

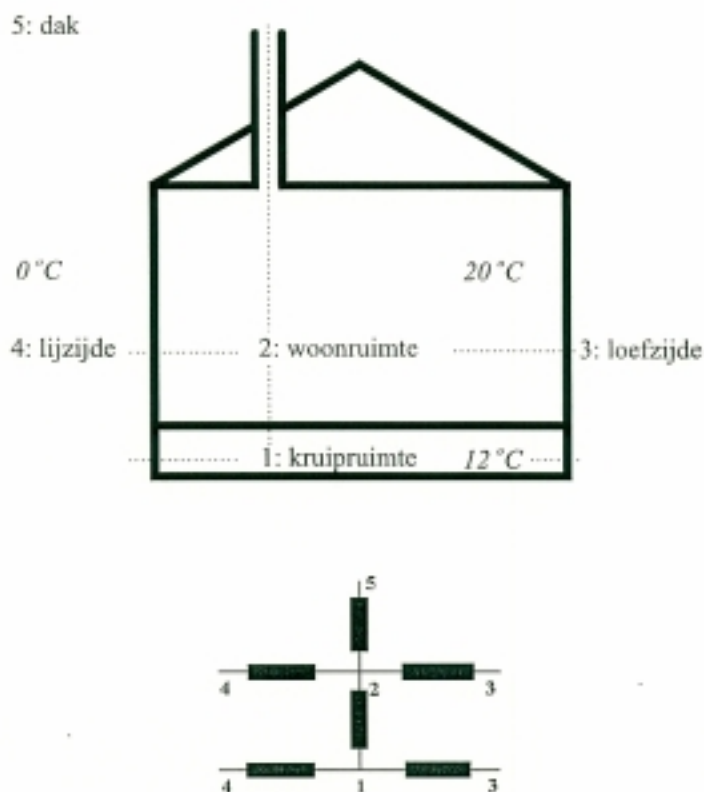
Meerzone luchtstroommodellen

Kennisbank Bouwfysica
Auteur: Ruud van Herpen MSc.

1 Principe van een meerzone luchtstroommodel

Inzicht in de druk- en volumestroomverdeling binnen een bouwwerk kan worden verkregen met behulp van een meerzone luchtstroommodel. Hierin wordt het bouwwerk gemodelleerd tot een aantal ruimten (zones), die met elkaar en met de buitenlucht verbonden zijn via niet-lineaire luchtstroomweerstand (zie 2.2). Deze luchtstroomweerstand kunnen worden gevormd door roosters, kanalen, ventilatievoorzieningen, kieren, naden e.d.. Daarbij kunnen als randvoorwaarden temperaturen en winddrukken worden ingevoerd. Ook kan een opgelegde lucht volumestroom worden ingevoerd (ventilator).

Eigenlijk kan een luchtstroommodel worden voorgesteld in een elektrisch analogon. Figuur 1 geeft een eenvoudig voorbeeld van een 2-zone model, waarin de woning en de kruipruimte elk een aparte zone vormen.



Figuur 1. Schematische doorsnede van een woning en het bijbehorende 2-zone luchtstroommodel, weergegeven in een elektrisch analogon.

Als bekend zijn:

- de drukverdeling rond het bouwwerk;
- de heersende temperaturen;
- de luchtstroomweerstand binnen het bouwwerk en in de buitenschil;
- de eventuele opgelegde lucht volumestromen (mechanische ventilatie);

dan kan worden berekend:

- de drukverdeling in het bouwwerk (in de zones);
- de onbekende lucht volumestromen (tussen de zones).

Daarnaast is het mogelijk om ook de verspreiding van verontreinigingen met een luchtstroommodel te berekenen. Daarvoor dienen additioneel bekend te zijn:

- de verontreinigingsbron (grootte en plaats van de bron);
- de achtergrondconcentratie in de buitenlucht (externe zones).

2 De fysische parameters

2.1 Winddruk- en temperatureffecten

De grootte van de drukverschillen rond een bouwwerk, veroorzaakt door windinvloeden, hangt af van de windsnelheid en de windrichting.

De drukverdeling rond een bouwwerk, en dus ook op de ventilatie-openingen van dit bouwwerk, wordt gegeven door:

$$\Delta P_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_p \cdot v^2$$

met:

ΔP_w	drukverschil ten gevolge van wind [Pa]
v	windsnelheid [m/s]
C_p	plaatsafhankelijke factor (winddrukcoëfficiënt)
ρ	dichtheid van de lucht [kg/m ³]

De plaatsafhankelijke factor of winddrukcoëfficiënt c_p hangt af van de oriëntatie van het vlak, het referentiepunt voor de windsnelheid v en de beschutting rond het bouwwerk. Aan de loefzijde van het bouwwerk ontstaat een overdruk, aan de overige zijden doorgaans een onderdruk.

Voor de schuine vlakken ligt de situatie gecompliceerder; vooral ter plaatse van aansluitingen aan andere vlakken is onduidelijk welke waarde voor de c_p moet worden aangehouden. In dat geval moet een schatting gemaakt worden, bijvoorbeeld door middel van interpolatie.

In bijlage 2 zijn enige praktijkwaarden voor de winddrukcoëfficiënt weergegeven in het vrije veld.

De windsnelheid hangt af van de terreinruwheid en de hoogte boven maaiveld waarop de windsnelheid van belang is. De windsnelheid wordt gegeven door:

$$v = v_m \cdot K \cdot z^a$$

met:

- v plaatselijke windsnelheid [m/s]
 K, a terreincoëfficiënten (zie bijlage 3)
 v_m de windsnelheid onder meteocondities (10 m hoogte boven vrije veld) [m/s]
 z hoogte ten opzichte van maaiveld [m]
 (BS 5925: 1991)

De mate van beschutting rond een bouwwerk kan verdisconteerd worden in de winddrukcoëfficiënt (bijlage 2) of in de windsnelheid (bijlage 1).

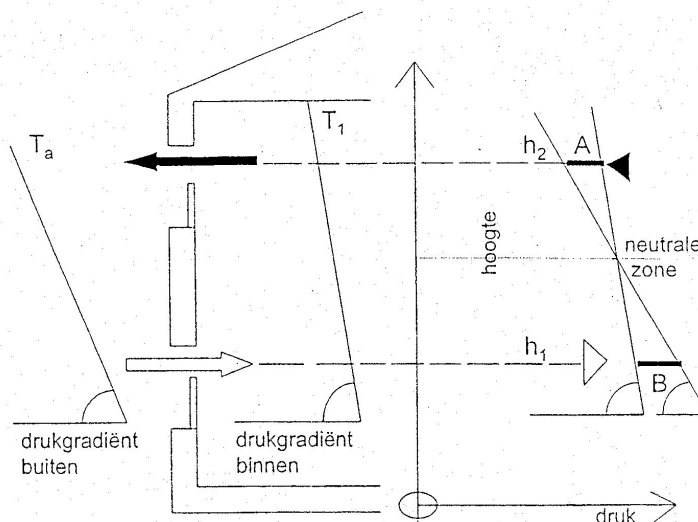
De grootte van de drukverschillen, veroorzaakt door thermische trek, wordt berekend uit:

$$\Delta P_t = \rho_o \cdot g \cdot h \cdot 273 \cdot \frac{(T_1 - T_2)}{(T_1 \cdot T_2)}$$

met:

- ΔP_t thermische trek [Pa]
 h hoogteverschil (2-1) [m]
 g zwaartekrachtversnelling [m/s²]
 T_1 absolute temperatuur op plaats 1 [K]
 T_2 absolute temperatuur op plaats 2 [K]
 ρ_o dichtheid van lucht bij 273 K [kg/m³]

Wanneer er tussen de ventilatie-openingen van een ruimte of zone een hoogteverschil aanwezig is, speelt thermische trek een rol. Zo is het mogelijk dat zelfs bij openingen die in één gevel zijn gesitueerd (waarop in principe gelijke winddrukken heersen) luchttoevoer en luchtafvoer plaatsvindt, mits er een temperatuurverschil tussen de ruimte of zone en de buitenlucht aanwezig is. Zie figuur 2.



Figuur 2. Schematische weergave van het principe van thermische trek bij ventilatie-openingen die op verschillende hoogtes in hetzelfde gevelvlak zijn gelegen.

2.2 Luchtstroomweerstand

In het model wordt een bouwwerk voorgesteld door een aantal ruimten die met elkaar en met de buitenlucht verbonden zijn via niet-lineair luchtstroomweerstand. Deze luchtstroomweerstand kunnen worden gevormd door bijvoorbeeld roosters, kanalen, ventilatievoorzieningen, kieren en naden. Bij een drukverschil ΔP over de luchtstroomweerstand bedraagt de luchtvolumestroom Q :

$$Q = C_w \cdot (\Delta P)^{\frac{1}{n}}$$

met:

Q	<i>luchtvolumestroom [m³/s]</i>
C_w	<i>capaciteit van de luchtstroomweerstand (luchtvolumestroom bij 1Pa drukverschil) [Paⁿm³/s]</i>
ΔP	<i>drukverschil [Pa]</i>
n	<i>stromingsfactor</i>

De stromingsfactor n varieert van 1 tot 2. Voor laminaire stroming geldt $n = 1$, voor turbulente stroming geldt $n = 2$. Wanneer $n > 1$ gedraagt de luchtstroomweerstand zich niet lineair.

De capaciteit van een kanaal

$$C = \frac{A \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho}}}{1 + \sqrt{\lambda l / D + \sum \zeta_i}}$$

met:

A	<i>kanaaloppervlakte in doorsnede</i>
ρ	<i>dichtheid van lucht</i>
λ	<i>wandwrijvingscoëfficiënt.</i>
l	<i>kanaallengte</i>
D	<i>hydraulische diameter (4x oppervlakte/omtrek)</i>
ζ_i	<i>weerstandsfactor van element i.</i>
i	<i>het aantal weerstandverhogende elementen in het kanaal (bochten, roosters enz.)</i>

Voor de bijbehorende stromingsfactor geldt $n = 2$.

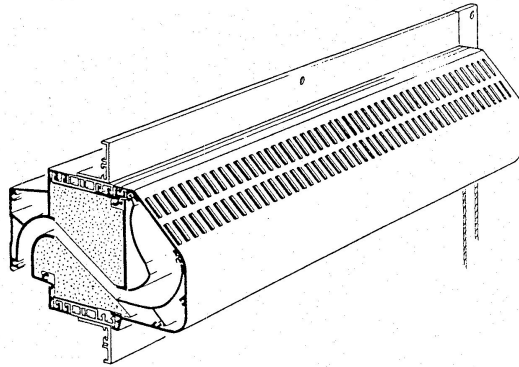
De capaciteit van een opening

$$C = A\mu \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho}}$$

met:

A	netto doorlaat van de opening [m^2]
μ	contractiecoëfficiënt
ρ	dichtheid van lucht [kg/m^3]

Voor de bijbehorende stromingsfactor geldt $n = 2$.



Figuur 3. Een geluidgedempt ventilatierooster heeft doorgaans een geringere capaciteit dan een ongedempt ventilatierooster.

De capaciteit van spleten, naden en kieren

$$C = c \cdot l$$

met:

c	spleetweerstand per lengte eenheid [$Pa^n m^3 / (s \cdot m)$]
l	totale spleetlengte [m]

Voor de bijbehorende stromingsfactor geldt $1 < n < 2$.

Vaak wordt gehanteerd: $n=1,5$.

Numerieke waarden

Voor precieze numerieke waarden van de stromingsfactor, de capaciteit, de wandenwrijvingscoëfficiënt en dergelijke kunnen diverse handboeken geraadpleegd worden. Dit geldt ook voor terreincoëfficiënten en winddrukcoëfficiënten. De bijlagen geven enkele veel gebruikte waarden.

3 Scalaire grootheden

3.1 Verontreinigingen

Wanneer de volumestroomverdeling binnen een bouwwerk eenmaal bekend is, kan ook de verspreiding van verontreinigingen inzichtelijk gemaakt worden. Dergelijke parameters die impliciet het gevolg zijn van het fysische model noemt men wel scalaire grootheden. Deze grootheden vormen dus geen essentieel onderdeel van het fysische model.

Bij een gegeven ventilatiedebiet en een bekende verontreinigingsbron, kan de verontreinigingsconcentratie in die zone berekend worden (stationaire beschouwing). Daarbij wordt uitgegaan van een homogene concentratieverdeling binnen de zone (homogene menging).

$$\Delta C_i = \frac{G}{Q_i}$$

met:

ΔC_i	toename verontreinigingsconcentratie in zone i [kg/m^3]
G	verontreinigingsbron [kg/s]
Q_i	ventilatiedebiet (luchtvolumestroom) [m^3/s]

3.2 Andere bronnen

De bronnen hoeven niet altijd verontreinigingen te introduceren in de vorm van gassen, dampen of deeltjes (zoals rook). Ook vochtbronnen introduceren een verontreiniging (waterdampconcentraties). Zelfs een warmtebron (thermisch vermogen) introduceert een verontreiniging. Bij deze bron gaat het niet om verontreinigingsconcentraties, maar om temperatuurverhoging.

Dit kan geschreven worden als:

$$\Delta T_i = \frac{U_{bron}}{\rho c Q_i}$$

met:

ΔT_i	temperatuuroename in zone i [K]
U_{bron}	warmtebron [W]
ρc	warmtecapaciteit [$\text{J}/\text{m}^3\text{K}$]
Q_i	ventilatiedebiet (luchtvolumestroom) [m^3/s]

Ook nu wordt weer uitgegaan van een homogene menging binnen de zone. Bovendien wordt op deze wijze geen rekening gehouden met afkoeling aan de bouwkundige scheidingsconstructies door thermische traagheid of transmissie.

Literatuur

Berekenen van de druk-volumestroomverdeling binnen een bouwwerk: VVmod versie 4.2
Ir. R.A.P. van Herpen – Adviesburo Nieman BV, mei 2003

Berekening van de ventilatie in vertrekken met geopende ramen
Ir. J. Huuslage – TU Delft, faculteit Civiele Techniek, mei 1991

A Guide to energy efficient ventilation
Martin W. Liddament – Air Infiltration and Ventilation Centre AIVC, GB, march 1996

BIJLAGE 1

Waarden voor de terreincoëfficiënten a en K .

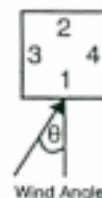
Terreinomschrijving	K	a
Open vlak gebied	0,68	0,17
Landelijk gebied met enige huizen en bomen	0,52	0,20
Gebied met laagbouw (dorpen)	0,35	0,25
Gebied met hoogbouw (stad)	0,21	0,33

BIJLAGE 2 Winddrukcoëfficiënten

Table A2.1 Wind Pressure Coefficient Data

Low-rise buildings (up to 3 storeys)
Length to width ratio: 1:1
Shielding condition: Exposed

Wind speed reference level: Building height

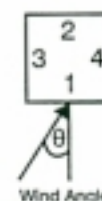


Location		Wind Angle							
		0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°
Face 1		0.7	0.35	-0.5	-0.4	-0.2	-0.4	-0.5	0.35
Face 2		-0.2	-0.4	-0.5	0.35	0.7	0.35	-0.5	-0.4
Face 3		-0.5	0.35	0.7	0.35	-0.5	-0.4	-0.2	-0.4
Face 4		-0.5	-0.4	-0.2	-0.4	-0.5	0.35	0.7	0.35
Roof (<10° pitch)	Front	-0.8	-0.7	-0.6	-0.5	-0.4	-0.5	-0.6	-0.7
	Rear	-0.4	-0.5	-0.6	-0.7	-0.8	-0.7	-0.6	-0.5
Average		-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6
Roof (11-30° pitch)	Front	-0.4	-0.5	-0.6	-0.5	-0.4	-0.5	-0.6	-0.5
	Rear	-0.4	-0.5	-0.6	-0.5	-0.4	-0.5	-0.6	-0.5
Average		-0.4	-0.5	-0.6	-0.5	-0.4	-0.5	-0.6	-0.5
Roof (>30° pitch)	Front	0.3	-0.4	-0.6	-0.4	-0.5	-0.4	-0.6	-0.4
	Rear	-0.5	-0.4	-0.6	-0.4	0.3	-0.4	-0.6	-0.4
Average		-0.1	-0.4	-0.6	-0.4	-0.1	-0.4	-0.6	-0.4

Table A2.2 Wind Pressure Coefficient Data

Low-rise buildings (up to 3 storeys)
Length to width ratio: 1:1
Shielding condition: Surrounded by obstructions
equivalent to half the height of the building

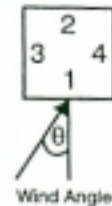
Wind speed reference level: Building height



Location		Wind Angle							
		0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°
Face 1		0.4	0.1	-0.3	-0.35	-0.2	-0.35	-0.3	0.1
Face 2		-0.2	-0.35	-0.3	0.1	0.4	0.1	-0.3	-0.35
Face 3		-0.3	0.1	0.4	0.1	-0.3	-0.35	-0.2	-0.35
Face 4		-0.3	-0.35	-0.2	-0.35	-0.3	0.1	0.4	0.1
Roof (<10° pitch)	Front	-0.6	-0.5	-0.4	-0.5	-0.6	-0.5	-0.4	-0.5
	Rear	-0.6	-0.5	-0.4	-0.5	-0.6	-0.5	-0.4	-0.5
Average		-0.6	-0.5	-0.4	-0.5	-0.6	-0.5	-0.4	-0.5
Roof (11-30° pitch)	Front	-0.35	-0.45	-0.55	-0.45	-0.35	-0.45	-0.55	-0.45
	Rear	-0.35	-0.45	-0.55	-0.45	-0.35	-0.45	-0.55	-0.45
Average		-0.35	-0.45	-0.55	-0.45	-0.35	-0.45	-0.55	-0.45
Roof (>30° pitch)	Front	0.3	-0.5	-0.6	-0.5	-0.5	-0.5	-0.6	-0.5
	Rear	-0.5	-0.5	-0.6	-0.5	0.3	-0.5	-0.6	-0.5
Average		-0.1	-0.5	-0.6	-0.5	-0.1	-0.5	-0.6	-0.5

Table A2.3 Wind Pressure Coefficient Data

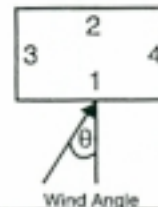
Low-rise buildings (up to 3 storeys)
Length to width ratio: 1:1
Shielding condition: Surrounded by obstructions
equal to the height of the building
Wind speed reference level: Building height



Location		Wind Angle							
		0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°
Face 1		0.2	0.05	-0.25	-0.3	-0.25	-0.3	-0.25	0.05
Face 2		-0.25	-0.3	-0.25	0.05	0.2	0.05	-0.25	-0.3
Face 3		-0.25	0.05	0.2	0.05	-0.25	-0.3	-0.25	-0.3
Face 4		-0.25	-0.3	-0.25	-0.3	-0.25	0.05	0.2	0.05
Roof (<10° pitch)	Front	-0.5	-0.5	-0.4	-0.5	-0.5	-0.5	-0.4	-0.5
	Rear	-0.5	-0.5	-0.4	-0.5	-0.5	-0.5	-0.4	-0.5
Average		-0.5	-0.5	-0.4	-0.5	-0.5	-0.5	-0.4	-0.5
Roof (11-30° pitch)	Front	-0.3	-0.4	-0.5	-0.4	-0.3	-0.4	-0.5	-0.4
	Rear	-0.3	-0.4	-0.5	-0.4	-0.3	-0.4	-0.5	-0.4
Average		-0.3	-0.4	-0.5	-0.4	-0.3	-0.4	-0.5	-0.4
Roof (>30° pitch)	Front	0.25	-0.3	-0.5	-0.3	-0.4	-0.3	-0.5	-0.3
	Rear	-0.4	-0.3	-0.5	-0.3	0.25	-0.3	-0.5	-0.3
Average		-0.08	-0.3	-0.5	-0.3	-0.08	-0.3	-0.5	-0.3

Table A2.4 Wind Pressure Coefficient Data

Low-rise buildings (up to 3 storeys)
Length to width ratio: 2:1
Shielding condition: Exposed
Wind speed reference level: Building height



Location		Wind Angle							
		0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°
Face 1		0.5	0.25	-0.5	-0.8	-0.7	-0.8	-0.5	0.25
Face 2		-0.7	-0.8	-0.5	0.25	0.5	0.25	-0.5	-0.8
Face 3		-0.9	0.2	0.6	0.2	-0.9	-0.6	-0.35	-0.6
Face 4		-0.9	-0.6	-0.35	-0.6	-0.9	0.2	0.6	0.2
Roof (<10° pitch)	Front	-0.7	-0.7	-0.8	-0.7	-0.7	-0.7	-0.8	-0.7
	Rear	-0.7	-0.7	-0.8	-0.7	-0.7	-0.7	-0.8	-0.7
Average		-0.7	-0.7	-0.8	-0.7	-0.7	-0.7	-0.8	-0.7
Roof (11-30° pitch)	Front	-0.7	-0.7	-0.7	-0.6	-0.5	-0.6	-0.7	-0.7
	Rear	-0.5	-0.6	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7	-0.6
Average		-0.6	-0.65	-0.7	-0.65	-0.6	-0.65	-0.7	-0.65
Roof (>30° pitch)	Front	0.25	0	-0.6	-0.9	-0.8	-0.9	-0.6	0
	Rear	-0.8	-0.9	-0.6	0	0.25	0	-0.6	-0.9
Average		-0.18	-0.45	-0.6	-0.45	-0.18	-0.45	-0.6	-0.45

Table A2.5 Wind Pressure Coefficient Data

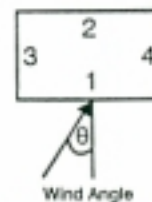
Low-rise buildings (up to 3 storeys)
 Length to width ratio: 2:1
 Shielding condition: Surrounded by obstructions
 equivalent to half the height of the building
 Wind speed reference level: Building height



Location	Wind Angle							
	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°
Face 1	0.25	0.06	-0.35	-0.6	-0.5	-0.6	-0.35	0.06
Face 2	-0.5	-0.6	-0.35	0.06	0.25	0.06	-0.35	-0.6
Face 3	-0.6	0.2	0.4	0.2	-0.6	-0.5	-0.3	-0.5
Face 4	-0.6	-0.5	-0.3	-0.5	-0.6	0.5	0.4	0.2
Roof (<10° pitch)	Front	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6
	Rear	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6
Average	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6
Roof (11-30° pitch)	Front	-0.6	-0.6	-0.55	-0.55	-0.45	-0.55	-0.55
	Rear	-0.45	-0.55	-0.55	-0.6	-0.6	-0.6	-0.55
Average	-0.5	-0.6	-0.55	-0.6	-0.5	-0.6	-0.55	-0.6
Roof (>30° pitch)	Front	0.15	-0.08	-0.4	-0.75	-0.6	-0.75	-0.4
	Rear	-0.6	-0.75	-0.4	-0.08	0.15	-0.08	-0.4
Average	-0.2	-0.4	-0.4	-0.4	-0.2	-0.4	-0.4	-0.4

Table A2.6 Wind Pressure Coefficient Data

Low-rise buildings (up to 3 storeys)
 Length to width ratio: 2:1
 Shielding condition: Surrounded by obstructions
 equal to the height of the building
 Wind speed reference level: Building height



Location	Wind Angle							
	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°
Face 1	0.06	-0.12	-0.2	-0.38	-0.3	-0.38	-0.2	0.12
Face 2	-0.3	-0.38	-0.2	-0.12	0.06	-0.12	-0.2	-0.38
Face 3	-0.3	0.15	0.18	0.15	-0.3	-0.32	-0.2	-0.32
Face 4	-0.3	-0.32	-0.2	-0.32	-0.3	0.15	0.18	0.15
Roof (<10° pitch)	Front	-0.49	-0.46	-0.41	-0.46	-0.49	-0.46	-0.41
	Rear	-0.49	-0.46	-0.41	-0.46	-0.49	-0.46	-0.41
Average	-0.49	-0.46	-0.41	-0.46	-0.49	-0.46	-0.41	-0.46
Roof (11-30° pitch)	Front	-0.49	-0.46	-0.41	-0.46	-0.4	-0.46	-0.41
	Rear	-0.4	-0.46	-0.41	-0.46	-0.49	-0.46	-0.41
Average	-0.45	-0.46	-0.41	-0.46	-0.45	-0.46	-0.41	-0.46
Roof (>30° pitch)	Front	0.06	-0.15	-0.23	-0.6	-0.42	-0.6	-0.23
	Rear	-0.42	-0.6	-0.23	-0.15	-0.06	-0.15	-0.23
Average	-0.18	-0.4	-0.23	-0.4	-0.18	-0.4	-0.23	-0.4

BIJLAGE 3.

Enkele veel voorkomende richtwaarden voor de berekening van luchtstroomweerstand

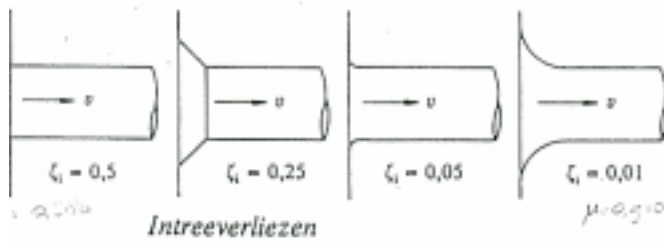
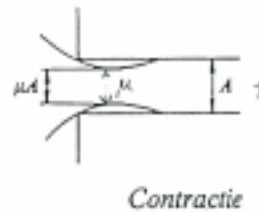
Waarden voor de weerstandsfactor ζ [-]	
bocht	0,5
scherpe toevoering	0,5
rooster voor kanaal	1,0
kap	1,5
Waarden voor de wandwrijvingscoëfficiënt λ [-]	
glad kanaal (metaal, PVC)	0,035
ruw kanaal (gemetseld)	0,045
Waarden voor coëfficiënt n [-]	
grote openingen	2,0
spleten, kieren en naden	1,5
poreus materiaal met aansluitnaden	1,33
poreus materiaal	1,0
Waarden voor weerstandcoëfficiënt C [m^3/h]	
grote openingen (per cm^2 opening)	0,30 (n = 2)
goed sluitend raam (per m kierlengte)	0,43 (n = 1,5)
redelijke sluitend raam (per m kierlengte)	1,15 (n = 1,5)
slecht sluitend raam (per m kierlengte)	3,9 (n = 1,5)
deur met tochtstrip (per m kierlengte)	4,3 (n = 1,5)
deur zonder tochtstrip (per m kierlengte)	5,3 (n = 1,5)
naden tussen kozijn / gevel (per m kierlengte)	1,4 (n = 1,5)
buitengevel (per m^2 geveloppervlak)	0,14 (n = 1)

Vormweerstand

Intreeverliezen (ζ_i)

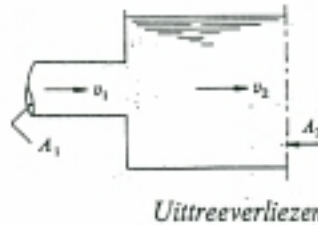
ζ_i wordt bepaald door de afronding. Er treedt bij binnenstromen *contractie* op.

De *contractie-coëfficiënt* is $\mu = \frac{1}{1 + \sqrt{\zeta_i}}$,
dus $\zeta_i = \left(\frac{1}{\mu} - 1\right)^2$



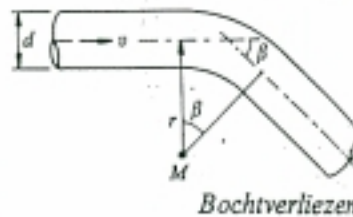
Uittreeverliezen (ζ_u)

$\zeta_u = \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right)^2$ betrokken op v_1
 $h_v = \zeta_u \frac{v_1^2}{2g}$



Bochtverliezen (ζ_b)

ζ_b is een functie van de bocht-hoek β en de waarde r/d , zie tabel A (volgens Hütte).

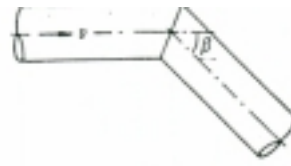


Tabel A. ζ_b -waarden voor bochten bij verschillende β -waarden

β	15°	22,5°	30°	45°	60°	90°
r						
d	0,03	0,045	0,085	0,14	0,19	0,21
$2d$	0,03	0,045	0,060	0,09	0,12	0,14
$4d$	0,03	0,045	0,055	0,08	0,10	0,11
$6d$	0,03	0,045	0,050	0,075	0,09	0,09
$10d$	0,03	0,045	0,045	0,07	0,07	0,11

Knikverliezen (ζ_k)

Tabel B geeft waarden van ζ_k afhankelijk van de waarde van β (volgens Hütte).



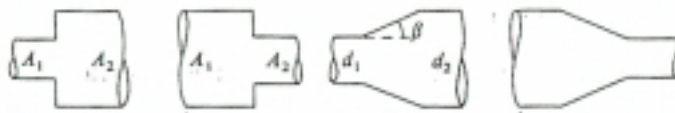
Knikverliezen

Tabel B. ζ_k -waarden voor knikken bij verschillende β -waarden

	10°	15°	22,5°	30°	45°	60°	90°
glad	0,034	0,042	0,066	0,130	0,236	0,471	1,129
ruw	0,044	0,062	0,154	0,165	0,320	0,684	1,265

Verliezen t.g.v. vernauwing en verwijding (ζ_v)

De verliezen worden gegeven voor de uitgangssnelheid v_2 .



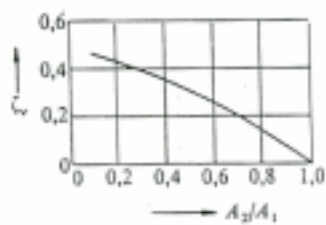
a $\zeta_v = \left(\frac{A_2}{A_1} - 1\right)^2$

b *

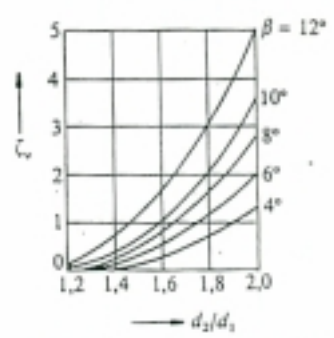
c **

d $\zeta_v = 0,05$
voor niet te grote hoeken

ζ_v -waarden (volgens Dubbel)


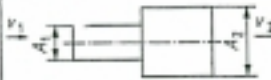
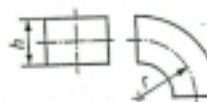
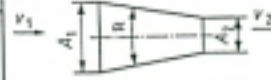
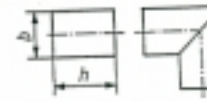

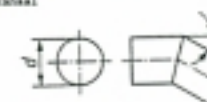


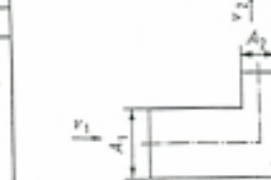
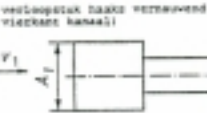
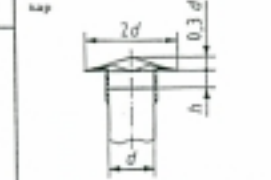


Figuur * ζ_v -waarden voor geval b



Figuur ** ζ_v -waarden voor geval c

Weerstandsfactoren

<p>hoek in rond kanaal</p> 	r/d	r		<p>verloophoek haaks verwijderd</p> 	A ₂ /A ₁	t.o.v. $\frac{v_1}{v_2}$	
	0,5 0,75 1,0 1,5 2,0	1,0 0,5 0,25 0,2 0,2			0,8 0,6 0,4 0,3 0,0	0,84 0,36 0,36 0,44 1,0	
<p>hoek in rechthoekig kanaal</p> 	r/d	r		<p>verloophoek conisch vervaagd</p> 	w	t.o.v. $\frac{v_1}{v_2}$	
	0,5 0,75 1,0 1,5	1,5 0,5 0,3 0,2				10° 45° 60° 0,23 0,64 0,67	
<p>haaks hoek in rechthoekig kanaal</p> 	A ₂ /b	r		<p>verloophoek conisch verwijderd</p> 	w	t.o.v. $\frac{v_1}{v_2}$	
	0,25 0,5 1,0 2,0	1,5 1,7 1,0 0,4				5° 10° 20° 30° 45° 0,17 0,28 0,45 0,38 0,72	
<p>scherpe omhoog in rond of vierkant kanaal</p> 	w	r rond	r vierkant	<p>verloophoek haaks verwijderd</p> 	A ₂ /A ₁	t.o.v. $\frac{v_1}{v_2}$	
	10° 10° 45° 60° 90°	0,1 0,2 0,4 0,7 1,2	0,1 0,2 0,4 0,4 1,2		0,2 0,4 0,6 0,8 0,9 1,8	0,24 1,45 0,32 0,35 1,04 1,2	
<p>segmenthoek</p> 	r/d	kanaal segmenten			<p>verloophoek haaks vervaagd</p> 	A ₂ /A ₁	t.o.v. $\frac{v_1}{v_2}$
		3 4 5					
	1,0 1,5 2,0 4,0	0,5 0,4 0,4 0,25	0,4 0,25 0,1 0,25	0,25 0,1 0,25 0,3		0,2 0,4 0,6 0,8	0,23 0,52 0,75 0,95
<p>verloophoek haaks vervaagd (rond of vierkant kanaal)</p> 	A ₂ /A ₁	t.o.v. $\frac{v_1}{v_2}$		<p>kap</p> 		r	
	0,75 0,5 0,25 0,0	0,2 0,3 0,4 0,5				1,5	