ }^\circ\text{C}; \quad \alpha_g = \infty\text{ W}/(\text{m}^2\text{K});$ op 3 meter diepte.

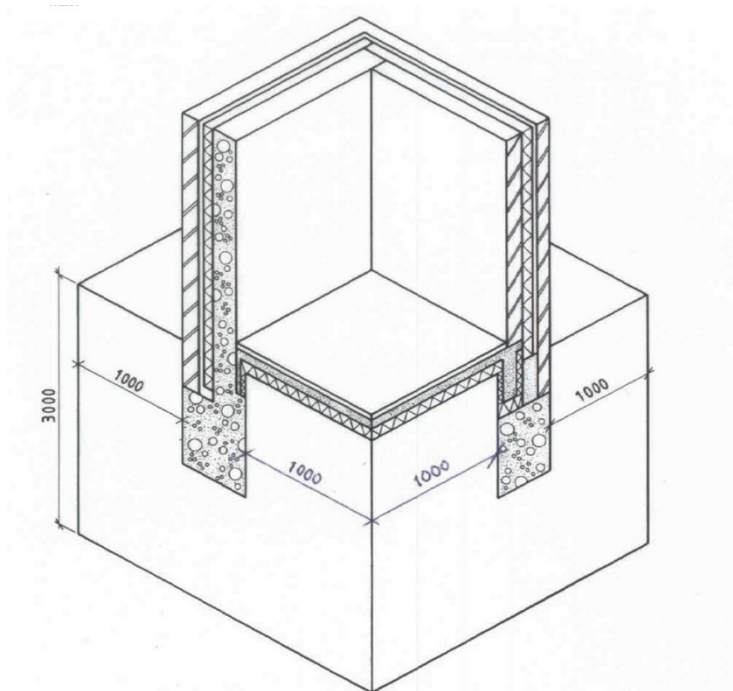
Hierin is:

θ temperatuur [$^\circ\text{C}$]
 α overgangscoefficiënt [W/(m²K)]
 (het omgekeerde van de overgangsweerstand aan het oppervlak)

Numerieke berekeningen worden vervolgens met een eindige-elementenmethode uitgevoerd. Het bouwkundige detail wordt daartoe eerst in kern- en aansluitelementen verdeeld. In de kernelementen is een maximaal orthogonaal raster van 25 x 25 x 25 mm toegestaan. In de aansluitelementen worden grotere rastermaten toegestaan naarmate de afstand tot het kernelement toeneemt. De kleinste volume-elementjes bevinden zich dus in de kern van de bouwkundige aansluiting. Hier is de rekennauwkeurigheid dan ook het grootst. Verder van het detail kan met grotere volume-ementen volstaan worden in de eindige-elementenberekening.



figuur 2. discretisering van een detail (kernelementen en aansluitelementen) in het minimale raster volgens NEN 2778



figuur 3. omvang van het rekendetail: de lengte van aansluitelementen dient ten minste een meter te bedragen; een eventueel grondpakket dient ten minste drie meter diep meegenomen te worden in het rekendetail

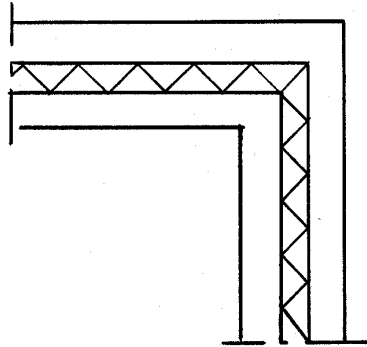
12.3. Categorieën van koudebruggen

Koudebruggen zijn plekken in een constructie waar meer warmte naar buiten weglekt dan op andere plaatsen. Deze zwakke plekken kunnen bij voorbeeld worden gevormd door spouwankers, maar ook door doorstekende of aansluitende constructiedelen. In de huidige nieuwbouw worden hinderlijke koudebruggen vooral vermeden ter voorkoming van schimmelgroei en de gezondheidsrisico's die daarmee samenhangen.

Bij goed geïsoleerde constructies vormen koudebruggen echter ook belangrijke thermische lekken, die extra warmteverlies veroorzaken. Dit geldt ook voor koudebruggen die voldoen aan de huidige eisen. Hierbij moet serieus worden gekeken naar lekken die tot voor kort als minder ernstig werden beschouwd zoals kozijnen, gebouwhoeken en aansluitingen van gebouwdelen onderling (funderingsranden, dakranden en dergelijke). Om de energetische consequenties van dergelijke koudebruggen te kunnen vaststellen, is in NEN 1068 dezelfde rekenmethode als in NEN 2778 opgenomen, zij het dat het accent nu niet ligt op de temperatuur, maar op de warmtestroomdichtheid.

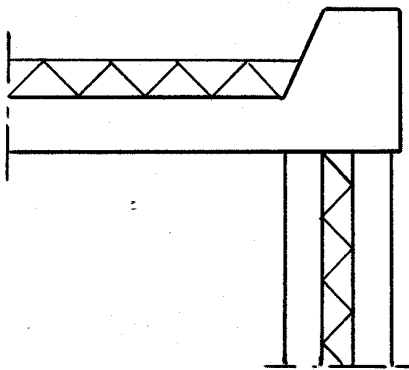
Er zijn drie soorten thermische lekken:

1. een geometrische koudebrug als gevolg van een buitenoppervlak dat groter is dan het binnenoppervlak van de constructie (zie figuur 4a);
2. een constructieve koudebrug als gevolg van het verspringen van de plaats van de isolatie in de constructie (zie figuur 4b);
3. een constructieve koudebrug als gevolg van het doorbreken van de isolatielaag. Deze koudebruggen zijn veelal een gevolg van constructieve koppelingen (zie figuur 4c).



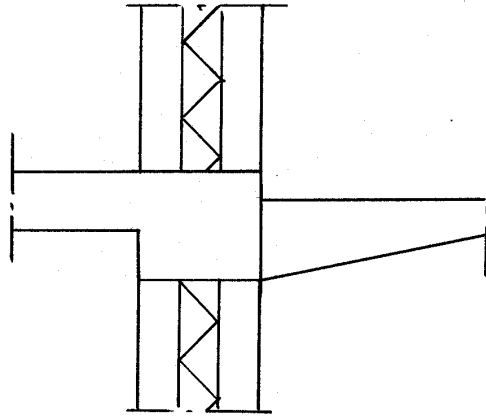
figuur 4a: geometrische koudebrug (buitenhoek)

Het aantal geometrische koudebruggen kan worden gereduceerd door het aantal uitwendige hoeken in de schil te beperken. Dit heeft belangrijke gevolgen voor de vormgeving van het gebouw. Het is dan ook goed om te beseffen dat een geometrische koudebrug vergeleken met de beide andere typen slechts een beperkt effect heeft.



figuur 4b: verspringen van de isolatielaag (dakrand)

Het verspringen van de isolatielaag is te voorkomen of te beperken door een goede constructiekeuze en detaillering. Uiteraard zijn constructieve koppelingen niet te vermijden. Vanuit het oogpunt van thermische isolatie verdient het aanbeveling de koudebrug te beperken door geen oplegging over de volle lengte toe te passen, maar te kiezen voor oplegging op nokken.



figuur 4c: doorbreking van de isolatielaag (console)

Constructieve doorbrekingen van de isolatielaag vormen vrijwel altijd ernstige thermische lekken. Deze koudebruggen doen zich met name voor bij balkons, trappenhuizen en uitkragende bouwvolumes. Zonder onderbreking voldoet dit type koudebrug meestal niet meer aan het Bouwbesluit.

Dit type koudebruggen heeft grote invloed op de totale warmteweerstand van de gebouwschil. De voorkeur gaat daarom uit naar toepassing van een zelfstandige draagconstructie voor deze bouwelementen. Als koppelingen onvermijdelijk zijn, moeten deze zodanig worden ontworpen dat de warmtedoorgang zo klein mogelijk is, bijvoorbeeld door het contactvlak te minimaliseren en door een materiaal met een kleine geleiding te gebruiken voor het overdragen van de krachten. Concrete mogelijkheden om het effect van doorbrekingen te beperken, zijn:

- het plaatsen van een thermische scheiding op plaatsen waar geen krachten worden overgedragen;
- het plaatsen van drukbestendig isolatiemateriaal op plaatsen waar krachten worden overgebracht;
- het gebruik van roestvrij staal (RVS) op plaatsen waar druk- of trekwapening de isolatielaag doorbreekt. RVS heeft een warmtegeleiding die twee tot drie keer zo laag is als die van conventioneel constructiestaal.

12.4. Voorbeeld: Koudebrug door betonconsole

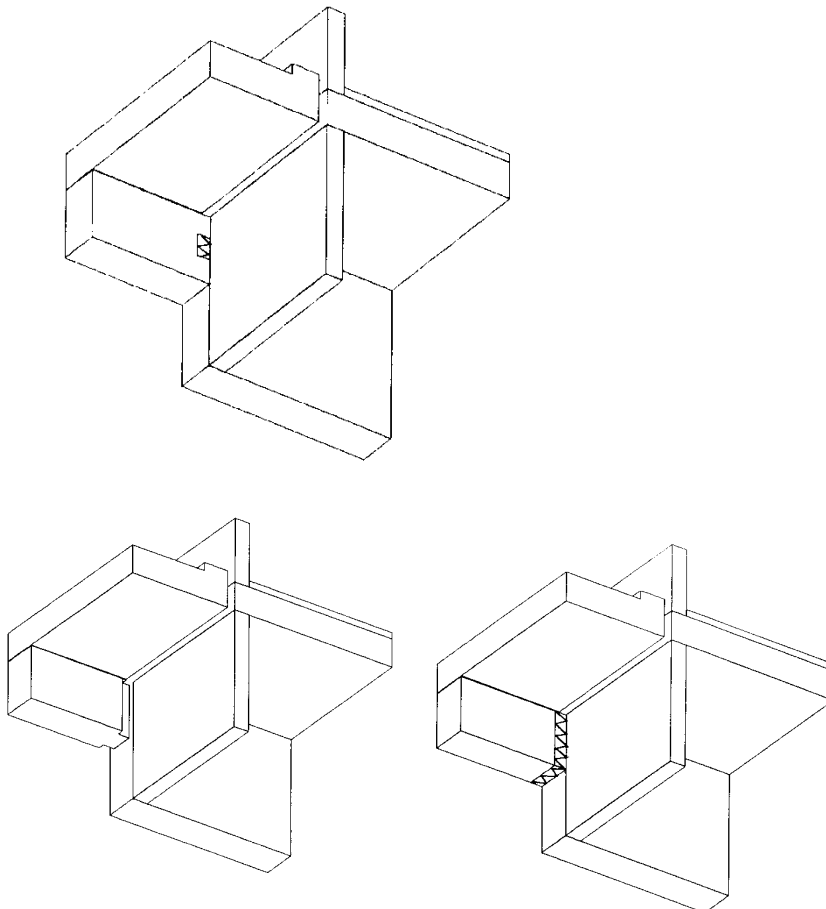
Voor consoles is het van belang goed rekening te houden met invloeden op de f-waarde, de temperatuurfactor van het binnenoppervlak. De voornaamste aspecten zijn:

- De afmeting van de console. Gelet op het koudebrug-effect en dus op de f-waarde verdient het de voorkeur een console zo slank mogelijk uit te voeren. De spouwmuurisolatie moet zoveel mogelijk in tact blijven. Dat wil zeggen dat er voldoende isolatiemateriaal aanwezig moet zijn tussen balkon of galerij en binnenspouwblad (vloerrand), minimaal 60 mm dik.
- In de standaarddetails, ontwikkeld door de Stichting Bouwresearch (publicatie SBR200) is als maat voor de consoles een breedte van 230 mm gekozen en een hoogte van 450 mm, in combinatie met een gietbouwskelet. Ter plaatse van de kopgevel is de console 180 mm breed. Deze maten sluiten aan bij de bouwpraktijk.

- Opbouw van de uitwendige scheidingsconstructie. De opbouw van de uitwendige scheidingsconstructie komt neer op een keuze voor binnen- en buitenspouwblad. De plaats van de thermische isolatie in de spouw en de mate waarin de spouw wordt onderbroken door bij voorbeeld houten stijlen en regels is van invloed op de f-waarde. De twee meest toegepaste gevelvarianten zijn de combinaties gemetseld buitenspouwblad -houten binnenspouwblad en gemetseld buitenspouwblad - gemetseld of gelijmd binnenspouwblad. In het eerste geval is de isolatie opgenomen in het binnenspouwblad, in het tweede geval is de spouw voorzien van isolatie. Andere gevelopbouwen zijn minder kritisch.

In een aantal situaties moeten consoles aangepast worden om te voldoen aan de in het Bouwbesluit vereiste f-waarde $>0,65$ voor woongebouwen. Hiervoor zijn diverse oplossingen:

- Het is mogelijk om al tijdens de fabricage van de console een isolatiestrook van bij voorbeeld PS-schuim in de spanningsneutrale zone aan te brengen. Het PS-blok moet goed aansluiten op de spouwisolatie.
- Het insnoeren van de console over de volle hoogte geeft eveneens een verbetering van de f-waarde. De insnoering van de console strookt met de dikte van de spouwisolatie.
- Ten slotte is er nog de mogelijkheid een console volledig thermisch te onderbreken van het betonskelet en alleen de trek-, druk- en schuifkrachtwapening in roestvrij staal te laten doorlopen. Van dergelijke systemen zijn doorgaans KOMO-attesten beschikbaar, waarin een minimale temperatuurfactor wordt gegarandeerd.



figuur 5. isolatievarianten voor een betonconsole in de woningbouw

13. Regelgeving thermische isolatie

13.1. Inleiding

De belangrijkste reden voor de overheid om eisen te stellen aan de thermische isolatie, is het beperken van energiegebruik. Daarnaast wil men bevorderen dat het thermisch binnenklimaat aan de huidige kwaliteitseisen voldoet. Voor opdrachtgevers is het realiseren van een behaaglijk thermisch binnenklimaat vaak de belangrijkste reden voor het stellen van (aanvullende) eisen.

De eisen die gesteld worden aan de thermische isolatie zijn opgenomen in het Bouwbesluit. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen woningen en niet tot bewoning bestemde gebouwen. Naast de eisen aan de thermische isolatie, worden in het Bouwbesluit ook eisen gesteld aan de Energieprestatiecoëfficiënt (EPC). De EPC wordt berekend aan de hand van de Energieprestatienormering (EPN). Dit is een gestandaardiseerde rekenmethode, waarmee het totale energiegebruik van een gebouw wordt berekend, dus inclusief verlichting, koeling enzovoort.

Om te kunnen voldoen aan de eisen die in het Bouwbesluit worden gesteld aan de EPC, is het vaak noodzakelijk om beter te isoleren dan noodzakelijk zou zijn op basis van de eisen aan de thermische isolatie. De eisen die worden gesteld aan de thermische isolatie blijven hierdoor zinvol; bij voorbeeld een EPC-berekening van een kleine aanbouw aan een bestaand gebouw is niet altijd mogelijk. De eisen die gesteld worden aan de thermische isolatie zijn in die situatie van belang om een minimum isolatieniveau te garanderen.

De directe eisen die in het Bouwbesluit worden gesteld, komen in paragraaf 2 aan de orde. Elk nieuw te bouwen (permanent) gebouw moet aan deze eisen voldoen. Het Bouwbesluit geeft slechts aan wat de ondergrens is uit het oogpunt van veiligheid, gezondheid en energiezuinigheid. Naast de eisen uit het Bouwbesluit stellen professionele opdrachtgevers in veel gevallen aanvullende eisen. In paragraaf 3 wordt op deze aanvullende eisen ingegaan.



figuur 1 en 2. door de eeuwen heen is er veel veranderd in de bouwregelgeving

13.2. Eisen in het Bouwbesluit

In het Bouwbesluit worden eisen gesteld aan de thermische isolatie van woningen en woongebouwen en aan de thermische isolatie van niet tot bewoning bestemde gebouwen. De eisen worden gesteld in de vorm van minimale Rc-waarden voor de dichte delen van de gebouwmhulling, maximale U-waarden voor de overige delen van de gebouwmhulling en

een binnenoppervlaktetemperatuurfactor (f-factor) voor het voorkomen van koudebruggen. De onderstaande eisen worden gesteld:

13.3. Aanvullende eisen van opdrachtgevers

Veel opdrachtgevers van woningen, woongebouwen of utiliteitsgebouwen, stellen eisen in aanvulling op de eisen uit het Bouwbesluit. Vaak worden extra eisen gesteld, die gericht zijn op het verbeteren van de energie-efficiëntie. Meestal wordt geen zwaardere eis gesteld aan de thermische isolatie, maar wordt een zwaardere EPC-eis gesteld (energieprestatienormering).

Het stellen van een EPC-eis laat de ontwerper vrij te bepalen welke maatregelen om technische of economische redenen de voorkeur hebben. Zoals blijkt uit het volgende voorbeeld kan het stellen van aanvullende eisen aan de thermische isolatie zelfs tot ongewenste effecten leiden.

In veel utiliteitsgebouwen maakt de benodigde energie voor koeling een wezenlijk onderdeel uit van het totale energiegebruik. Meer thermische isolatie zorgt ervoor, dat het gebouw minder warmte verliest. Van een verminderd warmteverlies is niet alleen sprake in de winter, maak ook in de zomer. Het gevolg kan zijn dat de energiebehoefte voor verwarming afneemt, maar de energiebehoefte voor koeling juist toeneemt.

13.4. NEN-normen

In NEN-normen die betrekking hebben op de bouw worden tegenwoordig met name bepalingmethoden beschreven. In sommige normen zijn daarnaast ook eisen opgenomen. Het is van belang te weten, dat de eisen uit een NEN-norm op zich geen wettelijke status hebben. Men is niet verplicht aan de betreffende eisen te voldoen, tenzij het betreffende deel van de norm in het Bouwbesluit wordt bekrachtigd. In het algemeen wordt in het Bouwbesluit alleen verwezen naar de bepalingmethoden uit de NEN-normen. De eisen zelf zijn in het Bouwbesluit opgenomen.

Over het onderwerp thermische isolatie zijn een aantal NEN-normen verschenen. Om een beeld te geven van de inhoud, worden deze normen in het kort beschreven.

13.4.1. NEN 1068; Thermische isolatie van gebouwen – Rekenmethoden

In deze norm wordt een rekenmethode beschreven voor het berekenen van de warmteweerstand van een constructie. Hierbij wordt aandacht besteed aan de wijze van schematisering en aan de aan te houden rekenwaarden.

13.4.2. NEN 2444; Bepaling van de warmteweerstand en/of de warmtegeleidingcoëfficiënt van bouw- en isolatiematerialen

In deze norm wordt een bepalingmethode gegeven voor het bepalen van de warmteweerstand en/of de warmtegeleidingcoëfficiënt van materialen in het laboratorium.

13.4.3.NEN 2778; Vochtwering in gebouwen – Bepalingsmethoden

In deze norm worden bepalingmethoden gegeven voor het beproeven van scheidingsconstructies op waterdichtheid, regenwerendheid en wateropname. Daarnaast wordt aangegeven op welke wijze en met welke randvoorwaarden de berekening van de binnenoppervlaktetemperatuurfactor (f-factor) moet plaatshebben.