

## Auteurs

Dr. Ing. Ben Bronsema [1], Ir. Tonko Leemhuis [2], Ir. Sacha Noorlander [2], Ir. Hette de Vlieger [3]

1. Stichting EWF-Lab - Bronsema Consult
2. NWA architecten
3. IF Technology

# Geavanceerde natuurlijke ventilatie in energieneutrale hoogbouw appartementen

## Earth, Wind & Fire on the move

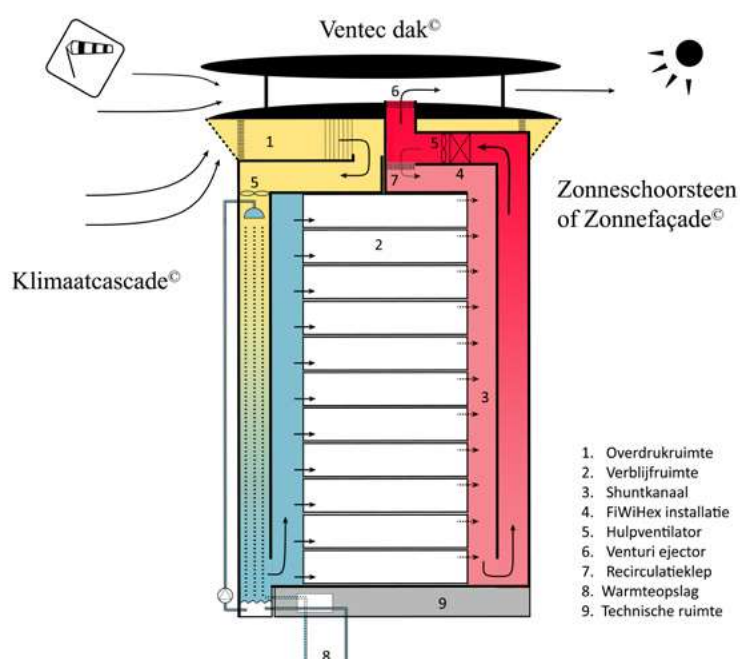
*Natuurlijke ventilatie met behoud van een goed binnenklimaat in een energieneutrale hoogbouw lijkt een illusie. Gezien de klimaatverandering met warmere zomers en frequentere hittegolven is zelfs koeling wenselijk dan wel noodzakelijk (W/E-adviseurs 2018). In een studie is onderzocht of en hoe een ventilatiesysteem op basis van het Earth, Wind & Fire-concept (EWF) kan helpen dit te realiseren.*

Het EWF-concept, dat in het promotieonderzoek van de hoofdauteur is ontwikkeld voor natuurlijke airconditioning in kantoorgebouwen (Bronsema, B. 2013), wordt in deze studie toegepast als collectief ventilatiesysteem in een appartementsgebouw. Door gebruik te maken van natuurlijke energiebronnen, geothermische energie, wind en zon ("Earth, Wind & Fire") wordt een gebouw getransformeerd tot een klimaatmachine, geactiveerd door natuurlijke hulpbronnen.

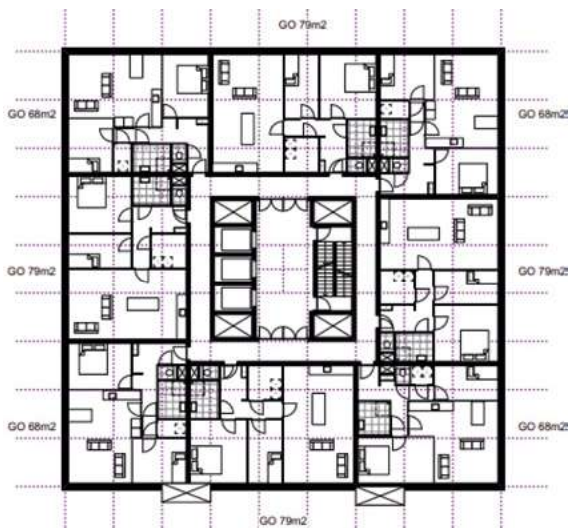
Deze klimaatmachine wordt gevormd door drie responsieve bouwkundige elementen:

- Het Ventecdak, dat gebruik maakt van winddruk voor toevoer van ventilatielucht via de overdrukkamer en afzuig via de venturi-ejector.
- De Klimaatcascade voor het conditioneren van de ventilatielucht (koelen en drogen in de zomer, verwarmen en bevochtigen in de winter). Hierbij wordt tevens overdruk opgewekt voor het luchttransport in het gebouw.
- De Zonneschoorsteen voor het afzuigen van de ventilatie lucht en het oogsten van zonnewarmte.

Het EWF-concept vraagt om een nieuwe ontwerpmethodologie, waarbij de architect een belangrijke rol speelt als technisch en artistiek co-ontwerper van het klimaatstelsel. Met dit concept kan niet alleen een substantiële bijdrage worden geleverd aan de noodzakelijke energietransitie in de gestapelde woningbouw, maar kunnen ook veel voorkomende binnenklimaatproblemen in dit type gebouwen worden voorkomen. Het gaat niet om een hightech, maar om een onderhoudsvriendelijke low-tech oplossing, zeker op woningniveau.



Figuur 1: Het Earth, Wind & Fire-concept.



Figuur 2: Plattegrond Woonlaag.

Conventionele woningventilatie wordt uitgevoerd als onderdrukstelsysteem met luchttoevoer in de verblijfsruimten via gevelroosters en afzuiging met een afzuigunit per woning (balansventilatie uitgezonderd). De ventilatiecapaciteit wordt in overeenstemming met het Bouwbesluit bepaald op basis van het oppervlak van de verblijfsruimten. Omdat er geen direct verband is tussen het oppervlak en het aantal aanwezige personen is dit een zeer grove benadering. Er is daarom algemeen consensus dat dit concept voorbijgaat aan de eisen die aan een gezond binnenmilieu moeten worden gesteld. De consequentie hiervan is veelal ongezonde ruimtelucht met CO<sub>2</sub>-concentraties van meer dan 1.200 PPM, terwijl voor gezonde volwassenen een grenswaarde van 800 PPM zou moeten worden aangehouden (ISIAQ-CIB 2003, TNO 2003, Roelofsen 2012).

Het hierna omschreven collectieve ventilatiesysteem op basis van het Earth, Wind & Fire-concept levert geconditioneerde ventilatielucht onder overdruk aan de individuele appartementen. De luchtverdeling vindt plaats op basis van de CO<sub>2</sub>-concentratie, en niet op basis van oppervlak volgens Bouwbesluit. De bewoner profiteert van gezonde lucht met koeling en fijnstofreductie in de zomer, en in de winter geen droge lucht meer. Het EWF-concept is hierdoor beter dan Klasse A -Zeer Goed- van het Programma van Eisen Gezonde Woningen 2022. Laten we het Klasse A++ noemen.

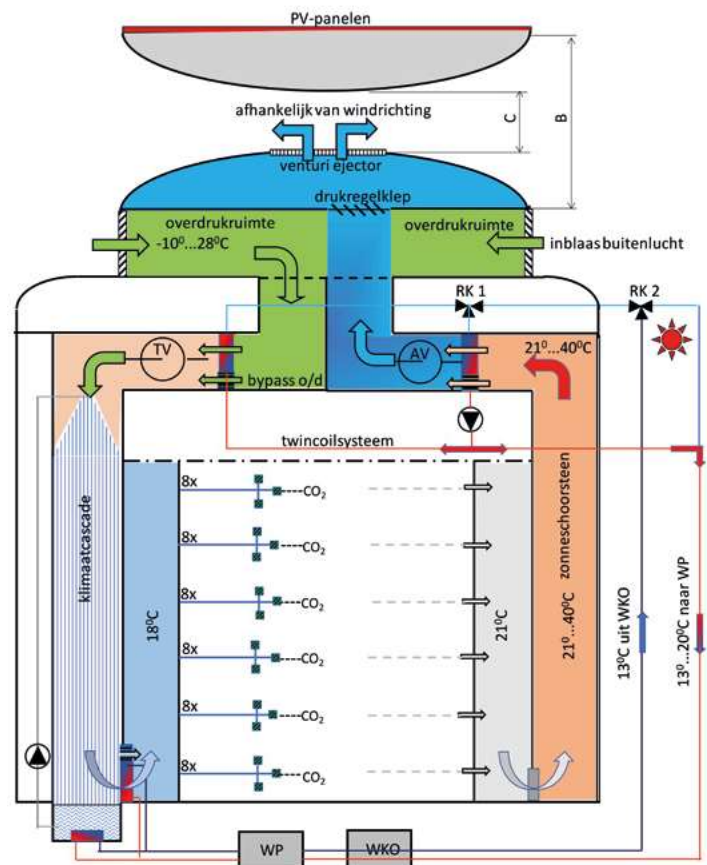
### Voorbeeldgebouw

De studie is toegespitst op een appartementsgebouw van 20 woonlagen + een begane grond met winkel-, horeca

of bedrijfsbestemming- en een kelder verdieping, zie figuur 2. Elke woonlaag heeft 8 appartementen van gemiddeld 75 m<sup>2</sup> en een totaal gebruiksoppervlak (GO) van circa 600 m<sup>2</sup>. De hoogte van de woonlagen is 3,1 m en van de begane grond 4,0 m. De gevelfactor is 0,46.

Het ventilatieoppervlak is gesteld op 70% van het gebruiksoppervlak, overeenkomend met ongeveer 420 m<sup>2</sup> per woonlaag. De minimum ventilatie capaciteit volgens het Bouwbesluit is 0,9 dm<sup>3</sup>/s.m<sup>2</sup>, per woonlaag 1.360 m<sup>3</sup>/h en per appartement 170 m<sup>3</sup>/h. In verband met een optimale luchtkwaliteit en koelcapaciteit in de zomer gaan we iets boven het minimum zitten en rekenen verder met 200 m<sup>3</sup>/h. De ventilatiecapaciteit per woonlaag is 1.600 m<sup>3</sup>/h, en voor 20 verdiepingen en 32.000 m<sup>3</sup>/h totaal. Samen met de ventilatiecapaciteit van de begane grond, gesteld op 4.000 m<sup>3</sup>/h, totaal 36.000 m<sup>3</sup>/h  $\equiv$  10 m<sup>3</sup>/s.

Figuur 3 geeft een compleet beeld van het EWF-concept vanaf de toevoer van verse ventilatielucht tot de afvoer van de gebruikte lucht.



Figuur 3: Anatomie van het EWF-concept.

Het gemiddelde drukverlies van het luchttoevoer systeem in zomer en winter bij 100% capaciteit is circa 150 Pa, waarvan 50 Pa voor de debietregelaars in de appartementen. Het luchtafvoersysteem werkt met een gemiddeld drukverlies van 30 Pa. Dit wordt mogelijk door

toepassing van multi-kanaal warmtewisselaars met bypass en lage luchtsnelheden in de luchtkanalen. Bij een gemiddelde ventilatiebehoefte van 50% van de geïnstalleerde capaciteit zijn de totale drukverliezen van toevoer en afzuig 100 Pa. Deze worden, mede afhankelijk van het plaatselijk windklimaat, in hoge mate gecompenseerd door aerodynamische, hydraulische en thermische drukverschillen in Ventecdak, klimaatcascade en zonneshoorsteen.

### Centrale capaciteitsregeling

Het luchttoevoersysteem onderhoudt een constante druk in het kanalsysteem van circa 50 Pa (instelbaar) op de verst verwijderde debietregelaar aan het eind van het kanalsysteem. Het totale drukverlies van het systeem wordt in eerste instantie gecompenseerd door winddruk in het Ventecdak en positieve drukopbouw in de klimaatcascade. Met behulp van de toerengeregelde hulpventilatoren aan de top van de klimaatcascade wordt onder alle weer-en klimaatcondities een constante druk op de debietregelaars onderhouden, en daardoor ook voldoende toevoer van ventilatielucht gerealiseerd.

In de luchtafvoer dient een constante onderdruk in het afzuigkanaal te worden onderhouden van circa -25 Pa op het eind van het afvoerkanal. Deze onderdruk wordt in eerste instantie geleverd door thermische trek in de zonneshoorsteen en aerodynamische trek in het Ventecdak. Met behulp van de toerengeregelde hulpventilatoren aan de top van de zonneshoorsteen wordt onder alle weer-en klimaatcondities een constante onderdruk in het afzuigkanaal onderhouden, waardoor ook de nodige afzuigcapaciteit in stand blijft.

### Warmteterugwinning

Figuur 3 brengt ook het systeem voor warmteterugwinning in beeld. De warme afzuiglucht uit de zonneshoorsteen wordt gekoeld door een warmtewisselaar, waarbij de teruggewonnen warmte, afhankelijk van het seizoen, als volgt wordt benut:

**Winterseizoen:** de warmte wordt afgegeven aan een warmtewisselaar in de luchttoevoer, waardoor de koude ventilatielucht wordt voorverwarmd (twin-coil systeem).

**Tussenseizoen:** via regelklep 1 wordt de warmte verdeeld tussen het twin-coil systeem en water van  $\approx 13^\circ\text{C}$  uit de WKO-installatie. Het hierdoor verwarmde water wordt benut als warmtebron voor de warmtepompen, die daardoor met verhoogde COP werken.

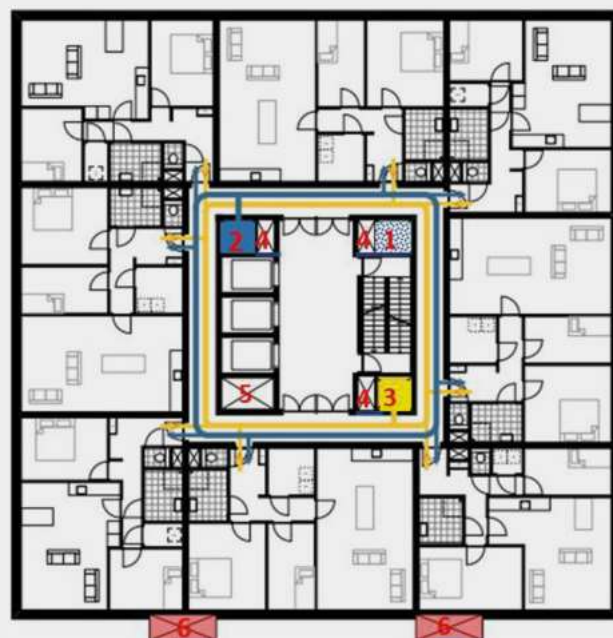
**Zomerseizoen:** het verwarmde water uit de WKO-installatie wordt gebruikt als warmtebron voor warmtepompen ten behoeve van warm tapwatervoorziening. Overtollige warmte wordt aan de bodem teruggeleverd voor herstel van de energiebalans. Als dit niet nodig is,

wordt het koude water via regelklep 2 onverwarmd teruggevoerd naar het WKO-systeem.

De warmtewisselaars worden voorzien van een bypass, die ter beperking van het drukverlies worden geopend als warmteterugwinning niet nodig is, zoals de twin-coil batterij in tussen- en zomerseizoen.

De hoofdstructuur van het ventilatiesysteem is aangegeven in figuur 3.  
 1 = klimaatcascade  
 2 = toevoerschacht  
 3 = afvoerschacht  
 4 = elektra/leidingschacht  
 5 = reserveschacht/beloken schoorsteen  
 6 = zonneshoorsteen  
 = luchttoevoer  
 = luchtafvoer

Tabel 1: Verklaring hoofdstructuur.



Figuur 4: Ventilatie Woonlaag.

De Klimaatcascade (1) is voorlopig gedimensioneerd op een luchtsnelheid van 4,0 m/s waaruit een doorsnede volgt van  $10/4 = 2,5 \text{ m}^2$ , en bij een vierkante doorsnede  $1,6 \times 1,6 \text{ m}$ . De breedte kan worden aangepast aan de schachtbreedte, waardoor een rechthoekige doorsnede ontstaat. De overblijvende ruimte (4) is beschikbaar voor leidingen of als elektraschacht. In de kelder wordt de klimaatcascade via een luchtdichte kamer aangesloten op de toevoerschacht (2). Bij een lichtdebiet van  $(36.000 - 4.000)/3.600 \text{ m}^3/\text{h} \approx 8,9 \text{ m}^3/\text{s}$  en een luchtsnelheid van 3,0 m/s wordt de doorsnede hiervan  $3 \text{ m}^2$ . De restruimte in de schacht (4) is beschikbaar voor leidingen. In de kelder is hier ter plaatse ook een techniekruimte nodig voor sproeiopompen, waterbehandeling, warmtepompen e.d.

Per verdieping wordt de toevoerschacht (2) aangesloten op de toevoerkanalen in de plafond-ruimte van de gangen rondom de centrale kern, waardoor de ventilatielucht naar de appartementen wordt getransporteerd.

De plafondruimte van de gangen wordt verdeeld in een toevoerkanaal en een afzuigkanaal van gelijke breedte. Bij een gangbreedte van 1,6 m is de beschikbare breedte van beide kanalen  $\approx 0,75$  m.

Bij een ventilatiecapaciteit van  $0,45 \text{ m}^3/\text{s}$  per woonlaag, en een luchtsnelheid van  $1,5 \text{ m/s}$  is de benodigde kanaalhoogte  $(0,45/2)/(0,75 \cdot 1,5) = 0,2$  m.

Per verdieping worden de afzuigkanalen aangesloten op de afvoerschacht (3) waardoor de lucht neerwaarts wordt afgezogen naar de begane grond. De afmetingen van de afvoerschacht zijn in principe gelijk aan die van de toevoerschacht.

In de plafondruimte van de begane grond wordt de afvoerschacht aangesloten op de twee zonneschoorstenen (6). Per zonneschoorsteen wordt  $5 \text{ m}^3/\text{s}$  afgezogen. Bij een breedte van  $\approx 3,0$  m en een luchtsnelheid van  $2,5 \text{ m/s}$  is de gewenste diepte  $\approx 0,65$  m, dat is ongeveer de minimaal gewenste diepte voor de glazenwasser.

De aangegeven getallen zijn de aerodynamische gewenste afmetingen. De breedte van de zonneschoorstenen kan nader worden vastgesteld op basis van energetische eisen, i.c. de gewenste warmteopbrengst t.b.v. de energiebalans van het WKO-systeem. Als deze energiebalans kan worden gerealiseerd zonder zonneschoorstenen is de schacht (5) beschikbaar als afvoerschacht, zogeheten "beloken schoorsteen". De ventilatielucht wordt naar buiten afgevoerd via het Ventecdak.

### Ventilatie van de appartementen

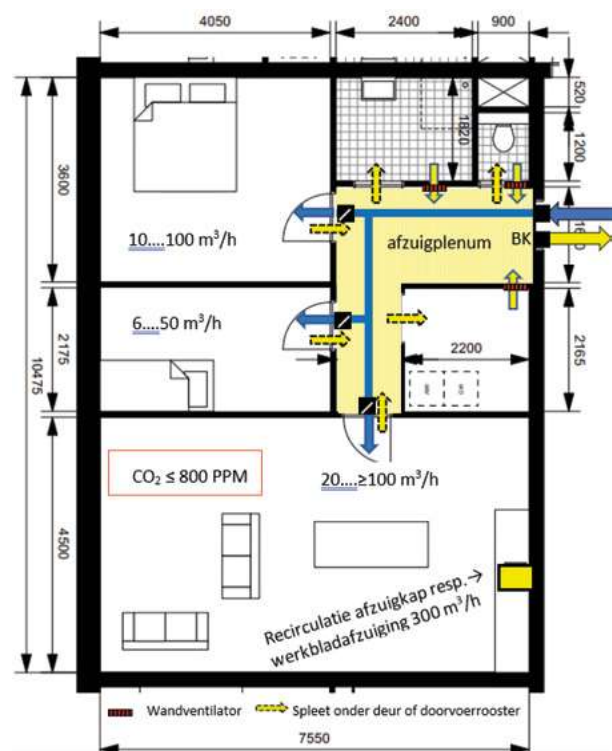
Vanuit het centrale toevoer kanaal langs de kern wordt lucht aan de appartementen toegevoerd via brandkleppen boven de voordeur, zie figuur 5. De entrees worden voorzien van verlaagde plafonds; de plafondruimte wordt luchtdicht uitgevoerd en dient als afzuigplenum. De toevoerkanalen worden aangebracht in de plafondruimte en de lucht wordt via variabel debietregelaars in de woon- en slaapkamers ingeblazen. De luchthoeveelheid wordt per vertrek geregeld op basis van  $\text{CO}_2$ -concentratie. Via overstroomb voorzieningen, spleten onder de deuren of geluiddichte overstroombroosters, stroomt de lucht naar de entree ruimten en vervolgens als suppletie naar de afgezogen ruimten.

De badkamer, ( $30 \text{ m}^3/\text{h}$ ), toilet ( $25 \text{ m}^3/\text{h}$ ) en bijkeuken/berging ( $30 \text{ m}^3/\text{h}$ ) worden via het afzuigplenum afgezogen naar het centrale afzuigkanaal langs de kern. De afzuigroosters in deze ruimten worden

uitgevoerd met een wandventilator, die bij inschakeling een verhoogd debiet naar het afzuigplenum afvoeren, ten koste van het debiet van de andere ruimten. Deze ventilatoren kunnen worden geschakeld op basis van de Relatieve Vochtigheid (badkamer) of met een tijdschakelaar (toilet).

De gewenste onderdruk wordt bepaald door het drukverlies van het afzuigstelsel in het appartement. Voorlopig is uitgegaan van maximum circa  $-25 \text{ Pa}$ , bij de inregeling proefondervindelijk zo laag mogelijk in te stellen. Het afzuigplenum is via een brandklep boven de voordeur direct aangesloten op het centrale afzuigkanaal langs de kern.

Voor een effectieve keukenafzuiging is een capaciteit nodig  $\geq 300 \text{ m}^3/\text{h}$  (Jacobs et al 2017, 2018) hetgeen niet te combineren is met een afzuigstelsel op basis van het Bouwbesluit. Voorgesteld wordt hiervoor recirculatiekappen of werkbladafzuiging met actief kool- en fijnstoffilter toe te passen.



Figuur 5: Ventilatie appartementen.

### Ventilatiecapaciteit

De ventilatiecapaciteit is gesteld op  $200 \text{ m}^3/\text{h}$  per appartement. Bij een luchtverversing van  $50 \text{ m}^3/\text{h}$  per persoon wordt een  $\text{CO}_2$ -concentratie  $\leq 800 \text{ PPM}$  gerealiseerd, bij  $400 \text{ PPM}$  in de buitenlucht. Het jaargemiddelde voor 2021 was  $416 \text{ PPM}$ . Bij een aanwezigheid van 4 personen voldoet de luchtkwaliteit nog steeds aan hoge eisen.

Conventionele ventilatiesystemen in woningen worden geregeld op basis van de afzuigcapaciteit. Lucht wordt toegevoerd via gevelroosters of via balansventilatie. Bij het EWF-concept wordt niet de afzuigcapaciteit geregeld, maar de toevoercapaciteit. Het ventilatiesysteem levert geconditioneerde lucht onder overdruk aan de individuele appartementen. De luchtverdeling vindt plaats op basis van een CO<sub>2</sub>-concentratie van 800 PPM, gerelateerd aan het aantal personen in de verschillende vertrekken, en niet op basis van oppervlak volgens het Bouwbesluit. Het systeem is vergelijkbaar met het in kantoorgebouwen bekende variabel debiet (VAV) systeem, bij woningbouw echter niet geregeld op basis van ruimtetemperatuur maar van CO<sub>2</sub>-concentratie. Bij de capaciteitsbepaling volgens het Bouwbesluit kan hierbij ruimschoots worden voldaan aan de voorwaarde CO<sub>2</sub>-concentratie ≤ 800 PPM.

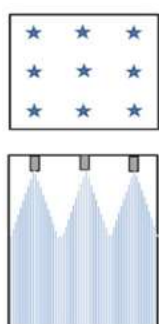
De geïnstalleerde ventilatiecapaciteit voor perioden van aanwezigheid is gesteld op 200 m<sup>3</sup>/h per appartement. De minimum ventilatiecapaciteit voor perioden van afwezigheid is gesteld op 20% hiervan, oftewel 40 m<sup>3</sup>/h per appartement (Dauerlüftung).

In de zomerperiode wordt de ventilatielucht van ≈18°C gebruikt om de appartementen te koelen. De CO<sub>2</sub>-regeling wordt hiervoor bij een bepaalde temperatuuroverschrijding, hetzij manueel, hetzij automatisch, overbrugd waardoor de debietregelaars naar de 100% open stand worden gestuurd. Het Ventecdak kan aerodynamisch in 3 varianten worden uitgevoerd: met pseudoventuri, met koepeldak of een hybride tussenvorm.

### Ontwerp klimaatcascades

Uitgaande van een ventilatiecapaciteit van 36.000 m<sup>3</sup>/h en een luchtsnelheid van 4 m/s is de doorsnede van de klimaatcascades ongeveer 2,5 m<sup>2</sup>. Bij een rechthoekige doorsnede zijn de inwendige afmetingen circa 1,6\*1,6 m.

Aan de top van de klimaatcascade worden 1 of meer kleine sproeiers geïnstalleerd, die samen 10% van de benodigde sproeicapaciteit leveren. De hoofdsproeibank ter hoogte van de 10e verdieping wordt uitgevoerd met 9 sproeiers, zie figuur 6.



**Figuur 6:** De hoofdsproeibank ter hoogte van de 10e verdieping wordt uitgevoerd met 9 sproeiers.



**Foto 1:** Klimaatcascade in het Langeveld Building van de Erasmus Universiteit Rotterdam. Ventilatiecapaciteit 67.500 m<sup>3</sup>/h.

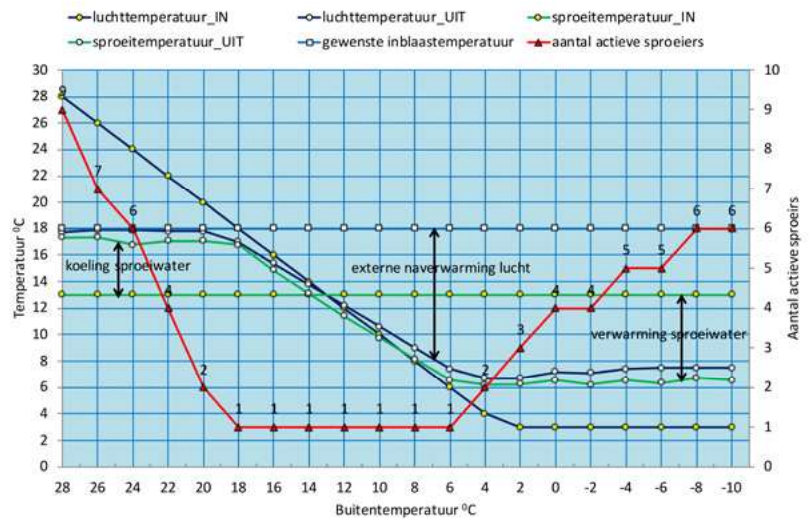
De drukopbrengst en de energetische prestaties van de klimaatcascade worden iteratief geoptimaliseerd op basis van verschillende variabelen, zoals water/luchtverhouding, luchtsnelheid, sproeiertype met druppelgrootteverdeling, sproeidruk, locatie van de hoofdsproeibank en capaciteit topsproeier(s).

### Bedrijfsvoering en regeling

De capaciteit van de klimaatcascade wordt in principe geregeld met behulp van het aantal actieve sproeiers. Dit is eveneens het geval bij afnemende luchtdebieten. Bij buitentemperaturen onder de ontwerpconditie worden sproeiers afgeschakeld om de gewenste luchttemperatuur van ongeveer 18°C te realiseren. Dit gaat uiteraard ten koste van de drukopbrengst, die in dit geval wordt gecompenseerd door de hulpventilatoren. De ontkoppeling van de capaciteitsregeling en de drukopbouw maakt het dus mogelijk bij dalende capaciteitsvraag sproeiers af te schakelen, waardoor pompenergie wordt bespaard.

Figuur 7 brengt het functioneren van de klimaatcascade en de warmteterugwinning in beeld als functie van de buitentemperatuur. Bij buitentemperaturen van 28°C tot 18°C wordt de lucht naar circa 18°C gekoeld door regeling van het aantal actieve sproeiers. Bij een buitentemperatuur van minder dan 18°C komt de warmteterugwinning in bedrijf. Uitgegaan is van een rendement van 68%, de door de EU voorgeschreven minimumwaarde. Bij buitentemperaturen van 18°C tot -2°C wordt voorverwarmde de lucht in de klimaatcascade

met 1 actieve topsproeier door het sproeiwater van 13°C enigszins gekoeld. In feite zou de klimaatcascade thermisch gezien bij dit temperatuurtraject buiten bedrijf kunnen worden gesteld. Met het oog op het reinigingseffect van het sproeispectrum en ook het realiseren van een geringe drukopbouw heeft deze bedrijfsvoering de voorkeur. Bij buitentemperaturen van minder dan -2°C wordt het aantal actieve sproeiers weer vergroot, met het doel de relatieve vochtigheid in de ruimte tussen 30% en 40% te houden. Na uittrede uit de klimaatcascade wordt de lucht extern naverwarmd tot de gewenste inblaasttemperatuur van 17° à 18°C.



Figuur 7: Temperaturen in klimaatcascade als functie van buitentemperatuur en aantal actieve sproeiers.

### Warmtebehoefte appartementen

**Verwarming:** De netto jaarlijkse warmtebehoefte is globaal berekend op 34 kWh/m<sup>2</sup> GO. Hierbij is uitgegaan van een raampercentage van 40% van het buitenoppervlak van de gevel. De ramen zijn uitgevoerd met triple glas U = 0,6 W/m<sup>2</sup>.K. De warmteweerstand van de dichte delen is 5,0 m<sup>2</sup> K/W. De berekening is uitgevoerd met behulp van een basaal Excel rekenmodel en KNMI-klimaatstatistieken. Voor concrete projecten verdient uiteraard gebruik van software programmatuur de voorkeur. Warmtelevering door WKO met centrale W/W warmtepompen via een lage temperatuur (LT) warmtenet, temperatuurtraject circa 40°C → 35°C.

**Ventilatie:** Bij gebruik van vraagsturing per ruimte op basis van de CO<sub>2</sub>-concentratie en/of relatieve vochtigheid wordt de gemiddelde ventilatiebehoefte geraamd op 50% van de geïnstalleerde capaciteit.

De jaarlijkse warmtebehoefte hiervoor is geraamd op 52 kWh/m<sup>2</sup> GO. Dit is inclusief de energie voor de bevochtiging die een integraal onderdeel van de luchtbehandeling in de klimaatcascade uitmaakt.

**Warm tapwater:** De warmtebehoefte voor warm tapwater is berekend op basis van de in NTA 8800:2022 vermelde rekenwaarden. Uitgegaan is van een collectieve warmtapwatervoorziening via een hoge temperatuur (HT)-warmtenet, temperatuurtraject circa 67°C → 57°C. Warmtelevering met centrale W/W-booster warmtepompen in parallelbedrijf met de centrale warmtepompen. De totale jaarlijkse warmtebehoefte wordt geraamd op 21 kWh/m<sup>2</sup> GO.

Inherent aan de capaciteitsregeling van de klimaatcascade wordt in de appartementen een luchtvochtigheid gerealiseerd van ≥ 30% in de winter en ≤ 70% in de zomer. In de winter veroorzaakt een te lage vochtigheid uitdroging van de huid en slijmvliezen, waardoor bij gevoelige mensen de kans op huid-, oog-, en luchtwegirritaties wordt vergroot. Bij een lage vochtigheid worden stofdeeltjes ook gemakkelijker door de ruimte verspreid. En aangezien virussen deze stofdeeltjes als drager gebruiken, wordt het risico van virusinfecties bij een lage vochtigheid in principe groter.

### Concept ruimteverwarming

Het warmtenet werkt met een aanvoertemperatuur van ≈ 40°C, wat impliceert dat een lage-temperatuur verwarmingssysteem moet worden toegepast. Naast de veel toegepaste vloerverwarming zijn plafondverwarming en wandverwarming goede mogelijkheden. Vloerverwarming reageert traag op temperatuurwisselingen en stelt beperkingen aan de vrijheid van bewoners met betrekking tot de keuze van de vloerbedekking en de plaatsing van meubilair. Plafondverwarming is in goed geïsoleerde woningen een uitstekende optie, omdat de plafondtemperatuur dicht bij de operationele ruimtetemperatuur ligt. Omdat de ruimte vrijwel uitsluitend door straling wordt verwarmd, zijn er minder convectiestromingen, waardoor ook minder stof in de ademzone terecht komt, dit in tegenstelling tot vloer- en radiatorverwarming. Verder is plafondverwarming uitstekend uit te breiden met koeling, wat niet alleen van belang is voor het bewonerscomfort in de zomer, maar ook een belangrijke bijdrage kan leveren aan de thermische regeneratie van de bodem, die in de stookperiode sterk wordt gekoeld.

Uitgegaan wordt van een warmte/koude opslagsysteem (WKO) in de bodem. De aan de bodem onttrokken koude met een temperatuur van 12° à 13°C wordt gebruikt voor:

- Activering van de klimaatcascade door aanvoer van koud sproeiwater
- Warmtebron voor een water/water warmtepompinstallatie.
- Koude levering aan het gebouw via het koudenet (alternatief)

Tabel 2: Jaarlijkse energiegebruik.

WKO met warmtepomp-Ventilatie EWF-concept - Warmtapwater booster WP - 20 verdiepingen						
	kWh.m <sup>-2</sup>	GO Σ m <sup>2</sup>	kWh per jaar	COP WP	kWh WP	kWh Bron
Verwarming	34,0	12.000	408.000			
Ventilatie	27,0	12.000	324.000			
Luchtbevochtiging	25,0	12.000	300.000			
Warmtapwater LT	10,5	12.000	126.000			
Totaal LT-net	96,5	12.000	1.158.000	5	231.600	926.400
Warmtapwater HT	10,5	12.000	126.000	3	42.000	84.000
Totaal LT + HT	107,0	12.000	1.284.000		273.600	1.010.400
Begane grond						
	kWh.m <sup>-2</sup>	GO Σ m <sup>2</sup>	kWh per jaar	COP WP	kWh WP	kWh Bron
Verwarming	51,0	690	35.190			
Ventilatie	58,0	690	40.020			
Luchtbevochtiging	54,0	690	37.260			
Warmtapwater LT	10,5	690	7.245			
Totaal LT-net	173,5	690	119.715	5	23.943	95.772
Warmtapwater HT	10,5	690	7.245	3	2.415	4.830
Totaal LT + HT	184,0	690	126.960		26.358	100.602
<b>Totaal voor gebouw kWh per jaar</b>					<b>299.958</b>	<b>1.111.002</b>
Jaarlijks energiegebruik warmtepompinstallatie afgerond					<b>300.000</b>	
Sproeipomp EWF						
Hulpventilatoren EWF						
Circulatiepompen						
Totaal					25.000	
Totaal energiegebruik afgerond					<b>325.000</b>	

De warmtebehoefte wordt via de WKO-installatie aan de bodem onttrokken en door de warmtepompinstallatie op de gewenste temperatuur van ongeveer 40°C gebracht. Het gemiddelde opwekkingsrendement (COP) wordt normaliter gesteld op 4,6. Bij het EWF-concept wordt de gemiddelde COP verhoogd omdat in de tussenseizoenen het bronwater wordt verwarmd door de warmtewisselaar aan de top van de zonneshoorsteen. Hierna is uitgegaan van een gemiddelde COP = 5,0.

### Energiegebruik

Het jaarlijks energiegebruik van de warmtepompinstallatie is globaal berekend op rond de 300.000 kWh. Samen met sproeipompen, hulpventilatoren en circulatiepompen is het jaarlijks energiegebruik ≈ 325.000 kWh – zie tabel 2.

### Duurzame energiebronnen

De volgende duurzame energiebronnen zijn beschikbaar:

- PV-park op het dak met een geraamde jaaropbrengst van maximaal 94.000 kWh bij gebruik van hoog-rendements PV-panelen.
- PV-panelen in de tweeling zonneshoorsteen met geraamde jaaropbrengst van 46.700 kWh.
- Gevel geïntegreerde PV-panelen (BIPV) Zuidgevel. Geraamde jaaropbrengst 76.000 kWh.
- Gevel geïntegreerde PV-panelen (BIPV) Oost en Westgevel. Geraamde jaaropbrengst 109.000 kWh

Met een totale jaarlijkse opbrengst van 325.000 kWh wordt een energie-neutraal gebouw gerealiseerd- zie tabel 3.

Opwekking Duurzame Energie	
PV-panelen op dak	94.000
PV-panelen in zonneshoorsteen	46.000
BIPV Zuidgevel	76.000
BIPV Oost en Westgevel	109.000
Totaal voor energieneutraliteit	<b>325.000</b>

Tabel 3: Opwekking duurzame energie.

## De architectonische integratie

Vanuit een architectonisch standpunt is het zeer goed mogelijk om energieneutrale gebouwen te ontwerpen met het EWF-systeem en daarmee duurzaamheid en schoonheid tegelijkertijd te bewerkstelligen. De eerder beschreven onderdelen zullen gelijk bij de start van het ontwerp worden opgepakt door de technische en architectonische ontwerpers. Het samengaan van de techniek en de architectuur is uitgangspunt en als dat zorgvuldig in het ontwerpproces wordt geborgd, kunnen er bijzonder interessante gebouwen ontstaan. Binnen de voorwaarden die door het EWF-systeem worden gesteld, blijft er meer dan genoeg ruimte over voor allerlei denkbare soorten architectonische expressie.

## Energiebalans

Tabel 4 laat zien dat in de stookperiode jaarlijks afgerond circa 1.100.000 kWh koude aan de bodem wordt geleverd, die buiten de stookperiode moet worden gecompenseerd. Veelal is echter een bepaalde onbalans acceptabel. Een geohydrologisch onderzoek voor de bodemgesteldheid en grondwaterstromingen moet uitwijzen welke onbalans mag worden aangehouden. Voorlopig is bij de navolgende berekeningen uitgegaan van een toelaatbaar koudeoverschot van 115%.

Voor warmtelevering zijn de volgende bronnen zijn beschikbaar:

- Klimaatcascade in het zomerseizoen
- Warmteterugwinning uit de afzuiglucht
- Basiskoeling EWF in het zomerseizoen
- Zonneschoorsteen

Tabel 4 laat zien dat er bij deze omstandigheden nog een jaarlijks koudeoverschot is van 412.000 kWh.

Energiebalans in de bodem kWh per jaar	
Warmtevraag appartementen + begane grond - tabel 3	-1.111.002
Koude overschot 115%	-966.000
Klimaatcascade in zomerseizoen	71.000
WTW uit afzuiglucht	168.000
Basiskoeling EWF in zomerseizoen	139.000
Zonneschoorsteen	176.000
Koude overschot zonder additionele warmtelevering	-412.000

Tabel 4: Energiebalans in de bodem.

### Referenties

1. Bronsema, B. 2013. Earth, Wind & Fire Natuurlijke Airconditioning. Proefschrift TU Delft ISBN 978 90 5972 762 5.
2. ISIAQ-CIB 2003. Performance Criteria of Buildings for Health and Comfort. ISIAQ-CIB Task Group TG 42 number 292.
3. Jacobs, P. en Borsboom, W. 2017. Cooking exhaust systems for low energy dwellings. REHVA Journal December 2017.
4. Jacobs, P. 2018. Belang van kookafzuiging in luchtdichte woningen. ISIAQ.nl symposium 2018.



Figuur 8: Gevelbeelden  
Zuidgevel met zonneshoorstenen links – Oost- en Westgevel rechts.

Voor reductie van het koudeoverschot zijn de volgende mogelijkheden beschikbaar:

- Koeling van de appartementen en begane grond in de zomerperiode. De opbrengst hiervan wordt geraamd op 338.000 kWh per jaar, waarmee het koudeoverschot grotendeels kan worden gedekt. Levering van koude aan de appartementen is ook een ideale oplossing, omdat hierdoor het klimaatcomfort in de zomermaanden substantieel wordt verbeterd. De infrastructuur hiervoor is grotendeels aanwezig, omdat het systeem van vloerverwarming of klimaatplafonds hiervoor kan worden ingezet.
- Verbreding van de zonneshoorstenen van 3,0 m naar 4,25 meter-jaaropbrengst  $\approx$  73.000 kWh.

## Conclusies

Uit de studie kan worden geconcludeerd dat het EWF-concept een gezond, mensvriendelijk en toekomstbestendig binnenklimaat levert, met een goede luchtkwaliteit, een goede luchtvochtigheid in de winter en koeling in de zomer. Een efficiënte collectieve energievoorziening met behulp van WKO en warmtepompen zorgt voor een laag energiegebruik. PV-voorzieningen op het dak en in de gevels leveren voldoende energie voor energieneutraliteit. In het spanningsveld van daglicht, uitzicht en BIPV heeft de architect ruime vrijheid om een aantrekkelijk gevelbeeld te realiseren. En de zonneshoorsteen levert een substantiële bijdrage aan de energiebalans in de bodem.

Voor zover we anno 2023 in de toekomst kunnen kijken zijn de appartementen toekomstbestendig. Met betrekking tot het binnenklimaat kan de door het EWF-concept geleverde koeling desgewenst worden uitgebreid met ruimtekoeling via het WKO-systeem. Met betrekking tot de energieprestatie zijn de appartementen 'Paris Proof'. Het huishoudelijk stroomgebruik is immers vanaf 2050 duurzaam opgewekt.