

Natuurlijke ventilatie en energie via het dak

Miniturbines, kleine windmolens, op daken van gebouwen hebben een slechte reputatie. Ze zijn vaak niet robuust genoeg voor ons windklimaat, staan op de verkeerde plek, leveren (te) weinig stroom, staan vaak stil en als ze draaien komen er weer klachten van omwonenden. De belangstelling voor deze technologie in het duurzaamheidsdiscours is om deze redenen sterk afgenomen. Dit is echter in tegenstelling met de logica van het concept: Gebouwen hebben energie nodig en energieopwekking op of in het gebouw zelf is de meest efficiënte methode. Energieopwekking met miniturbines kent een aantal technische uitdagingen. Daarnaast is opwekking tegen een concurrerende kWh-prijs ook een hele opgave. Dat lukt niet met de technologie van gisteren. Laten we daarom gaan werken aan de technologie van morgen.

Dr.-Ing. B. (Ben) Bronsema Consult – TU Delft faculteit Bouwkunde – afdeling AE + T
Ir. M. (Maarten) Quist, SUN investments, v/h Dutch Green Company
Dr. Ir. L. (Lourens) Aanen, Ingenieursbureau Peutz
Drs. O. (Otto) Meerstadt, Dutch Green Company

"Embrace the wind and fall into another time and space"

Voor Hotel BREEZE Amsterdam is door het BREEZE-consortium² in de onderzoeksperiode 2014 – 2015 naar een oplossing gezocht voor een kosteneffectieve productie van windenergie in de Gebouwde Omgeving met behulp van verticale-as-windturbines (VAWTs) op het dak³. Hierbij werden verschillende uitvoeringen van het zgn. Powerdak⁴ geanalyseerd op aerodynamische- en energieprestatie Blocken,

B. 2016). Het onderzoek heeft veel kennis opgeleverd over windenergie in de gebouwde omgeving met behulp van VAWTs; het voorliggende artikel beschrijft in grote lijnen de voorlopige resultaten. De doelstelling, het opwekken van windenergie op gebouwniveau, is weliswaar dichterbij gekomen maar om deze te kunnen realiseren is verder onderzoek nodig, bij voorkeur aansluitend, of in de marge van het Europees onderzoeksproject AEOLUS4FUTURE, dat wordt gefinancierd in het kader van Horizon 2020⁵. Ondanks de

tegenvallende prestaties van *Urban Turbines* in de voorgaande jaren moet windenergie op de agenda van het duurzaamheidsdiscours blijven staan. Want: *"Windenergie in de gebouwde omgeving - Sine qua non voor energie neutrale hoogbouw"* (Bronsema, B. 2017).

WINDENERGIE IN DE GEBOUWDE OMGEVING

De huidige trend in de ontwikkeling van windenergie is de aanleg van grootschalige windparken in windrijke omgevingen, bijvoor-

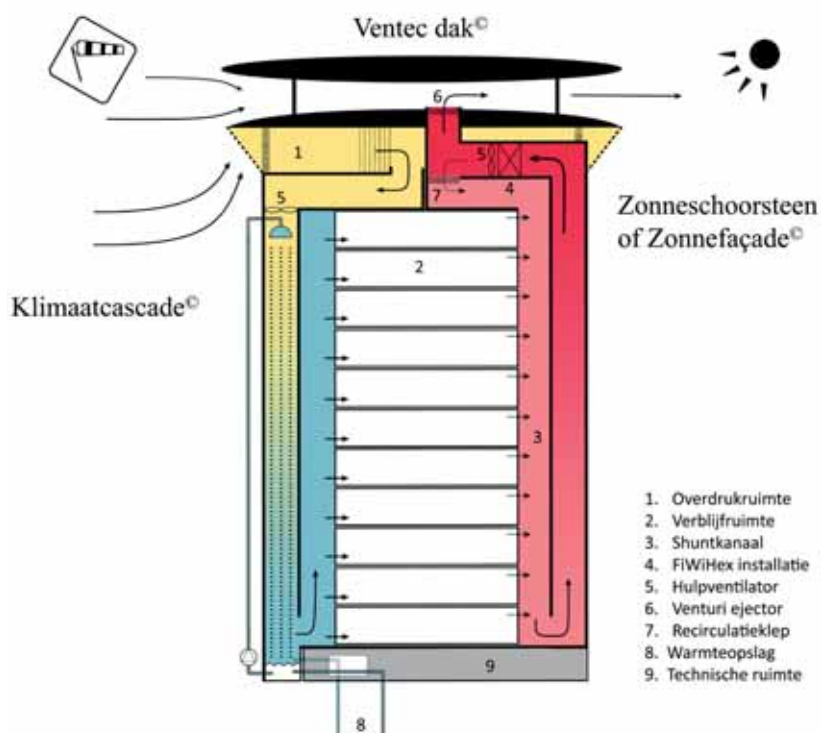
beeld op zee of aan de kust. Een dergelijke centrale energieopwekking met grote tot zeer grote windturbines is duurder dan traditionele grijze stroom; het kostenverschil wordt momenteel door subsidies opgevangen. Door de grote afstand tot de gebouwde omgeving treden transport- en omzettingsverliezen van de opgewekte energie op. Er is een toenemende maatschappelijke weerstand tegen windturbines op land, die zijn oorsprong vindt in het gevaar dat ze opleveren voor vogels, de geluidsoverlast en slagschaduw voor omwonenden en de ervaren "horizonvervuiling", het zgn. Not In My Backyard probleem.

De genoemde problemen spelen een kleinere rol bij kleinschalige opwekking van windenergie in de gebouwde omgeving. Speciaal voor dit doel ontworpen turbines kunnen direct op het gebouwnet "achter de meter" worden aangesloten waardoor de opgewekte energie direct kan worden gebruikt voor eigen behoefte. De opbrengst van elke zelf benutte kWh is hierdoor gelijk aan de "vermeden kosten van inkoop", die beduidend hoger is dan de huidige vergoeding voor terug levering, althans in Nederland.

Een nadeel van kleinschalige opwekking van windenergie in de gebouwde omgeving is dat de windsnelheden hier lager zijn dan in het open veld. Bij hoogbouw wordt echter gebruik gemaakt van de hogere windsnelheden op grotere hoogten. Bij de verdere ontwikkelingen wordt de opbrengst van de windturbines verhoogd door gebruik te maken van de verhoogde windsnelheid in de pseudo venturi (Powerdak 2.0) of op een gekromd dak (Powerdak 3.0). De energieopbrengst, die evenredig is met de derdemacht van de windsnelheid, neemt hierdoor substantieel toe. In het Powerdak zijn de windturbines onderdeel van de technische gebouwinstallaties, waardoor de elektrotechnische afstemming met de gebouwvoorzieningen wordt vereenvoudigd. Door de integratie van de windturbines in het gebouw zijn de investeringskosten lager dan bij vrijstaande turbines omdat geen masten nodig zijn en elektrische infrastructuur aanwezig is.

HET POWERDAK 1.0

Figuur 1 laat het Ventecdak⁶ zien van het oorspronkelijke EWF-concept 1.0 zoals dat in het onderzoek Earth, Wind & Fire werd ontwikkeld (Bronsema, B. 2013). Aan de windzijde wordt met behulp van dak overstekken lucht opgevangen en door de positieve winddruk naar de overdrukkamer gevoerd. Een deel van de lucht stroomt naar de klimaatcascade voor de ventilatie van het gebouw (Bronsema, B. et al 2018). Een groter deel, afhankelijk van



Figuur 1 - EWF-concept 1.0 met Powerdak 1.0⁷

de winddruk, wordt benut voor energieopwekking met behulp van in de overdrukkamer aangebrachte windturbines. De overdrukkamer moet bij alle windrichtingen kunnen functioneren, hetgeen wordt gerealiseerd met een systeem van gemotoriseerde luchtkleppen, die automatisch op de windzijde worden geopend en op de lijzijde gesloten.

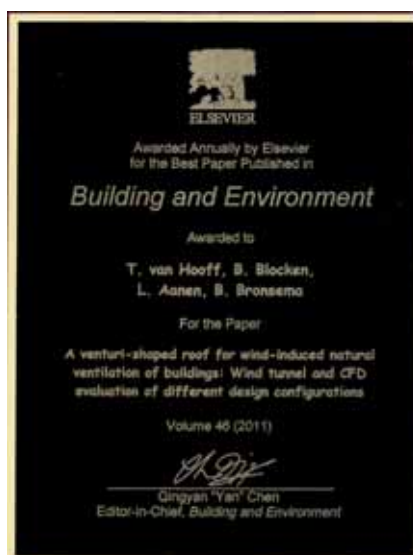
NATUURLIJKE VENTILATIE

Het Ventecdak met pseudo-venturi werd in eerste instantie ontworpen voor het afzuigen van ventilatielucht via de zonneschoorsteen en de venturi-ejector. Een publicatie hierover in Building and Environment trok wereldwijde

aandacht en werd beloond met de Best Paper Award van Elsevier. Al snel werd duidelijk dat dit een veel te kostbare oplossing zou zijn voor deze beperkte functie. Derhalve is in tweede instantie naast de onderdruk ook de positieve winddruk ingezet om met behulp van energieopwekking de rentabiliteit van het dak te vergroten - zie hierna.

Positieve winddruk wordt ook benut voor luchttoevoer naar het gebouw via de klimaatcascade. De druk in de overdrukkruimte plus een positief drukverschil in de Klimaatcascade dient ter compensatie van het drukverlies in het luchttoevoersysteem.

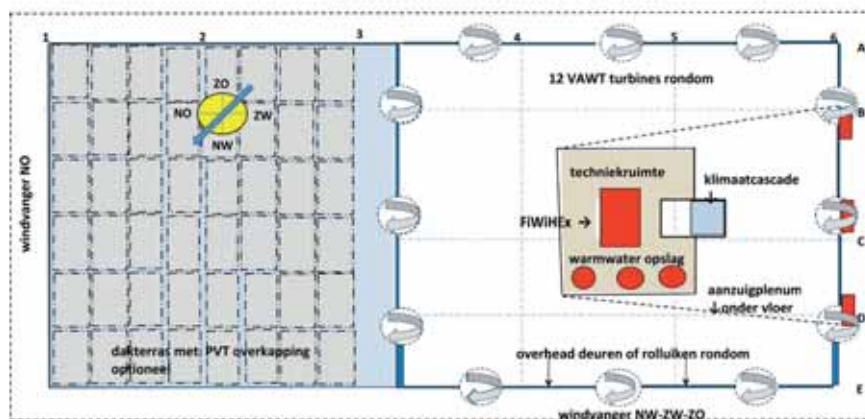
Lucht wordt afgezogen via de venturi-ejector in het Ventecdak, waar door de verhoogde windsnelheid onderdruk wordt gerealiseerd. Het drukverlies van het afzuigstelsel moet worden gecompenseerd door de thermische trek van de zonneschoorsteen plus de aerodynamische trek van de Venturi-ejector. De volumedebieten van toevoer en afzuig moeten onafhankelijk van wind en zon worden geregeld, een uitdagende ontwerpogave. Bij hoge windsnelheden moet het toevoerdebiet zo nodig worden weg gesmoord door luchtkleppen in het toevoersysteem. Een surplus aan thermische trek in de zonneschoorsteen of een te hoge aerodynamische trek van de Venturi-ejector moet worden weg gesmoord door luchtkleppen in het afzuigstelsel. Het proefschrift⁸ geeft een uitgebreid rekenmodel voor de prestatiesimulatie van het Ventecdak.



ENERGIEOPWEKKING

Vrijstaande windturbines worden door de dynamische winddruk aangedreven. Windturbines in de overdrukruimte maken daarentegen gebruik van statische drukverschillen tussen de windzijde en de lijzijde van het gebouw. In principe zouden met dit concept hogere vermogenscoëfficiënten $C_{p,ov}$ kunnen worden gerealiseerd dan bij vrijstaande turbines. Doordat de turbines niet vrij omstroemd worden zijn waarden boven de zgn. Betz-limiet van 0,59 mogelijk. Wel zal de turbine hier speciaal op moeten worden ontworpen. Verder zijn er verschillende voordelen. De turbines worden onderdeel van de technische gebouwinstallaties, waardoor de afstemming van energieproductie en energiegebruik eenvoudiger wordt. Onderhoud kan plaatsvinden vanuit de turbinekamer in de dakopbouw, een gemakkelijk toegankelijke en beschermde techniekruimte. En er is in principe geen omgevingsvergunning nodig. Voor de ontwikkeling van hotel BREEZE Amsterdam is een voorlopige verkenning uitgevoerd van de potentiële prestaties van windturbines in de overdrukruimte van het Powerdak 1.0.⁹ Met behulp van basale modellering in MS Excel is getracht een indruk te krijgen van de energieprestaties van dit concept. In tegenstelling tot de basale rekenmodellen regels voor de Earth, Wind & Fire-klimaatvoorzieningen zijn voor de energieopwekking met windturbines geen gevalideerde modellen beschikbaar. Het conceptuele ontwerp van het Powerdak 1.0 voor hotel BREEZE Amsterdam omvatte een overdrukruimte van 20 x 20m, zie figuur 2.

De ramingen van de potentiële energieopbrengsten zijn gemaakt met behulp van de in het proefschrift omschreven rekenmethodiek en het plaatselijke windprofiel. De berekeningen zijn gemaakt volgens aan de luchttechniek ontleende methodiek, waarvan het zeer de vraag is of deze toegepast kunnen worden zijn op de luchtstromingen in- en door de overdrukruimte. Kwantitatief is deze benadering daarom hoogst onzeker, maar de kwalitatieve aspecten kunnen waardevol zijn bij een eventuele verdere ontwikkeling. In de buitenwanden zijn 12 windturbines geprojecteerd, met daar tussenin overheaddeuren of rolluiken, die al naar gelang de windrichting worden geopend of gesloten. De verhouding tussen het vrije wandoppervlak en het totale rotoroppervlak is door optimalisatie bepaald op 3:1. De jaarlijkse energieproductie van deze windcentrale is berekend op ≈ 27.500 kWh, overeenkomend met ≈ 2.300 kWh per turbine. Er zijn verschillende redenen die hebben geleid



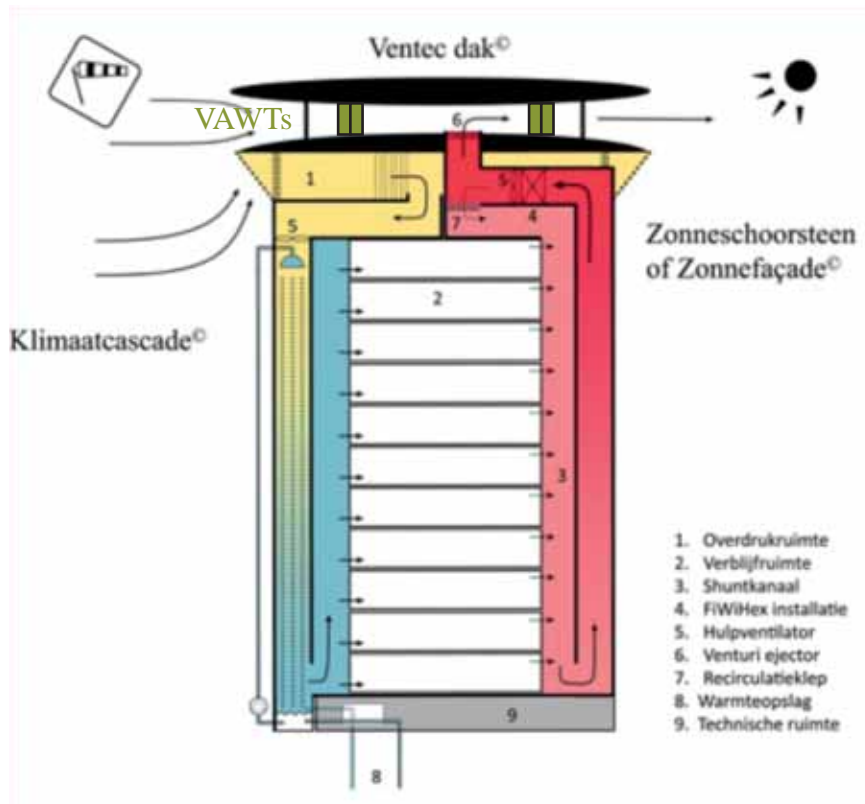
Figuur 2 - Principe Powerdak 1.0 - Windcentrale in overdrukruimte

tot het loslaten van dit concept, te weten:

1. De berekende energieproductie is gering.
2. De investeringskosten van de windturbines, en de benodigde regeltechniek zijn hoog, waardoor geen rendabele exploitatie van een dergelijke windcentrale mogelijk is.
3. Het systeem is door de windrichtingafhankelijke regeling gecompliceerd en onderhoudsgevoelig.
4. Windenergie moet concurreren met zonne-energie, en zal het hierbij af moeten leggen tegen de goedkoper te produceren energie met PV en/of PVT-collectoren.
5. De geveloverstekken, noodzakelijke windvangers voor de overdrukruimte, zijn kostbare, architecturaal ongewenste en constructief moeilijk te realiseren elementen. Deze zijn in principe niet meer nodig.

HET POWERDAK 2.0

Gezien de geringe energieopbrengst en de complexe en dure uitvoering van het Powerdak 1.0 werd besloten de functie van het Ventecdak te verbreden. De verhoogde windsnelheden in de pseudo-venturi kunnen namelijk, naast het creëren van onderdruk t.b.v. het afzuigstelsel, ook efficiënt worden geëxploiteerd voor energieopwekking met behulp van Verticale-As-Windturbines (VAWTs). In het Powerdak 2.0 maken de turbines gebruik van de verhoogde windsnelheid, waardoor de energieopbrengst, die evenredig is met de derde macht van de windsnelheid, in principe substantieel toeneemt. Figuur 3 brengt deze optie beeld. De problematische geveloverstekken –zie punt 5 hiervoor- zijn in principe niet meer nodig.



Figuur 3 - EWF-concept 1.0 met Powerdak 2.0

Het Powerdak 2.0 is in de tweede helft van 2014 ontwikkeld op basis van door de afdeling Building Physics & Systems (BPS) van TU/e uitgevoerde CFD simulaties en berekeningen. Hierbij werd niet alleen de morfologie van het dak geoptimaliseerd (Blocken en van Hooff 2016A), maar tevens onderzoek gedaan naar het optimale bladprofiel van de te installeren VAWTs (Blocken, B. 2016B).

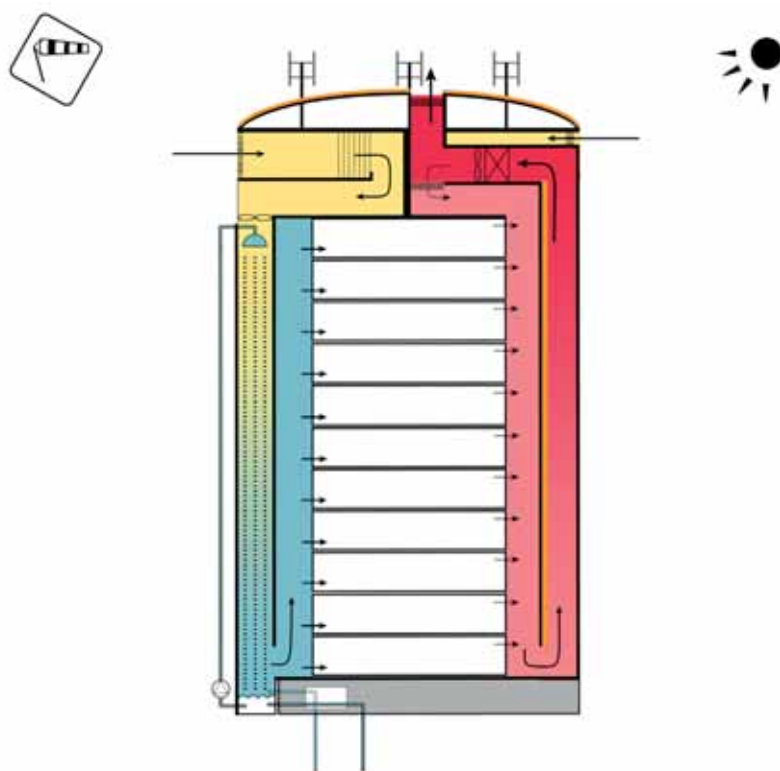
In eerste instantie lieten de simulaties veelbelovende energieopbrengsten zien, maar de uiteindelijke schatting van de stroomproductie van het Powerdak 2.0 was echter beduidend lager dan verwacht (Blocken, B. 2016C). De geschatte aerodynamische jaaropbrengst van een windpark op een denkbeeldig gebouw van 50 m hoog met een dak van 20x20 m op de locatie Schiphol met 16 VAWTs in carréopstelling, rotorhoogte 3 m, rotordiameter \varnothing 3,5m is \approx 75.000 kWh. Als het rendement van generator en omvormer op 80% wordt gesteld is de jaarlijkse stroomproductie maximaal \approx 3.750 kWh per turbine. Deze lage opbrengst is volgens de auteur te wijten zijn aan een combinatie van omstandigheden:

1. Een relatief lage windsnelheid in het Powerdak 2.0: De theoretische windsnelheid in de geoptimaliseerde pseudo-venturi zonder turbines is met behulp van CFD berekend op \approx 1,25 keer de referentiwindsnelheid op dezelfde hoogte. Door de inbouw van windturbines neemt de luchtweerstand van het dak echter toe waardoor er meer lucht om het dak heen stroomt en minder door de pseudo-venturi, het zogenaamde blokkeereffect. Aangezien de energieproductie van windturbines evenredig is met de derdemacht van de windsnelheid heeft dit grote consequenties. Experts schatten de verhoging van de energieproductie als gevolg van het venturi-effect op slechts \approx 20% hetgeen veel te weinig is om de constructiekosten van het bovendak van de pseudo-venturi te rechtvaardigen.
2. De carréopstelling van de turbines, waardoor, afhankelijk van de windrichting, sommige turbines in elkaars zog staan dan wel werken op lagere windsnelheid omdat de eerste rij de wind voor de tweede rij turbines afremt
3. Een te lage prognose van de energieopbrengst van het theoretische VAWT-model met geoptimaliseerd bladprofiel dat bij de CFD-modellering is gebruikt, die overigens ook niet is gevalideerd. Om de werkelijke energieopbrengst van de te installeren VAWTs te kunnen bepalen zou hiervan een fysiek model moeten worden gebouwd en getest. Een desbetreffend projectvoorstel

is destijds voor subsidiëring bij RVO.nl ingediend, maar werd niet gehonoreerd- zie hierna.

Door de hoge kosten en de lage energieopbrengst van het windpark is een kosteneffectieve exploitatie van het Powerdak 2.0 vrijwel onmogelijk. De vergelijking dringt zich hierop met het PowerNEST van Ibis Power, dat sterk op het Powerdak 2.0 is geïnspireerd. De kWh-prijs van het PowerNEST wordt geschat op € 0,40 voor wind + zon en op € 0,80 voor wind sec (Bronsema B. 2017B). Deze cijfers zijn gebaseerd op een dakhoogte van ca. 32 m op een locatie in de stad Utrecht.

op basis van door de afdeling Building Physics & Systems (BPS) van TU/e uitgevoerde CFD simulaties en berekeningen. Hierbij werd de morfologie van het dak geoptimaliseerd in combinatie met ramingen van de energieopbrengsten (Blocken, B. 2016D en 2016E). De geschatte aerodynamische jaaropbrengst van een windpark op een denkbeeldig gebouw van 50 m hoog met een dak van 20x20 m op de locatie Schiphol met 16 VAWTs in carréopstelling, rotorhoogte 3 m, rotordiameter \varnothing 3,5m is \approx 70.000 kWh. Als het rendement van generator en omvormer op 80% wordt gesteld is de jaarlijkse stroomproductie maxi-



Figuur 4 – EWF-concept 2.0 met Powerdak 3.0

HET POWERDAK 3.0

Om de ambitie van een energieneutraal hotel toch te kunnen realiseren werd door het consortium besloten het onderzoek verder te richten op een gekromd dak met VAWTs onder de open hemel, het Powerdak 3.0- zie figuur 4.

Bij een gekromd dak wordt de snelheid van de aanstromende wind plaatselijk verhoogd, waardoor de energieopbrengst van de windturbines substantieel kan worden vergroot. Het Ventecdak en de problematische geveloverstekken zijn in dit concept verdwenen waardoor een grote kostenbesparing wordt gerealiseerd. Het blokkeereffect van het Ventecdak bestaat niet meer waardoor potentieel ook een hogere energieopbrengst mogelijk is. Het Powerdak 3.0 is in 2015 ontwikkeld

maal \approx 3.500 kWh per turbine. Dat is \approx 7% minder dan voor Powerdak 2.0 werd geraamd, maar door de veel eenvoudiger dakvorm zou het in principe een kosteneffectief model kunnen zijn.

Voor hotel BREEZE Amsterdam met een hoogte van \approx 36 m en een dak van 20x36,7 m werd met 24 turbines een jaarlijkse aerodynamische opbrengst geraamd van \approx 124.000 kWh, resulterend in een stroomopbrengst van \approx 4.100 kWh per turbine. Zonder subsidie ligt de kWh prijs in de orde van € 0,25. Met subsidie is het Powerdak 3.0 op hotel BREEZE Amsterdam qua rentabiliteit een randgeval. Een grotere bouwhoogte en een ligging dicht bij de kuststrook zou de rentabiliteit positief beïnvloeden. Door de hoogte van de rotor te vergroten van 3 \rightarrow 4m zou wellicht een rendabele exploitatie mogelijk zijn.

In de berekeningen is nog geen rekening gehouden met een beperkende factor, die het plaatsen van turbines op daken sterk negatief kan beïnvloeden. Doordat de turbines laag in de turbulente grenslaag van de wind staan, is de windstroming behoorlijk turbulent, veel turbulenter dan bijvoorbeeld de stroming rond grote windturbines. Dit heeft tot gevolg dat de turbines door de traagheid van het systeem een groot deel van de tijd niet op de optimale rotatiesnelheid draaien, wat de efficiëntie van het systeem significant verkleint. Dit effect is een van de verklaringen van het feit dat veel turbines op daken een veel lagere opbrengst hebben dan verwacht. Als het rendement van dergelijke turbines al door de fabrikant is opgegeven, is dat meestal op basis van metingen in een windtunnel, waarin de windsnelheid constant is. De opbrengsten vallen daardoor in de praktijk vaak tegen. Een van de aspecten waarop een kleine windturbine op ontworpen zou moeten worden, is daarom ook hoe snel het opgewekte vermogen afneemt als de turbine niet op het optimale toerental draait.

DE WINDTURBINE

De bovenvermelde opbrengsten van de windturbine in het Powerdak zijn gebaseerd op een door de afdeling Building Physics & Systems (BPS) van TU/e ontwikkeld virtueel turbinemodel, waarmee potentieel veel betere prestaties mogelijk zouden zijn dan van op de markt verkrijgbare VAWTs. Volgens BPS zou het risico om VAWTs op de markt te kopen groot zijn omdat veel van deze turbines onder hun specificaties presteren. De bedoeling was op basis van dit onderzoek zelf een dedicated VAWT voor het Powerdak te ontwikkelen, aerodynamisch geoptimaliseerd door BPS en elektromechanisch geoptimaliseerd door het Equipment & Prototype Centre (EPC) van TU/e. Een en ander zou moeten worden gerealiseerd door de bouw van een prototype en de beproeving hiervan in de windtunnel. Een subsidieaanvraag hiervoor werd echter door TKI Urban Energy niet gehonoreerd. Als laatste poging het Powerdak 3.0 voor hotel BREEZE Amsterdam te redden zijn windtunneltesten uitgevoerd met een op papier veelbelovende windturbine van Amerikaanse makelij. De resultaten hiervan waren teleurstellend en bevestigden de heersende opvatting t.a.v. de magere energieprestaties van VAWTs. Omdat met virtuele windturbines uiteraard geen Powerdak kan worden gebouwd, heeft Dutch Green Company, mede onder druk van de planontwikkeling, helaas moeten besluiten hotel BREEZE Amsterdam zonder Powerdak uit te voeren. De doelstelling om het hotel

als Zero Energy Building uit te voeren werd hierdoor ernstig gefrustreerd.

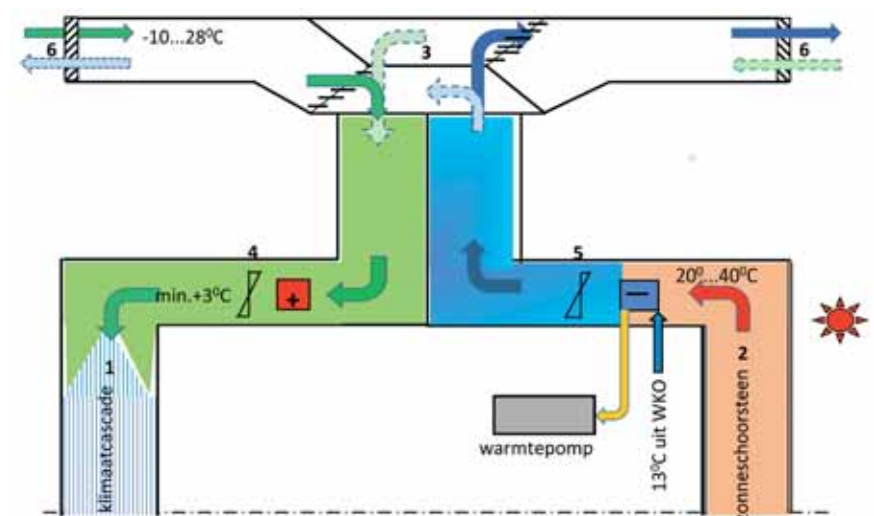
DE VENTEC-WISSEL¹¹

Om desondanks nog enigszins van de wind gebruik te kunnen maken is de Ventec-wissel ontwikkeld, waarmee tevens een kortsluitveilige luchtaanzuiging wordt gerealiseerd - zie figuren 5 en 6. In de dakrand zijn in tegenover elkaar gelegen gevels de buitenlucht aanzuigen en afblaasroosters (6) gepositioneerd. De openingen zijn verborgen achter een bouwkundige open gevelafwerking en voorzien van een druppelvangert en insectengaas. De roosters worden aangesloten op een wisselklepsectie, de Ventec-wissel (3), die windrichtingafhankelijk de kleppen stuurt waardoor het luchtuitblaasrooster zich altijd aan de lijzijde van het gebouw bevindt, en het luchtaanzuigrooster altijd aan de loefzijde zit. Idealiter wordt de Ventec-wissel 4-zijdig uitgevoerd, maar bij hotel BREEZE Amsterdam was dat niet mogelijk. De hulpventilatoren voor luchttoevoer (4) en luchtafvoer (5) worden alleen ingeschakeld als de druk die opgewekt wordt door de kli-

maatcascade (1) en/of zonneshoortsteen (2) niet toereikend is om de benodigde overdruk en onderdruk in de toevoer en afzuigkanalen te handhaven.

DE TOEKOMST VAN WINDENERGIE IN DE GEBOUWDE OMGEVING

Ondanks de tegenvallende prestaties van Urban Turbines in de voorgaande jaren moet windenergie in de gebouwde omgeving op de agenda van het duurzaamheidsdiscours blijven staan. Het is daarom van belang het onderzoek naar een rendabel Powerdak voor de Nederlandse situatie voort te zetten. Dit onderzoek zal zich vooral moeten richten op ondersteuning en validering van het lopende wetenschappelijke onderzoek vanuit de praktijk en het in praktijk brengen van de onderzoeksresultaten. Het gaat hierbij om meer dan de ontwikkeling van Urban Turbines. Ook de bredere context van architectuur, bouwtechniek, geluidsoverlast moet erbij zijn betrokken. Optimalisering van dakvormen, de ontwikkeling van dakspoilers, de architecturale inpassing en uitstraling, de constructieve



Figuur 5 - Ventec-wissel



Figuur 6 - Techniekrimte 10e verdieping met Ventec-wissel (tekening Van Delft)

en bouwtechnische integratie, trillingen en akoestische aspecten, alle moeten grondig worden bestudeerd. Een niet onbelangrijke vraag is verder wat de potentiële bijdrage van windenergie in de gebouwde omgeving kan zijn en welke gebouwen zich hiervoor lenen. Wat is de minimumgebouwhoogte in de verschillende windsnelheidsgebieden waarin windenergie rendabel kan worden opgewekt. Wat zijn de te verwachten kWh prijzen voor de verschillende configuraties, enzovoorts. De meest geschikte turbine hiervoor is de verticale-as-windturbine. Deze biedt zowel aerodynamisch, akoestisch als esthetisch voordelen boven de bekende horizontale-as-windturbine. De turbine is bijvoorbeeld windrichtingonafhankelijk en daardoor minder gevoelig voor de turbulentie. Door de kleinere diameter kunnen ze in een windpark op het dak van hoge gebouwen worden gegroepeerd. Door het ontbreken van masten zijn de aanlegkosten geringer dan bij een windpark op land. Tevens kunnen ze dienen als eyecatcher of landmark van gebouwen. Met behulp van een gekromd dak kan de windsnelheid boven het dak met een factor van circa 1,2 worden opgevoerd waardoor de energieopbrengst in principe met circa 70% wordt vergroot. Hier staat tegenover dat door de onderlinge beïnvloeding van de turbines de opbrengst drastisch kan worden verlaagd. Zie bijvoorbeeld figuur 7, een windpark met 18 turbines. Bij een gunstige windrichting, loodrecht op de rij van 6 turbines, zou deze rij de maximale (100%) windenergie genereren. Als wordt aangenomen dat de windsnelheid bij de tweede rij met $\approx 20\%$ is afgenomen, draagt deze rij turbines slechts $\approx 50\%$ bij. De turbines die parallel zijn aan de windrichting dragen, m.u.v. de voorste, helemaal niet bij. De gemiddelde opbrengst per turbine is dan ruwweg $\approx 44\%$. Bij een windrichting loodrecht op de rij van 5 turbines is de gemiddelde opbrengst per turbine slechts $\approx 36\%$. De winst ten gevolge van de hogere windsnelheid door het gekromde dak weegt daar niet tegenop. Het is dus van groot belang om de configuratie van het windpark af



Figuur 7 - Windpark op hoogbouw (OMA architecten/Royal HaskoningDHV)

te stemmen op de overheersende windrichting. Ten behoeve van hotel BREEZE Amsterdam heeft de TU Eindhoven met behulp van simulatietechnieken een fundamentele studie gemaakt van de aerodynamische- en energieprestaties van de rotorbladen van verticale turbines bij verschillende bladprofielen en bladhoeken en bij verschillende krommingen van het dak.

Uiteraard geldt dat de energieprestaties van een zogeheten Powerdak 3.0 met windturbines afhankelijk is van vele variabelen: het windsnelheidsgebied, het dakoppervlak, de kromming van het dakoppervlak, het aantal turbines op het dak, de configuratie van het windpark, de diameter en de hoogte van de rotoren en het rendement (vermogenscoëfficiënt $C_{p,wind}$) van de turbine. Op basis van door de auteur uitgevoerde voorlopige verkenningen met conservatieve aannamen wordt voor het polderlaagland, waarvoor het windstation Schiphol representatief is, een jaarlijkse energieopbrengst geschat van 300-500 kWh per m^2 dakoppervlak voor gebouwhoogten oplopend van 40-160 m en turbinehoogten van 3 – 5 meter.

Vergeleken met de gemiddelde opbrengst van 80 kWh per m^2 voor een PV-zonnedak zijn dit superieure waarden: een Powerdak 3.0 kan, afhankelijk van de locatie en de hoogte, een factor 4 tot 6 meer energie leveren dan een PV-zonnedak. Overigens is het zeer goed mogelijk tussen de windturbines zonnepanelen of -folie aan te brengen, waardoor de energieprestatie van het dak nog wordt verhoogd.

■ SLOTOPMERKING

Van de drie ingrediënten van het Earth, Wind & Fire concept voor Natuurlijke Airconditioning is de exploitatie van WIND ongetwijfeld het weerbarstigst. Tegenover de constante zwaartekracht van EARTH, die in de klimaatcascade wordt ingezet, en de voorspelbare zonnestraling van FIRE die in de zonnescorsteen wordt benut, staat de onvoorspelbare, en in tijd, richting en sterkte wisselende wind. Voor het realiseren van energieneutrale hoogbouw is het van groot belang het onderzoek naar windenergie in de gebouwde omgeving voort te zetten.

1. Nena & Kim Wilde in Anyplace, Anywhere, Anytime
2. Dutch Green Company – TU Eindhoven – Bronsema Consult
3. Het onderzoek werd uitgevoerd met subsidie van TKI ENERGEO
4. Powerdak: Een dak waarmee energie kan worden opgewekt met behulp van wind en zon

5. Hét Europese subsidie programma voor Onderzoek en Innovatie in Europa.
6. Van Vent en Tect, Latijn voor Wind en Dak, maar ook voor Ventilation en Technology
7. Voor een omschrijving van het EWF-concept zie TVVL Magazine 01/2018 pag. 35 e.v.
8. Natuurlijke Airconditioning – Earth, Wind & Fire ISBN 978 90 5972 762 5
9. Windenergie voor EWF Hotel BREEZE Amsterdam "HET POWERDAK 1.0" – maart 2014
10. Overeenkomstig het gebouw Powerdak 2.0
11. Naar een idee en ontwerp van Joost Vermeer, Van Delft Groep

■ REFERENTIES

- Blocken, B. en van Hooff, T. 2016A Powerdak BREEZE – deel 1: Numeriek onderzoek naar aerodynamische prestaties – parameterstudie. www.bronconsult.org
- Blocken, B. 2016B. Powerdak BREEZE – deel 2: Aerodynamische analyse bladprofiel voor verticale-as-windturbines d.d. 16 mei 2016. www.bronconsult.org
- Blocken, B. 2016C. Powerdak BREEZE – deel 3: Schatting van windenergieopbrengsten voor het Powerdak 2.0 d.d. 16 mei 2016. www.bronconsult.org
- Blocken, B. 2016D. Powerdak BREEZE – deel 4: Schatting van windenergieopbrengsten voor het Powerdak 3.0 d.d. 22 mei 2016. www.bronconsult.org
- Blocken, B. 2016E. Powerdak BREEZE – deel 5: Schatting van windenergieopbrengsten voor het hotel met Powerdak 3.0 d.d. 26 juni 2016. www.bronconsult.org
- Bronsema B. 2013. Earth, Wind & Fire – Natuurlijke Airconditioning. Proefschrift TU Delft. Uitgeverij Eburon Delft - ISBN 978 90 5972 762 5. <https://tudelft.on.worldcat.org/oclc/845637529>
- Bronsema B. 2017A. Energieneutrale hoogbouw kan niet zonder wind - Turbines aan de top. Ingenieur 2017 nr.6
- Bronsema B. 2017B. Het PowerNEST van Ibis Power nader bekeken. www.bronconsult.org
- Bronsema, B. et al 2018. Natuurlijke airconditioning: Waar wachten we nog op? TVVL Magazine 01/2018
- Bronsema, B. et al 2018. Earth, Wind & Fire: Evolutie van een innovatie (1) - Natuurlijke ventilatie en luchtbehandeling via klimaatcascade. TVVL Magazine 01/2018