



Netherlands Enterprise Agency

CONVERGE: COMfortabele Natuurlijke Ventilatie en
EnergieReductie in de GEbouwde omgeving

OPENBAAR EINDRAPPORT



1. Gegevens van het project

Projectnummer:	TEUE318008
Projecttitel:	CONVERGE: Comfortabele Natuurlijke Ventilatie en EnergieReductie in de GEbouwde omgeving
Penvoerder:	Technische Universiteit Delft
Deelnemers:	Technische Universiteit Delft Van Dorp Hunter Douglas Priva Stichting Green Village
Projectperiode:	1 maart 2019 – 1 september 2022

2. Uitgangspunten en doelstellingen van het project en de samenwerkende partijen

2.1. Inleiding

De gebouwde omgeving in Nederland is goed voor 38% van het totale finale energieverbruik. Daarmee is het de sector met het hoogste energieverbruik. Zowel in huishoudens als in de dienstensector wordt meer dan twee-derde van de gebruikte energie gebruikt voor het verwarmen en koelen van ruimtes. Dat wil zeggen dat maar liefst circa 25% van het totale energieverbruik in Nederland nodig is om een aangenaam klimaat in gebouwen te creëren.

Het streven naar energie-neutrale of zelfs energie-positieve gebouwen is dan ook een zeer belangrijk onderdeel van de energietransitie. Het terugdringen van de energievraag, het gebruik van duurzame bronnen en het verhogen van het rendement van apparaten moeten daarbij gecombineerd worden. Het uiteindelijke doel is om alle bestaande gebouwen in Nederland energieneutraal of zelfs energiepositief te maken door gebruik te maken van hernieuwbare energie zonder dat dit ten koste gaat van het comfort. Het project CONVERGE heeft tot doel om hier een grote bijdrage aan te leveren.

2.2. Uitgangspunten

Er zijn veel oplossingen om op een energie-neutrale of energie-positieve manier een comfortabel klimaat in een gebouw te creëren. De meeste bestaande oplossingen zijn gebaseerd op actieve systemen die zelf energie nodig hebben, zoals warmte- en koude-opslag-systemen met pompen. Dergelijke oplossingen zijn vanuit duurzaamheidsoogpunt echter niet ideaal. De benodigde energie moet immers op een of andere manier worden opgewekt, wat ten koste gaat van ruimte en budget. Bovendien is de levensduur van electro-mechanische installaties beperkt, waardoor er op termijn veel materialen, onderdelen en onderhoudswerkzaamheden nodig zijn. Anderzijds zijn er ook passieve manieren om het binnenklimaat te beheersen. De basis van deze systemen is het benutten en



beheersen van zonnewarmte en andere natuurlijke omstandigheden. Een passief gebouw wordt zoveel mogelijk verwarmd door invallend zonlicht. Omdat koelen in veel moderne luchtdichte en goed geïsoleerde gebouwen vaak een grotere uitdaging is dan verwarmen, ligt de focus juist op het beheersen van de zoninval. Bij lage binnentemperaturen is er dus meer zonne-energie nodig, en bij hoge temperaturen moet de zon buiten de leefruimtes blijven.

Met name de ramen en het glas in gevels zijn belangrijke "poorten" waardoor zonne-energie een gebouw binnenkomt. Binnen in het gebouw creëren passieve systemen een comfortabel klimaat door gebruik te maken van hoogteverschillen, natuurlijke luchtstromen en energiebronnen, met zo min mogelijk gebruik van ondersteunende apparaten. Door het gebouw zo te ontwerpen dat het gebruik van zonlicht wordt gemaximaliseerd, wordt de vraag naar aanvullende energiebronnen voor verwarming, ventilatie en koeling geminimaliseerd of zelfs geëlimineerd.

Dit betekent dat passieve klimaatbeheersing een enorme bijdrage kan leveren aan het terugdringen van het energieverbruik in gebouwen. Dergelijke systemen worden echter nog niet vaak toegepast. Technische uitdagingen, maar ook onbekendheid met de mogelijkheden, gebrek aan gebruikerservaring en gebrek aan inzicht in de business case van een passief klimaatstelsel liggen hieraan ten grondslag.

De fundamentele uitdaging bij passieve klimaatbeheersing is regeling en beheersbaarheid. Aangezien passieve klimaatregeling is gebaseerd op luchtstromen die worden veroorzaakt door van nature aanwezige druk- en temperatuurverschillen, is in de basisvorm geen regeling mogelijk. Hierdoor is het niet mogelijk om vraag en aanbod van warmte, ventilatie en koeling bij elkaar te brengen. Er is dus technologie nodig om het systeem te besturen.

Al met al zorgt de complexiteit van de interactie tussen de bovengenoemde factoren ervoor dat passieve klimaatstelsels nog geen succesvolle marktintroductie hebben gehad, ondanks de potentieel aantrekkelijke business case en de zeer positieve gevolgen voor het energiegebruik in de gebouwde omgeving. Alle elementen zijn aanwezig, maar van een succesvolle integratie is nog geen sprake. Het bovenstaande resulteert in de volgende centrale probleemstelling voor dit project: Hoe kan een passief klimaatstelsel worden ontwikkeld dat zorgt voor een comfortabel binnenklimaat met voldoende verwarming, ventilatie en koeling in diverse gebouwen en situaties met een minimaal energieverbruik en dat laagdrempelig, kosteneffectief en circulair kan worden ingevoerd in de bestaande bouwpraktijk in zowel bestaande gebouwen als nieuwbouw?

2.3. Doelstellingen

Om een zo goed mogelijke oplossing te bieden voor het hierboven beschreven probleem, is de doelstelling van het CONVERGE project tweeledig:

1. Onderzoek en ontwikkeling van passieve klimaatbeheersing in gebouwen op basis van een klimaatstelsel die energie kan besparen op verwarming, koeling en ventilatie in gebouwen ten opzichte van de gebruikelijke bouwpraktijk. De effectiviteit en toepasbaarheid wordt getest en gedemonstreerd in een geschikt testgebouw in het project. Door een klimaatstelsel in combinatie met een gebouw met een flexibele zonwerende glasgevel te onderzoeken,



ontwerpen, ontwikkelen en in de praktijk te testen,, worden systematisch verschillende scenario's en ontwerpen onderzocht en uitgevoerd en is opschaling mogelijk.

2. Het ontwikkelen van een instrumentarium bestaande uit concepten, ontwerpen, richtlijnen, scenario's en praktische en theoretische richtlijnen en instructies voor de gehele bouwketen. Speciale aandacht gaat uit naar digitalisering en industrialisatie van het ontwerp- en bouwproces door bijvoorbeeld bouwinformatiemodellering. Ook wordt tijdens de gebruiksfase het BIM-model gebruikt voor terugkoppeling vanuit de gebruikerservaring naar het ontwerp. Zo wordt ervoor gezorgd dat dit project niet enkel op zichzelf staat, maar dat de markt direct en efficiënt aan de slag kan met passieve klimaatbeheersing in concrete en uiteenlopende bouwprojecten.

3. Behaalde resultaten, knelpunten en perspectief voor toepassing

3.1. Communicatie over het project

De resultaten van het project zijn voorgesteld op diverse wetenschappelijke conferenties en praktijkbijeenkomsten en in wetenschappelijk tijdschriften:

- P. v.d. Engel, R. Bokel, L.A. de Araujo Passos, E. Brembilla, and P. Luscuere (2022). "CONVERGE: low energy with active passiveness in a transparent highly occupied building". Proceedings of the 14th Heating, Ventilation, and Air-Conditioning World Congress, Rotterdam, Nederland
- E. Brembilla (2022). "CONVERGE: windows to the future". NVBV Kennisdag
- E. Brembilla (2021). "Presentation Velux". Velux Daylight Symposium, Copenhagen, Denemarken
- T.J. Ceha, L.A. de Araujo Passos, S. Baldi, and B.D. Schutter (2021). "Model Predictive Control for optimal integration of a thermal chimney and solar shaded building". Proceedings of the 29th Mediterranean Conference on Control and Automation, Puglia, Italië
- L.A. de Araujo Passos, P. v.d. Engel, S. Baldi, and B. De Schutter (2022). "Optimal Schedule for long-term operation of a latent heat storage, solar shading, and energy backup in a low-energy climate system". Energy Conversion and Management.
- L.A. de Araujo Passos, T.J. Ceha, S. Baldi, and B. De Schutter (2022). "Model predictive control of a thermal chimney and dynamic solar shades for an all-glass facades building". Energy.
- P. v.d. Engel, M. Malin, N.K. Venkatesh, and L.A. de Araujo Passos (2022). "Performance of a Phase- Change Material battery in a transparent building". Fluid Dynamics & Materials Processing.

Daarnaast was er ook aandacht voor het project in de pers en de media:

- P. Luscuere and B. van Dorp. "How do they do it?". Discovery Channel, National. Datum: 15/06/2021.



- Nieuws artikel, Magazine Cobouw, Datum: 20/05/2022
- Nieuws artikel, NOS, Datum: 14/01/2022
- CONVERGE, Deerns magazine, Datum: 17/01/2022
- Co-Creation Center: "Innovatie is nu eenmaal niet perfect", Glas in beeld, Datum: 26/10/2020.

Verder vonden er ook nog een aantal evenement plaats op locatie:

- WP5 Market Consultation event 1
- Kennissessie Converge
- Dutch Daylight Award
- WP5 Market Consultation event 2
- Tour delegatie Buitenlandse Zaken aan The Green Village
- Brains4Buildings tour
- BTIC

3.2. Behaalde resultaten

3.2.1. Regelalgoritmen voor het klimaatsysteem

Priva heeft een set regelalgoritmen voor de klimaattoren ontworpen. De algoritmen zijn gebaseerd op PID-regelmethoden die op een aantal regels is gebaseerd, waarbij de systeemventilatie en air conditioning van het gebouw automatisch worden gerealiseerd op basis van de systeemcapaciteit, feedback van metingen en referentieomstandigheden binnenshuis. Het systeem kan online gemonitord worden via een gebruiksvriendelijk platform, maar de systeem-actuatoren kunnen ook handmatig bediend worden. Voor de duidelijkheid heeft Priva een specifiek rapport opgesteld waarin meer details over een dergelijke ontwikkeling te vinden zijn. Bovendien heeft Priva een recent ontwikkelde intelligente controller (Priva ECO) geïmplementeerd. In dit geval past het besturingssysteem een modelgebaseerdvoorspellend schema toe om de systeemprestaties te voorspellen en te optimaliseren.

3.2.2. Model voor het voorspellen van energie-efficiëntie en energieverbruik

De TU Delft en Van Dorp hebben numerieke modellen ontwikkeld om de prestaties van het klimaatsysteem in verschillende vormen te simuleren en tegelijkertijd verschillende scenario's te evalueren. De modellen zijn ontwikkeld in CFD (Phoenix), DesignBuilder en MATLAB. Deze modellen kunnen worden gebruikt om het energieverbruik en de systeemefficiëntie te bepalen. We hebben rekening gehouden met het effect van relevante parameters (bv. weer en gebruikersgedrag) en verschillende mogelijke inputs op de energie-efficiëntie en het energieverbruik van het klimaatsysteem (bv. zonweringopening, ventilatiesnelheden, PCM-gebruik). De volgende aspecten van het systeem zijn onderzocht:



- Wat zijn de optimale inputs voor de werking van de klimaattoren om te voldoen aan de energievraag voor verwarming en koeling van het glazen gebouw?
- De benodigde warmtepompvraag tijdens de winter- en zomerperiode.
- Benodigde regeling om een comfortabele binnenomgeving voor de gebruiker te creëren, rekening houdend met temperatuur, licht, akoestiek en luchtkwaliteit.

De belangrijkste resultaten wijzen op een jaarlijks energieverbruik van 27 kWh/m²/jaar, wat suggereert dat het gebouw een energiezuinig gebouw is. Deze waarde (27 kWh/m²/jaar) verwijst naar het actieve vermogen en vertegenwoordigt 42% van het jaarlijkse verbruik, terwijl de geoptimaliseerde passieve fractie 58% van de totale vraag vertegenwoordigt. De gedetailleerde resultaten van de simulaties zijn te vinden in de in dit rapport genoemde publicaties.

3.2.3. Specificaties voor de luifels

Hunter Douglas heeft het zonweringsysteem ontworpen en getest op haalbaarheid. Zij bepaalden de optimale specificatie voor de buitenzonwering (jaloezieën) in samenhang met de glasspecificatie en de totale energiebalans van het gebouw. Hier vatten we enkele belangrijke aspecten samen:

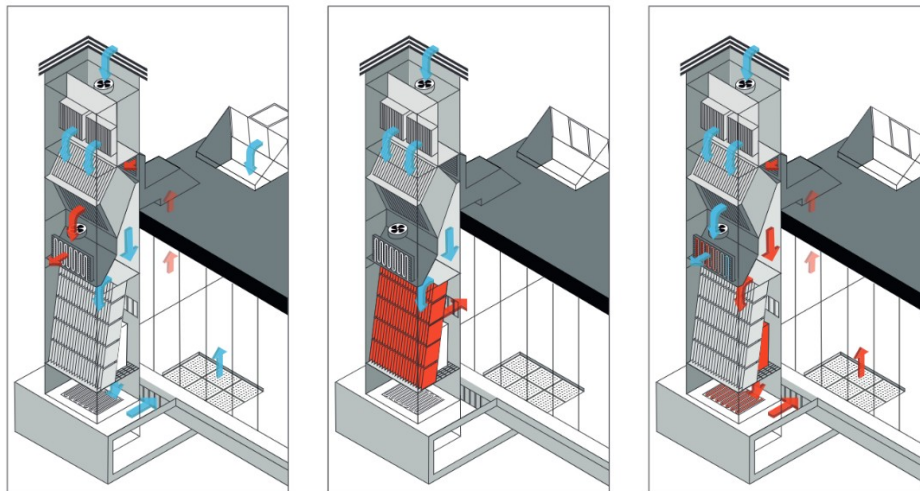
- De lamelkleur van de jaloezieën werd tijdens het eerste jaar van het project bepaald als HD-1861. Dit is een matzwarte coating die zowel de controle over de warmtewinst als de controle over verblinding maximaliseert.
- Onze regelaar communiceert via XML over HTTP met het Priva BMS (Building Management System). Dit leest zowel sensorgegevens als besturingsinstellingen en publiceert jaloezie-instellingen en berekende energie- en lichtresultaten. Jaloezie-instellingen worden door het BMS rechtstreeks doorgestuurd naar de motoren via gateways die protocolvertalingen uitvoeren. Energie- en lichtuitkomsten kunnen door het BMS worden gebruikt om de bedieningsinstellingen van de jaloezieën aan te passen (bv. de zonnearmtewinst verminderen tot x) alsmede de bedieningsinstellingen van de andere systemen die door het BMS worden bestuurd. Het systeem heeft in wezen feilloos gefunctioneerd tijdens het project.
- De jaloezieën werden zonder problemen gedimensioneerd en gemonteerd en functioneren nagenoeg probleemloos.
- In de laatste versie van onze regelaar hebben we enkele belangrijke wijzigingen aangebracht ten opzichte van onze eerdere regelaar: 1) In plaats van aansturing op basis van lokale sensordata, werkt onze nieuwste implementatie op basis van satellietdata die van internet gehaald wordt. Dit heeft als voordeel dat de regelaar als het ware in de toekomst kan kijken en de toekomstige zonnestralsintensiteit kan plannen. 2) We hebben ook de kalender van de Co-Creation Centre als input toegevoegd. Omdat het neerlaten en optrekken van een zonwering storend is (dit duurt meer dan 2 minuten, maakt geluid en beïnvloedt zowel het daglicht als daglichtgevoelige kunstverlichting), wordt zonweringsbeweging gepland voor of na een

evenement in het Co-Creation Centre. Al met al resulteert dit in een rustige dynamiek waarbij de zonwering logisch en voorspellend werkt, zonder ooit opdringerig te zijn.

Bovendien heeft Hunter Douglas de besturingsalgoritmen geïmplementeerd voor het bedienen van de zonwering, waaronder een PID-controller voor daglichttoetreding en energie-efficiëntie, en een modelgebaseerde voorspellende regelaar.

3.2.4. Conceptueel ontwerp van de klimaattoren

Van Dorp ontwikkelde het conceptuele ontwerp van de klimaattoren. De technische tekeningen die de voorzieningen voor warmte/koude/ventilatie (warmtepomp, ventilatoren) illustreren en detailleren, zijn te zien in Figuur 1.



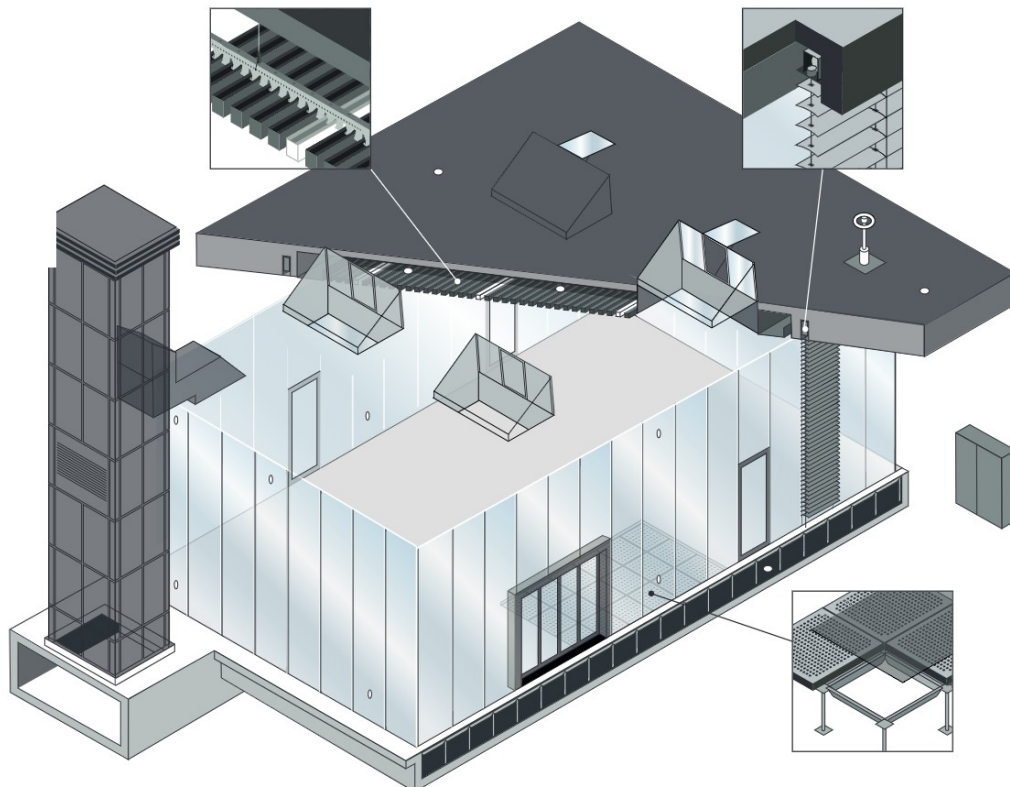
Figuur 1 - Conceptueel ontwerp van de klimaattoren

3.2.5. Ontwerp van het te realiseren gebouw/toren

Het ontwerp van het gebouw berust op de grondbeginselen van de thermodynamica, warmteoverdracht, vloeistofmechanica en regeltheorie. Dergelijke concepten zijn voortdurend in de praktijk onderzocht, zoals het gebruik van rekenkundige hulpmiddelen en simulatiemodellen. Zo hebben Priva, Hunter Douglas en Van Dorp, aangezien de meeste installaties zijn afgerond, ook hun producten in de praktijk kunnen testen met name sensormetingen, zonwering en de werking van de klimaattoren.

Ook het bouwconcept wordt voortdurend onderzocht. In die zin werd een extern gebouw met de naam Nono house ontworpen en geïnstalleerd in de buurt van het Co-Creation Centre. Het doel is dat dit huis de energiebesparing van het Co-Creation Centre ondersteunt en tegelijkertijd een geïsoleerde ruimte biedt voor de toegang van mensen, toiletten, lunch, besturingscomponenten enz tot het gebouw. Om de systeemprestaties numeriek te evalueren, hebben we simulaties uitgevoerd in PHOENICS en DesignBuilder. Deze simulatietools leverden de temperaturen en

stroomsnelheidsprofielen in het gebouw, dynamische warmtesnelheden, hulpverwarmingsvraag, zonne-inval, buffering van faseovergangsmaterialen, effect van materiaaleigenschappen/afmetingen en algehele passieve prestaties van het systeem. Bovendien zijn moderne regelalgoritmen, zoals Model Predictive Control-architecturen, numeriek geïmplementeerd in Matlab met behulp van optimalisatietools zoals interior point methoden, kwadratisch programmeren en genetische algoritmen. De zonneschermen worden ook numeriek onderzocht voor prestatiebeoordeling. Figuur 2 illustreert het ontwerp van het gebouw/de toren.



Figuur 2 - Ontwerp van het gebouw en de geïntegreerde klimaattoren

3.2.6. Intelligent en voorspellend meet- en regelsysteem met bijbehorende sensoren waarin de verschillende deelsystemen zijn geïntegreerd

Priva en Hunter Douglas hebben software en hardware geleverd voor het monitoren en besturen van het systeem op basis van het Building Information model (BIM) en de energie-versus-comfort relatie. In totaal zijn er meer dan 100 sensoren in het systeem geïnstalleerd, voor metingen van temperatuur, luchtstroom, vochtigheid, CO₂-niveaus, verlichting en weersomstandigheden (zonnestraling, buitentemperatuur en windsnelheid). Tijdens het project werden hoogwaardige lux-sensoren geïnstalleerd die in verschillende richtingen kijken. Hunter Douglas besloot deze te gebruiken in combinatie met de Priva pyranometer. De oorspronkelijk verwachte multisensor werd ontworpen, maar niet gerealiseerd omdat die geen toegevoegde waarde zou hebben voor het project.



Er zijn nauwkeurige jaloeziemodellen ontwikkeld en geïmplementeerd. Het werd echter duidelijk dat er rekening moest worden gehouden met de omgeving (overstekken, aangrenzende gebouwen en bomen) om de licht- en energieresultaten zinvol te maken. Dit werd aangepakt door een eenvoudig geometrisch model op te nemen in de Hunter Douglas-regelaar. Deze oplossing werkt goed voor door de mens gemaakte objecten, maar minder voor bomen. De noodzaak van een milieumodel heeft ook invloed op de commerciële levensvatbaarheid van het systeem, omdat het een modelleringsinspanning vereist die niet kan worden uitgevoerd door conventionele zonweringverkopers en extra kosten met zich meebrengt.

Door te draaien op voorspelde zonnestralingsgegevens kan onze regelaar ook functioneren in de context van modelgebaseerde voorspellende regeling (in het Engels: Model Predictive Control (MPC)). Hoe dit in de praktijk kan worden gebracht, wordt momenteel samen met de TU Delft onderzocht. Onze nieuwe aanpak omzeilt de knelpunten in signaalverwerking en schatting die inherent zijn aan het verwerken van lokale gegevens. Bovendien worden problemen geëlimineerd die voortkomen uit sensoren die geleidelijk vuil worden en daardoor afwijkende meetwaarden opleveren.

Daarnaast hebben Priva en Hunter Douglas intelligente en voorspellende regelingen geïmplementeerd. Bij deze regelingen houden we vooraf rekening met weersvoorspellingen om te anticiperen op de systeemprestaties en de beste regelstrategie te vinden. De Priva regeling (ECO) is gebaseerd op *black box* modellering waarbij de modellen statistisch representatief zijn door middel van datatraining en zelfkalibrerende principes. Het Hunter Douglas-model daarentegen is gebaseerd op *grey box* modellering, waarbij fysieke modellen worden gecombineerd met statistische gegevens en weersvoorspellingsgegevens.

Priva, Hunter Douglas en Van Dorp hebben samengewerkt aan de koppeling van de subsystemen via een geïntegreerde interface. The Green Village heeft alle verzamelde gegevens beschikbaar gesteld in een online repository waar de gegevens kunnen worden geraadpleegd voor gegevensuitwisseling en toekomstig (onderzoeks)werk.

3.2.7. Scenario's voor het testen en valideren van het systeem

De TU Delft heeft in het gebouw praktijktesten georganiseerd, waaronder experimentele testen voor het evalueren van de systeemprestaties, voor het valideren van de numerieke modellen en voor het verifiëren van het systeem onder reële operationele omstandigheden. Gedurende een jaar zijn vijf testweken geselecteerd om rekening te houden met het systeemgedrag onder verschillende weersomstandigheden en een controleerbaar binnenklimaat. Gedurende deze weken was het gebouw gesloten om variabelen zoals de interne warmteopwekking en luchtinfiltratie beter te kunnen regelen.

De verzamelde resultaten werden geacht de numerieke modellen te valideren, wat resulteert in een *variance-accounted-for* van 95%. Desalniettemin werd het gebouw ook in de praktijk continu gemonitord om de effectiviteit van het systeem te verifiëren en continu bijgestuurd voor instelpunten en comfortreferenties.

3.2.8. Een klimaattoren geïntegreerd met een proefgebouw

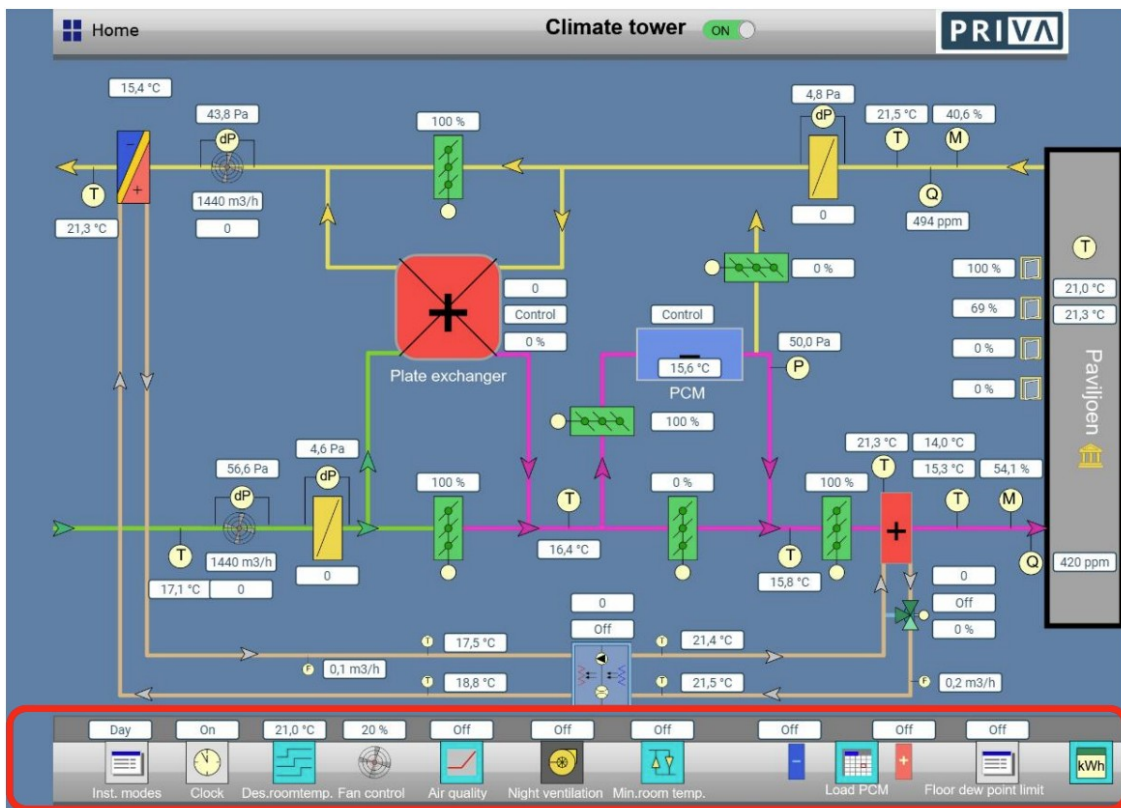
De faciliteit omvat de klimaattoren, het Co-Creation Centre (d.w.z. het gebouw) en het Nono-huis, inclusief alle subfaciliteiten (d.w.z. sensoren, warmtewisselaars, opslagsysteem, elektronica, enz.), zoals weergegeven in Figuur 3.

Red area = Climate Tower
Green area = Co creation center
Blue area = NoNoHouse

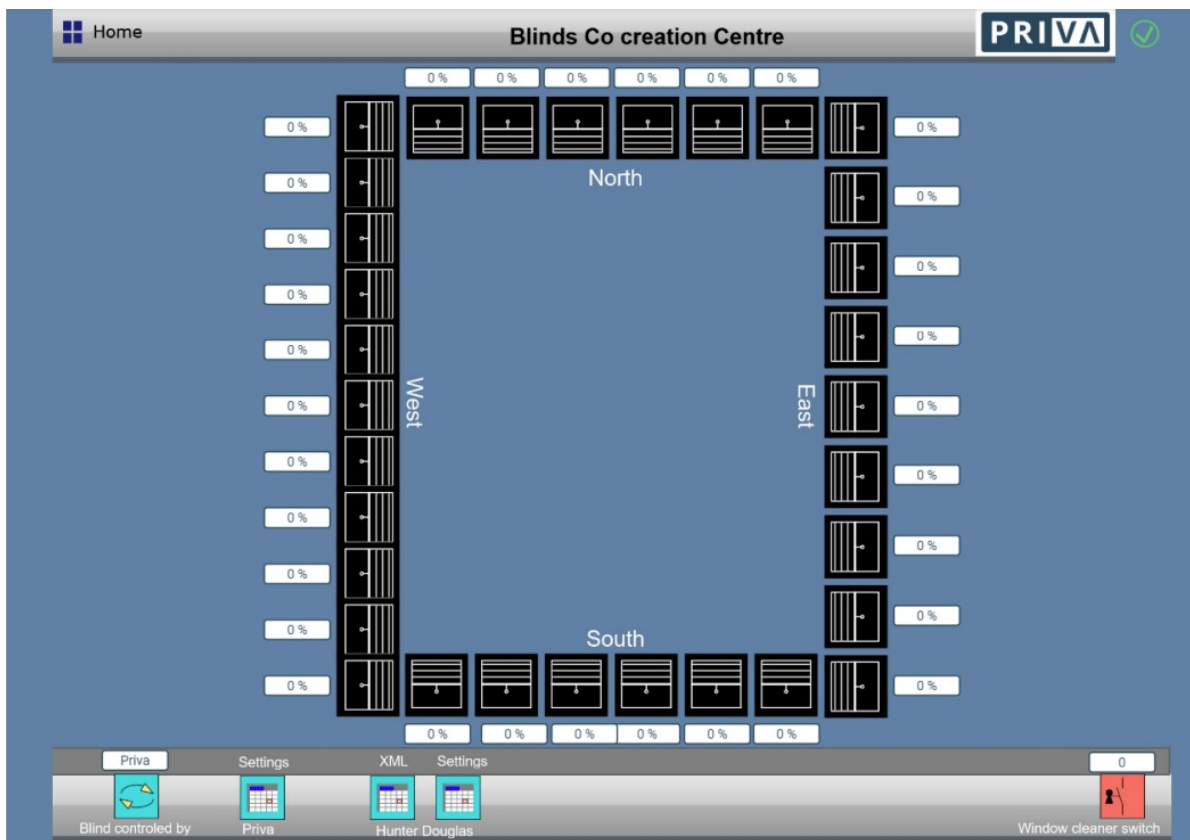


Figuur 3 - Klimaattoren geïntegreerd met het testgebouw

De integratie wordt bewaakt door de online interface van Priva. Via deze interface kan men de hulpventilatie, verwarmings-/koelprocessen en luchtstroomkleppen regelen, terwijl men de effecten op de binnenomstandigheden observeert. Een dergelijke interface wordt getoond in Figuur 4 (voor de toren) en Figuur 5 (voor de zonwering).



Figuur 4 - Regelinterface voor de klimaattoren



Figuur 5 - Regelinterface voor de zonwering

3.2.9. Gevalideerd klimaattoerensysteem

Het gebouw is operationeel geweest en continu gemonitord, terwijl het de gewenste binnenconditie voor het gebruik van het gebouw bood. Er hebben verschillende evenementen plaatsgevonden in dit gebouw, waarbij tot 240 mensen tegelijkertijd konden plaatsnemen (in totaal 16000 mensen tot nu toe).

De systeemprestaties worden gemonitord en vastgelegd op een databasis (repository) van The Green Village. Toekomstig werk omvat het real-time beschikbaar stellen van gegevens op een scherm in het huidige gebouw. De bezoekers van het gebouw zijn gevraagd naar feedback over thermisch comfort en visueel comfort. De feedback van mensen is positief over thermisch comfort, met enkele opmerkingen over het zwarte schaduw effect en de schittering van volledig beglaasde gevels. Figuur 6 toont het uiteindelijke gebouw.



Figuur 6 - Het gevalideerde klimaattorensysteem (Co-Creation Center)

3.2.10. Gevalideerde zonweringprestaties en intelligente zonweringsturing op basis van energie- en comforteffecten

De zonwering is operationeel en geïntegreerd in het gebouw. De bedrijfsmodi van de jaloezieën zijn afhankelijk van het energiecomfort en de beschikbaarheid van zonnestraling. Hunter Douglas heeft onderzocht of verdere integratie van het BMS met andere energiegerelateerde systemen in het gebouw mogelijk is.

3.2.11. Instrumentarium bestaande uit scenario's, praktische en theoretische richtlijnen en instructies voor de toepassing van het systeem gespecificeerd door gebouw en gebruiksomstandigheden

De TU Delft heeft de systeemprestaties vergeleken met bestaande en ontwikkelde gebouwen om de effecten van de voorgestelde technologieën te valideren. Priva, Van Dorp en Hunter Douglas hebben klimaatbeheersingsstrategieën ontwikkeld om het systeem feedbackgestuurd te laten werken en tegelijkertijd prioriteit te geven aan het gebruik van passieve energie. Bovendien heeft de TU Delft een model voor voorspellende regeling en adaptieve regelstrategie voorgesteld om de systeemprestaties te optimaliseren.

De gegenereerde data wordt via een online repository toegankelijk gemaakt/beschikbaar gesteld aan partijen die een alternatieve technologie willen toevoegen of testen. We hebben ook de akoestiek van de torens en de PCM-belasting gemeten, waaruit de maximale stroomwerking volgde om overmatige geluiden in de buurt te vermijden.



Priva heeft ook een richtlijn gemaakt over het gebruik van het gebouwbeheersysteem (een beschrijving van de installatie). Dit document beschrijft in detail het regelsysteem. De verlichtingstesten die in het gebouw zijn uitgevoerd, hebben twee hoofdeffecten geïdentificeerd waarop kan worden gereageerd en de regelstrategie kan worden verbeterd:

- Het verlichtingsontwerp levert veel hogere verlichtingsniveaus dan nodig is en kan daarom op de meeste momenten worden afgestemd op lagere intensiteiten.
- De herverdeling van licht overdag en 's nachts is zeer verschillend, wat leidt tot verhoudingen tussen bureauverlichtingssterkte en plafondverlichtingssterkte van 1,1 (dag) en 27 (nacht). Dit betekent dat de toegepaste correctiefactoren voor daglichtcompensatie en voor nachtelijke lichtregeling verschillend moeten zijn en dat de overgang tussen dag en nacht complexere strategieën vereist.

Uit de berekeningen van het team bleek dat dit gebouw het laagste energieverbruik heeft op de TU-campus. De gegevens zijn ook op te vragen bij The Green Village.

3.2.12. Materialen en circulariteit

Afzonderlijke prestaties zijn te zien op de aspecten afvalreductie, hergebruik en recycling. Als we de geïntegreerde innovaties vergelijken met een traditioneel ontwerp, blijkt dat er tijdens de realisatiefase 6–10 ton CO₂-uitstoot wordt bespaard en jaarlijks 18 ton CO₂-uitstoot door het zeer lage energieverbruik (weigeren en verminderen). Besparingen op onderhoud en vervanging worden verwacht, maar deze kunnen op dit moment alleen worden geschat en zijn niet gekwantificeerd. De meeste, zo niet alle gebruikte materialen kunnen worden hergebruikt en gerecycled voor volledige materiaalwaarde.

3.2.13. Integrale business case voor de klimaatoren, slimme zonwering en bouwsysteem als geheel

Met betrekking tot de gerealiseerde klimaatoren, de businesscase voor het toepassen van een dergelijke constructie en de gepresenteerde technologieën wordt geschat dat deze een terugverdientijd van 0-2 jaar zullen opleveren. Deze uitkomst is grotendeels afhankelijk van de gehanteerde integrale energiekosten.

3.3. Knelpunten en oplossingen

3.3.1. Volledige integratie en overkoepelende regeling van het systeem

De volledige integratie en overkoepelende modelgebaseerde aansturing van het systeem ontbreekt nog. Terwijl de berekening van de zonnearmtewinst, het haalbare bereik daarvan en de rapportage daarvan aan het BMS is bereikt, ontbreekt het nog steeds aan het terugkrijgen van een geoptimaliseerd instelpunt van het BMS met het oog op de huidige en verwachte toestand en het energieverbruik van het gebouw.

Daardoor ontbreekt een optimale ondersteuning van het faseovergangsmateriaal (in het Engels: Phase Change Material (PCM)) door de zonwering op een directe en handelbare manier.



Voor de zonweringen wordt momenteel gewerkt aan de implementatie van modelgebaseerde voorspellende besturing. Deze nieuwe regelaar kan energieprognoses voor het gebouw rapporteren, rekening houdend met de verwachte bezetting van het gebouw. Het BMS heeft echter op dit moment niet de mogelijkheid om om te gaan met deze prognoses.

3.3.2. Hunter Douglas is onlangs gekocht door een investeringsmaatschappij

Op dit moment is het onduidelijk wat dit zal betekenen voor de daadwerkelijke technologieontwikkeling op dit gebied. De complexiteit van het omgaan met de omgeving is een andere hindernis. Dit overstijgt de reikwijdte van wat de Hunter Douglas verkopers en wederverkopers momenteel doen.

3.3.3. Levensvatbaarheid en acceptatie van geavanceerde bedieningselementen voor zonwering

Een ander knelpunt voor de levensvatbaarheid en acceptatie van geavanceerde besturingen zoals die in dit project zijn ontwikkeld, is dat de NTA8800- en BENG-software op geen enkele manier slimme besturing toekennen. Dit is een fundamenteel punt in de manier waarop de NTA8800-methode is gestructureerd. NTA8800 is gebaseerd op maandgemiddelden, terwijl de uitkomsten van een slim energiecontrolesysteem alleen op uur- of subuurschaal kunnen worden vastgesteld. Dit wordt momenteel binnen het team besproken en er is nog niet tot een conclusie gekomen.

Bijgevolg zal de functionaliteit van een praktische controller van de volgende generatie veel fundamenteeler zijn dan wat in dit project is ontwikkeld. Met name de omgeving zal nog niet worden meegenomen.

De oplossing daarvoor is om partnerships aan te gaan met leveranciers van orchestrators zoals Priva om zo een ecosysteem te creëren waarin op energie gebaseerde zonwering kan worden gestuurd. Ook gaat het team werken aan het opnemen van de effecten van slimme besturingen in de BENG-regelgeving.

3.4. Perspectief voor toepassing

3.4.1. Business cases voor de verschillende deelsystemen uit de klimaattoren en het proefgebouw

Met betrekking tot de subsystemen hebben het onderzoek en de marktconsultatie de volgende bevindingen opgeleverd:

- Proactieve zonwering en regeling: vereenvoudigde return-on-investment (ROI) < 1 jaar
- Slimme gebouwbeheersystemen: vereenvoudigde ROI < 1 jaar
- Passieve ventilatie en koeling met te openen dakluiken: vereenvoudigde ROI < 1 jaar. Wel moet worden opgemerkt dat de randvoorwaarden in deze specifieke businesscase grootschalige opschaling in de weg staan.
- Ventilatie van onderaf: vereenvoudigde ROI van < 3 jaar
- PCM voor passieve koeling: vereenvoudigde ROI van < 1 jaar
- Geïntegreerde klimaattoren: vereenvoudigde ROI van 1 jaar



Daarbij moet worden aangetekend dat randvoorwaarden, in de context van in Nederland veelal woon(ruimtelijke) vergunningseisen, bepalend zijn voor opschaling.

3.4.2. Opschalen van belemmeringen in wet- en regelgeving en normen

In de marktconsultatiesessies zijn ook de opschalingsvoorwaarden en -beperkingen aan de orde gekomen en is het volgende geconstateerd:

- Dit ontwerp en de geïntegreerde technologieën zijn niet geschikt voor een copy-paste ontwerpbenadering: het vereist een op maat gemaakt en specifiek ontwerp met een evaluatie van de toegepaste technologieën, en wordt daarom beperkt door de capaciteit van ontwerpers op het gebied van bouwfysica en installaties.
- Ruimtelijke eisen aan een klimaattoren: ruimte, hoogte, geluid (stedelijke herinrichting). Er werd voorgesteld om door te gaan met het bouwen van geïntegreerde benaderingen, toepasbaarheid op het dak en/of ondergrondse implementaties.
- Complexiteit en kosten van het huidige Nederlandse beleidsinstrumentarium voor materiaalbeoordelingen: MKI, MPG, NMD, enz.
- Energieprestatieberekening van gebouwen met behulp van NTA 8800 (BENG): Er is bijna geen mogelijkheid om het recht te bekomen om een alternatief voorstel in te dienen, geen waardering van slimme regelingen, harde beperkingen op het combineren van actieve en passieve technieken, geen toegang tot zonnenergieregeling, geen waardering op kouderetentie van de warmtewisselaar voor ventilatie (WTW), complexiteit beperkt ontwerpers om daadwerkelijk te ontwerpen, en er is geen aandacht voor luchtverdeling en ventilatie-effectiviteit

4. Bijdrage aan de de doelstellingen van de regelingen

4.1 Bijdrage aan duurzame energiehuishouding

Het project heeft aangetoond dat het voorgestelde ontwerp van passieve klimaatbeheersing voor gebouwen op basis van een klimaattoren succesvol is en leidt tot een aanzienlijke energiebesparing voor verwarming, koeling en ventilatie ten opzichte van de gebruikelijke bouwpraktijk. De effectiviteit en toepasbaarheid van deze oplossing is grondig en met positief resultaat getest en aangetoond in een Co-Creation Center testgebouw. Ook werd actief gebruik gemaakt van terugkoppeling vanuit de gebruikerservaring voor het verbeteren en aanpassen van het ontwerp. Uit de berekeningen van het team bleek dat het tetsgebouw nu het laagste energieverbruik heeft op de TU-campus. Daarnaast heeft het project ook een business case opgeleverd alsmede een instrumentarium met concepten, ontwerpen, praktische en theoretische richtlijnen en instructies voor verdere opschaling en uitbreiding van het voorgestelde concept.

Op deze manier heeft CONVERGE bijgedragen aan de doelstelling van de regeling en aan het uiteindelijke doel is om alle bestaande gebouwen in Nederland energieneutraal of zelfs energiepositief te maken door gebruik te maken van hernieuwbare energie zonder dat dit ten koste gaat van het comfort.



4.2. Bijdrage aan versterking van de kennispositie

Het CONVERGE project heeft op verschillende manieren bijgedragen aan de versterking van de kennispositie van het Nederlandse bedrijfsleven en de Nederlandse universiteiten. De deelnemende bedrijven en universiteit hebben expertise en ervaring opgedaan in het ontwikkelen en implementeren van een innovatief concept voor passieve klimaatbeheersing inclusief geavanceerde regelingen op basis van modellen en optimalisatie. Deze bevindingen zijn ook gedeeld.

Er zijn twee aparte bijeenkomsten georganiseerd in The Green Village met academici, architecten, ontwerpers, bouwbedrijven en installatiebedrijven (aanwezigheid per bijeenkomst: 30+ bedrijven en personen). Verder hebben de betrokken bedrijven een aantal afzonderlijke bijeenkomsten gehouden met relevante belanghebbenden om de impact en resultaten van het project en de businesscases te verifiëren, gericht op het opschalen van de getoonde innovaties naar een groter publiek van relevante belanghebbenden.

5. Spin-off binnen en buiten de sector

Als mogelijk vervolgonderzoek en toekomstig werk hebben we spin-off mogelijkheden binnen en buiten de sector besproken. Dit is een lijst met mogelijke kansen:

- Integratie van het Co-Creation Center (d.w.z. het CONVERGE-gebouw) met zijn omgeving: stadsverwarming, energiepalen, aquathermie, enz.
- Energiezuil: Alternatieve HVAC (in Office Lab)
- Klimaattoren 2.0 (verbeterde opstelling van de huidige toren)
- HVAC voor het binnenklimaat (inclusief vocht) in biobased gebouwen
- Houten gebouwen: nonohouse, Office Lab, PD Lab, Woody's, Sustainer Homes
- Passieve HVAC in woongebouwen
- Energieopslag voor off-grid (d.w.z. netonafhankelijke) oplossingen
- Aansluiting op 24/7 Energy Lab
- Regeling gebaseerd op machine learning en kunstmatige intelligentie, modelgebadeerde voorspellende regeling
- Verband met overig onderzoek: DataLess, Zonnet, Brein voor Gebouwen, Kowanet
- Ontwikkelen/verkopen van Converge 2.0 als concept (nieuw + bestaand)
- Bewonersperceptie, feedback (monitoren van gebruikers)
- Planten als luchtverversingsfilter.

Deze concepten zijn momenteel in discussie en vervolgprojecten zouden kunnen worden gesubsidieerd door RVO, NWO, Horizon Europe of andere Europese fondsen.

6. Overzicht van openbare publicaties over the project

Er zijn verschillende wetenschappelijke publicaties over het project beschikbaar, waarin meer details zijn gegeven. In de volgende lijst sommen we deze publicaties op en geven we aan waar ze te vinden zijn:

- Dynamic optimization for minimal HVAC demand with latent heat storage, heat recovery, natural ventilation, and solar shadings.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890422013516>



- Model predictive control of a thermal chimney and dynamic solar shades for an all-glass facades building.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544222030638>
- Performance of a Phase Change Material Battery in a Transparent Building.
https://file.techscience.com/ueditor/files/fdmp/TSP_FDMP-19-3/TSP_FDMP_21962/TSP_FDMP_21962.pdf
- Model Predictive Control for Optimal Integration of a Thermal Chimney and Solar Shaded Building.
<https://ieeexplore.ieee.org/document/9480299>
- CONVERGE: low energy with active passiveness in a transparent highly occupied building.
<https://proceedings.open.tudelft.nl/clima2022/article/view/254>
- Effects of Sensor Selection and Additional State Measurements on HVAC Predictive Control.
<https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3A6752b113-e3fb-4770-94f7-7c357f46c0f2>
- Hierarchical Model Predictive Control in Building Climate Systems for Passive Energy Sources.
<https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:8e221205-139f-48ea-9d9a-575396dc3901>

7. Vermeldingen

Dit eindrapport is beschikbaar als pdf file en verkrijgbaar via de CONVERGE contactpersoon bij de Technische Universiteit Delft: Bart De Schutter (email: b.deschutter@tudelft.nl).

Het project is uitgevoerd met subsidie van het Ministerie van Economische Zaken en Klimaat en het Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit, Nationale regelingen EZK- en LNV-subsidies, Topsector Energie uitgevoerd door Rijksdienst voor Ondernemend Nederland.”