

# Geavanceerde natuurlijke ventilatie in een energieneutrale hoogbouw

Binnenklimaat, Architectuur, Klimaattechniek, Energieprestatie.

## (1) Woongebouw

Dr.-Ing. Ben Bronsema<sup>1</sup>, Ir. Tonko Leemhuis<sup>2</sup>, Ir. Sacha Noorlander<sup>2</sup>, Ir. Hette de Vlieger<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Stichting EWF-Lab – TU Delft - Bronsema Consult

<sup>2</sup> NWA architecten

<sup>3</sup> IF Technology

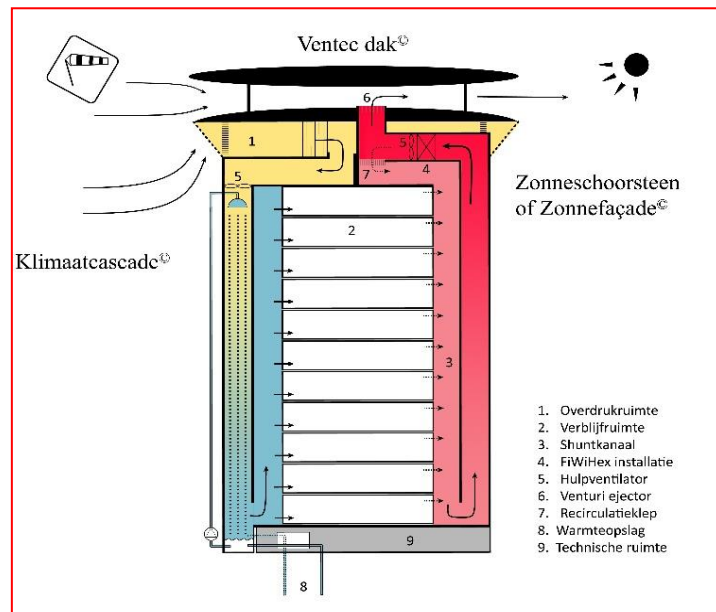
### 1 Inleiding

Natuurlijke ventilatie met behoud van een goed binnenklimaat in een energieneutrale hoogbouw lijkt een illusie, maar is gezien de huidige energiecrisis en klimaatverandering met warmere zomers en frequentere hittegolven<sup>1</sup> wel zeer wenselijk. In de voorliggende studie wordt 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 natuurlijk 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.



Voor energieneutraliteit geldt de formule Watts + Negawatts = 0. Met Watts wordt de hoeveelheid energie uitgedrukt die met het gebouw duurzaam wordt opgewekt (BENG 3). Een Negawatt<sup>2</sup> vertegenwoordigt een Watt aan energie die niet wordt gebruikt door energiebesparing of het gebruik van energiezuinige producten. Negawatts zijn aanzienlijk goedkoper dan Watts, belasten het milieu niet, verlagen de aansluitwaarde van het gebouw, en verminderen de congestie op het stroomnet. Het EWF-concept levert, in vergelijking met conventionele ventilatiesystemen, een aanzienlijk vermogen aan Negawatts.

<sup>1</sup> Zie de OSKA-intentieverklaring. <https://klimaatadaptatienederland.nl/actueel/actueel/nieuws/2020/intentieverklaring-koeling-gebouwen/>

<sup>2</sup> Gemunt door Amory Lovins, oprichter van het Rocky Mountains Institute <https://rmi.org/>

In combinatie met een hoogwaardige thermische uitvoering van de gebouwschil (BENG 1) en optimale beperking van het energiegebruik voor warm tapwater, wordt het energiegebruik tot een minimum teruggebracht. De voorzieningen voor opwekking van duurzame energie (BENG 2) kunnen hierdoor worden beperkt en energieneutraliteit is gemakkelijker te realiseren.

Het EWF-concept vraagt om een nieuwe ontwerpmethodologie, waarbij de architect een belangrijke rol speelt als technisch en artistiek co-ontwerper van het klimaatsysteem. 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.

De voorliggende studie heeft betrekking op een woongebouw en is deel (1) van een miniserie. In deel (2) wordt de functionaliteit van het EWF-concept onderzocht voor een kantoorfunctie en in deel (3) voor een hotelfunctie.

Conventionele woningventilatie wordt uitgevoerd als onderdrukstelsel met luchttoevoer in de verblijfsruimten via gevelroosters en afzuiging met een afzuigunit per woning<sup>3</sup>. De ventilatiecapaciteit wordt in overeenstemming met 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 >> 1.200 PPM, terwijl voor gezonde volwassenen een grenswaarde van 800 PPM zou moeten worden aangehouden. De hiervoor benodigde verdubbeling van de ventilatiecapaciteit is bij deze conventionele benadering uit oogpunt van energiegebruik en comfort niet te realiseren.

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 het aantal personen in de verschillende vertrekken, en niet op basis van oppervlak volgens Bouwbesluit. Dit vraag gestuurde systeem is vergelijkbaar met het in kantoorgebouwen bekende variabel debiet systeem, bij woningbouw echter niet geregeld op basis van ruimtetemperatuur maar van CO<sub>2</sub>-concentratie. Bij de capaciteitsbepaling volgens Bouwbesluit kan hierbij ruimschoots worden voldaan aan de voorwaarde CO<sub>2</sub>-concentratie ≤ 800 PPM.

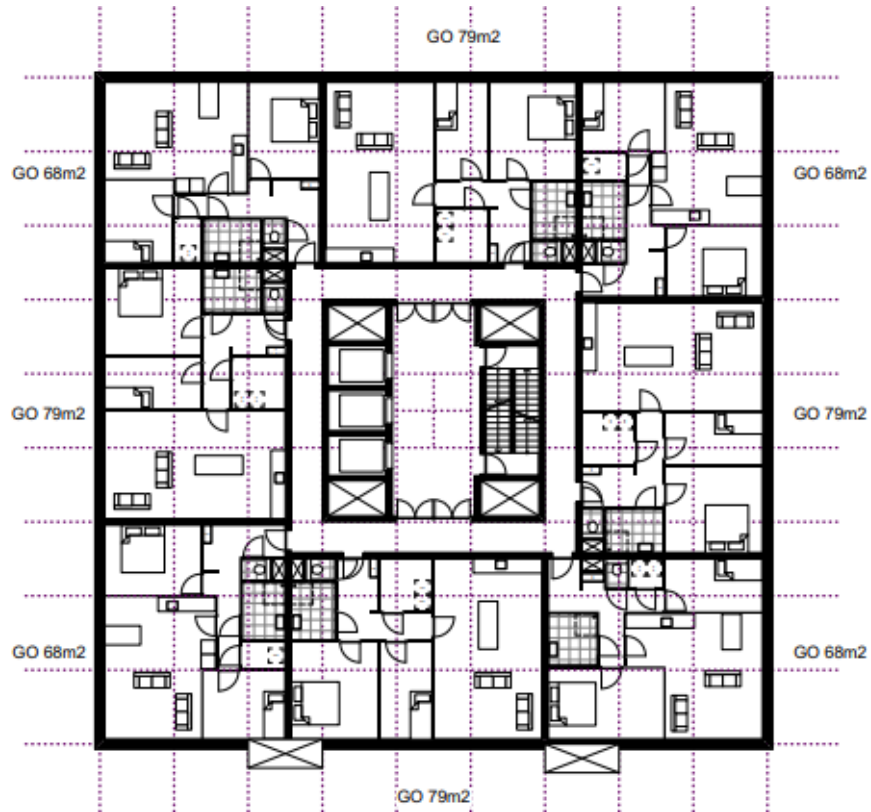
## 2 Voorbeeldgebouw

De voorliggende studie is toegespitst op een appartementsgebouw van 20 woonlagen + een begane grond met winkel-, horeca of bedrijfsbestemming- en een kelderverdieping- zie figuur 1. Elke woonlaag heeft 8 appartementen van gemiddeld 75 m<sup>2</sup> en een totaal gebruiksoppervlak (GO) van ca. 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 ca. 420 m<sup>2</sup> per woonlaag. De minimum ventilatie capaciteit volgens 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 ≅ 10 m<sup>3</sup>/s.

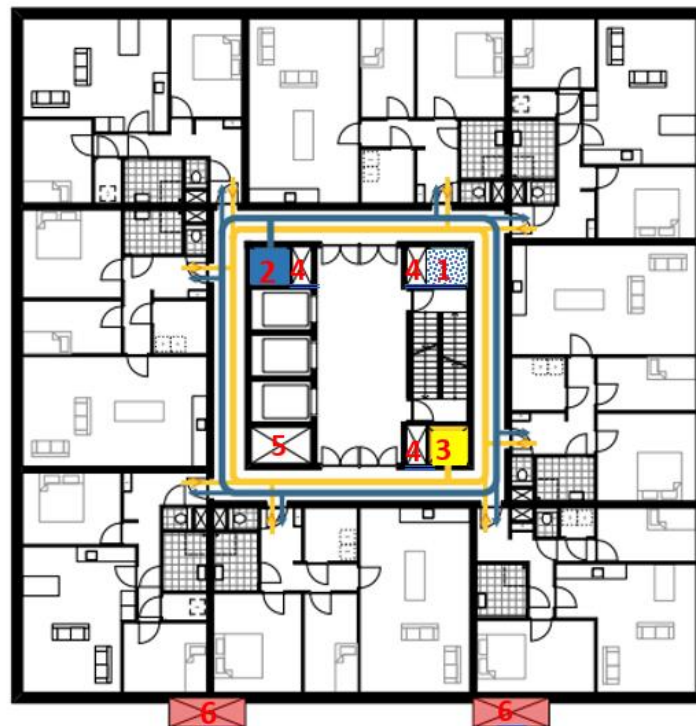
---

<sup>3</sup> Balansventilatie uitgezonderd



Figuur 1 - Plattegrond Woonlaag

### 3 Bouwkundige integratie centraal ventilatiesysteem



Figuur 2 - Ventilatie Woonlaag

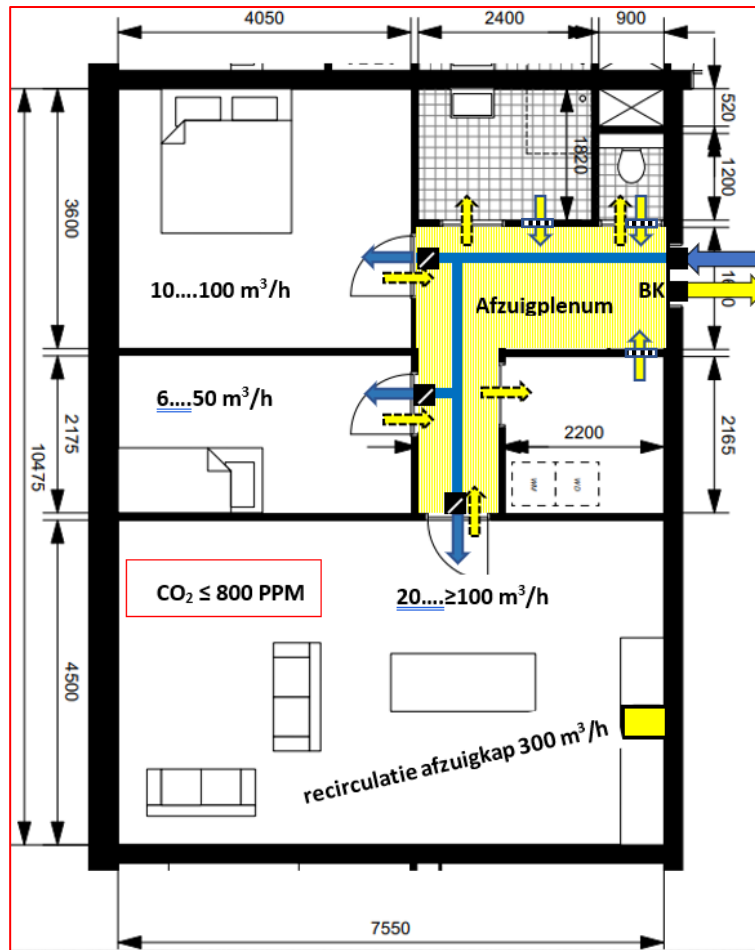
<p>De hoofdstructuur van het ventilatiesysteem is aangegeven in figuur 2.</p> <p>1 = klimaatcascade                  2 = toevoerschacht                  3 = afvoerschacht                  4 = elektra/leidingschacht</p>	<p>5 = reserveschacht/beloken schoorsteen                  6 = zonneschoorsteen</p>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

#### Verklaring hoofdstructuur

- Ventilatielucht wordt toegevoerd via een niet op de schets aangegeven Ventecdak met warmteterugwinning- zie paragraaf 4.
- 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 luchtdebiet 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 ca  $3,0 \text{ m}^2$ . De restruimte in de schacht (4) is beschikbaar voor leidingen.
- In de kelder is hier ter plaatse ook een techniekruimte nodig voor sproeipompen, waterbehandeling, warmtepompen e.d.
- Per verdieping wordt de toevoerschacht (2) aangesloten op de toevoerkanalen in de plafondruimte 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  $\approx 0,75 \text{ m}$ .
  - Bij een ventilatiecapaciteit van  $0,45 \text{ m}^3/\text{s}$  per woonlaag, en een luchtsnelheid van 1,5 m/s is de benodigde kanaalhoogte  $(0,45/2)/(0,75 \times 1,5) = 0,2 \text{ m}$ .
  - 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  $\approx 3,0 \text{ m}$  en een luchtsnelheid van 2,5 m/s is de gewenste diepte  $\approx 0,65 \text{ m}$ , overeenkomend met de minimaal gewenste diepte voor de glazenwasser en schoonmaakonderhoud.
  - De aangegeven getallen zijn de aerodynamische gewenste afmetingen. De breedte van de zonneschoorstenen zal nader worden vastgesteld op basis van energetische eisen, i.c. de gewenst 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, zgn. "beloken schoorsteen".
- De ventilatielucht wordt naar buiten afgevoerd via een niet op de schets aangegeven Ventecdak met warmteterugwinning.

#### 4 Ventilatie van de appartementen

- Vanuit het centrale toevoerkanaal langs de kern wordt lucht aan de appartementen toegevoerd via brandkleppen boven de voordeur-zie figuur 3.



Figuur 3 – Ventilatie appartementen

- De gewenste voordruk wordt bepaald door het drukverlies van de debietregelaars en het kanaalsysteem in het appartement. Voorlopig is uitgegaan van maximum ca. 50 Pa, bij de inregeling proefondervindelijk zo laag mogelijk in te stellen.
- 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 CO<sub>2</sub>-concentratie.
- Via overstroomvoorzieningen, spleten onder de deuren of geluiddichte overstroomroosters, stroomt de lucht naar de entreeruimten en vervolgens als suppletie naar de afgezogen ruimten.
- De badkamer, (30 m<sup>3</sup>/h), toilet (25 m<sup>3</sup>/h) en bijkeuken/berging (30 m<sup>3</sup>/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 afzuigsysteem in het appartement. Voorlopig is uitgegaan van maximum ca. -25 Pa, bij de inregeling proefondervindelijk zo laag mogelijk in te stellen- zie paragraaf 8.
- 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  $\geq 300 \text{ m}^3/\text{h}$  hetgeen niet te combineren is met een afzuigstelsel op basis van het Bouwbesluit. Voorgesteld wordt hiervoor recirculatiekappen met actief kool- en fijnstoffilter toe te passen. Alternatief een afzuigkap met directe afvoer naar buiten.

## 5 Ventilatiecapaciteit

Als indicator voor een veilige luchtkwaliteit voor gezonde mensen wordt een  $\text{CO}_2$ -concentratie van 1.200 PPM algemeen als bovengrens beschouwd. Voor een gezonde luchtkwaliteit wordt een waarde  $\leq 1.000$  PPM aanbevolen. Voor gezonde volwassenen (20 tot 55 jaar) zou een grenswaarde van 800 PPM moeten worden aangehouden. Voor kinderen  $<20$  jaar en ouderen  $> 55$  jaar geldt een waarde  $\leq 700$  PPM en voor de meest gevoelige categorie van COPD-patiënten  $\leq 600$  PPM (ISIAQ-CIB 2003, TNO 2003). Het lijkt er dan ook op dat bij de introductie van het Bouwbesluit 2012 voorbij is gegaan aan de eisen van een gezond binnenmilieu.

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  $\leq 800$  PPM gerealiseerd, bij 400 PPM in de buitenlucht<sup>4</sup> Bij een aanwezigheid van 4 personen voldoet de luchtkwaliteit nog steeds aan hoge eisen.

## 6 Vraagsturing appartementen

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 toevoerapaciteit. Het ventilatiesysteem levert geconditioneerde lucht onder overdruk aan de individuele appartementen. De luchtverdeling vindt plaats op basis van een  $\text{CO}_2$ -concentratie van 800 PPM, gerelateerd aan het aantal personen in de verschillende vertrekken, en niet op basis van oppervlak volgens Bouwbesluit. Het systeem is vergelijkbaar met het in kantoorgebouwen bekende variabel debiet systeem, bij woningbouw echter niet geregeld op basis van ruimtetemperatuur maar van  $\text{CO}_2$ -concentratie. Bij de capaciteitsbepaling volgens Bouwbesluit kan hierbij ruimschoots worden voldaan aan de voorwaarde  $\text{CO}_2$ -concentratie  $\leq 800$  PPM.

## 7 Centrale capaciteitsregeling

Het luchttoevoersysteem onderhoudt een constante druk in het kanalsysteem van circa 50 Pa (instelbaar) op het eind van het kanalsysteem. Deze druk wordt in eerste instantie geleverd door winddruk in het Venteddak 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 afvoerkanaal. Deze onderdruk wordt in eerste instantie geleverd door thermische trek in de zonneshoorsteen en aerodynamische trek in het Venteddak. 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. Het geringe drukverlies van het afzuigstelsel in de appartementen wordt hierbij gecompenseerd door de onderdruk in het centrale afzuigkanaal + eventuele overdruk in het appartement.

## 8 Ventilatie bij afwezigheid van bewoners

---

<sup>4</sup> Jaargemiddelde voor 2021 416 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).

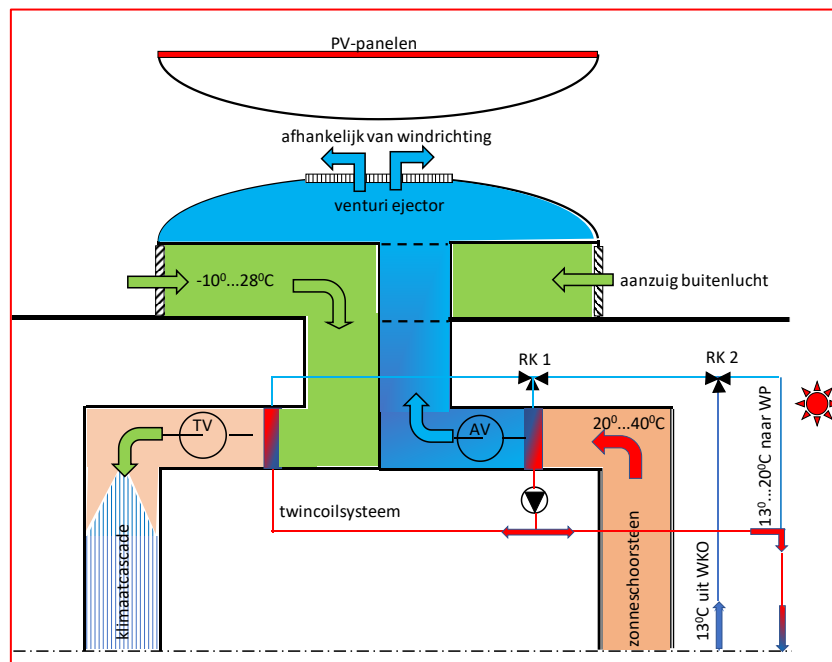
Het lijkt aan te bevelen bij binnenkomst van de bewoners(s) de debietregelaars naar de 100% open stand te sturen, waarna de regeling op basis van CO<sub>2</sub>-concentratie in werking treedt.

## 9 Zomerventilatie

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.

## 10 Ventecdak

Het Ventecdak kan aerodynamisch in 3 varianten worden uitgevoerd, met pseudoventuri, met koepeldak of een hybride tussen vorm. Figuur 4 toont het model met pseudoventuri, ontwikkeld in het promotieonderzoek van de hoofdauteur.



Figuur 4 Ventecdak met Pseudo Venturi

## 11 Warmteterugwinning

Figuur 4 brengt ook het twin-coil 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:

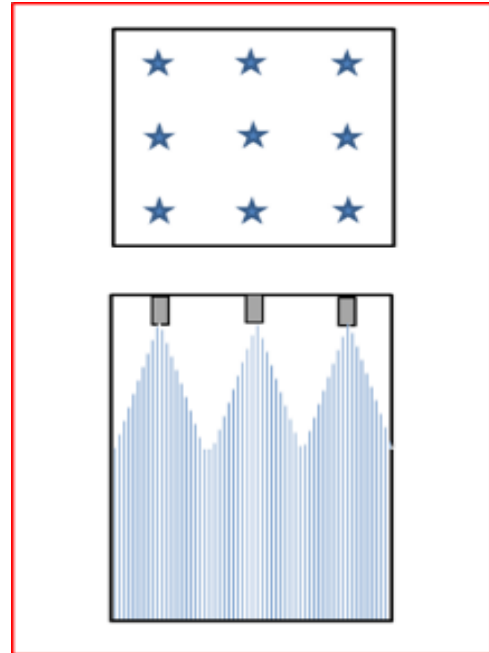
- Winterseizoen: de warmte wordt afgegeven aan een warmtewisselaar in de luchttoevoer, waardoor de koude ventilatielucht wordt voorverwarmd (twin-coil systeem).
- Tussenseizoen: via regelklep 1 wordt de warmte verdeeld tussen het twin-coil systeem en water van ≈ 13°C uit de WKO-installatie. Het hierdoor 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 t.b.v. warm tapwatervoorziening. Overtollige warmte wordt aan de bodem terug geleverd voor herstel van de energiebalans. Als dit niet nodig is wordt het koude water via regelklep 2 onverwarmd teruggevoerd naar het WKO-systeem.

## 12 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  $\approx 2,5$  m<sup>2</sup>. Bij een rechthoekige doorsnede zijn de inwendige afmetingen ca. 1,6\*1,6 m.

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

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



## 13 Bedrijfsvoering en regeling

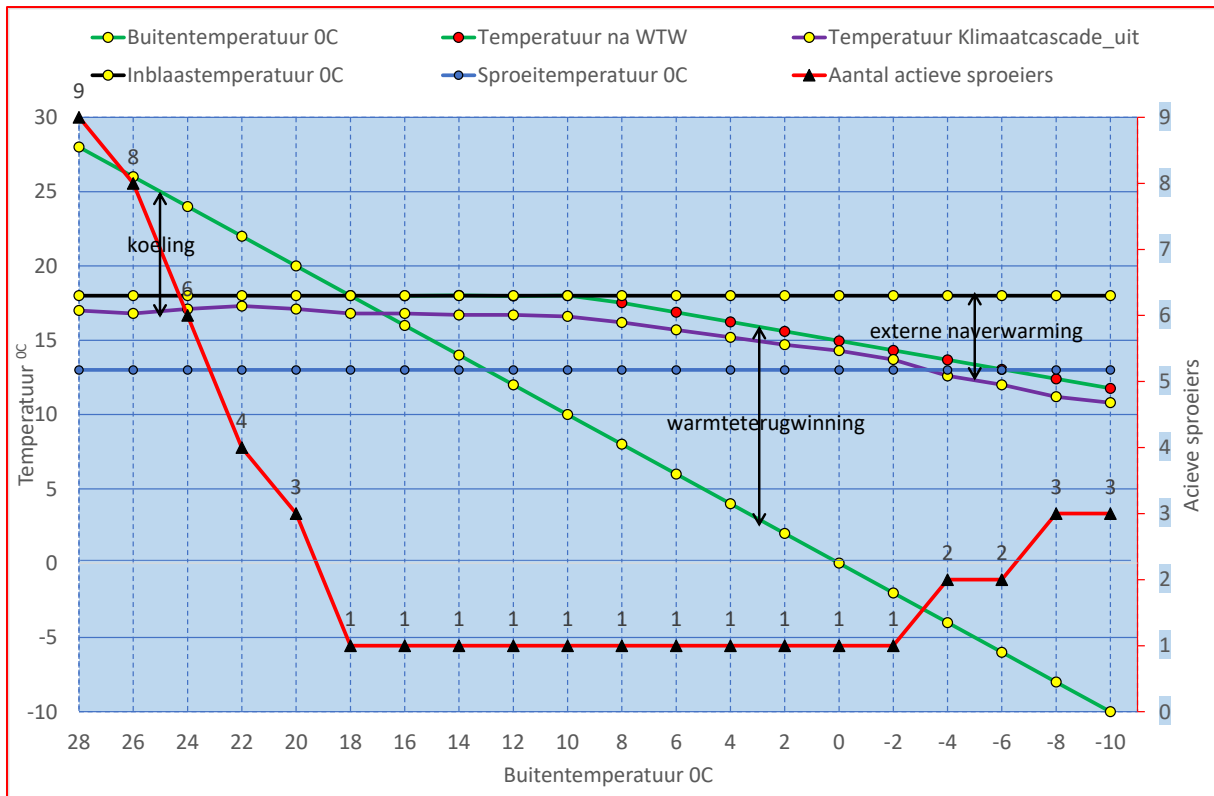
De capaciteit van de klimaatcascade wordt in principe geregeld met behulp van het aantal actieve sproeiers. Dit is eveneens het geval bij afnemende luchtdebieten. Bij buitentemperaturen onder de ontwerpconditie worden sproeiers afgeschakeld teneinde de gewenste luchttemperatuur van  $\approx 18^{\circ}\text{C}$  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  $28^{\circ}\text{C} \rightarrow 18^{\circ}\text{C}$  wordt de lucht naar ca.  $18^{\circ}\text{C}$  gekoeld door regeling van het aantal actieve sproeiers.
- Bij een buitentemperatuur  $< 18^{\circ}\text{C}$  komt de warmteterugwinning in bedrijf. Uitgegaan is van een rendement van 68%, de door de EU voorgeschreven minimumwaarde.
- Bij buitentemperaturen van  $18^{\circ}\text{C} \rightarrow -2^{\circ}\text{C}$  wordt voorverwarmde de lucht in de klimaatcascade met 1 actieve topsproeier door het sproeiwater van  $13^{\circ}\text{C}$  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  $< -2^{\circ}\text{C}$  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 inblaastemperatuur van  $17^{\circ}$  à  $18^{\circ}\text{C}$ .





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

#### 14 Zonneschoorsteen

Per zonneschoorsteen wordt  $5 \text{ m}^3/\text{s}$  afgezogen. Bij een breedte van  $\approx 3,0 \text{ m}$  en een luchtsnelheid van  $2,5 \text{ m/s}$  is de gewenste diepte  $\approx 0,65 \text{ m}$ , overeenkomend met de minimaal gewenste diepte voor de glazenwasser en schoonmaakonderhoud.

#### 15 Warmtebehoefte appartementen

- Verwarming: De geraamde netto jaarlijkse warmtebehoefte wordt geraamd op  $34 \text{ kWh/m}^2 \text{ GO}$ . Hierbij is uitgegaan van een raampercentage van 40% van het buitenoppervlak van de gevel. De ramen zijn uitgevoerd met triple glas  $U = 0,6 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ . De warmteweerstand van de dichte delen is  $5,0 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ .
- Ventilatie: Bij gebruik van vraagsturing per ruimte op basis van de  $\text{CO}_2$ -concentratie en/of relatieve vochtigheid wordt de gemiddelde ventilatiebehoefte geraamd op 50% van de geïnstalleerde capaciteit. De jaarlijkse warmtebehoefte hiervoor is geraamd op  $52 \text{ kWh/m}^2 \text{ GO}$  inclusief bevochtiging.
- 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, aangesloten op een HT-warmtenet, temperatuurtraject  $67^\circ\text{C} \rightarrow 57^\circ\text{C}$ . Warmtelevering met centrale W/W-booster warmtepompen in parallelbedrijf met de centrale warmtepompen. De totale jaarlijkse warmtebehoefte wordt geraamd op  $21 \text{ kWh/m}^2 \text{ GO}$ .

Het twin-coil systeem is recuperatief, d.w.z. dat alleen warmte wordt teruggewonnen, en geen vocht. Dit in tegenstelling tot een regeneratief systeem waarbij ook vocht wordt teruggewonnen.

#### 16 Luchtvochtigheid

Met het EWF-concept wordt ook automatisch de luchtvochtigheid in de appartementen geregeld op een relatieve vochtigheid van minimum 30% in de winter en maximum 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. Door uitdroging van de neus- en keelslijmvliezen kunnen deze hun functie als stoffilter geheel of gedeeltelijk verliezen. 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.

NEN-ISO 7730 stelt in Annex D *“Het wordt aanbevolen om de relatieve luchtvochtigheid tussen 30% en 70% te houden. Deze limieten zijn gesteld om het risico op een onaangenaam natte of droge huid, oogirritatie, statische elektriciteit, microbiële groei en luchtwegaandoeningen te verminderen”*

### **17 Concept ruimteverwarming**

Het warmtenet werkt met een aanvoertemperatuur van  $\approx 40^{\circ}\text{C}$ , hetgeen 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 m.b.t. 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.

Een notoir nadeel van lage-temperatuurverwarming is het ontbreken van een hoge-temperatuur stralingsbron, die voor veel mensen van groot belang is voor hun gevoel van thermisch comfort. Ter compensatie hiervan kan in de woonkamers een elektrisch infrarood paneel aangebracht, ofwel kan aan de bewoners een mobiel stralingspaneel ter beschikking gesteld met een vermogen van  $\approx 1,5 \text{ kW}_e$ , dat in mindering wordt gebracht op de capaciteit van het verwarmingssysteem. Dergelijke panelen geven na inschakeling direct warmte af, compenseren daarmee de traagheid van het verwarmingssysteem. Uitgegaan wordt van een warmte/koude opslagsysteem (WKO) in de bodem. De aan de bodem onttrokken koude met een temperatuur van  $\approx 12^{\circ}$  à  $13^{\circ}\text{C}$  wordt gebruikt voor

- Activering van de klimaatcascade
- Warmtebron voor een water/water warmtepompinstallatie.
- Koude levering aan het gebouw via het koudenet (Alternatief)

De warmtebehoefte wordt via de WKO-installatie aan de bodem onttrokken en door de warmtepompinstallatie op de gewenste temperatuur van  $\approx 40^{\circ}\text{C}$  gebracht. Het gemiddelde opwekkingsrendement (COP) wordt normaliter gesteld op 4,6. Bij het EWF-concept wordt de gemiddelde COP verhoogd omdat in de tussenzeizoenen het bronwater wordt verwarmd door de warmtewisselaar aan de top van de zonneshoorsteen zie paragraaf 14. Hierna is uitgegaan van een gemiddelde COP = 5,0.

### **18 Energiegebruik**

Het jaarlijks energiegebruik van de warmtepompinstallatie is berekend op  $\approx 300.000 \text{ kWh}$ . Samen met sproeipompen, hulpventilatoren en circulatiepompen is het jaarlijks energiegebruik  $\approx 325.000 \text{ kWh}$  – zie tabel 3.

<b>WKO met warmtepomp-Ventilatie EWF-concept - Warmtapwater booster WP - 20 verdiepingen</b>						
<b>Appartementen</b>						
	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
<b>Begane grond</b>						
	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>	

Tabel 3 – Jaarlijkse energiegebruik

### 19 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 zonneschoorsteen met geraamde jaaropbrengst van 46.700 kWh. Onderzocht moet worden of met behulp van PVT-panelen de temperatuur kan worden verlaagd, waardoor het PV-rendement kan worden verbeterd.
  - 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 energieneutraal gebouw gerealiseerd - zie tabel 4.

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	325.000	

Tabel 4 – Opwekking duurzame energie

## 20 De architectonische integratie

Vanuit een architectonisch standpunt is het zeer goed mogelijk om energie neutrale gebouwen te ontwerpen met het EWF-systeem en daarmee duurzaamheid en schoonheid tegelijkertijd te bewerkstelligen. De boven 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.



Figuur 9 - Gevelbeelden Zuidgevel met zonneshoorstenen links – Oost-en Westgevel rechts

## 21 Energiebalans in de bodem

Tabel 3 laat zien dat in de stookperiode jaarlijks 1.111.002 kWh koude aan de bodem wordt geleverd, die buiten de stookperiode moet worden gecompenseerd. Veelal is echter een bepaalde onbalans acceptabel. Een geohydrologisch onderzoek m.b.t. tot bodemgesteldheid, grondwaterstromingen e.d. 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 5 laat zien dat er bij deze omstandigheden nog een jaarlijks koude overschot 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 5 – Energiebalans in de bodem

Voor reductie van het koude overschot zijn de volgende mogelijkheden beschikbaar:

- Koeling de appartementen en begane grond in de zomerperiode. De opbrengst hiervan wordt geraamd op 338.000 kWh per jaar, waarmee het koude overschot 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 zonneschoorstenen van 3,0 m naar 4,25 meter- jaaropbrengst  $\approx$  73.000 kWh
- Bijplaatsen van zonneschoorstenen op de Oost- en Westgevel. Deze zouden met een totaal frontoppervlak van 372 m<sup>2</sup>, een jaaropbrengst van 650 kWh/m<sup>2</sup> en een rendement van 55% totaal  $\approx$  133.000 kWh per jaar kunnen opleveren.
- PVT-panelen in de zonneschoorstenen i.p.v. PV-panelen
- Gebruikmaken van oppervlaktewater met behulp van een aquathermiesysteem. Bij een kleine onbalans is dit systeem te kostbaar.
- Installatie van een droge koeler, echter moeilijk inpasbaar in het Ventecdak.

## 22 Conclusies

Uit het onderzoek 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 zonneschoorsteen levert een substantiële bijdrage aan de energiebalans in de bodem.

Voor zover we anno 2022 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.