

Convectief warmtetransport

Kenniskbank Bouwfysica

Auteur: Ruud van Herpen MSc.

1 Warmtetransport, algemeen

In de brandveiligheid worden, net als in de overige bouwfysische vakgebieden, drie principiële warmtetransportmechanismen:

1. geleiding;
2. convectie (stroming);
3. straling.

Ad 1: geleiding.

Geleiding treedt op bij warmtetransport door vaste materialen. Hoewel dit transport in theorie ook optreedt in vloeistoffen en gassen, is het hier meestal volledig ondergeschikt aan het stromingstransport. Het warmtetransport door geleiding in het materiaal komt tot stand onder invloed van een temperatuurverschil over het materiaal, waarbij de mate van geleiding wordt bepaald door de warmtegeleidingscoëfficiënt van het materiaal.

Ad 2: convectie.

Convectie of stromingstransport treedt op in vloeistoffen en gassen. De warmte-inhoud van het materiaal wordt door het massatransport verplaatst. Dit stromingstransport komt tot stand door een drukverschil. Dit drukverschil wordt overigens, in geval van brand, vaak door een temperatuurverschil veroorzaakt.

Ad 3: straling.

Stralingsoverdracht komt niet via een materiaal tot stand, maar is het gevolg van emissie van infrarode (elektromagnetische) straling aan het materiaaloppervlak. Dit kan een vast materiaal zijn, maar ook een vloeibaar of gasvormig materiaallichaam, zoals een vlam.

2 Convectief warmtetransport

Eendimensionaal warmtetransport als gevolg van lucht- en rookstroming, komt bij voorbeeld voor in een tunnel. De warmtestroomdichtheid door een willekeurige doorsnede van de tunnel kan (in de lengterichting x) als volgt worden beschreven:

$$q_x = \rho_{x,y,z} \cdot v_{x,y,z} \cdot c_p \cdot (T_{x,y,z} - T_o) \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (1)$$

Dit geeft voor de warmtestroom:

$$Q_x = \int \rho_{x,y,z} \cdot v_{x,y,z} \cdot c_p \cdot (T_{x,y,z} - T_o) dydz \text{ [W]} \quad (2)$$

Wanneer in de doorsnede A_x de grootheden constant, dus niet plaatsafhankelijk van de coördinaten (x,y,z) worden verondersteld, kan worden geschreven:

$$Q_x = \rho_o \cdot v_{x,o} \cdot c_p \cdot A_x (T_{gem,x} - T_o) \text{ [W]} \quad (3)$$

Ofwel, in warmtestroomdichtheid:

$$q_x = \rho_o \cdot v_{x,o} \cdot c_p \cdot (T_x - T_o) \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (4)$$

Hierin is:

Q	warmtestroom
q	warmtestroomdichtheid
ρ	soortelijke massa van het lucht/rook mengsel
v	luchtsnelheid
c_p	soortelijke warmte van het lucht/rook mengsel
A	oppervlakte
T	temperatuur

Indices:

x,y,z	positie van de grootheid in de tunnel
o	op de instroompositie
x	in x-richting (lengterichting), of loodrecht op de lengterichting (ddorsnede)
gem	gemiddelde waarde

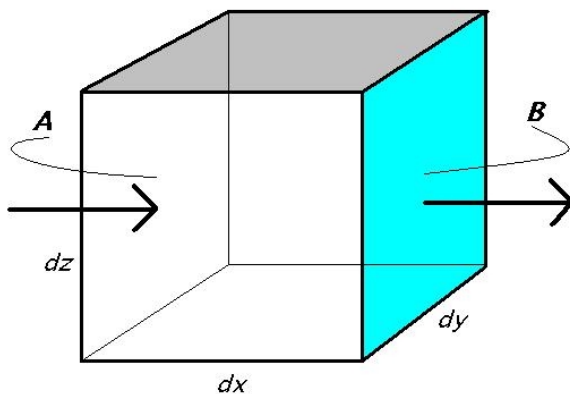
Omdat bij lucht/rookstroming de inkomende massa van het stromingsmedium gelijk moet zijn aan de uitgaande massa van het stromingsmedium, verminderd met de eventuele massatoename in het stromingsmedium, kan voor het stromingstransport in één richting geschreven worden (zie figuur 1):

$$(\rho_{in} v_{in} - \rho_{uit} v_{uit}) \cdot dt + (\rho_{in} - \rho_{uit}) \cdot dx = 0 \quad (5)$$

Dit wordt wel de massawet genoemd, in een willekeurig volume-elementje kan geen massa verloren gaan (behoud van massa). Deze massawet leidt, iets netter geschreven, bij ééndimensionaal stromingstransport tot:

$$\partial(\rho v) \cdot \partial t + \partial \rho \cdot \partial x = 0$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x) = 0 \quad (6)$$



figuur 1. warmtetransport (stroming) door een volume-element van kleine afmetingen

Uitgebreid naar drie dimensies wordt vergelijking (6) geschreven als:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \rho \mathbf{u} = 0 \tag{7}$$

Hierin is:

- \mathbf{u} snelheidsvecotor (v_x, v_y, v_z)
- t tijd [s]

Behalve behoud van massa in het volume-elementje van figuur 1 is ook behoud van (rook)deeltjes, behoud van impulsmoment en behoud van energie van belang. Deze vier “behoudswetten” vormen de basis van hydrodynamische berekeningen. Dergelijke berekeningen zijn niet alleen geschikt voor vloeistofstromingen maar ook voor stromingen in gassen en lucht.

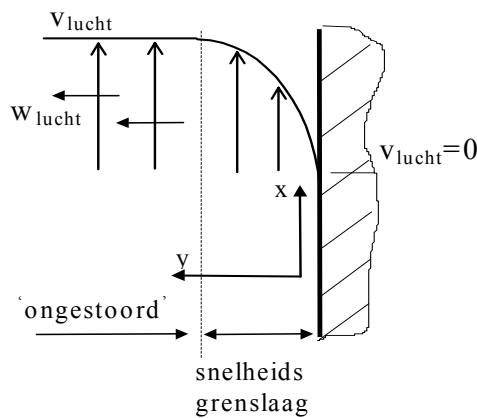
Het zal duidelijk zijn dat hiermee een ingewikkeld stelsel vergelijkingen wordt opgesteld voor elk volume-elementje. Numerieke oplossing hiervan is alleen mogelijk met behulp van computersimulaties; vandaar ook de naam Computational Fluid Dynamics (CFD).

3 Convectieve warmte-afgifte

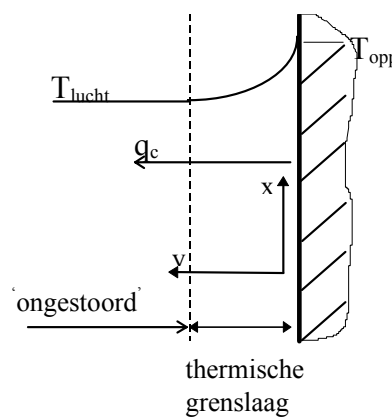
Wanneer een oppervlak aan bij voorbeeld het medium lucht of water grenst, zal - indien er een temperatuurverschil tussen het oppervlak en het medium bestaat - uitwisseling van warmte tussen medium en oppervlak plaatshebben.

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 2a).

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 2b).



figuur 2a. snelheidsverloop nabij een wand



figuur 2b. temperatuurverloop nabij een wand

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

$$\text{Energievergelijking: } \frac{\partial(vT)}{\partial x} + \frac{\partial(wT)}{\partial y} = a \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (8a)$$

$$\text{Impulsvergelijking: } \frac{\partial v^2}{\partial x} + \frac{\partial(wv)}{\partial y} = v \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \quad (8b)$$

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 diffusiviteit) van lucht

Het linkerlid van de energievergelijking (8a) 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 (8b) 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 dus van dezelfde grootte orde.

Voor $Pr = 1$ ($\nu = a$) zijn de energie- en impulsvergelijking 8a en 8b 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:

$$q_c = \alpha_c (T_{opp} - T_{med}) \quad (9)$$

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.

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.

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 (binnenconditie) $\alpha_c \approx 0,5 \text{ tot } 3$
- brand (binnenconditie) $\alpha_c \approx 20$
- gemiddelde wind buiten $\alpha_c \approx 20$
- storm buiten $\alpha_c \approx 200$

4 De grenslaag bij convectieve overdracht

Bij convectieve warmte-overdracht geeft een warm lichaam warmte af aan de lucht en neemt een koud lichaam deze warmte uit de lucht weer op. In de overdracht speelt niet alleen de luchtstroming een belangrijke rol, maar ook in de warmte-afgifte aan de lucht en warmte-opname uit de lucht. Dit proces speelt zich af in de grenslaag rond het lichaam.

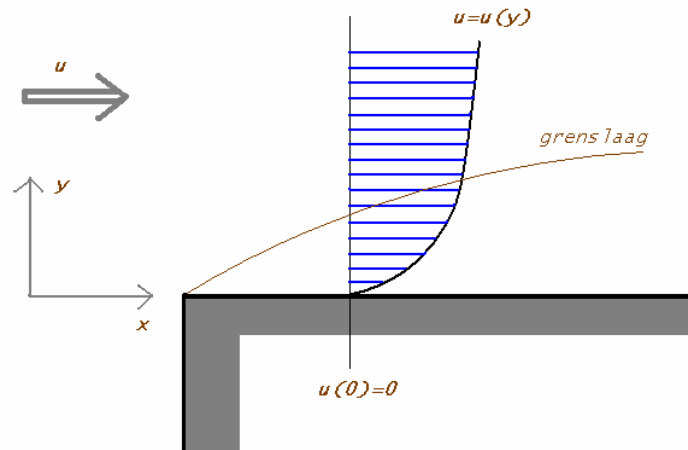
De luchtstroming waarin een lichaam zich bevindt kan laminair zijn (evenwijdige stroomlijnen zonder wervelingen) of turbulent (continue wervelingen). Langs het oppervlak ontstaat een grenslaag van geringe dikte met speciale eigenschappen, afhankelijk van luchtsnelheid, viscositeit en ruwheid van het oppervlak.

De grenslaag bij luchtstroming langs het oppervlak is vrijwel altijd turbulent, ook wanneer de stroming zelf laminair is. De mate van turbulentie en de dikte van de grenslaag bepalen de convectieve overdracht bij opwarming of afkoeling van het oppervlak.

Per definitie wordt de dikte van de grenslaag bepaald door het 99%-interval van de snelheid in de onverstoorde situatie. Dus:

$$u(\delta) = 0,99 \cdot u(\infty) \quad (10)$$

De grenslaag is, kort achter de beginrand van het oppervlak, laminair. Vervolgens ontstaat een turbulente grenslaag, waarbij overigens altijd, dicht bij het oppervlak, een zeer dunne laminaire sublaag aanwezig is.



figuur 3. hydrodynamische grenslaag langs een oppervlak; de grenslaag neemt in dikte toe vanaf de beginrand van het oppervlak

De dikte van een laminaire hydraulische grenslaag kan benaderd worden door:

$$\delta_{h,x} \approx x \cdot \left(\frac{8}{\text{Re}_x} \right)^{1/2} \quad (11)$$

Hierin is:

$\delta_{h,x}$ dikte van de laminaire grenslaag op positie x.

Re_x lokaal Reynolds-getal op positie x.

Wanneer het oppervlak een andere temperatuur bezit dan de omringende lucht, is er eveneens een thermische grenslaag aanwezig. De mate waarin warmte-overdracht plaatsheeft tussen het oppervlak en de omringende lucht hangt af van de temperatuurgradiënt in de grenslaag op de positie $y=0$:

$$q = -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_{y=0} \quad (12)$$

De grootheid λ is de warmtegeleidingscoëfficiënt van de lucht (het stromingsmedium).

Formule (12) komt bij benadering overeen met:

$$q \approx \frac{\lambda}{\delta_\theta} (T_\infty - T_s) \quad (13)$$

Hierin is:

δ_θ	dikte van de thermische grenslaag
T_∞	temperatuur van de lucht (stromingsmedium)
T_s	temperatuur van het oppervlak

De verhouding van de dikte van de hydraulische grenslaag en de thermische grenslaag is afhankelijk van het getal van Prandtl. Het getal van Prandtl ($Pr = \nu/\alpha$) is dimensieloos en hangt af van de kinematische viscositeit ($\nu = \mu/\rho$: de dynamische viscositeit, gedeeld door de dichtheid) en de thermische diffusiteit (temperatuurvereffeningscoëfficiënt) van lucht (α). De dikteverhouding van de hydraulische en de thermische grenslaag kan nu als volgt worden geschreven:

$$\frac{\delta_\theta}{\delta_h} \approx (Pr)^{-1/3} \quad (14)$$

De convectieve warmte-overdrachtscoëfficiënt h ligt hierdoor, bij een laminaire grenslaag, als volgt vast:

$$h \approx \frac{\lambda}{l \cdot (8/Re)^{1/2} \cdot (Pr)^{-1/3}} \quad (15)$$

Of, gebruik makend van het (lokale) Nusselt-getal ($Nu = hl/\lambda$):

$$Nu = \frac{hl}{\lambda} \approx 0,35 Re^{1/2} Pr^{1/3} \text{ laminaire grenslaag, gedwongen convectie} \quad (16a)$$

$$20 < Re < 3 \times 10^5$$

Voor een turbulente grenslaag geldt:

$$Nu = \frac{hl}{\lambda} \approx 0,037 Re^{4/5} Pr^{1/3} \text{ turbulente grenslaag, gedwongen convectie} \quad (16b)$$

$$(Re > 3 \times 10^5)$$

In de bovenstaande vergelijkingen is l de lengte van het oppervlak. De vergelijkingen hebben betrekking op gedwongen convectie, dat wil zeggen dat er een geforceerde luchtstroming langs het oppervlak aanwezig is ten gevolge van externe randcondities.

In het geval van natuurlijke convectie (luchtstroming geïnitieerd door het temperatuurverschil tussen oppervlak en lucht, dus niet door externe randcondities), is niet het Reynolds-getal van belang, maar het Grashof-getal:

$$Gr = \frac{gl^3(\rho_\infty - \rho)}{\rho\nu^2} = \frac{gl^3\beta\Delta T}{\nu^2} \quad (17)$$

De grootte β wordt hierin de expansie-coëfficiënt genoemd.

In tabel 1 is het Nusselt-getal, afhankelijk van het Grashof-getal en het Prandtl-getal, bij natuurlijke convectie langs een oppervlak weergegeven.

stromingskarakteristiek	Nusselt-getal $Nu = h l / \lambda$
laminair, natuurlijke convectie langs een verticaal oppervlak met lengte l ($10^4 < Gr.Pr < 10^9$)	$0,59 (Gr.Pr)^{1/4}$
turbulent, natuurlijke convectie langs een verticaal oppervlak met lengte l ($Gr.Pr > 10^9$)	$0,13 (Gr.Pr)^{1/3}$
laminair, natuurlijke convectie langs een horizontaal oppervlak met lengte l , bovenzijde ($10^5 < Gr.Pr < 2 \times 10^7$)	$0,54 (Gr.Pr)^{1/4}$
turbulent, natuurlijke convectie langs een horizontaal oppervlak met lengte l , bovenzijde ($2 \times 10^7 < Gr.Pr < 3 \times 10^{10}$)	$0,14 (Gr.Pr)^{1/3}$

tabel 1. Nusselt-getal bij natuurlijke convectie