

Tochtbestrijding met industriële luchtgordijnen

Ir. Bart Cremers
ing. Roberto Traversar, MBA

Bij industriële gebouwen is gebalanceerde ventilatie geen gemeengoed. Door oplopende drukverschillen over de gevel komt veel koude buitenlucht naar binnen en is het comfort vlak achter de deur erg laag. Een goed luchtgordijn kan grote hoeveelheden binnenkomende koude buitenlucht zodanig opwarmen dat de energiebesparing optimaal is en het comfort hoog blijft.

Het binnenmilieu in gebouwen wordt beïnvloed door ventilatie (gecontroleerde luchtverversing) en infiltratie (ongecontroleerde luchtverversing). Bij een openstaande deur komt het merendeel van de frisse lucht via de deuropening van buiten naar binnen. Het nadeel hiervan is dat deze instroom van koude lucht achter de deur tot tochtklachten en warmteverlies leidt. Industriële gebouwen, zoals magazijnen en fabricagehallen, hebben vaak te maken met grote hoeveelheden binnenkomende koude lucht. Dit heeft verschillende oorzaken (afbeelding 1).

Als eerste zijn daar de specifieke kenmerken van een industrieel gebouw. In vergelijking met winkels en kantoren zijn industriegebouwen vaak groter en ze liggen vaak in open terrein. Ook hebben ze vaak verscheidene deuropeningen van grotere afmeting. De deuropeningen kunnen zich aan één zijde van het gebouw bevinden, maar er kunnen ook deuren zijn aan tegenoverliggende zijden van het gebouw. De lage lekdichtheid van (vooral oudere) fabrieksgebouwen kan ook een grote infiltratie veroorzaken. Al deze factoren kunnen leiden tot een grote hoeveelheid lucht die door een openstaande deur naar binnen stroomt, en ergens anders het pand weer verlaat.

Een tweede oorzaak is de mechanische ventilatie. Mechanische ventilatie wordt gebruikt om op gecontroleerde wijze

een gebouw van voldoende frisse lucht te voorzien. Wanneer niet voor gecontroleerde toevoer van eenzelfde hoeveelheid lucht wordt gezorgd, ontstaat een drukverschil tussen binnen en buiten. Staat ergens een deur open, dan komt het merendeel van de ventilatie hier naar binnen doordat in de deuropening de weerstand lager is dan bij openstaande ramen of kieren. Een andere bron van ventilatie en infiltratie is de lokale afzuiging van industriële processen, zoals lassen of slijpen. Als deze lokale afzuiging niet wordt gecompenseerd door gecontroleerde toevoer van buitenlucht, leidt dit tot tochtproblemen bij een openstaande deur.

Een derde oorzaak van tochtproblemen is de windbelasting. Bij wind is de tocht groot als deuren aan beide zijden van het gebouw open staan. De wind kan dan met hoge snelheden vrij door het gebouw heen stromen. In de zomer wordt in woningen van dit effect dankbaar gebruik gemaakt door juist de deuren 'tegen elkaar' open te zetten. Als één deur open staat, stroomt de wind niet in zijn geheel door de deur heen, want de druk binnen zal zich onmiddellijk vereffenen en weerstand geven aan de binnenstromende lucht. De wind zorgt wel voor een overdruk aan de loefzijde van het gebouw en voor een onderdruk aan de lijzijde van het gebouw. Hierdoor ontstaat een stroming door het gebouw van de loefzijde naar de lijzijde. De grootte van deze stroming hangt af van de windkracht, de windrichting en de geveldichtheid van het gebouw. Daarnaast zorgt het turbulente karakter van de wind voor een pulserende druk op een openstaande deur, waardoor drukverschillen kunnen variëren in de tijd en qua positie in de deuropening.

Een vierde oorzaak is het schoorsteeneffect. De ruimten in een fabriek worden zodanig verwarmd dat de personen op de werkvloer zich comfortabel voelen. De warme lucht stijgt op en verlaat via kieren of openstaande dakramen het gebouw. Op vloerniveau wordt de ruimte aangevuld door koude buitenlucht die via de deur de fabriek in stroomt.

TEMPERATUUR- OF DRUKVERSCHIL

De oorzaak van de luchtstroming door een openstaande deur is af te leiden uit het bijbehorende stromingsprofiel. Dit

Gebouw kenmerken

- grote deuren
- veel deuren
- tegenoverliggende deuren
- slechte lekdichtheid



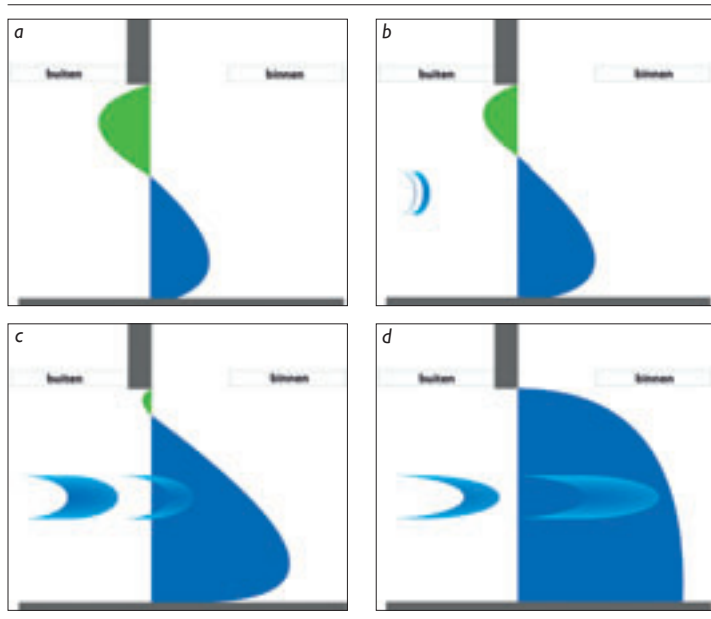
Schoorsteen-effect

- interne warmtebronnen
- dakramen open

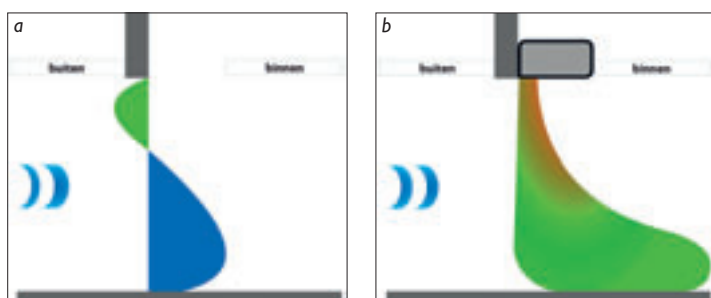
Wind-effecten

- geïsoleerde gebouwen
- windsnelheid
- windrichting

1. Oorzaken van ventilatie en infiltratie in industriële gebouwen.



2. Stromingsprofiel bij een open deur zonder luchtgordijn volgens netto instroom: geen a), laag b), gemiddeld c) en hoog d).



3. Schematische weergave van stromingsprofiel zonder luchtgordijn a) en met luchtgordijn b).

klasse	neutrale hoogte z_n
geen netto instroom	$1/2 h$
lage netto instroom	$1/2 h - 3/4 h$
gemiddelde netto instroom	$3/4 h - h$
hoge netto instroom	$> h$

Tabel 1. Klassen met bijbehorende waarden voor neutrale hoogte. De deurhoogte wordt met h aangegeven.

profiel is een optelsom van de éézijdige stroming (door drukverschillen) en de tweezijdige stroming (door temperatuurverschillen). Door gebruik te maken van de zogenoemde neutrale hoogte, kunnen vier verschillende klassen (tabel 1) worden onderscheiden. De neutrale hoogte is de hoogte in de deuropening waarbij de horizontale luchtsnelheid nul is. De neutrale hoogte in een openstaande deur is in de praktijk op te sporen door rook los te laten over een verticale lijn door de deuropening. De hoogte waar de rook stil blijft staan is de neutrale hoogte.

Als er geen netto instroom door de deuropening is (denk aan lekdichte gebouwen), heeft het aanwezige temperatuurverschil over de deuropening een tweezijdige luchtstroming

tot gevolg (natuurlijke convectie). In het onderste deel van de deur stroomt koude lucht naar binnen en warme lucht ontsnapt via de bovenkant van de deur (afbeelding 2a). De neutrale hoogte ligt in dit geval op ongeveer de helft van de deurhoogte.

Bij een geringe netto instroom door de deuropening stroomt meer koude lucht naar binnen dan warme lucht naar buiten. De neutrale hoogte ligt dan hoger. Wanneer de neutrale hoogte tussen de halve deurhoogte en driekwart deurhoogte ligt, heet dit een lage netto instroom (afbeelding 2b).

Bij een nog hogere netto instroom zal de neutrale hoogte tussen driekwart deurhoogte en de volledige deurhoogte liggen (afbeelding 2c). De binnenstromende lucht is nu voor het merendeel bepaald door ventilatie en infiltratie. Er ontsnapt dus nog slechts een kleine hoeveelheid warme lucht naar buiten. Dit heet een gemiddelde netto instroom.

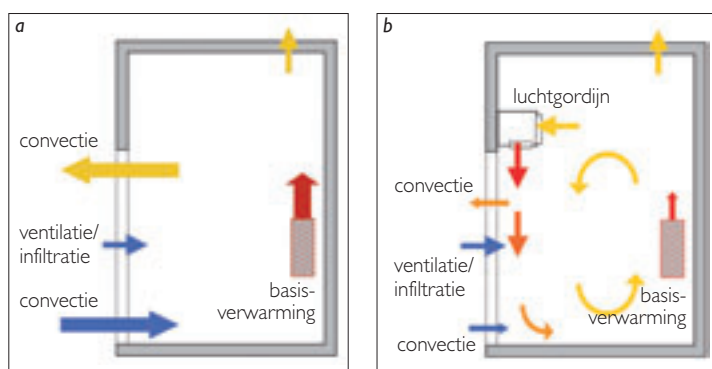
Als de netto instroom nog groter is, ontstaat een éézijdige stroming naar binnen. De ventilatie en infiltratie zijn nu volledig dominant geworden ten opzichte van de natuurlijke convectie. De neutrale hoogte ligt nu boven de deurhoogte. Deze klasse heet een hoge netto instroom. Praktisch gezien betekent dit dat rook over de volledige deur naar binnen gaat (afbeelding 2d). Bij een industriële deur van 4,50 m hoog en een temperatuurverschil tussen binnen en buiten van 20 °C komt dit uit op ongeveer 4.000 m³/h aan binnenkomende koude lucht per m² deuropervlak.

Het bepalen van de neutrale hoogte geeft inzicht in de voornaamste oorzaak van de tochtverschijnselen. Bij de klassen geen netto instroom en lage netto instroom is het temperatuurverschil de voornaamste oorzaak van de tocht. Bij de klassen gemiddelde netto instroom en hoge netto instroom is het tochtprobleem vooral te wijten aan het drukverschil over de deur. Met deze kennis is een passende oplossing te vinden voor het tochtprobleem en kan een geschikt luchtgordijn worden geselecteerd.

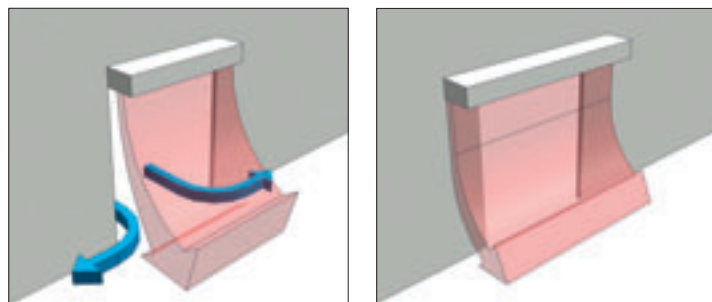
ONTWERPREGELS

Een luchtgordijn heeft bij een lage netto instroom als voornaamste doel te verhinderen dat de warme lucht naar buiten kan ontsnappen. Door het luchtgordijn wordt de warme lucht naar beneden geblazen waarna deze op vloerniveau weer naar de warme ruimte stroomt. Hiermee bespaart een luchtgordijn, slechts gebruikmakend van ventilatorenenergie, stookkosten voor verwarming door de natuurlijke convectie te verminderen. Verder zal ook de instroom van koude lucht door natuurlijke convectie verminderen en daarmee het comfort in de warme ruimte verbeteren.





4. Warmtebalans van gebouw met openstaande deur zonder luchtgordijn a) en met luchtgordijn b).



5. Lekkage van kou langs het luchtgordijn (links) en een goed werkend luchtgordijn, dicht bij de deur en langer dan de deurbreedte (rechts).

Bij een hogere netto instroom is het voornaamste doel meer gericht op verhoging van het comfort achter de deuropening. De binnenstromende koude lucht mengt met verwarmde lucht uit het luchtgordijn en stijgt daarmee in temperatuur tot comfortabele waarden. De binnenstromende koude lucht wordt dus niet gestopt, maar opgewarmd. Hiermee worden de tochtverschijnselen vermeden (afbeelding 3). De verwarmingscapaciteit die door het luchtgordijn wordt geleverd, komt ten goede aan de binnenruimte en hoeft dus niet meer te worden geleverd door de bestaande hoofdverwarming van het gebouw.

De warmtebalans van een gebouw met een openstaande deur zonder of met luchtgordijn is weergegeven in afbeelding 4. Voor een kwalitatieve beschrijving van de werking van een luchtgordijn, zie eerder verschenen publicaties [1] en [2].

DICHT BIJ DE DEUR

De deuren in industriële gebouwen zijn vaak hoog. De luchtstraal van het luchtgordijn moet dus een lange weg afleggen voordat deze de grond bereikt. Op de weg naar beneden wordt het luchtgordijn naar binnen afgebogen en bereikt de grond dus in de binnenruimte. Koude lucht kan zo binnendringen tussen het deurkozijn en de naar binnen gebogen luchtstraal (afbeelding 5a). Om het binnendringen van koude lucht aan de zijkant te verminderen, moet de lengte van het luchtgordijn altijd groter zijn dan de breedte van de deur. Ook moet de luchtstraal zo dicht mogelijk langs de deur worden uitgeblazen (afbeelding 5b). Hierdoor moet de binnenkomende koude lucht wel dóór het luchtgordijn gaan in plaats van er langs.

LAGE TURBULENTIE

Voor een goede werking van het luchtgordijn moet ook de uitwisseling van de luchtstraal met de koude omgevingslucht tot een minimum worden beperkt. Dit kan op twee manieren. Allereerst moet de turbulentie van de uitgeblazen lucht zo klein mogelijk zijn. Dit kan door een geschikt uitblaasrooster te kiezen. De 'kanaaltjes' in de rooster moeten klein en lang zijn, zodat grote wervels worden opgebroken in kleinere. De luchtstraal wordt zo minder turbulent (afbeelding 6). Verder moet het snelheidsverschil tussen de luchtstraal en de stilstaande omgevingslucht zo klein mogelijk worden gehouden. Dit wordt bereikt door relatief lage uitblaassnelheden te gebruiken [2].

HOGE VERWARMINGSCAPACITEIT

Luchtgordijnen moeten een bepaalde impuls hebben om aan de grond te komen (dieptewerking) en een bepaalde verwarmingscapaciteit hebben om de binnenkomende koude buitenlucht te verwarmen. De impuls I_0 en de verwarmingscapaciteit Q_0 van een luchtstraal zijn gegeven door formule A en formule B. Hierin is l_0 de lengte van het luchtgordijn (iets groter dan de deurbreedte), ρ staat voor dichtheid en T staat voor temperatuur. Met de subscripten $_i$ en $_o$ wordt de binnenruimte en het luchtgordijn aangegeven. De specifieke warmtecapaciteit staat aangegeven met C_p .

$$A \quad I_0 = \rho_o \cdot l_0 \cdot d_o \cdot U_o^2 \propto d_o \cdot U_o^2$$

$$B \quad Q_0 = \rho_i \cdot c_p \cdot l_0 \cdot d_o \cdot U_o \cdot (T_o - T_i) \propto d_o \cdot U_o$$

Luchtgordijnen kunnen worden onderverdeeld in twee typen. Smalle luchtstralen (d_o van ongeveer 2 tot 6 cm) met een hoge uitblaassnelheid (U_o van ongeveer 10 tot 25 m/s)



6. Turbulentieverlaging door uitblaasrooster.

Rekenvoorbeeld

Als voorbeeld wordt een luchtgordijn genomen met een uitblaas van 10 cm breed en 4 m/s luchtsnelheid. Om bij een smal luchtgordijn van 4 cm uitblaasbreedte dezelfde impuls (en dus ook dieptewerking) te krijgen moet een luchtsnelheid worden gekozen van 16 m/s.

Het brede luchtgordijn levert nu per strekkende meter een luchtdebiet van ($I_0 \cdot d_0 \cdot U_0 = 1 \times 0,1 \times 10 \times 3.600 =$) 3.600 m³/h en het smalle luchtgordijn levert slechts ($I_0 \cdot d_0 \cdot U_0 = 1 \times 0,04 \times 16 \times 3.600 =$) 2.300 m³/h.

Als de luchtstraal door het toestel wordt verwarmd van 15 °C aanzuigtemperatuur tot 35 °C uitblaastemperatuur, levert dit (met formule 2 en een luchtdichtheid ρ_0 van 1,2 kg/m³) respectievelijk 24 kW en 15,4 kW op aan verwarmend vermogen. Dit betekent dat het brede luchtgordijn bij dezelfde dieptewerking ongeveer 50 procent meer verwarmend vermogen heeft. Als in een bepaalde situatie 24 kW aan koude binnenkomt, zal het smalle luchtgordijn met een nog hogere temperatuur dan 35 °C moeten uitblazen (namelijk met 47 °C!) om eenzelfde verwarmingscapaciteit te krijgen. Deze temperatuur is echter zó hoog dat het luchtgordijn door stijfkrachten weer moeite heeft om aan de grond te komen. Bovendien is dit warme luchtgordijn niet comfortabel om onderdoor te lopen.

type luchtgordijn	breedte d_0 (cm)	snelheid U_0 (m/s)	impuls I_0 (N)	luchtverplaatsing $I_0 \cdot d_0 \cdot U_0$ (m ³ /h)	verwarmend vermogen Q_0 (kW)
brede uitblaas	10	4	12	3.600	24
smalle uitblaas	4	16	12	2.300	15

Tabel 2. Vergelijking van twee typen luchtgordijnen op basis van impuls om aan de grond te komen en verwarmend vermogen om de binnenkomende lucht op te warmen. Bij luchtgordijnen is de opgenomen ventilatorenergie ongeveer 1 à 2 procent van de opgenomen energie voor verwarming.

of brede luchtstralen (6 tot 20 cm) met een relatief lage luchtsnelheid (4 tot 10 m/s).

Zowel smalle als brede luchtstralen kunnen zodanig worden ingesteld dat ze netjes tot de grond komen. Bij gelijke impuls (evenredig met $d_0 \cdot U_0^2$) van de luchtgordijnen zal de brede luchtstraal echter veel meer warmtecapaciteit hebben (evenredig met $d_0 \cdot U_0$). Deze grote warmtecapaciteit is nodig wanneer grote hoeveelheden binnenkomende koude moeten worden opgewarmd. Vandaar dat beter kan worden gekozen voor brede luchtstralen met een relatief lage luchtsnelheid. Verwarming van slechts een gedeelte van de luchtstraal biedt geen voordeel, omdat dit deel dan tot een zeer hoge uitblaastemperatuur moet worden verwarmd om een bepaald vermogen te krijgen. Uit oogpunt van duurzame energiebediening is het dus raadzaam relatief brede luchtstralen met lage uitblaastemperaturen (35 °C in plaats van 50 °C) te gebruiken. Dit soort lagetemperatuursystemen zijn 'no regret'-opties, omdat hierdoor ook duurzame energiesystemen (bijvoorbeeld warmtepompen) kunnen worden toegepast.

CONCLUSIE

Een openstaande deur in een gebouw zorgt voor warmte- en comfortverlies. De oorzaken kunnen heel divers zijn. Het is belangrijk de specifieke problemen van elke situatie te onderzoeken. Naast gegevens, zoals deurafmetingen en verwachte temperatuurverschillen, is het ook van belang te weten hoeveel ventilatie en infiltratie door de openstaande deur naar binnen komen. Dit kan worden geschat aan de hand van de gebouwenkenmerken, of gemeten aan de hand van de neutrale hoogte in de deuropening.

In industriële gebouwen kunnen de ventilatie en infiltratie tot hoge waarden oplopen. Hier is een luchtgordijn met een relatief brede uitblaas en relatief lage luchtsnelheden doorgaans de juiste keuze. Hiermee wordt de binnenkomende koude lucht opgewarmd op een comfortabele en energiezuinige manier.

Literatuur

1. Cremers, ir. B.E., *Computersimulaties voor klimaatscheidingsproducten*, TWL Magazine, augustus 2000.
2. Cremers, ir. B.E., *Hoe hard denkt u dat een luchtgordijn moet blazen?*, TWL Magazine, maart 2003.

Auteurs

Ir. Bart Cremers, Biddle
ing. Roberto Traversari MBA, TNO Bouw en Ondergrond