

# Natuurlijk ventilatie en luchtbehandeling via klimaatcascade

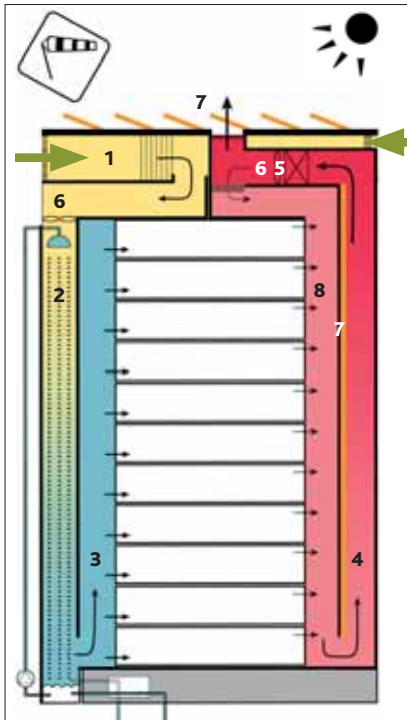
“Door energie-efficiënte en duurzame installatietechnieken toe te passen in gebouwen maken we duurzaamheidsdoelstellingen waar. Duurzame gebouwen zijn toekomstbestendig, waardevast, hebben een lage of geen CO<sub>2</sub>-uitstoot, zijn energieneutraal of produceren zelf energie en hebben een hoog comfort. Het is belangrijk goed op de hoogte te zijn van duurzame innovaties in de markt en kennis van technieken. Een duurzaam installatieproject vraagt om een compleet nieuwe benadering”. Bovenstaand citaat, waar de auteurs zich geheel in kunnen vinden, is te lezen in een mailbericht van TVVL[1] bij de introductie van de cursus “Duurzaamheid in de Gebouwde Omgeving”. Natuurlijke airconditioning, zonder ventilatoren, is ongetwijfeld een cruciale exponent van duurzame klimaattechniek en rijp voor grootschalige toepassing in bestaande gebouwen en nieuwbouw (Bronsema, B. et al 2017). Architecten staan overwegend open voor deze technologie. Durft de installatiesector de uitdaging aan?

Dr. ing. B. (Ben) Bronsema (Bronsema Consult – TU Delft faculteit Bouwkunde – afdeling AE + T [7]); Dr. R. (Regina) Bokel (TU Delft faculteit Bouwkunde – afdeling AE+T), Ing. H. (Harry) Bruggema (Peutz BV); Ir. M. (Maarten) Quist (Dutch Green Company); Dr. Ir. W. (Wim) van der Spoel (VdS raadgevend ingenieursbureau - TU Delft faculteit Bouwkunde – afdeling AE + T [7]); Ir. P. (Peter) Swier (ABT Ingenieurs in Bouwtechniek); Ing. J. (Joost) Vermeer (Van Delft Groep); Ing. J. (Jaap) Veerman (Royal Haskoning DHV)

De Klimaatcascade (afb. 1) is 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 sproeiwater van circa 13 °C toegevoerd. 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. Het principe van luchtkoeling door direct contact met gekoeld water is niet nieuw, maar stond aan het begin van de ontwikkeling van de airconditioning begin 20e eeuw. Het belangrijkste toepassingsgebied lag destijds in de tabaks-

en de katoenindustrie, waar vochtbeheersing belangrijker was dan temperatuurbeheersing. De luchtwasser, uitgevonden door Willis H. Carrier, een van de grondleggers van airconditioning, later ontwikkeld tot koelwater met dauwpuntsregeling, werd daardoor een centraal element ook voor comforttoepassingen. Carrier wees droge luchtkoelers (koelbatterijen) eigenlijk af, omdat hiermee de vochtigheid niet



Afbeelding 1. Een oud principe in een nieuwe jas

goed te regelen was; "It's not the heat, it's the humidity" (Cooper, G. 1998). 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. De klimaatcascade voorziet in de drie primaire functies van airconditioning: ventileren, koelen en drogen, verwarmen en bevochtigen, en kan daarmee de traditionele luchtbehandelingskast met luchtfilter, ventilator, geluiddemper en bevochtiger vervangen (Bronsema, B. et al 2017).

### KLIMAATCASCADE 3.0

Het ontwerp en de prestaties van de innovatieve klimaatcascade zijn voor generieke toepassingen uitvoerig beschreven in het proefschrift (Bronsema, B. 2013/A) Het was een interessante exercitie een en ander in bouwteamverband voor een specifiek project, hotel Breeze Amsterdam, uit te werken. Detailleren is specificeren. Met dank aan de gewaardeerde inbreng van de ontwerppartners is een robuust ontwerp van de klimaatcascade 3.0 tot stand gekomen, waarbij energiezuinigheid een dominante rol heeft gespeeld. Voor de klimaatcascade is een BREEAM Innovatiecredit aangevraagd, waarin de berekende prestatie-eisen gedetailleerd zijn omschreven. De ervaringen tijdens de detaillering van het ontwerp en de realisatie zullen

zorgvuldig worden vastgelegd, en na oplevering worden de thermische-, psychrometrische-, aerodynamische- en energieprestaties van de klimaatcascade gedurende één jaar gemonitord. De ontwerpdocumenten worden op basis van deze ervaringen en voortschrijdend inzicht continue geactualiseerd. De definitieve ontwerpdocumenten zijn daarna beschikbaar voor brede toepassing van de klimaatcascade in de luchtbehandelingstechniek, hopelijk in de vorm van een ISSO/SBR-publicatie. De auteurs hopen intussen dat de klimaatcascade op korte termijn in meerdere projecten, nieuwbouw of renovatie, zal worden ingezet, want "Natuurlijke Airconditioning: Waar wachten we nog op?" (Bronsema, B. et al 2017).

### UITGANGSPUNTEN VOOR HET ONTWERP

Het totale ventilatiedebiet voor hotelkamers en algemene ruimten bedraagt  $25.000 \text{ m}^3/\text{h}^{-1}$  overeenkomend met  $\approx 6,95 \text{ m}^3/\text{s}^{-1}$  of  $\approx 8,33 \text{ kg}/\text{s}^{-1}$  Uitgangspunten voor het ontwerp van de klimaatcascade zijn:

#### Koeling van de ventilatielucht in het koelseizoen.

De ontwerpconditie voor het koelseizoen is gesteld op  $28 \text{ }^\circ\text{C}$  bij  $55\% \text{ RV}$  (relatieve vochtigheid). De ventilatielucht moet hierbij worden gekoeld naar ongeveer  $17 \text{ }^\circ\text{C}$ . Uitgaande van een opwarming van  $1\text{K}$  in het luchttransportsysteem wordt dan een inblaasttemperatuur van  $18 \text{ }^\circ\text{C}$  gerealiseerd.

#### Gebruik van koude uit de bodem.

De koude wordt onttrokken aan de bodem, die ter plaatse een temperatuur heeft van  $12 \text{ }^\circ\text{C}$ . Hiermee wordt via een TSA met een MLTD [3] van  $1\text{K}$  een constante sproeiwatertemperatuur van  $13 \text{ }^\circ\text{C}$  gerealiseerd. Bij buitentemperaturen lager dan  $13 \text{ }^\circ\text{C}$  is geen koude uit de bodem meer nodig. Het sproeiwater wordt dan door de koude buitenlucht gekoeld en buiten de klimaatcascade weer naar  $13 \text{ }^\circ\text{C}$  verwarmd met behulp van warmte uit de WKO-installatie en warmtepompen.

#### Drukopbouw ten behoeve van het luchttransport in het gebouw [4].

Positieve druk aan de voet van de klimaatcascade levert een belangrijke bijdrage voor het luchttransport in het gebouw. Parameters hiervoor zijn de water/luchtverhouding  $R_{w/L}$  en de doorsnede van de cascade. Een toenemende  $R_{w/L}$  heeft een hogere dichtheid van het water/luchtmengsel tot gevolg waardoor de positieve drukgradiënt ten opzichte van lucht toeneemt. Een kleinere doorsnede heeft bij dezelfde  $R_{w/L}$  hetzelfde effect. Het pompvermogen neemt

echter ook evenredig toe met het sproeiwaterdebiet, hetgeen energetisch een nadeel is. Het drukverlies van het luchttoevoersysteem inclusief de voordruk op het verst gelegen toevoerpunt bedraagt  $100 \text{ Pa}$ . In voorgaande versies van het ontwerp werd uitgegaan van een onder alle omstandigheden te realiseren positieve drukgradiënt aan de voet van de klimaatcascade van minimaal  $100 \text{ Pa}$ . Simulaties met het Excel rekenmodel wijzen uit dat hiervoor een hoge  $RW/L$  nodig is in combinatie met een hoge luchtsnelheid van ongeveer  $4,5 \text{ m}/\text{s}^{-1}$ . Dit heeft de volgende nadelen:

- Het vermogen en het inherente energiegebruik van de sproeipomp is hoog;
- Het afschakelen van sproeiers is niet mogelijk omdat dit direct gevolgen heeft voor de drukgradiënt;
- In de U-bocht aan de voet van de cascade treedt een relatief hoog drukverlies op;
- Gevreesd moet worden dat door de hoge luchtsnelheid wateraerosolen worden meegevoerd in het toevoersysteem.

Er is daarom in combinatie met de sproeierselectie gekozen voor een zo laag mogelijk sproeiwaterdebiet waarmee de positieve drukgradiënt van  $100 \text{ Pa}$  niet kan worden gerealiseerd. Om het effect hiervan te compenseren is in het centrale toevoerkanaal van de lucht een regelbare hulpventilator geïntegreerd. Deze ont koppeling van de capaciteitsregeling en de drukopbouw maakt het tevens mogelijk bij dalende capaciteitsvraag sproeiers af te schakelen. De hierdoor bespaarde pompenergie is aanzienlijk groter dan de extra benodigde ventilatorenergie.

#### Minimalisering van het energiegebruik in alle seizoenen.

Traditionele warmteterugwinning met behulp van twin-coil batterijen is in dit concept niet mogelijk omdat het luchtzijdig drukverlies over de warmtewisselaars niet door de natuurlijke drukopbouw in de klimaatcascade kan worden gecompenseerd. Warmteterugwinning wordt gerealiseerd door het zo diep mogelijk koelen van de gebruikte afvoerlucht, en het nuttig gebruik van de teruggewonnen warmte via de WKO-installatie met behulp van warmtepompen.

#### Maximalisering van de Coëfficiënt of Performance COP.

De COP van de klimaatcascade wordt berekend als quotiënt van de psychrometrische energieprestatie en het opgenomen vermogen van de sproeiwaterpomp + de hulpventilator.

### SPROEISYSTEEM

#### Druppelgrootteverdeling

De distributieve verdeling van druppeldiameters in de klimaatcascade kan worden uitgedrukt in

enkele kengetallen, waarmee de druppelgrootteverdeling, het sproeispectrum, met één getal kan worden gekarakteriseerd.

$d_{10}$  - gemiddelde druppeldiameter

$d_{20}$  - gemiddelde druppeldiameter op oppervlak of SMD (Surface Mean Diameter). Het cumulatieve oppervlak van de druppels, uitgedrukt in  $d_{20}$  (SMD), is bepalend voor het warmtewisselend oppervlak in de klimaatcascade

$d_{30}$  - gemiddelde druppeldiameter op volume of VMD (Volume Mean Diameter). De valsnelheid van de druppels, medebepalend voor de warmteoverdrachtscoëfficiënt, is afhankelijk van  $d_{30}$  (VMD).

$d_{32}$  - Sauter Mean Diameter SMD – de diameter met de dezelfde volume/oppervlak verhouding als het totale volume/oppervlak van de druppelverzameling in het sproeispectrum. Deze relatie tussen SMD en VMD is belangrijk voor de warmteoverdracht.

### Excel 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 in Excel gemaakt, dat met één muisklik het spelen met de vele variabelen mogelijk maakt en de consequenties daarvan voor het ontwerp en de dimensionering in beeld brengt [5]. 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 uitredeconditie van de lucht worden bepaald bij de energetisch of anderszins optimale omstandigheden. De hydraulische en thermische trek worden als afgeleide hiervan berekend. Het model is gevalideerd op basis van metingen in een fysiek model, en de resultaten zijn, voor wat betreft de voelbare capaciteit, betrouwbaar genoeg voor praktisch gebruik. De berekening van de latente capaciteit is echter minder nauwkeurig (Bronsema, B. 2013/A).

### CFD-simulatiemodel

Door Spraying Systems GmbH, de leverancier van de sproeiers, is een CFD-simulatiemodel

ontwikkeld dat eveneens is gevalideerd op basis van metingen in het fysiek model, en ook betrouwbare resultaten levert (Bronsema, B. 2013).

### Ontwerp

Na uitgebreide trial-and-error simulaties met behulp van het excel-rekenmodel is, mede in overleg met Spraying Systems GmbH, het volgende ontwerp tot stand gekomen (zie figuur 1).

- Doorsnede van de klimaatcascade 1.300 x 1.300 mm, met een bijbehorende luchtsnelheid van  $4,1 \text{ m/s}^{-1}$
- 9 Sproeiers type FullJet 1-1/2HH-30250. De druppelgrootteverdeling van dit model is bekend waardoor extra kosten voor de meting hiervan konden worden vermeden [6]. Het sproeispectrum van dit type bij een waterdebiet van  $0,7 \text{ dm}^3/\text{s}^{-1}$  en een voordruk van 0,5 bar wordt gekarakteriseerd door  $d_{10} = 0,581 \text{ mm}$ ,  $d_{30} = 1,708 \text{ mm}$  (VMD) en  $d_{32} = 1,377 \text{ mm}$  (SMD). De sproeihoek van dit model is 15 graden.
- Vloeistofdebiet  $9 \cdot 0,7 = 6,3 \text{ dm}^3/\text{s}^{-1}$ , met een bijbehorende de water/luchtratio  $R_{w/l} = 0,756$ .

De thermische, psychrometrische en aerodynamische prestaties van dit ontwerp zijn met behulp van het excel-rekenmodel geanalyseerd. Ter meerdere zekerheid zijn de berekeningen door Spraying Systems GmbH met behulp van CFD-simulaties geverifieerd.

### Sproeipomp

De sproeipomp moet het koelwater oppompen naar de 10e verdieping en tevens de drukver-

liezen van de sproeileiding en de sproeiers compenseren. De pompenergie wordt voor een deel benut voor het in beweging brengen van de ventilatielucht door impulsoverdracht van de vallende waterdruppels op de lucht. Naar verwachting wordt een veel groter deel tijdens de val omgezet in warmte.

Bij een sproeidruk van 50 kPa en enig drukverlies in het leidingwerk is de opvoerhoogte van de pomp 40 m. Bij een pomp rendement inclusief elektromotor van 75% wordt het pompvermogen berekend op 3,3 kW.

### BEDRIJFSVOERING

De sproeipomp is gedimensioneerd op de psychrometrische prestatie van de klimaatcascade bij de ontwerp buitenconditie van  $28 \text{ }^\circ\text{C}$  bij 55% RV. Bij lagere buitentemperaturen kunnen sproeiers worden afgeschakeld waardoor veel energie wordt bespaard. Met behulp van het Excel rekenmodel is het aantal actieve sproeiers bepaald dat nodig is om de luchttemperatuur aan de voet van de klimaatcascade op  $17,5 \text{ }^\circ\text{C}$  te houden (figuur 2). Deze figuur laat zien dat bij  $\theta_e \approx 18 \text{ }^\circ\text{C}$  nog slechts 1 actieve sproeier nodig is. In feite zou bij deze buitentemperatuur de klimaatcascade buiten bedrijf kunnen worden gesteld, maar in verband met een continue bedrijfsvoering verdient dit geen voorkeur. Bij  $\theta_e \leq 6 \text{ }^\circ\text{C}$  worden in volgorde weer sproeiers bijgeschakeld om een R.V. van minimum 30% in de ruimte te waarborgen.

### THERMISCHE PRESTATIES

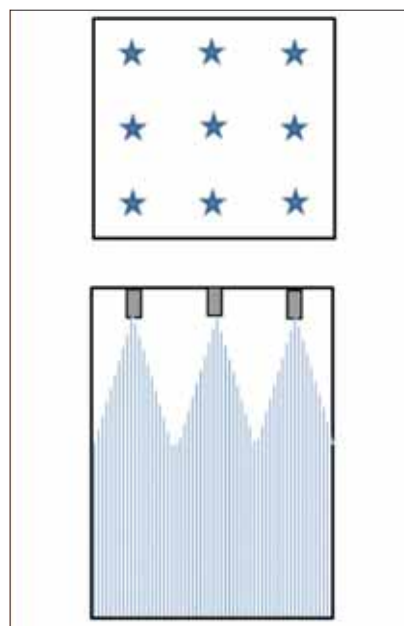
De temperatuur van het sproeiwater wordt op  $13 \text{ }^\circ\text{C}$  geregeld. Bij  $\theta_e \geq 14 \text{ }^\circ\text{C}$  wordt het sproeiwater naar  $13 \text{ }^\circ\text{C}$  terug gekoeld met behulp van bronwater uit het WKO-systeem. Bij  $\theta_e \leq 13 \text{ }^\circ\text{C}$  wordt het sproeiwater door de lucht gekoeld en moet via een externe warmtewisselaar in het sproeisysteem weer op  $13 \text{ }^\circ\text{C}$  worden verwarmd. Om bevroeringsgevaar in het sproeispectrum te voorkomen wordt bij buitentemperaturen  $< 3 \text{ }^\circ\text{C}$  de lucht extern voorverwarmd tot  $\approx +3 \text{ }^\circ\text{C}$ .

### HYGRISCHE PRESTATIES

De luchtvochtigheid in de ruimte  $-RV_i-$  is een resultante van de vochtigheid van de buitenlucht  $-RV_e-$  en de hygrische prestaties van de klimaatcascade. Figuur 3 laat zien dat is uitgaan van  $RV_e = 90\%$ , vanaf  $\theta_e = 18 \text{ }^\circ\text{C}$  aflopend naar de ontwerp zomerconditie van 55% bij  $\theta_e = 28 \text{ }^\circ\text{C}$ . De resulterende ruimte  $RV_i$  ligt tussen de ideale waarden van 30% en 70%. Hierbij is geen rekening gehouden met vochtontwikkeling in de ruimte. De vochtigheid wordt geregeld door af- en bij schakeling van het aantal sproeiers.

### AERODYNAMISCHE PRESTATIE

De druk aan de voet van de klimaatcascade

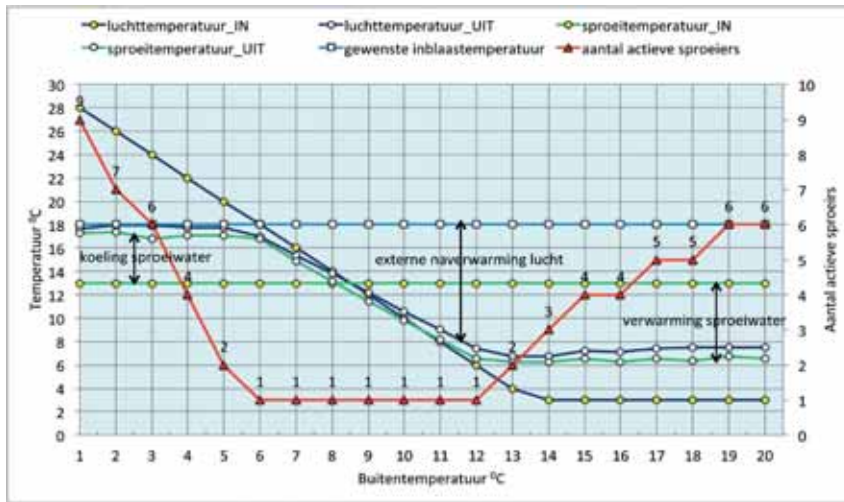


Figuur 1. Principe-ontwerp klimaatcascade

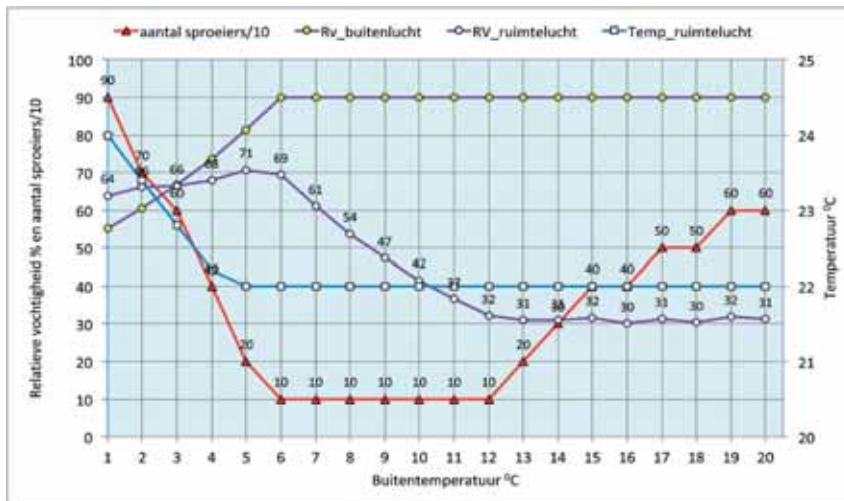
wordt bepaald door aerodynamische, hydraulische en thermische drukverschillen, waarbij het hydraulische drukverschil de grootste rol speelt. Deze wordt in hoofdzaak bepaald door de water-

massa in de klimaatcascade, een resultante van de water/lucht verhouding  $R_{w/l}$  en het oppervlak van de doorsnede, die een afgeleide is van de gekozen luchtsnelheid. Thermische drukverschil-

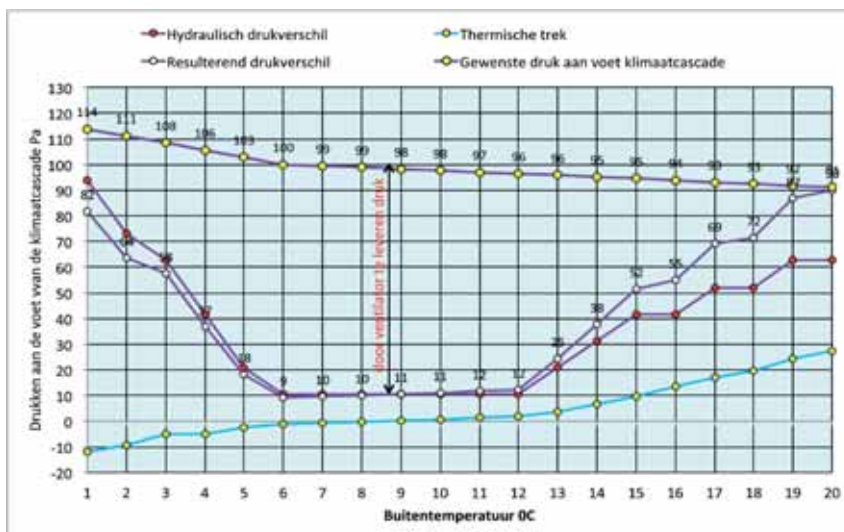
len zijn afhankelijk van de buitentemperatuur, spelen hierbij een geringere rol maar kunnen desondanks niet worden verwaarloosd. Het drukverlies in het toevoersysteem is bepaald op  $\approx 50$  Pa en de gewenste voordruk ten behoeve van de aansluitingen van de hotelkamers met brandklep en constant debietregelaar bedraagt  $\approx 50$  Pa. De benodigde druk in de toevoerschachten is dus  $\approx 100$  Pa. Verder moet rekening worden gehouden met de thermische trek in de toevoerschachten, die varieert met de buitentemperatuur. De maximum (negatieve) thermische trek op de 10e verdieping is 's zomers  $\approx -14$  Pa hetgeen inhoudt dat de druk aan de voet van de klimaatcascade moet worden verhoogd tot  $\approx 114$  Pa. 's Winters is de maximum thermische trek op de begane grond  $\approx +9$  Pa, waardoor de druk aan de voet van de klimaatcascade kan worden verlaagd tot 91 Pa. De drukopbouw aan de voet van de klimaatcascade volgens het hiervoor omschreven ontwerp en bedrijfsvoering is als functie van de buitentemperatuur aangegeven in figuur 4. Bij hoge buitentemperaturen en 9 actieve sproeiers wordt 82 Pa door de klimaatcascade geleverd. Bij daling van de buitentemperatuur worden sproeiers afgeschakeld volgens het hiervoor omschreven algoritme, waardoor het hydraulisch drukverschil afneemt. Bij buitentemperaturen  $\geq 16$  °C ontstaat er in de klimaatcascade een positieve thermische trek waardoor bij de ontwerp-wintertemperatuur de druk aan de voet van de klimaatcascade oploopt tot 90 Pa. Het verschil tussen de benodigde druk in het toevoersysteem en het resulterend drukverschil aan de voet van de klimaatcascade moet worden opgebracht door een ventilator. In principe kan ook gebruik worden gemaakt van de winddruk ter plaatse van de buitenlucht aanzuigkamer.



Figuur 2. Temperaturen in de klimaatcascade als functie van buitentemperatuur en aantal actieve sproeiers.



Figuur 3. Relatieve vochtigheid en aantal actieve sproeiers als functie van de buitentemperatuur



Figuur 4. Drukopbouw in de klimaatcascade als functie van de buitentemperatuur

## ENERGIEPRESTATIES

De met behulp van het excel-rekenprogramma berekende psychrometrische capaciteiten bij buitentemperaturen van 28 °C → -10 °C zijn aangegeven in tabel 1.

Het nominale vermogen van de sproeipomp bij 9 actieve sproeiers is 3,3 Kw. Er is vanuit gegaan dat bij het afschakelen van sproeiers het vermogen naar evenredigheid daalt. Hierbij is echter geen rekening gehouden met het resulterend drukverschil van de klimaatcascade dat ten goede komt aan het vermogen van de toevoerventilator. Om dit effect in rekening te brengen zijn de bespaarde ventilatorvermogens verrekend met de vermogens van de sproeipomp. Het aldus berekende "virtueel" pompvermogen is nu gebruikt voor de berekening van de COP. De aldus berekende COP-waarden variëren van -46 (koeling en droging) tot +90 (verwarming

temperaturen		energieprestatie -kW			energieprestatie -kWh.a <sup>-1</sup>			energieprestatie				COP
$\theta_e$ - °C	uren/jaar	Qtot	Qvoelb	Qlat	Qtot	Qvoelb	Qlat	kW <sub>pomp</sub>	kW <sub>spie</sub>	kW <sub>verto</sub>	kWh/jaar	Qtot/kW <sub>verto</sub>
28	64	-114	-86	-28	-7.295	-5.491	-1.804	3,3	0,81	2,48	159	-46
26	77	-89	-67	-21	-6.822	-5.195	-1.627	2,6	0,63	1,93	149	-46
24	116	-72	-51	-21	-8.388	-5.894	-2.494	2,2	0,57	1,63	189	-44
22	198	-52	-35	-17	-10.267	-6.927	-3.340	1,5	0,36	1,10	218	-47
20	329	-22	-18	-4	-7.286	-6.029	-1.257	0,7	0,18	0,55	181	-40
18	557	-10	-8	-1	-5.358	-4.640	-719	0,4	0,09	0,27	153	-35
16	754	-6	-5	-1	-4.341	-3.768	-573	0,4	0,10	0,27	204	-21
14	897	-2	-2	0	-1.530	-1.494	-35	0,4	0,10	0,27	239	-6
12	920	2	2	1	2.221	1.533	688	0,4	0,11	0,26	240	9
10	960	7	5	2	6.357	4.798	1.559	0,4	0,11	0,26	246	26
8	945	11	8	3	10.775	7.872	2.903	0,4	0,12	0,25	236	46
6	910	15	12	3	13.766	10.612	3.153	0,4	0,12	0,25	223	62
4	688	37	22	14	25.174	15.474	9.701	0,7	0,24	0,49	337	75
2	521	58	31	27	29.991	16.058	13.933	1,1	0,38	0,72	377	80
0	382	75	35	41	28.837	13.365	15.472	1,5	0,51	0,95	364	79
-2	209	80	34	46	16.770	7.138	9.632	1,5	0,55	0,92	192	87
-4	112	96	37	60	10.794	4.105	6.689	1,8	0,69	1,14	128	84
-6	59	102	37	64	6.002	2.212	3.790	1,8	0,67	1,17	69	87
-8	35	114	37	77	4.000	1.312	2.688	2,2	0,86	1,34	47	86
-10	31	118	37	80	3.652	1.162	2.489	2,2	0,89	1,30	40	90
uren	8764										3.991	
koelen/drogen					-51.287	-39.440	-11.847					
verwarmen/bevochtigen					158.338	85.640	72.698					

Tabel 1. Psychrometrische en energieprestaties

en bevochtiging) bij buitentemperaturen van 28 °C tot -10 °C, zie tabel 1, die de berekeningen tabellarisch weergeeft. Het jaargemiddelde van de COP-waarde is 55. De frequentie van de buitentemperatuur  $\theta_e$  is ontleend aan de frequentietabellen van het KNMI voor De Bilt over de jaren 1981-2000.

### NAVERWARMING VAN DE VENTILATIELUCHT

De luchttemperaturen aan de voet van de klimaatcascade zijn als functie van de buitentemperatuur weergegeven in figuur 5. Om de gewenste inblaasttemperatuur van  $\approx 17,5$  °C te realiseren moet de lucht bij buitentemperaturen  $\approx 18$  °C worden naverwarmd.

### WATERZIJDIGE PRESTATIES

De watertemperaturen zijn als functie van de buitentemperatuur weergegeven in figuur 6. Bij de ontwerp zomerconditie moet het sproeiwaterdebiet bij 9 actieve sproeiers van  $6,3 \text{ kg/s}^{-1}$  worden teruggekoeld van  $\approx 17,3$  °C naar 13 °C. Het thermisch vermogen hiervoor wordt geleverd door het WKO-systeem via een TSA met een MLTD van 1 K in de thermo-hydraulische kringloop.

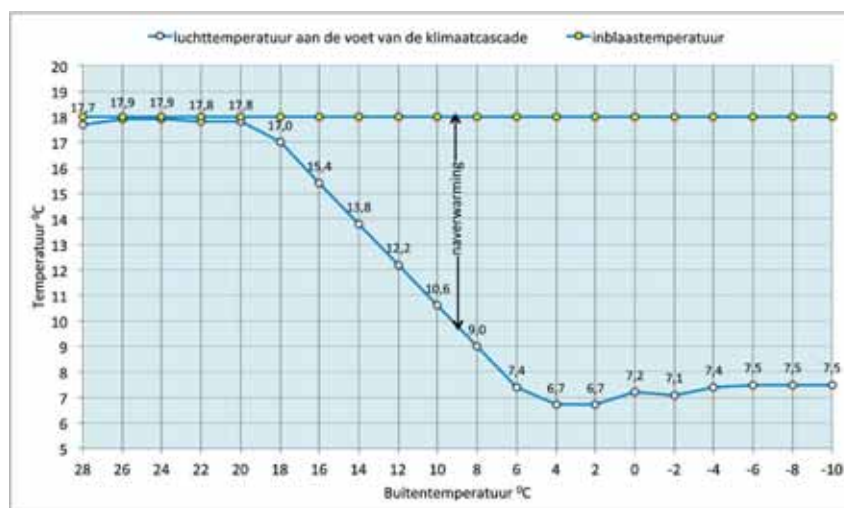
Bij de ontwerp winterconditie moet het sproeiwaterdebiet bij 6 actieve sproeiers van  $6,3 \cdot 6/9 = 4,2 \text{ kg/s}^{-1}$  worden verwarmd van  $\approx 6,6$  °C naar 13 °C. Het thermisch vermogen bedraagt  $[4,2 \cdot 4,182 \cdot (13 - 6,6)] \approx 115 \text{ kW}$  wordt geleverd door de warmtecentrale via een TSA in de sproeileiding.

### JAARLIJKSEENERGIEPRESTATIES

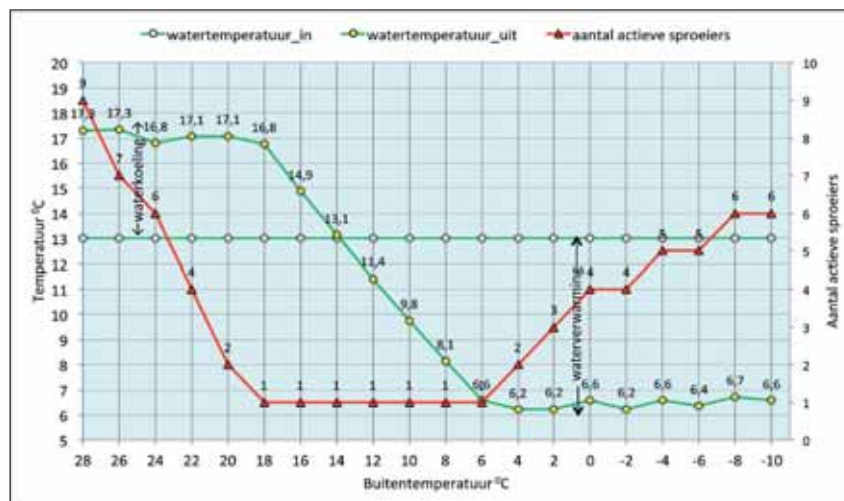
De sproeipomp en de ventilator verzorgen tezamen de conditionering en de verplaatsing van de ventilatielucht. De berekende jaarlijkse energiegebruiken van

sproeipomp en ventilator zijn als functie van de buitentemperatuur weergegeven in figuur 7. Het aandeel van de pompenergie in het totale

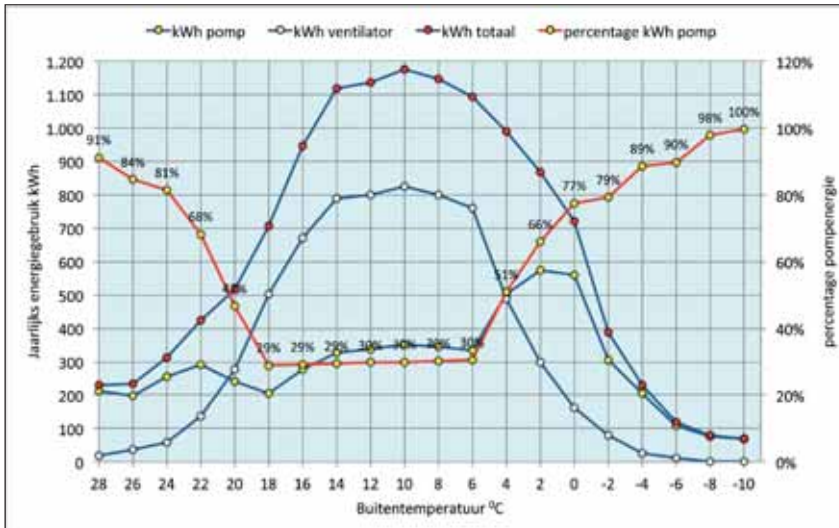
gebruik loopt parallel met het aantal actieve sproeiers volgens figuur 2. De figuren laten duidelijk de invloed zien van het aantal actieve



Figuur 5. Luchttemperaturen als functie van de buitentemperatuur



Figuur 6. Watertemperaturen als functie van de buitentemperatuur



Figuur 7. Jaarlijkse energiegebruiken voor het luchttransport distributief

sproeiers op de ventilatorenergie. Merk op dat bij een buitentemperatuur van -10 °C, mede dankzij de thermische trek in de toevoerschachten, het luchttransport geheel door de klimaatcascade wordt verzorgd.

Het jaarlijkse energiegebruik voor ventilator en sproeipomp energie is berekend op 12,5 MWh. Een traditionele luchtbehandelingskast voorzien luchtfilter, geluiddempers, warmtewiel en verwarmings- en koelbatterij mag volgens EU-verordening 1253/2014 per 2018 een maximaal intern specifiek ventilatorvermogen hebben van  $800 \text{ W} \cdot (\text{m}^3/\text{s}^{-1})^{-1}$ , voor een debiet van  $25.000 \text{ m}^3/\text{h}^{-1}$  en continubedrijf overeenkomend met een jaarlijks gebruik van 48,7 MWh, ongeveer vier keer zoveel als voor de klimaatcascade. Andersom kan worden gesteld dat het energiegebruik voor de luchtverplaatsing via de klimaatcascade slechts  $(12,5/48,7) \cdot 100 \approx 25\%$  is van het van het energiegebruik voor luchttransport bij traditionele airconditioning. Hierbij wordt aangetekend dat het fijnmazige luchtverdeel- en afzuigsysteem, met constant debiet- en terugslagkleppen per hotelkamer,

een aanzienlijk hoger drukverlies heeft dan in een kantoorgebouw. Ook is bij de vergelijking het energiegebruik van de gekoeld waterpompen in een traditioneel systeem nog niet in rekening gebracht.

### PSYCHROMETRISCHE PROCESSEN

De psychrometrische processen voor de ontwerp condities van zomer en winter zijn in figuur 8 en 9aangegeven.

### LUCHTKWALITEIT

In het sproeispectrum worden verschillende luchtverontreinigingen in de ventilatielucht geabsorbeerd, waardoor de luchtkwaliteit wordt verbeterd. Door het lage temperatuurniveau krijgt legionella geen kans en een hygiënische bedrijfsvoering wordt zeker gesteld door filtering en desinfectie van het sproeiwater. Mogelijke positieve effecten door het water-valeffect, ionisatie en/of ozonisatie zullen in de praktijk nader worden onderzocht.

Dit artikel is deel 1 van de miniserie.

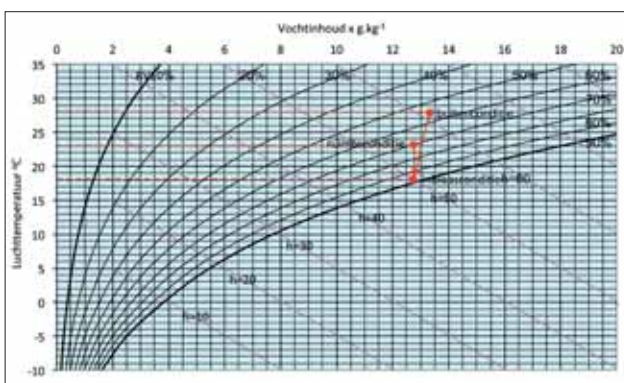
- EARTH, WIND & FIRE: EVOLUTIE VAN EEN INNOVATIE (1)  
"Earth": Natuurlijke ventilatie en luchtbehandeling via de klimaatcascade
- EARTH, WIND & FIRE: EVOLUTIE VAN EEN INNOVATIE (2)  
"Wind": Natuurlijke ventilatie en energie via het dak
- EARTH, WIND & FIRE: EVOLUTIE VAN EEN INNOVATIE (3)  
"Fire": Natuurlijke ventilatie en energie via de zonneshoorssteen

### REFERENTIES

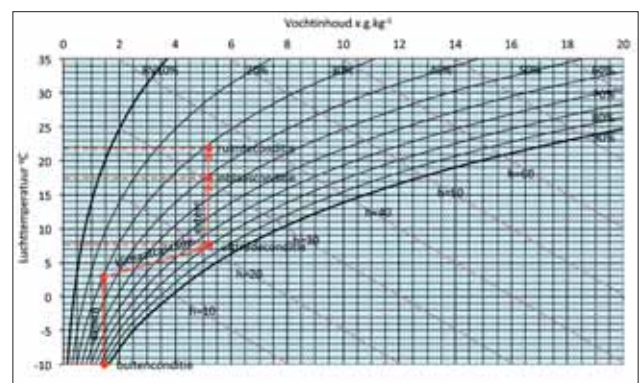
- Bronsema, B. 2013/A. Earth, Wind & Fire – Natuurlijke Airconditioning. Proefschrift TU Delft. Uitgeverij Eburon Delft. ISBN 978 90 5972 762 5. TU Delft Repository <https://tudelft.on.worldcat.org/oclc/845637529>
- Bronsema, B. 2013/B. Earth, Wind & Fire – Natuurlijke airconditioning (1)- Onderzoeksdoelen en -methoden. TVVL Magazine | 07/08 | 2013
- Bronsema, B. 2013/C. Earth, Wind & Fire – Natuurlijke airconditioning (2)- Onderzoeksresultaten. TVVL Ma-gazine | 07/08 | 2013
- Bronsema, B. et al 2017. Natuurlijke airconditioning: Waar wachten we op? TVVL magazine 10/2017
- Cooper, G. 1998. Air-conditioning America, Engineers and the Controlled Environment 1900 – 1960. John Hopkins University Press. ISBN 0-8018-5716-3

### VERWIJZINGEN:

1. 8 augustus 2017
2. Voor een samenvatting van het onderzoek zie (Bronsema, B. 2013/B en 2013/C)
3. Mean Logarithmic Temperature Difference
4. Lucht wordt afgezogen via de zonneshoorssteen – zie deel (3) van deze miniserie
5. Ontwerper Wim van der Spoel
6. Gemeten ten behoeve van het Onderzoek Earth, Wind & Fire
7. Architectural Engineering & Technology



Figuur 8. Ontwerp zomercondities 28 °C -55% RV.



Figuur 9. Ontwerp wintercondities -10 °C-90% RV.