



TU Delft
Technische Universiteit Delft

“EARTH, WIND AND FIRE”

NATUURLIJKE AIRCONDITIONING

PROEFSCHRIFT

ter verkrijging van de graad van doctor aan de
Technische Universiteit Delft

door Benjamin Bronsema – Raadgevend Ingenieur

December 2012

Opgedragen aan Ilona †
mijn liefde

Zing, vecht, huil, bid, lach, werk en bewonder
Ramses Shaffy

VOORWOORD

Het onderzoek *Earth, Wind & Fire*, geïnspireerd door Fons Verheijen, is gestart in de vroege zomer van 2007. Mijn vrouw Ilona was herstellende van een chemokuur na een zware operatie, en ik was ervan overtuigd dat ze bij de 20% van de vrouwen zou horen die volgens de statistieken genezen van ovariumkanker. Ik was haar mantelzorger.

Eind augustus was de kanker terug. En er kwam bericht van SenterNovem dat de subsidieaanvraag voor het onderzoek was goedgekeurd. Ik moest mijn tijd verdelen tussen Ilona en *Earth, Wind & Fire*. Dit *annus horribilis* werd verder nog onderbroken door een heupoperatie, die niet kon worden uitgesteld. Het onderzoek verliep daardoor met horten en stoten, en mijn ambitie en inspiratie waren tegen de jaarwisseling zo verminderd dat ik overwoog de opdracht terug te geven.

Het was Ilona die me overtuigde dat ik door moest gaan. *“Je werk was altijd je lust en je leven”* zei ze, *“en als ik er niet meer ben heb je nog een prachtig doel in je leven”*. Ze stierf op 22 februari 2008.

*Die ik het meest heb liefgehad, dat was mijn zieke lief, door kanker opgevreten.
Ik wilde haar niet kwijt. Mijn leven is gespleten, toen ik huilend bij haar sterfbed zat.*

In het voorjaar probeerde ik de draad weer op te pakken, maar zonder veel animo. Het was Wim van der Spoel, die me op fijnzinnige wijze het duwtje gaf dat ik nodig bleek te hebben. En het was Regina Bokel, die me over een grote hobbel heen hielp met het maken van een elegant rekenmodel voor de zonneshoorsteen. Ik kreeg er weer plezier in! Dierbare collega's, hartelijk dank.

Er kwamen spannende jaren, waarin langzamerhand de Zonneshoorsteen, het Ventecdak en ten slotte de Klimaatcascade hun geheimen prijsgaven. De resultaten waren mooier dan ik had durven hopen, en de samenwerking met de leden van het onderzoeksteam was bijzonder inspirerend. Eind 2011 was het onderzoek afgerond en kon ik me gaan wijden aan mijn proefschrift.

Het was een voorrecht en een genoegen dit onderzoek uit te hebben mogen voeren met de zeer capabele en enthousiaste medewerkers van de TU Delft, de TU Eindhoven, Peutz en Spraying Systems. Mijn bijzondere dank hiervoor gaat uit naar:

- Dr. Regina Bokel en Dr. Ir. Wim van der Spoel van de TU Delft voor hun scherpzinnige inbreng bij alle elementen van het onderzoek, in het bijzonder voor hun hulp bij het opstellen van rekenmodellen voor de Zonneshoorsteen en de Klimaatcascade.
- Dr. Dipl.-Ing. Marija Trcka, Marietta Gontikaki, Dr. Daniel Cóstola, Ir. Jeroen Houben en Ir. Dennis van Goch van de TU Eindhoven vooral met betrekking tot hun volhardende inzet bij het doorgronden van de geheimen van de Zonneshoorsteen. En naar Prof. Dr. Ir. Jan Hensen voor zijn stimulerende rol hierbij op de achtergrond.
- Dr.-Ing. J. Stefan Markus van Spraying Systems GmbH voor zijn belangrijke aandeel in de ontwikkeling van sproeitechnologie voor de Klimaatcascade en de met grote inzet hiervoor uitgevoerde CFD simulaties.
- Ing. Harry Bruggema van Peutz voor de bouw en instrumentatie van de fysieke testmodellen en de uitvoering van de meetprogramma's voor de Zonneshoorsteen en de Klimaatcascade. Zonder zijn betrokken, nauwgezette en deskundige inbreng zou de validatie van de computermodellen niet mogelijk zijn geweest.
- Prof. Dr. Ir. Bert Blocken en Ir. Twan van Hooff van de TU Eindhoven voor hun enthousiaste inzet bij de ontwikkeling van het Ventecdak. Met behulp van de door hen uitgevoerde CFD simulaties werden intuïtieve ideeën omgezet in reële innovatieve mogelijkheden voor de toepassing van natuurlijke ventilatie in kantoorgebouwen.
- Dr. Ir. Lourens Aanen van Peutz, die het Ventecdak in de windtunnel heeft getest, waardoor de hoge betrouwbaarheid van de CFD simulaties werd bevestigd, en die ook verder altijd beschikbaar was om zijn scherpzinnige licht over diverse problemen te laten schijnen.

- Ir. Maria Vera van Embden Andres voor verschillende fraaie tekeningen en Ir. Michiel Fremouw voor zijn bereidwilligheid mij uit de nood te helpen bij diverse computerproblemen.
- De leden van de klankbordgroep, Ir. Peter H. Wapenaar, Ir. Henk van Dorp, Ir. Koos Mast, Ir. Jack de Leeuw en Ir. Kees van der Hoeven, de naamgever van het Ventecdak. Zij hebben belangeloos vanuit de bouwwereld een sturende rol gespeeld bij de uitvoering van het onderzoek.

Het jaar 2012 heb ik grotendeels gewijd aan het schrijven van mijn proefschrift. Ik dank mijn promotoren, Prof. Ir. Peter Luscuere en Prof. Ir. Fons Verheijen voor de prettige samenwerking en hun begeleiding en waardevolle adviezen tijdens dit traject en daarvoor.

Het onderzoek zou niet mogelijk zijn geweest zonder de subsidie van de overheid, want al de bovengenoemde knappe koppen en de fysieke testmodellen hebben veel geld gekost. Ik bedank in het bijzonder Ir. Piet Heijnen van Agentschap NL voor zijn bemiddeling en betrokkenheid bij het onderzoek, en via hem de Nederlandse belastingbetaler. Ik ben ervan overtuigd dat we met de ontwikkelde *Natuurlijke Airconditioning* de samenleving iets terug kunnen geven, nodig voor de transitie naar een duurzame energievoorziening. Om het vertrouwen van potentiële opdrachtgevers en de bouwwereld te winnen nodig ik hen hierbij uit het *Earth, Wind & Fire* concept een kans te geven voor uitvoering in een *pilot project*. Graag stel ik hiervoor mijn expertise en ervaring beschikbaar.

Mijn bijzondere dank gaat uit naar Bob Schalkoord, die me in 1993 uitnodigde om gastdocent bij Bouwkunde te worden. Zonder deze interventie in mijn leven zou dit proefschrift naar alle waarschijnlijkheid nooit zijn geschreven.

Ik wil tenslotte mijn kinderen, kleinkinderen, familie en vrienden bedanken voor hun steun in zware tijden en drukke jaren. Ik beloof jullie dat ik na mijn promotie meer tijd met jullie zal doorbrengen dan de afgelopen jaren. Hopelijk wordt 2013 mijn *annus mirabilis*.

Voorschoten, december 2012,

Ben Bronsema

SAMENVATTING

“Architecture will therefore become more informed by the wind, by the sun, by the earth, by the water and so on. This does not mean that we will not use technology. On the contrary, we will use technology even more because technology is the way to optimise and minimize the use of natural resources”(Richard Rogers)

Er zit een kloof tussen architectuur en technologie en het onderzoek *“Earth, Wind & Fire – Natuurlijke Airconditioning”* is een zoektocht naar kennis en wetenschap die nodig is om deze kloof te overbruggen.

De onderzoeker is technoloog, te omschrijven als

“iemand die poogt een nieuwe methode te ontdekken om in een dringende behoefte te voorzien, door verbetering van de werkmethode die hij tot op dat moment gebruikt en met behulp van materiaal dat voor hem bereikbaar is¹”.

De *werkmethode* die ik in mijn beroep als ontwerper van klimaatinstallaties heb gevolgd was gebaseerd op bekende mechanische systemen en technieken. De *nieuwe methode* maakt gebruik van natuurlijke hulpbronnen, zoals zo treffend verwoord in het bovenstaande citaat van Richard Rogers. De *dringende behoefte* heeft enerzijds betrekking op energiebesparing en de nabije noodzakelijke energieneutraliteit van gebouwen. Anderzijds op de noodzakelijke doorbreking van de dichotomie tussen architectuur en technologie, die mede verantwoordelijk is voor hoge faalkosten.

De strategische opzet van het onderzoek is gericht op de ontwikkeling van *Klimaat Responsieve Architectuur* waarbij klimaatontwerp, bouwfysica en installaties worden gekoppeld aan een architecturale opgave. Een gebouw wordt hierbij ook ontworpen als *“klimaatmachine”*, een machine die wordt geactiveerd door zwaartekracht en de omgevingsenergie van aardmassa, wind en zon, metaforisch aangeduid met *Earth, Wind & Fire*.

Bij deze strategie krijgt de architect een grote rol bij het klimaatontwerp en de energie-efficiency van gebouwen. Door de klimaatvoorzieningen uit te voeren als elementen voor architectonische expressie is klimaattechniek niet meer ondergeschikt aan architectuur maar wordt zelf deel van 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.

De rol van de klimaatingenieur wordt bij dit concept van integraal ontwerpen niet minder belangrijk. Hij moet hierbij wel putten uit een nieuw stuk kennisrepertoire, dat in het onderzoek *Earth, Wind & Fire*, is ontwikkeld en waarvan de belangrijkste resultaten zijn weergegeven in dit proefschrift. De klimaatingenieur bedrijft hiermee geen *“installatiearchitectuur”* zoals door sommigen wordt bepleit². *“Het concept, het basisontwerp zal eerst door de architect geconcipieerd moeten worden, dan is er plaats voor de andere disciplines³”*

HYPOTHESE

Uitgangspunt voor het onderzoek *Earth, Wind & Fire*, waarbij de subconcepten van Ventedak, Klimaatcascade en Zonneschoorsteen een integraal deel van het (Architectonisch) gebouwontwerp vormen is de volgende hypothese:

1. *Een geïntegreerde benadering tussen Architectuur/Constructies en Klimaatontwerp is in staat om de vrij beschikbare omgevingsenergie, in de vorm van aardmassa, wind en zon, aan te wenden om een gebouw op voornamelijk natuurlijke wijze te klimatiseren.*
2. *De subconcepten kunnen worden gemodelleerd en gevalideerd, waardoor ze een betrouwbare ondersteuning aan praktische ontwerpprocessen kunnen bieden.”*
3. *De subconcepten kunnen afzonderlijk of in combinatie een bijdrage leveren aan de energieneutraliteit van gebouwen.*

HET ONDERZOEK

¹ James, K. Feibleman in “Importance of Technology”. NATURE January 1966

² Emile Quanjel en Wim Zeiler in “De basis voor installatiearchitectuur – Integraal Ontwerpen”. TVVL Magazine 11/2002.

³ Jouke Post in “De ziel van het concept”. TVVL Magazine 11/2002.

Het onderzoek is voortgevloeid uit een jarenlange begeleiding van architectuur- en bouwkundestudenten. Hieruit kwamen verschillende intuïtieve ideeën en concepten naar voren over de mogelijkheden klimaattechniek en energieaspecten te koppelen aan architectuur. In eerste instantie zijn deze ideeën basaal analytisch gemodelleerd, waarna een keuze is gemaakt uit de meest belovende concepten. Deze omvatten drie responsieve architecturale elementen, het *Ventecdak*⁴, de *Klimaatcascade*, en de *Zonneschoorsteen* of *Zonnefaçade*. Deze elementen zijn in eerste instantie afzonderlijk ontwikkeld, geoptimaliseerd en geëvalueerd, maar ze vormen uiteindelijk in totaalconcept van klimaatregeling een symbiose met de architectuur van een gebouw –zie figuur 1.3/1.

VENTECDAK

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

Het *Ventecdak* kan in principe ook worden benut voor het opwekken van windenergie en zonne-energie, waarmee een belangrijke bijdrage kan worden geleverd aan de energieneutraliteit van gebouwen.

KLIMAATCASCADE

Kern van het klimaatsysteem is de *Klimaatcascade*, een door zwaartekracht geactiveerde warmtewisselaar voor de conditionering van ventilatielucht, uitgevoerd als bouwkundige schacht. In de *Klimaatcascade* wordt de ventilatielucht al naar behoefte gekoeld of verwarmd, gedroogd of bevochtigd. Aan de top wordt zomer en winter via sproeiers water van ca. 13°C toegevoerd, waarbij door impulsoverdracht van druppels op lucht de neerwaartse luchtbeweging vanuit de overdrukruimte 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 zonneschoorsteen 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 zeer klein temperatuurverschil tussen lucht en water.

ZONNESCHOORSTEEN

Ventilatie lucht wordt afgezogen via de *Zonneschoorsteen* of *Zonnefaçade* waarin tevens zonne-energie wordt geoogst, die wordt gebruikt voor verwarming van het gebouw in het stookseizoen. Met behulp van een warmtewisselaar aan de top van de zonneschoorsteen wordt de zonnewarmte overgedragen op circulerend water en in de bodem onder het gebouw opgeslagen. De *Venturi-ejector* in het *Ventecdak* dient mede om het drukverlies van de warmtewisselaar te compenseren. Voor de morfologie van een zonneschoorsteen zijn vele varianten denkbaar, waarbij de gevel bedekkende *Zonnefaçade* de grootste energieprestatie levert.

TOEPASSING VAN HET EARTH, WIND & FIRE CONCEPT

Het ontwikkelde *Earth, Wind & Fire* concept moet worden beschouwd als een centrale voorziening voor luchtbehandeling van gebouwen die de centrale mechanische luchtbehandeling van een gebouw kan vervangen. Decentrale voorzieningen voor verwarming en koeling op werkplekniveau, zoals klimaatplafonds, ventilatorconvectoren, radiatoren e.d. kunnen uitstekend met het concept worden gecombineerd.

Het *Earth, Wind & Fire* concept 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.

Het *Earth, Wind & Fire* concept kan in elke architectuurstijl worden toegepast, klassiek, modern, internationaal, postmodern, bioklimatisch etc. Het is de architect die vorm geeft aan de uitwerking van het gebouw als klimaatmachine”.

⁴ Van Vent en Tect, Latijn voor Wind en Dak, maar ook voor Ventilation & Technology.

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 *Klimaatcascade*. De uitgevoerde *case-study* geeft hiervan een voorbeeld –zie hoofdstuk 6.

BASALE MODELLERING

Bij de ontwikkeling van de verschillende concepten zijn in eerste instantie eenvoudige rekenmodellen gemaakt, die een eerste indruk gaven van de haalbaarheid en de potenties van het betreffende concept. Met behulp van wetenschappelijke en technische gegevens uit het repertoire van de klimaatingenieur zijn wiskundige beschrijvingen gegeven van de warmteoverdracht en stromingen op macroniveau. Dergelijke modellen staan dicht bij de ingenieurspraktijk en maakten een snelle evaluatie van alternatieven mogelijk, mede op basis van ervaring en intuïtie.

De gebruikte formules hebben uiteraard betrekking op stationaire omstandigheden, maar door discretisering konden de processen quasi dynamisch worden gesimuleerd. 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 hoger resolutieniveau.

GEDETAILLEERDE MODELLERING

De met de basale rekenmodellen geanalyseerde concepten zijn met behulp van CFD uitgewerkt tot virtuele prototypes, 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.

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. Op basis van de virtuele prototypes zijn fysieke schaalmodellen gebouwd voor experimenteel onderzoek. Met behulp hiervan konden de CFD simulaties worden gevalideerd. De fysieke schaalmodellen zijn op hun beurt ook weer prototypes voor de in de werkelijke bouwpraktijk te realiseren bouwdelen. Met behulp van CFD is nagegaan of de geteste schaalmodellen representatief zijn voor de modellen op ware grootte.

DYNAMISCHE MODELLERING

Het basale rekenmodel en het CFD simulatiemodel zijn gebruikt als instrument voor de berekening en het ontwerp van *Klimaatcascade* en *Zonneschoorsteen* onder stationaire omstandigheden. Voor de bestudering van het dynamisch gedrag en ramingen van de jaarlijkse energieprestatie van deze responsieve bouwdelen is het dynamische simulatiemodel ESP-r gebruikt. Dit model biedt 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 klimaatvoorzieningen inclusief regelsysteem. Het is flexibel en krachtig, en daardoor zeer geschikt voor het simuleren van innovatieve technieken. Voor de berekening van de jaarlijkse energieprestaties is in het onderzoek het referentiejaar NEN 5060:2008 gebruikt.

VALIDATIE DOOR METINGEN IN EEN FYSIEK ONDERZOEK MODEL

Op basis van de basale en de gedetailleerde modellen zijn fysieke modellen 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 testopstellingen zijn in een terugkoppeling de basale en de gedetailleerde simulatiemodellen gekalibreerd en gevalideerd.

REKENMODEL VOOR DE PRAKTIJK

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 ontwikkeld. Architect en klimaatingenieur kunnen met behulp hiervan deze elementen in het definitief ontwerp nauwkeuriger dimensioneren en berekenen.

DE STEDENBOUWKUNDIGE CONTEXT

Randvoorwaarde voor een optimale werking van de *Natuurlijke Airconditioning* volgens het *Earth, Wind & Fire* concept is dat de invloed van wind en zon op het betreffende gebouw niet substantieel door de omliggende bebouwing wordt belemmerd. Idealiter moet de wind vrij spel hebben om het *Ventecdak* en moet de *Zonneschoorsteen* niet in de schaduw liggen van andere gebouwen.

Voor de werking van het *Ventecdak* hebben hoogteverschillen tussen gebouwen de meeste invloed. Voor de zonneschoorsteen zijn laterale tussenafstanden meer bepalend voor de stedenbouwkundige omgeving. Mede door de grote potentiële bijdrage van een *Zonneschoorsteen* aan het warmteverbruik van gebouwen hebben de stedenbouwkundige randvoorwaarden voor de *Zonneschoorsteen* dan ook prioriteit. Geconcludeerd wordt dat optimale bezonning mogelijk is bij normaal te achten stedenbouwkundige randvoorwaarden

De beschouwingen hebben een globaal en algemeen karakter. Voor specifieke situaties wordt aanbevolen gebruik te maken van windtunnelonderzoek en/of bezonningssoftware al dan niet in combinatie met onderzoek in een zonn simulator.

CASE STUDY

De jaarlijkse nieuwbouw van kantoorgebouwen in Nederland omvat maar een klein percentage van de aanwezige voorraad. Toepassing van het *Earth, Wind & Fire* concept is daarom vooral van belang bij grote renovaties van bestaande gebouwen. Om de mogelijkheid hiervan te onderzoeken is een case study gemaakt waarbij een bestaand kantoorgebouw virtueel wordt uitgevoerd met *Natuurlijke Airconditioning* volgens *Earth, Wind & Fire* concept. De case study diende enerzijds als ontwerp oefening, anderzijds om de energieprestaties van het concept in een reëel gebouw te evalueren. Uitgangspunt hierbij was dat architectonisch, bouwkundig en installatietechnisch het ontwerp niet alleen virtueel maar ook reëel zou moeten kunnen worden gerealiseerd. Het ontwerp is daarom uitgewerkt op VO (Voorlopig Ontwerp) niveau.

Uit de ontwerp oefening blijkt dat toepassing van het *Earth, Wind & Fire* concept in het onderhavige kantoorgebouw zeer goed mogelijk is.

Een basale analyse van de energieprestatie wijst uit dat het totale gebouwgebonden primaire jaarlijkse energiegebruik in de referentiesituatie van ca. $120\text{kWh}\cdot\text{m}^{-2}$ na deze virtuele interventie tot minder dan de helft wordt teruggebracht. Door de energieopbrengst van het *Ventecdak* wordt het gebouw energieneutraal. Een gedetailleerde dynamische analyse met ESP-r geeft een nog gunstiger beeld.

CONCLUSIES

Ventecdak

Het *Ventecdak* is een dominant architecturaal element en een typerende expressie van *Klimaat Responsieve Architectuur*. Als geïntegreerde benadering tussen Architectuur / Constructies en Klimaatontwerp kan het een belangrijke bijdrage leveren aan een *Natuurlijke Airconditioning* en aan de energieneutraliteit van gebouwen. Voor het ontwerp zijn gevalideerde ontwerptools en rekenmodellen beschikbaar. De hypothese is voor dit deel van het *Earth, Wind & Fire* concept dan ook bewezen.

Het *Ventecdak* is verder een intrinsiek veilig concept om kortsluiting tussen verse en gebruikte ventilatielucht te voorkomen.

De aerodynamische prestaties van het *Ventecdak* zijn afhankelijk van de windsnelheid op dakhoogte, die in hoofdzaak wordt bepaald door de hoogte van het gebouw en door de omliggende bebouwing. Met behulp van windtunnelonderzoek zijn randvoorwaarden geformuleerd voor optimalisering van het *Ventecdak* in een stedenbouwkundige context.

In een case study is aangetoond dat het aanbrengen van een *Ventecdak* op bestaande gebouwen een reële optie is.

Klimaatcascade

De *Klimaatcascade* is een architecturaal onopvallend element, tenzij toegepast voor de koeling van atria. Voor de binnenklimaatcondities daarentegen is de *Klimaatcascade* een essentieel bouwdeel, niet alleen voor de conditionering van de ventilatielucht maar ook voor het opwekken van positieve drukken ten behoeve van de luchtdistributie.

Het onderzoek was aanvankelijk alleen gericht op het gebruik van de *Klimaatcascade* voor koeling van de ventilatielucht in de zomerperiode. Gaandeweg zijn ook de andere seizoenen in het onderzoek betrokken, waardoor tevens gedurende het hele jaar de aerodynamische prestaties kunnen worden benut. Essentieel voor het onderzoek was de fysieke testopstelling waarin de psychometrische prestaties ook onder extreme zomer- en wintercondities konden worden gemeten. Hiermee werd het bewijs geleverd dat een *Klimaatcascade* een robuust en universeel bouwdeel kan zijn voor koeling/droging en verwarming/bevochtiging van ventilatielucht in gebouwen in alle jaargetijden.

Het basale rekenmodel en het numerieke simulatiemodel zijn beide in de fysieke testopstelling gevalideerd. Beide modellen blijken de psychometrische en aerodynamische prestaties van een *Klimaatcascade* met een hoge mate van nauwkeurigheid te kunnen voorspellen.

De koudefactor (COP) van een *Klimaatcascade* is afhankelijk van de water/luchtfactor en van de hoogte van het gebouw en kan variëren van 50 →15 bij gebouwen van 4 →20 verdiepingen. Een voor de hand liggende variant op het concept is de uitvoering van de *Klimaatcascade* in meerdere gestapelde secties. Dit maakt bij een gebouw van 20 verdiepingen een COP in de orde van 100 mogelijk, hetgeen de energiezuinigheid van het concept onderstreept. Deze variant is overigens niet uitgewerkt.

Enkele risicofactoren die het gebruik van een *Klimaatcascade* met zich zou kunnen brengen zijn onderzocht. Voor de ontwikkeling van legionellabacteria en andere ziektekiemen is de *Klimaatcascade* door de lage watertemperaturen intrinsiek veilig. Condensrisico op uitwendige scheidingsconstructies is bij een correcte uitvoering van thermische bruggen uitgesloten.

Samenvattend kan worden geconcludeerd dat de *Klimaatcascade* als geïntegreerde benadering tussen Architectuur / Constructies en Klimaatontwerp een belangrijke bijdrage kan leveren aan een *Natuurlijke Airconditioning* en aan de energieneutraliteit van gebouwen. Voor het ontwerp zijn gevalideerde ontwerptools en rekenmodellen beschikbaar. De hypothese is voor dit deel van het Earth, Wind & Fire concept dan ook bewezen.

In een case study is aangetoond dat het aanbrengen van een *Klimaatcascade* in bestaande gebouwen een reële optie is.

Zonneschoorsteen

De *Zonneschoorsteen* is evenals het *Ventecdak*, een typerende expressie van *Klimaat Responsieve Architectuur*. Door gebruik te maken van de zon als drijvende kracht voor het afzuigen van ventilatielucht, kan een essentiële bijdrage worden geleverd aan een *Natuurlijke Airconditioning* van gebouwen. Van groter belang is echter de functie van de *Zonneschoorsteen* als absorber van zonne-energie die kan worden benut voor de verwarming van gebouwen. Hiermee kan een belangrijke bijdrage worden geleverd aan de energieneutraliteit van gebouwen.

In een fysieke testopstelling zijn gedurende vier seizoenen metingen uitgevoerd van temperaturen en luchtsnelheden als functie van de stralingsflux van de zon en de buitentemperatuur. De metingen gaven een goed beeld van de gecompliceerde thermodynamische processen in een zonneschoorsteen.

Het basale thermische model en stromingsmodel zijn gevalideerd aan de hand van metingen in de testopstelling, en blijken nauwkeurig genoeg te zijn om als basis te dienen voor een rekenmodel voor de praktijk. Een dynamisch simulatiemodel in ESP-r werd gekalibreerd en gevalideerd op basis van de meetresultaten in de fysieke testopstelling.

Het is de architect die in de conceptuele fase de basis legt voor een succesvolle architectonische integratie van een *zonneschoorsteen* in een gebouw. Voor deze intuïtieve en interactieve ontwerpfase is op basis van de basale modellering een eenvoudig en gebruiksvriendelijk rekenmodel ontwikkeld,

dat met een muisklik architectonische varianten en de energetische consequenties daarvan in beeld brengt.

Het thermisch rendement van een *zonneshoorsteen*, gedefinieerd als de verhouding van de aan de lucht afgegeven warmte en de opvallende zonnestraling wordt hoofdzakelijk bepaald door de eigenschappen van de glaswand. Bij een goede keuze mag een gemiddeld jaarrendement van rond 60% worden verwacht.

De hoogste energieprestatie wordt geleverd door een *Zonnefaçade*, een gevelbedekkende *Zonneshoorsteen*. Deze is toegepast in de case study, waarmee tevens is aangetoond dat toepassing van het concept bij bestaande gebouwen een reële optie is.

In voorjaar en najaar kan zonnewarmte voor een deel rechtstreeks of via korte termijn warmteopslag voor de verwarming van gebouwen worden benut. Voor de zomermaanden is een lange termijn opslag nodig om de warmte in het stookseizoen te kunnen gebruiken. Enkele systemen voor warmteopslag worden summier conceptueel toegelicht.

Aangetoond wordt dat met een *Zonneshoorsteen* een substantieel deel van de jaarlijkse warmtebehoefte van een gebouw kan worden gedekt, en dat met een *Zonnefaçade* in principe in de gehele warmtebehoefte kan worden voorzien. Dit geldt voor energiezuinige gebouwen met een jaarlijks warmteverbruik van ca. 50 kWh.m^{-2} .

Samenvattend kan worden geconcludeerd dat een *Zonneshoorsteen* als geïntegreerde benadering tussen Architectuur / Constructies en Klimaatontwerp een belangrijke bijdrage kan leveren aan een *Natuurlijke Airconditioning* en aan de energieneutraliteit van gebouwen. Voor het ontwerp zijn gevalideerde ontwerptools en rekenmodellen beschikbaar. De hypothese is voor dit deel van het Earth, Wind & Fire concept dan ook bewezen.

Leeswijzer

Subconcept →		Ventecdak	Klimaatcascade	Zonneschoorsteen
Betreft ↓				
1	Inleiding / algemeen	2.1	3.1	4.1
2	Basale modellering	2.2	3.2	4.2
3	Gedetailleerde modellering	2.3	3.3	4.3
4	Metingen en modelvalidatie	2.4	3.4	4.4
5	Ontwerp en Prestaties	2.5	3.5	4.5
6	Risicofactoren	-	3.6	-
7	Windenergie	5.3	-	-
8	Zonne-energie thermisch	-	-	4.5
9	Zonne-energie PV	5.4	-	-
10	Warmteopslag	-	-	4.5
11	Stedenbouwkundige context	6.2	-	6.3
12	Case Study	7	7	7
13	Conclusies	8.1	8.2	8.3

SUMMARY

“Architecture will therefore become more informed by the wind, by the sun, by the earth, by the water and so on. This does not mean that we will not use technology. On the contrary, we will use technology even more because technology is the way to optimise and minimize the use of natural resources” (Richard Rogers)

There is a gap between technology and architecture and the research "*Earth, Wind & Fire - Natural Airconditioning*" is a quest for knowledge and science needed to bridge this gap.

The researcher is a technologist, described as

"Someone who tries to discover a new method to provide in an urgent need, by improving the working method he used to date and using material that is accessible to him⁵."

The working method in my profession as a designer of HVAC systems was based on known mechanical systems and techniques. The new method makes use of natural resources, as so aptly expressed in the above quote from Richard Rogers. The urgent need covers on the one hand energy savings and the necessity of zero energy buildings in the near future; on the other hand the necessary breaking of the dichotomy between architecture and technology, which is *also* partly responsible for high failure costs.

The strategic aim of the research is focused on the development of *Climate Responsive Architecture*. In this concept climate design, building physics and HVAC systems are linked to an architectural assignment. A building is hereby also designed as "*climate machine*", a machine that is activated by gravity and the ambient energy of earth mass, wind and sun, metaphorically referred to as Earth, Wind & Fire.

This strategy gives the architect a major role in the design of the indoor environment and the energy efficiency of buildings. The climate features performing as elements for architectural expression, climate technology is no longer subordinate to architecture but is itself part of architecture. The design of a building as climate machine has become a task of the architect, who thus also is partly responsible for the indoor climate and energy management.

The role of the HVAC engineer in this concept of integrated design is no less important. He should, however, draw on a new piece of knowledge repertoire which has been developed in the research *Earth, Wind & Fire*, the main results of which being presented in this thesis.

This does not mean that the HVAC engineer commits "HVAC architecture" as some have advocated⁶. "*The concept, the basic design will first have to be conceived by the architect, then there is room for the other disciplines*⁷"

HYPOTHESIS

The starting point for the research *Earth, Wind & Fire*, with the sub concepts of *Ventec roof*, *Climate Cascade* and *Solar Chimney* being an integral part of the (Architectural) building design, is the following hypothesis:

1. An integrated approach between Architecture / Constructions and Climate Design is able to use the available ambient energy, in the form of earth mass, wind and sun, for a mainly natural air-conditioning of buildings.
2. The sub concepts can be modeled and validated, making them a reliable support for design processes in practice.
3. The sub concepts can individually or in combination contribute to zero energy buildings.

THE RESEARCH

The research arose from a long-standing supervision of architectural engineering students. Several intuitive ideas and concepts came into being on linking climate engineering and energy aspects to architecture. Initially, these ideas have been basal analytically modeled, after which a choice was made between the most promising concepts. These include three responsive architectural elements, the *Ventec roof*, the *Climate Cascade* and the *Solar Chimney* or *Solar Façade*. These elements have

⁵ James K. Feibleman in "Importance of Technology". NATURE January 1966

⁶ Emile Quanjel en Wim Zeiler in "Integrated Design – Base for HVAC Architecture". TVVL Magazine 11/2002.

⁷ Jouke Post in "The soul of the concept". TVVL Magazine 11/2002.

initially been developed, optimized and evaluated separately, but ultimately they are modeled into a total concept of air-conditioning in a symbiosis with the architecture of a building, see figure 1.3 / 1.

VENTEC ROOF

The *Ventec roof* utilizes positive wind pressures for the supply of ventilation air to the building via an overpressure chamber and the *Climate Cascade*. Negative wind pressures are used to extract used ventilation air from the building through the *Solar Chimney* and a *Venturi-ejector*. This concept takes advantage of the relatively good air quality at higher altitudes. Furthermore, the horizontal separation between supply air and exhaust air prevents short circuiting between the two air flows.

The *Ventec roof* can in principle also be used for the generation of wind and solar energy, by which an important contribution can be made to zero energy buildings.

CLIMATE CASCADE

Core of the climate system is the *Climate Cascade*, a gravity-activated heat exchanger for conditioning of ventilation air, designed as architectural shaft.

In the *Climate Cascade* ventilation air is cooled or heated, dried or humidified as needed. At the top in summer and winter water is sprayed at a temperature of app. 13°C. By momentum transfer from droplets on air the downward movement of air from the pressure chamber is enhanced. These aerodynamic pressure makes, together with the hydraulic pressure and the downward thermal draft, fans superfluous. The required cold is extracted from the soil, and heat is directly or indirectly supplied by the solar chimney.

Because of the high heat transfer coefficient from water to air and the large active surface of the millions of droplets in the spray spectrum the *Climate Cascade* operates at very small temperature differences between air and water.

SOLAR CHIMNEY

Ventilation air is sucked through the *Solar Chimney* or *Solar Façade* in which also solar energy is harvested, which is used to heat the building in the heating season. With the aid of a heat exchanger at the top of the solar chimney, the solar heat is transferred to water and transported to the heat storage in the ground under the building. The *Venturi-ejector* in the *Ventec roof* compensates for the pressure drop of the heat exchanger.

For the morphology of a solar chimney, numerous variants are conceivable, in which the façade covering *Solar Façade* provides the largest energy performance.

APPLICATION OF THE EARTH, WIND & FIRE CONCEPT

The *Earth, Wind & Fire* concept has to be considered as a central facility for air-conditioning of buildings, replacing the central mechanical system. Decentralized facilities for heating and cooling at workplace level, such as climate ceilings, fan coil units, radiators etc. can be combined perfectly with the concept.

The *Earth, Wind & Fire* concept is a total concept. This does not imply that the responsive building elements which are developed in this research can be applied in combination only. A stand alone application of a *Solar Chimney* or *Solar Façade*, a *Ventec roof* or *Climate Cascade* in office buildings is perfectly feasible.

The *Earth, Wind & Fire* concept can be applied in any architectural style, classic, modern, international, postmodern, bioclimatic etc. It is the architect who designs the building as "*climate machine*".

New-construction projects can obviously dedicatedly be designed to the *Earth, Wind & Fire* concept. In case of large renovations of existing buildings however, the concept can also be applied, either in part or as a whole. A *Ventec roof* and a *Solar Chimney* are possible additions to a building. Existing façades can be converted to *Solar façades*. Existing installation shafts can be converted to a *Climate Cascade*. The case study provides an example of this -see Chapter 6.

BASIC MODELING

The development of the three sub concepts is initially carried out by means of simple computational models, which gave a first impression of the feasibility and potential. Using scientific and technical data from the repertoire of the climate engineer mathematical descriptions of the heat transfer and flow

at the macro level could be made. Such models are close to the engineering practice and make a quick evaluation of alternatives feasible, partly based on experience and intuition as well.

The formulas used are of course related to stationary conditions, but by discretization quasi dynamic processes could be simulated. This method yielded not only a good insight into the underlying phenomena of heat transfer and air flow and the coupling of both. Many uncertainties came to light as well, which showed the need for further simulations with a higher resolution level

DETAILED MODELING

The sub concepts, analyzed by basic modeling, are developed into virtual prototypes using CFD, which gave insight into the heat transfer and flow patterns at the micro level. Using simulation techniques the physical effects could be analyzed in detail, in order to determine whether and to what extent models could be scaled up to full size components.

For the research *Earth, Wind & Fire* CFD virtual prototypes of the *Climate Cascade*, the *Ventec roof* and the *Solar Chimney* have been drawn up and the performance of these sub concepts has been analyzed and optimized. Based on the virtual prototypes physical mock-ups have been built for experimental research and measurements by which the CFD simulations have been validated. The physical mock-ups are in turn also prototypes for full-size building components in the real world. CFD is used to verify whether the tested models are representative of the full-size components.

DYNAMIC MODELING

The basic computational model and the CFD simulation are used as a tool for the computation and the design of the *Climate Cascade* and the *Solar Chimney* under stationary conditions. For the study of the dynamic behavior and estimates of the annual energy performance of these responsive components the dynamic simulation model ESP-r is used. This model offers designers the opportunity to study the complex relationships between the exterior and interior climate of a building based on architecture, building mass, air flows and HVAC facilities including control system. It is flexible and powerful, and therefore very suitable for the simulation of innovative techniques. For the calculation of the annual energy performance the reference year NEN 5060:2008 is used.

VALIDATION BY MEASUREMENTS IN A PHYSICAL MOCK-UP

Based on the basic and detailed models physical mock-ups have been erected of the *Solar Chimney*, the *Climate Cascade* and the *Ventec roof*. By means of these the actually occurring phenomena of heat transfer and airflows are measured in real time under different conditions. Obviously, these are scale models, but with such dimensions that the processes could reliably be monitored and recorded. On the basis of the measurement data from the physical mock-ups the basic and the detailed simulation models have been calibrated and validated.

COMPUTATIONAL MODEL FOR PRACTICE

A computational model for practical use, validated by the research results, offers architects and engineers the possibility to roughly develop and compute actual projects. For the *Solar Chimney*, a dominant architectural building component, a user-friendly computational model has been developed. In the conceptual phase of the building design, the architect can vary the proportions of a solar chimney with a mouse click and directly read the matching performance.

For the conceptual design of the *Ventec roof* and the *Climate Cascade* overall design data have been developed. Architect and climate engineer can use these data in the final design for precise dimensioning and calculation.

THE URBAN CONTEXT

Precondition for an optimal operation of *Natural Air-conditioning* according to the *Earth, Wind & Fire* concept is that the influence of wind and sun on the building in question is not substantially impeded by the surrounding buildings. Ideally, the wind should have free access to the *Ventec roof* and the *Solar Chimney* should not lie in the shadow of other buildings.

For the operation of the *Ventec roof* the difference in height between buildings has the most influence. For the solar chimney lateral spacing in the urban environment is more decisive. Due to the large potential contribution of a *Solar Chimney* to the heat consumption of a building, the urban boundary conditions for the *Solar Chimney* prevail. It is concluded that optimal solar access is possible at generally accepted urban boundary conditions.

The considerations have a global and general character. For specific situations, it is recommended to use wind tunnel research and / or solar software, whether or not in combination with research in a solar simulator.

CASE STUDY

The annual construction of office buildings in the Netherlands comprises only a small percentage of the existing building stock. Application of the *Earth, Wind & Fire* concept is therefore especially important for major renovations of existing buildings. In order to investigate this feasibility a case study is performed using an existing office building which is virtually fitted with *Natural Air-conditioning* according to the *Earth, Wind & Fire* concept. The case study served both as a design exercise, as well as to evaluate the energy performance of the concept in a real building. The starting point was that concerning architecture as well as structure and building services the design should not only virtually be viable but also in reality. The design is therefore drawn on Preliminary Design level. The design exercise shows that application of the *Earth, Wind & Fire* concept in this office is very well feasible.

A basic analysis of the energy performance indicates that the total building-related annual primary energy consumption in the reference situation of approx 120 kWh.m⁻² is reduced to less than half after this virtual intervention. With the energy yield of the *Ventec roof* a zero energy building is attained. A detailed dynamic analysis with ESP-r gives a still more favorable picture.

CONCLUSIONS

Ventec roof

The *Ventec roof* is a dominant architectural element and a typical expression of *Climate Responsive Architecture*. As an integrated approach between Architecture / Constructions and Climate Design it can make an important contribution to a *Natural Air-conditioning* of buildings at zero energy. For the design validated design tools and computational models are available.

The *Ventec roof* is also an intrinsically safe concept to prevent short-circuiting of fresh air and used ventilation air.

The aerodynamic performance of the *Ventec roof* depends on the wind speed at roof height, which is primarily determined by the height of the building and the surrounding buildings. Using wind tunnel research boundary conditions have been formulated for optimizing the *Ventec roof* in an urban context. A case study has shown that the application of a *Ventec roof* on an existing building is a real option. The hypothesis for this subconcept is just proven.

Climate Cascade

Unless used for cooling atria the *Climate Cascade* is an inconspicuous architectural element. For the indoor climate conditions however, the *Climate Cascade* is an essential building element, not only for the conditioning of the ventilation air, but also for the generation of positive pressures for the air distribution in a building.

The research was initially focused on the use of the *Climate Cascade* for cooling ventilation air in the summer only. In the course of the research the other seasons have been included in the study, by which also the aerodynamic performance can be utilized throughout the year. Essential for the study was the physical test mock-up in which the psychrometric performance could be measured even under extreme summer and winter conditions. It was demonstrated that a *Climate Cascade* is a robust and universal building component to be used for cooling / drying and heating / humidification of ventilation air in all seasons.

The basic computational model and numerical simulation model are both validated in the physical test mock-up. Both models can predict the psychrometric and aerodynamic performance of a *Climate Cascade* with a high degree of accuracy.

The Coefficient of Performance (COP) of a *Climate Cascade* depends on the water / air ratio and the height of the building and may vary from 50 → 15 in buildings of 4 → 20 storey's. An obvious variant of the concept, which incidentally has not been worked out, makes a COP of 100 feasible at 20 floors, which underlines the energy efficiency of the concept.

Some of the risk that the use of a *Climate Cascade* might entail have been investigated. Because of the low water temperatures the *Climate Cascade* is intrinsically safe for the development of legionella

bacteria and other pathogens. With a correct execution of thermal bridges condensation risk at outer partitions is excluded.

In summary it can be concluded that the *Cascade Climate* is an important contribution to *Natural Air-conditioning* and zero energy buildings. Validated design tools and computational models are available. A case study has shown that the application of a *Ventec roof* on an existing building is a real option. The hypothesis for this subconcept is just proven.

Solar Chimney

Like the *Ventec roof*, the *Solar Chimney* is a typical expression of *Climate Responsive Architecture*. Using the sun as a driving force for the extraction of ventilation air, an essential contribution to *Natural Air-conditioning* of buildings is attained. Still greater is the importance of the *Solar Chimney* as absorber of solar energy that can be used for the heating of buildings, which means a significant contribution to zero energy buildings.

During four seasons a physical test mock-up is used for measurements of temperatures and air velocities as a function of the radiation flux from the sun and the outside temperature. The measurements gave a good picture of the complex thermodynamic processes in a solar chimney. The basic thermal- and flow models are validated by means of measurements in the test mock-up, and prove accurate enough to provide a basis for a computational model for practical use. A dynamic simulation in ESP-r was calibrated and validated on the basis of the measurements in the test mock-up.

It is the architect who in the conceptual phase lays the foundation for a successful architectural integration of a solar chimney in a building. For this intuitive and interactive design a user-friendly computational model has been developed which can be used by architects. With one mouse click architectural variants and the inherent energetic consequences are brought into vision.

The thermal efficiency of a *Solar Chimney*, defined as the ratio of the heat absorbed by the airflow and the incident solar radiation is mainly determined by the properties of the glass wall. With a good choice an average annual efficiency of around 60% can be expected.

The highest energy performance is yielded by a *Solar Façade*, a facade covering *Solar Chimney*. This option is applied in the case study, which also shows that the application of the concept in existing buildings is a real option.

In spring and autumn solar heat can be used directly or through short-term storage for heating the building. For the summer months a long term storage is needed to use the solar heat in the heating season. Some systems for heat storage are briefly and conceptually explained.

It is shown that using a *Solar Chimney* a substantial portion of the annual heat demand of a building can be covered, and that with a *Solar Façade* basically the entire heat requirement can be met. This applies to energy-efficient buildings with an annual heat consumption of 50 kWh.m⁻².

In summary it can be concluded that the *Solar Chimney* is an important contribution to *Natural Air-conditioning* and zero energy buildings. Validated design tools and computational models are available. The hypothesis for this subconcept is just proven.

Reading Instructions

Subconcept →		Ventec roof	Climate Cascade	Solar Chimney
Relating to ↓				
1	Introduction / general	2.1	3.1	4.1
2	Basic modelling	2.2	3.2	4.2
3	Detailed modelling	2.3	3.3	4.3
4	Measurements and Modelvalidation	2.4	3.4	4.4
5	Design and Performance	2.5	3.5	4.5
6	Risk factors	-	3.6	-
7	Wind energy	5.3	-	-
8	Solar energy thermal	-	-	4.5
9	Solar energy PV	5.4	-	-
10	Thermal storage	-	-	4.5
11	Urban context	6.2	-	6.3
12	Case Study	7	7	7
13	Conclusions	8.1	8.2	8.3

INHOUDSOPGAVE

VOORWOORD	3
SAMENVATTING	5
Leeswijzer	11
SUMMARY	12
Reading Instructions	17
1 NATUURLIJKE AIRCONDITIONING	25
1.1 Inleiding	25
1.1.1 Considerans	25
1.1.2 Achtergrond.....	25
1.1.3 Kanttekeningen bij de Energie Prestatie Normering	26
1.1.4 Probleemstelling.....	26
1.1.5 Uitdagingen voor de bouwwereld	27
1.1.6 Uitdagingen voor architect en klimaatingenieur	27
1.1.7 Paradigmaverandering.....	28
1.1.8 Belemmeringen	28
1.2 Routes naar een duurzaam en energieneutraal gebouw	29
1.2.1 Wat is een duurzaam gebouw?.....	29
1.2.2 Energiegebruik	30
1.2.3 Trias Energetica.....	30
1.2.4 Bioklimatische architectuur.....	30
1.2.5 Klimaat Responsieve Architectuur.....	31
1.2.6 Integrale duurzaamheid	32
1.2.7 Een holistische benadering.....	33
1.3 Het Earth, Wind & Fire concept	33
1.3.1 Inleiding	33
1.3.2 Earth, Wind & Fire in het kort	33
1.3.3 Ventecdak	33
1.3.4 Klimaatcascade.....	34
1.3.5 Zonneschoorsteen of Zonnefaçade.....	34
1.3.6 Toepassing van het Earth, Wind & Fire concept.....	35
1.4 Demarcaties	35
1.4.1 Inleiding	35
1.4.2 Benutting van omgevingsenergie	36
1.4.3 Thema Earth	37
1.4.4 Thema Wind.....	38
1.4.5 Thema Fire	39
1.5 Hypothese	39
1.6 Onderzoeksvragen	39
1.7 Het onderzoek	40
1.8 Methoden	41
1.8.1 Modelleren, Simuleren en Valideren.....	41
1.8.2 Basale modellering [1]	42
1.8.3 Numerieke stromingsmodellering met CFD [2].....	42
1.8.4 Dynamische simulering met ESP-r [3].....	43
1.8.5 Validatie door metingen in een fysiek onderzoek model [4].....	43
1.8.6 Rekenmodel voor de praktijk [5].....	44
1.8.7 Verband tussen de modellen.....	44

1.8.8	Het onderzoeksproces.....	44
1.8.9	Samenvatting.....	45
2	HET VENTECDAK.....	46
2.1	Ventilatie en Wind.....	46
1.1.1	Inleiding	46
2.1.1	Windsnelheidsprofiel.....	46
2.1.2	Berekening plaatselijk windsnelheidsprofiel.....	48
2.1.3	Windstatistieken	48
2.1.4	Wind in stedelijke gebieden	50
2.1.5	Luchtkwaliteit in de stad	51
2.1.6	Het warmte-eiland effect.....	51
2.1.7	Luchtkwaliteit en ventilatie.....	52
2.1.8	Windstromingen om gebouwen.....	53
2.1.9	Winddrukcoëfficiënt.....	54
2.1.10	Cp Generator	56
2.1.11	Natuurlijke ventilatie via de gevel.....	56
2.2	Basale modellering	57
2.2.1	Overdrukruimte	57
2.2.2	Venturi-ejector.....	59
2.3	Gedetailleerde modellering.....	65
2.3.1	Inleiding	65
2.3.2	Initiële CFD simulaties.....	66
2.3.3	CFD simulaties gevalideerd met windtunnelmetingen.....	69
2.3.4	Prestatiesimulaties van het Ventecdak met actieve venturi-ejector.....	71
2.3.5	De venturi-ejector in perspectief.....	72
2.3.6	Ventecdak en Architectuur.....	73
2.3.7	CFD simulaties met gereduceerd bovendak	73
2.3.8	Vervolgonderzoek	74
2.4	Validatie door metingen in de windtunnel	75
2.4.1	Inleiding	75
2.4.2	Het schaalmodel	75
2.4.3	Meetresultaten	76
2.4.4	Metingen met actieve venturi-ejector.....	78
2.4.5	Het Ventecdak in de stedenbouwkundige context.....	80
2.5	Aerodynamische prestaties	80
2.5.1	Inleiding	80
2.5.2	Windsnelheidsprofiel.....	80
2.5.3	Drukken in het Ventecdak.....	81
2.5.4	Minimum ontwerpdrukverschil.....	83
2.5.5	Maximum ontwerpdrukverschil	84
2.5.6	Drukregeling overdrukruimte	84
2.5.7	Invloed van de terreinruwheid.....	84
3	DE KLIMAATCASCADE.....	86
3.1	Airconditioning zonder ventilatoren.....	86
3.1.1	Inleiding	86
3.1.2	Een oud principe.....	86
3.1.3	Warmteoverdracht en klimaatregeling	86
3.1.4	Klimaatcascade: Een oud principe in een nieuwe jas.....	87
3.1.5	Binnenklimaatcondities ALPHA en BETA.....	87
3.1.6	Klimaatcascade voor adiabatische koeling.....	90
3.1.7	Klimaatcascade voor diabatische koeling	91

3.1.8	De water/luchtfactor	94
3.1.9	Gebouw/klimaatype ALPHA valt af	95
3.1.10	Voelbare koelcapaciteit gebouw/klimaatype BETA	95
3.1.11	Indirecte adiabatistische koeling	95
3.2	Basale modellering	96
3.2.1	De Klimaatcascade als warmtewisselaar	96
3.2.2	Warmte- en stofoverdracht in een Klimaatcascade	97
3.2.3	Karakterisering van het sproeispectrum in een Klimaatcascade	98
3.2.4	Valsnelheid waterdruppels	100
3.2.5	Werkzaam oppervlak van de druppelverzameling in de sproeizone	104
3.2.6	Warmteovergangscoefficiënt in de sproeizone	105
3.2.7	Stofoverdrachtscoëfficiënt in de sproeizone	106
3.2.8	Invloed van de wanden op de warmteoverdracht	107
3.2.9	Werkzame oppervlak van de binnenwanden	108
3.2.10	Warmteovergangscoefficiënt wanden en lucht	108
3.2.11	Stofoverdrachtscoëfficiënt wanden en lucht	108
3.2.12	Sproeispectrum en werkzaam oppervlak Klimaatcascade	109
3.2.13	Sproeispectrum en warmteoverdrachtscoëfficiënt	109
3.2.14	Invloed van het sproeispectrum	110
3.2.15	Drukopbouw in de Klimaatcascade	111
3.2.16	Rekenmodel	115
3.3	Gedetailleerde modellering	117
3.3.1	Inleiding	117
3.3.2	De CFD simulaties	117
3.3.3	Het CFD simulatiemodel	118
3.3.4	Voorselectie van de sproeiers	118
3.3.5	Sproeierselectie door Spraying Systems	119
3.3.6	Meting van de druppelgrootteverdeling	119
3.3.7	Druppelgrootteverdeling	119
3.3.8	CFD simulaties fysiek testmodel	120
3.3.9	CFD simulaties model ware grootte	123
3.3.10	Verloop van de luchttemperatuur over de hoogte van de Klimaatcascade	126
3.3.11	Drukopbouw in de klimaatcascade	127
3.3.12	Conclusies CFD simulaties	128
3.3.13	Dynamisch simulatiemodel ESP-r	128
3.4	Validatie van de simulaties	129
3.4.1	Fysiske testopstelling	129
3.4.2	Meetresultaten B1 - ontwerp zomercondities	131
3.4.3	Meetresultaten variant B2 - gemiddelde zomercondities	134
3.4.4	Variant B3 - Gemiddelde winterconditie	135
3.4.5	Variant B4 - Voorjaar/Najaarscondities	135
3.4.6	Variant B5 - Ontwerp wintercondities	136
3.4.7	Overzicht van de meerresultaten varianten B1 t/m B5	136
3.4.8	De Klimaatcascade in een vorstperiode	137
3.4.9	Validatie voelbare prestaties basaal rekenmodel en CFD model	139
3.4.10	Diepte analyse psychometrische prestaties basaal rekenmodel	140
3.5	Het ontwerp	144
3.5.1	Ontwerpcriteria	144
3.5.2	Psychometrische en aerodynamische prestaties	146
3.5.3	Temperatuurregeling	149
3.5.4	Energieprestaties	149
3.5.5	Luchtverplaatsing en Regeling	153
3.5.6	De Klimaatcascade buiten het koelseizoen	159

3.5.7	Infrastructuur voor de luchtverdeling	164
3.5.8	Luchtreiniging	168
3.5.9	Open ramen	171
3.6	Risico- en beschermende factoren.....	173
3.6.1	Inleiding	173
3.6.2	Ziektekiemen in luchtbevochtigers.....	173
3.6.3	Legionella Pneumophila.....	174
3.6.4	Condensrisico en vorstschade	175
3.6.5	Ionisatie	176
3.6.6	Watervaleffect	177
3.6.7	Ozon	177
4	DE ZONNESCHOORSTEEN.....	179
4.1	Opbouw en uitvoering.....	179
4.1.1	Inleiding	179
4.1.2	Zonnestraling.....	179
4.1.3	De zonneshoorsteen.....	180
4.1.4	Keuzecriteria voor de glaswand	181
4.1.5	Warmtecapaciteit binnenwanden.....	181
4.1.6	De absorber.....	182
4.1.7	Isolatie	183
4.1.8	Optimale oriëntatie	183
4.1.9	Morfologie.....	185
4.1.10	Zonnefaçade	187
4.1.11	Shuntkanaal	188
4.2	Basale modellering	188
4.2.1	Inleiding	188
4.2.2	De g-waarde van glas	188
4.2.3	Referentiecondities	189
4.2.4	Convectieve warmteoverdracht.....	190
4.2.5	Basaal thermisch model.....	196
4.2.6	Thermische trek.....	200
4.2.7	Basaal stromingsmodel.....	202
4.2.8	Basaal rekenmodel	206
4.3	Gedetailleerde modellering.....	209
4.3.1	Inleiding	209
4.3.2	CFD simulaties CWC.....	210
4.3.3	CFD simulaties stromingspatroon	210
4.3.4	Dynamisch ESP-r model	211
4.4	Validatie van de simulaties	213
4.4.1	Fysieke testopstelling	213
4.4.2	Metingen.....	215
4.4.3	Dynamisch gedrag.....	217
4.4.4	Evaluatie formules CWC.....	217
4.4.5	Validatie basaal rekenmodel.....	218
4.4.6	Rendementsanalyse	222
4.4.7	Validatie van de ESP-r simulaties	223
4.4.8	Parametrische analyse	225
4.5	Het ontwerp.....	226
4.5.1	Ontwerpcriteria.....	226
4.5.2	Ventilatie-debiet	227
4.5.3	Thermisch rendement	227

4.5.4	Voorbeeldberekeningen.....	227
4.5.5	Debietregeling	228
4.5.6	Rendementsanalyse en optimalisering	229
1.1.7	Morfologie en thermische prestaties	234
4.5.6	Warmteopslag.....	238
4.5.7	Energieprestaties	242
4.5.8	Rekenmodel voor de praktijk	248
4.5.9	De zonneshoorsteen in het Nederlandse klimaat	252
5	ENERGIEOPWEKKING.....	260
5.1	Inleiding.....	260
5.2	Doelstellingen	260
5.3	Windenergie.....	261
5.3.1	Inleiding	261
5.3.2	Berekeningen windenergie	262
5.3.3	Windturbines in het Ventecdak	263
5.3.4	Terreincondities.....	265
5.3.5	Windturbines in de overdrukruimte.....	265
5.3.6	Energieproductie	267
5.3.7	Productiefactor (Specifieke energieproductie)	268
5.3.8	Windturbine in de Venturi-ejector.....	269
5.3.9	Vervolgonderzoek	269
5.4	Fotovoltaïsche energie	270
5.4.1	Inleiding	270
5.4.2	Dunne film PV-folie.....	270
5.4.3	Energieopbrengst.....	270
5.5	Totale energieprestatie Zon + Wind	272
5.5.1	Rekenvoorbeeld.....	272
5.5.2	Zonneschade	272
5.5.3	Windenergie	273
5.5.4	Fotovoltaïsche energie.....	273
5.5.5	Totale energieprestatie van zon en wind	273
5.5.6	Specifieke energieprestatie per m ² bruto vloeroppervlak.....	274
5.5.7	Energieprestatie per m ² bruto vloeroppervlak op basis van primaire energie	275
5.5.8	Jaarlijks verloop van de energieprestatie.....	276
6	DE STEDENBOUWKUNDIGE CONTEXT	277
6.1	Inleiding.....	277
6.2	Het Ventecdak.....	277
6.2.1	Algemeen	277
6.2.2	Testresultaten.....	278
6.3	De zonneshoorsteen	279
6.3.1	Positie van de zon.....	279
6.3.2	Dagelijks verloop van de zonnestraling	280
6.3.3	Schaduwwerking van de zon.....	281
6.3.4	Maximaliseren energieopbrengst van de zonneshoorsteen.....	282
6.3.5	Optimaliseren van de zonneshoorsteen als afzuigsysteem	283
6.3.6	Stedenbouwkundige karakteristieken.....	284
6.4	Vervolgonderzoek.....	284
7	CASE STUDY	286

7.1	Inleiding.....	286
7.2	Het gebouw.....	286
7.2.1	Algemeen	286
7.2.2	Globale oppervlakte analyse	287
7.3	Voorlopig ontwerp Earth, Wind & Fire concept.....	287
7.3.1	Zonneschoorsteen.....	287
7.3.2	Zonnefaçade	287
7.3.3	Ventecdak.....	288
7.3.4	Klimaatcascade.....	288
7.3.5	Natuurlijke Airconditioning	288
7.3.6	Natuurlijke luchtafzuiging en warmtewinning in Zonnefaçade	289
7.4	Ventilatie en klimaatregeling kantoren.....	289
7.4.1	Luchtdistributie	289
7.4.2	Klimaatregeling.....	289
7.4.3	Warmte- en koudevoorziening	290
7.4.4	Referentiesituatie.....	290
7.5	Basale energieprestatie analyse.....	291
7.5.1	Fasering	291
7.5.2	Energetische uitgangspunten.....	292
7.5.3	Resultaten Stap 1 -Klimaatcascade	293
7.5.4	Resultaten Stap 2 – zonnefaçade.....	293
7.5.5	Resultaten Stap 3 –WKO installatie.....	294
7.5.6	Resultaten Stap 4.....	294
7.5.7	Overzichtsgrafiek	295
7.6	Gedetailleerde energieprestatie analyse.....	295
7.6.1	ESP-r simulaties	295
7.6.2	Resultaten van de simulaties	296
7.6.3	Vergelijking basale en ESP-r energieprestatie analyse	296
8	CONCLUSIES	297
8.1	Het Ventecdak.....	297
8.2	De Klimaatcascade	297
8.3	De Zonneschoorsteen	299
8.4	Energieopwekking Ventecdak.....	300
8.5	Case study	300
9	REFERENTIES	302
9.1	Het onderzoek.....	302
9.2	Het Ventecdak.....	304
9.3	De Klimaatcascade	306
9.4	De Zonneschoorsteen	310
9.5	Energieopwekking.....	313
9.6	De stedenbouwkundige context.....	313
9.7	Case Study.....	314
10	BEGRIPPEN, EENHEDEN EN SYMBOLEN.....	316
10.1	Begrippen	316

10.2	Eenheden en symbolen ruimte en tijd	320
10.3	Eenheden en symbolen warmte.....	320
10.4	Eenheden en symbolen klimaatregeling	321
10.5	Eenheden en symbolen stromingsleer.....	322
11	CURRICULUM VITAE ING. BENJAMIN BRONSEMA	323

CONCEPT

1 NATUURLIJKE AIRCONDITIONING

1.1 Inleiding

1.1.1 Considerans

Hoofdonderzoeker van het project “EARTH, WIND & FIRE – NATUURLIJKE AIRCONDITIONING” is Benjamin Bronsema, raadgevend ingenieur en onderzoeker bij de TU Delft, faculteit Bouwkunde, afdeling Architectural Engineering + Technology. Het navolgende is ontleend aan zijn persoonlijke website www.bronconsult.org.

“Mijn specialisme is de klimaattechniek en mijn fascinatie is de inzet hiervan voor een veilig, gezond, productief, behaaglijk, en energiezuinig binnenmilieu. Aan deze fascinatie heb ik een groot deel van mijn beroepsmatige leven gewijd, zowel als ontwerper als onderzoeker. In de loop van mijn ontwikkeling zijn de accenten hierbij gaandeweg verschoven van mechanische- naar meer natuurlijke systemen, culminerend in het huidige onderzoek.

Het optimale klimaatsysteem wordt naar mijn overtuiging gevormd door een symbiose van natuur en techniek met behulp van hybride systemen. Zowel met het oog op de gebruiker (binnenmilieu) als met betrekking tot het energiegebruik (buitenmilieu) speelt de natuur bij deze systemen een dominante rol.

Sinds 1993 ben ik als parttime praktijkdocent klimaattechniek betrokken bij de faculteit Bouwkunde van de TU Delft. Mijn taak bestond in hoofdzaak uit het begeleiden van studenten bij de klimaattechnische aspecten van hun afstudeerontwerp. In die hoedanigheid heb ik enkele honderden studenten mogen begeleiden. Naast mijn reguliere adviseurswerkzaamheden heb ik deze activiteiten als bijzonder bevredigend ervaren. Ik had met mijn praktische ervaring de studenten wat te bieden, en andersom hielden deze jonge mensen mij ook alert en jong.

Anderzijds heb ik ervaren dat studenten vaak een zekere schroom hadden om mij te consulteren, bang als ze waren dat hun soms primitieve maar vaak intrigerende ideeën over ventilatie en klimaatregeling door mij van tafel zouden worden geveegd. De mooiste contacten waren die waarbij studenten opgelucht verder konden met hun ontwerp en soms zelfs enthousiast werden over de “klimaatregeling met andere middelen” die we samen hadden ontwikkeld. Hier kwamen minder ventilatoren, pompen en pijpen aan te pas kwamen dan in mijn beroepspraktijk, maar daar werden dan ook van mij garanties gevraagd die in een afstudeerwerk niet aan de orde zijn. Vaak voelde ik de behoefte bepaalde innovatieve oplossingen op het grensvlak van klimaattechniek en architectuur grondiger uit te werken tot werkende concepten en dat heeft uiteindelijk geleid tot het onderzoeksproject “Earth, Wind & Fire”.

De jarenlange samenwerking met architectuur- en bouwkundestudenten heeft mijn visie op de klimaattechniek veranderd. Ook voor mij gold dat het grensvlak van twee disciplines de beste voedingsbodem is voor innovatieve ideeën. Uitgedaagd en geïnspireerd door studenten en docenten (Luscuere, P.G. 1992 en Verheijen, A.P.J.M. 2002) ben ik mij sinds 2005 op de ontwikkeling van deze ideeën gaan toeleiden, wat tenslotte resulteerde in mijn promotieonderzoek “EARTH, WIND & FIRE – NATUURLIJKE AIRCONDITIONING”.

De primaire doelstelling van het onderzoek was het verkleinen van de begripsafstand tussen architect en klimaatingenieur door de klimaatvoorzieningen in een gebouw uit te voeren met behulp van architectonische en bouwkundige elementen. Door deze doelstelling te koppelen aan de nabije noodzaak van toekomstige energie neutrale gebouwen, wordt tevens een hoger maatschappelijk doel gediend. Een in principe passief gebouw, dat wordt geactiveerd door de zwaartekracht en de omgevingsenergie van aardmassa, wind en zon, was dan ook de basisidee achter het Earth, Wind & Fire onderzoek.

1.1.2 Achtergrond

Energiebesparing in de gebouwde omgeving is een belangrijke opdracht voor de bouwsector. De formele doelstelling binnen de EU, aangegeven in de EPBD⁸ Recast (Directive 2010/31/EU) (EP en EC 2010) is

*“As of 31 December 2020 new buildings in the EU will have to consume “nearly zero” energy.....
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*

⁸ Energy Performance of Buildings Directive

significant extent by energy from renewable sources, including energy from renewable sources produced on site or nearby”.

Het gaat hier om het gebouw gebonden energiegebruik, waarover in Nederland al in 2008 tussen de belangrijkste actoren in de bouw een soortgelijke doelstelling werd geformuleerd in het zgn. Lenteakkoord (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.

In de Europese Unie wordt energiezuinigheid gereguleerd via de Energy Performance of Buildings Directive, in Nederland uitgewerkt in de Energie Prestatie Norm (EPN), waarmee de energieprestatie van een gebouw of woning wordt voorspeld. De uitkomst van een EPN-berekening is de maat voor de energie-efficiëntie: de Energie Prestatie Coëfficiënt (EPC), sinds 1995 een instrument van het Nederlandse klimaatbeleid.

1.1.3 Kanttekeningen bij de Energie Prestatie Normering

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 van 1,1 EPC. 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 voldaan. 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 vragen en kanttekeningen worden geplaatst, bijvoorbeeld:

- Installatietechnische voorzieningen hebben globaal genomen slechts een levenscyclus van 15 tot 20 jaar en zijn in principe kwetsbaarder en duurder in onderhoud dan meer robuuste bouwkundige voorzieningen (Juricic, S.M.M. et al 2012). Is het uit 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 meer duurzame bouwkundige voorzieningen, die dan achterwege worden gelaten (Shaviv, Edna 2011).
- De nadruk op de installatietechniek heeft in de loop van de ontwikkeling geresulteerd in steeds complexere, 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 (Mendell, M.J. et al 1990, Teeuw, B. 1993, Zweers, T. et al 1992, Groes, L. 1995, Leaman, A. et al 1993, Leyten, Joe et al 2006, Seppanen, O. et al 2002, Mendell, M.J. 2000, Juricic, S.M.M. et al 2012).
- 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 hierna omschreven *Earth, Wind & Fire* concept vallen geheel buiten de genormeerde bepalingmethode. Ingewikkelde en kostbare procedures voor het verkrijgen van gelijkwaardigheidverklaringen zijn dan noodzakelijk.
- Onderzoek wijst uit dat er geen statistisch significante correlatie is tussen de voorspelde en de naderhand in de gebruiksfase gemeten energieprestatie van gebouwen (Guerra Santin, Olivia en Itard, Laure 2010, 2012⁹, ECBCS-Annex 53, 2012).

1.1.4 Probleemstelling

Het is onwaarschijnlijk dat de gewenste “*nearly zero-energy buildings*” kunnen worden gerealiseerd door een verdere verlaging van de EPC-eis met toepassing van verbeterde bouw- en installatietechnieken. Bouwkundige en bouwfysische mogelijkheden om het energiegebruik te reduceren raken uitgeput. Installatietechnische verbeteringen zijn zeker mogelijk maar zullen worden gekenmerkt door een afnemende meerwaarde en vormen bovendien een potentiële bedreiging voor de robuustheid van de klimaatvoorzieningen en de kosten effectiviteit van de benodigde investeringen.

⁹ Dit onderzoek heeft weliswaar betrekking op woningen, maar er zijn geen redenen aan te voeren waarom het niet ook voor kantoorgebouwen zou gelden.

Zorgwekkende scenario's bij het verlagen van de EPC eis zijn verder potentiële mogelijkheden het energiegebruik in gebouwen te reduceren door

- (1) Verlaging van de ventilatiecapaciteit met als dreigend gevolg een verslechtering van de binnenluchtkwaliteit en inherent grotere gezondheidsproblemen op de werkplek (Seppanen, Olli 2012).
- (2) Vermijding van klimaatregeling door alleen natuurlijke ventilatie toe te passen met als gevolg een verslechtering van het thermisch comfort op de werkplek in de zomerperiode en inherent lagere productiviteit van kantoorwerkers (Settels, Paul 2009, Olesen, Bjarne 2010, Roelofsen, Paul 2010, REHVA 2006).
- (3) Het realiseren van de gewenste energieprestatie door toepassing van goedkopere maar minder duurzame installatietechnische voorzieningen in plaats van duurere maar meer duurzame bouwkundige voorzieningen (Shaviv, Edna 2011, Bouwens, Claudia 2011¹⁰).

Deze scenario's staan ook op gespannen voet met de Energy Performance of Buildings Directive –zie paragraaf 1.1.2- die eveneens stelt dat

*“...requirements shall take into account not just the energy performance but also general indoor climate conditions, in order to avoid possible negative effects such as inadequate ventilation...
... measures should take into account climatic and local conditions as well as indoor climate environment and cost effectiveness”.*

1.1.5 Uitdagingen voor de bouwwereld

Energiebesparing in de gebouwde omgeving is niet de enige uitdaging waar de bouwwereld, in dit verband vooral de klimaatsector, voor staat.

- Het energiegebruik moet drastisch worden beperkt dan wel hernieuwbaar worden opgewekt.
- Dit mag echter niet ten koste gaan van de kwaliteit van het binnenmilieu.
- En tenslotte moeten de maatregelen ook nog kosteneffectief zijn.

Energiebesparing in de gebouwde omgeving is tot dusver voornamelijk het domein geweest van de bouwfysica en de klimaattechniek. Beide hebben in de afgelopen decennia uitstekende prestaties geleverd door een gezonder, behaaglijker, productiever en veiliger binnenmilieu te realiseren bij een aanzienlijk lager energiegebruik dan voorheen (Bronsema, B. 2003). De industrie liet zich hierbij niet onbetuigd door de ontwikkeling van energie-efficiënte technieken voor warmte- en koude opwekking, warmteterugwinning, en energiezuinige klimaatsystemen. Het einde van deze ontwikkeling lijkt echter in zicht. Er kan althans in deze sectoren een afnemende meerwaarde worden waargenomen (IEA ECBCS¹¹ Annex 44, 2009).

“Research into building energy efficiency over the last decade has focused on efficiency improvements of specific building elements like the building envelope, including its walls, roofs and fenestration components (windows, day lighting, ventilation, etc.) and building equipment such as heating, ventilation, air handling, cooling equipment and lighting. Significant improvements have been made, and whilst most building elements still offer some opportunities for efficiency improvements, the greatest future potential lies with technologies that promote the integration of active building elements and communication among building services.”

1.1.6 Uitdagingen voor architect en klimaatingenieur

De door ECBCS gepropageerde integratie van actieve bouwelementen en klimaatvoorzieningen ligt binnen het domein van de bouwfysica en de klimaattechniek. De architectuur, de discipline met de grootste impact op de gebouwde omgeving, staat hierbij echter nog grotendeels afzijdig. Door de architect, met zijn grote creativiteit en invloed op het bouwproces, direct te betrekken bij de problematiek van energie en binnenmilieu, openen zich in principe nieuwe mogelijkheden op basis van een werkelijk integraal ontwerp. Door architectuur en architectonische elementen een plaats te geven in het totale pakket van de klimaatvoorzieningen in een gebouw, wordt tevens voldaan aan de primaire doelstelling van het onderzoek: Verkleining van de begripsafstand tussen architect en klimaatingenieur – zie paragraaf 1.1.1.

¹⁰ *“Toch zijn er nog steeds bouwpartijen die proberen een bestaand concept met installaties op te plussen, net zolang de EPC is gehaald”.*

¹¹ International Energy Agency – Energy Conservation in Buildings & Community Systems

De innovatieve idee achter het onderzoek Earth, Wind & Fire is het gebruik van de omgevingsenergie van wind en zon voor de klimaatregeling van gebouwen. En de centrale vraagstelling luidt of het mogelijk is een gebouw te ontwerpen als “KLIMAATMACHINE” die door deze omgevingsenergie in combinatie met de zwaartekracht wordt geactiveerd.

In een dergelijk gebouw zouden architectuur, bouwmassa, constructies en klimaatvoorzieningen gezamenlijk en interactief zodanig op het buitenklimaat moeten reageren dat er een “NATUURLIJKE AIRCONDITIONING” tot stand komt. De luchtbehandeling in dit gebouw komt dan in principe door de natuur tot stand en is daardoor veel minder afhankelijk van technische installaties.

Volgens de doelstelling binnen de EU zou dit gebouw in principe (bijna) energieneutraal moeten zijn, en zou de nog benodigde restenergie door zon en wind moeten worden opgewekt -zie paragraaf 1.1.1.

1.1.7 Paradigmaverandering

Tegen deze achtergrond is voor het ontwerp van gebouwen een geheel andere denkwijze en ontwerpmethodologie nodig. Een methodologie waarmee binnen afzienbare tijd energie neutrale gebouwen kunnen worden gerealiseerd met vermindering van negatieve effecten, zoals onvoldoende ventilatie en onbehaaglijke binnenklimaatcondities.

De directe inzet van natuurelementen voor klimaatregeling voert de architect terug naar één van de *basics* van zijn metier, integraal ontwerper, de rol die hij in het verleden altijd heeft gehad –zie paragraaf 1.1.8. Hij zal 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*”.

Voor de klimaatingenieur is het een uitdaging om door een hoge mate van integratie met architectonisch ontwerpen zijn beroep op een hoger niveau uit te kunnen oefenen, vergelijkbaar met dat van de ontwerper van de draagconstructies. Klimaattechniek wordt Architectuur en omgekeerd. Architect en ingenieur zullen hierdoor in staat zijn een gebouw als totaalontwerp te maken inclusief binnenklimaat- en energievoorzieningen. Op weg naar het energie neutrale gebouw lijkt dit een belangrijke, en wellicht noodzakelijke stap.

Het onderzoek Earth, Wind & Fire is een zoektocht naar deze noodzakelijke paradigmaverandering in de bouwwereld: “*Architectuur en Klimaattechniek in een symbiotische samenwerking.*”

1.1.8 Belemmeringen

Eeuwenlang heeft de architectuur rekening gehouden met het klimaat op de locatie van gebouwen. Het was de taak van de gebouwmhulling het interieur te beschermen tegen de hitte, koude en zonstraling, en anderzijds hiervan 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. Integraal ontwerpen in optima forma! In de laatste decennia zien we deze trend terugkomen in de ontwikkeling van zgn. klimaat actieve bouwelementen in bio-klimatische architectuur. Dergelijke gebouwen of bouwelementen reageren op veranderende binnen- of buitencondities door verandering van fysische eigenschappen ter verbetering van de energetische prestaties –zie paragraaf 1.2.4.

De installatietechniek is pas vanaf ≈ 1850 tot ontwikkeling gekomen (Bronsema 2003). De vrijwel gelijktijdige ontwikkeling van installatietechniek en draagconstructies met staal- of betonskelet en ongebonden gebouwschil maakten een andere architectuur mogelijk. De rol van de buitengevel werd minder belangrijk, want 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).

Als gevolg hiervan hebben architectuur en klimaattechniek zich in de loop van de geschiedenis ontwikkeld als strikt gescheiden domeinen. De rol van de architect als integraal ontwerper is hierdoor uitgehold. De ontwikkeling van de klimaattechniek heeft architecten een grote architectonische ontwerp-vrijheid 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 veel afhankelijker geworden van installaties en energie. Ironisch genoeg is de

tevredenheid van gebruikers over het binnenklimaat hieraan niet evenredig. Het zgn. *Sick Building Syndroom* heeft zich vooral gemanifesteerd in gebouwen met omvangrijke klimaatinstallaties ((Mendell, M.J. et al 1990, Teeuw, B. 1993, Zweers, T. et al 1992, Groes, L. 1995, Leaman, A. et al 1993, Seppanen, O. et al 2002, Mendell, M.J. 2000)). Architecten hebben door de gescheiden ontwikkeling van de klimaattechniek en hun ondeskundigheid op dit gebied niet zelden een zekere weerstand tegen de installatietechniek opgevat hetgeen op gespannen voet staat met een integraal ontwerpproces.

De ontwikkelingen naar energiebesparing zijn in hoge mate aan de architectuur voorbijgegaan; er kunnen zelfs duidelijke *rebound* effecten worden vastgesteld. Heeft de glasindustrie 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 moest worden geroepen om een goed binnenmilieu te realiseren.

De *mainstream* ontwikkeling binnen de architectuur bekommert zich niet of nauwelijks actief om de afstemming van architectonisch ontwerp en het binnenmilieu in relatie met 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..." (Banham, Reyner, 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...." (Baird, George 2001)

Een korte rondgang door de geschiedenis leert dat er wel kritiek is geweest op de eenzijdige benadering vanuit de architectuur. Verschillende voorbeelden van zogenaamde klimaat actieve architectuur wijzen op een kentering en de ontwikkeling naar energie neutrale 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, pleitbezorgers en beoefenaren van bioklimatische architectuur.

1.2 Routes naar een duurzaam en energieneutraal gebouw

1.2.1 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.

Naast de in het kader van de Energie Prestatie Normering anno 2012 gangbare maatregelen kan een toenemende belangstelling worden gesignaleerd voor bioklimatische architectuur –zie paragraaf 1.2.4- en gebruik van klimaat actieve bouwelementen –zie paragraaf 1.2.2.

Het onderzoek *Earth, Wind & Fire* voegt hier een nieuwe dimensie aan toevoegen: *Klimaat Responsieve Architectuur*.

1.2.2 Energiegebruik

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 klimaatactieve bouwelementen en klimaatinstallaties wordt beschouwd als de voornaamste strategie voor het realiseren van verdere energiebesparingen (IEA Annex 44 2011). Met klimaatactief 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 zoveel mogelijk gebruik van natuurlijke middelen voor klimaatregeling en daglicht en integratie van omgevingsenergie. Als klimaat actieve bouwelementen worden genoemd (IEA Annex 44 2010):

- Geavanceerde geïntegreerde gevels, o.a. dubbele huidgevels met ventilatie.
- Benutting van de thermische massa van bouwdelen 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 klimaat actieve bouwelementen en energie- en klimaatsystemen in één systeem waarmee optimale milieuprestaties kunnen worden gerealiseerd. Dit wordt geïllustreerd in figuur 1.1 “*Flattening the curve*” van Olgyay –zie paragraaf 1.2.4.

1.2.3 Trias Energetica

Energiebesparing wordt idealiter gerealiseerd volgens de Trias Energetica (Lysen, E.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 het toepassen van vraag beperkende maatregelen.
2. Gebruik voor de energiebehoefte zoveel mogelijk duurzame bronnen zoals wind- en zonne-energie.
3. Zet efficiënte technieken in om aan het resterende energiegebruik uit fossiele brandstoffen te voldoen.

Stap 1: wordt idealiter gerealiseerd met behulp van maatregelen uit het repertoire van bioklimatische architectuur inclusief Annex 44 –zie paragraaf 1.2.4.

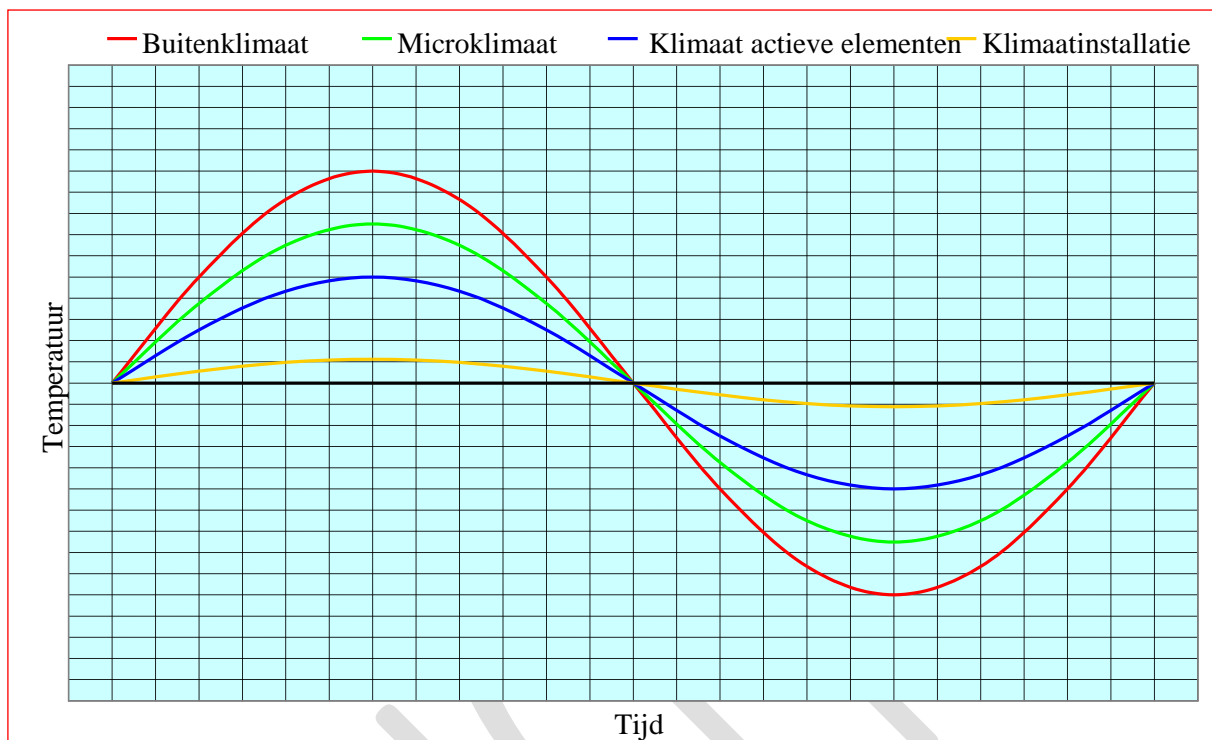
Stap 2: wordt in het Earth, Wind & Fire concept gerealiseerd door directe benutting van de omgevingsenergie van aardmassa, wind en zon. Ook het resterend energiegebruik ad stap 3 wordt idealiter door wind en zon gedekt (Energieneutraliteit) –zie paragraaf 1.3.

Stap 3: Efficiënte technieken in het Earth, Wind & Fire concept zijn o.a. warmteterugwinning en gebruik van warmtepompen.

1.2.4 Bioklimatische architectuur

Eén van de grondleggers van de bioklimatische architectuur, Victor Olgyay, 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 1.2/1. Het buitenklimaat wordt getemperd door de stedenbouwkundige omgeving, situering, en begroeiing waardoor op de bouwlocatie een microklimaat ontstaat. De gebouwschil en de bouwmassa zorgen in combinatie met klimaat actieve bouwelementen voor een verdere demping. Hierdoor ontstaat een meer natuurlijke klimaatregeling waardoor de omvang van de klimaatinstallatie kan worden beperkt (Olgyay, Victor 1973, Hawkes, Dean e.a. 2002).

Dit concept gaat overigens voorbij aan het feit dat door het warmte-eiland-effect in een stedelijke omgeving het microklimaat op de bouwlocatie veelal niet onder het buitenklimaat ligt, maar daar boven –zie paragraaf 2.1.7. Verder komt een belangrijke eigenschap van klimaat actieve elementen, faseverschuiving door absorptie en desorptie van warmte, in de grafiek niet tot uitdrukking.



Figuur 1.2/1 - Flattening the curve volgens Olgyay

Bioklimatische architectuur richt zich in de eerste plaats op de architectonische integratie van systemen voor daglicht, passieve verwarming, natuurlijke ventilatie en koeling. De bekende bioklimatische architect Ken Yeang geeft hiervoor de volgende motiveringen¹² (Hamzah, T.R. & Yeang Sdn.Bhg 1994):

- 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.

Bioklimatische 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).

Conventionele middelen hiervoor uit het architectonisch repertoire zijn lay-out, locatie en oriëntatie, glaspercentage van de gevel, uitvoering van ramen en zonwering, thermische isolatie en accumulerend vermogen van de constructie etc. (Givoni, B. 1994). Anno 2012 kunnen hieraan klimaat actieve bouwelementen worden toegevoegd.

1.2.5 Klimaat Responsieve Architectuur

Bioklimatische architectuur is in staat de invloed van het buitenklimaat op het binnenklimaat te dempen en daardoor het benodigde energiegebruik van een gebouw te beperken. Met passieve

¹² 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.

maatregelen alleen kan echter niet altijd een thermisch behaaglijk binnenmilieu in een gebouw worden gerealiseerd. Er is nog altijd energie nodig voor de klimaatregeling –zie figuur 1.1 en het realiseren van een energieneutraal gebouw vraagt dan ook om verdergaande voorzieningen.

Klimaat Responsieve Architectuur, hierna uitgewerkt in het *Earth, Wind & Fire* concept –zie paragraaf 1.3, vult deze leemte door gebruik te maken van de natuurlijke omgevingsenergie in het buitenklimaat en van de aardmassa. Hierdoor kan in principe een energie neutraal gebouw worden gerealiseerd met vermindering van negatieve effecten voor het binnenmilieu. Volgens dit concept wordt een gebouw ontworpen als “*KLIMAATMACHINE*”-zie paragraaf 1.3- die wordt geactiveerd door de gecombineerde krachten van zon, wind en zwaartekracht.

Klimaat Responsieve Architectuur valt hiermee weliswaar onder het brede spectrum van passieve en energiezuinige architectuur maar mag niet worden geïdentificeerd met bioklimatische architectuur.

“...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).

Als *Klimaat Responsieve Architectuur* koppelt het *Earth, Wind & Fire* concept klimaatontwerp, bouwfysica en installaties aan een architecturale opgave. Door deze holistische benadering van het ontwerpproces wordt de begripsafstand tussen architect en klimaatingenieur verkleind, een primaire doelstelling van het onderzoek –zie paragraaf 1.1.1.

De architect krijgt hierbij per axioma een grote rol bij het klimaatontwerp en de energie-efficiency van gebouwen. Door de klimaatvoorzieningen uit te voeren als elementen voor architectonische expressie is klimaattechniek niet meer ondergeschikt aan architectuur maar wordt zelf deel van 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 groot intellectueel en artistiek potentieel wordt hierdoor ingeschakeld voor een intrinsiek integraal ontwerp. Deze strategie belooft eveneens een potentiële verbetering van het ontwerp en vermindering van faalkosten.

1.2.6 Integrale duurzaamheid

Energie is weliswaar door de beperkte beschikbaarheid van fossiele brandstoffen en de verhoogde concentratie van broeikasgassen in de atmosfeer een cruciaal milieuthema, maar het milieuthema omvat meer dan alleen energie. In verschillende landen zijn instrumenten ontwikkeld waarmee in de ontwerpfase de integrale duurzaamheid van een gebouw kan worden gekwantificeerd. Hierbij worden punten of scores met bepaalde wegingsfactoren toegekend aan uiteenlopende aspecten zoals energiegebruik, watergebruik, materiaal gebonden milieubelasting, binnenmilieukwaliteit, en de kwaliteit van de stedenbouwkundige omgeving.

Veel gebruikte instrumenten in Nederland zijn Greencalc en BREEAM-NL, die zullen worden geïntegreerd tot BREEAM-LIGHT. Verder worden genoemd Eco-Quantum en GPR-Gebouw. Bij het gebruik van deze instrumenten kunnen wel enkele kritische opmerkingen worden geplaatst:

- Evenals bij het streven naar een lage EPC waarde –zie paragraaf 1.1.3 - 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 (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 ontwerp kwaliteit (Chen, Yant et al 2011).

- Gebruik van verschillende instrumenten leidt tot verschillende uitkomsten op de schaal van duurzaamheid (Zeiler, Wim 2011).

1.2.7 Een holistische benadering

Klimaat Responsieve Architectuur is in principe toepasbaar voor elk gebouwontwerp. Combinatie met bioklimatische architectuur ad paragraaf 1.2.4 en een hoge milieuscore ad paragraaf 1.2.6 biedt uiteraard de grootste milieuvoordelen. Een laag energiegebruik gaat dan gepaard met integrale duurzaamheid.

1.3 Het Earth, Wind & Fire concept

1.3.1 Inleiding

Earth, Wind & Fire staat metaforisch voor zwaartekracht en de omgevingsenergie van aardmassa, wind en zon. Hieraan zou, in navolging van Empedokles (“aarde, lucht, water en vuur – de elementen van alles”), water aan toe kunnen worden gevoegd. In het *Earth, Wind & Fire* concept is water weliswaar een essentieel medium, maar geen energiebron als zodanig en derhalve niet in de trits opgenomen.

1.3.2 Earth, Wind & Fire in het kort

In een jarenlange samenwerking met architectuur- en bouwkundestudenten – zie paragraaf 1.1- ontstonden verschillende intuïtieve ideeën over de mogelijkheden klimaattechniek en energieaspecten te koppelen aan architectuur.

In eerste instantie zijn de verschillende intuïtieve ideeën analytisch en rekenkundig uitgewerkt, waarna een keuze is gemaakt uit de meest belovende concepten –zie de hoofdstukken 2, 3 en 4. Deze omvatten drie responsieve architecturale elementen, het Ventecdak, de Klimaatcascade, en de Zonneschoorsteen of Zonnefaçade. Deze elementen zijn in eerste instantie afzonderlijk ontwikkeld, geoptimaliseerd en geëvalueerd, maar ze vormen uiteindelijk in totaalconcept van klimaatregeling een symbiose met de architectuur van een gebouw – zie figuur 1.3/1.

1.3.3 Ventecdak¹³

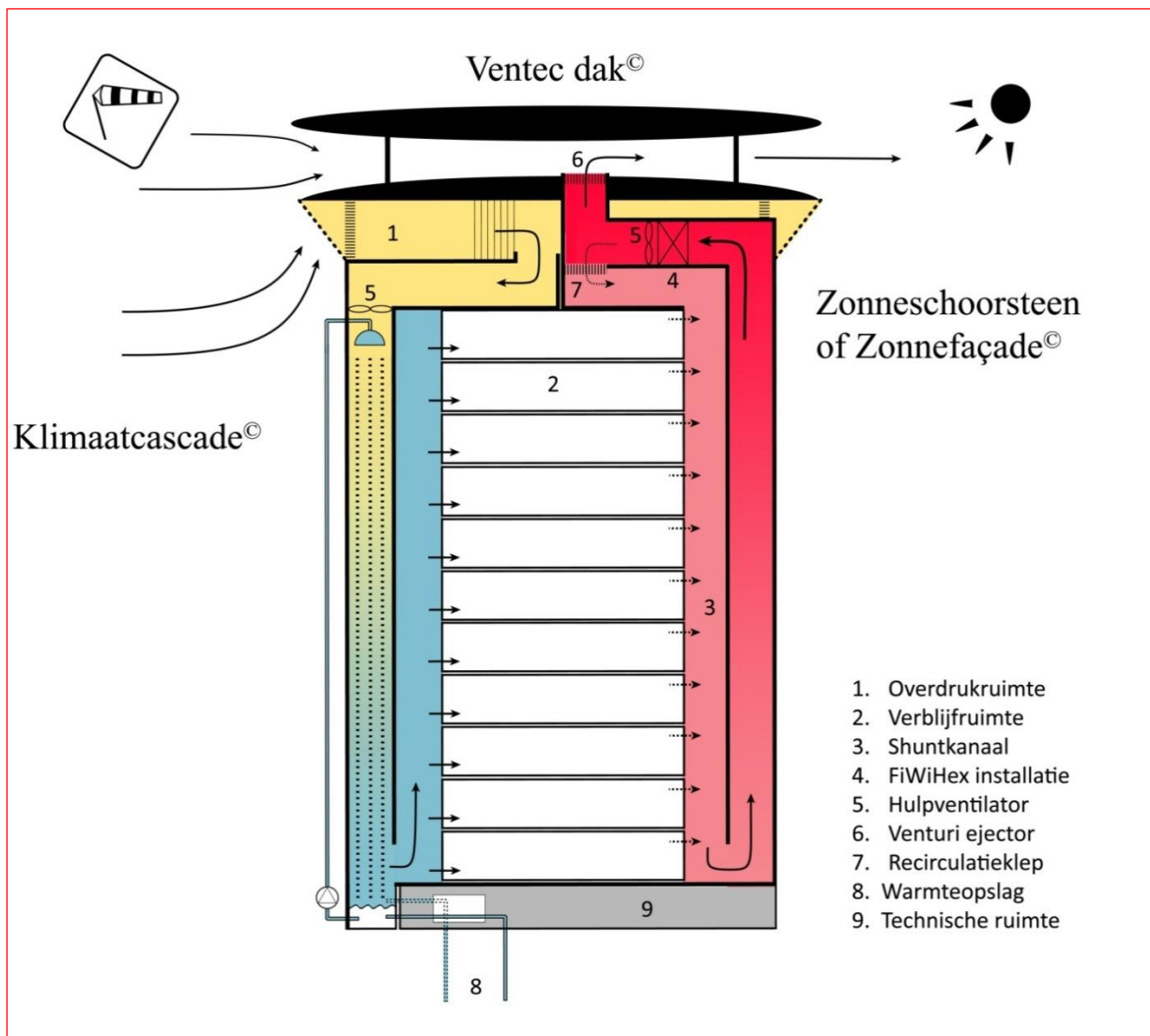
Het Ventecdak –zie hoofdstuk 2- gebruikt positieve winddrukken om ventilatielucht via de overdrukruimte (1) en de Klimaatcascade aan het gebouw toe te voeren. Negatieve winddrukken worden gebruikt om het gebouw via de Zonneschoorsteen en de Venturi-ejector (6) af te zuigen. Met dit concept wordt gebruik gemaakt van de relatief goede luchtkwaliteit op grotere hoogte (Luria, M. et al 1984, Rubino, F. M. et al 1998, Hitchins, J. et al 2002, Mendell, M.J. et al 2008). Verder wordt door de horizontale scheiding tussen toevoerlucht en afvoerlucht kortsluiting tussen beide luchtstromingen voorkomen.

Het Ventecdak kan in principe ook worden benut voor het opwekken van wind- en zonne-energie, waarmee wordt voldaan aan de tweede voorwaarde van de EPBD Recast –zie paragraaf 1.1.2.

In de overdrukruimte kunnen windturbines worden aangebracht (niet in de tekening aangegeven), waarmee in principe hoge vermogenscoëfficiënten kunnen worden gerealiseerd –zie hoofdstuk 5. 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..

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 jaarlijkse energieopbrengst van ca. 100 kWh.m⁻² bereikbaar –zie hoofdstuk 5.

¹³ Van Vent en Tect, Latijn voor Wind en Dak, maar ook Ventilation en Technology



Figuur 1.3/1 - Principes Earth, Wind & Fire concept

1.3.4 Klimaatscascade

Kern van het klimaatsysteem is de Klimaatscascade –zie hoofdstuk 3-, een door zwaartekracht geactiveerde warmtewisselaar voor de conditionering van ventilatielucht, uitgevoerd als bouwkundige schacht.

In de Klimaatscascade wordt de ventilatielucht al naar behoefte gekoeld of verwarmd, gedroogd of bevochtigd. Aan de top wordt zomer en winter via sproeiers water van ca. 13°C toegevoerd, waarbij door impulsoverdracht van druppels op lucht de neerwaartse luchtbeweging vanuit de overdrukruimte 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 zonneschoorsteen geleverd.

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

1.3.5 Zonneschoorsteen of Zonnefaçade

Ventilatie lucht wordt afgezogen via de Zonneschoorsteen of Zonnefaçade –zie hoofdstuk 4- waarin tevens zonne-energie wordt geogst, die wordt gebruikt voor verwarming van het gebouw in het stookseizoen. Met behulp van een warmtewisselaar aan de top van de zonneschoorsteen wordt de zonnewarmte overgedragen op circulerend water en in de bodem onder het gebouw opgeslagen. Deze techniek wordt in de tuinbouw toegepast voor het koelen en verwarmen van kassen. De Venturi-ejector in het Ventecdak dient mede om het drukverlies van de warmtewisselaar te compenseren.

De thermische prestatie van een zonneshoorsteen, die bij een bepaalde gebouwhoogte hoofdzakelijk wordt bepaald door de breedte, wordt minimaal afgestemd op het af te zuigen luchtdebiet bij referentiecondities. Deze zijn arbitrair vastgesteld op 20°C buitentemperatuur bij een stralingsflux van 400 W.m⁻².

Bij toepassing van een goede glassoort ligt het te behalen jaarrendement in de orde van 60%. De totale straling op een zuid georiënteerd vlak bedraagt in het referentiejaar NEN 5060:2008 ca. 860 kWh.m⁻² waardoor per m² zonneshoorsteen een opbrengst van ca. 500 kWh.m⁻² kan worden verwacht.

Voor de morfologie van een zonneshoorsteen zijn vele varianten denkbaar, waarbij de gevel bedekkende Zonnefaçade de grootste energieprestatie levert.

1.3.6 Toepassing van het Earth, Wind & Fire concept

De luchtstromingen voor de toevoer van ventilatielucht via de Klimaatcascade en de afvoer hiervan via de Zonneshoorsteen of Zonnefaçade, worden veroorzaakt door drukverschillen. Deze komen tot stand door dichtheidsverschillen tussen koudere en warmere lucht en zijn evenredig met de hoogte van Klimaatcascade en Zonneshoorsteen 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 meter¹⁴.

Het ontwikkelde *Earth, Wind & Fire* concept moet worden beschouwd als een centrale voorziening voor luchtbehandeling van gebouwen dat de centrale mechanische luchtbehandeling van een gebouw kan vervangen. Decentrale voorzieningen voor verwarming en koeling op werkplekniveau, zoals klimaatplafonds, ventilatorconvectoren, radiatoren e.d. kunnen uitstekend met het concept worden gecombineerd.

Hoewel niet bedoeld voor toepassing in woningen zijn verschillende elementen ook bruikbaar voor gestapelde woningbouw.

Het *Earth, Wind & Fire* concept 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 Zonneshoorsteen of Zonnefaçade, een Ventecdak of een Klimaatcascade in kantoorgebouwen is goed mogelijk.

Het *Earth, Wind & Fire* concept kan in elke architectuurstijl worden toegepast, klassiek, modern, internationaal, postmodern, bioklimatisch etc. Het is de architect die vorm geeft aan de uitwerking van het gebouw als *klimaatmachine*".

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 Zonneshoorsteen zijn mogelijke toevoegingen aan een gebouw. Bestaande gevels kunnen worden omgebouwd tot Zonnefaçades. Bestaande installatieschachten kunnen worden omgebouwd tot Klimaatcascade. De uitgevoerde case-study geeft hiervan een voorbeeld –zie hoofdstuk 6.

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

1.4 Demarcaties

1.4.1 Inleiding

Het *Earth, Wind & Fire* concept koppelt klimaatontwerp, bouwfysica en installaties aan een architecturale opgave, en is daarom aangeduid als *Klimaat Responsieve Architectuur* –zie paragraaf 3.3. Het mag dan ook niet worden geïdentificeerd met bioklimatische architectuur ad paragraaf 3.2 en/of het geïntegreerde bouwconcept volgens Annex 44 ad paragraaf 4.1.

De demarcaties van de onderzoeksdoelen worden in hoge mate door deze positionering bepaald. De nadruk ligt op stap 2 van de Trias Energetica en op de architecturale mogelijkheden en expressie die

¹⁴ In de Angelsaksische literatuur vaak aangeduid met "*Low-Rise Buildings*"

realisatie hiervan mogelijk moeten maken respectievelijk faciliteren. Het gaat daarbij dus uitsluitend om passieve en actieve systemen die integraal onderdeel zijn van de architectuur en hierdoor kunnen worden beïnvloed – zie figuur 1.4/1.

		Passief	Actief
Separaat		X	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Fotovoltaïsche zonnepanelen ❖ Thermische zonnepanelen ❖ Vrijstaande windturbines
Integraal	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 	X

Figuur 1.4/1 – Positionering en demarcatie van het onderzoek

1.4.2 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 1.4.2.1
- Separate en integrale systemen –zie paragraaf 1.4.2.2

1.4.2.1 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. 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 rendementsverliezen op zoals bij actieve systemen.

Earth, Wind & Fire is voor wat betreft benutting van omgevingsenergie een hybride concept.

- Actieve elementen zijn de windturbines in de overdrukkamer en de PV-folie op het Ventecdak. Ook de Zonneschoorsteen of Zonnefaçade 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 Zonnefaçade 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.

1.4.2.2 Separate en Integrale systemen

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

Bij integrale concepten zijn deze elementen onderdeel van het gebouw. Voorbeelden hiervan zijn zonneshoorstenen, 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 integrale bouwconcepten. Separate elementen en systemen zijn niet in beschouwing genomen.

1.4.3 Thema Earth

Het thema Earth geeft uitdrukking aan de relatie tussen klimaatregeling en de invloed van de aardmassa. 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 1.4.3.1.
- De mogelijkheden die de aardbodem biedt als warmte- en koudebron en voor opslag van warmte- en koude –paragraaf 1.4.3.2.
- De mogelijkheden om warmte aan diepe aardlagen te onttrekken, de zgn. geothermische energie paragraaf 1.4.3.3.

1.4.3.1 Benutting van de zwaartekracht

Als in een open systeem dichtheidsverschillen in een vloeistof 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 thermosyfon genoemd. De drijfkracht van deze stromingen is evenredig met de dichtheidsverschillen en met de hoogte van de kolom.

In het *Earth, Wind & Fire* concept wordt een dichtheidsverschil tot stand gebracht tussen twee verticale kolommen. Enerzijds wordt in de Klimaatcascade, die als toevoerschacht dient voor de ventilatielucht, een suspensie gecreëerd van lucht en water, die een grotere dichtheid heeft dan droge lucht. Deze suspensie wordt in het koelseizoen tevens gekoeld waardoor de dichtheid ten opzichte van droge lucht nog toeneemt –zie hoofdstuk 9.

Anderzijds wordt in de Zonneshoorsteen of Zonnefaçade, 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 –zie hoofdstuk 7.

Het is duidelijk dat de drijfkracht van dit ventilatiesysteem evenredig is 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 het gunstigst is, en dat tevens gebruik kan worden gemaakt van de relatief hoge windsnelheid hier ter plaatse –zie hoofdstuk 8.

In de Klimaatcascade vindt tevens een tweede benutting van de zwaartekracht plaats. 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.

1.4.3.2 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 heipalen¹⁵.

¹⁵ Heipalen met geïntegreerde energieabsorber

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 Zonnefaçade. 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 ventilatielucht aangezogen, die hierbij 's zomers wordt (voor)gekoeld en 's winters (voor)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. Ook kent dit concept 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.

1.4.3.3 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 Zonnefaçade. Het valt ook buiten de integrale ontwikkeling van architectuur, bouwtechniek en klimaattechniek die in het *Earth, Wind & Fire* concept wordt nagestreefd.

1.4.4 Thema Wind

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

- Actieve energieopwekking met behulp van windturbines –paragraaf 1.4.4.1
- Wind gedreven natuurlijke ventilatie –paragraaf 1.4.4.2.

1.4.4.1 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. De ontwikkeling van dit type windturbines kent een nog zeer korte historie. De activiteiten van de Dutch Wind Group van de TU Delft zijn helaas in 2009 beëindigd.

Het *Earth, Wind & Fire* concept is gericht op de integrale 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 overigens slechts gedeeltelijk uitgewerkt en zal in een vervolgonderzoek nader moeten worden geanalyseerd.

1.4.4.2 Wind gedreven 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). Een toepassing van dit concept met decentrale luchttoevoer in combinatie met een Zonneschoorsteen of Zonnefaçade als afzuigstelsel is in principe goed mogelijk maar valt dan onder de categorie “natuurlijke ventilatie”.

De scope van het integrale *Earth, Wind & Fire* concept is veel breder, omdat het meer biedt dan natuurlijke ventilatie. Door gebruik van een klimaatcascade wordt immers “natuurlijke airconditioning” gerealiseerd.

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, maar het onderzoek *Earth, Wind & Fire* heeft zich geconcentreerd op de benutting van winddrukken –zie hoofdstuk 2. Positieve winddrukken worden hierbij gebruikt voor centrale toevoer van ventilatielucht via de Klimaatcascade –zie hoofdstuk 3 en negatieve winddrukken voor het afzuigen van lucht via de Zonneschoorsteen of Zonnefaçade zie hoofdstuk 4.

Na evaluatie van verschillende mogelijkheden is gekozen voor het dak als windvanger waarbij de meest kansrijke optie, het Ventecdak, is gekozen voor verdere ontwikkeling. Zie hoofdstuk 2.

1.4.5 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 1.4.5.1
- Indirecte en directe systemen – zie paragraaf 1.4.5.2
- Separate en integrale systemen – zie paragraaf 1.4.5.3

1.4.5.1 Passieve en Actieve systemen

Passieve benutting van zonnewarmte, door zoninstraling via de ramen, is in woningen een welkome energiebron, althans in de stookperiode. In kantoorgebouwen, met vaak aanzienlijke interne thermische belastingen, heeft dit vaak oververhitting tot gevolg, ook in de stookperiode. Behoudens bij sommige toepassingen van “intelligente” dubbele huidgevels verdient de benutting van passieve zoninstraling daarom 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 Anderzijds fotonvoltaïsch met behulp van PV folie op het Ventecdak.

1.4.5.2 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.

1.4.5.3 Separate en integrale concepten

Zoals in paragraaf 1.4.2 aangegeven is het onderzoek *Earth, Wind & Fire* uitsluitend gericht op integrale bouwconcepten. De Zonneschoorsteen of Zonnefaçade en de PV folie op het Ventecdak staan daarom in het onderzoek centraal.

Toegevoegde elementen zoals separate zonnecellen, thermisch en/of fotonvoltaïsch, zijn zeer goed mogelijk maar vallen als separate concepten buiten de scope van het onderzoek. Dit geldt eveneens voor zon gedreven absorptiekoeling.

1.5 Hypothese

Uitgangspunt voor het onderzoek *Earth, Wind & Fire*, waarbij de subconcepten van Ventecdak, Klimaatcascade en Zonneschoorsteen een integraal deel van het (Architectonisch) gebouwontwerp vormen is de volgende hypothese:

1. *Een geïntegreerde benadering tussen Architectuur/Constructies en Klimaatontwerp is in staat om de vrij beschikbare omgevingsenergie, in de vorm van aardmassa, wind en zon, aan te wenden om een gebouw op voornamelijk natuurlijke wijze te klimatiseren.*
2. *De subconcepten kunnen worden gemodelleerd en gevalideerd, waardoor ze een betrouwbare ondersteuning aan praktische ontwerpprocessen kunnen bieden.”*
3. *De subconcepten kunnen afzonderlijk of in combinatie een bijdrage leveren aan de energieneutraliteit van gebouwen.*

1.6 Onderzoeksvragen

Uit de hypothese zijn de volgende onderzoeksvragen afgeleid:

1. Wat zijn de potentiële mogelijkheden van de subconcepten van Ventecdak, Klimaatcascade en Zonneschoorsteen voor het realiseren van een natuurlijke airconditioning in gebouwen?

2. Wat zijn de ontwerpcriteria voor het Ventedak, de Klimaatcascade en de Zonneschoorsteen voor het realiseren van
 - De gewenste volumestromen voor een goede kwaliteit van de binnenlucht?
 - Thermische behaaglijkheid in het binnenmilieu?
3. Wat zijn de potentiële mogelijkheden van de drie subconcepten voor actieve energieopwekking met wind en zon?
4. In hoeverre kan het *Earth, Wind & Fire* concept bijdragen aan de energieneutraliteit van gebouwen?
5. Welke betrouwbare ontwerptools en/of rekenmodellen kunnen worden ontwikkeld voor gebruik in de praktijk?
6. Wat zijn de randvoorwaarden voor toepassing van deze strategie op bestaande gebouwen?

1.7 Het onderzoek

Het onderzoek *Earth, Wind & Fire* is uitgevoerd om de hypothese ad paragraaf 1.5 theoretisch en empirisch te valideren op basis van de onderzoeksvragen ad paragraaf 1.6.

Hiervoor is het researchteam *Earth, Wind & Fire* geformeerd, een samenwerkingsproject van de TU Delft, de TU Eindhoven en VVKH Architecten. Hoofdonderzoeker van het project is Ing. Ben Bronsema, REHVA Fellow, geassisteerd door wetenschappelijke medewerkers van de faculteiten Bouwkunde van de TUD en de TU/e. Verschillende specialistische werkzaamheden zijn uitbesteed. Zie figuur 1.7/1.

Het onderzoek is begeleid door een klankbordgroep, samengesteld uit prominente vertegenwoordigers van de Nederlandse architectuur, de bouwwereld en de installatiesector.

Voor een gedetailleerde omschrijving van het onderzoek zie het "*Projectplan Earth, Wind & Fire – Naar nieuwe concepten voor de klimaatregeling van gebouwen*" (Bronsema, B. 2007).

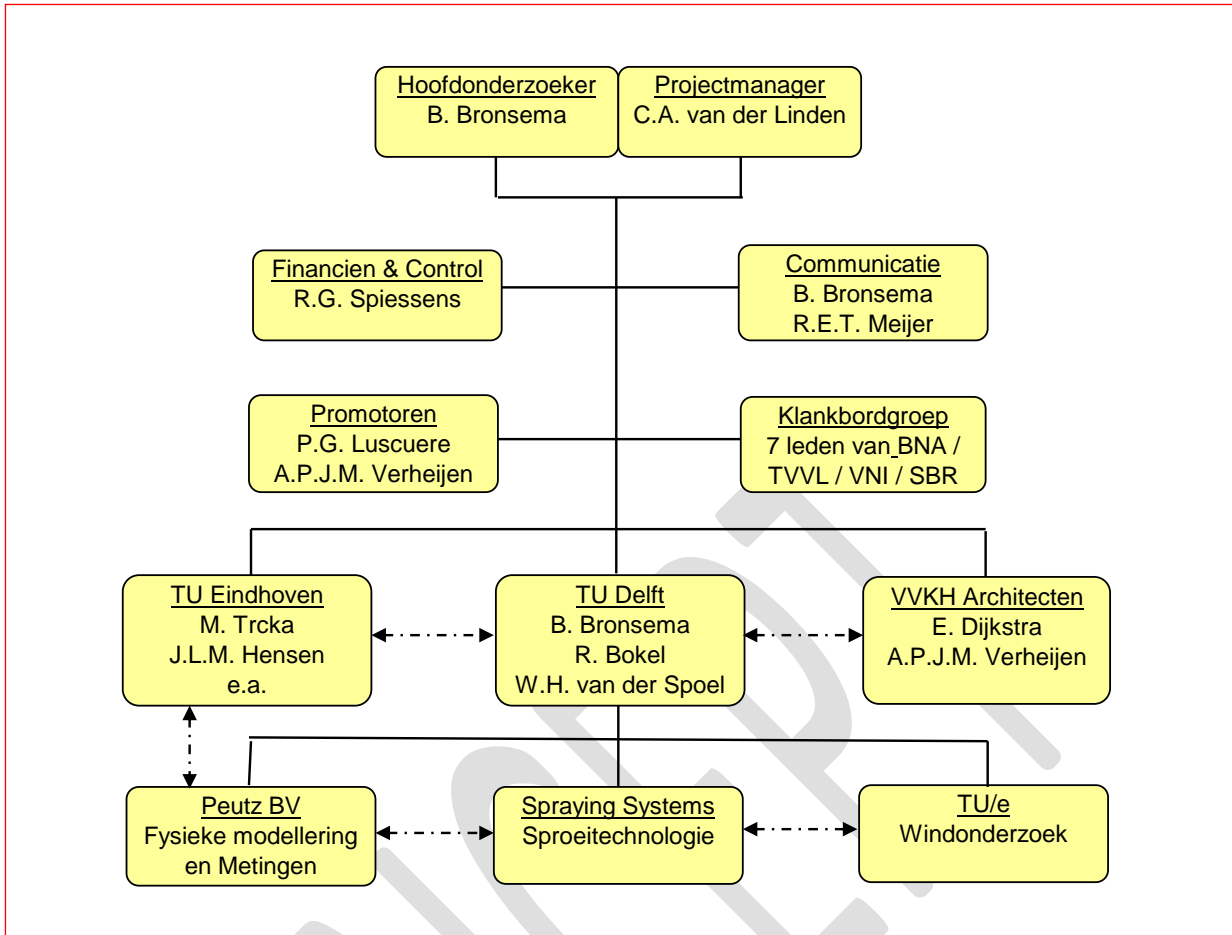
Het onderzoek is uitgevoerd met subsidie van het Ministerie van Economische Zaken, Landbouw en Innovatie; regeling Energie Onderzoek Subsidie: lange termijn (artikel 18b).

De resultaten van het onderzoek zijn in compacte vorm weergegeven in het voorliggende proefschrift. Voor een gedetailleerde verslaglegging wordt verwezen naar de volgende eindrapporten d.d. maart 2012 (online beschikbaar):

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

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



Figuur 1.7/1- Organisatiestructuur onderzoeksproject Earth, Wind & Fire

1.8 Methoden

1.8.1 Modelleren, Simuleren en Valideren

Het onderzoek en de ontwikkeling van het Ventecdak, de Klimaatcascade en de Zonneschoorsteen of Zonnefaçade zijn ontwikkeld volgens de methode modelleren, simuleren en valideren, zie figuur 1.8/1.

Een van de doelstellingen van het onderzoek “Earth, Wind & Fire” is klimaatingenieurs en architecten te kunnen 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.

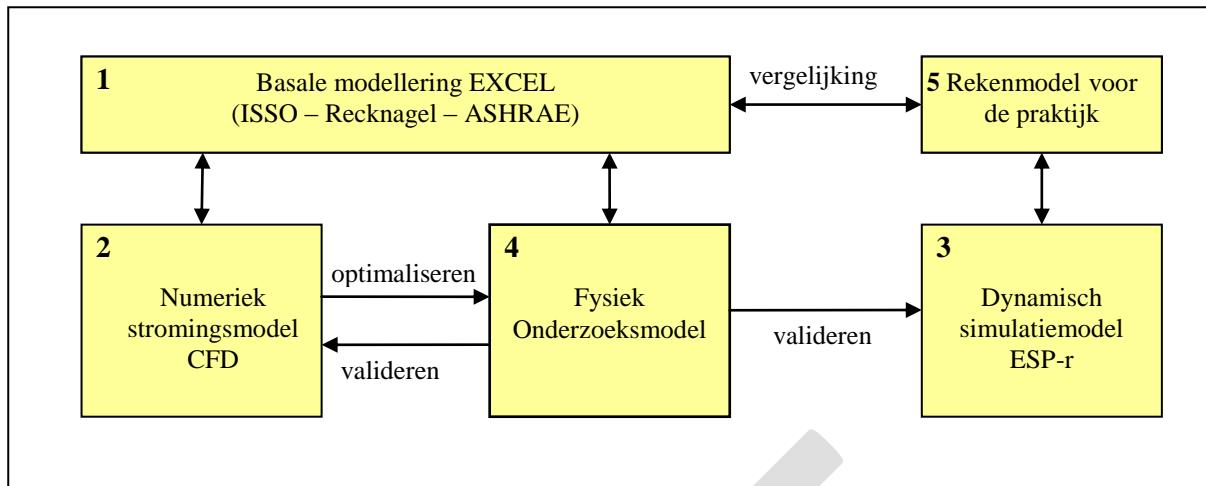
“Simulatie is het proces van het maken van een vereenvoudigd model van een complex systeem en het gebruik van dit model om het gedrag van het werkelijke systeem te analyseren en te voorspellen” (Hensen, J. 2003).

Verschiede studies hebben uitgewezen dat gebouwsimulatie meer is dan alleen maar software (o.a. Hensen, J.L.M 2003). 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):

Domeinkennis (1) was in de persoon van de hoofdonderzoeker ruimschoots aanwezig.

Computersimulaties (2) zijn uitgevoerd door experts die over de bovengenoemde vaardigheden beschikken.



Figuur 1.8/1 – Modelleren en Simuleren

1.8.2 Basale modellering [1]

Bij 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 quasi dynamisch worden gesimuleerd. 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 hoger resolutieniveau.

1.8.3 Numerieke stromingsmodellering met CFD [2]

De met de Excel rekenmodellen geanalyseerde concepten zijn met behulp van CFD numerieke stromingsmodellen uitgewerkt tot virtuele prototypes, 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 analyse 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 konden de prestaties van verschillende concepten snel worden doorgerekend en geoptimaliseerd. Op basis van geoptimaliseerde virtuele prototypes zijn fysieke prototypes gemaakt, waardoor tijd en geld werd bespaard.

“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)

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. Op basis van de virtuele prototypes zijn van deze responsieve bouwelementen

fysieke schaalmodellen gebouwd voor experimenteel onderzoek –zie paragraaf 1.8.5. Met behulp hiervan konden de CFD simulaties worden gevalideerd. De fysieke schaalmodellen zijn op hun beurt ook weer prototypes voor de in de werkelijke bouwpraktijk te realiseren bouwdelen. Met behulp van CFD is nagegaan of de geteste schaalmodellen representatief zijn voor de modellen op ware grootte

Door beperkingen in computercapaciteit heeft CFD (nog) niet het niveau bereikt dat nodig is voor gekoppelde dynamische jaarberekeningen. Hiervoor is het dynamische gebouwsimulatiemodel ESP-r gebruikt, dat is gekalibreerd en gevalideerd op basis van de meetgegevens aan experimentele onderzoek modellen.

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. Zie de hoofdstukken 2, 3 en 4 voor respectievelijk het Ventecdak, de Klimaatcascade en de Zonneschoorsteen.

1.8.4 Dynamische simulering met ESP-r [3]

Het Excel rekenmodel en het CFD simulatiemodel zijn gebruikt als instrument voor de berekening en het ontwerp van Klimaatcascade en Zonneschoorsteen onder stationaire omstandigheden. Voor de bestudering van het dynamisch gedrag en ramingen van de jaarlijkse energieprestatie van deze responsieve bouwdelen is het dynamische simulatiemodel ESP-r gebruikt. Dit model biedt 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 klimaatvoorzieningen inclusief 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, waarmee onderling gekoppelde warmte- en massastromen worden gesimuleerd. 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 thermisch netwerk en het stromingsnetwerk kan in principe in het ESP-r model van een gebouw worden geïntegreerd. Enerzijds maakt dit een flexibel gebruik van het gebouwmodel mogelijk, maar anderzijds is het lastig en omslachtig in de toepassing. In het onderzoek is het ESP-r model daarom gebruikt voor het simuleren van de prestaties van de Zonneschoorsteen en de Klimaatcascade als *stand-alone* installatie-elementen.

Voor de berekening van de jaarlijkse energieprestaties is in het onderzoek 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.

1.8.5 Validatie door metingen in een fysiek onderzoek model [4]

Op basis van de basale modellering in EXCEL en de bestudering, verificatie en detaillering hiervan met behulp van CFD simulaties zijn fysieke modellen 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 testopstellingen zijn in een terugkoppeling het Excel rekenmodel en de CFD en ESP-r simulatiemodellen gekalibreerd en gevalideerd

Het functionele ontwerp en de hoofdafmetingen van de fysieke modellen 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.

1.8.6 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 gebouwoontwerp 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.

1.8.7 Verband tussen de modellen

Het verband tussen de verschillende modellen is weergegeven in figuur 1.8/1. Elk model heeft zijn eigen toepassingsgebied en door gegevensuitwisseling tussen de modellen en verificatie met de fysieke modelmetingen 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 Blocken 2009).

1.8.8 Het onderzoeksproces

De gevolgde procedure van basaal modelleren → gedetailleerd modelleren → simuleren → valideren heeft goed gewerkt, en leverde ook een vruchtbare samenwerking op tussen de ingenieurspraktijk en de wetenschappelijke benadering.

De basale analytische modellering, gebaseerd op het repertoire van de klimaatingenieur, geeft inzicht in de thermodynamische processen waardoor de intuïtieve “ongeveerkunde”¹⁶ (Verheijen, A.P.J.M. 2002) wordt getraind. Hierdoor kan richting worden gegeven en tegengewicht geboden aan de gedetailleerde, maar voor de klimaatingenieur minder toegankelijke wetenschappelijke modelbenadering, die hierdoor in sommige gevallen ook moest worden aangepast. Anderzijds werden soms intuïtieve en schijnbaar logische veronderstellingen op verrassende wijze gelogenstraft door de uitkomsten van het onderzoek.

De kennismaking met de geavanceerde CFD modellen, die voor het Ventecdak en de Klimaatcascade voortreffelijke simulatieresultaten opleverden, was voor de onderzoeker een leerrijke ervaring. Dit geldt eveneens voor de dynamische simulaties met het ESP-r model die met de basale statische benadering niet mogelijk zouden zijn geweest. Het was bijzonder vreugdevol dat de basale analytische en de gedetailleerde modellen van de Klimaatcascade en de Zonneschoorsteen gelijkwaardige resultaten opleverden. Het kan een les voor klimaatingenieurs zijn niet te snel naar geavanceerde computermodellen te grijpen, maar eerst de “ongeveerkunde” te bedrijven op basis van de hem/haar vertrouwde basiskennis van de warmte- en stromingsleer.

¹⁶ “Omgaan met twijfel”

1.8.9 Samenvatting

Bouwstenen van het concept zijn fundamentele fysica, technologische kennis, ontwerpende creativiteit en inzicht in praktische toepasbaarheid. Door de werkwijze van modelleren, simuleren en valideren is het *Earth, Wind & Fire* concept wetenschappelijk relevant.

Omdat de gevalideerde modellen en formules beschikbaar komen voor praktische toepassing, en hiermee een bijdrage kunnen leveren aan de doelstellingen van energieneutraliteit en onafhankelijkheid van fossiele energiebronnen, is het *Earth, Wind & Fire* concept ook maatschappelijk relevant.

CONCEPT

2 HET VENTECDAK

2.1 Ventilatie en Wind

1.1.1 Inleiding

Het Ventecdak maakt gebruik van positieve en negatieve windrukken voor de natuurlijke ventilatie van een gebouw –zie paragraaf 1.4.7.3. Voor het onderzoek naar de werking en optimalisatie van de ontwerpparameters van het Ventecdak is het noodzakelijk inzicht te hebben in het Nederlandse windklimaat, in het bijzonder dat van de stad, waarvoor het *Earth, Wind & Fire* concept in eerste instantie is bedoeld.

Er is veel onderzoek gedaan naar de effecten van de wind op de constructie van gebouwen, zoals windkrachten en infiltratie door de gebouwschil. Voor de stedenbouwkundige omgeving speelt het discomfort op voetgangersniveau een rol. In bouwnormen en Eurocodes (NEN), Researchpublicaties (SBR, ISSO) en regelgeving (Bouwbesluit) is vastgelegd hoe met deze als negatief te beschouwen windeffecten in de bouwpraktijk rekening moet worden gehouden.

Positieve windeffecten staan veel minder in de belangstelling. Wind zorgt bijvoorbeeld voor de aanvoer van frisse lucht en de afvoer van antropogene luchtverontreiniging in de stedelijke omgeving. Wind kan verder bijdragen aan de natuurlijke ventilatie van gebouwen en is een onbeperkte bron van omgevingsenergie. Over deze positieve kanten van wind in de gebouwde omgeving is veel minder bekend.

Door de mondiale trend van toenemende verstedelijking verdient de kwaliteit van het stedelijk klimaat grote aandacht. Veel vragen kunnen momenteel slechts in algemene zin en globaal worden beantwoord. Wat is bijvoorbeeld de invloed van windsnelheid, windrichting en thermiek op de luchtkwaliteit in de stad en op het warmte-eiland-effect? Waar vinden we de optimale luchtkwaliteit voor de ventilatie van gebouwen? Hoe kan de wind het beste worden ingezet voor natuurlijke ventilatie van gebouwen? Hoe kan de omgevingsenergie van de wind worden “geogst”?

Deze vragen zijn in toenemende mate onderwerp van studie en onderzoek. Het is echter een 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.

Voor het ontwerp van klimaatinstallaties speelt de luchtkwaliteit een belangrijke rol, maar ook het energiegebruik en de toekomstige eis van energieneutraliteit in de gebouwde omgeving. Het onderzoek *Earth, Wind & Fire – Natuurlijke Airconditioning* richt zich op beide aspecten. De vragen die hiervoor moeten worden beantwoord zijn

1. Hoe kan de wind het beste worden gebruikt voor ventilatie van gebouwen?
2. Welke bijdrage kan het Ventecdak kan leveren aan het concept van *Natuurlijke Airconditioning*?
3. Welke bijdrage kan het Ventecdak leveren aan vermindering van het energiegebruik in de gebouwde omgeving?
4. Wat zijn de ontwerpparameters voor het optimaal functioneren van het Ventecdak?

Het onderzoeksrapport “*Earth, Wind and Fire*” deel (II) *Onderzoek Natuurlijke Ventilatie, Wind en het Ventecdak* (Bronsema, B. 2012) geeft een uitgebreid verslag van deze zoektocht. Voor nadere toelichting en detaillering wordt in een voetnoot naar dit rapport verwezen.

2.1.1 Windsnelheidsprofiel

De winddruk waarvan het Ventecdak gebruik maakt is een functie van de windsnelheid op dakrandhoogte, en is dus afhankelijk van de gebouwhoogte.

In een vlak terrein is de windsnelheid een logaritmische functie van de hoogte boven de grond uitgedrukt in de formule (Wieringa, J. et al 1983):

$$U(z) = \frac{U^*}{k} \ln\left(\frac{z-d}{z_0}\right) \quad (2.1.1)$$

Waarin

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

Toelichting op de begrippen:

- De wrijvingssnelheid U^* is een fictieve “snelheid” die afhangt van de wrijving die de wind ondervindt bij de stroming langs het grondoppervlak.
- De ruwheidlengte z_0 is een aerodynamische karakteristiek van het bodemoppervlak bepaald door de bodemstructuur en de geometrie van de obstakels –zie paragraaf 2.xx. De windsnelheid neemt af bij toenemende ruwheidhoogte.
- De verschuivingslengte d is een virtuele verhoging van het grondoppervlak in het geval de dichtheid van de obstakels op de grond groter is dan ca. 25% van het totale oppervlak.

Op Nederlandse weerstations worden op een hoogte van ca. 10 m de windsnelheden geregistreerd met behulp van een anemometer, en de windrichting met een windvaan. De weerstations liggen in vlak terrein met een ruwheidlengte z_0 van 0,03 m. De aldus geregistreerde windsnelheid U_{10} wordt aangeduid met “*potentiële windsnelheid*”. Met de logaritmische formule (2.1.1) kan het verloop van de gelijktijdige windsnelheden over de hoogte Z worden berekend.

De ruwheidlengte z_0 kan worden geschat op basis van een terreinclassificatie waarbij voor elk terreintype een grove aanduiding van de bijbehorende z_0 waarde is gegeven. Veel gebruikt is de ruwheidclassificatie volgens Davenport –zie tabel 2.1.1. (Wieringa, J et al 1983). Deze classificatie is inmiddels op verschillende punten verfijnd en aangepast (Wieringa, J. 2001), maar voor het doel van het onderzoek doet dit niet zoveel ter zake.

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

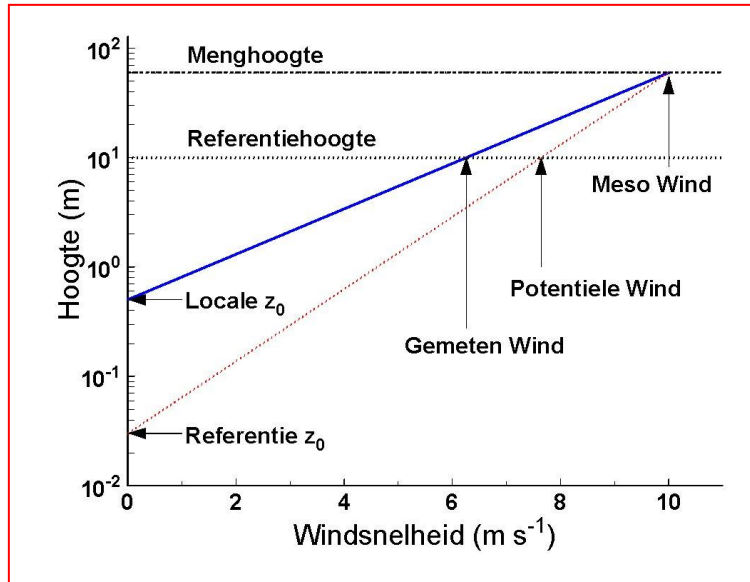
Tabel 2.1.1 – Ruwheidclassificatie volgens Davenport

De windprofielen voor de CFD simulaties en de modelmetingen in de windtunnel van het Ventecdak – paragraaf 2.3 en 2.4- zijn gebaseerd op een zeer ruw terrein, klasse 6 met een ruwheidslengte $z_0 = 0,5$ m.

2.1.2 Berekening plaatselijk windsnelheidsprofiel

Op een hoogte van ca. $z = 60$ m boven de grond, de menghoogte, heerst in een bepaald gebied eenzelfde gemiddelde windsnelheid, aangeduid met *mesosnelheid* U_m .

Uitgaande van de gemeten potentiële windsnelheid U_{10} en de lokale ruwheid z_0 wordt de windsnelheid op de menghoogte berekend. Deze meso wind wordt weer naar beneden vertaald tot op standaard hoogte en met een referentie-ruwheid. In de grafiek zijn de meethoogte en de referentiehoogte beide gelijk aan 10 m, de menghoogte is 60 m, de lokale ruwheidslengte is 0.5 m en de referentie-ruwheidslengte is 0.03 m. De hoogtetransformatie wordt gedaan met behulp van formule 2.1.1 (www.knmi.nl)



Figuur 2.1.1 –Berekening plaatselijk windsnelheidsprofiel

De NPR 6097:2006 “Toepassing van de statistiek van de uurgemiddelde windsnelheden voor Nederland” (NNI 2006) geeft voor een willekeurige locatie in Nederland een probabilistische beschrijving van de uurgemiddelde *mesosnelheid* U_m .

Voor het bepalen van de statistiek van de uurgemiddelde windsnelheid op een locatie zijn de X- en Y-coördinaten van de locatie nodig. Deze kunnen worden bepaald met behulp van het Rijksdriehoeksstelsel, die kunnen worden afgelezen met behulp van een gedetailleerde kaart van Nederland.

Met behulp van de NPR 6097:2006 kan op willekeurige locaties het windprofiel en de referentiewindsnelheid worden bepaald voor de prestatieberekeningen van het Ventecdak.

2.1.3 Windstatistieken

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

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

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

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

De aangegeven windsnelheden hebben alle betrekking op de zgn. “potentiële windsnelheid” - zie paragraaf 2.1.2.

Windsnelheden worden vaak opgegeven in schaaldelen van de Beaufort-schaal en aangeduid met “windkracht”, zie tabel 2.1.2. De opgegeven schaaldelen zijn gemiddeld over minstens 10 minuten.

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

Tabel 2.1.2 – Internationale Beaufort-schaal te land

De globale variabiliteit van het windklimaat in Nederland blijkt redelijk in beeld te kunnen worden gebracht door een classificatie in zeeklimaat, kustklimaat en landklimaat. (Wieringa, J. et al 1983).

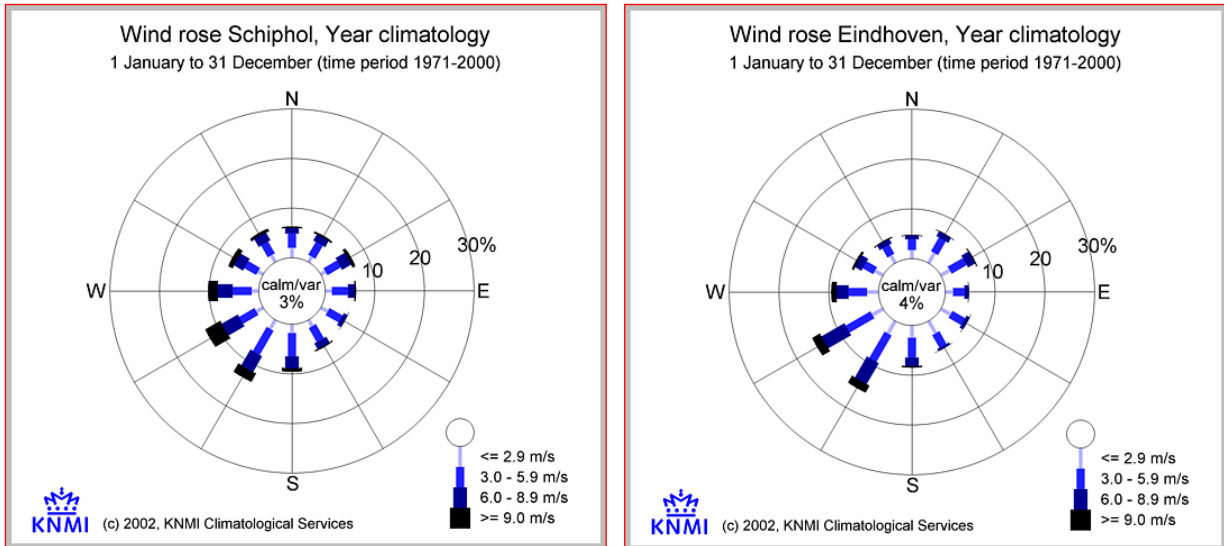
Voor het onderzoek *Earth, Wind & Fire* is het zeeklimaat niet van belang. Het kustklimaat omvat slechts een smalle strook van enkele kilometers en is daarom ook minder relevant. In het navolgende is daarom ingezoomd op het landklimaat met als representatieve meetstations Schiphol en Eindhoven. Windrozen

Statistische informatie over het windklimaat wordt fraai in beeld gebracht met behulp van de zogenaamde windroos, die in één oogopslag een globaal beeld geeft van de procentuele verdeling over de windrichtingen met de daarbij behorende gemiddelde snelheid –zie figuur 2.1.1 die de windrozen toont voor de stations Schiphol en Eindhoven.

De richtingen zijn hierbij opgedeeld in twaalf klassen van dertig graden. Hoe langer een staafje, des te vaker komt de wind uit de bijbehorende richtingsklasse.

In de windroos is een schaal weergegeven waarmee de procentuele frequentie kan worden afgelezen. De staafjes tezamen inclusief de variabele winden en windstiltes (stil/var) tellen op tot 100%. De breedte van de staafjes geeft informatie over hoe hard het gewaaid heeft. Er worden hierbij drie snelheidsklassen gehanteerd, te weten 1-2 Beaufort, 3-4 Beaufort en 5 Beaufort en meer.

Voor beide stations Schiphol en Eindhoven is de overheersende windrichting Zuidwest. In Eindhoven komt de wind vaker uit deze hoek dan in Schiphol, maar op dit station zijn de windsnelheden wat groter



Figuur 2.1.2 – Windrozen Schiphol en Eindhoven

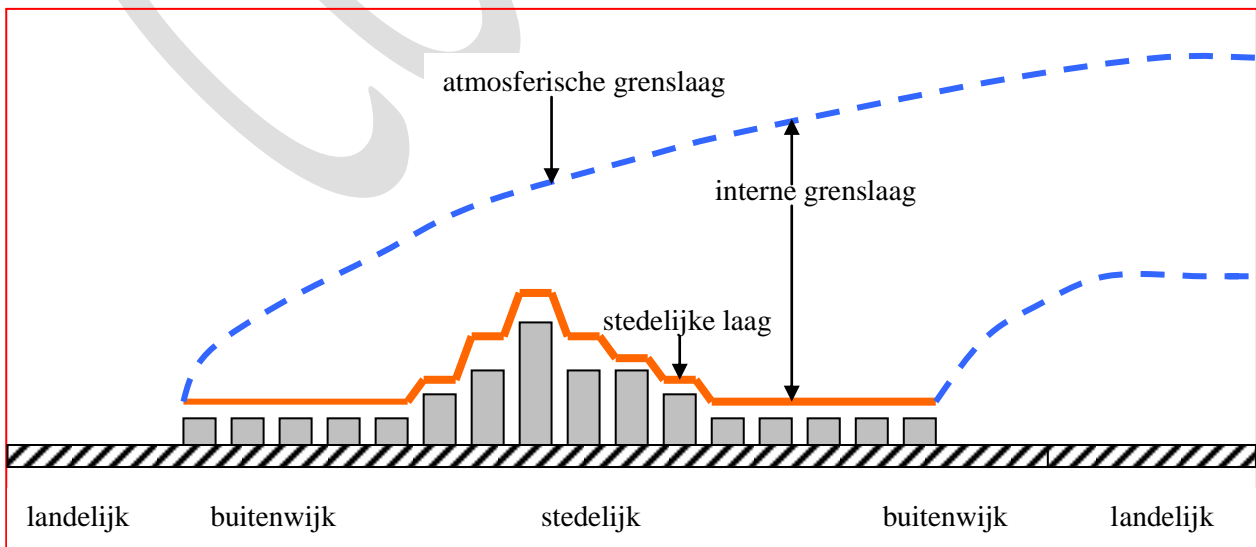
2.1.4 Wind in stedelijke gebieden

In een stedelijke omgeving zijn zoveel obstakels aanwezig dat formule (2.1.1) op de lagere niveaus niet kan worden gebruikt. De wrijvingsnelheid U^* , de ruwheidhoogte en de verschuivinglengte zijn hier om begrijpelijke redenen niet eenduidig genoeg vast te stellen. Vanaf een hoogte van ongeveer één à twee keer de gemiddelde gebouwhoogte is deze formule hier echter ook bruikbaar

Als de wind vanaf het platteland de stad bereikt wordt hij aan de onderzijde afgeremd, waarbij de turbulentie-intensiteit toeneemt. Bij sterke wind ontstaan door de wrijving met de bebouwing eveneens wervels. Bij zwakke tot matige wind ontstaan opwaartse luchtbewegingen. Naarmate de wind langer over de bebouwing strijkt stijgt de luchttemperatuur waardoor tot een zekere hoogte eveneens opwaartse luchtbewegingen ontstaan. De grotere turbulentie-intensiteit heeft tot gevolg dat een steeds dikkere luchtlaag wordt afgeremd.

Boven de stad kunnen drie lagen worden onderscheiden –zie figuur 2.1.3.

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



Figuur 2.1.3 – Laagvorming boven stedelijke gebieden

De dikte van de stedelijke laag kan worden gesteld op

$$Z_s = 20Z_0 + d \quad (2.1.2)$$

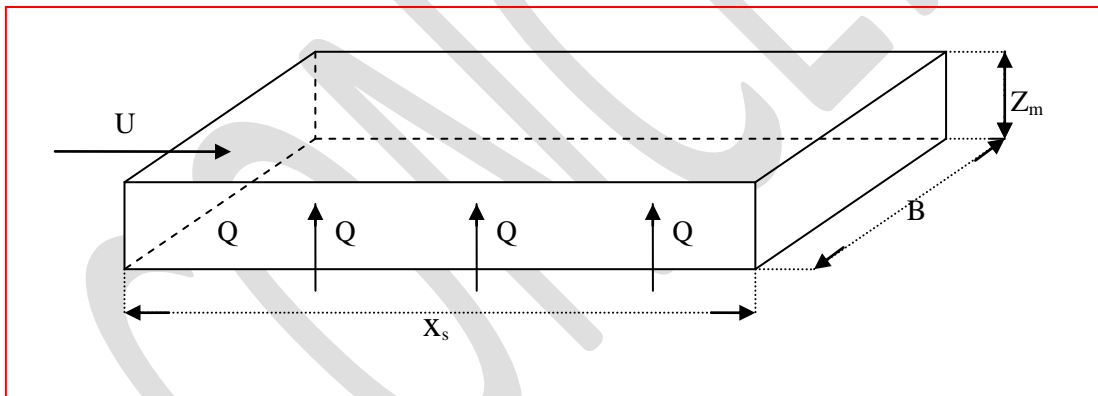
Voor een stadskern kan de ruwheidhoogte Z_0 worden gesteld op $\geq 2\text{m}$ en de verschuiving lengte d op $0,8 H$, waarin H de dominante gebouwhoogte is. In een stadskern met $H = 30\text{ m}$ kan de dikte van de stedelijke laag dan worden berekend op $(20 \cdot 2 + 0,8 \cdot 30) = 64\text{ m}$. Een complicatie hierbij is dat convectieve thermische luchtstromingen, veroorzaakt door het warmte-eiland effect zie paragraaf 2.1.6- een grote invloed op de stromingspatronen kunnen hebben, vooral bij lage windsnelheden.

2.1.5 Luchtkwaliteit in de stad

De stad “ademt” in de atmosfeer boven de stad. Ventilatielucht voor gebouwen en verbrandingslucht voor motorvoertuigen en verbrandingstoestellen wordt uit de omgeving aangezogen en na gebruik in verontreinigde toestand weer in dezelfde omgeving gedumpt. Om een zekere luchtkwaliteit in stand te houden moet de stad continue worden geventileerd. Door wind en temperatuurverschillen geïnduceerde luchtstromingen, beïnvloed door de geografische ligging, de topografie van de stad en de permeabiliteit van de bebouwing, spelen hierbij een belangrijke rol.

Het doosmodel is een eenvoudig model om de luchtverontreiniging concentratie boven een stad te schatten (Wit de, M.H. 2001). In dit model wordt over de stad een grote doos gedacht waarin alle luchtverontreinigingen uit de stad worden opgevangen. De wind “blaast” deze verontreinigingen uit de doos. Zie figuur 2.1.4. Hierin is

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



Figuur 2.1.4 – Het doosmodel (box model)

De menghoogte is de begrenzing van de zgn. atmosferische grenslaag, de laag waarin een stad “ademt” – zie figuur 2.1.3. Luchtverontreinigingen uit de stad kunnen deze grenslaag niet doorbreken omdat daarboven een zgn. inversie optreedt, een verschijnsel waarop hier niet verder wordt ingegaan. De menghoogte is afhankelijk van de weersomstandigheden en de tijd van de dag, en kan in Nederland variëren van 50 tot 1.500 meter. De menghoogte is veel kleiner dan de horizontale afmetingen van een stad. “Een stad “ademt” in een dunne schil”.

2.1.6 Het warmte-eiland effect

Het warmte-eilandeffect of *urban heat island* effect (UHI) is het verschijnsel dat de temperatuur in een stedelijk gebied gemiddeld hoger is dan op een bepaald referentiepunt in het omliggende landelijk gebied. Dit temperatuurverschil wordt veroorzaakt door de volgende factoren (Taha, Haider (2004):

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

- De diffuse reflectiefactor (albedo) van het stedenbouwkundig profiel is meestal kleiner dan die van een landelijk oppervlak.
- In een landelijk gebied wordt een groter deel van de zonnestraling door verdamping omgezet in latente warmte dan in een stedelijk gebied en dus minder voelbare warmte geabsorbeerd.

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

- Het ontstaan van thermische luchtstromingen door temperatuurverschillen;
- Een verhoogde buitentemperatuur; karakteristieke waarden liggen in de orde van 2^oC, maar in bepaalde steden zijn waarden gemeten tot 6^o à 7^o (Londen) en 8^oC (Sao Paolo). De referentiehoogte waarbij deze waarden zijn gemeten wordt niet vermeld;
- Een verhoogde menging van luchtverontreinigingen in de interne grenslaag – zie paragraaf 2.4.3;
- Verhoogde temperatuurafhankelijke emissies van bepaalde luchtverontreinigingen;
- Verhoogde fotochemische productie van smog, een belangrijk gezondheidsrisico in een stedelijk gebied (Santamouris, M. 2004).
- Een hogere binnentemperatuur in gebouwen in geval van natuurlijke ventilatie.

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

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

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

Door Wageningen University is recentelijk het warmte-eiland effect in stedelijke gebieden van Nederland onderzocht (Hove, van L.W.A. 2011). Daarbij is gebruik gemaakt van literatuurstudie, voorlopige resultaten van recente meteorologische metingen in Rotterdam en Arnhem, alsmede gegevens verstrekt door amateur meteorologen. Een vergelijking met buitenlandse steden geeft aan dat de warmte-eiland effecten in Nederland van dezelfde grootteorde zijn.

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

De positieve verticale temperatuurgradiënt is voor het *Earth, Wind & Fire* concept, waar de ventilatielucht op dak niveau wordt aangezogen, een minder gunstige omstandigheid. Voor gebouwen tot een hoogte van 70 m is het effect in de dag situatie echter beperkt tot max. ca. 2^oC. Voor een gebouw van deze hoogte in het centrum van Rotterdam, waar het warmte-eiland effect op straatniveau 1 à 2 K is, houdt dit in dat in de koelperiode rekening moet worden gehouden met een temperatuur van de aangezogen ventilatielucht die 3 à 4 K boven de ontwerp buitentemperatuur ligt. De nadelige consequenties die dit heeft voor de koellast worden in de stookperiode gedeeltelijk gecompenseerd. (Kolokotroni, Maria et al 2010).

2.1.7 Luchtkwaliteit en ventilatie

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 allerm minst en in een stedelijke omgeving voldoet de luchtkwaliteit soms zelfs niet aan wettelijke normen. Emissies van motorvoertuigen, uitstoot van verbrandingstoestellen en de verspreiding van fijn stof van het wegdek zijn de belangrijkste bronnen van antropogene luchtverontreiniging

In natuurlijk geventileerde gebouwen, met ventilatie via ramen of gevelroosters, is de penetratie van luchtverontreinigingen in het interieur 100%.

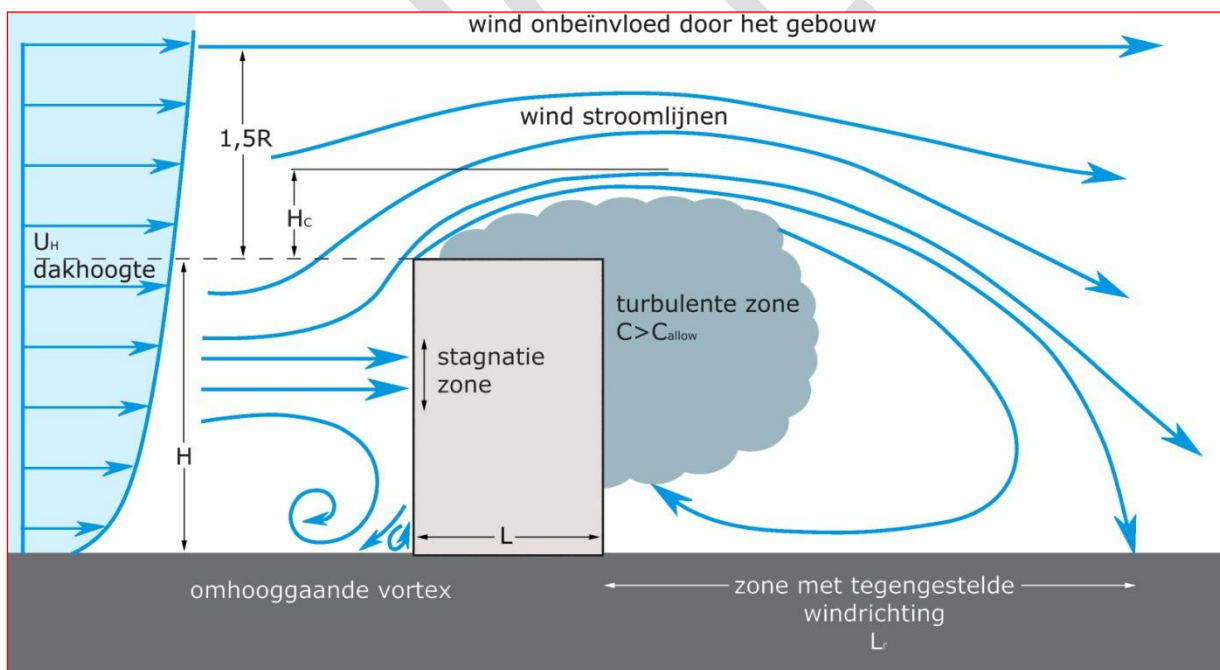
In mechanisch geventileerde gebouwen wordt een deel van de luchtverontreinigingen in de luchtfilters van het ventilatiesysteem verwijderd, hoewel dit in veel gevallen maar een klein deel is omdat de gebruikelijke luchtfilters nauwelijks fijn stof en gasvormige verontreinigingen afvangen. De penetratiegraad van luchtverontreinigingen is hier mede afhankelijk van de dichtheid van de gevel en van de aanzuiglocatie van de ventilatielucht.

Intuïtief kan worden aangenomen dat in stedelijke gebieden de concentratie van de luchtverontreiniging bij grotere hoogte afnemen. Luchtvervuiling wordt hier door de thermiek van het warmte-eiland effect - zie paragraaf 2.1.7- en door de wind verspreid en verdund. Luchtaanzuiging op dak niveau en zover mogelijk afgewend van het verkeer verdient in dit licht de voorkeur. Een literatuuronderzoek heeft deze intuïtieve aanname bevestigd (Bronsema B. 2012). De conclusie is daarom gerechtvaardigd dat met het oog op de luchtkwaliteit het aanzuigen van ventilatielucht op een hoog niveau de voorkeur verdient. Voor de *Natuurlijke Airconditioning* volgens het *Earth, Wind & Fire* concept is dit een gunstige omstandigheid. Mede door de geringe gevoeligheid voor vervuiling zijn in principe geen luchtfilters nodig.

Voor alle gebouwen geldt overigens dat een zo goed mogelijk dichtheid van de gevel een primaire eis is, niet alleen tegen de infiltratie van luchtverontreiniging, maar ook tegen ongewenste energieverliezen en voor thermische behaaglijkheid in de gevelzone. De minste infiltratie is te verwachten bij een gebouw waarvan de oriëntatie van de langshevels evenwijdig loopt met de dominante windrichting, in Nederland dus tussen Zuidoost en Zuidwest. Buiten deze gevels heerst dan meestal onderdruk; zie de negatieve winddrukcoëfficiënten in figuur 2.7.4 van paragraaf 2.7 (Bronsema, B. 2005).

2.1.8 Windstromingen om gebouwen

Stromingspatronen om gebouwen in een stedelijke omgeving zijn nauwelijks of niet te berekenen. Figuur 2.1.5, die betrekking heeft op een alleenstaand rechthoekig gebouw, geeft een zeer globale indruk van de stromingspatronen gegeven (ASHRAE 2001).



Figuur 2.1.5 – Stromingspatroon rondom een alleenstaand rechthoekig gebouw volgens ASHRAE

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

De hogere windsnelheid op dakniveau en de inherente hogere stilstandsdruk op het bovenste deel van het gebouw veroorzaakt een neerwaartse stroming op de onderste helft. Deze stroming komt los van het gebouw voordat de grond wordt bereikt en vormt daar een wervel tegen de windrichting in, die een

hoge snelheid kan bereiken. Deze tegenwindse wervel verplaatst zich langs de zijden van het gebouw en neemt daarbij vuil en stof van de straat mee. Windhinder wordt vaak door deze wervel veroorzaakt.

In de zone die $\approx 1/4 - 1/3$ van de hoogte H omvat, stroomt de wind opzij om het gebouw heen en naar boven over het dak. In de gekromde stroomlijnen bovendaks en langs zij vindt versnelling van de stroming plaats, die overgaat in een vertraging als de stroming neerwaarts afbuigt in het zog aan de zijzijde van het gebouw, waar een recirculatiezone ontstaat. Deze wordt gekenmerkt door een lage gemiddelde windsnelheid en veel turbulenties.

In een stedelijke omgeving zijn zoveel obstakels aanwezig dat de logaritmische formule (2.1.2) op de lagere niveaus niet kan worden gebruikt. ASHRAE geeft hiervoor de volgende formule

$$U_{(z)} = U_{(10)} \left(\frac{\delta_{(0)}}{Z_{(10)}} \right)^{a_{met}} \left(\frac{Z}{\delta} \right)^a \quad (2.1.3)$$

Waarin:

$U_{(z)}$	windsnelheid op hoogte z	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$
$U_{(10)}$	potentiële windsnelheid	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$ – zie paragraaf 2.1.x
$\delta_{(0)}$	ruwheidshoogte meetstation	$[\text{m}]$ - zie paragraaf 2.1.x
Z	hoogte gebouw	$[\text{m}]$
$Z_{(10)}$	hoogte meetstation	$[10 \text{ m}]$
δ	ruwheidshoogte ter plaatse	$[\text{m}]$
a	exponent atmosferische grenslaag	$[-]$ – zie tabel 8.7.1

In vergelijking (2.1.3) is de term $\left(\frac{\delta_{(0)}}{Z_{(10)}} \right)^{a_{met}}$ de correctiefactor voor het terrein en de term $\left(\frac{Z}{\delta} \right)^a$ de

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

Tabel 2.1.3 geeft de waarden van de atmosferische parameters δ en a

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

Tabel 2.1.3 – Parameters atmosferische grenslaag volgens ASHRAE

2.1.9 Winddrukcoëfficiënt

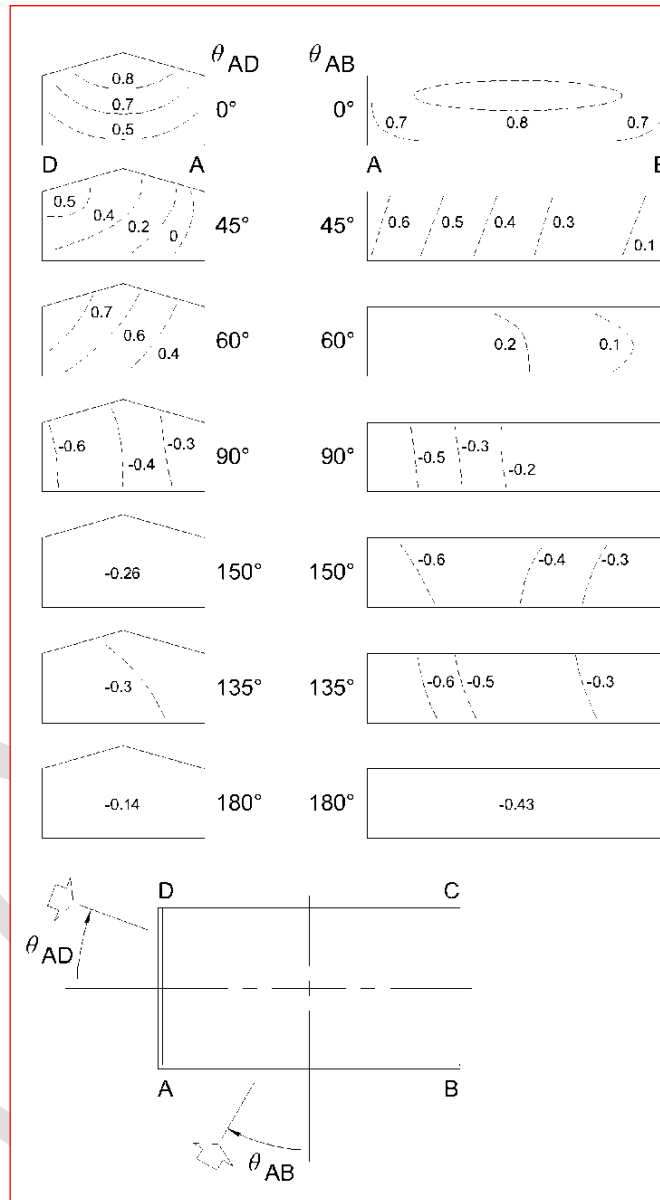
De winddrukcoëfficiënt C_p wordt gedefinieerd als de fractie van de dynamische winddruk die wordt uitgeoefend op gevels en daken van gebouwen bij een bepaalde windrichting.

$$C_p = \frac{p - p_0}{0,5 \cdot \rho \cdot U_{ref}^2} \quad (2.1.4)$$

Waarin C_p winddrukcoëfficiënt $[-]$

p	statische druk op het gebouw	[Pa]
p_0	referentie statische druk	[Pa]
ρ	soortelijke dichtheid van lucht	[kg.m ⁻³]
U_{ref}	windsnelheid	[m.s ⁻¹]

Figuur 2.1.6 geeft een globaal beeld van de winddrukcoëfficiënten voor een rechthoekig gebouw bij verschillende windrichtingen (ASHRAE 2001). Aan deze figuur wordt ook in andere publicaties gerefereerd (Allard, F. 1998).



2.1.6 – Winddrukcoëfficiënten volgens ASHRAE

De figuur toont de kopgevel en langsegevel van een gebouw bij verschillende windrichtingen. De gestippelde lijnen met de bijgeschreven waarden geven de Cp-waarden aan.

Voorbeeld 1:

De wind staat loodrecht op de langsegevel A-B van het gebouw ($\theta_{AB} = 0^0$). De Cp-waarde op deze gevel is $\approx 0,7 - 0,8$. Aan de lijzijdige langsegevel met $\theta_{AB} = 180^0$ heerst dan met Cp $\approx -0,43$ onderdruk. Aan de kopgevels met $\theta_{AD} = 90^0$ heerst dan met Cp $\approx -0,3 \dots -0,6$ eveneens onderdruk.

Voorbeeld 2:

De wind staat loodrecht op de kopgevel AD van het gebouw ($\theta_{AD} = 0^0$). De Cp-waarde op deze gevel is $\approx 0,5 \dots 0,8$. Aan beide zijgevels met $\theta_{AB} = 90^0$ heerst dan met Cp $\approx -0,5 \dots -0,2$ onderdruk.

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

Een veel gebruikte compilatie van Cp waarden is ook door AIVC gepubliceerd (Liddament 1996). Deze bronnen moeten met voorzichtigheid worden gehanteerd, en kunnen hoogstens dienen voor een kwalitatieve vergelijking en een indruk van de orde van grootte.

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

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

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

2.1.10 Cp Generator

TNO Bouw en Ondergrond heeft een computerprogramma ontwikkeld voor het simuleren van winddrukcoëfficiënten Cp op gevels en daken van blokvormige gebouwen (<http://cpgen.bouw.tno.nl>) Het programma houdt rekening met plaatselijke obstakels en terrein ruwheid. Voor een eenvoudige omgeving wordt een goede nauwkeurigheid geclaimd. Voor complexe gebouwvormen en obstakels wordt het programma continu verbeterd. Een bèta testversie is beschikbaar (Knoll, H.1996).

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

In het dynamisch simulatiemodel ESP-r, zie paragraaf 1.8.4, is de Cp-generator als adaptief algoritme gebruikt voor de voorspelling van overdrukken en onderdrukken op het Ventecdak.

2.1.11 Natuurlijke ventilatie via de gevel

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

- Thermische trek is evenredig met het verschil in binnen- en buitentemperatuur, dat kan variëren van + 30K in de winter tot – 10K in de zomer. Voor een gebouw van 42 m hoog betekent dit op de gevel van de begane grond een maximaal drukverschil binnen/buiten van -52 Pa in de winter en +8 Pa in de zomer.
- Windsnelheden kunnen in Nederland variëren tussen een windkracht van 0 en 9 Beaufort, resp. $\approx 0,2 \text{ m.s}^{-1}$ en $\approx 24 \text{ m.s}^{-1}$ met uitschieters tot 11 Beaufort. In voorbeeld 1 bij figuur 2.8 met winddruk coëfficiënten tot 0,8 aan de windzijde en -0,43 aan de lijzijde houdt dit in dat drukverschillen kunnen optreden van maximaal 280 Pa en -150 Pa. Bovendien kan de wind uit alle richtingen komen waardoor de drukverschillen met de windrichting variëren. Een stabiel werkend natuurlijk ventilatiesysteem waarbij alle ruimten ten allen tijde van voldoende verse lucht worden voorzien is daarom problematisch.

Met behulp van dubbele huidgevels, internationaal aangeduid met *Advanced Integrated Façades* (IEA 2007) en regelbare gevelroosters (Bronsema, B. 2012) kunnen deze problemen in principe worden ondervangen. Bij toepassing van het *Earth, Wind & Fire* concept spelen ze in het geheel geen rol.

Bij directe luchttoevoer via de gevel moet tevens grote aandacht worden besteed aan het thermisch comfort in de gevelzone. In het stookseizoen heeft de koude lucht de neiging naar beneden te vallen waardoor tochtverschijnselen ontstaan. Er zijn verschillende mogelijkheden dit te voorkomen (Bronsema, B. 1996, 2001, 2003, 2005). Bij toepassing van het *Earth, Wind & Fire* concept zijn ook deze problemen niet aan de orde.

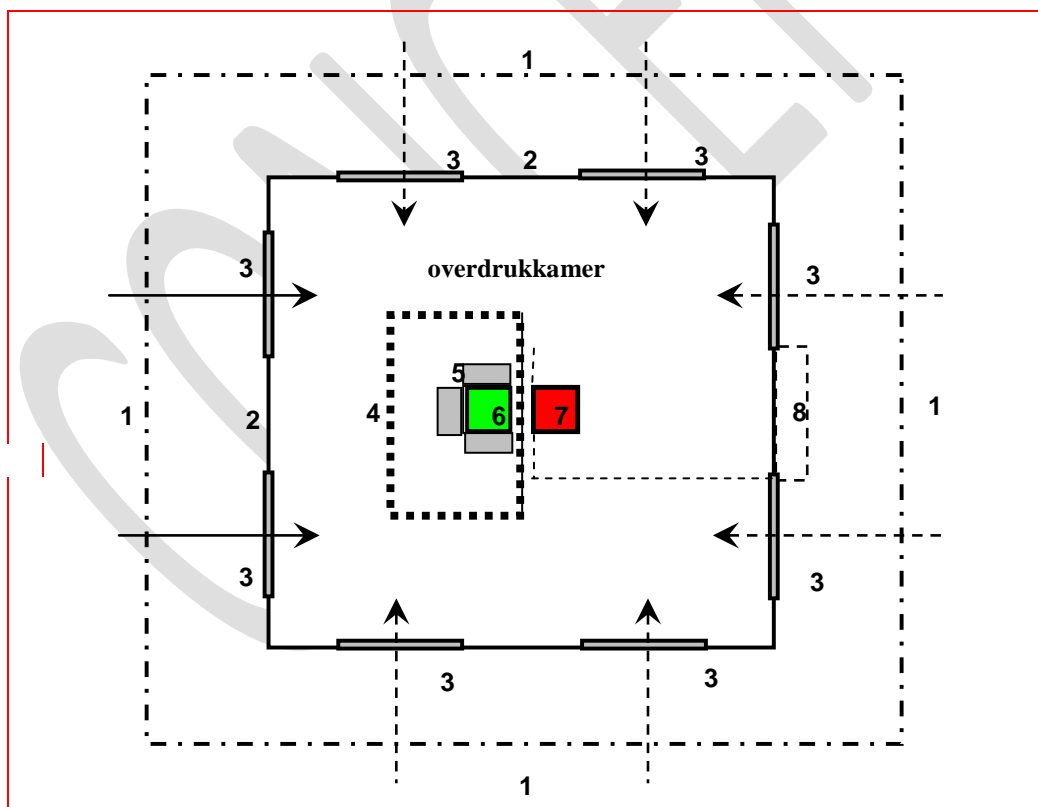
2.2 Basale modellering

2.2.1 Overdrukruimte

Voor het principe van de overdrukruimte zie figuur 2.2.1. Aan de windzijde wordt met behulp van dakoverstekken ventilatielucht opgevangen en door de positieve winddruk naar de overdrukkamer gevoerd.

De grootte van de stuwdruk wordt bepaald door de plaatselijke windsnelheid en de winddrukcoëfficiënt op het betreffende geveldeel. Beide hebben normaliter de hoogste waarde bij de top van een gebouw -zie paragraaf 2.1.9 en 2.1.10- waar tevens de luchtkwaliteit optimaal is -zie paragraaf 2.1.8.

De overdrukkamer moet bij alle windrichtingen kunnen functioneren, hetgeen kan worden gerealiseerd met een systeem van gemotoriseerde luchtkleppen, die automatisch op de windzijde worden geopend en op de lijzijde gesloten – zie figuur 2.2.1. Deze kleppen kunnen eveneens dienst doen om de druk in de overdrukkamer naar boven te begrenzen in geval van hoge windsnelheden en -drukken. De overdrukkamer doet tevens dienst als bufferruimte om snelle drukwisselingen bij korte windvlagen op te vangen. In de overdrukkamer kunnen ook windturbines worden aangebracht voor de opwekking van elektrische energie –zie hoofdstuk 5.

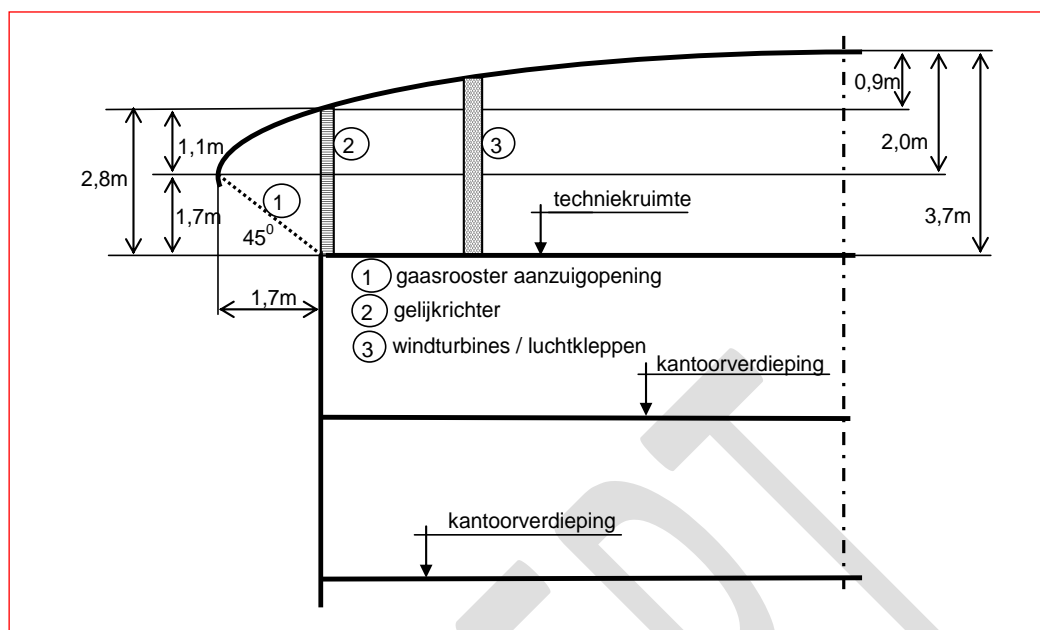


Figuur 2.2.1 – Plattegrond overdrukkamer

Figuur 2.2.1 toont een schematische plattegrond van de overdrukkamer met (1) dakoverstekken, (2) gevel van het gebouw en de luchtkleppen (3). Een grof filter (4) houdt insecten en grof vuil tegen en dient tevens ter bescherming van een eventueel elektrostatisch filter (5). Verder zijn aangegeven de Klimaatcascade (6) en de uitmonding van de Zonneschoorsteen in de Venturi-ejector (7).

Figuur 2.2.2 laat een detail zien van de luchttoevoer naar de overdrukkamer met de globale maatvoering zoals gebruikt voor de gedetailleerde modellering paragraaf 2.3.

Figuur 5.4 in hoofdstuk 5 is een explosietekening (exploded view) van het Ventecdak met windturbines waarin de indeling van de overdrukkamer duidelijk is aangegeven.



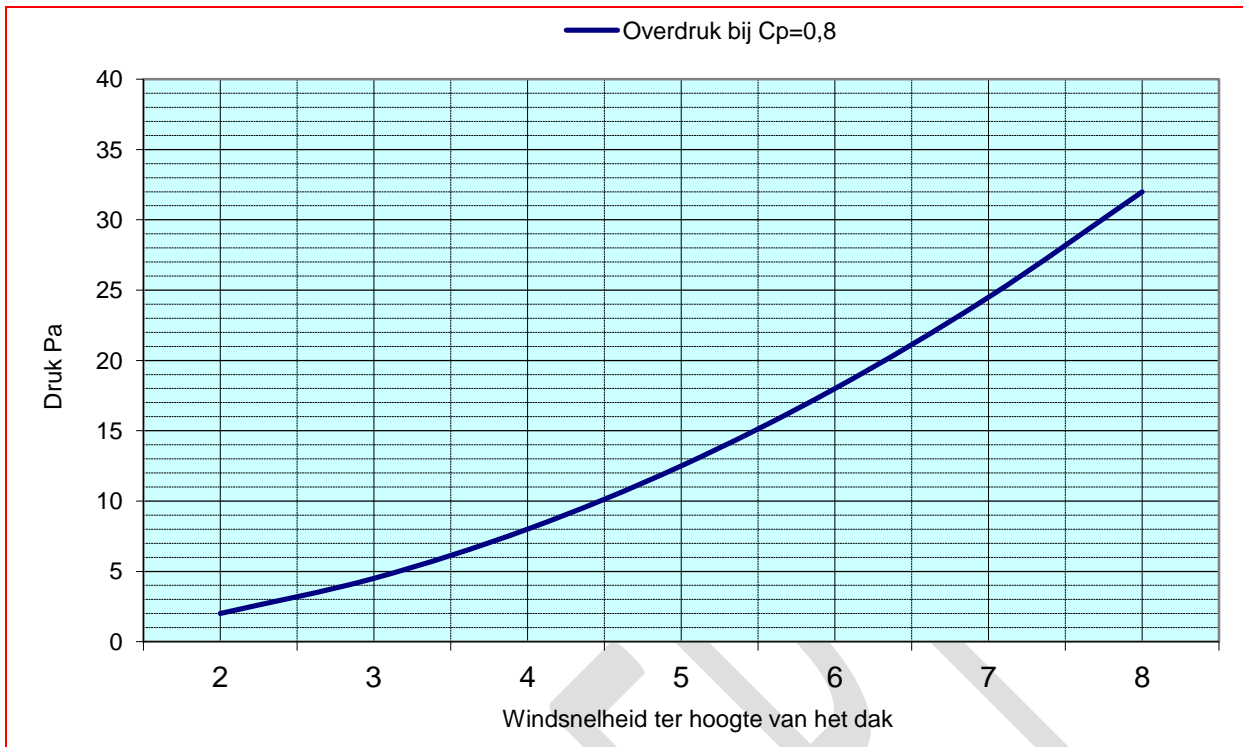
Figuur 2.2.2 – Detail luchttoevoer naar overdrukkruimte

De grootte van de dakoverstekken en van de inlaatopeningen waardoor de ventilatielucht naar de overdrukkamer wordt geleid, wordt in principe bepaald door de ventilatiecapaciteit en de minimum winddruk waarop het concept wordt ontworpen. Indien in de overdrukkamer windturbines worden geïnstalleerd is maximalisering van de energieprestatie maatgevend voor het ontwerp.

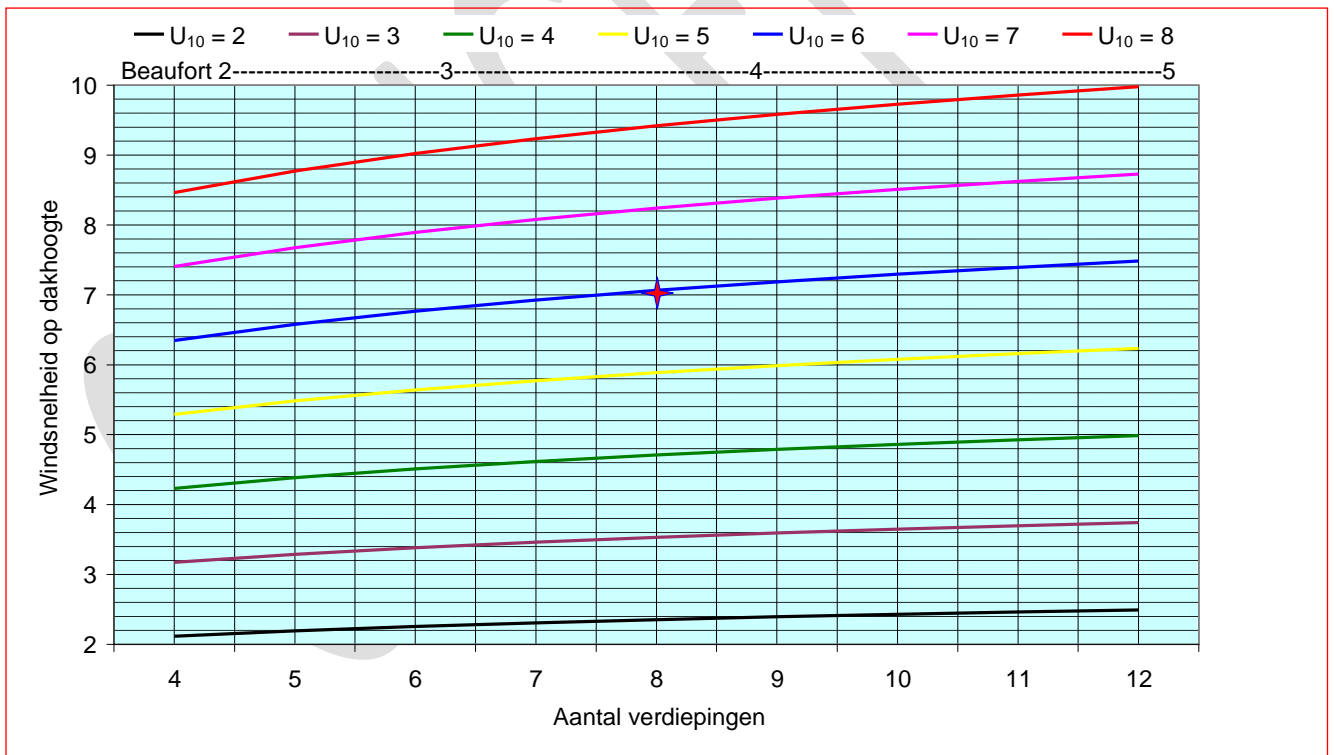
Ter plaatse van de dakrand is de te verwachten winddrukcoëfficiënt ca. 0,8, zie figuur 2.1.6. Bij een matige wind van 3 - 4 Bft, windsnelheid $5 - 8 \text{ m.s}^{-1}$ zijn dan overdrukken te verwachten van 12 - 32 Pa - zie figuur 2.2.3.

De dominante windsnelheid in Nederland is $2 - 5 \text{ m.s}^{-1}$ overeenkomend met een windkracht van 2 -4 Beaufort, zie paragraaf 8.3.2. Dit is de zgn. potentiële windsnelheid U_{10} , gemeten op 10 m hoogte bij een ruwheidslengte van 0,03m, zie paragraaf 2.1.4. Figuur 2.2.4 brengt de relatie in beeld van de potentiële windsnelheid U_{10} en de windsnelheid op dakhoogte voor gebouwen met 4 tot 12 verdiepingen met een verdiepinghoogte van 3,5 m.

Bij een vrijstaand gebouw van 8 verdiepingen is bij matige wind, windkracht 4 Bft en $U_{10} = 6 \text{ m.s}^{-1}$ de windsnelheid op dakhoogte 7 m.s^{-1} . Hiermee wordt volgens figuur 2.2.3 een druk in de overdrukkamer gerealiseerd van ca. 25 Pa, voor een natuurlijk ventilatiesysteem een respectabele druk.



Figuur 2.2.3 – Stuwdruk in de overdrukkamer als functie van de windsnelheid



Figuur 2.2.4 – Windsnelheid op dakhoogte als functie van aantal verdiepingen en potentiële windsnelheid

2.2.2 Venturi-ejector

De Venturi-ejector is de uitmondning van het centrale afzuigstelsel in het Venteddak dat verder wordt gevormd door de Zonneschoorsteen en de FiWiHex installatie voor warmteterugwinning –zie figuur 1.3. Het drukverlies van het afzuigstelsel moet worden gecompenseerd door de thermische trek van de Zonneschoorsteen –zie hoofdstuk 3- en de complementaire aerodynamische trek van de Venturi-ejector.

Bij de navolgende theoretische beschouwingen is ervan uitgegaan dat de venturi-ejector gesloten is. De secundaire luchtstroom uit de ejector heeft naar verwachting een versturende invloed op de werking van de pseudo-venturi en op de te realiseren onderdruk, maar deze invloed is bij een basale benadering niet te modelleren. Bij de gedetailleerde modellering ad paragraaf 2.3.4 en de validatie hiervan in de windtunnel ad paragraaf 2.3.5 is dit wel gebeurd.

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

Het venturi-effect is in principe alleen van toepassing op een gesloten systeem en geldt in feite dus niet voor een open systeem, zoals de hier beschouwde windstroming rond gebouwen. De wind wordt hierbij namelijk niet gedwongen dóór de venturi te stromen maar kan ook gedeeltelijk rondom ontwijken, hetgeen in onderzoek voor stedenbouwkundige toepassing ook is aangetoond (Blocken, B. et al 2008). Omdat de venturi een kunstmatige ingebouwde weerstand in de luchtstroom is, treedt dit zgn. blokkeereffect ook hier op.

Met behulp van een CFD simulatie, gevalideerd door windtunnelonderzoek, is aangetoond dat het concept uitstekend werkt – zie paragraaf 2.3 en 2.4. Omdat de venturi hier wordt toegepast in een open systeem wordt deze in het navolgende aangeduid met pseudo-venturi.

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

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

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

$$p_{st} + 0,5\rho \cdot w^2 + \rho \cdot g \cdot z = \text{constant} \quad (2.2.1)$$

Waarin:

P_{st}	statische druk	[Pa]
ρ	soortelijke massa	[kg.m ⁻³]
w	stroomsnelheid	[m.s ⁻¹]
g	valversnelling	[m.s ⁻²]
z	hoogte boven referentieniveau	[m]

De drie termen in vergelijking (2.2.1) stellen drukken voor, respectievelijk de statische druk (p_{st}), de dynamische druk ($0,5\rho \cdot w^2$), en de druk uitgeoefend door een kolom met hoogte z , de gravitatiedruk.

Als vergelijking (2.2.1) wordt toegepast op een horizontaal luchtkanaal met een niet constante doorsnede, verlopend van 1 naar 2, dan geldt:

$$p_{st,1} + 0,5\rho \cdot w_1^2 = p_{st,2} + 0,5\rho \cdot w_2^2 \quad (2.2.2)$$

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

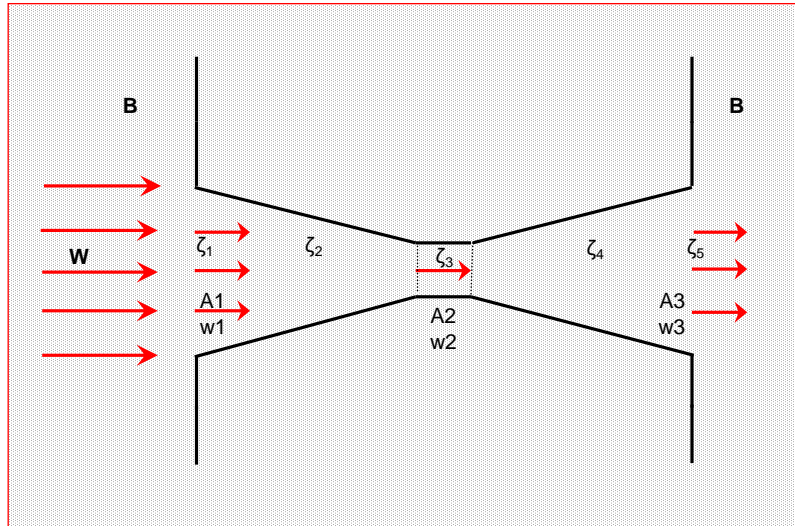
$$A_1 \cdot w_1 = A_2 \cdot w_2$$

Waarin A_1 en A_2 staan voor de oppervlakte van de dwarsdoorsnede in m²

Voor het medium lucht kan de vergelijking van Bernoulli strikt genomen niet worden toegepast omdat bij stroming inwendige wrijving optreedt. Deze resulteert in een verlies aan totale druk Δp , waardoor vergelijking (2.2.2) overgaat in:

$$p_{st,1} + 0,5\rho \cdot w_1^2 = p_{st,2} + 0,5\rho \cdot w_2^2 + \Delta p \quad (2.2.3)$$

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



Figuur 2.2.5 – Stroming en snelheden in venturi

De vergelijking van Bernoulli wordt nu toegepast op de pseudo-venturi, afgebeeld in figuur 2.2.5, waarin B de barometrische druk is. Onder invloed van de wind stroomt van links naar rechts lucht door de venturi. Omdat het een open systeem betreft en de wind zowel door de venturi als om de venturi kan stromen is niet bekend hoeveel lucht er door de venturi zal stromen.

Aangenomen is dat het luchtdebiet door de pseudo-venturi een zodanige grootte heeft dat het drukverschil aan loef- en lijzijde van het gebouw in evenwicht is met de drukverliezen in de pseudo-venturi. Hoe kleiner de luchtweerstand van de pseudo-venturi, des te meer lucht zal er doorheen stromen. De luchtsnelheden in de pseudo-venturi en het inherente luchtdebiet worden bij deze aanname dus bepaald door twee factoren:

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

Om het venturi-effect te maximaliseren moet de verhoging van de luchtsnelheid in de pseudo-venturi zo groot mogelijk zijn. De grotere vernauwing die hiervoor nodig is levert echter ook een groter drukverlies op waardoor minder lucht door de pseudo-venturi zal stromen en het effect weer (gedeeltelijk) teniet wordt gedaan. Het bij een bepaald drukverschil door de pseudo-venturi stromende luchtdebiet, en de te realiseren luchtsnelheid, zijn afhankelijk van de geometrische verhoudingen annex bijbehorende aerodynamische weerstanden. Met behulp van een eenvoudig rekenmodel is getracht enig inzicht te krijgen in de luchtstroming en de mogelijke drukverschillen in een open pseudo-venturi. Met behulp van gevalideerde CFD simulaties zijn naderhand de optimale geometrische verhoudingen van de pseudo-venturi en de in werkelijkheid optredende drukverschillen bepaald –zie paragraaf 2.3

Drukverschil

Drukverschillen tussen loef- en lijzijde van een bepaald gebouw in een bepaalde stedenbouwkundige context zijn afhankelijk van vele parameters. Voor de bepaling hiervan kan gebruik worden gemaakt van de winddrukcoëfficiënten C_p -zie paragraaf 2.1.10. In eerste instantie kunnen deze worden geschat op basis van literatuurgegevens en globale praktijkcijfers (ASHRAE 2001, Liddament 1996), tijdens het ontwerpproces te verfijnen met behulp van een analytische methode (C_p Generator – paragraaf 2.1.11) of windtunnelonderzoek.

Volgens figuur 2.1.6 is de maximum winddrukcoëfficiënt aan de loefzijde $C_{p_w} \approx 0,8$. Aan de lijzijde geeft figuur 2.1.6 waarden van $C_{p_l} \approx -0,14$ voor de kopgevel en $\approx -0,43$ voor de langsevel. In de navolgende analyse is uitgegaan van een voor hoogbouw karakteristieke waarde van $(C_{p_w} - C_{p_l}) = 1,1$ met een gevoeligheidsanalyse voor waarden van 1,0 en 1,2. ¹⁷In de windtunnel is naderhand aan de lijzijde een waarde gemeten van $C_{p_l} = -0,4$ (zie figuur 2.4.6) waardoor $(C_{p_w} - C_{p_l}) \approx 1,2$

Drukverliezen:

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

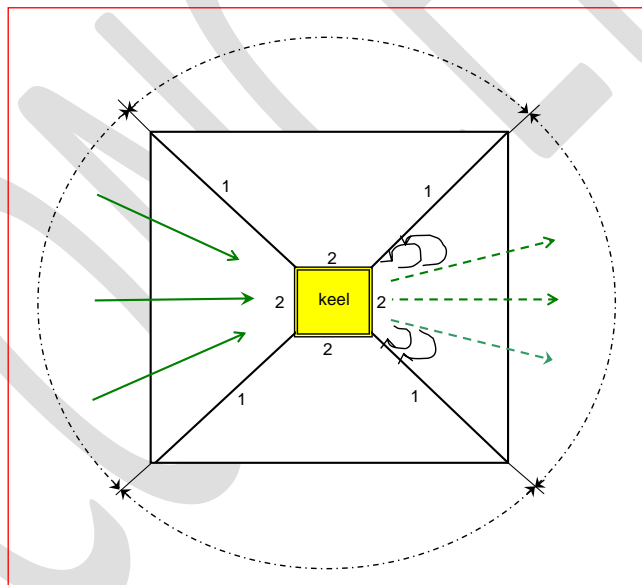
$$\Delta p = p_d \cdot \zeta = 0,5 \rho \cdot w^2 \cdot \zeta \quad (2.2.4)$$

Waarin:

p_d	dynamische druk	[Pa]
ζ	weerstandscoëfficiënt	[-]

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

Het eenvoudig rekenmodel is gebaseerd op de uitvoering van de pseudo-venturi volgens figuur 2.2.6. Hierin zijn verticale vinnen (1) voorzien om de aerodynamische werking te optimaliseren en kleppensecties (2) die het concept in principe windrichtingonafhankelijk zouden kunnen maken. Beide voorzieningen zijn zuiver intuïtief ingegeven- zie ook paragraaf 2.3.2.



Figuur 2.2.6 – Stroming en snelheden in pseudo-venturi

Rekenmodel

De luchtsnelheden in de pseudo-venturi volgens figuur 2.2.5 en 2.2.6 kunnen worden berekend met de formule:

$$p_{d,w} (C_{p_w} - C_{p_l}) = p_{d,1} \cdot \zeta_1 + p_{d,2} \cdot \zeta_2 + p_{d,2} \cdot \zeta_3 + p_{d,2} \cdot \zeta_4 + p_{d,3} \cdot \zeta_5 \quad (2.2.5)$$

Waarin:

C_{p_w}	winddrukcoëfficiënt windzijde	[-]
C_{p_l}	winddrukcoëfficiënt lijzijde	[-]

¹⁷ In de windtunnel is naderhand aan de lijzijde een waarde gemeten van $C_{p_l} = -0,4$ (zie figuur 2.4.6) waardoor $(C_{p_w} - C_{p_l}) \approx 1,2$.

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

De weerstandscoefficiënten in de pseudo venturi zijn als volgt in rekening gebracht.

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

Voor een onderbouwing van deze waarden wordt verwezen naar het onderzoeksrapport “*Earth, Wind & Fire*” deel (II) *Onderzoek Natuurlijke Ventilatie, Wind en het Ventecdak* (Bronsema 2012).

Na substitueren van de waarden ($0,5\rho \cdot w^2$) voor p_d gaat formule (2.2.5) over in:

$$W_1^2 (Cp_w - Cp_l) = w_1^2 \cdot \zeta_1 + w_2^2 \cdot \zeta_2 + w_2^2 \cdot \zeta_3 + w_2^2 \cdot \zeta_4 + w_3^2 \cdot \zeta_5 \quad (2.2.6)$$

In een symmetrische venturi is $w_1 = w_3$. Als de ratio $A2/A1$ wordt gesteld op R , de contractiecoëfficiënt¹⁸, met $w_2/w_1 = 1/R$ en $w_1/w_2 = R$ gaat formule (2.2.6) over in:

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

en

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

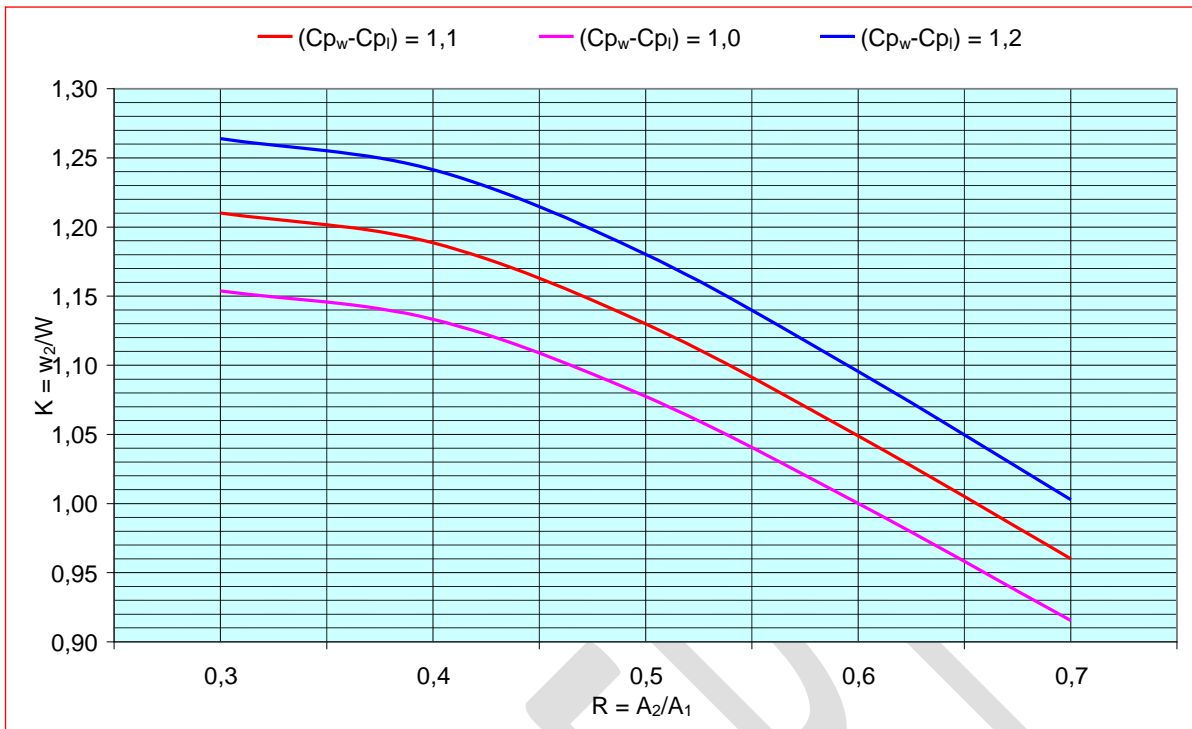
$$\frac{w_2^2}{W^2} = \frac{(Cp_w - Cp_l)}{R^2 (\zeta_1 + \zeta_5) + (\zeta_2 + \zeta_3 + \zeta_4)} \quad (2.2.7)$$

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

Voor een karakteristieke waarde van $(Cp_w - Cp_l) = 1,1$ en R -waarden van 0,3 tot 0,7 zijn met behulp van vergelijking (2.2.7) de berekende waarden van K weergegeven in figuur 2.2.7. Een versnelling treedt pas op bij een R -waarde $\leq 0,65$ en bereikt een maximum waarde van $K \approx 1,21$ bij $R = 0,3$. De afvlakking bij lagere R -waarden is mogelijk een gevolg van de toenemende weerstandscoefficiënten in dit gebied. Een gevoeligheidsanalyse voor $(Cp_w - Cp_l) = 1,0$ en 1,2 laat geringe verschuivingen van deze waarden zien.

NB: De CFD simulaties en de fysieke modelmetingen – zie paragraaf 2.3 en 2.4 hebben aangetoond dat geleideschoepen en kleppen de werking van de pseudo-venturi negatief beïnvloeden. Het additionele drukverlies van deze elementen heeft een toename van het windblokkeereffect tot gevolg, waardoor minder lucht door de pseudo-venturi stroomt en de prestatie van de venturi-ejector afneemt. Het Ventecdak wordt daarom zonder geleideschoepen en kleppen uitgevoerd en wordt hierdoor tevens windrichtingonafhankelijk.

¹⁸ Voor de CFD simulaties in paragraaf 2.3 is de contractieverhouding $A1/A2$ gebuikt, die dus de inverse is van de contractiecoëfficiënt R



Figuur 2.2.7 – Versnellingsfactor $K = w_2/W$ in de keel van de venturi

Onderdrukken in de keel van de pseudo-venturi

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

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

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

$$P_{st,V} - P_{tot,E} = P_{tot,E} - \Delta p - P_{dyn,V} - P_{tot,E} = -\Delta p + P_{dyn,V} \quad (2.2.8)$$

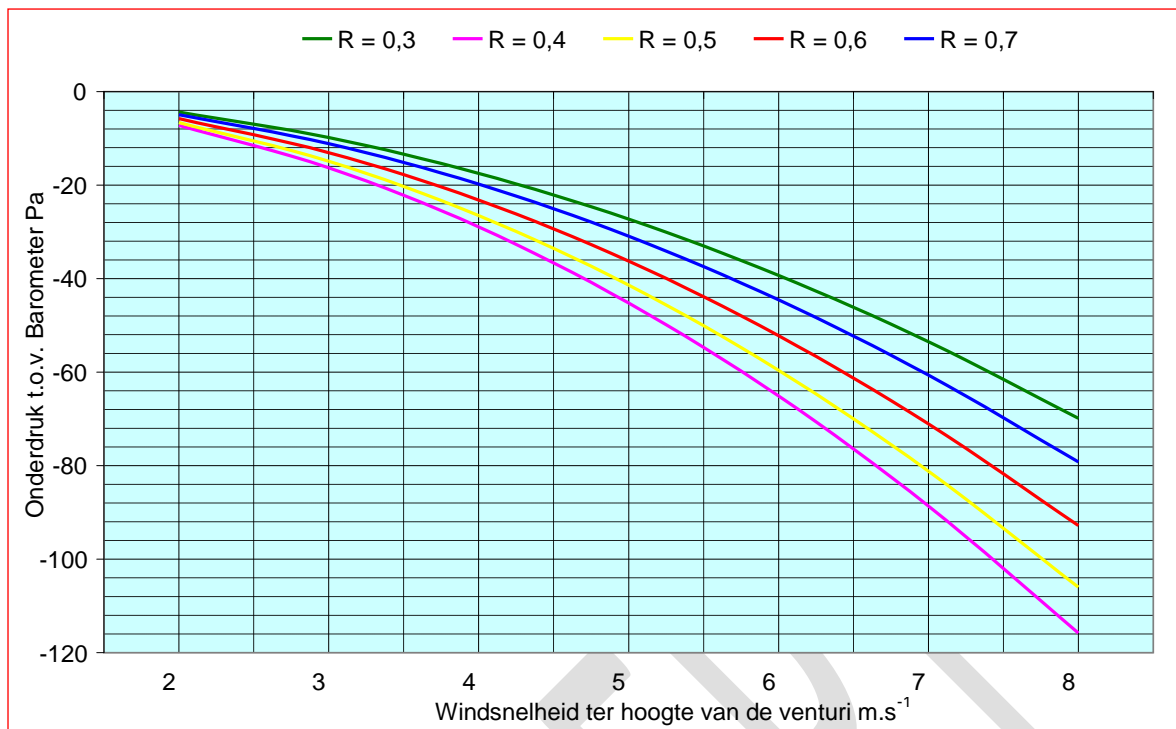
Waarin

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

De onderdrukken in de keel van de pseudo-venturi als functie van de windsnelheid en de contractiecoëfficiënt R zijn weergegeven in figuur 2.2.8.

Merk op bij een contractiecoëfficiënt $R = 0,4$ de hoogste onderdrukken worden gerealiseerd. Bij een hogere R-waarde, dus een kleinere contractie, stroomt er weliswaar meer lucht door de venturi maar dit levert geen hogere onderdruk op. Een lagere R-waarde van 0,3 geeft potentieel een hogere luchtsnelheid in de keel van de pseudo-venturi en dus een hogere onderdruk maar de luchtweerstand neemt zodanig toe dat in een open pseudo-venturi meer lucht om de pseudo-venturi heen zal stromen.

NB: Deze berekeningen hebben uitsluitend tot doel de effecten van een pseudo-venturi te illustreren. Voor gevalideerde waarden zie paragraaf 2.3 en 2.4.



Figuur 2.2.8 – Onderdruk in de keel van de pseudo-venturi als functie van windsnelheid W en contractiecoëfficiënt R

2.3 Gedetailleerde modellering

2.3.1 Inleiding

Met de basale modellering ad paragraaf 2.2 is aangetoond dat de wind kan worden benut om via een pseudo-venturi aanzienlijke onderdrukken op het dakniveau van een gebouw te realiseren. Het basale rekenmodel geeft een globaal kwalitatief inzicht in de potenties van de pseudo-venturi op basis van in de luchttechniek gebruikte stromingstechnische gegevens.

Windstroming in de vrije lucht is uiteraard nauwelijks vergelijkbaar met de stroming in een gesloten aerodynamisch systeem. Om de kwalitatieve informatie uit het rekenmodel te onderbouwen en te kwantificeren zijn CFD simulaties uitgevoerd, die op hun beurt weer zijn gevalideerd met metingen in de windtunnel- zie paragraaf 2.4. Tenslotte is met behulp van CFD een rekenmodel ontwikkeld voor de dimensionering van de pseudo-venturi in de praktijk.

Het uitvoeren van CFD simulaties, in het bijzonder op stedenbouwkundig niveau, is een gecompliceerde activiteit –zie paragraaf 1.8.3. CFD simulaties voor het Ventecdak zijn dan ook onder auspiciën van de onderzoeker uitgevoerd door prof. dr. ir. B. Blocken en ir. T.A.J. van Hooff van de Technische Universiteit Eindhoven, Faculteit Bouwkunde, afdeling Building Physics and Systems, die, getuige hun wetenschappelijk publicaties, erkende specialisten zijn op het gebied van de stedenbouwfysica.

Voor het *Earth, Wind & Fire* concept zou het ideaal zijn de luchtstromingen buiten het gebouw en binnen het gebouw gelijktijdig te kunnen modelleren en simuleren met één model binnen hetzelfde computerdomein. Het nadeel van een aldus gekoppelde CFD simulatie is het grote verschil in de geometrische schaal van de stedenbouwkundige omgeving (1 – 5 km) en die van de ventilatieopeningen in het gebouw (0,01 – 1 m). Dit zou een zeer omvangrijk grid met hoge resolutie noodzakelijk maken, hetgeen hoge computerkosten met zich meebrengt (van Hooff en Blocken 2010). Verder heeft door beperkingen in computercapaciteit CFD (nog) niet het niveau bereikt dat nodig is voor *real-time* berekeningen. Koppeling met een dynamisch gebouwsimulatiemodel is daardoor (nog) niet mogelijk.

2.3.2 Initiële CFD simulaties

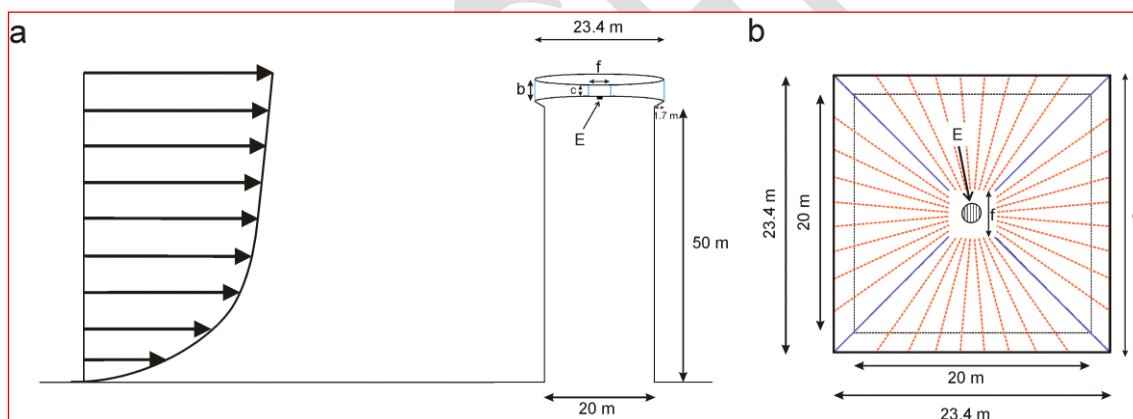
In het eenvoudig rekenmodel ad paragraaf 2.2.2 is intuïtief verondersteld dat verticale vinnen nodig zouden zijn om de aerodynamische werking van de pseudo-venturi te optimaliseren –zie figuur 2.2.6. Deze vinnen zorgen voor de geleiding van de wind door de keel van de pseudo-venturi, en het aantal vinnen is bepalend voor de mate van deze geleiding. Hoe groter het aantal vinnen, des te sterker de geleiding, en des te minder uitgesproken –naar verwachting- de separatie van de wind, en het drukverlies over de pseudo-venturi.

Deze vinnen hebben echter eveneens een blokkeereffect op de wind waardoor het luchtdebiet tussen de vinnen en dus ook de lichtsnelheid in de keel van de pseudo-venturi zal afnemen (Blocken et al 2008). Omwille van deze potentieel belangrijke effecten is veel aandacht besteed aan CFD simulaties voor diverse configuraties van de verticale vinnen met betrekking tot aantal en lengte daarvan.

Verder zouden zijkleppen in de keel van de pseudo-venturi een windrichtingonafhankelijke werking mogelijk moeten maken –zie figuur 2.2.6. Deze kleppen vormen echter eveneens een obstructie voor de windstroming met een potentiële toename van het blokkeereffect.

Initiële CFD simulaties zijn uitgevoerd ter bepaling van de parameters die naar verwachting de grootste invloed zouden hebben op de onderdrukken. Deze initiële simulaties zijn niet gevalideerd aan de hand van windtunnelmetingen en dienen dan ook enkel om de invloed van bepaalde parameters kwalitatief te onderzoeken.

De geometrie van het simulatiemodel is weergegeven in figuur 2.3.1. Het onderzochte gebouw is 50 m hoog en heeft een voetafdruk van 20 x 20 m. Inclusief de dakoverstekken van 1,7 m -zie figuur 2.2.2- zijn de buitenafmetingen van het dak 23,4 x 23,4 m.



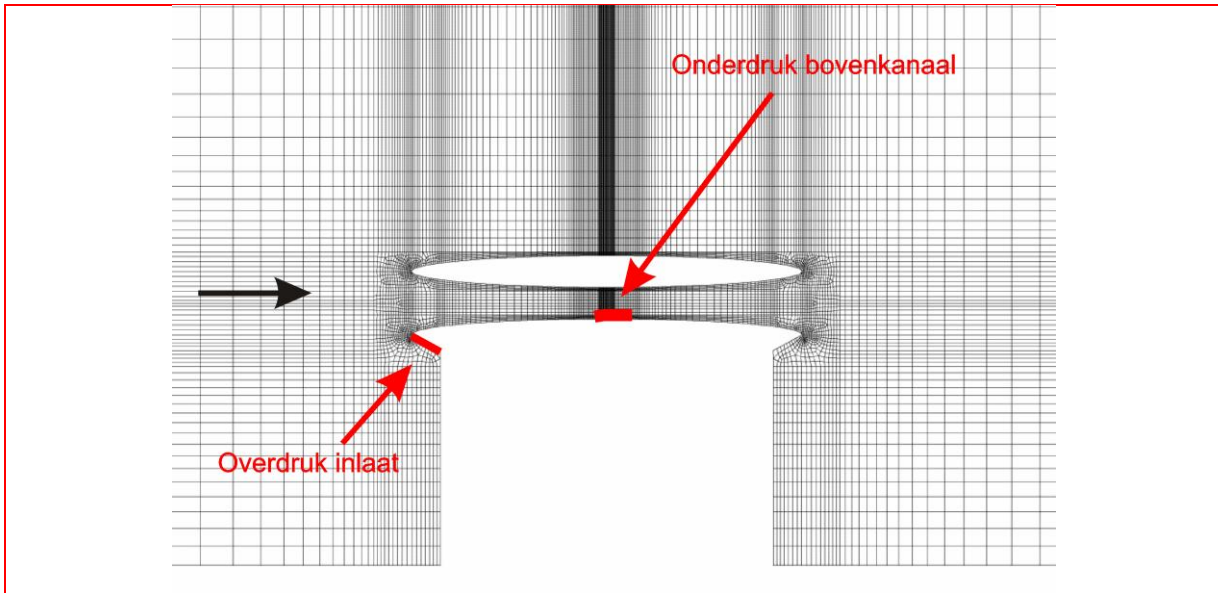
Figuur 2.3.1 – Geometrie van het simulatiemodel

Simulaties zijn uitgevoerd met de volgende parameters:

1. Aantal verticale vinnen in het bovenkanaal –zie (1) in figuur 2.2.6
2. Aanwezigheid geleidende zijkleppen in het bovenkanaal –zie (2) in figuur 2.2.6
3. Lengte van de verticale vinnen - bepaalt horizontale contractieverhouding g/f ;
4. Verticale contractieverhouding van het bovenkanaal (b/c);
5. Hoogte van het bovenkanaal (c);
6. Gebouweometrie B en H

De prestaties van de pseudo-venturi zijn getoetst aan de hand van (1) de overdruk ter plaatse van de luchtinlaat en (2) de onderdruk in het midden van het bovenkanaal, ter plaatse van de venturi-ejector – zie figuur 2.3.2. De simulaties zijn uitgevoerd met gesloten venturi-ejector, dus zonder secundaire luchtstroom uit het gebouw.

Om de drukken onafhankelijk te maken van de referentiewindsnelheid zijn ze uitgedrukt in C_p -waarden volgens formule (2.1.4)



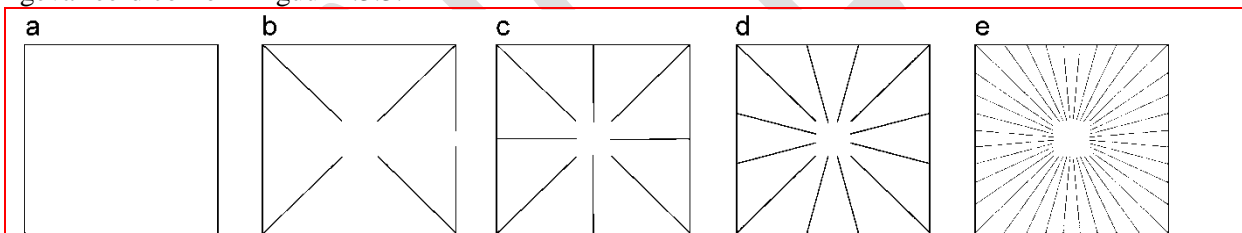
Figuur 2.3.2 – Detail Ventecdak met rekenraster

Overdruk ter plaatse van de luchtinlaat:

Onafhankelijk van de bovengenoemde parameters is ter plaatse van de luchtinlaat een winddrukcoëfficiënt berekend van $C_p = 0,8$. Deze komt overeen met de in figuur 2.1.6 vermelde waarde en met de in de windtunnel gemeten waarde –zie paragraaf 2.4.

Parameteranalyse 1: Aantal verticale vinnen in het bovenkanaal

De simulaties zijn uitgevoerd met vaste waarden voor de geometrische parameters volgens figuur 2.3.1 met $c = 2$ m en $b = 4$ m en een contractiecoëfficiënt $R = b/c = 2,0$. Het aantal verticale vinnen is gevarieerd conform figuur 2.3.3.



Figuur 2.3.3 – Horizontale doorsnede Ventecdak met verschillen vinconfiguraties

De resultaten van deze parameteranalyse zijn weergegeven in tabel 2.3.1.

Configuratie vinnen	Cp-waarden voor windrichting		
	0°	22.5°	45°
Geen vinnen	-0,94	-0,91	-1,00
Vinnen om de 90°	-0,11	-0,14	-0,06
Vinnen om de 45°	-0,06	-0,20	-0,06
Vinnen om de 30°	-0,07	-0,26	-0,09
Vinnen om de 10°	-0,28	-0,31	-0,14

Tabel 2.3.1 – Cp-waarden voor verschillende varianten en drie windrichtingen

De Cp-waarden blijken de hoogste negatieve waarde te hebben voor de situatie zonder vinnen, en zijn weinig gevoelig voor de windrichting. Bij de toepassing van vinnen neemt de aerodynamische weerstand van het bovenkanaal toe. De wind zoekt in dit geval de weg van de minste weerstand en stroomt voor een deel van de wind niet door de keel van de pseudo-venturi maar ontwijkt zijdelings, het wind blokkeer effect.

Conclusie: Verticale vinnen hebben een negatief effect op de werking van pseudo-venturi.

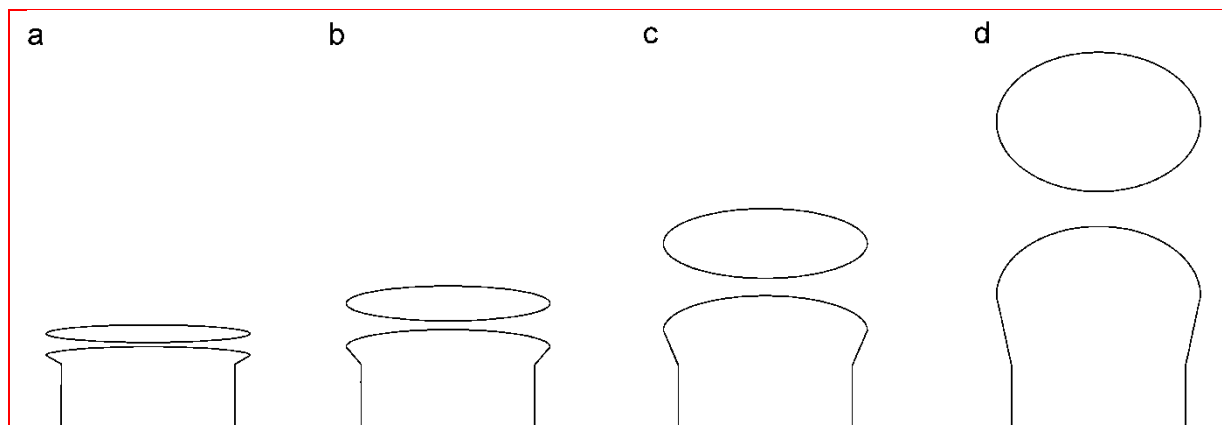
Parameteranalyse 2 en 3: zijkleppen in het bovenkanaal en lengte van de vinnen

Voor het *Earth, Wind & Fire* concept wordt gestreefd naar een zo hoog mogelijke onderdruk in de keel van de pseudo-venturi. Parameteranalyse 1 wijst uit dat het niet zinvol is verticale vinnen toe te passen, waardoor een eventuele verlenging hiervan alsmede toepassing van zijkleppen niet relevant is.

Conclusie: Zonder verticale vinnen is de lengte hiervan alsmede toepassing van zijkleppen niet relevant.

Parameteranalyse 4: hoogte van het bovenkanaal

Bij een contractieverhouding van 5:1 is de hoogte van het bovenkanaal gevarieerd van de waarde van 0,5 m (a) in parameteranalyse 1 tot 1,0 (b) – 2,0 (c) en 4,0m (d). Bij de grotere hoogten leidt dit tot een sterk veranderde dakvorm –zie figuur 2.3.4.



Figuur 2.3.4 - Contractieverhoudingen b/c = 5:1 en verschillende hoogten bovenkanaal

De resultaten van deze simulaties, uitgevoerd zonder vinnen, zijn weergegeven in tabel 2.3.2.. De optimale variant is die met een hoogte van het bovenkanaal van 1,0 à 2,0m. Dit is een gelukkige omstandigheid omdat een hoogte < 1,0 m uit praktische overwegingen nauwelijks in aanmerking komt en hoogten > 2,0 m architectonisch merkwaardige vormen opleveren. Bovendien zijn de prestaties van het Venteddak met actieve venturi-ejector beter bij een hoogte van 2 m –zie paragraaf 2.3.4

Configuratie met b/c = 5:1		Cp bij windrichting		
Figuur nr.	Hoogte bovenkanaal	0°	22,5°	45°
8.12.4a	0,5 m	-1.70	-1.82	-1.90
8.12.4b	1,0 m	-2.05	-2.10	-2.10
8.12.4c	2,0 m	-2.02	-2.07	-2.10
8.12.4d	4,0 m	-1.79	-1.93	-1.99

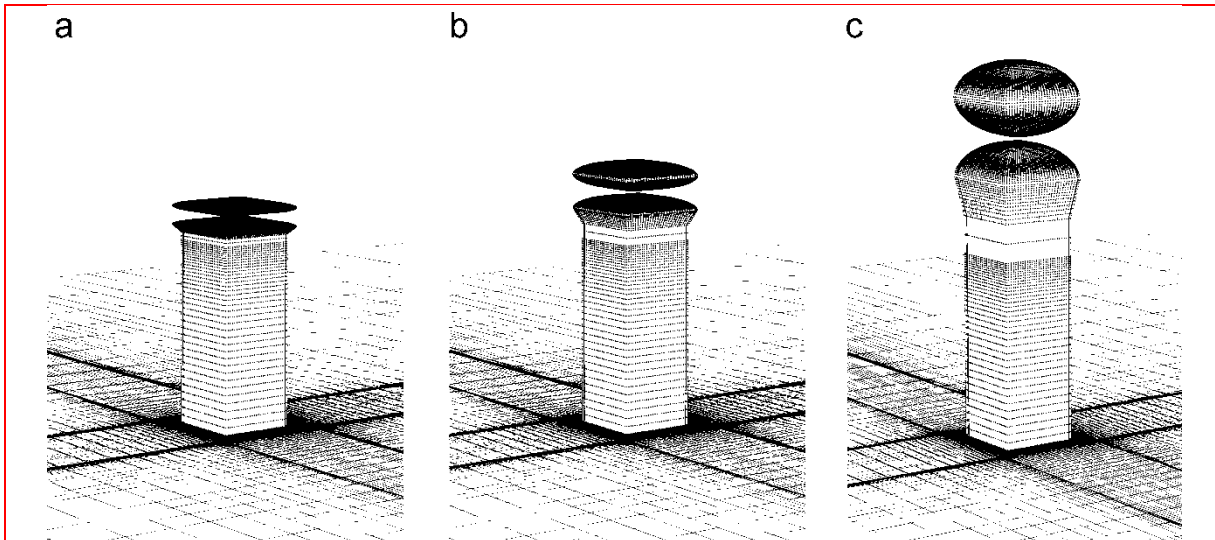
Tabel 2.3.2 – Cp-waarden voor verschillende hoogten van het bovenkanaal bij 3 windrichtingen

Parameteranalyse 5: Contractieverhouding

Parameteranalyse 4 leverde bij een verticale contractieverhouding van 5:1 en een hoogte van het bovenkanaal van 1,0 m de sterkste onderdruk- zie tabel 2.3.2. Nagegaan is of dit resultaat met grotere contractieverhoudingen nog te verbeteren is. Tabel 2.3.3 laat het resultaat van deze simulaties zien voor verschillende contractieverhoudingen bij een hoogte van het bovenkanaal van 1,0 m. Er ligt een duidelijk optimum bij een contractieverhouding van 9:1 /11:1. Hogere waarden geven geen beter resultaat en leveren merkwaardige dakvormen op, dit uiteraard ter beoordeling van de architect –zie figuur 2.3.5.

	Verticale contractieverhouding bij windrichting 0°						
	3:1	5:1	7:1	9:1	11:1	15:1	21:1
Figuur 8.12.5 →	a	-	-	b	-	-	c
Cp-waarde	-1.25	-2.02	-2.45	-2.64	-2.73	-2.58	-2.53

Tabel 2.3.3 – Cp-waarden voor contractieverhoudingen 3:1 → 21:1 - hoogte bovenkanaal 1,0m

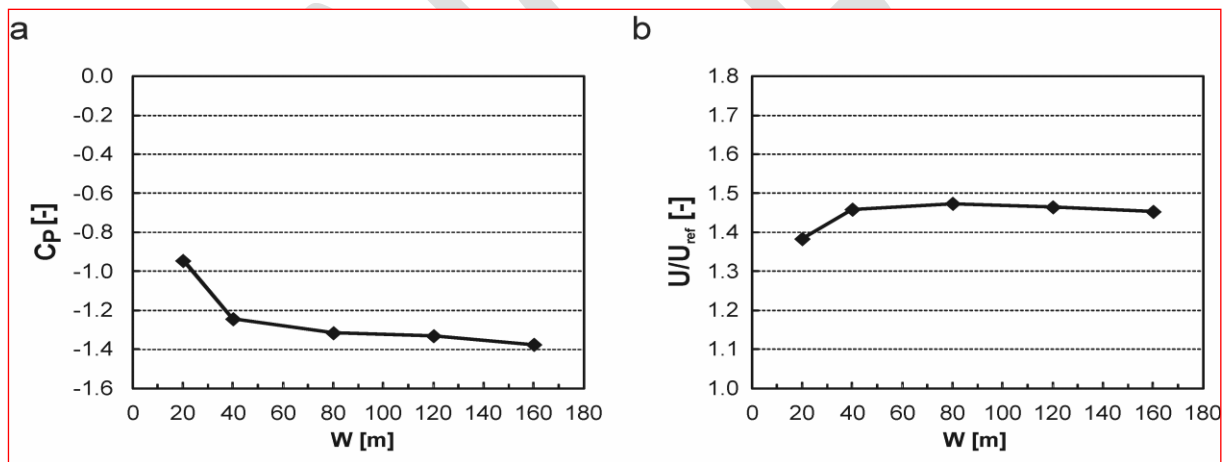


Figuur 2.3.5 – Dakvormen bij contractieverhoudingen 3:1, 9:1 en 21:1 en hoogte bovenkanaal 1,0 m

Parameteranalyse 6: Gebouwgeometrie

De voorgaande simulaties zijn uitgevoerd voor een gebouwgeometrie volgens figuur 2.3.1. met geoptimaliseerd dak, zonder verticale vinnen en geleidende zijkleppen. De voetafdruk van dit gebouw is 20 x 20m.

Verbreiding van het gebouw van 20m tot 40m levert een hogere snelheid in de pseudo-venturi op met een substantiële verbetering van de C_p -waarde - zie figuur 2.3.6. Verdere verbreiding geeft nog enige additionele verbetering. De prestatieverbetering van het dak bij toenemende gebouwbreedte wordt toegeschreven aan een hogere overdruk aan de windzijde en een lagere onderdruk aan de lijzijde achter het gebouw.



Figuur 2.3.6 – (a) Winddrukcoëfficiënt C_p in de Venturi-ejector als functie van de gebouwbreedte W
(b) Dimensieloze windsnelheidsverhouding U/U_{ref} in het midden van de pseudo-venturi
 $H = 50$ m

Een volledig verslag van deze simulaties is opgenomen in het onderzoeksrapport “*Evaluatie en optimalisatie van de werking van het Bronsemadak*”- deel 1” (Blocken, B. en van Hooff, T. 2010).

2.3.3 CFD simulaties gevalideerd met windtunnelmetingen

“*CFD resultaten zijn fout tot het tegendeel bewezen is.*” Verificatie en validatie van CFD simulaties zijn essentieel. Voor de validatie zijn nauwkeurige metingen nodig -zie paragraaf 1.8.3.

Op basis van deze quote zijn enkele CFD-simulaties ad paragraaf 2.3.2 herhaald, maar nu gevalideerd op basis van windtunnelmetingen –zie paragraaf 2.4. Gekozen is voor de volgende gevallen:

1. De aanwezigheid en het aantal verticale vinnen in het bovenkanaal. De intuïtieve aanname bij het ontwerp van het eenvoudig rekenmodel dat deze voor de werking van de pseudo-venturi nodig

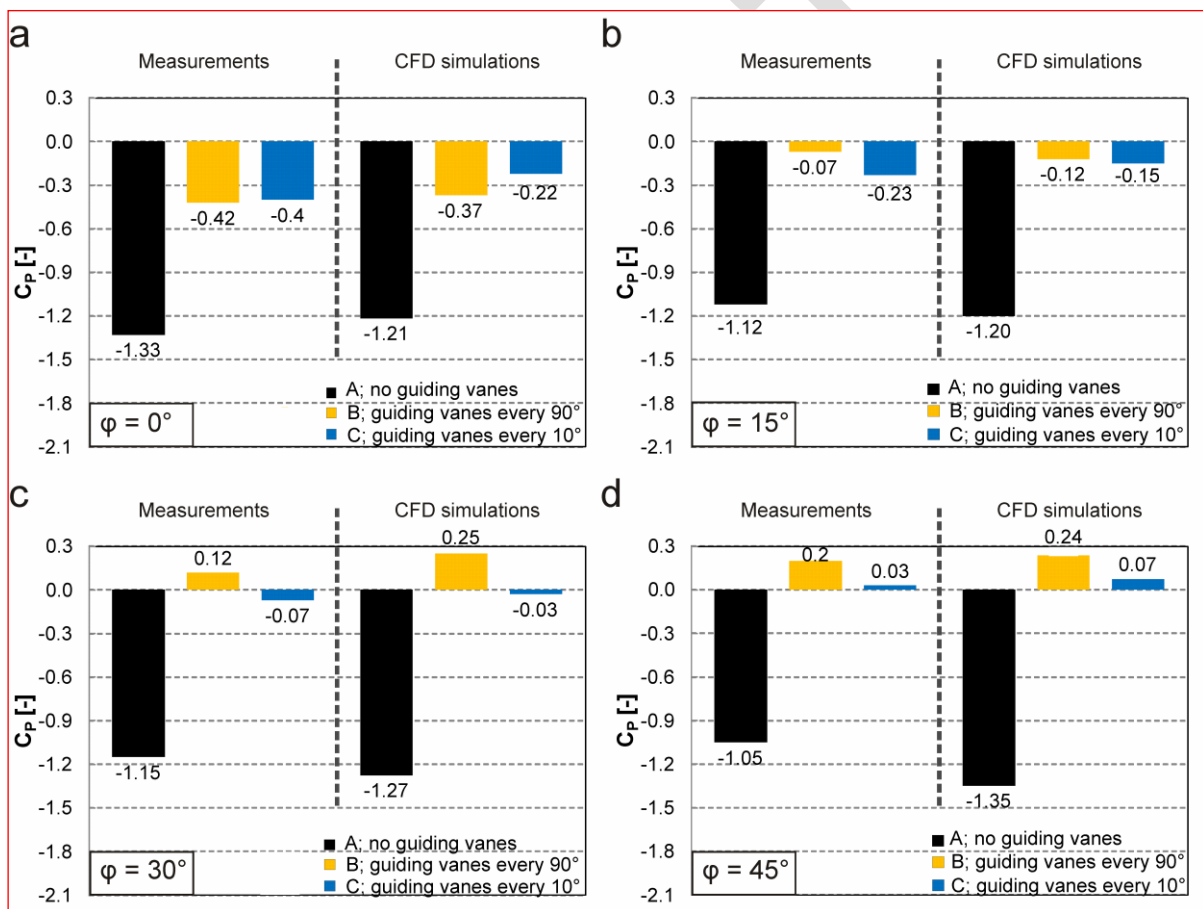
zouden zijn –zie paragraaf 2.2.2- werd door de initiële simulaties ad paragraaf 2.3.2 gelogenstraft. Dit min of meer opzienbarende resultaat, veroorzaakt door het zgn. windblokkeereffect, verdiende nadere validatie.

2. De hoogte en contractieverhouding van het bovenkanaal. Dit zijn belangrijke gegevens voor het ontwerp van een Ventecdak.

Invloed verticale vinnen

De resultaten zijn weergegeven in figuur 2.3.7. Er blijkt uitstekende overeenstemming te zijn tussen simulaties en metingen. Op grond hiervan zijn de conclusie gerechtvaardigd:

- Met behulp van CFD simulaties kunnen betrouwbare voorspellingen worden gedaan voor de verdere ontwikkeling van het Ventecdak.
- Zonder verticale vinnen worden voor alle windrichtingen de hoogste negatieve C_p waarden gerealiseerd. De prestatie van het Ventecdak wordt door verticale vinnen dus negatief beïnvloed.
- Zonder verticale vinnen worden de prestaties van het Ventecdak vrijwel onafhankelijk van de windrichting.
- Zonder verticale vinnen wordt het dak eenvoudiger en goedkoper.

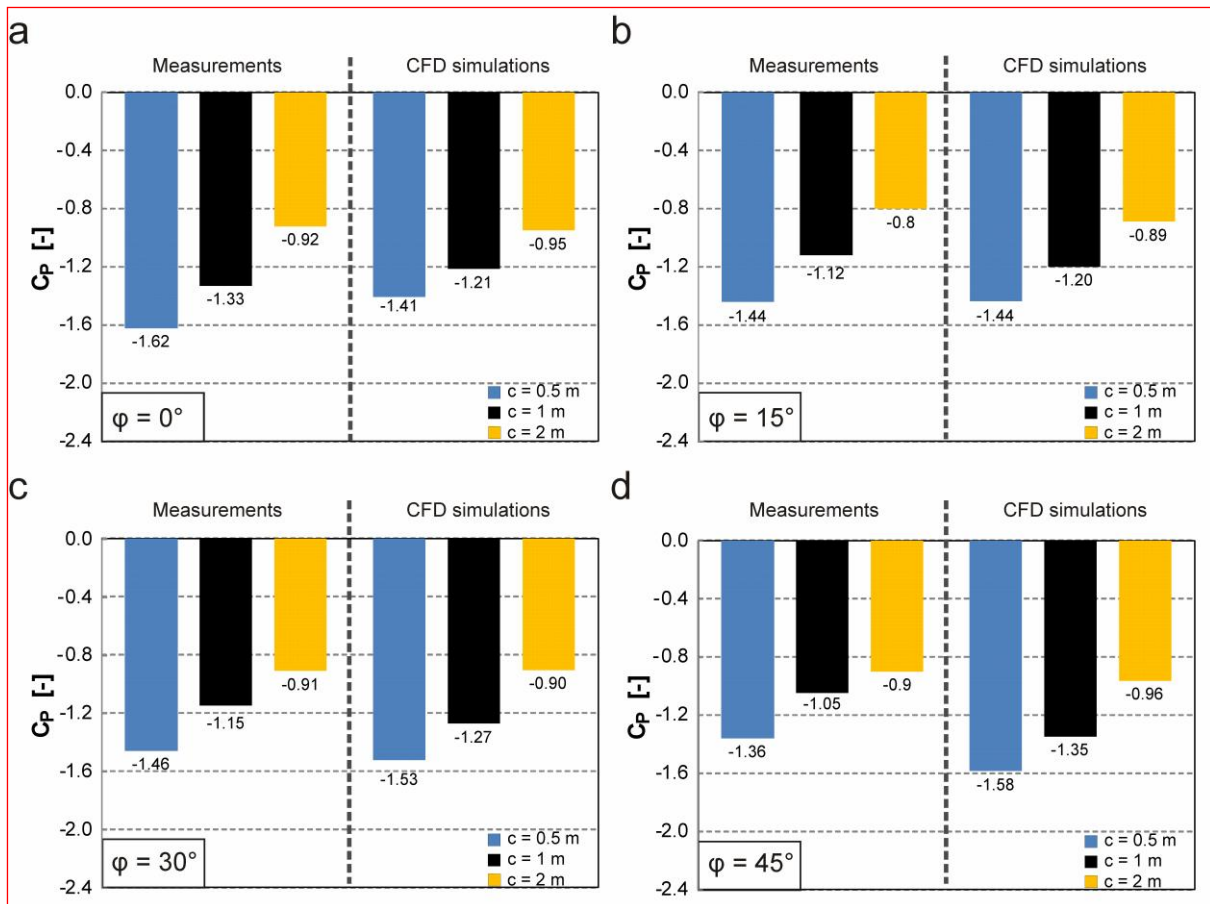


Figuur 2.3.7 – Vergelijking tussen numerieke simulaties en gemeten C_p -waarden

Hoogte en contractieverhouding van het bovenkanaal

De simulaties zijn uitgevoerd met een keelbreedte $f = 4$ m -zie figuur 2.3.1. Gevarieerd zijn de verticale contractieverhouding b/c en de hoogte van het bovenkanaal b . Hierbij wordt aangetekend dat een hoogte van het bovenkanaal $c < 1$ m uit praktische overwegingen nauwelijks in aanmerking komt. Deze variant is dan ook voornamelijk uitgevoerd uit wetenschappelijk belangstelling.

De resultaten zijn weergegeven in figuur 2.3.7. Er blijkt uitstekende overeenstemming te zijn tussen simulaties en metingen.



Figuur 2.3.8 - Vergelijking tussen numerieke simulaties en gemeten Cp-waarden

Voor een volledig verslag van deze simulaties wordt verwezen naar de publicaties

- “A venturi-shaped roof for wind-induced natural ventilation of buildings: Wind tunnel and CFD evaluation of different design configurations” (Van Hooff, T. et al. 2011).
- “Computational analysis of the performance of a venturi-shaped roof for natural ventilation: Venturi-effect versus wind-blocking effect” (Blocken, B. et al. 2011).

Voor de validatiemetingen in de windtunnel zie paragraaf 2.4

2.3.4 Prestatiesimulaties van het Venteddak met actieve venturi-ejector

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

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

$$C_p = 0,5374 \ln(U_{\text{ejector}} / U_{\text{ref}}) + 0,6381 \quad (2.3.1)$$

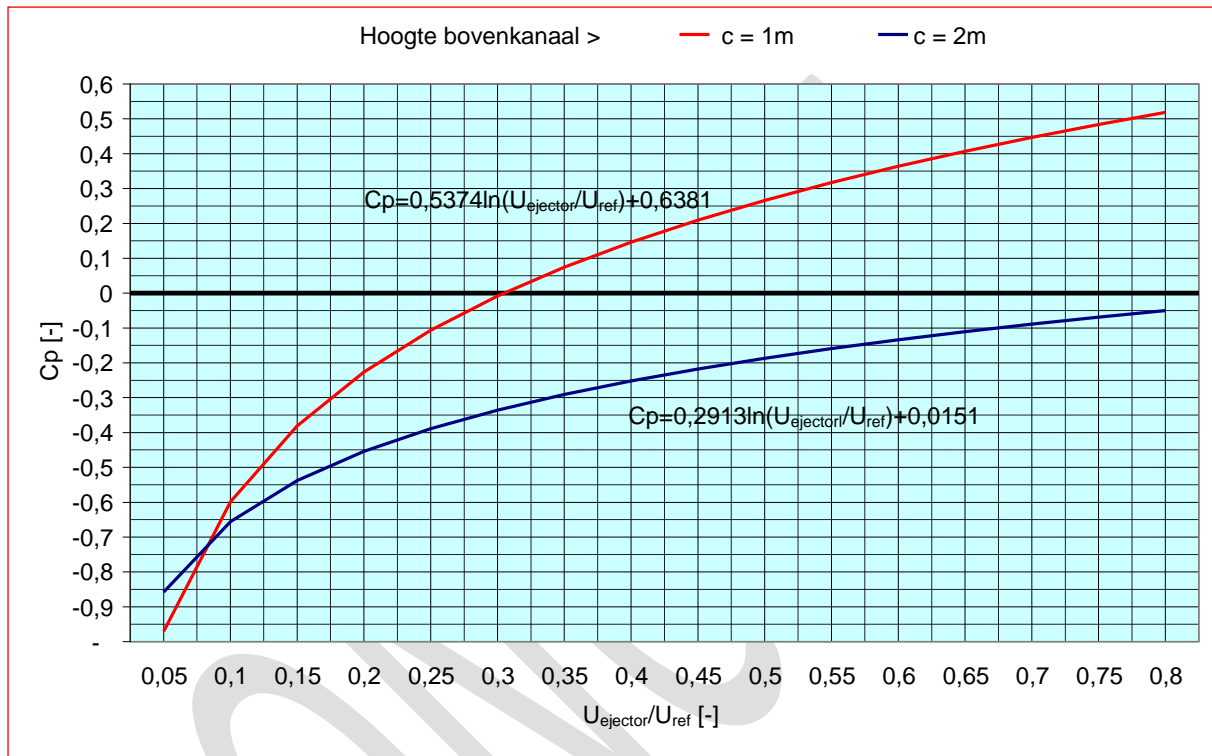
voor een bovenkanaal met $c = 1,0$ m

en $C_p = 0,2913 \ln(U_{ejector}/U_{ref}) + 0,0151$ (2.3.2)

voor een bovenkanaal met $c = 2,0$ m

Waarin $U_{ejector}$ snelheid in de venturi-ejector [m.s⁻¹]
 U_{ref} referentie windsnelheid op dakhoogte [m.s⁻¹]

Het resultaat van deze simulaties is weergegeven in figuur 2.3.9. Hieruit blijkt dat naast de snelheidsverhouding $U_{ejector}/U_{ref}$ de hoogte van het bovenkanaal een belangrijke rol speelt. Bij $c = 1$ m slaat de negatieve druk in de venturi-ejector om in positieve druk bij $U_{ejector}/U_{ref} \geq 0,3$. Bij $c = 2$ m blijft de druk in de venturi-ejector ook bij hoge snelheidsverhoudingen negatief.



Figuur 2.3.9 – Cp-waarde venturi-ejector als functie van ($U_{ejector}/U_{ref}$)

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

In figuur 2.3.9 wordt voor $c = 2$ m bij $U_{ejector}/U_{ref} = (2,0/10,5) = 0,19$ een C_p -waarde in de keel van de pseudo-venturi afgelezen van $-0,46$. Het met formule (2.1.4) berekende drukverschil $(p-p_0) \approx -31 \text{ Pa}$. Een Ventecdak met $c = 1$ m geeft een C_p -waarde van $-0,25$ en een drukverschil van $\approx -17 \text{ Pa}$.

Bij een lage windsnelheid van bijvoorbeeld $U_{ref} = 5 \text{ m.s}^{-1}$ wordt bij een Ventecdak met $c = 2$ m nog steeds een drukverschil van -7 Pa gerealiseerd.

2.3.5 De venturi-ejector in perspectief

De venturi-ejector is het sluitstuk van het afzuigstelsel van het gebouw dat gevormd wordt door de afzuigvoorzieningen op de verdiepingen, het shuntkanaal en de zonneshoorsteen.

Het drukverlies van het afzuigstelsel bestaat uit extern drukverlies op de verdiepingen, wrijvingsverliezen en plaatselijke weerstanden in shuntkanaal en zonneshoorsteen en drukverlies van de FiWiHex installatie voor warmteterugwinning –zie hoofdstuk 4. Deze drukverliezen moeten worden gecompenseerd door de thermische trek van de zonneshoorsteen en de aerodynamische trek

van de venturi-ejector. Als zon en wind tezamen te weinig trek leveren om de vereiste ventilatiecapaciteit te realiseren wordt de hulpventilator aan de top van de zonneshoorsteen ingeschakeld. De karakteristiek van het afzuigstelsel is dus geen constante, maar wisselt voortdurend.

Het door de venturi-ejector geleverde drukverschil moet dan ook worden beoordeeld in samenhang met het door de zonneshoorsteen geleverde positieve drukverschil. Binnen het *Earth, Wind & Fire* concept hebben zon en wind een complementaire werking.

2.3.6 Ventecdak en Architectuur

Het Ventecdak is een prominent architecturaal element, dat vooral bij lagere gebouwen erg in het oog springt. Bij de ontwikkeling van de *case study*, -zie hoofdstuk 6- is gebleken dat de dakvorm volgens figuur 2.3.1 qua architectuur te dominant is voor een laag gebouw van 4 verdiepingen. De architect heeft voor het ontwerp een grotere vrijheid nodig dan de tot dusver onderzochte dakvorm hem geeft. Verkleining van het bovendak ten opzichte van het onderdak zou een oplossing voor dit probleem kunnen bieden.

Uitgangspunt voor het ontwerp van het Ventecdak is idealiter het realiseren van een goede synthese van technologie (effectiviteit en prestaties) en architectuur. Om de prestaties van het Ventecdak met gereduceerd bovendak te analyseren zijn daarom aanvullende CFD simulaties uitgevoerd –zie paragraaf 2.3.7.

2.3.7 CFD simulaties met gereduceerd bovendak

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

Er werd daarom besloten de simulaties te herhalen met behulp van tijdsafhankelijke Large Eddy Simulaties (LES). Ter vergelijking met de RANS simulaties ad paragraaf 2.3.4 zijn eerst LES simulaties uitgevoerd voor een volledig bovendak conform figuur 2.3.1 en daarna voor een half bovendak.

Tijdsafhankelijke LES simulaties zijn zeer tijdrovend - minstens 1 à 2 weken per simulatie op de snelste servers van de TU/e- waardoor geen volledig simulatieprogramma kon worden afgewerkt.

Tabel 2.3.4 toont de eerste LES resultaten voor een heel en een half bovendak en verschillende waarden van $(U_{ejector}/U_{ref})$. De hoogte van het bovenkanaal bij deze simulaties is 2,0 m.

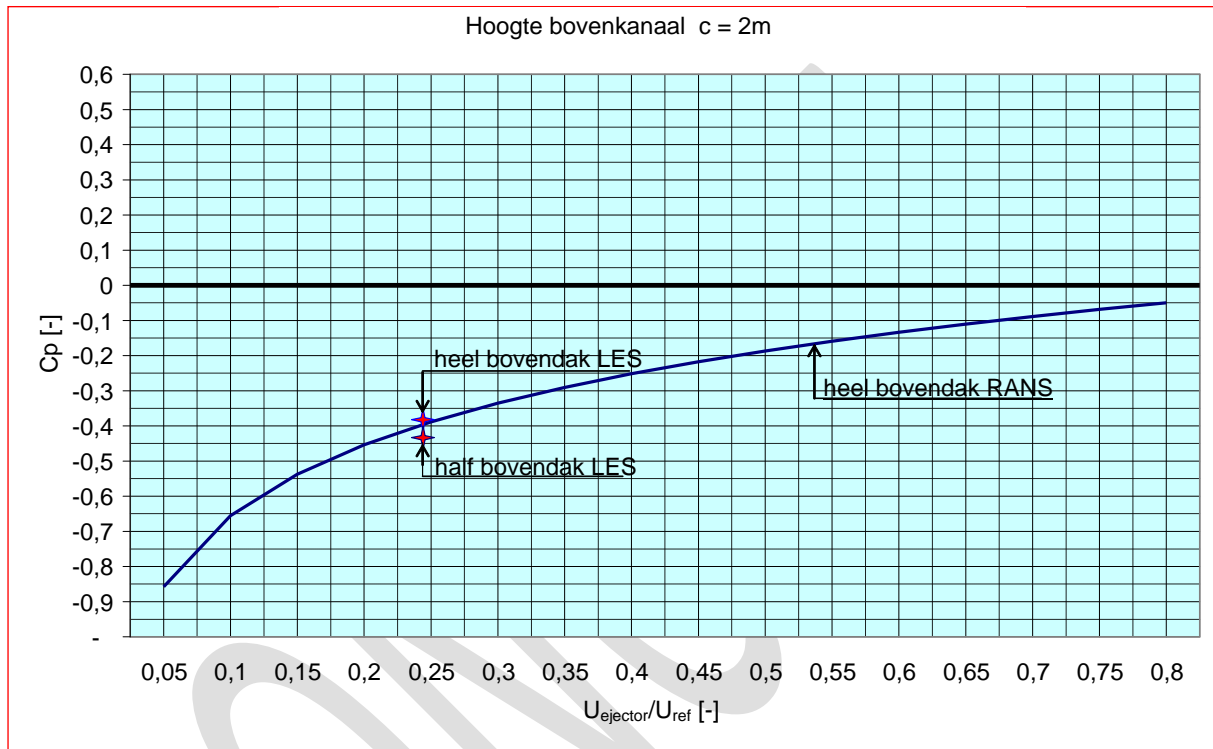
De tabel laat zien dat met het halve bovendak de C_p -waarden iets lager of gelijk zijn dan bij het hele bovendak. Het Ventecdak met gereduceerd bovendak presteert dus iets beter dan met een volledig bovendak.

Dit wordt ook duidelijk gemaakt in figuur 2.3.10, dezelfde grafiek als figuur 2.3.9, die is gebaseerd op RANS simulaties met een luchtsnelheid in de venturi-ejector van $2,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Voor een geheel bovendak zijn de resultaten voor RANS en LES vrijwel gelijk, maar een half bovendak laat LES een iets lagere C_p -waarde zien.

Case 1 -LES	Entire Roof	
Velocity imposed at chanel inlet	C_p	$U_{channel}/U_{ref}$
[$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]	[-]	[-]
0,5	-0,74	0,060
1,0	-0,58	0,119
2,0	-0,39	0,238
4,0		0,476
8,0		0,952

Case 3 -LES	Half Roof	
Velocity imposed at chanel inlet	Cp	$U_{channel}/U_{ref}$
[m.s ⁻¹]	[-]	[-]
0,5	-0,95	0,060
1,0	-0,58	0,119
2,0	-0,42	0,238
4,0		0,476
8,0		0,952

Tabel 2.3.4 – Cp waarden venturi-ejector heel en half bovendak met



Figuur 2.3.10 – Cp-waarde venturi-ejector RANS en LES

2.3.8 Vervolgonderzoek

Voor een verdere optimalisering van de prestaties van het Ventecdak, mede in relatie tot de architectonische kwaliteit is aanvullend onderzoek nodig. Dit onderzoek uit te voeren met behulp van CFD simulaties en de validatie hiervan met modelmetingen in de windtunnel. In principe komen hierbij de volgende parameters aan de orde:

- De omvang van het bovendak in relatie tot het onderdak – 5 varianten;
- De grootte van de overstekken ten behoeve van de overdrukkamer – 4 varianten;
- De kromtestraal van het onderdak - 5 varianten;
- De kromtestraal van het bovendak - 4 varianten;
- De hoogte van het bovenkanaal c - 2 hoogtes in relatie tot
- De luchtsnelheid in de venturi-ejector – 4 varianten;
- De invloed op de winddrukcoëfficiënten van de door kleppen en windturbines in de overdrukkamer uitstromende lucht – 3 varianten.

Op basis van deze simulaties kunnen prestatie-eisen worden geformuleerd voor het optimaliseren van de winddrukcoëfficiënten aan wind- en lijzijde.

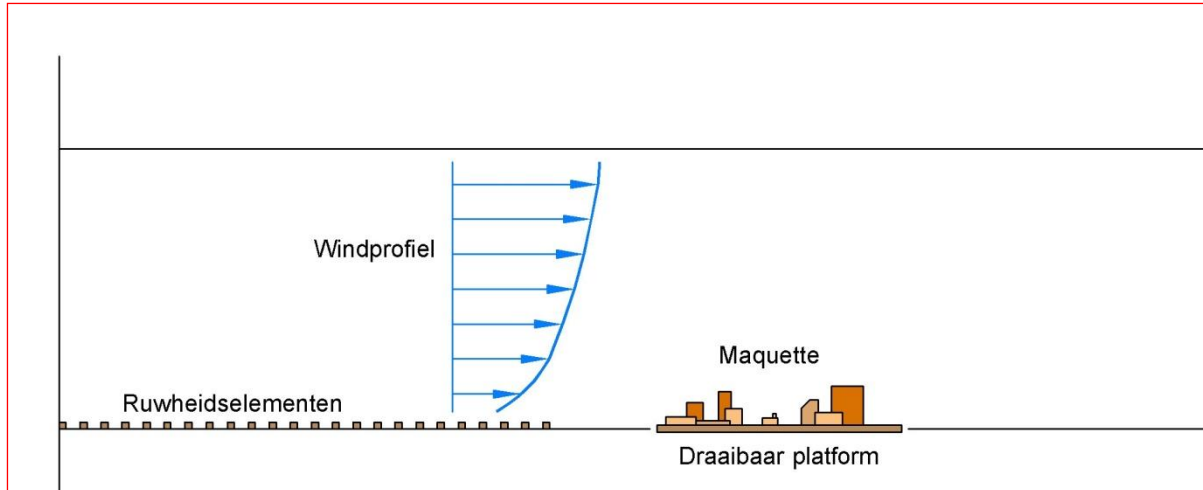
Deze prestatie-eisen kunnen architecturaal worden vertaald in modellen voor gebouwen met verschillende hoogten. Het Ventecdak zal hierdoor de nagestreefde synthese van technologie en architectuur kunnen opleveren –zie paragraaf 2.3.6.

2.4 Validatie door metingen in de windtunnel

2.4.1 Inleiding

De CFD simulaties ad paragraaf 2.3.3 zijn gevalideerd in de windtunnel van Peutz bv. Dit is een zgn. gesloten grenslaagtunnel, speciaal ontworpen voor het simuleren van een atmosferische grenslaag. In de grenslaag kunnen snelheden tot ca 30 m.s^{-1} worden bereikt (Peutz bv 2012).

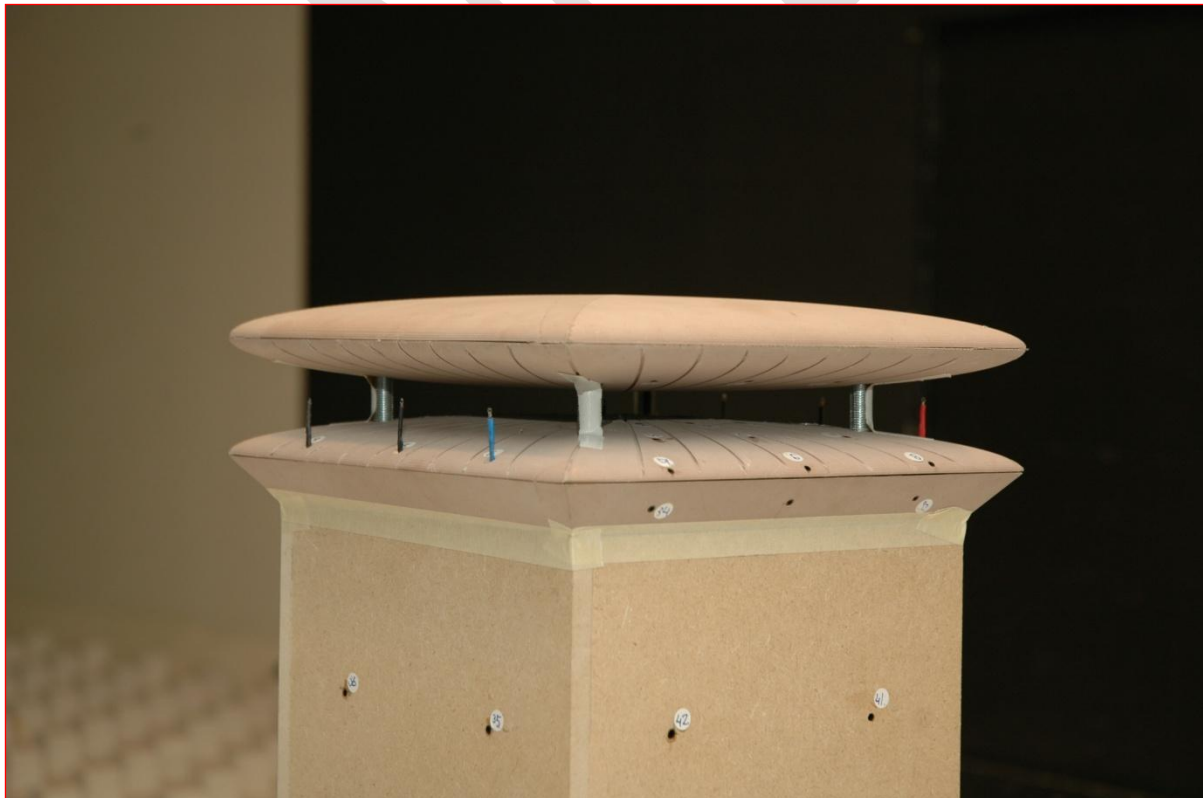
De referentiewindsnelheid U_{ref} op dakrandhoogte is ingesteld op $10,5 \text{ m.s}^{-1}$. Voor de CFD simulaties zijn de gemeten windsnelheden op basis van formule (2.1.1) vertaald in een logaritmisch windsnelheidsprofiel met $U^* = 0,956 \text{ m.s}^{-1}$ en $z_0 = 0,5 \text{ m}$.



Figuur 2.4.1 – Opwekken windprofiel in de windtunnel

2.4.2 Het schaalmodel

Het model is op schaal 1:100 uitgevoerd conform het CFD model ad paragraaf 2.3.1 en figuur 2.3.1.



Figuur 2.4.2 – Detail van het schaalmodel met drukopnemers en NTC thermistors in de windtunnel

De lokale drukken zijn op 58 posities in het model gemeten. De gebruikte opnemers registreren met een frequentie van 1000 Hz gedurende 180 seconden de instantane drukken op de meetpunten. Omdat voor ventilatie vooral de uurgemiddelde drukken van belang zijn, wordt van deze tijdseries het gemiddelde berekend. Deze drukken worden genormeerd met de ongestoorde stuwdruk op de dakrandhoogte zonder Ventecdak, 50 m op volle schaal, bepaald uit het gemeten snelheidsprofiel aan de bovenstroomse rand van de maquetteschijf.

De snelheden in het model zijn bepaald met behulp van windrichtingonafhankelijke NTC¹⁹ thermistors. Gezien de traagheid van deze elementen wordt alleen de uurgemiddelde windsnelheid bepaald. Evenals bij de drukken worden deze snelheden genormeerd met de ongestoorde snelheid op dakrandhoogte.

2.4.3 Meetresultaten

Een volledig overzicht van de meetresultaten is opgenomen in het rapport van Peutz bv “Windtunnelmetingen Ventecdak, rapportnummer B 1099-1-RA-001 d.d. 1 april 2011 (Aanen, L. 2011). Voor een vergelijking van de verschillende metingen met de CFD simulaties zie paragraaf 2.3.3. Enkele metingen worden hierna weergegeven.

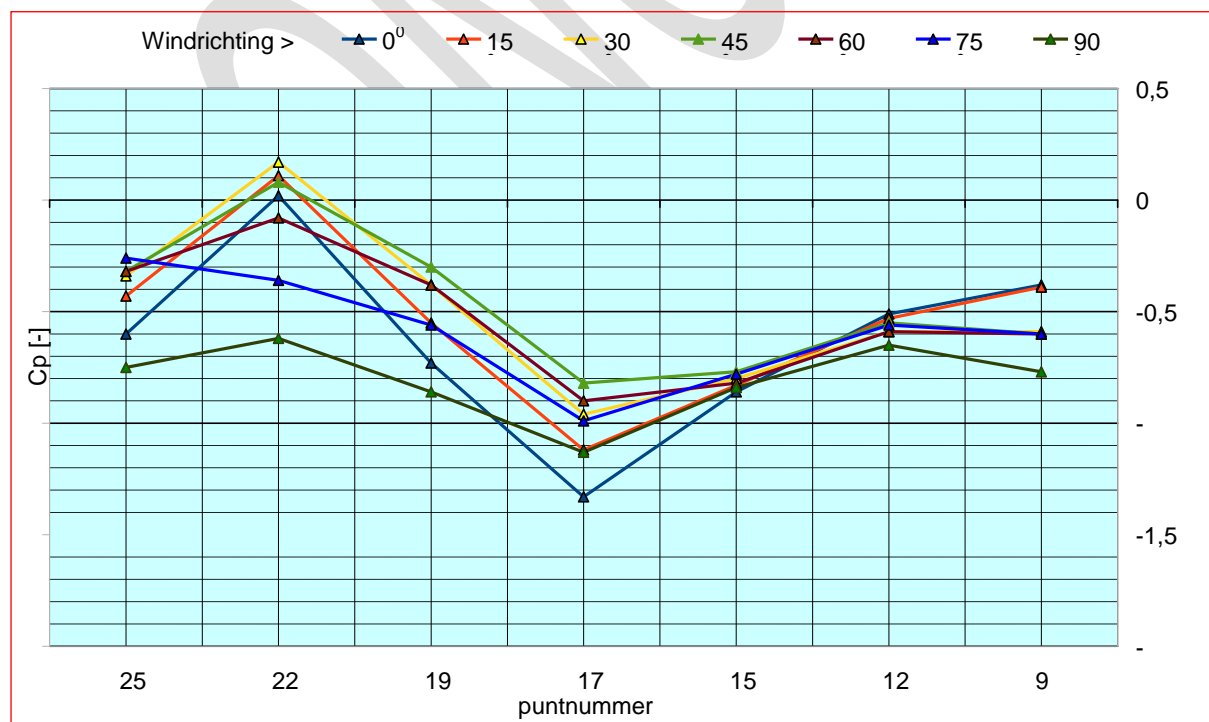
Overdruk:

De overdruk ter plaatse van de luchtinlaat is nauwelijks afhankelijk van de uitvoering van het Ventecdak en komt bij alle metingen voor aanstroming loodrecht op de gevel overeen met een C_p -waarde van $\approx 0,8$. Deze waarde wordt ook teruggevonden in figuur 2.1.6, die een generiek beeld geeft van de optredende winddrukcoëfficiënten op gebouwen. Bij de basale modellering ad paragraaf 2.2.2 is eveneens van deze waarde uitgegaan.

Invloed verticale vinnen:

De varianten met verticale vinnen in het bovenkanaal zijn gemeten om de belangrijke conclusie van de CFD simulaties ad paragraaf 2.3.3 te valideren. De contractiecoëfficiënt bij deze metingen $b/c = 5:1$ hetgeen bij een hoogte $c = 1,0$ m van het bovenkanaal inhoudt dat $b = 5$ m. Dit is dus de hoogte waarin de wind “gevangen” wordt.

Voor de meetresultaten zie figuur 2.3.7. Er is een uitstekende overeenstemming tussen simulaties en metingen. De meetresultaten voor de variant zonder vinnen zijn weergegeven in figuur 2.4.3



Figuur 2.4.3 – Winddrukcoëfficiënten in de pseudo-venturi – $c = 1,0$ m - contractieverhouding 5:1

¹⁹ Negative Temperature Coefficient

De gemeten drukcoëfficiënten zijn op 7 meetpunten weergegeven op een lijn door het midden van het dak voor 7 verschillende windrichtingen. Hierbij komt 0^0 overeen met wind parallel aan de doorsnede en 90^0 met wind loodrecht op de doorsnede. De windrichting loopt van meetpunt 25 aan de loefzijde naar meetpunt 9 aan de lijzijde.

Na een initiële toename van de druk vindt door versnelling van de stroming een drukverlaging plaats met een drukminimum ter plaatse van de keel van de pseudo-venturi, meetpunt 17. Hierbij worden, afhankelijk van de windrichting, C_p waarden tot $\approx -1,33$ gerealiseerd, overeenkomend met de in figuur 2.3.7a vermelde waarde.

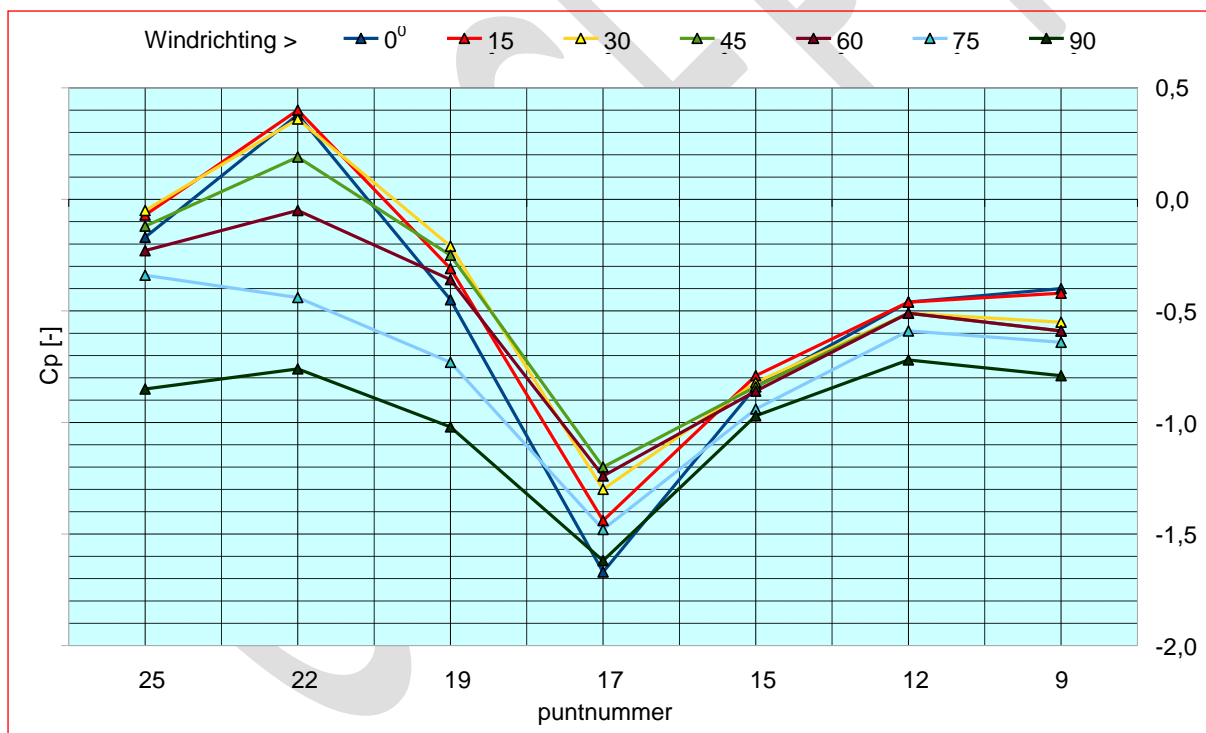
Hoogte en contractieverhouding van het bovenkanaal:

De vorm van het model is bij deze metingen niet veranderd. Door vergroting van de hoogte van het bovenkanaal wordt de hoogte waarin de wind gevangen wordt vergroot en vice versa.

- $c = 0,5 \text{ m}$ $b = 4,5 \text{ m}$ $b/c = 9:1$
- $c = 1,0 \text{ m}$ $b = 5,0 \text{ m}$ $b/c = 5:1$
- $c = 2,0 \text{ m}$ $b = 6,0 \text{ m}$ $b/c = 3:1$

Deze varianten zijn gemeten om de betreffende CFD simulaties ad paragraaf 2.3.3 te valideren. Voor de meetresultaten zie figuur 2.3.8. Er is ook hier een uitstekende overeenstemming tussen simulaties en metingen.

Figuur 2.4.4 is het equivalent van figuur 2.4.3 echter voor een contractieverhouding van 9:1. Er worden nu, weer afhankelijk van de windrichting, in de keel van de pseudo-venturi C_p -waarden gerealiseerd tot $\approx -1,65$ overeenkomend met de in figuur 2.3.7a vermelde waarde.



Figuur 2.4.4 – Winddrukcoëfficiënten in de pseudo-venturi – $c = 0,5\text{m}$ - contractieverhouding 9:1

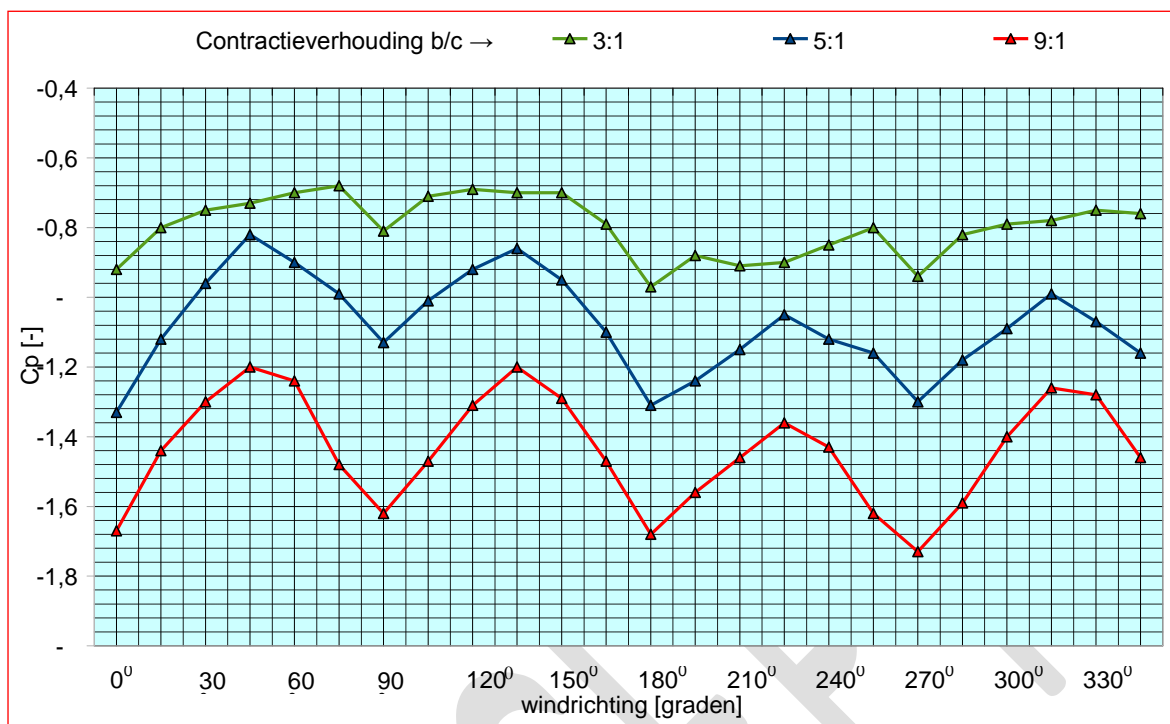
Vergelijking contractieverhoudingen 1:9 – 1:5 – 1:3

Figuur 2.4.5 geeft een overzicht van de te realiseren winddrukcoëfficiënten bij de hiervoor onderzochte contractieverhoudingen. Hieraan is de verhouding 3:1 toegevoegd, die duidelijk slechter presteert dan 9:1 en 5:1.

Hiermee is bevestigd dat bij toenemende contractieverhoudingen, en dus afnemende hoogte van het bovenkanaal, de C_p waarden lager worden oplevert, hetgeen met de CFD simulaties ook werd voorspeld –zie figuur 2.3.8.

Hierbij wordt aangetekend dat een hoogte van het bovenkanaal $c < 1\text{m}$ en $b/c = 9:1$ om praktische overwegingen nauwelijks in aanmerking komt. Een hoogte van $c = 2\text{m}$ bij $b/c = 3:1$ presteert

weliswaar minder dan een hoogte van $c = 1\text{ m}$ bij $b/c = 5:1$, maar dit is alleen het geval bij gesloten venturi-ejector – zie paragraaf 2.4.4



Figuur 2.4.5 – Cp waarden als functie van contractieverhouding en windrichting

2.4.4 Metingen met actieve venturi-ejector

De voorgaande metingen zijn uitgevoerd om de CFD simulaties ad paragraaf 2.3.3 te valideren. De venturi-ejector is hierbij gesloten, dus niet actief.

Om de CFD simulaties met actieve venturi-ejector ad paragraaf 2.3.4 te valideren zijn metingen uitgevoerd. Om het effect van de stroming windrichtingonafhankelijk te maken is gekozen voor een ronde opening met een diameter van 1,4m op volle schaal, doorsnede $2,5\text{ m}^2$.

De metingen zijn bedoeld om de invloed van de secundaire luchtstroming op de primaire windstroming vast te stellen. Bij een constante lichtsnelheid in de windtunnel van 10 m.s^{-1} is daarom de lichtsnelheid in de venturi-ejector gevarieerd van 2, 4 en 8 m.s^{-1} met bijbehorende verhoudingen $U_{\text{ejector}}/U_{\text{ref}}$ van respectievelijk 0,2 – 0,4 en 0,8.

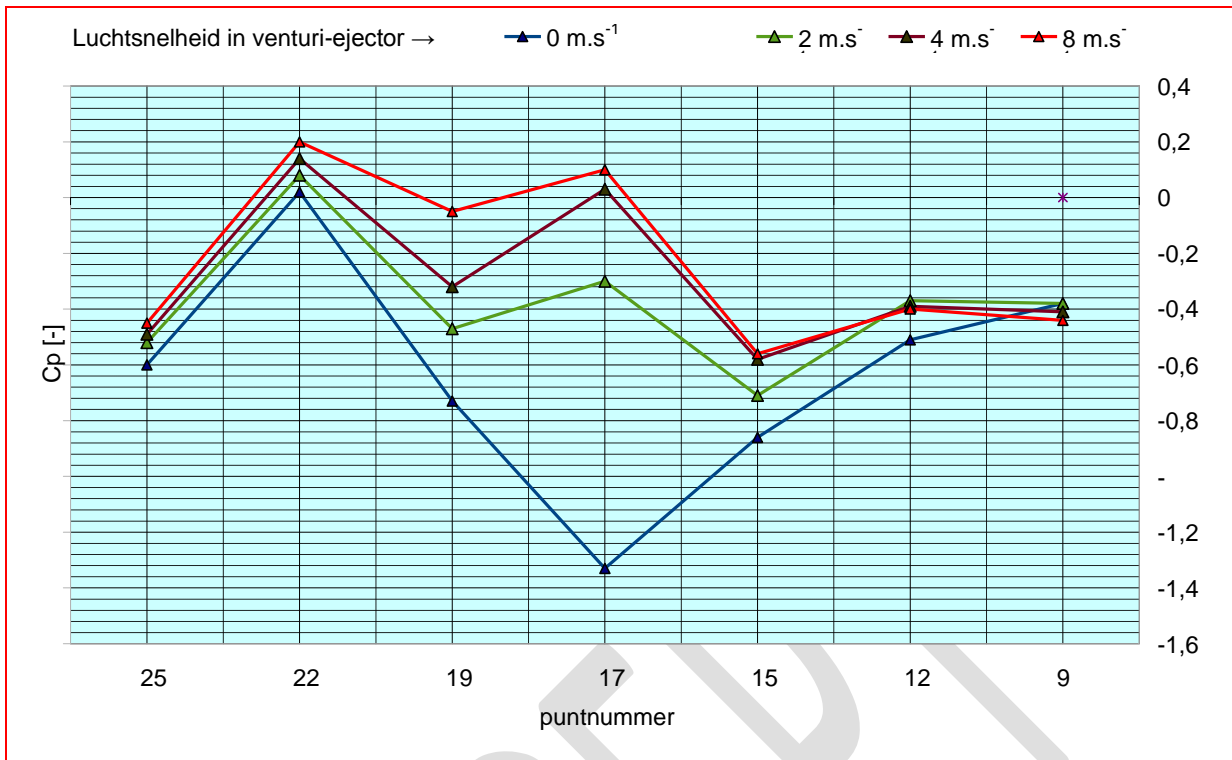
De stromingen zijn in het model tot stand gebracht met behulp van een pompje. Het meetpunt dat bij de voorgaande metingen in het midden van het dak lag, is verplaatst naar de zijwand van het afzuigkanaal en geeft dus de druk in het afzuigkanaal weer.

Voor een gebouw van 50 m hoog is op dakrandhoogte de jaargemiddelde windsnelheid in Nederland $\approx 5\text{ m.s}^{-1}$. Metingen zijn uitgevoerd voor deze jaargemiddelde windsnelheid, een halvering en een verdubbeling hiervan, die dus als volgt kunnen worden geïnterpreteerd:

- Lichtsnelheid in venturi-ejector 2 m.s^{-1} - Representatief voor hoge windsnelheid
- Lichtsnelheid in venturi-ejector 4 m.s^{-1} - Representatief voor jaargemiddelde windsnelheid
- Lichtsnelheid in venturi-ejector 8 m.s^{-1} - Representatief voor lage windsnelheid

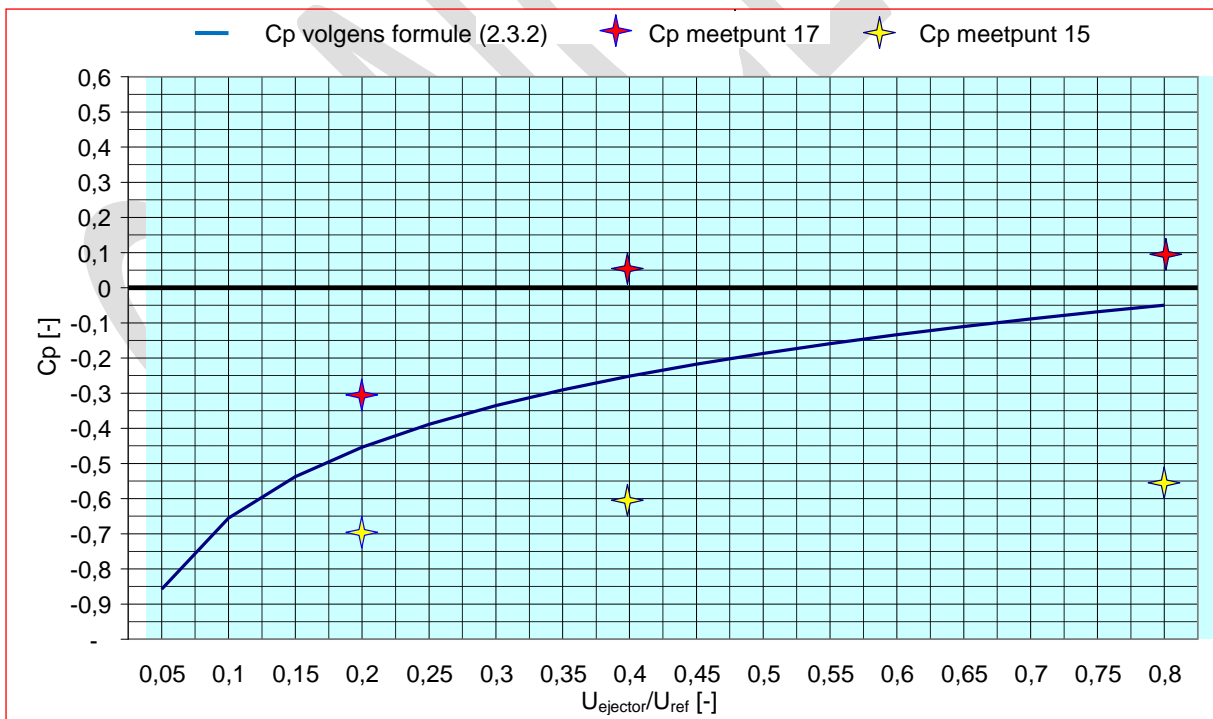
De meetresultaten zijn weergegeven in figuur 2.4.6. Ter vergelijking is de situatie met gesloten venturi-ejector volgens figuur 2.4.3 toegevoegd.

De figuur laat zien dat bij alle metingen de minimum Cp-waarden benedenstrooms de keel van de pseudo-venturi liggen bij meetpunt 15. Blijkbaar is de snelheid hier hoger dan in de keel, hetgeen mogelijk zou kunnen worden verklaard door het additionele secundaire luchtdebiet dat zich vanuit de venturi-ejector bij de hoofdstroom heeft gevoegd. De lagere benedenstroomse Cp-waarde heeft wellicht wel een positieve invloed op de prestatie van de venturi-ejector. Dit verschijnsel, veroorzaakt door de discontinuïteit in de pseudo-venturi is overigens lastig te duiden.



Figuur 2.4.6 – Gemeten Cp-waarden als functie van windsnelheid bij actieve en inactieve venturi-ejector

Ter vergelijking met de gemeten waarden zijn de Cp-waarden ook berekend met behulp van formule (2.3.2) – zie tabel 2.4.1 en weergegeven in figuur 2.4.7, die overeenkomt met figuur 2.3.9 voor een hoogte van het bovenkanaal van 2m.



Figuur 2.4.7 – Gemeten versus berekende Cp-waarden van de actieve venturi-ejector

Figuur 2.4.7 laat zien dat de met formule (2.3.2) berekende Cp-waarden globaal genomen tussen de op meetpunten 17 en 15 gemeten waarden liggen, althans voor hoge tot gemiddelde windsnelheden. Hoewel enigszins speculatief is daarom voor het rekenmodel van de aerodynamische prestaties ad paragraaf 2.5 formule (2.3.2) gebruikt.

$U_{ref} - m.s^{-1}$	10		
Windsnelheid	hoog	gemiddeld	laag
$U_{ejector} - m.s^{-1}$	2	4	8
$U_{ejector}/U_{ref}$	0,2	0,4	0,8
Cp - punt 17	-0,3	+0,05	+0,1
Cp - punt 15	-0,7	-0,6	-0,55
Cp- berekend	-0,45	-0,25	-0,05

Tabel 2.4.1 – Gemeten en berekende Cp-waarden

2.4.5 Het Ventecdak in de stedenbouwkundige context

De voorgaande analyses hebben betrekking op situaties waarbij de wind op dakniveau niet wordt gehinderd door obstakels rondom een gebouw. In werkelijkheid staat een gebouw zelden solitair en zullen omliggende gebouwen, afhankelijk van de onderlinge tussenafstanden en hoogteverschillen, de windsnelheid en de windrichting beïnvloeden. De effectiviteit van het Ventecdak kan hierdoor worden beïnvloed, hetgeen in de windtunnel voor enkele situaties is vastgesteld.

Voor een globale analyse van het Ventecdak in de stedenbouwkundige omgeving zie hoofdstuk 9.

2.5 Aerodynamische prestaties

2.5.1 Inleiding

De aerodynamische prestaties van het Ventecdak zijn afhankelijk van de Cp-waarden en van de windsnelheid op dakhoogte, die wordt bepaald door de potentiële windsnelheid U_{10} , de ruwheidsklasse van het terrein en de hoogte van het gebouw, tot uitdrukking komend in het zgn. windsnelheidsprofiel –zie paragraaf 2.1.2.

Op basis van de gevalideerde CFD simulaties ad paragraaf 2.3 zijn de prestaties van het Ventecdak nader onderzocht.

2.5.2 Windsnelheidsprofiel

Voor de berekening van plaatselijke windsnelheidsprofielen zie paragraaf 2.1.2 en 2.1.3, in het bijzonder formule (2.1.1)

De potentiële windsnelheid U_{10} wordt gemeten op 10 m hoogte in een open terrein met een verschuivingshoogte $d = 0$, een ruwheidslengte $z_0 = 0,03$ m –zie paragraaf 2.1.2. De wrijvingssnelheid U^* in een dergelijk terrein bij $d = 0$ en $K = 0,4$ wordt berekend volgens formule (2.5.1).

$$U^* = \frac{K \cdot U_{10}}{\ln\left(\frac{z-d}{z_0}\right)} = 0,069U_{10} \quad [m.s^{-1}] \quad (2.5.1)$$

De mesosnelheid U_m –zie paragraaf 2.1.3- wordt met behulp van deze als volgt worden berekend:

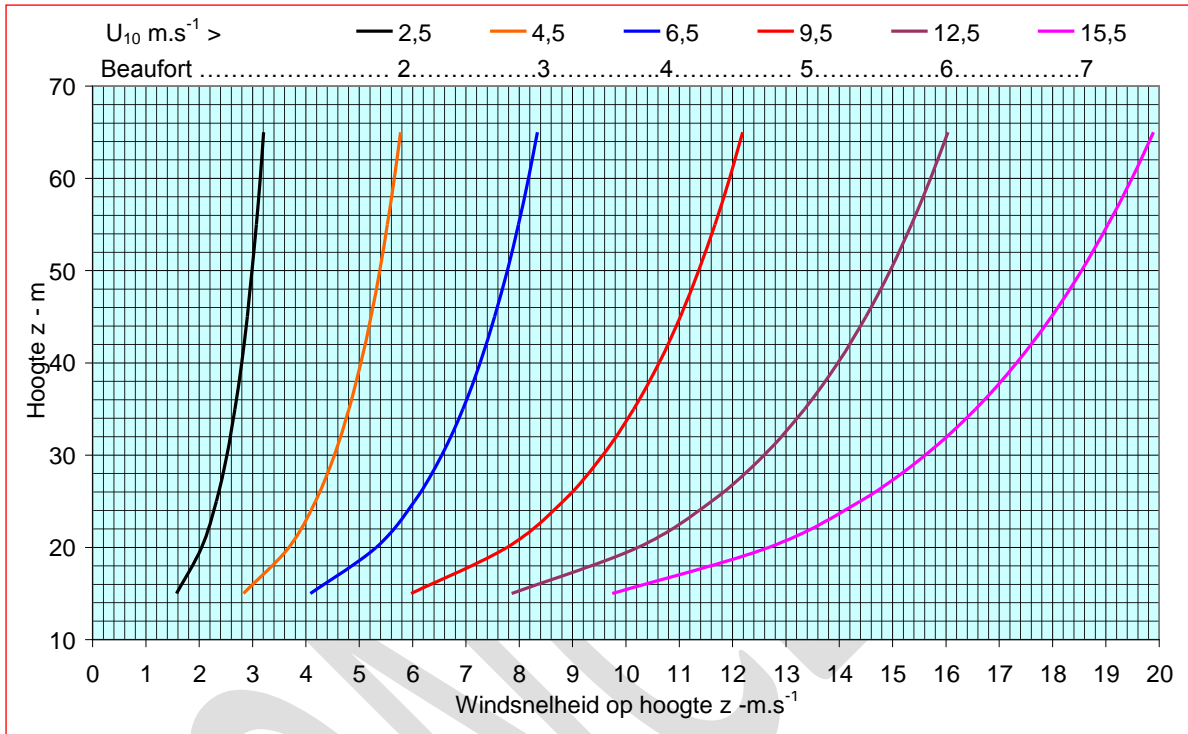
$$U_m = \frac{0,069 \cdot U_{10}}{0,4} \ln\left(\frac{60}{0,03}\right) = 1,31U_{10} \quad [m.s^{-1}] \quad (2.5.2)$$

Het CFD model is niet gesitueerd in een open, maar in een zeer ruw terrein volgens de Davenport classificatie met een ruwheidslengte $z_0 = 0,5$ m. De verschuivingshoogte in dit terrein kan worden gesteld op $d = 10$ m, waardoor de mesosnelheid U_m 10 m omhoog schuift naar $(60 + 10 =) 70$ m.

De windsnelheid U_z op willekeurige hoogten z en terreincondities kan op basis hiervan worden teruggerekend met de formule

$$U_z = U_m \left(\frac{\ln \frac{z-10}{z_0}}{\ln \frac{70-10}{z_0}} \right) \equiv 0,273 U_{10} \ln \left(\frac{z-10}{0,5} \right) \quad (2.5.3)$$

Figuur 2.5.1 brengt het windsnelheidsprofiel in beeld als functie van de hoogte, berekend volgens formule (2.5.3). Bij een potentiële windsnelheid van bijvoorbeeld $6,5 \text{ m.s}^{-1}$ (matige wind, 4 Bft) is de windsnelheid op 20 m hoogte $5,4 \text{ m.s}^{-1}$ en op 50 m hoogte $7,8 \text{ m.s}^{-1}$.



Figuur 2.5.1 – Windprofiel als functie van hoogte z en potentiële windsnelheid U_{10}

Met behulp van de NPR 6097:2006 kan op willekeurige locaties het windprofiel en de referentiewindsnelheid worden bepaald voor de prestatieberekeningen van het Ventecdak –zie paragraaf 2.1.3.

2.5.3 Drukken in het Ventecdak

De positieve en negatieve drukken in het Ventecdak kunnen worden berekend op basis van de windsnelheid op dakhoogte, U_{ref} , en de C_p -waarden van de betreffende dakconfiguraties, berekend met behulp van de formules (2.3.1) en (2.3.2).

Windstatistieken gaan uit van de zgn. potentiële windsnelheid U_{10} –zie paragraaf 2.1.2. In de volgende analyses is U_{ref} , die bepalend is voor de C_p -waarde, volgens formule (2.5.3) teruggerekend naar U_{10} . Dit houdt dus tevens in dat is uitgegaan van de in paragraaf 2.5.2 genoemde terreincondities.

Overdruk

De druk in de overdrukkamer wordt berekend met behulp van formule (2.1.4) en is dus evenredig met C_p en $(U_{ref})^2$.

Het drukverlies van het gaasrooster, de gelijkrichter en de luchtkleppen –zie figuur 2.2.2- is bij een luchtsnelheid $< 2,5 \text{ m.s}^{-1}$ en de dominante windsnelheden $< 5\%$ van het beschikbare drukverschil en wordt in het navolgende verwaarloosd –zie ook paragraaf 5.3.5.

Voor de overdruk ter plaatse van de luchtinlaat is uitgegaan van de in de windtunnel gemeten C_p -waarde van $\approx 0,8$ –zie paragraaf 2.4.3.

De windsnelheid op dakhoogte U_{ref} wordt berekend volgens paragraaf 2.5.2.

Onderdruk

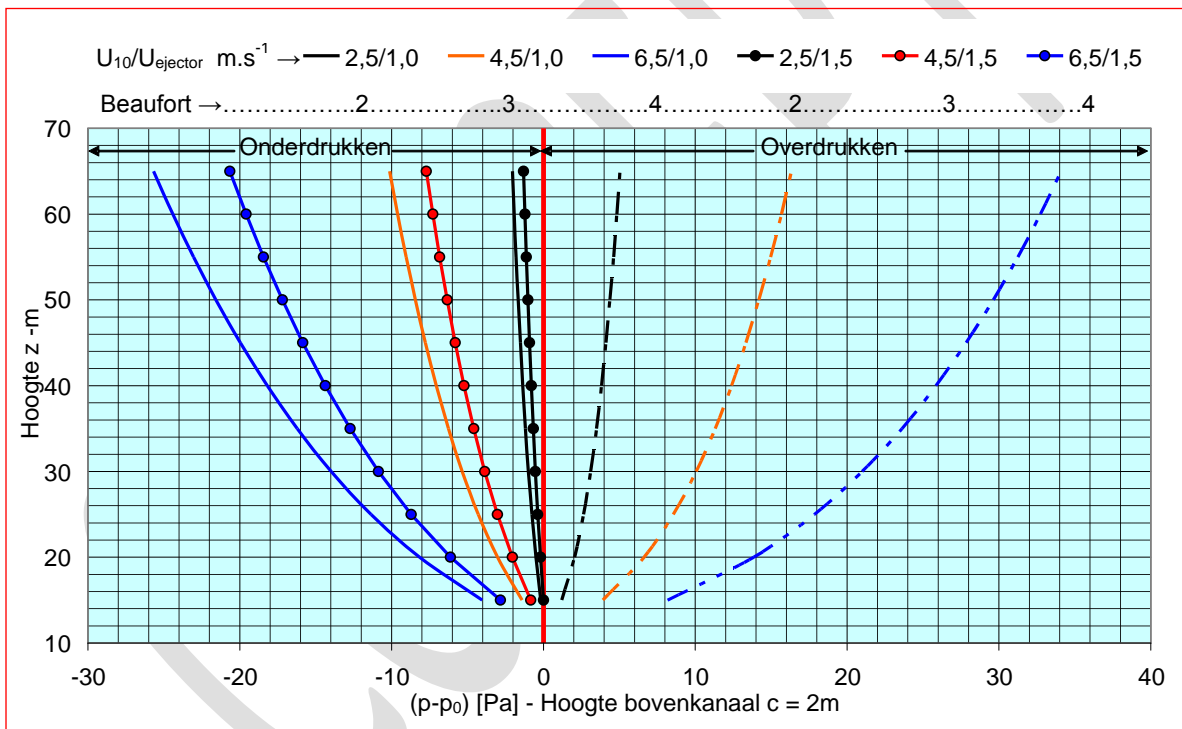
De onderdruk in het Ventecdak wordt eveneens berekend met behulp van formule (2.1.4) en is evenredig met C_p en $(U_{ref})^2$.

De C_p -waarde wordt berekend met behulp van één van de formules (2.3.1) en (2.3.2) en is dus afhankelijk van de verhouding $(U_{ejector}/U_{ref})$ en van de hoogte van het bovenkanaal. Een grotere hoogte (c) en een kleinere snelheid in de venturi-ejector ($U_{ejector}$) zijn gunstig voor de aerodynamische prestaties –zie figuur 2.3.9.

In de navolgende analyses van de aerodynamische prestaties zijn varianten berekend met hoogten van het bovenkanaal van $c = 2\text{m}$ bij $U_{ejector} = 1$ en $1,5 \text{ m.s}^{-1}$ (figuur 2.5.2) en $c = 1\text{m}$ bij $U_{ejector} = 1,5$ en $2,0 \text{ m.s}^{-1}$ (figuur 2.5.3)

De snelheid in de venturi-ejector kan in principe door de klimaatontwerper vrij worden gekozen. De hoogte van het bovenkanaal beïnvloedt de architectonische expressie. Bij lagere gebouwen met lagere windsnelheden op dakhoogte is het gewenst hiervoor de grootst mogelijke waarde te kiezen, hetgeen op gespannen voet kan staan met de architectuur.

Figuur 2.5.2 brengt de berekende drukken in beeld voor een bovenkanaal van $c = 2 \text{ m}$ en een luchtsnelheid in de venturi-ejector $U_{ejector} = 1,0$ en $1,5 \text{ m.s}^{-1}$ voor potentiële windsnelheden van respectievelijk $U_{10} = 2,5 - 4,5$ en $6,5 \text{ m.s}^{-1}$, globaal overeenkomend met windkracht 2, 3 en 4 Beaufort.



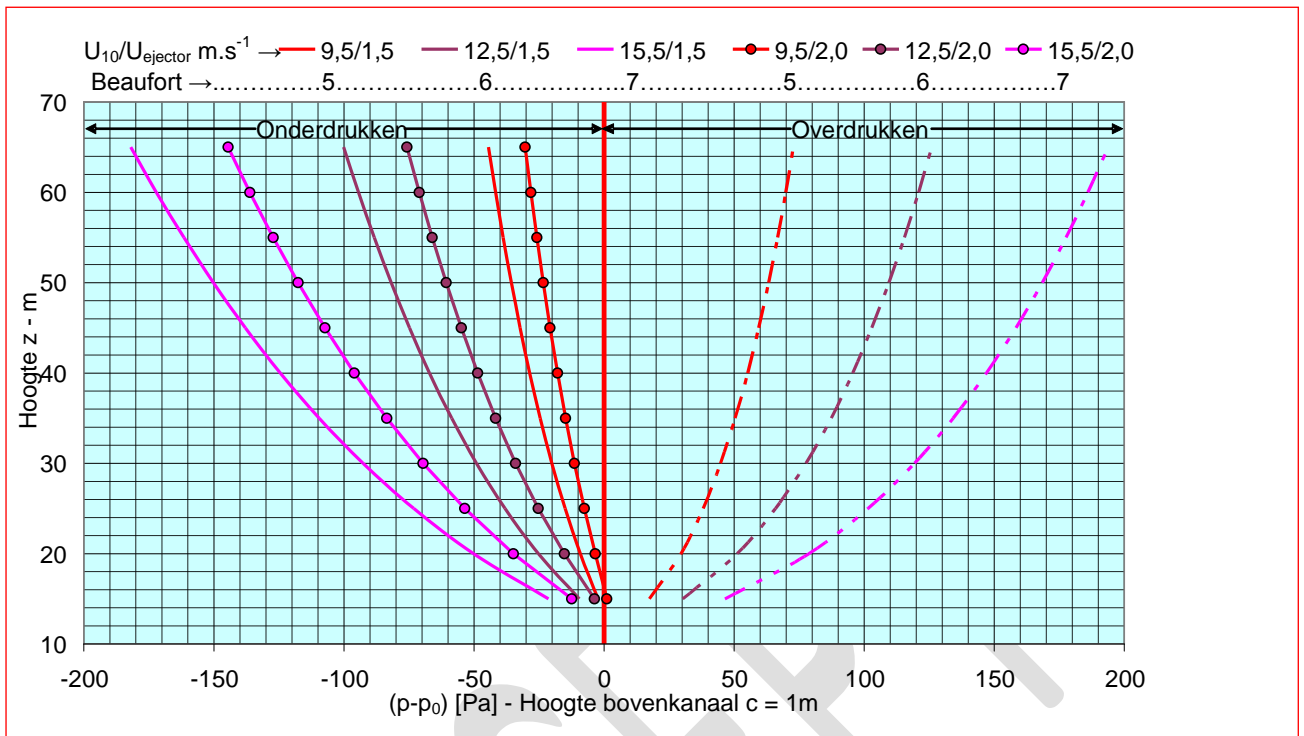
Figuur 2.5.2 – Drukken in het Ventecdak als functie van de hoogte, U_{10} en $U_{ejector}$

Tabel 2.5.1 geeft een voorbeeld van de uitlezing van figuur 2.5.2 voor een hoogte van 30m.

Windsnelheid		Drukverschil $(p-p_0)$ op hoogte van 30 m in Pa		
$U_{10} - \text{m.s}^{-1}$	Beaufort	overdrukrimte	onderdruk $U_{ej}=1,0 \text{ m.s}^{-1}$	onderdruk $U_{ej}=1,5 \text{ m.s}^{-1}$
2,5	2	+3,1	-1,0	-0,15
4,5	3	+10	-5,4	-3,9
6,5	4	+21	-14	-10,9

Tabel 2.5.1 – Voorbeeld toepassing figuur 2.5.2

Figuur 2.5.3 brengt de berekende drukken in beeld voor een bovenkanaal van $c = 1 \text{ m}$ en een luchtsnelheid in de venturi-ejector $U_{ejector} = 1,5$ en $2,0 \text{ m.s}^{-1}$ voor potentiële windsnelheden van respectievelijk $U_{10} = 9,5 - 12,5$ en $15,5 \text{ m.s}^{-1}$, globaal overeenkomend met windkracht 5, 6 en 7 Beaufort.



Figuur 2.5.3 – Drukken in het Ventecdak als functie van de hoogte, U_{10} en $U_{ejector}$

Tabel 2.5.2 geeft een voorbeeld van de uitlezing van figuur 2.5.3 voor een hoogte van 30m. Merk op dat de druk in de venturi-ejector op een hoogte van 15 m licht positief wordt bij een windsnelheid van 9,5 m.s⁻¹ en 2,0 m.s⁻¹ in de ejector.

Windsnelheid		Drukverschil (P-P ₀) op hoogte van 30 m -Pa		
U_{10} - m.s ⁻¹	Beaufort	overdrukrimte	onderdruk $U_{ej}=1,5$ m.s ⁻¹	onderdruk $U_{ej}=2,0$ m.s ⁻¹
9,5	5	+44,9	-20,0	-11,4
12,5	6	+77,7	-49,0	-34,0
15,5	7	+119,4	-92,6	-69,4

Tabel 2.5.2 – Voorbeeld toepassing figuur 2.5.3

2.5.4 Minimum ontwerpdrukverschil

Figuur 2.5.2 laat zien dat bij $U_{10}/U_{ejector} = 2,5/1,0$ slechts zeer geringe drukverschillen te realiseren zijn. Het ligt daarom voor de hand de ondergrens voor het dakontwerp te leggen bij $U_{10} \approx 3,0$ m.s⁻¹, een windsnelheid die statistisch minder dan 20% van de tijd wordt onderschreden

(<http://www.knmi.nl/klimatologie>). Voor de combinatie $U_{10}/U_{ejector} = 3,5/1,0$ zijn dan redelijke drukverschillen te realiseren, zie tabel 2.5.3. Ook kan worden overwogen de minimum gebouwhoogte voor toepassing van het Ventecdak hoger te leggen dan 15 m.

hoogte z -m	15	20	25	30	35	40	45	50
U_{10} -m/s	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
U_{ref} -m/s	2,20	2,86	3,25	3,52	3,74	3,91	4,06	4,19
U_{ej} -m/s	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
C_p	-0,21	-0,29	-0,33	-0,35	-0,37	-0,38	-0,39	-0,40
$(p-p_0)$	-0,64	-1,46	-2,12	-2,68	-3,16	-3,58	-3,97	-4,32
C_{p+}	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
$(p-p_0)$	2,37	4,01	5,18	6,09	6,85	7,50	8,07	8,59

Tabel 2.5.3 – Drukken in het Ventecdak bij een potentiële windsnelheid van 3,5 m.s⁻¹

2.5.5 Maximum ontwerpdrukverschil

Het Venteddak kan *stand alone* worden toegepast maar is in principe onderdeel van het *Earth, Wind & Fire* concept.

De druk in de overdrukruimte plus een positief drukverschil in de Klimaatcascade dient ter compensatie van het drukverlies in het luchttoevoersysteem.

Het drukverlies van het afzuigstelsel moet worden gecompenseerd door de thermische trek van de zonnescchoorsteen plus de aerodynamische trek van de Venturi-ejector.

De volumedebieten van toevoer en afzuig moeten onafhankelijk van wind en zon worden geregeld, een uitdagende ontwerpogave.

Als het Venteddak wordt ontworpen op $U_{10} = 3,5 \pm 0,5 \text{ m.s}^{-1}$ –zie paragraaf 2.5.4- moet bij $U_{10} > 4,0 \text{ m.s}^{-1}$ de druk in de overdrukruimte zo nodig worden afgeregeld. Bij $U_{10} < 3,0 \text{ m.s}^{-1}$ kan eventueel de hulpventilator (5) in de Klimaatcascade worden ingeschakeld –zie figuur 1.2. Een en ander is mede afhankelijk van de drukopbouw in de Klimaatcascade.

Voor het luchtafzuigstelsel geldt dat, mede afhankelijk van de thermische trek van de zonnescchoorsteen, bij $U_{10} > 4,0 \text{ m.s}^{-1}$ de aerodynamische trek van de Venturi-ejector te groot zou kunnen worden. Het surplus aan trek moet dan worden weggesmoord door luchtkleppen in het afzuigstelsel.

2.5.6 Drukregeling overdrukruimte

Voor de druk in de overdrukruimte kan in principe een smoorregeling of een verdelende regeling met bypass worden toegepast. In paragraaf 2.2.1 is uitgegaan van een bypassregeling met luchtkleppen waardoor lucht naar de lijzijde kan ontsnappen. Voor de zonnescchoorsteen is uitgegaan van een smoorregeling met luchtkleppen –zie hoofdstuk 4.

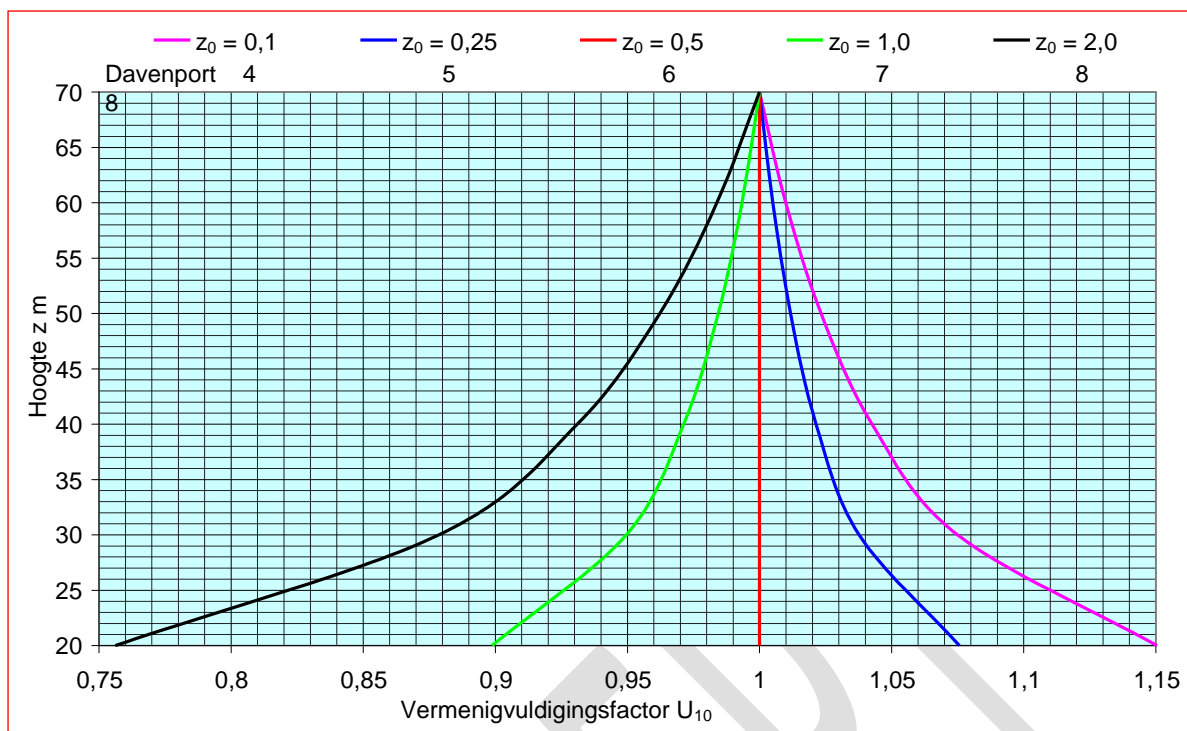
Een potentieel veel uitdagender concept is een bypassregeling die lucht uit de overdrukruimte laat ontwijken naar het bovenkanaal van het Venteddak. In deze bypass kan een windturbine voor energieopwekking worden aangebracht. In principe kan hiermee ook de druk in het bovenkanaal worden geregeld, en eventueel zelfs overdruk worden gerealiseerd.

Met dit concept worden drie vliegen in één klap geslagen: (1) elegante drukregeling van het Venteddak (2) energieopwekking en (3) debietregeling ten behoeve van de Zonnescchoorsteen. Voor een globale verkenning van deze optie zie paragraaf 5.3.8.

De drukverschilregeling zal ook rekening moeten houden met windvlagen en turbulenties –zie paragraaf 2.2.1. De dempende eigenschappen van de overdrukruimte en van het gebouw als geheel moeten hierbij worden onderzocht, evenals de relatie met de debietregeling op werkplekniveau. Een en ander is in het kader van het onderzoek niet uitgediept, maar vormt interessante stof voor vervolgonderzoek.

2.5.7 Invloed van de terreinruwheid

Volledigheidshalve wordt nog opgemerkt dat deze analyse betrekking heeft op gebouwen in een zeer ruw terrein, ruwheidsklasse 6 volgens de classificatie van Davenport en een verschuivingshoogte van 10 m. In een gebied met een grotere ruwheid zijn de windsnelheden t.o.v. de potentiële windsnelheid hoger en omgekeerd. Voor de vermenigvuldigingsfactoren voor de windsnelheid zie figuur 2.5.4, die is berekend met formule (2.5.3). Op 70 m hoogte heerst de mesosnelheid en wordt de vermenigvuldigingsfactor 1.



Figuur 2.5.4 – Vermenigvuldigingsfactor U_{10} als functie van ruwheidsklasse en hoogte

3 DE KLIMAATCASCADE

3.1 Airconditioning zonder ventilatoren

3.1.1 Inleiding

Het Ventecdak –hoofdstuk 2- benut de omgevingsenergie van de wind voor het realiseren van drukverschillen ten behoeve van de natuurlijke ventilatie en het opwekken van windenergie. De Zonneschoorsteen –hoofdstuk 4- benut zonnestraling voor het realiseren van thermische trek en het oogsten van zonne-energie.

De Klimaatcascade maakt gebruik van de zwaartekracht voor het koelen en verwarmen, drogen en bevochtigen van de ventilatielucht en is daarmee het hart van de *Natuurlijke Airconditioning* volgens het *Earth, Wind & Fire* concept.

Voor een korte functionele beschrijving van de Klimaatcascade en zijn plaats in het EW&F concept zie paragraaf 1.3. Het onderzoeksrapport “*Earth, Wind and Fire*” deel (III) *Onderzoek Klimaatcascade en Geo-Klimaatconcept* (Bronsema, B. 2012) geeft een uitgebreid verslag van deze zoektocht. Voor nadere toelichting en detaillering wordt in een voetnoot naar dit rapport verwezen.

3.1.2 Een oud principe

Het principe van luchtbehandeling door direct contact met gekoeld water is niet nieuw, en stond in feite aan het begin van de ontwikkeling van de airconditioning begin 20^e eeuw. Het belangrijkste toepassingsgebied lag destijds in de tabaks- en de katoenindustrie, waar vochtbeheersing belangrijker was dan temperatuurbeheersing. De luchtwater, uitgevonden door Willis H. Carrier, later ontwikkeld tot koelwater met dauwpuntsregeling, werd daardoor een centraal element ook voor comforttoepassingen (Bronsema, B. 2002; El-Morsi, M.S.2002).

Pas veel later, toen ook theaters, kantoorgebouwen en woningen werden voorzien van airconditioning, kreeg indirecte koeling met compacte koelbatterijen de overhand. Koelwassers waren voor deze toepassing te log en onpraktisch en bovendien was voor het grote publiek koeling de belangrijkste functie van airconditioning en niet de vochtregeling (Cooper, G. 1998; Will, H.M. 1999).

Hernieuwde belangstelling en onderzoek naar directe koeling met watersproeiers voor toepassing in luchtbehandelingskasten (El-Morsi, M.S. 2002) heeft voor zover bekend niet geleid tot acceptatie hiervan door de luchtbehandelingsindustrie.

3.1.3 Warmteoverdracht en klimaatregeling

Warmteoverdracht wordt weergegeven met de vergelijking:

$$\Phi = h \cdot A \cdot (\theta_m - \theta_\infty)$$

Waarin:	Φ	warmtestroom (koelprestatie)	[W]
	h	warmteoverdrachtscoëfficiënt	[W.m ² .K ⁻¹]
	A	scheidingsoppervlak	[m ²]
	θ_m	temperatuur koelmedium	[°C]
	θ_∞	luchttemperatuur	[°C]

De huidige airconditioningstechniek voor comfortdoeleinden maakt gebruik van koelbatterijen, waarbij als koelmedium gekoeld water of een koudemiddel wordt gebruikt. De kosten van een koelbatterij worden in hoge mate bepaald door de factor A , en om deze bij gelijke koelprestatie zo laag mogelijk te houden wordt in principe gestreefd naar zo hoog mogelijke waarden van h en $(\theta_m - \theta_\infty)$.

Voor de waarde van h is de luchtzijdige warmteoverdrachtscoëfficiënt een beperkende factor (ISSO 2000, Recknagel 2000). Om deze te vergroten wordt vaak de luchtsnelheid opgevoerd, hetgeen echter resulteert in een hoger drukverlies en een hoger energiegebruik van de ventilator.

De (absolute) waarde van $(\theta_m - \theta_\infty)$ kan bij een bepaalde luchttemperatuur θ_∞ worden vergroot door verlaging van de mediumtemperatuur θ_m in casu de temperatuur van het koel- of koudemiddel. Hierdoor wordt echter de koudefactor (COP) van de koudeopwekking verlaagd, en het energiegebruik verhoogd.

Beperking van het energiegebruik wordt mogelijk gemaakt door een hoge koelwatertemperatuur in combinatie met een groot koelend oppervlak van de warmtewisselaar. De grote investeringskosten hiervan en de beperkte inbouw mogelijkheden in traditionele luchtbehandelingskasten staan dit echter in de weg. Koelbatterijen worden dan ook vaak geoptimaliseerd op basis van kosten en niet op energiegebruik.

3.1.4 Klimaatcascade: Een oud principe in een nieuwe jas

De Klimaatcascade grijpt terug op het oude principe van de koelwasser, echter in de geheel andere setting van bouwkundig element, gericht op centrale luchtbehandeling in gebouwen. Belangrijke voordelen ten opzichte van traditionele koelbatterijen zijn:

- Het koelend oppervlak is groot door het zeer grote aantal waterdruppels in het sproeispectrum.
- Het koelend oppervlak kan worden vergroot of verkleind door variatie van het waterdebiet en het sproeispectrum.
- De warmteoverdrachtscoëfficiënt tussen de vallende druppels en de lucht is hoog.
- Het temperatuurverschil tussen water en lucht kan hierdoor minimaal zijn.
- Door de relatief hoge watertemperatuur wordt het energiegebruik voor koeling beperkt.
- De Klimaatcascade is niet alleen geschikt voor koeling maar voor luchtbehandeling in alle seizoenen, inclusief (voor)verwarming en luchtbevochtiging.
- De Klimaatcascade heeft geen luchtzijdige weerstand maar levert integendeel druk op voor de luchtverdeling in het gebouw.
- Filtering van de lucht is in principe niet nodig.

De Klimaatcascade kan hierdoor een belangrijke bijdrage leveren aan het energieneutrale gebouw van de toekomst. Omdat de vormgeving en de situering van een Klimaatcascade in een gebouw mede door de architect worden bepaald wordt hiermee ook voldaan aan de primaire doelstelling van het onderzoek zoals geformuleerd in paragraaf 1.1.1.

3.1.5 Binnenklimaatcondities ALPHA en BETA

3.1.5.1 Thermische behaaglijkheid versus productiviteit

Energiezuinigheid van gebouwen mag niet ten koste gaan van de binnenklimaatcondities, die in veel gebouwen, vooral in het koelseizoen, vaak onder druk staan. Een belangrijk uitgangspunt voor het ontwerp van een Klimaatcascade is daarom de gewenste binnenklimaatcondities. Deze worden bepaald door twee criteria: thermische behaaglijkheid en productiviteit op de werkplek

3.1.5.2 Thermische behaaglijkheid

Hierbij kan onderscheid worden gemaakt tussen de gebouw/klimaattypen ALPHA en BETA, zoals gedefinieerd in ISSO publicatie 74 (ISSO 2004).

Het type ALPHA komt min of meer overeen met natuurlijk geventileerde gebouwen en het type BETA met airconditioned gebouwen. Het onderscheid tussen deze twee typen kan worden gemaakt aan de hand van het stroomschema –zie figuur 3.1.5/1(Boegborn, J. et al. xxx). Hier binnen zijn nog 3 kwaliteitsklassen gedefinieerd. Het onderzoek Klimaatcascade gaat uit van klasse B met een acceptatiegraad van 80%, die wordt gekarakteriseerd als “*centrale classificatie voor een goed binnenklimaat voor algemene toepassing in standaard situaties*”. De hierbij behorende behaaglijkheidsgrenzen zijn aangegeven in figuur 3.1.5/2

3.1.5.3 Productiviteit

Wetenschappelijk en praktijkonderzoek heeft aangetoond dat de kwaliteit van het binnenmilieu invloed heeft op de productiviteit van mensen en van een organisatie (Olesen, B. 2010; Roelofsen, P. 2010; Settels, P. 2009). ISIAQ²⁰ publiceert via de *Indoor Air Quality Scientific Findings Resource Bank* regelmatig onderzoeksresultaten op het gebied van het binnenmilieu. Figuur 3.1.5/3 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)

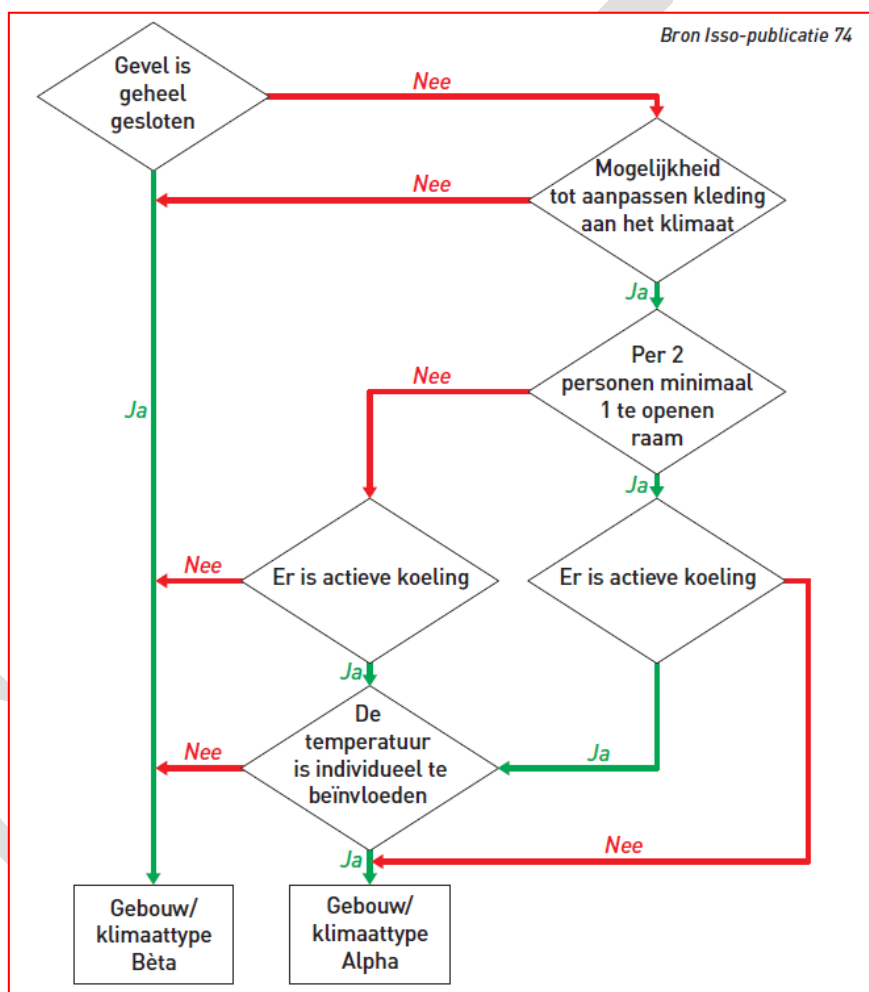
²⁰ International Society for Indoor Air Quality and Climate

De tendens om met het oog op energiebesparing de behaaglijkheidsgrenzen op te rekken naar het gebouw/klimaatype ALPHA staat dan ook op gespannen voet met het productiviteitscriterium. Met de iets hogere eisen van gebouw/klimaatypes BETA kan de productiviteit substantieel worden verhoogd (REHVA 2006).

3.1.5.4 ALPHA versus BETA

Het thermisch behaaglijkheidsmodel volgens ISSO 74 en de populariteit van gebouw/klimaatype ALPHA verdient dus een kritische beoordeling. Het laatste woord over dit onderwerp is echter 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 van belang voor het optimaliseren van de productiviteit²¹.

Het gebouw/klimaatype ALPHA valt buiten het toepassingsgebied van de Klimaatcascade en wordt daarom in het navolgende niet meer in beschouwing genomen – zie paragraaf 3.1.9.



Figuur 3.1.5/1 – Stroomschema voor de bepaling van type ALPHA en BETA

3.1.5.5 Luchtvochtigheid

Het is opvallend dat in de beschouwingen over thermisch comfort in ISSO publicatie 74 de luchtvochtigheid in het geheel niet aan de orde komt. Blijkbaar is in Nederland de overheersende opvatting dat de relatieve vochtigheid in het binnenmilieu nauwelijks van belang is.

Verschillende normen geven aanbevelingen over de rol van de luchtvochtigheid:

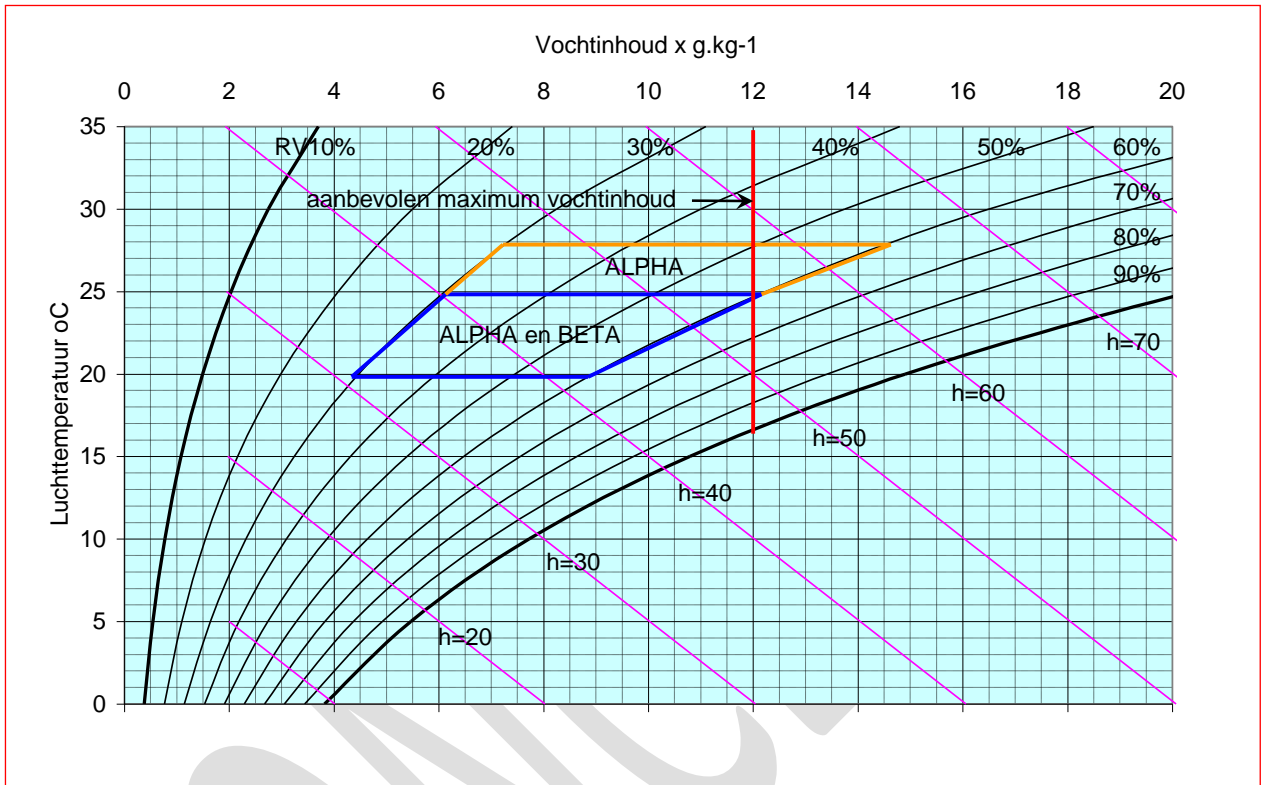
- NEN-EN 15251:2007 geeft als aanbeveling een range van 50 – 70% RV met een maximale vochtinhoud van 12 g.kg^{-1} .
- NEN-ISO 7730 stelt in Annex D (informative):

²¹ Zie onderzoeksrapport deel III (Bronsema 2012)

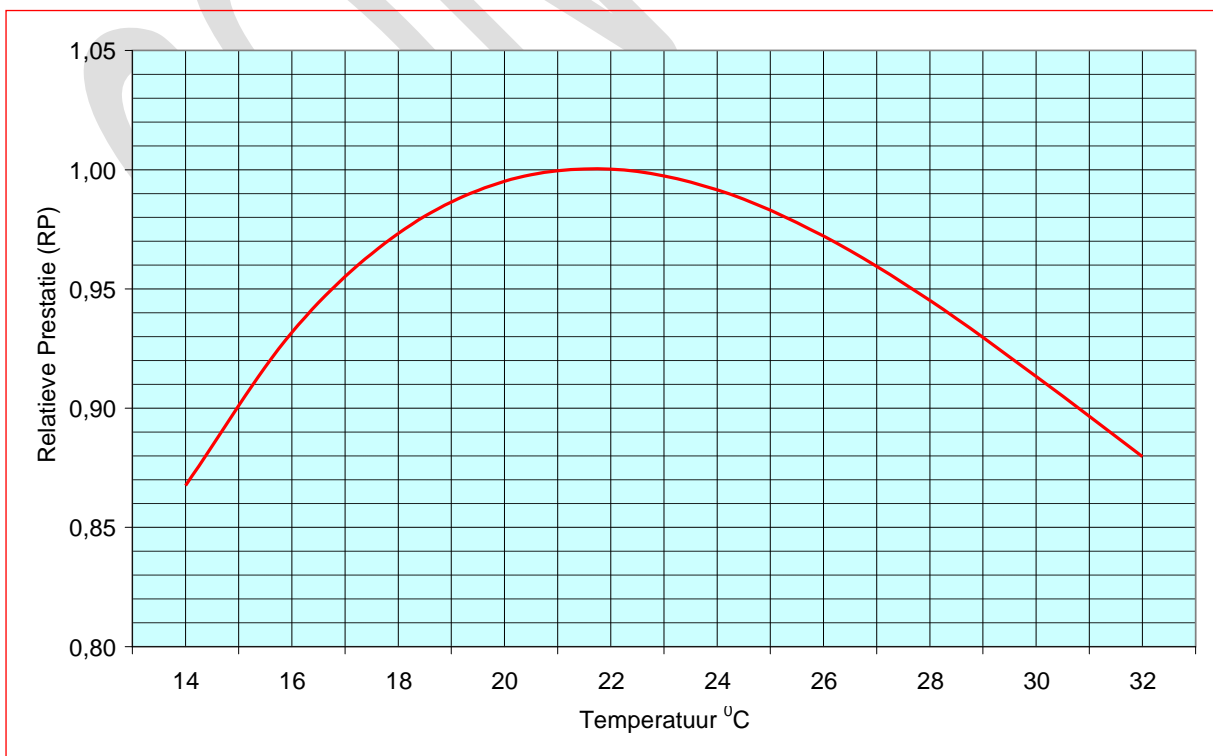
"It is recommended that the relative humidity be kept between 30% and 70%. The limits are set to decrease the risk of unpleasantly wet or dry skin, eye irritation, static electricity, microbial growth and respiratory diseases".

- ASHRAE Standard 55-2002 (ASHRAE 2002) geeft een bovengrens aan van $x = 12 \text{ g.kg}^{-1}$. Een ondergrens wordt niet vermeld.

De aanbevolen grenswaarde van $x = 12 \text{ g.kg}^{-1}$ is aangegeven in figuur 3.1.5/2. Voor type ALPHA zou dan een maximum RV van 50% moeten worden aangehouden en voor type BETA 60%.



Figuur 3.1.5/2 –Behaaglijkheidgrenzen voor gebouw/klimaattypen ALPHA en BETA



Figuur 3.1.5/3 – Relatie ruimtetemperatuur en arbeidsprestatie volgens ISIAQ

3.1.6 Klimaatcascade voor adiabatiscche koeling

3.1.6.1 Principe

Adiabatiscche koeling in een verticale schacht kan als een voorloper worden beschouwd van de Klimaatcascade waarin het psychometrisch proces in principe niet adiabatiscch verloopt.

In een adiabatiscch 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. Een dergelijk koelsysteem wordt dan ook vaak aangeduid met verdampingskoeling of *evaporative cooling*.

In een droog en heet klimaat wordt dit koelsysteem vaak toegepast en om die reden ook wel *desert cooling* genoemd. De stijging van de vochtigheid bij ventilatie met 100% buitenlucht is hier meestal geen probleem zolang de relatieve vochtigheid binnen de grenzen blijft.

In het Nederlandse klimaat met vaak hoge relatieve vochtigheid van de buitenlucht komt directe verdampingskoeling in principe niet voor kantoorgebouwen in aanmerking. Een nieuwe techniek van indirecte verdampingskoeling biedt in sommige gevallen wel interessante mogelijkheden -zie paragraaf 3.1.11.

3.1.6.2 Onderzoek

Het psychometrisch proces in een Klimaatcascade verloopt in principe niet adiabatiscch. Er is echter veel onderzoek naar adiabatiscche koeling in een verticale schacht gedaan, in de wetenschappelijke literatuur meestal aangeduid met *Passive Draught Evaporative Cooling (PDEC)* of *Direct Evaporative Cooling Tower (DECT)* (Bowmen, N. et al 1996, 2000, Erell, E. et al 2007, Martinez, D. et al 2000, Pearlmutter, D. et al 2007, Yajima, S. et al 1997).

Het onderzoek heeft hoofdzakelijk plaatsgevonden op basis van modelleren en simuleren, zonder validatie op basis van metingen aan testmodellen of uitgevoerde installaties.

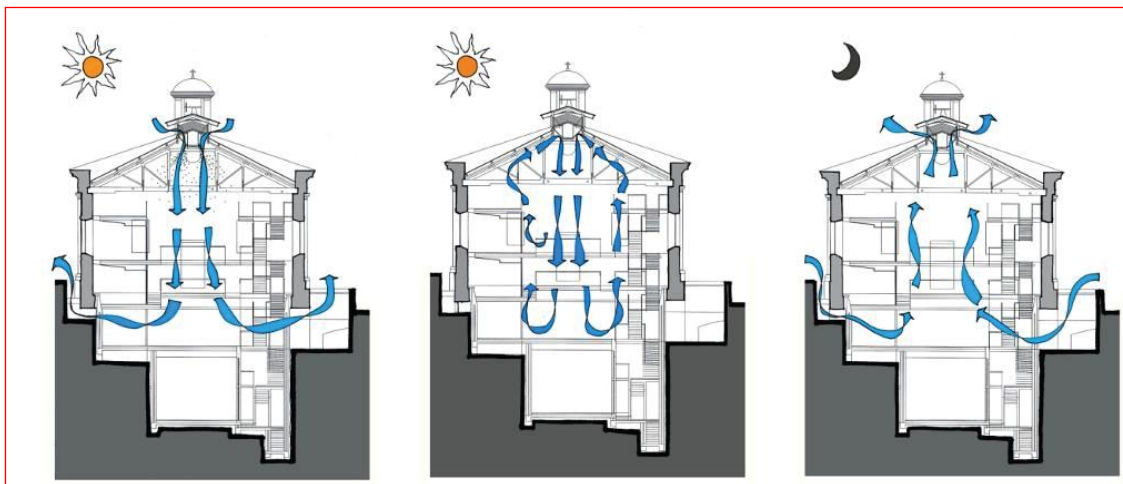
Een interessant onderzoek met behulp van CFD en dynamische simulaties betreft een denkbeeldig kantoorgebouw in Sevilla (Cook, M.J. et al. 2000, Lomas, K.J. et al. 2004, Robinson, D. et al. 2004). *PDEC* blijkt hierbij niet in staat te zijn een behaaglijk binnenmilieu te realiseren. In de zomerperiode is altijd ondersteuning nodig met nachtventilatie en/of mechanische koeling. Ook dan nog moesten de grenzen van thermische behaaglijkheid op de werkplek worden opgerekt, vooral met betrekking tot de relatieve vochtigheid.

De modellen en de gebruikte simulatietools worden nog lang niet betrouwbaar genoeg geacht om als hulpmiddelen voor het ontwerp te kunnen dienen.

Methodologisch gezien was het interessant kennis te nemen van de vermelde onderzoeksresultaten. Voor de ontwikkeling van de Klimaatcascade is er echter nauwelijks gebruik van gemaakt.

3.1.6.3 Hybride systemen

De prestaties van *Passive Draught Evaporative Cooling* kunnen worden verbeterd door actieve koelelementen in de luchtstroom op te nemen (Salméron, J.M. et al 2009), door de onderzoekers aangeduid met *PHDC - Passive and Hybrid Draught Cooling*. Het betreffende onderzoek is met subsidie van de EU uitgevoerd, zie www.phdc.eu en figuur 3.1.6.



Figuur 3.1.6 Hybride PHDC systeem met actieve koelelementen in de Malta Stock Exchange

3.1.7 Klimaatcascade voor diabatische koeling

3.1.7.1 Principe

In een diabatische toestandsverandering van een thermodynamisch systeem wordt warmte met de omgeving uitgewisseld. Het is de tegenhanger van de adiabiatische toestandsverandering ad paragraaf 3.3 ([http://de.wikipedia.org/wiki/Diabatische Zustandsändering](http://de.wikipedia.org/wiki/Diabatische_Zustandsändering))

Met het diabatisch proces in de Klimaatcascade wordt warmte afgevoerd door de toevoer van gekoeld water. Het water neemt warmte en vocht uit de luchtstroom op waardoor de lucht wordt gekoeld en gedroogd, terwijl de watertemperatuur stijgt.

De Klimaatcascade is geschikt voor (pre)conditionering van de ventilatielucht in alle seizoenen –zie paragraaf 3.x.x. In de voorliggende paragraaf wordt het concept beschreven vanuit de zomerconditie waarbij koeling de primaire functie is.

3.1.7.2 Conceptueel psychometrisch ontwerp

Een Klimaatcascade wordt in principe ontworpen op de maximum buitenluchtconditie, die wordt gesteld op 28°C bij $\approx 55\%$ RV. De absolute luchtvochtigheid hierbij is $\approx 13,1 \text{ g.kg}^{-1}$.

De maximum toegestane relatieve vochtigheid in de ruimte is gesteld op 60% -zie figuur 3.1.5/2.²²

Voor type ALPHA komt dit bij de maximum ruimtetemperatuur van 28°C overeen met een maximum absolute luchtvochtigheid van $\approx 14,1 \text{ g.kg}^{-1}$.

Voor type BETA, met een maximum ruimtetemperatuur van 25°C , is de maximum absolute luchtvochtigheid $\approx 12,1 \text{ g.kg}^{-1}$.

De waterdampafgifte van personen bij een ruimtetemperatuur van $25^{\circ} - 28^{\circ}\text{C}$ en lichte kantoorarbeid is ca 65 g.h^{-1} . Bij een specifieke ventilatiecapaciteit van $5 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ – zie paragraaf 4.5.2- en een beschikbaar vloeroppervlak van 10 m^2 per persoon komt dit overeen met $\Delta x \approx 1 \text{ g.kg}^{-1}$. Het vochtgehalte van de ventilatielucht bij uittrede van de klimaatcascade moet dan 1 g.kg^{-1} lager zijn dan dat in de ruimte. Voor type ALPHA houdt dit in dat de buitenlucht niet hoeft te worden ontvochtigd. Voor type BETA is een ontvochtiging nodig tot $\approx 11,1 \text{ g.kg}^{-1}$

De relatieve vochtigheid van de lucht bij uittrede van de Klimaatcascade is nog niet bekend. Voor het conceptueel psychometrisch ontwerp is uitgegaan van een RV van 90% ²³.

Verder is aangenomen dat de uitgaande watertemperatuur gelijk is aan de dauwpuntstemperatuur van de uitgaande lucht.

²² Er is hierbij (nog) geen rekening gehouden met de aanbeveling in paragraaf 3.1.5.3 om de absolute luchtvochtigheid te beperken tot 12 g.kg^{-1}

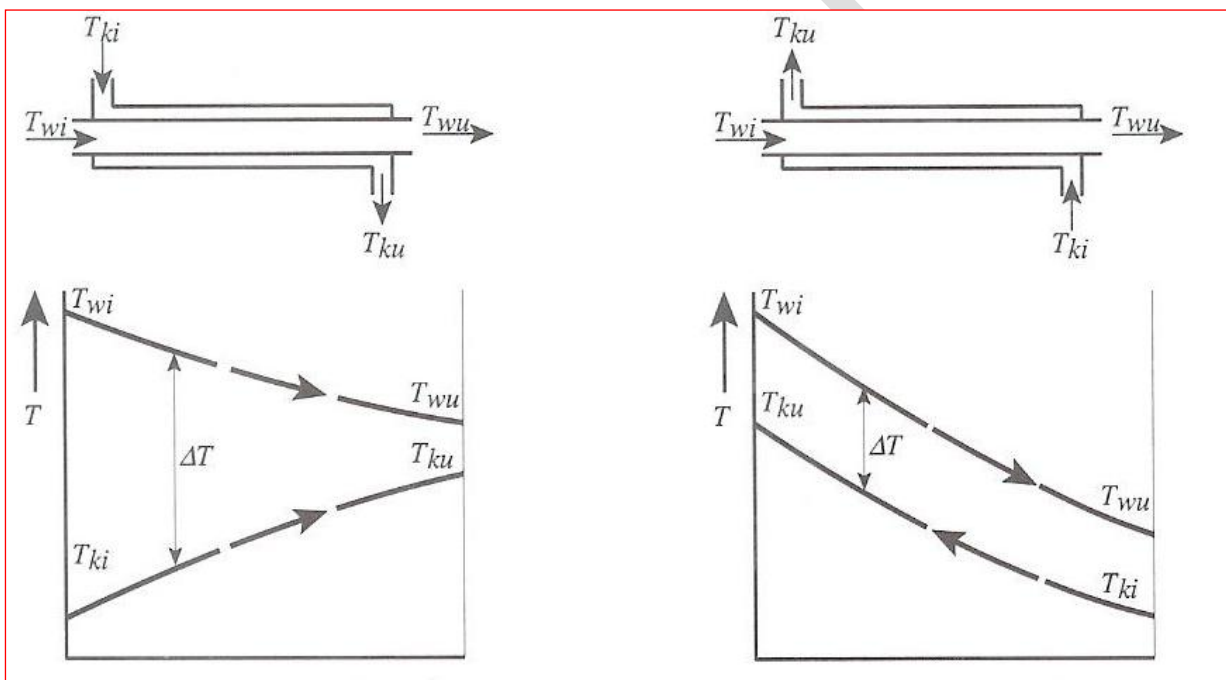
²³ Bij de gedetailleerde modellering bleek de RV meestal tussen 90% en 100% te liggen –zie paragraaf 3.xx

3.1.7.3 Temperatuurtrajecten Klimaatcascade

Een Klimaatcascade is een warmtewisselaar waarin de twee media, water en lucht, niet gescheiden, maar direct met elkaar in contact staan, waardoor naast warmteoverdracht ook stofoverdracht kan plaatsvinden. De te koelen lucht en het koelwater, in de vorm van een waterval, bewegen in dezelfde richting. Een Klimaatcascade kan daardoor worden beschouwd als een gelijkstroom warmtewisselaar, zie figuur 3.1.7/1 links, ontleend aan het Handboek Installatietechniek (ISSO 2002). Voor het temperatuurverschil ΔT dat als “drijvende kracht” voor het warmtetransport geldt moet het zgn. logaritmisches gemiddelde temperatuurverschil worden ingezet, vaak aangeduid met MLTD, *Mean Logarithmic Temperature Difference* waarvoor de formule geldt

$$\Delta T_{\log, gelijk} = \frac{(T_{wi} - T_{ki}) - (T_{wu} - T_{ku})}{\ln \frac{(T_{wi} - T_{ki})}{(T_{wu} - T_{ku})}} \quad (3.1.7/1)$$

Omdat het in deze formule om temperatuurverschillen gaat, kan in plaats van de absolute temperatuur T ook de temperatuur θ in $^{\circ}\text{C}$ worden ingevuld.



Figuur 3.1.7/1 – Principe warmtewisselaars – Links Gelijkstroom – Rechts Tegenstroom

De temperaturen en de MLTD voor de gebouw/klimaattypen ALPHA en BETA, zoals voorlopig aangenomen, zijn aangegeven in tabel 3.1.7/1. De temperatuurtrajecten van het gekoelde water zijn gebaseerd op de analyse in paragraaf 3.1.7.4. Met behulp van een rekenmodel zijn deze waarden naderhand nauwkeuriger bepaald –zie hoofdstuk 3.2 en 3.3.

Type	$\theta_{w,in}$	$\theta_{w,uit}$	$\theta_{k,in}$	$\theta_{k,uit}$	MLTD
ALPHA	28 ⁰	20 ⁰	13 ⁰	18,0 ⁰	6,1
BETA	28 ⁰	17 ⁰	13 ⁰	15,4 ⁰	6,1

Tabel 3.1.7/1 – Temperatuurtrajecten en MLTD Klimaatcascade

3.1.7.4 Temperatuurtraject warmtewisselaar WKO

De Klimaatcascade maakt gebruik van koude uit de bodem, zonder additionele mechanische koeling, zie figuur 4.5.8/4 uit hoofdstuk 4. Deze figuur is getekend voor winterbedrijf; de werking voor zomerbedrijf is tegengesteld. Uitgegaan wordt van een bodemtemperatuur van 12⁰C.

In de zomersituatie wordt water uit de koude bron opgepompt, en het opgewarmde water wordt geïnfiltreerd in de warme bron. Een warmtewisselaar scheidt het bronsysteem van het bovengrondse systeem (Willemsen en van Harlingen 2002).

Voor de scheiding tussen het bronsysteem en het bovengrondse systeem wordt een zgn. tegenstroom warmtewisselaar gebruikt, zie figuur 3.1.7/1 rechts. Voor het temperatuurverschil ΔT dat als “drijvende kracht” voor het warmtetransport geldt moet ook hier het logaritmisches gemiddelde temperatuurverschil MLTD worden ingezet. Voor tegenstroom geldt de formule

$$\Delta T_{\log,tegen} = \frac{(T_{wi} - T_{ku}) - (T_{wu} - T_{ki})}{\ln \frac{(T_{wi} - T_{ku})}{(T_{wu} - T_{ki})}} \quad (3.1.7/2)$$

Omdat het in deze formule om temperatuurverschillen gaat, kan in plaats van de absolute temperatuur T ook de temperatuur θ in $^{\circ}\text{C}$ worden ingevuld.

Een realistische en veel gebruikte waarde voor tegenstroom warmtewisselaars $\Delta\theta_{\log}$ is 1K; deze wordt gerealiseerd bij temperatuurtrajecten van het bronsysteem als aangegeven in tabel 3.1.7/1. De intredetemperatuur van de Klimaatcascade bij deze condities is 13°C , slechts 1 K boven de brontemperatuur van 12°C . Ook deze waarden zijn naderhand nauwkeuriger bepaald met behulp van een rekenmodel –zie hoofdstuk 3.2.xx.

Type	$\theta_{w,in}$	$\theta_{w,uit}$	$\theta_{k,in}$	$\theta_{k,uit}$	MLTD
ALPHA	18°	13°	12°	17°	1,0
BETA	$15,4^{\circ}$	13°	12°	$14,4^{\circ}$	1,0

Tabel 3.1.7/2 – Temperaturen en MLTD warmtewisselaar bronsysteem

Het temperatuurniveau van 13°C van het gekoeld water is ook geschikt voor ruimteteoeling door bouwdeelactivering en/of actieve koelplafonds.

3.1.7.5 Psychometrische condities conceptueel ontwerp

Tabel 3.1.7/3 en de figuren 3.1.7/2 en 3.1.7/4 geven de psychometrische condities en koeltrajecten weer van het conceptueel ontwerp voor de gebouw/klimaattypen ALPHA en BETA. Met behulp van een rekenmodel zijn deze nader vastgesteld –zie hoofdstuk 3.xxx en 3.xxx.

Conditie	Temperatuur [$^{\circ}\text{C}$]		RV [%]		x [$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$]		h [$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$]	
	ALPHA	BETA	ALPH	BETA	ALPHA	BETA	ALPHA	BETA
Buitenconditie	28°	28°	55%	55%	13,3	13,3	61,4	61,4
Uittrede Klimaatcascade	20°	17°	90%	90%	13,3	11,1	52,9	45,2
Ruimteconditie	28°	25°	60%	60%	14,5	12,1		
Dauwpunt	$18,0^{\circ}$	$15,4^{\circ}$						
Temp.traject koelwater	13° - 18° 18°	13° - $15,4^{\circ}$						
Enthalpie-verschil lucht							8,5	16,2
Voelbare warmte							8,3	10,9
Latente warmte							0,2	5,3
Voelbare Warmte Factor							0,98	0,67

Tabel 3.1.7/3 – Globale psychometrische condities Klimaatcascade – Maximum RV in de ruimte 60%

3.1.7.6 Toelichting op de Mollierdiagrammen

Type ALPHA - Figuur 3.1.7/2

Vanaf de intredeconditie (■) zal de lucht in eerste instantie door het koelwater van 13°C worden gekoeld en gedroogd, maar waar in de Klimaatcascade de lucht- en koelwatertemperaturen elkaar naderen vindt adiabatische koeling en bevochtiging plaats naar de uittredeconditie van 20°C bij 90% RV. De psychometrische toestandverandering is niet exact te voorspellen en gemakshalve met rechte

lijnen aangegeven. Na opname van de vochtproductie in de ruimte wordt de maximum ruimteconditie van 28°C bij 60% RV bereikt.

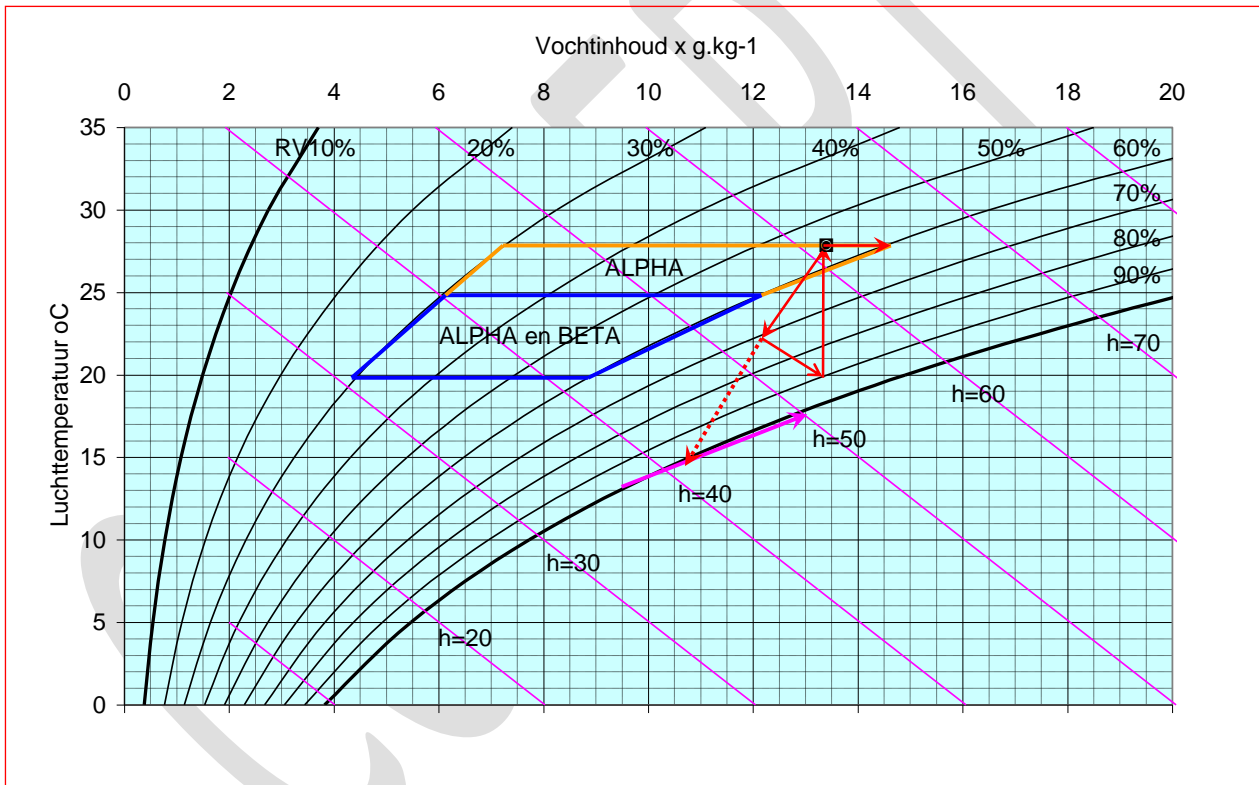
Bij type ALPHA vindt na aanvankelijke voelbare koeling en droging adiabatische koeling en bevochtiging plaats. De totale vochtinhoud van de lucht verandert niet waardoor, merkwaardigerwijs in dit verband, gesproken kan worden van “droge koeling”. Dit is uiteraard het gevolg van de in dit geval maximum toegestane vochtinhoud in de ruimte van 14,5 g.kg⁻¹.

Type BETA – figuur 3.1.7/3

Vanaf de intredeconditie (■) wordt de lucht door het koelwater van 13°C gekoeld en gedroogd naar de uitreideconditie van 17°C bij 90% RV. Na opname van de vochtproductie in de ruimte wordt de maximum ruimteconditie van 25°C bij 60% RV bereikt. De psychometrische toestandverandering is ook in deze figuur gemakshalve met rechte lijnen aangegeven

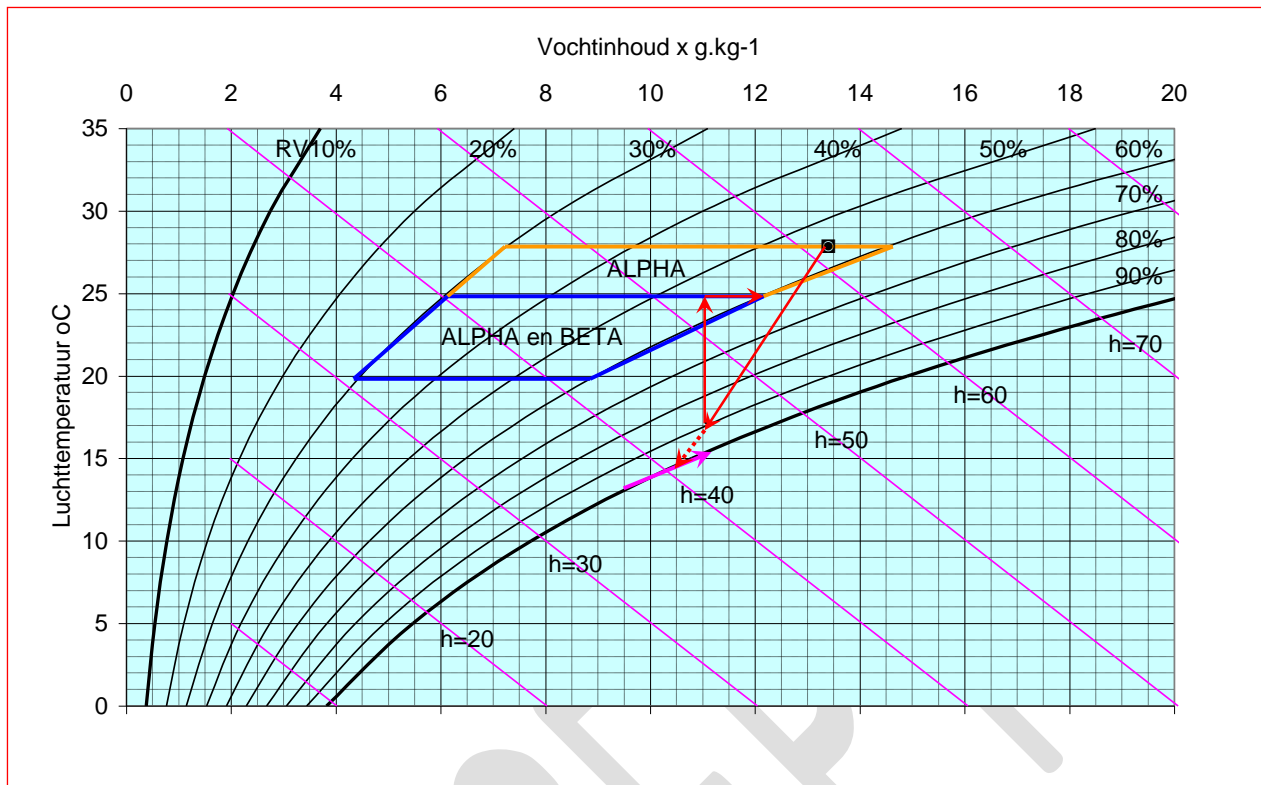
3.1.8 De water/luchtfactor

De water/luchtfactor $R_{w/L}$ [-] is de verhouding van de massastromen van water en lucht in een Klimaatcascade, en daarmee een belangrijke indicator voor het energiegebruik van de sproeipomp. Voor het conceptueel psychometrisch ontwerp zijn voor ALPHA en BETA de waarden van $R_{w/L}$ respectievelijk 0,4 en 1,6²⁴. De pompenergie voor BETA is dus 4 x zo groot als voor ALPHA.



Figuur 3.1.7/2 – Psychometrisch proces Klimaatcascade gebouw/klimaattype ALPHA – $RV_{max} = 60\%$

²⁴ Deze waarden zijn in de rekenmodellen ad paragraaf 3.2 en 3.3 nauwkeuriger berekend.



Figuur 3.1.7/3 – Psychometrisch proces Klimaatcascade gebouw/klimaatype BETA – $RV_{max} = 60\%$

3.1.9 Gebouw/klimaatype ALPHA valt af

De aanbevolen grenswaarde van de absolute luchtvochtigheid is 12 g.kg^{-1} – zie paragraaf 3.1.5 – waardoor voor het gebouw/klimaatype ALPHA een maximum RV van 50% moet worden aangehouden. Als deze grenswaarde wordt gerespecteerd houdt dit in dat het psychometrisch proces van ALPHA identiek wordt aan dat van BETA.

Het gebouw/klimaatype ALPHA valt hierdoor buiten het toepassingsgebied van de Klimaatcascade en wordt daarom niet verder in beschouwing genomen.

3.1.10 Voelbare koelcapaciteit gebouw/klimaatype BETA

Bij een specifieke ventilatiecapaciteit van $5 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ en uittredetemperatuur van 17°C is de door de Klimaatcascade geleverde voelbare koelcapaciteit 12 à 13 W.m^{-2} . Bij normaal te achten thermische belastingen in kantoorruimten van 25 – 50 W.m^{-2} zal deze basiskoeling niet tot onderkoeling leiden. Het verschil tussen de variabele thermische belasting en de vaste basiskoeling wordt geleverd door de klimaatvoorzieningen op ruimteniveau. Zie bijvoorbeeld de *case study* hoofdstuk 7 waarin klimaatplafonds zijn voorzien.

3.1.11 Indirecte adiabatische koeling

Water kan als koudemiddel een belangrijke rol spelen bij de klimaatregeling van gebouwen. De verdampingswarmte van water is ca. 2.450 kJ.kg^{-1} bij 20°C en dit betekent dat 1 m^3 water bij verdamping ca 680 kWh koude kan leveren.

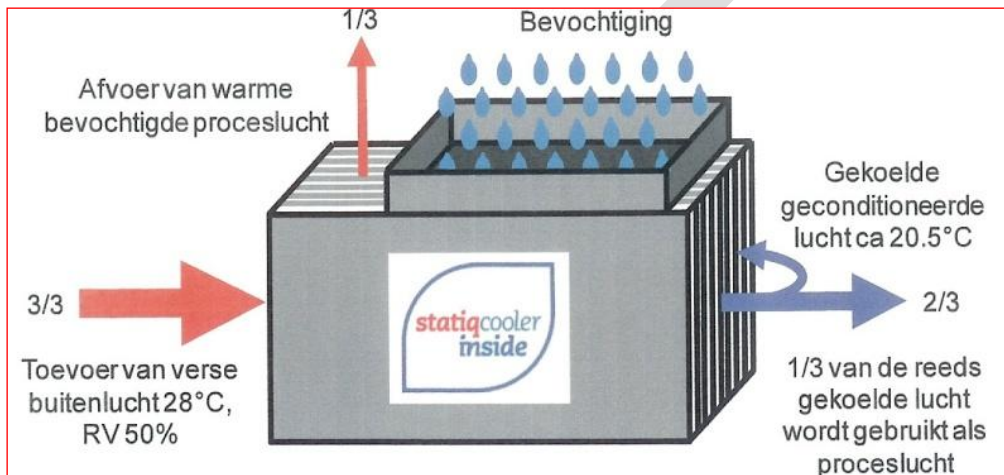
In een Klimaatcascade wordt water niet als koudemiddel gebruikt maar als koelmedium. Er wordt dus geen gebruik gemaakt van de verdampingswarmte van water. Mede door de groeiende populariteit van indirecte adiabatische koeling, in een bepaalde toepassing ook wel dauwpuntskoeling genoemd, is globaal nagegaan of dit systeem bij de *Natuurlijke Airconditioning* volgens het *Earth, Wind & Fire* concept als alternatief voor de Klimaatcascade kan worden toegepast.

Bij indirecte adiabatische koeling wordt de gebruikte afvoerlucht adiabatisch gekoeld en met behulp van een warmtewisselaar wordt hiermee aansluitend de verse ventilatielucht gekoeld (Bronsema, B. 1993). De twee luchtstromen van verse en gebruikte ventilatielucht moeten in principe in de warmtewisselaars bij elkaar worden gebracht. In het *Earth, Wind & Fire* concept, waarbij in het

Ventecdak de twee luchtstromen zijn gescheiden, is dit niet mogelijk. Verder ontbreekt de hydraulische trek en is het drukverlies van de warmtewisselaar prohibitief.

Een mogelijk alternatief zou kunnen worden gevormd door een bijzondere vorm van indirecte adiabatiese koeling, de zogenaamde dauwpuntskoeling –zie figuur 3.1.11. Hierbij wordt de aangezogen buitenlucht als primaire lucht afgekoeld in een warmtewisselaar. Aan het einde van deze warmtewisselaar wordt een deel van de primaire luchtstroom in tegenstroom teruggeluid als secundaire (proces) luchtstroom. Deze proceslucht neemt het vocht op dat verdampft uit een besproeiende hygroscopische laag die is aangebracht aan de proceskant (buitenzijde) van de platen waaruit de warmtewisselaar is opgebouwd.

De voor het verdampen benodigde warmte wordt onttrokken aan de door de warmtewisselaarplaat stromende primaire lucht die daardoor op haar beurt wordt afgekoeld bij gelijkblijvend vochtgehalte. Het verdampste vocht wordt met de proceslucht naar buiten afgevoerd en komt dus niet in de te ventileren ruimte terecht. (Kouwenhoven, H.J.L. et al. 2008; Uges, P.G.H. 2006, 2008).



Figuur 3.1.11 – Principe dauwpuntskoeling

Dauwpuntskoeling is een innovatief en energiezuinig concept maar geen bruikbaar alternatief voor de Klimaatcascade met sproeisysteem. Het drukverlies is prohibitief, hydraulische trek ontbreekt, en de gewenste luchttemperatuur van $\approx 17^{\circ}\text{C}$ is nauwelijks bereikbaar²⁵.

3.2 Basale modellering

3.2.1 De Klimaatcascade als warmtewisselaar

Warmteoverdracht wordt weergegeven met de vergelijking:

$$\Phi = h \cdot A \cdot (\theta_m - \theta_{\infty})$$

Een Klimaatcascade is een bijzondere uitvoering van een warmtewisselaar waarin het primaire medium, gekoeld water²⁶, in direct contact staat met het secundaire medium, de lucht.

De warmteoverdracht (Φ) van lucht op water in een Klimaatcascade, voelbaar en latent, is gelijk aan de benodigde enthalpieverandering van de lucht –zie paragraaf 3.1.3.

Het werkzame oppervlak (A) van een Klimaatcascade wordt in hoofdzaak bepaald door het cumulatieve oppervlak van de waterdruppels, product van het aantal gevormde druppels per tijdseenheid 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

²⁵ Zie onderzoeksrapport deel III (Bronsema 2012)

²⁶ De beschouwingen en analyses in deze paragraaf gaan uit van koelprestaties. Voor het functioneren van een klimaatcascade buiten het koelseizoen zie paragraaf 3.6

diameters en valsnelheden. Het cumulatieve oppervlak wordt bepaald door de distributieve verdeling van druppeldiameters in de sproeizone, het sproeispectrum.

De warmteoverdrachtscoëfficiënt (h) is afhankelijk van de kengetallen van Nusselt, Prandl en Reynolds en wordt in hoge mate bepaald door de relatieve valsnelheid van de waterdruppels.

Voor het temperatuurverschil ($\theta_m - \theta_\infty$) tussen water en lucht moet het logaritmisch gemiddelde, de MLTD, worden gebruikt –zie paragraaf 3.1.7.3.

3.2.2 Warmte- en stofoverdracht in een Klimaatcascade

Warmte- en stofoverdracht in een Klimaatcascade vindt plaats via de waterdruppels en via het natte wandoppervlak. Van beide moet het werkzame oppervlak en de warmteovergangscoefficiënt worden bepaald.

De warmtestroom tussen lucht en water in een Klimaatcascade wordt bepaald door het benodigde thermisch vermogen, uitgedrukt in de formule

$$\Phi = q_{v,l} \cdot \rho_l \cdot (h_{l,in} - h_{l,uit}) \quad (3.2.2/1)$$

Waarin	Φ	warmtestroom	[W]
	$q_{v,l}$	volumedebiet lucht	[dm ³ ·s ⁻¹]
	ρ_l	dichtheid van de lucht	[g·dm ⁻³]
	$h_{l,in}$	enthalpie van de lucht bij intrede	[J·g ⁻¹]
	$h_{l,uit}$	enthalpie van de lucht bij uitrede	[J·g ⁻¹]

De warmtestroom bestaat uit een voelbare component Φ_v en een latente component Φ_l , waarbij $\Phi = \Phi_v + \Phi_l$.

De voelbare warmteoverdracht in een Klimaatcascade kan worden beschreven met de algemene formule

$$\Phi_v = A_{dr} \cdot h_{c,dr} (\theta_{dr} - \theta_\infty) + A_{wnd} \cdot h_{c,wnd} (\theta_{wnd} - \theta_\infty) \quad (3.2.2/2)$$

Waarin	Φ_v	voelbare component warmtestroom	[W]
	A_{dr}	cumulatief oppervlak waterdruppels in de sproeizone	[m ²]
	$h_{c,dr}$	convectieve warmteovergangscoefficiënt van lucht op druppels	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]
	θ_{dr}	temperatuur van de waterdruppels	[°C]
	θ_∞	temperatuur in de luchtstroom	[°C]
	A_{wnd}	totaal oppervlak wand	[m ²]
	$h_{c,wnd}$	convectieve warmteovergangscoefficiënt lucht en wanden	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]
	θ_{wnd}	temperatuur van de wand	[°C]

Op analoge wijze kan de latente warmteoverdracht in een Klimaatcascade worden beschreven met de algemene formule

$$\Phi_l = A_{dr} \cdot K_{dr} \cdot r (c_{d,opp} - c_{d,\infty}) + A_{wnd} \cdot K_w \cdot r (c_{d,wnd} - c_{d,\infty}) \quad (3.2.2/3)$$

Waarin	Φ_l	latente component warmtestroom	[W]
	A_{dr}	cumulatief oppervlak waterdruppels in de sproeizone	[m ²]
	K_{dr}	stofoverdrachtscoëfficiënt luchtvochtigheid op druppels	[m·s ⁻¹]
	r	verdampingswarmte water bij de condensatietemperatuur	[J·g ⁻¹]
	$c_{d,\infty}$	waterdampconcentratie in de lucht	[g·m ⁻³]
	$c_{d,opp}$	waterdampconcentratie aan het oppervlak van de druppels	[g·m ⁻³]
	A_{wnd}	totaal oppervlak wand	[m ²]
	K_w	stofoverdrachtscoëfficiënt luchtvochtigheid op wand	[m·s ⁻¹]
	$c_{d,wnd}$	waterdampconcentratie aan het oppervlak van de wand	[g·m ⁻³]

3.2.3 Karakterisering van het sproeispectrum in een Klimaatcascade

Met behulp van de Equivalente Bol Theorie is het mogelijk de eigenschappen van een druppelverzameling, diameter, oppervlak en volume met één getal, de equivalente druppeldiameter, te karakteriseren (Rawle A. 2001-2005, Jones A. et al. 1995). Druppels hoeven hiervoor niet perfect bolvormig te zijn (Tekasakul P. et al. 2002), hetgeen met de door luchtweerstand afgeplatte waterdruppels in een Klimaatcascade ook niet het geval is

De gemiddelde druppeldiameter wordt mathematisch uitgedrukt in de formule

$$D[1,0] = \frac{\sum n \cdot d}{n} \quad (3.2.3/1)$$

Waarin

D[1,0]	Gemiddelde druppeldiameter, vaak geschreven als d_{10}	[mm]
d	Diameter van de afzonderlijke druppels	[mm]
n	Aantal druppels	[-]

De uitdrukking D[1,0] betekent dat in de teller van de vergelijking de diameter de macht 1 heeft (d^1) en in de noemer d niet voorkomt (d^0).

De valsnelheid wordt niet bepaald door de diameter maar in hoofdzaak door het gewicht, en dus het volume van een druppel. Het volume van een bol is $\pi d^3/6$ en de relatie tussen de gemiddelde druppeldiameter en het gemiddelde volume hiervan wordt geschreven als

$$D[3,0] = \sqrt[3]{\frac{\sum n \cdot d^3}{n}} \quad (3.2.3/2)$$

Waarin

D[3,0]	Gemiddelde druppeldiameter op volume of VMD, Volume Mean Diameter, vaak geschreven als d_{30}
--------	---

Het oppervlak van een bol is πd^2 en de relatie tussen de gemiddelde druppeldiameter en het gemiddelde oppervlak hiervan wordt daarom geschreven als

$$D[2,0] = \sqrt{\frac{\sum n \cdot d^2}{n}} \quad (3.2.3/3)$$

Waarin

D[2,0]	Gemiddelde druppeldiameter op oppervlak of SMD, Surface Mean Diameter, vaak geschreven als d_{20}
--------	---

Voor toepassingen waarbij het actieve oppervlak van belang is, zoals bij katalyse en de verbranding van brandstofniveaus en, naar aan te nemen, ook bij warmteoverdracht in een Klimaatcascade, wordt de relatie tussen de gemiddelde druppeldiameter en het gemiddelde oppervlak hiervan meestal uitgedrukt in de Sauter Mean Diameter SMD die wordt geschreven als

$$D[3,2] = \frac{\sum n \cdot d^3}{\sum n \cdot d^2} \quad (3.2.3/4)$$

Waarin

D[3,2]	Sauter Mean Diameter, vaak geschreven als d_{32}
--------	--

De druppeldiameter en het aantal druppels in een sproeistraal kan worden gemeten met behulp van fotografische technieken. Een voorbeeld van dergelijke metingen in de sproeizone van een koeltoren (Terblanche, R. et al. 2009) geeft het in tabel 3.2.2/1 weergegeven beeld waarin

d	druppeldiameter	[mm]
n	aantal druppels	[-]

d [mm]	n	R _m	n.d ¹	n.d ² [mm] ²	n.d ³ [mm] ³	
0,25	5	0,999995	1,25	0,31	0,08	De equivalente druppeldiameters zijn als volgt berekend: d ₁₀ of D[1,0] $= \frac{\sum n.d^1}{n} = 2,95mm$ d ₂₀ of D[2,0] $= \sqrt{\frac{\sum n.d^2}{n}} = 3,55mm$ d ₃₀ of D[3,0] $= \sqrt[3]{\frac{\sum n.d^3}{n}} = 4,01mm$ d ₃₂ of D[3,2] $= \frac{\sum n.d^3}{\sum n.d^2} = 5,14mm$
0,75	48	0,998806	36,00	27,00	20,25	
1,25	35	0,994789	43,75	54,69	68,36	
1,75	27	0,986287	47,25	82,69	144,70	
2,25	15	0,976248	33,75	75,94	170,86	
2,75	21	0,950587	57,75	158,81	436,73	
3,25	10	0,930417	32,50	105,63	343,28	
3,75	13	0,890137	48,75	182,81	685,55	
4,25	21	0,795417	89,25	379,31	1612,08	
4,75	18	0,682071	85,50	406,13	1929,09	
5,25	15	0,554538	78,75	413,44	2170,55	
5,75	16	0,375817	92,00	529,00	3041,75	
6,25	11	0,218024	68,75	429,69	2685,55	
6,75	4	0,145743	27,00	182,25	1230,19	
7,25	2	0,100961	14,50	105,13	762,16	
7,75	0	0,100961	0,00	0,00	0,00	
8,25	0	0,100961	0,00	0,00	0,00	
8,75	0	0,100961	0,00	0,00	0,00	
9,25	1	0,054459	9,25	85,56	791,45	
9,75	1	0	9,75	95,06	926,86	
Σ	263		775,75	3313,44	17019,48	

Tabel 3.2.3/1 – Gemeten en berekende druppeldiameters in een koeltoren

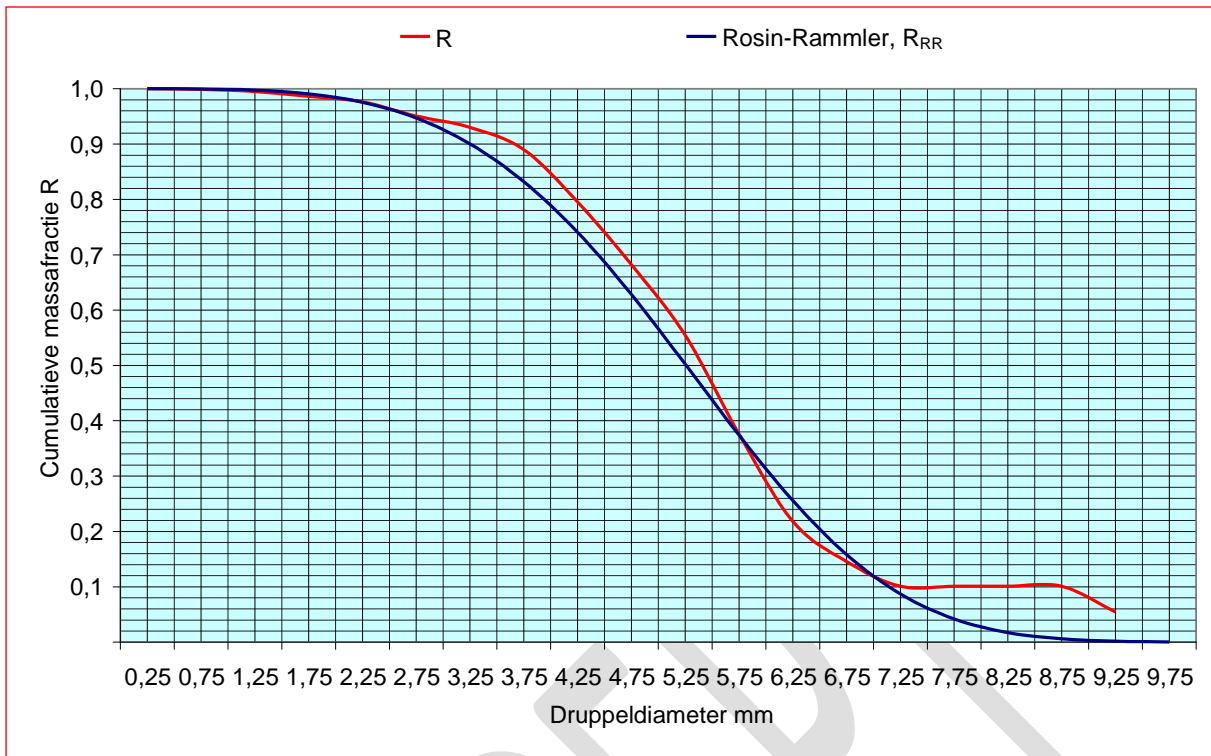
De cumulatieve druppelgrootteverdeling (DGV) van het druppelspectrum in deze metingen is weergegeven in figuur 3.2.3/1. Naast de gemeten DGV R_M is hierin ook de probabilistische verdeling volgens Rosin-Rammler R_{RR} aangegeven. De Rosin-Rammler functie is een empirische relatie die wordt gebruikt om de gemeten cumulatieve massaverdeling te correleren aan de druppeldiameters²⁷. De water/luchtverhouding en de lichtsnelheid hebben weinig invloed op de druppelgrootteverdeling (Terblanche, R. et al. 2009).

Op basis van de distributieve spectrumverdeling van tabel 3.2.3/1 en figuur 3.2.3/1 zijn 10 sproeispectra met afnemende druppelgrootte gedefinieerd. De druppeldiameter is hierbij in stappen van telkens 10% verkleind, en met de formules (3.2.3/2) t/m (3.2.3/4) zijn de equivalente druppeldiameters d₂₀, d₃₀ en d₃₂ hiervan berekend - zie tabel 3.2.3/2 en figuur 3.2.3/2. Deze spectra zijn gebruikt voor de hierna volgende analyse van de warmte- en stofoverdracht in een Klimaatcascade.

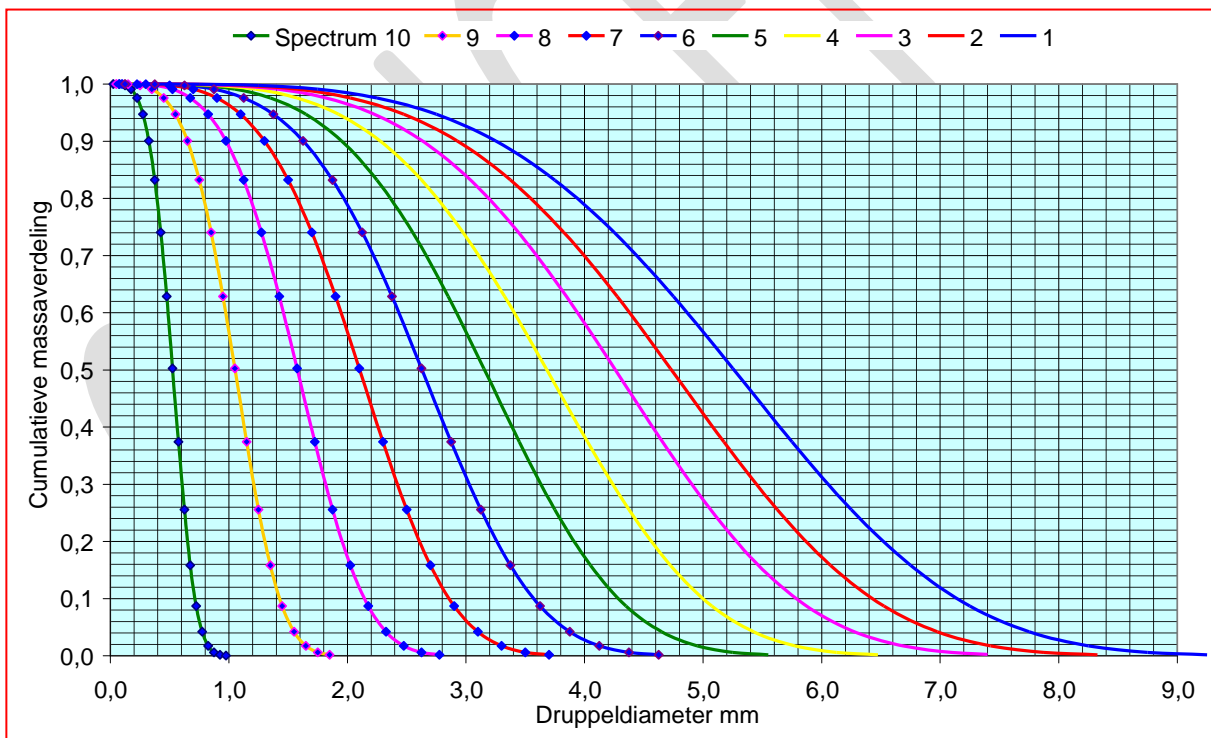
Spectrum→	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Diameter	nominaal	0,9*1	0,8*1	0,7*1	0,6*1	0,5*1	0,4*1	0,3*1	0,2*1	0,1*1
d ₁₀ - mm	2,95	2,65	2,36	2,06	1,77	1,47	1,18	0,88	0,59	0,29
d ₂₀ - mm	3,55	3,19	2,84	2,48	2,13	1,77	1,42	1,06	0,71	0,35
d ₃₀ - mm	4,01	3,61	3,21	2,81	2,41	2,01	1,61	1,20	0,80	0,40
d ₃₂ - mm	5,14	4,62	4,11	3,60	3,08	2,57	2,05	1,54	1,03	0,51

Tabel 3.2.3/2 – Equivalente druppeldiameters in verschillende spectra

²⁷ Zie onderzoeksrapport deel III (Bronsema, B. 2012)



Figuur 3.2.3/1 – Cumulatieve massaverdeling van de metingen volgens tabel 3.2.2/1



Figuur 3.2.3/2 – Cumulatieve massaverdeling in verschillende spectra

3.2.4 Valsnelheid waterdruppels

Het werkzame oppervlak van een Klimaatcascade wordt naast een vast wandoppervlak bepaald door het cumulatieve oppervlak van de waterdruppels die gelijktijdig in de cascade aanwezig zijn. Dit cumulatieve oppervlak is een functie van het aantal druppels en de SMD d_{32} - zie paragraaf 3.2.3. Het aantal druppels hangt af van het waterdebiet en de VMD d_{30} . De verblijfstijd van een druppel in de Klimaatcascade is een functie van de hoogte en van de valsnelheid, die weer direct verband houdt met het gewicht en dus met de VMD d_{30} .

De valsnelheid is tevens een belangrijke parameter voor het getal van Reynolds en daarmee van de convectieve warmteovergangscoefficiënt.

De valsnelheid van een druppel of een druppelverzameling wordt bepaald door de aanvangssnelheid, de zwaartekracht en de luchtweerstand. Tijdens de val neemt in eerste instantie de snelheid toe met de gravitatieversnelling g maar door de toenemende snelheid neemt ook de luchtweerstand toe. Als beide krachten in evenwicht zijn neemt de snelheid niet verder toe en is de eindsnelheid $w_{v,t}$ bereikt.

De luchtweerstand wordt bepaald door de weerstandscoefficiënt C_w die afhankelijk is van de aard van de stroming, laminair, turbulent of tussenliggend, uitgedrukt in het getal van Reynolds Re volgens de formule

$$Re = \frac{d_{dr} \cdot \rho_l \cdot (w_{dr} - w_l)}{\mu_l} \quad (3.2.4/1)$$

Waarin

Re	getal van Reynolds	[-]
d_{dr}	druppeldiameter	[m]
ρ_l	dichtheid van de lucht	[kg.m ⁻³]
w_{dr}	snelheid van de druppel	[m.s ⁻¹]
w_l	luchtsnelheid	[m.s ⁻¹]
μ_l	dynamische viscositeit lucht	[Pa.s]

Laminaire stroming treedt op bij $Re \leq 1$ en turbulente stroming bij $Re \geq 300$ (Hemeon, W.C.L. 1999). In het overgangsgebied neemt de turbulentie in het zog van de vallende druppels geleidelijk toe. Er is geen scherpe overgang van laminaire naar turbulente stroming aan te wijzen. In een klimaatcascade zal bij relatieve valsnelheden ≥ 4 m.s⁻¹ overwegend sprake zijn van turbulente stroming²⁸.

De weerstandscoefficiënt C_w wordt uitgedrukt in de formule

$$F_w = 0,5 \rho_l \cdot (w_{dr} - w_l)^2 \cdot C_w \cdot A \quad (3.2.4/2)$$

Waarin

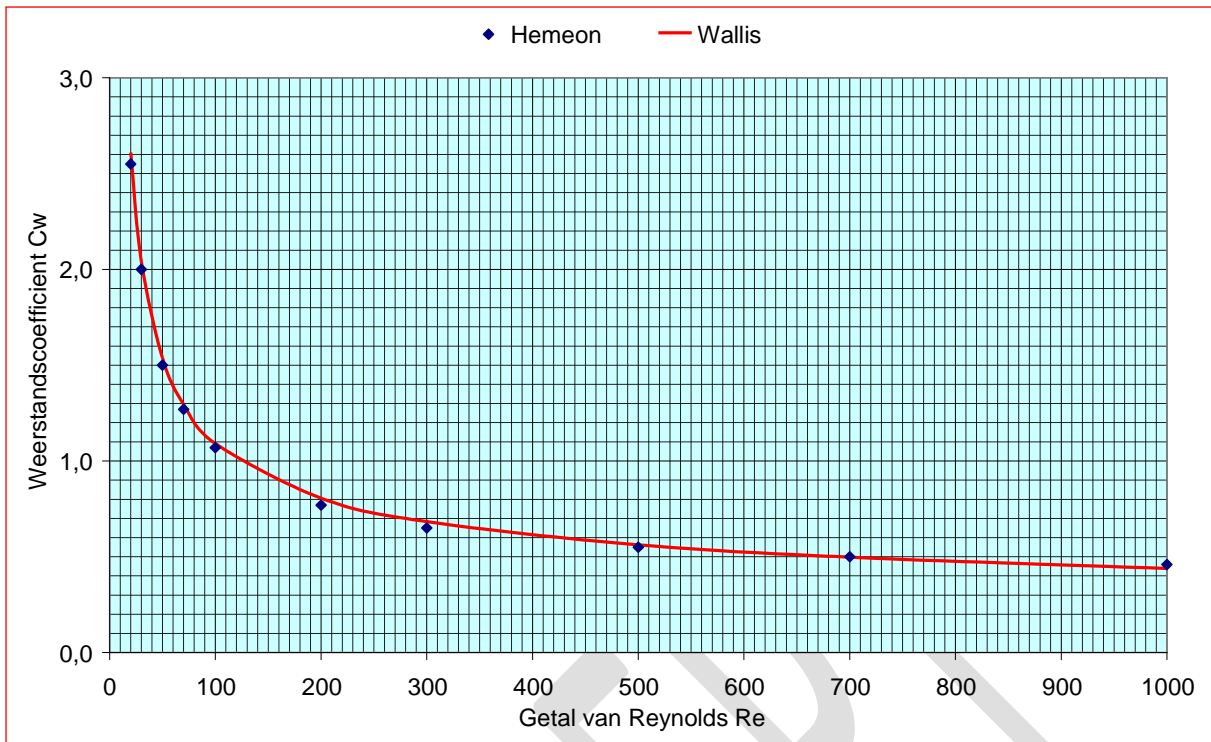
F_w	weerstandskracht	[N]
ρ_l	dichtheid van lucht	[kg.m ⁻³]
w_{dr}	snelheid van de druppel	[m.s ⁻¹]
w_l	luchtsnelheid	[m.s ⁻¹]
C_w	weerstandscoefficiënt	[-]
A	geprojecteerd druppeloppervlak	[m ²]

De weerstandscoefficiënt C_w kan worden berekend met de formule van Wallis (1969), ontleend aan Ghosh, S. 1994)

$$C_w = \left(\frac{24}{Re} \right) \cdot \left(1 + 0,15 Re^{0,687} \right) \quad (3.2.4/3)$$

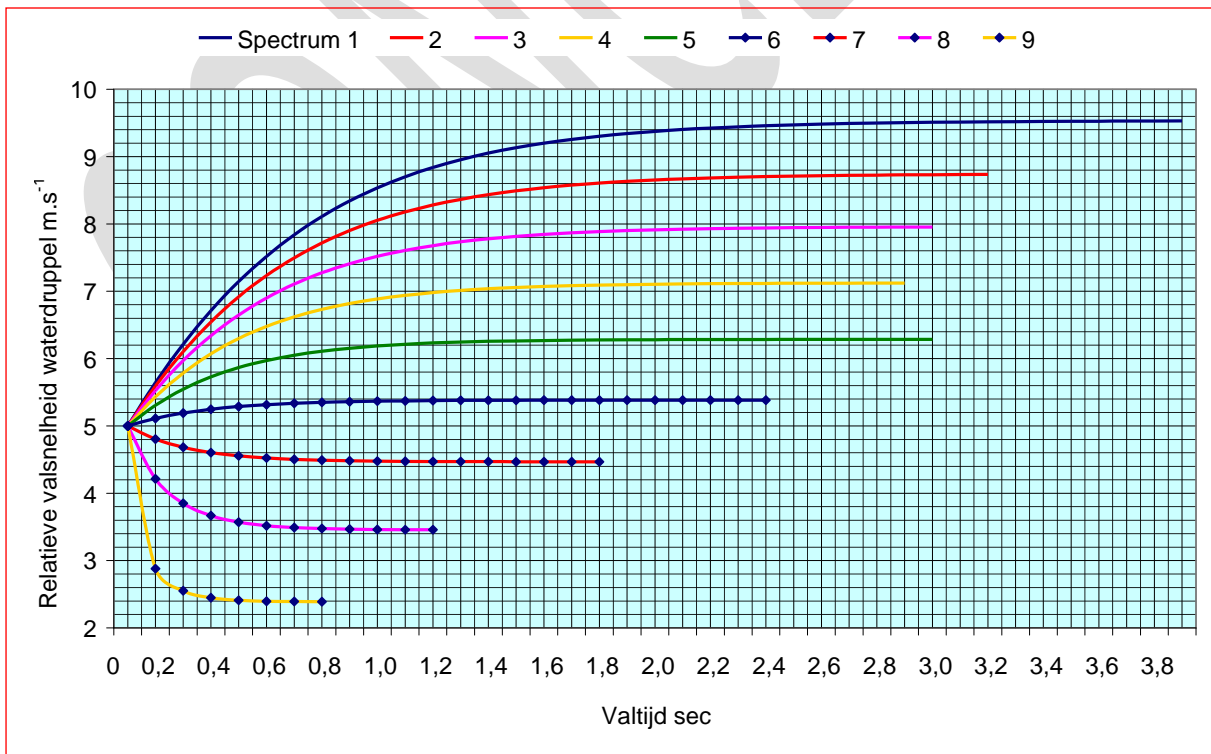
Figuur 3.2.4/1 geeft het verloop weer van de weerstandscoefficiënt C_w volgens formule (3.2.4/2). In de figuur zijn ook de C_w waarden aangegeven zoals in 1940 empirisch bepaald door Lapple en Shepherd (Hemeon W.C.L. 1999). Beide waarden komen zeer goed overeen.

²⁸ Zie onderzoeksrapport deel III (Bronsema, B. 2012)



Figuur 3.2.4/1 - Weerstandcoëfficiënt C_w als functie van getal van Reynolds

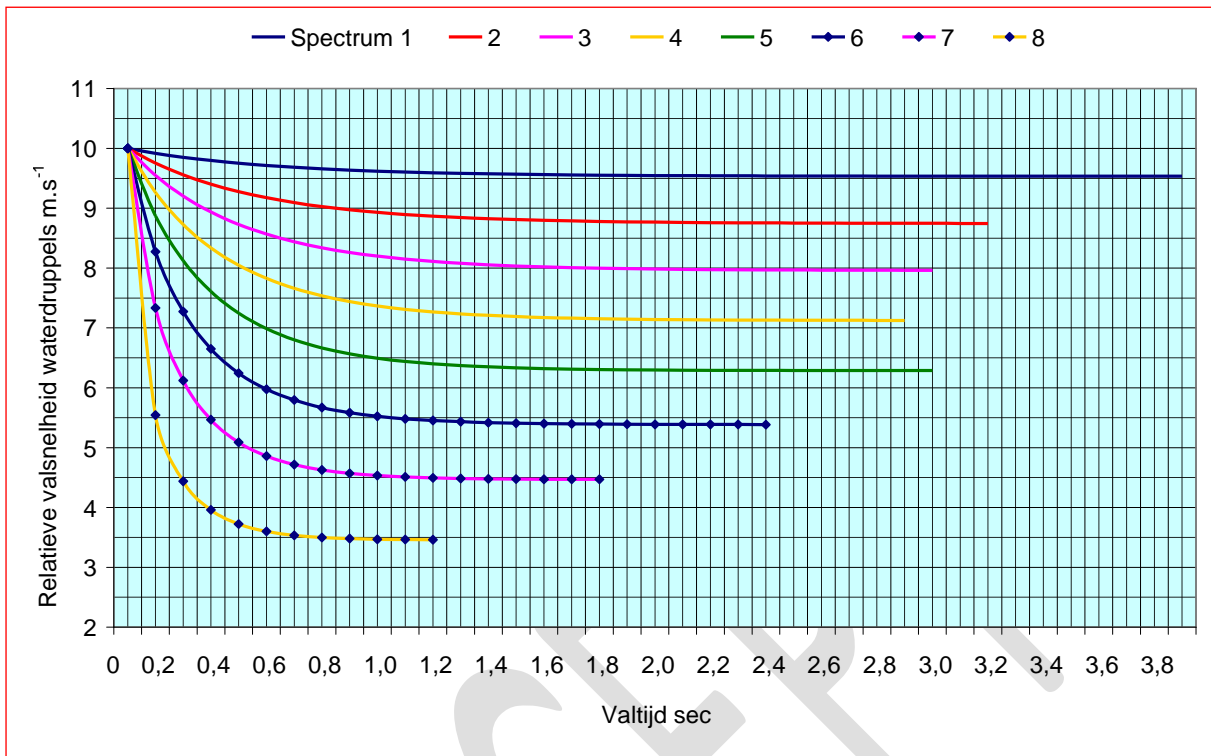
Figuur 3.2.4/2 brengt de snelheidsontwikkeling in beeld van waterdruppels met diameters d_{10} in de sproeispectra 1 t/m 9 conform tabel 3.2.3/2. De beginsnelheid van de druppels is hier 5 m.s^{-1} . De zwaardere druppels van spectrum 1 met $d_{10} = 2,95 \text{ mm}$ bereiken hierbij hun eindsnelheid van $\approx 9,5 \text{ m.s}^{-1}$ na $\approx 2,5$ seconde. Lichtere druppels van spectrum 6 met $d_{10} = 1,47 \text{ mm}$ bereiken hun eindsnelheid van $\approx 5,4 \text{ m.s}^{-1}$ reeds na $\approx 1,0$ seconde.



Figuur 3.2.4/2 – Snelheidsontwikkeling waterdruppels in Klimaatcascade - beginsnelheid 5 m.s^{-1}

Figuur 3.2.4/3 laat de snelheidsontwikkeling zien van de verschillende spectra voor een beginsnelheid 10 m.s^{-1} , die wordt gerealiseerd bij een voordruk van $0,5 \text{ bar}$. Vergelijking met figuur 3.2.4/2 leert dat

de eindsnelheid onafhankelijk is van de beginsnelheid, hetgeen ook uit de volgende berekeningen blijkt –zie figuur 3.2.4/5 en formule 3.2.4/6.



Figuur 3.2.4/3 – Snelheidsontwikkeling waterdruppels in Klimaatcascade - beginsnelheid 10 m.s⁻¹

De minimum voordruk voor de meeste sproeiers is 0,5 bar waarbij een beginsnelheid in het sproeispectrum wordt gerealiseerd van $\approx 10 \text{ m.s}^{-1}$. Figuur 3.2.4/2 is opgenomen als illustratie van het feit dat de eindsnelheid onafhankelijk is van de beginsnelheid. Alle verdere beschouwingen gaan uit van een beginsnelheid van 10 m.s^{-1}

De eindsnelheid $w_{v,t}$ van een waterdruppel, waarbij de zwaartekracht $m \cdot g$ in evenwicht is met de weerstandskracht F_w wordt gegeven door de formule

$$m \cdot g = F_w = 0,5 \rho_l \cdot (w_{v,t} - w_l)^2 \cdot C_w \cdot A \quad (3.2.4/4)$$

Die ook kan worden geschreven als

$$w_{dr,t} = w_l + \sqrt{\frac{2 \cdot m \cdot g}{\rho \cdot A_{dr} \cdot C_w}} \quad (3.2.4/5)$$

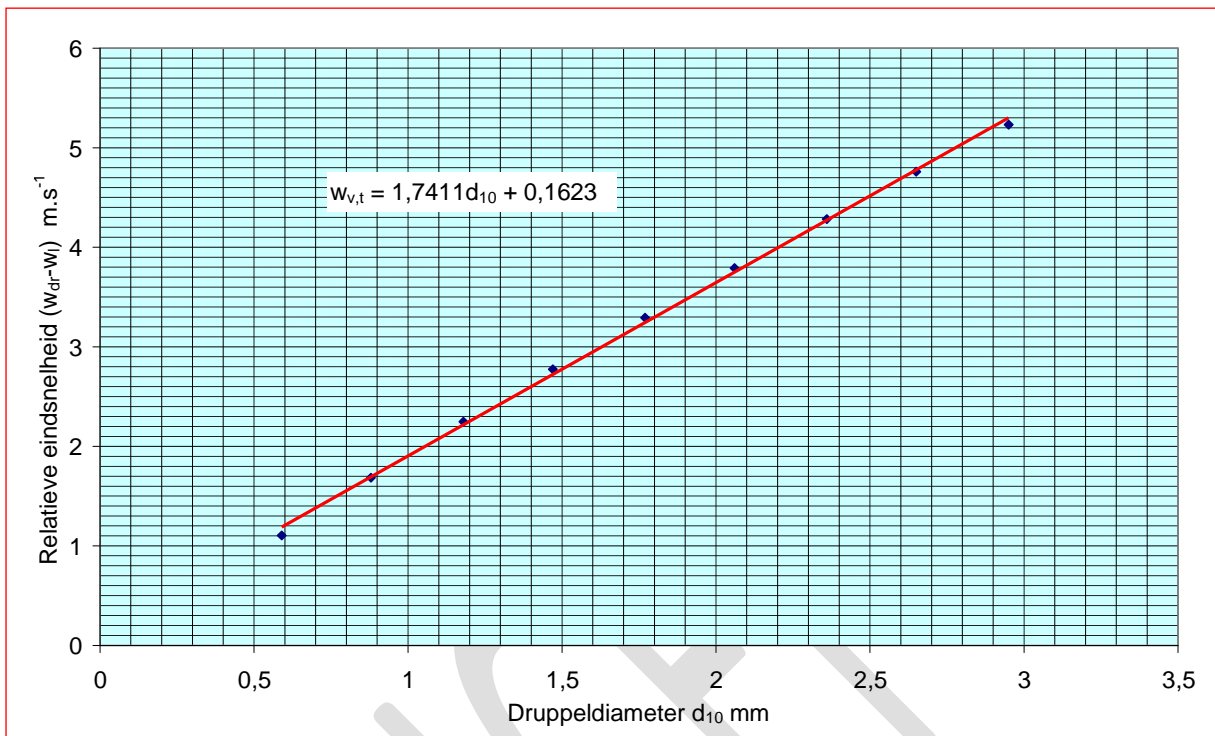
Waarin

$w_{dr,t}$	= eindsnelheid van een druppel	[m.s ⁻¹]
w_l	= luchtsnelheid	[m.s ⁻¹]
m	= massa van de druppel	[kg]
g	= gravitatieversnelling	[m.s ⁻²]
A	= geprojecteerd oppervlak druppel	[m ²]
C_w	= weerstandscoefficiënt	[-]

De weerstandscoefficiënt C_w is volgens formule (3.2.4/3) afhankelijk van het getal van Reynolds (Re) dat op zijn beurt weer afhankelijk is van de druppelsnelheid. Formule (3.2.4/5) is daarom iteratief uitgewerkt voor druppelverzamelingen met $d_{10} = 0,5 - 3,0 \text{ mm}$, zie figuur 3.2.4/5 waarin de relatieve eindsnelheid is aangegeven gebaseerd op een luchtsnelheid van $2,0 \text{ m.s}^{-1}$ in de Klimaatcascade. De functie kan worden weergegeven door de vergelijking

$$w_{v,t} = 1,7411 d_{10} + 0,1623 \quad (3.2.4/6)$$

Zoals hier boven reeds opgemerkt is de eindsnelheid van een waterdruppel onafhankelijk van de beginsnelheid. Voor het sproeisysteem betekent dit dat de beginsnelheid laag kan worden gehouden; de zwaartekracht doet dan zijn werk om de eindsnelheid te bereiken. De voordruk bij de sproeiers kan dan ook laag zijn waardoor de pompenergie kan worden beperkt.



Figuur 3.2.4/5 – Relatieve eindsnelheid ($w_{dr} - w_l$) voor $w_l = 2,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Voor de navolgende berekeningen van de warmteoverdracht in een Klimaatcascade is gerekend met de *gemiddelde* druppelsnelheid in de sproeizone. Er wordt hierbij geen grote fout gemaakt als de *gemiddelde* snelheid gelijk wordt gesteld aan de *eindsnelheid*. De figuren 3.2.4/2 en 3.2.4/3 maken duidelijk dat deze voor de fijnere sproeispectra zeer snel wordt bereikt. De grovere sproeispectra met zwaardere druppels komen alleen in aanmerking voor hoge gebouwen met langere valtijden, waardoor het gemiddelde eveneens een redelijk benadering blijft.

De valsnelheid van druppels in een Klimaatcascade kan worden vergeleken met de valsnelheid van regendruppels, die door verschillende wetenschappers is gemeten (o.a. Spilhaus, A.F. 1948 en Beard, K.V. 1976). Er blijkt een redelijke overeenstemming te zijn met de theoretisch bepaalde waarden.

Voor de bepaling van de verblijfstijd van een waterdruppel in een Klimaatcascade is de absolute valsnelheid van belang. Voor de berekening van de warmteovergangscoefficiënt moet worden uitgegaan van de relatieve valsnelheid ten opzicht van de lucht. In de navolgende analyses is voorlopig uitgegaan van een luchtsnelheid van $2,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ in de Klimaatcascade.

3.2.5 Werkzaam oppervlak van de druppelverzameling in de sproeizone

Het massadebiet water dat nodig is om de warmteoverdracht tussen lucht naar water te realiseren wordt uitgedrukt in de formule

$$q_{m,w} = \frac{\Phi}{c_w (\theta_{uit} - \theta_{in})} \quad (3.2.5/1)$$

Waarin

$q_{m,w}$	massadebiet water	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$
Φ	warmtestroom of thermisch vermogen	$[\text{kJ} \cdot \text{s}^{-1}]$
c_w	soortelijke warmte van water	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$
θ_{uit}	watertemperatuur uitrede	$[^{\circ}\text{C}]$
θ_m	watertemperatuur intrede	$[^{\circ}\text{C}]$

De verzameling van waterdruppels in de sproeizone wordt gekarakteriseerd door de equivalente diameters d_{10} , d_{30} en d_{32} - zie paragraaf 3.2.3.

Het aantal druppels dat per tijdseenheid in de Klimaatcascade wordt gevormd, wordt bepaald door het massadebiet en de equivalente druppeldiameter d_{30} volgens de formule

$$n = \frac{6q_{m,w}}{\pi \cdot (d_{30} \cdot 10^{-2})^3} \quad (3.2.5/2)$$

Waarin

n aantal druppels [s⁻¹]

Het cumulatieve oppervlak van n druppels met een equivalente diameter d_{32} is

$$A = n \cdot \pi \cdot (d_{32} \cdot 10^{-3})^2 \quad (3.2.5/3)$$

De valsnelheid van een druppelverzameling met de equivalente druppeldiameter d_{30} is volgens formule (3.2.4.6)

$$w_{v,t} = 1,7411d_{10} + 0,1623 \quad (3.2.5/4)$$

De gemiddelde verblijfstijd van een druppelverzameling met de equivalente druppeldiameter d_{30} is

$$t = \frac{H}{w_{v,t}} \quad (3.2.5/5)$$

Waarin

t verblijfstijd [s]
 H hoogte van de Klimaatcascade [m]
 $w_{v,t}$ valsnelheid [ms⁻¹]

Het aantal druppels dat zich tegelijkertijd in de Klimaatcascade bevindt wordt berekend door vermenigvuldiging van de vergelijkingen (10.4.19) en (10.4.22)

$$n = \frac{6q_v}{\pi \cdot (d_{30} \cdot 10^{-2})^3} * \frac{H}{w_{v,t}} \quad (3.2.5/6)$$

Het cumulatieve oppervlak van deze druppelverzameling wordt berekend door combinatie van de vergelijkingen (3.2.5/3) en (3.2.5/6)

$$A_{dr} = \frac{6q_v}{(d_{30} \cdot 10^{-2})^3} * \frac{H}{w_{v,e}} * (d_{32} \cdot 10^{-3})^2 \quad (3.2.5/7)$$

3.2.6 Warmteovergangscoefficiënt in de sproeizone

De warmteoverdrachtscoëfficiënt door convectie $h_{c,dr}$ in de sproeizone van lucht op waterdruppels is een functie van verschillende variabelen, zoals temperatuur, snelheid van de media, viscositeit, warmtegeleidingscoëfficiënten, turbulente of laminaire stroming en geometrie van de druppels. Voor $h_{c,dr}$ kan de volgende relatie worden gebruikt (El-Morsi, M.S. 2002, Ranz, W.E. et al. 1952):

$$Nu = \frac{h_{c,dr} \cdot d_{10}}{\lambda} = 2 + 0,6Pr^{2/3} \cdot Re^{1/2} \quad (3.2.6/1)$$

Waarin

Nu getal van Nusselt [-]
 $h_{c,dr}$ warmteoverdrachtscoëfficiënt [W.m⁻².K⁻¹]
 λ warmtegeleidingscoëfficiënt [W.m⁻¹.K⁻¹]
 Pr getal van Prandl [-]
 Re getal van Reynolds [-]

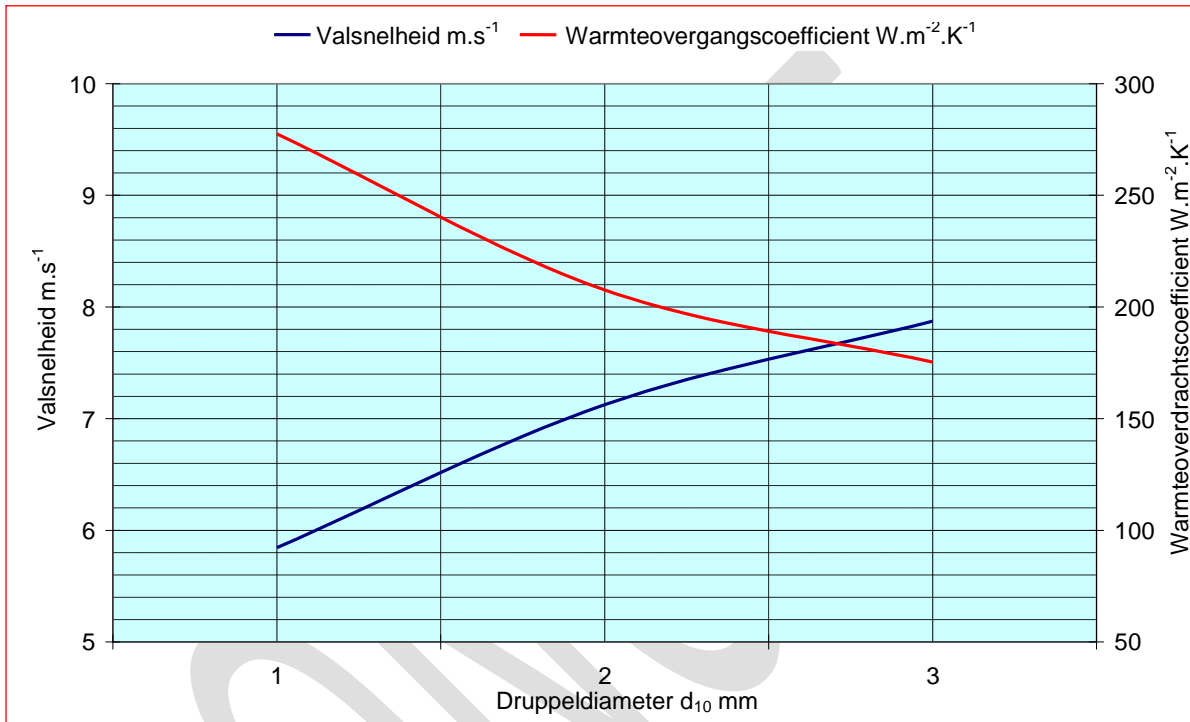
Voor lucht in het temperatuurbereik van 20°C - 40°C geldt $Pr \approx 0,71$ (Recknagel 2010).

$$Re = \frac{(w_{dr} - w_{\infty}) \cdot d_{10}}{\nu} \quad (3.2.6/2)$$

Waarin

w_{dr}	snelheid van de waterdruppel	$[m \cdot s^{-1}]$
w_{∞}	snelheid van de lucht	$[m \cdot s^{-1}]$
ν	kinematische viscositeit	$[m^2 \cdot s^{-1}]$

De relatieve luchtsnelheid ($w_{\infty} - w_d$) van een waterdruppel ten opzichte van de lucht is in hoge mate afhankelijk van de druppeldiameter d - zie paragraaf 10.4.4. In figuur 3.2.6 zijn de relatieve valsnelheden van waterdruppels met een diameter van 1–3 mm aangegeven alsmede de met formule (3.2.6/1) berekende warmteovergangscoefficienten.



Figuur 3.2.6 – Valsnelheid druppels en warmteoverdrachtscoëfficiënt water/lucht van diameter d_{10}

3.2.7 Stofoverdrachtscoëfficiënt in de sproeizone

Voor de stofoverdrachtscoëfficiënt K_{dr} van waterdamp op waterdruppels in de sproeizone kan de volgende relatie worden gebruikt (El-Morsi, M.S. 2002, Ranz, W.E. et al. 1952):

$$Sh = \frac{K_{dr} \cdot d_{10}}{ID} = 2 + 0,6Sc^{1/3} \cdot Re^{1/2} \quad (3.2.7/1)$$

Waarin

Sh	=	Getal van Sherwood	$[-]$
K_{dr}	=	stofoverdrachtscoëfficiënt	$[m \cdot s^{-1}]$
d_{10}	=	diameter waterdruppel	$[m]$
ID	=	diffusiecoëfficiënt waterdamp	$[m^2 \cdot s^{-1}]$
Sc	=	Getal van Schmidt	$[-]$
Re	=	Getal van Reynolds – zie (3.2.6/2)	$[-]$

$$Sc = \frac{\nu}{ID} \quad (3.2.7/2)$$

Waarin

ν	=	kinematische viscositeit	$[m^2 \cdot s^{-1}]$
-------	---	--------------------------	----------------------

De diffusiecoëfficiënt van waterdamp in lucht kan worden benaderd met de formule (ASHRAE 2001)

$$ID = \frac{0,926}{p} \left(\frac{T^{2,5}}{T + 245} \right) \cdot 10^{-6} \quad (3.2.7/3)$$

Waarin

p	druk	[kPa]
T	temperatuur	[K]

Bij een luchttemperatuur van 25°C en een druk van 101,325 kPa wordt de diffusiecoëfficiënt ID berekend op 25,8·10⁻⁶ [m²·s⁻¹]. Een berekening volgens het Handboek Installatietechniek (ISSO 2000) geeft vrijwel dezelfde uitkomst.

Het Handboek Installatietechniek geeft voor het getal van Schmidt Sc = 0,63 bij een temperatuur van 20°C. Gecorrigeerd naar 25°C kan worden gerekend met Sc = 0,65.

Met een gemiddelde waarde van ID = 25·10⁻⁶ wordt kan de stofoverdrachtscoëfficiënt K_{dr} in de sproeizone worden berekend met de formule

$$K_{dr} = \frac{Sh \cdot ID}{d_{10}} = \frac{(50 + 13 Re^{1/2}) \cdot 10^{-6}}{d_{10}} \quad (3.2.7/4)$$

3.2.8 Invloed van de wanden op de warmteoverdracht

Niet alle door het sproeisysteem toegevoerde koelwater komt in de sproeizone terecht. Een deel van de druppels valt op de wanden van de Klimaatcascade en stroomt naar beneden. Als de watertoevoer groot genoeg is worden op het wandoppervlak stroompjes gevormd. Bij toenemende watertoevoer worden de stroompjes breder totdat uiteindelijk het gehele wandoppervlak is bedekt met een benedenwaarts stromende waterfilm. De dikte van de waterfilm is een functie van het toegevoerde massadebiet water en van de schuifkracht tussen wandoppervlak en water, die bepaald wordt door adhesiekrachten en de aard van het oppervlak.

Er is veel theoretisch en experimenteel onderzoek gedaan naar de karakteristieken van waterfilms langs verticale vlakke platen (Portalski, S. 1963, Zhou, D.W. et al. 2009, Ambrosini, W. et al. 2002, Mikielewicz, J. et al. 1976, Rao, B.K. 1999, Yan, W.M. et al. 1990, Doniec, A. 1988).

De theoretische dikte van een vallende waterfilm langs een vlak en glad oppervlak met verwaarlozing van de adhesieve schuifkracht op de *interface* water/wand, kan worden berekend met de formule (Nusselt, W. 1916; Zhou, D.W. 2009)

$$\delta = \left[\frac{3 \cdot \nu \cdot \Gamma_N}{\rho \cdot g \cdot \sin \beta} \right]^{1/3} \quad (3.2.8/1)$$

Waarin

δ	dikte van de waterfilm	[m]
ν	kinematische viscositeit	[m ² ·s ⁻¹]
Γ	toegevoerde volumestroom	[kg·s ⁻¹]
Γ_N	waterdebiet per breedte-eenheid	[kg·s ⁻¹ ·m ⁻¹]
ρ	dichtheid van water	[kg·m ⁻³]
g	gravitatieconstante	[m·s ⁻²]
β	hellingshoek van het oppervlak	[°]

Voorbeeld:

Een Klimaatcascade met een doorsnede van 1,7*1,7 m² en een massadebiet water van 2,1 kg·s⁻¹, waarvan 15% op de wanden van de cascade valt – $\Gamma = 0,15 \cdot 2,1 = 0,315$ kg·s⁻¹.

De dikte van de waterfilm wordt berekend op $\delta = 0,24$ mm

De minimum dikte van een waterfilm voordat deze uiteenvalt in afzonderlijke stroompjes is experimenteel gemeten op $\approx 0,15$ mm (Mikielewicz, J. et al. 1976). Onder de vermelde condities is in het voorbeeld dus sprake van een gesloten waterfilm en draagt het gehele wandoppervlak bij aan de warmteoverdracht.

De valsnelheid van de waterfilm is een functie van de volumestroom dat op de wanden van de cascade valt en de dikte van de film. Uit de continuïteitsvergelijking volgt de formule

$$w = \frac{\Gamma}{\delta * L} \quad (3.2.8/2)$$

Waarin

w valsnelheid [m.s⁻¹]
L lengte van de film [m] = omtrek van de cascade

In het voorbeeld wordt de valsnelheid berekend op $w = 0,19 \text{ m.s}^{-1}$

3.2.9 **Werkzame oppervlak van de binnenwanden**

Als door voldoende watertoevoer op het wandoppervlak een gesloten waterfilm ontstaat, is het werkzame oppervlak van een Klimaatcascade gelijk aan het fysieke wandoppervlak. Uitgaande van een rechthoekige doorsnede met gelijke zijden wordt het oppervlak hiervan berekend met de formule

$$A_{wnd} = 4.H \sqrt{\frac{q_{v,l}}{w_l}} \quad (3.2.9/1)$$

Waarin

A_{wnd} wandoppervlak [m²]
 $q_{v,l}$ volumedebiet lucht [m³s⁻¹]
 w_l lichtsnelheid [m.s⁻¹]
H hoogte Klimaatcascade [m]

3.2.10 **Warmteovergangscoefficiënt wanden en lucht**

Voor de convectieve warmteovergangscoefficiënt CWC in een zonneschoorsteen is in hoofdstuk 4 voor $w > 1 \text{ m.s}^{-1}$ de benaderingsformules afgeleid

$$h_{c,m} = 7,65w \quad (4.2.4/9)$$

In een Klimaatcascade is de turbulentie-intensiteit in de luchtstroom, veroorzaakt door de vallende waterdruppels, waarschijnlijk groter dan in een Zonneschoorsteen. Hierdoor zou een grotere CWC kunnen worden verwacht waardoor formule (4.2.4/9) waarschijnlijk aan de veilige kant is.

Bij lichtsnelheden van $1,5 - 2,5 \text{ m.s}^{-2}$ wordt de CWC berekend op $h_{c,m} = 11,5 \dots 19,1 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$, hetgeen realistische waarden lijken. Voor het bepalen van de warmteoverdracht aan de wanden van de Klimaatcascade is in de navolgende analyses van formule (4.2.4/9) gebruik gemaakt.

Dat het hier, in tegenstelling tot een zonneschoorsteen, om een nat vlak gaat speelt kennelijk geen rol. De warmte weerstand van een dunne waterfilm is immers verwaarloosbaar klein. Dit wordt bevestigd door globaal literatuuronderzoek op het gebied van warmteoverdracht in verdampers en condensors (Kandlikar, S.G. 2006)

De wandtemperatuur θ_{wnd} is mede afhankelijk van de uitvoering van de Klimaatcascade. Bij een transparante uitvoering in glas vindt er tevens warmte-uitwisseling plaats met de omgeving. Bij een visueel gesloten uitvoering wordt de Klimaatcascade in principe geïsoleerd en is het proces van warmteoverdracht adiabatisch.

3.2.11 **Stofoverdrachtscoefficient wanden en lucht**

Tussen stof- en warmteoverdracht bestaat voor niet te kleine Re-waarden een analogie, uitgedrukt in de formule (Handboek Installatietechniek):

$$Nu.(Re)^{-1} . (Pr)^{1/3} = Sh. (Re)^{-1} . (Sc)^{1/3} \quad (3.2.11/1)$$

Hieruit volgt voor de stofoverdrachtscoefficient K_w

$$K_w = \frac{h_c}{\rho.c_p} \cdot \left[\frac{Pr}{Sc} \right]^{2/3} \quad (3.2.11/2)$$

Waarin

K_w	= stofoverdrachtscoëfficiënt op wand	$[m.s^{-1}]$
h_c	= convectieve warmteoverdrachtscoëfficiënt	$[W.m^{-2}.K^{-1}]$
ρ	= dichtheid van de lucht	$[kg.m^{-3}]$
c_p	= soortelijke warmte van de lucht	$[J.kg^{-1}.K^{-1}]$
Pr	= getal van Prandtl	$[-]$
Sc	= getal van Schmidt $\approx 0,65$ bij $\approx 25^{\circ}C$	$[-]$ zie paragraaf 9.11

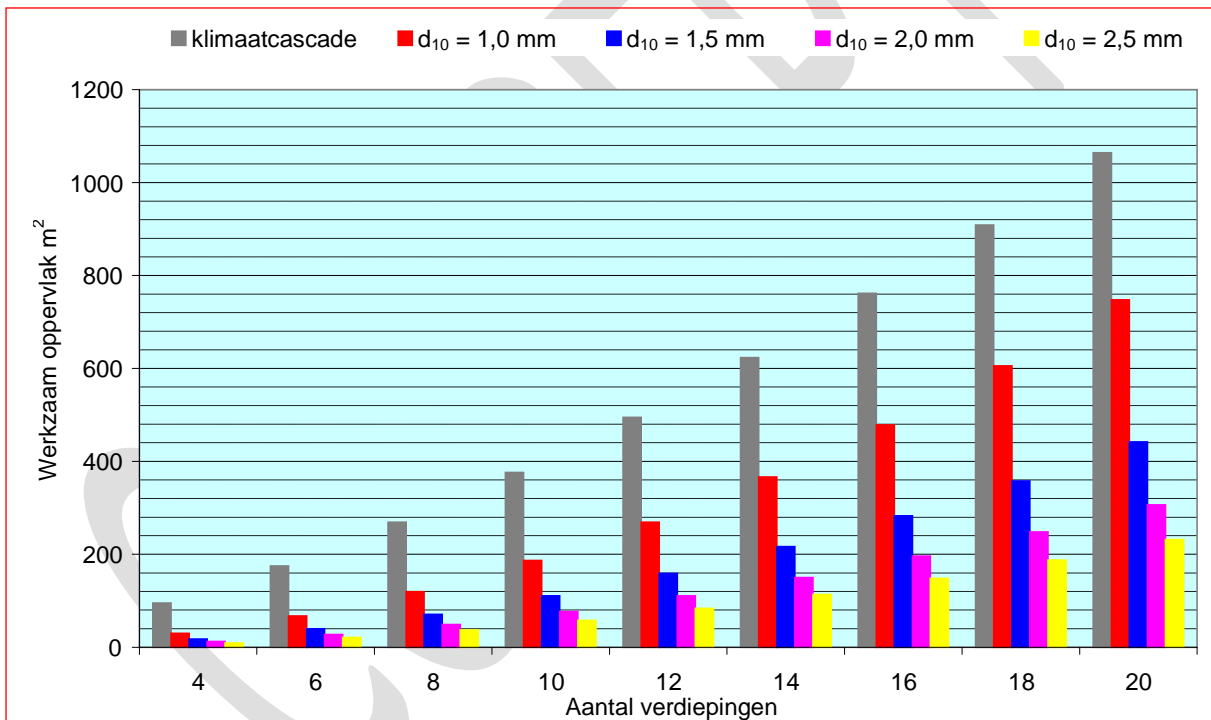
Bij lucht van $20^{\circ}C$ is het getal van Prandtl 0,71 (Recknagel 2012). De stofoverdrachtscoëfficiënt wordt dan berekend met de formule

$$K = 0,875 \cdot 10^{-3} \cdot h_c \quad (3.2.11/3)$$

Voor het bepalen van het warmte-effect door condensatie en verdamping aan de wanden van de Klimaatcascade wordt in de navolgende analyses van formule (3.4.11/3) gebruik gemaakt.

3.2.12 Sproeispectrum en werkzaam oppervlak Klimaatcascade

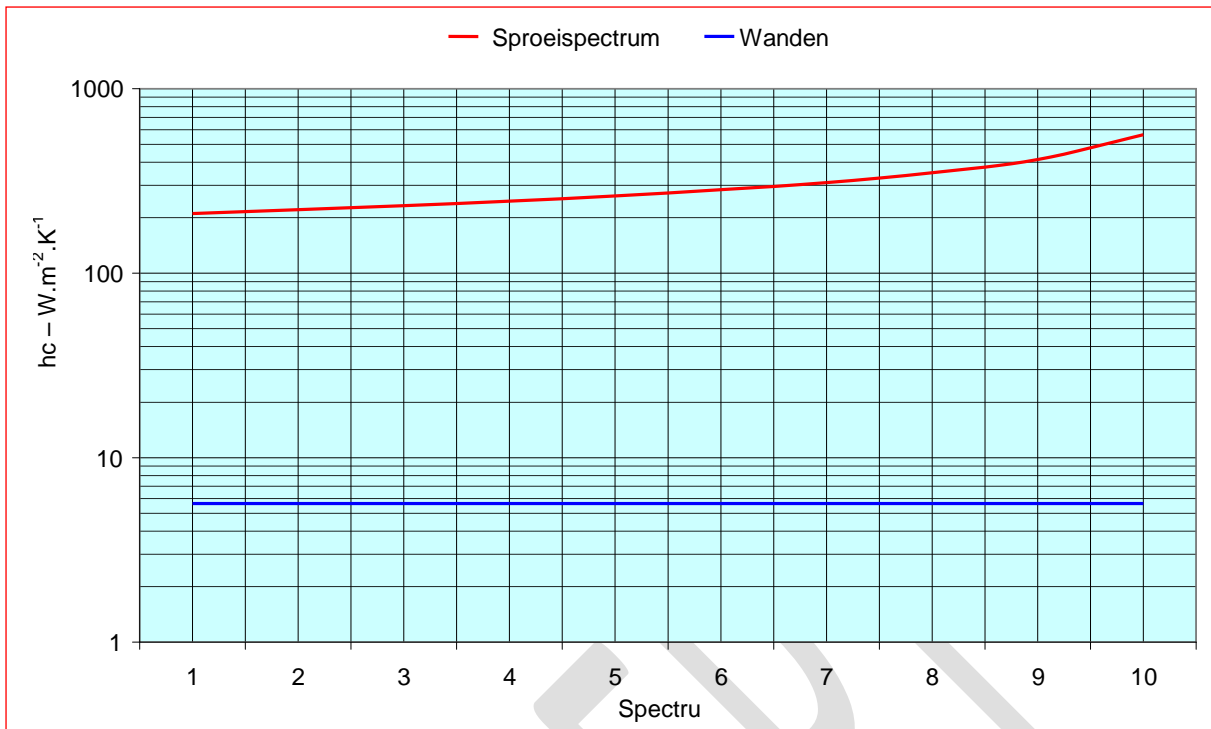
Figuur 3.2.12 laat de vergroting zien van het werkzame oppervlak van een Klimaatcascade als een fijner sproeispectrum wordt gebruikt. Uitgegaan is van een luchtsnelheid van $1,5 m.s^{-1}$. Verkleining van de druppelgrootte is een bijzonder effectief middel om het werkzame oppervlak te vergroten. Het wandoppervlak speelt een grote rol bij een grover sproeispectrum.



Figuur 3.2.12 – Werkzaam oppervlak Klimaatcascade als functie van sproeispectrum en hoogte

3.2.13 Sproeispectrum en warmteoverdrachtscoëfficiënt

Figuur 3.2.13 geeft de vergroting weer van de warmteovergangcoëfficiënt bij gebruik van een fijner sproei patroon. De warmteovergangcoëfficiënt van de wanden blijft hierbij gelijk, maar deze is slechts een kleine fractie van die in de sproeizone. Uitgegaan is van een luchtsnelheid in de Klimaatcascade van $1,5 m.s^{-1}$



Figuur 3.2.13 – Warmteoverdrachtscoëfficiënt h_c in de sproeizone als functie van het sproeispectrum

3.2.14 Invloed van het sproeispectrum

Het benodigde sproeispectrum wordt hoofdzakelijk bepaald door de benodigde koelprestatie. In hogere gebouwen met een langere contacttijd tussen water en lucht kan in principe met een grover sproeispectrum worden gewerkt.

De warmteoverdracht in een Klimaatcascade is evenredig met de warmteovergangscoefficiënt en met het werkzaam oppervlak.

De warmteovergangscoefficiënt neemt toe bij een fijner sproeispectrum met kleinere druppels –zie figuur 3.2.13.

Het werkzaam oppervlak van de druppelverzameling is omgekeerd evenredig met de gemiddelde druppeldiameter op volume VMD of d_{30} . Een fijner sproeispectrum geeft dus een groter werkzaam oppervlak –zie figuur 3.2.12.

Het werkzaam oppervlak van de druppelverzameling is afhankelijk van de verblijfstijd van de druppels in de cascade. Deze neemt toe bij kleinere druppels met een lagere valsnelheid, en is dus eveneens omgekeerd evenredig met de gemiddelde druppeldiameter op volume VMD of d_{30} .

Om een zo groot mogelijke warmteoverdracht te realiseren zou dus gekozen moeten worden voor een zo fijn mogelijk sproeispectrum. Een fijner sproeispectrum heeft echter ook nadelen, te weten:

- De vereiste voordruk bij de sproeier neemt toe waardoor het pompvermogen en het inherente energiegebruik stijgen.
- Kleinere druppels kunnen zich als aerosolen gaan gedragen en met de ventilatielucht worden meegevoerd, hetgeen ongewenst is.
- Door de lagere valsnelheid van kleinere druppels zal de aerodynamische trek minder zijn dan bij grotere druppels zie paragraaf 3.xx.
- De kleine gaatjes in de hiervoor benodigde sproeiers zijn gevoelig voor verstopping, waardoor de potentiële onderhoudskosten kunnen stijgen.

De keuze van het sproeispectrum is dus altijd een compromis. Paragraaf 3.xxx gaat verder op dit aspect in.

3.2.15 Drukopbouw in de Klimaatcascade

3.2.15.1 Inleiding

De Klimaatcascade zorgt niet alleen voor het conditioneren van de ventilatielucht, maar levert eveneens een positief drukverschil ten behoeve van de luchtdistributie in het aangesloten gebouw. Dit drukverschil komt tot stand door de opgewekte aerodynamische trek, de hydraulische trek en de neerwaartse thermische trek. Anders dan de door het Ventecdak en de Zonneschoorsteen geleverde externe drukverschillen, die variëren met de weersomstandigheden, is de interne drukopbouw in de Klimaatcascade, die immers berust op de zwaartekracht, redelijk stabiel. Het is de combinatie van externe en interne drukverschillen die gedurende een zo groot mogelijke deel van de bedrijfstijd de gewenste luchtverplaatsing in een gebouw in stand moet houden.

3.2.15.2 Aerodynamische trek

Aerodynamische trek in een Klimaatcascade berust op de inducerende werking van vallende waterdruppels op lucht.

Het aerodynamisch gedrag van vloeistofstralen is door enkele onderzoekers theoretisch geanalyseerd (Rothe P.H. et al. 1977; Ghosh S. et al. 1994). Het gaat hierin hoofdzakelijk over de straalontwikkeling en impulsoverdracht in vrije stralen, zoals in toepassingen voor industrie, tuinbouw en brandbestrijding.

In een Klimaatcascade is maar zeer beperkt sprake van een vrije straal; deze is beperkt tot de inductiezone direct na de sproeier. Zodra de druppels de wanden van de cascade hebben bereikt kan de straal zich niet verder meer uitbreiden en is de sproeizone beperkt tot de cascade. Omdat er dan geen lucht van buiten meer wordt geïnduceerd houdt de verdere ontwikkeling van de straal op en zijn de druppels alleen onderhevig aan de zwaartekracht en de luchtweerstand –zie figuur 3.2.15/1 en paragraaf 3.2.4.

De lengte L van de inductiezone wordt bepaald door de sproeihoek Φ en de doorsnede van de Klimaatcascade D volgens de relatie

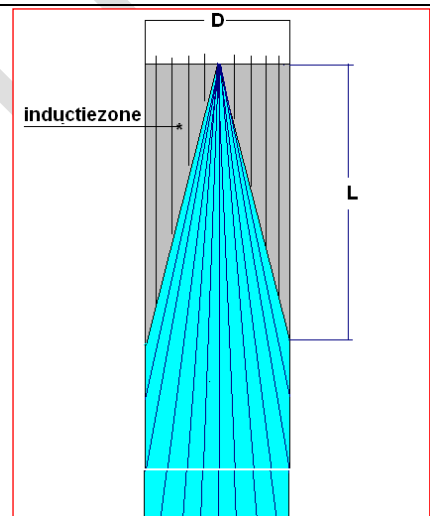
$$L = \frac{0,5D}{\operatorname{tg}(\Phi/2)}$$

Voorbeeld:

$D = 2 \text{ m}$ en $\Phi = 30^\circ - L = 3,73 \text{ m}$

De aerodynamische trek wordt door 4 factoren bepaald:

- Het waterdebiet;
- De initiële snelheid van de waterstraal;
- Het sproeispectrum;
- De sproeihoek Φ en de geometrie van de cascade.



Figuur 3.2.15/1 - Straalontwikkeling

De hierboven genoemde referenties geven een gecompliceerde analytische benadering van het aerodynamische gedrag in de sproeizone op druppelniveau, echter zonder experimentele validatie. Ook het onderzoek naar adiabatische koeling in *Direct Evaporative Cooling Towers*, zie paragraaf 3.1.6 levert geen aanknopingspunten op met betrekking tot aerodynamische trek.

De aerodynamische trek in een Klimaatcascade kan worden benaderd met behulp van de impulsvergelijking

$$m \cdot \Delta w = F \cdot \Delta t \quad (3.2.15/1)$$

Waarin

m	druppel ­ massa	[kg]
Δw	$w_i - w_t$	[m.s ⁻¹]
w_i	initiele druppel ­ snelheid	[m.s ⁻¹]

w_i	eindsnelheid druppels	[m.s ⁻¹]
F	krachtsuitwisseling	[N]
Δt	tijdverschil (w_i en w_t)	[s]

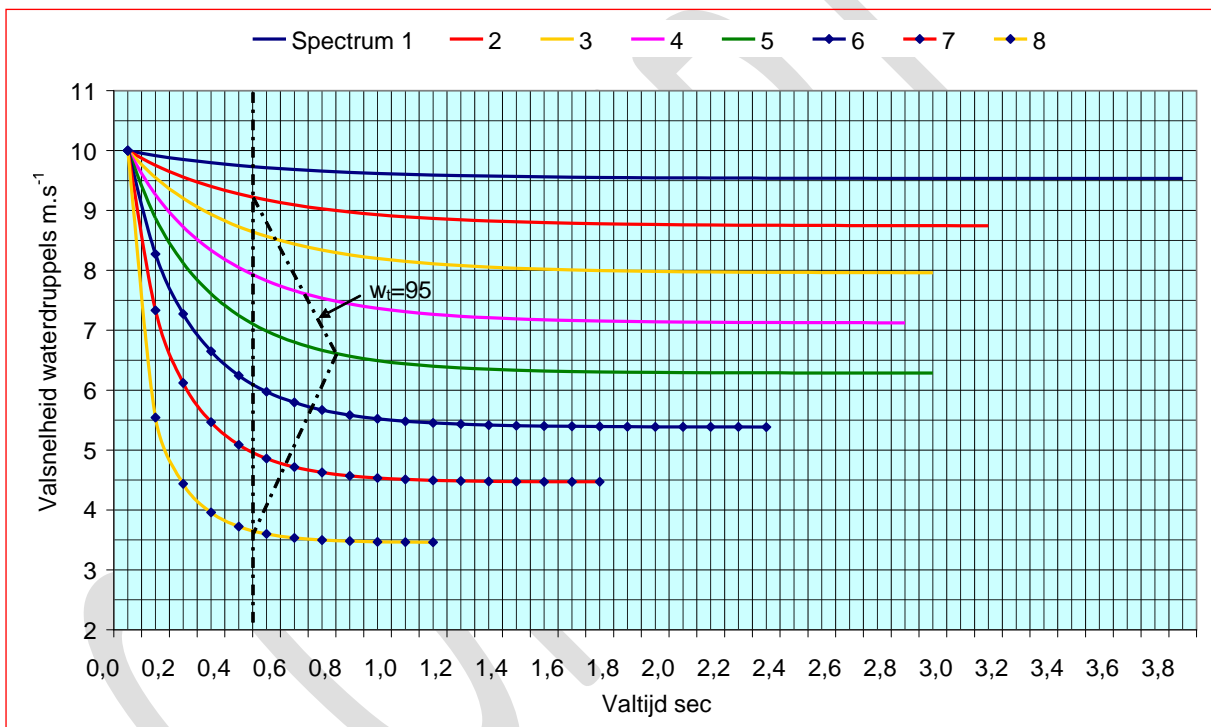
Als de initiële druppelsnelheid w_i hoger is dan de eindsnelheid w_t kan hierdoor in theorie een druk worden gegenereerd van

$$\Delta p_{ae} = \frac{F}{A} = \frac{m}{A \cdot \Delta t} \cdot \Delta w = \frac{\Phi_{dr}}{A} \cdot \Delta w \quad (3.2.15/2)$$

Waarin

Δp_{ae}	aerodynamische trek	[Pa]
A	doorsnede Klimaatcascade	[m ²]
Φ_{dr}	massastroomdichtheid water	[kg.s ⁻¹]

Figuur 3.2.15/2 geeft een beeld van de snelheidsontwikkeling van druppels in verschillende sproeispectra voor een initiële druppelsnelheid $w_i = 10 \text{ m.s}^{-1}$. Voor het fijnste sproeispectrum 8 is $w_i - w_t = (10 - 3,5) = 6,5 \text{ m.s}^{-1}$.



Figuur 3.2.15/2 – Snelheidsontwikkeling waterdruppels in Klimaatcascade bij $w_i = 10 \text{ m.s}^{-1}$

De massastroomdichtheid van het water is via de water/luchtfactor $R_{w/L}$ gerelateerd aan het luchtdebiet –zie paragraaf 3.1.8.

Rekenvoorbeeld:

Voor een luchtdebiet van $q_v \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, overeenkomend met $\approx 1,2q_m \text{ kg.s}^{-1}$ en $R_{w/L} = 1,4$ is het waterdebiet $\Phi_{dr} = 1,68q_m \text{ kg.s}^{-1}$

Het oppervlak A van de Klimaatcascade voor een luchtdebiet van $q_v \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ is bij een luchtsnelheid van $2 \text{ m.s}^{-1} = 0,5q_v \text{ m}^2$. Hieruit volgt een maximaal bereikbare aerodynamische trek

$$\Delta p_{ae} = \frac{1,68q_v}{0,5q_v} \cdot 6,5 = 21,8 \text{ Pa}$$

Voorwaarde hiervoor is dat tijdens de overgang van w_i naar w_t de straal zich vrij kan uitbreiden. Deze uitbreiding houdt op zodra de sproeistraal de wanden van de cascade heeft bereikt, hetgeen het geval is na 0,5.....0,8 seconden, afhankelijk van de sproeihoek en het sproeispectrum; zie figuur 3.2.15/2.

De hierin getekende lijnen $w_t = 95\%$ staan voor de tijd dat de sproeistraal 95% van de eindsnelheid heeft bereikt. Observatie van deze figuur leidt tot de volgende conclusies:

- Voor het meest grove spectrum 1 is het verschil tussen de initiële snelheid en de eindsnelheid van de druppels slechts $\approx 0,5 \text{ m.s}^{-1}$. De aerodynamische trek is dan verwaarloosbaar.
- Voor het fijnste spectrum 8 is het verschil tussen de initiële snelheid en de eindsnelheid van de druppels zoals hierboven aangegeven $\approx 6,5 \text{ m.s}^{-1}$. De gemiddelde snelheid in dit traject is $\approx 6,75 \text{ m.s}^{-1}$, hetgeen inhoudt dat de straal de wanden van de cascade bij een uitvoering volgens figuur 3.2.15/1 na $\approx (3,73/6,75=) 0,55$ seconden raakt, iets na het bereiken van de eindsnelheid. De boven berekende waarden van de aerodynamische trek zouden dan correct moeten zijn.
- Voor spectrum 5 is het verschil tussen de initiële snelheid en de eindsnelheid van de druppels zoals hierboven aangegeven $\approx (10-6,3=) 3,7 \text{ m.s}^{-1}$. De gemiddelde snelheid in dit traject $\approx 8,15 \text{ m.s}^{-1}$, hetgeen inhoudt dat de straal de wanden van de cascade bij een uitvoering volgens figuur 10.13.1 na $\approx (3,73/8,15=) 0,45$ seconden raakt, ruim voor het bereiken van de eindsnelheid. De aerodynamische trek moet dan ook kleiner zijn dan uit de berekening met formule (3.2.15/2) zou volgen.

De algemene conclusie luidt dat de aerodynamische trek het grootst is bij de kleinste druppelgrootte. Het verschil tussen de initiële snelheid en eindsnelheid is hierbij het grootst en tevens wordt de eindsnelheid bereikt voordat de wand wordt geraakt. De geometrische verhoudingen van de Klimaatcascade en de sproeihoek zijn mede bepalende factoren.

De bijdrage van de aerodynamische trek aan deze drukopbouw is moeilijk te bepalen. In tegenstelling tot een Klimaatcascade met vrije uitmonding is de luchtsnelheid immers niet afhankelijk van de aerodynamische trek. De wind, de neerwaartse hydraulische en thermische trek en de hulpventilator zijn afzonderlijk en in combinatie dominant en bepalend voor de luchtsnelheid waarvoor de Klimaatcascade wordt ontworpen.

In de fysieke testopstelling is ook het totale drukverschil in de Klimaatcascade gemeten - zie paragraaf 3.4. Het aandeel van de aerodynamische trek hierin was niet afzonderlijk vast te stellen.

3.2.15.3 Hydraulische trek²⁹

Veronderstel een stilstaande luchtkolom, die gezien de aanwezigheid van een bodem gemiddeld ook niet zal gaan bewegen. In deze luchtkolom bewegen zich druppels naar beneden met een constante snelheid, die een functie is van de druppeldiameter, en bij grotere druppeldichtheid, door het ontstaan van turbulenties etc., ook van de hoeveelheid druppels. Bij een constant waterdebiet is de hoeveelheid water in 1 m^3 lucht, de “waterdichtheid” ρ_{wk}

$$\rho_{wk} = \frac{\Phi_{dr}}{A \cdot w_{dr}} \quad (3.2.15/3)$$

Waarin

ρ_{wk}	waterdichtheid in de lucht	$[\text{kg.m}^{-3}]$
Φ_{dr}	waterdebiet	$[\text{kg.s}^{-1}]$
A	oppervlak van de kolom	$[\text{m}^2]$
w_{dr}	druppelsnelheid	$[\text{m.s}^{-1}]$

Omdat de druppels een constante snelheid hebben is er evenwicht tussen de zwaartekracht op de druppels en de wrijvingskracht van de lucht –zie formule (3.2.4/4). De totale kracht die door de druppels op 1 m^3 lucht wordt uitgeoefend is gelijk aan het totale gewicht aan water in het volume ρ_{wk} . De druppels zorgen dan ook voor een toename van de drukgradiënt over de kolom, bovenop de normale statische drukgradiënt ten gevolge van het gewicht van de lucht van

$$\frac{dp}{dh} = \rho_{wk} \cdot g = \frac{\Phi_{dr}}{A \cdot w_{dr}} \cdot g \quad [\text{Pa.m}^{-1}] \quad (3.2.15/4)$$

Waarin

g	gravitatieversnelling	$[\text{m.s}^{-2}]$
-----	-----------------------	---------------------

Dit is dus eigenlijk niet meer dan een toename van de dichtheid van het water/luchtmengsel ten opzichte van lucht.

²⁹ Aanen, Lourens 2010

De drukgradiënt is afhankelijk van het waterdebiet en de druppelgrootte; deze bepaalt immers de valsnelheid van de druppels. Bij een gelijk waterdebiet is er bij grotere druppels minder water in de luchtkolom aanwezig, waardoor de drukgradiënt kleiner is. Echter, bij gelijke hoeveelheid water in de kolom is de drukgradiënt onafhankelijk van de druppelgrootte.

Bij deze beschouwing is uitgegaan van een gelijkmatige verdeling van de druppels over het oppervlak van de kolom. Als dat niet het geval is ontstaan er in de kolom verschillen in drukgradiënten wat zal leiden tot circulaties binnen de kolom.

Als de kolom aan de onderzijde niet gesloten is, zoals bij een Klimaatcascade, blijft deze beschouwing in principe onveranderd. De constante eindsnelheid van de druppels ten opzichte van de lucht blijft gelijk. De absolute valsnelheid van de druppels wordt in dit geval vermeerderd met de lichtsnelheid. Bij hetzelfde waterdebiet wordt de waterdichtheid dus kleiner. In formule

$$\rho_{wk} = \frac{\Phi_{dr}}{A \cdot (w_{dr} + w_l)} \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}] \quad (3.2.15/5)$$

Waarin

$$w_l = \text{luchtsnelheid} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$$

En daardoor ook de drukgradiënt

$$\frac{dp}{dh} = \rho_{wk} \cdot g = \frac{\Phi_{dr}}{A \cdot (w_{dr} + w_l)} \cdot g \quad [\text{Pa} \cdot \text{m}^{-1}] \quad (3.2.15/6)$$

Het effect van turbulentie op de valsnelheid is hierbij niet in rekening gebracht.

De bovenstaande beschouwing geldt alleen voor het deel van de Klimaatcascade waarin de druppels hun eindsnelheid hebben bereikt. In het gedeelte waarin dit niet het geval is leveren de druppels een extra kracht op de lucht, die afhankelijk is van de initiële snelheid van de druppels, de aerodynamische trek - zie paragraaf 3.2.15/2.

Met behulp van formule (3.2.15/6) en het rekenmodel ad paragraaf 3.2.16 is de hydraulische trek berekend voor gebouwen van 4 tot 20 verdiepingen bij een lichtsnelheden van $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$. De berekeningen zijn gebaseerd op een netto vloeroppervlak $nvo = 1.000 \text{ m}^2$ per verdieping en een ventilatiecapaciteit van $5 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, betrokken op nvo.

Om het energiegebruik van de sproeipomp te beperken is uitgegaan is van een zo laag mogelijke waarde van de water/luchtfactor en is het bijbehorend sproeispectrum zodanig gekozen dat bij de ontwerp zomerconditie van $28^\circ\text{C} - 55\% \text{ RV}$ de gewenste uittredetemperatuur van $\approx 17^\circ\text{C}$ wordt gerealiseerd. Bij $R_{w/L} = 0,9$ wordt hierbij een hydraulische trek van 6,25 Pa per verdieping gerealiseerd zie tabel 3.2.15.

Als bij de gemiddelde zomerconditie van $20^\circ\text{C} - 80\% \text{ RV}$ door het uitschakelen van sproeiers de water/luchtfactor wordt gereduceerd tot $R_{w/L} = 0,3$ en bedraagt de hydraulische trek nog 2,1 Pa per verdieping. Zie ook paragraaf 3.5.2 – 3.5.4.

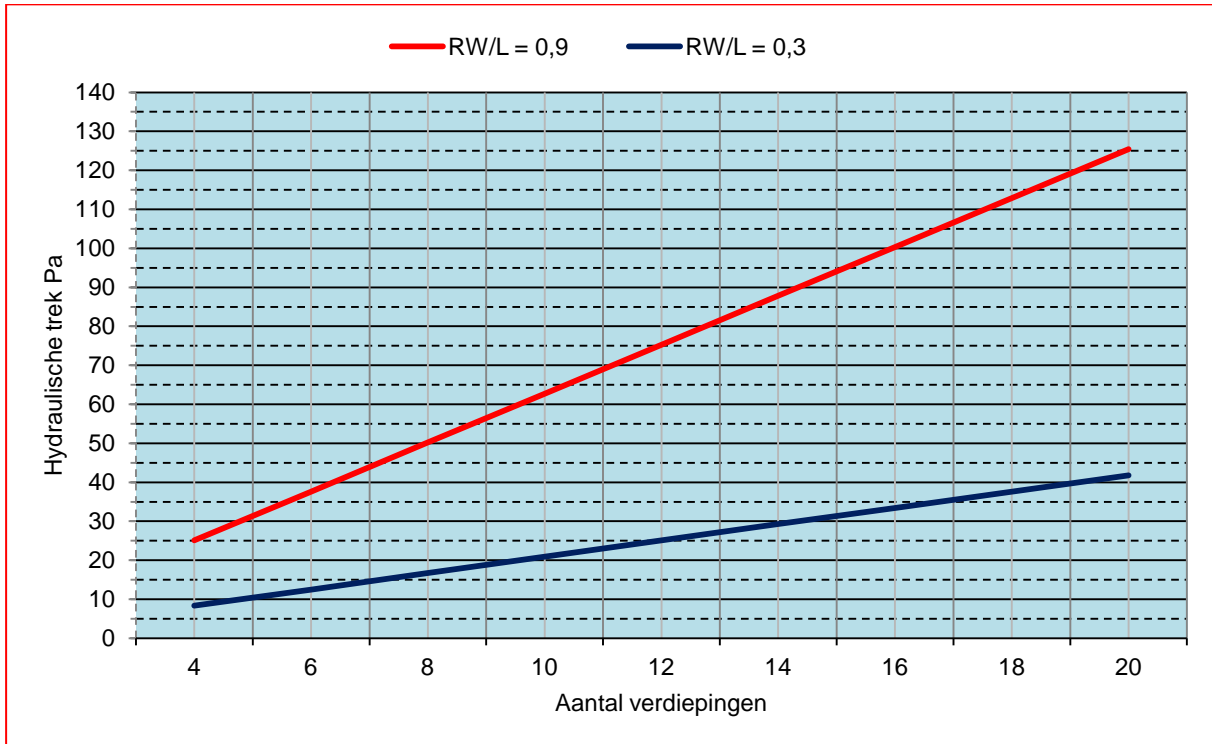
Aantal verdiepingen →	4	6	8	10	12	14	16	18	20
Ontwerp zomerconditie - $R_{w/L} = 0,9$									
Sproeispectrum nr. →	8	7	6	5	4	3	2	1	1
$\Delta p_{\text{hydr.}} [\text{Pa}]$ →	25,1	37,6	50,2	62,7	75,3	87,8	100,3	112,9	125,4
$\Delta p_{\text{hydr.}} [\text{Pa}]$ per verd.	$\approx 6,25$								
Gemiddelde zomercondities - $R_{w/L} = 0,3$									
$\Delta p_{\text{hydr.}} [\text{Pa}]$ →	8,4	12,5	16,7	20,9	25,1	29,3	33,4	37,6	41,8
$\Delta p_{\text{hydr.}} [\text{Pa}]$ per verd. →	$\approx 2,1$								

Tabel 3.2.15 – Water/Luchtfactor $R_{w/L}$, sproeispectra en hydraulische trek als functie van aantal verdiepingen – $w = 2,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

De resultaten van de berekeningen zijn ook aangegeven in figuur 3.2.15/3.

Het waterdebiet Φ_{dr} is evenredig met het aantal verdiepingen. Bij hogere gebouwen is het sproeispectrum grover met een inherent hogere valsnelheid w_{dr} van de waterdruppels. In formule (3.2.15/6) houden teller en noemer elkaar daardoor in evenwicht.

Het verloop van de druppelsnelheid over de hoogte van de Klimaatcascade is overigens in het rekenmodel slechts bij benadering verwerkt waardoor afwijkingen van de rekenresultaten mogelijk zijn –zie paragraaf 3.2.16. Gezien de positieve resultaten van het validatieproces –zie paragraaf 3.4- is geen poging ondernomen het rekenmodel nog te verbeteren.



Figuur 3.2.15/3 - Hydraulische trek in Klimaatcascade als functie van aantal verdiepingen en water/luchtfactor – $w = 2,0 \text{ m.s}^{-1}$

3.2.15.4 Thermische trek

Een Klimaatcascade levert door de gerealiseerde temperatuurverschillen ook thermische trek. In het koelseizoen, als buitenlucht wordt gekoeld en een temperatuurverschil met de buitentemperatuur ontstaat, is de thermische trek neerwaarts gericht (negatief) en versterkt, tezamen met de aerodynamische en de hydraulische trek de drukopbouw. In het stookseizoen is de thermische trek opwaarts gericht (positief) en verzwakt daarmee de drukopbouw.

In paragraaf 4.2.6 is voor de thermische trek in een zonneshoorssteen formule (4.2.6/1) afgeleid:

$$\Delta p = \rho_0 \left[\frac{T_0}{T_1} - \frac{T_0}{T_2} \right] \cdot g \cdot H \quad (4.2.6/1)$$

In deze formule is T_1 de buitentemperatuur en T_2 de gemiddelde temperatuur in de klimaatcascade. In het koelseizoen is $T_2 < T_1$ en is Δp negatief. Voor het stookseizoen is de situatie omgekeerd.

3.2.16 Rekenmodel

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

Om dit mogelijk te maken is een gebruiksvriendelijk rekenmodel gemaakt dat met een muisklik het spelen met de vele variabelen mogelijk maakt en de consequenties daarvan voor het ontwerp en de dimensionering in beeld brengt.

Een rekenmodel voor het warmte- en massatransport in een Klimaatcascade is ontwikkeld door specialisten van de afdeling Architectural Engineering + Technology van de TU Delft, faculteit Bouwkunde (Spoel, W. v.d. en Bokel, R. 2010-2011)³⁰. Hierbij is voortgebouwd op de analyse van de fysische processen volgens paragraaf 3.2.1 – 3.2.15.

Het rekenmodel is ontwikkeld vanuit twee invalshoeken, respectievelijk op basis van fysische beschouwing van de warmte- en massabalans en op basis van differentiaalvergelijkingen. De fysische processen zijn uiteraard voor beide invalshoeken gelijk, en de eindresultaten van de twee benaderingen verschillen dan ook niet³¹.

Invoerparameters van het rekenmodel zijn de hoogte van de Klimaatcascade, het volumedebiet en de temperatuur en relatieve vochtigheid van de lucht. De luchtsnelheid, de water/luchtfactor, het sproeispectrum en de watertemperatuur kunnen vrij worden gekozen. Door iteratie van de variabelen kan de gewenste uittredeconditie van de lucht worden bepaald bij de energetisch of anderszins optimale omstandigheden. De hydraulische en thermische trek worden als afgeleide hiervan berekend.

Een bètaversie van het rekenmodel in MS-EXCEL is gebruikt voor de berekeningen van koelprestaties in paragraaf 3.4 en voor het optimaliseren van het ontwerp van de fysieke testopstelling ad paragraaf 3.5. Verschillende effecten, die invloed zouden kunnen hebben op de berekeningsresultaten, 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 terecht komt, 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.

Het verloop van de druppelsnelheid over de hoogte van de Klimaatcascade is overigens in het rekenmodel slechts bij benadering verwerkt waardoor afwijkingen van de rekenresultaten mogelijk zijn –zie paragraaf 3.2.16. Gezien de positieve resultaten van het validatieproces –zie paragraaf 3.4- is geen poging ondernomen het rekenmodel nog te verbeteren –zie ook de opmerking bij paragraaf 3.2.15.3.

Voorbeeld

Figuur 3.2.16 toont een met behulp van het rekenmodel uitgewerkt voorbeeld van een Klimaatcascade voor een gebouw van 4 verdiepingen, hoogte 14 m, luchtdebiet 20.000 m³.h⁻¹, water/luchtfactor 1,2. Aangegeven zijn de warmteovergangscoefficiënt, het werkzaam druppeloppervlak en het aantal druppels in de cascade voor de sproeispectra 1 t/m 10.

De effectiviteit van de Klimaatcascade ten opzichte van de traditionele indirecte koeling, waarbij lucht langs een watervoerende pijpenbundel stroomt, blijkt uit de volgende eigenschappen:

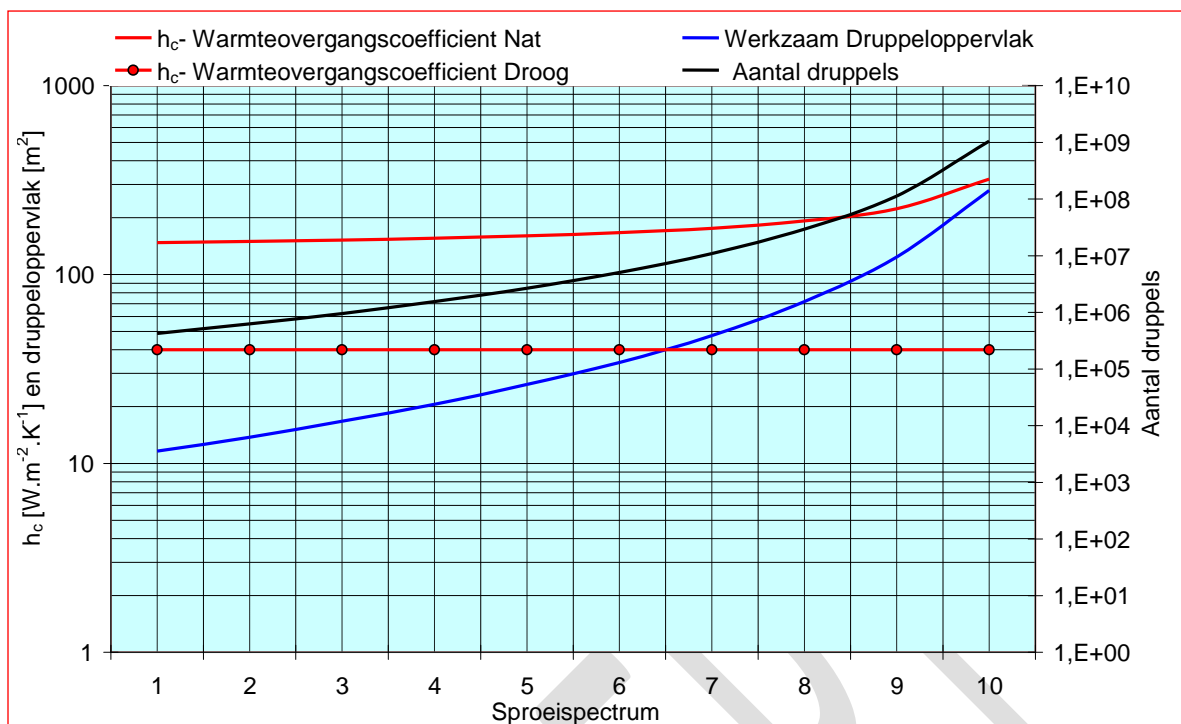
- De hoge warmteovergangscoefficiënt, oplopend van $h_c \approx 150$ bij spectrum 1 tot 300 W.m⁻².K⁻¹ bij spectrum 10, en daarmee globaal genomen 3 tot 6 keer zo hoog als bij traditionele koelsystemen – zie de eveneens in de grafiek aangegeven waarde voor droge koeling van $h_c \approx 40$ W.m⁻².K⁻¹.
- Het grote werkzaam oppervlak van de druppelverzameling, oplopend van ≈ 12 tot 280 m², en daarmee nauwelijks vergelijkbaar met een traditioneel systeem.

Het aantal druppels in deze Klimaatcascade loopt op van $\approx 10^6$ bij het grove spectrum 1 naar $\approx 10^9$ bij het fijnste spectrum 10

In de klimaattechniek worden traditionele indirecte koelsystemen compact uitgevoerd, met als gevolg hoge drukverliezen, die met behulp van een ventilator moet worden opgebracht. De Klimaatcascade daarentegen levert positieve druk aan het luchtverdeelsysteem – zie paragraaf 3.3.

³⁰ Dr.ing.Marije Trcka van TU/e is hierbij als reviewer opgetreden

³¹ Zie het onderzoeksrapport deel III (Bronsema, B. 2012)



Figuur 3.2.16 – Warmteovergangscoefficiënt, druppeloppervlak en aantal druppels als functie van het sproeispectrum

3.3 Gedetailleerde modellering

3.3.1 Inleiding

Met de basale modellering ad paragraaf 3.2 is vertrouwen gewekt in het concept van de Klimaatcascade en met behulp van het rekenmodel ad paragraaf 3.2.16 zijn de prestaties hiervan globaal gesimuleerd. Gezien het innovatieve karakter en de inherente onbekendheid met de toepassing van sproeitechnologie voor klimaatregeling is het noodzakelijk het rekenmodel te verifiëren met behulp van een meer geavanceerd simulatiemodel. Numerieke stromingssimulaties met behulp van CFD komt hiervoor als eerste in aanmerking –zie paragraaf 1.8.3.

Een tweede en niet minder belangrijke reden voor het gebruik van CFD voor de ontwikkeling van de Klimaatcascade was de selectie van de benodigde sproeiers voor de fysieke testopstelling. Met behulp van het 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. Deze partner is gevonden in Dr.-Ing. Stefan Markus van Spraying Systems Deutschland GmbH, tijdelijk lid van het onderzoeksteam. Spraying Systems is gespecialiseerd in adiabatische koeling van hete rookgassen met behulp van watersproeiers, hetgeen in bepaalde gevallen nodig is om filtersystemen te beschermen tegen de hoge temperatuur van deze gassen. Diabatische koeling van lucht ten behoeve van klimaatregeling was voor het bedrijf een onbekende technologie, die voor het onderzoek *Earth, Wind & Fire* moest worden ontwikkeld.

Voor bestudering van het dynamisch gedrag van een Klimaatcascade en voorspellingen van de energieprestaties is het geavanceerde ESP-r model gebruikt –zie paragraaf 3.3.4 en 1.8.4.

3.3.2 De CFD simulaties

De simulaties zijn uitgevoerd met de algemene CFD code van ANSYS FLUENT. Omdat deze code standaard niet geschikt is voor de modellering van het koelproces met condensatie in een Klimaatcascade, is hiervoor in samenwerking met Fluent Germany een speciale UDF³² ontwikkeld.

Het CFD simulatiemodel ten behoeve van de Klimaatcascade heeft enkele beperkingen, namelijk:

³² User Defined Function

- Het sproeispectrum komt pas op enige afstand van de sproeier tot ontwikkeling. Direct na het verlaten van de sproeier is de waterstraal nog niet opgebroken in afzonderlijke druppels. Door de uitzonderlijk hoge druppeldichtheid is modellering met CFD in deze fase niet goed mogelijk. Pas na een afstand van ca 1000 mm heeft het spectrum zich voldoende ontwikkeld en gestabiliseerd om met CFD te kunnen worden gemodelleerd.
- Niet alle door het sproeisysteem toegevoerde koelwater komt in de sproeizone terecht. Een deel van de druppels valt op de wanden van de Klimaatcascade, en doet daarom maar beperkt mee aan het koelproces. Hoe groot dit aandeel is valt nauwelijks te voorspellen; in het fysieke onderzoeksmodel is dit aandeel gemeten –zie paragraaf 3.4.x.
- Bij het gebruik van meerdere kleine sproeiers gaan de sproeispectra elkaar op enige afstand overlappen, waardoor de druppelgrootteverdeling meer uiteen gaat lopen dan bij één enkele sproeier.

Verwacht werd dat deze beperkingen de simulatieresultaten niet teveel zouden beïnvloeden, hetgeen bij de validatie een juiste veronderstelling bleek te zijn.

Voor een volledig verslag van de CFD simulaties wordt verwezen naar de desbetreffende rapportage *CFD Simulations Climate Cascade for Project Earth, Wind & Fire* (Markus, S. 2010B)

3.3.3 Het CFD simulatiemodel

Om de CFD simulaties te kunnen valideren is een 3D model ontworpen dat overeenkomt met het fysieke onderzoeksmodel zoals in paragraaf 3.4.x beschreven.

Om na te gaan of de simulatie met voldoende betrouwbaarheid kan worden opgeschaald naar ware grootte is ook een model ontwikkeld voor een gebouw van 8 verdiepingen –zie paragraaf 3.4.x.

3.3.4 Voorselectie van de sproeiers

Met behulp van het basale rekenmodel is een analyse gemaakt van de koelprestaties van het fysieke model van de Klimaatcascade en de daarvoor benodigde massadebiten en temperaturen van het koelwater. Aanvankelijk is hierbij nog onderscheid gemaakt voor de klimaat/gebouwtypen ALPHA en BETA volgens het conceptueel psychometrisch ontwerp ad paragraaf 3.1.7.5 met luchttemperaturen bij uittrede van de Klimaatcascade van respectievelijk 20°C en 17°C – zie tabel 3.1.7/3. In verband met de aanbevolen grenswaarde van de absolute luchtvochtigheid in de ruimte van 12 g.kg⁻¹ is het type ALPHA echter buiten beschouwing gelaten –zie paragraaf 3.1.9.

De te bereiken koelprestatie kan worden gemanipuleerd door variatie van (1) de water/luchtfactor en (2) het sproeispectrum. Bij een lagere water/luchtfactor hoort een fijner sproeispectrum en vice versa. De relatieve vochtigheid moet hierbij << zijn dan 100%. De berekende varianten zijn aangegeven in tabel 3.3.4.

Klimaat/gebouw type BETA								
R _{w/L}	kg.kg ⁻¹	1,40	1,30	1,20	1,10	1,00	0,90	0,85
θ _{w,in}	°C	13,0	13,5	13,8	13,5	13,0	13,2	13,1
θ _{w,uit}	°C	15,7	16,3	16,7	16,7	16,5	16,9	17,0
spectrum	nummer	5	6	7	7	7	8	9
θ _{air,in}	°C	28,0	28,0	28,0	28,0	28,0	28,0	28,0
θ _{air,uit}	°C	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0
RV _{air,uit}	%	93	95	97,0	97,0	96,0	99,0	100,0
Δp	Pa	47,4	44,0	40,6	37,3	33,9	30,5	28,8
q _{m,water}	kg.s ⁻¹	0,84	0,78	0,72	0,66	0,60	0,54	0,51
q _{m,water}	m ³ .h ⁻¹	3,02	2,81	2,59	2,38	2,16	1,94	1,84

Tabel 3.3.4 – Overzicht koelprestaties

Om het pompvermogen te minimaliseren is voor de sproeiersselectie uitgegaan van een zo klein mogelijke water/luchtfactor bij een relatieve luchtvochtigheid bij uittrede <<100%. Hieruit volgt de keuze voor een water/lucht verhouding R_{w/L} = 1,00 kg.kg⁻¹ bij sproeispectrum nr. 7 en een koelwaterdebiet van 0,6 kg.s⁻¹. Voor de hierbij behorende sproeispectra en druppelkarakteristiek zie paragraaf 3.2.3, tabel 3.2.3/2 en figuur 3.2.3/2.

3.3.5 Sproeierselectie door Spraying Systems

Op basis van tabel 3.3.4 is door Spraying Systems een voorselectie gemaakt van de mogelijk te gebruiken sproeiers. Criteria hiervoor zijn:

- De verwachte congruentie met de berekende druppelgrootteverdeling.
- Een hoog massadebiet bij een zo laag mogelijke druk (< 1 bar).
- Een kleine sproeihoek (30°) om zo weinig mogelijk water op de wanden te sproeien.
- Een volledig gevulde sproeizone – geen holle kegel model.
- Minimaal aantal sproeiers om de aanschaf- en onderhoudskosten laag te houden.
- Bij meerdere sproeiers in de vierkante Klimaatcascade is het aantal beperkt tot 4 of 5.

Figuur 3.3.5, ontleend aan de catalogus van Spraying Systems GmbH, laat enkele sproeiers zien waaruit op basis van deze criteria een keuze kon worden gemaakt.



Figuur 3.3.5 – Mogelijke sproeiers t.b.v. de selectie door Spraying Systems

Als eerste werd een type FullJet[®] 1-1/2HH-30250 geselecteerd (figuur 3.3.5 rechts), waarvan een druppelgrootteverdeling bij benadering bekend was. Een oriënterende CFD simulatie met deze sproeier toonde aan dat hiermee niet de gevraagde koelcapaciteit kon worden bereikt.

Een kleinere sproeier type FullJet[®] 3/4GG-3050 (figuur 3.3.5 midden) met een fijner sproeispectrum gaf bij een iets verhoogde water/luchtverhouding globaal genomen wel het gewenste resultaat, maar hiervan waren 5 stuks nodig. Besloten werd voor beide sproeiers een CFD simulatie uit te voeren. Voor een zo realistisch mogelijke simulatie werd van beide sproeiers de druppelgrootteverdeling nauwkeurig gemeten.

3.3.6 Meting van de druppelgrootteverdeling

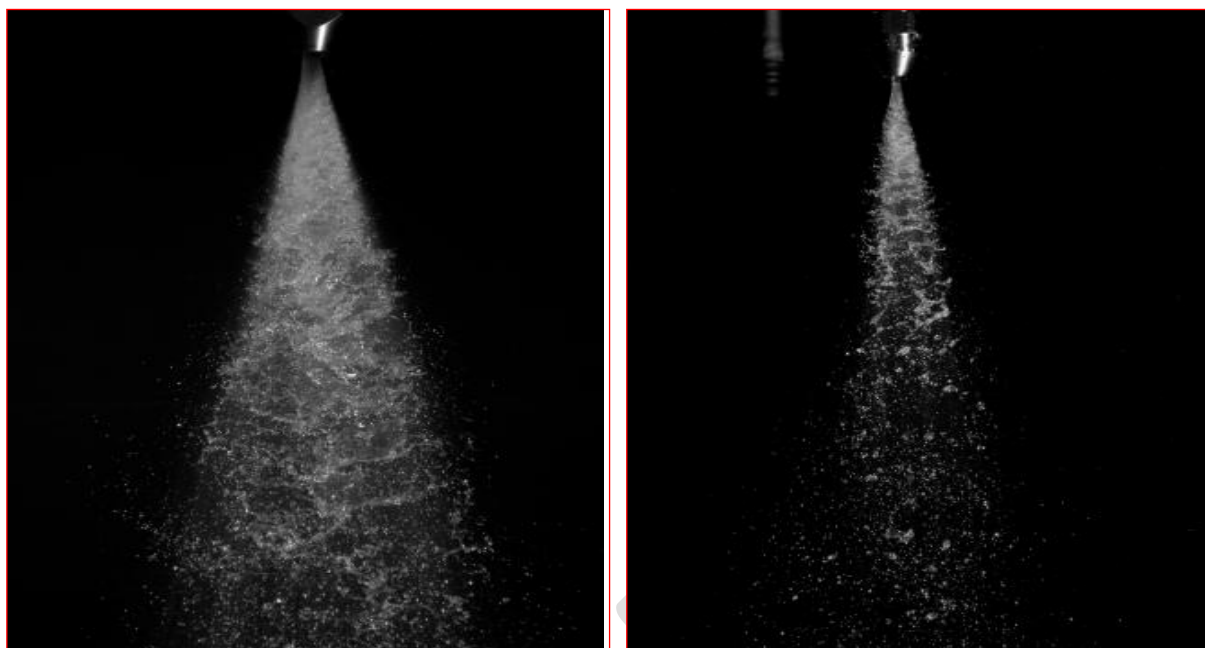
De druppelgrootteverdeling van de geselecteerde sproeiers zoals ingevoerd bij de oriënterende CFD simulaties berustte op verouderde gegevens, en gold alleen bij hogere drukken dan voor de Klimaatcascade gewenst. Om een betrouwbare CFD simulatie mogelijk te maken zijn de sproeispectra daarom bij een lage druk van 0,5 bar gemeten in het laboratorium van Spraying Systems Deutschland. Documentatie van Spraying Systems Co. geeft uitgebreide informatie over de meetsystematiek die hiervoor gebruikt is (Schick, Rudolf J. 2010).

3.3.7 Druppelgrootteverdeling

Figuur 3.3.7/1 laat de sproeipatronen zien van de twee onderzochte sproeiers met een massadebiet van respectievelijk $\approx 42 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ voor type 1-1/2HH-30250, en $\approx 8,23 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ voor type 3/4GG-3050.

De figuur laat duidelijk zien dat het spectrum van de grotere sproeier (links) compacter is dan die van het kleinere type (rechts). De druppelgrootteverdeling werd gemeten op een afstand van 1000 mm van de sproeier. Het sproeispectrum heeft zich op deze afstand voldoende ontwikkeld en gestabiliseerd.

De grote sproeier type FullJet[®] 1-1/2HH-30250 bleek ook bij een herhaalde CFD simulatie met het gemeten sproeipatroon niet de gewenste koelcapaciteit te leveren. De simulaties zijn daarom uitgevoerd met 5 stuks van de kleinere sproeier type FullJet[®] 3/4GG-3050. Dit type is uiteraard ook voor de metingen in de fysieke testopstelling gebruikt.



Figuur 3.3.7/1 –Sproei patroon type 1-1/2HH-30250 (links) en 3/4GG-3050 (rechts) bij 0,5 bar voordruk
De druppelgrootteverdeling volgens de metingen van Spraying Systems is aangegeven in tabel 3.3.7.

Current Y Position ³³	0	50	100	150	200
Counts	8118	6462	3284	5808	1700
Data Rate (Hz)	18,3	13,5	8,0	5,4	1,6
Diameter Min (µm)	28,6	26,3	201,6	186,2	220,5
Diameter Max (µm)	3346,6	3171,0	3227,9	3208,7	2565,3
D ₁₀ PVC ³⁴ (µm)	734,3	769,1	800,9	842,0	869,8
D ₂₀ PVC (µm)	867,2	890,1	914,3	937,0	939,7
D ₃₀ PVC (µm)	1006,6	1018,6	1035,0	1033,4	1009,2
D ₃₂ PVC (µm)	1356,2	1333,9	1326,3	1257,0	1164,1

Tabel 3.3.7 – Druppelgrootteverdeling sproeier FullJet[®] 3/4GG-3050 bij een voordruk van 0,5 bar

Voor de validatie van het basale rekenmodel, het CFD model en het ESP-r model, en een goede onderlinge prestatievergelijking, dient voor alle simulaties dezelfde druppelstatistiek te worden ingevoerd. Op advies van Spraying Systems zijn hiervoor gemiddelde waarden gebruikt van respectievelijk $D_{30} = 1048 \mu\text{m}$ en $D_{32} = 1317 \mu\text{m}$. Een vergelijking met tabel 3.2.3/2 leert dat dit spectrum tussen de gedefinieerde spectra 8 en 9 ligt en daarmee aanzienlijk fijner is dan spectrum 7 dat voor de voorselectie van de sproeiers is gebruikt.

Voor het volledige meetrapport van de sproeiers wordt verwezen naar het “*Test Report Drop Size Analysis*” van Spraying Systems Deutschland GmbH (Markus, S. 2010).

3.3.8 CFD simulaties fysiek testmodel

3.3.8.1 Invoergegevens

De simulaties voor het fysieke testmodel zijn uitgevoerd met de in tabel 3.3.8 vermelde gegevens. Deze zijn berekend met behulp van het basale rekenmodel op basis van de gemeten druppelgrootteverdeling voor de FullJet[®] sproeiers 3/4GG-3050 bij een voordruk van 0,5 bar. De volumestroom van het water is voor alle simulaties constant. De watertemperatuur van 13°C is voor de ontwerp winterconditie iets verhoogd.

³³ De *current Y position* is de radiale afstand vanuit hart van de sproeier

³⁴ *Probe Volume Corrected*, een correctie voor de gebruikte Phase Doppler Interferometer.

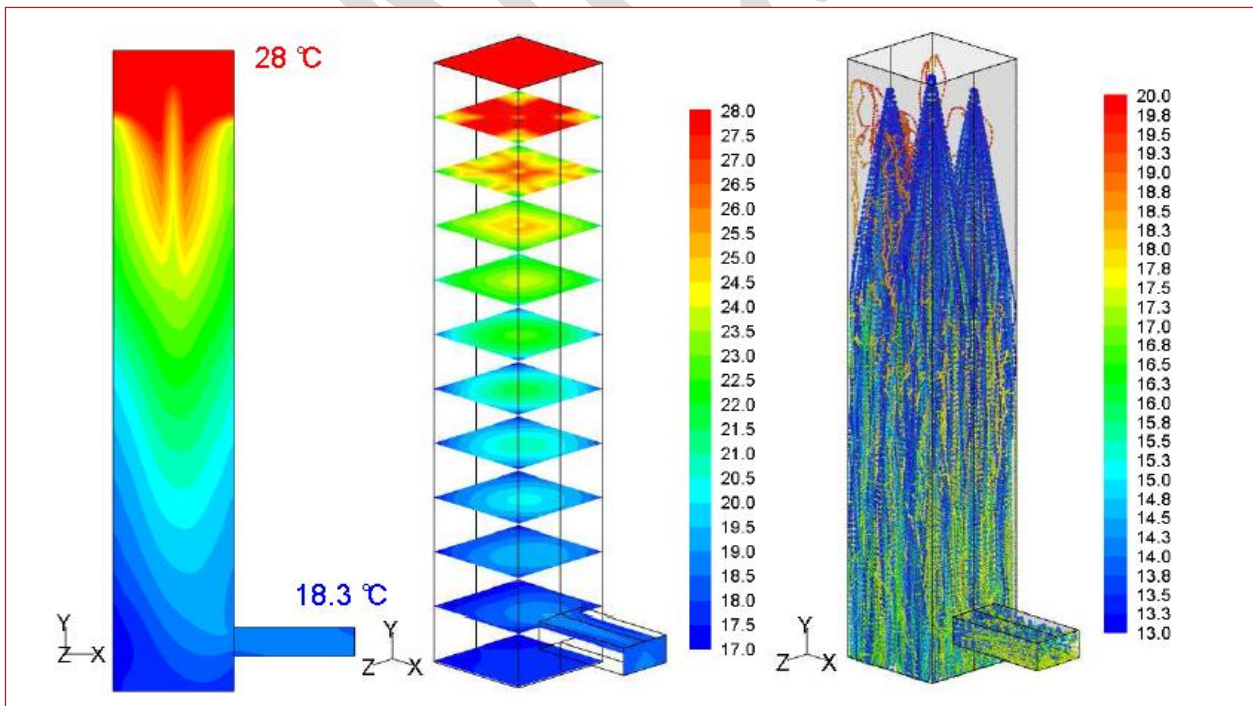
	Eenheid	Lucht- en waterzijdige gegevens volgens basaal rekenmodel			
		Zomer		Winter	
		Ontwerp	Gemiddeld	Gemiddeld	Ontwerp
Luchtdruk	kPa	100	100	100	100
Luchttemperatuur in	$^{\circ}\text{C}$	28	20	5	-10
Relatieve vochtigheid	%	55	80	90	90
Luchtsnelheid	m.s^{-1}	0,5	0,5	0,5	0,5
Lucht volumestroom	$\text{m}^3.\text{h}^{-1}$	1.800	1.800	1.800	1.800
Lucht massastroom	kg.s^{-1}	0,574	0,576	0,626	0,671
Luchttemperatuur uit	$^{\circ}\text{C}$	17	17	8	8
Relatieve vochtigheid	%	95	95	95	95
Watertemperatuur in	$^{\circ}\text{C}$	13	13	13	15
Water volumestroom	l.min^{-1}	40,3	40,4	40,4	40,4
Water volumestroom	$\text{m}^3.\text{h}^{-1}$	2,42	2,42	2,42	2,42
Water massastroom	kg.s^{-1}	0,672	0,672	0,672	0,672
Water/Luchtverhouding	-	1,17	1,17	1,07	1,00
Case	→	B1	B2	B3	B5

Tabel 3.3.8 – Lucht- en waterzijdige gegevens voor de simulaties fysieke testmodel

3.3.8.2 Case B1 – Ontwerp zomercondities

Zie figuur 3.3.8/1. Bij een koelwatertemperatuur van 13°C wordt de lucht gekoeld van 28°C naar ca 18°C en voldoet daarmee niet geheel aan de eis van 17°C voor het conceptueel psychometrisch ontwerp ad paragraaf 3.1.7.2. De berekende relatieve luchtvochtigheid bij uitrede is 95%.

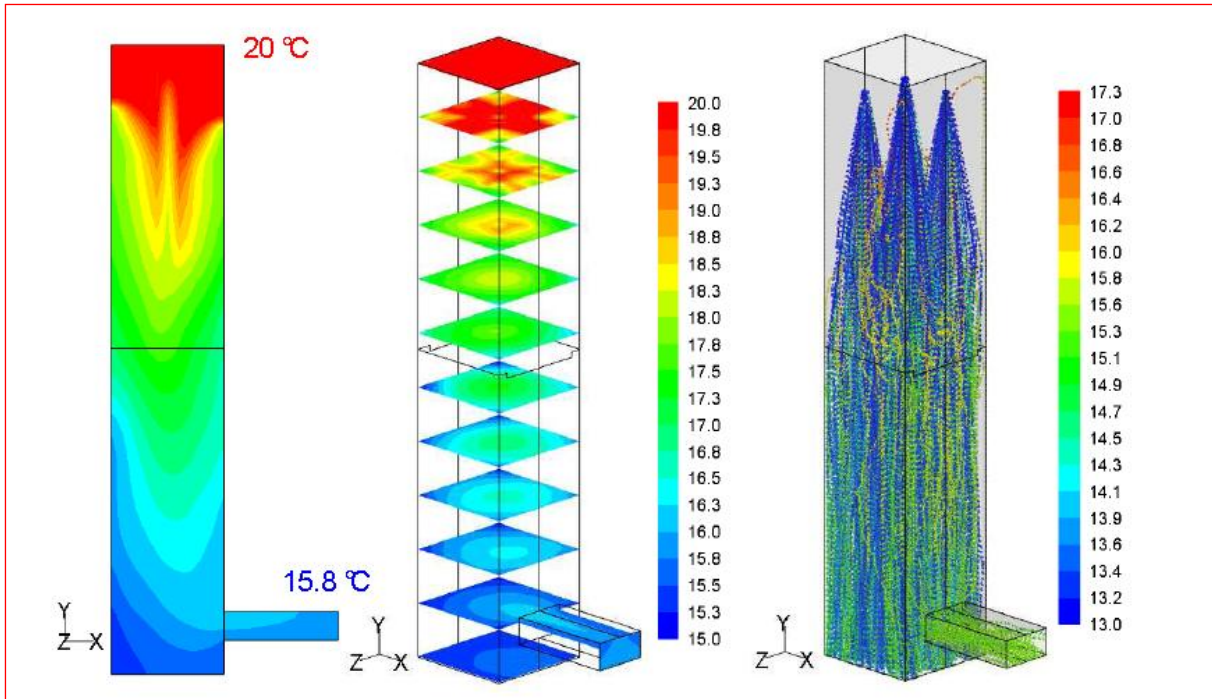
NB: De simulatie voor een 8 verdiepingen gebouw met identieke sproeiers, water/luchtverhouding en koelwatertemperatuur laat zien dat de uitgaande luchttemperatuur hier met $16,5^{\circ}\text{C}$ wel ruimschoots aan de eis voldoet. Mogelijk is het koelproces in de fysieke testopstelling door de beperkte hoogte hiervan nog niet voltooid.



Figuur 3.3.8/1 – Case B1 – Luchttemperaturen (links) en druppeltemperaturen (rechts) in $^{\circ}\text{C}$

3.3.8.3 Case B2 – Gemiddelde zomercondities

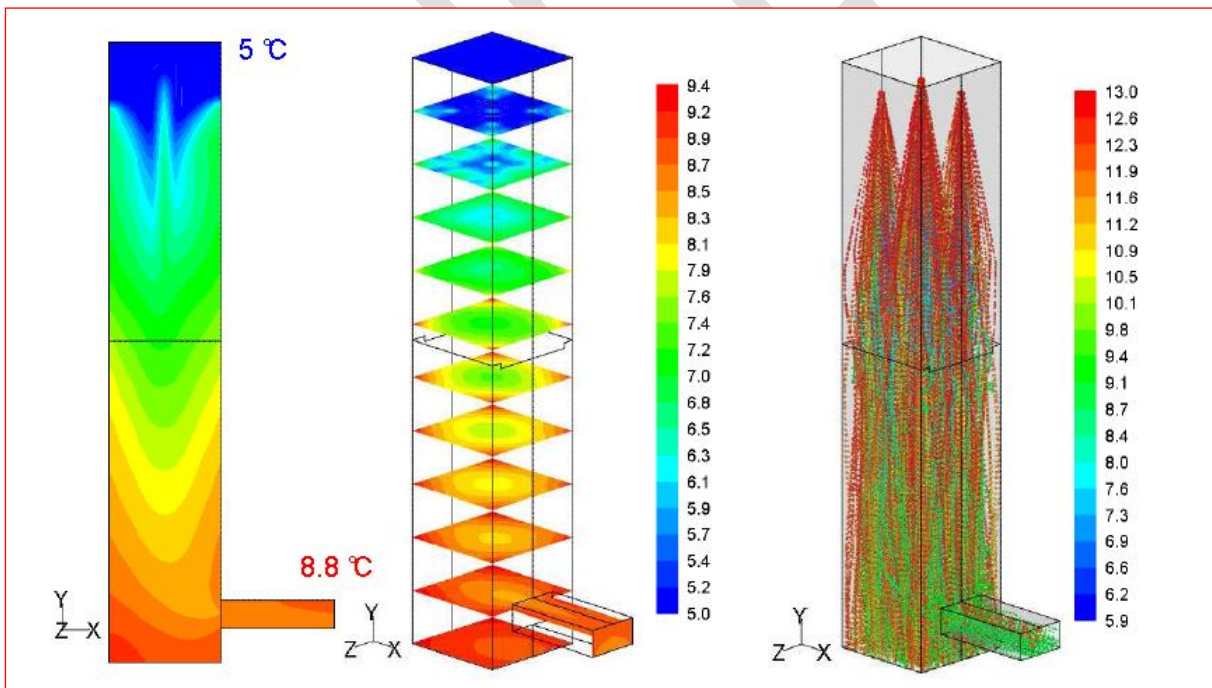
Zie figuur 3.3.8/2. De berekende relatieve luchtvochtigheid bij uitrede is 95%, conform de berekening met het basale rekenmodel.



Figuur 3.3.8/2 - Case B2 – Luchttemperaturen (links) en druppeltemperaturen (rechts) in °C

3.3.8.4 Case B3 – Gemiddelde wintercondities

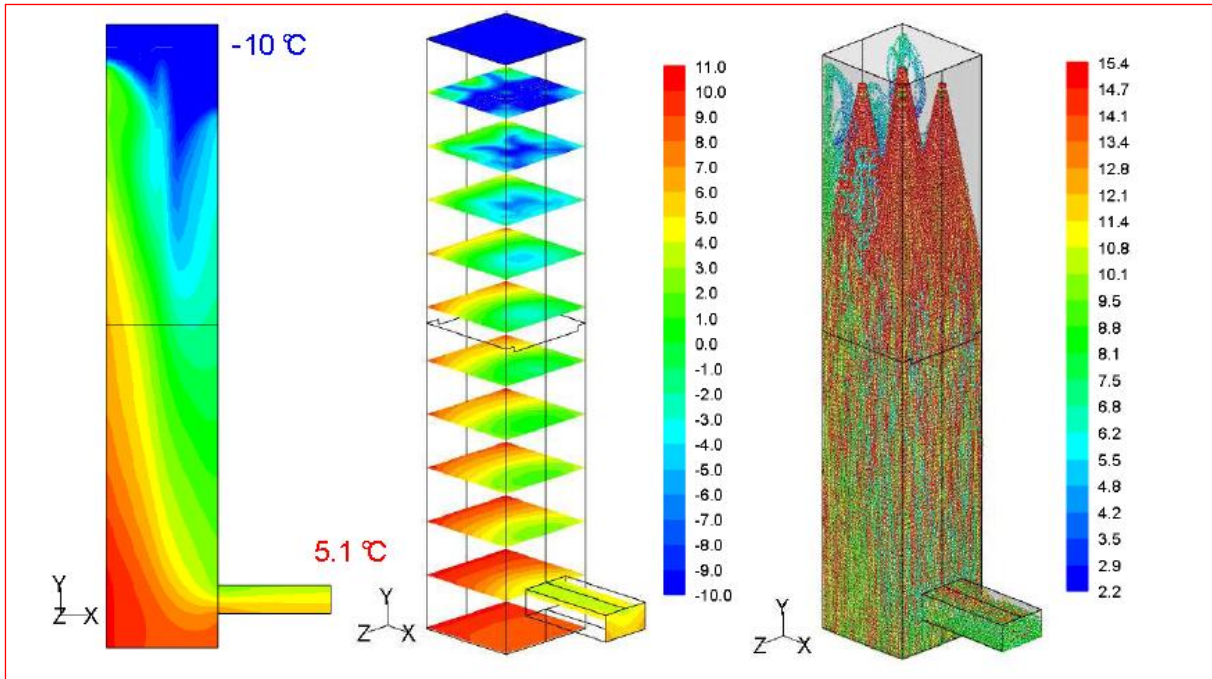
Zie figuur 3.3.8/3. Met een watertemperatuur van 13°C wordt de lucht verwarmd van 5°C → 8,8°C, zodat kan worden gesproken van een ultra-laag temperatuur verwarmingssysteem. De berekende relatieve luchtvochtigheid bij uittrede is 100%.



Figuur 3.3.8/3 - Case B3 – Luchttemperaturen (links) en druppeltemperaturen (rechts) in °C

3.3.8.5 Case B5 – Ontwerp wintercondities

Zie figuur 3.3.8/4. Voor deze simulatie is de watertemperatuur verhoogd naar 15,4°C waardoor de lucht wordt verwarmd van -10°C → +5,1°C. Nog steeds kan worden gesproken van een ultra-laag temperatuur verwarmingssysteem. De berekende relatieve luchtvochtigheid bij uittrede is 100%.



Figuur 3.3.8/4 - Case B5 – Luchttemperaturen (links) en druppeltemperaturen (rechts) in °C

3.3.9 CFD simulaties model ware grootte

3.3.9.1 Keuze van het model

Tabel 3.3.9/1 laat een aantal varianten van gebouwen zien van 4 tot 20 verdiepingen met daaraan gerelateerde volumedebieten die voor CFD simulatie in aanmerking zouden kunnen komen. De water/luchtfactor $R_{w/L}$ en de druppelkarakteristieken zijn berekend met het basale rekenmodel. Om het aantal simulaties te beperken is gekozen voor het gebouw van 8 verdiepingen.

Aantal verdiepingen →		4	6	8	10	12	14	16	18	20
Hoogte	m	14	21	28	35	42	49	56	63	70
NVO per verdieping ³⁵	m ²	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Ventilatiecapaciteit	m ³ .m ⁻² .h ⁻¹	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Volumedebiet lucht	m ³ .h ⁻¹	20000	30000	40000	50000	60000	70000	80000	90000	100000
Massadebiet lucht	kg.h ⁻¹	24000	36000	48000	60000	72000	84000	96000	108000	120000
Luchtsnelheid	m.s ⁻¹	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Doorsnede cascade	m ²	2,78	4,17	5,56	6,94	8,33	9,72	11,11	12,50	13,89
Diepte cascade	m	1,67	2,04	2,36	2,64	2,89	3,12	3,33	3,54	3,73
Breedte cascade	m	1,67	2,04	2,36	2,64	2,89	3,12	3,33	3,54	3,73
Berekend met het basale rekenmodel										
BETA - $R_{w/l}$	→	1,3	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Massadebiet water	dm ³ .h ⁻¹	31200	43200	57600	72000	86400	100800	115200	129600	144000
Spectrum	nummer	6	5	4	3	2	2	1	1	1

Tabel 3.3.9/1 – Mogelijke varianten gebouw/klimaat model

3.3.9.2 Invoercondities

De invoercondities voor deze simulaties zijn aangegeven in tabel 3.3.9/2

Voor de simulaties van het 8 verdiepingenmodel is gekozen voor 25 sproeiers type 1-1/2HH-30250 omdat de druppelgrootteverdeling hiervan nauwkeurig bekend is –zie paragraaf 3.3.7. Voor werkelijke toepassingen kan de sproeierselectie uiteraard worden geoptimaliseerd.

		Lucht- en waterzijdige gegevens volgens basaal rekenmodel
--	--	---

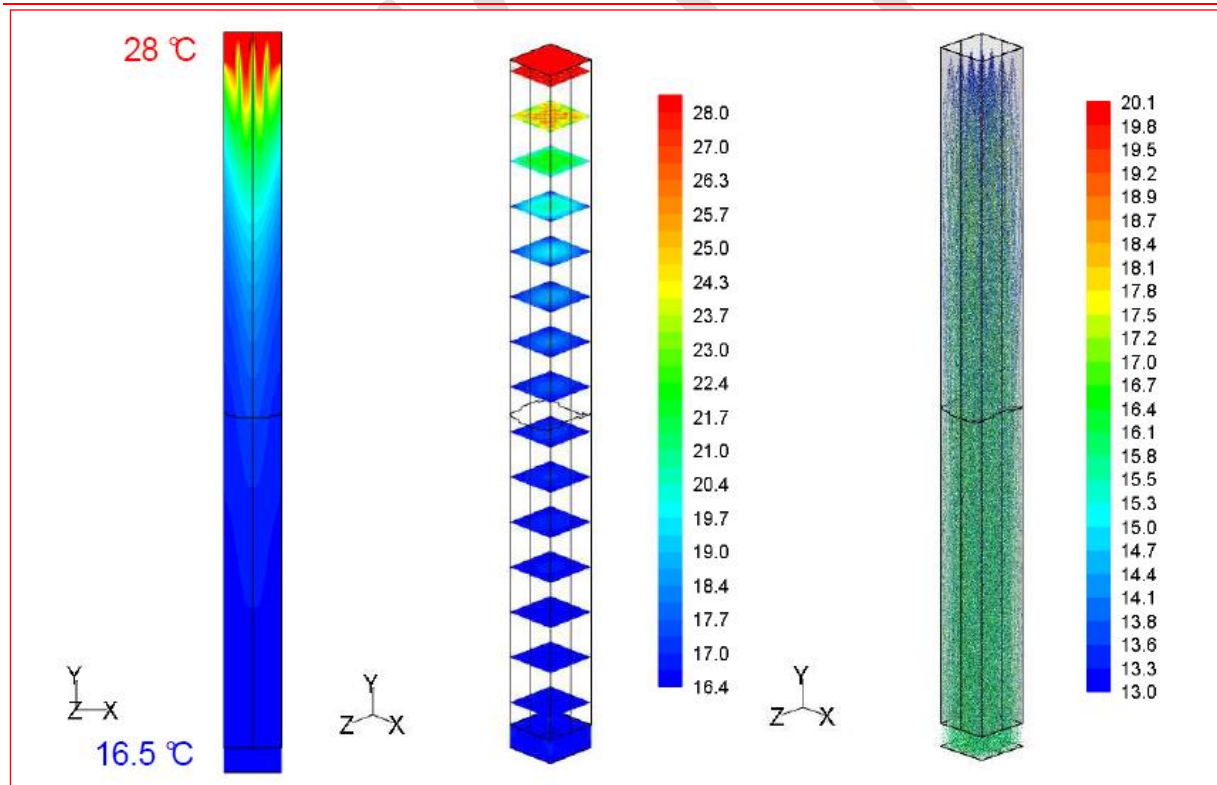
³⁵ Het vloeroppervlak per verdieping is willekeurig gekozen

	Eenheid	Zomer		Winter	
		Ontwerp	Gemiddeld	Gemiddeld	Ontwerp
Luchtdruk	kPa	100	100	100	100
Luchttemperatuur in	$^{\circ}\text{C}$	28	20	5	-10
Relatieve vochtigheid	%	55	80	90	90
Lichtsnelheid	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	2,0	2,0	2,0	2,0
Lucht volumestroom	$\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$	40.000	40.000	40.000	40.000
Lucht massastroom	$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$	13,0	13,4	14,1	14,9
Luchttemperatuur uit	$^{\circ}\text{C}$	17	17	8	8
Relatieve vochtigheid	%	95	95	95	95
Watertemperatuur in	$^{\circ}\text{C}$	13	13	13	15
Water volumestroom	$\text{l}\cdot\text{min}^{-1}$	40,3	40,4	40,4	40,4
Water volumestroom	$\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$	2,42	2,42	2,42	2,42
Water massastroom	$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$	15,2	15,7	15,1	14,9
Water/Luchtverhouding	-	1,17	1,17	1,07	1,00
Case	→	D1	D2	D3	D4

Tabel 3.3.9/2 – Lucht- en waterzijdige gegevens voor de CFD simulaties model ware grootte

3.3.9.3 Case D1 - Ontwerp zomercondities

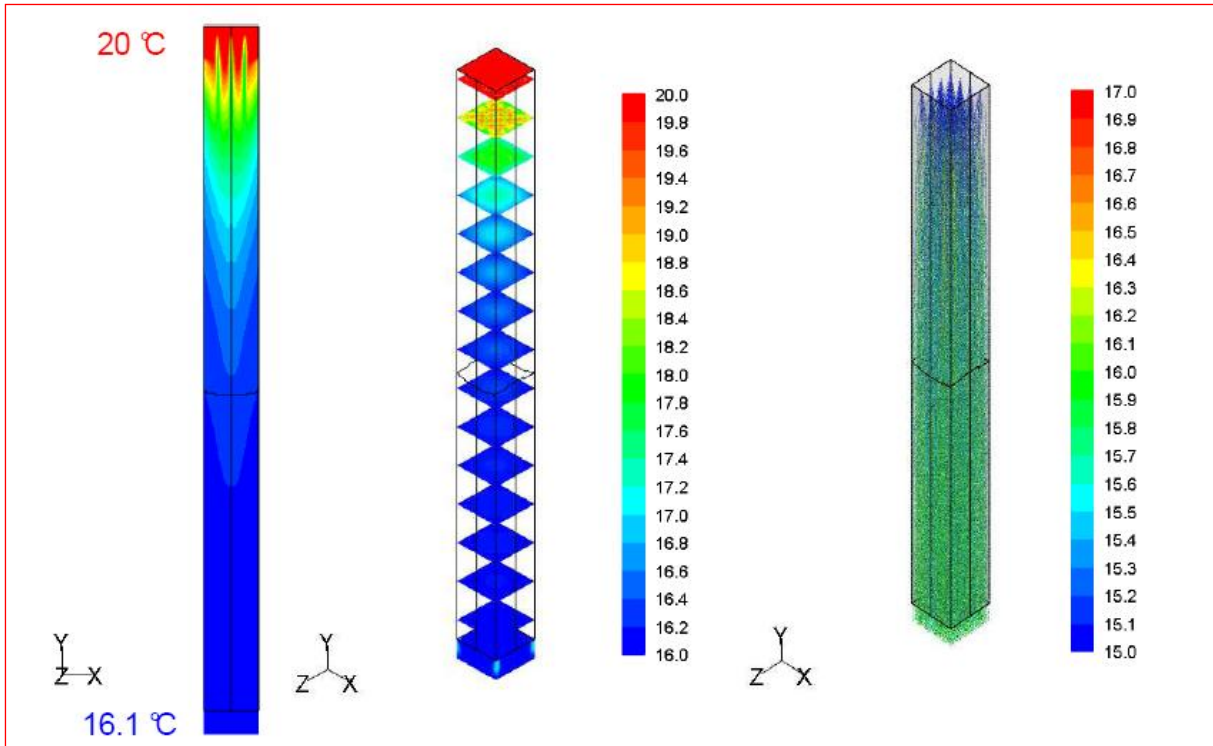
Zie figuur 3.3.9/1. In tegenstelling tot de simulatie van het fysieke onderzoeksmodel wordt hier ruimschoots voldaan aan de gewenste uittredetemperatuur van 17°C voor het conceptueel psychometrisch ontwerp ad paragraaf 3.1.7.2. De berekende relatieve luchtvochtigheid bij uittrede is 100%.



Figuur 3.3.9/1 - Case D1 – Luchttemperaturen (links) en druppeltemperaturen (rechts) in $^{\circ}\text{C}$

3.3.9.4 Case D2 - Gemiddelde zomercondities

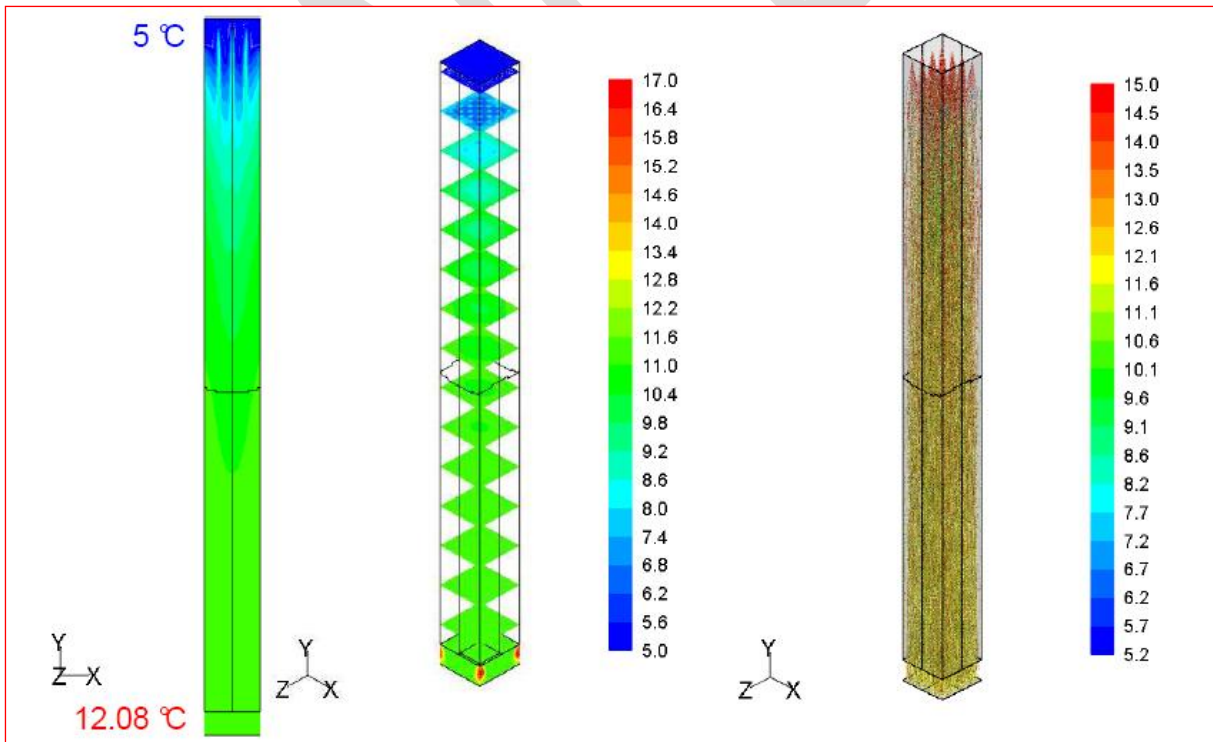
Zie figuur 3.3.9/2. De berekende relatieve luchtvochtigheid bij uittrede is 100%.



Figuur 3.3.9/2 - Case D2 – Luchttemperaturen (links) en druppeltemperaturen (rechts) in °C

3.3.9.5 Case D3 - Gemiddelde wintercondities

Zie figuur 3.3.9/3. Met een watertemperatuur van 13°C wordt de lucht verwarmd van 5°C → 12°C, zodat ook in dit geval kan worden gesproken van een ultra-laag temperatuur verwarmingssysteem. De berekende relatieve luchtvochtigheid bij uitrede is 100%.

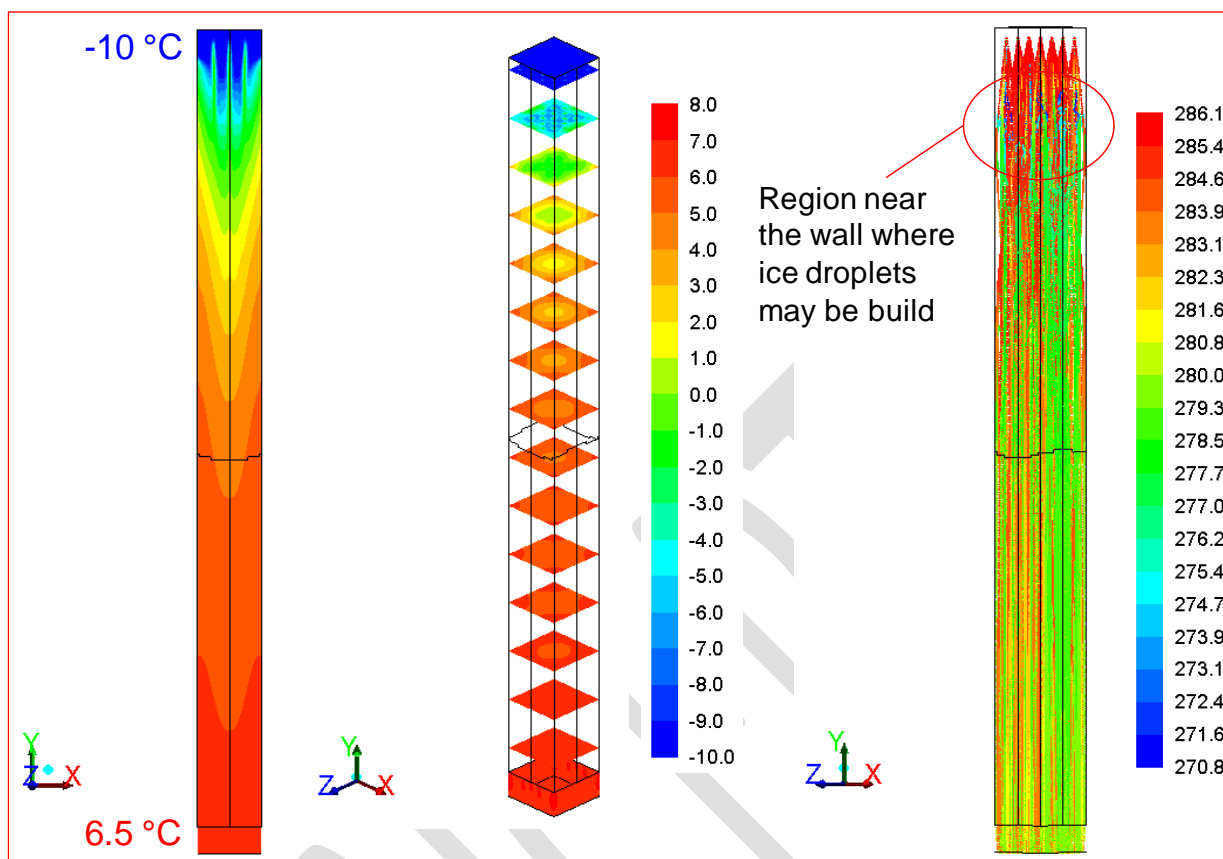


Figuur 3.3.9/3 - Case D3 – Luchttemperaturen (links) en druppeltemperaturen (rechts) in °C

3.3.9.6 Case D4 - Ontwerp wintercondities

Zie figuur 3.3.9/4. Met een watertemperatuur van 15°C wordt de lucht verwarmd van -10°C → +6,5°C, zodat ook in dit geval kan worden gesproken van een ultra-laag temperatuur verwarmingssysteem. De

berekende relatieve luchtvochtigheid bij uittrede is 100%. Aan de top van de Klimaatcascade kunnen kleine druppels tegen de wanden bevriezen; dit bevroeringsproces is niet gemodelleerd.



Figuur 3.3.9/4 - Case D4 – Luchttemperaturen (links) en druppeltemperaturen (rechts) in °C

3.3.10 Verloop van de luchttemperatuur over de hoogte van de Klimaatcascade

Figuur 3.3.10 laat het verloop zien van luchttemperatuur en relatieve vochtigheid over de hoogte van de Klimaatcascade. Deze simulatie heeft betrekking op case D1 maar de andere cases laten een soortgelijk beeld zien. De eindtemperatuur van de uitgaande lucht wordt reeds op ongeveer de halve hoogte van de Klimaatcascade bereikt wordt. Als de sproeiers op een hoogte van 4 verdiepingen zouden zijn aangebracht zou ongeveer dezelfde psychometrische prestatie kunnen worden geleverd

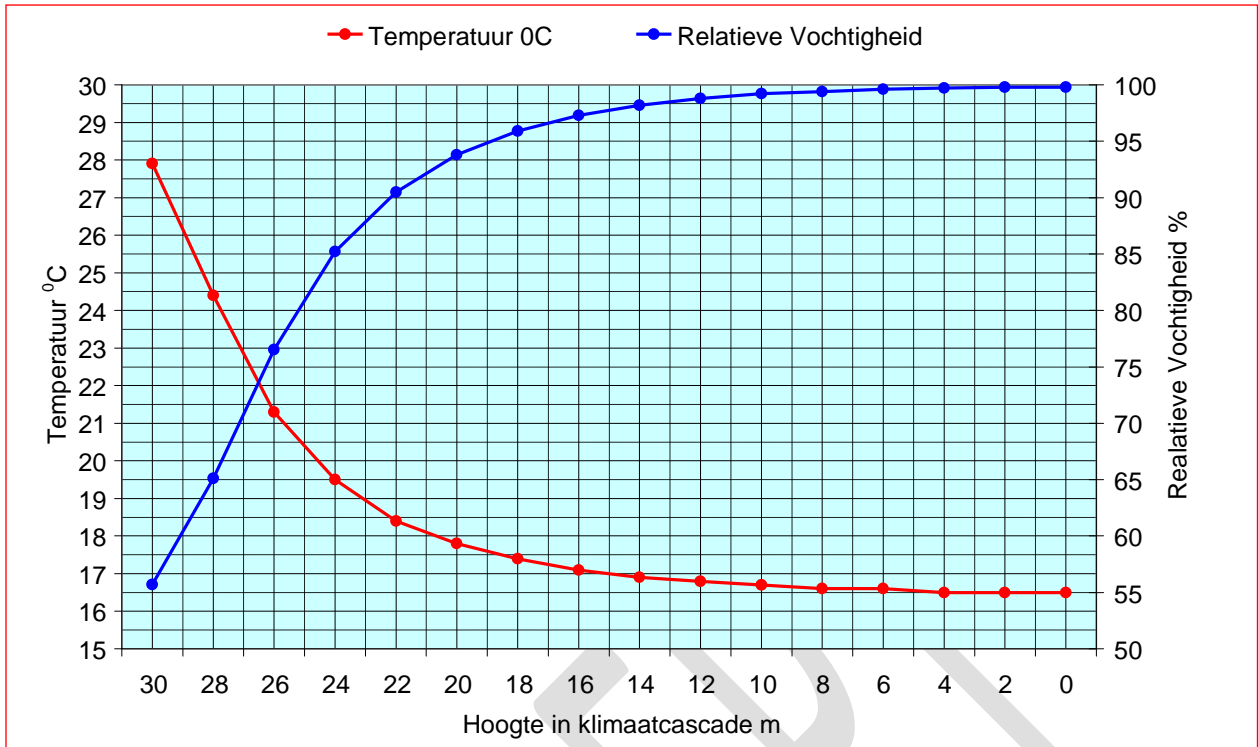
Voor de toepassing van de Klimaatcascade zou het een interessante mogelijkheid kunnen zijn de sproeiers niet aan de top maar op een lager niveau aan te brengen, waardoor aanzienlijk op pompenergie zou kunnen worden bespaard. Een dergelijke interventie heeft echter consequenties voor de drukopbouw in de Klimaatcascade:

- De hydraulische trek wordt aanzienlijk lager –zie paragraaf 3.2.15.3.
- De neerwaartse thermische trek wordt in de stookperiode hoger en in de koelperiode lager – zie paragraaf 3.2.15.4.

De aerodynamische trek blijft hierbij uiteraard ongewijzigd – zie paragraaf 3.2.15.2.

Aangezien de drukopbouw in een Klimaatcascade bij een bepaalde water/luchtfactor en hoogte in belangrijke mate door de constante en veelal dominante hydraulische trek wordt bepaald –zie paragraaf 3.2.15.3- is het niet mogelijk uit dit verschijnsel algemene conclusies te trekken. Voor een specifiek ontwerp kunnen de consequenties van een lagere positie van de sproeiers nader worden onderzocht.

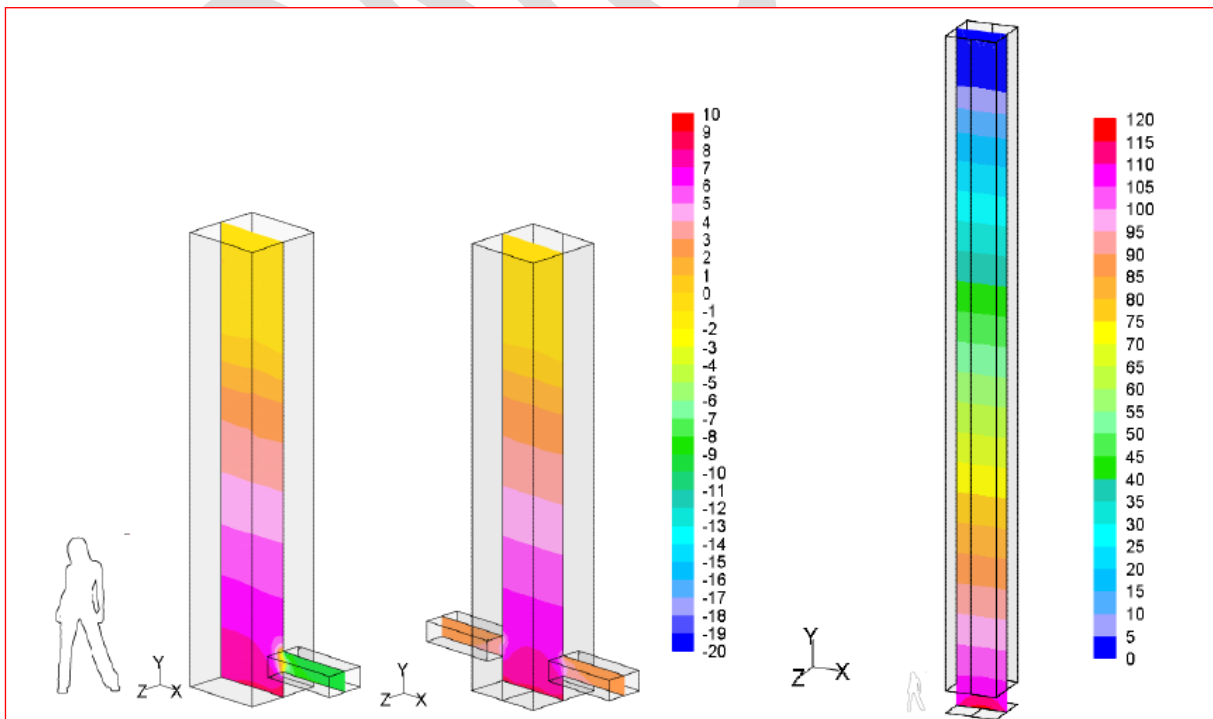
Het temperatuurprofiel houdt in dat voor de berekening van de thermische trek in formule (4.2.6/1) – zie paragraaf 3.2.15.4- niet mag worden uitgegaan van het rekenkundig gemiddelde van begin- en eindtemperatuur van de lucht.



Figuur 3.3.10 – Case D1 -Temperatuur en RV van de lucht als functie van de hoogte in de cascade

3.3.11 Drukopbouw in de klimaatcascade

In de klimaatcascade wordt door aerodynamische, hydraulische en thermisch trek statische druk opgebouwd. Figuur 3.3.11 brengt deze drukken in beeld, zowel voor het fysieke onderzoeksmodel met ≈ 10 Pa (links) als voor het 8 verdiepingenmodel met ≈ 100 Pa (rechts). Beide gelden voor de gemiddelde zomerconditie, buitentemperatuur 20°C . Bij hogere buitentemperaturen nemen de drukken toe; bij lagere buitentemperaturen ze af.



Figuur 3.3.11 – Statische drukken in de Klimaatcascade -Links case B2 en C1³⁶ – Rechts case D2

³⁶ Psychometrisch is case C1 identiek aan case B2 - Alleen de luchtafvoer is dubbel uitgevoerd.

3.3.12 Conclusies CFD simulaties

Alle simulatieresultaten laten zien dat de Klimaatcascade zowel onder zomercondities als wintercondities goed functioneert. In de zomer is gelijktijdige koeling en droging van warme en vochtige buitenlucht mogelijk. In de winter kan koude en droge buitenlucht worden verwarmd en bevochtigd.

Opschalen van het fysieke schaalmodel naar ware grootte laat het verschil zien tussen een onderbroken proces in het schaalmodel naar een voltooid proces bij ware grootte. In het eerste geval is de warmtewisseling tussen water en lucht door de beperkte hoogte van de cascade en de inherente korte contacttijd nog niet voltooid. In het tweede geval is het temperatuurverschil tussen water en lucht aan de voet van de cascade zeer gering bij een relatieve luchtvochtigheid van tegen 100%.

Verder is aangetoond dat in een Klimaatcascade een aanzienlijk positief drukverschil kan worden opgebouwd.

3.3.13 Dynamisch simulatiemodel ESP-r

3.3.13.1 Inleiding

Van de Klimaatcascade in de uitvoering volgens de fysieke testopstelling –zie paragraaf 3.4.x- is een simulatiemodel in de ESP-r omgeving gemaakt (Trcka, Marija et al. 2010). Het ESP-r model is fysisch gebaseerd op het basale rekenmodel voor warmte- en massatransport ad paragraaf 3.2.16.

Voor wat betreft de uit te voeren simulaties kan het ESP-r model van de Klimaatcascade in principe op twee niveaus worden toegepast: Op gebouwniveau of als *stand-alone* voorziening in het klimaatsysteem.

3.3.13.2 Integratie van de Klimaatcascade op gebouwniveau

Het thermisch netwerk en het stromingsnetwerk van de Klimaatcascade worden hierbij in het ESP-r model van het gebouw geïntegreerd. Voordelen van deze benadering zijn:

- Flexibiliteit in de regeling: De invloed van variërende invoerparameters, zoals waterdebiet, sproeispectrum en watertemperatuur, kunnen direct op gebouwniveau worden gesimuleerd.
- Flexibiliteit in de systeemconfiguratie: De Klimaatcascade kan op willekeurige plaatsen in de klimaatinstallatie worden opgenomen, en gecombineerd met andere installatiecomponenten.
- Nauwkeurigheid: Door convergentie van gebouwmodel, thermisch netwerk en stromingsnetwerk wordt de beste nauwkeurigheid van het simulatieresultaat verkregen.

Deze benadering heeft echter enkele belangrijke nadelen:

- Complexiteit in implementatie en in het gebruik van de drie modules van *Earth, Wind & Fire*.
- Convergentieproblemen die hierdoor ontstaan.
- Lastig en omslachtig in de toepassing: de gebruiker moet in elke module de gebouwkenmerken invoeren, hetgeen tijdrovend is en de kans op fouten vergroot.

De flexibiliteit in regeling en systeemconfiguratie zijn ook niet nodig. De Klimaatcascade werkt voor een bepaalde prestatie in principe met een vast massadebiet, temperatuur en druppelgrootteverdeling van het koelwater en heeft een vaste plaats in de *Natuurlijke Airconditioning* volgens het *Earth, Wind & Fire* concept –zie figuur 1.3. Er is om deze redenen niet gekozen voor de integratie van de Klimaatcascade op gebouwniveau.

3.3.13.3 Stand-alone simulatiemodel

De Klimaatcascade wordt hierbij gesimuleerd als *stand-alone* element voor het preconditioneren van ventilatielucht, met vaste waterzijdige invoergegevens. De psychometrische prestaties worden geïmplementeerd in het gebouwmodel, waardoor de energieprestaties over het referentiejaar kunnen worden berekend.

Thermisch netwerk

Het thermisch netwerk van de Klimaatcascade is gemodelleerd op basis van de bètaversie van het basale rekenmodel ad paragraaf 3.2.16. Er zijn dus geen grote verschillen tussen beide modellen te verwachten.

Voor wat betreft de bedrijfsvoering is uitgegaan van de systeemvariant waarbij het sproeisysteem het gehele jaar in werking blijft, zonder voorverwarming van de lucht –zie paragraaf 3.5.x

Stromingsnetwerk

Het stromingsnetwerk is in ESP-r uitsluitend gekoppeld aan het thermisch netwerk, maar dit is in de Klimaatcascade niet voldoende. Aerodynamische en hydraulische trek spelen hierin een wisselende, en onder omstandigheden zelfs dominante rol, en daarom zou het stromingsnetwerk moeten worden uitgebreid met een koppeling aan de functies die hiervoor zijn afgeleid –zie paragraaf 3.2.15.2 en 3.2.15.3. In verband met budgetbeperkingen kon deze koppeling binnen de huidige projectomvang niet worden gerealiseerd, hetgeen impliceert dat met het ESP-r model alleen de thermische prestaties van de Klimaatcascade kunnen worden gesimuleerd.

3.3.13.4 Uitgevoerde simulaties

ESP-r simulaties zijn uitgevoerd voor dezelfde varianten als voor de CFD simulaties- zie paragraaf 3.3.8 en 3.3.9. De simulaties zijn beperkt tot het valideren van het ESP-r model met betrekking tot luchttemperaturen en voelbare prestaties. Validatie met betrekking tot de luchtvochtigheid en latente prestaties is niet uitgevoerd.

Het ESP-r simulatiemodel voor de Klimaatcascade is gebaseerd op dezelfde fysische wetmatigheden als het basale rekenmodel en de simulatieresultaten zijn dan ook identiek.

3.3.13.5 Jaarlijkse energieprestaties

Het gevalideerde ESP-r model is gebruikt voor de voorspelling van de jaarlijkse energieprestaties van het gebouw voor de *case study*- zie hoofdstuk 7.

3.4 Validatie van de simulaties

3.4.1 Fysieke testopstelling

3.4.1.1 Inleiding

In het bouwfysisch laboratorium van Peutz bv is een fysieke testopstelling gebouwd waarin de in werkelijkheid optredende psychometrische processen en de drukopbouw in een Klimaatcascade bij wisselende klimaatcondities zijn gemeten. De meetresultaten zijn gebruikt voor de validatie van het basale rekenmodel ad paragraaf 3.2.16, het CFD model ad paragraaf 3.3.3 en het ESP-r model ad paragraaf 3.3.13.

3.4.1.2 Locatie en afmetingen van de testopstelling

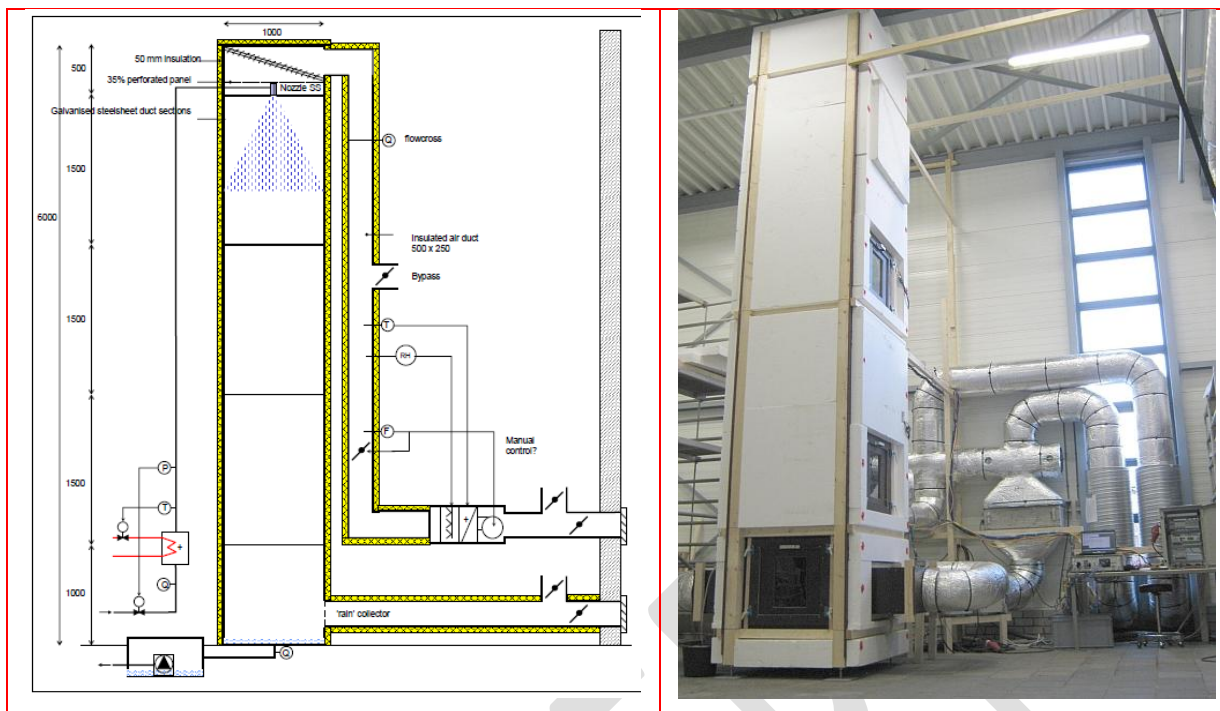
In eerste instantie is getracht een testopstelling te bouwen met een hoogte van ≈ 11 m, overeenkomend met 3 verdiepingen, gelijk aan de hoogte van de zonneshoorsteen. Een dergelijk oplossing zou alleen op het buitenterrein kunnen worden gerealiseerd, waarvoor een bouwvergunning en een welstandsverklaring vereist zijn die een ongewenste vertraging en hoge kosten met zich mee zou brengen –zie ook paragraaf 4.4.1.1. De testopstelling is daarom gebouwd in een bestaande laboratoriumhal met een beschikbare vrije hoogte van 6,5 m.

Het functionele ontwerp en de hoofdafmetingen van de testopstelling zijn door de hoofdonderzoeker op pragmatische gronden en kostenoverwegingen vastgesteld. Voor de cascade werd een minimum doorsnede van 1 m^2 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 $0,5 \text{ m.s}^{-1}$. In praktische toepassingen wordt weliswaar een hogere luchtsnelheid toegepast van $2,0 - 2,5 \text{ m.s}^{-1}$, maar berekeningen met behulp van het basale rekenmodel wijzen uit dat de psychometrische prestaties slechts in geringe mate door de luchtsnelheid wordt beïnvloed.

3.4.1.3 Ontwerp van de testopstelling

Het detailontwerp van de testopstelling is onder auspiciën van het onderzoeksteam gemaakt door Peutz bv, die ook alle metingen heeft uitgevoerd en verwerkt –zie paragraaf 3.4.2 t/m 3.4.8.

De meetschacht met een doorsnede $1000 \times 1000 \text{ mm}$ en een hoogte van 6000 mm , is uitgevoerd in thermisch verzinkt plaatstaal, uitwendig geïsoleerd. Proceslucht wordt op het hoogste punt via een toevoerplenum met leidschoepen en een geperforeerde plaat aan de meetschacht toegevoerd, waardoor een gelijkmatige instroming wordt gerealiseerd. De lucht wordt aan de onderzijde van de meetschacht via een druppelvanger afgevoerd –zie figuur 3.4.1.



Figuur 3.4.1 – Ontwerp en uitvoering van de testopstelling

De meetschacht is voorzien van gootjes voor het opvangen van het sproeiwater dat op de wanden terecht komt, waardoor deze hoeveelheid kan worden gemeten. Verder zijn op 4 hoogten 2 inspectieramen aangebracht en aan de onderzijde een afsluitbare inspectiedeur. De meetschacht staat op een wateropvangbak, aangesloten op de riolering.

3.4.1.4 Ventilatiesysteem

Proceslucht wordt op de gewenste conditie gebracht met behulp van een luchtbehandelingskast met een nominale luchtverplaatsing van $1.800 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, 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 kan met behulp van de regelbare ventilator en een meetkruis in het toevoerkanaal handmatig worden geregeld.

Een koelinstallatie voor de lucht is in verband met budgetbeperkingen niet voorzien. Voor de wintermetingen moest daarom worden gewacht op geschikte buitencondities. De ontwerp winterconditie van $\theta_e = -10^\circ\text{C}$ heeft zich in de meetperiode echter niet voorgedaan en de metingen zijn daarom uitgevoerd bij de laagst mogelijke intredetemperaturen.

3.4.1.5 Sproeisysteem

De metingen zijn uitgevoerd met de door Spraying Systems geselecteerde sproeiers, 5 stuks type Fulljet[®]3/4GG-3050 –zie paragraaf 3.3.7. De sproeiers zijn via kogelkranen direct op de waterleiding aangesloten.

De temperatuur van het leidingwater hangt af van het seizoen en kan fluctueren tussen 10°C in de winter en 15°C in de zomer. Met behulp van een tegenstroomapparaat kan het water zo nodig worden verwarmd. Koeling is wegens budgetbeperkingen niet voorzien, hetgeen inhoudt dat metingen, waarvoor een watertemperatuur van 13°C nodig is, niet in de zomer plaats kunnen vinden. 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.

3.4.1.6 Instrumentatie

De instrumentatie van de testopstelling is onder auspiciën van de onderzoeker en het onderzoeksteam ontworpen en door Peutz gematerialiseerd en geïnstalleerd. Meetopnemers zijn aangebracht voor de luchttemperatuur (21), relatieve vochtigheid (5), druk (4), massadebiet van het water (2) en voordruk op de sproeiers (1).

3.4.1.7 Overige informatie

Voor een gedetailleerde omschrijving van de testopstelling wordt verwezen naar het rapport van Peutz (Bruggema, H. 2010).

3.4.2 Meetresultaten B1 - ontwerp zomercondities

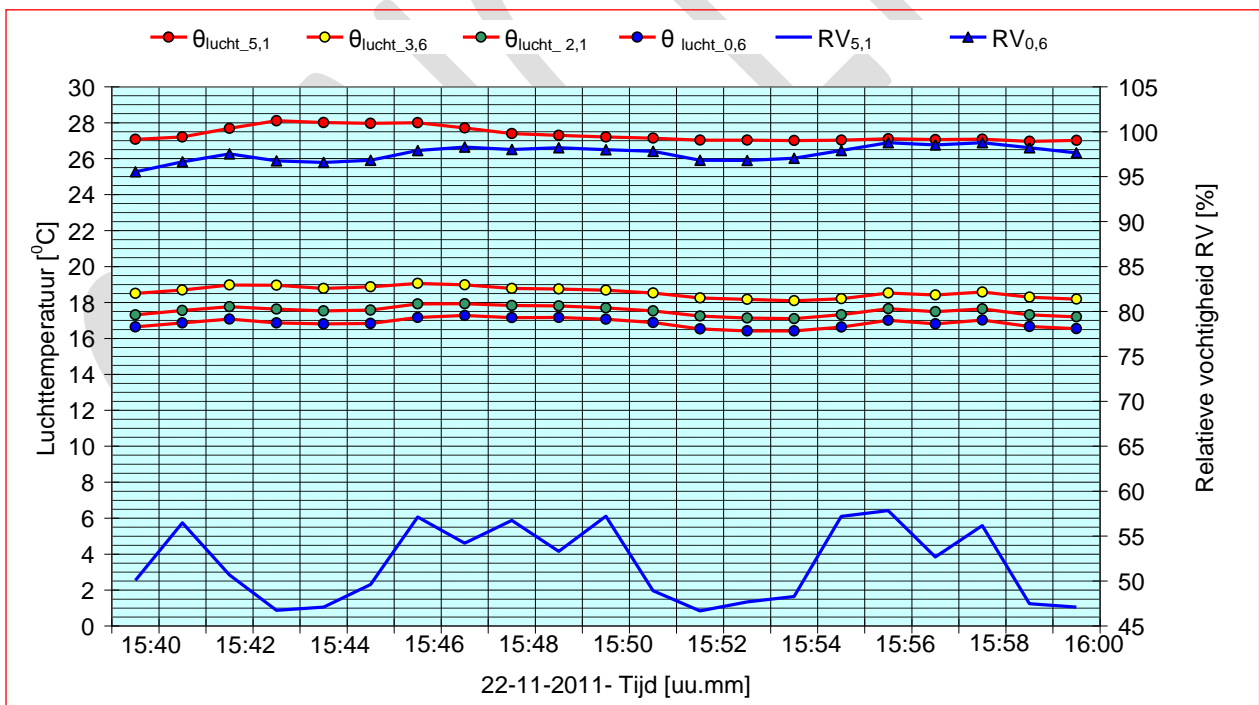
De metingen zijn in eerste instantie bedoeld om de CFD simulaties ad paragraaf 3.3.8 te kalibreren en te valideren. Het meetprogramma komt dan ook overeen met de lucht- en waterzijdige gegevens volgens tabel 3.3.8.

3.4.2.1 Variant B1/1 – Water/Luchtfactor $R_{w/L} = 1,17$

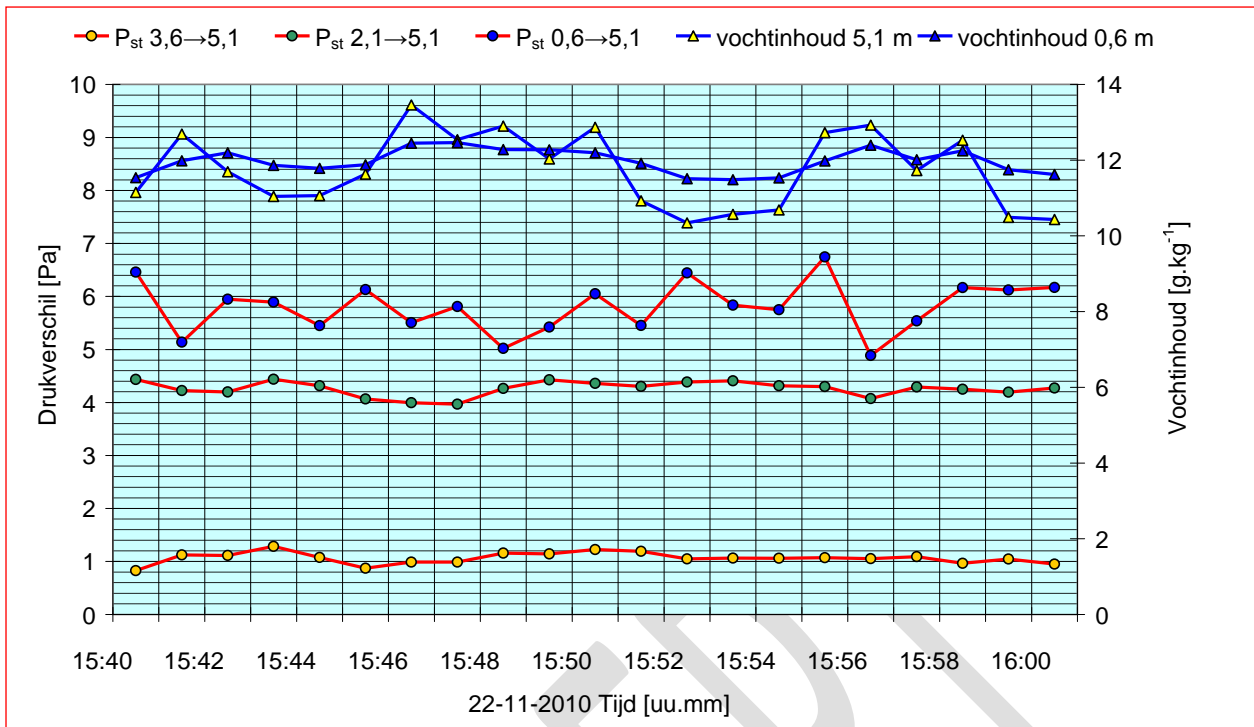
De metingen zijn uitgevoerd over een periode van enkele uren. Figuur 3.4.2/1 laat de meetresultaten zien over een tijdsbestek van 20 minuten. Aangegeven zijn de luchttemperaturen θ_{lucht} op respectievelijk 5,1 – 3,6 – 2,1 en 0,6 m hoogte en de relatieve vochtigheid RV op 5,1 en 0,6 m hoogte. Figuur 3.4.2/2 geeft de drukverschillen en de absolute vochtinhoud weer over dezelfde periode.

Figuur 3.4.2/3 toont de gemiddelde resultaten van deze meetsessie als functie van de hoogte in de cascade. De luchttemperaturen zijn op de aangegeven 4 posities gemeten. De relatieve en absolute luchtvochtigheid zijn alleen op het hoogste en laagste niveau gemeten; de verbindinglijnen geven alleen de richting aan van het vochtigheidsverloop.

Deze meetsessie heeft betrekking op de ontwerp zomercondities. In het conceptueel psychometrisch ontwerp werd hiervoor uitgegaan van een uittredeconditie van 17°C bij een relatieve vochtigheid van 90% –zie tabel 3.1.7/3 in paragraaf 3.1. De Klimaatcascade voldoet met een gemeten temperatuur van $16,85^{\circ}\text{C}$ geheel aan de gewenste voelbare koelcapaciteit. De gewenste relatieve vochtigheid van 90% wordt echter door de geringe daling van de vochtinhoud niet gerealiseerd. De latente capaciteit is hierdoor zeer beperkt. De CFD simulaties voor case B1 lieten een uittredeconditie zien van $18,3^{\circ}\text{C}$ bij 95%RV -zie paragraaf 3.3.8.2.

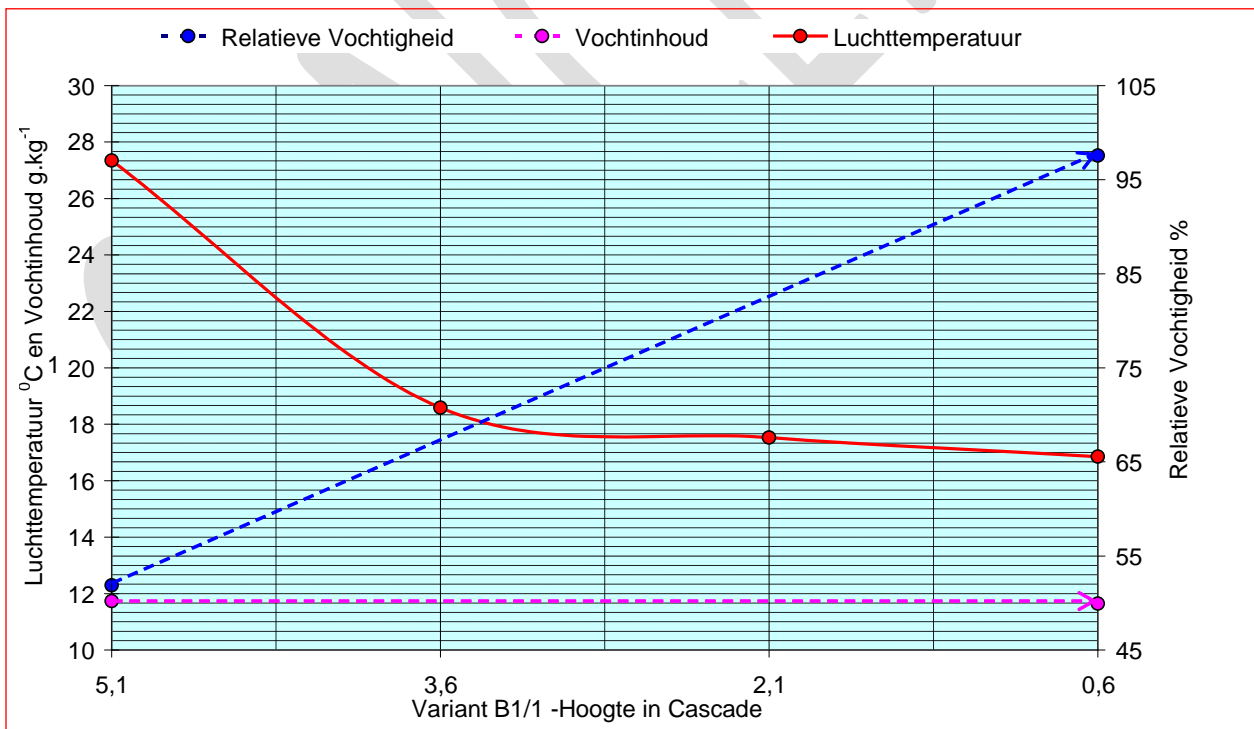


Figuur 3.4.2/1 – Variant B1/1 – Luchttemperatuur en Relatieve Vochtigheid als functie van de tijd



Figuur 3.4.2/2 – Variant B1/1 – Drukverschil en Vochtinhoud als functie van de tijd

Het in de cascade opgebouwde drukverschil ligt tussen 4,9 en 6,75 Pa met een gemiddelde van 5,8 Pa – zie figuur 3.4.2/2. Dit komt redelijk overeen met de waarde die met de CFD simulaties is berekend zie figuur 3.3.11.



Figuur 3.4.2/3 – Variant B1/1 – Ontwerp Zomerconditie – $\theta_e = 28^{\circ}\text{C}$ – $\text{RV}_e = 55\%$

3.4.2.2 Variant B1/2 – B1/3 en B1/4 – Verhoogde water/luchtfactor

De in variant B1 (te) geringe latente capaciteit kan in principe 2 oorzaken hebben:

- Het koelproces is aan de voet van de cascade door de beperkte hoogte van de testopstelling nog niet voltooid. Zie de opmerking in paragraaf 3.3.8.2, waarin voor de resultaten van de CFD simulatie van case B1 ook een dergelijke veronderstelling werd geuit.

- Het waterdebiet is te klein en/of het sproeispectrum is te grof waardoor het cumulatieve druppeloppervlak te klein is.

In enkele aanvullende meetsessies is nagegaan of door vergroting van het cumulatieve druppeloppervlak een verhoging van de latente capaciteit zou kunnen worden gerealiseerd. In de testopstelling was het niet mogelijk het sproeispectrum aan te passen. Verhoging van het waterdebiet zou mogelijk zijn, maar dat impliceert tevens verandering van het sproeispectrum. Voor nader onderzoek bleef dan als enige mogelijk over het verhogen van de water/luchtfactor door verlaging van het luchtdebiet.

De water/luchtfactor van $R_{w/L} = 1,17$ is gebaseerd op de energiebalans water/lucht. Dit is een theoretische waarde, waarbij ervan is uitgegaan dat de warmteoverdracht volledig plaatsvindt in het sproeispectrum. In de testopstelling is echter gemeten dat ca 10% van het koelwater op de wanden terecht komt. Dit deel heeft door de geringe warmte- en stofoverdrachtscoëfficiënt een aanzienlijk kleiner koeffect dan het sproeispectrum –zie paragraaf 3.2.13. Als het koeffect van de wanden wordt verwaarloosd zou het waterdebiet dus met 10% moeten worden verhoogd.

Verder is ook een grovere druppelgrootteverdeling te verwachten dan het bij de CFD simulaties gebruikte sproeispectrum. Bij gebruik van meerdere kleine sproeiers gaan de afzonderlijke stralen elkaar op enige afstand beïnvloeden, waardoor druppels kunnen gaan coaguleren met als gevolg een grover sproeispectrum. Ook dit effect zou gecompenseerd kunnen worden door een hogere water/luchtfactor.

Om het effect van een hogere water/luchtfactor te kunnen bepalen zijn de metingen voor de ontwerp zomerconditie bij gelijkblijvend sproeispectrum herhaald met $R_{w/L} = 1,37 - 1,7$ en $2,3$, variant nummers respectievelijk B1/2 – B1/3 en B1/4. Om dit met handhaving van de aanwezige sproeiers mogelijk te maken is in deze meetsessies het luchtdebiet verminderd. Hierdoor wordt de luchtsnelheid in de cascade kleiner, maar dit heeft weinig invloed op de warmteoverdracht –zie paragraaf 3.5.2.

Voor de varianten B1/1 t/m B1/4 zijn berekeningen uitgevoerd met invoercondities die overeenkomen met die van de metingen. De voor deze condities berekende prestaties van de Klimaatcascade zijn vergeleken met de voor deze varianten gemeten waarden –zie tabel 3.4.2/1.

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 basale rekenmodel is voor alle water/luchtfactoren onvoldoende.

Variant		$R_{w/L}$	Temperatuur °C				Vochtinhoud $g \cdot kg^{-1}$			
Case	Peutz ³⁷		berekend		gemeten		berekend		gemeten	
			traject	$\Delta\theta$	traject	$\Delta\theta$	traject	Δx	traject	Δx
B1/1	28	1,17	27,34 ↓ 17,49	9,85	27,34 ↓ 16,85	10,49	11,74 ↓ 10,64	1,1	11,74 ↓ 11,64	0,1
B1/2	30	1,37	27,9 ↓ 17,14	10,76	27,9 ↓ 16,99	10,91	12,45 ↓ 10,68	1,77	12,45 ↓ 11,96	0,49
B1/3	31	1,7	28,6 ↓ 16,37	12,23	28,6 ↓ 16,64	11,96	13,03 ↓ 10,83	2,2	13,03 ↓ 12,02	1,01
B1/4	32	2,3	28,04 ↓ 15,42	12,62	28,04 ↓ 16,29	11,75	13,47 ↓ 10,61	2,86	13,47 ↓ 11,8	1,67

Tabel 3.4.2/1 - Varianten B1/1 t/m B1/4 met verhoogde Water/Luchtfactor

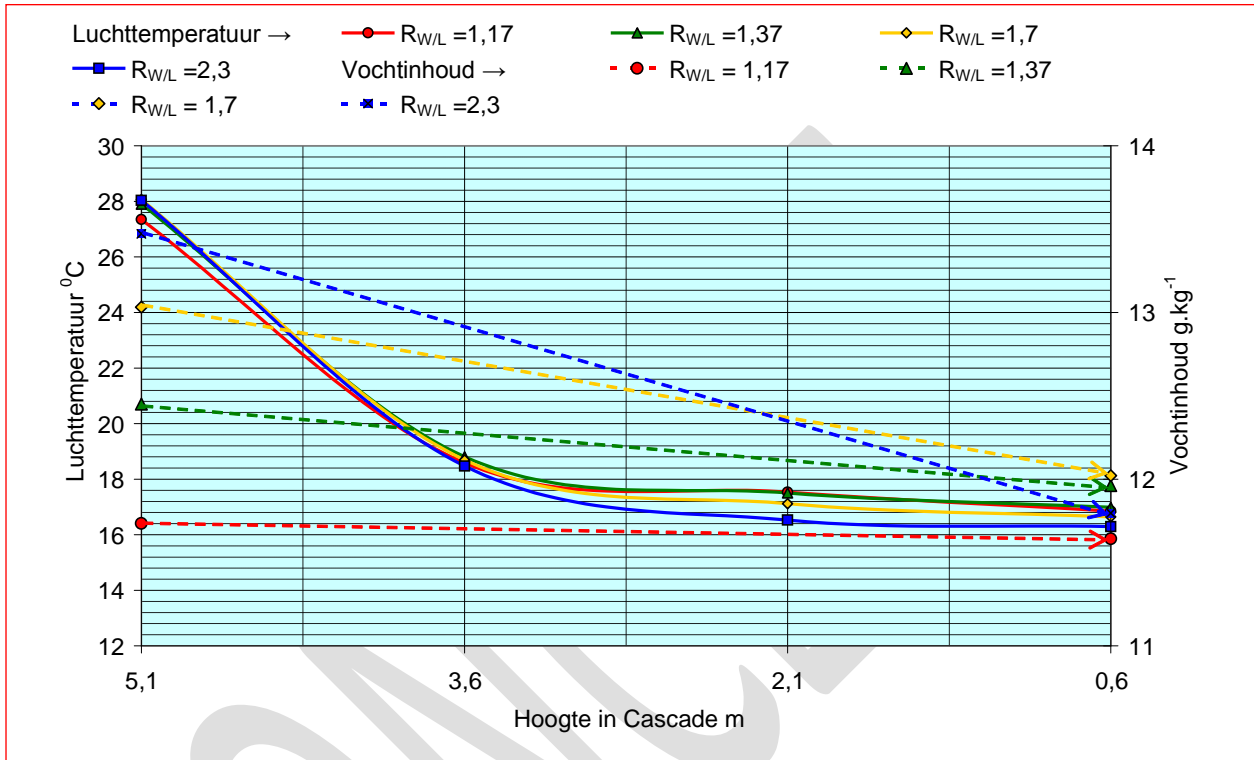
De resultaten van deze metingen zijn ook weergegeven in figuur 3.4.2/4. De interpretatie van deze figuur wordt bemoeilijkt door verschillen in de intredecondities en water- en luchtdebieten.

Een eenduidige beoordeling wordt mogelijk door een berekening van de *MLTD* (*Mean Logarithmic Temperature Difference* $\Delta T_{log, gelijk}$) van de 4 varianten. Het blijkt dat bij verhoging van $R_{w/L}$ van $1,17$

³⁷ Nummering van de metingen door Peutz

→ 2,3 het *MLTD* volgens formule (3.1.7/1) vrijwel onveranderd blijft. Aangezien door handhaving van het sproeispectrum het werkzaam oppervlak in de cascade en de warmteoverdrachtscoëfficiënt tussen water en lucht ook niet of nauwelijks veranderd, betekent dit dat verhoging van de water/luchtfactor weinig of geen invloed zal hebben op de voelbare koelcapaciteit.

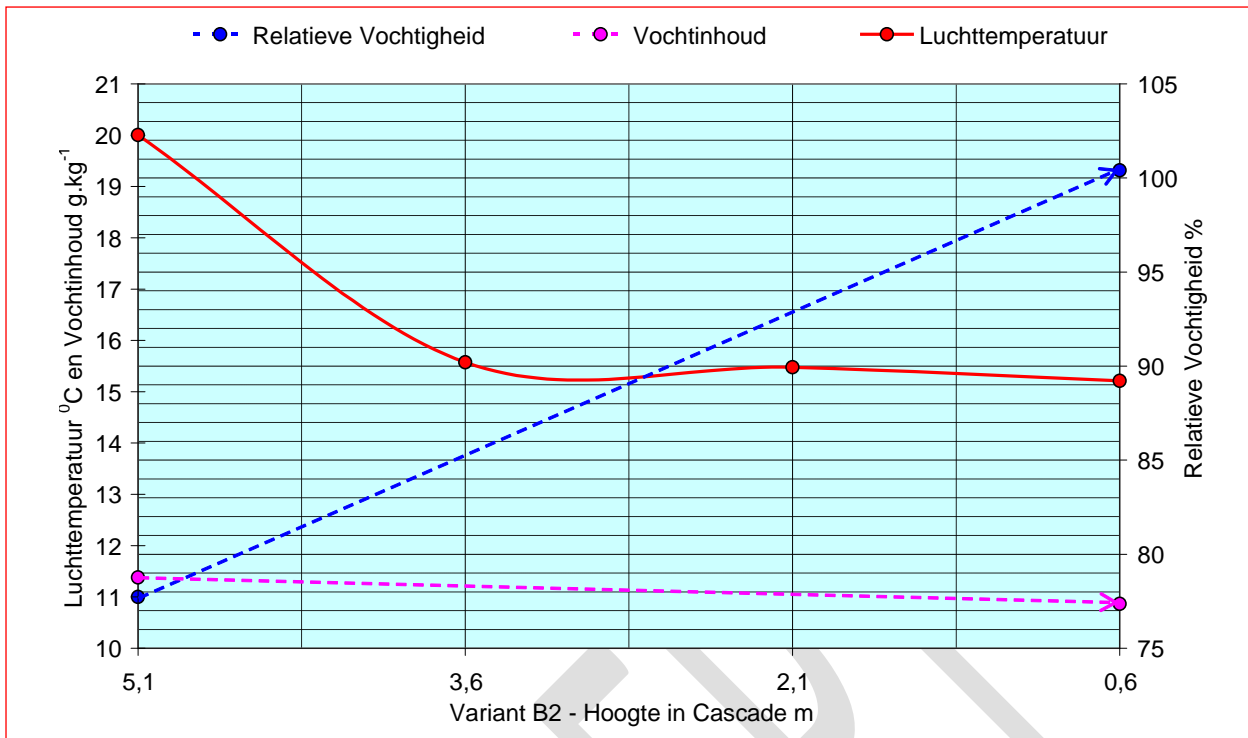
Bij alle varianten ligt de gemeten relatieve vochtigheid van de uitgaande lucht op $\approx 100\%$, bij slechts geringe verschillen in temperatuur. Verhoging van de water/luchtfactor van $R_{W/L}$ van 1,17 → 2,3 heeft dus ook geen invloed op de vochtinhoud van de lucht, hetgeen ook duidelijk blijkt uit tabel 3.4.2/1. De gewenste verdere droging van de lucht door verhoging van $R_{W/L}$ is dan ook niet mogelijk.



Figuur 3.4.2/4 – Temperatuur en Vochtinhoud als functie van $R_{W/L}$ en hoogte in de cascade

3.4.3 Meetresultaten variant B2 -gemiddelde zomercondities

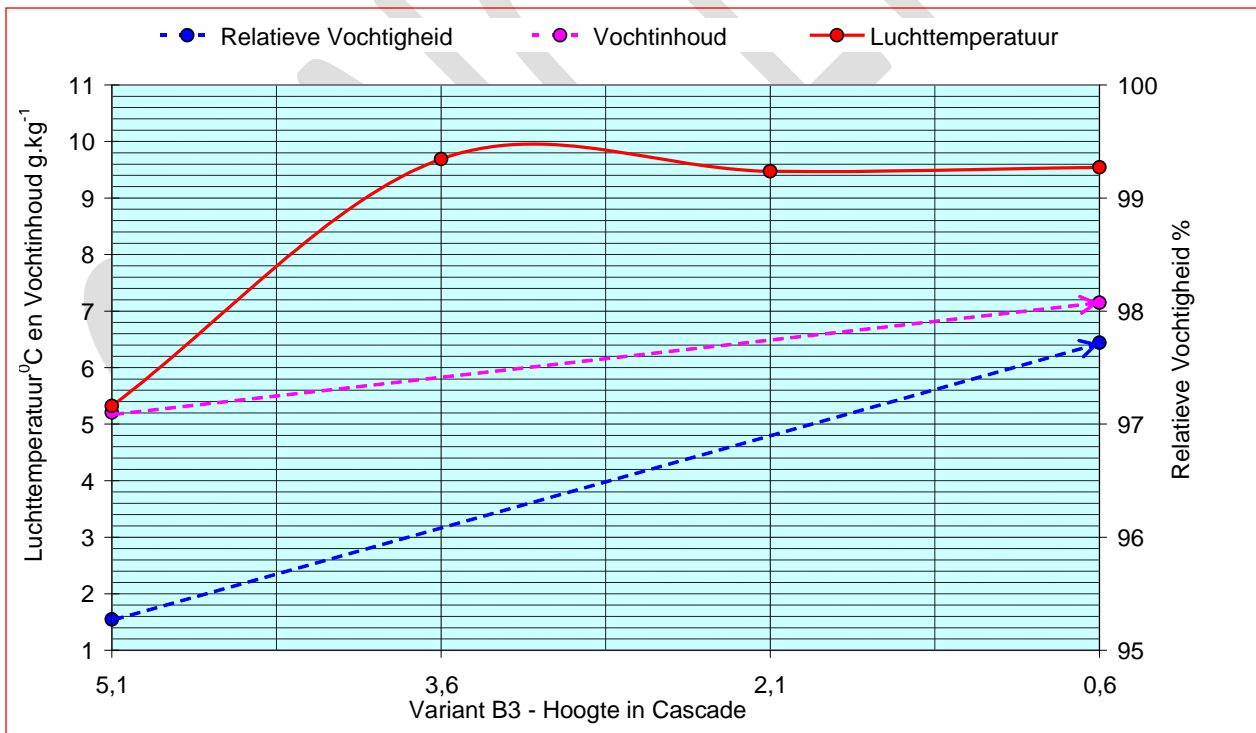
Zie figuur 3.4.3. De lucht wordt gekoeld tot $15,2^{\circ}\text{C}$ waarbij tevens de vochtinhoud met $\approx 0,5 \text{ g.kg}^{-1}$ wordt verlaagd. Uitgaande van een gewenste uittredetemperatuur van 17°C kan worden gesteld dat de voelbare koelcapaciteit hoger is dan gevraagd. De gemeten luchtdroging is echter wel gewenst en de vraag doet zich voor of en hoe het psychometrisch proces in een Klimaatcascade kan worden beïnvloed. De meest gereede 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 - zie paragraaf 3.5.4



Figuur 3.4.3 - Variant B2 – Gemiddelde zomerconditie - $\theta_e = 20^{\circ}\text{C}$ - $\text{RV}_e = 80\%$

3.4.4 Variant B3 - Gemiddelde winterconditie

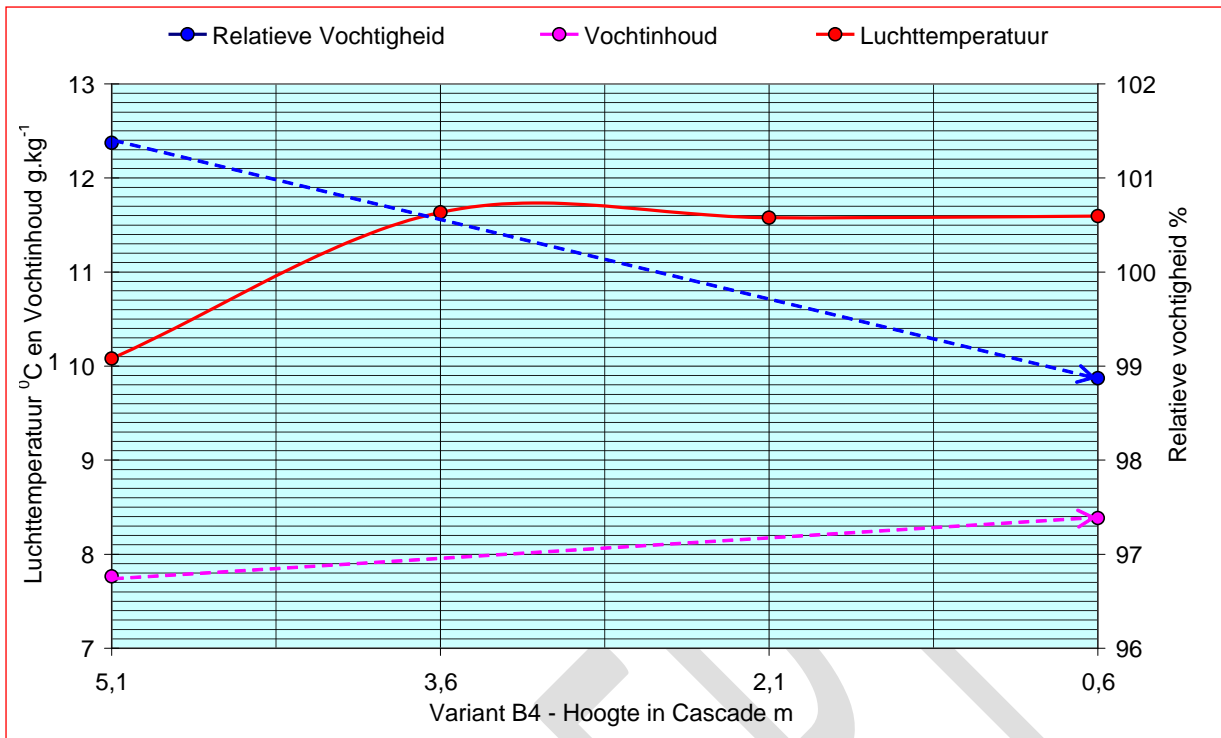
Zie figuur 3.4.4.



Figuur 3.4.4 - Variant B3 – Gemiddelde winterconditie - $\theta_e = 5^{\circ}\text{C}$ - $\text{RV}_e = 90\%$

3.4.5 Variant B4 - Voorjaar/Najaarscondities

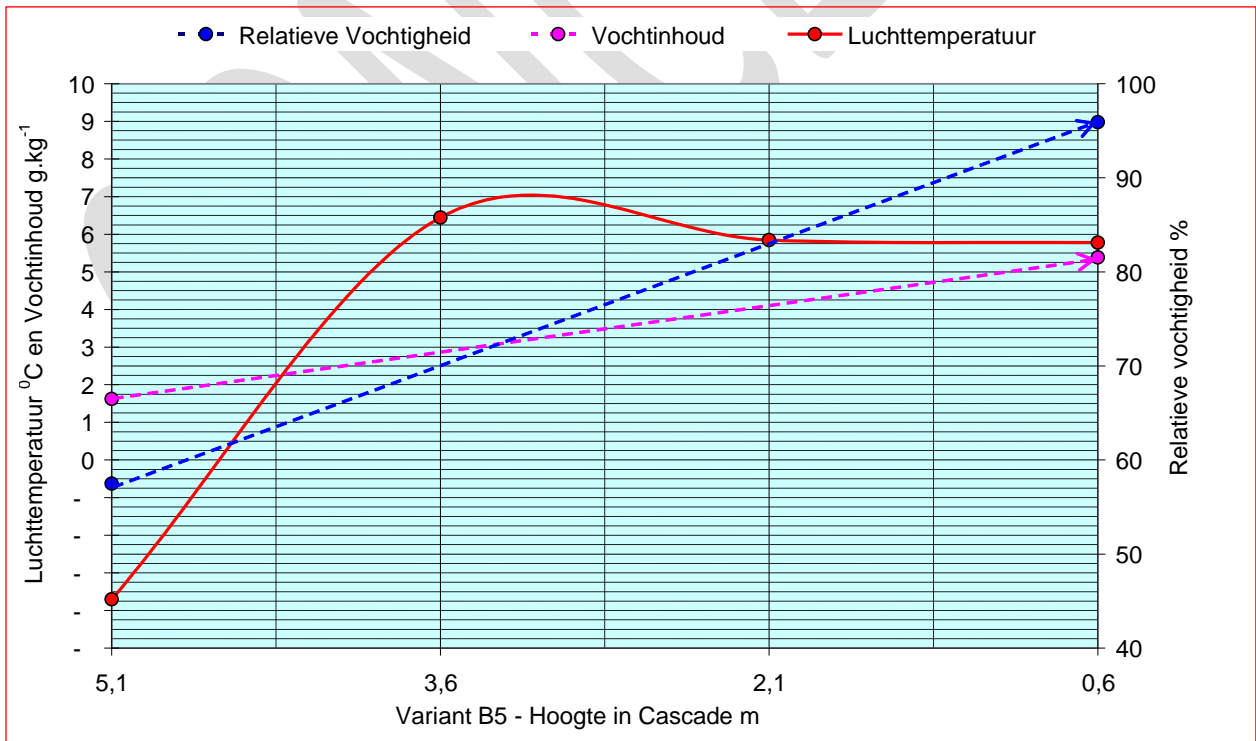
Zie figuur 3.4.5. Deze meet sessie, waarvan geen CFD simulatie beschikbaar is, is naderhand toegevoegd. De intredeconditie is 10°C bij 95% RV, en de uitreideconditie $11,6^{\circ}\text{C}$ bij 98% RV. De lucht- en watertemperaturen liggen hier dicht bij elkaar en de psychometrische prestatie van de Klimaatcascade is beperkt tot een geringe voorverwarming en bevochtiging van de lucht.



Figuur 3.4.5 - Variant B4 – Gemiddelde najaar/voorjaarsconditie - $\theta_e = 10^0\text{C}$ - $RV_e = 100\%$

3.4.6 Variant B5 - Ontwerp wintercondities

Zie figuur 3.4.6. De ontwerp winterconditie van $\theta_e = -10^0\text{C}$ heeft zich in de meetperiode niet voorgedaan; de metingen zijn daarom uitgevoerd bij de laagst mogelijke intredetemperatuur van $\theta_e = -3,7^0\text{C}$ – zie paragraaf 17.4.3.



Figuur 3.4.6 - Variant B5 – Ontwerp winterconditie - $\theta_e = -10^0\text{C}$ - $RV_e = 55\%$

3.4.7 Overzicht van de meeresultaten varianten B1 t/m B5

Tabel 3.4.7 geeft een overzicht van de meetresultaten en enkele afgeleide waarden. Enkele observaties:

- Bij de ontwerp zomercondities – meetsessie B1 - is met een VWF = 0,95 de overdracht van voelbare warmte dominant. Er treedt slechts een geringe luchtdroging op. De Klimaatcascade functioneert voornamelijk als luchtkoeler.
- Bij gemiddelde zomercondities -meetsessie B2 -is met een 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 – meetsessies B2A, B3 en B5 - 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%.

Gebouw / Klimaatype BETA							
Variant >			B1/1	B2	B4	B3	B5
Figuur			3.4.2/3	3.4.3	3.4.5	3.4.4	3.4.6
Water/Luchtfactor	R _{w/L}	kg.kg ⁻¹	1,164	1,109	1,061	1,049	1,029
WATER							
Volumedebiet	q _v	dm ³ .h ⁻¹	2422	2425	2410	2427	2427
Massadebiet	q _m	kg.s ⁻¹	0,673	0,674	0,670	0,674	0,674
Aanvoertemperatuur	θ _{w,in}	°C	12,85	13,03	12,83	13,10	12,93
Afvoertemperatuur	θ _{w,uit}	°C	15,11	14,37	12,13	11,00	8,50
LUCHT							
Volumedebiet	q _v	m ³ .h ⁻¹	1789	1832	1836	1836	1807
Dichtheid	ρ (rho)	kg.m ⁻³	1,16	1,19	1,24	1,26	1,31
Massadebiet	q _m	m ³ .h ⁻¹	2081	2186	2272	2314	2359
Massadebiet	q _m	kg.s ⁻¹	0,578	0,607	0,631	0,643	0,655
Intredeconditie							
Temperatuur	θ _{l,in}	°C	27,34	20,00	10,08	5,32	-3,70
Relatieve vochtigheid	RV	%	51,88	77,73	101,37	95,27	57,48
Vochtinhoud	x	g.kg ⁻¹	11,74	11,38	7,76	5,21	1,62
Enthalpie	h	Kj.kg ⁻¹	57,59	49,14	29,79	18,48	0,32
Uittredeconditie							
Temperatuur	θ _{l,in}	°C	16,85	15,21	11,60	9,54	5,78
Relatieve vochtigheid	RV	%	97,56	100,41	98,87	97,72	95,91
Vochtinhoud	x	g.kg ⁻¹	11,64	10,87	8,38	7,149	5,39
Enthalpie	h	Kj.kg ⁻¹	46,57	42,91	32,90	27,68	19,39
PRESTATIES							
Enthalpieverschil	Δh	Kj.kg ⁻¹	-11,02	-6,23	3,12	9,21	19,07
Temperatuurverschil	Δθ	K	-10,49	-4,79	1,52	4,22	9,48
Verschil Vochtinhoud	Δx	g.kg ⁻¹	-0,09	-0,52	0,62	1,94	3,76
Thermisch vermogen	P	Kw	-6,37	-3,78	1,97	5,92	12,50
MLTD	ΔT _{log,gel}	K	-6,01	-2,90	1,35	3,77	7,69
Voelbaar vermogen	P	Kw	-6,07	-2,91	0,96	2,71	6,21
Totaal vermogen	P	Kw	-6,37	-3,78	1,97	5,92	12,50
Latent vermogen	P	Kw	-0,30	-0,88	1,01	3,20	6,28
Voelbare warmte factor	VWF	Δθ/Δh	0,95	0,77	0,49	0,46	0,50
Drukopbouw	Δp	Pa	5,81	6,18	7,17	8,44	9,77

Tabel 3.4.7 – Overzicht meetresultaten en bewerkingen

3.4.8 De Klimaatcascade in een vorstperiode

Een interessante waarneming betreft de ontmoeting van kleine waterdruppels in de sproeistraal en de

lucht bij temperaturen onder het vriespunt. Het risico op ijsvorming is het grootst bij lage water/luchtfactoren. Door het afsluiten van sproeiers en de inherente verlaging van de water/luchtfactor is dit verschijnsel in beeld gebracht.

Figuur 3.4.8/1 laat zien dat met 2 actieve sproeiers en $R_{w/L} = 0,44$ bij $\theta_e = -4^{\circ}\text{C}$ er geen sprake is van ijsvorming.

Figuur 3.4.8/2 geeft de situatie weer met 1 actieve sproeier en $R_{w/L} = 0,22$ bij $\theta_e = -6^{\circ}\text{C}$. Hierbij vindt enige ijsvorming plaats. Dit is echter geen normale bedrijfsconditie.

Geconcludeerd kan worden dat onder normale bedrijfsomstandigheden met $R_{w/L} \approx 1,0$ bij lage buitentemperaturen geen ijsvorming op zal treden.



Figuur 3.4.8/1 $\theta_e = -4^{\circ}\text{C}$ - 2 sproeiers - $R_{w/L} = 0,44$ Figuur 3.4.8/2 - $\theta_e = -6^{\circ}\text{C}$ - 1 sproeier - $R_{w/L} = 0,22$

3.4.9 Validatie voelbare prestaties basaal rekenmodel en CFD model

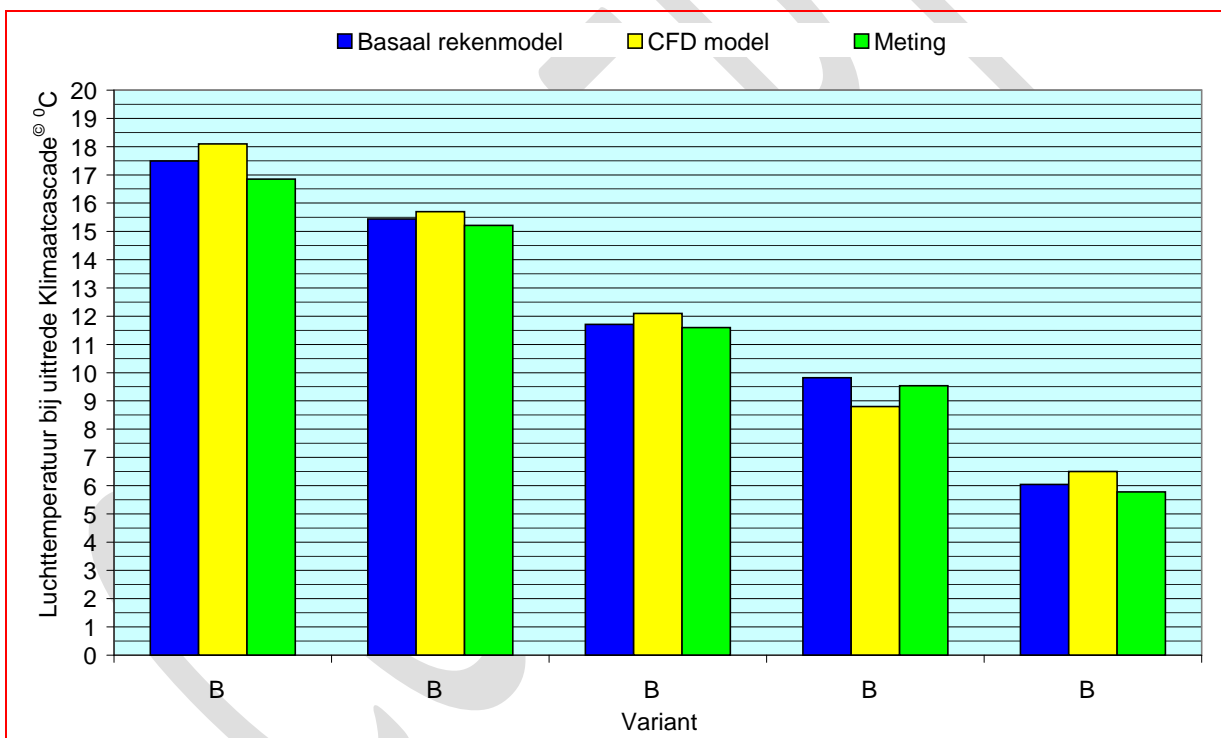
De invloed van de luchtvochtigheid op de kwaliteit van het binnenmilieu is beperkt –zie paragraaf 3.1.5.5. De voelbare prestaties van de Klimaatcascade, uitgedrukt in de uitgaande luchttemperaturen, wegen dan ook zwaarder dan de latente prestaties. In eerste instantie zijn daarom de voelbare prestaties van het basale rekenmodel en van het CFD model gevalideerd. Het ESP-r model is gebaseerd op hetzelfde fysisch model als het basale rekenmodel, en de simulatieresultaten zijn dan ook identiek -zie paragraaf 3.3.13.4.

Figuur 3.4.9 laat de uitgaande luchttemperaturen zien voor de varianten B1 t/m B5 zoals gemeten in de fysieke testopstelling en volgens de berekeningen met het basale rekenmodel en het CFD model. Het basale rekenmodel scoort in de meeste gevallen verrassenderwijs iets beter dan het CFD model.

Bij zomercondities, varianten B1 en B2, liggen de berekende temperaturen minder dan 1°C boven de gemeten waarden, waardoor de voelbare prestaties van de Klimaatcascade licht worden ondergewaardeerd.

Bij voor- en najaar en wintercondities, varianten B3, B4 en B5, scoort het basale rekenmodel nog beter, met een geringe overwaardering van de voelbare prestaties.

Geconcludeerd kan worden dat het basale rekenmodel betrouwbare resultaten oplevert voor de berekening van de voelbare prestaties een Klimaatcascade.



Figuur 3.4.9 – Vergelijking basaal rekenmodel en CFD model met de metingen - Varianten B1 t/m B5

Het toepassingsgebied van het CFD model ligt voornamelijk in de selectie van sproeiers en simulatie van de bijbehorende psychometrische prestaties in een concreet ontwerp van een Klimaatcascade. Het CFD model is hiervoor valide, maar niet toegankelijk voor de klimaatingenieur –zie paragraaf 3.3.2.

Het toepassingsgebied van het ESP-r model ligt voornamelijk in de dynamische simulaties die voor de Klimaatcascade kunnen worden uitgevoerd, momenteel alleen als *stand alone* element maar in de toekomst eveneens op gebouwniveau –zie paragraaf 3.3.13. Het ESP-r model is hiervoor valide, maar slecht toegankelijk voor de klimaatingenieur

Het basale rekenmodel is de basis voor het ontwerp van een Klimaatcascade in een concrete toepassing. Het model is valide en gebruiksvriendelijk, en goed toegankelijk voor de klimaatingenieur. Het is daarom van belang naast de validatie van de voelbare prestaties een diepte analyse te maken van de integrale psychometrische prestaties van het model.

3.4.10 Diepte analyse psychometrische prestaties basaal rekenmodel

3.4.10.1 Uitgangspunten

Berekeningen zijn uitgevoerd met de bèta versie van het Excel rekenmodel –zie paragraaf 3.2.16. Eén van de uitvoerparameters van het model is de relatieve vochtigheid van de lucht, die echter door de temperatuurafhankelijkheid een lastig te interpreteren waarde is. Aan het model is daarom een berekening van de vochtinhoud van de lucht toegevoegd, die direct inzicht geeft in de latente capaciteit van de Klimaatcascade. In de hierna volgende prestatievergelijkingen is daarom als parameter de absolute luchtvochtigheid in g.kg^{-1} gebruikt.

De vochtinhoud is berekend met de formule (ISSO 2002)

$$x = 0,622 \cdot \frac{p_d}{p_1 - p_d} \quad (3.4.10)$$

Waarin	x	vochtinhoud	$[\text{kg.kg}^{-1}]$
	p_d	partiële druk van de waterdamp	$[\text{Pa}]$
	p_1	totale druk (barometerstand)	$[\text{Pa}]$

In de overzichten met meetgegevens is de barometerstand tijdens de metingen niet vermeld. Uitgegaan is van een gemiddelde waarde van 101.325 Pa .

De berekeningen zijn uitgevoerd met een watertemperatuur van $\approx 13^\circ\text{C}$ en een nominaal volumedebiet van $2.400 \text{ dm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Voor de verschillende varianten zijn de exacte waarden aangehouden zoals vermeld in tabel 3.4.7.

Het in het model ingevoerde sproeispectrum is conform de voor de sproeiers in de fysieke testopstelling gemeten waarden, en ligt tussen de gedefinieerde spectra 8 en 9 in. Voor de berekeningen zijn waarden gehanteerd van $D_{30} \text{ (VMD)} = 1,048 \text{ mm}$ en $D_{32} \text{ (SMD)} = 1,317 \text{ mm}$ –zie paragraaf 3.3.7.

3.4.10.2 Druppelsnelheid

Bij een voordruk van $0,5 \text{ bar}$ is de theoretische beginsnelheid van de druppels 10 m.s^{-1} . De eindsnelheid van $\approx 3 \text{ m.s}^{-1}$ wordt voor deze kleine druppels al na $\approx 0,4 \text{ sec}$ bereikt - zie figuur 3.2.4/3 in paragraaf 3.2.4. Voor de validatie is daarom gerekend is met een constante gemiddelde druppelsnelheid van 3 m.s^{-1} .

Deze simplificatie geeft overigens een verkeerd beeld van de beginfase van het psychometrisch proces, waarin de druppelsnelheid hoger is dan de gemiddelde snelheid. De snelheidsafhankelijke warmte- en stofoverdachtscoëfficiënten zijn in de beginfase hoger dan gemiddeld waardoor de berekende waarden afwijken van de gemeten waarden. Gedurende de eerste $0,4 \text{ sec}$ van het psychometrisch proces is de gemiddelde druppelsnelheid ongeveer $\approx 6,5 \text{ m.s}^{-1}$ waarin de druppels $\approx 2,6 \text{ m}$ in de Klimaatcascade afleggen. Het is in deze fase dat de grootste afwijkingen tussen berekeningen en metingen optreden. In geval van koeling zijn de berekende waarden te hoog en bij verwarming te laag. De incongruentie van de profielen van berekening en meting tijdens het psychometrisch proces in de Klimaatcascade is afhankelijk van de water/luchtfactor en het temperatuurverschil tussen water en lucht. In de hierna volgende grafische weergave van de verschillende cases is dit duidelijk te zien..

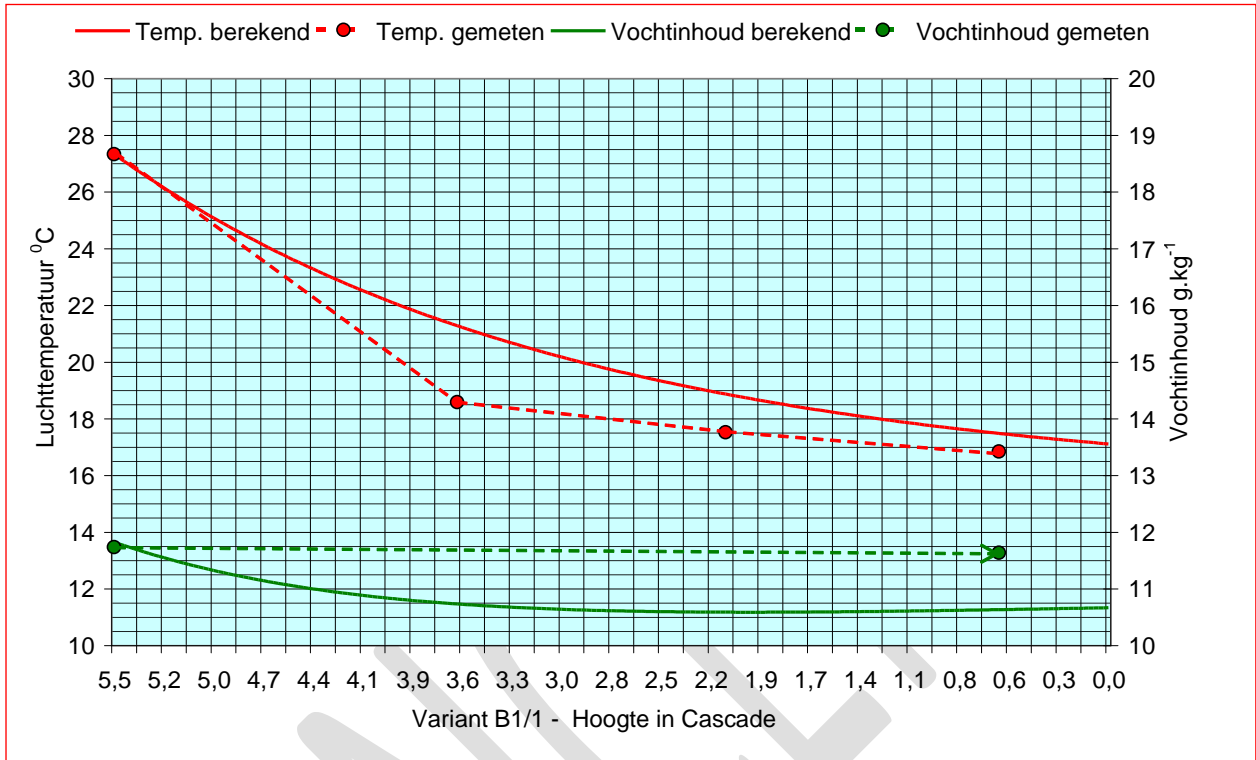
Er is van afgezien in het Excel rekenmodel het werkelijke snelheidsverloop van de druppels in te voeren. Het hiervoor nodige rekenalgoritme is gecompliceerd en uit de resultaten van de validaties blijkt dat het gebruik van een gemiddelde druppelsnelheid voor het betreffende fijne sproeispectrum goede resultaten oplevert. Voor een grover spectrum, waarin het langer duurt voordat de eindsnelheid van de druppels is bereikt, kan het wenselijk zijn het werkelijke snelheidsverloop van de druppels in het rekenmodel te integreren. Dit is mede afhankelijk van de totale valtijd van de druppels, die weer afhangt van de hoogte van de Klimaatcascade- zie figuur 3.2.4/3.

Het is een interessante vraag of verschillen tussen berekeningen en metingen te wijten zijn aan onnauwkeurigheid van het rekenmodel of van de metingen. Temperatuurmetingen zijn in het

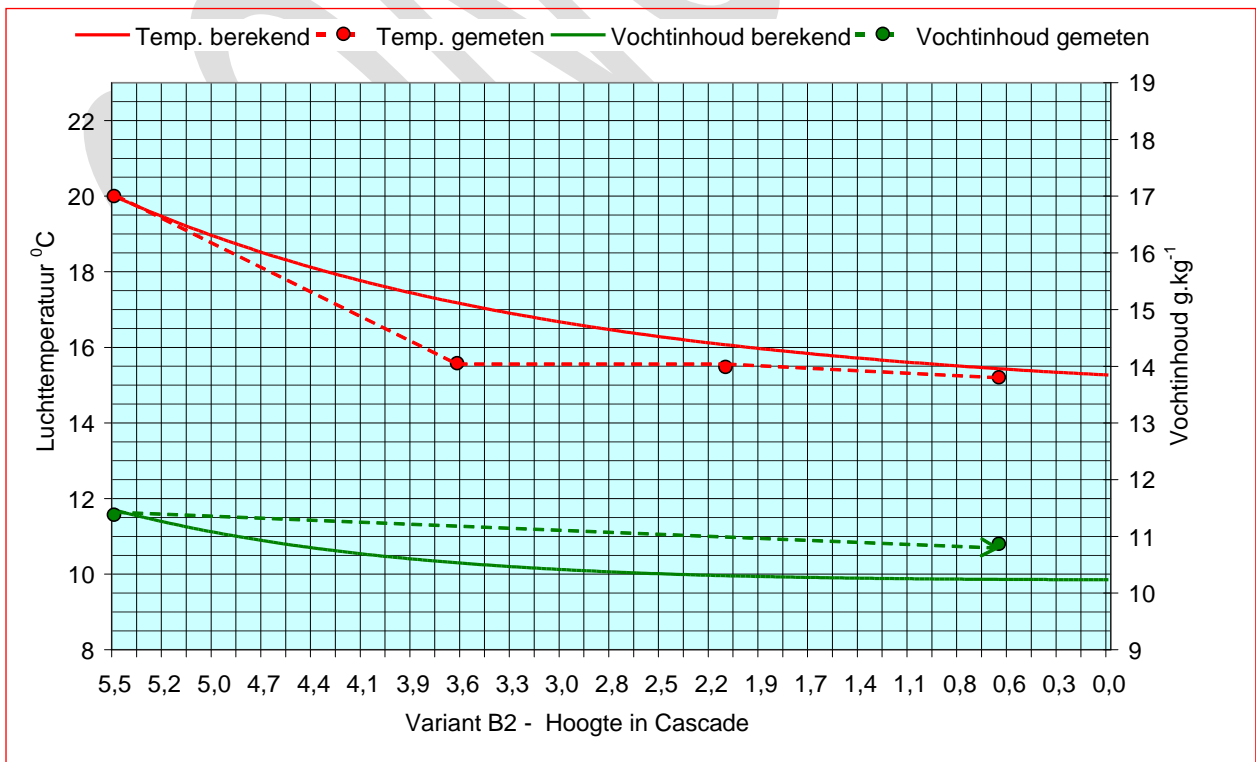
algemeen nauwkeuriger dan vochtmetingen. Vooral een nauwkeurige meting van de relatieve vochtigheid rond de verzadigingsgrens is niet eenvoudig. In verschillende metingen werd een RV > 100% gerapporteerd, hetgeen fysisch niet mogelijk is.

3.4.10.3 Varianten B1 t/m B5 – Metingen versus berekeningen

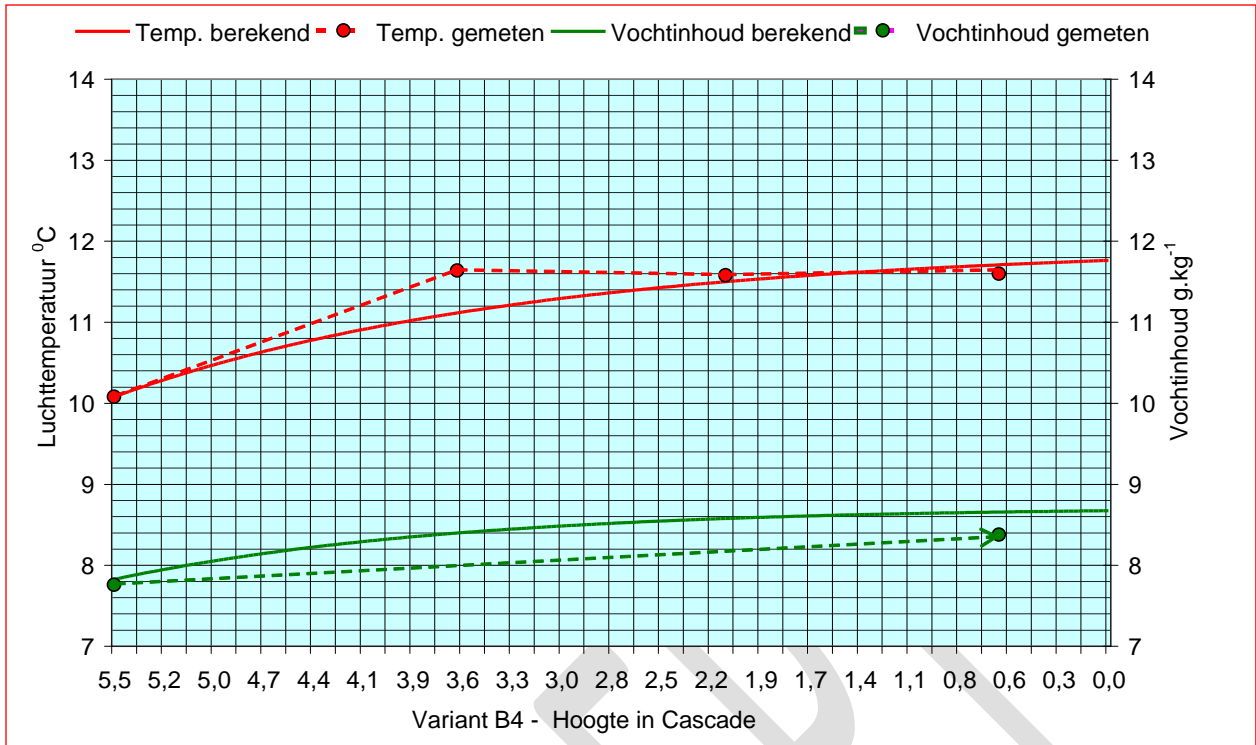
In de volgende figuren zijn de resultaten van de metingen en de berekeningen grafisch weergegeven.



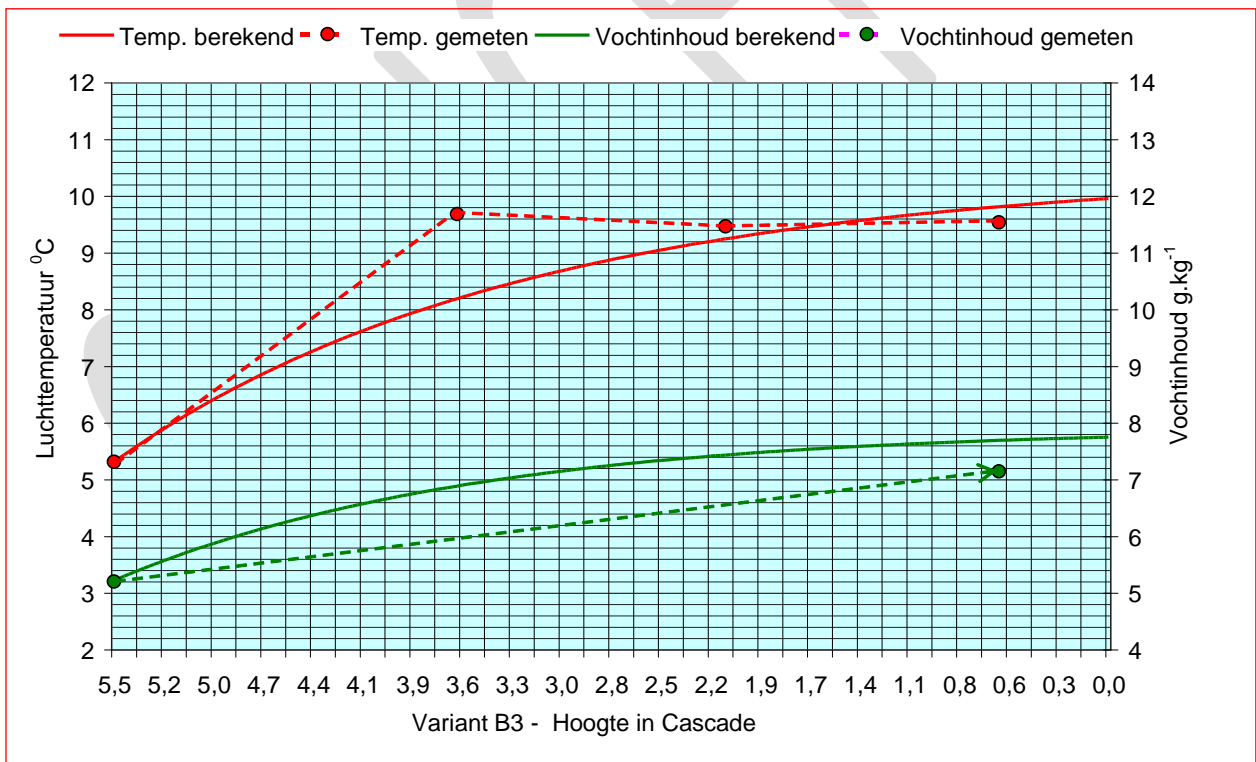
Figuur 3.4.10/1 – Variant B1 – Ontwerpcondities zomer



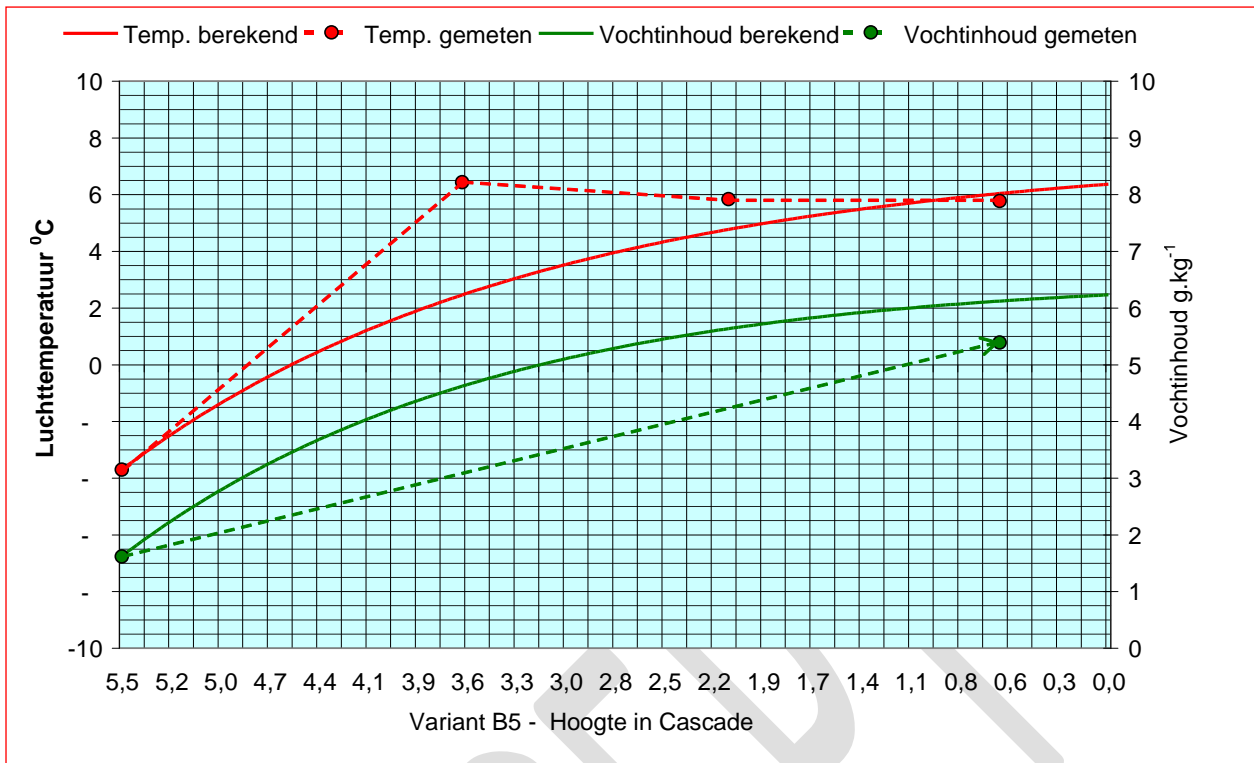
Figuur 3.4.10/2 – Variant B2 – Gemiddelde zomercondities zomer



Figuur 3.4.10/3 – Variant B4 – Voorjaar / Najaarscondities



Figuur 3.4.10/4 – Variant B3 – Gemiddelde winterconditie



Figuur 3.4.10/5 – Variant B5 – Ontwerp winterconditie

3.4.10.4 Conclusies varianten B1 t/m B5

- De latente prestaties van de Klimaatcascade worden met het basale rekenmodel in de meeste varianten overgewaardeerd, een lagere vochtinhoud in de zomerperiode en een hogere vochtinhoud in de winterperiode. Een mogelijke verklaring hiervoor zou kunnen zijn dat de invloed van kleine ten opzichte van grotere druppels onvoldoende in het rekenmodel wordt gewaardeerd. Kleine druppels hebben door hun lagere eindsnelheid een langere verblijfstijd in de cascade dan grotere druppels, waardoor onderin de cascade per m³ ruimte verhoudingsgewijs meer kleinere druppels voorkomen dan bovenin. De temperatuur van deze kleine druppels ligt ook dichterbij de luchttemperatuur dan van grotere druppels, 's zomers hoger en 's winters lager. Dit heeft naar verwachting een grotere invloed op de vochtinhoud dan op de temperatuur van de lucht.
- Door beperkingen in het basale 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 basale 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 zeker. 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 $1,0 \text{ g.kg}^{-1}$.
- Het Excel rekenmodel is dus gevoelig voor het temperatuurverschil water/lucht en voor de water/luchtfactor. Voor het meest voor de hand liggende Gebouw/Klimaatype BETA en een water/luchtfactor 1,2 tot 1,4 geeft het model goede resultaten.

Een kwalitatieve beoordeling van het basale rekenmodel is weergegeven in tabel 3.4.10/1. Er is hierbij van uitgegaan dat de meetgegevens juist zijn en dat eventuele verschillen tussen berekening en metingen aan het rekenmodel worden geweten. De waardering voor de kwaliteit is als volgt uitgedrukt:

- ++ Zeer goed \rightarrow Temperatuur $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ – Vochtinhoud $\pm 0,5 \text{ g.kg}^{-1}$
- + Goed \rightarrow Temperatuur $\pm 1,0^{\circ}\text{C}$ – Vochtinhoud $\pm 1,0 \text{ g.kg}^{-1}$
- +/- Matig \rightarrow Temperatuur $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$ – Vochtinhoud $\pm 1,5 \text{ g.kg}^{-1}$
- Slecht \rightarrow Temperatuur $\pm 2,0^{\circ}\text{C}$ – Vochtinhoud $\pm 2,0 \text{ g.kg}^{-1}$

Variant →	B1/1	B2	B3	B4	B5
Temperatuur	+	++	++	++	++
Vochtinhoud	+/-	-	+	++	+

Tabel 3.4.10 – Kwalitatieve waardering basale rekenmodel

3.5 Het ontwerp

3.5.1 Ontwerpcriteria

De belangrijkste ontwerpcriteria voor een Klimaatcascade zijn

- De gewenste ventilatiecapaciteit – zie paragraaf 3.5.1.1
- De gewenste binnenklimaatcondities – zie paragraaf 3.5.1.2

3.5.1.1 Ventilatiecapaciteit

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 energieprestatie 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 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 3.5.1/1 (Olesen, B. 2011).

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 3.5.1/1 – Ventilatiecapaciteit volgens NEN-EN 15251 en ASHRAE Standard 62.1

Voorbeeld:

Een cellenkantoor kwaliteitscategorie II en een laag emissieniveau:

- De ventilatiecapaciteit voor personen bedraagt (0,1*7) $0,7 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$
- De additionele ventilatie voor gebouw en interieur is $0,7 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$
- De totale ventilatiecapaciteit bedraagt $1,4 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \equiv 5,0 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$

Deze waarde komt overeen met de specifieke ventilatiecapaciteit zoals die als uitgangspunt ook voor het ontwerp van een zonneshoorsteen is aanbevolen –zie paragraaf 4.5.2.

Tabel 3.5.1/1 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 CEN als ASHRAE 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-effluenten 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.

NEN-EN 13779 biedt ook de mogelijkheid te kiezen voor een bepaalde kwaliteit van de binnenlucht zie tabel 3.5.1/2. Deze norm gaat echter in hoofdzaak over ventilatie en 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 3.5.1/2 – 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 $1,0 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$. 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.

Het is de klimaatingenieur die de ventilatiecapaciteit voor een bepaald project vaststelt. Voor een globale dimensionering van het Ventecdak, de Klimaatcascade en de zonneshoorsteen kan worden

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 $\approx 5 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, betrokken op het afdelingsvloeroppervlak volgens NEN 2580 –zie figuur 4.5.2 in hoofdstuk 4. Hiermee wordt niet alleen voldaan aan comforteisen maar ook aan de eisen die aan de luchtkwaliteit worden gesteld met betrekking tot gezondheid en productiviteit³⁸.

3.5.1.2 Binnenklimaatcondities

Aanbevelingen voor de klimaatcondities in kantoorruimten zijn in verschillende normen te vinden. (NEN 2008, ASHRAE 2008, ISO 2008, DIN 2008). De in paragraaf 3.5.1.1 genoemde norm NEN-EN 15251:2007 geeft als algemene regel voor kantoorruimten de volgende operationele temperaturen

- Stookseizoen minimum $20,0^\circ\text{C}$ bij $1,0 \text{ clo}$ ³⁹
- Koelseizoen maximum $26,0^\circ\text{C}$ bij $0,5 \text{ clo}$

ASHRAE Standard 55 – 2004 (ASHRAE 2002, Olesen et al. 2004) geeft een behaaglijkheidsgebied weer in relatie met het kledingniveau en de relatieve vochtigheid. De maximum operationele temperatuur bij $0,5 \text{ Clo}$ is hier met 27°C 1 graad hoger dan in NEN-EN 15251:2007.

Een kledingweerstand van $0,5 \text{ Clo}$ heeft betrekking op een uiterst lichte en informele kleding, 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 $0,7 \text{ Clo}$ lijkt het, zeker voor organisaties in gebouwen met een meer formele *dress-code*, verstandig de maximum operationele temperatuur te beperken tot 25°C . Zie ook paragraaf 3.1.5 en 3.1.7, waar gekozen is voor het gebouw/klimaatmodel BETA met een maximum ruimtetemperatuur van 25°C .

3.5.1.3 Ontwerp van de Klimaatcascade

Op basis van de gekozen ontwerpcriteria kan met behulp van het rekenmodel ad paragraaf 3.2.16 de Klimaatcascade worden gedimensioneerd en de water/luchtfactor, het sproeispectrum en de watertemperatuur worden bepaald.

3.5.2 Psychometrische en aerodynamische prestaties

3.5.2.1 Psychometrische prestaties

Met behulp van het gevalideerde rekenmodel ad paragraaf 3.2.16 zijn voor gebouwen van 4 tot 20 verdiepingen en volumedebieten van 20.000 tot $100.000 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ de psychometrische prestaties van een Klimaatcascade in de koelperiode berekend. Uitgegaan is van de ontwerp zomerconditie van 28°C bij $55\% \text{ RV}$ en de gewenste temperatuur van de ventilatielucht van $\approx 17^\circ\text{C}$ - zie paragraaf 3.1.7.

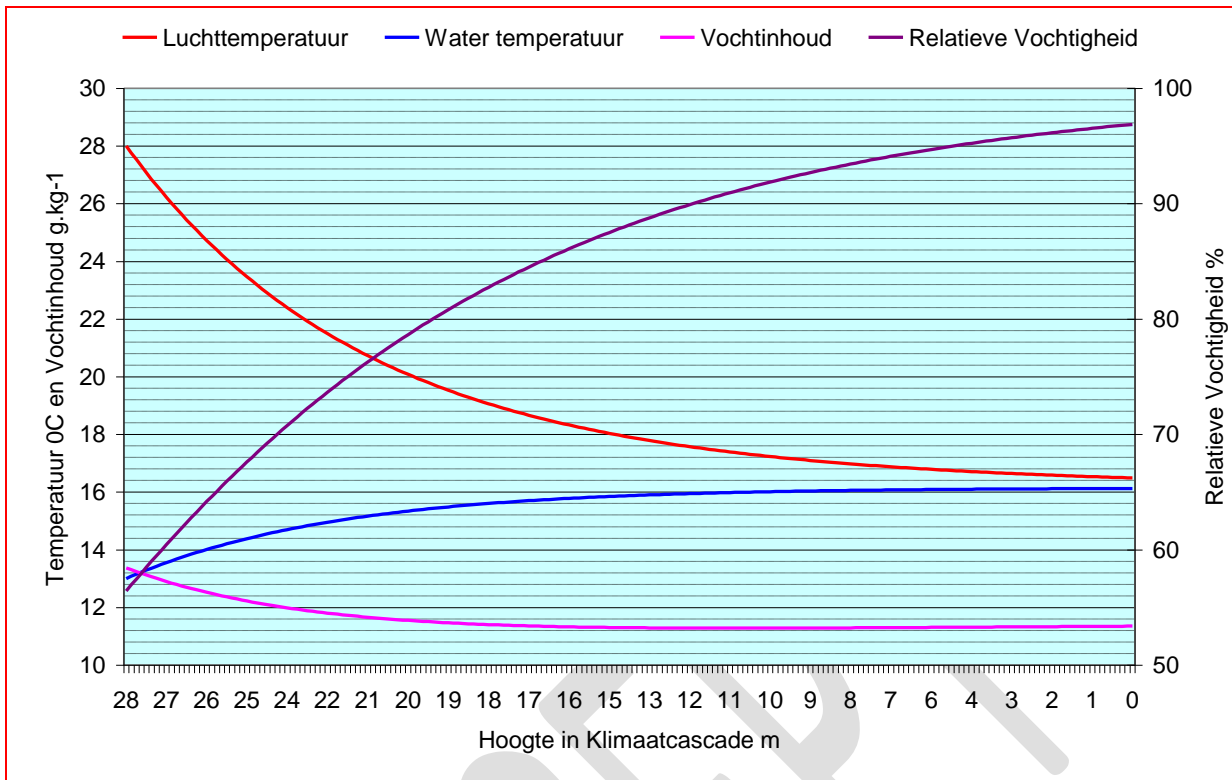
Verdere uitgangspunten voor de berekeningen zijn:

- Een afdelingsvloeroppervlak van 1.000 m^2 per verdieping –zie paragraaf 4.5.2.
- Een specifiek ventilatiedebiet van $5 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ –zie paragraaf 4.5.2.
- Een gekoeld watertemperatuur van 13°C - zie paragraaf 3.1.7.4.
- Een zo klein mogelijke water/luchtfactor R_{WL} ter beperking van de pompenergie.

Figuur 3.5.2/1 brengt als voorbeeld het verloop van de luchtcondities en watertemperaturen in beeld van een Klimaatcascade met een hoogte van 8 verdiepingen à $3,5 \text{ m}$. Het karakter van de Klimaatcascade als gelijkstroom warmtewisselaar komt hierin duidelijk tot uiting –zie figuur 3.1.7/1. Het aangegeven verloop van de relatieve vochtigheid en de vochtinhoud verdient enige relativering omdat het rekenmodel voor deze condities slechts matig scoort –zie paragraaf 3.4.10.4. De daling van de vochtinhoud is in werkelijkheid minder dan de figuur aangeeft.

³⁸ Zie onderzoeksrapport deel IV (Bronsema, B. 2012)

³⁹ Eenheid van kledingweerstand –zie paragraaf 10.1



Figuur 3.5.2/1 – Verloop van luchtcondities en watertemperatuur als functie van de hoogte in een Klimaatcascade van 28 m

3.5.2.2 Water/Luchtfactor en sproeispectrum

De psychometrische en aerodynamische prestaties van een Klimaatcascade worden in hoge mate bepaald door de water/luchtfactor $R_{w/L}$ –zie paragraaf 3.1.8- en het sproeispectrum –zie paragraaf 3.2.3.

Voor een bepaald luchtdebiet is de water/luchtfactor $R_{w/L}$ samen met de hoogte van de Klimaatcascade maatgevend voor het energiegebruik van de sproeipomp. Uitgangspunt voor de simulaties met behulp van het rekenmodel is daarom minimalisering van $R_{w/L}$. Het gewenste sproeispectrum is iteratief bepaald op basis van de laagst mogelijke waarde. Hierbij is uitgegaan van een relatieve vochtigheid aan de voet van de Klimaatcascade $< 100\%$.

Verder is uitgegaan van een luchtsnelheid van $2,0 \text{ m.s}^{-1}$ en een relatieve vochtigheid aan de voet van de Klimaatcascade $< 100\%$.

De resultaten zijn aangegeven in tabel 3.5.2/1. De optimale water/luchtfactor is voor alle gebouwhoogten 0,9. Beginnend met het fijne spectrum nr. 8 bij 4 verdiepingen kan, naarmate de gebouwhoogte toeneemt, een grover sproeispectrum worden gekozen.

De berekeningen laten eveneens zien dat bij fijnere sproeispectra als aangegeven de relatieve vochtigheid aan de voet van de Klimaatcascade snel naar 100% stijgt. Hoewel het rekenmodel de luchtvochtigheid niet nauwkeurig kan modelleren –zie paragraaf 3.4.10.4- is het naar alle waarschijnlijkheid verstandig het sproeispectrum zo grof mogelijk te kiezen. Een “mager” spectrum is bevorderlijk voor de latente koeling in de Klimaatcascade.

Aantal verdiepingen →	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$R_{w/L}$ →	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Sproeispectrum nr. →	8	7	6	5	4	3	2	1	1

Tabel 3.5.2/1 – Water/Luchtfactor en sproeispectrum als functie van aantal verdiepingen

Voor het fysieke testmodel met een hoogte van 6 m (< 2 verdiepingen) is uitgegaan van $R_{w/L} = 1,17$ en een sproeispectrum tussen 8 en 9 –zie tabel 3.3.8. Een berekening met het rekenmodel geeft voor deze

waarden een uittredeconditie van de lucht $\approx 17^{\circ}\text{C} / 95\% \text{ RV}$ zijn, hetgeen goed overeenkomt met de meting –zie tabel 3.4.7-variant B1/1.

Het CFD simulatiemodel ware grootte was 28 m hoog (8 verdiepingen) en eveneens gebaseerd op $R_{w/L} = 1,17$ en een sproeispectrum tussen 8 en 9 –zie tabel 3.3.9/2. Een berekening met het rekenmodel geeft voor deze waarden een uittredeconditie van de lucht $\approx 16,1^{\circ}\text{C} / 100\% \text{ RV}$, hetgeen goed overeenkomt met de berekende waarde van $16,5^{\circ}\text{C} / 100\% \text{ RV}$ –zie figuur 3.3.9/1.

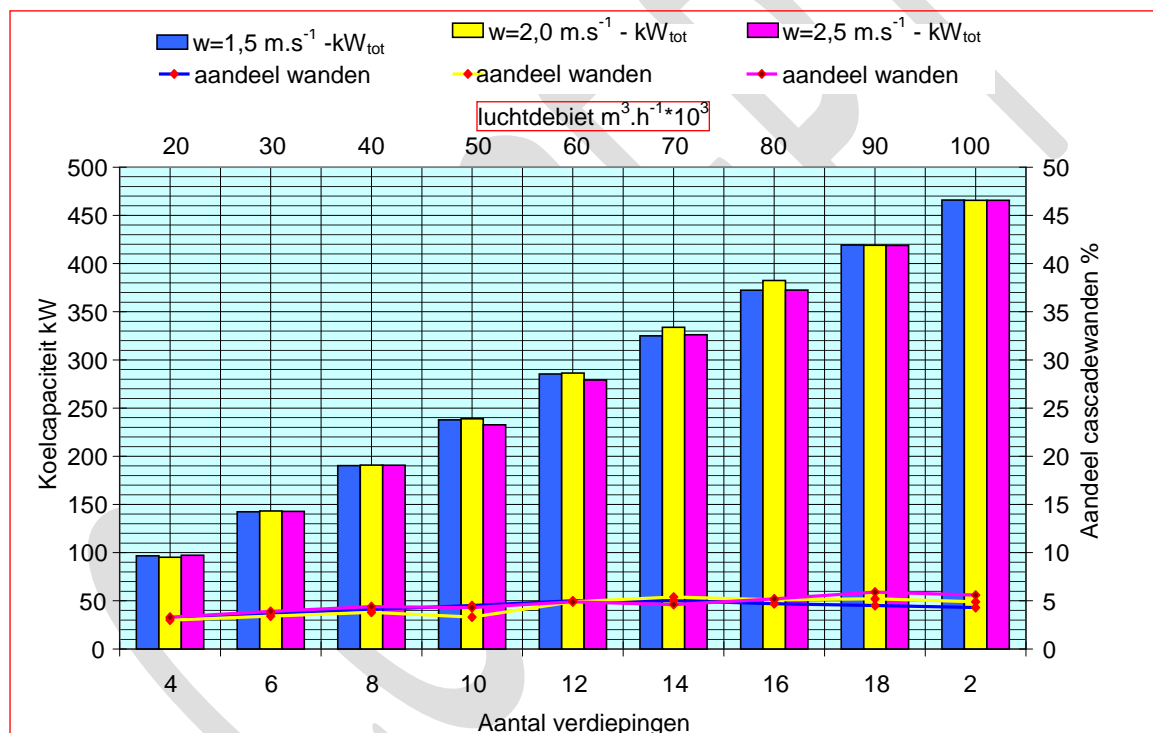
Geconcludeerd mag worden dat het rekenmodel betrouwbaar genoeg is voor verdere simulaties.

3.5.2.3 Invloed van de luchtsnelheid

Om de invloed van de luchtsnelheid in de Klimaatcascade op de psychometrische prestaties vast te kunnen stellen zijn de koelcapaciteiten berekend bij luchtsnelheden van $1,5 - 2,0$ en $2,5 \text{ m.s}^{-1}$. Verder is bepaald welk aandeel van de totale koelcapaciteit door de cascadowanden wordt geleverd.

De resultaten van de berekeningen zijn weergegeven in figuur 3.5.2/2. Hieruit kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- De luchtsnelheid in de Klimaatcascade heeft nauwelijks invloed op de koelcapaciteit.
- Het aandeel van de cascadowanden op de totale koelcapaciteit is bij lagere gebouwen beperkt tot $\approx 3\%$ en loopt bij hogere gebouwen op tot $\approx 5\%$.



Figuur 3.5.2/2 – Koelcapaciteit, sproeispectrum en aandeel van de wanden als functie van de luchtsnelheid

3.5.2.4 Aerodynamische prestaties

De aerodynamische trek in een Klimaatcascade is lastig te modelleren –zie paragraaf 3.2.15.2. De thermische trek is afhankelijk van de buitentemperatuur en alleen in de koelperiode positief – zie paragraaf 3.2.15.4. De hydraulische trek is daarentegen goed te modelleren en bij een gegeven water/luchtfactor in alle seizoenen constant - zie paragraaf 3.2.15.3.

De berekeningen ad paragraaf 3.5.2.2 laten zien dat voor de hier vermelde gegevens een hydraulische trek van $\approx 6,25 \text{ Pa}$ per verdieping wordt gerealiseerd. Het toepassingsgebied van de *Natuurlijke Airconditioning* volgens het *Earth, Wind & Fire* concept omvat gebouwen van minimaal 4 bouwlagen à 3,5 –zie paragraaf 1.3.6. De Klimaatcascade in een dergelijk gebouw kan dus een hydraulische trek van $\approx 25 \text{ Pa}$ opwekken.

3.5.3 Temperatuurregeling

Een Klimaatcascade wordt ontworpen op de ontwerp zomerconditie van 28°C bij 55% RV –zie paragraaf 3.2.5. Bij gemiddelde zomercondities van 20°C bij 80% RV moet de koelcapaciteit worden teruggeregeld om de gewenste uittredeconditie van de lucht van 17°C bij zo laag mogelijke relatieve vochtigheid te realiseren. Deze capaciteitsregeling kan in principe worden uitgevoerd door verhoging van de gekoeld watertemperatuur en/of reductie van het waterdebiet.

Verhoging van de watertemperatuur bij constant debiet brengt een ongewenste verhoging van de luchtvochtigheid met zich mee. Reductie van het waterdebiet maakt besparingen op pompenergie mogelijk en verdient daarom de voorkeur.

Simulaties met het rekenmodel wijzen uit dat met behoud van de sproeispectra ad tabel 3.5.2 de water/luchtfactor bij gemiddelde zomercondities kan worden verlaagd van 0,9 naar 0,3 –zie tabel 3.5.3. Evenals voor de ontwerp zomercondities is bij de simulaties uitgegaan van een uittredeconditie van 17°C bij een relatieve vochtigheid < 100% aan de voet van de Klimaatcascade en een lichtsnelheid van 2,0 m.s⁻¹

Aantal verdiepingen →	4	6	8	10	12	14	16	18	20
R _{w/L} →	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Sproeispectrum nr. →	8	7	6	5	4	3	2	1	1

Tabel 3.5.3 – Water/Luchtfactor en sproeispectrum als functie van aantal verdiepingen

Om de sproeispectra in stand te houden dient het sproeisysteem te worden uitgevoerd met 6 sproeiers of een veelvoud daarvan, waarvan minimaal 2 actief zijn. Bij oplopende buitencondities worden in stappen sproeiers bijgeschakeld totdat bij de ontwerp zomerconditie de gehele sproeibank actief is. De regeling vindt plaats op basis van een constante uittredetemperatuur van 17°C.

3.5.4 Energieprestaties

3.5.4.1 Pompenergie

Het psychometrisch en aerodynamisch proces in de Klimaatcascade wordt geactiveerd door de sproeipomp. De temperatuur van het gekoeld water reservoir wordt geregeld door de aanvoer van koude of warmte uit het bodemsysteem met behulp van primaire en secundaire bronpompen. Om een goede beoordeling van de energieprestatie van de Klimaatcascade mogelijk te maken is een globale berekening gemaakt van het energiegebruik van de pompen.

Het volumedebiet van een pomp wordt berekend met de formule:

$$q_v = \frac{P_{th}}{\rho_{uit} - \rho_{in} \cdot c} \quad (3.5.4/1)$$

Waarin:

q_v	volumestroom	[dm ³ .s ⁻¹]
P_{th}	thermisch vermogen	[kW]
ρ_{uit}	uitgaande temperatuur	[°C]
ρ_{in}	ingaaande temperatuur	[°C]
c	specifieke warmte	[kJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹]

De opvoerhoogte van een pomp is de druktoename in de pomp, herleid tot de hoogte van een kolom van de verpompte vloeistof, en wordt berekend met de formule:

$$h = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho \cdot g} + \Delta H \quad (3.5.4/2)$$

Waarin:

h	= opvoerhoogte	[m]
$(\rho_2 - \rho_1)$	= drukverschil systeem	[N.m ⁻²]
ρ	= soortelijke massa	[kg.m ⁻³]
g	= gravitatieversnelling	[m.s ⁻²]

$$\Delta H = \text{hoogteverschil} \quad [\text{m}]$$

Het aandrijfvermogen van een pomp wordt berekend met de formule:

$$P = \frac{\rho \cdot g \cdot h \cdot q_v}{\eta} \quad (3.5.4/3)$$

Waarin

P	pompvermogen	[W]
h	opvoerhoogte	[m]
q_v	volumestroom	[m ³ .s ⁻¹]
η	rendement	[-]

3.5.4.2 Sproeipomp

De sproeipomp staat in een open systeem. Naast het leveren van voldoende voordruk voor de sproeiers en het compenseren van de drukverliezen van het leidingsysteem moet koelwater moet worden opgepompt over het aantal verdiepingen dat het gebouw omvat. De hiervoor benodigde energie wordt voor een deel benut voor het in beweging brengen van de ventilatielucht door aerodynamische en hydraulische trek. Een deel wordt omgezet in warmte als de druppels in het koelwaterreservoir vallen.

Voor een raming van benodigde pompenergie zijn de volgende aannamen gedaan:

- Voordruk sproeiers 50 [kPa] (conform de sproeiers uit het testprogramma)
- Wrijvingsweerstand leidingen 100 [Pa.m⁻¹]
- Plaatselijke weerstanden 1 [kPa]
- Pomprendement 75 [%] (inclusief elektromotor)

3.5.4.3 Bronpompen

De bronpompen staan in een gesloten systeem, waarin alleen energie nodig is voor het compenseren van de drukverliezen van leidingen en warmtewisselaars.

Voor een raming van benodigde pompenergie zijn de volgende aannamen gedaan:

- Totaal drukverlies 15 [kPa] (warmtewisselaars en leidingsysteem)
- Pomprendement 75 [%] (inclusief elektromotor)

3.5.4.4 Pompvermogens

De berekende pompvermogens voor gebouwen van 4 tot 20 verdiepingen zijn voor de ontwerpcondities volgens tabel 3.5.2 en de gemiddelde zomercondities volgens tabel 3.5.3 aangegeven in tabel 3.5.4/2. Het effect van de lagere water/luchtfactor in de gemiddelde zomerperiode ad tabel 3.5.3 komt hierin duidelijk tot uiting.

Aantal verdiepingen →	4	6	8	10	12	14	16	18	20
Pompvermogens kW →									
Ontwerp zomerconditie	1,87	3,55	5,78	8,55	11,87	15,72	20,12	25,05	30,53
Pompvermogens kW →									
Gemiddelde zomerconditie	0,87	1,52	2,35	3,36	4,54	5,91	7,45	9,18	11,08

Tabel 3.5.4/2 – Vermogens van sproeipomp en bronpompen in relatie tot aantal verdiepingen

3.5.4.5 Pompvermogen en Koudefactor (COP)

De Klimaatcascade levert een bepaald koudevermogen waarvoor de primaire energie aan de bodem wordt onttrokken. De prestaties van het concept kunnen worden uitgedrukt in de koudefactor ε . Deze wordt gedefinieerd als de verhouding van de koelprestatie tot het hiervoor benodigde opgenomen vermogen van de pompen. In formule

$$\varepsilon = \frac{\Phi_o}{P} \quad (3.5.4/4)$$

Waarin

ε	koudefactor	[-]
Φ_o	koelprestatie	[kW]

P opgenomen vermogen [kW]

Voor gebouwen van 4 tot 20 verdiepingen zijn de pompvermogens en koudefactoren berekend, gebaseerd op de uitgangspunten ad paragraaf 3.5.2 en een water/luchtfactor van 0,9 volgens tabel 3.5.2. Voor de resultaten van de berekeningen zie figuur 3.5.4/1, waarin 2 modellen zijn weergegeven.

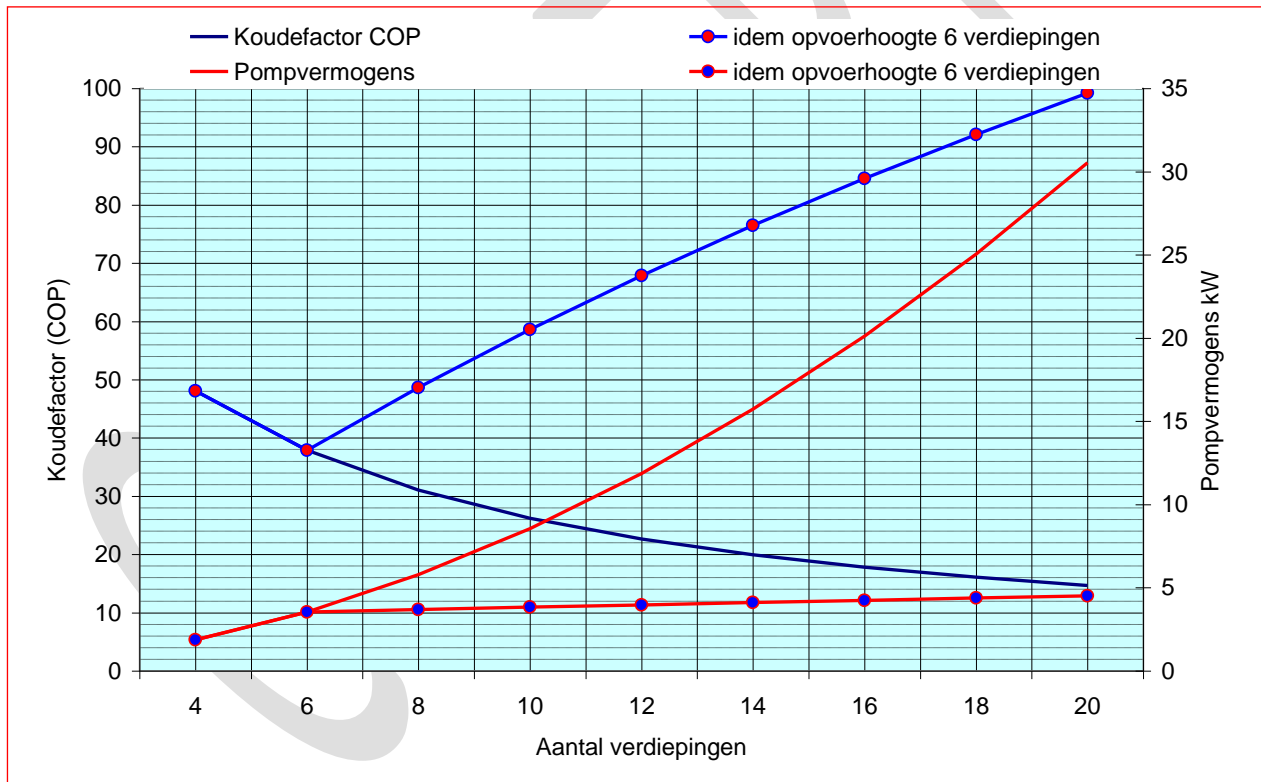
Bij het basismodel wordt het sproeiwater opgepompt over de volledige hoogte van de Klimaatcascade. De pompvermogens nemen hierbij toe van ≈ 5 - 35 kW met afnemende koudefactoren van ≈ 48 – 15. Ook bij hoge gebouwen zijn aanzienlijk hogere koudefactoren haalbaar dan bij de traditionele koudetechniek

Als de opvoerhoogte van de sproeipomp wordt beperkt tot 6 verdiepingen worden de pompvermogens substantieel gereduceerd en is bij 20 verdiepingen een koudefactor van ≈ 100 mogelijk.

Dit energetisch aantrekkelijke alternatief kan in 2 varianten worden uitgevoerd:

- Bij gebouwen hoger dan 6 verdiepingen wordt het sproeisysteem op de 6^e verdieping aangebracht. Omdat het psychometrisch proces zich grotendeels direct achter de sproeiers voltrekt behoeft de Klimaatcascade niet over de volledige hoogte te worden gebruikt –zie paragraaf 3.xx
- De Klimaatcascade wordt bij hoge gebouwen in meerdere secties uitgevoerd, elk met een afzonderlijk sproeisysteem en gekoeld water reservoir die via een gesloten leidingnet worden aangesloten op het bodemsysteem.

Deze varianten zijn in het kader van het onderzoek niet verder uitgewerkt.



Figuur 3.5.4/1 – Pompvermogens en Koudefactoren

3.5.4.6 De Klimaatcascade versus conventionele koeling

Een vergelijking van een Klimaatcascade met conventionele koeling op basis van de koudefactor bij gedefinieerde condities gaat mank. Een Klimaatcascade dient namelijk niet alleen voor koeling van de ventilatielucht maar ook voor het luchttransport en moet derhalve gedurende de gehele bedrijfstijd van het klimaatsysteem in bedrijf blijven. Een koelmachine voor mechanische koeling heeft daarentegen maar een beperkt aantal bedrijfsuren, terwijl het luchttransport verzorgd wordt met behulp van een separate ventilator.

Voor een betere vergelijking wordt daarom in dit verband de Energy Efficiency Ratio EER^{k+v} geïntroduceerd, waarmee zowel het energiegebruik voor koudeopwekking als voor het transport van

de koude naar de werkplek via de lucht in rekening wordt gebracht. In feite betekent dit dat de systeemvergelijking niet plaatsvindt op basis van de koudeproductie maar op basis van de koudelevering op de werkplek.

De EER^{k+v} wordt als volgt gedefinieerd:

$$EER^{k+v} = \frac{\Phi_{th,a}}{P_k + P_v} \quad (3.5.4/5)$$

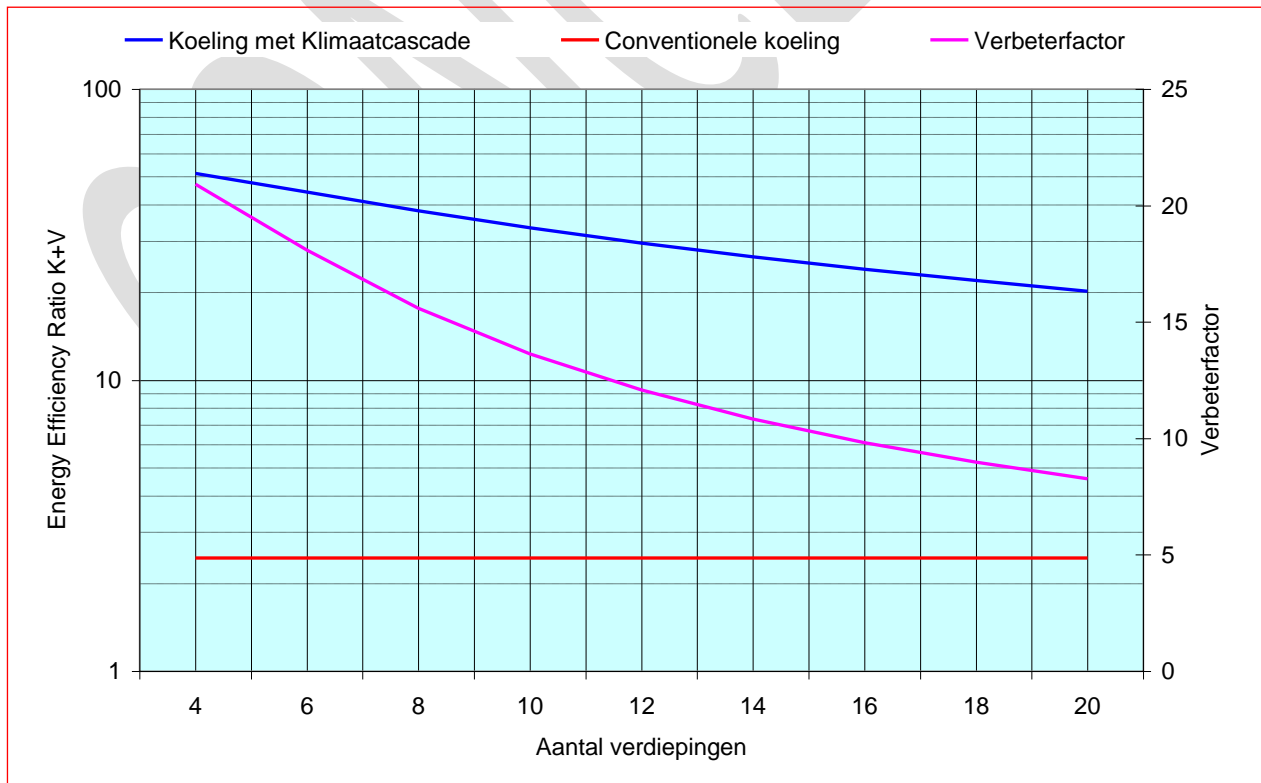
Waarin

$\Phi_{th,a}$	=	jaarlijkse koudevraag	[kWh]
P_k	=	jaarlijks energiegebruik voor koeling	[kWh]
P_v	=	jaarlijks energiegebruik voor luchttransport	[kWh] (in koelperiode)

Een globale prestatievergelijking is gemaakt voor de Klimaatcascade en een conventioneel systeem volgens de onderstaande uitgangspunten:

- Het conventionele systeem bestaat uit een waterkoelinstallatie met watergekoelde condensor en natte koeltoren. De gemiddelde koudefactor in het koelseizoen wordt gesteld op 4,5 (TNO en Deerns 2007). Het energiegebruik van de koeltoren, de koelwater- en de gekoeld waterpompen is in rekening gebracht door een correctie van de koudefactor met -1, hetgeen wordt geneutraliseerd door een verhoging van +1 door toepassing van een Hoog Temperatuur afgiftesysteem.
- Voor het energiegebruik ten behoeve van het luchttransport in een conventioneel systeem wordt uitgegaan van een SPF van 4, conform NEN EN 13779 (CEN 2008) de standaardwaarde voor de toevoerventilator van een luchtbehandelinginstallatie. SPF is de *Specific Fan Power* in $W \cdot m^{-3} \cdot s^{-1}$ en ligt voor een SPF van 4 in het bereik van $1.250 \dots 2.000 W \cdot m^{-3} \cdot s^{-1}$. Gerekend is met een waarde van 1.500.
- De koudevraag in het koelseizoen $\Phi_{th,a}$ wordt berekend op basis van 500 vollasturen.
- Het aantal bedrijfsuren in het koelseizoen is gesteld op 1.000.

De op basis van deze uitgangspunten berekende waarden EER^{k+v} zijn aangegeven in figuur 3.5.4/2.



Figuur 3.5.4/2 – Vergelijking koelsystemen – Klimaatcascade versus conventioneel

De verbeterfactor Klimaatcascade versus conventionele koeling is ≈ 21 bij 4 verdiepingen afnemend naar ≈ 8 bij 20 verdiepingen.

Als de opvoerhoogte van de sproeipomp wordt beperkt tot 6 verdiepingen –zie paragraaf 3.5.4.5 wordt de verbeterfactor ook voor hoge gebouwen gunstiger.

3.5.5 Luchtverplaatsing en Regeling

3.5.5.1 Inleiding

Bij de *Natuurlijke Airconditioning* volgens het *Earth, Wind & Fire* concept komt de luchtverplaatsing in een gebouw tot stand door externe en interne drijfkrachten.

Externe drijfkrachten zijn de wind en de zon die via het Ventecdak en de Zonneschoorsteen de drukverschillen leveren voor de toevoer en de afvoer van de ventilatielucht –zie hoofdstuk 2 en 4.

De multifunctionele Klimaatcascade zorgt niet alleen voor het conditioneren van de ventilatielucht maar levert door de opgewekte aerodynamische trek, de hydraulische trek en de thermische trek eveneens interne drijfkracht voor de luchtverplaatsing.

De combinatie van externe en interne drijfkrachten moet gedurende een zo groot mogelijke deel van de bedrijfstijd in staat zijn de gewenste luchtverplaatsing in een gebouw te realiseren.

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 ventilatie ontstaan, maar evengoed een surplus. Een tekort zal worden gecompenseerd met behulp van regelbare hulpventilatoren in de Klimaatcascade en de Zonneschoorsteen. Een surplus wordt voorkomen met behulp van regelbare kleppen in het luchttoevoersysteem. Het gewenste ventilatiedebiet zal onder alle omstandigheden kunnen worden gerealiseerd.

Hierbij wordt aangetekend dat het in principe mogelijk is de ventilatiecapaciteit te vergroten zonder consequenties voor ventilatorenergie en ventilatiegeluid. Dit geeft de *Natuurlijk Airconditioning* volgens het *Earth, Wind & Fire* concept in vergelijking met mechanische ventilatie een bijzonder voordeel.

3.5.5.2 Het gebouw als neutrale zone

Ongewenste luchtstromingen van lucht uit het gebouw naar de omgeving en *vice versa*, met alle negatieve gevolgen hiervan voor het thermisch comfort en warmteverliezen, moeten worden voorkomen. Om dit te realiseren moet het interieur van een gebouw als neutrale zone worden uitgevoerd waarin de druk in principe gelijk is aan de druk buiten het gebouw, die als referentiedruk wordt beschouwd.

Door deze neutrale zone tussen het luchttoevoer- en het afzuigsysteem is het gebouw geen gesloten systeem. Dit houdt in dat de overdruk van het toevoersysteem niet kan worden gebruikt om een tekort aan afzuigcapaciteit te compenseren. Evenmin kan de onderdruk van het afzuigsysteem worden gebruikt om een tekort aan toevoerventilatie te compenseren.

Drukverliezen in het luchttoevoersysteem moeten worden gecompenseerd door positieve winddruk in het Ventecdak en de drukopbouw in de Klimaatcascade. Drukverliezen in het luchtafzuigsysteem moeten worden gecompenseerd door de thermische trek in de Zonneschoorsteen en de negatieve winddruk in het Ventecdak.

3.5.5.3 Drukverschillen ten gevolge van thermische trek

Het drukverschil van de lucht aan de voet van de Klimaatcascade en de buitenlucht bedraagt

$$P_{kc} - P_e = g \cdot H \cdot \rho_{kc} - g \cdot H \cdot \rho_e \quad (3.5.5/1)$$

Waarin

P_{kc}	=	druk aan de voet van de Klimaatcascade	[Pa]
P_e	=	referentiedruk van de buitenlucht	[Pa]
ρ_{kc}	=	gemiddelde dichtheid lucht in Klimaatcascade	[Pa]
ρ_e	=	dichtheid van de buitenlucht	[Pa]

$$\rho_{kc} = \rho_0 \cdot \frac{T_0}{T_{kc}} \quad \text{en} \quad \rho_e = \rho_0 \cdot \frac{T_0}{T_e}$$

Hieruit volgt:

$$P_{kc} = P_e + g \cdot H \cdot \rho_0 \cdot T_0 \left(\frac{1}{T_{kc}} - \frac{1}{T_e} \right) \quad (3.5.5/2)$$

Met $g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$, $\rho_0 = 1,293 \text{ kg.m}^{-3}$, $T_0 = 273\text{K}$ en $H = n_1$ verdiepingen à 3,5 m is de constante term in deze formule (12.120.n) en gaat de formule over in

$$P_{kc} = P_e + 12120 n_1 \left(\frac{1}{T_{kc}} - \frac{1}{T_e} \right) \quad (3.5.5/3)$$

Waarin n_1 = aantal verdiepingen Klimaatcascade [-]
 T_{kc} = absolute temperatuur aan de voet van de cascade [K]
 T_e = absolute temperatuur van de buitenlucht [K]

Het drukverschil tussen de stijgschacht en de Klimaatcascade wordt naar analogie van formule (3.5.5/3) bepaald met de formule

$$P_{ts} = P_{kc} - 12120 n_2 \left(\frac{1}{T_{ts}} - \frac{1}{T_{kc}} \right) \quad (3.5.5/4)$$

Waarin P_{ts} = druk in de toevoerschacht [Pa]
 n_2 = aantal verdiepingen toevoerschacht [-]
 T_{ts} = absolute temperatuur in de toevoerschacht [K]

Het drukverschil tussen de toevoerschacht en de referentiedruk van de buitenlucht kan met behulp van de formules (3.5.5/3) en (3.5.5/4) als volgt worden berekend

$$P_{ts} = P_e + 12120 \left(\frac{n_1}{T_{kc}} - \frac{n_1}{T_e} - \frac{n_2}{T_{ts}} + \frac{n_2}{T_{kc}} \right) \quad (3.5.5/5)$$

Aan de voet van de Klimaatcascade is $n_2 = 0$ en is het drukverschil met de referentiedruk

$$P_{ts} = P_e + 12120 \left(\frac{n_1}{T_{kc}} - \frac{n_1}{T_e} \right) \quad (3.5.5/6)$$

3.5.5.4 Drukverschil t.g.v. thermische trek bij ontwerp zomercondities

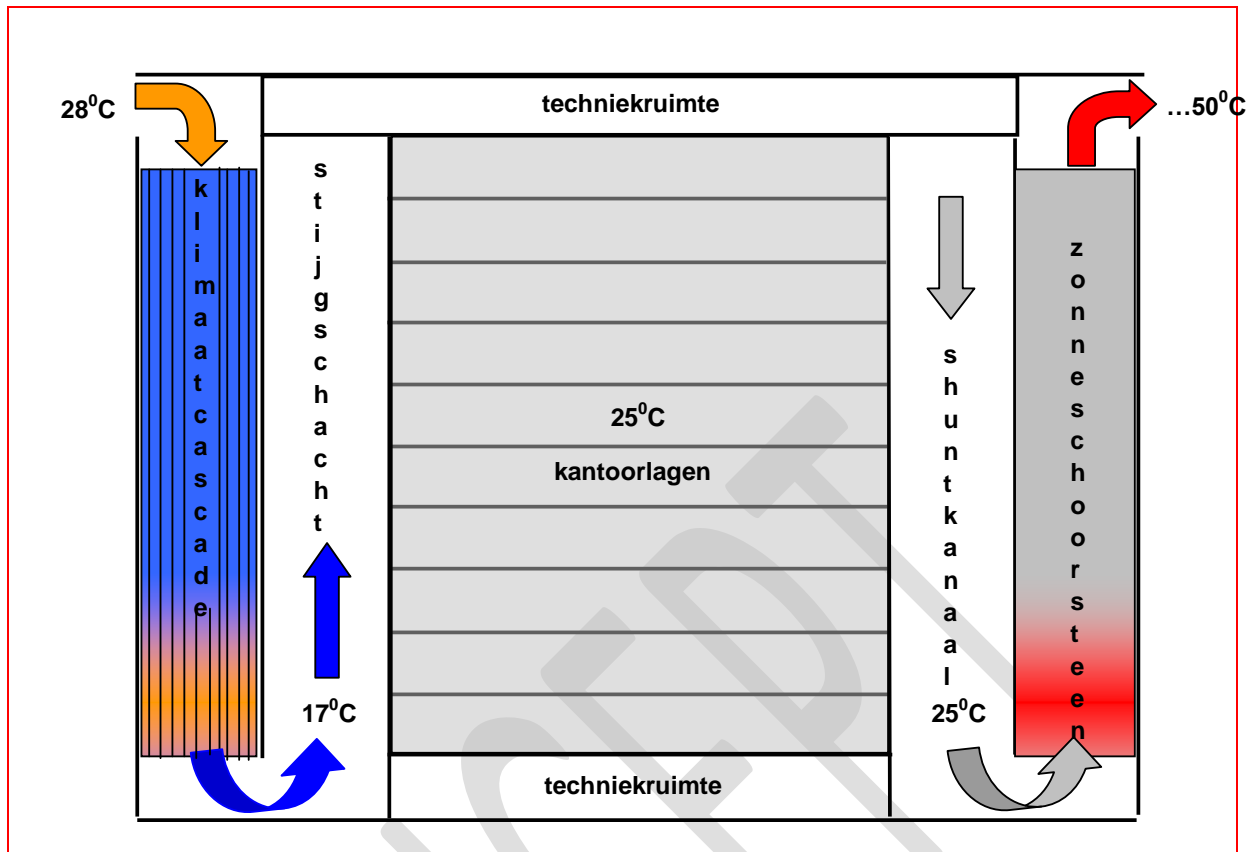
Zie figuur 3.5.5/1, waarin een 35 meter hoog gebouw met 10 verdiepingen schematisch is weergegeven.

Buitenlucht met een temperatuur van 28°C wordt gekoeld tot 17°C . Als de gemiddelde temperatuur in de Klimaatcascade wordt gesteld op $22,5^{\circ}\text{C}$ is het drukverschil met de referentiedruk aan de voet van de cascade, berekend met behulp van formule (3.5.5/6) $P_{ts} = 7,5\text{Pa}$.

De gekoelde lucht stroomt vervolgens door de stijgschacht omhoog. Het drukverschil met de referentiedruk aan de top van de cascade, berekend met $n_2 = 10$ in formule (3.5.5/5) $P_{ts} = -0,3\text{Pa}$

Voor de onderste verdieping is er dus een positief drukverschil tussen de stijgschacht en het gebouw beschikbaar van $+7,5\text{Pa}$. Naar boven toe neemt dit drukverschil af en slaat om in een gering negatief drukverschil van $-0,3\text{Pa}$ op de bovenste verdieping.

Deze benadering gaat uit van een rechtlijnig verloop van de luchttemperatuur in de Klimaatcascade met een rekenkundig gemiddelde. Het werkelijk temperatuurverloop ziet er anders uit, zie paragraaf 3.4.10, maar dit doet niets af van het principe van de benadering.



Figuur 3.5.5/1 – Luchtstroming en temperaturen bij ontwerp zomercondities

3.5.5.5 Drukverschil t.g.v. thermische trek bij ontwerp wintercondities

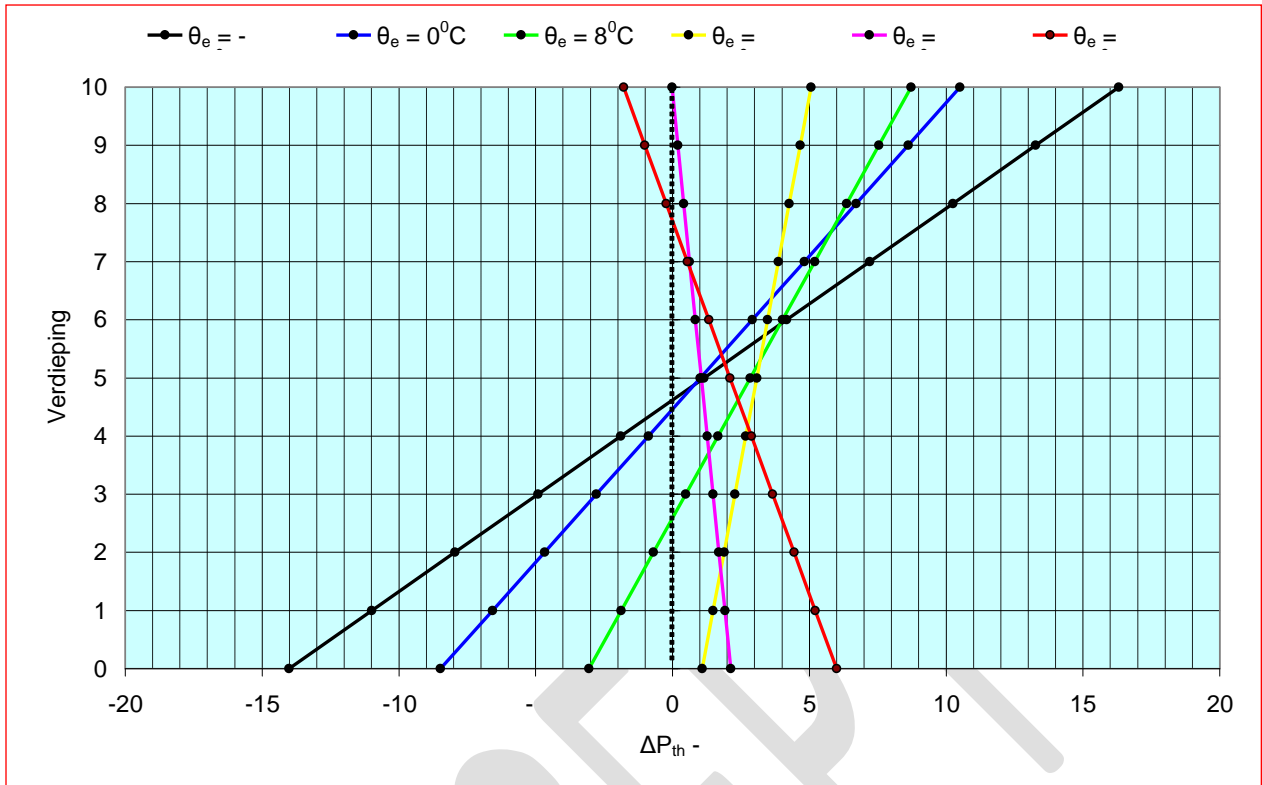
Buitenlucht met een temperatuur van -10°C wordt verwarmd tot $+6,5^{\circ}\text{C}$ –zie de CFD simulatie case D4, figuur 3.3.0/4. Als de gemiddelde temperatuur in de Klimaatcascade wordt gesteld op $-1,75^{\circ}\text{C}$ is het drukverschil met de referentiedruk aan de voet van de cascade, berekend met behulp van formule (3.5.5/6) $P_{ts} = -14,0 \text{ Pa}$.

De lucht wordt aan de voet van de stijgshaft verwarmd tot 18°C . Het drukverschil met de referentiedruk aan de top van de cascade, berekend met $n_2 = 10$ in formule (3.5.5/5) $P_{ts} = 16,3 \text{ Pa}$. Ten opzichte van de Klimaatcascade wordt in de stijgshaft een thermische trek gerealiseerd van $+30,3 \text{ Pa}$, die de negatieve thermische trek in de Klimaatcascade ruimschoots compenseert.

3.5.5.6 Hoogteafhankelijke drukverschillen t.g.v. thermische trek

Voor verschillende buitentemperaturen θ_e zijn de drukverschillen ten gevolge van thermische trek berekend tussen de stijgshaft en het gebouw –zie figuur 3.5.5/2. Deze drukverschillen wisselen met de seizoenen en zijn afhankelijk van de hoogte van de Klimaatcascade en met de hoogteligging van de betreffende verdieping. Het is duidelijk dat een Klimaatcascade niet op basis thermische trek alleen kan functioneren. Additionele aerodynamische en hydraulische trek, al dan niet in combinatie met winddruk zijn nodig, vooral bij buitentemperaturen boven 20°C .

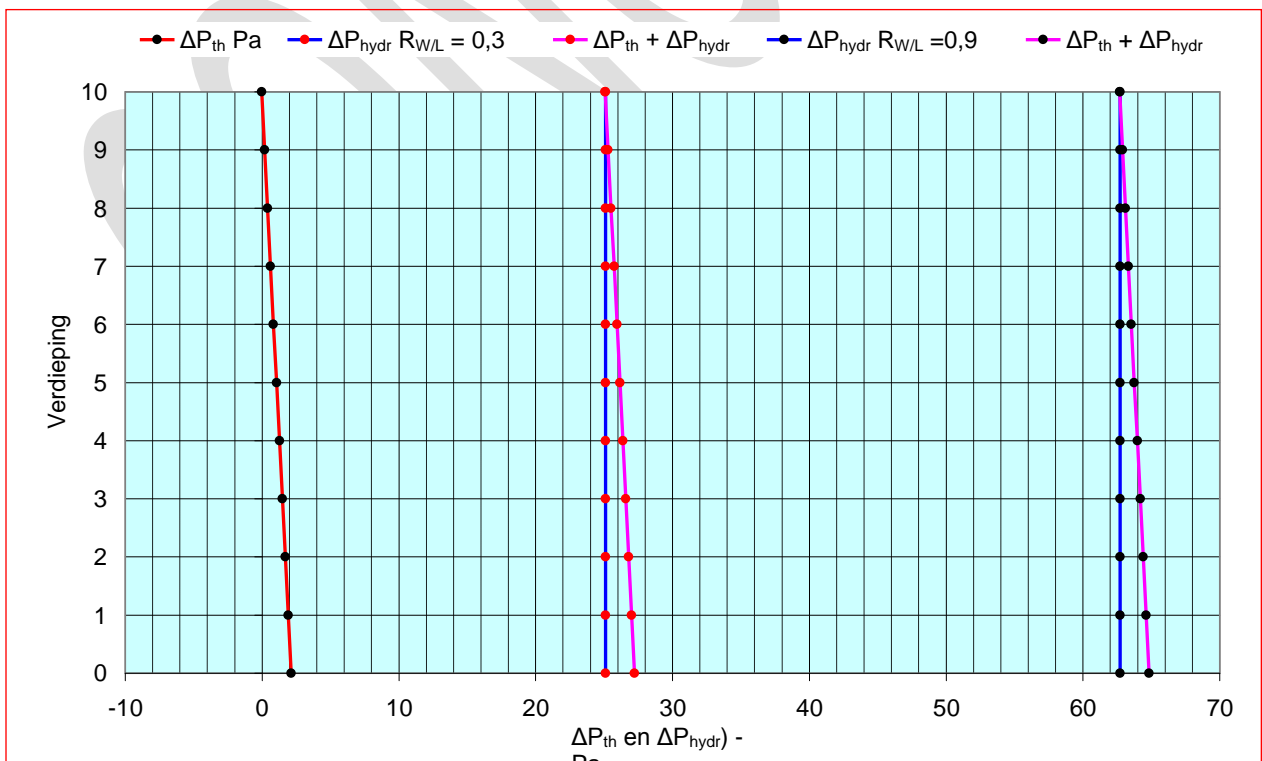
Dit geldt in het bijzonder voor een Klimaatcascade met vrije uitloop, bijvoorbeeld volgens figuur 3.5.7/3 in paragraaf 3.5.7, waar de thermische trek van de toevoerschacht ontbreekt.



Figuur 3.5.5/2 – Hoogteafhankelijke drücken ΔP_{ts} t.g.v. thermische trek in de toevoerschicht t.o.v. de referentiedruk

3.5.5.7 Drukverschillen t.g.v. thermische + hydraulische trek

De hydraulische trek wordt in hoofdzaak bepaald door de hoogte van de Klimaatcascade en water/luchtfactor $R_{W/L}$ en is daardoor een stabiele factor in de drukopbouw van de toevoerschicht –zie figuur 3.5.5/3 die geldt voor de gemiddelde zomerconditie $-\theta_e = 20^\circ\text{C}$.



Figuur 3.5.5/3 – Drukverschillen t.g.v. thermische en hydraulische trek bij gemiddelde zomercondities als functie van hoogte en water/luchtfactor

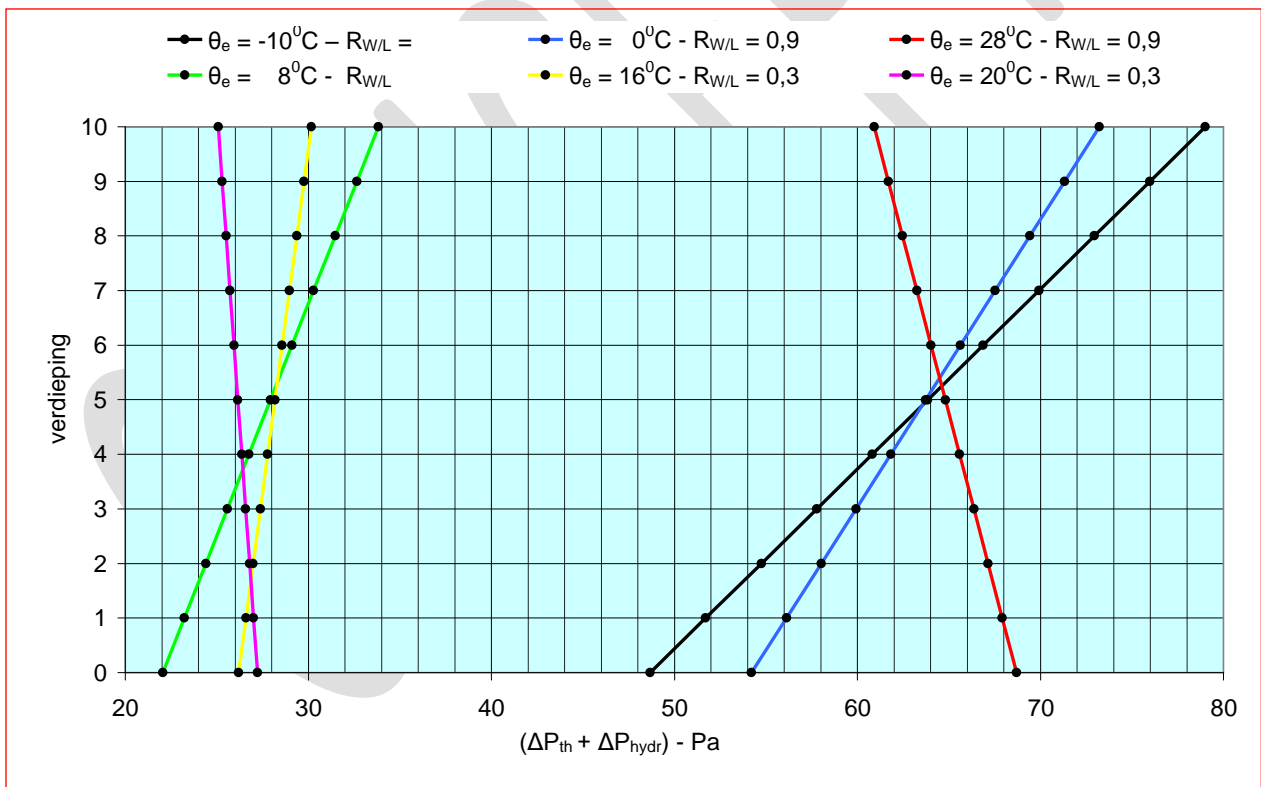
De figuur laat duidelijk de stabiliserende werking zien van de hydraulische trek en van de water/luchtfactor op de te realiseren drukverschillen

Dit is eveneens weergegeven in figuur 3.5.5/4, pendant van figuur 3.5.5/2, waarin de hoogteafhankelijke drukken t.g.v. thermische trek Δp_{th} en van hydraulische trek Δp_{hydr} in de Klimaatcascade zijn gesommeerd. Negatieve drukken komen niet meer voor.

De hydraulische trek is echter afhankelijk van de water/luchtfactor $R_{w/L}$ en die hoeft voor een specifiek ontwerp van een Klimaatcascade niet constant te zijn. Als wordt uitgegaan van $R_{w/L} = 0,9$ als nominale waarde - zie paragraaf 3.5.2.2- is het uit oogpunt van energiebesparing mogelijk deze tussen buitentemperaturen van $0^{\circ}\text{C} - 20^{\circ}\text{C}$ te verlagen naar $R_{w/L} = 0,3$ - zie paragraaf 3.5.3. Bij de ontwerp zomerconditie met $\theta_e = 28^{\circ}\text{C}$ is een $R_{w/L}$ van 0,9 nodig in verband met de gevraagde koelcapaciteit. Bij de ontwerp winterconditie moet een $R_{w/L}$ van 0,9 worden aangehouden in verband met bevroeringsgevaar -zie paragraaf 3.4.8. Met behulp van het rekenmodel kunnen voor een specifieke Klimaatcascade alle voorkomende simulaties worden uitgevoerd.

Het luchtdistributiesysteem voor de *Natuurlijke Airconditioning* volgens het *Earth, Wind & Fire* concept kan waarschijnlijk in veel gevallen worden ontworpen op basis van een drukverschil van 20 – 30Pa. Met een water/luchtfactor van $R_{w/L} = 0,3$ kan dan voldoende drukverschil in de stijgschacht worden gerealiseerd.

Als bij extreme zomer- en wintercondities de water/luchtfactor moet worden verhoogd naar $R_{w/L} = 0,9$ moet het hierdoor veroorzaakte hogere drukverschil worden afgeregeld met behulp van kleppen aan de voet van de stijgschacht -zie paragraaf 3.5.5.8.



Figuur 3.5.5/4- Hoogteafhankelijke drukken in de toevoerschacht ΔP_{ts} t.o.v. de buitenlucht als functie van de buitentemperatuur en de hoogte

3.5.5.8 Debietregeling

De druk aan de voet van de Klimaatcascade moet op een variabele of een constante waarde worden geregeld, afhankelijk van de ventilatiebehoefte in de kantoorruimten.

Een kleppensectie tussen de Klimaatcascade en de stijgschacht schacht reduceert een te hoge druk ten gevolge van winddruk, en/of hydraulische en aerodynamische druk.

In geval van te lage druk in de stijgschacht wordt de hulpventilator in de Klimaatcascade ingeschakeld.

De drukken in de toevoerschacht zijn afhankelijk van de hoogte en wisselen ook per seizoen. De aansluitingen naar de te ventileren verdiepingen en ruimten moeten daarom eveneens worden voorzien van kleppen, die automatisch worden geregeld op basis van luchtdebiet.

3.5.5.9 Hulpventilator

De hulpventilator moet in staat zijn een groot luchtdebiet te leveren bij een klein drukverschil. Axiaalventilatoren met een klein aantal schoepen, een kleine naafdiameter en een grote buitendiameter zijn hiervoor het meest geschikt -zie figuur 3.5.5/5-1 en 3.5.5/5-2

De hulpventilator kan het beste boven het sproeisysteem, hoog in de Klimaatcascade worden aangebracht –zie figuur 1.3 en 3.5.8/3. De invloed van de roterende luchtbeweging bij in bedrijf zijnde ventilator moet nader worden onderzocht, maar wordt niet als problematisch gezien.

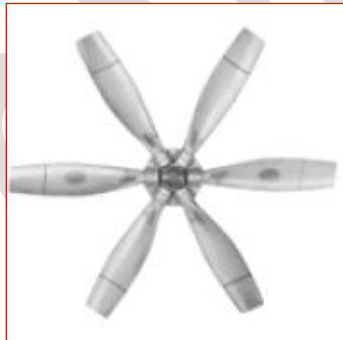
De luchtweerstand van dergelijke ventilatoren bij stilstand is gering. Overwogen zou kunnen worden om bij voldoende winddruk de ventilator als generator te laten werken voor de opwekking van elektrische energie.

Het ventilatorvermogen kan worden berekend met de formule

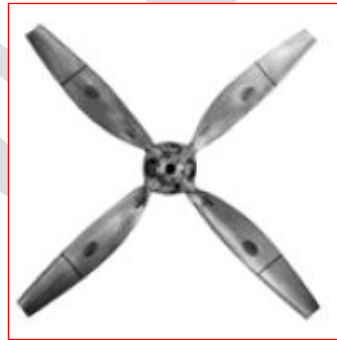
$$P_{el} = \frac{q_v \cdot p_{tot}}{\eta_{hydr} \cdot \eta_{mot}} \quad (3.5.5/7)$$

Waarin

P_{el}	elektrisch opgenomen vermogen	[W]
q_v	volumestroom	[m ³ .s ⁻¹]
p_{tot}	totaaldruk	[Pa]
η_{hydr}	waaierrendement betrokken op p_{tot}	[-]
η_{mot}	motorrendement	[-]



Figuur 3.5.5/5-1



Figuur 3.5.5/5-2

De drukopbrengst van de hulpventilator wordt door de klimaatingenieur vastgesteld. Omdat de hydraulische trek bij normale bedrijfsvoering voldoende drukverschil voor de luchtdistributie levert, wordt de drukopbrengst bepaald door omstandigheden waarbij het sproeisysteem buiten werking is, bijvoorbeeld door een storing of anderszins.

Een totaaldruk van 50Pa zal in veel gevallen voldoende zijn. Voor een groot gebouw van 20.000 m² bruto vloer oppervlak en een ventilatiecapaciteit van 100.000 m³.h⁻¹ is het hiervoor benodigde motorvermogen ca 2,5 kW. Aangezien er eerder sprake is van een noodventilator als van een hulpventilator is het jaarlijks energiegebruik nihil.

3.5.6 De Klimaatcascade buiten het koelseizoen

3.5.6.1 Inleiding

Het ontwerp van een Klimaatcascade is gebaseerd op het leveren van gekoelde lucht in de koelperiode. Bij lagere buitentemperaturen moet de ventilatielucht worden verwarmd, hetgeen partieel ook in de Klimaatcascade kan worden gerealiseerd. Hierbij vindt tevens luchtbevochtiging plaats, hetgeen in het algemeen ook wenselijk is. Om de relatieve vochtigheid in de ruimte te beperken is slechts voorverwarming in de cascade mogelijk. Hiervoor zijn verschillende varianten onderzocht. Naverwarming moet buiten de Klimaatcascade worden gerealiseerd.

3.5.6.2 Varianten

Voor de bedrijfsvoering van de Klimaatcascade in de stookperiode zijn de volgende varianten onderzocht:⁴⁰

- A. Partiële verwarming in de Klimaatcascade met behulp van het sproeisysteem en externe naverwarming—zie paragraaf 3.5.6.4.
- B. Externe voorverwarming met dauwpuntsregeling in de Klimaatcascade en externe naverwarming—zie paragraaf 3.5.6.5.
- C. Verwarming buiten de Klimaatcascade, die in dit geval uitsluitend voor koeling wordt gebruikt. Vanwege deze onnodige functiebeperking wordt deze variant verder buiten beschouwing gelaten.

Bij het gebruik van de Klimaatcascade in de stookperiode moet aandacht worden geschonken aan de grenswaarden van de luchtvochtigheid.

3.5.6.3 Grenswaarden van de luchtvochtigheid

De grenswaarden van de luchtvochtigheid in gebouwen worden bepaald door beschermende factoren en risicofactoren⁴¹.

Een belangrijke beschermende factor voor het binnenmilieu is de relatieve luchtvochtigheid, waarvoor in NEN-EN 15251:2007 een bereik wordt aanbevolen van 50 – 70% -zie paragraaf 3.1.5.4. Het optimale bereik voor een gezond binnenmilieu is 40 – 60% (Sterling E.M. et al.1985, Bronsema B. 2002).

Een hoge relatieve vochtigheid is een risicofactor voor zowel het binnenmilieu als voor het gebouw zie paragraaf 3.6. Met betrekking tot condensrisico bij zeer lage buitentemperaturen is bij een binnentemperatuur van 20°C de maximum toelaatbare relatieve vochtigheid 45% bij een veilige *f*-waarde van 0,65—zie paragraaf 3.6.4.

3.5.6.4 Variant A - Partiële verwarming in de Klimaatcascade en externe naverwarming

De CFD simulatie voor Case D4 laat zien dat bij de ontwerp winterconditie de lucht wordt verwarmd van -10°C → + 6,5°C bij 100% RV. Deze simulatie is gebaseerd op een water/luchtfactor $R_{w/L} \approx 1,0$ en een watertemperatuur van 15°C—zie tabel 3.3.9/2 en figuur 3.3.9/4. Het verloop van de luchtconditie in de Klimaatcascade van -10°C → +6,5°C is globaal in figuur 3.5.6/1aangegeven. Uit de CFD simulatie blijkt dat de lucht bij +2°C reeds de verzadigingsgrens heeft bereikt.

De vochtinhoud van de lucht bij de berekende 100% RV is $\approx 6 \text{ g.kg}^{-1}$.

De metingen in de fysieke testopstelling lieten zien dat bij een water/luchtfactor van 1,0 en een watertemperatuur van $\approx 13^\circ\text{C}$ de lucht werd verwarmd van $-3,7^\circ\text{C} \rightarrow +5,8^\circ\text{C}$ bij $\approx 96\%$ RV—zie tabel 3.4.7. Dit geeft voldoende zekerheid dat variant A een reële optie is.

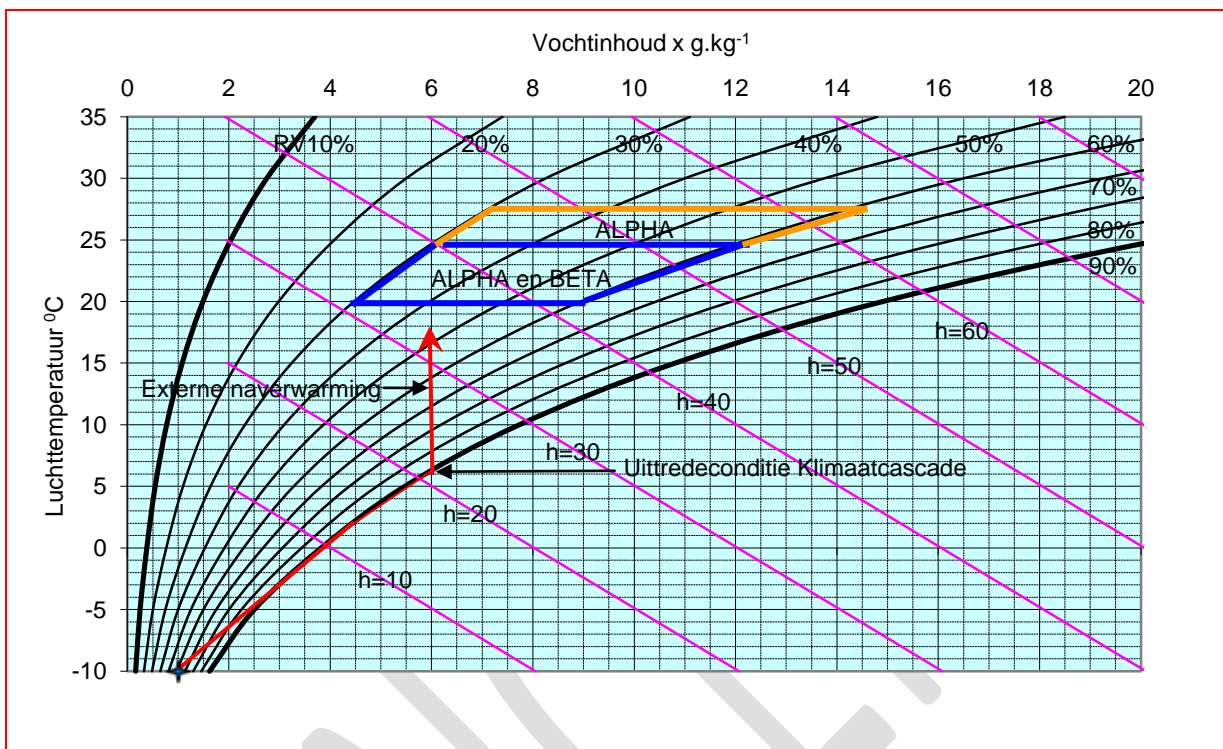
Na externe naverwarming wordt de lucht met $\approx 18^\circ\text{C}$ aan de ruimte toegevoerd, en onder invloed van interne warmtebronnen wordt een ruimtetemperatuur van 20°C of hoger gerealiseerd. Het Mollierdiagram figuur 3.5.6/1 laat zien dat hierbij een relatieve vochtigheid in de ruimte van 40% of lager wordt gerealiseerd, waardoor geheel aan de voorwaarden ad paragraaf 3.5.6.3 wordt voldaan.

Voorverwarming van de ventilatielucht vindt bij deze variant plaats bij extreem lage temperaturen van het verwarmingsmedium en is daarmee een uitstekend voorbeeld van lage temperatuur (LT)verwarming, geheel passend in het *Earth, Wind & Fire* concept. Ogenscheinlijk is het ook een

⁴⁰ Zie onderzoeksrapport deel III (Bronsema 2012)

⁴¹ Zie paragraaf 3.6

kwetsbaar systeem, vooral door het risico van bevriezing van kleine waterdruppels boven in de Klimaatcascade. Experimenten in de fysieke testopstelling hebben echter uitgewezen dat onder normale bedrijfsomstandigheden met $R_{w/L} \approx 1,0$ bij lage buitentemperaturen geen ijsvorming op zal treden –zie paragraaf 3.4.8.



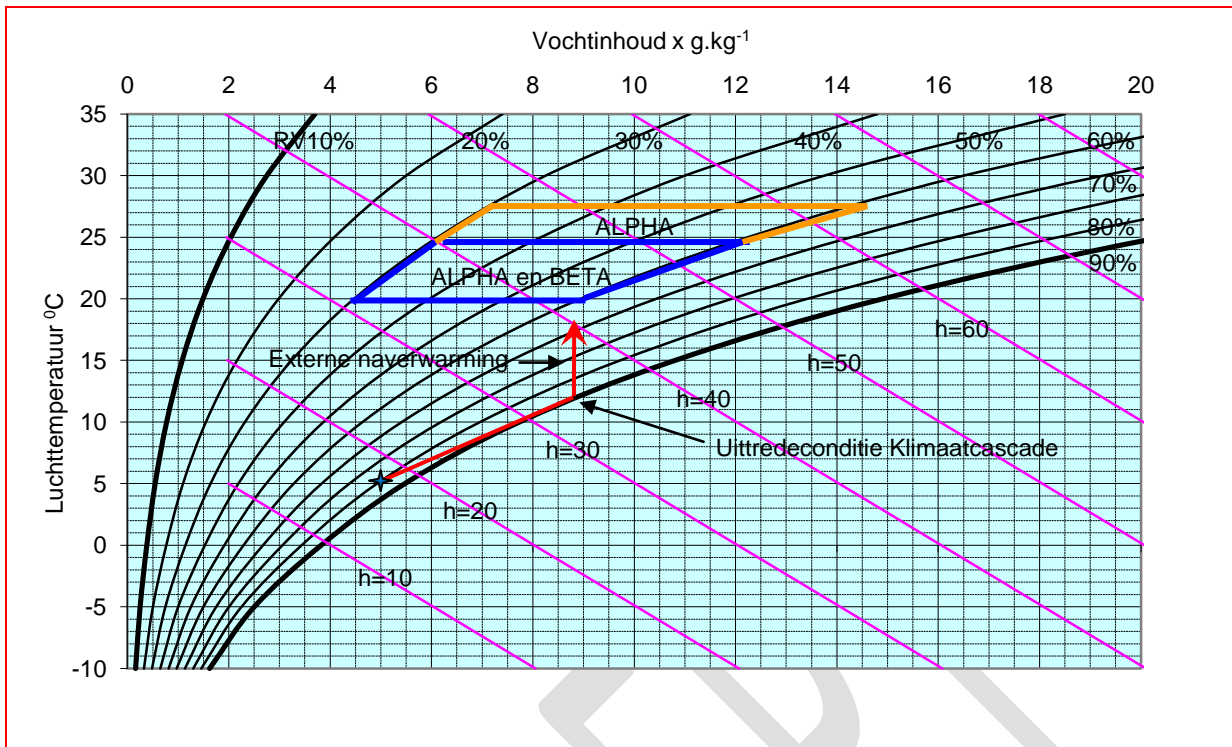
Figuur 3.5.6/1 –Psychometrisch proces Variant A bij de ontwerp winterconditie

Het psychometrisch proces bij gemiddelde wintercondities is weergegeven in figuur 3.5.6/2. Het temperatuurtraject van $+5^{\circ}\text{C} \rightarrow 12^{\circ}\text{C}$ is ontleend aan de CFD simulaties case D3 - figuur 3.3.9/3. De relatieve vochtigheid in de ruimte kan in dit geval stijgen tot 60%. Dit is qua thermisch comfort geen probleem, en door de hogere buitentemperatuur is er voor bouwfysisch robuuste gebouwen ook geen condensrisico.

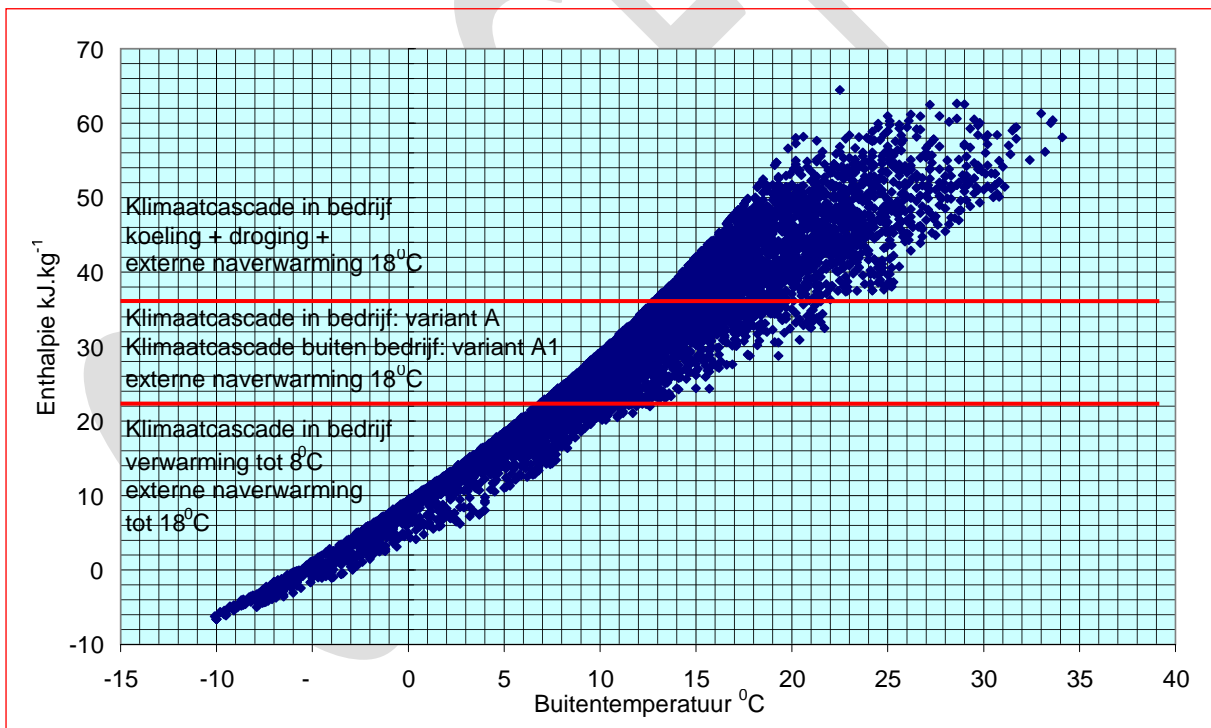
Bij toepassing van de Klimaatcascade in bestaande gebouwen moet een zorgvuldig onderzoek worden uitgevoerd naar eventueel aanwezige thermische bruggen, en de mogelijkheden de bouwfysische kwaliteit hiervan te verbeteren naar het niveau van nieuwbouw –zie paragraaf 3.6.4. Als dit niet mogelijk is kan worden overwogen het bevochtigingsrendement van de Klimaatcascade te verlagen. Dit is in principe mogelijk door wijziging van het sproeispectrum, bijvoorbeeld door uitschakeling van één of meer sproeiers bij een multi-sproeiersysteem. In het kader van het onderzoek is deze optie niet verder onderzocht.

Een andere mogelijkheid is om in de tussenseizoenen het sproeisysteem in de Klimaatcascade uit te schakelen waardoor deze alleen dienst doet als aanzuigkanaal voor de buitenlucht. De hydraulische trek in het ventilatiesysteem, een belangrijke drijvende kracht voor het luchttransport, is dan niet meer beschikbaar. De hulpventilator in de Klimaatcascade –zie paragraaf 3.x.x- zal de ontbrekende aerodynamische en hydraulische trek moeten compenseren met in principe een groter elektrisch energiegebruik als gevolg.

De bedrijfsvoering van de Klimaatcascade voor deze situatie, aangeduid met variant A1, is weergegeven in figuur 3.5.6/3



Figuur 3.5.6/2 –Psychmetrisch proces Variant A bij de gemiddelde winterconditie



Figuur 3.5.6/3 – Bedrijfsvoering Klimaatcascade variant A in relatie tot enthalpie en buitentemperatuur

Figuur 3.5.6/4 geeft deze bedrijfsmodus weer in een andere context. De relatie tussen de buitentemperatuur en de luchtenthalpie in deze grafiek is ontleend aan NEN 5060:2008 –B2, waarbij de enthalpie is berekend met de formule uit Handboek Installatietechniek (ISSO 2002):

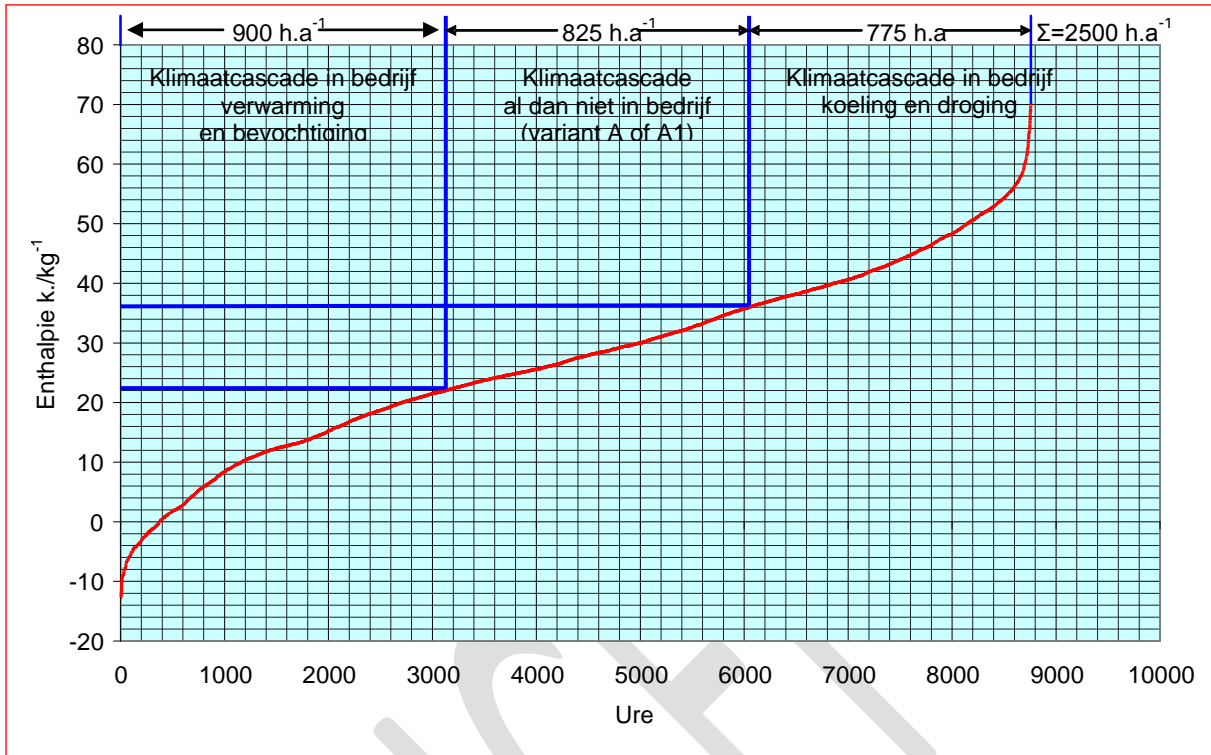
$$h_e = 1,006 \cdot \theta_e + x \cdot (491 + 1,926 \theta_e) \quad (3.5.6)$$

Waarin

h_e = enthalpie buitenlucht [kJ.kg⁻¹]
 θ_e = buitentemperatuur [°C]

$$x = \text{absoluut vochtgehalte} \quad [\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}]$$

Figuur 3.5.6/4 laat het jaarlijks aantal bedrijfsuren voor de drie bedrijfsmodi zien van systeemvariant A1 in relatie tot de frequentieverdeling van de buitenluchtenthalpie.



Figuur 3.5.6/4 – Jaarlijks aantal bedrijfsuren Klimaatcascade variant A

3.5.6.5 Variant B - Externe voorverwarming met dauwpuntsregeling in de Klimaatcascade

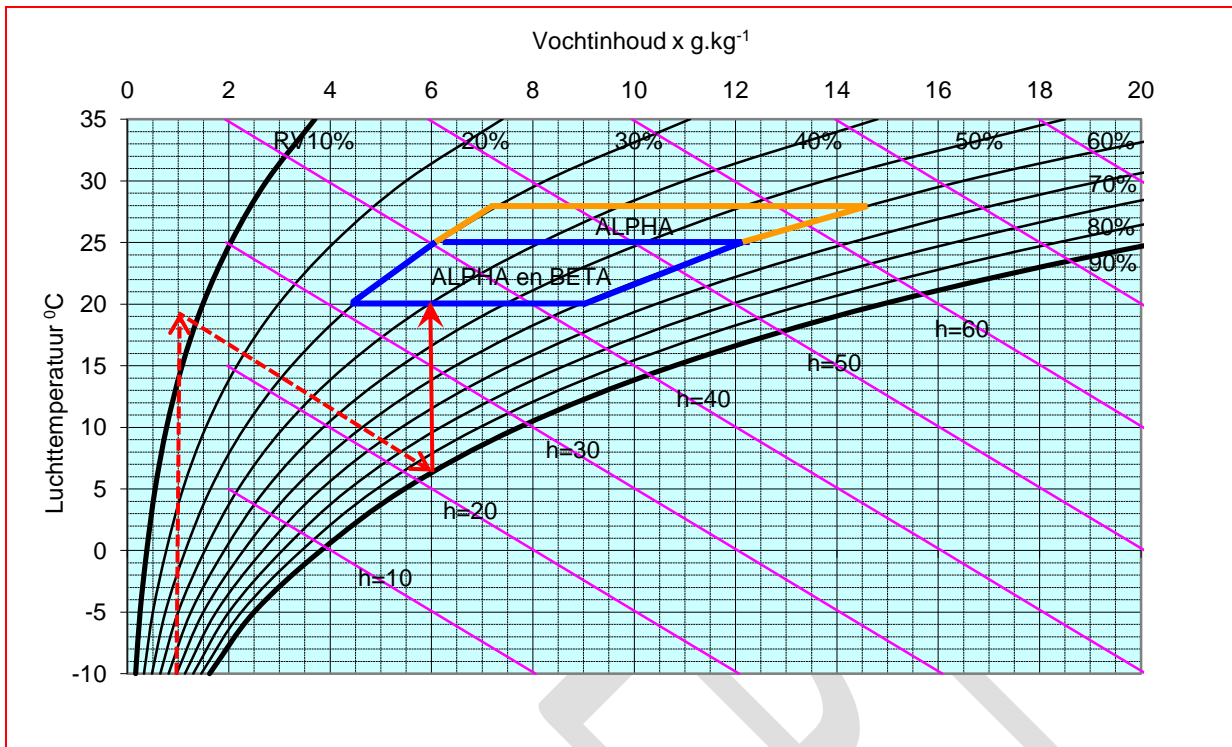
Het versproeien van water in lucht met een temperatuur beneden het vriespunt is in de klimaattechniek niet gebruikelijk. In traditionele luchtwassers wordt de lucht eerst voorverwarmd en aansluitend adiabatisch gekoeld, de zogenaamde dauwpuntsregeling. Bevriezingsgevaar wordt hierdoor voorkomen en bij klimaatregeling is dit een bekende techniek.

Bij de ontwerp wintercondities wordt de lucht hierbij voorverwarmd tot $\approx 19^{\circ}\text{C}$ en in de cascade adiabatisch gekoeld naar $6,5^{\circ}\text{C}$ bij 100% RV - zie figuur 3.5.6/5.

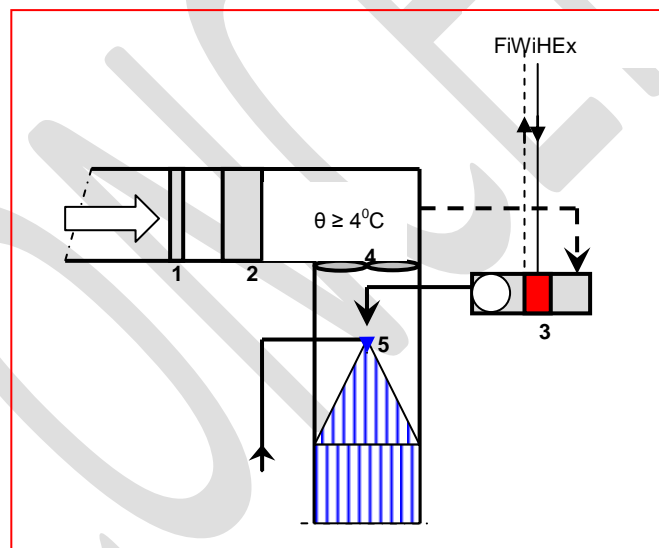
Voor de gemiddelde wintercondities geldt hetgeen in paragraaf 3.5.6.4 is opgemerkt voor variant A.

De installatietechnische implicaties van variant B bestaan uit in hoofdzaak uit een installatie voor het voorverwarmen van de lucht.

Het traditionele systeem van luchtverwarming met behulp van een verwarmingsbatterij in de luchtstroom kan bij de *Natuurlijke Airconditioning* volgens het *Earth, Wind & Fire* concept niet worden toegepast omdat dit teveel drukverlies zou geven. De lucht moet daarom worden verwarmd met een buiten de luchtstroom geplaatste verwarmingsunit voorzien van ventilator en verwarmingsbatterij, die is aangesloten op de FiWiHEX warmtewisselaar van de zonneschoorsteen - paragraaf 4.5.8.2. De lucht wordt hierbij met hoge snelheid via straalpijpen in de Klimaatcascade geblazen, waardoor een goede menging plaatsvindt en tevens aerodynamische trek wordt opgewekt. Figuur 3.5.6/6 geeft één en ander schematisch weer.



Figuur 3.5.6/5 – Psychometrisch proces Variant B bij de ontwerp winterconditie



Figuur 3.5.6/6 Voorverwarming van de lucht bij variant B

3.5.6.6 Naverwarming van de lucht

De lucht moet buiten de Klimaatcascade worden verwarmd tot de toevoertemperatuur van $\approx 18^{\circ}\text{C}$, gebaseerd op verdringingsventilatie. De uitvoering hiervan is afhankelijk van de infrastructuur van de luchtverdeling –zie paragraaf 3.5.7⁴². Verwarming met een buiten de luchtstroom geplaatste verwarmingsunit, aangesloten op de FiWiHEX warmtewisselaar van de zonneshoorsteen, is de meest voor de hand liggende optie –zie ook figuur 3.5.6/6.

3.5.6.7 Drukopbouw in de Klimaatcascade

In de stookperiode wordt de lucht in de Klimaatcascade verwarmd waardoor hierin een ongewenste opwaartse thermische trek ontstaat. Deze moet worden gecompenseerd door neerwaartse aerodynamische en hydraulische trek, al dan niet in combinatie met winddruk en/of de hulpventilator.

⁴² Zie rapport deel III (Bronsema 2012)

Bij variant B speelt dit door de hogere temperatuur in de Klimaatcascade een grotere rol dan bij variant A.

In vergelijking met de onzekere aerodynamische trek en de met de seizoenen wisselende thermische trek levert de hydraulische trek een substantiële en constante bijdrage aan het drukverschil waarop het luchtransportstelsel kan worden ontworpen - zie paragraaf 3.2.15. Als de Klimaatcascade in de tussenseizoenen niet in bedrijf is -variant A1- is geen hydraulische trek beschikbaar. De hulpventilator zal dit kunnen compenseren, maar het elektrisch energiegebruik neemt daardoor toe.

De temperatuur in de toevoerschacht(en) is tijdens de stookperiode $\approx 18^{\circ}\text{C}$, waardoor ten opzichte van de buitenlucht een opwaartse thermische trek tot stand komt, die de opwaartse thermische trek in het luchttoevoersysteem geheel of gedeeltelijk compenseert –zie paragraaf 3.5.5.

3.5.6.8 Variant A is de voorkeursvariant

Variant A past het beste bij het concept van *Natuurlijke Airconditioning* volgens het *Earth, Wind & Fire* concept en verdient daarom de voorkeur. Hierbij moet condensrisico op uitwendige scheidingsconstructies worden uitgesloten door een zorgvuldige bouwfysische uitvoering.

Bij bestaande gebouwen moet een zorgvuldig onderzoek worden uitgevoerd naar eventueel aanwezige thermische bruggen en de mogelijkheden de bouwfysische kwaliteit hiervan te verbeteren naar het niveau van nieuwbouw -zie paragraaf 3.6.4. Als hier problemen te verwachten zijn wordt aanbevolen de Klimaatcascade in de tussenseizoenen, en indien noodzakelijk ook bij lage buitentemperaturen, buiten bedrijf te stellen -Variant A1.

3.5.7 Infrastructuur voor de luchtverdeling

3.5.7.1 Inleiding

De Klimaatcascade is het hart van de *Natuurlijke Airconditioning* volgens het *Earth, Wind & Fire* concept. In de Klimaatcascade wordt ook overdruk opgewekt, waarmee in principe de drukverliezen in het luchtransportstelsel moeten worden gecompenseerd –zie paragraaf 3.5.5. De winddruk kan hierbij een aanvullende, zij het wisselende rol spelen – zie hoofdstuk 2.

In vergelijking met traditionele luchtbehandelingsystemen is de beschikbare druk gering en het luchtransportstelsel moet dan ook worden ontworpen op basis van lage luchtsnelheden en lage drukverliezen. De afmetingen van de benodigde schachten en kanalen zijn hierdoor aanzienlijk groter dan bij de traditionele mechanische systemen. Bouwkundige integratie hiervan in het architectonisch ontwerp is een noodzakelijke strategie voor het realiseren van een efficiënte luchtverdeling in het gebouw. Hierbij wordt ook voldaan aan de primaire doelstelling van het onderzoek, het verkleinen van de begripsafstand tussen architect en klimaattechnicus door de klimaatvoorzieningen in een gebouw uit te voeren met behulp van architectonische en bouwkundige elementen –zie paragraaf 1.2.5.

Bij deze strategie is er een specifieke relatie tussen gebouw en klimaatvoorzieningen, een situatie die in de eerste helft van de 20^e eeuw niet ongebruikelijk was en die bijzondere bouwwerken heeft opgeleverd.⁴³ Het is echter de vraag of deze strategie wel compatibel is met belangrijke hedendaagse voorwaarden voor duurzaamheid, te weten functionaliteit en flexibiliteit – zie paragraaf 1.2.1. Functieveranderingen van een gebouw moeten flexibel kunnen worden opgevangen door aanpassingen van de klimaatinstallatie. Technologische vernieuwingen op het gebied van de klimaattechniek moeten probleemloos binnen de gebouwstructuur kunnen worden verwerkt. En binnen de levensduur van een gebouw moet rekening worden gehouden met meerdere klimaattechnische renovaties.

Het is om deze redenen van belang de *Natuurlijke Airconditioning* volgens het *Earth, Wind & Fire* concept niet exclusief te koppelen aan een specifieke relatie tussen gebouw en klimaatvoorzieningen. Er moet ook een generieke systematiek worden gevonden voor de implementatie van het concept, een systematiek die tevens bruikbaar moet zijn voor implementatie in bestaande kantoorgebouwen.

⁴³ Een bekend voorbeeld is het voormalig kantoor van de Nederlandse Handel Maatschappij aan de Vijzelstraat in Amsterdam van architect K.P.C. de Bazel uit 1926.

In de volgende paragrafen wordt het *Earth, Wind & Fire* concept in enkele gebouwtypen geprojecteerd en nagegaan welke typen zich het beste lenen voor de toepassing.

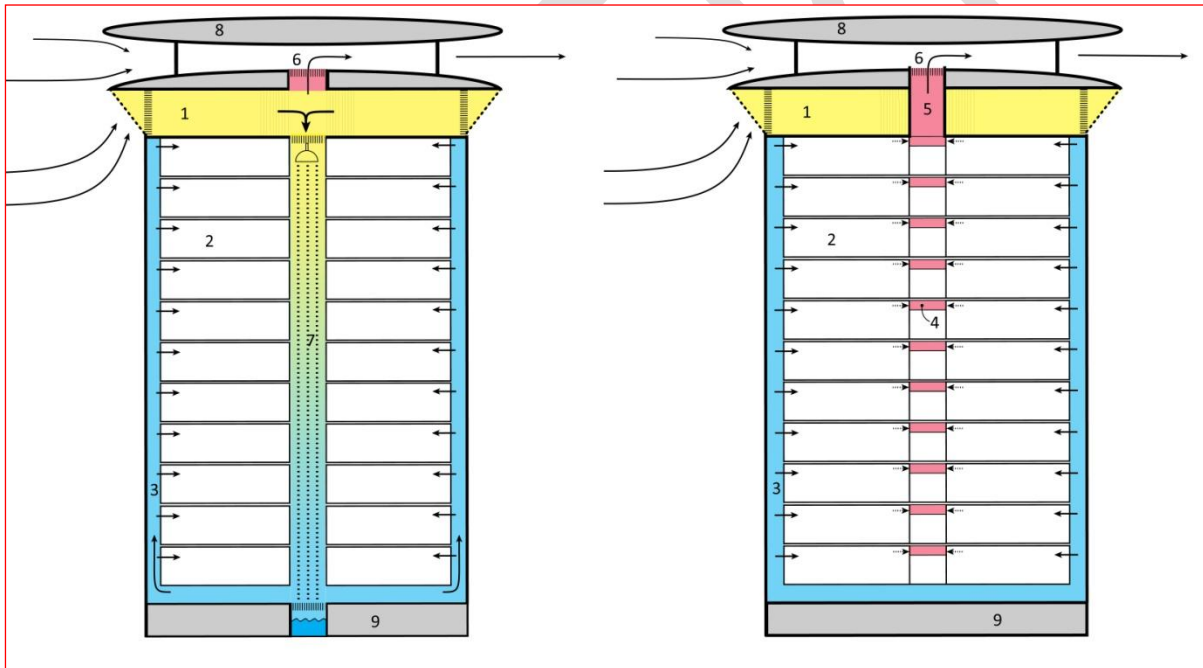
3.5.7.2 Specifiek ontwerp: Enkel corridor gebouw met luchttoevoer via gevelkanalen

Figuur 3.5.7/1 geeft het concept weer. Links is de doorsnede ter plaatse van de Klimaatcascade (7) - rechts de normaaldoorsnede.

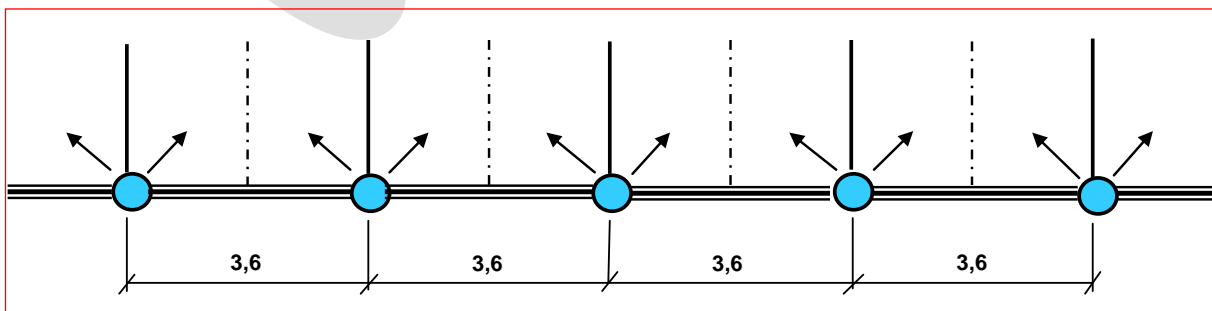
Geconditioneerde lucht wordt aan de voet van de Klimaatcascade (7) via een tussenvloer naar verticale verdeelkanalen aan de gevel (3) toegevoerd, en van daaruit gedistribueerd naar de kantoorruimten (2). De gebruikte lucht wordt aan de gangzijde via een kanaalsysteem in het gangplafond (4) afgevoerd naar het shuntkanaal van de zonneschoorsteen en stroomt van daaruit via de Zonneschoorsteen (5) –zie hoofdstuk 4 - en het de venturi-ejector (6) in het Ventecdak (8) –zie hoofdstuk 2- naar buiten.

Het luchttoevoersysteem is hier nogal omvangrijk en gecompliceerd. Er is een tussenvloer nodig en de gevelkanalen krijgen, vooral bij hogere gebouwen, een grote omvang. Bij een gebouw van 10 verdiepingen, één gevelkanaal per 3,6 m, een vertrekdiepte van 5,4 m, een ventilatiecapaciteit van $5 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ en een luchtsnelheid van ca $2,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ worden de gevelkanalen ca $\text{Ø } 400 \text{ mm}$ - zie figuur 3.5.7/2.

Uit hygiënische overwegingen moet aandacht moet worden besteed aan de reinigbaarheid van het systeem en aan de eventuele noodzaak van elektrostatische luchtfilters van het luchttoevoersysteem - zie paragraaf 3.5.8.



Figuur 3.5.7/1 – Enkel corridor gebouw – Luchttoevoer via gevelkanalen



Figuur 3.5.7/2 – Principe luchttoevoerkanalen aan de gevel of inpandig

Als alternatief op dit concept kunnen inpandige toevoerkanalen in de gangzone worden toegepast in een identieke verdeling en maatvoering.

3.5.7.3 Specifiek ontwerp: Atriumgebouw

Een atrium kan worden gebruikt als centraal toevoerplenum of als centraal afzuigplenum van de ventilatielucht.

Atrium als centraal toevoerplenum – Figuur 3.5.7/3

De Klimaatcascade wordt bij dit principe op het niveau van de eerste verdieping onderbroken en het water valt als een fontein vrij in het gekoeld water reservoir, dat als een vijver kan worden vormgegeven. De ventilatielucht stroomt hier ter plaatse het atrium in en stroomt via laaggeplaatste doorvoerroosters naar de kantoorruimten. Afzuiging vindt plaats via afzuigkanalen aan de gevel, die aan de voet zijn aangesloten op de zonneschoorsteen. Deze gevelkanalen dienen tevens als shuntkanaal voor de zonneschoorsteen.

De Klimaatcascade, fontein en vijver zijn objecten voor architectonische expressie.

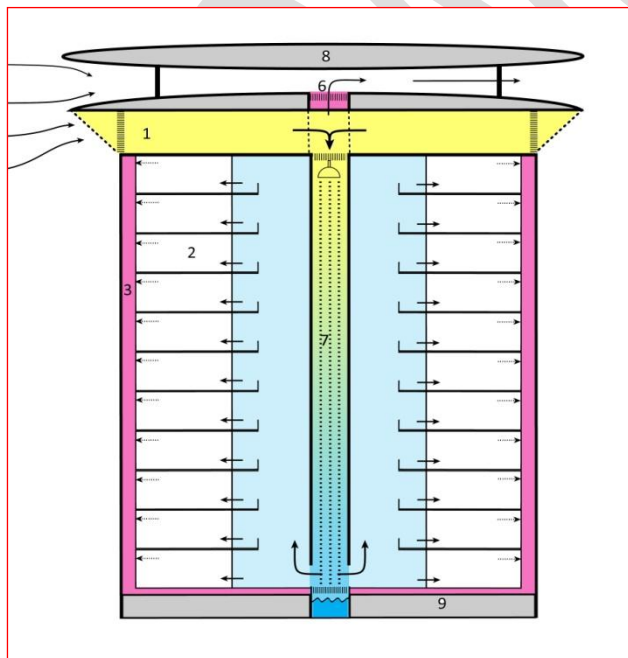
Het atrium is bij dit concept altijd koeler dan de kantoorruimten en de luchttemperatuur aan de voet van de Klimaatcascade mag daarom niet te laag zijn. Naverwarming tot ca. 18°C van de vrij uitstromende lucht aan de voet van de Klimaatcascade is architectonisch en installatietechnisch een lastige opgave die in het kader van het onderzoek niet is uitgewerkt.

Naverwarming kan ook aan de top van de Klimaatcascade worden gerealiseerd, bijvoorbeeld volgens figuur 3.5.6/6. Om een te hoge relatieve vochtigheid te voorkomen is het dan noodzakelijk het sproeisysteem van de Klimaatcascade tijdig uit te schakelen, waardoor de luchtverplaatsing geheel afhankelijk wordt van positieve druk in de overdrukruimte en de hulpventilator.

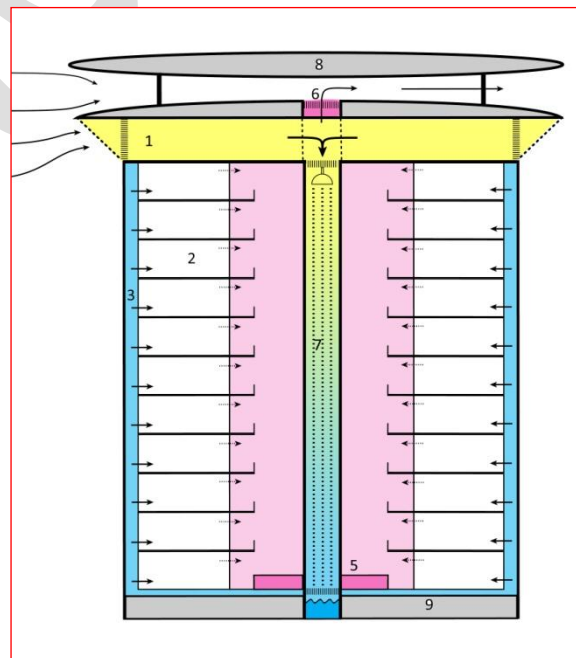
Het komt er op neer dat bij dit concept de Klimaatcascade alleen in en rond het koelseizoen actief is en daar buiten alleen dient voor de toevoer van ventilatielucht. Op zich is dit niet ongevoelbaar. Perceptueel zal voor veel mensen de waterval uit de Klimaatcascade nauwer verbonden zijn met zomerse koelte als met winterse omstandigheden.

Het is van belang zoninstraling in het atrium tijdens het koelseizoen zoveel mogelijk te beperken. De koele lucht is in de eerste plaats bestemd voor de kantoorruimten en niet voor koeling van het atrium.

Gebruik van een atrium als toevoerplenum in combinatie met *Passive Draught Evaporative Cooling* is een veel geciteerde en onderzochte oplossing in een warm klimaat –zie figuur 3.1.6.



Figuur 3.5.7/3 – Atrium als toevoerplenum



Figuur 3.5.7/4 – Atrium als afzuigplenum

Atrium als centraal afzuigplenum – Figuur 3.5.7/4

De luchttoevoer is bij dit concept als omschreven bij figuur 10.15.1. De gebruikte ventilatielucht stroomt vanuit de kantoorruimten via overstromroosters naar het atrium en wordt daar via een laag

geplaatste rooster afgezogen naar de voet van de zonneschoorsteen of de Zonnefaçade. Het atrium dient hier dus tevens als shuntkanaal.

Het voordeel van een centraal afzuigplenum is dat de door de zonneschoorsteen te leveren thermische trek niet groot hoeft te zijn omdat het drukverlies van het afzuigstelsel beperkt is - zie hoofdstuk 4. Het thermisch vermogen en daarmee de afmetingen van zonneschoorsteen kunnen daardoor kleiner zijn dan bij een centraal toevoerplenum.

Zoninstraling in het atrium is binnen bepaalde grenzen geen probleem, want zonnewarmte wordt via de gebruikte ventilatielucht afgevoerd.

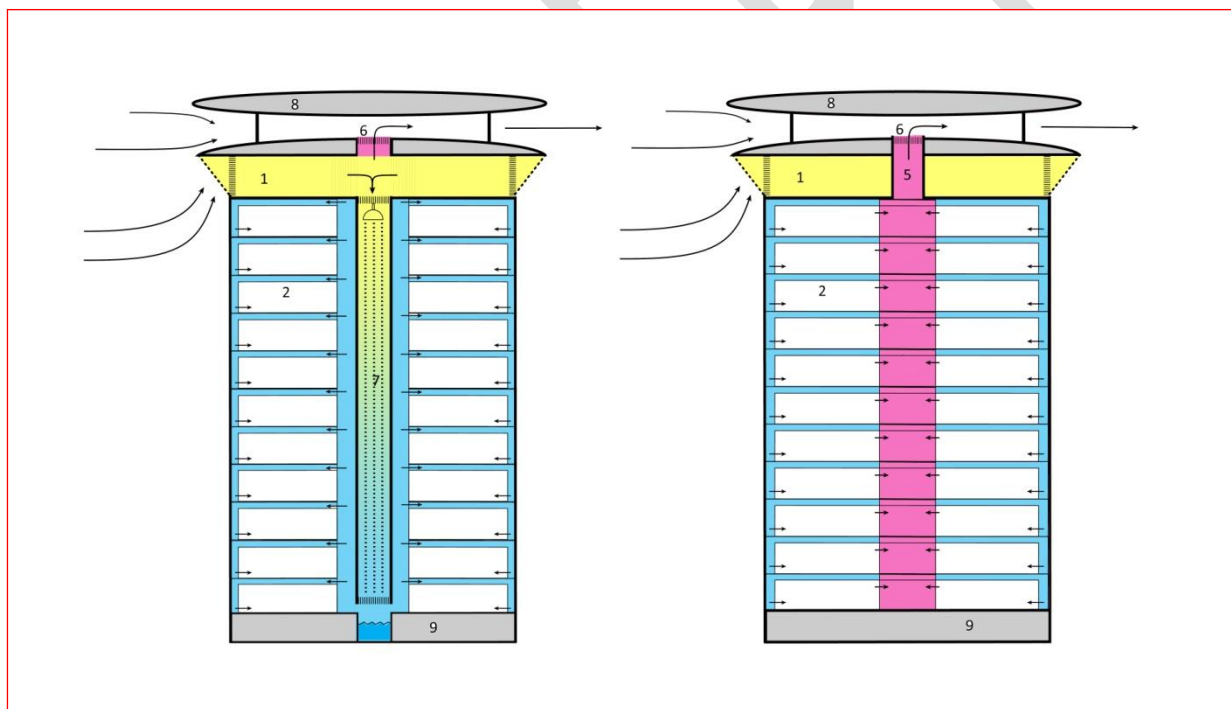
3.5.7.4 Specifiek ontwerp: Overige

Er zijn uiteraard meerdere varianten denkbaar voor de situering van de Klimaatcascade, de luchtdistributie en het afzuigstelsel, bijvoorbeeld een atriumgebouw met inpandige afzuigkanalen, variant op figuur 3.5.7/3, en een dubbel corridorgebouw⁴⁴.

3.5.7.5 Generiek ontwerp: Klimaatcascade in nieuwe en bestaande gebouwen

De voorgaande paragrafen geven een beeld van de mogelijke inpassing van *Natuurlijke Airconditioning* volgens het *Earth, Wind & Fire* concept in verschillende bouwtypologieën. De getoonde concepten hebben betrekking op nieuwbouw, waarbij het gebouwontwerp en klimaatvoorzieningen geheel op elkaar zijn afgestemd.

Het hierna omschreven concept is generiek en kan zowel worden toegepast bij nieuwbouw als bij grote renovaties van bestaande gebouwen - zie figuur 3.5.7/5.



Figuur 3.5.7/5 – Klimaatcascade in bestaand gebouw

De Klimaatcascade, de luchttoevoerschacht en het shuntkanaal worden ondergebracht in bestaande installatieschachten. Bij gebrek aan voldoende schachtruimte wordt deze uitgebreid of worden nieuwe schachten gebouwd.

Vanuit de luchttoevoerschacht wordt de in de Klimaatcascade geconditioneerde lucht toegevoerd aan de plafondruimte. Vanuit de plafondruimte worden aan de gevelzijde driehoekige luchtschachtjes aangebracht die op vloerniveau zijn voorzien van luchttoevoerroosters. De onderkoelde ventilatielucht wordt dus toegevoerd volgens het verdringingsprincipe.

⁴⁴ Zie onderzoeksrapport deel III (Bronsema 2012)

De lucht wordt op plafondniveau via de gangen afgezogen naar het shuntkanaal, dat aan de voet is aangesloten op de zonneshoorsteen.

De plafondruimte dient in dit concept als toevoerplenum van de lucht bij een geringe overdruk. Hoewel lekverliezen via de plafonds voor de ruimteventilatie niet verloren zijn is het van belang dat de ventilatielucht zijn weg naar 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.

Het omschreven systeem is toegepast in het gebouw van de *case study* –zie figuur 7.4.1. In dit gebouw wordt de lucht via een atrium afgezogen, waardoor geen shuntkanaal nodig is.

3.5.8 Luchtreiniging

3.5.8.1 Luchtfilters

Luchtfilters in luchtbehandelinginstallaties dienen in de eerste plaats om vervuiling van de installatie te voorkomen, want

- Vervuilde warmtewisselaars in luchtbehandelingcentrales veroorzaken op den duur capaciteitsvermindering.
- Vervuilde ventilatoren werken met een lager rendement, raken in onbalans en produceren meer geluid.
- Vervuilde regelopnemers en sensoren verstoren de regeling.
- Vervuilde luchtkanalen kunnen gezondheidsproblemen opleveren als in het geaccumuleerde stof micro-organismen gaan groeien die later in de ruimte terecht kunnen komen.

Omdat deze installatiecomponenten in het *Earth, Wind & Fire* concept niet voorkomen, is luchtfiltering om deze reden niet nodig.

Een tweede reden om ventilatielucht te reinigen is de bescherming die luchtfilters kunnen bieden tegen vervuiling en verkleuring van het interieur. Het is vooral fijn stof ($PM_{2,5} - PM_{10}$)^{*} dat hiervoor verantwoordelijk is, en juist fijn stof wordt door de gangbare luchtfilters onvoldoende verwijderd. Voor dit doel zouden zeer hoogwaardige luchtfilters moeten worden toegepast.

Een derde, misschien wel de belangrijkste reden, is de bescherming van mensen in het binnenmilieu tegen fijn stof ($< PM_5$) dat door de slijmvliezen, het zelfreinigend menselijk luchtfilter, niet wordt gevangen en diep in de longen kan doordringen. De deeltjes in dit stofspectrum kunnen besmet zijn met schadelijke en giftige stoffen, zoals vluchtige organische stoffen en metalen. Op locaties waar dit risico aanwezig is kan het verstandig zijn hoogwaardige luchtfilters toe te passen (Bronsema 1995). Ook als voor bepaalde gebouwen bescherming tegen bio-terreur gewenst is kunnen dergelijke filters een extra beveiliging bieden (Bronsema 2002B, 2005).

3.5.8.2 De Klimaatcascade als luchtwater

Bij *Natuurlijke Airconditioning* volgens het *Earth, Wind & Fire* concept functioneert de Klimaatcascade tevens als luchtwater. In een luchtwater wordt een deel van de (bevochtigbare) stofdeeltjes $> \approx 5 \mu m$ door de waterdruppels uit de lucht “*gewassen*”. Het filtereffect berust op het botsen van stofdeeltjes met waterdruppels, waarna de stofdeeltjes met het water worden afgevoerd. Vettige stof- en roetdeeltjes worden niet door de waterdruppels opgenomen.

Het reinigingseffect in een sproeistraal is beperkt (ASHRAE 2000), omdat de lucht ruimte rondom de waterdruppels relatief groot is en er daarom weinig botsingen plaats zullen vinden. In de klimaattechniek worden luchtwassers altijd in tegenstroom uitgevoerd, terwijl de Klimaatcascade in gelijkstroom werkt waardoor het te verwachten reinigingseffect nog kleiner zou kunnen zijn. Anders dan de naam suggereert kan een luchtwater dus niet als volwaardige luchtreiniger worden beschouwd

Luchtwassers worden veel toegepast in de industrie en de intensieve veehouderij om de stof- en geurbelasting van proceslucht te reduceren. Voor gebouwen in een industriële of stedelijke omgeving, waar de buitenlucht soms sterk verontreinigd kan zijn, is het een voordeel dat veel oplosbare gassen, SO_2 , NO_x , Ozon, NH_3 , formaldehyde, geurstoffen en smog in de Klimaatcascade worden geabsorbeerd.

3.5.8.3 Stoffilters

In de traditionele klimaattechniek worden in het beste geval zakkenfilters toegepast van de klasse EU 8/9 met een rendement van 80 – 90% bij een deeltjesgrootte van 1µm; fijn stof wordt in dergelijke filters niet gevangen. De luchtweerstand van deze filters is aanzienlijk, 100 – 400 Pa, waardoor ze voor de *Natuurlijke Airconditioning* volgens het *Earth, Wind & Fire* concept niet kunnen worden toegepast. Bovendien laboreren dergelijke filters aan de zgn. *luchtfILTERparadox*: Stofdeeltjes worden uit de lucht verwijderd maar na enige tijd gaat het in de filters verzamelde stof geur afgeven die door mensen als onaangenaam wordt ervaren. P.O. Fanger noemde deze geuremissie de “*verborgen olfs*” (Fanger 1987). Het effect wordt nog versterkt als filters nat worden, bijvoorbeeld ingeval van mistig weer als kleine waterdruppeltjes in het filter worden afgescheiden. In dit geval kan een luchtfILTER zelfs een uitstekende voedingsbron gaan vormen voor microbiologische groei. Niet alleen wordt hierdoor de geuremissie versterkt, maar ook bestaat kans op schimmelgroei in het filter met de kans dat schimmelsporen in de ruimte terecht komen en bij gevoelige mensen allergische reacties kunnen veroorzaken. Technieken om luchtfilters droog te houden zijn bekend, maar worden niet algemeen toegepast (Bronsema 2001).

Geconcludeerd kan worden dat stoffilters in klimaatinstallaties een noodzakelijk kwaad zijn. Ze vormen niet alleen een belangrijke kostenpost voor het energiegebruik en de exploitatie van klimaatinstallaties, maar zijn ook debet aan een degeneratie van de luchtkwaliteit in het binnenmilieu. De beste luchtkwaliteit is die van de buitenlucht mits die niet door het verkeer en/of andere bronnen is verontreinigd –zie ook paragraaf 2.1.8. Natuurlijke ventilatiesystemen zijn dan ook qua luchtkwaliteit superieur.

3.5.8.4 Hoogwaardige luchtfilters

Indien een slechte kwaliteit van de buitenlucht dan wel de aan het binnenmilieu gestelde eisen dit noodzakelijk of wenselijk maakt moet de ventilatielucht worden gefilterd, maar dan wel met hoogwaardige luchtfilters. Deze kunnen ook uit hygiënische overwegingen wenselijk zijn om de luchtkanalen, en/of de vloer- of plafondruimte, als deze voor de luchtverdeling worden gebruikt, zo schoon mogelijk te houden.

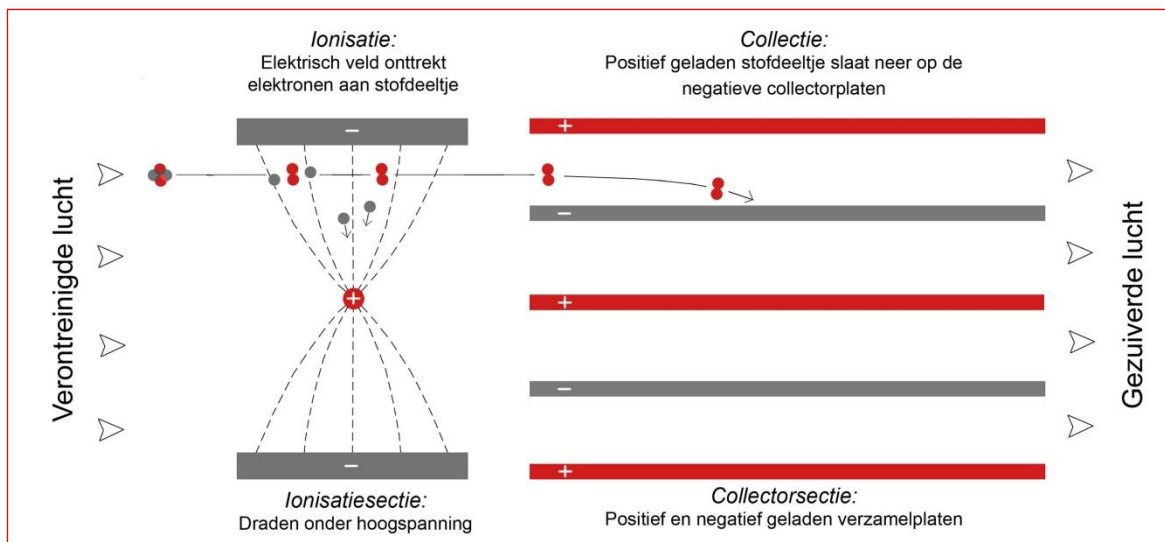
Hoogwaardige HEPA stoffilters komen voor een natuurlijk ventilatiesysteem niet in aanmerking in verband met hun hoge luchtweerstand.

Het enige luchtfILTER dat een zeer hoog rendement combineert met een zeer lage luchtweerstand is het elektrostatische luchtfILTER (Bronsema, B. 1997). Dit type is dus geschikt voor toepassing in het *Earth, Wind & Fire* concept.

3.5.8.5 Elektrostatisch luchtfILTER

Het reinigingseffect van elektrostatische filters is gebaseerd op het fysische principe dat elektrisch geladen deeltjes in een elektrisch veld worden afgebogen. In een elektrostatische luchtfILTER worden stofdeeltjes elektrisch opgeladen en vervolgens door middel van een elektrostatisch veld van baan veranderd en opgevangen op platen, zie figuur 3.5.8/1 ontleend aan het Handboek Installatietechniek (ISSO 2002).

De te reinigen lucht stroomt door het filter, bestaande uit een ionisatiesectie en een collectorsectie. In de ionisatiesectie worden de stofdeeltjes elektrisch geladen in het spanningsveld dat aanwezig is tussen de ionisatiedraden en de gearde platen. Deze geladen deeltjes komen nu in de collectorsectie; deze bestaat uit een aantal parallel geplaatste metalen collectorplaten, afwisselend gearde of aangesloten op een hoge spanning. De positief geladen deeltjes worden door de positief geladen platen afgestoten en op de gearde platen neergeslagen en daarmee uit de luchtstroom verwijderd. De adhesiekrachten, al of niet geholpen door een stofbindmiddel, houden de deeltjes op hun plaats. Met behulp van een (automatische) wasinrichting wordt het filter periodiek gereinigd..



Figuur 3.5.8/1. – Principe van een elektrostatisch luchtfilter (ISSO 2002)

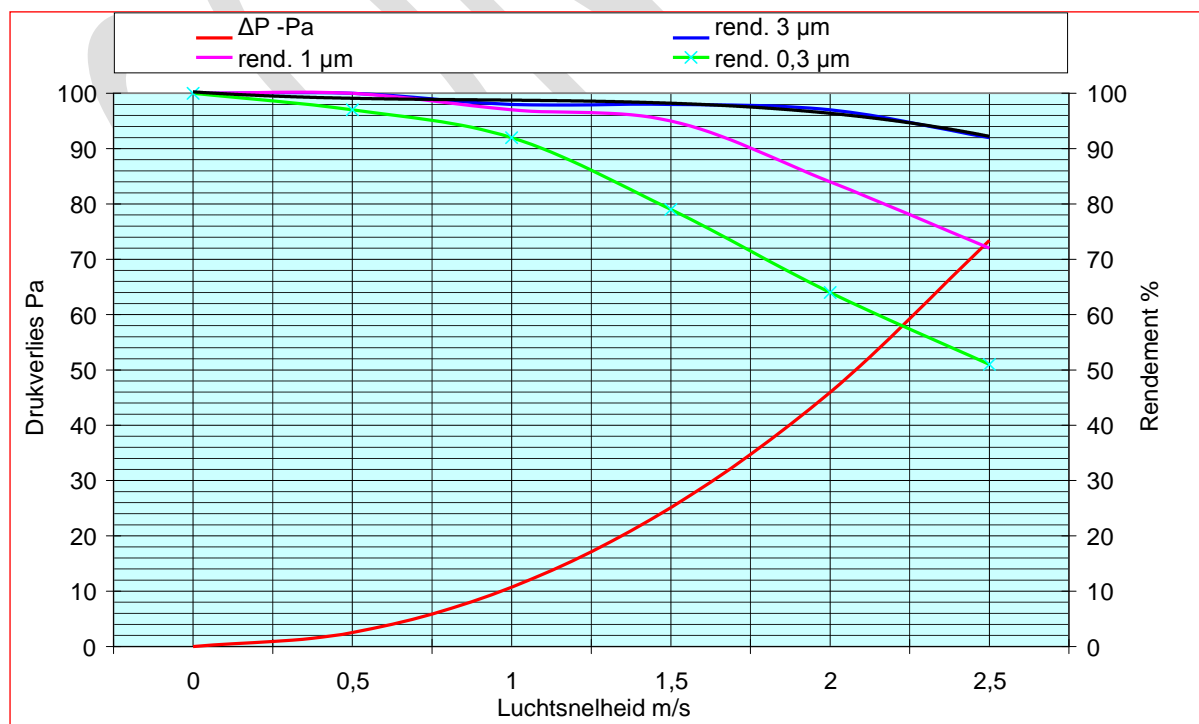
Voordelen van elektrostatische luchtfilters t.o.v. zakkenfilters zijn de volgende (Bronsema B. 2002C):

- Hoge afscheidingsgraad tot 99% voor fijn stof en laag drukverlies – zie figuur 3.5.8/2
- Geen geuremissie en microbiële groei in het filter;
- Microbiële verontreinigingen zoals bacteriën worden niet slechts afgescheiden maar tevens door de in het hoogspanningsveld gevormde ozon “geoxideerd” oftewel verbrand;
- Door de ozonvorming worden ook vele organische geurstoffen geoxideerd waardoor de lucht frisser wordt, mede door de omzetting van O_3 naar O_2 ;
- Constant drukverlies, onafhankelijk van de vervuilingtoestand;

Grotere stofdeeltjes $> 30 \mu m$ worden in een elektrostatisch filter slecht afgescheiden. Voor dit stofspectrum wordt daarom een grof voorfilter aangebracht.

3.5.8.6 Conclusie

Door de gunstige aanzuiglocatie van de buitenlucht -zie paragraaf 2.1.8- zal in veel gevallen geen luchtfiltering nodig zijn. Waar dit wel het geval is kunnen voor *Natuurlijke Airconditioning* volgens het *Earth, Wind & Fire* concept elektrostatische luchtfilters worden toegepast.



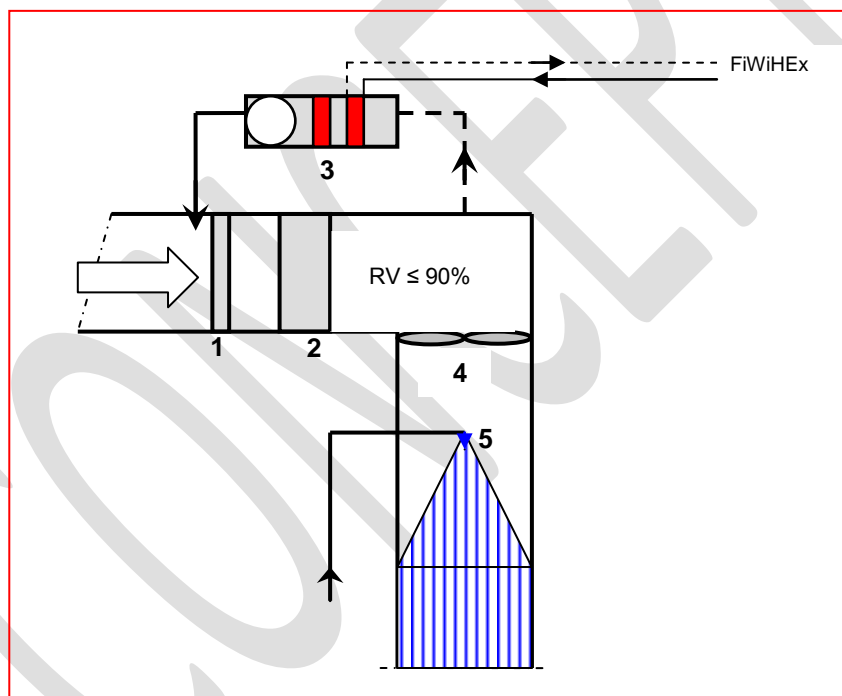
Figuur 3.5.8/2 – Rendement en drukverlies elektrostatisch luchtfilter – bron GEA-Delbag

3.5.8.7 Keep the filter dry

Luchtfilters in een ventilatiesysteem kunnen in geval van stuifneeuw, mist en motregen vochtdoorslag geven en/of dichtvriezen. Ook bestaat gevaar voor corrosie en elektrische overslag in elektrostatische filters. Het is daarom gewenst luchtfilters droog te houden: “*The First Law in Air Filter Technology: Keep the Filter Dry*”(Bronsema, B. 2001B, 1995). Om dit te bereiken moet de lucht onder de genoemde omstandigheden worden gedroogd.

Het thermisch vermogen van het droogstelsel moet in principe groot genoeg zijn om de relatieve vochtigheid van de lucht tot 90% te beperken (DIN 1994). De maximum concentratie van vloeibare vochtdeeltjes in lucht bedraagt ca 200 mg.m^{-3} en om deze te verdampen en de lucht verder te drogen tot een relatieve vochtigheid van 90% is per $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ventilatielucht een thermisch vermogen nodig van $\approx 3 \text{ kW}$.

Luchtdroging t.b.v. luchtfilterprotectie kan het beste worden uitgevoerd door recirculatie met warme lucht– zie figuur 3.5.8/3. Ca 10% van het luchtdebiet wordt uit de Klimaatcascade gerecirculeerd en na verwarming met $\approx 25 \text{ K}$ teruggevoerd naar de vuile kant van het elektrostatisch luchtfilter in de overdrukkamer (2) dat is beschermd met een grof voorfilter (1). De luchtverwarmingskast (3) wordt gevoed vanuit de FiWiHEX⁴⁵ installatie aan de top van de zonneshoorssteen en is voorzien van elektrische back-up. Verder zijn aangegeven de hulpventilator (4) en het sproeisysteem (5).



Figuur 3.5.8/3 – Luchtdroging t.b.v. luchtfilterprotectie

3.5.9 Open ramen

3.5.9.1 Het belang van te openen ramen

De tijd dat klimaattechnici een gesloten gevel propageerden om door een strikte scheiding van natuur en techniek de kunstmatige klimaatregeling beter beheersbaar te maken, ligt gelukkig ver achter ons. Tocht heeft deze tijd diepe sporen achtergelaten en het basale wantrouwen van veel mensen tegen *airconditioning* in de hand gewerkt. Iedereen die in een geconditioneerd gebouw met een gesloten gevel heeft gewerkt zal dit kunnen beamen, vooral als op een warme zomerdag de “*airco*” het eens af heeft laten weten. Ook slecht functionerende of vervuilde klimaatinstallaties, die in veel gebouwen oorzaak zijn geweest van het *Sick Building Syndrome* hebben het verlangen naar natuurlijke ventilatie

⁴⁵ Zie paragraaf 4.5.8.2

via een open raam geweldig versterkt. Een te openen raam is eigenlijk een elementair recht van de werkende mens (Bronsema, B. 1996).

In een gebouw met een goed functionerende klimaatregeling zijn te openen ramen niet nodig voor thermisch comfort of luchtkwaliteit. Een te openen raam is echter een probaat middel om het hoofd te kunnen bieden aan “*opvliegers*”, plotselinge aanvallen van warmte, gepaard gaande met een versnelde hartslag, verhoging van de lichaamstemperatuur, transpireren en vaatverwijding. Dit is geen typisch vrouwelijk verschijnsel, maar kan iedereen overkomen die geconfronteerd wordt met een plotseling opkomende stress. Het spreekt dan ook vanzelf dat in een gebouw dat is uitgerust met *Natuurlijke Airconditioning* volgens het *Earth, Wind & Fire* concept de ramen te openen moeten zijn.

De invloed van open ramen op de klimaatregeling van een gebouw wordt bepaald door externe en interne factoren.

Externe factoren –zie paragraaf 2.1:

- Windrichting en windsnelheid : Wind op de gevel geeft overdruk, wind langs de gevel geeft onderdruk. De windsnelheid is bepalend voor de grootte van over- en onderdrukken.
- Temperatuurverschillen: Bij afnemende buitentemperatuur worden thermische drukverschillen groter.

Interne factoren:

- Grootte van de raamopening: Windhinder in een kantoorruimte, tocht en opwaaiende documenten, geven al snel aanleiding om door individueel ingrijpen de raamstand te minimaliseren.
- Grootte van de ruimte: In een eenpersoonskamer zijn de effecten van een open raam beperkt tot de ruimte zelf en de lokale gebruiker. In groepskantoren treedt een disciplinerend effect op, waardoor nadelige effecten van een open raam sneller zullen worden gecorrigeerd.
- Binnendeuren: Gesloten binnendeuren vormen een belemmering voor de luchtstroom die optreedt tengevolge van een open raam. In veel kantoren staan de binnendeuren naar de gang vaak open, en is de invloed van de luchtstroom op het gebouw groter.
- Gebouwtype: In een enkel corridor gebouw kunnen de effecten van de luchtstroom sterk zijn als ramen in tegenover elkaar liggende gevels worden geopend bij openstaande gangdeuren. In atrium gebouwen zorgt de dempende werking van het bouwvolume in principe voor kleinere effecten.
- Aantal open ramen:: De effecten van de luchtstroom worden minder naarmate minder ramen open staan. Bij een goed binnenklimaat is de behoefte om een raam te openen in het algemeen gering.
- Bouwvolume: Grotere bouwvolumes hebben een groter dempend effect, waardoor de invloed van open ramen kleiner wordt.
- Debietregeling op lokaal niveau: Op lokaal niveau is een debietregeling aan te bevelen op basis van luchtkwaliteit en/of CO₂ concentratie. Als in een dergelijke ruimte een raam geopend wordt zal het ventilatiedebiet dat via het klimaatsysteem wordt toegevoerd worden gereduceerd of tot nul teruggebracht. De invloed van een open raam op het gebouw wordt hierdoor kleiner; tevens wordt de bedrijfsvoering energiezuiniger.
- Debietregeling op gebouwniveau: De *Natuurlijke Airconditioning* volgens *Earth, Wind & Fire* is geen *free-running* concept. Zowel de luchttoevoer vanuit de Klimaatcascade als de luchtafzuiging via de Zonneschoorsteen wordt behoefteafhankelijk geregeld. Er zal dus nimmer een storm binnen een gebouw kunnen gaan waaien.

Samengevat: In een Gezond Gebouw is een te openen ramen een essentiële voorziening. Bij een goed binnenklimaat, eveneens een essentiële voorziening, is de behoefte om een raam ook metterdaad te openen gering. Enkele geopende ramen hebben in principe weinig invloed op de niet voorziene luchtstromingen in een gebouw. Regeling van de volumestromen voor ventilatie is belangrijk.

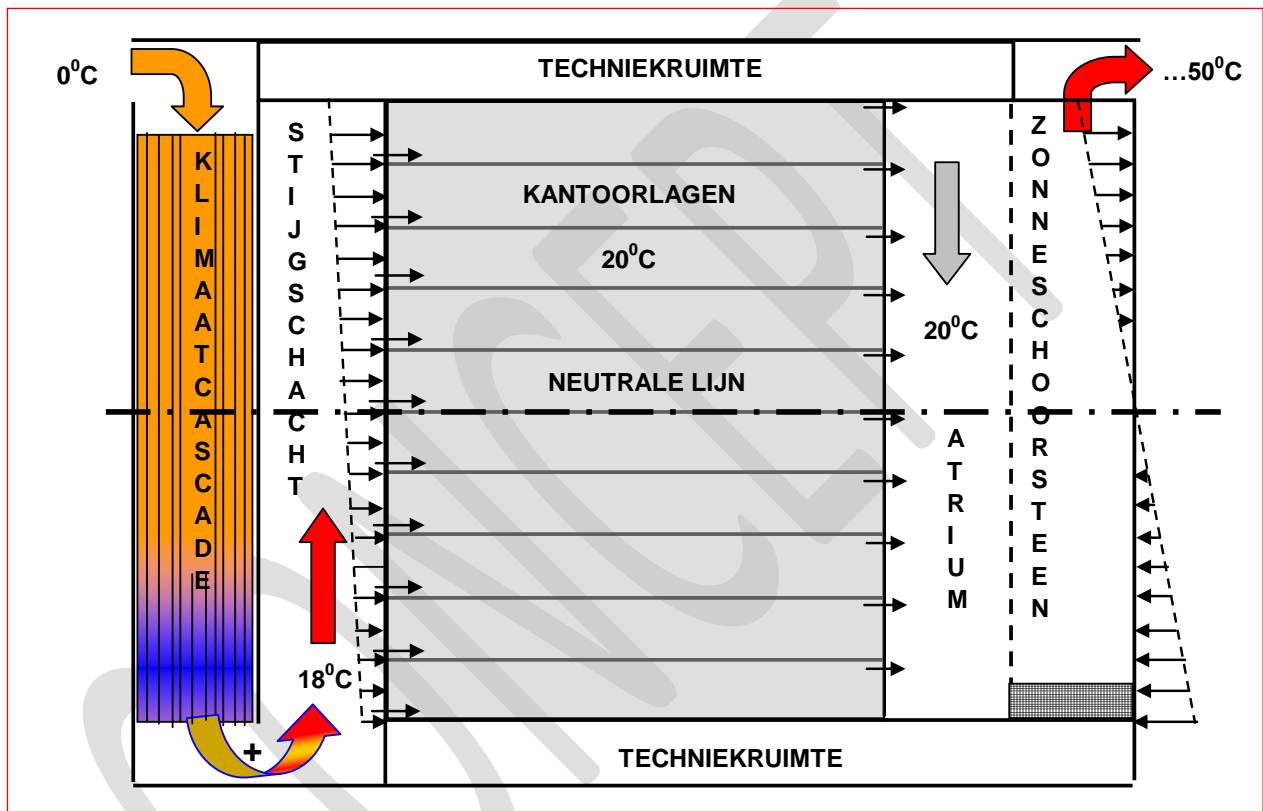
3.5.9.2 Drukverschillen in het gebouw

De vraag is of drukken en drukverschillen in het gebouw de ventilatiestromen kunnen beïnvloeden. Bij luchtafvoer via een gesloten afzuigsysteem dit nauwelijks het geval. Bij luchtafvoer via een atrium of serre, als aangegeven in figuur 3.5.9 zou beïnvloeding mogelijk zijn als in de buitenwand openingen aanwezig zijn waardoor het temperatuurverschil tussen binnen en buiten zich in drukverschillen in atrium of serre zou kunnen manifesteren.

Een dergelijke situatie moet in hoogbouw altijd worden voorkomen, ook bij toepassing van traditionele ventilatieconcepten. De toegangen op de begane grond moeten worden uitgevoerd met draaideuren en raamopeningen dienen bij grote temperatuurverschillen tussen binnen en buiten gesloten blijven.

De in figuur 3.5.9 aangegeven neutrale lijn is gebaseerd op de veronderstelling dat ondiepteden in de buitengevel gelijkmatig verdeeld zijn. Op de neutrale lijn kan dan een virtuele opening worden gedacht waarin geen drukverschil tussen binnen en buiten aanwezig is.

In de getekende wintersituatie staat de buitengevel onder de neutrale lijn op overdruk van buiten naar binnen, terwijl boven de neutrale lijn de overdruk van binnen naar buiten werkt. Zolang de buitenwand naast de genoemde virtuele opening dicht is, en er geen andere openingen aanwezig zijn, kunnen de overdrukken en onderdrukken niet tot uitwerking komen. Zodra boven en onder de neutrale lijn geveldelen worden geopend ontstaan er luchtstromingen.



Figuur 3.5.9 – Luchtafvoer via serre of atrium

3.6 Risico- en beschermende factoren⁴⁶

3.6.1 Inleiding

Vocht in gebouwen en luchtbevochtigung met behulp van luchtwassers brengt bepaalde risico's met zich mee met betrekking tot het binnenmilieu, corrosie en vorstschade. Met de Klimaatcascade wordt in de stookperiode bewust vocht in een gebouw gebracht en het is van belang de risico's hiervan te onderkennen.

Anderzijds heeft de Klimaatcascade voor het binnenmilieu ook enkele positieve effecten, die als beschermende factor voor het binnenmilieu kunnen worden beschouwd.

3.6.2 Ziektekiemen in luchtbevochtigers

De gewenste vochtigheidsgraad in kantoorruimten en het al dan niet toepassen van luchtbevochtigung is al jaren lang controversieel thema. Enerzijds is er een zekere *communis opinio* dat de relatieve vochtigheid in de stookperiode niet te laag moet zijn – zie paragraaf 3.1.5.4. Anderzijds is er veel weerstand tegen de wijze waarop de klimaattechniek deze doelstelling heeft getracht te verwezenlijken

⁴⁶ "Beschermende factor" kan als tegenovergestelde van risicofactor worden gezien

(Bronsema, B. 1997). Luchtbevochtiging kan namelijk risico's met zich meebrengen omdat door een onjuist ontwerp en een onhygiënische bedrijfsvoering in sommige bevochtigingsystemen ziektekiemen tot ontwikkeling kunnen komen die via de luchtbehandeling in een gebouw kunnen worden verspreid. Luchtbevochtiging is daarom in ons land niet erg populair en wordt vaak achterwege gelaten omdat men bevreesd is voor de negatieve gezondheidseffecten (Meer, A. v.d. 1985).

Het aanhouden van een minimum vochtigheidsgraad van de lucht in het interieur heeft echter vele positieve aspecten (Bronsema, B. 1997; 2002) waarin de multifunctionele Klimaatcascade kan voorzien. Potentiële risico's zijn beperkt door de lage watertemperatuur en de goede toegankelijkheid voor inspectie en reiniging. In vergelijking met traditionele sproei-bevochtigers is het druppelspectrum vrij grof, waardoor vochtdoorslag in de vorm van aerosolen wordt beperkt. Risico's kunnen verder worden geëlimineerd door een hygiënische bedrijfsvoering (Bronsema, B. 1993).

3.6.3 Legionella Pneumophila⁴⁷

Een beruchte ziektekiem is de legionellabacterie, die bij inademing kan leiden tot infecties via de luchtwegen. Bij koeltorens wordt veel aandacht besteed aan legionellapreventie en ook voor de Klimaatcascade is dit een belangrijk punt.

Er zijn ongeveer 50 soorten legionellabacteriën waarvan de Legionella Pneumophila waarschijnlijk de enige is die ziekteverwekkend is. Deze bacteriesoort komt altijd in zeer lage aantallen voor in alle typen water. Legionellose ofwel "*veteranenziekte*" kan alleen ontstaan door inademing van kleine waterdruppels (aerosolen). De bacterie nestelt zich in de longblaasjes.

De legionellabacterie verblijft bij voorkeur in een biofilm, dit is een slijmachtige substantie tegen de wanden van leidingen en reservoirs. Stilstaand water bevordert de vorming van biofilm en moet dus zo veel mogelijk worden voorkomen.

Figuur 3.6.3 illustreert het temperatuurbereik waarbinnen Legionella overleeft, groeit of afsterft. Tevens wordt een indruk gegeven van het temperatuurbereik van een aantal veel gebruikte systemen en verschillende typen apparatuur.

Toepassingsgebied	Temperatuurgebied	Legionella groei- en afsterfgedrag
Stoombevochtiging	100°C	snelle decimering
HT CV systemen	80°C	
Warm tapwater	60°C	
	50°C	langzame uitgroei
	45°C	
	40°C	snelle uitgroei
baden, douches, koeltorens	30°C	optimale uitgroei
	25°C	snelle uitgroei
adiabatische koeling	20°C	langzame uitgroei
KLIMAATCASCADE		
leidingwater in gebouw	10° 0°	overleving in lage concentraties mogelijk

Figuur 3.6.3 – Groei- en afsterfgedrag van de Legionella bacterie volgens ISSO

Een Klimaatcascade werkt in het temperatuurbereik tussen 10°C en 20°C, voor de ontwikkeling van legionella een veilig gebied. Omdat de Klimaatcascade werkt bij koelwatertemperaturen van 13° -

⁴⁷ ISSO 2008

20°C is het risico voor overleving van legionella bacteriën uitgesloten. Het concept is met andere woorden intrinsiek veilig.

3.6.4 Condensrisico en vorstschade

Bij het gebruik van de Klimaatcascade buiten het koelseizoen moet aandacht worden geschonken aan eventueel condensrisico op uitwendige scheidingsconstructies.

Bij de beoordeling hiervan kan gebruik worden gemaakt van de temperatuurfactor of *f-waarde*. Deze factor, die als een karakteristieke eigenschap van een constructie moet worden beschouwd, wordt als volgt gedefinieerd (Handboek Installatietechniek 2002):

$$f = \frac{\theta_{i,opp} - \theta_{e,lucht}}{\theta_{i,lucht} - \theta_{e,lucht}} \quad [-] \quad (3.6.4/1)$$

Waarin

$\theta_{i,opp}$	binnenoppervlaktetemperatuur	[°C]
$\theta_{e,lucht}$	luchttemperatuur buiten	[°C]
$\theta_{i,lucht}$	= luchttemperatuur binnen	[°C]

Volgens artikel 3.26 van het Bouwbesluit dient de *f-waarde* voor kantoorgebouwen minimaal 0,5 te bedragen. Op basis van deze eis kan bij verschillende binnen- en buitencondities de te verwachten binnenoppervlaktetemperatuur van een constructie worden bepaald. Vervolgens kan worden getoetst of het dauwpunt van de binnenlucht niet hoger is dan $\theta_{i,o}$. Indien dit het geval is zal er sprake zijn van condensatie. Om schimmelgroei te voorkomen wordt vaak de stelregel gehanteerd dat de RV nabij een constructie niet langdurig hoger mag zijn dan 80%. Dit kan inhouden dat het dauwpunt ten opzichte van $\theta_{i,o}$ moet worden verlaagd.

Bij wintercondities van $\theta_{i,lucht} = 20^\circ\text{C}$ en $\theta_{e,lucht} = -5^\circ\text{C}$ wordt met formule (3.9.4) bij de minimum temperatuurfactor uit het Bouwbesluit van $f = 0,5$ de binnenoppervlaktetemperatuur berekend op $\theta_{i,opp} = 7,5^\circ\text{C}$. Als in het grensvlak met deze temperatuur wordt uitgegaan van een maximum RV = 80%, bedraagt de maximum vochtigheidsgraad van de lucht $x \approx 5,2 \text{ g.kg}^{-1}$. De maximum toelaatbare relatieve vochtigheid in de ruimte met $\theta_{i,lucht} = 20^\circ\text{C}$ is dan 35%.

De waterdampafgifte van personen bij een ruimtetemperatuur van 20°C en lichte kantoorarbeid is $\approx 36 \text{ g.h}^{-1}$. Bij een ventilatiedebiet van $50 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ per persoon komt dit overeen met $\Delta x \approx 0,6 \text{ g.kg}^{-1}$. De vochtigheidsgraad van de toevoerlucht mag dan $(5,2 - 0,6 =) 4,6 \text{ g.kg}^{-1}$ bedragen.

Voor woningbouw wordt in het Bouwbesluit een minimum *f-waarde* van 0,65 voorgeschreven. Bij dezelfde klimaatcondities $\theta_{i,lucht} = 20^\circ\text{C}$ en $\theta_{e,lucht} = -5^\circ\text{C}$ is de bijbehorende minimum binnenoppervlaktetemperatuur $\theta_{i,opp} = 11,25^\circ\text{C}$. Bij 80% RV is de maximum vochtigheidsgraad van de lucht $x \approx 6,7 \text{ g.kg}^{-1}$ en de maximum toelaatbare relatieve vochtigheid in de ruimte met $\theta_{i,lucht} = 20^\circ\text{C}$ is dan 45%. De vochtigheidsgraad van de toevoerlucht mag dan $(6,7 - 0,6 =) 6,1 \text{ g.kg}^{-1}$ bedragen. Systeemvariant A met $\text{RV}_i = 40\%$ levert dan geen probleem op –zie paragraaf 10.12.4. en tabel 10.12.1.

Voor constructievlakken kan de temperatuurfactor eenvoudig worden berekend op basis van de warmteweerstand van de constructie. Het Bouwbesluit eist voor uitwendige scheidingsconstructies van kantoorgebouwen een warmteweerstand R_c van $2,5 \text{ W.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$. Deze wordt gedefinieerd als (NEN 1068:2001):

$$R_c = \frac{1}{U} - R_{si} - R_{se}$$

Waarin

U	warmtedoorgangscoefficiënt van het vlak	$[\text{W.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$
R_{si}	warmteovergangsweerstand ingaande warmtestroom	$[\text{m}^2 \cdot \text{K.W}^{-1}]$
R_{se}	warmteovergangsweerstand uitgaande warmtestroom	$[\text{m}^2 \cdot \text{K.W}^{-1}]$

Dit betreft de warmteweerstand inclusief de overgangsweerstanden buiten en binnen. Voor scheidingsconstructies grenzend aan de buitenlucht worden forfaitaire waarden gehanteerd aangehouden van $R_{si} = 0,13$ en $R_{se} = 0,04$.

De binnenoppervlaktetemperatuur wordt berekend met de formule

$$\theta_{i,opp} = \theta_{i,lucht} - \left(\frac{R_{si}}{R_c + R_{si} + R_{se}} \right) * \left(\theta_{i,lucht} - \theta_{e,lucht} \right) \quad (3.6.4/2)$$

Bij een $\theta_{i,lucht} = 20^{\circ}\text{C}$ en $\theta_{e,lucht} = -5^{\circ}\text{C}$ wordt $\theta_{i,opp}$ berekend op $18,8^{\circ}\text{C}$. Als in het grensvlak met een temperatuur van $18,8^{\circ}\text{C}$ wordt uitgegaan van een maximum $\text{RV} = 80\%$, bedraagt de maximum vochtigheidsgraad van de lucht $\approx 11,0 \text{ g.kg}^{-1}$. De maximum toelaatbare relatieve vochtigheid in de ruimte met $\theta_{i,lucht} = 20^{\circ}\text{C}$ is dan 76% .

De temperatuurcoëfficiënt wordt bij deze conditie berekend op $f = 0,95$, dus zeer ruim boven de minimumwaarde van $f = 0,5$.

Thermische bruggen en meerdimensionale aansluitingen hebben in het algemeen een lagere temperatuur dan constructievlakken en zijn daardoor kwetsbaarder voor condensrisico. Er bestaan computerprogramma's om thermische bruggen te berekenen. NEN-EN-ISO 13788 (NNI 2011) geeft hiervoor rekenvoorschriften met o.a. de volgende uitgangspunten :

- Maandelijkse berekening voor de kritische periode van oktober tot en met april;
- Voor elk van deze maanden wordt de maandgemiddelde buitentemperatuur gehanteerd.

Ook kan gebruik worden gemaakt van de SBR-referentiedetails of details van leveranciers met een attest, waarmee op eenvoudige wijze kan worden voldaan aan de eis van de *f-waarde* uit het Bouwbesluit.

Geconcludeerd kan worden dat gebruik van de Klimaatcascade buiten het koelseizoen voor wat betreft condensrisico geen problemen behoeft op te leveren als wordt voldaan aan de minimum eis voor de temperatuurfactor uit het Bouwbesluit. Voor een robuuste bedrijfsvoering wordt aanbevolen hierbij uit te gaan van $f = 0,65$.

Bij toepassing van een Klimaatcascade in bestaande gebouwen moet een zorgvuldig onderzoek worden uitgevoerd naar eventueel aanwezige thermische bruggen, en de mogelijkheden de bouwfysische kwaliteit hiervan te verbeteren naar het niveau van nieuwbouw. Als dit niet mogelijk is wordt aanbevolen systeemvariant B of C uit paragraaf 3.5.6 toe te passen.

3.6.5 Ionisatie

De ionenconcentratie in de binnenlucht van kantoren, vooral die met mechanische ventilatie of airconditioning is veel lager dan die in de buitenlucht. In plaatstalen luchtkanalen slaan de geladen moleculen in de ventilatielucht neer op de wanden waardoor vrijwel geen ionen de ruimte meer bereiken. In een gebouw worden weliswaar continu nieuwe ionen gevormd, maar deze slaan grotendeels neer op statisch geladen vlakken zoals computerschermen. De ionenconcentratie in de onderhavige gebouwen is daardoor slechts 10% of minder dan de concentratie in de buitenlucht (Hawkins L.H. 1981).

De positieve werking van negatieve luchtionen op de luchtkwaliteit is bepaald niet onomstreden. Het Handboek Installatietechniek (ISSO 2002) en de Recknagel (Recknagel Sprenger Schramek 2009) besteden er geen enkele aandacht aan. De CIBSE Guide A (CIBSE 1999) vermeldt in paragraaf 1.11.2

"It has been suggested that the ion balance of the air is an important factor in human comfort in that negative ions tend to produce sensations of freshness and well-being and positive ions cause headache, nausea and general malaise. Present evidence on the effects of air ions and, in particular, the effectiveness of air ionisers is inconclusive and hence no design criteria can be established".

Vanaf ≈ 1950 rees bij wetenschappers het vermoeden dat negatieve luchtionen een positief effect zouden kunnen hebben voor mensen met gevoelige luchtwegen; dit vermoeden werd door onderzoek in Amerika bevestigd. In een wetenschappelijk Deens onderzoek werd echter geen correlatie gevonden tussen de concentraties van luchtionen en comfortklachten. (Andersen Ib 2008).

Het binnenmilieuonderzoek heeft zich vanaf 1970 onder leiding van P.O. Fanger vooral geconcentreerd op temperatuur en kwaliteit van de binnenlucht.

Een overzichtsartikel over dit onderwerp (Yates Alayne e.a. 1986) geeft de volgende samenvatting:

“Exposure to positive and negative air ions appears to have diverse effects on physiological and behavioural systems. The general trend is that positive ions are associated with adverse results and that negative ions are associated with salutary results. Ionisation changes do not influence all individuals, may have differential effects according to gender, and are more likely to impact upon organisms under stress or those affected by a disease process. Effects may be complex and subtle, involving anxiety, activity, mood, learning and internal rhythm. Air ion research has only recently begun to regard descriptions of the electrical environment and the experimental microclimates as important variables to be measured and considered in interpreting the results”.

Hoewel de gezondheidseffecten die aan negatieve ionen toegeschreven worden twijfelachtig zijn, is er wereldwijd een hele industrie van “ionisatie luchtreinigers” oftewel *ionisers* ontstaan. De werking van deze apparaten is aanleiding geweest voor veel onderzoek, met soms tegenstrijdige resultaten. Een potentiële verbetering van de luchtkwaliteit met behulp van ionisatie luchtreinigers valt buiten het kader van de onderzoeksdoelstellingen. Er zijn ook geen metingen in de fysieke testopstelling uitgevoerd.

De *Natuurlijke Airconditioning* volgens het *Earth, Wind & Fire* concept onderscheidt zich echter op enkele punten van traditionele luchtbehandelingsystemen. Hiermee zou een bijdrage kunnen worden geleverd aan behoud of versterking van de natuurlijke ionenbalans in de ventilatielucht met een mogelijk positieve invloed op de luchtkwaliteit in de binnenruimte:

- De Klimaatcascade is in principe een bouwkundige schacht waarin negatieve luchtionen niet op de wanden zullen neerslaan en de natuurlijke concentratie van de buitenlucht behouden blijft.
 - De waterval in de Klimaatcascade is zelf een bron van negatieve luchtionen –zie paragraaf 3.6.6.
 - Het elektrostatisch filter, indien toegepast, is een bron van negatieve ionen –zie paragraaf 3.5.8.
- Deze gedachtegang is speculatief, maar interessant genoeg voor vervolgonderzoek.

3.6.6 Watervaleffect

Een mogelijk positief effect van het fysisch proces in de Klimaatcascade is de productie van negatieve ionen door het watervaleffect, ook Lenards effect genoemd naar de Hongaarse fysicus en Nobelprijswinnaar P. Lenard (1892). Een soortgelijk effect treedt ook op bij de golfbeweging en de inherente druppelvorming van zeewater, ook Blanchard effect genoemd naar de Franse meteoroloog D. Blanchard. Sinds de oudheid wordt de luchtkwaliteit in een dergelijke omgeving als gezond en prettig ervaren, hetgeen wordt toegeschreven aan de positieve werking van negatieve luchtionen – zie paragraaf 3.5.5.

In een waterval worden waterdruppels door de val langs de wand en op de ondergrond, en door onderlinge botsingen gefragmenteerd. Hierbij zouden de meeste positieve ionen in de druppel achterblijven en negatieve ionen als vrije ionen in de lucht worden geëmitteerd. De Klimaatcascade zou dus een gunstige invloed op het binnenmilieu kunnen hebben.

Deze gedachtegang is speculatief, maar interessant genoeg voor vervolgonderzoek.

3.6.7 Ozon

Ozon is een bijzondere vorm van zuurstof. De ozon molecule bestaat uit drie zuurstofatomen, O₃, dat echter een instabiele verbinding is. Dit betekent dat O₃ snel terugvalt in de stabiele zuurstof molecule O₂. Als de ozon molecule echter weer uiteenvalt in gewone zuurstof, gaat dit altijd via een reactie partner (ASHRAE 1994).

Ozon komt in wisselende maar veelal kleine concentraties voor in de buitenlucht en wordt in het binnenmilieu geëmitteerd door kopieerapparaten en laser printers. Ozon wordt ook als bijproduct geëmitteerd in elektrostatische luchtfilters, zie paragraaf 3.5.8. In het binnenmilieu kan ozon in principe als een schadelijke en gezondheidsbedreigende stof worden gezien,

Ozon is ook een sterke oxidant en biocide die onder meer wordt gebruikt voor waterbehandeling en legionellapreventie in koeltorens (ISSO 2008) - zie ook paragraaf 3.6.3.

Ozon generatoren, zogenoemde *ozonisers*, worden vooral in de VS in grote aantallen verkocht. Fabrikanten claimen dat verontreinigingen in de binnenlucht door ozon worden geoxideerd, waardoor de luchtkwaliteit zou verbeteren. In een breed overzichtsartikel over ozon wordt echter gesteld dat (Weschler, Charles J. 2000).

“...ozon is not a practical and effective means of improving indoor air quality, especially in light of its potentially serious risk to health”

In een Klimaatcascade zouden de positieve en negatieve eigenschappen van ozon wellicht kunnen worden gecombineerd. De ozonemissie van een eventueel elektrostatisch luchtfilter wordt in het koelwater, waarbij omzetting plaatsvindt van O_3 naar O_2 . Het aldus met zuurstof verrijkte water heeft op zijn beurt een gunstige uitwerking op de luchtkwaliteit. Tevens worden eventuele micro-organismen in het koelwater gedood.

Deze gedachtegang is speculatief, maar interessant genoeg voor vervolgonderzoek.

CONCEPT

4 DE ZONNESCHOORSTEEN

4.1 Opbouw en uitvoering

4.1.1 Inleiding

Een zonneshoorsteen maakt gebruik van de convectiestroming van lucht die door de zon is verwarmd. In het *Earth, Wind & Fire* concept van *Natuurlijke Airconditioning* wordt deze stroming benut voor de natuurlijke (afzuig)ventilatie en het “oogsten” van zonnewarmte die kan worden benut voor de verwarming van gebouwen –zie figuur 1.2 en paragraaf 1.3.5. Hiermee kan een bijdrage worden geleverd aan de dubbele doelstelling van de EPBD Recast – zie paragraaf 1.1.2. De vragen die hiervoor moeten worden beantwoord zijn

1. Welke bijdrage kan een zonneshoorsteen leveren aan het concept van *Natuurlijke Airconditioning*?
2. Welke bijdrage kan een zonneshoorsteen leveren aan reductie van het energiegebruik in de gebouwde omgeving?
3. Wat zijn de ontwerpparameters voor het optimaal functioneren van een zonneshoorsteen?

Het onderzoeksrapport “*Earth, Wind and Fire*” deel (I) *Onderzoek Zonneshoorsteen en Zonnepaas* (Bronsema, B. 2012) geeft een uitgebreid verslag van deze zoektocht. Voor nadere toelichting en detaillering wordt in een voetnoot naar dit rapport verwezen.

Internet levert voor de zoekterm “*solar chimney*” talloze verwijzingen. Vele hiervan hebben betrekking op kleinschalige toepassingen voor woonhuisventilatie in Aziatische landen en hebben weinig waarde voor het onderzoek. (Bassiouny, R. et al. 2006, Bilgen, E. et al. 1982, Brinkworth, B.J. 2002, Burek, S.A.M. et al. 2007, Chantawong, P. et al. 2006, Charvat, P. et al. 2004, Cheng & Müller 1998, Elbakheit, A.R. et al. 2006, Gan, G. 2006, Harris, D.J. et al., Hatami, N. et al. 2008, Jyotirmay, M. et al. 2006, Marti-Herrero, J. et al. 2007, Mathur, J. et al. 2006, Ménézo, Christophe 2008, Moshfeg, B. et al. 1996, Ong, K.S. et al. 2003, Spencer, S. et al. 2000, Sandberg, M. et al. 1996, Tonui, J.K. et al. 2008, Zamora, B. et al. 2009, Zhai, X.Q. et al. 2011). Een standaardwerk over Solar Engineering heeft ook nauwelijks informatie opgeleverd (Goswami, D.Y. et al. 2000). Systematisch onderzoek naar het functioneren en optimaliseren van een zonneshoorsteen voor kantoorgebouwen in het West Europese klimaat is zover bekend niet eerder uitgevoerd. De resultaten van het onderzoek *Earth, Wind & Fire* voorzien in deze leemte.

Toepassing van zonneshoorstenen voor energieopwekking, zgn. “*solar updraft towers*” en voor koeling van PV cellen in PhotoVolaïsche/Thermische (PV/T) systemen, vallen buiten het kader van het onderzoek.

Het International Energy Agency voert sinds 1977 in het programma Solar Heating and Cooling onderzoek uit naar de toepassing van zonne-energie - zie paragraaf 4.5.9. Onderzoek op het gebied van zonneshoorstenen maakt echter geen deel uit van het programma.

4.1.2 Zonnestraling

Zonne-energie wordt geleverd door kernfusiereacties in het binnenste van de zon. Langjarige metingen hebben aangetoond dat deze energiestroom nauwelijks met de tijd verandert en dat daarom kan worden gesproken van een zonneconstante. Dit is de energie die per seconde wordt opgevangen aan de rand van de atmosfeer door een vlak van 1m^2 dat loodrecht op de richting van de zonnestraling is gericht. De gemiddelde waarde van de zonneconstante is $1367\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ (Velds, C.A.1992). De zonnestraling wordt op zijn weg naar het aardoppervlak door wolken en gassen en deeltjes in de atmosfeer verzwakt en verstrooid.

Uitgaande van de zonneconstante kan de maximaal op horizontale en verticale vlakken vallende zonnestraling worden berekend. Rekenalgoritmes hiervoor, die rekening houden met absorptie en verstrooiing in de atmosfeer, zijn o.a. te vinden in de ISSO publicaties 3 (ISSO 1967), “Zonnestraling in Nederland” (Velds, C.A. 1992) en “Handboek HBz” (ISSO 2010).

In een aantal weerstations van het KNMI wordt de globale straling in $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ gemeten, die wordt gedefinieerd als de som van de kortgolvlige directe en diffuse stralingsflux gemeten op een horizontaal

vlak (www.knmi.nl/klimatologie). Voor een zonneshoorsteen moet de globale straling steeds worden teruggerekend naar het verticale vlak.

De stralingsflux op een zonneshoorsteen bestaat uit drie componenten:

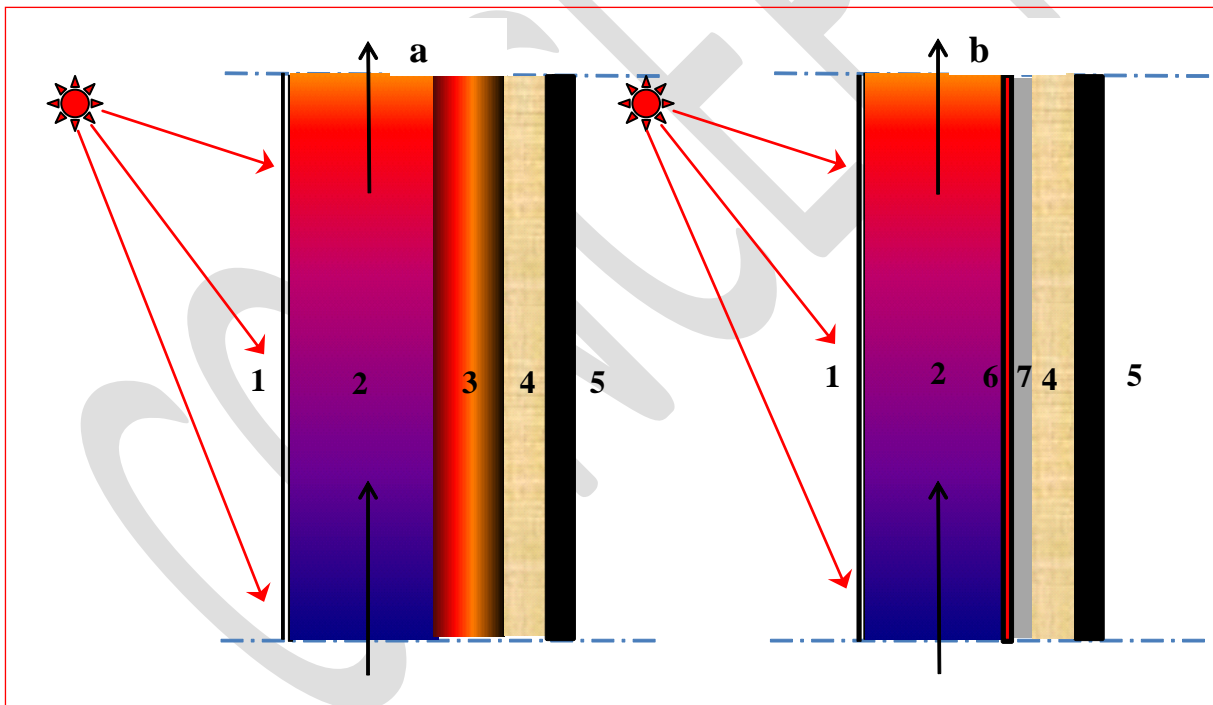
- Directe straling, de van de zon komende gerichte zonnestraling;
- Diffuse straling, de niet gerichte straling ontstaan door verstrooiing van zonnestraling in de atmosfeer, ook wel hemelstraling genoemd;
- Zonnestraling ten gevolge van grondreflectie, de door de omgeving gereflecteerde straling.

De opvallende zonstraling en de verhouding tussen de drie genoemde componenten is afhankelijk van de breedtegraad, de oriëntatie van de zonneshoorsteen, de datum, het tijdstip van de dag, de atmosferische troebeling en, voor wat betreft de grondreflectie, de aard en de ligging van de reflecterende oppervlakken.

4.1.3 De zonneshoorsteen

In de eenvoudigste vorm bestaat een zonneshoorsteen uit een verticale schacht op een bezonde oriëntatie die aan de onderzijde is aangesloten op het afzuigventilatiesysteem van een gebouw. Aan de bovenzijde kan de lucht naar buiten ontwijken –zie figuur 4.1.3.

De buitenkant van de schacht is afgedekt met isolerende beglazing (1) en de binnenkant wordt gevormd door een warmte absorberende binnenwand. De kortgolvlige zonnestraling verwarmt de binnenwand en wordt daar omgezet in langgolvlige warmtestraling die door het glas niet wordt doorgelaten. De verwarmde binnenwand geeft de warmte af aan de lucht waardoor een opwaartse stroming ontstaat. De achterwand is geïsoleerd (4).



Figuur 4.1.3 – Principe zonneshoorsteen

De zonneshoorsteen met Trombewand (figuur 4.1.3a) is de meest bekende uitvoering. Warmte wordt in de thermisch zware binnenwand (3) geaccumuleerd, en op een latere tijdstip, weer aan de lucht afgegeven ten behoeve van nachtventilatie.

Bij de zonneshoorsteen met lichte binnenwand (figuur 4.1.3b) wordt de zonnewarmte op een lichte metalen plaat, de absorber (6) geabsorbeerd en direct aan de lucht afgegeven. Bij de top van de schoorsteen wordt de warmte via een warmtewisselaar op water overgedragen voor korte en/of lange termijn opslag. De energieprestatie van deze lichte uitvoering is beter dan de uitvoering met Trombewand en is daarom in het *Earth, Wind & Fire* concept gekozen voor verdere modellering- zie paragraaf 4.1.5.

4.1.4 Keuzecriteria voor de glaswand

- Kies glas met een zo hoog mogelijke g-waarde voor maximale transmissie van de opvallende zonstraling naar de absorber.
- Kies glas met een zo laag mogelijke U-waarde voor beperking van het warmteverlies naar de buitenlucht .
- Beperk het kozijnpercentage van de glaswand door toepassing van metalen kozijnen of structurele beglazing zonder raamstijlen.
- Beperk het warmteverlies door toepassing van metalen kozijnen met thermische onderbreking en vermijd lineaire thermische bruggen.

In tabel 4.1.4 worden een vijftal glassoorten vergeleken.

NB: De hierin vermelde g-waarden en U-waarden gelden bij standaardcondities voor toepassing in gebouwen en kunnen daarom niet zonder meer worden gebruikt bij berekeningen –zie paragraaf 4.2.2.

De beste combinatie van hoge ZTA- en lage U-waarde biedt SGG Planitherm Solar glas 4/15/4 argon. De basale modellering in paragraaf 4.2 is gebaseerd op dit glastype.

Om praktische redenen (prijs en verkrijgbaarheid) is voor het fysieke onderzoek model gekozen voor SGG Diamant Planitherm Total low E zie paragraaf 4.4.1.

nr	glastype ↓	g-waarde (EN410) ⁴⁸	U-waarde (EN 763)	beoordeling	score
1	Blank dubbel glas	0,7	3,0	hoge U-waarde	0
2	HR ⁺⁺ glas	0,64	1,1	lage g-waarde	0
3	Lexan Thermoclear driewandig	0,68	2,0	vervuiling	0
4	SGG Planitherm Solar glas 4/15/4 argon	0,75	1,1	beste keus	+
5	SGG Diamant Planitherm Total low E	0,7	1,32	redelijke keus	+0

Tabel 4.1.4 – Vergelijking glassoorten

De glaswand is onderhevig aan corrosie en vervuiling, zowel aan de buitenzijde als binnen. Voor prestatiebehoud van een Zonneschoorsteen is corrosiebescherming en regelmatige reiniging van de glasvlakken daarom noodzakelijk.

Het aanbrengen van een anticorrosieve en vuilafstotende coating kan in belangrijke mate bijdragen aan prestatiebehoud van een Zonneschoorsteen en beperking van het schoonmaakonderhoud. Een dergelijke coating is onder de merknaam Vindico PV+ ontwikkeld voor fotovoltaïsche (PV) cellen (<http://www.vindico.info>). Deze coating heeft antireflecterende eigenschappen, waardoor tevens de energieprestatie wordt verbeterd. De fabrikant claimt bij gebruik van Vindico PV+ een verhoging van de lichttransmissie tot 5%. Wat de positieve invloed is van deze coating op de g-waarde volgens EN 410 van de glassoorten in tabel 4.1.4 is niet bekend.

In een Zonneschoorsteen hoge temperaturen optreden. Voor ongehard dubbel glas (2x6mm) wordt een maximum temperatuur van 80°C genoemd, die in een Zonneschoorsteen niet licht zal worden bereikt, maar in een Zonnefaçade wel kan worden overschreden –zie paragraaf 4.5.10. Om veiligheidsredenen kan het dan aan te bevelen zijn gehard glas toe te passen, waardoor de glaswand tevens molestbestendig wordt, zelfs tegen stenengooiers.

De uitvoering van de kozijnconstructie moet uiteraard zijn berekend op de uitzetting van het glas bij hogere temperaturen.

4.1.5 Warmtecapaciteit binnenwanden

Een zonneschoorsteen heeft een dubbelfunctie: (1) afzuigen van ventilatielucht en (2) oogsten van zonnewarmte. In het *Earth, Wind & Fire* concept zijn de drukverliezen in het afzuigstelsel zeer laag en de mogelijke besparingen op ventilatorenergie derhalve gering – zie paragraaf 4.5.10.

Zonnewarmte daarentegen kan een substantiële bijdrage leveren aan het warmtegebruik van een gebouw – zie de case study in hoofdstuk 7. Het ligt dan ook voor de hand het ontwerp van een zonneschoorsteen te optimaliseren op energieprestaties – zie ook paragraaf 4.5.10.

⁴⁸ Exclusief verhoging bij toepassing van Vindico+ - zie paragraaf 7.4.4.2

Een thermisch zware binnenwand stabiliseert de thermische trek op zomerse dagen met wisselende zonnestraling waardoor potentiële besparingen op de overigens geringe ventilatorenergie mogelijk zouden zijn –zie paragraaf 4.5.10. Anderzijds gaat de overdag in de binnenwand geaccumuleerde warmte als warmteverlies verloren als aan het einde van de werktijd de ventilatie wordt gestopt. Intuïtief werd daarom verondersteld dat een binnenwand met geringe warmtecapaciteit de beste energieprestatie zou geven.

Met behulp van dynamische simulaties is aangetoond dat een zonneschoorsteen, uitgevoerd met thermisch lichte binnenwand, inderdaad een betere energieprestatie heeft dan een uitvoering met zware wanden. Simulaties, uitgevoerd met ESP-r en met Matlab leveren globaal genomen dezelfde resultaten. Bij een optimale bedrijfswijze is, mede afhankelijk van de CWC en de hoogte, een jaarrendement bereikbaar van 55%...60% tegenover 35% - 50% bij een zware constructie (Spoel W. vd 2009, Trcka, M.2009).

De simulatieresultaten worden bevestigd door metingen in de fysieke testopstelling, die eveneens een rendement van 55% - 60% laten zien –zie paragraaf 4.4.2. Op basis hiervan is besloten het onderzoek uit te voeren op basis van een zonneschoorsteen met thermisch lichte absorber.

4.1.6 De absorber

Het oppervlak van de binnenwand, de absorber, moet de zonnestraling zo goed mogelijk absorberen en zo weinig mogelijk door emissantie verliezen. Deze eigenschappen worden uitgedrukt in respectievelijk de absorptiefactor α en de emissiefactor ε ; bij gelijke golflengte λ zijn deze aan elkaar gelijk; in formule

$$\alpha_{\lambda} = \varepsilon_{\lambda} \quad (4.1.6/1)$$

Waarin

α_{λ}	absorptiefactor bij golflengte λ	[-]
ε_{λ}	emissiefactor bij golflengte λ	[-]

Het is onmogelijk om in hetzelfde golflengtegebied een hoge absorptie te combineren met een lage emissie. Voor een spectraal selectief oppervlak is dit wel mogelijk; zie hierna (Francken, 1980, Heereveld en Vogelzand 1984)

Een zonneschoorsteen is idealiter een zwart lichaam, dat wordt gedefinieerd als een oppervlak dat alle straling, van alle golflengten, volledig absorbeert. Ook de zon is een “zwarte straler”.

De totale emissantie M_b van een zwarte straler wordt berekend met de *wet van Stephan –Boltzmann*:

$$M_b = \sigma \cdot T^4 \quad (4.1.6/2)$$

Waarin

M_b	totale emissantie van een zwarte straler	[W.m ⁻²]
σ	stralingsconstante $5,67 \cdot 10^{-8}$	[W.m ⁻² .K ⁴]
T	Absolute temperatuur	[K]

De emissantie van een zwart lichaam $M_{\lambda b}$ bij golflengte λ wordt berekend met *de wet van Planck*:

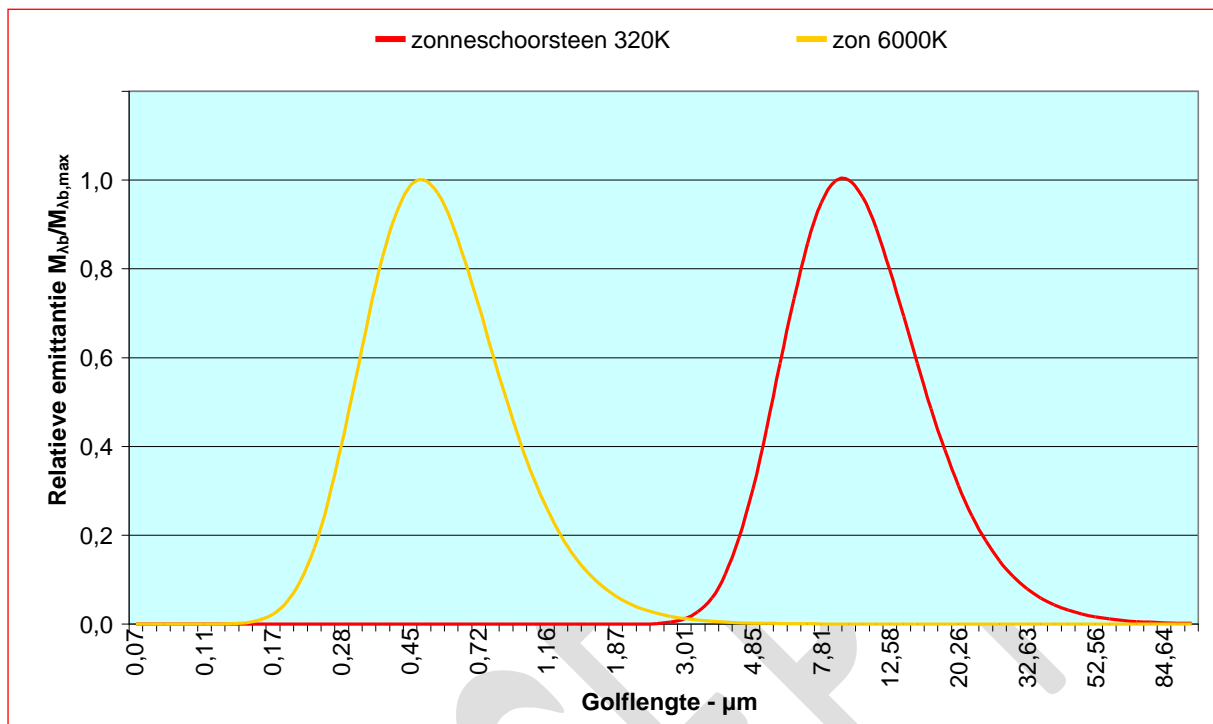
$$M_{\lambda b} = \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1} \quad (4.1.6/3)$$

Waarin

$M_{\lambda b}$	emissantie bij golflengte λ	[W.m ⁻²]
h	constante van Planck = $6,62 \cdot 10^{-34}$	[Js]
c	lichtsnelheid	[m.s ⁻¹]
k	constante van Boltzmann = $1,38 \cdot 10^{-23}$	[JK ⁻¹]
λ	golflengte van de straling	[μ m]

Formule 4.1.6/3 is berekend voor respectievelijk een temperatuur van 6000 K, de zon, en 320K, een zonneschoorsteen. Figuur 4.1.6 laat de stralingsspectra bij deze temperaturen zien, genormaliseerd op hun respectievelijke pieken. Het maximum voor de zonstraling ligt bij een golflengte van ca 0,5 μ m.

Voor de Zonneschoorsteen en Zonnefaçade ligt het maximum bij ca. 10 μm . De lijnen raken elkaar bij ca. 3 μm en er is nauwelijks overlap.



Figuur 4.1.6 – Relatieve emittantie zon en zonneshoorsteen

Een Zonneschoorsteen moet dus idealiter worden voorzien van een spectraal selectieve absorber met een zo hoog mogelijke gemiddelde absorptiefactor in het spectrum $\lambda < 3 \mu\text{m}$, en een zo laag mogelijke emissiefactor in het spectrum $\lambda > 3 \mu\text{m}$. Materialen die aan deze eis voldoen zijn ontwikkeld voor thermische zonnecollectoren en commercieel verkrijgbaar. De hierna volgende berekeningen en analyses zijn gebaseerd op het absorber materiaal Mirotherm[®]. Dit materiaal is vervaardigd van aluminium, aan beide zijden voorzien van een reflecterende coating. De gemiddelde optische eigenschappen zijn:

- $\alpha = 0,95 \pm 0,02$ voor zonstraling
- $\varepsilon = 0,05 \pm 0,02$ voor warmtestraling bij een temperatuur van 100°C.

In een Zonneschoorsteen is de absorber temperatuur meestal veel lager waardoor de emissiefactor in de praktijk ook lager zal zijn.

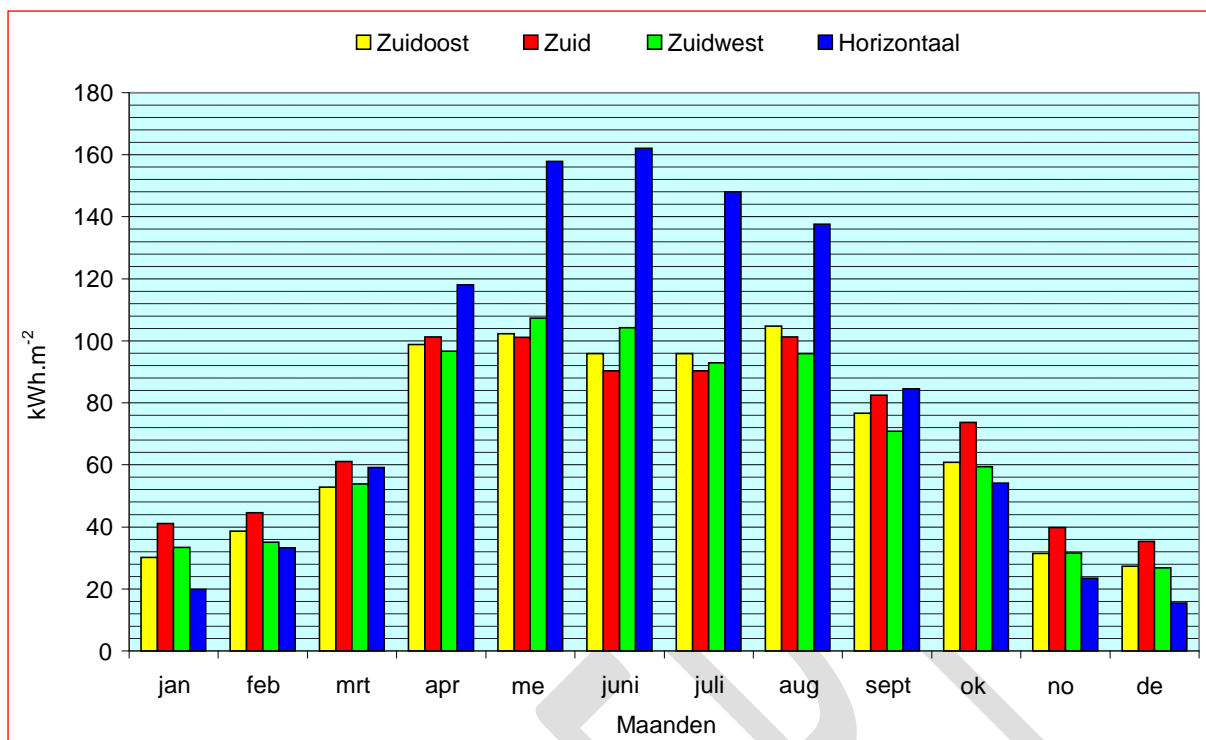
4.1.7 Isolatie

Om warmteverlies te beperken moeten de binnenwanden van een zonneshoorsteen goed worden geïsoleerd. De isolatiedikte wordt bepaald door het warmteverlies dat door de ontwerper toelaatbaar wordt geacht. De hoogte van de zonneshoorsteen, het luchtdebiet en de breedte/diepte verhouding zijn hiervoor belangrijke parameters.

Voor de basale modellering in paragraaf 4.2.8 is arbitrair uitgegaan van een isolatie met een R_c waarde van $5 \text{ m}^2 \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$. Bij een gemiddelde wandtemperatuur van 40°C en een ruimtetemperatuur in het aangrenzende gebouw van 20°C bedraagt het warmteverlies dan $\approx 4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, overeenkomend met 1% van de referentie zonnestraling van $400 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Gezien de geringe invloed is in het kader van het onderzoek niet onderzocht wat de meest economische isolatiedikte is

4.1.8 Optimale oriëntatie

Uitgangspunt voor de oriëntatie van een zonneshoorsteen is optimalisatie van de energieprestatie. Figuur 4.1.8/1 en tabel 4.1.8 laten de maand- en de jaarsommen zien van de totale zonnestraling op verschillend georiënteerde verticale vlakken. De berekeningen hiervoor zijn op basis van NEN 5060:2008 door VABI uitgevoerd. Ter vergelijking is ook de globale straling op het horizontale vlak aangegeven, die in de zomermaanden aanzienlijk groter dan die op verticale vlakken. Het valt op dat er maar geringe verschillen zijn tussen de straling op Zuidoost, Zuid, en Zuidwest oriëntatie.



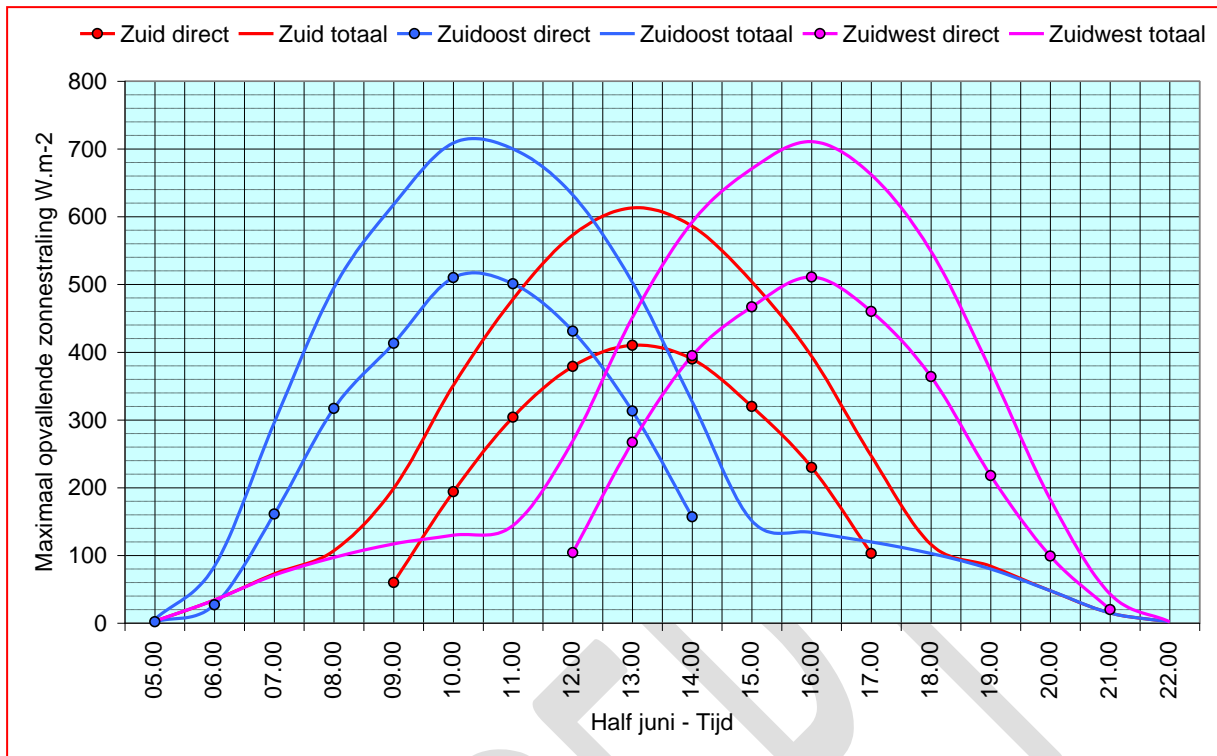
Figuur 4.1.8/1 – Maandsommen totale straling op verticale en horizontale vlakken volgens NEN 5060:2008

Maand	Oost	Zuidoost	Zuid	Zuidwest	West	Horizontaal
jan	14,7	30,1	41,1	33,4	17,1	19,9
februari	25,7	38,7	44,6	35,0	22,7	33,2
maart	38,6	52,8	61,1	53,8	39,6	59,2
april	81,1	98,8	101,3	96,7	79,4	118,0
mei	90,7	102,3	101,2	107,3	99,2	157,9
juni	94,3	95,8	90,3	104,2	104,3	162,1
juli	90,9	95,8	90,3	92,9	84,8	148,1
augustus	90,4	104,8	101,3	95,8	81,7	137,6
september	57,2	76,6	82,4	70,9	53,7	84,5
oktober	38,2	60,8	73,7	59,4	36,9	54,1
november	17,4	31,4	39,8	31,6	17,6	23,4
december	12,3	27,3	35,3	26,8	12,0	15,5
jaar totaal	651,5	815,2	862,4	807,9	648,8	1013,5
procentueel	75,5%	94,5%	100%	93,7%	75,2%	117,5%

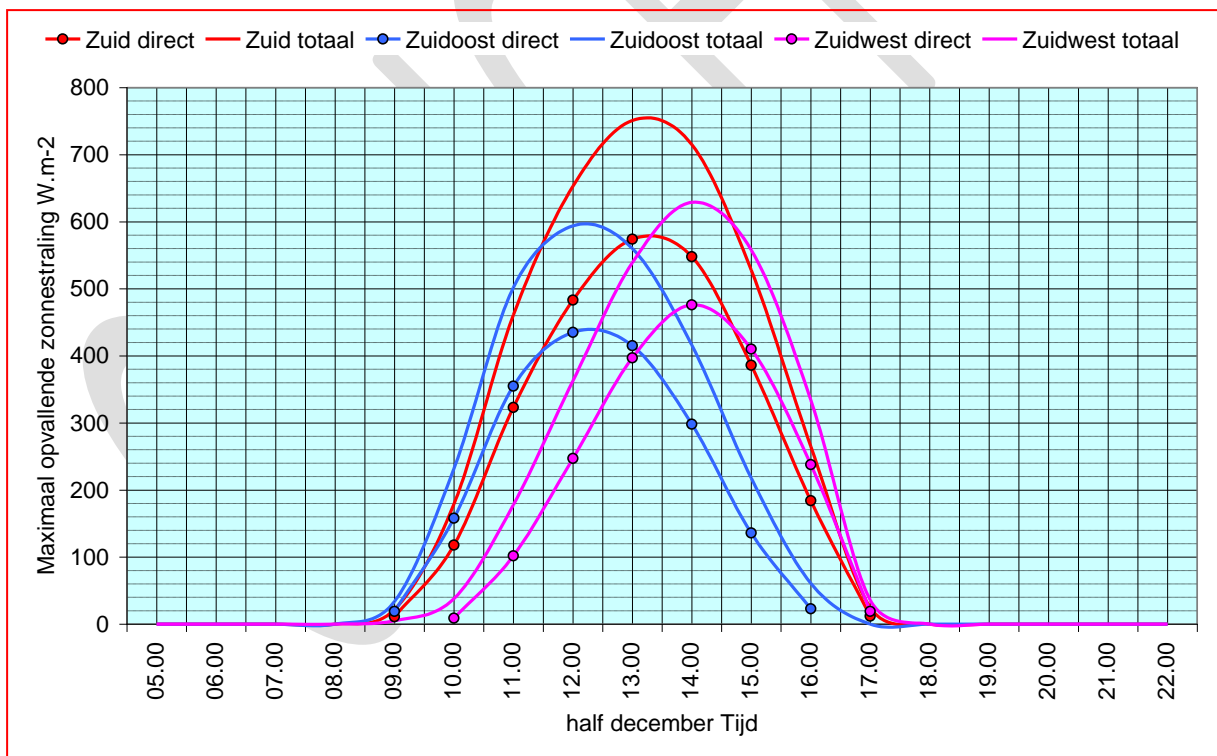
Tabel 4.1.8 – Maandsommen van de totale straling op horizontale en verticale vlakken volgens NEN 5060:2008 in kWh.m⁻²

De in het stookseizoen geogoste zonnearmte kan in principe direct voor de verwarming van het gebouw worden benut. De in het koelseizoen geogoste warmte moet daarentegen voor een langere termijn worden opgeslagen hetgeen met rendementsverliezen gepaard gaat – zie paragraaf 4.5.7. Winterse zonnestraling heeft daarom een hogere economische waarde dan die in de zomer. Mede hierdoor is de Zuid oriëntatie voor een zonneshoorsteen optimaal. De verschillen in opbrengst met een Zuidoost- en Zuidwest oriëntatie zijn echter gering.

De figuren 4.1.8/2. en 4.1.8/3 laten het dagelijks verloop zien de maximale zonnestraling in zomer en winter, voor respectievelijk half juni en half december (www.knmi.nl/klimatologie). Het verschil tussen de totale en de directe zonnestraling is de richtingonafhankelijke diffuse straling; de figuren laten zien dat het aandeel hiervan aanzienlijk is. Opvallend is de superieure straling op de zuid oriëntatie in de wintermaanden. De figuren gelden voor helder weer en de minimale atmosferische troebeling die in Nederland verwacht mag worden. Deze waarden zijn van belang voor het analyseren van het thermisch gedrag, de thermische trek en de temperatuurontwikkeling in een zonneshoorsteen.



Figuur 4.1.8/2 – Maximaal opvallende zonnestraling half juni voor de jaren 1986 t/m 2005



Figuur 4.1.8/3 – Maximaal opvallende zonnestraling half december voor de jaren 1986 t/m 2005

4.1.9 Morfologie

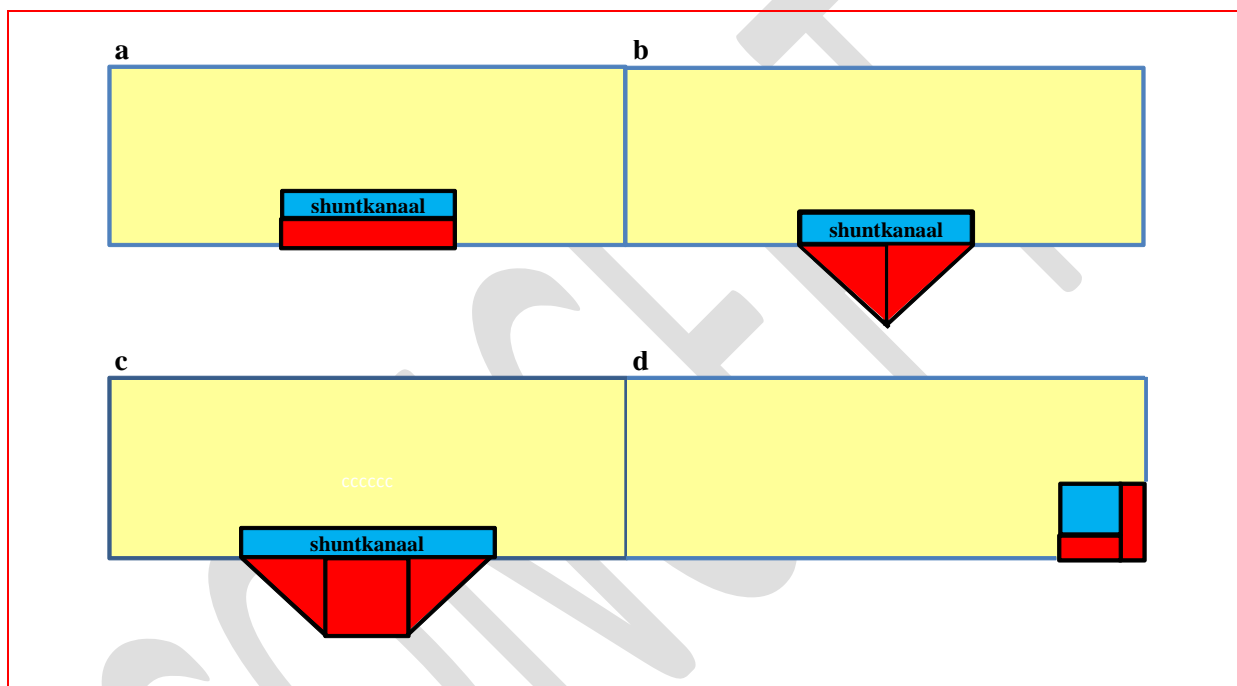
De dubbelfunctie van de zonneshoorsteen in het *Earth, Wind & Fire* concept, zoals aangegeven in paragraaf 4.1.1 is (1) afzuigen van ventilatielucht en (2) oogsten van zonnewarmte. Voor (1) is een zo stabiel mogelijke thermische trek tijdens bedrijfsuren van belang, voor (2) een optimale oriëntatie.

In het stookseizoen levert de zonneshoorsteen door het verschil tussen ruimtetemperatuur en buitentemperatuur voldoende en stabiele thermische trek, ook zonder zon. Bovendien levert de venturi-ejector in dit seizoen door de overwegend hogere windsnelheid vaak aanzienlijk

aerodynamische trek. Een eenzijdig op het zuiden georiënteerde zonneshoorsteen voldoet dan aan beide functie-eisen (1) en (2).

Voor een stabiele thermische trek in het koelseizoen moet de gemiddelde schoorsteentemperatuur tijdens bedrijfsuren zoveel mogelijk boven de buitentemperatuur liggen, waardoor de bedrijfstijd van de hulpventilator wordt beperkt. De zoninstraling moet dan ook zo constant mogelijk zijn, hetgeen kan worden bevorderd door een meervoudige oriëntatie ZO/ZW. In het koelseizoen is het bovendien van belang dat de zoninstraling min of meer congruent is met het verloop van de buitentemperatuur tijdens de dag. Bij oplopende buitentemperatuur tijdens de ochtend moet de schoorsteentemperatuur idealiter navenant stijgen, waardoor de thermische trek min of meer constant blijft. Dit effect kan worden bereikt met een zonneshoorsteen die vanuit het oosten wordt aangestraald wordt- zie ook paragraaf 4.2.2.

De morfologie van een zonneshoorsteen is mede afhankelijk van de oriëntatie van het gebouw. Figuur 4.1.9 laat enkele uitvoeringsvormen van zonneshoorstenen zien.



Figuur 4.1.9 – Uitvoeringsvormen van een zonneshoorsteen

Het gevelmodel (a) ligt binnen het gebouw met de glaswand in de gevellijn maar kan ook als erker worden uitgebouwd. Een oriëntatie op het Zuiden levert de grootste opbrengst. Dit model heeft een goede energetische prestatie maar door de eenzijdige oriëntatie is de thermische trek gedurende de dag niet stabiel.

Het meervoudig ZO/ZW georiënteerde piramidemodel (b) is een eenvoudige en effectieve oplossing om bij gelijkblijvende gevelbreedte de energieopbrengst en de stabiliteit van de thermische trek te verbeteren. In deze configuratie zijn in feite twee afzonderlijke zonneshoorstenen parallel aangesloten op één shuntkanaal.

Het trapeziummodel (c) is een variant op het piramidemodel. Door toevoeging van een vlak op het zuiden wordt geprofiteerd van de hoge stralingsintensiteit op deze oriëntatie.

Het hoekmodel (d) kan eveneens zoninstraling op meerdere oriëntaties opvangen. Een ZO/ZW oriëntatie biedt een redelijk stabiele zoninstraling gedurende een groot deel van de dag. Bij gebouwen met Noord/Zuid oriëntatie kan dit type ook als tweelingmodel worden uitgevoerd op beide hoeken van de zuidgevel.

Er zijn nog vele andere mogelijkheden voor de architectonische integratie van een zonneshoorsteen in gebouwen, o.a. de combinatie met een (nood)trappenhuis.

Bij meervoudig georiënteerde zonneshoorstenen moet aandacht worden besteed aan de ongelijkmatige verwarming van de verschillende vlakken door directe zonnestraling en de hierdoor veroorzaakte snelheidsverschillen en de inherente turbulenties van de luchtstroom. In het kader van het onderzoek is dit aspect niet verder onderzocht.

Van het gevelmodel, het piramidemodel en het trapeziummodel zijn in paragraaf 4.5.6 de prestaties geanalyseerd. Op basis hiervan kunnen voor elke willekeurige configuratie de prestaties worden berekend. Een buitencategorie van de mogelijke uitvoeringsvormen is de zonnegevel of zonnefaçade waarmee aanzienlijk hogere energieprestaties kunnen worden gerealiseerd dan met een zonneshoorsteen –zie paragraaf 4.1.10.

4.1.10 Zonnefaçade

Een Zonnefaçade is een gevel bedekkende zonneshoorsteen, die slechts wordt doorbroken door de ramen die via raamkasten de directe verbinding vormen met buiten.

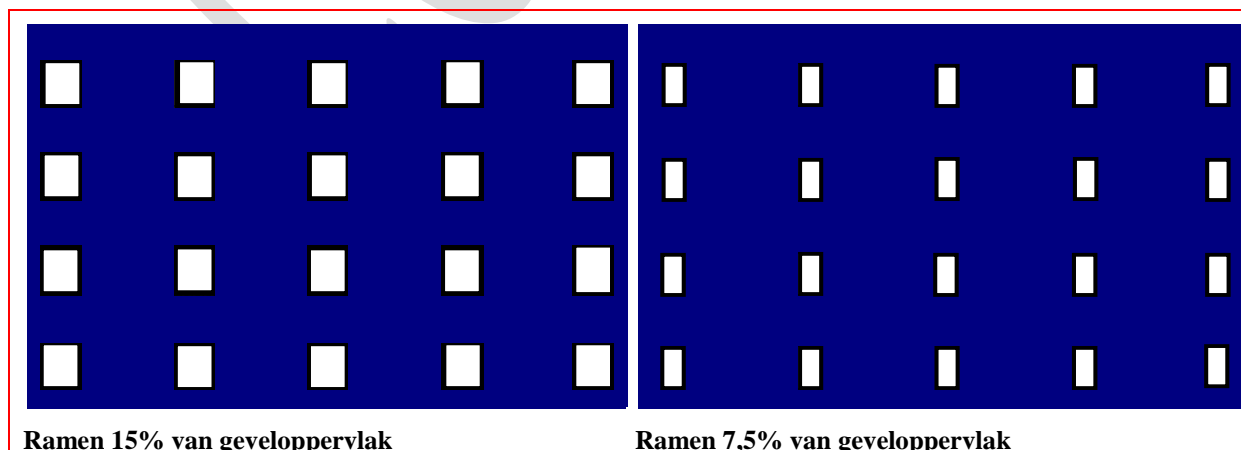
Het effectieve oppervlak, en daarmee de energieprestatie van de Zonnefaçade wordt bepaald door de grootte van de raamopeningen. Bij de bepaling hiervan moet een compromis worden gevonden tussen gedeeltelijk tegengestelde eisen en belangen, te weten:

- Daglicht – Grote ramen bieden in principe veel daglicht, waardoor op kunstverlichting en energiekosten kan worden bespaard.
- Koellast – Grote ramen brengen in principe een hogere thermische belasting met zich mee dan kleine ramen. Hierdoor wordt van de klimaatinstallatie meer capaciteit gevraagd en stijgen de energiekosten, tenzij concessies worden gedaan aan de eisen aan het binnenmilieu.
- Uitzicht – Kleine ramen kunnen in principe het uitzicht op de buitenwereld beperken, en daarmee het comfort van mensen beïnvloeden. Dit is mede afhankelijk van wat de buitenwereld aan uitzicht te bieden heeft.
- Kosten – Ramen zijn in principe duurder dan ondoorzichtige geveldelen.
- Architectuur - Transparantie en Introversie vormen tegengestelde belangen.

Het Bouwbesluit stelt in afdeling 3.20 voor nieuwbouw minimum eisen aan het daglicht. Voor kantoorfuncties in een verblijfsgebied zijn de grenswaarden van het equivalente daglichtoppervlak 2,5% van het vloeroppervlak met een minimum van 0,5 m² in elke verblijfsruimte. Bij een verdiepinghoogte van 3,6 m en een vertrekdiepte van 5,4 m is het minimum raamoppervlak dan ca. 4% van het geveloppervlak.

Het Arbobesluit geeft in artikel 6.4 aan dat het gezamenlijk oppervlak van de lichtopeningen ten minste 1/20 van het vloeroppervlak van een ruimte moet bedragen. Als percentage van het geveloppervlak komt dit neer op ca. 7,5%, ruwweg 2 keer zo groot als volgens het Bouwbesluit. Een hogere waarde wordt echter aanbevolen.

Figuur 4.1.10 geeft een beeld van de transparantie van een zonnegevel met respectievelijk 15% en 7,5% raamoppervlak.



Figuur 4.1.10 – Zonnefaçade

Abgebeeld is een gevelfragment van 4 verdiepingen hoog en 9 modules breed met een bruto oppervlak van ca. 233 m². Hierin zijn 20 ramen opgenomen van respectievelijk 1,8*1,0 m (15%) en 1,5*0,6 m (7,5%).

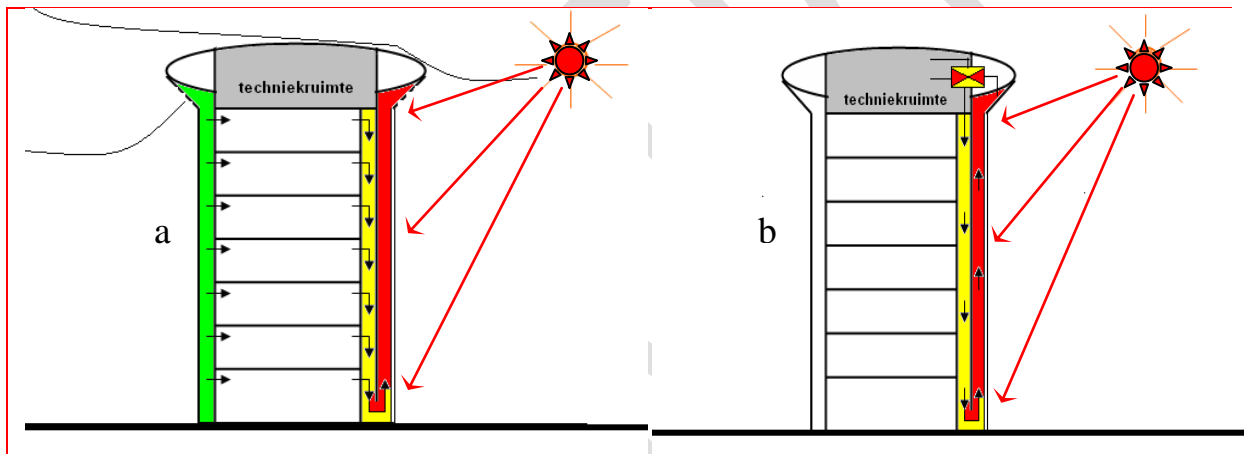
In verband met schoonmaakonderhoud van de glaswand van binnenuit zal de diepte van de zonnespouw ca. 0,65 m moeten bedragen, waardoor diepe raamkasten ontstaan. Het glas van de ramen kan aan de buitenzijde of aan de binnenkant van de raamkasten worden geplaatst.

Aandacht moet worden besteed aan de ligging en de aansluiting van het shuntkanaal en van het verzamelkanaal op de zonnegevel. De case study in hoofdstuk 7 geeft hiervan een voorbeeld.

4.1.11 Shuntkanaal

De thermische trek van een schoorsteen is evenredig met de hoogte. Als de afzuigkanalen op de verdiepingen rechtstreeks op de zonneschoorsteen zouden zijn aangesloten wordt de beschikbare trek voor de hogere verdiepingen steeds kleiner. Om ervoor te zorgen dat de onderdrukcondities voor alle verdiepingen ongeveer gelijk zijn is een shuntkanaal nodig –figuur 4.1.11 a. Dit shuntkanaal maakt het tevens mogelijk een zonneschoorsteen voor warmteterugwinning buiten de bedrijfsuren te gebruiken –figuur 4.1.11b.

Bij lage buitentemperaturen en afwezigheid van zonnestraling kan ook worden overwogen met de hulpventilator lucht rechtstreeks af te zuigen via het shuntkanaal, waardoor warmteverlies in de zonneschoorsteen wordt voorkomen.



Figuur 4.1.11 – Principe luchtafzuig en recirculatie via shuntkanaal

4.2 Basale modellering

4.2.1 Inleiding

Een zonneschoorsteen kan worden beschouwd als een warmtewisselaar met een primair medium, zonnearmte, een secundair medium, lucht en een warmtewisselend oppervlak, de glaswand en de binnenwanden. De warmteoverdracht door convectie en straling is een gecompliceerd proces, dat zich niet gemakkelijk in eenduidige algoritmes vast laat leggen. Het onderzoeksrapport geeft van dit proces een uitvoerige analyse.⁴⁹

4.2.2 De g-waarde van glas

Bij de basale modellering wordt uitgegaan van de door de fabrikant van het glas opgegeven g-waarde van 0,7 –zie paragraaf 4.1.4. Het is de vraag of deze waarde zonder meer voor een zonneschoorsteen kan worden gehanteerd. De condities in een zonneschoorsteen komen namelijk niet overeen met de in NEN-EN 410:2010 vermelde referentiecondities. Aangenomen is dat zonder grote fouten kan worden gewerkt met de g-waarde van 0,7.

De g-waarde van glas wordt in hoge mate beïnvloed door reflectie van zonnestralen, die afhankelijk is van de invalshoek van de zon. Figuur 4.2.2, berekend met behulp van het Window Information System

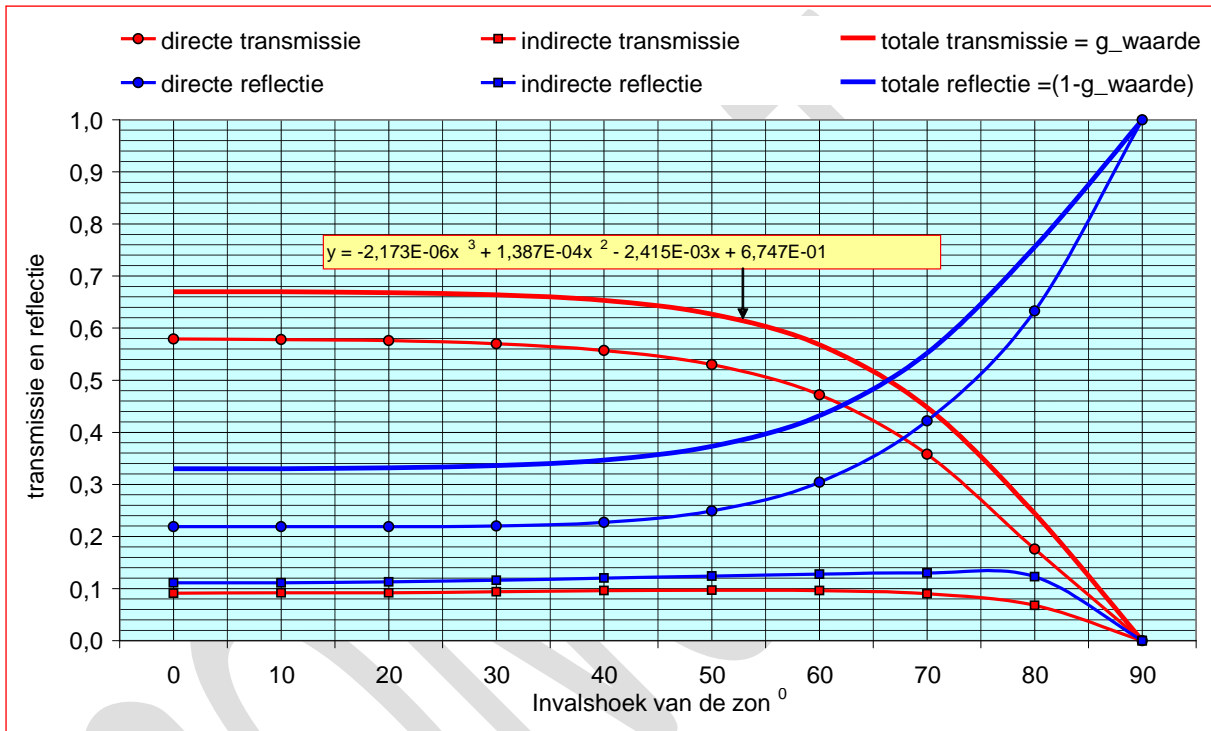
⁴⁹ Zie onderzoeksrapport deel I (Bronsema 2012)

WIS (www.windat.org), brengt deze relatie voor het glastype HR 4-16-4 argon in beeld. De indirecte component is de reflectie op het binnenblad van dubbel glas.

Bij helder weer wordt een zonneshoorsteen van de vroege morgen tot in de late namiddag of avond door de zon beschenen. De invalshoek van de zonnestrallen is aanvankelijk zeer groot, neemt gedurende de dag af tot een minimum bij de hoogste zonnestand, en wordt daarna weer groter. Tot een invalshoek van 40° blijft de g-waarde redelijk constant, maar neemt daarna af.

Voor een zuid georiënteerde zonneshoorsteen, bijvoorbeeld volgens figuur 4.1.5a, brengt de lage g-waarde in de ochtenduren een lagere thermische trek met zich mee, hetgeen reden kan zijn om voor een meervoudig georiënteerde zonneshoorsteen te kiezen –zie paragraaf 4.1.9.

Zonnestraling bestaat uit directe + diffuse straling –zie paragraaf 4.1.8. Diffuse straling is uiteraard niet richting afhankelijk.



Figuur 4.2.2 – Transmissie en Reflectie bij invalshoeken van 0° - 90°

De g-waarde is de fractie van de totale transmissie van zonnestraling ten opzichte van de opvallende straling. Deze fractie wordt gedeeltelijk geabsorbeerd in de binnenste ruit van de glaswand. In het dynamische simulatiemodel ESP-r -zie paragraaf 4.3.4- wordt dit automatisch tot uitdrukking gebracht maar in het eenvoudige rekenmodel moet de g-waarde worden gesplitst in twee factoren: zonnewarmte geabsorbeerd in de glaswand ($g \cdot f_1$) en zonnewarmte geabsorbeerd in de absorber ($g \cdot f_2$). De factoren f_1 en f_2 zijn bepaald op basis van metingen in de fysieke testopstelling op $f_1 = 0,25$ en $f_2 = 0,75$ - zie paragraaf 4.4.1 . Ze kunnen ook worden berekend met het computerprogramma WIS.

4.2.3 Referentiecondities

Voor het ontwerp van zonneshoorstenen is het van belang referentiecondities vast te stellen. Deze worden gebruikt voor de beoordeling en de onderlinge vergelijking van de thermische prestaties en de energieprestaties van zonneshoorstenen.

Voor de thermische prestaties wordt ervan uitgegaan dat een zonneshoorsteen bij gemiddelde condities van buitentemperatuur en stralingsflux in de zomermaanden zo stabiel mogelijk moet kunnen functioneren als afzuigstelsel van de gebouwventilatie. Deze gemiddelde condities zijn ontleend aan het De Bilt Referentiejaar met uurgemiddelde weergegevens- zie tabel 4.2.3

(www.knmi.nl/klimatologie).

Maand →		juni	juli	augustus
Gemiddelde buitentemperatuur θ_e °C	08.00 – 18.00	17,9	19,2	20,1
Gemiddelde globale straling Φ_{zon} W.m ⁻²	08.00 – 18.00	383	398	357

Tabel 4.2.3 – Gemiddelde buitentemperatuur en globale straling

Op basis hiervan zijn als referentieconditie de volgende waarden gekozen:

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

Bij buitentemperaturen $> 20^{\circ}\text{C}$ is de stralingsflux veelal groter dan de 400 W.m^{-2} waarop de zonneshoorsteen is gedimensioneerd, waardoor voor wat betreft de thermische trek de hogere buitentemperatuur wordt gecompenseerd door de hogere schoorsteentemperatuur.

4.2.4 Convectieve warmteoverdracht

4.2.4.1 Inleiding

De in een Zonneshoorsteen geabsorbeerde zonnewarmte wordt door convectie aan de lucht afgegeven. Deze convectieve warmteoverdracht bestaat uit twee componenten, vrije- of natuurlijke convectie en gedwongen convectie, tezamen gemengde convectie genoemd.

Vrije, of natuurlijke convectie treedt op ten gevolge van dichtheidsverschillen in lucht, veroorzaakt door temperatuurverschillen tussen de wanden en de lucht. Gedwongen convectie komt tot stand door geforceerde luchtbeweging langs de wanden, in een zonneshoorsteen veroorzaakt door de thermische trek.

De convectieve warmteoverdracht in een Zonneshoorsteen is een gecompliceerd verschijnsel. De convectieve warmteoverdrachtscoëfficiënt CWC ⁵⁰ is moeilijk te definiëren, mede als gevolg van de onbekende turbulentie-intensiteit, mede als gevolg van de ongelijkmatige luchtstroming tengevolge van de wisselende stralingsflux van de rondgaande zon. (Advanced Thermal Solutions 2009). Een uitgebreid literatuuronderzoek en een eigen zoektocht⁵¹ hebben geen sluitend algoritme voor de berekening van de CWC opgeleverd. Voor de berekening van de energieprestaties van een zonneshoorsteen is dit verrassenderwijs van ondergeschikt belang. Bij de berekening van de optredende temperaturen van glas en absorber moet met deze onzekerheid rekening worden gehouden – zie paragraaf 4.5.10.

Convectieve warmteoverdracht wordt weergegeven met de vergelijking:

$$\Phi_c = h_{c,m} \cdot A \cdot (\theta_w - \theta_{\infty}) \quad (4.2.4/1)$$

Waarin:

Φ_c	convectieve warmtestroom	[W]
$h_{c,m}$	warmteoverdrachtscoëfficiënt (CWC gemengde convectie)	[W.m ⁻² .K ⁻¹]
A	wandoppervlak	[m ²]
w	temperatuur wandoppervlak	[°C]
θ_{∞}	luchttemperatuur in de hoofdstroom	[°C]

De CWC voor gemengde convectie $h_{c,m}$ is een functie van verschillende variabelen, zoals temperatuurverschillen, lichtsnelheid, laminaire of turbulente stroming, turbulentie intensiteit, viscositeit, warmtegeleidingscoëfficiënt, en geometrie van de wand, uitgedrukt in de kengetallen van Nusselt, Grashof, Prandl, Raleigh en Reynolds.

4.2.4.2 Bepalende factoren

Karakteristieke lengte L

In de genoemde kengetallen speelt de karakteristieke lengte L een belangrijke rol. Een zonneshoorsteen kan in principe worden beschouwd als een kanaal maar ook als een besloten ruimte

⁵⁰ Naar analogie van de Convective Heat Transfer Coëfficiënt CHTC wordt in het navolgende de afkorting CWC gebruikt

⁵¹ Zie onderzoeksrapport deel I (Bronsema 2012)

begrensd door vier verticale vlakken. De karakteristieke lengte L in de genoemde kengetallen wordt voor deze gevallen verschillend gedefinieerd. Voor een zonneshoorsteen is het niet a priori duidelijk of van een kanaal of van een open ruimte kan worden gesproken.

Een zonneshoorsteen van beperkte afmetingen met een duidelijk ontwikkelde luchtstroming kan als een kanaal worden beschouwd. Een zonneshoorsteen met grote doorsnede en een weinig ontwikkelde luchtstroming kan daarentegen ook worden opgevat als een besloten ruimte begrensd door vier verticale vlakken. Het getal van Rayleigh Ra en de hoogte-breedteverhouding H/D_h , met D_h als hydraulische diameter zijn hiervoor bepalend (Leal, V. et al 2004). Als het getal van Rayleigh $Ra > 10^4$ kan een zonneshoorsteen worden beschouwd als een kanaal en dit is normaliter altijd het geval.

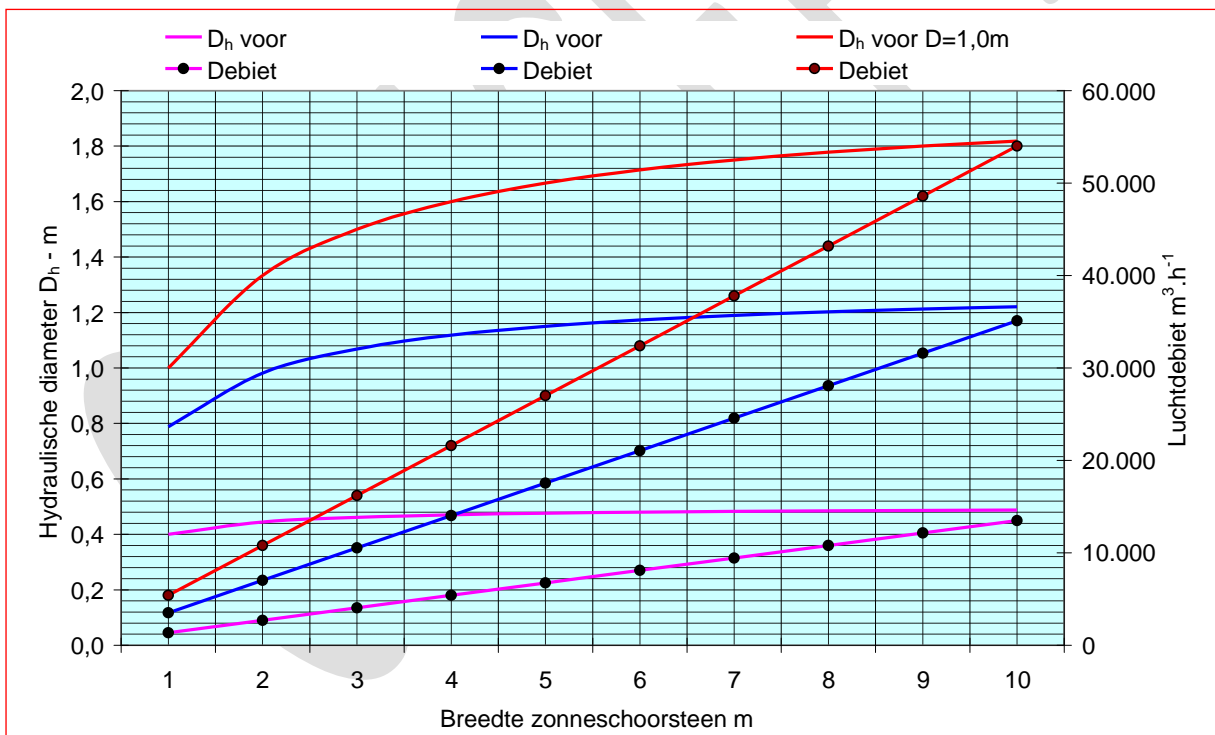
Hydraulische diameter

Als karakteristiek afmeting L geldt de hydraulische diameter D_h van het kanaal, gedefinieerd door de formule

$$D_h = \frac{2 \cdot a \cdot b}{a + b} \quad (4.2.4/2)$$

Waarin a en b staan voor de breedte en diepte van de zonneshoorsteen.

De hydraulische diameter van zonneshoorstenen is meestal $< 2,0$ m. Zie als voorbeeld figuur 4.2.4/1 die hydraulische diameters weergeeft van zonneshoorstenen, bij diepten van respectievelijk 0,25 – 0,65 en 1,0 m, een lichtsnelheid van $1,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, en luchtdebieten tot $55.000 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$. De maximale hydraulische diameter ligt bij $\approx 1,8$ m. Stel dat het betreffende gebouw 12 bouwlagen heeft en een hoogte van 42 m, dan is $H/D_h = 23$.



Figuur 4.2.4/1 – Hydraulische diameter D_h en luchtdebiet als functie van de breedte bij $w = 1,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

Laminaire of turbulente stroming

Het getal van Reynolds – Re – is een dimensieloos getal dat wordt gebruikt om te bepalen of een stroming laminair is of turbulent, in formule

$$Re = \frac{w \cdot L}{\nu} \quad (4.2.4/3)$$

Waarin

w	lichtsnelheid	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$
L	karakteristieke lengte	$[\text{m}]$

ν kinematische viscositeit [m².s⁻¹]

Een stroming is laminair bij $Re < \approx 2300$ en turbulent bij $Re > \approx 3500$

De luchtsnelheid in een zonneshoorsteen die ontworpen is voor afzuiging van een gebouw is normaliter $\geq 1,0 \text{ m.s}^{-1}$. De kinematische viscositeit voor lucht van 20⁰.....80⁰C $\approx 15.10^{-6}$21.10⁻⁶ m².s⁻¹. Formule (4.2.4/3) laat zien dat zelfs bij een zeer lage luchtsnelheid in een zonneshoorsteen $Re \gg 3.500$ zal zijn, zodat uitgegaan kan worden van turbulente stroming.

Wandruwheid

Warmteoverdracht in een turbulente stroming wordt door twee mechanismen beheerst, namelijk (1) warmtegeleiding door de viskeuze grenslaag en (2) diffuse energieoverdracht van de rand van de grenslaag naar de hoofdstroom; deze heeft de grootste invloed. De diffuse energieoverdracht is evenredig met de turbulentieproductie nabij de rand van de viskeuze grenslaag. Deze turbulentieproductie is afhankelijk van het snelheidsverschil van het fluïdum aan de rand van de grenslaag en in de hoofdstroom (Aicher & Martin 1997).

De wandruwheid van een zonneshoorsteen heeft invloed op de CWC tussen wanden en lucht en daarmee op de temperaturen van glas en absorber. De invloed op de energieprestatie is echter gering – zie paragraaf 4.2.4.4.

In de analyse van vrije, gedwongen en gemengde convectie volgens het Handboek Installatietechniek (ISSO 2000) en Recknagel (Recknagel 2000) speelt de wandruwheid geen rol en dat lijkt gezien de geringe invloed op de energieprestatie verantwoord.

4.2.4.3 Convectieve warmteoverdrachtscoëfficiënt (CWC)

Vrije convectie

Het Handboek Installatietechniek en Recknagel geven een heldere uiteenzetting van de fysische wetmatigheden die bepalend zijn voor de warmteoverdracht en berekeningsalgoritmes voor de warmteoverdrachtscoëfficiënt $h_{c,v}$. Op basis hiervan is de volgende benaderingsformule ontwikkeld

$$h_{c,v} = 1,51 \left(\theta_w - \theta_\infty \right)^{0,33} \quad (4.2.4/4)$$

Waarin

$h_{c,v}$	warmteoverdrachtscoëfficiënt (vrije convectie)	[W.m ⁻² .K ⁻¹]
θ_w	temperatuur wandoppervlak	[⁰ C]
θ_∞	luchttemperatuur in de hoofdstroom	[⁰ C]

Gedwongen convectie

Op basis van het Handboek Installatietechniek en Recknagel is ook hiervoor een benaderingsformule ontwikkeld. Voor hydraulische diameters $1,0 < D_h < 2,0$ geldt bij benadering

$$h_{c,g} = 4.w^{0,8} \quad (4.2.4/5)$$

Waarin

$h_{c,g}$	warmteoverdrachtscoëfficiënt (gedwongen convectie)	[W.m ⁻² .K ⁻¹]
w	luchtsnelheid	[m.s ⁻¹]

Gemengde convectie

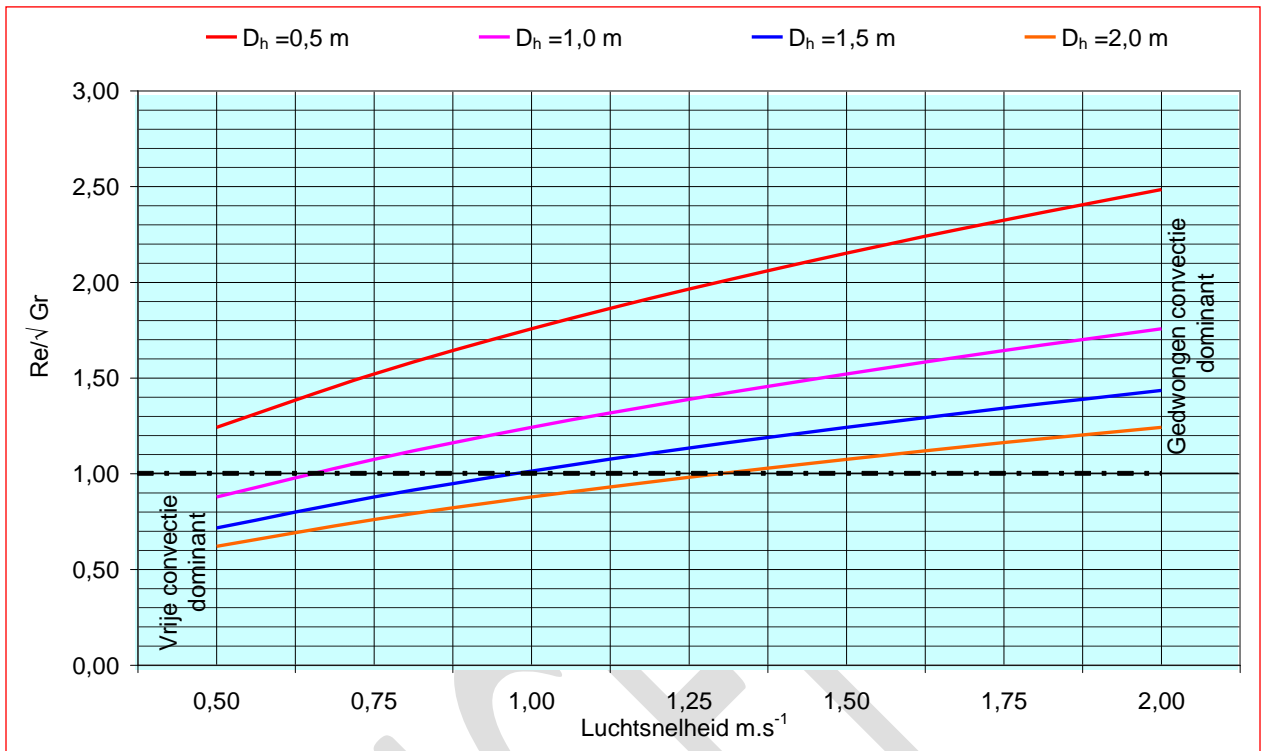
Berekeningen van gemengde convectie worden in het algemeen als uiterst gecompliceerd aangemerkt. Het Handboek Installatietechniek geeft als globale regel:

$$Re \ll \sqrt{Gr} \quad \text{vrije convectie overheerst}$$

$$Re > \sqrt{Gr} \quad \text{gedwongen convectie overheerst}$$

Voor luchtsnelheden van 0,5...2,0 m.s⁻¹ en hydraulische diameters D_h van 0,5 – 1,0 – 1,5 en 2,0 m is het quotiënt Re/\sqrt{Gr} in figuur 4.2.4/2 aangegeven. Voor waarden $\ll 1$ overheerst de vrije convectie;

voor waarden > 1 overheerst de gedwongen convectie. De figuur maakt duidelijk dat voor grotere luchtsnelheden en kleinere hydraulische diameters gedwongen convectie overheerst. Voor kleinere luchtsnelheden en grotere hydraulische diameters is de vrije convectie dominant.



Figuur 4.2.4/2 – Quotiënt Re/\sqrt{Gr} als functie van luchtsnelheid en hydraulische diameter

Recknagel geeft voor gemengde convectie de volgende benaderingsformule

$$h_{c,m} = \sqrt[3]{h_{c,v}^3 + h_{c,g}^3} \quad (4.2.4/6)$$

Deze vergelijking is een toepassing van de algemene mengformule van Churchill-Usagi – zie hierna.

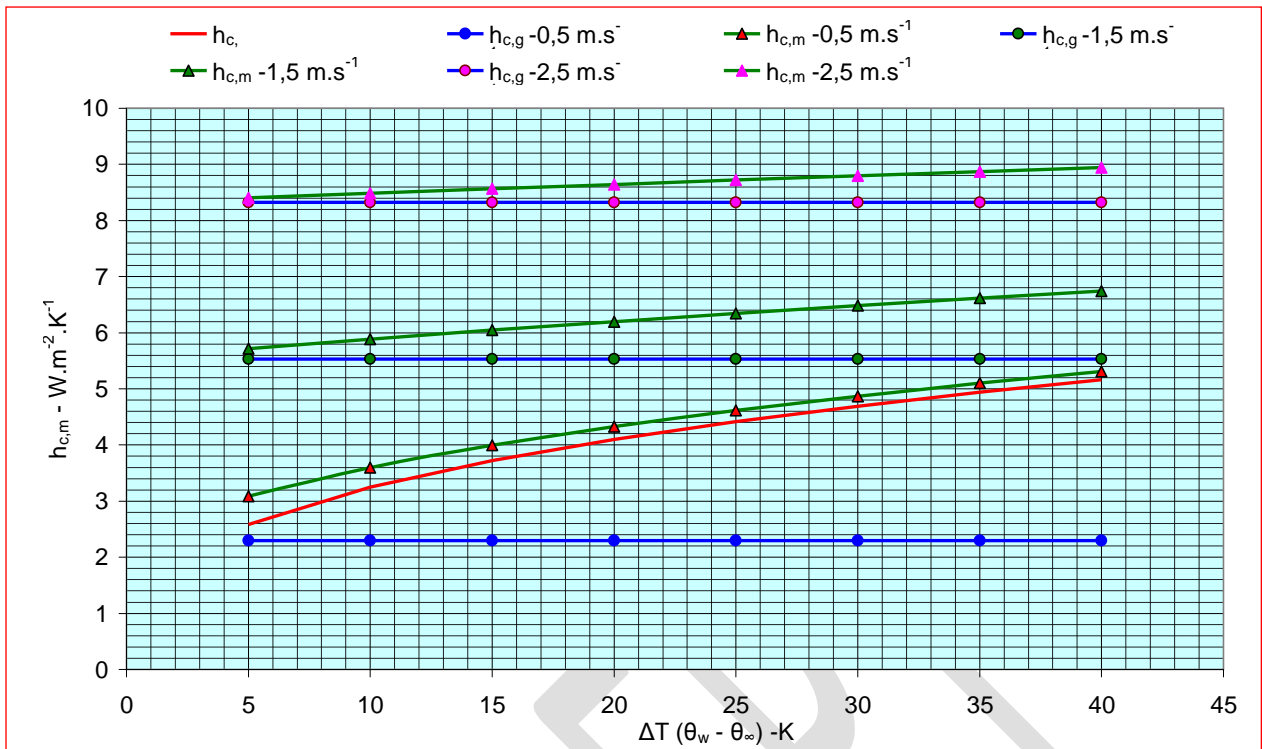
Beausoleil-Morrison (2000, 2001) heeft een diepgaande analyse gemaakt van algoritmen voor warmteoverdracht voor gebruik in het dynamische gebouwsimulatieprogramma ESP-r. Voor de “menging” van vrije convectie en gedwongen convectie gebruikt hij de algemene mengformule toe van Churchill en Usagi (1974)

$$Y = \left(X^a + Z^a \right)^{1/a}$$

Waarin Y de mengvorm is van de onafhankelijke variabelen X en Z en (a) de Churchill-Usagi mengcoëfficiënt, een empirische constante, waarvoor in het geval van convectiestromingen een waarde van 3 wordt aanbevolen (Incropera en Dewitt 1985).

Voor warmteoverdracht bij gemengde convectie komt deze mengformule overeen met formule (4.2.4/6) van Recknagel. Een uitwerking van deze formule is grafisch weergegeven in figuur 4.2.4/3. Bij een lage luchtsnelheid van bijvoorbeeld $0,5 \text{ m.s}^{-1}$ is de warmteoverdracht door vrije convectie duidelijk dominant; de snelheidscomponent heeft maar een geringe invloed. Bij een hoge luchtsnelheid van bijvoorbeeld $2,5 \text{ m.s}^{-1}$ daarentegen is de warmteoverdracht door gedwongen convectie duidelijk dominant; de vrije convectiecomponent heeft hier maar weinig invloed.

Het onderzoek van Beausoleil-Morrison heeft betrekking op warmteoverdracht en stromingen in een besloten ruimte en gaat daardoor voorbij aan de verschillen met de warmteoverdracht in een zonneshoorsteen, die meestal als een kanaal kan worden opgevat- zie paragraaf 4.2.4.2



Figuur 4.2.4/3 – Warmteoverdrachtscoëfficiënten gemengde convectie volgens mengformule (4.2.4/6)

Voorlopige conclusies gemengde convectie

De warmteoverdrachtscoëfficiënten voor vrije convectie en gedwongen convectie, berekend volgens het Handboek IT en Recknagel komen goed overeen. Beausoleil-Morrison toont aan dat de berekening van gemengde convectie volgens formule (4.2.6) wetenschappelijk verantwoord is. Voor gemengde convectie zou daarom een formule kunnen worden voorgesteld waarin vrije convectie volgens formule (4.2.4/4) en gedwongen convectie volgens formule (4.2.4/5) worden gemengd volgens de formule

$$h_{c,m} = \left(\left[5 \left(\theta_w - \theta_\infty \right)^{0,33} \right]^3 + \left[w^{0,8} \right]^3 \right)^{1/3} \quad (4.2.4/7)$$

Evaluatie in de fysieke testopstelling

Bij metingen in de fysieke testopstelling is gebleken dat formule (4.2.4/7) te lage waarden voor $h_{c,m}$ oplevert –zie paragraaf 4.4.2. Een betere overeenstemming wordt bereikt door deze formule als volgt te modificeren

$$h_{c,m} = \left[\theta_w - \theta_\infty \right] + \left[w \right]^{7/3} \quad (4.2.4/8)$$

De invloed van de luchtsnelheid is hierin drastisch vergroot ten koste van de invloed van de vrije convectie. Als een zonneshoorsteen wordt ontworpen op een luchtsnelheid $\geq 1,0$ à $1,5 \text{ m.s}^{-1}$ is de invloed van de vrije convectie in formule (4.2.4/8) gering en kan de CWC uitsluitend worden gebaseerd op de luchtsnelheid volgens de eenvoudige formule $h_{c,m} = 8 \cdot w$, die dus geldt voor het fysieke testmodel met een kleine hydraulische diameter van 0,44m. Voor grotere zonneshoorstenen met een kleiner aandeel gedwongen convectie zou deze formule te hoge waarden voor $h_{c,m}$ kunnen opleveren. Om dit te compenseren wordt voorgesteld formule (4.2.4/9) te gebruiken, die vrijwel overeenkomt met de op basis van de beschouwingen van Aicher & Martin (Aicher & Martin 1997) opgestelde formule⁵²

$$h_{c,m} = 7,65 \cdot w \quad (4.2.4/9)$$

⁵² Zie onderzoeksrapport deel I (Bronsema 2012)

Deze formule is gebruikt voor de simulaties van de zonneshoorsteen in het Nederlandse klimaat –zie paragraaf 4.5.10.

Gemengde convectie volgens Molina & Maestre

Voor de kalibratie van het ESP-r simulatiemodel – zie paragraaf 4.4.3- is voor de convectieve warmteoverdracht in de zonneshoorsteen de empirische functie (4.2.4/8) gebruikt (Molina & Maestre 2002)

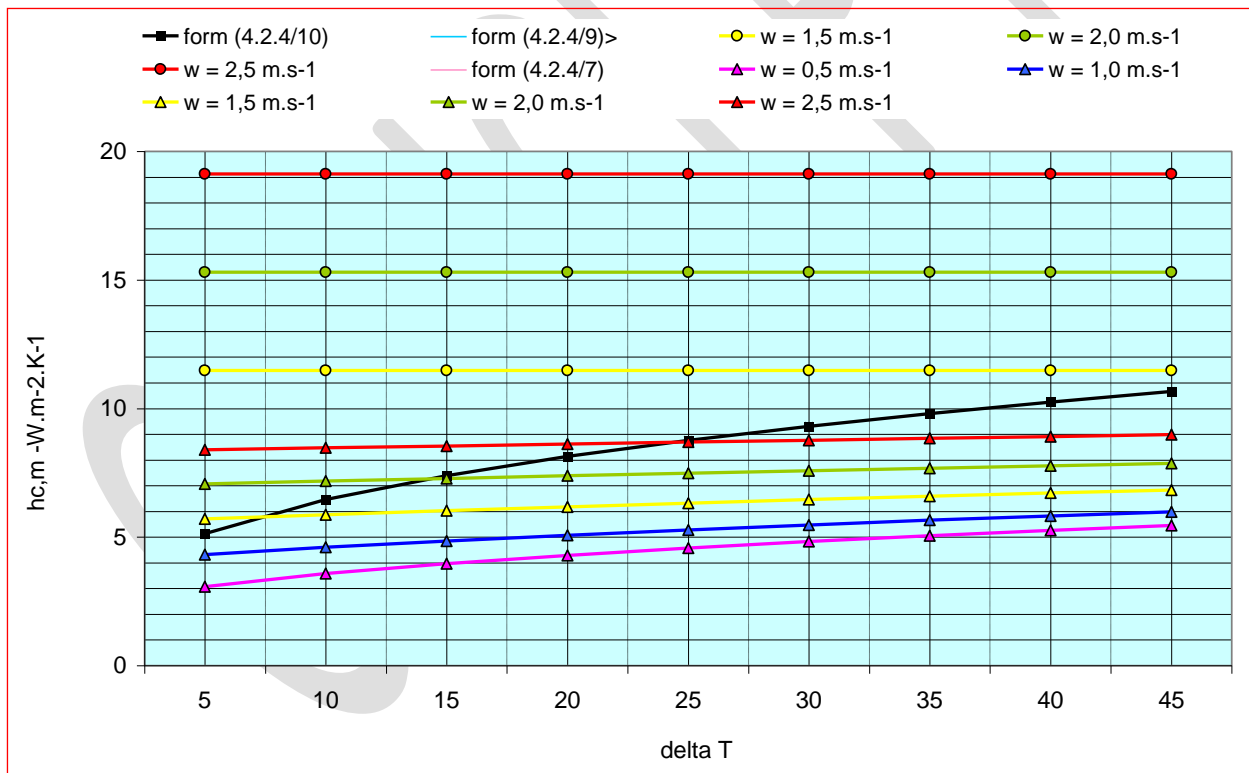
$$h_c = 3 \left(\theta_{gl,w} - \theta_{\infty,in} \right)^{1/3} \quad (4.2.4/10)$$

Waarin

$\theta_{\infty,in}$ luchttemperatuur bij intrede van de zonneshoorsteen [°C]

Qua structuur vertoont deze formule veel overeenkomst met formule (4.2.4/4) voor vrije convectie. Merk op dat de luchttemperatuur θ_{∞} bij Molina & Maestre staat voor de intredetemperatuur en in formule (4.2.4) voor de gemiddelde temperatuur. De factor 2 verschil tussen beide formules geeft de invloed van de gedwongen convectie weer.

De CWC berekend met bovenstaande formules geeft het beeld als weergegeven in figuur 4.2.4/4. De invloed van het temperatuurverschil ΔT ($\theta_w - \theta_{\infty}$) is gering. Aangezien een zonneshoorsteen in de meeste gevallen wordt ontworpen op een luchtsnelheid van $1,5 \text{ m.s}^{-1}$ en pas vanaf 8 verdiepingen en hoger op $2,0 \text{ m.s}^{-1}$ –zie paragraaf 4.2.8- is het temperatuurverschil van ondergeschikt belang. Voor een zonnefaçade, waarin veel lagere luchtsnelheden optreden, kan de temperatuurinvloed niet worden verwaarloosd.



Figuur 4.2.4/4 – CWC ($h_{c,m}$) volgens formules (4.2.4/7), (4.2.4/9) en (4.2.4/10) (Molina & Maestre)

Berekeningen met behulp van CFD simulaties

Met behulp van CFD simulaties is getracht een sluitend algoritme voor de CWC te ontwikkelen, hetgeen echter niet is gelukt –zie paragraaf 4.3.2.

4.2.4.4 Convectieve warmteoverdracht en Energieprestatie

De energieprestatie van een zonneshoorsteen kan op twee manieren worden berekend, (1) op basis van het thermisch rendement en (2) op basis van het interne thermodynamische proces. Bij beide benaderingen speelt de convectieve warmteoverdrachtscoëfficiënt een grote rol.

(1) Thermisch rendement

Voor het thermisch rendement is in paragraaf 4.5.5 de volgende formule afgeleid

$$\eta_{z,ref} = g \frac{U_{gl}^* (\theta_{gl} - \theta_e)}{\Phi_{zon}} - \frac{U_w^* p (\theta_w - \theta_a)}{\Phi_{zon}} \quad (4.5.5/2)$$

De momentane energiestroom, overeenkomend met de convectieve warmtestroom Φ_c , kan dus worden geschreven als

$$\Phi_c = \eta_{z,ref} \cdot \Phi_{zon} = g \cdot \Phi_{zon} - U_{gl}^* (\theta_{gl} - \theta_e) - U_w^* p (\theta_w - \theta_a)$$

De 2^e en 3^e term in deze formule staan voor respectievelijk de warmteverliezen via de glaswand en via de binnenwanden. De energiestroom Φ_c is bij een bepaalde stralingsflux Φ_{zon} en g-waarde dus uitsluitend afhankelijk van de warmteverliezen.

De CWC ($h_{c,m}$) heeft langs twee wegen invloed op de warmteverliezen:

1. Lagere waarden vergroten de temperatuurverschillen ($\theta_w - \theta_\infty$) en ($\theta_{gl} - \theta_\infty$). De hogere wandtemperaturen hebben potentieel grotere warmteverliezen tot gevolg.
2. Lagere waarden hebben tevens lagere warmtegeleidingscoëfficiënten van glaswand en binnenwanden tot gevolg met potentieel lagere warmteverliezen. Dit heeft een compenserende werking op het grotere warmteverlies ad 1.

Hieruit kan worden afgeleid dat de invloed van de CWC op de energiestroom minder groot is dan intuïtief zou kunnen worden verondersteld.

(2) Interne thermodynamische proces

De momentane energiestroom kan worden uitgedrukt in de formule –zie paragraaf 4.2.2:

$$\Phi_c = h_{c,m} \cdot A \cdot (\theta_w - \theta_\infty) \quad (4.2.4/10)$$

In deze formule is de convectieve warmtestroom Φ_c , overeenkomend met de momentane energiestroom, evenredig met de convectieve warmteoverdrachtscoëfficiënt $h_{c,m}$.

Er treedt hier echter het bovengenoemde compensatiemechanisme op tussen $h_{c,m}$ en het temperatuurverschil ($\theta_w - \theta_\infty$). Als bij de simulaties een te hoge waarde van $h_{c,m}$ wordt gebruikt wordt dit gecompenseerd door een lagere waarde van θ_w vice versa.

Voor de berekening van de energiestroom is de CWC dan ook van ondergeschikt belang. Omdat het onderzoek hiervoor slechts een benaderingsalgoritme heeft opgeleverd, formule (4.2.4/9), is dit is een gelukkige omstandigheid

Het geringe effect van de CWC op de energiestroom houdt niet in dat deze voor de constructie van een zonneshorsteen irrelevant is. Voor het vaststellen van de maximum temperaturen die op kunnen treden, vooral die van de glaswand, is het van belang de waarde zo nauwkeurig mogelijk vast te kunnen stellen. Als met een te hoge waarde wordt gerekend wordt een te lage waarde van de glastemperatuur berekend, hetgeen dan in de praktijk tot glasbreuk zou kunnen leiden.

Het omgekeerde is ook het geval: Voor het functioneel ontwerp van de fysieke testopstelling –zie paragraaf 4.4.1- werd uitgegaan van een te lage waarde van $h_{c,m}$. Op grond hiervan werden hoge glastemperaturen verwacht en werd gekozen voor gehard glas, dat uiteraard hoge(re) kosten met zich meebracht. Bij de metingen bleken de glastemperaturen aanzienlijk lager dan verwacht en zou ongehard glas mogelijk zijn geweest.

4.2.5 Basaal thermisch model

4.2.5.1 Stralingsmodel

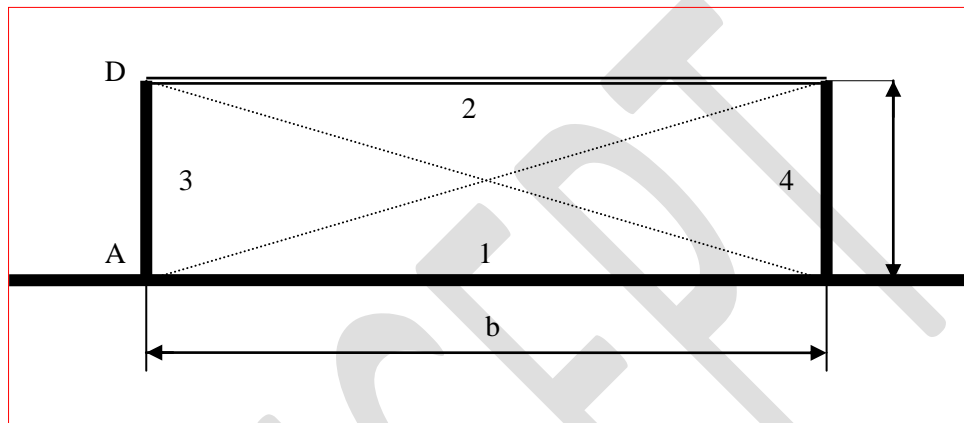
Droge lucht is een diathermaan gas, hetgeen betekent dat warmtestraling ongehinderd wordt doorgelaten. Lucht kan dus niet door straling worden verwarmd.

De stralingsflux van de zon wordt door de glasvlakken deels doorgelaten, deels gereflecteerd en deels door de binnenwanden 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.

Voor een beschouwing van de stralingsverschijnselen zie figuur 4.2.5/1. Door de zoninstraling via het transparante vlak 2 worden de binnenoppervlakken 1, 3 en 4 verwarmd, die op hun beurt weer naar elkaar en naar vlak 2 stralen. Bepalend voor het interne warmtetransport zijn:

- De afmetingen en geometrische verhoudingen van de zonneshoornsteen, die bepalend zijn voor de mate waarin de oppervlakken elkaar “zien”, aangeduid met de zichtfactor φ ; de zichtfactor $\varphi_{1 \rightarrow 2}$ geeft bijvoorbeeld aan in welke mate vlak 1 het vlak 2 “ziet”.
- De temperaturen van de binnenoppervlakken, die worden bepaald door de zoninstraling, absorptiecoëfficiënten α , emissiecoëfficiënten ε , en de thermisch werkzame massa, die afhankelijk is van de soortelijke massa ρ , soortelijke warmte c , en warmtegeleidingscoëfficiënt λ van de gebruikte materialen.



Figuur 4.2.5/1 – Zonneshoornsteen – Horizontale doorsnede

De zichtfactoren φ kunnen op een elegante manier worden bepaald volgens de “Crossed-String” methode (Handboek Installatietechniek 2002) met behulp van formule (7.6.1):

$$\varphi_{1 \rightarrow 2} = \frac{\sum \text{diagonalen} - \sum \text{verbindingslijnen}}{2 * \text{lengtevlak1}} \quad (4.2.5/1)$$

Voor de stralingsemissie van een vlak naar een ander vlak geldt de algemene formule:

$$\Phi_s = A \cdot \varphi \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (4.2.5/2)$$

Waarin:

Φ_s	stralingsemissie	[W]
A	oppervlak	[m ²]
φ	zichtfactor	[-]
ε	emissiecoëfficiënt	[-]
σ	stralingsconstante $56,7 \cdot 10^{-9}$	[W.m ⁻² .K ⁻⁴]
T	temperatuur	[K]

Voor de netto stralingsuitwisseling tussen de achterwand en de evenwijdige glaswand met een zichtfactor φ geldt de formule uit Bouwfysica (Linden, v.d. C.A. 1998):

$$\Phi_{s,w} - \Phi_{s,gl} = \frac{\varepsilon_w \cdot \varepsilon_{gl}}{\varepsilon_w - \varepsilon_w \cdot \varepsilon_{gl} + \varepsilon_{gl}} \cdot A \cdot \sigma \cdot (T_w^4 - T_{gl}^4) \quad (4.2.5/3)$$

Waarin:

$\Phi_{s,w}$	warmteafgifte wand door straling	[W]
$\Phi_{s,gl}$	warmteafgifte glas door straling	[W]
ε_w	emissiecoëfficiënt wand	[-]
ε_{gl}	emissiecoëfficiënt glas	[-]
T_w	wandtemperatuur	[K]

T_{gl} glastemperatuur [K]

De factor $\frac{\epsilon_w \cdot \epsilon_{gl}}{\epsilon_w - \epsilon_w \epsilon_{gl} + \epsilon_{gl}}$ kan worden geschreven als ϵ_{res} met $\frac{1}{\epsilon_{res}} = \frac{1}{\epsilon_w} + \frac{1}{\epsilon_{gl}} - 1$

Waarin: ϵ_{res} = resulterende emissiecoëfficiënt

Vergelijking (4.2.5/3) gaat hierdoor over in

$$\Phi_{s,w} - \Phi_{s,gl} = \epsilon_{res} \cdot A \cdot \sigma \cdot (T_w^4 - T_{gl}^4) \quad (4.2.5/4)$$

Deze vergelijking is door linearisatie te vereenvoudigen tot:

$$\Phi_{s,w} - \Phi_{s,gl} = A \cdot h_{str} \cdot (T_w - T_{gl}) \quad \text{of} \quad \Phi_{s,w} - \Phi_{s,gl} = A \cdot h_{str} \cdot (\theta_w - \theta_{gl}) \quad (4.2.5/5)$$

Waarin: $h_{str} = \epsilon_{res} \cdot \sigma \cdot (T_w^2 + T_{gl}^2) \cdot (T_w + T_{gl})$ (4.2.5/6)

Bij de in een zonneschoorsteen optredende kleine temperatuurverschillen, $(T_w - T_{gl}) < 50K$ kan formule (4.2.5/6) verder worden vereenvoudigd tot:

$$h_{str} = 4 \cdot \epsilon_{res} \cdot \sigma \cdot T_{gem}^3 \quad (4.2.5/7)$$

Waarin $T_{gem} = \frac{T_w + T_{gl}}{2}$

De waarde van de warmteoverdrachtscoëfficiënt door straling h_{str} van de binnenwand is berekend voor een generiek materiaal met $\epsilon_w = 0,9$ en voor een spectraal selectieve absorber met $\epsilon_w = 0,05$ volgens paragraaf 4.1.6 – zie tabel 4.2.5

Emissiecoëfficiënt binnenwand ϵ_w	>	0,9	0,05
Emissiecoëfficiënt glaswand ϵ_{gl}	>	0,87	0,87
Resulterende emissiecoëfficiënt ϵ_{res}	>	0,793	0,0496
Stralingsconstante σ	>	$5,67 \cdot 10^{-8}$	$5,67 \cdot 10^{-8}$
Formule: $h_{str} = 4 \cdot \epsilon_{res} \cdot \sigma \cdot T_{gem}^3 \cdot 10^{-8}$	>	$h_{str} = 17,985 \cdot T_{gem}^3 \cdot 10^{-8}$	$h_{str} = 1,125 \cdot T_{gem}^3 \cdot 10^{-8}$
Formule		(4.2.5/8)	(4.2.5/9)

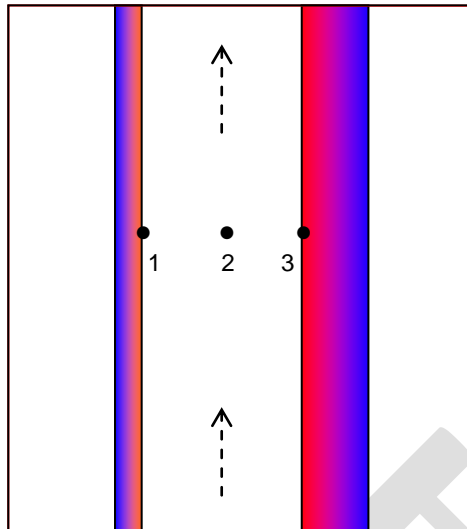
Tabel 4.2.5 – Formules voor de warmteoverdrachtscoëfficiënt door straling h_{str}

Bij een spectraal selectieve binnenwand met $\epsilon_w = 0,05$ is h_{str} met een waarde van $0,3 - 0,5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ nauwelijks afhankelijk van de wandtemperatuur. Bij een binnenwand met $\epsilon_w = 0,9$ kan h_{str} variëren tussen waarden van $6 - 8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$, afhankelijk van het temperatuurverschil tussen binnenwand en glas.

4.2.5.2 Basaal thermisch model – zonder zijwanden

Een zonneschoorsteen kan worden gezien als een model met 3 knopen waartussen allerlei energiestromen optreden - zie figuur 4.2.5/2. Voor elk van de drie knopen kan een vergelijking worden opgesteld van de optredende energiestromen. Dit levert een stelsel op van 3 vergelijkingen met 3 onbekenden: de temperatuur van het glas θ_{gl} , de temperatuur van de lucht θ_{∞} en de temperatuur van de binnenwand θ_w .

In deze eerste versie zijn de vergelijkingen uitgewerkt voor een model waarin de invloed van de zijwanden en het warmteverlies via de binnenwanden is verwaarloosd. Tevens is er ter wille van de eenvoud van uitgegaan dat er in de binnenruimte van de glaswand geen absorptie van zonstraling plaatsvindt. In paragraaf 4.2.5/3 is een model uitgewerkt waarin deze factoren wel in rekening zijn gebracht, en waarin tevens een reductiefactor R voor de berekening van het netto glasoppervlak is verwerkt.



Figuur 4.2.5/2 –Model zonneshoorsteen

Vergelijking knoop 1 -[W.m⁻²]

$$U^* (\theta_{gl} - \theta_e) + h_{c,m,gl} (\theta_{gl} - \theta_\infty) = h_{str} (\theta_w - \theta_{gl}) \quad (4.2.5/10)$$

Vergelijking knoop 2 - [W]

$$h_{c,m,gl} \cdot H \cdot B (\theta_{gl} - \theta_\infty) + h_{c,m,w} \cdot H \cdot B (\theta_w - \theta_\infty) = \rho \cdot c \cdot (\theta_\infty - \theta_{in}) \cdot B \cdot D_{sp} \cdot w \quad (4.2.5/11)$$

Vergelijking knoop 3 -[W.m⁻²]

$$h_{c,m,w} (\theta_w - \theta_\infty) + h_{str} (\theta_w - \theta_{gl}) = g \cdot \Phi_{zon} \quad (4.2.5/12)$$

Waarin:

U^*	warmteovergangscoefficiënt glas (glasoppervlak →buitenlucht)	[W.m ⁻² .K ⁻¹]
θ_{gl}	oppervlaktetemperatuur glas	[°C]
θ_e	buitentemperatuur	[°C]
θ_∞	luchttemperatuur in de hoofdstroom	[°C]
θ_w	oppervlaktetemperatuur wand	[°C]
$h_{c,m,gl}$	conv. warmteoverdrachtscoëfficiënt glas	[W.m ⁻² .K ⁻¹]
$h_{c,m,w}$	conv. warmteoverdrachtscoëfficiënt wand	[W.m ⁻² .K ⁻¹]
h_{str}	warmteoverdrachtscoëfficiënt straling	[W.m ⁻² .K ⁻¹]
H	hoogte schoorsteensegment	[m]
B	breedte van de schoorsteen	[m]
D_{sp}	diepte van de schoorsteen	[m]
ρ	dichtheid van lucht	[kg.m ⁻³]
θ_{in}	intredetemperatuur van de lucht	[°C]
c	soortelijke warmte van lucht	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]
w	luchtsnelheid in de schoorsteen	[m.s ⁻¹]
g	gravitatieversnelling	[m.s ⁻²]
Φ	stralingsflux van de zon	[W.m ⁻²]

4.2.5.3 Basaal thermisch model –met zijwanden

De invloed van de zijwanden wordt verdisconteerd door invoering van de schijnbare breedte voor straling en de schijnbare breedte voor convectie ⁵³

- = 0,872B+1,6D [m]
- = B+2D [m]

⁵³ Zie onderzoeksrapport del I (Bronsema 2012)

Verder zijn de volgende factoren ingevoerd

- R = Reductiefactor netto/bruto glasoppervlak [-]
- f_1 = Fractie van de zonnewarmte geabsorbeerd in knoop 1 [-]
- f_2 = Fractie van de zonnewarmte geabsorbeerd in knoop 3 [-]

De vergelijkingen (4.2.5/10) t/m (4.4.2.5/12) zijn op basis hiervan als volgt gemodificeerd:

Vergelijking knoop 1 - [W.m⁻¹]

$$BU^* \left(\dot{Q}_{gl} - \theta_e \right) + B \cdot h_{c,m,gl} (\theta_{gl} - \theta_\infty) = B \cdot R \cdot g \cdot f_1 \cdot \Phi_{zon} + B_{str}^* \cdot h_{str} \left(\dot{Q}_w - \theta_{gl} \right) \quad (4.2.5/13)$$

Vergelijking knoop 2 - [W]

$$h_{c,m,gl} \cdot H \cdot B \left(\dot{Q}_{gl} - \theta_\infty \right) + h_{c,m,w} \cdot H \cdot B_{conv}^* \left(\dot{Q}_w - \theta_\infty \right) = \rho \cdot c \cdot \left(\dot{Q}_\infty - \theta_{in} \right) \cdot B \cdot D \cdot w \quad (4.2.5/14)$$

Vergelijking knoop 3 - [W.m⁻²]

$$h_{c,m,w} \left(\dot{Q}_w - \theta_\infty \right) + h_{str} \left(\dot{Q}_w - \theta_{gl} \right) = f_2 \cdot g \cdot \Phi_{zon} \quad (4.2.5/15)$$

Voor een zonneschoorsteen met gedefinieerde eigenschappen kunnen voor elke combinatie van stralingsflux en buitentemperatuur de 3 onbekenden \dot{Q}_w , θ_{gl} en θ_∞ in deze vergelijkingen met behulp van matrixvermenigvuldiging in MS Excel worden berekend.⁵⁴

4.2.6 Thermische trek

4.2.6.1 Berekening

Thermische trek ontstaat door het drukverschil dat twee kolommen gas van verschillende dichtheid op elkaar uitoefenen. In een zonneschoorsteen ontstaan dichtheidsverschillen door temperatuurverschillen van de lucht. Deze kunnen worden berekend met de Wet van Gay-Lussac, uitgewerkt in de formule

$$\Delta p = \rho_0 \left[\frac{T_0}{T_1} - \frac{T_0}{T_2} \right] \cdot g \cdot h \quad (4.2.6/1)$$

Waarin	Δp	thermische trek	[Pa]
	ρ_0	dichtheid lucht bij 0°C	[kg.m ⁻³]
	g	gravitatieconstante	[m.s ⁻²]
	T_0	luchttemperatuur bij 0°C	[K]
	T_1	luchttemperatuur buiten	[K]
	T_2	luchttemperatuur in schoorsteen	[K]
	H	hoogte van de kolom	[m]

1.1.1.1 Gemiddeld temperatuurverschil

Bij warmtewisselaars is de warmteoverdracht normaliter niet gelijkmatig over het verwarmend oppervlak verdeeld, waardoor niet mag worden gerekend met het rekenkundig gemiddelde van de primaire en secundaire temperaturen maar met het logaritmisch gemiddelde.

Bij een zonneschoorsteen met een gelijkmatige zonstraling over de gehele hoogte kan worden uitgegaan van een lineair temperatuurverloop en kan het gemiddelde temperatuurverschil $(\theta_w - \theta_\infty)_{gem}$ eenvoudig worden bepaald volgens de formule

$$\left(\dot{Q}_w - \theta_\infty \right)_{gem} = \frac{\left(\dot{Q}_{w,in} - \theta_{\infty,in} \right) + \left(\dot{Q}_{w,uit} - \theta_{\infty,uit} \right)}{2} \quad (4.2.6/2)$$

en

$$\theta_{\infty,gem} = \frac{\theta_{\infty,in} + \theta_{\infty,uit}}{2} \quad (4.2.6/3)$$

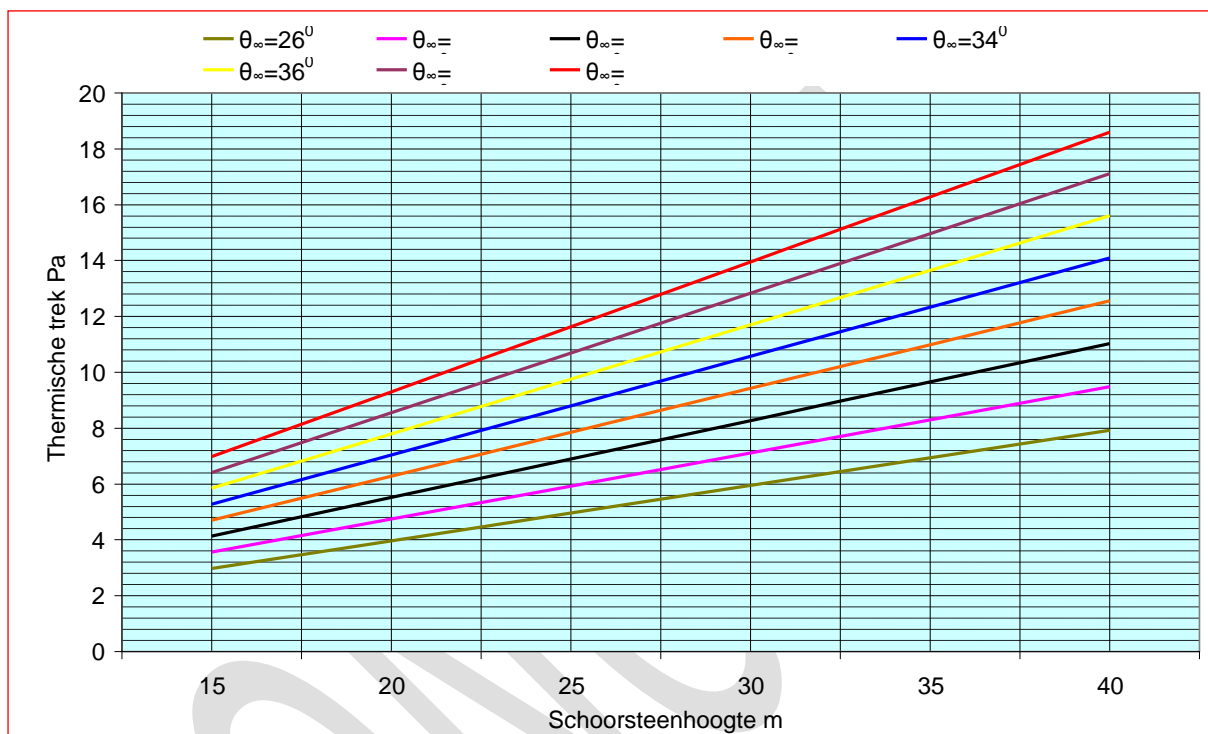
⁵⁴ Zie onderzoeksrapport deel I (Bronsema 2012)

De indices w en ∞ staan voor de wand en de luchttemperatuur en in en uit voor de temperatuur aan de voet respectievelijk de uitmonding van de zeeschoorsteen.

4.2.6.2 Te realiseren thermische trek in de zomer

In de zomerperiode kan de gemiddelde temperatuur van de afzuiglucht in een kantoorgebouw in Nederland worden gesteld op ca. 24°C .

Met behulp van de formules (4.2.6/1) en (4.2.6/3) kan de thermische trek worden berekend als functie van de schoorsteenhoogte en de uitgaande luchttemperatuur. Figuur 4.2.6/1 laat de resultaten van deze berekening zien voor hoogten van 15 – 40 m bij verschillende uittredetemperaturen en de referentie buitentemperatuur θ_e van 20°C .



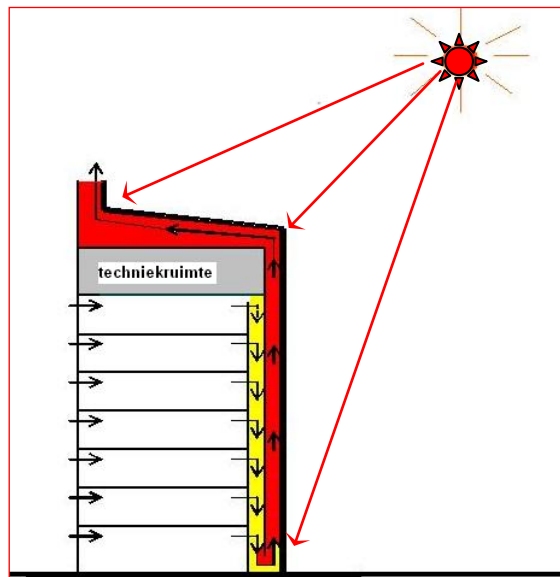
Figuur 4.2.6/1 – Thermische trek als functie van uitgaande schoorsteentemperaturen

4.2.6.3 Verhoging thermische trek met behulp van een horizontaal vlak

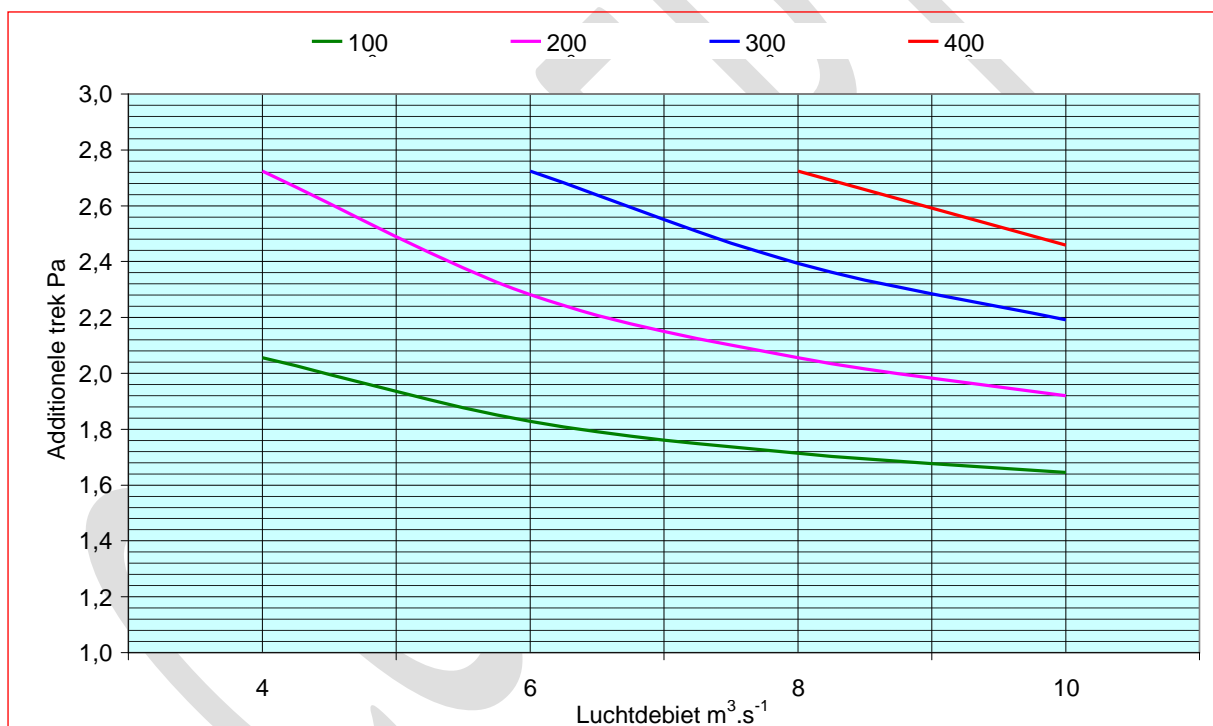
De zonstraling op een horizontaal vlak kan worden benut om de lucht na passage van de zeeschoorsteen verder te verwarmen in een dak absorber, een serreachtige dakopbouw of een glas overkapt daktuin, waardoor additionele thermische trek wordt gerealiseerd en de energieprestatie wordt verbeterd- zie figuur 4.2.6/2. Voor lage gebouwen kan met behulp hiervan de thermische trek substantieel worden verhoogd; zie figuur 4.2.6/3. De temperatuur in de daktuin is hierin gemaximeerd op ca. 50°C . De effectieve hoogte is 3,5 m; bij grotere hoogten neemt de additionele trek evenredig toe. Voor hogere gebouwen neemt dit effect af omdat het luchtdebiet dat door de daktuin stroomt dan veel groter is.

De zoninstraling op een horizontaal vlak is het grootst in de maanden juni en juli, waardoor in principe de lagere zoninstraling op verticale vlakken, die dan het kleinst is, kan worden gecompenseerd.

Een dak absorber maakt het in principe mogelijk ook bij lage gebouwen een zeeschoorsteen toe te passen. Het voordeel van een daktuin ter verhoging van de thermische trek in de zomer berust verder hoofdzakelijk op de hoge zoninstraling in de zomermaanden. In de wintermaanden is door de lage zonnestand de zoninstraling in een daktuin gering, waardoor de bijdrage van een daktuin aan de warmteopbrengst van een zeeschoorsteen juist in de winter weinig effectief is. Aangezien energiebesparing de belangrijkste motivering is voor toepassing van een zeeschoorsteen zal een daktuin vooral uit architectonische overwegingen in het gebouwontwerp worden opgenomen.



Figuur 4.2.6/2 – Dak absorber



Figuur 4.2.6/3 – Additionele trek als functie van luchtdebiet en oppervlak daktuin bij referentiecondities

4.2.7 Basaal stromingsmodel

4.2.7.1 Inleiding

Met het stromingsmodel worden de drukverliezen in het shuntkanaal en in de zonneschoorsteen berekend als functie van het luchtdebiet. Het model is gebruikt in het rekenmodel ad paragraaf 4.2.8.

Het stromingsmodel is opgesteld op basis van aan de luchttechniek ontleende formules. Het is onzeker of deze met redelijke betrouwbaarheid voor een zonneschoorsteen kunnen worden toegepast. Het te verwachten ongelijkmatige stromingspatroon in een zonneschoorsteen, veroorzaakt door de rondgaande zon, de temperatuurverschillen tussen absorber en glaswand, de turbulente warmteoverdracht van de warme binnenwanden op de lucht, en wellicht zelfs een mogelijke verticale stratificatie, kunnen oorzaak zijn van een groter drukverlies dan berekend. Ook door verschillen in wandruwheid, met de inherente verschillen in turbulentie-intensiteit, is het stromingspatroon in een zonneschoorsteen niet één op één te vergelijken met dat in een luchtkanaal.

4.2.7.2 Algemeen

De door een zonneshoorsteen te leveren thermische trek moet het drukverlies compenseren van het afzuigstelsel in het gebouw + het eigen drukverlies van shuntkanaal en zonneshoorsteen. Het drukverlies bestaat uit de volgende elementen:

- Extern drukverlies buiten het shuntkanaal;
- Drukverliezen door wrijving en plaatselijke weerstanden in het shuntkanaal;
- Drukverliezen door wrijving en plaatselijke weerstanden in de zonneshoorsteen;
- Verlies dynamische druk bij de uitmonding van de zonneshoorsteen.

Het drukverlies van de warmtewisselaar aan de top van de zonneshoorsteen – zie paragraaf 4.5.7/2- is hierin nog niet opgenomen. Uitgangspunt is dat dit drukverlies wordt gecompenseerd door de aerodynamische trek van de venturi-ejector in het Ventecdak – zie paragraaf 2.2.2 en/of door de hulpventilator – zie paragraaf 4.5.10. Het is aan de ontwerper om in het totaalconcept de beste balans te vinden tussen drukverliezen, thermische trek en aerodynamische trek.

4.2.7.3 Dynamische druk

De dynamische- of snelheidsdruk, aangeduid met P_d , is de druk die nodig is voor het opwekken van de luchtsnelheid in shuntkanaal en zonneshoorsteen. Deze druk gaat bij het uittreden van de lucht uit de schoorsteen normaliter verloren.

$$P_d = 0,5 \rho w^2 \quad (4.2.7/1)$$

Waarin: P_d dynamische druk [Pa]
 ρ dichtheid van lucht [kg.m^{-3}]
 w luchtsnelheid [m.s^{-1}]

4.2.7.4 Drukverliezen door wrijving

Het drukverlies Δp als gevolg van wrijving in rechte kanalen met een constante rechthoekige doorsnede wordt berekend met de formule:

$$\Delta p = \lambda \frac{l}{D_h} 0,5 \rho w^2 \quad (4.2.7/2)$$

Waarin: λ wrijvingsfactor [-]
 L lengte van het kanaal [m]
 D_h hydraulische diameter van het kanaal [m] zie paragraaf 4.2.4.2
 ρ soortelijke massa lucht [kg.m^{-3}]
 w gemiddelde luchtsnelheid [m.s^{-1}]

De wrijvingsfactor λ wordt normaliter berekend met de empirische formule van Colebrook-White:

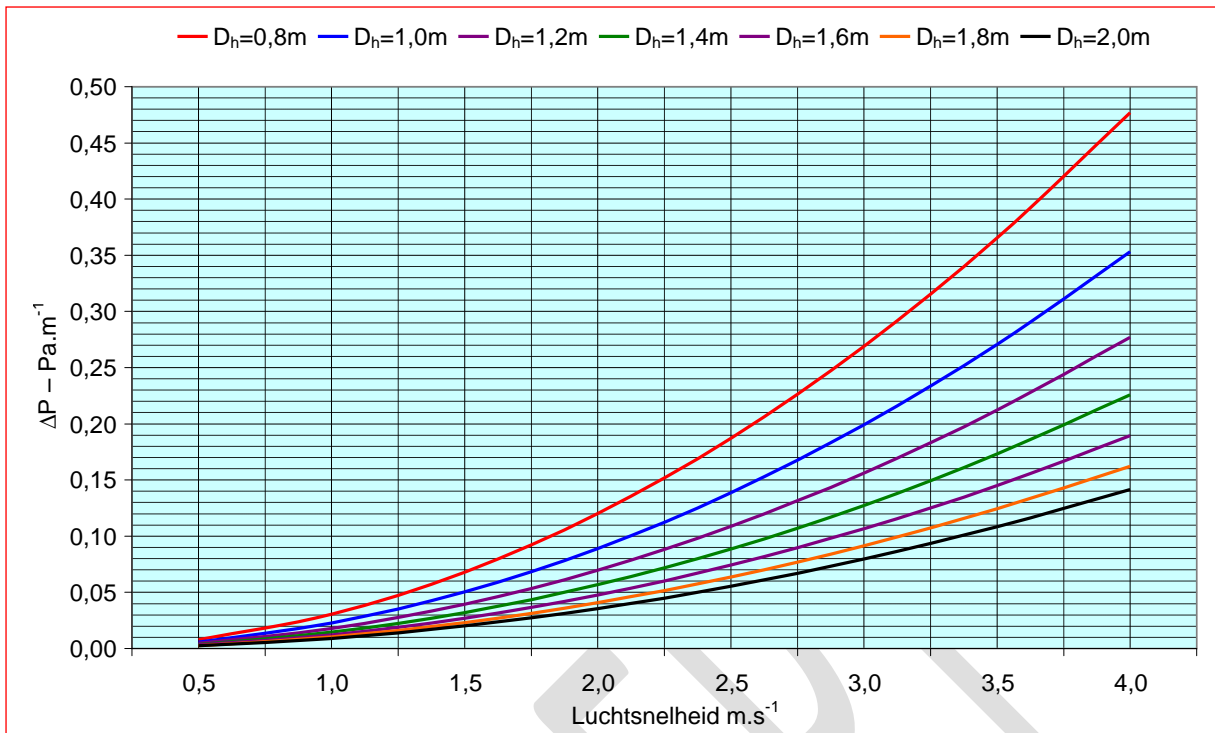
$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon}{3,72D} + \frac{5,74}{Re^{0,901}} \right) \quad (4.2.7/3)$$

Waarin: ε wandruwheid [m]
 D kanaaldiameter [m]
 Re getal van Reynolds [-]

- De dagelijkse gang van de zonnestraling veroorzaakt aanzienlijke temperatuurverschillen over de breedte van de absorber met inherente snelheidsverschillen van de lucht – zie paragraaf 4.4.1.
- De wandruwheid van een zonneshoorsteen is waarschijnlijk groter dan die van een metalen ventilatiekanaal.

Het is hierdoor onzeker of en in hoeverre de wrijvingsfactor met voldoende nauwkeurigheid met de formules (4.2.7/2) en (4.2.7/3) kan worden berekend.

Figuur 4.2.7/1 toont het drukverlies door wrijving in luchtkanalen met verschillende hydraulische diameters en luchtsnelheden, berekend met behulp van formule (4.2.7/2) en een wandruwheid van 10 mm.



Figuur 4.2.7/1 – Drukverlies door wrijving als functie van de luchtsnelheid – $\varepsilon = 10\text{mm}$ - $\theta_{\infty} = 25^{\circ} - 40^{\circ}\text{C}$

4.2.7.5 Drukverlies door plaatselijke weerstanden

Het drukverlies door plaatselijke weerstanden wordt berekend met de formule

$$\Delta p = \xi \cdot P_d = 0,5 \rho w^2 \cdot \xi \quad (4.2.7/4)$$

Waarin: ξ weerstandscoefficient [-]

Waarden van weerstandscoefficienten worden gegeven in diverse handboeken, o.a. Handboek Installatietechniek (ISSO 2010) en Recknagel (Recknagel 2010).

4.2.7.6 Stromingsformule

De relatie tussen het massadebiet en het drukverlies kan met behulp van de formules (4.2.7/2) en (4.2.7/4) worden uitgedrukt in de formule

$$\dot{m} = A \sqrt{\frac{2 \cdot \rho \cdot \Delta p}{\frac{\lambda \cdot L}{D} + \sum \xi}} \quad (4.2.7/5)$$

Waarin: \dot{m} momentaan massadebiet [kg.s⁻¹]

Deze formule is gebruikt voor de kalibratie en validatie van de dynamische modellering met ESP-r – zie paragraaf 4.3.4.

4.2.7.7 Extern drukverlies

Het externe drukverlies wordt normaliter berekend door de ontwerper van het ventilatiesysteem. In verband met de beperkte thermische trek van een zonneshoorsteen is het in het algemeen noodzakelijk dit drukverlies zoveel mogelijk te beperken.

Zonneshoorstenen die ontworpen zijn op basis van een bepaalde energieopbrengst of van een architectonische inpassing in de gevel kunnen voor wat betreft de thermische trek over gedimensioneerd zijn zie paragraaf 4.5.1. Een overschot aan thermische trek kan dan worden benut om het externe drukverlies te vergroten, al dan niet met behulp van regelkleppen aan de voet van de schoorsteen.

Om een goede luchtverdeling over de aangesloten verdiepingen te realiseren verdient het aanbeveling het afzuigstelsel uit te voeren met een automatische debietregeling per verdieping. Alternatief kunnen zelfregelende roosters per kantoorruimte worden toegepast - zie de case study hoofdstuk 7. Het drukverlies van dergelijke roosters in handelsuitvoering is minimaal 1 Pa bij de nominale capaciteit. Afhankelijk van de uitvoering van het ventilatieconcept kunnen deze roosters in de luchttoevoer, in de luchtafzuiging of in beide worden aangebracht.

Afzuig van kantoorvertrekken via een atrium levert de minste weerstand op en is daarom uitermate geschikt voor de combinatie met een zonneshoortsteen, vooral bij lagere gebouwen.

Luchttransport via kanalen, bijvoorbeeld de plafondruimte van gangen, brengt in het algemeen een groter drukverlies met zich mee. Aanbevolen wordt dit drukverlies bij lagere gebouwen te beperken tot ca. 5 Pa hetgeen betekent dat bij de aansluitingen op het shuntkanaal een onderdruk van 5 Pa beschikbaar moet zijn. Bij hogere gebouwen is in het algemeen een groter drukverlies toegestaan.

4.2.7.8 Drukverliezen in het shuntkanaal

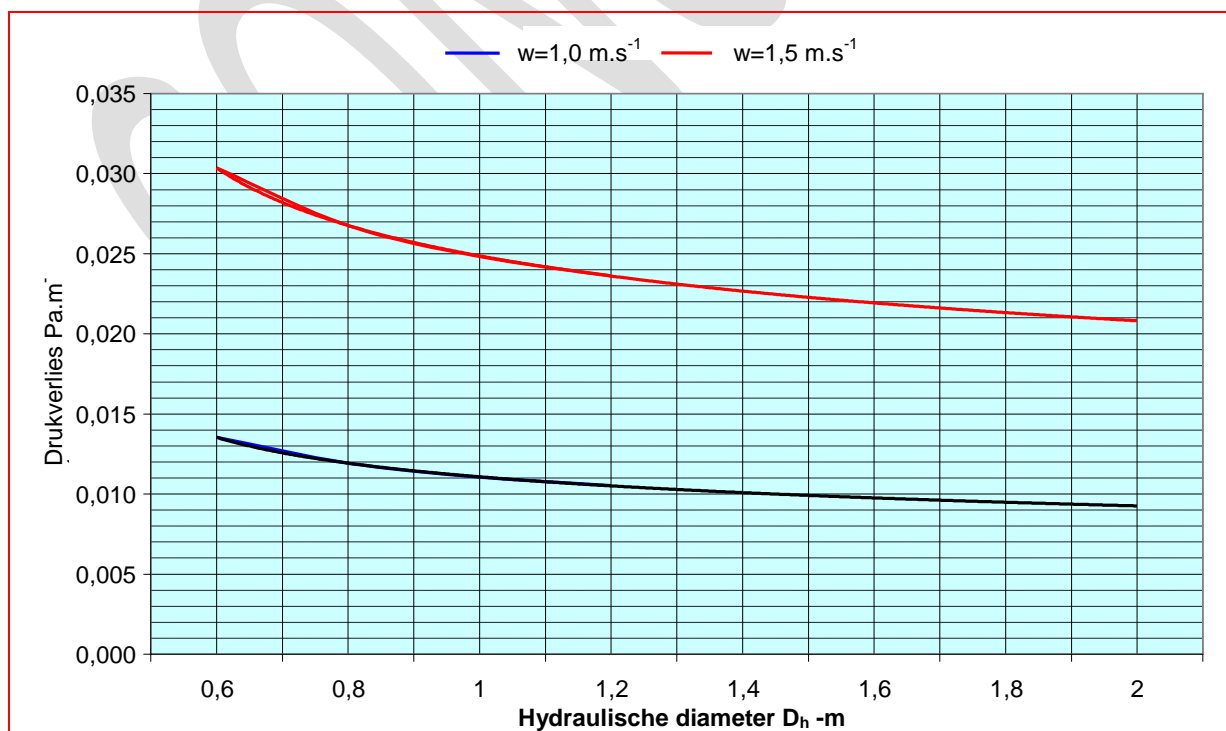
Het shuntkanaal wordt in principe uitgevoerd als een schacht met constante doorsnede, gelijk aan die van de zonneshoortsteen, over de volle hoogte. Hierdoor kan het in weekeinden als recirculatiekanaal functioneren - zie figuur 4.1.11 of 's winters als er geen zon is als afvoer kanaal.

Om een zo gelijkmatige mogelijke lucht afzuiging over de verdiepingen te realiseren is het belangrijk het drukverlies van het shuntkanaal zo beperkt mogelijk te houden. Een lage luchtsnelheid van 1,0 à 1,5 ms^{-1} is daarvoor gewenst.

De luchtsnelheid in het shuntkanaal is ter plaatse van de hoogste verdieping laag en neemt geleidelijk toe naarmate meer verdiepingen zijn aangesloten. Bij de onderste verdieping sluit het shuntkanaal via plenum of een U-bocht aan op de zonneshoortsteen.

De aansluitingen van de afzuigkanalen op de verdiepingen moeten gestroomlijnd op het shuntkanaal worden aangesloten waardoor de invloed op het drukverlies van het shuntkanaal gering is of zelfs positief kan zijn.

Figuur 4.2.7/2 laat het drukverlies van het shuntkanaal zien bij verschillende hydraulische diameters en luchtsnelheden van 1,0 en 1,5 m/s.



Figuur 4.2.7/2 – Drukverlies shuntkanaal: wrijving + plaatselijke weerstanden.

Voor een zo eenvoudig mogelijke aansluiting van het shuntkanaal op de zonneschoorsteen kan de breedte van het shuntkanaal in principe gelijk worden gehouden aan die van de zonneschoorsteen.

De weerstandscoefficiënt ζ van de U-bocht tussen het shuntkanaal en de voet van de zonneschoorsteen wordt geraamd op ca. 0,5 indien voorzien van leidschoepen.

4.2.7.9 Drukverliezen in de zonneschoorsteen

Plaatselijke weerstanden in een zonneschoorsteen moeten worden vermeden. Een intredeweerstand aan de voet kan optreden in geval van snelheidsverschillen in shuntkanaal en zonneschoorsteen, mede afhankelijk van de aansluiting via een plenumconstructie of een U-bocht

4.2.7.10 Rekenvoorbeeld

Een zonneschoorsteen met een hoogte van 35 m en een doorsnede van 5,4 x 0,65 m (hydraulische diameter 1,16m) is ontworpen op een nominale luchtsnelheid van $1,5 \text{ m.s}^{-1}$, en het shuntkanaal op $1,0 \text{ m.s}^{-1}$. Het externe drukverlies is 5 Pa. De weerstandscoefficiënt ζ van de U-bocht is 0,5.

Het totale drukverlies van het systeem wordt als volgt berekend:

▪ Extern drukverlies	5,00 Pa	
▪ Shuntkanaal	0,40 Pa	[figuur 4.2.7/2]
▪ U-bocht	0,67 Pa	
▪ Zonneschoorsteen	1,75 Pa	[figuur 4.2.7/1]
▪ Dynamische druk	<u>1,30 Pa</u>	
▪ Totaal	9,12 Pa	

Deze zonneschoorsteen moet dus een thermische trek van 9,12 Pa leveren om bij referentiecondities autonoom, d.w.z. zonder venturi-ejector en hulpventilator, te kunnen werken. Uit figuur 4.2.6/1 is af te lezen dat de lucht dan tot ca. 30°C moet worden verwarmd.

4.2.8 Basaal rekenmodel

4.2.8.1 Opbouw van het model

Uitgangspunt is dat het gewenste ventilatiedebiet bij de referentiecondities ad paragraaf 4.2.3 moet kunnen worden gerealiseerd. Het drukverlies van het afzuigstelsel, berekend met behulp van het stromingsmodel ad paragraaf 4.2.7, moet dan evenwicht zijn met de thermische trek, berekend met behulp van paragraaf 4.2.6. De uitgaande schoorsteentemperatuur wordt berekend met behulp van het thermisch model ad paragraaf 4.2.5.

Het thermisch vermogen van een zonneschoorsteen wordt uitgedrukt in de formule

$$P_{th} = n \cdot H_{verd} \cdot B \cdot R \cdot \Phi_{zon} \cdot \eta_z \quad (4.2.8/1)$$

Waarin

P_{th}	thermisch vermogen	[W]
n	aantal verdiepingen	[-]
H_{verd}	verdieping hoogte	[m]
B	breedte van de zonneschoorsteen	[m]
Φ_{zon}	stralingsflux	[W.m ⁻²]
R	reductiefactor netto/bruto oppervlak	[-]
$\eta_{z,ref}$	rendement	[-]

Omdat de hoogte van zonneschoorstenen variabel is heeft het voordelen om met het thermisch vermogen per verdieping te rekenen. Vergelijking (4.2.8/1) gaat dan over in

$$P_{th,verd} = H_{verd} \cdot B \cdot R \cdot \Phi_{zon} \cdot \eta_z \quad (4.2.8/2)$$

Waarin

$P_{th,verd}$	thermisch vermogen per verdieping	[W]
---------------	-----------------------------------	-----

De temperatuurstijging van de lucht per verdieping wordt uitgedrukt in de formule

$$\Delta\theta_{verd} = \frac{P_{th,verd}}{\rho \cdot c \cdot q_v} \quad (4.2.8/3)$$

Waarin

$\Delta\theta_{verd}$	temperatuurstijging van de lucht per verdieping	[K]
ρ	dichtheid van lucht	[g.m ⁻³]
c	soortelijke warmte van lucht	[J.g ⁻¹ .K ⁻¹]
q_v	luchtdebiet	[m ³ .s ⁻¹]

Het luchtdebiet kan worden uitgedrukt in de formule

$$q_v = w \cdot B \cdot D \quad (4.2.8/4)$$

Waarin

w	luchtsnelheid	[m.s ⁻¹]
D	diepte van de zonneschoorsteen	[m]

Substitutie van (4.2.8/1), en (4.2.8/4) in (4.2.8/3) geeft

$$\Delta\theta_{verd} = \frac{H_{verd} \cdot R \cdot \Phi_{zon} \cdot \eta_z}{\rho \cdot c \cdot w \cdot D} \quad (4.2.8/5)$$

Deze formule kan worden vereenvoudigd door uit te gaan van vaste getallen voor de niet of weinig variabele waarden:

▪ Standaard verdieping hoogte voor kantoorgebouwen	H_{verd}	3,5	[m]
▪ Referentiewaarde stralingsflux van de zon	Φ_{zon}	400	[W.m ⁻²]
▪ Gemiddeld rendement Planitherm Total Low E -	η	0,625	[-] –zie figuur 4.5.5/1
▪ Reductiefactor netto t.o.v. bruto glasoppervlak	R	0,95	[-]
▪ Dichtheid van lucht	ρ	1185	[g.m ⁻³]
▪ Soortelijke warmte van lucht	c	1,007	[J.g ⁻¹ .K ⁻¹]

Formule (4.2.8/5) gaat dan over in

$$\Delta\theta_{ref,verd} = \frac{0,7}{D \cdot w} \quad (4.2.8/6)$$

Waarin

$\Delta\theta_{ref,verd}$	temperatuurstijging van de lucht per verdieping bij referentiecondities	[K]
---------------------------	---	-----

De breedte B komt in deze formule niet meer voor, hetgeen inhoudt dat de opwarming van de lucht alleen wordt bepaald door het product van diepte en luchtsnelheid, eenheid m².s⁻¹.

Om praktische redenen, in casu de reinigingsmogelijkheden van het glas aan de binnenzijde, is in het navolgende een minimumdiepte van 0,65 m aangehouden, hetgeen (te) grote schoorsteenbreedtes kan opleveren. Om deze reden is tevens een diepte van 1,0 m doorgerekend. Het staat de ontwerper overigens vrij om de diepte / breedte verhouding op basis van het rekenmodel te manipuleren.

4.2.8.2 Basaal rekenmodel

De thermische trek en het drukverlies zijn in MS Excel uitgewerkt voor de volgende omstandigheden:

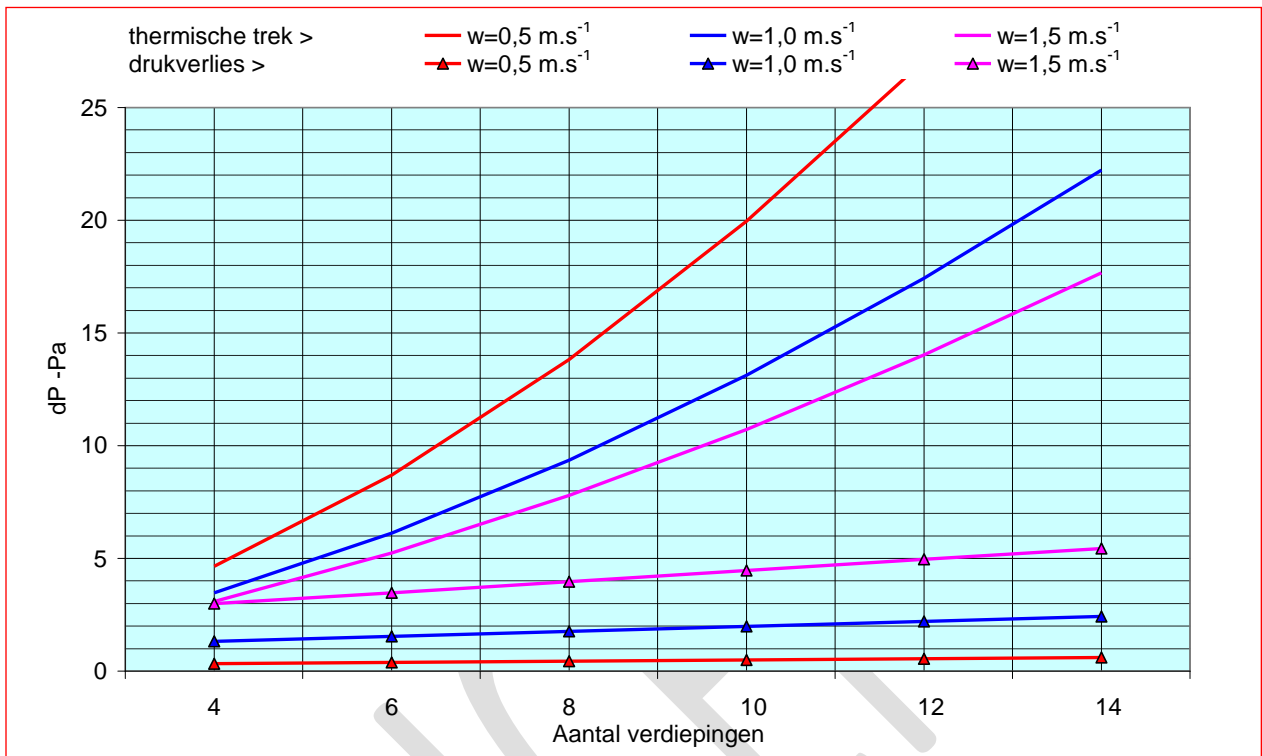
▪ Breedte	B	3,6	[m]
▪ Diepte	D	0,65 en 1,0	[m]
▪ Aantal verdiepingen		4 t/m 14	[-]
▪ Luchtsnelheid		0,5 t/m 3,0	[m.s ⁻¹]

Berekend zijn bij de referentiecondities:

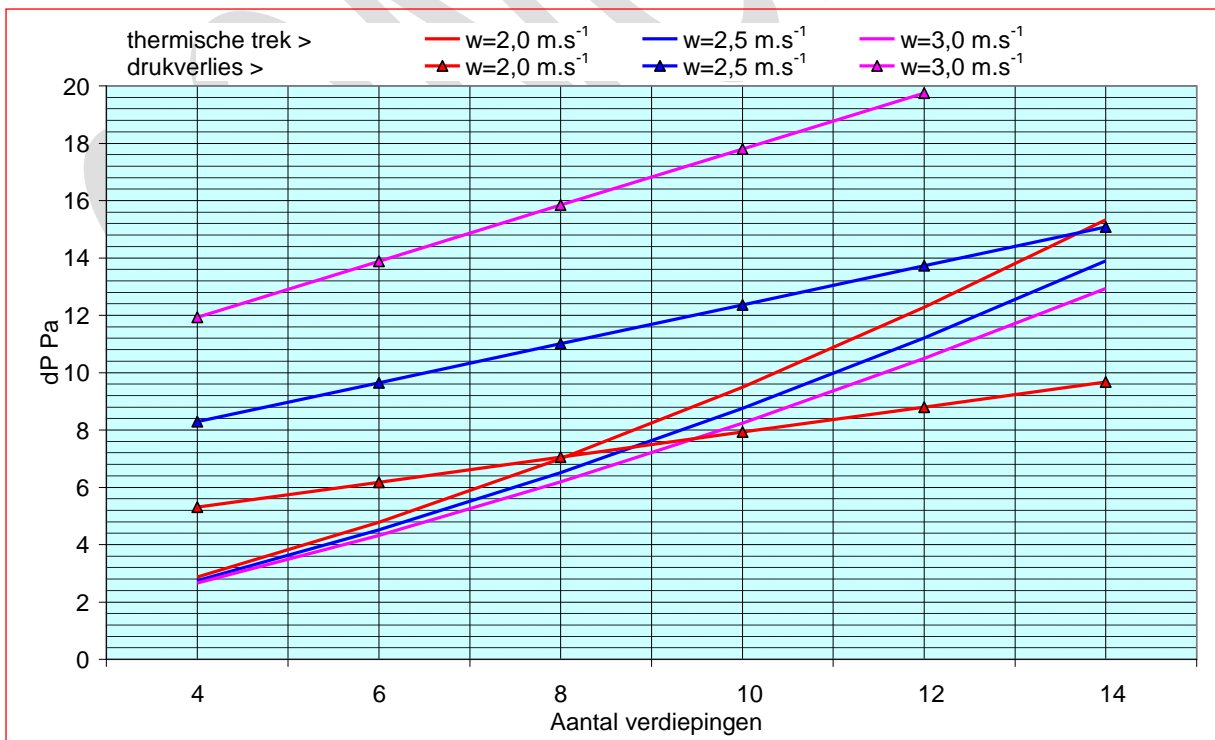
- Het eigen drukverlies van de zonneschoorsteen, shuntkanaal, U-bocht en het dynamisch drukverlies, conform paragraaf 4.2.7. De snelheid in het shuntkanaal is hierbij gesteld op 1,0 m.s⁻¹.
- De thermische trek, conform paragraaf 4.2.6.

De berekeningsresultaten zijn weergegeven in de figuren 4.2.8.1 en 4.2.8.2 voor een schoorsteendiepte van 0,65m.

Figuur 4.2.8.1 laat zien dat bij luchtsnelheden van 0,5 t/m 1,5 m.s⁻¹ de thermische trek altijd groter is dan het eigen drukverlies van shuntkanaal + zonneschoorsteen. Bij grotere luchtsnelheden is dat niet meer het geval - zie figuur 4.2.8.2. Luchtsnelheden van 2,5 en 3,0 m.s⁻¹ zijn niet mogelijk; een luchtsnelheid van 2,0 m.s⁻¹ is pas mogelijk bij meer dan 8 verdiepingen

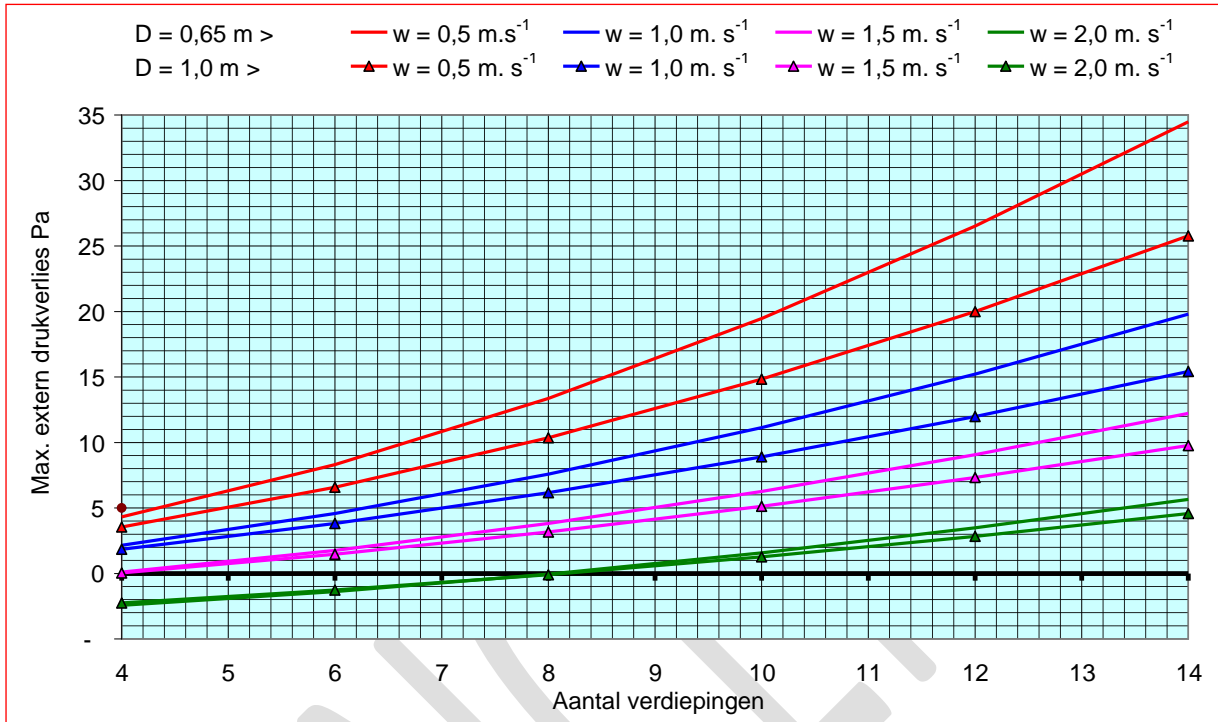


Figuur 4.2.8/1 – Thermische trek en eigen drukverlies als functie van luchtsnelheid en aantal verdiepingen voor $w = 0,5 - 1,0$ en $1,5 \text{ m.s}^{-1}$ - $D = 0,65\text{m}$ – Referentiecondities



Figuur 4.2.8/2 – Thermische trek en eigen drukverlies als functie van luchtsnelheid en aantal verdiepingen voor $w = 2,0 - 2,5$ en $3,0 \text{ m.s}^{-1}$ - $D = 0,65 \text{ m}$ - Referentiecondities

Figuur 4.2.8/3 geeft een overzicht van het maximum toelaatbaar extern drukverlies als functie van de luchtsnelheid, het aantal verdiepingen en de diepte D van de zonneshoorsteen. Een grotere diepte bij gelijke luchtsnelheid betekent een groter luchtdebiet, een kleinere temperatuurstijging, een lagere gemiddelde temperatuur in de zonneshoorsteen en een kleinere thermische trek. Luchtsnelheden $> 2,0 \text{ m.s}^{-1}$ zijn niet meer opgenomen omdat deze bij gebouwhoogten tot 14 verdiepingen teveel drukverlies opleveren.



Figuur 4.2.8/3 – Maximum externe druk als functie van luchtsnelheid, aantal verdiepingen en diepte van de zonneshoorsteen –Referentiecondities

4.2.8.3 Voorbeeldberekeningen

(1) Gebouw van 6 verdiepingen – Luchtdebiet $6.000 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$ – Benodigde externe druk 8 Pa

Figuur 4.2.8/3 - D = 0,65m – Maximum luchtsnelheid is $0,5 \text{ m.s}^{-1}$. De breedte van de zonneshoorsteen wordt $(6.000/3.600*0,65*0,5) = 5,12\text{m}$.

(2) Gebouw van 10 verdiepingen – Luchtdebiet $12.000 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$ – Gewenste breedte 5,4m

Figuur 4.2.8/3 - D = 0,65m – Luchtsnelheid is $(12.000/3.600*5,4*0,65) = 0,95 \text{ m.s}^{-1}$. De maximum externe druk is 12 Pa

Voor de energieprestaties van deze voorbeelden zie paragraaf 4.5.8

4.2.8.4 Gebruiksvriendelijk computermodel

Het voorgestelde grafische model maakt de dimensionering van een zonneshoorsteen inzichtelijk voor de ingenieurspraktijk, maar is ook nogal bewerkelijk. Het is echter 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 ontwerpfase is daarom op basis van het grafische model een eenvoudig en gebruiksvriendelijk computermodel ontwikkeld. Hiermee kunnen met een muisklik de architectonische varianten en de energetische consequenties daarvan in beeld worden gebracht –zie paragraaf 4.5.9.

4.3 Gedetailleerde modellering

4.3.1 Inleiding

De basale modellering ad paragraaf 4.2. is nuttig om inzicht te krijgen in de warmteoverdracht en stroming in een zonneshoorsteen. Een gedetailleerde modellering is nodig om deze in een hoger resolutieniveau te kunnen bestuderen. Hiervoor komen numerieke simulaties met behulp van CFD als eerste in aanmerking –zie paragraaf 1.8.3.

Voor bestudering van het dynamisch gedrag en voorspellingen van de energieprestaties is een dynamisch simulatiemodel nodig. Hiervoor is het geavanceerde ESP-r model zeer geschikt –zie paragraaf 1.8.4 en 4.3.4.

4.3.2 CFD simulaties CWC

In de paragraaf 4.2.4 is op basis van literatuuronderzoek en theoretische beschouwingen getracht een betrouwbaar algoritme te vinden voor de bepaling van de CWC in een zonneshoorsteen. Bij deze warmteoverdracht spelen temperatuurverschillen en lichtsnelheden een complementaire en wisselende rol, waardoor sprake is van gemengde convectie. De warmteoverdracht bij gemengde convectie blijkt een uiterst gecompliceerd proces te zijn dat nauwelijks of niet te berekenen valt. Het gezochte algoritme kon dan ook niet met voldoende zekerheid worden bepaald.

Aangetoond werd overigens dat de energieprestatie van een zonneshoorsteen weinig afhankelijk is van de CWC, zie paragraaf 4.2.4.4. Deze heeft echter wel grote invloed op de glas- en wandtemperaturen in een zonneshoorsteen. Vooral voor de glaswand, waar thermische glasbreuk op zou kunnen treden, is het van belang een betrouwbaar algoritme te vinden voor de bepaling van de CWC. Naast wetenschappelijk nieuwsgierigheid was dit dan ook de belangrijkste reden voor een poging het algoritme voor de berekening van de CWC met behulp van numerieke stromingssimulatie te verbeteren.

De CFD simulaties zijn onder auspiciën van de onderzoeker uitgevoerd door een externe specialist. Alle simulaties leveren aanzienlijke lagere waarden van de CWC op dan op basis van de analyses in paragraaf 4.2.4 en van literatuuronderzoek te verwachten zou zijn. Als meest waarschijnlijke oorzaken hiervoor worden genoemd het gebruikte RANS turbulentiemodel, en de onbekende turbulenti-intensiteit in de zonneshoorsteen. De simulaties hebben daarmee niet het gewenste resultaat opgeleverd.

Voor een volledig verslag van de CFD simulaties wordt verwezen naar de desbetreffende rapportage (Blocken, B. 2011).

4.3.3 CFD simulaties stromingspatroon

4.3.3.1 Considerans

Door het temperatuurverschil tussen glas en absorber wordt de lucht in een zonneshoorsteen asymmetrisch verwarmd. De warmteoverdracht tussen de warmere lucht aan de binnenwanden op de koelere lucht aan de glaswand komt tot stand door wervels en/of turbulenties. Met behulp van het basale thermische model ad paragraaf 4.2.5 en het stromingsmodel ad paragraaf 4.2.7 is op macroniveau getracht de warmteoverdracht en stromingen in een zonneshoorsteen te modelleren. Er rezen echter verschillende vragen die het wenselijk maakten het stromingspatroon in een zonneshoorsteen in een hogere resolutie te bestuderen, zoals:

- Welke invloed heeft de asymmetrische verwarming op het stromingspatroon van de lucht?
- Is er er wellicht een neerwaartse stroming (koudeval) aan de glaszijde te verwachten bij lagere buitentemperaturen?
- Zou hierdoor wellicht een verticale stratificatie in de zonneshoorsteen kunnen ontstaan?
- Wat is de invloed van een ongelijkmatig stromingspatroon op het eenvoudig stromingsmodel ad paragraaf 4.2.7?
- Is de keuze voor een absorber met een lage emissiecoëfficiënt –zie paragraaf 4.1.6- die grote temperatuurverschillen veroorzaakt, wel optimaal?

Om een beter inzicht in deze problematiek te krijgen is als voorbereiding op het ontwerp van de fysieke testopstelling met behulp van CFD een virtueel prototype gemaakt. Door dit prototype virtueel op te blazen naar grotere afmetingen zou tevens moeten blijken of het model voldoende schaalafhankelijk is en of het te onderzoeken schaalmodel representatief is voor een zonneshoorsteen op ware grootte in de werkelijke bouwpraktijk.

4.3.3.2 De CFD simulaties

Kennis van het vaktechnische domein was in het onderzoeksteam ruimschoots aanwezig, maar de kennis van numerieke rekentechnieken was beperkt. De CFD simulaties zijn dan ook onder auspiciën van de onderzoeker uitgevoerd door een externe specialist .

Simulaties zijn uitgevoerd voor schoorsteenafmetingen van 0,25m * 11m, het fysieke testmodel, en verder voor 0,65m * 11m en 1,0m * 44m (Diepte*Hoogte). De eerste en de derde hebben dus een identieke diepte/hoogte verhouding.

Om de effecten van een asymmetrische verwarming van de lucht te kunnen evalueren zijn voor de absorber twee varianten gesimuleerd: (1) met een spectraal selectieve coating, emissiefactor 0,05 en (2) met een emissiefactor van 0,95 –zie paragraaf 4.1.6.

Voor de invallende stralingsflux zijn twee varianten gesimuleerd: (1) de referentiewaarde van 400 W.m⁻² en (2) een maximum stralingsflux van 900 W.m⁻².

Voor de buitentemperatuur zijn twee varianten gesimuleerd: (1) de referentiewaarde van 20⁰C en (2) een wintertemperatuur van 0⁰C.

Een zeer belangrijk punt bij CFD is de wijze waarop de warmteoverdracht van de wand op het fluïdum, in dit geval de lucht, wordt gemodelleerd. Na evaluatie van enkele mogelijkheden is voor de CWC een functie gebruikt die in het toenmalige stadium van het onderzoek (2009) de meest gereede werd verondersteld te zijn, een voorloper van formule (4.2.4/7).

Hoewel in eerste instantie bedoeld om een kwalitatief beeld te krijgen van de stromingspatronen en snelheidsprofielen in een zonneshoorsteen, zijn de simulaties uitgebreid naar kwantitatieve aspecten zoals de energiebalans, temperaturen en drukverdeling.

4.3.3.3 Resultaten

De CFD simulaties laten een redelijk gelijkmatige stroming zien, waaruit kan worden geconcludeerd dat de in paragraaf 4.3.3.1 vermoede verschijnselen in werkelijkheid niet op zullen treden.

Als verdere resultaten kunnen worden genoemd:

- Een binnenwand met een lage emissiefactor geeft een iets hoger thermisch rendement.
- Het is gebleken dat de simulaties met het model van 0,25 * 11 m, en van een groter model van 1,0 * 44 m elkaar niet volledig dekken. De afwijkingen zijn echter niet groot.
- De energiebalans van het experimentele model laat een thermisch rendement zien dat goed overeenkomt met dat van het grotere model van 1,0 * 44 m. Het schaalmodel wordt daarom in voldoende mate representatief geacht voor grotere modellen.
- De voorspelde stromingspatronen, de temperaturen en luchtsnelheden zijn relatief ongevoelig voor variaties van het raster en de constanten in de gebruikte formule voor de CWC.

Kwalitatief lijken de CFD simulaties hiermee een voldoende betrouwbaar beeld op te leveren. Kwantitatief zijn er echter nauwelijks overeenkomsten met de naderhand in de experimentele onderzoeksofstelling gemeten waarden.

Voor een volledig verslag van de CFD simulaties wordt verwezen naar de desbetreffende rapportage (Uffelen, M. van 2009).

4.3.4 Dynamisch ESP-r model

4.3.4.1 ESP-r model zonneshoorsteen

Van de zonneshoorsteen in de fysieke testopstelling –zie paragraaf 4.4- is een simulatiemodel in de ESP-r omgeving gemaakt. Hiermee kunnen de onderling gekoppelde warmte- en massastromen onder wisselende klimaatomstandigheden worden gesimuleerd – zie paragraaf 1.8.4. Het ESP-r simulatiemodel vraagt geoefende gebruikers, en daarom zijn de simulaties uitgevoerd door specialisten van de TU Eindhoven – zie figuur 1.3.

Om de prestaties van een zonneshoorsteen zo nauwkeurig mogelijk te kunnen voorspellen is het cruciaal het thermodynamisch proces en de stromingskarakteristiek zo nauwkeurig mogelijk te modelleren. Daarom zijn de parameters in het thermische- en het stromingsnetwerk gekalibreerd. Voor het thermisch netwerk is kalibratie vooral van belang voor de keuze van het meest gereede algoritme voor de bepaling van de CWC in een zonneshoorsteen. Voor het stromingsnetwerk is kalibratie noodzakelijk om de waarde vast te stellen van de parameters die het drukverlies door wrijving en plaatselijke weerstanden in een zonneshoorsteen bepalen.

Tabel 4.3.4 geeft de belangrijkste verschillen weer tussen het kalibratie- en het validatieproces.

	Kalibratie	Validatie
Doel	Kalibratie van de stromingscomponenten	Vertrouwen wekken in de dynamische voorspellingen van het model
Model	Alleen de schacht van de zonneshoorsteen is gemodelleerd	Alle onderdelen van het fysieke onderzoeksmodel zijn gemodelleerd
Mechanisme	Zonnestraling is niet gemodelleerd –de oppervlaktetemperaturen zijn input	Zonnestraling is gemodelleerd
Simulatieperiode & Condities	Simulatieperiode van één uur onder veronderstelde stationaire condities	Simulatieperiode van 24 uur onder dynamische condities
Input	Oppervlaktetemperaturen en Drukverschillen	Werkelijke klimaatcondities

Tabel 4.3.4 –Vergelijking tussen Kalibratie en Validatie

4.3.4.2 Kalibratie thermisch netwerk

Het thermisch netwerk reguleert de warmteoverdracht tussen de wanden en de lucht. ESP-r beschikt over enkele standaard betrekkingen voor de CWC, waarvan die van Molina & Maestre volgens formule (4.2.4/10) het meest geschikt werd geacht voor de modellering van een zonneshoorsteen. Een gevoeligheidsanalyse van de door het ESP-r model voorspelde prestatie-indicatoren met enkele andere betrekkingen toonde slechts een verwaarloosbaar verschil aan. De conclusies uit paragraaf 4.2.4.4 over de geringe gevoeligheid van de CWC op de energieprestatie werd hierdoor bevestigd.

4.3.4.3 Kalibratie stromingsnetwerk

Het stromingsnetwerk reguleert de luchtstroming in een zonneshoorsteen op basis van temperatuurafhankelijke drukverschillen en drukverliezen.

Het ESP-r model werd opgedeeld in 9 zones van elk $\approx 1,22$ m, corresponderend met de zones van het thermisch netwerk. Voor de kalibratie werden de gemeten oppervlaktetemperaturen van de glaswand en de wanden van de absorber in het ESP-r model ingevoerd en gebruikt om de luchttemperaturen te berekenen. Dit proces werd uitgevoerd voor 10 verschillende tijdsintervallen lopend van december 2009 tot april 2010. De berekende luchttemperaturen bleken voor het overgrote deel binnen een bandbreedte van $\pm 5\%$ van de gemeten waarden te liggen - zie ook paragraaf 4.4.3.

Op basis van de berekende luchttemperaturen werden de drukverschillen en de luchtdebieten in de 9 zones berekend. Deze werden aansluitend vergeleken met de gemeten waarden.

Het luchtdebiet werd bepaald op basis van metingen van de luchtsnelheid op 2 punten in de doorsnede en op 4 verschillende hoogten. De snelheidsmetingen gaven een variatie te zien tot 20% over de doorsnede, op basis waarvan werd geconcludeerd dat het voorspelde luchtdebiet een nauwkeurigheid heeft van $\pm 20\%$.

Op basis van de berekende en gemeten luchtsnelheden kon het drukverlies van de zonneshoorsteen worden bepaald.

4.3.4.4 Drukverliezen

De stromingsknooppunten zijn in het ESP-r model verbonden met behulp van formule (4.2.7/5). De waarden A, L en D zijn ontleend aan de geometrie van het fysieke testmodel. De waarden ρ en Δp volgen uit de simulaties, $\Sigma \zeta$ wordt door het programma berekend en C_f en ε , de wandruwheid voor de bepaling van de wrijvingsfactor λ , worden gevarieerd.

Het drukverlies door wrijving is bij een luchtsnelheid van $\approx 1 \text{ m.s}^{-1}$ gering –zie ook figuur 4.2.7/1 in paragraaf 4.2.7. De wandruwheid blijkt voor het bereik van 1 - 10 mm slechts een verwaarloosbaar effect te hebben. In het model werd daarom een vaste waarde van 1 mm aangehouden.

Omdat uit de metingen niet goed het drukverschil over de inlaat- en uitlaatopening kon worden bepaald, bestond de kans dat een deel van deze invloeden bij het drukverlies in de schacht zou worden verrekend. Daarom is ervoor gekozen om alle plaatselijke weerstandscoefficienten ξ van de schacht toe te wijzen aan de inlaatopening en voor de schacht alleen de wandruwheid in rekening te brengen. Dit is een redelijke keuze; de instroomopening en de regelklep zijn verantwoordelijk voor het grootste deel van het totale drukverlies.

Voor een volledig verslag van de ESP-r simulaties wordt verwezen naar de desbetreffende rapportage (Gontikaki, Marietta et al 2010).

4.4 Validatie van de simulaties

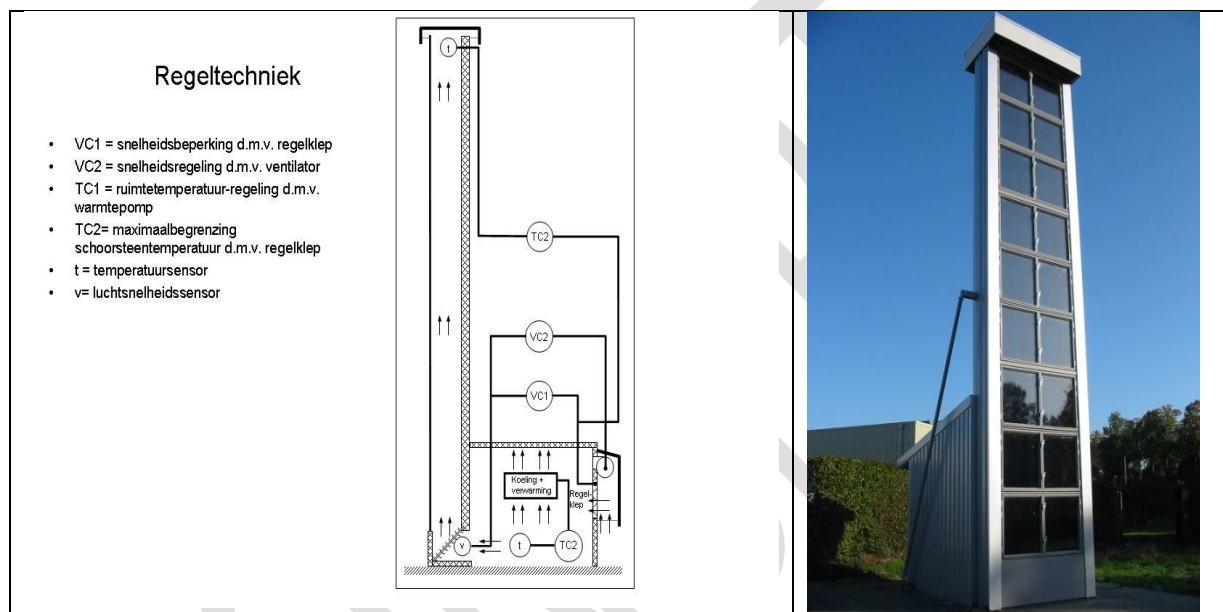
4.4.1 Fysieke testopstelling

Mede op basis van het virtuele CFD model –zie paragraaf 4.3.3- is een fysieke testopstelling gebouwd waarmee de in werkelijkheid optredende fenomenen van warmteoverdracht en stromingen in een zonneshoorsteen onder wisselende klimaatcondities zijn gemeten. De meetresultaten zijn gebruikt voor de validatie van het basale rekenmodel ad paragraaf 4.2.8 en het dynamische ESP-r simulatiemodel ad paragraaf 4.3.4.

4.4.1.1 Afmetingen van de fysieke testopstelling

Het testmodel is gebouwd op het terrein van Peutz bv te Molenhoek. Dit terrein valt onder een bestemmingsplan, waardoor een bouwvergunning en een welstandsverklaring vereist zijn. De maximum bouwhoogte voor op dit terrein is 12 m. Voor de testopstelling is gekozen voor een hoogte van 11 m. De breedte is arbitrair vastgesteld op 2,0 m.

Het model is pal op het zuiden georiënteerd –zie figuur 4.4.1/1.



Figuur 4.4.1/1 – Fysieke testopstelling van de zonneshoorsteen

Uitgangspunt voor de vaststelling van de diepte van het testmodel was dat bij de referentieconditie $\Phi_{zon} = 400 \text{ W.m}^{-2}$ en $\theta_e = 20^{\circ}\text{C}$ –zie paragraaf 4.2.3- een luchtsnelheid van 1 m.s^{-1} zou moeten kunnen worden gerealiseerd. Bij deze conditie moet het drukverlies in evenwicht zijn met de thermische trek.

Met behulp van het eenvoudige rekenmodel ad zie paragraaf 4.2.8 zijn globale berekeningen gemaakt. De hieruit berekende diepte D van het model is 0,22 m. Veiligheidshalve is gekozen voor een waarde van $D = 0,25 \text{ m}$. Het nominale luchtdebiet bedraagt hierbij $0,5 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ ($1.800 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$)

Luchtsnelheden $> 1,0 \text{ m.s}^{-1}$ zijn te realiseren bij buitentemperaturen $\theta_e < 20^{\circ}\text{C}$ en/of een hogere stralingsflux Φ_{zon} van de zon. Bij $\Phi_{zon} = 800 \text{ W.m}^{-2}$ kan nog een luchtsnelheid van $1,0 \text{ m.s}^{-1}$ worden gerealiseerd tot $\theta_e = 25^{\circ}\text{C}$.

4.4.1.2 Uitvoering van het testmodel

De glaswand is uitgevoerd met SGG Diamant Planitherm Total low E –zie tabel 4.1.4. De glaswand is uitgevoerd met te openen delen in verband met eventuele reiniging en bereikbaarheid van de meetsensoren in het model. Het glas is gevat in een houten kozijnconstructie. De reductiefactor R netto/bruto glasoppervlak- zie paragraaf 4.2.5.3 is $\approx 0,83$. Voor een zonneshoorsteen is dit een zeer laag percentage, te wijten aan de houten kozijnen en de vele te openen delen. Voor reële zonneshoorstenen met metalen kozijnen moet een glaspercentage van 90% - 95% mogelijk zijn.

De U-waarde van het glas volgens NEN-EN 763 is $1,32 \text{ W.m}^2.\text{K}^{-1}$. De effectieve U-waarde van de glaswand, inclusief de houten kozijnen en PSI-waarden⁵⁵, berekend volgens NEN-EN-ISO 10077-2, is $1,58 \text{ W.m}^2.\text{K}^{-1}$.

De binnenwand is, van buiten naar binnen, als volgt opgebouwd:

- Metalen gevelbeplating
- 16 mm multiplex $-\lambda = 0,13 \text{ [W.m}^2.\text{K}^{-1}]$
- 120 mm steenwol $-\lambda = 0,04 \text{ [W.m}^2.\text{K}^{-1}]$
- 16 mm multiplex $-\lambda = 0,13 \text{ [W.m}^2.\text{K}^{-1}]$
- 120 mm steenwol $-\lambda = 0,04 \text{ [W.m}^2.\text{K}^{-1}]$
- Absorber Mirotherm –zie paragraaf 4.1.6

De warmteweerstand van de constructie is berekend op $4,25 \text{ W.m}^2.\text{K}^{-1}$.

4.4.1.3 Testopstelling

Het detailontwerp van de testopstelling is onder auspiciën van de hoofdonderzoeker en het onderzoeksteam gemaakt door Peutz bv, die ook alle metingen hebben uitgevoerd en verwerkt –zie figuur 4.4.1/1.

Aan de voet van de schoorsteen is een bouwkundige ruimte voorzien, de testcel, met de volgende voorzieningen:

- Een regeninslagvrije luchtaanzuigopening;
- Een luchtverwarmings- en koelunit waarmee de lucht in de ruimte kan worden verwarmd op 20°C bij $\theta_e \leq 20^{\circ}\text{C}$ of gekoeld op 24°C bij $\theta_e \geq 20^{\circ}\text{C}$. Bij $\theta_e \leq 0^{\circ}\text{C}$ en $\geq 30^{\circ}\text{C}$ is de capaciteit van de unit onvoldoende en wordt het meetprogramma onderbroken.
- Een regelklep waarmee het luchtdebiet naar de schoorsteen kan worden geregeld.
- Een hulpventilator waarmee zo nodig buitenlucht in de test cel kan worden geblazen.
- Het data acquisitiesysteem voor continue registratie van de te registreren parameters, bestaande uit een 96-kanaals datalogger met maximaal 32 analoge kanalen en 64 temperatuurkanalen gekoppeld aan een PC. Momentane meetwaarden zijn per minuut geregistreerd en over 10 minuten gemiddeld en opgeslagen. De gegevens zijn direct in een Excelbestand weggeschreven waarmee volume en capaciteitsberekeningen konden worden gemaakt.

4.4.1.4 Instrumentatie

Met het oog op het kalibreren en valideren van het ESP-r simulatiemodel is de instrumentatie onder auspiciën van de onderzoeker en het onderzoeksteam ontworpen door de TU Eindhoven, en door Peutz gematerialiseerd en geïnstalleerd. Meetopnemers zijn aangebracht voor de luchttemperatuur (15), oppervlaktetemperaturen (36), luchtsnelheid (8), drukken (4), solarimeters (3), relatieve luchtvochtigheid (2) en windsnelheid (2).

Door middel van momentane metingen en rook is het stromingspatroon in de schacht onderzocht. Op basis van deze informatie is de positie van de meetopnemers voor de continue registratie geoptimaliseerd.

4.4.1.5 Luchtsnelheid

Voor de luchtsnelheid in het testmodel kon in principe worden gekozen uit de volgende opties:

- Variabel debiet (*free running*): De luchtsnelheid wordt geheel bepaald door de klimaatcondities van buitentemperatuur en stralingsflux en kan dus variëren. Als voordeel van deze optie kan worden gezien dat de variërende afzuigcapaciteit van een zonneshoorsteen kan worden bepaald bij wisselend buitenklimaat. Voor een zonneshoorsteen, bestemd voor natuurlijke woonhuisventilatie zou dit interessante gegevens kunnen opleveren –zie paragraaf 4.1.1.
- Constant debiet: De luchtsnelheid is onafhankelijk van de klimaatcondities. Met behulp van een hulpventilator wordt een minimaal luchtdebiet in de schoorsteen gehandhaafd als de klimaatomstandigheden dat noodzakelijk maken. In principe zou dit het geval zijn bij een buitentemperatuur $\geq 20^{\circ}\text{C}$ en/of een zonstraling $\leq 400 \text{ W.m}^2$.

⁵⁵ PSI-waarde is de grootte waarmee de warmteverliezen door lijnvormige aansluitingen wordt aangeduid

Omdat de zonneschoorsteen als afzuigstelsysteem voor de gebouwventilatie functioneert waarbij een wisselend debiet ongewenst is, is het onderzoek uitgevoerd met constant debiet. De testcel is hiertoe voorzien van een toevoerventilator die lucht in de ruimte blaast als het luchtdebiet in de schoorsteen bij bepaalde klimaatomstandigheden beneden de gewenste waarde zou dalen. Een automatische regeling meet de luchtsnelheid in de schoorsteen en regelt het toerental van de ventilator. Bij een te hoog debiet wordt het luchtdebiet met behulp van een kleppenregister geknepen. Het luchtdebiet wordt hierdoor gestabiliseerd.

4.4.2 Metingen

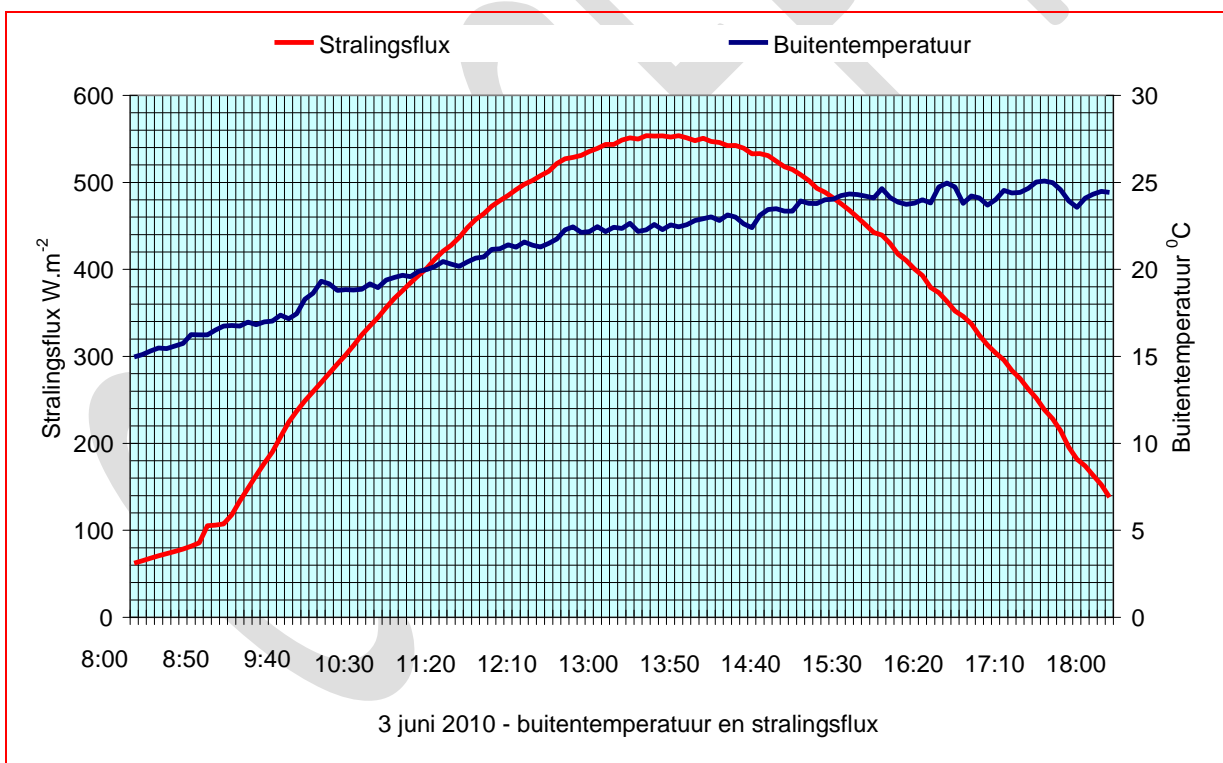
In de periode van november 2009 tot juni 2010 zijn metingen uitgevoerd en vastgelegd in MS Excel bestanden. De meetgegevens zijn gebruikt voor de kalibratie en validatie van het eenvoudige rekenmodel ad paragraaf 4.2.8 en het dynamische ESP-r model ad paragraaf 4.3.4.

Tevens zijn uit de metingen van de externe en de interne stralingsflux van de zon de factoren $f1$ en $f2$ afgeleid. Met behulp hiervan werd in het eenvoudige thermisch model ad paragraaf 4.2.5 de invallende stralingsflux worden gesplitst in fracties die worden geabsorbeerd in respectievelijk de binnenste ruit van de glaswand $f1$ en in de absorber $f2$ – zie paragraaf 7.6.5.

De volgende paragrafen geven een beeld van de metingen op 3 juni 2010, een zonnige zomerdag en op 15 december 2009, een zonnige winterdag.

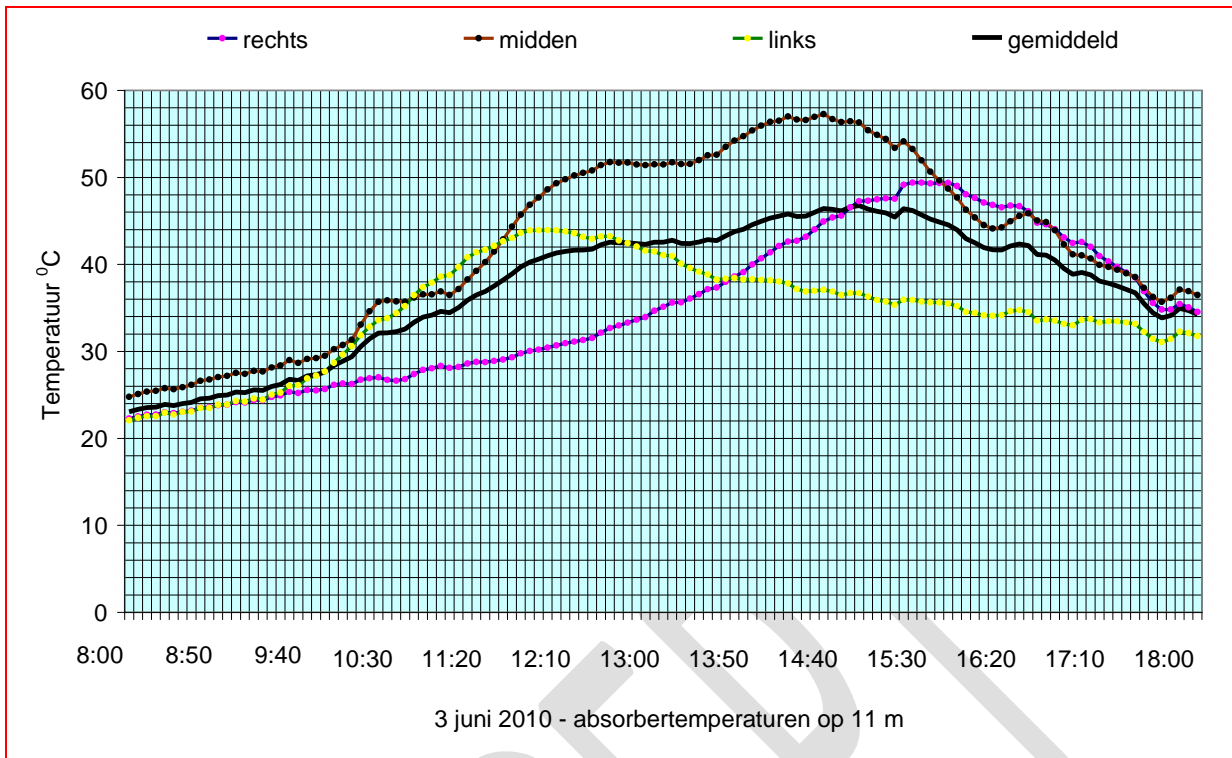
Metingen 3 juni 2010

Dit is een zonnige zomerdag met een stralingsflux oplopend tot ca. 550 W.m^{-2} en een temperatuur oplopend tot ca. 25°C - zie figuur 4.4.2/1.



Figuur 4.4.2/1 – Buitentemperatuur en stralingsflux van de zon op 3 juni 2010

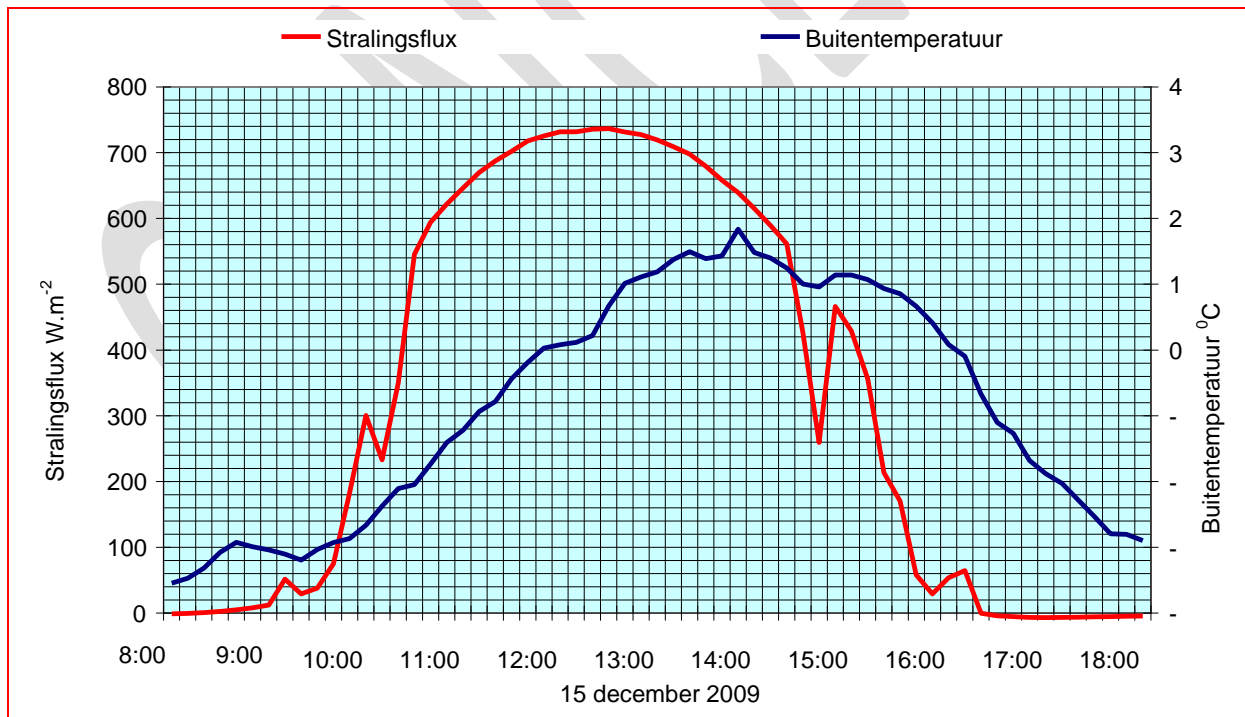
In figuur 4.4.2/2 zijn de gemeten absorbertemperaturen weergegeven op 11 m hoogte en op 3 punten respectievelijk, rechts, midden en links. De figuur laat op elk meetpunt een maximum zien, oplopend van links – ca. 12.00 uur - via het midden –ca. 15.00 uur - naar rechts – ca. 16.00 uur. De dagelijkse gang van de zon van Oost via Zuid naar West is oorzaak van grote temperatuurverschillen over de breedte van de zonneschoorsteen. Deze verschillen zijn onverwacht groot, tot ca. 20K om 14.00 uur. Deze temperatuurverschillen over de breedte van de absorber zijn ook oorzaak van verschillen in luchttemperatuur, die op hun beurt weer oorzaak zijn van verschillen in luchtsnelheid.



Figuur 4.4.2/2 - Absorbertemperaturen op 11 m hoogte

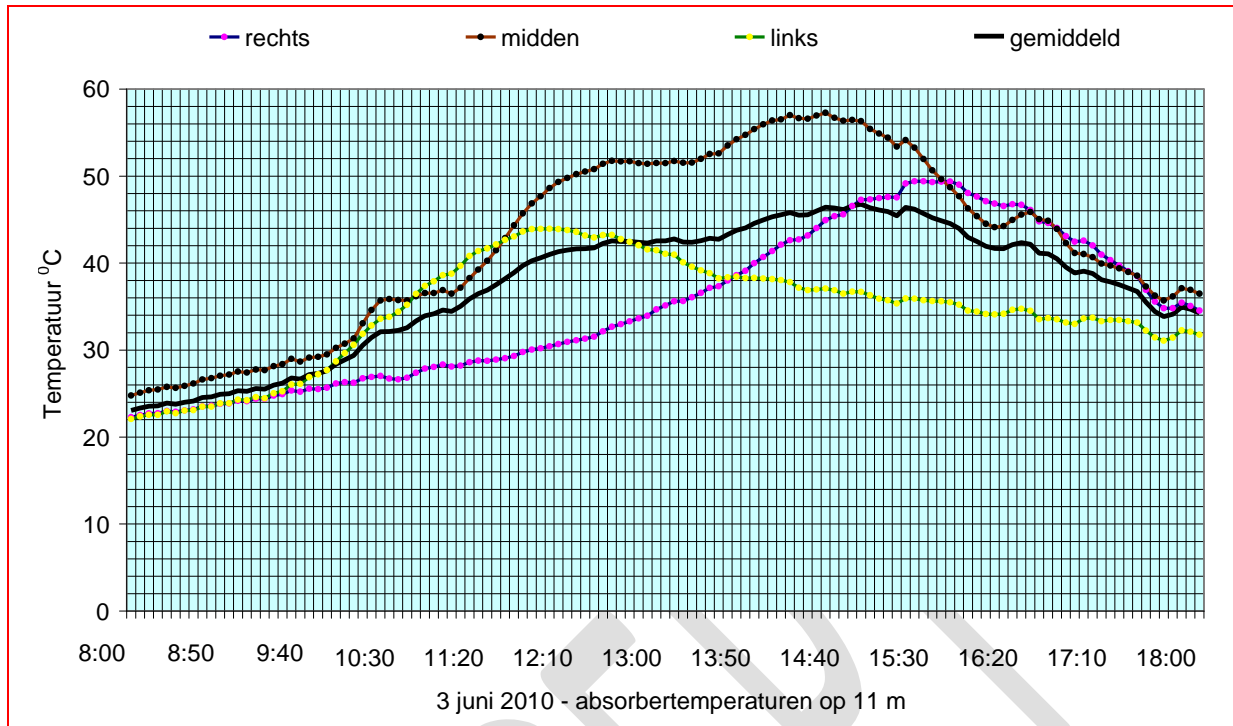
Metingen 15 december 2009

Dit is een zonnige winterdag met een stralingsflux oplopend tot ca. 740 W.m^{-2} en een temperatuur rond het vriespunt - zie figuur 4.4.2/3.



Figuur 4.4.2/3 – Buitentemperatuur en stralingsflux van de zon op 15 december 2009

Figuur 4.4.2/4 geeft de absorbertemperaturen weer op dezelfde meetpunten als in figuur 4.4.2/2. Ook in deze figuur is de dagelijkse gang van de zon van Oost via Zuid naar West met de inherente temperatuurverschillen over de breedte van de absorber te zien. Deze verschillen zijn hier nog veel groter dan op 3 juni met een maximum van ca. 34 K om 14.00 uur. De verschillen in luchttemperatuur en luchtsnelheid zijn navenant.



Figuur 4.4.2/4 - Absorbertemperaturen op 11 m hoogte

De metingen geven een goed beeld van de gecompliceerde thermodynamische processen in een zonneshoorsteen. Ondanks de vele meetpunten is het niet eenvoudig om ondubbelzinnige gemiddelde waarden vast te stellen van de optredende temperaturen en lichtsnelheden, die nodig zijn voor het berekenen van de prestaties van een zonneshoorsteen.

4.4.3 Dynamisch gedrag

Vergelijking van de figuren 4.4.2/1 en 4.4.2/2 (metingen 3 juni 2010) en 4.4.2/3 en 4.4.2/4 (metingen 15 december 2009) laat zien dat de maxima van stralingsflux en gemiddelde absorbertemperatuur ca 90 minuten in fase zijn verschoven. Deze faseverschuiving kan alleen maar worden verklaard door de in de glaswand en absorber geaccumuleerde warmte, waardoor de oppervlaktetemperaturen hiervan na-ijlen bij de variatie in stralingsflux. Dit is nogal verrassend omdat bij de modelvorming en de opbouw van de zonneshoorsteen is uitgegaan van een thermisch lichte constructie, waarbij een dergelijke faseverschuiving niet werd verwacht.

Nagegaan is of dit gegeven kon worden gebruikt om tot een betere overeenstemming te komen tussen het analytisch rekenmodel en de metingen –zie paragraaf 4.4.4. Dit blijkt echter niet het geval te zijn. .

4.4.3.1 Bepaling van de factoren f_1 en f_2

In het fysieke onderzoeksmodel is de stralingsflux van de zon binnen en buiten de zonneshoorsteen gemeten, waaruit de factoren f_1 en f_2 in het basaal thermisch model ad paragraaf 4.2 zijn bepaald op $f_1 = 0,25$ en $f_2 = 0,75$.

4.4.3.2 Referenties

Voor een gedetailleerde omschrijving van de testopstelling wordt verwezen naar de desbetreffende rapportage van Peutz (Bruggema, H. 2009). Alle meetresultaten zijn online beschikbaar voor nadere evaluatie.

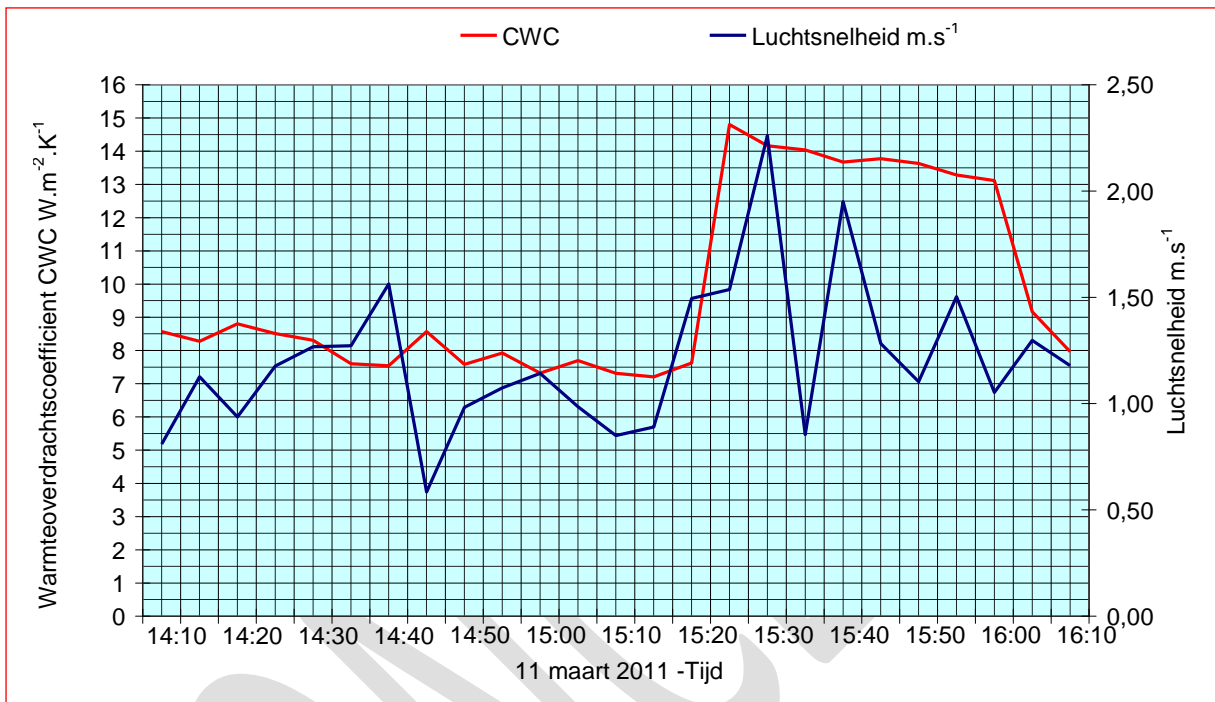
Voor een bredere analyse van de meetresultaten zie het eindrapport “Onderzoek Zonneshoorsteen en Zonnefacade” (Bronsema, B. 2012).

4.4.4 Evaluatie formules CWC

In paragraaf 4.2.4.3 is op theoretische gronden voor de CWC formule (4.2.4/7) afgeleid. De fysieke testopstelling is gebruikt om deze formule te evalueren. Door de zonneshoorsteen enkele uren in de *free running* modus te laten werken is informatie gegenereerd over de combinatie van lichtsnelheid en

temperatuurverschil tussen wanden en lucht. Uit de berekende thermisch vermogens is met behulp van de gemiddelde temperatuurverschillen tussen wanden en lucht de CWC berekend. Omdat in het testmodel met een hydraulische diameter van 0,44m en lichtsnelheden $> 1 \text{ m.s}^{-1}$ gedwongen convectie dominant is – zie figuur 4.2.4/2- is alleen de relatie CWC en lichtsnelheid geëvalueerd.

Figuur 4.4.4 laat over de periode 14.10 tot 16.10 het verband zien tussen de lichtsnelheid en de berekende CWC. Deze ligt van 14.10 tot 15.20 bij lichtsnelheden rond $1,2 \text{ m.s}^{-1}$ tussen $\approx 7,5$ en $8,5 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$. Na 15.20 treedt een scherpe piek op in zowel de lichtsnelheid als in de CWC die daarna bij fluctuerende lichtsnelheden weer afneemt van $14,5$ tot $13,0 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$. Er is dus een duidelijk verband tussen de lichtsnelheid en de CWC.



Figuur 4.4.4 – Relatie lichtsnelheid en CWC

De gemiddelde CWC over de gehele meetperiode van 11 maart 2011 is berekend op $8,65 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$. Om dezelfde waarde te verkrijgen met de algemene mengformule (4.2.4/7) zou deze als volgt moeten worden gemodificeerd

$$h_{c,m} = \left[\frac{1}{2} (h_w - \theta_\infty) \right] + \left(\frac{8}{3} w \right)^{1/3} \quad (4.2.4/8)$$

In deze formule is de invloed van de lichtsnelheid drastisch vergroot en die van de vrije convectie verkleind. Als een zonneshoorsteen wordt ontworpen op een lichtsnelheid $\geq 1,0$ à $1,5 \text{ m.s}^{-1}$ is de invloed van de vrije convectie in formule (4.2.4/8) gering en kan de CWC uitsluitend worden gebaseerd op de lichtsnelheid volgens de eenvoudige formule $h_{c,m} = 8*w$.

*NB: Deze formule geldt voor het testmodel. Voor zonneshoorstenen met grotere hydraulische diameters wordt aanbevolen formule (4.2.4/9) te gebruiken: $h_{c,m} = 6,5*w$ - zie paragraaf 4.2.4.3.*

4.4.5 Validatie basaal rekenmodel

4.4.5.1 Inleiding

Het basale rekenmodel ad paragraaf 4.2.8 sluit door de grote inzichtelijkheid in de thermodynamische processen die eraan ten grondslag liggen goed aan bij de ingenieurspraktijk. Omdat het ook de basis vormt van het rekenmodel voor de praktijk ad paragraaf 4.5.9, is validatie op basis van metingen in de fysieke testopstelling noodzakelijk.

Het basale rekenmodel is overigens een veel grovere benadering van de werkelijkheid dan het dynamische ESP-r model ad paragraaf 4.3.4. dat een meer wetenschappelijke karakter heeft. Voor validatie van het ESP-r model zie paragraaf 4.4.3.

Het basale rekenmodel berust op het thermisch model ad paragraaf 4.2.5 en het stromingsmodel ad paragraaf 4.2.7, die afzonderlijk zijn gevalideerd. Met behulp van het thermisch model zijn voor het fysieke testmodel ad paragraaf 4.4.1 de wand-, glas en luchttemperaturen θ_w , θ_{gl} en θ_∞ berekend en vergeleken met gemeten waarden. Voor straling is formule (4.2.5/9) gebruikt; voor convectieve warmteoverdracht formule (4.2.4/7).

4.4.5.2 Validatie basaal thermisch model - metingen 15 december 2009

Op deze zonnige winterdag zijn de stralingsflux van de zon Φ_{zon} , en de buitentemperaturen θ_e van 11.00 tot 14.00 uur als aangegeven in figuur 4.4.1/4. Voor de periode van 11.50 tot 13.00 uur kan de stralingsflux met een gemiddelde van 730 W.m^{-2} als quasi stationair worden beschouwd waardoor gebruik van het rekenmodel verantwoord lijkt. De buitentemperatuur loopt in dezer periode op van $-0,2^\circ\text{C}$ tot $+1,8^\circ\text{C}$ met een gemiddelde van $0,55^\circ\text{C}$.

Met het rekenmodel zijn voor de bovengenoemde periode de wand- glas- en luchttemperaturen berekend, en afgezet tegen de gemeten waarden –zie tabel 4.4.5/1.

h > m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	gemiddeld
Berekening												
θ_{gl} berekend	29,77	30,81	31,87	32,90	33,93	34,97	35,98	37,02	38,02	39,02	40,04	34,94
θ_∞ berekend	21,22	22,44	23,65	24,85	26,05	27,24	28,43	29,61	30,78	31,95	33,11	27,21
θ_w berekend	46,93	48,13	49,30	50,47	51,63	52,77	53,92	55,09	56,23	57,36	58,47	52,75
Meetgegevens												
θ_{gl} gemeten				34,92				33,69			36,72	35,11
θ_∞ gemeten	20,92	22,10	23,28	24,46	25,45	26,45	27,44	28,43	29,66	30,88	32,11	26,47
θ_w gemeten	22,81	24,43	26,04	27,66	31,05	34,44	37,83	41,21	43,44	45,67	47,90	34,77

Tabel 4.4.5/1 – Berekende en gemeten temperaturen in het fysieke testmodel -15 december 2009

Conclusies:

- De gemeten luchttemperaturen komen redelijk overeen met de berekende waarden.
- De gemeten glastemperatuur is aan de top 3,3 K lager dan de berekende waarde.
- De gemeten wandtemperatuur is aan de top ca 10,6 K lager dan de berekende waarde.

De uitgaande luchttemperatuur kan met het eenvoudig thermisch model redelijk nauwkeurig worden voorspeld, maar de oppervlaktetemperaturen van wanden en glas niet. Dit versterkt de conclusie uit paragraaf 4.2.4.4 dat met betrekking tot de energieprestatie de wand- en glastemperaturen in een zonneshoorsteen betrekkelijk irrelevant zijn.

Een poging is gedaan om via *trial and error* de factoren en exponenten in de gebruikte formules zodanig aan te passen dat een betere overeenkomst tussen de metingen en berekeningen wordt bereikt. Dit heeft echter geen betere resultaten opgeleverd.⁵⁶

4.4.5.3 Validatie basaal thermisch model - metingen 3 juni 2010

Op deze zonnige dag zijn de stralingsflux van de zon Φ_{zon} , en de buitentemperaturen θ_e van 11.00 tot 14.00 uur als aangegeven in figuur 4.4.2/1. Voor de periode van 13.00 tot 14.00 uur kan de stralingsflux met een gemiddelde van 550 W.m^{-2} als quasi stationair worden beschouwd waardoor gebruik van het rekenmodel verantwoord is. De buitentemperatuur in deze periode ligt vrij constant op ca $22,6^\circ\text{C}$.

Met het rekenmodel zijn voor de bovengenoemde periode de wand- glas- en luchttemperaturen berekend, en afgezet tegen de gemeten waarden, tabel 4.4.2/2.

De gemeten lucht- en wandtemperaturen komen goed overeen met de berekende waarden. De glastemperatuur wijkt af.

⁵⁶ Zie onderzoeksrapport deel I (Bronsema 2012)

h > m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	gemiddeld
Berekening												
θ_{gl} berekend	27,42	28,27	29,11	29,93	30,76	31,58	32,40	33,21	34,01	34,80	35,59	31,55
θ_{∞} berekend	20,97	21,93	22,88	23,83	24,77	25,71	26,64	27,56	28,48	29,39	30,30	25,68
θ_w berekend	34,81	35,76	36,70	37,63	38,55	39,48	40,39	41,30	42,20	43,11	43,99	39,45
Meetgegevens												
θ_{gl} gemeten				38,00				40,70			31,70	36,80
θ_{∞} gemeten	22,90			27,10				27,70			30,90	27,15
θ_w gemeten	28,60			33,30				43,90			43,60	37,35

Tabel 4.4.5/2 – Berekende en gemeten temperaturen in het fysieke testmodel -3 juni 2010

4.4.5.4 Conclusies kalibratieresultaten eenvoudig thermisch model

1. De berekende luchttemperaturen komen goed overeen met de gemeten waarden. Het basale thermisch model kan hierdoor geschikt worden geacht voor de berekening van energieprestaties.
2. De verschillen tussen de berekende en de gemeten waarden van wand- en glastemperatuur kunnen worden toegeschreven aan onjuiste betrekkingen voor de warmteoverdrachtscoëfficiënten voor convectie en straling, maar wellicht ook aan het thermisch model als zodanig.
3. Het eenvoudig thermisch model is gebaseerd op *steady-state* condities waarbij geen warmteaccumulatie in glas en absorber plaatsvindt. Verondersteld werd dat dit voor een lichte constructie als een zonneshoorsteen verantwoord zou zijn. Een analyse van enkele metingen bracht aan het licht dat er tussen de maximum stralingsflux van de zon en de maximum temperatuur van glas en absorber een tijdsverschil ligt van ongeveer 1,5 uur –zie de figuren in paragraaf 4.4.2. Deze faseverschuiving is uiteraard een gevolg van de in de glaswand en absorber geaccumuleerde warmte, waardoor de oppervlaktetemperaturen hiervan na-ijlen bij de variatie in stralingsflux. Dit is een belemmering voor de vergelijking van het *steady-state* thermisch model en de *real-time* metingen.

Omdat de energieprestatie het belangrijkste kenmerk van een zonneshoorsteen is, zijn in het kader van het onderzoek verder geen pogingen ondernomen de algoritmen voor de berekening van wand- en glastemperaturen te verbeteren.

4.4.5.5 Validatie basaal stromingsmodel

Bij de validatie van het stromingsmodel gaat het in de eerste plaats om het vaststellen van de factoren die het drukverlies van de zonneshoorsteen in de fysieke testopstelling bepalen, wrijvingsverliezen en plaatselijke weerstanden.

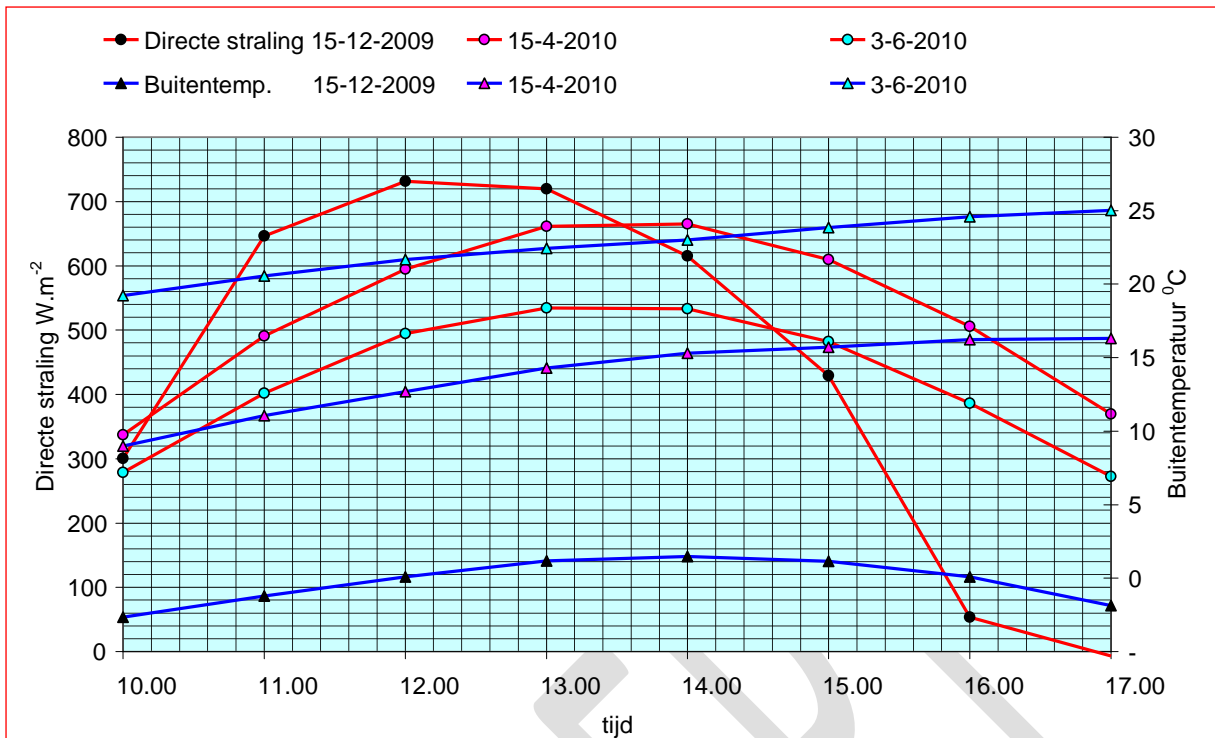
Bij het bepalen van de optimale diepte van dit model is er arbitrair vanuit gegaan dat bij de referentieconditie $\Phi_{zon} = 400 \text{ W.m}^{-2}$ en $\theta_e = 20^\circ\text{C}$ een luchtsnelheid van 1 m.s^{-1} moet kunnen worden gerealiseerd- zie paragraaf 4.4.1.1. Bij deze conditie moet de thermische trek in evenwicht zijn met het berekende drukverlies volgens tabel 4.4.2/3.

Op basis van de metingen in de fysieke testopstelling is nagegaan of en in hoeverre deze berekening de realiteit weerspiegelt.

Luchtsnelheid	1,0	[m.s ⁻¹]
Dynamische druk - formule (4.2.7/1)	(0,6)	[Pa]
Δp instroomopening bij $\zeta = 1,25$ – formule (4.2.7/4)	0,75	[Pa]
Δp Regelklep bij $\zeta = 1,0$ – formule (4.2.7/4)	0,45	[Pa]
Wrijvingsweerstand - Dh= 0,444 m - $\lambda = 0,03$ – formule (4.2.7/2)	0,40	[Pa]
Δp Regenkap bij $\zeta = 0,5$ – formule (4.2.7/4)	0,30	[Pa]
Totaal drukverlies Pa	1,90	[Pa]

Tabel 4.4.5/3 – Geraamd drukverlies van het onderzoeksmodel

Voor de kalibratie van het stromingsmodel zijn meetgegevens gebruikt van verschillende dagen; enkele hiervan zijn weergegeven in figuur 4.4.5/1.



Figuur 4.4.5/1 – Directe straling op verticaal vlak en buitentemperatuur tijdens 3 testdagen

Een korte karakteristiek:

- 15-12-2009: Een heldere winterdag met een directe stralingsflux oplopend tot $\approx 730 \text{ W.m}^{-2}$ en buitentemperaturen om het vriespunt –zie ook figuur 4.4.2/3
- 15-04-2010: Een heldere voorjaarsdag met een directe stralingsflux oplopend tot 665 W.m^{-2} en buitentemperaturen oplopend van 9°C tot 16°C .
- 03-06-2010: Een warme zomerdag met een directe stralingsflux oplopend tot 535 W.m^{-2} en buitentemperaturen oplopend van 19°C tot 25°C – zie ook figuur 4.4.2/1.

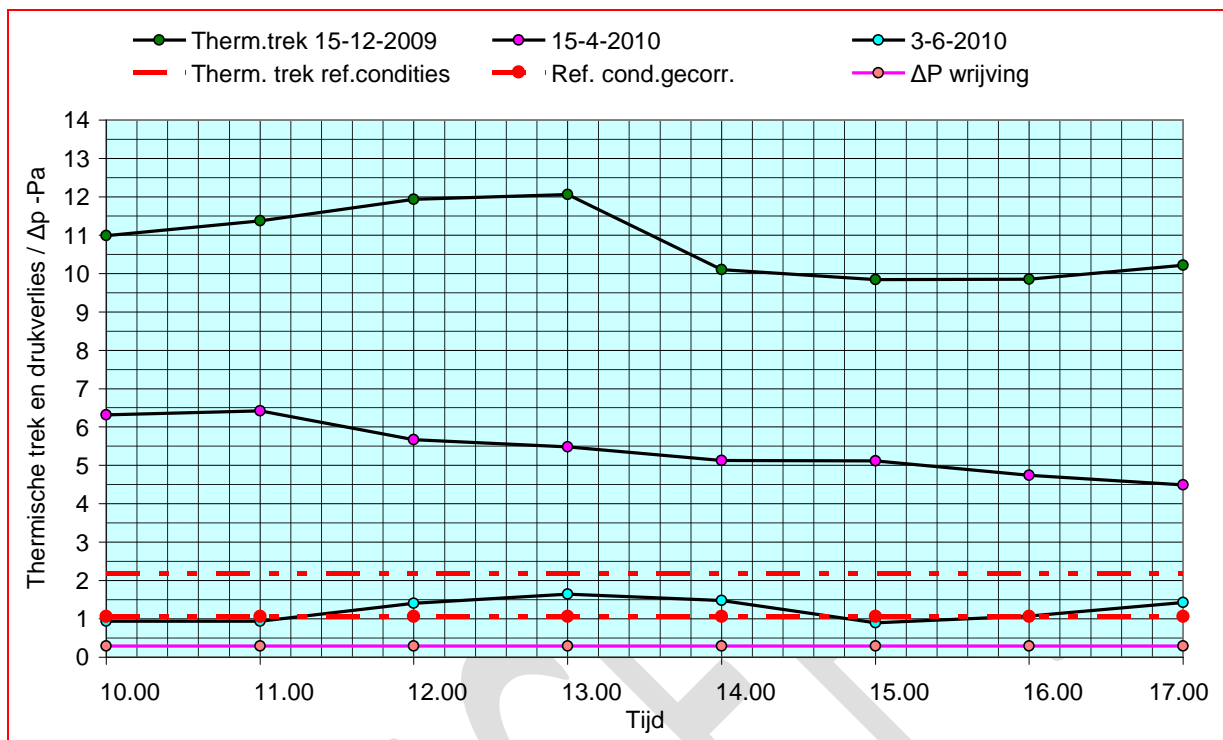
Voor deze 3 testdagen zijn de gemeten uitgaande luchttemperaturen gebruikt om de thermische trek van de zonneshoorsteen te bepalen, één en ander volgens de methodiek van paragraaf 4.2.1 –zie figuur 4.4.5/2. In deze figuur is ook de thermische trek bij referentiecondities ($\Phi_{\text{zon}} = 400 \text{ W.m}^{-2}$ en $\theta_{\text{e}} = 20^{\circ}\text{C}$) aangegeven.

De zomerdag van 03-06-2010 ligt het dichtst bij de referentiecondities. De stralingsflux is echter hoger dan de referentiewaarde, echter ook de buitentemperatuur, twee effecten die elkaar voor wat betreft de thermische trek enigszins neutraliseren. De gemeten luchtsnelheid over de testperiode is met $\approx 0,82 \text{ m.s}^{-1}$ lager dan de referentiesnelheid van $1,0 \text{ m.s}^{-1}$ waardoor het drukverlies kleiner is dan bij de referentie. De hiervoor gecorrigeerde thermische trek bij de referentie is eveneens in figuur 4.4.2/2 aangegeven. Deze waarde ligt dicht bij de op 03-06-2010 gemeten waarden, hetgeen inhoudt dat thermische trek en drukverlies op deze dag ongeveer in evenwicht zijn. Verdere kalibratie van het model daarom niet meer nodig.

Enkele interessante observaties:

- Het drukverlies door wrijving is gering, zowel in absolute waarde als in deel van het totale drukverlies.
- Op de testdag 03-06-2010 is de gemeten luchtsnelheid lager dan de referentiewaarde van $1,0 \text{ m.s}^{-1}$. Dit betekent dat de hulpventilator, die de snelheid op 1 m.s^{-1} zou moeten houden niet is ingeschakeld, een observatie die overeenkomt met een mededeling van de testoperator.
- Geconcludeerd kan worden dat bij deze lage luchtsnelheid de regelklep geheel geopend moet zijn geweest en dat de totale weerstandscoefficiënt $\Sigma\zeta$ van het systeem volgens tabel 4.4.5/3 een reële waarde is.

- Bij de meeste metingen ligt de luchtsnelheid rond $1,0 \text{ m.s}^{-1}$, waardoor het drukverlies van de zonneshoorsteen als zodanig als constant kan worden beschouwd. Het verschil tussen thermische trek en drukverlies wordt gecompenseerd door de regelklep.



Figuur 4.4.5/2 – Thermische trek in de testschoorsteen tijdens drie testdagen

4.4.5.6 Conclusies basale rekenmodel

- Het basale thermisch model heeft een redelijke betrouwbaarheid. De luchttemperaturen blijken met goede nauwkeurigheid te kunnen worden berekend. De gevoeligheid voor de ingevoerde warmteoverdrachtscoëfficiënten blijkt gering te zijn. In combinatie met de gegeven luchtsnelheid geeft dit redelijk betrouwbare informatie over de energieprestaties van een zonneshoorsteen.
- Het basale stromingsmodel inclusief de daarin gebruikte parameters is voldoende nauwkeurig.

4.4.6 Rendementsanalyse

Met behulp van de meetresultaten ad paragraaf 4.4.2 kan het rendement in de testperioden globaal als volgt worden berekend.

Metingen 15 december 2009 - Tabel 4.4.2/1

In de quasistationaire meetperiode was de gemiddelde stralingsflux van de zon 730 W.m^{-2} . Bij de gemiddelde luchtsnelheid van $0,95 \text{ m.s}^{-1}$ is het luchtdebiet $0,475 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$. De lucht werd hierbij verwarmd van $19,44^\circ\text{C}$ tot $32,11^\circ\text{C}$.

Het rendement in deze periode, berekend met behulp van formule (4.5.6/1), met $R = 0,83$, $B = 2\text{m}$ en $H = 10,5\text{m}$ is $\approx 56\%$.

Metingen 3 juni 2010 - Tabel 4.4.2/2

In de quasistationaire meetperiode was de gemiddelde stralingsflux van de zon 550 W.m^{-2} . Bij de gemiddelde luchtsnelheid van $1,0 \text{ m.s}^{-1}$ is het luchtdebiet $0,5 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$. De lucht werd hierbij verwarmd van $22,9^\circ\text{C}$ tot $30,9^\circ\text{C}$. Het met formule (4.5.6/1) berekende rendement in deze periode is $\approx 50\%$.

Voor de metingen van 15 december zou gezien de lage buitentemperatuur een lager rendement mogen worden verwacht dan voor de metingen op 3 juni – zie paragraaf 4.5.5.6. Rekening houdend met meetfouten tot 20% voor de luchtdebieten en 3,5% voor de temperatuurmetingen – zie paragraaf 4.4.3 geldt voor de rendementsberekeningen een onzekerheidsmarges van $\pm 20\%$. Desondanks liggen de berekende rendementscijfers redelijk in lijn met de verwachtingen naar aanleiding van de Matlab en ESP-r simulaties (Spoel, W. v.d 2009, Trcka, M. 2009) en de theoretische beschouwingen in paragraaf 4.5.6.

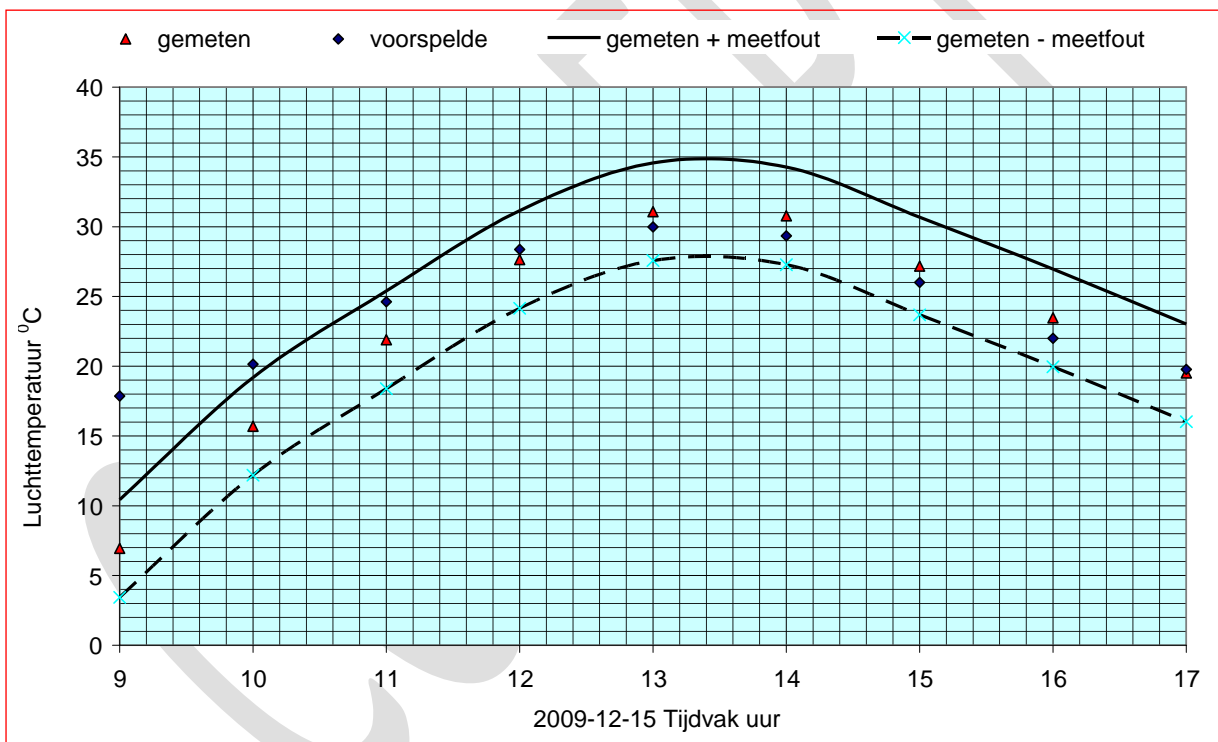
4.4.7 Validatie van de ESP-r simulaties

4.4.7.1 Validatie van het model

Om vertrouwen te wekken in de dynamische voorspellingen is het gekalibreerde model gevalideerd (Gontikaki, Marietta 2010). Bij dit proces worden simulaties over een hele dag uitgevoerd en de resultaten worden vergeleken met de metingen op soortgelijke wijze als bij de kalibratie. De klimaatbestanden, zoals ter plaatse gemeten, worden hierbij als invoer gebruikt. De simulatie heeft nu niet alleen betrekking op het onderzoeksmodel alleen, maar op het gehele systeem vanaf de aanvoer van buitenlucht in de testcel tot en met de luchtafvoer via de regenkap. Windinvloeden zijn hierbij niet in rekening gebracht.

De validatie werd uitgevoerd voor de dagen 15/12/09, 08/01/10, 18/03/10 en 15/04/10. Rekening houdend met meetfouten tot 20% voor de debietmetingen en maximaal 3,5% voor de temperatuurmetingen zijn onzekerheidsmarges bepaald.

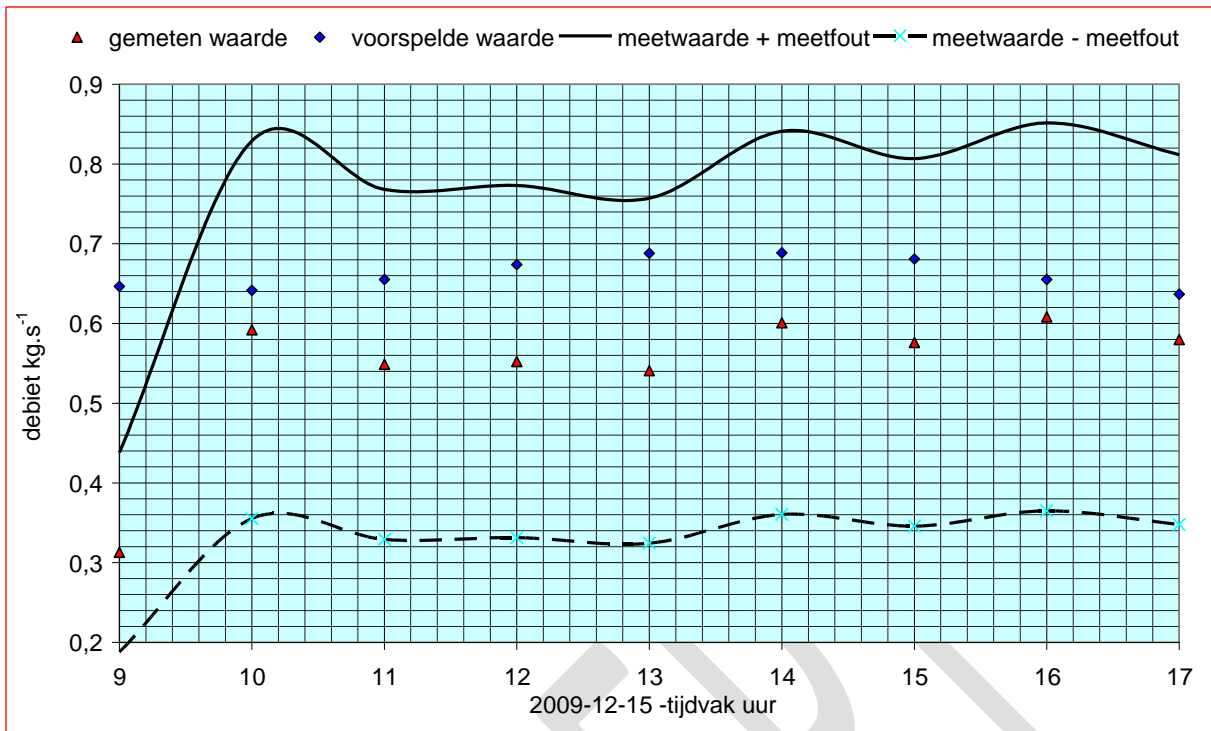
De met het ESP-r voorspelde, en in het fysieke onderzoeksmodel gemeten waarden van luchttemperatuur en luchtdebiet zijn in het onderzoeksverslag voor de bovengenoemde dagen grafisch weergegeven. Figuur 4.4.7/1 t/m 4.4.7/3 laten voorbeelden zien van de validatieresultaten op 15/12/09 voor respectievelijk luchttemperaturen, luchtdebieten en glas- en wandtemperaturen.



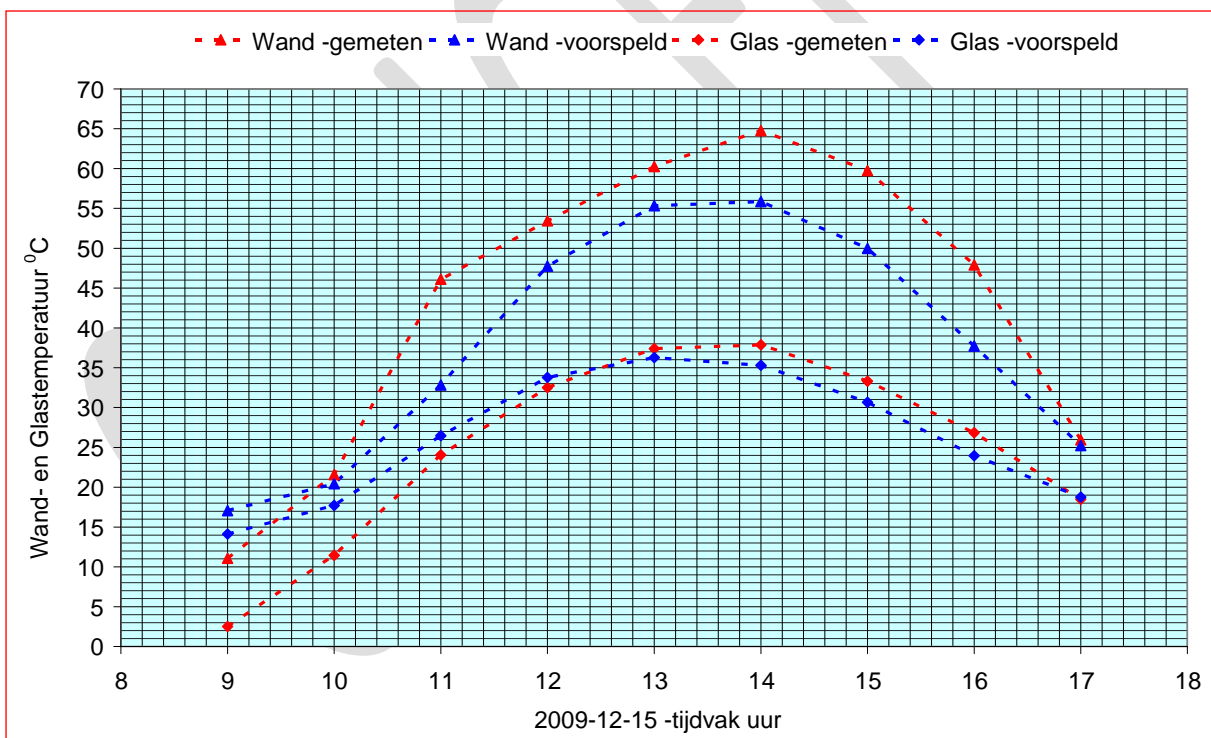
Figuur 4.4.7/1 – Validatieresultaten voor 15 december 2009 – Luchttemperaturen aan de top

Bij de analyse van de validatieresultaten kunnen de volgende opmerkingen worden gemaakt:

- De voorspelde luchttemperaturen liggen in de meeste gevallen binnen de onzekerheidsmarge – zie figuur 4.4.7/1.
- Trendmatig kan worden vastgesteld dat als de voorspelde en gemeten luchttemperaturen goed overeenstemmen de voorspelde luchtdebieten bij de bovengrens van de onzekerheidsmarge liggen –zie figuur 4.4.7/2. Het omgekeerde is ook waar: als de voorspelde en gemeten luchtdebieten goed overeenstemmen de voorspelde luchttemperaturen tegen de bovengrens van de onzekerheidsmarge liggen –zie figuur 4.4.7/1.
- De windsnelheid, die in het model niet rekening is gebracht, heeft waarschijnlijk grote invloed op de nauwkeurigheid van de voorspellingen. Een hoge windsnelheid is oorzaak van onderdruk ter plaatse van de afvoerkap waardoor het luchtdebiet toeneemt en ergo de luchttemperatuur daalt.



Figuur 4.4.7/2 – Validatieresultaten voor 15 december 2009 - Luchtdebieten



Figuur 4.4.7/3 – Validatieresultaten voor 15 december 2009 – Wand- en glastemperaturen aan de top

4.4.7.2 Discussie

1. De gemeten wand- en glastemperaturen liggen hier boven de voorspelde waarden. Bij de kalibratie van het basale thermisch model is dit omgekeerd – zie paragraaf 4.4.2.3.
2. De gemeten en voorspelde waarden van de glastemperatuur liggen dichter bij elkaar dan die van de wandtemperatuur. Bij de kalibratie van het eenvoudig thermisch model is was dit ook het geval – zie paragraaf 4.4.2.
3. Voor de berekening van de energieprestaties, in termen van jaarlijkse energieopbrengst, zijn de wand- en glastemperaturen van minder belang – zie paragraaf 4.2.4.4. De energieprestatie is het

belangrijkste kenmerk van een zonneshoorsteen en daarom is aan de verschillen in wand- en glastemperaturen verder geen aandacht besteed.

4.4.7.3 Conclusies

Het ESP-r model heeft verschillende beperkingen, die alle in meer of mindere mate de voorspellingen beïnvloeden, zoals:

- Onzekerheidsmarges van de luchtdebieten - $\pm 20\%$ - en temperaturen $\pm 3,5\%$
- Onzekerheidsmarges van de fysische eigenschappen van beglazing en absorber;
- Het niet in rekening brengen van windeffecten;
- Ongelijkmatige zoninstraling door de dagelijkse gang van de zon en de inherente schaduweffecten.

Omdat de voorspelde waarden in de meeste gevallen binnen de onzekerheidsmarges liggen, kan desondanks worden geconcludeerd dat het ESP-r model een redelijke betrouwbaarheid heeft.

4.4.8 Parametrische analyse

Met behulp van het gevalideerde ESP-r simulatiemodel kunnen de prestaties van een zonneshoorsteen worden voorspeld. Met behulp van parametrische en statistische analyse is het verder mogelijk de relatieve invloed van de verschillende ontwerpvariabelen op de prestaties vast te stellen. Deze methodologie is gebruikt om de optimale combinatie van de ontwerpvariabelen van een Zonneshoorsteen te bepalen.

De parametrische analyse is uitgevoerd door specialisten van de Unit Building Physics and Systems, faculteit Bouwkunde van de Technische Universiteit Eindhoven, (Van Goch, T.A.J en Costola, D. et al 2011.

Als prestatie-indicatoren zijn gebruikt

- De jaarlijkse energieprestatie – veruit de belangrijkste indicator.
- De jaarlijkse besparingen op ventilatorenergie – deze indicator is van ondergeschikt belang; zie paragraaf 4.5.10.8
- De oppervlaktetemperatuur van het glas – van belang voor het eventuele risico van glasbreuk.

Als ontwerp-variabelen zijn ingevoerd

- De geometrische vorm en afmetingen
 - breedte in stappen van 0,6 m van 3,6 tot 24 m.
 - hoogte 4 - 20 verdiepingen
 - diepte 0,35 – 0,65 – 1,0 en 1,35m afhankelijk van de hoogte
- De oriëntatie – Zuidoost – Zuid - Zuidwest.
- De fysieke uitvoering
- 4 glassoorten volgens tabel 4.1.4 met uitzondering van Lexan Thermoclear
- Emissiecoëfficiënt absorber $0,05 \pm 0,02$ in stappen van 0,001
- Ventilatiecapaciteit variabel van $3,5 \dots 10,8 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$

Voor de klimaatgegevens is uitgegaan van het referentiejaar van NEN 5060:2008 –bijlage A.2.

Het aantal mogelijke combinaties van de ontwerp-variabelen is zeer groot. Om het aantal simulaties te beperken is gebruik gemaakt van 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.

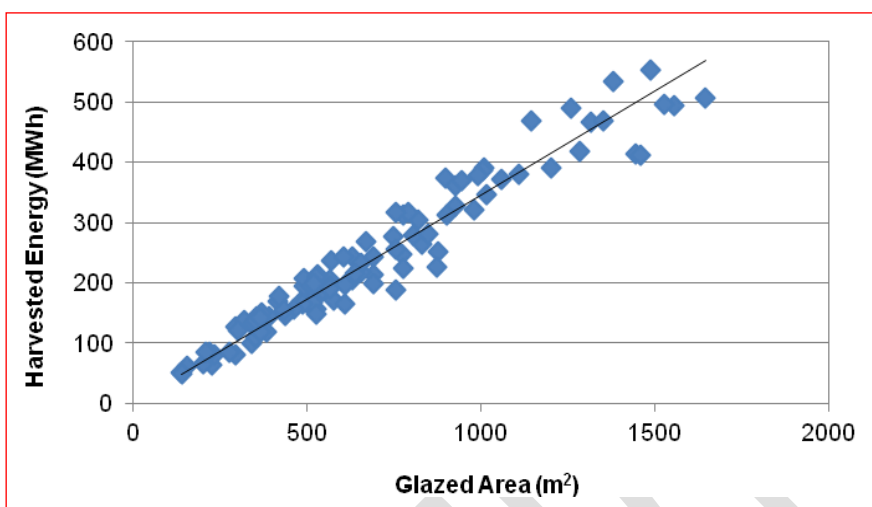
Met behulp van een gevoeligheidsanalyse is de invloed van de invoervariabelen op de prestatie-indicatoren geanalyseerd. Zoals te verwachten is het oppervlak van de glaswand, breedte * hoogte van de zonneshoorsteen, de dominante prestatie-indicator voor de jaarlijkse energieopbrengst. Andere parameters hebben minder invloed, hetgeen in overeenstemming is met de rendementsanalyse in paragraaf 4.5.5.4.

In geval van lineaire relatie tussen de ontwerp-variabelen en de prestatie-indicatoren kan lineaire regressieanalyse op de simulatieresultaten worden toegepast. Figuur 4.4.6 brengt de jaarlijkse energieprestatie in beeld als functie van het glasoppervlak met $R^2 = 0,93$.

De aangegeven relatie kan lineair worden weergegeven met de formule

$$Q = 345 * A_{glas} \quad (4.4.6)$$

Waarin Q jaarlijkse energieopbrengst [kWh]
 A_{glas} glasoppervlak [m²]



Figuur 4.4.8 – Jaarlijkse energieopbrengst als functie van het glasoppervlak

De totale jaarlijkse straling op een zuid georiënteerd verticaal vlak volgens NEN 5060:2008 bedraagt 862,4 kWh.m⁻² –zie tabel 4.1.8 in paragraaf 4.1. Het rendement van een zonneschoorsteen, berekend op basis van parametrische analyse zou dan $(345/862,4)*100 = 40\%$ bedragen (volgens de onderzoekers $\pm 9\%$). Dit is aanzienlijk lager dan de volgens de in paragraaf 4.1.5 genoemde simulaties te verwachten rendementen van 55% - 60%. De oorzaken hiervan worden geweten aan de onzekerheidsmarges van $\pm 20\%$ in het ESP-r model en de onzekerheden van de parametrische analyse als zodanig. Een niet lineaire regressie, uitgevoerd met een kunstmatig neurale netwerk laat een geringe verbetering zien.

Het lineaire model lijkt in principe bruikbaar te zijn, maar de nauwkeurigheid ervan verdient verbetering.

4.5 Het ontwerp

4.5.1 Ontwerpcriteria

In het *Earth, Wind & Fire* concept heeft de zonneschoorsteen een dubbelfunctie: (1) afzuigen van ventilatielucht, de thermische prestatie en (2) oogsten van zonnewarmte, de energieprestatie. Daarnaast is de zonneschoorsteen een dominant architectonisch element (3), de architecturale prestatie. Bij het ontwerp moet dan ook een keuze worden gemaakt uit de prioriteitsvolgorde van deze prestatie-eisen, waarbij de architectuur (3) in veel gevallen terugkoppeling naar (1) en (2) noodzakelijk zal maken. Bij elke keuze moet het af te zuigen ventilatiedebiet ad paragraaf 4.5.2 kunnen worden gerealiseerd.

(1) Thermische prestatie primair

De primaire functie is in dit geval het afzuigen van ventilatielucht. De zonneschoorsteen kan in principe, evenals een afzuigventilator, worden gedimensioneerd op basis van het benodigde luchtdebiet [m³.s⁻¹] en de te leveren (onder)druk [Pa]. Als hierbij wordt uitgegaan van de in paragraaf 4.2.3 vermelde referentiecondities, is er voldoende zekerheid dat de aldus ontworpen zonneschoorsteen ook in de zomermaanden gemiddeld genomen aan zijn doel zal beantwoorden. Het ontwerp moet uiteraard worden afgestemd op de architectuur (3). De energieprestatie (2) is een afgeleide functie.

(2) Energieprestatie primair

De energieprestatie kan worden uitgedrukt in het thermisch vermogen of in de jaarlijkse warmteopbrengst. Bij een gegeven hoogte en uitvoering van de zonneschoorsteen is de breedte de

belangrijkste ontwerpvariabele. Een consequentie van dit criterium is dan ook dat inpassing van de zonneshoorsteen in het gevelontwerp kan conflicteren met de architectuur (3).

De thermische prestaties (1) en het te realiseren externe drukverschil ter compensatie van het drukverlies buiten het shuntkanaal –zie paragraaf 4.2.7.7- worden door het ontwerp bepaald. Door het variëren van de diepte kan het eigen drukverlies worden beïnvloed en daarmee de beschikbare externe druk. Het rekenmodel gaat hierbij uit van de referentiecondities ad paragraaf 4.2.3 maar het staat de ontwerper vrij andere condities aan te houden.

(3) *Architecturale prestatie primair*

De breedte, en mogelijk ook de diepte van de zonneshoorsteen wordt door de architectuur bepaald. Bij een gegeven hoogte en uitvoering liggen dan de thermische prestaties (1) en de energieprestaties (2) vast.

4.5.2 Ventilatie-debiet

Een belangrijk uitgangspunt voor de dimensionering van een zonneshoorsteen is het ventilatie-debiet, dat in principe door de ontwerper van het ventilatiesysteem wordt vastgesteld. Voor het rekenmodel is uitgegaan van een specifiek ventilatie-debiet van $1,4 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ of $\approx 5 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ betrokken op het afdelingsvloeroppervlak volgens NEN 2580, zie figuur 4.5.2. Hiermee wordt, bij een laag emissieniveau uit het interieur, een goede luchtkwaliteit gerealiseerd, categorie II uit NEN-EN 15251

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

Figuur 4.5.2 - Gebouwooppervlakken volgens NEN 2580

Voor een goede luchtverdeling over de op het natuurlijke ventilatiesysteem aangesloten ruimten en een energie-efficiënte bedrijfsvoering wordt idealiter uitgegaan van de toepassing van zelfregelende roosters met aanwezigheidsregeling, waardoor het specifieke ventilatie-debiet in principe met ca. 10% kan worden gereduceerd.

4.5.3 Thermisch rendement

Eén van de parameters die het thermisch rendement van een zonneshoorsteen bepalen is de luchtsnelheid – zie paragraaf 4.5.5.6. Bij het ontwerp wordt idealiter gestreefd naar een zo hoog mogelijke luchtsnelheid, omdat hierdoor een hoger rendement kan worden gerealiseerd.

4.5.4 Voorbeeldberekeningen

Deze paragraaf geeft enkele voorbeelden voor de dimensionering van een zonneshoorsteen op basis van het basale rekenmodel ad paragraaf 4.2.8. De glaswand is uitgevoerd met SGG Diamant Planitherm Total Low E. Verwezen wordt naar figuur 4.2.8/3 in paragraaf 4.2.8

Gebouw 6 verdiepingen – Debiet $6.000 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ – Benodigde externe druk 8 Pa.

- D = 0,65 m – figuur 4.2.8/3: De maximum toegestane luchtsnelheid is $\approx 0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. De breedte B van de zonneshoorsteen wordt $\approx 5,12 \text{ m}$
Het thermisch rendement bij deze snelheid is ca. 0,58 –zie figuur 4.5.5/2
- D = 1,0 m – figuur 4.2.8/3: De luchtsnelheid zou in dit geval $< 0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ zijn, waardoor het rendement af zou nemen. Deze optie wordt dus niet aanbevolen.

Gebouw 6 verdiepingen – Debiet 6.000 m³.h⁻¹ – Benodigde externe druk 5 Pa.

- D = 0,65m – figuur 4.2.8/3: De maximum toegestane luchtsnelheid is ≈ 0,9 m.s⁻¹. De breedte B van de zonneshoorsteen wordt ≈ 2,85m. Het thermisch rendement bij deze snelheid is ≈ 0,61 –zie figuur 4.5.5/2. Het externe drukverlies heeft dus grote invloed op de breedte van de zonneshoorsteen.
- D = 1,0m – figuur 4.2.8/3: De maximum toegestane luchtsnelheid is ≈ 0,7 m.s⁻¹. De breedte B van de zonneshoorsteen wordt ≈ 2,40m. Het thermisch rendement bij deze snelheid is ≈ 0,6 –zie figuur 4.5.5/2

Gebouw 10 verdiepingen – Debiet 12.000 m³.h⁻¹ – Gewenste breedte 5,4 m

- D = 0,65 m – figuur 4.2.8/3: De luchtsnelheid is ≈ 0,95 m.s⁻¹. Het maximum externe drukverlies is ≈ 12 Pa. Het thermisch rendement bij deze snelheid is ≈ 0,6.
- D = 1,00 m – figuur 4.2.8/3: De luchtsnelheid ≈ 0,62 m.s⁻¹. De maximum externe druk is ≈ 13 Pa. Het thermisch rendement bij deze snelheid is ≈ 0,61 –zie figuur 4.5.5/2

Gebouw 14 verdiepingen – Debiet 20.000 m³.h⁻¹ – Welke opties zijn mogelijk?

Tabel 4.5.4 laat de mogelijke opties zien. Het is aan de ontwerpers van de zonneshoorsteen de projectgebonden juiste keuze te maken.

Diepte [m]	Breedte [m]	Luchtsnelheid [m.s ⁻¹]	Max extern [Pa]	Thermisch rend. [-]
0,65	4,27	2,0	6	0,62
1,0	2,85	2,0	4,5	0,64
0,65	5,7	1,5	12	0,61
1,0	3,8	1,5	10	0,63
0,65	8,55	1,0	20	0,60
1,0	5,7	1,0	15	0,62
0,65	17,1	0,5	35	0,58
1,0	11,4	0,5	26	0,60

Tabel 4.5.4 – Overzicht van de rekenresultaten

NB: De met een zonneshoorsteen te realiseren thermische trek is beperkt- zie paragraaf 4.2.6-, zeker in vergelijking met de onderdrukken die in mechanische afzuigsystemen mogelijk zijn.

Drukverliesberekeningen moeten derhalve met de nodige voorzichtigheid en reserves worden gemaakt. De voorbeeldberekeningen kunnen worden gebruikt voor het voorontwerp. Voor het definitief ontwerp zijn aanvullende berekeningen nodig bijvoorbeeld met het VABI programma VA 100.

4.5.5 Debietregeling

Referentiecondities zijn rekenwaarden die in het werkelijke buitenklimaat slechts toevallig en incidenteel voorkomen.

Buitentemperaturen liggen overwegend (ver) onder de referentiewaarde van 20⁰C, hetgeen inhoudt dat de thermische trek overwegend (ver) boven de ontwerpwaarde van de zonneshoorsteen ligt. Om de gewenste ventilatie in stand te houden is derhalve een automatisch regelsysteem nodig waarmee wordt voorkomen dat het afzuigdebiet uit het gebouw ontoelaatbaar stijgt.

Deze regeling kan worden uitgevoerd met behulp van luchtkleppen aan de voet of aan de top van de zonneshoorsteen, geregeld op basis van constante druk of constant debiet. Zelfregelende roosters op de verdiepingen of in de aangesloten ruimten kunnen hierbij zo nodig voor de fijnregeling zorgen.

Bij buitentemperaturen > 20⁰C neemt de thermische trek in principe af, maar veelal wordt dit gecompenseerd door een hogere stralingsflux die in dat geval een hogere schoorsteentemperatuur met zich meebrengt.

In principe wordt voor ventilatiesystemen in gebouwen uitgegaan van constant debiet. Met een zonneshoorsteen als afzuigstelsel is het echter mogelijk bij bepaalde weersomstandigheden het ventilatiedebiet te verhogen.

Voor een diepteanalyse van het gedrag van een zonneshoorsteen in het Nederlandse klimaat zie paragraaf 4.5.10.

4.5.6 Rendementsanalyse en optimalisering

4.5.6.1 Rendementsberekening

Het thermisch rendement van een zonneshoorsteen wordt gedefinieerd als de verhouding tussen de netto aan de doorstromende lucht afgegeven warmte en de opvallende zonstraling. In formule

$$\eta_{z,ref} = \frac{q_v \cdot \rho \cdot c \cdot (\theta_{uit} - \theta_{in})}{R \cdot B \cdot H \cdot \Phi_{zon}} \quad (4.5.6/1)$$

Waarin:

$\eta_{z,ref}$	thermisch rendement zonneshoorsteen bij referentiecondities	[-]
q_v	volumedebiet van de doorstromende lucht	[m ³ .s-1]
ρ	dichtheid van de lucht	[kg.m ⁻³]
c	soortelijke warmte van de lucht	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]
θ_{uit}	uittredetemperatuur van de lucht	[°C]
θ_{in}	intredetemperatuur van de lucht	[°C]
B	breedte van de schoorsteen	[m]
H	hoogte schoorsteen(segment)	[m]
Φ	stralingsflux van de zon	[W.m ⁻²]
R	reductiefactor netto t.o.v. bruto glasoppervlak	[-]

Formule (4.2.6/1) kan na bewerking als volgt worden geschreven⁵⁷

$$\eta_{z,ref} = g \cdot \frac{U_{gl}^* \cdot (\theta_{gl} - \theta_e)}{\Phi_{zon}} \cdot \frac{U_w^* \cdot p \cdot (\theta_w - \theta_a)}{\Phi_{zon}} \quad (4.5.6/2)$$

Waarin	U_{gl}^*	warmtedoorgangscoefficiënt binnenglasopp. → buitenlucht	[W.m ⁻² .K ⁻¹]
	U_w^*	warmtedoorgangscoefficiënt binnenwandopp. → omgeving	[W.m ⁻² .K ⁻¹]
	p	= B/(B+2D)	

Deze eenvoudige formule is ook intuïtief gemakkelijk te duiden. Het thermisch rendement van een zonneshoorsteen wordt bepaald door 3 factoren:

1. De g-waarde van het glas - zie paragraaf 4.1.4 - verreweg de belangrijkste factor –.
2. Het warmteverlies naar de buitenlucht, bepaald door de U waarde van het glas en het verschil tussen glastemperatuur en buitentemperatuur –in volgorde de tweede verliesfactor.
3. Het warmteverlies door de binnenwanden, bepaald door de U waarde van de binnenwand, de diepte van de zonneshoorsteen en het verschil tussen wandtemperatuur en temperatuur van de achterliggende ruimte. Door een goede isolatie met lage U waarde te kiezen is dit de kleinste verliesfactor.

De wand- en glastemperaturen in een zonneshoorsteen zijn intergerelateerde functies van de warmteoverdrachtscoëfficiënten voor straling en convectie, die op hun beurt weer functies zijn van de geometrische verhoudingen, de luchtsnelheid en de stralingsflux van de zon - zie paragraaf 4.2.4 en 4.2.5. Met behulp van het basale rekenmodel ad paragraaf 4.28 is de invloed van deze factoren op het thermisch rendement onderzocht.

4.5.6.2 Rendement en CWC

Paragraaf 4.2.2 beschrijft de zoektocht naar de CWC in een zonneshoorsteen. Intuïtief heeft een hogere waarde van de CWC een positief effect op de warmteopbrengst en daarmee op het rendement van een zonneshoorsteen. In de rendementsformule (4.5.6/1) komt de CWC echter in het geheel niet voor. De invloed van de CWC op het rendement is namelijk indirect, zoals in paragraaf 4.2.4.4 is aangetoond.

⁵⁷ Zie onderzoeksrapport deel I (Bronsema 2012)

Ook dynamische simulaties met ESP-r en Matlab Simulink laten zien dat bij een $CWC > 5 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ de rendementsstijging sterk afvlakt (Spoel, W.vd 2009, Trcka, M. 2009) –zie paragraaf 4.1.5. Omdat in een zonneshoorsteen in het algemeen met (veel) hogere waarden wordt gerekend –zie figuur 4.2.4/4- is de invloed van de CWC op het rendement gering.

4.5.6.3 Rendementsanalyse

Het rendement van een zonneshoorsteen is afhankelijk van de condities waaronder het wordt bepaald. De stralingsflux van de zon en de daaraan gerelateerde wand- en glastemperaturen hebben hierop invloed evenals de luchtsnelheid en de externe temperaturen.

Rendementsanalyses zijn uitgevoerd met behulp van het basale rekenmodel –zie paragraaf 4.2.8 en formule (4.5.6/2). Omdat de temperaturen in een zonneshoorsteen bij toenemende hoogte stijgen moeten bij toepassing van deze formule gemiddelde waarden worden gebruikt –zie paragraaf 4.2.6.2.

Uitgegaan is van een zonneshoorsteen in de volgende basisuitvoering:

- Breedte 3,6 [m]
- Diepte 0,65 [m]
- Luchtsnelheid 1,5 [m.s^{-1}]
- Hoogte 14 - 49 [m] - overeenkomend met 4 - 14 verdiepingen à 3,5 m
- Absorber Mirotherm – zie paragraaf 4.1.6
- Reductiefactor 0,95 [-]
- Luchtintrede 20 [$^{\circ}\text{C}$]

De conclusies die uit de analyses worden getrokken kunnen zonder grote fout worden geëxtrapoleerd naar bredere modellen dan 3,6 m. In de rendementsformule (4.5.6/2) heeft de breedte alleen invloed via de factor p, die in combinatie met de lage U waarde van de binnenwanden slechts geringe invloed op het rendement heeft.

Gevarieerd zijn de volgende parameters:

- Glaskwaliteit paragraaf 4.5.6.4
- Luchtsnelheid paragraaf 4.5.6.5
- Buitentemperatuur paragraaf 4.5.6.6
- Stralingsflux paragraaf 4.5.6.7

De analyse is bedoeld om de relatieve gevoeligheid van het thermisch rendement voor de verschillende parameters in beeld te brengen. Met behulp van het basale rekenmodel kan voor een specifiek ontwerp van een zonneshoorsteen een indruk worden verkregen van de invloed van bepaalde ontwerpparameters, bijvoorbeeld de glaskwaliteit en/of de luchtsnelheid, die veelal gerelateerd is aan de diepte.

Voor ramingen van jaarrendementen zijn dynamische simulaties nodig bijvoorbeeld met ESP-r of Matlab.

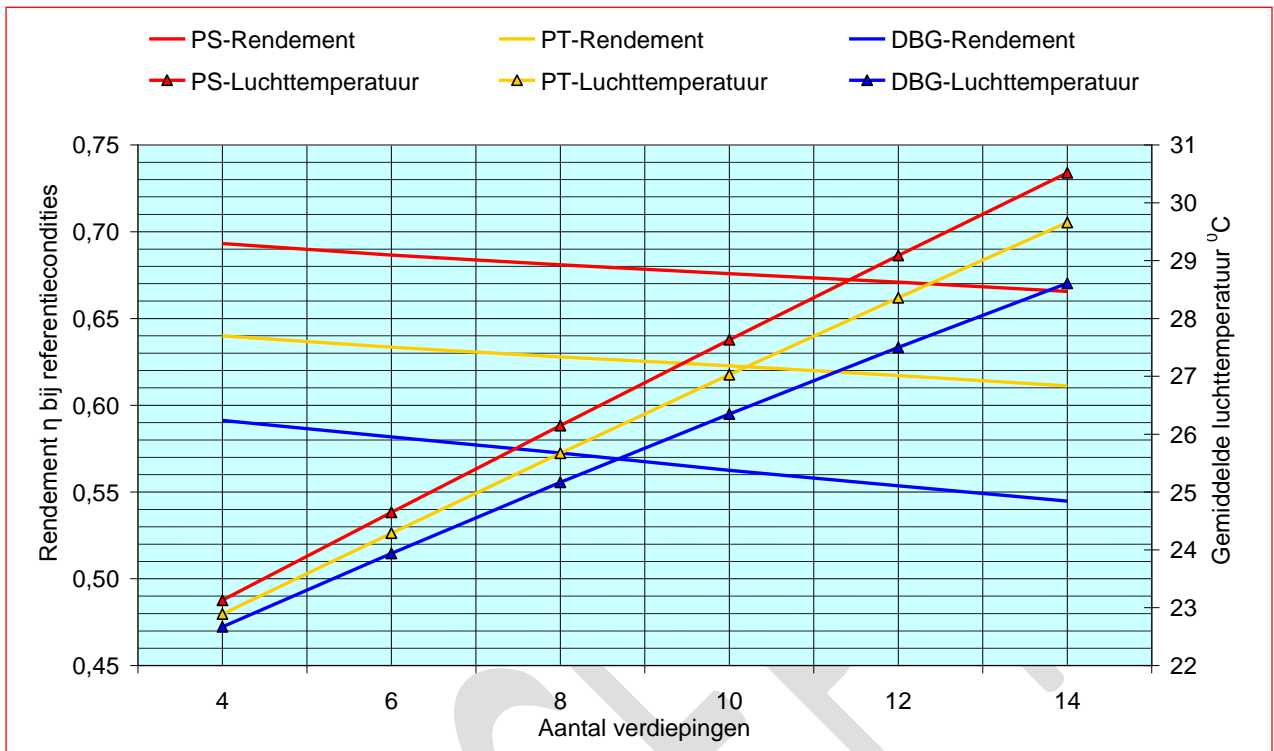
4.5.6.4 Rendement en Glaskwaliteit

Simulaties zijn uitgevoerd met de volgende glaskwaliteiten in het basismodel:

- SGG Planitherm Solar 4/15/4 (PS)
 - g = 0,75 [-]
 - U = 1,10 [$\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$]
- SGG Diamant Planitherm Total low E (PT) – dit glas is gebruikt in de fysieke testopstelling
 - g = 0,70 [-]
 - U = 1,32 [$\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$]
- Blank dubbel glas (DBG)
 - g = 0,70 [-]
 - U = 3,00 [$\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$]

De resultaten zijn weergegeven in figuur 4.5.6/1. Bij toenemende gebouwhoogte stijgt de uitgaande luchttemperatuur en daalt het thermisch rendement. Ten opzichte van het superieure Planitherm Solar (PS) daalt het rendement bij toepassing van Dubbel blank glas (DBG) met ca. 10 procentpunten. Planitherm Total (PT) ligt daar ongeveer tussen in. Bij toenemende gebouwhoogte worden de

verschillen groter, hetgeen verklaard kan worden uit de stijgende luchttemperaturen en de lagere U waarden.



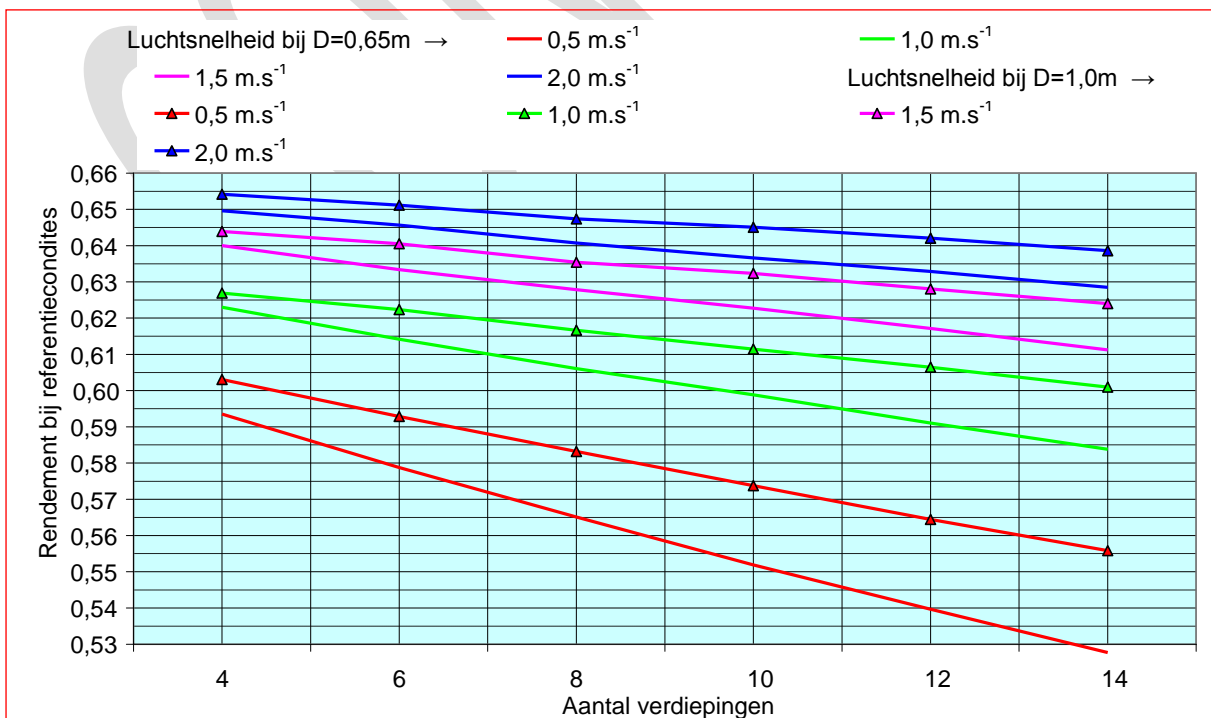
Figuur 4.5.6/1 –Rendement en luchttemperaturen als functie van gebouwhoogte en glaskwaliteit

4.5.6.5 Rendement en Luchtsnelheid

Simulaties zijn uitgevoerd voor het basismodel, uitgevoerd met SGG Diamant Planitherm Total low E, en de volgende variabelen:

- Diepte 0,65 en 1,0 [m]
- Luchtsnelheid Variabel 0,5 1,0 1,5 2,0 2,5 3,0 [m.s⁻¹]

De resultaten zijn weergegeven in figuur 4.5.6/2.



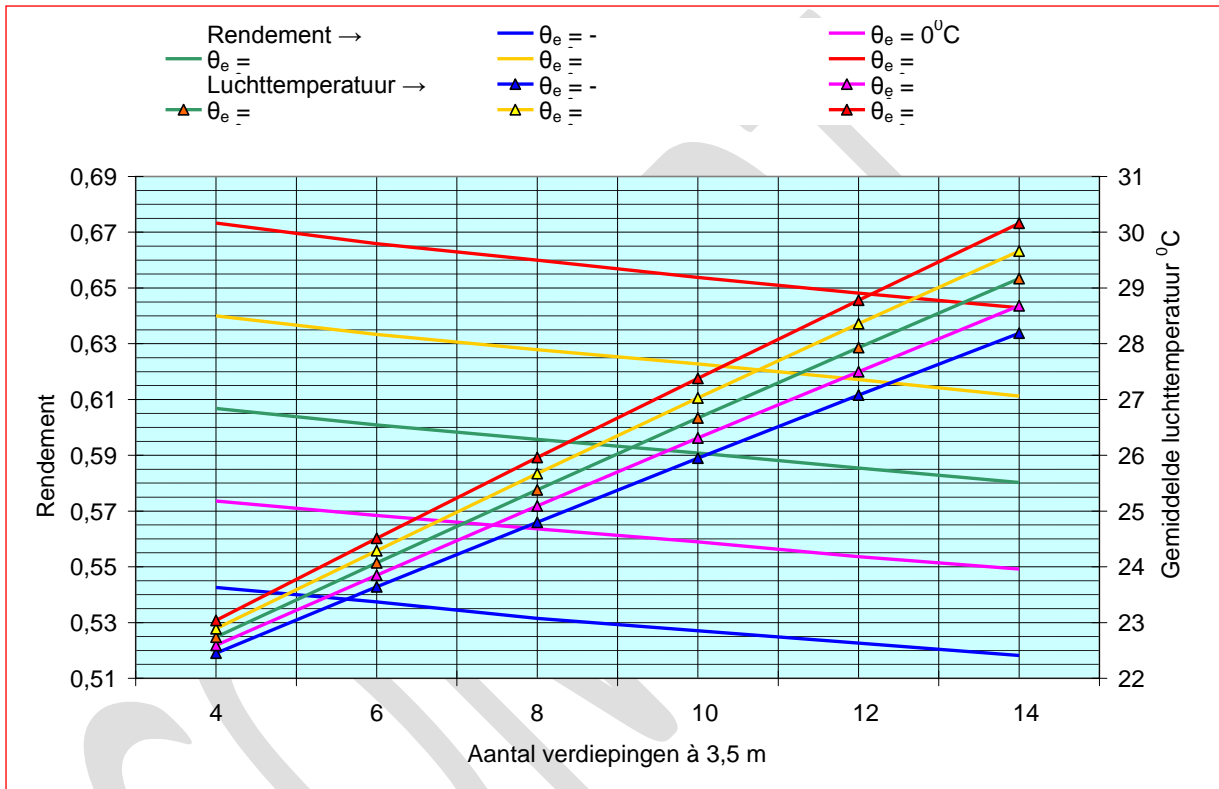
Figuur 4.5.6/2 –Rendement als functie van gebouwhoogte en luchtsnelheid

Verhoging van de luchtsnelheid levert een hoger thermisch rendement op. Stijging van de luchtsnelheid houdt verhoging van het luchtdebiet in. Bij gelijkblijvende zonnestraling daalt dan de luchttemperatuur en de nemen de warmteverliezen af.

4.5.6.6 Rendement en Buitentemperatuur

Het warmteverlies van een zonneshoorsteen is mede afhankelijk van de buitentemperatuur θ_e . Simulaties zijn uitgevoerd voor het basismodel, uitgevoerd met SGG Diamant Planitherm Total low E, en buitentemperaturen van respectievelijk $\theta_e = -10$, $\theta_e = \pm 0$, $\theta_e = +10$, $\theta_e = +20$ en $\theta_e = +30^\circ\text{C}$

Figuur 4.5.6/3, waarin tevens de gemiddelde luchttemperaturen zijn aangegeven, laat zien dat het rendementsverschil tussen de laagste en de hoogste buitentemperatuur van respectievelijk -10°C en $+30^\circ\text{C}$ ca. 13 procentpunten bedraagt. Ook bij de laagste buitentemperatuur is het rendement echter nog steeds hoger dan 50%.

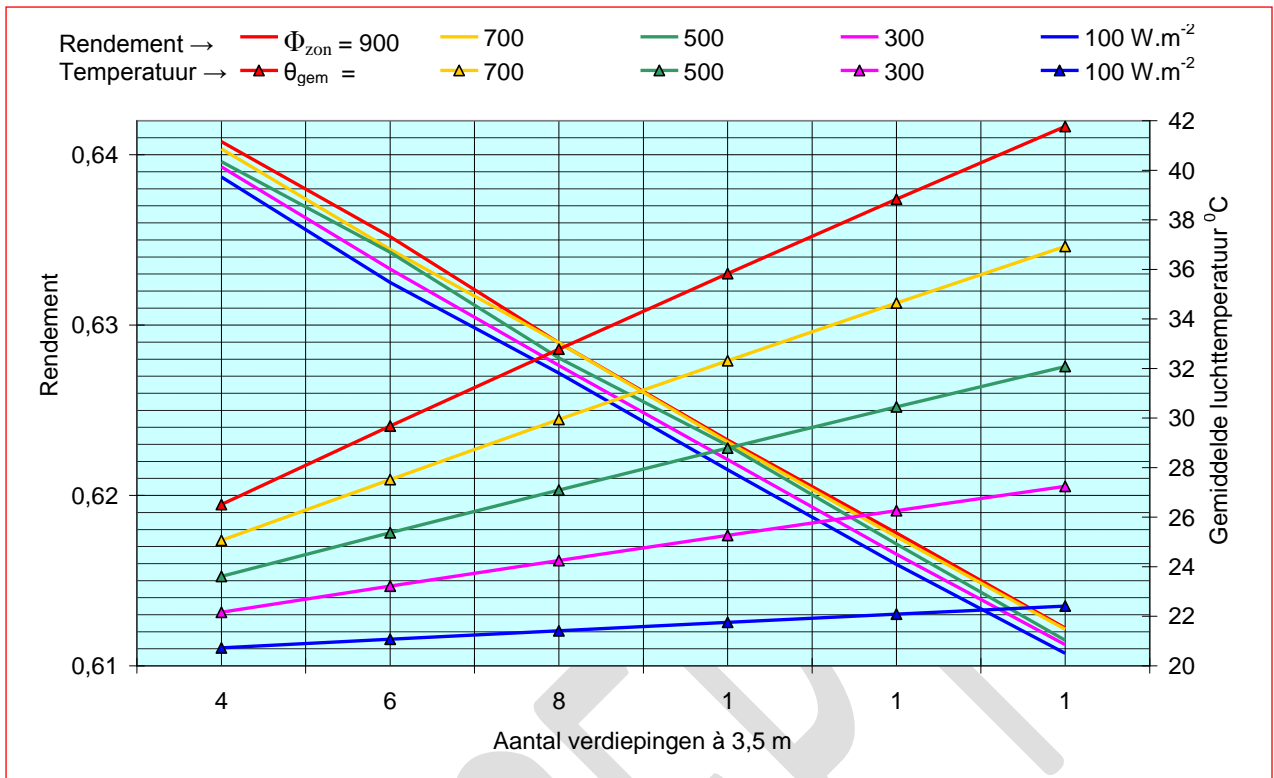


Figuur 4.5.6/3 –Rendement en luchttemperaturen als functie van gebouwhoogte en buitentemperatuur

4.5.6.7 Rendement en Stralingsflux

Het basismodel is uitgevoerd met SGG Diamant Planitherm Total low E, diepte 0,65 m, luchtsnelheid $1,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Simulaties zijn uitgevoerd voor een stralingsflux van respectievelijk $\Phi_{\text{zon}} = 100 - 300 - 500 - 700$ en $900 \text{ [W}\cdot\text{m}^{-2}]$

Een hogere stralingsflux heeft marginale invloed op het thermisch rendement –zie figuur 4.5.6/4 waarin tevens de luchttemperaturen zijn aangegeven die hierbij worden gerealiseerd. De hogere warmteverliezen die inherent zijn aan een hogere luchttemperatuur worden gecompenseerd door de hogere warmteoverdracht in de zonneshoorsteen.

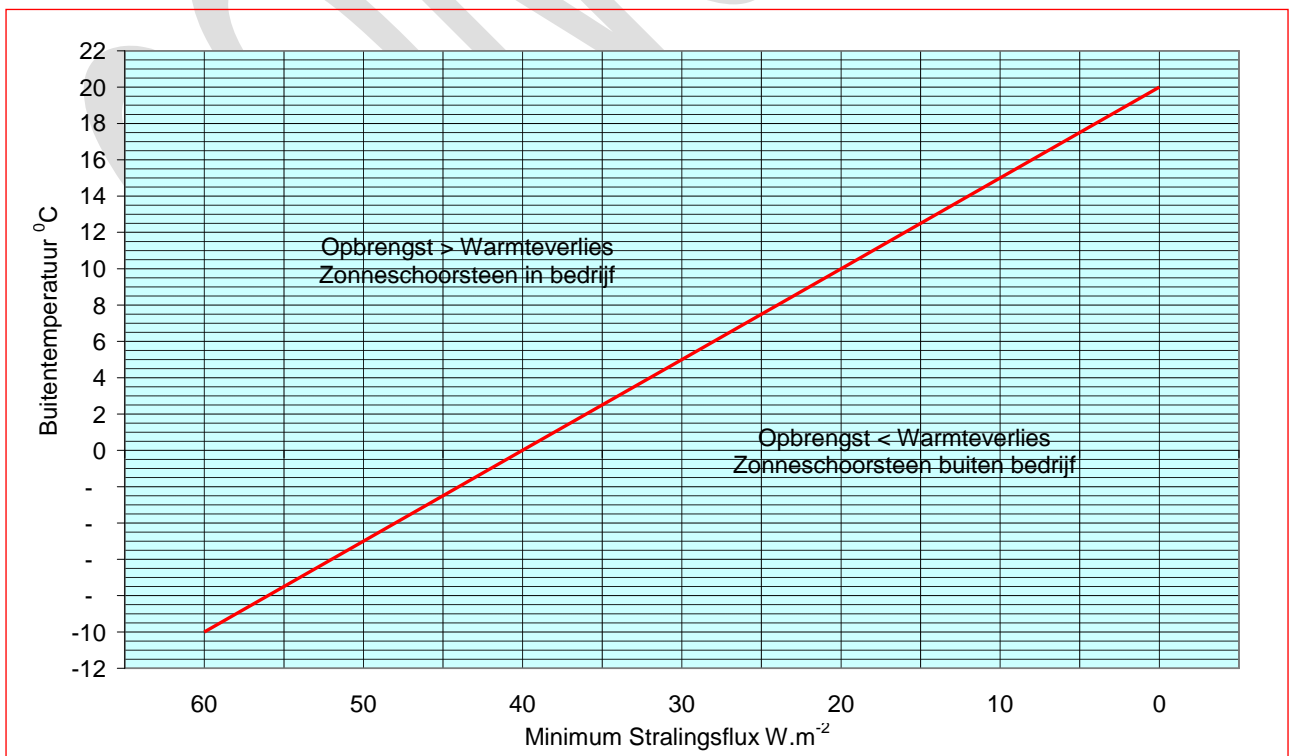


Figuur 4.5.6/4 – Rendement en luchttemperatuur als functie van gebouwhoogte en stralingsflux

4.5.6.8 Kantelpunt bij lage buitentemperatuur en lage stralingsflux

Het basismodel is uitgevoerd met SGG Diamant Planitherm Total low E, diepte 0,65 m, luchtsnelheid $1,5 \text{ m.s}^{-1}$. Simulaties zijn uitgevoerd voor een stralingsflux van 10 en $60 \text{ [W.m}^{-2}]$ en buitentemperaturen van -10 en $+20 \text{ [}^\circ\text{C]}$

Bij afnemende buitentemperaturen en stralingsflux treedt er bij een bepaalde combinatie een situatie op waarbij de netto warmteproductie van een zonneshoorsteen nul wordt. Het kantelpunt waarop deze situatie optreedt is weergegeven in figuur 4.2.6/5.



Figuur 4.5.6/5 – Kantelpunt voor de bedrijfsvoering van de zonneshoorsteen met positief rendement

Bij een buitentemperatuur van bijvoorbeeld 0°C is de minimum vereiste stralingsflux $40 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$. Bij nog verdergaande daling zouden dan warmteverliezen optreden, die voorkomen moeten worden. De zonneshoorsteen is immers tevens afzuigkanaal voor het ventilatiesysteem en de warmte in de afvoerlucht moet zoveel mogelijk behouden blijven.

Beneden het kantelpunt wordt de zonneshoorsteen afgesloten en gaat het shuntkanaal dienen als afzuigkanaal voor het ventilatiesysteem -zie paragraaf 4.1.11.

4.5.6.9 Rendement en warmtecapaciteit binnenwand

De warmtecapaciteit van de binnenwand heeft invloed op het jaarrendement en daarmee op de energieprestatie. Met behulp van dynamische simulaties is aangetoond dat een zonneshoorsteen uitgevoerd met thermisch lichte binnenwanden, een ca. 10% hoger rendement heeft dan een uitvoering met zware wanden –zie paragraaf 4.1.5.

1.1.7 Morfologie en thermische prestaties

4.5.5.1 Inleiding

Eén van de kernvragen van het onderzoek is welke bijdrage een zonneshoorsteen kan leveren aan het concept van *Natuurlijke Airconditioning* –zie paragraaf 4.1.1. Voor het functioneren van een zonneshoorsteen als afzuigsysteem in de zomer zijn daarom de thermische prestaties van belang –zie paragraaf 4.1.9. Deze wordt beoordeeld op basis van de criteria:

- Zonnestraling per oppervlakte-eenheid, uitgedrukt in $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$: Criterium → Hoe meer hoe beter
- Het profiel van de zonnestraling gedurende de dag: Criterium → Hoe constanter hoe beter

Van enkele configuraties worden in deze paragraaf de thermische prestaties geanalyseerd. De gebruikte waarden voor de stralingsflux zijn de maximum waarden bij onbewolkte hemel.

4.5.5.2 Methodiek

Een nauwkeurige analyse van de thermische prestaties van een zonneshoorsteen is een gecompliceerd proces, dat nauwelijks zonder een computermodel zoals ESP-r kan worden uitgevoerd. De benaderingsmethode volgens deze paragraaf is echter eenvoudig toepasbaar, geeft inzicht in de bepalende parameters en is daarmee voor de praktijk goed bruikbaar.

Er zijn talloze configuraties van zonneshoorstenen mogelijk, niet alleen qua morfologie –zie paragraaf 4.1.9, maar ook voor wat betreft uitvoering, afmetingen, oriëntatie, soort beglazing etc. Voor de hierna volgende analyse van de thermische prestaties is gekozen voor de volgende modellen:

- Gevelmodel -zie figuur 4.1.9(a)
- Piramidemodel -zie figuur 4.1.9(b)
- Trapeziummodel -zie figuur 4.1.9(c)

Gekozen is voor de volgende uitgangspunten:

- | | | | |
|---------------------|-----------------|--|---------------------------------------|
| ▪ Oriëntatie | Zuid | | |
| ▪ Breedte | 3,6 | [m] | gevel- en piramidemodel |
| ▪ Breedte | 5,4 | [m] | trapeziummodel |
| ▪ Beglazing | HR 4-16-4 argon | | uit WIS selectie –zie paragraaf 4.2.2 |
| ▪ g-waarde | 0,67 | [-] | berekend met WIS |
| ▪ U-waarde | 1,5 | $[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}]$ | berekend met WIS |
| ▪ R-waarde glaswand | 0,9 | [-] | reductiefactor netto/bruto |

Het piramidemodel en het trapeziummodel is haaks uitgevoerd, m.a.w. de schuine glasvlakken liggen respectievelijk op Zuidoost en Zuidwest.

De maximaal opvallende zonnestraling - direct en diffuus- op verticale vlakken is ontleend aan het Handboek HBz (ISSO 2010). De berekeningen zijn gemaakt voor één verdieping met een hoogte van 3,5m.

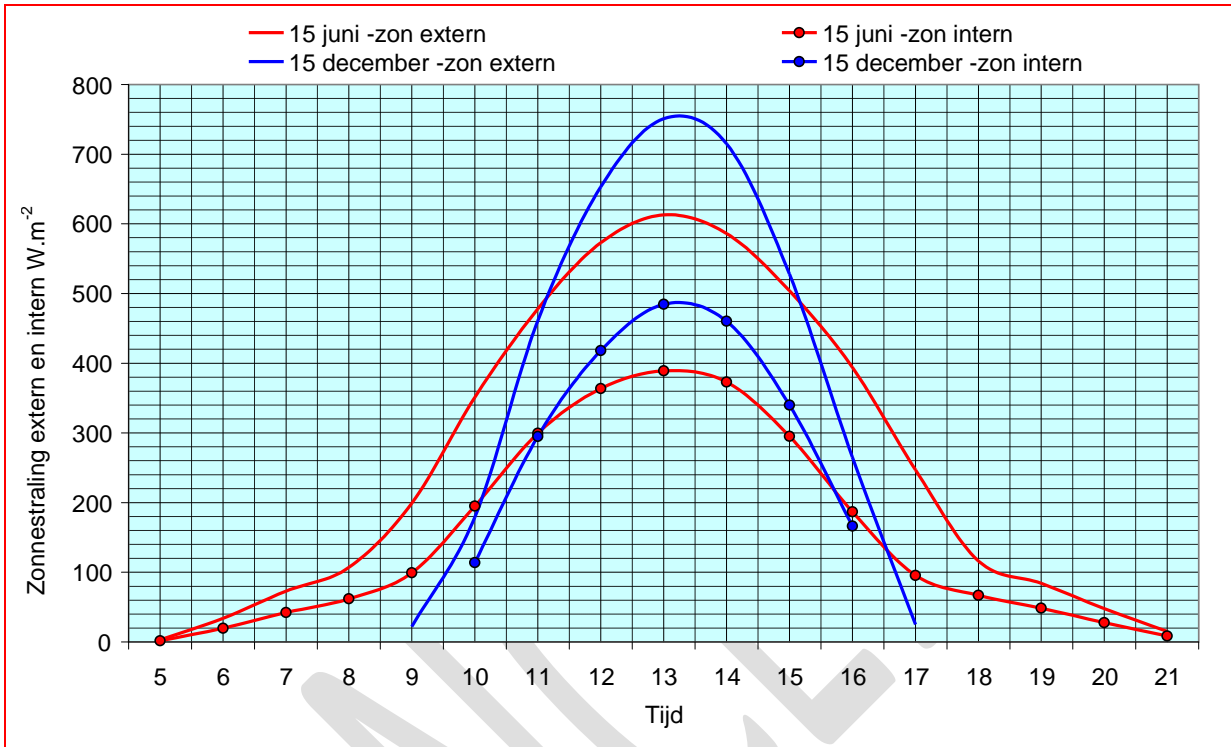
4.5.5.3 Gevelmodel

Figuur 4.5.7/1 laat de maximale zonneflux zien zoals die op de zonneshoorsteen valt –extern- en het deel dat daarvan wordt doorgelaten –intern. De figuur geldt voor het gevelmodel in de maanden juni en december. Hoe kleiner het verschil, des te hoger het thermisch rendement en des te beter de prestatie van de zonneshoorsteen.

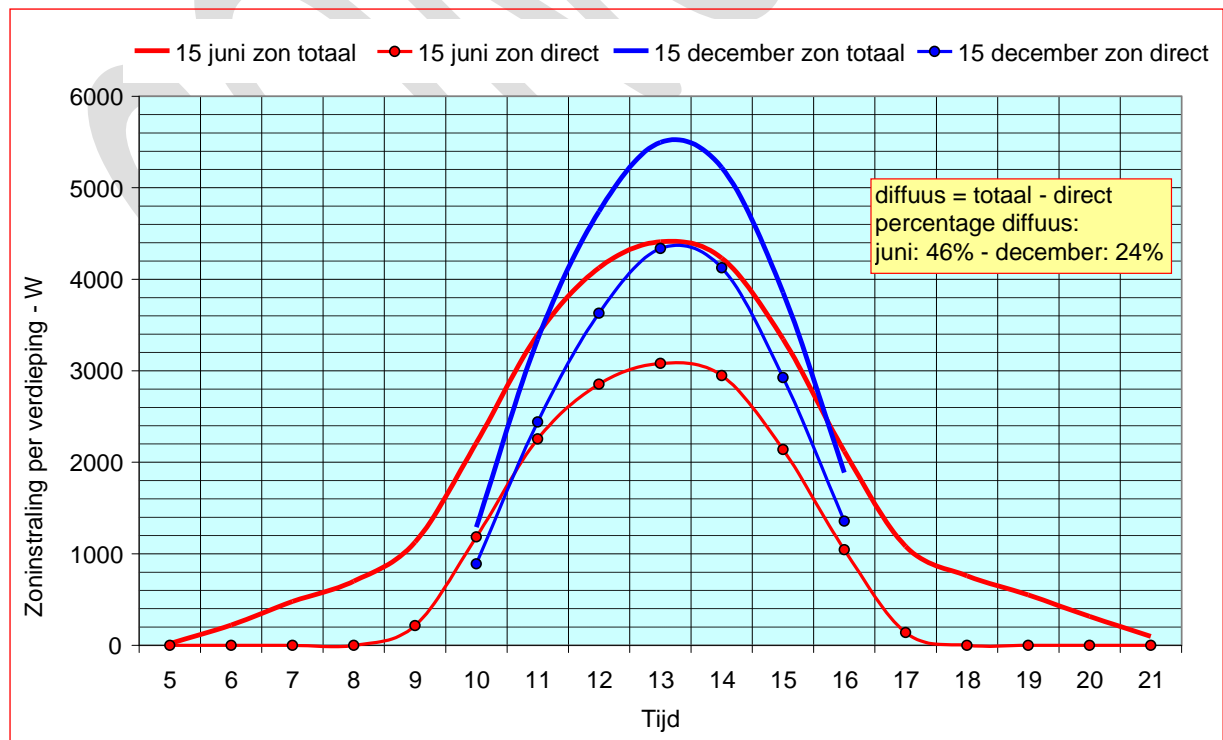
Figuur 4.5.7/2 laat de maximale zoninstraling zien voor dit model onderverdeeld in totale straling en directe straling; het verschil is de diffuse straling. Het aandeel van de diffuse straling is het grootst in de zomer. De directe straling wordt in de vroege ochtend en de namiddag door de dan optredende grote invalshoeken grotendeels door het glas gereflecteerd, waardoor de g-waarde minimaal wordt.

's Winters is dit effect veel minder omdat dan de zon later opkomt en eerder ondergaat. Merk op:

- de grote invloed van de laagstaande winterzon in vergelijking met de hogere zomerzon;
- het scherpe profiel van de zoninstraling, ongunstig voor de stabiliteit van het afzuigstelsel.



Figuur 4.5.7/1 – Gevelmodel: zoninstraling extern en intern in $W.m^{-2}$



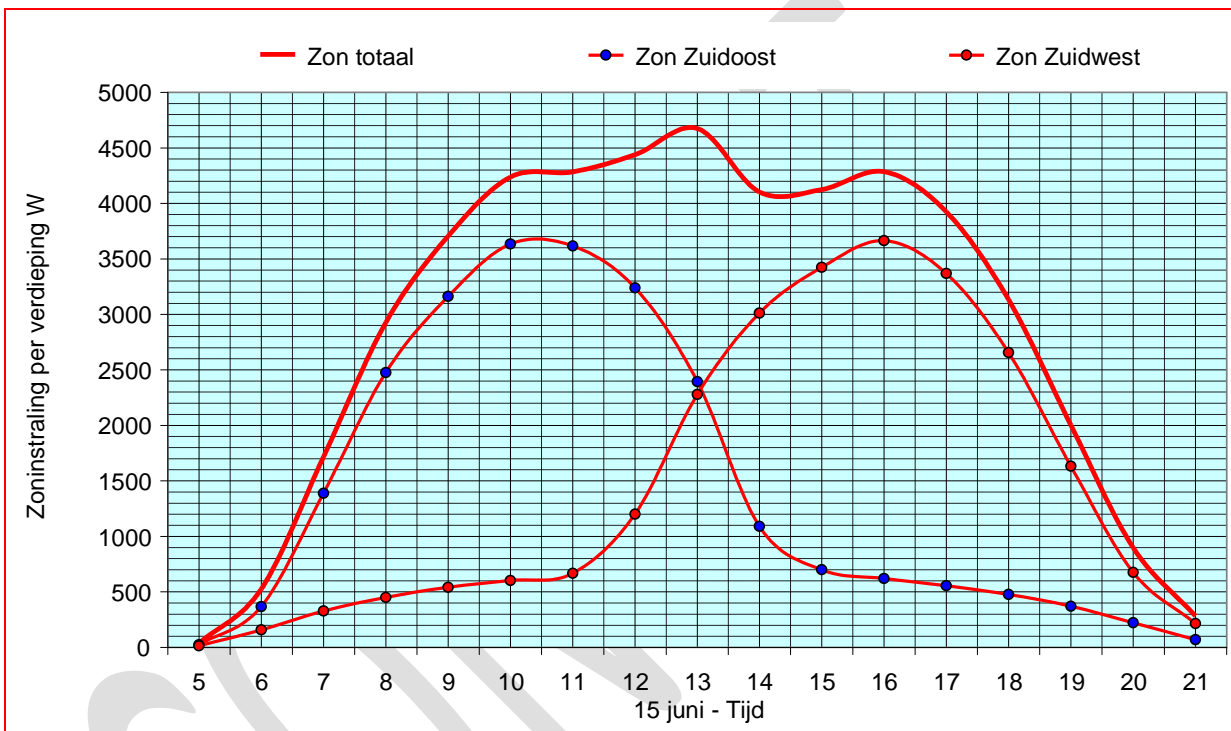
Figuur 4.5.7/2 – Gevelmodel: zoninstraling voor één verdieping - juni en december

De maximum dagelijkse zoninstraling bedraagt 4.410 W in juni en 5.496 W in december. Het oppervlak van de glaswand voor één verdieping is $(3,6*3,5)= 12,6 \text{ m}^2$, waarmee een maximale specifieke prestatie wordt berekend van 350 W.m^{-2} in juni en 436 W.m^{-2} in december.

4.5.5.4 Piramidemodel

Figuur 4.5.7/3 laat de maximale zoninstraling zien voor het piramidemodel in de maand juni, onderverdeeld in straling op het Zuidoost vlak en het Zuidwest vlak. Merk op dat dit model tussen ca. 10.00 en 17.00 uur een redelijk stabiele capaciteit laat zien. Voor de duidelijkheid is geen onderscheid meer gemaakt tussen totale en directe zoninstraling gemaakt.

De maximale zoninstraling bedraagt in juni 4.674 W, slechts ca 6% meer dan voor het gevelmodel. Het oppervlak van de glaswand voor één verdieping is $(3,6*3,5*\sqrt{2})= 17,8 \text{ m}^2$, waarmee voor deze maand een maximale specifieke prestatie wordt berekend van 263 W.m^{-2} , ca. 25 % minder dan bij het gevelmodel.



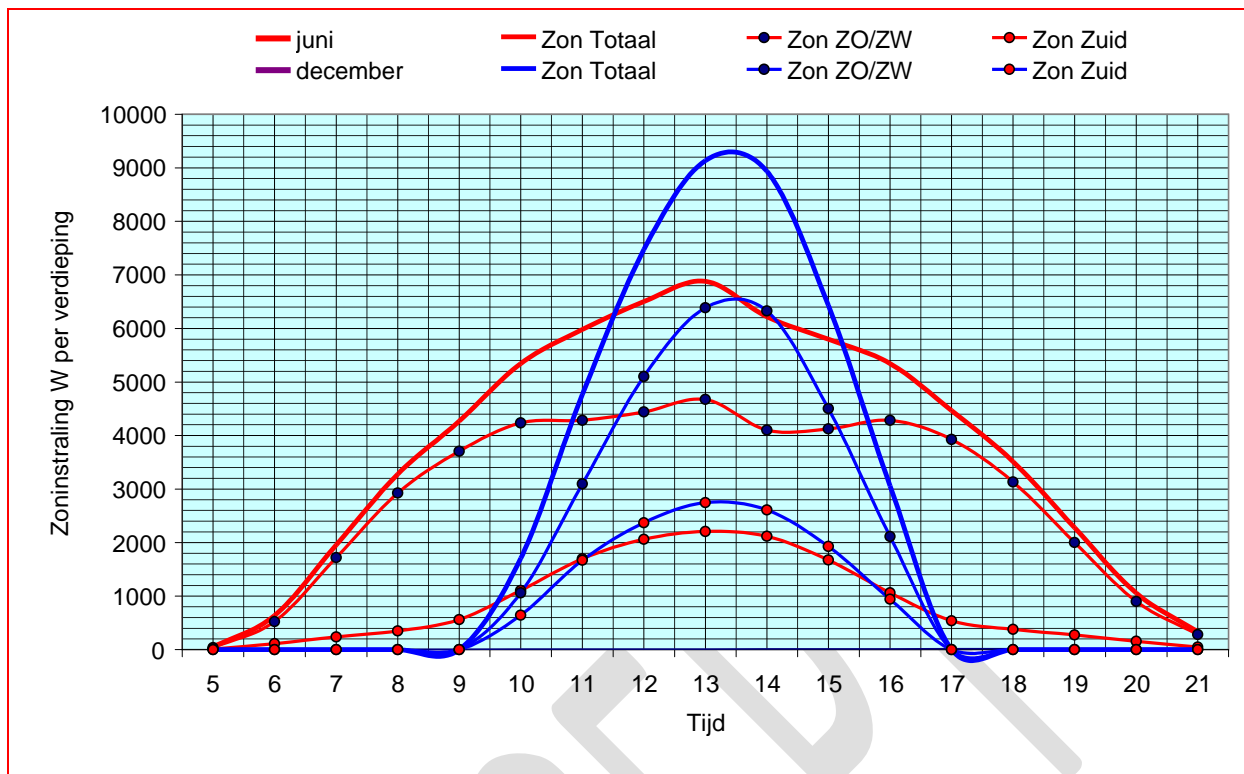
Figuur 4.5.7/3 – Piramidemodel: zoninstraling voor één verdieping in juni

4.5.5.5 Trapeziummodel

Figuur 4.5.7/4 laat de maximale zoninstraling zien voor het trapeziummodel in de maanden juni en december, onderverdeeld in straling op de ZO/ZW vlakken en het Zuid-vlak. Dit model ligt qua thermische prestaties en profiel van de zoninstraling tussen het gevelmodel en het piramidemodel.

De maximale zoninstraling bedraagt in juni 6.880 W, en in december 9.135 W.

Het oppervlak van de glaswand voor één verdieping is $(1,8*3,5+3,6*3,5*\sqrt{2})= 24,1 \text{ m}^2$, waarmee voor deze maand een maximale specifieke prestatie wordt berekend van 285 W.m^{-2} in juni en 379 W in december.



Figuur 4.5.7/4 – Trapeziummodel: zoninstraling voor één verdieping juni en december

4.5.5.6 Overzicht en conclusies

Tabel 4.5.7 geeft de resultaten van de analyse in één oogopslag weer. Het piramidemodel geeft 's zomers de hoogste energieopbrengst per m² glas -20% hoger dan het gevelmodel- en de kleinste variatie in het thermisch vermogen, dus de meest stabiele werking van de zonneshoorsteen als afzuigstelsel.

De hoge energieopbrengst in de zomer verdient wel enige relativering, omdat deze energie niet direct in het gebouw kan worden gebruikt en in de bodem moet worden opgeslagen. Bij een systeemrendement van 57% van het opslagsysteem blijft er dan weinig van het voordeel over -zie paragraaf 4.5.9.

's Winters daarentegen is de energieopbrengst van het gevelmodel superieur. De hoge deviatie in het thermisch vermogen is geen probleem omdat door de lage buitentemperatuur voldoende thermische trek beschikbaar is. De hoge deviatie in de zomer houdt in dat de hulpventilator vaker moet worden ingeschakeld en langer in bedrijf zal zijn.

Thermisch vermogen en energieopbrengst	Eenheid	Gevelmodel		Piramidemodel		Trapeziummodel	
		waarde	%	waarde	%	waarde	%
juni							
P _{th} maximum	W.m ⁻²	350	100	263	75	285	81
P _{th} minimum	W.m ⁻²	168	100	230	137	222	132
P _{th} gemiddeld	W.m ⁻²	270	100	242	90	249	92
deviatie	±	30%	-	9%	-	15%	-
Q _{th} onbewolkte dag	Kwh.m ⁻²	2,31	100	2,77	120	2,65	115
december							
P _{th} maximum	W.m ⁻²	436	100	359	82	379	87
P _{th} minimum	W.m ⁻²	168	100	60	36	76	45
P _{th} gemiddeld	W.m ⁻²	292	100	229	78	246	84
deviatie	±	49%	-	57%	-	54%	-
Q _{th} onbewolkte dag	Kwh.m ⁻²	2,05	100	1,61	79	1,72	84

Tabel 4.5.7 – Vergelijkend overzicht van drie modellen

4.5.6 Warmteopslag

4.5.6.1 Inleiding

Eén van de kernvragen van het onderzoek wat de bijdrage van een zonneshoorsteen kan zijn aan de reductie van het energiegebruik in de gebouwde omgeving –zie paragraaf 4.1.1. Hiervoor moet de netto jaarlijkse warmteopbrengst worden bepaald die voor de gebouwverwarming kan worden gebruikt. Door de verschillende profielen van beschikbare zonne-energie en warmtebehoefte over de seizoenen is tijdelijke warmteopslag noodzakelijk. Het warmteopslagsysteem ligt dus binnen de systeemgrens van het onderzoek.

In voorjaar en najaar kan zonnewarmte voor een deel rechtstreeks of via een korte termijn (KT) opslag voor de verwarming van het gebouw worden benut. Voor de zomermaanden is een lange termijn (LT) opslag nodig om de zonnewarmte in de winter te kunnen benutten.

Binnen het *Earth, Wind & Fire* project is het onderzoek gericht op de zonneshoorsteen als zodanig. Hoewel warmteopslag een belangrijk aspect is, wordt deze techniek niet uitvoerig behandeld, maar slechts conceptueel toegelicht. Een gedetailleerde uitwerking zou zeker een afzonderlijke uitwerking waard zijn, maar valt buiten het kader van het onderzoek.

4.5.6.2 De FiWiHEX warmtewisselaar

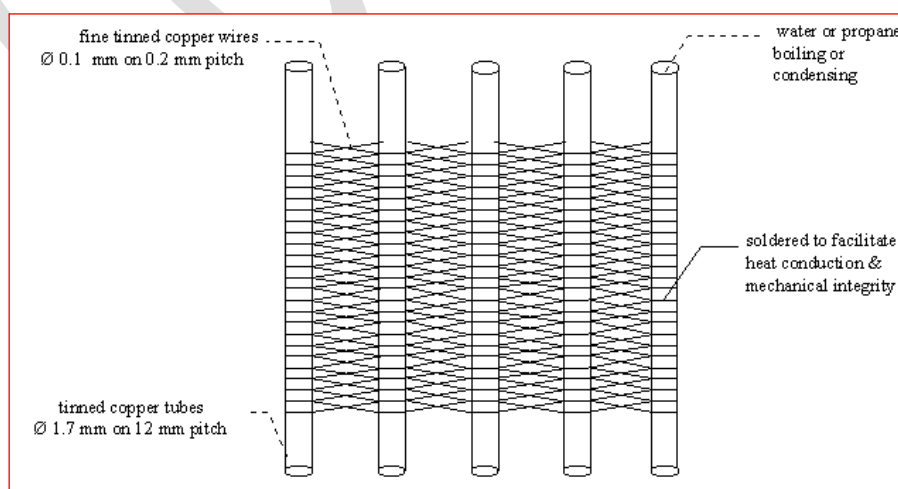
In een zonneshoorsteen wordt zonnewarmte “geogst” door verwarming van de doorstromende lucht. Als opslagmedium voor warmte komt als eerste water in aanmerking, dat zich kenmerkt door een grote warmtecapaciteit. Voor de warmteoverdracht van lucht op water is een warmtewisselaar nodig.

Een probleem bij de warmteoverdracht van lucht op water in een warmtewisselaar is de kleine warmteoverdrachtscoëfficiënt aan het luchtzijdige oppervlak. Men kan deze vergroten door het verhogen van de luchtsnelheid. Hierdoor wordt echter de luchtzijdige weerstand verhoogd waardoor deze methode niet geschikt is voor toepassing in het *Earth, Wind & Fire* concept.

Het opvoeren van het temperatuurverschil tussen lucht en water is in het *Earth, Wind & Fire* concept maar zeer beperkt mogelijk en brengt tevens een ongewenst exergieverlies met zich mee.

De laatste mogelijkheid voor capaciteitsvergroting van een warmtewisselaar bij lage luchtzijdige weerstand en kleine temperatuurverschillen is het vergroten van het oppervlak. Dit is het uitgangspunt van de dunne draad warmtewisselaar of FiWiHEX (www.fiwihex.nl)

FiWiHEX staat voor *Fine Wire Heat Exchanger* of Dunne Draad Warmtewisselaar; deze kenmerkt zich door een zeer goede warmteoverdracht van lucht op water bij een geringe luchtzijdige weerstand. De goede overdracht van warmte is gebaseerd op het sterk vergrote contactoppervlak van lucht aan een weefsel van koperdraad van 0,1 mm dik dat geweven is rond watervoerende capillairen \varnothing 1,7 mm. Zie figuur 4.5.8/1. Een aantal van dergelijke matjes is aan twee zijden in koperen ringen gesoldeerd voor de aanvoer en de retour van het te verwarmen water.



Figuur 4.5.8/1 – Principe FiWiHEX

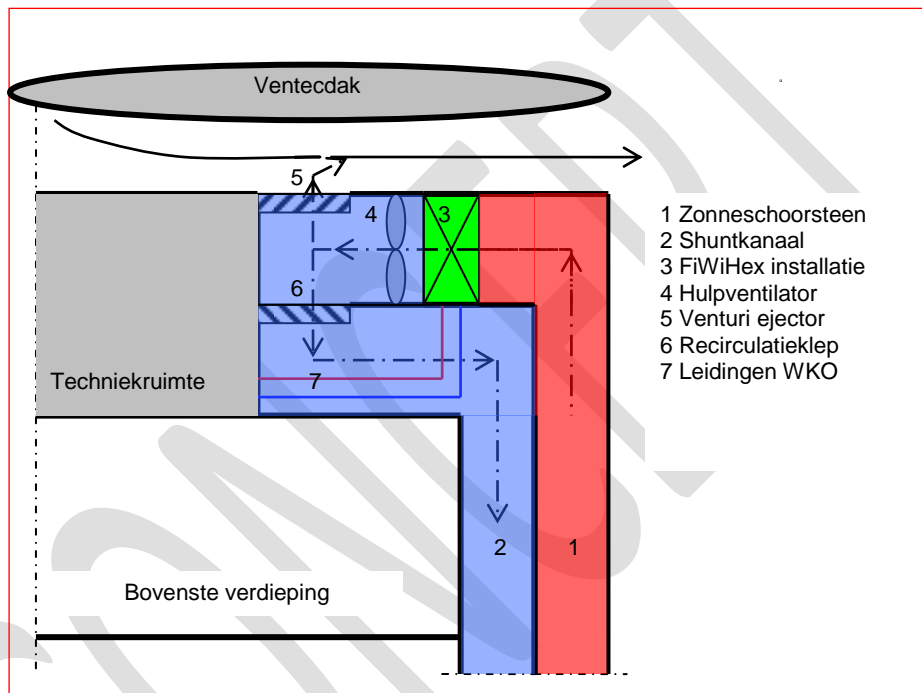
Het gemiddelde temperatuurverschil van lucht en water bedraagt, afhankelijk van de dimensionering, slechts enkele graden. Bij een uitgaande schoorsteentemperatuur van 30° - 40° C kan hierdoor een

watertemperatuur worden gerealiseerd op een niveau dat geschikt is voor een lage temperatuur (LT) verwarmingssysteem zonder inzet van een warmtepomp.

Met de FiWiHEX warmtewisselaar is ervaring opgedaan in de tuinbouw bij een project voor een energie producerende tuinbouwkas. In het zomerseizoen wordt de (gesloten) kas gekoeld met koude uit de bodem, waarbij de warmte in de bodem wordt opgeslagen. In het winterseizoen wordt de kas verwarmd met warmte uit de bodem zonder tussenkomst van een warmtepomp (SenterNovem 2006). Warmteopslag in het *Earth, Wind & Fire* concept wordt volgens hetzelfde principe uitgevoerd.

Figuur 4.5.7/2 laat een mogelijke opstelling van de FiWiHEX installatie zien. Zie ook figuur 1.2 in paragraaf 1.3. Het drukverlies van de warmtewisselaar wordt bij onvoldoende thermische trek gecompenseerd door de aerodynamische trek van de venturi-ejector in het Ventecdak – zie paragraaf 2.2.2 en/of de hulpventilator.

Buiten bedrijfsuren en in weekeinden kan warmte worden teruggewonnen via het shuntkanaal - zie ook figuur 4.1.11.



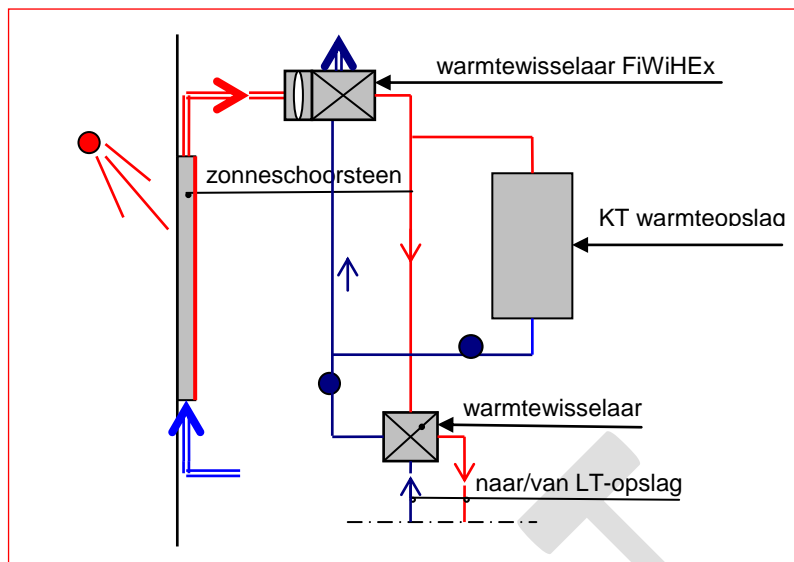
Figuur 4.5.8/2 – Opstelling FiWiHEX installatie

4.5.6.3 Warmteopslag Korte Termijn (KT)

De KT-opslag wordt in principe gebruikt in voorjaar en najaar. Via de FiWiHEX warmtewisselaar wordt zonnewarmte uit de lucht overgebracht naar de KT-warmteopslag, dat is uitgevoerd als gesloten vloeistofreservoir –zie figuur 4.5.8/3. Surplus warmte tijdens zonnige dagen in voor- en najaar kan worden benut in de opwarmcyclus van het gebouw na nachtelijke bedrijfsonderbreking. Gezien het temperatuurniveau van de opslag, orde van grootte 30^o à 35^oC, is hiervoor een LT (Lage-Temperatuur) verwarmingssysteem noodzakelijk.

Een interessante optie om de opslagcapaciteit te vergroten en/of het opslagvolume te verkleinen is de latente warmteopslag in een PCM/water mengsel.⁵⁸

⁵⁸ Zie onderzoeksrapport deel I (Bronsema 2012)



Figuur 4.5.8/3 – Principeschema warmteopslag

4.5.6.4 Warmteopslag Lange Termijn (LT) in aquifers

Energieopslag in de bodem is een milieuvriendelijk en energiebesparend alternatief voor een conventionele energievoorziening. In de zomer wordt warmte uit de zonneshoorsteen, tezamen met warmte die uit gebouwen wordt afgevoerd, in de bodem opgeslagen om in de winter te gebruiken. Omgekeerd wordt in de zomer koude aan de bodem onttrokken voor koeling van gebouwen.

Bij de overwegend geschikte bodemgesteldheid wordt in Nederland meestal gebruik gemaakt van aquifers, watervoerende zandlagen. Bij monobronsystemen liggen de warme en koude bron boven elkaar; bij zgn. doubletsystemen liggen ze op een bepaalde horizontale afstand naast elkaar.

Gestandaardiseerde monobron systemen worden door gespecialiseerde bedrijven *turn-key* geleverd; zie tabel 4.5.8 (GeoComfort 2007). De $\Delta\theta$ ligt bij deze systemen op 8 à 10 K; de tabelwaarden gelden voor koude levering.

Vermogen	kW	45	70	90	115	145	175	235	290	350	410	465	525	585
Waterdebiet	m ³ h ⁻¹	5	7,5	10	10	12,5	15	20	25	30	35	40	45	50

Tabel 4.5.8 – Gestandaardiseerde monobronsystemen

Om rendabel gebruik bij renovatie, vervanging of uitbreiding mogelijk te maken, is over het algemeen een bepaald minimum bouwvolume vereist. Een algemene vuistregel is dat de toepassing economisch rendabel is als de koude vraag minimaal 100 kW bedraagt. Voor een doorsnee kantoorgebouw komt dat overeen met circa 1.500 à 2.000 m² bruto vloeroppervlak.

Figuur 4.5.8/4 toont een mono bron als hierboven beschreven (Broekhuizen 2007). In de winter wordt warmwater uit de warme bron opgepompt, afgekoeld en als koud water in de koude bron geïnfiltrerd. In de zomer kan het water uit de koude bron worden opgepompt voor koeling. Warmwater wordt dan geïnfiltrerd in de warme bron. Een warmtewisselaar scheidt het bronsysteem van het bovengrondse systeem (Willemsen en van Harlingen 2002).

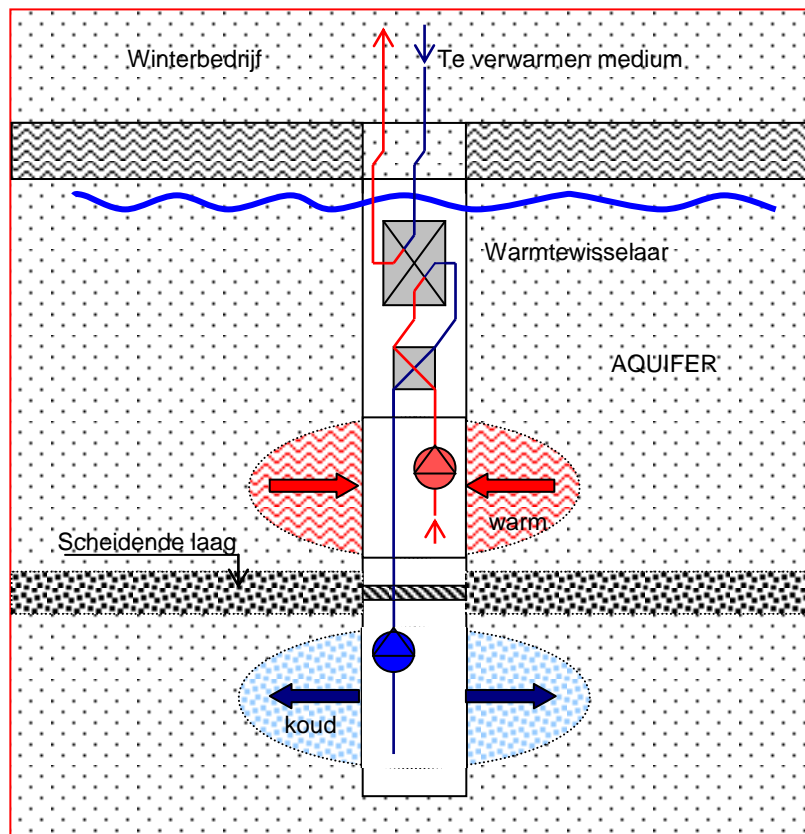
Een monobron is overigens in Nederland slechts beperkt inzetbaar, omdat veelal wordt geëist dat zowel de koude- als de warmteopslag in één watervoerend pakket moet plaatsvinden.

Met uitzondering van Limburg en de Achterhoek komen in heel Nederland aquifers voor, die zich overigens niet altijd lenen voor warmte/koudeopslag (ISSO 1997).

Warmteopslag in aquifers is een zgn. open bodemenergiesysteem⁵⁹ dat vergunningplichtig is onder de Waterwet. Deze wet heeft onder meer tot doel heeft de chemische en ecologische kwaliteit van grondwater te bevorderen. Vergunningen worden verleend door de provincie.

Voor een overzicht van de problematiek met mogelijke oplossingen bij WKO zie (Weerdhof, Björn 2005).

⁵⁹ Meestal aangeduid met Warmte Koude Opslagsysteem (WKO)



Figuur 4.5.8/4 – Monobron in winterbedrijf

4.5.6.5 Warmteopslag Lange Termijn (LT) met bodemwarmtewisselaars

Waar de bodem niet geschikt is voor LT warmteopslag in aquifers kunnen vaak verticale bodemwarmtewisselaars worden toegepast, die eveneens geschikt zijn voor kleinere projecten. Eén of meer bodemwarmtewisselaars vormen tezamen een gesloten circuit van leidingen in de bodem. Door deze leidingen, vervaardigd van hoge kwaliteit polyethyleen, wordt een vloeistof, meestal een water-antivriesmengsel rondgepompt. Wanneer die vloeistof kouder is dan de omringende bodem neemt het systeem warmte op, wanneer de vloeistof warmer is dan de bodem wordt warmte afgedragen. In de zomer wordt de bodem verwarmd met warmte uit de zonneshoorsteen. In de winter dient de bodem als warmtebron, direct of met behulp van een warmtepomp, afhankelijk van de bodemtemperatuur. Antivries wordt toegevoegd als de temperatuur van de vloeistof hierbij onder het vriespunt kan dalen. De leidingen worden verticaal in de grond aangebracht tot een diepte tussen 100 en 200 meter, bij voorkeur naast en niet onder het gebouw in verband met veiligheidsaspecten qua constructie.

Warmteopslag met bodemwarmtewisselaars is een zgn. gesloten bodemenergiesysteem dat medio 2011 nog niet vergunningplichtig is onder de Waterwet. Er is echter een Besluit Bodemenergiesystemen in voorbereiding waarmee een vergunning- of meldingsplicht voor gesloten systemen zal worden ingevoerd. Dit is met name van belang in zgn. interferentiegebieden, locaties waar verschillende bodemenergiesystemen elkaar negatief kunnen beïnvloeden. Het gevolg van het aanwijzen van een interferentiegebied is dat kleine gesloten systemen vergunningplichtig worden. Buiten interferentiegebieden geldt alleen een meldingsplicht voor het plaatsen van kleine gesloten systemen. Grote gesloten systemen (> 70 kW) zijn ook buiten interferentiegebieden vergunning plichtig.

4.5.6.6 Lange Termijn (LT) thermochemische warmteopslag

Een derde technologie voor warmteopslag is de sorptie warmteopslag. De werking hiervan berust op het principe dat warmte gebruikt kan worden om een reversibele endotherme reactie aan te drijven. Als de warmtetoevoer stopt en het systeem weer afkoelt zal de exotherme terug reactie spontaan weer optreden en komt de warmte weer vrij. Om de warmte langdurig op te slaan is het dus nodig deze spontane terug reactie te voorkomen. Dit kan worden gedaan door de reactieproducten van de

endotherme reactie te isoleren en gescheiden van elkaar op te slaan. Op deze manier kan warmte vrijwel verliesvrij bewaard worden. Bovendien is het mogelijk om, door de juiste materialen te kiezen, zeer hoge energiedichtheden te behalen. Dit kan oplopen tot meer dan een factor vijf hoger dan bij warmteopslag in water (Zondag, Herbert, 2010).

Aan de Technische Universiteit Eindhoven wordt onderzoek gedaan naar deze veelbelovende technologie. In principe zou deze kunnen dienen voor LT- warmteopslag in gebieden waar de bodem zich niet leent voor het gebruik van aquifers. Het opslagsysteem zou dan kunnen worden gerealiseerd in kelders of bovengrondse silo's.

4.5.7 Energieprestaties

4.5.7.1 Jaarlijkse gang van de globale straling volgens KNMI

De globale straling op het horizontale vlak en het verloop daarvan gedurende de seizoenen wordt door het KNMI op een aantal stations gemeten (www.knmi.nl/klimatologie). Tabel 4.5.9/1 laat voor 7 weerstations de variaties zien van de gemiddelde dagsommen van de globale straling per seizoen en per jaar. Hieruit blijkt dat bij vrijwel alle stations een hogere opbrengst gemeten is dan bij De Bilt. Als de gegevens van De Bilt worden gebruikt zit men voor de rest van het land aan de veilige kant.

De door het KNMI gebruikte seizoen indeling is als volgt:

- Winter december - januari – februari
- Lente maart – april – mei
- Zomer juni - juli – augustus
- Herfst september – oktober – november

	De Bilt		De Kooy		Eelde		Naaldwijk		Oostvoorne		Vlissingen		Zuid Limburg	
	kWh .m ⁻²	%	kWh .m ⁻²	%	kWh .m ⁻²	%	kWh .m ⁻²	%	kWh .m ⁻²	%	kWh .m ⁻²	%	kWh .m ⁻²	%
Winter	803	100	811	101	739	92	828	103	836	104	878	109	881	110
Lente	3469	100	3872	112	3511	101	3736	108	3731	108	3689	106	3506	101
Zomer	4581	100	5050	110	4603	100	4867	106	4917	107	4939	108	4550	99
Herfst	1783	100	1814	102	1736	97	1819	102	1819	102	1914	107	1889	106
Jaar	2669	100	2900	109	2658	100	2850	107	2839	106	2867	107	2719	102

Tabel 4.5.9/1 – Gemiddelde dagsommen van de globale straling in kWh.m⁻² en percentages

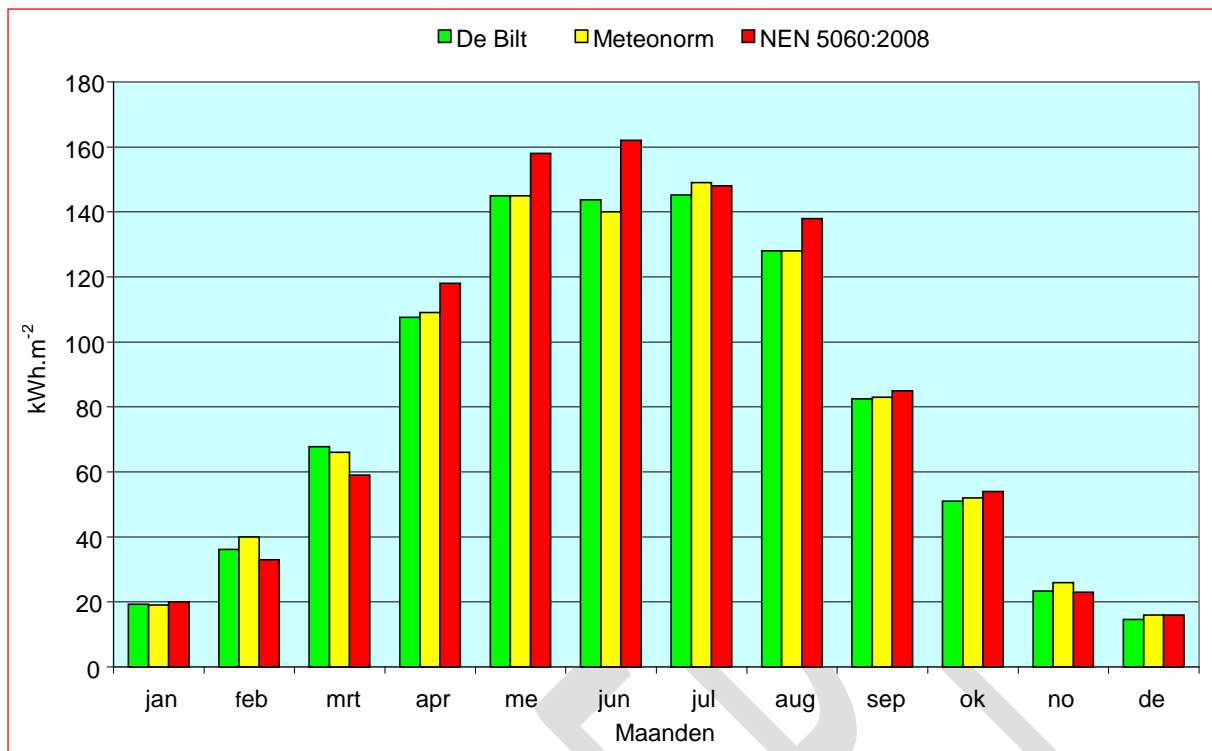
4.5.7.2 NEN 5060: 2008

In NEN 5060:2008 “Hygrothermische eigenschappen van gebouwen – Referentieklimaatgegevens” zijn actuele referentieklimaatgegevens van De Bilt opgenomen vanuit de klimaatdata over de periode 1986 – 2005. Deze 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 zijn herzien. In dit hoofdstuk zijn de gegevens uit de periode 1986 – 2005 gebruikt.

Bijlage A.2 van NEN 5060:2008 omvat een data file met klimaatgegevens die gegenereerd zijn conform NEN-EN-ISO 15927-4 en bedoeld voor de berekening van de energiebehoefte van gebouwen. Berekeningen van de energieopbrengst van zonneshorstenen zijn in dit onderzoek gemaakt op basis van de genoemde data file. Hierdoor wordt ook aangesloten bij de in de definitieve ontwerp (DO) fase uit te voeren berekeningen op gebouwniveau.

4.5.7.3 De globale straling per maand

Figuur 4.5.9/1 geeft een beeld van de gemiddelde maandsommen van de globale straling op het horizontale vlak voor De Bilt volgens het KNMI (Velds, C.A.1992,) en NEN 5060:2008. Tevens zijn de waarden aangegeven volgens Meteonorm, een uitgebreide klimatologische database en computerprogramma voor berekeningen m.b.t. zonne-energie (www.meteonorm.com). Meteonorm en KNMI zijn vrijwel identiek. NEN 5060:2008 geeft voor de maanden april tot oktober, en ook voor het referentiejaar als geheel, duidelijk hogere waarden, wellicht als effect van een verwachte toekomstige klimaatverandering.



Figuur 4.5.9/1 – Gemiddelde maandsommen globale straling op een horizontaal vlak

4.5.7.4 Directe en diffuse zonnestraling

De globale zonnestraling bestaat uit twee componenten, de directe straling en de diffuse straling, zie paragraaf 4.1.2. De maximale globale straling wordt vaak niet gemeten bij een onbewolkte hemel maar bij een gedeeltelijk bewolkte lucht, omdat dan naast de directe straling nog een grote hoeveelheid diffuse straling via verstrooiing aan de wolken de aarde bereikt.

Referentiemetingen van zonnestraling worden uitgevoerd op een horizontaal vlak. Voor een zonneshoornsteen moeten de waarden steeds worden teruggerekend naar het verticale vlak. Voor de directe straling en de diffuse straling gelden verschillende rekenalgoritmes. Voor de berekening van de totale zonnestraling op een verticaal vlak is het dus noodzakelijk de twee componenten te onderscheiden.

4.5.7.5 Invloed van luchtverontreiniging

Door de hogere luchtverontreiniging in grootstedelijke en industriële gebieden wordt de invallende globale straling hier meer geabsorbeerd en verstrooid dan in een landelijke omgeving. Omdat de zon in de winter lager staat dan in de zomer en de weglengte door de atmosfeer daardoor langer is, is dit effect in de winter sterker dan in de zomer.

Metingen hebben uitgewezen dat de verschillen tussen meetstations met de meeste en de minste luchtverontreiniging 's zomers ca. 10% kan bedragen oplopend tot ca. 20% in de winter (Velds, C.A.1992). Dit wordt gedeeltelijk gecompenseerd door het feit dat in dit onderzoek de relatief lage meetwaarden van De Bilt worden gebruikt – zie tabel 4.5.9/1. Met een afname van de globale straling door luchtverontreiniging is in het onderzoek verder geen rekening gehouden.

4.5.7.6 Straling op verticale vlakken

Directe straling

De directe straling op een verticaal vlak kan voor korte tijdsintervallen met relatief eenvoudige goniometrische functies uit de straling op een horizontaal vlak worden afgeleid. NEN 5060:2008 geeft hiervoor in een informatieve bijlage E een rekenalgoritme. Meteonorm gebruikt een identiek algoritme. Op basis van de data file met klimaatgegevens (bijlage A.2 van NEN 5060:2008) kan de berekening eenvoudig in MS Excel op een PC worden uitgevoerd.

Diffuse straling:

De berekening van de diffuse component is gecompliceerder omdat de straling van de hemelkoepel zeer variabel is, zowel in termen van tijd als met betrekking tot de verdeling over de hemelkoepel. Onder een gedeeltelijk bewolkte hemel is de verdeling van de diffuse straling nog complexer ten gevolge van het verstrooiingseffect van wolkendruppeltjes (Velds, C.A. 1992). NEN 5060:2008 geeft ook hiervoor in bijlage E een rekenalgoritme maar de berekening is bijzonder omslachtig en gecompliceerd en kan niet in MS EXCEL op een PC worden uitgevoerd.

Grondreflectie

Naast de directe en de diffuse zonnestraling is voor een zonneshoorsteen nog een derde component van belang: de zonnestraling ten gevolge van grondreflectie. NEN 5060:2008 geeft hiervoor in bijlage E eveneens een rekenalgoritme. Op basis van de data file met klimaatgegevens (bijlage A.2 van NEN 5060:2008) kan de berekening eenvoudig in MS Excel op een PC worden uitgevoerd.

Berekeningen

Voor het onderzoek zijn de berekeningen van de directe- en diffuse straling en de grondreflectie door VABI uitgevoerd. Tabel 4.5.9/2, identiek aan tabel 4.1.8 laat de maandsommen zien van de totale straling zien op horizontale en verticale vlakken; deze waarden zijn gebruikt voor de berekening van de warmteopbrengsten. Het valt op dat er maar geringe verschillen zijn tussen de straling op Zuidoost, Zuid, en Zuidwest oriëntatie. Voor optimalisering van de warmteopbrengst behoeft een zonneshoorsteen dus niet precies op het Zuiden te liggen.

Maand	Oost	Zuidoost	Zuid	Zuidwest	West	Horizontaal
jan	14,7	30,1	41,1	33,4	17,1	19,9
februari	25,7	38,7	44,6	35,0	22,7	33,2
maart	38,6	52,8	61,1	53,8	39,6	59,2
april	81,1	98,8	101,3	96,7	79,4	118,0
mei	90,7	102,3	101,2	107,3	99,2	157,9
juni	94,3	95,8	90,3	104,2	104,3	162,1
juli	90,9	95,8	90,3	92,9	84,8	148,1
augustus	90,4	104,8	101,3	95,8	81,7	137,6
september	57,2	76,6	82,4	70,9	53,7	84,5
oktober	38,2	60,8	73,7	59,4	36,9	54,1
november	17,4	31,4	39,8	31,6	17,6	23,4
december	12,3	27,3	35,3	26,8	12,0	15,5
jaar totaal	651,5	815,2	862,4	807,9	648,8	1013,5
procentueel	75,5%	94,5%	100%	93,7%	75,2%	117,5%

Tabel 4.5.9/2 – Maandsommen van de totale straling op horizontale en verticale vlakken volgens NEN 5060:2008 in kWh.m⁻² (VABI)

Tabel 4.5.9/3 geeft de verzamelde resultaten per seizoen. In afwijking van de indeling van het KNMI zijn de seizoenen hierbij als volgt gedefinieerd:

- Winter december, januari, februari
- Voorjaar maart en april
- Zomer mei, juni, juli, augustus, september
- Najaar oktober en november

Maand	Oost	Zuidoost	Zuid	Zuidwest	West	Horizontaal
winter	52,7	96,1	121,0	95,2	51,8	68,6
lente	119,7	151,6	162,4	150,5	119,0	177,2
zomer	423,5	475,3	465,5	471,1	423,7	690,2
herfst	55,6	92,2	113,5	91,0	54,5	77,5
totaal	651,5	815,2	862,4	807,8	649,0	1013,5

Tabel 4.5.8/3. – Totale straling op horizontale en verticale vlakken in kWh.m⁻² in de vier seizoenen volgens NEN 5060:2008

Deze onderverdeling is van belang. De in de winter geogste zonnewarmte kan in principe direct voor de verwarming van het gebouw worden benut. In de zomer gaat de geogste warmte in principe naar de LT-warmteopslag. In voorjaar en najaar wordt de geogste warmte direct gebruikt of indirect via de KT-warmteopslag –zie paragraaf 4.5.8

4.5.7.7 Systeemrendement zonneshoorstenen

De netto jaarlijkse warmteopbrengst die kan worden gebruikt voor de verwarming van een gebouw wordt berekend door de warmteopbrengst van de zonneshoorsteen te verminderen met de verliezen in het warmteopslagsysteem. Voor de relatief geringe verliezen in de KT-warmteopslag zijn geschatte rendementscijfers gebruikt. Voor de verliezen in de LT-warmteopslag is uitgegaan van literatuurgegevens (van Elswijk en Willemsen 2003).

Uitgaande van een opslagtemperatuur van 40°C en een afkaptemperatuur van 17°C, wordt een opslagrendement vermeld van ≈ 57% en een transportrendement van ≈ 68% inclusief de bijdrage van de warmtepomp. De afkaptemperatuur is de minimale bruikbare onttrekking temperatuur uit de warme bron.

Het systeemrendement wordt als volgt gedefinieerd:

$$\eta_{sys} = \eta_{opsl} * \eta_{trans} \quad (4.5.9/1)$$

Waarin η_{sys} systeemrendement
 η_{opsl} opslagrendement
 η_{trans} transportrendement

Het opslagrendement is sterk afhankelijk van de bodemgesteldheid. In een fijnzandige aquifer treedt weinig convectiestroming op met geringe warmteverlies. In dergelijke aquifers, die zich op dieptes vanaf 200 m onder maaiveld bevinden, kunnen opslagrendementen tot 84% worden gerealiseerd. Bij grovere aquifers kan het opslagrendement halveren. Voor het onderzoek is uitgegaan van de hierboven genoemde waarde van 57%. Voor concrete toepassingen is nader haalbaarheidsonderzoek noodzakelijk.

Met het transportrendement van 68% wordt de energie in rekening gebracht voor de bronpompen en de warmtepomp die bij lagere bodemtemperaturen de aanvoertemperatuur op een geschikt niveau moet brengen. Het aandeel directe warmtelevering versus levering via de warmtepomp is hierbij gesteld op 35% direct en 65% via de warmtepomp.

Warmteopslag in een fijnzandige, diepe aquifer zal in het algemeen financieel niet gerechtvaardigd kunnen worden door een zonneshoorsteen alleen, waardoor een combinatie met andere warmtebronnen in het gebouw, dan wel warmteopslag op wijkniveau, voor de hand ligt.

In de Waterwet, die onder meer tot doel heeft de chemische en ecologische kwaliteit van watersystemen te bevorderen, wordt ter bescherming van de grondwaterkwaliteit de maximuminfiltratietemperatuur beperkt, in provinciaal beleid meestal bepaald op 25°C. Bij hogere temperaturen kunnen microbiologische processen plaatsvinden en/of de chemische samenstelling veranderen. Hogere opslagtemperaturen zijn alleen mogelijk in overleg met de Provincie. Als pilot project zijn enkele systemen gerealiseerd met een temperatuur van 90°C en is anno 2011 een aantal projecten in ontwikkeling met een temperatuur van 40°C.

Beperking van de maximuminfiltratietemperatuur heeft door de lagere bodemtemperatuur een positieve invloed op het opslagrendement. De invloed op het transportrendement is echter negatief door grotere pompdebieten en een grotere inzet van de warmtepomp.

In tabel 4.5.9/4 zijn de bruto en de netto opbrengsten van een zonneshoorsteen met Zuidoriëntatie aangegeven. Hierbij is van de volgende veronderstellingen uitgegaan:

- Winter: 100% directe benutting gebruik in het gebouw;
- Lente: 50% directe benutting in het gebouw en 50% in korte termijn opslag;
- Zomer: 100% in lange termijn opslag;
- Herfst: 50% directe benutting in het gebouw en 50% in korte termijn opslag

seizoen	kWh.m ⁻² bruto	Rendement				kWh.m ⁻² netto
		η _{zs}	η _{opsl}	η _{trans}	η _{sys}	
winter	121,0	0,61	1,00	1,00	0,61	74
lente	162,4	0,63	0,92	0,84	0,49	80
zomer	465,5	0,63	0,84	0,68	0,36	168
herfst	113,5	0,65	0,92	0,84	0,50	57
totaal	862,4				0,44	379

Tabel 4.5.9 /4 – Rendementen en bruto- en netto opbrengsten zoneschoorsteen op Zuid oriëntatie

4.5.7.8 Warmteopbrengst en oppervlak zoneschoorsteen

Het is van belang om de warmteopbrengst van een zoneschoorsteen op één of andere manier te relateren aan het warmteverbruik van een gebouw en/of aan het bruto vloeroppervlak (bvo). Deze relatie kan als volgt worden uitgedrukt:

$$A_{zs} = \frac{q_{spec} \cdot bvo}{Q_a \cdot \eta_{sys}} \quad (4.5.9/2)$$

Waarin

A_{zs}	netto glasoppervlak zoneschoorsteen	[m ²]
q_{spec}	gewenste bijdrage warmteverbruik	[kWh.m ⁻² .a ⁻¹]
bvo	bruto vloeroppervlak gebouw	[m ²]
Q_a	bruto warmteopbrengst zoneschoorsteen	[kWh.m ⁻² .a ⁻¹]
η_{sys}	totaal rendement zoneschoorsteen	[-]

Het bruto glasoppervlak kan worden uitgedrukt als percentage %_{zs} van het bvo:

$$\%_{zs} = \frac{A_{zs} \cdot 10^2}{bvo} = \frac{q_{spec} \cdot 10^2}{Q_a \cdot \eta_{tot}} \quad (4.5.9/3)$$

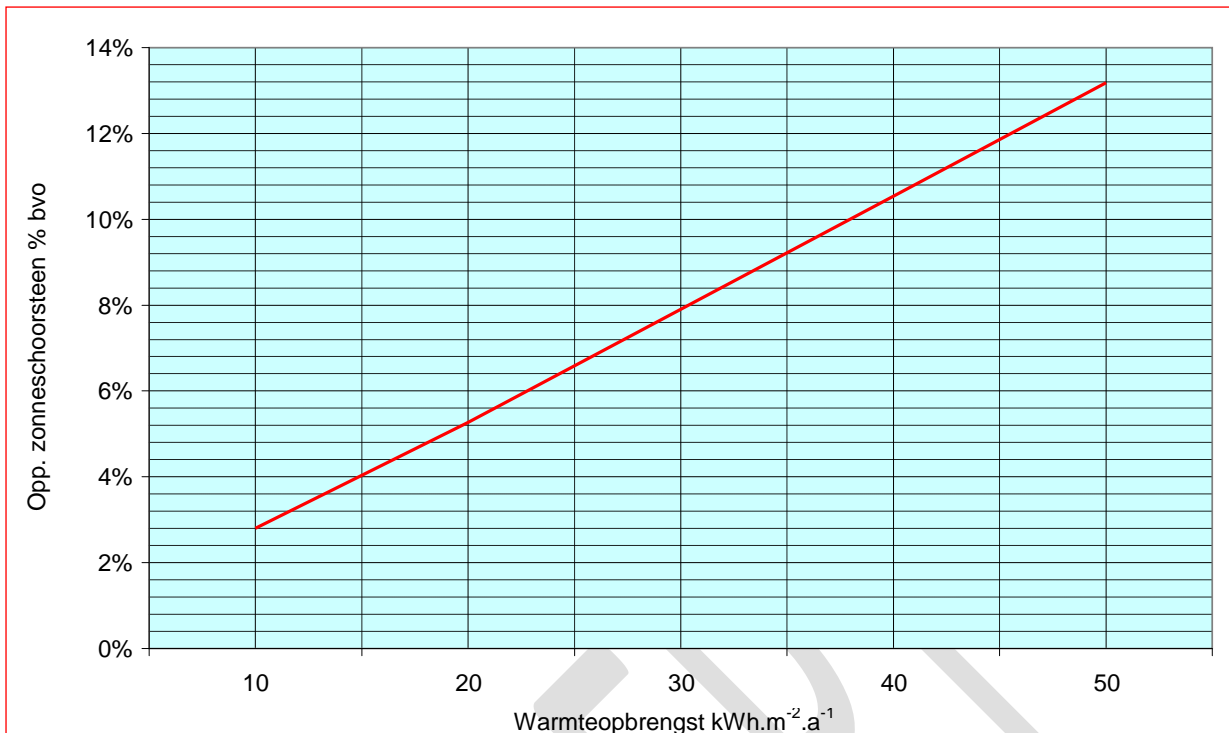
Voorbeeld (1)

Van een zoneschoorsteen op Zuid wordt een specifieke warmteopbrengst q_{spec} gevraagd van 20 kWh.m⁻².a⁻¹. De jaarlijkse opbrengst van de zoneschoorsteen volgens tabel 4.5.8/2 bedraagt 862,4 kWh.m⁻². Het totaal rendement volgens tabel 4.5.9/4 is 44%. Het bruto glasoppervlak van de zoneschoorsteen is 5,27% van het bruto vloeroppervlak.

Figuur 4.5.9/2 brengt deze relatie voor de in paragraaf 7.14.9 vermelde opbrengsten en rendementen in beeld.

Om deze figuur enig reliëf te geven zij vermeldt dat voor energiezuinige kantoorgebouwen met een EPC < 1,5 een warmteverbruik mogelijk is van 50 à 60 kWh.m⁻².a⁻¹ (Ham, E.J. 2004). Dit wordt bevestigd door een benchmarkonderzoek in overheidskantoren (Stimular 2011). Het best scorende kantoorgebouw heeft een gasverbruik van 1,7 m³ per m³ bouwvolume, hetgeen bij een verdieping hoogte van 3,5 m en een gemiddeld stookrendement overeenkomt met ca. 50 kWh.m⁻².a⁻¹.

Bij een volledige dekking van het warmteverbruik met zonnewarmte zou het netto oppervlak van een zoneschoorsteen in een dergelijk gebouw 13,2% van het bvo moeten bedragen.



Figuur 4.5.9/2 – Oppervlak zonneshoorsteen in % bvo als functie van de warmteopbrengst

4.5.7.9 Warmteopbrengst en oppervlak zonneshoorsteen als % van het geveloppervlak

De gevelfactor wordt gedefinieerd als de verhouding tussen het geveloppervlak en het bruto vloeroppervlak. Voor veel gebouwen ligt deze factor tussen 0,4 - 0,7. Figuur 4.5.9/3 laat zien hoeveel procent van het geveloppervlak als zonneshoorsteen moet worden gebruikt om een bepaalde warmteopbrengst te realiseren.

Voorbeeld (2):

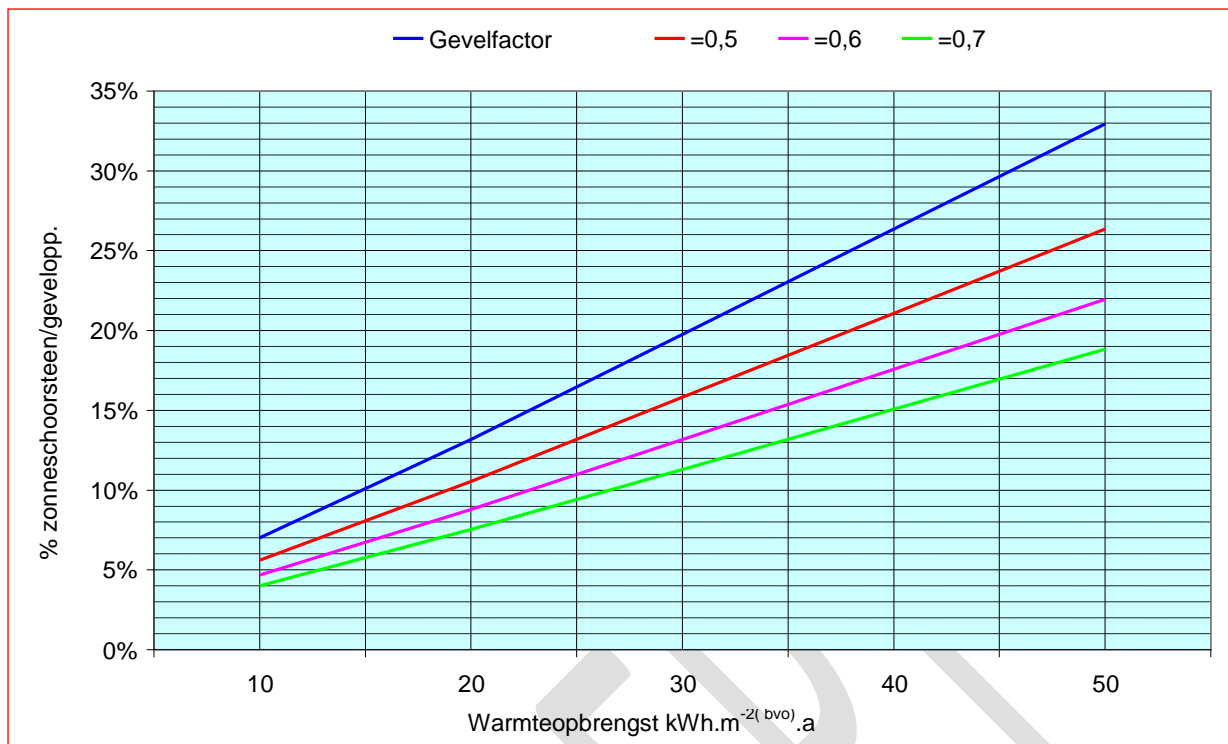
Het gebouw uit voorbeeld (1) heeft een gevelfactor van 0,6. Het bruto glasoppervlak van de zonneshoorsteen is $(5,27/0,6) = 8,8\%$ van het geveloppervlak.

Stel dat het hier een gebouw betreft met een voetafdruk van $50 \times 15\text{m}$ (L*D) en een verdieping hoogte van 3,5 m. Bij n verdiepingen is het geveloppervlak is $2(50+15) \times 3,5 \times n$.

Gesteld dat een gehele kopgevel van dit gebouw als zonneshoorsteen zou worden uitgevoerd, dan krijgt deze een oppervlak van $15 \times 3,5 \times n$ overeenkomend met ca. 11,5% van het totale geveloppervlak. Volgens figuur 4.5.9/3 heeft deze zonneshoorsteen een jaarlijkse warmteopbrengst van ca. 26 kWh.m⁻², waarmee dus ca. 50% van de totale warmtebehoefte kan worden gedekt.

Bij een volledige dekking van het warmteverbruik met zonnewarmte zou het oppervlak van een zonneshoorsteen in een dergelijk gebouw 22% van het geveloppervlak moeten bedragen.

Een langsgewel, uitgevoerd als zonnefaçade met 15% raamoppervlak – zie figuur 4.1.7 in paragraaf 4.1.10- heeft een oppervlak van $[0,85 \times 50/2 \times (50+15)] \approx 33\%$ van het totale geveloppervlak en zou dus ruimschoots in de totale warmtebehoefte kunnen voorzien.



Figuur 4.5.9/3 – Oppervlak zonneshoorsteen in % geveloppervlak als functie van de warmteopbrengst

4.5.7.10 Conclusies

Uit deze voorbeelden kan worden geconcludeerd dat voor een substantiële bijdrage aan het jaarlijkse warmteverbruik brede zonneshoorstenen nodig zijn. Een zonnefaçade kan worden beschouwd als een zeer brede zonneshoorsteen en heeft door zijn grote oppervlak aanzienlijk grotere warmteopbrengsten – zie de *case study* hoofdstuk 7.

Hierbij moet wel worden bedacht dat een zonneshoorsteen onderdeel is van het totaalconcept *Earth, Wind & Fire*, dat aanzienlijke besparingen mogelijk maakt op andere energiegebruikers in een gebouw, vooral van de klimaatinstallaties. Bovendien is een zonneshoorsteen het enige afzuigstelsel dat geen energie kost maar energie oplevert!

4.5.8 Rekenmodel voor de praktijk

4.5.8.1 Inleiding

In paragraaf 4.2.8 is een basaal rekenmodel ontwikkeld voor de dimensionering van een zonneshoorsteen en de berekening van de energieprestaties daarvan. Dit model is geschikt om door ingenieurs te worden gebruikt voor het ontwerp en de dimensionering in de voorlopig ontwerp (VO) fase

Het is echter de architect die in de conceptuele en voorlopig ontwerp fase (VO) de basis legt voor de architectonische integratie van een zonneshoorsteen of een zonnefaçade in een gebouw. Conceptueel ontwerpen is een intuïtief en iteratief proces, waarvoor een eenvoudig en gebruiksvriendelijk rekenmodel nodig is, dat met een muisklik architectonische varianten en de energetische consequenties daarvan in beeld brengt.

Deze paragraaf geeft een eerste aanzet voor de ontwikkeling van een dergelijk model. Het is opgezet door specialisten van de afdeling Architectural Engineering + Technology van de TU Delft, faculteit Bouwkunde (Bokel, Regina 2011). Hierbij is voortgebouwd op de onderzoeksresultaten van Taakgroep 41 van het Solar Heating and Cooling onderzoek van het International Energy Agency IEA.

4.5.8.2 IEA-SHC Task 41

Het Solar Heating and Cooling onderzoek werd in 1977 gestart als een van de eerste programma's van het International Energy Agency, en wordt, in samenwerking met de industrie, uitgevoerd door een groot aantal landen + de Europese Unie. Taakgroep 41 – “Solar Energy and Architecture” is gericht op

het stimuleren van architectuur als drijvende kracht voor de benutting van zonne-energie, met name door de ontwikkeling van geïntegreerde responsieve bouwelementen.

Het visiedocument van deze taakgroep luidt:

“Our vision - and the opportunity - is to make architectural design a driving force for the use of solar energy. Solar energy use can be an important part of the building design and the building's energy balance to a much higher extent than it is today. The development towards zero energy buildings will cause a more frequent use of building integrated solar energy systems. Due to the large size of such systems in relation to the scale of the building envelope, the architectural quality of their integration has a major impact on the final architectural quality of the building. Many solar systems do exist on the market, and with better and better energy performance. But, if they are not designed to be integrated into buildings in an appealing way, probably no building permit will be given, at least not in urban areas. And then – what is the use of a highly efficient collector if it will not be used?”

The main objective of this Task is to help achieve high quality architecture for buildings integrating solar energy systems: on one hand by improving the qualifications of the architects, their communications and interactions with engineers, manufactures and clients; on the other hand by enhancing manufacturers' awareness on building integration issues. Criteria are defined and guidelines proposed for all the actors in the field; architects, collector and façade/roof manufacturers, tool developers, clients and public bodies (municipalities, city planners). Through various interactions with all these actors, the results of this Task should largely contribute to increasing the architectural quality of the products and of the integrations.

http://www.iea-shc.org/task41/highlights/Task_41_Highlights_2010.pdf

Het werk van de taakgroep is verdeeld in drie speerpunten, waarvan voor de ontwikkeling van het rekenmodel voor de praktijk vooral de tweede van belang is:

1. *Architectural quality criteria; guidelines for architects by technology and application for new products development.*
2. *Tool development for early stage evaluations and balancing of various solar technologies integration. This objective concerns methods and tools to be used by architects at an early design stage, which need to be developed or improved. An example of such a tool can be how to visualize the solar energy concepts to show e.g. clients. Other examples can be tools needed to quantify and clearly illustrate the solar energy contribution and help balance the use of different active and passive solar technologies on the building envelope.*
3. *Integration concepts and examples, and derived guidelines for architects*

SHC Task 41 is een drie jaar durend samenwerkingsproject dat in april 2012 wordt afgerond; een eindrapport is tijdens het schrijven van dit proefschrift nog niet beschikbaar. Paragraaf 4.5.9.3 is ontleend aan een presentatie op PLEA 2011 (Kanters, Jouri 2011).

4.5.8.3 Aan een rekenmodel te stellen eisen

SHC Taakgroep 41 heeft een inventarisatie gemaakt van bestaande en veel gebruikte software voor zonne-energie en daglicht. In totaal zijn 56 computerprogramma's beoordeeld, onderverdeeld in CAAD (computer-aided architectural design), visualisatie en simulatie. Het onderzoek wijst uit dat de meeste programma's zijn ontworpen voor het detailontwerp maar voor het conceptueel ontwerp minder geschikt zijn. In een vervolgfase wordt de programmatuur door geoefende gebruikers getest op een referentiegebouw ten einde na te gaan welke verbeteringen mogelijk zijn (Dubois, Marie-Claude en Horvat, Miljana et al 2010).

Als volgende stap is met behulp van vragenlijsten een groot aantal architecten over het gebruik van software geënquêteerd. Het resultaat van deze enquête wijst uit dat de beschikbare software voor gebruik in de conceptuele fase niet erg geschikt zijn. Architecten onderkennen in meerderheid het belang van zonnearchitectuur maar willen gebruiksvriendelijke software, die geschikt is voor de conceptuele ontwerpfase, die kwantitatieve output levert en die compatible is met CAAD software. De resultaten van de enquête geven duidelijk aan dat de conceptuele ontwerpfase cruciaal is voor een geslaagde integratie van zonne-energie en architectuur. Architecten melden ook in meerderheid dat dit aspect door henzelf wordt behandeld, en dat in deze intuïtieve en iteratieve ontwerpfase de software met een muisklik alternatieven moet kunnen laten zien met betrekking tot bouwvolume, geometrie en oriëntatie en de gevolgen daarvan voor de energieprestaties (Kanters, Jouri 2011).

4.5.8.4 Rekenmodel algemeen

Een zonneschoorsteen heeft een dubbelfunctie: (1) Natuurlijk afzuiging van het ventilatiesysteem en (2) Oogsten van zonnewarmte.

Als afzuigstelsel moet de zonneschoorsteen, evenals een afzuigventilator, worden gedimensioneerd op basis van luchttechnische prestaties, i.c. een bepaald luchtdebiet bij een bepaald drukverlies in het afzuigstelsel. Dit is een dimensionerende berekening, waarbij, uitgaande van referentiecondities, de thermische trek in evenwicht is met het drukverlies. De energieprestaties, in termen van jaarlijkse energieopbrengsten, zijn in dit geval een afgeleide van de berekende schoorsteenafmetingen.

Als het oogsten van zonnewarmte primair staat, in termen van jaarlijkse energieopbrengsten in $\text{MJ}\cdot\text{a}^{-1}$ of $\text{kWh}\cdot\text{a}^{-1}$, wordt de zonneschoorsteen gedimensioneerd op basis van energieprestaties en zijn de luchttechnische prestaties hiervan een afgeleide.

In beide gevallen moet de zonneschoorsteen worden afgestemd op het architectonisch ontwerp, hetgeen met zich meebrengt dat de functie-eisen kunnen worden overschreden of onderschreden.

Een luchttechnisch overgedimensioneerde zonneschoorsteen heeft een grotere afzuigcapaciteit dan bij de referentiecondities noodzakelijk. Dit houdt in dat:

- De kleppenregeling vaker in moet grijpen om het luchtdebiet tot de ontwerpwaarde te beperken, of
- Het afzuigdebiet tijdelijk kan worden verhoogd, hetgeen bij hoge buitentemperaturen en hoge stralingsflux een aantrekkelijke optie kan zijn.
- Het aantal draaiuren van de hulpventilator wordt beperkt.

Een luchttechnisch overgedimensioneerde zonneschoorsteen heeft ook een hogere jaarlijkse energieopbrengst, maar dit zal zelden een probleem opleveren.

Bij een luchttechnisch ondergedimensioneerde zonneschoorsteen zal de hulpventilator vaker in bedrijf moeten komen, en is uiteraard de jaarlijkse energieprestatie geringer.

4.5.8.5 Rhinoceros en Grasshopper

Rhinoceros 3d (Rhino) is een professioneel *NURBS -Non-uniform rational basis spline*⁶⁰ computerprogramma voor het ontwerpen en het maken van computer graphics in 3D. Tijdens het modelleren krijgt de ontwerper met behulp 3D-computergraphics een visuele terugkoppeling. Voor architectuur is Rhinoceros 3d een veel gebruikt programma, vooral door de integratie met Grasshopper.

Grasshopper® is een grafisch opmaakprogramma, geïntegreerd in Rhino, dat via een plug and play interface parametrisch modelleren mogelijk maakt zonder kennis van de RhinoScript programmeertaal.

De combinatie Rhino/Grasshopper voldoet hiermee aan de eisen die aan een rekenmodel voor de praktijk worden gesteld –zie paragraaf 4.5.9.3. Bij variatie van de grootte van de zonneschoorsteen, de grootte van het gebouw en het ventilatiedebiet wordt real-time informatie gegeven over de prestaties van de zonneschoorsteen, uitgedrukt in thermisch vermogen, drukopbrengst, rendement en jaarlijkse energieopbrengst.

4.5.8.6 Rekenmodel op basis van luchttechnische prestaties

Dit rekenmodel is bedoeld voor het dimensioneren van een zonneschoorsteen als afzuigstelsel van de gebouwventilatie onder de referentiecondities ad paragraaf 4.2.3. Uitgangspunten hiervoor is het basale rekenmodel ad paragraaf 4.2.8. In paragraaf 4.4.3 is aangetoond dat dit voldoende nauwkeurig is. Door manipulatie van afmeting en geometrische verhoudingen van de zonneschoorsteen wordt het drukverlies van het afzuigstelsel in evenwicht gebracht met de thermische trek.

Uitgegaan is van een zonneschoorsteen met een glaswand van SGG Diamant Planitherm Total Low E en een absorber van Mirotherm®, zie paragraaf 4.1.6. Deze uitvoering is conform de uitvoering van het fysieke testmodel volgens paragraaf 4.4.1.

De uitvoer van het rekenmodel omvat:

⁶⁰ Een spline is een functie die bestaat uit een aaneenschakeling van stukjes van polynomen. Met behulp van splines kunnen op relatief eenvoudige wijze krommen beschreven en bewerkt worden

- Het thermisch vermogen bij referentiecondities $P_{th,ref}$
- Het thermisch rendement bij referentiecondities $\eta_{th,ref}$
- Het beschikbare externe drukverschil bij referentiecondities Δp_{ext}
- De jaarlijkse energieopbrengst

4.5.8.7 Rekenmodel op basis van energieprestaties

De jaarlijkse energieopbrengst is berekend volgens paragraaf 4.5.8. Voor de in paragraaf 4.5.9.6 vermelde uitvoering is uitgegaan van een te behalen jaarrendement van $\approx 60\%$ van de zonneshoorsteen en een systeemrendement van $\approx 44\%$ - zie tabel 4.5.9/4.

Orientatie →		Oost	Zuidoost	Zuid	Zuidwest	West	Horizontaal
Jaarsom stralingsflux	kWh.m ⁻²	651,5	815,2	862,4	807,9	648,8	1013,5
Rendement	%	60%	60%	60%	60%	60%	60%
Bruto opbrengst	kWh.m ⁻²	390	490	517	485	390	608
Systeemrendement	%	44%	44%	44%	44%	44%	44%
Netto opbrengst	kWh.m ⁻²	285	360	380	355	285	445
Procentueel t.o.v. Z.	%	75%	95%	100%	93%	75%	117%

Tabel 4.5.9 – Bruto en netto jaarsommen van de totale straling op horizontale en verticale vlakken

Het rekenmodel geeft uiteraard slechts een indicatie van de geraamde energieprestaties. Voor het conceptueel en voorlopig ontwerp van een zonneshoorsteen lijkt dit voldoende. In de definitief ontwerp (DO)fase kan de energieprestatie door de klimaatingenieur met behulp van een dynamisch simulatiemodel nauwkeuriger worden bepaald.

4.5.8.8 Presentatie van de resultaten

Om het rekenmodel visueel te vereenvoudigen is een model gemaakt waarbij alleen de invoer en uitvoer zichtbaar is –zie figuur 4.5.9. Voor de gemiddelde gebruiker lijkt deze presentatie voldoende.

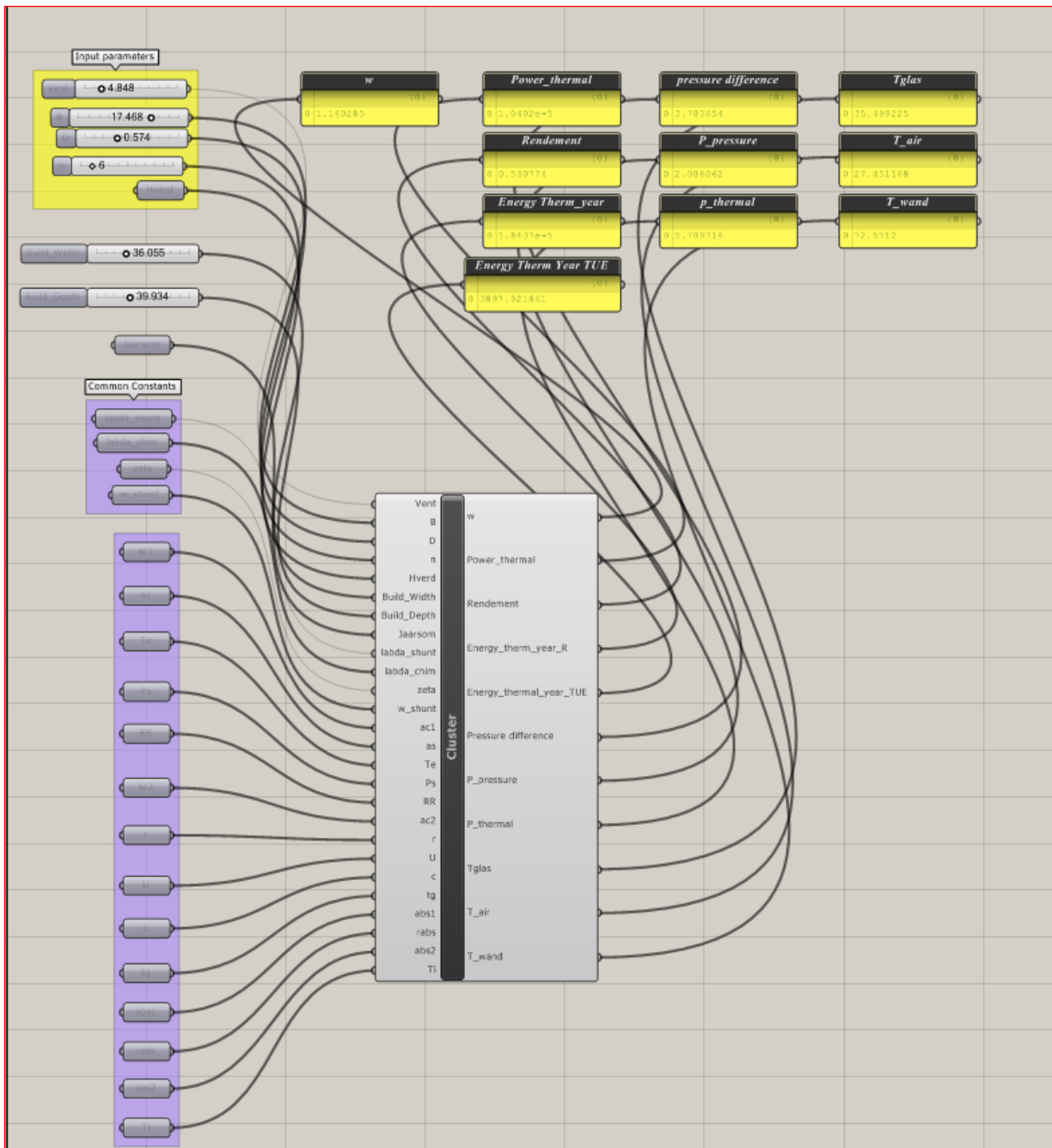
De te veranderen invoer parameters zijn weergegeven met een schuifbalkje. De andere invoerparameters zijn over het algemeen onafhankelijk van de geometrie van de het model en zijn als vaste constanten ingevoerd.

4.5.8.9 Test van de software

Het rekenmodel is ontwikkeld op basis van de in het onderzoeksrapport gepresenteerde onderzoeksresultaten (Bronsema 2012), en kan worden beschouwd als alfaversie. Om vast te stellen of het rekenmodel voldoet aan de gestelde eisen ten aanzien van kwaliteit en gebruikersvriendelijkheid dient het te worden gevalideerd en geverifieerd.

Deze alfa test zou kunnen worden uitgevoerd in het kader van een projectoefening *Earth, Wind & Fire* door studenten Architectural Engineering van de faculteiten Bouwkunde van TU Delft en TU Eindhoven. Een projectvoorstel hiervoor is bij deze faculteiten ingediend.

Aansluitend aan de alfa test zal een externe beta test worden uitgevoerd, waarvoor bij de afronding van het onderzoek nog geen concrete plannen zijn gemaakt.



Figuur 4.5.9 Overzicht Vereenvoudigde Grasshoppermodel

4.5.9 De zonneschoorsteen in het Nederlandse klimaat

4.5.9.1 Inleiding

In de voorgaande paragrafen zijn berekeningen voor zonneschoorstenen gemaakt bij de referentiecondities volgens zie paragraaf 4.2.3.

Ontwerpcondities zijn van belang voor het dimensioneren van installaties maar houden 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 stralingsflux en buitentemperatuur. Welke temperaturen en drukverschillen zijn te verwachten? Is er risico op glasbreuk? Hoe wordt het luchtdebiet geregeld bij te lage of te hoge thermische trek? Etc.

In het voorliggende paragraaf worden deze vragen onderzocht aan de hand van een schoorsteenmodel met een hoogte van 4 - 14 verdiepingen. Hiervoor is het basale rekenmodel ad paragraaf 4.2.8 gebruikt.

4.5.9.2 Simulatie variabelen

Afmetingen zonneshoorsteen

Berekeningen zijn gemaakt voor een zonneshoorsteen met de volgende afmetingen:

- Breedte 3,6 [m]
- Diepte 0,65 [m]
- Hoogte 14 - 49 [m] overeenkomend met
- Aantal verdiepingen 4 - 14 [-]

Uitvoering zonneshoorsteen

Berekeningen zijn gemaakt voor een zonneshoorsteen in de volgende uitvoering –zie paragraaf 4.1:

- SGG Planitherm Solar 4/15/4
 - g-waarde 0,75 [-]
 - U-waarde 1,10 [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$]
- SGG Diamant Planitherm Total low E
 - g-waarde 0,70 [-]
 - U-waarde 1,32 [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$]
- Blank dubbel glas
 - g-waarde 0,70 [-]
 - U-waarde 3,00 [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$]
- Absorber Mirotherm - zie paragraaf 7.4.2

Klimaatcondities

Berekeningen zijn gemaakt voor een luchtsnelheid van $1,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ en drie klimaatcondities:

- Referentieconditie:
 - Buitentemperatuur $\theta_e = 20$ [$^{\circ}\text{C}$]
 - Stralingsflux $\Phi_{\text{zon}} = 400$ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]
 - Luchtintredetemperatuur = 21 [$^{\circ}\text{C}$]
- Extreme zomerconditie (uur 4074 van NEN 5060 – A2 – Zuid):
 - Buitentemperatuur $\theta_e = 32$ [$^{\circ}\text{C}$]
 - Stralingsflux $\Phi_{\text{zon}} = 840$ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]
 - Luchtintredetemperatuur = 24 [$^{\circ}\text{C}$]
- Extreme winterconditie (Testdag 15-12-2009 van de fysieke testopstelling –zie figuur 4.4.1/4)
 - Buitentemperatuur $\theta_e = +0,55$ [$^{\circ}\text{C}$]
 - Stralingsflux $\Phi_{\text{zon}} = 730$ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]
 - Luchtintredetemperatuur = 22 [$^{\circ}\text{C}$]

CWC

De berekeningen zijn uitgevoerd met de in paragraaf 4.2.4.3 voorgestelde defaultformule voor de CWC. Deze formule is enigszins speculatief, maar een betere benadering is voorshands niet beschikbaar.

$$h_{c,m} = 6,5 * w \quad (4.2.4/9)$$

NB: Zo lang er geen grotere zekerheid is over de waarde van de CWC moeten de berekeningsresultaten met de nodige voorzichtigheid worden gehanteerd. Hogere waarden leveren lagere wand- en glastemperaturen op vice versa.

4.5.9.3 Resultaten zomersituatie

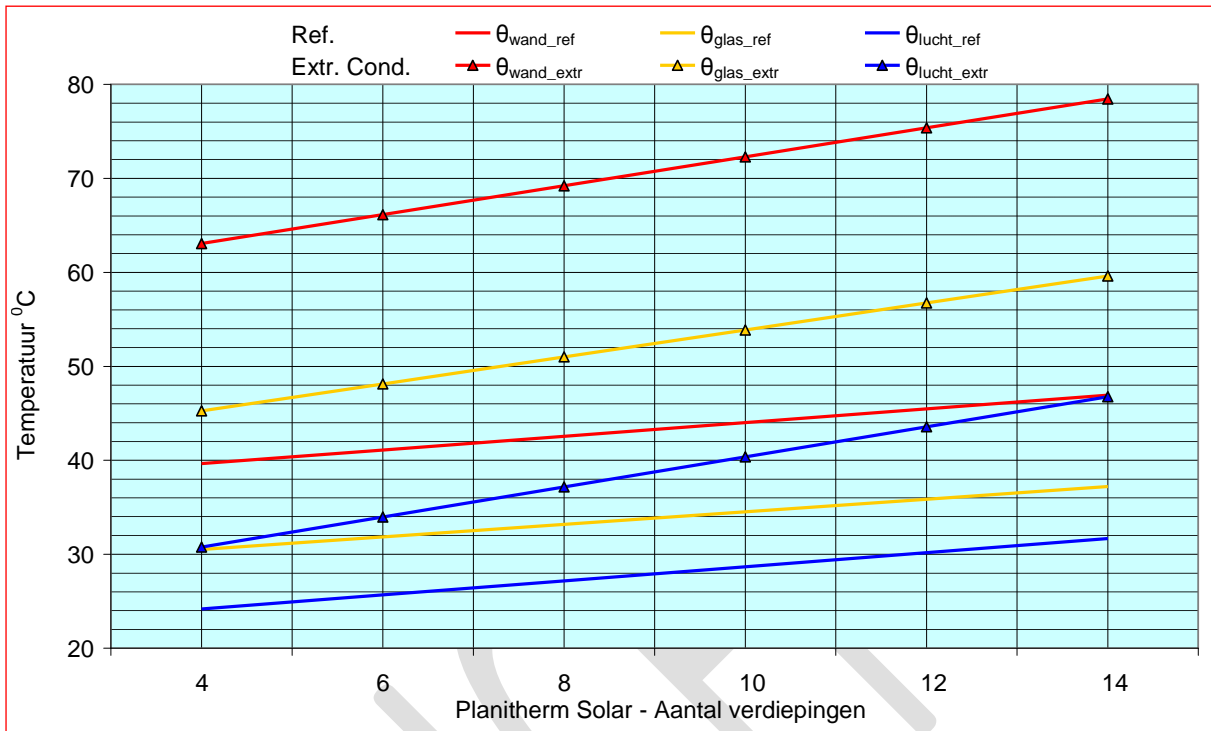
De resultaten voor de zomersituatie zijn weergegeven in de figuren 4.5.11/1 – 4.5.11/2 en 4.5.11/3.

Naast de wand en glastemperaturen zijn hierin ook de luchttemperaturen aangegeven. Enkele observaties:

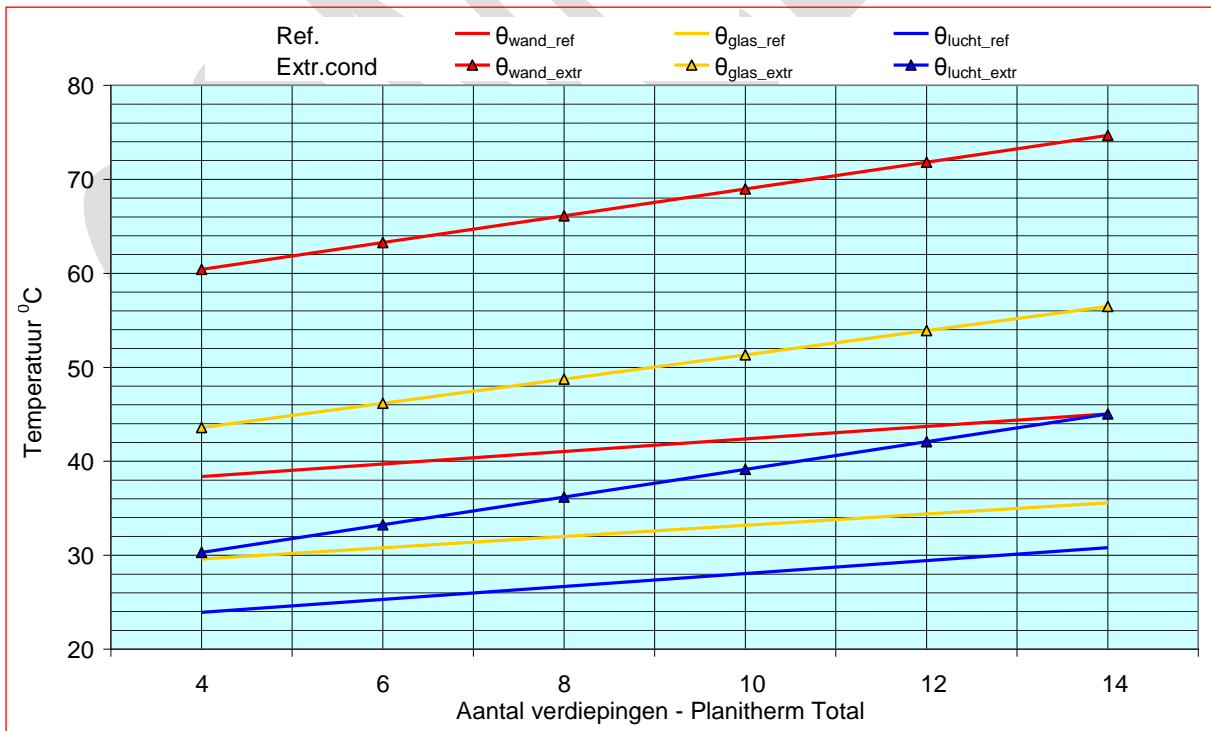
- Bij het superieure Planitherm Solar loopt bij extreme condities de maximum glastemperatuur op tot ca. 60°C bij een zonneshoorsteen van 14 verdiepingen hoog. Bij Planitherm Total en Blank dubbel glas zijn deze waarden respectievelijk 56°C en 51°C .
- Deze glastemperaturen liggen ruim onder de maximum toegestane temperatuur van 80°C voor ongehard glas – zie paragraaf 4.1.4.

- De maximum wandtemperatuur voor een zonneshoorsteen van 14 verdiepingen hoog met Planitherm Solar is ca. 73°C, eveneens onder de maximum waarde.

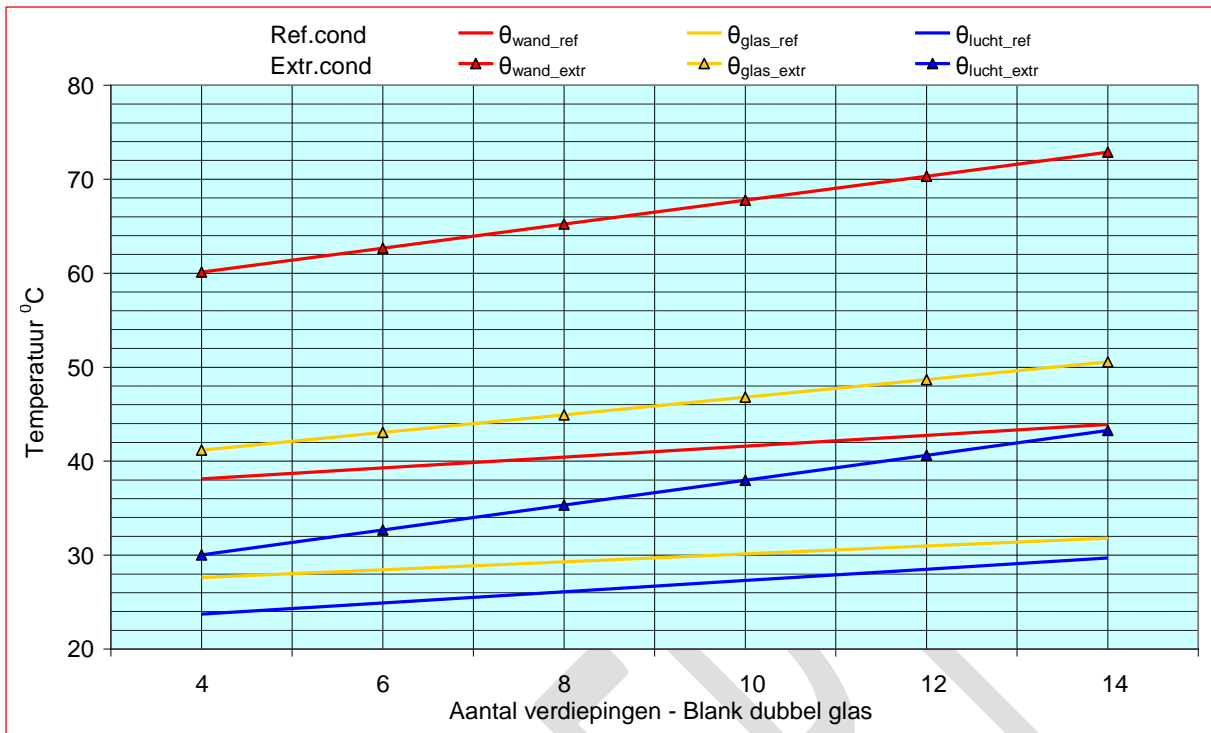
NB: De wand- en glastemperaturen zijn zeer gevoelig voor de CWC. Zie de waarschuwing bij paragraaf 4.5.11.2.



Figuur 4.5.11/1 – Temperaturen zonneshoorsteen met Planitherm Solar - Zomersituatie



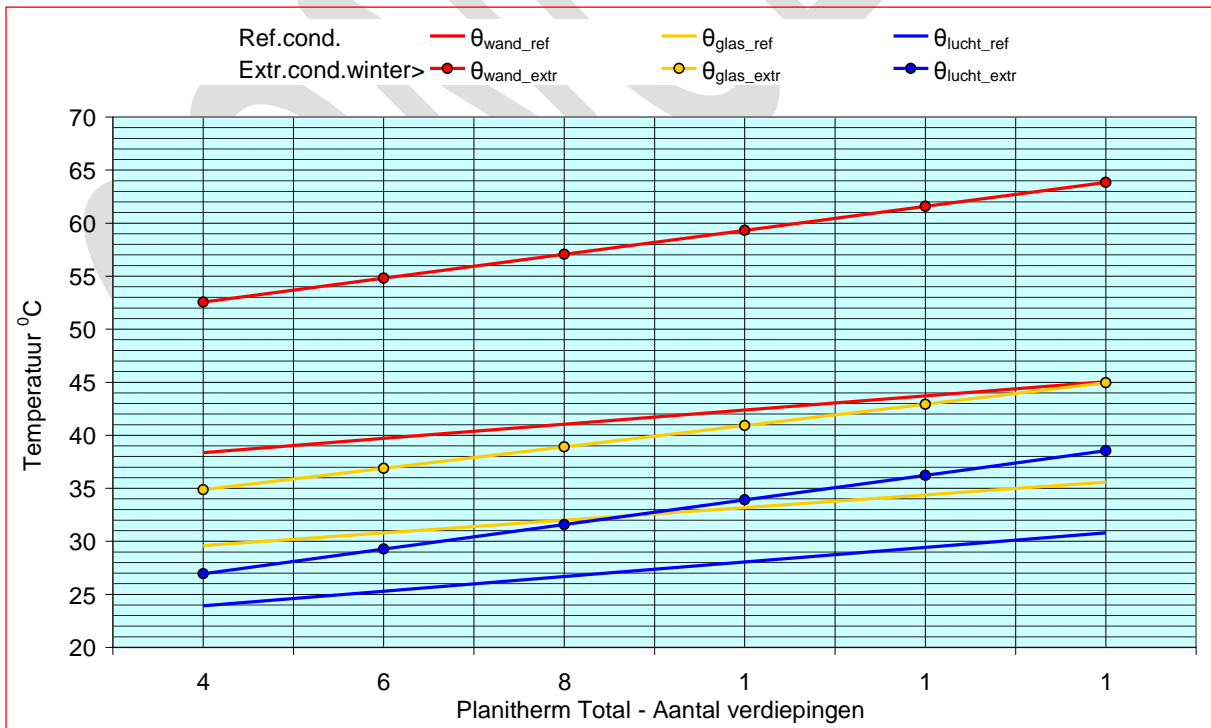
Figuur 4.5.11/2 – Temperaturen zonneshoorsteen met Planitherm Total - Zomersituatie



Figuur 4.5.11/3 – Temperatures zonneshoorsteen met blank dubbel glas - Zomersituatie

4.5.9.4 Resultaten wintersituatie

De wintersituatie is alleen berekend voor Planitherm Total –zie figuur 4.5.11/4, waarin ter vergelijking ook de referentieconditie is aangegeven. De wand- en glastemperaturen liggen respectievelijk ≈ 10 en 11 K lager dan in de zomersituatie.



Figuur 4.5.11/4 – Temperatures zonneshoorsteen met Planitherm Total – Wintersituatie

4.5.9.5 Glas- en Wandtemperaturen in een zonnefaçade

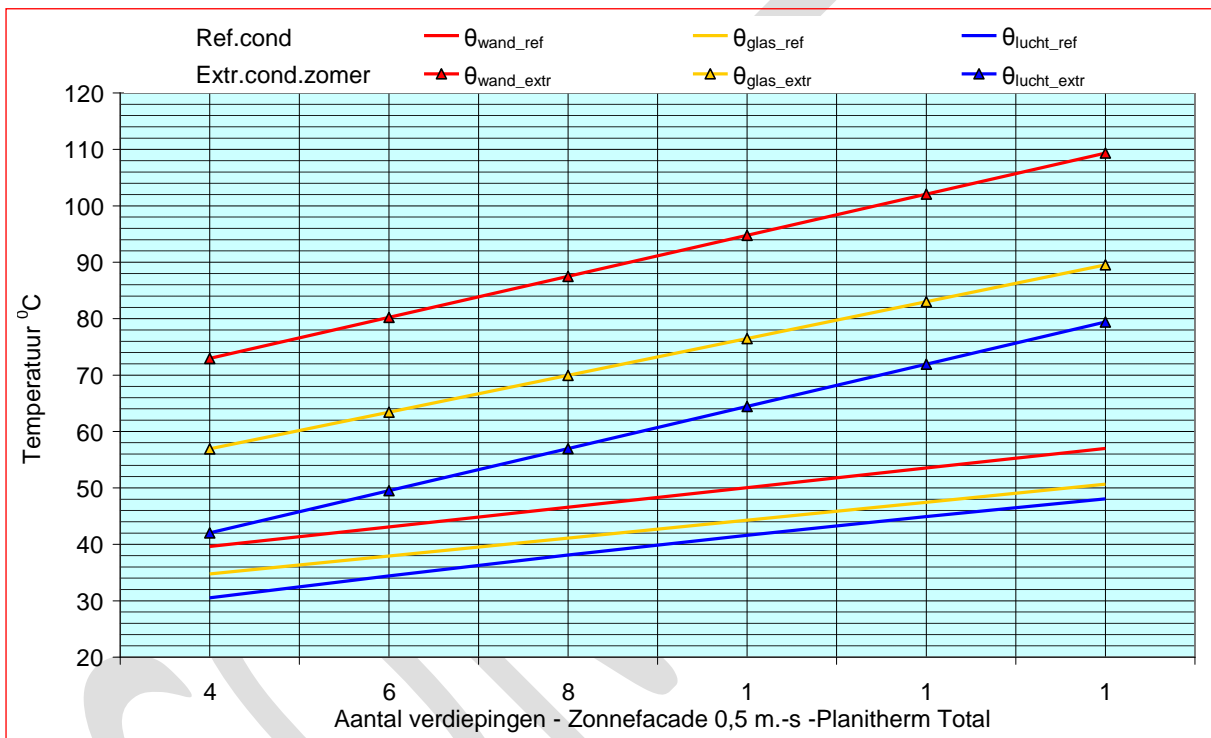
In een Zonnefaçade is de lichtsnelheid meestal lager dan in een zonneshoorsteen en wordt de luchtstroom op vele plekken door de raamkasten onderbroken. Van een ongehinderde stroming is

daarom geen sprake. Het is te verwachten dat de hiermee gepaard gaande turbulentie-intensiteit een positieve invloed heeft op de CWC. Hierover bestaat echter geen zekerheid.

Door de lage luchtsnelheid in een zonnepaneel wordt de CWC in principe meer door temperatuurverschillen bepaald dan door de luchtsnelheid. Voor de temperatuurberekeningen is daarom formule (4.2.4/10) van Molina & Maestre gebruikt –zie paragraaf 4.2.4.3.

Figuur 4.5.11/5 geeft een beeld van de aldus berekende temperaturen in een zonnepaneel met Planitherm Total bij een luchtsnelheid van $0,5 \text{ m.s}^{-1}$. Aangegeven zijn de referentieconditie en de extreme zomerconditie. Bij een hoogte van 14 verdiepingen en toepassing van Planitherm Total kan bij extreme zomercondities de glastemperatuur oplopen tot ca. 90°C . Toepassing van gehard glas is in dit geval noodzakelijk –zie paragraaf 4.1.4.

NB: De wand- en glastemperaturen zijn zeer gevoelig voor de CWC. Zie de waarschuwing bij paragraaf 4.5.10/2.



Figuur 4.5.11/5 – Temperaturen zonnepaneel met Planitherm Total – D = 0,65m

4.5.9.6 Beveiliging tegen te hoge glastemperaturen

Het is mogelijk dat onder bepaalde omstandigheden incidenteel kritieke glastemperaturen, hoger dan 80°C , in een zonnepaneel of zonnepaneel optreden. Dit kan het geval zijn bij extreme buitencondities, maar ook bij het blokkeren van de luchtstroom als gevolg van een regeltechnische storing of anderszins.

Het verdient aanbeveling een zonnepaneel tegen te hoge temperaturen te beveiligen, waardoor de extra kosten van gehard glas kunnen worden vermeden. Dit kan worden gerealiseerd met behulp van de bypasskleppen aan de top, mogelijk in combinatie met bypasskleppen aan de voet. Bij overschrijding van een bepaalde temperatuur worden deze kleppen gedwongen open gestuurd, en zorgt de additionele luchtstroom voor voldoende koeling.

4.5.9.7 Invloed buitentemperatuur op de thermische trek

De invloed van de buitentemperatuur en de hoogte op de thermische trek is zeer groot –zie figuur 4.5.11/6, die betrekking heeft op het schoorsteenmodel uit paragraaf 4.5.11.2, uitgevoerd met SGG Planitherm Total low E. Bij buitentemperaturen onder de ruimtetemperatuur werkt een zonnepaneel in feite als gewone schoorsteen; de thermische trek wordt door de zonnestraling versterkt. Pas bij buitentemperaturen boven de ruimtetemperatuur is de thermische trek geheel afhankelijk van de zonnestraling.

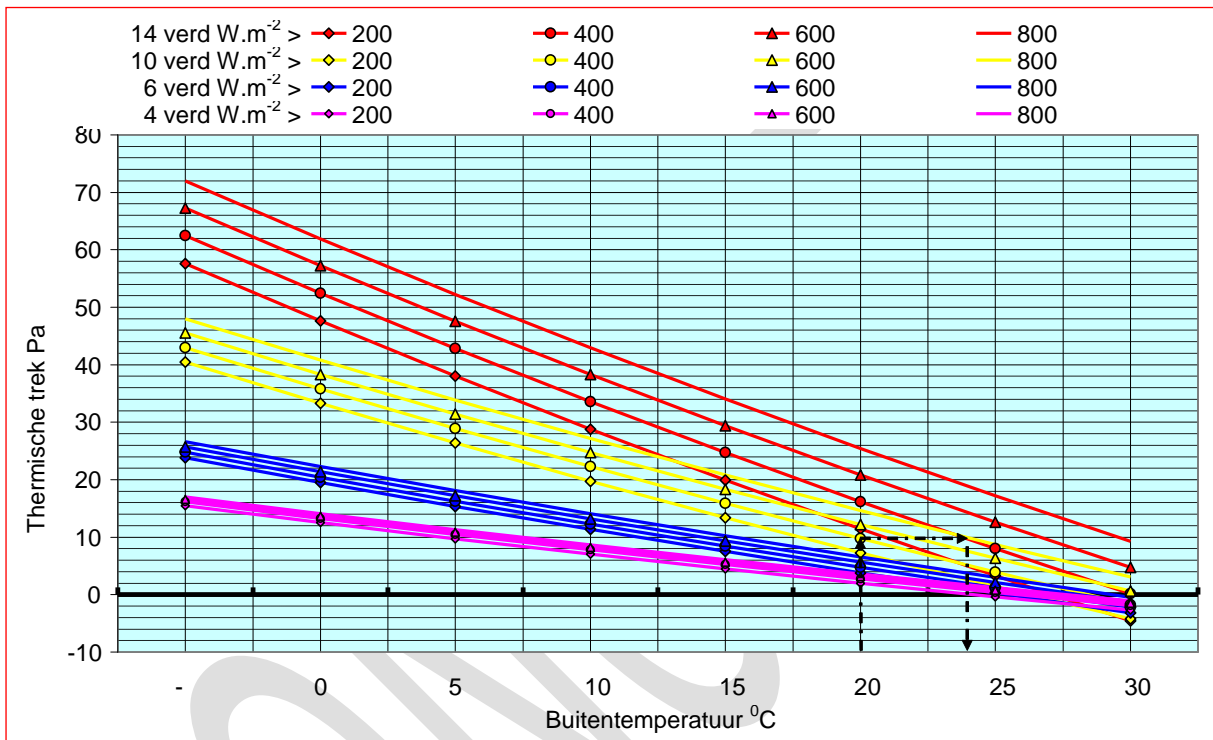
Voorbeeld:

Een zonneschoorsteen voor een gebouw van 10 verdiepingen is ontworpen op een thermische trek van 10 Pa bij referentiecondities. (Buitentemperatuur $\theta_e = 20^\circ\text{C}$ en stralingsflux $\Phi_{zon} = 400 \text{ W.m}^{-2}$).

In figuur 4.5.11/6 kan worden afgelezen dat bij een stralingsflux van 800 W.m^{-2} deze trek in stand blijft tot een buitentemperatuur van 28°C .

Bij hogere buitentemperaturen en/of lagere stralingsflux moet de hulpventilator worden ingeschakeld, tenzij de venturi-ejector in het Venteddak voldoende compensatie geeft. Het drukverlies van de FiWiHeX warmtewisselaar –zie paragraaf 4.5.8.2- is hierbij buitenbeschouwing gelaten..

Bij buitentemperaturen $< 20^\circ\text{C}$ stijgt de beschikbare trek tot een maximum van 40 Pa bij $\theta_e = -5^\circ\text{C}$ en $\Phi_{zon} = 200 \text{ W.m}^{-2}$.



Figuur 4.5.11/6 – Thermische trek als functie van buitentemperatuur, stralingsflux en hoogte

4.5.9.8 Onvoldoende thermische trek - Hulpventilator

Als de zonstraling te laag is, en/of de buitentemperatuur te hoog, moet de trek van een zonneschoorsteen met behulp van een hulpventilator worden opgevoerd. Het door deze ventilator te leveren drukverschil bestaat uit twee componenten:

- de drukverliezen van het ventilatiesysteem inclusief de zonneschoorsteen.
- de negatieve trek van de zonneschoorsteen onder deze omstandigheden;

De drukverliezen van het ventilatiesysteem onder referentiecondities zijn bepaald bij de dimensionering van de zonneschoorsteen volgens het rekenmodel ad paragraaf 4.2.8. De grootte van de negatieve trek is afhankelijk van de buitentemperatuur θ_e en de gelijktijdige stralingsflux Φ_{zon} . Als zeer extreme omstandigheid zou kunnen worden verondersteld dat bij een hoge buitentemperatuur van 35°C een onweersbui optreedt die de zon min of meer verduistert en de opwarming van de ventilatielucht in de zonneschoorsteen tot nul reduceert. Bij het verwaarlozen van de warmtetransmissie door de beglazing kan de negatieve trek met behulp van formule (4.2.6/1) worden berekend op $\Delta p \approx 0,4H \text{ Pa}$, waarin H de hoogte is.

Voorbeeldberekening:

Voor een gebouw van 10 verdiepingen à 3,5 m bedraagt het ventilatiedebiet $15 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$. Het drukverlies, overeenkomend met de thermische trek onder referentiecondities is berekend op 10 Pa

De maximale negatieve trek onder genoemde extreme condities bedraagt 14 Pa. Het totale drukverlies bedraagt 24 Pa. Stel dat de dynamische druk 6 Pa bedraagt, dan moet de hulpventilator worden gedimensioneerd op een debiet van $15 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ bij een totaal drukverschil van 30 Pa.

Het benodigde elektrisch vermogen wordt berekend met de formule

$$P_e = q_v \cdot p \cdot \frac{1}{\eta_v \cdot \eta_e} \quad (4.5.11/1)$$

Waarin

P_e	elektrisch vermogen	[W]
q_v	luchtdebiet	[m ³ .s ⁻¹]
p	drukverschil	[Pa]
η_v	rendement ventilator	[-]
η_e	rendement elektromotor	[-]

Bij bijvoorbeeld $\eta_v = 0,85$ en $\eta_e = 0,90$ wordt het elektrisch vermogen in dit rekenvoorbeeld berekend op 600W. Dit geldt voor zeer extreme klimaatcondities.

Het vermogen bij meer normale klimaatcondities waarbij stimulering van de thermische trek nodig is bedraagt naar schatting niet meer dan 20% hiervan, waarbij komt dat het aantal bedrijfsuren beperkt is. Er is om deze reden afgezien van een nadere berekening van het elektrisch energiegebruik.

Voor de uitvoering en de plaatsing van de hulpventilator zijn verschillende mogelijkheden aanwezig. Voorshands lijkt de meest logische optie de ventilator van de FiWiHEX warmtewisselaar hiervoor te gebruiken- zie figuur 4.5.8.2. Het luchtdebiet kan hierbij worden geregeld door toerenregeling van de ventilator.

4.5.9.9 Variabel debiet (*Free running*)

De hoeveelheid te oogsten zonnewarmte kan in principe worden vergroot door gebruik te maken van een hoge zonstraling en buitentemperaturen boven de referentiecondities. Via een bypassklep zou buitenlucht in de zonneschoorsteen kunnen worden aangezogen.

Voor een zonneschoorsteen die ontworpen is voor het stimuleren van natuurlijke woonhuisventilatie zou de *free running* optie interessant kunnen zijn. In het kader van het onderzoek is deze optie om de volgende redenen echter niet onderzocht:

- In een kantoorgebouw met natuurlijke airconditioning op basis van het *Earth, Wind & Fire* concept dient een zonneschoorsteen in principe als afzuigventilator en moet derhalve worden gedimensioneerd op een constant luchtdebiet.
- Berekeningen in paragraaf 4.5.5.6 tonen aan dat de hogere lichtsnelheid, die met variabel debiet zou kunnen worden gerealiseerd, slechts een marginale rendementsverbetering oplevert.
- Het is de vraag of de sterk toenemende en variabele luchtdebieten door de FiWiHEX warmtewisselaar kunnen worden verwerkt.
- Afhankelijk van de locatie moet waarschijnlijk met extra vervuiling van de zonneschoorsteen door de buitenlucht rekening worden gehouden.

4.5.9.10 Weekendbedrijf

Tijdens weekeinden en andere dagen dat er geen ventilatiebehoefte in een gebouw is, zal het shuntkanaal als recirculatiekanaal worden gebruikt. De warmteterugwinning blijft dan uiteraard in bedrijf - zie figuur 4.5.8/2.

4.5.9.11 Directe afzuiging via shuntkanaal

Bij lage buitentemperaturen en afwezigheid van zonnestraling kan worden overwogen met behulp van de hulpventilator lucht af te zuigen via het shuntkanaal. Warmteverlies via de zonneschoorsteen wordt hierdoor voorkomen.

Bij deze optie moeten de potentiële energiebesparingen worden afgewogen tegen de extra investeringskosten en regeltechnische complicaties.

4.5.9.12 Conclusies

De belangrijkste conclusies zijn:

- De berekende maximum glastemperaturen in een zonneschoorsteen blijven bij een lichtsnelheid van 1,5 m.s⁻¹ en extreme klimaatcondities ruim onder de maximum toegestane temperatuur van 80°C voor ongehard glas.

- In een zonnepaneel kan bij een lichtsnelheid van $0,5 \text{ m.s}^{-1}$ en extreme klimaatcondities de glastemperatuur hoger worden dan 80°C en is vanaf een bepaalde hoogte toepassing van gehard glas noodzakelijk
- Ter beveiliging tegen glasbreuk kan het aanbeveling verdienen een begrenzing van de maximum luchttemperatuur te voorzien, die in combinatie met bypasskleppen additionele koeling levert.
- 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.

CONCEPT

5 ENERGIEOPWEKKING

5.1 Inleiding

Het streven in de Europese Gemeenschap is volgens de EPBD Recast (EP en EC 2010) gericht op een reductie tot “*nearly zero*” van het energiegebruik in de gebouwde omgeving tegen het jaar 2020. Het jaarlijks resterende energiegebruik moet hierbij “*on-site renewable*” worden opgewekt –zie paragraaf 1.1.2.⁶¹ In Nederland is hiervoor het begrip “*energieneutraal bouwen*” geïntroduceerd, dat overigens nog niet nauwkeurig is gedefinieerd (www.agentschapnl.nl/programmas-regelingen/energieneutraal-bouwen)

REHVA heeft met het oog op Europese harmonisatie voorstellen gedaan om de begrippen “*nearly zero energy buildings*” en de systeemgrenzen hiervan te definiëren (Kurnitzki, Jarek et al 2011). De volgende definities worden voorgesteld:

- Net zero energy building (nZEB) - energy use of $0 \text{ kWh.m}^2\text{a}^{-1}$ primary energy
A nZEB is typically a grid connected building with very high energy performance. nZEB balances its primary energy use so that the primary energy feed-in to the grid or other energy network equals to the primary energy delivered to nZEB from energy networks. Annual balance of $0 \text{ kWh/(m}^2 \text{ a)}$ primary energy use typically leads to the situation where significant amount of the on-site energy generation will be exchanged with the grid. Therefore a nZEB produces energy when conditions are suitable, and uses delivered energy during rest of the time.
- Nearly net zero energy building (nnZEB) - national cost optimal energy use of $> 0 \text{ kWh.m}^2\text{a}^{-1}$ primary energy
Not all renewable energy technologies needed for nearly zero energy building have to be cost-effective, if appropriate financial incentives are not available.

In de EPBD Recast wordt de energieprestatie van een gebouw als volgt gedefinieerd:

“energy performance of a building” means the calculated or measured amount of energy needed to meet the energy demand associated with a typical use of the building, which includes, inter alia, energy used for heating, cooling, ventilation, hot water and lighting”

Volgens deze definitie valt het stroomverbruik voor verlichting binnen de systeemgrens. Het gebruikersgebonden stroomverbruik voor huishoudelijke doeleinden en de zgn. contactdoosbelasting daarentegen valt buiten de systeemgrens.

In NEN-EN 15603:2008 en (“*Energieprestatie van gebouwen - Het totale energieverbruik en definitie van prestatie indicatoren*”) is het gebruikersgebonden stroomverbruik wel als energieprestatie opgenomen. Het wordt aan de nationale staten overgelaten om te bepalen of dit verbruik binnen of buiten de systeemgrens van de EPBD Recast wordt geplaatst.

Gezien het in kantoorgebouwen veelal onvoorspelbare gebruikersgebonden stroomverbruik is het logischer de systeemgrens van de EPBD Recast te hanteren, en alleen het gebouwgebonden energiegebruik inclusief verlichting in rekening te brengen.

5.2 Doelstellingen

De formele doelstelling van de EPBD Recast (EP en EC 2010), waaraan ook Nederland zich heeft gecommitteerd, is tweeledig –zie paragraaf 1.1.2:

1. Het realiseren van gebouwen met een energiegebruik van “*nearly zero*”.
2. Het voor een zeer groot deel opwekken van het resterende energiegebruik door “*renewable sources, produced on site or nearby*”.

Het *Earth, Wind & Fire* concept maak gebruik van de omgevingsenergie rondom een gebouw voor een *Natuurlijke Airconditioning* –zie paragraaf 1.3- en kan daarmee een belangrijke bijdrage leveren aan de eerste doelstelling.

In hoofdstuk 4 is aangetoond dat met een zonneshoorsteen een substantieel deel van de jaarlijkse warmtebehoefte van een gebouw kan worden gedekt, en dat met een zonnepanelen in principe in de gehele warmtebehoefte kan worden voorzien. Dit geldt voor energiezuinige gebouwen met een

⁶¹ ASHRAE Vision 2020 gaat uit van de doelstelling “*Net Zero Energy Buildings*” in 2030 (ASHRAE 2008).

jaarlijks warmteverbruik van ca. 50 kWh.m² –zie paragraaf 4.5.9.8. Hiermee wordt een substantiële bijdrage geleverd aan de tweede doelstelling.

In het voorliggende hoofdstuk wordt onderzocht of en in hoeverre de omgevingsenergie van zon en wind ook een bijdrage kan leveren aan het opwekken van het resterende energiegebruik ten behoeve van de gebouwgebonden installaties, de tweede doelstelling. Hierbij worden niet alleen de pompen en hulpventilatoren van het *Earth, Wind & Fire* concept gerekend, maar ook de pompen e.d. voor de overige installatietechnische voorzieningen, en ook de verlichtingsinstallatie.

Voor energieopwekking worden veelal PV-cellen op het dak geïnstalleerd. Laagbouw biedt in het algemeen de beste mogelijkheden om met behulp hiervan binnen de voetafdruk van het gebouw energieneutraliteit te realiseren. Bij een toenemend aantal verdiepingen wordt de verhouding dakoppervlak/vloeroppervlak kleiner en wordt de specifieke energieopbrengst van PV-cellen per m² vloeroppervlak steeds kleiner. Dit geldt met name voor hoogbouw, het gebouwtype waarop het *Earth, Wind & Fire* concept is gericht. Windenergie, waarvan de prestatie juist toeneemt bij een groter aantal verdiepingen, zou de afname van de specifieke energieopbrengst van fotovoltaïsche energie kunnen compenseren.

In paragraaf 5.3 worden de mogelijkheden voor het gebruik van windenergie verkend. Gebruik van windenergie in de gebouwde omgeving is om een aantal redenen omstreden en ook kostbaar mede omdat de windsnelheden hier lager zijn dan in het open veld. Het multifunctionele Ventecdak, dat in eerste instantie is ontworpen voor natuurlijke ventilatie, biedt hiervoor echter veelbelovende mogelijkheden.

In paragraaf 5.4 worden de mogelijkheden voor gebruik van fotovoltaïsche energie met behulp van PV-folie het Ventecdak verkend. De dakoverstekken, bedoeld als windvangsers, zorgen voor een substantiële vergroting van het dakoppervlak ten opzichte van de voetafdruk van een gebouw, en daarmee tevens voor een inherente meeropbrengst van fotovoltaïsche energie.

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 zonne-energie en windenergie is daarom in principe een interessante optie.

In tegenstelling tot de Zonneschoorsteen, het Ventecdak en de Klimaatcascade zijn de beschouwingen en berekeningen in dit hoofdstuk niet gevalideerd. Nader onderzoek met behulp van CFD simulaties en metingen in de windtunnel is nodig om de berekeningen met betrekking tot windenergie te valideren en het energieconcept voor algemene toepassingen te optimaliseren.

5.3 Windenergie

5.3.1 Inleiding

“Windenergie is omstreden. De weinig genuanceerde berichtgeving over windenergie laat zien dat de discussie erover tamelijk gepolariseerd is. Dat komt niet alleen door het zware stempel dat windenergie op grote landelijke productiegebieden drukt. Ook financieel moeten er offers voor worden gebracht. Uiteraard roept dat politieke en maatschappelijke vragen op. Wat is het nut en wat de noodzaak van windenergie, wat zijn de kosten en hoe staat het met de baten ervan? Zijn er nu of straks betere alternatieven?” (<http://www.groenerekenkamer.nl/wind>)

De huidige trend in de ontwikkeling van windenergie is de aanleg van grootschalige windparken in windrijke omgevingen, bijvoorbeeld op zee of aan de kust. Een dergelijke centrale energieopwekking met grote tot zeer grote windturbines is veel duurder dan traditionele grijze stroom; het kostenverschil wordt momenteel door subsidies opgevangen.

Door de grote afstand tot de gebouwde omgeving treden transport- en omzettingsverliezen van de opgewekte energie op. Er is een toenemende maatschappelijke weerstand tegen windturbines, die zijn oorsprong vindt in het gevaar dat ze opleveren voor vogels, de geluidsoverlast en slagschaduw voor omwonenden en de ervaren “*horizonvervuiling*”.

De genoemde problemen zijn minder bij een kleinschalige opwekking van windenergie in de gebouwde omgeving. Speciaal voor dit doel ontworpen kleine turbines zoals de Turby (www.turby.nl),

een verticale as windturbine met een nominaal vermogen van 2,5 kW (TU Delft 2005) kunnen direct op het gebouwnet “*achter de meter*” worden aangesloten waardoor de opgewekte energie direct kan worden gebruikt voor eigen behoefte. De opbrengst van elke zelf benutte kWh is hierdoor gelijk aan de “*vermeden kosten van inkoop*”, die beduidend hoger is dan de huidige vergoeding voor teruglevering, althans in Nederland.

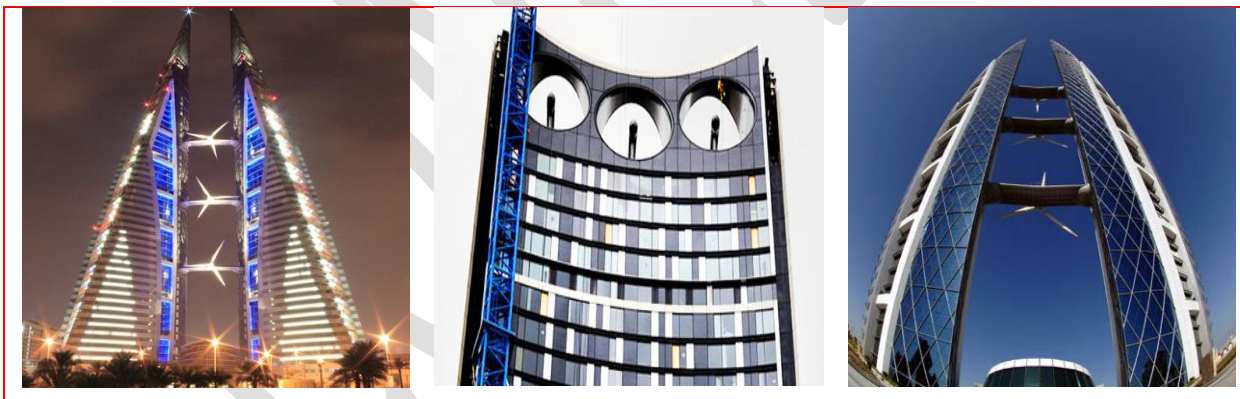
Toepassing van decentrale energieopwekking in de gebouwde omgeving wordt gestimuleerd door de ontwikkeling van “*smart grids*” oftewel “*intelligente energienetwerken*” die al over een aantal jaren werkelijkheid kunnen zijn. De energievoorziening verloopt hierbij niet meer uitsluitend centraal en eenzijdig vanaf de grote centrales naar de energieverbruikers. Het energienetwerk wordt interactief: gebruikers kunnen zelf deelnemen aan de energieproductie en overwegen per situatie van welke producent ze energie willen afnemen (Europese Commissie 2011).

Een nadeel van kleinschalige opwekking van windenergie in de gebouwde omgeving is dat de windsnelheden hier lager zijn dan in het open veld. Dit kan gecompenseerd worden door de turbine hoog te plaatsen, bijvoorbeeld op een hoog gebouw. Ook kan gebruik worden gemaakt van plaatselijk hoge winddrukken op gevels, waarbij de turbine in een kanaal door het gebouw wordt geplaatst. Een interessante mogelijkheid is de windsnelheid plaatselijk te verhogen door een architectonische en stedenbouwkundige integratie van windturbines en gebouwen - zie bijvoorbeeld figuur 5.3.1 (Mertens, S. 2006). De wind wordt hierbij door een specifieke oriëntatie en vormgeving van gebouwen geconcentreerd op de locatie van de windturbine

Geluidsproblemen en gevaar voor vogels vragen in het bijzonder bij windenergie in de gebouwde omgeving om een oplossing.

Met windenergie in het Ventecdak, dat in eerste aanleg is ontworpen voor natuurlijke ventilatie, zijn windturbines deel van de technische gebouwinstallaties. Door de situering binnen het gebouw kunnen dergelijke problemen eenvoudiger worden opgelost.

Van de combinatie windenergie en natuurlijke ventilatie is in de literatuur slechts één referentie gevonden (Toet, S. 2002).



Figuur 5.3.1 – Geïntegreerde stedelijke windenergie

5.3.2 Berekeningen windenergie

De energie in een bewegende massa kan worden uitgedrukt in de algemene formule

$$E = 0,5 \cdot m \cdot U^2 \quad (5.3.1)$$

waarin

E	energie	$[\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \equiv \text{N} \cdot \text{m}]$
m	massa	$[\text{kg}]$
U	snelheid	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$

De massastroom door het oppervlak van een turbinerotor stroomt wordt uitgedrukt in de formule

$$q_m = \rho \cdot A_r \cdot U_r \quad (5.3.2)$$

waarin

q_m	massastroom	$[\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}]$
ρ	massadichtheid	$[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$
A_r	rotoroppervlak	$[\text{m}^2]$
U_r	snelheid door de rotor	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$

Het maximum vermogen P_m van deze massastroom, zonder rekening te houden met omzettingsverliezen in de rotor, bedraagt theoretisch

$$P_m = \alpha \cdot 0,5 \cdot \rho \cdot A_r \cdot U_r^3 \quad (5.3.3)$$

waarin

P_m	vermogen	$[\text{W}]$
α	aerodynamisch rendement	$[-]$

Bij vrijstaande windturbines kiest de wind de weg van de minste weerstand en stroomt gedeeltelijk niet meer door de rotor, maar er omheen. Dit zgn. wind blokkeereffect kwam eerder aan de orde bij de analyse van het venturi-effect in het Ventecdak (Blocken, B. et al. 2011).

Bij een constante windsnelheid wordt de snelheid door de turbine kleiner als de drukval over de turbine groter wordt. In het extreme geval van maximale drukval over de rotor is de snelheid nul; in het extreme geval van maximale snelheid is het drukverschil nul. In beide gevallen wordt er geen vermogen opgewekt.

Er kan worden aangetoond dat er een optimum in het vermogen is als de snelheid door de turbine de helft is van de ongestoorde windsnelheid. Dit theoretisch maximaal opgewekt vermogen wordt de Lancaster-Betz- limiet genoemd en bepaalt de maximale waarde van het aerodynamisch rendement, dat dan gelijk is aan 0,59 (Plomp, H. en Aanen, L. 2007)

De verhouding tussen het onttrokken vermogen P_t en het totale vermogen P_m van de massastroom volgens (5.3.3) is het rendement uitgedrukt in de vermogenscoëfficiënt C_{pow} ⁶².

$$C_{pow} = \frac{P_t}{\alpha \cdot 0,5 \cdot \rho \cdot A_r \cdot U_r^3} \quad (5.3.4)$$

met

C_{pow}	vermogenscoëfficiënt	$[-]$
P_t	turbinevermogen	$[\text{W}]$

Voor conventionele windturbines, werkend volgens het liftprincipe, komt de theoretische maximum vermogenscoëfficiënt overeen met de Lancaster-Betz limiet van $C_{pow,max} \approx 0,59$.

Omzettingsverliezen in de rotor kunnen, naar analogie van de bij ventilatoren gebruikte terminologie, worden uitgedrukt in het hydraulisch rendement η_{hyd} . De vermogenscoëfficiënt is dan

$$C_{pow} = C_{pow,max} \cdot \eta_{hyd} \quad (5.3.5)$$

Voor moderne windturbines worden in de praktijk waarden gerealiseerd van $C_{pow} \approx 40 \dots 45\%$, hetgeen inhoudt dat $\eta_{hyd} \approx 0,7 \dots 0,75$.

5.3.3 Windturbines in het Ventecdak

Er zijn drie essentiële verschillen tussen windturbines in het Ventecdak en conventionele vrijstaande windturbines.

- Een vrijstaande windturbine maakt gebruik van de dynamische winddruk, terwijl de turbine in het Ventecdak wordt aangedreven door statische drukverschillen. De omzetting van dynamische in statische druk in het Ventecdak gaat gepaard met drukverliezen.
- Bij een vrijstaande windturbine stroomt de lucht gedeeltelijk om de rotor heen, hetgeen bij de turbine in het Ventecdak niet mogelijk is. Dit houdt in dat de in paragraaf 5.3.2 genoemde Lancaster-Betz limiet hier niet van toepassing is.

⁶² Omdat C_p al is gebruikt voor de winddrukcoëfficiënt wordt hier C_{pow} gebruikt.

- De in het Ventecdak opgewekte drukverschillen zijn veel groter zijn dan drukverschillen in de open lucht. Met turbines in het Ventecdak kunnen daarom hogere vermogenscoëfficiënten worden gerealiseerd dan met vrijstaande windturbines.

Naast de hogere vermogenscoëfficiënt hebben windturbines in het Ventecdak ten opzichte van conventionele windturbines nog de verdere voordelen:

- Eventuele geluidsproblemen zijn door de inpandige opstelling gemakkelijker op te lossen.
- Er is geen omgevingsvergunning (Wabo) nodig.
- De windturbines worden deel van de technische gebouwinstallaties, waardoor de afstemming van energieproductie en energiegebruik eenvoudiger wordt.
- Onderhoud kan plaatsvinden vanuit de turbinekamer⁶³ in de dakopbouw, een gemakkelijk toegankelijke en beschermde techniekruimte.

De drukval over, en de snelheid in de rotor kan bij de turbine in het Ventecdak worden uitgedrukt in de volgende formule

$$\Delta p = 0,5 \cdot \rho \cdot (\zeta_{in} + \zeta_{rot} + \zeta_{uit}) U_{rot}^2 \quad (5.3.6)$$

waarin

$$\begin{aligned} \Delta p &= \text{drukval over de rotor} & [\text{Pa} \equiv \text{N} \cdot \text{m}^{-2} \equiv \text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{m}^{-2}] \\ \rho &= \text{massadichtheid} & [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}] \\ \zeta_{in} &= \text{weerstandscoefficient intrede} & [-] \\ \zeta_{rot} &= \text{weerstandscoefficient rotor} & [-] \\ \zeta_{uit} &= \text{weerstandscoefficient uittrede} & [-] \\ U_{rot} &= \text{luchtsnelheid in de rotor} & [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \end{aligned}$$

Opgelost voor U_{rot} kan vergelijking (5.3.6) worden geschreven

$$U_{rot}^2 = \frac{\Delta p}{0,5 \cdot \rho \cdot (\zeta_{in} + \zeta_{rot} + \zeta_{uit})} \quad (5.3.7)$$

Het vermogen dat de turbine theoretisch kan leveren is

$$P_{th} = \Delta p_{rot} \cdot A_{rot} \cdot U_{rot} \quad (5.3.8)$$

waarin $P_{th} = \text{theor. turbinevermogen} \quad [\text{W}]$
 $A = \text{rotoroppervlak} \quad [\text{m}^2]$

met

$$\Delta p_{rot} = 0,5 \cdot \zeta_{rot} \cdot \rho \cdot U_{rot}^2$$

gaat (5.3.8) over in

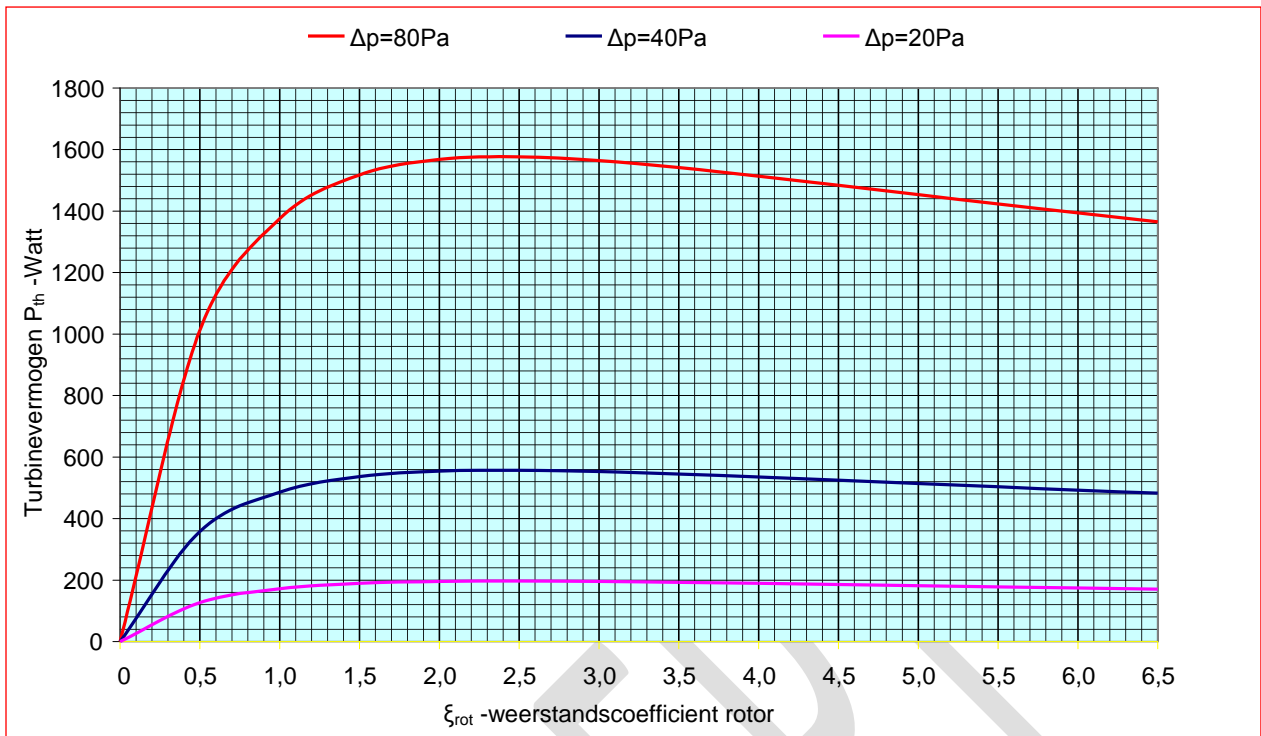
$$P_{th} = 0,5 \cdot \zeta_{rot} \cdot \rho \cdot A_{rot} \cdot U_{rot}^3 \quad (5.3.9)$$

Substitutie van (5.3.7) in (5.3.9) levert voor een bepaalde Δp de volgende relatie tussen de weerstandscoefficiënt ζ_{rot} van de turbine en het vermogen P

$$P_{th} = 0,5 \cdot \zeta_{rot} \cdot \rho \cdot A_{rot} \cdot \left(\frac{\Delta p}{0,5 \cdot \rho \cdot (\zeta_{in} + \zeta_{rot} + \zeta_{uit})} \right)^{1,5} \quad (5.3.10)$$

Formule (5.3.10) is voor een rotordiameter van 2,5 m, $\zeta_{in} = 0,2$ en $\zeta_{uit} = 1,0$ en drukverschillen van 80, 40 en 20Pa in figuur 5.3.3 grafisch uitgewerkt.

⁶³ Als in de overdrukruimte windturbines worden geïnstalleerd wordt deze ruimte turbinekamer genoemd.



Figuur 5.3.3 – Turbinevermogen P_{th} als functie van de weerstandscoefficiënt ξ_{rot} van de rotor

Het turbinevermogen P_{th} loopt aanvankelijk bij toenemende weerstandscoefficiënt van de rotor snel op om bij $\xi_{rot} \approx 2,5$ een optimum te bereiken. Bij $\xi_{rot} > 2,5$ neemt het vermogen geleidelijk af. Het ontwerp van de windturbines en de rotorbladen voor toepassing in het Ventecdak moet dus worden gericht op een weerstandscoefficiënt $\xi_{rot} \approx 2,5$.

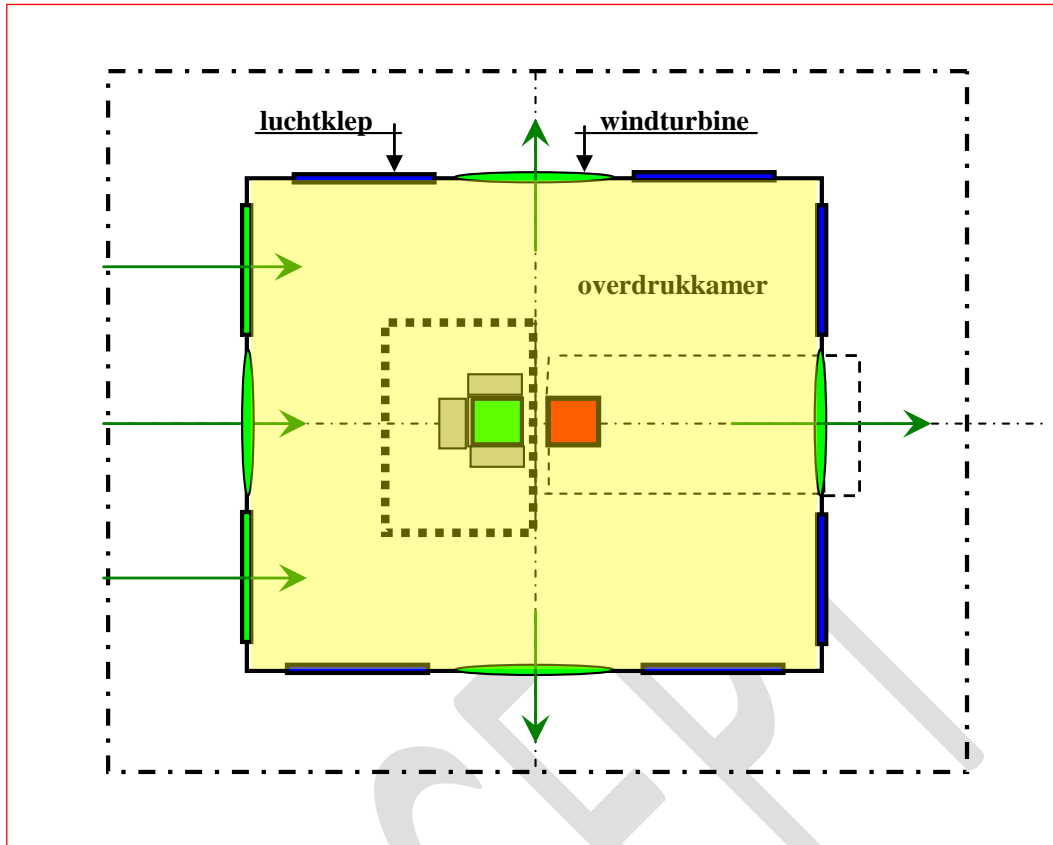
5.3.4 Terreincondities

Drukverschillen over de overdrukkamer zijn afhankelijk van de plaatselijke windsnelheid en de winddrukcoëfficiënten aan wind- en lijzijde. Voor de prestatieberekeningen van windturbines in het Ventecdak is uitgegaan van het windprofiel in een zeer ruw terrein volgens de Davenport classificatie 6 met een ruwheidslengte $z_0 = 0,5$ m –zie paragraaf 2.1.2. De referentiewindsnelheden U_z voor gebouwhoogten van 15 tot 65 m zijn berekend met de formule (2.5.3)

$$U_z = 0,273 \cdot U_{10} \cdot \ln\left(\frac{z-10}{0,5}\right) \quad (5.3.11)$$

5.3.5 Windturbines in de overdrukruimte

Windturbines kunnen worden aangebracht in de overdrukruimte, die dan turbinekamer wordt genoemd – zie figuur 5.3.5/1. Deze oplossing is windrichtingafhankelijk en daarom zijn tenminste vier turbines nodig. Om bij een beperkte hoogte van de turbinekamer de energieproductie op te voeren is het wenselijk meerdere turbines per wand aan te brengen. Opties zijn onderzocht met respectievelijk 4, 8 en 12 turbines $\varnothing 2,5$ m. De afmetingen van de turbinekamer zijn hieraan gerelateerd; in de eerste plaats om voldoende wandoppervlak voor de turbines te realiseren en in de tweede plaats om de luchtsnelheid en het inherente drukverlies van de suppletie lucht voor de turbines te beperken.



Figuur 5.3.5/1 – Windturbines in overdrukkamer – meerdere turbines per wand mogelijk

De luchtkleppen zijn aan de windzijde geopend en op de overige oriëntaties gesloten, waardoor in de turbinekamer druk wordt opgebouwd. De turbine die in de windrichting staat doet mede dienst voor luchttoevoer naar de turbinekamer. De lucht stroomt via de actieve lijzijdige en de parallelle turbines naar buiten, waarbij de snelheid door de rotor afhankelijk is van de drukverschillen op elke oriëntatie.

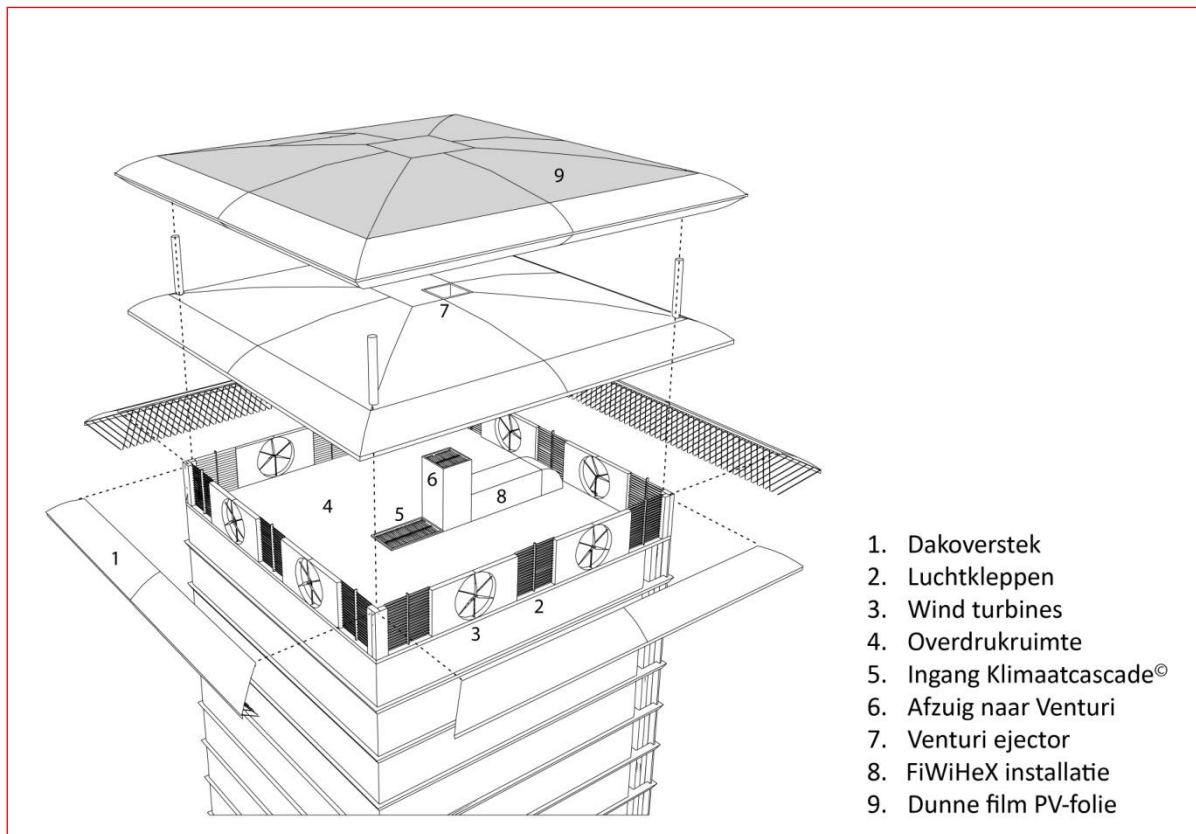
De turbinekamer doet tevens dienst als techniekruimte en de hoogte is in verband hiermee gesteld op $\approx 2,75$ m. De hieraan gerelateerde diameter van de aan te brengen turbines is daarom voorlopig bepaald op 2,5 m.

De door de actieve turbines stromende lucht moet via de gevel aan de windzijde worden toegevoerd. Om de luchtsnelheid in de toevoeropeningen, bestaande uit luchtkleppen en inactieve turbine(s), te beperken is een bepaald geveleppervlak nodig. Bij de aangenomen hoogte van 2,75 m hoort dus een bepaalde gevallengte, die overigens ook nodig is voor het onderbrengen van meerdere turbines per oriëntatie indien gewenst. Berekeningen zijn gemaakt voor de volgende gevallen:

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

Bij de meest voorkomende potentiële windsnelheden is de luchtsnelheid in de toevoeropeningen dan $< 2,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ bij een drukverlies $< 5\%$ van het beschikbare drukverschil.

Figuur 5.3.5/2 toont een *exploded view* van het Ventecdak met 8 turbines in de overdrukkamer.



Figuur 5.3.5/2 - Ventecdak - Exploded view

5.3.6 Energieproductie

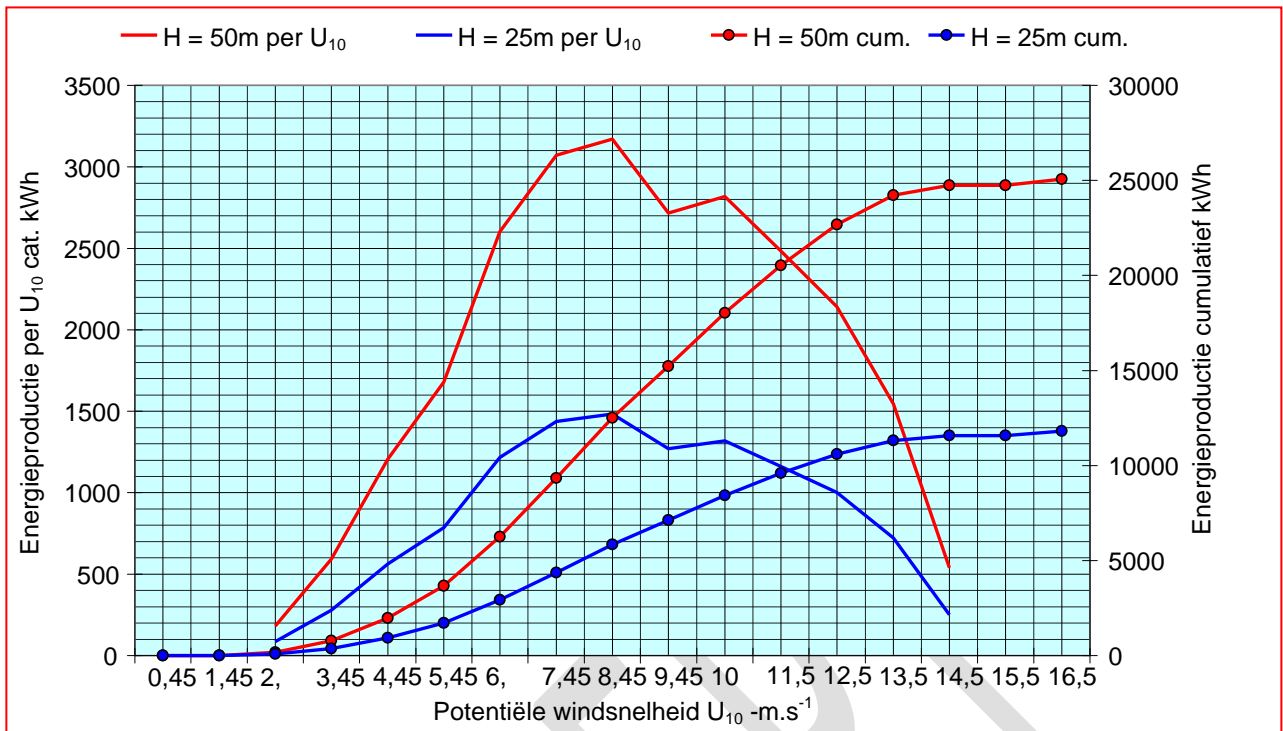
Het drukverschil over de turbines kan worden gebaseerd op de bij de fysieke modelmetingen in de windtunnel gemeten waarden. Voor de overdruk ter plaatse van de luchtinlaat is uitgegaan van een winddrukcoëfficiënt $C_p = 0,8$. Voor de lijzijde zijn C_p -waarden gemeten van $-0,4$, hetgeen het totale drukverschil ($C_{p_w} - C_{p_l}$) op $1,2$ brengt - zie figuur 2.4.6

Het drukverschil aan de zijkanten van de overdrukkamer, evenwijdig aan de windrichting, is niet bekend. Op basis van metingen in de windtunnel kan hier een C_p -waarde van $-0,4$ worden verondersteld met een totaal drukverschil ($C_{p_w} - C_{p_l}$) = $1,2$. De invloed van de door de turbines stromende lucht op de totale C_p -waarde is niet bekend.

Voor de navolgende berekeningen is uitgegaan van een conservatieve schatting van de gemiddelde waarde voor alle turbines van $(C_{p_w} - C_{p_l}) \approx 1,2$. Deze waarde moet in een vervolgstudie met behulp van CFD en fysieke metingen nauwkeuriger worden bepaald – zie paragraaf 5.3.9.

Met behulp van de hiervoor afgeleide formules is de distributieve en cumulatieve energieproductie berekend voor een gebouw met een turbinekamer van 20×20 m met 8 turbines $\varnothing 2,5$ m, waarvan 6 actief, voor een gebouwhoogte van 25 en 50 m en potentiële windsnelheden $U_{10} = 2,5$ tot $16,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, ontleend aan de frequentietabel windsnelheid Schiphol.

De resultaten zijn weergegeven in figuur 5.3.6.



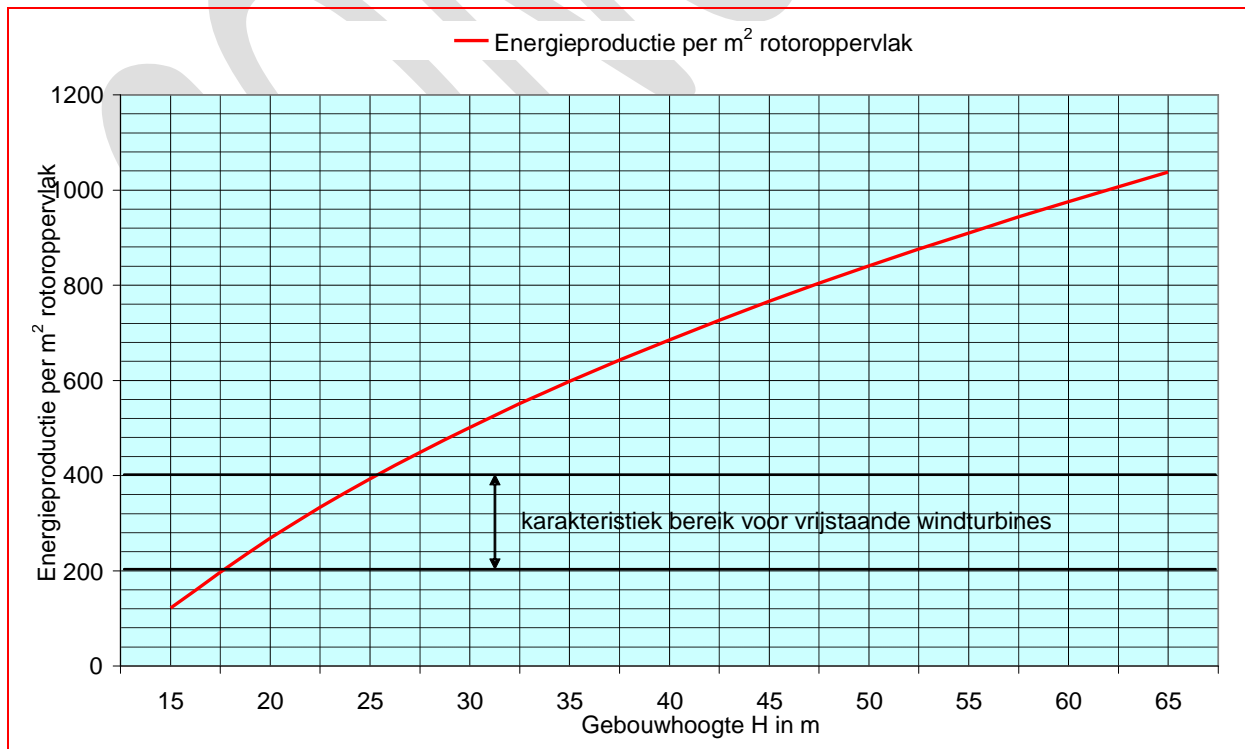
Figuur 5.3.6 - Jaarlijkse energieproductie Ventedak 20 x 20 m met 8 windturbines \varnothing 2,5m

5.3.7 Productiefactor (Specifieke energieproductie)

De jaarlijkse energieproductie van windturbines kan worden uitgedrukt in een specifieke productie per m^2 rotoroppervlak, de zgn. productiefactor – zie figuur 5.3.7. Voor conventionele windturbines geldt een normale productiefactor van 200 tot 400 $kWh \cdot m^{-2}$.

Voorbeeld:

- $H = 35$ m – 8 rotoren \varnothing 2,5 m, waarvan 6 actief – productiefactor ≈ 600 $kWh \cdot m^{-2}$
- Jaarlijkse energieproductie = $6 * 600 * (\pi/4) * 2,5^2 \approx 17.670$ kWh



Figuur 5.3.7 – Specifieke energieproductie per m^2 rotoroppervlak als functie van de gebouwhoogte

5.3.8 Windturbine in de Venturi-ejector

Om de energieproductie te maximaliseren kan additioneel in de venturi-ejector een windturbine worden aangebracht. Deze moet tijdens bedrijfsuren worden vastgezet, omdat de venturi-ejector dan nodig is voor de afzuigventilatie. Buiten de bedrijfsuren kan deze additionele turbine een bijdrage leveren aan de energieproductie. Bij 2.500 bedrijfsuren per jaar omvat deze periode ruim 70% van het totaal aantal uren. $[(8.760-2.500)/8.760]$

De werking van de venturi-ejector wordt door de secundaire luchtstroom verstoord –zie paragraaf 2.3.4 en figuur 2.3.9. De waarde van de factor U_{ej}/U_{ref} is maatgevend voor de mate van deze verstoring.

Uit de berekeningen blijkt dat deze factor voor de turbines in het Ventecdak een waarde heeft van 0,51. Figuur 2.3.9 laat zien dat bij een hoogte van het bovenkanaal $c = 1$ m de winddrukcoëfficiënt C_p een positieve waarde heeft, hetgeen betekent dat de druk in het bovenkanaal positief is. Bij een hoogte $c = 2$ m is in het bovenkanaal een lichte onderdruk aanwezig. Gezien de verhoudingsgewijs hoge drukken in de overdrukkamer zal een windturbine in de venturi-ejector desondanks buiten bedrijfsuren een bijdrage kunnen leveren aan de energieproductie van het Ventecdak. De additionele energieopbrengst van een eventuele turbine in de venturi-ejector is in de berekeningen van paragraaf 5.3.6 niet meegeteld.

5.3.9 Vervolgonderzoek

De voorgaande analyses en berekeningen zijn voor een deel gebaseerd op de CFD stromingssimulaties – paragraaf 2.3.3 - en de metingen in de windtunnel –paragraaf 2.4 -van het Ventecdak. Daarnaast zijn enkele aannames gedaan, die in een vervolgonderzoek nader moeten worden gevalideerd. Dit onderzoek uit te voeren in samenhang met het aanvullend onderzoek naar het optimaliseren van de prestaties van het Ventecdak - zie paragraaf 2.3.8. Het onderzoek omvat in hoofdlijnen:

- Het maken van een schaalmodel van het geoptimaliseerde Ventecdak, de schaal nader vast te stellen. Het schaalmodel uit te voeren met meerdere openingen in de overdrukkamer, voorzien van gazen, voor het simuleren van de turbines.
- Het meten van luchtsnelheden en drukverschillen over de openingen bij verschillende windsnelheden en gaasdichtheden, en het bepalen van de winddrukcoëfficiënten C_p in de overdrukkamer en aan lijzijde.
- Het bepalen van maximale aerodynamische rendementen α , theoretische turbinevermogens P_{th} en vermogenscoëfficiënten C_{pow} bij verschillende configuraties;

Voor de metingen is een groter schaalmodel vereist dan het model 1:100 dat is gebruikt voor de CFD simulaties en de metingen in de windtunnel. Bij de gesloten grenslaagtunnel van Peutz blokkeert een meetobject tot op zekere hoogte de luchtstroom, en daarom zijn de afmetingen van het model beperkt.

Het onderzoek zal daarom in principe worden uitgevoerd in de Open Straal windtunnel (*Open Jet Facility -OJF*) van de faculteit Lucht- en Ruimtevaart van de TU Delft. Deze heeft een uitstroomopening met een oppervlak van 2,85 x 2,85 meter, genereert windsnelheden tot 35 m.s⁻¹ en heeft een ‘open’ lay-out. Dit betekent dat er een vrije luchtstroom in de testsectie is.. Bij een open straal tunnel staat het meetobject in een grote, open ruimte zodat de luchtstroom vrij om het object kan bewegen. Dat is ideaal voor onderzoek aan windturbines.

5.4 Fotovoltaïsche energie

5.4.1 Inleiding

Het multi-functionele Venteddak, dat in eerste instantie is ontworpen voor natuurlijk ventilatie, biedt naast de conversie van windenergie ad paragraaf 5.3 ook goede mogelijkheden voor fotovoltaïsche energie met behulp van dunne PV-folie op het bovendak. In de voorliggende paragraaf worden de potentiële prestaties hiervan onderzocht.

5.4.2 Dunne film PV-folie

Dunne film PV-systemen bestaan uit een dunne laag fotovoltaïsch materiaal aangebracht op een flexibele onderlaag. Folie als drager biedt grote voordelen ten opzichte van PV panelen.

- Het systeem is flexibel, schokbestendig, beloopbaar, lichter en biedt grote vrijheid qua vorm van de modules zie figuur 5.4.2.
- De hellingshoek is minder belangrijk omdat de folie een hogere opbrengst heeft met diffuus licht.
- PV-folie is daarom geschikt om als dakbedekking van gebouwen te worden gebruikt.
- Dunne film is minder gevoelig voor opwarming, hetgeen een positief effect heeft op het rendement.
- Dankzij het verminderde gebruik van silicium en de snellere productie t.o.v. PV panelen zijn de productiekosten lager.
- Dunne filmsilicium kan bij een lage temperatuur van ca 200⁰C worden aangebracht waardoor goedkope buigbare dragers kunnen worden gebruikt en het productieproces duurzamer is.

In het Helianthos project werken TU Delft, TU Eindhoven en de Universiteit van Utrecht samen met TNO, Akzo-Nobel en Nuon aan de ontwikkeling van deze technologie⁶⁴. Het aanvankelijke lage rendement van ca 6% is inmiddels verbeterd naar ca 10% en verwacht wordt dat een rendement van 15% haalbaar is (Zeman, Miro 2010). De onderzoeksgroep Photovoltaic Materials and Devices Laboratory van TU Delft richt zich in het bijzonder op de verhoging van het rendement. Hierbij wordt onder meer gewerkt aan verstrooiing van het licht in de zonnecel door het oppervlak onregelmatig te maken. Daardoor leggen de lichtstralen een langere weg af in de dunne siliciumfilm wat tot gevolg heeft dat de zonnecel meer elektriciteit levert.

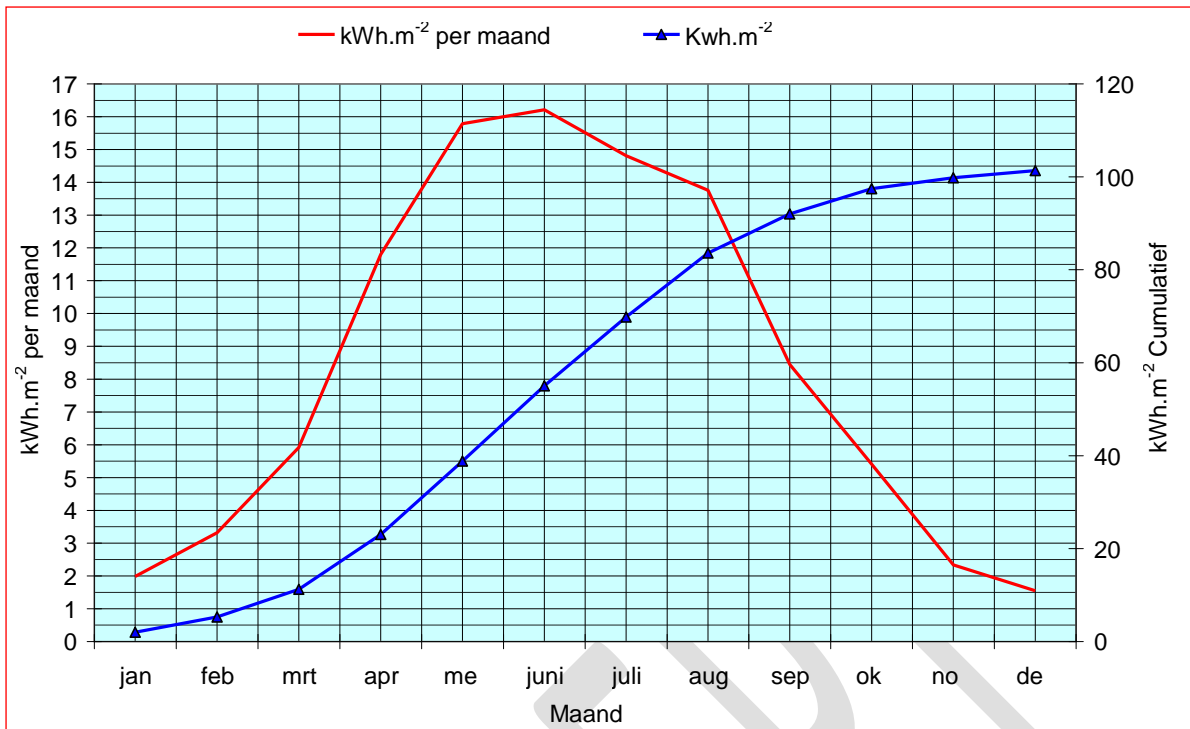


Figuur 5.4/1 – Dunne film silicium zonnecel

5.4.3 Energieopbrengst

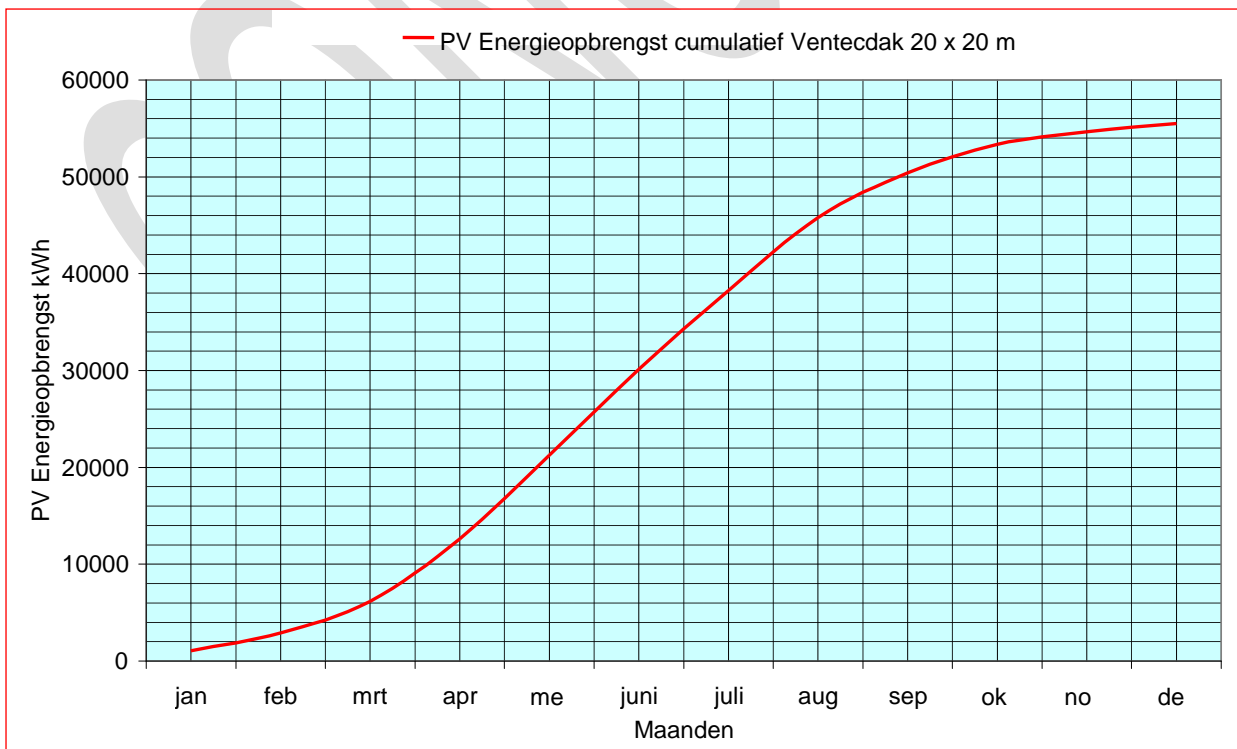
In paragraaf 4.5.9 is een overzicht opgenomen van de door VABI berekende maandsommen van de totale straling op horizontale en verticale vlakken in het referentiejaar NEN 5060:2008 – zie tabel 4.5.9/2. De energieopbrengst van de PV-folie op het Venteddak kan worden berekend als product van de straling op een horizontaal vlak en het in paragraaf 5.4.2 vermelde rendement van 10%. Figuur 5.4.3/1 geeft een beeld van de energieopbrengsten, zowel maandelijks als cumulatief over een jaar. De berekende jaaropbrengst van ca 100 kWh.m⁻² komt overeen met de verwachtingen van de onderzoeksgroep Photovoltaic Materials and Devices Laboratory van TU Delft (Zeman, Miro 2011).

⁶⁴ De proeffabriek is september 2011 door NUON gesloten maar het project heeft in mei 2012 een doorstart gemaakt



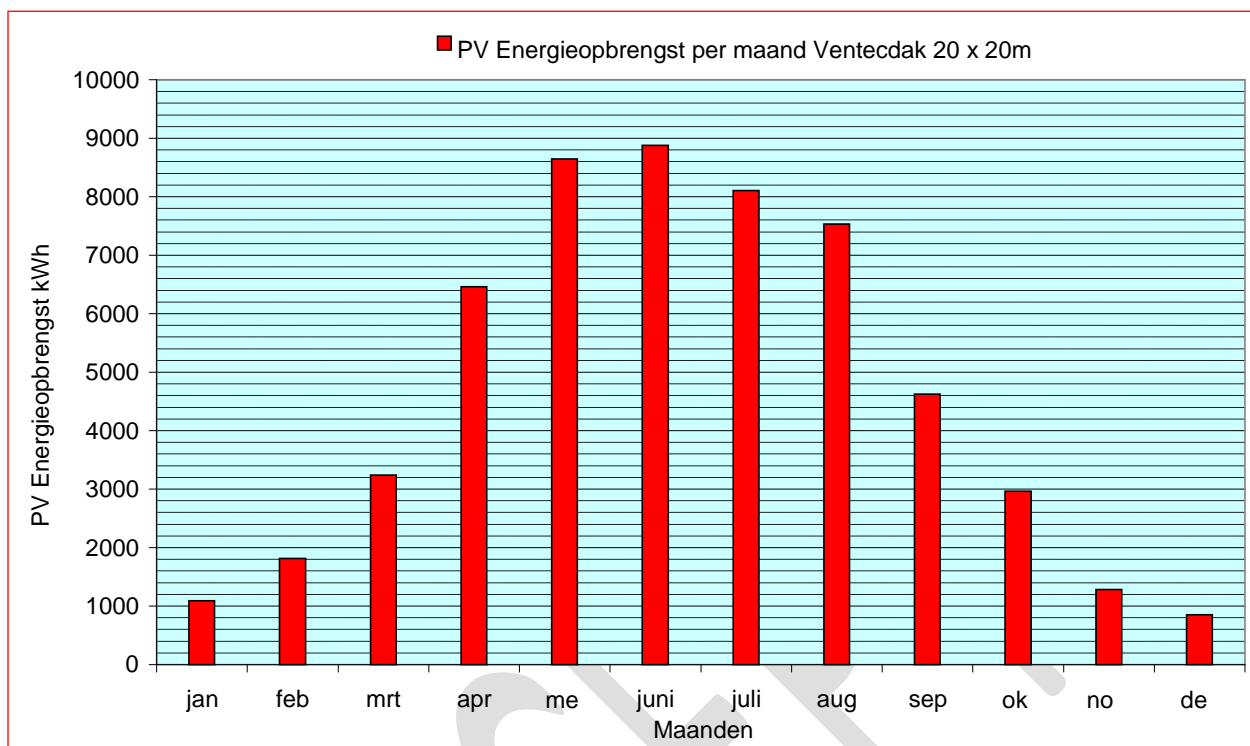
Figuur 5.4.3/1 – Fotovoltaïsche energieopbrengst in referentiejaar NEN 5060:2008 op een horizontaal dak bij een rendement van 10%

Het Ventecdak dat model heeft gestaan voor de CFD simulaties en de fysieke modelmetingen heeft afmetingen van 20 x 20 m exclusief de dakoverstekken van 1,7m rondom. Het oppervlak van het bovendak is $(20+2*1,7)^2 \approx 550 \text{ m}^2$ waarmee een jaarlijkse energieopbrengst van ca. 55.000 kWh kan worden gegenereerd – zie figuur 5.4.3/2. De dakoverstekken dienen niet alleen voor het “invangen” van wind maar leveren tevens een dakvergroting ten opzichte van de voetafdruk op van ca. 37% met een even grote meeropbrengst van fotovoltaïsche energie



Figuur 5.4.3/2 – Fotovoltaïsche energieopbrengst Ventecdak 20 x 20 m in referentiejaar NEN 5060:2008

Figuur 5.4.3/3 geeft een beeld van het jaarlijks verloop van de energieproductie in het referentiejaar voor het Ventedak 20 x 20 m.



Figuur 5.4.3/3 – Fotovoltaïsche Energieopbrengst Ventedak 20 x 20 m per maand in referentiejaar NEN 5060:2008

5.5 Totale energieprestatie Zon + Wind

5.5.1 Rekenvoorbeeld

Het volgende rekenvoorbeeld brengt de potentiële totale energieprestatie in beeld van een gebouw met Zonnefaçade en Ventedak als functie van de gebouwhoogte. Het gebouw is conform het simulatiemodel van paragraaf 2.3.2 en uitgevoerd met windturbines en PV-folie op het bovendak:

- Oriëntatie Noord / Zuid
- Zonnefaçade op Zuidgevel
- Voetafdruk 20 x 20 [m]
- Hoogte 15 – 65 [m]
- Verdiepinghoogte 3,5 [m]
- Raamoppervlak 15 [%] – zie figuur 4.1.10
- Aantal windturbines 8 [-] - zie figuur 5.3.5/1 en 5.3.5/2
- Turbinediameter Ø 2,5 [m]

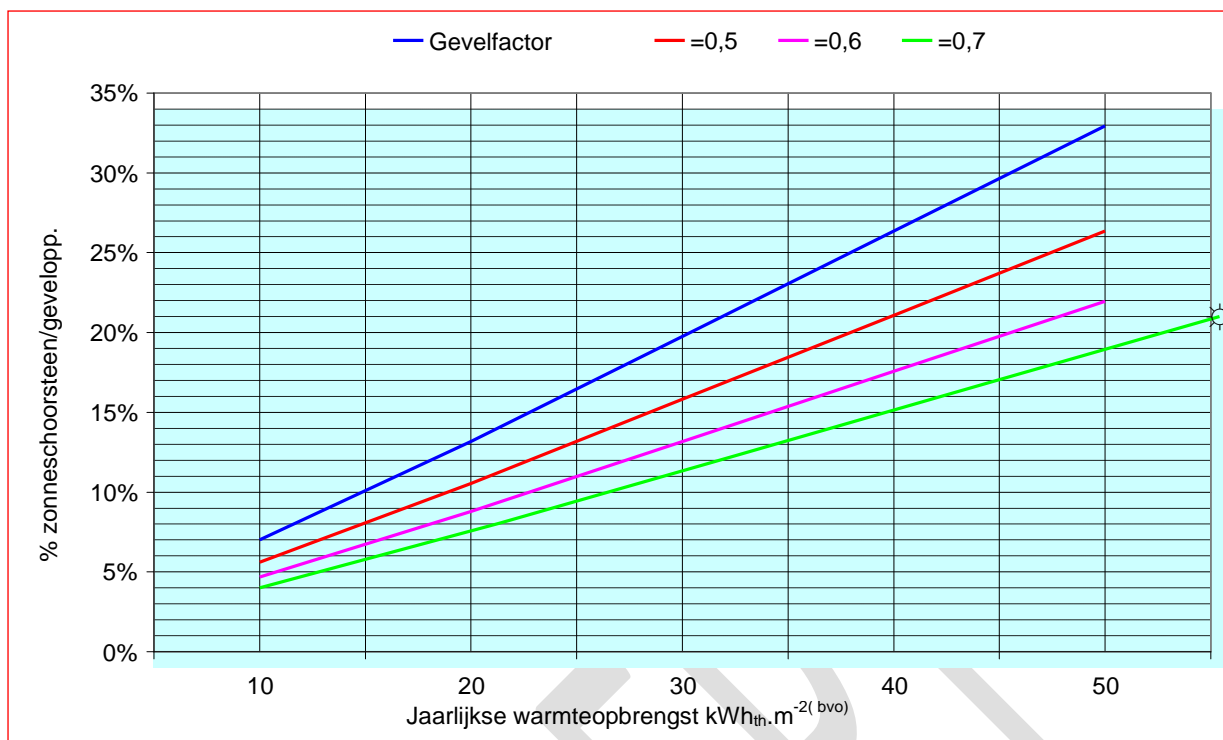
5.5.2 Zonnefaçade

Het oppervlak van de zonnefaçade is $(n \cdot 3,5 \cdot 20 \cdot 0,85) = 59,5n \text{ m}^2$. De netto jaarlijkse warmteopbrengst volgens tabel 4.5.9/4 bij een totaal rendement van 44% is $379 \text{ kWh}_{\text{th}} \cdot \text{m}^{-2}$ overeenkomend met $(379 \cdot 59,5n) / (n \cdot 20 \cdot 20) = 56,4 \text{ kWh}_{\text{th}} \cdot \text{m}^{-2}$, betrokken op het bruto vloeroppervlak⁶⁵.

Dit resultaat kan ook worden ontleend aan figuur 5.5.2 die overeenkomt met figuur 4.5.9/3.

De gevelfactor van het gebouw, gedefinieerd als de verhouding tussen het geveloppervlak en het bruto vloeroppervlak, bedraagt $(n \cdot 4 \cdot 20 \cdot 3,5) / (n \cdot 20 \cdot 20) = 0,7$, waarin n staat voor het aantal verdiepingen. Het aandeel zonnefaçade / geveloppervlak bedraagt $(n \cdot 3,5 \cdot 20 \cdot 0,85) / (n \cdot 4 \cdot 20 \cdot 3,5) = 0,2125$ oftewel 21,25%. Extrapolatie laat zien dat bij dit percentage de jaarlijkse warmteopbrengst ca. $56 \text{ kWh}_{\text{th}} \cdot \text{m}^{-2}$ bedraagt.

⁶⁵ Ter onderscheiding met wind- en fotovoltaïsche energie wordt de opbrengst van de zonnefaçade uitgedrukt in kWh_{th}



Figuur 5.5.2 – Oppervlak zonneshoorsteen in % geveloppervlak als functie van de warmteopbrengst

Zoals in paragraaf 5.2 vermeld is het mogelijk voor energiezuinige kantoorgebouwen met een EPC < 1,5 een jaarlijks warmteverbruik te realiseren van 50 à 60 $\text{kWh}_{\text{th}} \cdot \text{m}^{-2}$. Dit houdt in dat met de Zonnefaçade geheel in de eigen warmtebehoefte van het voorbeeldgebouw kan voorzien, mits dit energiezuinig is uitgevoerd. De geringe rendementsdaling bij toenemende gebouwhoogte –zie paragraaf 4.5.6- is hierbij niet in rekening gebracht.

Figuur 5.5.5 laat zien dat de warmteopbrengst evenredig is met de gebouwhoogte en oploopt van ca. 100.000 naar ca. 420.000 kWh_{th} per jaar bij een gebouwhoogte oplopend van 15 tot 65 m.

5.5.3 Windenergie

Het voorbeeldgebouw is uitgevoerd met een Ventecdak van 20 x 20 m. In de turbineruimte zijn per oriëntatie 2 windturbines \varnothing 2,5m geïnstalleerd conform figuur 5.3/3 en 5.3/4. De productiefactor hiervan is afhankelijk van de windsnelheid en stijgt dus met de gebouwhoogte –zie paragraaf 5.3.6. Voor de berekende energieopbrengst als functie van de gebouwhoogte zie figuur 5.5.5. De energieopbrengst loopt op van ca. 4.000 kWh_e naar ca. 30.000 per jaar bij een gebouwhoogte oplopend van 15 tot 65 m⁶⁶.

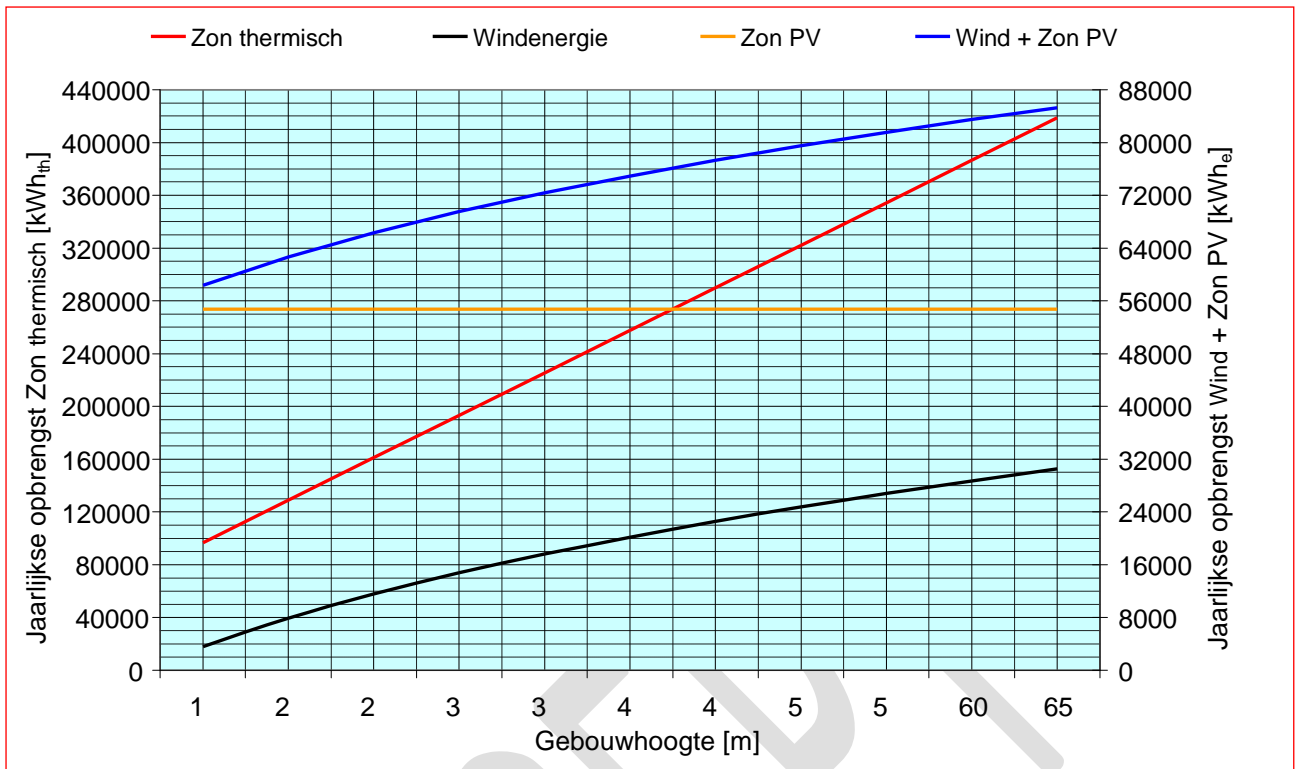
5.5.4 Fotovoltaïsche energie

Het Ventecdak is uitgevoerd met dunne PV-folie volgens paragraaf 5.4.2. De energieopbrengst, uiteraard onafhankelijk van de gebouwhoogte, bedraagt ca. 55.000 kWh per jaar. Zie figuur 5.5.5.

5.5.5 Totale energieprestatie van zon en wind

De totale energieprestatie van het voorbeeldgebouw is aangegeven in figuur 5.5.5. Opvallend is de relatief bescheiden bijdrage van windenergie in vergelijking met de fotovoltaïsche energie.

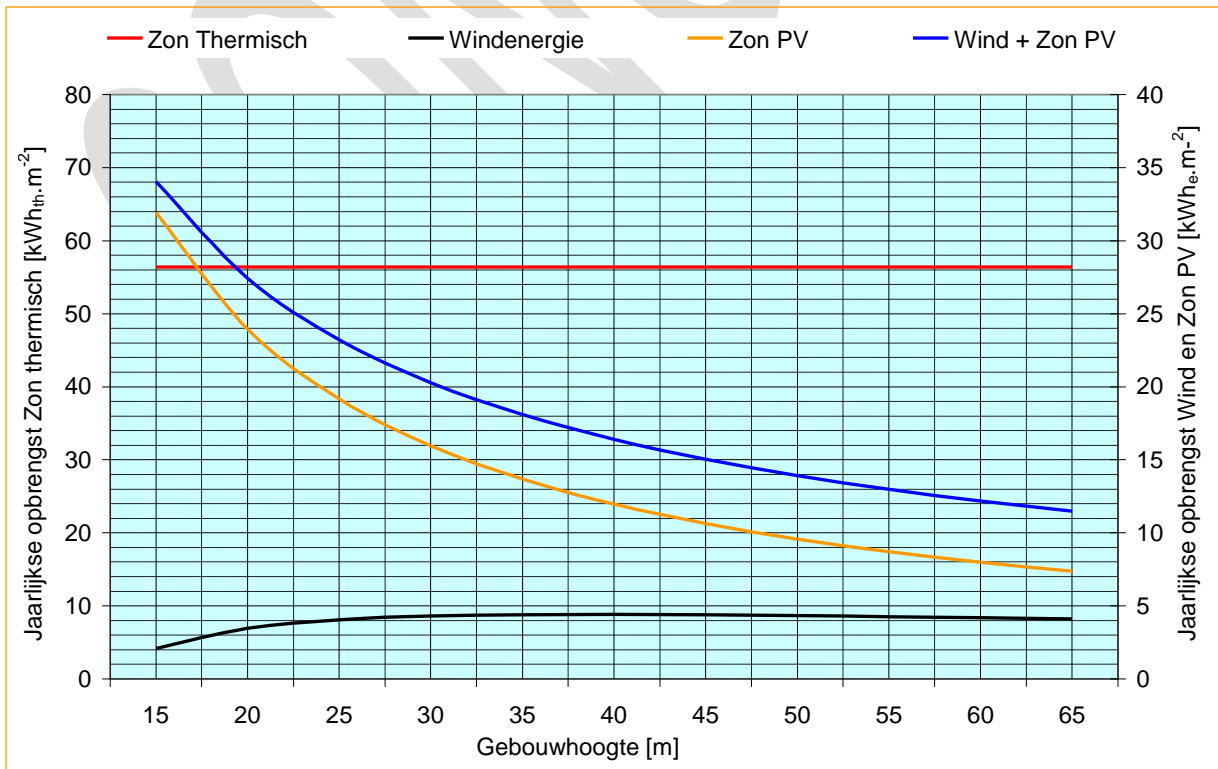
⁶⁶ Ter onderscheiding met de warmteopbrengst van de zonnefaçade wordt de opbrengst van wind- en fotovoltaïsche energie uitgedrukt in kWh_e



Figuur 5.5.5– Totale energieprestatie zon en wind als functie van de gebouwhoogte

5.5.6 Specifieke energieprestatie per m² bruto vloeroppervlak

In figuur 5.5.6 zijn de gegevens van figuur 5.5.5 uitgedrukt in specifieke energieprestaties per m² bruto vloeroppervlak (bvo). Opvallend is de opbrengst van de windenergie die een lichte stijging van ca. 2 naar 4 kWh_e.m⁻² laat zien bij een gebouwhoogte oplopend van 15 tot 30 m en daarna vrijwel constant blijft. Dit compenseert de opbrengst van de fotonvoltaische energie die daalt van ca. 32 naar 7,5 kWh_e.m⁻² bij een gebouwhoogte oplopend van 15 tot 65 m.



Figuur 5.5.6 – Specifieke energieprestatie Zon en Wind als functie van de gebouwhoogte

In een recente publicatie over een nZEB⁶⁷ gebouw in Helsinki wordt voor verlichting een geïnstalleerd vermogen vermeld van 7 W.m^{-2} bij een jaarlijks verbruik van $12,5 \text{ kWh.m}^{-2}$ op basis van nuttig vloeroppervlak (Kurnitski, Jarek 2012). Cellenkantoren in dit gebouw zijn uitgevoerd met bewegingsmelders en tijdafhankelijke regeling en in grotere ruimten is tevens een daglicht/kunstlichtregeling aangebracht.

Als wordt uitgegaan van 3000 branduren per jaar kan de belastingsfactor van deze lichtinstallatie worden berekend op $(12,5/(7*3000*10^{-3})) \approx 0,6$.

Een publicatie over een nZEB gebouw in Dijon vermeld een geïnstalleerd vermogen van 2 W.m^{-2} bij een jaarlijks verbruik van $4,1 \text{ kWh.m}^{-2}$ (Hernandez Oscar 2011). Hier wordt echter een aanvullende werkplekverlichting toegepast, waardoor een vergelijking wordt bemoeilijkt.

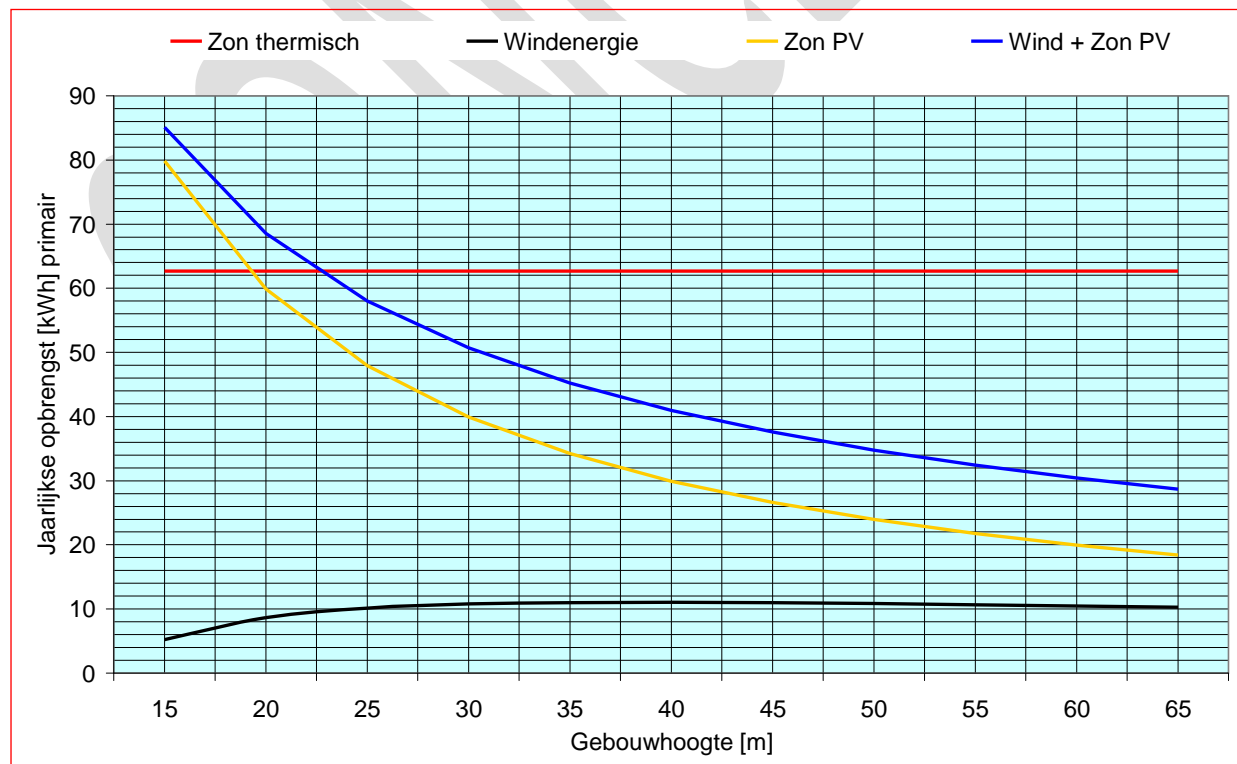
Als voor verlichting een jaarlijks verbruik van $12,5 \text{ kWh.m}^{-2}$ als uitgangspunt wordt genomen en voor pompen e.d. $2,5 \text{ kWh.m}^{-2}$ in rekening wordt gebracht bedraagt het totaal jaarlijkse verbruik voor de gebouwgebonden installaties 15 kWh.m^{-2} . Uitgaande van een afdelingsvloeroppervlak dat 65% van het bruto vloeroppervlak (bvo) omvat –zie paragraaf 4.5.2 - komt dit overeen met $\approx 10 \text{ kWh.m}^{-2}$ op bvo basis.

Figuur 5.5.6 laat zien dat met Zon PV dit verbruik kan worden gedekt tot een gebouwhoogte van 47,5 m overeenkomend met 13 à 14 verdiepingen. Wind + Zon PV zijn samen in staat het verbruik te dekken tot een gebouwhoogte van 65 m, waarbij zelfs teruglevering aan het stroomnet plaats kan vinden.

5.5.7 Energieprestatie per m^2 bruto vloeroppervlak op basis van primaire energie

De energieprestaties in Kwh_{th} en kWh_e van figuur 5.13 kunnen worden herleid naar prestaties in kWh primaire energie – zie figuur 5.5.7. Hiervoor zijn conversiefactoren gebruikt van 2,5 voor elektrische energie en 1,0 voor gas. De calorische waarde van aardgas bedraagt $9,78 \text{ kWh.m}^{-3}$ –de zgn. bovenwaarde- en het gemiddeld rendement van een condenserende CV ketel is gesteld op 90%.

Opvallend is de dominante invloed van de Zonnefaçade, die vanaf een gebouwhoogte van 22,5 m -ca 6 verdiepingen- de grootste bijdrage levert aan de energievoorziening van het gebouw.

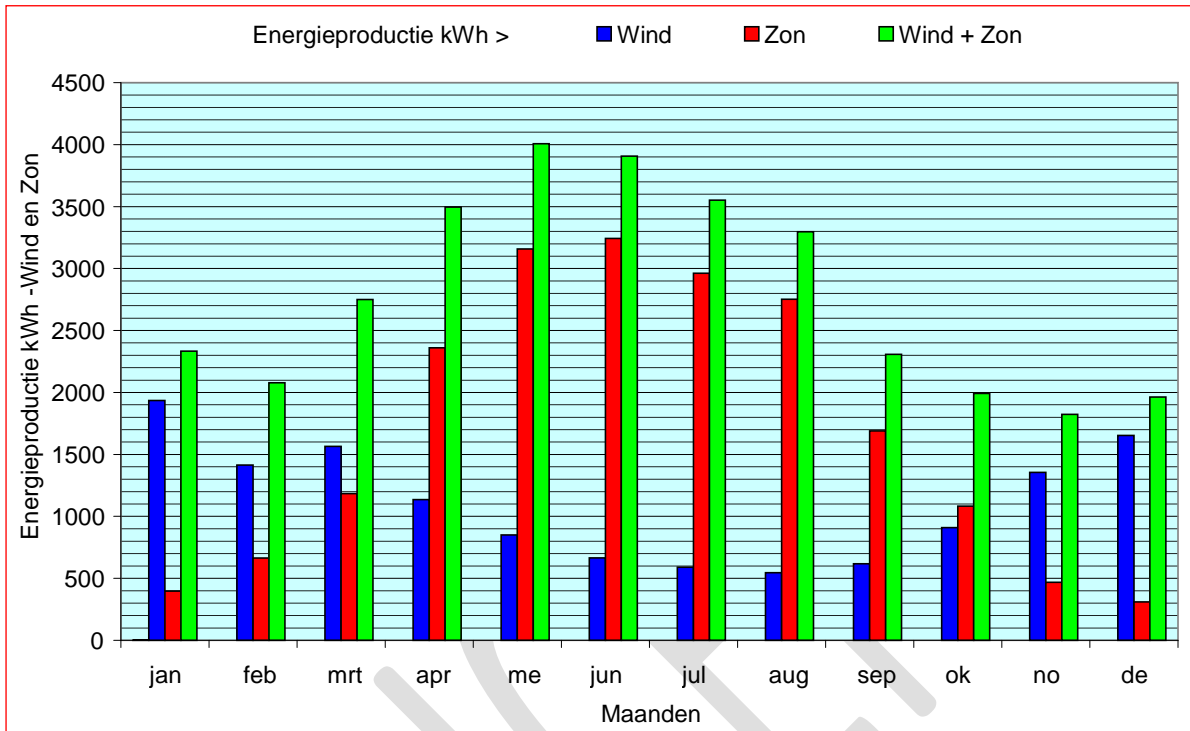


Figuur 5.5.7 –Energieprestatie Zon en Wind als functie van de gebouwhoogte - basis primaire energie

⁶⁷ nearly Zero Energy Building –zie paragraaf 9.1

5.5.8 Jaarlijks verloop van de energieprestatie

De profielen van de beschikbare windenergie en zonne-energie zijn over de seizoenen gerekend redelijk complementair. Een gecombineerde toepassing van wind en zon in het Ventecdak is daarom een interessante optie, omdat door de seizoenen heen beide energievormen elkaar aanvullen. Zie als voorbeeld figuur 5.5.8



Figuur 5.5.8 – Energieproductie Wind + Zon -Ventecdak 20 x 20 m met 8 turbines – Hoogte 35 m

6 DE STEDENBOUWKUNDIGE CONTEXT

6.1 Inleiding

Randvoorwaarde voor een optimale werking van de *Natuurlijke Airconditioning* volgens het *Earth, Wind & Fire* concept is dat de invloed van wind en zon op het betreffende gebouw niet substantieel door de omliggende bebouwing wordt belemmerd. Idealiter moet de wind vrij spel hebben om het Ventecdak en moet de zonneshoorsteen niet in de schaduw liggen van andere gebouwen. In werkelijkheid staat een gebouw echter zelden solitair en zullen omliggende gebouwen de werking van het concept negatief kunnen beïnvloeden.

Een klimaatresponsief gebouw –zie paragraaf 1.2.5- komt het beste tot zijn recht in een klimaatresponsieve stedenbouwkundige omgeving. Het voorliggende hoofdstuk analyseert globaal wat dit voor het *Earth, Wind & Fire* concept betekent.

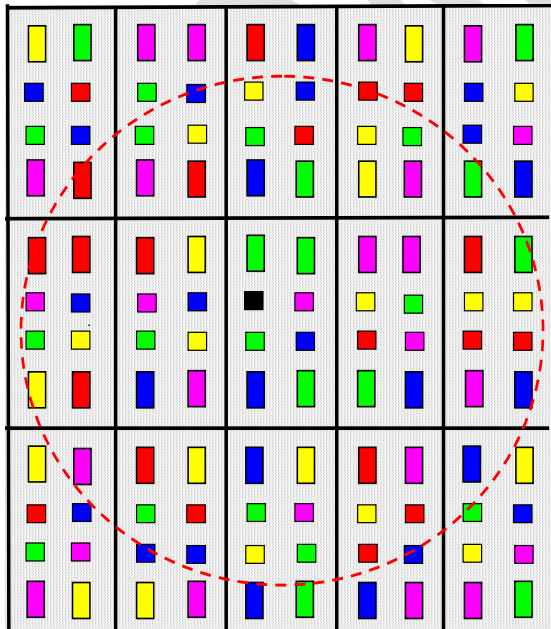
Voor de werking van het Ventecdak hebben hoogteverschillen tussen gebouwen de meeste invloed. Voor de zonneshoorsteen zijn laterale tussenafstanden meer bepalend voor de stedenbouwkundige omgeving. Mede door de grote potentiële bijdrage van een zonneshoorsteen aan het warmteverbruik van gebouwen hebben de stedenbouwkundige randvoorwaarden voor de zonneshoorsteen dan ook prioriteit

De beschouwingen hebben een globaal en algemeen karakter. Voor specifieke situaties wordt aanbevolen gebruik te maken van windtunnelonderzoek en/of bezonningssoftware al dan niet in combinatie met onderzoek in een zonn simulator.

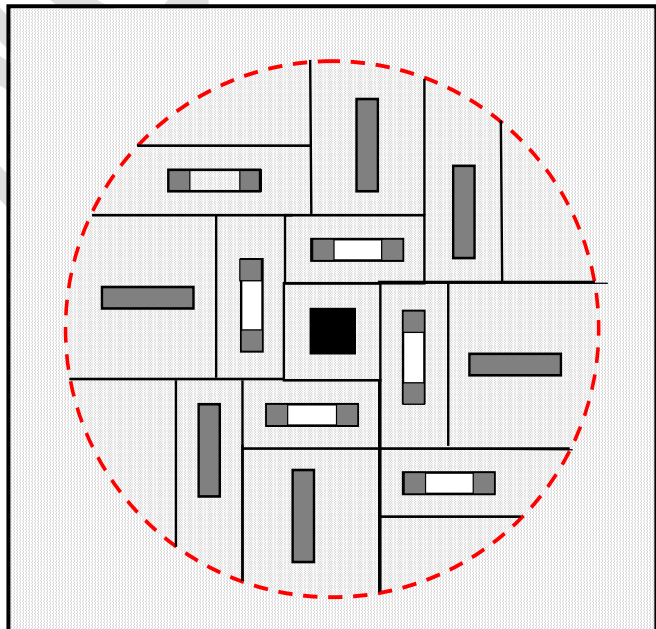
6.2 Het Ventecdak

6.2.1 Algemeen

Het Ventecdak heeft een minder grote invloed op de stedenbouwkundige omgeving dan de zonneshoorsteen –zie paragraaf 6.1. In paragraaf 6.3 is een stedenbouwkundige omgeving ontworpen gebaseerd op de optimalisering van de zonneshoorsteen. Het ligt voor de hand deze ook te gebruiken als testlocatie voor windtunnelonderzoek van het Ventecdak –zie figuur 6.2.1/1. Door de hoogte van de bouwblokken te variëren, willekeurig, naar het midden oplopend dan wel aflopend, kunnen de prestaties van het Ventecdak worden onderzocht.



Figuur 6.2.1/1 –Stedenbouwkundig plan
Zoals gewenst



Figuur 6.2.1/2 Stedenbouwkundige plan
Zoals uitgevoerd

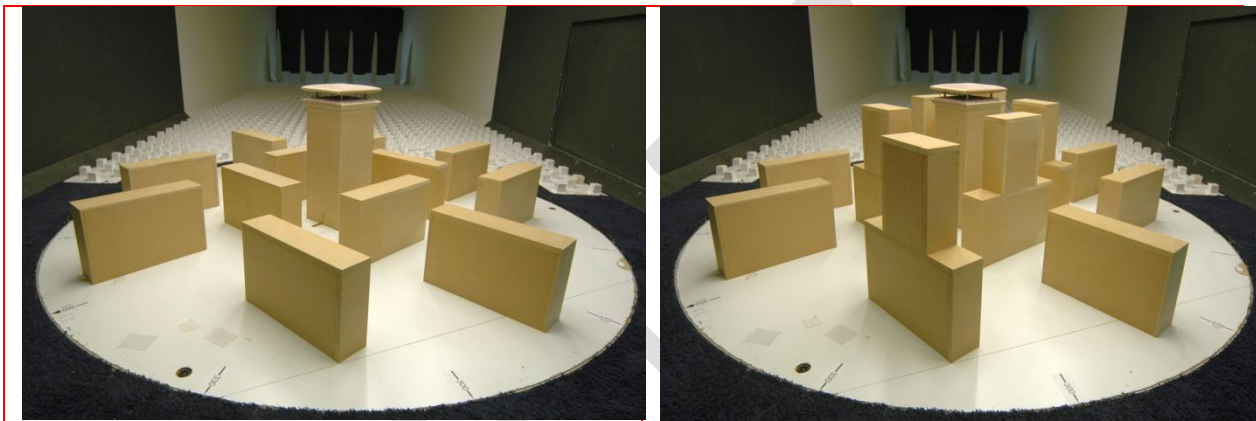
De testlocatie volgens figuur 6.2.1/1, uitgevoerd met het model 1:100 dat voor de metingen ad paragraaf 2.4 werd gebruikt, past echter niet op de draaischijf van de windtunnel, waardoor een veel kleiner model nodig zou zijn. In dit kleinere model is het echter niet mogelijk de noodzakelijke

drukopnemers en NTC thermistors in te bouwen –zie figuur 2.4.2. Bovendien zouden de kosten hiervan prohibitief hoog zijn. Een mogelijke oplossing, waarbij het bestaande model 1:100 wordt gebruikt, zou inhouden dat slechts een klein, en niet representatief deel van de gewenste stedenbouwkundige invulling zou kunnen worden opgenomen.

Gekozen is daarom voor een min of meer willekeurige stedenbouwkundige invulling volgens figuur 6.2.1/2 met bouwblokken van 10 x 40 m waartussen het testmodel is opgesteld. Het testmodel heeft een voetafdruk van 20 x 20 m en is 50 m hoog exclusief Venteddak. De volgende situaties zijn onderzocht:

- Omliggende bebouwing met bouwblokken van 25 m hoog – figuur 6.2.1/3 links
- Omliggende bebouwing met bouwblokken tot 50 m hoog – figuur 6.2.1/3 rechts

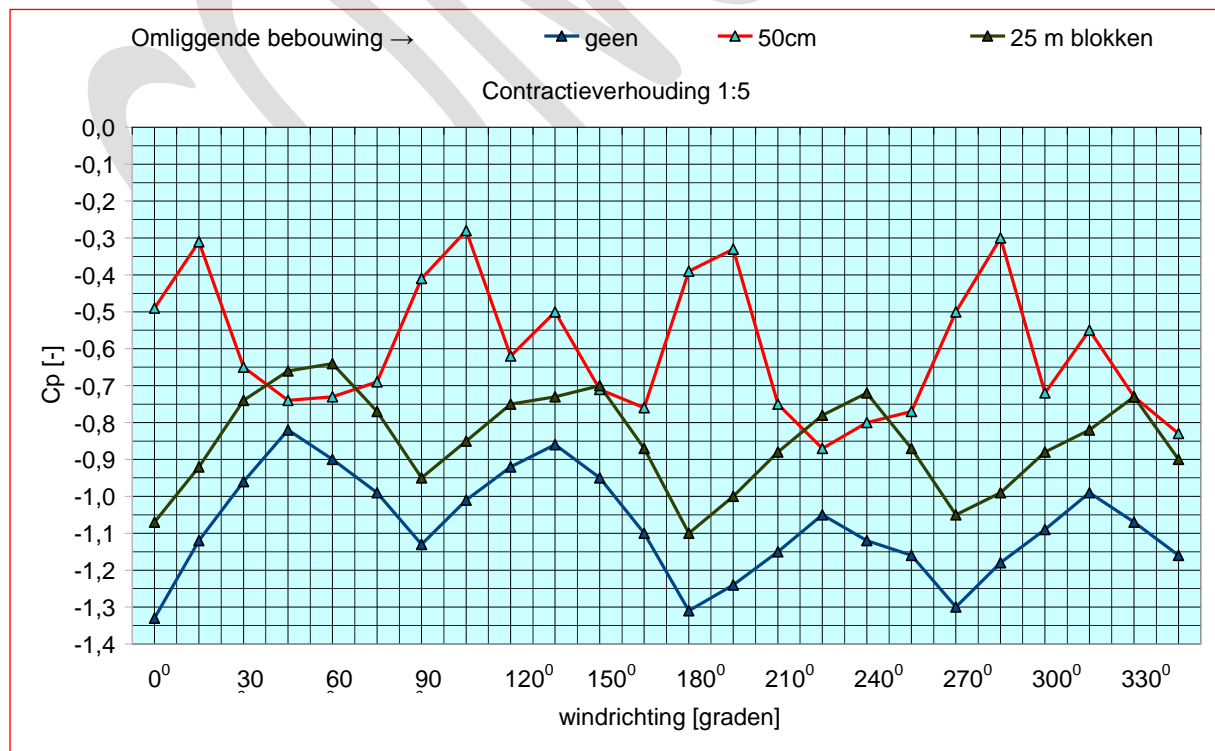
Voor informatie over windtunnelonderzoek en de meetcondities wordt verwezen naar het meetrapport (Aanen, L. 2011) en paragraaf 2.4.



Figuur 6.2.1/3 – Venteddak met stedenbouwkundige omgeving in de windtunnel

6.2.2 Testresultaten

Figuur 6.2.2, het equivalent van figuur 2.4.5, laat het effect zien van de omliggende bebouwing op een Venteddak met een contractieverhouding van 1:5 voor respectievelijk een solitair gebouw en een omliggende bebouwing met bouwblokken van 25m en 50m.



Figuur 6.2.2 – Cp waarden als functie van windrichting en stedenbouwkundige omgeving

Solitair gebouw:

Voor het solitaire gebouw (blauwe lijn) zijn Cp waarden gemeten van -0,8 tot -1,3, uiteraard overeenkomend met die in figuur 2.4.5.

Omliggende bebouwing met bouwblokken van 25 m hoog

Er worden, afhankelijk van de windrichting, in de keel van de pseudo-venturi Cp-waarden gerealiseerd van -0,7 tot -1,1. De omliggende bebouwing heeft dus een negatieve invloed op de te realiseren winddrukcoëfficiënt. Het verschil kan worden verklaard door wijzigingen in de aanstroomrichting en de turbulentie van de wind. Het Ventecdak blijft ook in deze situatie functioneren, zij het met verminderde prestaties.

Omliggende bebouwing met bouwblokken van 50 m hoog

Er worden, afhankelijk van de windrichting, in de keel van de pseudo-venturi Cp-waarden gerealiseerd van -0,3 tot -0,8. Dit type bebouwing heeft dus een grotere negatieve invloed op de te realiseren winddrukcoëfficiënt. Het Ventecdak blijft ook in deze situatie functioneren, zij het met verder verminderde prestatie. Bij geen van de windrichtingen worden de Cp-waarden gehaald als in het geval zonder bebouwing. In vergelijking met de 25 m omgeving zien we dat bij sommige windrichtingen de prestaties slechter worden, maar bij andere windrichtingen weer beter. Dit kan verklaard worden door het feit dat gebouwen niet alleen een zog hebben waarin de snelheden lager zijn, maar er ook windrichtingen zijn waar de snelheden door de gebouwen juist worden verhoogd.

6.3 De zonneschoorsteen

6.3.1 Positie van de zon

De positie van de zon wordt aangegeven met de zonshoogte h en de zonsazimut α_0 in graden, zie figuur 6.3/1. Deze kunnen worden berekend met de volgende formules (ISSO 1976, Velds, C.A. 1992).

- Zonshoogte h :

$$\sinh = \sin L \cdot \sin D - \cos L \cdot \cos D \cdot \cos U \quad (6.3.1/1)$$

- Zonsazimut α_0 :

$$\sin \alpha_0 = \frac{\cos D \cdot \sin U}{\cosh} \quad (6.3.1/2)$$

en

$$\cos \alpha_0 = \frac{-\sin D \cdot \cos L + \cos D \cdot \sin L \cdot \cos U}{\cosh} \quad (6.3.1/3)$$

Waarin L plaatselijke geografische breedte⁶⁸
D declinatie van de zon⁶⁹
U uurhoek⁷⁰

De declinatie van de zon kan bij benadering worden berekend met de formule

$$D \cong 23,45 \cdot \sin \left(\frac{k-82}{365} \cdot 360 \right) \quad (6.3.1/4)$$

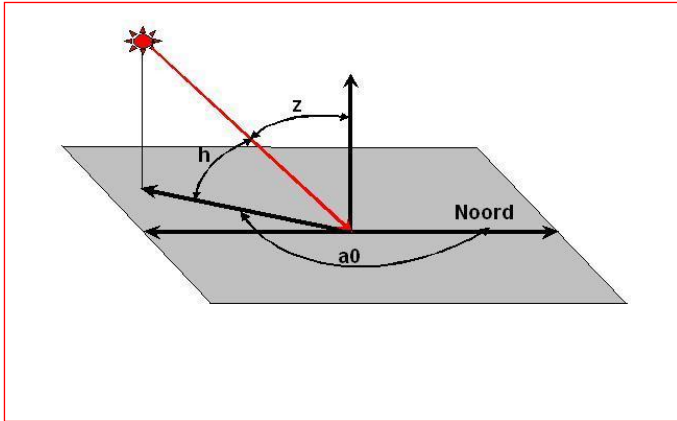
Waarin k = aantal dagen sinds het begin van het jaar.

Aangezien het azimut α_0 waarden van -180^0 tot $+180^0$ kan hebben zijn zowel voor de oplossing van $\cos \alpha_0$ als die voor $\sin \alpha_0$ twee antwoorden mogelijk, nl. voor $\cos \alpha_0$ de waarden van $+\alpha_0$ en $-\alpha_0$ (daar $\cos \alpha_0 = \cos -\alpha_0$), voor $\sin \alpha_0$ de waarden α_0 en $(180^0 - \alpha_0)$, daar $\alpha_0 = \sin (180^0 - \alpha_0)$. Het azimut moet daarom berekend worden zowel met behulp van $\cos \alpha_0$ als van $\sin \alpha_0$. Van de vier antwoorden komt er één tweemaal voor; dat is de gezochte oplossing (Velds C.A. 1992).

⁶⁸ Voor praktische toepassingen kan voor geheel Nederland de geografische breedte op 52^0 worden gesteld.

⁶⁹ De hoek tussen de stralingsrichting en het equatoriaal vlak van de aarde.

⁷⁰ De zonnetijd wordt uitgedrukt in de uurhoek, die vanaf middernacht met $U=0$ elk uur met 15^0 toeneemt.



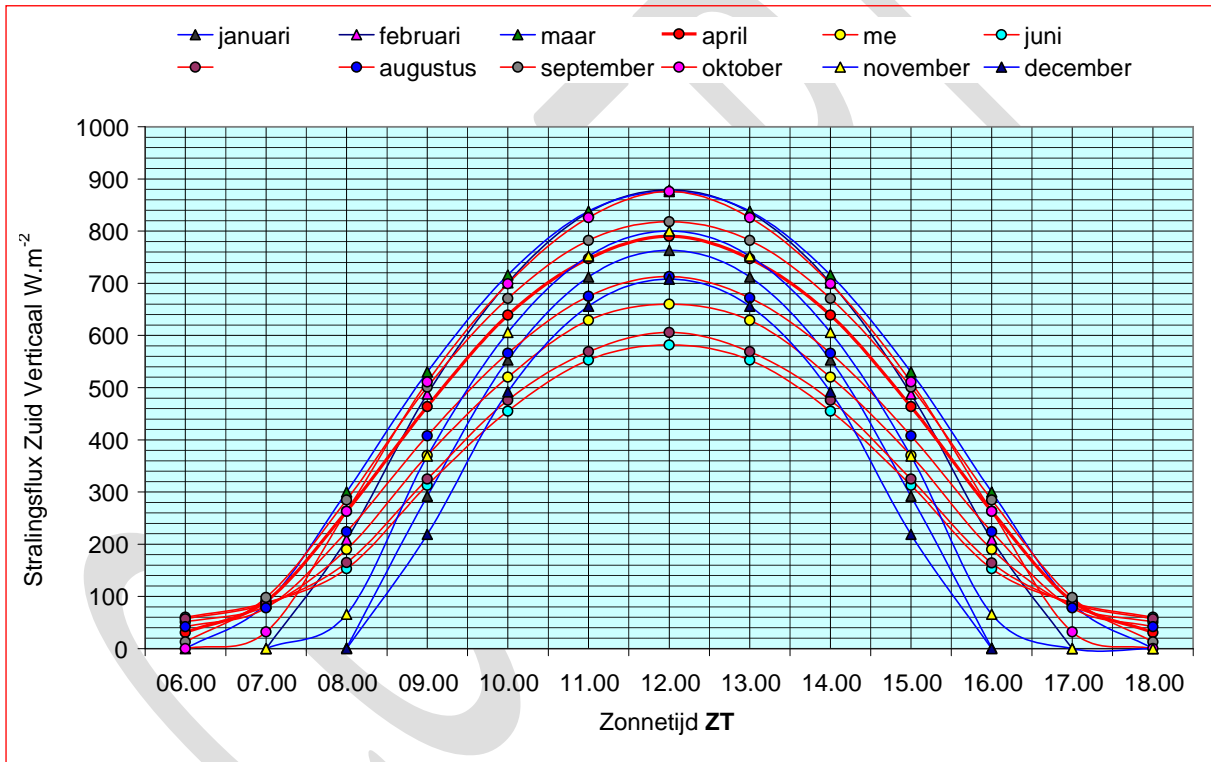
Verklaring

- a_0 = zonsazimut in graden, met de wijzers van de klok mee gemeten vanaf Noord. Voor de berekeningen in dit hoofdstuk is a_0 gemeten vanaf Oost, met $a_{90} = a_0 - 90^0$
- h = zonshoogte in graden, gemeten vanaf de horizon
- z = zenit in graden, gemeten vanuit het verticale vlak

Figuur 6.3.1 – zonsazimut – zonshoogte - zenit

6.3.2 Dagelijks verloop van de zonnestraling

Figuur 6.3.2 laat het dagelijks verloop van de stralingsflux zien op een Zuid georiënteerd verticaal vlak in de maanden januari t/m december.



Figuur 6.3.2 – Dagelijks verloop van de zonnestraling op een verticaal vlak op het zuiden

De waarden zijn ontleend aan tabel A.1 van ISSO publicatie 3 (ISSO 1976). Hierin is de invloed van reflectieverschillen bij verschillende invalshoeken van de directe zonnestraling verdisconteerd. De blauwe lijnen hebben betrekking op de normale tijd met MEMT⁷¹ = ZT⁷² + 40 minuten; de rode lijnen staan voor de zomertijd met MEMT = ZT + 1 uur 40 minuten. De maanden maart en oktober spannen de kroon met een maximum stralingsflux van 876 W.m². In de maanden juni en juli is de stralingsflux het laagst met respectievelijk 582 en 606 W.m².

Het is gewenst optimaal gebruik te maken van de relatief sterke stralingsflux in de maand april. Hierbij moet zoveel mogelijk worden voorkomen dat een zonnescorsteen door de omliggende gebouwen wordt beschaduwd.

⁷¹ MEMT = Middel Europese-Middelbare Tijd, de wettige tijd in Nederland.

⁷² ZT = Zonnetijd, tijdregeling volgens de stand van de zon, zodanig dat de hoogste zonnestand om 12 uur valt.

6.3.3 Schaduwwerking van de zon

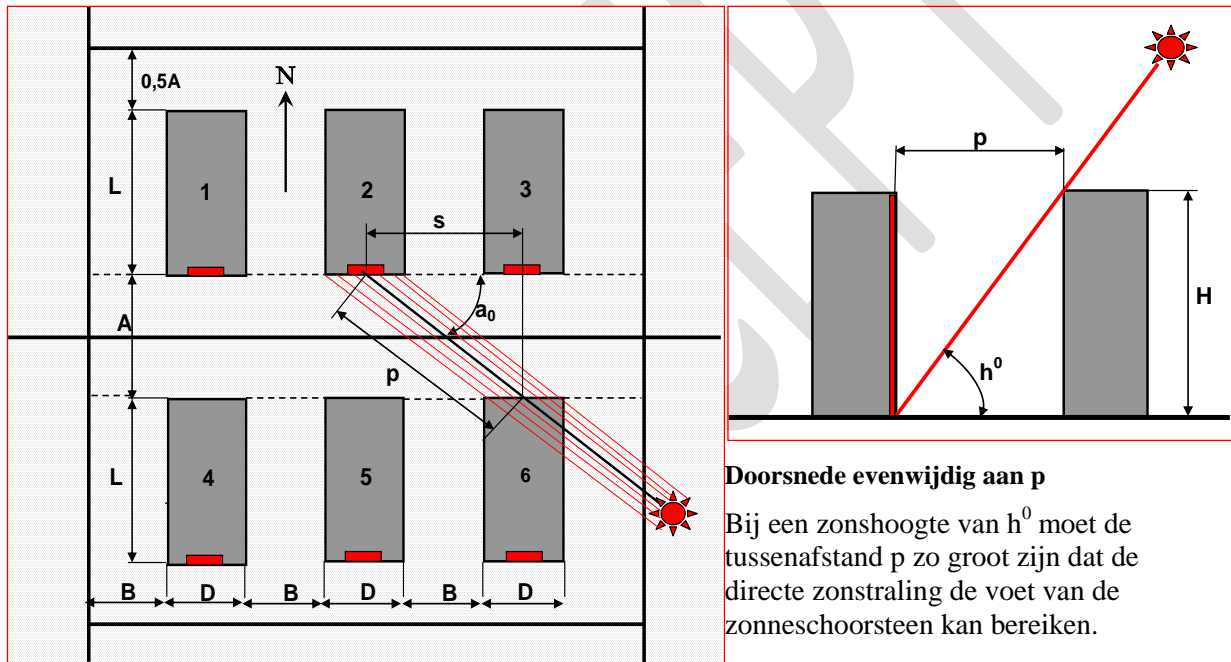
Figuur 6.3.3/1 laat een zestal gebouwen zien met lengte L m en diepte D m op tussenafstanden van respectievelijk A en B . De gebouwen zijn Noord/Zuid georiënteerd met zonneshoorstenen op Zuid. Getekend is de ochtendsituatie waarbij de gebouwen 1 en 2 zijdelings worden beschaduwd door de gebouwen 5 en 6. Bij de hoogste zonnestand $ZT = 12.00$ uur is er geen zijdelingse beschaduwing meer en worden de gebouwen 1, 2 en 3 beschaduwd door de gebouwen 4, 5 en 6.

De tussenafstand A is van belang voor de mate van beschaduwing van tegenover elkaar gelegen gebouwen en daarmee voor de energieopbrengst. Deze waarde kan worden berekend met behulp van de zonsazimuth a_{90} en de zonshoogte h volgens de formules $A \geq p \cdot \sin a_{90}$ en $p \geq \frac{H}{\tan h}$ waaruit volgt

$$A \geq H \frac{\sin a_{90}}{\tan h} \quad (6.3.3)$$

De tussenafstand B is van belang voor de zijdelingse beschaduwing en daarmee voor het functioneren van de zonneshoorsteen bij laagstaande zon.

Voor de zonsazimut a_{90} en de zonshoogte h in de ochtenduren zijn de waarden van de factor $(\sin a_0 / \tan h)$ berekend; zie figuur 6.3.3/2. Een belangrijke observatie is dat in de zomer deze factor zijn maximum bereikt om 12.00 ZT. In de wintermaanden gaan de waarden daarentegen om 12.00 ZT naar het minimum.



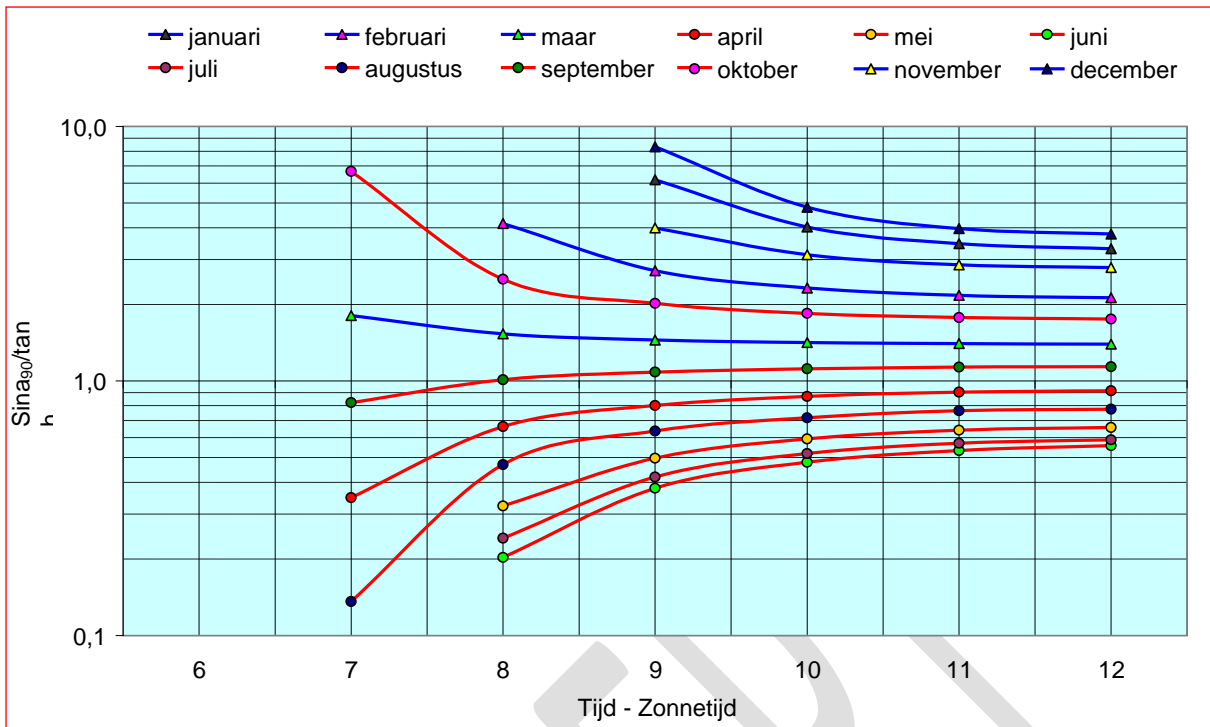
Figuur 6.3.3/1 – Stedenbouwkundige variant A

Tabel 6.3.3 geeft de jaarlijkse waarden van de factor $(\sin a_0 / \tan h)$ voor de verschillende tijdstippen.

	jan.	feb.	mrt.	apr.	mei	juni	juli	aug.	sep.	okt.	nov.	dec.
factor	6,18	4,16	1,81	0,92	0,66	0,56	0,59	0,78	1,14	6,66	3,99	8,33
Z.T	09.00	08.00	07.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	07.00	09.00	09.00

Tabel 6.3.3 – Maximum waarden van de factor $(\sin a_0 / \tan h)$ in de zomermaanden

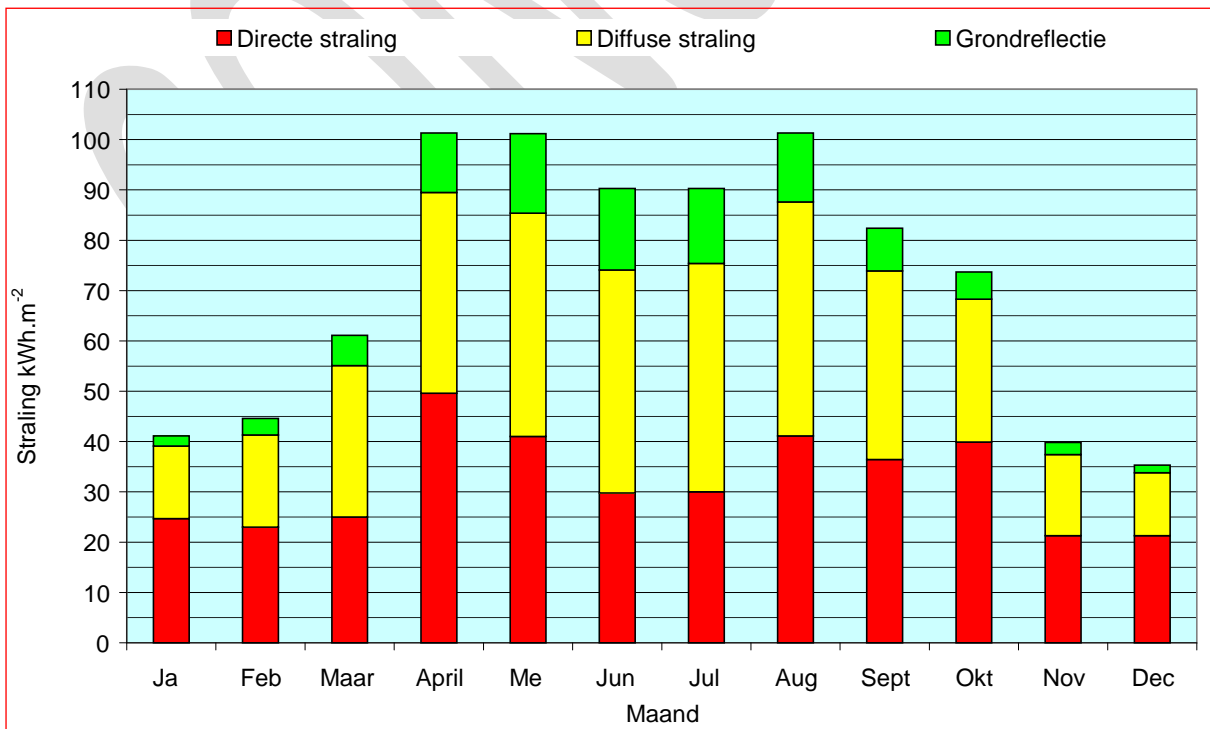
Voor het stedenbouwkundig ontwerp moet deze worden gekozen in samenhang met de periode waarin deze valt. Het heeft hierbij weinig zin uit te gaan van de maanden januari t/m maart en november/december omdat in deze perioden zowel de stralingsflux als de energieopbrengst relatief gering is. Door de relatief sterke stralingsflux in april -zie figuur 6.3.2-, maar vooral ook door de hoge energieopbrengst -zie paragraaf 6.3.4, is deze maand maatgevend gesteld.



Figuur 6.3.3/2 – Waarden van de factor $\sin a_0 / \tan h$

6.3.4 Maximaliseren energieopbrengst van de zonneshoorsteen

Het maximaliseren van de energieopbrengst is voor de stedenbouwkundige context een belangrijk criterium. De tussenafstand A moet worden berekend met de maximale factor ($\sin a_0 / \tan h$) volgens tabel 6.3.3 of figuur 6.3.3/2. Deze factor is afhankelijk van de maand die hiervoor maatgevend is. Hierbij moet niet worden uitgegaan van de maand met de hoogste stralingsintensiteit volgens figuur 6.3.2, maar van de maand met de hoogste energieopbrengst volgens figuur 6.3.4 en tabel 6.3.4. Deze zijn gebaseerd op de berekeningen van VABI in paragraaf 4.5.9 tabel 4.5.9/2 maar nu onderverdeeld in directe en diffuse straling en grondreflectie.



Figuur 6.3.4 – Straling op een verticaal vlak op het zuiden- referentiejaar NEN 5060: 2008 /A.2

Straling	jan	feb.	maart	apr.	mei	juni	juli	aug.	sept.	okt.	nov.	dec.	totaal	%
Direct	24,7	23,0	25,0	49,6	41,0	29,8	30,0	41,1	36,4	39,9	21,3	21,3	383,1	44,4
Diffuus	14,4	18,3	30,1	39,9	44,4	44,3	45,4	46,5	37,5	28,4	16,1	12,5	390,3	43,8
Grondreflectie.	2,0	3,3	6,0	11,8	15,8	16,2	14,9	13,7	8,5	5,4	2,4	1,5	101,5	11,8
Tot. kWh.m ⁻²	41,1	44,6	61,1	101,3	101,2	90,3	90,3	101,3	82,4	73,7	39,8	35,3	862,4	100,0
Percentage	4,8	5,2	7,1	11,7	11,7	10,5	10,5	11,7	9,6	8,5	4,6	4,1	100,0	

Tabel 6.3.4/1 – Straling kWh.m⁻² op een verticaal vlak op het zuiden - referentiejaar NEN 5060: 2008 /A.2

De maanden april, mei en augustus hebben een vrijwel gelijke energieopbrengst, maar in april is de directe straling het grootst. Het ligt daarom voor de hand april te selecteren als maatgevend voor de bepaling van de factor ($\sin a_0 / \tan h$), die dan een maximale waarde heeft van 0,92.

De berekende minimum tussenafstanden A zijn weergegeven in tabel 6.3.4/2. De tussenmaten B spelen bij het maximaliseren van de energieopbrengsten geen rol.

aant.verdiepingen	4	6	8	10	12	14	16	18	20
verdiepinghoogte	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
gebouwhoogte	14	21	28	35	42	49	56	63	70
factor ($\sin a_0/\tan h$)	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92
Tussenafstand A ≥ m	13	19	26	32	39	45	52	58	64

Tabel 6.3.4/2 – Minimum waarden van de tussenafstanden A

Tabel 6.3.4/1 laat overigens zien dat de directe zonstraling in april slechts ca. 50% van de totale straling omvat. Een suboptimale stedenbouwkundige context heeft dan ook minder invloed dan op basis van de berekeningen te verwachten zou zijn.

6.3.5 Optimaliseren van de zonneshoorsteen als afzuigsysteem

Een afzuigsysteem moet in werking treden bij het begin van de bedrijfstijd, die voor een kantoorgebouw kan worden gesteld op 08.00 uur MEMT. Idealiter moet de zonneshoorsteen op dit tijdstip kunnen functioneren, en moet de schaduw van omliggende gebouwen worden beperkt. In figuur 6.3.3/1 worden de gebouwen 1 en 2 door de gebouwen 5 en 6 beschaduwd. Deze beschaduwing is afhankelijk van de hoogte van de gebouwen 5 en 6, en met de afstand B tussen de gebouwen.

De invloed van de buitentemperatuur en de hoogte op de thermische trek is groot – zie figuur 4.5.10/6. De om 08.00 uur MEMT optredende buitentemperaturen in de maand april liggen volgens gegevens van KNMI grosso modo onder 15⁰C (www.knmi.nl/klimatologie). Bij een binnentemperatuur van 20⁰C levert de zonneshoorsteen dan ook zonder zoninstraling thermische trek. De in de loop van de ochtend stijgende buitentemperatuur moet idealiter worden gecompenseerd door zoninstraling in de zonneshoorsteen. Er zou dus van kunnen worden uitgegaan dat medio april om 08.00 uur MEMT de zonneshoorsteen, bij de op dit tijdstip nog laagstaande zon, niet door de omgevende gebouwen wordt beschaduwd. Mutatis mutandis geldt een dergelijke voorwaarde ook voor het einde van de werktijd van stel 17.00 uur MEMT. Ook dan moet de zon nog ongehinderd in de zonneshoorsteen kunnen schijnen.

De aanvangstijd van 08.00 uur MEMT komt overeen met 06.20 ZT. Uit figuur 6.3.2 blijkt dat de stralingsflux op dat moment nog gering is, minder dan 100 W.m⁻². Het is daarom nauwelijks relevant dit tijdstip als maatgevend voor de beschaduwing te beschouwen. Een uur later, om 07.20 ZT, is de stralingsflux gestegen tot ca. 150 W.m⁻² en wordt de tussenafstand B van belang.

Om 07.20 ZT is de zonszimuth $a_0 = 100,1^0$ en de zonshoogte $h = 19,7^0$. De tussenmaat B kan dan als volgt worden berekend – zie figuur 6.3.3/1.

$$p = \frac{H}{\tan 19,7^0} = 2,79H \quad \text{en} \quad s = \sqrt{p^2 - A^2} \quad \text{en} \quad B = s - D$$

De berekeningsresultaten zijn weergegeven in tabel 6.3.4/3, waarin volledigheidshalve ook nog eens de tussenafstanden A volgens tabel 6.3.4/2 zijn vermeld.

De tussenafstand B kan bij grotere gebouwhoogten problematisch worden. De voet van de zonneshoorsteen in de gebouwen 1 en 2 kan zou in deze vroege ochtenduren in de schaduw van gebouw 6 kunnen komen te liggen.

Aantal verdiepingen	4	6	8	10	12	14	16	18	20
Verdieping hoogte m	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
Gebouwhoogte m	14	21	28	35	42	49	56	63	70
factor (sin a_0 /tan h)	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92
$A \geq m$ (tabel 6.3.4/2)	13	19	26	32	39	45	52	58	64
07.20 ZT - h	19,7	19,7	19,7	19,7	19,7	19,7	19,7	19,7	19,7
07.20 ZT - a_0	10,1	10,1	10,1	10,1	10,1	10,1	10,1	10,1	10,1
p m	39,1	58,7	78,2	97,8	117,3	136,9	156,4	176,0	195,5
s m	36,9	55,4	73,8	92,3	110,8	129,2	147,7	166,1	184,6
D m	25	25	25	25	25	25	25	25	25
$B \geq m$	12	30	49	67	86	104	123	141	160

Tabel 6.3.4/3 – Tussenafstanden B bij optimalisatie zonneshoorsteen als afzuigstelsel – 07.20 ZT

Tabel 6.3.4/4 laat de berekeningsresultaten zien voor het tijdstip 08.20 ZT overeenkomend met 10.00 MEMT. Ten opzichte van tabel 6.3.4/3 zijn de tussenafstanden B ongeveer gehalveerd. Hieruit blijkt het relatieve belang van dit criterium, temeer omdat bij kleinere tussenafstanden B alleen de voet van de zonneshoorsteen beschaduwd wordt; een groter deel zal altijd directe straling ontvangen. De gehele zonneshoorsteen tenslotte krijgt continu een wisselende diffuse straling en grondreflectie.

Aantal verdiepingen	4	6	8	10	12	14	16	18	20
Verdiepinghoogte	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
Gebouwhoogte	14	21	28	35	42	49	56	63	70
factor sin a_0 /tan h	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92
$A \geq m$	13	19	26	32	39	45	52	58	64
08.20 ZT - h	28,6	28,6	28,6	28,6	28,6	28,6	28,6	28,6	28,6
08.20 ZT - a_0	23,1	23,1	23,1	23,1	23,1	23,1	23,1	23,1	23,1
p m	25,7	38,5	51,4	64,2	77,0	89,9	102,7	115,6	128,4
s m	22,2	33,3	44,4	55,5	66,6	77,7	88,9	100,0	111,1
D m	25	25	25	25	25	25	25	25	25
B m	-3	8	19	31	42	53	64	75	86

Tabel 6.3.4/4 – Tussenafstanden B bij optimalisatie zonneshoorsteen als afzuigstelsel – 08.20 ZT

6.3.6 Stedenbouwkundige karakteristieken

De stedenbouwkundige verkaveling van figuur 6.3.3/1 met de afstanden A en B tussen de gebouwen volgens 6.3.4/4 is gekarakteriseerd met behulp van *Spacemate*® *the spatial logic of urban density* (Berghauser Pont, Meta en Haupt, Per 2004, 2008) – zie het onderzoeksrapport (Bronsema 2012).

Geconcludeerd kan worden dat een verkaveling volgens tabel 6.3.4/4 past binnen normaal te achten stedenbouwkundige randvoorwaarden.

6.4 Vervolgonderzoek

De beschreven analytische benadering van een klimaatactieve stedenbouwkundige omgeving voor toepassing van *Natuurlijke Airconditioning* volgens het *Earth, Wind & Fire* concept heeft een hoog theoretisch karakter en is ook alleen van toepassing voor nieuwbouwwijken. Een vervolgonderzoek zou zich o.a. moeten richten op:

- Analyse van bestaande en nieuwe stedenbouwkundige omgevingen en gebouwen met het oogmerk na te gaan in hoeverre deze zich lenen voor de toepassing van het *Earth, Wind & Fire* concept.
- Combinatie van bezonningsonderzoek met windonderzoek voor wat betreft:
 - Differentiatie van gebouwhoogten in verband met de prestaties van het Ventecdak zie paragraaf 6.2.

- Dichtheid, permeabiliteit en oriëntatie van de bebouwing met betrekking tot het warmte-eiland effect en de afvoer van stedelijke luchtverontreinigingen –zie paragraaf 2.1.

Het vervolgonderzoek idealiter uit te voeren in samenhang met algemeen bezonningsonderzoek in stedelijke omgevingen (o.a. Ng, Edward 2005, Bruce, Giles 2008, Curelli, Alessandra et al 2011, Beckers, Benoit 2011, Zeiler, Wim 2011, Schuster, Heide et al 2011, Esch van, Marjolein M,E, van & Haupt 2006,2007).

CONCEPT

7 CASE STUDY

7.1 Inleiding

De jaarlijkse nieuwbouw van kantoorgebouwen in Nederland omvat maar een klein percentage van de aanwezige voorraad. Toepassing van het *Earth, Wind & Fire* concept is daarom vooral van belang bij grote renovaties van bestaande gebouwen.

Om de mogelijkheid hiervan te onderzoeken is een *case study* gemaakt waarin een bestaand kantoorgebouw virtueel wordt uitgevoerd met *Natuurlijke Airconditioning* volgens *Earth, Wind & Fire* concept. De *case study* dient enerzijds als ontwerp oefening, anderzijds om de energieprestaties van het concept in een reëel gebouw te evalueren. Uitgangspunt hierbij was dat architectonisch, bouwkundig en installatietechnisch het ontwerp niet alleen virtueel maar ook reëel zou moeten kunnen worden gerealiseerd. Het ontwerp is daarom uitgewerkt op VO (Voorlopig Ontwerp) niveau.

7.2 Het gebouw

7.2.1 Algemeen

Voor de case study is gekozen voor het bestaande kantoorgebouw met vijf bouwlagen + ondergrondse parkeergarage van de Pensioenstichting Zomers Buiten, Anderlechtlaan 200 Amsterdam, bouwjaar 1999- zie figuur 7.2.1/1. Het ontwerp is van Joost de Haan van VVKH Architecten te Leiden. Het gebouw is gesitueerd in een buitenwijk met overwegend laagbouw - zie figuur 7.2.1/2. Slechts aan de Oostzijde ligt op een afstand van ca 100 m het hogere gebouw van Troostwijk.



Figuur 7.2.1/1 - Kantoorgebouw Zomers Buiten Amsterdam



Figuur 7.2.1/2 – Streetview gezien vanuit het zuiden

7.2.2 Globale oppervlakte analyse

▪ Afdelings vloeroppervlak	≈ 2.480	[m ²]	
▪ Verkeersruimte	≈ 600	[m ²]	
▪ Sanitaire ruimten ca	≈ 325	[m ²]	
▪ Techniekruijnte	≈ 120	[m ²]	
▪ Tarra oppervlak	≈ 175	[m ²]	
▪ Bruto vloeroppervlak	≈ 3.700	[m ²]	excl. Parkeergarage

Voor een toelichting op deze indeling van oppervlakken zie figuur 4.5.2 in hoofdstuk 4.

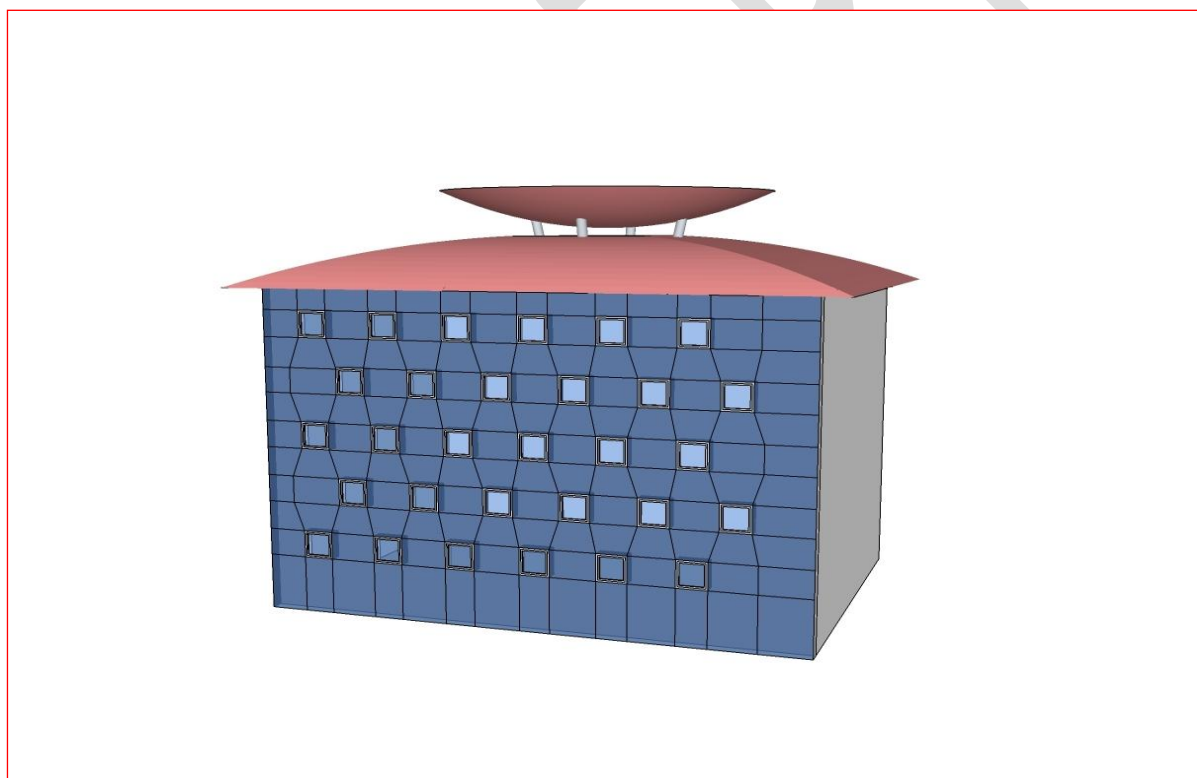
7.3 Voorlopig ontwerp Earth, Wind & Fire concept

7.3.1 Zonneschoorsteen

Als eerste optie werd gekozen voor 2 zonneschoorstenen van ca 2 m breed in buitenliggend hoekmodel op respectievelijk Zuid/Oost en Zuid/West oriëntatie - zie figuur 4.1.9d in hoofdstuk 4, en figuur 7.2.1/2. De jaarlijkse energieopbrengst hiervan werd berekend op ≈ 6,4 kWh per m² bvo overeenkomend met ≈ 11% van het berekende het jaarlijkse warmteverbruik zoals aangegeven in tabel 7.5.2. Deze opbrengst is daarmee te laag om de bouw van deze zonneschoorstenen te rechtvaardigen.

7.3.2 Zonnefaçade

Op suggestie van de architect werd besloten de zuidgevel om te bouwen tot zonnefaçade conform paragraaf 4.1.10 – zie figuur 7.3.2 waarop tevens het voorlopig ontwerp van het Ventecdak is aangegeven.



Figuur 7.3.2 – Kantoor Zomers Buiten met Zonnefaçade en Ventecdak -Voorlopig Ontwerp

Het bruto geveoppervlak is 475 m². Het totale raamoppervlak is 43,5 m², ca 9% van het geveoppervlak waardoor een netto oppervlakvoor de zonnefaçade resulteert van 431,5 m².

De jaarlijkse energieopbrengst van deze zonnefaçade, geraamd conform paragraaf 4.5.9 bedraagt ≈ 44 kWh per m² bvo, overeenkomend met ≈ 80% van het warmteverbruik.

Ten behoeve van het schoonmaakonderhoud van de Zonnefaçade is uitgegaan van een diepte van 0,65 m, waardoor bij het luchtdebiet van 3,45 m³.s⁻¹ (tabel 7.4.4) de gemiddelde luchtsnelheid over de doorsnede 0,18 m.s⁻¹ is. Tussen de ramen is het oppervlak van de doorsnede kleiner en is de luchtsnelheid 0,24 m.s⁻¹.

Bij de referentiecondities ad paragraaf 4.2.3 en een thermisch rendement van 60% wordt temperatuurstijging van de lucht berekend op $\approx 25^{\circ}\text{C}$. 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 $\approx 57^{\circ}\text{C}$. Bij een intredetemperatuur van 25°C zou de uitgaande luchttemperatuur dan kunnen oplopen tot 82°C , waardoor toepassing van gehard glas noodzakelijk is – zie paragraaf 4.1.4. Het is van belang bij de verdere uitwerking van de zonnefaçade de maximum glastemperatuur nauwkeuriger te berekenen. Door de zeer lage luchtsnelheid verdient het aanbeveling hiervoor formule (4.2.4/10) van Molina & Maestre te gebruiken –zie paragraaf 4.2.4.

7.3.3 Ventecdak

Het voorlopig ontwerp van het Ventecdak is is aangegeven in figuur 7.3.2. Om architectonische redenen is een gereduceerd bovendak toegepast –zie paragraaf 2.3.6. Hierbij is uitgegaan van een contractieverhouding van 5:1 en een bovenkanaal met een hoogte van 2,0m.

De C_p -waarde van de venturi-ejector kan worden berekend met behulp van formule (2.3.2). De C_p -waarde ter plaatse van de luchtinlaat kan worden gesteld op 0,8 -zie paragraaf 2.4.3.

De bezonde oppervlakken van het Ventecdak zijn voorzien van dunne film PV-folie –zie paragraaf 5.4

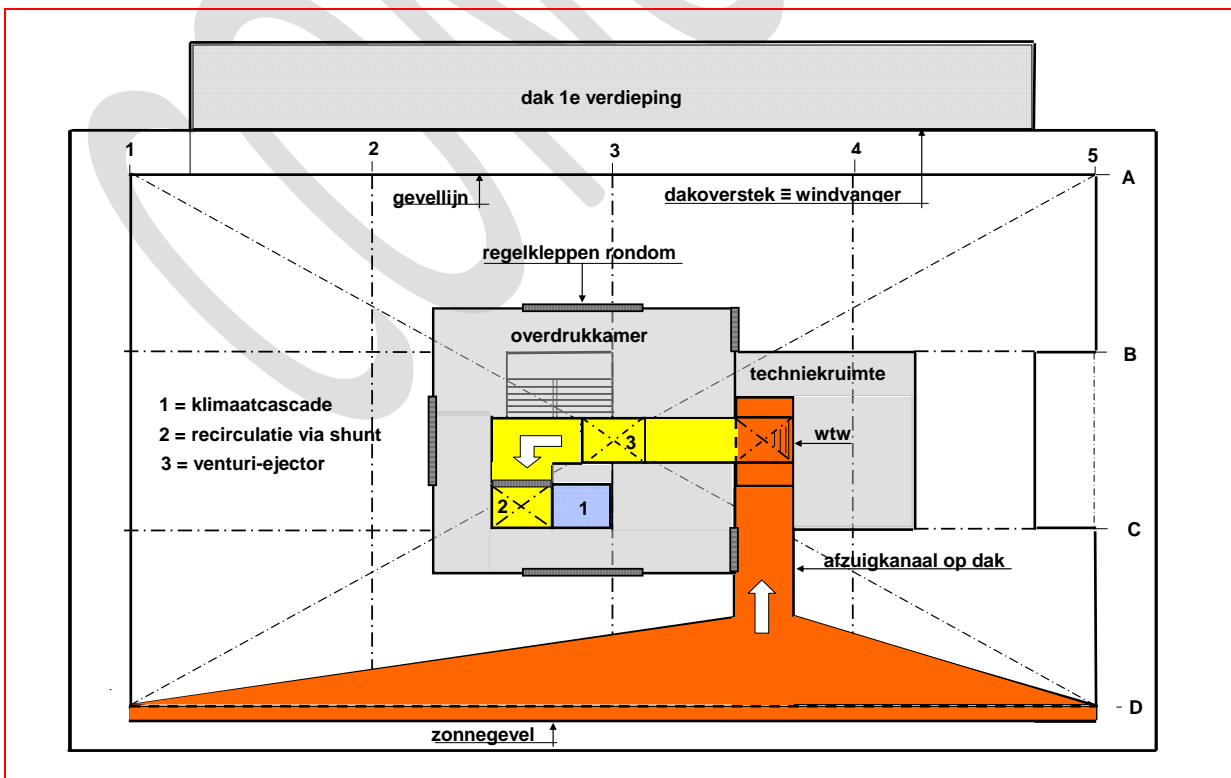
7.3.4 Klimaatcascade

Zie figuur 7.3.5. De klimaatcascade (1) en de luchttoevoerschacht (2) worden ondergebracht in een bestaande installatieschacht. Uitgaande van een luchtsnelheid van $\approx 1,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, is het oppervlak van de doorsnede $\approx 2,3 \text{ m}^2$.

7.3.5 Natuurlijke Airconditioning

Figuur 7.3.5 brengt de luchttoevoer via de overdrukkamer in beeld, zoals in paragraaf 2.2.1 omschreven. Windturbines zijn niet voorzien omdat door de geringe hoogte van het gebouw de energieopbrengst hiervan (te) klein is –zie paragraaf 7.5.6 .

Vanuit de overdrukkamer stroomt de lucht in de klimaatcascade (1), waarin de luchtbehandeling plaatsvindt door het versproeien van water – zie hoofdstuk 3. 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.



Figuur 7.3.5 – Earth, Wind & Fire elementen op dakniveau

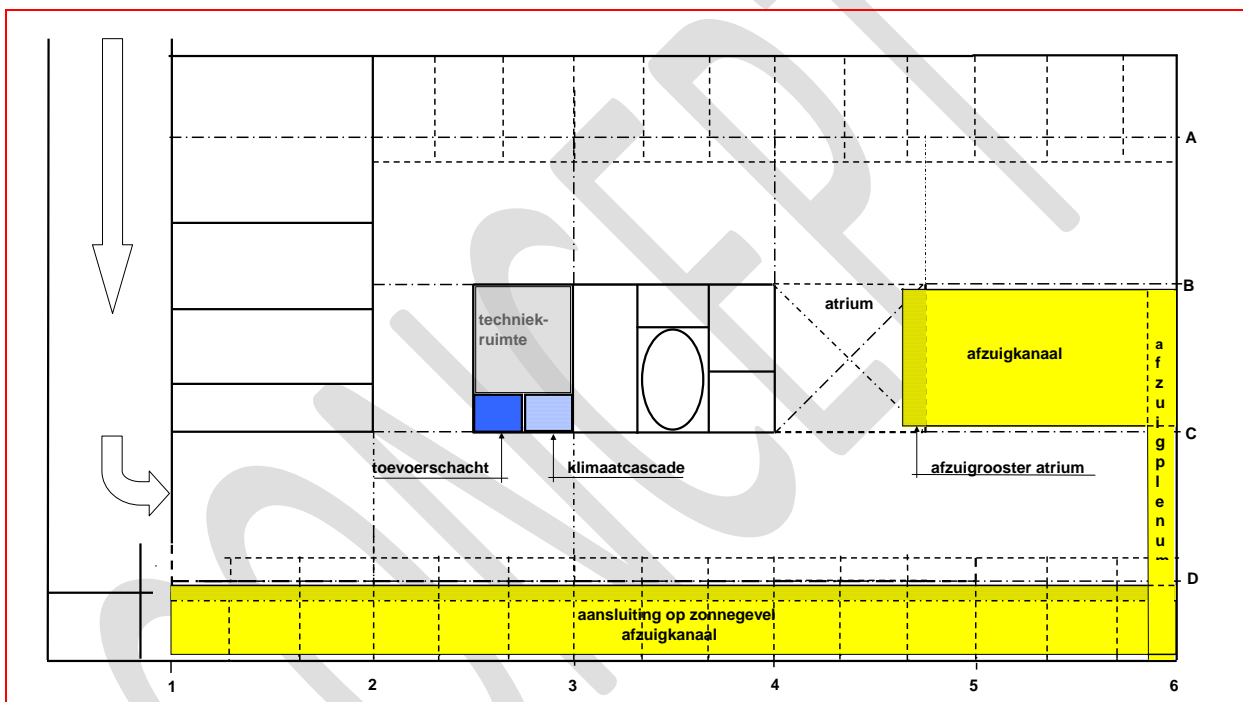
Aan de voet van de klimaatcascade wordt het water opgevangen in een bassin en na koeling dan wel verwarming weer naar de sproeiers gepompt. De behandelde lucht stroomt in de toevoerschacht voor verdere distributie naar de kantoorvertrekken - zie figuur 7.3.6 en 7.4.1. In het stookseizoen wordt de lucht naverwarmd tot $\approx 18^{\circ}\text{C}$.

7.3.6 Natuurlijke luchtafzuiging en warmtewinning in Zonnefaçade

Ventilatielucht wordt via een rooster in de vloer van het atrium en een afzuigkanaal in de parkeerkelder, afgezogen naar de zonnegevel – zie figuur 7.3.6.

Op het dak wordt de lucht via een afzuigkanaal naar de techniekruimte gevoerd –zie figuur 7.3.5- waar met behulp van de FiWiHEX warmtewisselaar warmte wordt teruggewonnen –zie paragraaf 4.5.8.2. 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 in het Ventecdak 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 7.3.6 - Luchtafzuigstelsysteem

7.4 Ventilatie en klimaatregeling kantoren

7.4.1 Luchtdistributie

Vanuit de toevoerschacht wordt op elke verdieping het benodigde luchtdebiet in de plafondruimte geblazen. Vanuit de plafondruimte wordt de lucht met lage snelheid aan de kantoorruimten toegevoerd via driehoekige verticale kokers die op vloerniveau zijn voorzien van toevoerroosters. (kwel- of verdingingsventilatie) –zie figuur 7.4.1. Per afzonderlijke kantoorruimte kan het luchtdebiet worden geregeld op basis van aanwezigheid, luchtkwaliteit of persoonlijke behoefte.

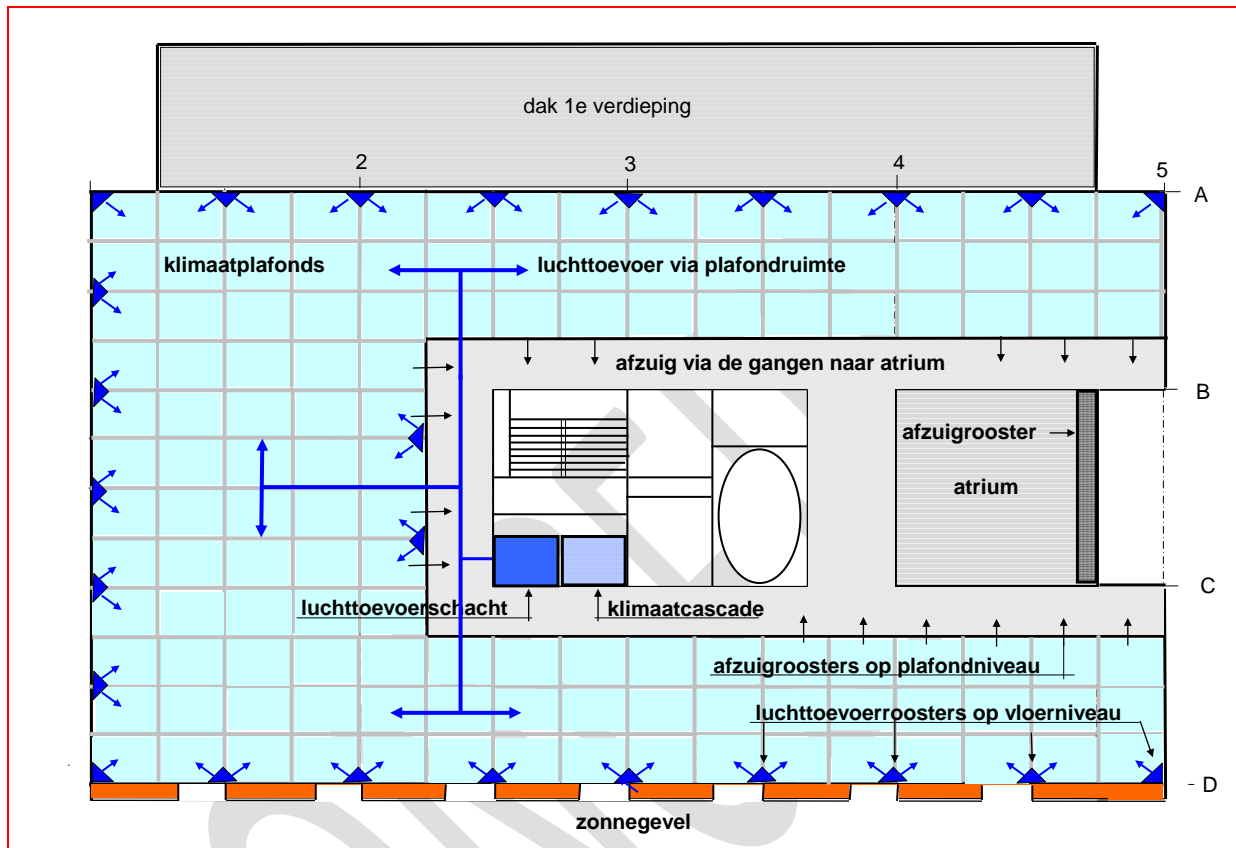
Gebruikte lucht stroomt op plafondniveau via hooggeplaatste overstroomroosters naar de gangen en wordt verder via het atrium en de zonnefaçade afgezogen.

7.4.2 Klimaatregeling

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. 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.



Figuur 7.4.1 – Ventilatie en klimaatregeling kantoorverdieping

7.4.3 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 –zie paragraaf 4.5.8.3. In het koelseizoen wordt de gewonnen zonnewarmte in de bodem opgeslagen, voor lange termijn opslag - zie paragraaf 4.5.8.4.

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.

7.4.4 Referentiesituatie

Als referentiesituatie voor de analyses van de energieprestatie is uitgegaan van de gegevens als aangegeven in tabel 7.4.4. De operationele gegevens zijn gebaseerd op generieke uitgangspunten en niet op de specifieke bedrijfsgegevens van de organisatie in het gebouw.

De nominale bezetting is gebaseerd op een kantoorquotiënt van 20 m² bvo per persoon en een afwezigheidspercentage van ca 10%.

	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 7.4.4 – Referentiegegevens

7.5 Basale energieprestatie analyse

7.5.1 Fasering

Om de relatieve invloed van de klimaatcascade, de zonnefaçade en het Venteddak op de integrale energieprestatie vast te kunnen stellen is de virtuele verbouwing van de huidige situatie 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 7.4.2.
- Luchtafzuig via gangen en atrium met behulp van een lage druk afzuigventilator.
- Warmteterugwinning met behulp van de FiWiHEX warmtewisselaar – paragraaf 7.3.6.
- Vervanging van de bestaande radiatorverwarming door klimaatplafonds –zie paragraaf 7.4.2.
- De bestaande CV ketels en de koelinstallatie blijven gehandhaafd.
- Geen constructieve en/of architectonische veranderingen van het gebouw.

Stap 2:

- Ombouw van de zuidgevel tot zonnefacade – zie paragraaf 7.3.2.
- Installatie van het korte termijn warmteopslagsysteem –zie paragraaf 7.4.3
- De bestaande CV ketels en de koelinstallatie blijven gehandhaafd.

Stap 3:

- Aanleg van de WKO⁷³ voorzieningen –zie paragraaf 4.5.8.4 en aansluiting van de FiWiHEX warmtewisselaar op de virtuele aquifer.
- Demontage van de bestaande CV ketels en koelinstallatie.
- Installatie en aansluiting van een warmtepomp op de WKO voorzieningen

Stap 4:

- Bouw van het Venteddak inclusief dunne film PV folie – zie paragraaf 7.3.3
- Aansluiting van de FiWiHEX warmtewisselaar op de Venturi-ejector en demontage van de hulp-afzuigventilator.

⁷³ Warmte en Koude Opslag

- Installatie van windturbines in het Ventedak en aansluiting op de bestaande gebouwvoorzieningen (Facultatief – zie paragraaf 7.3.5).

7.5.2 Energetische uitgangspunten

7.5.2.1 Energiegebruik referentiesituatie

Het gebouwgebonden energiegebruik wordt bepaald door:

- De warmte- en koudebehoefte van het gebouw –paragraaf 7.5.2.2.
- Het opwekkingsrendement van de warmte- en koudevoorziening –paragraaf 7.5.2.3.
- De energieverliezen die optreden in de klimaatinstallatie –paragraaf 7.5.2.4.

7.5.2.2 Warmte- en koudebehoefte

Voor de jaarlijkse warmte- en koudebehoefte in de referentiesituatie is uitgegaan van de met het ESP-r model voor het referentiejaar NEN 5060:2008 berekende waarden. Deze liggen redelijk in lijn met kengetallen voor kantoorgebouwen uit de periode waarin het gebouw is gerealiseerd (BRE 2000, VDI 1998).

De gerelateerde ventilatorenergie in de referentiesituatie is bepaald op basis van een totale druk van 900 Pa voor het luchttoevoersysteem, 600 Pa voor het afzuigstelsel, en rendementen van 70% voor de ventilator, 90% voor de transmissie en 90% voor de elektromotor. Volgens EN 13779 (NNI 2007) kan bij deze waarden worden uitgegaan van een SPF –Specific Fan Power-(Railio, J. 2007, Brelih Nejc 2012) van $2,64 \text{ kW} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})^{-1}$, bij een debiet van $3,44 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ overeenkomend met een ventilatorvermogen van 9,1 kW.

7.5.2.3 Opwekkingsrendement

Het gemiddeld rendement van de CV ketels is gesteld op 80%, gebaseerd op niet-condenserende ketels. De koudefactor – COP- van de luchtgekoelde koelinstallatie is gesteld op 3,0 inclusief de gerelateerde pompenenergie.

7.5.2.4 Energieverliezen

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 o.a. energieverliezen in luchtbehandelingskasten, traagheid van de klimaatinstallatie, regelstrategie en optimaliseringsregelingen.

De energieverliezen in een klimaatinstallatie worden uitgedrukt in een systeemrendement, in de norm NEN 2916 (NNI 2004) gedefinieerd als de “*Fractie van de opgewekte warmte of koude, die effectief wordt benut*”. Systeemrendementen zijn berekend volgens standaard algoritmes (ISSO 1998) –zie tabel 7.5.2.

7.5.2.5 Conversiefactoren:

Alle berekeningen worden gerelateerd aan primair energiegebruik in kW. Hiervoor zijn de volgende conversiefactoren gehanteerd:

- Elektrische energie 2,5
- Gas 1,0
- Calorische waarde aardgas $9,78 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-3}$ (de zgn. bovenwaarde)

7.5.2.6 Energiegebruiken referentiesituatie

De geraamde energiegebruiken in de referentiesituatie zijn aangegeven in tabel 7.5.2.

Energievraag t.b.v	Gas of Elektrisch	kWh.m ⁻² basis bvo	Rendement		Energiegebruik		
			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 7.5.2 – Jaarlijkse 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 kWh.m⁻² voor *Good Practice* tot 250 kWh.m⁻² voor *Typical* (BRE 2000). De databank van SenterNovem vermeldt voor kantoorgebouwen een gebouw gebonden energiegebruik van gemiddeld 630 MJ.m⁻² overeenkomend met 175 kWh.m⁻² (<http://senternovem.databank.nl>). Het kantoorgebouw van Zomers Buiten uit 1998 kan dus worden aangemerkt als energiezuinig.

7.5.3 Resultaten Stap 1 -Klimaatcascade

Met behulp van het Excel rekenmodel –zie paragraaf 3.x.x zijn voor een luchtdebiet van 12.400 m³.h⁻¹ de volgende prestaties berekend:

- Intredeconditie lucht 28⁰C / 55%RV (Buitenconditie)
- Uittredeconditie lucht 17⁰C / 95%RV
- Waterdebiet 17 m³.h⁻¹
- Koelcapaciteit 200 kW
- Drukopbouw 35 Pa

De drukopbouw in de klimaatcascade is voldoende om de drukverliezen in het lage druk luchtverdeelstelsel ad paragraaf 7.4.1 te compenseren. Voor de lage druk afzuigventilator, die hoofdzakelijk bedoeld is om het drukverlies van de FiWiHex warmtewisselaar te compenseren, is 10% van het oorspronkelijke ventilatorvermogen gereserveerd.

Het pompvermogen ten behoeve van de klimaatcascade is voor een opvoerhoogte van 25m berekend op 1,6 kW en de jaarlijkse pompenergie bij 3.060 h op 4.900 kWh overeenkomend met 1,3 kWh.m⁻². 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 stijgt door het lage temperatuur afgiftesysteem naar ca 82%.

De geraamde effecten van deze stap zijn aangegeven in tabel 7.5.3

Energievraag t.b.v	Gas of Elektrisch	kWh.m ⁻² basis bvo	Rendement		Energiegebruik		
			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 7.5.3 – Jaarlijkse energiegebruiken na stap 1

7.5.4 Resultaten Stap 2 – zonnepaneel

De energieopbrengst van de zonnepaneel is geraamd op basis van tabel 4.5.9/4 in hoofdstuk 4 –zie tabel 7.5.4/1.

Zuid		winter	lente	zomer	herfst	
bruto	kWh.m ⁻²	121,0	162,4	465,5	113,5	
opp.	m ²	431,5	431,5	431,5	431,5	
bruto	kWh.	52212	70076	200863	48975	
rendement	%	0,61	0,49	0,36	0,50	
netto	kWh.	31849	34337	72311	24488	162984
totaal gebouw kWh.						162984
per m ² bvo kWh.						44,05

Tabel 7.5.4/1 – Geraamde jaarlijkse energieopbrengst van de Zonnepaneel[©]

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%. De jaarlijkse energieopbrengst in deze fase bedraagt dan 61262 kWh overeenkomend met 16,6 kWh.m⁻² op bvo basis.

De geraamde effecten van deze stap zijn aangegeven in tabel 7.5.4/2. Hoewel de lucht via de zonnefaçade wordt afgezogen is in de tabel de ventilatorenergie voorlopig gehandhaafd omdat in deze fase de venturi-ejector in het Ventecdak nog niet aanwezig is.

Energievraag t.b.v	Gas of Elektrisch	kWh.m ⁻² .a ⁻¹ basis bvo	Rendement		Energiegebruik		
			Systeem	Opwekking	Gebruik	Conversie	Primair
Warmte	Gas	57	0,85	0,82	81,5	1	81,5
Zonnefaçade	-						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 7.5.4/2 – Energiegebruiken na stap 2

7.5.5 Resultaten Stap 3 –WKO installatie

Voor de geraamde energieopbrengst van de zonnefaçade zie tabel 7.5.4/1. De jaarlijkse energieopbrengst bedraagt nu 101724 kWh overeenkomend met 27,5 kWh.m⁻² 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. Bij een bodemtemperatuur van 20⁰C kan een warmtefactor van ≈ 8,3 worden aangehouden (Bronsema, B. 2000, 2002). Hierdoor kan jaarlijks 30,8 kWh.m⁻² aan het gebouw worden geleverd. Samen met de warmtelevering in stap 2 à 16,6 kWh.m⁻² komt dit overeen met 83% van de warmtevraag ad 57 kWh.m⁻² 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 7.5.5. 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 basis bvo	Rendement		Energiegebruik		
			Systeem	Opwekking	Gebruik	Conversie	Primair
Warmte	Gas	57	0,85	0,82	81,5	1	81,5
Zonnefaçade 2	-	16,6-					16,6-
Zonnefaçade 3	-	27,5-		1,12	30,8-		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 7.5.5 – Jaarlijkse energiegebruiken na stap 3

7.5.6 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 zonne-energie kan worden gerealiseerd overeenkomend met 21,6 kWh.m⁻² op bvo basis. Zie paragraaf 5.4.

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 jaarlijkse energieproductie per m² rotoroppervlak ≈ 190 kWh. Voor 6 actieve turbines bedraagt de jaarlijkse energieproductie ≈ 5.600 kWh overeenkomend met 1,5 kWh.m⁻² op bvo basis. Zie paragraaf 5.3.

Het is niet waarschijnlijk dat met dergelijke geringe opbrengsten het opwekken van windenergie in het onderhavige gebouw rendabel is.

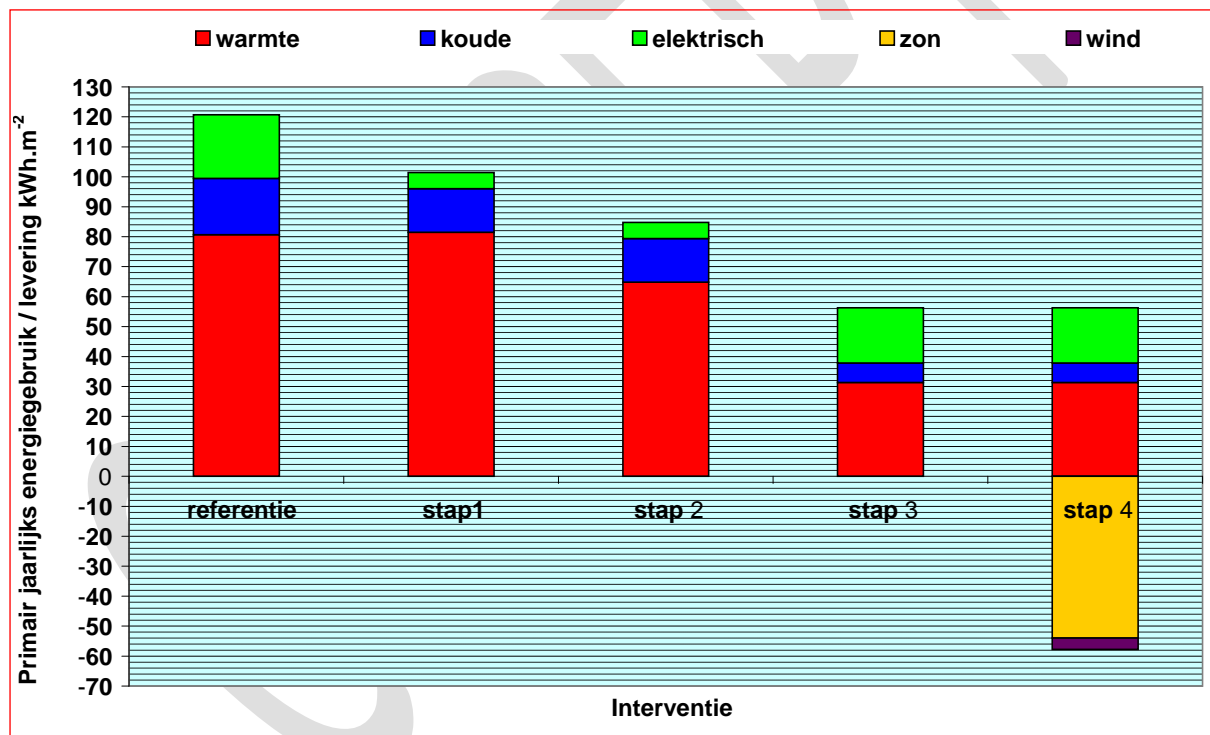
De geraamde effecten van deze stap zijn aangegeven in tabel 7.5.6. Het gebouw is hiermee ook zonder windenergie energieneutraal.

Energievraag t.b.v	Gas of Elektrisch	kWh.m ⁻² basis bvo	Rendement		Energiegebruik		
			Systeem	Opwekking	Gebruik	Conversie	Primair
Warmte	Gas	57	0,85	0,82	81,5	1	81,5
Zonnefaçade 2	-	16,6-					16,6-
Zonnefaçade 3	-	27,5-		1,12	30,8-		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
Zonne-energie					-21,6	2,5	54,0-
Windenergie					-1,5	2,5	3,8-
Totaal							5,6-

Tabel 7.5.6 – Jaarlijkse energiegebruiken na stap 4

7.5.7 Overzichtsgrafiek

De resultaten van de analyses zijn in figuur 7.5.7 weergegeven.



Figuur 7.5.7 – Primair jaarlijks energiegebruik referentiesituatie en na interventies in 4 stappen

7.6 Gedetailleerde energieprestatie analyse

7.6.1 ESP-r simulaties

ESP-r simulatiemodellen zijn ontwikkeld voor de zonnefaçade - zie paragraaf 4.3.4 en de klimaatcascade - zie paragraaf 3.xx.

Voor het Ventecdak is met behulp van CFD 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 - zie paragraaf 2.3.4. De hiermee te berekenen Cp-waarde kan in het ESP-r model worden ingevoerd.

Met behulp van een geïntegreerd ESP-r model van het gebouw is door specialisten van de Technische Universiteit Eindhoven een beperkte energieprestatie simulatie uitgevoerd (Hensen, J. et al 2011). Evenals voor de basale analyse ad paragraaf 7.5 is uitgegaan van het referentiejaar NEN 5060:2008.

Het ESP-r model omvat alleen de effecten van de klimaatcascade en de zonnefaçade op het energiegebruik. De KT en LT warmteopslag zijn niet mee gemodelleerd, evenmin als de invloed van de klimaatplafonds op het warmtegebruik en de energieopbrengsten van zon en wind in het Ventecdak. De warmtefactor (COP) van de warmtepomp is gesteld op 5.

7.6.2 Resultaten van de simulaties

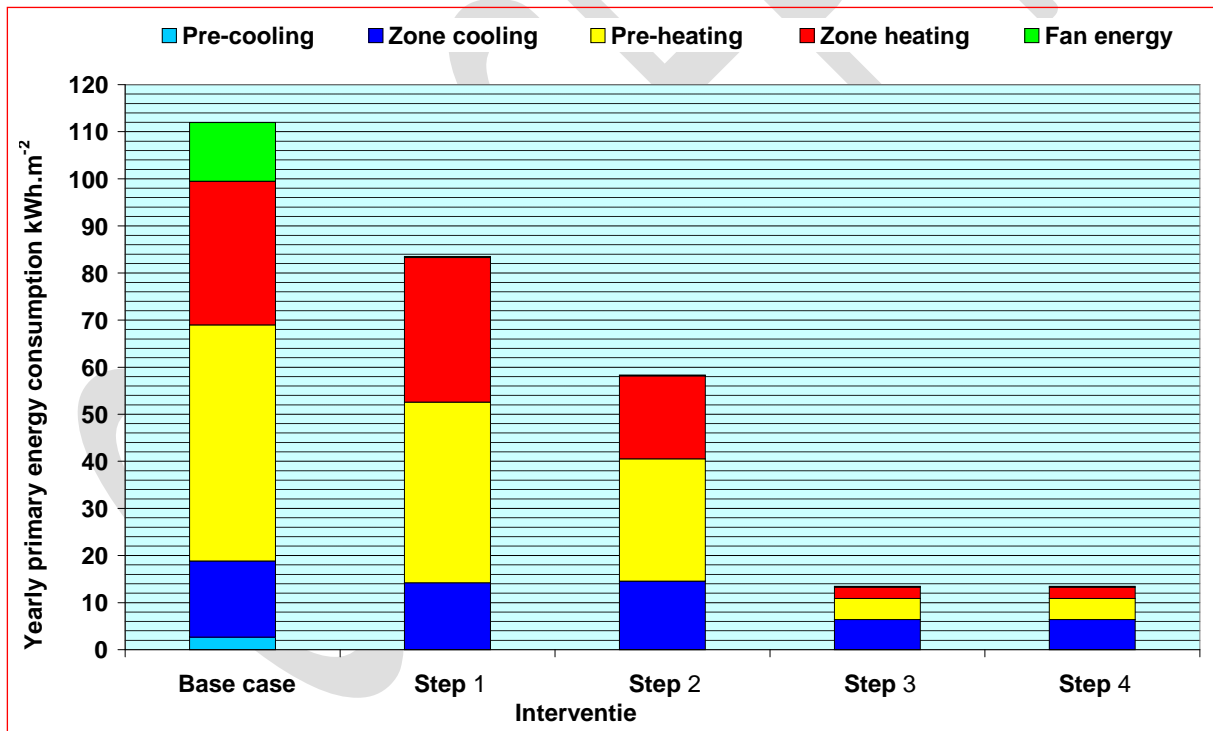
De resultaten van de ESP-r simulaties zijn weergegeven in figuur 7.6.2. In deze grafiek is onderscheid gemaakt tussen energiegebruik voor pre-conditionering van de lucht (pre-cooling en pre-heating) en voor ruimtekoeling (zone-cooling) en ruimteverwarming (zone-heating).

Stap 1 laat zien dat de ventilatorenergie tot nul is teruggebracht. Dit is te danken aan het lage druk luchtdistributiesysteem via de plafondruimte en de drukopbouw in de klimaatcascade. Deze zorgt ook voor reductie van het energiegebruik voor pre-conditionering van de lucht.

Stap 2 laat de verdere reductie van het warmteverbruik zien door de benutting van zonne-energie uit de zonnefaçade in combinatie met korte termijn warmteopslag.

Stap 3 maakt de grote invloed van het WKO systeem in combinatie met een warmtepomp zichtbaar.

Stap 4 laat zien dat het Ventecdak (zonder PV-folie en windturbines) nauwelijks invloed heeft op het energiegebruik.



Figuur 7.6.2 – Primair energiegebruik referentiesituatie en na interventies in 4 stappen volgens ESP-r

7.6.3 Vergelijking basale en ESP-r energieprestatie analyse

Een opvallend verschil tussen de basale en de ESP-r energieprestatie analyse is het jaarlijks energiegebruik na stap 3: $\approx 54,2 \text{ kWh.m}^{-2}$ in figuur 7.5.7 versus $\approx 13,5 \text{ kWh.m}^{-2}$ in figuur 7.6.2. Het verschil zit grotendeels in de berekening van het warmteverbruik.

Mede gezien het weinig toegankelijke karakter van het ESP-r model voor de klimaatingenieur is er van afgezien een nauwkeurige analyse te maken van de verschillen. Beide methoden leveren een aanzienlijk reductie van het energiegebruik op.

8 CONCLUSIES

8.1 Het Ventecdak

Het Ventecdak is een typerende expressie van Klimaat Responsieve Architectuur⁷⁴. Het maakt op een efficiënte wijze gebruik van de wind als drijvende kracht voor ventilatie, zowel luchttoevoer als luchtafvoer, en kan daarmee een aanzienlijke bijdrage leveren aan een *Natuurlijke Airconditioning* van gebouwen (hoofdstuk 2).

Het opwekken van onderdruk ten behoeve van de luchtafvoer met behulp van een venturi spreekt het meest tot de verbeelding en is tevens het gecompliceerdste deel van het onderzoek. Volgens de methode van modelleren → simuleren → valideren is dit deel van het Ventecdak geoptimaliseerd. Een basaal model van de venturi-ejector is in een productief samenspel van numerieke simulaties en windtunnelonderzoek ontwikkeld naar een gevalideerd model voor de dimensionering en de prestatieberekening (par.2.3.4 en 2.4.4).

Verscheidene wetenschappelijke publicaties, waarvan één zelfs de prestigieuze Best Paper Award van Buildings and Environment kreeg, hebben het Ventecdak ook internationaal onder de aandacht gebracht (Hooff, T.van et al.2011).

Het opwekken van overdruk voor de luchttoevoer werd aanvankelijk als essentieel beschouwd voor de werking van het *Earth, Wind & Fire* concept. Bij de ontwikkeling van de Klimaatcascade bleek echter dat hierin voldoende druk kan worden opgebouwd om het drukverlies van het luchtdistributiesysteem te compenseren (par.3.2.15 en 3.5.5). Mede om deze reden is het onderzoek verbreed met de integratie van windturbines in de overdrukruimte van het Ventecdak, die tezamen met een PV dakbedekking elektrische energie produceren en daardoor bijdragen aan de energieneutraliteit van gebouwen (hoofdstuk 5).

De luchtkwaliteit in een gebouw wordt in hoge mate bepaald door het ventilatiesysteem en de kwaliteit van de buitenlucht. Bij het *Earth, Wind & Fire* concept wordt de ventilatielucht vanaf het dakniveau toegevoerd, waar de luchtkwaliteit normaliter optimaal is (par.2.1.7). Het Ventecdak is verder een intrinsiek veilig concept om kortsluiting tussen verse en gebruikte ventilatielucht te voorkomen (par.1.3.3). Eventueel noodzakelijke reiniging van de ventilatielucht kan worden gerealiseerd met behulp van elektrostatische filters in de overdrukruimte (par.3.5.8).

De aerodynamische prestaties van het Ventecdak zijn afhankelijk van de windsnelheid op dakhoogte, die in hoofdzaak wordt bepaald door de hoogte van het gebouw en door de omliggende bebouwing. Met behulp van windtunnelonderzoek zijn randvoorwaarden geformuleerd voor optimalisering van het Ventecdak in een stedenbouwkundige context (hoofdstuk 6).

In een case study is aangetoond dat het aanbrengen van een Ventecdak op bestaande gebouwen een reële optie is (hoofdstuk 7).

Het Ventecdak is een dominant architecturaal element en de architect daarom heeft voor het ontwerp een grotere vrijheid nodig dan de tot dusver onderzochte dakvormen hem bieden. Daarom is vervolgonderzoek nodig voor daken van verschillende geometrie en vormen (par. 2.3.8).

Samenvattend kan worden geconcludeerd dat het Ventecdak, als geïntegreerde benadering tussen Architectuur / Constructies en Klimaatontwerp, niet alleen een belangrijke bijdrage kan leveren aan een *Natuurlijke Airconditioning*, maar ook aan de energieneutraliteit van gebouwen, in het geval van de case study zelfs voor 100% (par.7.5 en 7.6). Voor het ontwerp zijn gevalideerde ontwerptools en rekenmodellen beschikbaar (par.2.3.4 en 2.5.3). De hypothese is voor dit deel van het *Earth, Wind & Fire* concept dan ook bewezen.

8.2 De Klimaatcascade

Tenzij toegepast voor de koeling van atria is de Klimaatcascade een architecturaal onopvallend element. Voor de binnenklimaatcondities daarentegen is de Klimaatcascade een essentieel bouwdeel, niet alleen voor de conditionering van de ventilatielucht maar ook voor het opwekken van positieve drukken ten behoeve van de luchtdistributie (hoofdstuk 3).

⁷⁴ Zie paragraaf 1.2.5

De psychometrische en aerodynamische prestaties van de Klimaatcascade zijn onderzocht op basis van modelleren → simuleren → valideren. De interactie tussen lucht en miljoenen vallende waterdruppels van verschillende grootte en valsnelheid is een gecompliceerd proces, waarvoor in de wetenschappelijke literatuur nauwelijks aanknopingspunten te vinden zijn. In een intensief samenspel van basale en gedetailleerde modellering, gevalideerd met metingen in een fysieke testopstelling, is een betrouwbaar rekenmodel ontwikkeld voor de warmte- en stofoverdracht en de prestatieberekening van een Klimaatcascade (par.3.2.16 en 3.3.13).

Aanvankelijk was het onderzoek alleen gericht op het gebruik van de Klimaatcascade voor koeling van de ventilatielucht in de zomerperiode. Gaandeweg is het onderzoek uitgebreid naar de andere seizoenen, waardoor tevens gedurende het hele jaar de aerodynamische prestaties zouden kunnen worden benut (par.3.5.6). Essentieel voor het onderzoek was de fysieke testopstelling waarin de psychometrische prestaties ook onder extreme zomer- en wintercondities konden worden gemeten (par.3.4.1). Hiermee werd het bewijs geleverd dat een Klimaatcascade een robuust en universeel bouwdeel kan zijn voor koeling/droging en verwarming/bevochtiging van ventilatielucht in gebouwen in alle jaargetijden (par.3.4.9).

Het basale rekenmodel is nodig om een indicatie van het benodigde sproeispectrum te kunnen geven. Op basis hiervan zijn door een externe specialist de sproeiers voor de fysieke testopstelling geselecteerd en geavanceerde numerieke simulaties uitgevoerd (par. 3.3). Het basale rekenmodel en het numerieke simulatiemodel zijn beide in een fysieke testopstelling gevalideerd. Beide modellen blijken de psychometrische en aerodynamische prestaties van een Klimaatcascade met een hoge mate van nauwkeurigheid te kunnen voorspellen (par.3.4.9).

Op basis van de fysica achter het basale rekenmodel is een dynamisch simulatiemodel in de ESP-omgeving ontwikkeld, waarmee de energieprestaties van een Klimaatcascade in een referentiejaar kunnen worden voorspeld (par.3.3.13).

De koudefactor (COP) van een Klimaatcascade is afhankelijk van de water/luchtfactor en van de hoogte van het gebouw en kan variëren van 50 →15 bij gebouwen van 4 →20 verdiepingen. Een voor de hand liggende variant op het concept is de uitvoering van de Klimaatcascade in meerdere gestapelde secties, waardoor de pompvermogens kunnen worden beperkt. Dit maakt bij een gebouw van 20 verdiepingen een COP in de orde van 100 mogelijk, hetgeen de energiezuinigheid van het concept onderstreept (par.3.5.4.5). Deze variant is overigens niet uitgewerkt.

De aerodynamische drukopbouw in een Klimaatcascade is afhankelijk van de water/luchtfactor en varieert met de seizoenen (par.3.2.15). Omdat ook de druk in de stijgschacht per verdieping verschilt moet de luchtverdeling in het gebouw drukonafhankelijk worden uitgevoerd met behulp van automatisch geregelde kleppen per verdieping (par.3.5.5).

Enkele risicofactoren die het gebruik van een Klimaatcascade met zich zou kunnen brengen zijn onderzocht. Voor de ontwikkeling van legionellabacteria en andere ziektekiemen is de Klimaatcascade door de lage watertemperaturen intrinsiek veilig (par.3.6.2 en 3.6.3). Condensrisico op uitwendige scheidingsconstructies is bij een correcte uitvoering van thermische bruggen uitgesloten (par.3.6.4).

Toepassing van een Klimaatcascade brengt ook enkele potentieel beschermende factoren voor het binnenmilieu met zich mee. Een voldoende vochtigheidsgraad van de binnenlucht is ook in de stookperiode gewaarborgd (par. 3.6.2). Verschillende verontreinigingen in de buitenlucht worden in de sproeizone geabsorbeerd, waardoor de kwaliteit van de binnenlucht, vooral in periodes van smogvorming, wordt verbeterd (par. 3.5.8.2).

In een case study is aangetoond dat het aanbrengen van een Klimaatcascade in bestaande gebouwen een reële optie is (hoofdstuk 7).

Samenvattend kan worden geconcludeerd dat de Klimaatcascade een belangrijke bijdrage kan leveren aan een *Natuurlijke Airconditioning* en aan de energieneutraliteit van gebouwen. Voor het ontwerp zijn gevalideerde ontwerptools en rekenmodellen beschikbaar. De hypothese is dan ook voor dit deel van het Earth, Wind & Fire concept bewezen.

8.3 De Zonneschoorsteen

Evenals het Ventecdak is de Zonneschoorsteen een typerende expressie van Klimaat Responsieve Architectuur⁷⁵. Door gebruik te maken van de zon als drijvende kracht voor het afzuigen van ventilatielucht, kan een essentiële bijdrage worden geleverd aan een *Natuurlijke Airconditioning* van gebouwen. Van groter belang is echter de functie van de Zonneschoorsteen als absorber van zonne-energie die kan worden benut voor de verwarming van gebouwen. Hiermee kan een belangrijke bijdrage worden geleverd aan de energieneutraliteit van gebouwen (hoofdstuk 4).

De zonneschoorsteen is een warmtewisselaar waarin de warmteoverdracht van zonnewarmte op de doorstromende lucht een belangrijke prestatie-indicator is. Op basis van uitgebreid literatuuronderzoek (par.4.2.4) en met behulp van CFD simulaties (par.4.3.2) en metingen in de testopstelling (par.4.4.4) is gezocht naar een adequaat algoritme voor de bepaling van de hiervoor bepalende convectieve warmteoverdrachtscoëfficiënt. Deze zoektocht heeft geen bevredigend resultaat opgeleverd, maar verrassenderwijs heeft dit nauwelijks gevolgen voor de energieprestatie. Het hiervoor verantwoordelijke compensatiemechanisme werd pas in een laat stadium onderkend (par. 4.2.4.4).

Met behulp van numerieke CFD simulaties is getracht op microniveau inzicht te krijgen in de luchtstromingen in een zonneschoorsteen. Vooral door het ontbreken van een adequaat algoritme voor de berekening van de convectieve warmteoverdrachtscoëfficiënt hebben deze simulaties slechts povere resultaten opgeleverd (par.4.3.3).

Voor de warmteoverdracht van zonnestraling op de absorber en de daardoor tot stand komende luchtstroming is een basaal thermisch model en een stromingsmodel gemaakt. Op basis hiervan werden de specificaties voor de fysieke testopstelling opgesteld (par.4.2.8).

In deze testopstelling (par.4.4.1) zijn gedurende vier seizoenen metingen uitgevoerd van temperaturen en luchtsnelheden als functie van de stralingsflux van de zon en de buitentemperatuur. De metingen gaven een goed beeld van de gecompliceerde thermodynamische processen in een zonneschoorsteen (par.4.4.2).

Een dynamisch simulatiemodel in ESP-r werd gekalibreerd en gevalideerd op basis van de meetresultaten in de fysieke testopstelling. De bandbreedte van de onzekerheidsmarges die de voorspellingen beïnvloeden is $\pm 20\%$, hetgeen gezien het gecompliceerde thermodynamische proces in een zonneschoorsteen en de problematiek van de metingen een redelijke marge wordt geacht.

Op basis van het ESP-r model is een parametrische analyse gemaakt waarmee na statistische bewerking de relatieve invloed van de verschillende ontwerpvariabelen op de prestatie-indicatoren kon worden gedefinieerd. Deze geavanceerde methode dient voor toepassing in de ingenieurspraktijk nog verder te worden ontwikkeld (par.4.4.8).

Het basale thermisch model en het stromingsmodel zijn gevalideerd aan de hand van metingen in de testopstelling, en blijken nauwkeurig genoeg te zijn om als basis te dienen voor een rekenmodel voor de praktijk (par.4.4.5).

Het is de architect die in de conceptuele fase de basis legt voor een succesvolle architectonische integratie van een zonneschoorsteen in een gebouw. Voor deze intuïtieve en interactieve ontwerpfase is op basis van de basale modellering een eenvoudig en gebruiksvriendelijk rekenmodel ontwikkeld, dat met een muisklik architectonische varianten en de energetische consequenties daarvan in beeld brengt (par.4.5.10).

Het thermisch rendement van een zonneschoorsteen, gedefinieerd als de verhouding van de aan de lucht afgegeven warmte en de opvallende zonnestraling wordt hoofdzakelijk bepaald door de eigenschappen van de glaswand. Bij een goede keuze mag een gemiddeld jaarrendement van rond 60% worden verwacht (par.4.1.5 en 4.5.6).

De beste energieprestatie van een zonneschoorsteen wordt gerealiseerd bij oriëntatie op het Zuiden, maar de verschillen tussen Zuidoost en Zuidwest zijn gering. Bij een meervoudig georiënteerde

⁷⁵ Zie paragraaf 1.2.5

zonneshoorsteen, waarvan verschillende voorbeelden worden gegeven, is de thermische trek over de dag gelijkmatiger (par.4.5.7).

De energieprestatie van een zonneshoorsteen is evenredig met de breedte van de glaswand. De hoogste energieprestatie wordt geleverd door een Zonnefaçade, een gevelbedekkende zonneshoorsteen (par.4.1.10). Deze is toegepast in de case study, waarmee tevens is aangetoond dat toepassing van het concept bij bestaande gebouwen een reële optie is (hoofdstuk 7).

De energieprestaties van een zonneshoorsteen worden mede bepaald door eventuele schaduwwerking van omliggende gebouwen. Op basis van een theoretische analyse wordt geconcludeerd dat bij een normaal te achten stedenbouwkundige context geen problemen te verwachten zijn (hoofdstuk 6).

In voorjaar en najaar kan zonnewarmte voor een deel rechtstreeks of via korte termijn warmteopslag voor de verwarming van gebouwen worden benut. Voor de zomermaanden is een lange termijn opslag nodig om de warmte in het stookseizoen te kunnen gebruiken. Enkele systemen voor warmteopslag worden summier conceptueel toegelicht (par.4.5.8).

Aangetoond wordt dat met een zonneshoorsteen een substantieel deel van de jaarlijkse warmtebehoefte van een gebouw kan worden gedekt, en dat bij bepaalde randvoorwaarden met een zonnefaçade in principe in de gehele warmtebehoefte kan worden voorzien (par.4.5.9). Dit geldt voor energiezuinige gebouwen met een jaarlijks warmteverbruik van ca. 50 kWh.m^{-2} .

Samenvattend kan worden geconcludeerd dat de zonneshoorsteen een belangrijke bijdrage kan leveren aan een *Natuurlijke Airconditioning* en aan de energieneutraliteit van gebouwen. Voor het ontwerp zijn gevalideerde ontwerptools en rekenmodellen beschikbaar. De hypothese is dan ook voor dit deel van het Earth, Wind & Fire concept bewezen.

8.4 Energieopwekking Ventecdak

De belangrijkste functie van het Ventecdak is het afzuigen van lucht via de venturi-ejector als de zonneshoorsteen onvoldoende thermische trek levert. De positieve winddruk werd aanvankelijk nodig geacht voor de luchttoevoer, maar lopende het onderzoek bleek dat de drukopbrengst van de Klimaatcascade hiervoor normaliter voldoende is. De functie van het Ventecdak is derhalve uitgebreid met energieopwekking, waardoor tevens wordt voldaan aan de tweede voorwaarde van de EPBD Recast (par.1.1.2)

Energieopwekking wordt in het *Earth, Wind & Fire* concept gerealiseerd met behulp van zon en wind. In de overdrukruimte van het Ventecdak worden hiervoor windturbines geïnstalleerd en het bovendak wordt voorzien van dunne PV folie (hoofdstuk 5). De profielen van de beschikbare windenergie en zonne-energie zijn over de seizoenen gerekend redelijk complementair, waardoor de gecombineerde toepassing een interessante optie is (par.5.5.8).

Er is een toenemende maatschappelijke weerstand tegen windturbines, die zijn oorsprong vindt in het gevaar dat ze opleveren voor vogels, de geluidsoverlast en slagschaduw voor omwonenden en de ervaren "*horizonvervuiling*". Met windenergie in het Ventecdak zijn windturbines deel van de technische gebouwinstallaties. Door de situering binnen het gebouw kunnen deze problemen eenvoudiger worden opgelost (par.5.3.1).

In tegenstelling tot de thermische en aerodynamische modellering van de zonneshoorsteen, het Ventecdak en de Klimaatcascade zijn de energetische analyses niet gevalideerd. Nader onderzoek met behulp van CFD simulaties en metingen in de windtunnel is nodig om de berekeningen met betrekking tot windenergie te valideren en het energieconcept voor algemene toepassingen te optimaliseren (par.5.3.9).

8.5 Case study

De jaarlijkse nieuwbouw van kantoorgebouwen in Nederland omvat maar een klein percentage van de aanwezige voorraad. Toepassing van het *Earth, Wind & Fire* concept is daarom vooral van belang bij grote renovaties van bestaande gebouwen.

Om de mogelijkheid hiervan te onderzoeken is een *case study* gemaakt waarin een bestaand kantoorgebouw virtueel wordt uitgevoerd met *Natuurlijke Airconditioning* volgens het *Earth, Wind & Fire* concept (hoofdstuk 7).

De *case study* dient enerzijds als ontwerp oefening, anderzijds om de energieprestaties van het concept in een reëel gebouw te evalueren. Uitgangspunt hierbij was dat architectonisch, bouwkundig en installatietechnisch het ontwerp niet alleen virtueel maar ook reëel zou moeten kunnen worden gerealiseerd. Het ontwerp is daarom uitgewerkt op VO (Voorlopig Ontwerp) niveau.

Een basale energieprestatie analyse wijst uit dat het gebouw na deze virtuele interventie energieneutraal is (par.7.5). Een analyse met behulp van ESP-r simulaties geeft een nog gunstiger beeld (par.7.6).

CONCEPT

9 REFERENTIES

9.1 Het onderzoek

Inleiding – Paragraaf 1.1

- Ackermann, Marsha E. 2002. *Cool Comfort – America's Romance with Air-Conditioning*. Smithsonian Institute ISBN 1-58834-040-6.
- Baird, George 2001. *The Architectural Expression of Environmental Control Systems*. Spon Press London, ISBN 0-419-24430-1
- Banham, Reyner 1984. *The Architecture of the Well-tempered Environment*. The University of Chicago Press, Chicago 60637. ISBN 0-226-03698-7
- Bouwens, Claudia 2011. *Energiezuinige woningen ontwikkelen: De Beste Basis*. Publicatie NEPROM, Lente-akkoord.
- Bronsema, Benjamin 2003. *Een duurzame toekomst voor de installatietechniek*. Themadag TU Delft – Duurzame installaties in gebouwen – Delft
- Cooper, Gail 1998. *Air-conditioning America. Engineers and the Controlled Environment 1900 – 1960*. John Hopkins University Press, Baltimore, Maryland. ISBN 0-8018-5716-3
- ECBCS-Annex 53, 2012. *Berekende energieprestatie wordt in praktijk niet gehaald*. Expertmeeting 25 april 2012 Rotterdam. <http://www.duurzaamgebouwd.nl/society/20120501>
- EP en EC 2010. *Energy Performance of Buildings Directive Recast*. http://www.ecee.org/buildings/EPBD_Recast/
- Groes, L. 1995. *The European IAQ – Audit Project – A Statistical Analysis of Indoor Environmental Factors*. Laboratory of Heating and Air-Conditioning – Technical University of Denmark,
- Guerra-Santin, Olivia en Itard, Laure 2012. *The effect of energy performance regulations on energy consumption*. Energy Efficiency – Springer Verlag Published online 08 February 2012. DOI 10.1007/s12053-012-9147-9
- Guerra-Santin, Olivia en Itard, Laure 2010. *Verwarmingsenergie: Hoe groot is de invloed van bewoners?* TVVL Magazine | 04 | 2010.
- IEA ECBCS-Annex 44, 2009. *Expert Guide Part 2 Responsive Building Elements*. Exco Review Draft June 2009.
- Juricic, S.M.M. 2012 et al. *Robustness of a building – Relationship between building characteristics and energy use and health and comfort perception*. Proceedings of 7th Windsor Conference: The changing context of comfort in an unpredictable world, Windsor UK, 12 – 15 April 2012.
- Leaman, A. et al. 1993. *Buildings design, complexity and manageability*. Facilities 11 (9) (1993) 16 – 27.
- 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>
- Leyten, Joe L. et al. 2006. *Robustness of buildings and HVAC systems as a hypothetical construct explaining differences in building related health and comfort symptoms and complaint rates*. Energy and Buildings 38 (2006) 701 707.
- Luscuere, P.G. 1992. *Wat niet weet, wat niet deert.....? Gebouwinstallaties, gevolg of onderdeel van architectonische vormgeving?* Intreerede 21 augustus 1992, Faculteit der Bouwkunde van de Technische Universiteit Delft.
- Mendell, M.J. et al. 1990. *Consistent pattern of elevated symptoms in air-conditioned office buildings: A reanalysis of epidemiologic studies*. American Journal of Public Health 80 (10) (1990) 1193 – 1199.
- Mendell, M.J. 2000. *Ventilation systems and building related symptoms: An epidemiological perspective*. NIOSH, USA, presented at Healthy Buildings Conference 2000.
- Olesen, B. et al. 2010. *Productivity and Indoor Air Quality*. International Centre for Indoor Environment and Energy -Technical University of Denmark
- 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.

- Roelofsen, P. 2010. *Binnenmilieu en productiviteit*. ISSO Seminar 8 april 2010. <http://www.isso.nl>
- Seppanen, O. et al. 2002. *Association of system ventilation type with SBS symptoms in office workers*. Indoor Air 11 (2) (2002) 98 - 112
- Seppanen, O. 2012. *Effect of EPBD on future ventilation systems*. REHVA Journal – February 2012.
- Settels P.J.M. (ING) 2009. *Productiviteit/Comfort/Energie*. TNO Symposium “Beleef het Productief Kantoor” 23 april 2009.
- Shaviv, Edna 2011. *Do current environmental assessment methods provide a good measure of sustainability? Or what should be a good measure for Green Building Standard?* PLEA 2011 - 27th Conference on Passive and Low Energy Architecture, Louvain-la-Neuve, Belgium, 13-15 July 2011
- Teeuw, B. 1993. *Sick Building Syndrome – the role of airborne microorganisms and endotoxins*. University of Utrecht, The Netherlands 1993.
- Verheijen, A.P.J.M. 2002. *Het schijnbaar onmogelijke en omgaan met de twijfel*. Inaugurele rede 22 februari 2002, Faculteit der Bouwkunde van de Technische Universiteit Delft.
- Will, H.M. 1999. *The First Century of Air-conditioning*. ASHRAE. ISBN 1-883413-76-1.
- Wittchen Kim B. en Englund Thomsen, Kirsten 2012. *Introducing cost-optimal levels for energy requirements*. REHVA Journal – March 2012.
- Zweers, T. et al. 1992. *Health and Indoor Climate Complaints of 7043 Office Workers in 61 Buildings in The Netherlands*. Indoor Air 2 (1992) 127 - 136.

Routes naar een energieneutraal en duurzaam gebouw –Paragraaf 1.2

- Brown, G.Z. 2009. *Pleasure and Performance*. Proceedings PLEA 2009 – 26th Conference on Passive and Low Energy Architecture, Quebec City, 22-24 June 2009.
- Chen, Yanti et al. 2011. *What is the Relationship between Design Excellence and Building Performance?* 27th International PLEA conference, 13 – 15 July 2011, Louvain Le Neuve.
- Givoni, Baruch 1994. *Passive and Low Energy Cooling of Buildings*. John Wiley & Sons, Inc. ISBN 0-471-28473-4
- Gwilliam, J.A. et al. (2011). *Assessment of Sustainable Buildings: A Case for Enabling Post Occupancy Verification*. 27th International PLEA conference, 13 – 15 July 2011, Louvain Le Neuve
- Hamzah, T.R. & Yeang Sdn. Bhd. 1994. *Bioclimatic Skyscrapers*. Ellipsis London Limited. ISBN 1-899858-70-9
- Hawkes, Dean en Forster, Wayne (2002). *Architecture, Engineering and Environment*. Laurence King Publishing Ltd London. ISBN 1 85669 322 8.
- IEA ECBS Annex 44, 2011. *Integrating Environmentally Responsive Elements in Buildings*. <http://www.ecbs.org/annexes/annex44.htm>
- Olgyay, Victor 1973. *Design With Climate – Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism*. Princeton University Press, Princeton, New Jersey.
- Shaviv, Edna 2011. *Do current environmental assessment methods provide a good measure of sustainability? Or what should be a good measure for Green Building Standard?* PLEA 2011 - 27th Conference on Passive and Low Energy Architecture, Louvain-la-Neuve, Belgium, 13-15 July 2011
- 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>
- Vitruvius, 85-20 v.Chr. *De Architectura*. Vertaling Ton Peters 1997 *Handboek Bouwkunde*. Atheneum - Polak & Van Gennep 1998. ISBN 90 253 5868 / NUGI 301,167
- Zeiler, W. 2011. *Sustainable architecture and sustainable design assessment tools*. 27th International PLEA conference, 13 – 15 July 2011, Louvain Le Neuve.

Het Earth, Wind & Fire concept – Paragraaf 1.3

- 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.
- Hitchins, J. et al. 2002. *Concentrations of sub micrometer particles from vehicle emissions near a major road*. Atmospheric Environment 34 (2000) pp 51-59.

- Luria, M. et al. 1984. *Comparison of air quality data obtained from roof top, side walk and suburban areas*. Environmental Monitoring and Assessments 5 (1985) pp 249-254
- Mendell, M.J. et al. 2008. *Risk factors in heating, ventilating and air-conditioning systems for occupant symptoms in US office buildings: the US EPA BASE study*. Indoor Air 2008: 18: pp 301-316. Atmospheric Environment 33 (1999) pp 1261-1274
- Rubino, F.M. et al. 1998. *Height Profile of some Air Quality Markers in the Urban Atmosphere Surrounding a 100 m Tower Building*. Atmospheric Environment Vol. 32 No. 20 (1998) pp 3569-3580.
- Verbeeck, Griet et al. 2011. *Renovation versus demolition of old dwellings: comparative analysis of costs, energy consumption and environmental impact*. 27th International PLEA conference, 13 – 15 July 2011, Louvain Le Neuve

Demarcaties – Paragraaf 1.4

- IEA ECBS Annex 44, 2011. *Integrating Environmentally Responsive Elements in Buildings*. <http://www.ecbs.org/annexes/annex44.htm>

Het onderzoek – Paragraaf 1.7

- Bronsema, B. 2007. *Projectplan Earth, Wind & Fire – Naar nieuwe concepten voor de klimaatregeling van gebouwen*. Online beschikbaar.

Methoden – Paragraaf 1.8

- ASHRAE 2001. *Handbook Fundamentals SI Edition*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, Inc. Atlanta, GA. ISBN 1-883413-88-5
- ASHRAE 2000. *Handbook Systems and Equipment SI Edition*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, Inc. Atlanta, GA. ISBN 1-883413-88-5
- Blocken, B. 2010. *CFD voor een gezonde en comfortabele stedelijke omgeving*. BOUWFYSICA 1, 2010 pp 16-19
- Blocken, B. et al. 2010. *Application of CFD in building performance simulation for the outdoor environment: an overview*. Journal of Building Performance Simulation, Vol. 4, No. 2, June 2011, 157–184
- Hensen, Jan 2003. *Simulating Building Performance: Just how useful is it?* REHVA Journal 3/2003
- Hensen, Jan 2004. *Gebouwprestaties(t)imulatie. Rede uitgesproken op 14 november 2003 ter gelegenheid van de intrede als hoogleraar*. TVVL magazine 3/2004
- Hooff, T. van and Blocken, B. 2010. *Coupled urban wind flow and indoor natural ventilation modelling on a high-resolution grid: A case study for the Amsterdam ArenA stadium*. Environmental Modelling & Software Volume 25, Issue 1, January 2010, Pages 51-65
- ISSO 2002. *Handboek Installatietechniek*. Stichting ISSO– Rotterdam. ISBN 90-5044-094-0
- Oldenburg Industrieverlag 2010. *Recknagel Sprenger Schramer. Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik, 74e druk*. ISBN 978-3-8356-3134-2

9.2 Het Ventecdak

Ventilatie en Wind –Paragraaf 2.1

- Allard, Francis (editor) 1998. *Natural Ventilation in Buildings*. James & James (Science Publishers) Ltd. ISBN 1 873936 72 9.
- ASHRAE 2001. *Airflow around buildings*. 2001 ASHRAE Handbook Fundamentals Chapter16. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
- Bronsema, B. 1996. *Natuurlijke ventilatie van kantoorgebouwen – Een goed idee?* TVVL Magazine 9/96, pp 42-46.
- Bronsema, B. 2001. *Hybrid Ventilation: Our First Choice*. CLIMA 2000. 7th REHVA WORLD CONGRESS Napoli 15 – 18 September 2001.
- Bronsema, B. 2003. *Een nieuwe school - Kan het ook beter? (2)*. TVVL magazine 1/2003, pp 40-46
- Bronsema, B. 2005. *Een nieuwe school - Kan het ook beter? (3)*. TVVL magazine 10/2005, pp 60 – 65

- Bronsema, B. 2012. *Onderzoeksrapport "Earth, Wind & Fire" deel (II) Onderzoek Natuurlijke, Wind en het Ventecdak*".
- Bronsema, B. 2005. *Bij milieucatastrofes en bio-terreur – De Klimaatinstallatie: Vriend of Vijand?*(2). TVVL Magazine 12/2005. www.bronconsult.org.
- Bronsema, B. 2005. *Environmental disasters and bio-terrorist attacks. Can buildings protect us against airborne pollutants?* REHVA Journal 1-2/2005. www.bronconsult.org.
- Costola, D. et al. 2009. *Overview of pressure coefficient data in building energy simulation and airflow network programs*. Building and Environment, 44 (10), 2027-2036.
- Ellefsen, R. 1990. *Mapping and Measuring Buildings in the Canopy Boundary Layer in Ten U.S. Cities*. Energy and Buildings 15 – 16 (1990-1991) pp 1025 – 1049.
- Hove, van L.W.A. 2011. *Exploring the Urban Heat Island Intensity of Dutch Cities*. Workshop Manchester Architecture Research Centre (MARC), 23-24 June 2011 at the University of Manchester
- IEA International Energy Agency 2007. ANNEX 44 - Integrating Environmentally Responsive Elements in Buildings. *State-of-the-art Review Vol.1 State-of-the-Art Report*. www.civil.aau.dk/Annex44
- IEA International Energy Agency 2007. ANNEX 44 - Integrating Environmentally Responsive Elements in Buildings. *State-of-the-art Review Vol.2A Responsive Building Elements*. www.civil.aau.dk/Annex44
- IEA International Energy Agency 2007. ANNEX 44 - Integrating Environmentally Responsive Elements in Buildings. *Expert Guide Part 2- Responsive Building Elements*. www.civil.aau.dk/Annex44
- Jamriska, M. et al. 1999. *Relation between Indoor and Outdoor Exposure to Fine Particles near a Busy Arterial Road*. Indoor Air 1999: 9: pp 75 – 84.
- Knoll, B. et al. 1996. *Pressure Coefficient Simulation Program*. Air Infiltration Review Volume 17, No 3, Juni 1996. www.aivc.org/Air/17_3/pcsim.html
- Kolokotroni, Maria et al. 2010. *A validated methodology for the prediction of heating and cooling energy demand for buildings within the Urban Heat Island: Case study of London*. Solar Energy Volume 84, Issue 12, December 2010, pp 2246-2255
- Liddament, Martin W – 1996. *A Guide to Energy Efficient Ventilation*. AICV – Air Infiltration and Ventilation Centre -Document AIC-TN-VENTGUIDE-1996 -ISBN 0 946075 85 9
- NNI 2006. Toepassing van de statistiek van de uurgemiddelde windsnelheden voor Nederland. Nederlandse praktijkrichtlijn NPR 6097:2006 (nl)
- Santamouris, M. 2004. *Natural Ventilation in Urban Areas*. Ventilation Information Paper No. 3 maart 2004. Air Infiltration and Ventilation Centre – www.aivc.org
- Taha, Haider (2004). *Heat Islands and Energy*. Encyclopaedia of Energy, Volume 3 @ 2004 Elsevier Inc.
- Taseiko, O.V. et al. 2009. *Air pollution dispersion within urban street canyons*. Atmospheric Environment 43 (2009) pp 245 – 252.
- Wieringa, J en Rijkooft, P.J.1983. *Windklimaat van Nederland*. KNMI De Bilt. Staatsuitgeverij Den Haag. ISBN 90 12 04466 9.
- Wieringa, J. et al. 2001. *New Revision of Davenport Roughness Classification*. 3 EACWE (3rd European & African Conference on Wind Engineering), Eindhoven, Netherlands July 2001.
- Wit, de M.H. 2001. *Wind in de Gebouwde Omgeving*. Reader Technische Universiteit Eindhoven – Faculteit Bouwkunde –Capaciteitsgroep FAGO.

Basale modellering – Paragraaf 2.2

- ASHRAE 2001. *Airflow around buildings*. 2001 ASHRAE Handbook Fundamentals Chapter 16. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
- Blocken, B. et al. 2008. *Numerical Study on the Existence of the Venturi Effect in Passages between Perpendicular Buildings*. Journal of Engineering Mechanics@ASCE December 2008, pp1021 – 1028.
- ISSO 2002. *Handboek Installatietechniek*. ISBN 90-5044-094-0. Stichting ISSO – Rotterdam.
- Liddament, Martin W – 1996. *A Guide to Energy Efficient Ventilation*. AICV – Air Infiltration and Ventilation Centre -Document AIC-TN-VENTGUIDE-1996 -ISBN 0 946075 85 9

Gedetailleerde modellering – Paragraaf 2.3

- Blocken, B. en van Hooff, T. 2010. *Evaluatie en optimalisatie van de werking van het Bronsemadak*. Onderzoeksrapport TU/e -Unit Building Physics and Systems.
- Blocken, B. et al. 2011. *Computational analysis of the performance of a venturi-shaped roof for natural ventilation: venturi-effect versus wind-blocking effect*. Computers and Fluids
- Hoof, T. van et al. 2011. *Experimental and numerical analysis of a wind roof design for natural ventilation*. International Conference on Wind Engineering, Amsterdam, May 2011.
- Hoof, T. van et al. 2011. *A venturi-shaped roof for wind-induced natural ventilation of buildings: CFD and wind tunnel study for different design configurations*. Building & Environment 46 (2011) pp 1797-1807
- Hooff T. van, B. Blocken B., Aanen L. en Bronsema B. *Numerical analysis of the performance of a venturi-shaped roof for natural ventilation: influence of building width*. Journal of Wind Engineering, published online

Validatie door windtunnelmetingen – Paragraaf 2.4

- Aanen, L. 2011. *Windtunnelmetingen Ventecdak*. Peutz bv –rapportnummer B 1099-1-RA-001 - april 2011
- Peutz bv 2012. *Windtechnologie van Peutz*. ISBN: 978-90-811189-0-3

9.3 De Klimaatcascade

Airconditioning zonder ventilatoren – Paragraaf 3.1

- ASHREA 2010. *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy - ANSI/ASHRAE 55-2010*
- Boegborn, J. en Versteeg, H. 2010. *Thermische behaaglijkheid in de zomer. Nieuwe richtlijnen en criteria*. Bouwwereld # 6
- Bowmen, N. et al. 1997. *Application of Passive Draught Evaporative Cooling (PDEC) to Non-Domestic Buildings*. Renewable Energy, Vol. 10, No. 2/3, pp 191-196.
- Bowmen, N.T. et al. 2000. *Passive Draught Evaporative Cooling I. Concepts and Precedents*. Indoor Built Environment 2000; 9: 284 – 290.
- Bronsema B. 1993. *Adiabatische koeling bij comfortinstallaties deel [1] en [2]*. TG Techniek in de Gezondheidszorg Januari 1993
- Bronsema, B. 2002. *Een duurzame toekomst voor de installatietechniek*. Symposium Duurzame Installaties 7 maart 2002 – Technische Universiteit Delft.
- Bronsema, B. 2012. *Onderzoek Earth, Wind & Fire Eindrapport deel III – Klimaatcascade en het Geo-klimaatconcept*. Technische Universiteit Delft
- Cook, M.J. et al. 2000. *Passive Draught Evaporative Cooling II. Airflow Modelling*. Indoor Built Environment 2000; 9: 325 - 334.
- Cooper, G. 1998. *Air-conditioning America. Engineers and the Controlled Environment 1900 – 1960*. John Hopkins University Press, Baltimore, Maryland. ISBN 0-8018-5716-3
- El-Morsi, M.S. 2002. *Optimization of Direct-Contact-Spray-Coolers*. Dissertation University of Wisconsin-Madison 2002.
- Erell, Evyatar et al. 2007. *A multi-stage down-draft evaporative cool tower for semi-enclosed spaces: Aerodynamic performance*. Solar Energy 82 (2008) pp 420-429.
- ISSO 2002. *Handboek Installatietechniek*. ISSO. Kennisinstituut voor de installatiesector. ISBN 90-5044-094-0
- ISSO 2004. *Thermische behaaglijkheid - Eisen voor de binnentemperatuur in gebouwen –ISSO Publicatie 74*
- Kouwenhoven, H.J.L. 2008. *Verdampingskoeling verklaard vanuit het Mollier diagram*. Koude & Luchtbehandeling februari 2007.
- Lomas, K.J et al. 2004. *Building bioclimatic charts for non-domestic buildings and passive draught evaporative cooling*. Building and Environment 39, (2004) pp 661 – 676.
- Martinez, D. et al. 2000. *Predicted Comfort Envelopes for Office Buildings with Passive Draught Evaporative Cooling*. Roomvent 2000, Reading, UK, Conference Proceedings p 53.
- NNI 2005. *Klimaatomstandigheden - Analytische bepaling en interpretatie van thermische behaaglijkheid door berekeningen van de PMV en PPD-waarden en lokale thermische behaaglijkheid*. NEN-EN-ISO 7730:2005 en

- NNI 2007. Binnenmilieu gerelateerde input parameters voor ontwerp en beoordeling van energieprestatie van gebouwen voor de kwaliteit van binnenlucht, het thermisch comfort, de verlichting en akoestiek. NEN-EN 15251:2007 en
- Olesen, Bjarne.W et al. 2004. *A Better Way to Predict Comfort: The New ASHRAE Standard 55-2004*. ASHRAE Journal, August 2004.
- Olesen, Bjarne W.2010. *Indoor Environment – Health – Comfort and Productivity*. International Center for Indoor Environment and Energy, Technical University of Denmark
- Pearlmutter, D. et al. 2007. *A multi-stage down-draft evaporative cool tower for semi-enclosed spaces: Experiments with a water spraying system*. Solar Energy 82 (2008) pp 430-440.
- Robinson, D. et al. 2004. *Passive Draught Evaporative Cooling III. Thermal Modelling of an Office Building*. Indoor Built Environment 2004; 13: 205 - 221.
- Recknagel 2000. *Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik, 69e druk*. R. Oldenbourg Verlag München Wien. ISBN3-486-26215-7
- 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.
- Salméron, J.M. et al. 2009. *Passive and hybrid draught cooling in buildings and software design*. REHVA Journal - december 2009.
- Settels P.J.M. (ING) 2009. *Productiviteit/Comfort/Energie*. TNO Symposium “Beleef het Productief Kantoor” 23 april 2009.
- Uges, P.G.H. 2006. *Air-conditioning using R718 (water) as refrigerant*. 7th IIR Gustav Lorentzen Conference on Natural Working Fluids, Trondheim, Norway, May 28-2006
- Uges, P.G.H. 2009. *Verdampingskoeling: betrouwbaar en milieubesparend*. Verwarming en Ventilatie juni 2009.
- Willemsen, A. en van Harlingen, S.M. 2002. *De bodemtechnische basisprincipes van energieopslag*. TVVL Magazine 10/2002
- Will, H.M. 1999. *The First Century of Air-conditioning*. ASHRAE. ISBN 1-883413-76-1.
- Yajima, S. et al. 1997. *Experimental Performance of the Shower Cooling Tower in Japan*. Renewable Energy, Vol. 10, No 2/3, pp 179-183.

Basale modellering – Paragraaf 3.2

- Aanen, L. 2010. *Druppels in een lucht kolom, een korte beschouwing*. Peutz bv -Online beschikbaar.
- Ambrosini, W. e.a. 2002. *Statistical characteristics of a water film falling down a flat plate at different inclinations and temperatures*. International Journal of Multiphase Flow 28 (2002) pp 1521-1540
- ASHRAE 2001. *Handbook Fundamentals 2001* - Chapter 5.2
- Beard, K.V. 1976. *Terminal Velocity and Shape of Cloud and Precipitation Drops Aloft*. Journal of the atmospheric sciences Volume 33, May 1976.
- De Wit, M.H. 2008. *Heat and Moisture in building envelopes*. Colledictaat TU Eindhoven
- Doniec, A. 1988. *Flow of a laminar liquid film down a vertical surface*. Chemical Engineering Science Vol. 43, No.4 pp 847-854.
- El-Morsi, M.S. 2002. *Optimization of Direct-Contact-Spray-Coolers*. Dissertation University of Wisconsin-Madison 2002.
- Gosh S. e.a. 1994. *Induced air velocity within droplet driven sprays*. Proceedings: Mathematical and Physical Sciences, Vol. 444, No. 1920 (Jan. 8, 1994), 105-127.
- Hemeon, W.C.L. (1999). *Hemeon's Plant & Process Ventilation – Third Edition Edited by D. Jeff Burton*. Lewis Publishers, Boca Raton, Fl. ISBN 1-56670-347-6.
- ISSO 2002. *Handboek Installatietechniek*. ISSO Kennisinstituut voor de installatiesector. ISBN 90-5044-094-0
- Jones, A. e.a. 1995. *Discussions on the use of fine water sprays or mists for fire suppression*. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Volume 8, Issue 1, 1995, Pages 17-22

- Kandlikar, Satish G. 2006. *Heat transfer and fluid flow in minichannels and microchannels*. Elsevier Ltd. London. ISBN:0-0804-4527-6
- Mills, Anthony F. 2001. *Mass transfer*. Prentice Hall. ISBN 013032829-4
- Mikeliewicz, J. e.a. 1976. *Minimum thickness of a liquid film flowing vertically down a solid surface*. International Journal of Heat and Mass Transfer Vol. 19, pp 771-776.
- Portalski, S. 1963. *Studies of falling liquid film flow – Film thickness on a smooth vertical plate*. Chemical Engineering Science, 1963, Vol. 18, pp 787-804.
- Ranz, W. E. and Marshall, W. R., 1952, Evaporation from drops. Chem. Engng. Prog. 48(3), 141-146 (Part I); 48(4),173-180 (Part II).
- Rao, B.K. 1999. *Heat transfer to a falling power-law fluid film*. International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 20, Issue 4, August 1999, pp 429-436.
- Rawle, A. 2001-2005. *Particle Sizing – An Introduction*. <http://www.silver-colloids.com/Tutorials/psintro.html>
- Recknagel 2000. *Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik, 69e druk*. R. Oldenbourg Verlag München Wien. ISBN3-486-26215-7
- Rothe P.H. e.a. 1977. *Aerodynamic behaviour of liquid sprays*. International Journal of Multiphase Flow Vol.3, pp 2673-272.
- Spilhaus, A.F. 1948. *Raindrop size, shape and falling speed*. Journal of Meteorology Volume 5, June 1948.
- Spoel, W, v.d. et al. 2010-2011. *Model voor warmte- en massatransport in de klimaatcascade*. TU Delft –online beschikbaar.
- Tekasakul, P. e.a. 2002. *Evaporation from non- spherical particles: the equivalent-volume and inscribed sphere approximations for nearly spherical particles*. Journal of Aerosol Sciences Vol. 33 (2002) pp 307-317.
- Terblanche, R. e.a. 2009. *Drop size distribution below different wet-cooling tower fills*. Applied Thermal Engineering 29 (2009) pp 1552-1560.
- Yan, W.M. e.a. 1990. *Combined heat and mass transfer in natural convection between parallel plates with film evaporation*. International Journal of Heat and Mass Transfere Vol. 33, No. 3, pp 529-541.
- Zhou, D.W. e.a. 2009. *Measurement of falling film thickness to flat plate using confocal chromatic sensing technique*.

Gedetailleerde modellering – Paragraaf 3.3

- Costola, Daniel et al. 2012. *Earth, Wind & Fire Project – Climate Cascade – ESP-r models*. Report Version 2, 26-02-2012. Eindhoven University of Technology – Building Physics & Systems
- Markus, Stefan 2010A. *Test Report Drop size analysis*. Spraying Systems Deutschland GmbH, Project No P 100165-A d.d. 29-09-2010.
- Markus, Stefan 2010B. *CFD Simulations Climate Cascade for Project EARTH, WIND & FIRE*. Spraying Systems Deutschland GmbH. Project-No.: P100165-A d.d. 07.12.2010
- Schick, Rudolf J. 2010. *Spray Technology Reference Guide: Understanding Drop Size*. Spray Analysis and Research Services – A Service of Spraying Systems Co. <http://www.SprayConsultants.com>

Validatie van de simulaties – Paragraaf 3.4

- Bruggema, Harry 2011. *Reactie Modeltest klimaatcascade concept D 100311*. Rapport Peutz 25 mei 2010 - HBr/HBr/LvI/B 1099-5-ME
- ISSO 2002. *Handboek Installatietechniek*. ISSO Kennisinstituut voor de installatiesector. ISBN 90-5044-094-0

Het Ontwerp – Paragraaf 3.5

- ASHRAE 2000. *ASHRAE Handbook HVAC Systems and Equipment*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. Atlanta GA, USA. ISBN 1-883413-81-8.

- ASHRAE 2002. *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. BSR/ASHRAE Standard 55-2002. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
- Bronsema, B. 1993. *Het binnenklimaat in de zomer: Conflict tussen theorie en praktijk?* Klimaatbeheersing 22 (1993) nr. 9 (september). www.bronconsult.org
- Bronsema, B. 1995. *Over lucht en luchtfilters*. TVVL Magazine 11/95. www.bronconsult.org (publicaties/wetenschappelijk)
- Bronsema, B. 1996. *Natuurlijke ventilatie van kantoorgebouwen – een goed idee?* TVVL Magazine 9 /1996
- Bronsema, B. 1997. *An Air Handling Unit for the Next Century Part 1 and 2* Healthy Buildings / IAQ '97 Conference Volume 1. www.bronconsult.org (publicaties/wetenschappelijk)
- Bronsema, B. 2001. *The First Principle of Air Filter Technology: “Keep the Filter Dry”*. Proceedings 7th REHVA World Congress CLIMA 2000/Napoli 2001. www.bronconsult.org (publicaties/wetenschappelijk)
- Bronsema B. 2002B. *De klimaatinstallatie – Vriend of Vijand? (1)*. TVVL Magazine 4/2002. www.bronconsult.org (publicaties/wetenschappelijk)
- Bronsema, B. 2002C. *Luchtfilters voor een beter milieu*. Nationale Milieu Techniekdag 2002.
- Bronsema, B. 2005. *De klimaatinstallatie – Vriend of Vijand? (2)*. TVVL Magazine 12/2005. www.bronconsult.org (publicaties/wetenschappelijk)
- Bronsema, B. 2012. *Onderzoeksrapport “Earth, Wind & Fire” deel (II) Onderzoek Natuurlijke, Wind en het Ventecdak”*.
- Fanger, P.O. 1987. *A solution for the Sick Building Mystery*. Proceedings Indoor Air Conference 1987.
- Gunnarsen, Lars et al. *Adaptation to indoor air pollution*. Environment International, Vol. 18, pp 43 -54, 1992.
- ISSO 2002. *Handboek Installatietechniek*. ISSO. Kennisinstituut voor de installatiesector. ISBN 90-5044-094-0
- NNI 2007. *Ventilatie voor utiliteitsgebouwen - Prestatie-eisen voor ventilatie- en luchtbehandelingssystemen*. NEN-EN 13779:2007 en.
- Olesen, B.W et al. 2004. *A Better Way to Predict Comfort: The New ASHRAE Standard 55-2004*. ASHRAE Journal, August 2004.
- Olesen, B. 2011. *Standards for Ventilation and Indoor Air Quality in relation to the EPBD*. REHVA Journal Volume 48, Issue 1, January 2011. ISSN 1307-3729
- Sterling, E.M. et al. 1985. *Criteria for Human Exposure to Humidity in Occupied Buildings*. ASHRAE Transactions CH-85-13 No.1.
- TNO en Deerns 2007. *Keuzewijzer voor koelinstallaties in de utiliteitsbouw*. In opdracht van SenterNovem.

Risico- en beschermende factoren – Paragraaf 3.6

- Andersen Ib et al. 2008. *Before the big bang of indoor climate research*. Proceedings Indoor Air 2008, Copenhagen – Paper ID: Su17K1.
- ASHRAE 1994. *The Ins and Outs of Ozone*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. Atlanta GA, USA. ISBN 1-883413-12-5.
- Bronsema, B. 1993. *TVVL Cursus Luchtbehandelingstechniek “Een Gezond Gebouw” hoofdstuk 5 “Gezonde Installatietechnologie”*
- Bronsema, B. 1997. *Luchtbevochtiging – Van de regen in de drup?* TVVL Magazine 7/1997. www.bronconsult.org (publicaties/wetenschappelijk)
- Bronsema, B. 2002. *Vocht – Waar maken we ons druk om?* TVVL Magazine 6/2002. www.bronconsult.org (publicaties/wetenschappelijk)
- CIBSE Guide A (1999). *Environmental Design*. The Chartered Institute of Building Services Engineers London – ISBN 0 900953 96 9
- Hawkins, L.H. 1981. *The influence of air ions, temperature and humidity on subjective wellbeing and comfort*. Journal of Environmental Psychology (1981) 1, 279-292.

- ISSO 2002. *Handboek Installatietechniek*. ISSO. Kennisinstituut voor de installatiesector. ISBN 90-5044-094-0
- ISSO 2008. *Legionellapreventie in klimaatinstallaties – Publicatie 55.3*. ISSO Kennisinstituut voor de installatiesector. ISBN 978-90-5044-160-5.
- *NNI 2011*. Hygrothermische prestatie van bouwcomponenten en -elementen - Binnenoppervlaktetemperatuur om kritische oppervlaktevochtigheid te vermijden en berekening van de condensatie in bouwdelen - Berekeningsmethode *.NEN-EN-ISO 13788:2011 en*
- Recknagel Sprenger Schramek 2009. *Taschenbuch für HEIZUNG + KLIMATECHNIK 74. Auflage*. Oldenburg Industrie Verlag, München, ISBN 978-3-8356-3134-2.
- Weschler, Charles J. 2000. *Ozone in Indoor Environments: Concentration and Chemistry*. Indoor Air 2000; 10: 269-288.
- Yates, Alayne et al. 1986. *Air ions: Past problems and future directions*. Environment International, Vol. 12, pp 99-108, 1986.

9.4 De Zonneschoorsteen

Opbouw en uitvoering – Paragraaf 4.1

- Bassiouny, R. en Koura Nader (2008). *An analytical and numerical study of solar chimney use for room natural ventilation*. Energy and Buildings 40 (2008) pag. 865-873.
- Bilgen, E. en Chaaban, M. (1982). *Solar Heating – Ventilating system using a solar chimney*. Solar Energy Vol.28, No 3, pag. 227-233.
- Brinkworth, B.J. (2002). *Coupling of Convective and Radiative Heat Transfer in PV Cooling Ducts*. Transactions of the ASME, Vol. 124, August 2002, pag. 250-255.
- Bronsema, B. 2012. *Onderzoeksrapport “Earth, Wind & Fire” deel (I) Onderzoek Zonneschoorsteen en Zonnefaçade*. Technische Universiteit Delft.
- Burek, S.A.M. en Habeb, A. (2007). *Air flow and thermal efficiency characteristics in solar chimneys and Trombe walls*. Energy and Buildings 39 (2007) pag. 128-135.
- Chantawong, P., Hirunlabh, J. e.a.(2006). *Investigation on thermal performance of glazed solar chimney walls*. Solar Energy Volume 80, Issue 3, March 2006, pag. 288-297.
- Charvat, P. Jicha M. en Stetina, J. (2004) *Solar Chimneys for ventilation and passive cooling* World Renewable energy Congress VIII – Denver Colorado 2004..
- Cheng, X en Müller, U. (1998). *Turbulent natural convection coupled with thermal radiation in large vertical channels with asymmetric heating*. International Heat Mass Transfer Vol. 41, No 12, pag. 1681-1692.
- Elbakheit, A.R. e.a.(2006). *Architectural Facade design with photovoltaic using CFD*. Sudan Engineering Society JOURNAL September 2006, Volume 52 No 47.
- Francken, J.C. 1980. *Zonnecollectoren*. Mikroniek no.1 januari 1980.
- Gan Guohui (2006). *Simulation of buoyancy-induced flow in open cavities for natural ventilation*. Energy and Buildings 38 (2006) pag. 410-420
- Goswami, D.Y. et al 2000. *Principles of Solar Engineering 2nd Edition*. Taylor & Francis Group, Abingdon GB. ISBN 1-56032-714-6 en ISBN 978-1-56032-714-1.
- Harris, D.J. en Helwig, N. (2006). *Solar chimney and building ventilation*. Applied Energy 84 (2007) pag. 135-146.
- Hatami, N en Bahadorinejad, M. (2008). *Experimental determination of natural convection heat transfer coefficient in a vertical flat-plate solar air heater*. Solar Energy 82 (2008) pag. 903-910.
- Heereveld, A.A.M.T. en Vogelzand, E. 1984. *Spectraal-selectieve oppervlakten*. Nederlands Tijdschrift voor Fotonica, augustus 1984
- ISSO (1976). *Publicatie 3 – Zonstralingstabellen*. Stichting ISSO – Rotterdam. www.isso.nl
- ISSO (2010). *Handboek HBz - Zonstraling en Zontoetreding*. Stichting ISSO – Rotterdam. ISBN 978-90-5044-190-2
- Jyotirmay, M. en Sanjay, M. en A. (2006). *Experimental investigation on four different types of solar chimneys*. Advances in Energy Research (AER-2006), pag. 151-156.
- Marti-Herrero, J. en Heras-Celemin, M.R.(2007). *Dynamic physical model for a solar chimney*. Solar Energy Volume 81, Issue 5, May 2007, pag. 614-622.
- Mathur, J., Bansai, N.K. e.a.(2006). *Experimental investigations on solar chimney for room ventilation*. Solar Energy Volume 80, Issue 2006, pag. 927-935.

- Ménézo, Christophe (2008). *Convective heat transfer enhancement for Building-Integrated Photovoltaic applications and new solar PV-T collector design*. Polytech'Savoie/Université de Savoie.
- Moshfegh B. en Sandberg M. (1996) *Investigation of fluid flow and heat transfer in a vertical channel heated from one side by PV elements. Part I - Numerical study*. Renewable Energy Vol. 8, pag. 248-253.
- Ong, K.S. en Chow, C.C.(2003). *Performance of a solar chimney*. Solar Energy Volume 74, Issue 1, January 2003, pag.1-17.
- Sandberg M en Moshfegh B.(1996) *Investigation of fluid flow and heat transfer in a vertical channel heated from one side by PV elements. Part II - Experimental study*. Renewable Energy Vol. 8, pag. 254-258.
- Spencer, S., Chen, Z.D., Li, Y. & Haghghat, F. (2000). *Experimental investigation of a solar chimney natural ventilation system*. In *Air Distribution in Rooms (ROOMVENT 2000)*, ed. H.B. Awbi, pag. 813–818.
- Spoel, W., van der, (2009). *Effect van thermische massa van de achterwand van een zonneshoorsteen op de warmteopbrengst – Matlab simulatie*. Technische Universiteit Delft - Faculteit Bouwkunde – Sectie Architectural Engineering & Technology.
- Tonui, J.K. en Tripanagnostopoulos, Y. (2008). *Performance improvement of PV/T solar collectors with natural air flow operation*. Solar Energy 82 (2008) pag. 1-12.
- Trcka, M 2009. *Thickness of the back wall of a solar chimney and its thermal efficiency –ESP-r modeling*. Eindhoven University of Technology – Faculty Built Environment - Dpt. Building Physics and Systems.
- Velds, C.A. 1992. *Klimaat van Nederland 3 – Zonnestraling in Nederland*. Koninklijk Meteorologisch Instituut. ISBN 90-5210-14—X; NUGI 819
- Zamora, B en Kaiser, A.S (2009). *Optimum wall-to-wall spacing in solar chimney shaped channels in natural convection by numerical investigation*. Applied Thermal Engineering 29 (2009),pag. 762-769.
- Zhai, X,Q, et al (2011). *A review for the applications of solar chimneys in buildings*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 15 (2011) 3757–3767.

Basale modellering – Paragraaf 4.2

- Advanced Thermal Solutions (2009). *Understanding Heat Transfer Coefficient*. <http://zeus.phys.uconn.edu/halld/tagger/fp-microscope/fusion-10-2009/convection.pdf>
- Aicher, T. en Martin, H. (1997). *New correlations for mixed turbulent natural and forced convection heat transfer in vertical tubes*. International Journal Heat and Mass transfer, Vol. 40 Nr 15, pp 3617 - 3626
- Beausoleil-Morrison, Ian (2000). *The Adaptive Coupling of Heat and Air Flow Modelling Within Dynamic Whole-Building Simulation*. PhD Thesis University of Strathclyde, Glasgow UK
- Beausoleil-Morrison, Ian (2001). *Flow responsive modelling of internal surface convection*. Seventh International IBNPSA Conference, Rio de Janeiro August 13-15
- Bronsema, B. 2012. *Onderzoeksrapport “Earth, Wind & Fire” deel (I) Onderzoek Zonneshoorsteen en Zonnefaçade*. Technische Universiteit Delft.
- Churchill, Stuart W. en Usagi, R. (1974). *A Standardized Procedure for the Production of Correlations in the Form of a Common Empirical Equation*. Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals, pp 39–44
- Incropera, Frank P. en Dewitt, David P. (1985) *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. Wiley - ISBN 978-0-471-45728-2
- ISSO 2002. *Handboek Installatietechniek*. Stichting ISSO – Rotterdam. ISBN 90-5044-094-0
- Leal, V en Maldonado, E. (2002). *Improving the Whole Building Modelling and Integration of an Innovative Window using the Passys Test Cell*. Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering of the University of Porto.
- Linden van der, A.C. 1998. *Bouwfysica*. SMD Educatieve Uitgevers. ISBN 90 212 9082 0.
- Molina, J.L. en Maestre, I.R. (2002) *Modelling The Effect Of Ventilated Air Cavities In The Solvent Prototype: A Reversible Solar Screen Glazing System- Preliminary Results*. Department of Thermal Energy Engineering. University of Seville, Spain

- Recknagel 2000. *Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik, 69e druk*. R. Oldenbourg Verlag München Wien. ISBN3-486-26215-7

Gedetailleerde modellering – Paragraaf 4.3

- Blocken, B. 2011. *CFD-simulatie van de convectieve warmteovergangscoefficiënt in een zonneshoorsteen*. Technical University of Eindhoven –Dept. of Architecture, Building and Planning – Unit Building Physics and Systems..
- Gontikaki, Marietta en Houben, Jeroen 2010. *Calibration & Validation Report of the Esp-r solar chimney model*. Technical University of Eindhoven –Dept. of Architecture, Building and Planning – Unit Building Physics and Systems.
- Uffelen, M. van 2009. *Report CFD computations solar chimney of Earth, Wind & Fire project - 3rd draft*. Peutz bv.

Validatie van de simulaties – Paragraaf 4.4

- Bronsema, B. 2012. *Onderzoeksrapport “Earth, Wind & Fire” deel (I) Onderzoek Zonneshoorsteen en Zonnefaçade*. Technische Universiteit Delft.
- Bruggema, H.M. 2009. *Criteria en Opzet Onderzoeksmodel Zonneshoorsteen*. Peutz bv Memo versie 6 – Ref. HBr/LvI/B 1099-2-ME
- Goch van, T.A.J. en Costola, D. et al 2011. *Solar Chimney –Parametric analysis of a solar chimney ESP-r model*. Report 05-12-2011 version 2.
- Gontikaki, Marietta en Houben, Jeroen 2010. *Calibration & Validation Report of the Esp-r solar chimney model*. Technical University of Eindhoven –Dept. of Architecture, Building and Planning – Unit Building Physics and Systems.
- Spoel, W., van der, (2009). *Effect van thermische massa van de achterwand van een zonneshoorsteen op de warmteopbrengst – Matlab simulatie*. Technische Universiteit Delft - Faculteit Bouwkunde – Sectie Architectural Engineering & Technology.
- Treka, M 2009. *Thickness of the back wall of a solar chimney and its thermal efficiency –ESP-r modeling*. Eindhoven University of Technology – Faculty Built Environment - Dpt. Building Physics and Systems.

Het ontwerp – Paragraaf 4.5

- Bokel, Regina 2011. *Een gebruiksvriendelijk rekenmodel voor het initieel ontwerp van een zonneshoorsteen*. Technische Universiteit Delft - Faculteit Bouwkunde – Sectie Architectural Engineering & Technology
- Broekhuizen, H.J. 2004. *Optimale prijs/prestatie energieopslagsystemen*. TVVL Magazine 10/2004
- Bronsema, B. 2012. *Onderzoeksrapport “Earth, Wind & Fire” deel (I) Onderzoek Zonneshoorsteen en Zonnefaçade*. Technische Universiteit Delft.
- Dubois, Marie-Claude en Horvat, Miljana et al 2010. *State-of-the-Art of Digital Tools Used by Architects for Solar Design*. IEA-SHC Task 41 Report T.41.B.1
- Elswijk van R.C. en Willemsen, A. 2003. *Optimalisatie van het temperatuurniveau bij warmteopslag*. TVVL Magazine 7-8/2003
- GeoComfort 2007. *Koeling & Verwarming uit de bodem*. www.geocomfort.nl
- Ham, Eric R. v.d. 2004. *Relatie tussen EPC en werkelijk energiegebruik bij kantoorgebouwen*. Rapport SenterNovem 1019-03-10-10-001 – 9 juli 2004.
- ISSO 1997. *Publicatie 39 – Lange termijn koude opslag in de bodem*. Stichting ISSO – Rotterdam. ISBN 90-5044-057-6
- ISSO (2010). *Handboek HBz - Zonnestraling en Zontoetreding*. Stichting ISSO – Rotterdam. ISBN 978-90-5044-190-2
- Kanters, Jouri 2011. *Adequacy of current design tools and methods for solar architecture – results of IEA-SHC Task 41’s international survey*. PLEA 2011 - 27th Conference on Passive and Low Energy Architecture, Louvain-la-Neuve, Belgium, 13-15 July 2011.
- Meteororm 2003. *Global Meteorological Database for Engineers, Planners and Education – Version 6.0 – Edition 2008. Software and Data on CD-ROM*. www.meteororm.com
- RUBITHERM GmbH – *Paraffins in thermal energy storage applications - The Latent Heat Storage Process – Bound PCM’s*. www.rubitherm.com.

- SenterNovem 2006. *Fiwihex geslotenkas bij Franico in Hoogwoud*. (www.senternovem.nl/eos/Projecten/EOS_Demonstratie/2006/Fiwihex_gesloten)
- Spoel, W., van der, (2009). *Effect van thermische massa van de achterwand van een zonneshoorsteen op de warmteopbrengst – Matlab simulatie*. Technische Universiteit Delft - Faculteit Bouwkunde – Sectie Architectural Engineering & Technology.
- Trcka, M 2009. *Thickness of the back wall of a solar chimney and its thermal efficiency –ESP-r modeling*. Eindhoven University of Technology – Faculty Built Environment - Dpt. Building Physics and Systems.
- Stimular (2011). *Milieubarometer Benchmark Overheidskantoorgebouwen 2011*. <http://www.milieubarometer.nl>
- Torcellini, P and Pless, S. *Trombe Walls in Low-Energy Buildings: Practical Experiences*. World Renewable Energy Congress VIII and Expo, Denver Colorado, 2004
- Velds, A.C. 1992. *Klimaat van Nederland 3 – Zonnestraling in Nederland*. Koninklijk Meteorologisch Instituut. ISBN 90-5210-14—X; NUGI 819
- Weerhof, Björn van de 2005. *Meervoudige ontwerp-en effectenstudie van koude-warmteopslagsystemen in de binnenstad van Den Haag*. Afstudeerverslag TU Delft Fsculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen Afdeling Watermanagement, juli 2005.
- Willemsen, A. en van Harlingen, S.M. 2002. *De bodemtechnische basisprincipes van energieopslag*.
- Zondag, Herbert 2010. *De ontwikkeling van thermochemische warmteopslag*. Intreerede prof.dr. Herbert Zondag uitgesproken op 12 november 2010 aan de Technische Universiteit Eindhoven

9.5 Energieopwekking

Inleiding – Paragraaf 5.1

- EP en EC 2010. *Energy Performance of Buildings Directive Recast*. http://www.ecee.org/buildings/EPBD_Recast/
- Kurnitski, Jarek et al 2011. *How to define nearly net zero energy buildings nZEB – REHVA proposal for uniformed national implementation of EPBD recast*. REHVA Journal May 2011.

Doelstellingen – Paragraaf 5.2

- EP en EC 2010. *Energy Performance of Buildings Directive Recast*. http://www.ecee.org/buildings/EPBD_Recast/

Windenergie – Paragraaf 5.3

- Europese Commissie 2011. *Smart Grids: from innovation to deployment*. <http://www.smartgrids.eu>
- Mertens, Sander 2006. *Wind Energy in the Built Environment –Concentrator Effects of Buildings*. Proefschrift TU Delft. ISBN 0906522 35 8.
- Plomp, H. en Aanen, L. 2007. *Windenergie en Hoogbouw*. TVVL Magazine 6/2007.
- Toet, S. 2002. *Energieproductie uit windgedreven ventilatie*. Afstudeerverslag Haagse Hogeschool, januari 2002.
- TU Delft 2005. *Turby – Sustainable urban wind power from the roof top*. Delft Outlook 2005 Volume 22, No 2

Fotovoltaïsche energie – Paragraaf 5.4

- Zeman, Miro 2010. *Increasing the competitiveness of thin-film silicon solar cells*. Quadraad November 2010, pp 16,17
- Zeman, Miro 2011 in *De zon in huis met superdunne siliciumfolie*. FD selections 8 januari 2011. <http://www.fdselections.nl/energie/Nieuws>

Totale energieprestatie – Paragraaf 5.5

- Hernandez Oscar 2011. *Elithis Tower in Dijon, France*. REHVA Journal - May 2011
- Kurnitski Jarek 2012. *nZEB office building Ympäristöotalo in Helsinki, Finland*. REHVA Journal – February 2012.

9.6 De stedenbouwkundige context

Het Ventecdak – Paragraaf 6.2

- Aanen, L. 2011. *Windtunnelmetingen Ventecdak*. Peutz bv –rapportnummer B 1099-1-RA-001 - april 2011

De zonneshoorsteen – Paragraaf 6.3

- Berghauser Pont, Meta en Haupt, Per (2004). *Spacemate® the spatial logic of urban density*. Delft University Press, ISBN 90-407-2530-6
- Berghauser Pont, Meta en Haupt, Per (2009). *Space, Density and Urban Form*. Proefschrift Technische Universiteit Delft, ISBN 978-90-5269-375-0
- Bronsema, B. 2012. *Onderzoeksrapport “Earth, Wind & Fire” deel (I) Onderzoek Zonneshoorsteen en Zonnefaçade*. Technische Universiteit Delft.
- ISSO 1976. *Publicatie 3 – Zonstralingstabellen*. Stichting ISSO – Rotterdam. www.isso.nl
- Velds, A.C. (1992). *Klimaat van Nederland 3 – Zonstraling in Nederland*. Koninklijk Meteorologisch Instituut. ISBN 90-5210-14—X; NUGI 819

Vervolgonderzoek – Paragraaf 6.4

- Beckers, Benoit (2011). *Impact of solar energy on cities sustainability*. PLEA 2011- 27th Conference on Passive and Low Energy Architecture, Louvain-la-Neuve, 13-15 July 2011
- Bruce, Giles (2008). *High Density, Low Energy: Achieving useful solar access for Dublin’s multi-storey apartment developments*. PLEA 2011- 25th Conference on Passive and Low Energy Architecture, Dublin, 22- 24 October 2008.
- Curelli Alessandra et al (2011). *Solar access in densely built urban environments*. PLEA 2011- 27th Conference on Passive and Low Energy Architecture, Louvain-la-Neuve, 13-15 July 2011
- Ng, Edward (2005). *A study of the relationship between daylight performance and height difference of buildings in high density cities using computational simulation*. Ninth International IBPSA Conference Montréal, Canada August 15-18, 2005
- Esch, Marjolein M, E van & Haupt, PA (2006). *Bebouwingsdichtheid en daglichttoetreding*. Bouwfysica, 17(4), 8-16.
- Esch, Marjolein M. E. van & Haupt, PA (2007). *Daylight and Urban Density*. In H.C. Bekkering, D. Hauptmann, A. den Heijer, J. Klatte, U. Knaack & S.van Manen (Eds.), *The Architecture Annual 2005-2006* (pp. 86-91). Rotterdam: 010 Publishers. (TUD)
- Löschnig, Wolfgang (?). *A study of the relationship between daylight performance and urban patterns in high density cities using computational simulation*. Graz University of Technology, Austria.
- Schuster, Heide et al (2011). *Thoughts & Facts on Sustainable Urban Design*. PLEA 2011- 27th Conference on Passive and Low Energy Architecture, Louvain-la-Neuve, 13-15 July 2011.
- Zeiler, Wim (2011). *Synergetics between Sun and Building*. PLEA 2011- 27th Conference on Passive and Low Energy Architecture, Louvain-la-Neuve, 13-15 July 2011

9.7 Case Study

Basale energieprestatie analyse – Paragraaf 7.5

- 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.
- ISSO 1998. *Bepalingsmethode Systeemrendementen ten behoeve van NEN 2916*. ISSO researchrapport 11
- NNI 2004. *NEN 2916:2004 nl. Energieprestatie van utiliteitsgebouwen - Bepalingsmethode*
- 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. *Energieverbrauchs-kennwerte für Gebäude- Heizenergie- und Stromverbrauchs-kennwerte*. VDI 3807. Beuth Verlag GmbH Berlin

Gedetailleerde energieprestatie analyse – Paragraaf 7.6

- Hensen, J.- Costola, D. -Trcka, M. 2012. *TU/e Final Report. Eindhoven University of Technology, Built Environment Department, Building Physics & Services*

CONCEPT

10 BEGRIPPEN, EENHEDEN EN SYMBOLEN

10.1 Begrippen

Begrip	Engels	
Albedo	Albedo	Diffuse reflectiefactor
ASHRAE	ASHRAE	American Society of Heating Ventilation and Air-conditioning Engineers
Atmosferische grenslaag	Atmospheric Boundary Layer	De onderste laag van de atmosfeer waarin turbulentie door wind en thermiek aanwezig is.
Badgir	Badgir	Iraanse windtoren
Beaufort	Beaufort	Schaal van windsnelheden, aangeduid met "windkracht"
Bernoulli –wet van	Bernoulli law	Natuurkundige wetmatigheid die het stromingsgedrag van vloeistoffen en gassen beschrijft, en de drukveranderingen aan hoogte- en snelheidsveranderingen relateert
Bernoulli-injector	Bernoulli-injector	Opening in het Venteddak 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
CWC	CHTC	Convectieve warmteoverdrachtscoëfficiënt Convective Heat Transfer Coefficient

Earth, Wind & Fire
Natuurlijke Airconditioning

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.
Grijze stroom		Grijze stroom is alle elektriciteit die met behulp van fossiele brandstoffen wordt opgewekt
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.

Earth, Wind & Fire
Natuurlijke Airconditioning

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 lucht aanzuig 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.
NEN	-	Nederlandse Normalisatie
NNI	-	Nederlands Normalisatie Instituut
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 ≤ 0,1 μm
PSI	-	Constructiegebonden knooppuntkarakteristiek van een koudebrug
Potentiele windsnelheid – U ₁₀	Potential wind speed	In weerstations gemeten windsnelheid op een hoogte van 10 m in een vlak terrein met een ruwheidslengte 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.

Earth, Wind & Fire
Natuurlijke Airconditioning

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
VABI	-	Softwarebedrijf voor de installatietechniek
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 menighoogte, waarmee de afvoer van luchtverontreinigingen kan worden geschat.
Venturi-ejector	Venturi-ejector	Opening in het Ventecdak [®] waardoor ventilatielucht kan worden afgezogen
Vermogenscoëfficiënt	Power Coëfficiënt	De verhouding tussen het onttrokken vermogen en het totale vermogen van de massastroom in een windturbine
Venturi-effect	Venturi effect	Een doelbewust in een stromingskanaal voor vloeistof of gas aangebrachte vernauwing. Doordat het passerende medium een snelheidsverhoging ondergaat ontstaat daardoor op die plek een drukverlaging; het "Venturi-effect"
Vlaggerigheid		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	Verschuifsel 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
WIS	-	Window Information System
Wrijvingssnelheid		Fictieve "snelheid" die afhangt van de wrijving die de wind ondervindt bij de stroming langs het grondoppervlak
Zog	Wake	Gebied aan de lijzijde van een gebouw waar de windinvloed nog merkbaar is.
Zonnefaçade [®] of Zonnegevel [®]	Solar Façade [®]	Gevelbedekkende Zonneschoorsteen
Zonneschoorsteen	Solar Chimney	Een verticale schacht waarin zonne-energie wordt benut om natuurlijke ventilatie in een gebouw te stimuleren en zonnewarmte te oogsten.
Zonnetoren	Solar updraft tower	Krachtcentrale voor de opwekking van elektrische energie. Lucht wordt verwarmd in een grote cirkelvormige glasoverkapt ruimte en stijgt op in een hoge slanke toren. De convectiestroom drijft luchturbines aan die elektrische stroom opwekken.
ZTA-waarde		Zie g-waarde
Zwarte straler	Black body	Een voorwerp dat al het licht dat er op valt, absorbeert, en dus niet reflecteert. Hoewel de naam anders zou doen vermoeden, zendt een zwarte straler wel degelijk licht uit. Het spectrum van een zwarte straler is zeer karakteristiek, en slechts afhankelijk van de temperatuur van de zwarte straler.

10.2 Eenheden en symbolen ruimte en tijd

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

10.3 Eenheden en symbolen warmte

<i>T</i>	Thermodynamische temperatuur	K
----------	------------------------------	---

θ	<i>(theta)</i>	Celsius temperatuur	$^{\circ}\text{C}$
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_v		warmtestroomdichtheid	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
G		warmtegeleiding	$\text{W}\cdot\text{K}^{-1}$
λ	<i>(lamda)</i>	warmtegeleidingscoëfficiënt	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
h		warmteoverdrachtscoëfficiënt	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$
U		warmtedoorgangscoefficiënt	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$
r		warmteweerstandscoefficiënt	$\text{m}\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$
R		warmteweerstand	$\text{m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$
a		temperatuurvereffeningscoëfficiënt	$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$
C		warmtecapaciteit	$\text{J}\cdot\text{K}^{-1}$
r		verdampingswarmte	$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$
c		soortelijke warmte	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
c_p		soortelijke warmte bij constante druk	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
c_v		soortelijke warmte bij constant volume	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
γ	<i>(gamma)</i>	verhouding c_p/c_v	-
h		(soortelijke) enthalpie	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$

10.4 Eenheden en symbolen klimaatregeling

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

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

10.5 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	$\text{m}^2\cdot\text{s}$
ξ (<i>xi</i>)	weerstandcoëfficiënt	-
λ (<i>lamda</i>)	weerstandsfactor voor pijpen	-
σ, γ (<i>sigma, gamma</i>)	oppervlaktespanning	$\text{n}\cdot\text{m}^{-1}$

11 CURRICULUM VITAE ING. BENJAMIN BRONSEMA

- 1935 Geboren Assen
- 1955 Diploma HTS Werktuigbouwkunde Groningen –Academie Minerva
- 1957 Reserve Officier KL Regiment Technische Troepen
- 1958 Projecttechnicus Geveke & Co's Technisch Bureau Amsterdam
- 1962 Projectleider Geveke Warmtetechniek BV Amsterdam
- 1967 Vestigingsdirecteur Geveke Warmtetechniek BV Arnhem
- 1972 Adviseur Adviesgroep Ketel en van Scheindelen Delft
- 1978 Directeur en Partner Ketel Raadgevende Ingenieurs BV Delft (tot 1998)
(Projecten o.a. Stadhuis Lelystad – Ministerie van VROM Den Haag – Terminal 3 Amsterdam Airport Schiphol)
- 1993 Vaste TVVL vertegenwoordiger bij ASHRAE (tot 2002)
- 1993 Parttime gastdocent TU Delft Faculteit Bouwkunde (tot 2007)
- 1995 Voorzitter Technische Raad TVVL (tot 2004)
- 1996 Lid van de REHVA Coöperation Group namens TVVL (tot 2001)
- 1998 Pre-pensionering - Oprichting Bronsema Consult
- 1998 Arbitrator Nederlands Arbitrage Instituut, de Raad van Arbitrage voor de Metaalnijverheid en Handel en de Commissie van Geschillen van het KIVI (tot 2006)
- 2001 Chairman REHVA REGION 1 v/h REHVA Coöperation Group (tot 2005)
- 2002 Chairman REHVA Taskforce "Ventilation and Smoking" (tot 2005)
- 2002 Chairman REHVA Taskforce "Indoor Environment and Energy in Schools" (tot 2005)
- 2003 Voorzitter TVVL Werkgroep "Ventilatie en Roken" (tot 2005)
- 2003 Voorzitter normcommissie "Klimaatbeheersing van Gebouwen" van het Nederlands Normalisatie-instituut (tot 2007)
- 2005 Kandidaat promovendus TU Delft op het onderzoek *Earth, Wind & Fire*
- 2007 Promovendus TU Delft (tot heden)

Onderscheidingen:

- 1996 B.J. Maxprijs voor diverse artikelen in TVVL Magazine
- 2004 Gouden TVVL penning voor uitstekende bijdragen aan de ontwikkeling van het vakgebied
- 2005 REHVA Honorary Fellow
- 2011 REHVA Fellow

Publicaties per 2012:

- 60 Wetenschappelijke- en vakpublicaties inclusief conference papers
- 42 Gemengde korte artikelen, interviews, cursusmateriaal, reflecties en reacties

NAW gegevens:

Prof. Boerhaaveweg 37,
2251 HX Voorschoten.
T + 31 71 561 96 70
E bronconsult@planet.nl
I www.bronconsult.org

CONCEPT