



Rijksdienst voor Ondernemend
Nederland

Binnenmilieu: Symbiose van Architectuur en Klimaattechniek

EOS-LT Earth, Wind & Fire

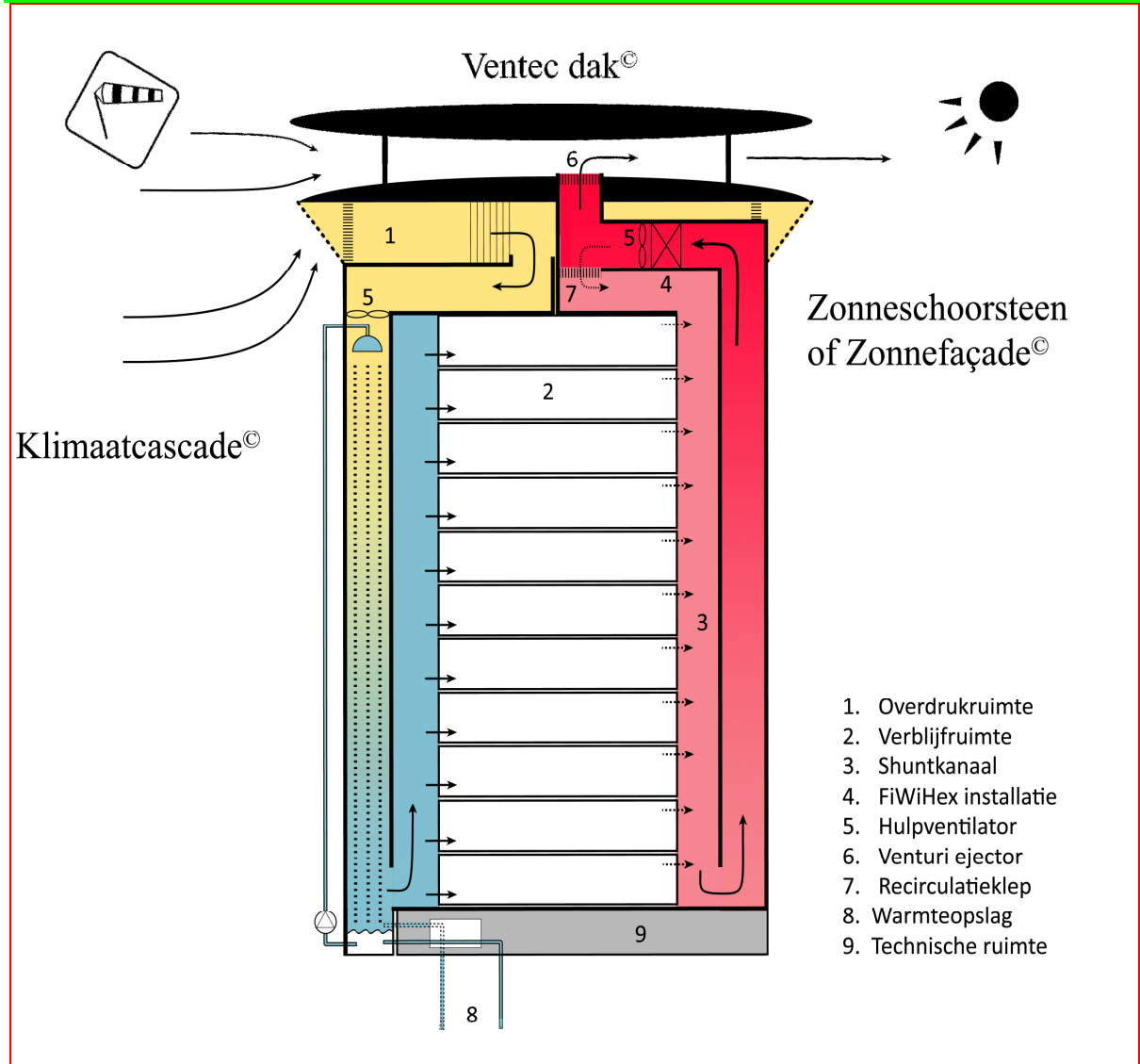
Datum Maart 2012


Ben Bronsema, REHVA Honorary Fellow

In opdracht van SenterNovem (nu Rijksdienst voor
Ondernemend Nederland)

Publicatienr RVO-145-1501/RP-DUZA
www.rvo.nl

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





TU Delft
Technische Universiteit Delft

“EARTH, WIND AND FIRE”

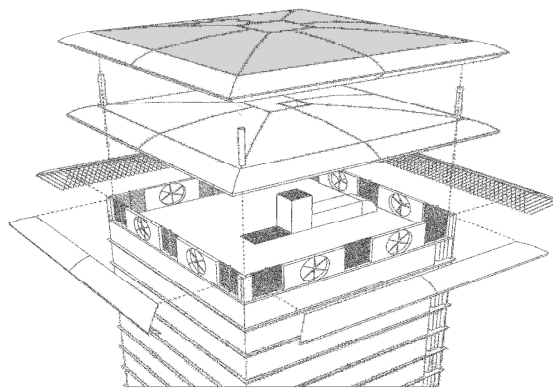
AIRCONDITIONING ZONDER VENTILATOREN

(IV) Binnenmilieu:
Symbiose van Architectuur en Klimaattechniek

Auteur Ben Bronsema –REHVA Honorary Fellow
Maart 2012



KLIMAATCASCADE®



VENTECDAK®



ZONNESCHOORSTEEN

VOORWOORD

Het onderzoek Earth, Wind & Fire is gestart medio 2007, en heeft in maart 2012 geresulteerd in de volgende deelrapporten

- (I) Onderzoek Zonneschoorsteen en Zonnefaçade[©]*
- (II) Onderzoek Natuurlijke Ventilatie, Wind en Ventecdak[©]*
- (III) Onderzoek Klimaatcascade[©] en Geo-Klimaatconcept[©]*

Deze deelrapporten geven een gedetailleerd verslag van de drie deelonderzoeken en richtlijnen voor het ontwerp van respectievelijk de Zonneschoorsteen en Zonnefaçade[©], het Ventecdak[©] en de Klimaatcascade[©]. Met behulp van deze responsieve bouwdelen, geïntegreerd in de architectuur en de constructie van een gebouw, kan een aanzienlijke energiebesparing worden gerealiseerd, met als einddoel een energieneutraal gebouw en zelfs een energieleverend gebouw.

Onderzoek is zelden een lineair proces, en ook bij het onderzoek Earth, Wind & Fire zijn verschillende zijwegen ingeslagen, waarvan verslag wordt gedaan in het voorliggende deelrapport

(IV) BINNENMILIEU: Symbiose van Architectuur en Klimaattechniek

Dit rapport bevat tevens samenvattingen van de deelrapporten (I), (II) en (III) en beschrijft de procesmatige aanpak van modelleren en simuleren bij de ontwikkeling van de Zonneschoorsteen, het Ventecdak[©] en de Klimaatcascade[©]. Verder wordt een klimaatmodel beschreven dat past in het Earth, Wind & Fire concept, het OMEGA klimaatmodel, dat met “Binnenklimaat op Maat” een optimale kwaliteit van het binnenmilieu biedt.

Integratie van Klimaatvoorzieningen in de Architectuur is een nog weinig onderzocht gebied. De dichotomie tussen architectuur en techniek die zich sinds het ontstaan van de installatietechniek heeft ontwikkeld is tot op heden nooit verdwenen, ook al hebben partijen in enkele opzichten vooruitgang geboekt. Een zoektocht naar de “Architecture of the Well-tempered Environment” en de “Architectural Expression of Environmental Control Systems*” was voor de onderzoeker, klimaatingenieur pur sang, een fascinerende bezigheid. Klimaatactieve, of bioklimatische architectuur van Victor Olgyay en Ken Yeang* gaf nieuwe inzichten, niet alleen voor de klimaatvoorzieningen maar ook voor het integratieproces. Deelrapport (IV) doet verslag van deze zoektocht.*

Energiebesparing mag nooit ten koste gaan van de kwaliteit van het binnenmilieu, en tijdens het gehele onderzoekstraject is hieraan dan ook veel aandacht besteed. Liever dan uit te gaan van rigide minimum normen is teruggespreng naar fundamentele uitgangspunten voor luchtkwaliteit en thermisch comfort ten behoeve van een gezond, behaaglijk en productief binnenmilieu. Deelrapport (IV) doet ook hiervan verslag.

*Als sluitstuk wordt in een case study de virtuele ombouw van een bestaand Amsterdams kantoorgebouw beschreven met toepassing van een Zonnefaçade[©], een Ventecdak[©] en een Klimaatcascade[©]. De EU doelstelling van “nearly zero energy**” blijkt haalbaar te zijn, en met behulp van het Ventecdak[©] kan zelfs een energieoverschot worden gerealiseerd.*

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

*Delft, maart 2012,
Ing. Ben Bronsema*

* Zie hoofdstuk 5

** Zie hoofdstuk 1

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.....	16
1.20 SPIN-OFF EFFECTEN	16
1.21 VERANTWOORDING	16
1.22 PUBLICATIES.....	16
9. ARCHITECTUUR EN KLIMAATTECHNIEK	17
1.23 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
10. KORTE INHOUD	23
3.1 ARCHITECTUUR EN KLIMAATTECHNIEK	23
3.2 EEN GEZOND, BEHAAGLIJK EN PRODUCTIEF BINNENMILIEU	24
3.3 HET ONDERZOEK EARTH, WIND & FIRE.....	26
3.4 CASE STUDY	27
11. BEGRIPPEN, EENHEDEN EN SYMBOLEN	29
4.1 BEGRIPPEN.....	29
4.2 EENHEDEN EN SYMBOLEN RUIMTE EN TIJD	33
4.3 EENHEDEN EN SYMBOLEN WARMTE.....	33
4.4 EENHEDEN EN SYMBOLEN KLIMAATREGELING.....	34
4.5 EENHEDEN EN SYMBOLEN STROMINGSLEER	34

12.	INSTALLATIETECHNIEK EN ARCHITECTUUR.....	37
5.1	INLEIDING	37
5.2	DE VISIE VAN EEN ARCHITECT.....	37
5.3	THE ARCHITECTURE OF THE WELL-TEMPERED ENVIRONMENT – REYNER BANHAM.....	38
5.4	KLIMAATACTIEVE ARCHITECTUUR	39
5.5	THERMISCH COMFORT IN EEN KLIMAATACTIEF GEBOUW	40
5.6	BIOClimatic SKYSCRAPERS – KEN YEANG	40
5.7	PASSIVE AND LOW ENERGY COOLING OF BUILDINGS – BARUCH GIVONI.....	41
5.8	SUN, WIND, AND LIGHT - G.Z. BROWN	42
5.9	CRADLE TO CRADLE - M. BRAUNGART EN W. MCDONOUGH.....	42
5.10	THE SELECTIVE ENVIRONMENT – DEAN HAWKES, JANE MCDONALD AND KOEN STEMERS.....	43
5.11	THE ARCHITECTURAL EXPRESSION OF ENVIRONMENTAL CONTROL SYSTEMS – GEORGE BAIRD	43
5.12	EEN KLIMAATACTIEVE STEDENBOUWKUNDIGE OMGEVING.....	44
5.13	FORM FOLLOWS ENERGY.....	45
5.14	ADAPTATIE EN PRODUCTIVITEIT	46
5.15	WAT IS EEN DUURZAAM GEBOUW?	46
5.16	WETTELIJK VERPLICHTE INSTRUMENTEN VOOR DE ENERGIEPRESTATIE	47
5.17	VRIJWILLIGE INSTRUMENTEN VOOR DE BEPALING VAN INTEGRALE DUURZAAMHEID	47
5.18	HET EARTH, WIND & FIRE CONCEPT.....	51
5.19	DE TIEN GEBODEN VOOR EEN GEZOND BINNENMILIEU	51
13.	VENTILEREN VOOR EEN GEZOND EN PRODUCTIEF BINNENMILIEU.....	53
6.1	INLEIDING	53
6.2	SAMENVATTING.....	53
6.3	NORMERING.....	54
6.4	SENSORISCHE KWALITEITSBEPALING	55
6.5	DE CO ₂ INDEX	57
6.6	VENTILATIECAPACITEIT EN SBS SYMPTOMEN.....	58
6.7	VENTILATIECAPACITEIT EN ARBEIDSPRESTATIE	59
6.8	INFECTIERISICO	60
6.9	VENTILATIE EN PRODUCTIVITEIT	61
6.10	VENTILATIE-EFFECTIVITEIT	61
6.11	META-ANALYSE	61
6.12	CONCLUSIES VENTILATIECAPACITEIT	61
6.13	KWALITEIT VAN DE BUITENLUCHT.....	62
6.14	LOCATIE VAN DE LUCHTAANZUIGING VOOR VENTILATIE	63
6.15	EEN VEILIGE LUCHTAANZUIGING VOOR VENTILATIE.....	63
6.16	KORTSLUITING	63
6.17	LUCHTREINIGING.....	63
6.18	LUCHTKANALEN.....	64
6.19	EMISSIE PERSONAL COMPUTERS.....	64
14.	THERMISCH COMFORT EN PRODUCTIVITEIT OP DE WERKPLEK.....	65
7.1	INLEIDING	65
7.2	SAMENVATTING.....	65
7.3	NORMERING VAN KLIMAATCONDITIES IN KANTOORRUIMTEN.....	66
7.4	BINNENKLIMAAT OP MAAT	66
7.5	INDIVIDUELE REGELING KLIMAATCONDITIES	68
7.6	ADAPTIEF THERMISCH BEHAAGLIJKHEIDSMODEL.....	69
7.7	RUIMTEKLIMAAT EN ARBEIDSPRESTATIE.....	72
7.8	THERMISCH COMFORT EN PRODUCTIVITEIT	73
7.9	LUCHTVOCHTIGHEID EN THERMISCH COMFORT.....	75
7.10	BEHAAGLIJKHEID IS MEER DAN THERMISCH COMFORT.....	75

7.11	NIET THERMISCHE BEHAAGLIJKHEIDFACTOREN	75
7.12	STRESSFACTOREN.....	76
7.13	GEZONDHEIDSFACOREN	77
7.14	CONCLUSIES M.B.T. DE RELATIEVE VOCHTIGHEID	77
7.15	BUITENKLIMAATCONDITIES	77
7.16	MAXIMUM BUITENCONDITIE	79
15.	VERANTWOORDING VAN DE ONDERZOEKSDOELEN	81
8.1	INLEIDING, POSITIONERING EN DEMARCATIE VAN HET ONDERZOEK	81
8.2	BENUTTING VAN OMGEVINGSENERGIE.....	82
8.3	THEMA EARTH.....	83
8.4	THEMA WIND	84
8.5	THEMA FIRE.....	85
9.	MODELLEREN EN SIMULEREN	87
9.1	INLEIDING	87
9.2	SIMULATIEMODELLEN	87
9.3	MODELLERING ZONNESCHOORSTEEN EN ZONNEFAÇADE [®]	90
9.3	MODELLERING KLIMAATCASCADE [®]	92
9.4	MODELLERING VENTECDAK [®]	95
9.4	REKENMODELLEN VOOR DE PRAKTIJK	96
10.	SAMENVATTING DEELRAPPORT (I) – ONDERZOEK ZONNESCHOORSTEEN EN ZONNEFAÇADE[®]	97
10.1	ZONNESTRALING EN DE ZONNESCHOORSTEEN.....	97
10.2	ORIENTATIE, MORFOLOGIE EN DE STEDENBOUWKUNDIGE CONTEXT	99
10.3	DIMENSIONERING EN PRESTATIES.....	100
10.4	MODELLEREN, SIMULEREN, KALBREREN EN VALIDEREN.....	102
11.	SAMENVATTING DEELRAPPORT (II) – ONDERZOEK NATUURLIJKE VENTILATIE EN HET VENTECDAK[®].....	107
11.1	WIND, LUCHTKWALITEIT EN VENTILATIE.....	107
11.2	WINDVANGERS	108
11.3	MODELLERING, VALIDATIE EN ONTWERP.....	110
11.4	ENERGIEOPWEKKING MET HET VENTECDAK [®]	111
12.	SAMENVATTING DEELRAPPORT (III) - ONDERZOEK KLIMAATCASCADE[®] EN HET GEO-KLIMAATCONCEPT[®]	113
12.1	LUCHTREINIGING EN ARCHITECTONISCHE INPASSING	113
12.2	PSYCHOMETRISCHE PRESTATIES EN REKENMODEL.....	114
12.3	LUCHTVERPLAATSING EN FYSISCH/CHEMISCHE ASPECTEN	117
12.4	MODELLEREN, SIMULEREN, KALBREREN EN VALIDEREN	118
13.	HET OMEGA KLIMAATMODEL	123
13.1	INLEIDING EN SAMENVATTING	123
13.2	CAPACITEIT	123
13.3	THERMISCHE BELASTINGEN	123
13.4	FIJNMAZIGHEID	125
13.5	STRALING NOODZAKELIJK.....	125
13.6	REACTIETIJD	125
13.7	BINNENKLIMAAT OP MAAT: DE NOODZAAK	125
13.8	BINNENKLIMAAT OP MAAT: DE REALISATIE.....	125
13.9	INDIVIDUELE TEMPERATUURREGELING	127
13.10	VENTILATIE	127
13.11	WARMTE EN KOUDE UIT DE BODEM	127

13.12	CONCLUSIE	127
13.13	WERKPLEKVERWARMING.....	127
14.	CASE STUDY.....	129
14.1	INLEIDING	129
14.2	HET GEBOUW	129
14.3	BOUWKUNDIG EN ARCHITECTONISCH HERONTWERP	131
14.3	TOEPASSING EARTH, WIND & FIRE PRINCIPES.....	133
14.5	VENTILATIE EN KLIMAATREGELING KANTOREN	135
14.6	WARMTE- EN KOUDEVOORZIENING.....	136
14.7	FUNCTIONELE OMSCHRIJVING VAN DE REGELING.....	136
14.8	ENERGIEPRESTATIE	137
15.	INTEGRALE PRESTATIEANALYSE VAN DE CASE STUDY	139
15.1	INLEIDING EN SAMENVATTING.....	139
15.2	REFERENTIESITUATIE.....	139
15.3	FASERING.....	140
15.4	ENERGETISCHE UITGANGSPUNTEN.....	141
15.5	ANALYTISCHE PRESTATIE ANALYSE	143
15.6	ESP-R SIMULATIES	147
16.	REFERENTIES.....	150

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: Gevefactor, 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.

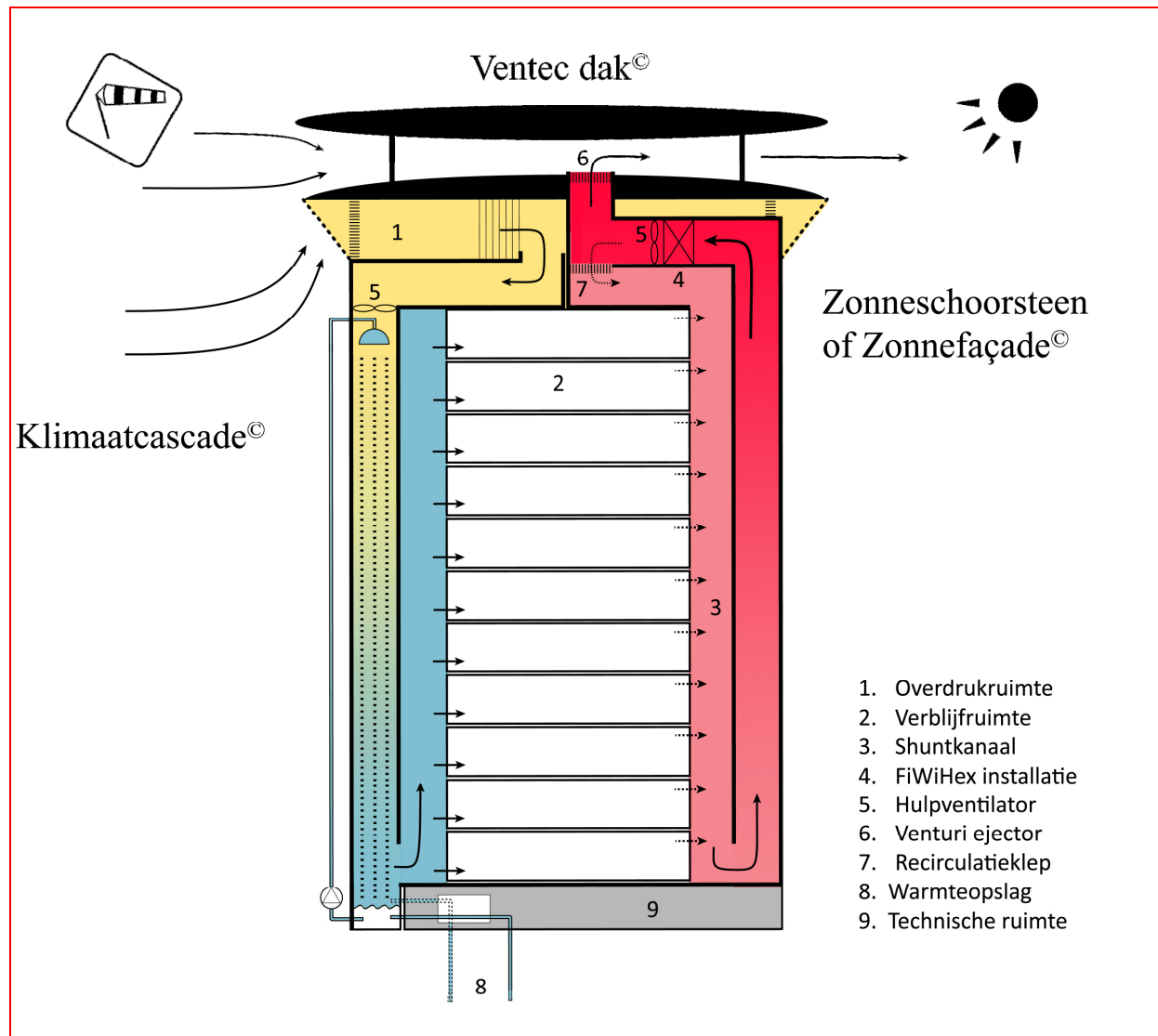
1.3 Earth, Wind & Fire: naar een energieneutraal gebouw

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 overdrukruimte 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 13⁰C 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 zonnearmte 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 20⁰C 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

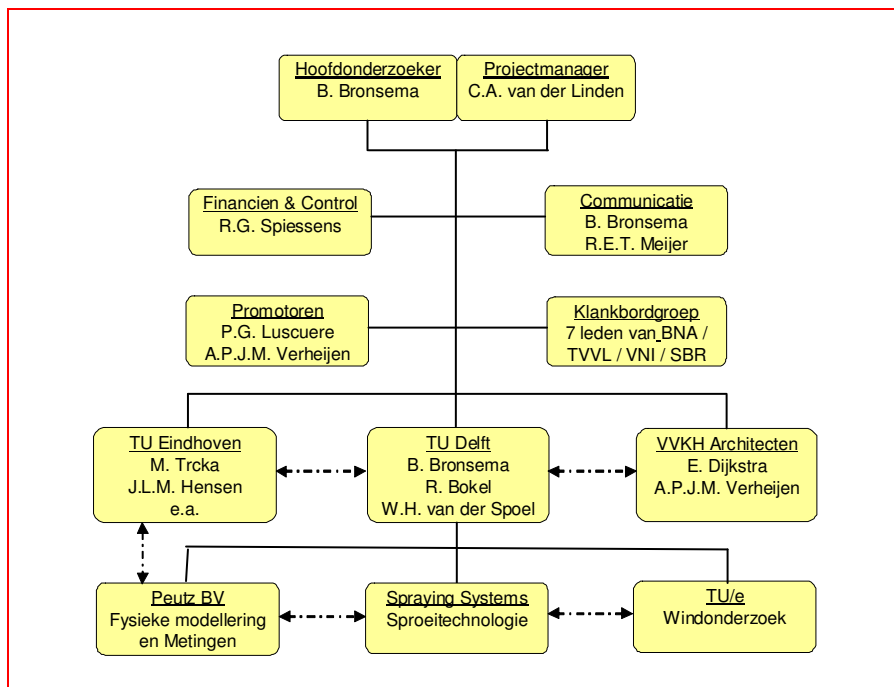
en hoofdstuk 2. Een combinatie met responsieve bouwelementen uit het repertoire van IEA Annex 44 ligt wel voor de hand, maar is geen vereiste. Tabel 8.1 brengt de positionering en de demarcaties van het onderzoek in beeld.

		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, *REHVA*¹ 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

¹ 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.

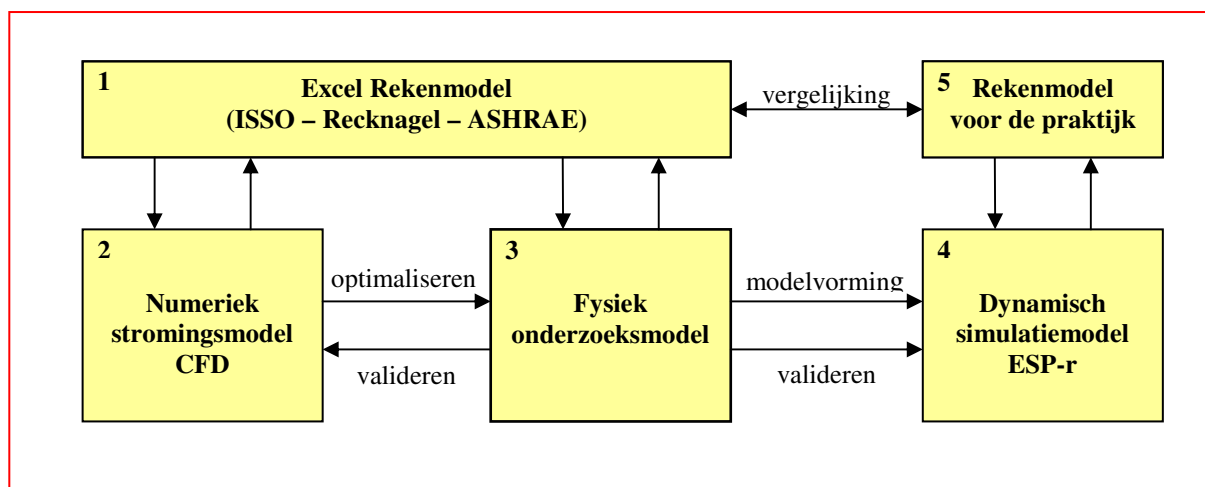
[1] De ontwikkeling van de verschillende concepten is begonnen met het maken van eenvoudige rekenmodellen, die een eerste indruk gaven van de haalbaarheid en de potenties van het betreffende concept. Dergelijke modellen staan dicht bij de ingenieurspraktijk en maken een snelle evaluatie van alternatieven 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.

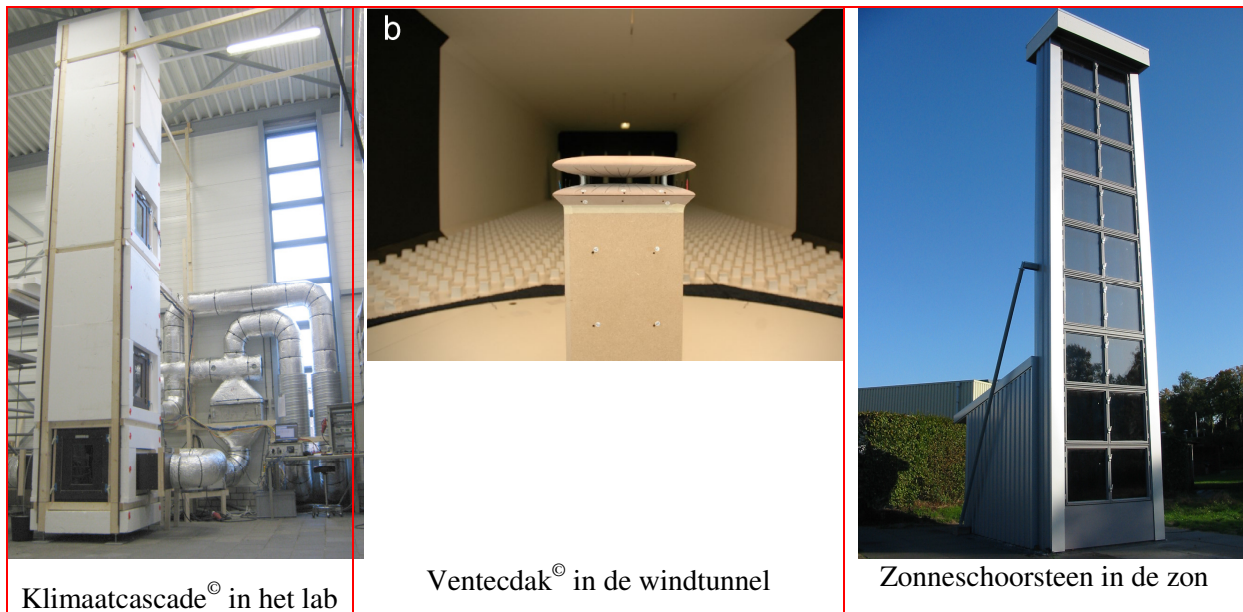
[3] De analytische en de CFD simulatiemodellen zijn gekalibreerd en gevalideerd met behulp van fysieke onderzoeksmodellen, waarin de werkelijk optredende fenomenen van warmteoverdracht en stromingen zijn gemeten. De fysieke onderzoeksmodellen zijn ontworpen door de hoofdonderzoeker en gebouwd en geïnstrumenteerd 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 is met een analytische methode en met behulp van het dynamisch simulatiemodel ESP-r het jaarlijkse energiegebruik in een referentie klimaatjaar bepaald en vergeleken met de oorspronkelijke situatie. Hieruit kan worden geconcludeerd dat het nagestreefde “*nearly zero energy use*” mogelijk is en dat zelfs een energieoverschot kan worden gerealiseerd. 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 Klimatechniek

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 meter¹.

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 (Verbeek, 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 In de Angelsaksische literatuur vaak aangeduid met “*Low-Rise Buildings*”

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).

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 kunnen 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 valt buiten het kader van dit onderzoek en zal in een vervolgstudie nader moeten worden gekwantificeerd.

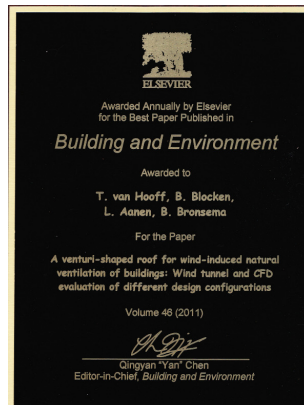
1.21 Verantwoording

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



9. ARCHITECTUUR EN KLIMAATTECHNIEK

1.23 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 ontwerp¹ 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

¹ “*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

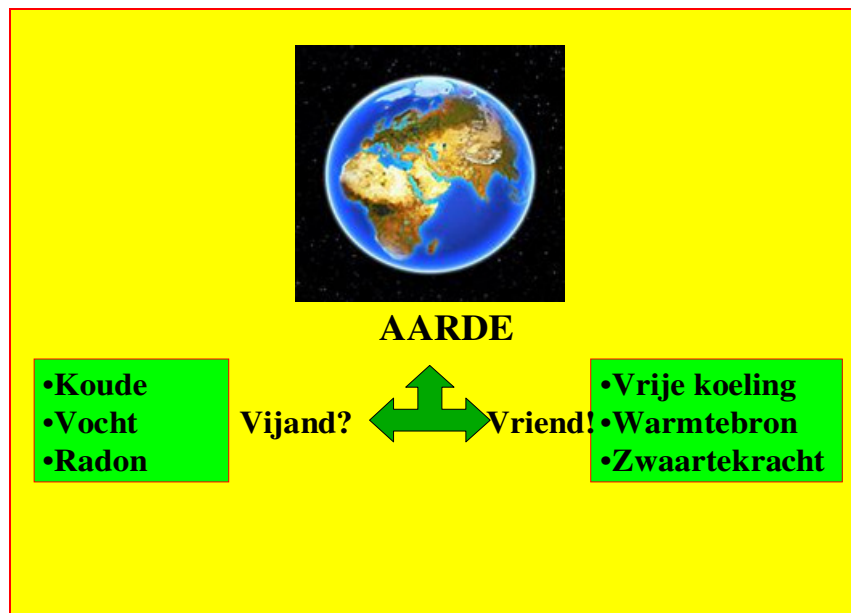
Zon, wind, geothermische energie en zwaartekracht kunnen op verschillende manieren worden ingezet voor de klimaatregeling van gebouwen. In het kader van het onderzoek is uitsluitend ingezet op geïntegreerde concepten van architectuur en binnenmilieu.:

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.



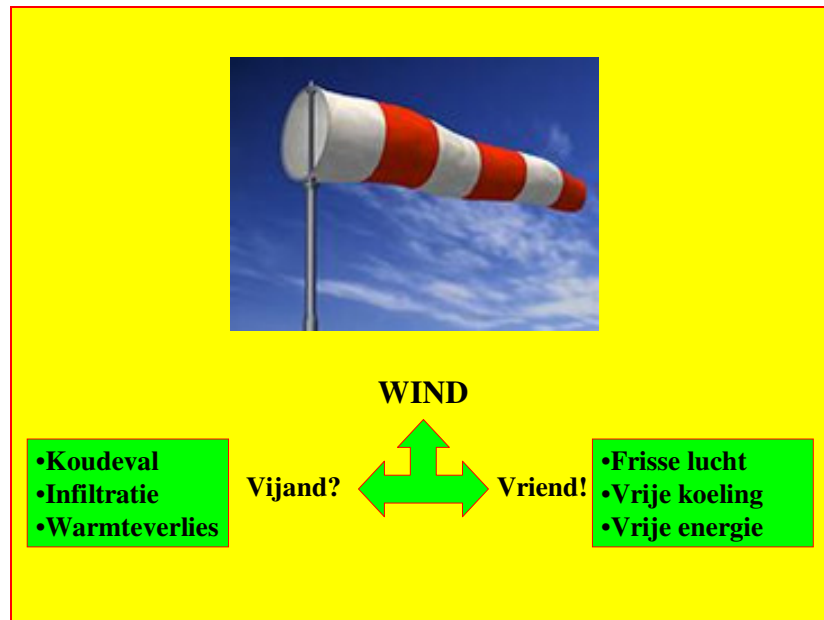
Figuur 2.1 De Aarde – Vriend of Vijand?

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.

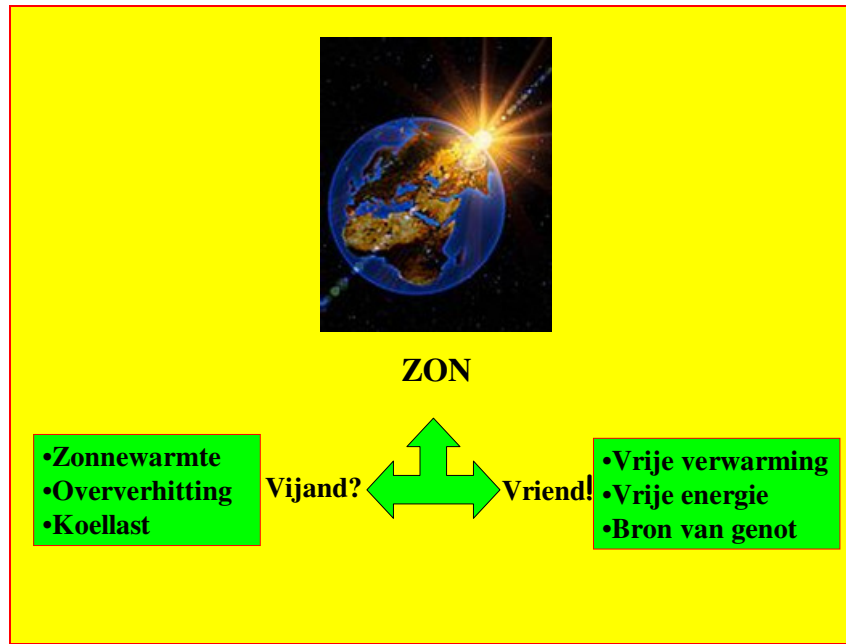


Figuur 2.2 De Wind – Vriend of Vijand?

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 ventilatiecapaciteit¹.

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

¹ Een “*Net Zero Energy Building*” mag geen “*Net Zero Acceptability Building*” worden. Dan Int-Hout in ASHRAE Journal december 2010.

kwaliteit en/of functionaliteit (Rooijackers, Gerard e.a. 2010). De omvang van faalkosten in de bouw 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 Zwaaftink, Miranda 2010), zou voor een innovatieve en milieubewuste opdrachtgever met gelijkgestemde partners een goede contractvorm kunnen zijn.

10. KORTE INHOUD

3.1 Architectuur en Klimaattechniek

[1]¹ 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*”.

Na een evaluatie van verschillende mogelijkheden zijn drie subconcepten geselecteerd, die in eerste instantie als afzonderlijke bouwdelen zijn ontwikkeld en geoptimaliseerd, maar die uiteindelijk in een totaalconcept van klimaatregeling een symbiose gaan vormen. De drie subconcepten zijn:

- Het Ventecdak[®] dat positieve winddrukken gebruikt voor de toevoerventilatie en negatieve winddrukken voor de afzuigventilatie van gebouwen. De ontwikkeling en het ontwerp van het Ventecdak[®] is beschreven in deelrapport (II) van het onderzoek. Voor een samenvatting van het deelrapport zie hoofdstuk 11.
- De Klimaatcascade[®], een uiterst efficiënte warmtewisselaar waarin de ventilatielucht in het koelseizoen wordt gekoeld en in het stookseizoen wordt verwarmd en bevochtigd met behulp van waterdruppels die met een constante temperatuur van 13^oC via sproeiers worden toegevoerd. In de Klimaatcascade[®] wordt tevens druk opgebouwd ten behoeve van de luchtverdeling in het gebouw. De ontwikkeling en het ontwerp van de Klimaatcascade[®] is beschreven in deelrapport (III) van het onderzoek. Voor een samenvatting van het deelrapport zie hoofdstuk 12.
- Een Zonneschoorsteen of Zonnefaçade[®] die dient voor de afzuigventilatie van een gebouw en het oogsten van zonnewarmte. De ontwikkeling en het ontwerp van de Zonneschoorsteen en de Zonnefaçade[®] zijn beschreven in deelrapport (I) van het onderzoek. Voor een samenvatting van het deelrapport zie hoofdstuk 10.

Het *Earth, Wind & Fire* concept is niet alleen energiezuinig; het zet ook omgevingsenergie om in vormen die direct voor de klimaatregeling kunnen worden gebruikt. Windturbines in het Ventecdak[®] en PV-folie op het dak produceren elektrische energie, de Zonneschoorsteen levert warmte. Hiermee wordt een belangrijke stap gezet naar de ontwikkeling van “*nearly zero-energy buildings*”, die volgens de Europese Directive 2010/31/EU in artikel 2,2 als volgt worden gedefinieerd:

“Nearly zero-energy building” means a building that has a very high energy performance, as determined in accordance with Annex 1. The nearly zero, or very low amount of energy required should be covered to a very significant extent by energy from renewable sources, including energy from renewable sources produced on site or nearby.

[2] In de loop van de geschiedenis hebben architectuur en klimaattechniek zich 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 ontwerprijheid 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.

“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).

¹ De nummers tussen haken verwijzen naar de betreffende hoofdstukken

Energiebesparing in gebouwen is tot dusver het domein geweest van de bouwfysica en de installatietechniek. De architectuur, de discipline met de grootste impact op de gebouwde omgeving, is hierbij echter 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.

[5] De *mainstream* ontwikkeling binnen de architectuur bekommert zich niet of nauwelijks actief om de afstemming van architectonisch ontwerp op omgevingsklimaat en -energie.

“...The waning confidence of architects in their own ability to deal with energy problems (or opportunities) was increasingly manifested in the form of calls for a return to traditional modes of construction, inherited wisdom about location and orientation. Much of what was said was intelligent and well-founded, but most of what received publicity in those years now looks like paranoia. Rather than calling for more efficient air-conditioning, the call was for the abandonment of air-conditioning altogether, no matter who might suffer...” (Reyner Banham 1984!)

Anderzijds geldt helaas ook voor klimaatingenieurs dat deze zich nauwelijks hebben verdiept in architectuur en de drijfveren van de architect, hetgeen één van hen tot de verzuchting bracht

“Six years of undergraduate, postgraduate and evening classes’ study at the University of Glasgow’s Faculty of Engineering.....had given me little exposure to architects, or even to architecture. A further 6 years at the University of Glasgow’s Building Services Research Unit had been little better in that respect. Not only did Banham’s book introduce me to architecture, but also it helped me throw off the engineering blinkers I had unwittingly been wearing for the previous 12 years...” (George Baird 2001)

Een korte rondgang door de geschiedenis van de architectuur leert dat er wel kritiek geweest is op de eenzijdige benadering vanuit de architectuur. Verschillende voorbeelden van zogenaamde klimaatactieve architectuur wijzen op een kentering en de ontwikkeling naar energieneutrale gebouwen zal hieraan ongetwijfeld de noodzakelijke stimulans geven. Een recente ontwikkeling op dit punt is de *cradle to cradle* filosofie van Braungart en Mc. Donough.

Volgens Vitruvius, een architect en ingenieur uit de Romeinse tijd, moet een gebouw voldoen aan de drie kwaliteitseisen van *firmitas*, *utilitas*, *venustas* oftewel sterkte, nuttigheid en schoonheid (Vitruvius 85- 20 v.Chr.). Een gebouw dat aan de eerste en de derde kwaliteitseis voldoet zal niet voortijdig instorten en evenmin snel worden afgebroken, waardoor het in principe ook een duurzaam gebouw is. De tweede kwaliteitseis is meer tijdgebonden en omvat in de 21e eeuw naast functionaliteit en flexibiliteit vooral binnenmilieukwaliteit en energiezuinigheid. Bij het onderzoek Earth, Wind & Fire gaat het vooral over de laatstgenoemde aspecten. Beide zijn meetbaar, maar uitsluitend in een gebouw dat in gebruik is. Om het kwaliteitsniveau voor nieuwbouw te kunnen voorspellen zijn rekenmodellen en beoordelingscriteria nodig. Verschillende wettelijk verplichte en vrijwillige instrumenten voor de bepaling van de energieprestatie en integrale duurzaamheid worden kort toegelicht.

3.2 Een gezond, behaaglijk en productief binnenmilieu

[6] Lucht is naast water en voedsel een belangrijk levensmiddel. Mensen brengen verreweg het grootste deel van hun leven binnen vier muren door, en daarom is de kwaliteit van de binnenlucht van groot belang voor de gezondheid. In kantoorgebouwen, waar door de dichte personenbezetting een

intensieve luchtverversing nodig is moet aan de ventilatiecapaciteit veel aandacht worden besteed, en moet de ventilatielucht zo goed mogelijk te worden gezuiverd.

Ventilatie heeft tot doel verontreinigingen in het binnenmilieu af te voeren, en omdat buitenlucht in het algemeen een betere kwaliteit heeft als mechanische toegevoerde lucht presteert natuurlijke ventilatie in principe beter dan mechanische ventilatie. Er moet dan wel voor worden gezorgd dat mensen hun ventilatievoorzieningen niet hoeven te sluiten omdat ze last ondervinden van tocht en/of lawaai bijvoorbeeld bij een stevige wind op de gevel en/of bij lage buitentemperaturen. Veel gebouwen met natuurlijke luchttoevoer lijden aan dit euvel, vooral 's winters, met als gevolg ernstige onderventilatie en slechte binnenluchtkwaliteit.

Energiebesparing wordt niet zelden gerealiseerd door besparing op de ventilatiecapaciteit, hetgeen vaak ten koste gaat van het binnenmilieu. Het Earth, Wind & Fire concept claimt echter een energiezuinig gebouw te kunnen realiseren bij een gezond, behaaglijk en productief binnenmilieu. Beter dan uit te gaan van Bouwbesluit of standaard normen wordt om deze reden in dit hoofdstuk de hiervoor benodigde ventilatiecapaciteit tegen het licht gehouden.

Het Geo-Klimaatconcept[®] voorziet de werkplekken in principe van ventilatielucht met een temperatuur die slechts enkele graden onder de ruimtetemperatuur ligt, waardoor, in combinatie met de temperatuurregeling in de ruimte, tochrisico wordt voorkomen.

Ventileren is nodig voor een gezond binnenmilieu en in een gezonde werkomgeving hebben mensen minder klachten, is het infectierisico kleiner, en de arbeidsprestatie groter. Gestreefd moet dus worden naar een hoge kwaliteit van de binnenlucht; een investering hierin wordt binnen enkele jaren door een hogere productiviteit terugverdiend. De simpele benadering van het ventilatievraagstuk dat de lucht fris moet ruiken is te beperkt. De benodigde ventilatiecapaciteit hangt sterk samen met de uit het interieur en werkplekcomputers geëmitteerde verontreinigingen. Een goede binnenluchtkwaliteit begint met het beperken van deze emissies.

Verschillende normen en methoden ter bepaling van de ventilatiecapaciteit worden kort toegelicht. Voldoen aan het Bouwbesluit levert in het algemeen een matige luchtkwaliteit op. Voor de globale dimensionering van het Ventecdak[®], de Klimaatcascade[®] en de Zonneschoorsteen in de deelrapporten (I), (II) en (III) wordt uitgegaan van kwaliteitscategorie II uit NEN-EN 15251 bij een laag emissieniveau uit het interieur. Voor een cellenkantoor komt dit overeen met $\approx 5 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$

De kwaliteit van de buitenlucht en de locatie waar deze wordt aangezogen is van groot belang. Soms kan het nodig zijn de ventilatielucht te reinigen en kortsluiting tussen schone en vuile luchtstromen moet worden voorkómen. Het *Earth, Wind & Fire* concept voorziet in een veilige en molestvrije aanzuiglocatie. De ventilatiecapaciteit is flexibel en met het toegepaste Ventecdak[®] wordt kortsluiting voorkomen.

[7] Naast een goede luchtkwaliteit is thermisch comfort op de werkplek een belangrijke voorwaarde voor elk individu en elke organisatie. Verschillende normen en methoden voor de definiëring hiervan volgens NEN, ASHRAE, ISO en DIN worden kort toegelicht.

Wetenschappelijk onderzoek heeft aangetoond dat de kwaliteit van het binnenmilieu ook invloed heeft op de productiviteit van mensen en van een organisatie. Met iets hogere eisen dan de bovenste comfortgrenzen aangeven, kan de productiviteit substantieel worden verhoogd. De tendens om met het oog op potentiële energiebesparingen de comfortgrenzen op te rekken staat op gespannen voet met het productiviteitscriterium. Het adaptief thermisch behaaglijkheidsmodel volgens ISSO 74 en de populariteit van gebouw/klimaatype ALPHA verdienen in dit opzicht een kritische beoordeling.

Minstens even belangrijk als de fysische kwaliteit van het binnenmilieu is de mogelijkheid tot individuele regeling hiervan op de werkplek door de kantooremployee zelf. Hierdoor kan tevens worden voldaan aan een primaire menselijke behoefte om invloed te kunnen uitoefenen op de omgevingscondities.

Het binnenmilieu gaat niet alleen over thermisch comfort. Niet thermische- en gezondheidsfactoren spelen eveneens een rol, o.a. bij de gewenste relatieve vochtigheid.

Het *Earth, Wind & Fire* concept claimt een veilig, gezond, behaaglijk en productief binnenmilieu te kunnen realiseren bij een uitzonderlijk laag energiegebruik. Hierbij worden geen concessies gedaan

aan de kwaliteit van het binnenmilieu, zoals dat bij veel gebouwen met natuurlijke ventilatie wel het geval is.

Individuele regelbaarheid van de temperatuur op de werkplek is zowel qua thermisch comfort als productiviteit van cruciaal belang. Bij het OMEGA klimaatconcept met een “Binnenklimaat op Maat” gaan is in principe een acceptatiegraad van 100% bereikbaar en zal zowel de waardering voor het binnenmilieu als de productiviteit maximaal kunnen zijn –zie hoofdstuk 13.

3.3 Het onderzoek Earth, Wind & Fire

[8] Er zijn vele manieren om het energiegebruik van gebouwen te beperken. Sinds enkele decennia is dit ook een intensief onderzoeksterrein geweest, vooral gericht op thermische verbeteringen van de gebouwmhulling, efficiencyverbetering van transparante geveldelen en efficiencyverbetering van klimaatinstallaties.

Integratie van responsieve bouwelementen en klimaatinstallaties wordt beschouwd als de voornaamste strategie voor het realiseren van verdere energiebesparingen. Met responsief wordt in deze context de dynamische afstemming bedoeld van fysische eigenschappen en energetische prestaties bij wisselende buiten- en ruimtecondities. Met deze strategie worden geen afzonderlijke elementen en subsystemen meer geoptimaliseerd, maar ontstaan geïntegreerd ontworpen bouwconcepten. Deze maken optimaal gebruik van natuurlijke middelen voor klimaatregeling en dagverlichting en integratie van omgevingsenergie. Als responsieve bouwelementen kunnen worden genoemd geavanceerde geïntegreerde gevels, benutting van de thermische massa van bouwdelen voor de korte termijn opslag van warmte en koude, bouwdeelactivering, benutting van de thermische capaciteit van de aardmassa, dynamische isolatiesystemen in wanden en Phase Change Materials – PCM- geïntegreerd in bouwelementen.

Volgens Annex 44 van het IEA wordt een geïntegreerd bouwconcept gevormd door de synergie van responsieve bouwelementen en energie- en klimaatvoorzieningen in één systeem waarmee optimale milieuprestaties kunnen worden gerealiseerd.

Het Earth, Wind & Fire concept mag niet worden geïdentificeerd met het geïntegreerde bouwconcept volgens Annex 44, maar kan als buitencategorie hiervan worden beschouwd. De nadruk ligt namelijk op de benutting van de omgevingsenergie van zon, wind en aardmassa voor het realiseren van een hoogwaardige klimaatregeling. Overigens biedt het Earth, Wind & Fire concept, toegepast in combinatie met klimaatactieve architectuur met een hoge milieuscore, de grootste milieuvoordelen en zou derhalve kunnen worden gekarakteriseerd als “*klimaatactieve architectuur van de 2^e generatie*”.

Omgevingsenergie kan op verschillende manieren worden ingezet voor de klimaatregeling van gebouwen, enerzijds actief, passief of hybride, anderzijds toegevoegd aan of geïntegreerd in het gebouw. *Earth, Wind & Fire* is voor wat betreft benutting van omgevingsenergie een hybride concept. Actieve elementen zijn de Zonneschoorsteen of Zonnefacade[®] waarin zonnewarmte wordt geoogst, de windturbines in de overdrukkamer en de PV-folie op het Ventecdak[®].

Passieve elementen zijn het Ventecdak[®] waarmee positieve en negatieve winddrukken worden benut voor ventilatie. Ook de Zonneschoorsteen of Zonnefacade[®] heeft als afzuigstelsel passieve eigenschappen.

Een hybride passief/actief element is de Klimaatcascade[®]. Pompenergie wordt hierbij ingezet om gekoeld water naar de top van de cascade te voeren, waarna de zwaartekracht zijn werk doet om ventilatielucht in beweging te zetten en te koelen of te verwarmen in een overigens passieve cascade.

Het gebruik van omgevingsenergie in gebouwen wordt veelal gerealiseerd met behulp van losse elementen die aan een gebouw worden toegevoegd, zoals zonnepanelen en vrijstaande windturbines. Het *Earth, Wind & Fire* concept is gericht op geïntegreerde bouwconcepten. Het Ventecdak[®], de Klimaatcascade[®] en de Zonneschoorsteen of Zonnefacade[®] zijn integrale onderdelen van het gebouw. Toegevoegde elementen en systemen zijn niet in beschouwing genomen.

[9] Een belangrijke doelstelling van het onderzoek “Earth, Wind & Fire” is klimaatingenieurs en architecten te voorzien van betrouwbare ontwerpgegevens voor dit revolutionaire concept van klimaatregeling. Pas als deze beschikbaar zijn zullen opdrachtgevers en ontwerpers bereid kunnen worden gevonden het concept in concrete bouwwerken tot uitvoering te brengen. Deze doelstelling kan met behulp van gevalideerde simulaties worden verwezenlijkt.

Simuleren kan worden gedefinieerd als 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).

Het Ventecdak[®], de Klimaatcascade[®] en de Zonneschoorsteen of Zonnefaçade[®] zijn ontwikkeld op basis van modelleren, simuleren, kalibreren en valideren. Er is hierbij gebruik gemaakt van analytische modellen in Excel, numerieke stromingsmodellen met behulp van CFD en dynamische simulatiemodellen in ESP-r. De modellen zijn gekalibreerd en gevalideerd door metingen in fysieke testopstellingen. Voor de Zonneschoorsteen, een dominant architectonisch element is een rekenmodel voor de praktijk ontwikkeld, voor gebruik door de architect in de conceptuele ontwerpfase.

[10] – [11] – [12] De 4 deelrapporten: (I) Onderzoek Zonneschoorsteen en Zonnefaçade[®], (II) Onderzoek Natuurlijk Ventilatie, Wind en het Ventecdak[®], (III) Onderzoek Klimaatcascade[®] en het Geo-Klimaatconcept[®] en (IV) Binnenmilieu – Symbiose van Architectuur en Klimaattechniek zijn zelfstandige eenheden en afzonderlijk te lezen. In alle delen is als afzonderlijk hoofdstuk een Korte Inhoud opgenomen. In het voorliggende deelrapport (IV) zijn de samenvattingen van de delen (I), (II) en (III) opgenomen in respectievelijk de hoofdstukken [10], [11] en [12].

3.4 Case Study

[13] Het OMEGA klimaatconcept levert een “Binnenklimaat op Maat”, dat mensen de mogelijkheid biedt de thermische omgevingscondities van hun werkplek individueel aan te passen aan hun persoonlijke behoefte. In principe is dan een acceptatiegraad van 100% bereikbaar en zal zowel de waardering voor het binnenmilieu als de productiviteit maximaal kunnen zijn. Om dit te kunnen realiseren beschikt het installatieontwerp over de volgende eigenschappen:

- Voldoende capaciteit op alle werkplekken om aan uiteenlopende wensen te kunnen voldoen;
- Een fijnmazige en gebruikersvriendelijke individuele regelmogelijkheid per werkplek;
- Flexibiliteit bij indelingswijzigingen;
- Een korte reactietijd zodat een thermostaatverstelling zo snel mogelijk wordt gevolgd door het gewenste resultaat.

Het beschreven concept, dat ook voor de *case study* is gebruikt, kan worden toegepast met behulp van traditionele technieken.

Verder wordt enige aandacht besteed aan een geavanceerd concept van *task-ambient conditioning* met behulp van in het kantoormeubilair geïntegreerde stralingspanelen.

[14] Om de energieprestaties van het *Earth, Wind & Fire* concept in een reëel gebouw te evalueren is een *case study* uitgevoerd, die tevens dient als ontwerp oefening. De jaarlijkse nieuwbouw in Nederland omvat maar een klein percentage van de aanwezige bouwvoorraad. Toepassing van de *Earth, Wind & Fire* principes is daarom vooral van belang voor toepassing bij grote renovaties van bestaande gebouwen. Om deze reden is gekozen voor een bestaand kantoorgebouw dat virtueel wordt omgebouwd. Het uitgangspunt hierbij was dat zowel architectonisch als bouwkundig het ontwerp niet alleen virtueel maar ook reëel zou moeten kunnen worden gerealiseerd.

De *case study* is uitgevoerd voor een kantoorgebouw met vijf bouwlagen in Amsterdam, bouwjaar 1999 met een bruto vloeroppervlak van ca 3.700 m² en parkeerkelder. Het Ventecdak[®] is om architectonische redenen uitgevoerd met gereduceerd bovendak. De gehele Zuidgevel is uitgevoerd als Zonnefaçade[®] en de Klimaatcascade[®] is ondergebracht in een bestaande installatieschacht. De ventilatielucht wordt verdeeld via de plafondruimte en kwelroosters op vloerniveau. De lucht wordt naar de Zonnefaçade[®] afgezogen van de gangen en een atrium. De ruimteverwarming en -koeling is uitgevoerd conform het OMEGA klimaatconcept. Het dak wordt niet gebruikt voor energieopwekking.

[15] In hoofdstuk 14 is de virtuele ombouw beschreven van het kantoorgebouw van de Pensioenstichting Zomers Buiten in Amsterdam op basis van het *Earth, Wind & Fire* concept. Het voorliggende hoofdstuk geeft een analyse van de energieprestaties van dit gebouw als resultaat van deze interventie, waarin achtereenvolgens de Klimaatcascade[®], de Zonnefaçade[®] en het Ventecdak[®] zijn geïmplementeerd.

Voor deze geïntegreerde prestatieanalyse is gebruik gemaakt van het dynamisch gebouwsimulatiemodel ESP-r en het referentie klimaatjaar 1986 – 2005 volgens NEN 5060:2008. De ontwikkeling van afzonderlijke ESP-r modules voor de Zonnefaçade[®] en de Klimaatcascade[®] zijn

beschreven in de deelrapporten (I) en (III), terwijl voor het Ventecdak[®] wordt teruggegrepen op een in deelrapport (II) ontwikkeld rekenalgoritme.

Een geïntegreerde prestatieanalyse kan het zicht benemen op de relatieve invloed van de verschillende ingrepen. Uitgaande van de referentiesituatie is de virtuele ombouw daarom in 4 stappen uitgevoerd, en is het effect van elke stap afzonderlijk geanalyseerd. Voor wat betreft operationele gegevens is uitgegaan van generieke uitgangspunten en niet van de specifieke bedrijfsgegevens van de organisatie in het onderhavige gebouw.

De methodologie bij de ontwikkeling van de Klimaatcascade[®], de Zonnefaçade[®] en het Ventecdak[®] had als startpunt het maken van eenvoudige rekenmodellen, die aansluiten bij de ingenieurspraktijk, met behulp waarvan een indruk werd verkregen van de potenties van de betreffende concepten. De resultaten van de daarop volgende sophisticated dynamische ESP-r simulaties konden met behulp hiervan kwantitatief goed worden geëvalueerd.

Bij de geïntegreerde prestatieanalyse is een soortgelijke methodiek gevolgd. In eerste instantie is een analytische benadering gevolgd, waarbij de resultaten handmatig werden berekend. In tweede instantie is het dynamisch gebouwsimulatiemodel ESP-r gebruikt. In beide gevallen is uitgegaan van de met behulp van het ESP-r model berekende warmte- en koudegebruiken van het gebouw.

Met de analytische methode wordt een reductie van het primaire energiegebruik berekend van 120,7 → 58,4 kWh.m⁻².a⁻¹ op basis van m² bvo, overeenkomend met een reductie van ≈ 52%.

Met de ESP-r methode wordt een reductie van het primaire energiegebruik berekend van 112 → 13,5 kWh.m⁻².a⁻¹ op basis van m² bvo, overeenkomend met een reductie van ≈ 88%. Opgemerkt wordt dat verschillende onderdelen, de klimaatplafonds, de warmteopslag en de warmtepomp niet in ESP-r konden worden gemodelleerd. De effecten hiervan zijn handmatig berekend.

In beide gevallen wordt de belangrijkste bijdrage geleverd door de Zonnefaçade[®] in combinatie met korte- en lange termijn warmteopslag. ESP-r berekent hier aanzienlijk hogere opbrengsten dan de analytische methode. Er is van afgezien een nauwkeurige analyse te maken van de verschillen.

Met behulp van dunne film PV folie op het Ventecdak[®] kan 21,6 kWh.m⁻².a⁻¹ elektrische energie worden opgewekt overeenkomend met 54 kWh.m⁻².a⁻¹ primaire energie. Volgens de analytische methode wordt het gebouw wordt hierdoor vrijwel energieneutraal. Volgens de ESP-r methode wordt een energieoverschot gerealiseerd van ≈ 40 kWh.m⁻².a⁻¹.

De mogelijke bijdrage van windenergie in het Ventecdak[®] is met 3,8 kWh.m⁻².a⁻¹ gering, vooral door de geringe bouwhoogte van 5 verdiepingen en de lage windsnelheden op deze hoogte.

11. BEGRIPPEN, EENHEDEN EN SYMBOLEN

4.1 Begrippen

Begrip	Engels	
Albedo	Albedo	Diffuse reflectiefactor
Aquifer		Watervoerende bodemlaag, doorgaans op 25 à 100 meter diepte, die als bron of opslagplaats van warmte of koude kan dienen
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 gasen beschrijft, en de drukveranderingen aan hoogte- en snelheidsveranderingen relateert
Bernoulli-injector	Bernoulli-injector	Opening in het Ventedak [®] 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 vloeistofstroming 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.
Operatieve temperatuur	Operative temperature	Waarde, samengesteld uit Lucht- en Gemiddelde stralingstemperatuur, die een maat is voor het gecombineerd effect op de thermische behaaglijkheid
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.
Strijk lengte		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 menhoogte, 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 stromingkanaal 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
WKO		Warmte-Koude-Opslag in waterhoudende grondlagen (aquifers) diep in de bodem. Deze worden benut als energiebuffer..
Wrijvingssnelheid		Fictieve “snelheid” die afhangt van de wrijving die de wind ondervindt bij de stroming langs het grondoppervlak
Zog	Wake	Gebied aan de lizijde 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 glasoverkapte 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	$m \cdot s^{-1}$
a	versnelling	$m \cdot s^{-2}$
g	gravitatieversnelling	$m \cdot s^{-2}$

4.3 Eenheden en symbolen warmte

T	Thermodynamische temperatuur	K
θ (<i>theta</i>)	Celsiustemperatuur	$^{\circ}C$
α, λ (<i>alpha, lamda</i>)	lineaire uitzettingscoëfficiënt	K^{-1}
β, α_v (<i>beta,</i>)	kubieke uitzettingscoëfficiënt	K^{-1}
Q	hoeveelheid warmte	J
Φ (<i>phi</i>)	warmtestroom	W
q	warmtestroomdichtheid	$W \cdot m^{-2}$
G	warmtegeleiding	$W \cdot K^{-1}$
λ (<i>lamda</i>)	warmtegeleidingscoëfficiënt	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
h	warmteoverdrachtscoëfficiënt	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
U	warmtedoorgangcoëfficiënt	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
r	warmteweerstandcoëfficiënt	$m \cdot K \cdot W^{-1}$
R	warmteweerstand	$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$

a	temperatuurvereffeningscoëfficiënt	$m^2 \cdot s^{-1}$
C	warmtecapaciteit	$J \cdot K^{-1}$
r	verdampingswarmte	$kJ \cdot kg^{-1}$
c	soortelijke warmte	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
c_p	soortelijke warmte bij constante druk	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
c_v	soortelijke warmte bij constant volume	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
γ (<i>gamma</i>)	verhouding c_p/c_v	-
h	(soortelijke) enthalpie	$J \cdot kg^{-1}$

4.4 Eenheden en symbolen klimaatregeling

t	tijd	s
T	thermodynamische temperatuur	K
θ (<i>theta</i>)	celsiustemperatuur	$^{\circ}C$
v	volume	m^3
q_v	volumestroom, (volume)debiet	$m^3 \cdot s^{-1}$
m	massa	kg
q_m	massastroom	$kg \cdot s^{-1}$
p	druk	Pa
A	oppervlak	m^2
u, v, w, c	snelheid	$m \cdot s^{-1}$
ρ (<i>rho</i>)	(massa)dichtheid, soortelijke massa	kg.
c	soortelijke warmte	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
$h, (i)$	(soortelijke) enthalpie	$J \cdot kg^{-1}$
P	vermogen	W
Q	hoeveelheid warmte	J
Φ (<i>phi</i>)	warmtestroom	W
$q, (\varphi)$ (<i>phi</i>)	warmtestroomdichtheid	$W \cdot m^{-2}$
U	warmtedoorgangcoëfficiënt	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
G	vochtstroom	$kg \cdot s^{-1}$
g	vochtstroomdichtheid	$kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$
x	absolute vochtigheid	$kg \cdot kg^{-1}$
φ (<i>phi</i>)	relatieve vochtigheid	%
n	ventilatievoud	$m^3 \cdot h^{-1} \cdot m^{-3}$
N	aantal uren	h
G_h	aantal graaduren	K.h
G_d	aantal graaddagen	K.d
I_{clo}	kledingweerstand	Clo ($0,155m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$)

4.5 Eenheden en symbolen stromingsleer

C_p	Winddrukcoëfficiënt	-
-------	---------------------	---

C_{pow}	Vermogenscoëfficiënt	-
p	druk	Pa
σ (<i>sigma</i>)	normaalspanning	Pa
τ (<i>tau</i>)	schuifspanning	Pa
$\eta, (\mu)$ (<i>eta, mu</i>)	(dynamische) viscositeit	Pa.s
ν (<i>nu</i>)	kinematische viscositeit	m ² .s
ζ (<i>xi</i>)	weerstandscoefficiënt	-
λ (<i>lamda</i>)	weerstandsfactor voor pijpen	-
σ, γ (<i>sigma, gamma</i>)	oppervlaktetension	n.m ⁻¹

12. INSTALLATIETECHNIEK EN ARCHITECTUUR

5.1 Inleiding

De installatietechniek is pas vanaf ≈ 1850 tot ontwikkeling gekomen (Bronsema 2002). Vòòr die tijd was het de taak van de gebouwmhulling het interieur enerzijds te beschermen tegen de hitte, koude en zonstraling in het buitenmilieu, en anderzijds van deze hitte, koude en zonstraling zo goed mogelijk gebruik te maken voor een natuurlijke klimaatregeling. De vorm van een gebouw en de uitvoering van de buitengevel als *interface* tussen buiten- en binnenmilieu was en is hiervoor een belangrijk gegeven en tevens een dominante factor in de architectonische expressie.

De vrijwel gelijktijdige ontwikkeling van de installatietechniek en van de draagconstructie met staal- of betonskelet en ongebonden gebouwschil maakte een andere architectuur mogelijk. De rol van de buitengevel werd minder belangrijk; met technische installaties konden grote klimaatverschillen worden overbrugd. De maatschappelijke en culturele verschillen die hiermee gepaard gingen zijn niet gering (Cooper, Gail 1998, Will, H.M. 1999, Ackermann, Marsha E. 2002).

“...Sinds 1940 zijn acht van de tien snelst groeiende steden in het zuidoosten en zuidwesten van de VS te vinden. Deze snelle groei is het rechtstreekse gevolg van airconditioning. Airconditioning is nu een “way of life” in de VS. Volgens het Air-Conditioning and Refrigerating Institute hebben in de VS 50% van alle woningen airconditioning en zijn 81% van alle in 1996 nieuw gebouwde woningen voorzien van centrale airconditioning...” (Hayter, Richard B. 2000).

Gebouwen konden worden ontworpen zonder rekening te houden met het lokale klimaat, maar werden hierdoor wel geheel afhankelijk van installaties en energie. Om energie te besparen werden compacte gebouwen ontworpen met een zo klein mogelijke verhouding tussen geveloppervlak en bouwvolume. Ook de installatietechniek liet zich hierbij niet onbetuigd door de ontwikkeling van hoogrendements warmte- en koudeopwekking, warmteterugwinning, en energiezuinige klimaatsystemen.

De noodzaak om in de gebouwde omgeving zuinig te zijn met energie, met als grote uitdaging op termijn energieneutrale gebouwen te realiseren, heeft geleid tot een andere denkrichting in architectuur, waarbij zowel bouwtechnologie als installatietechniek een belangrijke rol spelen.

Gebouwen krijgen hierbij een deel van hun vroegere functie terug als intermediair voor het dempen van verschillen tussen buiten- en binnenmilieu en het benutten van daglicht en zonstraling. Bio-klimatische architectuur is van deze richting de dominante ontwikkeling.

Het Earth, Wind & Fire concept kan in bioklimatische architectuur goed tot zijn recht komen, maar is even goed toepasbaar in niet-bioklimatische architectuur. De rol van de architect wordt in beide concepten belangrijker; zie paragraaf 3.2.

Het voorliggende hoofdstuk geeft een aantal beschouwingen over dit thema, ontleend aan de literatuur en besluit met een *statement* over thermisch comfort en productiviteit.

5.2 De visie van een architect¹

Globaal kan worden gesteld dat een derde van een bouwbudget wordt besteed aan constructie, een derde aan bouwkundige elementen en een derde aan klimaat- en comfortaspecten. Architecten gebruiken vooral de constructieve en de bouwkundige elementen om gebouwen architectonisch tot uitdrukking te brengen. Ze laten zo een derde van het bouwbudget liggen in de zoektocht naar architectuur.

De klimaat- en comfortaspecten worden vooral behandeld door de klimaat- of installatieadviseur. Architecten hebben weinig affiniteit met deze materie, weten te weinig en zijn wellicht daarom ook minder geïnteresseerd. De installatieadviseur is gericht op het functioneren van de installaties en begrijpt niet dat zijn werk ook architectonische invloed (positief of negatief) kan hebben en het beeld beïnvloedt. Architectonische ongelukken zijn hiervan het gevolg. Er is een taalprobleem tussen architect en adviseur, onbegrip over en weer. Er moeten bruggen worden geslagen!

In deze tijd waarin enerzijds de energieprijzen stijgen, er een milieunoodzaak is zuiniger om te gaan met energie en anderzijds comforteisen steeds hoger worden, moeten nieuwe wegen worden gezocht. De architect heeft veelal het begrip verloren het gebouw ook te zien als een klimaatmachine, installaties lossen immers alle falen van een gebouw op (te grote glasvlakken op het zuiden, dan meer koeling, in

¹ Fons Verheijen

plaats van het vermijden van die glasvlakken). Een goed klimaat in een gebouw zou tegenwoordig allereerst bouwkundig gevormd moeten worden en daarna pas (als sluitpost) de installatietechnisch. De zoektocht naar nieuwe wegen vergt een andere attitude van de architect en een andere, intensievere, samenwerking met de adviseur. Voor een duurzamere wereld zullen bij zo'n nieuwe ontwerphouding ook de gegeven omgevingsfactoren meegenomen moeten worden om deze niet negatief maar juist productief in te zetten voor een beter en energiezuiniger binnenklimaat. Hierdoor kunnen nieuwe gebouwtypen en systemen ontstaan en daarmee ook nieuwe architectuuruitingen.

Bruggen moeten worden geslagen, nieuwe ontwerphoudingen worden aangeleerd. Het onderzoeksprogramma Earth Wind and Fire gaat hier op in en zal voor architecten en studenten nieuwe werelden openen die in de huidige ontwerpwereld nodig zijn. Het binnenklimaat moet vooral eerst in handen van de architect liggen en zijn verantwoordelijkheid zijn. Dit zal leiden tot een andere en vruchtbaardere samenwerking met de adviseur die op zijn beurt oog moet krijgen voor de architectuur als geheel. Nieuwe werelden ontstaan en Earth Wind and Fire zal daarin één van de aanjagers zijn.

5.3 The Architecture of the Well-tempered Environment – Reyner Banham

Deze klassieker gaat over de dichotomie tussen architectuur en techniek zoals die zich sinds het ontstaan van de installatietechniek heeft ontwikkeld en die door de schrijver op een vaak heftige wijze wordt veroordeeld. In een apologie schrijft hij

“In a world ...where architects more easily recognised where their prime human responsibilities must lie...this book need never have been written, because those services in buildings that provide for the comfort and well-being of humans would always have been part of the history of architecture as taught in schools, studied by scholars, and honoured by the profession..... The understanding of architecture after some two centuries of narrow-eyed aesthetic vision is corrupted. ...The idea that architecture belongs in one place and technology in another is comparatively new in history, and its effect on architecture, which should be the most complete of the arts of mankind, has been crippling....

Because of this failure of the architectural profession to keep its house in order, it fell to another body of men to assume responsibility for the maintenance of decent environmental conditions: everybody from plumbers to consulting engineers. They represented “ another culture”, so alien that most architects held it beneath contempt, and still do. The works and opinions of this other culture have been allowed to impinge as little as possible on the teaching of architecture schools, where the preoccupation of elegant graphic compositions rendering the merely structural aspects of plan, elevation, and sometimes section. (Never mind all that environmental rubbish, get on with your architecture)”.....

In this circumstance of persistently lopsided architectural discourse, environmental provisions have only attracted attention when they have made some gross monumental impact on the exterior aspect of buildings, as with the brightly coloured duct work of the Centre Pompidou in Paris....

....The waning confidence of architects in their own ability to deal with energy problems (or opportunities) was increasingly manifested in the form of calls for a return to traditional modes of construction, inherited wisdom about location and orientation. Much of what was said was intelligent and well-founded, but most of what received publicity in those years now looks like paranoia. Rather than calling for more efficient air-conditioning, the call was for the abandonment of air-conditioning altogether, no matter who might suffer...

...The mechanical environmental controls are the most obvious and spectacularly important, both as a manifestation of changed expectations and as an irrevocable modification of the ancient primacy of structure; yet they are the least studied.....”

De reactie van de architectuur op de ontwikkeling van gebouwinstallaties wordt boeiend beschreven, vooral met betrekking tot de verschillen tussen Europa en Amerika, waar de uitvindingen van Edison en Carrier de meeste impact hadden. Deze ontwikkeling werd aanvankelijk door sommigen genegeerd, door anderen aarzelend geaccepteerd, door een enkeling verkeerd begrepen (Le Corbusier) en door een eenzame grootheid volledig omarmd (Lloyd Wright).

De ontwikkeling van gebouwinstallaties had twee kanten: de ene was gericht op de integratie van installaties in bestaande architectuur, waardoor gebouwen met de nieuwe technieken beter konden functioneren; de andere op een nieuwe architectuur, die gebouwen geheel afhankelijk maakt van de installatietechniek, waardoor met het lokale klimaat geen rekening meer hoeft te worden gehouden en gebouwen overal ter wereld dezelfde verschijningsvorm konden aannemen.

Integraal ontwerpen gaat veel verder dan het inpassen van installaties in de constructie en het vinden van de optimale locatie voor de centrale voorzieningen, maar

“setting them to work in partnership with the structure so that the whole is more than the sum of the parts”.

De haat-liefdeverhouding tussen veel architecten en hun adviseurs, hoe historisch verklaarbaar ook, kan met het *Earth, Wind & Fire* concept mogelijk een wending nemen. Het binnenklimaat wordt gerealiseerd met behulp van elementen uit het idioom van de architect en dat zou in principe de kloof moeten kunnen overbruggen.

De tweede druk van *The Architecture of the Well-tempered Environment* is van 1984, en het zou goed zijn als de culturele erfgenen van Reyner Banham eens een *update* zouden maken tot de situatie anno 2009. Mogelijk is er in deze periode iets veranderd.

Zie bijvoorbeeld figuur 2.1 die een indrukwekkende integratie van architectuur en installaties in het Stadhuis Lelystad (1984) laat zien. Architect Jan Hoogstad – Adviseur klimaattechniek Ben Bronsema. Een duurzaam gebouw ook, met een energieverbruik dat nog geen 40 procent is van wat tot die tijd gebruikelijk was.



Figuur 5.1 – Stadhuis Lelystad

5.4 Klimaatactieve architectuur

In internationaal verband wordt hiervoor meestal het begrip bioklimatische architectuur gebruikt. Eén van de grondleggers hiervan, Victor Olgay, heeft betoogd dat de installatietechniek alleen de *fine-tuning* zou moeten regelen van de klimaatregeling, die in hoofdzaak door het gebouw zelf zou moeten worden gerealiseerd; zie figuur 2.2. Het buitenklimaat wordt door het microklimaat op de bouwlocatie, beïnvloed door ligging, urbanisatie en begroeiing gedempt aan het gebouw doorgegeven, waar het door de bouwmassa verder wordt gedempt, zodat de klimaatinstallatie beperkt van omvang kan zijn (Olgay, Victor 1973, Hawkes, Dean e.a. 2002).

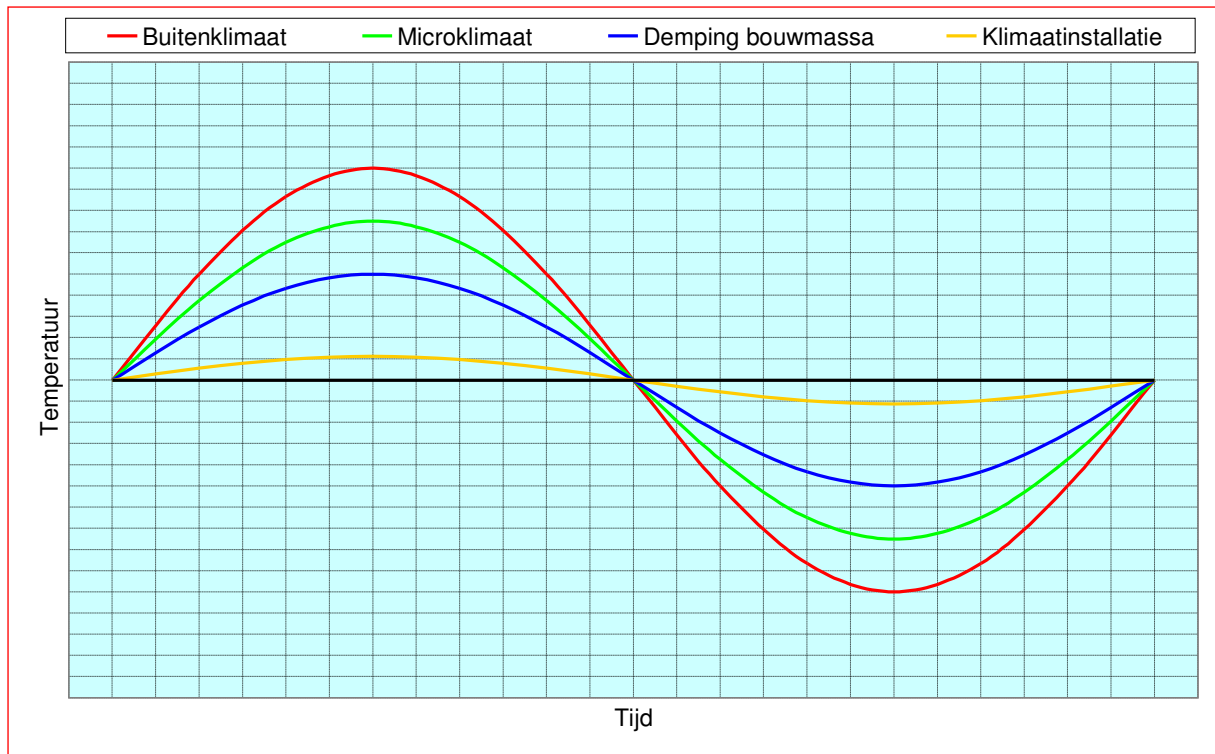
Klimaatactieve architectuur richt zich in de eerste plaats op de architectonische integratie van systemen voor dagverlichting, passieve verwarming, natuurlijke ventilatie en koeling. De bekende bioklimatische architect Ken Yeang geeft hiervoor de volgende motiveringen¹ (zie paragraaf 3.5):

- Een ecologische: beperking van het energiegebruik en verhoging van de duurzaamheid van bouwwerken.
- Een sociale: verhoging van het menselijk welzijn, vooral in hoogbouw.
- Een culturele: voortzetting van het historisch menselijk leerproces om gebouwen aan te passen aan het regionale klimaat.

Klimaatactieve architectuur richt zich dus volgens Ken Yeang niet alleen op de vorm, schoonheid en bruikbaarheid van een gebouw, maar ook op haar ecologische, sociale en culturele prestaties. In eerste instantie gericht op energiezuinigheid en duurzaamheid zou de integratie van bioklimatische strategieën dus nog een ander doel dienen namelijk het bevorderen van een hoge sensorische en mentale tevredenheid van bewoners en gebruikers van een gebouw, waardoor tevens hun prestaties kunnen worden verbeterd (Brown, G.Z. 2009).

Technische middelen die hiervoor worden aangewend zijn conventionele aspecten uit het architectonisch repertoire als lay-out, oriëntatie, aantal, situering en uitvoering van ramen en zonwering, thermische isolatie en accumulerend vermogen van de constructie etc. (Givoni, B. 1994).

¹ Een vierde beweegreden, een commerciële, wordt door Yeang niet genoemd, maar speelt voor een architect die zijn naam zo uitdrukkelijk verbonden heeft aan bioklimatische architectuur ongetwijfeld ook een rol.



Figuur 5.2 - *Flattening the curve* volgens Olgyay

5.5 Thermisch comfort in een klimaatactief gebouw

In een klimaatactief gebouw zijn meestal de behaaglijkheidcriteria ruim gedefinieerd, maar hebben bewoners en gebruikers ook ruime mogelijkheden de omgevingscondities van hun werkplek aan te passen aan hun persoonlijke behoefte, en/of omgekeerd hun kleding op deze omgevingscondities af te stemmen (adaptatie). Onderzoek heeft aangetoond dat dit van groot belang is voor de voldoening die men op de werkplek ervaart (Heerwagen J.H. 2001). De bewoner/gebruiker is hierbij niet meer de passieve ontvanger van voorgeprogrammeerde omgevingscondities, maar participeert actief in het realiseren van het door hem of haar gewenste behaaglijkheidsniveau (Cole, R.J. e.a. 2009). De hiervoor beschikbare middelen, organisatorisch, bouwkundig en installatietechnisch moeten dan wel intuïtief begrijpelijk en gemakkelijk te bedienen zijn.

Dat mensen in “groene gebouwen” toleranter zijn voor de klimaatcondities op hun werkplek dan in traditionele gebouwen is door velen onderzocht (o.a. Heerwagen, J.H. e.a. 1992; Leaman A. e.a. 2007; Brager, G.S. en De Dear, R.J. 2003). “Groene gebouwen” zijn ook overwegend succesvol voor de organisaties die ze huisvesten en voor de productiviteit van hun medewerkers (Heerwagen, J.H. 2000). De wijze waarop de productiviteit gemeten is roept echter nogal wat vragen op. Veel onderzoek berust niet op metingen maar op een subjectieve beoordeling van de betrokken personen.

Het oprekken van de behaaglijkheidcriteria staat op gespannen voet met de arbeidsproductiviteit in een werkruimte, zie paragraaf 2.11. Klimaatactieve architectuur kan echter ook heel goed samengaan met *hightech* installatietechniek, zie bijvoorbeeld het werk van Ken Yeang, paragraaf 3.6.

5.6 Bioclimatic Skyscrapers – Ken Yeang

Ken Yeang, een bekende Maleisische architect, heeft in zijn oeuvre het bioklimatisch principe voluit in praktijk gebracht; zie o.a. zijn *Bioclimatic Skyscrapers* (Hamzang, T.R. & Yeang, Snd.Bhd. 1994). De beweegredenen hiervoor geeft hij als volgt weer:

“Our current research and development work on the bioclimatic approach is essentially a sub-set of broader environmentally responsive design strategies. We find that there are basically two justifications for the bioclimatic approach, one a comfort-based rationale and the other a passive, low-energy one. The latter eventually was found to be expeditious for us in explaining our environmentally responsive design agenda to commercially minded clients. Energy savings could be easily accounted for in terms of monetary savings.....”

..... *The climatically responsive tall building can enhance its users' sense of well-being while enabling them to be aware of and to experience the external climate of the place. Research in the UK and Japan has shown that more than 40 per cent of users of tall buildings would like the option of being able to open windows to the outside. A climatically responsive design should provide the building's users with the opportunity to experience the external environment (and diurnal and seasonal changes) and, in doing so, to avert the blandness of spending their working hours over a significant part of the day in an otherwise artificial environment that remains constant throughout the year.*

....*A further justification is ecological. Designing with climate would result in a reduction of the overall energy consumption of the building by the use of passive (non-mechanical) structural devices. Savings in operational costs derive from less use of electrical energy which is usually derived from the burning of non-renewable fossil fuels. The lowering of energy consumption would further reduce overall emission of waste heat, thereby cutting the overall heat-island effect on the locality.*

....*There is a further justification - a regionalist one. Climate, viewed in the overall perspective of human history and built settlements, is the single most constant factor in our landscape, apart from its basic geological structure. While socio-economic and political conditions may change almost unrecognisably over a period of, say, one hundred years, as may visual taste and aesthetic sensibility, climate remains more or less unchanged in its cyclical course. History shows us that, with accumulated human experience and imagination, the architecture of the shelter evolved into diverse solutions to meet the challenges of widely varying climates, indicating that the ancients recognised regional climatic adaptation as an essential principle of architecture. In this regard, the climatically responsive building can be seen as having a closer fit with its geographical context”.*

De oriëntatie en de indeling van Yeang's ontwerpen zijn afgestemd op de loop van de zon en de overheersende windrichting ter plaatse. Hoge ramen zorgen voor veel daglicht, waarbij overstekken, balkons en binnenterrassen met planten en bomen voor beschaduwing zorgen. Secundaire- en serviceruimten liggen op plaatsen met de hoogste zonbelasting, en worden natuurlijk geventileerd. Atria en serres schermen werkplekken zoveel mogelijk af van de zon maar zorgen wel voor daglicht. Gebruikers hebben in veel gevallen de mogelijkheid hun werkplek even te verlaten voor een frisse neus op balkon of binnenterras.

Schachten voor vertikaal transport en installaties liggen zoveel mogelijk aan de buitenkant van het gebouw en worden zo mogelijk dubbel uitgevoerd.

“...A double core has many benefits. With both cores on the hot sides, they provide buffer zones, insulating internal spaces....Lift lobbies, stairways and toilets should be given natural ventilation and a view out where possible. Inevitably this means that they should be on the periphery of the usable floor space.....Aesthetically, by placing these service zones on the periphery they receive sunlight and have views out which are not possible with a central core position. The user of the building leaving an elevator at an upper floor can see out and be aware of the place, instead of entering an artificially lit lobby that could be anywhere in the world.....”

De kantooruimten in de *skyscrapers* van Ken Yeang worden overigens volledig geklimatiseerd, hetgeen aantoont dat bioklimatische architectuur niet synoniem hoeft te zijn met installatiearm en/of een twijfelachtige binnenmilieukwaliteit. Dit heeft ongetwijfeld ook te maken met het feit dat de in zijn boek beschreven projecten in Azië liggen. Hoe zijn principes in een West-Europees klimaat, met grotere temperatuurverschillen en lagere zonnestanden toegepast kunnen worden is nog een vraag. Dit geldt ook voor de karakteristieke weelderige begroeiing die in een tropisch- of subtropisch klimaat beter kan gedijen dan in het koudere West-Europese klimaat.

5.7 Passive and low energy cooling of buildings – Baruch Givoni

Baruch Givoni is emeritus hoogleraar van de UCLA (University of California in Los Angeles) en één van de pioniers op het gebied van passieve en energiezuinige koeling van gebouwen. Op basis van praktisch en theoretisch onderzoek in Israël en Californië en onderzoek van anderen heeft hij voor dit vakgebied een wetenschappelijk fundament gelegd. In zijn boek *Passive and low energy cooling of buildings* (Givoni, B. 1998) gebruikt hij hiervoor de volgende classificatie van middelen:

- *Ventilatie*: het realiseren van thermische behaaglijkheid door het verhogen van de luchtsnelheid in een ruimte. (Dit heeft dus niets te maken met ventilatie voor de luchtkwaliteit).
- *Nachtventilatie*: het koelen van de bouwmasse met behulp van relatief koude lucht die 's nachts beschikbaar is.

- *Stralingskoeling*: het gebruik maken van de nachtelijke uitstraling van daken naar bij een heldere hemel, al dan niet met warmteopslag. Vooral geschikt voor laagbouw.
- *Directe verdampingskoeling*: koelen van lucht door water in de lucht te verdampen.
- *Indirecte verdampingskoeling*: koelen van daken door verdamping van water uit een dakreservoir.
- *Bodemkoeling*: koelen van de bodem door verdamping van water, en de benutting hiervan als koudebron voor gebouwen.
- *Koeling van buitenruimtes*: technieken die toegepast kunnen worden op open patio's e.d. bij gebouwen. (Givoni was de ontwerper van het koelsysteem voor buitenruimten op de EXPO '92 in Sevilla).

Het werk van Givoni is hoofdzakelijk gericht op tropische en subtropische regio's, maar verschillende elementen zijn ook van belang voor het koelere West-Europese klimaat. Zijn uitgangspunt is de bioklimatische architectuur, echter niet ten dienste van de bewoners/gebruikers, maar in de eerste plaats ter beperking van de koellast.

Interessant is zijn gebruik van *bioclimatic charts*, in een psychometrische kaart ingetekende velden die de begrenzing aangeven van de buitenklimaatcondities waarin bepaalde passieve technieken kunnen worden toegepast.

5.8 Sun, Wind, and Light - G.Z. Brown

Brown is professor architectuur aan de universiteit van Oregon, en zijn boek *Sun, Wind, and Light* (Brown, G.Z. 1994) is geschreven voor architecten die in het prille begin van het ontwerpproces de invloed van deze elementen in hun ontwerp willen integreren. Het boek benadrukt de energetische implicaties van zon, wind en daglicht, maar doet dit vanuit een architectonische context door te focussen op de relatie tussen vormgeving en energiegebruik. Energie is volgens Brown niet bepalend voor de architectuur, maar architectuur kan wel in hoge mate het energiegebruik beïnvloeden. Het boek werkt met zondiagrammen en windrozen en geeft veel praktische informatie, vuistregels en voorbeelden van uiteenlopende passieve strategieën. Het is daarom geen wetenschappelijk werk, maar dat is ook niet Browns opzet geweest.

Sun, Wind, and Light is een interessant boek maar kan door de focus op architectuur niet veel bijdragen aan het onderzoek *Earth, Wind & Fire*. Door het gebruik van het Angelsaksische stelsel van eenheden wordt de bruikbaarheid ook niet bevorderd.

5.9 Cradle to Cradle - M. Braungart en W. McDonough

Braungart en McDonough zijn de geestelijke vaders van de “*cradle to cradle*” filosofie, waarmee ze ook in Nederland furore hebben gemaakt. Hun boek uit 2002 is in 2007 in het Nederlands vertaald (Search Knowledge 2007). “Afvval = Voedsel” is hun credo en ze pleiten voor milieu-intelligente ontwerpen, die aan het einde van hun levensduur niet slechts gerecycled kunnen worden, maar door “*upcycling*” terug gegeven kunnen worden aan de natuur. *Recycling* is in hun ogen meestal *downcycling*, d.w.z. dat er bij recycling altijd kwaliteitsverlies optreedt.

Ze onderscheiden twee sferen, de biosfeer en de technosfeer, en hoewel dit in hun boek niet expliciet wordt, lijkt het aannemelijk dat Braungart als chemicus zich meer op de biosfeer richt en McDonough als architect meer op de technosfeer. Dit laatste is ook de reden dat in het onderzoek *Earth, Wind & Fire* aandacht aan hun filosofie wordt besteed. Wat kunnen we van een architect als McDonough leren op het gebied van milieubewust ontwerpen? Hoe kan de “*cradle to cradle*” filosofie worden toegepast op een gebouw?

In het boek ontloopt McDonough zich als pleitbezorger en beoefenaar van bioklimatische architectuur.

“...we hebben een idee uitgewerkt voor een gebouw waarvan het terrein was gemodelleerd naar de wijze waarop een boom werkt. We bedachten manieren waarop het gebouw de lucht zou kunnen zuiveren, schaduw en leefgebied zou kunnen creëren de grond kon verrijken, met de seizoenen kon veranderen en uiteindelijk meer energie kon produceren dan het zelf nodig had om te functioneren. Hiervoor gebruikten we onder andere zonnepanelen op het dak; een groepje bomen aan de noordkant van het gebouw om het tegen wind te beschermen en om wat diversiteit te bieden; een interieur dat zo ontworpen was dat het kon worden veranderd en aangepast aan esthetische en functionele voorkeuren van mensen, met verhoogde vloeren en een geleaste vloerbedekking; een vijver die water opslaat voor irrigatie; een levende machine van binnen, en buiten een vijver vol speciaal geselecteerde organismen

en planten om het afvalwater te zuiveren; klaslokalen en openbare ruimten op het westen en zuiden om van de zon te profiteren; speciale ruiten die zorgen dat er niet teveel ultraviolet licht het gebouw binnen komt; een weer teruggebracht bos aan de oostkant van het gebouw en een methodiek van landschapsarchitectuur en terreinonderhoud die de toepassing van pesticiden of irrigatie overbodig maakt. Tijdens de eerste zomer genereerde het gebouw meer energiekapitaal dan het verbruikte, een bescheiden maar hoopvol begin. Stel je eens voor dat een gebouw zou zijn als een boom en een stad als een bos”.

Afgezien van enkele vragen die dit citaat oproept is het wel een fascinerende gedachte die hier achter schuilgaat, en dat geldt eigenlijk voor het hele boek. Over de vraag hoe een gebouw aan het einde van zijn levenscyclus als afval tot voedsel zou kunnen dienen wordt nauwelijks iets gezegd. Maar één ding is wel duidelijk: Het Earth, Wind & Fire concept past naadloos in de “*cradle to cradle*” filosofie.

5.10 The Selective Environment – Dean Hawkes, Jane McDonald and Koen Stemers

De begrippen “*selective*” en zijn antoniem “*exclusive*” staan in dit verband voor de manier waarop het binnenmilieu tot stand komt. Volgens deze definitie, ontleend aan Reyner Banham, omvat de selectieve modus een interactie tussen klimaat en comfort, met als belangrijkste doelstellingen:

- Maximaliseren van het gebruik van hernieuwbare energiebronnen uit de omgeving;
- Minimaliseren van installatietechnische voorzieningen en het daaraan gerelateerde energiegebruik; voor de beheersing van het binnenmilieu
- Maximaliseren van de mogelijkheden om gebruikers invloed te geven voor de regeling van het binnenmilieu.

Tabel 3.1 laat de algemene karakteristieken zien van de selectieve en de exclusieve modi. Een gebouw volgens de exclusieve modus kan in principe in elk klimaat dezelfde verschijningsvorm hebben, terwijl het bij de selectieve modus is afgestemd op het regionale buitenklimaat.

Exclusieve modus	Selectieve modus
Het binnenmilieu wordt automatisch geregeld en is hoofdzakelijk kunstmatig;	Het binnenmilieu wordt geregeld door een combinatie van automatische en manuele middelen en is een variabele mix van natuurlijke en kunstmatige elementen;
De gebouwvorm is compact met minimale interactie tussen binnen- en buitenmilieu;	De gebouwvorm is bewust afgestemd op het opnemen van energie uit het buitenmilieu
De oriëntatie is relatief onbelangrijk;	De oriëntatie is cruciaal;
Raamafmetingen zijn beperkt en de ramen zijn niet te openen;	Raamafmetingen zijn variabel, afhankelijk van oriëntatie, en grootte en functie van de ruimte.
Gedurende alle seizoenen is energieopwekking primair.	Energie wordt in de eerste plaats uit het buitenmilieu gehaald en wordt waar nodig aangevuld met energieopwekking. Het gebruik varieert van seizoen tot seizoen.

Tabel 2.1. – Exclusieve versus selectieve modus van binnenmilieu

5.11 The Architectural Expression of Environmental Control Systems – George Baird

De schrijver, geïnspireerd door Reyner Banham, introduceert zich in de inleiding op zijn boek (Baird George 2001) als volgt:

“...My personal motivation comes from having spent half a lifetime at the interface of three professions, architects, building services engineers and building scientists.....Six years of undergraduate, postgraduate and evening classes’ study at the University of Glasgow’s Faculty of Engineering and at the National College for Heating, Ventilating, Refrigerating and Fan Engineering in London had given me little exposure to architects, or even to architecture. A further 6 years at the University of Glasgow’s Building Services Research Unit had been little better in that respect. Not only did Banham’s book introduce me to architecture, but also it helped me throw off the engineering blinkers I had unwittingly been wearing for the previous 12 years....”

Het boek is een zoektocht naar de manier waarop bij het ontwerp van gebouwen zowel passieve als actieve klimaatsystemen op een creatieve manier tot uitdrukking kunnen worden gebracht. Aan de hand van tientallen wereldwijde casestudies en interviews met architecten en klimaatingenieurs wordt een overzicht gegeven van innovatieve en elegante oplossingen voor architectuur- en klimaatproblemen.

“...Architecture, as much as any other design activity, is dependent on a satisfactory reconciliation of the intuitive with the rational. A building has to be both poem and machine...”

(citaat van Jones, D.L. uit *Architecture and the Environment: Bioclimatic Building Design* – London Laurence King 1998).

Dit boek is geschreven vanuit het gezichtspunt van de klimaatingenieur en dat maakt het bijzonder boeiend. Het zou aanbeveling verdienen dergelijke lectuur op te nemen in het curriculum van de opleidingen tot klimaatingenieurs en TVVL cursussen.

5.12 Een klimaatactieve stedenbouwkundige omgeving

Een klimaatactief gebouw komt het beste tot zijn recht in een klimaatactieve stedenbouwkundige omgeving. Deze wordt gekenmerkt door een stedenbouwkundige morfologie die in de eerste plaats optimale afvoer van antropogene warmte en luchtverontreinigingen door de wind mogelijk maakt –zie hoofdstuk 7 van deelrapport (II). In de tweede plaats wordt het gebruik van daglicht in plaats van kunstlicht bevorderd (Esch, Marjolein van et al, 2009).

Voor het Earth, Wind & Fire concept is het verder van belang dat zonnestraling in Zonneschoorstenen en Zonreflektoren[®] zo weinig mogelijk wordt belemmerd –zie hoofdstuk 11 van deelrapport (I) en dat de effectiviteit van Ventecdaken[®] wordt geoptimaliseerd –zie hoofdstuk 15 van deelrapport (II). Globaal genomen wijzen deze randvoorwaarden in de richting van een weinig compacte stedenbouwkundige verkaveling met voldoende ruimte om de gebouwen heen, te karakteriseren met hoge Open Space Ratio –OSR- en een lage Ground Space Index –GSI (Berghauser Pont, Meta en Haupt, Per 2004, 2008).

Het overheidsbeleid is daarentegen veelal gericht op een intensiever gebruik van de stedelijke ruimte en versterking van stedelijke functies. In een Compacte Stad worden door verdichting nieuwbouw alle open plekken en oude bedrijfsterreinen volgebouwd om de stad weer aantrekkelijk te maken voor grote groepen mensen. Doel van dit beleid is enerzijds het open landschap te behouden en de benodigde infrastructuur voor stadsuitbreiding te beperken. Anderzijds wordt hierdoor de mobiliteit beperkt en gebruik van het openbaar vervoer bevorderd. Ondanks dit beleid is er een duidelijke trek gaande van inwoners vanuit de stad naar de randen en ook de bedrijvigheid groeit het sterkst buiten het bestaand bebouwd gebied (Planbureau voor de Leefomgeving, 2011)



Figuur 5.3 – Voorbeeld van ongewenste stedelijke dichtheid –Shenzhen, China 2001 – bron Heide Schuster

Figuur 5.3 maakt duidelijk dat de compacte stad zijn grenzen heeft, en dat bij een dergelijke dichtheid geen sprake meer is van voldoende stedelijke ventilatie en daglichttoetreding in gebouwen, nog afgezien van brandveiligheid.

Echter

“The growth of new urban areas cannot be stopped due to population growth. Therefore the consideration of densification and introduction of green areas into the cityscape plays an important role not only for the overall city climate but also for the usability of a city in terms of thermal comfort” (Schuster, Heide et al 2011).

Nog breder gezien kan worden gesteld dat duurzaamheid meer is dan enkel en alleen de milieuhuishouding van een stad.

” Duurzaamheid betekent succes op alle fronten: economisch, ecologisch, menselijk en sociaal. Het bij elkaar houden van de stad is de opgave van de toekomst” (Zoest, Johan van et al 2007).

Een evenwichtige ontwikkeling in de stedenbouwkunde zal met alle genoemde aspecten rekening dienen te houden.

5.13 Form follows Energy

Het adagium *Form follows Function*¹, is sinds het begin van de 20e eeuw een bekend principe in de moderne architectuur en industriële vormgeving. Het houdt in dat het ontwerp van een bouwwerk of product voortvloeit uit of gebaseerd wordt op de beoogde functie of het uiteindelijke gebruik.

Met *Form follows Energy* (Cody, Brian 2007, 2010) krijgt dit principe een extra dimensie.

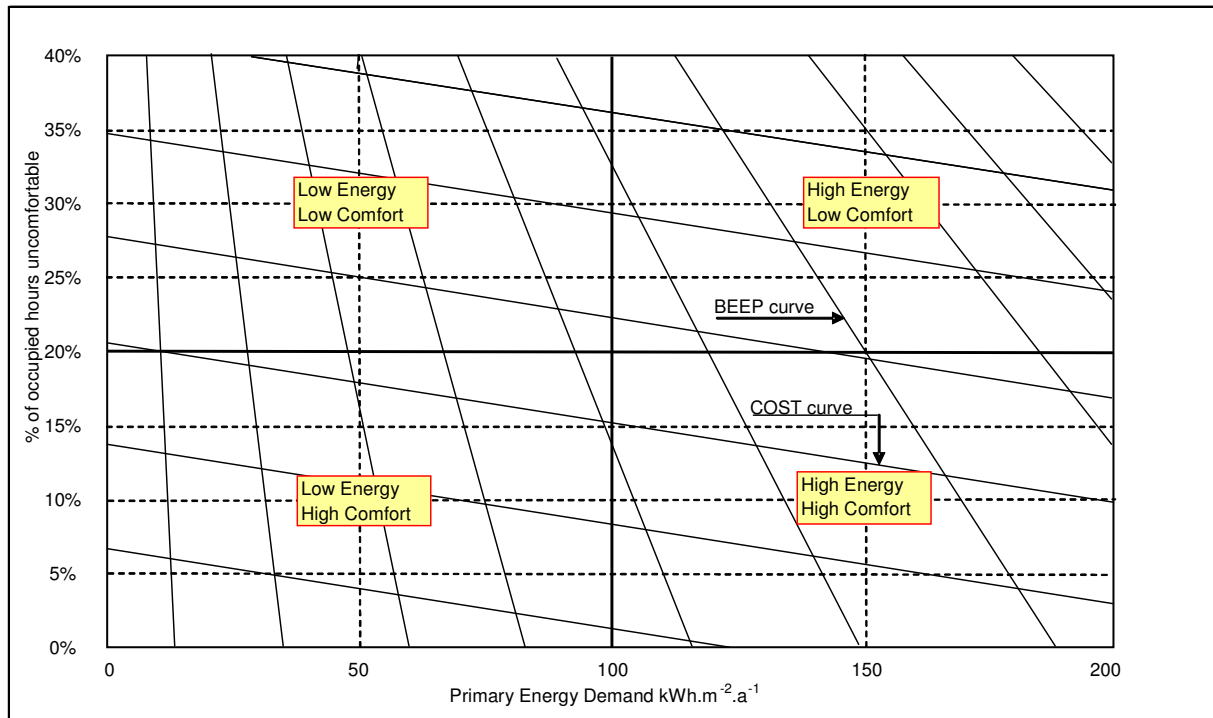
Volgens Cody is de huidige nadruk op energiegebruik en energiebesparing in de huidige wet- en regelgeving, o.a. de EPBD, onjuist. Het gaat niet om energiegebruik of energiebesparing in absolute zin maar om de efficiency waarmee energie wordt gebruikt. Deze efficiency zou moeten worden uitgedrukt in de prestatievergelijking output versus input, waarbij de output wordt gevormd door de kwaliteit van het binnenmilieu. Het energiegebruik wordt dan niet worden uitgedrukt per eenheid gebouwoppervlak ($\text{kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$) maar in kWh per eenheid van thermisch comfort, uitgedrukt in “aantal behaaglijke uren per kWh”. Cody introduceert hiervoor als indicator de BEEP waarde – Building Energy and Environmental Performance. Zie figuur 5.4.

Het is gemakkelijk energie te besparen door de comfortcriteria los te laten – Low Energy / Low Comfort: het linker kwadrant boven. In principe kan met geavanceerde installatietechniek ten koste van een hoog energiegebruik en hoge kosten aan hoge comfortcriteria worden voldaan – High Energy / High comfort: het rechter kwadrant onder. Niet zelden echter wordt met dergelijke middelen een plaatsje in het rechter kwadrant boven gerealiseerd: High Energy / Low Comfort.

De EPBD laat de comfortcriteria overigens niet vrij maar geeft in NEN EN 15251 (NEN 2008) voor verschillende klimaatklassen richtwaarden voor aan te houden ruimtetemperaturen bij het ontwerp van klimaatinstallaties. De kritiek van Cody op de EPBD is dan ook niet helemaal terecht. Toch is zijn benadering interessant omdat bij de keuze van de klimaatklasse productiviteitseffecten kunnen worden meegewogen.

Het BEEP model staat overigens nog in de kinderschoenen. Kapitaalskosten bijvoorbeeld zijn in het huidige model niet opgenomen.

¹ Toegeschreven aan de Amerikaanse architect Louis Sullivan (1856 – 1924)



Figuur 5.4 – Grafische voorstelling Building Energy and Environmental Performance (BEEP)

5.14 Adaptatie en Productiviteit

In Nederland heeft ISSO met haar publicatie 74 “Thermische Behaaglijkheid” de deur geopend voor de toepassing van het adaptieve behaaglijkheidsmodel – zie paragraaf 5.4. Het is echter de vraag hoe de ruimere behaaglijkheidscriteria van dit model zich verhouden tot de productiviteit van kantoorwerkers. In paragraaf 3.5 worden enkele referenties vermeld die uitwijzen dat in een bioklimatisch gebouw een hogere productiviteit mag worden verwacht, maar dit kan nauwelijks te danken zijn aan de ruimere behaaglijkheidscriteria als zodanig, maar eerder aan de mogelijkheden die mensen hebben om de omgevingscondities van de werkplek aan te passen aan hun persoonlijke behoefte. Objectieve productiviteitsmetingen hebben aangetoond dat de hoogste productiviteit wordt bereikt bij een ruimtetemperatuur tussen 20°C en 23°C (ISIAQ 2009), zie ook paragraaf 5.6. Het lijkt daarom logisch dat voor een optimaal productiviteitsniveau niet alleen de ruimtetemperatuur aan bepaalde eisen moet voldoen, maar dat ook de mogelijkheid voor persoonlijke beïnvloeding daarvan noodzakelijk is.

In navolging van ISSO publicatie 74 is voor de ontwerpcondities van het GEO-KLIMAATCONCEPT niet voor één behaaglijkheidsmodel gekozen, maar wordt aan de opdrachtgever de keuze gelaten uit het ALPHA model, met ruimere behaaglijkheidsgrenzen en het BETA model met stringenter eisen. Voor beide modellen geldt dat de gebruiker in elk geval de mogelijkheid dient te hebben voor een persoonlijke aanpassing van de omgevingscondities van hun werkplek. Dit wordt verder uitgewerkt in hoofdstuk 16.

5.15 Wat is een duurzaam gebouw?

Volgens Vitruvius, een architect en ingenieur uit de Romeinse tijd, moet een gebouw voldoen aan de drie kwaliteitseisen van *firmitas*, *utilitas*, *venustas* oftewel sterkte, nuttigheid en schoonheid (Vitruvius 85- 20 v.Chr.). Een gebouw dat aan de eerste en de derde kwaliteitseis voldoet zal niet voortijdig instorten en evenmin snel worden afgebroken, waardoor het in principe ook een duurzaam gebouw is. De tweede kwaliteitseis is meer tijdgebonden en omvat in de 21e eeuw naast functionaliteit en flexibiliteit vooral binnenmilieukwaliteit en energiezuinigheid. Bij het onderzoek Earth, Wind & Fire gaat het vooral over de laatstgenoemde aspecten. Beide zijn meetbaar, maar uitsluitend in een gebouw dat in gebruik is. Om het kwaliteitsniveau voor nieuwbouw te kunnen voorspellen zijn rekenmodellen en beoordelingscriteria nodig.

5.16 Wettelijk verplichte instrumenten voor de energieprestatie

5.16.1 NEN 7120:2011- Energieprestatie van gebouwen - Bepalingsmethode

Bij nieuwbouw van kantoren en woningen worden in het Bouwbesluit eisen gesteld aan de energiezuinigheid van gebouwen in de gebruiksfase. Hierbij wordt de Energie Prestatie Norm (EPN) gehanteerd, waarmee de energieprestatie van een gebouw of woning voorspeld. De uitkomst van een EPN-berekening is de maat voor de energie-efficiëntie: de Energie Prestatie Coëfficiënt (EPC).

De EPC is sinds 1995 een instrument van het Nederlandse klimaatbeleid. Door energiebesparing en toepassing van duurzame energie wordt de verbranding van fossiele brandstoffen beperkt. Hiermee wordt een bijdrage geleverd aan de vermindering van de Nederlandse uitstoot van CO₂.

Een in Nederland voorgeschreven rekenmodel om de energieprestatie van gebouwen te voorspellen, zowel voor bestaande bouw als voor nieuwbouw, is opgenomen in NEN 7120:2011. Deze methode is bedoeld als instrument voor de integrale beoordeling van energiezuinigheid van een gebouw en de bijbehorende installaties voor ruimteverwarming, koeling, ventilatie en warm tapwater in de gebruiksfase.

Vanaf 1 juli 2011 is er EPG software beschikbaar, waarmee bouwplannen kunnen worden getoetst aan de scherpere EPC- eisen per 1 januari 2012.

5.16.2 Bouwbesluit

Grenswaarden voor de EPC worden in het Bouwbesluit genoemd en periodiek aangescherpt. Voor nieuwe utiliteitsgebouwen, waaronder kantoren, verschillen de EPC-grenswaarden per gebouwfunctie. Anno 2012 geldt voor kantoorfuncties een eis EPC van 1,1

Doordat de eis is gesteld op het niveau van de gebruiksfunctie, heeft de ontwerper een maximale vrijheid bij het bepalen van hoe aan de verlangde energieprestatie zal worden voldoen. Daarbij geeft de eis een prikkel tot het geïntegreerd ontwerpen van casco en installaties en het ontwerp van energiezuinige gebouwconcepten. Bij dit uitgangspunt, hoe aantrekkelijk ook voor het stimuleren van integraal ontwerpen, kunnen wel enkele kritische aantekeningen worden gemaakt, bijvoorbeeld:

- Bouwkundige voorzieningen zijn in principe veel duurzamer dan installatietechnische voorzieningen, die globaal genomen slechts een levenscyclus van 15 tot 20 jaar kennen. Is het oogpunt van duurzaamheid wel verantwoord beide categorieën op een lijn te stellen?
- Om de geëiste EPC waarde te realiseren kan vaak gemakkelijker en goedkoper worden gescoord met minder duurzame installatietechnische voorzieningen dan met kostbaardere maar duurzamere bouwkundige voorzieningen, die dan achterwege worden gelaten.
- Installatietechnische voorzieningen zijn in principe kwetsbaarder en duurder in onderhoud dan meer robuuste bouwkundige voorzieningen.
- De energie die is gebruikt om de betreffende voorzieningen te produceren, de zgn. *embedded energy*, wordt in het EPC model niet gewaardeerd.
- Innovatieve ontwikkelingen zoals het Earth, Wind & Fire concept met het Ventedak[®], de Klimaatcascade[®] en de Zonneschoorsteen of Zonnefacade[®] vallen geheel buiten de bepalingmethode van NEN 7120:2011. Ingewikkelde en kostbare procedures voor het verkrijgen van gelijkwaardigheidverklaringen zijn dan noodzakelijk.
- Er is in veel gevallen slechts een zwakke correlatie tussen de voorspelde en de naderhand in de gebruiksfase gemeten energieprestaties van gebouwen.

5.17 Vrijwillige instrumenten voor de bepaling van integrale duurzaamheid

5.17.1 CEN/TC 350 – Sustainability of Construction works

CEN/TC 350 is verantwoordelijk voor het ontwikkelen van vrijwillige gestandaardiseerde methoden voor de beoordeling van duurzaamheidsaspecten bij nieuwe en bestaande gebouwen en voor normontwikkeling op het gebied van de milieueigenschappen van producten en bouwmaterialen. De normen zullen algemeen toepasbaar zijn (horizontaal) en relevant voor de beoordeling van de integrale prestaties van gebouwen tijdens de gehele levenscyclus.

De normen zullen een geharmoniseerde methodologie bieden voor de beoordeling van de milieuprestaties en levenscycluskosten van gebouwen inclusief de meetbare prestaties op het gebied

van gezondheid en comfort. Anno 2011 zijn verschillende ontwerpnormen van TC 350 in de goedkeuringsfase.

5.17.2 Instrumenten voor de bepaling van integrale duurzaamheid

In verschillende landen zijn instrumenten ontwikkeld waarmee in de ontwerpfase de verwachte duurzaamheid van een gebouw kan worden gekwantificeerd. Hierbij worden punten of scores met bepaalde wegingsfactoren toegekend aan uiteenlopende aspecten zoals energiegebruik, watergebruik, materiaalgebonden milieubelasting, binnenmilieukwaliteit, en de kwaliteit van de stedenbouwkundige omgeving. Bij laatstgenoemd aspect wordt o.a. gekeken naar de bereikbaarheid van het gebouw, de locatie ten opzichte van openbare vervoersvoorzieningen en de afhankelijkheid van de eigen auto. Normatieve gegevens voor de bepaling van de materiaalgebonden milieubelasting zijn in Nederland geharmoniseerd. Het beheer en onderhoud van de methode en de databases is ondergebracht bij de Stichting Bouwkwiteit (SBK).

In Nederland worden verschillende min of meer concurrerende instrumenten gebruikt, die in de volgende paragrafen kort worden beschreven. Penetratiegraden hiervan zijn niet gepubliceerd. Bij het gebruik van deze instrumenten, die hun nut overigens wel hebben bewezen, kunnen enkele kritische opmerkingen worden geplaatst, zoals

- Evenals bij het streven naar een lage EPC waarde –zie paragraaf 5.15.2 - kan ook hierbij vaak gemakkelijker en goedkoper worden gescoord met minder duurzame installatietechnische voorzieningen dan met kostbaardere maar duurzamere bouwkundige voorzieningen, die dan achterwege worden gelaten (Shaviv, Edna 2011).
- Belangrijke kwaliteitsaspecten worden niet in de beoordeling betrokken. Het gaat hier bijvoorbeeld om de functionaliteit van het gebouw voor de gebruikers, de stedenbouwkundige aantrekkelijkheid, o.a. tot uitdrukking komend in de kwaliteit van winkels en openbare groenvoorzieningen, en ten slotte de “schoonheid” van het gebouw als zodanig –zie paragraaf 5.12 (Gwilliam Julie 2011).
- Terugkoppeling van metingen en ervaringen in de gebruiksfase naar de beoordeling van het gebouw in de ontwerpfase vindt zelden plaats. Een continue aanpassing en verbetering van de systemen en modellen op basis van praktische ervaringen wordt daardoor bemoeilijkt. Dit geldt met name voor energiegebruik en CO₂ emissies, sleutels voor het terugdringen van de klimaatverandering (Gwilliam Julie 2011).
- Een gebouw met een hoge score op het gebied van duurzaamheid en energiezuinigheid, zelfs als dat in de gebruiksfase is gevalideerd, kan het belangrijkste aspect van architectuur hebben verwaarloosd, namelijk het bieden van een aangename, gezonde en productieve werkplek, een combinatie van welzijn en ontwerpkwiteit (Chen, Yant et al 2011).
- Gebruik van verschillende instrumenten leidt tot verschillende uitkomsten op de schaal van duurzaamheid. Bij een test over 8 kantoorgebouwen, uitgevoerd met 4 verschillende instrumenten, bleken de scores voor energiezuinigheid in dezelfde orde grootte te liggen, maar de scores voor transport, water en materialen liepen ver uiteen (Zeiler, Wim 2011).

5.17.3 LEED - Leadership in Energy & Environmental Design

LEED is een in de VS ontwikkeld en door vele landen gebruikt certificeringssysteem, ontwikkeld door de [U.S. Green Building Council](http://www.usgbc.org) (USGBC). (<http://www.usgbc.org>) Voor de waardering van de verschillende maatregelen wordt een puntenschema gebruikt, zie tabel 5.15.

Bij een beoordeling van verschillende met LEED geaccrediteerde gebouwen werd geconstateerd dat verbetering van de energieprestatie voornamelijk kon worden gerealiseerd met behulp van de installatietechniek. Verbetering van de klimaatactieve eigenschappen van het gebouw en gebruik van passieve zonne-energie voegde nauwelijks iets toe (Shaviv, Edna 2011). Voor een land waar airconditioning de standaard is, is dat nauwelijks verbazingwekkend, maar voor de waardering van klimaatactieve architectuur in het Nederlandse klimaat lijkt LEED daarom minder geschikt.

LEED® for Core & Shell	
Total Possible Points**	110*
Sustainable Sites	28
Water Efficiency	10
Energy & Atmosphere	37
Materials & Resources	13
Indoor Environment Quality	12
*Out of possible 100 points + 10 bonus points: <i>Certified 40+ points Silver 50+ points</i> <i>Gold 60+ points Platinum 80+ points</i>	
Bonuspoints Innovation in Design	6
Bonuspoints Regional Priority	4

Tabel 5.5 – Puntenschema LEED

5.17.4 BREEAM-NL

BREEAM-NL is een beoordelingsmethode om de duurzaamheidprestatie van gebouwen te bepalen. De methode omvat verschillende keurmerken voor nieuwbouw, bestaande bouw en duurzame gebiedsontwikkeling die medio 2011 gedeeltelijk nog in ontwikkeling zijn (<http://www.breeam.nl>)

BREEAM staat voor Building Research Establishment Environmental Assessment Method en werd oorspronkelijk ontwikkeld en geïntroduceerd door het Building Research Establishment (BRE) De toevoeging NL maakt duidelijk dat het hier om de Nederlandse versie gaat. BREEAM stelt een standaard voor een duurzaam gebouw en geeft vervolgens aan welk prestatieniveau het onderzochte gebouw heeft. Het systeem maakt gebruik van kwalitatieve weging; als totaalscore krijgt een nieuw gebouw of gebied één van de volgende waarderingen: Pass, Good, Very Good, Excellent of Outstanding, ofwel 1 tot 5 sterren.

Een gebouw wordt beoordeeld op bouwkundige elementen (tussenvloeren, gevels, dak, ramen), installaties (verlichting, verwarming, koeling, ventilatie), afwerking (van onder andere vloeren en binnenwanden) en het bij het gebouw horende terrein (de bouwkaavel). De beoordeling vindt plaats in negen categorieën, zie tabel 5.6. De categorieën zijn weer onderverdeeld in ‘credits’. Het gebouw krijgt per credit punten toegekend. Die worden gezamenlijk doorgerekend tot één samengestelde gebouwscore. De Nederlandse creditlijst is toegespitst op de Nederlandse wet- en regelgeving, praktijkrichtlijnen en de bouwpraktijk.

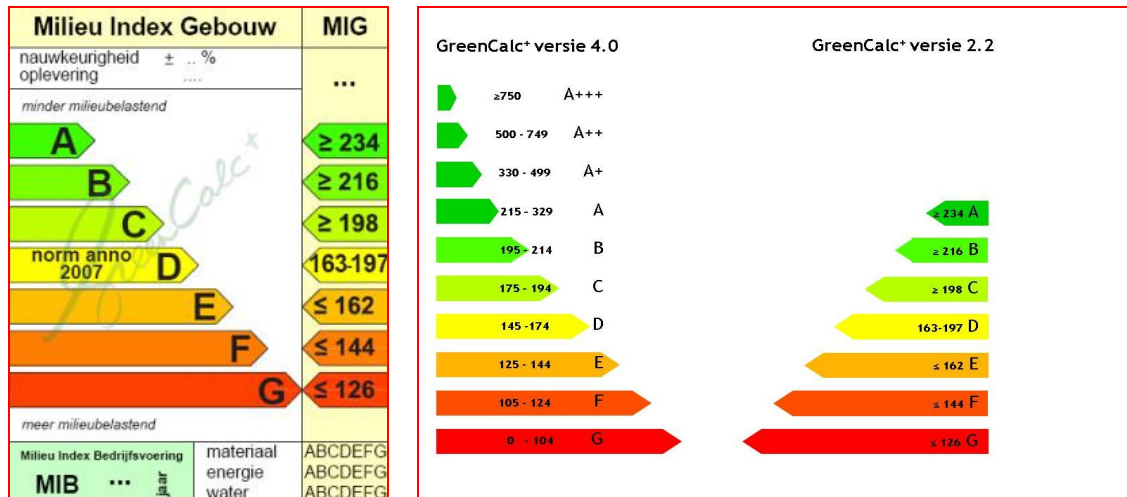
BREEAM-NL - Categorie & Weging	
Management	12%
Gezondheid	15%
Energie	19%
Transport	8%
Water	6%
Materialen	12,5%
Afval	7,5%
Landgebruik & Ecologie	10%
Vervuiling	10%

Tabel 5.6 – Beoordelingsschema BREEAM-NL

5.17.5 GreenCalc

De duurzaamheid van een gebouw of wijk wordt in GreenCalc+ uitgedrukt in één overzichtelijk getal, de milieu-index. Hierbij wordt het gebouw of de wijk beoordeeld op de aspecten energiegebruik, watergebruik en materiaalgebruik (<http://www.greencalc.com>)

In GreenCalc+ wordt een onderscheid gemaakt in de milieu-index gebouw (MIG), milieu-index bedrijfsvoering (MIB) en de eigen-index. De MIG geeft de duurzaamheid van een gebouw weer, onafhankelijk van het gedrag van de gebruiker die in het gebouw gehuisvest is. De MIG maakt het mogelijk om gebouwen met een zelfde gebruiksfunctie onderling te vergelijken –zie figuur 5.5.



Figuur 5.5 – Milieu Index Gebouw GreenCalc versie 2.2 en 4.0

De MIG wordt berekend door de duurzaamheid van het pand te vergelijken met de duurzaamheid van een standaard gebouw uit 1990. Het standaard referentiegebouw uit 1990 heeft een MIG waarde van 100. Wanneer een gebouw duurzamer is dan het referentiegebouw uit 1990, dan zal de MIG waarde boven de 100 uitkomen. Gebouwen met een MIG-waarde onder 100, zijn minder duurzaam dan een gebouw uit 1990.

In GreenCalc+ wordt dus altijd een vergelijking gemaakt met de gemiddelde bouwwijze uit 1990. Om dit mogelijk te maken, zijn in GreenCalc+ standaard referentiegebouwen 1990 opgenomen. Wanneer een gebouw vergeleken wordt met deze vastgelegde referentiegebouwen, dan mag men spreken over een milieu-index. Stelt men zelf een referentiegebouw vast waarmee vergeleken wordt, dan is er sprake van een 'eigen-index'.

De Rijksoverheid heeft voor kantoren in haar beleid een MIG van minimaal 200 geëist.

5.17.6 Integratie van GreenCalc+ en BREEAM-NL tot BREEAM-LIGHT

Medio 2011 is het besluit genomen voor de integratie van GreenCalc+ en BREEAM-NL, waardoor één gemeenschappelijke taal zal ontstaan voor het beoordelen van duurzame gebouwen en gebieden in Nederland. De integratie maakt het mogelijk om op een eenvoudige en snelle manier een indruk te krijgen van de duurzaamheid van een gebouw. De kennis die opgedaan is bij het ontwikkelen van GreenCalc+ en de BREEAM-methode zal in BREEAM-Light worden samengevoegd.

Met BREEAM-Light zal het mogelijk zijn om in een vroege ontwerpfase al uitspraken te doen over de duurzaamheid van een project. Indien dat gewenst is kan daarna alsnog het officiële BREEAM traject doorlopen worden. Het is medio 2011 nog niet bekend wanneer BREEAM-Light zal verschijnen.

5.17.7 GPR-Gebouw

GPR Gebouw (Gemeentelijke Praktijk Richtlijn), ontwikkeld door W/E adviseurs, is een online-instrument voor nieuwbouw en bestaande bouw dat kan worden ingezet bij beleidsontwikkeling, ontwerpproces en realisatie (<http://www.gprgebouw.nl>)

Het softwarepakket geeft een bouwproject een rapportcijfer op vijf verschillende gebieden: energie, milieu, gezondheid, gebruikskwaliteit en toekomstwaarde.

5.17.8 Eco-Quantum

Eco-Quantum is een instrument voor de bepaling van de milieuprestatie van een gebouw op basis van LCA (levenscyclusanalyse), uitgedrukt in één of meer cijfers. Het is ontwikkeld door IVAM, een onderzoeksbureau gelieerd aan de Universiteit van Amsterdam. In Eco-Quantum kan informatie over materialen, energieverbruik en afval worden ingevoerd. Het programma berekent vervolgens de milieueffecten.

5.17.9 DuBo Calc

DuBoCalc is een door Rijkswaterstaat ontworpen computerprogramma voor de berekening van de [milieueffecten](#) van het materiaal- en energiegebruik van grond-, weg-, en waterbouwkundige werken. Voor gebouwen en de gebouwde omgeving is het niet van toepassing.

5.17.10 Eco-Instal

Eco-Instal is software waarmee de milieuprestaties kunnen worden bepaald van installaties in woning- en utiliteitsbouw aan de hand van gebouwkenmerken en gekozen installatieconcept. Het instrument, oorspronkelijk een initiatief van TVVL, wordt ontwikkeld door TNO en Stichting ISSO, en is anno 2011 nog in ontwikkeling (<http://www.issso.nl/diensten/eco-instal>).

5.18 Het Earth, Wind & Fire concept

Het Earth, Wind & Fire concept maakt gebruik van natuurlijke hulpbronnen voor het realiseren van thermische behaaglijkheid en een gezond binnenmilieu in gebouwen. De gecombineerde krachten van zon, wind en zwaartekracht fungeren hiervoor als motor; het gebouw zelf moet de natuurlijke klimaatregeling faciliteren en hierop ook zijn ontworpen. Het concept valt hiermee weliswaar onder het brede spectrum van passieve en energiezuinige architectuur maar mag niet worden geïdentificeerd met klimaatactieve architectuur.

Passieve maatregelen zijn als zodanig niet voldoende om ten allen tijde een thermisch behaaglijk binnenmilieu in een gebouw te realiseren. Het Earth, Wind & Fire concept beoogt dit te kunnen benaderen en is daarmee een nieuw fenomeen. Het gebruik van mechanische hulpmiddelen wordt hierbij niet geschuwd, maar het rendement hiervan is vele malen hoger dan in de traditionele installatietechniek.

Toepassing van het Earth, Wind & Fire concept is niet afhankelijk van een bepaalde architectuur, maar het gebouw moet wel zodanig worden ontworpen dat het concept wordt geactiveerd.

“...a new-found creative collaboration between architecture and engineering can produce designs that combine logic and intuition in solving increasingly complex and demanding tasks”

(Hawkes, Dean 2002).

5.19 De tien geboden voor een gezond binnenmilieu

Het GEO-KLIMAATCONCEPT is een hybride klimaatsysteem dat de voordelen van een passieve/natuurlijke klimaatregeling combineert met die van een actieve/mechanische klimaatregeling met uitsluiting van de nadelen van beide systemen. Als geen ander systeem is het daardoor in staat is een veilig, gezond, behaaglijk en productief binnenmilieu te realiseren.

Het GEO-KLIMAATCONCEPT staat hierbij niet op zichzelf, maar is onderdeel van een gebouw dat invloed ondervindt vanuit haar omgeving en van haar gebruikers. Omdat geen ketting sterker is dan haar zwakste schakel moet tevens worden voldaan aan de punten van onderstaande checklist die mede bepalend zijn voor het welslagen van het concept. Deze checklist wordt hierbij aangeduid met “Tien Geboden voor een gezond binnenmilieu” (Bronsema 2001).

1	Bouw met gezonde materialen
2	Houd het gebouw droog
3	Houd het gebouw schoon
4	Houd het binnenmilieu koel en droog
5	Niet roken in gebouwen
6	Ventileer – Ventileer – Ventileer!!! ¹
7	Pas het KISS principe toe ²
8	Geef de gebruiker invloed op het binnenklimaat ³
9	Houd de luchtfilters en de luchtkanalen droog ⁴
10	Onderhoud – Onderhoud – Onderhoud!!!

¹ Te weinig ventilatie is de belangrijkste oorzaak van binnenmilieuproblemen;

² Keep It Stupid Simple

³ Zie hoofdstuk 13

⁴ In het Geo-Klimaatconcept[©] niet van toepassing

13. VENTILEREN VOOR EEN GEZOND EN PRODUCTIEF BINNENMILIEU

6.1 Inleiding

De benadering van de binnenluchtkwaliteit volgens dit hoofdstuk is op de praktijk gericht en wetenschappelijk wellicht enigszins simplistisch. Een praktische benadering is echter voorlopig de enig mogelijke, gezien de conclusies van een wetenschappelijke meta-analyse (Bluyssen, Philomena 2009)”

“...dat er een kennishiaat is over gezondheid- en comforteffecten van stoffen in het binnenmilieu en verschillen van deze effecten tussen individuen. Maar er is ook een gebrek aan kennis op het gebied van de mechanismen die zich afspelen in en op de producten en de interacties tussen verschillende stoffen in de lucht en op oppervlakten van bronnen. Onderzoek geeft aan dat er een urgente behoefte is aan het betrekken van de medische en neuropsychologische onderzoekswereld bij het bestuderen van de mechanismen achter dosiseffect, gezondheidseffecten en interacties tussen en met andere factoren en parameters van het binnenmilieu en het menselijk lichaam en de hersenen.....”

6.2 Samenvatting

Lucht is naast water en voedsel een belangrijk levensmiddel. Mensen brengen verreweg het grootste deel van hun leven binnen vier muren door, en daarom is de kwaliteit van de binnenlucht van groot belang voor de gezondheid. In kantoorgebouwen, waar door de dichte personenbezetting een intensieve luchtverversing nodig is moet aan de ventilatiecapaciteit veel aandacht worden besteed, en moet de ventilatielucht zo goed mogelijk te worden gezuiverd.

Ventilatie heeft tot doel verontreinigingen in het binnenmilieu af te voeren, en omdat buitenlucht in het algemeen een betere kwaliteit heeft als mechanische toegevoerde lucht presteert natuurlijke ventilatie in principe beter dan mechanische ventilatie. Er moet dan wel voor worden gezorgd dat mensen hun ventilatievoorzieningen niet hoeven te sluiten omdat ze last ondervinden van tocht en/of lawaai bijvoorbeeld bij een stevige wind op de gevel en/of bij lage buitentemperaturen. Veel gebouwen met natuurlijke luchttoevoer lijden aan dit euvel, vooral ‘s winters, met als gevolg ernstige onderventilatie en slechte binnenluchtkwaliteit.

Energiebesparing wordt niet zelden gerealiseerd door besparing op de ventilatiecapaciteit, hetgeen vaak ten koste gaat van het binnenmilieu. Het Earth, Wind & Fire concept claimt echter een energiezuinig gebouw te kunnen realiseren bij een gezond, behaaglijk en productief binnenmilieu. Beter dan uit te gaan van Bouwbesluit of standaard normen wordt om deze reden in deze paragraaf de hiervoor benodigde ventilatiecapaciteit tegen het licht gehouden.

Het Geo-Klimaatconcept[®] voorziet de werkplekken in principe van ventilatielucht met een temperatuur die slechts enkele graden onder de ruimtetemperatuur ligt, waardoor, in combinatie met de temperatuurregeling in de ruimte, tochttrisiko wordt voorkomen.

Een variant op het Geo-Klimaatconcept[®], waarbij alleen een Zonneschoorsteen wordt gebruikt en de ventilatielucht via de gevel wordt toegevoerd, wordt omschreven in hoofdstuk 13. Ook hierbij kan door beproefde voorzieningen tochttrisiko worden vermeden.

Ventileren is nodig voor een gezond binnenmilieu en in een gezonde werkomgeving hebben mensen minder klachten, is het infectierisiko kleiner, en de arbeidsprestatie groter. Gestreefd moet dus worden naar een hoge kwaliteit van de binnenlucht; een investering hierin wordt binnen enkele jaren door een hogere productiviteit terugverdiend. De simpele benadering van het ventilatievraagstuk dat de lucht fris moet ruiken is te beperkt.

De benodigde ventilatiecapaciteit hangt sterk samen met de uit het interieur en werkplekcomputers geëmitteerde verontreinigingen. Een goede binnenluchtkwaliteit begint met het beperken van deze emissies.

Verschiedende normen en methoden ter bepaling van de ventilatiecapaciteit worden kort toegelicht. Voldoen aan het Bouwbesluit levert in het algemeen een matige luchtkwaliteit op. Voor de globale dimensionering van het Ventecdak[®], de Klimaatcascade[®] en de Zonneschoorsteen in de deelrapporten (I), (II) en (III) wordt uitgegaan van kwaliteitscategorie II uit NEN-EN 15251 bij een laag

emissieniveau uit het interieur. Voor een cellenkantoor komt dit overeen met $1,4 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ of $\approx 5 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$

De kwaliteit van de buitenlucht en de locatie waar deze wordt aangezogen is van groot belang. Soms kan het nodig zijn de ventilatielucht te reinigen en kortsluiting tussen schone en vuile luchtstromen moet worden voorkómen.

Het *Earth, Wind & Fire* concept voorziet in een veilige en molestvrije aanzuiglocatie. De ventilatiecapaciteit is flexibel en met het toegepaste Ventecdak[®] wordt kortsluiting voorkomen.

6.3 Normering

Ventilatie dient in de eerste plaats voor het afvoeren van bio-effluenten, lichaamsgeuren en ademlucht van mensen. De ventilatiecapaciteit wordt bepaald door de personendichtheid in een bepaalde ruimte, door de eisen die aan de luchtkwaliteit worden gesteld en door al dan niet rekening te houden met adaptatie. Hiermee wordt het verschijnsel bedoeld dat mensen over het algemeen snel aan bepaalde geuren wennen en de luchtkwaliteit dan niet meer negatief beoordelen.

In de tweede plaats dient ventilatie voor het verdunnen en afvoeren van hinderlijke en/of schadelijke emissies uit het interieur. Adaptatie aan dergelijke verontreinigingen verloopt aanzienlijk trager of in het geheel niet.

Hedentijdse normen houden met beide aspecten rekening door naast de benodigde ventilatiecapaciteit voor de afvoer van bio-effluenten een toeslag in rekening te brengen voor emissies uit het interieur. Deze toeslag is afhankelijk van de te verwachten emissies, die grotendeels worden bepaald door de emissiekwaliteit van de materialen die in de afwerking en inrichting van het interieur worden toegepast.

Er zijn verschillende nationale en internationale normen voor de bepaling van de ventilatiecapaciteit in relatie tot de gewenste luchtkwaliteit. De bekendste zijn

- NEN-EN 15251: 2007 en - *Binnenmilieu gerelateerde input parameters voor ontwerp en beoordeling van energiestaat van gebouwen voor de kwaliteit van binnenlucht, het thermisch comfort, de verlichting en akoestiek*
- NEN-EN 13779: 2007 en - *Ventilatie voor utiliteitsgebouwen - Prestatie-eisen voor ventilatie- en luchtbehandelingssystemen*
- ASHRAE Standard 62.1-2007 - *Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality*
- ISO 16814:2008 - *Building environment design - Indoor air quality -- Methods of expressing the quality of indoor air for human occupancy*

NEN-EN 15251: 2007 en onderscheidt de kwaliteitscategorieën I, II en III met respectievelijk 15%, 20% en 30% potentiële klagers over de luchtkwaliteit. Voor elke categorie wordt een ventilatiecapaciteit voorgeschreven waarmee aan de luchtkwaliteit in de betreffende categorie moet kunnen worden voldaan. Verder kan worden gekozen tussen drie categorieën van emissies uit het interieur, zeer laag, laag en normaal –zie tabel 6.1 (Olesen, Bjarne, 2011).

Voorbeeld:

Een cellenkantoor met kwaliteitscategorie II en een laag emissieniveau.

De ventilatiecapaciteit voor personen bedraagt ($0,1 \cdot 7 =$) $0,7 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$

De additionele ventilatie voor gebouw en interieur is $\frac{0,7 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}}$

De totale ventilatiecapaciteit bedraagt $1,4 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \equiv 5,04 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$

Tabel 6.1 geeft ook de ventilatiecapaciteit aan volgens ASHRAE Standard 62.1-2007, die voor hetzelfde voorbeeld met $0,55 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ ca 60% lager uitkomt. Het grote verschil wordt in hoofdzaak veroorzaakt door het feit dat ASHRAE uitgaat van geadapteerde personen, waar CEN dat niet doet.

Zowel ASHRAE als CEN bepalen de ventilatiecapaciteit op basis van de luchtkwaliteit zoals die door mensen wordt ervaren. In Europa is hiervoor de eerste indruk doorslaggevend, zoals die wordt ervaren bij het betreden van een ruimte. Het wordt niet realistisch gevonden tegen mensen te zeggen dat ze een eerste negatieve indruk maar moeten negeren, omdat ze immers snel gewend raken aan de muffe lucht, meestal al na enkele minuten. In Amerika is men daarentegen de opvatting toegedaan dat die eerste indruk kan worden genegeerd, juist vanwege de snelle adaptatie.

In ruimten waar mensen in- en uitlopen, is de eerste indruk belangrijk en dient de ventilatiecapaciteit op deze eerste indruk te worden afgestemd. In ruimten waar een groep mensen voor een bepaalde tijd

bijeenkomt kan van adaptatie worden uitgegaan waardoor de ventilatiecapaciteit aanzienlijk lager uitvalt. Voorbeelden hiervan zijn theaters, klaslokalen, vergaderruimten e.d. (Gunnarsen, Lars e.a. 1992). In dergelijke ruimten zijn menselijke bio-effluënten meestal dominant, waardoor adaptatie ook duidelijker optreedt.

Een ander verschil tussen ASHRAE en CEN is dat de laatste een prestatiegerichte keuzemogelijkheid geeft voor de ventilatiecapaciteit op basis van een percentage potentiële klagers. ASHRAE schrijft slechts een bepaalde minimum ventilatiecapaciteit voor.

ruimte type	bezetting pers.m ⁻²	categorie CEN	basisventilatie voor personen dm ³ .s ⁻¹ .pers ⁻¹		additionele ventilatie voor gebouw en interieur - dm ³ .s ⁻¹ .m ⁻²			totale ventilatie dm ³ .s ⁻¹ .m ⁻²		
			ASH RAE R _p	CEN	ASH RAE R _s	emissies volgens CEN			ASH RAE	CEN laag
						zeer laag	laag	normaal		
cellenkantoor	0,1	I	2,5	10	0,3	0,5	1,0	2,0	0,55	2,0
		II		7		1,0	0,7	1,4		1,4
		III		4		2,0	0,4	0,8		0,8
spreekkamers	0,5	I	2,5	10	0,3	0,5	1,0	2,0	1,55	6,0
		II		7		1,0	0,7	1,4		4,2
		III		4		2,0	0,4	0,8		2,4

Tabel 6.1 – Ventilatiecapaciteit volgens NEN-EN 15251 en ASHRAE Standard 62.1

NEN-EN 13779 biedt ook de mogelijkheid te kiezen voor een bepaalde kwaliteit van de binnenlucht zie tabel 6.2. Deze norm gaat echter in hoofdzaak over ventilatie en het binnenmilieu in het algemeen, en bevat een groot aantal voorschriften voor de uitvoering van de hiervoor nodige technische voorzieningen. De kwalificaties IDA 1 t/m 3 komen globaal overeen met de klassen I t/m III uit NEN-EN 15251. De norm houdt geen rekening met emissies uit het interieur.

categorie	omschrijving kwaliteit binnenlucht	eenheid	ventilatiecapaciteit			
			per persoon		per m ² bij 0,1 pers.m ⁻²	
			typische waarde	defaultwaarde	typerende waarde	defaultwaarde
IDA 1	hoge kwaliteit	dm ³ .s ⁻¹ .pers ⁻¹	> 15	20	> 1,5	2,0
IDA 2	gemiddelde kwaliteit	dm ³ .s ⁻¹ .pers ⁻¹	10 - 15	12,5	1,0 – 1,5	1,25
IDA 3	matige kwaliteit	dm ³ .s ⁻¹ .pers ⁻¹	6 - 10	8	0,6 – 1,0	0,8
IDA 4	lage kwaliteit	dm ³ .s ⁻¹ .pers ⁻¹	< 6	5	< 0,6	0,5

Tabel 6.2 – Ventilatiecapaciteiten cellenkantoor volgens NEN-EN 13779

De internationale norm ISO 16814: 2008 noemt drie criteria voor de bepaling van de gewenste luchtkwaliteit, gezondheid, comfort en productiviteit. Bepalingsmethoden hiervoor worden niet gegeven.

Het Nederlandse Bouwbesluit eist voor kantoorfuncties een minimum ventilatiecapaciteit van 1,0 dm³.s⁻¹.m⁻². Dit is een minimumwaarde die geen rekening houdt met de personendichtheid en emissies uit het interieur en daarom niets zegt over de kwaliteit van de ruimtelucht. Deze waarde komt globaal overeen met IDA 3 – matige kwaliteit- van NEN-EN 13779, respectievelijk klasse III van NEN-EN 15251.

Voor de globale dimensionering van het Ventexdak[®], de Klimaatcascade[®] en de Zonneschoorsteen in de deelrapporten (I), (II) en (III) wordt uitgegaan van kwaliteitscategorie II uit NEN-EN 15251 bij een laag emissieniveau uit het interieur. Voor een cellenkantoor komt dit overeen met 1,4 dm³.s⁻¹.m⁻² of ≈ 5 m³.m⁻².h⁻¹. Hiermee wordt niet alleen voldaan aan comforteisen maar ook aan de eisen die aan de luchtkwaliteit worden gesteld met betrekking tot gezondheid en productiviteit.

6.4 Sensorische kwaliteitsbepaling

Bij de bepaling van de ventilatiecapaciteit volgens de voorgaande paragrafen wordt niet direct rekening gehouden met de emissies uit het interieur. Aangenomen mag worden dat deze in de vermelde cijfers zijn verwerkt.

Bij de sensorische bepaling van de luchtkwaliteit kunnen ook de emissies uit het interieur in rekening worden gebracht, gesteld dat deze bekend zouden zijn, hetgeen in het algemeen nauwelijks het geval

zal zijn. Belangrijke bronnen van luchtverontreiniging in het interieur zijn zachte materialen zoals de vloerbedekking, en vooral nieuwe *personal computers*, met een emissiesterkte van > 3 olf (Bakó-Biró, Z. e.a. 2004) – zie par. 6.16.

In 1988 introduceerde Fanger de *olf* en de *decipol* als eenheden voor de kwantificering van luchtverontreiniging zoals deze door mensen wordt waargenomen (Fanger 1988). Een chemische analyse kan weliswaar individuele luchtverontreinigingen aan het licht brengen, maar de meeste hiervan komen in zeer kleine concentraties voor. Afzonderlijk zijn deze verontreinigingen niet alleen moeilijk te meten, maar ook de invloed van elke specifieke component op de luchtkwaliteit is moeilijk vast te stellen. De waargenomen luchtkwaliteit, die hinder en klachten kan veroorzaken, wordt bepaald door de cocktail van de gezamenlijke verontreinigingen.

De eenheden *olf* en *decipol* worden als volgt gedefinieerd:

- Een *olf* is de bronsterkte van luchtverontreiniging (bio-effluenten) van een standaard persoon; Elke andere bron van luchtverontreiniging wordt uitgedrukt in *olf* equivalenten;
- Een *decipol* is de eenheid van luchtkwaliteit die wordt gerealiseerd bij een emissie van één *olf* en een ventilatie met niet verontreinigde lucht van $10 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Uit experimenten met grote groepen proefpersonen is de volgende formule afgeleid, waarmee het statistisch oordeel over de luchtkwaliteit kan worden berekend bij de door één standaard persoon geëmitteerde luchtverontreiniging (bronsterkte 1 olf) en een bepaalde ventilatiecapaciteit.

$$PD_{IAQ} = 395 \exp[-1,83q^{0,25}]$$

(6.1)

Waarin

$$\begin{aligned} PD_{IAQ} &= \text{percentage ontevreden (Percentage Dissatisfied) m.b.t. luchtkwaliteit (IAQ)} \\ q &= \text{specifieke ventilatiecapaciteit } [\text{dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \end{aligned}$$

Formule (6.1) kan ook worden geschreven als

$$q / (\text{olf}) = \left[-\frac{1}{1,83} \ln \left(\frac{PD_{IAQ}}{395} \right) \right]^4 \quad [\text{dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{olf}^{-1}]$$

(6.2)

Met deze formule kan de ventilatiecapaciteit worden afgeleid als functie van de PD_{IAQ}

Figuur 6.1 brengt deze vergelijking in beeld voor de PD_{IAQ} als functie van de ventilatiecapaciteit voor een beeldschermwerkplek van 10 m^2 bij een emissiesterkte van 1.....5 olf. Bij 1 olf moet dan worden gedacht aan 1 persoon in een ruimte zonder enige emissie en geventileerd met 100% zuivere buitenlucht, een theoretisch geval. Bij een ventilatiecapaciteit van 10 l/s is de $PD_{IAQ} \approx 15\%$.

Ventilatie volgens het Bouwbesluit geeft voor deze werkplek $10 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, die bij een belasting van 3 *olf*, een hoge streefwaarde, resulteert in een PD_{IAQ} van $\approx 33\%$. Als in deze ruimte gewerkt zou worden met nieuwe PC's en de emissies daardoor oploopt naar 5 *olf* gaat de PD_{IAQ} naar $\approx 45\%$.

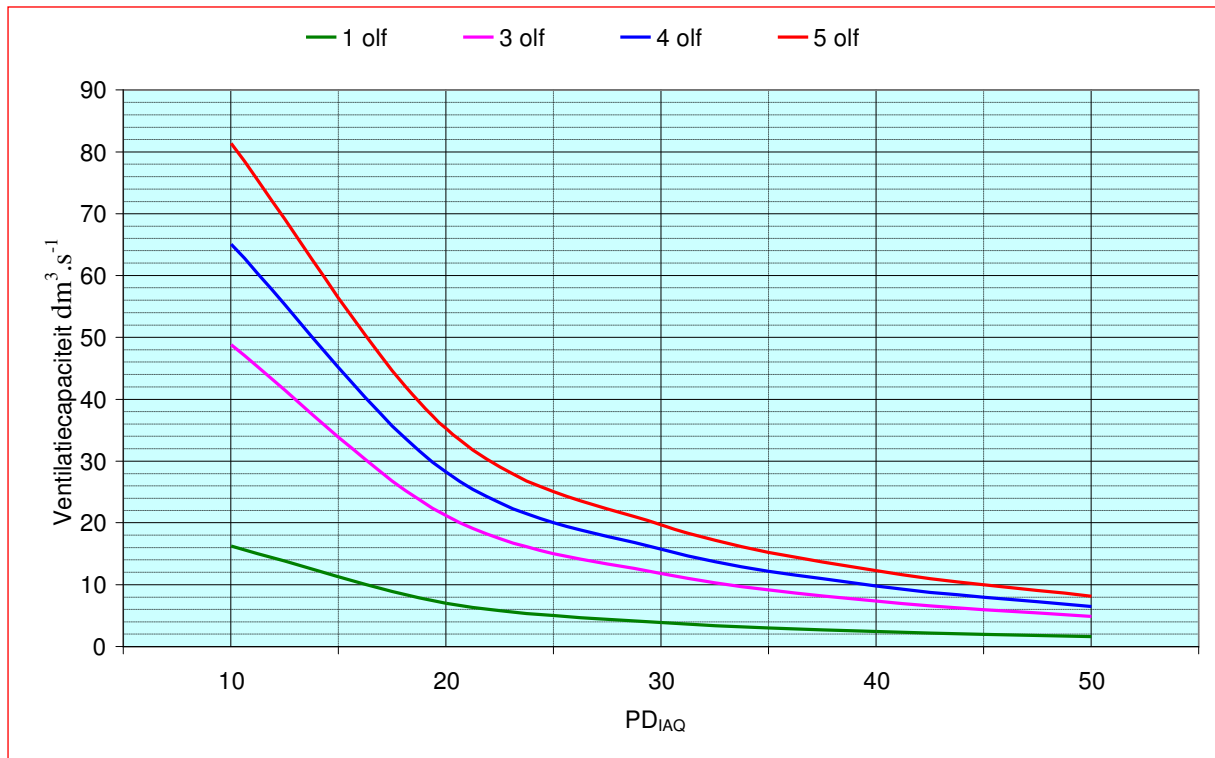
Voor de hoge luchtkwaliteit IDA 1 volgens NEN-EN 13779 is de ventilatiecapaciteit voor deze werkplek $20 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Bij een belasting van 3 *olf* wordt een PD_{IAQ} gerealiseerd van $\approx 25\%$.

Deze voorbeelden demonstreren enerzijds het belang van een zo hoog mogelijke kwaliteit van de ventilatielucht, waarbij de Klimaatcascade[®] van het Geo-Klimaatconcept[®] een belangrijke rol kan spelen. Anderzijds wordt duidelijk dat gestreefd moet worden naar zo laag mogelijke emissies uit het interieur. Het opvoeren van de ventilatiecapaciteit om de luchtkwaliteit te verbeteren is in feite het paard achter de wagen spannen. De aan Pettenkofer¹ toegeschreven uitspraak

“je kunt de stank van een mesthoop in je kamer weg ventileren, maar het is effectiever de mesthoop weg te halen”

is nog steeds actueel.

¹ Pettenkofer – Duits arbeidshygiënist *avant la lettre* 1818 - 1901



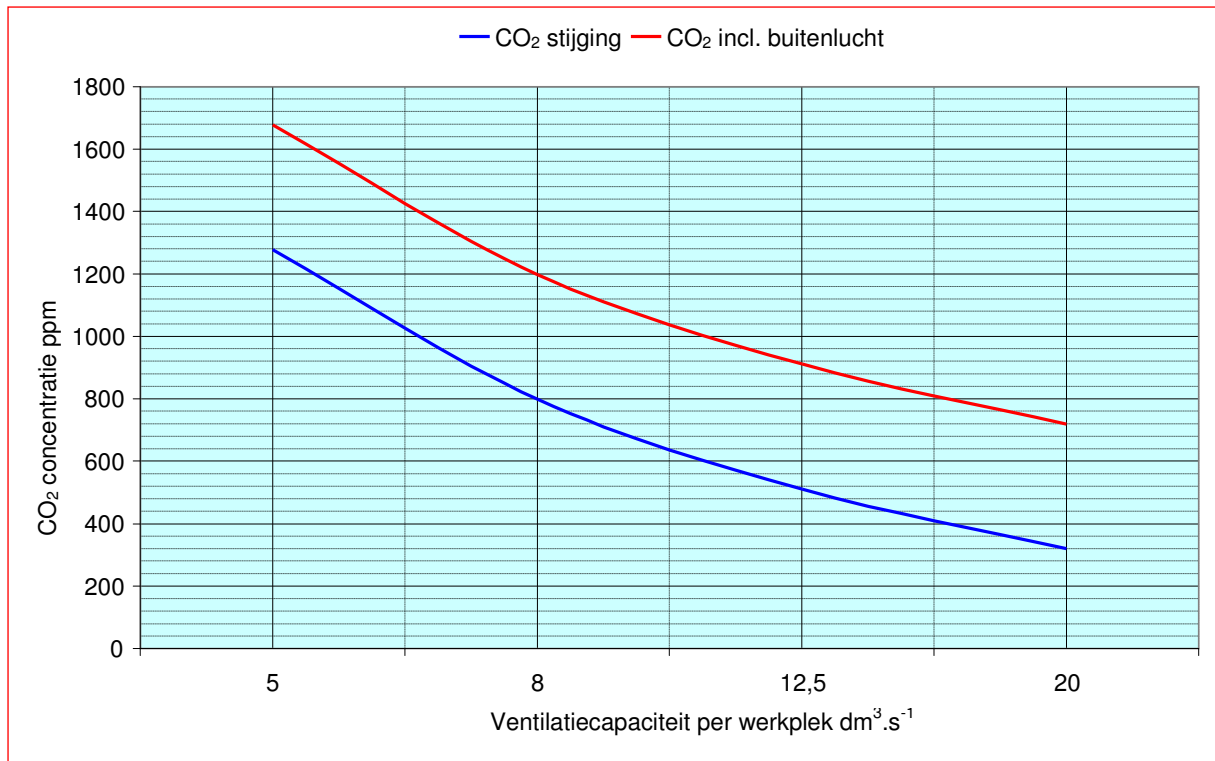
Figuur 6.1 – Ventilatiecapaciteit en PD_{IAQ} per beeldschermwerkplek van 10 m^2

De olf/decipol methode voor de berekening van de ventilatiecapaciteit op basis van een gewenste PD_{IAQ} en een bepaalde emissie van bouw- en inrichtingsmaterialen en apparatuur in de ruimte is in principe een prachtig instrument. Dat de methode in de praktijk niet of nauwelijks wordt gebruikt komt voornamelijk door het ontbreken van betrouwbare gegevens inzake de genoemde emissies. CEN zal hiervoor in verschillende Technical Committees normen ontwikkelen (CEN/TC 134 voor vloerbedekking, CEN/TC 193 voor kleefmiddelen e.d., CEN/TC 38 voor hout- en houtconserveringsmiddelen en CEN/TC 139 voor verf en vernis). Emissies zullen hierin waarschijnlijk worden uitgedrukt in μg per m^2 en per tijdseenheid, en het is de vraag of de omzetting naar *olf's* mogelijk zal zijn.

6.5 De CO_2 index

Voor de mate van geurverontreiniging door de aanwezigheid van personen wordt vaak de CO_2 -concentratie in de binnenlucht als maatstaf gehanteerd. Een goede kwaliteit binnenlucht bevat volgens de Beleidsregels Arbowet (ministerie SZW 2008) minder dan 0,1 vol % CO_2 ($1.000 \mu\text{l} \cdot \text{dm}^{-3}$)¹. Als grenswaarde wordt 0,12 vol % ($1.200 \mu\text{l} \cdot \text{dm}^{-3}$) gehanteerd. Bij incidentele afwijkingen van het beoogde gebruik, waarbij een grotere verontreiniging optreedt, (bijvoorbeeld een tijdelijk hogere bezetting van de arbeidsplaats), mag de CO_2 -concentratie ten hoogste 0,15 vol % ($1.500 \mu\text{l} \cdot \text{dm}^{-3}$) bedragen. Omdat de CO_2 -concentratie in de buitenlucht, afhankelijk van de locatie varieert, globaal tussen 350 en $450 \mu\text{l} \cdot \text{dm}^{-3}$, is het juist de stijging van de concentratie boven die van de buitenlucht aan te geven. De CO_2 -productie van volwassen mensen die zittend werk verrichten bedraagt $\approx 23 \text{ dm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. De stijging van de CO_2 -concentratie boven de buitenlucht is voor de categorieën IDA 1 t/m 4 van NEN-EN13779 af te lezen in figuur 6.2. Tevens is hierin de absolute CO_2 -concentratie aangegeven bij $400 \mu\text{l} \cdot \text{dm}^{-3} \text{ CO}_2$ in de buitenlucht. De eis uit de Beleidsregels Arbowet komt (uiteraard) overeen met die van het Bouwbesluit.

¹ De eenheid $\mu\text{l} \cdot \text{dm}^{-3}$ is equivalent aan de verouderde eenheid ppm – parts per million



Figuur 6.2 – Ventilatiecapaciteit en CO₂ concentratie

6.6 Ventilatiecapaciteit en SBS symptomen

ISIAQ¹ publiceert via de *Indoor Air Quality Scientific Findings Resource Bank* regelmatig onderzoeksresultaten op het gebied van binnenluchtkwaliteit. Figuur 6.3. brengt de belangrijkste resultaten van statistisch geanalyseerd omvangrijk veldonderzoek in beeld van de relatie tussen ventilatiecapaciteit en de prevalentie van SBS symptomen (www.iaqscience.lbl.gov/si/vent-syndrome.html). De experimenteel hiervoor afgeleide formule is

$$RP = \exp[-0,0541901 + 0,0008939q] * q + 0,452511 \quad (6.3)$$

Waarin q = Ventilatiecapaciteit per persoon in $\text{dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
 RP = Relatieve Symptoom Prevalantie (RP) t.o.v. $q = 10 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

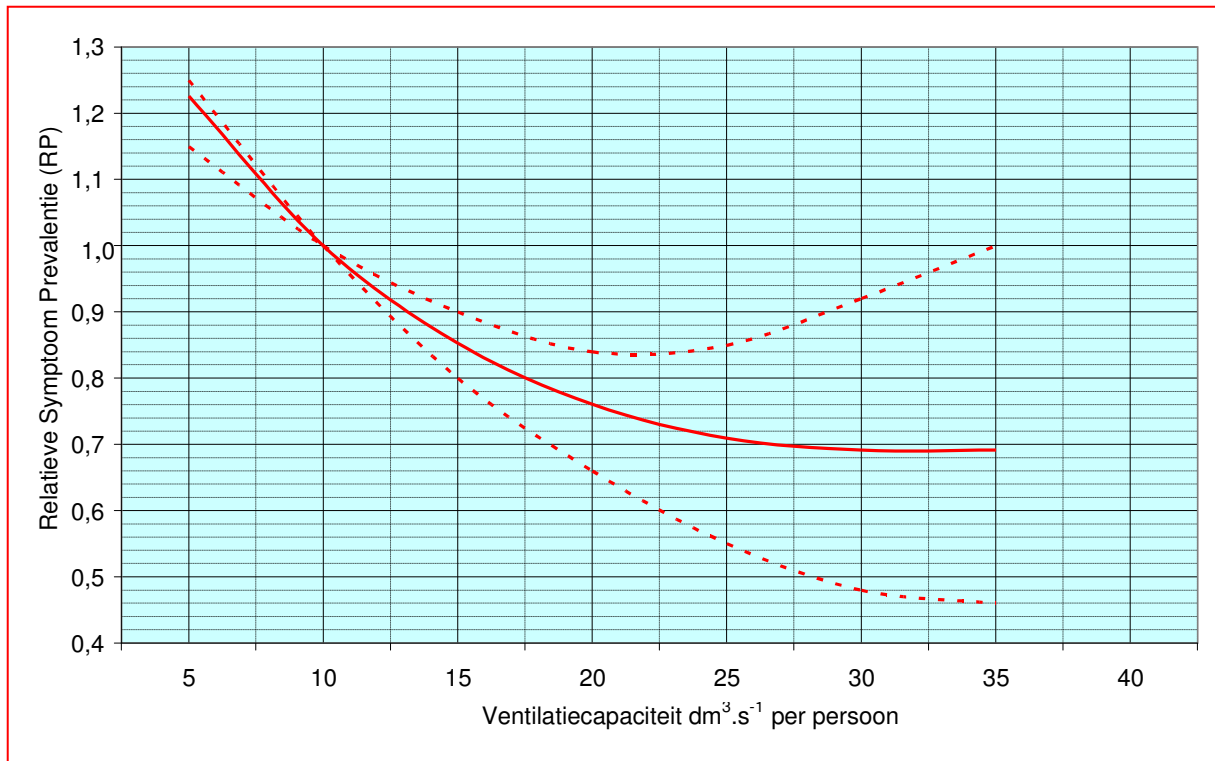
De gestippelde lijnen in de grafiek geven de onzekerheidsmarge aan.

Verhoging van de ventilatiecapaciteit van $10 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ naar $20 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ levert een reductie van de RP waarde op van 24% (1,0 naar 0,76). Omgekeerde levert een vermindering van de ventilatiecapaciteit van $10 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ naar $5 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ levert een stijging van de RP waarde op van 22% (1,0 naar 1,22).

De grafiek laat zien dat een verhoging van de ventilatiecapaciteit groter dan 20 à 25 dm^3/s weinig meer oplevert. Bovendien is de onzekerheidsmarge in dit gebied veel groter.

De onderzoekers wijzen weliswaar op belangrijke beperkingen van de analyse, maar in grote lijnen lijkt een verhoging van de ventilatiecapaciteit van $10 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (\approx IDA 2/3) naar $20 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (\approx IDA 2/1) te helpen om het aantal SBS klachten te verminderen.

¹ International Society for Indoor Air Quality and Climate



Figuur 6.3 – Ventilatiecapaciteit en relatieve SBS symptoom prevalentie

6.7 Ventilatiecapaciteit en arbeidsprestatie

De Indoor Air Quality Scientific Findings Resourced Bank biedt ook onderzoeksresultaten van de relatie tussen ventilatiecapaciteit en productiviteit van kantoorwerk (www.iaqscience.lbl.gov/si/vent-office.html). Figuur 6.4. brengt de resultaten van statistisch geanalyseerd omvangrijk veldonderzoek in beeld. De experimenteel hiervoor afgeleide formule is

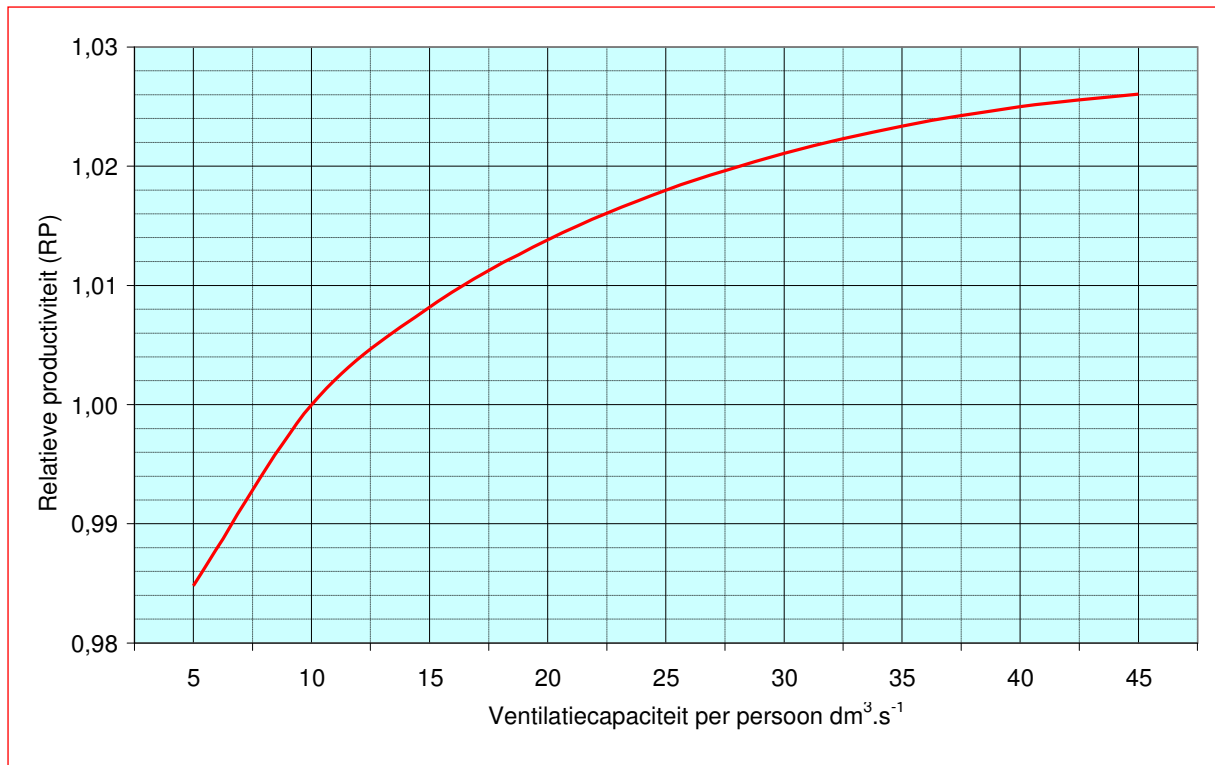
$$RP = \exp((-76,38q^{-1} - 0,78 \cdot q \cdot \ln(q)) + 3,87 \cdot q - y_0) / 1000$$

(6.4)

Waarin RP = Relatieve Prestatie
 q = Ventilatiecapaciteit per persoon in $\text{dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
 $y_0 = 13,1018$ voor $q = 10 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Verhoging van de ventilatiecapaciteit van $10 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ naar $20 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ levert een prestatieverhoging op van 1,2%. Omgekeerd levert een vermindering van de ventilatiecapaciteit van $10 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ naar $5 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ een prestatievermindering op van 1,5%.

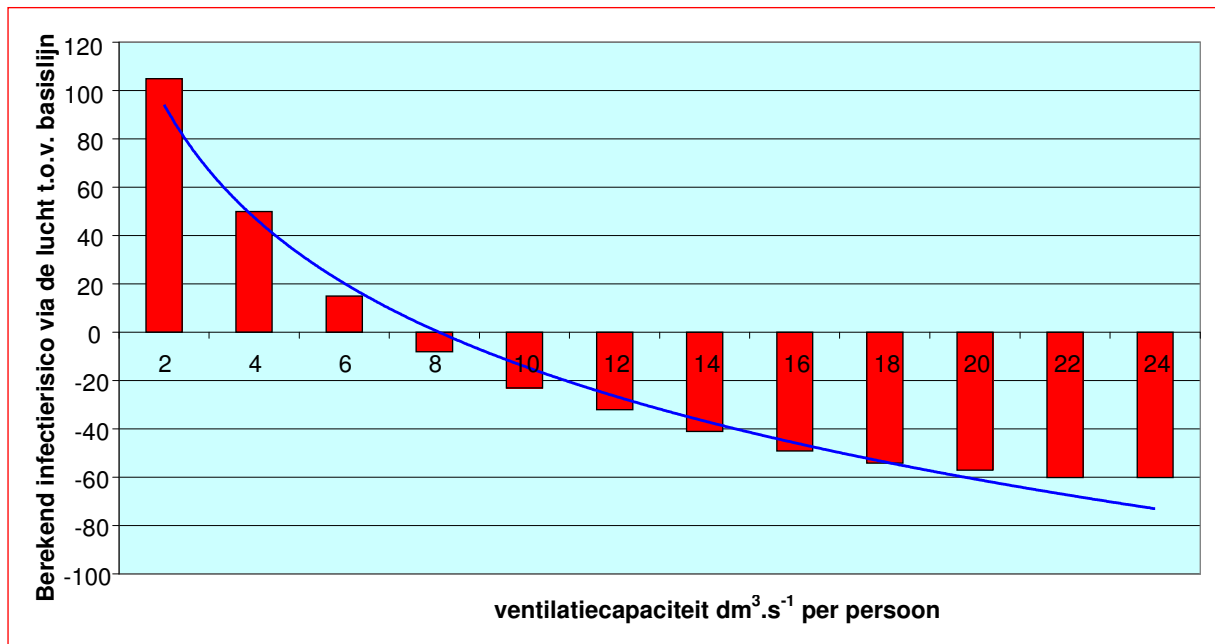
De onderzoekers wijzen weliswaar op belangrijke beperkingen van de analyse, maar in grote lijnen lijkt een verhoging van de ventilatiecapaciteit van $10 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (\approx IDA 2/3) naar $20 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (\approx IDA 2/1) verhoging van de arbeidsprestatie op te leveren.



Figuur 6.4 – Ventilatiecapaciteit en relatieve arbeidsprestatie (RP)

6.8 Infectierisico

Gezondheidsklachten kunnen vaak worden gerelateerd aan het infectierisico in een ruimte. Figuur 6.5 laat dit verband zien op basis van een theoretisch model (Nardell & Keegan 1991). De onderzoeksresultaten van *Indoor Air Quality Scientific Findings Resourced Bank* worden hierdoor bevestigd.



Figuur 6.5 – Relatie tussen infectierisico en ventilatiedebiet

6.9 Ventilatie en Productiviteit

De effecten van ventilatie, binnenluchtkwaliteit en de prevalentie van SBS symptomen op de productiviteit van kantoremployeees en de financiële aspecten daarvan zijn door REHVA in kaart gebracht (REHVA 2006). Enkele in het oog springende punten;

- Een verdubbeling van de ventilatiecapaciteit kan ziekte en ziekteverzuim met $\approx 10\%$ terugbrengen en de productiviteit met $\approx 1,5\%$ verhogen;
- Elke 10% reductie van de PD_{IAQ} kan de productiviteit met $\approx 1\%$ verhogen;
- De terugverdientijd voor investeringen ter verbetering van het binnenmilieu is in het algemeen minder dan 2 jaar.

In dit licht bezien ligt de keuze voor een hoge luchtkwaliteit van de categorie IDA 1 en de bijbehorende ventilatiecapaciteit meer voor de hand dan de gemiddelde tot matige kwaliteit IDA 2/3 van het Bouwbesluit. Het is echter niet alleen de ventilatiecapaciteit die de kwaliteit van de ruimtelucht bepaalt, maar ook de uit het interieur en computers geëmitteerde verontreinigingen; zie paragraaf 6.18. Toepassing van de eis van het Bouwbesluit is niet verkeerd, maar vergt wel grote aandacht voor een emissiearm interieur.

6.10 Ventilatie-effectiviteit

De luchtkwaliteit hoeft in een geventileerde ruimte niet uniform te zijn. Waar het voor de gebruikers op aan komt is de luchtkwaliteit in de ademzone. Een niet homogene luchtkwaliteit in een ruimte kan invloed hebben op de ventilatiecapaciteit; deze wordt uitgedrukt in de ventilatie-effectiviteit.

In het voorgaande is uitgegaan van een volledige menging van de verontreinigingen in een ruimte met de ventilatielucht; de ventilatie-effectiviteit bedraagt dan 1. Als de luchtkwaliteit in de ademzone beter is dan die in de afgezogen lucht is de ventilatie-effectiviteit groter dan 1, en kan in principe met een kleinere ventilatiecapaciteit worden gewerkt. Het omgekeerde is eveneens waar.

In het Geo-Klimaatconcept[©] wordt lucht aan de ruimten toegevoerd op basis van kwelventilatie¹, waardoor een ventilatie-effectiviteit van 1,2 ... 1,4 kan worden gerealiseerd. De hiervoor toe te passen impulsarme roosters worden op vloerniveau aangebracht en de lucht wordt met geringe snelheid en een ondertemperatuur van enkele graden toegevoerd. Dit principe wordt overigens ook in de traditionele klimaattechniek meer en meer toegepast.

6.11 Meta-analyse

Een meta-analyse van 20 studies in meer dan 350 gebouwen en bijna 30.000 personen, overwegend kantoorpersoneel, leidde tot de volgende conclusies: (Seppanen, Olli e.a.)

“The available data indicate that occupant health and perceived IAQ will usually be improved by avoiding ventilation rates below $9 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ per occupant and indicate that further improvements in health and perceived IAQ will sometimes result from higher ventilation rates up to $18 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$ per person. These findings are relatively consistent for office buildings located in cold or moderate climates, but less certain for other building types and climates.

The limitations in the existing data point to several research needs. Some of the pressing needs include research on the benefits of increasing ventilation rates above $9 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ per occupant, research involving schools and retail buildings, and research within hot, humid climates.

Because increases in ventilation may increase building energy consumption, research is also needed to identify practical methods of decreasing minimum ventilation requirements by reducing indoor pollutant emissions or by increasing the effectiveness of ventilation in controlling pollutant exposures.”

6.12 Conclusies ventilatiecapaciteit

De minimum ventilatiecapaciteit van $10 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ per persoon uit het Bouwbesluit is ook in Nederland een algemeen gehanteerde praktijkwaarde. In een “gezond” en emissiearm gebouw kan in principe ook met deze waarde worden volstaan, ook al omdat door de ventilatie-effectiviteit > 1 de luchtkwaliteit in principe substantieel beter wordt dan met de traditionele systemen.

¹ Meestal aangeduid met (NL) “Verdringingsventilatie”, (D) “Quelllüftung” of (GB) “Displacement Ventilation”

Mede afhankelijk van de personendichtheid, de kwaliteit van de buitenlucht en de mate waarin de “Tien Geboden” worden opgevolgd, kan het verstandig zijn enige tolerantie in te bouwen en uit te gaan van bijvoorbeeld $15 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ per persoon.

6.13 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 allerminst. Tabel 6.3 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.

De huidige Nederlandse grenswaarden voor luchtverontreiniging zijn doorgaans strenger dan de Europese. Binnen Europa vindt echter een algemene herziening plaats, waardoor de Europese grenswaarden vanaf 2010 aanzienlijk strenger zijn dan de huidige Nederlandse grenswaarden.

Hoewel alle genoemde stoffen invloed hebben op de volksgezondheid wordt in een recente studie stikstofoxide –NO₂– als maatgevend beschouwd voor de luchtkwaliteit. Hiervoor zal vanaf 2010 een jaargemiddelde grenswaarde gelden van maximaal $40 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$. Het is niet te verwachten dat industrieën een Hinderwetvergunning zullen krijgen als ze niet voldoen aan de gestelde grenswaarden.

Een belangrijke bron van luchtverontreinigende stoffen vormt echter het verkeer en met name langs snelwegen worden dan ook relatief hoge concentraties van deze stoffen verwacht. Het is daarom van belang de aanzuiglocatie van de ventilatielucht zorgvuldig te kiezen en de lucht zo goed mogelijk te reinigen (zie paragraaf 6.13).

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

Tabel 6.3 – Primaire verontreinigingen van de buitenlucht

Tabel 6.4 geeft een classificatie van buitenluchtkwaliteit ODA (Outdoor Air) volgens NEN-EN 13779.

Categorie	Omschrijving
ODA 1	Zuivere lucht die alleen tijdelijk enige stofbelasting heeft bijv. pollen
ODA 2	Lucht met hoge concentraties stof- en/of gasvormige verontreinigingen
ODA 3	Lucht met zeer hoge concentraties gasvormige verontreinigingen en/of stof

Tabel 6.4 – Classificatie van buitenluchtkwaliteit volgens NEN-EN 13779

Hierbij worden de volgende voorlopige criteria gegeven:

- ODA 1 is van toepassing als voldaan wordt aan de richtlijnen van de WHO (1999) en nationale kwaliteitseisen;
- ODA 2 is van toepassing als de luchtverontreinigingen een factor $\leq 1,5$ hoger zijn dan als de richtlijnen van de WHO (1999) en nationale kwaliteitseisen;
- ODA 3 is van toepassing als de luchtverontreinigingen een factor $\geq 1,5$ hoger zijn dan als de richtlijnen van de WHO (1999) en nationale kwaliteitseisen;

Voor de combinatie ODA 3 / IDA 1,2 (slechte buitenluchtkwaliteit in combinatie met gemiddelde en hoge kwaliteit ruimtelucht) wordt een filtercombinatie F7+GF+F9 aanbevolen. In het *Earth, Wind & Fire* concept wordt deze vervangen door een elektrostatisch filter in combinatie met de Klimaatcascade®.

Informatie over de buitenluchtkwaliteit op een bepaalde locatie zou in Nederland door het RIVM kunnen worden gegeven. In Duitsland kan via een commerciële site de luchtkwaliteit tot op 50 m nauwkeurig worden opgevraagd (www.cci-promotor.de/ODA-Werte)

6.14 Locatie van de luchtaanzuiging voor ventilatie

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).

Voor alle gebouwen op “*ongezonde*” lokaties geldt:

- De locatie van de luchtaanzuiging zover mogelijk van de vuile lucht verwijderen; en/of
- Hoogwaardige luchtreiniging toepassen met electrostatische filters en luchtwassers.

In het algemeen neemt de luchtkwaliteit in stedelijke gebieden en langs snelwegen toe bij grotere hoogte, waar luchtvervuiling door de wind is verspreid en verdund. Luchtaanzuiging op dakniveau en zover mogelijk afgewend van het verkeer verdient daarom de voorkeur. Aan deze randvoorwaarde wordt in het *Earth, Wind & Fire* concept volledig voldaan; de ventilatielucht wordt namelijk op dakniveau aangezogen.

6.15 Een veilige luchtaanzuiging voor ventilatie

Er is nog een tweede reden om de ventilatielucht op dakniveau, en zo schoon mogelijk, 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 al met een traangaspatroon. Levensbedreigende terreur wordt het als dodelijke ziektekiemen opzettelijk in de lucht terecht komen. Berichten hierover kwamen in 2002 uit Amerika, waar terroristen ervan werden verdacht de luchtbehandelinginstallatie 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. Luchtaanzuiging op dakniveau voldoet het beste aan deze eis.

6.16 Kortsluiting

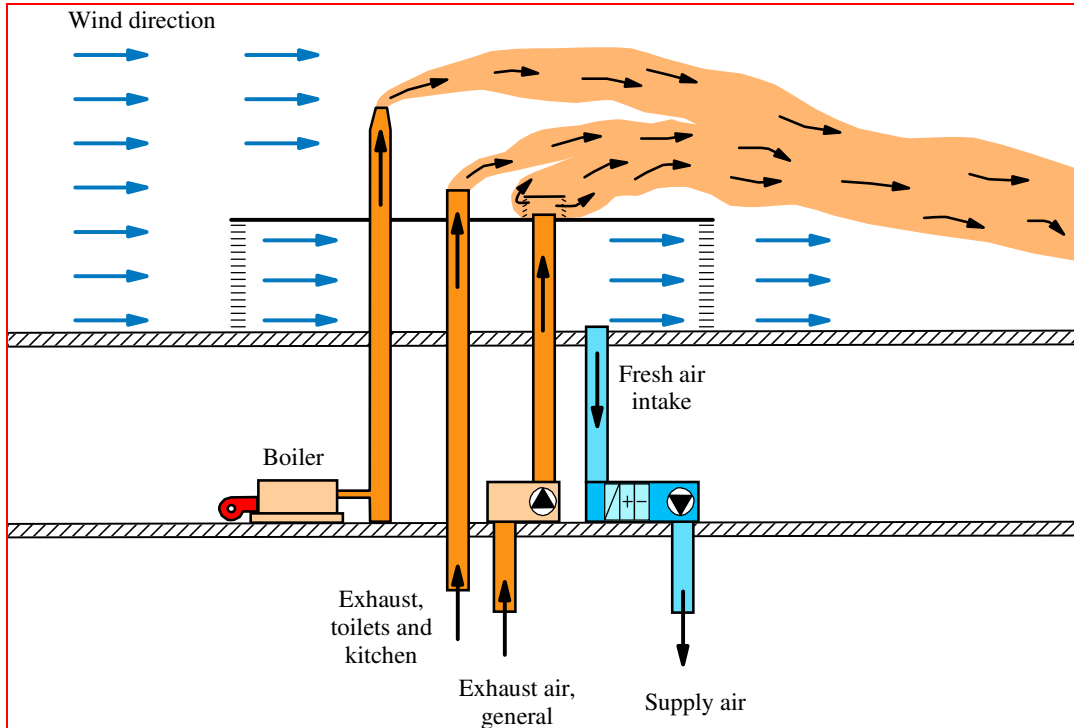
Kortsluiting treedt op als de aangezogen buitenlucht wordt “besmet” door de uitstoot van gassen en verontreinigde lucht uit het gebouw zelf. Deze kunnen dan door het gebouw worden verspreid. Veel mensen zijn met dit verschijnsel bekend als ze op hun werkplek op gezette tijden of bij een bepaalde windrichting 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 bio-terreur.

Figuur 6.6 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. Het Ventexdak[®] van het *Earth, Wind & Fire* concept is een bijzondere uitwerking van dit concept.

6.17 Luchtreiniging

In het Geo-Klimaatconcept[®] wordt de aangezogen ventilatielucht in eerste instantie gereinigd in de Klimaatcascade[®] waardoor grof stof en veel gasvormige verontreinigingen worden afgescheiden –zie hoofdstuk 5 van deelraport (III). Als een slechte kwaliteit van de buitenlucht dit noodzakelijk maakt, of als er hoge eisen worden gesteld aan de kwaliteit van de binnenlucht, is een verdere luchtreiniging met behulp van luchtfilters nodig.

Luchtfilters moeten in staat zijn ook submicron deeltjes af te scheiden die in regio's met een hoge bevolkings- en verkeersdichtheid besmet kunnen zijn met schadelijke stoffen (zie par. 6.12). In het Geo-Klimaatconcept[®], dat gebaseerd is op natuurlijke ventilatie komen hiervoor uitsluitend elektrostatische luchtfilters in aanmerking, die zich kenmerken door een zeer laag drukverlies -zie hoofdstuk 5 van deelrapport (III).



Figuur 6.6 – Kortsluitveilige luchtaanzuiging

6.18 Luchtkanalen

Luchtkanalen kunnen als de longen van een gebouw worden beschouwd. Ondanks de toepassing van luchtfilters kan zich in de loop van de tijd op bepaalde plaatsen in kanalen stof afzetten. Als dit stof droog blijft is het in het algemeen betrekkelijk onschadelijk, maar als de kanalen nat worden, vormt de combinatie van stof, water en lucht een uitstekende voedingsbodem voor microbiële groei die allergische problemen en geuroverlast in het binnenmilieu kan opleveren. In het Geo-Klimaatconcept[®] worden zo nodig hoogwaardige elektrostatische luchtfilters toegepast waardoor dit risico kleiner wordt. De bouwkundige luchtkanalen zullen met het oog hierop gemakkelijk reinigbaar moeten zijn.

6.19 Emissie personal computers

Bakó-Biró, Z. e.a. van het Fanger team onderzochten de emissie van personal computers in een laag emitterende kantoorruimte. Dertig vrouwelijke proefpersonen werkten in groepen van zes gedurende 4,8 uur in een ruimte op oude PC's. Achter een scherm waren niet zichtbaar, 3 maanden oude PC's opgesteld, die tijdens het experiment werden binnengebracht. De ruimte werd gedurende het onderzoek geventileerd op basis van $10 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ per persoon. De proefpersonen gaven gedurende de test hun oordeel over de kwaliteit van de binnenlucht en rapporteerden tevens de ondervonden SBS symptomen. De 3 maanden oude PC's bleken sterke bronnen van luchtverontreiniging te zijn. De sensorische bronsterkte van elke PC was 3,4 *olf*, meer dan drie maal zo groot als die van een standaard persoon. De aanwezigheid van deze PC's deed de PD_{IAQ} stijgen van 13% tot 41%, en verhoogde de benodigde tijd voor tekstverwerking met 9%

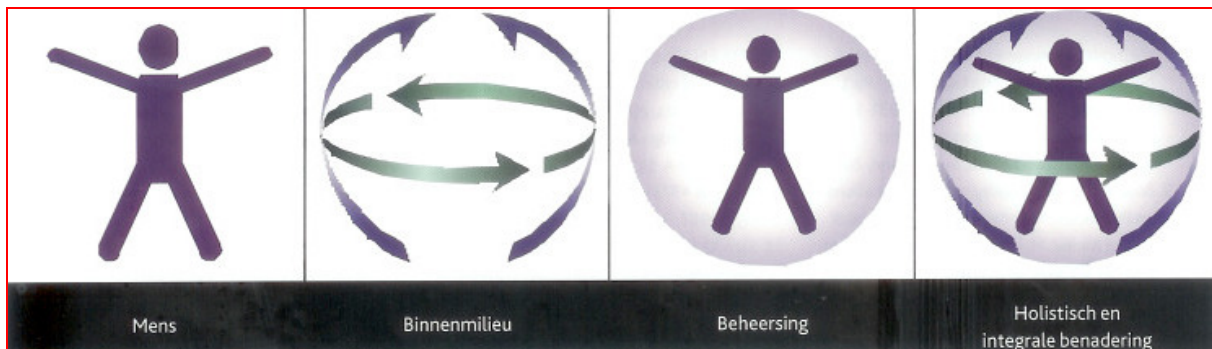
14. THERMISCH COMFORT EN PRODUCTIVITEIT OP DE WERKPLEK

7.1 Inleiding

De benadering van thermisch comfort en productiviteit in dit hoofdstuk is op de praktijk gericht en wetenschappelijk gezien niet volledig. Een praktische benadering is echter voorlopig de enig mogelijke, gezien de samenvatting van een wetenschappelijke meta-analyse (Bluyssen, Philomena 2010):

“Er zijn veel en diverse manieren, instrumenten en concepten ontwikkeld om te bepalen of een gebouw comfortabel is voor de bewoners. Echter, de resulterende prestatie-indicatoren en criteria zijn meestal niet bruikbaar, omdat de gebruikte dosisrespons relaties niet compleet zijn. Daarnaast valt op dat interacties die op verschillende niveaus optreden (op mensniveau, op het niveau van de parameters van het binnenmilieu en op gebouwniveau), niet worden meegenomen. Bovendien wordt meestal op een bepaald tijdstip de status bepaald (statisch), terwijl het blootstaan aan invloeden in een gebouw een dynamisch proces is. Tot slot kan worden opgemerkt dat positieve stimuli over het algemeen niet worden beschouwd. Er is behoefte aan een andere, of tenminste, een aangepaste benadering voor het beoordelen van gezondheid en comfort van bewoners in het binnenmilieu: een integrale multidisciplinaire benadering die zowel positieve als negatieve stimuli in de tijd meeneemt en die zich om de echte”behoefte van mensen bekommert”.

Zie ook figuur 7.1



Figuur 7.1 – Kader voor Gezondheid en Comfort volgens Bluyssen

7.2 Samenvatting

Naast een goede luchtkwaliteit – hoofdstuk 6, is thermisch comfort op de werkplek een belangrijke parameter voor elk individu en elke organisatie. Verschillende normen en methoden voor de definiëring hiervan worden kort toegelicht.

Wetenschappelijk onderzoek heeft aangetoond dat de kwaliteit van het binnenmilieu ook invloed heeft op de productiviteit van mensen en van een organisatie. Met iets hogere eisen dan de bovenste comfortgrenzen aangeven kan de productiviteit substantieel worden verhoogd. De tendens om met het oog op potentiële energiebesparingen de comfortgrenzen op te rekken staat op gespannen voet met het productiviteitscriterium. Het adaptief thermisch behaaglijkheidsmodel volgens ISSO 74 en de populariteit van gebouw/klimaatype ALPHA verdient in dit opzicht een kritische beoordeling.

Minstens even belangrijk als de fysieke kwaliteit van het binnenmilieu is de mogelijkheid tot individuele regeling hiervan op de werkplek door de kantoremployee zelf. Hierdoor kan tevens worden voldaan aan een primaire menselijke behoefte om invloed te kunnen uitoefenen op zijn omgevingscondities.

Het binnenmilieu gaat niet alleen over thermisch comfort. Niet thermische- en gezondheidsfactoren spelen eveneens een rol, o.a. bij de gewenste relatieve vochtigheid.

Het *Earth, Wind & Fire* concept claimt een veilig, gezond, behaaglijk en productief binnenmilieu te kunnen realiseren bij een uitzonderlijk laag energiegebruik. Hierbij worden geen concessies gedaan aan de kwaliteit van het binnenmilieu, zoals dat met veel gebouwen met natuurlijke ventilatie wel het geval is.

Individuele regelbaarheid van de temperatuur op de werkplek is zowel qua thermisch comfort als productiviteit van cruciaal belang. Bij een gebouw/klimaatmodel OMEGA met een “Binnenklimaat op Maat” –zie hoofdstuk 13, gaan *Pleasure and Performance* (Brown, G.Z. 2009) hand in hand.

7.3 Normering van klimaatcondities in kantoorruimten

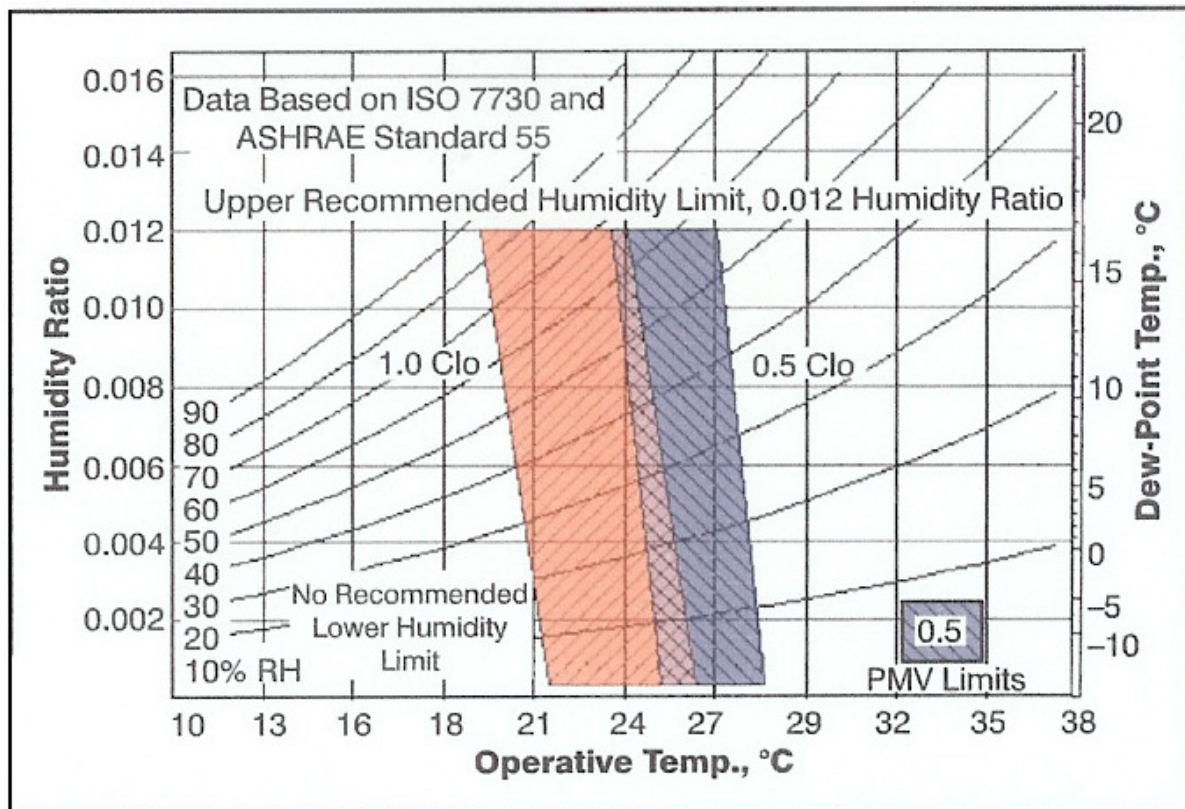
Aanbevelingen voor de klimaatcondities in kantoorruimten zijn in verschillende normen te vinden. (NEN 2008, ASHRAE 2008, ISO 2008, DIN 2008). De recente NEN EN 15251 (NEN 2008) geeft als algemene regel voor kantoorruimten de volgende operationele temperaturen

- Stookseizoen minimum 20,0°C bij 1,0 clo
- Koelseizoen maximum 26,0°C bij 0,5 clo

Voor nieuwe gebouwen klasse II met klimaatregeling wordt een relatieve luchtvochtigheid aanbevolen van maximum 60% en minimum 25% R.V. met een bovengrens van 12 g.kg⁻¹ absolute vochtigheid.

ASHRAE Standard 55 – 2004 (ASHRAE 2002, Olesen e.a. 2004) geeft een behaaglijkheidsgebied weer in relatie met het kledingniveau en de relatieve vochtigheid; zie figuur 7.2. De maximum operationele temperatuur bij 0,5 Clo is hier met 27°C 1 graad hoger dan in NEN EN 15251.

Opgemerkt wordt dat een kledingweerstand van 0,5 Clo een uiterst lichte en informele kleding inhoudt, die in Nederlandse omstandigheden, zeker voor mannen, maar zelden geaccepteerd zal worden (Bronsema 1993). Rekening houdend met een hogere kledingweerstand van bijvoorbeeld 0,6 à 0,7 Clo lijkt het, zeker voor organisaties in gebouwen met een meer formele *dress-code*, verstandig de maximum operationele temperatuur te beperken tot 25°C.



Figuur 7.2 – Operationele ruimtetemperatuur en vochtigheid volgens ASHRAE 55-2004

7.4 Binnenklimaat op Maat

Mensen hebben verschillende “*thermische karakters.*” Hiermee wordt de persoonlijke eigenschap bedoeld die aangeeft bij welke omgevingscondities het lichaam zich thermisch behaaglijk voelt. Omgevingscondities zijn de luchttemperatuur, de gemiddelde stralingstemperatuur, de lichtsnelheid langs het lichaam en, in mindere mate, de luchtvochtigheid. Als maat voor de thermische gewaarwording wordt meestal de ASHRAE-schaal gebruikt; zie tabel 7.1.

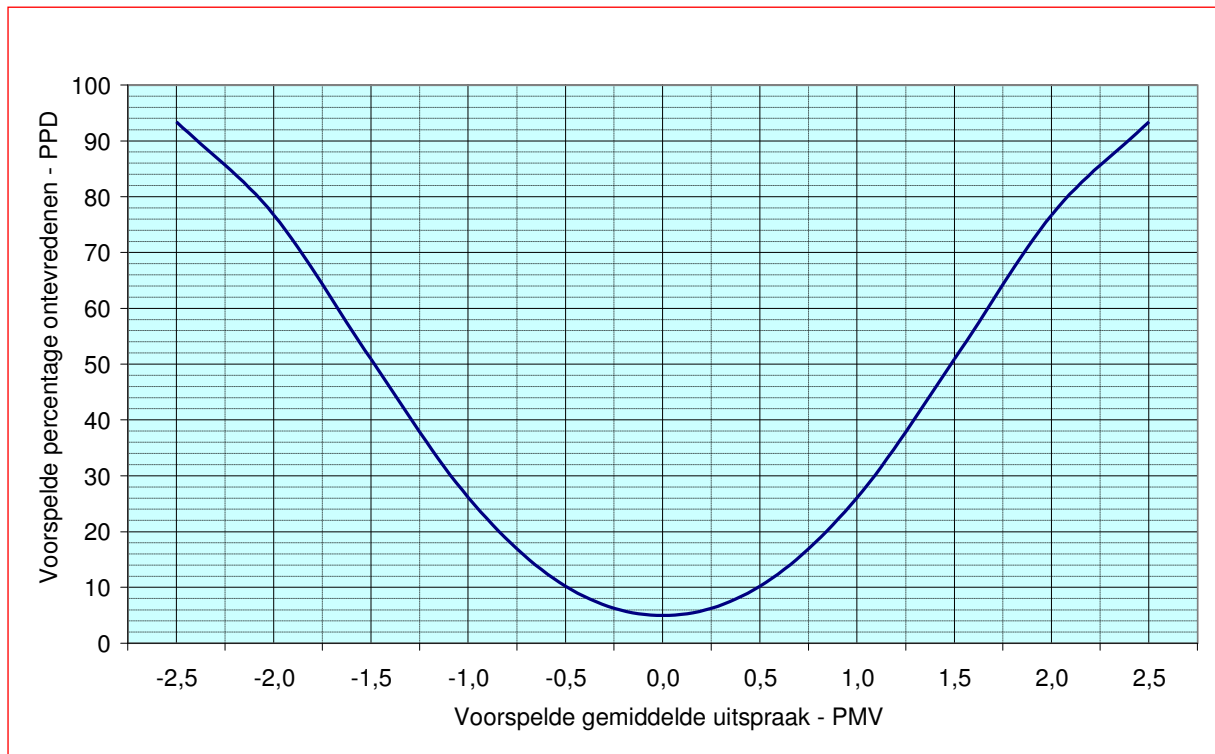
ASHRAE schaal	
-3	Koud
-2	Koel
-1	Lichtelijk koel
0	Neutraal
+1	Lichtelijk warm
+2	Warm
+3	Heet

Tabel 7.1 – ASHRAE schaal

Met behulp van een groot aantal proefpersonen is door o.a. Fanger een frequentieverdeling gemaakt van de verschillende thermische karakters, gestileerd weergegeven in figuur 7.3 (Fanger 1970). Horizontaal is de zgn. *Predicted Mean Vote* (PMV) uitgezet waarvoor de getalwaarden van de ASHRAE-schaal zijn gebruikt. Verticaal is op een logaritmische schaal het zgn. *Predicted Percentage of Dissatisfied* (PPD) aangegeven, oftewel het percentage potentiële klagers. De proefpersonen waren jonge gezonde mensen, die tijdens de tests kleding met identieke warmteweerstand droegen en alle hetzelfde activiteitsniveau hadden.

De experimenteel voor de relatie PMV / PPD afgeleide functie is

$$PPD = 100 - 95 \exp\left(-\left(0,03353 PMV^4 + 0,2179 PMV^2\right)\right) \quad (7.1)$$



Figuur 7.3 – PPD als functie van PMV

Voor een grote groep mensen is er maar één optimale omgevingsconditie, nl. bij $PMV = 0$. Het theoretische minimum aantal potentiële klagers (PPD) is 5%. Normaliter wordt een klimaatinstallatie ontworpen op $-0,5 < PMV < +0,5$ en ca. 10% potentiële klagers. Tabel 7.2 laat zien hoe hierbij de verdeling is tussen warme en koude klagers. Opvallend is dat bij $PMV -0,5$ een aantal mensen het nog steeds te warm vindt (0,4%) en omgekeerd bij $PMV +0,5$ nog steeds 0,4% van de groep vindt dat het te koud is. Een uniform thermisch binnenklimaat, dat een gehele groep mensen tevreden stelt, is dus duidelijk een illusie.

PMV	PPD		
	Koud	Warm	Totaal
-0,5%	9,9%	0,4%	10,3%
+0,5%	0,4%	9,9%	10,3%

Tabel 7.2 - Verdeling tussen "warme en koude klagers"

Behalve de verschillen in thermische karakters zijn er tussen mensen ook verschillen in de persoonsgebonden parameters van kleding en activiteitsniveau. Deze hebben betrekking op de warmteweerstand van de kleding, uitgedrukt in de eenheid Clo, en het activiteitsniveau dat de warmteontwikkeling in het lichaam veroorzaakt, uitgedrukt in de eenheid van metabolisme Met. Een hoger activiteitsniveau kan door een lagere Clo-waarde worden gecompenseerd en omgekeerd. Uiteraard heeft dit zijn beperkingen, vooral voor mannen. Jasje uit in de zomer kan in de meeste organisaties tegenwoordig wel, zij het niet in alle functies, maar zonder stropdas en in korte mouw wordt het soms al wat lastiger, om nog maar niet te spreken van een korte broek.

Het activiteitsniveau van mensen op kantoren kan ook sterk uiteenlopen. Voor rustig zittend kantoorwerk wordt meestal 1,2 Met aangehouden, maar bij onder druk werkende, koffiedrinkende en ambulante personen (staan - ijsberen - toiletbezoek - trap op- en af etc.) kan dit gemakkelijk oplopen tot 1,5 Met. Stress (snelle hartslag - transpiratie) en een slechte conditie geeft nog hogere waarden. Een binnenklimaat dat ontworpen is op $-0,5 < PMV < +0,5$ en ca. 10% potentiële klagers bij 1,2 Met en 0,65 Clo kan hierdoor in de praktijk gemakkelijk een PPD score van 25% of hoger opleveren. Mensen zijn dus niet alleen verschillend; ze werken ook onder verschillende omstandigheden. De illusie van een ideaal uniform thermisch binnenklimaat voor iedereen wordt hierdoor nog groter.

Voor het ontwerp van het binnenmilieu in gebouwen is daarom het belangrijk om mensen de mogelijkheid te geven de thermische omgevingscondities van hun werkplek individueel te kunnen regelen. In principe is dan een acceptatiegraad van 100% bereikbaar en zal zowel de waardering voor het binnenmilieu als de productiviteit maximaal zijn. Dit aspect wordt in paragraaf 7.5 verder uitgewerkt.

7.5 Individuele regeling klimaatcondities

“Het valt anno 2010 niet mee om een kantoorgebouw of school te vinden zonder binnenklimaatklachten. Zeker als je naar de wat grotere gebouwen met moderne, complexe klimaatinstallaties kijkt”.

Aldus een deskundige die van binnenmilieuonderzoek zijn beroep heeft gemaakt (Boerstra, Atze 2010).

De in paragraaf 7.3 genoemde normen gaan uit van de veronderstelling dat het thermisch comfort in gebouwen bepaald wordt door de omgevingsfactoren: luchttemperatuur, stralingstemperatuur, luchtvochtigheid, luchtsnelheid, metabolisme en kleding. Kenmerkende karakteristieken van menselijk gedrag, aanpassingsvermogen en interacties tussen mens en gebouw zijn niet in aanmerking genomen. Met andere woorden, de normen zijn gebaseerd op technocratische thermofysiologische uitgangspunten. Psychologische aspecten van menselijk gedrag zijn hierbij genegeerd (Boerstra, Atze 2010).

Een meer holistische benadering gaat ervan uit dat de mens in staat is zich op een effectieve wijze aan te passen aan zijn omgevingscondities (Fiala, D. e.a.2001). Voor wat betreft thermisch comfort worden de volgende mogelijkheden genoemd (Endravan, M. e.a.2004):

- Verandering van de metabolische warmteproductie, bijvoorbeeld door aanpassing van activiteitsniveau;
- Verandering van het warmteverlies van het lichaam, bijvoorbeeld door aanpassing van kleding;
- Verandering van omgevingsfactoren, bijvoorbeeld door een thermostaat hoger of lager te zetten.

In een wetenschappelijke meta-analyse werd aangetoond dat de mogelijkheid voor individuele regeling van de klimaatcondities resulteert in verhoging van thermisch comfort, vermindering van gezondheidsklachten en stijging van de productiviteit (Boerstra, Atze 2010).

Individuele regeling biedt niet alleen de mogelijkheid om een “*Binnenklimaat op Maat*” te realiseren (zie paragraaf 7.4). Psychologisch gezien is het ook een effectieve manier van stressbestrijding (Vroon, P.A. 1990).

7.6 Adaptief thermisch behaaglijkheidsmodel

In ISSO publicatie 74 “Thermische Behaaglijkheid” wordt onderscheid gemaakt in twee typen gebouwen/binnenklimaat, type “ALPHA” en “BÈTA”.

- Gebouwen/Binnenklimaat type “ALPHA” zijn uitgevoerd met natuurlijke ventilatie, en gebruikers hebben goede mogelijkheden voor individuele beïnvloeding van het binnenklimaat door te openen ramen, en de mogelijkheid hun kleding aan te passen aan een veranderende ruimtetemperatuur. In dergelijke gebouwen worden ’s zomers hogere ruimtetemperaturen toelaatbaar geacht dan in het hierna vermelde gebouw/klimaattype “BÈTA”, waar deze mogelijkheden ontbreken. Naast de fysische mogelijkheden van lichtere kleding en extra luchtbeweging door een open raam speelt ook het lagere verwachtingspatroon een rol dat mensen in dergelijke gebouwen hebben met betrekking tot de ruimtetemperatuur. Het complex van factoren dat hieraan ten grondslag ligt wordt aangeduid als adaptieve thermische behaaglijkheid, dat gedragsmatige, fysiologische en psychologische adaptatie omvat.
- Gebouwen/Binnenklimaat type “BÈTA” zijn uitgevoerd met centrale klimaatregeling en gesloten gevels en de gebruikers hebben geen mogelijkheden voor individuele beïnvloeding van het binnenklimaat en/of aanpassing van hun kleding, bijvoorbeeld in organisaties met formele kledingvoorschriften.

In het schema van figuur 7.4 kan worden afgelezen hoe het type gebouw/binnenklimaat kan worden bepaald. Voor het onderzoek Geo-Klimaatconcept[®] zijn twee routes aangegeven voor respectievelijk gebouw/klimaattype “ALPHA” en “BETA”.

De figuren 7.5 en 7.6 geven weer welke ruimtetemperaturen in de gebouw/klimaattypen ALPHA en BÈTA aanvaardbaar worden geacht. De in de figuren genoemde operationele temperatuur is een numeriek gemiddelde van de lucht- en de stralingstemperatuur, gewogen door de respectievelijke warmteovergangscoefficienten. De classificatie van het thermisch binnenklimaat is aangegeven in tabel 7.3. Voor het onderzoek Geo-Klimaatconcept[®] is uitgegaan van Klasse B met een acceptatiegraad van 80%.

De figuren gelden voor reguliere waarden van metabolisme M en kledingweerstand I_{cl} in kantoorgebouwen: $1,0 < M < 1,4$ met en $0,5 < I_{cl} < 0,9$ Clo.

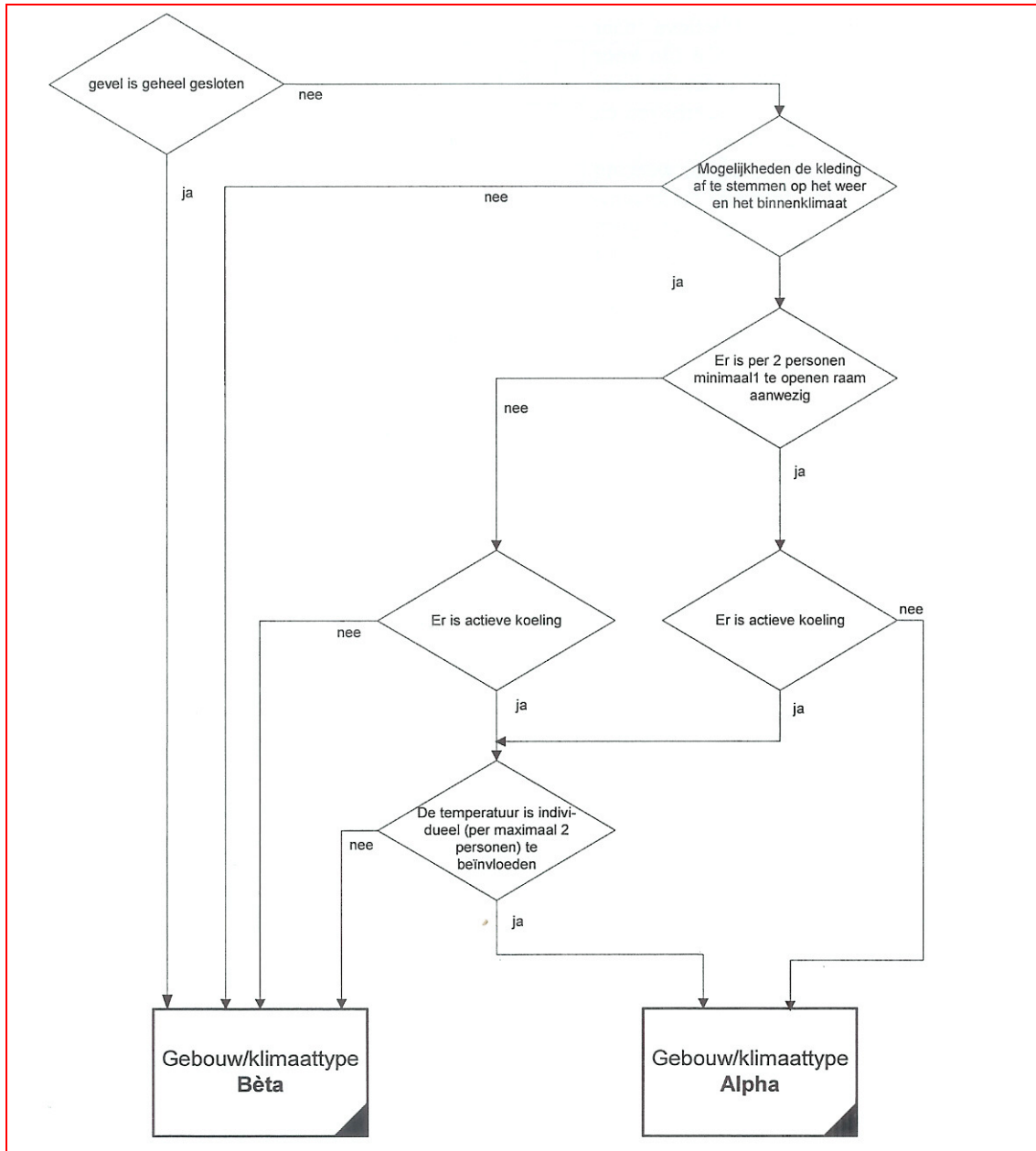
Klasse	Acceptatie	Toepassing
A	90%	Gebouwen met een relatief gevoelige groep gebouwgebruikers of gebouwen waarin extra hoge eisen aan het thermisch comfort worden gesteld, bijvoorbeeld een hoofdkantoor op een A-locatie.
B	80%	Centrale classificatie voor een “goed binnenklimaat” voor algemene toepassing in standaard situaties.
C	65%	“Tijdelijke situaties”; deze klassen wordt, uitzonderingen daargelaten, in beginsel niet toegepast in een ontwerpsituatie voor nieuwe huisvesting.

Tabel 7.3 – Classificatie thermisch binnenklimaat (ISSO 74)

Voorbeeld: In een gebouw/klimaattype ALPHA is volgens figuur 7.5 bij een gemiddelde gewogen buitentemperatuur van 22°C en een acceptatiegraad van 80% een maximale binnentemperatuur van 28°C toelaatbaar. Bij een acceptatiegraad van 90% is dit 27°C.

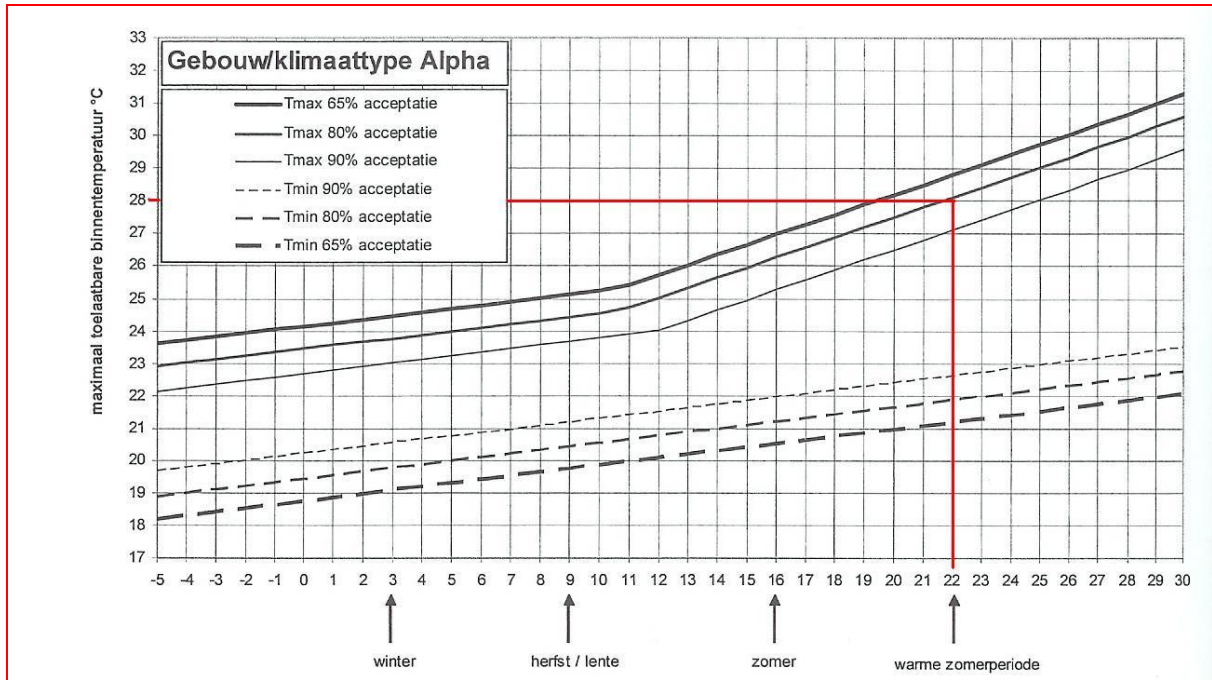
In een gebouw/klimaattype BÈTA zijn deze temperaturen volgens figuur 7.6 respectievelijk $\approx 26^{\circ}\text{C}$ en 25°C .

In een klimaatactief concept wordt een gebouw in principe als type ALPHA ontworpen. Pas als er binnen de organisatie die het gebouw gaat gebruiken geen mogelijkheden zijn voor afstemming van de kleding op het binnenklimaat wordt voor type BETA gekozen. Deze keuze zal ook niet zelden worden gemaakt voor meer prestigieuze gebouwen of als voor een maximale arbeidsproductiviteit wordt gekozen. Het gebied van de thermische behaaglijkheid voor type BETA is kleiner dan voor type “ALPHA”; zie figuur 7.7, die het behaaglijkheidsgebied volgens ASHRAE 55-2004 weergeeft in het Mollier diagram.

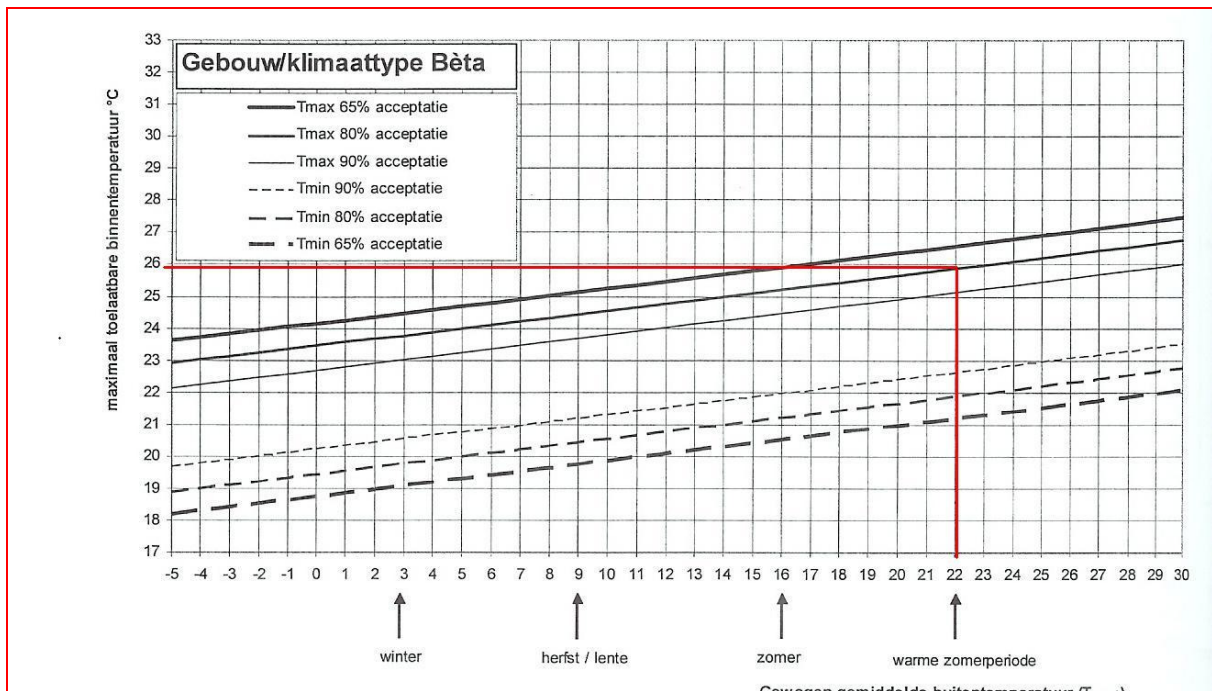


Figuur 7.4 – Schema voor het bepalen van gebouw/klimaatype ALPHA of BETA (ISSO 74)

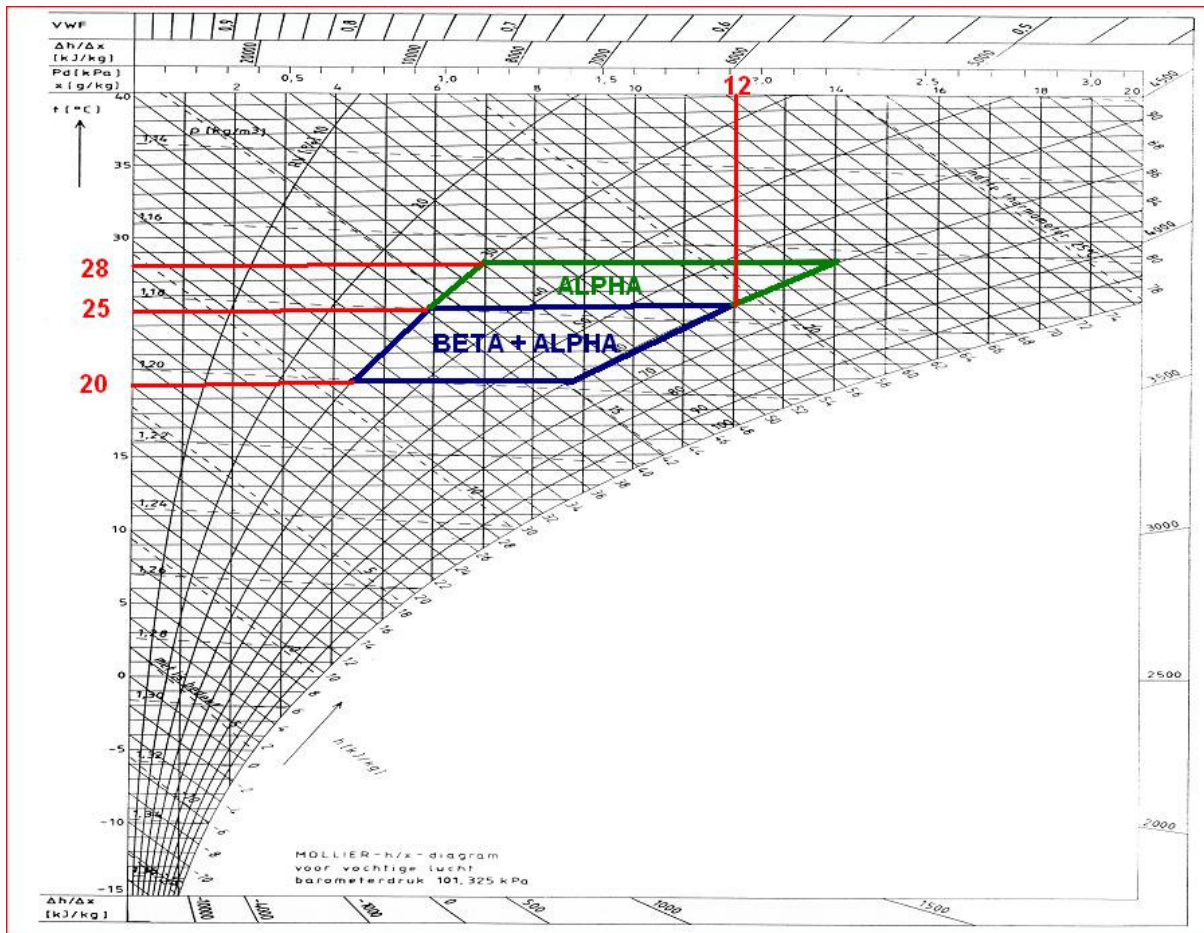
NB: ISSO publicatie 74 is uitsluitend gericht op thermisch comfort en houdt geen rekening met productiviteitseffecten; zie paragraaf 7.7 en 7.8.



Figuur 7.5– Gebouw/Klimaatype ALPHA. Max. toelaatbare operationele ruimtetemperatuur (ISSO 74)



Figuur 7.6 – Gebouw/Klimaatype Bèta. Max. toelaatbare operationele ruimtetemperatuur (ISSO 74)



Figuur 7.7 – Thermisch behaaglijkheidsgebied voor gebouw/klimaattype ALPHA en BETA

7.7 Ruimteklimaat en arbeidsprestatie

ISIAQ¹ publiceert via de *Indoor Air Quality Scientific Findings Resource Bank* regelmatig onderzoeksresultaten op het gebied van het binnenmilieu. Figuur 7.8. brengt de resultaten in beeld van statistisch geanalyseerd veldonderzoek inzake de relatie tussen de ruimtetemperatuur en de relatieve arbeidsprestatie in een kantooromgeving (www.iaqscience.lbl.gov/si/performance-temp-office.html). De experimenteel hiervoor afgeleide formule is

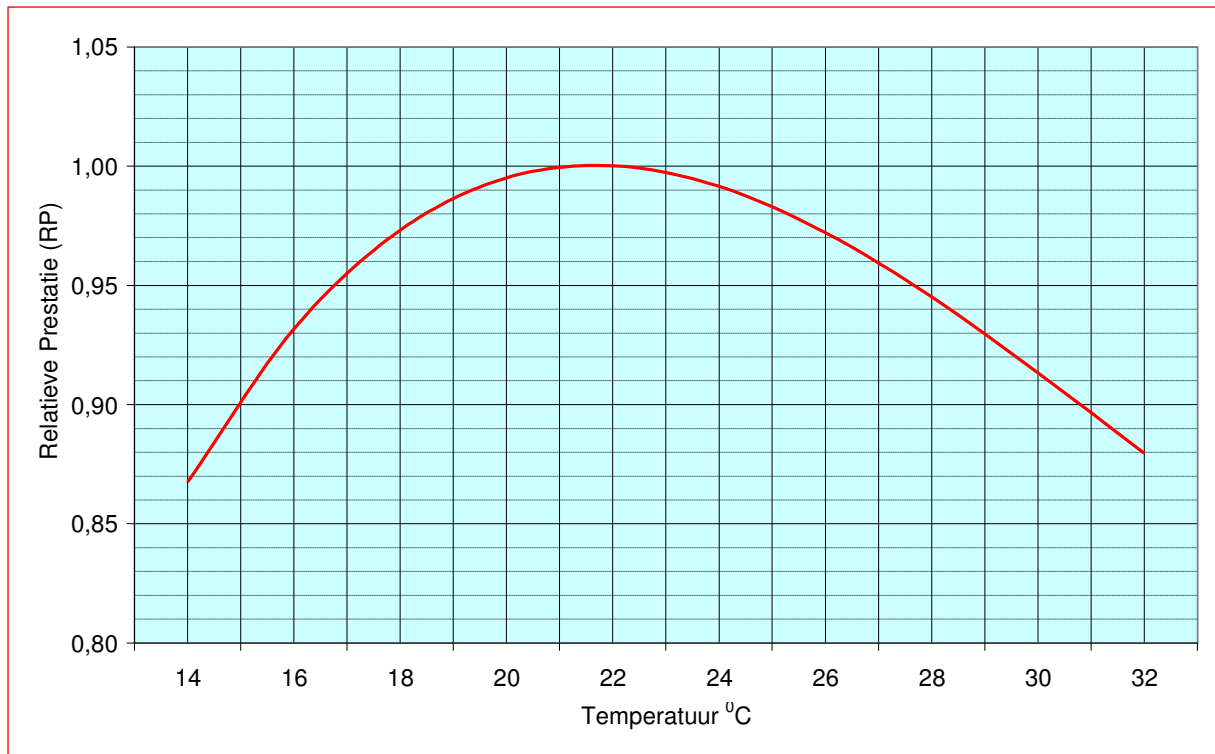
$$RP = -0,4685 + 0,1648 \cdot \theta_i - 5,827 \cdot \theta_i \cdot 10^{-3} + 6,23 \cdot \theta_i \cdot 10^{-5} \quad (7.2)$$

Waarin RP = relatieve arbeidsprestatie [-]
 θ_i = ruimtetemperatuur [$^{\circ}\text{C}$]

De figuur laat zien dat bij een ruimtetemperatuur van $\approx 22^{\circ}\text{C}$ de arbeidsprestatie maximaal is, en dat deze bij lagere en hogere luchttemperaturen vermindert.

Opgemerkt wordt dat het verband statistisch weliswaar significant is maar dat er onzekerheid bestaat over de omvang ervan in praktijksituaties. Het effect van de ruimtetemperatuur op de arbeidsprestatie kan aanzienlijk variëren met het soort werk, het binnenmilieu, de kleding en met gebouweigenschappen die invloed hebben op de kwaliteit van het binnenmilieu. Ook de mogelijkheden tot individuele regeling van de klimaatcondities op de werkplek hebben een aanzienlijke invloed; zie paragraaf 7.4 en 7.5.

¹ International Society for Indoor Air Quality and Climate



Figuur 7.8 – Relatie ruimtetemperatuur en arbeidsprestatie

7.8 Thermisch comfort en Productiviteit

Er is overvloedig wetenschappelijk aangetoond verband tussen thermisch comfort op de werkplek en de productiviteit van kantoremployees (Olesen, Bjarne 2010, Roelofsen, Paul 2010). Thermische onbehaaglijkheid leidt de aandacht van het werk af en genereert klachten die de onderhoudskosten verhogen. Warmte vermindert alertheid, verergert SBS symptomen en heeft een negatief effect op mentale taken.

De financiële aspecten hiervan zijn door REHVA in kaart gebracht (REHVA 2006). Enkele in het oog springende punten:

- Bij een ruimtetemperatuur $\geq 24^{\circ}\text{C}$ neemt de productiviteit af met $\approx 1,5\%$ per $^{\circ}\text{C}$;
- Individuele regelbaarheid van de temperatuur kan de productiviteit met $4\%..7\%$ verhogen;
- De terugverdientijd van investeringen ter verbetering van het binnenmilieu is in het algemeen minder dan 2 jaar.

Het ontwerp van klimaatinstallaties in kantoorgebouwen is vrijwel altijd gebaseerd op het comfortcriterium, dat met het oog op potentiële energiebesparingen steeds verder wordt opgerekt. Het adaptief thermisch behaaglijkheidsmodel (paragraaf 7.6) en de door verschillende onderzoekers gevoerde pleidooien voor het gebouw/klimaatmodel ALPHA zijn hiervan saillante voorbeelden.

Achtergronden van deze ontwikkeling zijn:

- 1 De voorstanders van het ALPHA model hebben overwegend een bouwfysische achtergrond en weinig affiniteit met installatietechniek.
- 2 Door het oprekken van de comfortcriteria wordt mechanische koeling geëlimineerd waardoor energiebesparing kan worden gerealiseerd.
- 3 Veel mensen hebben een aversie tegen airconditioning met als hoofdoorzaken:
 - Men kan zelf geen invloed uitoefenen op de ruimtetemperatuur;
 - Ramen zijn vaak niet te openen;
 - Het monotone achtergrondgeluid van de installatie;
 - De soms / vaak slechte werking van de installatie;
 - De soms / vaak matige luchtkwaliteit.

Het is zeer de vraag of een sociaal criterium als behaaglijkheid uit productiviteitoverwegingen wel juist is. Een behaaglijk binnenklimaat is een uitstekende “secundaire arbeidsvoorwaarde” maar

kantoorwerkers worden in de eerste plaats ingehuurd om optimaal te presteren. Daarom zou moeten worden uitgegaan van maximalisering van de productiviteit en de daarbij behorende klimaatcondities. Bevestiging van dit standpunt wordt gevonden bij een erkend praktijkdeskundige op dit gebied¹ die stelt

“...dat oververhitting in kantoorpanden erg veel geld kan kosten. Berekeningen gebaseerd op onderzoeken tonen aan dat bij een binnentemperatuur boven 25°C, bij elke graad stijging de arbeidsproductie met 10% daalt. Ervan uitgaande dat de binnentemperatuur in een gemiddelde zomer minimaal 10 dagen boven de 25°C ligt, dan kost een gebouw met 2000 medewerkers enkele miljoenen euro's aan productie. Maar ook het ontvangen en behandelen van comfortklachten in een gebouw met 2000 medewerkers waar het binnenklimaat niet goed is, kost aan inspanningen van facility managers al € 800.000” (Settels, Paul 2009)

Bestrijders van dit standpunt zijn er ook (Kurvers, S.R. e.a.2009). Zij stellen dat

“...er niet mag worden geconcludeerd dat de productiviteit lager is in ALPHA gebouwen omdat het ATG criterium (Adaptieve Temperatuur Grens) hogere temperaturen toestaat. Onderzoek waaruit blijkt dat de productiviteit het hoogst is bij een temperatuur van circa 22°C is niet uitgevoerd in free running omgevingen. Uit onderzoek blijkt dat de productiviteit het hoogst is bij neutrale temperaturen die hoger zijn dan in free running omgevingen, waardoor kan worden verwacht dat de productiviteit in free running omgevingen bij hogere temperaturen optimaal is dan in gekoelde omgevingen”.

Opgemerkt wordt dat Kurvers c.a. erkende adepten zijn van het adaptieve behaaglijkheidsmodel. Zij pleiten er overigens voor dat

“ Toekomstig onderzoek naar productiviteit dient dan ook in verschillende omgevingen te worden uitgevoerd, waarbij niet alleen de temperatuur, maar ook aspecten als comfort en luchtkwaliteit worden onderzocht”.

Een wetenschappelijk overzichtsartikel van TNO (Bluysen, Philomena 2010) stelt dat

“Productiviteit is afhankelijk van veel aspecten: welzijn, mentale drive, tevredenheid met het werk, technische competentie, carrièremogelijkheden, thuis/werk balans, relaties met anderen, persoonlijke omstandigheden, organisatorische zaken etc., en tot slot de omgevingsfactoren (buiten en binnenmilieu.

Het bepalen van het effect van een bepaalde factor op productiviteit in een gecontroleerde omgeving is moeilijk.....Ten eerste omdat productiviteit met zoveel aspecten is gerelateerd. En ten tweede omdat bij elk van de meetmethoden kanttekeningen zijn te plaatsen die de relevantie van de uitkomst twijfelachtig maakt.....”

Een interessante benadering van de relatie binnenmilieu en productiviteit is weergegeven in de formule (7.3)

$$WEP = 6,74 - 0,42 * E - 0,164 * JD - 0,05 * JS$$

(7.3)

Waarin

WEP = Werknemers Eigen Waardering van Productiviteit (9 puntsschaal)
E = Environment (7 puntsschaal)
JD = Job Dissatisfaction (7 puntsschaal)
JS = Job Stress (7 puntsschaal)

Hieruit zou blijken dat het binnenmilieu van groter belang is voor de productiviteit dan ontevredenheid over de baan of stress.

Het laatste woord over dit onderwerp is dus nog niet gezegd, maar in de discussies tekenen zich toch twee majeure aspecten af: de klimaatcondities op de werkplek en de mogelijkheden voor de individuele regeling van deze klimaatcondities. Beide zijn blijkbaar van belang voor het optimaliseren van de productiviteit.

¹ Paul Settels - European Ergonomist Safety Manager Health Service Consultant at ING HRN Health&Safety department.

Eén van de bekendste onderzoekers op het gebied van arbeidsproductiviteit komt tot de conclusie dat in moderne kantoorgebouwen met nauwe temperatuurgrenzen de mate waarin mensen de temperatuur op hun werkplek zelf kunnen instellen de meest bepalende factor is voor hun productiviteit (Wyon, David P. 2000). Het is daarom heel goed denkbaar dat als mensen de keuze hebben tussen een gebouw met centrale klimaatregeling zonder mogelijkheden voor individuele regeling, en een gebouw zonder klimaatregeling maar met individuele regelmogelijkheden, zij voor de tweede optie zullen kiezen. Het ligt voor de hand dat een gebouw met centrale klimaatregeling en met individuele regelmogelijkheden het beste zal scoren op de productiviteitsladder.

Het Earth, Wind & Fire klimaatconcept combineert de voordelen van klimaatregeling met die van natuurlijke ventilatie in het gebouw / klimaatmodel OMEGA – zie hoofdstuk...

Individuele regelbaarheid van de ruimtetemperatuur blijft bij dit alles een aspect van cruciaal belang. *Pleasure and Performance* (Brown, 2009) gaan dan hand in hand.

7.9 Luchtvochtigheid en thermisch comfort

Het is opvallend dat in de beschouwingen over thermische comfort in ISSO 74 de luchtvochtigheid in het geheel niet aan de orde komt. Ook in andere publicaties en normen speelt deze nauwelijks een rol. Blijkbaar is in Nederland de overheersende opvatting dat de relatieve vochtigheid in het binnenmilieu niet van belang is. Een kort overzicht:

- NEN-ISO 7730 stelt in Annex D (informative):
“It is recommended that the relative humidity be kept between 30% and 70%. The limits are set to decrease the risk of unpleasantly wet or dry skin, eye irritation, static electricity, microbial growth and respiratory diseases”.
- ASHRAE Standard 55-2002 (ASHRAE 2002) geeft een bovengrens aan van $x = 12 \text{ g.kg}^{-1}$. Een ondergrens wordt niet vermeld.
- DIN 1946 Teil 2 stelt een bovengrens van $x \approx 11,5 \text{ g.kg}^{-1}$ en 60% RV bij een ondergrens van 30% RV, die echter incidenteel mag worden over- en onderschreden.

Het thermisch comfortgebied volgens bovenstaande grenzen is aangegeven in het Mollier diagram figuur 7.7. De maximum luchtvochtigheid bij $\theta_i = 28^\circ\text{C}$, uitgedrukt in g.kg^{-1} , is bij 70% RV volgens NEN-ISO 7730: $x = 16,9 \text{ g.kg}^{-1}$ en bij 60% RV volgens ASHRAE en DIN: $x = 14,5 \text{ g.kg}^{-1}$.

7.10 Behaaglijkheid is meer dan thermisch comfort

In het thermo-fysiologisch model van NEN-ISO 7730 komt het belang van de luchtvochtigheid nauwelijks of niet tot uitdrukking. De invloed van de luchtvochtigheid op de behaaglijkheid van het binnenmilieu is daarom in het vakgebied van de klimaattechniek ondergewaardeerd (Bronsema 1997). Behaaglijkheid is echter meer dan thermisch comfort. Naast een als onbehaaglijk ervaren vochtige en natte huid bij een hoge relatieve vochtigheid, heeft vooral onvoldoende koeling van de slijmvliezen in de bovenste luchtwegen een negatief effect op de ervaren behaaglijkheid en de luchtkwaliteit. Verder spelen stress en gezondheidfactoren een rol – zie paragraaf 7.11 en 7.12.

De ontwerp-ruimteconditie moet met al deze factoren rekening houden en dient met zorgvuldigheid worden vastgesteld. Dit geldt temeer omdat in de Klimaatcascade[©] van het Geo-Klimaatconcept[©] lucht wordt gekoeld door direct contact met het koelwater.

7.11 Niet thermische behaaglijkheidsfactoren

Dat behaaglijkheid meer omvat dan het in thermisch evenwicht zijn met de omgeving wordt intuïtief wel aanvoeld. Welke factoren hierbij echter een rol spelen, en in hoeverre deze door het binnenklimaat kunnen worden beïnvloed, is binnen het vakgebied van de klimaattechniek nauwelijks bekend. Op bepaalde aspecten heeft wetenschappelijk onderzoek momenteel al verassende resultaten opgeleverd, maar op andere punten zijn onderzoekers nog niet veel verder dan het testen van hun theorieën. Een bekende onderzoeker schrijft:

“The physiological and energy balance considerations...would indicate there is neither an upper or lower humidity limit in terms of thermal sensation. But laboratory, field and personal experiences suggest that there are humidity limits for comfort and acceptability” (Berglund 1998).

En een onderzoeker uit het team van Fanger schrijft:

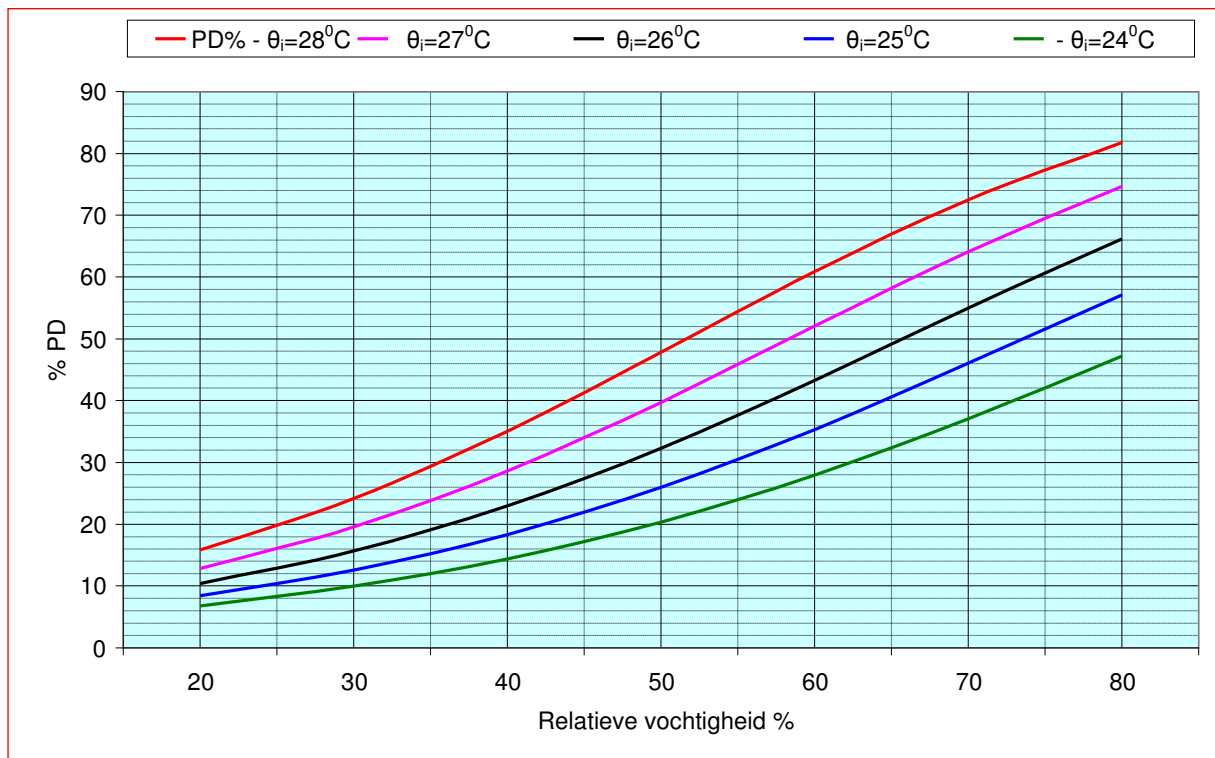
“At present, the avenues by which humidity affects comfort are not completely known. A high level of air humidity may cause discomfort in spite of thermal neutrality. No human receptors for recording air humidity are known; therefore, humidity-related discomfort may be ascribed to other indirect factors” (Toftum 1999).

Als andere indirecte factoren, zelfstandig of in combinatie, worden genoemd:

- Een onbehaaglijk hoge vochtigheid van de huid (Berglund 1998, Toftum 1999);
- Een onaangename natheid van de huid (Berglund 1998);
- De interactie van een vochtige huid en de kleding (Berglund 1998, Toftum 1999);
- Onvoldoende koeling van de slijmvliezen in de bovenste luchtwegen (Toftum 1999); zie figuur 7.9 die de statistische relatie tussen de relatieve vochtigheid, de luchttemperatuur en de ontevredenheidsscore weergeeft, uitgedrukt in Percentage Dissatisfied (PD). De experimenteel hiervoor afgeleide formule is

$$PD = 100 / (1 + \exp(-3,58 + 0,18(30 - \theta_i) + 0,14(42,5 - 0,01.RV)))$$

(7.4)



Figuur 7.9 – Percentage Dissatisfied (PD) door onvoldoende koeling van de slijmvliezen

Figuur 7.9 laat zien dat voor een gebouw/klimaattype ALPHA met $\theta_i = 28^\circ\text{C}$ en 60% RV de ontevredenheidsscore $PD \approx 60\%$ is. Bij type “BETA” met $\theta_i = 25^\circ\text{C}$ en 60% RV is de PD score met 35% aanzienlijk lager.

Voor een nadere toelichting op de vermelde factoren wordt ook verwezen naar (Bronsema 2002).

7.12 Stressfactoren

Dit hoofdstuk gaat over fysieke behaaglijkheid op de werkplek, vooral de thermische aspecten daarvan, maar comfort is veel meer dan een thermische kwestie (ASHRAE 1996). Fysiologische aspecten als verlichting, ruimteakoestiek en de ergonomie van de werkplek, potentiële stressfactoren, spelen ook een belangrijke rol. Mogelijkheden voor aanpassing van de werkplekomstandigheden aan de individuele behoefte van mensen, bijvoorbeeld door individuele regeling van het klimaat en werkplekverlichting, kan sommige problemen voorkomen. Het laagfrequente ventilatorgeruis, een

stressfactor van betekenis in een interieur met mechanische ventilatie, treedt bij het *Earth, Wind & Fire* concept niet op.

Psychologische en persoonlijke aspecten als werkdruk, arbeidsvreugde, privacy van de werkplek, en zelfs de kwaliteit van de koffie hebben ook invloed op de comfortbevinding maar deze vallen uiteraard buiten de verantwoordelijkheid van de ontwerper.

Ruime afmetingen van de werkplek hebben naar het oordeel van de auteur een stressverminderende en comfortverhogende invloed. De ontwikkelingen om hierop te besparen ter vermindering van het bruto vloeroppervlak zouden wel eens niet op kunnen wegen tegen de inherente productiviteitsvermindering.

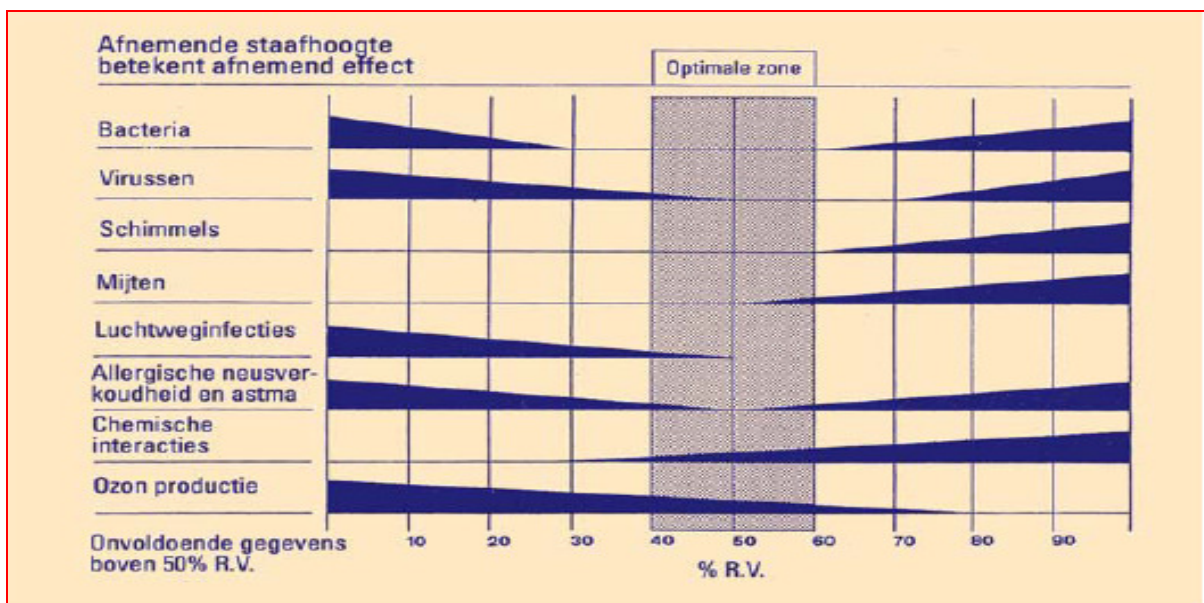
7.13 Gezondheidsfactoren

Naast de directe invloed op de thermische behaaglijkheid heeft de luchtvochtigheid ook complexe maar niet minder belangrijke effecten op de gezondheid van mensen. Vocht is gunstig voor de overlevingskansen en de ontwikkeling van biologische verontreinigingen zoals bacteria, virussen, schimmels en mijten. Ziektekiemen kunnen allergische reacties teweegbrengen zoals ademhalingsproblemen, neusverkoudheid, luchtweginfecties en astma. Ozon en sommige chemische stoffen in het interieur reageren met waterdamp in de lucht en kunnen huid-, oog-, en luchtwegirritaties veroorzaken of versterken. Al deze factoren zijn gecombineerd in figuur 7.10, waaruit blijkt dat op basis van gezondheidsoverwegingen (Sterling 1985) de optimale relatieve vochtigheid tussen 40% en 60% RV ligt.

Sommigen vinden deze grafiek te simplistisch omdat weegfactoren voor de verschillende gezondheidsaspecten ontbreken en de bouwfysische uitvoering van gebouwen in relatie tot het buitenklimaat niet tot uitdrukking worden gebracht. De verrassende eenvoud en de heldere weergave van de samenhang tussen de verschillende factoren heeft deze grafiek echter een grote bekendheid gegeven

7.14 Conclusies m.b.t. de Relatieve Vochtigheid

De Relatieve Vochtigheid van de lucht heeft weinig invloed op de thermische behaaglijkheid. Op basis van niet-thermische behaaglijkheidsfactoren (par. 7.11) en gezondheidsfactoren (par. 7.12) wordt voor de ontwikkeling van de Klimaatcascade[®] –zie deelrapport (III) uitgegaan van een maximum Relatieve Vochtigheid van 60%.



Figuur 7.10 – Gezondheidsaspecten en relatieve vochtigheid volgens Sterling

7.15 Buitenklimaatcondities

In de NEN 5060:2008 “Hygrothermische eigenschappen van gebouwen – Referentieklimaatgegevens” zijn actuele referentieklimaatgegevens van De Bildt opgenomen vanuit de klimaatdata over de

periode 1986 – 2005. Deze zijn gegenereerd op basis van de in NEN-EN-ISO 15927 (NEN 2008) opgenomen procedures, en gelden voor een aaneensluitende periode van 20 jaar, waarbij de dataset eindigt met een jaar als veelvoud van 5. Dit impliceert dat na 2010 de referentieklimaatgegevens zullen moeten worden herzien.

Bijlage B.2 van NEN 5060:2008 omvat een datafile met klimaatgegevens die bedoeld zijn voor simulatieberekeningen van temperatuuroverschrijdingen (TO) - en warmte-/koudebehoefte. Er zijn 3 datafiles opgenomen voor respectievelijk 5%, 2% en 1% over-/onderschrijding. Deze data zijn gebruikt om met behulp van dynamische simulaties de prestaties van de koelwater en het GEO-Klimaatconcept[®] te analyseren –zie deel (III).

Figuur 7.11 brengt de combinaties van temperatuur en relatieve vochtigheid in beeld voor de datafile met 1% over-/onderschrijding. Volgens frequentietabellen van de uurwaarden van de temperatuur van het KNMI –distributief in aantallen- (www.knmi.nl/klimatologie/frequentietabellen/uur.cgi) zijn over een periode van 20 jaar (1981 – 2000) in het tijdvak 09.00 tot 20.00 uur de volgende temperaturen geregistreerd:

> 26,9^oC → 678 uur = 33,9 h.a⁻¹ = 0,85%
> 27,9^oC → 484 uur = 24,2 h.a⁻¹ = 0,60%
> 28,9^oC → 358 uur = 17,9 h.a⁻¹ = 0,45%

Voor analytische berekeningen gewerkt met een grenswaarde van 28^oC.

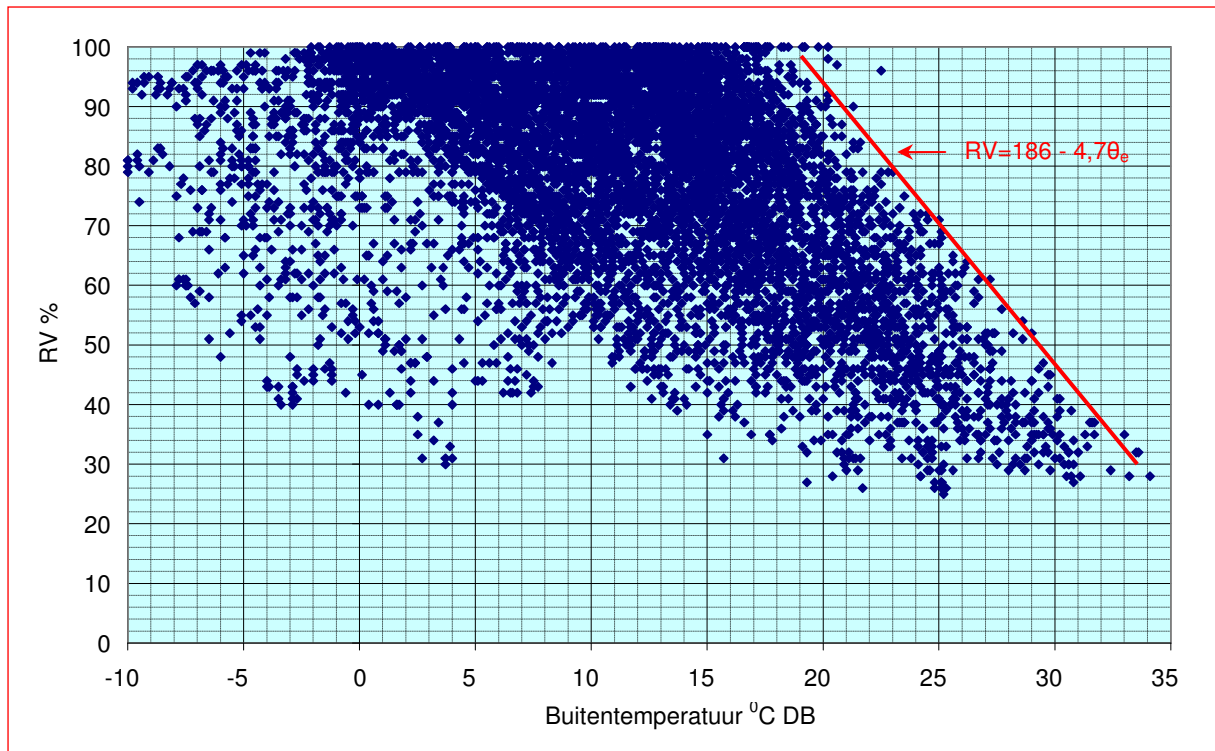
De statistische relatie tussen de buitentemperatuur en de maximum relatieve vochtigheid kan globaal worden uitgedrukt in de formule

$$RV = 186 - 4,7\theta_e$$

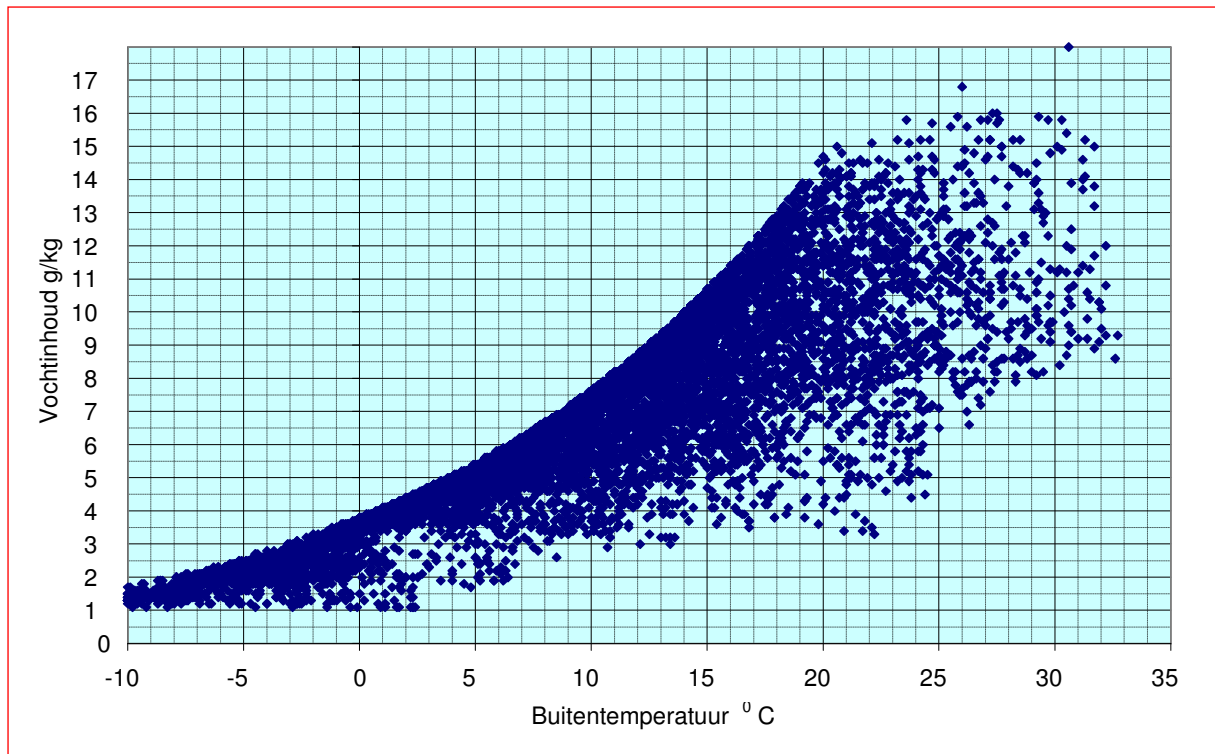
(7.5)

Waarin RV = relatieve vochtigheid [%]
 θ_e = buitentemperatuur [^oC]

Figuur 7.12 brengt de combinaties van temperatuur en vochtinhoud in beeld voor de datafile met 1% over-/onderschrijding.



Figuur 7.11 – Buitentemperatuur θ_e en Relatieve Vochtigheid RV volgens NEN 5060: 2008 –B2 -5%



Figuur 7.12 – Buitentemperatuur θ_e en Vochtinhoud volgens NEN 5060: 2008 –B2 -5%

7.16 Maximum buitenconditie

In ISSO 74 wordt geen maximum buitentemperatuur gespecificeerd maar een “gewogen gemiddelde buitentemperatuur” $\theta_{e,ref}$, die wordt gedefinieerd als

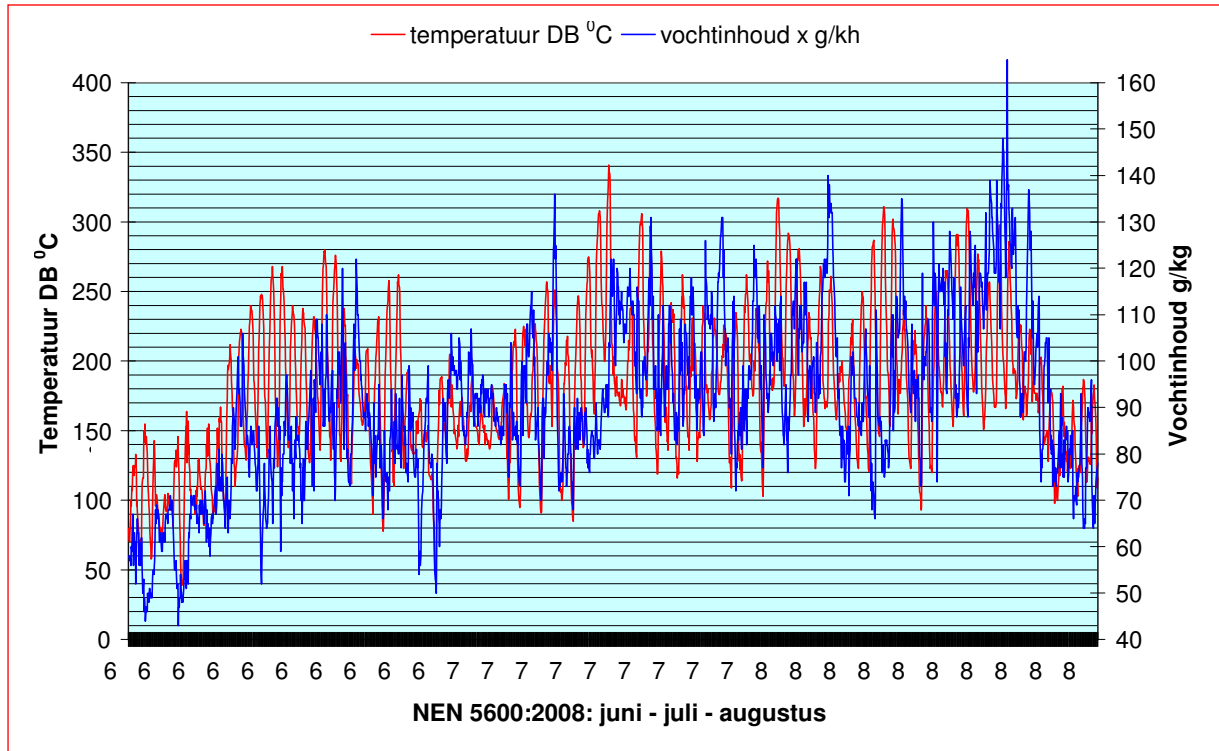
$$\theta_{e,ref} = \frac{1 * \theta_{vandaag} + 0,8 * \theta_{gisteren} + 0,4 * \theta_{eergisteren} + 0,2 * \theta_{eer-eergisteren}}{2,4}$$

- (7.6)
- Waarin $\theta_{e,ref}$ = gewogen gemiddelde buitentemperatuur [$^{\circ}$ C]
 $\theta_{vandaag}$ = gemiddelde etmaaltemperatuur buiten, vandaag (gemiddelde van de maximum en de minimum temperatuur)
 $\theta_{gisteren}$ = gemiddelde etmaaltemperatuur buiten, gisteren
 $\theta_{eergisteren}$ = gemiddelde etmaaltemperatuur buiten, eergisteren
 $\theta_{eer-eergisteren}$ = gemiddelde etmaaltemperatuur buiten, eer-eergisteren

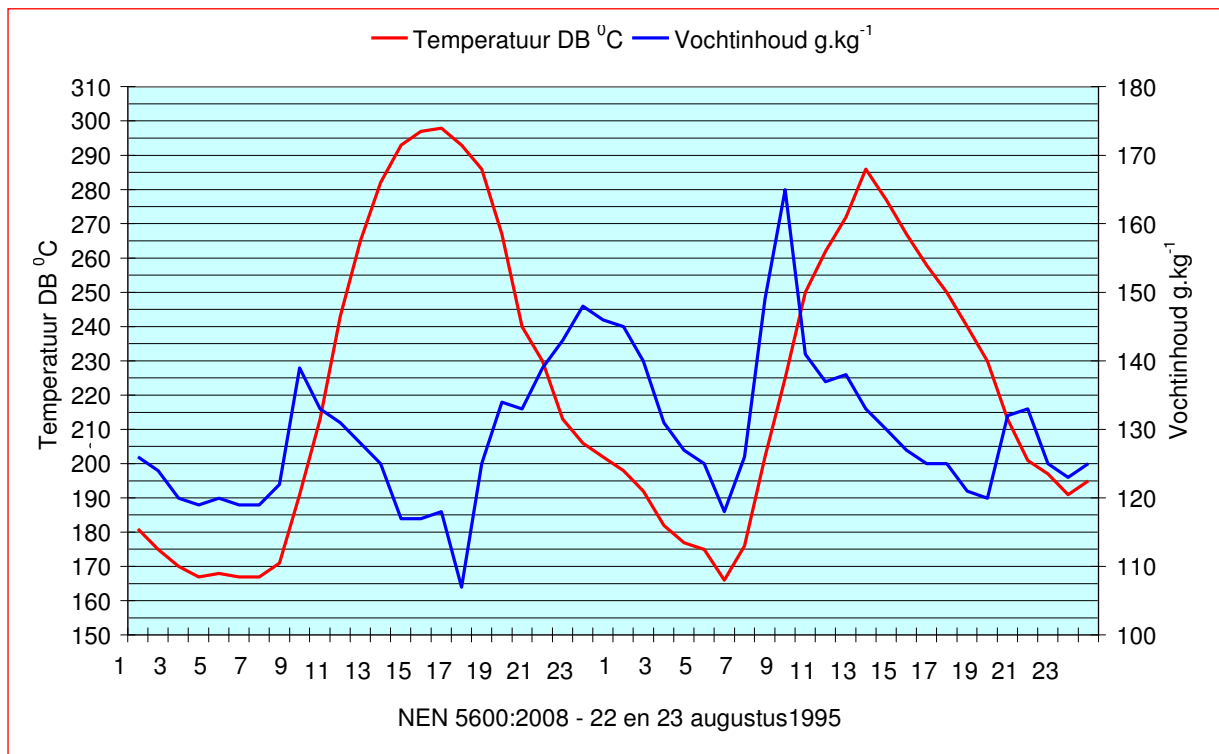
De prestaties van het Geo-Klimaatconcept[®] zijn met behulp van gebouwssimulatieberekeningen bepaald, waarvoor formule (7.6) wordt gebruikt. Voor de globale capaciteitsberekeningen van de Klimaatcascade[®] in deel (III) is uitgegaan van een maximum buitentemperatuur $\theta_e = 28^{\circ}$ C.

De maximum relatieve vochtigheid bij een buitentemperatuur van 28° C is volgens formule (5.3) $\approx 54,4\%$ en de bijbehorende absolute luchtvochtigheid is $13,1 \text{ g.kg}^{-1}$ (tabel 1.2-15 Handboek Installatietechniek)

Figuur 7.13 brengt de combinaties van DB temperatuur en vochtinhoud in beeld voor de zomermaanden juni, juli en augustus van NEN 5600: 2008. Figuur 7.14 is een close up van twee warme en vochtige dagen uit deze periode.



Figuur 7.13 – Zomermaanden van NEN 5600:2008



Figuur 7.14. Twee extreme dagen

15. VERANTWOORDING VAN DE ONDERZOEKSDOELEN

8.1 Inleiding, positionering en demarcatie van het onderzoek

Er zijn vele manieren om het energiegebruik van gebouwen te beperken. Sinds enkele decennia is dit ook een intensief onderzoeksterrein geweest, vooral gericht op:

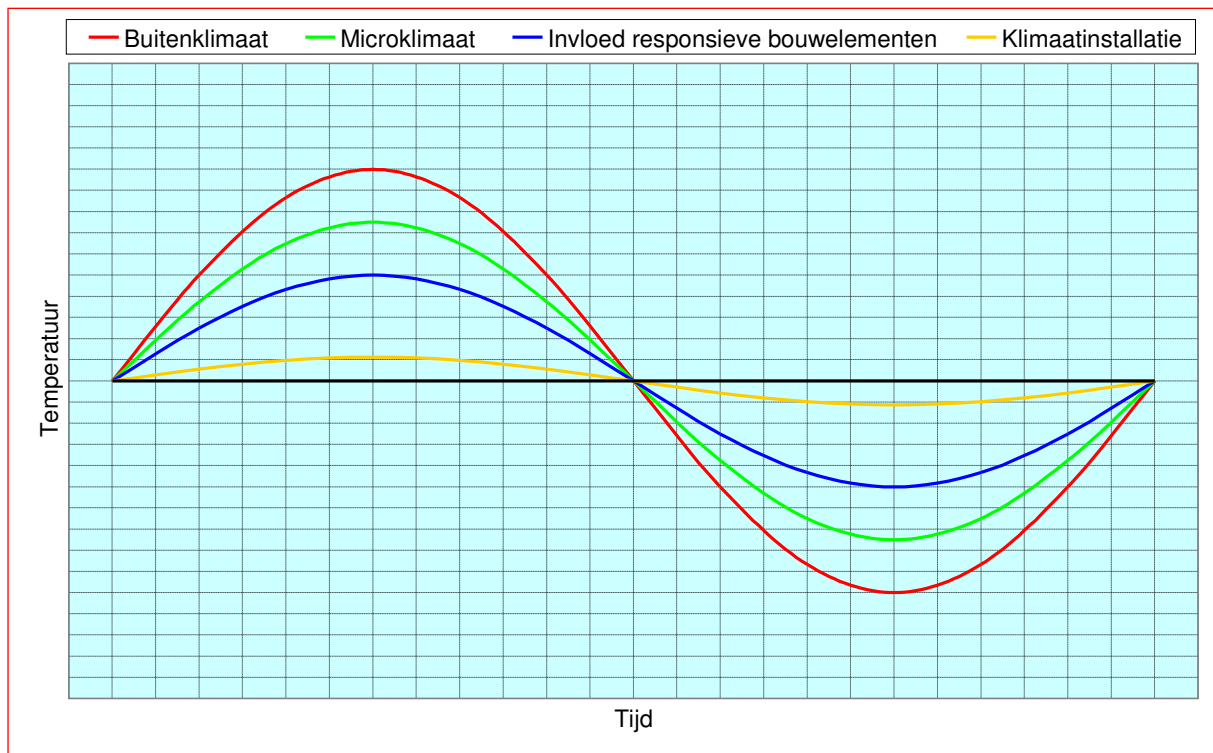
- Thermische verbeteringen van de gebouwmhulling, gevels, vloeren en daken.
- Efficiencyverbetering van transparante geveldelen, isolatie, zonwering en daglicht.
- Efficiencyverbetering van klimaatinstallaties, ventilatie, verwarming, koeling en verlichting.

Integratie van responsieve bouwelementen en klimaatinstallaties wordt beschouwd als de voornaamste strategie voor het realiseren van verdere energiebesparingen. Met responsief wordt in deze context de dynamische afstemming bedoeld van fysische eigenschappen en energetische prestaties bij wisselende buiten- en ruimtecondities. Met deze strategie worden geen afzonderlijke elementen en subsystemen meer geoptimaliseerd, maar ontstaan geïntegreerd ontworpen bouwconcepten. Deze maken optimaal gebruik van natuurlijke middelen voor klimaatregeling en dagverlichting en integratie van omgevingsenergie (IEA Annex 44 2010).

Als responsieve bouwelementen worden genoemd

- Geavanceerde geïntegreerde gevels, o.a. dubbele huidgevels met ventilatie.
- Benutting van de thermische massa van bouwdeelen voor de opslag van warmte en koude, alsmede bouwdeelactivering.
- Benutting van de thermische capaciteit van de aardmassa, o.a. door grondluchtcollectoren.
- Dynamische isolatiesystemen in wanden, bijvoorbeeld ademende wanden voor ventilatie.
- Phase Change Materials, PCM geïntegreerd in bouwelementen.

Een geïntegreerd bouwconcept wordt volgens Annex 44 gevormd door de synergie van responsieve bouwelementen en energie- en klimaatsystemen in één systeem waarmee optimale milieuprestaties kunnen worden gerealiseerd. Dit wordt geïllustreerd in figuur 8.1 een variant op figuur 5.1 *Flattening the curve* van Olgyay.



Figuur 8.1 - Flattening the curve volgens Olgyay

Het Earth, Wind & Fire concept mag niet worden geïdentificeerd met het geïntegreerde bouwconcept volgens Annex 44, maar kan als buitencategorie hiervan worden beschouwd. De nadruk ligt bij dit

concept niet in de eerste plaats op energiebesparing maar op de benutting van de omgevingsenergie van zon, wind en aardmassa voor het realiseren van een hoogwaardige klimaatregeling. Toepassing van responsieve bouwelementen uit het repertoire van Annex 44 als eerste stap van de *Trias Ecologica*, ligt daarom wel voor de hand, maar is niet een eerste vereiste¹. Het Earth, wind & Fire concept richt zich op stap 2 van de *Trias Ecologica* “Gebruik zoveel mogelijk duurzame energiebronnen” –zie paragraaf 1.1.

Overigens biedt het Earth, Wind & Fire concept, toegepast in combinatie met bio-klimatische of klimaatactieve architectuur met een hoge BREEAM-NL of GreenCalc milieuscore, de grootste milieuvoordelen. Een maximale milieuprestatie van het gebouw gaat dan gepaard met optimale condities van het binnenmilieu. Deze combinatie is eerder aangeduid als “*klimaatactieve architectuur van de 2^e generatie*” – zie paragraaf 1.13.

Tabel 8.1 brengt de positionering en de demarcatie van het Earth, Wind & Fire 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 8.1 – Positionering en demarcatie van het onderzoek

8.2 Benutting van omgevingsenergie

Omgevingsenergie kan op verschillende manieren worden ingezet voor de klimaatregeling van gebouwen. Onderscheid kan worden gemaakt tussen

- Actieve, passieve en hybride systemen -zie paragraaf 8.2.1.
- Gescheiden en geïntegreerde systemen –zie paragraaf 8.2.2

8.2.1 Actieve, passieve en hybride systemen.

Actieve systemen zetten energie uit de omgeving om in elektrische energie of warmte. Met behulp van PV cellen en windturbines kunnen zonne-energie en windenergie worden omgezet in elektrische energie, die vervolgens kan worden gebruikt voor de aandrijving van ventilatoren en pompen. Met behulp van thermische zonnecollectoren kan zonne-energie worden omgezet in warmte voor gebouwverwarming. Omzettings- en rendementsverliezen zijn bij actieve systemen onvermijdelijk.

Passieve systemen gebruiken de omgevingsenergie direct voor de klimaatregeling van een gebouw. Zoninstraling door transparante geveldelen, en ventilatie via gevelroosters door winddruk zijn hiervan voorbeelden. Er treden hierbij geen omzettings- en rendementsverliezen op zoals bij actieve systemen. Earth, Wind & Fire is voor wat betreft benutting van omgevingsenergie een hybride concept.

¹ Overigens kunnen zowel het Ventecdak[®] als de Zonneschoorsteen of Zonnefaçade[®] als responsieve bouwelementen worden beschouwd.

- Actieve elementen zijn de windturbines in de overdrukkamer en de PV-folie op het Ventecdak[®]. Ook de Zonneschoorsteen of Zonnefacade[®] waarin zonnewarmte wordt geogst valt onder deze categorie.
- Passieve elementen zijn het Ventecdak[®] waarmee positieve en negatieve winddrukken worden benut voor ventilatie. Ook de Zonneschoorsteen of Zonnefacade[®] heeft als afzuigsysteem passieve eigenschappen.
- Een hybride passief/actief element is de Klimaatcascade[®]. Pompenergie wordt hierbij ingezet om gekoeld water naar de top van de cascade te voeren, waarna de zwaartekracht zijn werk doet om ventilatielucht in beweging te zetten en te koelen of te verwarmen in een overigens passieve cascade.

8.2.2 Toegevoegde en geïntegreerde systemen

Het gebruik van omgevingsenergie in gebouwen wordt veelal gerealiseerd met behulp van losse elementen die aan een gebouw worden toegevoegd. Voorbeelden hiervan zijn zonnepanelen, vrijstaande windturbines, geboorde bodemabsorbers e.d.

Bij geïntegreerde concepten zijn deze elementen onderdeel van het gebouw. Voorbeelden hiervan zijn zonneschoorstenen, geïntegreerde zonnepanelen in gevel of dak, energiedaken voor warmtepompen, actieve heipalen etc. Ook het Ventecdak[®] is een integraal onderdeel van een gebouw.

Het onderzoek *Earth, Wind & Fire* is gericht op passieve, actieve en hybride systemen voor de benutting van omgevingsenergie in geïntegreerde bouwconcepten. Toegevoegde elementen en systemen zijn niet in beschouwing genomen.

8.3 Thema Earth

Het thema Earth geeft uitdrukking aan de relatie tussen klimaatregeling en de invloed van de aardmassa, in een bepaald verband ook wel GEO genoemd. Het op deze relatie gebaseerde klimaatconcept is daarom het Geo-Klimaatconcept[®] genoemd.

Deze invloed komt tot uitdrukking in

- De zwaartekracht, die een waterval kan veroorzaken in een Klimaatcascade[®] en lucht in beweging kan zetten voor ventilatie van gebouwen –paragraaf 8.3.1.
- De mogelijkheden die de aardbodem biedt als warmte- en koudebron en voor opslag van warmte- en koude –paragraaf 8.3.2.
- De mogelijkheden om warmte aan diepe aardlagen te onttrekken, de zgn. geothermische energie paragraaf 8.3.3.

Het onderzoek gaat uit van integratie van architectuur en installatietechniek en heeft daarom alleen betrekking op gebouwgebonden voorzieningen

8.3.1 Benutting van de zwaartekracht

Als in een open systeem gewichtsverschillen in een vloeisof of gas aanwezig zijn ontstaan onder invloed van de zwaartekracht circulatiestromingen. Het zwaardere medium stroomt benedenwaarts met verdringing van het lichtere. Bekend zijn de vroege centrale verwarmingssystemen die werkten met natuurlijke circulatie, ook wel thermo-syfon genoemd. De drijfkracht van deze stromingen is evenredig met de gewichtsverschillen, die bepaald wordt door verschillen in dichtheid en door de hoogte van de kolom.

In het *Earth, Wind & Fire* concept wordt een gewichtsverschil tot stand gebracht tussen twee verticale kolommen. Enerzijds wordt in de Klimaatcascade[®], die als toevoerschacht dient voor de ventilatielucht, een emulsie gecreëerd van lucht en water, die een grotere dichtheid heeft dan droge lucht. Deze emulsie wordt in het koelseizoen tevens gekoeld waardoor de dichtheid ten opzichte van droge lucht nog toeneemt.

Anderzijds wordt in de Zonneschoorsteen of Zonnefacade[®], die als afvoerschacht voor de ventilatie dient, de lucht door zonnestraling verwarmd. Door het temperatuurverschil tussen toevoerlucht en afvoerlucht ontstaat een stroming waarbij de koelere verse lucht de gebruikte afvoerlucht verdringt: een natuurlijk ventilatiesysteem.

Het is duidelijk dat de drijfkracht van dit ventilatiesysteem evenredig toeneemt met de hoogte van het gebouw. Inherent aan het systeem is dan ook dat de ventilatielucht boven in het gebouw wordt

aangezogen, wat tevens nog het voordeel met zich meebrengt dat op deze locatie de luchtkwaliteit meestal optimaal is, en dat tevens gebruik kan worden gemaakt van de relatief hoge windsnelheid hier ter plaatse.

Een tweede benutting van de zwaartekracht vindt plaats in de Klimaatcascade[®]. Aan de top worden waterdruppels in de cascade gespreid, die onder invloed van de zwaartekracht naar beneden vallen. De impuls van deze druppels wordt gedeeltelijk overgedragen aan de stromende lucht.

8.3.2 Benutting van de thermische capaciteit van de aardmassa

De thermische capaciteit van de aardmassa onder of naast een gebouw kan direct of indirect worden benut. Bij actieve systemen vindt de koppeling tussen aardmassa en gebouw plaats via een tussenmedium, meestal water, waardoor warmte of koude aan de bodem kan worden onttrokken, of in het geval van warmte- of koudeopslag, vanuit het gebouw aan de bodem kan worden toegevoerd.

Voorbeelden hiervan zijn

- Lange termijn warmte en koudeopslag in aquifers.
- Gebruik van de bodem als energieabsorber met behulp van verticale bodemwarmtewisselaars of actieve heipalen¹.

Dergelijke actieve systemen zijn flexibel en goed regelbaar. In het Geo-Klimaatconcept[®] wordt gebruik gemaakt van lange termijn opslag van warmte uit de Zonneschoorsteen of Zonnefacade[®]. De ventilatielucht wordt gekoeld met koude uit de bodem.

Een passieve benutting van de thermische capaciteit van de aardmassa is mogelijk met behulp van grondluchtcollectoren, die op een bepaalde diepte worden ingegraven. Door deze collectoren wordt de ventilatielucht aangezogen, die hierbij 's zomers wordt gekoeld en 's winters verwarmd.

Deze systematiek is niet verenigbaar met het *Earth, Wind & Fire* concept, omdat hierbij de ventilatielucht aan de top van een gebouw moet worden aangezogen; zie boven. Ook overigens kennen grondluchtcollectoren verschillende nadelen waardoor ze in een gezond gebouw beter niet kunnen worden toegepast. Vooral de inwendige vervuiling van de collectoren, 's zomers vaak in combinatie met condensatie uit vochtige ventilatielucht veroorzaakt een verslechtering van de ervaren luchtkwaliteit.

Actieve benutting van de thermische capaciteit van de aardmassa met behulp van een tussenmedium is aanzienlijk effectiever.

8.3.3 Geothermische energie

Aardwarmte of geothermische energie is de energie die zich bevindt in de diep in de aarde gelegen warmtebronnen. De energie kan worden gewonnen door gebruik te maken van het temperatuurverschil tussen de aardoppervlakte en diep in de aarde gelegen warmte.

Op bepaalde locaties komt geothermische energie in aanmerking voor warmtelevering aan gebouwen, echter niet op kleinschalig gebouwniveau, en zeker niet als bivalent of multivalent systeem tezamen met warmteopslag uit de Zonneschoorsteen of Zonnefacade[®]. Het valt ook buiten de geïntegreerde ontwikkeling van architectuur, bouwtechniek en klimaattechniek die in het *Earth, Wind & Fire* concept wordt nagestreefd.

8.4 Thema Wind

Het thema Wind geeft uitdrukking aan de relatie tussen klimaatregeling en de wind, die zowel positieve als negatieve aspecten heeft; zie figuur 2.2. In de gebouwde omgeving kan de wind in positieve zin worden benut voor

- Actieve energieopwekking met behulp van windturbines –paragraaf 8.4.1.
- Windgedreven natuurlijke ventilatie –paragraaf 8.4.2.

8.4.1 Actieve energieopwekking met behulp van windturbines

Voor toepassing in de gebouwde omgeving zijn speciale Urban Turbines in ontwikkeling. Deze kunnen in woonwijken en op kantoren en andere gebouwen geplaatst worden. Deze Urban Turbines zijn aangepast aan de windeigenschappen, geluid- en esthetische eisen van de gebouwde omgeving.

¹ Heipalen met geïntegreerde energieabsorber

De ontwikkeling van dit type windturbines kent een nog zeer korte historie. De activiteiten van de Dutch Wind Group van de TU Delft zijn in 2009 beëindigd –zie deelrapport (II).

Het Earth, Wind & Fire concept is gericht op de geïntegreerde ontwikkeling van architectuur, bouwtechniek en klimaattechniek. In de overdrukkamer van het Ventecdak[®] aangebrachte windturbines voldoen aan deze doelstelling en vallen hierdoor in principe binnen de scope van het onderzoek. Deze optie is slechts rekenkundig uitgewerkt en zal in een vervolgonderzoek nader worden geanalyseerd – zie deelrapport (II).

8.4.2 Windgedreven natuurlijke ventilatie

Wind kan, mits goed toegepast, een goede drijfkracht zijn voor natuurlijke ventilatie. Natuurlijke ventilatie bij hoogbouw staat wereldwijd in de belangstelling. Onderzoek op dit gebied heeft vooral betrekking op ventilatie via de gevel met behulp van al dan niet “intelligente” dubbele huidgevels (IEA Annex 44) –zie paragraaf 11.2 van deelrapport (II). Een toepassing van dit concept in combinatie met een Zonneschoorsteen of Zonnefaçade[®] als afzuigstelsel wordt beschreven in hoofdstuk 13.

De grootste problemen met natuurlijke ventilatie via de gevel zijn de regelbaarheid van de ventilatiecapaciteit bij wisselende winddrukken en tochtproblemen in de gevelzone bij lage buitentemperaturen. Deze problemen zijn weliswaar oplosbaar – zie deelrapport (II), maar het onderzoek *Earth, Wind & Fire* heeft zich geconcentreerd op de benutting van winddrukken in het Geo-Klimaatconcept[®] –zie deelrapport (III). Positieve winddrukken worden hierbij ingezet voor centrale toevoer van ventilatielucht via de Klimaatcascade[®] en negatieve winddrukken voor het afzuigen van lucht via de Zonneschoorsteen of Zonnefaçade[®] –zie deelrapport (I).

Na evaluatie van verschillende mogelijkheden is gekozen voor het dak als windvanger waarbij de meest kansrijk geachte optie, het Ventecdak[®], is gekozen voor verdere ontwikkeling.

8.5 Thema Fire

Fire is hier gebruikt als metafoor voor de zon. In de gebouwde omgeving kan zonne-energie op verschillende manieren worden benut. Onderscheid kan worden gemaakt tussen

- Passieve en Actieve systemen –paragraaf 8.5.1.
- Indirecte en directe systemen – zie paragraaf 8.5.2.
- Gescheiden en geïntegreerde systemen – zie paragraaf 8.5.3

8.5.1 Passieve en Actieve systemen

Passieve benutting van zonnewarmte, door zoninstraling via de ramen, heeft in kantoorgebouwen vaak oververhitting tot gevolg en verdient daarom, behoudens bij sommige toepassingen van “intelligente” dubbele huidgevels, nauwelijks aanbeveling.

Het *Earth, Wind & Fire* onderzoek is derhalve uitsluitend gericht op actieve benutting van zonne-energie. Enerzijds thermisch met behulp van een Zonneschoorsteen of Zonnefaçade[®] -zie deelrapport (I). Anderzijds fotonvoltaïsch met behulp van PV folie op het Ventecdak[®] -zie deelrapport (II).

8.5.2 Indirecte en directe concepten

Het Earth, Wind & Fire concept is voor wat betreft benutting van omgevingsenergie een hybride concept. Zonne-energie wordt zowel indirect benut met behulp van PV folie op het Ventecdak[®] als direct in de Zonneschoorsteen of Zonnefaçade[®].

8.5.3 Toegevoegde en geïntegreerde concepten

Zoals in paragraaf 8.2.2 aangegeven is het onderzoek *Earth, Wind & Fire* uitsluitend gericht op geïntegreerde bouwconcepten. De Zonneschoorsteen of Zonnefaçade[®] en de PV folie op het Ventecdak[®] staan daarom in het onderzoek centraal.

Toegevoegde elementen zoals niet-geïntegreerde zonnecellen, thermisch en/of fotonvoltaïsch, zijn zeer goed mogelijk maar vallen buiten de scope van het onderzoek. Dit geldt eveneens voor zongedreven absorptiekoeling.

9. MODELLEREN EN SIMULEREN

9.1 Inleiding

Een belangrijke doelstelling van het onderzoek “Earth, Wind & Fire” is klimaatingenieurs en architecten te voorzien van betrouwbare ontwerpgegevens voor dit innovatieve concept van klimaatregeling. Pas als deze beschikbaar zijn zullen opdrachtgevers en ontwerpers bereid kunnen worden gevonden het concept in concrete bouwwerken tot uitvoering te brengen. Deze doelstelling kan met behulp van gevalideerde simulaties worden verwezenlijkt.

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).

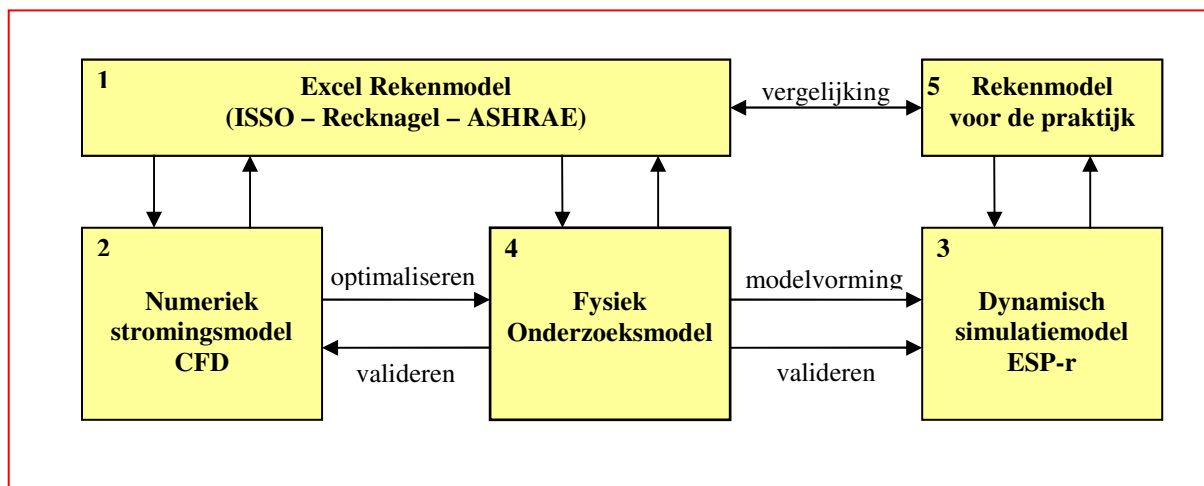
Verschillende studies hebben uitgewezen dat gebouwsimulatie meer is dan alleen maar software; het dient als een “kunde” worden beschouwd waarvoor twee essentiële vaardigheden vereist zijn

(1) *De kennis en kunde om het complexe systeem met bijbehorende interrelaties te begrijpen, ofwel voldoende domeinkennis;*

(2) *De bekwaamheid om dit begrip te vertalen in een voor de simulatiesoftware geschikte, logische representatie.*

(Hensen, J. 2004):

Het Ventecdak[®], de Klimaatcascade[®] en de Zonneschoorsteen of Zonnefaçade[®] zijn ontwikkeld met behulp van modelleren, simuleren, kalibreren en valideren, zie figuur 9.1. Computersimulaties zijn uitgevoerd door deskundigen die over de bovengenoemde vaardigheden beschikken.



Figuur 9.1 – Modelleren en Simuleren

9.2 Simulatiemodellen

9.2.1 Excel rekenmodel [1]

De ontwikkeling van de verschillende concepten is begonnen met het maken van eenvoudige rekenmodellen, 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 zijn wiskundige beschrijvingen gegeven van de warmteoverdracht en stromingen op macroniveau. Hierbij is gebruik gemaakt van het Handboek Installatietechniek (ISSO 2002), het Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik van Recknagel, Sprenger en Schramer (Oldenburg Industrieverlag 2010), de ASHRAE Handbooks Fundamentals (ASHRAE 2001) en HVAC Systems and Equipment (ASHRAE 2000). Voor enkele onderwerpen zijn wetenschappelijke publicaties geraadpleegd.

De gebruikte formules hebben uiteraard betrekking op stationaire omstandigheden, maar door discretisering konden de processen met behulp van MS EXCEL quasidynamisch worden gesimuleerd, en derhalve aangeduid als Excel Rekenmodel.

Deze werkwijze leverde niet alleen een goed inzicht op in de onderliggende verschijnselen van warmteoverdracht en stroming en de koppeling van beide. Er kwamen ook vele onzekerheden aan het licht, die de noodzaak aantoonde van verdere simulaties met een veel hoger resolutieniveau dan met een analytische benadering mogelijk is. Deze werkwijze leverde voorlopige concepten op waaruit een keuze kon worden gemaakt voor de verder modellering.

Excel rekenmodellen zijn opgesteld door de hoofdonderzoeker in samenwerking met wetenschappelijke medewerkers van de TU Delft.

9.2.2 CFD simulatiemodel [2]

Met behulp van numerieke stromingsmodellen met behulp van 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..

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 bouwdelen 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 efficiëntie wijze worden geoptimaliseerd. Fysische 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 gemaakt van de Klimaatcascade[®], het Ventecdak[®] en de Zonneschoorsteen en zijn de prestaties hiervan geanalyseerd en geoptimaliseerd. Mede op basis hiervan zijn van deze responsieve bouwelementen fysieke schaalmodellen gebouwd voor experimenteel onderzoek. Deze schaalmodellen zijn op hun beurt ook weer prototypes voor de in de werkelijke bouwpraktijk te realiseren bouwdelen. Met behulp van CFD kan worden nagegaan of de geteste schaalmodellen representatief zijn voor de modellen op ware grootte

“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: “CFD 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)

De resultaten van een CFD simulatie zijn dan ook door onnauwkeurige invoergegevens, een gebrekkig analytisch model, een onjuiste keuze van het raster, niet adequate software of beperkte computercapaciteit niet bij voorbaat betrouwbaar . In het onderzoek *Earth, Wind & Fire* is CFD dan ook hoofdzakelijk gebruikt om ontwerpvarianten te vergelijken, om inzicht te krijgen in de kwalitatieve aspecten van de verschillende varianten en voor het optimaliseren van de fysieke onderzoeksmodellen.

Door beperkingen in computercapaciteit heeft CFD (nog) niet het niveau bereikt dat nodig is voor *real-time* berekeningen. Hiervoor is het dynamische gebouwsimulatiemodel ESP-r gebruikt, dat is gekalibreerd en gevalideerd op basis van de meetgegevens aan experimentele onderzoeksmodellen. 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 erkende externe specialisten

9.2.3 ESP-r dynamisch simulatiemodel [3]

ESP-r is een simulatieomgeving 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 fysische verschijnselen. Toepassing is mogelijk in de verschillende ontwerpfasen van globaal tot gedetailleerd. ESP-r maakt een integrale en evenwichtige prestatiebeoordeling mogelijk van alle relevante aspecten.

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 architectuur, bouwmassa, luchtstromingen en de klimaatinstallatie inclusief het regelsysteem. Het is flexibel en krachtig, en daardoor zeer geschikt voor het simuleren van innovatieve technieken.

De Zonneschoorsteen en de Klimaatcascade[®] zijn in ESP-r gemodelleerd met behulp van een thermisch- en een stromingsnetwerk opgebouwd uit knooppunten. Hiermee worden onderling gekoppelde warmte- en massastromen 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 intergerelateerd: In de Zonneschoorsteen induceert de temperatuurstijging van de lucht een opwaartse thermische trek die een stroming tot stand brengt. In de Klimaatcascade[®] induceert temperatuurdaling van de lucht een neerwaartse thermische trek die tezamen met de aerodynamische en hydraulische trek een stroming tot stand brengt. De omvang van de stroming bepaalt op zijn beurt weer de temperatuur van de lucht.

Het ESP-r model kan *stand-alone* worden toegepast voor het simuleren van de prestaties van de Zonneschoorsteen en de Klimaatcascade[®] als afzonderlijke installatie-elementen. Het thermisch netwerk en het stromingsnetwerk kan ook in het ESP-r model van een gebouw worden geïntegreerd. De jaarlijkse energieprestaties van de Zonneschoorsteen en de Klimaatcascade[®] kunnen hierdoor afzonderlijk en van een gebouw als geheel worden gesimuleerd. In het onderzoek worden hiervoor de klimaatomstandigheden van het referentiejaar NEN 5060:2008 gebruikt.

Voor het werken met ESP-r zijn geoefende gebruikers nodig met een grondige kennis van de te simuleren fysische processen. De ESP-r modellen en de simulaties zijn ontworpen en uitgevoerd door specialisten van de unit Building Physics and Systems van de TU Eindhoven. De simulaties zijn gekalibreerd en gevalideerd op basis van metingen in de fysieke modellen waardoor ze voldoende betrouwbaar zijn.

9.2.4 Fysieke onderzoeksmodel [4]

Op basis van het Excel rekenmodel en de bestudering, verificatie en detaillering hiervan met behulp van CFD simulaties zijn fysieke testopstellingen gemaakt van de Zonneschoorsteen, de Klimaatcascade[®] en het Ventecdak[®]. Met behulp hiervan zijn onder verschillende condities en in *real-time* de in werkelijkheid optredende fenomenen van warmteoverdracht en stromingen gemeten. Uiteraard gaat het hier om schaalmodellen, maar met zodanige afmetingen dat de processen betrouwbaar konden worden gemonitord en geregistreerd.

Op basis van de meetgegevens uit de fysieke onderzoeksmodellen zijn in een terugkoppeling het Excel rekenmodel en de CFD en ESP-r simulatiemodellen weer gekalibreerd en gevalideerd

Het functionele ontwerp en de hoofdafmetingen van de fysieke onderzoeksmodellen zijn bepaald door de hoofdonderzoeker. Ontwerp, engineering, en uitvoering is door Peutz gerealiseerd. Met het oog op het kalibreren en valideren van de ESP-r simulatiemodellen is de instrumentatie onder auspiciën van het onderzoeksteam ontworpen door de TU Eindhoven en door Peutz gematerialiseerd en geïnstalleerd.

9.2.5 Rekenmodel voor de praktijk [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. Voor de Zonneschoorsteen, een dominant architectonisch bouwdeel, is in het kader van het onderzoek een gebruiksvriendelijk rekenmodel ontwikkeld. In de conceptuele fase van het gebouwwontwerp 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.

9.2.6 Verband tussen de modellen

Het verband tussen de verschillende modellen is weergegeven in figuur 9.1. Elk model heeft zijn eigen toepassingsgebied en door gegevensuitwisseling tussen de modellen kan in principe een hoge mate van betrouwbaarheid worden gerealiseerd.

Voor het *Earth, Wind & Fire* concept zou het ideaal zijn de processen van warmteoverdracht en stroming in de Klimaatcascade[®] en de Zonneschoorsteen gelijktijdig te kunnen modelleren en simuleren met één model binnen hetzelfde computerdomein. Door beperkingen in computercapaciteit heeft CFD echter (nog) niet het niveau bereikt dat nodig is voor de gewenste dynamische *real-time* berekeningen. Daarom is hiervoor het gebouwsimulatiemodel ESP-r gebruikt.

Voor het Ventecdak[®] is koppeling van de luchtstromingen buiten het gebouw en binnen het gebouw geen realistische optie door 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 zou een zeer omvangrijk *grid* met hoge resolutie noodzakelijk maken met prohibitief hoge computerkosten. (van Hooff en Blokken 2009).

9.2.7 Verwijzing

Modellering en simulatie van de Zonneschoorsteen, de Klimaatcascade[®] en het Ventecdak[®] is gedetailleerd beschreven in de desbetreffende deelrapporten.

9.3 Modellering Zonneschoorsteen en Zonnefaçade[®]

9.2.1 Excel rekenmodel

Het Excel rekenmodel heeft een thermische en een stromingscomponent die elkaar wederzijds beïnvloeden.

De thermische component geeft inzicht in de gecompliceerde energiestromen in een zonneschoorsteen. De stralingsflux van de zon wordt deels door de glasvlakken gereflecteerd en geabsorbeerd en deels door de binnenwand geabsorbeerd. Hierdoor ontstaat een stralingsuitwisseling tussen de verschillende vlakken, die afhangt van hun materiaaleigenschappen en geometrische relaties.

De temperatuur van deze vlakken, bepaald door deze stralingsuitwisseling, veroorzaakt weer de gewenste convectieve warmteoverdracht aan de lucht en de inherente luchtstromingen.

Met behulp van matrixvermenigvuldiging is een Excel rekenmodel gemaakt van de stralingsuitwisseling en temperatuurverdeling op de binnenwanden en de glaswand. Met behulp van theoretisch afgeleide warmteoverdrachtscoëfficiënten kunnen met behulp van het model de luchttemperaturen en daarmee de prestaties van een zonneschoorsteen worden berekend.

Over warmteoverdracht door vrije convectie is veel bekend, warmteoverdracht door gedwongen convectie is minder bestudeerd en de combinatie, warmteoverdracht door gemengde convectie, is in zekere zin nog terra incognita. Toch is het dit fenomeen dat zich in hoge zonneschoorstenen afspeelt. De hiervoor afgeleide benaderingsformules hebben, hoewel gebaseerd op de best verkrijgbare wetenschappelijke gegevens, toch een enigszins speculatief karakter hebben. Met behulp van metingen in de fysieke testopstelling en met CFD simulaties is getracht een beter inzicht te krijgen in het fenomeen van gemengde convectie. Het is met name de onbekende turbulentie-intensiteit, veroorzaakt door snelheidsverschillen over de doorsnede van de Zonneschoorsteen, het instroompatroon van de lucht en de wandruwheid, die de vaststelling van een eenduidig algoritme voor de bepaling van de convectieve warmteoverdrachtscoëfficiënt bemoeilijken. Het onderzoek heeft hiervoor geen sluitend algoritme opgeleverd. Voor de berekening van de energieprestatie is dit overigens nauwelijks van belang. Zonnearmte, eenmaal gevangen in de Zonneschoorsteen, kan alleen maar verloren gaan door warmteverlies via glaswand en binnenwand, en door de lage U-waarden hiervan is het warmteverlies bij gemiddelde buitentemperaturen per definitie beperkt.

De stromingscomponent gaat ervan uit dat de thermische trek in evenwicht is met de drukverliezen in een zonneschoorsteen, berekend met behulp van standaard formules uit de luchttechniek. In een

zonneshoorsteen zijn door temperatuurverschillen over de breedte van de absorber en tussen de binnenwanden en de lucht turbulenties te verwachten, waardoor de luchtstroming nauwelijks zal voldoen aan de randvoorwaarden die gelden voor de gebruikte standaardformules. Desondanks blijkt uit metingen in de fysieke testopstelling dat deze werkwijze goede resultaten oplevert.

Het Excel rekenmodel is gevalideerd op basis van metingen in de fysieke testopstelling; hiervoor zijn perioden genomen van een zonnige winterdag en een zomerdag waarin het proces in de zonneshoorsteen quasi stationair kon worden beschouwd. Het model blijkt de luchttemperaturen vrij nauwkeurig te kunnen voorspellen, maar het geeft een forse overschatting van de wandtemperatuur en een iets kleinere overschatting van de glastemperatuur. De adaptieve koppeling van warmtestromen en de gerelateerde luchtstromingen blijkt een moeilijk op te lossen probleem.

9.2.2 CFD simulatiemodel

Met behulp van het Excel rekenmodel is op macroniveau een indruk verkregen van de warmteoverdracht en luchtstromen in de fysieke testopstelling, maar het is noodzakelijk deze verschijnselen in een hogere resolutie te kunnen bestuderen. Met behulp van een CFD simulatiemodel zijn de stromingsverschijnselen daarom op microniveau geanalyseerd.

De CFD simulaties zijn uitgevoerd door een ervaren specialist op dit gebied van Peutz bv,. De simulaties zouden antwoord moeten geven op vragen als: Is het denkbaar dat aan de glaszijde bij lagere buitentemperaturen een neerwaartse stroming (koudeval) ontstaat? Is er wellicht een verticale stratificatie in de zonneshoorsteen denkbaar? Is een binnenwand met een lage emissiecoëfficiënt, met onvoorziene en mogelijk ongewenste effecten op de stroming, wel de juiste keuze? Wat is de invloed van een ongelijkmatige luchtstroming op het drukverlies en de thermische trek? Verder moeten de resultaten van het experimentele onderzoeksmodel met beperkte afmetingen kunnen worden geëxtrapoleerd naar zonneshoorstenen met werkelijke afmetingen in de *real world*. Simulaties zijn daarom uitgevoerd voor het fysieke testmodel van 0,25m * 11m en een groter model van 1,0m * 44 m. Kwalitatief lijken de CFD simulaties een betrouwbaar beeld op te leveren; ongewenste effecten, zoals omgekeerde luchtstroming langs een relatief koud glasvlak, zijn in de simulaties niet opgetreden. Kwantitatief zijn er nauwelijks overeenkomsten met de in de fysieke onderzoekopstelling gemeten waarden. Het ontbreken van een betrouwbaar algoritme voor de bepaling van de convectieve warmteoverdrachtscoëfficiënt is een probleem dat zich ook bij de analytische en de ESP-r simulaties manifesteerde.

De energiebalans van het fysieke onderzoeksmodel van 0,25 * 11 m laat een thermisch rendement zien dat goed overeenkomt met dat van het grotere model van 1,0 * 44 m. Het schaalmodel is daarom voldoende representatief te achten voor grotere modellen. Op basis van de goede overeenkomsten tussen beide kan worden geconcludeerd dat de resultaten van de simulaties voldoende schaalonafhankelijk zijn.

9.2.3 ESP-r dynamisch simulatiemodel

Door specialisten van de Unit Building Physics and Systems van de TU/e is een simulatiemodel van de Zonneshoorsteen ontworpen in de ESP-r omgeving. Het model is gekalibreerd en gevalideerd op basis van de metingen in de fysieke testopstelling. De bandbreedte van de onzekerheidsmarges die de voorspellingen beïnvloeden is $\approx \pm 20\%$. Voor het dynamische proces in een zonneshoorsteen met vele variabelen wordt dit een redelijke marge geacht. Het gevalideerde model kan worden gebruikt voor het voorspellen van energie- en massastromen in een zonneshoorsteen onder invloed van de thermodynamische koppeling tussen energie -geleiding, convectie en straling- en luchtstromen.

Het ESP-r model heeft verschillende beperkingen, die alle in meer of mindere mate de voorspellingen beïnvloeden, zoals onzekerheidsmarges in de metingen van luchtdebieten en temperaturen en van de fysische eigenschappen van beglazing en absorber. Verder zijn windeffecten niet in rekening gebracht en is geen rekening gehouden met ongelijkmatige zoninstraling door de dagelijkse gang van de zon en de inherente schadueffecten. Omdat desondanks de voorspelde waarden in de meeste gevallen binnen de onzekerheidsmarges van de metingen liggen, kan worden geconcludeerd dat het model een voldoende mate van betrouwbaarheid heeft.

Om de prestaties met een behoorlijk mate van betrouwbaarheid te kunnen realiseren is het cruciaal de thermische processen en de stromingskarakteristieken zo nauwkeurig mogelijk te modelleren.

Kalibratie van bepaalde parameters in het thermische- en het stromingsnetwerk van ESP-r is daarom noodzakelijk. Voor het thermisch netwerk is kalibratie vooral van belang om het meest geschikte algoritme voor de bepaling van de convectieve warmteoverdracht te kiezen. Voor het stromingsnetwerk is kalibratie noodzakelijk om de meest geschikte stromingscomponenten te kiezen en gereede waarden toe te kennen aan bepaalde parameters van de stromingscomponent.

9.2.4 Fysieke testopstelling

Er is een fysieke testopstelling gebouwd met behulp waarvan de in werkelijkheid optredende warmteoverdracht en stromingen in een zonneshoorsteen zijn gemeten. De meetwaarden konden worden vergeleken met de berekende waarden uit het Excel rekenmodel en de CFD en ESP-r simulatiemodellen. De metingen zijn uitgevoerd met een constant debiet op basis van een luchtsnelheid van 1 m.s^{-1} die indien nodig met een hulpventilator in stand werd gehouden.

De metingen gaven een goed beeld van de gecompliceerde thermodynamische processen in een zonneshoorsteen. Door de dagelijkse gang van de zonnestraling werden grote temperatuurverschillen over de breedte van de absorber gemeten. Ondanks de thermisch lichte constructie werd een aanzienlijke faseverschuiving vastgesteld tussen de maxima van de stralingsflux en de temperaturen van absorber en glaswand. Ondanks het grote aantal meetpunten was het niet eenvoudig om ondubbelzinnig gemiddelde waarden van de optredende temperaturen en luchtsnelheden vast te stellen. Desondanks konden op basis van de metingen het analytische en het ESP-r simulatiemodel met voldoende nauwkeurigheid worden gekalibreerd en gevalideerd.

Het onderzoeksmodel is gebouwd op het terrein van Peutz bv te Molenhoek, waarvoor een maximum bouwhoogte geldt van 12 m; gekozen is voor een hoogte van 11 m. De breedte is arbitrair bepaald op 2 m en met behulp van het Excel rekenmodel werd de diepte berekend op 0,25 m. Hierbij werd ervan uitgegaan dat bij een stralingsintensiteit van de zon $\Phi_{\text{zon}} = 400 \text{ W.m}^{-2}$ en een buitentemperatuur $\theta_e = 20^\circ\text{C}$ een luchtsnelheid van 1 m.s^{-1} moest kunnen worden gerealiseerd. Bij deze conditie zou de thermische trek van de schoorsteen in evenwicht moeten zijn met het geraamde drukverlies.

De beglazing bestaat uit SGG Diamant Planitherm Total met $g = 0,7$ en $U = 1,32 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$, gevat in een houten kozijnconstructie. De glaswand is uitgevoerd met te openen delen in verband met eventuele reiniging en bereikbaarheid van de meetsensoren.

De absorber bestaat uit Mirotherm geanodiseerde aluminiumplaat ter dikte van 0,5 mm, voorzien van spectraal selectieve coating met een absorptiefactor voor zonlicht $\alpha = 0,95$ en een emissiefactor voor warmtesstraling $\varepsilon = 0,05$.

Meetopnemers zijn aangebracht voor de luchttemperatuur (15), oppervlaktetemperaturen (36), luchtsnelheden (8), drukken (4), zonbelasting (3), relatieve vochtigheid (2) en windsnelheid (2).

Omdat de zonneshoorsteen als afzuigstelsysteem voor de gebouwventilatie functioneert, waarbij een wisselend debiet ongewenst is, is het onderzoek uitgevoerd met constant debiet. In de achter de zonneshoorsteen aangebrachte testcel is een ventilator aangebracht, die bij onvoldoende trek voor de nodige luchttoevoer zorgt. In geval van te hoge trek wordt met behulp van een regelklep het luchtdebiet geknepen. De testcel is voorzien van een verwarmings- en koelunit waarmee de lucht kan worden verwarmd op 20°C bij $\theta_e \leq 20^\circ\text{C}$ of gekoeld bij $\theta_e \geq 20^\circ\text{C}$. In de testcel zijn de te registreren parameters met behulp van een datalogger continu geregistreerd. Metingen zijn uitgevoerd in de periode van november 2009 tot juni 2010 en vastgelegd in MS EXCEL bestanden.

9.3 Modelling Klimaatcascade[©]

9.3.1 Excel rekenmodel

Het warmte- en massatransport in een Klimaatcascade[©] is een gecompliceerd proces waarin vele, vaak onderling gerelateerde variabelen een rol spelen.

Een unieke eigenschap van een Klimaatcascade[©] is verder dat het werkzame oppervlak geen vaste waarde is, zoals bij traditionele warmtewisselaars. Door het variëren van het sproeispectrum kan het warmtewisselend oppervlak worden vergroot of verkleind, waardoor bij een gelijke psychometrische prestatie het debiet en het temperatuurtraject van het koelwater kunnen worden beïnvloed.

Om een psychometrisch en energetisch zo gunstig mogelijk ontwerp van een Klimaatcascade[©] mogelijk te maken is een rekenmodel in MS-EXCEL opgesteld. De alfaversie hiervan is gebruikt voor

het maken van voorlopige berekeningen, voor het optimaliseren van het ontwerp van de fysieke onderzoekopstelling en het bepalen van de varianten voor de CFD simulaties. De alfaversie is verder ontwikkeld tot een bètaversie die is gebruikt om het model te valideren op basis van metingen in de fysieke testopstelling en voor een vergelijking met de CFD simulaties.

In het model is het mogelijk verschillende sproeispectra in te voeren, gekarakteriseerd door de distributieve massaverdeling van druppeldiameters. De gemiddelde eigenschappen van druppels in het spectrum worden hierbij uitgedrukt in d_{10} -gemiddelde diameter, d_{20} -gemiddelde diameter op oppervlak, d_{30} - gemiddelde diameter op volume en d_{32} , de Sauter Mean Diameter SMD een belangrijke eenheid voor berekening van de warmteoverdracht. Deze gedefinieerde spectra zijn tevens gebruikt voor de selectie van sproeiers.

Het Excel rekenmodel is ook gebruikt voor de voorselectie van de benodigde sproeiers door Spraying Systems GmbH. Als uitgangspunt hiervoor is de koelprestatie van een Klimaatcascade[®] in de koelperiode gekozen. Op basis van de werkelijke gerealiseerde sproeispectra in de fysieke testopstelling zijn met behulp van het rekenmodel de prestaties van de Klimaatcascade[®] herberekend, waardoor een goede vergelijking tussen het analytisch model en het CFD simulatiemodel kon worden gemaakt.

Om prestatieberekeningen voor verschillende psychometrische varianten mogelijk te maken is de water/luchtverhouding $R_{w/L}$ in het rekenmodel gebruikt. Met behulp van het rekenmodel kan tevens de drukopbouw in de Klimaatcascade[®] worden berekend.

9.3.2 CFD simulatiemodel

Om meer zekerheid te krijgen over de simulaties met het Excel rekenmodel zijn deze geverifieerd met behulp van een geavanceerd CFD simulatiemodel. Een tweede en niet minder belangrijke reden voor het gebruik van CFD voor de ontwikkeling van de Klimaatcascade[®] is de selectie van de benodigde sproeiers. Met behulp van het Excel rekenmodel kan weliswaar een voorlopig sproeispectrum worden geselecteerd, maar het type sproeier dat dit spectrum bij een bepaalde voordruk kan leveren is hiermee nog niet bekend. Samenwerking met een partner op het gebied van sproeitechnologie, die niet alleen het sproeispectrum van sproeiers kan meten maar ook in staat is dit via CFD te verbinden met de gewenste prestaties in een Klimaatcascade[®] is hiervoor onontbeerlijk. Een dergelijke partner is gevonden in de persoon van Dr.-Ing.J. Stefan Markus van Spraying Systems Deutschland GmbH, gespecialiseerd CFD Engineer.

De voor de Klimaatcascade[®] uitgevoerde CFD simulaties omvatten in hoofdlijnen:

- Koeling en droging van ventilatielucht bij een ontwerp zomerconditie van 28°C bij 55% RV en bij een gemiddelde zomerconditie van 20°C bij 80% RV.
- Verwarming en bevochtiging van ventilatielucht bij een ontwerp winterconditie van -10°C bij 90% RV en bij een gemiddelde winterconditie van +5°C bij 90% RV

Simulaties zijn uitgevoerd voor het model van de fysieke testopstelling en voor een model op ware grootte, waarvoor gekozen is voor een gebouw van 8 verdiepingen met een ventilatiecapaciteit van 40.000 m³.h⁻¹ en gebouw/klimaatmodel BETA. De simulaties wijzen uit dat de in zomer en winter gevraagde luchtcondities bij uitrede van de Klimaatcascade[®] kunnen worden gerealiseerd bij een constante watertemperatuur van 13°C en een constant waterdebiet. Dit maakt een regeltechnisch zeer eenvoudige uitvoering van de Klimaatcascade[®] mogelijk; slechts bij zeer lage buitentemperaturen is een geringe verhoging van de watertemperatuur gewenst. De Klimaatcascade[®] is hierdoor niet alleen een effectief en energievriendelijk Hoog Temperatuur Koelsysteem (HTK), maar tevens een ultra Laag Temperatuur Verwarmingssysteem (LTV).

Naast simulatie van de psychometrische prestaties zijn ook simulaties uitgevoerd met betrekking tot de drukopbouw in een Klimaatcascade[®]. Bij gemiddelde zomercondities wordt in het model met 8 verdiepingen aan de voet van de Klimaatcascade[®] een positieve druk gerealiseerd van ca 100 Pa.

De voor het testmodel gemaakte simulaties zijn gevalideerd met metingen in de fysieke testopstelling.

9.3.3 ESP-r dynamisch simulatiemodel

Door specialisten van de Unit Building Physics and Systems van de TU/e is een simulatiemodel van de Klimaatcascade[®] in de ESP-r omgeving ontworpen. Het model is gebaseerd op dezelfde fysieke

principes en rekenmethodiek als het Excel rekenmodel, en levert dan ook vrijwel identieke resultaten op.

Op analoge wijze als in paragraaf 9.3.3 voor de Zonneschoorsteen beschreven is de Klimaatcascade[®] in het ESP-r model gemodelleerd met behulp van een thermisch- en een stromingsnetwerk opgebouwd uit knooppunten, waarmee de onderling gekoppelde warmte- en massastromen kunnen worden gesimuleerd.

Het thermisch netwerk en het stromingsnetwerk kan in het ESP-r model van een gebouw worden geïntegreerd, waardoor de invloed van variërende invoerparameters zoals waterdebiet en –temperatuur en sproeispectrum direct op gebouwniveau kan worden gesimuleerd. De voordelen hiervan wegen echter niet op tegen de nadelen, i.c. toenemende complexiteit en afnemende gebruikersvriendelijkheid. Het ESP-r model is derhalve als *stand-alone* element gebruikt voor het simuleren van de prestaties van de Klimaatcascade[®] als afzonderlijke installatie-element.

9.3.4 Fysieke testopstelling

Het ontwerp van de testopstelling is bepaald op pragmatische gronden en kostenoverwegingen. Voor de Klimaatcascade[®] werd een minimum doorsnede van 1,0 x 1,0 m noodzakelijk geacht. Om de omvang van het luchtcirculatiesysteem en de benodigde vermogens voor verwarming en bevochtiging van de lucht te beperken is gekozen voor een luchtsnelheid van 0,5 m.s⁻¹. In praktische toepassingen wordt weliswaar een hogere luchtsnelheid toegepast, 2,0 ... 2,5 m.s⁻¹, maar berekeningen met behulp van het Excel rekenmodel wijzen uit dat de koelprestatie slechts in geringe mate door de luchtsnelheid wordt beïnvloed. De testopstelling is gebouwd in één van de hallen van Peutz bv te Molenhoek, waardoor de maximum hoogte van het model moest worden beperkt tot 6 m.

Proceslucht wordt op het hoogste punt via een toevoerplenum aan de meetschacht toegevoerd, waardoor een gelijkmatige instroming wordt gerealiseerd. De lucht wordt aan de onderzijde van via een druppelvanger afgevoerd. De meetschacht is voorzien van gootjes voor het opvangen van het sproeiwater dat op de wanden terechtkomt, waardoor deze hoeveelheid kan worden gemeten. Ten behoeve van visuele inspectie zijn op 4 hoogten 2 inspectieramen aangebracht, terwijl aan de onderzijde een afsluitbare inspectiedeur is aangebracht. De meetschacht staat op een wateropvangbak, aangesloten op de riolering.

Proceslucht wordt gerecirculeerd met behulp van een luchtbehandelingskast met een nominale luchtverplaatsing van 1.800 m³.h⁻¹, uitgevoerd met regelbare ventilator, elektrische luchtverwarmer en stoombevochtiger. Met behulp van handbediende kleppen kan de lucht van buiten worden aangezogen en weer op de buitenlucht afgevoerd, dan wel via de laboratorium hal worden gerecirculeerd. Het luchtdebiet wordt met behulp van de regelbare ventilator en een meetkruis in het toevoerkanaal handmatig geregeld.

Ten behoeve van de zomermetingen kan de lucht met behulp van de luchtbehandelingskast op de juiste aanvoerconditie worden gebracht. Een koelsysteem voor de lucht is echter niet voorzien, hetgeen betekent dat voor de wintermetingen moest worden gewacht op de geschikte buitencondities.

De metingen zijn uitgevoerd met de door Spraying Systems GmbH geselecteerde sproeiers die direct op de waterleiding zijn aangesloten. Met behulp van een regelventiel wordt de voordruk op de sproeiers op de gewenste druk van 0,5 bar geregeld. Het waterdebiet wordt met behulp van een digitale flowmeter geregistreerd.

De temperatuur van het leidingwater is seizoensafhankelijk en kan fluctueren tussen 10^o en 15^oC. Via een tegenstroomapparaat kan het water zo nodig worden verwarmd. Koeling van het water is niet voorzien, hetgeen inhoudt dat als gevolg van een watertemperatuur > 13^oC de zomermetingen in het najaar moesten worden uitgevoerd.

Gemeten zijn luchttemperaturen, relatieve vochtigheid en drukken in de cascade –totaal 30 meetpunten, alsmede waterdebiet en sproeidruk. Metingen zijn uitgevoerd in de periode van november 2011 t/m februari 2012. De te registreren meetwaarden zijn met behulp van een datalogger geregistreerd en vastgelegd in MS EXCEL bestanden

De metingen zijn in eerste instantie bedoeld om het CFD simulatiemodel ad paragraaf 9.4.2 te kalibreren en te valideren; het meetprogramma is dan ook hierop afgestemd. In tweede instantie zijn de metingen gebruikt om in een terugkoppeling het Excel rekenmodel te kalibreren en te valideren.

9.4 Modelling Ventecdak[®]

9.4.1 Excel rekenmodel

Er is een Excel rekenmodel ontwikkeld dat kwalitatief enig inzicht geeft in de werking van een op het dak van een gebouw geplaatste pseudo-venturi. Dit model maakt een kwantitatieve, zij het zeer speculatieve benadering van de prestaties mogelijk. 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 een open systeem betreft zal de wind slechts gedeeltelijk door de pseudo-venturi, en gedeeltelijk om de pseudo-venturi heen stromen. Op basis van een rekenvoorbeeld werd een optimum van de contractiecoëfficiënt vastgesteld waarbij een maximale prestatie van de venturi-ejector werd gerealiseerd.

De beschikbare verschildrukken ($C_{p_w} - C_{p_l}$) over de pseudo-venturi werden ontleend aan referentiewaarden uit de literatuur. Het drukverlies over de pseudo-venturi is berekend met behulp van standaard formules uit de luchttechniek die uiteraard in een vrije omgeving geen geldigheid bezitten. De rekenresultaten zijn daardoor zeer speculatief en geven slechts een indruk van de mogelijke prestatie van het concept.

Om de prestaties van de pseudo-venturi te optimaliseren werd ervan uitgegaan dat geleideschoepen in de vorm van verticale vinnen nodig zouden zijn alsmede zijkleppen om de wind zoveel mogelijk door de keel van de venturi te dwingen. Deze voorzieningen zouden het concept echter windrichtingafhankelijk maken, een ongewenst effect.

Met het speculatieve Excel rekenmodel konden alleen de onderdrukken in de pseudo-venturi worden berekend bij gesloten venturi-ejector. De invloed van de secundaire luchtstroom uit de venturi-ejector op deze onderdrukken kan met een simpele rekenkundige benadering niet worden voorspeld. Hiervoor is het CFD simulatiemodel gebruikt.

9.4.2 CFD simulatiemodel

De prestatie van de pseudo-venturi met betrekking tot de te realiseren onderdrukken in de keel is met behulp van CFD simulaties onderzocht. Deze zijn uitgevoerd door specialisten op het gebied van de stedenbouwfysica van de Unit Building Physics and Systems, faculteit Built Environment van de TU/e. Voor de geometrie van het simulatiemodel is een gebouw van 50 m hoog gekozen met 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 een aantal initiële simulaties zijn de parameters bepaald die de grootste invloed hebben op de overdrukken en de onderdrukken. Om de optimale configuratie van de pseudo-venturi, inmiddels Ventecdak[®] genoemd, te kunnen bepalen is de invloed van deze parameters vervolgens in detail geanalyseerd. De betreffende parameters waren in hoofdzaak het aantal verticale vinnen in de pseudo-venturi, het effect van zijkleppen, de hoogte en de verticale contractieverhouding van de pseudo-venturi, en tenslotte de breedte en hoogte van het gebouw..

De verticale vinnen waren in het Excel rekenmodel 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 venturi. Deze vinnen hebben echter eveneens een *wind-blocking effect* tot gevolg waardoor het luchtdebiet tussen de vinnen en dus ook de luchtsnelheid in de keel van de pseudo-venturi zal afnemen.

Samengevat zijn de belangrijkste resultaten:

- Optimale prestaties van het Ventecdak[®] worden gerealiseerd bij de eenvoudigste constructie, zonder geleidevinnen en zijkleppen, waardoor het windrichtingonafhankelijk is – een verrassende en belangrijke uitkomst
- De optimale hoogte van het bovenkanaal bedraagt 1,0 m bij een verticale contractieverhouding van 9:1.

De genoemde CFD simulaties hebben betrekking op het Ventecdak[®] met gesloten venturi-ejector, dus zonder secundaire luchtstroom uit het afzuigstelsel. Resultaten van aanvullende simulaties met open

venturi-ejector hebben een elegante formule opgeleverd waarmee de C_p -waarde van de venturi-ejector kan worden bepaald als functie van de luchtsnelheid in de ejector en de windsnelheid op dakrandhoogte. Deze formule kan worden gebruikt om de afzuigcapaciteit van de venturi-ejector te bepalen als functie van de windsnelheid.

9.4.3 ESP-r dynamisch simulatiemodel

Simulatie van de prestaties van het Ventecdak[®] ligt in het domein van de stedenbouwfysica en valt als zodanig buiten het domein van ESP-r.

De met behulp van het gevalideerde CFD simulatiemodel berekende winddrukcoëfficiënten worden geïmplementeerd in het ESP-r gebouwmodel voor de integrale prestatiesimulatie van het Earth, Wind & Fire concept.

9.4.4 Fysieke testopstelling

Het geoptimaliseerde CFD simulatiemodel van het Ventecdak[®] volgens paragraaf 9.5.2. is gevalideerd in de windtunnel van Peutz bv. Deze windtunnel is een zgn. gesloten grenslaagtunnel, speciaal ontworpen voor het simuleren van een atmosferische grenslaag. Boven de grenslaag kunnen snelheden tot ca 30 m.s⁻¹ worden bereikt. 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. Temperatuurinvloeden worden in deze windtunnel niet gesimuleerd; er wordt dus gemeten bij een neutrale stabiliteit met betrekking tot het temperatuurprofiel.

Voor de metingen is een model van het Ventecdak[®] schaal 1:100 gemaakt, waarmee de verschillende varianten zijn getest. Op 58 posities in het model zijn de lokale drukken gemeten. De snelheden in het model zijn bepaald met behulp van windrichtingonafhankelijke NTC¹ thermistors. Snelheden en drukken zijn genormeerd met de ongestoorde snelheid en stuwdruk op dakrandhoogte.

De resultaten van de CFD simulaties worden door de metingen bevestigd. De belangrijkste conclusies zijn dat geleideschoepen geen positieve bijdrage leveren aan de werking van het dak en dat een significante onderdruk in de keel van het Ventecdak[®] kan worden gerealiseerd. 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.

In de windtunnel zijn ook metingen gedaan aan het Ventecdak[®] met open venturi-ejector. De gemeten waarden stemmen goed overeen met de CFD simulatieresultaten, waardoor de in paragraaf 9.5.2 genoemde formule is gevalideerd voor gebruik in de ontwerppraktijk.

9.4 Rekenmodellen voor de praktijk

- Zonneschoorsteen en Zonnefaçade[®]
Voor prestatieanalyses van een Zonneschoorsteen door de architect in de conceptuele ontwerpfase is een elegant en gebruiksvriendelijk rekenmodel beschikbaar. – zie deelrapport (I).
Voor berekeningen in de ontwerpfase kan het Excel rekenmodel of het ESP-r simulatiemodel worden gebruikt – zie deelrapport (I).
- Klimaatcascade[®]
Voor de psychometrische prestaties van een Klimaatcascade[®] is het Excel rekenmodel beschikbaar, waarmee eveneens de drukopbouw kan worden berekend - zie deelrapport (III).
Voor de sproeierselectie kan gebruik worden gemaakt van het CFD simulatiemodel van Spraying Systems GmbH- zie deelrapport (III). .
- Ventecdak[®]
De prestaties van de venturi-ejector kunnen worden berekend met behulp van het met behulp van CFD ontwikkelde rekenalgoritme – zie deelrapport (III).

¹ Negative Temperature Coefficient

10. SAMENVATTING DEELRAPPORT (I) – ONDERZOEK ZONNESCHOORSTEEN EN ZONNEFACADE[®]

10.1 Zonnestraling en de zonneshoorsteen

[5]¹ Voor het ontwerp van een zonneshoorsteen, thermisch vermogen, thermische trek, energieopbrengst en het benodigde glasoppervlak is de zonnestraling Φ_{zon} op een vertikaal vlak, uitgedrukt in $W.m^{-2}$, en het dagelijkse profiel hiervan een belangrijk gegeven.

Door weerstations wordt de globale straling in $W.m^{-2}$ gemeten, die wordt gedefinieerd als de som van de kortgolvlige directe en diffuse stralingsflux gemeten op een horizontaal vlak. Voor een zonneshoorsteen moet de globale straling steeds worden teruggerekend naar het verticale vlak. Hiervoor zijn rekenalgoritmes beschikbaar, maar ter wille van de eenvoud is in dit onderzoek gebruik gemaakt van stralingstabellen.

In de zomermaanden is de zonnestraling het grootst bij zuidwest en zuidoost oriëntaties. In de wintermaanden is dit bij de dan optredende lage zonnestanden het geval voor een zuivere zuid oriëntatie. Een meervoudige georiënteerde zonneshoorsteen ontvangt de meeste zonnestraling en levert ook gedurende een groter deel van de dag een stabielere afzuigcapaciteit.

De prestatie van een zonneshoorsteen is uiteraard niet alleen afhankelijk van de oriëntatie maar eveneens en vooral van de uren zonneshijn in de verschillende seizoenen. Voor de energieopbrengst van een zonneshoorsteen is dan ook de zonnestraling geïntegreerd over de tijd, uitgedrukt in $Js.cm^{-2}$, $kWh.m^{-2}$, of $MJ.m^{-2}.a^{-1}$ van belang.

[6] De studie omvat een onderzoek naar de mogelijkheden met behulp van een zonneshoorsteen zonnewarmte te benutten. Aanvankelijk was het onderzoek alleen gericht op de toepassing voor natuurlijke ventilatie van kantoorgebouwen in de zomerperiode. Deze functie is echter met het oog op de groeiende aandacht voor energieneutrale gebouwen en kosteneffectiviteit te beperkt gebleken. Daarom is ook onderzocht of en hoe de geogste zonne-energie nuttig kan worden gemaakt voor de warmtelevering aan een gebouw. Dit aspect heeft lopende het onderzoek prioriteit gekregen.

Een viertal varianten wordt globaal vergeleken; deze onderscheiden zich in hoofdzaak door de warmtecapaciteit van de absorber. Met een thermisch zware absorber kan de overdag geaccumuleerde warmte worden benut voor nachtventilatie. Op basis van een dynamische simulatie blijkt een lichte variant met gering accumulerend vermogen superieur met betrekking tot de jaarlijks te oogsten zonnewarmte. Het onderzoek is verder dan ook op deze variant gericht.

Een in eerste instantie opgezette modelindeling in passieve, actieve en hybride zonneshoorstenen, de laatste bedoeld voor bestaande gebouwen, is minder zinvol gebleken en daarom niet verder onderzocht.

Het oogsten van zonnewarmte maakt geen deel uit van het Solar Heating and Cooling programma van het International Energy Agency.

Een literatuuronderzoek heeft niet veel bruikbare informatie opgeleverd, maar wel een beeld gegeven van de gecompliceerde thermodynamische processen in een zonneshoorsteen.

[7] De criteria voor de keuze van de samenstellende delen van een zonneshoorsteen zijn de volgende: Voor de binnenwand is een hoge absorptiefactor voor de kortgolvlige zonnestraling van belang in combinatie met een lage emissiefactor voor langgolvlige warmtestraling. Voor het onderzoek is gekozen voor Mirotherm[®], een spectraal selectief materiaal dat ook voor zonnecollectoren wordt gebruikt.

De voorkeurseigenschappen van de beglazing zijn een hoge g-waarde en een lage U-waarde. Enkele glasvarianten worden vergeleken; voor het fysieke modelonderzoek is op praktische gronden gekozen voor Diamant Planitherm Total low E van Saint Gobain.

Warmteverlies door de achterwand moet zoveel mogelijk worden beperkt, waarvoor een hoge warmteweerstand nodig is.

¹ De nummers verwijzen naar de betreffende hoofdstukken

De invloed van het accumulerend vermogen van de binnenwand op het thermisch jaarrendement is in een dynamische simulatie geanalyseerd. Op basis hiervan is voor het onderzoek gekozen voor een binnenwand met een zo klein mogelijke warmtecapaciteit waardoor een maximaal rendement wordt gerealiseerd.

Ingegaan wordt op de noodzaak van een shuntkanaal, dat een gelijkmatige trek van de zonneshoorsteen voor alle verdiepingen van een gebouw moet bevorderen, en dat buiten bedrijfstijden als recirculatiekanaal kan dienen.

[8] Een zonneshoorsteen is een warmtewisselaar waarbij de door de zon verwarmde wanden convectief warmte afgeven aan de lucht. Met gangbare formules uit de technische warmteleer is een wiskundige beschrijving gegeven van de fenomenen van warmteoverdracht bij vrije, gedwongen en gemengde convectie in een zonneshoorsteen. Om zo dicht mogelijk bij de ingenieurspraktijk te blijven zijn deze formules ontleend aan het Handboek Installatietechniek en de Recknagel die elkaar in de uitwerking nauwelijks ontlopen. Er is bij deze analytische rekenkundige benadering geen gebruik gemaakt van vuistregels maar van wetenschappelijk verantwoorde basisgegevens.

Convectieve warmteoverdracht in een zonneshoorsteen is een weerbarstige materie, gekenmerkt door onzekerheden inzake de convectieve warmteoverdrachtscoëfficiënten $CHTC^1$, de wisselende stralingsflux van de rondgaande zon en de dynamiek van turbulente luchtstromingen die zich moeilijk laten voorspellen.

Over warmteoverdracht door vrije convectie is veel bekend, warmteoverdracht door gedwongen convectie is minder bestudeerd en de combinatie, warmteoverdracht door gemengde convectie, is in zekere zin nog terra incognita. Toch is het dit fenomeen dat zich in hoge zonneshoorstenen afspeelt. In het voorliggend hoofdstuk zijn hiervoor benaderingsformules afgeleid, die, hoewel gebaseerd op de best verkrijgbare wetenschappelijke gegevens, toch een enigszins speculatief karakter hebben. Met behulp van metingen in de fysieke testopstelling en met CFD simulaties is getracht een beter inzicht te krijgen in het fenomeen van gemengde convectie. Het is met name de onbekende turbulentie-intensiteit, veroorzaakt door snelheidsverschillen over de doorsnede van de Zonneshoorsteen, het instroompatroon van de lucht en de wandruwheid, die de vaststelling van een eenduidig algoritme voor de bepaling van de $CHTC$ bemoeilijken. Hiervoor is nader onderzoek nodig.

Het is niet gelukt een sluitend algoritme te vinden voor de berekening van de convectieve warmteoverdrachtscoëfficiënt $CHTC$ in een zonneshoorsteen. Voor de berekening van de energieprestatie is dit ook nauwelijks van belang. Zonnewarmte, eenmaal gevangen in de Zonneshoorsteen, kan alleen maar verloren gaan door warmteverlies via glaswand en binnenwand, en door de lage U -waarden hiervan is het warmteverlies bij gemiddelde buitentemperaturen per definitie beperkt.

De energieprestatie wordt bepaald door de convectieve warmteoverdracht in een Zonneshoorsteen, weergegeven met vergelijking

$$\Phi_c = h_{c,m} \cdot A \cdot (\theta_w - \theta_\infty)$$

Φ_c wordt dus in hoge mate bepaald door de U -waarden van glas en binnenwand, die in deze vergelijking niet voorkomen. Als Φ_c weinig variabel is en A is constant, volgt dat in elk model het product $(\theta_w - \theta_\infty) \cdot h_{c,m}$ ook constant is. Als voor $h_{c,m}$ lagere waarden worden ingevoerd levert dit per definitie hogere waarden op voor het temperatuurverschil $(\theta_w - \theta_\infty)$.

De energieprestatie van een Zonneshoorsteen wordt in geringe mate beïnvloed door het warmteverlies, dat echter door de lage U -waarden van glaswand en binnenwand bij gemiddelde buitentemperaturen beperkt is. Hierbij beïnvloed de convectieve warmteoverdrachtscoëfficiënt het warmteverlies langs twee wegen:

1. Een lage waarde van $h_{c,m}$ brengt een hogere waarde van $(\theta_w - \theta_\infty)$ met zich mee, en daarmee een hogere wandtemperatuur θ_w . Hierdoor stijgt het temperatuurverschil met de omgeving met als gevolg een groter warmteverlies.
2. Een lage waarde van $h_{c,m}$ levert een hogere U -waarde op van glaswand en binnenwand. Hierdoor wordt het grotere warmteverlies ad 1 gedeeltelijk gecompenseerd.

¹ Combined Heat Transfer Coëfficiënt

Het geringe effect van de warmteoverdrachtscoëfficiënt $h_{c,m}$ op de energieprestatie houdt niet in dat deze voor de constructie van een Zonneschoorsteen irrelevant is. Voor het vaststellen van de maximum temperaturen die op kunnen treden, vooral die van de glaswand, is het van belang deze in de ontwerpfase te kunnen bepalen. Het lijkt verantwoord hiervoor de volgende, conservatief geachte en eenvoudige betrekkingen te gebruiken:

- Voor een Zonneschoorsteen met $w \geq 1,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ > $h_{c,m} = 6,5 \cdot w$ de CHTC is alleen afhankelijk van de luchtsnelheid.
- Voor een Zonnefaçade[®] met $w \leq 1,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ > $h_c = 3,00(\theta_{gl,w} - \theta_{\infty,in})^{1/3}$ de CHTC is alleen afhankelijk van het temperatuurverschil.

[9] Een thermisch rekenmodel geeft inzicht in de gecompliceerde energiestromen binnen een zonneschoorsteen. De stralingsflux van de zon wordt deels door de glasvlakken gereflecteerd en geabsorbeerd en deels door de binnenwand geabsorbeerd. Hierdoor ontstaat een stralingsuitwisseling tussen de verschillende vlakken, die afhangt van hun materiaaleigenschappen en geometrische relaties. De temperatuur van deze vlakken, bepaald door deze stralingsuitwisseling, veroorzaakt weer de gewenste convectieve warmteoverdracht en de inherente luchtstromingen.

Met behulp van stralingswetten is een Excel rekenmodel gemaakt van de stralingsuitwisseling en temperatuurverdeling op de binnenwanden en de glaswand. Met behulp van de in hoofdstuk 8 afgeleide warmteoverdrachtscoëfficiënten kunnen met behulp van het model de luchttemperaturen en daarmee de prestaties van een zonneschoorsteen worden berekend.

Het Excel rekenmodel is gevalideerd op basis van metingen in de fysieke testopstelling; hiervoor zijn perioden genomen van een zonnige winterdag en een zomerdag waarin het proces in de zonneschoorsteen quasi stationair kon worden beschouwd. Het model blijkt de luchttemperaturen vrij nauwkeurig te kunnen voorspellen, maar het geeft een forse overschatting van de wandtemperatuur en een iets kleinere overschatting van de glastemperatuur.

10.2 Oriëntatie, Morfologie en de Stedenbouwkundige context

[10] De optimale oriëntatie voor een zonneschoorsteen ligt tussen Zuidoost en Zuidwest, maar beter is een meervoudige oriëntatie, omdat daarmee een stabielere zoninstraling over het verloop van de dag wordt verkregen. Een zonneschoorsteen hoeft daarom ook niet in het gevelvlak te liggen, maar moet bij voorkeur als piramidemodel, (tweeling)hoekmodel, of in de vorm van een serre worden uitgevoerd, al dan niet in combinatie met een inpandig of uitpandig (nood)trappenhuis. Een serre en een combinatie met een uitpandig trappenhuis biedt de beste mogelijkheden een zo groot mogelijk glasoppervlak te realiseren. Een vrijstaande zonneschoorsteen hoort eveneens tot de mogelijkheden. Het moet voor de architect een uitdaging zijn hier vorm aan te geven.

Het achter de zonneschoorsteen liggende shuntkanaal moet op één of andere wijze aansluiten op het afzuigstelsel van het gebouw. Suggesties hiervoor worden globaal aangeduid, maar de uitwerking hiervan valt buiten het bereik van dit onderzoek.

[11] De voorgaande analyses en berekeningen hebben betrekking op situaties waarin een zonneschoorsteen zonder enige belemmering door de zon kan worden beschenen. In werkelijkheid staat een gebouw zelden solitair en zullen omliggende gebouwen schaduw op de zonneschoorsteen kunnen werpen waardoor de effectiviteit ervan vermindert.

Een klimaatactief gebouw komt het beste tot zijn recht in een klimaatactieve stedenbouwkundige omgeving. Het voorliggende hoofdstuk geeft daarom globaal aan hoe de beschaduwning van een zonneschoorsteen door het stedenbouwkundig ontwerp kan worden beperkt. Voor specifieke situaties kan dit verschijnsel het beste met behulp van een zonnesimulator worden geanalyseerd.

Voor een compositie van een zestal gebouwen zijn de stedenbouwkundige randvoorwaarden bepaald voor een maximale energieopbrengst en een minimale beschaduwning. Met het oog op de zonneschoorstenen op het Zuiden zijn de gebouwen Noord-Zuid georiënteerd. Het maximaliseren van de energieopbrengst is als hoofddoel gesteld; de afstand tussen de zonneschoorsteen en de tegenoverliggende gevel is hiervoor bepalend. De minimum tussenafstanden zijn berekend voor gebouwen van 4 – 20 verdiepingen; de maand april blijkt hiervoor maatgevend te zijn.

Het minimaliseren van de beschaduwing bij laagstaande zon dient hoofdzakelijk het functioneren van de zonneshoorsteen als afzuigstelsel. De laterale afstand tussen de gebouwen is hiervoor bepalend; de minimum waarden hiervan zijn eveneens berekend.

Met de aldus berekende tussenafstanden is de compositie van de zes gebouwen in de stedenbouwkundige context geplaatst van Spacemate[®]. Hiermee zijn de Floor Space Index FSI, de Ground Space Index GSI en de Open Space Ratio OSR bepaald. Het blijkt dat de doelstellingen van maximale energieopbrengst en minimale beschaduwing kunnen worden gerealiseerd bij normaal te achten stedenbouwkundige randvoorwaarden.

[12] Het rendement van een zonneshoorsteen, gedefinieerd als de verhouding tussen de netto aan de doorstromende lucht afgegeven warmte gedeeld door de opvallende zonstraling, wordt vooral bepaald door de g-waarde en de U-waarde van het glas. De g-waarde is bepalend voor de hoeveelheid zonnestraling die de zonneshoorsteen binnenkomt; de U-waarde is bepalend voor het warmteverlies naar de buitenlucht.

Bij een optimale keuze van het glas, in dit onderzoek is dat Planitherm Solar met $g = 0,75$ en $U=1,1 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$, zijn de buitentemperatuur en de schoorsteentemperatuur van minder belang. De te behalen rendementen liggen tussen 65...70%.

[13] De hoogte van de schoorsteen en het verschil tussen de gemiddelde schoorsteentemperatuur en de buitentemperatuur zijn bepalend voor de thermische trek. Zowel de schoorsteentemperatuur als de buitentemperatuur zijn variabel, en de thermische trek is dan ook geen constante. Om eenduidig te kunnen rekenen zijn daarom de volgende referentiecondities vastgesteld:

- Buitentemperatuur $\theta_e = 20 \text{ [}^\circ\text{C]}$
- Globale straling $\Phi_{\text{zon}} = 400 \text{ [W.m}^{-2}\text{]}$

Bij lage gebouwen, globaal genomen $< 10 \text{ m}$ is de te realiseren thermische trek zeer beperkt; een hoge schoorsteentemperatuur is dan nodig. Verhoging van de thermische trek met behulp van een glasoverkapte daktuin behoort dan tot de mogelijkheden.

[14] In deze paragraaf worden op basis van standaard formules uit de luchttechniek berekeningen gemaakt van het drukverlies in shuntkanaal en zonneshoorsteen.

Om de beschikbare onderdruk voor alle aangesloten verdiepingen zo gelijk mogelijk te maken wordt het shuntkanaal gedimensioneerd op een lage snelheid van $1,0 \dots 1,5 \text{ m.s}^{-1}$.

In een zonneshoorsteen zijn door de temperatuurverschillen tussen binnenwanden en glaswand hoge turbulenties te verwachten, waardoor de luchtstroming waarschijnlijk niet voldoet aan de randvoorwaarden van de gebruikte standaard formules; dit maakt de drukverliesberekening onzeker. De kalibratie van het analytisch rekenmodel heeft echter aangetoond dat het stromingsmodel en de daarin gebruikte parameters voldoende nauwkeurig zijn.

Het toegestane externe drukverlies wordt beperkt door de thermische capaciteit en de hoogte van de zonneshoorsteen. Een zorgvuldige berekening is noodzakelijk.

[15] Een zonneshoorsteen wordt in principe gedimensioneerd op het luchtdebiet dat uit een gebouw moet worden afgezogen, en op het drukverschil dat hiervoor nodig of gewenst is. Voor het luchtdebiet kan in eerste instantie met vuistregels worden gewerkt.

Architectonische eisen kunnen met zich mee brengen dat de breedte van een zonneshoorsteen moet worden vergroot of verkleind. Het effect hiervan moet in het externe drukverlies worden gecompenseerd. Dit geldt eveneens als een groter thermisch vermogen of een hogere warmteopbrengst wordt gevraagd dan uit de berekening zou volgen.

Met behulp van een grafisch rekenmodel kan een zonneshoorsteen vrij eenvoudig worden gedimensioneerd. Op basis hiervan is een computerprogramma ontworpen.

10.3 Dimensionering en Prestaties

[16] In de voorgaande hoofdstukken zijn berekeningen voor zonneshoorstenen gemaakt bij de in hoofdstuk 13 vermelde referentiecondities.

Ontwerpcondities zijn van belang voor het dimensioneren van installaties maar hebben geen verband met werkelijke klimaatcondities. De vraag is dan ook hoe een zonneschoorsteen of Zonnefaçade[®] functioneert in het Nederlandse klimaat onder zeer uiteenlopende condities en combinaties van globale straling en buitentemperatuur. Welke temperaturen en drukverschillen zijn te verwachten? Is er risico van glasbreuk? Hoe wordt het luchtdebiet geregeld bij te lage of te hoge thermische trek? Ect.

In hoofdstuk 16 zijn deze vragen onderzocht aan de hand van een schoorsteenmodel met een hoogte van 414 verdiepingen. Hiervoor wordt het Excel rekenmodel gebruikt. De belangrijkste conclusies zijn:

- De berekende maximum glastemperaturen in een zonneschoorsteen met een luchtsnelheid van 1,5 m.s⁻¹ blijven ook bij extreme klimaatcondities ruim onder de maximum toegestane temperatuur van 80⁰C voor ongehard glas – zie paragraaf 7.5.
- In een Zonnefaçade[®] met een luchtsnelheid van 0,5 m.s⁻¹ kan bij extreme klimaatcondities de glastemperatuur hoger worden dan 80⁰C en is vanaf een bepaalde hoogte toepassing van gehard glas noodzakelijk
- *NB: Wand- en glastemperaturen zijn zeer gevoelig zijn voor de warmteoverdrachtscoëfficiënt $h_{c,m}$. Zo lang er geen absolute zekerheid is over de waarde hiervan moeten de berekende wand- en glastemperaturen met de nodige voorzichtigheid worden gehanteerd. Hogere waarden leveren lagere wand- en glastemperaturen op vice versa.*
- De berekende convectieve warmteoverdrachtscoëfficiënten voor de glaswand van een zonneschoorsteen met een luchtsnelheid van 1,5 m.s⁻¹ liggen bij een hoge stralingsflux in de orde van $h_{c,m} \approx 20 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ en zijn daarmee aanzienlijk hoger dan de analyses uit hoofdstuk 8 zouden doen verwachten.
- In een Zonnefaçade[®] met een luchtsnelheid van 0,6 m.s⁻¹ en hoge stralingsflux is de convectieve warmteoverdrachtscoëfficiënt van de glaswand afhankelijk van het aantal verdiepingen en van de buitentemperatuur en kan variëren van $h_{c,m} \approx 15 \rightarrow 12 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ in de zomer tot $h_{c,m} \approx 12 \rightarrow 9 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ in de winter bij 4 → 14 verdiepingen.
- Afhankelijk van het aantal verdiepingen en de stralingsflux kan bij lage buitentemperaturen de thermische trek toenemen tot een veelvoud van het ontwerpdrukverschil bij de referentiecondities. Met behulp van regelkleppen kan het luchtdebiet op de gewenste waarde worden gehouden.
- Bij hoge buitentemperaturen en lage stralingsflux kan de thermische trek te gering worden om de natuurlijke afzuiging in stand te houden. Als in dit geval ook de Venturi-ejector te weinig drukverschil levert kan een hulpventilator worden ingeschakeld. Het energiegebruik hiervan is zeer laag.
- Een zonneschoorsteen en Zonnefaçade[®] kan in *free running* bedrijf in principe meer zonnewarmte oogsten dan bij constant debiet. Deze bedrijfswijze conflicteert echter met het constant debiet karakter van het ventilatiesysteem en is derhalve niet nader onderzocht.

[17] Met behulp van het WIS computerprogramma is een analyse gemaakt van de g-waarde van een gekozen glasoort. Hiermee zijn drie zonneschoorsteenmodellen doorgerekend, naar hun vorm aangeduid met gevelmodel, piramidemodel en trapeziummodel. Voor een onbewolkte dag zijn de thermische prestaties in W.m⁻², de specifieke energieopbrengst in kWh.m⁻² en het profiel van de zoninstraling berekend.

De optimale zonneschoorsteen maakt gebruik van de hoge stralingsintensiteit op het Zuiden, en van de ochtendzou en de middagzou om het profiel van de zoninstraling gedurende de dag te verbeteren.

Het meervoudig georiënteerde piramidemodel en het vlakke gevelmodel op het Zuiden scoren beide goed. Een verantwoorde keus kan worden gemaakt op basis van berekeningen van de jaarlijkse energieopbrengst inclusief het thermische opslagsysteem. De architectuur van het gebouw speelt hierbij uiteraard ook een rol.

[18] Voor een raming van de jaarlijkse energieopbrengst van een zonneschoorsteen zijn verschillende bronnen beschikbaar, o.a.:

- Gemiddelde opbrengstgegevens 1971 – 2000, o.a. van het KNMI en Meteororm;
 - Het referentieklimaatjaar 1986 – 2005 volgens NEN 5060:2008
- Beide bronnen zijn gebruikt en met elkaar vergeleken; voor de berekeningen is gekozen voor de meest actuele en toekomstzekere NEN 5060:2008.

Veruit de meeste zonnestraling vindt plaats buiten het stookseizoen. Om een zonneshoorsteen optimaal tot zijn recht te laten komen is seizoenopslag van de geogste zonnewarmte nodig. Idealiter kan dit worden gecombineerd met warmteopslag van andere warmtebronnen in een gebouw.

De totale zonnestraling bestaat uit 3 componenten: directe, diffuse en gereflecteerde grondstraling. De berekening van zonnestraling op horizontale naar verticale vlakken wordt voor de 3 componenten met verschillende rekenalgoritmes uitgevoerd. In verband met de gecompliceerdheid van deze berekeningen zijn deze door VABI gemaakt.

De jaarlijkse zonnestraling is voor de vier seizoenen afzonderlijk berekend, en gecorrigeerd met het systeemrendement per seizoen. Het systeemrendement houdt rekening met het rendement van de zonneshoorsteen zelf, het opslagrendement, en het transportrendement. Warmteverliezen in de bodem en de energie die nodig is voor (warmte)pompen worden hiermee in rekening gebracht.

Relaties zijn uitgewerkt voor de warmteopbrengst en het oppervlak van zonneshoorstenen als functie van het bruto vloeroppervlak en van het geveloppervlak. Met behulp hiervan kunnen zonneshoorstenen worden berekend op basis van een bepaalde gewenste warmteopbrengst.

[19] Met een zonneshoorsteen kunnen aanzienlijke warmteopbrengsten worden gerealiseerd in periodes dat er geen warmtevraag in een gebouw is. Om deze warmte niet verloren te laten gaan is één of andere vorm van warmteopslag noodzakelijk.

Van zonneshoorstenen met inherente warmteaccumulatie, type Trombewand en PCM, is een korte analyse opgenomen. Deze typen kenmerken zich door een beperkte opslagcapaciteit, geschikt om de overdag geaccumuleerde zonnewarmte 's nachts weer af te geven. Het probleem is dat er 's nachts nauwelijks of geen warmtevraag in gebouwen is, in de zomer al helemaal niet. Deze warmte wordt dan gebruikt om de nachtventilatie te activeren en/of te stimuleren, hetgeen echter veel efficiënter en tegen gering energiegebruik met een hulpventilator in de zonneshoorsteen kan worden gerealiseerd.

Met een zonneshoorsteen in lichte, d.w.z. niet of weinig accumulerende uitvoering kunnen de grootste warmteopbrengsten worden gerealiseerd, hetgeen dan tevens de hoogste eisen aan de warmteopslag stelt.

Voor perioden in lente en herfst met afwisselende zonnestraling in combinatie met tijdelijke warmtebehoefte in het gebouw is een externe korte termijn (KT)-opslag gewenst, te realiseren in een vat gevuld met water of een water/PCM mengsel. Voor de zomerperiode is een lange termijn (LT)-opslag in een aquifer noodzakelijk. De karakteristieken hiervan worden kort omschreven.

Voor de warmteoverdracht van de warme lucht op het opslagmedium water wordt een FiWiHEX warmtewisselaar voorgesteld, die zich kenmerkt door een zeer goede warmteoverdracht van lucht op water bij een geringe luchtzijdige weerstand.

Het onderzoek is gericht op de zonneshoorsteen als zodanig, en hoewel warmteopslag een belangrijk aspect is wordt deze techniek niet uitvoerig behandeld, maar slechts op conceptueel niveau toegelicht.

10.4 Modelleren, simuleren, kalibreren en valideren

[20] In een zonneshoorsteen wordt de lucht door temperatuurverschillen tussen glas en wand asymmetrisch verwarmd. De vraag deed zich voor hoe het stromingspatroon hierdoor bij wisselende omstandigheden zou worden beïnvloed. Een neerwaartse stroming aan de glaszijde (koudeval) en eventuele verticale stratificatie bij lagere buitentemperaturen zou consequenties kunnen hebben voor het drukverlies en de thermische trek. Dit effect wordt versterkt door een binnenwand met lage emissiecoëfficiënt en de vraag deed zich voor of de hiervoor gemaakte keuze in dit opzicht wel de optimale was.

Met behulp van numerieke stromingssimulatie (CFD) zijn de stromingsverschijnselen op microniveau geanalyseerd. De verwachte stromingseffecten worden kwalitatief door de simulaties niet bevestigd. Kwantitatief zijn er echter nauwelijks overeenkomsten met de in de fysieke testopstelling gemeten waarden, vooral met betrekking tot de wand- en glastemperaturen. In hoeverre dit te wijten is aan onzekerheid inzake het toegepaste algoritme voor de convectieve warmteoverdrachtscoëfficiënt is niet duidelijk geworden.

Bij vergelijking van het fysieke testmodel van $0,25 * 11$ m met een groter model van $1,0 * 44$ m blijken de simulaties voldoende overeenkomsten te hebben voor de conclusie dat de simulatieresultaten voldoende schaalafhankelijk zijn.

[21] Er is een fysieke testopstelling gebouwd met behulp waarvan de in werkelijkheid optredende fenomenen van warmteoverdracht en stromingen in een zonneshoorsteen zijn gemeten. De meetwaarden konden worden vergeleken met de in het Excel rekenmodel en het CFD stromingsmodel berekende waarden, waardoor het inzicht in het functioneren van een zonneshoorsteen werd verdiept. De metingen zijn uitgevoerd met een constant debiet op basis van een luchtsnelheid van 1 m.s^{-1} die indien nodig met een hulpventilator in stand werd gehouden.

De metingen gaven een goed beeld van de gecompliceerde thermodynamische processen in een zonneshoorsteen. Door de dagelijkse gang van de zonnestraling werden grote temperatuurverschillen over de breedte van de absorber gemeten. Ondanks de thermisch lichte constructie werd een aanzienlijke faseverschuiving vastgesteld tussen de maxima van de stralingsflux en de temperaturen van absorber en glaswand. Het was niet eenvoudig om ondubbelzinnig gemiddelde waarden van de optredende temperaturen en luchtsnelheden vast te stellen, ondanks het grote aantal meetpunten. Desondanks kon op basis van de metingen het dynamische ESP-r simulatiemodel met voldoende nauwkeurigheid worden gekalibreerd en gevalideerd.

[22] Voor het ontwerp van een zonneshoorsteen is een betrouwbaar rekenmodel voor de praktijk nodig. Voor de ontwikkeling van dit model kan gebruik worden gemaakt van het Excel rekenmodel en van het ESP-r simulatiemodel. Beide modellen zijn hiertoe gekalibreerd en gevalideerd op basis van werkelijke meetgegevens uit de fysieke testopstelling. Hierbij wordt aangetekend dat het Excel rekenmodel een veel grovere benadering is van de werkelijkheid dan het geavanceerde en sophisticated ESP-r model. Anderzijds sluit het met betrekking tot een grotere inzichtelijkheid beter aan bij de ingenieurspraktijk.

Het hoofdstuk heeft betrekking op de kalibratie en validatie van het Excel rekenmodel. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen het thermisch model en het stromingsmodel. Het thermisch model omvat het stelsel van betrekkingen die de warmteoverdracht in een zonneshoorsteen bepalen, temperatuurverschillen en warmteoverdrachtscoëfficiënten. Het stromingsmodel omvat het stelsel van betrekkingen die de luchtstroming bepalen, drukverschillen en drukverliezen.

Voor het thermisch model is de in hoofdstuk 8 ontwikkelde functie voor de warmteoverdrachtscoëfficiënt geëvalueerd. De luchttemperaturen, konden via deze functie met een marge van $+1^{\circ}\text{C}$ nauwkeurig worden voorspeld. De berekende glas- en wandtemperaturen liggen echter met respectievelijk $+3,5^{\circ}\text{C}$ en $+10,5^{\circ}\text{C}$ aanzienlijk hoger dan de gemeten waarden. Via *trial and error* is de functie zodanig gekalibreerd dat de berekende lucht- wand- en glastemperaturen een goede overeenkomst vertonen met de gemeten waarden, zowel voor een winterdag als een zomerdag. Deze methode is echter speculatief omdat niet bekend is of de geconstateerde afwijkingen het gevolg zijn van een foutieve functie, van fouten in het model of van beide.

Vastgesteld is dat de luchttemperatuur nauwelijks gevoelig is voor een te hoge of te lage warmteoverdrachtscoëfficiënt. De ingestraalde zonnewarmte heeft maar weinig mogelijkheden te “ontsnappen” en afwijkingen in de waarde van de warmteoverdrachtscoëfficiënt worden in het model gecompenseerd door te lage of te hoge wandtemperaturen. De energieprestaties van een zonneshoorsteen kunnen dus, onafhankelijk van de gebruikte betrekking voor de warmteoverdrachtscoëfficiënt, goed worden voorspeld. Voor een realistische voorspelling van wand- en glastemperaturen is een correcte functie van de warmteoverdrachtscoëfficiënt uiteraard wel van belang

Het Excel rekenmodel gaat uit van *steady-state* condities, maar bij nadere beschouwing blijkt de warmtecapaciteit van het onderzoeksmodel, ondanks de lichte constructie, zo groot te zijn dat hiervan nauwelijks kan worden gesproken. Bovendien blijkt uit de *real-time* metingen dat tussen de maxima van de stralingsflux enerzijds en de glas- en wandtemperatuur anderzijds een faseverschuiving optreedt van ca 1,5 uur.

Uitgangspunt voor het stromingsmodel is dat onder referentiecondities de drukverliezen in een zonneshoorsteen in evenwicht zijn met de thermische trek. Het hiervoor ontwikkelde rekenmodel is omschreven in hoofdstuk 15.

Het rekenmodel is toegepast bij het ontwerp van de fysieke testopstelling. Op basis van metingen is nagegaan of en in hoeverre de uitgangspunten voor het ontwerp, drukverliezen door wrijving en plaatselijke weerstanden, overeenkomen met de werkelijkheid. Voor een zomerdag waarop de referentiecondities werden benaderd, zijn de berekende en de gemeten waarden vergeleken. Vastgesteld werd dat de thermische trek en het drukverlies gedurende deze dag globaal in evenwicht zijn. Verdere kalibratie van het rekenmodel blijkt derhalve niet nodig.

Het drukverlies door wrijving is in een zonneshoorsteen gering. Drukverliezen door plaatselijke weerstanden, met name de instroomopening en de regelklep zijn duidelijk dominant.

[23] Een door specialisten van TU/e ontworpen dynamisch simulatiemodel van de zonneshoorsteen in de ESP-r omgeving is gekalibreerd en gevalideerd op basis van de metingen in de fysieke testopstelling. De bandbreedte van de onzekerheidsmarges die de voorspellingen beïnvloeden is $\approx \pm 20\%$. Voor het dynamische proces in een zonneshoorsteen met vele variabelen wordt dit een redelijke marge geacht.

Het gevalideerde model kan worden gebruikt voor het voorspellen van energie- en massastromen in een zonneshoorsteen onder invloed van de thermodynamische koppeling tussen energie (geleiding, convectie en straling) en luchtstromen.

[24] Een Zonneshoorsteen en Zonnefaçade[®] hebben een dubbelfunctie: afzuigen van ventilatielucht en oogsten van zonnewarmte. Door de lage drukverliezen in het afzuigstelsel zijn de mogelijke besparingen op ventilatorenergie gering. Zonnewarmte daarentegen kan een substantiële bijdrage leveren aan het warmtegebruik van een gebouw. Het ligt dan ook voor de hand het ontwerp van een zonneshoorsteen te optimaliseren op energieprestaties.

Intuïtief werd verondersteld dat een binnenwand met geringe warmtecapaciteit voor beide functies de beste resultaten, i.c. het hoogste rendement zou opleveren. Hoe minder warmte in de binnenwanden wordt geaccumuleerd, des te hoger de wandtemperaturen en de thermische trek voor het afzuigstelsel. Hoe minder geaccumuleerde warmte, des te geringer de warmteverliezen als aan het einde van de werktijd de ventilatie wordt gestopt.

Met behulp van dynamische simulaties is aangetoond dat een Zonneshoorsteen en Zonnefaçade[®], uitgevoerd met thermisch lichte binnenwanden, een betere energieprestatie heeft dan een uitvoering met zware wanden. Simulaties zijn uitgevoerd met ESP-r en met Matlab; beide leveren globaal genomen dezelfde resultaten. Bij een optimale bedrijfswijze is, mede afhankelijk van de convectieve warmteoverdrachtscoëfficiënt en de hoogte, een jaarrendement bereikbaar van 55%...60% tegenover 35% ...50% bij een zware constructie.

De simulatieresultaten worden bevestigd door metingen in de fysieke testopstelling, die eveneens een rendement van 55%...60% laten zien.

[25] Het is de architect die in de conceptuele fase en bij het voorlopig ontwerp de basis legt voor de architectonische integratie van een Zonneshoorsteen of een Zonnefaçade[®] in een gebouw. Voor deze intuïtieve en iteratieve ontwerpfasen is een eenvoudig en gebruiksvriendelijk rekenmodel nodig, dat met een muisklik architectonische varianten en de energetische consequenties daarvan in beeld brengt. Voor de ontwikkeling van een dergelijk model wordt voortgebouwd op de onderzoeksresultaten van Taakgroep 41 van het Solar Heating and Cooling onderzoek van het International Energy Agency IEA.

Een Zonneshoorsteen en een Zonnefaçade[®] hebben een dubbelfunctie. Als natuurlijk afzuigstelsel van de gebouwventilatie moet een dimensionerende berekening worden gemaakt. Voor het oogsten van zonne-energie moet de jaarlijkse energieopbrengst worden bepaald. Het Programma van Eisen dient te vermelden welke functie bepalend is. Als prominent responsief bouwdeel moet het ontwerp tevens worden afgestemd op het architectonisch ontwerp, hetgeen met zich meebrengt dat de functie-eisen kunnen worden overschreden of onderschreden.

Het gepresenteerde rekenmodel voor een dimensionerende berekening is afgeleid van de grafische methode die wordt voorzien van een gebruiksvriendelijke interface. Voor een aldus gedimensioneerde

Zonneschoorsteen of Zonnefaçade[®] kan met behulp van kengetallen op eenvoudige wijze de energieprestatie worden bepaald. Het dynamisch simulatiemodel ESP-r kan worden gebruikt om in de definitief ontwerpfase (DO) het ontwerp en de energieprestatie nauwkeuriger te bepalen.

[26] Met behulp van parametrische en statistische analyse en is het mogelijk de relatieve invloed van de verschillende ontwerpvariabelen op de prestatie-indicatoren te definiëren. Deze methodologie is in principe geschikt voor het bepalen van de optimale combinatie van de ontwerpvariabelen van een Zonneschoorsteen en een Zonnefaçade[®].

De prestatie van een Zonneschoorsteen of een Zonnefaçade[®], uitgedrukt in prestatie-indicatoren, wordt door vele variabelen bepaald zoals de geometrische vorm en afmetingen, de oriëntatie, de fysieke uitvoering – g-waarde en U-waarde van het glas, spectrale eigenschappen- en het thermodynamisch proces in de schoorsteen – temperaturen en luchtsnelheden.

Om het aantal simulaties te beperken is gebruik gemaakt van een statistische analyse. Hiervoor is Latin Hypercube Sampling gebruikt waardoor met een beperkt aantal simulaties een betrouwbaar beeld van de werkelijke variabiliteit wordt verkregen. In totaal zijn 100 simulaties uitgevoerd met het dynamisch ESP-r simulatiemodel. Met behulp van een gevoeligheidsanalyse is de invloed van de invoervariabelen op de prestatie-indicatoren geanalyseerd. Zoals te verwachten is het oppervlak van de glaswand de dominante prestatie-indicator voor de jaarlijkse energieopbrengst. Andere parameters hebben minder invloed, hetgeen in overeenstemming is met de rendementsanalyse in hoofdstuk 12.

De simulatieresultaten zijn met behulp van lineaire regressieanalyse verwerkt. Op basis hiervan wordt een jaarrendement van de zonneschoorsteen berekend van $40\% \pm 9\%$, hetgeen aanzienlijk lager is dan de $55\%...60\%$ uit de rendementsanalyse van hoofdstuk 12. De oorzaken hiervan kunnen worden geweten aan de onzekerheidsmarges van $\pm 20\%$ in het ESP-r model en de onzekerheden van de parametrische analyse zelf. Het lineaire model blijkt dus in principe bruikbaar te zijn, maar de nauwkeurigheid moet worden verbeterd. Een niet lineaire regressie, uitgevoerd met een kunstmatig neurale netwerk laat een geringe verbetering zien.

De resultaten van de parametrische analyse kunnen in principe als invoer worden gebruikt voor het Rekenmodel Energieprestaties voor het conceptueel ontwerp en de dimensionering van een Zonneschoorsteen of een Zonnefaçade[®]. Besloten is echter uit te gaan van de in hoofdstuk 24 vermelde waarden.

Gesteld kan worden dat de geavanceerde en sophisticated methode van parametrische analyse verder moet worden ontwikkeld alvorens deze met succes kan worden toegepast. Verder onderzoek moet uitwijzen welke methode uiteindelijk de meest bruikbare is.

11. SAMENVATTING DEELRAPPORT (II) – ONDERZOEK NATUURLIJKE VENTILATIE EN HET VENTECDAK[®]

11.1 Wind, luchtkwaliteit en ventilatie

[5]¹ Het Earth, Wind & Fire concept maakt met behulp van het Ventedak[®] 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 vlaggerigheid 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.

¹ De nummers tussen de haken verwijzen naar de betreffende hoofdstukken

[8] 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.

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.

11.2 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 zonnescchoorsteen 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 daksniveau 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 Zonnescchoorsteen 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 Excel 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 luchtafzuiggebied 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. In een case study is hiervan met behulp van ESP-r een dynamische analyse gemaakt –zie deelrapport (IV).

Om los van een 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[®] en met een Coanda-ejector in een vleugel. De laatstgenoemde optie is 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.

Tenslotte 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[®].

11.3 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 luchtsnelheid 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 zeer betrouwbaar zijn.

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 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.

[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 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. 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 dakhoogte en de C_p -waarden. De referentie windsnelheid wordt bepaald door de potentiële windsnelheid U_{10} , de ruweidklasse 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 C_p -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 kan de hoogte van het bovenkanaal worden beperkt tot 1,0 m bij een luchtsnelheid 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. Deze drukverschilregeling dient in een vervolgonderzoek in samenhang met de debietregeling op werkplekniveau nader te worden onderzocht.

11.4 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 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 met respectievelijk 4, 8 en 12 turbines $\varnothing 2,5\text{m}$ in de overdrukkamer. De jaarproductie van deze turbines, uitgedrukt in kWh.a^{-1} per m^2 rotoroppervlak, is afhankelijk van de gebouwhoogte. Bij een hydraulisch rendement van 75% zijn energieproducties berekend van $\approx 200 \text{ kWh.m}^{-2}.\text{a}^{-1}$ bij een gebouwhoogte van 20 m tot $780 \text{ kWh.m}^{-2}.\text{a}^{-1}$ 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.

12. SAMENVATTING DEELRAPPORT (III) - ONDERZOEK KLIMAATCASCADE[®] EN HET GEO-KLIMAATCONCEPT[®]

12.1 Luchtreiniging en architectonische inpassing

[5] Luchtfilters in luchtbehandelingsinstallaties dienen in de eerste plaats om vervuiling van de installatie te voorkomen. Voor de kwaliteit van het binnenmilieu kunnen ze door hun geuremissie als een noodzakelijk kwaad worden beschouwd. In het *Earth, Wind & Fire* concept, waarbij het gebouw fungeert als machine voor de klimaatregeling, is luchtfiltering in principe niet nodig.

De zelfreinigende klimaatcascade fungeert in beperkte mate als luchtwasser voor grotere stofdeeltjes. Bovendien worden verschillende verontreinigingen in de buitenlucht in het sproeispectrum geabsorbeerd.

Indien om één of andere reden luchtfiltering noodzakelijk wordt geacht, kunnen elektrostatische luchtfilters worden toegepast, die een zeer laag drukverlies combineren met een zeer hoog rendement, ook voor fijn stof. Het verdient hierbij aanbeveling de luchtvochtigheid in het filter te beperken tot 90%. Om dit te realiseren kan de lucht worden voorverwarmd met behulp van een buiten de hoofdluchtstroom geplaatste verwarmingsunit.

[6] Hart van het Geo-Klimaatconcept[®] is de Klimaatcascade[®], waarin de ventilatielucht al naar gelang het seizoen wordt gekoeld en gedroogd dan wel verwarmd en bevochtigd. In de Klimaatcascade[®] wordt ook overdruk opgewekt, waarmee de drukverliezen in het luchttransportsysteem kunnen worden gecompenseerd. De winddruk speelt hierbij een aanvullende, maar wisselende rol.

Het Geo-Klimaatconcept[®] werkt zonder ventilatoren en het luchttransportsysteem moet dan ook worden ontworpen op basis van lage luchtsnelheden en lage drukverliezen. De afmetingen van de benodigde schachten en kanalen zijn hierdoor groter dan bij mechanische systemen. Het luchttransportsysteem wordt daarom idealiter in het architectonisch bouwkundig ontwerp geïntegreerd.

Voor enkele gebouwtypen is schematisch aangegeven hoe deze integratie kan worden gerealiseerd:

- Enkel corridor gebouw, met luchttoevoer via geïntegreerde gevelkanalen of inpandige kanalen en luchtafzuiging via de plafondruimten van de corridors.
- Atrium gebouw met luchttoevoer via geïntegreerde gevelkanalen en afzuiging via het atrium.
- Atriumgebouw met luchttoevoer via het atrium en afzuig via geïntegreerde gevelkanalen of inpandige kanalen.
- Dubbel corridorgebouw als variant op het atriumgebouw.

Bij deze gebouwtypen worden de gevelkanalen en de inpandige kanalen idealiter geïntegreerd met de draagconstructie.

Bij de toepassing van het Geo-Klimaatconcept[®] voor grote renovaties van bestaande gebouwen is integratie van het luchttransportsysteem in het architectonisch en bouwkundig ontwerp niet of nauwelijks uitvoerbaar. Voor dergelijke gevallen wordt een systematiek omschreven waarbij gebruik wordt van gemaakt van bestaande installatieschachten. De luchttoevoer wordt hierbij gerealiseerd via de plafondruimte en de luchtafzuiging via de corridors. Dit concept is uitgewerkt voor de *case study* – deeloprapport (IV).

[7] Adiabatische koeling in zgn. *Direct Evaporative Cooling Towers* geniet een toenemende populariteit in landen met een warm en droog klimaat. In een adiabatisch proces wordt geen warmte toe- of afgevoerd, en blijft de warmte-inhoud of enthalpie van de lucht constant. Koeling van de lucht vindt plaats door verdamping van water, waarbij de verdampingswarmte aan de lucht wordt onttrokken. Hierdoor daalt de luchttemperatuur en stijgt de luchtvochtigheid. In het Nederlandse klimaat met vaak hoge relatieve vochtigheid van de buitenlucht komt directe verdampingskoeling in principe niet voor kantoorgebouwen in aanmerking.

Enkele voorbeelden worden gegeven van toepassingen in landen met een warm en droog klimaat alsmede een uitgebreide bibliografie van uitgevoerd onderzoek.

12.2 Psychometrische prestaties en rekenmodel

[8] In tegenstelling tot een adiabatisch proces -zie hoofdstuk 7, wordt in een diabatisch proces warmte afgevoerd. Dit gebeurt door gekoeld water toe te voeren, dat warmte en vocht uit de luchtstroom opneemt waardoor de lucht wordt gekoeld en gedroogd, terwijl het water in temperatuur stijgt. Hoofdstuk 8 geeft zuiver op basis van psychometrische analyse een voorlopig beeld van:

- het psychometrisch proces in een Klimaatcascade[®];
- de hiervoor benodigde koelwatertemperaturen en -debieten;
- de koelprestaties van een Klimaatcascade[®];
- de koudefactoren in vergelijking met conventionele koelsystemen;
- de energetische aspecten.

De eigenschappen van een Klimaatcascade[®] als warmtewisselaar worden in hoofdstuk 9 onderzocht. Op basis hiervan is een rekenmodel voor warmte- en stofoverdracht in een Klimaatcascade[®] ontwikkeld, waarmee de psychometrische berekeningen zijn uitgewerkt -zie hoofdstuk 11. Het rekenmodel is verder vergeleken met een numeriek CFD stromingsmodel -zie hoofdstuk 16, een dynamisch ESP-r simulatiemodel -zie hoofdstuk 18, en tenslotte gevalideerd en gekalibreerd in een fysieke testopstelling -zie hoofdstuk 17.

Uitgangspunt voor de diabatische koeling is dat de benodigde koude aan de bodem wordt onttrokken, waardoor de temperatuur van het koelwater is beperkt tot $\approx 13^{\circ}\text{C}$. Voor de koeling van de lucht is alleen pompenergie nodig die uiteraard toeneemt naarmate het aantal bouwlagen van een gebouw groter wordt. Het energiegebruik voor koeling van lucht met behulp van een Klimaatcascade[®] is bij gebouw/klimaattype ALPHA maar een fractie van het energiegebruik van conventionele koudeopwekking. Ook bij BETA gebouwen is de energiebesparing zeer aanzienlijk, vooral bij niet te hoge gebouwen.

De Klimaatcascade[®] die aanvankelijk alleen als koelwasser was bedoeld, is in de loop van het onderzoek doorontwikkeld tot universeel en volwaardig element voor *year-round* luchtbehandeling inclusief (voor)verwarming en bevochtiging -zie hoofdstuk 12.

[9] Een Klimaatcascade[®] kan worden beschouwd als een bijzondere uitvoering van een warmtewisselaar waarin het primaire medium, gekoeld water, in direct contact staat met het secundaire medium, de lucht. Het warmtewisselend oppervlak wordt gevormd door de waterdruppels van het primaire medium en de wanden van de cascade.

De warmte- en stofoverdracht van water op lucht in een Klimaatcascade[®] komt overeen met de psychometrisch benodigde enthalpieverandering van de lucht. Het warmtewisselend oppervlak van de cascade moet in combinatie met de warmteoverdrachtscoëfficiënt en het temperatuurverschil tussen water en lucht deze warmte- en stofoverdracht mogelijk maken. Bij de analyse hiervan is in eerste instantie uitgegaan van de benodigde koelcapaciteit in het koelseizoen.

Het warmtewisselend oppervlak van een Klimaatcascade[®] wordt in hoofdzaak bepaald door het cumulatieve oppervlak van de waterdruppels en de verblijfsduur hiervan in de cascade. Daarnaast speelt ook het wandoppervlak van de cascade een rol bij de warmteoverdracht, zij het minder prominent.

De verblijfsduur van de waterdruppels is een functie van de valsnelheid en de hoogte van de cascade. De valsnelheid wordt op zijn beurt weer bepaald door het druppelgewicht, en dus door de diameter van de druppels. Elke waterdruppel maakt deel uit van een druppelverzameling met uiteenlopende diameters en valsnelheden. Het cumulatieve oppervlak wordt bepaald door de distributieve verdeling van druppeldiameters in de sproeizone.

De warmteoverdrachtscoëfficiënt tussen lucht en water is een functie van de diameter en de valsnelheid van de waterdruppels; de functies zijn dus onderling gerelateerd. Een berekening of raming van de thermische prestaties van een Klimaatcascade[®] is daarom gecompliceerd. Het in werkelijkheid optredende sproeipatroon is moeilijk te voorspellen; veel hangt af van de uitvoering van de sproeiers, de waterdruk en de hoogte van de Klimaatcascade[®]. De analyses zijn echter van belang om een beter inzicht te krijgen in de uitgangspunten voor de CFD simulaties en de fysieke testopstelling.

Het spectrum van druppeldiameters in een Klimaatcascade[®] met de daarbij behorende parameters is geanalyseerd. Met behulp van literatuurgegevens is op basis van een gemeten distributieve verdeling een cumulatieve massaverdeling berekend. Deze dient als uitgangspunt voor de karakterisering van het sproeispectrum en de berekening van het cumulatieve oppervlak voor verschillende andere spectra. Een deel van het koelwater valt op de wanden van de Klimaatcascade[®] en vormt daar een waterfilm die ook een, zij het geringe rol speelt bij de warmteoverdracht..

De valsnelheid van waterdruppels is enerzijds bepalend voor hun verblijfstijd in de Klimaatcascade[®], anderzijds voor de warmteoverdracht tussen lucht en water. Met behulp van gangbare theorieën uit de stromingsleer is een functie afgeleid die de relatie tussen de diameter en de valsnelheid weergeeft. Deze is vergeleken met meteorologisch onderzoek naar de valsnelheid van regendruppels.

Het werkzame oppervlak van een Klimaatcascade[®] wordt hoofdzakelijk gevormd door het cumulatieve oppervlak van de druppelverzameling in de sproeizone. Op basis van metingen in de sproeizone van een koeltoren uit de literatuur is het werkzame oppervlak in een Klimaatcascade[®] gekarakteriseerd. Hieruit is een algoritme ontwikkeld voor de karakterisering van verschillende fijnere sproeispectra.

De warmte- en stofoverdrachtscoëfficiënten tussen lucht en water in de sproeizone en de wanden is geanalyseerd. De warmteoverdrachtscoëfficiënt in de sproeizone blijkt een factor ≈ 20 hoger te zijn dan die tussen wanden en lucht.

Formules zijn ontwikkeld voor de capaciteitsberekening van een Klimaatcascade[®]. Voor een transparante cascade, die de waterval van buiten af zichtbaar maakt, is een aanvullend rekenalgoritme ontwikkeld.

Op basis van de analyses in hoofdstuk 9 is een Excel rekenmodel gemaakt voor de warmte- en stofoverdracht in een Klimaatcascade[®], met behulp waarvan de koelprestaties zijn berekend van een Klimaatcascade[®] voor gebouwen van uiteenlopende omvang en hoogte –zie hoofdstuk 10 en 11.

Simulaties met het Excel rekenmodel zijn ook vergeleken met CFD stromingssimulaties –zie hoofdstuk 16, en een dynamische ESP-r simulatie –zie hoofdstuk 18. De simulaties zijn tenslotte gevalideerd en gekalibreerd op basis van metingen in een fysieke testopstelling –zie hoofdstuk 17.

[10] Het warmte- en massatransport in een Klimaatcascade[®] is een gecompliceerd proces waarin vele, vaak onderling gerelateerde variabelen een rol spelen. Een unieke eigenschap van een Klimaatcascade[®] is verder dat het werkzame oppervlak geen vaste waarde is, zoals bij traditionele warmtewisselaars. Door het variëren van het sproeispectrum kan het warmtewisselend oppervlak worden vergroot of verkleind, waardoor bij een gelijke koelprestatie het debiet en het temperatuurtraject van het koelwater kunnen worden beïnvloed.

Om een energetisch zo gunstig mogelijk ontwerp mogelijk te maken is het noodzakelijk over een rekenmodel voor het warmte- en massatransport in een Klimaatcascade[®] te kunnen beschikken, met behulp waarvan het ontwerp kan worden geoptimaliseerd. Een dergelijk model is in MS EXCEL ontwikkeld door Dr. ir. Wim van der Spoel en dr. Regina Bokel, beide van TU Delft. Benaderd vanuit twee invalshoeken, respectievelijk op basis van fysische beschouwing en op basis van differentiaalvergelijkingen van de warmte- en massabalans, is een elegant en werkbaar model tot stand gekomen. Dr.Dipl.-Ing. Marija Trcka van TU Eindhoven is hierbij als *reviewer* opgetreden.

Hoofdstuk 10 geeft een beschrijving van de alfaversie van het rekenmodel. Een bètaversie is gebruikt voor de berekeningen in hoofdstuk 11 en voor het optimaliseren van het ontwerp voor de fysieke testopstelling. Het Excel rekenmodel is in de loop van het onderzoek doorontwikkeld, mede op basis van de CFD simulaties en metingen in de fysieke testopstelling.

Belangrijke effecten, die een wezenlijke invloed kunnen hebben op de warmte- en stofoverdracht in een Klimaatcascade[®] zijn in de bètaversie nog niet uitgewerkt, zoals:

- De ontwikkeling van het sproeispectrum bij de val van de waterdruppels, waarbij door verschillen in valsnelheid druppels kunnen coaguleren of uiteenvallen.
- Het percentage van het waterdebiet dat op de wanden van de Klimaatcascade[®] terechtkomt, en niet deelneemt aan het proces van warmte- en stofoverdracht in het sproeispectrum.
- De invloed van de variërende valsnelheid van waterdruppels tussen beginsnelheid en eindsnelheid.

[11] Het Excel rekenmodel volgens hoofdstuk 10 is toegepast voor het dimensioneren van een Klimaatcascade[®] van 4 tot 20 verdiepingen hoog, luchtdebieten van 20.000 tot 100.000 m³.h⁻¹ en luchtsnelheden van 1,5 – 2,0 en 2,5 m.s⁻¹ voor gebouw/klimaattypen ALPHA en BETA.

De koelprestatie van een Klimaatcascade[®] wordt bepaald door het temperatuurtraject van het koelwater, de water/luchtverhouding, het sproeispectrum en de hoogte. Om het benodigde pompvermogen zo klein mogelijk te houden zijn een zo laag mogelijke koelwatertemperatuur en een zo klein mogelijke water/luchtverhouding gewenst. Hierbij moet worden gewaakt voor psychometrisch ongewenste effecten zoals adiabatistische luchtbevochtiging in de koelperiode (negatieve latente koeling) en een te hoge luchtvochtigheid van de toevoerlucht.

Het benodigde sproeispectrum is afhankelijk van de hoogte van de cascade. Bij hogere gebouwen kan een grover sproeipatroon worden gebruikt en omgekeerd. De luchtsnelheid in de Klimaatcascade[®] heeft nauwelijks invloed op de koelprestatie. Het aandeel van de cascadowanden in de totale koelprestatie is bij type ALPHA beperkt tot 5 à 15%, afhankelijk van de hoogte, en bij type BETA met ≈ 5% vrijwel verwaarloosbaar.

Volgens de berekeningen bedraagt het aandeel latente koeling bij type ALPHA ca 10...15% van de totale koelprestatie, bij een koelwatertemperatuur van 13^oC en een water/luchtverhouding van 0,4. Bij type BETA is dit aandeel 20...23% bij een koelwatertemperatuur van 14^oC en wisselende water/luchtverhoudingen van 1,2...1,4, afhankelijk van de cascadehoogte. De relatieve vochtigheid aan de voet van de Klimaatcascade[®] ligt bij type ALPHA tussen 85% en 90% en bij type BETA tussen 95% en 99%.

De metingen in de fysieke testopstelling zijn naderhand gebruikt voor de validatie van het Excel rekenmodel. Luchttemperaturen, en daarmee de voelbare prestaties van een Klimaatcascade[®] kunnen met een hoge graad van nauwkeurigheid worden berekend. De berekening van de vochtinhoud van de lucht, en daarmee van de latente prestaties, is minder nauwkeurig –zie hoofdstuk 18.

[12] De ontwerpcondities voor een Klimaatcascade[®] zijn gebaseerd op het leveren van gekoelde lucht in de koelperiode. Bij lagere buitentemperaturen moet de ventilatielucht worden verwarmd tot de toevoertemperatuur van 18^oC. Als de Klimaatcascade[®] hiervoor wordt ingezet vindt tevens luchtbevochtiging plaats, hetgeen onder winterse condities een gewenst fenomeen is. Om echter in de tussenseizoenen de relatieve vochtigheid in de ruimte te beperken tot maximaal 40% is slechts een partiële verwarming in de cascade mogelijk; naverwarming tot 18^oC moet buiten de Klimaatcascade[®] worden gerealiseerd.

In hoofdstuk 12 worden drie systeemvarianten onderzocht:

- A - Partiële verwarming en bevochtiging in de Klimaatcascade[®] met behulp van warm sproeiwater + externe naverwarming tot 18^oC.
- B - Partiële verwarming en bevochtiging in de Klimaatcascade[®] met behulp van externe voorverwarming gevolgd door adiabatistische koeling + externe naverwarming tot 18^oC.
- C – Totale verwarming tot 18^oC buiten de Klimaatcascade[®] al dan niet met separate externe luchtbevochtiging.

De systeemvarianten A en B zijn onderverdeeld in de varianten A1, A2 en B1, B2. Bij A1 en B1 is de Klimaatcascade[®] alle seizoenen door in bedrijf waarbij de luchtvochtigheid in de ruimte kan oplopen tot 60% RV. Bij A2 en B2 wordt het sproeisysteem in de Klimaatcascade[®] in de tussenseizoenen uitgeschakeld waardoor de luchtvochtigheid tot 40% wordt beperkt. Een evaluatie van de bouwfysische consequenties hiervan is projectgebonden.

De varianten onderscheiden zich voor wat betreft energiegebruik, robuustheid, luchtbevochtiging, bevroeringsrisico, thermische, aerodynamische en hydraulische trek, luchtwasserfunctie, legionellarisico en condensrisico in het gebouw. De varianten zijn op al deze aspecten beoordeeld. Systeemvariant A1, waarbij de Klimaatcascade[®] 100% van de tijd in bedrijf is, past het beste in het robuuste en energiezuinige Geo-Klimaatconcept[®]. Bevroering van sproeiwater bij zeer lage buitentemperaturen blijkt bij de normale water/luchtfactoren niet op te treden - zie hoofdstuk 17. Systeemvariant C waarbij de Klimaatcascade[®] buiten het koelseizoen niet actief in gebruik is en slechts dient als aanzuigkanaal voor de lucht, is een veilige optie voor toepassing in condensgevoelige gebouwen.

12.3 Luchtverplaatsing en fysisch/chemische aspecten

[13] Om de gewenste luchtverplaatsing in een gebouw tot stand te brengen beschikt het Geo-Klimaatconcept[®] concept over verschillende drijfkrachten. Externe drijfkracht wordt geleverd door de wind, die via het Ventecdak[®] positieve drukken kan leveren voor de luchttoevoer en, in combinatie met de zonneshoorsteen, negatieve drukken voor de luchtafvoer - zie deelrapport (II). Interne drijfkrachten binnen het Geo-Klimaatconcept[®] zijn de aerodynamische trek, de hydraulische trek en de thermische trek in de Klimaatcascade[®]. De combinatie van externe en interne drijfkrachten moet gedurende het grootst mogelijke deel van de bedrijfstijd in staat zijn de gewenste luchtverplaatsing in een gebouw te realiseren.

Aerodynamische trek is het sterkst bij de fijnste druppelspectra, vrijwel verwaarloosbaar bij de grofste spectra en sterk afhankelijk van de sproeidruk, de sproeihoek en de geometrische verhoudingen van de Klimaatcascade[®]. In vergelijking met de hydraulische en de thermische trek is de invloed op het functioneren van de Klimaatcascade[®] gering.

Hydraulische trek¹ is een krachtige “luchtbeweger”, en voor het functioneren van een Klimaatcascade[®] van dominant belang. Opvallend is dat in de literatuur geen informatie over dit fenomeen te vinden is. Bij Klimaatcascades[®] voor adiabatische koeling (*Passive Draught Evaporative Cooling PDEC*) – zie hoofdstuk 7 is de strategie gericht op maximale verdamping van de waterdruppels, waarbij uiteraard geen hydraulische trek optreedt.

Thermische trek is alleen nuttig voor het functioneren van een Klimaatcascade[®] als deze benedenwaarts is gericht, dus in de koelperiode. Als in de stookperiode en de tussenseizoenen de lucht in de Klimaatcascade[®] wordt verwarmd is de opwaarts gerichte thermische trek ongewenst. Dit effect wordt door hydraulische trek gecompenseerd, waardoor onder alle omstandigheden een positieve luchtbeweging in het ventilatiesysteem kan worden gerealiseerd.

Natuurlijke drijfkrachten zijn naar hun aard wisselvallig en tevens afhankelijk van de vorm, de hoogte en de stedenbouwkundige context van het gebouw. Er kan onder omstandigheden een tekort aan ventilatiecapaciteit ontstaan, maar evengoed een surplus. Een tekort zal worden gecompenseerd met behulp van een regelbare axiaalventilator in de Klimaatcascade[®]. Een surplus wordt voorkomen met behulp van regelbare kleppen in het luchttoevoersysteem. Het gewenste ventilatie-debiet zal onder alle omstandigheden kunnen worden gerealiseerd, waarbij wordt aangetekend dat bij gunstige weersomstandigheden vergroting van de ventilatiecapaciteit in principe mogelijk is zonder consequenties voor ventilatorenergie en ventilatiegeluid. Dit geeft het natuurlijk werkende Geo-Klimaatconcept[®] in vergelijking met mechanische ventilatie een bijzonder voordeel.

[14] In een Klimaatcascade[®] treedt het zgn. watervaleffect op waarbij negatieve ionen worden gevormd, waaraan een positieve invloed op de kwaliteit van de ruimtelucht wordt toegeschreven. Een literatuurstudie naar de effecten van negatieve ionen op het binnenmilieu levert geen duidelijk beeld op. Wel kan worden gesteld dat in een Klimaatcascade[®] de natuurlijke ionenbalans in stand blijft, dit in tegenstelling tot de situatie bij mechanische systemen van ventilatie en airconditioning.

Ozonemissie uit elektrostatische luchtfilters zou een gunstige invloed kunnen hebben op de kwaliteit van het koelwater in de Klimaatcascade[®] en daarmee op de kwaliteit van de ruimtelucht. Voorhands is dit aspect speculatief.

De koelwatertemperaturen en de bedrijfswijze van de Klimaatcascade[®] zijn zodanig dat aan de preventie van legionella in principe geen aandacht behoeft te worden besteed. Het concept is intrinsiek veilig.

[15] De uitwerking en dimensionering van het Geo-Klimaatconcept[®] is alleen mogelijk in het kader van een Voorlopig Ontwerp van een concreet gebouw. Hoofdstuk 15 geeft enkele richtlijnen voor de ventilatiecapaciteit in relatie tot het vloeroppervlak van een gebouw en de hieraan gerelateerde doorsnede van een Klimaatcascade[®]. Verder wordt de methodologie besproken voor het selecteren van het sproeisysteem.

¹ De term “hydraulische trek” is als zodanig door Bronsema voorgesteld

De beschikbare drukken zijn in vergelijking met mechanische ventilatiesystemen gering en vereisen een goede afstemming met de infrastructuur van de luchtverdeling en de debietregeling.

12.4 Modelleren, Simuleren, Kalibreren en Valideren

[16] In hoofdstuk 10 is een Excel rekenmodel beschreven waarmee de prestaties van een Klimaatcascade[®] kunnen worden gesimuleerd. Het is gewenst dan wel noodzakelijk dit rekenmodel te verifiëren met behulp van een meer geavanceerd simulatiemodel. Een numerieke stromingssimulatie met behulp van CFD komt hiervoor als eerste in aanmerking.

Een tweede en niet minder belangrijke reden voor het gebruik van CFD voor de ontwikkeling van de Klimaatcascade[®] is de selectie van de benodigde sproeiers. Met behulp van het Excel rekenmodel kan weliswaar een voorlopig sproeipatroon worden geselecteerd, maar het type sproeier dat dit spectrum bij een bepaalde voordruk kan leveren is hiermee nog niet bekend. Samenwerking met een partner op het gebied van sproeitechnologie, die niet alleen het sproeispectrum van sproeiers kan meten maar ook in staat is dit via CFD te verbinden met de gewenste prestaties in een Klimaatcascade[®] is hiervoor onontbeerlijk. Een dergelijke partner is gevonden in Spraying Systems Deutschland GmbH

Na een korte inleiding over het karakter en de mogelijkheden van numerieke stromingssimulatie met behulp van CFD, wordt een overzicht gegeven van de voor een Klimaatcascade[®] uitgevoerde CFD simulaties. Deze omvatten in hoofdlijnen:

- Koeling en droging van ventilatielucht bij een ontwerp zomerconditie van 28⁰C bij 55% RV en bij een gemiddelde zomerconditie van 20⁰C bij 80% RV.
- Verwarming en bevochtiging van ventilatielucht bij een ontwerp winterconditie van -10⁰C bij 90% RV en bij een gemiddelde winterconditie van +5⁰C bij 90% RV

Simulaties zijn uitgevoerd voor de fysieke testopstelling volgens hoofdstuk 17 en voor een model op ware grootte, waarvoor gekozen is voor een gebouw van 8 verdiepingen met een ventilatiecapaciteit van 40.000 m³.h⁻¹ en gebouw/klimaatmodel BETA. De simulaties wijzen uit dat de in zomer en winter gevraagde luchtcondities bij uittrede van de Klimaatcascade[®] kunnen worden gerealiseerd bij een constante watertemperatuur van 13⁰C en een constant waterdebiet. Dit maakt een regeltechnisch zeer eenvoudige uitvoering van de Klimaatcascade[®] mogelijk; slechts bij zeer lage buitentemperaturen is een geringe verhoging van de watertemperatuur gewenst. De Klimaatcascade[®] is hierdoor niet alleen een effectief en energie vriendelijk Hoog Temperatuur Koelsysteem (HTK), maar tevens een ultra Laag Temperatuur Verwarmingssysteem (LTV).

Naast simulatie van de psychometrische prestaties zijn ook simulaties uitgevoerd met betrekking tot de drukopbouw in een Klimaatcascade[®]. Bij gemiddelde zomercondities wordt in het model met 8 verdiepingen aan de voet van de Klimaatcascade[®] een positieve druk gerealiseerd van ca 100 Pa.

De voor het testmodel gemaakte simulaties zijn gevalideerd met metingen in de fysieke testopstelling.

[17] Validatie van de het Excel rekenmodel en het CFD simulatiemodel van de Klimaatcascade[®] is uitgevoerd met behulp van een fysieke testopstelling in het bouwfysisch laboratorium van Peutz bv. Op pragmatische gronden en kostenoverwegingen is gekozen voor de minimum geachte doorsnede van 1,0 x 1,0 m. Om de omvang van het luchtcirculatiesysteem en de benodigde vermogens voor verwarming en bevochtiging van de lucht te beperken is gekozen voor een luchtsnelheid van 0,5 m.s⁻¹.

De testopstelling is gebouwd in een bestaande hal, waardoor de hoogte van het model moest worden beperkt tot 6 m. De metingen zijn uitgevoerd met de door Spraying Systems GmbH geselecteerde sproeiers, die direct op de waterleiding zijn aangesloten.

De berekening van de psychometrische prestaties en de selectie van de sproeiers is gebaseerd op CFD simulaties –zie hoofdstuk 16. De metingen zijn dan ook in eerste instantie bedoeld om het CFD simulatiemodel voor Gebouw/Klimaattype BETA te valideren. Het meetprogramma is derhalve gebaseerd op het CFD simulatieprogramma. In tweede instantie is met behulp van de meetresultaten ook het Excel rekenmodel gevalideerd.

Gebouw/Klimaattype BETA:

Als eerste zijn metingen uitgevoerd voor de ontwerp zomercondities. De voelbare koelprestatie voldoet aan de uitgangspunten van het conceptueel psychometrisch ontwerp zoals geformuleerd in hoofdstuk 8. De verwachte luchtdroging trad echter nauwelijks op, waarop is getracht met verhoging

van de water/luchtfactor $R_{w/L}$ het droogeffect te verbeteren. De relatieve vochtigheid van de uitgaande lucht ligt echter in alle gevallen op $\approx 100\%$ bij slechts geringe verschillen in temperatuur, waaruit geconcludeerd kan worden dat verhoging van de water/luchtfactor geen invloed hebben op de vochtinhoud van de lucht. De Klimaatcascade[®] functioneert bij de ontwerp zomercondities voornamelijk als een (effectieve) luchtkoeler.

Bij gemiddelde zomercondities is met een Voelbare Warmte Factor $VWF = 0,77$ de overdracht van voelbare warmte eveneens dominant, maar er treedt eveneens een duidelijke luchtdroging op. De Klimaatcascade[®] functioneert als luchtkoeler en -droger.

Bij wintercondities zijn met een $VWF \approx 0,5$ de overdracht van voelbare en latente warmte ongeveer in evenwicht. Naast verwarming van de lucht treedt een aanzienlijke luchtbevochtiging op. De Klimaatcascade[®] functioneert als (voor)verwarmer en luchtbevochtiger.

De relatieve vochtigheid van de uitgaande lucht ligt bij alle metingen dicht bij 100% . De relatieve vochtigheid die hierdoor in de ruimte wordt gerealiseerd ligt bij alle varianten binnen de grenzen van thermisch comfort.

De gemeten drukopbouw in de Klimaatcascade[®] komt goed overeen met de berekende waarden van de CFD simulaties.

Het temperatuurverloop in de Klimaatcascade[®] is voor alle varianten grafisch weergegeven. Opvallend is dat de temperatuurdaling respectievelijk –stijging van de lucht zich vrijwel geheel afspeelt in het bovenste deel van de cascade, tussen $5,1\text{m} \rightarrow 3,6\text{m}$. Of dit ook geldt voor de vochtinhoud is niet bekend, omdat de alleen bij de intrede en de uitrede zijn gemeten.

Gebouw / Klimaatmodel ALPHA:

Voor het ALPHA model zijn door budgetbeperkingen geen CFD simulaties uitgevoerd. De metingen hiervoor dienen dus niet voor de validatie van het CFD model, maar ter verificatie en kalibratie van het Excel rekenmodel.

De voor het ALPHA model benodigde water/luchtfactor van $R_{w/L} \approx 0,4$ is gerealiseerd door vermindering van het waterdebiet bij handhaving van het luchtdebiet en het sproeispectrum. Door 3 van de 5 sproeiers af te sluiten werd een water/luchtfactor $R_{w/L}$ van $\approx 0,44$ gerealiseerd. Het asymmetrische sproeipatroon dat hierbij ontstaat moest worden geaccepteerd.

Als eerste zijn metingen uitgevoerd voor de ontwerp zomercondities. De voelbare koelprestatie voldoet geheel aan de uitgangspunten van het conceptueel psychometrisch ontwerp zoals geformuleerd in hoofdstuk 8. In plaats van de verwachte luchtdroging trad echter een geringe luchtbevochtiging op

Er treedt hierdoor een ongewenste, zij het beperkte adiabatische koeling op waardoor de latente capaciteit negatief is

Bij de gemiddelde zomerconditie wordt de lucht dieper gekoeld dan de gewenste 20°C waarbij tevens een geringe verlaging van de vochtinhoud plaatsvindt. De voelbare koelcapaciteit is dus hoger dan noodzakelijk, en de vraag doet zich voor of en hoe het psychometrisch proces in een Klimaatcascade[®] kan worden beïnvloed. Een optie hiervoor is het aanpassen van de water/luchtfactor $R_{w/L}$ door sproeiers uit te schakelen bij handhaving van het sproeispectrum en een constante watertemperatuur van 13°C . Een tweede mogelijkheid is het verhogen van de watertemperatuur bij constante water/luchtfactor.

Bij wintercondities is de overdracht van latente warmte dominant. Er treedt een aanzienlijke luchtbevochtiging op. De Klimaatcascade[®] functioneert als (voor)verwarmer en luchtbevochtiger.

De relatieve vochtigheid van de uitgaande lucht ligt bij alle metingen dicht bij 100% . De relatieve vochtigheid die hierdoor in de ruimte wordt gerealiseerd ligt bij alle varianten binnen de grenzen van thermisch comfort.

Condensrisico in het gebouw:

Voor de laagst gemeten buitentemperatuur is voor een temperatuurfactor van 0,5 en 0,65 de maximum toegestane relatieve vochtigheid in de ruimte berekend. Hierbij is ervan uitgegaan dat de RV nabij een constructie niet langdurig hoger mag zijn dan 80% .

Voor Gebouw / Klimaatmodel BETA en een normale ruimtetemperatuur van 22°C ligt de relatieve vochtigheid in de ruimte op een veilig niveau. Voor ALPHA is zelfs een zeer veilige marge aanwezig.

Geconcludeerd kan worden dat condensrisico op uitwendige scheidingsconstructies als gevolg van gebruik van de Klimaatcascade[®] in de winterperiode niet aanwezig is. Thermische bruggen en meerdimensionale aansluitingen moeten uiteraard zorgvuldig worden gedetailleerd en berekend.

[18] De metingen in de fysieke testopstelling zijn gebruikt voor de validatie van het Excel rekenmodel en het CFD simulatiemodel. Voor het Excel rekenmodel zijn berekeningen uitgevoerd voor de varianten B1 t/m B5 en A1 t/m A5 met dezelfde invoercondities als in het meetprogramma volgens hoofdstuk 17. Tevens zijn enkele berekeningen gemaakt om de gevoeligheid van het model voor de water/lucht factor te testen.

Conclusies varianten B1 t/m B5:

- Door beperkingen in het Excel rekenmodel voor wat betreft de valsnelheid van de druppels zijn de berekende en de gemeten profielen van het psychometrisch proces in de Klimaatcascade[®] niet congruent. Dit heeft echter weinig invloed op het eindresultaat.
- Met het Excel rekenmodel kunnen de luchttemperaturen, en daarmee de voelbare prestaties van de Klimaatcascade[®], met een hoge tot zeer hoge graad van nauwkeurigheid worden berekend.
- De berekening van de vochtinhoud van de lucht, en daarmee van de latente prestaties is minder nauwkeurig. Zowel in de koelperiode als in de verwarmingsperiode is de gemeten latente capaciteit lager dan de berekende waarden. De verschillen liggen globaal tussen $\approx -0,5$ en $-1,0$ g.kg⁻¹.

Conclusies varianten A1 t/m A5:

- Bij de ontwerp zomerconditie, variant A1, is de berekende luchttemperatuur substantieel hoger dan de gemeten waarde, waardoor de voelbare prestatie van de Klimaatcascade[®] aanzienlijk wordt ondergewaardeerd.
- Bij de gemiddelde zomercondities, variant A2, zijn de verschillen kleiner, maar wordt de voelbare prestatie van de Klimaatcascade[®] nog steeds ondergewaardeerd.
- De latente prestaties van de Klimaatcascade[®] worden bij de varianten A1 en A2 aanzienlijk overgewaardeerd. De gemeten vochtinhoud van de lucht ligt aanzienlijk boven de berekende waarden.
- Voor de voorjaar/najaar en wintercondities A3 t/m A5 komen de berekende waarden voor zowel de luchttemperatuur als de vochtinhoud goed tot zeer goed overeen met de gemeten waarden.

Gevoeligheid voor de water/luchtfactor

- Voor wat betreft de voelbare prestaties is het effect van een verhoogde water/luchtfactor bij de berekeningen sterker dan bij de metingen. Bij verhoging van de water/luchtfactor $R_{w/L}$ van $1,17 \rightarrow 1,37$ komen de berekende en gemeten luchttemperaturen zeer dicht bij elkaar te liggen om daarna bij $R_{w/L} = 1,37 \rightarrow 2,3$ weer te divergeren.
- Voor wat betreft de latente prestaties is het beeld minder duidelijk. Het verschil tussen de berekende en gemeten vochtinhoud neemt bij $R_{w/L}$ van $1,17 \rightarrow 1,37 \rightarrow 1,7$ toe om daarna weer af te nemen. De betrouwbaarheid van het Excel rekenmodel is voor latente prestaties onvoldoende.

Het Excel rekenmodel is dus gevoelig voor het temperatuurverschil water/lucht en voor de water/luchtfactor. Voor het meest voor de hand liggende Gebouw/Klimaattype BETA en een water/luchtfactor 1,2 tot 1,4 geeft het model goede resultaten.

Conclusies CFD simulatiemodel:

De cases B1 t/m B3 van de CFD simulaties zijn eveneens gevalideerd op basis van de meetresultaten, waarbij alleen de luchttemperaturen zijn beoordeeld. Het beeld komt in grote trekken overeen met de resultaten van de overeenkomstige simulaties met het Excel rekenmodel. Geconcludeerd kan worden dat de CFD simulaties een betrouwbaar beeld geven van de voelbare prestaties van een Klimaatcascade[®].

[19] Door specialisten van de unit Building Physics and Systems (BPS) van de Technische Universiteit Eindhoven is een simulatiemodel van de Klimaatcascade[®] ontworpen in de ESP-r omgeving. Het model is gebaseerd op het Excel Rekenmodel en is voor wat betreft de voelbare prestaties gekalibreerd en gevalideerd op basis van de metingen in de fysieke testopstelling. De resultaten van de validatie zijn vergeleken met het Excel Rekenmodel, het CFD model en de metingen in de fysieke testopstelling. In de meeste gevallen is er sprake van een goede tot zeer goede overeenkomst waardoor het ESP-r model geschikt is om betrouwbare voorspellingen te kunnen doen

over de voelbare energieprestatie van een Klimaatcascade[®]. Voor wat betreft de latente prestaties is verbetering van het model gewenst.

Aerodynamische, hydraulische en thermische trek zijn voorshands nog niet in het stromingsnetwerk van het ESP-r model geïntegreerd, waardoor het model geen voorspellingen kan doen over het energiegebruik ten behoeve van luchttransport.

Het ESP-r model van de Klimaatcascade[®] kan in principe in het gebouwmodel worden geïntegreerd, hetgeen enerzijds een grotere gebruiksflexibiliteit biedt, maar anderzijds complicerend werkt voor implementatie en gebruik. Dit was de reden om de Klimaatcascade[®] als *stand-alone* element te simuleren voor het preconditioneren van ventilatielucht. De psychometrische prestaties worden geïmplementeerd in het gebouwmodel, waardoor de energieprestaties over het referentiejaar kunnen worden voorspeld.

Voor de perfectionering van het ESP-r model is aanvullend onderzoek nodig met betrekking tot de integratie van functies voor de aerodynamische en hydraulische trek in het stromingsnetwerk en verbetering van de functies voor de latente prestaties,.

[20] In een Klimaatcascade[®] wordt water gebruikt als koelmedium, niet als koudemiddel. Er wordt dus geen gebruik gemaakt van de verdampingswarmte van water en er is dus geen sprake van directe adiabatische verdampingskoeling.

Mede door de groeiende populariteit van indirecte adiabatische verdampingskoeling, zogenaamde dauwpuntkoeling, is globaal nagegaan of dit systeem in het Geo-Klimaatconcept[®] als alternatief voor de Klimaatcascade[®] zou kunnen worden toegepast. Geconcludeerd wordt dat dit om de volgende redenen niet het geval is:

- Het drukverlies is voor een natuurlijk ventilatiesysteem te hoog.
- Er is geen neerwaartse hydraulische trek beschikbaar, waardoor het systeem sterk afhankelijk is van de hulpventilator.
- De gewenste luchttemperatuur van 17⁰C voor Gebouw/Klimaatmodel BETA is moeilijk te realiseren.

13. HET OMEGA KLIMAATMODEL

13.1 Inleiding en samenvatting

In paragraaf 7.4 “Binnenklimaat op Maat” is benadrukt dat mensen de mogelijkheid moeten hebben de thermische omgevingscondities van hun werkplek individueel aan te passen aan hun persoonlijke behoefte. In principe is dan een acceptatiegraad van 100% bereikbaar en zal zowel de waardering voor het binnenmilieu als de productiviteit maximaal kunnen zijn. Dit uitgangspunt geldt voor beide gebouw/klimaattypen ALPHA en BETA. Om aan deze eis te voldoen moet de klimaatinstallatie over de volgende eigenschappen beschikken:

- Voldoende capaciteit op alle werkplekken om aan uiteenlopende wensen te kunnen voldoen;
- Een fijnmazige individuele regeling bij voorkeur per werkplek;
- Een korte reactietijd zodat een thermostaatverstelling zo snel mogelijk wordt gevolgd door het gewenste resultaat.

In het voorliggende hoofdstuk wordt een flexibel installatieconcept voor kantoorgebouwen omschreven dat aan deze eisen voldoet. Hierbij is teruggegrepen op een onderzoek uit 1994 (Bronsema, Ben 1994). Dit concept kan worden toegepast met behulp van traditionele technieken. Verder wordt enige aandacht besteed aan een geavanceerd concepten van *task-ambient conditioning* met behulp van in het kantoormeubilair geïntegreerde stralingspanelen.

13.2 Capaciteit

Omdat een verwarmingsinstallatie voor extreme buitencondities wordt berekend is de verwarmingscapaciteit in het stookseizoen in principe geen probleem. Oververhitting van de ruimte door hoge thermische belastingen, intern en/of extern, kan ook in het stookseizoen optreden, maar in principe eenvoudig worden bestreden door een raam te openen.

Oververhitting van de ruimte in het koelseizoen treedt op als het klimaatstelsel niet is opgewassen tegen de thermische belasting en onvoldoende koeling levert. Bij de berekening wordt meestal uitgegaan van een gemiddelde of een gemiddeld maximum van de thermische belasting. Deze kan echter voor werkplekken in tijd en plaats sterk variëren, waarbij de individuele koelbehoefte nog wordt versterkt door de verschillen in *thermisch karakter* van mensen –zie paragraaf 7.4.

13.3 Thermische belastingen

Werk- en werkomstandigheden zijn in hoge mate bepalend voor de thermische belasting van de werkplek en beïnvloeden daardoor sterk de capaciteit van de klimaatregeling. Leidinggevenden hebben in het algemeen een grote kamer; een eventuele P.C. wordt weinig gebruikt en de thermische belasting is laag. Uitvoerende werkzaamheden worden vrijwel altijd gedaan in meer-persoonskamers of groepskantoren. De werkplekgrootte is 8 à 10m². Het werk kenmerkt zich door een intensief gebruik van P.C.'s en printers. De thermische belastingen zijn hoger.

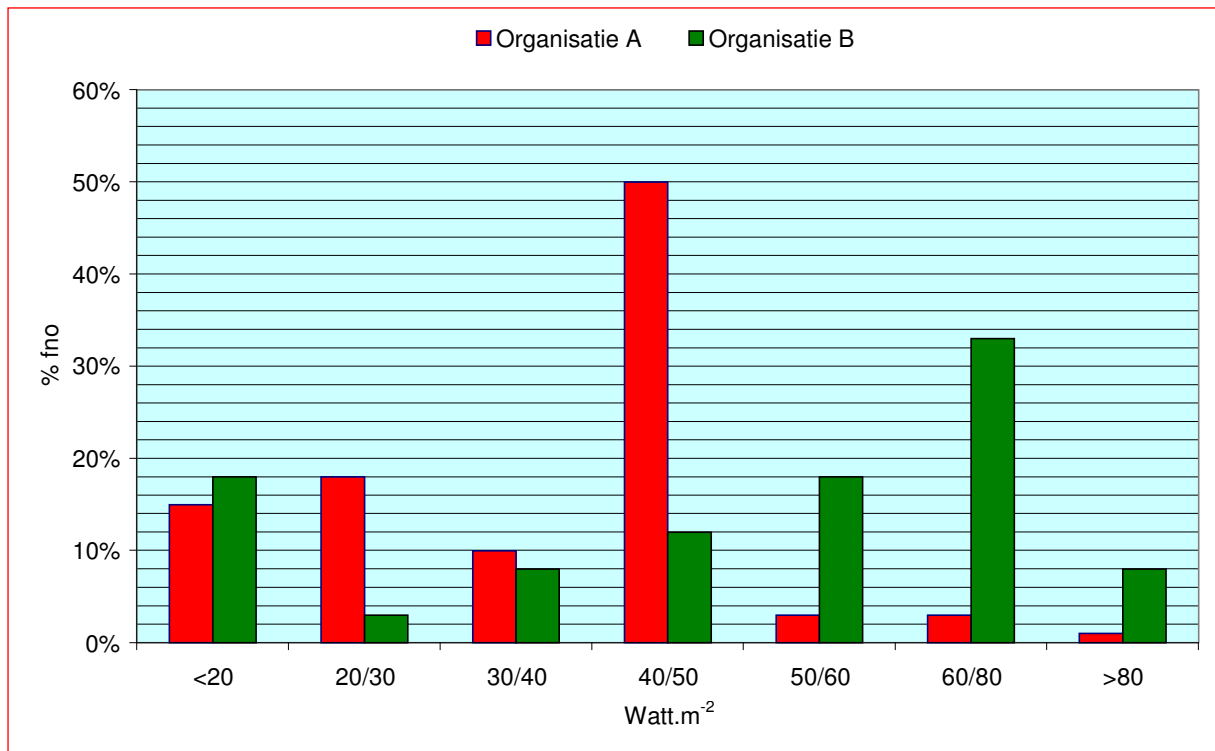
De aard van het bedrijf of afdelingen binnen een bedrijf heeft ook invloed op de thermische belastingen. Ingenieursbureaus kennen meestal een hoge graad van automatisering, maar de werkplekken van de ambulante medewerkers zijn onregelmatig bezet. CAD-tekenkamers daarentegen met krachtige werkstations worden juist heel intensief gebruikt. In de administratieve sector, zoals het bank- en verzekeringsbedrijf, zijn de werkplekken regelmatig bezet, en de gemiddelde terminal/PC dichtheid is vaak groter dan 1, bijv. 1,25. De thermische belastingen kunnen door al deze omstandigheden sterk variëren. Tabel 13.1 geeft hiervan een beeld.

Behalve kantoorruimten zijn er in kantoorgebouwen nog vele bijzondere ruimten te vinden, zoals vergaderruimten, spreekkamers, archiefkamers, computerruimten, reproductie, pantry's, kantines, post- en telefoonruimten, magazijnen etc. De thermische belasting in deze ruimten is zeer divers, van vrijwel nihil tot 250 Watt.m² of meer.

Interne thermische belasting Watt.m ⁻²				
Warmtebron	Laag	Normaal	Hoog	Zeer hoog
Personen	≤ 8	10	10	10
Verlichting	5	10	10	15
P.C.'s e.d.	≤ 7	15	25	≥ 35
Totaal	≤ 20 (57%)	35 (100%)	45 (129 %)	≥ 60 (171 %)

Tabel 13.1 - Interne thermische belastingen in kantoorruimten

Figuur 13.1 geeft een beeld van de interne thermische belastingen in een tweetal kantoorgebouwen, berekend op basis van de betreffende Programma's van Eisen. Voor 7 groepen van thermische belastingen is het percentage aangegeven dat elke groep van het afdelingsvloeroppervlak¹ in beslag neemt. Het is duidelijk dat het om verschillende organisaties gaat, met uiteenlopende automatiseringsdichtheid.



Figuur 13.1 – Interne thermische belasting in twee kantoorgebouwen

Behalve de interne thermische belastingen is er ook nog de externe belasting, hoofdzakelijk door zoninstraling. Afhankelijk van oriëntatie, beschaduwing, raamgrootte en zonweringsysteem, kan deze belasting variëren van 10....40 Watt.m⁻², betrokken op afdelingsvloeroppervlak.

Idealiter zou het huisvestingsplan zodanig kunnen worden ontwerpen dat ruimten met hoge interne belastingen worden gesitueerd op locaties met lage externe belastingen. De totale thermische belasting zou hierdoor voor de verschillende ruimten wat kunnen worden vereffend.

In de praktijk houden *facility managers* hier meestal nauwelijks rekening mee, en dat kunnen ze ook vaak moeilijk omdat andere criteria prioriteit hebben. Bovendien brengt de dynamiek van organisaties veelvuldige herindelingen met zich mee, waardoor een ideale uitgangssituatie al na korte tijd volledig veranderd zou blijken te zijn.

Om op elke werkplek voldoende koeling te kunnen leveren moet de te installeren koelcapaciteit aanpasbaar zijn, niet alleen in nieuwbouwsituaties maar ook gedurende de levensduur van een gebouw.

¹ Volgens NEN 2580

13.4 Fijnmazigheid

Klimaatinstallaties worden meestal modulair ontworpen maar lang niet altijd ook modulair geregeld. Een uitzondering hierop is een radiatorenverwarming met thermostatische regelventielen per moduul. Een indeling op basis van een moduulmaat van 1,8 m en een diepte van 5,4 m levert een werkplek op van 9,72 m bruto, en biedt hiermee een goede basis voor een regeling per werkplek.

13.5 Straling noodzakelijk

Het is uiteraard niet mogelijk voor meerpersoonskamers de luchttemperatuur per werkplek te variëren. Een individuele regeling van de operationele temperatuur is wel mogelijk door toepassing van stralingsverwarming en –koeling. In een ruimte met een gemiddelde luchttemperatuur kan door verhoging of verlaging van de stralingstemperatuur de operationele temperatuur worden afgestemd op de persoonlijke behoefte.

13.6 Reactietijd

In veel gebouwen wordt de thermische massa gebruikt om in het koelseizoen warmte te accumuleren, waardoor op koelcapaciteit kan worden bespaard. Met behulp van nachtventilatie wordt de overdag geaccumuleerde warmte weer afgevoerd.

De keerzijde van deze systematiek is dat de waargenomen reactietijd van een thermostaatverstelling groot is, omdat de bouwmassa warmte afgeeft of opneemt en het lang duurt voordat een merkbare verandering van de ruimtetemperatuur optreedt. Een veel voorkomende klacht is dan ook dat de regeling niet goed werkt.

Dit effect wordt nog versterkt als bouwdeelen worden benut voor verwarming en koeling. Om deze reden moet vloer- of wandverwarming in kantoorruimten worden afgewezen, terwijl bouwdeelactivering alleen in aanmerking komt voor stabilisatie van de gebouwtemperatuur en niet voor actieve verwarming of koeling.

Licht uitgevoerde stralingsschermen of –plafonds hebben niet alleen een korte reactietijd, maar zijn ook in staat een snelle verandering van de operationele temperatuur te realiseren, en voldoen daarmee optimaal aan de eis.

13.7 Binnenklimaat op maat: de noodzaak

Traditioneel wordt bij het ontwerp van klimaatinstallaties uitgegaan van een bepaalde maatgevende interne thermische belasting. Een blik op figuur 13.1 leert dat dit voor organisatie A bijvoorbeeld 40...50 Watt/m² zou kunnen zijn, waarmee ca. 50% van het kantooroppervlak goed zou zijn bediend. Voor ca. 40% wordt in dat geval teveel koeling geïnstalleerd en voor ca. 5% (veel) te weinig.

Als echter dit gebouw zou worden betrokken door organisatie B met overwegend hogere thermische belastingen, zijn de volgende consequenties denkbaar:

- De klimaatinstallatie wordt grotendeels vernieuwd;
- Er worden additionele voorzieningen getroffen;
- Er ontstaat een rampsituatie voor het binnenklimaat.

De meest voorkomende klimaatsystemen zijn goed geschikt om de ontwerpcapaciteit terug te regelen, dus minder koeling te leveren. Het waar nodig substantieel opvoeren van de koelcapaciteit boven de ontwerpcapaciteit is echter nauwelijks mogelijk. De conclusie kan dan ook niet anders zijn dan dat bij het ontwerp van hedentijdse klimaatinstallaties moet worden gezocht naar een flexibele invulling van de koudelevering.

13.8 Binnenklimaat op maat: de realisatie

De functies van een klimaatinstallatie, ventileren, koelen en verwarmen, desgewenst nog aan te vullen met drogen en bevochtigen, kunnen in één luchtbehandelingsstelsel worden gecombineerd. Een voorbeeld hiervan is het all-air variabel debietsysteem (V A V) met geïntegreerde verwarming. Hierbij treden risico's op o.a. met betrekking tot het thermisch comfort (tocht) en de binnenluchtkwaliteit (recirculatie). Hoewel technisch zeer sophisticated zijn dergelijke installaties bovendien nogal gecompliceerd, hetgeen een optimale bedrijfsvoering in de weg kan staan.

Er tekent zich daarom sinds de jaren negentig van de vorige eeuw een trend af de bovengenoemde klimaatfuncties zoveel mogelijk te ontkoppelen. Elke functie kan dan op zichzelf worden geoptimaliseerd en de installaties worden in principe eenvoudiger. Deze functiescheiding gaat als volgt:

Ventilatie:

- Constant debiet via het Geo-Klimaatsysteem[®] – mogelijkheid om het debiet op te voeren
- 100% buitenlucht
- Temperatuur $\approx 18^{\circ}\text{C}$
- Constante ventilatie-effectiviteit.

Verwarming:

- Klimaatplafonds of -schermen boven de werkplekken.

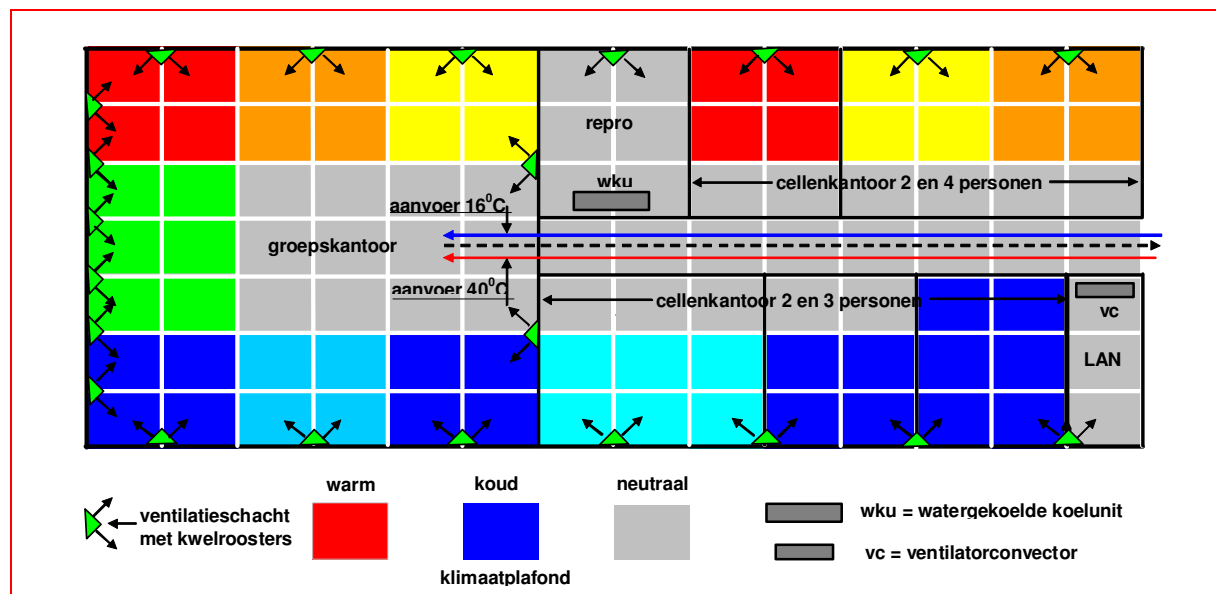
Koeling:

- Basiskoeling door de klimaatplafonds in de perimeterzone en de gekoelde ventilatielucht in combinatie met nachtkoeling;
- Additionele koeling met behulp van een infrastructuur, bestaande uit een driepijps leidingstelsel met een aanvoertemperatuur van $\approx 40^{\circ}\text{C}$ voor verwarming en $\approx 16^{\circ}\text{C}$ voor koeling. Op deze ringleiding kunnen, afhankelijk van de behoefte per kantoorruimte, moduul, of werkplek, extra koelplafonds in de binnenzone worden aangesloten respectievelijk koelconvectoren, ventilatorconvectoren of watergekoelde koelunits.

Figuur 13.2 brengt in beeld hoe met deze systematiek metterdaad binnenklimaat op maat kan worden geleverd. Uitgegaan is van een ventilatie met ca. 2,5 luchtwisselingen per uur en een luchttemperatuur van 18°C . In combinatie met een zekere warmteaccumulatie in de bouwmasa kan hiermee ca. 30 Watt.m^{-2} basiskoeling worden geleverd.

- $\leq 60 \text{ W.m}^{-2}$ → Koelplafonds in de perimeterzone
- $60 - 80 \text{ W.m}^{-2}$ → Additionele koelplafonds in de binnenzone of koelconvectoren
- $80 - 100 \text{ W.m}^{-2}$ → Ventilatorconvectoren in repro- en computerruimten
- $\geq 100 \text{ W.m}^{-2}$ → Watergekoelde koelunits.

De klimaatplafonds, ventilatorconvectoren en koelunits zijn aangesloten op afzonderlijke aanvoerleidingen van warm en gekoeld water met een gemeenschappelijk retourleiding. Door de modulaire opbouw van het plafondsysteem kan de ruimte vrij worden ingedeeld, zowel in cellenkantoren als groepskantoren.



Figuur 13.2 – Binnenklimaat op maat

13.9 Individuele temperatuurregeling

De klimaatplafonds zijn geordend in elementen ter grootte van 1 moduul. Elk element is afzonderlijk regelbaar en elke gewenste configuratie van elementen kan met behulp van BACnet®, LonWorks® of hybride protocol op een willekeurige persoonlijke thermostaat met afstandsbediening worden aangesloten. In principe is het hierdoor mogelijk elke werkplek te voorzien van individuele micro-klimaatcondities, één van de belangrijkste condities voor het realiseren van een hoge thermische tevredenheidsscore in een gebouw - zie hoofdstuk 7. Ideaal zou zijn de temperatuur van de klimaatplafonds visueel op het plafond zelf of op de afstandsbediening zichtbaar te maken

De kleuren van de klimaatplafonds in figuur 13.2 laten zien dat de kantoorruimten aan de ene gevel overwegend warmte vragen terwijl aan de andere gevel een overwegende koelbehoefte is. In de binnenzone wordt geen warmte- of koude geleverd..

13.10 Ventilatie

De infrastructuur van het ventilatiesysteem is uiteraard afhankelijk van de mogelijkheden van het ontwerp van het Geo-Klimaatsysteem® en de keuzes die hierbij worden gemaakt. In figuur 13.2 is uitgegaan van luchtverdeling via de plafondruimte. Vanuit de plafondruimte zijn aan de gevelzijde driehoekige luchtschachtjes aangebracht die op vloerniveau zijn voorzien van luchttoevoerroosters. De lucht wordt met lage snelheid aan de kantoorruimten toegevoerd via driehoekige verticale kokers die op vloerniveau zijn voorzien van toevoerroosters – zogenaamde kwelventilatie¹.

Per afzonderlijke kantoorruimte kan het luchtdebiet elektronisch worden geregeld. De regeling kan plaatsvinden op basis van aanwezigheid, luchtkwaliteit of persoonlijke behoefte, al dan niet *stand-alone* of in combinatie met de temperatuurregeling van de klimaatplafonds.

De plafondruimte dient in dit concept als toevoerplenum van de ventilatielucht bij een geringe overdruk. Hoewel lekverliezen via de plafonds voor de ruimteventilatie niet verloren zijn, is het van belang dat de ventilatielucht zijn weg maar de kantoorruimten vindt via de toevoerroosters. Er moeten dan ook bepaalde eisen worden gesteld aan de dichtheid van de verlaagde plafonds.

Verlichtingsarmaturen dienen te zijn uitgevoerd zonder ventilatiesleuven, en onderhoudsgevoelige apparatuur moet bij voorkeur buiten de plenumzone worden aangebracht.

Gebruikte lucht stroomt op plafondniveau via hooggeplaatste overstroomroosters naar de gangen en wordt vandaar afgezogen naar het shuntkanaal van de Zonneschoorsteen of de Zonnefaçade®.

13.11 Warmte en koude uit de bodem

Het temperatuurniveau van de koude- en warmtevoorziening is geschikt voor WKO –Warmte en Koude Opslag- in de bodem te werken. Voor de verwarming worden warmtepompen ingezet.

13.12 Conclusie

Door toepassing van het omschreven installatieconcept is het mogelijk een binnenklimaat te realiseren dat nauw aansluit bij de individuele behoefte en werkomstandigheden van kantoorwerkers. Het systeem is uiterst flexibel en geschikt voor temperatuurregeling per werkplek. De kosten zijn beperkt en de inbouwmogelijkheden in bestaande kantoorgebouwen groot. Het systeem is bijzonder energie-efficiënt en kent de volgende nevenvoordelen:

- De grote Nederlandse kantoorvoorraad die is uitgerust met mechanische ventilatie en topkoeling kan zo nodig op relatief eenvoudige wijze van additionele koeling worden voorzien.
- De infrastructuur voor additionele koeling kan tegen een laag bedrag in de huurprijs worden opgenomen. De huurders betalen zelf voor de gewenste additionele koeling.

13.13 Werkplekverwarming

TNO Bouw en Ondergrond heeft onderzoek gedaan naar het door hen met “Productief Kantoor” aangeduide kantoorconcept, dat nog meer op de individuele kantoorgebruiker is afgestemd.

¹ Meestal verdringingsventilatie genoemd

“...een energiezuinig kantoor dat zich aanpast aan de individuele gebruiker, afhankelijk van de werkzaamheden van die persoon. Met dit kantoor daalt ook de energierekening en vermindert de CO₂ uitstoot. Zo wordt bijgedragen aan een gezond, comfortabel en energiezuinig binnenklimaat op kantoren.

Iedere werkplek en persoon stelt eigen eisen aan de voorzieningen. Naast de bestaande centrale faciliteiten vraagt dit om lokale, persoonlijk instelbare maatregelen voor verlichting, ventilatie, temperatuurregeling, luchtfiltratie, akoestiek en inrichting.

Het voordeel daarvan is niet alleen een afgestemd binnenklimaat voor iedere gebruiker, maar tegelijkertijd wordt energie bespaard. Want alleen daar waar nodig staan voorzieningen aan. De verwachting is dat een beter afgestemd binnenklimaat klachten vermindert en zorgt voor een hogere productiviteit”.

In een proefopstelling is met behulp van een thermische mannequin onderzocht in welke mate het met verschillende *task-ambient conditioning* (TAC) systemen mogelijk is de omgevingstemperatuur individueel te beïnvloeden. Zie figuur 13.3



Figuur 13.3 – Proefopstelling Productief Kantoor TNO

In deze proefopstelling is een systeem voor persoonlijke verwarming toegepast dat is opgebouwd uit elektrische stralingspanelen die in een bureau en een bureaustoel zijn geïntegreerd. De stralingspanelen zijn op vier posities aangebracht: in de hoofdsteun van de stoel, aan de bovenzijde van het bureaublad en op de vloer. De pijlen op de figuur geven de positie van de stralingspanelen aan. Deze kunnen door de gebruiker worden aangestuurd met regelknoppen op de bovenzijde van het bureaublad.

De resultaten van de pilotstudie laten zien dat door het gebruik van lokale verwarmingspanelen bij een verlaging van de ruimteluchttemperatuur naar 20⁰C of zelfs naar 18⁰C een verbetering haalbaar is van het geheel comfort ten opzichte van de situatie zonder verwarmingspanelen. Hierdoor kan in de meeste gevallen een substantiële energiebesparing worden gerealiseerd, ondanks het gebruik van de elektrische verwarmingselementen (Oeffelen, E.C.M. van e.a. 2010)

14. CASE STUDY

14.1 Inleiding

Om de energieprestaties van het *Earth, Wind & Fire* concept in een reëel gebouw te evalueren is een *case study* uitgevoerd, die tevens dient als ontwerp oefening. De jaarlijkse nieuwbouw in Nederland omvat maar een klein percentage van de aanwezige bouwvoorraad. Toepassing van de *Earth, Wind & Fire* principes is daarom vooral van belang voor toepassing bij grote renovaties van bestaande gebouwen. Om deze reden is gekozen voor een bestaand kantoorgebouw dat virtueel wordt omgebouwd. Het uitgangspunt hierbij was dat zowel architectonisch als bouwkundig het ontwerp niet alleen virtueel maar ook reëel zou moeten kunnen worden gerealiseerd.

Voor de geïntegreerde energieprestatie van dit gebouw, uitgevoerd met Ventecdak[®], Klimaatcascade[®] en Zonnefaçade[®] zie hoofdstuk 15.

14.2 Het gebouw

14.2.1 Algemeen

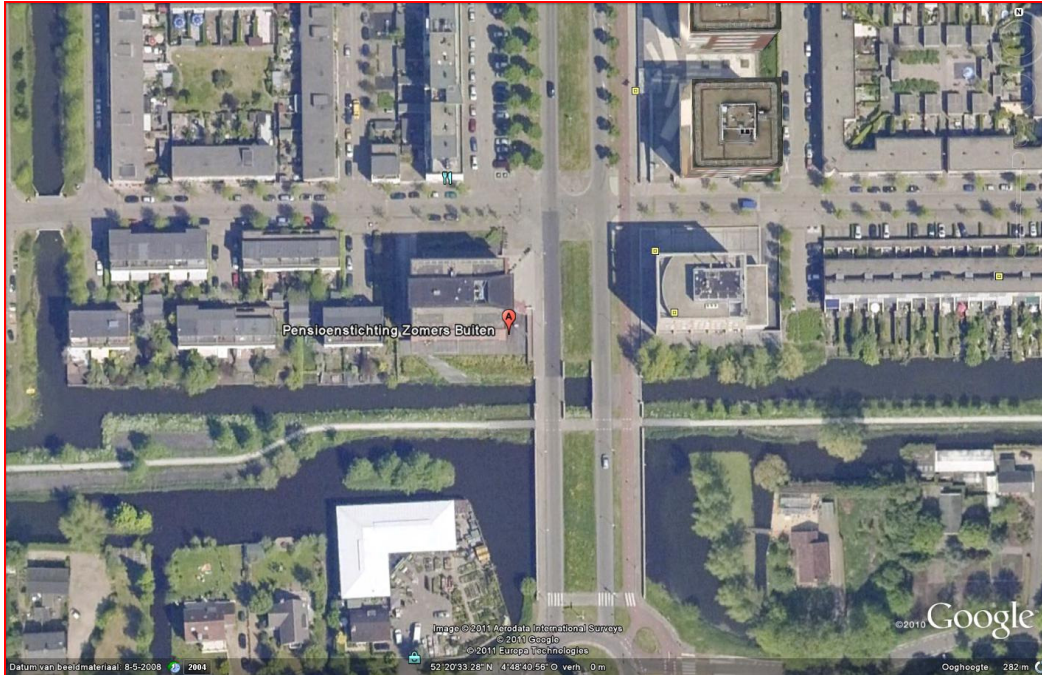
Voor de case study is gekozen voor het bestaande kantoorgebouw met vijf bouwlagen + ondergrondse parkeergarage van de Pensioenstichting Zomers Buiten, Anderlechtlaan 200, 1066 HL Amsterdam, bouwjaar 1999- zie figuur 15.1. Het ontwerp is van Joost de Haan van VVKH Architecten te Leiden.



Figuur 14.1 - Kantoorgebouw Zomers Buiten Amsterdam



Figuur 14.2 – Streetview



Figuur 14.3 – Kantoorgebouw Zomers Buiten in Google Earth

Het gebouw is gesitueerd in een buitenwijk met overwegend laagbouw - zie figuur 14.2 en 14.3. Slechts aan de Oostzijde ligt op een afstand van ca 100 m het hogere gebouw van Troostwijk.

14.2.2 Globale gebouwoppervlakken volgens NEN 2580 excl. Parkeergarage

- Afdelings vloeroppervlak ≈ 2.480 [m²]
- Verkeersruimte ≈ 600 [m²]
- Sanitaire ruimten ca ≈ 325 [m²]
- Techniekrimte ≈ 120 [m²]
- Tarra oppervlak ≈ 175 [m²]
- Bruto vloeroppervlak ≈ 3.700 [m²]

Zie ook figuur 15.4

Bruto vloeroppervlak (bvo)	Netto vloeroppervlak (nvo)	Nuttig vloeroppervlak	Afdelings vloeroppervlak	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Vloeroppervlak werkplekken inclusief ▪ Looproutes tussen werkplekken 	67%
				<ul style="list-style-type: none"> ▪ Supplementaire afdelingsruimte 	incl.
			<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sanitaire ruimten ▪ Speciale ruimten ▪ Buitenberging, stallingen 		9%
			<ul style="list-style-type: none"> ▪ Verkeersoppervlak ▪ Oppervlak voor technische installaties 		19%
	Tarra vloeroppervlak	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Niet statische bouwdelen ▪ Statische bouwdelen ▪ Ruimten lager dan 1,5 m 		5%	

Figuur 15.4 – Gebouwoppervlakken volgens NEN 2580

14.2.3 Gebruiksgegevens

Zie paragraaf 15.2

14.2.4 Bouwfysische gegevens

- R-waarde gevels $[m^2 \cdot K \cdot W^{-1}]$

- R-waarde ramen $[m^2.K.W^{-1}]$
- g-waarde ramen $[-]$
- Glaspercentage in gevels $[%]$
- Type zonwering
- R-waarde dak $[m^2.K.W^{-1}]$
- R-waarde begane grond $[m^2.K.W^{-1}]$
- Energieprestatiecoëfficiënt $[-]$

14.3 Bouwkundig en architectonisch herontwerp

14.3.1 Uitgangspunt ventilatie

Als uitgangspunt voor het herontwerp is uitgegaan van een ventilatiedebiet conform paragraaf 6.3. Bij een specifiek debiet van $5 m^3.m^{-2}.h^{-1}$ betrokken op het afdelings vloeroppervlak van $2.480 m^2$ bedraagt het totale ventilatiedebiet van het gebouw ($5 \cdot 2,480 =$) $12.400 m^3.h^{-1} \equiv 3,45 m^3.s^{-1}$.

14.3.2 Zonneschoorsteen

Als eerste optie wordt het gebouw voorzien van 2 zonneschoorstenen in buitenliggend hoekmodel op respectievelijk Zuid/Oost en Zuid/West oriëntatie - zie deelrapport (I) figuur 10.5.

Het bruto bezonde oppervlak bedraagt:

- Oost oriëntatie 2,15 $[m^2.m^{-1}]$
- Zuid oriëntatie 4,30 $[m^2.m^{-1}]$
- West oriëntatie 2,15 $[m^2.m^{-1}]$

Bij een hoogte van 16,9 m zijn de totale bezonde oppervlakken:

- Oost oriëntatie 36,35 $[m^2]$
- Zuid oriëntatie 72,7 $[m^2]$
- West oriëntatie 36,35 $[m^2]$

De energieopbrengst van deze zonneschoorstenen in een standaard referentiejaar is geraamd op basis van de gegevens uit hoofdstuk 18 van deelrapport (I) - zie tabel 15.1.

Oost		winter	lente	zomer	herfst	totaal
bruto	kWh.m ⁻² .a ⁻¹	52,7	119,7	423,5	55,6	
oppervlak	m ²	36,35	36,35	36,35	36,35	
bruto	kWh.a ⁻¹	1915,6	4351,1	15394,2	2021,1	
rendement	%	0,61	0,49	0,36	0,5	
netto	kWh.a ⁻¹	1168,5	2132,0	5541,9	1010,5	9853
Zuid		winter	lente	zomer	herfst	totaal
bruto	kWh.m ⁻² .a ⁻¹	121,0	162,4	465,5	113,5	
oppervlak	m ²	36,35	36,35	36,35	36,35	
bruto	kWh.a ⁻¹	4398,4	5903,2	16920,9	4125,7	
rendement	%	0,61	0,49	0,36	0,50	
netto	kWh.a ⁻¹	2683,0	2892,6	6091,5	2062,9	13730
West		winter	lente	zomer	herfst	totaal
bruto	kWh.m ⁻² .a ⁻¹	51,8	119,0	423,7	54,5	
oppervlak	m ²	36,35	36,35	36,35	36,35	
bruto	kWh.a ⁻¹	1882,9	4325,7	15401,5	1981,1	
rendement	%	0,61	0,49	0,36	0,50	
netto	kWh.a ⁻¹	1148,6	2119,6	5544,5	990,5	9803
totaal gebouw kWh.a⁻¹						23583
per m² bvo kWh.a⁻¹						6,37

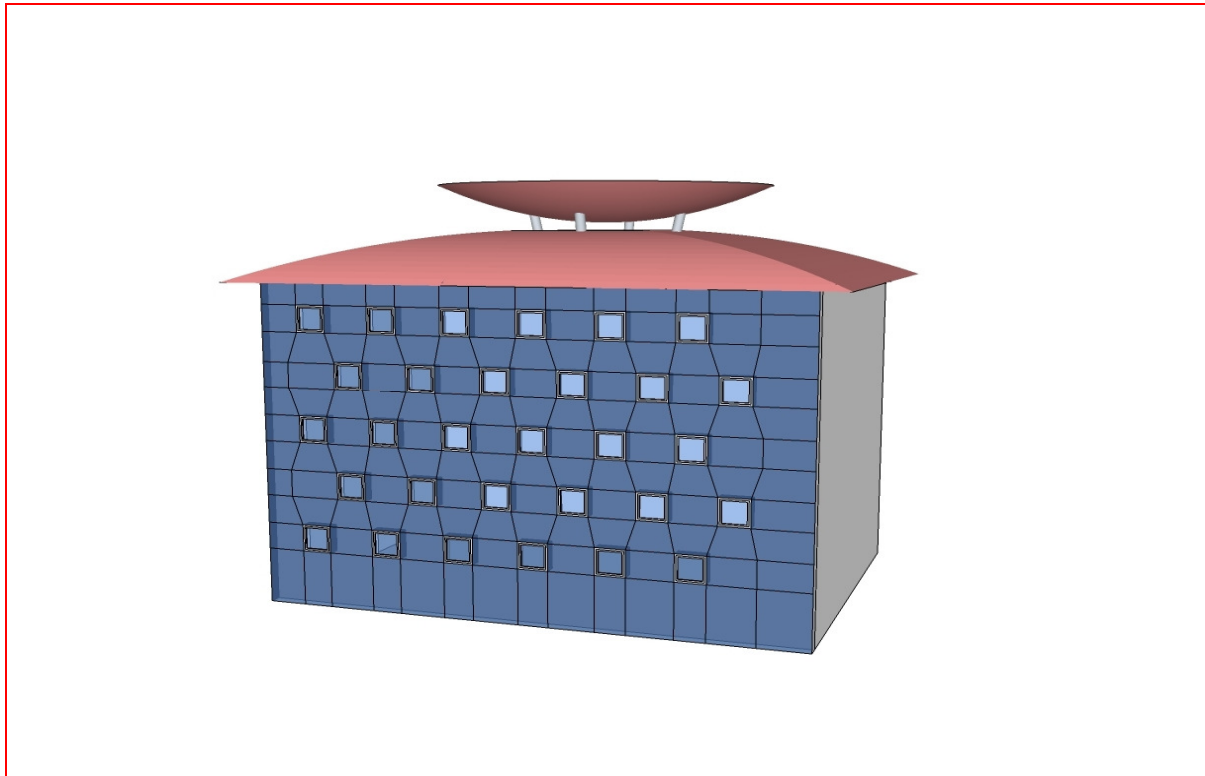
Tabel 14.1 – Geraamde energieopbrengst van de twee zonneschoorstenen

Voor energiezuinige kantoorgebouwen met een EPC < 1,5 is een warmteverbruik mogelijk van 50 à 60 kWh.m⁻².a⁻¹ – zie deelrapport (I) paragraaf 18.11. De energieopbrengst van 6,37 kWh.m⁻².a⁻¹ komt

overeen met ≈ 10 à 13% van het jaarlijkse warmteverbruik en is daarmee te laag om de bouw van deze zonneshoorstenen te rechtvaardigen.

15.4.1 Zonnefaçade[®]

Een Zonnefaçade^{®1} is een gevelbedekkende zonneshoorsteen, die slechts wordt doorbroken door de ramen die via raamkasten een directe verbinding hebben met de buitenlucht – zie hoofdstuk 10 van deelrapport (I) en figuur 15.4. die tevens een voorlopig ontwerp van het Ventecdak[®] weergeeft.



Figuur 14.4 – Kantoor 's Zomers Buiten met Zonnefaçade[®] en Ventexdak[®] -Voorlopig Ontwerp Fons Verheijen

Het bruto geveloppervlak ($B * H$) is ($28,8 * 16,5 =$) 475 m^2 . Het gezamenlijke raamoppervlak (30 st. à $1,45 \text{ m}^2$) is $43,5 \text{ m}^2$ waardoor een netto oppervlak voor de zonnegevel[®] resulteert van $431,5 \text{ m}^2$. De energieopbrengst van deze zonnegevel in een standaard referentiejaar is geraamd op basis van de gegevens uit hoofdstuk 18 van deelrapport (I) - zie tabel 14.2.

Zuid		winter	lente	zomer	herfst	
bruto	$\text{kWh.m}^{-2}.\text{a}^{-1}$	121,0	162,4	465,5	113,5	
opp.	m^2	431,5	431,5	431,5	431,5	
bruto	kWh.a^{-1}	52212	70076	200863	48975	
rendement	%	0,61	0,49	0,36	0,50	
netto	kWh.a^{-1}	31849	34337	72311	24488	162984
totaal gebouw kWh.a^{-1}						162984
per m^2 bvo kWh.a^{-1}						44,05

Tabel 14.2 – Geraamde energieopbrengst van de Zonnefaçade[®]

Voor energiezuinige kantoorgebouwen met een $\text{EPC} < 1,5$ is een warmteverbruik mogelijk van 50 à $60 \text{ kWh.m}^{-2}.\text{a}^{-1}$ – zie deelrapport (I) hoofdstuk 18. De energieopbrengst van $44,05 \text{ kWh.m}^{-2}.\text{a}^{-1}$ komt in dit geval overeen met ≈ 75 à 88% van het jaarlijkse warmteverbruik. Hiermee kan een belangrijke stap worden gezet op weg naar het ambitieniveau van een “nearly zero”energiegebruik –zie paragraaf 1.1.

¹ Naar een idee en ontwerp van Fons Verheijen

Voor het schoonmaakonderhoud van de Zonnefaçade[®] wordt voorlopig uitgegaan van een diepte van 0,65 m, waardoor een bruto oppervlak van de doorsnede ($B * D$) wordt gerealiseerd van $(28,8 * 0,65 =) 18,7 \text{ m}^2$. Bij het luchtdebiet van $3,45 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ is de gemiddelde luchtsnelheid over de doorsnede $(3,45/18,7 =) 0,18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Tussen de ramen is het oppervlak van de doorsnede $[(28,8 - 6 * 1,1) * 0,65] 14,4 \text{ m}^2$ en de luchtsnelheid $(3,45/14,4 =) 0,24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. De voortdurende snelheidswisselingen van de doorstromende lucht veroorzaken drukverliezen die echter bij de optredende lage luchtsnelheden beperkt zullen zijn en gecompenseerd zullen worden door de hoge luchttemperaturen en de inherente thermische trek in de Zonnefaçade[®].

Bij de referentie stralingsintensiteit van $400 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ – zie paragraaf 13.4- wordt bij een thermisch rendement van 60% met behulp van vergelijking (13.4) de temperatuurstijging van de lucht berekend op $[(400 * 431,5 * 0,6) / (3,45 * 1185 * 1,007)] \approx 25^\circ\text{C}$. Bij een intredetemperatuur van 22°C is de uitgaande luchttemperatuur 47°C .

Bij een extreme stralingsintensiteit van $900 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ is de temperatuurstijging van de lucht $[(900/400) * 25] \approx 57^\circ\text{C}$. Bij een intredetemperatuur van 25°C is de uitgaande luchttemperatuur dan 82°C . Bij dergelijk hoge luchttemperaturen neemt het warmteverlies naar buiten toe waardoor het thermisch rendement wordt verlaagd evenals de uitgaande luchttemperatuur.

Bij de verdere uitwerking van het concept van de Zonnefaçade[®] zal aandacht worden besteed aan de volgende aspecten:

- De bepaling van de convectieve warmteovergangscoefficiënt bij hoge temperaturen en lage luchtsnelheden – zie deelrapport (I) hoofdstuk 8.
- De berekening van de maximale glastemperatuur en wandtemperatuur bij extreme condities – zie deelrapport (I) hoofdstuk 16.

15.4.2 Ontwerp Ventecdak[®]

Het voorlopig ontwerp van het Ventecdak[®] is aangegeven op figuur 14.4. Hierbij is uitgegaan van de volgende hoofdgegevens:

- Hoogte bovenkanaal 2,0 [m]
- Contractieverhouding 5:1 [-]

Om architectonische redenen is een gereduceerd bovendak toegepast –zie paragraaf 16.11 van deelrapport (II). Op basis van de voorlopige resultaten van de hier beschreven Large Eddy Simulaties is voor de ESP-r simulaties uitgegaan van de volgende Cp-waarden:

- Winddrukcoëfficiënt t.p.v. de Venturi-ejector volgens formule (16.3) uit hoofdstuk 16 van deelrapport (II)

$$C_p = 0,2913 \ln(U_{ejector} / U_{ref}) + 0,0151$$

- Winddrukcoëfficiënt t.p.v. de luchtinlaat volgens de metingen in de windtunnel –zie hoofdstuk 17 van deelrapport (II)

$$C_p = 0,8$$

15.4.3 Klimaatcascade[©]

Voor de klimaatcascade en de luchttoevoerschacht is uitgegaan van een luchtsnelheid van $\approx 1,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Het oppervlak van de doorsnede van de klimaatcascade en de luchttoevoerschacht is berekend op $(3,45/1,5) \approx 2,3 \text{ [m}^2\text{]}$

14.3 Toepassing Earth, Wind & Fire principles

Voor een gedetailleerde omschrijving van de Earth, Wind & Fire principles in het Geo-Klimaatconcept[®] zie deelrapport (III), meer specifiek de hoofdstukken 6 t/m 13.

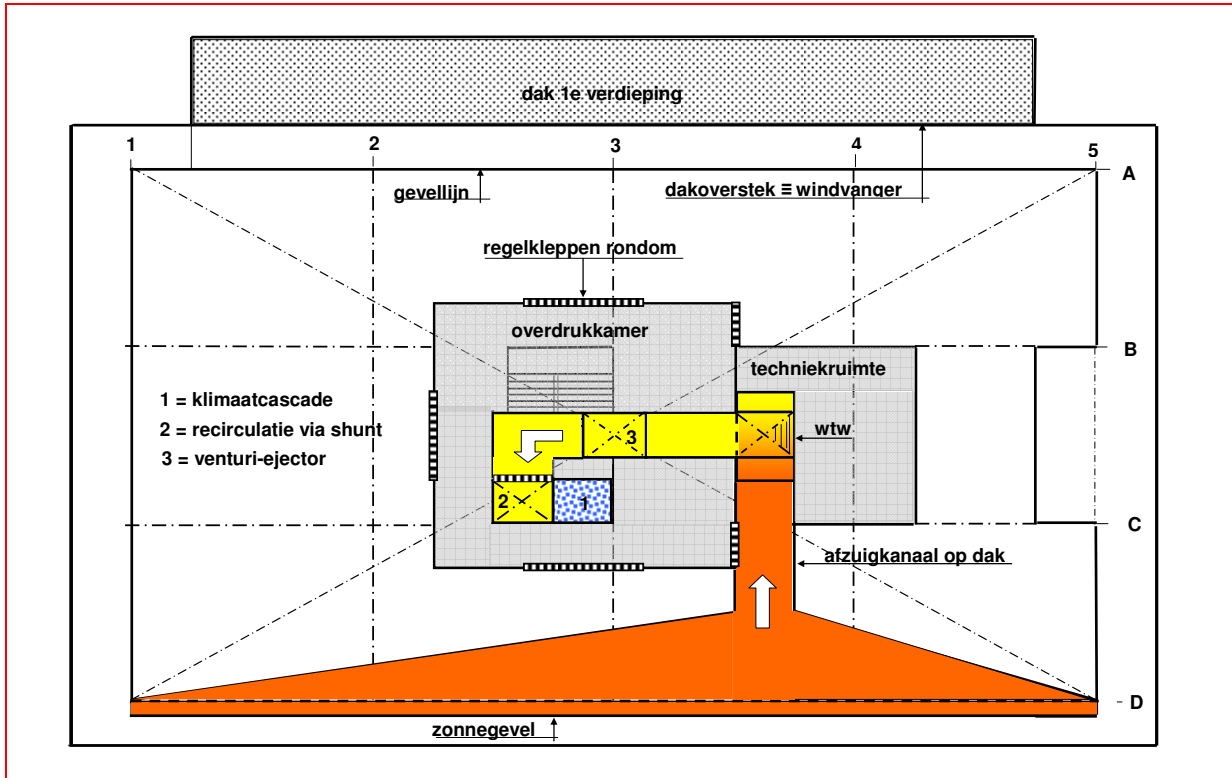
14.4.1 Natuurlijke luchttoevoer

Figuur 14.5 brengt de toepassing van de Earth, Wind & Fire principles voor de Case Study in beeld. Wind wordt opgevangen onder de dakoverstekken van het onderdak en stroomt in de overdrukkamer. De windzijdige regelkleppen zijn geopend, de lijzijdige gesloten, waardoor de drukopbouw effectief wordt benut. Windturbines zijn in de *case study* niet voorzien.

Vanuit de overdrukkamer stroomt de lucht in de klimaatcascade, waarin de luchtbehandeling plaatsvindt door het versproeien van water.

In het koelseizoen wordt de lucht gekoeld tot $\approx 18^{\circ}\text{C}$ waarbij tevens enige droging plaats vindt. In het stookseizoen wordt de lucht verwarmd tot $\approx 8^{\circ}\text{C}$ waarbij tevens bevochtiging plaats vindt.

Het proceswater heeft het gehele jaar een constante temperatuur van $\approx 13^{\circ}\text{C}$.



Figuur 14.5 – Earth, Wind & Fire elementen op dakniveau

Aan de voet van de klimaatcascade wordt het water opgevangen in een bassin en na koeling dan wel verwarming weer naar de sproeiers gepompt. De behandelde lucht stroomt in de toevoerschacht voor verdere distributie naar de kantoorvertrekken - zie paragraaf 14.5. In het stookseizoen wordt de lucht met een parallel geschakelde luchtverwarmingsunit naverwarmd tot $\approx 18^{\circ}\text{C}$ - zie figuur 12.9 in deelrapport (III).

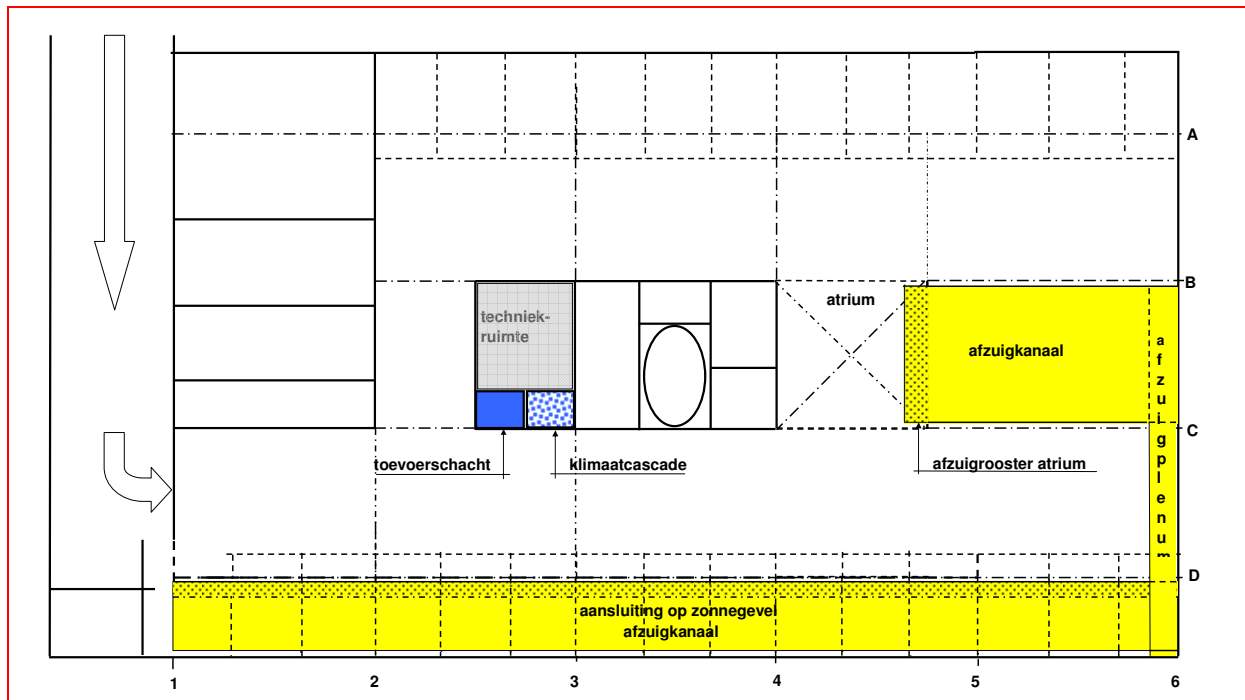
14.4.2 Natuurlijke luchtafzuiging en warmtewinning in Zonnegevel[®]

Ventilatielucht wordt via een rooster in de vloer van het atrium en een afzuigkanaal in de parkeerkelder, afgezogen naar de zonnegevel – zie figuur 15.7.

Op het dak wordt de lucht via een afzuigkanaal naar de techniekruijme gevoerd waar met behulp van de FiWiHEX installatie warmte wordt teruggewonnen. Deze warmte wordt voor het grootste deel in de zonnegevel geproduceerd, maar omvat uiteraard ook de interne en externe thermische belastingen van de kantoorruimten.

De afgekoelde lucht wordt via de venturi-ejector naar buiten afgevoerd.

Buiten bedrijfstijd, bijvoorbeeld in weekeinden, als er geen ventilatiebehoefte is maar wel zonneschijn, wordt bij gesloten venturi-ejector overgeschakeld op recirculatie. Hierdoor kan de zonnestraling maximaal worden benut.



Figuur 14.6 - Luchtafzuigstelsysteem

14.5 Ventilatie en klimaatregeling kantoren

De klimaatregeling van de kantoren is ontworpen op basis van “Binnenklimaat op Maat” volgens het OMEGA klimaatmodel –zie hoofdstuk 13 en figuur 15.7.

Vanuit de toevoerschacht wordt per verdieping een bepaald luchtdebiet in de plafondruimte geblazen. De lucht wordt met lage snelheid aan de kantoorruimten toegevoerd via driehoekige verticale kokers die op vloerniveau zijn voorzien van toevoerroosters; (kwelventilatie)¹. Per afzonderlijke kantoorruimte kan het luchtdebiet elektronisch worden geregeld. De regeling kan plaatsvinden op basis van aanwezigheid, luchtkwaliteit of persoonlijke behoefte, al dan niet *stand-alone* of in combinatie met de temperatuurregeling van de klimaatplafonds –zie hierna.

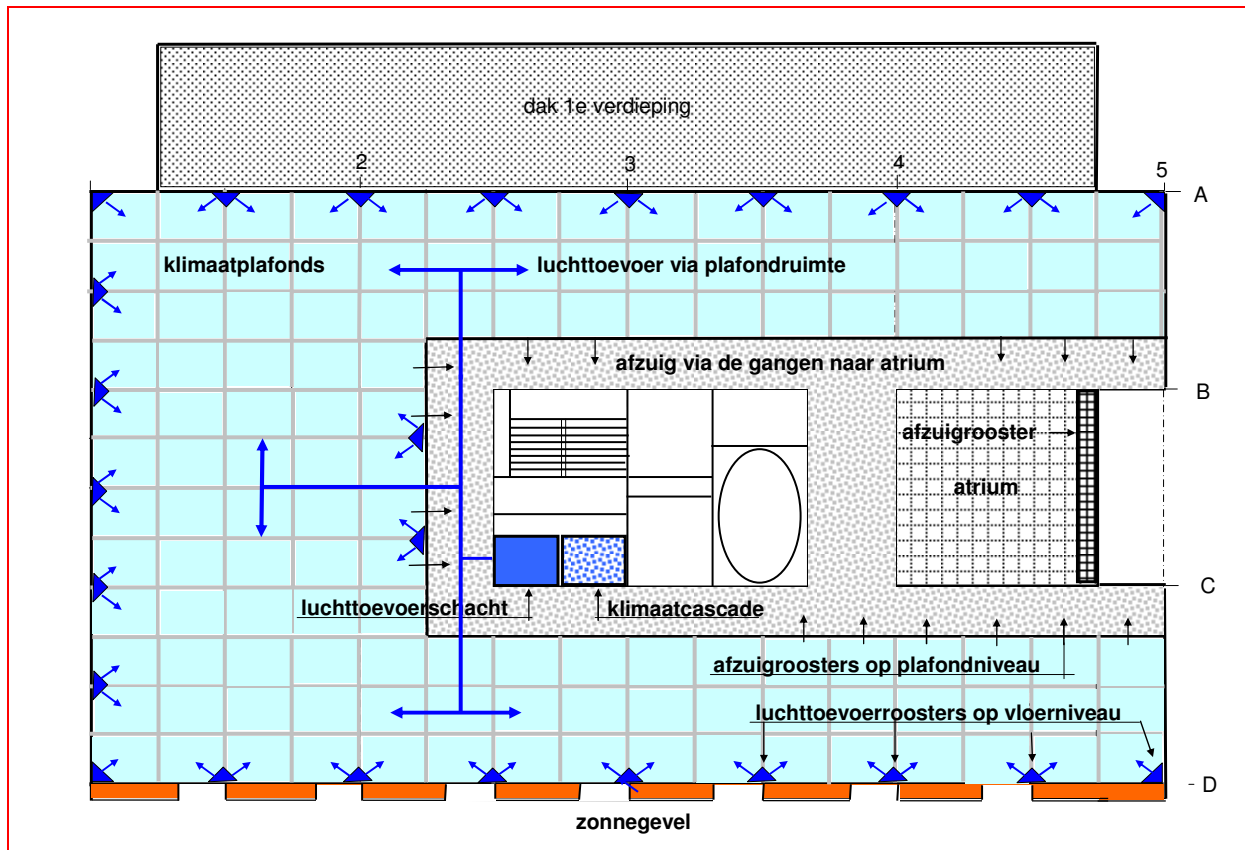
Gebruikte lucht stroomt op plafondniveau via hooggeplaatste overstroombroosters naar de gangen en wordt verder via het atrium afgezogen – zie paragraaf 15.4.2

Klimaatregeling van de kantoren vindt plaats met behulp van klimaatplafonds, die geordend zijn in elementen ter grootte van 1 moduul. Elk element is afzonderlijk regelbaar en elke gewenste configuratie van elementen kan met behulp van BACnet[®], LonWorks[®] of hybride protocol op een willekeurige persoonlijke thermostaat met afstandsbediening worden aangesloten. In principe is het hierdoor mogelijk elke werkplek te voorzien van individuele micro- klimaatcondities, één van de belangrijkste condities voor het realiseren van een hoge thermische tevredenheidsscore in een gebouw. Zie paragraaf 7.4.

Door de modulaire opbouw van het plafondsysteem kan de ruimte vrij worden ingedeeld, zowel in cellenkantoren als groepskantoren.

De klimaatplafonds zijn aangesloten op afzonderlijke aanvoerleidingen van warm en gekoeld water met een gemeenschappelijk retourleiding.

¹ Meestal verdringingsventilatie genoemd



Figuur 14.7 – Ventilatie en klimaatregeling kantoorverdieping

14.6 Warmte- en koudevoorziening

In het stookseizoen wordt de gewonnen zonnewarmte zoveel mogelijk direct gebruikt voor gebouwverwarming. Dit gebeurt via van een warmwatervat voor korte termijn opslag in de techniekruimte op het dak. In het koelseizoen wordt de gewonnen zonnewarmte in de bodem opgeslagen, die dan fungeert als lange termijn opslag - zie deelrapport (I) hoofdstuk 18 en 19.

Warmteverbruikers zijn in hoofdzaak de klimaatplafonds, de klimaatcascade en de verwarmingsunit voor de ventilatielucht. Met behulp van elektrische warmtepompen wordt het verwarmingsmedium op de juiste temperatuur gebracht.

In het koelseizoen wordt koude aan de bodem onttrokken. Koudegebruikers zijn in hoofdzaak de klimaatplafonds en de klimaatcascade.

14.7 Functionele omschrijving van de regeling

- **Luchttoevoer:**
Het onderdak, de klimaatcascade en/of de hulpventilator zorgen voor de luchttoevoer in het gebouw; dit is een gedefinieerd debiet, dat in principe door winddruk en drukopbouw in de klimaatcascade tot stand komt.
- **Winddruk:** Door ESP-r te berekenen met behulp van de winddrukcoëfficiënten C_p volgens paragraaf 15.3.4.
- **Hydraulische druk:** Door ESP-r te berekenen op basis van een nader te berekenen druppelgrootteverdeling (analytisch rekenmodel) en waterdebiet.
- **Debietregeling luchttoevoer:**
 - **Te hoge druk:** De regelkleppen in het onderdak en die aan de voet van de klimaatcascade worden in volgorde geregeld. Eerst wordt de externe (wind)druk teruggeregeld door het openen van de kleppen in de overdrukruimte. Daarna wordt de interne drukopbouw in de klimaatcascade teruggeregeld door het sluiten van de kleppen.

- **Te lage druk:** De regelkleppen in de overdrukruimte zijn geheel gesloten en die aan de voet van de klimaatcascade geheel geopend, waarna de hulpventilator door toerentalregeling het gedefinieerde debiet levert.
- **Debietregeling Luchtafvoer:**

De zonneschoorsteen en de Venturi-ejector zorgen voor luchtafvoer uit het gebouw. Het afvoerdebiet is in principe gelijk aan het toevoerdebiet. **NB** Het gebouw is een neutrale zone, m.a.w. het luchttoevoersysteem en het luchtafvoersysteem staan niet in serie, maar worden onafhankelijk van elkaar geregeld.

 - Te hoge onderdruk: Het afvoerdebiet wordt geregeld met behulp van de regelkleppen in de zonneschoorsteen
 - Te lage onderdruk: De regelkleppen zijn geheel geopend, waarna de hulpventilator door toerenregeling het gedefinieerde afzuigdebiet levert.
- **Temperatuurregeling luchttoevoer:**
 - Het sproeiwater in de cascade wordt in principe geregeld op een constante temperatuur van 13⁰C.
 - Naverwarming van de toevoerlucht zo nodig op 18⁰C
- **Ruimtetemperatuurregeling:**
 - Individuele temperatuurregeling per werkplek met behulp van klimaatplafonds.

14.8 Energieprestatie

Voor de energieprestatie van het virtueel verbouwde kantoorgebouw van de Pensioenstichting Zomers Buiten in het referentiejaar NEN 5060:2008 zie hoofdstuk 15.

15. INTEGRALE PRESTATIEANALYSE VAN DE CASE STUDY

15.1 Inleiding en Samenvatting

In hoofdstuk 14 is de virtuele ombouw beschreven van het kantoorgebouw van de Pensioenstichting Zomers Buiten in Amsterdam op basis van het *Earth, Wind & Fire* concept. Het voorliggende hoofdstuk geeft een analyse van de energiestatistiek van dit gebouw als resultaat van deze interventie, waarin achtereenvolgens de Klimaatcascade[®], de Zonnefaçade[®] en het Ventecdak[®] zijn geïmplementeerd.

Voor deze geïntegreerde prestatieanalyse is gebruik gemaakt van het dynamisch gebouwsimulatiemodel ESP-r en het referentie klimaatjaar 1986 – 2005 volgens NEN 5060:2008. De ontwikkeling van afzonderlijke ESP-r modules voor de Zonnefaçade[®] en de Klimaatcascade[®] zijn beschreven in de deelrapporten (I) en (III), terwijl voor het Ventecdak[®] wordt teruggegrepen op een in deelrapport (II) ontwikkeld rekenalgoritme.

Een geïntegreerde prestatieanalyse kan het zicht benemen op de relatieve invloed van de verschillende ingrepen. Uitgaande van de referentiesituatie is de virtuele ombouw daarom in 4 stappen uitgevoerd, en is het effect van elke stap afzonderlijk geanalyseerd. Voor wat betreft operationele gegevens is uitgegaan van generieke uitgangspunten en niet van de specifieke bedrijfsgegevens van de organisatie in het onderhavige gebouw.

De methodologie bij de ontwikkeling van de Klimaatcascade[®], de Zonnefaçade[®] en het Ventecdak[®] had als startpunt het maken van eenvoudige rekenmodellen, die aansluiten bij de ingenieurspraktijk, met behulp waarvan een indruk werd verkregen van de potenties van de betreffende concepten. De resultaten van de daarop volgende sophisticated dynamische ESP-r simulaties konden met behulp hiervan kwantitatief goed worden geëvalueerd.

Bij de geïntegreerde prestatieanalyse is een soortgelijke methodiek gevolgd. In eerste instantie is een analytische benadering gevolgd, waarbij de resultaten handmatig werden berekend. In tweede instantie is het dynamisch gebouwsimulatiemodel ESP-r gebruikt. In beide gevallen is uitgegaan van de met behulp van het ESP-r model berekende warmte- en koudegebruiken van het gebouw.

Met de analytische methode wordt een reductie van het primaire energiegebruik berekend van 120,7 → 58,4 kWh.m⁻².a⁻¹ op basis van m² bvo, overeenkomend met een reductie van ≈ 52%.

Met de ESP-r methode wordt een reductie van het primaire energiegebruik berekend van 112 → 13,5 kWh.m⁻².a⁻¹ op basis van m² bvo, overeenkomend met een reductie van ≈ 88%. Opgemerkt wordt dat verschillende onderdelen, de klimaatplafonds, de warmteopslag en de warmtepomp niet in ESP-r konden worden gemodelleerd. De effecten hiervan zijn handmatig berekend.

In beide gevallen wordt de belangrijkste bijdrage geleverd door de Zonnefaçade[®] in combinatie met korte- en lange termijn warmteopslag. ESP-r berekent hier aanzienlijk hogere opbrengsten dan de analytische methode. Er is van afgezien een nauwkeurige analyse te maken van de verschillen.

Met behulp van dunne film PV folie op het Ventecdak[®] kan 21,6 kWh.m⁻².a⁻¹ elektrische energie worden opgewekt overeenkomend met 54 kWh.m⁻².a⁻¹ primaire energie. Volgens de analytische methode wordt het gebouw wordt hierdoor vrijwel energieneutraal. Volgens de ESP-r methode wordt een energieoverschot gerealiseerd van ≈ 40 kWh.m⁻².a⁻¹.

De mogelijke bijdrage van windenergie in het Ventecdak[®] is met 3,8 kWh.m⁻².a⁻¹ gering, vooral door de geringe bouwhoogte van 5 verdiepingen en de lage windsnelheden op deze hoogte.

15.2 Referentiesituatie

Referentiesituatie is het gebouw in de huidige toestand zoals omschreven in paragraaf 14.2. Voor wat betreft operationele gegevens is uitgegaan van generieke uitgangspunten en niet van de specifieke bedrijfsgegevens van de organisatie in het onderhavige gebouw.

De nominale bezetting is gebaseerd op een kantoorquotiënt van 20 m² bvo per persoon en een afwezigheidspercentage van ca 10%. Voor de interne belastingen zie paragraaf 13.3.

Voor het binnenklimaat is in principe uitgegaan van gebouw/klimaattype BETA –zie hoofdstuk 7. De invoergegevens voor de simulaties zijn aangegeven in tabel 15.1.

	zones	waarde	eenheid
Nominale bezetting	Aantal personen maximaal	185	-
	Aantal personen gemiddeld	165	-
Interne belastingen	Maximaal tijdens kantooruren	35	W.m ⁻²
	Gemiddeld tijdens kantooruren	25	Afdelingsoppervlak
	Overige ruimten	geen	-
Bedrijfstijden	Maandag t/m Vrijdag	-	-
	Aantal bedrijfsdagen per jaar	255	d.a ⁻¹
	Aantal bedrijfsuren per jaar	3060	h.a ⁻¹
Ventilatie	Totaal debiet voor het gebouw	3,44	m ³ .s ⁻¹
	Specifiek debiet kantoren	5,0	m ³ .m ⁻² .h ⁻¹
	Specifiek debiet per persoon	10	dm ³ .s ⁻¹
Infiltratie	Alle zones	0,3	m ³ .m ⁻³ .h ⁻¹
Instelpunten temperatuur	Luchttoevoer laag - hoog	17 ⁰ - 18 ⁰	⁰ C
	Tijdens bedrijfsuren	07.00 – 19.00	h
	Ruimtetemperatuur laag - hoog	21 ⁰ - 25 ⁰	⁰ C
	Tijdens kantooruren	08.00 – 18.00	h
	Temperatuur overige ruimten	geen eis	-
Schakelpunt zonwering	Alle ramen	250	W.m ⁻² zonstraling

Tabel 15.1 – Invoergegevens voor de simulaties

15.3 Fasering

Om de relatieve invloed van de Klimaatcascade[®], de Zon nefacade[®] en het Ventecdak[®] op de integrale energieprestatie vast te kunnen stellen wordt de virtuele verbouwing van de uitgangssituatie naar het Earth, Wind & Fire concept in 4 stappen uitgevoerd.

Stap 1:

- Vervanging van het bestaande all air mechanische ventilatiesysteem door de Klimaatcascade[®] en een luchtverdeelsysteem via de plafondruimte –zie paragraaf 14.4.
- Luchtafzuig via gangen en atrium met behulp van een lage druk afzuigventilator.
- Warmteterugwinning met behulp van een FiWiHEX installatie – zie deelrapport (I) hoofdstuk 19.
- Vervanging van de bestaande radiatorverwarming door klimaatplafonds waarmee individuele verwarming en koeling van de kantoorruimten wordt gerealiseerd volgens het Omega klimaatmodel –zie hoofdstuk 13.
- De CV ketels en de koelinstallatie blijven gehandhaafd.
- Geen constructieve en/of architectonische veranderingen van het gebouw.

Stap 2:

- Ombouw van de Zuidgevel tot Zon nefacade[®].
- Installatie van een korte termijn- KT- warmteopslagsysteem voor warmtelevering in zomer en voor- en naseizoen.
- De bestaande CV ketels blijven gehandhaafd voor warmtelevering in de winter en stand-by voorziening.
- Koudelevering door de bestaande koelinstallatie.

Stap 3:

- Aanleg van de WKO¹ voorzieningen –zie deelrapport (I) hoofdstuk 19 en aansluiting van de FiWiHEX installatie op de virtuele aquifer voor lange termijn –LT- warmteopslag.
- Demontage van de bestaande CV ketels en de koelinstallatie.
- Installatie en aansluiting van een warmtepomp op de WKO voorzieningen

Stap 4:

- Bouw van het Ventecdak[®] inclusief dunne film PV folie – zie deelrapport (II)
- Aansluiting van de FiWiHEX installatie op de Venturi-ejector en demontage van de hulp-afzuigventilator.

¹ Warmte en Koude Opslag

- Installatie van windturbines in het Ventedak[®] en aansluiting op de bestaande gebouwvoorzieningen.

15.4 Energetische uitgangspunten

15.4.1 Conversiefactoren

Alle berekeningen worden gerelateerd aan primair energiegebruik in kW. Hiervoor worden de volgende conversiefactoren gehanteerd:

- Elektrische energie 2,5
- Gas 1,0
- Calorische waarde aardgas 9,78 kWh.m⁻³ (de zgn. bovenwaarde)

15.4.2 Energie referentiesituatie (forfaitair)

- De ventilatorenergie in de referentiesituatie is bepaald op basis van karakteristieke waarden voor drukverliezen volgens NEN-EN 13779 (NNI 2007): Luchttoevoersysteem 0,9 kPa en afzuigsysteem 0,6 kPa.
- Voor het rendement van de ventilator is uitgegaan van de volgende karakteristieke waarden: Ventilator 65% - Elektromotor 85% - Transmissie 90% (Breljih Nejc 2012). Totaal rendement 50%.
- De Specific Fan Power SPF bij deze uitgangspunten is $(0,9+0,6)/0,5 = 3 \text{ kW} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})^{-1}$, overeenkomend met de in NEN-EN 13779 vermelde *default* waarde. Voor oudere gebouwen worden SPF waarden genoemd van 5 – 10 kW.(m³.s⁻¹)⁻¹ (Railio, Jorma 2007), zodat de gekozen waarde van 3 niet te pessimistisch kan worden geacht.
- Het ventilatorvermogen voor een luchtdebiet van 3,44 m³.s⁻¹ bedraagt $(3,44 \cdot 3) = 10,3 \text{ kW}$ en het specifiek jaarlijks energiegebruik is $(3060 \cdot 10,3)/3700 = 8,5 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2}$ op bvo basis.
- Voor het gemiddeld rendement van de CV ketels is uitgegaan van 80%, gebaseerd op niet-condenserende ketels.
- Voor de koudefactor – COP- van de luchtgekoelde koelinstallatie is 3,0 aangehouden, waarin de gerelateerde pompenenergie is inbegrepen.

15.4.3 Systeemrendementen

De energieprestatie van een gebouw wordt voor wat betreft de klimaatregeling bepaald door het energiegebruik voor verwarming en koeling. Dit energiegebruik is afhankelijk van

- De warmte- en koudebehoefte van het gebouw.
- Het opwekkingsrendement van de warmte- en koudevoorziening.
- De energieverliezen die optreden in de klimaatinstallatie.

Energieverliezen treden op ten gevolge van gelijktijdige verwarming en koeling, en verliezen bij het transport van warmte- en koude in een energiesector. Factoren die hierbij een rol spelen zijn bijvoorbeeld energieverliezen in luchtbehandelingskasten, traagheid van de klimaatinstallatie, regelstrategie en optimaliseringsregelingen.

De energieverliezen in een klimaatinstallatie worden uitgedrukt in een systeemrendement. In normblad NEN 2916 wordt het systeemrendement gedefinieerd als

“Fractie van de opgewekte warmte of koude, die effectief wordt benut”

Met effectief benutten wordt hierbij bedoeld:

“Het deel van de opgewekte energie dat daadwerkelijk zorg draagt voor het afdekken van de warmte- en koelbehoefte van het gebouw”

Systeemrendementen kunnen volgens bepaalde formules worden berekend (ISSO 1998). Voor verwarming geldt formule (15.1) en voor koeling formule (15.2)

$$\eta_{\text{sys;verw}} = \frac{1}{1 + a_{\text{verw}} + \frac{f_{\text{verm}}}{f_{\text{wb}}}}$$

(15.1)

$$\eta_{\text{sys};\text{koel}} = \frac{1}{1 + a_{\text{koel}} + \frac{f_{\text{vern}}}{f_{\text{kb}}}}$$

(15.2)

- f_{wb} en f_{kb} zijn respectievelijk de fracties van warmtebehoefte en koudebehoefte t.o.v. de totale behoefte van verwarming en koeling, dus $(f_{\text{wb}} + f_{\text{kb}}) = 1$. De waarden hiervan volgen uit de eigenschappen van gebouw & organisatie.
- f_{vern} is de vernietigingsfactor, een maat voor de hoeveelheid energievernietiging.
- a_{verw} en a_{koel} zijn factoren voor de teveel geleverde verwarmingsenergie en koelenergie ten gevolge van leidingverliezen, luchtkanaalverliezen en het ontbreken van individuele temperatuurregeling.

Voor de waarden van deze factoren zie tabel 15.2

Warmtetransport door middel van	Koeltransport door middel van	Individuele regeling verwarming	Systeem nr.	f_{vern}	a_{verw}	a_{koel}
Water	nvt	Ja	1		0,08	nct
		Nee			0,25	nvt
of	water	Ja	2	0,04	0,13	0,06
	lucht	Ja	3			
Water en Lucht	water en lucht	Nee	4	0,04	0,25	0,06
		Ja			0,13	0,07

Tabel 15.2 – Factoren voor de bepaling van systeemrendementen

De aanwezige individueel geregelde radiatorverwarming in de kantoren in combinatie met het luchtkoelsysteem valt onder systeem 3. De systeemrendementen hiervan worden als volgt berekend:

- $\eta_{\text{sys};\text{verw}} = 0,88$
- $\eta_{\text{sys};\text{koel}} = 0,94$

De ombouw naar natuurlijke ventilatie via de Klimaatcascade[®] in combinatie met klimaatplafonds in Stap 1 betekent een verschuiving naar systeem 4. Als f_{wb} en f_{kb} voorlopig worden gesteld op 0,75 en 0,25 worden de systeemrendementen hiervoor als volgt berekend:

- $\eta_{\text{sys};\text{verw}} = 0,85$
- $\eta_{\text{sys};\text{koel}} = 0,81$

15.4.4 De warmtefactor van de warmtepomp

De koudefactor van een koelinstallatie wordt berekend met de formule (Bronsema, Ben 2000, 2002)

$$\varepsilon_k = \varepsilon_{kc} * \eta_{ck}$$

(15.3)

waarin

ε_k = koudefactor (COP) [-]

ε_{kc} = ideale koudfactor (Carnot) [-]

η_{ck} = Carnot rendement [-]

en

$$\varepsilon_{kc} = \frac{T_k}{(T_w - T_k)}$$

(15.4)

waarin

T_k = temperatuur koude kant [K]

T_w = temperatuur warme kant [K]

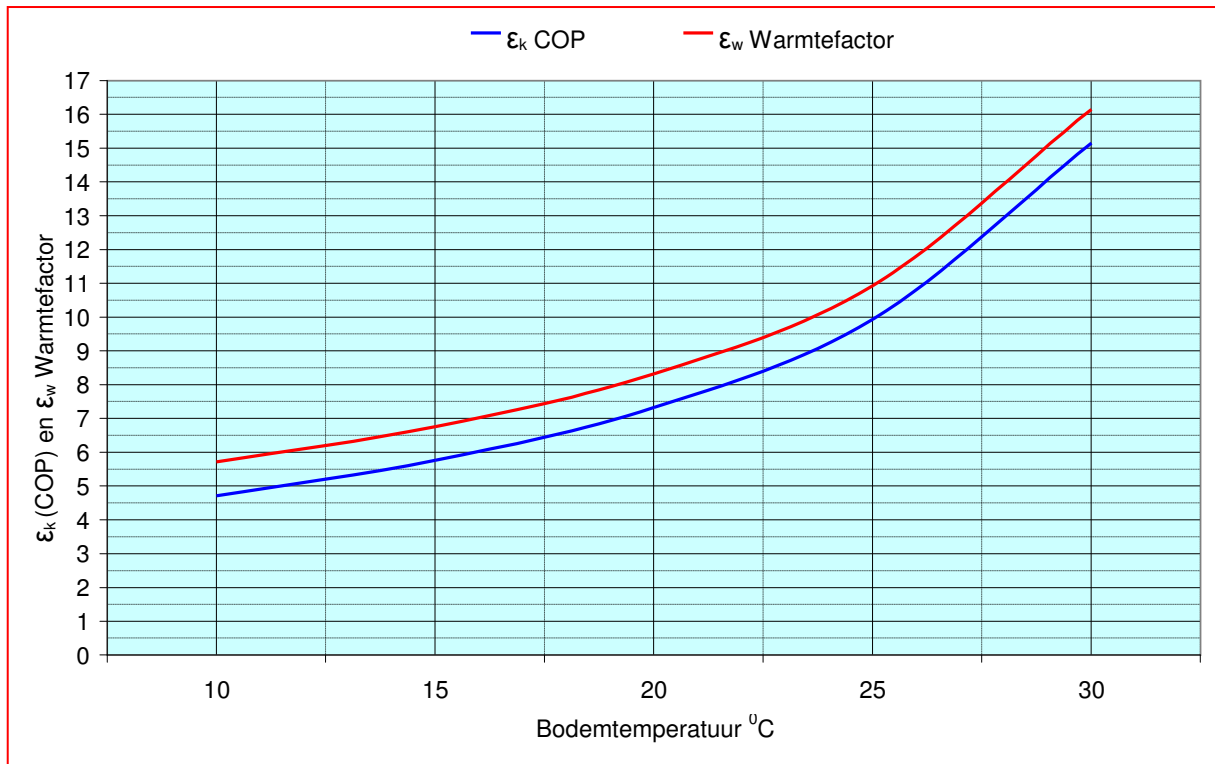
De warmtefactor ε_w van een warmtepomp is gelijk aan $(\varepsilon_k + 1)$

Bij plafondverwarming is de temperatuur aan de warme kant bijvoorbeeld 40°C. Bij een bodemtemperatuur van 12°C zou de temperatuur aan de koude kant 10°C kunnen zijn.

Het Carnot rendement η_{ck} wordt bepaald door het gebruikte koudemiddel, het ontwerp van de betreffende koelmachine, en het rendement van compressor en elektromotor. Als het Carnot

rendement wordt gesteld op 0,5 dan wordt voor deze condities een koudefactor berekend van 4,7, waarbij de warmtefactor dus 5,7 is.

De globale relatie tussen bodemtemperatuur, koudefactor ϵ_k en warmtefactor ϵ_w is in figuur aangegeven.



Figuur 15.2 - Koudefactor ϵ_k (COP) en Warmtefactor ϵ_w als functie van de bodemtemperatuur

Bij de navolgende berekeningen is uitgegaan van een gemiddelde bodemtemperatuur van 20°C. Afhankelijk van de bodemverliezen kan deze waarde hoger of lager zijn. Bij zeer geringe bodemverliezen worden hoge warmtefactoren gerealiseerd, en kan een situatie ontstaan waarbij de plafondverwarming zonder warmtepomp direct uit de warme bodem wordt gevoed.

15.5 Analytische prestatie analyse

15.5.1 Inleiding

Een analytische prestatie analyse met behulp van de in de deelrapporten (I), (II) en (III) ontwikkelde rekenmodellen geeft een globaal kwantitatief inzicht in de potenties van het Earth, Wind & Fire concept. Op basis hiervan kunnen de resultaten van de ESP-r simulaties ook beter worden beoordeeld.

15.5.2 Referentiesituatie

De energiegebruiken in de referentiesituatie zijn aangegeven in tabel 15.3.

Energievraag t.b.v	Gas of Elektrisch	kWh.m ⁻² .a ⁻¹ basis bvo	Rendement		Energiegebruik kWh.m ⁻² .a ⁻¹		
			Systeem	Opwekking	Gebruik	Conversie	Primair
Warmte	Gas	57	0,88	0,8	80,7	1	80,7
Koude	Elektrisch	21	0,94	3	7,5	2,5	18,8
Ventilator	Elektrisch	8,5			8,5	2,5	21,3
Totaal							120,7

Tabel 15.3 – Energiegebruiken referentiesituatie

Om deze cijfers enig reliëf te geven kunnen ze worden vergeleken met statistische gebruikscijfers, die voor dergelijke kantoorgebouwen gemiddelde waarden aangeven van 130 ...250 kWh.m⁻² voor respectievelijk *Good Practice* en *Typical* (BRE 2000). De databank van SenterNovem vermeldt voor kantoorgebouwen een gebouw gebonden energiegebruik van gemiddeld $\approx 630 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{a}^{-1}$

overeenkomend met $\approx 175 \text{ kWh.m}^{-2}$ (<http://senternovem.databank.nl>). Het kantoorgebouw van Zomers Buiten uit 1998 kan dus worden aangemerkt als behoorlijk energiezuinig.

15.5.3 Resultaten Stap 1

De Klimaatcascade[®] heeft een hoogte van 19 m en een doorsnede van $2,3 \text{ m}^2$ – zie paragraaf 15.3.5- gebaseerd op een luchtsnelheid van $1,5 \text{ m.s}^{-1}$.

Met behulp van het Excel rekenmodel zijn de volgende prestaties berekend:

- Intredeconditie lucht $28^{\circ}\text{C} / 55\%\text{RV} \equiv$ Buitenconditie
- Enthalpie $61,8 \text{ kJ.kg}^{-1}$
- Luchtdebiet $3,44 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$
- Water/Luchtfactor 1,17
- Waterdebiet $4,7 \text{ kg.s}^{-1}$
- Sproeispectrum 4
- Watertemperatuur 13°C
- Uittredeconditie lucht $17^{\circ}\text{C} / 95\%\text{RV}$
- Enthalpie $11,6 \text{ kJ.kg}^{-1}$
- Koelcapaciteit 200 kW
- Drukopbouw 35 Pa

De drukopbouw in de Klimaatcascade[®] is voldoende om de drukverliezen in het lage druk luchtverdeelsysteem ad paragraaf 14.4 te compenseren. Voor de lage druk afzuigventilator, die in hoofdzaak het drukverlies van de FiWiHex moet compenseren, wordt 10% van het oorspronkelijke ventilatorvermogen gereserveerd.

De pompenergie ten behoeve van de Klimaatcascade[®] wordt berekend met de formule

$$P_{pomp} = \frac{\rho \cdot g \cdot h \cdot q_v \cdot 10^{-3}}{\eta_p \cdot \eta_e} \quad [\text{kW}]$$

(15.3)

Waarin

- ρ = dichtheid van water $1000 \text{ [kg.m}^3]$
- h = opvoerhoogte 25 [m]
- q_v = volumestroom $0,0047 \text{ [m}^3.\text{s}^{-1}]$
- η_p = pompendement $0,75 \text{ [-]}$
- η_{el} = rendement elektromotor $0,95$

Het aldus berekende pompvermogen bedraagt $1,6 \text{ kW}$ en de pompenergie bij 3.060 h.a^{-1} ($1,6 \cdot 3060$) = 4.900 kWh.a^{-1} overeenkomend met $(4900/3700) = 1,3 \text{ kWh.m}^{-2}.\text{a}^{-1}$

De koude wordt in deze fase geleverd door de koelmachine, echter bij een hogere koudefactor (COP). Door de toepassing van klimaatplafonds kan naar schatting met een koudefactor van 4,5 worden gerekend (Bronsema, B. 2000, 2002).

Het rendement van de CV ketels zal door het lage temperatuur afgiftesysteem iets stijgen naar bijvoorbeeld 82%.

De geraamde effecten van deze stap zijn aangegeven in tabel 15.4

Energievraag t.b.v	Gas of Elektrisch	kWh.m ⁻² .a ⁻¹ basis bvo	Rendement		Energiegebruik kWh.m ⁻² .a ⁻¹		
			Systeem	Opwekking	Gebruik	Conversie	Primair
Warmte	Gas	57	0,85	0,82	81,8	1	81,8
Koude	Elektrisch	21	0,81	4,5	5,8	2,5	14,4
Ventilator	Elektrisch	0,85			0,85	2,5	2,1
Pomp	Elektrisch	1,3			1,3	2,5	3,3
Totaal							101,4

Tabel 15.4 – Energiegebruiken stap 1

15.5.4 Resultaten Stap 2

Voor de geraamde energieopbrengst van de Zonnefaçade[®] zie tabel 14.2 in hoofdstuk 14. Er is in deze fase alleen korte termijn warmteopslag beschikbaar. Er is vanuit gegaan dat de energieopbrengst in de winter volledig kan worden gebruikt en in lente en herfst voor 50%.

- Winter $31849 * 1,0 = 31849$ [kWh.a⁻¹]
- Lente $34337 * 0,5 = 17169$ [kWh.a⁻¹]
- Herfst $24488 * 0,5 = 12244$ [kWh.a⁻¹]
- Totaal 61262 [kWh.a⁻¹] \equiv met $16,6$ kWh.m⁻².a⁻¹ op bvo basis.

De geraamde effecten van deze stap zijn aangegeven in tabel 15.4. Hoewel de lucht via de Zonnefaçade[®] wordt afgezogen is in de tabel de ventilatorenergie voorlopig gehandhaafd.

Energievraag t.b.v	Gas of Elektrisch	kWh.m ⁻² .a ⁻¹ basis bvo	Rendement		Energiegebruik kWh.m ⁻² .a ⁻¹		
			Systeem	Opwekking	Gebruik	Conversie	Primair
Warmte	Gas	57	0,85	0,82	81,5	1	81,5
Zonnefaçade [®]	-	16,6 -					16,6 -
Koude	Elektrisch	21	0,81	4,5	5,8	2,5	14,6
Ventilator	Elektrisch	0,85			0,85	2,5	2,1
Pomp	Elektrisch	1,3			1,3	2,5	3,3
Totaal							84,8

Tabel 15.5 – Energiegebruiken stap 2

15.5.5 Resultaten Stap 3

Voor de geraamde energieopbrengst van de Zonnefaçade[®] zie tabel 14.2 in hoofdstuk 14. Door de beschikbaarheid van lange termijn warmteopslag in de aquifer ziet de benutting van de warmte er als volgt uit

- Zomer $72311 * 1,0 = 72311$ [kWh.a⁻¹]
- Lente $34337 * 0,5 = 17169$ [kWh.a⁻¹]
- Herfst $24488 * 0,5 = 12244$ [kWh.a⁻¹]
- Totaal 101724 [kWh.a⁻¹] \equiv met $27,5$ kWh.m⁻².a⁻¹ op bvo basis.

Er wordt vanuit gegaan dat het temperatuurniveau in de warme bron van de aquifer te laag is voor directe voeding van de klimaatplafonds. De gewenste aanvoertemperatuur zal met behulp van een warmtepomp worden gerealiseerd. De bodemtemperatuur is gesteld op 20⁰C waarbij een warmtefactor van 8,3 kan worden aangehouden – zie paragraaf 15.4.4. Hierdoor kan $(1,12 * 27,5) = 30,8$ kWh.m⁻².a⁻¹ aan het gebouw worden geleverd. Tezamen met de warmtelevering in stap 2 à $16,6$ kWh.m⁻².a⁻¹ komt dit overeen met $(30,8+16,6)*10^2/57 = 83\%$ van de totale warmtevraag ad 57 kWh.m⁻².a⁻¹ van stap 1. De Zonnefaçade[®] kan dus voor een zeer groot deel in de warmtebehoefte van het gebouw voorzien.

De benodigde koude wordt geheel geleverd uit de koude bron van de aquifer. De pompenergie is in rekening gebracht door een koudefactor van 10 aan te houden.

De geraamde effecten van deze stap zijn aangegeven in tabel 15.6. Hoewel de lucht via de Zonnefaçade[®] wordt afgezogen is in de tabel de ventilatorenergie voorlopig gehandhaafd.

Energievraag t.b.v	Gas of Elektrisch	kWh.m ⁻² .a ⁻¹ basis bvo	Rendement		Energiegebruik kWh.m ⁻² .a ⁻¹		
			Systeem	Opwekking	Gebruik	Conversie	Primair
Warmte	Gas	57	0,85	0,82	81,5	1	81,5
Zonnefaçade [®]		16,6 -					16,6 -
Zonnefaçade [®]		27,5 -		1,12	30,8 -	1	30,8 -
Warmtepomp	Elektrisch	3,3			3,3	2,5	8,3
Koude	Elektrisch	21	0,81	10	2,6	2,5	6,5
Ventilator	Elektrisch	0,85			0,85	2,5	2,1
Pomp	Elektrisch	1,3			1,3	2,5	3,3
Totaal							54,2

Tabel 15.6 – Energiegebruiken stap 3

15.5.6 Resultaten Stap 4

De lucht wordt afgezogen via de Zonnefaçade[®] en de Venturi-ejector, waardoor de benodigde ventilatorenergie sterk wordt gereduceerd, en in dit kader verder wordt verwaarloosd.

Het voor dunne film PV folie beschikbare dakoppervlak is ca 800 m², waarmee bij een jaaropbrengst van 100 kWh.m⁻².a⁻¹ ca 80.000 kWh.a⁻¹ zonne-energie kan worden gerealiseerd overeenkomend met (80000/3700) = 21,6 kWh.m⁻².a⁻¹ op bvo basis. Zie deelrapport (II) hoofdstuk 20.

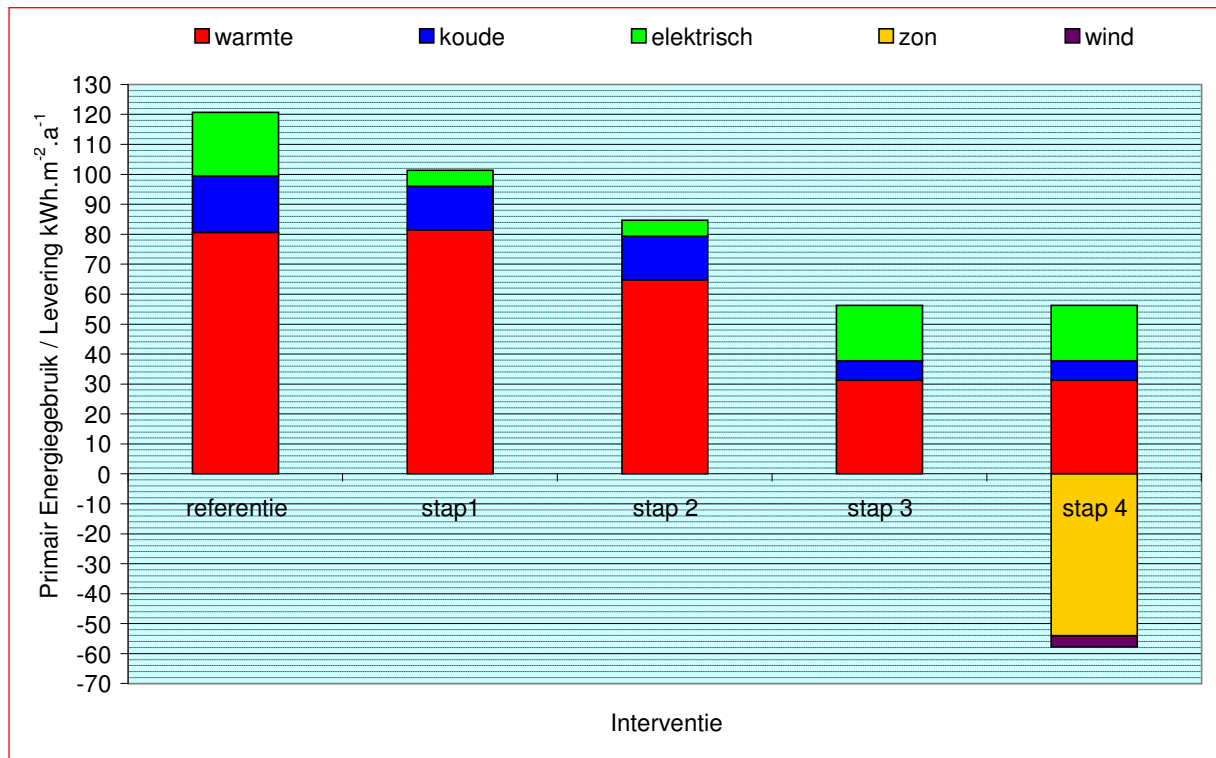
In de overdrukruimte kunnen per wand 2 windturbines worden aangebracht met een diameter van Ø 2,5 m. Op een hoogte van ca 18 m bedraagt de energieproductie per m² rotoroppervlak ≈ 190 kWh.a⁻¹. Voor 6 actieve turbines bedraagt de energieproductie (6 * 190 * π/4 * 2,5²) ≈ 5.600 kWh.a⁻¹ overeenkomend met (5600/3700) = 1,5 kWh.m⁻².a⁻¹ op bvo basis. Zie deelrapport (II) hoofdstuk 21. Het lijkt onwaarschijnlijk dat met dergelijke geringe opbrengsten het opwekken van windenergie in het onderhavige gebouw rendabel is.

De geraamde effecten van deze stap zijn aangegeven in tabel 15.7. Het gebouw is hiermee ook zonder windenergie energieneutraal.

Energievraag t.b.v	Gas of Elektrisch	kWh.m ⁻² .a ⁻¹ basis bvo	Rendement		Energiegebruik kWh.m ⁻² .a ⁻¹			
			Systeem	Opwekking	Gebruik	Conversie	Primair	
Warmte	Gas	57	0,85	0,82	81,5	1	81,5	
Zonnefaçade [®]		16,6 -					16,6 -	
Zonnefaçade [®]		27,5 -		1,12	30,8 -	1	30,8 -	
Warmtepomp	Elektrisch	3,3			3,3	2,5	8,3	
Koude	Elektrisch	21	0,81	10	2,6	2,5	6,5	
Pomp	Elektrisch	1,3			1,3	2,5	3,3	
Zonne-energie					-21,6	2,5	54,0 -	
Windenergie					-1,5	2,5	3,8 -	
Totaal			Ergieneutraal					5,6 -

Tabel 15.7 – Energiegebruiken stap 4

15.5.7 Overzichtsgrafiek



Figuur 15.1 – Primair energiegebruik referentiesituatie en na interventies – analytische methode

15.5.8 Projectplan 2007

Het is interessant de resultaten van bovenstaande exercitie te vergelijken met een prognose uit het projectplan 2007:

“Het volgende rekenmodel geeft een beeld van het energiebesparingspotentiaal. Stellen we ons een kantoorgebouw voor met volledige klimaatregeling. Het gasverbruik is $10 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{a}$ en het stroomverbruik voor de klimaatinstallaties is $70 \text{ kWh}/\text{m}^2.\text{a}$. De energiegebruiken vòòr en nà de introductie van het Earth, Wind & Fire concept zien er als volgt uit:

Energie MJ/m ² .a	Traditioneel		Earth, Wind & Fire	
	Primaire energie	Eindenergie	Primaire energie	Eindenergie
Gas	350 (:1,4 =)	250	0	0
Elektr. stroom	210 (:3,0=)	70	42 (:3,0=)	14
Warmtepomp	0	0	75 (:3,0=)	25
Zon en wind	0	0	117 -/-	
Totaal	560		0	Energie neutraal

De gerealiseerde energiebesparing van $(560 - 117 =) 443 \text{ MJ}/\text{m}^2.\text{a}$ komt overeen met ca 80%. Het zal daarom tevens een stuk eenvoudiger worden het resterend stroomverbruik uit vernieuwbare bronnen te produceren”

In dit voorbeeld is het initiële energiegebruik $560 \text{ MJ}.\text{m}^2.\text{a}^{-1} \equiv 155 \text{ kWh}.\text{m}^2.\text{a}^{-1}$. Dit wordt met het Earth, Wind & Fire concept gereduceerd tot $(42+75=) 117 \text{ MJ}.\text{m}^2.\text{a}^{-1} \equiv 32,5 \text{ kWh}.\text{m}^2.\text{a}^{-1} \equiv 20\%$, te leveren met Zon & Wind. Het voorbeeld is hierna energieneutraal.

In het gebouw van de case study zijn deze cijfers $120,7 \text{ kWh}.\text{m}^2.\text{a}^{-1}$ initieel energiegebruik, gereduceerd tot $54,2 \text{ kWh}.\text{m}^2.\text{a}^{-1} \equiv 45\%$, te leveren met Zon & Wind. Het gebouw is ook hierna energieneutraal.

15.6 ESP-r simulaties

15.6.1 Algemeen

ESP-r simulatiemodellen zijn ontwikkeld voor de Zonrefacade[®] - zie deelrapport (I) en de Klimaatcascade[®] -zie deelrapport (III).

Voor het Ventecdak[®] is een formule ontwikkeld voor de bepaling van de winddrukcoëfficiënt als functie van de luchtsnelheid $U_{ejector}$ in de Venturi-ejector en de referentie windsnelheid U_{ref} op dakhoogte. Deze formule luidt

$$C_p = 0,2913 \ln\left(\frac{U_{ejector}}{U_{ref}}\right) + 0,0151$$

Deze formule is gebaseerd op een bovenkanaal met een hoogte van 2,0 m. De snelheid in de venturi-ejector is onderwerp van optimalisatie

De simulaties zijn uitgevoerd door dr. Daniel Costola van de Technische Universiteit Eindhoven, faculteit Bouwkunde, Unit Building Physics and Systems. Als referentiejaar is uitgegaan van NEN 5060:2008

NB: Verschillende onderdelen van het energie- en klimaatsysteem zijn niet in ESP-r gemodelleerd, nl.:

- De klimaatplafonds
- Het warmteopslagsysteem, KT en LT
- De warmtepomp -

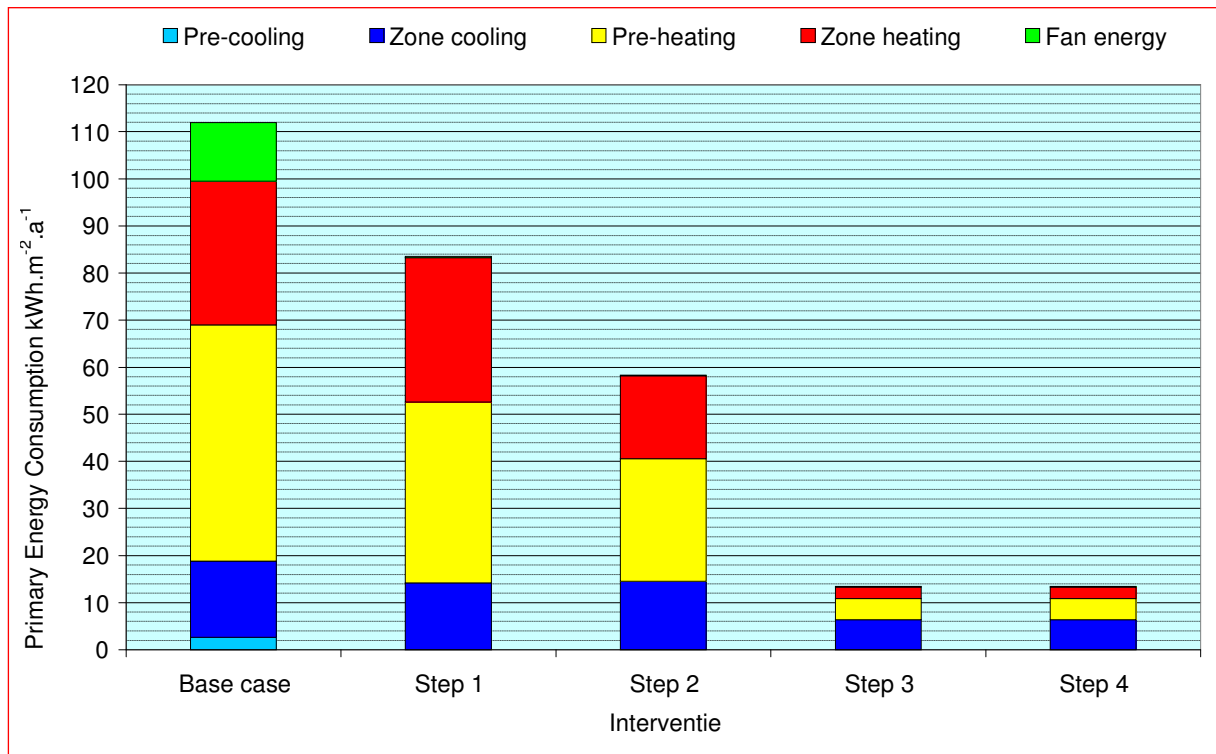
De COP van de warmtepomp is gesteld op 5.

15.6.2 Resultaten ESP-r simulaties

De resultaten van de ESP-r simulaties zijn weergegeven in figuur 15.3. In deze grafiek is onderscheid gemaakt tussen energiegebruik voor pre-conditionering van de lucht en voor ruimtekoeling en

ruimteverwarming. De energieopbrengsten van zon en wind in het het Ventedak[®] zijn in deze figuur niet aangegeven. Enkele opvallende verschillen met de analytische prestatie analyse zijn:

- Het totale energiegebruik in de referentiesituatie (base case) is $\approx 10 \text{ kWh.m}^{-2}.\text{a}^{-1}$ lager. Het verschil zit in een kleiner aandeel elektrische energie.
- Na stap 3 is het energiegebruik $\approx 13,5 \text{ kWh.m}^{-2}.\text{a}^{-1}$ hetgeen aanzienlijk minder is dan de $52,1 \text{ kWh.m}^{-2}.\text{a}^{-1}$ in de analytische versie



Figuur 15.3 – Primair energiegebruik referentiesituatie en na interventies in 4 stappen volgens ESP-r

Het verschil tussen de ESP-r simulaties en de analytische prestatie analyse zit grotendeels in de berekening van de warmtebehoefte. Er is van afgezien een nauwkeurige analyse te maken van de verschillen. Beide methoden leveren een aanzienlijk reductie van het energiegebruik op.

16. 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 ECBS¹ 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 Zwaaftink, 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 5 – Installatietechniek en Architectuur

- Ackermann, Marsha E. 2002. *Cool Comfort – America's Romance with Air-Conditioning*. Smithsonian Institute ISBN 1-58834-040-6.
- Brager, G.S. and De Dear, R.J. 2001. *Climate, Comfort, & Natural Ventilation: A new adaptive comfort standard for ASHRAE Standard 55. Indoor Environmental Quality (IEQ)*, Centre for the Built Environment, Centre for Environmental Design Research, UC Berkeley.
- Braungart, Michael e.a. 2007. *Cradle to Cradle – Afval = Voedsel*. Search Knowledge B.V. Heeswijk. ISBN 978-90-5594-577-1.
- Bronsema, B. 2001. *Healthy Buildings conferenties 1988 – 2000 – Een persoonlijke visie*. TVVL Magazine 2/2001. www.bronconsult.org (publicaties/wetenschappelijk)
- Bronsema, B. 2002. *Een duurzame toekomst voor de installatietechniek*. Symposium Duurzame Installaties 7 maart 2002 – Technische Universiteit Delft.

¹ Energy Conservation in Buildings and Community Systems

- Brown, G.Z. 1985. *Sun, Wind, and Light – Architectural Design Strategies*. John Wiley & Sons, Inc. ISBN 0-471-89506-7
- Brown, G.Z. 2009. *Pleasure and Performance*. Proceedings PLEA 2009 – 26th Conference on Passive and Low Energy Architecture, Quebec City, 22-24 June 2009.
- Cody, Brian 2011. *Form Follows Energy*. Springer Verlag GmbH. ISBN 9783211791639
- Cole, R.J. e.a. 2009. *Human and Automated Intelligence in Comfort Provisioning*. Proceedings PLEA 2009 – 26th Conference on Passive and Low Energy Architecture, Quebec City, 22-24 June 2009.
- Cooper, G. 1998. *Air-conditioning America. Engineers and the Controlled Environment 1900 – 1960*. John Hopkins University Press, Baltimore, Maryland. ISBN 0-8018-5716-3
- Givoni, Baruch 1994. *Passive and Low energy Cooling of Buildings*. John Wiley & Sons, Inc. ISBN 0-471-28473-4
- Givoni, Baruch 1998. *Climate Considerations in Building and Urban Design*. John Wiley & Sons, Inc. ISBN 0-471-29177-3.
- Hamzah, T.R. & Yeang Sdn. Bhd. 1994. *Bioclimatic Skyscrapers*. Ellipsis London Limited. ISBN 1-899858-70-9
- Hawkes, Dean e.a. 2002. *The Selective Environment – An approach to environmentally responsive architecture*. Spon Press London; ISBN 0-419-23530-2
- Hawkes, D. en Forster, W. i.s.m. Arup 2002. *Architecture, Engineering and Environment*. Laurence King Publishing Ltd, London. ISBN 1 856669 322 8.
- Heerwagen, J.H. 1992. *Adaptations and Coping: Occupant Response to Discomfort in energy Efficient Buildings*. ACEEE Summer study, Asimolar, California.
- Heerwagen, J.H. 2000. *Green Buildings, Organisational Success and Occupant Productivity* Building Research and Information Vol. 28 (5), 2000: pp 353-367.
- Heerwagen, J.H. 2001. *Do Green Buildings Enhance the Well Being of Workers?*
<http://www.edcmag.com>
- Henriks, Jeroen 2010. *Geïntegreerd en interdisciplinair ontwerpen*. TVVL Magazine 06 ?2010
- ISIAQ 2009. Indoor Air Quality Scientific Findings Resource Bank.
www.iaqscience.lbl.gov/si/performance-temp-office.html
- Hayter Richard B. 2000. *Toekomstvisie van een Amerikaan op de klimaattechniek*. TVVL Magazine 1/2000 pp 18-21.
- Leaman, A. e.a. 2007. *Are users more tolerant of “green” buildings?* Building Research and Information, Vol. 35, Issue 6, November 2007 pp 662-673.
- ISIAQ 2009.
- NEN-EN 15251:2007 en. *Binnenmilieu gerelateerde input parameters voor ontwerp en beoordeling van energieprestatie van gebouwen voor de kwaliteit van binnenlucht, het thermisch comfort, de verlichting en akoestiek*
- Olgay, Victor 1973. *Design With Climate – Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism*. Princeton University Press, Princeton, New Jersey.
- Search Knowledge 2007. *Cradle to Cradle – Afval = Voedsel*. Search Knowledge B.V. Heeswijk. ISBN 978-90-5594-577-1
- Will, H.M. 1999. *The First Century of Air-conditioning*. ASHRAE. ISBN 1-883413-76-1.

Hoofdstuk 6 – Ventileren voor een gezond en productief binnenklimaat

- Bakó-Biró, Z. e.a. 2004. *Effects of pollution from personal computers on perceived air quality, SBS symptoms and productivity in offices*. Indoor Air Volume 14 Issue 3, pp 178-187.
- Bluysen, Philomena 2009.
- Fanger, P.O. 1987. *A solution the Sick Building Mystery*. Proceedings Indoor Air Conference 1987.
- Gunnarsen, Lars e.a. *Adaptation to indoor air pollution*. Environment International, Vol. 18, pp 43-54, 1992.
- ISO 2008. *ISO 16814 -Building environment design – Indoor air quality – Methods of expressing the quality of indoor air for human occupancy*. International Standards Organization www.iso.org
- Metz, D. e.a. 2000. *Luchtkwaliteit langs het Nederlandse snelwegennet in 2010*. CE, Witteveen + Bos en TNO-MEP. <http://antenna.nl/ce>

- Ministerie van Sociale Zaken en Werkgelegenheid 2008. Beleidsregels Arboret. www.arbonieuwestijl.nl
- Nardell, E.A. en Keegan, J. et al (1991). *Theoretical Limits of Protection Achievable by Building Ventilation*. American Review of Respiratory Disease Vol. 144, pp302 – 306.
- Olesen, Bjarne 2011. *Standards for Ventilation and Indoor Air Quality in relation to the EPBD*. REHVA Journal Volume 48, Issue 1, January 2011. ISSN 1307-3729
- REHVA 2006 - *Guidebook no 6. Indoor Climate and Productivity in Offices. How to integrate productivity in life-cycle cost analyses of building services*. REHVA Federation of European Heating and Air-Conditioning Associations. ISBN 2 9600468-5-4.
- Seppanen, Olli e.a. 2002. *Ventilation Rates and Health*. ASHRAE Journal August 2002, pp 56 - 58
- WHO 1999.

Hoofdstuk 7 – Thermisch comfort en productiviteit op de werkplek

- ASHRAE 1996. *Comfort is More Than a Thermal Issue- Part 1 and Part 2*. Seminar ASHRAE Winter Meeting, Atlanta, Georgia, February 17 – 21 1996.
- ASHRAE 2002. *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. BSR/ASHRAE Standard 55-2002. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
- Berglund, Larry G. 1998. *Comfort and Humidity*. ASHRAE Journal August 1998.
- Boerstra, Atze 2010 (A). *Persoonlijke beïnvloeding als sleutel tot een A+ klimaat*. TVVL Magazine 04/2010.
- Boerstra, Atze 2010 (B). *Personal control over indoor climate and it's impact on health, comfort and performance*. Proceedings REHVA World Congress CLIMA 2010.
- Bronsema, B. 1993. *Het binnenklimaat in de zomer: Conflict tussen theorie en praktijk?* Klimaatbeheersing 22 (1993) nr. 9 (september). www.bronconsult.org
- Bronsema, B. 1994. *Binnenklimaat op Maat: Idee en Realisatie*. Nationale Milieutechniekdag 1994. www.bronconsult.org (conference papers).
- Bronsema, B. 1997. *Luchtbevochtiging – Van de regen in de drup?* TVVL Magazine 7/1997. www.bronconsult.org (publicaties/wetenschappelijk)
- Bronsema, B. 2002A. *Vocht – Waar maken we ons druk om?* TVVL Magazine 6/2002. www.bronconsult.org (publicaties/wetenschappelijk)
- Brown, G.Z. 2009. *Pleasure and Performance*. Proceedings PLEA 2009 – 26th Conference on Passive and Low Energy Architecture, Quebec City, 22-24 June 2009.
- Endravadan, M. e.a. 2004. *Modelling the behavioural adjustments and it's impact on energy consumption in offices*. Proceedings 9th international conference on air distribution in rooms 2004. University of Coimbra, Portugal.
- Fanger, P.O. 1970. *Thermal Comfort – Analyses and applications in Environmental Engineering*. McGraw-Hill Book Company. ISBN 0-07-019915-9.
- Fiala, D. e.a. 2001. *The dynamic effect of adaptive human responses in the sensation of thermal comfort*. Proceedings Windsor Conference 2001 “Moving thermal comfort standards into the 21st century.
- Kurvers, S.R. 2009. *Adaptief thermisch comfort in de praktijk*. TVVL Magazine 10/2009.
- Mil, Rob van 2009. *Hogere productiviteit en lagere energierekening: TNO wijst de weg*. Verwarming en Ventilatie juni 2009.
- NEN 2008. *Hygrothermische eigenschappen van gebouwen – Referentieklimaatgegevens*. NEN 5060:2008.
- Olesen, B.W e.a. 2004. *A Better Way to Predict Comfort: The New ASHRAE Standard 55-2004*. ASHRAE Journal, August 2004.
- Olesen, B.W. 2010
- REHVA 2006 - *Guidebook no 6. Indoor Climate and Productivity in Offices. How to integrate productivity in life-cycle cost analyses of building services*. REHVA Federation of European
- Roelofsen, C.P.G. 2002. *The impact of office environments on employee performance: the design of the workplace as a strategy for productivity enhancement*. Journal of Facilities Management, Vol. 1, No 3.
- Roelofsen, C.P.G. 2010

- Heating and Air-Conditioning Associations. ISBN 2 9600468-5-4.
- Sterling, E.M. et al 1985. *Criteria for Human Exposure to Humidity in Occupied Buildings*. ASHRAE Transactions CH-85-13 No.1
- Toftum, J. et al 1998. *Effect of fabric texture and material on perceived discomfort at high humidity*. Proceedings Indoor Air 99 Volume 1 Page 608-613.
- Toftum, J. en P O Fanger 1999. *Air Humidity Requirements for Human Comfort*. ASHRAE Transactions SE-00-5-1

Hoofdstuk 8 – Verantwoording van de onderzoeksdoelen

- IEA Annex 44 2010. *Integrating Environmentally Responsive Elements in Buildings .Volume 1. State of the Art Report. Volume 2A. Responsive Building Elements. Volume 2B. Integrated Building Concepts*.

Hoofdstuk 9 – Modelleren en Simuleren

- ASHRAE 2000.
- ASHRAE 2001
- Blocken, B. 2010.
- Hensen, J. 2003.
- Hensen, J. 2004.
- ISSO 2002.
- Oldenburg Industrieverlag 2010.

Hoofdstuk 13 – Het OMEGA Klimaatmodel

- Bronsema, B. 1994.
- Oeffelen, E.C.M. van e.a.2010.

Hoofdstuk 15 – Integrale prestatieanalyse van de Case Study

- BRE 2000. *Energy use in offices*. Energy Consumption Guide 19. British Research Establishment Best Practice Programme
- Brelih, Nejc 2012. *How to improve energy efficiency of fans for air handling units*. REHVA Journal February 2012.
- Bronsema, B.2000. *Koelen voor een beter milieu*. TVVL magazine 06-2000
- Bronsema, B.2002. *Een duurzame toekomst voor de installatietechniek*. Symposium Duurzame Installaties 7 maart 2002 – Technische Universiteit Delft.
- Costola, D. e.a.2012.
- ISSO 1998. *Bepalingsmethode Systeemrendementen ten behoeve van NEN 2916*. ISSO researchrapport 11
- NNI 2007. NEN-EN 13779:2007 en. *Ventilatie voor utiliteitsgebouwen - Prestatie-eisen voor ventilatie- en luchtbehandelingsystemen*
- Railio, Jorma 2007. *SPECIFIC FAN POWER – a tool for better performance of air handling systems*. Proceedings of CLIMA 2007 WellBeing Indoors.
- VDI 1998. *Energieverbrauchskennwerte für Gebäude- Heizenergie- und Stromverbrauchskennwerte*. VDI 3807. Beuth Verlag GmbH Berlin