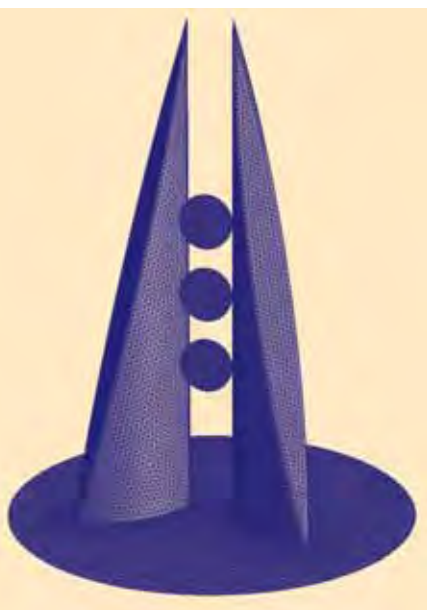


# Windenergie en hoogbouw

*Als onderdeel van het onderzoeksveld “interactie tussen wind en gebouwen”, wordt bij de faculteit Bouwkunde aan de TU Delft onder andere gekeken naar de consequenties van de gebouwvorm bij de opwekking van energie met behulp van windturbines. Het gaat daarbij niet zo zeer om de vraag hoeveel een turbine nu exact op gaat brengen op een bepaalde plek, maar om de vraag of de vormgeving van het gebouw kan bijdragen aan het beter presteren van de turbine. Gezien het feit dat het op grote hoogte harder waait dan dicht bij de grond, ligt het voor de hand dat hoogbouw wordt gezien als de eerst aangewezen plek voor het plaatsen van windturbines.*

*In dit artikel wordt een aantal aspecten, van belang bij het plaatsen van windturbines in hoogbouw, toegelicht. Dit gebeurt aan de hand van twee voorbeelden. Het eerste voorbeeld is een gebouw dat op het ogenblik wordt gebouwd, het WTC in Bahrain. Het tweede gebouw bestaat alleen nog maar op de tekening: de Kite Tower die zou moeten worden gebouwd in Leeds.*

**- door ir. H. Plomp\* en dr. ir. L. Aanen\*\***



Gemodellereerde geometrie van het WTC te Bahrain. Het gebruikte rekengrid op het oppervlak van de torens en de gemodellereerde windturbines is zichtbaar.

- FIGUUR 1-



ir. H. Plomp



Dr. ir. L. Aanen

**D**oor de toenemende aandacht voor groene energie staat ook windenergie weer in de belangstelling. Een van de aspecten daarvan is onderzoek naar de mogelijkheid om de wind in de bebouwde omgeving te gebruiken voor het opwekken van energie. Veel praktijktoepassingen van dit idee zijn er nog niet. Het is een relatief jong onderzoeksveld, waaraan nog maar weinig (openbaar) onderzoek is verricht, en waarover nog weinig publicaties zijn verschenen.

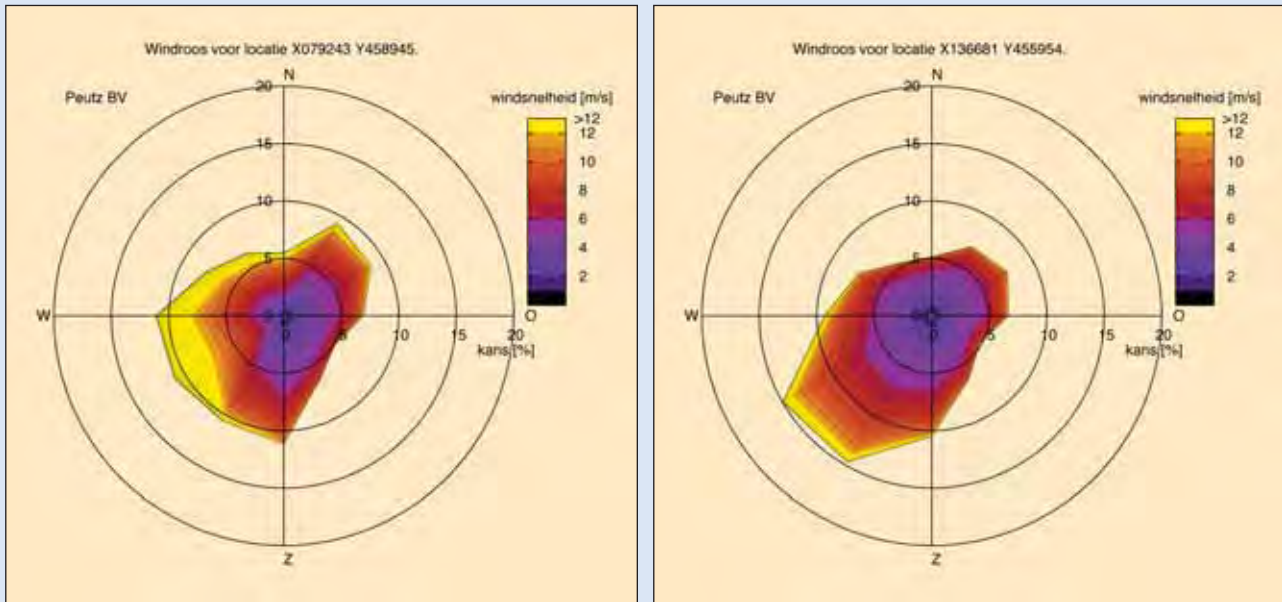
De meest directe toepassing van windenergie op gebouwen, is het plaatsen van turbines op bestaande (hoog)bouw. Voor het optimaal functioneren van windturbines bij hoogbouw, is het echter verstandig om bij het ontwerp van het gebouw reeds rekening te houden met de te plaatsen turbines. Bij het plaatsen van windturbines in de bebouwde omgeving speelt namelijk

een groot aantal aspecten een rol, bijvoorbeeld: wat is de windstatistiek op de locatie van het gebouw, niet alleen wat betreft de windsnelheid, maar ook wat betreft de richting, wat is de bebouwing in de omgeving van het gebouw, niet alleen in de directe omgeving, maar ook op wat grotere afstand, hoe beïnvloedt het gebouw zelf de stroming. Maar niet alleen het windaanbod is van belang, ook het type turbine is een belangrijke parameter.

Niet in de laatste plaats is het echter van belang, in hoeverre de architect bereid is een windturbine op of in zijn gebouw te plaatsen en als die bereidheid er is, in hoeverre wordt het ontwerp aangepast om de turbine optimaal te laten functioneren.

\* Universitair docent TU Delft

\*\*Onderzoeker TU Delft / projectleider Adviesbureau Peutz B.V. te Mook



Windroos op 60 meter hoogte voor Scheveeningen en Utrecht (bron data: NPR 6097). In de figuur is de kans op het voorkomen van wind uit een bepaalde windrichting en de verdeling van snelheden binnen die windrichting weergegeven.

· FIGUUR 2 ·

Naast de genoemde parameters zijn er natuurlijk meer aspecten die van belang zijn bij het plaatsen van windturbines zoals trillingen, geluid en reflecties. Deze aspecten zijn, gezien de scope van het onderzoeksveld, in dit artikel echter niet meegenomen.

### Case studies

Het belang van de verschillende hierboven genoemde aspecten wordt hieronder toegelicht aan de hand van twee verschillende gebouwen: het WTC in Bahrain en de Kite tower in Leeds. De gebouwen verschillen niet alleen sterk qua vorm, maar ook wat betreft het windklimaat waar ze voor zijn ontworpen en het type turbine dat is toegepast. Het WTC heeft een aërodynamische vorm en staat aan de kust, terwijl de Kite Tower een echte bluff body is, die waarschijnlijk in een stedelijke omgeving moet worden geplaatst. Overeenkomst tussen de beide ontwerpen is dat in beide gebouwen de turbines vast opgesteld zijn, dus niet op de wind kunnen worden gedraaid. Het is bij de beoordeling van de gepresenteerde resultaten van belang steeds in gedachten te houden dat het in beide gevallen gaat om een schematisering van de gebouwen en dat de resultaten dus zeker niet 1 op 1 op de werkelijke gebouwen van toepassing zijn.

### Methodiek

De stroming rond de gebouwen is onderzocht met behulp van het Computational Fluid Dynamics (CFD)

pakket Fluent. Er is gebruik gemaakt van het  $k\epsilon$ -RNG turbulentiemodel. Er zijn alleen stationaire berekeningen uitgevoerd. Voor de vergelijkbaarheid van de resultaten is er geen omliggende bebouwing meegenomen, en worden beide gebouwen aangestroomd met hetzelfde snelheidsprofiel, behorend bij een omgeving met een vrij kleine ruwheidslengte, vergelijkbaar met een polderlandschap. In beide geometrieën is het rekendomein een orde groter genomen dan de hoogte van het gebouw, zodat er geen randeffecten van de simulatie een rol spelen in de buurt van het gebouw. De simulaties zijn allen uitgevoerd met een referentiesnelheid van 5 m/s op 60 meter hoogte. De resultaten zullen waar mogelijk worden vertaald naar de Nederlandse situatie.

### Windaanbod

Eén van de belangrijke aspecten bij het plaatsen van windturbines is het windaanbod. Dit windaanbod is sterk gekoppeld aan de ruwheid van de omgeving. Deze ruwheid bepaalt het snelheidsprofiel van de aankomende wind. Dit verklaart ook waarom kustlocaties zo populair zijn bij het plaatsen van windturbines: op veel plekken op de wereld komt aan de kust de wind de meeste tijd van zee of komen de hoogste windsnelheden vanuit zee, vanwege de lage ruwheid van het zeeoppervlak. Ook in Nederland zien we dit aspect terug. Als we de windrozen op 60 meter

hoogte van bijvoorbeeld Scheveeningen en Utrecht met elkaar vergelijken (zie figuur 2), zien we dat de windroos van Utrecht een veel uniformere verdeling heeft dan die van Scheveeningen (bron NPR6097). Daarnaast komen in de windroos van Scheveeningen veel meer hoge snelheden voor dan in die van Utrecht. Eén en ander is te verklaren uit de ruwheid van de omgeving. Bij Scheveeningen komt de westenwind over zee, een oppervlak met een zeer lage ruwheid, Utrecht ligt midden in Nederland, en heeft daarbij een hoge ruwheid in de stad zelf.

Als windenergie en hoogbouw wordt bestudeerd zal dit meestal inhouden dat er in de Nederlandse context moet worden uitgegaan van een stedelijke omgeving. Het voorspellen van de windsnelheden tussen de gebouwen in een stedelijke omgeving is erg lastig. Voor hoogtes die ruim boven de gemiddelde bouwhoogte liggen, is de windstatistiek niet meer afhankelijk van de exacte geometrie van de omgeving, en kan op basis van een ruwheidskaart van de omgeving en meetgegevens van het KNMI een redelijk betrouwbare schatting worden gegeven van de windstatistiek. Dit is voor heel Nederland gedaan, wat heeft geleid tot de Nederlandse Praktijk Richtlijn NPR6097 [1], waarmee de windstatistiek op 60 meter hoogte bekend is voor elke plaats binnen Nederland. Voor een hoogbouwproject dat niet in de buurt staat van andere hoogbouwprojecten is er dus

zonder veel moeite een schatting te geven van de windstatistiek.

### **Turbine eigenschappen**

Voordat de twee casestudies zullen worden toegelicht, zal eerst kort iets worden geschreven over de opbrengst van windturbines en de wisselwerking tussen windturbines en de stroming. Daarnaast zal worden uitgelegd hoe de turbines in de CFD-berekeningen worden gemodelleerd.

Voor een goed begrip van de interactie tussen een windturbine en de stroming waar hij in staat, is het noodzakelijk iets te weten over het effect van de stromingseigenschappen van de turbine op de opbrengst. Daarom zal hieronder kort iets worden geschreven over het vermogen dat een windturbine kan opbrengen.

Het vermogen dat een windturbine aan de stroming onttrekt, is gelijk aan de drukval over de turbine vermenigvuldigd met de volumestroom door de turbine, in formule vorm:

$$P = Au_t \Delta p$$

waarin  $A$  het doorstroomde oppervlak van de turbine,  $u_t$  de snelheid van de wind door de turbine en  $\Delta p$  de drukval over de turbine. Hierin is de efficiency van de turbine nog niet meegenomen. Gezien het feit dat deze efficiency echter niets met de stroming te maken heeft, wordt dit aspect verder buitenbeschouwing gelaten. De drukval over de turbine schaal met de dichtheid van de lucht en het kwadraat van de snelheid van de lucht door de turbine:

$$\Delta p = \frac{1}{2} \rho u_t^2$$

waarin  $\rho$  de dichtheid is van lucht. Nu is het natuurlijk zo, dat bij een stroming in het vrije veld bij constante windsnelheid, de snelheid door de turbine kleiner zal worden, als de drukval over de turbine groter wordt: hoe "dichter" de turbine, des te groter de drukval en des te kleiner de windsnelheid. In beide extreme gevallen, het drukverschil is maximaal bij een snelheid nul en de snelheid is maximaal bij een drukverschil van nul, wordt er geen vermogen opgewekt. Verder wordt verondersteld dat de doorstroomsnelheid door de turbine evenredig is met de windsnelheid, zodat het aan de

wind onttrokken vermogen kan worden geschreven als:

$$P = \alpha \frac{1}{2} \rho A u^3$$

waarin  $u$  de windsnelheid is. Er valt aan te tonen [3] dat er een optimum in het vermogen is, als de snelheid door de turbine de helft is van de ongestoorde snelheid. Dit theoretisch maximaal opgewekte vermogen wordt de Betz-limiet genoemd en bepaalt de maximale waarde van de coëfficiënt  $\alpha$ , die dan gelijk is aan 0.59.

In geval van een turbine die niet vrij is omstroomd, geldt de Betz-limiet niet meer. De lucht kan namelijk niet zonder meer om de turbine heen stromen. Dit kan er voor zorgen dat als de eigenschappen van de turbine worden aangepast, in dat geval een hogere opbrengst van de turbine kan worden verkregen bij dezelfde windsnelheid.

In de CFD simulaties is de turbine steeds gemodelleerd als een poreuze schijf. Evenals bij een echte turbine het geval is, schaal de drukval over de schijf met het kwadraat van de windsnelheid. De drukval over de schijf wordt beïnvloed met een parameter  $C$  volgens:

$$\Delta p = \frac{1}{2} \rho C u_t^2$$

Het vermogen van de turbine is vervolgens te schrijven als:

$$P = \frac{1}{2} \rho A C u_t^3$$

Bij een turbine die ontworpen is op de Betz-limiet, is de snelheid door de turbine de helft van de ongestoorde snelheid, en volgt dus dat de coëfficiënt  $C$  in dat geval acht maal de Betz-limiet is, dus  $C_{Betz} = 4,72$ .

### **WTC BAHRAIN**

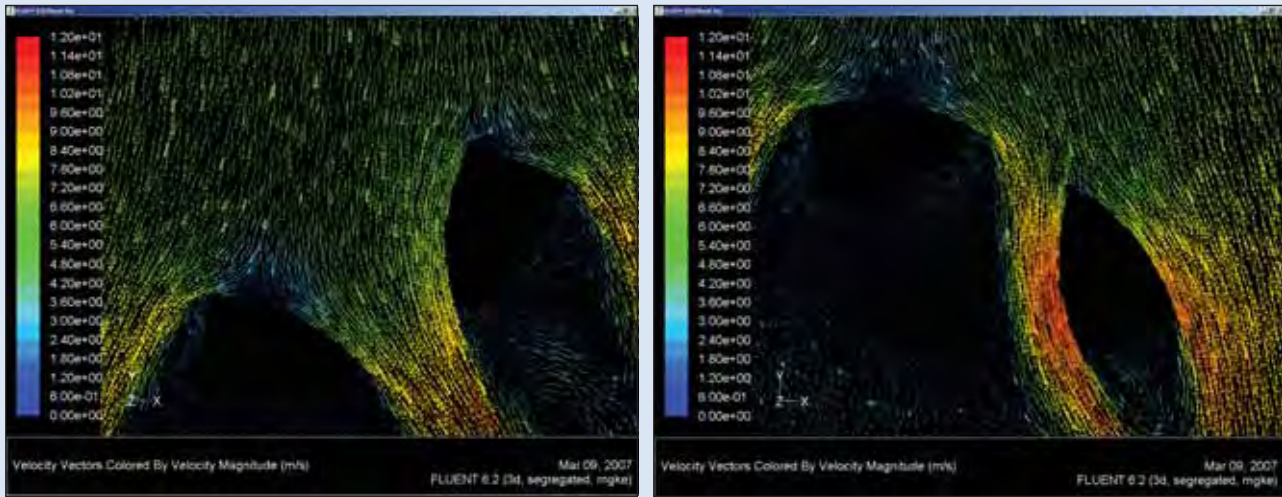
Op het ogenblik wordt in Bahrain gebouwd aan het nieuwe WTC, ontworpen door Atkins, UK. Het WTC bestaat uit twee gebouwen, die onder een hoek van ongeveer  $100^\circ$  met elkaar staan. Een schematisering van de gebouwen is weergegeven in figuur 1. Deze schematisering is gemaakt op basis van een plattegrond van het gebouw op de website van het WTC

(<http://www.bahrainwtc.com>), foto's van het gebouw in aanbouw en renderings van het eindresultaat, zoals die waren te vinden op internet. De hoogte van de torens is ongeveer 250 meter. Tussen de twee torens zijn drie turbines gepland met een diameter van meer dan 25 meter. De turbines worden geplaatst op hoogtes van ongeveer 75, 110 en 145 meter. De diameter van de turbines is groter dan de afstand tussen de gebouwen. Ze zijn dan ook niet exact op de positie waarop de afstand tussen de gebouwen het kleinst is geplaatst, maar iets voor deze opening (zie figuur 1).

Bij de beoordeling van dit gebouw op het gebied van windenergie zijn een aantal zaken van belang. Ten eerste dat het gebouw aan de kust staat. Als we de windroos van enkele plaatsen in de buurt van Bahrain bekijken (waarbij in de buurt een relatief begrip is) zien we dat deze een belangrijke component heeft in de noord-noordwestelijke richting. Dit is precies de richting loodrecht op de opening tussen de gebouwen, die richting de zee is georiënteerd. Hiermee komen we bij het eerste aspect van het ontwerp van deze gebouwen: ze zijn ontworpen op maximalisatie van de opbrengst van de windturbines voor wind vanuit één richting. Gezien de windroos lijkt dit een gerechtvaardigde keuze.

### **Interactie tussen wind en gebouwworm**

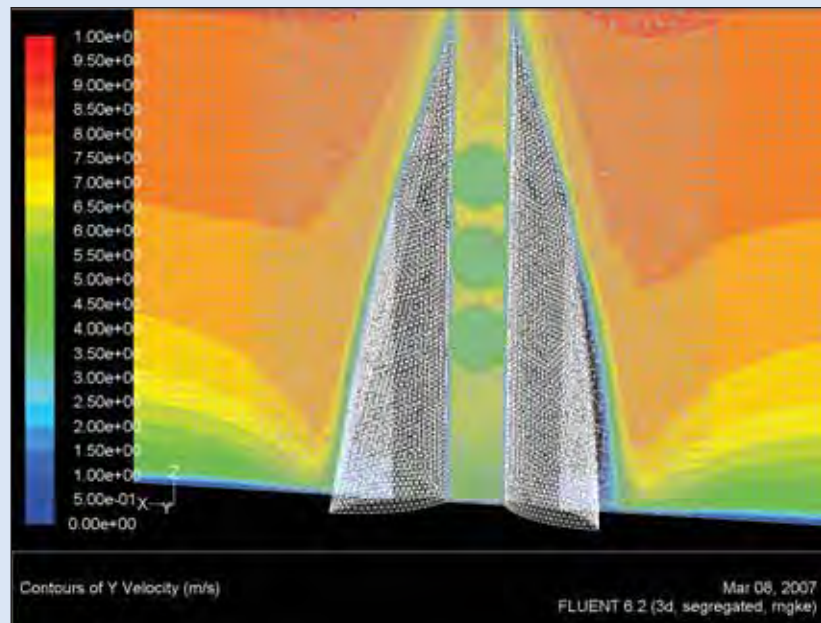
Eén van de belangrijkste argumenten om windturbines op hoogbouw toe te passen, is dat door de blokkade van de hoogbouw de wind om het gebouw heen moet en er daarmee gebieden ontstaan met een aanzienlijk hogere snelheid dan de ongestoorde windsnelheid. Juist in deze gebieden zouden de windturbines moeten worden geplaatst. Bij de stroming rond een hoog cilindervormig gebouw bijvoorbeeld, is de windsnelheid aan de zijkanten van het gebouw tot bijna tweemaal de ongestoorde windsnelheid op dezelfde hoogte. Bij de combinatie van twee gebouwen, zoals hier het geval is, kan bovendien gebruik worden gemaakt van het zogenaamde venturi-effect: door de omstroming van de twee gebouwen ontstaat achter de gebouwen een lage-drukgebied dat een verhoogde snelheid tussen de gebouwen teweegbrengt. Dit venturi-effect treedt maximaal op als de gebouwen vleugelvormig zijn, maar



Berekende windsnelheden rond het WTC te Bahrain zonder turbines, op een hoogte van 100 meter. In beide gevallen komt de wind van boven, met het gebouw 30° gedraaid t.o.v. de normaal. a: gebouworiëntatie zoals die wordt gerealiseerd. b: gebouwen in “venturi-opstelling”. Duidelijk is te zien dat in de eerste situatie de windturbines tussen de gebouwen loodrecht worden aangestroomd, terwijl dat in de tweede situatie absoluut niet het geval is.

- FIGUUR 3-

ook bij balkvormige gebouwen treedt dit effect op [2]. Voorwaarde voor het optreden van het venturi-effect is dat de gebouwen worden aangestroomd, met de wind komend uit de richting waar de gebouwen het dichtstbij elkaar staan. De gebouwen van het WTC in Bahrain staan echter juist met de opening naar de wind toe. De eerste reactie bij het beoordelen van de gebouwen was dan ook dat de gebouwen voor de stroming precies verkeerd om staan. Bij nadere bestudering en het uitvoeren van een aantal simulaties moet dit beeld echter worden bijgesteld. Voorwaarde voor het optreden van het venturi-effect, is dat de stroming “soepel” om de bovenstroomse kant van de gebouwen heen stroomt. Bij het WTC blijkt bij aanstroming vanuit deze richting een stuwpunt te ontstaan op de gevel van het gebouw. Voor het optreden van het venturi-effect zou de hoek tussen de twee gebouwen dus scherper moeten zijn. Wel lijkt het zo te zijn dat de hoogste snelheden bij wind loodrecht op de gebouwen niet tussen, maar achter de gebouwen optreedt. Dit is bij “venturi-opstelling” niet het geval. Dat lijkt er voor te pleiten de gebouwen toch om te draaien. Als we echter de gevoeligheid voor een kleine hoekverdraaiing van de wind tussen de gebouwen bekijken, blijkt het grote voordeel van de huidige opstelling van de gebouwen ten opzichte van de “venturi-opstelling”: Door de gebouwworm blijft de aanstroming van de turbines loodrecht, ook bij een hoek van de wind ten opzichte van de gebouwen van 30° (zie figuur 3a). Dit in tegenstelling tot de stroming die ontstaat in



Contourplot van de snelheid loodrecht op de turbines in het WTC te Bahrain, in het vlak door de turbines. Goed zichtbaar is, dat ondanks de snelheidsgradiënt over de hoogte van de ongestoorde stroming, de snelheid door de drie turbines vrijwel hetzelfde is.

- FIGUUR 4-

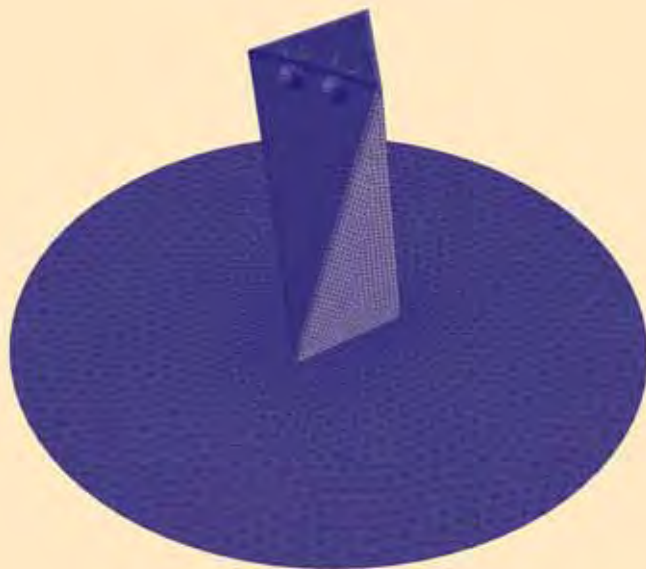
Hoogte turbine [m]	U zonder turbine [m/s]	U met turbine [m/s]	U vrije veld [m/s]	U vrije veld, met turbine [m/s]
75	6,8	3,7	7,2	3,6
110	7,0	3,75	7,6	3,8
145	7,2	3,85	7,95	4,0

Een vergelijking tussen de optredende snelheden op drie hoogtes met en zonder de turbines, en met en zonder de gebouwen van het WTC.

- TABEL 1-

de “venturi-opstelling”. In deze opstelling gaat de stroming aanliggen aan één van de gebouwen, en worden de turbines aangestroomd onder een hoek

die nog groter is dan de hoek van de wind ten opzichte van de gebouwen (figuur 3b), wat negatief is voor de opbrengst van de turbine. Conclusie



Gemodelleerde geometrie van de Kite Tower. Het gebruikte rekengrid op het oppervlak van de toren en de gemodelleerde windturbines is zichtbaar.

- FIGUUR 5-

moet dus zijn dat de opstelling van de gebouwen weliswaar niet een grote versnelling van de wind ten opzichte van de ongestoorde stroming veroorzaken, maar de aanstroming van de turbines wel ten goede komt.

#### **Effect van de turbines op de stroming**

Bij plaatsing van turbines in de buurt van een gebouw zal er een interactie zijn tussen de stroming om het gebouw en de turbine. Om daar een uitspraak over te kunnen doen is een berekening gemaakt met op de plaats van de turbines een poreuze schijf als model voor een turbine. De eigenschappen van de schijf zijn zo gekozen, dat als deze in een ongestoorde stroming wordt geplaatst, de snelheid van de lucht door de schijf de helft is van de ongestoorde snelheid ( $C=4,72$ ). Bij plaatsing in het vrije veld valt bij deze "dichtheid" van een turbine een maximaal rendement te verwachten. De resulterende snelheden die worden berekend door de poreuze schijf zijn vergeleken met de snelheden op dezelfde plek, zonder de poreuze schijf en met de snelheden op dezelfde hoogte in het vrije veld. Met deze vergelijking kan een uitspraak worden gedaan over twee dingen: de eerste is of de turbines tussen de gebouwen meer of minder zullen opbrengen dan een losse turbine in het vrije veld op dezelfde hoogte. Het tweede is, of de aanwezigheid van de gebouwen bij de turbines een positief effect op het rendement van de turbines heeft. De resultaten zijn weergegeven in tabel 1. Het eerste wat op valt is dat de snelheden ter plaatse van de turbine lager zijn dan

de snelheden in het vrije veld. Daaruit zou de conclusie kunnen worden getrokken dat de gebouwen dus een negatief effect hebben op de opbrengst. Dat beeld wordt echter genuanceerd als wordt gekeken naar de snelheden die optreden bij aanwezigheid van de turbines. Dan wordt duidelijk dat de turbines voor een deel gebruik maken van het drukverschil dat door de gebouwen wordt opgewekt. De luchtsnelheid door de turbines is namelijk meer dan de helft van de ongestoorde luchtsnelheid (zie figuur 4). De laagste turbine blijkt volgens deze berekening een hogere opbrengst te hebben dan een vergelijkbare turbine in het vrije veld. Bij de middelste turbine wordt de lagere ongestoorde snelheid t.g.v. de aanwezigheid van het gebouw ongeveer gecompenseerd door de extra drukval ten gevolge van het gebouw. De bovenste turbine levert volgens deze berekeningen minder energie dan een vergelijkbare turbine in het vrije veld.

#### **Optimalisatie van het ontwerp**

Nu een aantal aspecten van het ontwerp zijn besproken, rijst de vraag tot in hoeverre het WTC op windenergie lijkt te zijn ontworpen, en of er daarbij eenvoudig verbeteringen zijn aan te brengen. Gezien het feit dat de turbines gemiddeld niet meer lijken op te brengen dan een vergelijkbare turbine in het vrije veld, is er bij het ontwerp waarschijnlijk niet de eerste prioriteit gegeven aan het optimaliseren van de opbrengst van de turbines. Het verplaatsen van de turbines naar net ach-

ter de gebouwen, zou de opbrengst per vierkante meter waarschijnlijk verbeteren. De diameter van de turbines zou dan echter wel kleiner moeten zijn dan die van de huidige turbines.

Het is echter de vraag in hoeverre dat al dan niet een bewuste keuze is geweest. Architectonisch heeft het huidige ontwerp namelijk één ding voor op een verzameling losse turbines in het veld: door de vorm van het gebouw en de plaats van de turbines lijkt het zo te zijn dat de snelheid door de turbines vrijwel voor alle turbines gelijk is. Dat houdt ook in dat bij wisselende windsnelheden, de turbines ook allemaal ongeveer tegelijkertijd worden in en uit geschakeld, wat voor "het gezicht" natuurlijk wel zo aardig is.

#### **KITE TOWER LEEDS**

De Kite Tower, een ontwerp van Make/Carey Jones is een gebouw dat alleen nog maar op tekening bestaat, en waarvan zelfs de hoogte nog onduidelijk is. Het gebouw zou moeten worden gebouwd in Leeds, maar het is niet zeker of het zo ver komt. Het ontwerp heeft een gelijkzijdige driehoek als grondvlak en dak, die  $60^\circ$  ten opzichte van elkaar zijn gedraaid, en heeft zes gelijkbenige driehoeken als wanden. Voor de hoogte van de toren is op basis van de getallen, die circuleren voor het aantal verdiepingen, gekozen voor 100 m. De lengte van de basis van het grondvlak is gelijk genomen aan 40 m. Boven in de wanden van de toren zitten per wand twee ronde openingen (in totaal zes). Deze zijn verbonden met gaten in het dak (drie in totaal). In het dakvlak zijn in de gaten turbines aangebracht. Gebaseerd op een rendering, gevonden op internet, is de diameter van de gaten in de gevel geschat op 6 meter. De diameter van de turbines is geschat op 9 meter. Door het drukverschil tussen de gevel en het dak zal er een luchtstroom worden opgewekt, die de zogenaamde "ducted wind turbines" aandrijft [3].

#### **Interactie tussen wind en gebouwworm**

Het uitgangspunt voor de werking van de turbines is compleet verschillend van een conventionele windturbine. Bij de conventionele windturbine is het uitgangspunt een luchtstroming, waar een turbine wordt ingezet, zodat er een drukverschil over de turbine ontstaat, waardoor energie kan worden opgewekt. In dit geval is het uit-

Hoek	Snelheid m/s
0°	2,8
15°	2,7
30°	2,3
45°	1,4
60°	0,9

Relatie tussen aanstromingshoek van de wind en resulterende verticale snelheid door de turbines in de Kite Tower.

- TABEL 2-

C	$V_z$ (m/s)	P/A (W/m <sup>2</sup> )
0	3,3	0,0
2	3,1	35,7
4,72	2,8	62,2
10	2,3	73,0
20	1,8	70,0
200	0,6	25,9

De verticale stroomsnelheid door de turbines in de Kite Tower en het theoretisch maximaal opgebrachte vermogen per vierkante meter turbine, als functie van de parameter C.

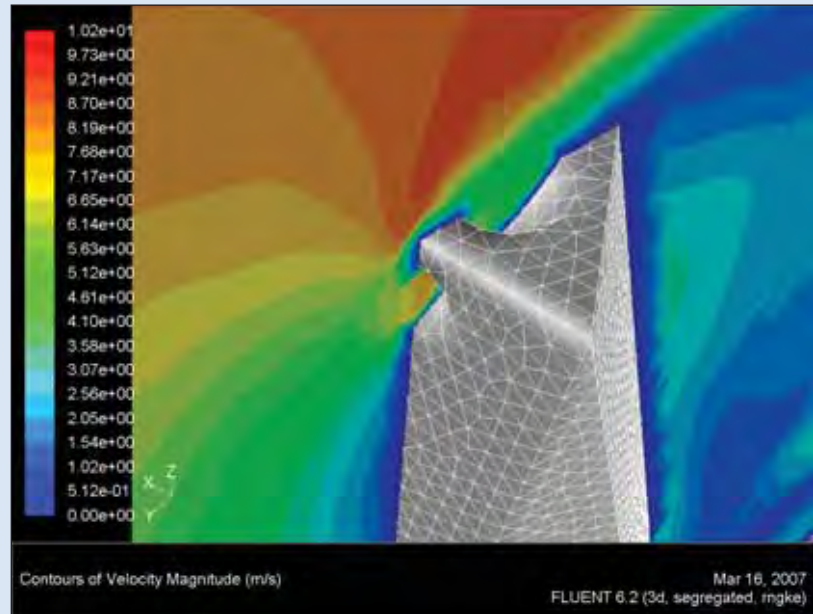
- TABEL 3-

gangspunt een gebouw, waar door de wind drukverschillen op ontstaan, waarna er een gat wordt gemaakt, waar een luchtstroming door optreedt, die een turbine aandrijft. In tegenstelling tot het WTC, waar de turbines in principe het beste gebaat zijn bij een zo aërodynamisch mogelijk vormgegeven gebouw, wordt bij het Kite Tower bewust gebruik gemaakt van scherpe randen. Op deze randen zal namelijk altijd loslating plaats vinden, met als gevolg een scherpe drukgradiënt. Er zijn daarmee dus vlakken met een hoge en vlakken met een lage druk dat een goed uitgangspunt is voor het plaatsen van een ducted windturbine.

In het gebruikte model van de toren zoals gepresenteerd in figuur 5 zijn slechts twee gaten en twee turbines aangebracht. De turbines zijn evenals bij het WTC gemodelleerd als een porieuze schijf.

Gezien het feit dat in alle zijden van de toren luchttoevoergaten voor de turbines aanwezig zijn, is de toren duidelijk ontworpen op maximale opbrengst voor alle windrichtingen. Om te kijken hoe gevoelig de opbrengst is voor de windrichting zijn een aantal simulaties uitgevoerd aan een toren, waarbij er een turbine in het dakvlak aanwezig is die in het vrije veld de snelheid zou halveren. De gemiddelde snelheid loodrecht op de turbines is voor hoeken tussen 0 en 60° bepaald in stappen van 15°. Er is steeds van uitgegaan dat er per turbine maar één gat in de gevel als toevoer dient. Boven de 60° komt de volgende gevel meer op de wind te staan. De resultaten zijn weergegeven in tabel 2.

Het eerste wat opvalt, is dat de snelheden zonder turbine significant lager



Contour plot van de snelheden in een verticaal vlak door een van de gaten van de Kite Tower. Wind loodrecht op de gevel, C gelijk aan 10.

- FIGUUR 6-

zijn dan de ongestoorde snelheid op dakhoogte, die ongeveer 7,5 m/s draagt. Daar zijn een aantal redenen voor. De eerste is dat de diameter van de turbineopening 1,5 maal groter is dan de openingen op de gevel. Daarmee zijn de snelheden door de turbine 2,25 maal lager dan de snelheden door de opening in de gevel. Daarnaast spelen intree- en uittree-verliezen een rol. Een zorgvuldig ontwerp van de openingen kan een significante verbetering van het rendement opleveren. Uit de resultaten blijkt verder, dat bij hoeken boven de 15° de opbrengst van de turbine fors afneemt. Dus hoewel de toren ontworpen lijkt op een optimale opbrengst van de turbines, onafhankelijk van de windrichting, lijkt dit volgens de berekeningen tegen te vallen. Eén van de aspecten waarmee nog geen rekening is gehouden, is het effect van windvlagen op het rendement van de

turbines. Bij het voorspellen van werkelijke opbrengsten van turbines zal gebruik moeten worden gemaakt van de statistiek van uurgemiddelde windsnelheden. Het moge duidelijk zijn dat de tijdschaal van de turbines veel kleiner is dan een uur. Voor een betrouwbare schatting van de opbrengst zal daar dan ook voor moeten worden gecorrigeerd. Het rendement van de turbines zal daardoor lager liggen dan berekend op basis van uurgemiddelde snelheden.

#### Turbine eigenschappen

Theoretisch kan er met een ducted turbine bij een vergelijkbaar turbineoppervlak dus een groter vermogen worden opgewekt. Het optimum van dit vermogen zal wellicht ook niet liggen bij de halve ongestoorde snelheid door de turbine. Er zal daarom, voor een optimale opbrengst, per geval

bekeken moeten worden wat de relatie is tussen de drukval over de turbine en de snelheid van de lucht door de turbine. Daaraan gekoppeld zal er dus voor een optimale energieopbrengst, dus ook moeten worden gekeken wat de optimale turbine-eigenschappen zijn, want een "gewone" windturbine zal in het gat niet optimaal presteren. Voor een aantal waarden van de porositeit van de turbine zijn berekeningen uitgevoerd met de wind loodrecht op de gevel. De resulterende snelheden loodrecht op de turbine en de drukken over de turbine zijn vervolgens bekeken als functie van deze porositeit. De resultaten zijn weergegeven in tabel 3. Een contourplot van de snelheden door een van de gaten met C gelijk aan 10 is weergegeven in figuur 5.


Het maximale vermogen dat uit de stroming kan worden gehaald blijkt bij een hogere turbineweerstand te liggen dan bij een standaard turbine met een Betz-weerstand. Het verdient dus inderdaad aanbeveling het turbine type aan te passen aan de gebouwgeometrie.

## CONCLUSIES

Op basis van het WTC in Bahrain en de Kite Tower zijn een aantal aspecten van windenergie en hoogbouw toegelicht. Eén van de belangrijke aspecten voor de Nederlandse context is het optimaliseren van de opbrengst voor alle windrichtingen. De opbrengst van de turbines in beide gebouwen blijkt sterk gevoelig te zijn voor de hoek waaronder ze worden aangestroomd. Dit ondanks het feit dat de Kite Tower ontworpen lijkt op een zo windrichting onafhankelijk mogelijke opbrengst. Bij het WTC zorgt de vormgeving er voor dat de aanstroming ongevoelig is voor kleine hoekverdraaiing van de windrichting. Daarnaast zorgt het ontwerp er voor dat de drie turbines ondanks de verschillende hoogtes waarop ze zijn aangebracht, toch ongeveer even snel draaien, wat architectonisch niet onbelangrijk is.

Uit de studie aan de Kite Tower blijkt dat bij een zorgvuldig vormgegeven inlaat, het mogelijk is om in geval van een ducted windturbine een hoog rendement per vierkante meter turbine

oppervlak te halen.

Bij een zorgvuldige afweging van het type turbine en de plaatsing van de turbine, en een inventarisatie van het lokale windklimaat heeft windenergie in hoogbouw potentie. 

## REFERENTIES

1. NPR 6097, *Toepassing van de statistiek van de uurgemiddelde windsnelheden voor Nederland*. Januari 2006.
2. *A numerical study on the existence of the Venturi-effect in passages between perpendicular buildings*. B. Blocken, T. Stathopoulos, J. Carmeliet. 6<sup>th</sup> Asia Pacific Conference on Wind Engineering, September 2005.
3. *The development of a ducted wind turbine simulation model*, A Grant and N. Kelly, 8<sup>th</sup> International IBIBSA Conference, Augustus 2003.

# navos®

Kleveringweg 20, 2616 LZ Delft, telefoon: 015-2153728, fax: 015-2153729

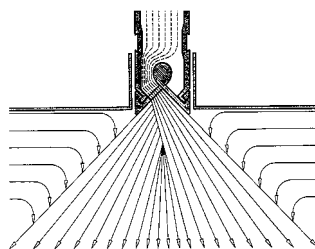


Voldoet ruimschoots aan de thermische comfortnormen zoals: NEN-EN-ISO 7730, DIN 1946/2, Arbo-normering AI-7 en ISSO publicatie nr.19.

**INDUCOOL**  
plafondkoelpaneel  
maakt gebruik van alle  
energetische voordelen  
van lucht en water.  
Leverbaar in capaciteiten  
tot **250 W/m<sup>2</sup>** of 500W/m<sup>2</sup>.



## Absoluut tochtvrij



**Het principe**  
Door smalle luchtspleetjes  
wordt onder een hoek van 45°  
met een inductiefactor van 25  
tot 30, lucht ingeblazen.  
Hierdoor ontstaat een diffuse  
en walsarme luchtstroming.



**INDUL**  
luchtverdeelarmatuur  
Geschikt voor constante of  
variabele volumens van 20 tot  
100%. Inzetbaar tot -14K.  
Leverbaar in cap. van 10 tot  
160 m<sup>3</sup>/hm<sup>1</sup>, in lengten van  
500 tot 2500mm.  
Toepasbaar in metalen-,  
gips- en systeemplafonds.

Wij leveren o.a.:

- **Kiefer**
  - Tochtvrije luchtverdeeltechniek, type Indul - Indulclip
  - Inducool, plafond koelpanelen lucht/water
  - Indultherm, automatisch verstelbare plafond lichtdoorlaat
  - Concretcool, betonkernactivering met lucht
- **Navotherm®**  
Ventilatorconvectoren  
t.b.v. kantoren, hotels, e.d.
- **Quitus**  
Meet- en inregelventielen  
3/8" tot NW 500
- **Stramax**  
Klimaatmatten
- **Verwol**  
Klimaatplafonds, koelplafonds



**Navos Klimaattechniek B.V.** is een technische handelsonderneming en importeur van energiesparende producten en systemen. Ons leveringsprogramma bestaat uit kwalitatief hoogwaardige producten die in grote mate bijdragen tot verbetering van het comfort in klimaatinstallaties. U vindt ons op internet: [www.navos.nl](http://www.navos.nl), e-mail: [navos@navos.nl](mailto:navos@navos.nl)