

Auteurs

Dr.-Ing. B. (Ben) Bronsema, Bronsema Consult – TU Delft faculteit Bouwkunde – afdeling AE + T; Dr. R. (Regina) Bokel, TU Delft faculteit Bouwkunde – afdeling AE + T; Ing. H. (Harry) Bruggema, Ingenieursbureau Peutz; Ir. R. (Ronald) van Luijk MSc, Green Building Engineering; Ing. A. (Arjan) van Mook, Van Delft Groep; Ir. M. (Martijn) de Potter, NWA Architecten; Ir. M. (Maarten) Quist, SUN Investments, v/h Dutch Green Company; Ing. J. (Joost) Vermeer, Van Delft Groep; Drs. O. (Otto) Meerstadt, Dutch Green Company

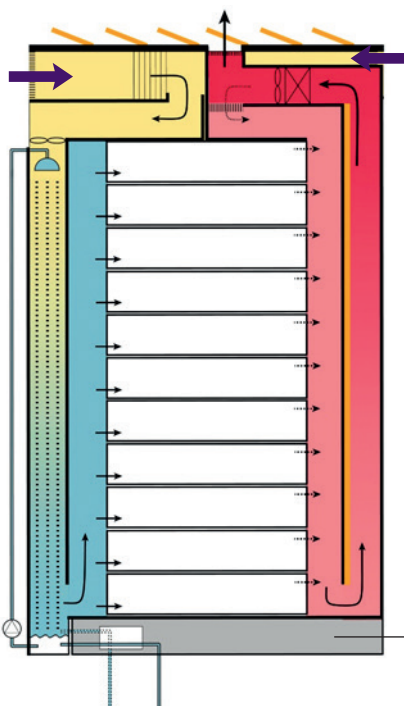
Earth Wind & Fire: Evolutie van een innovatie (3)

Natuurlijke ventilatie en energie via de zonnesc schoorsteen

Een zonnesc schoorsteen, ook in Nederland niet onbekend, is een sterk tot de verbeelding sprekend onderdeel van een gebouw. Internet levert voor de zoekterm “solar chimney” talloze verwijzingen. Vele hiervan hebben betrekking op kleinschalige toepassingen voor woonhuisventilatie in tropische landen. Systematisch wetenschappelijk onderzoek naar het functioneren en optimaliseren van een zonnesc schoorsteen voor utiliteitsbouw in het West-Europese klimaat is schaars. Met de resultaten van het onderzoek Earth, Wind & Fire (EWF) hebben ontwerpers nu de mogelijkheid een verantwoord ontwerp van een zonnesc schoorsteen te maken. De energieprestatie “Oogsten van zonne-energie”, en de functionele prestatie “Natuurlijke afzuiging van ventilatielucht” worden hierbij ontwikkeld in samenhang met de architecturale prestatie “Een mooi gebouw”. De zonnesc schoorsteen kan daardoor, in een perfecte symbiose van architectuur en technologie, een substantiële bijdrage leveren aan een energie neutrale gebouwde omgeving.

De zonnesc schoorsteen is een dominant architecturaal element en een typerende expressie van klimaatresponsieve 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 zonnesc schoorsteen als absorber van zonne-energie, thermisch en elektrisch, die kan worden benut voor de verwarming van gebouwen, voor herstel van het thermisch evenwicht in de bodem bij WKO-systemen en voor de aandrijving van

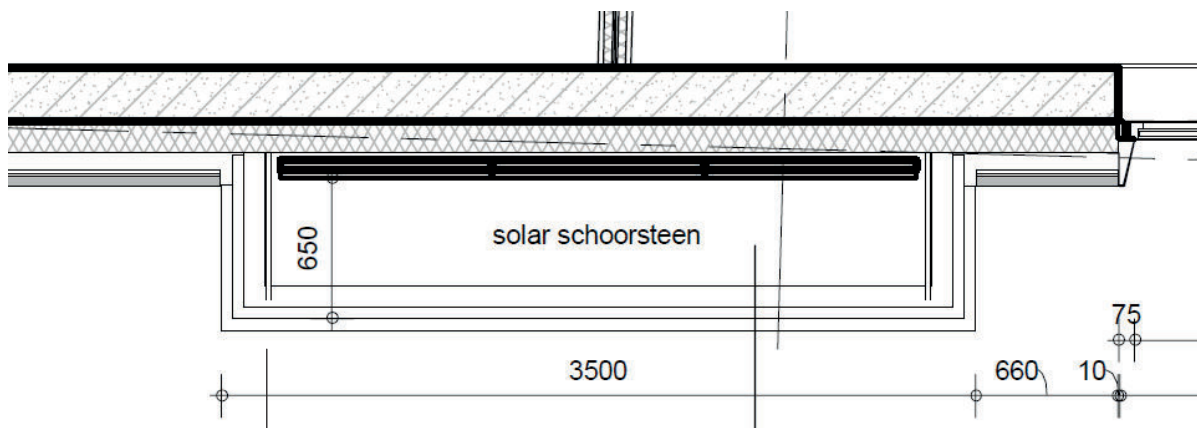
pompen en hulpventilatoren. Hiermee kan een belangrijke bijdrage worden geleverd aan de energieneutraliteit van gebouwen. Het ontwerp en de prestaties van de innovatieve zonnesc schoorsteen zijn voor generieke toepassingen uitvoerig beschreven (Bronsema, B. 2013/A,B,C). Het was een interessante exercitie een en ander in bouwteamverband voor een specifiek project, hotel BREEZE Amsterdam, uit te werken tot de te realiseren PVT-hybride zonnesc schoorsteen 3.0.



Figuur 1: Natuurlijke airconditioning met PVT-zonnesc schoorsteen 3.0

Met dank aan de gewaardeerde inbreng van de ontwerppartners is, in een zorgvuldige afweging van de architecturale-, de thermische-, de aerodynamische- en de energieprestaties, een robuust ontwerp van deze zonnesc schoorsteen gerealiseerd.

Voor de PVT-zonnesc schoorsteen 3.0 is een BREEAM Innovatiecredit



Figuur 2: Detail PVT-zonneschoorsteen hotel BREEZE Amsterdam

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-, aerodynamische- en energieprestaties van de zonneschoorsteen 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 zonneschoorsteen in de klimaattechniek, zo mogelijk in de vorm van een ISSO/SBR/BNA-publicatie. De auteurs hopen intussen dat de zonneschoorsteen op korte termijn in meerdere projecten, nieuwbouw of renovatie, zal worden ingezet, want *“Natuurlijke Airconditioning: Waar wachten we nog op?”* (Bronsema, B. et al 2018/1).

Uitgangspunten voor het ontwerp

In het Earth, Wind & Fire concept heeft de zonneschoorsteen meerdere functies:

1. Afzuigen van ventilatielucht, de aerodynamische prestatie.
2. Oogsten van zonne-energie, de energieprestatie.
3. Architectuur, de architecturale prestatie.

Bij het ontwerp moet 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.

Het totale ventilatiedebiet voor hotelkamers en algemene ruimten bedraagt 25.000 m³.h

¹. Ter beperking van het eigen drukverlies is uitgegaan is van een luchtsnelheid in de zonneschoorsteen van $\approx 1,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. De minimale diepte is om redenen van schoonmaakonderhoud gesteld op 0,65 m, waaruit een breedte van $\approx 7,0 \text{ m}$ volgt. De architect heeft deze uitgangspunten vertaald in een tweeling zonneschoorsteen van 2 x 3,5 m breed- zie figuur 2 en 3. Bij de uitwerking van het ontwerp bleek de energieprestatie van deze zonneschoorsteen ruim voldoende te zijn om te voorzien in de tapwaterverwarming en voor herstel van het thermisch evenwicht in de bodem van het WKO-systeem.

Het ligt in het algemeen meer voor de hand het ontwerp van een zonneschoorsteen te optimaliseren op energieprestaties. De drukverliezen in het afzuigstelsel zijn laag en de mogelijke besparingen op ventilatorenergie derhalve gering. Zonne-energie daarentegen kan een substantiële bijdrage leveren aan het warmtegebruik van een gebouw. De energieprestatie kan in principe worden vergroot of verkleind, waarbij voor een gegeven hoogte en uitvoering van de zonneschoorsteen de breedte de belangrijkste ontwerpvariabele is. Een consequentie hiervan is dat inpassing van de zonneschoorsteen in het gevelontwerp kan conflicteren met de architectuur.

De Zonneschoorsteen voor Hotel BREEZE Amsterdam

Figuur 3 toont de bezonde gevels van het hotel met de tweeling zonneschoorsteen in de Zuidwest gevel. De zwarte vlakken zijn building integrated PV-panelen. Elke zonneschoorsteen heeft een breedte van 3.500 mm bij een diepte van 650 mm. De voorkant en de zijkanten zijn voorzien van glas. De totale hoogte is $\approx 33 \text{ m}$. Het totale bruto frontoppervlak op de Zuidwest oriëntatie is $\approx 230 \text{ m}^2$. Het bruto oppervlak van de beide zijkanten op de Zuidoost en Noordwest oriëntatie is $\approx 42,5 \text{ m}^2$. Voor de berekeningen is het netto glasoppervlak berekend met een reductiefactor R van 0,95 van het bruto oppervlak i.v.m. constructie-elementen die het doorzicht belemmeren.



Figuur 3: De tweeling-zonneschoorsteen OZ Architecten.

Materialisatie

Glaswand

De belangrijkste keuzecriteria voor de glaswand zijn:

- Een zo hoog mogelijke g-waarde voor maximale transmissie van de opvallende zonstraling naar de absorber.
- Een zo laag mogelijke U-waarde voor beperking van het warmteverlies naar de buitenlucht.
- Maximalisering van de transparantiegraad van de glaswand door toepassing van structurele beglazing zonder raamstijlen.
- Vermijding van (lineaire) thermische bruggen.

In de navolgende analyses is uitgegaan van het glastype SGG Planitherm Solar 4/15/4 argon, dat ook is gebruikt in het onderzoek en de proefopstelling van het researchproject Earth, Wind & Fire. De fysische eigenschappen van dit glas zijn:

- $g = 0,75$ [-]
- $U = 1,1$ [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]

Anno 2017 is dit glas niet meer verkrijgbaar. Er zal, mede op basis van kosten, een keus worden gemaakt voor een glastype gelijkwaardige g- en U-waarde. De glaswand wordt opgebouwd met structurele beglazing zonder raamstijlen.

De achterwand

Met behulp van dynamische simulaties is aangetoond dat een zonneschoorsteen, uitgevoerd met een thermisch lichte, weinig accumulerende achterwand, een betere energieprestatie heeft dan een uitvoering met een thermisch zware achterwand (Bronsema, B. 2013/A). In de zonneschoorsteen van hotel BREEZE Amsterdam wordt de achterwand gevormd door lichte PV-panelen op een isolatielaag, waarbij warmteaccumulatie geen rol speelt.

Absorber

Bij het onderzoek en de proefopstelling van het researchproject Earth, Wind & Fire is voor de absorber gebruik gemaakt van Mirotherm, een 0,5 mm dikke geanodiseerde aluminiumplaat voorzien van een spectraal selectieve coating met een emissiecoëfficiënt van $\approx 0,05$. Ter verhoging van de exergetische prestatie zijn de absorbers in de tweeling zonneschoorsteen voor hotel BREEZE uitgevoerd als PV-paneel. De emissiecoëfficiënt van deze panelen is met een waarde van $\approx 0,87$ aanzienlijk hoger dan die van de spectraal selectieve absorber. Gevolg hiervan is een hogere temperatuur van de glaswand en een groter warmteverlies naar de buitenlucht. Berekeningen tonen echter aan dat dit effect gering is, voornamelijk door de lage U-waarde van de glaswand.

PV-panelen

De absorber is opgebouwd uit 98 PV-panelen fabrikaat Astronergy 300Wp mono Full Black, aangevuld met power optimizers (fabr. SMA/TIGO). Dit paneel is gekozen i.v.m. de zwarte uitstraling en de beschikbaarheid van een gelijkwaardigheidsverklaring, die nodig is voor de EPC-berekening. Het modulrendement van deze panelen is 18,34%.

Isolatie

Uitgegaan is van een isolatie met $R_c \geq 5,0$ [$m^2 \cdot K^{-1} \cdot W^{-1}$].

Glascoating

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 anti reflecterende 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 is niet bekend.

Inspectie en onderhoud

De zonneschoorstenen moet toegankelijk zijn voor inspectie en (schoonmaak)onderhoud van zowel de glaswand als de PV-

panelen. Voorzieningen hiervoor zijn in het ontwerp opgenomen.

Luchtdichtheid

Het afzuigdebiet via de zonneschoorstenen mag niet significant door winddruk en de inherente infiltratie van buitenlucht verstoord worden. Bij de voorziene uitvoering met structurele beglazing is de infiltratie naar verwachting verwaarloosbaar.

Thermisch rendement

Het thermisch rendement van een zonneschoorsteen wordt gedefinieerd als de verhouding tussen de netto aan de doorstromende lucht afgegeven warmte gedeeld door de opvallende zonstraling. In formule (Bronsema, B. 2013/A)

$$\eta_z = \frac{q_v \cdot \rho \cdot c (\theta_{uit} - \theta_{in})}{R \cdot B \cdot H \cdot \Phi_{zon}} \quad (1)$$

Waarin:

η_z	=	thermisch rendement zonneschoorsteen bij referentiecondities	
q_v	=	volumestroom van de doorstromende lucht	[m ³ .s ⁻¹]
ρ	=	dichtheid van de lucht	[g.m ⁻³]
c	=	soortelijke warmte van de lucht	[J.g ⁻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	[m]
Φ_{zon}	=	stralingsflux van de zon	[W.m ⁻²]
R	=	reductiefactor netto t.o.v. bruto glasoppervlak	[-]

Na verschillende herleidingen kan deze formule worden geschreven als

$$\eta_z = g - \frac{U_{gl}^* (\theta_{gl} - \theta_e)}{\Phi_{zon}} - \frac{U_w^* \cdot p \cdot (\theta_w - \theta_a)}{\Phi_{zon}} \quad (2)$$

Waarin:

g	=	g-waarde van het glas	[-]
U_{gl}^*	=	warmteovergangscoefficiënt glasoppervlak → buitenlucht	[W.m ⁻² .K ⁻¹]
U_w^*	=	warmteovergangscoefficiënt wandoppervlak → binnenlucht	[W.m ⁻² .K ⁻¹]
θ_{gl}	=	glastemperatuur	[°C]
θ_e	=	buitentemperatuur	[°C]
θ_w	=	wandtemperatuur	[°C]
θ_a	=	temperatuur achter binnenwand	[°C]
p	=	totaal binnenoppervlak/frontoppervlak	[-]

Deze formule is intuïtief gemakkelijk te duiden. Het thermisch rendement van een zonneschoorsteen wordt bepaald door de 3 factoren in deze formule:

1. De g-waarde van het glas – verreweg de belangrijkste factor.
De g-waarde van de voorlopig gekozen glasoort is ≈ 0,75. Als er geen warmteverliezen zouden zijn is dit tevens het maximum rendement. Bij toepassing van Vindico+ zou een verhoging tot ≈ 5% mogelijk zijn, maar dat is enigszins speculatief.
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 achterwand, de diepte van de zonneschoorsteen 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 zonneschoorsteen 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. Dynamische simulaties geven aan dat een jaarrendement bereikbaar is van 55%...60%. Als rekenwaarde voor het ontwerp is, bij toepassing van een goede glascoating, uitgegaan van een thermisch jaarrendement van 60%.

Rendement hybride PTV zonneschoorsteen

De absorber wordt in dit geval uitgevoerd met PV-panelen. Een deel van de zoninstraling wordt omgezet in elektrische energie, hetgeen ten koste gaat van het thermisch rendement. Formule 2 gaat dan over in

$$\eta_z = g - \frac{U_{gl}^* (\theta_{gl} - \theta_e)}{\Phi_{zon}} - \frac{U_w^* \cdot p \cdot (\theta_w - \theta_a)}{\Phi_{zon}} - g \cdot \eta_{pv} \quad (3)$$

Waarin

$$\eta_{pv} = \text{rendement PV paneel}$$

De verlaging van het thermisch rendement heeft een vermindering van de warmteopbrengst en van de thermische trek tot gevolg. De vermindering van de laagwaardige warmteopbrengst wordt echter gecompenseerd door de

PV prestaties								
Maand	Zuid							
	kWh.m ² .a ⁻¹	opp. m ²	vulgraad	g-waarde	R-waarde	rend.%	kWh.a ⁻¹	kWh.a ^{-1cum}
jan	41,1	230	0,7	0,75	0,95	18,34%	860	860
feb	44,6	230	0,7	0,75	0,95	18,34%	933	1793
mrt	61,1	230	0,7	0,75	0,95	18,34%	1.278	3071
apr	101,3	230	0,7	0,75	0,95	18,34%	2.119	5190
mei	101,2	230	0,7	0,75	0,95	18,34%	2.117	7307
juni	90,3	230	0,7	0,75	0,95	18,34%	1.889	9196
juli	90,3	230	0,7	0,75	0,95	18,34%	1.889	11084
aug	101,3	230	0,7	0,75	0,95	18,34%	2.119	13203
sept	82,4	230	0,7	0,75	0,95	18,34%	1.724	14927
okt	73,7	230	0,7	0,75	0,95	18,34%	1.542	16469
nov	39,8	230	0,7	0,75	0,95	18,34%	833	17301
dec	35,3	230	0,7	0,75	0,95	18,34%	738	18040
totaal	862,4						18.040	

Tabel 1: Energieopbrengst PV-stroom

hoogwaardige energieopbrengst van de PV-panels, waardoor het exergetisch rendement van de zonnescorsteen toe zal nemen. Vermindering van de thermische trek kan worden gecompenseerd door hulpventilator. Aandachtspunten met betrekking tot de thermische aspecten van dit concept zijn:

- De stralings- en warmteoverdrachtsverhoudingen in de zonnescorsteen worden door de andere eigenschappen van de absorber gewijzigd, met als gevolg een 1,5 à 2% groter warmteverlies.
- Omdat een deel van de zonnestraling wordt gereflecteerd op de glaswand wordt het effectieve rendement van de PV-panels met een factor g gereduceerd. Voor de geselecteerde Astronergy panels met een moduul rendement van 18,34% betekent dit een reductie tot $(0,75 \cdot 18,34) = 13,75\%$. De temperatuur in een zonnescorsteen is bij zoninstraling hoger dan de buitentemperatuur, waardoor het rendement van de PV-panels daalt. Bij een temperatuur van 30°C en een temperatuurcoëfficiënt van $-0,416\% \cdot K^{-1}$ betekent dit een afname van $\approx 2,0\%$ ten opzichte van de referentietemperatuur van 25°C. Als rekenwaarde is bij de navolgende berekeningen uitgegaan van een thermisch rendement van 50%.

Dynamisch model

In het onderzoek Earth, Wind & Fire is voor de bestudering van het dynamisch gedrag en ramingen van de jaarlijkse energieprestatie van de zonnescorsteen het dynamische simulatiemodel ESP-r gebruikt (Gontikaki et al 2010). Dit model, ontwikkeld door de TU Eindhoven, 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.

Rekenmodel voor de praktijk

Het is de architect die in de conceptuele fase de basis legt voor een succesvolle architectonische integratie van een zonnescorsteen 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 (Bokel, R. 2011).

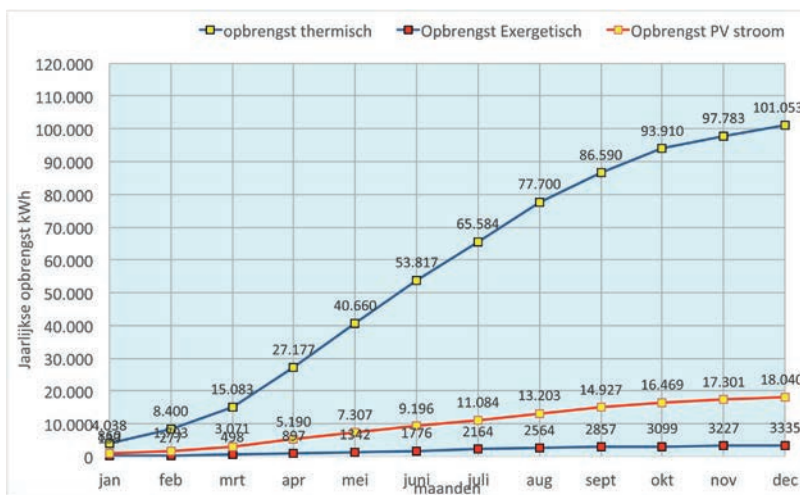
Energieprestaties

PV-stroom

De geraamde jaarlijkse energieopbrengst van de PV-panels in de tweeling zonnescorsteen is circa 18.000 kWh – zie tabel 1. Uitgegaan is van de specifieke maandsommen van de zonnestraling volgens VABI NEN 5060:2008. De vulgraad met PV-panels is aan de lage kant. Door de breedte van de zonnescorsteen optimaal

Maand	Zuidwest				Zuidoost	Noordwest	Totaal	Cum.	Exergie	
	kWh.m ² .a ⁻¹	opp. m ²	R-waarde	rend.%	kWh.a ⁻¹	kWh.a ⁻¹	kWh.a ⁻¹	MWh.a ⁻¹	kWh.a ⁻¹	
jan	41,1	230	0,95	50%	3.643	305	90	4.038	4.038	133
feb	44,6	230	0,95	50%	3.817	392	153	4.362	8.400	277
mrt	61,1	230	0,95	50%	5.867	534	282	6.683	15.083	498
apr	101,3	230	0,95	50%	10.546	1.000	548	12.094	27.177	897
mei	101,2	230	0,95	50%	11.702	1.035	746	13.483	40.660	1342
juni	90,3	230	0,95	50%	11.364	969	824	13.157	53.817	1776
juli	90,3	230	0,95	50%	10.132	969	666	11.767	65.584	2164
aug	101,3	230	0,95	50%	10.448	1.060	608	12.116	77.700	2564
sept	82,4	230	0,95	50%	7.732	775	383	8.890	86.590	2857
okt	73,7	230	0,95	50%	6.478	615	227	7.320	93.910	3099
nov	39,8	230	0,95	50%	3.446	318	109	3.873	97.783	3227
dec	35,3	230	0,95	50%	2.923	276	71	3.270	101.053	3335
totaal	862,4				88.098	8.248	4.707	101.053	101.053	3335

Tabel 2: Thermische energieopbrengst



Figuur 4: Cumulatieve jaaropbrengst PVT-zonneschoorsteen

af te stemmen op de maat van de PV-panelen (1654x989 mm) zou in principe een hogere vulgraad kunnen worden gerealiseerd.

Thermische energie

De geraamde jaarlijkse thermische energieopbrengst van de tweeling zonneschoorsteen is circa 101.000 kWh – zie tabel 2. Uitgegaan is van de specifieke maandsommen van de zonnestraling volgens VABI NEN 5060:2008 en een rendement van 50%. Tabel 2 laat zien dat de bijdrage van de zijwanden aan de energieopbrengst beperkt is (≈ 12,9%).

De in de zonneschoorsteen ge oogste warmte heeft een laag temperatuurniveau en dus een lage exergetische waarde. Direct gebruik ten behoeve van de klimaatinstallatie en de warm tapwater voorziening is daarom niet zonder meer mogelijk. Om de laagwaardige warmte optimaal te benutten zijn de volgende mogelijkheden aanwezig:

- De energieopbrengst in het stookseizoen (medio oktober tot medio april), is ≈ 31,6% van de totale jaarlijkse opbrengst. Deze warmte kan in principe, direct of indirect via warmtepompen, worden gebruikt voor de gebouwverwarming en de warm tapwatervoorziening.
- De energieopbrengst in het koelseizoen (medio april tot medio oktober), is ≈ 68,4% van de totale jaarlijkse opbrengst. Deze warmte kan in principe, direct of indirect via warmtepompen, worden gebruikt voor de warm tapwatervoorziening.
- Een belangrijke warmtegebruiker in het koelseizoen is verder de WKO-installatie, waar warmte nodig is voor het compenseren van de in het stookseizoen onttrokken warmte en het herstel van het thermisch evenwicht kin de bodem.

Exergieprestaties

Het temperatuurniveau van warmte is bepalend voor de kwaliteit van de energie, uitgedrukt in de exergiewaarde Ex_q . De exergiewaarde van PV-stroom is gelijk aan de energiewaarde: $Ex_{pv} = W$
 De exergiewaarde van warmte wordt berekend met de formule

$$Ex_q = (1 - T_0/T) * Q$$

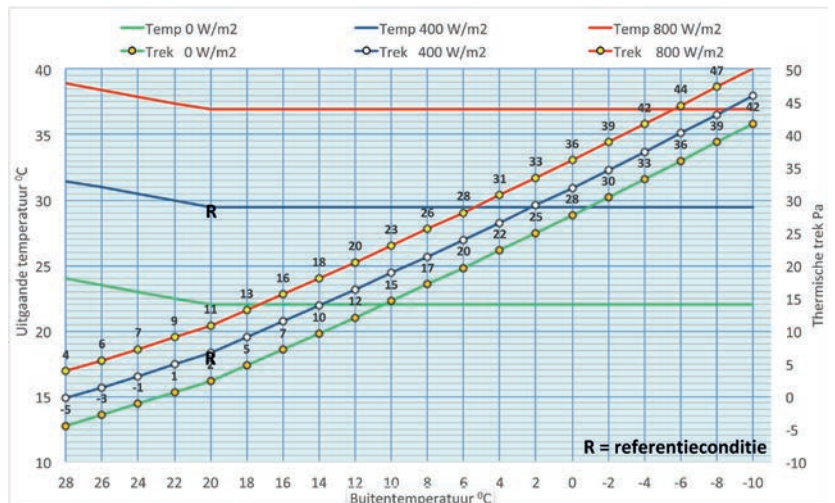
Waarin

T_0 = omgevingstemperatuur [K]

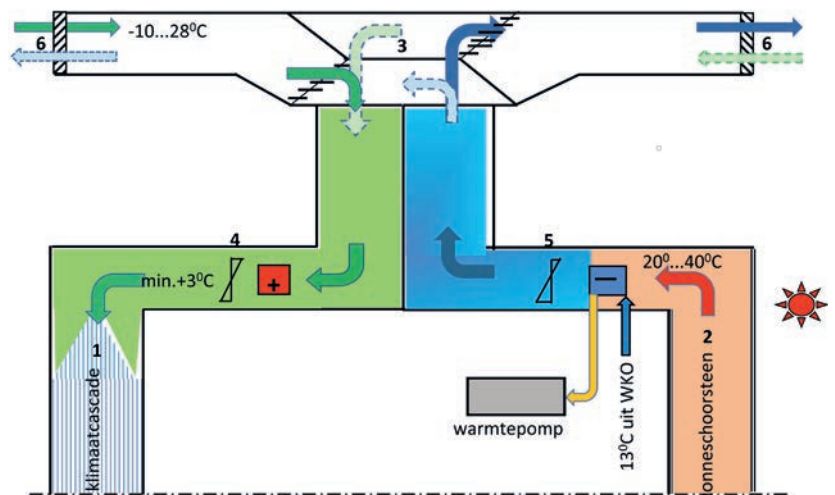
T = temperatuur van de warmtestroom [K]

Q = hoeveelheid warmte [W]

Bij de referentieconditie, een zonnestraling van $400 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ en een buitentemperatuur van 20°C - zie hierna - is de temperatuur van de afgezogen lucht boven in de zonneshoorsteen $\approx 30^\circ\text{C}$. De exergiewaarde van de warme lucht is bij deze temperatuur slechts 3,3%. **Figuur 4** brengt het cumulatieve verloop in beeld van de jaarlijks in de zonneshoorsteen geogoste energie, onderverdeeld in thermische energie, PV-stroom en de exergetische waarde van de thermische energie.



Figuur 5: Uitgaande luchttemperatuur en thermische trek als functie van buitentemperatuur en stralingsflux (Luchtdebiet $25.000 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)



Figuur 6: Principe warmteterugwinning zonneshoorsteen via Ventec-wissel

Aerodynamische prestaties

De thermische trek is een functie van de buitentemperatuur en de gemiddelde temperatuur in de zonneshoorsteen, die weer een functie is van de stralingsflux van de zon, het schoorsteenrendement en het luchtdebiet. Uitgangspunt bij het EWF-concept was dat de thermische trek bij referentiecondities voldoende zou moeten zijn om het drukverlies van het afzuigstelsel, inclusief de zonnefaçade zelf, te compenseren. De referentiecondities zijn als volgt gedefinieerd (Bronsema, B, 2013)

- Buitentemperatuur $\theta_e = 20 [^\circ\text{C}]$
- Stralingsflux $\phi_{\text{zon}} = 400 [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}]$

De referentie stralingsflux is de gemiddelde dagelijkse straling op zonnige dagen tijdens de zomermaanden. (Als ook de minder zonnige dagen worden meegeteld is de gemiddelde dagelijkse stralingsflux $\approx 350 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$).

Figuur 5 laat zien dat te realiseren thermische trek bij referentiecondities R slechts $\approx 6,6$ Pa bedraagt. Het is praktisch onmogelijk en zeker niet rendabel om het afzuigstelsel op dergelijke lage drukverliezen te ontwerpen. Het ligt dan ook voor de hand om bij deze condities de hulpventilator te gebruiken om voldoende trek te realiseren. Figuur 5 laat ook duidelijk de invloed zien van de buitentemperatuur op de thermische trek, die bij lage buitentemperaturen kan oplopen tot > 40 Pa op bewolkte dagen en > 50 Pa op zonnige winterdagen. De zonneshoорsteen werkt in dit geval als thermische schoорsteen en een debietregeling is nodig om het hoofd te kunnen bieden aan de wisselende thermische trek. Bij in bedrijf zijnde keuken wordt de keukenafzuiging, met een debiet van ≈ 7.500 $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, buiten de zonneshoорsteen om afgevoerd. De lichtsnelheid daalt hierbij naar $\approx 1,1$ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, en de luchttemperatuur kan oplopen tot $\approx 45^\circ\text{C}$. De berekende temperaturen liggen ruim onder de grens van 80°C waarbij gehard glas moet worden toegepast. Om het hoofd te bieden aan oververhitting door eventuele stagnatie in het afzuigstelsel wordt aan de top van de schoорsteen een maximumtemperatuur beveiliging aangebracht waarmee door een nader uit te werken regelactie de luchtstroom kan worden hersteld.

Warmteterugwinning

Het principe van de warmteterugwinning is aangegeven in figuur 6. De afgezogen warme lucht uit de zonneshoорsteen dient als warmtebron voor een warmtepomp, die de warmte op een hoger niveau afgeeft aan de warmtevoorziening van het hotel ten behoeve van gebouwverwarming, warm tapwatervoorziening

en herstel van het thermisch evenwicht in de bodem via de WKO-installatie. De aldus afgekoelde lucht wordt vervolgens via de Ventec-wissel (Bronsema, B. et al 2018/C) op de lijkzijde van het gebouw naar buiten afgevoerd.

Het optimaliseren van de bedrijfsvoering in combinatie met de opslagcapaciteit van warm tapwater is hierbij een interessante opgave. De warmtepomp moet energetisch gezien bij voorkeur in bedrijf zijn bij de hoogste brontemperaturen, in casu uren van optimale zonneschijn en stralingsintensiteit.

Afzuigventilator

De toerengeregelde afzuigventilator houdt het afzuigdebiet van 25.000 $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ in stand, onafhankelijk van de thermische trek van de zonneshoорsteen en de winddrukken op de langsgel.

De positieve thermische trek van de zonneshoорsteen is afhankelijk van de stralingsflux van de zon en van de buitentemperatuur, en kan variëren van -5 Pa tot $+50$ Pa –zie figuur 5.

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 zonneshoорsteen tot nul reduceert. Bij het verwaarlozen van de warmtetransmissie door de beglazing en warmteaccumulatie in de zonneshoорsteen kan de negatieve trek dan oplopen tot ≈ -10 Pa.



Dr.-Ing. B. (Ben) Bronsema

Referenties

1. Bokel, Regina 2011. Een gebruiksvriendelijk rekenmodel voor het initieel ontwerp van een zonneshoорsteen. Technische Universiteit Delft - Faculteit Bouwkunde – Afdeling AE+ T
2. 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>
3. Bronsema, B. 2013/B. Earth, Wind & Fire – Natuurlijke airconditioning (1)- Onderzoeksdoelen en -methoden. TVVL Magazine | 07/08 | 2013
4. Bronsema, B. 2013/C. Earth, Wind & Fire – Natuurlijke airconditioning (2)- Onderzoeksresultaten. TVVL Magazine | 07/08 | 2013
5. Bronsema, B. et al 2018/A. Natuurlijke airconditioning: Waar wachten we op? TVVL Magazine 01/2018.
6. Bronsema, B. et al 2018/B. Earth, Wind & Fire: Evolutie van een innovatie (2) Natuurlijke ventilatie en luchtbehandeling via klimaatcascade. TVVL Magazine 01/2018

7. Bronsema, B. et al 2018/C. Earth, Wind & Fire: Evolutie van een innovatie (1) Natuurlijke ventilatie en energie via het dak. TVVL Magazine 02/2018
8. Gontikaki, M. en Houben, J. 2010. Calibration & Validation Report of the ESP-r solar chimney model. TU Eindhoven, faculteit Bouwkunde, afdeling Building Physics & Systems.

Verwijzing

Dit artikel is deel 3 van de miniserie.

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