

ENERGIETRANSITIE IN EEN TOEKOMSTBESTENDIGE HOOGBOUW

Flatwoningen voor People, Planet & Profit

Dr.-Ing. Ben Bronsema

Technische Universiteit Delft, faculteit Bouwkunde, afdeling AE+T¹

Bronsema Consult - I www.bronconsult.org - E bronconsult@planet.nl

1 Inleiding

De komende decennia zijn in Nederland naar verwachting 1 miljoen nieuwe woningen nodig. Volgens het Planbureau voor de Leefomgeving (PBL) zou de helft hiervan in steden of in binnenstedelijke gebieden worden gebouwd, en dus in hoogbouw worden opgetrokken. Voor een deel zullen dit nieuwe woningen zijn, voor een deel gerealiseerd door transformatie van bestaande kantoor- of andere utiliteitsgebouwen. Deze woningen moeten in verband met de energietransitie voldoen aan de per 2020 in te voeren BENG-indicatoren voor energiezuinigheid en zijn in principe “los van het gas”. De oplossing voor deze uitdaging wordt gezocht in sterk verbeterde isolatie van de woningen, perfectie van de warmteterugwinning uit ventilatielucht, de inzet van elektrische warmtepompen en *smart technologies*. De energiesystemen in de woningen worden hierdoor complexer en minder robuust, terwijl de begripsafstand met de bewoners toeneemt. Ook zullen de installatiekosten aanzienlijk stijgen; de energietransitie is niet goedkoop. In tegenstelling hiermee staat de noodzaak om met name voor de sociale woningbouw de bouwkosten zoveel mogelijk drukken.

Voor een toekomstbestendige hoogbouw spelen ook andere factoren dan energiezuinigheid een rol. Goed geïsoleerde woningen zijn extra gevoelig voor oververhitting in de zomer, een effect dat nog wordt versterkt door klimaatverandering en het warmte-eiland effect in een urbane omgeving. Hogere eisen aan het binnenmilieu, vooral voor kwetsbare bevolkingsgroepen, en stijgende welvaartseisen vragen ook hier om een oplossing. Met een omkeerbare warmtepomp of door het plaatsen van een losse airconditioner kan dit probleem effectief worden bestreden, maar energetisch gezien wordt hiermee het paard achter de wagen gespannen.

De bouwindustrie streeft altijd naar kostenreductie, o.a. door sneller te bouwen met behulp van prefabricage van bouwelementen. Metselwerk wordt hierbij vervangen door lichte binnenwanden, met gering thermisch accumulatievermogen, die daardoor echter weinig warmte op kunnen nemen. Dit manifesteert zich in thermisch minder tolerante gebouwen met inherent hogere ruimtetemperaturen.

Tenslotte worden mensen ook veeleisender met betrekking tot hun binnenklimaat. Komend uit een geconditioneerde kantoorruimte rijdt men in een geconditioneerde auto naar huis en arriveert in een oververhit huis. Een koel plekje in de tuin kan dan voldoende soelaas bieden, maar in een flatwoning is deze mogelijkheid niet voorhanden!

2 Energiebesparing in Nederland

De door de EU vastgestelde Energy Performance of Buildings Directive (EPBD) is vanaf het begin van deze eeuw een belangrijke drijfveer geweest voor energiebesparing in de gebouwde omgeving. In Nederland is op basis hiervan de energieprestatiecoëfficiënt EPC ontwikkeld, die over enige tijd zal worden vervangen door de BENG-normen.

Warmtebehoefte voor woningen kan worden onderverdeeld in (1) Verwarming t.b.v. thermisch comfort, (2) Ventilatie t.b.v. gezondheid en (3) Warm tapwater t.b.v. hygiëne. De warmtebehoefte voor verwarming is gebouw gebonden en kan worden verminderd door verbetering van de thermische isolatie. De warmtebehoefte voor ventilatie en warm tapwater is gebruikers gebonden en leent zich in principe niet voor vermindering. Energiebesparing in de gebouwde omgeving wordt in hoofdzaak gerealiseerd door verbetering van de thermische isolatie en door kierdichting. Beide maatregelen zijn uiteraard bedoeld voor het stookseizoen, maar hebben in warme zomermaanden een negatief effect. Betere isolatie houdt in dat een gebouw minder warmte verliest, maar dat is in de zomer, als

¹ Architectural Engineering + Technology

de binnentemperatuur door zonnestraling hoog kan oplopen helemaal niet gewenst. Hetzelfde geldt mutatis mutandis voor verbeterde kierdichting waardoor de continue infiltratie en exfiltratie van buitenlucht, en ergo de gewenste warmteafvoer wordt belemmerd.

3 Oververhitting van flatwoningen: een groeiend probleem

Energiezuinigheid van gebouwen mag niet ten koste gaan van de binnenklimaatcondities, die in veel gebouwen, vooral in de zomermaanden, vaak onder druk staan. In flatwoningen is het soms niet mogelijk 's nachts ramen in de slaapkamer te openen in verband met stadslawaai en/of inbraakrisico's.

Er is momenteel geen algemeen geaccepteerde definitie van oververhitting van flatwoningen in de zomerperiode. In een Engelse richtlijn (CIBSE TM52, 2013) worden maximum operationele temperaturen genoemd van 28°C in woonkamers en 26°C in slaapkamers. Deze temperaturen mogen tijdens de zomerperiode van 1 mei – 30 september (153 dagen) gedurende maximaal 3% van de aanwezigheidsuren met $\leq 1K$ worden overschreden. Aanvullend geldt een drempel van maximaal 6 graduren op één dag en een absolute grenswaarde van $\leq 4K$. Voor een slaapkamer met 8 aanwezigheidsuren betekent dit dat in de zomerperiode de temperatuur van 26°C met $0,03 \cdot 153 \cdot 8 \approx 37$ uur met 1K mag worden overschreden. Voor het simuleren en modelleren van het binnenklimaat lijken dit bruikbare uitgangspunten, maar het valideren hiervan in de praktijksituatie zal niet eenvoudig zijn. Bovendien kan de vraag worden gesteld of het type bewoner niet ook een belangrijk gegeven is. Zouden voor kwetsbare ouderen geen zwaardere eisen moeten gelden dan voor jonge en gezonde mensen?

Voor toekomstbestendige woningen zou ook rekening moeten worden gehouden met de verwachte klimaatverandering. De extra mortaliteit tijdens de 10 dagen durende hittegolf in 2003 lag in Engeland 2000 slachtoffers boven het gemiddelde in een zomerperiode. Verwacht wordt dat tegen 2040 dergelijke temperaturen eerder regel dan uitzondering zullen zijn, en dat de extra mortaliteit tegen 2050 verdrievoudigd zal zijn (Lomas et al. 2017). Dit probleem wordt nog versterkt door het zgn. warmte-eilandeffect, het verschijnsel dat de temperatuur in een stedelijk gebied gemiddeld hoger is dan in het omliggende landelijk gebied. Tijdens de zomerperiode kan dit effect oplopen tot 4^o...8^oC. (Bronsema B. 2011).

De bouwindustrie streeft altijd naar kostenreductie, o.a. door sneller te bouwen met behulp van prefabricage van bouwelementen. Metselwerk wordt hierbij vervangen door lichte binnenwanden, met gering thermisch accumulatievermogen, die daardoor echter weinig warmte op kunnen nemen. Dit manifesteert zich in thermisch minder tolerante gebouwen met inherent hogere ruimtetemperaturen.

Tenslotte worden mensen ook veeleisender met betrekking tot hun binnenklimaat. Komend uit een geconditioneerde kantoorruimte rijdt men in een geconditioneerde auto naar huis en arriveert in een oververhit huis. Een koel plekje in de tuin kan dan voldoende soelaas bieden, maar in flatwoning is deze mogelijkheid niet voorhanden!

4 Luchtkwaliteit en fijnstofproblematiek

“Meer dan driekwart van de Nederlanders weet niet dat binnenlucht veel meer vervuild kan zijn dan buitenlucht. Bij ongezonde lucht denken mensen vaak aan vervuilende fabrieken of drukke snelwegen. Wat de meeste mensen niet beseffen, is dat ook bepaalde vervuilende, ziekmakende stoffen in alledaagse huishoudelijke voorwerpen de luchtkwaliteit binnenshuis kunnen verslechteren. Voorbeelden zijn schoonmaakmiddelen, plastic speelgoed, meubilair en bouwmaterialen. Ook veel alledaagse activiteiten – koken, schoonmaken, douchen, de was drogen, kaarsen branden en zelfs printen – beïnvloeden de luchtkwaliteit in huis. Ventilatie speelt hierbij een belangrijke rol. Om te voldoen aan de nieuwe eisen die vanaf 2020 voor de nieuwbouw gelden, worden bestaande en nieuwe gebouwen steeds intensiever geïsoleerd en luchtdicht gemaakt. Wanneer hierbij niet voldoende geventileerd en gelucht wordt, resulteert dat in vochtige, schimmelige ruimtes. En dat kan een negatief effect hebben op de gezondheid van de bewoners. Naast een grotere kans op het ontwikkelen van astma neemt het risico op luchtwegaandoeningen, COPD en andere allergieën toe.” Aldus Philomena Bluysen, hoogleeraar Indoor Environment bij de Technische Universiteit Delft in Bouwwereld 16-05-2018.

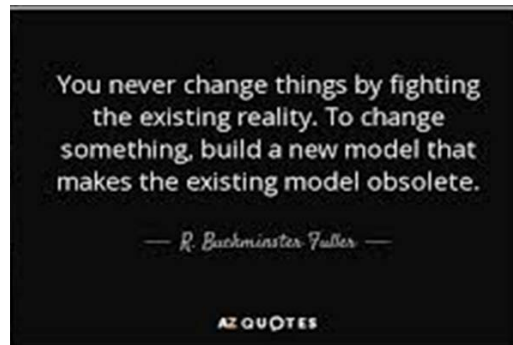
Ventilatie moet dan ook een integraal onderdeel zijn van elke energierenovatie. Ventileren kost echter veel energie en warmteterugwinning uit ventilatielucht is dan ook een absolute noodzaak. Balansventilatie met warmteterugwinning bespaart veel op de energiebehoefte voor ventilatie. Om te voldoen aan de stringente EPC-eisen zijn dergelijke systemen vanaf het begin van deze eeuw op grote schaal in woningen gerealiseerd. De ervaringen zijn blijkens een onderzoek uit 2012 nogal ontluisterend (Balvers, Jaap et al.2012).

Ook de kwaliteit van de buitenlucht is een belangrijk punt, en die laat in een stedelijke omgeving vaak te wensen over. Een vorm van luchtvervuiling, die gezondheidswetenschappers zorgen baart is fijnstof, in de lucht zwevende deeltjes kleiner dan 10 micrometer, van verschillende herkomst en chemische samenstelling.

5 Perfecte storm

In deze “perfecte storm” van energiezuinigheid, CO₂reductie, klimaatverandering met warmere zomers en frequentere hittegolven, toenemende urbanisatie, warmte-eiland effect, sneller en lichter bouwen, thermisch minder tolerante gebouwen, schaarse grond met toenemende grondprijzen, hogere gebouwen, milieukwaliteit van de buitenlucht, fijnstofproblematiek in de binnenlucht, hoogconjunctuur in de bouw- en installatiesector met voorkeur voor standaardoplossingen, een verouderende bevolking die in het nieuwe zorgstelsel ook langer in hun woning blijven wonen dan vroeger, moet een weg worden gezocht naar een toekomstbestendige oplossing. Hoe kunnen we ervoor zorgen dat we geen spijt krijgen van de plannen die in hoog tempo moeten worden ontwikkeld? Zijn er mogelijkheden om de energietransitie voor de gestapelde woningbouw op een toekomstbestendige, duurzame, eenvoudige en goedkope manier te realiseren?

Probleemoplossingen worden veelal gezocht in verbetering van bestaande technieken. In de huidige hoogconjunctuur in de bouw- en installatietechniek is er de voor de hand liggende neiging op bestaande technieken terug te grijpen, want innovaties kosten tijd en die is er niet. De auteur pleit daarentegen voor de probleembenadering van Buckminster Fuller².



6 Earth, Wind & Fire

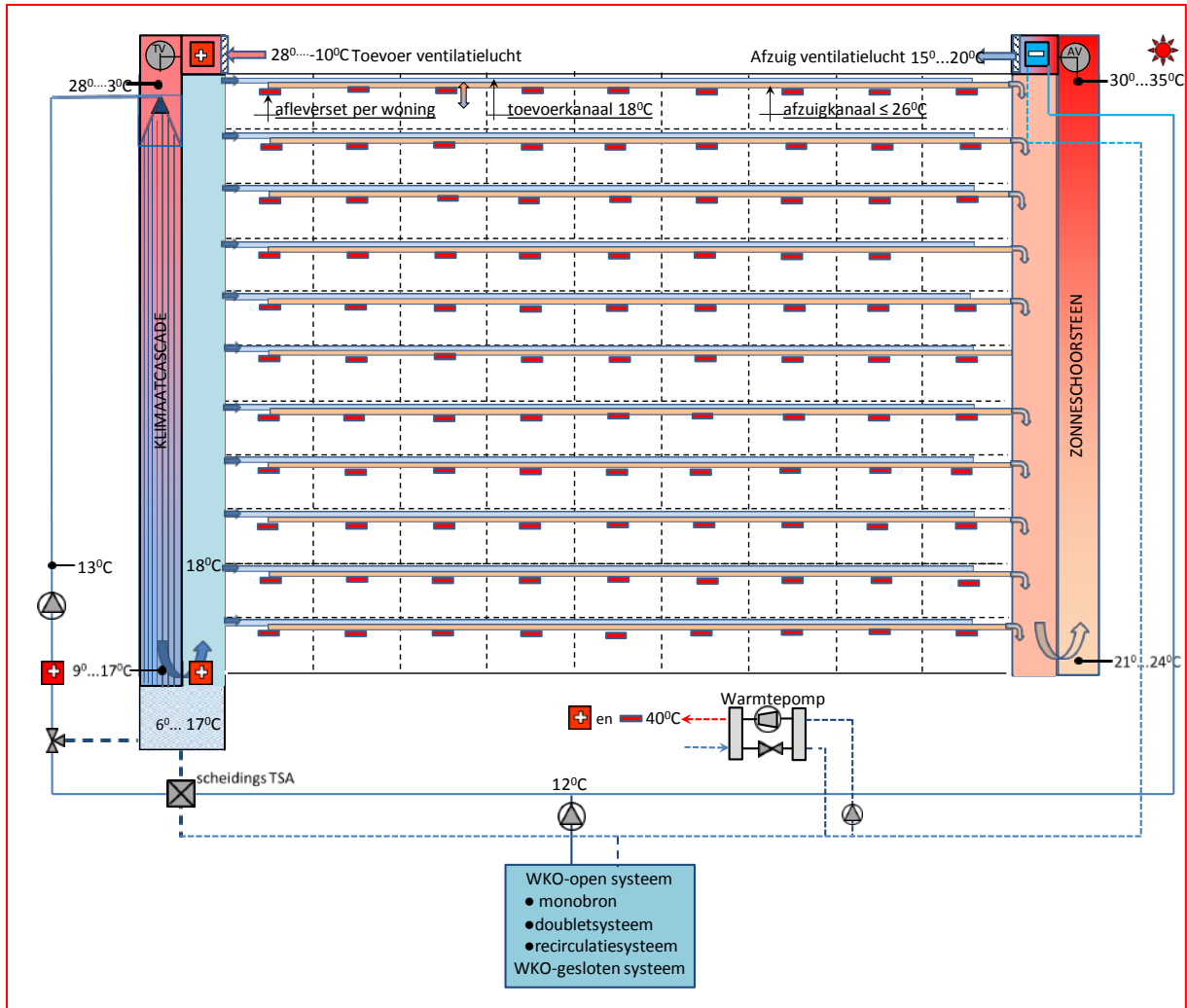
Een nieuw model voor energietransitie en klimaatverbetering in een toekomstbestendige hoogbouw bestaat uit de toepassing van het *Earth, Wind & Fire* concept voor natuurlijke airconditioning (Bronsema, B. 2013). Bij dit concept wordt het gebouw ontworpen als “klimaatmachine”, die gebruik maakt van de vrij beschikbare omgevingsenergie in aardmassa, wind en zon. Hiervoor worden twee architecturale bouwdelen gebruikt: (1) De KLIMAATCASCADE voor natuurlijke toevoer en de conditionering van de ventilatielucht. (2) De ZONNESCHOORSTEEN voor natuurlijke afzuiging van de lucht en het oogsten van zonne-energie- zie figuur 1.

Het concept is met subsidie van de Rijksdienst voor Ondernemend Nederland ontwikkeld voor nieuwe- en een upgrade van bestaande kantoorgebouwen, maar de eerste toepassing vindt plaats in een hotel.

Eind 2018 opent het energie neutrale Hotel BREEZE in Amsterdam IJburg zijn deuren, het eerste gebouw in de wereld met Earth, Wind & Fire - Natuurlijke Airconditioning. De uitwerking en enginee-

² Amerikaans architect, systeemtheoreticus, schrijver, ontwerper en uitvinder

ring van het concept voor dit hotel (Bronsema, B. et al. 2018) heeft aangetoond dat toepassing in de gestapelde woningbouw mutatis mutandis zeer goed mogelijk is. Op het eerste oog lijkt het Earth, Wind & Fire concept voor woningbouw misschien een luxe voorziening. Voor een energiezuinige Natuurlijke Airconditioning geldt deze overweging niet, temeer omdat het een oplossing biedt voor veel van de in het voorgaande omschreven problemen bij het realiseren van de toekomstbestendige hoogbouw in een urbane omgeving.



Figuur 1 – Collectief Earth, Wind & Fire ventilatieconcept in een flatgebouw van 11 verdiepingen

7 Klimaatcascade

Het ontwerp van de klimaatcascade wordt afgestemd op de totale collectieve ventilatiecapaciteit van de aangesloten woningen. Uitgaande van een afzuigcapaciteit volgens Bouwbesluit $\geq 180 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ zou per woning $\approx 200 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ kunnen worden toegevoerd. Bij een toevoertemperatuur van de lucht van 18°C en een ruimtetemperatuur van 26°C wordt hiermee een koelcapaciteit van ≈ 500 à 600W geleverd overeenkomend met maximaal $14,4 \text{ kWh}$ per dag.

Het ontwerp van de klimaatcascade wordt gebaseerd op koeling van de lucht naar 17°C à 18°C bij een ontwerp-zomerconditie van $28^\circ\text{C}/55\% \text{ RV}$, waarbij tevens voldoende druk wordt opgebouwd om het drukverlies van het luchttoevoersysteem zoveel mogelijk te compenseren. De water/luchtverhouding en de lichtsnelheid spelen hierbij een doorslaggevende rol. De hulpventilator bij de luchtinlaat zorgt onafhankelijk van de weersomstandigheden voor een constante druk op de woningaansluitingen.

Aan de top van de klimaatcascade wordt water met een temperatuur van 13°C gesproeid. In het koelseizoen wordt koude geleverd door het WKO-systeem. In het stookseizoen wordt het sproeiwater door de koude buitenlucht teruggekoeld. Bij lagere buitentemperaturen wordt de lucht door het sproeiwater verwarmd tot $\approx 7^\circ\text{C}$ en in de toevoerschacht naverwarmd tot 18°C .

Aan de voet van de klimaatcascade, waar de luchtstroom wordt omgekeerd, is een techniekruimte nodig voor pompen, warmtewisselaars en waterbehandelingsapparatuur. Een techniekruimte aan de top is nodig voor het sproeiregister, warmtewisselaar en hulpventilatoren.

Op de toevoerschacht worden verdeelkanalen aangesloten die via brandkleppen en debietregelaars de woningen van ventilatielucht voorzien.

8 Zonneschoorsteen

De zonneschoorsteen heeft de volgende functies:

- Oogsten van zonne-energie t.b.v. de woningverwarming via de warmtepomp (paragraaf 10) en thermische regeneratie van de bodem, waaraan in het stookseizoen warmte wordt onttrokken door de warmtepomp (paragraaf 17).
- Afzuigen van ventilatielucht uit de woningen door thermische trek. Ventilatielucht wordt naar de afzuigschacht van de zonneschoorsteen afgevoerd via parallel aan de toevoerkanalen liggende afzuigkanalen, voorzien van brandkleppen en debietregelaars. In principe wordt de zonneschoorsteen hierbij gedimensioneerd op het luchtdebiet dat moet worden afgezogen, en op het drukverschil dat hiervoor nodig of gewenst is. Een hulpventilator aan de top van de zonneschoorsteen zorgt onder alle omstandigheden voor handhaving van het ventilatiedebiet. Gebruik van de hulpventilator moet hierbij zoveel mogelijk worden beperkt.
- Naast de thermische dubbelfunctie wordt de zonneschoorsteen ook benut voor stroomopwekking met behulp van PV-panelen tegen de achterwand, die als absorber dienen. Het exergetisch rendement wordt hierdoor aanzienlijk vergroot.

De voor deze functies benodigde capaciteit wordt uitsluitend door de oriëntatie en de breedte van de zonneschoorsteen bepaald. De diepte wordt bepaald door de toelaatbare luchtsnelheid en het inherente drukverlies. In verband met schoonmaakonderhoud wordt een minimumdiepte van $\approx 0,7\text{m}$ aangehouden.

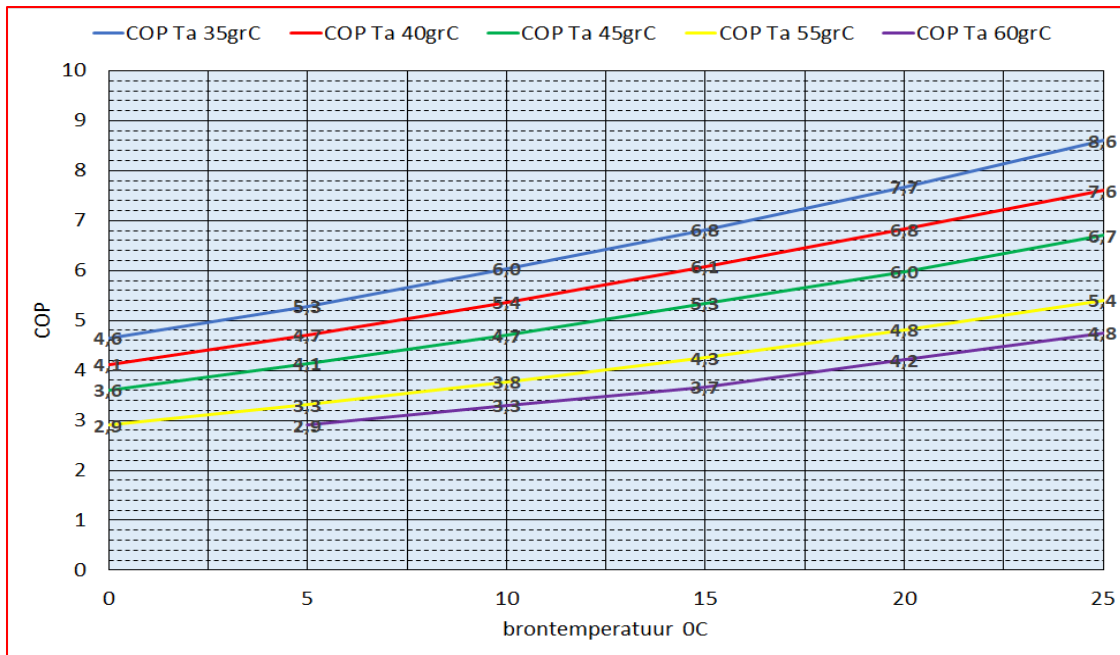
De zonneschoorsteen is ook een dominante bouwkundige verschijningsvorm en de architecturale functie kan overdimensionering tot gevolg hebben waarmee bij de uitwerking van het ontwerp rekening moet worden gehouden.

9 Warmteterugwinning

De afgezogen lucht met een temperatuur $\geq 23^{\circ}\text{C}$, afhankelijk van de zonnestraling, wordt aan de top van de zonneschoorsteen gekoeld via een warmtewisselaar die gevoed wordt met bronwater van 13°C uit de WKO-installatie. Het door de ventilatielucht en zonnewarmte tot ca. 22°C verwarmde retourwater dient als warmtebron voor de centrale warmtepomp en voor thermische regeneratie van de bodem via de WKO-installatie.

10 Warmtepomp

De brontemperatuur T_{koud} van de collectieve warmtepomp is ca. 22°C . Bij een aanvoertemperatuur van het warmtenet T_{warm} van 40°C kan hierbij een COP van $\approx 7,25$ worden gerealiseerd, op zonnige dagen nog iets hoger. De COP als functie van de brontemperatuur T_{koud} en de aanvoertemperatuur T_{warm} is voor een courante warmtepomp (Viessmann Vitocal 300-G Pro) weergegeven in figuur 2.



Figuur 2- COP als functie van brontemperatuur T_{koud} en aanvoertemperatuur T_{warm}
(Viessmann Vitocal 300-G Pro)

11 Warmtenet

Vanaf de centrale warmtepomp wordt water met een temperatuur van 40°C naar de warmtewisselaars van de collectieve voorzieningen getransporteerd en naar de afleversets in de individuele woningen. Warmtenetten, waarmee warmtebronnen aan warmtegebruikers worden gekoppeld staan erg in de belangstelling. De vele studies en publicaties over dit onderwerp (Planbureau voor de Leefomgeving 2017, Dobbelsteen 2018), hebben vooral betrekking op situaties waar restwarmte uit externe bronnen beschikbaar is. Het gebruik van in het gebouw zelf ge oogste warmte is een nieuwe en veelbelovende optie om niet alleen energieneutraliteit te realiseren, maar tegelijkertijd de zomerse nadelen van energiebesparing te neutraliseren.

12 Collectief ventilatiesysteem

In de grootschalige gestapelde woningbouw, die midden vorige eeuw inzette, werden collectieve CV-installaties aangebracht met een olie gestookt centraal ketelhuis in de kelder. Op de radiatoren waren zgn. warmtemeters aangebracht, die jaarlijks werden afgelezen, op basis waarvan de collectieve stookkosten over de woningen werden omgeslagen. Deze flatwoningen werden natuurlijk en collectief geventileerd via verticale afvoerkanalen met shuntvoorzieningen in toilet- en badruimten en dakkappen.

Bij de ontwikkelingen in de tweede helft van de vorige eeuw speelde de transitie van stookolie naar gas een grote rol. Compacte gasketels konden per woning worden geïnstalleerd, waardoor de stookkosten individueel op basis van het gasverbruik konden worden bepaald. Door de latere ontwikkeling van compacte mechanische afzuigunits werd ook de woningventilatie geïndividualiseerd. De steeds aangescherpte eisen m.b.t. de energieprestatie maakte gebalanceerde ventilatie met warmteterugwinning noodzakelijk en de hiervoor ontwikkelde units werden op grote schaal ingezet. Helaas niet altijd met succes (Balvers, Jaap et al.2012).

Onder invloed van verschillende ontwikkelingen zien we nu weer een beweging terug van individuele naar collectieve voorzieningen. Energiebesparing is collectief efficiënter te realiseren dan op individueel woningniveau. Geluidsproblemen kunnen worden vermeden of zijn beter beheersbaar. Energiezuinigheid leidt vaak ook tot complexe voorzieningen met "slimmere" regeltechniek, die tot grotere begripsafstand leidt met bewoners/gebruikers. Voor de utiliteitsbouw, waar bediening en onderhoud van de installaties professioneel geregeld is, is dit geen probleem maar voor de woningbouw

ligt dit anders. Hoe dommer de installatie, althans die op huiskamerniveau, des te beter zal deze door de gebruiker worden begrepen en gebruikt.

Het collectieve ventilatiesysteem is in feite de ultieme collectivisering van klimaatvoorzieningen. Via de klimaatcascade wordt lucht van ca.18°C toegevoerd, en de afzuiging vindt plaats via de zonnesc schoorsteen met warmteterugwinning. De teruggewonnen warmte uit de zonnesc schoorsteen wordt via een lage-temperatuur warmtenet naar de woningen getransporteerd t.b.v. de verwarming en de warm tapwatervoorziening.

Deze collectieve voorziening voor natuurlijke ventilatie en warmteterugwinning lijkt zowel qua rendement als onderhoud een uitstekende optie. Bewoners worden verlost van geluidsproblemen en thermische regeneratie van de bodem wordt op een elegante manier opgelost. Dit concept vraagt overigens wel om enig “omdenken” (Gunster Berthold 2010/2013).

De situering en uitvoering van de luchtkanalen, binnen het gebouw of buiten aan de gevel, horizontaal of verticaal, is sterk projectgebonden. Figuur 3 toont een architecturale oplossing zoals ontworpen voor een kantoorgebouw, maar evengoed toepasbaar voor een woongebouw. De twist in de kanalen laat het verloop zien van de convergentie en divergentie van toevoer- en afzuigkanalen.

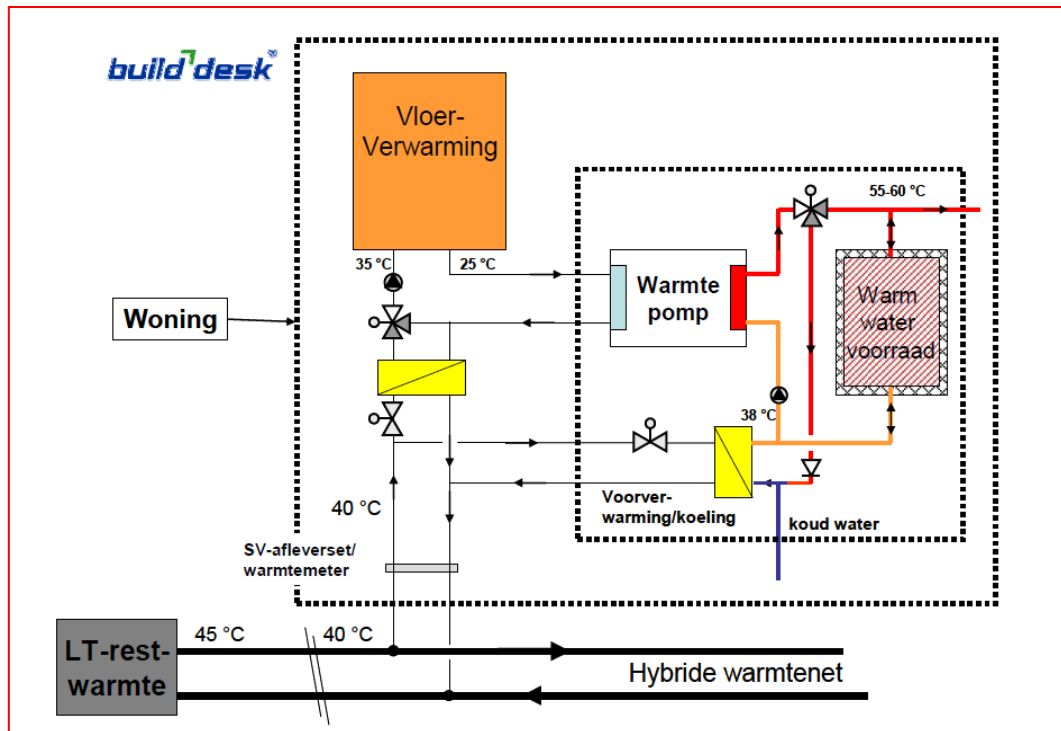


Figuur 3 - Ventilatiekanalen als architecturale expressie (ontwerp Peter Swier 2016)

13 Principe warmtevoorziening op woningniveau

De energiebehoefte voor ruimteverwarming is voor bijna-energie neutrale woningen extreem laag, en bij collectieve ventilatie op decentraal niveau zelfs nihil. Resteert de energiebehoefte voor tapwaterverwarming, die onder meer door luxe douche en badsystemen, toeneemt. In verband met het minimaliseren van warmteverliezen heeft een individueel systeem de voorkeur (BuildDesk Benelux 2011),

In combinatie met het Earth, Wind & Fire concept lijkt het principe van de warmtevoorziening op woningniveau volgens figuur 4 een optimale keus (BuildDesk Benelux 2011).



Figuur 4 – Principe hybride warmtenet in de woning (BuildDesk)

De werking wordt als volgt omschreven:

1. Vanuit de centrale warmtebron wordt via het hybride warmtenet water van 40° - 45° C naar de woningen getransporteerd.
2. De woningen worden aangesloten via een afleverset met scheidingswarmtewisselaar, waarvan dan water van 35° C via een traditionele verdeler direct de leidingen van de vloerverwarming instroomt. Met ca 25° C komt het daar weer uit.
3. Een tweede warmtestroom van 35° - 38° C gaat door een warmtewisselaar en verwarmt daarmee het warme tapwater voor tot 33° - 36° C, voordat dit het buffervat van ca 200 liter in gaat.
4. Het aldus voorverwarmde tapwater wordt, zoveel mogelijk tijdens perioden van maximaal stroomaanbod, naverwarmd tot 55° à 60° C met een kleine warmtepomp van 1 – 2 kW_{th} . De
5. De verdampers van de warmtepomp wordt aangesloten op de retour van de vloerverwarming en haalt zo de benodigde bronwarmte ook uit het warmtenet. Door de hoge brontemperatuur haalt de warmtepomp een hoge COP en heeft dus maar weinig stroom nodig.
6. Tijdens de naverwarming van het warmte tapwater produceert de warmtepomp tegelijkertijd een kleine hoeveelheid bruikbare koude die in de zomer te benutten is om de woning iets comfortabeler te laten zijn.

Stel dat het gemiddelde appartement per dag 100 liter warmtapwater van 65° C gebruikt. Via het warmtenet wordt dit voorverwarmd van $\approx 10^{\circ}$ C naar 38° C. Verwarming via de warmtepomp van 38° C naar 65° C kost $\approx 3,15$ kWh. Bij een COP van 6 wordt dan per dag via vloerkoeling $\approx 2,6$ kWh aan koude geleverd.

14 Beng-normen

De BENG-normen, die per 2020 zullen worden ingevoerd omvatten:

1. Een maximale energiebehoefte voor verwarming, ventilatie en koeling van 25 kWh per m^2 gebruiksoppervlak per jaar.
2. Een maximaal primair fossiel energiegebruik voor verwarming, koeling, warmtapwaterbereiding en ventilatoren van 25 kWh per m^2 gebruiksoppervlak per jaar. Bij gebruik van PV-panelen of andere hernieuwbare energiebronnen kan de opgewekte energie van het primair energiegebruik worden afgetrokken

3. Een minimaal aandeel hernieuwbare energie van 50%, te bepalen door de hoeveelheid hernieuwbare energie te delen door het totaal van hernieuwbare energie en primair fossiel energiegebruik.

Bij primair fossiel energiegebruik worden de systeemverliezen, hulpenergie van pompen e.d. en het rendement van de opwekkers meegenomen. Bij energiebehoefte is dat niet het geval. De energiebehoefte voor verlichting en huishoudelijke apparaten wordt niet meegeteld.

15 Kengetallen warmtebehoefte en energiegebruik

De warmtebehoefte voor woningen kan worden onderverdeeld in

1. Verwarming t.b.v. thermisch comfort
1. Ventilatie t.b.v. gezondheid
2. Warm tapwater t.b.v. hygiëne.

De warmtebehoefte voor verwarming is gebouw gebonden en kan worden verminderd door verbetering van de thermische isolatie. De warmtebehoefte voor ventilatie en warm tapwater is gebruikers gebonden en leent zich in principe niet voor vermindering.

15.1 Verwarming

Conform de BENG-normen. Om deze enig reliëf te geven t.o.v. de huidige situatie kan worden uitgegaan van het huidige gemiddelde jaarlijks gasgebruik in appartementen van 900 m³ (<http://www.energiesite.nl>), waarvan naar schatting 60 m³ voor koken en 840 m³ voor verwarming en ventilatie. Bij een rendement van 100% op de calorische onderwaarde van 8,8 kWh.m⁻³ levert dit jaarlijks 840*8,8 ≈ 7.400 kWh, voor een gemiddeld appartement van 100 m² overeenkomend met ≈ 74 kWh.m⁻². Als hiervan het gebruik voor tapwaterverwarming ad 25 kWh.m⁻² wordt afgetrokken (zie paragraaf 15.3) resteert voor het dekken van de warmtebehoefte + ventilatie ≈ 49 kWh.m⁻². De BENG-norm houdt dus globaal een halvering van de warmtebehoefte in t.o.v. de huidige situatie.

15.2 Ventilatie

De BENG-norm is inclusief de warmtebehoefte voor ventilatie, zonder bevochtiging. Op basis van voor hotel BREEZE uitgevoerde analyses (Bronsema B. et al. 2018) komt het specifieke jaarlijkse energiegebruik voor verwarming + bevochtiging van de ventilatielucht overeen met ≈ 12,5 kWh.m⁻², waarvan ≈ 6,75 kWh.m⁻² voor verwarming en ≈ 5,75 kWh.m⁻² voor bevochtiging. De jaarlijkse warmtebehoefte voor verwarming volgens de BENG-norm exclusief ventilatie bedraagt dan (25-6,75) ≈ 18,25 kWh.m⁻².

De BENG-norm geeft geen ruimte voor luchtbevochtiging. In de navolgende analyses wordt ervan uitgegaan dat de warmtebehoefte hiervoor moet worden gevonden binnen de gestelde limiet van 25 kWh.m⁻²

15.3 Warm tapwater

ISSO-publicatie 55 geeft rekenregels voor de warmwaterbehoefte van woongebouwen (ISSO 2015). Voor een gemiddeld tweekamerappartement van 100 m² kan hieruit globaal een dagelijkse volumebehoefte worden afgeleid van ≈ 100 liter met een temperatuur aan het tappunt van 60°C. Gezien de optredende warmteverliezen wordt uitgegaan van een temperatuur van 65°C in het voorraadvat. Bij een leidingwatertemperatuur van 10°C is dan de jaarlijkse warmtebehoefte $Q \approx 100 * 365 * 4,2 * (65 - 10) / 3600 = 2.340$ kWh overeenkomend met 23,4 kWh per m² woonoppervlak. Als kengetal voor verdere analyse wordt hierna uitgegaan van 25 kWh.m⁻², een waarde die ook als forfaitaire waarde voor de EU wordt vermeld (Kurnitski, J. et al. 2018).

15.4 Overzicht van de kengetallen:

Verwarming	18,25	[kWh.m-2]
Ventilatie	6,75	[kWh.m-2]
Bevochtiging	5,75	[kWh.m-2]
Warm tapwater	<u>25,00</u>	[kWh.m-2]
Totaal	55,75	[kWh.m-2]

Het tapwater wordt van 10°C → 38°C verwarmd via de collectieve warmtepomp (12,5 kWh.m⁻²) en van 38°C → 65°C door de individuele warmtepompen in de woningen (12,5 kWh.m⁻²)

15.5 Gebruikers gebonden energiegebruik buiten de BENG-norm

Als forfaitaire waarden voor de EU worden vermeld (Kurnitski, J. et al. 2018)

- Huishoudelijke apparaten 3 W.m⁻² GO - benuttingsfactor 0,6

Overeenkomend met $3 \cdot 0,6 \cdot 8765 / 1000 \approx 16$ [kWh.m⁻²]

- Verlichting 9 W.m⁻² GO - benuttingsfactor 0,14

Overeenkomend met $9 \cdot 0,14 \cdot 8765 / 100 \approx 11$ [kWh.m⁻²]

16 Projectanalyse

Analyses zijn uitgevoerd voor onderstaand project uitgevoerd met het EW&F-concept.

- Aantal woningen 100 [-]
- Woonoppervlak per woning 100 [m²]
- Totaal woonoppervlak 10.000 [m²]
- Ventilatiecapaciteit per woning 200 [m³.h⁻¹]
- Totale ventilatiecapaciteit 20.000 [m³.h⁻¹]

De energieprestaties van de klimaatcascade zijn ontleend aan de voor hotel BREEZE uitgevoerde analyse (Bronsema, B. et al 2018):

- Jaarlijks stroomgebruik ≈ 3.200 kWh_e $\equiv 0,32$ [kWh_e.m⁻²]
- Psychrometrische prestatie koelen/drogen ≈ 41.000 kWh_{th} $\equiv 4,1$ [kWh_{th}.m⁻²]
- Psychrometrische prestatie verwarmen/bevochtigen ≈ 125.000 kWh_{th} $\equiv 12,5$ [kWh_{th}.m⁻²]
- Maximum waterdebiet bij $\Delta T = 6K \approx 3,6$ kg.s⁻¹ $\equiv 13,0$ [m³.h⁻¹]

Bij een thermische isolatie resulterend in een warmtebehoefte 25 kWh.m⁻² conform de eerste BENG-norm is een jaarlijks primair energiegebruik berekend van 2,7 kWh per m² GO- zie tabel 1.

Jaarlijks energiegebruik bij V&V 25 kWh.m ⁻²								
	kWh.m ⁻²	m ² GO per app.	kWh per app.	Aantal app.	kWh tot.	COP WP	kWh _e WP	kWh _{th} WKO
V&V	25	100	2.500	100	250.000	7,25	34.483	215.517
Bevochtiging	5,75	100	575	100	57.500	7,25	7.931	49.569
WW coll.	12,5	100	1.250	100	125.000	7,25	17.241	107.759
WW ind.	12,5	100	1.250	100	125.000	5	25.000	100.000
Total	55,75		5.575		557.500		84.655	472.845
Specifiek primair energiegebruik kWh per m ² GO								
Circulatiepompen, WKO pomp, sproeipomp klimaatcascade kWh _e							5.898	
Jaarlijks bruto collectief energiegebruik kWh _e							90.553	
Af: PV-cellen op dak 9*10*10 = 900 m ² à 80 kWh _e .m ⁻²							-72.000	
Af: PV-cellen in zonneschoorsteen 200 m ² à 100 kWh _e .m ⁻²							-20.000	
Jaarlijks netto collectief energiegebruik kWh _e							-1.447	
Jaarlijks energiegebruik per appartement excl. circulatiepompen kWh _e							-14	
Circulatiepompen CV en WW-voorziening in appartementen kWh _e							120	
Jaarlijks energiegebruik per appartement incl. circulatiepompen kWh _e							106	
Idem per m ² GO kWh _e							1,1	
Jaarlijks primair energiegebruik per m² GO bij conversiefactor 2,56 kWh							2,7	

Tabel 1 – Jaarlijks primair energiegebruik bij een collectief EW&F-klimaatstelsel

Dit concept is bijna energieneutraal en zou bij optimalisering van de voorzieningen wellicht geheel energieneutraal kunnen worden. Het totale jaarlijkse energiegebruik bedraagt ≈ 101.000 kWh. De eigen opwekking met PV-cellen op het dak en in de zonneschoorsteen bedraagt 92.000 kWh oftewel $\approx 90\%$. Het concept voldoet hiermee aan de 3 BENG-normen.

De ruimte met de BENG-norm is $(25 - 2,7) = 22,3 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$ overeenkomend met $(22,3 \cdot 2,56) = 57 \text{ kWh}_e\cdot\text{m}^{-2}$ oftewel 5.700 kWh per appartement van 100 m^2 . Binnen de BENG-norm kunnen op basis hiervan de volgende strategische beslissingen worden genomen:

- Benutting van het overschot voor dekking van het gebruikers gebonden energiegebruik voor huishoudelijke apparatuur ad $1.577 \text{ kWh}\cdot\text{a}^{-1}$ en verlichting ad $1.104 \text{ kWh}\cdot\text{a}^{-1}$ - zie paragraaf 15.5.
- Vermindering van de stroomopwekking met PV-cellen, een kostenbesparing.
- Vermindering van de thermische isolatie van het gebouw naar een niveau van $35 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$, eveneens een kostenbesparing. Hiervoor is een jaarlijks primair energiegebruik berekend van $6,2 \text{ kWh}$ per $\text{m}^2 \text{ GO}$, nog steeds ruim binnen de BENG-norm van $25 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Het totale jaarlijkse energiegebruik stijgt hierbij naar $\approx 116.300 \text{ kWh}$. De eigen opwekking met PV-cellen op het dak en in de zonneshoorsteen blijft 92.000 kWh oftewel $\approx 79\%$. Het concept voldoet hiermee niet aan de 1e BENG-norm, maar wel aan de 2^e en 3^e, en die is uiteindelijk bepalend voor de CO₂ uitstoot.
- Een combinatie van maatregelen op basis van financieel-economische overwegingen, waarbij kosten en baten van de gebouweigenaar kunnen worden afgewogen tegen die van de bewoners.

Als dit project zou zijn uitgevoerd met hoogwaardige warmteterugwinning en een lucht/water warmtepomp per appartement zou bij een isolatiegraad van $25 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$ volgens de 1^e BENG-norm nog $\approx 30.000 \text{ kWh}$ PV-energie in de gevel moeten worden opgewekt om te voldoen aan de 2^e en 3^e BENG-norm. Dit is eveneens het geval bij een soortgelijk uitvoering met WKO en water/water warmtepompen.

17 Warmte- en Koudeopslag (WKO)

Met behulp van de WKO Tool Nederland kan worden bepaald of WKO op de betreffende locatie mogelijk is. (<http://www.wkool.nl/>). Of de bodem technisch geschikt is kan door de ontwerper van de ondergrondse installatie worden bepaald met behulp van een geohydrologisch vooronderzoek.

Warmteopslag in aquifers is een zgn. open bodemenergiesysteem dat vergunningplichtig is onder de Waterwet. Het brondebiet voor het project ad paragraaf 16 bedraagt

▪ Klimaatcascade	13	$[\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}]$	– paragraaf 19.2
▪ Zonneshoorsteen	7	$[\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}]$	– paragraaf 20.2
▪ Totaal	20	$[\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}]$	

Waar de bodem niet geschikt is voor warmteopslag in aquifers kunnen vaak verticale bodemwarmtewisselaars worden toegepast, die eveneens geschikt zijn voor kleinere projecten. Warmteopslag met bodemwarmtewisselaars is een zgn. gesloten bodemenergiesysteem waarvoor volgens het Besluit Bodemenergiesystemen een vergunning- of meldingsplicht geldt. Grote gesloten systemen ($> 70 \text{ kW}$) zijn ook buiten interferentiegebieden vergunning plichtig. De capaciteit van het project ad paragraaf 16 is bij een debiet van $20 [\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}]$ en een $\Delta T = 6\text{K} \approx 140 \text{ kW}$ en is dus vergunning plichtig.

De jaarlijkse warmteonttrekking aan de bodem bij de BENG-norm van $25 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$ bedraagt 472.845 kWh - zie tabel 1. De zonneshoorsteen dient als regeneratievoorziening en moet dus eenzelfde warmtehoeveelheid kunnen leveren. Deze warmtebalans ziet er als volgt uit:

▪ De klimaatcascade levert in zomerbedrijf	41.000 $[\text{kWh}\cdot\text{a}^{-1}]$
▪ Koeling van de lucht van 22^0 naar 15^0C levert	408.800 $[\text{kWh}\cdot\text{a}^{-1}]$
▪ Zoninstraling in de zonneshoorsteen	<u>23.045 $[\text{kWh}\cdot\text{a}^{-1}]$</u>
	472.845 $[\text{kWh}\cdot\text{a}^{-1}]$

De jaarlijkse zonnestraling op een zuidgevel bedraagt $862,4 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$. Bij een rendement van 50% en een hoogte van 30m is een breedte van 1,78m nodig. Voor een debiet van $20.000 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ en een maximum luchtsnelheid van $1,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ wordt de diepte dan $\approx 2,0 \text{ m}$. Uitgaande van een minimumdiepte van $0,7 \text{ m}$ wordt de benodigde breedte $5,3 \text{ m}$, resulterend in een opbrengst van $\approx 68.600 [\text{kWh}\cdot\text{a}^{-1}]$. Met deze grotere opbrengst van de regeneratievoorziening kan ook mee warmte aan de bodem worden onttrokken, en zou het energiegebruik kunnen worden verhoogd, bijvoorbeeld door minder thermische isolatie toe te passen.

18 Flatwoningen voor People – Planet - Profit

Het *Earth, Wind & Fire* concept biedt een oplossing voor veel problemen bij het realiseren van een toekomstbestendige hoogbouw in een urbane omgeving.

18.1 People:

1. Optimale luchtkwaliteit van de op dak niveau aangezogen ventilatielucht ook m.b.t. de fijnstof concentratie die vrijwel evenredig met de hoogte afneemt.
2. Natuurlijke ventilatie van hoogbouw in een urbane omgeving wordt mogelijk zonder door het stadsverkeer of de luchtvaart veroorzaakte geluidsproblemen.
3. Oververhitting van flatwoningen wordt op een elegante wijze geneutraliseerd waardoor een veilig en gezond binnenmilieu wordt gerealiseerd met een ideale relatieve vochtigheid van $\geq 30\%$ in de winter en $\leq 70\%$ in de zomer.
4. De ramen kunnen bij dit concept geopend worden. Een te openen raam hoort bij de “elementaire rechten van de mens”.
5. Problematische individuele voorzieningen voor warmteterugwinning in de woningen met inherent geluidsoverlast zijn niet nodig.
6. Bewoners hebben geen behoefte meer aan de aanschaf van individuele airconditioners met alle negatieve aspecten daarvan m.b.t. extra kosten en geluid. Via de ventilatielucht wordt dagelijks ca. 14,4 kWh koeling geleverd en via de vloerkoeling ca. 2,5 kWh. Samen levert dit ca. 17 kWh koelcapaciteit, overeenkomend met de koudelevering van de gemiddelde *room airconditioner* van 2.000 W gedurende 10 uur.
7. Ventilatioeroosters in de gevel zijn overbodig, en de inherente tochtproblemen in de wintermaanden behoren tot het verleden.

18.2 Planet:

8. Door het lage energiegebruik kan uiterst gemakkelijk worden voldaan aan de BENG-normen. Het concept is daarmee een grote stap op weg naar aardgas loze hoogbouw en een substantiële CO₂-reductie.
9. Het concept voorziet in een hoog-efficiënte collectieve warmteterugwinning
10. Vermijding van energiegebruik t.b.v. koeling met individuele airconditioners met alle negatieve aspecten daarvan m.b.t. energiegebruik en warmte-eiland effect.
11. Het *Earth, Wind & Fire* concept anticipeert op klimaatverandering met warmere zomers, frequentere hittegolven en warmte-eiland effect.

18.3 Profit:

12. Het *Earth, Wind & Fire* concept is een robuust en onderhoudsarm concept met lange levensduur en lage exploitatiekosten. Het maakt geen gebruik van slimme technologie met gecompliceerde en storingsgevoelige regelsystemen.
13. Negatieve effecten van een lichte en snelle bouwwijze met thermische minder tolerante gebouwen worden gecompenseerd.
14. Het concept wordt idealiter toegepast bij nieuwbouw, maar is in principe ook bij revitalisatie (*deep renovation*) dan wel een grondige energetische upgrade (*deep retrofit*) van bestaande gebouwen een reële mogelijkheid.
15. Het concept leent zich goed voor financiering en exploitatie door een ESCO.

19 Kosten

De bouwkundige- en installatietechnische kosten voor de klimaatcascade, de zonneshoorsteen en de luchtkanalen voor het collectieve ventilatiesysteem moeten worden gecompenseerd door

- Besparingen op de individuele voorzieningen in de appartementen, warmteterugwinning en warmtepompen
- Besparingen op de thermische uitvoering van de gebouwschil door het verlagen van de 1^e BENG-norm van 25 kWh.m⁻² naar 35 kWh.m⁻².

Gezien de ongelijksoortigheid van deze items qua levensduur en onderhoud moet hierbij worden uitgegaan van levensduurkosten.

20 ESCO

Voor applicatie van het EWF-concept lijkt inschakeling van een ESCO een goede mogelijkheid, vooral in bestaande gebouwen. Het meest voor de hand ligt een zgn. Gebouw-ESCO, die zich richt op ingrijpende energiebesparende maatregelen, zoals de klimaatinstallaties, op maatregelen in de schil van een gebouw, en de bouw van de klimaatcascade en de zonnescchoorsteen met de daarbij behorende installatietechnische voorzieningen. Sterkte punten van een ESCO zijn:

- Een ESCO heeft kennis van installaties, men hoeft dus niet zelf in technische kennis te investeren.
- Een ESCO kan de financiering van de aanleg van het EWF-concept op zich nemen.
- Een ESCO kan in aanmerking komen voor subsidies en fiscale regelingen.
- Een ESCO kan een totaal ontzorgingsconcept aanbieden.
- De investering kan worden verrekend met de maandelijkse utiliteitsrekening

In het energieprestatiecontract worden langjarige afspraken vastgelegd tussen de eigenaar van een gebouw en het bedrijf dat energiebesparende maatregelen installeert en onderhoudt. Het resultaat is een energiezuiniger gebouw zonder de bijbehorende diepte-investering. Door energiebesparing heeft de investering een terugverdieneffect. Na afloop van het contract valt de installatie volledig toe aan de eigenaar.

21 Referenties

- Balvers J., Rik Bogers, Rob Jongeneel, Irene van Kamp, Atze Boerstra & Froukje van Dijken (2012) *“Mechanical ventilation in recently built Dutch homes: technical shortcomings, possibilities for improvement, perceived indoor environment and health effects”*. Architectural Science Review 55:1, pp 4-14 (<https://doi.org/10.1080/00038628.2011.641736>)
- Bronsema B. (2012) *“Binnenmilieu: Symbiose van Architectuur en Klimaattechniek - EOS-LT Earth, Wind & Fire”*. Rijksdienst voor Ondernemend Nederland Publicatienr. RVO-145-1501/RP-DUZA (www.rvo.nl)
- Bronsema B. (2012) *“Onderzoek en Geo-klimaatconcept”- EOS-LT Earth, Wind & Fire*. Rijksdienst voor Ondernemend Nederland Publicatienr. RVO-165-1501/RP-DUZA (www.rvo.nl)
- Bronsema B. (2012) *“Onderzoek Zonnescchoorsteen en Zonnepaasade”- EOS-LT Earth, Wind & Fire*. Rijksdienst voor Ondernemend Nederland Publicatienr. RVO-165-1501/RP-DUZA (www.rvo.nl)
- Bronsema, B. et al.2018/A. [NATUURLIJKE AIRCONDITIONING: WAAR WACHTEN WE NOG OP?](#) TVVL Magazine 01 | 2018
- Bronsema, B. et al.2018/B. [EARTH, WIND & FIRE: EVOLUTIE VAN EEN INNOVATIE \(1\)](#) “Earth”: *Natuurlijke ventilatie en luchtbehandeling via de klimaatcascade*” TVVL Magazine 01 | 2018
- Bronsema, B. et al.2018/C. [EARTH, WIND & FIRE: EVOLUTIE VAN EEN INNOVATIE \(3\)](#) “Fire”: *Natuurlijke ventilatie en energie via de zonnescchoorsteen*”. TVVL Magazine 03 | 2018
- BuildDesk Benelux (2011). *“Rendement van tapwatersystemen: blijven evalueren of duurzaam evolueren”*. Rapportnummer 90409/CG/101244. (In opdracht van Agentschap NL)
- CIBSE TM52” (2013) *“The limits or thermal comfort: avoiding overheating in European Buildings”*. London: Chartered Institution of Building Services Engineers.
- Dobbelsteen 2018. *“TU maakt plan voor gasloos Amsterdam”*. <https://www.delta.tudelft.nl/article/tu-maakt-plan-voor-gasloos-amsterdam>
- Gunster, Berthold 2010/2013. *“Omdenken’- Ja-maar wat als alles lukt’ en ‘Huh?! – de techniek van het omdenken”*. Bruna Lev. ISBN 9789022996973
- ISSO 2015. ISSO-publicatie 55 *“Leidingwaterinstallaties Voor woon- en utiliteitsgebouwen”*. ISBN: 978-90-5044-250-3
- Kurnitski, J. et al. *“Proceedings of the REHVA Annual Meeting Conference Low Carbon Technologies in HVAC”* 23 April 2018, Brussels, Belgium. (<https://www.rehvam2018atic.eu>)
- Lomas Kevin J. & Stephen M. Porrit (2017) *“Overheating in buildings: lessons learned from research”*. Building Research & Information, 45:1-2 (<https://doi.org/10.1080/09613218.2017.1256136>)
- Planbureau voor de Leefomgeving 2017. *“Toekomstbeeld klimaatneutrale warmtenetten in Nederland”*. © PBL Planbureau voor de Leefomgeving. PBL-publicatienummer: 1926