

Validatie van een 'virtueel windtunnel' cfd-model

Windtunnel experimenten

Dit artikel is van algemeen belang omdat het gaat over de connectie tussen numerieke simulatie en experimenten.

Verschillende numerieke CFD-modellen betreffende wind rond gebouwen en windhinder worden geïntroduceerd en de resultaten worden vergeleken met metingen aan schaalmodellen in de windtunnel.

- door ir. G.M. van Uffelen en ir. W.D. Wormgoor**

Aangezien er op het gebied van Computational Fluid Dynamics (CFD) veel ervaring is opgedaan in bouwfysica-toepassingen, worden de mogelijkheden om CFD toe te passen op wind rond gebouwen en windhinder onderzocht. Als software wordt Phoenix 2006 van CHAM Ltd. toegepast, waarbij een rechthoekig rekengrid wordt gehanteerd.

Recentelijk hebben Hu en Wang [2005] laten zien dat met behulp van CFD een adequate voorspelling van het windklimaat op straatniveau kan worden gemaakt. Echter, er blijven enkele tekortkomingen bestaan, voornamelijk voor de toegepaste wandfuncties, zoals [2] aantonen. Vergelijking van windtunnel metingen aan windhinder met CFD-berekeningen is eerder gedaan door o.a. [4;5;6 en 7]. [7] laten zien dat met het RNG k- ϵ model een nauwkeurigheid van $\pm 10\%$ kan worden gehaald. [6] hebben aangegeven dat goede resultaten kunnen worden behaald met de Large Eddy Simulation (LES) methode.

TECHNISCHE ACHTERGROND

Een CFD-model van de windtunnel van Peutz BV is opgezet om de berekende atmosferische grenslaag en het

resulterende windstromingsveld rond gebouwen te berekenen. Het CFD-model kan de wind rond een groep gebouwen voor twaalf verschillende windrichtingen achter elkaar berekenen. Het CFD-model van de windtunnel heeft exact dezelfde grootte als de echte windtunnel in Mook, zodat vergelijking van de reken- en meetresultaten mogelijk wordt zonder rekening te hoeven houden met effecten van schaling en zogenaamde Reynolds-effecten.

De resulterende windsnelheidscoëfficiënten, die wordt gedefinieerd door de gemeten snelheid gedeeld door de snelheid op het meteostation op een hoogte van 10 m, zijn gecombineerd met de langjarige windstatistiek op locatie, verkregen volgens de NPR 6097. Vervolgens zijn zoals beschreven in de NEN 8100 de zogenaamde overschrijdingspercentages uitgerekend voor relevante locaties rond de gebouwen. Dit overschrijdingspercentage wordt gedefinieerd als een percentage van de tijd dat de windsnelheid op de betreffende locatie de grens windsnelheid van 5 m/s overschrijdt. Op basis van dit percentage kan vervolgens een uitspraak worden gedaan over de kwaliteit van het windklimaat ter plaatse: goed ($< 10\%$), matig (10-20%) of slecht ($> 20\%$) (wanneer het loopge-



Ir. G.M. van Uffelen



Ir. W.D. Wormgoor

bied betreft, voor zogenaamd 'slentergebied' gelden strengere eisen). Ook bestaat er een 'gevaarcriterium', dit laatste valt buiten het aandachtsgebied van dit onderzoek.

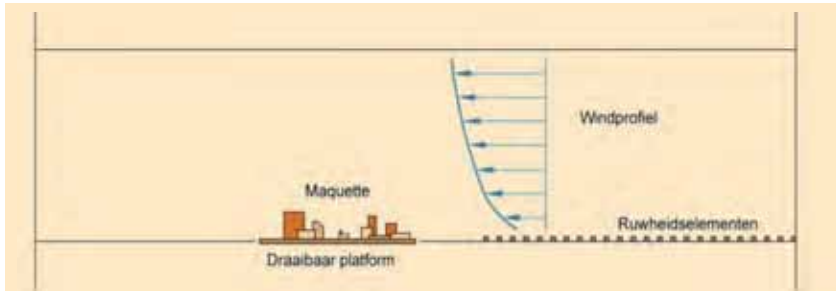
De resultaten van de CFD-berekeningen zijn vergeleken met windtunnel meetresultaten aan het WTC in Amsterdam, alsmede de 'Amsterdam Arch' (een ontwerp dat nooit gerealiseerd is) en ten slotte een ander hoog gebouw in Nederland; project A, om de CFD voorspellingen te valideren.

* Peutz BV, Mook



De atmosferische grenslaag windtunnel van Peutz BV te Mook. Zichtbaar zijn de cantelen en ruwheidselementen (het zogenaamde 'voorland') waarmee het snelheidsprofiel wordt opgewekt.

- FIGUUR 1 -



Schematische weergave van het opwekken van het windprofiel in de windtunnel.

- FIGUUR 2 -

De Amsterdam Arch is het meest complexe ontwerp en vergt daarom het meest van de rekenmodel.

CFD MODEL

Drie verschillende CFD-modellen zijn getest: één waarbij de 'volledige' windtunnel gemodelleerd is (de meetsectie inclusief de daarvoor liggende ruwheidselementen) en een model waarbij alleen de meetsectie met een diameter van 2,3 m is gemodelleerd en een windprofiel is opgelegd bij de aanstroomzijde. In het derde model is deze methodiek eveneens toegepast, maar zijn enkele verbeteringen in het turbulentiemodel doorgevoerd.

Het eerste model omvat de meetsectie inclusief de daarvoor liggende ruwheidselementen, totaal 15 m x 3 m x 0,9 m. De ontwikkeling van de grenslaag zoals omschreven door [1], bestaande uit een rij zwaarden die de

turbulentie genereren, alsmede ruwheidselementen over een lengte van 10 m zijn ook in het model opgenomen. Deze objecten zijn in Phoenix gemodelleerd als een grondplaat met oppervlakte ruwheid van 3 cm door het toepassen van de zogenaamde 'roughness wall functions' voor volledig ruwe oppervlakken. Verder zijn aan de uiteinden van het 'virtuele windtunnel model' inlaatopeningen voorzien met een uniform snelheidsprofiel met een luchtsnelheid van 8 m/s (de gemiddelde luchtsnelheid in de werkelijke tunnel) en met een turbulentie intensiteit van 100 %. In het eerste model wordt het standaard k-ε model en het zogenaamde 'hybrid' differentie schema gebruikt. Het totaal aantal rekencellen bedraagt 250.000. Alle in dit artikel besproken modellen zijn tijdsafhankelijke berekeningen.

In het tweede model wordt eveneens een windsnelheidsprofiel met een

gemiddelde snelheid van 8 m/s toegepast, maar de snelheid wordt nu over de hoogte gevarieerd volgens een machtswet met een coëfficiënt van 0,35. De toegepaste machtswet luidt derhalve:

$$\frac{V_1}{V_2} = \left(\frac{Z_1}{Z_2} \right)^{0.35} \quad (1)$$

Hierin is V de snelheid en Z de hoogte van de vloer van de windtunnel. De turbulentieintensiteit is zo (omgerekend naar volle schaal) ca. 35 % op een hoogte van 10 m.

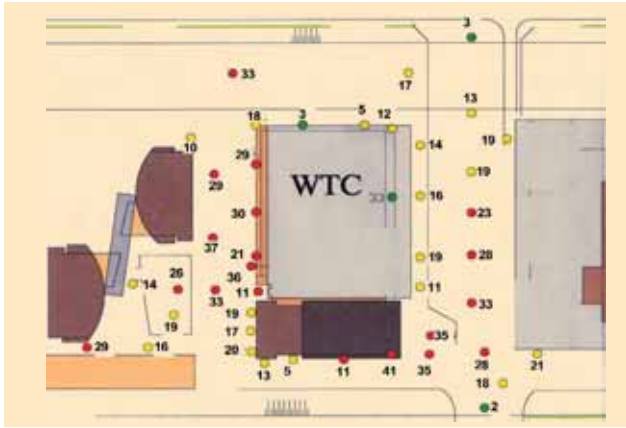
Verder wordt in het tweede model niet het standaard k-ε model toegepast, maar het zogenaamde RNG k-ε model en een tweede orde differentie schema (MINMOD) voor de drie snelheidscomponenten. Het totale aantal rekencellen is wederom 250.000.

In het derde model wordt voor de opwekking van het windprofiel dezelfde methodiek als in het tweede model gehanteerd, dus door middel van de machtswet. Teneinde de meetresultaten uit de windtunnel beter te laten corresponderen met de rekenresultaten in het CFD model zijn de constanten van het RNG k-ε model aangepast. Verder wordt in dit model ook het MINMOD-schema voor de drie componenten van de snelheid toegepast. Het totale aantal cellen in dit model bedraagt ca. 600.000.

RESULTATEN

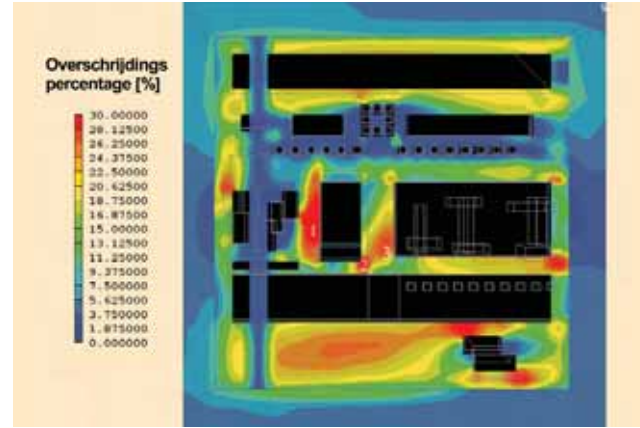
Het eerste model met de ontwikkelende atmosferische grenslaag blijkt heel goed in staat om de stroming in de windtunnel te reproduceren. Dit betekent dat bij de meetsectie de turbulentie-intensiteit op een hoogte van 10 m (volle schaal) de bovengenoemde 35 % aanneemt en dat het resulterende snelheidsprofiel de bovengenoemde machtswet volgt.

Aangezien een groot gedeelte van de 250.000 rekencellen wordt gebruikt om het voorland te simuleren is er slechts een klein aantal rekencellen dat beschikbaar is voor de meetsectie zelf (ca. 150.000 cellen). Echter, voor een redelijk eenvoudige rechthoekige geometrie, zoals het WTC in Amsterdam (figuur 3) met een orthogonaal stratenpatroon, worden veelbelovende



Meetresultaten windhinder aan WTC te Amsterdam; overschrijdingspercentage in procenten.

- FIGUUR 3 -



Resultaten berekening windhinder m.b.v. CFD aan WTC te Amsterdam; overschrijdingspercentage in procenten.

- FIGUUR 4 -

Locatie	CFD	Windtunnel
1	41 %	37 %
2	44 %	41 %
3	25 %	33 %

Eerste model WTC Amsterdam overschrijdingspercentages.

- TABEL 1 -

resultaten behaald, zelfs met het standaard k-ε model en het hybrid differentieschema. Het betreffende gebouw is weergegeven in het midden van de figuur.

In de daaronder weergegeven tabel 1 worden de met behulp van CFD-berekenende overschrijdingspercentages (zoals hierboven gedefinieerd) met de in de windtunnel gemeten overschrijdingspercentages vergeleken, zoals deze uit vergelijking van figuur 3 en 4 volgen. Figuur 3 laat de meetresulta-

ten uit de windtunnel van het WTC-project zien. De meetpunten zijn gemarkeerd door gekleurde rondjes. Groene rondjes geven een 'goed' windklimaat aan, geel staat voor 'matig' windklimaat en rood voor een 'slecht' windklimaat. Het gemeten overschrijdingspercentage in procenten is weergegeven door middel van een getal naast het rondje. In figuur 4 zijn 3 belangrijke locaties aangegeven met nummers. De resultaten van de deze locaties zijn samengevat in tabel 1. Over het algemeen wordt bij de hoeken van gebouwen het overschrijdingspercentage overschat door het CFD-model.

Echter, de Amsterdam Arch is een veel complexere situatie, wat blijkt uit vergelijking van figuur 5 met figuur 6. De resultaten zijn samengevat in tabel 2. Figuur 5 laat weer de resultaten van de windtunnelmetingen zien. De vierkantjes geven een meetpunt aan dat op een hoger niveau ligt dan maaiveld. Bij de overheersende zuidwesten wind

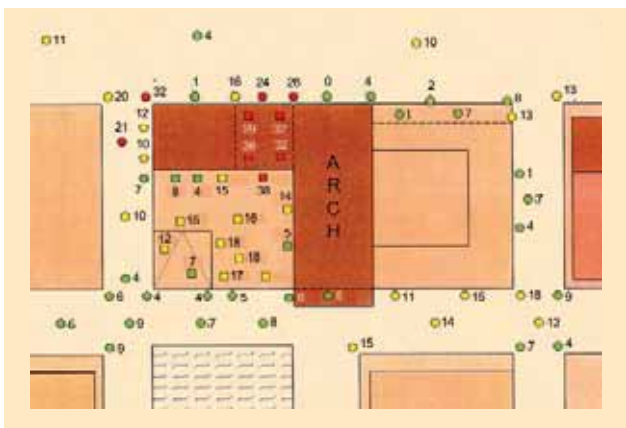
treedt er een bepaalde stroming op over het dak van een lager naastgelegen gebouw (linker onderhoek van de figuur) en vervolgens omlaag naar de grond richting het beschouwde gebouw. Dit stromingspatroon levert voor het eerste model een probleem op. Numerieke diffusie vanwege een te grof rekengrid en het 'hybrid' differentie schema zijn hier de oorzaak van.

Dit resulteert voornamelijk in lager berekende windsnelheden op het 'zonnedek' van de Amsterdam Arch (gebouwd deel linksonder, aangegeven met nummer 1 in de figuur).

Locatie	CFD	Windtunnel
1	5 %	18 %
2	29 tot 36 %	22 tot 27 %
3	22 %	32 %

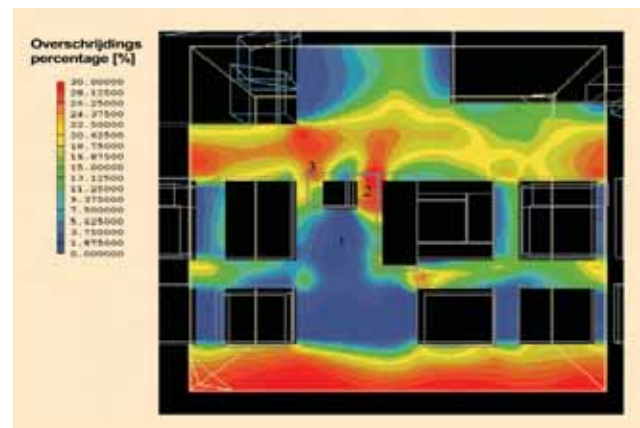
Eerste model Amsterdam Arch; overschrijdingspercentages in procenten.

- TABEL 2 -



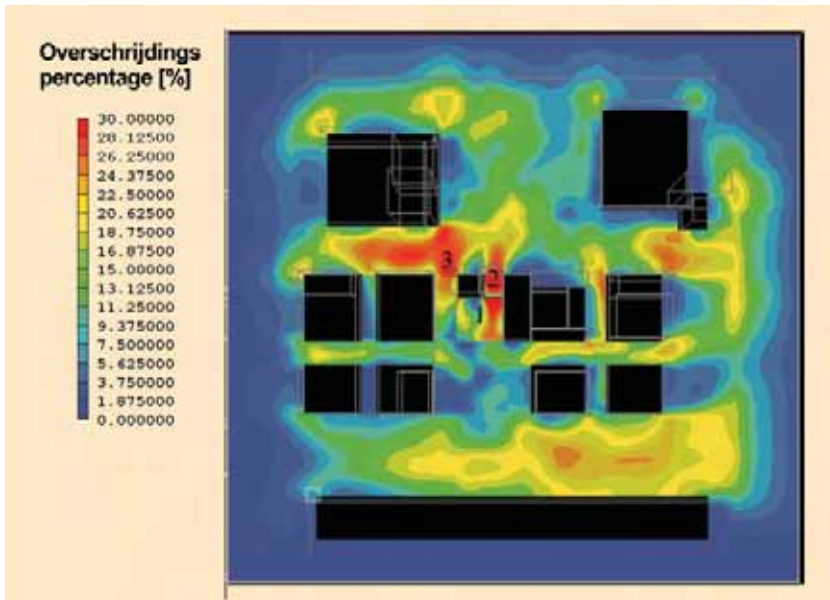
Meetresultaten windhinder aan Amsterdam Arch te Amsterdam; overschrijdingspercentage in procenten.

- FIGUUR 5 -



Resultaten berekening windhinder m.b.v. eerste CFD-model aan Amsterdam Arch te Amsterdam; overschrijdingspercentage in procenten.

- FIGUUR 6 -



Resultaten berekening windhinder mbv tweede CFD-model aan Amsterdam Arch te Amsterdam; overschrijdingspercentage in procenten.

- FIGUUR 7 -

Het tweede model, waarin alleen de meetsectie wordt gemodelleerd, vereist minder rekenkracht. Derhalve kan het totale aantal rekcellen (250.000) worden toegepast op alleen de meetsectie. Dit betekent dat in een straat tussen twee gebouwen 7 tot 10 cellen beschikbaar zijn. Verwacht wordt dat in combinatie met het RNG k-ε

Locatie	CFD	Windtunnel
1	37 %	36 %
2	4 %	4 %
3	28 %	38 %

Derde model project A; overschrijdingspercentages in procenten.

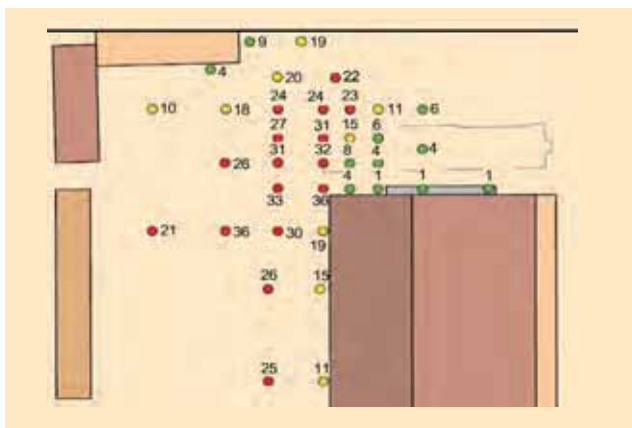
- TABEL 4 -

model en een tweede orde differentieschema (MINMOD) voor de drie snelheidscomponenten meer complexe geometrieën kunnen worden doorge-rekend.

Met dit model is de Amsterdam Arch opnieuw doorge-rekend. Vergelijking van figuur 5 en figuur 7 (en figuur 6) laat zien dat de resultaten aanzienlijk zijn verbeterd. De resultaten zijn samengevat in tabel 3.

Echter, opgemerkt moet worden dat op enkele locaties op het 'zonnedek' en op meerdere locaties rond het gebouw het overschrijdingspercentage wordt overschat.

Aangezien het tweede model betere resultaten geeft, is dit model verder



Meetresultaten windhinder aan project A; overschrijdingspercentage in procenten.

- FIGUUR 8 -

Locatie	CFD	Windtunnel
1	16 %	18 %
2	29 tot 36 %	25 tot 36 %
3	27 %	32 %

Tweede model Amsterdam Arch; overschrijdingspercentages in procenten.

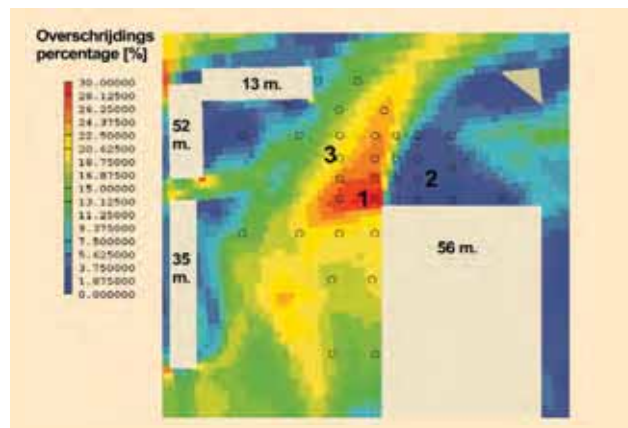
- TABEL 2 -

ontwikkeld. Teneinde de resultaten beter overeen te laten komen, zijn de coëfficiënten van het RNG k-ε model aangepast. Daarnaast is de zogenaamde verschuivingslengte, d_w , meegenomen in de beschrijving van het windprofiel, zodat de machtswet wordt:

$$\frac{V_1}{V_2} = \left(\frac{Z_1 - d_w}{Z_2} \right)^{0.35} \quad (2)$$

Verder zijn er meer rekcellen toegepast (mede gezien de toegenomen rekenkracht van de beschikbare PC's sinds de ontwikkeling van de eerdere modellen), zodat het totaal aantal rekcellen in het domein nu 600.000 bedraagt. Dit verbeterde model is toegepast op een hoogbouw situatie in Nederland; project A.

De meetresultaten voor dit project verkregen in de windtunnel zijn weergegeven in figuur 8. De resultaten van de CFD-berekening laten nu een goede overeenkomst met de meetresultaten zien, zoals te zien is door vergelijking van figuur 8 met figuur 9. Voor enkele belangrijke posities zijn de meetresultaten en de rekenresultaten samengevat in tabel 4.



Resultaten berekening windhinder m.b.v. derde CFD-model aan project A; overschrijdingspercentage in procenten.

- FIGUUR 9 -

CONCLUSIES EN TOEKOMSTIG WERK


Door het vergelijken van drie numerieke windtunnelmodellen met meting en in de echte windtunnel kan worden afgeleid dat de numerieke aanpak veelbelovend is.

Echter, een numerieke 'virtuele windtunnel' kan de echte nog niet vervangen. De locatie van probleemlocaties kan goed worden voorspeld, wat een voordeel kan opleveren voor sommige projecten en van hulp kan zijn bij het voorbereiden van metingen.

Teneinde een goede overeenkomst te verkrijgen tussen de meetresultaten en de rekenresultaten dient een erg fijn rekengrid met typisch 7 tot 10 rekencellen of meer per straat tussen twee gebouwen te worden toegepast. Verder dient het RNG k- ϵ model te worden toegepast met een tweede orde differentieschema (MINMOD) voor de drie componenten van de snelheid en een hoog aantal rekencellen (>500.000) te worden toegepast.

In de toekomst dient aandacht te worden besteed aan de afzonderlijke

invloed van deze maatregelen, aangezien op sommige locaties in het tweede en derde model de aanpassing teveel effect hebben, waardoor de overschrijdingspercentages worden overschat.

Verder onderzoek zal zich bezig houden met berekeningen aan niet-recht-hoekige modellen, het toepassen van Large Eddy Simulation (LES) modellen en meer validatieprojecten uit onze windtunnel ervaring. 

REFERENTIES

1. Counihan, J. [1973], *Simulation of an adiabatic urban boundary layer in a wind tunnel*, Atmospheric Environment, Vol. 7, pp. 673-689.
2. Blocken, B., Carmeliet, J., Stathopoulos, T. [2007], *CFD evaluation of wind speed conditions in passages between parallel buildings - effect of wall-function roughness modifications for the atmospheric boundary layer flow*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 95, No. , pp 941-962.
3. Hu, C-H., Wang, F. [2005], *Using*

a CFD approach for the study of street level winds in a built-up area, Building and Environment, Vol. 40, No. , pp 617-631.

4. Richards, P.J., Mallison, G.D., McMillan, D., Li, Y.F. [2002], *Pedestrian level wind speeds in downtown Auckland*, Wind and Structures, Vol. 5, No. 2-4, pp 151-164.
5. Li, L., Hu, F., Cheng, X.L., Han, H.Y. [2004], *The application of computational fluid dynamics to pedestrian level wind safety problem induced by high-rise buildings*, Chinese Physics, Vol. 13, No. 7, pp 1070-1075.
6. Tutar, M., Oguz, G. [2002], *Computational modeling of wind flow around a group of buildings*, International Journal of Computational Fluid Dynamics, Vol. 18, No. 8, pp 651-670.
7. Lam, K.M., To, A.P. [2006], *Reliability of numerical computation of pedestrian-level wind environment around a row of tall buildings*, Wind and Structures, Vol. 9, No. 6, pp 473-492.

Smitsair-JETsystemen



Toepassingsgebieden JET-systemen;

- fabriekshallen en lashallen,
- magazijnen en distributiecentra,
- voedselverwerkende industrie,
- sporthallen en zwembaden,
- concertzalen, theaters en discotheken,
- multifunctionele evenementenhallen,
- winkels, bouwmarkten,
- atria en binnentuinen,
- kantoorruimten, hotelkamers

Voor een vrijblijvend advies en/of een presentatie van de toepassingsmogelijkheden kunt u contact opnemen met dhr. R. Langeweg

Smitsair-JETsystemen BV is uw gespecialiseerde partner voor ontwerp, levering, montage en inbedrijfstelling van luchtdistributie en -verdeelsystemen ten behoeve van koeling, verwarming en ventilatie.

Met een projectmatige aanpak kunnen wij voor vrijwel iedere ruimte een effectief en energiezuinig ontwerp verzorgen waarbij techniek en comfort centraal staan. Tevens hebben wij diverse standaard luchtverdeelcomponenten in ons leveringspakket waaronder luchtgordijnen, wand-, kanaal-, trog-, lijn- en verdringingsroosters.

SMITSAIR-JETsystemen B.V.

Tel. 0297-564455

Fax 0297-569296

e-mail: jetsystemen@smitsair.nl

internet: www.smitsair.nl