

Luchtstroming in openingen

Kennisbank Bouwfysica
Ir. Ruud van Herpen

1 Algemeen

Luchtstroming door ventilatie-openingen in (uitwendige) scheidingsconstructies laat zich als volgt beschrijven:

$$\dot{V} = C(\Delta P)^n \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (1)$$

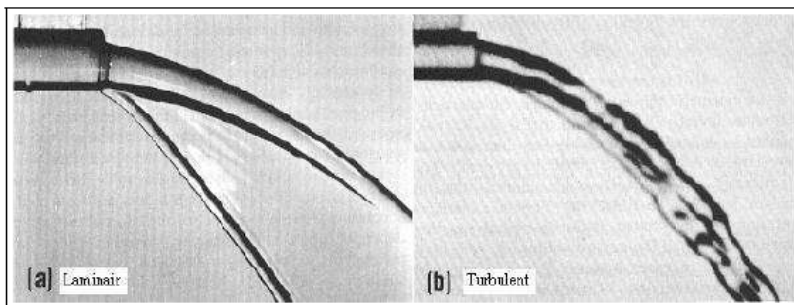
Met:

\dot{V}	volumestroom door de opening [m^3/s]
C	volumestroomcapaciteit van de opening [$\text{Pa}^{-n}\text{m}^3/\text{s}$]
ΔP	drukverschil over de opening [Pa^n]
n	stromingsexponent [-]

De stromingsexponent is een stromingseigenschap die afhangt van de aard van de stroming. Bij een volledig turbulente stroming geldt $n=0,5$. Bij een volledig laminaire stroming geldt $n=1$.

In een laminaire stroming zijn de stroomlijnen evenwijdig aan elkaar en glijden als het ware langs elkaar heen. Door de viscositeit van het stromingsmedium blijft de laminaire stroming in stand. Vandaar dat laminaire stroming ook wel visceuze stroming wordt genoemd.

In een turbulente stroming laten de stroomlijnen elkaar los en gaan wervelen. Dit levert een veel onrustiger beeld op. De viscositeit van het stromingsmedium speelt nu geen rol meer. Figuur 1 geeft het beeld weer van een laminaire stroming en een turbulente stroming in een waterstraal.



Figuur 1. Voorbeeld van een laminaire waterstraal (a) en een turbulente waterstraal (b).

2 Stromingsexponent en Reynoldsgetal

De stromingsexponent wordt bepaald door de aard van de stroming, laminair of turbulent. Het Reynoldsgetal is hiervoor bepalend.

Het Reynoldsgetal is bij een stroming door een opening gedefinieerd als:

$$\text{Re} = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\eta} \quad [-] \quad (2)$$

Met:

v	luchtsnelheid in de opening [m/s]
ρ	dichtheid van de lucht in de opening [kg/m ³]
η	dynamische viscositeit van de lucht in de opening [Pas]
D	hydraulische diameter [m]

Voor luchtstroming door openingen, buizen, kanalen, etc. geldt als omslagpunt tussen laminaire en turbulente stromingen een Reynoldsgetal van $Re = 2500$ a 5000 . Dat houdt in dat bij $Re < 2500$ de stroming als laminair is te beschouwen en bij $Re > 5000$ als turbulent.

Bij een omgevingstemperatuur van circa $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ geldt voor lucht:

- $\rho = 1,20\text{ kg/m}^3$
- $\eta = 0,0183\text{ mPas}$

Voor lage luchtsnelheden (orde-grootte 1 m/s) ligt het omslagpunt tussen laminaire en turbulente stromingen dan bij een hydraulische diameter van $37,5$ a 75 mm . Voor hogere luchtsnelheden (orde-grootte 5 m/s) ligt het omslagpunt bij een hydraulische diameter van $7,5$ a 15 mm .

Ter vergelijking:

Bij omstroming van een object (b.v. een kolom) ligt het omslagpunt bij een Reynoldsgetal dat een factor 20 keer groter is dan bij de inwendige stroming zoals hierboven is weergegeven. Ook de hydraulische diameter van het te omstromen object is daarbij een factor 20 keer groter. Deze bedraagt dus bij een luchtsnelheid in de orde van 1 m/s circa $0,75$ a $1,5\text{ m}$. Bij een luchtsnelheid in de orde van 5 m/s is dit circa $0,15$ a $0,3\text{ m}$.

3 Volumestroomcapaciteit

3.1 turbulente (niet-visceuze) stroming

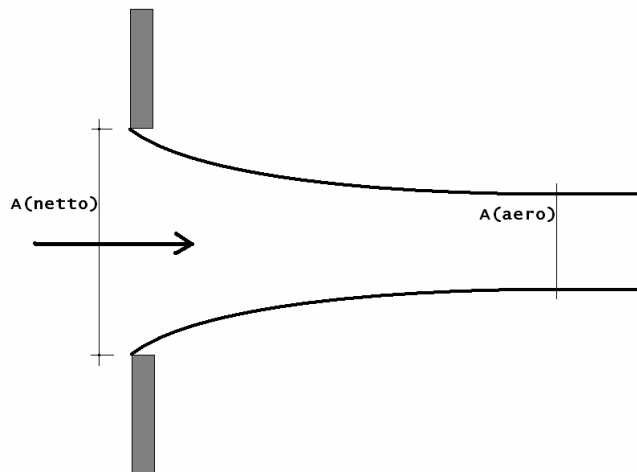
De volumestroomcapaciteit van een opening wordt bepaald door de netto doorlaat en de weerstand die door de randen van de netto doorlaat wordt geïntroduceerd. Deze weerstand wordt contractiecoëfficiënt genoemd of Bernouilli-coëfficiënt, en is het grootst bij scherpe randen. In formulevorm geldt voor de volumestroomcapaciteit, bij een stromingsexponent van $n=0,5$ (turbulente stroming):

$$C = C_d A \left(\frac{2}{\rho} \right)^{0,5} [\text{Pa}^{-0,5} \text{m}^3/\text{s}] \quad (3)$$

Met:

A	netto doorlaatoppervlakte van de opening [m ²]
C_d	contractie- of Bernouilli-coëfficiënt van de opening [-]
ρ	dichtheid van de lucht in de opening [kg/m ³]

Het product van contractiecoëfficiënt en netto doorlaat staat ook bekend als aerodynamische doorlaat. Zie figuur 2.



Figuur 2. Aerodynamische doorlaat en netto doorlaat. De verhouding van deze grootheden is de contractiecoëfficiënt.

De contractiecoëfficiënt in een opening wordt bepaald door de randafwerking aan de instroomzijde. Bij scherpe randen is de contractiecoëfficiënt het kleinst, deze bedraagt dan $C_d \geq 0,59$. Naarmate de randen meer afgerond worden neemt de contractiecoëfficiënt, en daarmee de volumestroomcapaciteit van de opening, toe. In het ideale geval van een zodanige afronding van de randen dat geen loslating van de stroming meer optreedt, is de aerodynamische doorlaat gelijk aan de netto doorlaat. De contractiecoëfficiënt is dan dus het grootst, in het ideale geval namelijk $C_d = 1,0$.

In de praktijk wordt veelal met een vaste contractiecoëfficiënt gerekend van tweederde: $C_d = 0,66$.

3.2 Laminaire (visceuze) stroming

Bij laminaire stroming door een opening kan niet van contractie van de stroming gesproken worden en is dus ook de contractiecoëfficiënt niet aan de orde. Het kenmerk van laminaire stroming is dat de stroomlijnen zonder wervelingen de opening passeren. Er is dus geen verkleining van de aerodynamische oppervlakte, deze is gelijk aan de netto doorstroomoppervlakte. De stromingsweerstand wordt in de opening bepaald door de viscositeit van de lucht.

Daardoor kan niet meer een opening beschouwd worden in een oneindig dunne scheidingsconstructie. Omdat de stromingsweerstand wordt bepaald door de viscositeit van de lucht is het noodzakelijk om in de stromingsrichting een lengtemaat te kennen (dit is de dikte van de scheidingsconstructie waarin de opening zich bevindt). Voor de laminaire volumestroom in een opening met een lengte (in stromingsrichting) L geldt:

$$Q_{lam} = \frac{\pi \cdot D^4}{128 \cdot L \cdot \eta} \cdot \Delta P \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (4)$$

Met:

D hydraulische diameter [m]

η dynamische viscositeit van de lucht in de opening [Pas]

L lengtemaat van de opening (dikte van de scheidingsconstructie) [m]

De volumestroomcapaciteit bedraagt hierin dus, bij een stromingsexponent van $n=1$:

$$C = \frac{\pi \cdot D^4}{128 \cdot L \cdot \eta} \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (4a)$$

4 Grote ventilatie-openingen en fijnmazige ventilatie-openingen

4.1 een grote opening van 1 m²

In een grote ventilatie-opening met een afmeting van 1 m x 1 m zal een turbulente stroming optreden, ongeacht de luchtsnelheid. De contractiecoëfficiënt bedraagt dan $C_d = 0,66$ (praktijkwaarde), de stromingsexponent is $n = 0,5$.

De capaciteit van de opening bedraagt op basis van deze gegevens:

$$C = 0,66 \cdot 1 \cdot \sqrt{\frac{2}{1,20}} = 0,86 \quad \text{m}^3/\text{s} \text{ bij } \Delta P = 1 \text{ Pa drukverschil.}$$

Voor de volumestroom door de opening geldt nu:

$$\dot{V} = C \sqrt{\Delta P} \quad \text{m}^3/\text{s}$$

4.2 fijnmazige openingen met een netto doorlaat van 1 m²

Wanneer een grote opening van fijnmazige spijlen of draden wordt voorzien kan de stroming laminair worden. Bij verticale draden met een diameter van 2,5 mm met een onderlinge maaswijdte van circa 5 mm geldt als hydraulische diameter bij een openingshoogte van 1 m:

$$D = \frac{4 \cdot A}{O} = \frac{4 \cdot 0,005}{2} = 0,01 \text{ m}$$

Hierin stelt A de oppervlakte van de opening tussen twee verticale draden voor en O de omtrek van die opening.

Voor luchtsnelheden tot ongeveer 3,8 m/s blijkt de stroming tussen de draden laminair te zijn, bij hogere luchtsnelheden moet worden uitgegaan van meer turbulente stroming.

Zolang de stroming laminair is kan als capaciteit van de opening worden gehanteerd:

$$C = \frac{\pi \cdot D^4}{128 \cdot L \cdot \eta} = \frac{\pi \cdot 0,01^4}{128 \cdot 0,0025 \cdot 0,0000183} = 0,0054 \quad \text{m}^3/\text{s} \text{ bij } \Delta P = 1 \text{ Pa drukverschil.}$$

Deze capaciteit geldt per opening van 5 mm tussen de verticale draden. Omgerekend naar een totale netto doorlaat van 1 m² bedraagt de capaciteit:

$$C = 1,08 \text{ m}^3/\text{s} \text{ bij } \Delta P = 1 \text{ Pa drukverschil.}$$

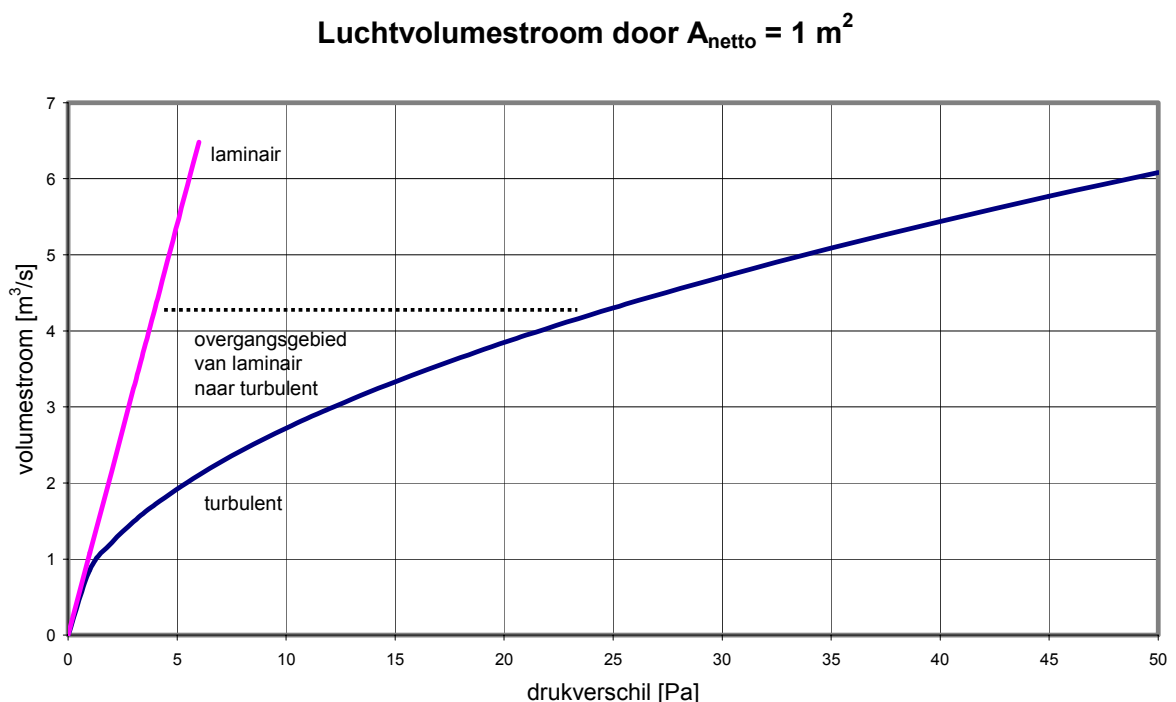
Voor de volumestroom door de opening geldt nu:

$$\dot{V} = C \cdot \Delta P \quad \text{m}^3/\text{s}$$

4.3 vergelijking

De situaties van 4.1 en 4.2 zijn uitgezet in figuur 3. Deze grafiek geeft de volumestroom door de openingen weer, als functie van het drukverschil over de openingen. In beide gevallen is van dezelfde netto doorlaat uitgegaan (referentiemaat: 1 m^2).

De laminaire situatie (4.2) is beduidend gunstiger dan de turbulente situatie (4.1). De luchtwervelingen in de turbulente situatie kosten energie, waardoor de snelheidsenergie in de opening wordt gereduceerd. Zoals aangegeven in 4.2 kan de laminaire situatie alleen maar bestaan bij lage luchtsnelheden. Bij hogere luchtsnelheden zal de laminaire situatie overgaan in de turbulente situatie. Dit overgangsgedrag is in figuur 3 eveneens weergegeven.



Figuur 3. Volumestroom door een netto doorlaat van 1 m^2 bij laminaire (4.2) en turbulente (4.1) stroming, afhankelijk van het drukverschil.

Er kan worden geconcludeerd dat de fijnmazige verdeling van ventilatie-openingen ten opzichte van een grofmazige verdeling een grotere luchtvolumestroomcapaciteit bezit. Dit voordeel treedt alleen bij relatief lage luchtsnelheden in de openingen op. Bij grote luchtsnelheden zijn de luchtstromingen zowel bij een fijnmazige als grofmazige verdeling turbulent en zijn de luchtvolumestroomcapaciteiten gelijk. Voor de volledigheid wordt opgemerkt dat de vergelijking geldig is voor gelijke netto doorstroomboppervlakten. Bruto doorstroomboppervlakten zullen daarbij in het algemeen niet gelijk zijn.

5 Bronnen

Fox, Robert W. and Alan T. McDonald; *Introduction to fluid mechanics*; John Wiley & Sons, 1994.

Cauberg, prof. ir. J.J.M. e.a.; *Stromingsweerstand van openingen in scheidingsconstructies*; Kennisbank Bouwfysica (Lu-13), 2005

Herpen, ir. Ruud van; *Meerzone luchtstroommodellen*; Kennisbank Bouwfysica (Lu-20), 2005