



Rijksdienst voor Ondernemend
Nederland

Natuurlijke Ventilatie en Wind

EOS-LT Earth, Wind & Fire

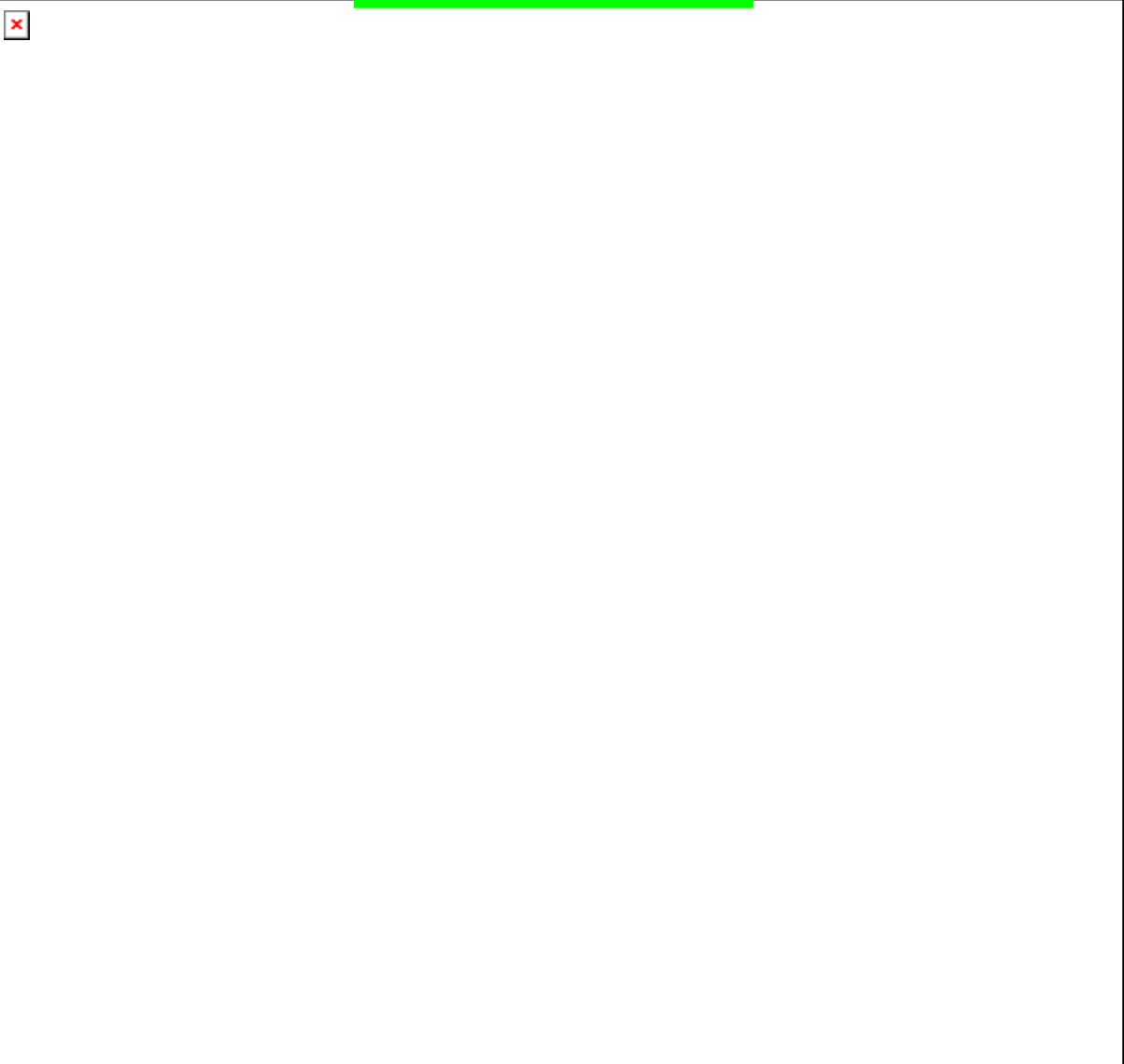
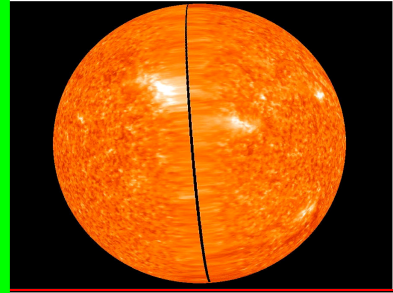
Datum December 2011

TU Delft, Ben Bronsema

In opdracht van SenterNovem (nu Rijksdienst voor
Ondernemend Nederland)

Publicatienr RVO-164-1501/RP-DUZA
www.rvo.nl

Dit rapport is tot stand gekomen in opdracht van het ministerie van
Economische Zaken.



Technische Universiteit Delft

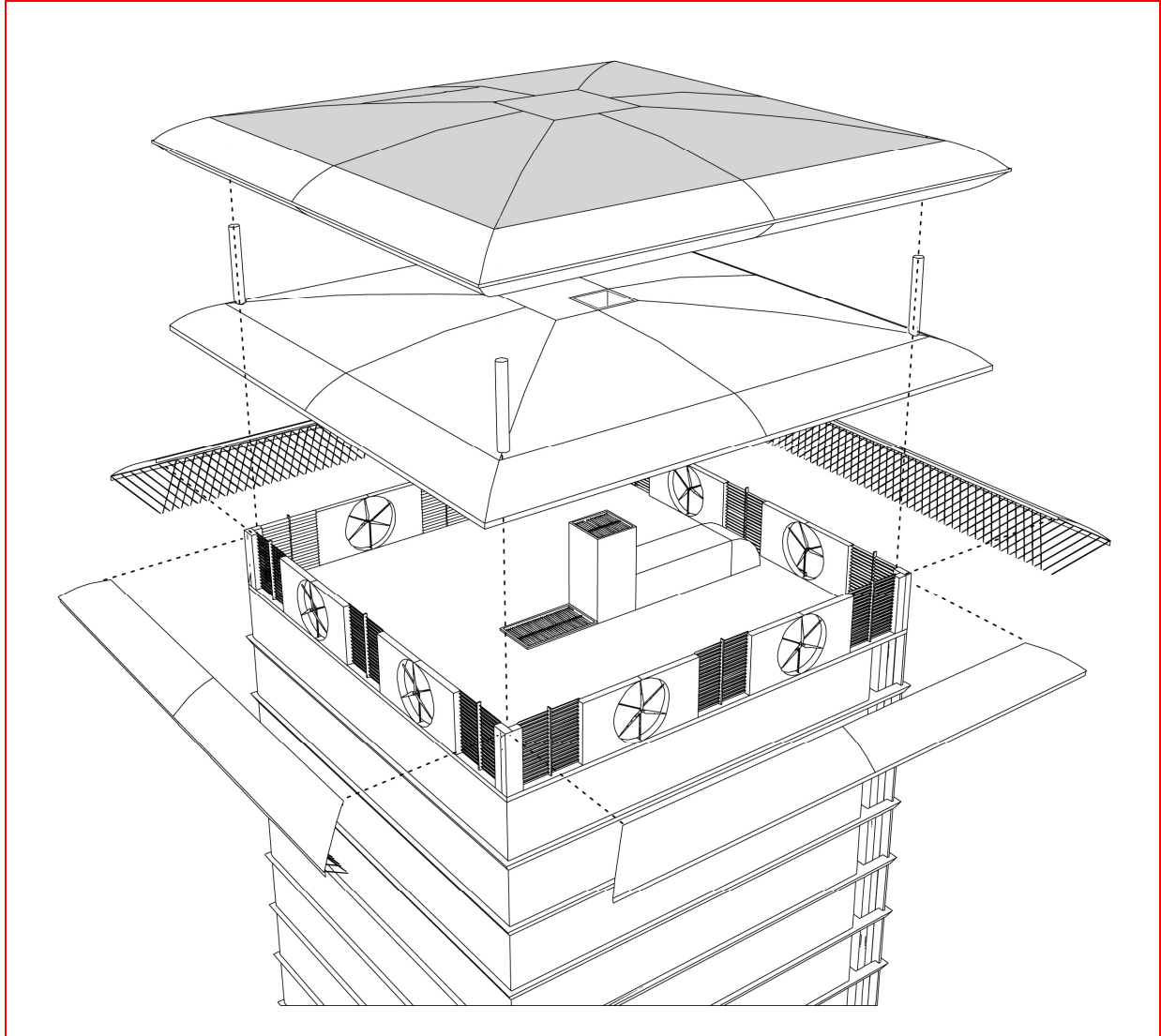
“EARTH, WIND AND FIRE”

AIRCONDITIONING ZONDER VENTILATOREN

(II) Thema Wind:

Onderzoek Natuurlijke Ventilatie, Wind en het Ventecdak[®]

Auteur Ben Bronsema –REHVA Fellow & Honorary Fellow
Eindrapport December 2011



VOORWOORD

Het onderzoek Natuurlijke Ventilatie en Wind is gestart in februari 2008. Het vooronderzoek werd afgesloten met een tussenrapportage concept B d.d. mei 2009. Op basis hiervan is het onderzoek voortgezet, zowel in de breedte als in de diepte.

Het onderzoek is verbreed met de integratie van windturbines in het ontwikkelde Ventecdak[®], die tezamen met een PV dakbedekking elektrische energie produceren voor de sproeiwaterpomp en de hulpventilatoren in het Geo-Klimaatconcept[®]. Verder zijn randvoorwaarden geformuleerd voor optimalisering van de prestatie van het Ventecdak[®] in een stedenbouwkundige context.

De verdieping van het onderzoek omvat voornamelijk de uitwerking van verschillende mogelijkheden het dak langs de weg van modelleren, simuleren, kalibreren en valideren te gebruiken als drijvende kracht voor ventilatie, zowel luchttoevoer als luchtafzuig. Het simpele analytische model van de venturi uit het vooronderzoek is in een buitengewoon productief samenspel van numerieke simulaties en windtunnelonderzoek verder ontwikkeld naar gevalideerde modellen voor de dimensionering en de prestatieberekening van het geavanceerde Ventecdak[®]. Dat intuïtieve en schijnbaar logische veronderstellingen hierbij soms op verrassende wijze werden gelogenstraft door de uitkomsten van het onderzoek droeg niet weinig bij aan het enthousiasme van het researchteam.

Verschillende wetenschappelijke publicaties, waarvan één zelfs de prestigieuze *Best Paper Award Buildings and Environment* kreeg, hebben het Ventecdak[®] ook internationaal onder de aandacht gebracht.

Het Ventecdak[®] is een dominant architecturaal element en de architect heeft voor het ontwerp een grotere vrijheid nodig dan de tot dusver onderzochte dakvorm hem geeft. Daarom is vervolgonderzoek nodig voor daken van verschillende geometrie en vormen. De hiervoor vereiste CFD techniek met tijdsafhankelijke Large Eddy Simulaties kost extreem veel rekentijd en aanvullende financiering hiervoor, inclusief validatie in de windtunnel, is noodzakelijk.

Het was een buitengewoon genoegen dit onderzoek uit kunnen voeren met de zeer capabele en enthousiaste medewerkers van de TU Delft, de TU Eindhoven en Peutz. In het bijzonder worden genoemd Prof. Dr.Ir. Bert Blocken, Ir. Twan van Hooff en Dipl.-Ing. Marija Trcka van de TU Eindhoven, Dr. Regina Bokel en Dr. Ir. Wim van der Spoel van de TU Delft, en Dr. Ir. Lourens Aanen en Ing. Harry Bruggema van Peutz.

Delft, januari 2012,
Ing. Ben Bronsema

INHOUDSOPGAVE

1. EARTH, WIND & FIRE – IN HET KORT	9
1.1 CONSIDERANS	9
1.2 GEBOUWGEBONDEN ENERGIEGEBRUIK VAN GEBOUWEN	9
1.3 EARTH, WIND & FIRE: NAAR EEN ENERGIENEUTRAAL GEBOUW	9
1.4 VENTECDAK [®]	10
1.5 KLIMAATCASCADE [®]	11
1.6 ZONNESCHOORSTEEN OF ZONNEFAÇADE [®]	11
1.7 EEN GEBOUW ALS KLIMAATMACHINE	11
1.8 POSITIONERING EN DEMARCATIES VAN HET ONDERZOEK	11
1.9 ORGANISATIESTRUCTUUR EN FINANCIERING	12
1.10 ONTWIKKELTRAJECT	13
1.11 RESULTATEN	14
1.12 DE TRIAS ENERGETICA	14
1.13 DEELSTUDIES	14
1.14 VOOR WELKE GEBOUWEN IS HET EARTH, WIND & FIRE CONCEPT BEDOELD?	15
1.15 VOOR WELKE ARCHITECTUUR KOMT HET EARTH, WIND & FIRE CONCEPT IN AANMERKING?	15
1.16 IS HET EARTH, WIND & FIRE EEN TOTAALCONCEPT?	15
1.17 IS HET EARTH, WIND & FIRE CONCEPT ALLEEN GESCHIKT VOOR NIEUWBOUW?	15
1.18 MOGEN BIJ HET GEO-KLIMAATCONCEPT [®] DE RAMEN OPEN?	15
1.19 POSITIONERING VAN EARTH, WIND & FIRE IN DE KLIMAATTECHNIEK	15
1.20 SPIN-OFF EFFECTEN	16
1.21 VERANTWOORDING	16
1.22 PUBLICATIES	16
2. ARCHITECTUUR EN KLIMAATTECHNIEK	17
2.1 HISTORISCHE ONTWIKKELING	17
2.2 DE STATUS-QUO ANNO 2011	17
2.3 INTEGRATIE VAN DOMEINEN	17
2.4 ONDERZOEK EARTH, WIND & FIRE	18
2.5 UITDAGINGEN EN KANSSEN VOOR DE ARCHITECTUUR	18
2.6 DRIE SUBCONCEPTEN	19
2.7 INTRODUCTIE THEMA EARTH	19
2.8 INTRODUCTIE THEMA WIND	19
2.9 INTRODUCTIE THEMA FIRE	20
2.10 POSITIONERING EN SYSTEEMGRENZEN VAN HET ONDERZOEK	21
2.11 ENERGIEGEBRUIK EN DE KWALITEIT VAN HET BINNENMILIEU	21
2.12 FAALKOSTEN	21
3. KORTE INHOUD	23
3.1 WIND, LUCHTKWALITEIT EN VENTILATIE	23
3.2 WINDVANGERS	24
3.3 MODELLERING, VALIDATIE EN ONTWERP	25
3.4 ENERGIEOPWEKKING MET HET VENTECDAK [®]	27
4. BEGRIPPEN, EENHEDEN EN SYMBOLEN	29
4.1 BEGRIPPEN	29
4.2 EENHEDEN EN SYMBOLEN RUIMTE EN TIJD	32
4.3 EENHEDEN EN SYMBOLEN WARMTE	32
4.4 EENHEDEN EN SYMBOLEN KLIMAATREGELING	33
4.5 EENHEDEN EN SYMBOLEN STROMINGSLEER	34
5. HET WINDKLIMAAT VAN NEDERLAND	35
5.1 INLEIDING EN SAMENVATTING	35
5.2 DE MENGLAAG (ATMOSFERISCHE GRENSLAAG)	35
5.3 WINDSNELHEIDSPROFIEL	36
5.4 DE DAVENPORT RUWHEIDSCCLASSIFICATIE	38

5.5	TEMPERATUURINVLOED.....	38
5.6	DAGELIJKSE VARIATIES VAN DE WIND.....	39
5.7	INVLOED VAN OBSTAKELS EN TERREINRUWHEID OP DE WIND	39
5.8	WINDVLAGEN EN TURBULENTIE.....	40
6.	WINDSTATISTIEKEN.....	43
6.1	INLEIDING EN SAMENVATTING	43
6.2	DE BEAUFORT-SCHAAL	43
6.3	CLASSIFICATIE VAN WINDGEBIEDEN IN NEDERLAND	43
6.4	WINDROZEN	44
6.5	FREQUENTIEVERDELING WINDRICHTING	45
6.6	FREQUENTIEVERDELING WINDSNELHEDEN.....	46
6.7	FREQUENTIETABEL WINDSNELHEID SCHIPHOL (HYDRA PROJECT)	47
6.8	NPR 6097:2006 (NL).....	48
7.	HET (WIND)KLIMAAT VAN DE STAD	49
7.1	INLEIDING EN SAMENVATTING	49
7.2	HET DOOSMODEL	49
7.3	WIND IN STEDELIJKE GEBIEDEN.....	50
7.4	HET WARMTE-EILAND EFFECT	51
7.5	KWALITEIT VAN DE BUITENLUCHT	58
7.6	HORIZONTALE VERSPREIDING VAN VERKEERSEMISSIES	60
7.7	VERTICALE VERSPREIDING VAN VERKEERSEMISSIES	60
7.8	GROOTSTE GROENE GEVEL VAN EUROPA IN ROTTERDAM (WWW.ROTTERDAMCLIMATEINITIATIVE.NL).....	62
7.9	PLAATSELIJKE LUCHTKWALITEIT	63
7.10	RELATIE BINNEN- EN BUITENLUCHTKWALITEIT.....	63
7.11	VERVOLGONDERZOEK.....	64
8.	WINDSTROMINGEN OM GEBOUWEN	65
8.1	INLEIDING EN SAMENVATTING	65
8.2	STROMINGSPATRONEN	65
8.3	WINDDRUK OP GEBOUWEN.....	66
8.4	WINDDRUKCOËFFICIËNT	68
8.5	CP GENERATOR.....	70
9.	EEN OPTIMALE AANZUIGLOCATIE.....	71
9.1	ALGEMEEN.....	71
9.2	LUCHTKWALITEIT	71
9.3	MOLEST EN BIOTERRORISME	71
9.4	KORTSLUITING	71
9.4	EEN OPTIMALE AANZUIGLOCATIE.....	72
9.5	HET DAK ALS WINDVANGER.....	72
10.	WINDVANGERS.....	73
10.1	DE BADGIR.....	73
10.2	MODERNE WINDVANGERS	74
11.	DE WIND ALS DRIJVENDE KRACHT VOOR VENTILATIE	75
11.1	INLEIDING EN SAMENVATTING	75
11.2	NATUURLIJKE DECENTRALE LUCHTTOEVOER VIA DE GEVEL	75
11.3	NATUURLIJKE CENTRALE LUCHTTOEVOER DOOR OVERDRUK.....	78
11.4	NATUURLIJKE CENTRALE LUCHTAFVOER DOOR ONDERDRUK.....	79
11.5	PRINCIPE VAN EEN VENTURI	80
11.6	TOEPASSING VAN HET VENTURI-CONCEPT	81
11.7	ANALYTISCH REKENMODEL	84
11.8	ONDERDRUKKEN IN DE KEEL VAN DE PSEUDO-VENTURI.....	86
11.9	WINDVERDIEPING	87
11.10	COMBINATIE OVERDRUK EN ONDERDRUK.....	88
11.11	VLEUGELCONCEPT – VENTILEREN MET COANDA?.....	88
11.12	VENTILATIE MET BEHULP VAN AERODYNAMISCHE DRUKVERSCHILLEN.....	89

12.	HET DAK ALS WINDVANGER	93
12.1	INLEIDING	93
12.2	LUCHTTOEVOER MET OVERDRUKKAMER EN AFZUIGING MET VENTURI-EJECTOR	93
12.3	GLOBALE KWANTIFICERING	94
13.	GLOBALE DIMENSIONERING	97
13.1	SAMENVATTING	97
13.2	VENTILATIECAPACITEIT	97
13.3	LUCHTTOEVOERSYSTEEM.....	98
13.4	LUCHTAFZUIGSYSTEEM.....	99
13.5	GELIJKTIJDIGHEID VAN ZON EN WIND	100
14.	DAKKAPPEN	103
14.1	INLEIDING EN SAMENVATTING	103
14.2	TRADITIONELE DAKKAPPEN	103
14.3	PASSIEVE DAKKAPPEN.....	104
14.4	ROTTERENDE DAKKAPPEN	105
14.5	HYBRIDE DAKKAPPEN	105
14.6	DAKKAPPEN ALS ARCHITECTONISCHE EXPRESSIE.....	106
15.	DE STEDENBOUWKUNDIGE CONTEXT	111
15.1	INLEIDING EN SAMENVATTING	111
15.2	STEDENBOUWKUNDIGE KARAKTERISTIEKEN.....	111
15.3	OPTIMALE STEDENBOUWKUNDIGE CONTEXT VOOR EEN ZONNESCHOORSTEEN OF ZONNEFACADE® ..	112
15.4	OBSTAKELS	113
15.5	INVLOED VAN DE BEBOUWINGSDICHTHEID.....	115
15.6	WINDTUNNELMETINGEN	117
15.7	VERVOLGONDERZOEK.....	118
16.	NUMERIEKE STROMINGSSIMULATIE VENTECDAK®	119
16.1	SAMENVATTING	119
16.2	INLEIDING CFD	119
16.3	BEPERKINGEN VAN CFD	120
16.4	UITVOERING VAN DE CFD SIMULATIES	120
16.5	VERBAND MET ANDERE MODELLEN.....	120
16.6	ANALYTISCH REKENMODEL VENTECDAK®	121
16.7	INITIËLE CFD SIMULATIES VENTECDAK®	121
16.8	CFD SIMULATIES GEBASEERD OP WINDTUNNELMETINGEN	127
16.9	PRESTATIES VAN HET VENTECDAK® MET ACTIEVE VENTURI-EJECTOR	131
16.10	VENTECDAK® EN ARCHITECTUUR.....	133
16.11	CFD SIMULATIES MET GEREDUCEERD BOVENDAK	133
16.12	VERVOLGONDERZOEK	134
17.	FYSIEKE MODELMETINGEN.....	137
17.1	SAMENVATTING	137
17.2	INLEIDING	137
17.3	DE WINDTUNNEL	138
17.4	HET SCHAALMODEL	139
17.5	MEETMETHODEN.....	139
17.6	MEETRESULTATEN	140
17.7	DRIJKVERSCHIL ($C_{p_w} - C_{p_l}$).....	141
17.8	HET VENTECDAK® IN DE STEDENBOUWKUNDIGE CONTEXT.....	143
17.9	METINGEN MET ACTIEVE VENTURI-EJECTOR	145
17.10	VERVOLGONDERZOEK	148
18.	DYNAMISCH SIMULATIEMODEL ESP-R	149
18.1	INLEIDING	149
18.2	DYNAMISCHE SIMULATIE MET ESP-R.....	149
18.3	ESP-R SIMULATIES ZONNESCHOORSTEEN.....	150
18.4	ESP-R SIMULATIES KLIMAATCASCADE	150

18.5	CASE STUDY	150
19.	BEREKENING EN ONTWERP	151
19.1	SAMENVATTING	151
19.2	BEREKENING WINDPROFIEL.....	151
19.3	DRUKKEN IN HET VENTECDAK [®]	153
19.4	WINDSTATISTIEK.....	155
19.5	MINIMUM ONTWERPDRUKVERSCHIL	156
19.6	MAXIMUM ONTWERPDRUKVERSCHIL	156
19.7	REGELING.....	156
19.8	INVLOED VAN DE TERREINRUWHEID.....	157
20.	WINDENERGIE IN HET VENTECDAK[®]	159
20.1	INLEIDING EN SAMENVATTING	159
20.2	INLEIDING WINDENERGIE	159
20.3	WINDENERGIE	161
20.4	WINDTURBINES IN HET VENTECDAK [®]	162
20.6	TERREINCONDITIES	163
20.7	WINDTURBINES IN DE OVERDRUKKAMER	164
20.8	ENERGIEPRODUCTIE	165
20.9	SPECIFIEKE ENERGIEPRODUCTIE.....	167
20.10	WINDTURBINE IN DE VENTURI-EJECTOR	168
20.11	JAARLIJKS VERLOOP VAN DE ENERGIEPRODUCTIE.....	168
20.12	ENERGIEPRODUCTIE VENTECDAK [®] MET WIND EN ZON	168
20.13	AXIAAL VENTILATOR VERSUS WINDTURBINE.....	169
20.14	VERVOLGONDERZOEK	169
21.	ZONNE-ENERGIE IN HET VENTECDAK[®]	171
21.1	INLEIDING EN SAMENVATTING	171
21.2	DUNNE FILM PV-FOLIE.....	171
21.3	ENERGIEOPBRENGST	172
21.4	JAARLIJKS VERLOOP VAN DE ENERGIEPRODUCTIE	173
21.5	ENERGIEPRODUCTIE VENTECDAK [®] MET ZON EN WIND.....	174
22.	REFERENTIES	175

1. EARTH, WIND & FIRE – IN HET KORT

1.1 Considerans

Energiebesparing in de gebouwde omgeving is een belangrijke opdracht voor de bouwsector. De formele doelstelling binnen de EU is (EP en EC 2010)

“As of 31 December 2020 new buildings in the EU will have to consume “nearly zero” energy and the energy will be “to a very large extent” from renewable sources”

Er mag van worden uitgegaan dat het hier gaat om het gebouwgebonden energiegebruik, waarover in Nederland al in 2008 tussen de belangrijkste actoren in de bouw een soortgelijke doelstelling werd geformuleerd in het zgn. Lente-akkoord (2008). In Europees verband is verder de “20-20-20” afspraak gemaakt, die inhoudt dat in 2020 20% van het energiegebruik in de gebouwde omgeving duurzaam zal worden opgewekt (EP en EC 2009).

Energiebesparing wordt in Nederland, als lid van de Europese Unie, gereguleerd via de Energy Performance of Buildings Directive (CEN 2006). De Energie Prestatie Coëfficiënt van gebouwen EPC wordt regelmatig aangescherpt, en het is in toenemende mate de installatietechniek die te hulp wordt geroepen om hieraan te kunnen voldoen. Dit heeft in de loop van de ontwikkeling geresulteerd in steeds complexere, kwetsbare en onderhoudsgevoelige klimaatinstallaties. Dergelijke installaties leveren vaak niet het gezonde binnenklimaat dat ervan verwacht mag worden en een eenvoudige en intuïtief begrijpelijke bediening wordt door de complexiteit bemoeilijkt. Een saillant voorbeeld hiervan is de zgn. balansventilatie in de woningbouw.

1.2 Gebouwgebonden energiegebruik van gebouwen

Het gebouwgebonden energiegebruik van een gebouw wordt in belangrijke mate vanuit het ontwerp bepaald. De belangrijkste, inter-gerelateerde, elementen van het energetisch ontwerp zijn:

- A. De gebouwschil: Gevelfactor, glaspercentage, bouwfysische kwaliteit;
- B. De klimaatregeling: Klimaatzone, klimaateisen, klimaatsysteem;
- C. Het verlichtingssysteem: Lichtniveaus, daglicht/kunstlicht.

In gebouwsimulatiemodellen wordt van deze gebouwkenmerken uitgegaan, en voor het beoogde “nearly zero energy” gebouw zijn dit de belangrijkste parameters.

Voor het energiegebruik in de praktijk spelen echter ook de volgende factoren een rol:

- D. De gebruiker: Personen- en automatiseringsdichtheid, gebruikersgebonden apparatuur;
- E. Het gebruikersgedrag: Bedrijfstijden, milieumentaliteit;
- F. De kwaliteit van het technisch onderhoud.

Volgens recent onderzoek kunnen deze factoren in gunstige gevallen een vermindering van het energiegebruik opleveren van 20...30%, maar in ongunstige gevallen ook leiden tot een verhoging met 50...100%, beide cijfers gerelateerd aan een gemiddeld gebouw. (Heller, Jonathan en Heater, Morgan 2011). Het “nearly zero energy” concept vraagt dus wel om een nauwkeuriger definitie.

Het onderzoek “*Earth, Wind & Fire – Airconditioning zonder ventilatoren*” is gericht op element B, de klimaatregeling, voor veel gebouwen de grootste energiegebruiker.

1.3 Earth, Wind & Fire: naar een energieneutraal gebouw

Het *Earth, Wind & Fire* concept zorgt voor een gezond, behaaglijk en productief binnenklimaat in gebouwen. De omvang van de installatietechniek wordt tot een minimum beperkt, het energiegebruik wordt drastisch teruggebracht, en de benodigde restenergie wordt door het gebouw zelf opgewekt. Architectuur, bouwmassa, constructies en klimaatvoorzieningen werken zodanig samen dat een bouwwerk, met behoud van architectonische en functionele kwaliteiten, wordt getransformeerd tot een klimaatmachine, geactiveerd door de natuurlijke hulpbronnen van zon, wind, geothermische energie en zwaartekracht: “*AIRCONDITIONING ZONDER VENTILATOREN*”.

Zon, wind, geothermische energie en zwaartekracht kunnen op verschillende manieren worden ingezet voor de klimaatregeling van gebouwen. Na een evaluatie van verschillende mogelijkheden zijn drie subconcepten geselecteerd die in eerste instantie afzonderlijk zijn ontwikkeld en geoptimaliseerd, maar uiteindelijk in een totaalconcept van klimaatregeling een symbiose gaan vormen –zie figuur 1.1

1.4 Ventecdak^{®1}

Het Ventecdak[®] benut positieve winddrukken om ventilatielucht via de Bernoulli-injector en de Klimaatcascade[®] aan het gebouw toe te voeren. Negatieve winddrukken worden gebruikt om het gebouw via de Zonneschoorsteen en de Venturi-ejector af te zuigen. Met dit concept wordt gebruik gemaakt van de goede luchtkwaliteit op grotere hoogte, en door de horizontale scheiding tussen toevoerlucht en afvoerlucht wordt kortsluiting tussen beide luchtstromingen voorkomen.



Figuur 1.1 - Principes Earth, Wind & Fire concept

In de overdrukkamer worden windturbines aangebracht, waarmee hogere vermogenscoëfficiënten kunnen worden gerealiseerd dan met vrijstaande turbines. Potentiële geluidsproblemen zijn door de inpandige situering gemakkelijk oplosbaar zijn, en het onderhoud kan binnen het gebouw worden uitgevoerd. Als onderdeel van de technische gebouwinstallaties is voor deze windturbines geen omgevingsvergunning vereist. Het vermogen van deze turbines is afhankelijk van de windsnelheid, die stijgt met toenemende gebouwhoogte, en varieert van ca 300 tot 750 kWh.a⁻¹ per m² rotoroppervlak bij gebouwhoogten van respectievelijk 25 tot 65 m.

Op het bovendak wordt als dakbedekking dunne film PV folie aangebracht dat ondanks een lager rendement een betere kosteneffectiviteit heeft dan zonnepanelen. Anno 2011 is hiermee in het referentiejaar NEN 5060:2008 een energieopbrengst van ca 100 W.m⁻² bereikbaar.

¹ Van Vent en Tect, Latijn voor Wind en Dak, maar ook Ventilation en Technology

1.5 Klimaatcascade®

Kern van het klimaatsysteem is de Klimaatcascade®, een warmtewisselaar met een zeer groot actief oppervlak, uitgevoerd als bouwkundige schacht. In de Klimaatcascade® wordt de ventilatielucht al naar behoefte wordt gekoeld of verwarmd, gedroogd of bevochtigd. Aan de top wordt zomer en winter via sproeiers water van ca 13°C toegevoerd, waarbij door impulsoverdracht van druppels op lucht de neerwaartse luchtbeweging wordt versterkt. Deze aerodynamische druk maakt tezamen met de hydraulische druk en de neerwaartse thermische trek ventilatoren overbodig. De benodigde koude wordt aan de bodem onttrokken, en warmte wordt direct of indirect door de zonneshoorsteen geleverd.

Door de hoge warmteoverdrachtscoëfficiënt van de vallende druppels en het grote actieve oppervlak van het miljoenen druppels tellende sproeispectrum werkt de Klimaatcascade® met een extreem klein temperatuurverschil tussen lucht en water.

1.6 Zonneshoorsteen of Zonnefaçade®

Ventilatie lucht wordt afgezogen via de Zonneshoorsteen of Zonnefaçade® waarin tevens zonne-energie wordt geoogst, die wordt gebruikt voor verwarming van het gebouw in het stookseizoen. Met behulp van een FiWiHex warmtewisselaar aan de top van de zonneshoorsteen wordt de zonnewarmte overgedragen op circulerend water en in de bodem onder het gebouw opgeslagen. De Venturi-ejector in het Ventecdak® dient mede om het drukverlies van de FiWiHex warmtewisselaar te compenseren. De thermische prestatie van een zonneshoorsteen, bij een bepaalde gebouwhoogte hoofdzakelijk bepaald door de breedte, wordt minimaal afgestemd op het af te zuigen luchtdebiet bij referentiecondities, die arbitrair zijn vastgesteld op 20°C buitentemperatuur bij een stralingsflux van 400 W.m⁻². 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 ca 860 kWh.m⁻² waardoor per m² zonneshoorsteen een opbrengst van ca 500 kWh.m⁻² kan worden verwacht.

Het is mogelijk een zonneshoorsteen te ontwerpen op basis van de bijdrage die deze moet leveren aan het jaarlijks warmtegebruik. Voor de morfologie van een zonneshoorsteen zijn vele varianten denkbaar, waarbij de gevelbedekkende Zonnefaçade® een ultieme uitvoeringsvorm is.

1.7 Een gebouw als klimaatmachine

Energiebesparing in gebouwen is tot dusver het domein geweest van de bouwfysica en de installatietechniek. Beide hebben ontegenzeggelijk grote prestaties op dit gebied geleverd. Maar de architectuur, de discipline met de grootste impact op de gebouwde omgeving, is hierbij grotendeels afzijdig gebleven.

Het Ventecdak®, de Klimaatcascade® en de Zonneshoorsteen of Zonnefaçade® zijn elk op zich belangrijke elementen voor architectonische expressie. Klimaattechniek is niet meer ondergeschikt aan architectuur maar is architectuur. Het ontwerpen van een gebouw als klimaatmachine is hierdoor ook een taak geworden van de architect, die daarmee tevens mede verantwoordelijk wordt voor het binnenklimaat en de energiehuishouding. Een onvermoed intellectueel en artistiek potentieel wordt hierdoor ingeschakeld voor een intrinsiek integraal ontwerp.

1.8 Positionering en demarcaties van het onderzoek

Beperking van het energiegebruik van gebouwen is al decennialang onderwerp van onderzoek en er zijn op dit gebied belangrijke resultaten geboekt. Deze zijn tot op heden in hoofdzaak bereikt door bouwfysische verbeteringen van de gebouwschil en efficiencyverbetering van klimaatinstallaties. De grenzen van de mogelijkheden op deze terreinen lijken echter in zicht te zijn. Integratie van responsieve bouwelementen en klimaatinstallaties wordt beschouwd als de voornaamste strategie voor het realiseren van verdere energiebesparingen (IEA Annex 44, 2010) –zie hoofdstuk 8.

Het Earth, Wind & Fire onderzoek richt zich niet in de eerste plaats op energiebesparing maar op de passieve en actieve benutting van de omgevingsenergie van zon, wind en aardmassa voor het realiseren van een hoogwaardige klimaatregeling, stap 2 van de *Trias Energetica*, zie paragraaf 1.11. De voorzieningen voor de klimaatregeling worden hierbij niet met behulp van technische installaties aan het gebouw toegevoegd, maar in de architectuur van het gebouw geïntegreerd – zie paragraaf 1.6

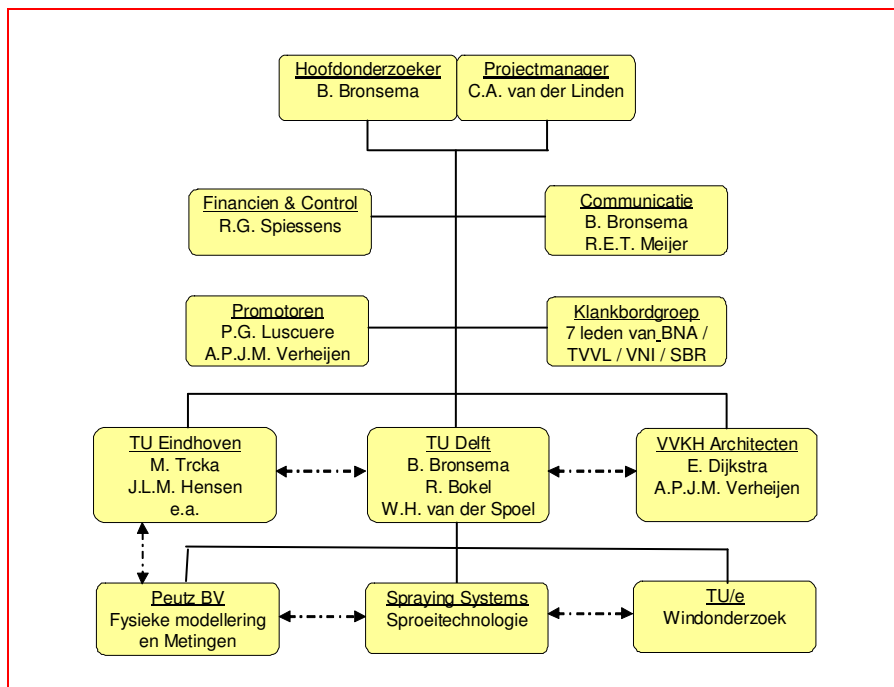
en hoofdstuk 2. Een combinatie met responsieve bouwelementen uit het repertoire van IEA Annex 44 ligt wel voor de hand, maar is geen vereiste. Tabel 8.1 brengt de positionering en de demarcaties van het onderzoek in beeld.

		Passief	Actief
Toegevoegd			<ul style="list-style-type: none"> Fotovoltaïsche zonnepanelen Thermische zonnepanelen Vrijstaande windturbines
Geïntegreerd	Earth, Wind & Fire	<ul style="list-style-type: none"> Ventecdak® Bernoulli-injector Venturi-ejector Zonneschoorsteen Zonnefaçade® Geo-Klimaatconcept® 	<ul style="list-style-type: none"> Klimaatcascade® Windturbines in Ventecdak® PV folie op Ventecdak® Zonneschoorsteen Zonnefaçade® Warmteopslag
	IEA Annex 44	<ul style="list-style-type: none"> Geïntegreerde gevels Bouwdeelactivering Grondluchtcollectoren Dynamische isolatiesystemen Phase Change Materials Geothermische energie 	

Tabel 1.1 – Positionering en demarcaties van het onderzoek

1.9 Organisatiestructuur en Financiering

Earth, Wind & Fire is een samenwerkingsproject van de TU Delft, de TU Eindhoven en VVKH Architecten. Hoofdonderzoeker van het project is Ing. Ben Bronsema, *REHVA² Fellow*, geassisteerd door wetenschappelijke medewerkers van de faculteiten Bouwkunde van de TUD en de TU/e. Zie figuur 1.2.



Figuur 1.2 – Organisatiestructuur Project Earth, Wind & Fire

² REHVA – Federation of European Heating, Ventilation and Air-conditioning Associations

1.10 Ontwikkeltraject

Het Ventecdak®, de Klimaatcascade® en de Zonneschoorsteen of Zonnefaçade® zijn ontwikkeld op basis van modelleren, simuleren, kalibreren en valideren, zie figuur 1.3.

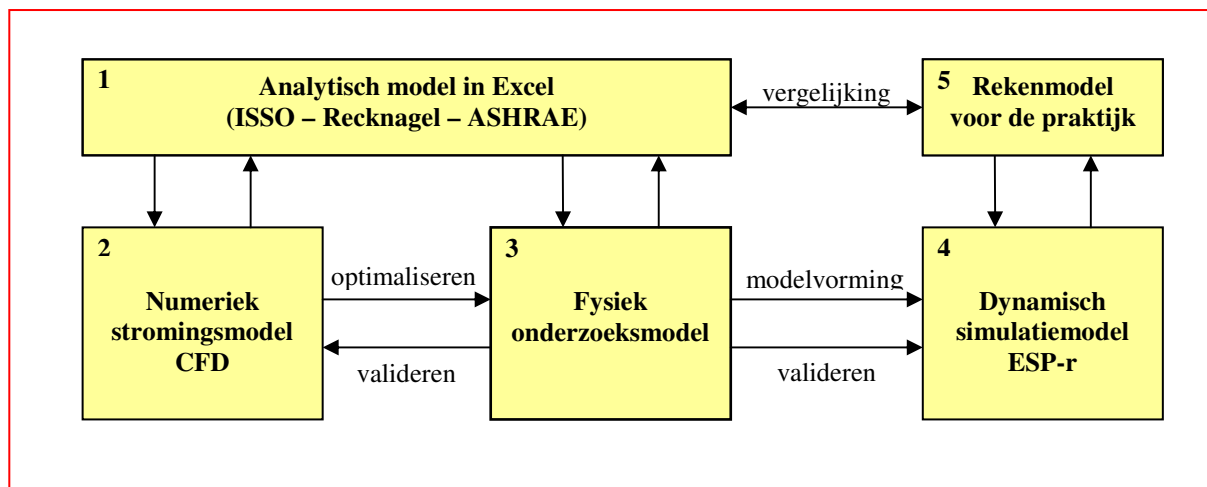
[1] De ontwikkeling van de verschillende concepten is begonnen met het maken van eenvoudige analytische modellen, die een eerste indruk gaven van de haalbaarheid en de potenties van het betreffende concept. Dergelijke modellen staan dicht bij de ingenieurspraktijk en maken een snelle evaluatie van alternatieven mogelijk, mede op basis van ervaring en intuïtie. Met behulp van wetenschappelijke en technische gegevens uit het repertoire van de klimaatingenieur werden wiskundige beschrijvingen gegeven van de fenomenen van warmteoverdracht en stromingen op macroniveau. Analytische modellen zijn opgesteld door de hoofdonderzoeker in samenwerking met wetenschappelijke medewerkers van de TU Delft.

[2] Met behulp van numerieke stromingsmodellen in CFD (Computational Fluid Dynamics) zijn vervolgens virtuele prototypes van de concepten gemaakt die inzicht gaven in de warmteoverdracht en stromingspatronen op microniveau. Hierdoor konden de fysische effecten nader worden geanalyseerd en werd met behulp van simulatietechnieken nagegaan of en in hoeverre modellen konden worden opgeschaald naar bouwdelen op ware grootte. De CFD simulaties voor het Ventecdak® zijn uitgevoerd door specialisten van de TU Eindhoven. CFD simulaties van de Klimaatcascade® zijn uitgevoerd door specialisten van Spraying Systems GmbH.

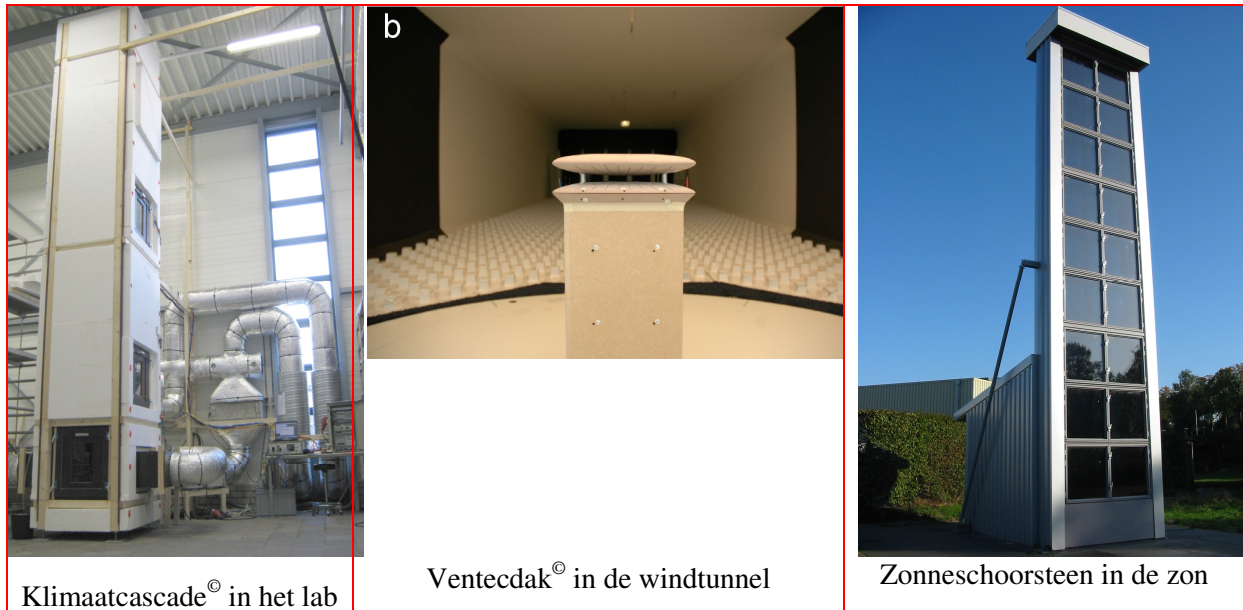
[3] De analytische en de CFD simulatiemodellen zijn gekalibreerd en gevalideerd met behulp van fysieke onderzoeksmodellen, waarin de werkelijk optredende fenomenen van warmteoverdracht en stromingen zijn gemeten. De fysieke onderzoeksmodellen zijn ontworpen door de hoofdonderzoeker en gebouwd en geïnstrumenteerd door Peutz; zie figuur 1.4.

[4] Met behulp van een dynamische simulatiemodel kunnen de energieprestaties van de Klimaatcascade® en de Zonneschoorsteen afzonderlijk en van een gebouw als geheel worden gesimuleerd in een wisselend buitenklimaat bij de klimaatomstandigheden van het referentiejaar NEN 5060:2008. Dynamische simulatiemodellen in ESP-r zijn ontworpen door specialisten van de unit Building Physics and Systems van de TU Eindhoven. De simulaties zijn gekalibreerd en gevalideerd op basis van de metingen in de fysieke modellen waardoor ze een hoge mate van betrouwbaarheid hebben verkregen.

[5] Een rekenmodel voor de praktijk, gebaseerd op de onderzoeksresultaten, geeft aan architecten en ingenieurs de mogelijkheid om de concepten voor concrete bouwprojecten globaal uit te werken en te dimensioneren. In het kader van het onderzoek is een gebruiksvriendelijk rekenmodel ontwikkeld voor de zonneschoorsteen, een dominant architectonisch bouwdeel. In de conceptuele fase kan de architect met dit model de afmetingen van een zonneschoorsteen variëren, en direct de hierbij behorende prestaties aflezen. Voor het conceptueel ontwerp van een Ventecdak® en een Klimaatcascade® zijn globale ontwerpgegevens opgenomen. De klimaatingenieur blijft uiteraard verantwoordelijk voor de dimensionering van deze elementen in het definitief ontwerp.



Figuur 1.3 – Modelleren – Simuleren – Kalibreren – Valideren



Figuur 1.4 – Fysieke modelmetingen

1.11 Resultaten

Het onderzoek heeft uitgewezen dat airconditioning zonder ventilatoren mogelijk is en dat met dit concept voor een belangrijk deel aan de primaire doelstelling, het realiseren van een energieneutraal gebouw, kan worden voldaan.

Een bestaand kantoorgebouw in Amsterdam is op basis van het *Earth, Wind & Fire* concept virtueel herontworpen. Voor dit gebouw wordt met behulp van het dynamisch simulatiemodel het jaarlijkse energiegebruik in een referentie klimaatjaar bepaald en vergeleken met de huidige situatie. Het onderzoek is op dit onderdeel nog niet afgesloten, maar de verwachting is dat het nagestreefde “*nearly zero energy use*” binnen bereik ligt. Bovendien is met deze *case study* aangetoond dat het concept niet alleen voor nieuwbouw maar ook voor de bestaande gebouwenvoorraad kan worden toegepast.

1.12 De Trias Energetica

Energiebesparing wordt idealiter gerealiseerd volgens de Trias Energetica (Lysen, Erik H. 1996), een begrip waarmee de volgorde van drie stappen naar een zo duurzaam mogelijke energievoorziening wordt aangeduid:

1. Beperk de vraag naar energie door toepassen van vraagbeperkende maatregelen;
2. Gebruik zoveel mogelijk duurzame energiebronnen om de energie die nog nodig is op te wekken;
3. Zet efficiënte technieken in om het resterende energieverbruik op te wekken.

Het onderzoek *Earth, Wind & Fire* is in hoofdzaak gericht op het tweede element van de Trias Energetica. De eerste stap, beperking van het energiegebruik, o.a. door optimalisatie van de gebouwschil, gaat hieraan vooraf. De derde stap, inzet van efficiënte technieken om het resterende energiegebruik op te wekken, wordt gerealiseerd met behulp van de Zonneschoorsteen of Zonnefaçade[®] en het Ventecdak[®]. Omdat het energiegebruik bij toepassing van het *Earth, Wind & Fire* concept gering is, is energieneutraliteit van gebouwen gemakkelijker te realiseren dan bij conventionele airconditioning.

1.13 Deelstudies

Het onderzoeksproject “Earth, Wind & Fire” is onderverdeeld in de volgende deelonderzoeken:

- *Earth, Wind & Fire* – (I) Onderzoek Zonneschoorsteen en Zonnefaçade[®]
- *Earth, Wind & Fire* – (II) Onderzoek Natuurlijke Ventilatie, Wind en Ventecdak[®]
- *Earth, Wind & Fire* – (III) Onderzoek Klimaatcascade[®] en Geo-Klimaatconcept[®]
- *Earth, Wind & Fire* – (IV) Binnenmilieu: Symbiose van Architectuur en Klimaattechniek

De deelrapporten (I) t/m (III) geven een gedetailleerd verslag van de drie deelonderzoeken en richtlijnen voor het ontwerp van de responsieve bouwdelen, respectievelijk (I) de Zonneschoorsteen of Zonnefaçade[®], (II) het Ventecdak[®] en (III) de Klimaatcascade[®].

Deel (IV) gaat in op de noodzakelijke interactie tussen architectuur en klimaattechniek, en geeft de hoofdlijnen weer van de delen (I) t/m (III). In dit deel wordt tevens een *case study* gepresenteerd. De vier delen zijn zelfstandige eenheden en afzonderlijk te lezen.

1.14 Voor welke gebouwen is het Earth, Wind & Fire concept bedoeld?

De luchtstromingen voor de toevoer van ventilatielucht via de Klimaatcascade[®] en de afvoer hiervan via de Zonneschoorsteen of Zonnefaçade[®], worden veroorzaakt door drukverschillen. Deze komen tot stand door gewichtsverschillen tussen koudere en warmere lucht en zijn evenredig met de hoogte van Klimaatcascade[®] en Zonneschoorsteen of Zonnefaçade[®]. Omdat het om relatief kleine temperatuur- en drukverschillen gaat is een bepaalde minimum hoogte van het gebouw noodzakelijk. Het onderzoek gaat uit van gebouwen van minimaal 4 bouwlagen à 3,5 meter³.

Het in het onderzoek ontwikkelde Geo-Klimaatconcept[®] betreft een centrale voorziening voor luchtbehandeling van gebouwen en is daardoor minder geschikt voor de woningbouw. Verschillende elementen zijn evenwel goed bruikbaar voor gestapelde woningbouw.

1.15 Voor welke architectuur komt het Earth, Wind & Fire concept in *aanmerking*?

Het Earth, Wind & Fire concept kan in elke architectuurstijl worden toegepast, klassiek, modern, internationaal, postmodern, bio-klimatisch, klimaatactief etc. Het is de architect die vorm geeft aan de uitwerking van het concept.

Het Earth, Wind & Fire concept, toegepast in combinatie met bio-klimatische of klimaatactieve architectuur met een hoge BREEAM-NL of GreenCalc milieuscore, biedt de grootste milieuvoordelen. Een maximale milieuprestatie van het gebouw gaat dan gepaard met optimale condities van het binnenmilieu. Deze combinatie kan het beste worden aangeduid als “*klimaatactieve architectuur van de 2^e generatie*”.

1.16 Is het Earth, Wind & Fire een totaalconcept?

Het in het onderzoek ontwikkelde Geo-Klimaatconcept[®] is een totaalconcept. Dit houdt niet in dat de responsieve bouwdelen die in het onderzoek ontwikkeld zijn alleen in combinatie kunnen worden toegepast. Een *stand alone* toepassing van een Zonneschoorsteen of Zonnefaçade[®], een Ventecdak[®] of een Klimaatcascade[®] in kantoorgebouwen is goed mogelijk.

1.17 Is het Earth, Wind & Fire concept alleen geschikt voor nieuwbouw?

Nieuwbouw kan uiteraard volledig op het Earth, Wind & Fire concept worden ontworpen. Bij grote renovaties van bestaande gebouwen kan het concept echter eveneens worden toegepast, zowel gedeeltelijk als in zijn geheel. Een Ventecdak[®] en een Zonneschoorsteen zijn mogelijke toevoegingen aan een gebouw. Bestaande gevels kunnen worden omgebouwd tot Zonnefaçades[®]. Bestaande installatieschachten kunnen worden omgebouwd tot Klimaatcascades[®]. De case-study – zie deelrapport (IV)- geeft hiervan een voorbeeld.

Dit aspect kan mede een rol spelen bij de keuze tussen afbraak of renovatie van bestaande gebouwen. Veelal wordt intuïtief gekozen voor renovatie, maar onderzoek wijst uit dat dit met betrekking tot milieuprestaties niet altijd vanzelfsprekend hoeft te zijn (Verbeeck, Griet et al 2011).

1.18 Mogen bij het Geo-Klimaatconcept[®] de ramen open?

Vanzelfsprekend!

Een te openen raam is in een kantoorgebouw een elementair recht van de werkende mens.

1.19 Positionering van Earth, Wind & Fire in de klimaattechniek

Het in het onderzoek ontwikkelde Geo-Klimaatconcept[®] vervangt de centrale mechanische luchtbehandeling van een gebouw. Decentrale voorzieningen voor verwarming en koeling op werkplekniveau, zoals klimaatplafonds, ventilatorconvectoren, radiatoren e.d. kunnen uitstekend worden gecombineerd met het Geo-Klimaatconcept[®] –zie ook hoofdstuk 13 van deelrapport (IV).

³ In de Angelsaksische literatuur vaak aangeduid met “*Low-Rise Buildings*”

1.20 Spin-off effecten

Drijfveer van het onderzoek *Earth, Wind & Fire* was het terugdringen van het energiegebruik in de gebouwde omgeving op de marsroute naar een energieneutraal gebouw. Het onderzoek heeft daarnaast enkele belangrijke *spin-off* effecten, te weten:

- De architect wordt medeplichtig en medeverantwoordelijk voor het klimaatsysteem en het energiegebruik – zie ook hoofdstuk 2 en hoofdstuk 5 van deelrapport (IV).
- Door de integrale samenwerking van architect en ingenieur op het gemeenschappelijke *Earth, Wind & Fire* platform krijgt het ontwerpproces een hogere dimensie – zie ook deelrapport (IV).
- Het kwaliteitsniveau van gebouwen zal hierdoor verbeteren en de faalkosten in de bouw worden gereduceerd – zie deelrapport (IV).
- Door het vermijden van potentieel vervuilde klimaatinstallaties, het ontbreken van installatiegeluid en het vermijden van lage temperaturen bij de luchttoevoer, wordt een gezonder binnenklimaat in gebouwen gerealiseerd – zie deelrapport (IV).
- Sick-Building symptomen verdwijnen met als gevolg een hogere productiviteit op de werkplek – zie deelrapport (IV).
- De bouw- en exploitatiekosten van gebouwen worden gereduceerd. Eén en ander zal in een vervolgstudie nader worden gekwantificeerd.

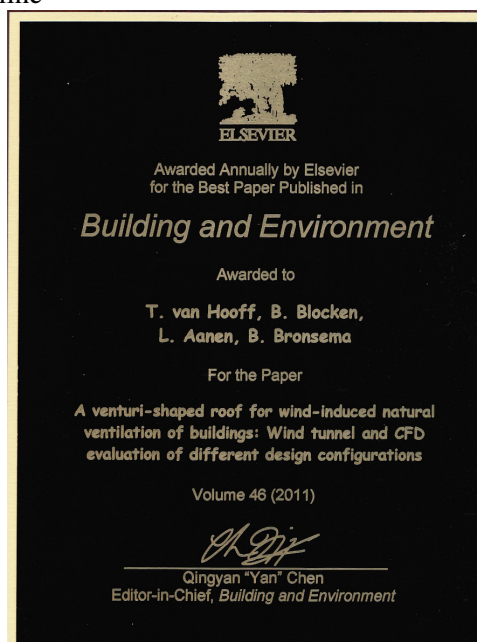
1.21 Verantwoording

Het onderzoeksproject is uitgevoerd met subsidie van het Ministerie van Economische Zaken, Landbouw en Innovatie; regeling Energie Onderzoek Subsidie: lange termijn (artikel 18b). De evaluatie en optimalisatie van het Ventecdak[®] met behulp van CFD simulaties is uitgevoerd met subsidie van de Stichting Studiefonds Adviesbureau Peutz & Associés.

1.22 Publicaties

De resultaten van het onderzoek zullen in wetenschappelijke- en vaktijdschriften worden gepubliceerd. Ultimo 2011 zijn de volgende publicaties verschenen:

- [1] Hooff T. van, B. Blocken B., Aanen L. en Bronsema B.; 'A venturi-shaped roof for wind-induced natural ventilation of buildings: wind tunnel and CFD evaluation of different design configurations', in: *Building and Environment*, published online 15-2-2011 (Best Paper Award)
- [2] Blocken B., Hooff T. van, Aanen L., en Bronsema B.; 'Computational analysis of the performance of a venturishaped roof for natural ventilation: venturi-effect versus wind-blocking effect', in: *Computers and Fluids*, published online 26-04-2011
- [3] Hooff 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



2. ARCHITECTUUR EN KLIMAATTECHNIEK

2.1 Historische ontwikkeling

Eeuwenlang heeft de architectuur rekening gehouden met het klimaat op de locatie van gebouwen, en werden gebouwen zorgvuldig ontworpen op de toetreding van licht en lucht en het weren dan wel toelaten van zonnewarmte. Integraal ontwerpen in optima forma!

In de loop van de geschiedenis hebben architectuur en klimaattechniek zich echter ontwikkeld als strikt gescheiden domeinen. De rol van de architect als integraal ontwerper is hierdoor uitgehold. De ontwikkeling van de klimaattechniek vanaf het einde van de 19^e eeuw heeft architecten een grote ontwerpvrijheid gegeven, maar de kunst en wetenschap om gebouwen te ontwerpen in de context van verwarming, ventilatie, verlichting en koeling zijn daardoor grotendeels verloren gegaan. Gebouwen zijn hierdoor geheel afhankelijk geworden van installaties en energie. Ironisch genoeg is de tevredenheid van gebruikers over het binnenklimaat hieraan niet evenredig. Het *Sick Building Syndrome* heeft zich vooral gemanifesteerd in gebouwen met omvangrijke klimaatinstallaties.

Architecten hebben door de gescheiden ontwikkeling van de klimaattechniek en hun ondeskundigheid op dit gebied niet zelden weerstand tegen de installatietechniek gekregen hetgeen op gespannen voet staat met een integraal ontwerpproces.

2.2 De status-quo anno 2011

De bouw- en installatietechniek heeft in de afgelopen kwart eeuw een uitstekende prestatie geleverd door een gezonder, behaaglijker, productiever en veiliger binnenmilieu te realiseren bij een aanzienlijk lager energiegebruik dan voorheen (Bronsema, Benjamin 2003).

De wettelijk voorgeschreven energieprestatie van gebouwen, wordt geleidelijk steeds aangescherpt – zie deelrapport (IV). Bouwfysische mogelijkheden raken langzamerhand uitgeput en energiebesparing wordt in toenemende mate gerealiseerd met behulp van steeds complexere technieken en installaties. Deze zijn niet altijd dienstbaar zijn aan het comfort, de tevredenheid en de gezondheid van de gebruiker en drukken zwaar op de exploitatie van gebouwen. Bovendien kunnen vraagtekens worden geplaatst bij de intrinsieke duurzaamheid van deze maatregelen zie deelrapport (IV).

De ontwikkelingen naar energiebesparing zijn in hoge mate aan in de architectuur voorbijgegaan; er kunnen daarentegen duidelijke *rebound* effecten worden vastgesteld. Heeft de industrie in enkele decennia de warmteweerstand van dubbel glas tot 1/3 gereduceerd, de architectuur heeft hierop gereageerd door in veel gevallen het glasoppervlak te verdrievoudigen. De architectuur heeft zich verder, mede onder invloed van een toenemende maatschappelijk welvaart en modeverschijnselen, laten verleiden tot steeds uitbundiger vormen en bouwmassa's waarbij de installatietechniek te hulp wordt geroepen een goed binnenmilieu te realiseren.

2.3 Integratie van domeinen

Energiebesparing in gebouwen is tot dusver het domein geweest van de bouwfysica en de installatietechniek. Beide hebben ontegenzeggelijk grote prestaties op dit gebied geleverd. Maar de architectuur, de discipline met de grootste impact op de gebouwde omgeving, is hierbij grotendeels afzijdig gebleven.

Het Ventecdak[®], de Klimaatcascade[®] en de Zonneschoorsteen of Zonnefaçade[®] zijn elk op zich belangrijke elementen voor architectonische expressie. Klimaattechniek is niet meer ondergeschikt aan architectuur maar is architectuur. Het ontwerpen van een gebouw als klimaatmachine is hierdoor ook een taak geworden van de architect, die daarmee tevens mede verantwoordelijk wordt voor het binnenklimaat en de energiehuishouding. Een onvermoed intellectueel en artistiek potentieel wordt hierdoor ingeschakeld voor een intrinsiek integraal ontwerp.

De directe inzet van natuurelementen voor klimaatregeling voert de architect terug naar één van de *basics* van zijn beroep. Architecten, met al hun creativiteit en invloed op het bouwproces, staan momenteel voornamelijk aan de kant als het gaat om energie en binnenmilieu. Door de nieuwe aanpak

van het ontwerpproces worden ze hierbij betrokken, en ook mede verantwoordelijk. Een onvermoed intellectueel en artistiek potentieel wordt hierdoor ingeschakeld voor een intrinsiek integraal ontwerp. Voor de klimaatingenieur is het een uitdaging om zijn beroep op een hoger niveau uit te kunnen oefenen, vergelijkbaar met dat van de ingenieur voor de draagconstructie. Installatietechniek wordt ook architectuur. Architect en ingenieurs zullen hierdoor op termijn in staat zijn een gebouw inclusief constructies en binnenklimaat echt integraal te ontwerpen. Op weg naar het energieneutrale gebouw lijkt deze aanpak een harde noodzaak.

Verder is te verwachten dat de faalkosten in het bouwproces met de inherente, maar onnodige milieuconsequenties door deze aanpak substantieel kunnen worden teruggebracht –zie paragraaf 2.10.

Met de ontwikkeling van een gemeenschappelijk ontwerpplatform op basis van integrale klimaatconcepten wordt in het project *Earth, Wind & Fire* een brug geslagen tussen architecten en klimaatingenieurs. Het onderzoek beweegt zich hiermee in de richting van *Passive and Low Energy Architecture*, PLEA, [<http://www.arct.cam.ac.uk/PLEA/Home.aspx>], een wereldwijde architectuurstroming die duurzame architectuur en stedenbouwkundige ontwikkeling nastreeft en beoogt hierdoor complexe gebouwinstallaties overbodig te maken.

2.4 Onderzoek Earth, Wind & Fire

Het onderzoek ging uit van de hypothese dat het mogelijk is gebouwen te ontwerpen waarin architectuur, bouwmassa, constructies en klimaatvoorzieningen zodanig samenwerken dat een bouwwerk, met behoud van architectonische en functionele kwaliteiten, wordt getransformeerd tot een klimaatmachine, geactiveerd door de natuurlijke hulpbronnen van zon, wind, geothermische energie en zwaartekracht: “*AIRCONDITIONING ZONDER VENTILATOREN*”.

In dergelijke gebouwen wordt een gezond, behaaglijk en productief binnenklimaat gerealiseerd. De omvang van mechanische klimaatinstallaties wordt tot een minimum beperkt en het energiegebruik drastisch verlaagd.

Doel van het onderzoek was de ontwikkeling van integrale klimaatconcepten waarin architecten en klimaatingenieurs elkaar vinden op een gemeenschappelijk platform van kennis, kunde en expertise.. Met behulp hiervan wordt het mogelijk gebouwen zodanig te ontwerpen dat een natuurlijke klimaatregeling mogelijk wordt gemaakt, aangedreven door zon, wind, geothermische energie en zwaartekracht.

2.5 Uitdagingen en kansen voor de architectuur

Het *Earth, Wind & Fire* concept biedt de architectuur nieuwe mogelijkheden voor een synthese van architectonische expressie en klimaattechniek, van intuïtieve creativiteit en rationele logica. De klimaatvoorzieningen, door architecten niet zelden als een noodzakelijk kwaad gezien, en mede daarom verborgen in schachten en plafondruimten, worden integrale elementen van een gebouw, door de architect vormgegeven.

Het Ventecdak[®], de Klimaatcascade[®] en de Zonneschoorsteen of Zonnefaçade[®], geïntegreerd in bouwdelen en constructieve elementen, zijn nieuwe uitdagingen voor architectonische expressie. Klimaattechniek is niet meer ondergeschikt aan architectuur maar is architectuur, en komt daarmee op gelijke voet te staan met de draagconstructie. De dialoog tussen architect en klimaatingenieur krijgt nieuwe dimensies en de door veel architecten zo verfoeide ordening van luchtkanalen en pijpen in het architectonisch ontwerp⁴ behoort grotendeels tot het verleden. De antibiose van werktuigbouwkunde en architectuur wordt opgeheven. Een nieuwe dimensie van *The Architecture of the Well-tempered Environment* (Banham, R. 1984).

De architect zal daarom zijn beroep op een hoger niveau uit kunnen oefenen door naast ontwerper van het gebouw tevens een belangrijke rol te spelen als technisch en artistiek co-ontwerper van het klimaatsysteem. “*Terug naar de Toekomst*”. Op basis van de ontwikkelde integrale klimaatconcepten

⁴ “*I do not like ducts, I do not like pipes. I hate them thoroughly, but because I hate them so thoroughly, I feel that they have to be given their place. If I just hated them and took no care, I think that they would invade the building and completely destroy it. I want to correct any notion you may have that I am in love with that kind of things*” Louis Kahn in (Hawkes, e.a. 2002).

wordt een nauwe samenwerking mogelijk met de klimaatingenieur. De kwaliteit van het gebouw en het bouwproces zal hierdoor worden verbeterd en de omvang van technische installaties verminderd. Het energiegebruik van het gebouw wordt gereduceerd en de productiviteit op de werkplek verhoogd.

2.6 Drie subconcepten

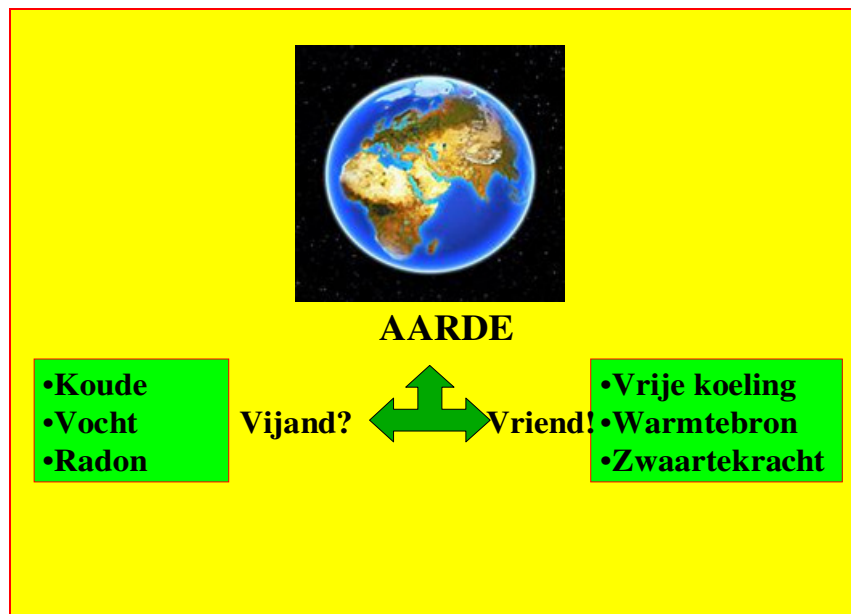
Zon, wind, geothermische energie en zwaartekracht kunnen op verschillende manieren worden ingezet voor de klimaatregeling van gebouwen. In het kader van het onderzoek is uitsluitend ingezet op geïntegreerde concepten van architectuur en binnenmilieu.:

Na een evaluatie van verschillende mogelijkheden zijn drie subconcepten geselecteerd, geïntegreerd in responsieve bouwdelen, die in eerste instantie afzonderlijk zijn ontwikkeld en geoptimaliseerd, maar uiteindelijk in een totaalconcept van klimaatregeling een symbiose gaan vormen. Een verantwoording van de gemaakte keuzes is opgenomen in deelrapport (IV).

2.7 Introductie thema EARTH

Deelrapport (III) “Geo-Klimaatconcept” omvat een onderzoek naar de mogelijkheden voor een natuurlijke klimaatregeling in gebouwen. Het thema **EARTH** geeft hierbij uitdrukking aan de relatie tussen klimaatregeling en de invloed van de aarde, in een bepaald verband ook wel Geo genoemd. Deze invloed komt tot uitdrukking in de zwaartekracht, die een waterval kan veroorzaken en lucht in beweging kan zetten voor ventilatie en klimaatregeling van gebouwen. Met de ontwikkelde Klimaatcascade[®] kan lucht worden getransporteerd zonder ventilatoren en vindt koeling of verwarming plaats bij extreem hoge koude- en warmtefactoren (COP). De aarde wordt hierbij benut voor de levering van koude en warmte. **EARTH** staat eveneens voor de bijdrage die de aarde kan leveren als bron en opslagmedium van warmte en koude

Figuur 2.1 laat enerzijds de vaak negatief beoordeelde effecten van de aarde ten aanzien van klimaatregeling zien. De positieve effecten die in het onderzoek *Earth, Wind & Fire* zijn geëxploreerd kunnen in toekomstige energieneutrale gebouwen worden ingezet voor een natuurlijke klimaatregeling.



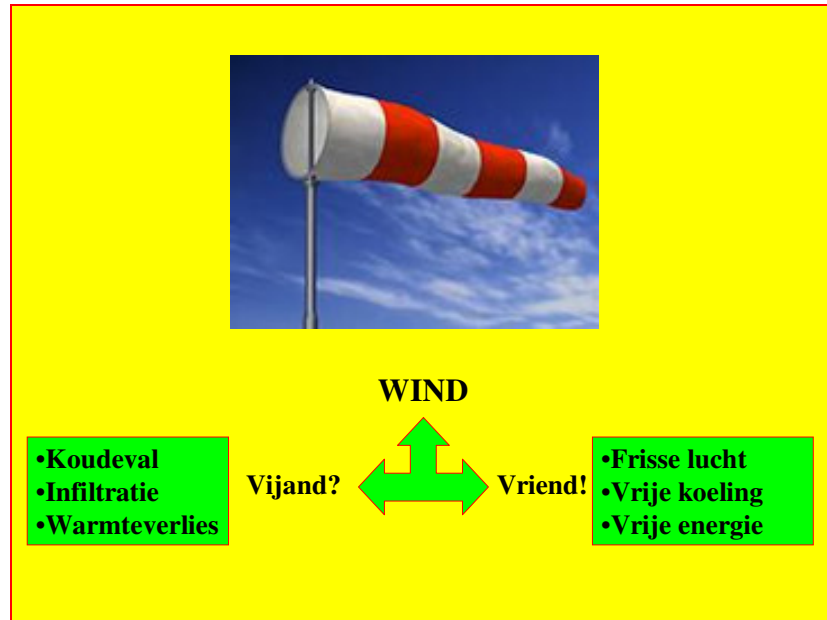
Figuur 2.1 De Aarde – Vriend of Vijand?

2.8 Introductie thema WIND

Deelrapport (II) “Onderzoek Natuurlijke Ventilatie en Wind” omvat een onderzoek naar de mogelijkheden die de wind biedt voor natuurlijke ventilatie van gebouwen. Het ontwikkelde Ventecdak[®], benut de overdruk van de wind op een gebouw voor de toevoer van ventilatielucht, die in de Klimaatcascade[®] wordt geconditioneerd. De onderdruk van de wind wordt benut om lucht via de

Zonneschoorsteen of Zonnefaçade® af te zuigen. Drukverschillen tussen wind- en lijzijde van een gebouw drijven windturbines aan voor stroomopwekking.

De relatie tussen klimaatregeling en de wind heeft zowel positieve als negatieve aspecten; zie figuur 2.2. Anno 2011 is de bouwtechniek uitstekend in staat de negatieve aspecten van de wind in gebouwen en de gebouwde omgeving te neutraliseren. De positieve effecten die in het onderzoek *Earth, Wind & Fire* zijn geëxploreerd kunnen in toekomstige energieneutrale gebouwen worden ingezet als bijdrage aan een natuurlijke klimaatregeling.

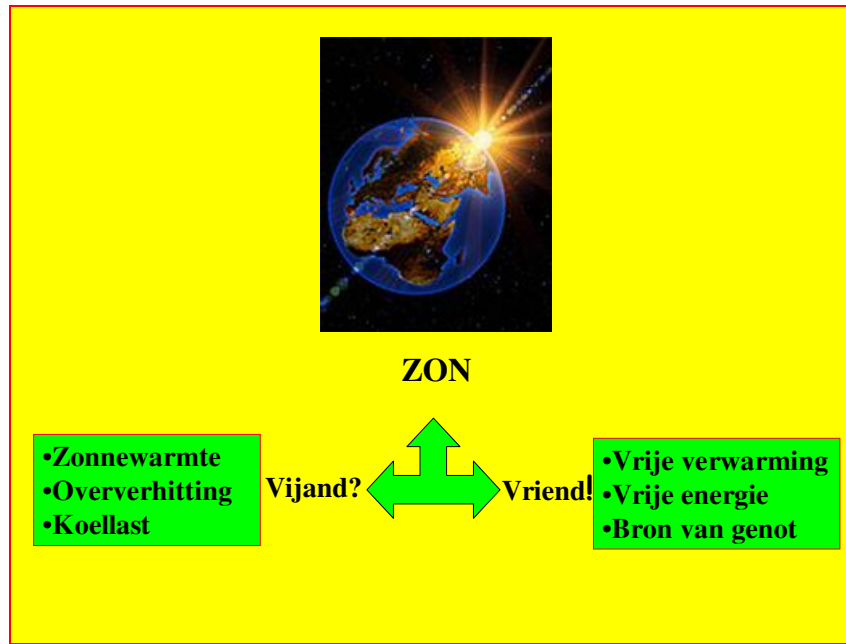


Figuur 2.2 De Wind – Vriend of Vijand?

2.9 Introductie Thema FIRE

Het voorliggende deelrapport (I) “Onderzoek Zonneschoorsteen / Zonnefaçade®” omvat een onderzoek naar de mogelijkheden om de zon te benutten voor het afzuigen van ventilatielucht uit gebouwen en het oogsten van zonnewarmte. *FIRE* is hierbij op te vatten als metafoor voor de zon. De zon is een onuitputtelijke bron van energie, maar in kantoorgebouwen wordt zoninstraling meestal zoveel mogelijk geweerd. Door de hoge isolatiegraad van gebouwen in combinatie met de interne thermische belastingen moet zonnewarmte in veel gevallen met behulp van koeling worden afgevoerd. Niet alleen gaat deze warmte hierdoor grotendeels voor de energiehuishouding van gebouwen verloren; voor het afvoeren ervan is ook extra energie nodig.

De relatie tussen klimaatregeling en de wind heeft zowel positieve als negatieve aspecten; zie figuur 2.3. Klimaatingenieurs zijn geneigd de zon als hinderlijk element te beschouwen, die zoveel mogelijk moet worden geweerd. De positieve effecten van de zon, die in het onderzoek *Earth, Wind & Fire* zijn geëxploreerd kunnen in de toekomstige energieneutrale gebouwen worden ingezet voor natuurlijke ventilatie en energiebesparing.



Figuur 2.3 De zon – Vriend of Vijand?

2.10 Positionering en systeemgrenzen van het onderzoek

NOVEM heeft enkele jaren geleden de Trias Energetica (zie paragraaf 1.11) in de bredere context geplaatst van de Trias Ecologica als stappenplan voor het realiseren van milieuneutrale gebouwen. Milieuneutraal in dit verband op te vatten als: energieneutraal, waterneutraal en materiaalneutraal.

Energie is een cruciaal milieuthema, enerzijds door de beperkte beschikbaarheid van fossiele brandstoffen, anderzijds door de verhoogde concentratie van broeikasgassen in de atmosfeer die bij verbranding ontstaan. Voor de gebouwde omgeving is de energieprestatie dan ook het belangrijkste onderdeel van de totale milieuprestatie. Het onderzoek Earth, Wind & Fire is ook uitsluitend gericht op energieaspecten, met als einddoel het realiseren van een energieneutraal gebouw

Er zijn anno 2011 verschillende instrumenten beschikbaar voor het kwantificeren van de integrale milieuprestaties van gebouwen “van de wieg naar het graf” zoals GREENCALC en BREEAM-NL – zie deelrapport (IV). Het lijkt een logische ontwikkeling dat toekomstige energieneutrale gebouwen in deze richting worden doorontwikkeld. Dit maakt echter geen deel uit van het onderzoek Earth, Wind & Fire.

2.11 Energiegebruik en de kwaliteit van het binnenmilieu

Drijfveer van het onderzoek *Earth, Wind & Fire* is het terugdringen van het energiegebruik in de gebouwde omgeving. Het is in principe heel gemakkelijk energie te besparen door concessies te doen aan de kwaliteit van het binnenmilieu. Als in het stookseizoen lagere, en in het koelseizoen hogere temperaturen worden geaccepteerd kan veel energie worden bespaard. Dit is eveneens het geval als concessies worden gedaan aan de luchtkwaliteit door beperking van de ventilatiecapaciteit⁵.

Het *Earth, Wind & Fire* concept doet geen concessies aan de kwaliteit van het binnenmilieu. De energieprestatie van gebouwen moet daarom altijd worden gezien in relatie met de kwaliteit van het binnenmilieu. In deelrapport (IV) wordt uitvoerig op dit aspect ingegaan.

2.12 Faalkosten

Faalkosten in de bouw zijn kosten die onnodig worden gemaakt in het productieproces van een gebouw en technische uitrusting. Het opgeleverde product voldoet niet aan gemaakte afspraken over kwaliteit en/of functionaliteit (Rooijackers, Gerard e.a. 2010). De omvang van faalkosten in de bouw

⁵ Een “Net Zero Energy Building” mag geen “Net Zero Acceptability Building” worden. Dan Int-Hout in ASHRAE Journal december 2010.

is in 2008 geraamd op 11,4% van de omzet (USP Marketing Consultancy 2008). Gebrekkige voorbereiding (1), gegevensuitwisseling (2) en communicatie (3) alsmede onvoldoende aandacht tijdens de ontwerpfase voor de uitvoerbaarheid (4) worden als grootste schuldigen genoemd. Voor wat betreft de installaties kunnen deze punten als volgt worden uitgewerkt:

1. De voorbereiding van technische installaties is vaak van een lager uitwerkingsniveau dan de voorbereiding van bouw- en draagconstructies. Installaties worden vaak schematisch op tekening aangegeven terwijl bouwconstructies meestal volledig worden gedetailleerd.
2. De gegevensuitwisseling tussen de ontwerper van de installaties en de architect wordt hierdoor bemoeilijkt hetgeen tijdens de uitvoering vaak tot problemen leidt, die dan ad hoc moeten worden opgelost, in veel gevallen tegen extra kosten en met verlies van kwaliteit. Dit probleem wordt nog versterkt door de omstandigheid dat de installateur vaak in een (te) laat stadium detailtekeningen moet vervaardigen waarbij conflicten tussen bouw- en installatietechniek (te) laat aan het licht komen.
3. De communicatie tussen ingenieur en architect wordt sowieso al bemoeilijkt door het cultuurverschil tussen rationele logica en intuïtieve vaardigheid, niet zelden resulterend in een haatlievende verhouding tussen beide partijen.
4. Onvoldoende aandacht tijdens de ontwerpfase voor de uitvoerbaarheid van het ontwerp wordt in de hand gewerkt door het relatief lage uitwerkingsniveau van technische installaties, zie punt 1. Dit is overigens vaak weer het gevolg is van een (te) beperkte opdracht aan de installatieontwerper door de opdrachtgever die enerzijds hierop kosten wil besparen en anderzijds de eindverantwoordelijkheid bij de uitvoerende partij wenst te leggen.

Het ligt voor de hand aan te nemen dat veel van de genoemde problemen bij het geïntegreerde *Earth, Wind & Fire* concept niet voor zullen komen. Het gebouw zelf wordt hierbij ontworpen als machine voor de klimaatregeling. De ingenieur berekent en dimensioneert het systeem, maar de vormgeving, materialisatie en constructie komt volledig voor rekening van de architect. Zoals een architect schrijft (Hendriks, Jeroen 2010):

“....Met een grondige voorbereiding door en een strakke coördinatie van de verschillende ontwerpdisciplines valt al erg veel te winnen. Maar nog beter is het, wanneer het totaalontwerp tevens geïntegreerd en interdisciplinair tot stand komt. Met andere woorden, wanneer de diverse adviseurs de architectuur, constructies en installaties volledig met elkaar verweven en componenten of gebouw onderdelen meerdere functies tegelijkertijd gaan vervullen..... Het spreekt vanzelf dat vanuit de aard van zijn ruimtelijk, technisch en esthetisch integrerende werkzaamheden de architect de meest aangewezen partij is voor een rol als procesregisseur.

Het spreekt ook vanzelf dat een dergelijk project niet op basis van deelbestekken of richtlijnenbestek kan worden ontworpen en aanbesteed. Een DBFMO contract (Design, Build, Finance, Maintain, Operate) zoals door de Rijkgebouwendienst ontwikkeld (Groot Zwaafink, Miranda 2010), zou voor een innovatieve en milieubewuste opdrachtgever met gelijkgestemde partners een goede contractvorm kunnen zijn.

3. KORTE INHOUD

3.1 Wind, luchtkwaliteit en ventilatie

[5]⁶ Het Earth, Wind & Fire concept maakt met behulp van het Ventecdak[©] gebruik van de wind als drijvende kracht voor natuurlijke ventilatie van gebouwen en voor energieopwekking. Op basis van literatuuronderzoek wordt een overzicht gegeven van de belangrijkste aspecten die hierbij van belang zijn, in hoofdzaak

- De atmosferische grenslaag waarin de stad “ademt”;
- Windsnelheidsprofielen in de atmosferische grenslaag;
- De invloed van thermiek en terreinruwheid;
- De dagelijkse variaties van de wind;
- De invloed van obstakels;
- De vlagerigheid en de turbulentie van de wind.

[6] Het windklimaat wordt in Nederland door het KNMI op een groot aantal weerstations onderzocht. Windstatistieken, langjarige gemiddelden 1971 – 2000, zijn in de “*Klimaatatlas van Nederland*” gepubliceerd. Op de site van het KNMI Hydra Project “*Wind climate assessment of the Netherlands*” zijn verder uitgebreide distributieve en cumulatieve frequentietabellen per jaar en per maand van het windklimaat in Nederland te vinden alsmede windrozen, gemeten op 28 weerstations. De gepubliceerde windsnelheden zijn aangegeven in $m.s^{-1}$, die kunnen worden omgezet in schaaldelen van de Beaufort-schaal, en dan worden aangeduid met “*windkracht*”. De aangegeven windsnelheden hebben alle betrekking op de zgn. “*potentiële windsnelheid*” dat is de referentiesnelheid, op 10 meter hoogte gemeten bij een bepaalde terreinruwheid.

[7] Het klimaat in een grote stad onderscheidt zich van het klimaat in een landelijke omgeving door een hogere gemiddelde temperatuur, het zogenaamde warmte-eiland effect, en door een slechtere luchtkwaliteit.

Door de mondiale trend van toenemende verstedelijking, in combinatie met de algemeen verwachte klimaatverandering en de aandacht voor de kwaliteit van het stedelijk klimaat, is het warmte-eiland effect wereldwijd onderwerp van onderzoek. Onderzoek door Wageningen University wijst uit dat warmte-eiland effecten in Nederland dezelfde ordegrrootte hebben als in het buitenland. Het lijkt gewenst hiermee bij het ontwerp van klimaatinstallaties rekening te houden. De stad “ademt” in de atmosfeer boven de stad. Ventilatielucht voor gebouwen en verbrandingslucht voor motorvoertuigen en verbrandingstoestellen wordt uit de omgeving aangezogen en na gebruik in verontreinigde toestand weer in dezelfde omgeving gedumpt. Om een zekere luchtkwaliteit in stand te houden moet de stad continue worden geventileerd. Deze ventilatie komt tot stand door luchtstromingen die door wind en temperatuurverschillen worden geïnduceerd. Deze worden beïnvloed door de geografische ligging, de topografie van de stad en de permeabiliteit van de bebouwing. Vele vragen kunnen slechts generiek en globaal worden beantwoord, zoals:

- Wat is de invloed van windsnelheid, windrichting en thermiek op de luchtkwaliteit boven de stad?
- Waar is de luchtkwaliteit optimaal?
- Wat zijn de beste condities voor gebruik van de wind voor natuurlijke ventilatie van gebouwen?
- Wat is de relatie tussen de kwaliteit van de buitenlucht en die van de binnenlucht?

Er is veel onderzoek gedaan naar windoverlast in de gebouwde omgeving en hierover is ook veel bekend. Over de positieve kanten van wind in de gebouwde omgeving is veel minder bekend, maar de bovenstaande vragen zijn in toenemende mate onderwerp van studie en onderzoek. Het is echter een weerbarstige en complexe materie, waarover zich momenteel alleen in kwalitatieve zin antwoorden beginnen af te tekenen. Meer specifieke kwantitatieve informatie kan momenteel slechts worden verkregen op basis van gericht windtunnelonderzoek. Wellicht kan deze informatie in de toekomst worden veralgemeniseerd op basis van karakteristieke stedenbouwkundige modellen.

[8] De windstroming rond gebouwen in een stedelijke omgeving hangt van verschillende omstandigheden en factoren af, zoals

⁶ De nummers tussen de haken verwijzen naar de betreffende hoofdstukken

- De geografische ligging, de topografie, het profiel en de permeabiliteit van de stedelijke bebouwing.
- De windsnelheid, windrichting, turbulentie en de stedelijke thermiek.

Op basis van literatuuronderzoek wordt enig kwalitatief inzicht gegeven in de complexe samenhangen die hier een rol spelen. Er kunnen aanzienlijke drukverschillen op gebouwen optreden, positief en negatief, die in principe kunnen worden benut voor ventilatie. Kwantitatieve analyses in algemene zin zijn echter nauwelijks te maken. Voor concrete situaties kan een windtunnelonderzoek de nodige informatie leveren.

[9] Een van de ernstigste fouten die bij het ontwerp van ventilatievoorzieningen kan worden gemaakt is een verkeerde keuze van de aanzuiglocatie van de buitenlucht. Hierdoor kan vervuilde lucht in een gebouw terecht komen met vaak ongewenste hygiënische- of gezondheidsconsequenties. De optimale aanzuiglocatie voor ventilatielucht moet worden bepaald op basis van

- Optimale luchtkwaliteit;
- Minimaal risico van molest en bio-terreur;
- Vermijding van kortsluitrisico's.

Het is van het grootste belang de aanzuiglocatie van de ventilatielucht niet te laten bepalen door bouwkundige efficiëntie of de toevallige locatie van techniekruimten, maar omgekeerd. Niet de architect maar de ontwerper van het klimaatsysteem is hiervoor verantwoordelijk.

3.2 Windvangers

[10] *Badgir* is Iraans voor windtoren. *Badgirs* spelen al vanaf de vroegst bekende tijden een belangrijke rol in de natuurlijke klimaatregeling van gebouwen in de hete en droge woestijngebieden in Iran. Ook in de streekarchitectuur van andere tropische landen worden ze aangetroffen.

Een summiere literatuurstudie roept respect op voor de architecten uit het verleden die met behulp van plaatselijke klimaatomstandigheden een natuurlijke klimaatregeling wisten te realiseren. Hoewel het vochtige West-Europese zeeklimaat om andere voorzieningen valt er voor de bouwkunst anno 2011 nog veel van hen te leren.

Moderne *windcatchers* voor montage op platte en schuine daken worden als complete eenheden door Monodraught UK op de markt gebracht.

De principes die ten grondslag liggen aan de *badgir* en de *windcatcher* zijn in het Ventecdak[®] toegepast

[11] Hoofdstuk 11 gaat in op de mogelijkheden die de wind biedt voor natuurlijke ventilatie bij hoogbouw. Ventilatiesystemen met luchttoevoer via traditionele gevelroosters en ramen zijn problematisch voor wat betreft de ventilatiecapaciteit, die varieert met de winddruk en de luchtkwaliteit in een stedelijke omgeving. Voor deze problemen zijn verschillende oplossingen denkbaar in de vorm van dubbele huidgevels en/of regelbare gevelroosters. Bij deze concepten kan de ventilatielucht in het stookseizoen niet worden verwarmd, hetgeen bijzondere aandacht vraagt voor het thermisch comfort in de gevelzone. Evenmin kan in het koelseizoen de ventilatielucht worden gekoeld waardoor de thermische belasting van de ruimte toeneemt. Een concept waarbij de ventilatielucht via actief geregelde gevelroosters wordt toegevoerd en via een zonneshoorsteen in combinatie met een Ventecdak[®] wordt afgevoerd is beschreven in hoofdstuk 10 van deelrapport (III).

In het *Earth, Wind & Fire* concept zijn deze problemen met behulp van het Ventecdak[®] op een effectieve en elegante manier opgelost. Door de luchtaanzuiging op dakniveau is de luchtkwaliteit optimaal. Positieve winddrukken worden benut om de ventilatielucht via de overdrukkamer naar de Klimaatcascade[®] te voeren, waar de lucht op een natuurlijke manier wordt verwarmd of gekoeld en bevochtigd of gedroogd. De afvoer van de gebruikte lucht vindt plaats via de Zonneshoorsteen of Zonnefaçade[®]. Warmte wordt gerecupereerd in een warmtewisselaar voor direct gebruik in het verwarmingssysteem of indirect via de bodemopslag. De luchtafvoer wordt ondersteund door de Venturi-ejector in het Ventecdak[®]. Met behulp van een globaal analytisch rekenmodel wordt gedemonstreerd dat op deze manier aanzienlijke drukverschillen voor natuurlijke ventilatie kunnen worden gerealiseerd. Met behulp van in de windtunnel gevalideerde CFD simulaties is dit naderhand ook wetenschappelijk aangetoond (Hoofdstuk 16 en 17).

Verder is globaal onderzocht of het mogelijk is aerodynamische drukverschillen te exploiteren met behulp van een op dakniveau aan te brengen spoiler of vleugel voorzien van een overdrukcompartiment en Coanda-ejector. Technisch en architectonisch is dit een interessante optie, die echter in vergelijking met het Ventecdak[®] aanzienlijke complicaties oplevert en derhalve niet verder is uitgewerkt.

[12] In Hoofdstuk 12 wordt het Ventecdak[®] globaal uitgewerkt en gekwantificeerd. Het ontwerp maakt gebruik van de eerder omschreven principes en omvat een overdrukkamer met Bernoulli-injector voor luchttoevoer en een Venturi-ejector voor luchtafvoer.

[13] Een ventilatiesysteem moet worden gedimensioneerd op de voor een gebouw benodigde ventilatiecapaciteit, te bepalen door de klimaatadviseur. Het luchttoevoer- en het luchtafzuigebied zijn hierbij in principe in evenwicht. In het kader van het onderzoek is voor de ventilatiecapaciteit uitgegaan van voor kantoorgebouwen karakteristieke waarden, ontleend aan NEN-EN 15251 en NEN 2580.

De dimensionering van een natuurlijk werkend ventilatiesysteem wordt in principe gebaseerd op de beschikbare positieve drukken in de Bernoulli-injector en de Klimaatcascade[®], en de door de Zonneschoorsteen of Zonnefaçade[®] en Venturi-ejector opgewekte negatieve drukken.

Ontwerpgegevens komen beschikbaar na afronding en validatie van het complete *Earth, Wind & Fire* concept met behulp van het simulatiepakket ESP-r.

Om vooruitlopend op de ESP-r simulatie een indruk te krijgen van het gelijktijdig optreden van zon en wind is op basis van genormaliseerde klimaatgegevens een steekproef genomen uit een zomerperiode. Deze globale analyse geeft steun aan de verwachting dat zon en wind binnen het *Earth, Wind & Fire* concept inderdaad complementaire energieprofielen hebben.

[14] In het *Earth, Wind & Fire* concept wordt gebruikte lucht afgezogen via de zonneschoorsteen – zie deel (I) van het onderzoek. Na warmteterugwinning moet de lucht zonder kortsluiting met de aangezogen verse ventilatielucht te veroorzaken bovendaks worden afgevoerd. Oplossingen hiervoor zijn onderzocht met behulp van een Venturi-ejector in het Ventecdak[®] (hoofdstuk 11 en 12) en met een Coanda-ejector in een vleugel (hoofdstuk 11- niet verder uitgewerkt).

Hoofdstuk 14 geeft een derde variant, te weten luchtafvoer met behulp van dakkappen, die in bepaalde omstandigheden een ejector zouden kunnen vervangen. Een overzicht wordt gegeven van de op de markt verkrijgbare uitvoeringsvormen, onderverdeeld in traditionele, passieve, roterende en hybride dakkappen. Capaciteitsgegevens zijn meestal onbekend.

Verder worden enkele voorbeelden gegeven van specifiek voor een bepaalde toepassing ontworpen dakkappen, die als *landmark* een bijdrage leveren aan de architectonische expressie van een gebouw.

[15] In de voorgaande beschouwingen en analyses wordt de wind niet gehinderd door obstakels rondom een gebouw. In werkelijkheid staat een gebouw zelden solitair en zullen omliggende gebouwen, afhankelijk van de onderlinge tussenafstanden en hoogteverschillen, de windsnelheid en de windrichting beïnvloeden. De effectiviteit van het Ventecdak[®] kan hierdoor verminderen.

Een klimaatactief gebouw komt het beste tot zijn recht in een klimaatactieve stedenbouwkundige omgeving. Hoofdstuk 15 geeft globaal aan hoe en in welke mate de stedenbouwkundige omgeving de werking van het dak beïnvloedt. Voor specifieke situaties kan dit verschijnsel het beste in de windtunnel worden geanalyseerd.

De effectiviteit van een Zonneschoorsteen of Zonnefaçade[®] is overigens meer bepalend voor de stedenbouwkundige omgeving dan de effectiviteit van een Ventecdak[®]. Uitgaande van een gebouw dat over beide faciliteiten beschikt, hebben de eisen ten behoeve van de zonneschoorsteen dan ook prioriteit. Hierop gebaseerd is een stedenbouwkundige omgeving ontworpen die is gebruikt als testlocatie voor het Ventecdak[®]. De stedenbouwkundige karakteristieken van deze locatie zijn gebaseerd op de kengetallen van Spacemate[®].

3.3 Modelling, validatie en ontwerp

[16] Na een inleiding over het karakter en de mogelijkheden van CFD wordt een overzicht gegeven van de voor het Ventecdak[®] uitgevoerde simulaties. Onderzocht zijn de uitvoering en de optimale

geometrische verhoudingen van het dak, in eerste instantie bij gesloten venturi-ejector en daarna ook met actieve venturi-ejector, dus met een secundaire luchtstroom uit het gebouw.

De intuïtieve aanname dat voor de goede werking van de Venturi-ejector geleidevinnen en zijkleppen noodzakelijk zouden zijn wordt door de simulaties niet bevestigd. Optimale prestaties van het Ventecdak[®] worden gerealiseerd bij de meest eenvoudige constructie, dus zonder geleidevinnen en zijkleppen. Het Ventecdak[®] wordt hierdoor richtingonafhankelijk, een niet te onderschatten voordeel. De optimale hoogte van het bovenkanaal ligt tussen 1,0 en 2,0 m, en hangt in hoge mate af van de verhouding tussen de lichtsnelheid in de Venturi-ejector en de windsnelheid ter plaatse van de dakrand. Voor lage gebouwen en lage windsnelheden is een grotere hoogte nodig dan voor hoge gebouwen en hoge windsnelheden. Deze hoogtemaat dient bij een specifiek ontwerp te worden vastgesteld op basis van de gewenste prestatie van de Venturi-ejector en architectonische randvoorwaarden.

Een vergelijking van de numeriek gesimuleerde en de in de windtunnel gemeten winddrukcoëfficiënten laat zien dat de CFD simulaties een hoge mate van betrouwbaarheid hebben. Een Ventecdak[®] met een volledig bovendak kan bij middelhoge gebouwen om architectonische redenen ongewenst zijn. Een begin is gemaakt met de simulaties van een Ventecdak[®] met gereduceerd bovendak. De hiervoor vereiste CFD techniek met tijdsafhankelijke Large Eddy Simulaties (LES) kost extreem veel rekentijd. De eerste resultaten zijn bemoedigend.

[17] Hoofdstuk 17 geeft een verslag van de metingen die in de windtunnel zijn uitgevoerd om de werking van het Ventecdak[®] te onderzoeken en daarmee de CFD simulaties te toetsen en te valideren. Hiervoor is een model van het Ventecdak[®] schaal 1:100 gemaakt. De belangrijkste conclusies zijn:

- De overdruk ter plaatse van de luchtinlaat kan worden uitgedrukt in een C_{p_w} -waarde $\approx 0,8$
- Geleideschoepen leveren geen positieve bijdrage aan de werking van het dak. Door het ontbreken van geleideschoepen wordt het Ventecdak[®] windrichtingonafhankelijk.
- Met behulp van de gekozen dakvorm is het mogelijk een significante onderdruk in de keel van het Ventecdak[®] te realiseren.
- Bij een contractieverhouding van 1:5 worden, afhankelijk van de windrichting, C_{p_v} waarden van $-0,8$ tot $-1,35$ gerealiseerd. Bij een contractieverhouding van 1:9 zijn C_{p_v} -waarden gemeten van $-1,2$ tot $-1,7$.
- Omgevingsbebouwing heeft een beperkte invloed op de werking van het Ventecdak[®] zolang deze significant lager is dan het gebouw zelf. Bij bebouwing van gelijke hoogte wordt de werking van het dak verstoord.
- Bij de gekozen gebouw grootte en dakvorm, kan bij een neutrale druk in het gebouw de Venturi-ejector het gewenst ventilatie debiet leveren bij windsnelheden vanaf ongeveer de jaargemiddelde windsnelheid op dakrandhoogte. Bij lagere windsnelheden zullen de zonneshoorsteen en/of de hulpventilator het afzuigstelsel moeten ondersteunen.

[18] Het dynamisch simulatiemodel ESP-r, is gebruikt om de prestaties van een gebouw als geheel te simuleren. Hiervoor staat het gebouw model dat voor de *case study* is geselecteerd, en dat virtueel is herontworpen op basis van het Earth, Wind & Fire concept, d.w.z. uitgevoerd met Ventecdak[®], Klimaatcascade[®] en Zonnefaçade[®] –zie hoofdstuk 15 van deelrapport (IV).

De prestaties van het Ventecdak[®] zijn gesimuleerd met behulp van CFD simulaties, die zijn gevalideerd met behulp van een fysiek model in de windtunnel –zie hoofdstuk 16 en 17. Koppeling van het CFD model en het dynamisch ESP-r model is niet mogelijk. De resultaten van de gevalideerde CFD simulaties, uitgedrukt in de winddrukcoëfficiënt C_p , worden ingevoerd in het ESP-r simulatiemodel.

[19] De te realiseren positieve en negatieve drukken van een Ventecdak[®] zijn afhankelijk van de referentie windsnelheid op dakhogte en de C_p -waarden. De referentie windsnelheid wordt bepaald door de potentiële windsnelheid U_{10} , de ruwheidsklasse van het terrein en de hoogte van het gebouw, tot uitdrukking komend in het zgn. windprofiel. De C_p -waarden worden bepaald door het ontwerp van het dak. Aansluitend bij de CFD simulaties en de metingen in de windtunnel zijn logaritmische windprofielen berekend voor een omgeving met een ruwheidsklasse 6 volgens Davenport.

De Cp-waarden van het Ventecdak[®] zijn berekend met formules die zijn afgeleid met behulp van CFD simulaties. De resultaten zijn in grafische vorm weergegeven. Voor gebouwen tot 4 verdiepingen zijn de te realiseren drukken beperkt. Voor maximale prestaties verdient het aanbeveling de hoogte van het bovenkanaal zo groot mogelijk te maken en een lage snelheid in de Venturi-ejector te kiezen. Tevens kan worden overwogen geen gebruik van het dak te maken bij windsnelheden < 2 Beaufort. Bij hogere gebouwen en grote windsnelheden kunnen aanzienlijke drukken worden opgewekt, bijvoorbeeld + 60 en – 35 Pa op 50 hoogte bij 5 Beaufort. In dergelijke gevallen zal de hoogte van het bovenkanaal kunnen worden beperkt tot 1,0 m bij een luchtsnelheid in de Venturi-ejector van 2,0 m.s⁻¹. Beheersing van drukverschillen in het Ventecdak[®] bij windsnelheden van 0 – 20 m.s⁻¹ is een belangrijk aspect, dat regeltechnisch moet worden opgelost. Naast een traditionele oplossing wordt voorgesteld drukverschillen te regelen behulp van een bypass tussen overdrukkamer en bovenkanaal, waarin een windturbine wordt aangebracht. Deze drukverschilregeling dient in een vervolgonderzoek in samenhang met de debietregeling op werkplekniveau nader te worden onderzocht.

3.4 Energieopwekking met het Ventecdak[®]

[20] Eén van de doelstellingen van het Earth, Wind & Fire concept is het energiegebruik van de noodzakelijke pompen en hulpventilatoren in het gebouw zelf met behulp van wind en zon op te wekken. Het multi-functionele Ventecdak[®], dat in eerste instantie is ontworpen voor natuurlijk ventilatie, biedt hiervoor goede mogelijkheden. Hoofdstuk 20 onderzoekt de potentiële prestaties van windenergie, terwijl in hoofdstuk 21 zonne-energie wordt onderzocht.

Opwekking van windenergie in de gebouwde omgeving wordt beschouwd als een kansrijke technologie. De hiervoor ontwikkelde Urban Turbines, zoals de Turby (<http://www.turby.nl>) worden in principe op gebouwen geplaatst. De ontwikkeling van het Ventecdak[®] maakt het mogelijk windturbines in een gebouw te integreren. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de in het Ventecdak[®] opgewekte drukverschillen, die veel groter zijn dan die in de open lucht. Verder zijn eventuele geluidsproblemen door de in pandige opstelling gemakkelijker op te lossen en kan onderhoud plaatsvinden vanuit een gemakkelijk toegankelijke en beschermde techniekruimte. Windenergie kan hierdoor in principe kosteneffectief worden opgewekt.

In de overdrukkamer van het Ventecdak[®] kunnen, afhankelijk van de afmetingen hiervan, meerdere windturbines worden geplaatst. Er zijn drie varianten onderzocht met respectievelijk 4, 8 en 12 turbines Ø 2,5m in de overdrukkamer. De jaarproductie van deze turbines, uitgedrukt in kWh.a⁻¹ per m² rotoroppervlak, is afhankelijk van de gebouwhoogte. Bij een hydraulisch rendement van 75% zijn energieproducties berekend van ≈ 200 kWh.m⁻².a⁻¹ bij een gebouwhoogte van 20 m tot 780 kWh.m⁻².a⁻¹ bij 65 m hoogte. Met betrekkelijk kleine turbines kan hierdoor een energieopbrengst worden gerealiseerd die minstens gelijkwaardig is aan die van een Turby. Nader onderzoek met behulp van CFD simulaties en metingen in de windtunnel is nodig om de berekeningen te valideren en het concept voor algemene toepassingen te optimaliseren

De profielen van de beschikbare windenergie en zonne-energie zijn over de seizoenen gerekend redelijk complementair. 's Zomers veel zon en weinig wind. 's Winters veel wind en weinig zon. Een gecombineerde toepassing van zon- en windenergie in het Ventecdak[®] is daarom een interessante optie.

[21] Voor het opwekken van zonne-energie komt dunne film PV-folie in aanmerking dat weliswaar een lager rendement heeft dan PV panelen, maar een betere kosteneffectiviteit heeft en zich goed leent als dakbedekking van het Ventecdak[®]. Anno 2011 is met deze technologie een rendement van 10% bereikbaar, en verwacht wordt dat een rendement van 15% binnen bereik ligt. Op basis van het referentiejaar NEN 5060:2008 is met een rendement van 10% een jaaropbrengst van 100 kWh.m⁻² berekend, hetgeen overeenkomt met gepubliceerde cijfers.

4. BEGRIPPEN, EENHEDEN EN SYMBOLEN

4.1 Begrippen

Begrip	Engels	
Albedo	Albedo	Diffuse reflectiefactor
ASHRAE	ASHRAE	American Society of Heating Ventilation and Air-conditioning Engineers
Atmosferische grenslaag	Atmospheric Boundary Layer	De onderste laag van de atmosfeer waarin turbulentie door wind en thermiek aanwezig is.
Badgir	Badgir	Iraanse windtoren
Beaufort	Beaufort	Schaal van windsnelheden, aangeduid met “windkracht”
Bernoulli –wet van	Bernoulli law	Natuurkundige wetmatigheid die het stromingsgedrag van vloeistoffen en gassen beschrijft, en de drukveranderingen aan hoogte- en snelheidsveranderingen relateert
Bernoulli-injector	Bernoulli-injector	Opening in het Ventecdak [®] waardoor ventilatielucht in de Klimaatcascade [®] kan worden toegevoerd
Bio-terreur	Bio-terrorism	Moedwillige verspreiding van virussen door bacteriologische besmette stoffen
Bowen factor	Bowen factor	Verhouding tussen de voelbare en de latente warmtestroom die door zonnestraling wordt veroorzaakt
BREEAM	BREEAM	British Research Establishment Environmental Assessment Method – een systeem voor de bepaling van de milieuprestatie van gebouwen
BREEAM-NL	-	Nederlandse versie van BREEAM
bvo	gfa	bruto vloeroppervlak / resp. gross floor area
CBR	CBR	Chemische, Bacteriologische en Radioactieve stoffen
CFD	CFD	Computational Fluid Dynamics – Numerieke stromingssimulatie van fluida
CHTC	CHTC	Convective Heat Transfer Coefficient Convectieve warmteoverdrachtscoëfficiënt
Cradle to Cradle	Cradle to Cradle	Een filosofie voor duurzaam ontwerpen
Doosmodel		Eenvoudig model met behulp waarvan de concentratie van de luchtverontreiniging boven een stad wordt geschat.
DUBO	-	Duurzaam Bouwen
ECO-INSTAL	-	Rekenprogramma voor de bepaling van de milieuprestatie van installaties (in ontwikkeling).
ECO-QUANTUM	-	Rekenprogramma voor de bepaling van de milieuprestatie van gebouwen.
ESP-r	ESP-r	Dynamisch gebouw simulatieprogramma.
Geo-Klimaatconcept	Geo-Climate concept	Innovatief systeem van klimaatregeling dat gebruik maakt van de zwaartekracht en de aardmassa voor het conditioneren van lucht.
Globale straling	Global radiation	Som van de directe zonstraling en diffuse hemelstraling op een horizontaal vlak.

GPR-Gebouw	-	Een rekenmodel voor het duurzaam ontwikkelen van gebouwen
GREENCALC	-	Rekenprogramma voor de milieuprestatie van gebouwen
g-waarde	g-value	De verhouding tussen de binnenkomende en de opvallende zonnestraling voor een raam of beglazingssysteem (zowel directe als diffuse straling). Vroegere aanduiding ZTA-waarde.
Interne grenslaag	Urban boundary layer	Laag waarin de stroming bij toenemende strijklengte wordt aangepast aan de ruwheid van de stad.
Invalshoek	Angle of incident	De hoek tussen de zonnestraal en de normaal op het betreffende vlak.
Irradiantie	Irradiance	De stralingsflux die door een oppervlakte-element wordt opgevangen.
ISIAQ	ISIAQ	International Society for Indoor Air Quality and Climate
ISSO	ISSO	Kennisinstituut voor de Installatiesector
Karman constante	Karman constant	Dimensieloze constante die het logaritmische snelheidsprofiel beschrijft van een turbulente vloei-stroming in de buurt van een grenslaag.
Klimaatactief gebouw, bouwelement,	Climate active building	Een gebouw of bouwelement dat dynamisch reageert op veranderende binnen- of buitencondities door fysische eigenschappen te veranderen om daarmee de energetische prestaties te verbeteren..
Klimaatcascade®	Climate Cascade®	Onderdeel van het Geo-Klimaatconcept waarmee lucht wordt geconditioneerd door direct contact met gekoeld of verwarmd water dat met sproeiers in de luchtstroom wordt gebracht.
Kortsluiting	Short Circuiting	Een ongewilde verbinding tussen luchtafvoer en luchtaanzuig bij ventilatiesystemen.
Loefzijde	Wind side	Windzijde
Lijzijde	Lea side	Benedenwindse zijde
Menglaag	Mixing layer	Luchtlaag waarvan de lucht door turbulentie of convectie dooreen gemengd en homogeen wordt.
PCM	Phase Change Material	PCM is een faseovergangsmateriaal met een hoge smeltings/stollingswarmte dat tijdens de faseovergang energie kan opslaan respectievelijk afgeven.
PLEA	PLEA	Passive and Low Energy Architecture – een internationale architectuurstroming.
PM ₁₀	PM ₁₀	Fijn stof - Vaste deeltjes ≤ 10 µm
PM _{2,5}	PM _{2,5}	Zeer fijn stof - Vaste deeltjes ≤ 2,5 µm
PM _{0,1}	PM _{0,1}	Ultra fijn stof – Vaste deeltjes ≤ 0,1µm
Potentiele windsnelheid – U ₁₀	Potential wind speed	In weerstations gemeten windsnelheid op een hoogte van 10 m in een vlak terrein met een ruwheidlengte van 0,03 m.
Radiantie	Radiance	De intensiteit van uitgaande straling in een bepaalde richting van een oppervlakte-element gedeeld door het oppervlak van de loodrechte projectie van het element op een vlak loodrecht op de gegeven richting.

REHVA	REHVA	Federation of European Heating, Ventilation and Air-conditioning Associations.
Ruwheidslengte		Een aerodynamische karakteristiek van het bodemoppervlak bepaald door de bodemstructuur en de geometrie van de obstakels. Windsnelheid neemt af bij toenemende ruwheidhoogte .
Stedelijke laag	Urban Canopy Layer	Laag waarin de windstroming voornamelijk bepaald wordt door de geometrie van straten en hoogte van gebouwen.
Strijklengte		Afstand waarover wind over een aaneengesloten oppervlak strijkt.
Stralingsenergie	Radiant energy	De hoeveelheid energie overgedragen door straling.
Stralingsflux, vermogen	Radiant flux	De stralingsenergie per tijdseenheid. Het vermogen dat wordt uitgezonden, overgedragen of ontvangen in de vorm van straling.
Trombewand	Trombewall	Een trombewand bestaat in principe uit een wand met daarvoor een glasplaat. De wand achter het glas warmt op door de zon en geeft - door de massa van de wand - de warmte vertraagd door naar de ruimte erachter. Door de glazen plaat wordt afkoeling en uitstraling naar buiten ('s nachts) tegengegaan.
Turbiditeit	Turbidity	Troebelheid; de toestand waarbij de doorlatendheid van de atmosfeer voor (zichtbare) straling is verminderd.
Turbulentie	Turbulence	Zie vlagerigheid
Turby	Turby	Kleine windturbine geschikt voor een stedelijke omgeving
TVVL	TVVL	Platform voor mens en techniek – voorheen Nederlandse Technische Vereniging voor Installaties in Gebouwen
Ventecdak [®]	Ventec Roof [®]	Innovatieve dakvorm die positieve winddruk benut voor energieopwekking en toevoerventilatie van gebouwen en negatieve winddruk voor afzuigventilatie
Ventilatiefactor	Ventilation factor	Variabele grootte, bepaald door windsnelheid en menghoogte, waarmee de afvoer van luchtverontreinigingen kan worden geschat.
Venturi-ejector	Venturi-ejector	Opening in het Ventecdak [®] waardoor ventilatielucht kan worden afgezogen
Vermogenscoëfficiënt	Power Coëfficiënt	De verhouding tussen het onttrokken vermogen en het totale vermogen van de massastroom in een windturbine
Venturi-effect	Venturi effect	Een doelbewust in een stromingskanaal voor vloeistof of gas aangebrachte vernauwing. Doordat het passerende medium een snelheidsverhoging ondergaat ontstaat daardoor op die plek een drukverlaging; het “Venturi-effect”.
Verschuivingshoogte		
Vlagerigheid		Windvariaties in tijd en snelheid
Winddrukcoëfficiënt	Pressure coëfficiënt	Fractie van de dynamische winddruk en de winddruk op een gebouw
Warmte-eiland effect	Urban Heat Island	Verschijsel dat de temperatuur in een stedelijk gebied gemiddeld hoger is dan op een referentiepunt in het omliggend landelijk gebied.

Windroos	Wind rose	Grafische voorstelling van windsnelheden en windrichtingen in een bepaalde periode
Wrijvingssnelheid		Fictieve “snelheid” die afhangt van de wrijving die de wind ondervindt bij de stroming langs het grondoppervlak
Zog	Wake	Gebied aan de lijzijde van een gebouw waar de windinvloed nog merkbaar is.
Zonnefaçade [®] of Zonnegevel [®]	Solar Façade [®]	Gevelbedekkende Zonneschoorsteen
Zonneschoorsteen	Solar Chimney	Een verticale schacht waarin zonne-energie wordt benut om natuurlijke ventilatie in een gebouw te stimuleren en zonnewarmte te oogsten.
Zonnetoren	Solar updraft tower	Krachtcentrale voor de opwekking van elektrische energie. Lucht wordt verwarmd in een grote cirkelvormige glasoverkapt ruimte en stijgt op in een hoge slanke toren. De convectiestroom drijft luchturbines aan die elektrische stroom opwekken.
ZTA-waarde		Zie g-waarde
Zwarte straler	Black body	Een voorwerp dat al het licht dat er op valt, absorbeert, en dus niet reflecteert. Hoewel de naam anders zou doen vermoeden, zendt een zwarte straler wel degelijk licht uit. Het spectrum van een zwarte straler is zeer karakteristiek, en slechts afhankelijk van de temperatuur van de zwarte straler.

4.2 Eenheden en symbolen ruimte en tijd

l	lengte	m
b	breedte, diepte	m
h	hoogte	m
d	dikte	m
r	straal	m
D	middellijn, diameter	m
s	weglengte	m
A	oppervlak	m ²
V	volume, inhoud	m ³
t	tijd	s
u, v, w, c	snelheid	m.s ⁻¹
a	versnelling	m.s ⁻²
g	gravitatieversnelling	m.s ⁻²

4.3 Eenheden en symbolen warmte

T	Thermodynamische temperatuur	K
θ (<i>theta</i>)	Celsiustemperatuur	⁰ C
α, λ (<i>alpha, lamda</i>)	lineaire uitzettingscoëfficiënt	K ⁻¹

β, α_v	(beta,)	kubieke uitzettingscoëfficiënt	K^{-1}
Q		hoeveelheid warmte	J
Φ	(phi)	warmtestroom	W
q_s		warmtestroomdichtheid	$W.m^{-2}$
G		warmtegeleiding	$W.K^{-1}$
λ	(lamda)	warmtegeleidingscoëfficiënt	$W.m^{-1}.K^{-1}$
h		warmteoverdrachtscoëfficiënt	$W.m^{-2}.k^{-1}$
U		warmtedoorgangscoefficiënt	$W.m^{-2}.K^{-1}$
r		warmteweerstandscoefficiënt	$m.k.W^{-1}$
R		warmteweerstand	$m^2.K.W^{-1}$
a		temperatuurvereffeningscoëfficiënt	$m^2.s^{-1}$
C		warmtecapaciteit	$J.k^{-1}$
r		verdampingswarmte	$kJ.kg^{-1}$
c		soortelijke warmte	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
c_p		soortelijke warmte bij constante druk	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
c_v		soortelijke warmte bij constant volume	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
γ	(gamma)	verhouding c_p/c_v	-
h		(soortelijke) enthalpie	$J.kg^{-1}$

4.4 Eenheden en symbolen klimaatregeling

t		tijd	s
T		thermodynamische temperatuur	K
θ	(theta)	celsiustemperatuur	$^{\circ}C$
v		volume	m^3
q_v		volumestroom, (volume)debiet	$m^3.s^{-1}$
m		massa	kg
q_m		massastroom	$kg.s^{-1}$
p		druk	Pa
A		oppervlak	m^2
u, v, w, c		snellheid	$m.s^{-1}$
ρ	(rho)	(massa)dichtheid, soortelijke massa	kg.
c		soortelijke warmte	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
$h, (i)$		(soortelijke) enthalpie	$J.kg^{-1}$
P		vermogen	W
Q		hoeveelheid warmte	J
Φ	(phi)	warmtestroom	W
$q, (\varphi)$	(phi)	warmtestroomdichtheid	$W.m^{-2}$
U		warmtedoorgangscoefficiënt	$W.m^{-1}.K^{-1}$
G		vochtstroom	$kg.s^{-1}$
g		vochtstroomdichtheid	$kg.m^{-2}.s^{-1}$

x	absolute vochtigheid	kg.kg^{-1}
φ (phi)	relatieve vochtigheid	%
n	ventilatievoud	$\text{m}^3.\text{h}^{-1}.\text{m}^{-3}$
N	aantal uren	h
G_h	aantal graaduren	K.h
G_d	aantal graaddagen	K.d
I_{clo}	kledingweerstand	Clo ($0,155\text{m}^2.\text{K.W}^{-1}$)

4.5 Eenheden en symbolen stromingsleer

C_p	Winddrukcoëfficiënt	-
C_{pow}	Vermogenscoëfficiënt	-
p	druk	Pa
σ (sigma)	normaalspanning	Pa
τ (tau)	schuifspanning	Pa
$\eta, (\mu)$ (eta, mu)	(dynamische) viscositeit	Pa.s
ν (nu)	kinematische viscositeit	$\text{m}^2.\text{s}$
ζ (xi)	weerstandcoëfficiënt	-
λ (lamda)	weerstandsfactor voor pijpen	-
σ, γ (sigma, gamma)	oppervlaktespanning	n.m^{-1}

5. HET WINDKLIMAAT VAN NEDERLAND

5.1 Inleiding en Samenvatting

“Kennis van het wisselvallige gedrag van de wind is van praktisch belang voor bouwconstructeurs, planologen, molenaars, boeren, bestrijders van luchtverontreiniging, piloten, zeilers, kampeeders en vele anderen” (Wieringa, J. en Rijkoort, P.J. 1983).

Voor het onderzoek *Earth, Wind & Fire* kunnen hieraan de volgende aspecten worden toegevoegd:

- Hoe kan van de wind gebruik worden gemaakt als drijvende kracht voor de natuurlijke ventilatie van gebouwen, zowel toevoer als afzuig?
- Wat is met het oog op de aanzuiglocatie van ventilatielucht de invloed van de wind op de verdunning en de verspreiding van luchtverontreinigingen?
- Hoe kan van de wind gebruik worden gemaakt voor energieopwekking in de gebouwde omgeving?

Om enig inzicht te krijgen in het wisselvallige gedrag van de wind is hiervan met gebruikmaking van verschillende bronnen een globale studie gemaakt (Wieringa, J. e.a. 1983, Wit, de M.H. 2001, Alard F. 1998). Hierbij komen verschillende aspecten aan bod waarvan niet a priori vaststaat dat ze bij het onderzoek een rol zullen spelen, maar die bij een windonderzoek ook niet kunnen worden veronachtzaamd, en die mogelijk bij het verdere onderzoek nuttig kunnen zijn. Aan de orde komen de atmosferische grenslaag waarin de stad “*ademi*”, windsnelheidsprofielen in de grenslaag en de invloed daarop van het temperatuurprofiel en de terreinruwheid, dagelijkse variaties van de wind, de invloed van obstakels en de vlaggerigheid en de turbulentie van de wind.

Frequentieverdelingen van windsnelheden en windrichtingen komen aan de orde in hoofdstuk 6. Het windklimaat in de stad en de luchtstromingen om gebouwen worden in de hoofdstukken 7 en 8 uitgediept.

5.2 De menglaag (atmosferische grenslaag)

In de atmosfeer worden verschillende lagen onderscheiden met elk verschillende eigenschappen. Voor dit onderzoek is vooral van belang de atmosferische grenslaag (*atmospheric boundary layer*), ook wel menglaag (*mixing layer*) genoemd. Dit is de laag van waaruit een regio of stad frisse ventilatielucht betreft en waarin luchtverontreinigingen worden gedumpt; zie hoofdstuk 7.

De stroming in de atmosferische grenslaag is turbulent en turbulentie veroorzaakt menging. In de grenslaag worden warmte, vocht, luchtverontreiniging en windsnelheid door turbulentie gemengd.

Aan het aardoppervlak wordt de stroming van de wind door wrijving afgeremd; hoe groter de ruwheid van het grondoppervlak, des te groter is de afremming; de turbulentie neemt hierdoor ook toe.

Als het aardoppervlak warmer is dan de lucht, bijvoorbeeld bij zonneshijn, neemt de turbulentie toe door de opwaartse thermiek. Het omgekeerde gebeurt als bijvoorbeeld door nachtelijke uitstraling het grondoppervlak afkoelt, en de turbulentie vermindert. De turbulente menging is dus van 2 factoren afhankelijk, (1) de ruwheid van het grondoppervlak –zie paragraaf 5.4 en (2) de verticale warmtestroom –zie par. 5.5.

Voor bouwkundige toepassingen wordt de verticale warmtestroom normaliter buiten beschouwing gelaten; de atmosfeer is dan in neutraal of indifferent evenwicht, en de grenslaag is neutraal – zie par. 5.5. De dagelijkse gang van de zonnestraling, de bewolking en de warmteafgifte van een stad worden hierbij verwaarloosd. De reden voor deze simplificatie is tweeledig:

- Windstudie dient in de bouw voornamelijk voor het schatten van de windbelasting in stormsituaties en de invloed van warmtestromen zijn dan verwaarloosbaar.
- Onderzoek naar de stroming om bouwwerken wordt uitgevoerd in windtunnels, en er zijn in Nederland geen windtunnels waarin een verticale warmtestroom kan worden nagebootst.

Uit buitenlands onderzoek is gebleken dat een dergelijke simplificatie bij lage windsnelheden niet te verwaarlozen is. Bovendien gaat het bij het onderzoek *Earth, Wind & Fire* om hele andere aspecten dan windbelastingen.

5.3 Windsnelheidsprofiel

In een vlak terrein is de windsnelheid een logaritmische functie van de hoogte boven de grond uitgedrukt in de formule:

$$U(z) = \frac{U^*}{k} \ln\left(\frac{z-d}{z_0}\right) \text{ m/s}$$

(5.1)

Waarin

$U(z)$	=	windsnelheid op hoogte z	[m.s ⁻¹]
U^*	=	wrijvingsnelheid	[m.s ⁻¹] zie onder
K	=	von Karman constante	[---] waarde 0,4
z	=	hoogte boven de grond	[m]
z_0	=	ruwheidlengte	[m] zie onder
d	=	verschuivingshoogte	[m] zie onder

Toelichting op de begrippen:

- De wrijvingsnelheid U^* is een fictieve “snelheid” die afhangt van de wrijving die de wind ondervindt bij de stroming langs het grondoppervlak.
- De ruwheidlengte z_0 is een aerodynamische karakteristiek van het bodemoppervlak bepaald door de bodemstructuur en de geometrie van de obstakels –zie paragraaf 5.4. De windsnelheid neemt af bij toenemende ruwheidhoogte.
- De verschuivingslengte d is een virtuele verhoging van het grondoppervlak in het geval de dichtheid van de obstakels op de grond groter is dan ca 25% van het totale oppervlak.

Op Nederlandse weerstations worden op een hoogte van ca 10 m de windsnelheden geregistreerd met behulp van een anemometer, en de windrichting met een windvaan. De weerstations liggen in vlak terrein met een ruwheidlengte z_0 van 0,03 m. De aldus geregistreerde windsnelheid U_{10} wordt aangeduid met “*potentiële windsnelheid*”. Met de logaritmische formule (5.1) kan het verloop van de gelijktijdige windsnelheden over de hoogte Z als volgt worden berekend:

$$U^* = \frac{K \cdot U_{10}}{\ln\left(\frac{z-d}{z_0}\right)} = \frac{0,4 \cdot U_{10}}{\ln\left(\frac{10-0}{0,03}\right)} = 0,069U_{10} \quad [\text{m.s}^{-1}]$$

(5.2)

Op 1,75 m (loop)hoogte is de windsnelheid:

$$U_{1,75} = \frac{0,069U_{10}}{0,4} \ln\left(\frac{1,75-0}{0,03}\right) = 0,7U_{10} \quad [\text{m.s}^{-1}]$$

(5.3)

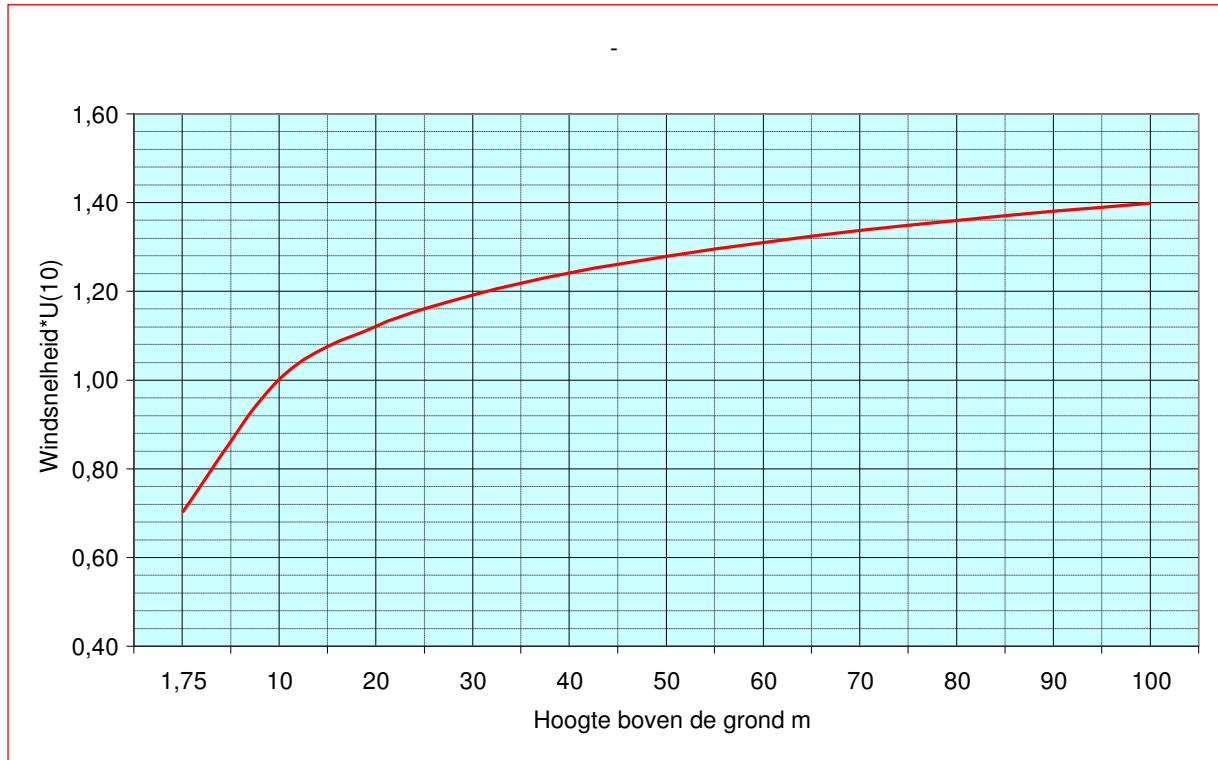
Op 50 m hoogte is de windsnelheid:

$$U_{50} = \frac{0,069U_{10}}{0,4} \ln\left(\frac{50-0}{0,03}\right) = 1,28U_{10} \quad [\text{m.s}^{-1}]$$

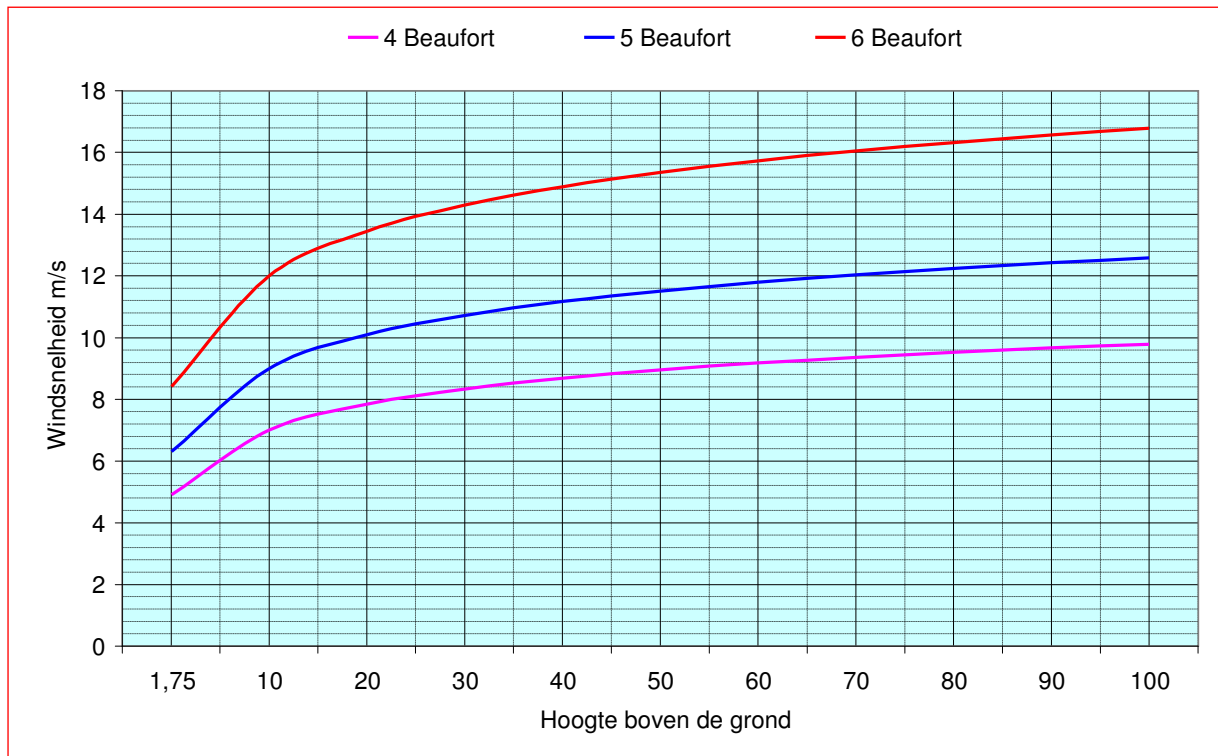
(5.4)

Figuur 5.1 laat zien hoe de windsnelheid bij $U_{10} = 1,0 \text{ m.s}^{-1}$ varieert van ca $0,7 \text{ m.s}^{-1}$ op loophoogte 1,75 m naar ca $1,4 \text{ m.s}^{-1}$ op 100 m hoogte.

Figuur 5.2 laat de windsnelheden zien vanaf 1,75 tot 100 m zien bij een windkracht van 4, 5 en 6 Beaufort op de meetlocatie.



Figuur 5.1 – Windsnelheden boven vlak terrein



Figuur 5.2 – Windsnelheden boven vlak terrein voor 4, 5 en 6 Beaufort van loophoogte tot 100m

5.4 De Davenport Ruwheidsclassificatie

De ruwheidslengte z_0 kan worden geschat op basis van een terreinclassificatie waarbij voor elk terreintype een grove aanduiding van de bijbehorende z_0 waarde is gegeven. Veel gebruikt is de ruwheidsclassificatie volgens Davenport –zie tabel 5.1, ontleend aan (Wieringa 1983). Deze classificatie is inmiddels op verschillende punten verfijnd en aangepast (Wieringa, J. 2001), maar voor het doel van het onderzoek doet dit niet zoveel ter zake.

De windprofielen voor de CFD simulaties en de modelmetingen in de windtunnel van het Ventecdak[®] –hoofdstuk 16 en 17- zijn gebaseerd op een zeer ruw terrein, klasse 6 met een ruwheidslengte $z_0 = 0,5$ m.

klasse	naam	z_0 -m	beschrijving
1	zee	0,0002	Open zee of plas, met een vrije strijklengte van tenminste 1 km, ongeacht de hoogte der golven.
2	glad	0,005	Landoppervlak zonder merkbare obstakels of begroeiing, bijvoorbeeld wad, strand, ijsvlakte, sneeuwlandschap zonder bomen
3	open	0,03	Vlak land met alleen oppervlakkige begroeiing, (gras) en soms geringe obstakels. Bijvoorbeeld startbanen, weideland zonder windsingels, braakliggend bouwland
4	ruwweg open	0,1	Bouwland met regelmatig laag gewas of weideland met sloten die minder dan 20 slootbreedten van elkaar liggen. Verspreide obstakels kunnen voorkomen op onderlinge afstanden van minstens 20x hun eigen hoogte
5	ruw	0,25	Bouwland met afwisselend hoge en lage gewassen. Grote obstakels met onderlinge afstanden van omstreeks 15x hun eigen hoogte. Wijngaarden, maïsvelden en dergelijke.
6	zeer ruw	0,5	Obstakelgroepen (grote boerenhofsteden, stukken bos e.d.) gescheiden door open ruimten van omstreeks 10x de typische obstakelhoogte. Voorts verspreid struikgewas, jong dicht open gepland bos en boomgaardgebieden.
7	gesloten	1,0	Bodem regelmatig en volledig bedekt met vrij grote obstakels, met tussengelegen ruimten niet groter dan een paar obstakelhoogten. Bijvoorbeeld grote bossen, laagbouw in dorpen en kleine steden.
8	stadskern	$\geq 2,0$	Centrum van grote stad met afwisselend laag- en hoogbouw. Ook bossen met grote oude bomen en veel onregelmatige open plekken.

Tabel 5.1 – Ruwheidsclassificatie volgens Davenport

5.5 Temperatuurinvloed

Het snelheidsverloop van de wind met de hoogte, het zgn. windprofiel, hangt af van het verloop van de temperatuur in de grenslaag met de hoogte, het zgn. temperatuurprofiel en van de geaardheid van het terrein bovenwinds. Voor dit tweede aspect zie paragraaf 5.7.

5.5.1 Onstabiele grenslaag:

Als het aardoppervlak relatief warm is ten opzichte van de atmosfeer wordt de grenslaag onstabiel genoemd. Dit kan het geval zijn op een zonnige zomerse dag, maar ook op een voorjaars- of najaarsdag wanneer er koude lucht uit de poolstreken wordt aangevoerd. De lucht aan de grond is dan warmer dan die op enige hoogte, bellen van deze lichtere lucht stijgen daardoor op, en worden vervangen door bellen van koudere en zwaardere lucht uit de hogere lagen. Bij deze verticale uitwisseling van luchtbellen wordt tevens de horizontale windsnelheid van deze bellen mee uitgewisseld. De doorgave van windsnelheid van grote hoogte naar beneden is dan maximaal, zodat de wind aan de grond maar weinig zwakker is dan die op grotere hoogte.

5.5.2 Stabiele grenslaag:

Als het aardoppervlak kouder is dan de atmosfeer erboven wordt de grenslaag stabiel genoemd. Dit kan het geval zijn in een heldere nacht als de grond afkoelt door warmtestraling naar het heelal. De lucht aan de grond is dan kouder dan die op enige hoogte en er vindt geen uitwisseling tussen de luchtlagen plaats. Ook de verticale uitwisseling van windsnelheid blijft dan achterwege, waardoor een krachtige wind op grotere hoogte kan samengaan met windstilte in de onderste regionen.

5.5.3 Adiabatische grenslaag:

De hoeveelheid bewolking speelt een belangrijke rol voor de stabiliteit van de grenslaag omdat deze bepalend is voor de mate van opwarming en afkoeling van de grond. Bij aanwezigheid van bewolking kunnen de opwaartse- en neerwaartse stromen in evenwicht zijn, waardoor de warmte-uitwisseling nul is. De grenslaag wordt in dit geval adiabatisch genoemd. Gemiddeld neemt de temperatuur dan af met de hoogte, $0,6^{\circ}\text{C}$ tot $1,0^{\circ}\text{C}$ per 100 m hoogteverschil. Een adiabatische grenslaag treedt gedurende korte tijd op tijdens de overgang tussen een onstabiele dag en een stabiele nacht, maar wordt ook effectief benaderd bij veel bewolking.

5.6 Dagelijkse variaties van de wind

Omdat boven land de nachtelijke grenslaag gemiddeld stabiel is en de grenslaag overdag enigszins onstabiel, is in de oppervlaktelaag de wind 's nachts gemiddeld zwakker dan overdag; men noemt dit de *dagelijkse gang* van de wind.

Overdag is bij weinig bewolking de grenslaag onstabiel en de neerwaartse doorgave van wind zeer effectief. De windsnelheid aan de grond is dan relatief hoog en aangezien die bewegingsenergie wordt aangevoerd ten koste van de luchtbeweging op hoger niveau, is de windsnelheid daar dan relatief laag.

Omgekeerd wordt in een stabiele nacht de lucht op grotere hoogte nauwelijks afgeremd door de grondruwheid, waardoor de windsnelheid daar toeneemt tot de grootteorde van de geostrofische wind.

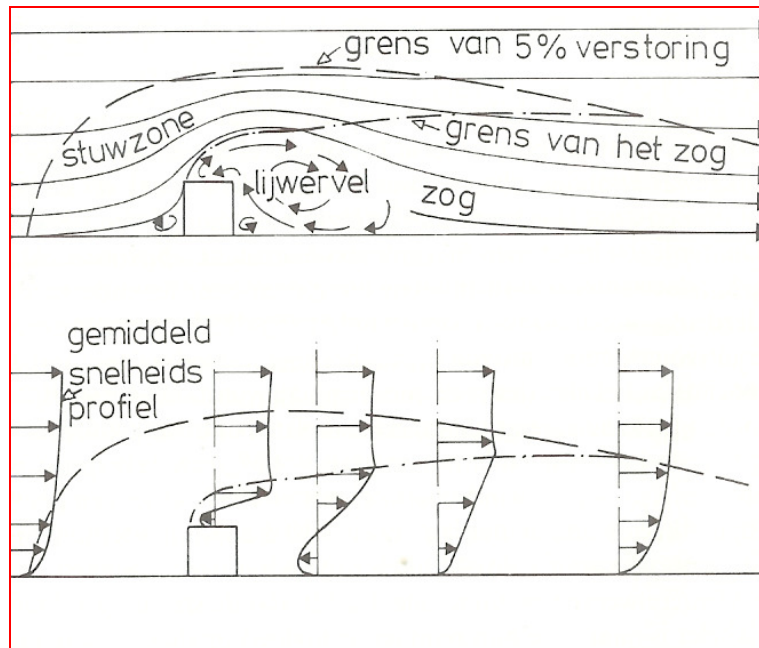
De vorm van de dagelijkse gang is niet geheel symmetrisch. Aan de grond op een onbewolkte dag neemt 's morgens de windsnelheid langzaam toe, terwijl deze bij het vallen van de avond vrij snel afneemt.

Metingen van de windsnelheid nabij de grond kunnen niet zonder meer worden gebruikt om de windsnelheid op grotere hoogte te schatten.

5.7 Invloed van obstakels en terreinruwheid op de wind

Figuur 5.3 geeft een kwalitatief beeld van de windstroming rondom een blokvormig object, bijvoorbeeld een huis dat eenzaam op een open veld staat. Aan de windzijde, ook *loefzijde* genoemd, wordt de lucht afgeremd en stroomt langs en over het huis, waar de snelheid toeneemt in vergelijking met het ongestoorde bovenwindse terrein. Benedenwinds van het object, aan de *lijzijde*, komt de lucht van opzij en van bovenaf weer toestromen, waarbij wervelingen ontstaan. Verder weg benedenwinds herstelt de stroming zich geleidelijk, maar toch treedt nog op grotere afstand een zgn. *zog* op met een windprofiel dat duidelijk afwijkt van het ongestoorde bovenwindse profiel.

Het directe invloedsgebied van obstakels op de wind nabij de grond wordt *zoggebied* genoemd en strekt zich naar boven uit tot een hoogte $z \approx 2H$ en benedenwinds tot een afstand $x \approx 12H$, waarbij H staat voor de hoogte van het obstakel. Van een "open ruimte" tussen obstakels is dus alleen sprake als $x/H \geq 12$ voor alle mogelijke windrichtingen. Als de obstakels veel dichter op elkaar staan, en er nabij de grond alleen maar luwtegebieden en wervels optreden, houdt de stroming nabij de grond nauwelijks meer verband met de gemiddelde windstroming boven de obstakels. Dit is het geval bij bossen, dorpen en steden; men spreekt dan van een *gesloten* ruwheid.



Figuur 5.3. Invloed van een obstakel

5.8 Windvlagen en turbulentie

Windvariaties in tijd en snelheid, aangeduid met de begrippen turbulentie of vlaggerigheid, zijn gekoppeld aan de ruwheid van een terrein. Metingen wijzen uit dat windvlagen zeer onregelmatig kunnen zijn met zowel korte uitschieters van enkele seconden als langdurige windvariaties van enkele minuten. Op grotere hoogte blijven hoofdzakelijk de langere variaties over.

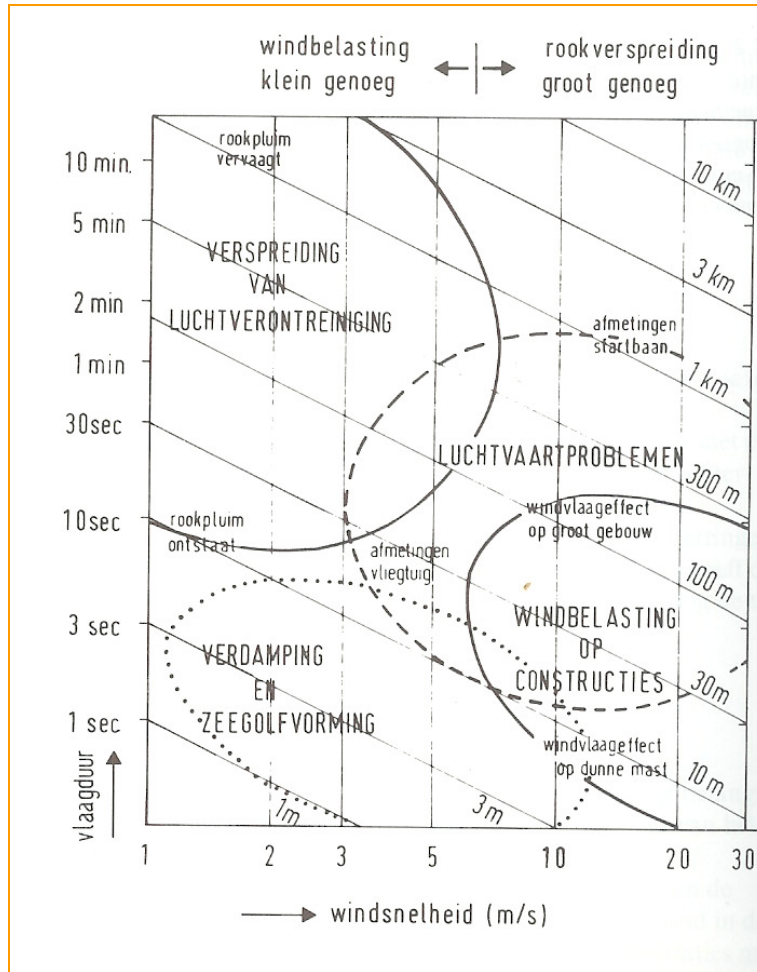
De afmetingen van een vlaag wordt uitgedrukt in het product $U \cdot t$ van vlaagduur t en de gemiddelde windsnelheid U . In figuur 5.4 is deze relatie tot uitdrukking gebracht; de diagonale lijnen geven de vlaaggolflengte weer. In de figuur zijn tevens de voor verschillende praktische toepassingen relevante vlaaggolflengten weergegeven.

De verhouding tussen de mediane maximale vlaagsnelheid u_{max} binnen 10 minuten en de gemiddelde windsnelheid op die plaats en hoogte wordt aangeduid met vlaagfactor G en kan worden geschat met formule (5.5)

$$G = \left(\frac{u_{max}}{U} \right)_z = f_r \left(1 + \frac{1,42 + 0,3 \ln \left[\left(\frac{10^3}{Ut} \right) - 4 \right]}{\ln \left(\frac{z}{z_0} \right)} \right)$$

(5.5)

Waarin	G	= vlaagfactor	[-]
	u_{max}	= mediane maximale vlaagsnelheid	[m.s ⁻¹]
	U	= gemiddelde windsnelheid op plaats en hoogte z	[m.s ⁻¹]
	Ut	= vlaagafmeting	[m]
	z	= hoogte	[m]
	z_0	= bovenwindse ruwheid	[m]



Figuur 5.4 – Vlaagduur en vlaaggolflengte

Bij een vlaaggolfanalyse wordt niet gewerkt met een gemiddelde maar met een mediane vlaagfactor, omdat een mediaan weinig wordt beïnvloed door incidenteel aanwezige niet representatieve hoge waarden.

6. WINDSTATISTIEKEN

6.1 Inleiding en samenvatting

Het windklimaat wordt in Nederland door het KNMI op een groot aantal weerstations onderzocht. Langjarige gemiddelden 1971 – 2000 zijn in de Klimaatatlas van Nederland gepubliceerd.

(<http://www.knmi.nl/klimatologie>)

Op de site van het KNMI Hydra Project - Wind climate assessment of the Netherlands - zijn verder uitgebreide distributieve en cumulatieve frequentietabellen per jaar en per maand te vinden van het windklimaat in Nederland alsmede windrozen, gemeten op 28 weerstations.

(<http://www.knmi.nl/samenw/hydra/index.html>).

De aangegeven windsnelheden hebben alle betrekking op de zgn. “*potentiële windsnelheid*” dat is de snelheid gemeten op 10 meter hoogte bij een ruwheidlengte van 0,03 m; zie hoofdstuk 5. Paragraaf 6.7 geeft de distributieve frequentietabel van de potentiële windsnelheid op Schiphol volgens Hydra.

De gepubliceerde windsnelheden zijn aangegeven in $m.s^{-1}$. Paragraaf 6.2 geeft een vergelijkend overzicht van windsnelheden en de populaire Beaufort-schaal.

6.2 De Beaufort-schaal

Windsnelheden worden vaak opgegeven in schaaldelen van de Beaufort-schaal en aangeduid met “*windkracht*”, zie tabel 6.1. De opgegeven schaaldelen zijn gemiddeld over minstens 10 minuten.

Klassenummer en benaming	Omschrijving zichtbare uitwerking te land (verkort)	Windsnelheid [$m.s^{-1}$]
0 Stil	Rook stijgt bijna recht omhoog	0 – 0,2
1 Zwakke wind	Windrichting herkenbaar aan rookpluimen	0,3 – 1,5
2 Zwakke wind	Wind merkbaar in het gezicht, bladeren ritselen	1,6 – 3,3
3 Matige wind	Bladeren en takken bewegen, lichte vlag wappert	3,4 – 5,4
4 Matige wind	Stof en papier dwarrelen op boven open terrein	5,5 – 7,9
5 Vrij krachtige wind	Bebladerde takken zwaaien	8,0 – 10,7
6 Krachtige wind	Wind fluit in draden, paraplu’s moeilijk hanteerbaar	10,8 – 13,8
7 Harde wind	Gehele bomen bewegen, wind is hinderlijk om tegen in te lopen	13,9 – 17,1
8 Stormachtig	Takjes breken af, lopen is lastig ook bij wind opzij	17,2 – 20,7
9 Storm	Schoorsteenkappen en dakpannen worden afgerukt, lichte schade in bossen	20,8 – 24,4
10 Zware storm	Flinke schade aan gebouwen, bomen worden ontworteld	24,5 – 28,4
11 Zeer zware storm	Zware schade in steden en bossen	28,5 – 32,6
12 Orkaan	Komt te land vrijwel nooit voor	$\geq 32,7$

Tabel 6.1 – Internationale Beaufort-schaal te land

6.3 Classificatie van windgebieden in Nederland

(Wieringa, J. e.a. 1983)

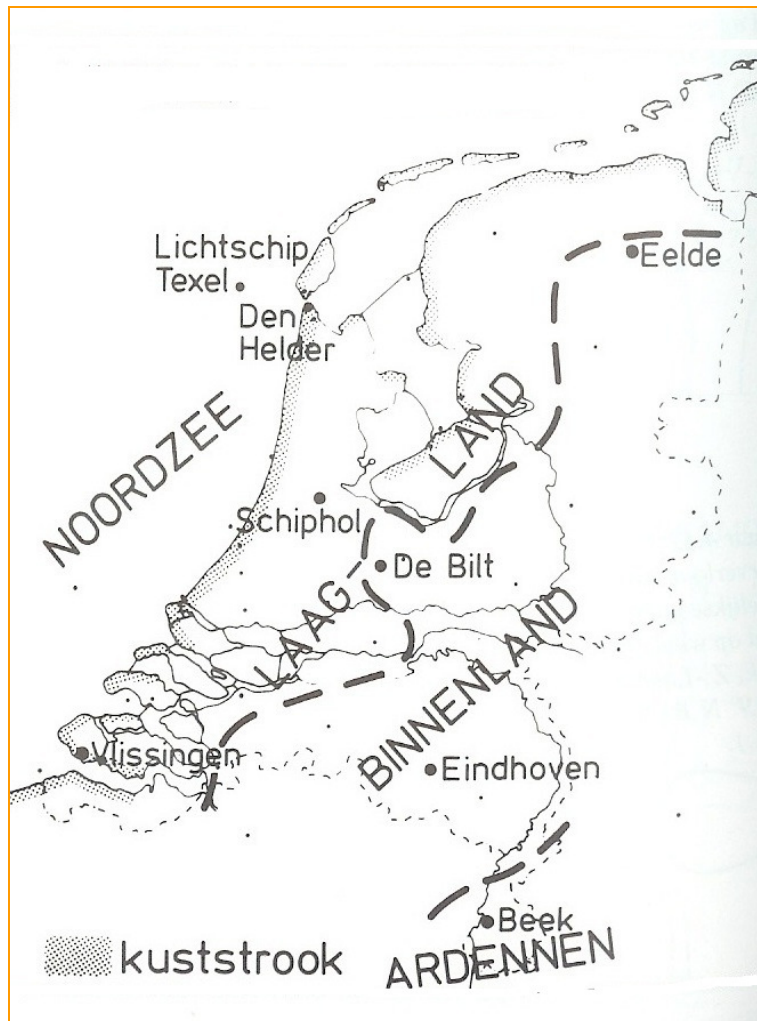
De globale variabiliteit van het windklimaat in Nederland blijkt redelijk in beeld te kunnen worden gebracht door een classificatie in zeeklimaat, kustklimaat, landklimaat en het klimaat van de

Ardennen. Over het laatste type is te weinig informatie beschikbaar, maar de andere typen zijn duidelijk herkenbaar.

De drie gebieden zijn aangegeven in figuur 6.1. De representatieve meetstations zijn

- Zeeklimaat : Lichtschip Texel
- Kustklimaat : Den Helder
- Landklimaat – Laagland : Schiphol
- Landklimaat – Binnenland: Eindhoven

Voor het onderzoek Earth, Wind & Fire is het zeeklimaat niet van belang. Het kustklimaat omvat slechts een smalle strook van enkele kilometers en is daarom ook minder relevant. In het navolgende is daarom ingezoomd op het Laagland en het Binnenland met als representatieve meetstations resp. Schiphol en Eindhoven. De stations Eelde en De Bilt liggen zeer dicht bij de scheidslijn tussen laagland en binnenland. Daarom wordt het station Eindhoven voor het binnenland representatiever geacht.

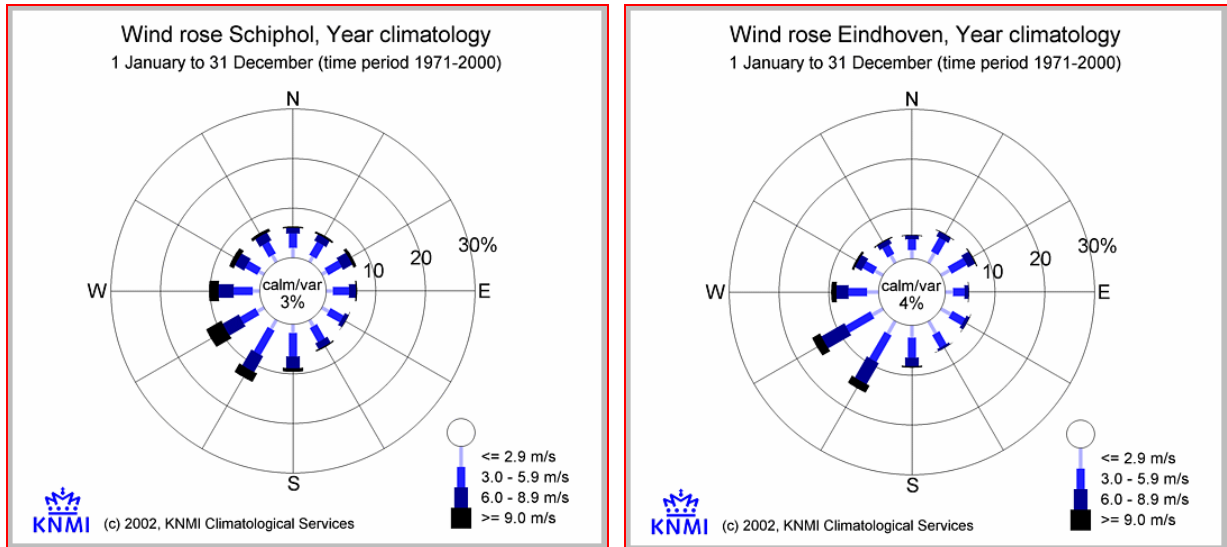


Figuur 6.1. – Representatieve gebieden windklimaat in Nederland.

6.4 Windrozen

Figuur 6.2 toont de windrozen voor de stations Schiphol en Eindhoven. Deze geven een globaal beeld van de procentuele verdeling over de windrichtingen met de daarbij behorende gemiddelde snelheid.

De richtingen zijn hierbij opgedeeld in twaalf klassen van dertig graden. Hoe langer een staafje, des te vaker komt de wind uit de bijbehorende richtingsklasse. In de windroos is een schaal weergegeven waarmee de procentuele frequentie kan worden afgelezen. De staafjes tezamen inclusief de variabele winden en windstiltes (stil/var) tellen op tot 100%.



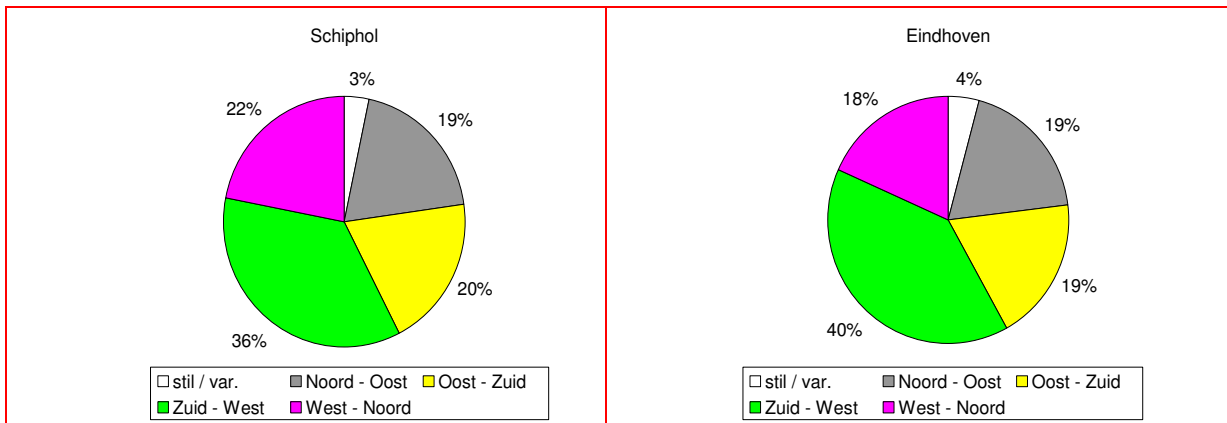
Figuur 6.2 - Windrozen Schiphol en Eindhoven

De breedte van de staafjes geeft informatie over hoe hard het gewaaid heeft. Er worden drie snelheidsklassen gehanteerd, te weten 1-2 Beaufort, 3-4 Beaufort en 5 Beaufort en meer. Voor een verklaring van de Beaufortschaal zie tabel 6.1.

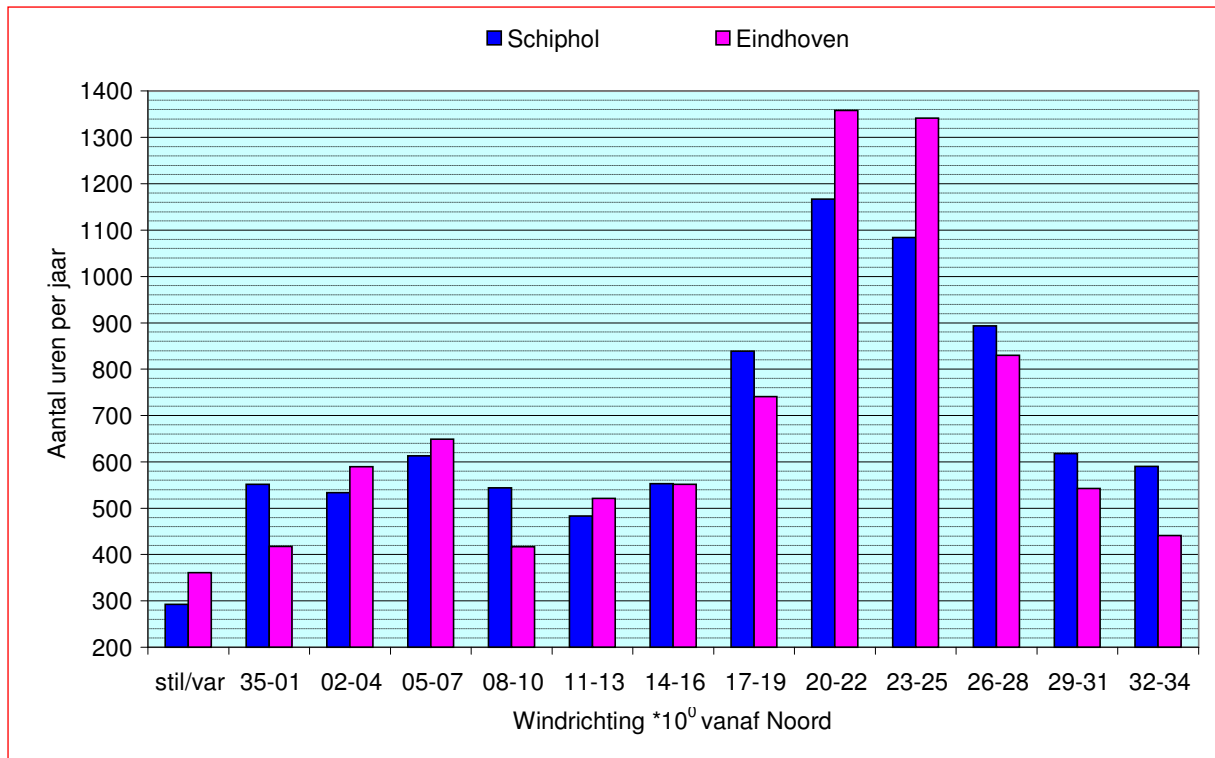
De windroos geeft in één oogopslag een goed beeld van het windklimaat in de stations Schiphol en Eindhoven. Voor beide stations is de overheersende windrichting Zuidwest. In Eindhoven komt de wind vaker uit deze hoek dan in Schiphol, maar op dit station zijn de windsnelheden wat groter. Paragraaf 6.5 brengt één en ander gedetailleerder in beeld.

6.5 Frequentieverdeling windrichting

De figuren 6.3 en 6.4. laten voor de stations Schiphol en Eindhoven de distributieve verdeling per jaar zien over de windrichtingen. In Eindhoven is wind uit de sector Zuid-West ($180^{\circ} - 270^{\circ}$) iets dominanter dan in Schiphol. De verschillen tussen de beide stations zijn verder niet substantieel.



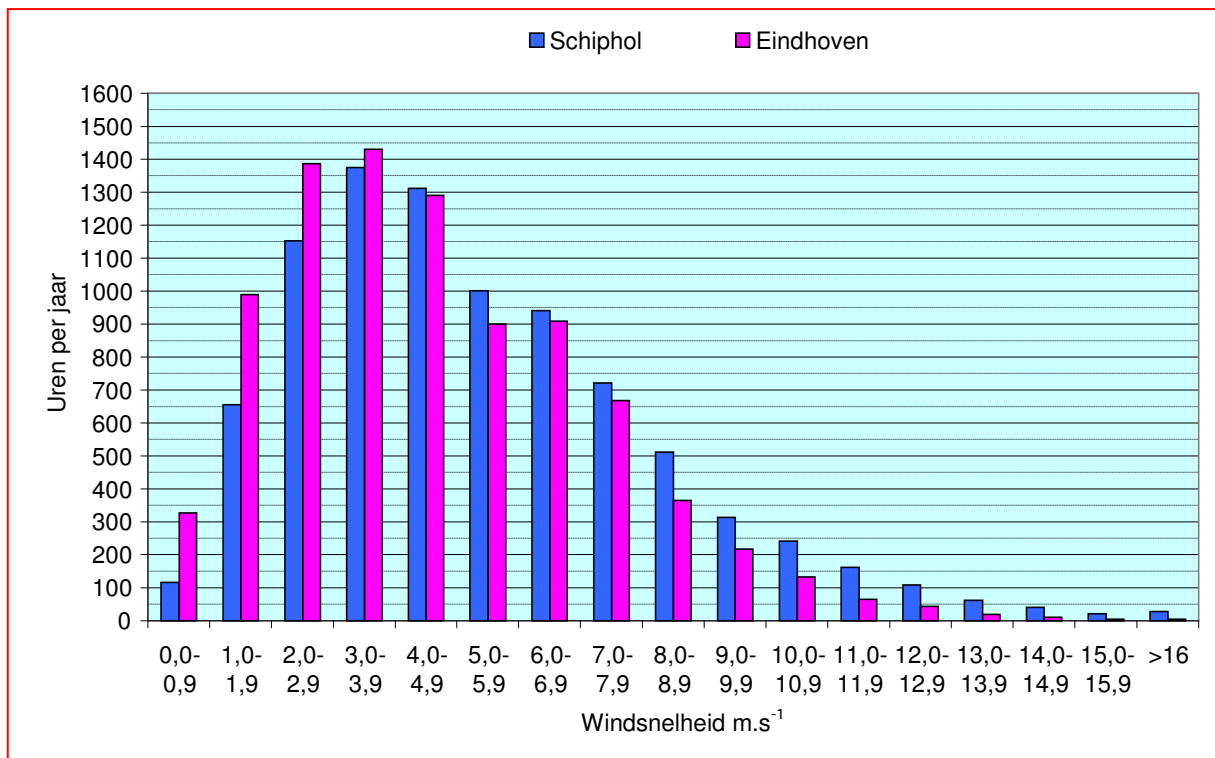
Figuur 6.3 – Procentuele verdeling van de windrichtingen



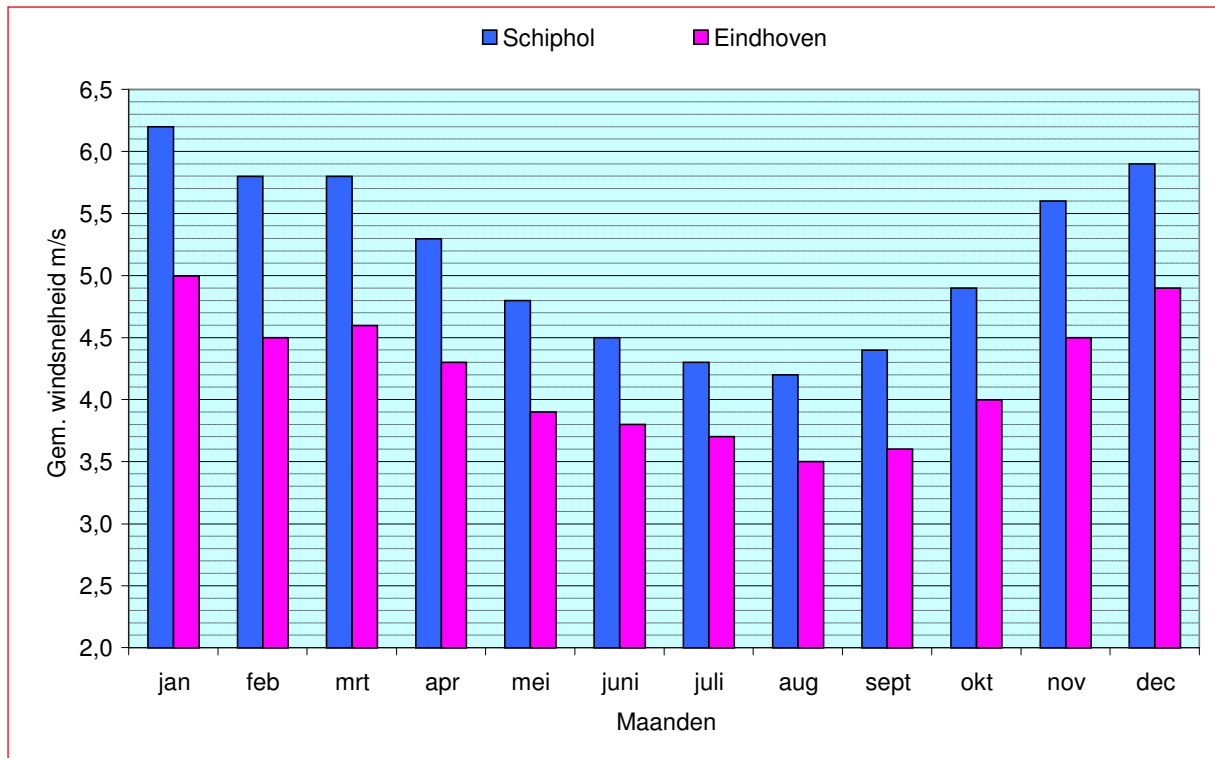
Figuur 6.4. – Distributieve verdeling van de windrichtingen

6.6 Frequentieverdeling windsnelheden

Figuur 6.5 laat voor de stations Schiphol en Eindhoven de distributieve verdeling per jaar zien van de windsnelheden. Bij lagere snelheden tot ca 4 m.s⁻¹ is Eindhoven licht dominant; bij hogere snelheden is dit Schiphol.



Figuur 6.5 – Distributieve verdeling van de windsnelheden per jaar



Figuur 6.6 Mediane gemiddelde windsnelheid per maand.

Figuur 6.6 geeft een beeld van de mediane windsnelheden per maand. Op Schiphol zijn deze duidelijk hoger dan in Eindhoven.

6.7 Frequentietabel windsnelheid Schiphol (Hydra project)

Frequency table of potential wind speed - Distributive absolute														
Location: 240 Schiphol, Period Year, Evaluated from the years 1971-2000														
Wind direction (x 10 degrees)														
	Calm / Variable	35-01	02-04	05-07	08-10	11-13	14-16	17-19	20-22	23-25	26-28	29-31	32-34	Cumulative
Wind speed [m.s ⁻¹]	Distributive in hours per year													
0.0 - 0.9	64.0	4.4	4.2	3.7	3.8	4.9	4.8	4.7	4.6	5.0	4.1	3.4	4.7	116.3
1.0 - 1.9	167.5	50.7	34.5	30.9	33.9	45.8	39.1	43.5	50.6	44.2	37.2	33.0	45.3	656.3
2.0 - 2.9	56.3	121.9	75.0	63.2	81.3	90.2	87.3	108.4	130.8	90.8	85.0	69.8	92.4	1152.3
3.0 - 3.9	4.4	118.5	95.9	87.6	110.1	109.9	111.9	149.7	182.2	102.9	110.8	93.4	97.7	1375.0
4.0 - 4.9	0.7	84.6	93.8	99.7	103.2	93.3	99.4	149.4	176.2	115.5	118.8	91.1	86.3	1311.7
5.0 - 5.9	0.2	52.4	77.4	89.9	72.1	62.1	76.8	116.2	135.3	95.9	107.7	57.8	56.9	1000.7
6.0 - 6.9	0.1	48.6	59.6	81.6	57.9	42.3	58.7	99.0	127.2	112.8	108.5	77.0	67.0	940.1
7.0 - 7.9	-	31.2	37.5	63.0	41.4	21.7	35.9	67.5	112.6	106.8	88.5	62.3	53.3	721.8
8.0 - 8.9	-	18.9	25.6	39.4	20.7	9.1	21.4	40.4	80.3	106.4	69.0	44.7	36.1	512.0
9.0 - 9.9	-	9.0	14.6	23.0	10.0	3.4	10.7	23.7	61.1	69.6	43.0	27.0	19.2	314.2
10.0 - 10.9	-	4.8	9.1	15.1	5.8	0.9	4.5	16.6	41.4	69.6	39.1	20.7	14.0	241.5
11.0 - 11.9	-	3.3	3.6	9.8	2.4	0.2	2.0	9.9	27.8	54.4	28.9	13.4	6.4	162.0
12.0 - 12.9	-	2.1	2.0	3.9	0.9	0.1	0.6	5.2	16.3	39.9	21.3	11.0	5.3	108.8
13.0 - 13.9	-	0.8	0.8	1.4	0.3	0.0	0.5	2.2	9.3	25.1	13.4	5.9	2.7	62.3
14.0 - 14.9	-	0.6	0.5	0.5	-	-	0.1	0.7	5.0	19.9	9.3	3.3	1.8	41.8
15.0 - 15.9	-	0.1	0.2	0.0	-	-	-	0.6	3.2	11.4	3.9	1.9	0.7	21.9
16.0 - 16.9	-	0.1	-	-	-	-	-	0.2	1.4	6.9	1.8	0.8	0.7	11.9
17.0 - 17.9	-	0.1	-	-	-	-	-	0.4	0.9	3.3	1.8	0.6	0.3	7.3

18.0 - 18.9	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0	0.6	2.4	0.7	0.5	0.1	4.4
19.0 - 19.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.1	0.9	0.6	0.1	0.1	1.9
20.0 - 20.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.4	0.3	0.1	-	0.8
21.0 - 21.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0	0.3	0.1	0.0	0.0	0.4
22.0 - 22.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.2	0.1	0.0	-	0.3
23.0 - 23.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.2	0.1	0.0	0.0	0.3
24.0 - 24.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0	-	-	-	-	0.0
25.0 - 25.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0	-	-	-	0.0
26.0 - 26.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0	-	-	-	0.0
27.0 - 27.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
28.0 and higher	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0	-	-	-	0.0
Cumulative	293.2	552.0	534.0	612.6	543.6	483.9	553.8	838.4	1167.0	1084.6	893.8	618.1	590.8	8766.0	

6.8 NPR 6097:2006 (nl)

De NPR 6097 – “*Toepassing van de statistiek van de uurgemiddelde windsnelheden voor Nederland*” (NNI 2006) geeft voor een willekeurige locatie in Nederland een probabilistische beschrijving van de uurgemiddelde windsnelheid op 60 m hoogte, de zgn. *mesosnelheid* U_m , zie paragraaf 19.2. De statistiek is gebaseerd op meetgegevens van de windsnelheid en windrichting van maximaal 51 KNMI meetstations. De statistiek van de referentiewindsnelheid op de locatie wordt gepresenteerd in twee frequentietabellen, distributief en cumulatief. Verder is de ruwheidstabel toegevoegd met daarin de aan het landgebruik gekoppelde ruwheidslengte.

Voor het bepalen van de statistiek van de uurgemiddelde windsnelheid op een locatie zijn de X- en Y-coördinaten van de locatie nodig. Het coördinatenstelsel is het Rijksdriehoekstelsel in Amersfoortse coördinaten, die kunnen worden afgelezen met behulp van een gedetailleerde kaart van Nederland.

De NPR 6097:2006 is bedoeld om te worden gebruikt bij toetsing van bouwplannen op windhinder en windgevaar, maar is uiteraard ook geschikt voor de vaststelling van het windprofiel en de referentiewindsnelheid voor de prestatieberekeningen van het Ventecdak® op willekeurige locaties.

7. HET (WIND)KLIMAAT VAN DE STAD

7.1 Inleiding en samenvatting

Het klimaat in een grote stad onderscheidt zich van het klimaat in een landelijke omgeving door een hogere gemiddelde temperatuur, het warmte-eiland effect -zie paragraaf 7.4- en door een slechtere luchtkwaliteit –zie paragraaf 7.5.

Door de mondiale trend van toenemende verstedelijking, in combinatie met de algemeen verwachte klimaatverandering en de aandacht voor de kwaliteit van het stedelijk klimaat, is het warmte-eiland effect wereldwijd onderwerp van onderzoek. Onderzoek door Wageningen University wijst uit dat warmte-eiland effecten in Nederland dezelfde orde grootte hebben als in het buitenland. Het lijkt gewenst hiermee bij het ontwerp van klimaatinstallaties rekening te houden.

De stad “ademt” in de atmosfeer boven de stad. Ventilatielucht voor gebouwen en verbrandingslucht voor motorvoertuigen en verbrandingstoestellen wordt uit de omgeving aangezogen en na gebruik in verontreinigde toestand weer in dezelfde omgeving gedumpt. Om een zekere luchtkwaliteit in stand te houden moet de stad continue worden geventileerd. Door wind en temperatuurverschillen geïnduceerde luchtstromingen, beïnvloed door de geografische ligging, de topografie van de stad en de permeabiliteit van de bebouwing, spelen hierbij een belangrijke rol. Vele vragen hierover zijn nog onbeantwoord, zoals: Wat is de invloed van windsnelheid, windrichting en thermiek op de luchtkwaliteit boven de stad? Waar is de luchtkwaliteit optimaal? Wat zijn de beste condities voor gebruik van de wind voor natuurlijke ventilatie van gebouwen? Wat is de relatie tussen de kwaliteit van de buitenlucht en die van de binnenlucht?

Er is veel onderzoek gedaan naar windoverlast in de gebouwde omgeving en hierover is ook veel bekend. Over de positieve kanten van wind in de gebouwde omgeving is veel minder bekend, maar de bovenstaande vragen zijn in toenemende mate onderwerp van studie en onderzoek. Het is echter een weerbarstige en complexe materie, waarover zich momenteel alleen in kwalitatieve zin antwoorden beginnen af te tekenen. Meer specifieke kwantitatieve informatie kan momenteel slechts worden verkregen op basis van gericht windtunnelonderzoek. Misschien kan deze informatie in de toekomst worden veralgemeniseerd op basis van karakteristieke stedenbouwkundige modellen.

7.2 Het doosmodel

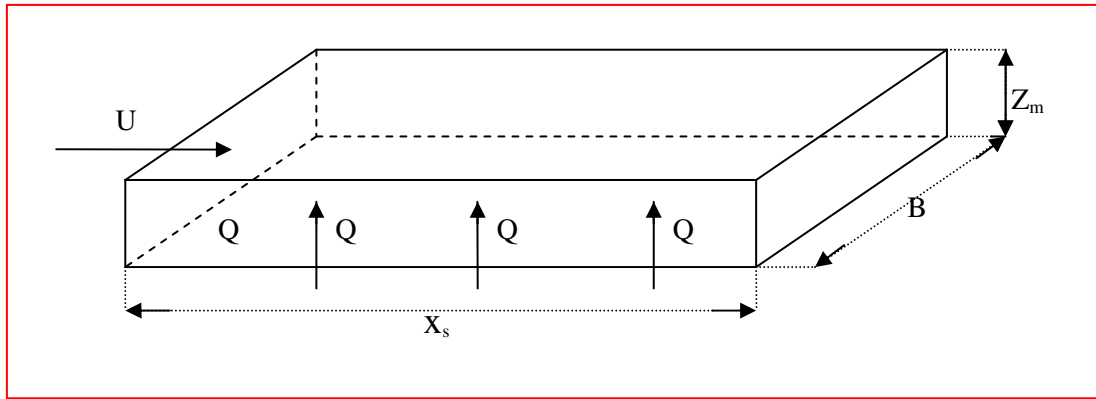
Het doosmodel is een eenvoudig model om de luchtverontreinigingconcentratie boven een stad te schatten (Wit de, M.H. 2001). In dit model wordt over de stad een grote doos gedacht waarin alle luchtverontreinigingen uit de stad worden opgevangen. De wind “blaast” deze verontreinigingen uit de doos. Zie figuur 7.1. Hierin is

$$\begin{aligned} Q &= \text{emissie van verontreinigingen} \quad [\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sec}^{-1}] \\ U &= \text{windsnelheid} \quad [\text{m}\cdot\text{s}^{-1}] \\ X_s &= \text{strijklengte van de wind} \quad [\text{m}] \\ B &= \text{breedte van de doos} \quad [\text{m}] \\ Z_m &= \text{menghoogte} \quad [\text{m}] \end{aligned}$$

De menghoogte is de begrenzing van de zgn. atmosferische grenslaag, de laag waarin een stad “ademt” – zie figuur 7.2. Luchtverontreinigingen uit de stad kunnen deze grenslaag niet doorbreken omdat daarboven een zgn. inversie optreedt; op dit verschijnsel wordt hier niet verder ingegaan. De menghoogte is afhankelijk van de weersomstandigheden en de tijd van de dag, en kan in Nederland variëren van 50 tot 1.500 meter. Zie tabel 7.1. De menghoogte is veel kleiner dan de horizontale afmetingen van een stad. “Een stad “ademt” in een dunne schil”.

Hoogte [m]	<500	500-1.000	1.000-1.500	1.500
Aantal dagen	117	110	79	59

Tabel 7.1 – Dagelijkse menghoogte in De Bildt in 1971



Figuur 7.1 – Het doosmodel (box model)

In het doosmodel wordt ervan uitgegaan dat de luchtverontreinigingen uit de stad goed en snel in de menglaag worden gemengd, en er geen depositie op de grond, begroeiing en gebouwen plaatsvindt. Beide premissen zijn twijfelachtig; het is bijvoorbeeld moeilijk in te zien dat over de menghoogte van (in Nederland) honderden meters een volledige menging plaats kan vinden. Echter, uitgaande van bovengenoemde condities kan de volgende vergelijking worden opgesteld.

$$B \cdot Z_m \cdot U \cdot C_{in} + Q \cdot X_s \cdot B = B \cdot Z_m \cdot U \cdot C_m \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (7.1)$$

Als het quotiënt $Z_m \cdot U$ wordt geschreven als R [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$] volgt:

$$R \cdot C_{in} + Q \cdot X_s = R \cdot C_{uit} \quad \text{en} \quad (7.2)$$

$$\Delta C = C_{uit} - C_{in} = \frac{Q \cdot X_s}{R} \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}] \quad (7.3)$$

R wordt de ventilatiefactor van een stad genoemd, en wordt dus bepaald door de windsnelheid en de menghoogte. Aangezien beide grootheden variabel zijn is de ventilatiefactor ook een variabele grootheid.

7.3 Wind in stedelijke gebieden

In het doosmodel wordt uitgegaan van een gemiddelde windsnelheid over de volle menghoogte. Aangezien de windsnelheid in het algemeen toeneemt met de hoogte boven de grond, is het interessant om na te gaan wat dit betekent voor de concentratie van verontreinigingen op verschillende hoogten. (Allard, Francis 1998 – Wit, de M.H. 2001)

In een stedelijke omgeving zijn zoveel obstakels aanwezig dat formule (5.1) op de lagere niveaus niet kan worden gebruikt. De wrijvingsnelheid U^* , de ruwheidhoogte en de verschuivingslengte zijn hier om begrijpelijke redenen niet eenduidig genoeg vast te stellen. Vanaf een hoogte van ongeveer één à twee keer de gemiddelde gebouwhoogte is formule (5.1) hier echter ook bruikbaar

Als de wind vanaf het platteland de stad bereikt wordt hij aan de onderzijde afgeremd. Voor matige tot sterke wind is de afname van de windsnelheid ca 20% - 30% bij een hoogte tot ca 20 m boven de grond. De turbulentie-intensiteit neemt hierbij 50% - 100% toe. Bij sterke wind ontstaan door de wrijving met de bebouwing eveneens wervels. Bij zwakke tot matige wind ontstaan opwaartse luchtbewegingen. Naarmate de wind langer over de bebouwing strijkt stijgt de luchttemperatuur waardoor tot een zekere hoogte eveneens opwaartse luchtbewegingen ontstaan. De grotere turbulentie-intensiteit heeft tot gevolg dat een steeds dikkere luchtlag wordt afgeremd.

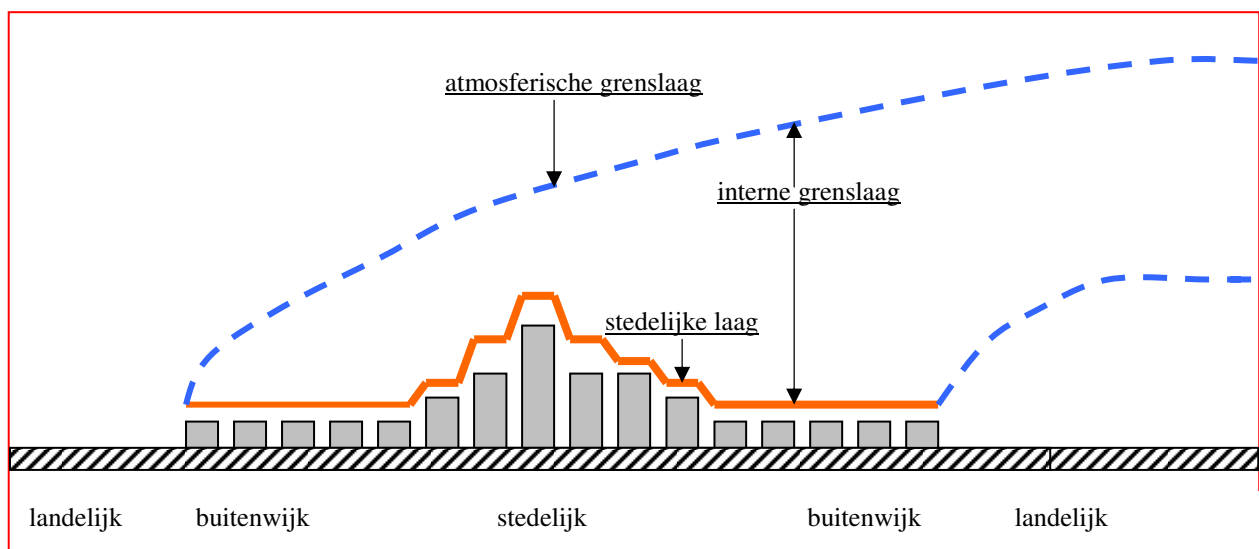
Boven de stad kunnen drie lagen worden onderscheiden –zie figuur 7.2. Van boven naar beneden achtereenvolgens:

- De menglaag of atmosferische grenslaag, begrensd door de eerder genoemde menghoogte Z_m . De condities in deze laag zijn nog niet door de stedelijke bebouwing beïnvloed.
- De interne grenslaag (*urban boundary*) met hoogte Z_{ig} , waarin, bij toenemende strijklengte, de stroming steeds meer wordt aangepast aan de ruwheid van de stad. In geval van een kleine menghoogte Z_m kan de interne grenslaag samenvallen met de menglaag.
- De stedelijke laag (*urban canopy*) met hoogte Z_s , waarin de stroming voornamelijk wordt bepaald door de geometrie van straten en hoogten van gebouwen. De dikte van deze laag kan worden gesteld op

$$Z_s = 20Z_0 + d \quad (7.4)$$

Voor een stadskern kan de ruwheidhoogte Z_0 worden gesteld op $\geq 2\text{ m}$ en de verschuivingslengte d op $0,8 H$, waarin H de dominante gebouwhoogte is. In een stadskern met $H = 30\text{ m}$ kan de dikte van de stedelijke laag dan worden berekend op $(20 \cdot 2 + 0,8 \cdot 30) = 64\text{ m}$.

Een complicatie bij dit onderwerp is dat convectieve thermische luchtstromingen, veroorzaakt door het hitte-eiland effect, een grote invloed op de stromingspatronen kunnen hebben, vooral bij lage windsnelheden.



Figuur 7.2 – Laagvorming boven stedelijke gebieden

7.4 Het warmte-eiland effect

7.4.1 Algemeen

(Taha, Haider (2004))

Het warmte-eilandeffect of *urban heat island* effect (UHI) is het verschijnsel dat de temperatuur in een stedelijk gebied gemiddeld hoger is dan op een bepaald referentiepunt in het omliggende landelijk gebied. Dit temperatuurverschil wordt veroorzaakt door de volgende factoren:

- In steden wordt meer zonlicht wordt geabsorbeerd dan in landelijke gebieden door het grotere absorberende oppervlak van gebouwen in combinatie met een hoge warmteopslagcapaciteit van bouwmaterialen, baksteen, beton, asfalt e.d.
- De zichtfactor voor uitstraling naar de hemel is kleiner dan in een landelijk gebied; gebouwen vangen elkaars straling op;
- De diffuse reflectiefactor (albedo) van het stedenbouwkundig profiel is meestal kleiner dan die van een landelijk oppervlak.

- In een landelijk gebied wordt een groter deel van de zonnestraling door verdamping omgezet in latente warmte dan in een stedelijk gebied en dus minder voelbare warmte geabsorbeerd. Dit effect wordt gekwantificeerd in de Bowen factor, uitgedrukt in de formule

$$\beta = \frac{Q_h}{Q_e}$$

(7.5)

Waarin β = Bowen factor [-]
 Q_h = voelbare warmtestroom [W]
 Q_e = latente warmtestroom [W]

Karakteristieke waarden voor de Bowen factor zijn 4...5 in een stedelijke gebied en 0,8...1,5 in een landelijk gebied.

- In een stedelijk gebied wordt veel antropogene warmte geproduceerd door klimaatregeling, verwarming en koeling van gebouwen, gemotoriseerd vervoer, fabrieken etc. Voor deze warmteflux worden cijfers genoemd van 10...20 W.m⁻² in woonwijken, 50...100 W.m⁻² in een dichtbebouwd stadscentrum, tot 120...150 W.m⁻² in Lower Manhattan;
- In een stedelijk gebied is de warmteafvoer door de wind minder dan in een landelijk gebied.

De genoemde factoren waren vroeger in veel mindere mate aanwezig. Een interessant onderzoek met numerieke simulatie, uitgevoerd op basis van historische gegevens uit de 19^e eeuw, toonde aan dat Tokyo in die tijd geen nachtelijk warmte-eiland effect kende. De stad was destijds weliswaar dichtbebouwd, maar er was geen hoogbouw en de gebruikte bouwmaterialen hadden een geringe thermische capaciteit (Takata, Masahito et al 2011).

De effecten van het warmte-eiland effect op het klimaat van de stad zijn:

- Het ontstaan van thermische luchtstromingen door temperatuurverschillen;
- Een verhoogde buitentemperatuur; karakteristieke waarden liggen in de orde van 2^oC, maar in bepaalde steden zijn waarden gemeten tot 6^o à 7^o (Londen) en 8^oC (Sao Paolo). De referentiehoogte waarbij deze waarden zijn gemeten wordt niet vermeld;
- Een verhoogde menging van luchtverontreinigingen in de interne grenslaag – zie paragraaf 7.5;
- Verhoogde temperatuurafhankelijke emissies van bepaalde luchtverontreinigingen;
- Verhoogde fotochemische productie van smog, een belangrijk gezondheidsrisico in een stedelijk gebied (Santamouris, M. 2004).
- Een hogere binnentemperatuur in gebouwen in geval van natuurlijke ventilatie.

De effecten van het warmte-eiland effect op het energiegebruik zijn:

- Een hoger energiegebruik voor koeling en klimaatregeling van gebouwen in de zomer;
- Een hoger brandstofverbruik voor de airconditioning van motorvoertuigen;
- Een lager energiegebruik voor gebouwverwarming in de winter;

De grotere koelbelasting in het koelseizoen kost in het algemeen meer energie dan in het stookseizoen wordt bespaard.

Het warmte-eiland effect is sterk afhankelijk van klimatologische omstandigheden. Bij een bewolkte lucht is de afkoeling gedurende de nacht geringer, zowel in een landelijk- als in een stedelijk gebied, waardoor de omvang van het nachtelijk warmte-eiland effect afneemt.

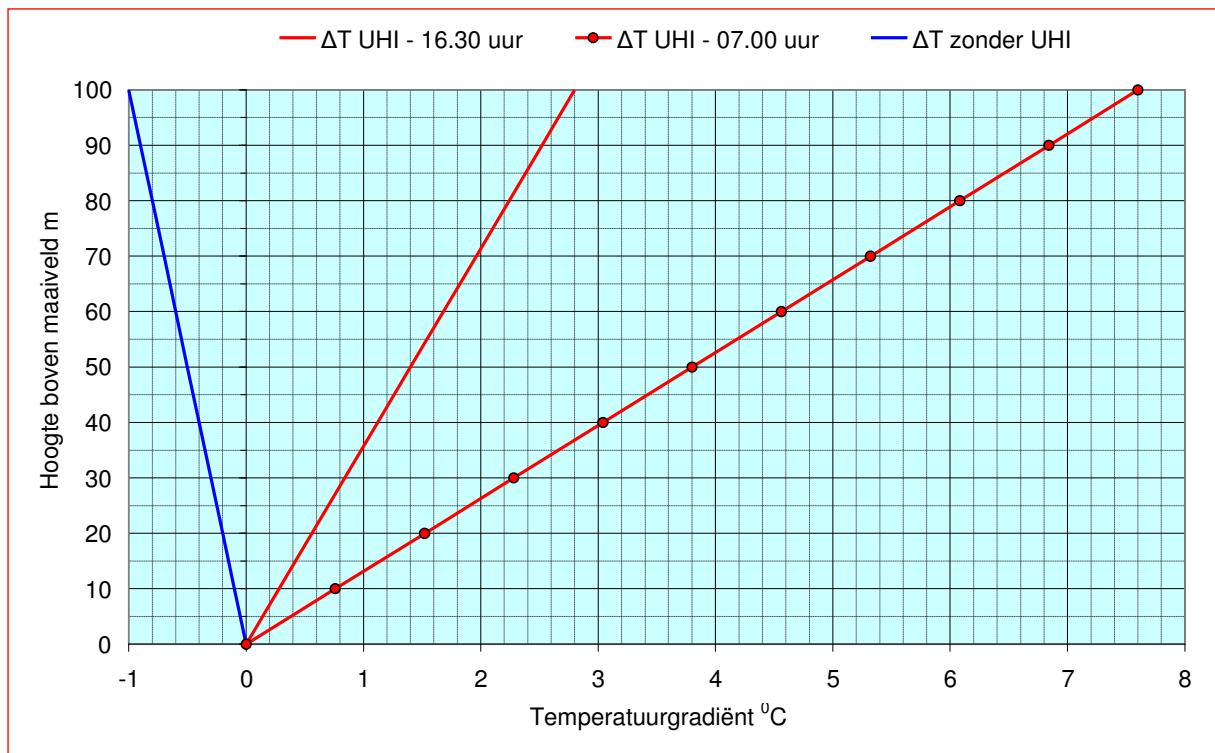
Na een regenbui wordt door verdamping een groter gedeelte van de zonnestraling omgezet in latente warmte onder gelijktijdige afname van de voelbare warmte en een inherente vermindering van warmte-eiland effect. Omgekeerd geeft een heldere hemel en droge lucht een groter warmte-eiland effect, tenzij de gemiddelde windsnelheid hoog is. In dat geval wordt voelbare warmte gemakkelijker afgevoerd en is het warmte-eiland effect juist minder (Erell, E. e.a. 2007).

Het warmte-eiland effect is dus het resultaat van verschillende factoren die in ruimte en tijd, geografische en klimatologische omstandigheden verschillen, maar is normaliter 's nachts het hoogst.

Oorzaak hiervan is de warmteaccumulatie in de steenachtige massa van gebouwen en straten, die in een landelijke omgeving ontbreekt.

Binnen het warmte-eiland effect op de macroschaal van een stad kunnen op de microschaal van straat of gebouw behoorlijke temperatuurverschillen ontstaan. De omvang hiervan is in hoge afhankelijk van de gemiddelde hoogte van gebouwen t.o.v. de straatbreedte, uitgedrukt in de aspectratio. Bij een hoge aspectratio, is de zontoetreding in een straat geringer en kan er binnen het warmte-eiland van de stad plaatselijk een koelte-eiland ontstaan (Erell, E. e.a. 2007).

Het warmte-eiland effect wordt verder gekenmerkt door een positieve verticale temperatuurgradiënt in de orde van 3^oC tot 8^oC per 100 m (Morawska 2004). Dit wordt bevestigd door eerder onderzoek (Rubino et al 1998) dat van straatniveau tot een hoogte van 100 m een verticale temperatuurgradiënt laat zien van 2,8^oC om 16.30 uur tot 7,6^oC om 07.00 uur; zie figuur 7.3. De verhouding tussen dag (16.30 uur) en nacht (07.00 uur) is ca 0,37. Zonder warmte-eiland effect is er een negatieve verticale temperatuurgradiënt van ca 1^oC per 100 m.



Figuur 7.3 - Verticale temperatuurgradiënt zonder en met warmte-eiland effect

7.4.2 Onderzoek

In de hele wereld is er een toenemende trend naar verstedelijking met als gevolg het ontstaan van megasteden, vooral in Oosterse landen. Klimatologen verwachten in deze eeuw onder invloed van het broeikas effect ook een mondiale temperatuurstijging. In verschillende Europese steden is tijdens enkele hittegolven in het vorige decennium een verhoogde sterfte onder de stadsbevolking gemeten⁷. Bij elkaar genomen heeft dit het onderzoek naar het warmte-eiland effect en de urbane klimatologie een impuls gegeven (Hebbert, Micheal 2011). De resultaten van dit onderzoek zijn vooral van belang voor de stedenbouwkundige topografie, waarin de bebouwingsdichtheid, de afwisseling van gebouwhoogten, de permeabiliteit van de bebouwing in relatie tot de windrichting en het ontwerp van water- en groenpartijen van belang zijn voor de vermindering van het warmte-eiland effect. Er ligt hier een duidelijk spanningsveld met de trend naar een hoge bebouwingsdichtheid in compacte steden (Ng, Edwarf 2011).

⁷ "The 2003 heat-wave that caused an extra 2139 deaths in England and Wales will become an average summer by 2040. By the end of the century, the 2003 heat-wave will be considered a cool summer" (Basset, Richard 2011).

Het onderzoek loopt parallel met het onderzoek naar de verspreiding van verkeersemisies –zie paragraaf 7.6 en 7.7. Het gebruik van GIS, Geographical Information System, en IRS, Infrared Remote Sensing, voor het vastleggen van *hotspots* en *coolspots* speelt hierbij een belangrijke rol (Hien, W.N. et al 2007, Cox, Jennifer R. 2011, Katzchner, Lutz 2011).

In de VS en enkele Zuid Europese landen (Synnefa, A. e.a. 2007, Poli, T. e.a. 2007) wordt onderzoek gedaan naar de vermindering van het warmte-eiland effect, o.a. door toepassing van reflecterende gevels en daken Een reflecterende dakbedekking geeft in de zomer een daktemperatuur van 10⁰...15⁰C tegenover 40⁰....45⁰C van een conventionele dakbedekking. Ook hier is de energiebesparing in de zomer groter dan het grotere energiegebruik in de winter. Voor Nederland zou een grootschalige toepassing van “groene” daken en gevels een betere oplossing kunnen bieden. Hierdoor wordt niet alleen het warmte-eiland effect verminderd en de luchtkwaliteit verbeterd, maar ook de thermische belasting op gevels verminderd (Alonso, Javier et al 2011); zie ook paragraaf 7.8. Een hogere reflectiefactor (Albedo) en een lagere Bowen factor (meer verdamping) hebben beide een gunstige uitwerking.

In ons land stimuleert de Gemeente Rotterdam met een subsidieregeling de aanleg van groene daken en gevels -zie paragraaf 7.8 .

7.4.3 Het warmte-eiland effect in Nederland

(Hove, van L.W.A. 2011)

In tegenstelling tot vele andere landen werd tot voor kort in Nederland aan urbane meteorologie geen onderzoek gedaan. Het warmte-eiland effect werd hier door het milde klimaat en de invloed van de Noordzee nauwelijks van belang geacht. Dit veranderde na de hittegolven van 2003 en 2006, die oorzaak waren van een extra sterfte van tussen 1000 en 2200 personen. Deze aantallen zijn in vergelijking met de cijfers van andere Europese landen relatief hoog.

De extra sterfte kwam vooral tot uitdrukking in steden, waardoor de bewustwording ontstond dat ook in Nederland met het warmte-eiland effect rekening moet worden gehouden. Daar komt bij dat de trend van een toenemende verstedelijking aan Nederland niet voorbijgaat en dat door de verwachte klimaatverandering ook in Nederland warme dagen frequenter zullen voorkomen.

Door Wageningen University is recentelijk het warmte-eiland effect in stedelijke gebieden van Nederland onderzocht (Hove, Bert et al 2010). Daarbij is gebruik gemaakt van literatuurstudie, voorlopige resultaten van recente meteorologische metingen in Rotterdam en Arnhem, alsmede gegevens verstrekt door amateur meteorologen.

In Rotterdam werden op een warme dag, 6 augustus 2009, metingen gedaan met behulp van mobiele meetstations op twee bakfietsen. Als referentiemeting werden de temperaturen op Rotterdam Airport gebruikt. In de vroege namiddag (14.00 – 16.00 uur) waren de temperaturen in de binnenstad 1 – 2 K hoger, en in het Park 1 – 2 K lager dan de referentie. In de late avond (22.00 – 24.00 uur) daarentegen was de temperatuur in de binnenstad 5 K hoger dan de referentie, en vergeleken met de landelijke omgeving zelfs 7 K.

Tabel 7.2 laat de belangrijkste meetresultaten zien voor de zomer van 2010 voor de locaties Rotterdam Centrum, Zuid en Oost.

	Rotterdam Centrum	Rotterdam Zuid	Rotterdam Oost
UCZ ⁸	1	2	3
Zomer 2010			
Mediaan	4,6 K	4,4 K	3,4 K
95 Percentiel	7,8 K	7,0 K	5,3 K
Maximum	8,9 K	7,8 K	6,7 K
Winter 2009 / 2010			
Mediaan	2,2 K	2,3 K	1,4 K
95 Percentiel	5,1 K	4,5 K	3,8 K
Maximum	5,7 K	5,0 K	4,8 K

⁸ Urban Climate Zone Classification – zie paragraaf 7.4.4

Winter 2010 . 2011			
Mediaan	2,3 K	2,2 K	2,0 K
95 Percentiel	6,7 K	5,2 K	3,8 K
Maximum	8,0 K	6,4 K	5,7 K

Tabel 7.2 – Gemeten waarden van het warmte-eiland effect in Rotterdam

In Arnhem werden op 19 augustus 2009 soortgelijke metingen gedaan, waarbij eveneens een substantieel warmte-eiland effect van ca 7 K werd gemeten.

Tabel 7.3 laat de waarden zien van het warmte-eiland effect voor verschillende Nederlandse steden en dorpen, zoals gemeten door amateur meteorologen. De hoogste waarden, gemeten in Rotterdam, komen goed overeen met de metingen van tabel 7.2. Opvallend zijn de relatief hoge waarden die gerapporteerd zijn in een kleine plaats als Losser.

	Plaats	Inwoners (x1000)	Begindatum	Einddatum	UCZ	UHI _{max} - K	
						Mediaan	95 Perc.
1	Apeldoorn	160	01/2008	06/2009	5	2,9	6,2
2	Assen	65	01/2007	03/2009	3	1,8	4,0
3	Damwoude	5,5	01/2005	04/2009	5-7	1,3	3,2
4	Delft	97	01/2007	03/2009	2-3	1,7	4,8
5	Doornenburg	2,7	06/2007	06/2009	5	2,6	5,7
6	Groningen	198	01/1999	03/2009	3	1,5	3,1
7	Haarlem	149	12/2005	02/2008	3	2,5	5,7
8	Heemskerk	39	01/2005	12/2008	3	2,8	5,9
9	Heerhugowaard	50	01/2005	04/2009	3-5	2,4	6,2
1	Houten	47	07/2006	04/2009	3	1,2	3,0
1	IJsselmuiden	12	07/2005	07/2009	3	3,1	6,8
1	Leeuwarden	94	01/2007	03/2009	3-5	1,1	3,0
1	Leiden	117	03/2004	03/2009	3	3,2	5,6
1	Losser	23	01/2003	12/2008	3-5	2,9	6,8
1	Purmerend	79	01/2008	03/2009	3	2,5	4,6
1	Rotterdam	588	12/2007	03/2009	2-3	3,4	7,6
1	Den Haag	483	07/2007	04/2009	3-5	2,2	5,3
1	Voorburg	40	01/2006	12/2008	2	2,4	5,6
1	Wageningen	35	01/2008	07/2010	3-5	2,4	5,6

Tabel 7.3 - Gemeten waarden van het warmte-eiland effect in verschillende plaatsen

Een vergelijking van Nederlandse met buitenlandse steden geeft aan dat de warmte-eiland effecten dezelfde grootteorde hebben.

7.4.4 Urban Climate Zone UCZ

Om warmte-eiland effecten in verschillende plaatsen te kunnen vergelijken is het onderscheid “urbaan versus ruraal”, of “stedelijk versus landelijk” veel te grof. Om stedenbouwkundige karakteristieken nauwkeuriger te kunnen definiëren is een classificatiesysteem UCZ ontwikkeld (Oke, Tim 2006) – zie figuur 7.4. Naast een omschrijving van het betreffende gebied zijn hierin enkele fysiek meetbare parameters gebruikt, te weten:

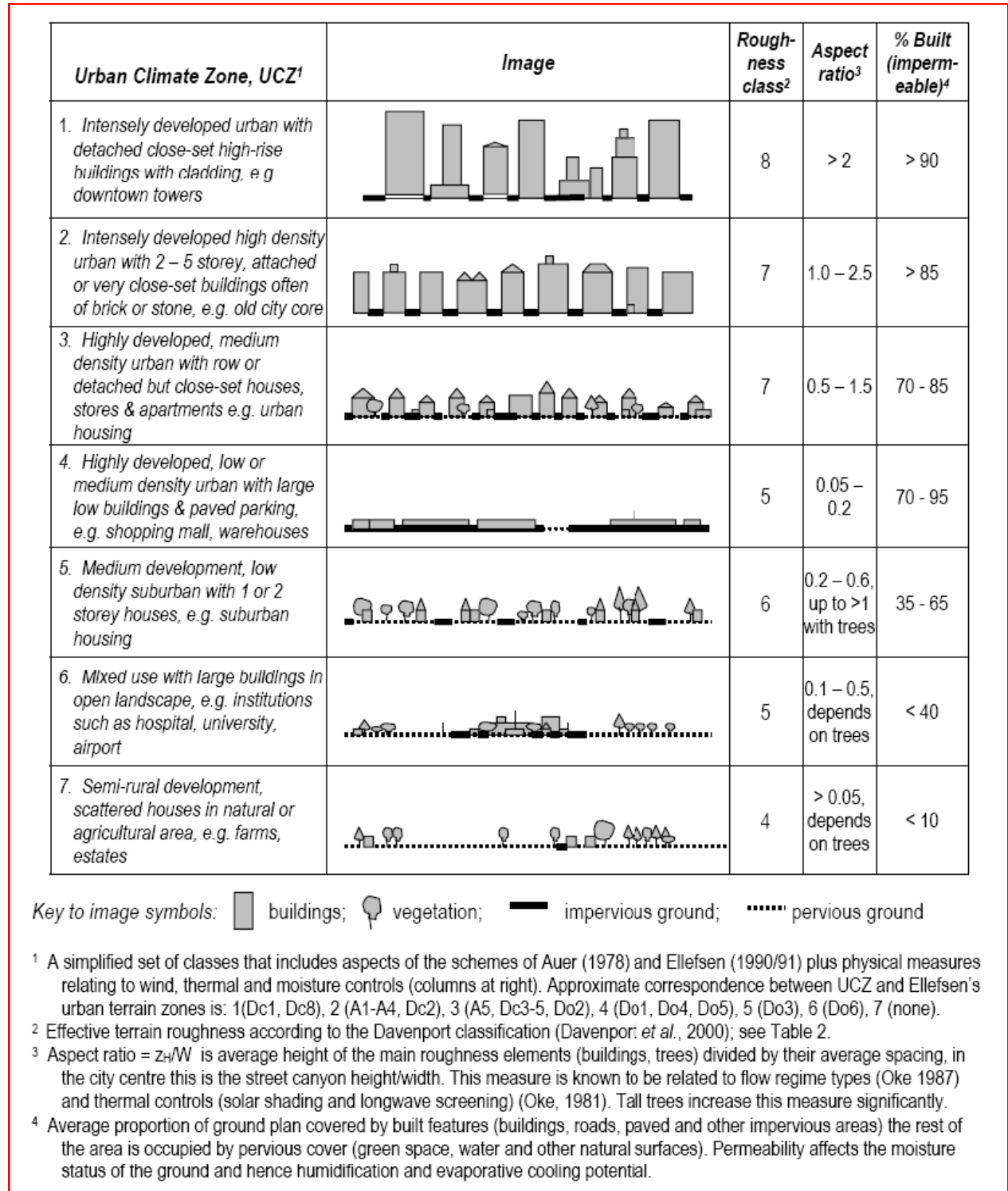
- De Davenport Ruwheidsclassificatie – zie hoofdstuk 5
- De Aspect Ratio – zie de verklaring in figuur 7.4
- Het percentage (bebouwde + verharde) grondoppervlak.

Het systeem wordt momenteel nog verder verfijnd met o.a. de diffuse reflectiefactor (albedo) en de antropogene wamteflux van het betreffende gebied (Stewart, Ian and Oke, Tim 2009).

Het UCZ classificatiesysteem heeft bepaalde kenmerken gemeen met de stedenbouwkundige karakterisering van Spacemate® *the spatial logic of urban density* – zie hoofdstuk 15. De Ground

Space Index GSI, de Open Space Ratio OSR, en Layers L zouden ook voor een UCZ classificatiesysteem kunnen worden gebruikt. Beide modellen zijn echter onafhankelijk van elkaar ontwikkeld.

Omdat een klimaatactief gebouw het beste tot zijn recht komt in een klimaatactieve stedenbouwkundige omgeving, zou onderzoek moeten worden gedaan naar een model dat stedenbouwkundige aspecten combineert met klimaat- en energieaspecten inclusief wind – hoofdstuk 15- en zon – hoofdstuk 11 van deelrapport (I).



Figuur 7.4 – Urban Climate Zone Classification

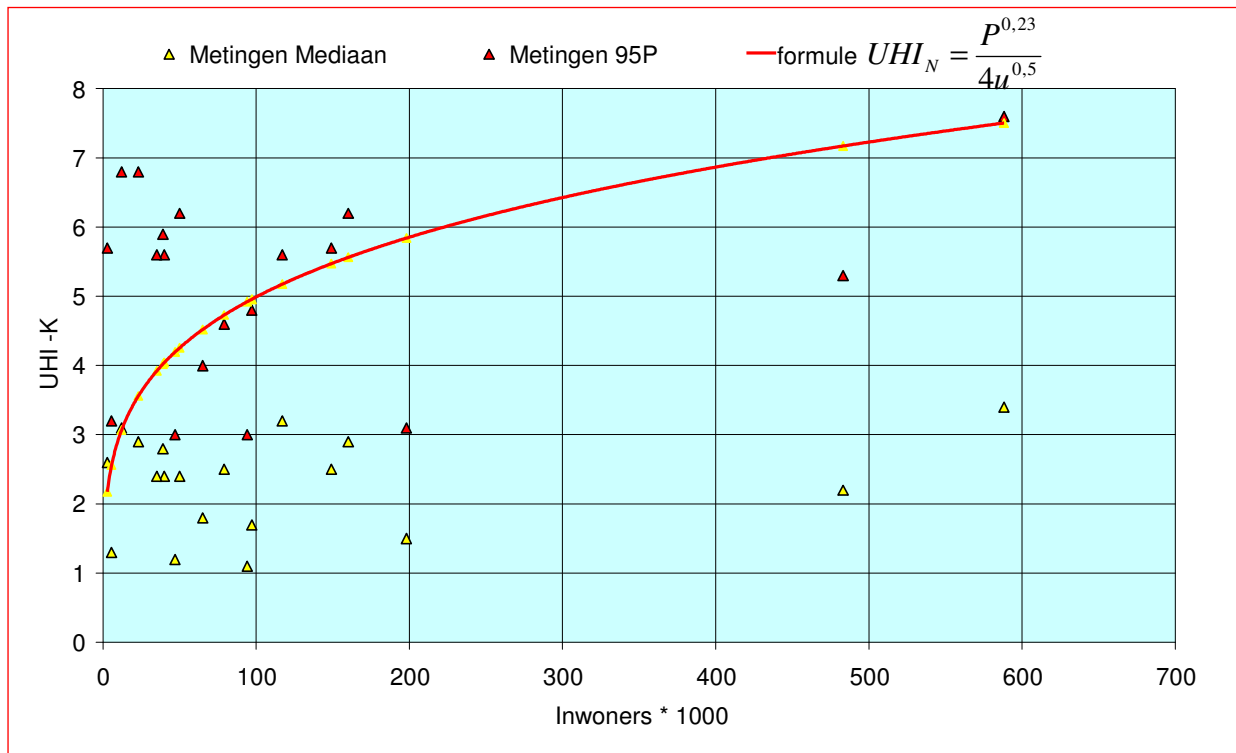
7.4.5 Is het warmte-eiland effect te berekenen?

Een oude publicatie geeft de volgende benaderingsformule voor het nachtelijke warmte-eiland effect (Bennett, M. et al 1982), die overigens in meer recente publicaties nergens is teruggevonden:

$$UHI_N = \frac{P^{0,25}}{4u^{0,5}} \quad (7.6)$$

Waarin UHI_N = warmte-eiland effect tijdens de nacht [K]
 P = aantal inwoners van de betreffende stad [-]
 U = windsnelheid [m.s⁻¹]

In figuur 7.5 zijn de meetgegevens van tabel 7.3 grafisch uitgezet. De grote spreiding laat niet toe met redelijke betrouwbaarheid een relatie af te leiden tussen het warmte-eiland effect en het aantal inwoners. In de figuur is ook formule 7.6 voor een windsnelheid van 0,5 m.s⁻¹ weergegeven, waarbij echter na enig *trial and error* de exponent van P is verlaagd van 0,25 naar 0,23. Voor Rotterdam en een zevental andere steden geeft de formule dan een resultaat dat redelijk overeenkomt met de gemeten waarden voor de 95 percentiel.



Figuur 7.5 – Grafische weergave meetgegevens tabel 7.3 en aangepaste formule 7.6 met $u = 0,5 \text{ m.s}^{-1}$

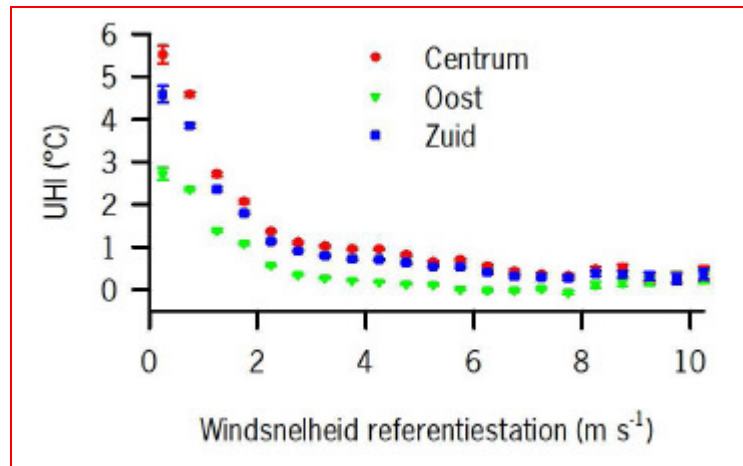
Er is niet vermeld op welke hoogte de windsnelheid wordt gemeten, maar aangenomen mag worden dat deze geldt ter plaatse van het meetstation, dus op straatniveau. Er is in dat geval nauwelijks een relatie met de potentiële windsnelheid U_{10} aan te geven en dus ook niet met de statistische frequentie hiervan.

Het aardige van deze formule is dat de windsnelheid hierin een rol speelt, en het is inderdaad de wind die bij de ventilatie en de warmteafvoer van de stad een belangrijke rol speelt. Anderzijds blijkt uit tabel 7.3 dat er niet altijd een relatie is tussen het aantal inwoners en het warmte-eiland effect. Ook uit kleinere plaatsen worden immers substantiële waarden gerapporteerd.

Bij de metingen in Rotterdam, met 588.000 inwoners, zijn ook de plaatselijke windsnelheden op de meetstations gemeten, zie figuur 7.6. Een controleberekening met gebruikmaking van de gemodificeerde formule (7.6) geeft voor windsnelheden van 0,5 - 1,0 en 1,5 m.s⁻¹ een UHI effect van respectievelijk 7,5⁰ - 5,3⁰ en 4,3⁰C, die hiermee ten opzichte van de metingen zijn overgewaardeerd.

Voor Amsterdam, met 750.000 inwoners, wordt bij deze windsnelheden een UHI effect berekend van respectievelijk $7,9^0 - 5,6^0$ en $4,6^0\text{C}$. Meetgegevens van Amsterdam zijn niet bekend. Voor Assen, met 65.000 inwoners, zijn deze cijfers respectievelijk $4,5^0 - 3,2^0$ en $2,6^0\text{C}$, redelijk vergelijkbaar met de in tabel 7.3. gemeten waarden.

Het aardige van deze formule is dat de windsnelheid hierin een rol speelt, en het is inderdaad de wind die bij de ventilatie en de warmteafvoer van de stad een belangrijke rol speelt. Anderzijds blijkt uit tabel 7.3 dat er niet altijd een relatie is tussen het aantal inwoners en het warmte-eiland effect. Ook uit kleinere plaatsen worden immers substantiële waarden gerapporteerd.



Figuur 7.6 – UHC (°C) in Rotterdam als functie van de windsnelheid

7.4.6 Conclusies voor het binnenmilieu

Het warmte-eiland effect is het sterkst in de nachtelijke uren als de meeste kantoorgebouwen gesloten zijn en er dus geen additionele belasting van de klimaatinstallatie optreedt. Voor gebouwen met continubedrijf treedt er wel een additionele belasting op, waar echter tegenover staat dat de externe belasting door zoninstraling 's nachts ontbreekt.

De positieve verticale temperatuurgradiënt is voor het Geo-Klimaatconcept[®] van Earth, Wind & Fire, waar de ventilatielucht op dakniveau wordt aangezogen, een minder gunstige omstandigheid. Voor gebouwen tot een hoogte van 70 m is het effect in de dagsituatie echter beperkt tot max. ca 2^0C ; zie figuur 7.3. Voor een gebouw van deze hoogte in het centrum van Rotterdam, waar het warmte-eiland effect op straatniveau 1 à 2 K is, houdt dit in dat in de koelperiode rekening moet worden gehouden met een temperatuur van de aangezogen ventilatielucht die 3 à 4 K boven de ontwerp buitentemperatuur ligt. De nadelige consequenties die dit heeft voor de koellast worden in de stookperiode gedeeltelijk gecompenseerd. Zie ook (Kolokotroni, Maria e.a. 2010).

De te verwachten negatieve effecten van het warmte-eiland effect op de thermische belasting worden ruimschoots gecompenseerd door de veel betere luchtkwaliteit op hogere niveaus; zie figuur 7.7.

7.5 Kwaliteit van de buitenlucht

Buitenlucht is meestal schoner dan binnenlucht, en daarom kan met behulp van ventilatie de kwaliteit van de binnenlucht worden verbeterd. Echt schoon is de buitenlucht in geïndustrialiseerde landen als Nederland echter allermindst en in een stedelijke omgeving voldoet de luchtkwaliteit soms niet aan wettelijke normen. In natuurlijk geventileerde gebouwen, met ventilatie via ramen of gevelroosters, is de penetratie van luchtverontreinigingen in het interieur 100%. In mechanisch geventileerde gebouwen wordt een deel van de luchtverontreinigingen in de luchtfilters van het ventilatiesysteem verwijderd, hoewel dit in veel gevallen maar een klein deel is omdat de gebruikelijke luchtfilters nauwelijks fijn stof en gasvormige verontreinigingen afvangen. De penetratiegraad van luchtverontreinigingen is hier mede afhankelijk van de dichtheid van de gevel en van de aanzuiglocatie van de ventilatielucht.

In de meeste stedelijke omgevingen zijn de emissies van motorvoertuigen de belangrijkste bron van antropogene luchtverontreiniging. Deze emissies zijn deels gasvormige en deels vast in de vorm van fijn stof en hebben een complexe chemische samenstelling. De gasvormige component omvat koolwaterstoffen (C_xH_y), vluchtige organische componenten (VOC), koolmonoxide (CO), stikstofoxiden (NO_x), kooldioxide (CO₂) en zwaveldioxide (SO₂). De vaste deeltjes behoren grotendeels tot het ultrafijne spectrum (<0,1 µm). Vaste deeltjes zijn meestal verzadigd met andere componenten en metalen. Van veel componenten is aangetoond dat ze schadelijk zijn voor de gezondheid (Morawska, L. 2004).

Naast de emissies van motorvoertuigen is de uitstoot van verbrandingstoestellen en industriële processen oorzaak van luchtverontreiniging. Verder verspreidt ook het wegdek fijn stof.

Door de complexe samenstelling van de luchtverontreinigingen is het praktisch onmogelijk de concentraties van alle stoffen te meten. Meestal worden hiervoor bepaalde merkstoffen gebruikt, zoals koolmonoxide CO, dat als een goede indicator voor de verspreiding en de verdunning van verkeersemisies wordt beschouwd. In tegenstelling tot andere componenten in de uitlaatgassen is het chemisch redelijk stabiel, en de, in vergelijking met andere componenten hoge concentraties in de stedelijke atmosfeer, maken een eenvoudige en betrouwbare meting mogelijk (Tasheiko, O.V. e.a. 2009).

Concentratiemetingen van fijn stof (≤ PM₁₀) worden meestal uitgevoerd op basis van massa, uitgedrukt in µg/m³. Van de zeer fijne (≤ PM_{2,5}) en ultra fijne deeltjes (≤ PM_{0,1}) in de uitlaatgassen wordt de concentratie gemeten in aantal deeltjes per cm³ of per m³. Ultra fijn stof kan diep in de longen en zelfs direct in de bloedbaan doordringen en is door de chemische samenstelling schadelijk voor de gezondheid. Er is een duidelijke behoefte aan een betere gezondheidsindicator voor fijn stof dan de huidige normen van PM_{2,5} en PM₁₀.

Fijn stof heeft de afgelopen jaren voor de nodige commotie gezorgd, omdat de EU-normen op verschillende plaatsen regelmatig wordt overschreden. Enkele bouwprojecten moesten op grond hiervan worden stilgelegd. Nederland heeft uitstel gevraagd voor het voldoen aan de Europese luchtkwaliteitsnormen. TNO heeft het initiatief genomen voor Europees onderzoek, waarbij gezondheidskundig onderzoek wordt gekoppeld aan de luchtkwaliteit (Peperstraten, J. van 2009).

De impact van voertuigemissies op de concentraties van luchtverontreinigingen heeft twee niveaus:

- De achtergrondconcentratie in een groter gebied, veroorzaakt door alle voertuigbewegingen in dit gebied tezamen;
- De plaatselijke concentratie nabij een drukke verkeersweg die boven de achtergrondconcentratie ligt, zgn. *hot spots*. Deze is afhankelijk van de plaatselijke verkeersdichtheid, het soort motorvoertuigen e.d. en kan gedurende de dag sterk variëren (Morawska, L. 2004).

Tabel 7.4 toont de meest voorkomende verontreinigingen van de buitenlucht. Enkele stoffen, de zogenaamde precursors, kunnen onder bepaalde omstandigheden secundaire verontreiniging veroorzaken, zoals zomer- en wintersmog, ozon en fijn stof.

Verontreiniging	Gasvormig	Stof	Precursor
SO ₂ – Zwaveldioxide	⚙		⚙
CO - Koolmonoxide	⚙		
VOC- Vluchtige Organische Componenten	⚙	⚙	⚙
PAK – Polycyclische aromatische koolwaterstoffen	⚙	⚙	
Fijn stof – PM ₁₀ – PM _{2,5} – ultra fijn stof		⚙	⚙
Zwarte rook		⚙	
NO _x - Stikstofoxiden	⚙		⚙
Zware metalen (arsen, cadmium, koper, lood, zink)		⚙	

Tabel 7.4 – Primaire verontreinigingen van de buitenlucht

Het luchtkwaliteitsbeleid in Nederland wordt voor een groot deel bepaald door internationale afspraken. Zo heeft de EU normen voor luchtverontreinigende stoffen opgesteld en hebben de lidstaten afspraken gemaakt over de vermindering van de uitstoot van deze stoffen. In Nederland zijn deze regels onder andere uitgewerkt in de Wet Luchtkwaliteit, die sinds najaar 2007 van kracht is en deel uitmaakt van de Wet Milieubeheer. In de Wet Luchtkwaliteit staan normen voor diverse stoffen in de lucht, zoals voor zwavel- en stikstofoxiden, fijn stof, lood, koolmonoxide en benzeen. Deze waarden zijn grotendeels afgeleid van internationale afspraken (RIVM 2007).

Sinds 1990 is de luchtkwaliteit in Nederland verbeterd. De EU-normen voor fijn stof en stikstofdioxide worden echter nog in veel grote steden overschreden (RIVM 2007)

De luchtkwaliteit langs het gehele Nederlandse snelwegennet is getoetst aan de vanaf 2010 geldende Europese NO₂ grenswaarde van 40 µg.m⁻³. Uit deze toetsing blijkt dat er heel wat locaties zijn waarop beter niet gebouwd zou kunnen worden (Metz, D. e.a.2000).

7.6 Horizontale verspreiding van verkeersemisies

De verspreiding van verkeersemisies wordt sterk bepaald door de interactie van windsnelheid en windrichting met gebouwen, straten, bomen e.d. De stedenbouwkundige topografie en de permeabiliteit van de bebouwing is hiervoor een belangrijk gegeven.

Voor de binnenluchtkwaliteit is het belangrijk inzicht te hebben in de concentratieprofielen van verkeersemisies als functie van de afstand tot de weg. Hiervoor is veel onderzoek gedaan, dat door de grote complexiteit van de onderliggende processen niet altijd eenduidige resultaten heeft opgeleverd (Morawska, L. 2004, Hitchins, J. et al 2000, Morawska, L. 1999, Li, Y. et al 1997).

Duidelijk is wel dat de concentraties afnemen bij toenemende afstand tussen meetpunt en weg, een bevinding die ook intuïtief gemakkelijk wordt bevestigd.

Voor fijn stof verloopt de concentratieafname volgens een machtswet waarvoor de volgende formule werd ontwikkeld (Gramotnev e.a. 2003):

$$C = Kd^{-\mu} + C_0$$

(7.7)

Waarin C = plaatselijke concentratie
K = constante, experimenteel bepaald op 500
d = afstand tot de weg in m
µ = constante, experimenteel bepaald op 0,88
C₀ = achtergrondconcentratie.

Voor afstanden d van resp. 5, 25, 50, 100 en 200m wordt met deze formule de waarde van C berekend op C₀ + 120, 30, 15, 10 en 5. De invloed van windkracht en windrichting is in deze formule niet tot uitdrukking gebracht.

Samenvattend kan worden gesteld dat in het algemeen boven een afstand van 300 m de plaatselijke concentratie niet uitgaat boven de achtergrondconcentratie. Binnen 100 m van de weg moet met verhoogde plaatselijke concentraties worden gerekend.

Modellering van luchtverontreiniging in stedelijke gebieden met behulp van CFD is lastig omdat stedelijke parameters moeilijk te definiëren zijn. Sommige onderzoekers hebben hiervoor semi empirische modellen opgesteld, met als parameters de bebouwingsdichtheid, de gebouwhoogte, en de permeabiliteit van de bebouwing in relatie tot de windrichting (Tasheiko, O.V. e.a. 2009). Of deze bruikbaar zijn voor Nederlandse omstandigheden is niet bekend.

Voor specifieke gevallen wordt wel onderzoek in een windtunnel uitgevoerd.

7.7 Verticale verspreiding van verkeersemisies

Intuïtief mag worden aangenomen dat in stedelijke gebieden de concentraties van de luchtverontreinigingen bij grotere hoogte afnemen. Luchtvervuiling wordt hier door de thermiek van

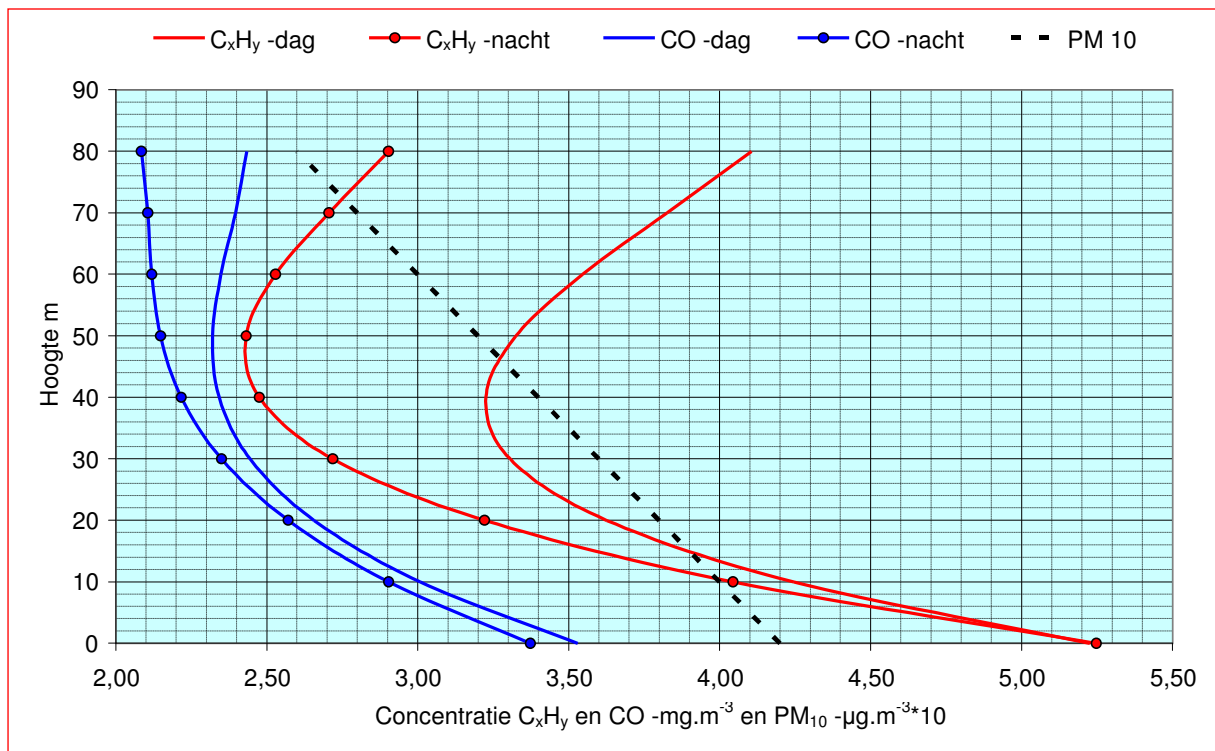
het warmte-eiland effect (zie paragraaf 7.4) en door de wind verspreid en verdund. Luchtaanzuiging op dakniveau en zover mogelijk afgewend van het verkeer zou daarom de voorkeur verdienen. Een literatuuronderzoek heeft deze intuïtieve aanname bevestigd.

Luria, M. (1984) e.a. deden onderzoek naar de meest representatieve locatie voor het trekken van monsters voor de bepaling van de luchtkwaliteit in Jeruzalem. Zij vonden dat de gemiddelde dagelijkse concentraties van stikstofoxides (NO_x) en koolmonoxide (CO) op straat- en voetgangersniveau 3,5 tot 4,0 keer hoger waren dan op het permanente meetstation dat zich op 20 m hoogte en 30m van de straat bevond. Voor de gemiddelde dagelijkse stofconcentratie, uitgedrukt in TSP_{st} was deze waarde 1,8. Het verschil wordt geweten aan de hogere achtergrondconcentratie van TSP dat niet alleen van het verkeer afkomstig is, maar ook van industriële en natuurlijke bronnen. De gemeten ozonconcentratie (O_3) op het permanente meetstation was ca 25% lager, hetgeen verklaard wordt door reductie van O_3 door NO via de chemische reactie $\text{NO} + \text{O}_3 \rightarrow \text{NO}_2 + \text{O}_2$.

Li, Y. e.a. (1997) heeft getracht met behulp van numerieke simulatie de verspreiding van luchtverontreiniging om gebouwen door de wind te voorspellen. Deze methodiek staat nog in de kinderschoenen, en levert weinig praktisch bruikbare informatie op voor het onderzoek Earth, Wind & Fire. Voor systematisch onderzoek op dit gebied zouden karakteristieke modellen voor een stedelijke omgeving met de daarbij behorende gebouwen moeten worden ontwikkeld.

Om de optimale positie van de aanzuigopening voor het ventilatiesysteem te bepalen voerden *Rubino, F.M. e.a. (1998)* een interessant onderzoek uit naar de luchtkwaliteit langs de gevels van een 100 m hoog gebouw in Milaan, gelegen aan een plein met een hoge verkeersintensiteit. Gedurende een periode van 30 dagen werden continue de concentraties van koolwaterstoffen C_xH_y , CO en PM_{10} gemonitord, zowel in tijd als in hoogte. De hoogteprofielen zijn gestileerd weergegeven in figuur 7.7; er blijkt een duidelijke negatieve verticale concentratiegradiënt te bestaan.

De concentratie van C_xH_y loopt tot een hoogte van 30 à 40 m sterk terug en stijgt daarna weer. Er is een duidelijk verschil te zien tussen de dag- en de nachtsituatie. Voor CO is een soortgelijke tendens gemeten, zij het minder geprononceerd. De PM_{10} concentratie neemt tot 80 m vrijwel evenredig met de hoogte af; boven 80 m is een scherpe daling gemeten tot concentraties rond $25 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (niet in de figuur aangegeven).



Figuur 7.7. Verticale concentratiegradiënten C_xH_y , CO en PM_{10}

Het onderzoek omvatte ook metingen van de verticale temperatuurgradiënt; zie figuur 7.7. Volgens de onderzoekers draagt deze is belangrijke mate bij aan de verdunning van de luchtverontreinigingen op grotere hoogten.

Hitchins e.a. (2002) hebben voor drie gebouwen van resp. 21, 24 en 33 m in de nabijheid van verkeerswegen met deeltjestellers concentratiemetingen uitgevoerd van fijn stof (<2,5µm) en ultrafijn stof (<0,1 µm). De concentraties bleken vanaf maaiveld tot dakniveau met 50% ...60% af te nemen. Zij concluderen op basis hiervan dat de beste locatie voor de aanzuig van ventilatielucht op dakniveau ligt.

Mendell, M.J. e.a. (2008) kwamen langs een geheel weg tot een soortgelijke conclusie. In een grootscheeps onderzoek, de US EPA BASE studie, uitgevoerd in 100 grote kantoorgebouwen in de VS gedurende 1994 tot 1998, werd de kwaliteit van de binnenlucht statistisch gerelateerd aan een aantal karakteristieken van de luchtbehandelingsinstallatie, waaronder de hoogte waarop ventilatielucht werd aangezogen. Er werd een sterk statistisch verband gevonden tussen aanzuigopeningen onder een hoogte van 60 m en gebouwgerelateerde gezondheidssymptomen, met name die van de bovenste luchtwegen.

Evenals bij de horizontale verspreiding wordt de verticale verspreiding van verkeersemisies mede bepaald door de interactie van windsnelheid en windrichting met gebouwen, straten, bomen e.d. De stedenbouwkundige profielen, de topografie en de permeabiliteit van de bebouwing zijn ook hier belangrijke parameters.

Op basis van het onderzoek is de conclusie gerechtvaardigd dat met het oog op de luchtkwaliteit het aanzuigen van ventilatielucht op een hoog niveau de voorkeur verdient.

7.8 Grootste groene gevel van Europa in Rotterdam (www.rotterdamclimateinitiative.nl)

Aan de parkeergarage Westblaak te Rotterdam komt de grootste groene gevel van Europa. Langs de verschillende zijvlakken en op de bovenste parkeerlaag wordt in totaal 5000 m² groene gevel aangelegd. De bouw start mei 2010 en zal naar verwachting eind augustus worden afgerond. De aanleg is mede mogelijk door een financiële bijdrage van de gemeente Rotterdam.

De gemeente Rotterdam stimuleert met een subsidieregeling reeds de aanleg van groene daken. Die spelen een belangrijke rol bij de afvang van overtollig regenwater bij extreme regenbuien, zorgen voor een langere levensduur van het dak en nemen fijn stof en CO₂ op. Met een financiële bijdrage voor de eerste groene gevel zet Rotterdam een nieuwe stap in het verder verduurzamen van de stad. Wethouder Bolsius (Haven, Financiën, Buitenruimte en Organisatie): “Groene gevels zorgen voor een lokale reductie van



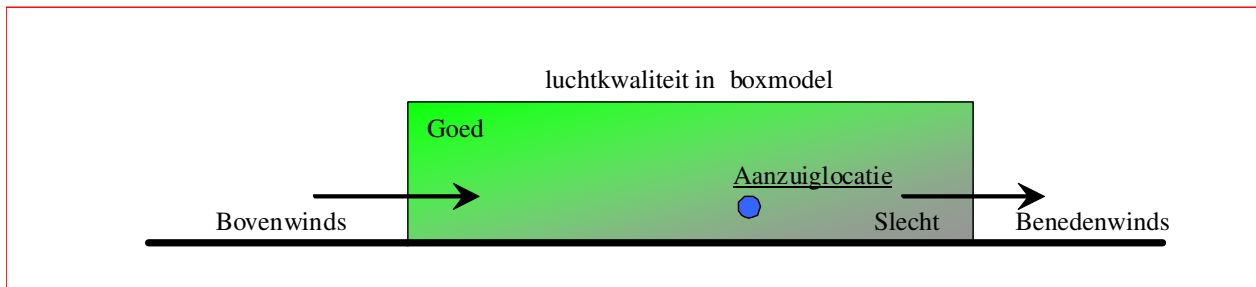
fijn stof, stikstof en omgevingslawaai. Daarnaast dragen ze bij aan een groene en aantrekkelijke leefomgeving. Dat zijn zeker bij een grote en centraal gelegen parkeergarage als de Westblaak grote voordelen. Bovendien werken groene gevels in de zomer verkoelend - de stralingswarmte is minder - en wordt bij de Westblaak garage het regenwater hergebruikt.” De groene gevel voor de parkeergarage Westblaak is de eerste pilot die in uitvoering gaat. In de toekomst volgen meerdere pilots zodat de effecten van groene gevels in beeld kunnen worden gebracht.

Rotterdams ontwerp

De parkeergarage Westblaak wordt voorzien van een korfstructuur van een lichtgewicht metalen gaasconstructie met wintergroene klimplanten (Hedera). Door de combinatie van het groene takkenmotief van de constructie en de planten ontstaat een extra architectonische dimensie met een frisse groene uitstraling. De planten worden volautomatisch gevoed met het regenwater dat is gefilterd en opgeslagen in waterreservoirs onder de parkeergarage. Het Rotterdamse architectenbureau Kühne & Co heeft de groene gevel van de parkeergarage Westblaak ontworpen.

7.9 Plaatselijke luchtkwaliteit

Uit bovenstaande beschouwingen lijkt het redelijk te veronderstellen dat de plaatselijke luchtkwaliteit in bovenwindse richting en op hogere niveaus beter is dan in de andere richting. Dit is van belang voor de locatie van gebouwen en voor de locatie van de luchtaanzuiging voor ventilatie – zie figuur 7.8.



Figuur 7.8 – Invloed aanzuiglocatie op de luchtkwaliteit

7.10 Relatie binnen- en buitenluchtkwaliteit

Bij de voorgaande beschouwingen over de kwaliteit van de buitenlucht, moet niet uit het oog worden verloren dat de kwaliteit van de binnenlucht, die door mensen langdurig als “levensmiddel” wordt gebruikt, belangrijker is. De kwaliteitsratio binnen/buiten (i/e) kan worden uitgedrukt in de formule

$$R_{i/e} = C_i / C_e \quad (7.8)$$

Waarin $R_{i/e}$ = kwaliteitsratio binnen/buiten
 C_i = concentratie in de binnenlucht [mg.m⁻³ – µg.m⁻³ of aantal deeltjes]
 C_e = concentratie in de buitenlucht [mg.m⁻³ – µg.m⁻³ of aantal deeltjes]

Een interieur wordt gekenmerkt door relatief grote oppervlakken, die mede afhankelijk van hun oppervlaktestructuur, luchtverontreinigingen aan zich kunnen binden door absorptie en adsorptie. $R_{i/e}$ is daarom meestal kleiner dan één, ook bij natuurlijk geventileerde ruimten. De waarde van $R_{i/e}$ is voor verschillende stoffen dan ook verschillend.

In de wetenschappelijke literatuur wordt fijn stof in toenemende mate als een bedreiging van de gezondheid gezien, vooral de zeer fijne (< 1 µm) en ultra fijne stofdeeltjes (<0,1 µm), die in gewicht slechts een klein deel van de totale stofbelasting vormen maar in aantal deeltjes dominant zijn. Deze deeltjes, geëmitteerd door motorvoertuigen zijn meestal ook dragers van schadelijke en giftige stoffen – zie paragraaf 7.5. Zij dringen diep in de ademenwegen door, kunnen daar neerslaan en worden dan niet weer uitgeademd (Jamriska, M. 1999).

Daarnaast wordt in het interieur door menselijke activiteiten ook stof geproduceerd, maar deze deeltjes zijn groter en de omvang ervan is in vergelijking met de stofconcentratie in de buitenlucht gering (Jamriska, M. e.a. 2000).

Verschillende onderzoekers bestuderen de gecompliceerde processen van stofpenetratie, interne stofontwikkeling, depositie en re-suspensie van stofdeeltjes en proberen hiervoor numerieke modellen op te stellen.

Bij natuurlijke geventileerde gebouwen komt fijn stof uit de buitenlucht ongehinderd in het interieur terecht. Bij mechanische ventilatie wordt een deel tegengehouden in de luchtbehandelinginstallatie, vooral in de luchtfilters en op natte oppervlakken van koelbatterijen. Voor een all-air systeem met recirculatie worden, bij toepassing van de gebruikelijke filters tot klasse EU 7, $R_{i/e}$ waarden in de grootteorde van 0,3 – 0,4 gerapporteerd (Partti-Pellinen, K. e.a. 2000, Jamriska, M. 2000). Bij dergelijke systemen wordt het gerecirculeerde luchtdebiet, vaak 4 tot 6 keer zo veel als het buitenluchtaandeel, bij elke luchtwisseling opnieuw gefilterd. Het effect van de luchtfiltering is dan ook (veel) groter is dan bij moderne klimaatsystemen die werken met 100% buitenlucht zonder recirculatie.

Naast het stof dat met de ventilatielucht wordt aangevoerd, komt ook stof het interieur binnen door infiltratie van buitenlucht. Sommigen hebben hiervoor een mathematisch model ontwikkeld (Tian, L. e.a. 2009). Uit experimenteel onderzoek inzake de omvang van deze stofinfiltratie melden onderzoekers verschillende resultaten, van dominant (Franchimon, F. 2009) tot niet significant (Jamriska, M. e.a. 2000). Dit is niet te verwonderen omdat het infiltratiedebiet afhankelijk is van windsnelheid, windrichting en gevelhoogte, die bij elk gebouw en bij elk onderzoek kunnen verschillen. De minste infiltratie is te verwachten bij een gebouw waarvan de oriëntatie van de langsegevels evenwijdig loopt met de dominante windrichting, in Nederland dus tussen Zuidoost en Zuidwest. Buiten deze gevels heerst dan meestal onderdruk; zie de negatieve winddrukcoëfficiënten in figuur 8.4 van hoofdstuk 8 (Bronsema, B. 2005).

En voor alle gebouwen geldt dat een zo goed mogelijk dichtheid van de gevel een primaire eis is, niet alleen tegen de infiltratie van fijn stof, maar ook tegen ongewenste energieverliezen en voor thermische behaaglijkheid in de gevelzone.

7.11 Vervolgonderzoek

- Ontwikkeling van een klimaatactief stedenbouwkundig model dat naast de klassieke stedenbouwkundige thema's ook aspecten omvat die betrekking hebben op het warmte-eiland effect, luchtkwaliteit, binnenklimaat en energie inclusief wind – hoofdstuk 15- en zon – hoofdstuk 11 van deelrapport (I).
- Ontwikkeling van parameters voor het ontwerp van klimaatinstallaties die rekening houden met het warmte-eiland effect in de betreffende Urban Climate Zone.
- Ontwikkeling van modellen voor de raming van het energiegebruik voor koeling en verwarming van gebouwen in verschillende Urban Climate Zones.

8. WINDSTROMINGEN OM GEBOUWEN

8.1 Inleiding en samenvatting

De windstroming rond gebouwen in een stedelijke omgeving hangt van verschillende omstandigheden en factoren af, zoals

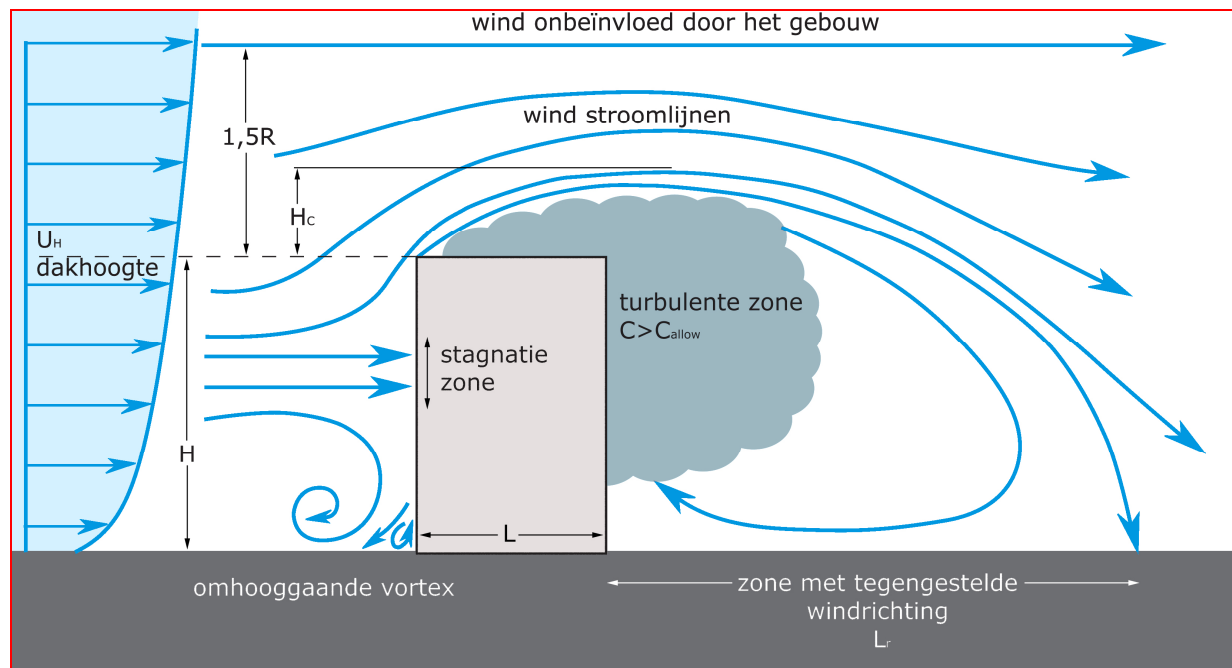
- De geografische ligging, de topografie, het profiel en de permeabiliteit van de stedelijke bebouwing.
- De windsnelheid, windrichting, turbulentie en de stedelijke thermiek.

Het voorliggende hoofdstuk geeft enig kwalitatief inzicht in de complexe samenhangen die hier een rol spelen. Kwantitatieve analyses in algemene zin zijn nauwelijks te maken. Voor concrete situaties kan een windtunnelonderzoek de nodige informatie leveren.

8.2 Stromingspatronen

Stromingspatronen om gebouwen in een stedelijke omgeving zijn nauwelijks of niet te berekenen. Voor concrete gevallen, meestal voor de analyse van eventuele windhinder, wordt vaak een windtunnelonderzoek uitgevoerd.

Aan de hand van figuur 8.1 dat een alleenstaand rechthoekig gebouw betreft, wordt een zeer globale indruk van de stromingspatronen gegeven (ASHRAE 2001).



Figuur 8.1 – Stromingspatroon rondom een alleenstaand rechthoekig gebouw

De gemiddelde snelheid w_H van de wind die loodrecht op een gebouw afkomt neemt toe met de hoogte H boven de grond. Het snelheidsprofiel en de turbulentiegraad van de wind bepalen in sterke mate het stromingspatroon om, en de winddrukken op het gebouw.

De hogere windsnelheid op dakhöhe en de inherente hogere stilstanddruk op het bovenste deel van het gebouw veroorzaakt een neerwaartse stroming op de onderste helft. Deze stroming komt los van het gebouw voordat de grond wordt bereikt en vormt daar een wervel tegen de windrichting in, die een hoge snelheid kan bereiken. Deze tegenwindse wervel verplaatst zich langs de zijden van het gebouw en neemt daarbij vuil en stof van de straat mee. Windhinder wordt vaak door deze wervel veroorzaakt.

In de zone die $\approx 1/4 - 1/3$ van de hoogte H omvat, stroomt de wind opzij om het gebouw heen en naar boven over het dak. In de gekromde stroomlijnen bovendaks en langs zij vindt versnelling van de

stroming plaats, die overgaat in een vertraging als de stroming neerwaarts afbuigt in het zog aan de zijzijde van het gebouw, waar een recirculatiezone ontstaat. Deze wordt gekenmerkt door een lage gemiddelde windsnelheid en veel turbulenties.

8.3 Winddruk op gebouwen

De turbulenties en de vlagerigheid van de wind zijn de oorzaak van sterk wisselende winddrukken. Daarom wordt gewerkt met tijdgemiddelde waarden over een periode van bijvoorbeeld 600 s. Instantane waarden kunnen aanzienlijk afwijken van het gemiddelde en piekwaarden van twee of drie keer de gemiddelde waarden zijn mogelijk.

De winddruk is evenredig met de dynamische druk volgens de wet van Bernoulli

$$p_d = 0,5\rho.U_{(z)}^2$$

(8.1)

Waarin: p_d = dynamische druk [Pa]
 ρ = dichtheid van de lucht [kg.m⁻³]
 $U_{(z)}$ = windsnelheid op hoogte z [m.s⁻¹]

Het verschil tussen de druk p_s op het gebouw en de plaatselijke atmosferische druk op hetzelfde niveau in de ongestoorde wind wordt uitgedrukt met de formule

$$p_s = C_p \cdot p_d$$

(8.2)

Waarin: C_p = winddrukcoëfficiënt – zie paragraaf 8.4

In een stedelijke omgeving zijn zoveel obstakels aanwezig dat de logaritmische formule (5.1) op de lagere niveaus niet kan worden gebruikt. Daarom wordt hier de ASHRAE formule gebruikt (ASHRAE 2001)

$$U_{(z)} = U_{(10)} \left(\frac{\delta_{(0)}}{Z_{(10)}} \right)^{a_{met}} \left(\frac{Z}{\delta} \right)^a$$

(8.3)

Waarin: $U_{(z)}$ = windsnelheid op hoogte z [m.s⁻¹]
 $U_{(10)}$ = potentiële windsnelheid [m.s⁻¹] – zie par. 3.4
 $\delta_{(0)}$ = ruwheidshoogte meetstation [m] - zie par. 3.4
 Z = hoogte gebouw [m]
 $Z_{(10)}$ = hoogte meetstation [10 m]
 δ = ruwheidshoogte ter plaatse
 a = exponent atmosferische grenslaag – zie tabel 4.1

In vergelijking (8.3) is de term $\left(\frac{\delta_{(0)}}{Z_{(10)}} \right)^{a_{met}}$ de correctiefactor voor het terrein en de term $\left(\frac{Z}{\delta} \right)^a$ de

correctiefactor voor de hoogte. De vergelijking geeft de windsnelheid $U_{(z)}$ op de hoogte Z gemeten boven de gemiddelde hoogte van de plaatselijke obstakels, zoals gebouwen en begroeiing. Op gelijke of grotere hoogten hangt de windsnelheid af van de plaatselijke omstandigheden en is de formule minder betrouwbaar.

Tabel 8.1 geeft de waarden van de atmosferische parameters δ en a

Voorbeeld:

Een gebouw van 12 verdiepingen met een hoogte van 42 m. Hoe groot is de gemiddelde windsnelheid op dakniveau bij een windsnelheid $U_{10} = 10$ m.s⁻¹ op het meetstation voor de vier verschillende terreincategorieën? De aangenomen dominante gebouwhoogte H is in de tabel aangegeven.

De rekenresultaten zijn aangegeven in tabel 8.2.

Terrein categorie	Omschrijving	Exponent a	Ruwheids-hoogte δ , m
1	Grote stadscentra waarin binnen een straal van minstens 2000 m minstens 50% van de gebouwen hoger is dan 21 m of tien maal de hoogte van een bovenwinds gebouw; de grootste maat geldt.	0,33	460
2	(Voor)stedelijke, beboste gebieden en andere terreinen met talrijke en dicht op elkaar staande belemmeringen zoals eengezinswoningen binnen een straal van 2000 m of tien maal de hoogte van een bovenwinds gebouw; de grootste maat geldt.	0,22	370
3	Open terrein met verspreide belemmeringen met een gemiddelde hoogte van minder dan 10 m, inclusief vlak open land, typisch voor een weerstation.	0,14	270
4	Vlakke onbelemmerde gebieden, waar wind over zee vrij toegang heeft met benedenwinds binnen 500 m geen belemmeringen of tien maal de hoogte van een benedenwinds gebouw.	0,1	210

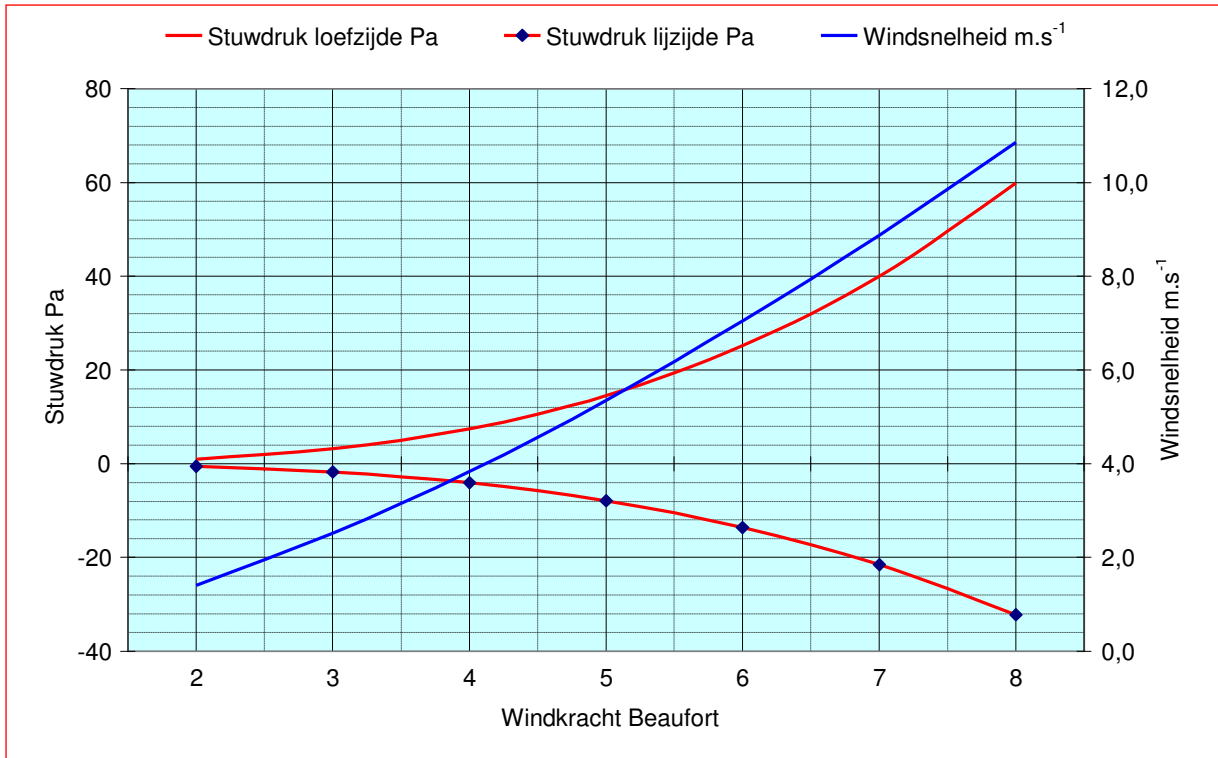
Tabel 8.1 – Parameters atmosferische grenslaag volgens ASHRAE

Terrein categorie	Correctiefactor terrein	Correctiefactor hoogte	Windsnelheid op dakhoogte $m \cdot s^{-1}$
1 H=21 m	$\left(\frac{\delta_{(0)}}{Z_{(10)}}\right)^{a_{met}} = \left(\frac{270}{10}\right)^{0,14} = 1,59$	$\left(\frac{Z}{\delta}\right)^a = \left(\frac{42-21}{460}\right)^{0,33} = 0,36$	$U_{42} = 10 * 1,59 * 0,36 = 5,7 \text{ m/s}$
2 H=10 m	$\left(\frac{\delta_{(0)}}{Z_{(10)}}\right)^{a_{met}} = \left(\frac{270}{10}\right)^{0,14} = 1,59$	$\left(\frac{Z}{\delta}\right)^a = \left(\frac{42-10}{370}\right)^{0,22} = 0,58$	$U_{42} = 10 * 1,59 * 0,58 = 9,2 \text{ m/s}$
3 H=6 m	$\left(\frac{\delta_{(0)}}{Z_{(10)}}\right)^{a_{met}} = \left(\frac{270}{10}\right)^{0,14} = 1,59$	$\left(\frac{Z}{\delta}\right)^a = \left(\frac{42-6}{270}\right)^{0,14} = 0,75$	$U_{42} = 10 * 1,59 * 0,75 = 11,9 \text{ m/s}$
4 H=0 m	$\left(\frac{\delta_{(0)}}{Z_{(10)}}\right)^{a_{met}} = \left(\frac{270}{10}\right)^{0,14} = 1,59$	$\left(\frac{Z}{\delta}\right)^a = \left(\frac{42-0}{210}\right)^{0,10} = 0,85$	$U_{42} = 10 * 1,59 * 0,85 = 13,5 \text{ m/s}$

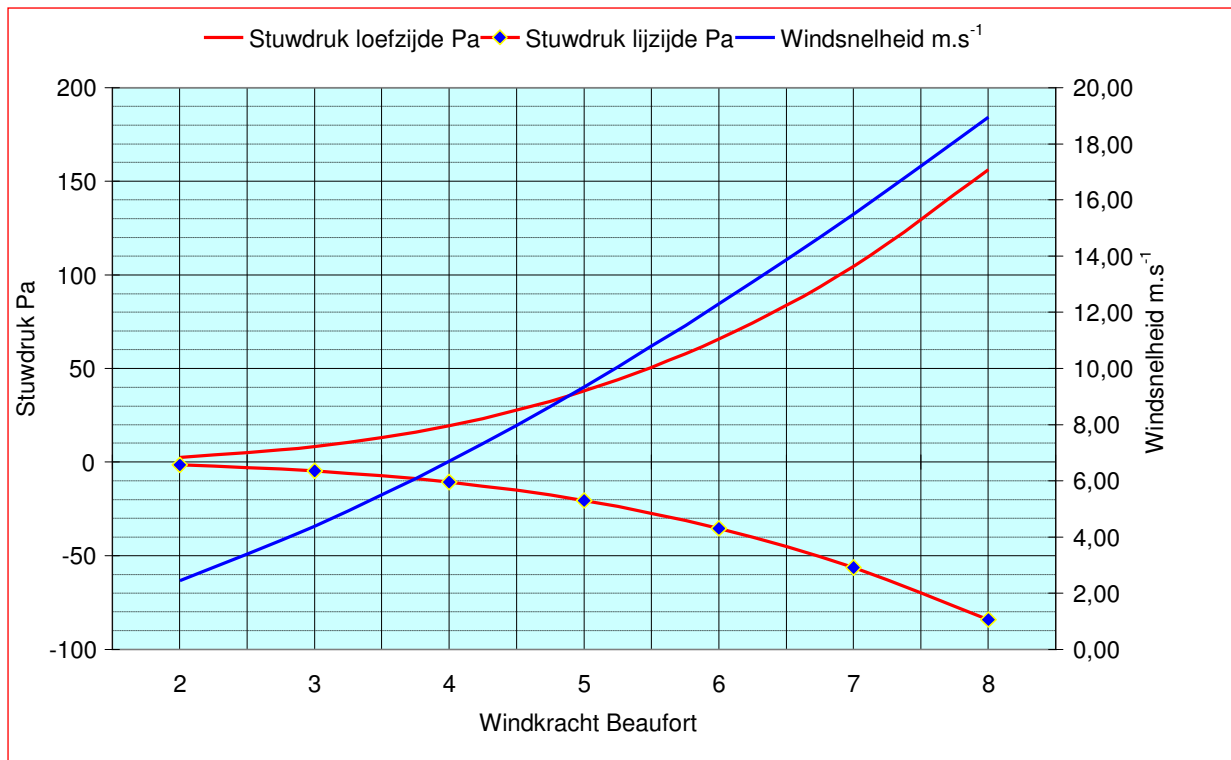
Tabel 8.2 – Windsnelheid op een hoogte van 42 m bij een gebouw op 4 verschillende terreincategorieën

De windsnelheden aan loef- en lijzijde zijn voor windkrachten van 2 tot 8 Beaufort en terreincategorie 1 aangegeven in figuur 8.2. Bij matige wind van 4 Beaufort is het drukverschil $\approx 10 \text{ Pa}$, oplopend tot $\approx 92 \text{ Pa}$ bij 8 Beaufort. Voor de berekening zijn de winddrukcoëfficiënten gebruikt zoals aangegeven in figuur 8.4.

Figuur 8.3 toont de overeenkomstige resultaten voor terreincategorie 2. Bij matige wind van 4 Beaufort is het drukverschil $\approx 30 \text{ Pa}$, oplopend tot $\approx 240 \text{ Pa}$ bij 8 Beaufort.



Figuur 8.2 – Windsnelheid en stuwdrukken - Voorbeeldgebouw in terreincategorie 1



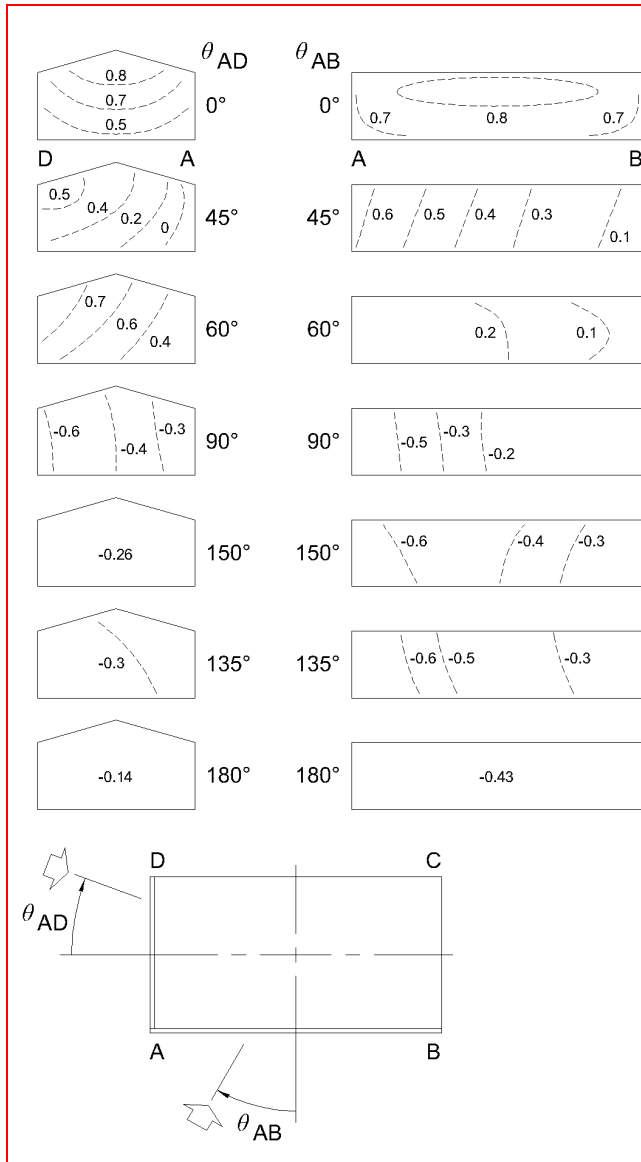
Figuur 8.3 – Windsnelheid en stuwdrukken - Voorbeeldgebouw in terreincategorie 2

8.4 Winddrukcoëfficiënt

De winddrukcoëfficiënt C_p wordt gedefinieerd als de fractie van de dynamische winddruk die wordt uitgeoefend op gevels en daken van gebouwen bij een bepaalde windrichting. C_p -waarden zijn nodig voor het ontwerp en de dimensionering van het Ventecdak[®] en voor gebruik in simulatieprogramma's voor natuurlijke ventilatie.

Winddrukcoëfficiënten worden beïnvloed door vele parameters, waaronder de geometrische verhoudingen van gebouwen, de detaillering van de gevel, de mate van beschutting door omliggende bebouwing, de windsnelheid en de windrichting. Het is praktisch onmogelijk al deze factoren in een analytisch model onder één noemer te brengen, en daarom wordt in simulatieprogramma's de Cp-waarde veelal sterk vereenvoudigd opgenomen (Cóstola, D. e.a. 2009).

Figuur 8.4 geeft een globaal beeld van de winddrukcoëfficiënten voor een rechthoekig gebouw bij verschillende windrichtingen (ASHRAE 1999). Een veel gebruikte compilatie van Cp-waarden is ook door AIVC gepubliceerd (Liddament 1996). Deze bronnen moeten met voorzichtigheid worden gehanteerd, en kunnen hoogstens dienen voor een kwalitatieve vergelijking en een indruk van de orde van grootte.



Figuur 8.4 – Winddrukcoëfficiënten volgens ASHRAE

Figuur 8.4, ontleend aan het ASHRAE Handbook Fundamentals, maar ook te vinden in andere publicaties (Allard, F. 1998), geeft een indruk van de globale Cp-waarden. De figuur toont de kopgevel en langsgevel van een gebouw bij verschillende windrichtingen. De gestippelde lijnen met de bijgeschreven waarden geven de Cp-waarden aan.

Voorbeeld 1:

De wind staat loodrecht op de langsgevel A-B van het gebouw ($\theta_{AB} = 0^\circ$). De Cp-waarde op deze gevel is $\approx 0,7 - 0,8$.

Aan de zijzijdige langsgevel met $\theta_{AB} = 180^\circ$ heerst dan met Cp $\approx -0,43$ onderdruk.

Aan de kopgevels met $\theta_{AD} = 90^\circ$ heerst dan met Cp $\approx -0,3 \dots -0,6$ eveneens onderdruk.

Voorbeeld 2:

De wind staat loodrecht op de kopgevel AD van het gebouw ($\theta_{AD} = 0^\circ$). De Cp-waarde op deze gevel is $\approx 0,5 \dots 0,8$.

Aan beide zijgevels met $\theta_{AB} = 90^\circ$ heerst dan met Cp $\approx -0,5 \dots -0,2$ onderdruk.

Een gebouw met de lengteas op de overheersende windrichting – in Nederland tussen ZW en NW- is relatief ongevoelig voor windinfiltratie.

Het gebruik van numerieke stromingssimulatie is niet eenvoudig vanwege de complexe aard van de berekeningen waarvoor een grote expertise vereist is, de hoge kosten en de lange rekkentijden. Niettemin is voor een fysiek testmodel van het Ventecdak[®] een CFD simulatie uitgevoerd - zie hoofdstuk 16.

Cp-waarden kunnen met een grote mate van betrouwbaarheid worden verkregen met behulp van windtunnelonderzoek. Hiervoor moet dan wel de stedenbouwkundige context van het betreffende gebouw bekend zijn, en daarom is deze methode in feite beperkt tot specifieke gevallen. Het fysieke

testmodel van het Ventecdak[®] is in de windtunnel beproefd, zowel in een *stand-alone* versie als in een stedenbouwkundige context.

8.5 Cp Generator

TNO Bouw en Ondergrond heeft een computerprogramma ontwikkeld voor het simuleren van winddrukcoëfficiënten Cp op gevels en daken van blokvormige gebouwen (<http://cpgen.bouw.tno.nl>)

Het programma houdt rekening met plaatselijke obstakels en terrein ruwheid. Het algoritme van de Cp-Generator is gebaseerd op systematisch windtunnelonderzoek en gepubliceerde resultaten van meetgegevens van verschillende research instellingen. Voor een eenvoudige omgeving wordt een goede nauwkeurigheid geclaimd. Voor complexe gebouwvormen en obstakels wordt het programma continu verbeterd. Een bèta testversie is beschikbaar (Knoll, H.1996).

Voor de ontwikkeling van het Ventecdak[®] is het van belang over betrouwbare Cp-waarden te kunnen beschikken, die in principe niet aan een stedenbouwkundige context moeten zijn gebonden. Wellicht kunnen hiervoor generieke stedenbouwkundige modellen worden gebruikt zoals die door verschillende onderzoekers, overigens voor geheel andere doeleinden zijn ontwikkeld (Ellefsen, R. 1990, Taseiko, O.V. e.a. 2009). Zie ook hoofdstuk 7.

In het dynamisch simulatiemodel ESP-r -hoofdstuk 18- kan de Cp-generator als adaptief algoritme worden gebruikt voor de voorspelling van overdrukken en onderdrukken op het Ventecdak[®].

9. EEN OPTIMALE AANZUIGLOCATIE

9.1 Algemeen

Een van de ernstigste fouten die bij het ontwerp van ventilatievoorzieningen kan worden gemaakt is een verkeerde keuze van de aanzuiglocatie van de buitenlucht. Hierdoor kan vervuilde lucht in een gebouw terecht komen met vaak ongewenste hygiënische- of gezondheidsconsequenties.

Verontreinigingen kunnen door een gebouw zelf worden uitgestoten bijvoorbeeld door rookgasafvoeren, koeltoren, laboratoriumafzuiging e.d. waardoor via kortsluiting de aangezogen ventilatielucht kan worden besmet –zie paragraaf 9.4. Dergelijke verontreinigingen kunnen ook van gebouwen uit de omgeving afkomstig zijn, zoals de legionella besmetting door een koeltoren in Amsterdam duidelijk heeft aangetoond. (IGZ 2007, RIVM 2006). In een stedelijke omgeving zijn uitlaatgassen van het verkeer de belangrijkste bronnen van luchtverontreiniging. Verder spelen emissies van industrieën en stuifmeel uit natuurlijke bronnen, die deels hinderlijk maar ook ongezonder kunnen zijn, een rol.

Het is van het grootste belang de aanzuiglocatie van de ventilatielucht niet te laten bepalen door bouwkundige efficiëntie of de toevallige locatie van techniekruimten, maar omgekeerd. Niet de architect maar de ontwerper van het klimaatsysteem is hiervoor verantwoordelijk.

9.2 Luchtkwaliteit

In een stedelijke omgeving voldoet de luchtkwaliteit vaak niet aan wettelijke- en gezondheidsnormen. Een zo hoog mogelijke aanzuiglocatie geeft de beste garantie voor een optimale luchtkwaliteit; zie hoofdstuk 7. Luchtaanzuiging op dakniveau voldoet het beste aan deze eis.

9.3 Molest en bioterrorisme

Er is nog een tweede reden om de ventilatielucht op dakniveau aan te zuigen. Ook moedwillige vervuiling van de aangezogen lucht door baldadigheid, molest en terreur moet worden voorkomen. Een rookbommetje in de aanzuigopening van de buitenlucht kan nog een vrij onschuldige grap lijken; erger wordt het met een traangaspatroon. Levensbedreigende terreur wordt het als dodelijke chemische, bacteriologische of radioactieve stoffen (CBR) opzettelijk in de lucht terecht komen. Berichten hierover kwamen in 2002 uit Amerika, waar terroristen ervan werden verdacht de luchtbehandelingsinstallatie van het Kapitol te hebben willen gebruiken voor hun lugubere en perverse doeleinden. De aanzuigopening van de ventilatielucht moet daarom op een van buitenaf onopvallende en/of ontoegankelijke plaats zijn aangebracht (Bronsema 2002, 2004, 2005). Luchtaanzuiging op dakniveau voldoet het beste aan deze eis.

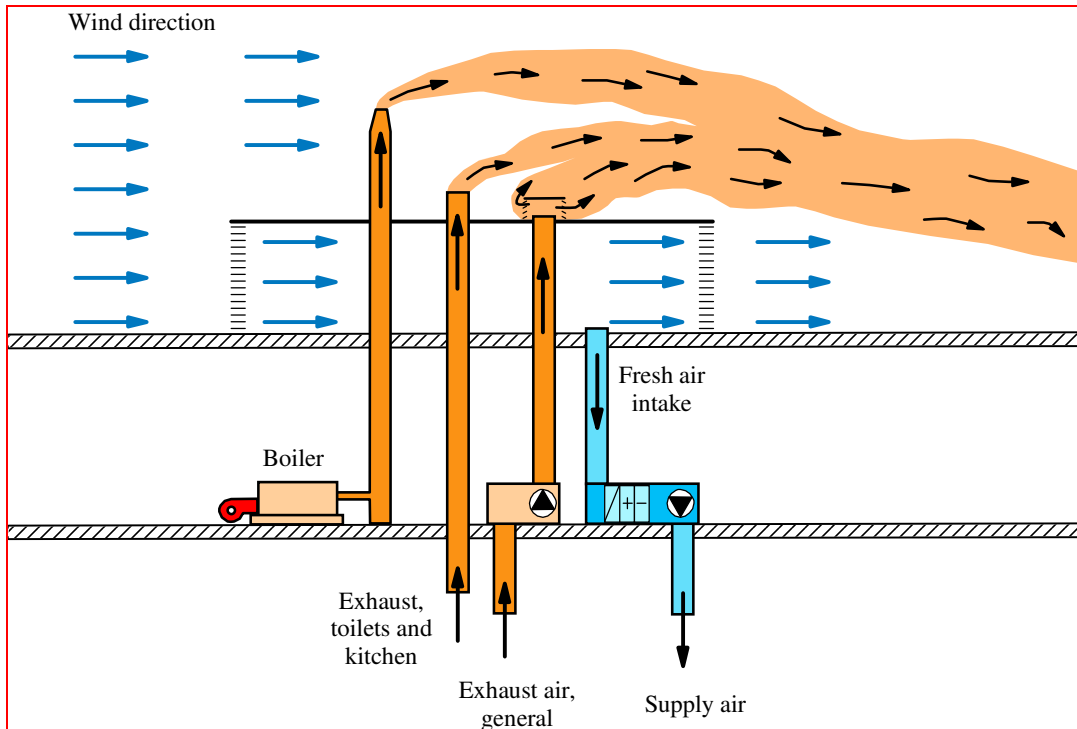
9.4 Kortsluiting

Kortsluiting treedt op als de aangezogen buitenlucht wordt “besmet” door de uitstoot van gassen en verontreinigde lucht uit het gebouw zelf. Deze kunnen dan door het gebouw worden verspreid. Veel mensen zijn met dit verschijnsel bekend als ze op hun werkplek op gezette tijden of bij een bepaalde windrichting de kroketten ruiken die op dat moment in de keuken worden gebakken. De afzuiglucht uit de keuken wordt in deze gevallen door de wind in de richting van de aanzuigopening van de buitenlucht gedreven en komt daar, meestal sterk verdund, via het ventilatiesysteem in het gebouw terecht. Erger wordt het als met legionella bacteriën besmette lucht, bijvoorbeeld uit een koeltoren, in een gebouw terechtkomt. Een berucht risico bij ziekenhuizen is verder de verspreiding van ziektekiemen uit de afgezogen lucht door kortsluiting. De geschiedenis van de klimaattechniek kent hiervan verschillende voorbeelden, ook in Nederland. We komen dan al dicht in de buurt van het risico van bioterrorisme –zie paragraaf 9.3.

In de vakliteratuur wordt aan de vermindering van het verschijnsel “kortsluiting” veel aandacht besteed (AIVC 1995, ASHRAE 1999, 2001). Opvallend is dat het ISSO Handboek Installatietechniek, dat in Nederland veel gebruikt wordt, “kortsluiting” alleen wordt vermeld in het hoofdstuk over elektrotechnische installaties!

Een grote afvoersnelheid in de uitmondung, een voldoende hoogte en minimum afstanden tussen aanzuig- en afvoeropeningen zijn de meest vermelde maatregelen. NEN-EN 13779 (NEN 2007) geeft in de informatieve Annex A richtlijnen voor de locatie van afvoeropeningen en de minimale tussenafstand met aanzuigopeningen. Alleen afvoerlucht met een lage graad van verontreiniging mag via gevels worden afgevoerd; voor alle andere gevallen wordt een bovendakse afvoer aanbevolen.

Bij het *Earth, Wind & Fire* concept, waar verse buitenlucht op dakhöhe wordt aangezogen en de gebruikte ventilatielucht op dakhöhe via een zonneshoorsteen wordt afgevoerd moet aan het risico van kortsluiting uitdrukkelijk aandacht worden besteed. Figuur 9.1 toont een voorbeeld van een zogenaamde “*kortsluitveilige*” luchtaanzuiging. Hierbij wordt, onafhankelijk van de windrichting, vanaf de loefzijde van het gebouw altijd schone buitenlucht aangezogen en verontreinigde lucht met de wind mee aan de lijzijde afgevoerd.



Figuur 9.1 – Kortsluitveilige luchtaanzuiging

9.4 Een optimale aanzuiglocatie

Het Ventecdak® biedt een optimale aanzuiglocatie voor ventilatielucht, want

- De luchtkwaliteit is op dakhöhe optimaal – zie hoofdstuk 7;
- Het risico van molest en bioterrorisme is op dakhöhe minimaal;
- Door de horizontale separatie van luchtaanzuig en luchtafvoer is kortsluitrisico uitgesloten.

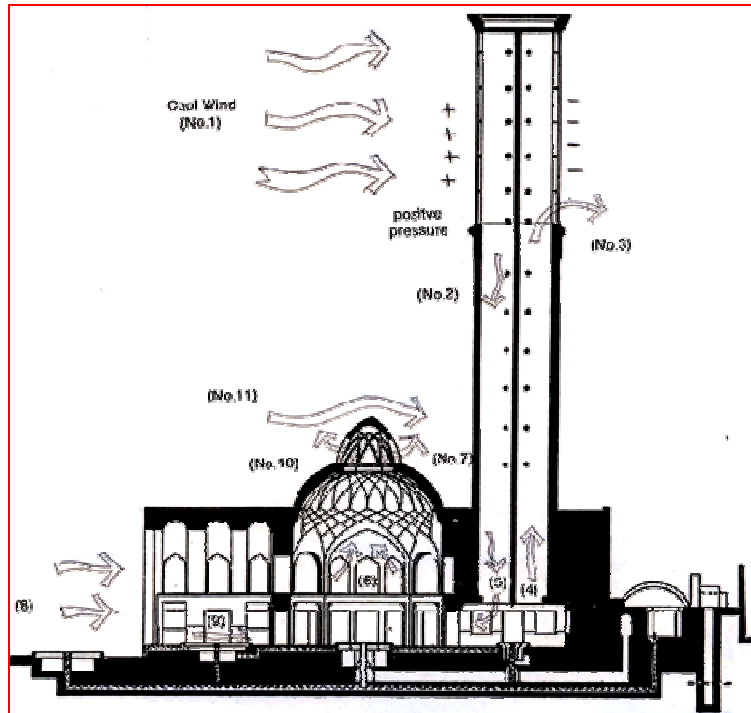
9.5 Het dak als windvanger

In hoofdstuk 11 wordt een concept ontwikkeld voor een luchtaanzuig- en afvoersysteem, het Ventecdak®, dat voldoet aan de hoogste eisen van veiligheid en hygiëne. Bovendien maakt het Ventecdak® gebruik van door de wind veroorzaakte drukverschillen waardoor op ventilatorenergie kan worden bespaard en windenergie kan worden opgewekt – zie hoofdstuk 20.

10. WINDVANGERS

10.1 De *Badgir*

Badgir is Iraans voor windtoren. *Badgirs* spelen al vanaf de vroegst bekende tijden een belangrijke rol in de natuurlijke klimaatregeling van gebouwen in de hete en droge woestijngebieden in Iran. Ook in de streekarchitectuur van andere tropische landen worden ze aangetroffen. De werking is als volgt – zie figuur 10.1 (A ‘Azami, A. 2005, Bahadori, Mehdi N. 1976)



Figuur 10.1 – Werking van een *badgir*

Bovenin de *badgir* wordt relatief koele lucht ingevangen (1) en via de schacht (2 en 5) naar beneden geleid. De lucht strijkt over een vijver met een fontein en wordt daar door verdamping van water gekoeld. De koele en vochtige lucht (6) stroomt vervolgens in de woonruimte.

Door het verschil in positieve winddruk aan loefzijde (1) en negatieve druk aan lijzijde (3) stroomt de gebruikte lucht weer naar buiten.

De koepel boven de woonruimte is aan de top voorzien van luchtgaten (10), en werkt mee aan het ventilatiesysteem. De lucht binnen de zonbeschenen koepel is warmer dan die op leefniveau, en door het schoorsteeneffect ontwijkt de warme lucht door de luchtgaten. Als wind over de koepel strijkt ontstaat door de versnelling van de lucht daar ter plaatse een geringe onderdruk waardoor het afzuigeffect wordt versterkt. In figuur 10.1 vindt extra luchttoevoer plaats via ramen die uitkijken op een koele patio met een fontein (8).

In gebieden met een overwegend uniforme windrichting heeft de windtoren twee kanalen, één voor de toevoer, en één voor de afvoer van lucht. Als de windrichting variabel is kunnen vier, zes of acht kanalen in de toren aanwezig zijn. Gebouwen kunnen ook zijn voorzien van meerdere *badgirs* zie figuur 10.2.

Door de windvanger te combineren met een *qanaat*, een ondergrondse waterstroom, kon de lucht nog verder afgekoeld worden.

Badgirs zijn uitgevoerd in baksteen of klei, en deze materialen spelen eveneens een rol bij de temperatuurregeling. In een heet en droog woestijnklimaat zijn er grote verschillen tussen de dag- en de nachttemperatuur van respectievelijk $\approx 35^{\circ}\text{C}$ en $\approx 17^{\circ}\text{C}$. 's Nachts koelt de *badgir* door straling en convectie af, waardoor de toegevoerde ventilatielucht 's ochtends wordt gekoeld en de luchtstroming wordt versterkt. De responsietijd van het materiaal is 7 tot 9 uur.

Een probleem met *badgirs* is dat insecten en vogels binnen kunnen komen; hogere torens hebben hier minder last van. In koude winters kunnen *badgirs* worden afgesloten. Er is op internet veel informatie over *badgirs* te vinden, maar kwantitatieve gegevens over de prestaties ontbreken.

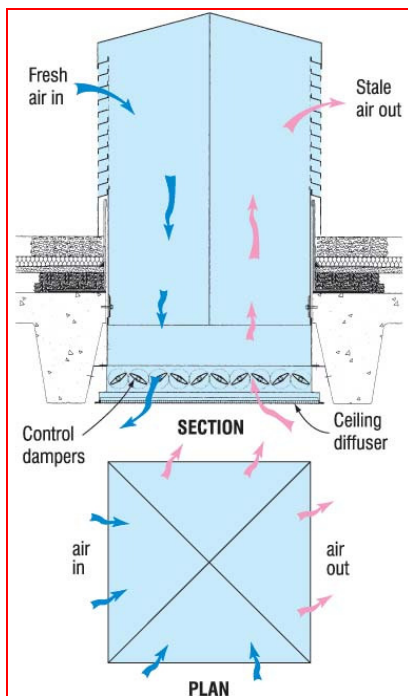


Figuur 10.2 – Badgirs en koepel

10.2 Moderne windvangers

(<http://www.sunpipe.co.uk/windcatcher/about/php>)

Een moderne variant op de *badgir* is de *windcatcher* van Monodraught UK – zie figuur 10.3 en 10.4



De schacht van de *windcatcher* is verdeeld in vier compartimenten, waarvan, bij aanwezigheid van wind, twee dienen voor luchttoevoer en twee voor luchtafvoer. Verse lucht wordt via de loefzijdige compartimenten aangevoerd en door de lijzijdige compartimenten afgevoerd. De werking is onafhankelijk van de windrichting. De units zijn voorzien van een brand / regelklep en een plafonddiffusor; het luchtdebiet kan hiermee worden geregeld.

Bij windstille werkt de *windcatcher* op basis van het schoorsteeneffect. De binnentemperatuur moet dan hoger zijn dan de buitentemperatuur.

Door verlenging van de schacht kan de *windcatcher* ook voor meerder verdiepingen worden toegepast.

Door een geprogrammeerde regeling van de luchtklep kan nachtcooling worden gerealiseerd, door bijvoorbeeld laat in de avond, als de buitentemperatuur voldoende is gedaald, de klep te openen en onder invloed van wind en/of thermiek koude nachtwind toe te laten.

Met behulp van een kierstand van de klep kan een ruimte ook continu worden geventileerd (Dauerlüftung).

Figuur 10.3 – Windcatcher van Monodraught



Figuur 10.4 – Enkele foto's van windcatchers.

De principes die in *badgirs* en *windcatchers* zijn toegepast zullen in de volgende paragrafen worden uitgewerkt voor toepassing in het *Earth, Wind & Fire* concept voor gebouwen in het West Europese klimaat.

11. DE WIND ALS DRIJVENDE KRACHT VOOR VENTILATIE

11.1 Inleiding en samenvatting

Dit hoofdstuk gaat in op de mogelijkheden die de wind biedt voor natuurlijke ventilatie bij hoogbouw. Ventilatiesystemen met luchttoevoer via traditionele gevelroosters en ramen zijn problematisch voor wat betreft de ventilatiecapaciteit, die varieert met de winddruk en de luchtkwaliteit in een stedelijke omgeving -zie hoofdstuk 7. Voor deze problemen zijn verschillende oplossingen denkbaar in de vorm van dubbele huidgevels en/of regelbare gevelroosters. Bij deze concepten kan de ventilatielucht in het stookseizoen niet worden verwarmd, hetgeen bijzondere aandacht vraagt voor het thermisch comfort in de gevelzone. Evenmin kan in het koelseizoen de ventilatielucht worden gekoeld waardoor de thermische belasting van de ruimte toeneemt.

In het natuurlijke Geo-Klimaatconcept van *Earth, Wind & Fire* zijn deze problemen op een effectieve en elegante manier opgelost. Door de luchtaanzuiging op dakniveau is de luchtkwaliteit optimaal. Positieve winddrukken worden benut om de ventilatielucht via een overdrukkamer naar de klimaatcascade te voeren, waar de lucht op een natuurlijke manier wordt verwarmd of gekoeld en bevochtigd of gedroogd. De afvoer van de gebruikte lucht vindt plaats via de zonneshoorsteen met warmterugwinning, ondersteund door het venturi-effect dat door de wind tot stand wordt gebracht. Met behulp van een globaal analytisch rekenmodel wordt gedemonstreerd dat op deze manier aanzienlijke drukverschillen voor natuurlijke ventilatie kunnen worden gerealiseerd. Met behulp van CFD simulaties, gevalideerd door modelmetingen in de windtunnel, is naderhand wetenschappelijk aangetoond dat het hieruit ontwikkelde Ventecdak[®] een effectief bouwdeel is voor natuurlijke ventilatie –zie hoofdstuk 16 en 17.

Verder wordt globaal onderzocht of het mogelijk is aerodynamische drukverschillen te exploiteren met behulp van een op dakniveau aan te brengen spoiler of vleugel. Dit lijkt technisch en architectonisch een interessante optie, die echter aanzienlijke complicaties oplevert en derhalve niet verder is uitgewerkt.

11.2 Natuurlijke decentrale luchttoevoer via de gevel

11.2.1 Algemeen

Natuurlijke ventilatie via de gevel staat ook in kantoorgebouwen wereldwijd in de belangstelling en wordt ook bij grotere bouwhoogten reeds toegepast. De natuurlijke krachten die hiervoor worden gebruikt zijn thermische trek (schoorsteeneffect) en winddruk; beide zijn zeer wisselvallig.

- Thermische trek is evenredig met het verschil in binnen- en buitentemperatuur, dat kan variëren van + 30K in de winter tot – 10K in de zomer. Voor een gebouw van 12 verdiepingen en 42 m hoog betekent dit op de gevel van de begane grond een maximaal drukverschil binnen/buiten van -52 Pa in de winter en +8 Pa in de zomer.
- Windsnelheden kunnen in Nederland variëren tussen een windkracht van 0 en 9 Beaufort, resp. $\approx 0,2$ m/s en ≈ 24 m/s met uitschieters tot 11 Beaufort. De figuren 8.2 en 8.3 in hoofdstuk 8 laten voor een gebouw van 12 verdiepingen de positieve en negatieve stuwdrukken zien op de windzijdige en de lijzijdige gevels in de betreffende terreincategorie. Voor categorie 2 (buitenwijk) en 8 Beaufort zijn de drukverschillen maximaal resp. + 155 Pa en – 85 Pa. Bovendien kan de wind uit alle richtingen komen waardoor de drukverschillen met de windrichting variëren. Een stabiel werkend natuurlijk ventilatiesysteem waarbij alle ruimten ten allen tijde van voldoende verse lucht worden voorzien is daarom problematisch.

Met de in paragraaf 11.2.2 t/m 11.2.4 beschreven strategieën kunnen deze problemen in principe worden ondervangen.

11.2.2 Dubbele huidgevels

Dit is een verzamelbegrip voor verschillende gevelconstructies, waarbij de gebouwschil van een tweede huid wordt voorzien met als belangrijkste, maar niet het enige doel, de reductie van de winddruk op gevels van gebouwen. Andere effecten (kunnen) zijn het reduceren van de geluidsdruk,

bescherming van de buitenzonwering, verbetering van het thermisch comfort in de gevelzone en energiebesparing.

De toepassing van dubbele huidgevels begon met het klassieke klimaatraam in de laatste decennia van de vorige eeuw, en is na een hausse rond de eeuwwisseling nu duidelijk op zijn retour. In deze periode ontwikkelde het concept zich van passieve, tot via het gebouwbeheersysteem aan de klimaatinstallatie gekoppelde, actieve systemen, internationaal aangeduid met *Advanced Integrated Façades* (IEA 2007).

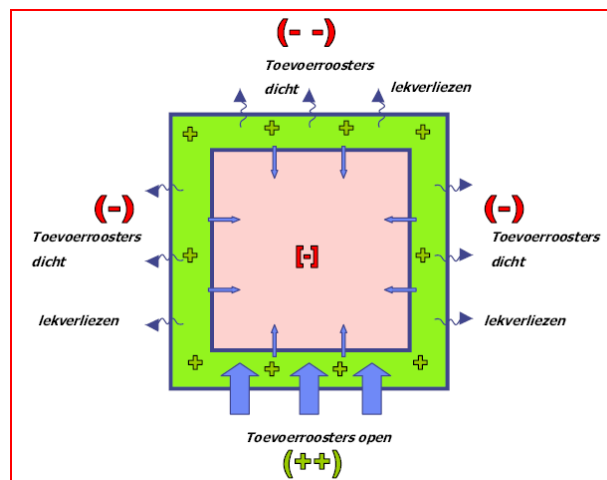
Het reduceren van de winddruk wordt gerealiseerd met regelbare openingen in het buitenste blad van de dubbele huid, terwijl de turbulente variaties van de winddruk (vlagerigheid) worden gedempt in het verticale plenum tussen het buiten- en binnenblad.

Bij de meeste uitvoeringsvormen van dit concept kan metterdaad een raam worden geopend, hetgeen door gebruikers zeer wordt gewaardeerd. Een hoge ruimtetemperatuur, die door zoninstraling en interne thermische belastingen ook bij lagere buitentemperaturen kan optreden, kan door een open raam effectief worden verlaagd. Ook in psychologisch opzicht is een te openen raam een noodzakelijke voorziening zie paragraaf 1.18.

11.2.3 Omloopkanaal

Drukverschillen kunnen in principe worden geëlimineerd door per één of twee verdiepingen een omloopkanaal aan te brengen, zie figuur 11.1 (Engel, P. v.d. 2007). Het omloopkanaal is rondom voorzien van gemotoriseerde luchtkleppen, die aan de loefzijde worden geopend en aan de andere zijden gesloten. Ventilatielucht bereikt de kantoornruimten via het omloopkanaal en wordt centraal afgezogen. Dergelijke kanalen zijn bouwkundig niet gemakkelijk in te passen en gevoelig voor inwendige vervuiling met alle consequenties daarvan voor de hygiënische- en de geurkwaliteit van de lucht.

Dit concept kan in principe worden uitgevoerd met te openen ramen, maar de directe relatie tussen het raam en de ventilatietoever is verdwenen. Dit maakt het systeem voor de gebruiker enigszins onduidelijk. Voor zover bekend is dit concept nog nergens uitgevoerd.

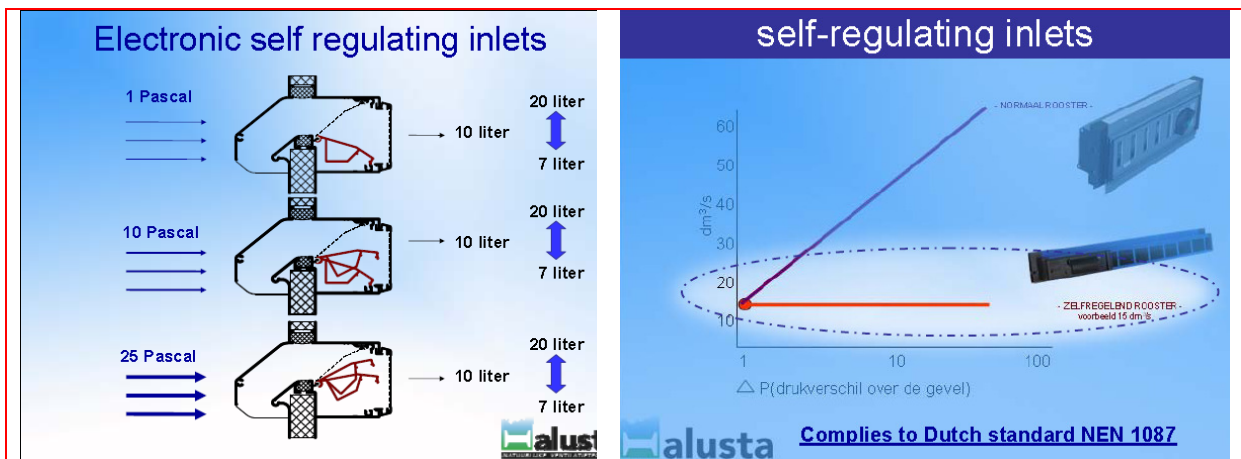


Figuur 11.1–Natuurlijke ventilatie met omloopkanaal

11.2.4 Regelbare gevelroosters

De toevoer van buitenlucht vindt hierbij plaats via zelfregelende gevelroosters. Een zelfregelend rooster is een ventilatievoorziening die de nominale capaciteit constant houdt, onafhankelijk van het werkelijk optredende drukverschil. Dergelijke roosters zijn er in passieve uitvoering, dat wil zeggen zelfwerkend, of in actieve, elektronisch geregelde uitvoering op basis van constant debiet of CO₂ concentratie in de ruimte, en kunnen dan worden aangesloten op een gebouwbeheersysteem. De luchtsnelheid en de richting hiervan worden in ieder rooster zelfstandig vastgelegd door een sensor. De aan de sensor gekoppelde elektronica en servomotor sturen het afsluitmechanisme aan, en sluiten het rooster steeds verder naarmate het drukverschil toeneemt. Daarnaast hebben deze roosters een diodewerking, wat wil zeggen dat ze sluiten als de lucht van binnen naar buiten zou gaan stromen.

Hierdoor wordt dwarstransport van lucht voorkomen (www.alusta.com). Figuur 11.2 laat een voorbeeld zien van een dergelijk gevelrooster in elektronisch geregelde uitvoering.



Figuur 11.2 – Elektronisch regelbaar gevelrooster

Dit concept kan eveneens worden uitgevoerd met te openen ramen, een in kantoorgebouwen zeer wenselijke voorziening –zie paragraaf 11.2.2. De roosters zijn vanuit de ruimte zichtbaar en de gebruiker kan de roosters met behulp van infrarood afstandsbediening bedienen, een belangrijk winstpunt. De beweging van de regelklep, op basis van de elektronische regeling of van de afstandsbediening, kan persoonlijk worden gevolgd, een belangrijk psychologisch voordeel..

De roosters kunnen worden uitgevoerd met suskast, waardoor geluid van buiten kan worden gedempt, en zijn mechanisch geschikt voor toepassing in windsnelheidsgebied I tot 150 m gebouwhoogte. Bij hoge winddrukken bieden dergelijke gevelroosters in geopende stand slechts beperkt bescherming tegen regeninslag. De drukverschillen op grote hoogte kunnen dusdanig groot zijn dat deze bescherming niet meer afdoende is, met het risico op waterinslag als gevolg. Voorkomen moet worden dat ventilatieroosters open staan in combinatie met regen en grote drukverschillen. Om dit te kunnen waarborgen wordt een regeling op basis van CO₂ concentratie aanbevolen. Er komt door de hoge druk op de gevel immers vrijwel altijd al voldoende lucht binnen via infiltratie door de gevel, zelfs bij een gebouw met een hele goede luchtdichtheid. Zolang deze infiltratie voldoende is voor het onderhouden van een goede luchtkwaliteit zullen de roosters gesloten blijven. Er ontstaat door de CO₂ regeling dus een causaal verband tussen risicovolle weersomstandigheden en het sluiten (of gesloten blijven) van de toevoerroosters.

11.2.5 Randvoorwaarden voor ventilatie via de gevel

Bij directe luchttoevoer van buiten moet de uiterste aandacht worden besteed aan het thermisch comfort in de gevelzone. In het stookseizoen heeft de koude lucht de neiging naar beneden te vallen waardoor tochtverschijnselen ontstaan. Mogelijkheden om dit te voorkomen zijn :

- Plaatsing van de roosters direct onder het plafond: door het Coanda-effect blijft de lucht aan het plafond “kleven” en wordt geleidelijk opgewarmd. Een bepaalde minimum luchtsnelheid in het rooster is noodzakelijk.
- Gebruik te maken van de plafondruimte als mengzone. Voordat de koude lucht naar beneden zou vallen wordt hij “opgevangen” door het verlaagd plafond.
- Gebruik te maken van klimaatschermen of spoilers, waardoor de koude lucht wordt opgevangen en verwarmd. In het koelseizoen kunnen deze schermen worden gebruikt voor koeling.

Met dit concept zijn vanaf het begin van de 20^e eeuw positieve ervaringen opgedaan (Bronsema, 1996, 2001, 2003, 2005).

Bij ventilatie via de gevel wordt de ventilatielucht uiteraard niet geconditioneerd; dit betekent voor het klimaatsysteem een extra warmte- en koudebelasting. Bevochtiging van de ventilatielucht is eveneens niet mogelijk.

Daarentegen kan in de Klimaatcascade[®] van het Geo-Klimaatconcept[®] de ventilatielucht worden gekoeld of verwarmd en gedroogd of bevochtigd –zie deelrapport (III).

11.2.6 Luchtafvoer

Bij decentrale luchttoevoer wordt de lucht centraal afgezogen via de zonneschoorsteen en de venturi-ejector in het Ventecdak[®] in combinatie met warmteterugwinning.

11.3 Natuurlijke centrale luchttoevoer door overdruk

11.3.1 Concepten

Van de overdruk aan de windzijde van een gebouw kan gebruik worden gemaakt om ventilatielucht toe te voeren. Hiervoor zijn twee mogelijke concepten onderzocht:

- Overdrukkamer op de bovenste verdieping van een gebouw. Dit concept is geanalyseerd in paragraaf 11.3.2 en hoofdstuk 12, en naderhand uitgewerkt tot het Ventecdak[®].
- Vleugel met overdrukcompartiment boven het dak. Dit concept is nogal speculatief en derhalve slechts globaal onderzocht en niet uitgewerkt- zie paragraaf 11.12

11.3.2 Overdrukkamer

Het principe van een overdrukkamer weergegeven in figuur 11.3.

Aan de windzijde wordt ventilatielucht met behulp van dakoverstekken opgevangen en door de positieve winddruk naar de overdrukkamer gevoerd. In de verticale schacht, de Klimaatcascade[®], wordt de lucht geconditioneerd en aan de aangesloten ruimten toegevoerd - zie deelrapport (III) van het onderzoek.

De grootte van de overdruk wordt bepaald door de winddrukcoëfficiënt en de plaatselijke windsnelheid op het betreffende geveldeel. Beide hebben gewoonlijk de hoogste waarde bij de top van een gebouw -zie hoofdstuk 8- en de overdrukkamer is dan ook op de dakverdieping gesitueerd waar tevens de luchtkwaliteit optimaal is -zie hoofdstuk 7 en 9.

Een overdrukkamer moet idealiter bij alle windrichtingen kunnen functioneren, hetgeen kan worden gerealiseerd met een systeem van gemotoriseerde luchtkleppen, die automatisch op de windzijde worden geopend en op de lijzijde gesloten – zie de figuren 12.1 en 12.2 in hoofdstuk 12. Deze kleppen kunnen eveneens dienst doen om de druk in de overdrukkamer naar boven te begrenzen in geval van hoge windsnelheden en -drukken. De overdrukkamer doet tevens dienst als bufferruimte om snelle drukwisselingen bij korte windvlagen op te vangen. In de overdrukkamer kunnen tevens windturbines worden aangebracht voor de opwekking van elektrische energie –zie hoofdstuk 20.

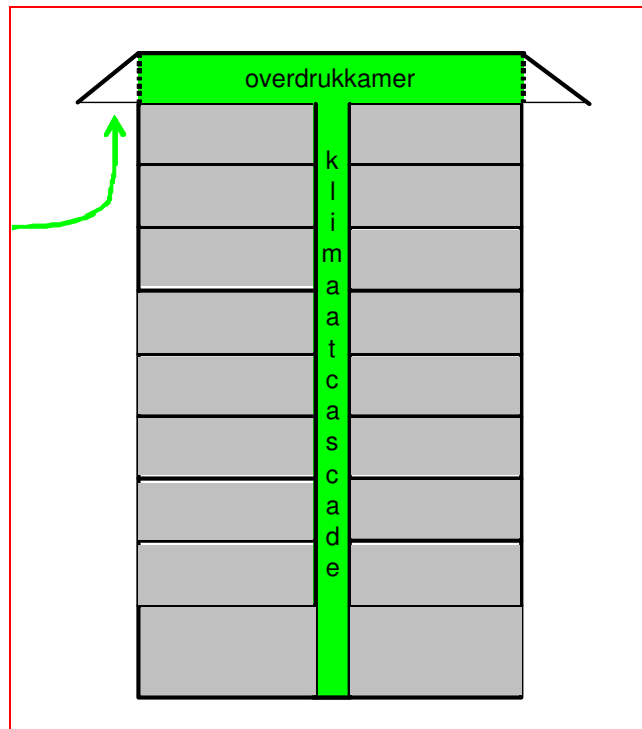
In hoofdstuk 8 zijn aan de hand van enkele voorbeeldberekeningen, gebaseerd op de ASHRAE formule, voor een gebouw van 12 verdiepingen de ordegrrootte van de te bereiken overdrukken in beeld gebracht; zie figuur 8.2 en 8.3. Bij een zwakke tot matige wind, windkracht 2 tot 3 Beaufort, zijn in terreincategorieën 1 en 2 al overdrukken bereikbaar van resp. 2 en 5 Pa, oplopend tot resp. 8 en 20 Pa bij een matige wind van 4 Beaufort. Voor een natuurlijk ventilatiesysteem zijn dit respectabele drukken.

De grootte van de dakoverstekken en van de inlaatopeningen waardoor de ventilatielucht naar de overdrukkamer wordt geleid, wordt bepaald door de ventilatiecapaciteit en de minimum winddruk waarop het concept wordt ontworpen. De optimale vormgeving hiervan, mede te bepalen op grond van windtunnelonderzoek, is een boeiende ontwerppoging voor de architect en de klimaatingenieur.

Figuur 11.3 gaat uit van een gebouw met een vierkante plattegrond waardoor de wind van alle kanten toegang heeft tot de overdrukkamer. Het is ook mogelijk de overdrukkamer los te koppelen van de dakrand en deze in een dakopbouw onder te brengen. Luchtaanzuiging kan dan plaats vinden via de dakranden die met bouwkundige luchtkanalen op de overdrukkamer zijn aangesloten. Figuur 11.4 geeft een voorbeeld van een gebouw met een rechthoekige plattegrond en twee kernen met dakopbouw.

De luchtkanalen transporteren ongefiltreerde lucht en zijn daarom gevoelig voor vervuiling. De toepassing van elektrostatische luchtfilters is daarom te overwegen, zie deelrapport (III). Gezien de

risico's van vervuiling, met de inherente verslechtering van de luchtkwaliteit, moeten de luchtkanalen goed reinigbaar zijn.



Figuur 11.3 – Principe luchttoevoer door overdruk



Figuur 11.4 – Overdrukkamer in dakopbouwen met lucht aanzuig via de dakranden

Het is voor een dergelijk gebouw in principe ook mogelijk de lucht direct in de overdrukkamer van de dakopbouw op te vangen, waardoor problemen van deze aard worden voorkomen. De lucht aanzuiging mag hier evenwel niet in de turbulente zone van de wind terecht komen, omdat dan geen sprake meer is van overdruk; zie figuur 8.1. De overdrukkamer moet daarom voldoende hoog zijn en tevens voorzien van overstekken om de opgaande wind op te vangen. De noodzakelijke hoogte en de afmetingen van de overstekken zullen per geval met behulp van CFD simulaties en/of windtunnelonderzoek moeten worden vastgesteld.

11.4 Natuurlijke centrale luchtafvoer door onderdruk

11.4.1 Concepten

Lucht wordt centraal afgezogen via een zonneschoorsteen en een afzuigvoorziening in het dak in combinatie met warmteterugwinning. Voor de afzuigvoorziening zijn twee mogelijke concepten onderzocht:

- Venturi-ejector in de dakverdieping van een gebouw. Dit concept is geanalyseerd in paragraaf 11.5 – 11.8 en hoofdstuk 12 en naderhand uitgewerkt tot het Ventecdak® -zie hoofdstuk 16 en 17.
- Coanda-ejector gevormd door een vleugel met onderdrukcompartiment boven het dak. Dit concept is nogal speculatief en derhalve slechts globaal onderzocht en niet uitgewerkt- zie paragraaf 11.12

11.4.2 Venturi-ejector

In dit concept wordt door de wind geïnduceerde onderdruk aan de lijszijde van een gebouw benut om ventilatielucht af te zuigen. In hoofdstuk 8 zijn aan de hand van enkele voorbeeldberekeningen, gebaseerd op de ASHRAE formule, voor een gebouw van 12 verdiepingen de ordegrrootte van de te bereiken onderdrukken in beeld gebracht; zie figuur 8.2 en 8.3. Bij een zwakke tot matige wind, windkracht 2 tot 3 Beaufort, zijn in terreincategorieën 1 en 2 al onderdrukken bereikbaar van resp. 2 en 5 Pa, oplopend tot resp. 4 en 10 Pa bij een matige wind van 4 Beaufort. Deze drukken kunnen in principe met behulp van het Venturi-effect worden versterkt –zie paragraaf 11.5 – 11.8. De Venturi-ejector staat in serie met de Zonneschoorsteen –zie deelrapport (I) van het onderzoek. Zon en wind werken bij het *Earth, Wind & Fire* concept samen en zijn complementair.

11.5 Principe van een Venturi

Een venturi is een doelbewust in een stromingkanaal voor vloeistof of gas aangebrachte vernauwing, die *keel* wordt genoemd. Doordat het passerende medium een snelheidsverhoging ondergaat ontstaat in de keel een drukverlaging; het venturi-effect. Bij bepaalde toepassingen kan door een in de Venturi aangebrachte zijaansluiting gas of vloeistof worden aangezogen. Het *Earth, Wind & Fire* maakt van dit principe gebruik door de wind via een vernauwing te leiden, en van de opgewekte onderdruk gebruik te maken voor de afzuiging van een gebouw.

Het Venturi-effect is in principe alleen van toepassing op een gesloten systeem en geldt in feite dus niet voor een open systeem, zoals de hier beschouwde windstroming rond gebouwen. De wind wordt hierbij namelijk niet gedwongen dóór de Venturi te stromen maar kan ook gedeeltelijk rondom ontwijken, hetgeen in onderzoek voor stedenbouwkundige toepassing ook is aangetoond (Blocken, B. e.a. 2008) . Omdat de Venturi een kunstmatige ingebouwde weerstand in de luchtstroom is, treedt dit zgn. blokkeereffect ook hier op. De onderdruk aan de lijszijde van een gebouw zou echter kunnen helpen de wind dóór de Venturi te zuigen. In paragraaf 11.6 is het principe analytisch onderzocht. Met behulp van een CFD simulatie, gevalideerd door windtunnelonderzoek, is aangetoond dat het concept uitstekend werkt – zie hoofdstuk 16 en 17. Omdat de venturi hier wordt toegepast in een open systeem wordt deze in het navolgende aangeduid met van pseudo-venturi

De werking van een venturi in een gesloten systeem kan worden beschreven met de vergelijking van Bernoulli. Deze vergelijking komt neer op het toepassen van de energiebalans op een stromend medium dat aan de volgende eisen voldoen (ISSO 2002):

- het medium heeft geen inwendige wrijving;
- er wordt geen energie onttrokken of toegevoerd;
- het medium is niet samendrukbaar;
- de stroming is stationair.

Op basis van deze randvoorwaarden luidt de vergelijking van Bernoulli als volgt:

$$p + \frac{1}{2} \rho w^2 + \rho \cdot g \cdot z = \text{constant}$$

(11.1)

Waarin:	p	=	statische druk	[Pa]
	ρ	=	soortelijke massa	[kg.m ⁻³]
	w	=	stroomsnelheid	[m.s ⁻¹]
	g	=	valversnelling	[m.s ⁻²]
	z	=	hoogte boven referentieniveau	[m]

De drie termen in vergelijking (11.1) stellen drukken voor, respectievelijk de statische druk (p), de dynamische druk ($1/2 \rho \cdot w^2$), en de druk uitgeoefend door een kolom met hoogte z , de gravitatiedruk.

Als vergelijking (11.1) wordt toegepast op een horizontaal luchtkanaal met een niet constante doorsnede, verlopend van 1 naar 2, dan geldt:

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho \cdot w_1^2 = p_2 + \frac{1}{2}\rho \cdot w_2^2$$

(11.2)

Waarbij het verband tussen de snelheden w_1 en w_2 volgt uit de continuïteitsvergelijking:

$$A_1 \cdot w_1 = A_2 \cdot w_2$$

(11.3)

Waarin A_1 en A_2 staan voor de oppervlakte van de dwarsdoorsnede in m^2

Voor het medium lucht kan de vergelijking van Bernoulli strikt genomen niet worden toegepast omdat bij stroming inwendige wrijving optreedt. Deze resulteert in een verlies aan totale druk Δp , waardoor vergelijking (11.3) overgaat in:

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho \cdot w_1^2 = p_2 + \frac{1}{2}\rho \cdot w_2^2 + \Delta p$$

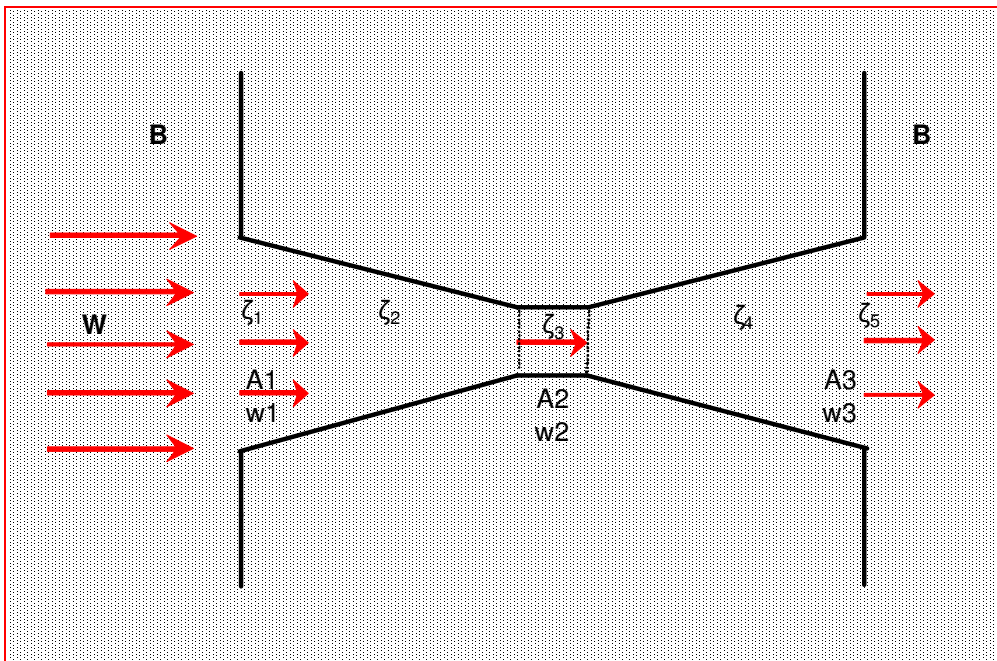
(11.4)

Lucht is samendrukbaar, maar bij de stroming van lucht in de hier bedoelde toepassing zijn de drukverschillen dermate gering dat praktisch wordt voldaan aan de randvoorwaarde van een niet samendrukbaar medium met een constante dichtheid.

11.6 Toepassing van het Venturi-concept

11.6.1 Algemeen

De vergelijking van Bernoulli wordt nu toegepast op de pseudo-venturi, afgebeeld in figuur 11.5, waarin B de barometrische druk is. Onder invloed van de wind stroomt van links naar rechts lucht door de venturi. Omdat het een open systeem betreft en de wind zowel door de venturi als om de venturi kan stromen is niet bekend hoeveel lucht er door de venturi zal stromen.



Figuur 11.5 – Stroming en snelheden in venturi

Aangenomen is dat het luchtdebiet door de pseudo-venturi een zodanige grootte heeft dat het drukverschil aan wind- en lijzijde van het gebouw in evenwicht is met de drukverliezen in de pseudo-venturi. Hoe kleiner de luchtweerstand van de pseudo-venturi, des te meer lucht zal er doorheen

stromen. De luchtsnelheden in de pseudo-venturi en het inherente luchtdebiet worden bij deze aanname dus bepaald door twee factoren:

- Het beschikbare drukverschil over de pseudo-venturi;
- De drukverliezen in de pseudo-venturi.

Om het venturi-effect te maximaliseren moet de verhoging van de luchtsnelheid in de pseudo-venturi zo groot mogelijk zijn. De grotere vernauwing die hiervoor nodig is levert echter ook een groter drukverlies op waardoor minder lucht door de pseudo-venturi zal stromen en het effect weer (gedeeltelijk) teniet wordt gedaan. De optimale geometrische verhoudingen van de pseudo-venturi zijn daarom voor een bepaald gebouw met behulp van CFD simulaties, gevalideerd met metingen in de windtunnel - zie hoofdstuk 16 en 17- vastgesteld. Het volgende analytisch rekenmodel –zie paragraaf 11.7- moet daarom worden beschouwd als oefening ter verdieping van het inzicht in de drukverschillen en luchtstroming in een open pseudo-venturi.

11.6.2 Drukverschil

Drukverschillen tussen windzijde en lijzijde van een bepaald gebouw in een bepaalde stedenbouwkundige context zijn afhankelijk van vele parameters. Voor de bepaling hiervan kan gebruik worden gemaakt van de winddrukcoëfficiënten C_p aan wind- en lijzijde; zie par. 8.4. In eerste instantie kunnen deze worden geschat op basis van literatuurgegevens en globale praktijkcijfers (ASHRAE 2001, Liddament 1996), tijdens het ontwerpproces te verfijnen met behulp van een analytische methode (Cp Generator – par. 8.5) of windtunnelonderzoek.

Voor het voorbeeldgebouw van figuur 8.4 is de winddrukcoëfficiënt aan de windzijde $C_{p_w} = 0,8$ en aan de lijzijde $C_{p_l} = -0,14$ (kopgevel) en $-0,43$ (langsgevel). In de navolgende analyse is uitgegaan van een voor hoogbouw karakteristieke waarde van $(C_{p_w} - C_{p_l}) = 1,1$ met een gevoeligheidsanalyse voor waarden van 1,0 en 1,2.

11.6.3 Drukverliezen:

De drukverliezen als gevolg van de plaatselijke weerstanden in de pseudo-venturi resulteren in verlies aan totale druk Δp . Deze drukverliezen worden berekend als fractie van de dynamische druk met de formule:

$$\Delta p = \xi \cdot p_d = 0,5 \rho \cdot w^2 \cdot \xi \quad [\text{Pa}]$$

(11.5)

Waarin: ξ = weerstandcoëfficiënt [-]

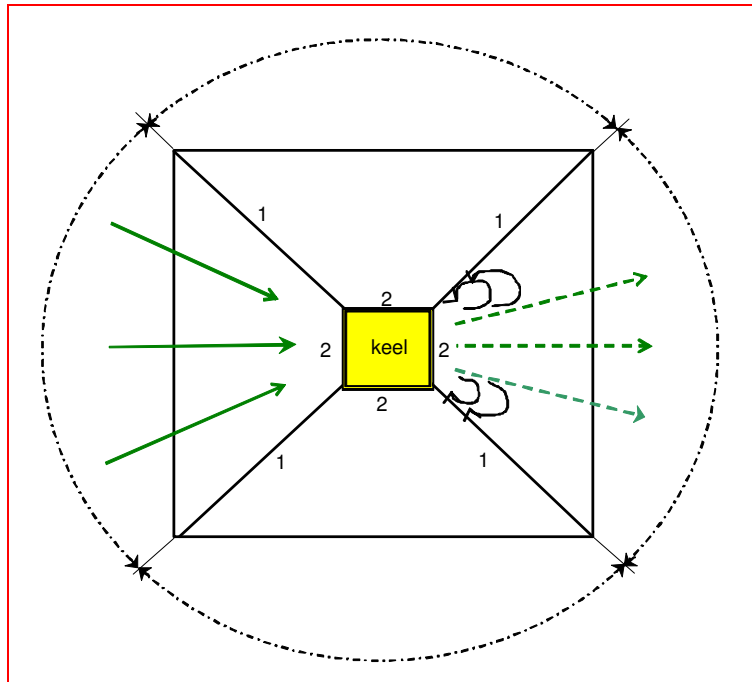
Deze formule geldt voor gesloten leidingsystemen met karakteristieke waarden voor turbulentiegraden en de inherente Reynoldsgetalen, niet te vergelijken met windstromingen in de vrije lucht. Bij gebrek aan specifieke gegevens en om toch enig inzicht te krijgen in de ordegrrootte van de in een pseudo-venturi optredende luchtsnelheden en drukverliezen is de analyse uitgevoerd met behulp van gegevens uit de luchttechniek.

Waarden van de weerstandcoëfficiënt worden gegeven in diverse handboeken o.a. het Handboek Installatietechniek (ISSO 2002) en het Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik, de zgn. Recknagel (2009/2010). Bij de navolgende uitwerking zijn de waarden uit de laatstgenoemde bron gehanteerd.

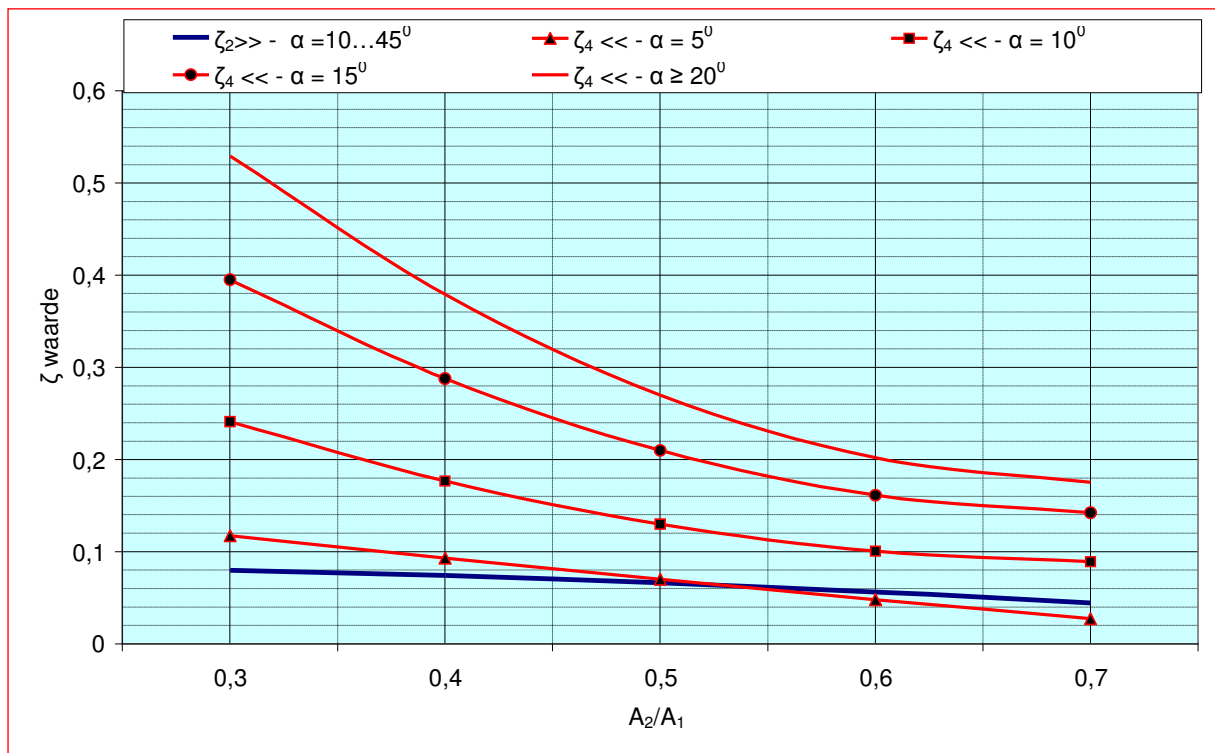
In de keel, gevormd door de verticale vinnen (1) zijn twee kleppensecties (2) aangebracht, die in de windrichting worden geopend waardoor het concept in principe richtingonafhankelijk kan werken. De weerstandcoëfficiënten ζ_3 van deze kleppensecties is $\zeta = 0,1$ (TROX 2009).

De weerstandcoëfficiënten in de vernauwing en de verwijding, resp. ζ_2 en ζ_4 zijn gebaseerd op globale gegevens uit Recknagel. Beide zijn afhankelijk van de verhouding $R = A_2/A_1$, maar er is een essentieel verschil tussen een vernauwing en een verwijding – zie figuur 11.7. De weerstandcoëfficiënt voor de vernauwing ζ_2 is tussen een instroomhoek $\alpha = 10^0$ tot 45^0 niet afhankelijk van α . Voor de verwijding is de weerstandcoëfficiënt ζ_4 in hoge mate afhankelijk van de uitstroomhoek α . Dit heeft te maken met de natuurlijke uitstroomhoek van lucht in een rechthoekige uitstroming. Bij $\alpha \leq \approx 12^0$ blijft de luchtstroom tegen de begrenzingvlakken aanliggen, maar bij $\alpha \geq \approx$

12° raakt de luchtstroom los van de begrenzingvlakken en ontstaan daar wervelingen die de luchtstroom afremmen (Recknagel 09-10 tabel 3.3.5-4) –zie figuur 11.6



Figuur 11.6 – Strooming en snelheden in venturi



Figuur 11.7 – Weerstandscoefficienten vernauwing (>>) en verwijding (<<) in de venturi

Om de luchtweerstand zo beperkt mogelijk te houden is voor het horizontale vlak uitgegaan van leidschoepen om de 30° , met $\alpha = 15^\circ$ en in het verticale vlak van $\alpha = 10^\circ$. De asymmetrie van de pseudo-venturi is in de berekeningen verwerkt door in figuur 11.5 te middelen tussen $\alpha = 10^\circ$ en 15° .

11.7 Analytisch rekenmodel

Omdat het een open systeem betreft zal de aanstromende wind slechts gedeeltelijk door de pseudo-venturi gaan en gedeeltelijk om de pseudo-venturi heen stromen. Het door de pseudo-venturi stromende luchtdebiet, en de te realiseren luchtsnelheden zijn afhankelijk van de geometrische verhoudingen annex bijbehorende luchtweerstand en daarom niet eenvoudig analytisch te bepalen. Met behulp van CFD simulaties- zie hoofdstuk 16- is dit probleem opgelost. Een analytisch rekenmodel kan echter wel het inzicht in de werking van het concept verdiepen, vandaar de volgende analytische benadering.

De luchtsnelheden in de pseudo-venturi kunnen worden berekend met de formule:

$$p_{d,w}(Cp_w - Cp_l) = p_{d,1} \cdot \zeta_1 + p_{d,2} \cdot \zeta_2 + p_{d,2} \cdot \zeta_3 + p_{d,2} \cdot \zeta_4 + p_{d,3} \cdot \zeta_5$$

(11.6)

Waarin:	Cp_w	=	winddrukcoëfficiënt windzijde		[-]
	Cp_l	=	winddrukcoëfficiënt lijzijde		[-]
	$p_{d,w}$	=	dynamische winddruk	$= 0,5\rho W^2$	[Pa]
	$p_{d,1}$	=	dynamische druk bij de instroming	$= 0,5\rho w_1^2$	[Pa]
	$p_{d,2}$	=	dynamische druk in de keel	$= 0,5\rho w_2^2$	[Pa]
	$p_{d,3}$	=	dynamische druk bij de uitstroming	$= 0,5\rho w_3^2$	[Pa]
	ζ_1	=	weerstandcoëfficiënt instroming		[-]
	ζ_2	=	weerstandcoëfficiënt vernauwing		[-]
	ζ_3	=	weerstandcoëfficiënt van de keel		[-]
	ζ_4	=	weerstandcoëfficiënt verwijding		[-]
	ζ_5	=	weerstandcoëfficiënt uitstroming		[-]

De weerstandcoëfficiënten in de venturi zijn als volgt in rekening gebracht:

- weerstand bij de instroming $\zeta_1 = 0,7$ betrokken op w_1
- weerstand over de vernauwing $\zeta_2 =$ zie figuur 11.7 - betrokken op w_2
- weerstand in de vernauwing $\zeta_3 = 2 * 0,1$ – betrokken op w_2 (2 kleppensecties)
- weerstand over de verwijding $\zeta_4 =$ zie figuur 11.7 - betrokken op w_2
- uitstroomverlies $\zeta_5 = 1,0$ betrokken op w_3

Na substitueren van de waarden ($0,5\rho w^2$) voor p_d gaat formule (11.6) over in:

$$W_1^2(Cp_w - Cp_l) = w_1^2 \cdot \zeta_1 + w_2^2 \cdot \zeta_2 + w_2^2 \cdot \zeta_3 + w_2^2 \cdot \zeta_4 + w_3^2 \cdot \zeta_5$$

(11.7)

In een symmetrische venturi is $w_1 = w_3$. Als de ratio A_2/A_1 wordt gesteld op R , de contractiecoëfficiënt⁹, met $w_2/w_1 = 1/R$ en $w_1/w_2 = R$ gaat formule (11.7) over in:

$$W^2(Cp_w - Cp_l) = R^2 w_2^2 (\zeta_1 + \zeta_5) + w_2^2 (\zeta_2 + \zeta_3 + \zeta_4)$$

en

$$\frac{W^2}{w_2^2}(Cp_w - Cp_l) = R^2(\zeta_1 + \zeta_5) + (\zeta_2 + \zeta_3 + \zeta_4)$$

$$\frac{W^2}{w_2^2} = \frac{R^2(\zeta_1 + \zeta_5) + (\zeta_2 + \zeta_3 + \zeta_4)}{(Cp_w - Cp_l)}$$

⁹ Voor de CFD simulaties in hoofdstuk 16 is de contractieverhouding A_1/A_2 gebuikt, die dus de inverse is van de contractiecoëfficiënt R

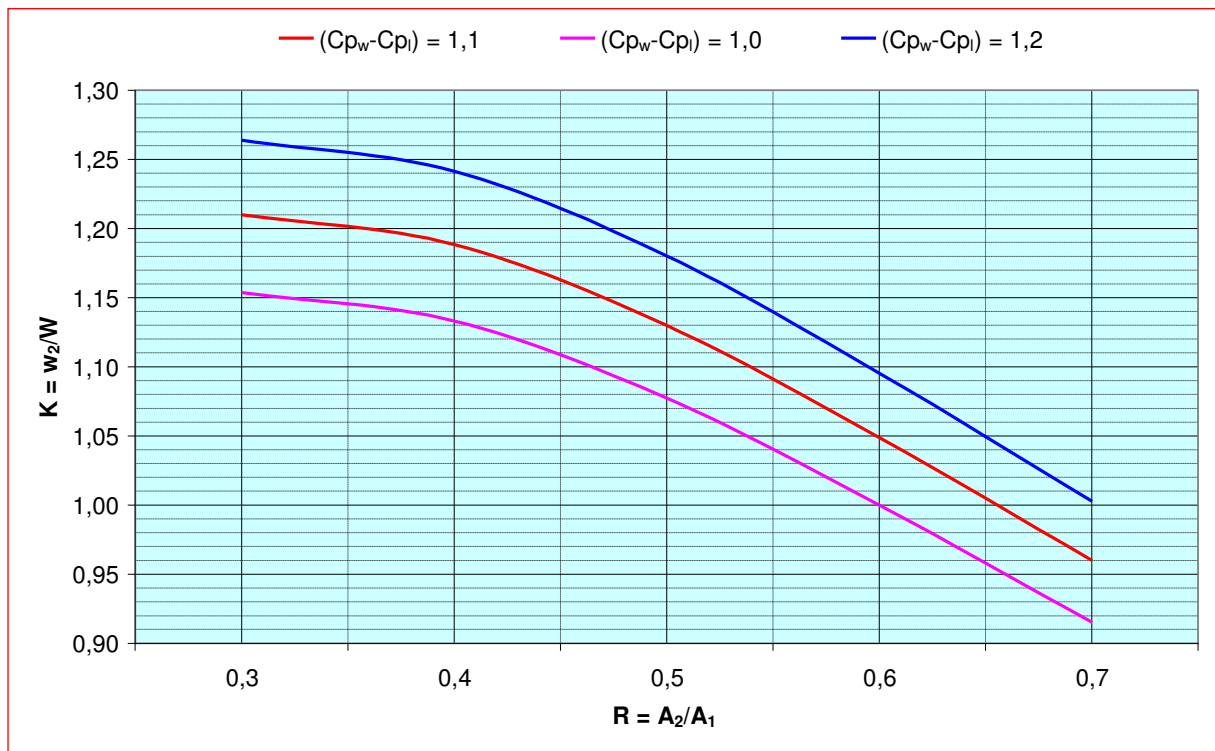
$$\frac{w_2^2}{W^2} = \frac{(C_{p_w} - C_{p_l})}{R^2(\xi_1 + \xi_5) + (\xi_2 + \xi_3 + \xi_4)}$$

(11.8)

w_2/W is de versnellingsfactor K van de wind in de keel van de pseudo-venturi. De formule maakt duidelijk dat verkleining van de weerstandscoefficienten een hogere versnellingsfactor oplevert.

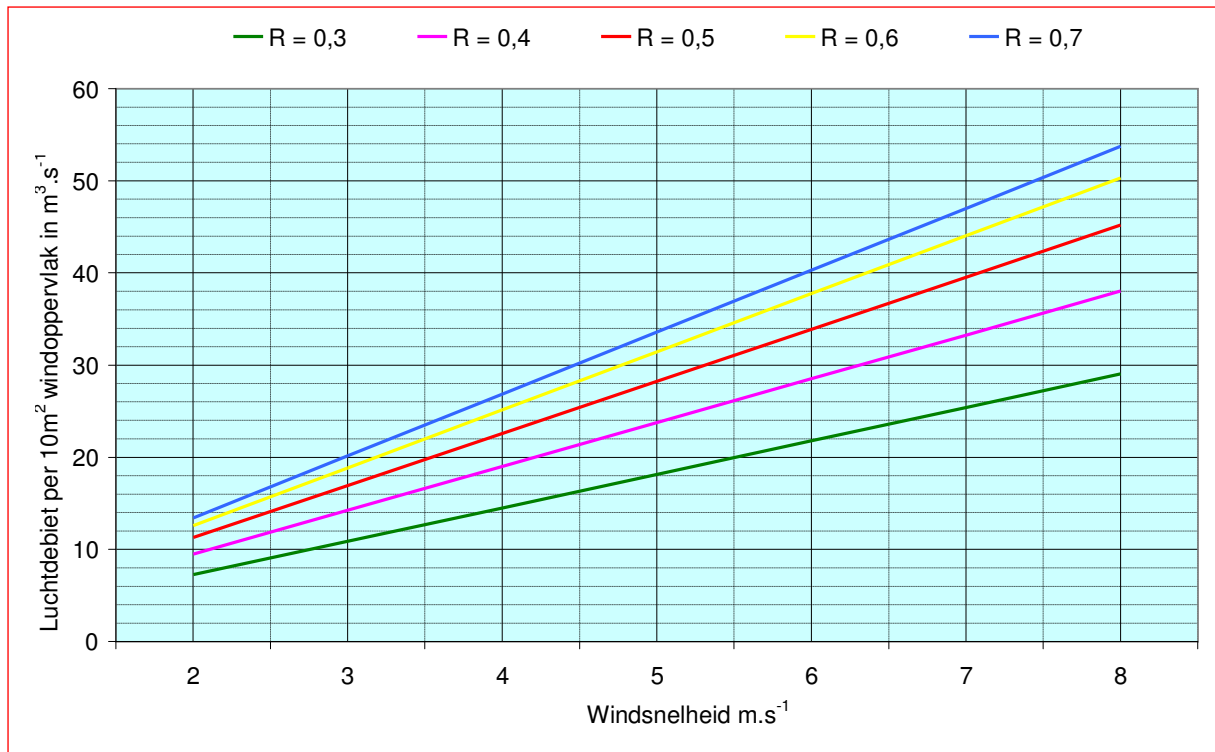
Voor een karakteristieke waarde van $(C_{p_w} - C_{p_l}) = 1,1$ en R -waarden van 0,3 tot 0,7 zijn met behulp van vergelijking (11.8) de berekende waarden van K weergegeven in figuur 11.8. Een versnelling treedt pas op bij een R -waarde $\leq 0,65$ en bereikt een maximum waarde van $K \approx 1,21$ bij $R = 0,3$. De afvlakking bij lagere R -waarden is waarschijnlijk een gevolg van de toenemende weerstandscoefficienten in dit gebied. Een gevoeligheidsanalyse voor $(C_{p_w} - C_{p_l}) = 1,0$ en 1,2 laat geringe verschuivingen van deze waarden zien.

Figuur 11.9 laat zien hoeveel lucht er door de pseudo-venturi stroomt bij windsnelheden van 2 tot 8 $m.s^{-1}$ en R -waarden van $R = 0,3$ tot 0,7, gebaseerd op een aangewaaid windoppervlak van 10 m^2 . Dit is van belang voor het dimensioneren van het afzuigstelsel. In de keel van de pseudo-venturi wordt immers lucht uit het gebouw afgezogen en naar de lijzijde afgevoerd. Deze secundaire lucht beïnvloedt het drukverlies en de lichtsnelheden in de pseudo-venturi, en daarmee de prestatie van de venturi-ejector –zie paragraaf 16.9.



Figuur 11.8 – Versnellingsfactor $K = w_2/W$ in de keel van de venturi bij $\Sigma \xi$ volgens paragraaf 11.7

NB: De CFD simulaties en de fysieke modelmetingen – zie hoofdstuk 16 en 17, hebben aangetoond dat geleideschoepen en kleppen de werking van de pseudo-venturi negatief beïnvloeden. Het additionele drukverlies van deze elementen heeft een toename van het windblokkeereffect tot gevolg, waardoor minder lucht door de pseudo-venturi stroomt en de prestatie van de venturi-ejector afneemt. Het Ventecdak[®] wordt daarom zonder geleideschoepen en kleppen uitgevoerd en wordt hierdoor tevens windrichtingonafhankelijk.



Figuur 11.9 – Luchtdebieten door de pseudo-venturi als functie van windsnelheid en contractiecoëfficiënt R

11.8 Onderdrukken in de keel van de pseudo-venturi

De druk in het gebouw, met stilstaande lucht, is gelijk aan de totale druk van de buitenlucht, $P_{tot,E}$. De onderdruk in de pseudo-venturi ten opzichte van de druk in het gebouw ($P_{st,V} - P_{tot,E}$) wordt als volgt berekend:

$$P_{tot,V} = P_{tot,E} - \Delta p = P_{st,E} + P_{dyn,E} - \Delta p$$

$$P_{st,V} = P_{tot,V} - P_{dyn,V} = P_{st,E} + P_{dyn,E} - \Delta p - P_{dyn,V} = P_{tot,E} - \Delta p - P_{dyn,V}$$

$$P_{st,V} - P_{tot,E} = P_{tot,E} - \Delta p - P_{dyn,V} - P_{tot,E} = -(\Delta p + P_{dyn,V})$$

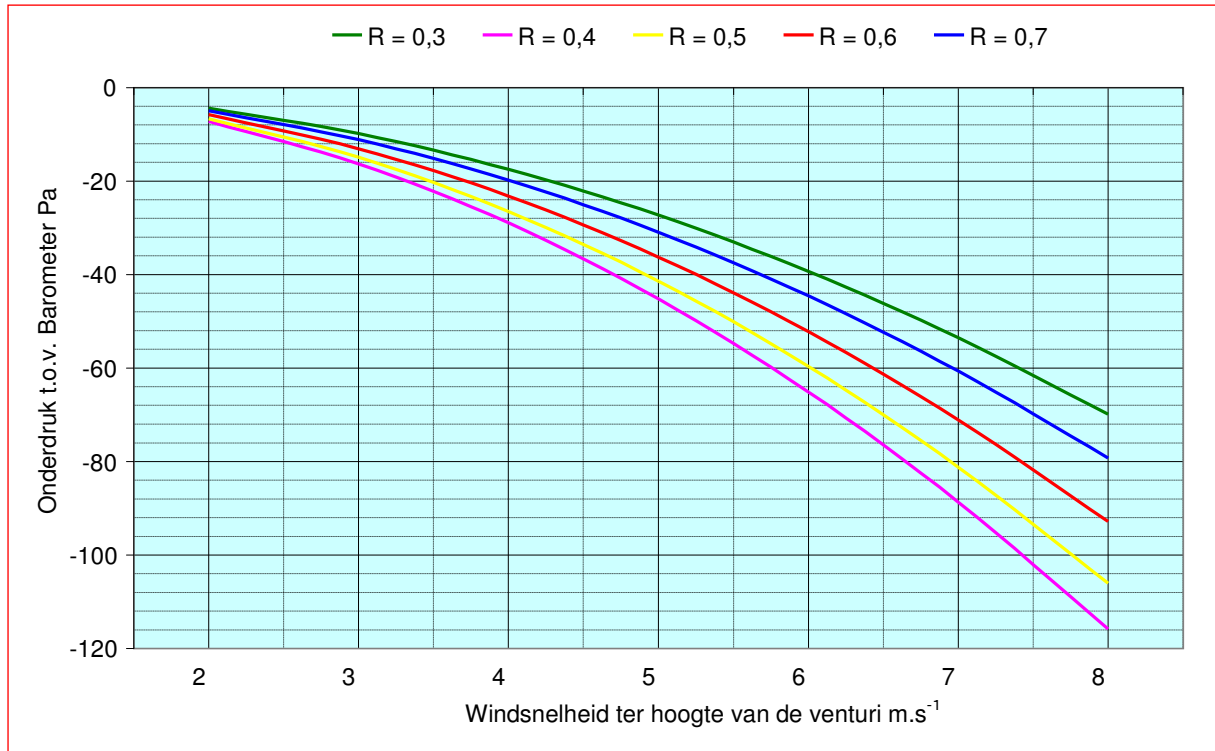
(11.9)

Waarin

$P_{tot,V}$	= totale druk in de pseudo-venturi	[Pa]
$P_{tot,E}$	= totale druk in de buitenlucht \equiv barometerstand	[Pa]
$P_{dyn,V}$	= dynamische druk in de pseudo-venturi	[Pa]
$P_{dyn,E}$	= dynamische winddruk buiten ter hoogte van de pseudo-venturi	[Pa]
$P_{st,V}$	= statische druk in de pseudo-venturi	[Pa]
$P_{st,E}$	= statische druk buiten	[Pa]
Δp	= drukverlies in de pseudo-venturi	[Pa]

De onderdrukken in de keel van de pseudo-venturi als functie van de windsnelheid en de contractiecoëfficiënt R is weergegeven in figuur 11.10. Voor de berekening zijn de weerstandscoefficienten volgens paragraaf 11.7 gebruikt. Merk op bij een contractiecoëfficiënt $R = 0,4$ de hoogste onderdrukken worden gerealiseerd. Bij hogere R-waarden (\equiv kleinere contracties) stroomt er weliswaar meer lucht door de venturi maar dit levert door de kleinere contractie geen hogere onderdruk op. Een lagere R-waarde van 0,3 geeft potentieel een hogere onderdruk maar de luchtweerstand neemt zodanig toe dat in een open pseudo-venturi meer lucht om de pseudo-venturi heen zal stromen. Zie paragraaf 11.6.1.

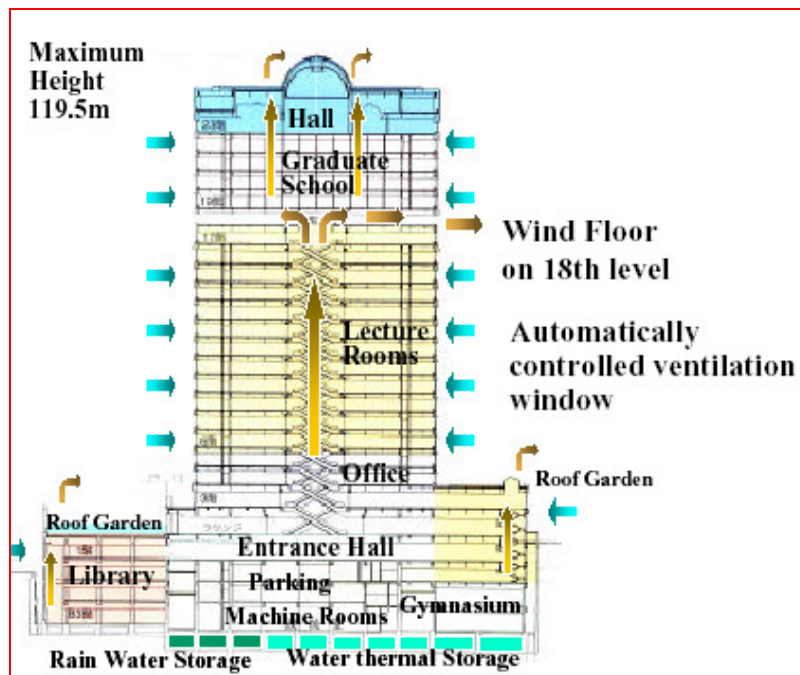
NB: Deze berekeningen hebben uitsluitend tot doel de effecten van een pseudo-venturi te illustreren. Voor gevalideerde waarden zie hoofdstuk 16 en 17.



Figuur 11.10 – Onderdrukken in de keel van de pseudo-venturi als functie van windsnelheid W en contractiecoëfficiënt R

11.9 Windverdieping

De methode om ventilatielucht af te zuigen met behulp van door wind veroorzaakte onderdruk wordt o.a. in Japan en Hongkong toegepast. In hoge gebouwen dient daar een rookvrije tussenverdieping te worden aangebracht die als vluchtzone kan dienen in geval van brand; zie figuur 11.11.



Figuur 11.11 – Liberty Tower Meiji University Tokyo met windverdieping

Deze zgn. windverdieping is aan alle zijden open waardoor de wind vrij toegang heeft. Er is hier geen sprake van versnelling van de wind door het venturi-effect. De gehele windverdieping staat onder onderdruk en functioneert als afzuigplenum. De ventilatielucht wordt via een centrale schacht afgezogen.

11.10 Combinatie overdruk en onderdruk

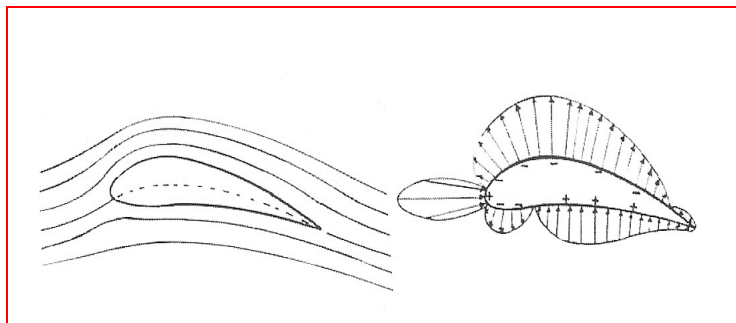
Hoofdstuk 12 laat zien hoe overdruk en onderdruk in één concept zinvol kunnen worden gecombineerd voor de benutting van de wind als drijvende kracht voor ventilatie.

11.11 Vleugelconcept – Ventileren met Coanda?

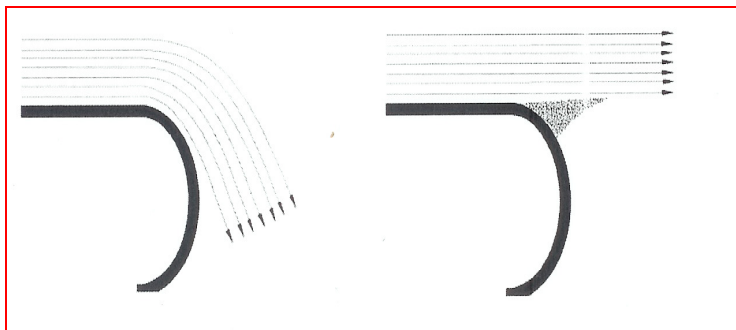
Het is interessant te onderzoeken of over drukverschillen van een geheel ander vakgebied iets valt te leren. De luchtvaart, die is gebaseerd op aerodynamische drukverschillen, lijkt hiervoor een dankbaar onderzoeksgebied.

Figuur 11.12 laat de luchtstroming langs een vliegtuigvleugel zien –links- en de drukken zien die op deze vleugel werken – rechts (Weltner, K. 2003). De van links komende luchtstroom ziet de vleugel als een hindernis, die zowel aan de bovenkant als aan de onderzijde ontweken moet worden. Aan de onderzijde heeft de lucht geen andere mogelijkheid dan naar beneden af te wijken. Deze benedenwaartse stroming heeft een drukverhoging op de vleugel tot gevolg, de zogenaamde *lift*.

Aan de bovenzijde wordt de lucht in eerste instantie naar boven afgebogen en zou in principe door haar traagheid rechtdoor willen stromen. Daarmee zou de luchtstroom zich echter van het vleugelprofiel verwijderen, en zou tussen de vleugel en de lucht een onderdruk ontstaan. Door dit drukverschil dat haaks op de stroomlijnen staat, wordt de stroming naar beneden gedrukt, het Coanda effect, zie figuur 11.13, waarin een luchtstraal is aangegeven die over een halve cilinder stroomt. Als de lucht rechtdoor zou stromen wordt in het gemarkeerde grensgebied (rechts) lucht door wrijving met de stroming meegenomen waardoor in dit gebied een onderdruk ontstaat. Deze heeft een ombuiging van de luchtstroom (links) tot gevolg.



Figuur 11.12 – Drukverschillen op een vliegtuigvleugel



Figuur 11.13 - Coanda-Effect

Overdruk ontstaat dus als de luchtstroming van het vlak af wordt gedrukt. Onderdruk ontstaat als de luchtstroming naar het vlak toe wordt gedrukt. Deze drukverschillen zijn zelf nog oorzaak van een ander effect. De lucht aan de onderkant van de vleugel wordt door de overdruk ter plaatse afgeremd.

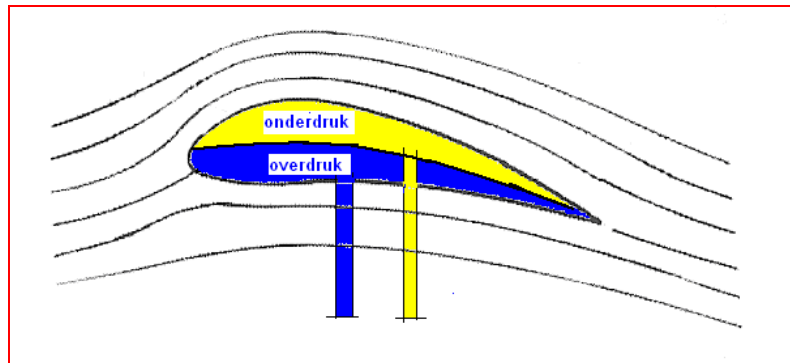
Door de onderdruk boven de vleugel wordt de lucht naar de bovenkant van de vleugel gezogen. Dit veroorzaakt een grotere snelheid van de lucht boven de vleugel dan er onder. Daardoor wordt als vuistregel twee derde van de liftkracht aan de bovenkant van de vleugel geleverd en één derde aan de onderkant. De afbuigkrachten voor de luchtmassa zijn evenredig met het kwadraat van de lichtsnelheid.

11.12 Ventilatie met behulp van aerodynamische drukverschillen

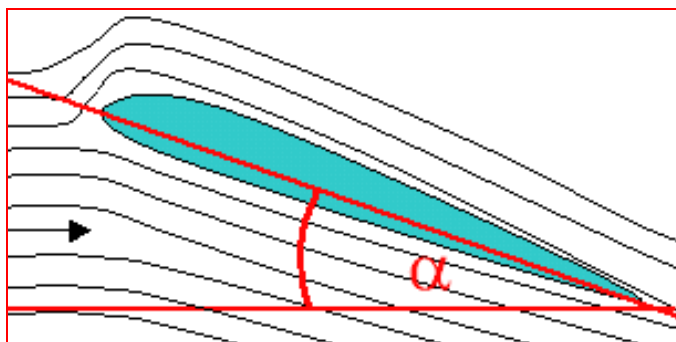
Het is een fascinerende gedachte de aerodynamische drukverschillen onder en boven een vleugel te benutten voor de ventilatie van gebouwen. Bovenop het dak zou een vleugel, of een combinatie van vleugels kunnen worden aangebracht, inwendig verdeeld in twee compartimenten; zie figuur 11.14. Aan de onderkant van de vleugel worden perforaties aangebracht, waardoor overdruk in het onderste compartiment ontstaat. Door dit compartiment met een luchtkanaal aan te sluiten op de luchttoevoerschacht van het gebouw wordt een deel van de voorbij stromende lucht in het gebouw geïnjecteerd.

De bovenkant van de vleugel wordt eveneens geperforeerd, waardoor in het bovenste compartiment onderdruk ontstaat. Als het afzuigstelsel van een gebouw hierop wordt aangesloten, gaat het bovenste compartiment werken als *coanda-ejector*.

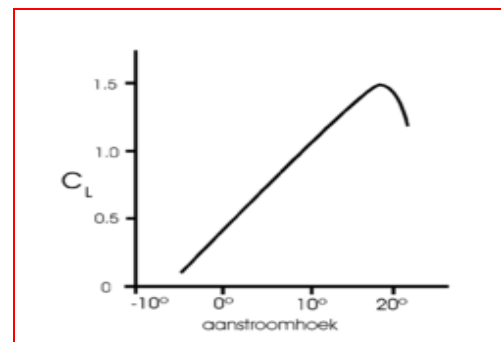
Bij toepassing voor gebouwventilatie zijn de lichtsnelheden veel lager dan in de luchtvaart en daarom zal de hoek die de vleugel maakt groter moeten zijn dan in figuur 11.14, bijvoorbeeld als aangegeven in figuur 11.15



Figuur 11.14 – Ventilatie met behulp van vleugelprincipe



Figuur 11.15 – Aanstroomhoek –bron Wikimedia Commons



Figuur 11.16 – Liftcoëfficiënt als functie van de aanstroomhoek - bron Wikipedia

De liftkracht F_L wordt berekend met de formule

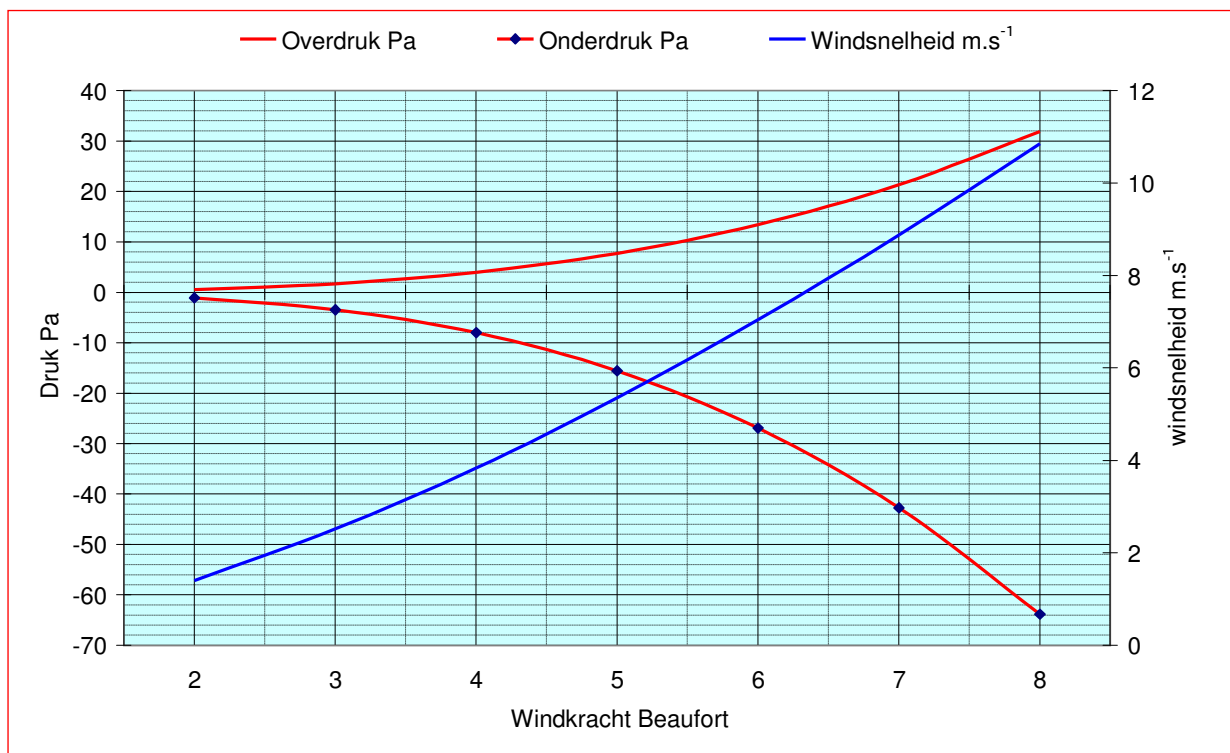
$$F_L = C_L \cdot \rho \cdot \frac{w^2}{2} \quad (11.10)$$

Waarin:

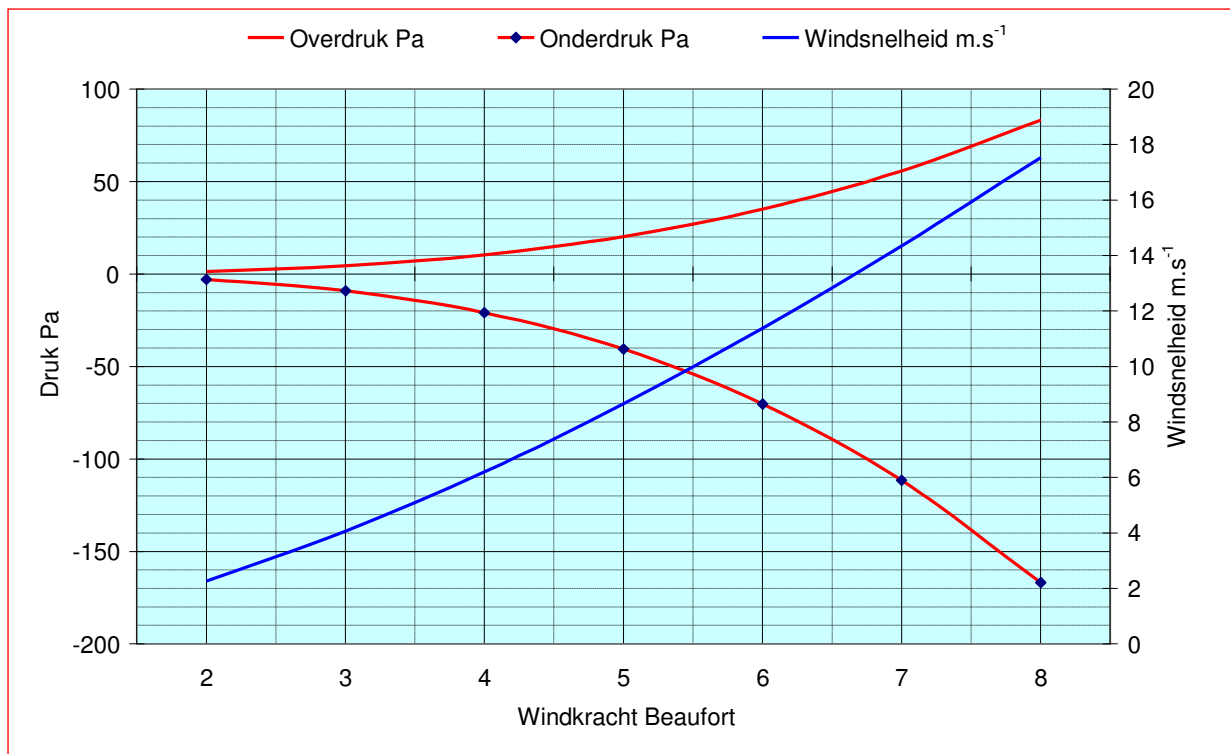
F_L	=	liftkracht	[N.m ⁻² ≡ Pa]
C_L	=	liftcoëfficiënt	[-] afhankelijk van de aanstroomhoek – zie figuur 11.16
ρ	=	soortelijke massa	[kg.m ⁻³]
w	=	windsnelheid	[m.s ⁻¹]

Bij een aanstroomhoek α van 15° is de waarde van C_L volgens figuur 11.16 $\approx 1,3$. Bij een windsnelheid van 5 m/s en een soortelijke massa van 1,25 kg/m³ wordt met formule (11.10) een liftkracht berekend van 20 Pa. Volgens de vuistregel 1/3 – 2/3 is de overdruk in de onderste vleugel helft ≈ 7 Pa en de onderdruk in de bovenste vleugel helft ≈ 13 Pa.

Met het voorbeeldgebouw van 12 verdiepingen en een hoogte van 42 m uit par. 8.4 is formule (11.10) uitgewerkt in de figuren 11.17 en 11.18 voor respectievelijk terreincategorie 1 en 2 volgens tabel 8.1. De figuren laten zien dat met een vleugelconstructie grote drukverschillen kunnen worden gerealiseerd.



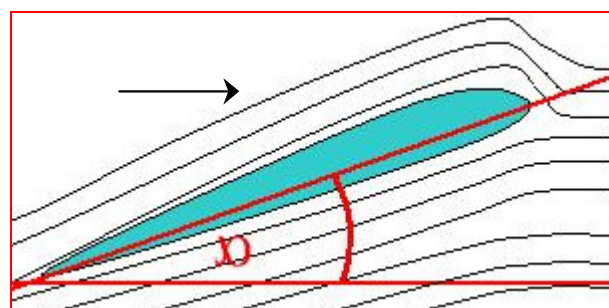
Figuur 11.17 – Drukken in vleugel – Voorbeeldgebouw (par. 8.4) in terreincat. 1 – aanstroomhoek 15°



Figuur 11.18– Drukken in vleugel – Voorbeeldgebouw (hfd.8) in terreincategorie 2 – aanstroomhoek 15°

Om het vleugelconcept zinvol te kunnen gebruiken voor gebouwventilatie moeten er overigens nog heel wat problemen worden opgelost, zoals

- Hoe houden we de vleugel in de wind?
- Is het mogelijk de vleugel als *blob* uit te voeren en daarmee geschikt te maken voor alle windrichtingen?
- Hoe kunnen de drukken worden geregeld? Met de vleugelconstructie zelf, zoals in de luchtvaart of met kleppen in het ventilatiesysteem?
- Hoe reageert het concept op windvlagen?
- Architectonische vormgeving?
- Wat zijn de mogelijkheden van een omgekeerd vleugelconcept, waarbij het Coanda-effect aan de onderkant optreedt; zie figuur 11.19. Dit principe is toegepast in de Wing Jetter dakkap, figuur 14.2



Figuur 11.19 – Omgekeerde vleugel

Alvorens het vleugelprincipe uit te werken zal eerst een nader theoretisch onderzoek moeten worden gedaan naar de aerodynamische, technische en architectonische mogelijkheden van het concept in het Nederlandse windklimaat.

Het Venturiconcept, in het hoofdstuk 12 uitgewerkt tot het Ventecdak®, heeft in principe dezelfde potenties als het vleugelconcept, maar is eenvoudiger en daarom aanzienlijk kansrijker. In het kader

van het onderzoek *Earth, Wind & Fire* is er derhalve voor gekozen het Venturiconcept verder uit te werken.

12. HET DAK ALS WINDVANGER

12.1 Inleiding

In hoofdstuk 11 zijn globaal enkele principes uitgewerkt op basis waarvan de wind in het *Earth, Wind & Fire* concept gericht kan worden ingezet voor gebouwventilatie.

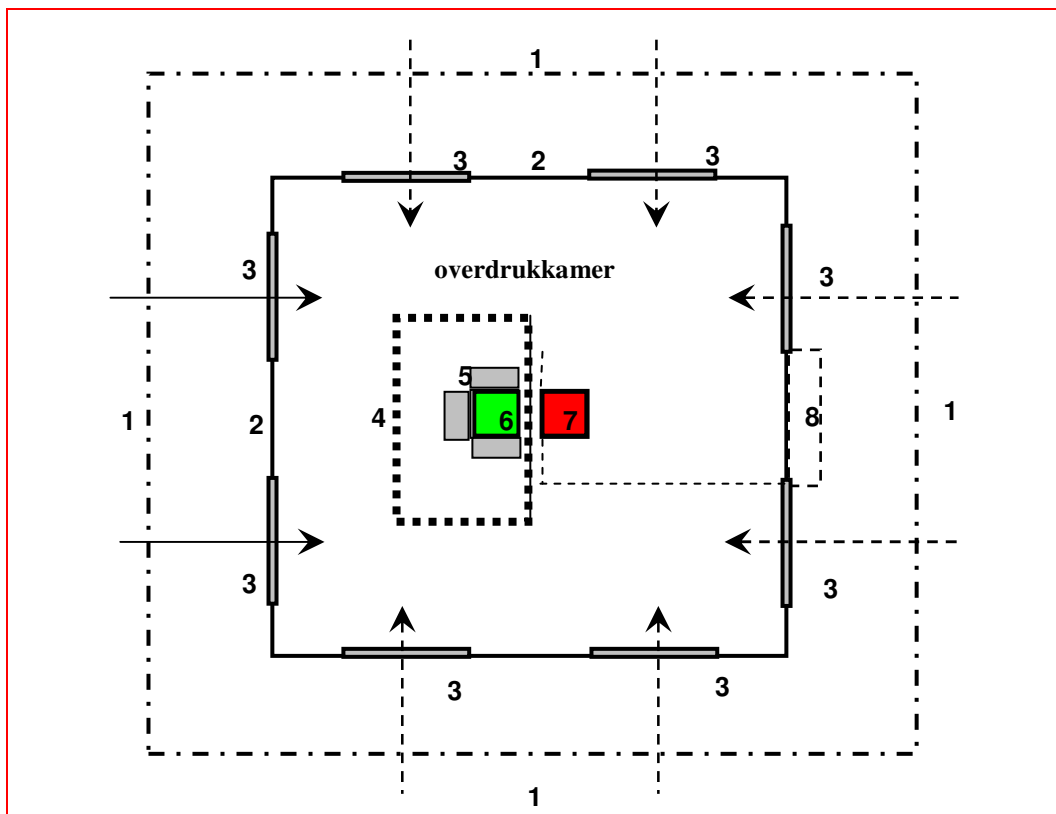
- Natuurlijke decentrale luchttoevoer via de gevel; luchtafvoer met behulp van zonneshoorsteen en een venturi-ejector –zie paragraaf 11.2 en 11.4. Een toepassing van dit concept met regelbare gevelroosters is beschreven in deelrapport (IV).
- Natuurlijke centrale luchttoevoer door overdruk met overdrukkamer en klimaatcascade; luchtafvoer met behulp van zonneshoorsteen en een Venturi-ejector –zie paragraaf 11.3 en 11.4. Dit principe wordt in het voorliggend hoofdstuk globaal uitgewerkt.
- Gecombineerde luchttoevoer en luchtafvoer met behulp van een vleugel, voorzien van overdrukcompartiment en Coanda-ejector –zie paragraaf 11.11 en 11.12. Dit principe is nogal speculatief en is niet verder uitgewerkt.

12.2 Luchttoevoer met overdrukkamer en afzuiging met Venturi-ejector

Een ontwerp, dat gebruik maakt van de in de paragrafen 11.3 t/m 11.8 omschreven principes, is weergegeven in de figuren 12.1 en 12.2 .

De tegen het gebouw waaiende wind wordt aan de windzijde opgevangen tussen de overstekende dakrand (1) en de gevel van het gebouw (2). De windsnelheid en de stuwdruk zijn hier het grootst (zie hoofdstuk 5 en 8). In de overdrukkamer zijn rondom gemotoriseerde luchtkleppen (3) aangebracht, die aan de windzijde zijn geopend en aan de lijkzijde gesloten; deze ruimte staat dus altijd onder overdruk.

De lucht stroomt vervolgens door een grof filter (4), dat insecten en grof vuil tegenhoudt, en mede dient ter bescherming van een eventueel elektrostatisch filter (5). De lucht stroomt aansluitend in de verticale schacht (6), de Klimaatcascade[®] – zie deelrapport (III) Geo-Klimaatconcept[®].



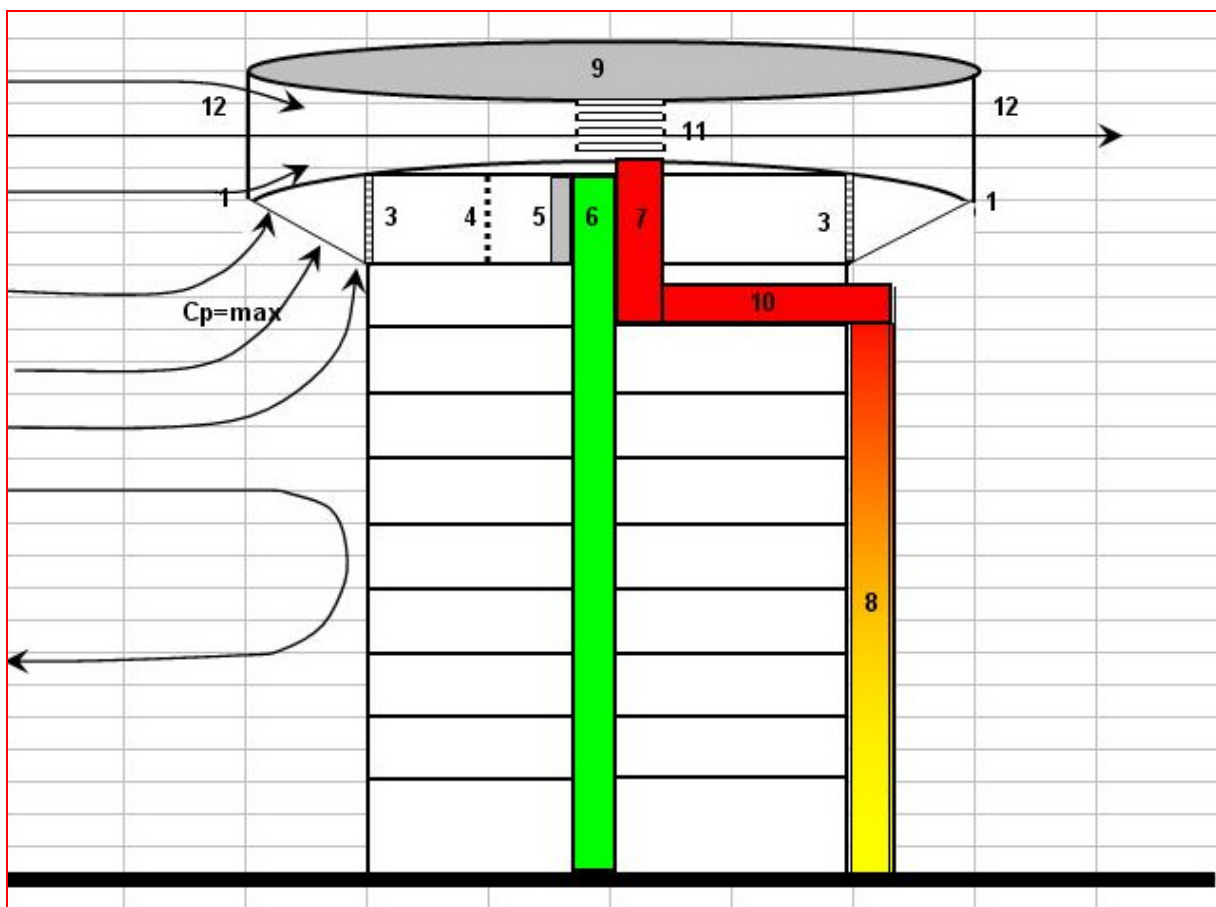
Figuur 12.1 – Centrale luchttoevoer met overdrukkamer – plattegrond dakverdieping

NB: Van de druk in de overdrukkamer kan ook gebruik worden gemaakt voor het opwekken van windenergie. Dit concept is in hoofdstuk 20 uitgewerkt –zie ook figuur 12.5

De gebruikte ventilatielucht wordt afgevoerd via de zonneschoorsteen (8), en het warmteterugwinsysteem naar de uitmonding bovendaks (7), de venturi-ejector. Deze uitmonding is gesitueerd in de keel van de pseudo-venturi die wordt gevormd door het gekromde onderdak, het gekromde bovendak (9) en de geleideschoepen (12), zie figuur 12.2. In de keel van de pseudo-venturi zijn kleppen (11) aangebracht die afhankelijk van de windrichting paarsgewijs worden geopend of gesloten.

NB: De CFD simulaties in hoofdstuk 16 hebben aangetoond dat de geleideschoepen (12) en de kleppen (11) de werking van de pseudo-venturi negatief beïnvloeden. Het additionele drukverlies van deze elementen heeft een toename van het windblokkeereffect tot gevolg, waardoor minder lucht door de pseudo-venturi stroomt en de prestatie van de venturi-ejector afneemt.

Het Ventecdak[®] wordt daarom zonder geleideschoepen en kleppen uitgevoerd en is hierdoor tevens windrichtingonafhankelijk.



Figuur 12.2 – Principe natuurlijke ventilatie met overdrukkamer en Venturi-ejector

12.3 Globale kwantificering

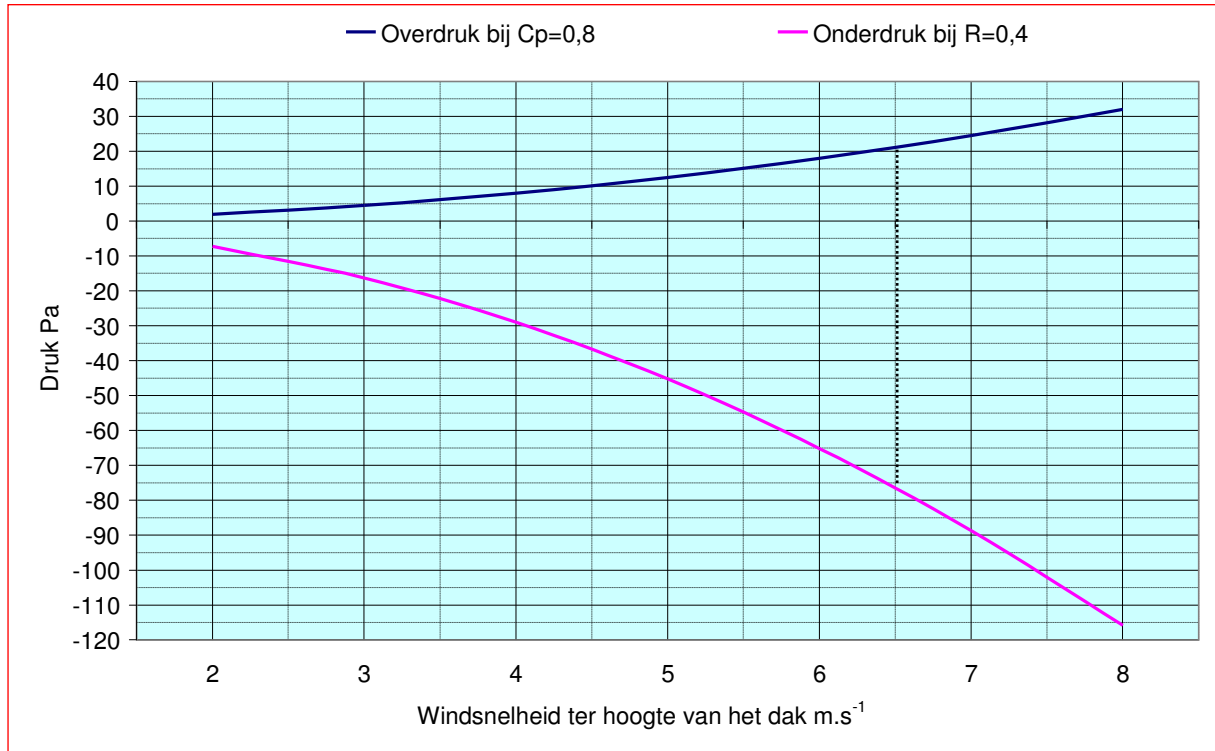
De berekende drukverschillen tussen de overdrukkamer en de Venturi-ejector voor windsnelheden van $2 - 8 \text{ m.s}^{-1}$ ter hoogte van het dak zijn weergegeven in figuur 12.3. Uitgangspunten:

- Winddrukcoëfficiënt $C_p = 0,8$
- $(C_{p_w} - C_{p_i}) = 1,1$ – zie paragraaf 11.7
- Contractiecoëfficiënt venturi $R = 0,4$

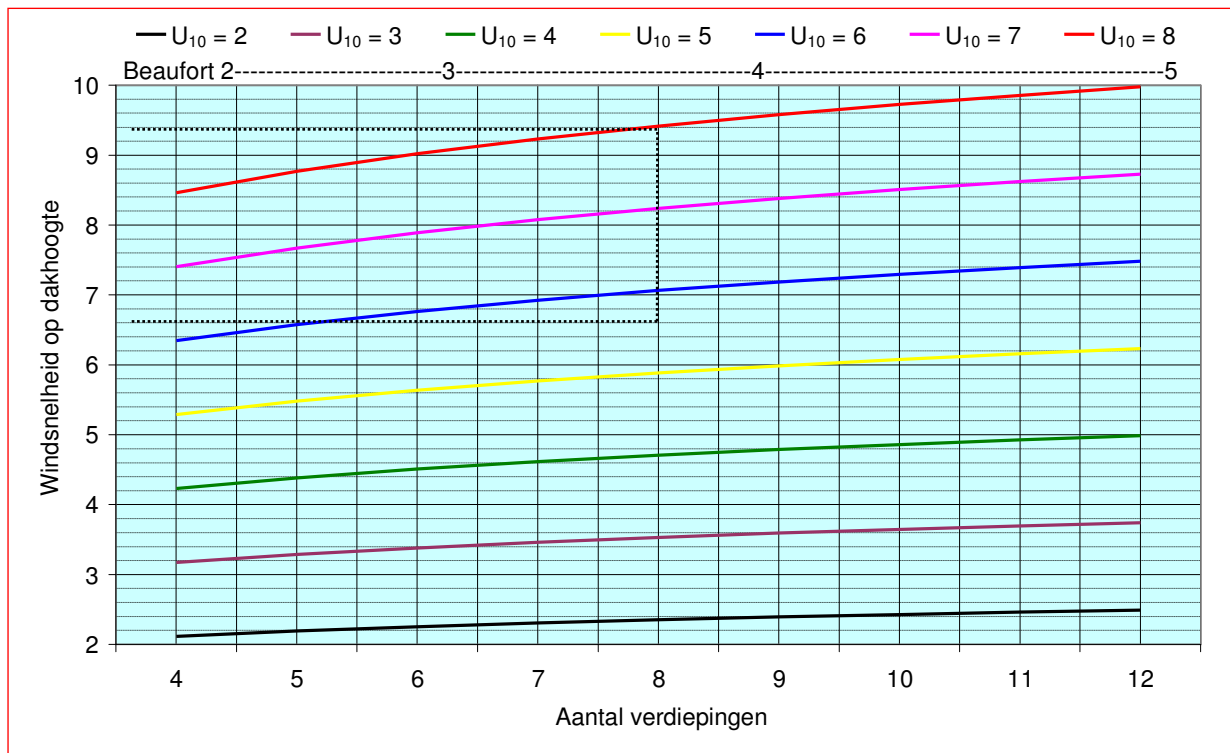
De dominante windsnelheid in Nederland is $2...5 \text{ m.s}^{-1}$ overeenkomend met een windkracht van $2...4$ Beaufort, zie hoofdstuk 6. Dit is de zgn. potentiële windsnelheid U_{10} , gemeten op 10 m hoogte bij een ruwheidslengte van 0,03m, zie paragraaf 6.1. Figuur 12.4 brengt de relatie in beeld van de potentiële

windsnelheid U_{10} en de windsnelheid op dakhoogte voor gebouwen met 4 tot 12 verdiepingen met een verdiepinghoogte van 3,5 m.

Bij een vrijstaand gebouw van 8 verdiepingen is bij matige wind, windkracht 4, en $U_{10} = 5,5 - 7,9 \text{ m.s}^{-1}$ de windsnelheid op dakhoogte $6,6 - 9,4 \text{ m.s}^{-1}$. Hiermee wordt een druk in de overdrukkamer $> 20 \text{ Pa}$ gerealiseerd en een onderdruk in de Venturi-ejector $> -75 \text{ Pa}$.

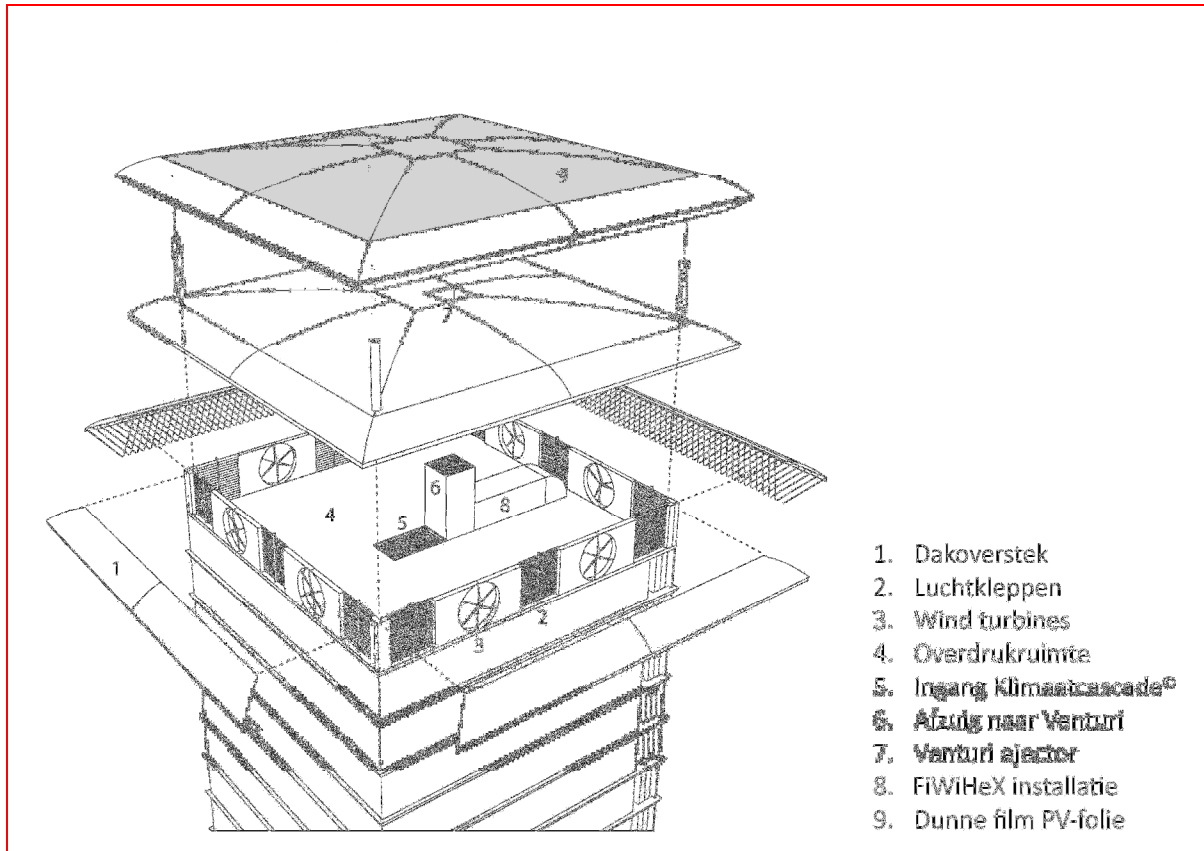


Figuur 12.3– Overdruk en Onderdruk in Ventecdak[®] als functie van de windsnelheid $-(C_{p_w} - C_{p_i}) = 1,1$

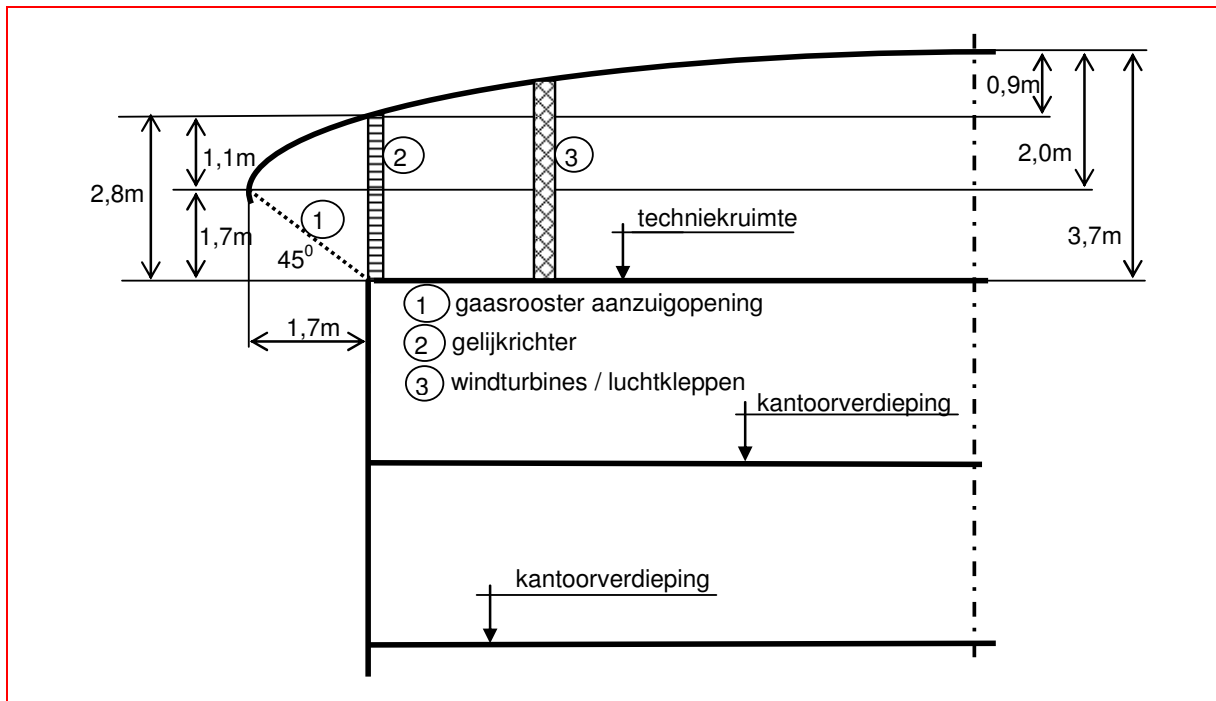


Figuur 12.4 – Windsnelheid op dakhoogte als functie van aantal verdiepingen en potentiële windsnelheid

NB: De berekeningen in dit hoofdstuk pretenderen geen nauwkeurigheid maar dienen hoofdzakelijk om het inzicht in werking van het concept te verdiepen. Voor gevalideerde berekeningen zie hoofdstuk 19.



Figuur 12.5 – Ventecdak[®] met windturbines



Figuur 12.6 – Detail luchttoevoer naar overdrukruimte

13. GLOBALE DIMENSIONERING

13.1 Samenvatting

Een ventilatiesysteem moet worden gedimensioneerd op de voor een gebouw benodigde ventilatiecapaciteit, te bepalen door de klimaatadviseur. Tenzij bijzondere omstandigheden dit noodzakelijk maken, zijn het luchttoevoer- en het luchtafzuigebiet hierbij in evenwicht.

In het kader van dit onderzoek is voor de ventilatiecapaciteit uitgegaan van voor kantoorgebouwen karakteristieke waarden, zoals ook gebruikt voor de dimensionering van zonneshoorstenen, zie deelrapport (I) hoofdstuk 15 van het onderzoek.

De dimensionering van het ventilatiesysteem wordt bepaald door de winddruk, het positieve drukverschil in de Klimaatcascade[®], en de door de Zonneshoorsteen of Zonnegevel[®] en venturiejector opgewekte onderdruk. Ontwerpgegevens zullen worden gegenereerd na afronding en validatie van het gehele complex van *Earth, Wind & Fire* met behulp van het simulatiepakket ESP-r. Om enig houvast te bieden voor het verdere onderzoek is voorlopig uitgegaan van een luchtsnelheid van 1,5 m.s⁻¹.

Om vooruitlopend op de ESP-r simulatie een indruk te krijgen van het gelijktijdig optreden van zon en wind is op basis van genormaliseerde klimaatgegevens een steekproef genomen uit een zomerperiode. Deze globale analyse geeft steun aan de verwachting dat zon en wind binnen het *Earth, Wind & Fire* concept inderdaad een complementaire werking hebben.

13.2 Ventilatiecapaciteit

De ventilatiecapaciteit dient te worden bepaald door de klimaatadviseur. Voor een eerste aanzet kan in kantoorgebouwen worden uitgegaan van de volgende globale gegevens.

Uitgegaan wordt van kwaliteitscategorie II uit NEN-EN 15251 bij een laag emissieniveau uit het interieur –zie deelrapport (IV). Voor een cellenkantoor komt dit overeen met 1,4 dm³.s⁻¹.m⁻² of $\approx 5 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ betrokken op het afdelings vloerooppervlak volgens NEN 2580, zie figuur 13.1. Het specifieke ventilatiedebiet op bvo basis bedraagt $5 \cdot 0,65 = 3,25 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$. Met een ventilatiedebiet van 1 m³.s⁻¹ kan dus een vloerooppervlak worden bediend van $1 \cdot 3600 / 3,25 \approx 1.100 \text{ m}^2$.

Bruto vloeroppervlak (bvo)	Netto vloeroppervlak (nvo)	Nuttig vloeroppervlak	Afdelings vloerooppervlak	<ul style="list-style-type: none"> Vloerooppervlak werkplekken inclusief Looproutes tussen werkplekken 	55%
				<ul style="list-style-type: none"> Supplementaire afdelingsruimte 	10%
			<ul style="list-style-type: none"> Sanitaire ruimten Speciale ruimten Buitenberging, stallingen 		
		<ul style="list-style-type: none"> Verkeersoppervlak Oppervlak voor technische installaties 			
	Tarra vloeroppervlak	<ul style="list-style-type: none"> Niet statische bouwdelen Statische bouwdelen Ruimten lager dan 1,5 m 			

Figuur 13.1 – Verdeling vloerooppervlakken van gebouwen volgens NEN 2580 (NNI 2007)

Voor een goede luchtverdeling over de op het natuurlijke ventilatiesysteem aangesloten ruimten en een energie-efficiënte bedrijfsvoering kan worden uitgegaan van de toepassing van zelfregelende roosters met regeling op basis van aanwezigheid en/of CO₂, waardoor een reductiefactor van 0,85 à 0,9 kan worden toegepast; het specifieke ventilatiedebiet kan hierdoor in principe worden verlaagd naar $\approx 4,5 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, betrokken op het afdelingsvloerooppervlak.

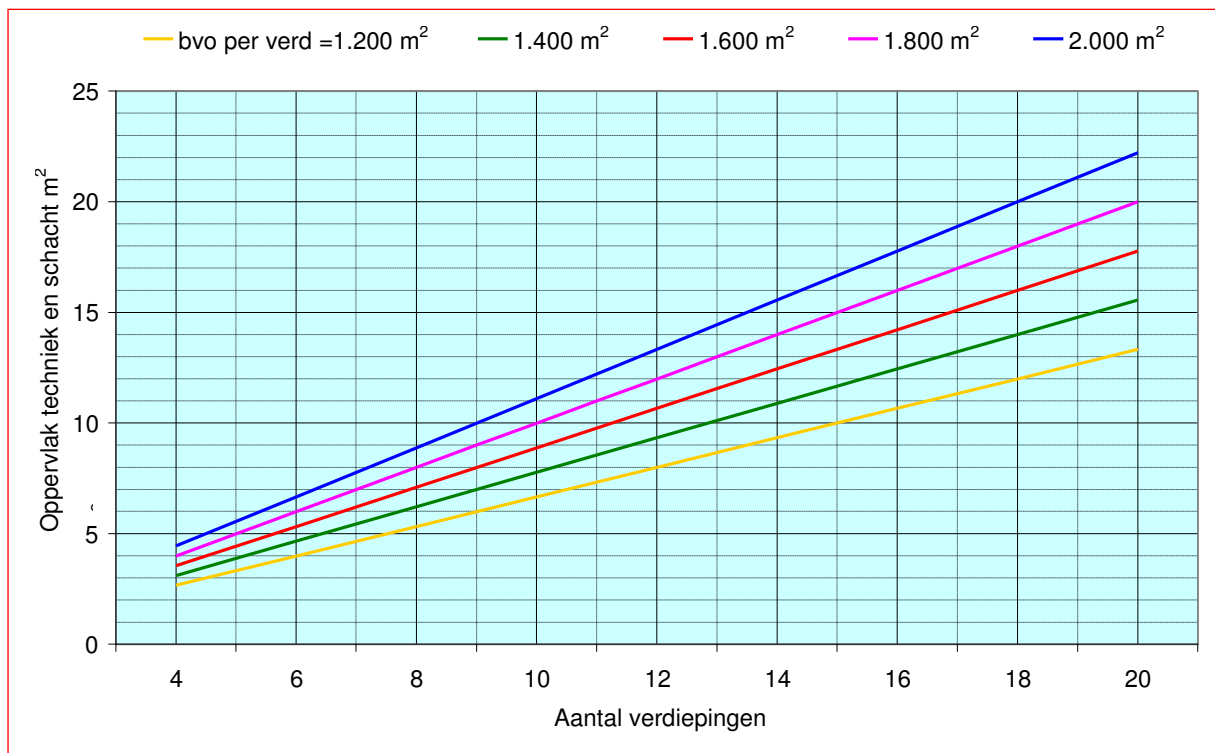
13.3 Luchttoevoersysteem

Het luchttoevoersysteem van een gebouw dat is uitgerust met het *Earth, Wind & Fire* ventilatieconcept bestaat in hoofdzaak uit de volgende, in serie aangebrachte componenten:

- De buitenluchttoetreding in de overdrukkamer - zie paragraaf 12.2;
- Een grof filter en (facultatief) een elektrostatische luchtfilter - zie paragraaf 12.2 en deelrapport (III);
- De Klimaatcascade[®] - zie deelrapport (III);
- De luchtverdeelschacht - deelrapport (III);
- Het luchtverdeel- en regelsysteem - deelrapport (III);
- De hulpventilator - deelrapport (III);

De overdrukkamer en de drukopbrengst van de klimaatcascade moeten ten allen tijde het totale drukverlies van het luchttoevoersysteem kunnen compenseren. Een geringe onderdruk ten gevolge van het afzuigstelsel lijkt hierbij aanvaardbaar, maar in principe dient de “trek” van het afzuigstelsel uitsluitend voor compensatie van de eigen drukverliezen + drukverlies van het warmteterugwinstelsel aan de top van de zonneshoofsteen. Het gebouw is hierbij een neutrale zone.

De dimensionering van de Klimaatcascade[®], wordt mede bepaald door de beschikbare drukken, die afhankelijk van de gebouwhoogte en randvoorwaarden voor elk specifiek ontwerp afzonderlijk moeten worden bepaald. Uitgaande van een minimum luchtsnelheid van $1,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ kan figuur 13.1 worden gebruikt voor de globale dimensionering.



Figuur 13.1 – Doorsnede van de Klimaatcascade[®], als functie van bvo voor $w = 1,5 \text{ m/s}$

Voorbeeld 13.3/1

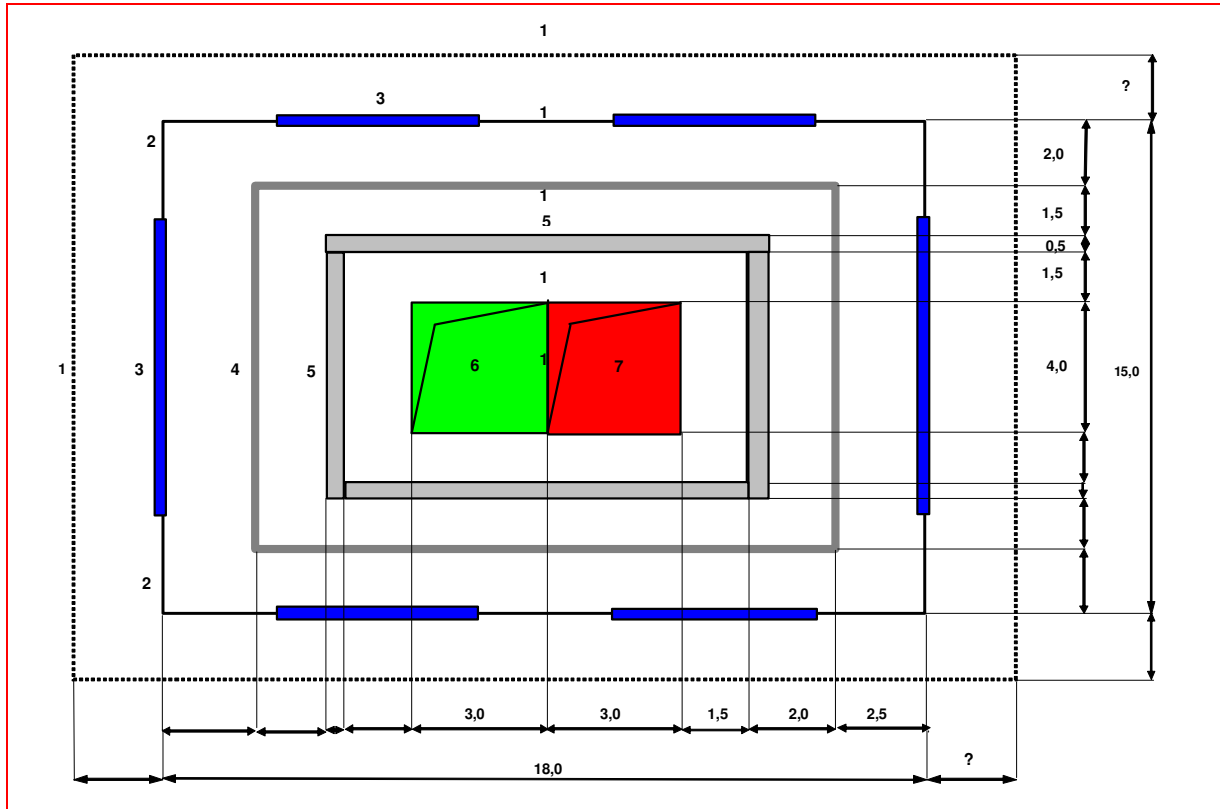
Een kantoorgebouw van 12 verdiepingen à 1.800 m^2 bvo per verdieping. De maximum doorsnede van de Klimaatcascade[®] is $\approx 12 \text{ m}^2$. Dit resultaat kan ook als volgt worden berekend:

- Bruto vloeroppervlak (bvo) = $12 \cdot 1.800 = 21.600 \text{ m}^2$
- Afdelings vloeroppervlak = $0,65 \cdot 21.600 = 14.040 \text{ m}^2$
- Ventilatie-debiet = $5 \cdot 14.040 = 70.200 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \equiv 19,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
- Doorsnede Klimaatcascade[®] = $19,5 / 1,5 = 13 \text{ m}^2$

Het oppervlak van de overdrukruimte met luchtkleppen en luchtfilters kan voor deze capaciteit globaal en zeer ruim worden geraamd op maximaal 270 m² overeenkomend met 1,25% van het bvo; zie figuur 13.2. De getallen in deze figuur komen overeen met die van figuur 12.1. Voor de hoogte van de overdrukkamer kan ca 2,75 m worden aangehouden in verband met de eventueel hierin aan te brengen windturbines –zie hoofdstuk 20.

Als geen elektrostatische luchtfilters nodig zijn kan het oppervlak van de overdrukruimte worden gereduceerd tot ≈ 180 m² overeenkomend met ≈ 0,85% van het bvo

Voor een traditionele luchtbehandelingsinstallatie van dezelfde omvang zou volgens NEN-EN 13779 eveneens een vloeroppervlak van ca 270 m² nodig zijn, echter met een hoogte van 5 m. Met het *Earth, Wind & Fire* concept kan dus op bouwvolume worden bespaard.



Figuur 13.2 – Globale indeling overdrukruimte

Hoofdstuk 20 geeft een geheel andere benadering voor de dimensionering van de overdrukkamer, nl. op basis van door windenergie gestelde eisen. De benodigde lengte- en breedtematen van de overdrukkamer zijn hierbij gerelateerd aan het aantal aan te brengen windturbines, te weten:

- Ruimteafmeting 10 x 10 m → 1 turbine per oriëntatie → totaal 4 turbines Ø 2,5 m
- Ruimteafmeting 20 x 20 m → 2 turbine per oriëntatie → totaal 8 turbines Ø 2,5 m
- Ruimteafmeting 30 x 30 m → 3 turbine per oriëntatie → totaal 12 turbines Ø 2,5 m

De door de actieve turbines stromende lucht moet via de gevel aan de windzijde worden gesuppleerd. Om het drukverlies in de toevoeropeningen aan de windzijde te beperken is ook een bepaald geveleoppervlak nodig. Bij de bovengenoemde afmetingen en de aangenomen hoogte van 2,75 m is de luchtsnelheid in de toevoeropeningen bij de dominante potentiële windsnelheden dan < 2,5 m.s⁻¹ bij een drukverlies < 5% van het beschikbare drukverschil –zie paragraaf 20.7

13.4 Luchtafzuigstelsysteem

Het luchtafzuigstelsysteem van een gebouw dat is uitgevoerd met het *Earth, Wind & Fire* ventilatieconcept bestaat in hoofdzaak uit de volgende, in serie staande, componenten:

- Het externe afzuigstelsysteem tot aan het shuntkanaal - zie deelrapport (I);
- Het shuntkanaal - zie deelrapport (I);
- De Zonneschoorsteen of Zonnefaçade[®] - zie deelrapport (I);
- De FiWiHEx warmtewisselaar - zie deelrapport (I);
- De luchtafvoer naar de buitenlucht via de Venturi-ejector, zie hoofdstuk 19;
- Een hulpventilator.

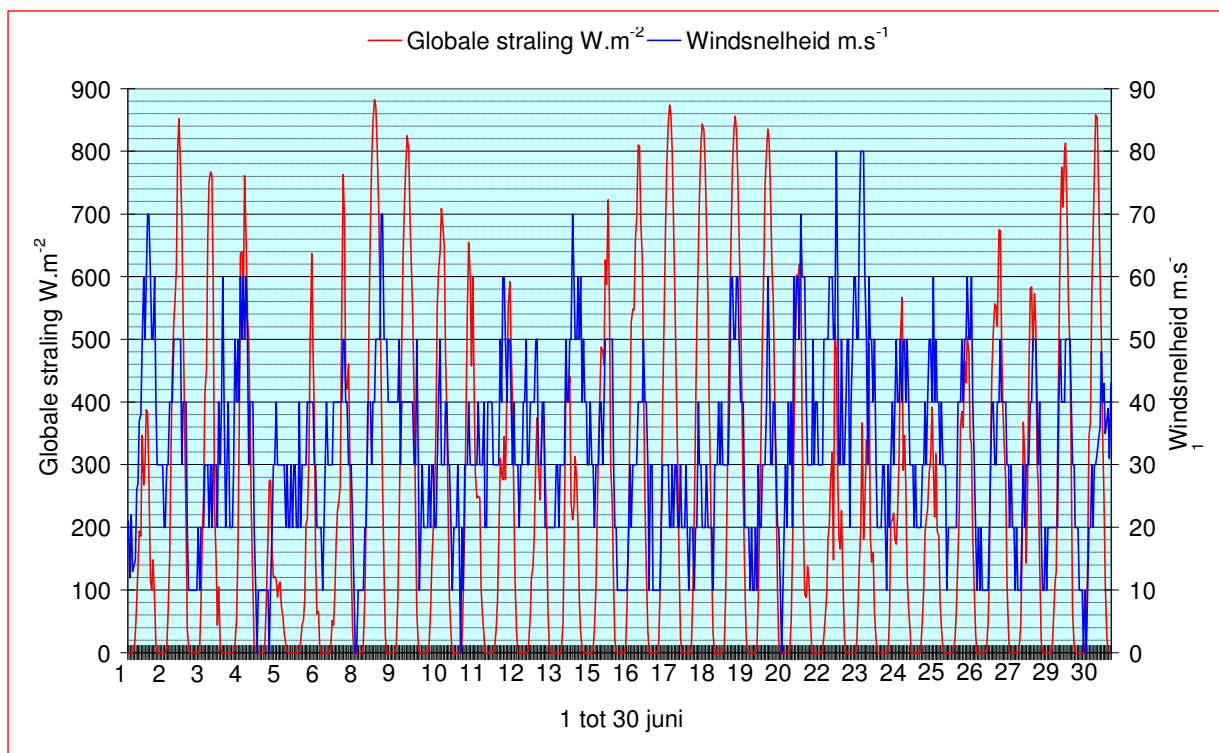
De Zonneschoorsteen of Zonnefaçade[®], de hulpventilator en het afvoersysteem naar buiten moeten ten allen tijde het totale drukverlies van het luchtafzuigstelsysteem kunnen compenseren inclusief het drukverlies van de FiWiHEx warmtewisselaar. De hulpventilator mag alleen in bedrijf komen als de complementaire samenwerking van zon en wind tekortschiet.

13.5 Gelijktijdigheid van Zon en Wind

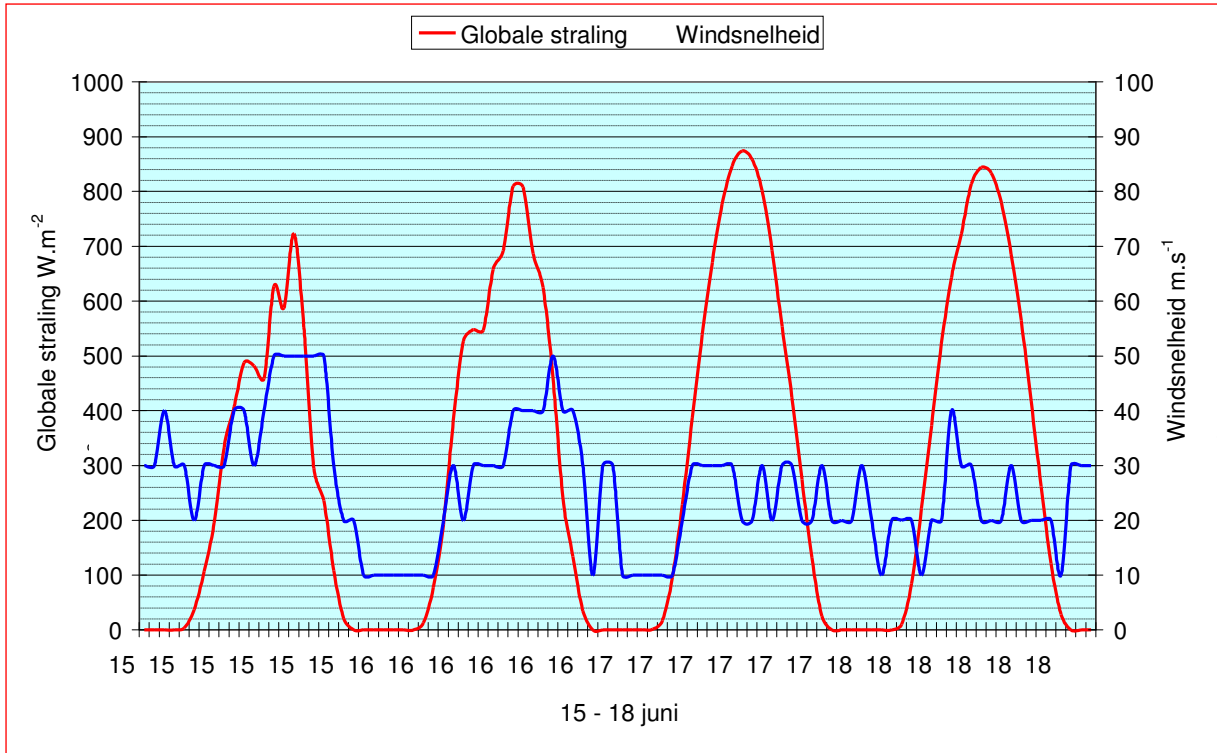
Na optimalisatie van de subconcepten voor luchttoevoer en luchtafzuiging met behulp van analytische rekenmodellen, CFD simulaties en dynamische simulaties met ESP-r, gevalideerd met metingen aan fysieke testmodellen is het totale *Earth, Wind & Fire* concept in een *case-study* geanalyseerd en geoptimaliseerd met behulp van de dynamische simulatiesoftware ESP-r.

Om vooruitlopend op de ESP-r simulatie een indruk te krijgen van het gelijktijdig optreden van zon en wind is op basis van de datafile met klimaatgegevens uit NEN 5060:2008 – Bijlage A.2 (NNI 2008) een overzicht gemaakt voor de maand juni; zie figuur 13.3. Deze figuur geeft de globale indruk dat bij een hoge zonnestraling de windsnelheden overwegend laag zijn en omgekeerd. De tijdschaal is echter erg gecomprimeerd en geeft daardoor nauwelijks informatie over het gelijktijdig optreden van zon en wind. Daarom is ingezoomd op twee perioden met respectievelijk veel zon, 21 – 24 juni, en veel wind, 15 – 18 juni, zie figuur 13.4 en 13.5.

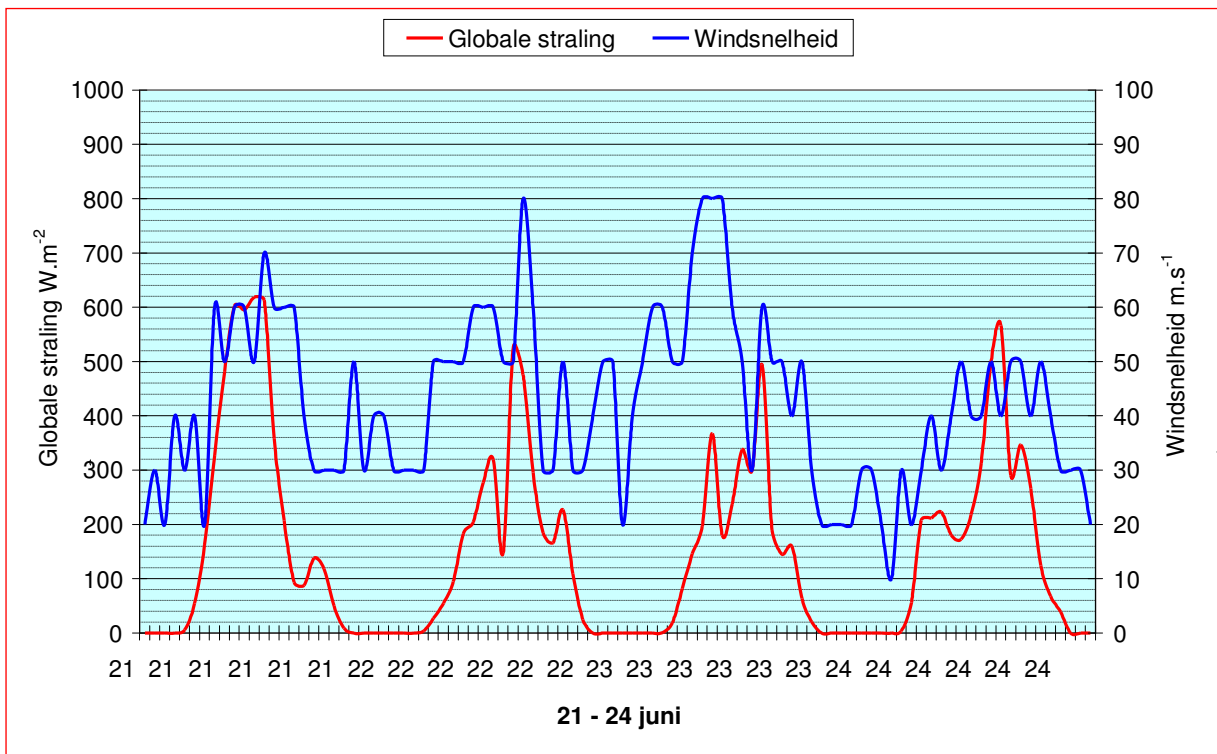
Binnen deze periode zijn nog twee dagen afzonderlijk geanalyseerd, 17 juni, een dag met veel zon en 23 juni, een dag met veel wind, zie figuur 13.6 en 13.7.



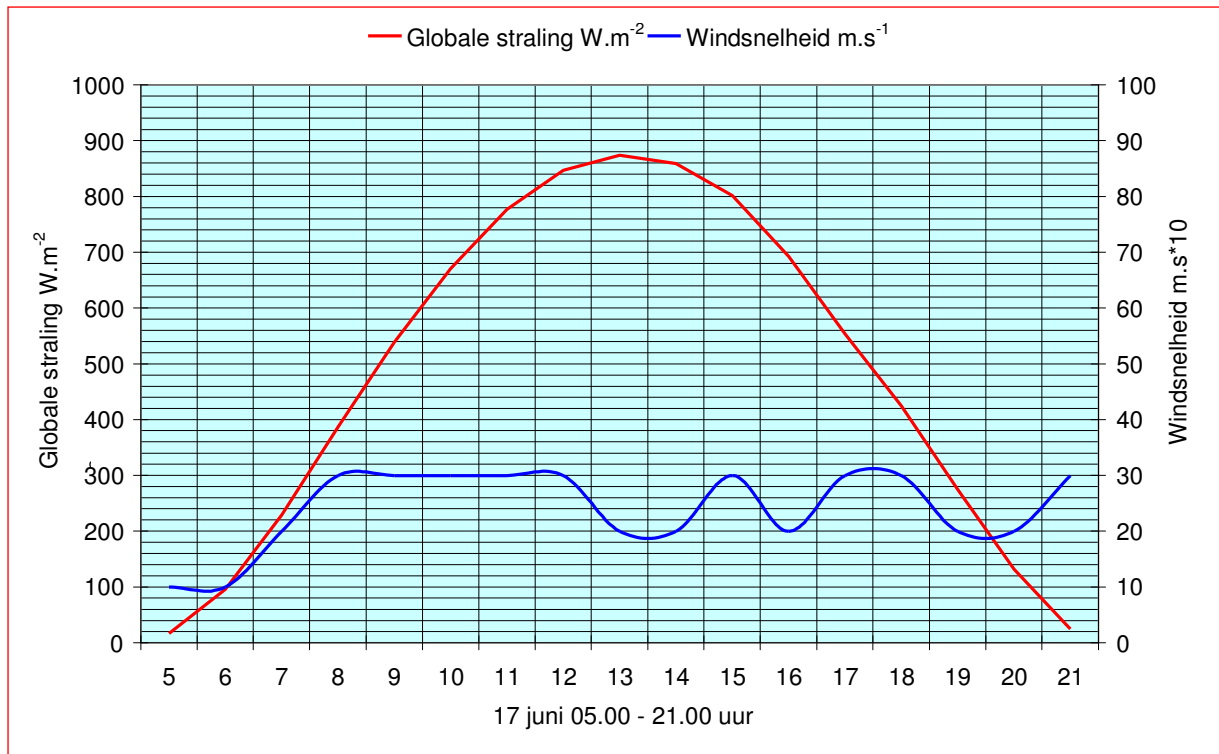
Figuur 13.3 – Zon en Wind NEN 5060:2008 – Bijlage A.2 – maand juni



Figuur 13.4 – Zon en Wind NEN 5060:2008 – Bijlage A.2 – 15 - 18 juni – zon dominant

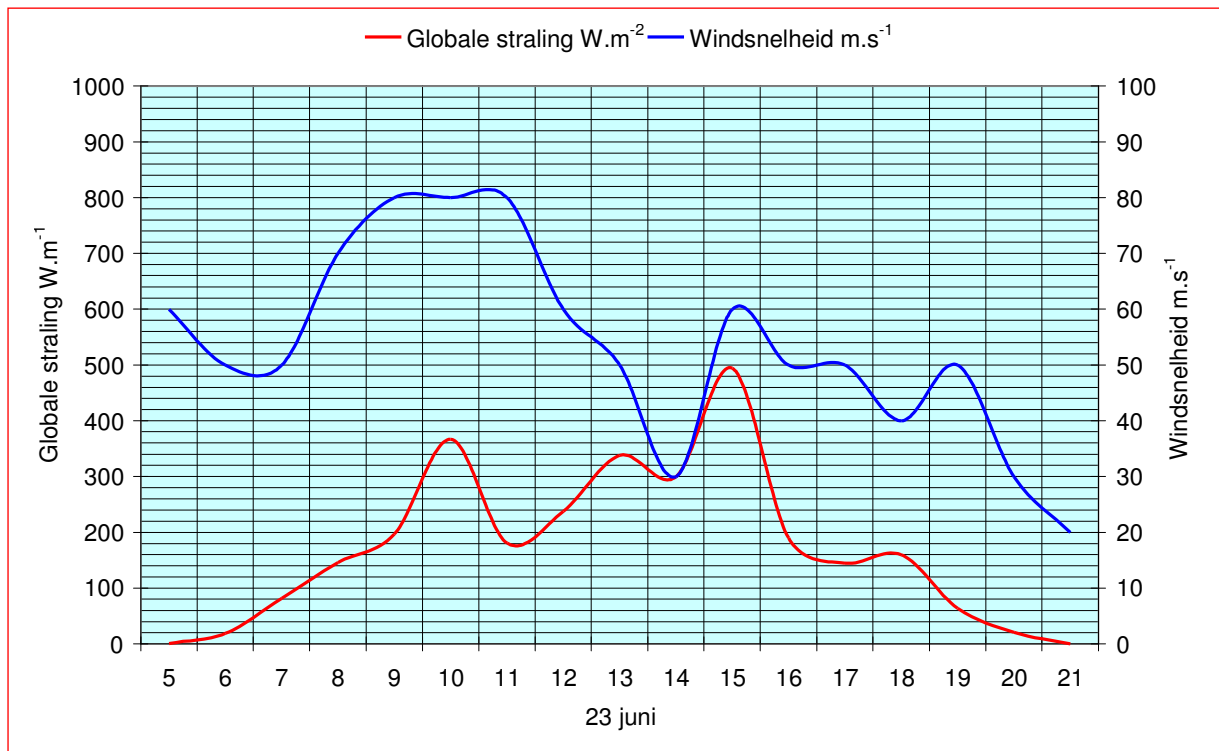


Figuur 13.5 – Zon en Wind NEN 5060:2008 – Bijlage A.2 – 21 - 24 juni – wind dominant



Figuur 13.6 – Zon en Wind NEN 5060:2008 – Bijlage A.2 – 17 juni – zon dominant

17 juni is een bijzondere zonnige dag met een globale straling van maximaal $\approx 900 W.m^2$. De windsnelheden op deze dag zijn met ≈ 2 tot $3 m/s$ (2 Beaufort) laag.



Figuur 13.7– Zon en Wind NEN 5060:2008 – Bijlage A.2 – 23 juni – wind dominant

23 juni is een dag met betrekkelijk weinig zon maar de windsnelheden op deze dag zijn met ≈ 3 tot $8 m.s^{-1}$ (3 à 4 Beaufort) behoorlijk hoog.

Deze globale analyses geven steun aan de verwachting dat zon en wind binnen het Earth, Wind & Fire concept inderdaad een complementaire werking hebben.

14. DAKKAPPEN

14.1 Inleiding en samenvatting

In het *Earth, Wind & Fire* concept wordt gebruikte lucht afgezogen via de zonneschoorsteen – zie deelrapport (I) van het onderzoek. Na warmteterugwinning moet de lucht zonder kortsluiting met de aangezogen verse ventilatielucht te veroorzaken bovendaks worden afgevoerd.

In de voorgaande hoofdstukken zijn hiervoor twee oplossingen omschreven:

- Afvoer met behulp van een Venturi-ejector, zie hoofdstuk 11, uitgewerkt in hoofdstuk 19;
- Afvoer met behulp van een Coanda-ejector, zie hoofdstuk 11, niet verder uitgewerkt.

Het voorliggende hoofdstuk geeft een derde variant:

- Afvoer via dakkappen, die in velerlei uitvoeringsvormen functioneel een ejector zouden kunnen vervangen, en tevens een bijdrage leveren aan de architectonische expressie van een gebouw.

14.2 Traditionele dakkappen

Dakkappen zijn op de markt verkrijgbaar in vele uitvoeringen en modellen; figuur 14.1. geeft hiervan een beeld;. Zij vinden vooral toepassing in de woningbouw en de kleinere utiliteitsbouw voor de afvoer van gebruikte ventilatielucht en van verbrandingsgassen. Tevens moeten ze bescherming bieden tegen valwinden in het afvoerkanaal en voorkomen dat regen, insecten en ongedierte binnen kunnen komen.



Figuur 14.1 – Handelsuitvoeringen van afzuigkappen (www.nbd-online.nl)

De goede werking en de effectiviteit van dakkappen is bijzonder gevoelig voor de windsnelheid en de plaatselijke windrichting. Een windtunnelonderzoek door TNO van verschillende dakkappen gaf de volgende classificatie (De Gids, W.F. e.a.1987):

- Kappen die een verbetering van de druk en de stabiliteit geven ten opzichte van een open pijp. De op een onderzoek van het Gasinstituut (GIVEG) berustende kappen, die o.a. onder de merknamen “Trega” en “Amgas”- kap in de handel zijn, behoren tot deze groep evenals de “gek”;

- Kappen die bij windaanval slechter werken dan een open pijp; de zgn. theepot en de roterende kap behoren tot deze groep.
- Kappen die in bepaalde omstandigheden een positieve invloed hebben en in andere gevallen een negatieve ten opzichte van een open pijp. In het algemeen werken deze kappen gunstig bij valwinden maar ongunstig bij stijgwinden.

Een algemene conclusie uit dit onderzoek luidt dat bij val- respectievelijk stijgwinden de door het Gasinstituut (GIVEG) ontwikkelde TREGA-kap het beste zal voldoen. Zie figuur 14.1.

Op basis van het windtunnelonderzoek door TNO zijn richtlijnen ontwikkeld voor de situering van dakkappen op schuine daken; deze richtlijnen zijn naderhand opgenomen in de Nederlandse regelgeving. De resultaten van dit onderzoek zijn naderhand gebruikt voor de validatie van CFD analyses waardoor het mogelijk is geworden het gedrag van de wind in een woonomgeving beter te voorspellen (Pfeiffer, A. e.a. 2008).

Voor het onderzoek *Earth, Wind & Fire* zijn de vermelde bevindingen niet direct toepasbaar, maar als algemene informatie en verwerving van inzicht in de problematiek van dakkappen is het nuttig er kennis van te nemen. In het algemeen geldt:

- Het windgedrag ter plaatse van de uitmonding moet zo goed mogelijk in kaart worden gebracht;
- Het drukverlies van een dakkap moet zo gering mogelijk zijn;
- Eén of andere vorm van redundantie is gewenst.

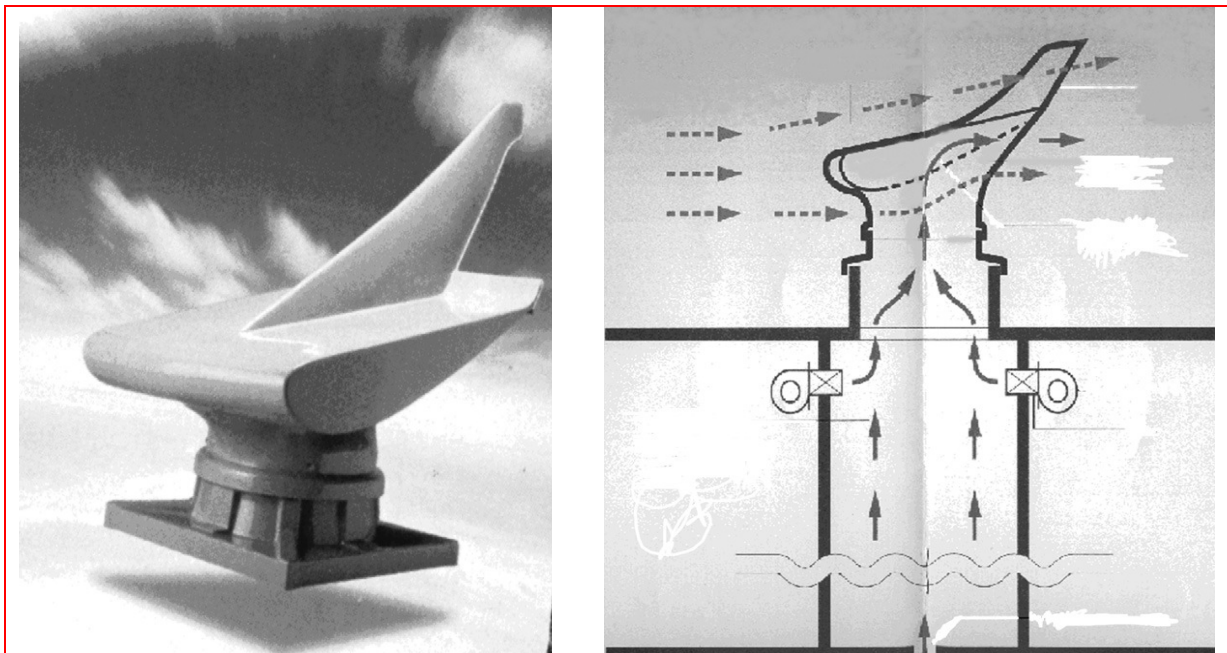
Dakkappen kunnen worden onderscheiden in

- Passieve dakkappen - paragraaf 14.3
- Roterende dakkappen - paragraaf 14.4

14.3 Passieve dakkappen

De bekende dakkappen in handelsuitvoering volgens figuur 14.1 worden in Nederland hoofdzakelijk toegepast voor rookafvoer van verbrandingstoestellen; voor ventilatie worden ze nauwelijks gebruikt. Prestatiegegevens als functie van de windsnelheid zijn nauwelijks te vinden, maar de afzuigcapaciteit is beperkt. Voor toepassing in het *Earth, Wind & Fire* concept komen ze derhalve niet in aanmerking.

Een bijzondere dakkap van deze categorie is de Wing Jetter, ontwikkeld door de Japanse HASEC Corporation. Hierin wordt gebruik gemaakt van aerodynamische drukverschillen over een omgekeerde vleugel (zie paragraaf 11.12)



Figuur 14.2 – Wing Jetter

De langs het vleugelprofiel stromende lucht wordt door het Coanda-effect naar de vleugel togetrokken en de hier ontstane onderdrukzone staat in verbinding met het afzuigkanaal. Aan de bovenkant is de vleugel voorzien van een windvaan die de vleugel in de juiste windrichting houdt.

De Wing Jetter in handelsuitvoering heeft maar een beperkte capaciteit, ca $400 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ bij een windsnelheid van $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, en kan daardoor nauwelijks concurreren met meer traditionele dakkappen (Khan, N. e.a. 2008). Het concept is echter interessant genoeg voor een eventueel nader onderzoek voor bredere toepassing.

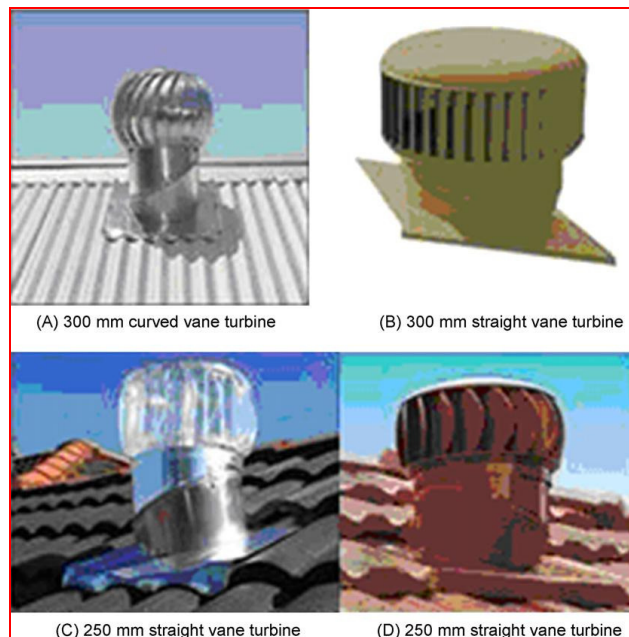
14.4 Roterende dakkappen

Een roterende dakkap is een combinatie van een kleine windturbine en een afzuigventilator, voorzien van rechte of gekromde schoepen, zie figuur 14.3 (Khan, N. 2008). Als de wind op de schoepen blaast gaat de turbine roteren en creëert daarmee binnenin een onderdruk waardoor lucht wordt afgezogen. De afzuiglucht treedt het turbinehuis axiaal binnen en wordt samen met de aandrijfvlucht radiaal uitgeblazen.

Een Australische studie toonde aan dat de prestaties van een roterende dakkap met rechte schoepen significant beter zijn dan die met gekromde schoepen. (Revel, A. 1998). Ook een grotere schoephoogte geeft een hogere capaciteit (West, S. 1999).

De constructie van een roterende dakkap is zeer simpel maar de aerodynamica van twee afzonderlijke maar samenhangende luchtstromen is buitengewoon ingewikkeld.

De capaciteit van roterende dakkappen hangt uiteraard af van de windsnelheid, maar is beperkt tot $\approx 1.000 \text{ m}^3/\text{h}$. Voor toepassing in het Earth, Wind & Fire concept komen ze daarom nauwelijks in aanmerking.



Figuur 14.3 – Roterende dakkappen

14.5 Hybride dakkappen

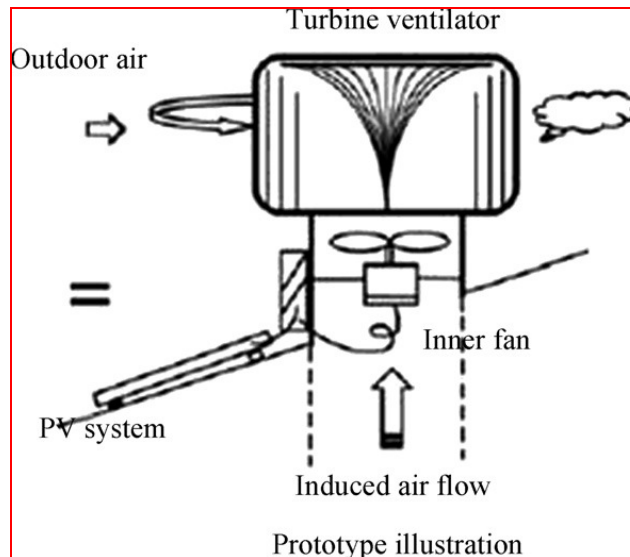
De EcoPower hybride dakkap van Edmonds combineert natuurlijke en mechanische ventilatie in één unit- zie figuur 14.4. De rotor is uitgevoerd met achterovergebogen schoepen en functioneert als centrifugaalventilator. Bij voldoende wind werkt de dakkap alleen op windkracht. Een ingebouwde gelijkstroom- motor zorgt voor een constante afzuigcapaciteit bij wisselende windsnelheden (www.hybridvent.com.au).

In tegenstelling tot veel andere dakkappen wordt de EcoPower geleverd in grote ventilatiecapaciteiten tot $10.000 \text{ m}^3/\text{h}$ bij een diameter van $\text{Ø} 900 \text{ mm}$



Figuur 14.4 – EcoPower hybride dakkap

Een nieuwe ontwikkeling is een roterende dakkap voorzien van een hulpventilator met gelijkstroommotor, die wordt gevoed door een PV paneel (Lai, C. 2005)- zie figuur 14.5. De axiaalventilator vormt hierbij een obstructie in de luchtstroom en belemmert min of meer het functioneren van de dakkap bij natuurlijke ventilatie.



Figuur 14.5 – Roterende dakkap met hulpventilator

14.6 Dakkappen als architectonische expressie

De op de markt verkrijgbare dakkappen hebben meestal een geringe afzuigcapaciteit, en komen, wellicht met uitzondering van de hybride EcoPower – paragraaf. 14.5, niet in aanmerking voor toepassing in het Earth, Wind & Fire concept.

De principes kunnen wel dienen als inspiratiebron voor architecten om in samenwerking met de klimaatadviseur specifieke afzuigsystemen te ontwerpen, die tevens kunnen dienen als *landmark* voor een gebouw. Enkele voorbeelden volgen hierna.

Figuur 14.6 is een voorbeeld van een roterende kap die duidelijk als landmark bedoeld is. De 9 meter hoge “kap” draait op stalen wielen en wordt in de wind gehouden door zeilen die aan een stalen “mast” zijn bevestigd.



Figuur 14.6 - ICI Chemicals Visitor Centre Runcorn UK

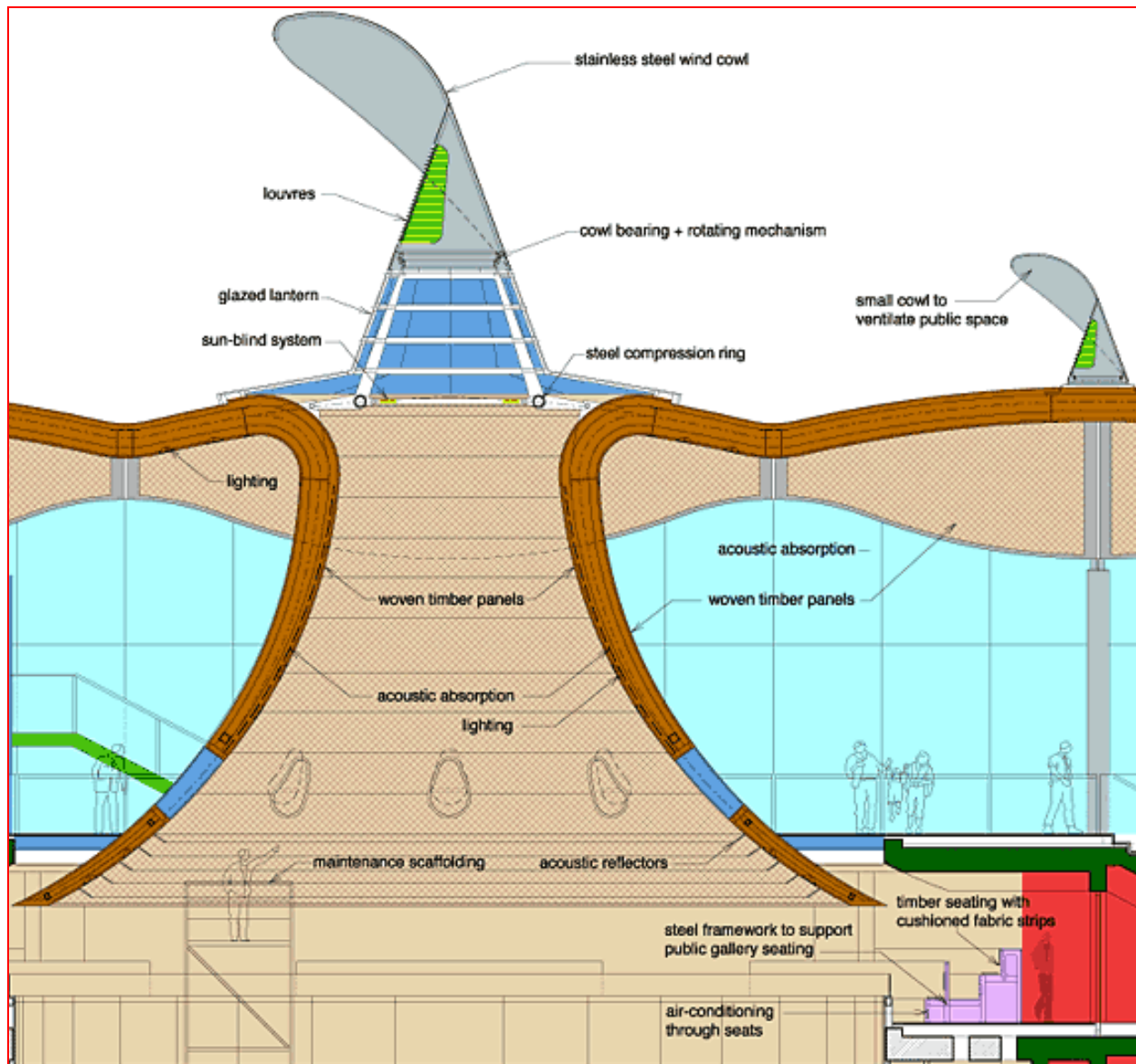
Een bijzonder afzuigstelsel is de VAWTEX machine, de Vertical Axis Wind Turbine Extractor-figuur 14.7. Het is een verticale as turbine met twee wieken die geschikt zijn voor functioneren in een turbulent stedelijke windklimaat. De verticale as van de turbine is direct gekoppeld aan een afzuigventilator die met de turbine meedraait en lucht afzuigt.

Er zijn geen technische gegevens bekend over de afzuigcapaciteit van de VAWTEX.



Figuur 14.7 – De Vawtex Machine

De draagconstructie van de “kap” volgens figuur 14.8 is gevormd als lichtkap waardoor via een trechtervormige lichtkoker het gebouw wordt voorzien van daglicht. De kap wordt door een grote windvaan in de wind gedraaid, en de gebruikte ventilatielucht wordt naar de buitenlucht afgevoerd via louveres. Eén of meer kleinere dakkappen zorgen voor de afzuiging van andere ruimten van het gebouw.



Figuur 14.8 Afzuigstelsel van een openbaar gebouw in Wales



Figuur 14.9 – Natuurlijke ventilatie Nottingham University

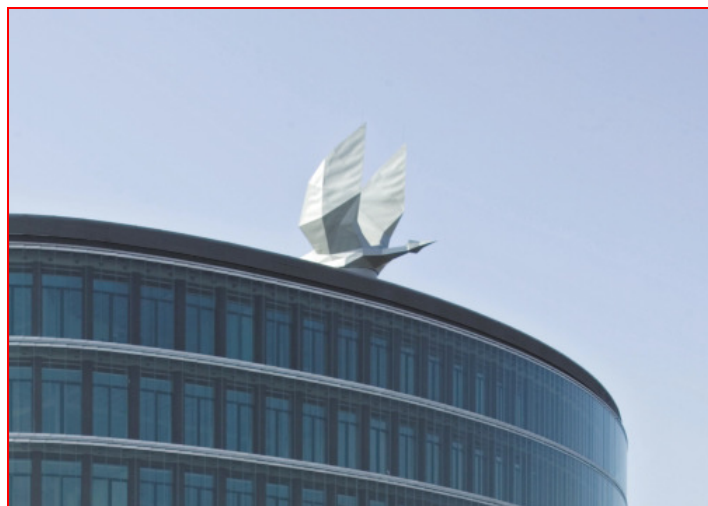
Wellicht kan de bekende scheepskap ook als inspiratiebron dienen.



Figuur 14.10 - Scheepskap



Figuur 14.11 – Queens Building De Montfort University



Figuur 14.12 – Ooievaar op stadsdeelkantoor Ypenburg

15. DE STEDENBOUWKUNDIGE CONTEXT

15.1 Inleiding en samenvatting

De voorgaande beschouwingen analyses hebben betrekking op situaties waarbij de wind op dakniveau niet wordt gehinderd door obstakels rondom een gebouw.

In werkelijkheid staat een gebouw zelden solitair en zullen omliggende gebouwen, afhankelijk van de onderlinge tussenafstanden en hoogteverschillen, de windsnelheid en de windrichting beïnvloeden. De effectiviteit van het Ventecdak[®] zal hierdoor verminderen.

Een klimaatactief gebouw komt het beste tot zijn recht in een klimaatactieve stedenbouwkundige omgeving. Het voorliggende hoofdstuk geeft daarom globaal aan hoe en in welke mate de stedenbouwkundige omgeving de werking van het dak beïnvloedt. Voor specifieke situaties kan dit verschijnsel het beste in de windtunnel worden geanalyseerd.

De effectiviteit van een Zonneschoorsteen of een Zonnefaçade[®] is overigens meer bepalend voor de stedenbouwkundige omgeving dan de effectiviteit van een Ventecdak[®]. Uitgaande van de veronderstelling dat een gebouw over beide faciliteiten beschikt hebben de eisen ten behoeve van de zonneschoorsteen dan ook prioriteit. Hierop gebaseerd is een stedenbouwkundige omgeving ontworpen die is gebruikt als testlocatie voor het Ventecdak[®]. De stedenbouwkundige karakteristieken van deze locatie zijn gebaseerd op de kengetallen van Spacemate[®].

Voor een optimale effectiviteit van het Ventecdak[®] is een ongehinderde aanstroming van de wind vanuit alle richtingen gewenst. Een vrije aanstroming wordt belemmerd door obstakels in de bovenwindse richting. In een stedelijke omgeving kan ieder gebouw als een obstakel voor het windveld en het windprofiel voor de naastliggende gebouwen worden beschouwd. Het is daarom noodzakelijk het effect van dergelijke obstakels te onderzoeken. Op basis van literatuurgegevens is hiervan een theoretische studie gemaakt.

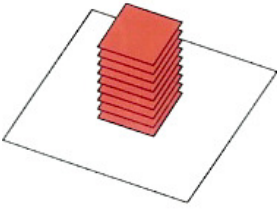
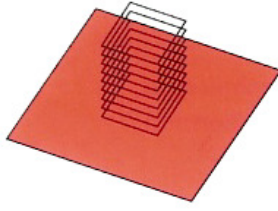
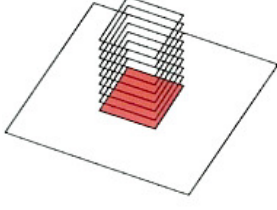
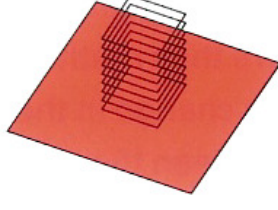
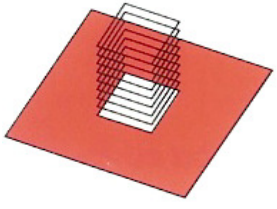
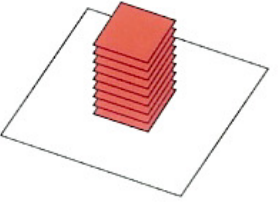
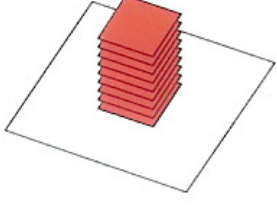
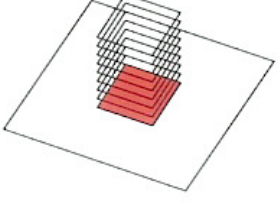
Het blijkt dat de stedenbouwkundige omgeving in feite bepalend is voor een succesvolle toepassing van het Ventecdak[®]. Omdat het niet goed mogelijk is de veranderingen in het windveld en de windprofielen te berekenen zijn verschillende testlocaties met wisselende bouwkundige profielen in de windtunnel doorgemeten. Het blijkt dat omgevingsbebouwing een beperkte invloed heeft op de prestaties van het Ventecdak[®] zolang deze significant lager is dan het gebouw. Bij bebouwing van gelijke hoogte wordt de werking van het Ventecdak[®] negatief beïnvloed, maar het blijft functioneren zij het met verminderde prestatie – zie hoofdstuk 17.

Vervolgonderzoek is nodig om de randvoorwaarden voor de toepassing van het Ventecdak[®] en de prestaties hiervan in diverse stedenbouwkundige omgevingen met behulp van CFD simulaties en windtunnelonderzoek nader te analyseren.

15.2 Stedenbouwkundige karakteristieken

Een stedenbouwkundige verkaveling kan worden gekarakteriseerd met behulp van Spacemate[®] the spatial logic of urban density (Berghauser Pont, Meta en Haupt, Per 2004, 2009). Hierbij worden de volgende kengetallen gebruikt – zie figuur 15.1:

- FSI = floor space index
- GSI = ground space index
- OSR = open space ratio
- Layers = gemiddeld aantal bouwlagen

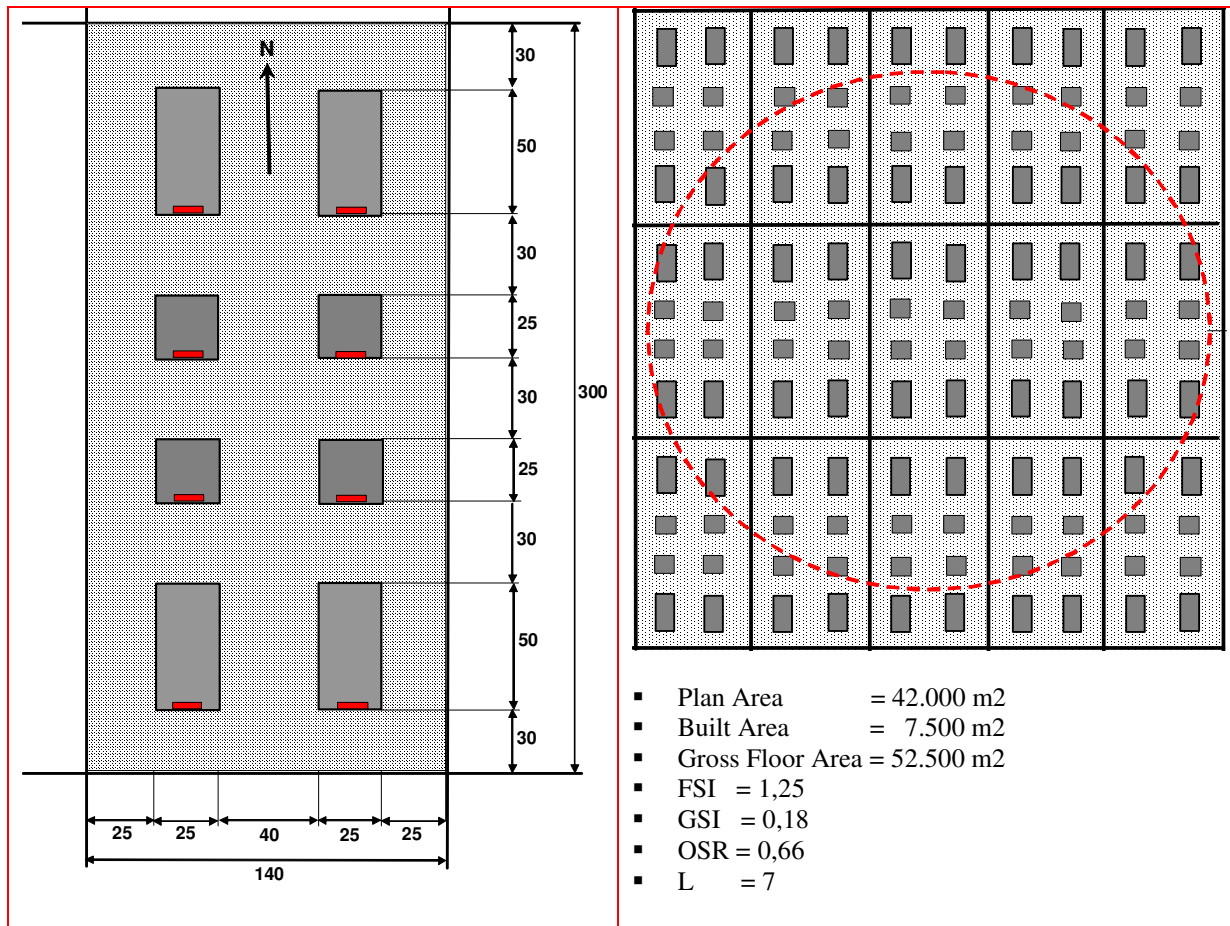
		<p>FSI = Floor Space Index gross floor area / plan area</p> <p>The FSI expresses the intensity of an area</p>
		<p>GSI = Ground Space Index built area / plan area</p> <p>The GSI expresses the compactness of an area</p>
		<p>OSR = Open Space Ratio (plan area – built area) / gross floor area</p> <p>The OSR expresses the openness and the pressure on the non-built space</p>
		<p>L = Layers gross floor area / built area</p> <p>L expresses the average number of floors in an area</p>

Figuur 15.1 – Kengetallen Spacemate®

15.3 Optimale stedenbouwkundige context voor een Zonneschoorsteen of Zonnefacade®

Figuur 15.2 laat een mogelijke stedenbouwkundige verkaveling zien van een “Zonnepark”. Oriëntatie en onderlinge afstanden tussen de gebouwen zijn hierbij geoptimaliseerd voor zonneschoorstenen; zie deelrapport (I) “Onderzoek Zonneschoorsteen”. Met een gemiddeld aantal bouwlagen van 7 zou dit gebied representatief kunnen zijn voor Amsterdam Zuidoost. De kengetallen volgens Spacemate® zijn in de figuur vermeld.

Het gemiddeld aantal bouwlagen in dit voorbeeld is 7. De aangegeven tussenafstanden Noord-Zuid van 30 m gelden tot een bouwhoogte van 8 verdiepingen. Deze afstand moet worden vergroot van 32 m tot 60 m bij gebouwhoogten van respectievelijk 10 tot 20 verdiepingen. Zie “Onderzoek Zonneschoorsteen” –deelrapport (I) - hoofdstuk 11. In principe is in deze context elk hoger gebouw een obstakel voor de aanstroming van wind op een lager benedenwinds gebouw.



Figuur 15.2 – Gebouwen in een “zonnepark”

15.4 Obstakels

Voor een optimale effectiviteit van het Ventecdak[®] is een ongehinderde aanstroming van de wind vanuit alle richtingen gewenst. Een vrije aanstroming wordt belemmerd door obstakels in de bovenwindse richting. Het is daarom noodzakelijk het effect van dergelijke obstakels te onderzoeken.

Figuur 15.3 geeft een globale indruk van de stromingspatronen rondom een obstakel volgens ASHREA, waarvoor een alleenstaand rechthoekig gebouw is gekozen (ASHRAE 2001) - zie ook hoofdstuk 8.

R wordt de scaling length genoemd, die voor de loodrechte aanstroming op een gebouw met afmetingen H en B kan worden bepaald met de formule

$$R = B_s^{0,67} \cdot B_L^{0,33}$$

(15.1)

Waarin

B_s = kleinste van het aanstroomoppervlak H en B

B_l = grootste van het aanstroomoppervlak H en B

Als B_l groter is dan $8B_s$ moet in formule (15.1) $B_l = 8B_s$ worden ingevuld.

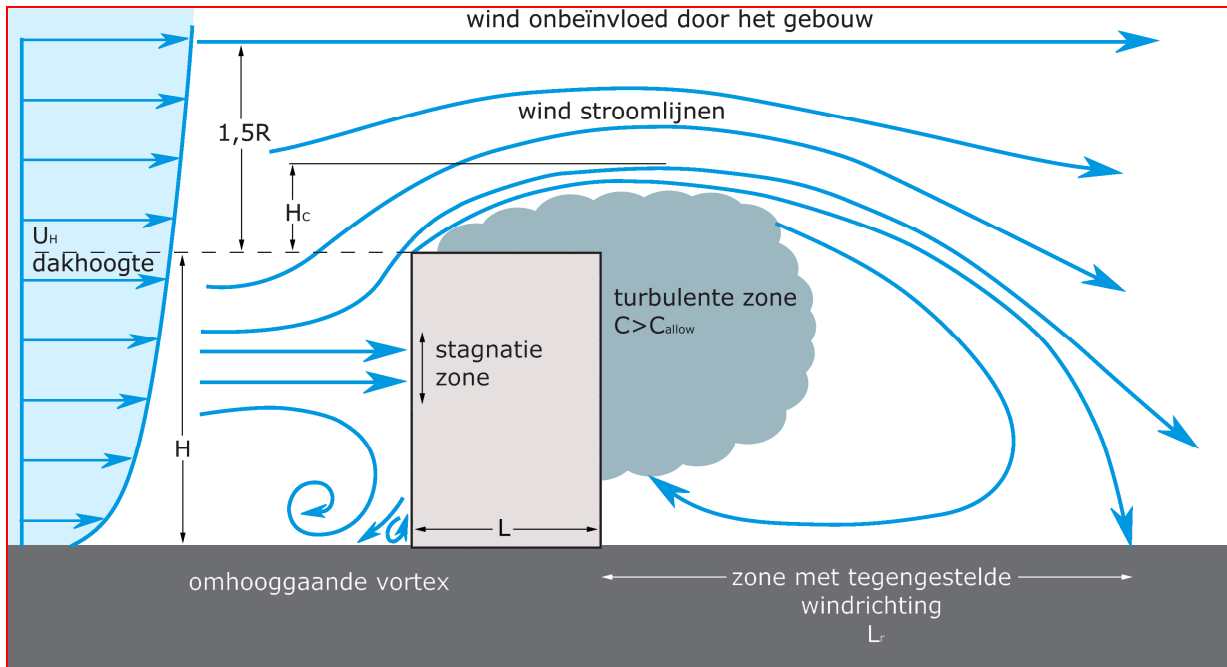
De stroomlijn patronen zijn onafhankelijk van de windsnelheid en hangen hoofdzakelijk af van de gebouwvorm en de windzijdige condities. Door de driedimensionale stroming om een gebouw zijn de vorm en de grootte van de turbulente zone niet constant over het oppervlak.

De wind in de dakzone wordt beïnvloed door het gebouw zelf. De stroming versnelt als de stroomlijnen bovenwaarts afbuigen en vertraagt bij de neerwaartse afbuiging. De hoogte boven het dak

waar het gebouw de stroming niet meer beïnvloedt is $\approx 1,5R$. Aangenomen mag worden dat de grootste belemmering bij $R \approx 0,75R$ is verdwenen.

Bij een niet loodrechte aanstroming van de wind ontstaan meer complexe stromingspatronen. Vanaf de windzijdige dakkanten ontwikkelen zich sterke wervelingen, waardoor in deze zone negatieve drukken ontstaan.

In de zone aan de lijzijde van een gebouw, het zogenaamde *zoggebied*, treedt een lage gemiddelde windsnelheid en een hoge turbulentie op. De lengte van deze zone $L_R \approx 1,0R$ op voetgangsniveau.



Figuur 15.3 – Stromingspatroon rondom een alleenstaand rechthoekig gebouw.

Voor een 8 verdiepingen hoog gebouw uit figuur 15.2 met een voetafdruk van 50*25 m en een hoogte van 28 m, dat onbelemmerd en loodrecht wordt aangestroomd door wind uit het Westen, kan volgens deze methode de maat R als volgt worden berekend:

$$H = 28\text{m} \quad - \quad B_S = 28\text{m} \quad - \quad B_L = 50\text{m}$$

$$R = 28^{0,67} \cdot 50^{0,33} = 34\text{m} \approx 1,2H \quad \text{en} \quad 1,5R = 1,8H \approx 51\text{m} \quad - \quad L_R = R = 34\text{m}$$

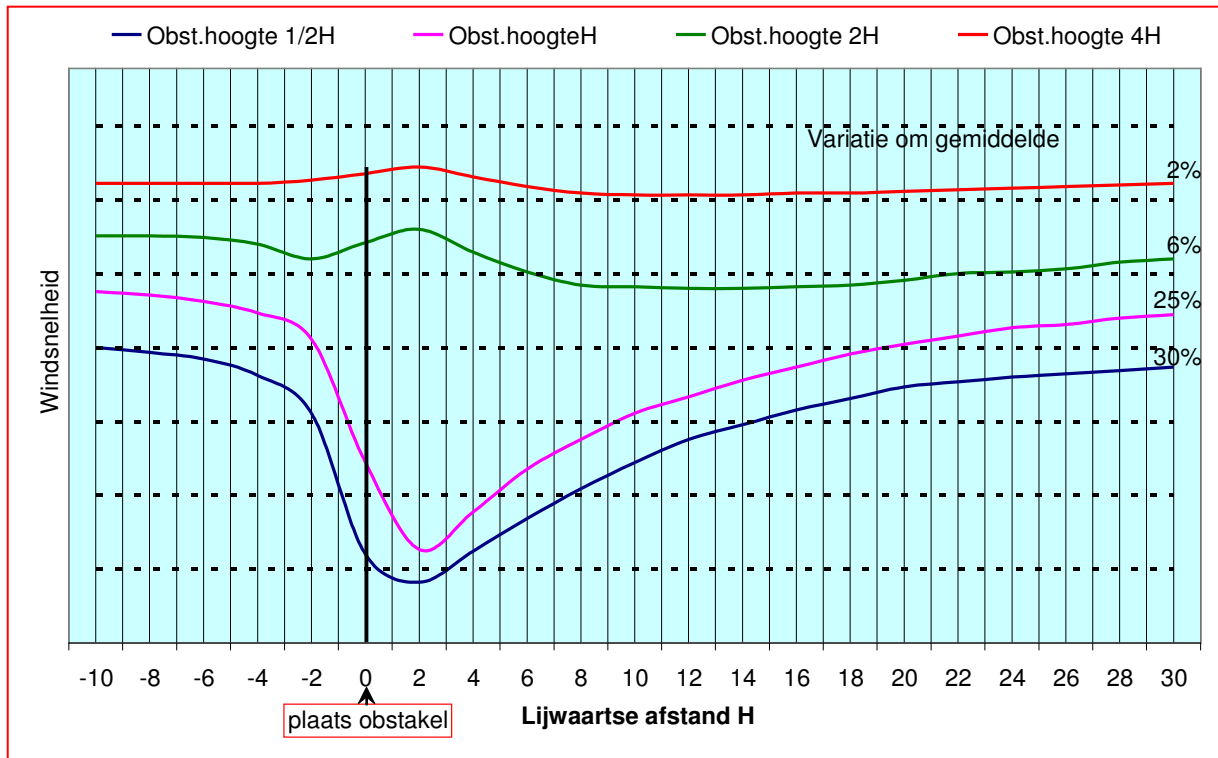
Conclusies:

- De lijzijdige gebouwen ondervinden op dakhöhe geen enkele invloed meer als ze 51 m boven het betreffende gebouw uitsteken. In het betreffende testgebied is dit geen optie.
- Het zoggebied heeft op voetgangsniveau een lengte van 34 m. Voor windhinder is dit een belangrijk gegeven, maar voor de windinvloed op dakhöhe geeft dit niet de gewenste informatie.

Figuur 15.4 ontleend aan “Windklimaat van Nederland” (Wieringa J en Rijkoort P.J. 1983) geeft ter zake betere kwantitatieve informatie. De obstakelwerking op de gemiddelde windsnelheid wordt hier beschreven voor verschillende hoogten z in afhankelijkheid van de afstand x benedenwinds van het obstakel. Beide grootheden z en x worden in dit geval uitgedrukt in eenheden van obstakelhöhe H, omdat H grotendeels bepaalt hoe lang het zog is en tot welke hoogte de invloed zich uitstrekt.

De lijwaartse afstand van 40 m, volgens figuur 15.2 komt overeen met $(40/28=) 1,4 H$. Figuur 15.4 maakt duidelijk dat voor een lijwaarts gebouw met dezelfde hoogte H de windsnelheid dan nog maar een fractie is van die van de onbelemmerde wind. Voor een enigszins hersteld windprofiel zou de lijwaartse afstand $\gg 10 H$ moeten zijn en dat is in een stedelijke omgeving geen optie.

Als de hoogte van het lijwaartse gebouw $2 H$ zou zijn is de windsnelheid op dakhöhe ongeveer gelijk aan die van de onbelemmerde wind. Globaal komt dit overeen met de AHSRAE formule die hiervoor $1,8 H$ berekent.

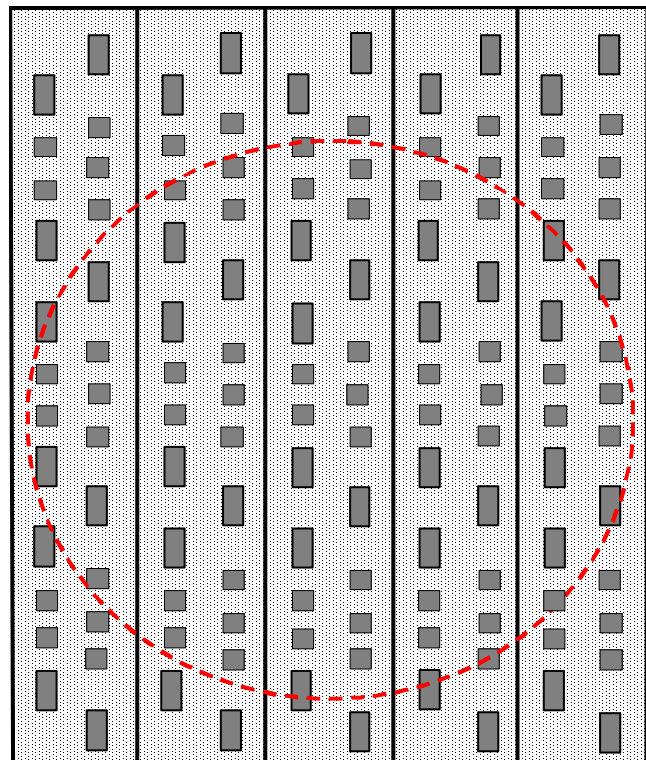


Figuur 15.4 – Verloop van de windsnelheid na een obstakel

Figuur 15.5 laat een stedenbouwkundige variant zien waarbij de gebouwen in Noord-Zuid richting ten opzichte van elkaar zijn versprongen. De gebouwen krijgen hierdoor in theorie bij Westen- en Oostenwind een groter vrij windveld. De afstand tussen de gebouwen wordt vergroot van 40 m naar 115 m, voor gebouwen met 8 verdiepingen en een hoogte van 28 m overeenkomend met $(115/28=) 4,1 H$.

Figuur 15.4 laat zien dat het windprofiel zich dan nog lang niet heeft hersteld; deze ingreep heeft dus weinig effect. Bovendien is het de vraag of door de onregelmatige bebouwing de verstoring van het windprofiel niet ernstiger is dan bij de regelmatige bebouwing volgens figuur 15.2.

Tenslotte brengt deze variant een groter oppervlak en een ander stratenpatroon met zich mee.

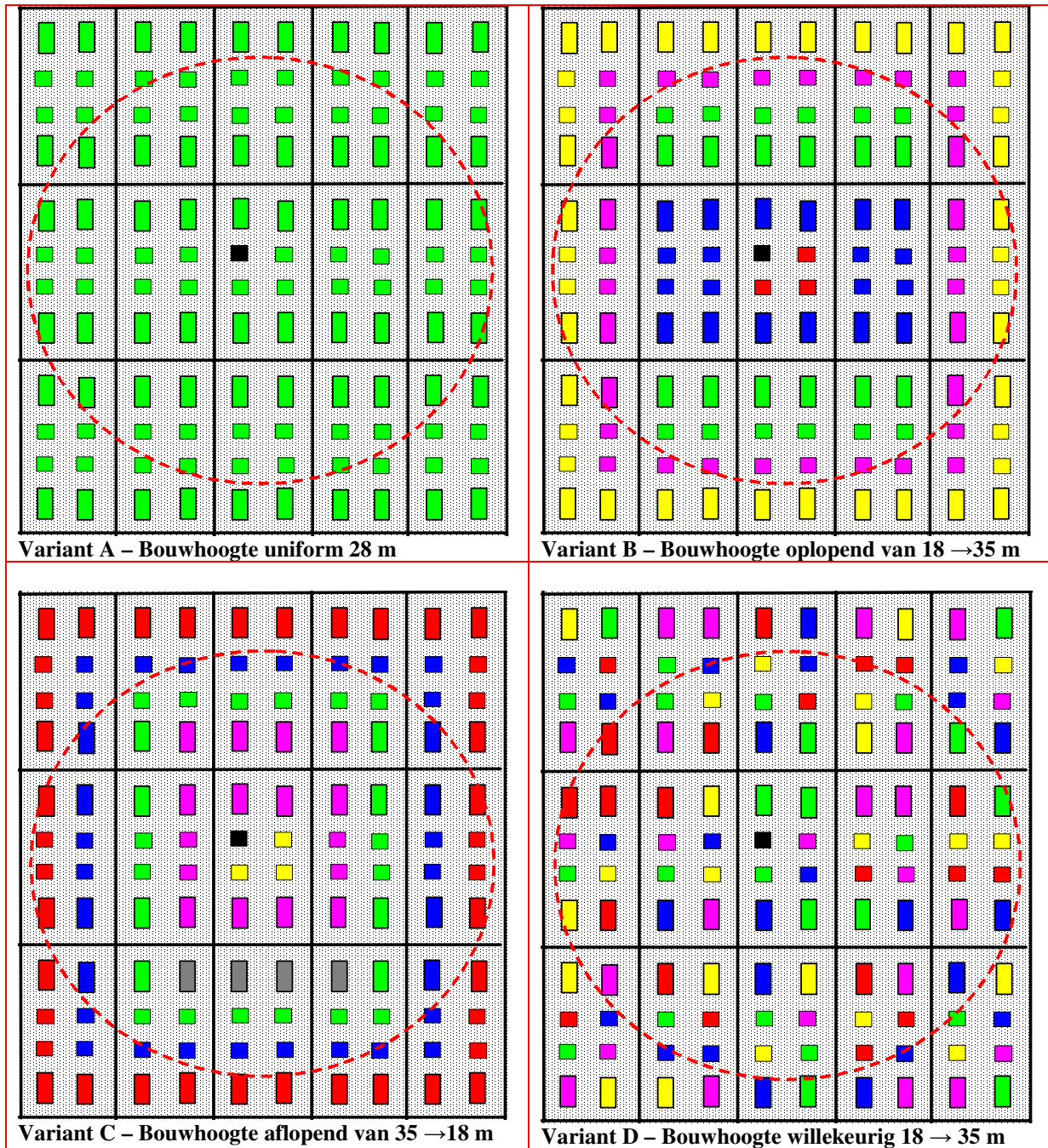


Figuur 15.5 – Stedenbouwkundige variant

15.5 Invloed van de bebouwingsdichtheid

Als de obstakels dicht op elkaar staan, zoals in figuur 15.2, heeft de gemiddelde windstroming boven de obstakels nauwelijks meer verband met stroming boven de grond. In dit geval spreekt men van een gesloten ruwheid, waarbij geen sprake meer is van alleenstaande gebouwen; zie ook hoofdstuk 5.

Om de effectiviteit van het Ventedak[®] in dergelijke situaties te onderzoeken zou het gewenst zijn enkele stedenbouwkundige profielen aan een beproeving in de windtunnel onderworpen. Uitgaande van een gemiddelde bouwhoogte van 28 m (8 verdiepingen) zijn hiervoor de varianten volgens tabel 15.1 geselecteerd; zie figuur 15.6:



Figuur 15.6 – Potentiële testvarianten Windtunnel

Verklaring		Varianten
	H = 6 m	A. Uniforme bouwhoogte van 28 m – 8 verdiepingen
	H = 7 m	B. Bouwhoogte naar de binnenkant van het testgebied oplopend van 21 naar 35 m
	H = 8 m	C. Bouwhoogte naar de binnenkant van het testgebied aflopend van 35 naar 21 m
	H = 9 m	D. Bouwhoogte willekeurig tussen 18 en 35 m (6 en 10 verdiepingen)
	H = 10 m	
	testlocatie	

Tabel 15.1 – Te onderzoeken varianten

15.6 Windtunnelmetingen

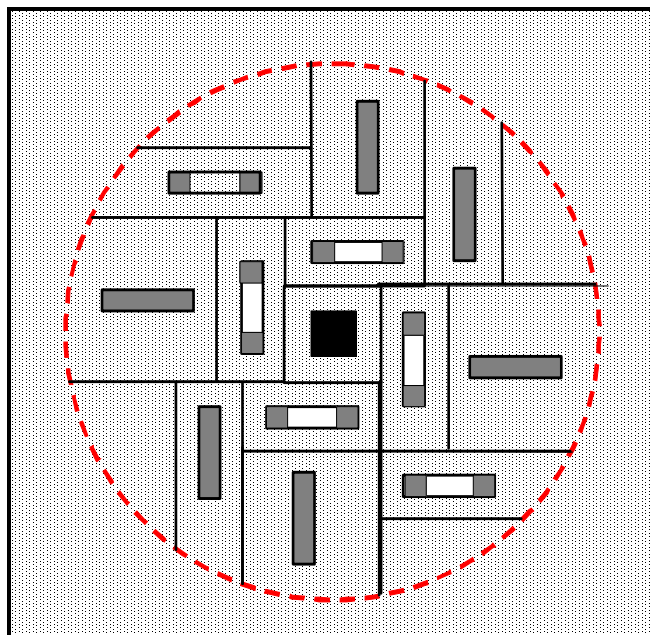
Om de geselecteerde varianten van het Ventecdak® in de windtunnel te onderzoeken zou een veel kleiner model van het gebouw nodig zijn dan het model 1:100 dat voor de overige metingen werd gebruikt. In een dergelijk klein model is het echter niet mogelijk de noodzakelijke drukopnemers en NTC thermistors in te bouwen. Bovendien zouden de kosten hiervan prohibitief hoog zijn. Een mogelijke oplossing, waarbij het bestaande model 1:100 wordt gebruikt, zou inhouden dat slechts een klein, en niet representatief deel van de gewenste stedenbouwkundige invulling zou kunnen worden opgenomen.

Gekozen is daarom voor een min of meer willekeurige stedenbouwkundige invulling volgens figuur 15.7, met bouwblokken van 10 x 40 m waartussen het testmodel is opgesteld. Het testmodel heeft een voetafdruk van 20 x 20 m en is 50 m hoog exclusief Ventecdak®.

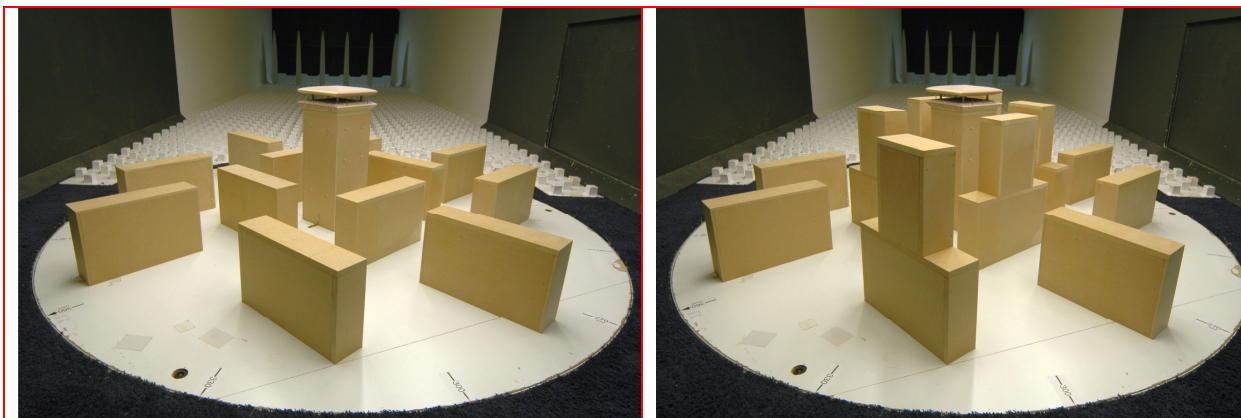
De volgende situaties zijn onderzocht:

- Omliggende bebouwing met bouwblokken van 25 m hoog – figuur 15.8 links
- Omliggende bebouwing met bouwblokken van 50 m hoog – figuur 15,8 rechts

Voor de resultaten van de metingen wordt verwezen naar hoofdstuk 17.



Figuur 15.7 – Geteste stedenbouwkundige context



Figuur 15.8 – Ventecdak® met stedenbouwkundige omgeving in de windtunnel

15.7 Vervolgonderzoek

Vervolgonderzoek is nodig om de randvoorwaarden voor de toepassing van het Ventecdak® en de prestaties hiervan in diverse stedenbouwkundige omgevingen met behulp van CFD simulaties en windtunnelonderzoek nader te analyseren.

16. NUMERIEKE STROMINGSSIMULATIE VENTECDAK[®]

16.1 Samenvatting

Na een korte inleiding over het karakter en de mogelijkheden van CFD wordt een overzicht gegeven van de voor het Ventecdak[®] uitgevoerde simulaties. Onderzocht zijn de uitvoering en de optimale geometrische verhoudingen van het dak, in eerste instantie bij gesloten venturi-ejector en daarna ook met actieve venturi-ejector, dus met een secundaire luchtstroom uit het gebouw.

De intuïtieve aanname bij het conceptueel ontwerp van de pseudo-venturi in paragraaf 11.6 dat geleidevinnen en zijkleppen noodzakelijk zouden zijn wordt door de simulaties niet bevestigd. Optimale prestaties van het Ventecdak[®] worden gerealiseerd bij de meest eenvoudige constructie, dus zonder geleidevinnen en zijkleppen. Het Ventecdak[®] wordt hierdoor richtingonafhankelijk, een niet te onderschatten voordeel.

De optimale hoogte van het bovenkanaal ligt tussen 1,0 en 2,0 m, en hangt in hoge mate af van de verhouding tussen de lichtsnelheid in de venturi-ejector en de windsnelheid ter plaatse van de dakrand. Voor lage gebouwen en lage windsnelheden is een grotere hoogte nodig dan voor hoge gebouwen en hoge windsnelheden. Deze hoogtemaat dient bij een specifiek ontwerp te worden vastgesteld op basis van de gewenste prestatie van de venturi-ejector en architectonische randvoorwaarden.

De breedte van een gebouw heeft invloed op de overdruk en onderdruk op dakhoogte. Bij een grotere breedte neemt de absolute waarde van de onderdruk in het bovenkanaal drastisch af als gevolg van het wind blokkeer effect. Op de overdruk ter plaatse van de luchtinlaat heeft de breedte van een gebouw minder invloed.

Een vergelijking van de numeriek gesimuleerde en de in de windtunnel gemeten winddrukcoëfficiënten laat zien dat de CFD simulaties een hoge mate van betrouwbaarheid hebben. Dit is niet in het minst te danken aan de grote deskundigheid en betrokkenheid van Bert Blocken en Twan van Hooff van de TU/e.

Het Ventecdak[®] is een dominant architecturaal element en de architect heeft voor het ontwerp een grotere vrijheid nodig dan de tot dusver onderzochte dakvorm hem geeft. Vervolgonderzoek is nodig voor daken met verschillende kromtestralen en omvang van het bovendak in relatie met het onderdak. De hiervoor vereiste CFD techniek met tijdsafhankelijke Large Eddy Simulaties kost echter extreem veel rekentijd en het was niet mogelijk deze in het financiële kader van het onderzoek uit te voeren. De eerste resultaten geven echter aan dat de prestaties van het Ventecdak[®] met gereduceerd en volledig bovendak vergelijkbaar zijn.

16.2 Inleiding CFD

Stromende fluïda, vloeistoffen en gassen, zorgen voor de overdracht van energie in klimaatinstallaties en het binnenmilieu. Stromende lucht in de gebouwde omgeving zorgt voor het transport van warmte, vocht en luchtverontreinigingen. *Computational Fluid Dynamics* (CFD) is een rekentechniek die het mogelijk maakt de beweging van en in een stroming te bestuderen. Met CFD kan in principe een rekenmodel worden geconstrueerd dat model staat voor het fysieke model dat men wil bestuderen. Dit virtuele prototype is gebaseerd op de wetten van de stromingsleer, en met behulp van de toegepaste software kunnen stromingen van vloeistoffen en gassen en gerelateerde fysische processen, zoals warmte- en stofoverdracht in beeld worden gebracht en voorspeld. De software geeft in grafische en numerieke vorm een voorspelling van de prestaties van deze bouwdelen.

Voor stromingen zijn de wetten van behoud van massa, impuls en energie van kracht, uitgedrukt in partiële differentiaalvergelijkingen PDE's. In CFD wordt het stromingsveld gediscretiseerd, onderverdeeld in een groot aantal afzonderlijke kleine cellen, het raster of grid. In elke cel worden de PDE's via algebraïsche algoritmes met behulp van computers numeriek seriematig opgelost waardoor een compleet beeld van de stroming in het betreffende stromingsveld kan worden gegenereerd.

CFD geeft snel inzicht in de werking van nieuwe concepten, die moeilijk op een andere manier kan worden verkregen. Dit is een groot voordeel bij de ontwikkeling van responsieve bouwdeelen omdat het bouwen van fysieke prototypes hiervoor erg kostbaar is. Met behulp van CFD analyse kan worden nagegaan hoe concepten en variaties hiervan zullen presteren. Met behulp van CFD kunnen snel veranderingen in processen worden voorspeld bij wijziging van randvoorwaarden. Ontwerpen kunnen hierdoor op een efficiënte wijze worden geoptimaliseerd. Fysieke prototypes kunnen dan worden gemaakt op basis van een geoptimaliseerd virtueel prototype, waardoor op tijd en geld wordt bespaard.

Voor het onderzoek *Earth, Wind & Fire* zijn met behulp van CFD virtuele prototypes de prestaties van het Ventecdak[®] geanalyseerd en geoptimaliseerd. Mede op basis hiervan is van het Ventecdak[®] een fysiek schaalmodel gebouwd voor experimenteel onderzoek –zie hoofdstuk 17. Dit schaalmodel is op zijn beurt ook weer een prototype voor het in de werkelijke bouwpraktijk te realiseren bouwdeel. Met behulp van CFD is zeker gesteld dat het geteste schaalmodel representatief is voor een Ventecdak[®] op ware grootte.

16.3 Beperkingen van CFD

“De grootste nadelen van CFD zijn de complexiteit en de gevoeligheid van de resultaten voor de te kiezen modelparameters. De gebruiker moet vele keuzes maken bij het uitvoeren van een simulatie, en deze kunnen sterk de nauwkeurigheid van de resultaten beïnvloeden. Als veilig uitgangspunt durven we te stellen dat voor CFD-resultaten niet de veronderstelling van onschuld geldt, integendeel: “Resultaten zijn fout, tot het tegendeel bewezen is”. Verificatie en validatie van CFD simulaties zijn essentieel. Voor de validatie zijn dan weer nauwkeurige metingen nodig” (Blocken, B. 2010).

Onnauwkeurige invoergegevens, een gebrekkig analytisch model, een onjuiste keuze van het raster, niet adequate software of beperkte computercapaciteit, kunnen de resultaten van een CFD simulatie sterk beïnvloeden. Deze kunnen dan ook pas betrouwbaar worden geacht, indien ze zijn gevalideerd met metingen *in situ* of aan een fysiek model.

Zoals in paragraaf 16.1 vermeld zijn de CFD simulaties voor het Ventecdak[®] gevalideerd aan de hand van metingen aan een model in de windtunnel. De betrouwbaarheid van de simulaties is hierdoor verzekerd.

16.4 Uitvoering van de CFD simulaties

De uitvoering van CFD simulaties, opstelling van het analytisch model, bepaling van het raster, discretisering van het stromingsveld en het simulatieproces inclusief visualisatie en analyse van de gegevens is een gecompliceerd proces. Kennis van het betreffende vaktechnische domein is onontbeerlijk, maar ook kennis van numerieke rekentechnieken. CFD simulaties voor het onderzoek *Earth, Wind & Fire* zijn dan ook onder auspiciën van de onderzoeker uitgevoerd door externe specialisten. Voor het in hoofdstuk 12 ontwikkelde Ventecdak[®] zijn dit prof. dr. ir. B. Blocken en ir. T.A.J. van Hooff van de Technische Universiteit Eindhoven, faculteit Bouwkunde, afdeling Building Physics and Systems, erkende specialisten op het gebied van de stedenbouwfysica.

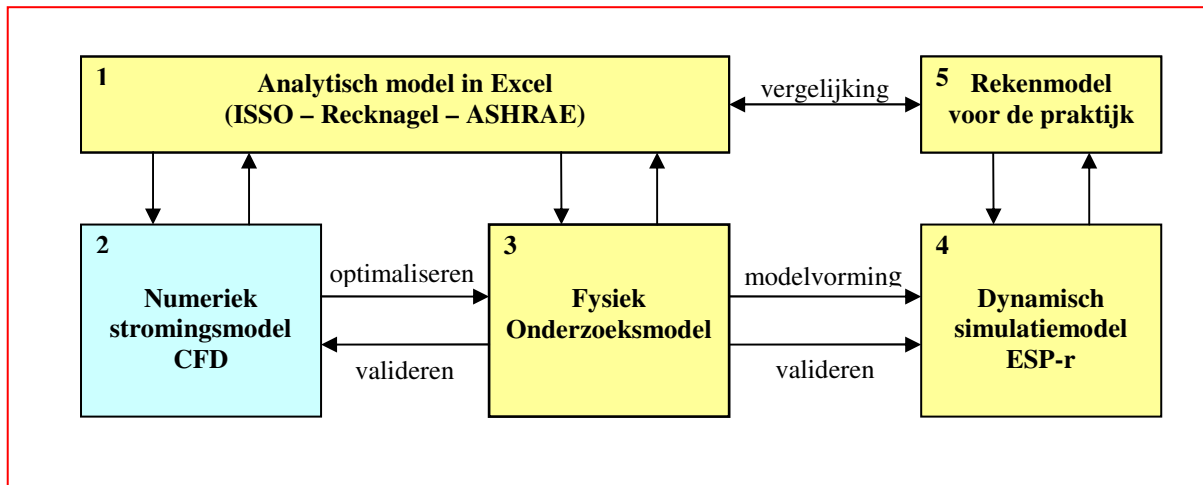
16.5 Verband met andere modellen

Voor het *Earth, Wind & Fire* concept zou het ideaal zijn de luchtstromingen buiten het gebouw en binnen het gebouw gelijktijdig te kunnen modelleren en simuleren met één model binnen hetzelfde computerdomein. Het nadeel van een aldus gekoppelde CFD simulatie is het grote verschil in de geometrische schaal van de stedenbouwkundige omgeving (1 – 5 km) en die van de ventilatieopeningen in het gebouw (0,01 – 1 m). Dit maakt een zeer omvangrijk grid met hoge resolutie noodzakelijk, hetgeen hoge computerkosten met zich meebrengt (van Hooff en Blocken 2010).

Verder heeft door beperkingen in computercapaciteit CFD (nog) niet het niveau bereikt dat nodig is voor *real-time* berekeningen. Koppeling met een dynamisch gebouwsimulatiemodel is daardoor (nog) niet mogelijk.

Het verband tussen het analytisch model in Excel, het numeriek stromingsmodel CFD, het fysieke onderzoeksmodel en het dynamisch simulatiemodel ESP-r is weergegeven in figuur 16.1. Elk model

heeft zijn eigen toepassingsgebied en door gegevensuitwisseling tussen de modellen kan in principe een hoge mate van betrouwbaarheid worden gerealiseerd.



Figuur 16.1 – Modelleren - Simuleren – Kalibreren - Valideren

16.6 Analytisch rekenmodel Ventecdak®

In hoofdstuk 11 is een analytisch rekenmodel ontwikkeld dat kwalitatief inzicht geeft in de werking van het concept en een kwantitatieve, zij het speculatieve benadering van de prestaties mogelijk maakt. Het model is gebaseerd op de aanname dat het beschikbare drukverschil aan de windzijde en de lijzijde van een gebouw, uitgedrukt in het verschil in winddrukcoëfficiënten ($C_{p_w} - C_{p_l}$), overeen komt met het drukverlies Δp over de pseudo-venturi. Omdat het om een open systeem gaat zal de aanstromende wind slechts gedeeltelijk door de keel van de pseudo-venturi stromen, maar door de tegendruk gedeeltelijk zijwaarts ontwijken. Op basis van een rekenvoorbeeld werd een optimum van de contractiecoëfficiënt vastgesteld waarbij een maximale prestatie van de venturi-ejector werd gerealiseerd –zie paragraaf 11.8. Zowel de beschikbare verschuldruk ($C_{p_w} - C_{p_l}$) als het drukverlies over de pseudo-venturi berust op schattingen waardoor de rekenresultaten onzeker zijn. Met behulp van een CFD simulatie, gevalideerd door metingen in de windtunnel, zijn verschillende varianten en geometrische parameters van het Ventecdak® geoptimaliseerd op de te realiseren onderdruk in de keel van de pseudo-venturi, uitgedrukt in de C_p -waarde.

16.7 Initiële CFD simulaties Ventecdak®

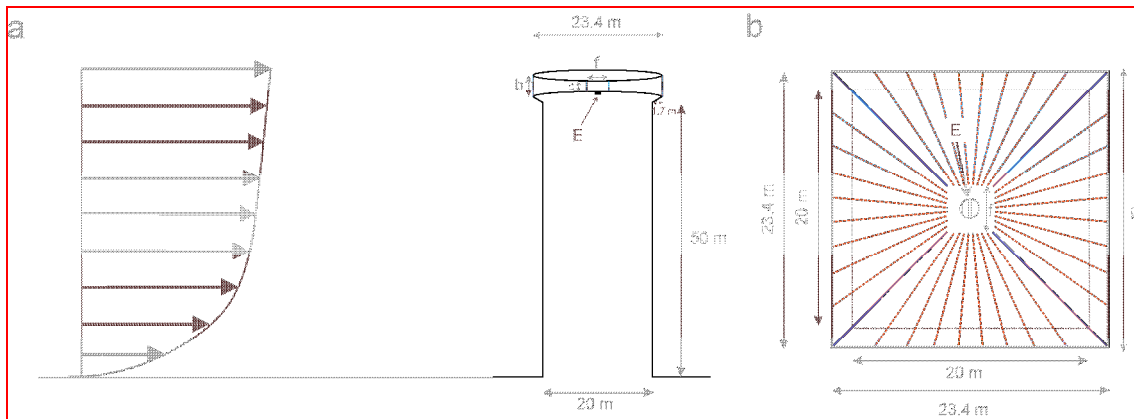
16.7.1 Geometrie en parameters

De geometrie van het simulatiemodel is weergegeven in figuur 16.2. Het onderzochte gebouw is 50 m hoog en heeft een voetafdruk van 20 x 20 m. Inclusief de dakoverstekken van 1,7 m zijn de buitenafmetingen van het dak 23,4 x 23,4 m.

Op basis van de in deze paragraaf beschreven initiële simulaties zijn de parameters bepaald die de grootste invloed hebben op de overdrukken en de onderdrukken. Deze initiële simulaties zijn niet gevalideerd aan de hand van windtunnelmetingen en dienen dan ook enkel om de invloed van bepaalde parameters kwalitatief te onderzoeken. Om de optimale configuratie van het Ventecdak® te kunnen bepalen is de invloed van deze parameters vervolgens in detail geanalyseerd. De betreffende parameters zijn:

1. Aantal verticale vinnen in het bovenkanaal –zie (1) in figuur 11.6;
2. Aanwezigheid geleidende zijkleppen in het bovenkanaal –zie (2) in figuur 11.6;
3. Lengte van de verticale vinnen - bepaalt horizontale contractieverhouding g/f ;
4. Verticale contractieverhouding van het bovenkanaal (b/c);
5. Hoogte van het bovenkanaal (c);
6. Gebouwbreedte (B);
7. Gebouwhoogte (H).

De verticale vinnen zijn in het oorspronkelijke ontwerp voorzien om voor de geleiding van de wind door de keel van de pseudo-venturi te zorgen. Het aantal aanwezige vinnen bepaalt hierbij de mate van deze geleiding. Hoe groter het aantal vinnen, des te sterker de geleiding, en des te minder uitgesproken –naar verwachting- de separatie van de wind, en het drukverlies over de pseudo-venturi. Deze vinnen hebben echter eveneens een blokkeer effect op de wind waardoor het luchtdebiet tussen de vinnen en dus ook de lichtsnelheid in de keel van de pseudo-venturi zal afnemen (Blocken et al. 2008). Omwille van deze potentieel belangrijke effecten is veel aandacht besteed aan CFD simulaties voor diverse configuraties van de verticale vinnen met betrekking tot aantal en lengte daarvan, en het effect van de zijkleppen.



Figuur 16.2 – Geometrie van het simulatiemodel

De prestaties van het Ventecdak[®] zijn getoetst aan de hand van (1) de overdruk ter plaatse van de luchtinlaat en (2) de onderdruk in het midden van het bovenkanaal, ter plaatse van de venturi-ejector – zie figuur 16.3. Om de drukken onafhankelijk te maken van de referentiewindsnelheid zijn ze uitgedrukt in C_p -waarden volgens formule (16.1)

$$C_p = \frac{p - p_0}{0,5 \cdot \rho \cdot U_{ref}^2}$$

(16.1)

Waarin

C_p	=	winddrukcoëfficiënt	[-]
p	=	statische druk aan de opening	[Pa]
p_0	=	referentie statische druk	[Pa]
U_{ref}	=	windsnelheid op dakrandhoogte	[m.s ⁻¹]

16.7.2 Numeriek model en randvoorwaarden

De simulaties werden uitgevoerd met de Reynoldsgemiddelde Navier-Stokesvergelijkingen (RANS), aangevuld met het realizable k - ϵ turbulentiemodel. De berekeningen worden uitgevoerd met tweede-orde discretisatieschema's. Druk-snelheidskoppeling wordt verwezenlijkt met het SIMPLE-algoritme, drukinterpolatie gebeurt met het standaardalgoritme.

De referentiewindsnelheid op dakrandhoogte ($z = 50$ m) is voor deze simulaties gelijk genomen aan $U_{ref} = 7,58$ m.s⁻¹. Deze is berekend op basis van de formule (5.1) uit hoofdstuk 5.

$$U_z = \frac{u^*}{K} \ln\left(\frac{z + z_0}{z_0}\right)$$

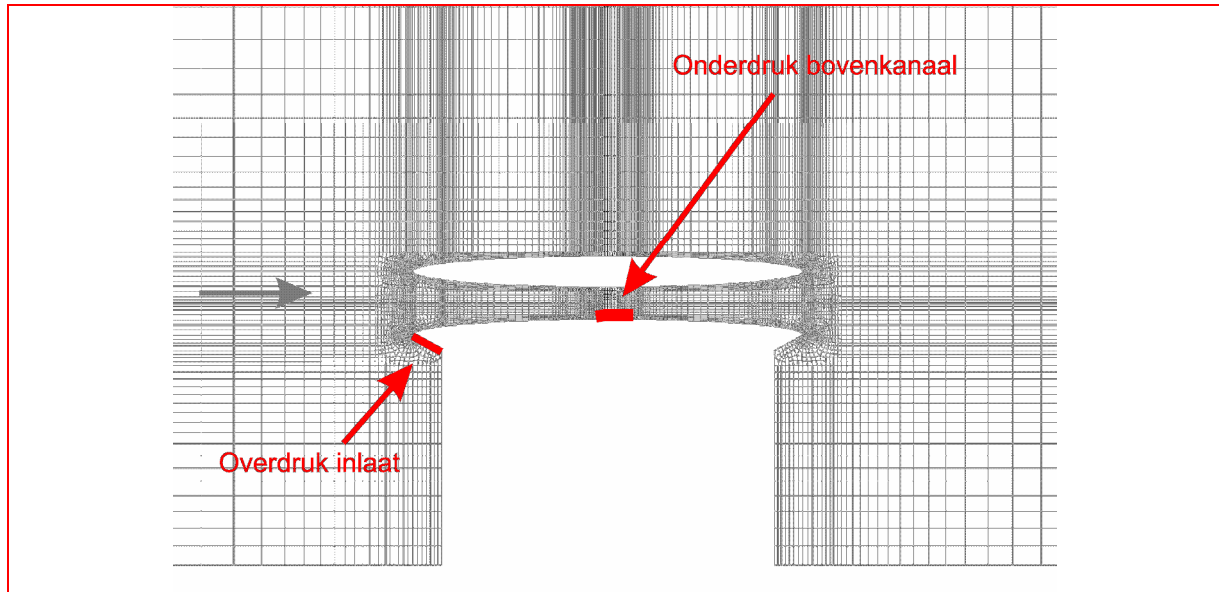
(5.1)

Waarin (volle schaal)

U_z	=	windsnelheid op hoogte z	[m.s ⁻¹]
u^*	=	wrijvingsnelheid :	0,690 [m.s ⁻¹]

$$\begin{aligned} K &= \text{von Karmanconstante} : && 0,42 \quad [-] \\ z &= \text{hoogte boven de grond} : && 50 \quad [\text{m}] \\ z_0 &= \text{aerodynamische ruwheidslengte} : && 0,5 \quad [\text{m}] \end{aligned}$$

De longitudinale turbulentie-intensiteit I_U varieert van 30% op 2 m hoogte tot 5% op gradiënthoogte. De turbulente kinetische energie k is berekend met behulp van de formule: $k = 1.5(I_U U)^2$ en de turbulente dissipatiesnelheid $\varepsilon = (u_{ABL}^*)^3 / \kappa(y + y_0)$. In deze formules is y de verticale coördinaat (hoogte boven het maaiveld), U de snelheid op hoogte y , y_0 de aerodynamische ruwheidslengte, κ de von Karman constante ($\kappa = 0.42$) en u_{ABL}^* de wrijvingsnelheid van de atmosferische grenslaag. De wrijvingssnelheid is gerelateerd is aan het logaritmisch snelheidsprofiel.



Figuur 16.3 – Detail Ventecdak[®] met rekenraster

Een volledig verslag van de simulaties is opgenomen in het onderzoeksrapport “*Evaluatie en optimalisatie van de werking van het Bronsemadak – deel I*” (Blocken, B. en van Hooff, T. 2010)

16.7.3 Model gebouwgeometrie en rekenraster

De afmetingen van het rekendomein voor de CFD simulaties zijn $1020 \times 1020 \times 325 \text{ m}^3$ (L x B x H). De ruwheid van de omgeving is gekarakteriseerd door een aerodynamische ruwheidslengte z_0 van 0,5 m –zie paragraaf 5.3.

Het rekendomein is gediscrètiseerd met een gestructureerd ruimteraster van zesvlakige cellen. De geschiktheid van het raster is aangetoond met behulp van een gevoeligheidsanalyse waarvoor vier rasters zijn getest van respectievelijk 264.956 cellen, 920.256 cellen, 1.666.580 cellen en 6.107.136 cellen. Voor de verschillende parameters –zie paragraaf 16.7, zijn rasters gekozen die voldoende rasteronafhankelijk zijn (1.67 miljoen cellen).

In de nabijheid van het Ventecdak[®] is een hogere gridresolutie toegepast om de stromingsgradiënten in dit gebied in detail te kunnen reproduceren –zie figuur 16.3.

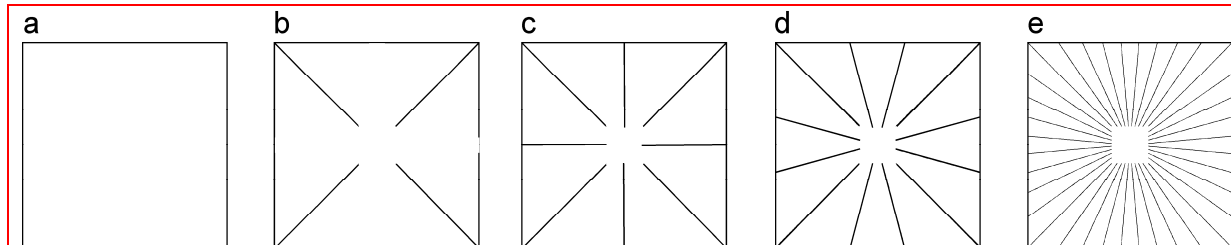
16.7.4 Parameteranalyse 1: Aantal verticale vinnen in het bovenkanaal

De eerste set simulaties ter bepaling van de winddrukcoëfficiënt C_p is uitgevoerd met:

- Vaste waarden voor de geometrische parameters volgens figuur 16.2 $c = 2 \text{ m}$ en $b = 4 \text{ m}$; de contractiecoëfficiënt $R = b/c = 2,0$
- Variabele waarden voor dakconfiguraties zonder vinnen (a) en met vinnen om de 90° (b), 45° (c), 30° (d) en 10° (e) -zie figuur 16.4.
- Drie windrichtingen, respectievelijk 0° , $22,5^\circ$ en 45°
- Gesloten venturi-ejector, dus zonder secundaire luchtstroom uit het gebouw

Enkele resultaten van deze parameteranalyse zijn weergegeven in tabel 16.1. De C_p -waarden blijken het laagst te zijn voor de situatie zonder vinnen, en weinig gevoelig voor de windrichting. De C_p -waarden zijn aanzienlijk hoger als vinnen worden toegepast. Door de toenemende luchtweerstand van het bovenkanaal zoekt de wind de weg van de minste weerstand en stroomt een deel van de wind niet door de keel van de pseudo-venturi maar ontwijkt zijdelings, het wind blokkeer effect - zie paragraaf 16.6.

Conclusie: Verticale vinnen hebben een negatief effect op de werking van het Venteddak[®].

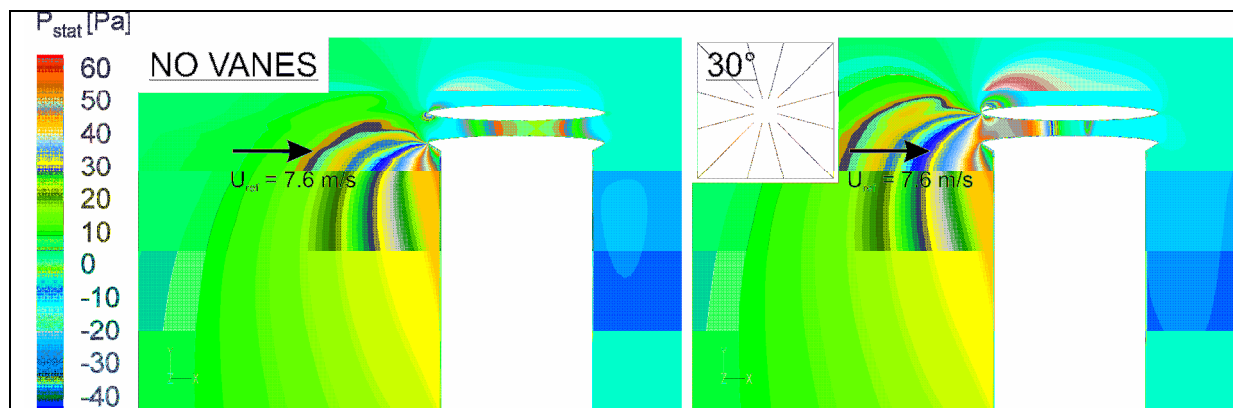


Figuur 16.4 – Horizontale doorsnede Venteddak[®] zonder, en met vinnen in verschillende configuraties

Configuratie vinnen	Cp-waarden voor windrichting		
	0°	22.5°	45°
Geen vinnen	-0.94	-0.91	-1.00
Vinnen om de 90°	-0.11	-0.14	-0.06
Vinnen om de 45°	-0.06	-0.20	-0.06
Vinnen om de 30°	-0.07	-0.26	-0.09
Vinnen om de 10°	-0.28	-0.31	-0.14

Tabel 16.1 – Cp-waarden voor verschillende varianten en drie windrichtingen

De invloed van de vinnen en van het wind blokkeereffect is ook te zien in figuur 16.5 waarin de contouren van de statische druk zijn aangegeven voor de variabele configuraties (a) en (d). De drukval in het bovenkanaal illustreert de weerstand die de stroming daar ondervindt; deze is veel groter bij aanwezigheid van vinnen.



Figuur 16.5 – Drukcontouren in het Venteddak[®]

16.7.5 Parameteranalyse 2: Geleidende zijkleppen in het bovenkanaal

Om de stroming te richten zijn in het concept van paragraaf 11.6 zijkleppen voorzien die in de windrichting worden geopend. Hierdoor zou het concept in principe min of meer onafhankelijk van de windrichting kunnen werken. De kleppen zorgen ervoor dat de wind gedwongen wordt door het bovenkanaal te stromen waardoor dit min of meer als een echte venturi zou kunnen functioneren. Het effect van deze kleppen is als parameter 2 onderzocht.

De resultaten van deze analyse wijzen uit dat bij toepassing van vinnen de zijkleppen weliswaar het venturi-effect versterken maar de C_p -waarden zijn in alle gevallen hoger dan bij parameteranalyse 1 zonder vinnen en dus ook zonder zijkleppen volgens zie tabel 16.1.

Conclusie: Zonder verticale vinnen is toepassing van zijkleppen niet relevant.

16.7.6 Parameteranalyse 3: Lengte van de verticale vinnen

Door verlenging van de verticale vinnen wordt de keel van de pseudo-venturi vernauwd, waardoor de snelheid hierin potentieel hoger wordt, maar waardoor tevens het drukverlies en het inherente wind blokkeer effect toeneemt. De simulatie wijst uit dat deze twee tegengestelde effecten elkaar in evenwicht houden en nauwelijks invloed hebben op de Cp-waarde.

Conclusie: Zonder verticale vinnen is de lengte hiervan niet relevant

Voor het *Earth, Wind & Fire* concept wordt gestreefd naar een zo hoog mogelijke onderdruk in de keel van de pseudo-venturi. Parameteranalyse 1 wijst uit dat het niet zinvol is verticale vinnen toe te passen, waardoor een eventuele verlenging hiervan alsmede toepassing van zijkleppen niet relevant is. Simulaties van parameteranalyse 2 en 3 zijn dan ook voornamelijk uitgevoerd uit wetenschappelijke belangstelling ter verdieping van het inzicht in de prestaties van het Ventecdak[®].

16.7.7 Parameteranalyse 4: hoogte bovenkanaal

Omdat de sterkste onderdrukken worden gevonden bij de grootste contractieverhouding is een tweede reeks simulaties uitgevoerd met een contractieverhouding $b/c = 5:1$ en is de hoogte van het bovenkanaal gevarieerd van de oorspronkelijke 0,5 m tot de volgende waarden.

Figuur 16.8 →	a	b	c	d
Contractieverhouding	5,0	5,0	5,0	5,0
Hoogte bovenkanaal	0,5 m	1,0 m	2,0 m	4,0 m

Bij de grotere hoogten leidt dit tot een sterk veranderde dakvorm –zie figuur 16.10.



Figuur 16.6 - Contractieverhoudingen $b/c = 5:1$ en verschillende hoogten bovenkanaal

De resultaten van deze analyse zijn weergegeven in tabel 16.4. De variant met vinnen is ook hier weggelaten omdat deze in alle gevallen hogere waarden voor Cp oplevert dan de variant zonder vinnen –zie paragraaf 16.9.1. De optimale variant is die met een hoogte van het bovenkanaal van 1,0 m. Dit is een gelukkige omstandigheid omdat een hoogte $< 1,0$ m uit praktische overwegingen nauwelijks in aanmerking komt en hoogten $> 1,0$ m architectonisch merkwaardige vormen opleveren. De positieve Cp-waarde ter plaatse van de inlaat blijft bij configuratie 16.8b vrijwel ongewijzigd t.o.v. parameteranalyse 1- zie paragraaf 16.8.1.

(NB: Deze serie simulaties is niet in de windtunnel gevalideerd)

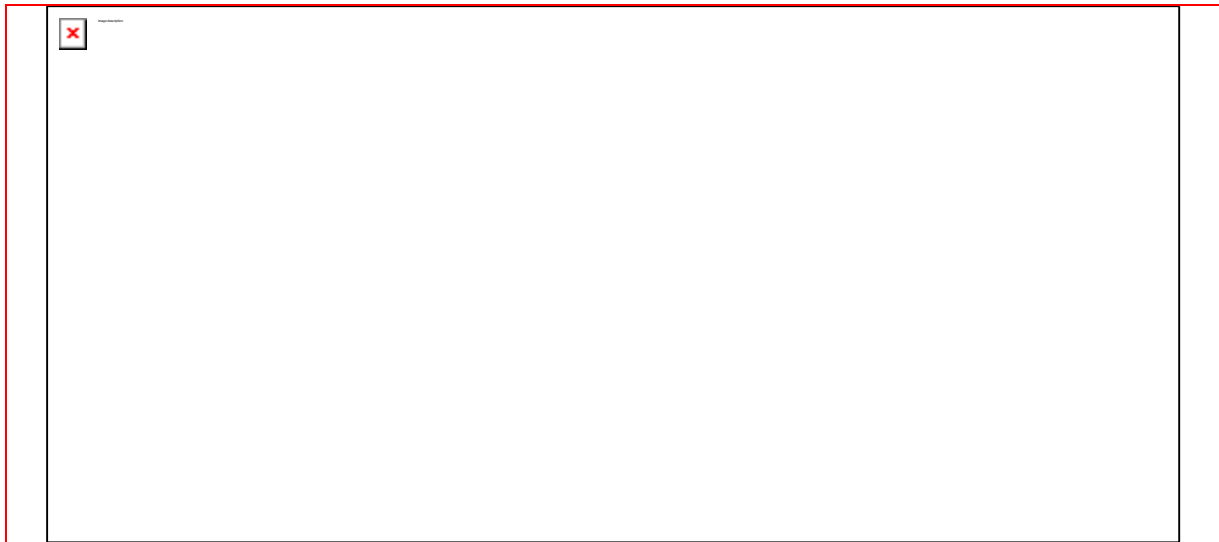
Configuratie met $b/c = 5:1$		Cp bij windrichting		
Figuur nr.	Hoogte bovenkanaal	0°	$22,5^\circ$	45°
16.8a	0,5 m	-1.70	-1.82	-1.90
16.8b	1,0 m	-2.05	-2.10	-2.10
16.8c	2,0 m	-2.02	-2.07	-2.10
16.8d	4,0 m	-1.79	-1.93	-1.99

Tabel 16.4 – Cp-waarden voor verschillende hoogten van het bovenkanaal bij 3 windrichtingen

16.7.8 Parameteranalyse 5: contractieverhouding

Bij de voorgaande simulaties leverde een verticale contractieverhouding van 5:1 bij een hoogte van het bovenkanaal van 1,0 m de sterkste onderdruk- zie tabel 16.3 en 16.4. Nagegaan is of dit resultaat met grotere contractieverhoudingen nog te verbeteren is. Tabel 16.5 laat het resultaat van deze simulaties zien voor verschillende contractieverhoudingen bij een hoogte van het bovenkanaal van 1,0 m. Er ligt een duidelijk optimum bij een contractieverhouding van 9:1 /11:1. Hogere waarden geven geen beter resultaat en leveren merkwaardige dakvormen op, die uiteraard ter beoordeling zijn van de architect – zie figuur 16.11.

(NB: Deze serie simulaties is niet in de windtunnel gevalideerd)



Figuur 16.7 – Dakvormen bij contractieverhoudingen 3:1, 9:1 en 21:1 en hoogte bovenkanaal 1,0 m

	Verticale contractieverhouding bij windrichting 0 ⁰						
	3:1	5:1	7:1	9:1	11:1	15:1	21:1
Figuur 16.9 -	a	-	-	b	-	-	c
Cp-waarde	-1.25	-2.02	-2.45	-2.64	-2.73	-2.58	-2.53

Tabel 16.5 – Cp-waarden voor contractieverhoudingen 3:1 → 21:1, geen vinnen, hoogte bovenkanaal 1,0m

16.7.9 Parameteranalyse 6: gebouwgeometrie

De voorgaande simulaties zijn uitgevoerd voor een gebouwgeometrie volgens figuur 16.2. Om de invloed van andere geometrische verhoudingen op de prestaties van het Ventecdak[®] te bepalen zijn verdere simulaties uitgevoerd. Basis voor deze simulaties is **niet** het geoptimaliseerde dak, maar een dak met de volgende kenmerken:

- Verticale vinnen om de 90° en geleidende zijkleppen– zie tabel 16.1
- Hoogte bovenkanaal 2,0 m –zie tabel 16.4
- Contractieverhouding 2:1 –zie tabel 16.5

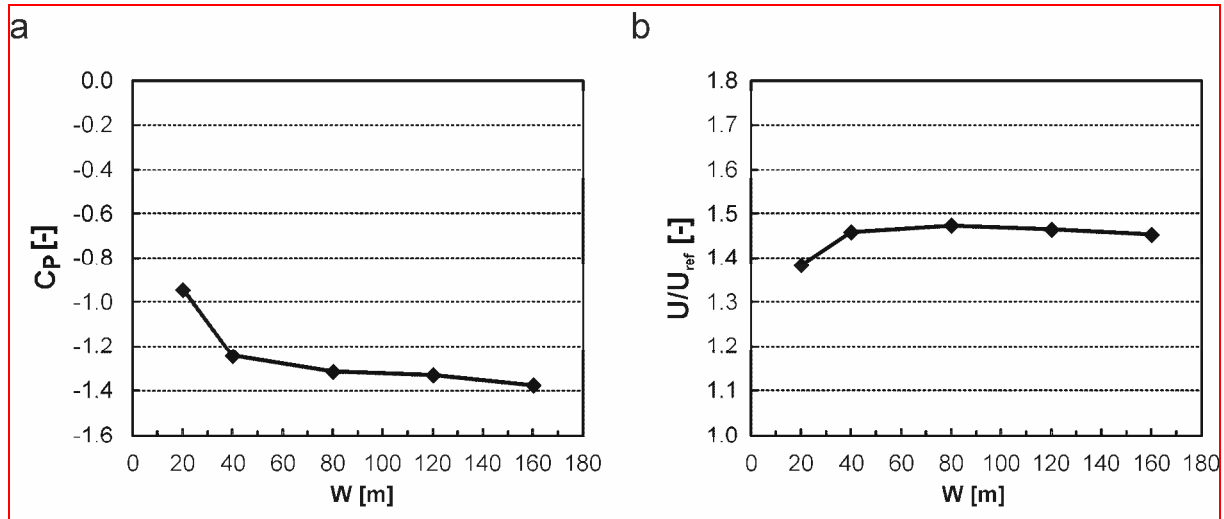
De resultaten van deze simulaties zijn weergegeven in tabel 16.6.

Cp-waarde	Windrichting	Gebouwbreedte bij H = 50 m				Gebouwhoogte bij B = 20 m			
		20	40	60	80	25	50	75	100
Overdruk	0 ⁰	1.56	1.51	1.42	1.34	1.11	1.56	1.82	1.99
Onderdruk	0 ⁰	-0.63	-0.20	0.03	-0.03	-0.51	-0.63	-0.80	-0.85

Tabel 16.6 – Cp-waarden van het niet geoptimaliseerde dak bij verschillende gebouwbreedten en –hoogten

Bij deze simulatie, met een niet-geoptimaliseerd dak, heeft de breedte van een gebouw dus een negatieve invloed op de overdruk en onderdruk op dakhoogte. Bij een grotere breedte neemt de absolute waarde van de onderdruk in het bovenkanaal drastisch af. Dit als gevolg van het wind blokkeer effect, waardoor de wind meer om en over het gebouw heen stroomt en minder door het Ventecdak[®]. Op de overdruk ter plaatse van de luchtinlaat heeft de breedte van een gebouw minder invloed. De hoogte van een gebouw is zoals te verwachten in hoge mate bepalend voor zowel de te realiseren overdruk als de onderdruk. (NB: Deze serie simulaties is niet in de windtunnel gevalideerd)

NB: Deze simulaties zijn naderhand herhaald voor het wel geoptimaliseerde dak, zonder verticale vinnen en geleidende zijkleppen. Hierbij werd een tegenovergesteld effect vastgesteld. Verbreding van het gebouw van 20m tot 40m levert in dit geval een lagere negatieve druk in de pseudo-venturi op van 31%. Verdere verbreding geeft nog enige additionele verbetering. De prestatieverbetering van het dak bij toenemende gebouwbreedte wordt toegeschreven aan een hogere overdruk aan de windzijde en een lagere onderdruk aande lijzijde achter het gebouw –zie figuur 16.8. (van Hooff e.a.2012).



Figuur 16.8 – (a) Winddrukcoëfficiënt Cp in de Venturi-ejector als functie van de gebouwbreedte –H=50m (b) Dimensieloze windsnelheidsverhouding U/U_{ref} in het midden van de pseudo-venturi

16.8 CFD simulaties gebaseerd op windtunnelmetingen

In deze paragraaf worden de CFD-simulaties gerapporteerd die zijn gebaseerd op de windtunnelmetingen. De modellen, randvoorwaarden, etc. zijn dan ook zo gekozen dat ze overeen komen met de omstandigheden in de windtunnel. De windtunnelmetingen zijn uitgevoerd voor een schaalmodel van het gebouw (1:100), de afmetingen in deze sectie zijn echter opgeschaald zodat ze overeen komen met de werkelijkheid.

16.8.1 Numeriek model en randvoorwaarden

De simulaties werden uitgevoerd met de Reynoldsgemiddelde Navier-Stokesvergelijkingen (RANS), aangevuld met het RNG k-ε turbulentiemodel (Yakhot et al. 1992). De berekeningen worden uitgevoerd met tweede-orde discretisatieschema's. Druk-snelheidskoppeling wordt verwezenlijkt met het SIMPLE-algoritme, drukinterpolatie gebeurt met het standaardalgoritme.

De referentiewindsnelheid op dakrandhoogte (z = 50m) is voor deze simulaties gelijk genomen aan de gemeten referetiewindsnelheid op dakrandhoogte in de windtunnel; U_{ref} = 10.5 m.s⁻¹. Uit de gemeten windsnelheden is een inlaatprofiel bepaald op basis van formule (5.1). Een logaritmisch windsnelheidsprofiel met u* = 0.956 m.s⁻¹ en z₀ = 0,5 m.s⁻¹ kwam nagenoeg exact overeen met het gemeten windsnelheidsprofiel in de windtunnel.

$$U_z = \frac{u^*}{K} \ln\left(\frac{z + z_0}{z_0}\right) \quad (5.1)$$

Waarin (volle schaal)

U _z	= windsnelheid op hoogte z:	[m.s ⁻¹]
u*	= wrijvingsnelheid:	0,956 [m.s ⁻¹]
K	= von Karmanconstante:	0,42 [-]
z	= hoogte boven de grond:	50 [m]

z_0 = aerodynamische ruwheidslengte: 0,5 [m]

De turbulente kinetische energie k is berekend met behulp van de formule: $k = 0.5(I_U U)^2$ en de turbulente dissipatiesnelheid $\varepsilon = (u^*)^3 / \kappa(y + y_0)$. In deze formules is y de verticale coördinaat (hoogte boven het maaiveld), U de snelheid op hoogte y , y_0 de aerodynamische ruwheidslengte, κ de von Karman constante ($\kappa = 0.42$) en u^* de wrijvingsnelheid van de atmosferische grenslaag. De wrijvingsnelheid is gerelateerd is aan het logaritmisch snelheidsprofiel.

Voor een volledig verslag wordt verwezen naar de publicaties “*A venturi-shaped roof for wind-induced natural ventilation of buildings: Wind tunnel and CFD evaluation of different design configurations*” (Van Hooff, T. e.a. 2011) en “*Computational analysis of the performance of a venturi-shaped roof for natural ventilation: Venturi-effect versus wind-blocking effect*” (Blocken, B. e.a. 2011).

16.8.2 Model gebouwgeometrie en rekenraster

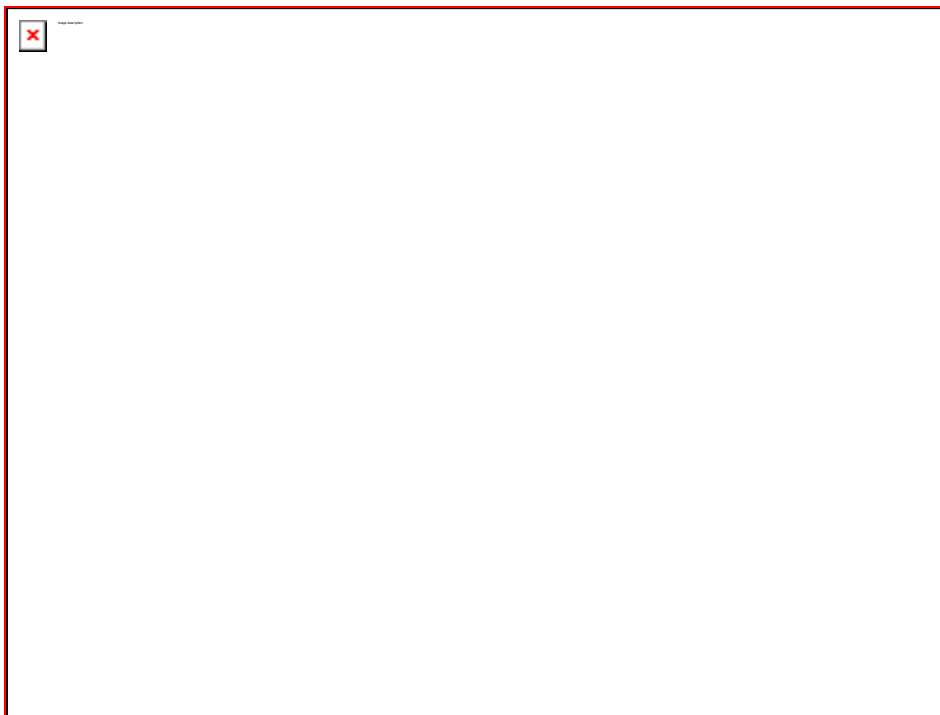
De afmetingen van het rekendomein voor de CFD simulaties zijn $1020 \times 1020 \times 300 \text{ m}^3$ (L x B x H). De ruwheid van de omgeving is gekarakteriseerd door een aerodynamische ruwheidslengte z_0 van 0,5 m –zie hoofdstuk 5.

Het rekendomein is gediscrètiseerd met een gestructureerd ruimteraster van zesvlakige cellen. De geschiktheid van de rasters is aangetoond met behulp van twee gevoeligheidsanalyses, één voor de situatie zonder vinnen, en één voor de situatie met vinnen om de 10° . Voor de eerste situatie zijn drie rasters getest van respectievelijk 549.380 cellen, 2.041.268 cellen, 4.364.688 cellen, en voor de tweede situatie zijn rasters getest van respectievelijk 2.040.644 cellen, 3.250.032 cellen en 7.107.648 cellen. Voor de verschillende parameters –zie paragraaf 16.7, zijn rasters gekozen die voldoende rasteronafhankelijk zijn (respectievelijk 2 miljoen cellen en 3.3 miljoen cellen).

In de nabijheid van het Ventecdak[®] is een hogere gridresolutie toegepast om de stromingsgradiënten in dit gebied in detail te kunnen reproduceren –zie figuur 16.3.

16.8.3 Invloed verticale vinnen

De in deze paragraaf beschreven simulaties zijn gevalideerd met metingen in de windtunnel zie hoofdstuk 17. Er is een uitstekende overeenstemming tussen simulaties en metingen, op grond waarvan kan de conclusie gerechtvaardigd is dat met behulp van CFD simulaties betrouwbare voorspellingen kunnen worden gedaan voor de verdere ontwikkeling van het Ventecdak[®] -zie figuur 16.9.

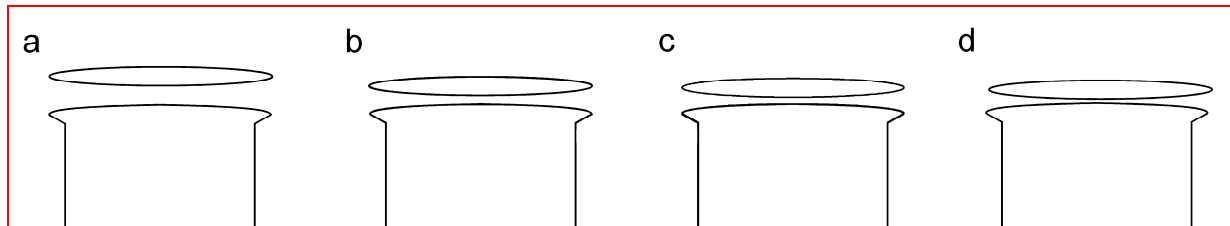


Figuur 16.9 – Vergelijking tussen numerieke simulaties en gemeten C_p -waarden

16.8.4 Hoogte en contractieverhouding van het bovenkanaal

Voor een volledig verslag wordt verwezen naar de publicatie “*Computational analysis of the performance of a venturi-shaped roof for natural ventilation: Venturi-effect versus wind-blocking effect*” (Blocken, B. e.a. 2011).

De simulaties zijn uitgevoerd met een keelbreedte $f = 4$ m. Gevarieerd zijn de verticale contractieverhouding b/c en de hoogte van het bovenkanaal b – zie figuur 16.2. en 16.11. Hierbij wordt aangetekend dat een hoogte van het bovenkanaal $c < 1$ m uit praktische overwegingen nauwelijks in aanmerking komt. Deze simulaties zijn dan ook voornamelijk uitgevoerd uit wetenschappelijk belangstelling.



Figuur 16.10 – Contractieverhoudingen en hoogte bovenkanaal

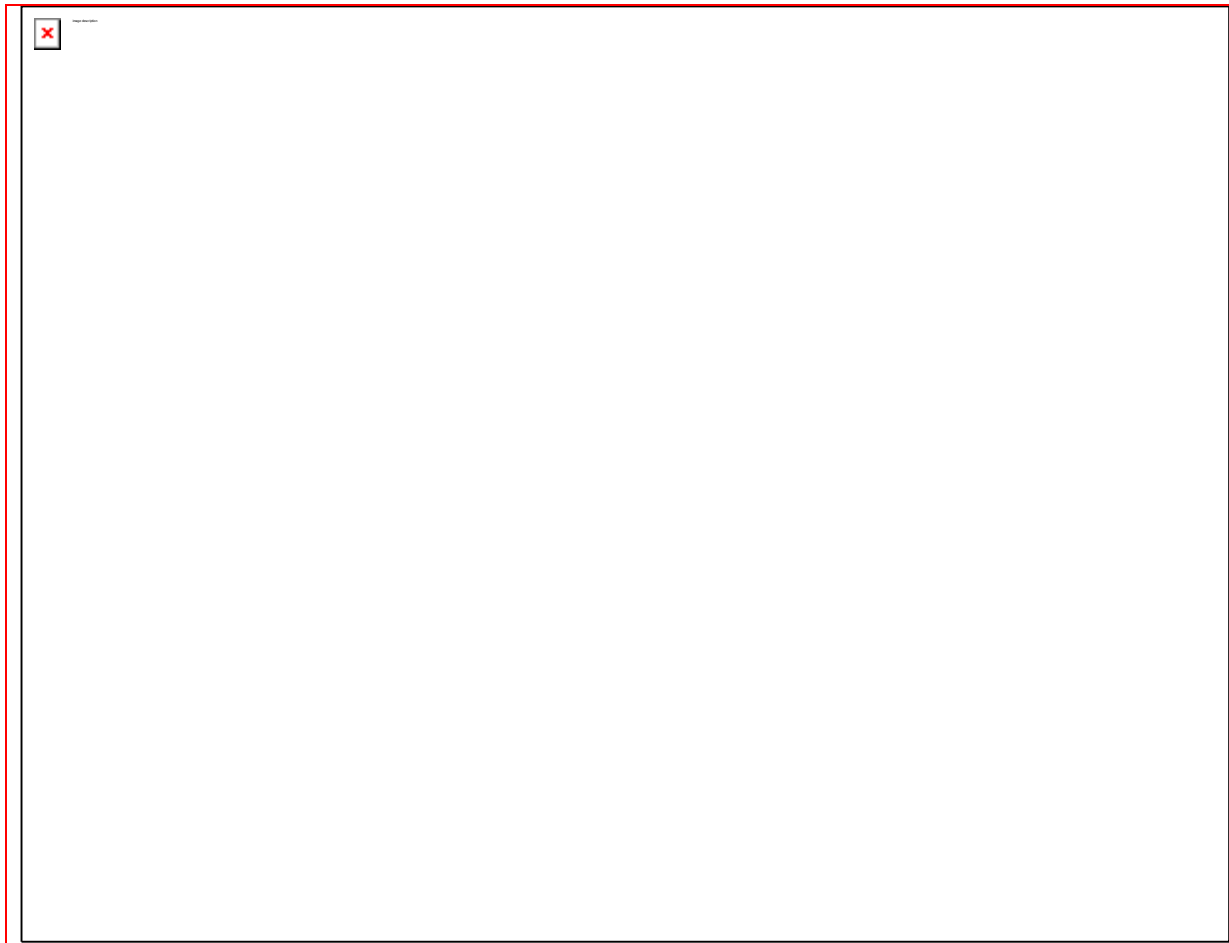
De resultaten van deze analyse zijn weergegeven in tabel 16.3. De variant met vinnen is hierin weggelaten omdat deze in alle gevallen hogere waarden voor C_p oplevert dan de variant zonder vinnen – zie paragraaf 16.8.1

Een toenemende contractieverhouding resulteert in afnemende C_p -waarden en sterkere onderdrukken. De gevoeligheid voor de windrichting is gering.

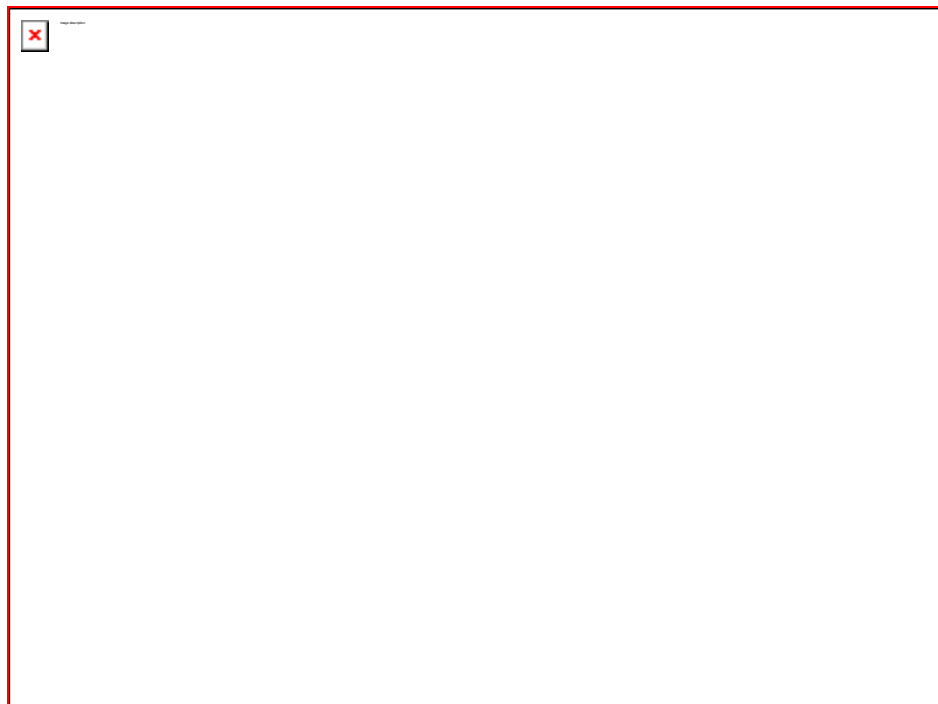
Figuur nr.	c	Contractieverhouding	0°	15°	30°	45°
16.7a	2,0 m	$b/c = 3,0$	-0,95	-0,89	-0,90	-0,96
16.7b	1,0 m	$b/c = 5,0$	-1,21	-1,20	-1,27	-1,35
16.7c	0,5 m	$b/c = 9,0$	-1,41	-1,44	-1,53	-1,58

Tabel 16.3 – C_p -waarden voor verschillende contractieverhoudingen bij 4 windrichtingen

De in deze paragraaf beschreven simulaties zijn eveneens gevalideerd met metingen in de windtunnel zie hoofdstuk 17. Ook hier blijkt een uitstekende overeenstemming tussen simulaties en metingen, waardoor de conclusie van paragraaf 16.8.3 inzake de betrouwbaarheid van CFD als hulpmiddel voor de verdere ontwikkeling van het Ventecdak[®] nog is versterkt -zie figuur 16.12.



Figuur 16.11 – Principedoorsnede Ventecdak[®] met hoogte bovenkanaal (c) en totale dakhoogte (b)



Figuur 16.12 - Vergelijking tussen numerieke simulaties en gemeten Cp-waarden

16.9 Prestaties van het Ventecdak[®] met actieve venturi-ejector

16.9.1 Inleiding

De prestaties van het Ventecdak[®], zoals met behulp van de hiervoor omschreven simulaties geanalyseerd, hebben alle betrekking op de situatie met gesloten venturi-ejector, waarbij geen lucht uit het gebouw wordt afgezogen. Uit wetenschappelijk oogpunt, en wellicht voor constructieve doeleinden, is dit interessante informatie, maar voor het natuurlijke ventilatieconcept van *Earth, Wind & Fire* gaat het in de eerste plaats om de afzuigcapaciteit van de venturi-ejector. Het ligt voor de hand te veronderstellen dat de secundaire luchtstroom, die haaks staat op primaire stroming in de keel van de pseudo-venturi, een negatieve invloed heeft op de prestatie van de venturi-ejector. Intuïtief spelen hierbij de snelheidsverhouding tussen secundaire en primaire luchtstroom en de hoogte c van het bovenkanaal een belangrijke rol.

16.9.2 Numerieke simulaties

Voor de optimalisering van het Ventecdak[®] zijn CFD simulaties uitgevoerd. Hierbij zijn C_p -waarden bepaald in de keel van de pseudo-venturi als functie van de verhouding van de luchtsnelheid in de venturi-ejector U_{kanaal} en de referentiewindsnelheid U_{ref} . Simulaties zijn uitgevoerd voor hoogten c van 1 m en 2 m van het bovenkanaal, waaruit de volgende formules zijn afgeleid:

$$C_p = 0,5374 \ln(U_{\text{ejector}} / U_{\text{ref}}) + 0,6381 \quad \text{voor een bovenkanaal met } c = 1,0 \text{ m} \quad (16.2)$$

en

$$C_p = 0,2913 \ln(U_{\text{ejector}} / U_{\text{ref}}) + 0,0151 \quad \text{voor een bovenkanaal met } c = 2,0 \text{ m} \quad (16.3)$$

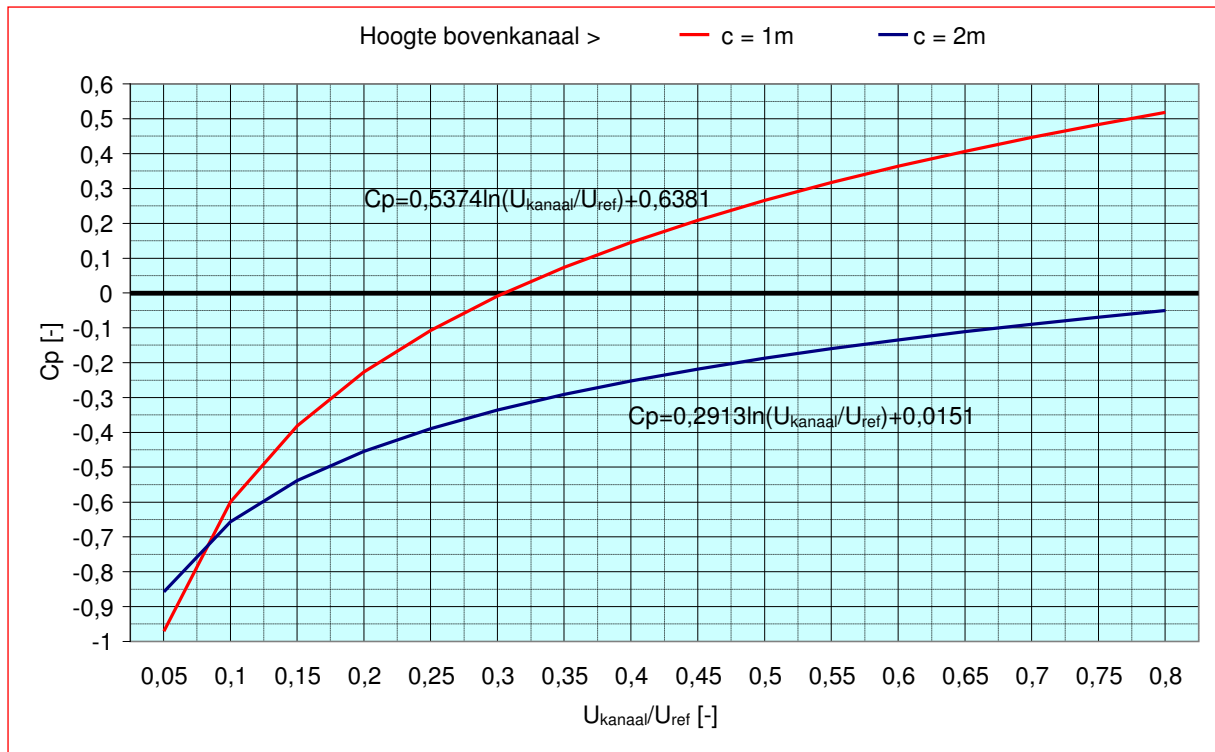
Waarin

$$\begin{aligned} U_{\text{ejector}} &= \text{snelheid in de venturi-ejector} && [\text{m}\cdot\text{s}^{-1}] \\ U_{\text{ref}} &= \text{referentie windsnelheid op dakhoogte} && [\text{m}\cdot\text{s}^{-1}] \end{aligned}$$

Het resultaat van deze simulaties is weergegeven in figuur 16.13. Hieruit blijkt dat naast de snelheidsverhouding $U_{\text{ejector}}/U_{\text{ref}}$ de hoogte van het bovenkanaal een belangrijke rol speelt. Bij $c = 1\text{m}$ slaat de negatieve druk in de venturi-ejector om in positieve druk bij $U_{\text{ejector}}/U_{\text{ref}} \geq 0,3$. Bij $c = 2\text{m}$ blijft de druk in de venturi-ejector ook bij hoge snelheidsverhoudingen negatief.

Het CFD model met een voetafdruk van $20 \times 20\text{m}$ en een hoogte van 50m representeert een gebouw van 14 verdiepingen met een totaal bvo van $\approx 5.500\text{m}^2$. De ventilatiecapaciteit voor dit gebouw, bepaald conform paragraaf 13.2 is $\approx 18.000 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Bij een luchtsnelheid van $2,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ in de venturi-ejector is de doorsnede hiervan bepaald op $\approx 2,5 \text{ m}^2$. CFD simulaties zijn uitgevoerd met een referentiewindsnelheid $U_{\text{ref}} = 10,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ op 50 m hoogte.

In figuur 16.13 wordt voor $c = 2\text{m}$ bij $U_{\text{ejector}}/U_{\text{ref}} = (2,0/10,5) = 0,19$ een C_p -waarde in de keel van de pseudo-venturi afgelezen van $-0,46$. Het met formule (16.1) berekende drukverschil $(p-p_0) \approx -31 \text{ Pa}$. Een Ventecdak[®] met $c = 1\text{m}$ geeft een C_p -waarde van $-0,25$ en een drukverschil van $\approx -17 \text{ Pa}$. Bij een lage windsnelheid van bijvoorbeeld $U_{\text{ref}} = 5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ wordt bij een Ventecdak[®] met $c = 2\text{m}$ nog steeds een drukverschil van -7 Pa gerealiseerd.



Figuur 16.13 – Cp-waarde venturi-ejector als functie van ($U_{\text{kanaal}}/U_{\text{ref}}$)

16.9.3 Validatie

In de windtunnel zijn metingen uitgevoerd die de CFD simulaties bevestigen –zie paragraaf 17.8. Ter vergelijking zijn de Cp-waarden van de in de windtunnel gemeten gevallen berekend met formule (16.2) –zie tabel 16.7. De berekende Cp-waarden stemmen goed overeen met de meetresultaten.

hoogte z -m	50	50	50
U_{10} -m.s ⁻¹	5,00	5,00	5,00
U_{ref} - m.s ⁻¹	5,98	5,98	5,98
U_{ejector} - m.s ⁻¹	4,00	8,00	2,00
$U_{\text{ejector}}/U_{\text{ref}}$	0,67	1,34	0,33
Cp-waarde	-0,10	0,10	-0,30
(p-p ₀) Pa	-2,24	2,19	-6,66

Tabel 16.7 – Berekening windtunnelmetingen

16.9.4 De venturi-ejector in perspectief

De venturi-ejector is het sluitstuk van het afzuigstelsel van het gebouw dat gevormd wordt door de afzuigvoorzieningen op de verdiepingen, het shuntkanaal en de zonneshoorsteen. Het drukverlies van het afzuigstelsel bestaat uit extern drukverlies op de verdiepingen, wrijvingsverliezen en plaatselijke weerstanden in shuntkanaal en zonneshoorsteen en drukverlies van de FiWiHex installatie voor warmteterugwinning –zie deelrapport (I). Deze drukverliezen moeten worden gecompenseerd door het positieve drukverschil dat door de zonneshoorsteen wordt geleverd en het negatieve drukverschil over de venturi-ejector. Als zon en wind tezamen te weinig druk leveren om de vereiste ventilatiecapaciteit te realiseren wordt de hulpventilator aan de top van de zonneshoorsteen ingeschakeld. De karakteristiek van het afzuigstelsel is dus geen constante, maar wisselt voortdurend.

Het door de pseudo-venturi geleverde drukverschil moet dan ook worden beoordeeld in samenhang met het door de zonneshoorsteen geleverde positieve drukverschil. In paragraaf 13.5 is aangegeven

dat binnen het Earth, Wind & Fire concept zon en wind een complementaire werking hebben. Met een dynamische gebouwsimulatie voor de case study met behulp van ESP-r wordt het effect hiervan nader onderzocht- zie deelrapport (IV).

16.10 Ventecdak[®] en Architectuur

Het Ventecdak[®] is een prominent architecturaal element, dat vooral bij lagere gebouwen in het oog springt. De architect heeft voor het ontwerp een grotere vrijheid nodig dan de tot dusver onderzochte dakvorm hem geeft. Bij de ontwikkeling van de *case study*, – zie deelrapport (IV)- is ook gebleken dat de dakvorm in de geometrie volgens paragraaf 16.7 qua architectuur niet geschikt is voor een laag gebouw van 4 verdiepingen. Verkleining van het bovendak ten opzichte van het onderdak zou een oplossing voor dit probleem kunnen bieden. Er is vervolgonderzoek nodig voor daken met verschillende kromtestralen en omvang van het bovendak in relatie met het onderdak. Hiervoor zijn aanvullende simulaties uitgevoerd –zie paragraaf 16.11

16.11 CFD simulaties met gereduceerd bovendak

Het Ventecdak[®] moet idealiter een perfecte synthese van technologie en architectuur opleveren, waarbij architectuur wordt gemaakt op basis van effectiviteit en prestaties. Om de prestaties van het Ventecdak[®] met gereduceerd bovendak voor toepassing bij lagere gebouwen te analyseren zijn daarom aanvullende CFD simulaties uitgevoerd.

Bij de gebruikelijke simulaties met RANS vergelijkingen (Reynolds-averaged Navier–Stokes) deed zich hierbij het probleem voor dat twee identieke simulaties verschillende uitkomsten te zien gaven, waardoor deze simulatieresultaten niet als voldoende betrouwbaar kunnen worden beschouwd. De oorzaak hiervan ligt in het feit dat RANS-simulaties tijdsafhankelijk zijn terwijl de stroming in realiteit tijdsafhankelijk is. Normaliter levert een RANS-simulatie een gemiddeld stromingsveld op, in dit geval gaven de twee identieke RANS-simulaties echter elk één van de vele tijdsafhankelijke (instantane) stromingsvelden.

Hierop werd besloten de analyses te herhalen met behulp van tijdsafhankelijke Large Eddy Simulaties (LES). De resultaten van deze LES-simulaties komen echter niet overeen met de tijdsafhankelijke RANS-simulaties. Om tot goede en verantwoorde resultaten te komen is besloten om LES toe te passen voor verschillende configuraties, te weten

- Volledig bovendak conform figuur 16.2
- Half bovendak
- Geen bovendak

De simulaties worden uitgevoerd met drie luchtsnelheden in de venturi-ejector, waardoor voor de verschillende varianten formules kunnen worden afgeleid voor de C_p -waarde van de venturi-ejector als functie van $(U_{\text{ejector}}/U_{\text{ref}})$. Zie de formules (16.2) en (16.3) en figuur 16.13. Na uitvoering van deze simulaties kan pas echt goed worden beoordeeld wat de prestaties zijn van de drie verschillende varianten. Deze tijdsafhankelijke simulaties zijn echter zeer tijdrovend - minstens 1 à 2 weken per simulatie op de snelste servers van de TU/e – waardoor de resultaten bij het afsluiten van dit deelrapport nog niet beschikbaar zijn.

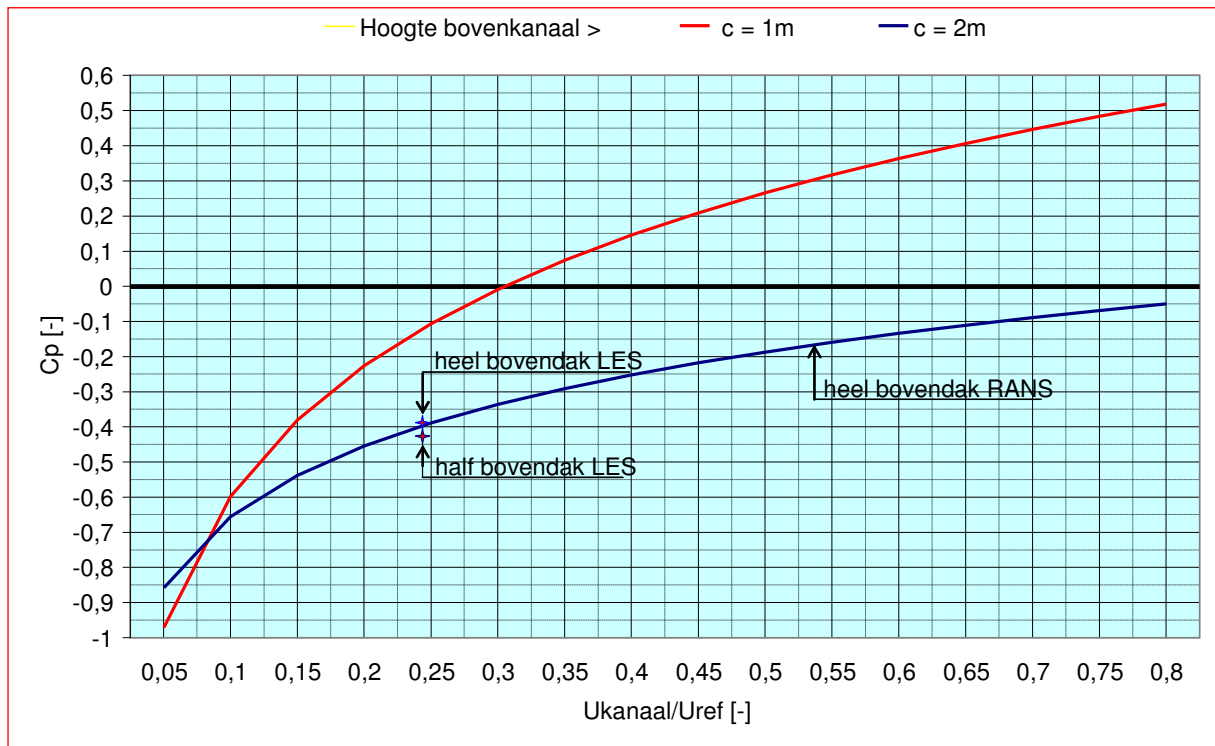
Tabel 16.8 toont de eerste LES resultaten voor een heel en een half bovendak en verschillende waarden van $(U_{\text{ejector}}/U_{\text{ref}})$. De hoogte van het bovenkanaal bij deze simulaties is 2,0 m.

De tabel laat zien dat met het halve bovendak de C_p -waarden iets lager of gelijk zijn dan bij het hele bovendak. Het Ventecdak[®] met gereduceerd bovendak presteert dus iets beter dan met een volledig bovendak.

Dit wordt ook duidelijk gemaakt in figuur 16.14, dezelfde grafiek als figuur 16.13, die is gebaseerd op RANS simulaties met een luchtsnelheid in de venturi-ejector van $2,0 \text{ m.s}^{-1}$. Voor een geheel bovendak zijn de resultaten voor RANS en LES vrijwel gelijk, maar een half bovendak laat een iets lagere C_p -waarde zien.

Case 1 - LES		Entire roof	
Velocity imposed at channel inlet	C_p	$U_{\text{channel}}/U_{\text{ref}}$	
[m.s ⁻¹]	[-]	[-]	
0.5	-0.74	0.060	
1	-0.58	0.119	
2	-0.39	0.238	
4		0.476	
8		0.952	
Case 3 - LES		Half roof	
Velocity imposed at channel inlet	C_p	$U_{\text{channel}}/U_{\text{ref}}$	
[m.s ⁻¹]	[-]	[-]	
0.5	-0.95	0.060	
1	-0.58	0.119	
2	-0.42	0.238	
4		0.476	
8		0.952	

Tabel 16.8 – C_p -waarden venturi-ejector heel en half bovendak met LES



Figuur 16.14 – C_p -waarde venturi-ejector RANS en LES

De CFD techniek met tijdsafhankelijke Large Eddy Simulaties kost extreem veel rekentijd en het was niet mogelijk deze in het financiële kader van het onderzoek in zijn geheel uit te voeren. Vervolgonderzoek is hiervoor noodzakelijk.

16.12 Vervolgonderzoek

Voor een verdere optimalisering van de prestaties van het Ventecdak[®], mede in relatie tot de architectonische kwaliteit is aanvullend onderzoek nodig. Dit onderzoek uit te voeren met behulp van

CFD simulaties en de validatie hiervan met modelmetingen in de windtunnel. In principe komen hierbij de volgende parameters aan de orde:

- De omvang van het bovendak in relatie tot het onderdak – 5 varianten;
- De grootte van de overstekken ten behoeve van de overdrukkamer – 4 varianten;
- De kromtestraal van het onderdak - 5 varianten;
- De kromtestraal van het bovendak - 4 varianten;
- De hoogte van het bovenkanaal c - 2 hoogtes in relatie tot
- De luchtsnelheid in de venturi-ejector – 4 varianten;
- De invloed op de winddrukcoëfficiënten van de door kleppen en windturbines in de overdrukkamer uitstromende lucht – 3 varianten.

Op basis van deze simulaties kunnen prestatie-eisen worden geformuleerd voor het optimaliseren van de winddrukcoëfficiënten aan wind- en lijzijde.

Deze prestatie-eisen zullen architecturaal worden vertaald in modellen voor gebouwen met verschillende hoogten. Architectuur is hierbij geen uitgangspunt, maar vertrekpunt op basis van effectiviteit en prestaties. Het Ventecdak[®] zal op deze wijze de nagestreefde perfecte synthese van technologie en architectuur kunnen opleveren.

Het onderzoek zal zo mogelijk worden uitgevoerd in combinatie met het vervolgonderzoek naar de opwekking van windenergie in het Ventecdak[®] -zie paragraaf 20.14.

17. FYSIEKE MODELMETINGEN

17.1 Samenvatting

Het voorliggende hoofdstuk geeft een verslag van de metingen die in de windtunnel zijn uitgevoerd om de werking van het Ventecdak[®] te onderzoeken en daarmee de CFD simulaties volgens hoofdstuk 16 te kunnen toetsen en te valideren. Hiervoor is een model van het Ventecdak[®] schaal 1:100 gemaakt in verschillende uitvoeringen op basis van de in paragraaf 16.7 vermelde parameters.

De genoemde CFD simulaties hebben betrekking op het Ventecdak[®] met inactieve venturi-ejector, dus zonder secundaire luchtstroom uit het afzuigstelsel. Om de invloed van een secundaire luchtstroom op de werking van het Ventecdak[®] na te gaan zijn aanvullende metingen gedaan.

Tenslotte is de invloed van omringende bebouwing op de werking van het Ventecdak[®] onderzocht.

De metingen zijn met grote deskundigheid en betrokkenheid onder leiding van Lourens Aanen uitgevoerd in de windtunnel van Peutz bv.

De belangrijkste conclusies die uit het onderzoek kunnen worden getrokken zijn:

- De overdruk ter plaatse van de luchtinlaat kan worden uitgedrukt in een C_{p_w} -waarde $\approx 0,8$
- Geleideschoepen leveren geen positieve bijdrage aan de werking van het dak. Door het ontbreken van geleideschoepen wordt het Ventecdak[®] windrichtingonafhankelijk.
- Met behulp van de gekozen dakvorm is het mogelijk een significante onderdruk in de keel van het Ventecdak[®] te realiseren.
- Bij een contractieverhouding van 1:5 worden, afhankelijk van de windrichting, C_{p_v} waarden van $-0,8$ tot $-1,35$ gerealiseerd. Bij een contractieverhouding van 1:9 zijn C_{p_v} -waarden gemeten van $-1,2$ tot $-1,7$.
- Bij verkleinen van de doorstroom opening van het Ventecdak[®] wordt binnen de geteste configuraties een extremere onderdruk gevonden.
- Omgevingsbebouwing heeft een beperkte invloed op de werking van het Ventecdak[®] zolang deze significant lager is dan het gebouw zelf. Bij bebouwing van gelijke hoogte wordt de werking van het dak verstoord.
- Bij de gekozen gebouwgrrootte en dakvorm, kan bij een neutrale druk in het gebouw de venturi-ejector het gewenste ventilatiedebiet leveren bij windsnelheden vanaf ongeveer de jaargemiddelde windsnelheid op dakrandhoogte. Bij lagere windsnelheden zullen de zonneshoorsteen en/of de hulpventilator het afzuigstelsel moeten ondersteunen.

17.2 Inleiding

Een belangrijke doelstelling van het onderzoek “*Earth, Wind & Fire – Airconditioning zonder ventilatoren*” is de bouwwereld te voorzien van betrouwbare ontwerpgegevens voor dit innovatieve concept van klimaatregeling. Pas als deze beschikbaar zijn zullen opdrachtgevers, architecten en ingenieurs bereid worden gevonden het concept in concrete bouwwerken toe te passen.

Evenals de Klimaatcascade[®] en de Zonneshoorsteen is het Ventecdak[®] daarom ontwikkeld op basis van modelleren, simuleren, kalibreren en valideren; zie paragraaf 1.9.

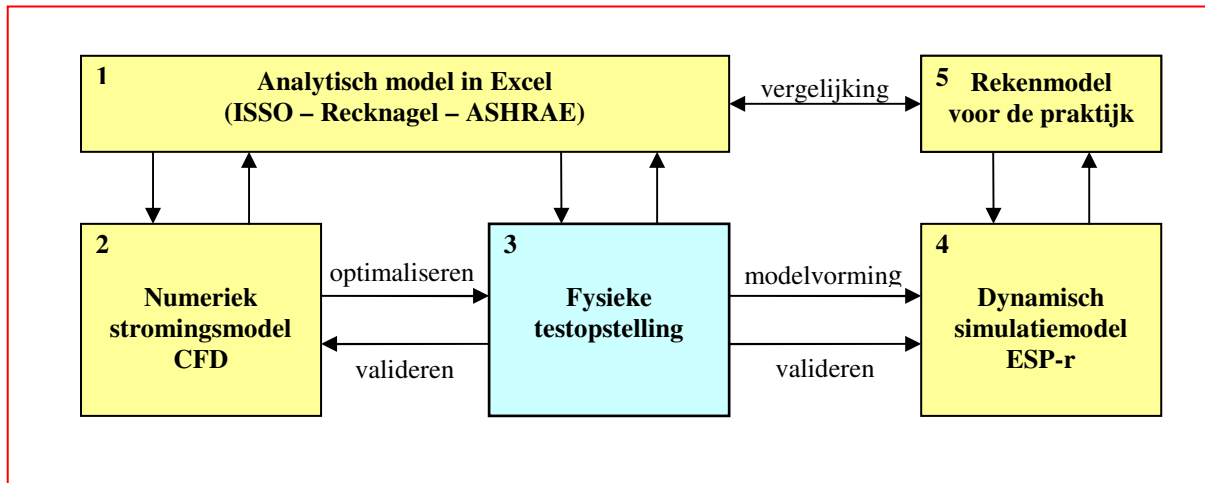
[1] In een analytisch rekenmodel is een poging gedaan met behulp van technische gegevens uit het repertoire van de klimaatingenieur een wiskundige beschrijving gegeven van de stromingen, drukverschillen in het Ventecdak[®] op macroniveau. Op basis hiervan werden winddrukcoëfficiënten afgeleid, die echter een hoogst speculatief karakter hebben. Een stroming in de vrije wind is immers nauwelijks vergelijkbaar met de stroming van lucht in luchtkanalen - zie paragraaf 11.7.

[2] Met behulp van het CFD stromingsmodel zijn virtuele prototypes van het Ventecdak[®] in verschillende varianten gemaakt die inzicht gaven in de optredende drukverschillen en winddrukcoëfficiënten. Op basis hiervan kon de optimale vorm en uitvoering van het dak worden bepaald -zie hoofdstuk 16.

[3] Met behulp van de fysieke testopstelling –het voorliggende hoofdstuk- zijn de in werkelijkheid optredende stromingen en drukverschillen in een model van het Ventecdak[®] gemeten. De CFD simulaties zijn op basis van deze meetgegevens getoetst en gevalideerd – zie hoofdstuk 16.

[4] De aldus bepaalde winddrukcoëfficiënten worden in het dynamische ESP-r simulatiemodel ingevoerd waardoor, in combinatie met de modellen van de Klimaatcascade® en de Zonneschoorsteen, de geïntegreerde prestatie van deze responsieve bouwdelen kan worden gesimuleerd in een wisselend buitenklimaat bij de statistisch relevante klimaatomstandigheden van een bepaald referentiejaar – zie de *case study* in deelrapport (IV).

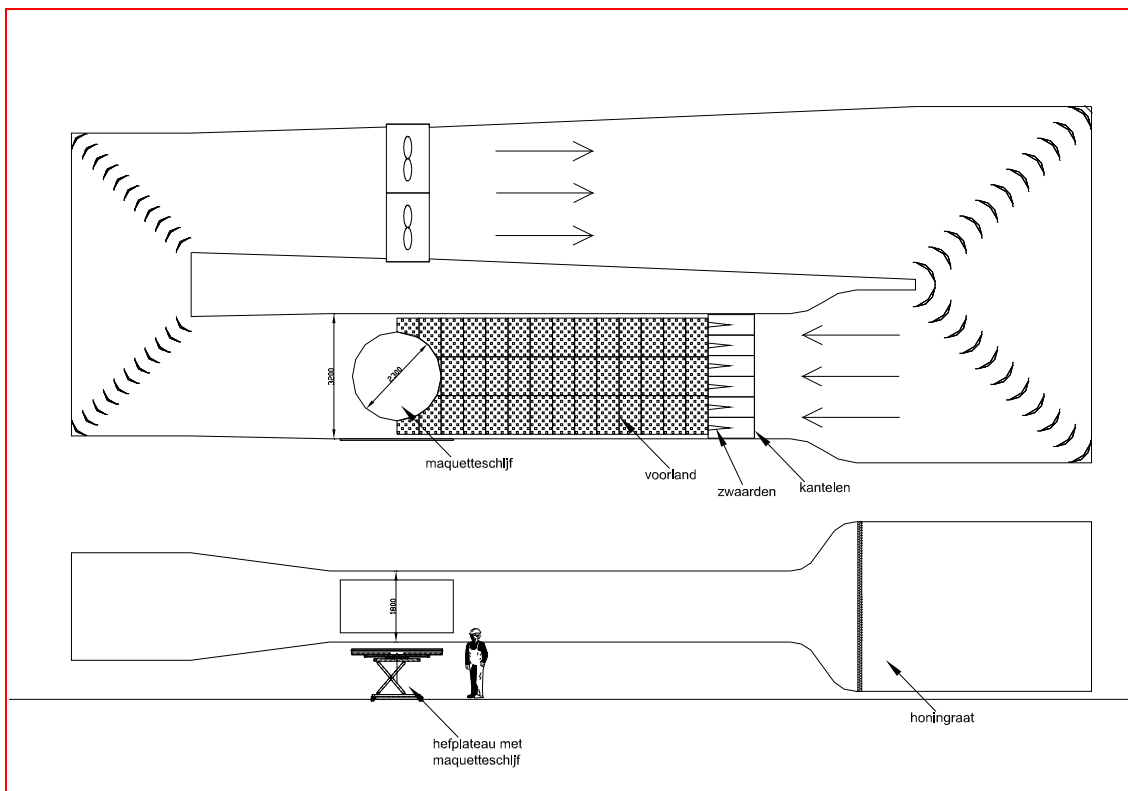
[5] Voor gebruik in de bouw- en installatiepraktijk is tenslotte een rekenmodel nodig. Voor wat betreft het Ventecdak® kan voorshands worden uitgegaan van richtgetallen die op basis van het vervolgonderzoek nader kunnen worden berekend.



Figuur 17.1 – Modelleren – Simuleren – Kalibreren – Valideren

17.3 De windtunnel

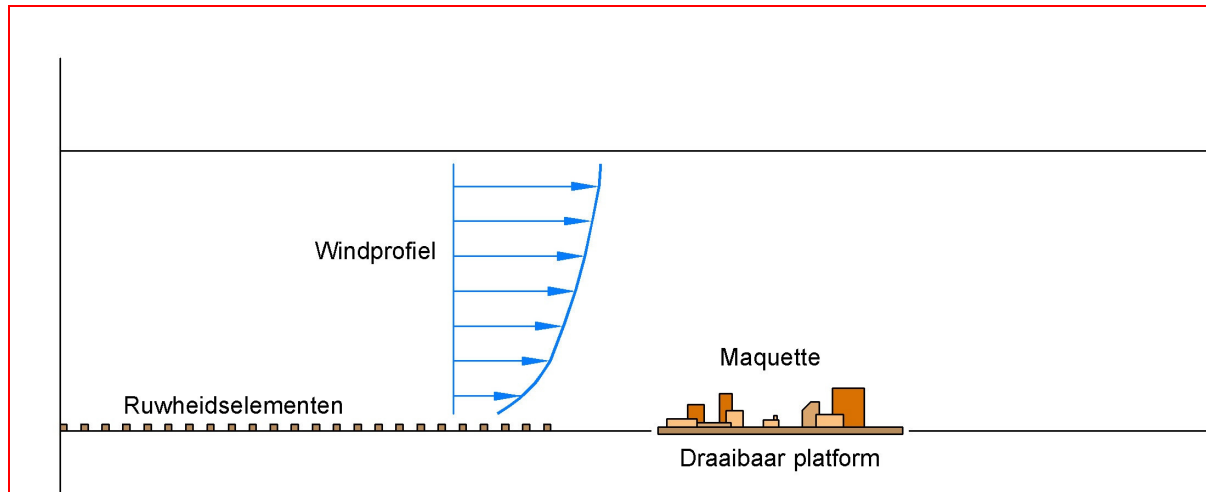
De windtunnel is een zgn. gesloten grenslaagtunnel, speciaal ontworpen voor het simuleren van een atmosferische grenslaag –zie paragraaf 5.2. Boven de grenslaag kunnen snelheden tot ca 30 m.s^{-1} worden bereikt - zie figuur 17.2.



Figuur 17.2 – Gesloten grenslaagtunnel van Peutz

In de windtunnel wordt de grenslaagstroming, die in de praktijk aanwezig, is op schaal opgewekt, zodat aan de rand van het schaalmodel, afhankelijk van de terreinruwheid, het juiste windprofiel wordt gesimuleerd –zie hoofdstuk 5 en 7. Aanpassing van de lokale windsituatie vindt plaats door het mee modelleren van de direct omliggende bebouwing –zie figuur 17.3.

Temperatuurinvloeden worden in deze windtunnel niet gesimuleerd; er wordt dus gemeten bij een neutrale stabiliteit met betrekking tot het temperatuurprofiel.



Figuur 17.3 – Opwekken windprofiel in de windtunnel

17.4 Het schaalmodel

Het model is op schaal 1:100 uitgevoerd conform het CFD model dat in paragraaf 16.7 is omschreven.

- Gebouwhoogte 50 [m]
- Voetafdruk 20 x 20 [m]
- Dakoverstekken 1,7 [m]

Alle CFD simulaties met de in paragraaf 16.7 vermelde parameters zijn in de windtunnel getoetst en gevalideerd. De betreffende parameters zijn:

1. Aantal verticale vinnen in het bovenkanaal;
2. Aanwezigheid geleidende zijkleppen in het bovenkanaal;
3. Lengte van de verticale vinnen – niet gevarieerd;
4. Verticale contractieverhouding van het bovenkanaal;
5. Hoogte van het bovenkanaal – gekoppeld aan 4;
6. Gebouwbreedte (B) – niet gevarieerd;
7. Gebouwhoogte (H) – niet gevarieerd.

17.5 Meetmethoden

17.5.1 Drukken

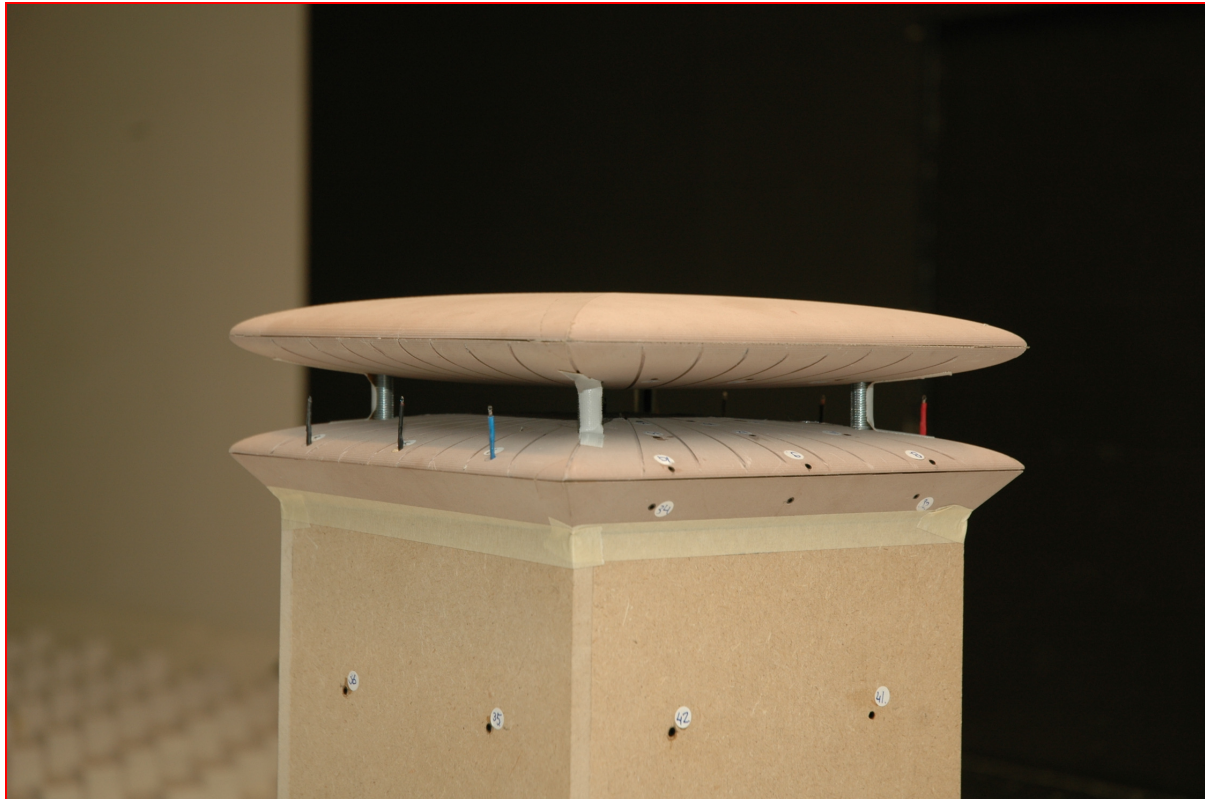
Op 58 posities in het model zijn de lokale drukken gemeten. De gebruikte opnemers registreren met een frequentie van 1000 Hz gedurende 180 seconden de instantane drukken op de meetpunten. Omdat voor ventilatie vooral de uurgemiddelde drukken van belang zijn, wordt van deze tijdseries het gemiddelde berekend. Deze drukken worden genormeerd met de ongestoorde stuwdruk op de dakrandhoogte zonder Ventecdak[®], 50 m op volle schaal, bepaald uit het gemeten snelheidsprofiel aan de bovenstroomse rand van de maquetteschijf.

17.5.2 Snelheden

De snelheden in het model zijn bepaald met behulp van windrichtingonafhankelijke NTC¹⁰ thermistors. Gezien de traagheid van deze elementen wordt alleen de uurgemiddelde windsnelheid

¹⁰ Negative Temperature Coefficient

bepaald. Evenals bij de drukken worden deze snelheden genormeerd met de ongestoorde snelheid op dakrandhoogte.



Figuur 17.4 – Detail van het Ventedak[®] met drukopnemers en NTC thermistors in de windtunnel

17.6 Meetresultaten

17.6.1 Algemeen

Een volledig overzicht van de meetresultaten is opgenomen in het rapport van Peutz bv “Windtunnelmetingen Ventedak[®], rapportnummer B 1099-1-RA-001 d.d. 1 april 2011 (Aanen, L 2011). Voor een vergelijking van de verschillende metingen met de CFD simulaties zie (Hoof, T. van e.a. 2011).

De varianten met de parameters 1 t/m 3, het aantal verticale vinnen in het bovenkanaal, de aanwezigheid van geleidende zijkleppen in het bovenkanaal en lengte van de verticale vinnen zijn hoofdzakelijk uit wetenschappelijk oogpunt interessant. De CFD simulaties hebben aangetoond dat deze varianten duidelijk minder presteren zijn dan de overige en daarom hebben ze voor het onderzoek *Earth, Wind & Fire* nauwelijks toegevoegde waarde. Om deze reden worden hierna alleen de meetresultaten van de geoptimaliseerde dakvorm, zonder vinnen en zijkleppen gepresenteerd – parameters 4 en 5.

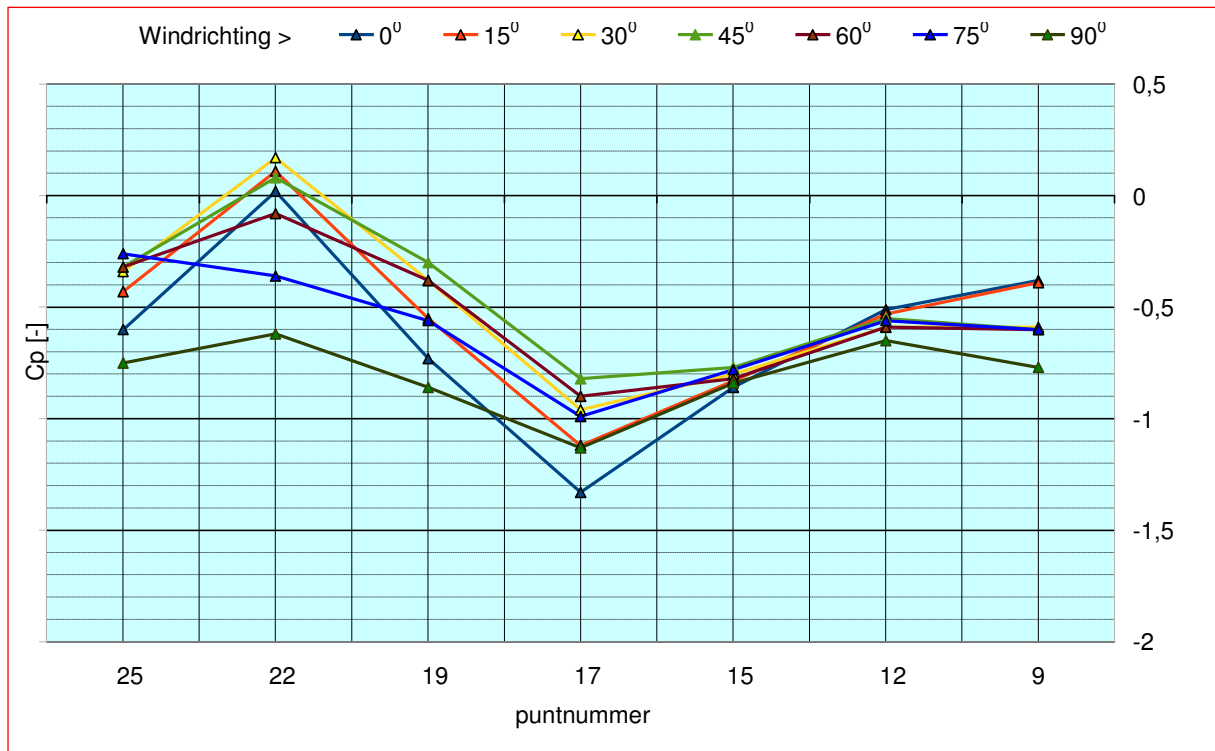
17.6.2 Overdrukken

De overdruk ter plaatse van de luchtinlaat is nauwelijks afhankelijk van de parameters 1 t/m 5, en komt bij alle metingen voor aanstroming loodrecht op de gevel overeen met een C_{p_w} -waarde van $\approx 0,8$. Deze waarde wordt ook teruggevonden in figuur 8.4, die een generiek beeld geeft van de optredende winddrukcoëfficiënten op gebouwen (ASHRAE 1999, 2001, Allard, F. 1998). In het analytisch rekenmodel –paragraaf 11.7, is eveneens uitgegaan van $C_{p_w} = 0,8$.

17.6.3 Onderdrukken - contractieverhouding 1:5

In figuur 17.5 zijn de gemeten drukcoëfficiënten op 7 punten op een lijn door het midden van het dak weergegeven voor 7 verschillende windrichtingen. Hierbij komt 0^0 overeen met wind parallel aan de doorsnede en 90^0 met wind loodrecht op de doorsnede.

In het midden van het dak is een gebied aanwezig met een druk die significant lager is dan de druk aan de uitstroomzijde. Na een initiële toename van de druk vindt door versnelling van de stroming een drukverlaging plaats met een drukminimum ter plaatse van de keel van de pseudo-venturi, punt 17. Hierbij worden, afhankelijk van de windrichting, C_p waarden van $-0,8$ tot $-1,35$ gerealiseerd. De verschillen worden veroorzaakt door de ondersteuning van het bovendak, het feit dat het gebouw vierkant is (de aanstroming van de opening is afhankelijk van de hoek van het gebouw ten opzichte van de stromingsrichting) en de zich in de pseudo-venturi bevindende NTC thermistors. In praktijksituaties is alleen de invloed van de ondersteuning van belang. Om de windrichtingonafhankelijkheid van het Ventecdak[®] te optimaliseren verdient het aanbeveling de uitvoering van deze ondersteuning nader te bestuderen.



Figuur 17.5 – Winddrukcoëfficiënten in de pseudo-venturi –contractieverhouding 1:5

17.6.4 Onderdrukken - contractieverhouding 1:9

Figuur 17.6 is het equivalent van figuur 17.5 echter voor een contractieverhouding van 1:9. Er worden nu, weer afhankelijk van de windrichting, in de keel van de pseudo-venturi C_p -waarden gerealiseerd van $-1,2$ tot $-1,7$.

17.6.5 Vergelijking contractieverhoudingen 1:9 – 1:5 – 1:3

Figuur 17.7 geeft een overzicht van de te realiseren winddrukcoëfficiënten bij de hiervoor onderzochte contractieverhoudingen. Hieraan is de verhouding 1:3 toegevoegd, die duidelijk slechter presteert dan 1:9 en 1:5. De invloed van de windrichting, tot uitdrukking komend door de ondersteuning van het bovendak en de NTC thermistors, is duidelijk zichtbaar.

Geconcludeerd kan worden dat een contractieverhouding van 1:9 de laagst mogelijke C_p waarden oplevert, hetgeen ook met de CFD simulaties werd aangetoond –zie paragraaf 16.7.8 tabel 16.5.

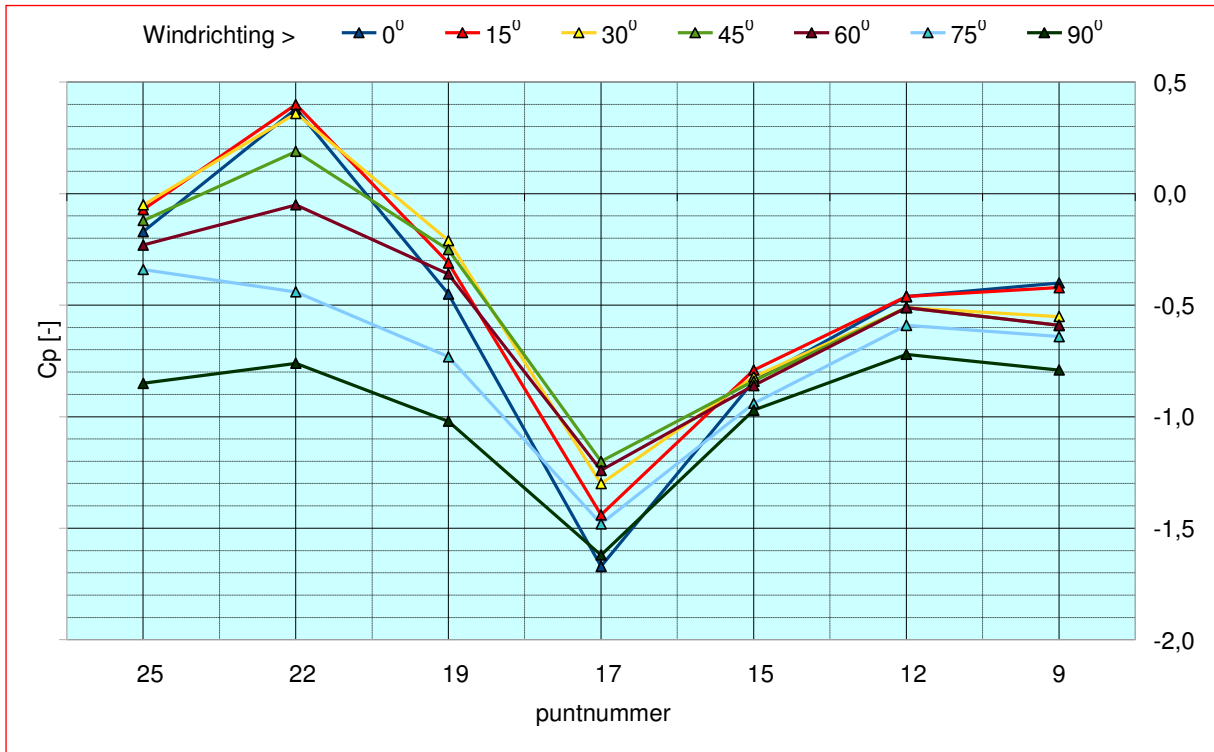
17.7 Drukverschil ($C_{p_w} - C_{p_l}$)

In het analytisch rekenmodel werd in eerste instantie uitgegaan van een drukverschil tussen windzijde en lijzijde ($C_{p_w} - C_{p_l}$) = 1,1 gebaseerd op $C_{p_w} = +0,8$ en $C_{p_l} = -0,3$.

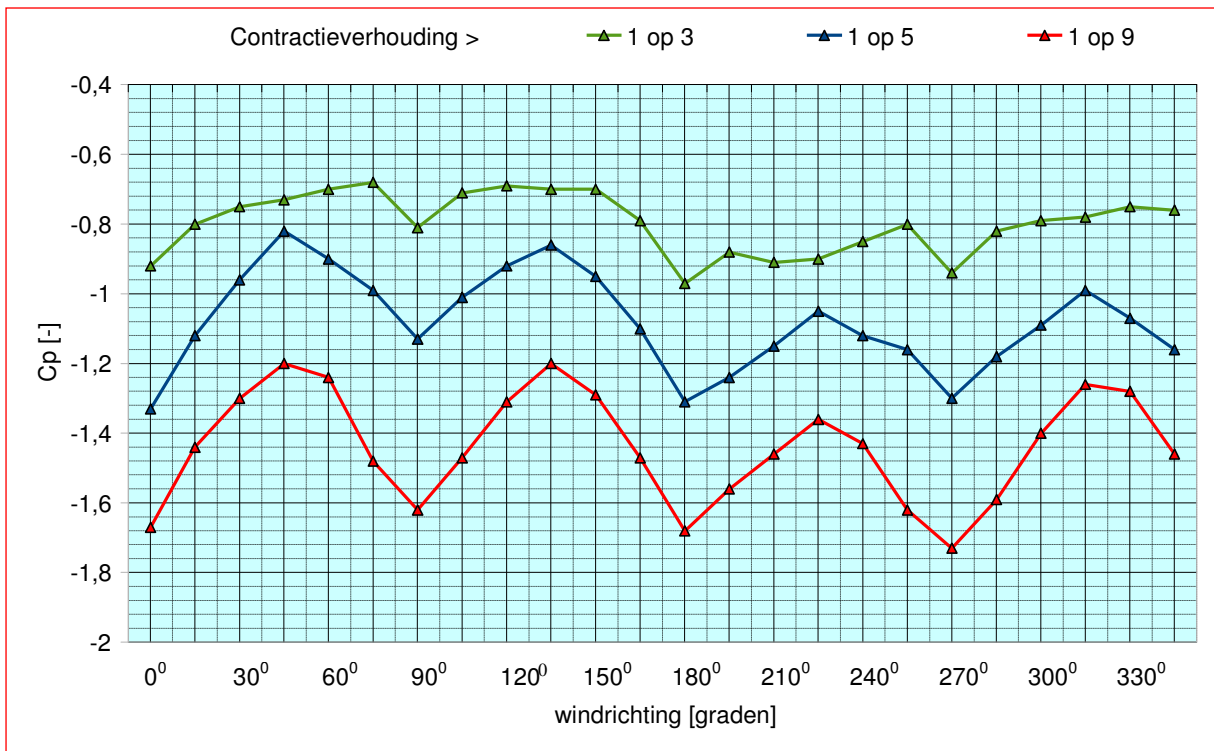
Uit de figuren 17.5 en 17.6 wordt voor C_{p_l} een gemiddelde waarde afgelezen van $-0,6$ waardoor het drukverschil ($C_{p_w} - C_{p_l}$) toeneemt tot $(0,8 + 0,6) = 1,4$.

In het analytisch rekenmodel werd verder uitgegaan van verticale vinnen en geleidende zijkleppen in het bovenkanaal. Door de afwezigheid hiervan in het model neemt het drukverlies van de pseudo-

venturi en daardoor het windblokkeereffect af, met als gevolg een grotere luchtstroom en hogere lichtsnelheid in de keel van de pseudo-venturi.



Figuur 17.6 – Winddrukcoëfficiënten in de pseudo-venturi –contractieverhouding 1:9



Figuur 17.7 – C_p waarden als functie van contractieverhouding en windrichting

17.8 Het Ventecdak[®] in de stedenbouwkundige context

17.8.1 Algemeen

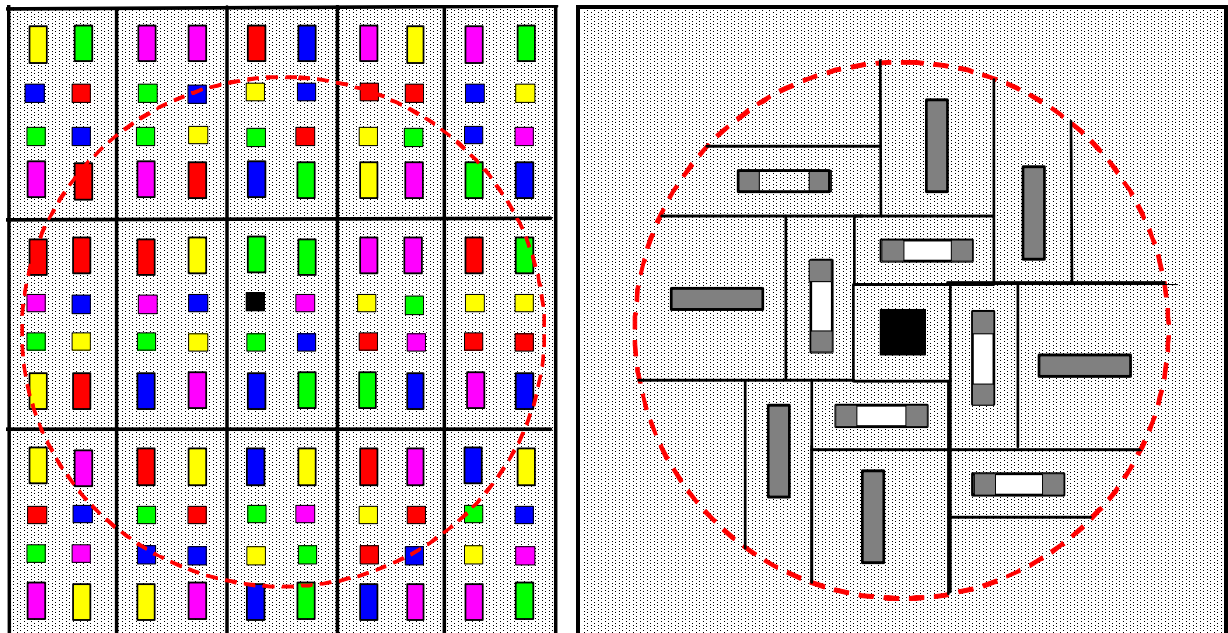
In hoofdstuk 15 is de stedenbouwkundige context van het Ventecdak[®] onderzocht en zijn een viertal varianten geselecteerd voor onderzoek in de windtunnel – zie figuur 17.8 links. Om dit mogelijk te maken zou een veel kleiner model van het gebouw nodig zijn dan het model 1:100 dat voor de metingen werd gebruikt. In een dergelijk klein model is het echter niet mogelijk de noodzakelijke drukopnemers en NTC thermistors in te bouwen. Bovendien zouden de kosten hiervan prohibitief hoog zijn.

Een mogelijke oplossing, waarbij het bestaande model 1:100 wordt gebruikt, zou inhouden dat slechts een klein, en niet representatief deel van de gewenste stedenbouwkundige invulling zou kunnen worden opgenomen.

Gekozen is daarom voor een min of meer willekeurige stedenbouwkundige invulling volgens figuur 17.9 met bouwblokken van 10 x 40 m waartussen het testmodel is opgesteld. Het testmodel heeft een voetafdruk van 20 x 20 m en is 50 m hoog exclusief Ventecdak[®].

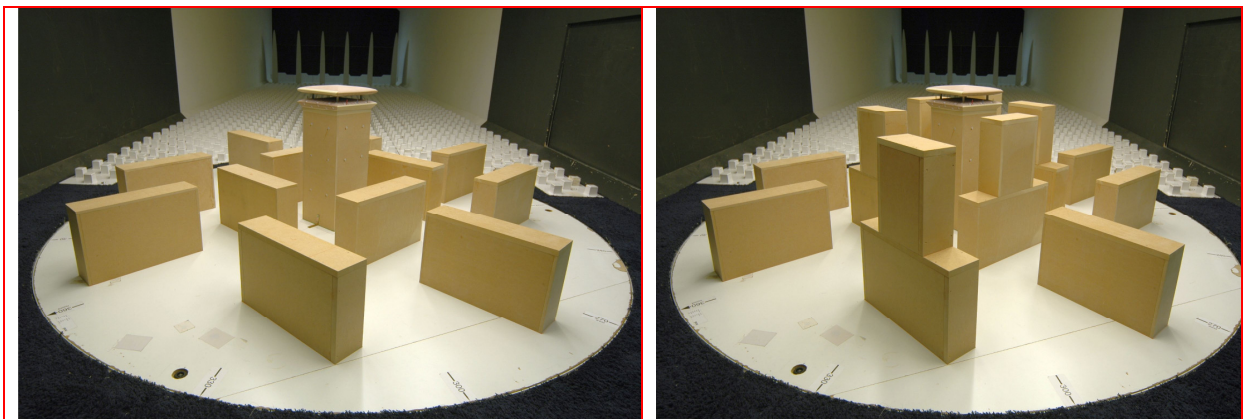
De volgende situaties zijn onderzocht:

- Omliggende bebouwing met bouwblokken van 25 m hoog – figuur 17.9 links
- Omliggende bebouwing met bouwblokken tot 50 m hoog – figuur 17.9 rechts



Figuur 17.8 – Stedenbouwkundige context
Zoals gewenst

Zoals uitgevoerd – zie figuur 17.9



Figuur 17.9 – Ventecdak[®] met stedenbouwkundige omgeving in de windtunnel

17.8.2 Omliggende bebouwing met bouwblokken van 25 m hoog

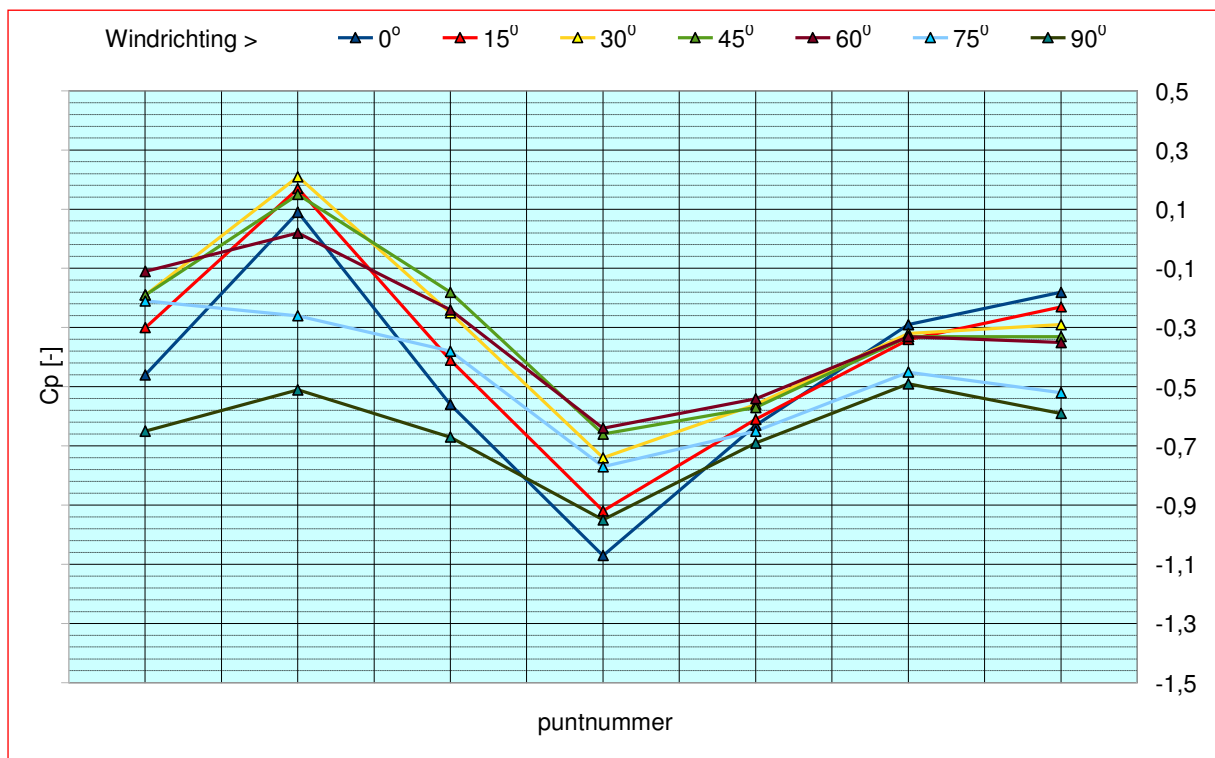
Figuur 17.10 is het equivalent van figuur 17.5 echter voor een situering in de stedenbouwkundige omgeving van figuur 17.9 /links. Er worden nu, weer afhankelijk van de windrichting, in de keel van de pseudo-venturi Cp-waarden gerealiseerd van $-0,7$ tot $-1,1$.

De omliggende bebouwing heeft dus een negatieve invloed op de te realiseren winddrukcoëfficiënt. Het verschil kan worden verklaard door wijzigingen in de aanstroombinding en de turbulentie van de wind. Het Ventecdak[®] blijft ook in deze situatie functioneren, zij het met verminderde prestatie.

17.8.3 Omliggende bebouwing met bouwblokken van 50 m hoog

Figuur 17.11 is het equivalent van figuur 17.10 echter voor een situering in de stedenbouwkundige omgeving van figuur 17.9 /rechts. Er worden nu, weer afhankelijk van de windrichting, in de keel van de pseudo-venturi Cp-waarden gerealiseerd van $-0,3$ tot $-0,75$.

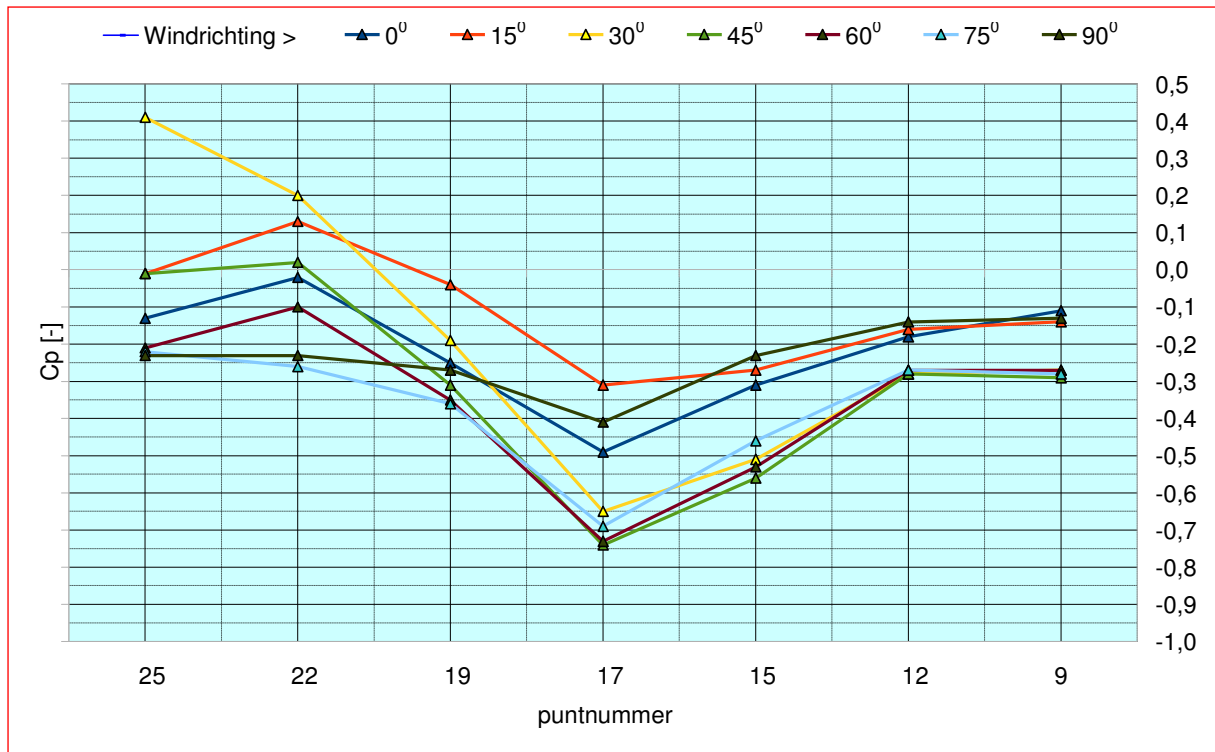
Dit type bebouwing heeft dus een grotere negatieve invloed op de te realiseren winddrukcoëfficiënt. Het Ventecdak[®] blijft ook in deze situatie functioneren, zij het met verder verminderde prestatie. Bij geen van de windrichtingen worden de onderdrukken gehaald als in het geval zonder bebouwing. In vergelijking met de 25 m omgeving zien we dat bij sommige windrichtingen de prestaties slechter worden, maar bij andere windrichtingen weer beter. Dit kan verklaard worden door het feit dat gebouwen niet alleen een zog hebben waarin de snelheden lager zijn, maar er ook windrichtingen zijn waar de snelheden door de gebouwen juist worden verhoogd.



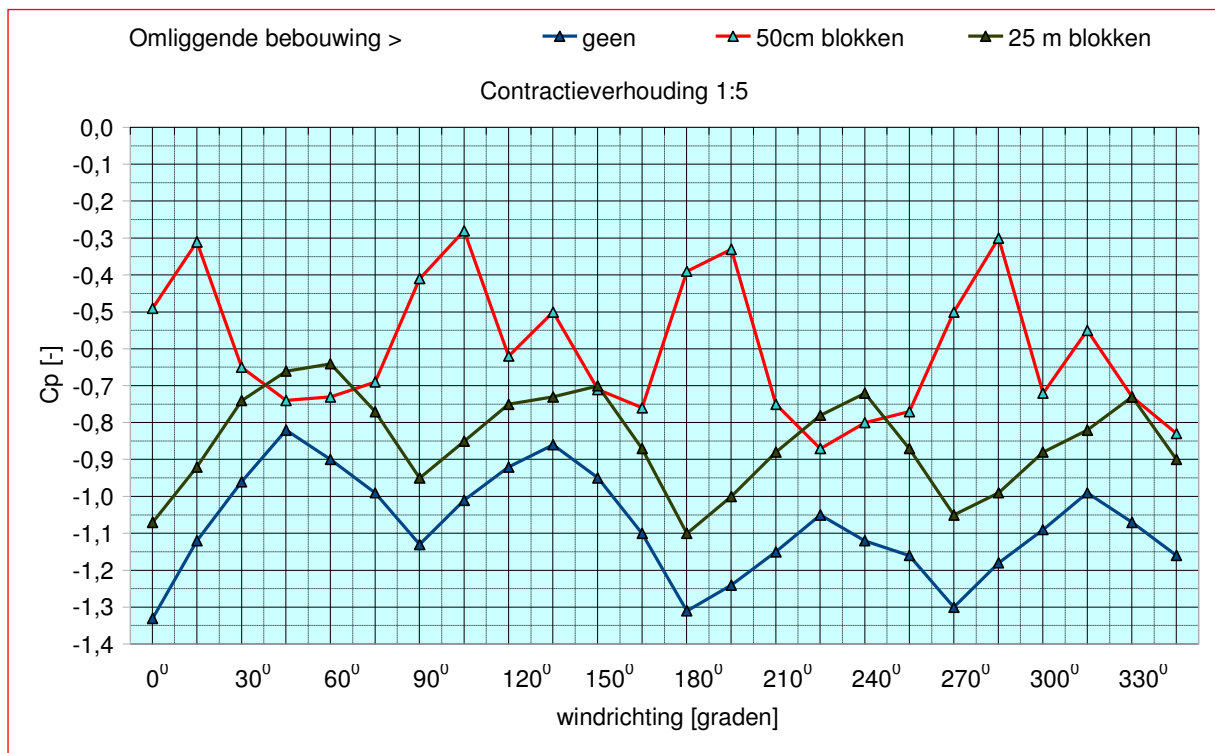
Figuur 17.10 – Winddrukcoëfficiënten in de pseudo-venturi – bouwblokken 25m -contractieverhouding 1:5

17.8.4 Vergelijking

Figuur 17.12 laat het effect zien van de omliggende bebouwing voor een Ventecdak[®] met een contractieverhouding van 1:5 voor respectievelijk een solitair gebouw en een omliggende bebouwing met bouwblokken van 25m en 50m



Figuur 17.11 – Winddrukcoëfficiënten in de pseudo-venturi –bouwblokken 50m -contractieverhouding 1:5



Figuur 17.12 – Cp waarden als functie van omliggende bebouwing en windrichting

17.9 Metingen met actieve venturi-ejector

De voorgaande metingen zijn uitgevoerd om vast te stellen welke onderdrukken en bijbehorende Cp-waarden in de keel van de pseudo-venturi kunnen worden gerealiseerd. De venturi-ejector was hierbij gesloten, dus niet actief.

Het Ventecdak® is echter bedoeld om lucht uit een gebouw af te zuigen en de vraag doet zich voor of en in hoeverre de werking van de pseudo-venturi wordt verstoord als er bij geopende venturi-ejector

een secundaire luchtstroming ontstaat die invloed heeft op de primaire luchtstroming door de wind. Om dit vast te stellen zijn in de windtunnel aanvullende metingen uitgevoerd.

De afzuigcapaciteit van de venturi-ejector is bepaald op basis van het gekozen model, dat met een voetafdruk van 20 x 20m en een hoogte van 50m een gebouw representeert van 14 verdiepingen met een totaal bvo van $\approx 5.500\text{m}^2$. De ventilatiecapaciteit voor dit gebouw, bepaald conform paragraaf 13.2 is $\approx 18.000\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$. Bij een luchtsnelheid van $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ in de venturi-ejector is de doorsnede hiervan bepaald op $\approx 2,5\text{ m}^2$. Om het effect van de stroming windrichtingonafhankelijk te maken is gekozen voor een ronde opening met een diameter van 1,4 m op volle schaal.

De metingen zijn bedoeld om de invloed van de secundaire luchtstroming op de primaire windstroming vast te stellen. Bij een constante luchtsnelheid in de windtunnel is daarom de luchtsnelheid in de venturi-ejector gevarieerd. Metingen zijn uitgevoerd met luchtsnelheden van 2, 4 en $8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. De stromingen zijn in het model tot stand gebracht met behulp van een pompje. Het meetpunt dat bij de voorgaande metingen in het midden van het dak lag, is verplaatst naar de zijwand van het afzuigkanaal en geeft dus de druk in het afzuigkanaal weer.

Voor een gebouw van 50 m hoog is op dakrandhoogte de jaargemiddelde windsnelheid in Nederland $\approx 5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Metingen zijn uitgevoerd voor een snelheidsverhouding van de lucht in het kanaal en de ongestoorde windsnelheid behorend bij deze jaargemiddelde windsnelheid, een halvering en een verdubbeling hiervan. Uitgaande van een luchtsnelheid in de windtunnel op dakrandhoogte van ≈ 2 maal de jaargemiddelde windsnelheid kunnen de metingen worden geïnterpreteerd als aangegeven in tabel 17.1:

Luchtsnelheid in venturi-ejector	Representatief voor windsnelheid	Resultaat in figuur
$2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	Hoog	17.12
$4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	Jaargemiddeld	17.13
$8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	Laag	17.14

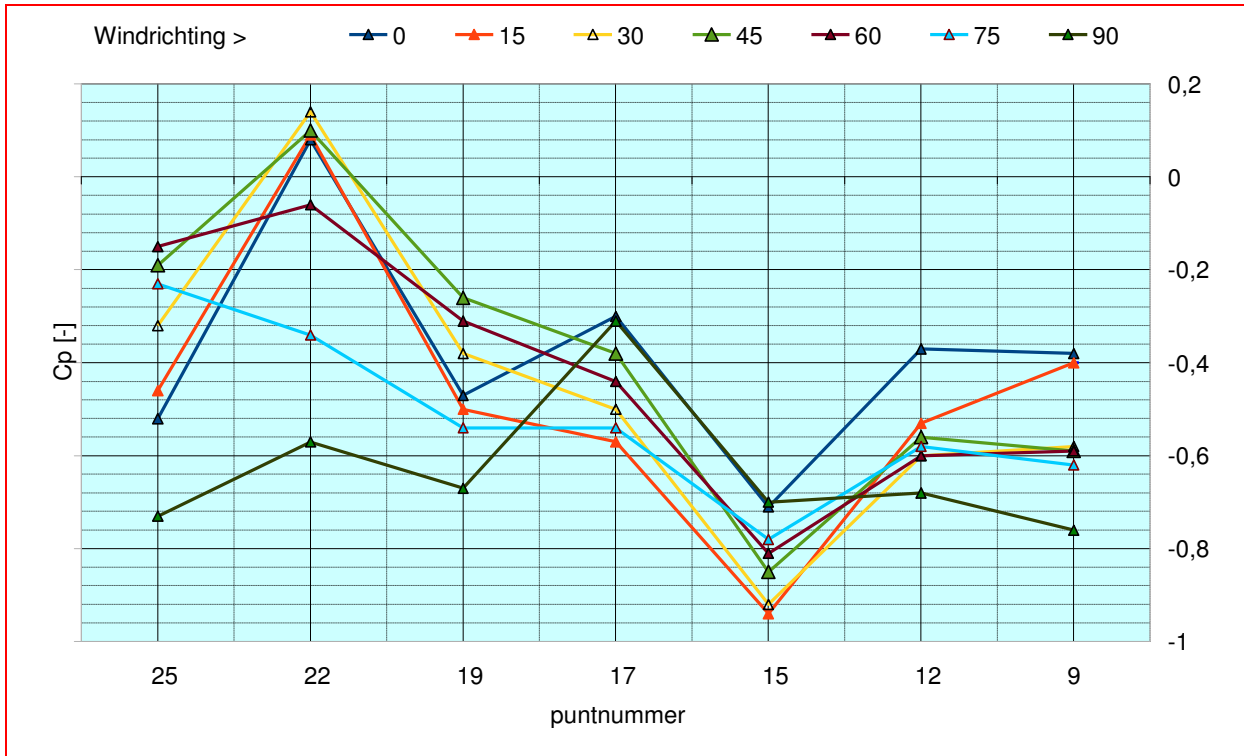
Tabel 17.1 – Metingen met actieve venturi-ejector

Figuur 17.13 laat de gemeten winddrukcoëfficiënten zien voor een hoge windsnelheid. Voor alle windrichtingen zijn de drukken in het afzuigkaneel negatief. Daarnaast is ook de venturiwerking van het dak goed zichtbaar; de minimum Cp-waarde ligt benedenstrooms van de keel. Bij deze windsnelheid functioneert het Ventecdak[®].

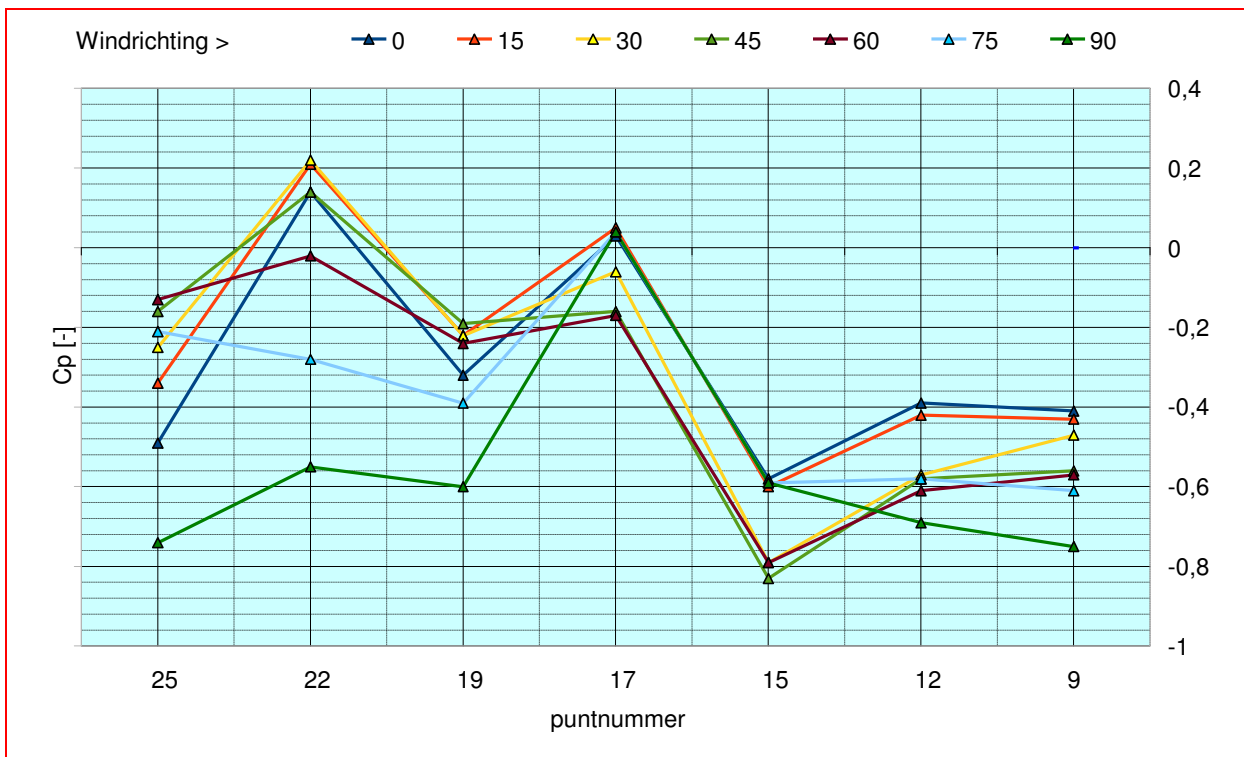
Figuur 17.14 laat de gemeten winddrukcoëfficiënten zien voor een jaargemiddelde windsnelheid. Voor alle windrichtingen liggen de drukken in het afzuigkaneel op of iets onder de omgevingsdruk. Ook hier is de venturiwerking van het dak goed zichtbaar met de minimum Cp-waarde benedenstrooms van de keel. Bij deze windsnelheid functioneert het Ventecdak[®] bij een neutrale druk in het afzuigkanaal juist genoeg om het gewenste debiet op te brengen.

Figuur 17.15 laat de gemeten winddrukcoëfficiënten zien voor een lage windsnelheid. Voor alle windrichtingen liggen de drukken in het afzuigkaneel iets boven de omgevingsdruk. De venturiwerking van het dak blijft goed zichtbaar met de minimum Cp-waarde benedenstrooms van de keel. Bij deze windsnelheid functioneert het Ventecdak[®] als zodanig niet meer, maar levert ook geen noemenswaardig drukverlies op voor het afzuigstelsel. De zonneshoorsteen en/of de hulpventilator moeten in dat geval de nodige druk leveren.

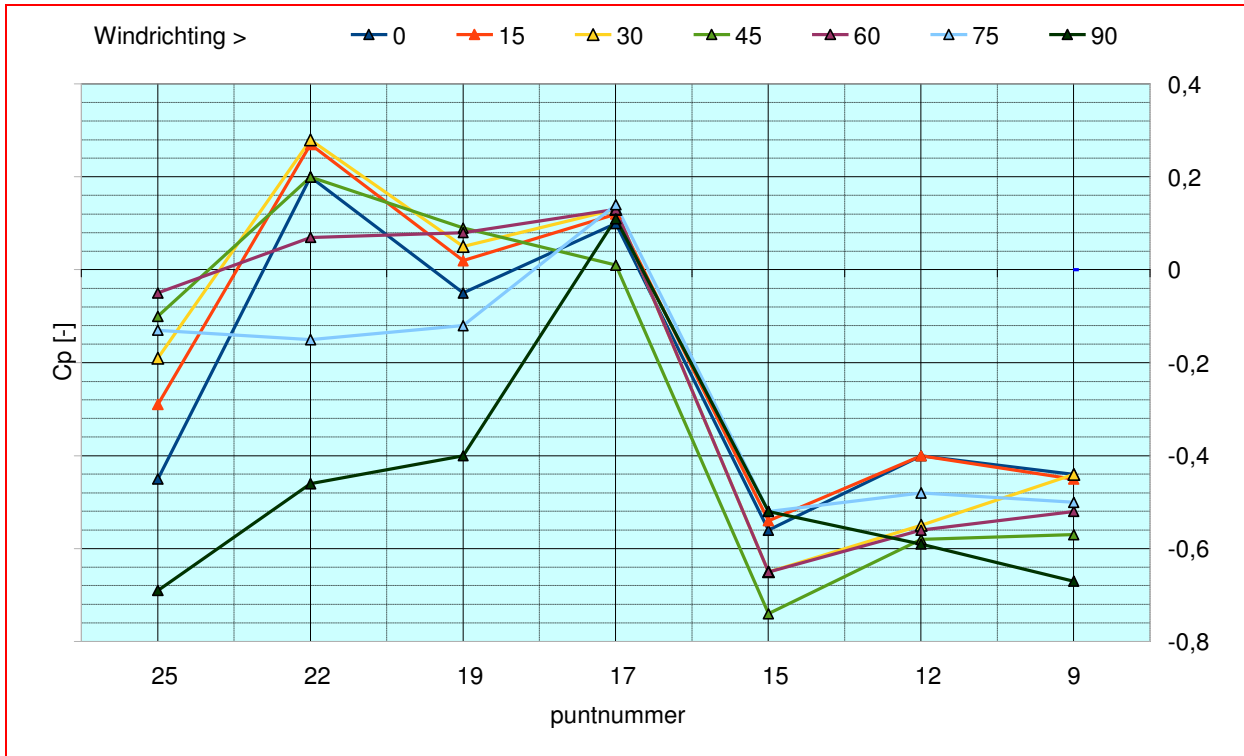
Figuur 17.16 geeft een overzicht van de figuren 17.2, 17.3 en 17.4 voor windrichting 0^0 , loodrechte aanstroming,. Ter vergelijking is de situatie met inactieve venturi-ejector volgens figuur 17.5 toegevoegd



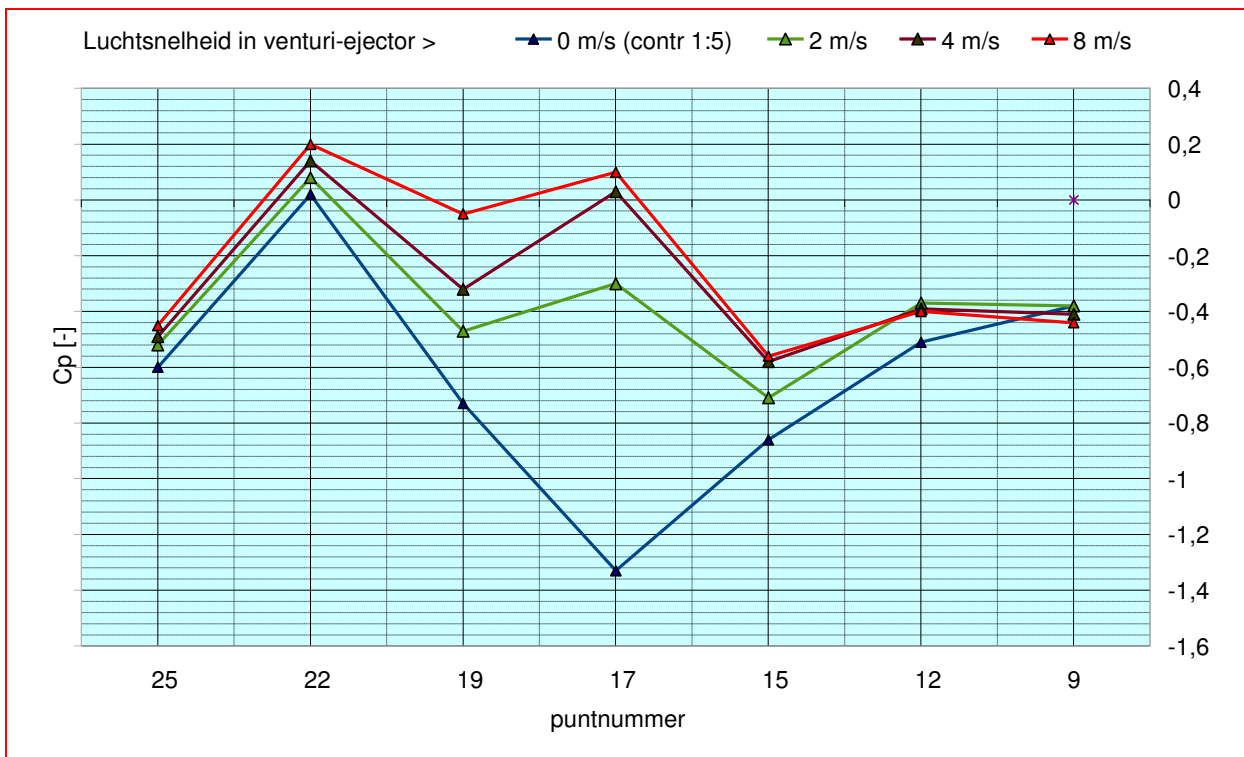
Figuur 17.13 – Cp-waarden bij actieve venturi-ejector – $w = 2 \text{ m.s}^{-1}$ - Hoge windsnelheid



Figuur 17.14 – Cp-waarden bij actieve venturi-ejector – $w = 4 \text{ m.s}^{-1}$ - Gemiddelde windsnelheid



Figuur 17.15 – Cp-waarden bij actieve venturi-ejector – $w = 8 \text{ m.s}^{-1}$ – Lage windsnelheid



Figuur 17.16 – Cp-waarden als functie van windsnelheid bij actieve en inactieve venturi-ejector

17.10 Vervolgonderzoek

In paragraaf 16.12 is als vervolgonderzoek een overzicht opgenomen van CFD simulaties voor het Ventecdak®. Deze simulaties zullen met behulp van modelmetingen in de windtunnel worden gevalideerd.

18. DYNAMISCH SIMULATIEMODEL ESP-r

18.1 Inleiding

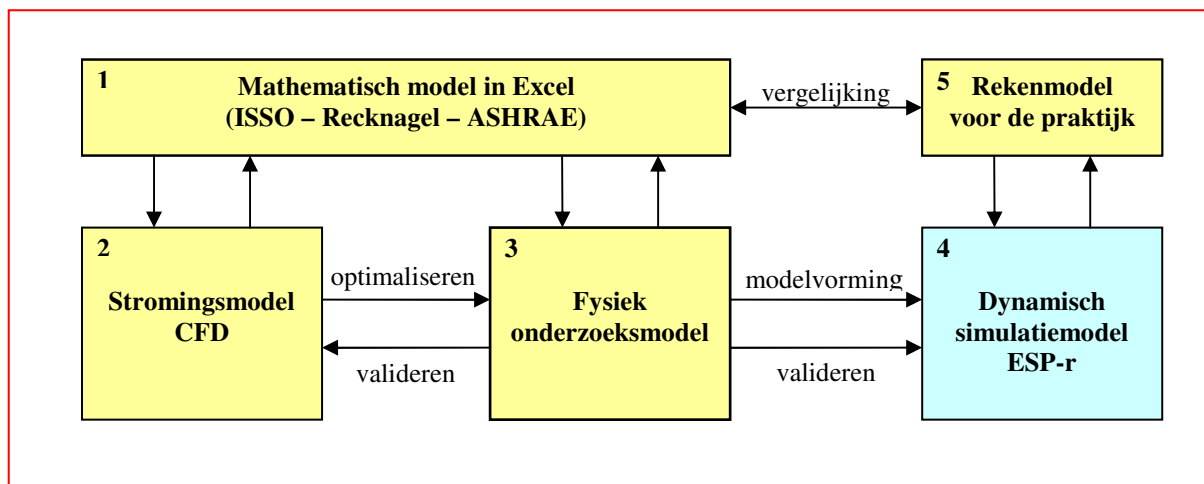
Simulatie is het proces van het maken van een vereenvoudigd model van een complex systeem en het gebruik van dit model om het gedrag van het werkelijke systeem te analyseren en te voorspellen (Hensen, J. 2003).

Met gebouwsimulaties kunnen in de concept- en de ontwerpfase voorspellingen worden gedaan over uiteenlopende en complexe kwaliteitsaspecten van een gebouw. Bij het onderzoek *Earth, Wind & Fire* gaat het in hoofdzaak om het analyseren en voorspellen van energie- en massastromen onder invloed van de thermodynamische koppeling tussen energie (geleiding, convectie en straling) en luchtstromen.

Het verband tussen het analytisch model in Excel, het numeriek stromingsmodel CFD, het fysieke onderzoeksmodel en het dynamisch simulatiemodel ESP-r is weergegeven in figuur 18.1. Elk model heeft zijn eigen toepassingsgebied en door gegevensuitwisseling tussen de modellen kan in principe een hoge mate van betrouwbaarheid worden gerealiseerd.

De prestaties van het Ventecdak[®] zijn gesimuleerd met behulp van CFD –zie hoofdstuk 16. De CFD simulaties zijn gevalideerd met behulp van een fysiek model in de windtunnel –zie hoofdstuk 17. Koppeling van het CFD model en het dynamisch ESP-r model is niet mogelijk. De resultaten, de gevalideerde CFD simulaties, uitgedrukt in de winddrukcoëfficiënt C_p , worden ingevoerd in het ESP-r simulatiemodel van het voor de case study geselecteerde gebouw –zie deelrapport (IV).

Volledigheidshalve is in de volgende paragrafen een beschrijving van het dynamisch ESP-r model opgenomen.



Figuur 18.1 – Modelleren - Simuleren – Kalibreren - Valideren

18.2 Dynamische simulatie met ESP-r

ESP-r is een simulatie-omgeving voor algemene doeleinden die een fundamentele bepaling mogelijk maakt van alle factoren die de energie- en milieuprestaties van gebouwen beïnvloeden.

Doelstelling van ESP-r is het simuleren van gebouwprestaties die

- Realistisch zijn en nauw aansluiten bij werkelijke fysieke verschijnselen;
- Toegepast kunnen worden in de verschillende ontwerpfasen van globaal tot gedetailleerd;
- Een integrale en evenwichtige prestatiebeoordeling mogelijk maken van alle relevante aspecten.

ESP-r wil de *real world* zo zorgvuldig mogelijk simuleren, op *best practice* niveau van de internationale simulatiegemeenschap. Door zich gelijktijdig op alle relevante aspecten te richten biedt ESP-r aan ontwerpers de mogelijkheid om de complexe relaties te bestuderen tussen het buiten- en binnenklimaat van een gebouw op basis van de architectuur, de bouwmassa, luchtstromingen en de klimaatinstallatie inclusief het regelsysteem.

ESP-r is gebaseerd op een eindig volume methode, waarbij een probleem wordt omgezet in een set vergelijkingen met behoud van energie, massa, impuls etc. Deze vergelijkingen worden in

opeenvolgende tijdstappen geïntegreerd als reactie op veranderingen in de variabelen. ESP-r is in 1974 ontworpen op de universiteit van Strathclyde, Glasgow en sindsdien continue doorontwikkeld. Het is flexibel en krachtig, en daardoor zeer geschikt voor het simuleren van innovatieve technieken. Voor het gebruik wordt een geoefende gebruiker verondersteld met een grondige kennis van de te simuleren fysische processen. (U.S. Department of Energy 2008). Verschillende studies hebben uitgewezen dat gebouwsimulatie meer is dan alleen maar software; het dient als een “kunde” worden beschouwd waarvoor twee essentiële vaardigheden vereist zijn (Hensen, J. 2004):

- De kennis en kunde om het complexe systeem met bijbehorende interrelaties te begrijpen, ofwel voldoende domeinkennis;
- De bekwaamheid om dit begrip te vertalen in een voor de simulatiesoftware geschikte, logische representatie.

De keus van ESP-r voor het *Earth, Wind & Fire* onderzoek is gebaseerd op de kracht en de flexibiliteit van deze simulatieomgeving, noodzakelijk voor de innovatieve concepten die moesten worden bestudeerd. Gekwalificeerde gebruikers, ruimschoots beschikkend over de bovengenoemde vaardigheden, zijn aanwezig bij de Unit Building Physics and Systems, faculteit Bouwkunde van de Technische Universiteit Eindhoven, een toonaangevend instituut op dit gebied, en tevens onderzoekspartner.

De simulatiemodellen voor het *Earth, Wind & Fire* onderzoek zijn in hoofdzaak ontworpen door Dr. Ing. Marija Trcka van genoemd instituut onder verantwoordelijkheid van Prof. Dr. Ir. Jan Hensen, hoofd van de Unit BPS.

18.3 ESP-r simulaties zonneshoorsteen

In ESP-r wordt de zonneshoorsteen gemodelleerd met behulp van een thermisch- en een stromingsnetwerk opgebouwd uit knooppunten. Hiermee worden onderling gekoppelde warmte- en massastromen worden gesimuleerd. Aan elk knooppunt wordt een temperatuur en een druk toegekend, die berekend zijn met respectievelijk de thermische- en de stromingssimulatie. De knooppunten zijn verbonden met zgn. stromingscomponenten; dit zijn vergelijkingen waarmee de massastroom kan worden berekend op basis van het drukverschil tussen de betreffende knooppunten. Het thermische- en het stromingsnetwerk zijn onderling afhankelijk: een temperatuurstijging van de lucht induceert opwaartse druk die de stroming tot stand brengt en de omvang van de stroming bepaalt op zijn beurt weer de temperatuur van de lucht.

Zie verder hoofdstuk 23 van deelrapport (I).

18.4 ESP-r simulaties Klimaatcascade

Ook de Klimaatcascade[®] wordt in ESP-r gemodelleerd met behulp van een thermisch- en een stromingsnetwerk opgebouwd uit knooppunten. Op soortgelijke wijze als in paragraaf 18.3 omschreven worden onderling gekoppelde warmte- en massastromen worden gesimuleerd. Aan elk knooppunt wordt een temperatuur en een druk toegekend, die berekend zijn met respectievelijk de thermische- en de stromingssimulatie. De knooppunten zijn verbonden met zgn.

stromingscomponenten; dit zijn vergelijkingen waarmee de massastroom kan worden berekend op basis van het drukverschil tussen de betreffende knooppunten. Het thermische- en het stromingsnetwerk zijn onderling afhankelijk: neerwaartse druk als gevolg van aerodynamische, hydraulische en thermische trek induceert neerwaartse stroming en de omvang van de stroming bepaalt op zijn beurt weer de temperatuur van de lucht.

Zie verder hoofdstuk 18 van deelrapport (III).

18.5 Case study

Een bestaand kantoorgebouw in Amsterdam is op basis van het Earth, Wind & Fire concept virtueel herontworpen. Voor dit gebouw wordt met behulp van het dynamisch simulatiemodel ESP-r het jaarlijkse energiegebruik in een referentie klimaatjaar bepaald en vergeleken met de huidige situatie.. Met deze case study is aangetoond dat het concept niet alleen voor nieuwbouw maar ook voor de bestaande gebouwenvoorraad kan worden toegepast.

19. BEREKENING EN ONTWERP

19.1 Samenvatting

De te realiseren positieve en negatieve drukken van een Ventecdak[®] zijn afhankelijk van de referentie windsnelheid op dakhoogte en de Cp-waarden.

De referentie windsnelheid wordt bepaald door de potentiële windsnelheid U_{10} , de ruwheidklasse van het terrein en de hoogte van het gebouw, tot uitdrukking komend in het zgn. windprofiel. De Cp-waarden worden bepaald door het ontwerp van het dak.

Aansluitend bij de CFD simulaties –zie hoofdstuk 16- en de metingen in de windtunnel –zie hoofdstuk 17- zijn logaritmische windprofielen berekend voor een omgeving met een ruwheidklasse 6 volgens Davenport.

De Cp-waarden van het Ventecdak[®] zijn berekend met de formules in paragraaf 16.9, die zijn afgeleid met behulp van CFD simulaties. De resultaten zijn in grafische vorm weergegeven.

Voor gebouwen tot 4 verdiepingen zijn de te realiseren drukken beperkt. Voor maximale prestaties verdient het aanbeveling de hoogte van het bovenkanaal zo groot mogelijk te maken en een lage snelheid in de venturi-ejector te kiezen. Tevens kan worden overwogen geen gebruik van het dak te maken bij windsnelheden < 2 Beaufort.

Bij hogere gebouwen en grote windsnelheden kunnen aanzienlijke drukken worden opgewekt, bijvoorbeeld $+ 60$ en $- 35$ Pa op 50 hoogte bij 5 Beaufort. In dergelijke gevallen zal de hoogte van het bovenkanaal kunnen worden beperkt tot 1,0 m bij een lichtsnelheid in de venturi-ejector van $2,0 \text{ m.s}^{-1}$.

Beheersing van drukverschillen in het Ventecdak[®] bij windsnelheden van $0 - 20 \text{ m.s}^{-1}$ is een belangrijk aspect, dat regeltechnisch moet worden opgelost. Naast een traditionele oplossing wordt voorgesteld drukverschillen te regelen behulp van een bypass tussen overdrukkamer en bovenkanaal, waarin een windturbine wordt aangebracht. De drukverschilregeling dient in een vervolgonderzoek in samenhang met de debietregeling op werklekniveau nader te worden onderzocht.

Een andere ruwheidklasse van het terrein levert ook een ander windprofiel profiel op. Hiervoor worden vermenigvuldigingsfactoren voor de potentiële windsnelheid gegeven.

19.2 Berekening windprofiel

De berekeningsmethode van plaatselijke windprofielen is ontleend aan (Wieringa 1983); zie ook hoofdstuk 5.

$$U_z = \frac{u^*}{K} \ln\left(\frac{z-d}{z_0}\right)$$

(19.1) \equiv (5.1)

Waarin

U_z	=	windsnelheid op hoogte z	$[\text{m.s}^{-1}]$
u^*	=	wrijvingssnelheid	$[\text{m.s}^{-1}]$
K	=	von Karmanconstante (0,4)	$[-]$
z	=	hoogte boven de grond	$[\text{m}]$
d	=	verschuivingshoogte	$[\text{m}]$
z_0	=	ruwheidslengte	$[\text{m}]$

De potentiële windsnelheid U_{10} wordt gemeten op 10 m hoogte in een open terrein met een verschuivingshoogte $d = 0$, een ruwheidslengte $z_0 = 0,03 \text{ m}$ –zie paragraaf 5.3. De wrijvingssnelheid in een dergelijk terrein met $d = 0$ wordt als volgt berekend.

$$u^* = \frac{K.U_{10}}{\ln\left(\frac{z-d}{z_0}\right)} = \frac{0,4.U_{10}}{\ln\left(\frac{10-0}{0,03}\right)} = 0,069U_{10} \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$$

(19.2) \equiv (5.2)

Op een hoogte van ca $z = 60$ m boven de grond heerst in een bepaald gebied eenzelfde gemiddelde windsnelheid, aangeduid met *mesosnelheid* U_m . Met behulp van (19.1) kan deze met $d = 0$ als volgt worden berekend:

$$U_m = \frac{0,069.U_{10}}{0,4} \ln\left(\frac{60}{0,03}\right) = 1,31U_{10} \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$$

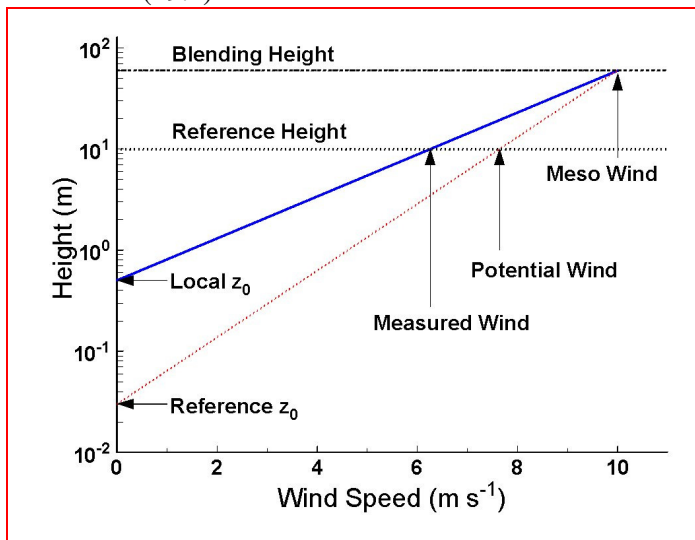
(19.3)

Het CFD model is niet gesitueerd in een open, maar in een zeer ruw terrein volgens de Davenport classificatie met een ruwheidslengte $z_0 = 0,5$ m. De verschuivingshoogte in dit terrein kan worden gesteld op $d = 10$ m, waardoor de mesosnelheid U_m 10 m omhoog schuift naar $(60 + 10) = 70$ m.

De windsnelheid U_z op willekeurige hoogten z en terreincondities kan op basis hiervan worden teruggerekend met de formule

$$U_z = U_m \left(\frac{\ln\left(\frac{z-10}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{70-10}{z_0}\right)} \right) \equiv 0,273U_{10} \ln\left(\frac{z-10}{0,5}\right)$$

(19.4)



“From the measured wind speed and the local roughness length, the wind speed at the blending height is computed. This meso wind speed is translated downwards to the potential wind speed at standard height and with standard roughness length. In this plot the measuring height and the standard height are both 10 m, the blending height is 60 m, the local roughness length is 0.5 m, and the standard roughness length is 0.03 m. The height transformations are done using the logarithmic wind speed profile”

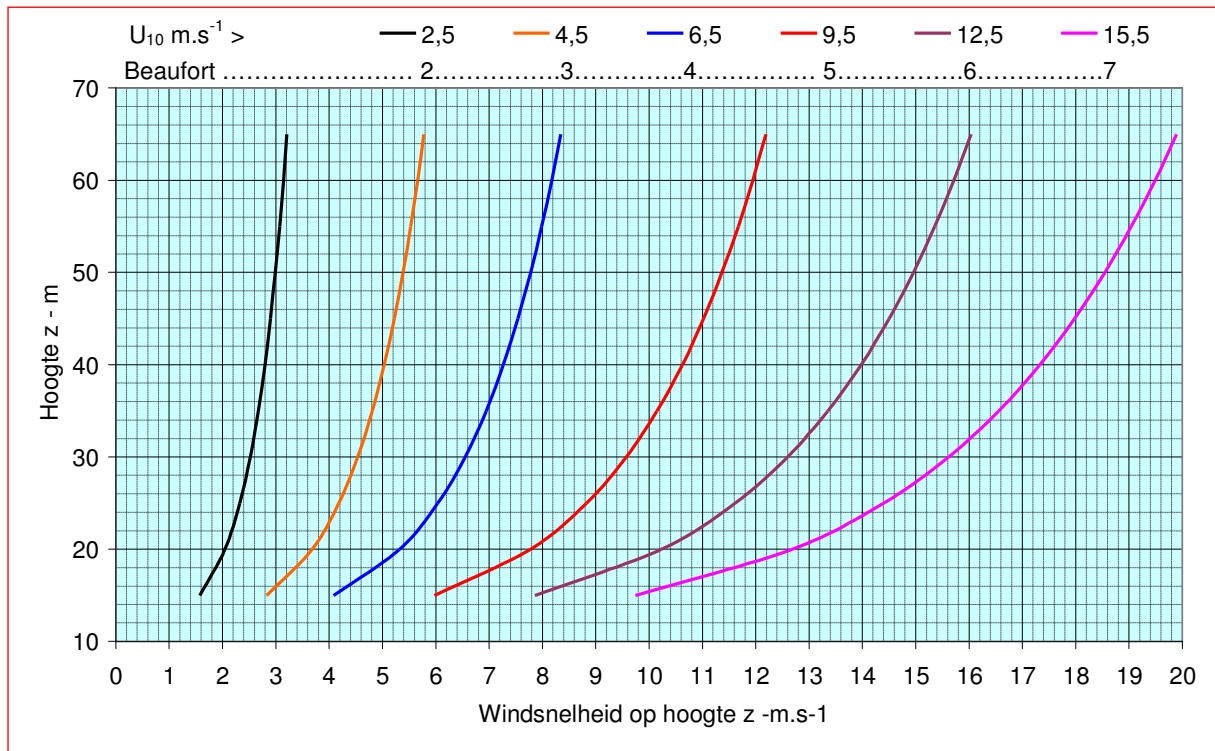
Figuur 19.1 – Potential Wind speed (www.knmi.nl)

Figuur 19.2 brengt het windprofiel in beeld als functie van de hoogte, berekend volgens formule (19.4). Bij een potentiële windsnelheid van bijvoorbeeld $6,5 \text{ m.s}^{-1}$ (matige wind, 4 Bft) is de windsnelheid op 20 m hoogte $5,4 \text{ m.s}^{-1}$ en op 50 m hoogte $7,8 \text{ m.s}^{-1}$.

De NPR 6097 – “Toepassing van de statistiek van de uurgemiddelde windsnelheden voor Nederland” (NNI 2006) geeft voor een willekeurige locatie in Nederland een probabilistische beschrijving van de uurgemiddelde windsnelheid op 60 m hoogte, de zgn. *mesosnelheid* U_m , zie paragraaf 6.8. De statistiek is gebaseerd op meetgegevens van de windsnelheid en windrichting van maximaal 51 KNMI meetstations. De statistiek van de referentiewindsnelheid op de locatie wordt gepresenteerd in twee

frequentietabellen, distributief en cumulatief. Verder is de ruweheidstabel toegevoegd met daarin de aan het landgebruik gekoppelde ruweheidslengte.

Voor het bepalen van de statistiek van de uurgemiddelde windsnelheid op een locatie zijn de X- en Y-coördinaten van de locatie nodig. Het coördinatenstelsel is het Rijksdriehoeksstelsel in Amersfoortse coördinaten, die kunnen worden afgelezen met behulp van een gedetailleerde kaart van Nederland. Met behulp van de NPR 6097:2006 kan op willekeurige locaties het windprofiel en de referentiewindsnelheid worden bepaald voor de prestatieberekeningen van het Ventecdak[®].



Figuur 19.2 – Windprofiel als functie van hoogte z en potentiële windsnelheid U₁₀

19.3 Drukken in het Ventecdak[®]

De positieve en negatieve drukken in het Ventecdak[®] kunnen worden berekend op basis van de windsnelheid en de Cp-waarden van de betreffende dakconfiguraties. De prestaties van het Ventecdak[®] in een jaarcyclus zijn uiteraard gerelateerd aan de frequentieverdeling van de windsnelheid in het referentiejaar dat wordt gekozen. Omdat windstatistieken uitgaan van de zgn. potentiële windsnelheid U₁₀ is in de volgende analyses de referentiewindsnelheid, die bepalend is voor de Cp-waarde, volgens formule (19.4) teruggerekend naar de potentiële windsnelheid U₁₀. Dit betekent dus tevens dat is uitgegaan van de in paragraaf 19.2 genoemde terreincondities.

Voor de overdruk ter plaatse van de luchtinlaat – de Bernoulli-injector- is uitgegaan van de in de windtunnel gemeten winddrukcoëfficiënt Cp = 0,8 –zie paragraaf 17.6.2.

De Cp-waarden van de Venturi-ejector zijn berekend met behulp van de in paragraaf 16.9 vermelde formules

en

$$C_p = 0,2913 \ln(U_{\text{kanaal}} / U_{\text{ref}}) + 0,0151 \quad \text{voor een hoogte van het bovenkanaal } c = 2\text{m}$$

(19.5) \equiv (16.3)

en

$$C_p = 0,5374 \ln(U_{\text{kanaal}} / U_{\text{ref}}) + 0,6381 \quad \text{voor een hoogte van het bovenkanaal } c = 1\text{m}$$

(19.6) \equiv (16.2)

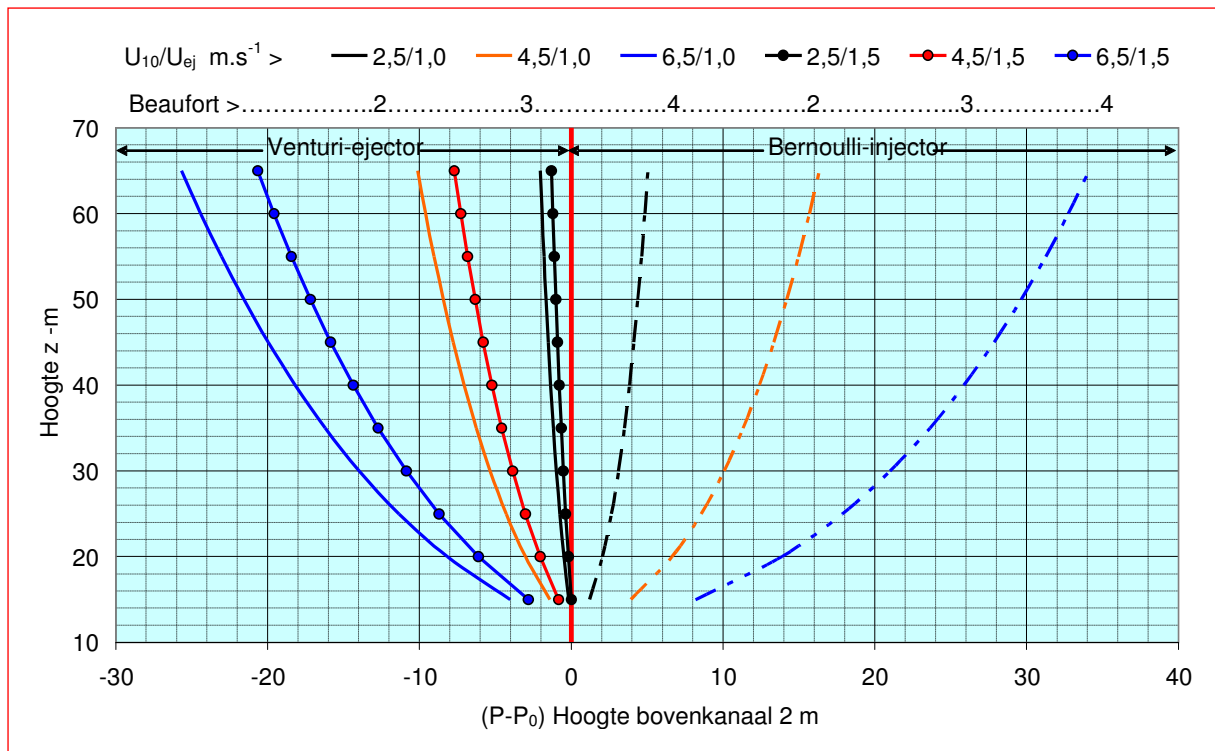
Figuur 19.3 brengt de volgens formule (19.5) berekende drukken ($P-P_0$) in beeld voor een bovenkanaal van $c = 2$ m en een luchtsnelheid in de venturi-ejector $U_{ej.} = 1,0$ en $1,5$ $m.s^{-1}$ voor

- potentiële windsnelheden van respectievelijk $U_{10} = 2,5 - 4,5$ en $6,5$ $m.s^{-1}$
- globaal overeenkomend met windkracht 2 – 3 en 4 Beaufort.

Tabel 19.1 geeft een voorbeeld van de uitlezing van figuur 19.3 voor een hoogte van 30m.

Windsnelheid		Drukverschil ($P-P_0$) op hoogte van 30 m -Pa		
$U_{10} - m.s^{-1}$	Beaufort	injector	ejector bij $U_{ej.}=1,0$ $m.s^{-1}$	ejector bij $U_{ej.}=1,5$ $m.s^{-1}$
2,5	2	+3,1	-1,0	-0,15
4,5	3	+10	-5,4	-3,9
6,5	4	+21	-14	-10,9

Tabel 19.1 – Voorbeeld toepassing figuur 19.3



Figuur 19.3 – Drukken in het Ventecdak[®] als functie van de potentiële windsnelheid en hoogte

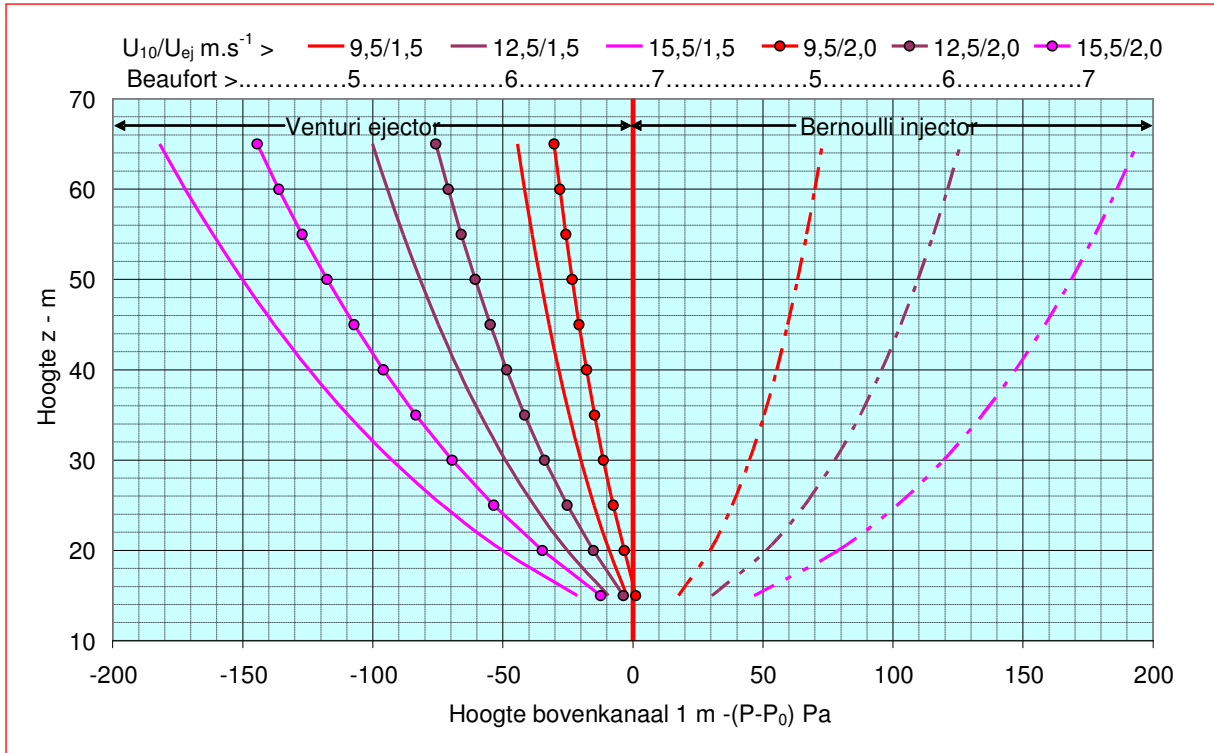
Figuur 19.4 brengt de volgens formule (19.5) berekende drukken ($P-P_0$) in beeld voor een bovenkanaal van $c = 1$ m en een luchtsnelheid in de venturi-ejector $U_{ej.} = 1,5$ en $2,0$ $m.s^{-1}$ voor

- potentiële windsnelheden van respectievelijk $U_{10} = 9,5 - 12,5$ en $15,5$ $m.s^{-1}$
- globaal overeenkomend met windkracht 5 – 6 en 7 Beaufort.

Tabel 19.2 geeft een voorbeeld van de uitlezing van figuur 19.4 voor een hoogte van 30m. Merk op dat de druk in de venturi-ejector op een hoogte van 15 m licht positief wordt bij een windsnelheid van $9,5$ $m.s^{-1}$ en $2,0$ $m.s^{-1}$ in de ejector.

Windsnelheid		Drukverschil ($P-P_0$) op hoogte van 30 m -Pa		
$U_{10} - m.s^{-1}$	Beaufort	injector	ejector bij $U_{ej.}=1,5$ $m.s^{-1}$	ejector bij $U_{ej.}=2,0$ $m.s^{-1}$
9,5	5	+44,9	-20,0	-11,4
12,5	6	+77,7	-49,0	-34,0
15,5	7	+119,4	-92,6	-69,4

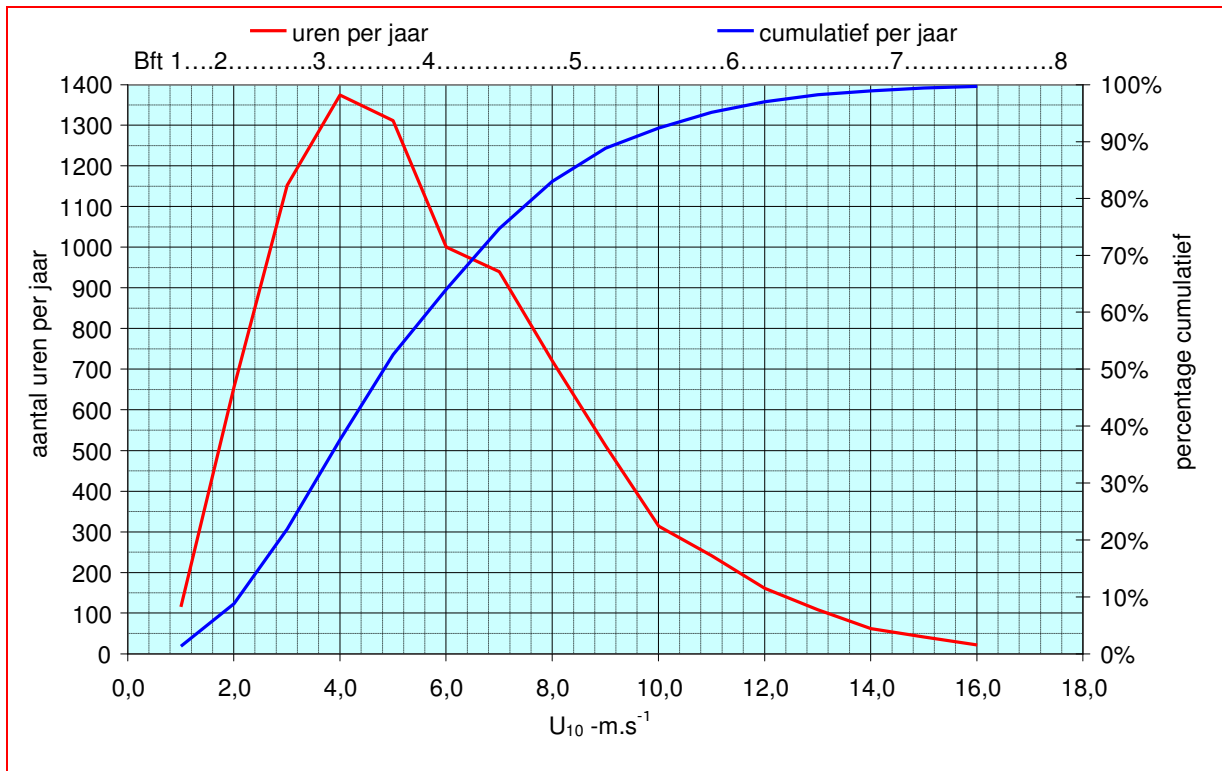
Tabel 19.2 – Voorbeeld toepassing figuur 19.3



Figuur 19.4 – Drukken in het Ventecdak® als functie van de potentiële windsnelheid en hoogte

19.4 Windstatistiek

Figuur 19.5 geeft de statistische frequentie weer van de potentiële windsnelheden U_{10} op de locatie Schiphol over de periode 1971 – 2000. De figuur is gebaseerd op de frequentietabel in paragraaf 6.7.



Figuur 19.5 – Frequentie van de potentiële windsnelheid U_{10} op de locatie Schiphol

19.5 Minimum ontwerpdrukverschil

Een potentiële windsnelheid $U_{10} < 2,0 \text{ m.s}^{-1}$ wordt minder dan 10% van de tijd onderschreden en dit lijkt dan ook een goede ondergrens voor het ontwerp van het Ventecdak[®].

Figuur 19.3 geeft aan dat bij $U_{10}/U_{ej} = 2,5/1,0$ slechts zeer geringe drukverschillen te realiseren zijn hetgeen ook te zien is in tabel 19.3, de getalsmatige basis van figuur 19.3 voor lage windsnelheid. Het ligt voor de hand de ondergrens te verhogen tot $U_{10} = 3,0 \text{ m.s}^{-1}$, een windsnelheid die statistisch minder dan 20% van de tijd wordt onderschreden. Voor de combinatie $U_{10}/U_{ej} = 3,5/1,0$ zijn dan redelijke drukverschillen te realiseren. Zie figuur 19.3 en tabel 19.4. Ook kan worden overwogen de minimum gebouwhoogte voor toepassing van het Ventecdak[®] hoger te leggen dan 15 m.

hoogte z -m	15	20	25	30	35	40	45	50
U_{10} -m/s	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
U_{ref} -m/s	1,57	2,04	2,32	2,52	2,67	2,79	2,90	2,99
U_{ej} -m/s	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
C_p -	-0,12	-0,19	-0,23	-0,25	-0,27	-0,28	-0,30	-0,30
$(p-p_0)$	-0,18	-0,49	-0,76	-0,99	-1,18	-1,36	-1,52	-1,67
C_p+	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
$(p-p_0)$	1,21	2,05	2,64	3,11	3,49	3,83	4,12	4,38

Tabel 19.3 – Drukken in het Ventecdak[®] bij een potentiële windsnelheid van $2,5 \text{ m.s}^{-1}$

hoogte z -m	15	20	25	30	35	40	45	50
U_{10} -m/s	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
U_{ref} -m/s	2,20	2,86	3,25	3,52	3,74	3,91	4,06	4,19
U_{ej} -m/s	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
C_p	-0,21	-0,29	-0,33	-0,35	-0,37	-0,38	-0,39	-0,40
$(p-p_0)$	-0,64	-1,46	-2,12	-2,68	-3,16	-3,58	-3,97	-4,32
C_p+	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
$(p-p_0)$	2,37	4,01	5,18	6,09	6,85	7,50	8,07	8,59

Tabel 19.4 – Drukken in het Ventecdak[®] bij een potentiële windsnelheid van $3,5 \text{ m.s}^{-1}$

19.6 Maximum ontwerpdrukverschil

Het Ventecdak[®] kan *stand alone* worden toegepast maar is in principe onderdeel van het Earth, Wind & Fire concept, waarin ook drukverschillen worden opgewekt door de Klimaatcascade[®] en de Zonneschoorsteen of Zonnefaçade[®]. Het totale drukverschil moet binnen een bepaalde bandbreedte worden geregeld. Deze bandbreedte om een bepaald instelpunt, uitgedrukt in potentiële windsnelheid, zou bijvoorbeeld 1 m.s^{-1} kunnen bedragen.

Het instelpunt is een belangrijke ontwerpparameter van het Ventecdak[®], en is afhankelijk van de gebouwhoogte –zie de figuren 19.3 en 19.4. Het Ventecdak[®] zou bijvoorbeeld kunnen worden ontworpen op $U_{10} = 3,5 \pm 0,5 \text{ m.s}^{-1}$. Bij $U_{10} < 3,0 \text{ m.s}^{-1}$ kan eventueel de hulpventilator worden ingeschakeld. Bij $U_{10} > 4,0 \text{ m.s}^{-1}$ moet het drukverschil worden afgeregeld. Een en ander is mede afhankelijk van de drukverschillen die in de Klimaatcascade[®] en de Zonneschoorsteen of Zonnefaçade[®] worden opgewekt.

19.7 Regeling

Voor de afregeling van drukverschillen kan een smoorregeling of een verdelende regeling met bypass worden toegepast. In paragraaf 12.2 is voor de drukregeling in de overdrukkamer uitgegaan van een bypassregeling met luchtkleppen waardoor lucht naar de lijzijde kan ontsnappen. Voor de zonneschoorsteen is uitgegaan van een smoorregeling met luchtkleppen –zie deelrapport (I).

Een potentieel veel uitdagender concept is een bypassregeling die lucht uit de overdrukkamer laat ontwijken naar het bovenkanaal van het Ventecdak[®]. In deze bypass kan een windturbine voor

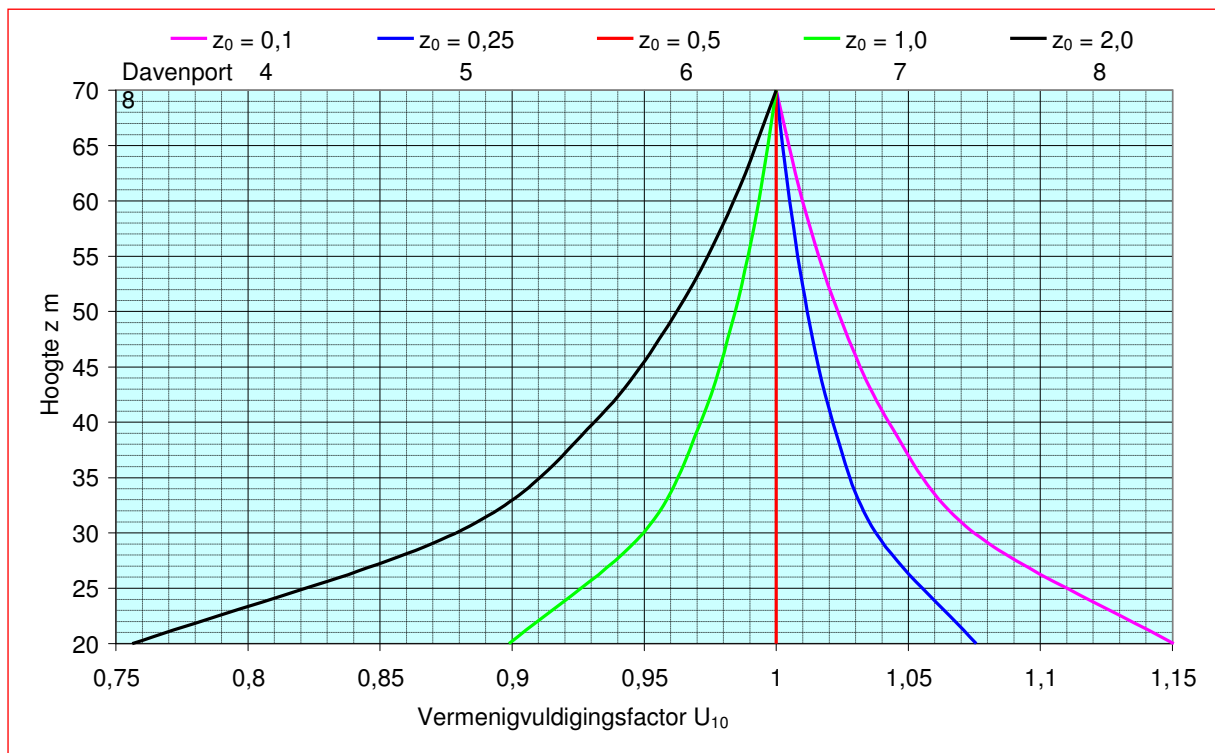
energieopwekking worden aangebracht. In principe kan hiermee ook de druk in het bovenkanaal worden geregeld, en eventueel zelfs overdruk worden gerealiseerd.

Met dit concept worden drie vliegen in één klap geslagen: (1) elegante drukregeling van het Ventecdak®, (2) energieopwekking en (3) debietregeling ten behoeve van de Zonneschoorsteen. Voor een globale verkenning van energieopwekking met het Ventecdak® zie hoofdstuk 20.

De drukverschilregeling zal ook rekening moeten houden met windvlagen en turbulenties –zie hoofdstuk 5. De dempende eigenschappen van de overdrukkamer en van het gebouw als geheel moeten hierbij worden onderzocht, evenals de relatie met de debietregeling op werkplekniveau. Een en ander is in het kader van het onderzoek niet uitgediept, maar vormt interessante stof voor vervolgonderzoek.

19.8 Invloed van de terreinruwheid

Volledigheidshalve wordt nog opgemerkt dat deze analyse betrekking heeft op gebouwen in een zeer ruw terrein, ruwheidsklasse 6 volgens de classificatie van Davenport en een verschuivingshoogte van 10 m. In een gebied met een grotere ruwheid zijn de windsnelheden t.o.v. de potentiële windsnelheid hoger en omgekeerd. Voor de vermenigvuldigingsfactoren voor de windsnelheid zie figuur 19.6, die is berekend met formule (19.4). Op 70 m hoogte heerst de mesosnelheid en wordt de vermenigvuldigingsfactor 1.



Figuur 19.6 – Vermenigvuldigingsfactor U_{10} als functie van ruwheidsklasse en hoogte

20. WINDENERGIE IN HET VENTECDAK[®]

20.1 Inleiding en Samenvatting

De doelstelling van de EPBD Recast (EP en EC 2010) is het realiseren van gebouwen met een energiegebruik van “*nearly zero*” en het resterende energiegebruik dient in hoofdzaak door “*renewable sources*” worden opgewekt. Hiervoor zou bijvoorbeeld dus groene stroom kunnen worden ingekocht.

ASHRAE gaat met de doelstelling van “*Net Zero Energy Buildings*”, waarvoor op jaarbasis het resterend energiegebruik “*on-site renewable*” moet worden opgewekt nog iets verder -zie paragraaf 1.1 van dit deelrapport. In Nederland is hiervoor het begrip “*energieneutraal bouwen*” geïntroduceerd, dat overigens nog niet nauwkeurig is gedefinieerd (www.agentschapnl.nl/programmas-regelingen/energieneutraal-bouwen)

Eén van de doelstellingen van het Earth, Wind & Fire concept is het energiegebruik van de noodzakelijke pompen en hulpventilatoren in het gebouw zelf met behulp van wind en zon op te wekken. Het multi-funcionele Ventecdak[®], dat in eerste instantie is ontworpen voor natuurlijk ventilatie, biedt hiervoor goede mogelijkheden. Het voorliggende hoofdstuk onderzoekt de potentiële prestaties van windenergie, terwijl in hoofdstuk 21 zonne-energie wordt onderzocht.

Opwekking van windenergie in de gebouwde omgeving wordt beschouwd als een kansrijke technologie. De hiervoor ontwikkelde Urban Turbines, zoals de Turby (<http://www.turby.nl>) worden in principe op gebouwen geplaatst. De ontwikkeling van het Ventecdak[®] maakt het mogelijk windturbines in een gebouw te integreren. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de in het Ventecdak[®] opgewekte drukverschillen, die veel groter zijn dan die in de open lucht. Verder zijn eventuele geluidsproblemen door de inpandige opstelling gemakkelijker op te lossen en kan onderhoud plaatsvinden vanuit een gemakkelijk toegankelijke en beschermde techniekruimte. Windenergie kan hierdoor in principe kosteneffectief worden opgewekt.

In de overdrukkamer van het Ventecdak[®] kunnen, afhankelijk van de afmetingen hiervan, meerdere windturbines worden geplaatst. Er zijn drie varianten onderzocht:

- Overdrukkamer 10 x 10 m met 4 turbines Ø 2,5m
- Overdrukkamer 20 x 20 m met 8 turbines Ø 2,5m
- Overdrukkamer 30 x 30 m met 12 turbines Ø 2,5m

De jaarproductie van deze turbines, uitgedrukt in kWh.a⁻¹ per m² rotoroppervlak, is afhankelijk van de gebouwhoogte. Bij een hydraulisch rendement van 75% zijn energieproducties berekend van ≈ 200 kWh.m⁻².a⁻¹ bij een gebouwhoogte van 20 m tot 780 kWh.m⁻².a⁻¹ bij 65 m hoogte. Met betrekkelijk kleine turbines kan hierdoor een energieopbrengst worden gerealiseerd die minstens gelijkwaardig is aan die van een Turby.

In principe kan ook in de venturi-ejector een turbine worden aangebracht, waardoor gebruik zou kunnen worden gemaakt van het grote drukverschil tussen overdrukkamer en venturi-ejector. De werking van de venturi-ejector wordt echter verstoord door de secundaire luchtstroom uit de turbine. Bovendien is het gelijktijdig gebruik van de venturi-ejector voor ventilatie en energieopwekking niet mogelijk, waardoor deze turbine alleen buiten de bedrijfsuren zou kunnen worden gebruikt.

De profielen van de beschikbare windenergie en zonne-energie zijn over de seizoenen gerekend redelijk complementair. 's Zomers veel zon en weinig wind. 's Winters veel wind en weinig zon. Een gecombineerde toepassing van zon- en windenergie in het Ventecdak[®] is daarom een interessante optie.

Nader onderzoek met behulp van CFD simulaties en metingen in de windtunnel is nodig om de berekeningen te valideren en het concept voor algemene toepassingen te optimaliseren

20.2 Inleiding windenergie

“Windenergie is omstreden. De weinig genuanceerde berichtgeving over windenergie laat zien dat de discussie erover tamelijk gepolariseerd is. Dat komt niet alleen door het zware stempel dat windenergie op grote landelijke productiegebieden drukt. Ook financieel moeten er offers voor worden gebracht. Uiteraard roept dat politieke en maatschappelijke vragen op. Wat is het nut en wat de noodzaak van

windenergie, wat zijn de kosten en hoe staat het met de baten ervan? Zijn er nu of straks betere alternatieven?” (<http://www.groenerekenkamer.nl/wind>)

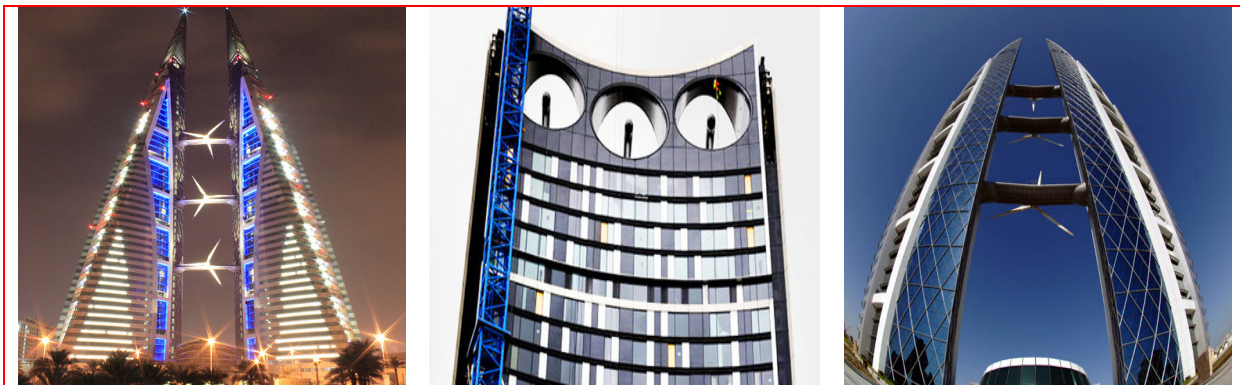
De huidige trend in de ontwikkeling van windenergie is de aanleg van grootschalige windparken in windrijke omgevingen, bijvoorbeeld op zee of aan de kust. Een dergelijke centrale energieopwekking met grote tot zeer grote windturbines is veel duurder dan traditionele grijze stroom; het kostenverschil wordt momenteel door subsidies opgevangen¹¹.

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, die zijn oorsprong vindt in het gevaar dat ze opleveren voor vogels, de geluidsoverlast en slagschaduw voor omwonenden en de ervaren “*horizonvervuiling*”.

De genoemde problemen zijn minder bij een kleinschalige opwekking van windenergie in de gebouwde omgeving. Speciaal voor dit doel ontworpen kleine turbines zoals de Turby, een verticale as windturbine met een nominaal vermogen van 2,5 kW 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 teruglevering, althans in Nederland.

Toepassing van decentrale energieopwekking in de gebouwde omgeving wordt gestimuleerd door de ontwikkeling van “*smart grids*” oftewel “*intelligente energienetwerken*” die al over een aantal jaren werkelijkheid kunnen zijn. De energievoorziening verloopt hierbij niet meer uitsluitend centraal en eenzijdig vanaf de grote centrales naar de energieverbruikers. Het energienetwerk wordt interactief: gebruikers kunnen zelf deelnemen aan de energieproductie en overwegen per situatie van welke producent ze energie willen afnemen (Europese Commissie 2011).

Een nadeel van kleinschalige opwekking van windenergie in de gebouwde omgeving is dat de windsnelheden hier lager zijn dan in het open veld. Dit kan gecompenseerd worden door de turbine hoog te plaatsen, bijvoorbeeld op een hoog gebouw. Ook kan gebruik worden gemaakt van plaatselijk hoge winddrukken op gevels, waarbij de turbine in een kanaal door het gebouw wordt geplaatst. Een interessante mogelijkheid is de windsnelheid plaatselijk te verhogen door een architectonische en stedenbouwkundige integratie van windturbines en gebouwen. De wind wordt hierbij door een specifieke oriëntatie en vormgeving van gebouwen geconcentreerd op de locatie van de windturbine (Mertens, Sander 2006,) - zie bijvoorbeeld figuur 20.1



Figuur 20.1 – Geïntegreerde stedelijke windenergie

Geluidsproblemen en gevaar voor vogels vragen ook bij windenergie in de gebouwde omgeving om een oplossing.

Met windenergie in het Ventecdak[®], dat in eerste aanleg is ontworpen voor natuurlijke ventilatie, zijn windturbines deel van de technische gebouwinstallaties. Door de situering binnen het gebouw kunnen dergelijke problemen eenvoudiger worden opgelost.

¹¹ Minister president Mark Rutte in een verkiezingstoespraak “*Windmolens draaien niet op wind, maar op subsidies*”

Van de combinatie windenergie en natuurlijke ventilatie is in de literatuur slechts één referentie gevonden (Toet, S. 2002).

20.3 Windenergie

De energie in een bewegende massa kan worden uitgedrukt in de algemene formule

$$E = 0,5 \cdot m \cdot U^2$$

(20.1)

waarin

E	= energie	[kg.m ² .s ⁻² ≡ N.m]
m	= massa	[kg]
U	= snelheid	[m.s ⁻¹]

De massastroom door het oppervlak van een turbinerotor stroomt wordt uitgedrukt in de formule

$$q_m = \rho \cdot A_r \cdot U_r$$

(20.2)

waarin

q_m	= massastroom	[kg.s ⁻¹]
ρ	= massadichtheid	[kg.m ⁻³]
A_r	= rotoroppervlak	[m ²]
U_r	= snelheid door de rotor	[m.s ⁻¹]

Het maximum vermogen P_m van deze massastroom, zonder rekening te houden met omzettingsverliezen in de rotor, bedraagt theoretisch

$$P_m = \alpha \cdot 0,5 \cdot \rho \cdot A_r \cdot U_r^3$$

(20.3)

waarin

P_m	= vermogen	[W]
α	= aerodynamisch rendement	[-]

Bij vrijstaande windturbines kiest de wind de weg van de minste weerstand en stroomt gedeeltelijk niet meer door de rotor, maar er omheen. Dit zgn. wind blokkeereffect kwam eerder aan de orde bij de analyse van het venturi-effect in het Ventecdak[®] (Blocken, B. et al 2011).

Bij een constante windsnelheid wordt de snelheid door de turbine kleiner als de drukval over de turbine groter wordt. In het extreme geval van maximale drukval over de rotor is de snelheid nul; in het extreme geval van maximale snelheid is het drukverschil nul en wordt er geen vermogen opgewekt.

Er kan worden aangetoond dat er een optimum in het vermogen is als de snelheid door de turbine de helft is van de ongestoorde windsnelheid. Dit theoretisch maximaal opgewekt vermogen wordt de Lancaster-Betz- limiet genoemd en bepaalt de maximale waarde van het aerodynamisch rendement, dat dan gelijk is aan 0,59 (Plomp, H. en Aanen, L. 2007)

De verhouding tussen het onttrokken vermogen P_t en het totale vermogen P_m van de massastroom volgens (20.3) is het rendement uitgedrukt in de vermogenscoëfficiënt C_{pow} ¹².

$$C_{pow} = \frac{P_t}{\alpha \cdot 0,5 \cdot \rho \cdot A_r \cdot U_r^3}$$

(20.4)

met

C_{pow}	= vermogenscoëfficiënt	[-]
P_t	= turbinevermogen	[W]

¹² Omdat C_p al is gebruikt voor de winddrukcoëfficiënt wordt hier C_{pow} gebruikt.

Voor conventionele windturbines, werkend volgens het liftprincipe, komt de theoretische maximum vermogenscoëfficiënt overeen met de Lancaster-Betz limiet van $C_{pow,max} \approx 0,59$.

Omzettingsverliezen in de rotor kunnen, naar analogie van de bij ventilatoren gebruikte terminologie, worden uitgedrukt in het hydraulisch rendement η_{hyd} . De vermogenscoëfficiënt is dan

$$C_{pow} = C_{pow,max} \cdot \eta_{hyd} \quad (20.5)$$

Voor moderne windturbines worden in de praktijk waarden gerealiseerd van $C_{pow} \approx 40 \dots 45\%$, hetgeen inhoudt dat $\eta_{hyd} \approx 0,7 \dots 0,75$.

20.4 Windturbines in het Ventecdak[®]

Er zijn twee essentiële verschillen tussen windturbines in het Ventecdak[®] en conventionele vrijstaande windturbines.

- Een vrijstaande windturbine maakt gebruik van de dynamische winddruk, terwijl de turbine in het Ventecdak[®] wordt aangedreven door statische drukverschillen. De omzetting van dynamische in statische druk in het Ventecdak[®] gaat gepaard met drukverliezen.
- Bij een vrijstaande windturbine stroomt de lucht gedeeltelijk om de rotor heen, hetgeen bij de turbine in het Ventecdak[®] niet mogelijk is. Dit houdt in dat de in paragraaf 20.4 genoemde Lancaster-Betz limiet hier niet van toepassing is.
- De in het Ventecdak[®] opgewekte drukverschillen zijn veel groter zijn dan drukverschillen in de open lucht. Met turbines in het Ventecdak[®] kunnen daarom hogere vermogenscoëfficiënten worden gerealiseerd dan met vrijstaande windturbines.

Naast de hogere vermogenscoëfficiënt hebben windturbines in het Ventecdak[®] ten opzichte van conventionele windturbines nog de verdere voordelen:

- Eventuele geluidsproblemen zijn door de inpandige opstelling gemakkelijker op te lossen.
- Er is geen omgevingsvergunning (Wabo) nodig.
- De windturbines worden deel van de technische gebouwinstallaties, waardoor de afstemming van energieproductie en energiegebruik eenvoudiger wordt.
- Onderhoud kan plaatsvinden vanuit de dakopbouw, een gemakkelijk toegankelijke en beschermde techniekruimte.

De drukval over, en de snelheid in de rotor kan bij de turbine in het Ventecdak[®] worden uitgedrukt in de volgende formule

$$\Delta p = 0,5 \cdot \rho \cdot (\zeta_{in} + \zeta_{rot} + \zeta_{uit}) \cdot U_{rot}^2 \quad (20.6)$$

Waarin

Δp	=	drukval over de rotor	[Pa \equiv N.m ⁻² \equiv kg.m.s ⁻² .m ⁻²]
ρ	=	massadichtheid	[kg.m ⁻³]
ζ_{in}	=	weerstandscoefficient intrede	[-]
ζ_{rot}	=	weerstandscoefficient rotor	[-]
ζ_{uit}	=	weerstandscoefficient uitrede	[-]
U_{rot}	=	luchtsnelheid in de rotor	[m.s ⁻¹]

Opgelost voor U_{rot} kan vergelijking (20.6) worden geschreven

$$U_{rot}^2 = \frac{\Delta p}{0,5 \cdot \rho \cdot (\zeta_{in} + \zeta_{rot} + \zeta_{uit})} \quad (20.7)$$

Het vermogen dat de turbine theoretisch kan leveren is

$$P_{th} = \Delta p_{rot} \cdot A_{rot} \cdot U_{rot} \quad (20.8)$$

Waarin P_{th} = theor. turbinevermogen [W]
 A = rotoroppervlak [m²]

Met

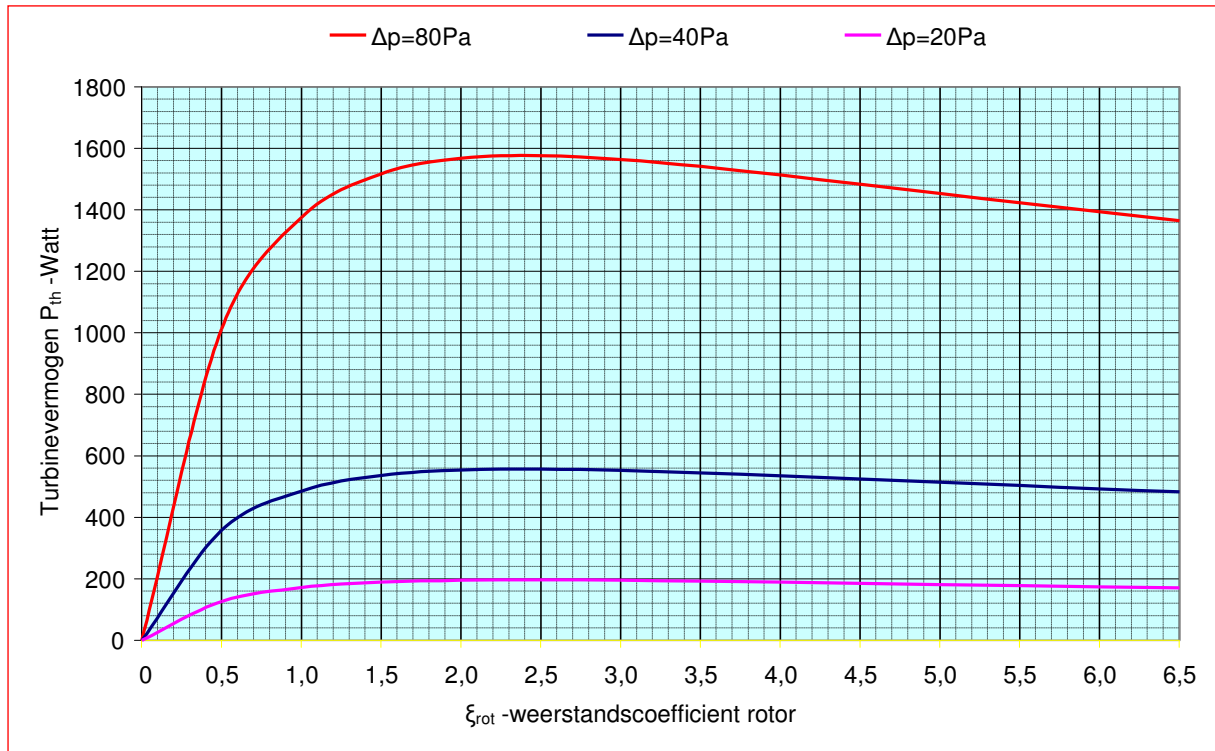
$$\Delta p_{rot} = 0,5 \cdot \zeta_{rot} \cdot \rho \cdot U_{rot}^2$$

Gaat (20.8) over in

$$P_{th} = 0,5 \cdot \zeta_{rot} \cdot \rho \cdot A_{rot} \cdot U_{rot}^3 \quad (20.9)$$

Substitutie van (20.7) in (20.9) levert voor een bepaalde Δp de volgende relatie tussen de weerstandscoefficiënt ζ_{rot} van de turbine en het vermogen P

$$P_{th} = 0,5 \cdot \zeta_{rot} \cdot \rho \cdot A_{rot} \cdot \left(\frac{\Delta p}{0,5 \cdot \rho \cdot (\zeta_{in} + \zeta_{rot} + \zeta_{uit})} \right)^{1,5} \quad (20.10)$$



Figuur 20.2 – Turbinevermogen P_{th} als functie van de weerstandscoefficiënt ξ_{rot} van de rotor

Formule (20.10) is voor een rotordiameter van 2,5 m, $\xi_{in} = 0,2$ en $\xi_{uit} = 1,0$ en drukverschillen van 80, 40 en 20 Pa in figuur 20.2 grafisch uitgewerkt. Het turbinevermogen P_{th} loopt aanvankelijk bij toenemende weerstandscoefficiënt van de rotor snel op om bij $\xi_{rot} \approx 2,5$ een optimum te bereiken. Bij $\xi_{rot} > 2,5$ neemt het vermogen geleidelijk af. Het ontwerp van de windturbines en de rotorbladen voor toepassing in het Ventecdak[®] moet dus worden gericht op een weerstandscoefficiënt $\xi_{rot} \approx 2,5$.

20.6 Terreincondities

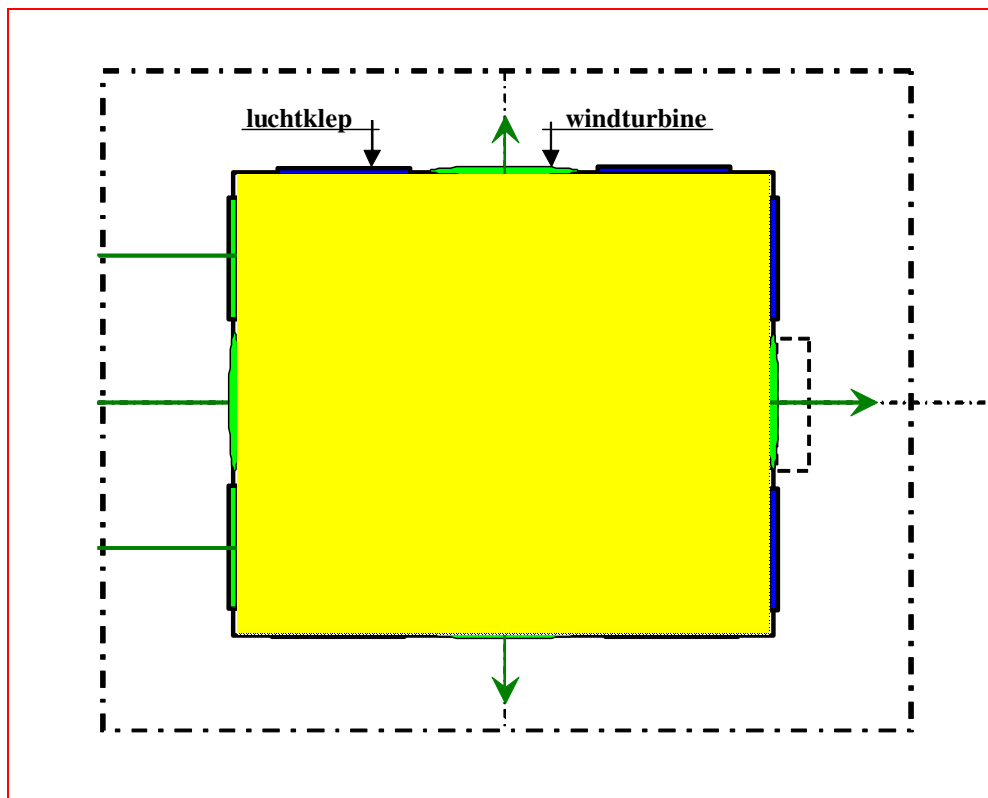
Drukverschillen over de overdrukkamer zijn afhankelijk van de plaatselijke windsnelheid en de winddrukcoëfficiënten aan wind- en lijzijde. Voor de prestatieberekeningen van windturbines in het Ventecdak[®] is, evenals in hoofdstuk 19, uitgegaan van het windprofiel in een zeer ruw terrein volgens de Davenport classificatie met een ruwheidslengte $z_0 = 0,5$ m. De referentiewindsnelheden U_z voor gebouwhoogten van 15 tot 65 m zijn berekend met de in paragraaf 19.2 afgeleide formule

$$U_z = 0,273 \cdot U_{10} \cdot \ln\left(\frac{z-10}{0,5}\right)$$

(19.4)

20.7 Windturbines in de overdrukkamer

Windturbines kunnen worden aangebracht in de overdrukkamer – zie figuur 20.3. Deze oplossing is windrichtingafhankelijk en daarom zijn tenminste vier turbines nodig. Om bij een beperkte hoogte van de overdrukkamer de energieproductie op te voeren is het wenselijk meerdere turbines per wand aan te brengen. In paragraaf 20.8 zijn de opties onderzocht met respectievelijk 4, 8 en 12 turbines Ø 2,5 m. De afmetingen van de overdrukkamer zijn hieraan gerelateerd; in de eerste plaats om voldoende wandoppervlak voor de turbines te realiseren en in de tweede plaats om de luchtsnelheid en het inherente drukverlies van de suppletie lucht voor de turbines te beperken.



Figuur 20.3 – Windturbines in overdrukkamer – meerdere turbines per wand mogelijk

De luchtkleppen –zie ook paragraaf 12.2 en figuur 12.1- zijn aan de windzijde geopend en op de overige oriëntaties gesloten, waardoor in de overdrukkamer druk wordt opgebouwd. De turbine die in de windrichting staat doet mede dienst voor luchttoevoer naar de overdrukkamer. De lucht stroomt via de actieve lijzijdige en de parallelle turbines naar buiten, waarbij de snelheid door de rotor afhankelijk is van de drukverschillen op elke oriëntatie.

De overdrukkamer doet tevens dienst als techniekruimte en de hoogte is in verband hiermee gesteld op $\approx 2,75$ m. De hieraan gerelateerde diameter van de aan te brengen turbines is daarom voorlopig bepaald op 2,5 m.

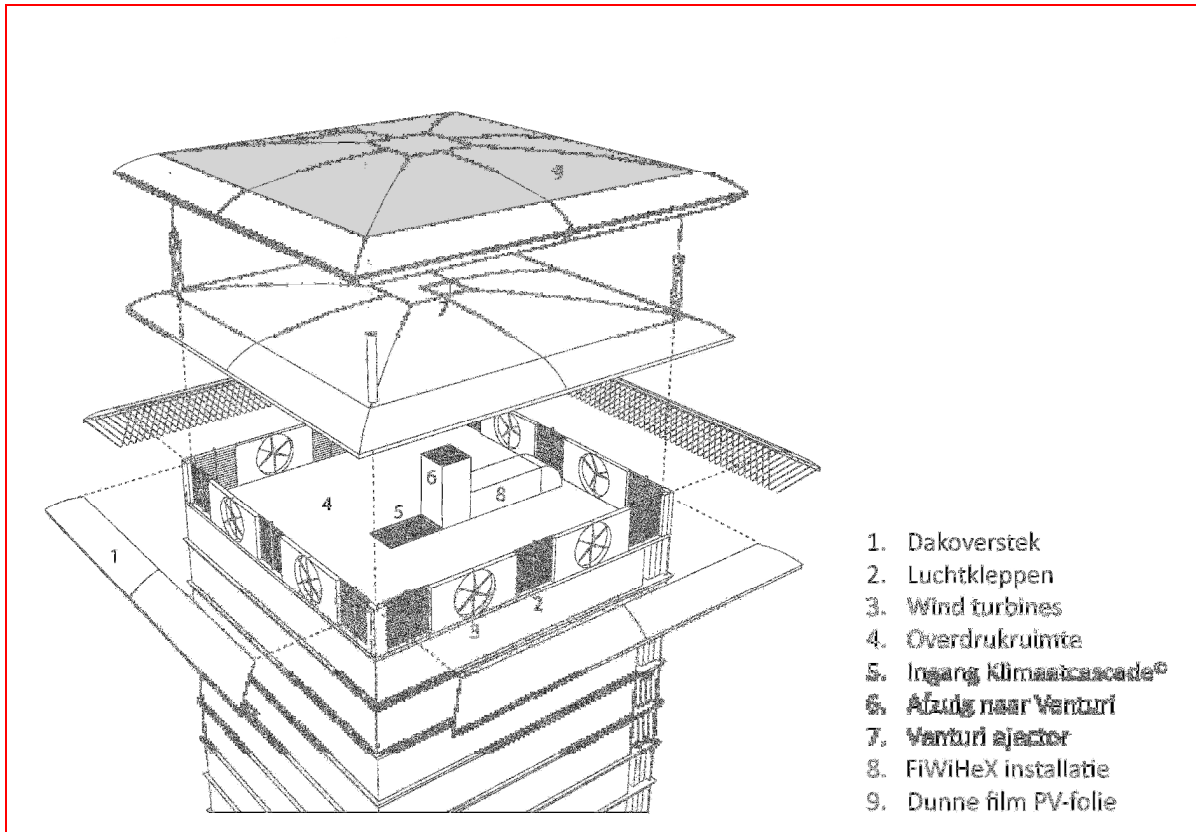
De door de actieve turbines stromende lucht moet via de gevel aan de windzijde worden toegevoerd. Om de luchtsnelheid in de toevoeropeningen, bestaande uit luchtkleppen en inactieve turbine(s), te beperken is een bepaald geveloppervlak nodig. Bij de aangenomen hoogte van 2,75 m hoort dus een bepaalde gevellengte, die overigens ook nodig is voor het onderbrengen van meerdere turbines per oriëntatie indien gewenst. Berekeningen zijn gemaakt voor de volgende gevallen:

Ruimteafmeting 10 x 10 m → 1 turbine per oriëntatie → totaal 4 turbines Ø 2,5 m

- Ruimteafmeting 20 x 20 m → 2 turbine per oriëntatie → totaal 8 turbines Ø 2,5 m
- Ruimteafmeting 30 x 30 m → 3 turbine per oriëntatie → totaal 12 turbines Ø 2,5 m

Bij de meest voorkomende potentiële windsnelheden is de lichtsnelheid in de toevoeropeningen dan $< 2,5 \text{ m.s}^{-1}$ bij een drukverlies $< 5\%$ van het beschikbare drukverschil.

Figuur 20.4 toont een exploded view van het Ventecdak[®] met 8 turbines in de overdrukkamer.



Figuur 20.3 - Ventecdak[®] - Exploded view

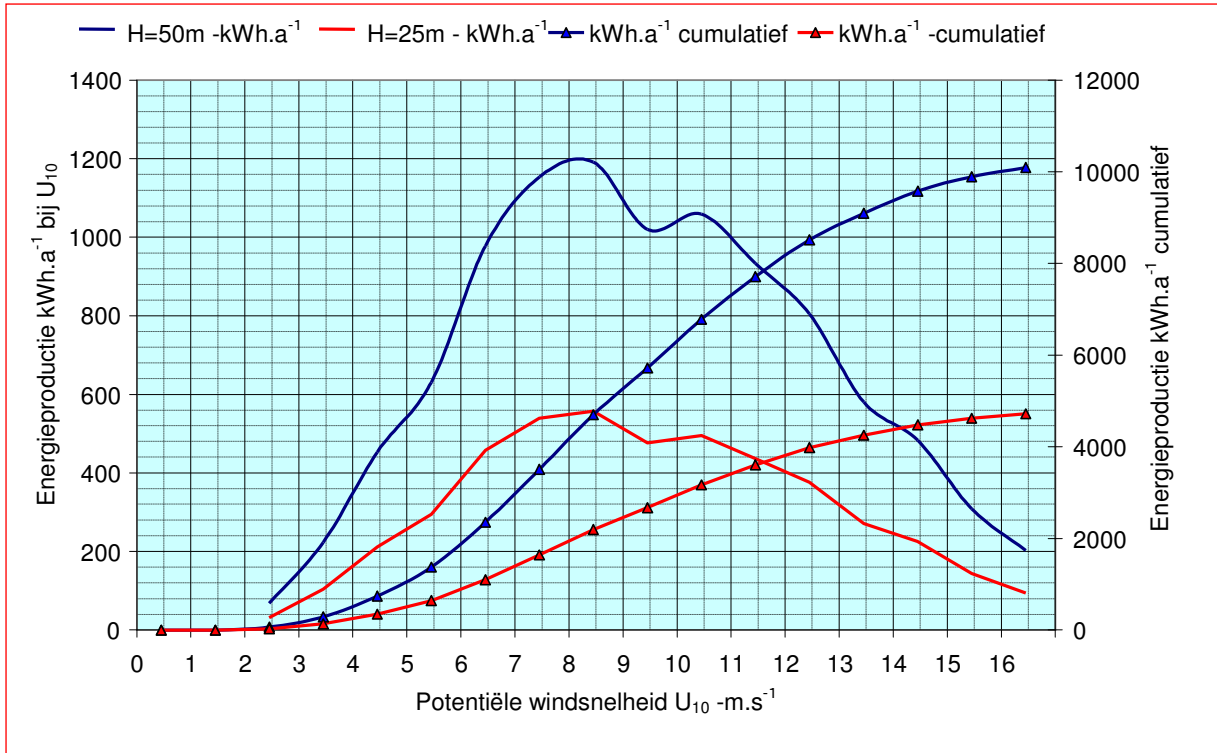
20.8 Energieproductie

Het drukverschil over de turbines kan worden gebaseerd op de bij de fysieke modelmetingen in de windtunnel gemeten waarden. Voor de overdruk ter plaatse van de luchtinlaat is uitgegaan van een winddrukcoëfficiënt $C_p = 0,8$. Voor de lijzijde zijn C_p -waarden gemeten van $-0,6$, hetgeen het totale drukverschil ($C_{p_w} - C_{p_l}$) op 1,4 brengt - zie paragraaf 17.7. Het drukverschil aan de zijkanalen van de overdrukkamer is niet bekend, evenmin als de invloed van de door de turbines stromende lucht op de totale C_p -waarde. Voor de navolgende berekeningen is uitgegaan van een conservatieve schatting van de gemiddelde waarde van $(C_{p_w} - C_{p_l}) \approx 1,0$. Deze waarde moet in een vervolgstudie met behulp van CFD en fysieke metingen nauwkeuriger worden bepaald.

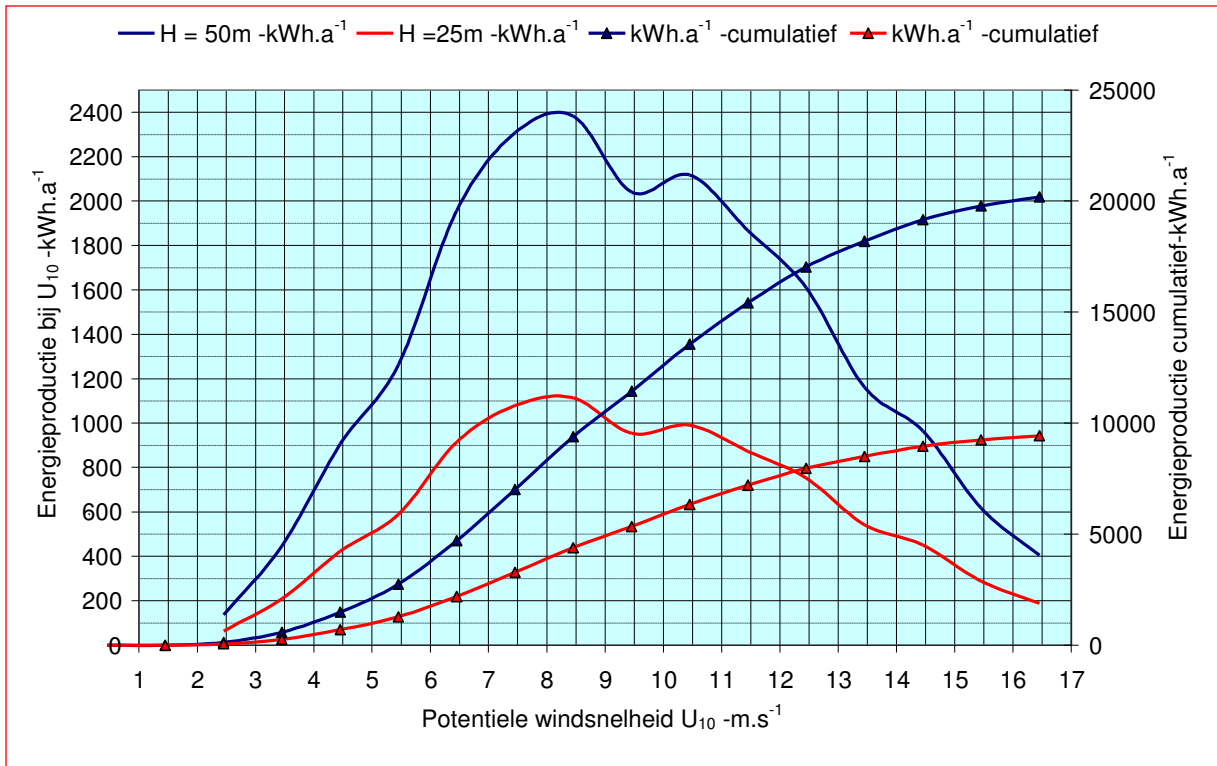
Met behulp van de in paragraaf 20.5 vermelde formules is de distributieve en cumulatieve energieproductie berekend voor

- Gebouwen van 15 tot 65 m hoog;
- Potentiële windsnelheden $U_{10} = 2,5$ tot $16,5 \text{ m.s}^{-1}$;
- Turbineconfiguraties volgens paragraaf 20.7;

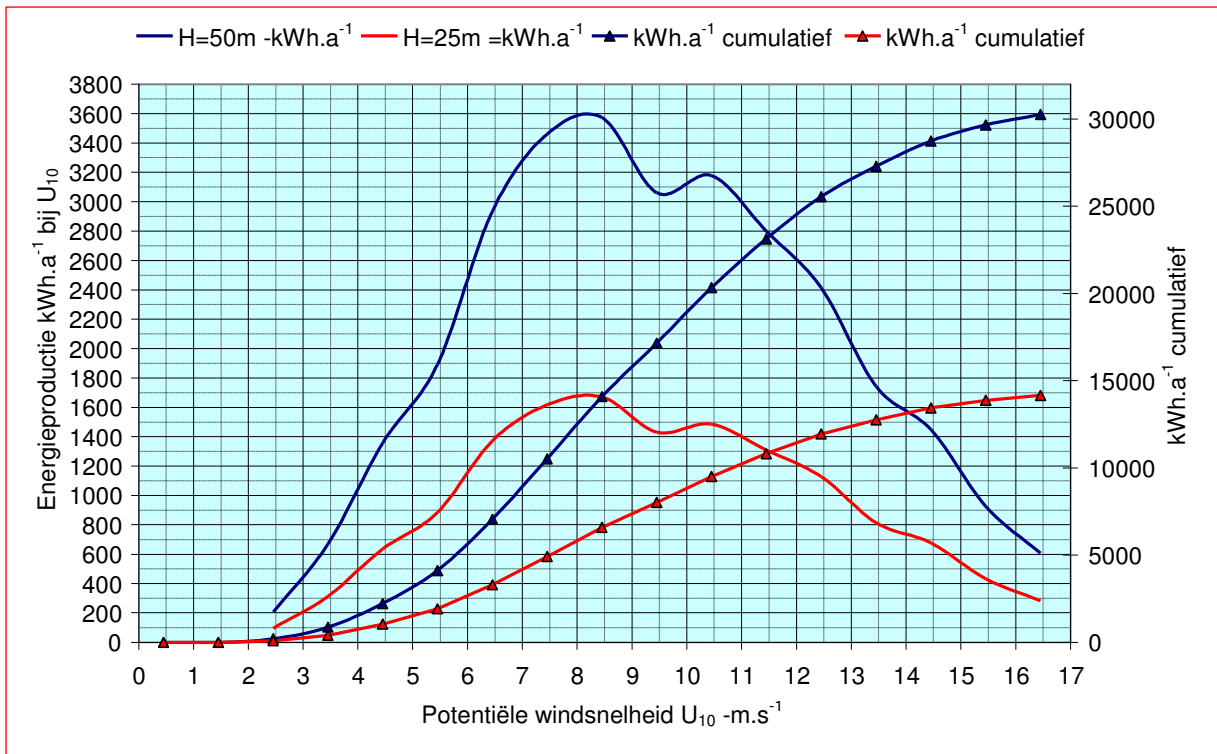
De resultaten zijn voor gebouwen van respectievelijk 25 m en 50 m hoog weergegeven in de figuren 20.4 – 20.5 en 20.6. De jaarlijkse energieproductie is uiteraard evenredig met het aantal actieve turbines



Figuur 20.4 - Jaarlijkse energieproductie Ventecdak[®] 10 x 10 m met 4 windturbines Ø 2,5m



Figuur 20.5 - Jaarlijkse energieproductie Ventecdak[®] 20 x 20 m met 8 windturbines Ø 2,5m

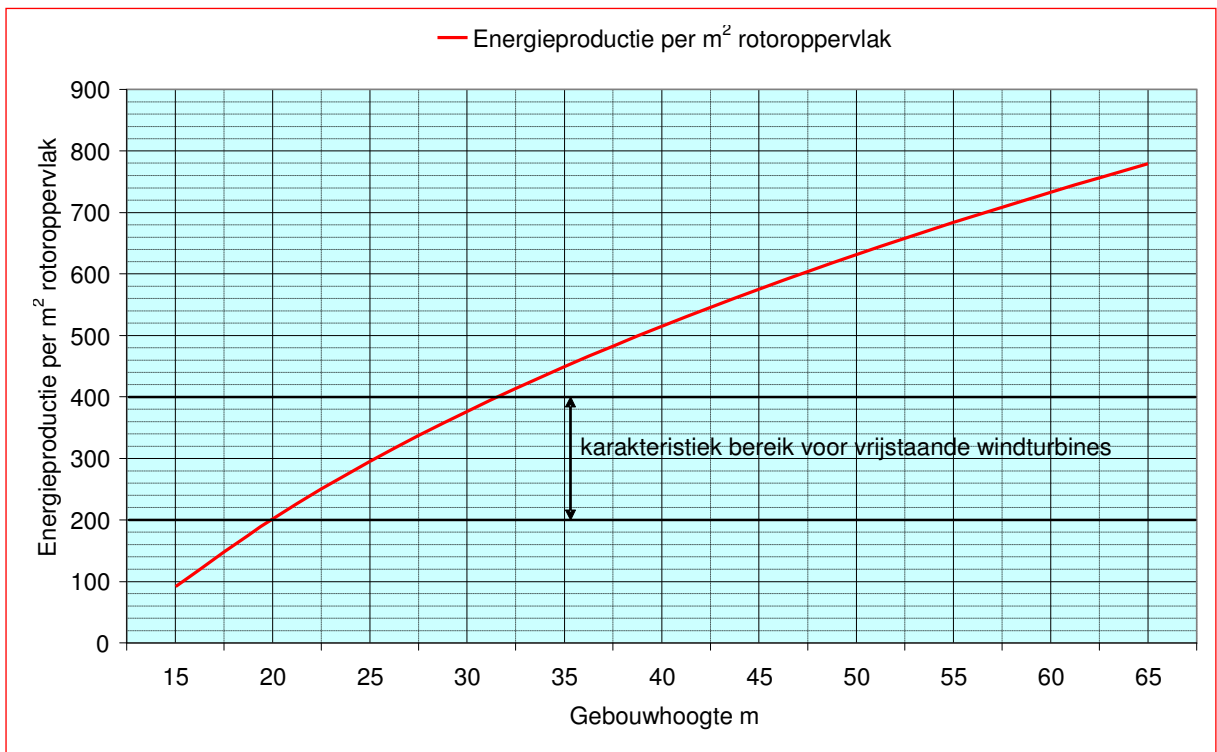


Figuur 20.6 - Jaarlijkse energieproductie Ventecdak[®] 30 x 30 m met 12 windturbines Ø 2,5m

20.9 Specifieke energieproductie

De energieproductie van windturbines kan worden uitgedrukt in een specifieke productie per m² rotoroppervlak. Voor conventionele windturbines geldt een normale productiefactor van 200 tot 400 kWh.a⁻¹.m⁻².

Voor windturbines in het Ventecdak[®] zijn waarden berekend als aangegeven in figuur 20.7.



Figuur 20.7 – Specifieke energieproductie per m² rotoroppervlak als functie van de gebouwhoogte

Voorbeeld:

- $H = 35 \text{ m}$ – 12 rotoren $\varnothing 2,5 \text{ m}$, waarvan 9 actief – energieproductie $\approx 450 \text{ kWh.m}^{-2}.\text{a}^{-1}$
- Totale energieproductie = $9 * 450 * \pi/4 * 2,5^2 \approx 20.000 \text{ kWh.a}^{-1}$

20.10 Windturbine in de Venturi-ejector

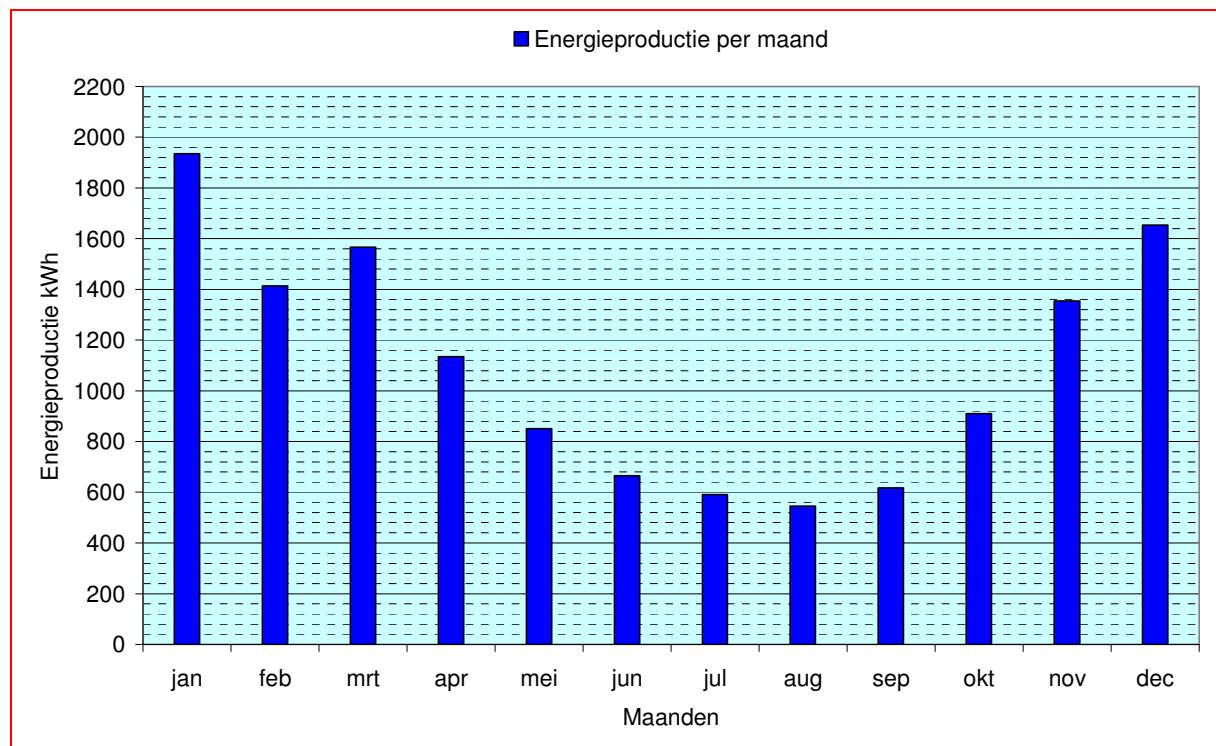
Om de energieproductie te maximaliseren kan additioneel in de venturi-ejector een windturbine worden aangebracht. Deze moet tijdens bedrijfsuren worden vastgezet, omdat de venturi-ejector dan nodig is voor de afzuigventilatie. Buiten de bedrijfsuren kan deze additionele turbine een bijdrage leveren aan de energieproductie. Bij 2.500 bedrijfsuren per jaar omvat deze periode ruim 70% van het totaal aantal uren. $[(8.760-2.500)/8.760]$

De werking van de venturi-ejector wordt door de secundaire luchtstroom verstoord –zie paragraaf 16.11 en figuur 16.12. De waarde van de factor U_{ej}/U_{ref} is maatgevend voor de mate van deze verstoring.

Uit de berekeningen blijkt dat deze factor voor de turbines in het Ventecdak[®] een waarde heeft van 0,51. Figuur 16.12 laat zien dat bij een hoogte van het bovenkanaal $c = 1 \text{ m}$ de winddrukcoëfficiënt C_p een positieve waarde heeft, hetgeen betekent dat de druk in het bovenkanaal positief is. Bij een hoogte $c = 2 \text{ m}$ is in het bovenkanaal een lichte onderdruk aanwezig. Gezien de verhoudingsgewijs hoge drukken in de overdrukkamer zal een windturbine in de venturi-ejector desondanks buiten bedrijfsuren een bijdrage kunnen leveren aan de energieproductie van het Ventecdak[®].

20.11 Jaarlijks verloop van de energieproductie

Figuur 20.8 geeft een globaal beeld van het jaarlijks verloop van de energieproductie in een Ventecdak[®] van $20 \times 20 \text{ m}$ met 8 turbines $\varnothing 2,5 \text{ m}$. Deze figuur is geconstrueerd op basis van figuur 6.6 in hoofdstuk 6, die betrekking heeft op de mediane gemiddelde windsnelheid per maand voor de locatie Schiphol.

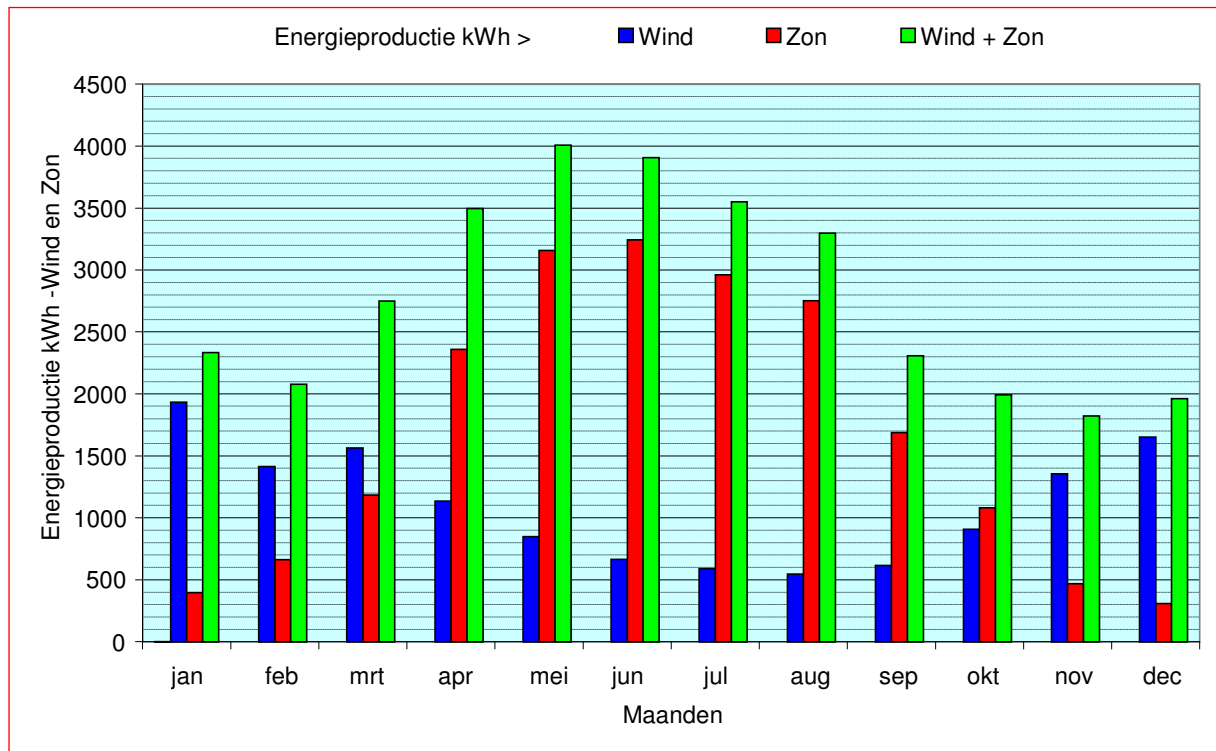


Figuur 20.8 – Energieproductie Ventecdak[®] $20 \times 20 \text{ m}$ met 8 windturbines $\varnothing 2,5\text{m}$ – Hoogte 35 m

20.12 Energieproductie Ventecdak[®] met Wind en Zon

Behalve met windturbines wordt met het Ventecdak[®] ook zonne-energie geproduceerd –zie hoofdstuk 21. De profielen van de beschikbare windenergie en zonne-energie zijn over de seizoenen gerekend

redelijk complementair. Een gecombineerde toepassing in het Ventecdak[®] is daarom een interessante optie, omdat door de seizoenen heen beide energievormen elkaar aanvullen. Zie figuur 20.9



Figuur 20.9 – Energieproductie Ventecdak[®] 20 x 20 m met 8 windturbines Ø 2,5m – Hoogte 35 m

20.13 Axiaal ventilator versus windturbine

Axiaalventilatoren zijn door massaproductie relatief goedkoop en de vraag kan worden gesteld of een axiaalventilator ook als windturbine kan worden gebruikt. Dit is niet het geval.

De rotor van een axiaalventilator is ontworpen om met behulp van energie een luchtbeweging tot stand te brengen bij tegendruk. De rotor van een windturbine gebruikt een luchtbeweging om energie op te wekken zonder tegendruk. Het ontwerp van beide rotorbladen is totaal verschillend.

In een windturbine zijn de bladen extreem lang in vergelijking met de afmeting van de naaf, en het aantal bladen is niet groter dan voor het verkrijgen van een goede balans nodig is. Om de massa zo klein mogelijk te maken is het geheel vervaardigd van lichtgewicht materialen, waardoor de aanvangstraagheid van de rotor ook bij lage windsnelheid gemakkelijk te overwinnen is. De kleine naaf/blad verhouding is het meest efficiënt om de maximum energie van de luchtstroom te “vangen”. Het rotorblad van een axiaalventilator ziet er met een grote naaf/blad verhouding en een groot aantal rotorbladen totaal anders uit. Bij een krachtige luchtbeweging zou zeker enige energie kunnen worden opgewekt, maar het rendement zal zeer laag zijn.

20.14 Vervolgonderzoek

De voorgaande analyses en berekeningen zijn voor een deel gebaseerd op de CFD stromingssimulaties – hoofdstuk 16- en de fysieke modelmetingen -hoofdstuk 17 -van het Ventecdak[®]. Daarnaast zijn enkele aannames gedaan, die in een vervolgonderzoek nader moeten worden gevalideerd. Dit onderzoek uit te voeren in samenhang met het aanvullend onderzoek naar het optimaliseren van de prestaties van het Ventecdak[®] - zie paragraaf 16.12. Het onderzoek omvat in hoofdlijnen:

- Het maken van een schaalmodel van het geoptimaliseerde Ventecdak[®], de schaal nader vast te stellen. Het schaalmodel uit te voeren met meerdere openingen in de overdrukkamer, voorzien van gazen, voor het simuleren van de turbines.
- Het meten van luchtsnelheden en drukverschillen over de openingen bij verschillende windsnelheden en gaasdichtheden, en het bepalen van de winddrukcoëfficiënten C_p in de overdrukkamer en aan lizijde.

- Het bepalen van maximale aerodynamische rendementen α , theoretische turbinevermogens P_{th} en vermogenscoëfficiënten C_{pow} bij verschillende configuraties;

Voor de metingen is een groter schaalmodel vereist dan het model 1:100 dat is gebruikt voor de CFD simulaties – hoofdstuk 16- en de metingen in de gesloten grenslaag windtunnel – hoofdstuk 17. Bij een dergelijke windtunnel blokkeert een meetobject tot op zekere hoogte de luchtstroom, en daarom zijn de afmetingen van het model beperkt.

Het onderzoek zal daarom in principe worden uitgevoerd in de Open Straal windtunnel (*Open Jet Facility -OJF*) van de faculteit Lucht- en Ruimtevaart van de TU Delft. Deze heeft een uitstroomopening met een oppervlak van 2,85 x 2,85 meter, genereert windsnelheden tot 35 m/s en heeft een ‘open’ layout. Dit betekent dat er een vrije luchtstroom in de testsectie is.. Bij een open straal tunnel staat het meetobject in een grote, open ruimte zodat de luchtstroom vrij om het object kan bewegen. Dat is ideaal voor onderzoek aan windturbines.

21. ZONNE-ENERGIE IN HET VENTECDAK[®]

21.1 Inleiding en samenvatting

De doelstelling van de EPBD Recast (EP en EC 2010) is het realiseren van gebouwen met een energiegebruik van “*nearly zero*” en het resterende energiegebruik dient in hoofdzaak door “*renewable sources*” worden opgewekt. Hiervoor zou bijvoorbeeld dus groene stroom kunnen worden ingekocht.

ASHRAE gaat met de doelstelling van “*Net Zero Energy Buildings*”, waarvoor op jaarbasis het resterend energiegebruik “*on-site renewable*” moet worden opgewekt nog iets verder -zie paragraaf 1.1 van dit deelrapport. In Nederland is hiervoor het begrip “*energieneutraal bouwen*” geïntroduceerd, dat overigens nog niet nauwkeurig is gedefinieerd (www.agentschapnl.nl/programmas-regelingen/energieneutraal-bouwen)

Eén van de doelstellingen van het Earth, Wind & Fire concept is het energiegebruik van de noodzakelijke pompen en hulpventilatoren in het gebouw zelf met behulp van wind en zon op te wekken. Het multi-functionele Ventecdak[®], dat in eerste instantie is ontworpen voor natuurlijk ventilatie, biedt hiervoor goede mogelijkheden. Het voorliggende hoofdstuk onderzoekt de potentiële prestaties van zonne-energie, terwijl in hoofdstuk 20 windenergie wordt onderzocht.

Voor windenergie zie hoofdstuk 20. Voor zonne-energie komt dunne film PV-folie in aanmerking dat weliswaar een lager rendement heeft dan PV panelen, maar een betere kosteneffectiviteit heeft en zich goed leent als dakbedekking van het Ventecdak[®]. Anno 2011 is met deze technologie een rendement van 10% bereikbaar, en verwacht wordt dat een rendement van 15% binnen bereik ligt. Op basis van het referentiejaar NEN 5060:2008 is met een rendement van 10% een jaaropbrengst van 100 kWh.m⁻² berekend, hetgeen overeenkomt met gepubliceerde cijfers.

De profielen van de beschikbare windenergie en zonne-energie zijn over de seizoenen gerekend redelijk complementair. 's Zomers veel zon en weinig wind. 's Winters veel wind en weinig zon. Een gecombineerde toepassing van zon- en windenergie in het Ventecdak[®] is daarom een interessante optie.

21.2 Dunne film PV-folie

Dunne film PV-systemen bestaan uit een dunne laag foto-voltaïsch materiaal aangebracht op een flexibele onderlaag. Folie als drager biedt grote voordelen ten opzichte van pv-panelen.

- Het systeem is flexibel, schokbestendig, beloopbaar, lichter en biedt grote vrijheid qua vorm van de modules zie figuur 21.1;
- De hellingshoek is minder belangrijk omdat de folie een hogere opbrengst heeft met diffuus licht;
- PV-folie is daarom geschikt om als dakbedekking van gebouwen te worden gebruikt;
- Dunne film is minder gevoelig voor opwarming, hetgeen een positief effect heeft op het rendement;
- Dankzij het verminderde gebruik van silicium en de snellere productie t.o.v. PV panelen zijn de productiekosten lager;
- Dunne filmsilicium kan bij een lage temperatuur van ca 200⁰C worden aangebracht waardoor goedkope buigbare dragers kunnen worden gebruikt en het productieproces duurzamer is.

In het Helianthos project werken TU Delft, TU Eindhoven en de Universiteit van Utrecht samen met TNO, Akzo-Nobel en Nuon aan de ontwikkeling van deze technologie. Het aanvankelijke lage rendement van ca 6% is inmiddels verbeterd naar ca 10% en verwacht wordt dat een rendement van 15% haalbaar is (Zeman, Miro 2010). De onderzoeksgroep Photovoltaic Materials and Devices Laboratory van TU Delft richt zich in het bijzonder op de verhoging van het rendement. Hierbij wordt onder meer gewerkt aan verstrooiing van het licht in de zonnecel door het oppervlak onregelmatig te maken. Daardoor leggen de lichtstralen een langere weg af in de dunne siliciumfilm wat tot gevolg heeft dat de zonnecel meer elektriciteit levert.

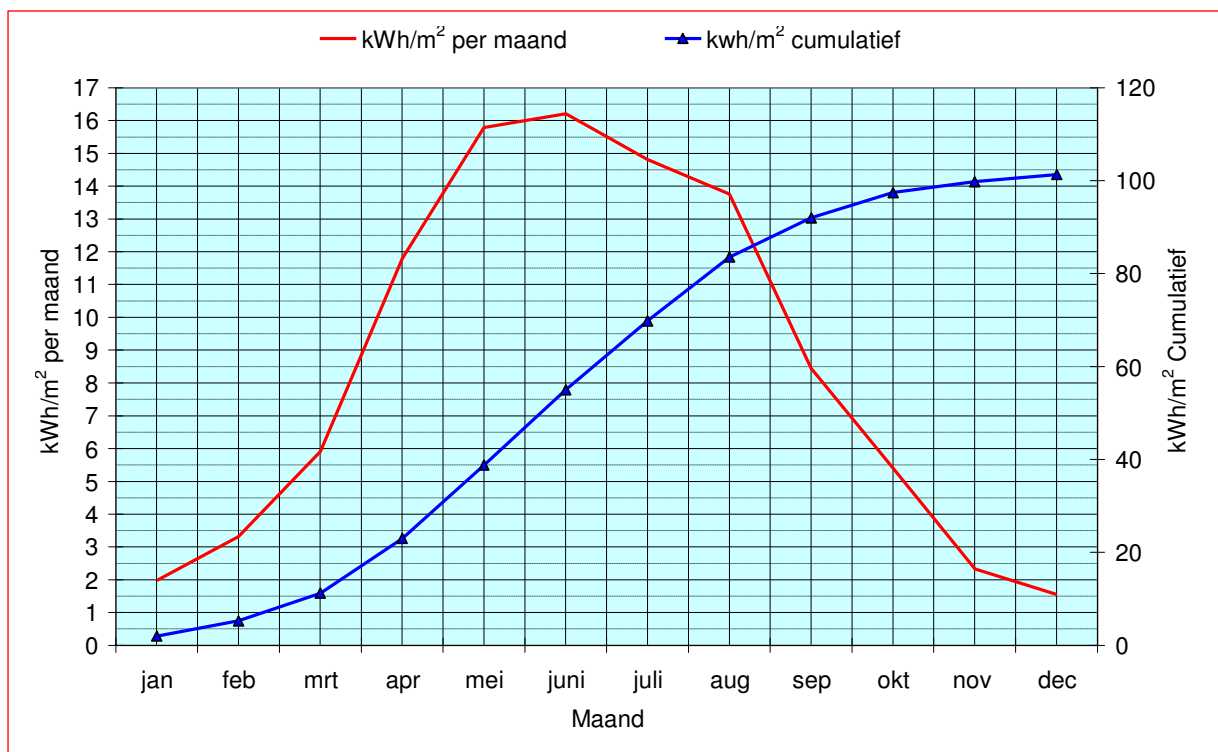


Figuur 21.1 – Dunne film silicium zonnecel

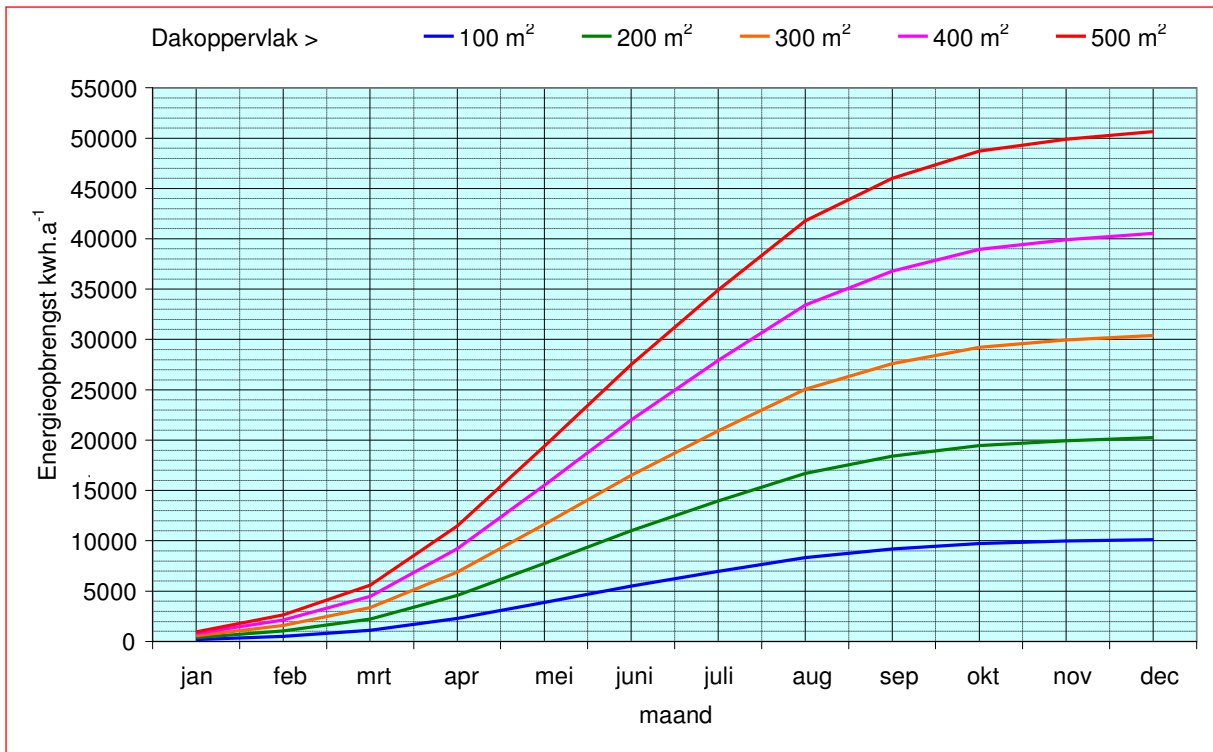
21.3 Energieopbrengst

In hoofdstuk 18 van de rapport (I) is een overzicht opgenomen van de door VABI berekende maandsommen van de totale straling op horizontale en verticale vlakken in het referentiejaar NEN 5060:2008 – zie tabel 18.2. De energieopbrengst van de PV-folie op het Ventecdak[®] kan worden berekend als product van de straling op een horizontaal vlak en het in paragraaf 21.2 vermelde rendement van 10%. Figuur 21.2 geeft een beeld van de energieopbrengsten, zowel maandelijks als cumulatief over een jaar. De berekende jaaropbrengst van ca 100 kWh.m⁻².a⁻¹ komt overeen met de verwachtingen van de onderzoeksgroep Photovoltaic Materials and Devices Laboratory van TU Delft (Zeman, Miro 2011).

Figuur 21.3 toont de energieopbrengsten in het referentiejaar als functie van het dakoppervlak. Het Ventecdak[®] dat model heeft gestaan voor de CFD simulaties en de fysieke modelmetingen heeft afmetingen van 20 x 20 m en zou met een oppervlak van 400 m² dus een jaarlijkse energieopbrengst van ca 40.000 kWh.a⁻¹ kunnen genereren.



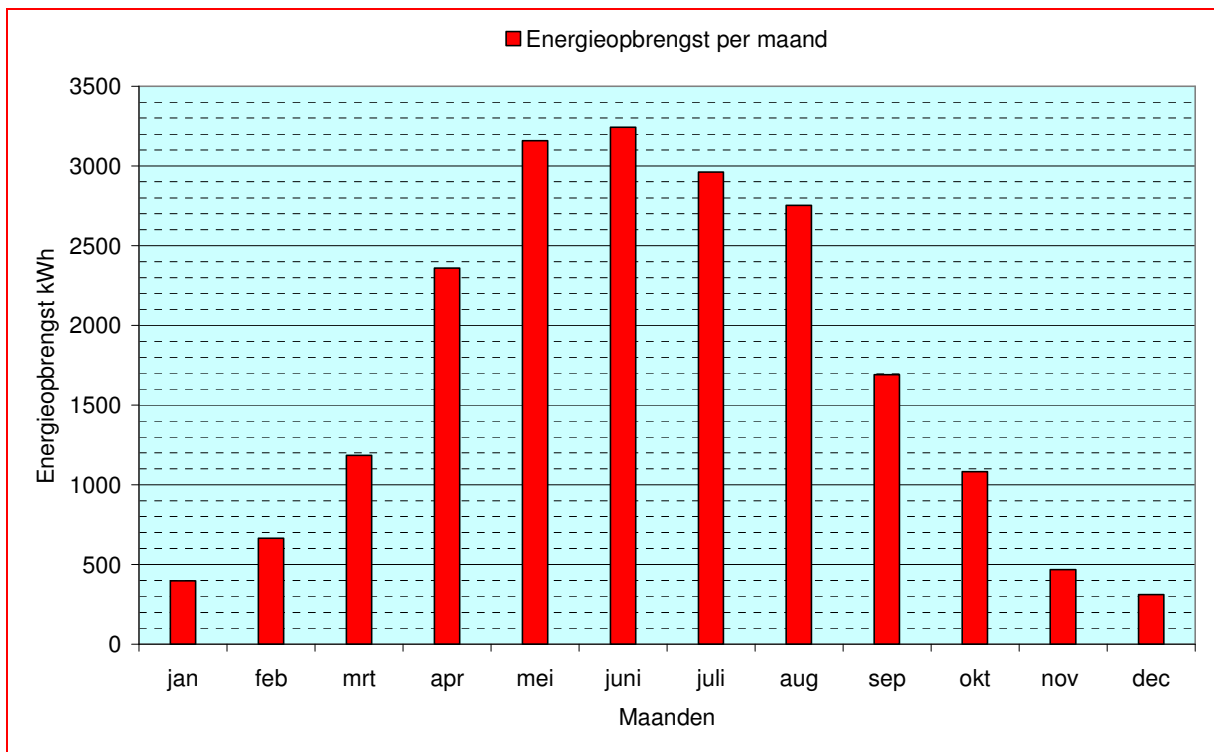
Figuur 21.2 – Energieopbrengst PV-folie in referentiejaar NEN 5060:2008 op een horizontaal dak bij een rendement van 10%



Figuur 21.3 - Energieopbrengst PV-folie in referentiejaar NEN 5060:2008 als functie van dakoppervlak

21.4 Jaarlijks verloop van de energieproductie

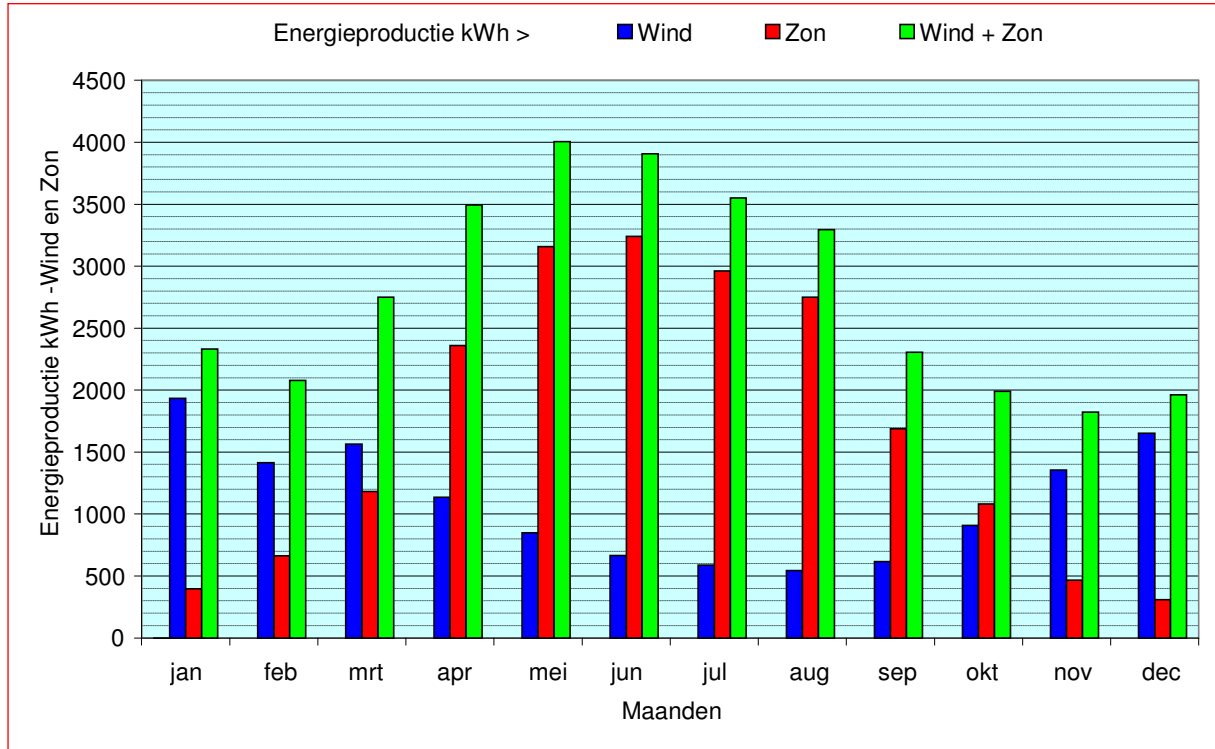
Figuur 21.4 geeft een beeld van het jaarlijks verloop van de energieproductie in het referentiejaar voor een dakoppervlak van 400 m².



Figuur 21.4 - Energieopbrengst PV-folie in referentiejaar NEN 5060:2008 – dakoppervlak 400 m²

21.5 Energieproductie Ventecdak[®] met Zon en Wind

Behalve met PV-folie wordt met het Ventecdak[®] ook windenergie geproduceerd –zie hoofdstuk 20. De profielen van de beschikbare windenergie en zonne-energie zijn over de seizoenen gerekend redelijk complementair. Een gecombineerde toepassing in het Ventecdak[®] is daarom een interessante optie, omdat door de seizoenen heen beide energievormen elkaar aanvullen. Zie figuur 21.4.



Figuur 21.4 – Energieproductie Wind + Zon -Ventecdak[®] 20 x 20 m met 8 turbines – Hoogte 35 m

22. REFERENTIES

Hoofdstuk 1 - Earth, Wind & Fire – In het Kort

- CEN (2006). *Energy Performance of Buildings Directive EPBD*. <http://www.epbd-ca.org>
- EP en EC (2009). *On the promotion of the use of energy from renewable sources...* Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council.
- EP en EC (2010). *Energy Performance of Buildings Directive Recast*. http://www.ecee.org/buildings/EPBD_Recast/
- EP en EC (2002). *Energy Performance of Buildings Directive*. <http://www.epbd.nl>
- Heller, Jonathan et al. (2011). *Sensitivity Analysis: Comparing the Impact of Design, Operation, and Tenant Behaviour on Building Energy Performance*. New Buildings Institute. <http://www.newbuildings.org/sites/default/files/NBISensitivityReport.pdf>
- IEA ECBS¹³ Annex 44 (2011). *Integrating Environmentally Responsive Elements in Buildings*. <http://www.ecbs.org/annexes/annex44.htm>
- Lente-akkoord (2008). Een initiatief van Aedes, Bouwend Nederland, NEPROM, NVB, de minister van VROM en de minister van WWI. <http://www.lente-akkoord.nl>
- Lysen, Erik H. (1996). *The Trias Energetica - Solar Energy Strategies for Developing Countries*. Proceedings Eurosun Conference, Freiburg, 16-19 Sept 1996. <http://www.senternovem.nl/duurzameenergie>
- Verbeeck, Griet (2011). *Renovation versus demolition of old dwellings: comparative analysis of costs, energy consumption and environmental impact*. 27th International conference on Passive and Low Energy Architecture PLEA 2011.

Hoofdstuk 2 - Architectuur en Klimaattechniek

- Banham, Reyner (1984). *The Architecture of the Well-tempered Environment*. The University of Chicago Press, Chicago 60637. ISBN 0-226-03698-7
- Bronsema, Benjamin (2003). *Een duurzame toekomst voor de installatietechniek*. Themadag TU Delft – Duurzame installaties in gebouwen – Delft
- Groot Zwaafink, Miranda W.H. et al (2010). *Rijksgebouwendienst pakt faalkosten aan*. TVVL Magazine | 06 | 2010
- Hawkes, Dean en Forster, Wayne (2002). *Architecture, Engineering and Environment*. Laurence King Publishing Ltd London. ISBN 1 85669 322 8.
- Hendriks, Jeroen (2010). *Geïntegreerd en interdisciplinair ontwerpen*. TVVL Magazine | 06 | 2010
- Rooijackers, Gerard e.a. (2010) *Faalkosten en de kosten van het falen*. TVVL Magazine | 06 | 2010
- USP Marketing Consultancy 2008. *Faalkosten in de bouw naar hoogtepunt*. http://www.usp-mc.nl/UserFiles?File/persberichten/april08_1.pdf

Hoofdstuk 3 - Korte Inhoud

Hoofdstuk 4 - Begrippen, Eenheden en Symbolen

Hoofdstuk 5 - Het Windklimaat Van Nederland

- Allard, Francis (editor) 1998. *Natural Ventilation in Buildings*. James & James (Science Publishers) Ltd. ISBN 1 873936 72 9.
- Wieringa, J en Rijkooft, P.J.1983. *Windklimaat van Nederland*. KNMI De Bilt. Staatsuitgeverij Den Haag. ISBN 90 12 04466 9.
- Wieringa, J. et al 2001. *New Revision of Davenport Roughness Classification*. 3 EACWE (3rd European & African Conference on Wind Engineering), Eindhoven, Netherlands July 2001.
- Wit, de M.H. 2001. *Wind in de Gebouwde Omgeving*. Reader Technische Universiteit Eindhoven – Faculteit Bouwkunde –Capaciteitsgroep FAGO.

Hoofdstuk 6 - Windstatistieken

¹³ Energy Conservation in Buildings and Community Systems

- NNI 2006. Toepassing van de statistiek van de uurgemiddelde windsnelheden voor Nederland. Nederlandse praktijkrichtlijn NPR 6097:2006 (nl)
- Wieringa, J en Rijkooft, P.J.1983. *Windklimaat van Nederland*. KNMI De Bilt. Staatsuitgeverij Den Haag. ISBN 90 12 04466 9.

Hoofdstuk 7 - Het (Wind)Klimaat van de Stad

- Allard, Francis (editor) 1998. *Natural Ventilation in Buildings*. James & James (Science Publishers) Ltd. ISBN 1 873936 72 9.
- Alonso, Javier et al 2011. *Hygrothermal Performance of Vegetation on Cladding and Translucent Façade Systems*. PLEA 2011 – 27th Conference on Passive and Low energy Architecture, Louv-la-Neuve, Belgium, 13-15 July 2011.
- Basset, Richard 2011. *Climate Science in Urban Design: A Historical and Comparative Study of Applied Urban Climatology*. Workshop Manchester Architecture Research Centre (MARC), 23-24 June 2011 at the University of Manchester.
- Bennett, M.; Saab, A.E., 1982: *Modelling of the urban heat island and of its interaction with pollutant dispersal*. Atmospheric Environment 16, 1797-1822
- Bronsema, B. 2005. *Bij milieucatastrofes en bio-terreur – De Klimaatinstallatie: Vriend of Vijand?*(2). TVVL Magazine 12/2005. www.bronconsult.org.
- Bronsema, B. 2005. *Environmental disasters and bio-terrorist attacks. Can buildings protect us against airborne pollutants?* REHVA Journal 1-2/2005. www.bronconsult.org.
- Cox, Jennifer R. 2011. *Cool Neighbourhoods within the New York Metro Island*. Workshop Manchester Architecture Research Centre (MARC), 23-24 June 2011 at the University of Manchester
- Erell, E. et al 2007. *Accounting for Urban Microclimate in Computer Simulation of Building Energy Performance*. Proceedings PLEA 2007- The 24th Conference on Passive and Low Energy Architecture, pp 210 – 217.
- Franchimon, F. 2009. *Healthy Building Services for the 21st Century* pp 65-75. PhD thesis Technische Universiteit Eindhoven.
- Gramotnev Dmitri K. and Galina 2002. Modeling of Aerosol Dispersion from a Busy Road in the Presence of Nanoparticle Fragmentation. Journal of Applied Meteorology and Climatology Volume 44 Issue 6 (June 2005).
- Hebbert, Michael e.a. (2011). *City Weathers: Meteorology and Urban Design 1950-2020*. Manchester Architecture Research Centre -Edited proceedings of the ESRC-sponsored City Weathers workshop held in Manchester on June 23-4 2011.
- Hien, W.N. et al 2007. *Geographical Information System (GIS)-Based Urban Heat Island Study in NUS Campus*. Proceedings PLEA 2007- The 24th Conference on Passive and Low Energy Architecture, pp 273 – 280.
- Hitchins, J. et al 2002. *Concentrations of sub micrometer particles from vehicle emissions near a major road*. Atmospheric Environment 34 (2000) pp 51-59.
- Hove van Bert et al 2010. *Het stadsklimaat van Rotterdam – Een eerste analyse van de meetgegevens van het meteorologische meetnet*. Rapport WUR - Rotterdam Climate Initiative.
- Hove, van L.W.A. 2011. *Exploring the Urban Heat Island Intensity of Dutch Cities*. Workshop Manchester Architecture Research Centre (MARC), 23-24 June 2011 at the University of Manchester
- Jamriska, M. et al 1999. *Relation between Indoor and Outdoor Exposure to Fine Particles near a Busy Arterial Road*. Indoor Air 1999: 9: pp 75 – 84.
- Jamriska, M. et al 2000. *Effect of Ventilation and Filtration on Submicrometer Particles in an Indoor Environment*. Indoor Air 2000: 10: pp 19 – 26.
- Katzchner, Lutz 2011. *Urban Climate Map System for the spatial planning of Compact Cities: A pilot study of Arnhem, Netherlands*. Manchester Architecture Research Centre -Edited proceedings of the ESRC-sponsored City Weathers workshop held in Manchester on June 23-4 2011.
- Kolokotroni, Maria et al 2010. *A validated methodology for the prediction of heating and cooling energy demand for buildings within the Urban Heat Island: Case study of London*. Solar Energy Volume 84, Issue 12, December 2010, pp 2246-2255

- Li, Y. et al 1997. *Numerical evaluation of wind-induced dispersion of pollutants around an building*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 67 & 68 (1997) pp 757–766.
- Luria, M. et al 1984. *Comparison of air quality data obtained from roof top, side walk and suburban areas*. Environmental Monitoring and Assessments 5 (1985) pp 249-254
- Mendell, M.J. et al 2008. *Risk factors in heating, ventilating and air-conditioning systems for occupant symptoms in US office buildings: the US EPA BASE study*. Indoor Air 2008: 18: pp 301-316. Atmospheric Environment 33 (1999) pp 1261-1274
- Metz, D. et al 2000. *Luchtkwaliteit langs het Nederlandse snelwegennet in 2010*. CE, Witteveen+Bos en TNO-MEP. <http://antenna.nl/ce>
- Morawska, L. et al 1999. *A study of the horizontal and vertical profile of sub micrometer particles in relation to a busy road*. Atmospheric Environment 33 (1999) pp 1261-1274.
- Morawska, L. 2004. *Motor vehicle emissions as a source of indoor particles*. Indoor environment, Wiley – VCH. Morawska and Saltthammer (Editors), pp 297-318.
- Ng, Edwarf 2011. *Application of Urban Climatic Map to Urban Planning of High Density Cities – An Experience from Hong Kong*. Workshop Manchester Architecture Research Centre (MARC), 23-24 June 2011 at the University of Manchester
- Oke, Timothy R. 2006. *Towards better scientific communication in urban climate*. Theoretical and applied climatology 84 (1-3): 179-190 February 2006
- Oke, Timothy R. 2009. *The Need to Establish Protocols in Urban Heat Island Work*. Timothy R. Oke Symposium, [Eighth Symposium on the Urban Environment](#) - 11-15 January 2009, Phoenix, Arizona.
- Partti-Pellinen, K. et al 2000. *Penetration of Nitrogen Oxides and Particles from Outdoor into Indoor Air and Removal of the Pollutants through Filtration of Incoming Air*. Indoor Air 2000: 10: pp 126 – 132.
- Peperstraten, J. van 2009. *Verkennend onderzoek naar ultrafijnstof - Vraagtekens bij de effectiviteit van fijnstofbeleid*. TNO Magazine april 2009.
- Poli, T. et al 2007. *The influence of albedo of surfaces on microclimatic modifications. New scenarios for Milano*. Proceedings PLEA 2007- The 24th Conference on Passive and Low Energy Architecture, pp 476 – 482.
- RIVM 2007. *Legionella-uitbraak in Amsterdam: koeltoeren als bron*. Infectieziekten Bulletin jaargang 17 nummer 09 2006 pp 319-321. www.rivm.nl/infectieziektenbulletin
- Rubino, F.M. et al 1998. *Height Profile of some Air Quality Markers in the Urban Atmosphere Surrounding a 100 m Tower Building*. Atmospheric Environment Vol. 32 No. 20 (1998) pp 3569-3580.
- Santamouris, M. 2004. *Natural Ventilation in Urban Areas*. Ventilation Information Paper No. 3 maart 2004. Air Infiltration and Ventilation Centre – www.aivc.org
- Steward, Ian and Oke, Tim 2006. *Newly developed “Thermal Climate Zones” for defining and measuring urban heat island magnitude in the canopy layer*. Timothy R. Oke Symposium, 11-15 January 2009, Phoenix, Arizona.
- Synnefa, A. et al 2007. *Passive cooling of buildings by the application of cool coatings*. Proceedings PLEA 2007- The 24th Conference on Passive and Low Energy Architecture, pp 431 – 436.
- Taha, Haider (2004). *Heat Islands and Energy*. Encyclopaedia of Energy, Volume 3 @ 2004 Elsevier Inc.
- Takata, Masahito et al 2011. *The City without a Nighttime Heat Island: Reproduction and Evaluation of summer Thermal Environment in Urban Residential Areas in Early Modern Tokyo using Numerical Simulation*. PLEA 2011 – 27th Conference on Passive and Low energy Architecture, Louvain-la-Neuve, Belgium, 13-15 July 2011.
- Taseiko, O.V. et al 2009. *Air pollution dispersion within urban street canyons*. Atmospheric Environment 43 (2009) pp 245 – 252.
- Tian, L. et al 2009. *Mathematical model of particle penetration through smooth/rough building envelop leakages*. Building and Environment 44 (2009) pp 1144 – 1149.
- Wieringa, J et al 2001. *New Revision of Davenport Roughness Classification*. 3rd European & African Conference on Wind Engineering – Eindhoven, Netherlands, July 2001.

- Wit, de M.H. 2001. *Wind in de gebouwde Omgeving*. Reader Technische Universiteit Eindhoven – Faculteit Bouwkunde –Capaciteitsgroep FAGO.

Hoofdstuk 8 - Windstromingen om Gebouwen

- ASHRAE 1999. *Building Air Intake and Exhaust Design*. 1999 ASHRAE Handbook Applications Chapter43.
- ASHRAE 2001. *Airflow around buildings*. 2001 ASHRAE Handbook Fundamentals Chapter16. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
- Allard, Francis (editor) 1998. *Natural Ventilation in Buildings*. James & James (Science Publishers) Ltd. ISBN 1 873936 72 9.
- Costola, D. et al 2009. [Overview of pressure coefficient data in building energy simulation and airflow network programs](#). Building and Environment, 44 (10), 2027-2036.
- Ellefsen, R. 1990. *Mapping and Measuring Buildings in the Canopy Boundary Layer in Ten U.S. Cities*. Energy and Buildings 15 – 16 (1990-1991) pp 1025 – 1049.
- Knoll, B. et al 1996. *Pressure Coefficient Simulation Program*. Air Infiltration Review Volume 17, No 3, Juni 1996. www.aivc.org/Air/17_3/pcsim.html
- Liddament, Martin W – 1996. *A Guide to Energy Efficient Ventilation*. AICV – Air Infiltration and Ventilation Centre -Document AIC-TN-VENTGUIDE-1996 -ISBN 0 946075 85 9
- Taseiko, O.V. et al 2009. *Air pollution dispersion within urban street canyons*. Atmospheric Environment 43 (2009) pp 245 – 252.

Hoofdstuk 9 - Een Optimale Aanzuiglocatie

- AIVC 1995. *Air Intake Positioning to Avoid Contamination of Ventilation Air- An Annotated Bibliography*. Air Infiltration and Ventilation Centre – www.aivc.org
- ASHRAE 1999. *Building Air Intake and Exhaust Design*. 1999 ASHRAE Handbook Applications Chapter43.
- ASHRAE 2001. *Airflow around buildings*. 2001 ASHRAE Handbook Fundamentals Chapter16. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
- Bronsema, B. 2002. *Bij milieucatastrofes en bio-terreur – De Klimaatinstallatie: Vriend of Vijand?(1)*. TVVL Magazine 4/2002. www.bronconsult.org.
- Bronsema, B. 2004. *The HVAC system – Friend or Foe in environmental disasters and bio-terrorist attacks*. REHVA Journal 3-4/2004. www.bronconsult.org
- Bronsema, B. 2005. *Bij milieucatastrofes en bio-terreur – De Klimaatinstallatie: Vriend of Vijand?(2)*. TVVL Magazine 12/2005. www.bronconsult.org.
- IGZ - Inspectie voor de Gezondheidszorg 2007. *KORTSCHRIFT “De legionella-uitbraak door een besmette koeltoren in Amsterdam*. www.igz.nl
- NEN 2007. *Ventilation for non-residential buildings – Performance requirements for ventilation and room-conditioning systems*. NEN-EN 13779 en.
- RIVM 2006. *Legionella-uitbraak in Amsterdam: koeltoren als bron*. Infectieziekten Bulletin jaargang 17 nummer 09 2006 pp 319-321. www.rivm.nl/infectieziektenbulletin

Hoofdstuk 10 - Windvangers

- 'Azami, A. 2005. *Badgir in traditional Iranian architecture*. Proceedings International Conference “Passive and Low Energy Cooling for the Built environment, May 2005, Santorini, Griekenland.
- Bahadori Mehdi, N. *Passive Cooling Systems in Iranian Architecture*. Scientific American February 1976.

Hoofdstuk 11 - De Wind als Drijvende Kracht voor Ventilatie

- ASHRAE 2001. *Airflow around buildings*. 2001 ASHRAE Handbook Fundamentals Chapter16. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
- Blocken, B. et al 2008. *Numerical Study on the Existence of the Venturi Effect in Passages between Perpendicular Buildings*. Journal of Engineering Mechanics@ASCE December 2008, pp1021 – 1028.
- Bronsema, B. 1996. *Natuurlijke ventilatie van kantoorgebouwen – Een goed idee?* TVVL Magazine 9/96, pp 42-46.

- Bronsema, B. 2001. *Hybrid Ventilation: Our First Choice*. CLIMA 2000. 7th REHVA WORLD CONGRESS Napoli 15 – 18 September 2001.
- Bronsema, B. 2003. *Een nieuwe school - Kan het ook beter? (2)*. TVVL magazine 1/2003, pp 40-46
- Bronsema, B. 2005. *Een nieuwe school - Kan het ook beter? (3)*. TVVL magazine 10/2005, pp 60 – 65
- Engel, P. van den 2007. *Natuurlijk geventileerde hoogbouw*. TVVL magazine ../2007.
- IEA International Energy Agency 2007. ANNEX 44 - Integrating Environmentally Responsive Elements in Buildings. *State-of-the-art Review Vol.1 State-of-the-Art Report*. www.civil.aau.dk/Annex44
- IEA International Energy Agency 2007. ANNEX 44 - Integrating Environmentally Responsive Elements in Buildings. *State-of-the-art Review Vol.2A Responsive Building Elements*. www.civil.aau.dk/Annex44
- IEA International Energy Agency 2007. ANNEX 44 - Integrating Environmentally Responsive Elements in Buildings. *Expert Guide Part 2- Responsive Building Elements*. www.civil.aau.dk/Annex44
- ISSO 2002. *Handboek Installatietechniek*. ISBN 90-5044-094-0. Stichting ISSO – Rotterdam.
- Liddament, Martin W – 1996. *A Guide to Energy Efficient Ventilation*. AICV – Air Infiltration and Ventilation Centre -Document AIC-TN-VENTGUIDE-1996 -ISBN 0 946075 85 9
- NNI 2008. *Hygrothermische eigenschappen van gebouwen – Referentieklimaatgegevens*. NEN 5060:2008 - Bijlage A.2.
- NNI 2005. *Ventilation for non-residential buildings – Performance requirements for ventilation and room-conditioning systems*. NEN EN 13779 – Annex A.13.2
- Recknagel Sprenger Schramek 2009/2010. *Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik*. Oldenburg Industrieverlag, München, ISBN 978-3-8356-3134-2
- TROX 2009. *Technische Daten Jalousieklappen – Diagramm 10 – Kennlinien – Gleichlaufig – $\alpha = 0^\circ$* . www.trox.de/xpool/downloads.
- Weltner, K. 2003. *Flugphysik – Physik des Fliegens, Strömungsphysik, Raketen, Satelliten*. Aulis Verlag Deubner & Co KG Köln. ISBN 3-7614=2364-0

Hoofdstuk 12 - Het Dak als Windvanger

Hoofdstuk 13 - Globale Dimensionering

- NNI 2007. *Oppervlakten en inhouden van gebouwen - Termen, definities en bepalingmethoden*. NEN 2580:2007 nl
- NNI 2008. *Hygrothermische eigenschappen van gebouwen – Referentieklimaatgegevens*. NEN 5060: 2008

Hoofdstuk 14 - Dakkappen

- De Gids, W.F. et al 1987. *Drie onderzoeken naar de werking van kanalen voor natuurlijke ventilatie waarbij nagegaan is de invloed van plaats en hoogte van de uitmonding van de bebouwing in de omgeving en van de vorm van de uitmonding*. TNO rapport UDC 533.6.07:551.55:697.921.2:728.2/3.
- Khan, N. 2008. *A review on wind driven ventilation techniques*. [Energy and Buildings Volume 40, Issue 8](#), 2008, Pages 1586-1604
- Lai, C. 2005. *Prototype development of the rooftop turbine ventilator powered by hybrid wind and photo-voltaic energy*. Energy and Buildings 38 (2005) pp 174 – 180.
- Pfeiffer, A. et al 2008. *Modelling of cowl performance in building simulation tools using experimental data and computational fluid dynamics*. Building and Environment 43 (2008) pp 1361 – 1372.
- Revel, A. et al 1998. *Characterising Roof Ventilators*. 15th Australasian Fluid Mechanics Conference The University of Sydney, Sydney, Australia 13-17 December 2004
- West, S. 1999. *Improving the sustainable development of building stock by the implementation of energy efficient climate control technologies*. Building & Environment 36 (1999) pp 281 – 289.

Hoofdstuk 15 - De Stedenbouwkundige Context

- ASHRAE 2001. *Airflow around buildings*. 2001 ASHRAE Handbook Fundamentals Chapter16. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
- Berghauser Pont, Meta en Haupt, Per (2004). *Spacemate[®] the spatial logic of urban density*. Delft University Press, ISBN 90-407-2530-6
- Berghauser Pont, Meta en Haupt, Per (2009). *Space, Density and Urban Form*. Proefschrift Technische Universiteit Delft, ISBN 978-90-5269-375-0
- Wieringa, J en Rijkooft, P.J.1983. *Windklimaat van Nederland*. KNMI De Bilt. Staatsuitgeverij Den Haag. ISBN 90 12 04466 9.

Hoofdstuk 16 - Numerieke Stroomings simulatie Ventecdak[©]

- Blocken, B. en van Hooff, T. 2010. *Evaluatie en optimalisatie van de werking van het Bronsemadak*. Onderzoeksrapport TU/e -Unit Building Physics and Systems.
- Blocken, B. et al 2010. *Application of CFD in building performance simulation for the outdoor environment: an overview*. Journal of Building Performance Simulation, Vol. 4, No. 2, June 2011, 157–184
- 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
- Hooff, T. van and Blocken, B. 2010. *Coupled urban wind flow and indoor natural ventilation modelling on a high-resolution grid: A case study for the Amsterdam ArenA stadium*. Environmental Modelling & Software Volume 25, Issue 1, January 2010, Pages 51-65
- 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.
- 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
- Hooff 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

Hoofdstuk 17 - Fysieke Modelmetingen

- Aanen, L. 2011. *Windtunnelmetingen Ventecdak[©]*. Peutz bv –rapportnummer B 1099-1-RA-001 - april 2011
- Allard, Francis (editor) 1998. *Natural Ventilation in Buildings*. James & James (Science Publishers) Ltd. ISBN 1 873936 72 9.
- ASHRAE 1999. *Building Air Intake and Exhaust Design*. 1999 ASHRAE Handbook Applications Chapter43.
- ASHRAE 2001. *Airflow around buildings*. 2001 ASHRAE Handbook Fundamentals Chapter16. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
- 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

Hoofdstuk 18 - Dynamisch Simulatiemodel ESP-r

- Hensen, Jan 2003. *Simulating Building Performance: Just how useful is it?* REHVA Journal 3/2003
- Hensen, Jan 2004. *Gebouwprestaties(t)imulatie*. Rede uitgesproken op 14 november 2003 ter gelegenheid van de intrede als hoogleraar. TVVL magazine 3/2004
- U.S. Department of ENERGY 2008. *Building Energy Software Tools Directory: ESP-r*

Hoofdstuk 19 - Berekening en Ontwerp

- Wieringa, J. en Rijkooft, P.J.1983. *Windklimaat van Nederland*. KNMI De Bilt. Staatsuitgeverij Den Haag. ISBN 90 12 04466 9.
- NNI 2006. NPR 6097:2006 “*Toepassing van de statistiek van de uurgemiddelde windsnelheden voor Nederland*”

Hoofdstuk 20 - Windenergie in het Ventecdak[©]

- EP en EC (2010). *Energy Performance of Buildings Directive Recast*.
http://www.ecee.org/buildings/EPBD_Recast/
- 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
- EP en EC 2010. *Energy Performance of Buildings Directive Recast*.
http://www.ecee.org/buildings/EPBD_Recast/
- Europese Commissie 2011. *Smart Grids: from innovation to deployment*.
<http://www.smartgrids.eu>
- Mertens, Sander 2006. *Wind Energy in the Built Environment – Concentrator Effects of Buildings*. Proefschrift TU Delft. ISBN 0906522 35 8.
- Plomp, H. en Aanen, L. 2007. *Windenergie en Hoogbouw*. TVVL Magazine 6/2007.
- Toet, S. 2002. *Energieproductie uit windgedreven ventilatie*. Afstudeerverslag Haagse Hogeschool, januari 2002.

Hoofdstuk 21 - Zonne-Energie in het Ventecdak[©]

- EP en EC 2010. *Energy Performance of Buildings Directive Recast*.
http://www.ecee.org/buildings/EPBD_Recast/
- Zeman, Miro 2010. *Increasing the competitiveness of thin-film silicon solar cells*. Quadraad November 2010, pp 16,17
- Zeman, Miro 2011 in *De zon in huis met superdunne siliciumfolie*. FD selections 8 januari 2011.
<http://www.fdselections.nl/energie/Nieuws>