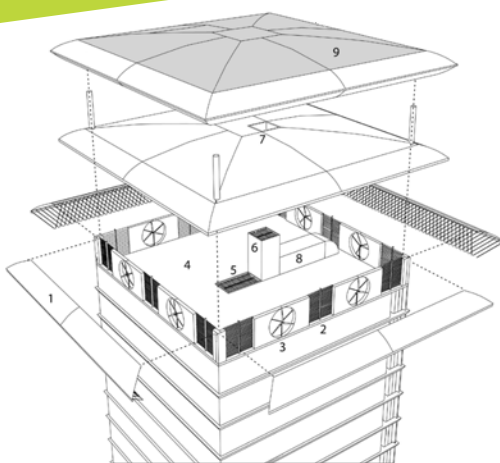


Earth, Wind & Fire – Natuurlijke Airconditioning (2)

Het Earth, Wind & Fire-concept voor natuurlijke airconditioning biedt meer zekerheid voor het realiseren van energieneutrale kantoorgebouwen dan mogelijk zou zijn door verbetering van bestaande technieken. Het concept maakt gebruik van de omgevingsenergie van aardmassa, wind en zon. In deel 1 worden de onderzoeksdoelen en -methoden van dit concept besproken (zie elders in deze uitgave). Dit deel 2 geeft een kort overzicht van de onderzoeksresultaten. De volledige resultaten van de basale en gedetailleerde modellen, de simulaties, de metingen in de fysieke modellen en het validatieproces zijn opgenomen in het proefschrift van de auteur [1].

Dr.ing. B. (Ben) Bronsema, Technische Universiteit Delft, Faculteit Bouwkunde, afdeling Architectural Engineering + Technology
Samenvatting van het gelijknamige proefschrift dat op 7 juni jl. door de auteur is verdedigd. Dit is een bewerkte vertaling van het artikel dat is gepresenteerd op Clima 2013



1. Dakoverstek
2. Luchtkleppen
3. Windturbines
4. Overdrukruimte
5. Ingang Klimaatcascade
6. Afzuig naar Venturi
7. Venturi ejector
8. FiWiHex installatie
9. Dunne film pv-folie

-Figuur 1- Ventecdak met windturbines en venturi-ejector

Aan de windzijde wordt met behulp van dakoverstekken (1) ventilatielucht opgevangen en via de overdrukruimte (4) aan de Klimaatcascade (5) toegevoerd. De grootte van de stuwdruk wordt bepaald door de plaatselijke windsnelheid en de winddrukcoëfficiënt op het betreffende geveldeel. In de windtunnel is een winddrukcoëfficiënt gemeten van 0,8. Dit betekent bijvoorbeeld dat in de overdrukruimte van een 25 m hoog gebouw in een stedelijke omgeving bij een matige wind van 4 Beaufort, windsnelheid 5,5 tot 7,9 m.s⁻¹, gemiddeld een positieve druk wordt opgebouwd van 20 Pa. Bij een vrij krachtige wind van 5 Beaufort, windsnelheid 8,0 tot 10,7 m.s⁻¹, loopt deze druk op tot 40 Pa. Voor een natuurlijk ventilatiesysteem zijn dit aanzienlijke waarden.

■ VENTECDAK – VENTURI-EJECTOR

De venturi-ejector (7 in figuur 1) is het sluitstuk

van het afzuigstelsel van het gebouw via de zonneshoorsteen en de FiWiHex-installatie voor warmteterugwinning (8). FiWiHex staat voor Fine Wire Heat Exchanger, een lucht-waterwarmtewisselaar met een zeer goede warmteoverdracht (www.fiwihex.nl). De werking berust op de onderdruk die ontstaat door de verhoging van de windsnelheid in de keel van het venturivormige kanaal tussen bovendak en onderdak. De aerodynamische prestaties van de venturi-ejector zijn geanalyseerd met behulp van CFD-simulaties, gevalideerd met windtunnelmetingen [2,3,4,5]. De winddrukcoëfficiënt is onafhankelijk van de windrichting, maar wel gevoelig voor de verhouding van de luchtsnelheid in de ejector en de referentiewindsnelheid $U_{ejector}/U_{ref}$ en de hoogte c in de keel van het venturivormige kanaal tussen bovendak en onderdak, zie figuur 2. In dit voorbeeld wordt bij een matige wind van 4 Beaufort, een hoogtemaat van $c = 2$ m en een snelheid van 2 m.s⁻¹ in de venturi-

ejector gemiddeld een negatieve druk van -8,5 Pa gerealiseerd, oplopend tot -18,6 Pa bij 5 Beaufort.

KLIMAATCASCADE

Een unieke eigenschap van de Klimaatcascade is dat het werkzame oppervlak geen vaste waarde is, zoals bij traditionele warmtewisselaars. Door het variëren van de water/luchtfactor en het sproeispectrum kan het warmtewisselend oppervlak worden vergroot of verkleind. Voor een bepaalde koelprestatie kan hierdoor de volumestroom en het temperatuurtraject van het koelwater worden beïnvloed, waardoor de Klimaatcascade energetisch kan worden geoptimaliseerd.

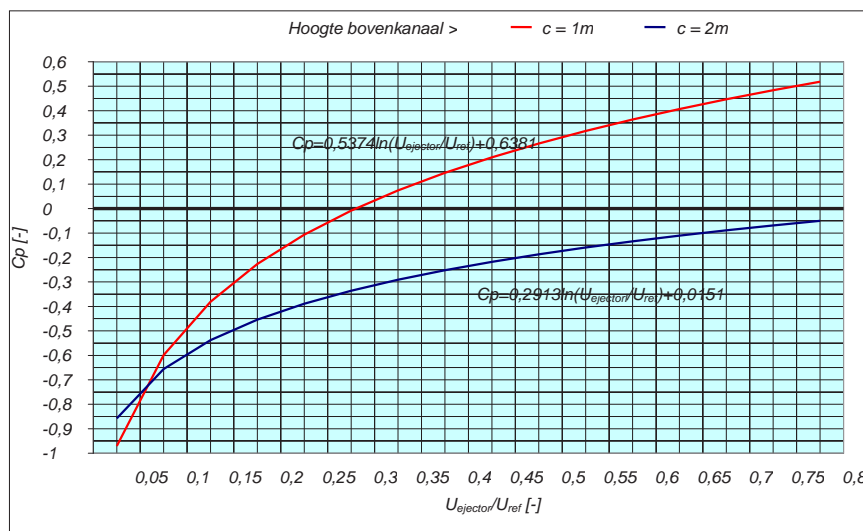
Om dit mogelijk te maken is een gebruiksvriendelijk rekenmodel gemaakt. Een muisklik maakt het spelen met de vele variabelen mogelijk en brengt de consequenties daarvan voor het ontwerp en de dimensionering in beeld. Invoerparameters van het rekenmodel zijn de hoogte van de Klimaatcascade, het volumedebiet en de temperatuur en relatieve vochtigheid van de lucht. De luchtsnelheid, de water/luchtfactor, het sproeispectrum en de watertemperatuur kunnen vrij worden gekozen. Door iteratie van de variabelen kan de gewenste uittredeconditie van de lucht worden bepaald bij de energetisch of anderszins optimale omstandigheden. De hydraulische en thermische trek worden als afgeleide hiervan berekend.

De CFD-simulaties zijn uitgevoerd met de algemene CFD-code van Ansys Fluent. Omdat deze code standaard niet geschikt is voor de modellering van het koelproces met condensatie in een Klimaatcascade, is hiervoor in samenwerking met Fluent Germany een speciale UDF (User Defined Function) ontwikkeld. Met behulp van de simulaties zijn ook de sproeiers voor de fysieke testopstelling geselecteerd [6].

Het rekenmodel en het CFD-model zijn gevalideerd met behulp van een fysieke testopstelling (zie figuur 3). Figuur 4, op de volgende pagina, laat de resultaten van de berekende en de gemeten thermische prestaties zien voor de verschillende seizoenen, waarvoor de volgende luchtintredecondities zijn aangehouden:

B1	ontwerp zomerconditie	28°C – 55% RV
B2	gemiddelde zomerconditie	20°C – 80% RV
B3	gemiddelde winterconditie	5°C – 90% RV
B4	voor- en najaarconditie	10°C – 100% RV
B5	ontwerp winterconditie	-10°C – 55% RV

Geconcludeerd kan worden dat het basale rekenmodel en het CFD-model betrouwbare resultaten opleveren voor de berekening van de voelbare prestaties een Klimaatcascade. De drukopbouw in een Klimaatcascade is opgebouwd uit aerodynamische, hydraulische



-Figuur 2- Winddrukcoëfficiënt venturi-ejector als functie van $U_{ejector}/U_{ref}$

en thermische trek. Bij een water/luchtfactor van 0,9 is de hydraulische trek ongeveer 6,25 Pa per verdieping van 3,5 m. De berekende waarden zijn door de metingen bevestigd. Voor de minimum bouwhoogte van vier verdiepingen (zie hiervoor) wordt hierdoor in de Klimaatcascade ongeveer 25 Pa neerwaartse trek opgebouwd. De aerodynamische trek is moeilijk te modelleren. De thermische trek wisselt met de seizoenen en kan zowel positief als negatief zijn.

ZONNESCHOORSTEEN

De luchtsnelheid, en daarmee de volumestroom in een zonneshoortsteen, wordt bepaald door de opwaartse thermische trek en de drukverliezen die in evenwicht moeten zijn. Hiervoor is een basaal rekenmodel en een dynamisch simulatiemodel in de ESP-r omgeving ontwikkeld. Beide modellen hebben een thermische- en een stromingscomponent. Op basis van het basale rekenmodel zijn de specificaties bepaald voor een fysiek testmodel, waarin onder wisselende klimaatcondities de in werkelijkheid optredende temperaturen en luchtsnelheden zijn gemeten (zie figuur 5, volgende pagina). Op basis van de metingen zijn het basale rekenmodel en het ESP-r model gevalideerd.

Het basale rekenmodel is voldoende betrouwbaar. De luchttemperaturen blijken met goede nauwkeurigheid te kunnen worden berekend. De gevoeligheid voor de warmteoverdrachtscoëfficiënt die zijn ingevoerd blijkt gering te zijn. In combinatie met de gegeven luchtsnelheid geeft dit betrouwbare informatie over de energieprestaties van een zonneshoortsteen. Het ESP-r model heeft verschillende beperkingen, die alle in meer of mindere mate de voorspellingen beïnvloeden, zoals:

- onzekerheidsmarges van de luchtdebieten ($\pm 20\%$) en temperaturen ($\pm 3,5\%$);



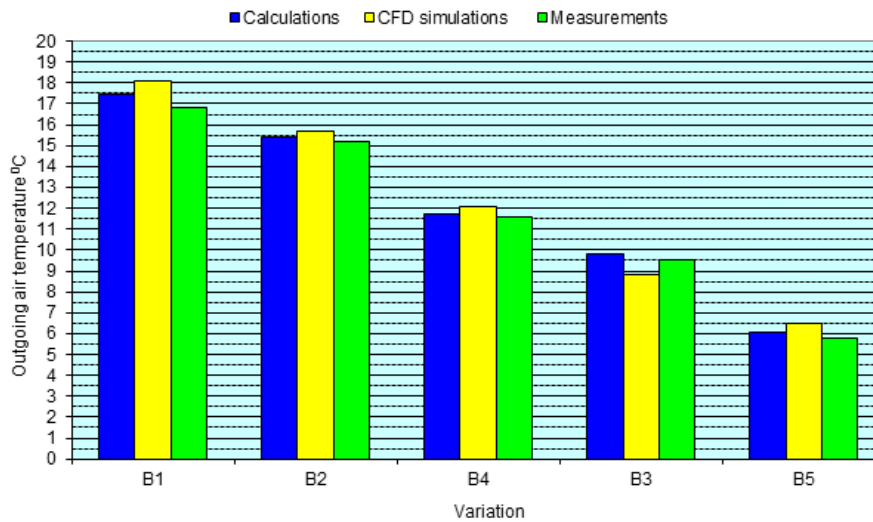
-Figuur 3- Fysieke testopstelling

- onzekerheidsmarges van de fysische eigenschappen van beglazing en absorber;
- het niet in rekening brengen van windeffecten;
- ongelijkmatige zoninstraling door de dagelijkse gang van de zon en de inherente schaduweffecten.

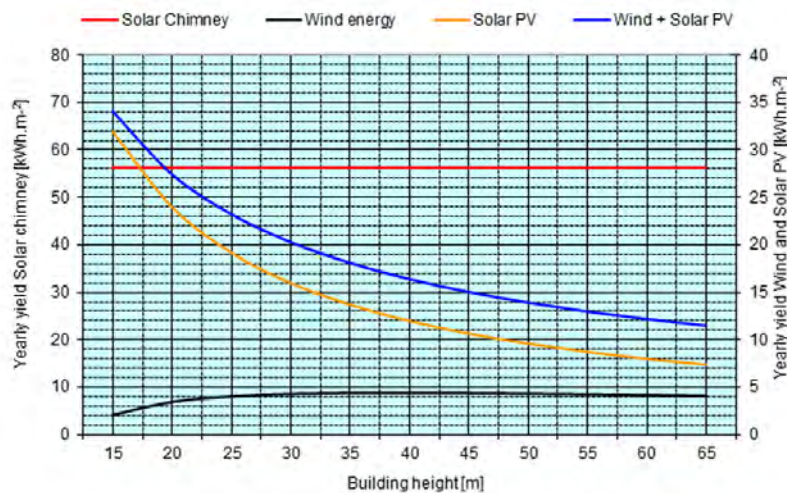
Omdat de voorspelde waarden in de meeste gevallen binnen de onzekerheidsmarges liggen, kan desondanks worden geconcludeerd dat het ESP-r model een voldoende betrouwbaarheid heeft. Bij toepassing van een goede glassoort ligt het te behalen jaarrendement in de orde van 60%. De totale straling op een zuid georiënteerd vlak bedraagt in het referentiejaar NEN 5060:2008 ongeveer 860 kWh.m⁻² waardoor per m² zonneshoortsteen een opbrengst van ongeveer 500 kWh.m⁻² kan worden verwacht.

ENERGIEOPWEKKING

In de overdrukruimte worden windturbines geïnstalleerd voor de energieproductie



-Figuur 4- Validatie basaal rekenmodel en CFD-model met de metingen



-Figuur 6- Jaarlijkse energieproductie door zon en wind in kWh per m² bruto vloeroppervlak

waarmee in principe hoge vermogenscoëfficiënten kunnen worden gerealiseerd. Geluidsproblemen zijn door deze intramurale situering gemakkelijk oplosbaar, en het onderhoud kan binnen het gebouw worden uitgevoerd. Als onderdeel van de technische gebouwinstallaties is voor deze windturbines geen omgevingsvergunning vereist. Op het bovendak wordt als dakbedekking dunne film PV folie aangebracht dat ondanks een lager rendement een betere kosteneffectiviteit heeft dan zonnepanelen.

In figuur 6 zijn de berekende specifieke energieprestaties per m² bruto vloeroppervlak aangegeven voor een gebouw met een voetafdruk van 20 x 20 m. De opbrengst van de windenergie laat een lichte stijging zien van ongeveer 2 naar 4 kWh_e.m⁻² bij een gebouwhoogte oplopend van 15 tot 30 m en blijft daarna vrijwel constant. Dit compenseert de opbrengst van de fotovoltaïsche energie die daalt van ongeveer 32 naar 7,5 kWh_e.m⁻² bij een gebouwhoogte oplopend van 15 tot 65 m.

CONCLUSIES

1. Het onderzoek heeft aangetoond dat Klimaatresponsieve Architectuur met Ventecdak, Klimaatcascade en

Zonneschoorsteen uitstekende mogelijkheden biedt voor het realiseren van een natuurlijke airconditioning van gebouwen.

2. Voor deze responsieve architecturale elementen zijn ontwerpcriteria ontwikkeld voor wat betreft morfologie en dimensionering alsmede randvoorwaarden voor de toepassing.
3. Het Earth, Wind & Fire concept biedt uitstekende mogelijkheden voor actieve energieopwekking met wind en zon. Intramurale windenergie en fotovoltaïsche energie in het Ventecdak. Thermische zonne-energie in de Zonneschoorsteen.
4. Het concept kan een substantiële bijdrage leveren aan de energieneutraliteit van gebouwen.
5. Voor de prestatieberekening van het Ventecdak, de Klimaatcascade en de Zonneschoorsteen zijn betrouwbare rekenmodellen ontwikkeld, die direct in de bouwpraktijk kunnen worden gebruikt.
6. Een virtuele casestudy van een bestaand kantoorgebouw heeft aangetoond dat het Earth, Wind & Fire concept uitstekend in een bestaand kantoorgebouw kan worden toegepast. Een randvoorwaarde is de stedenbouwkundige omgeving die vrije



-Figuur 5- Fysiek testmodel zonneschoorsteen

toegang van de omgevingsenergie van zon en wind mogelijk moet maken.

VERANTWOORDING

Earth, Wind & Fire is een samenwerkingsproject van de TU Delft, de TU Eindhoven en VVKH Architecten. Hoofdonderzoeker van het project is ing. Ben Bronsema, Rehva Fellow, geassisteerd door wetenschappelijke medewerkers van de faculteiten Bouwkunde van de TUD en de TU/e. Het onderzoeksproject is uitgevoerd met subsidie van het Ministerie van Economische Zaken, Landbouw en Innovatie; regeling Energie Onderzoek Subsidie: lange termijn (artikel 18b).

REFERENTIES

1. Bronsema, B. 2013. Earth, Wind & Fire – Natural Airconditioning. Proefschrift Technische Universiteit Delft
2. Hoof, T. van et al. 2011. Experimental and numerical analysis of a wind roof design for natural ventilation. International Conference on Wind Engineering, Amsterdam, May 2011
3. Hoof, T. van et al. 2011. A venturi-shaped roof for wind-induced natural ventilation of buildings: CFD and wind tunnel study for different design configurations. Building & Environment 46 (2011) pp 1797-1807
4. Hoof T. van, B. Blocken B., Aanen L. en Bronsema B. Numerical analysis of the performance of a venturi-shaped roof for natural ventilation: influence of building width. Journal of Wind Engineering, published online
5. Blocken, B. et al. 2011. Computational analysis of the performance of a venturi-shaped roof for natural ventilation: venturi-effect versus wind-blocking effect. Computers and Fluids
6. Markus, Stefan 2010. CFD Simulations Climate Cascade for Project Earth, Wind & Fire. Spraying Systems Deutschland GmbH. Project-No.: P100165-A d.d. 07.12.2010