

# Windaanval op luchtgordijnen een onbekende factor?

Ing. J. A. Leene\*

## Samenvatting

Luchtgordijnen worden onder andere toegepast om ingangen van grote gebouwen zoals warenhuizen en koelhuizen af te schermen. Bij het ontwerpen van een luchtgordijn voor een gegeven situatie dient zowel het drukverschil tussen beide gordijnzijden ten gevolge van een temperatuurverschil en een gedwongen ventilatie als door wind bekend te zijn.

Het effect van wind wordt in de literatuur over luchtgordijnen gewoonlijk sterk onderschat. Daar het drukverschil door wind zo sterk afhangt van gebouwgeometrie, ligging en ingangssituering zal dit van geval tot geval door middel van windtunnelonderzoek aan een maquette van het gebouw – met de omliggende gebouwen – moeten worden bepaald.

## Summary

Air curtains are a.o. applied to protect entrances of big buildings such as department stores and cold-storage warehouses. At designing an air curtain for a given situation the pressure difference between both sides of the curtain due to the temperature difference, a forced ventilation as well as the wind has to be known.

In literature on air curtains the effect of wind is generally underestimated. As the pressure difference by wind strongly depends on the shape of the building, the surroundings and the situation of the entrances it must be determined case by case by means of windtunnel research with a model of the building and its surroundings.

So long as no systematic research to the influence of the building geometry and – situation has been done, a such like ad-hoc investigation is a condition to arrive at a proper design of an air curtain.

## 1 Inleiding

Luchtgordijnen hebben eenzelfde functie als deuren: het scheiden van twee verschillende klimaatzones.

Dit kan betekenen dat afgeschermd moet worden tegen koude (warenhuizen e.d.) of tegen warmte (koelvemen) of tegen gas- of stofvormige verontreinigingen (destructiebedrijven, overslag van bulkgoederen, ook zuurkasten).

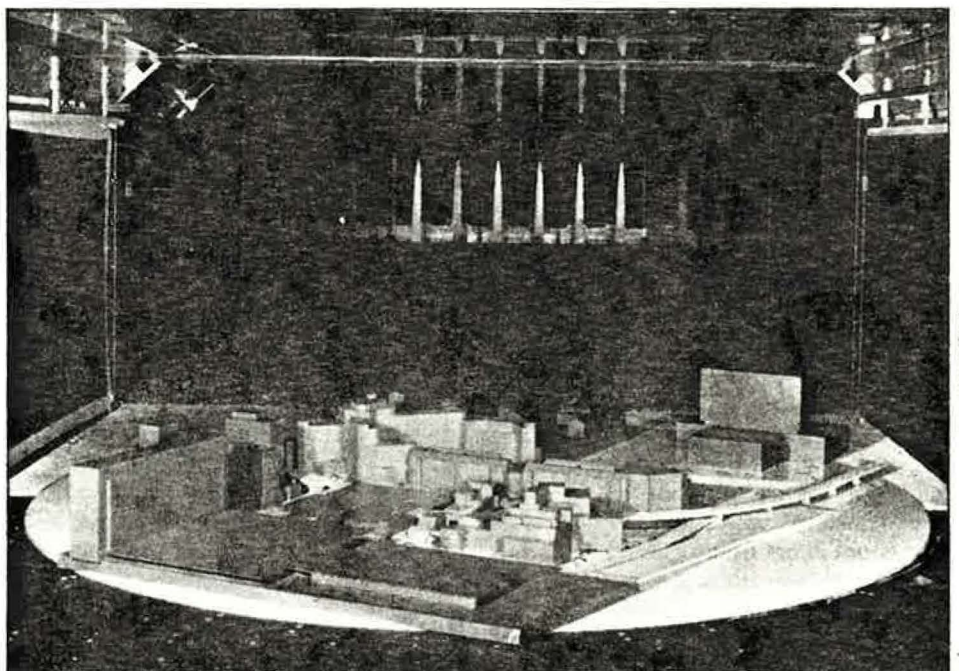
Aan beide gordijnzijden zal in het algemeen een verschillende druk heersen, waartegen dit gordijn bestand moet zijn. Het drukverschil dat de wind kan veroorzaken wordt doorgaans veel te laag geschat, met als gevolg dat het luchtgordijn een groot deel van de tijd onvoldoende afscherming biedt.

Op de jongste lezingenmiddag van het TVVL over luchtgordijnen werd gemeld dat luchtgordijnen bij koelhuizen na een enthousiaste entree in de 50-er jaren vrijwel niet meer worden toegepast, daar ze niet blijken te voldoen.

Toepassing van een luchtgordijn bleek soms zelfs een groter koudeverlies te geven dan een open deur.

Daar de koudeverliezen door de ingang bij koelhuizen met intensief heftruckverkeer in geld uitgedrukt enige honderdduizenden guldens per jaar kunnen bedragen, lijkt het dringend gewenst, ook gezien de energieschaarste, na te gaan welke oorzaken er kunnen zijn voor het falen van luchtgordijnen.

\* MT-TNO, Afd. Stroomingstechniek



Voorbeeld van een maquette en de atmosferische grenslaagwindtunnel van MT-TNO: Het nieuwe regeringscentrum in Den Haag

## 2 De werking van luchtgordijnen onder invloed van een drukverschil

Er is een zeer uitgebreide literatuur over luchtgordijnen. Wij beperken ons tot de luchtgordijnen die ontstaan door luchtuitblazing uit een nauwe sleuf, over de volle breedte van een deuropening. Als er geen drukverschil tussen beide gordijnzijden is, verloopt de stroming zoals geschetst in figuur 1a.

Als nu de druk buiten groter wordt  $p_1 >$

$p_2$  dan past de vorm van het luchtgordijn zich zodanig aan dat er in iedere doorsnede een nieuw evenwicht ontstaat: het luchtgordijn buigt af (fig. 1b).

De drukgradient die hierdoor over het gordijn ontstaat is

$$\frac{dp}{dr} = \rho \frac{v^2}{r} \quad (1)$$

Met de wet van behoud van impuls geldt voor iedere straald doorsnede  $\int \rho v^2 dA = \text{constant}$ , dus ook

$$\int_B^A \rho v^2 dA = \rho_j v_j^2 A_j \quad (2)$$

Voor de kromtestraal  $R$  van de neutrale lijn – straalas – volgt uit (1) en (2)

$$R = \frac{\rho_j v_j^2 A_j}{\Delta p} \quad (3)$$

Door de straalafbuiging neemt de straal-lengte toe, en de snelheid boven de grond af. Bij de grond zal het luchtgordijn het eerst doorslaan. Om nu te voorkomen dat

het gordijn zo ver naar buiten buigt onder invloed van een drukverschil dat het doorslaat wordt de spleetstraal in het algemeen onder een hoek ( $\alpha_j$ ) naar buiten uitgeblazen (fig. 2).

$$\text{Met } H = R (\sin \alpha_j + \sin \alpha_j) \quad (4)$$

is (3) ook te schrijven als

$$H = \frac{\rho_j v_j^2 A_j}{\Delta p} (\sin \alpha_j + \sin \alpha_j) \quad (5)$$

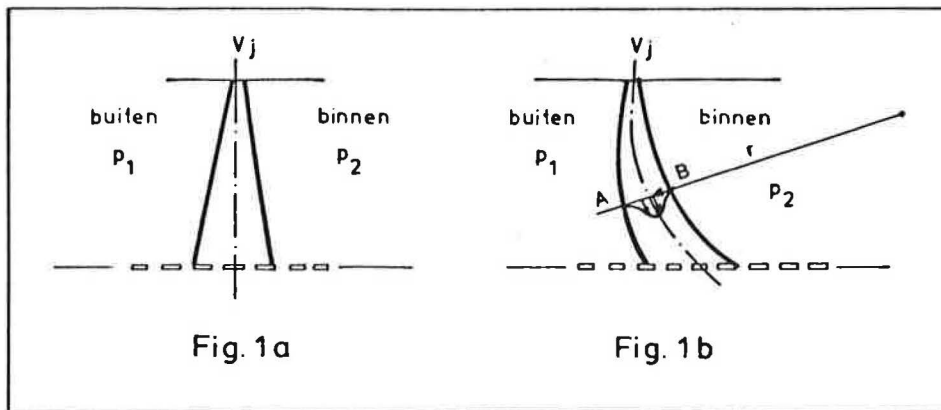


Fig. 1 Het luchtgardijn onder invloed van een drukverschil

De hoek waaronder de straal de grond treft  $\alpha_f$  is volgens [ref. 1]

$$\sin \alpha_f = 2,4 \left(1 - 2,56 \frac{b}{H}\right) \sqrt{\frac{b}{H}}$$

Bij de veel toegepaste waarden van  $\frac{b}{H}$  van 0,1 à 0,2 en een instelhoek  $\alpha_j \cong 30^\circ$ , is  $(\sin \alpha_j + \sin \alpha_f) \cong 1$

In dat geval gaat formule (5) over in

$$H = \frac{\rho_j v_j^2 A_j}{\Delta p} \quad (6)$$

$$\text{of } v_j = \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho_j A_j}} \cdot H \quad (7)$$

### 3 De druk aan weerskanten van een luchtgardijn

Door verschillende oorzaken kan over het luchtgardijn een drukverschil ontstaan.

#### Statisch

Ten gevolge van temperatuurverschil ontstaat een drukverschil  $\Delta p(z) = \Delta \rho(z) \cdot g \cdot z$

Doordat door de straal omgevingslucht wordt meegesleept treedt voor beide luchtgardijnzijden een intensieve menging op waardoor temperatuurverschillen over de hoogte van het luchtgardijn worden teniet gedaan.  $\Delta \rho$  kan dus worden afgeleid uit het verschil in gemiddelde temperatuur aan weerszijden van het gordijn.

Ook het ventilatiesysteem van een gebouw geeft een positief of negatief drukverschil over het luchtgardijn.

Tenslotte kan de wind een belangrijk drukverschil over het luchtgardijn veroorzaken.

In de meeste publicaties over luchtgardijnen wordt aan windaanval in het geheel geen aandacht geschonken, terwijl in de enkele, waar dit wel gebeurt het effect doorgaans schromelijk wordt onderschat. De veel geciteerde Niitsu en Katoh [ref. 2]

zeggen bijvoorbeeld: ..... 'wind pressure on the air curtain installed on the lower storey of a high structure having wide front is distributed almost uniformly and is allowed to be estimated practically at the same amount as velocity pressure of the outdoor wind'.

De winddruk op een luchtgardijn voor een gebouwingang zal in het algemeen zeker niet uniform zijn en met de windrichting variëren tussen overdruk en onderdruk.

Nog afgezien van het feit dat de 'velocity pressure of the outdoor wind' behalve bij vrijstaande gebouwen moeilijk te schatten is, is het onjuist deze  $\frac{1}{2} \rho u^2$  als maximaal mogelijk drukverschil te zien, daar gebouwen zelden luchtdicht zijn waardoor de wind ook in het gebouw een druk veroorzaakt [ref. 3].

Bij een gelijkmatig over alle gevels verdeelde lek zal in het gebouw een onderdruk heersen.

Welk drukverschil de wind kan veroorzaken hangt af van de gebouwgeometrie, de doorlaatbaarheid van de gevels, de ligging ten opzichte van andere gebouwen en de oriëntatie op de windrichting en van de snelheid van de ongestoorde wind.

De snelheid  $\bar{u}$  neemt toe met de hoogte  $z$  (fig. 3). Voor centra van kleine steden of voor buitenwijken van grote steden geldt

$$\frac{u_z}{u_{10}} = \left(\frac{z}{10}\right)^{0,26}$$

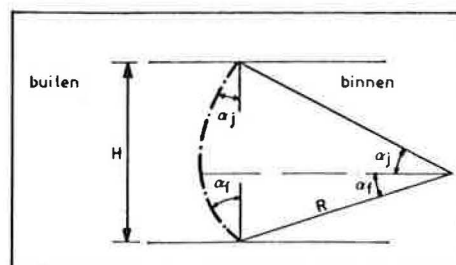


Fig. 2 Schematische voorstelling van een luchtgardijn bij uitblazen onder een hoek met de gevel

( $u_{10}$  is de windsnelheid op 10 m hoogte zoals opgegeven door het KNMI).

Nu blijkt de windsnelheid die in de ongestoorde stroming op dakhoogte van het gebouw heerst kenmerkend ook voor de stroming om het gebouw dicht boven de grond. Bij een 30 m hoog gebouw is de windsnelheid op dakhoogte  $u_{DAK} = 1,33 u_{10}$ .

De druk op het luchtgardijn ten gevolge van wind is

$$p = c_p \cdot \rho \cdot \frac{1}{2} u_{DAK}^2$$

Een praktijkwaarde van de coëfficiënt van de hoogste druk op een gevel is bijvoorbeeld  $c_p = 0,8$ .

De coëfficiënt van de interne druk ten gevolge van wind zal bij een gebouw met gelijkmatig verdeelde lek  $c_p = -0,3$  zijn. Het grootste drukverschil wordt daarmee

$$\Delta p = 1,1 \cdot \frac{1}{2} \rho (1,33 u_{10})^2 = 1,95 \cdot \frac{1}{2} \rho u_{10}^2$$

Als  $u_{10} = 5 \text{ m/s}$  is  $\Delta p = 30 \text{ N/m}^2$ .

#### Dynamisch

De wind heeft in het algemeen een vlagerig karakter, dat door gebouwen nog wordt versterkt. Het drukverschil door wind op een luchtgardijn uitgeoefend zal daardoor in de tijd variëren. Ook het veelvuldig passeren van een luchtgardijn met vrachtwagens, heftrucks e.d. geeft een wisselende belasting van het gordijn.

Welk effect drukwisselingen hebben op de stabiliteit van een luchtgardijn is uit de literatuur niet bekend.

Wel is bekend dat een pulserende uitstroming tot een veel sterkere meesleping van omgevingslucht leidt [ref. 7]. Zolang het effect van drukwisselingen niet is onderzocht is het raadzaam in plaats van met de gemiddelde windsnelheid te rekenen met een windsnelheid die in een vlaag kan voorkomen.

Een praktijkwaarde voor de vlaagsnelheid is  $u_p = 1,5 u_{10}$ .

In het voorgaande voorbeeld wordt het

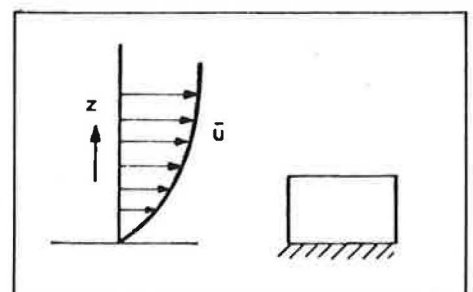


Fig. 3 Toename van de windsnelheid met de hoogte boven de grond, schematisch

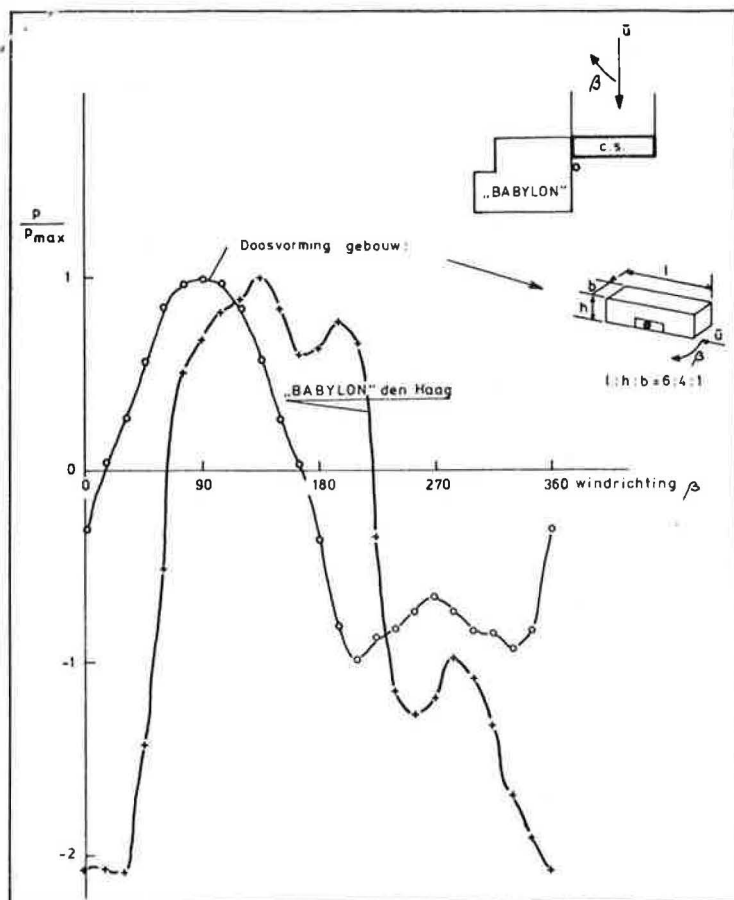


Fig. 4  
Invloed van de  
gebouweconomie  
en de omgeving  
op het verloop  
van de winddruk  
op een ingang  
met de windrich-  
ting

ontwerp drukverschil door wind daarmee

$$\Delta p_s = 1,95 \cdot \frac{1}{2} \rho (1,5 u_{10})^2 = 4,4 \cdot \frac{1}{2} \rho u_{10}^2$$

Als  $u_{10} = 5 \text{ m/s}$  is  $\Delta p_s = 68 \text{ N/m}^2$ .

Rekenvoorbeeld:

Als de af te schermen deuropening 3 m hoog en 4 m breed is, en de spleetbreedte 0,6 m is, volgt met formule 7 voor de vereiste uitblaassnelheid van het luchtgordijn bij de ontwerpwindnelheid  $u_{10} = 5 \text{ m/s}$  <sup>1)</sup>

$$v_j = \sqrt{\frac{\Delta p \cdot H}{\rho \cdot A_j}} = \sqrt{\frac{68 \cdot 3}{1,25 \cdot 0,6 \cdot 4}} = 8,24 \text{ ms}^{-1}$$

Het inblaasdebiet wordt daarmee:

$$Q_j = 8,24 \cdot 0,6 \cdot 0,4 = 19,79 \text{ m}^3/\text{s}$$

71247 m<sup>3</sup>/h

Om te kunnen voorspellen hoeveel dagen per jaar het grootste drukverschil gemiddeld wordt overschreden  $\tau$  en het luchtgordijn dus zal doorslaan – wordt altijd aangenomen dat dit maximum optreedt bij een ongestoorde windrichting loodrecht op de gevel waarin het gordijn geprojecteerd is.

Voor eenvoudige vrijstaande gebouwen is dat juist, maar in verreweg de meeste gevallen treedt het maximum op bij wind schuin op de gevel (fig. 4).

Het voorgaande voorbeeld met de veronderstelde drukcoëfficiënten dient slechts ter illustratie van het grote effect dat

windaanval op luchtgordijnen kan hebben.

De aangewezen manier om vast te stellen welk drukverschil in werkelijkheid over een deuropening kan ontstaan is het uitvoeren van een windtunnelonderzoek aan een maquette van het gebouw.

Ten behoeve van het ontwerpen van klimaatregelingen van gebouwen wordt dit ook reeds veelvuldig toegepast [ref. 4]. Gebruikmakend van KNMI gegevens over windsnelheden in een naburig weerstation kan uit zo'n windtunnelonderzoek worden afgeleid hoe vaak een bepaald drukverschil in werkelijkheid zal optreden. Hieruit kan de ontwerper van een luchtgordijn vaststellen of voor de gegeven situatie een luchtgordijn is te ontwerpen en welk deel van de tijd het gordijn afscherming zal bieden [ref. 5, 6].

#### Slotopmerkingen

– Het effect van wind wordt bij het ontwerp van luchtgordijnen meestal sterk onderschat. Het zal ook maar bij uitzondering mogelijk zijn het drukverschil dat in werkelijkheid op een gordijn werkt enigszins nauwkeurig te schatten. Een eenvoudige windtunnelmeting aan een maquette van het gebouw – met nagebootste omgeving – is in het algemeen een eerste voorwaarde om een luchtgordijn te kunnen ontwerpen dat aan de gestelde verwachtingen voldoet.

– Naast dergelijk ad-hoc onderzoek zou

een systematisch onderzoek naar de invloed van windparameters zoals richting, snelheid en turbulentie en bouwparameters zoals geometrie, deursituering, lekkage e.d. dienen plaats te vinden als ondersteuning bij het ontwerpen van nieuwe luchtgordijnen.

#### Notaties

z	hoogte coördinaat	[m]
H	hoogte deuropening	[m]
b	spleetbreedte	[m]
R	kromtestraal van het gordijn	[m]
A	oppervlak straaldoorsnede	[m <sup>2</sup> ]
$\rho$	soortelijke massa van lucht	[kgm <sup>-3</sup> ]
g	versnelling van de zwaartekracht	[ms <sup>-2</sup> ]
$\alpha_j$	hoek waaronder de spleetstraal wordt uitgeblazen	[O]
$\alpha_y$	hoek waaronder de spleetstraal de tegenoverliggende wand treft	[O]
v	snelheid van de straal	[ms <sup>-1</sup> ]
u	uwaagsnelheid	[ms <sup>-1</sup> ]
$u_s$	vlaagsnelheid	[ms <sup>-1</sup> ]
p	de winddruk op het gebouw	[Nm <sup>-2</sup> ]
$c_p$	de coëfficiënt van de winddruk	

$$c_p = \frac{p}{\frac{1}{2} \rho u^2}$$

$\Delta p$	$p_{\text{buiten}} - p_{\text{binnen}}$	[Nm <sup>-2</sup> ]
$\Delta \rho$	$\rho_{\text{buiten}} - \rho_{\text{binnen}}$	[kgm <sup>-3</sup> ]
indices		
j	straal uittree	
10	10 m hoogte	

#### Literatuur

- Hayes, F. C. and Stoecker, W. F. 'Heat Transfer Characteristics of the Air Curtain' ASHRAE Trans. 75 (1969) 2 No 2120 pp 153/167.
- Niitsu, Y. and Katoh, T. 'Performance and Design of Air Curtains' Trans. SHASE Japan, 1 (1963) pp 1-17.
- Stathopoulos, T. e.a. 'Internal Pressure Characteristics of Low-Rise Buildings due to Wind Action'.
- Leene, J. A. 'Winddrukonderzoek bij ventilatie- en tochtproblemen' Polytechn. Tijdschr. Bouw 33 (1978) nr 10.
- Janssen, L. A. M. 'Modelonderzoek naar de stankafscherming door middel van een luchtgordijn bij een destructiebedrijf' Briefverslag ST-TNO april 1978.
- Boschloo, G. A. 'Ontwerp en beproeving op schaal van een combinatie van een luchtgordijn en een afzuigkap' Rapp. ST-TNO ref. nr. 72-062.

<sup>1)</sup> nog afgezien van drukverschil door temperatuurverschil en kunstmatige ventilatie