

Leeghwaterstraat 44

2628 CA Delft

Postbus 6012

2600 JA Delft

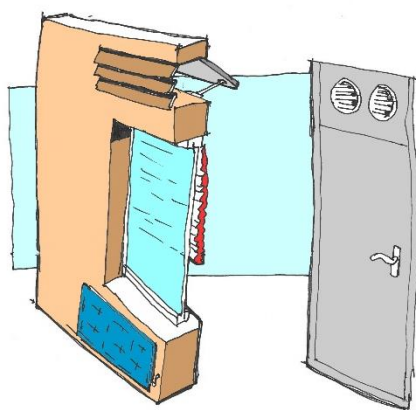
TNO-rapport

www.tno.nl

D4.4 Openbare eindrapportage Kameleo

T +31 88 866 22 00

F +31 88 866 06 30



Datum	25 maart 2019
Auteur(s)	Frans Koene, Leo Bakker, Andreas Mack
Projectnaam	TKI Kameleo
Projectnummer	060.18165

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© 2018 TNO

Inhoudsopgave

1	Samenvatting	4
2	Aanleiding en doelstelling	6
3	Innovatief ventilatiesysteem.....	7
3.1	Metingen en CFD-berekeningen van het 'mengen over binnendeuren' ventilatiesysteem	7
3.2	Conclusies ventilatiesysteem	9
4	Geavanceerde binnenzonwering	11
4.1	Conclusies geavanceerde zonwering.....	13
5	Bijdrage van het project aan de doelstellingen van de regeling	15
5.1	Energiebesparingspotentieel	15
5.2	Versterking van de Nederlandse kennispositie	15
5.3	Spin off binnen en buiten de sector	16
5.4	Overzicht van openbare publicaties over het project en waar deze te vinden of te verkrijgen zijn.....	16
5.5	Contactpersoon	16
6	Bijlage A. Innovatief ventilatiesysteem	17
6.1	Verbreiding fundamentele kennis.....	17
6.2	Prototype ventilatie in het NeroZero lab	18
6.3	Metingen Nerozero-lab	20
6.3.1	Uitgevoerde experimenten	22
6.3.2	Resultaten Metingen.....	23
6.4	CFD-Model NeroZero-lab	25
6.5	Vergelijking metingen en CFD-simulaties.....	26
6.6	Conclusies Innovatief ventilatiesysteem.....	30
7	Bijlage B. Geavanceerde binnenzonwering.....	32
7.1	Verbreiding fundamentele kennis.....	32

7.2	Prototype innovatieve binnenzonwering.....	32
7.3	Metingen Zonwering in TNO-lab.....	33
7.4	Modelleren van de innovatieve zonwering	34
7.5	Vergelijking metingen en berekeningen	36
7.6	Toepassing geavanceerde zonwering in het NeroZero-lab.....	41
7.7	Conclusies geavanceerde zonwering.....	41
8	Bijlage C. Berekening energiebesparing.....	43
8.1	Gebruikte rekenmodel	43
8.2	Gemodelleerde woningen.....	43
8.3	Varianten berekeningen en resultaten gasverbruik	45
8.4	Conclusies energiebesparing	47
9	Referenties	48

1 Samenvatting

In hoog-energetische renovaties kan in veel gevallen substantieel energie worden bespaard, maar vaak blijkt het binnencomfort te kort te schieten. In het bijzonder is er sprake van onvoldoende binnenluchtkwaliteit en van oververhitting in de zomer. Om grootschalige verduurzaming en in het bijzonder het energieneutraal maken van de gebouwde omgeving in Nederland te realiseren, moeten deze knelpunten worden opgelost.

Daartoe is in het Kameleon project fundamentele kennis ontwikkeld voor het realiseren van energiezuinige én gezonde gebouwen, met de focus op de verspreiding van verse lucht en voorkoming van oververhitting. Fundamentele kennis van ventilatieconcepten is verbreed door 2D- en 3D stromingsmodellen (Computational Fluid Dynamics of CFD) van een woning op te stellen om de belangrijkste parameters en hun invloed te bepalen.

Op het gebied van de verbreding van de fundamentele kennis is een literatuuronderzoek gedaan. De centrale vraag daarbij was of met een slim ontworpen binnenzonwering, die gebruik maakt van spectraal selectieve, IR-reflecterende en/of isolerende lagen, een effectieve zonwering (lage g-waarde) kan worden gerealiseerd en zo ja, welke parameters bepalend zijn voor een goede werking ervan.

Om de fundamentele kennis in de praktijk te toetsen, zijn er prototypes gebouwd en getest van een innovatief, kanaalarm ventilatieconcept en van een geavanceerde reflecterende én isolerende binnenzonwering.

Het prototype van het 'mengen over binnendeuren' ventilatiesysteem is beproefd in het NeroZero-lab van Koppen Bouwexperts in Heerhugowaard. Dit lab is een – niet bewoonde – proefwoning om nieuwe installatieconcepten te beproeven. Om een vergelijking met CFD-berekeningen te vergemakkelijken zijn de ingestelde luchtdebieten bewust lager ingesteld dan het bouwbesluit voorschrijft. Verder is in alle experimenten de afzuigopening in het toilet op de begane grond afgeplakt en is in een tweetal experimenten de afzuiging van de keuken (via de afzuigkap) afgeplakt, waardoor de ventilatie van de proefwoning werd verminderd.

De belangrijkste conclusie is dat ondanks een aantal beperkingen in de experimenten, de resultaten van de CFD berekeningen grotendeels konden worden gestaafd.

Op basis van de opgedane fundamentele kennis heeft Verosol een prototype van een innovatieve binnenzonwering gebouwd. Deze is in het TNO MEC-lab getest in een speciaal voor dat doel gebouwde meetopstelling en hiermee zijn de U-waarde en de g-waarde van de combinatie van glas en zonwering gemeten. Belangrijkste conclusie is dat er redelijke overeenstemming is gevonden tussen de gemeten en berekende U-waarden en g-waarden van de zonwering.

Op basis van de prestaties van het kanaalarm ventilatieconcept en van de geavanceerde binnenzonwering is de energiebesparing berekend voor een drietal

voorbeeldwoningen. uit de brochure Voorbeeldwoningen 2011 Bestaande bouw van Agentschap NL. Het resultaat was een energiebesparing van 21-29%.

Het project is uitgevoerd met door TNO als penvoerder met Koppen Bouwexperts, Verosol, Timpaan en Unifan als partners.

2 Aanleiding en doelstelling

In hoog-energetische renovaties kan in veel gevallen substantieel energie worden bespaard, maar vaak blijkt het binnencomfort vaak te kort te schieten. In het bijzonder is er sprake van onvoldoende binnenluchtkwaliteit en van oververhitting in de zomer. Om grootschalige verduurzaming en in het bijzonder het energieneutraal maken van de gebouwde omgeving in Nederland te realiseren, moeten deze knelpunten worden opgelost.

Het doel van het project is tweeledig. Enerzijds het ontwikkelen van fundamentele kennis voor energiezuinige én gezonde gebouwen, met de focus op de verspreiding van verse lucht en voorkoming van oververhitting. Anderzijds het bouwen van een prototype van een innovatief, kanaalarm ventilatieconcept en van een geavanceerde reflecterende én isolerende binnenzonwering.

Het project is uitgevoerd met door TNO als penvoerder met Koppen Bouwexperts, Verosol, Timpaan en Unifan als partners.

3 Innovatief ventilatiesysteem

Het innovatieve ventilatiesysteem bestaat uit het aanvoeren van verse lucht via de verkeersruimten (het trappenhuis) en het afvoeren van de vervuilde lucht via de natte ruimten. Beide stromen komen bij elkaar in een warmtewisselaar, waar de koude verse toevoerlucht wordt opgewarmd met de warme afvoerlucht.

Vertrekken zoals slaapkamers en woonkamer die grenzen aan de verkeersruimten worden geventileerd door met 'mengventilatoren', die lucht uitwisselen met relatief schone lucht in de verkeersruimte. Dit concept heet daarom 'mengen over binnendeuren' ventilatie.

Het systeem leent zich vooral voor toepassing bij renovaties waar de ruimte ontbreekt voor toepassing van een balansventilatiesysteem met toevoerkanalen naar de woonkamer en slaapkamers. Afvoerkanalen van badkamer, keuken en toilet zijn vaak wel aanwezig.

De fundamentele kennis van dergelijke ventilatieconcepten is verbreed door 2D- en 3D stromingsmodellen (Computational Fluid Dynamics of CFD) van een woning op te stellen om de belangrijkste parameters en hun invloed te bepalen. Hieruit is een aantal lessen getrokken voor het vervolg.

3.1 Metingen en CFD-berekeningen van het 'mengen over binnendeuren' ventilatiesysteem

Een prototype van het 'mengen over binnendeuren' ventilatiesysteem is toegepast en beproefd in het NeroZero-lab van Koppen Bouwexperts in Heerhugowaard (Figuur 1). Dit lab is een – niet bewoonde – proefwoning om nieuwe installatieconcepten te beproeven.

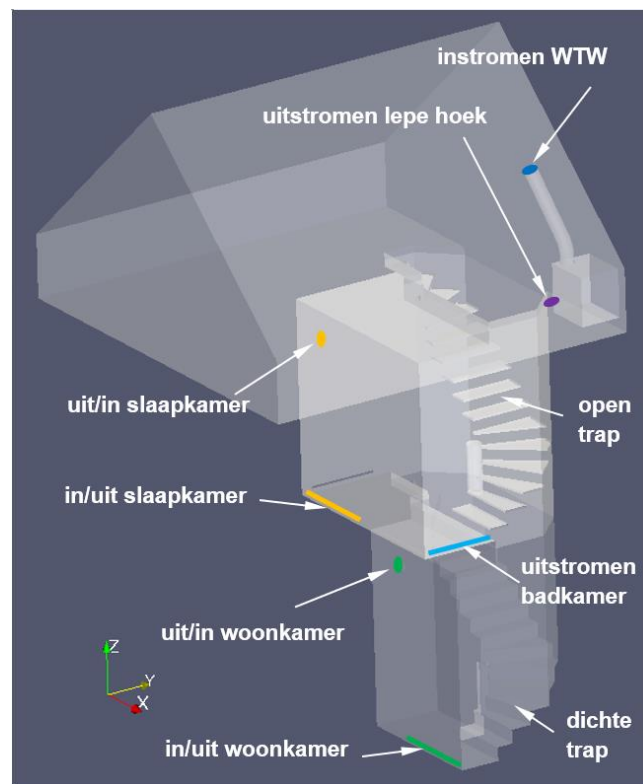


Figuur 1: Warmtewisselaar op zolder met naar linksboven gerichte inblaas van de verse lucht naar de proefwoning boven het trappenhuis (links) en Inblaasopeningen van de overloop naar slaapkamers op de 1e verdieping (rechts)

Op 15 en 17 januari 2019 zijn in deze proefwoning ventilatiemetingen uitgevoerd. Afwisselend zijn twee onderzoekers gedurende enkele uren in één van de vertrekken gaan zitten (woonkamer, slaapkamer en zolder, waar zij CO₂ hebben geproduceerd via uitademing). De CO₂-concentratie in verschillende vertrekken is gemeten om de effectiviteit van het ventilatiesysteem na te gaan. Ook temperaturen en luchtdebieten zijn daarbij gemeten.

Opgemerkt moet worden dat op een aantal punten is afgeweken van het normaal functioneren van het ventilatiesysteem om een vergelijking met CFD-berekeningen te vergemakkelijken. Zo zijn de ingestelde debieten van de warmteterugwin-unit bewust lager ingesteld dan het bouwbesluit voorschrijft. Verder is in alle experimenten de afzuigopening in het toilet op de begane grond afgeplakt. En in een tweetal experimenten is de afzuiging van de keuken (via de afzuigkap) afgeplakt, waardoor de ventilatie van de proefwoning werd verminderd.

Om de metingen te kunnen duiden, zijn er CFD-berekeningen gedaan van de verspreiding van CO₂ door de proefwoning. Daarbij is het CFD-model zo goed mogelijk gebaseerd op de geometrie van de NeroZero-proefwoning en zijn de invoergegevens gebaseerd op de gemeten temperaturen en volumestromen (Figuur 2). Ook is er rekening gehouden met het doorstromen van de rechter lepe hoek in deze proefwoning, die een verbinding vormt met de technische ruimte onder de trap op de begane grond en daarmee ook naar de woonkamer. Dit veroorzaakte een (onbedoelde) lekkagestroming van de zolder naar de woonkamer



Figuur 2: Het in een CFD-pakket gemodelleerde trappenhuis van de NeroZero-proefwoning.

3.2 Conclusies ventilatiesysteem

De resultaten van de metingen en de CFD-berekeningen geven aanleiding tot de volgende conclusies:

- De vergelijking tussen metingen en CFD-berekeningen toonde aan dat het ventilatieconcept werkt voor de slaapkamer. Voor de woonkamer was dit moeilijker vanwege versturende luchtstromingen o.a. door infiltratie en via de lepe hoek. Hiervoor zijn metingen nodig onder beter gecontroleerde omstandigheden (o.a. afdichten lepe hoeken, windstil weer).
- Het 'mengen over binnendeuren' ventilatieconcept werkt het best als de afvoer van vervuilde lucht uit de vertrekken naar het trappenhuis plaatsvindt aan de bovenkant van het vertrek, en de toevoer van relatief schone lucht naar het vertrek onder de deur via de overstroomopening. Op die manier wordt ongewenste kortsluiting van vervuilde lucht buiten het vertrek vermeden.
- Ondanks de hierboven beschreven afwijkingen van het normaal functioneren van het ventilatiesysteem, bleven de CO₂-concentraties door

de aanwezigheid van twee onderzoekers in alle metingen (ook met afgeplakte ventilatie in de keuken/woonkamer) onder de 1100 ppm ¹.

- De prototypes van de radiale mengventilatoren zorgen voor een relatief sterke lokale opmenging van lucht buiten het vertrek, wat tot (ongewenste) kortsluiting van vervuilde lucht leidt. Om die reden heeft toepassing van een tangentiaalventilator met een brede uitstroomopening de voorkeur.
- De prototypes van de mengventilatoren bleken ook om andere redenen minder geschikt: bij lage toerentallen bleken ze lastig te regelen en bij debieten vanaf ca. 70 m³/uur bleken ze niet zo stil als gewenst.

Meer gedetailleerde informatie is te vinden in Bijlage A. Innovatief ventilatiesysteem.

¹ In de experimenten met afgeplakte afzuigkap was er aan het eind van het experiment nog geen evenwichtsconcentratie bereikt. De verwachting is dat de CO₂-concentratie uiteindelijk een waarde van ca. 1200 ppm zou bereiken

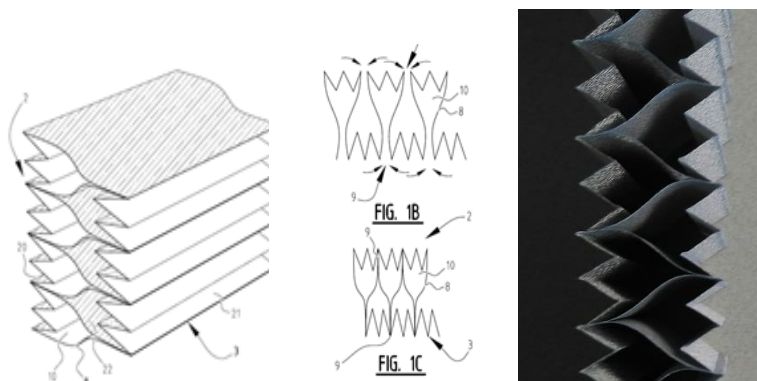
4 Geavanceerde binnenzonwering

Op het gebied van de verbreding van de fundamentele kennis is een literatuuronderzoek gedaan. De centrale vraag daarbij was of met een slim ontworpen binnenzonwering, die gebruik maakt van spectraal selectieve, IR-reflecterende en/of isolerende lagen, een effectieve zonwering (lage g-waarde) kan worden gerealiseerd en zo ja, welke parameters bepalend zijn voor een goede werking ervan.

De bestudeerde literatuur geeft hierop geen éénduidig antwoord. Aan de ene kant zijn er studies (Yunyang ,2015) die concluderen dat de prestatie van binnenzonwering vergelijkbaar kan zijn met die van buitenzonwering mits aan een aantal voorwaarden wordt voldaan. De belangrijkste hiervan zijn: een hoge reflectiecoëfficiënt van de zonwering een goede afdichting van de ruimte tussen de zonwering en het raam om secundaire warmteoverdracht naar het vertrek te minimaliseren.

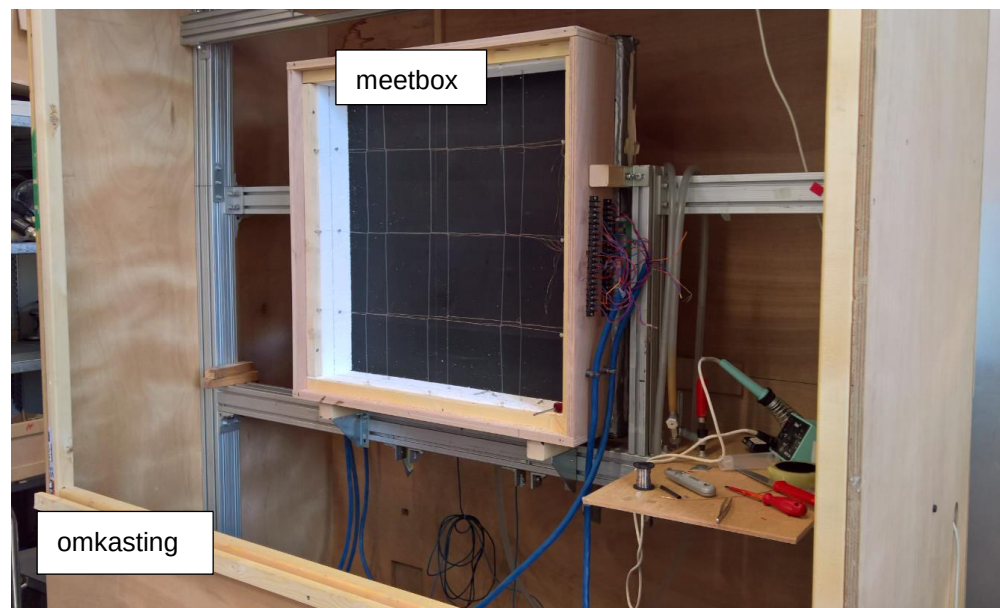
Experimenten uit de bestudeerde literatuur wijzen op hoge temperaturen die kunnen optreden bij binnen- en tussenzonwering, en die mogelijk leiden tot thermische spanningen in het glas. Deze ruimte zal mogelijk geventileerd moeten worden op zomerse dagen om dit te voorkomen.

Op basis van de opgedane fundamentele kennis heeft Verosol een innovatieve binnenzonwering ontwikkeld waarbij de zonweringsfunctie is verbeterd door toepassing van een hoog-reflecterende laag. Verder is de thermische isolatie tussen raam en vertrek verhoogd door een celstructuur met twee luchtlagen voorzien van een low E-coating, die warmte uit het vertrek naar binnen reflecteert (zie Figuur 3) en is de ruimte tussen raam en zonwering goed afgesloten met geleiders voorzien van met borstels.



Figuur 3: Verosol innovatieve meerlaagse binnenzonwering met low-E coating.

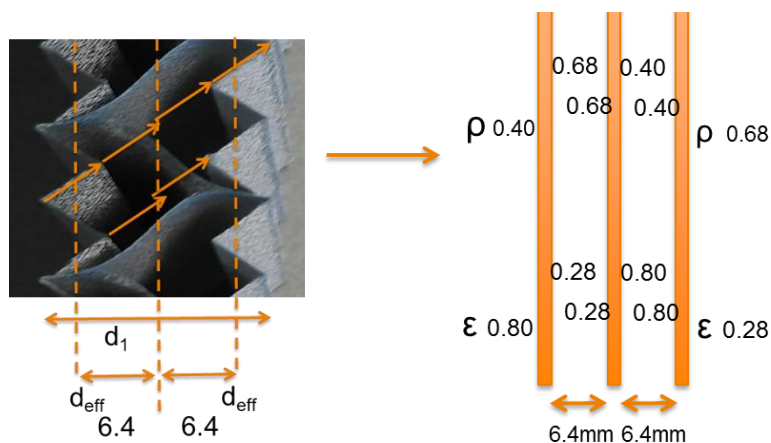
Er is een prototype van deze zonwering geproduceerd en getest in een speciaal voor dat doel gebouwde meetopstelling, weergegeven in Figuur 4. Hiermee zijn de U-waarde en de g-waarde van de combinatie van glas en zonwering gemeten.



Figuur 4: Meetopstelling bestaande uit een meetbox met daaromheen een omkasting.

Om de resultaten van de metingen te kunnen duiden zijn de U-waarden en de g-waarden ook berekend. Het berekenen van thermisch-energetische eigenschappen van ramen met eenvoudige zonweringen, zoals bijvoorbeeld rolschermen en lamellen, is mogelijk met het programma WIS². Echter, geavanceerde zonweringen, met meervoudige reflectie of zonweringen met dwarsverbanden of koudebruggen kunnen hiermee niet worden gemodelleerd.

De in dit project gevolgde aanpak is dat de eigenschappen van de meerlaagse zonwering worden vertaald naar een vereenvoudigd element dat dat kan dienen als invoer voor WIS. Het zo verkregen integraal vereenvoudigd model is geïllustreerd in Figuur 5.



² Window Information System WIS is ontwikkeld door TNO

Figuur 5: Integraal vereenvoudigd model van een 3-laagse-zonwering dat dient als invoer voor WIS

De resultaten van de metingen en de berekeningen zijn weergegeven in Tabel 1

Tabel 1: Gemeten U-waarde en g-waarde van Pilkington Insulight glas met en zonder zonwering.

Scenario	U [$\text{W/m}^2\text{K}$]		g [-]	
	Meting	Berek	Meting	Berek
Pilkington Insulight 4-15A-*4 (opg. fabr) ¹		1,12		0,63
Centrum glas	1,1±0,1			
Glas zonder zonwering in meetbox	1,9±0,3	1,5	0,52±0,04	0,63
Glas met zonwering omhoog in meetbox	1,9±0,5		0,51±0,05	
Glas met zonwering omlaag in meetbox	1,0±0,2	1,0	0,24±0,03	0,17

4.1 Conclusies geavanceerde zonwering

De metingen en de berekeningen aan de geavanceerde zonwering leiden tot de volgende conclusies.

- De *gemeten* U-waarde van de combinatie zonwering-glas halveert bijna ten opzichte van beglazing zonder zonwering (van 1,9 $\text{W/m}^2\text{K}$ naar 1,0 $\text{W/m}^2\text{K}$). De *berekende* isolerende werking van de zonwering is minder (van 1,5 $\text{W/m}^2\text{K}$ naar 1,0 $\text{W/m}^2\text{K}$), maar nog steeds aanzienlijk. De zonwering biedt daarmee een goede extra thermische isolatie in de winter, mede door de goede opsluiting van de lucht in de spouw tussen glas en (binnen)zonwering.
- De berekende g-waarde van de combinatie van glas met zonwering is 0,17, de gemeten waarde is 0,24. Het verschil is vermoedelijk toe te schrijven aan de secundaire warmteoverdracht die lastig is te meten. De geavanceerde binnenzonwering haalt daarmee nog niet de prestatie van

buitenzonwering in combinatie met het gebruikte glas (0,19-0,22), maar komt wel in de buurt ervan.

- Een aandachtspunt zijn de temperaturen in de spouw. De verwachting is dat onder zomerse omstandigheden de temperatuur in de spouw tussen glas en binnenzonwering aanzienlijk kan oplopen, wat in extreme omstandigheden kan leiden tot risico's op thermische spanningen en glasbreuk.
- Wat betreft prestatie voldoet de zonwering grotendeels aan de twee gestelde doelen, namelijk een lage g-waarde, die in de buurt komt van buitenzonwering en een goede thermische isolatie in de winter.

Meer gedetailleerde informatie is te vinden in Bijlage B. Geavanceerde binnenzonwering.

5 Bijdrage van het project aan de doelstellingen van de regeling

In hoog-energetische renovaties kan in veel gevallen substantieel energie worden bespaard, maar vaak blijkt het binnencomfort te kort te schieten (slechte binnenluchtkwaliteit, oververhitting). Om grootschalige verduurzaming en in het bijzonder het energieneutraal maken van de gebouwde omgeving in Nederland te realiseren, moeten deze knelpunten worden opgelost. Toepassing van het Kameleo concept bespaart enerzijds energie en neemt anderzijds het knelpunt van slecht comfort weg.

5.1 Energiebesparingspotentieel

Het besparingspotentieel van het Kameleo concept is berekend voor een drietal woningen uit de brochure Voorbeeldwoningen 2011 Bestaande bouw van Agentschap NL.

1. Vrijstaande woning 1965-1974 + besparingspakket, label A.
2. Rijwoning 1975-1991, label D.
3. Rijwoning gebouwd tot en met 1945, label G.

Hiervoor is een dynamisch gebouwmodel gebruikt dat de warmtestromen in de woning van uur tot uur berekent. Elke woning is doorgerekend in een basisvariant en een aantal varianten, namelijk met geavanceerde isolerende zonwering, met het innovatieve ventilatiesysteem via een warmteterugwin-unit ('mengen over binnendeuren') en met beiden.

De berekende besparing door isolerende zonwering op de warmtevraag voor ruimteverwarming is 3-7%, die door toepassen van het 'mengen over binnendeuren' ventilatiesysteem 18-22%. Beide maatregelen zijn vrijwel onafhankelijk dus de besparing door toepassing van beiden (het 'Kameleo' concept) is de som van de aparte besparingen: 21-29%.

Gedetailleerde gegevens over de uitgangspunten, berekeningen etc. zijn te vinden in Bijlage C. Berekening energiebesparing.

5.2 Versterking van de Nederlandse kennispositie

De Nederlandse kennispositie wordt versterkt door het vergroten van de concurrentiekracht van zowel Verosol, Brink Climate Systems, Koppen Vastgoed, Timpaan als TNO.

Verosol kan als eerste op de markt komen met een geavanceerd isolerend zonweringsysteem. Brink Climate Systems heeft de rol van UniFan op het gebied van de ventilatorontwikkeling overgenomen. Brink zal het 'mengen over binnendeuren' concept gaan vermarkten.

Koppen Vastgoed en Timpaan zijn beide gepositioneerd als innovatieve bedrijven in de bouwsector. TNO kan de in dit project opgebouwde kennis gebruiken en

inzetten in toekomstige projecten met betrekking tot klimaatbeheersing en comfort en daarmee de kennispositie van een breder marktsegment versterken.

5.3 Spin off binnen en buiten de sector

De NeroZero woning die als lab diende voor het testen van het 'mengen over binnendeuren concept' heeft veel aandacht gekregen vanwege een aantal noviteiten en het lage energiegebruik. Ze zal als voorbeeld dienen voor 44 sociale woningen in Heerhugowaard, zie Figuur 6.

**NERO
ZERO.**

44 energie neutrale en gezonde starterswoningen



Figuur 6: Ontwerp voor 44 energieneutrale en gezonde starterswoningen in Heerhugowaard

5.4 Overzicht van openbare publicaties over het project en waar deze te vinden of te verkrijgen zijn

Er is een aantal openbare publicaties verschenen over de realisatie van de NeroZero woning, maar die woning is buiten de subsidieregeling van TKI-UE gerealiseerd. Zie o.m. <https://www.tno.nl/nl/tno-insights/artikelen/nerozero-lab-samenwerken-aan-gezond-duurzaam-en-energiezuinig-wonen/>.

5.5 Contactpersoon

Voor meer informatie kan contact opgenomen worden met ir. F.G.H. Koene, email frans.koene@tno.nl.

Het project is uitgevoerd met TKI toeslag subsidie van het Ministerie van Economische Zaken voor TKI Urban Energy, Topsector Energie. (www.tki-urbanenergy.nl.)

6 Bijlage A. Innovatief ventilatiesysteem

Het in dit project bestudeerde innovatieve ventilatiesysteem bestaat uit het aanvoeren van verse lucht via de verkeersruimten (het trappenhuis) en het afvoeren van de vervuilde lucht via de natte ruimten. Beide stromen komen bij elkaar in een warmtewisselaar, waar de koude verse toevoerlucht wordt opgewarmd met de warme afvoerlucht.

Vertrekken zoals slaapkamers en woonkamer die grenzen aan de verkeersruimten worden geventileerd door met 'mengventilatoren', die lucht uitwisselen met relatief schone lucht in de verkeersruimte. Dit concept heet daarom 'mengen over binnendeuren' ventilatie.

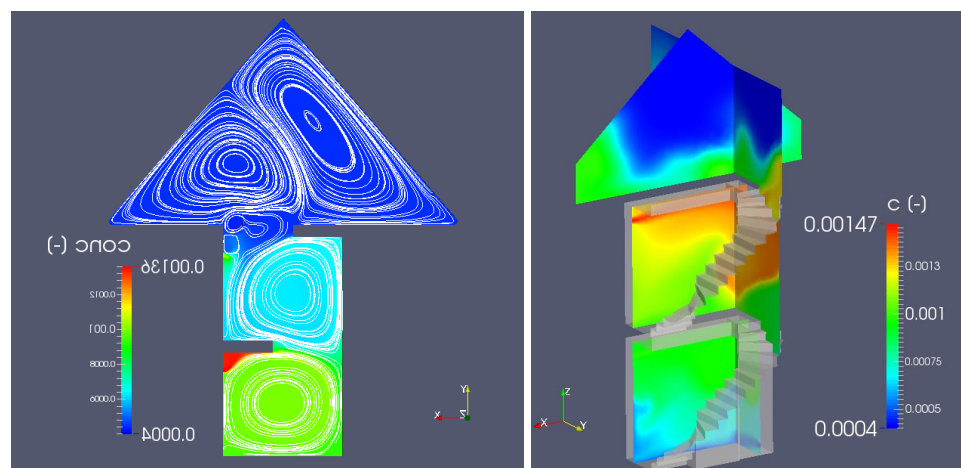
Het systeem leent zich vooral voor toepassing bij renovaties waar vaak de ruimte ontbreekt voor toepassing van een balansventilatiesysteem met toe- en afvoerkanalen naar elk vertrek.

6.1 Verbreding fundamentele kennis

In de literatuur is geen fundamentele kennis gevonden over het effect van drijvende krachten ten gevolge van windaanval en thermiek op de verspreiding en opmenging van contaminanten van binnenbronnen bij dit nieuwe ventilatieconcept. Het is de vraag hoe het proces van opmenging beïnvloed kan worden door o.m. mechanische ventilatie.

Om dit te onderzoeken zijn de volgende stappen uitgevoerd:

1. Er is een 2D-ventilatiemodel van een woning opgesteld om de belangrijkste parameters te onderzoeken
2. Vervolgens is een verfijnd 3D- ventilatiemodel opgesteld, waarbij ook rekening is gehouden met 3D-opwaartse krachten en crossflow-effecten.



Figuur 7: 2D simulatie (links) en 3D simulatie (rechts) van het trappenhuis van een woning, waar ventilatiestromen van en naar verschillende vertrekken op uitkomen.

Hieruit zijn de kenmerken en eisen aan een ventilatiesysteem voor optimale prestaties bepaald. De belangrijkste lessen uit de simulaties zijn de volgende:

- 3D-modellering is essentieel om de opmenging van luchtstromen in een trappenhuis correct te voorspellen.
- Een egale opmenging van schone verse lucht en vervuilde afvoerlucht in het trappenhuis is na te streven. Plaatselijke kortsluiting van afvoerlucht uit een vertrek en toevoerlucht naar het vertrek zal verhinderen dat het vertrek met voldoende verse lucht wordt geventileerd.
- De warmtewisselaar voor het inbrengen van verse lucht dient op zolder te worden geplaatst voor een betere menging van luchtstromen in het trappenhuis.
- De uitstroom van warme, verontreinigde lucht dient zo hoog mogelijk in het vertrek (d.w.z. tegen het plafond) plaats te vinden, en de instroom van lucht vanuit het trappenhuis naar de vertrekken dient zo laag mogelijk plaats te vinden, d.w.z. onder de deuropening.

6.2 Prototype ventilatie in het NeroZero lab

Het NeroZero-lab, gerealiseerd door Koppen Bouwexperts, is een – niet bewoonde – proefwoning in Heerhugowaard om nieuwe ventilatie- en verwarmingsconcepten te beproeven.



Figuur 8: Stelwerk zolderwanden (augustus 2017) en gerealiseerde NeroZero-proefwoning (maart 2018)

Het ‘mengen over binnendeuren’ ventilatieconcept is hierin toegepast en getest. De binnenkomende verse lucht wordt via de warmteterugwin-unit opgewarmd en door het trapgat de proefwoning ingeblazen, zie Figuur 9. Om comfortredenen wordt de lucht niet omlaag, maar omhoog het trappenhuis ingeblazen.



Figuur 9: Warmtewisselaar op zolder met naar linksboven gerichte inblaas van de verse lucht naar de proefwoning boven het trappenhuis (links) en Inblaasopeningen van de overloop naar slaapkamers op de 1e verdieping (rechts)



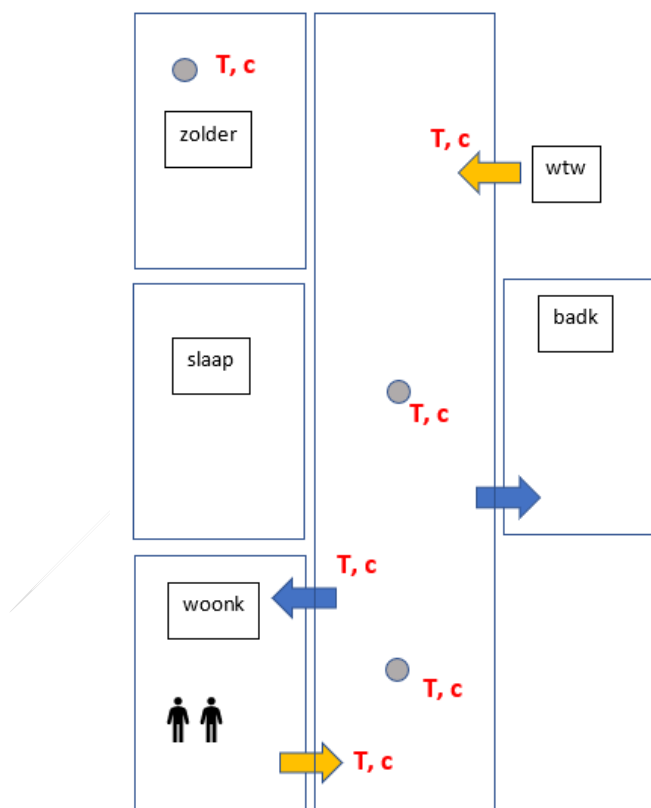
Figuur 10: Mengventilator in de hal op de bg, rechts naast de deur van de woonkamer (links) en 2^e meng-ventilator naast de deur van de woonkamer ten behoeve van metingen (rechts)

Het trappenhuis fungeert als centraal toevoerkanaal. Met mengventilatoren wordt de lucht uit het trappenhuis gezogen en de slaapkamers op de eerste verdieping en de woonkamer ingeblazen (Figuur 10).

Omdat er in de proefwoning een open keuken is, wordt ook lucht uit de woonkamer afgezogen via de keukenafzuiging. Dat gebeurt via de afzuigkap.

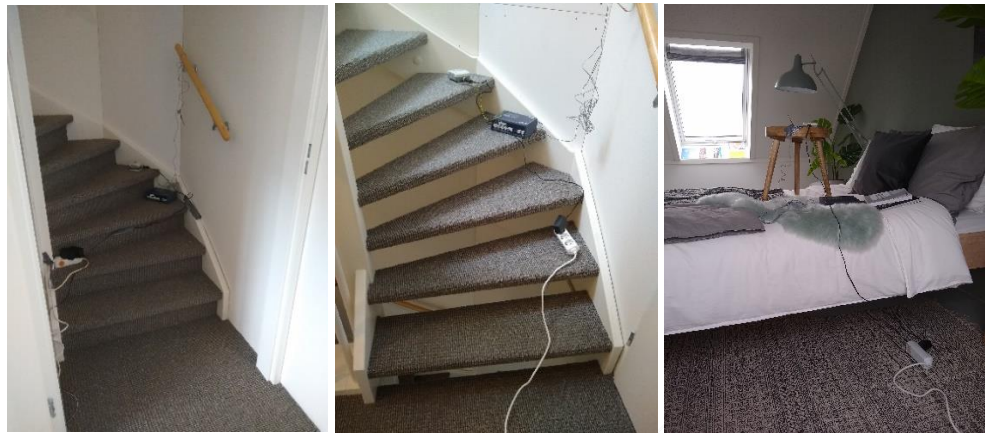
6.3 Metingen Nerozero-lab

Om een beeld te krijgen van de CO₂-concentraties in de proefwoning, zijn op verschillende plekken in het trappenhuis en vertrekken CO₂-sensoren geplaatst, die gedurende beide meetdagen elke minuut de CO₂-concentratie hebben gelogd. Omdat de luchtstroming in het trappenhuis deels tot stand komt door natuurlijke stroming door temperatuurverschillen, is op elke positie tevens de lucht temperatuur gemeten. Een overzicht van de sensoren is weergegeven in Figuur 11.



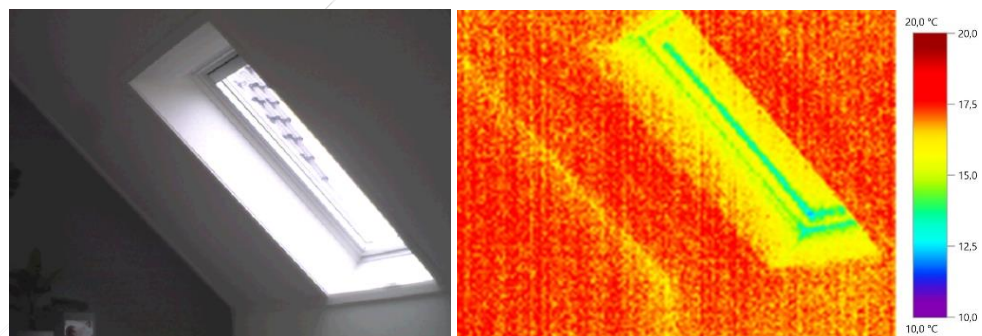
Figuur 11: Overzicht van de geplaatste sensoren. Een 'c' staat voor een meting van de CO₂-concentratie, een 'T' voor een temperatuur meting

De temperatuur- en CO₂-sensor op de trap naar de 1^e verdieping, op de trap naar de 2^e verdieping en op het tafeltje op het bed op zolder zijn in de foto's van Figuur 12 weergegeven.

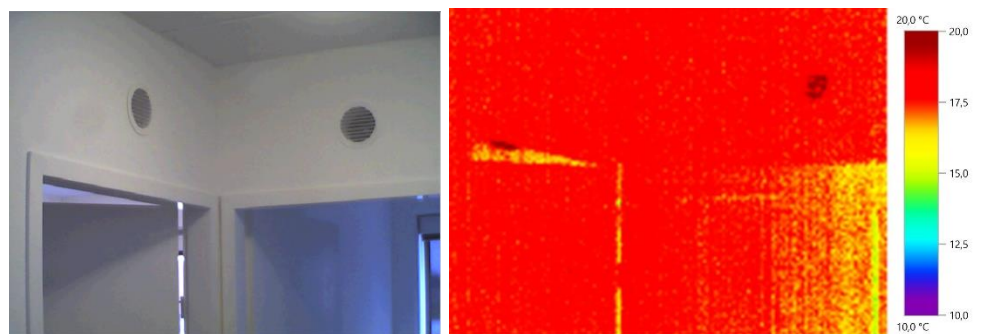


Figuur 12: Temperatuur- en CO₂-sensor (van links naar rechts): op de trap naar de 1^e verdieping, op de trap naar de 2^e verdieping en op het tafeltje op het bed op zolder.

De temperatuur van vloer, wanden en plafond bepaalt mede de warmteoverdracht tussen lucht en wand en daarmee de natuurlijke convectorie van lucht in het trappenhuis. Om die reden zijn er infrarood foto's gemaakt die een beeld geven van de temperatuurverdeling in het trappenhuis. De temperaturen zijn als input in het CFD-model gebruikt, geïllustreerd in Figuur 13 en Figuur 14.



Figuur 13: Foto en infrarood foto van het rechter zolderraam



Figuur 14: Foto en infrarood foto van wanden van de overloop boven de slaapkamer deuren. De IR-foto toont de warmte van een defecte ventilator, die niet draaide, maar wel warmte afgaf.

Uit de foto's komt naar voren dat de temperatuur op de begane grond redelijk egaal ca. 19° C bedroeg, de temperatuur op zolder is eveneens redelijk egaal, maar met 17-18°C iets lager.

6.3.1 Uitgevoerde experimenten

Op 15 en 17 januari 2019 zijn metingen uitgevoerd in het Nerozero-lab. Afwisselend zijn twee onderzoekers gedurende enkele uren in één van de vertrekken gaan zitten (slaapkamer, zolder en woonkamer). De uitgeademde lucht bevat CO₂ die is gemeten om de effectiviteit van het ventilatiesysteem na te gaan.

Er zijn in totaal 6 experimenten uitgevoerd. In alle experimenten is de afzuigopening in het toilet op de begane grond afgeplakt om de vergelijking met uitgevoerde CFD-berekeningen te vergemakkelijken.

De ingestelde debieten van de warmteterugwin-unit waren bewust lager ingesteld dan het bouwbesluit voorschrijft. De reden is dat die meetcondities een vergelijking met CFD berekeningen vergemakkelijken.

Experiment 1

In het eerste experiment waren beide onderzoekers in de woonkamer aanwezig. De warmteterugwin-unit blies vanuit de zolder lucht het trappenhuis in met een debiet van ca. 100 m³/uur. Lucht werd afgevoerd vanuit de keuken (ca. 70 m³/uur, gemeten) en de badkamer (ca. 30 m³/uur, gemeten). De mengventilator blies vanuit de woonkamer de met CO₂ vervuilde lucht naar het trappenhuis en lucht vanuit het trappenhuis stroomde onder de woonkamerdeur naar de woonkamer.

Experiment 2

Het tweede experiment lijkt op het eerste, maar nu blies de mengventilator lucht vanuit het trappenhuis naar de woonkamer en stroomde de met CO₂ vervuilde lucht onder de woonkamerdeur naar het trappenhuis. Dit is om te onderzoeken of omdraaien van mengventilator de efficiency van de luchtverversing in de woonkamer beïnvloedt.

Experiment 3

Het derde experiment lijkt op het tweede, maar nu was de afzuigkap afgeplakt om een dichte keuken te simuleren, dat wil zeggen dat de woonkamer enkel wordt geventileerd door de mengventilator die lucht vanuit het trappenhuis naar de woonkamer blies (en de met CO₂ vervuilde lucht onder de woonkamerdeur naar het trappenhuis stroomt).

Experiment 4

Beide onderzoekers waren in de grote slaapkamer op de 1^e verdieping aanwezig. De mengventilator blies lucht vanuit het trappenhuis naar de slaapkamer en de met CO₂ vervuilde lucht stroomde onder de slaapkamerdeur naar het trappenhuis.

Experiment 5

In dit experiment waren beide onderzoekers op zolder aanwezig. De debieten waren hetzelfde als in experiment 4. Er waren geen mengventilatoren in gebruik.

Experiment 6

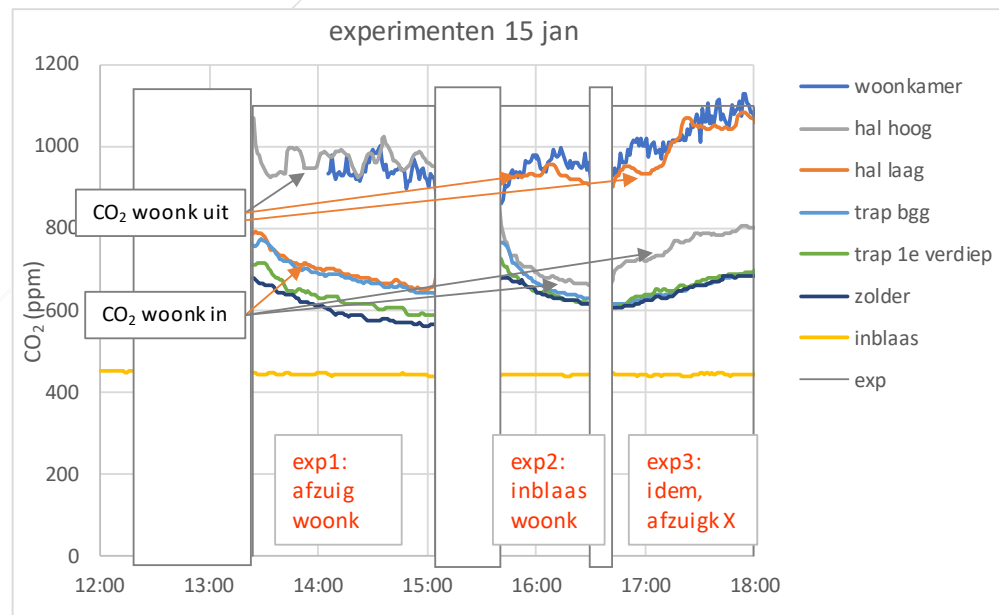
In dit experiment waren beide onderzoekers in de woonkamer aanwezig. Het experiment was hetzelfde als experiment 3, met afgeplakte afzuigkap om een dichte keuken te simuleren, maar de richting van de mengventilator in de woonkamer was omgedraaid t.o.v. experiment 3.

6.3.2 Resultaten Metingen

Uit metingen van de ventilatiedebieten blijkt dat het lastig is om de massabalans van de luchtstromen van en naar een vertrek of de proefwoning als geheel kloppend te krijgen. Een van de oorzaken is de niet volledige luchtdichtheid van de proefwoning³, waardoor er aan de loefzijde (waar de wind op staat) lucht door de schil naar binnenkomt en aan de lijzijde binnenlucht door de schil naar buiten gaat.

Een andere bevinding is dat er lucht tussen woonkamer en zolder wordt uitgewisseld via de technische ruimte die via de lepe hoeken in het trappenhuis in verbinding staat met de zolderruimte. Dit is daarom ook meegenomen in de CFD-berekeningen. Waar twijfel was over de luchtdebieten, zijn deze mede op basis van de gemeten CO₂ concentraties (zie hierna) zo goed mogelijk afgeschat.

De gemeten CO₂-concentraties op 15 januari 2019 zijn in Figuur 15 weergegeven.



Figuur 15: Gemeten CO₂ concentraties op 15 januari 2019.

³ Na de bouw is een luchtdichtheidsmeting uitgevoerd (blower door test). Hieruit kwam een waarde van de q_{v10} van $0,18 \text{ dm}^3/\text{s} / \text{m}^2$. Hoewel dit een lage waarde is, levert dit toch nog een infiltratiedebiet in de orde van $20 \text{ m}^3/\text{uur}$ (afhankelijk van o.m. winddruk aan lij- en loefzijde van de proefwoning). Deze waarde levert een 'gat' in de massabalans van de luchtstroming.

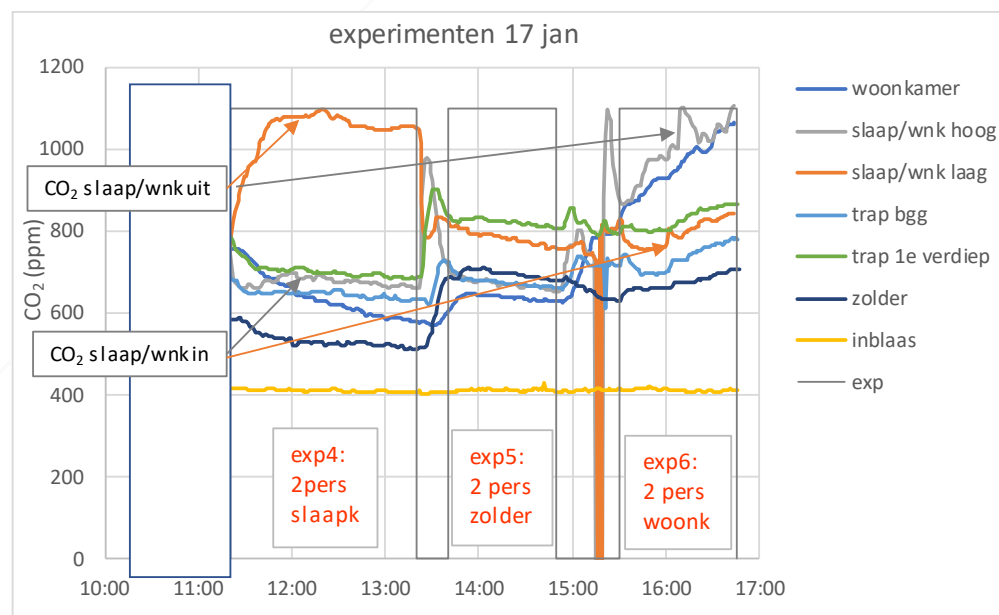
In experiment 1 (beide onderzoekers in de woonkamer) is de CO₂-concentratie in de woonkamer het hoogst (900-950 ppm). De CO₂-concentratie wordt lager hoe hoger in de proefwoning wordt gemeten (het laagst op zolder). In dit experiment hebben de CO₂-concentraties nog niet hun evenwichtswaarde bereikt aan het einde van de meting. De uiteindelijke waarden liggen waarschijnlijk lager.

In experiment 2 (omdraaien van de mengventilator t.o.v. experiment 1) is de CO₂-concentratie in de woonkamer vergelijkbaar met die in experiment 1. De CO₂-concentratie in rest van de proefwoning is egaler dan in experiment 1.

In experiment 3 (zonder afzuiging in de keuken) zijn de CO₂-concentraties overal hoger: 1100 ppm in de woonkamer, 800 ppm in het trappenhuis ter hoogte van de inblaas naar de woonkamer en 700 ppm op de 1^e verdieping en de zolder).

Ook in dit experiment hebben de CO₂-concentraties nog niet hun evenwichtswaarde bereikt aan het einde van de meting. De verwachting is dat de CO₂-concentratie in de woonkamer uiteindelijk een waarde van ca. 1200 ppm zal bereiken.

De gemeten CO₂-concentraties op 17 januari 2019 zijn in Figuur 16 weergegeven.



Figuur 16: Gemeten CO₂ concentraties op 17 januari 2019.

In experiment 4 (beide onderzoekers op de slaapkamer) bereikte de CO₂-concentratie in de slaapkamer een acceptabele waarde van ca. 1050 ppm. De CO₂-concentratie in de woonkamer is aan het eind van het experiment nog dalend vanwege de aanwezigheid van de onderzoekers 's ochtends voorafgaand aan het experiment. De CO₂-concentratie op zolder blijft laag met 500 ppm.

In experiment 5 (beide onderzoekers op zolder) is de CO₂-concentratie op de 1^e verdieping het hoogst 800 ppm, de CO₂-concentratie op zolder is lager. Mogelijk is

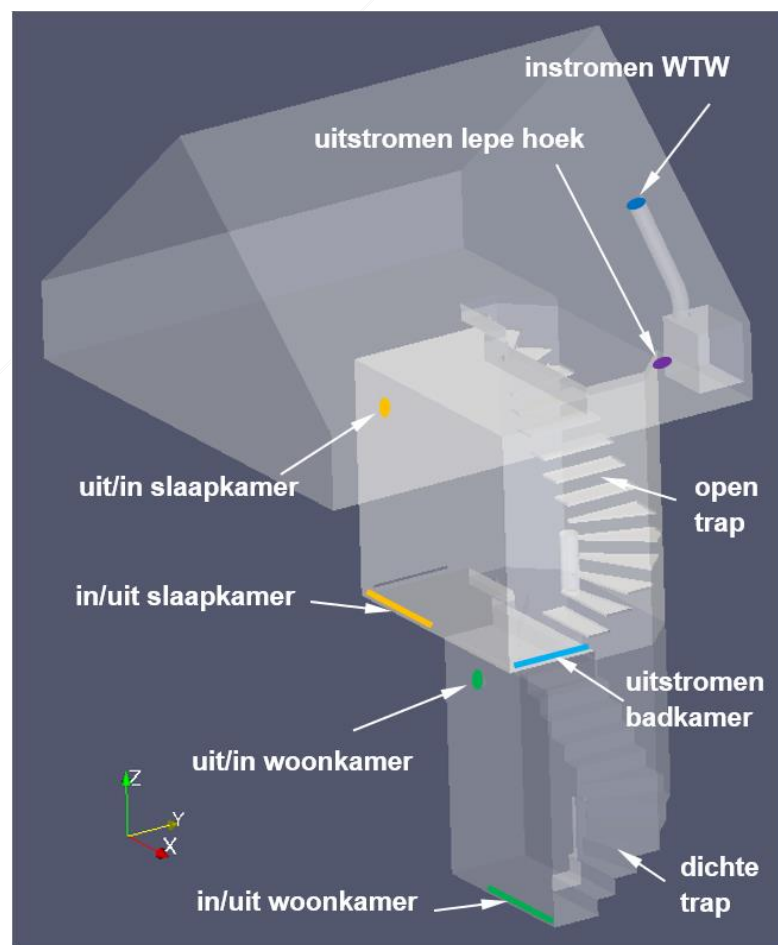
dit veroorzaakt door het (achteraf geconstateerde) scheef vastgezette linker dakraam, waardoor er verse lucht de zolder binnenkwam.

In experiment 6 (beide onderzoekers in de woonkamer, zonder keukenafzuiging) is de CO₂-concentratie in de woonkamer 1100 ppm, vergelijkbaar met die in experiment 3 (omgekeerde mengventilator). De CO₂-concentratie op zolder is ook vergelijkbaar met die in experiment 3 (700 ppm).

Ook in dit experiment hebben de CO₂-concentraties aan het einde van de meting nog niet hun evenichtswaarde bereikt. De verwachting is dat de CO₂-concentratie in de woonkamer uiteindelijk een waarde van ca. 1200 ppm zal bereiken.

6.4 CFD-Model NeroZero-lab

Voor het vergelijken met de metingen is een deel van het NeroZero-lab gedetailleerd gemodelleerd in een CFD (Computational Fluid Dynamics) pakket. Daarbij is aangenomen dat de vervuiling van de lucht in een vertrek door aanwezigheid van personen (geur, stof, vluchtige organische stoffen, en als 'marker' CO₂) zich egaal over dat vertrek verdeelt. De gemodelleerde ruimte, het trappenhuis is in Figuur 17 weergegeven.



Figuur 17: Het in een CFD-pakket gemodelleerde trappenhuis van het NeroZero-lab.

Gemodelleerd zijn de zolderruimte en het traphuis met een dichte trap op de begane grond en een open trap naar zolder. De trapleuningen en zijwangen van de trap zijn verwaarloosd, verder zijn alle afmetingen op de bouwtekeningen gebaseerd.

Bij de modellering is voor de randvoorwaarden rekening gehouden met het instromen en uitstromen uit de vertrekken (woonkamer, slaapkamer), het uitstromen naar de badkamer en instromen vanuit de WTW unit. Tevens is er rekening gehouden met het doorstromen van de rechter lepe hoek, die een verbinding vormt met de technische ruimte onder de trap op de begane grond en daarmee ook naar de woonkamer. Hierdoor wordt een lekkagestroming veroorzaakt naar de woonkamer.

Zoals in hoofdstuk 6.3 beschreven zijn er in januari 2019 metingen verricht in het Nerozero-lab. In de CFD-berekeningen zijn de volumestromen naar en vanuit de vertrekken gebaseerd op de gemeten waarden. De luchtstroom door de lepe hoek is berekend uit de balans van de massastromen.

6.5 Vergelijking metingen en CFD-simulaties

De CFD-simulaties zijn uitgevoerd op basis van de data uit experimenten 1, 4 en 6. Voor deze CFD simulaties zijn de volumestromen in en uit de vertrekken kloppend gemaakt. Hiervoor zijn missende ventilatiestromen aangenomen door stroming via de lepe hoeken (zoals aangetoond – maar niet gemeten - bij de experimenten).

In de andere uitgevoerde experimenten bleken er teveel versturende invloeden te zijn, waardoor de massabalans van de luchtstromingen onvoldoende kloppend gemaakt konden worden om zinvolle CFD-berekeningen uit te voeren.

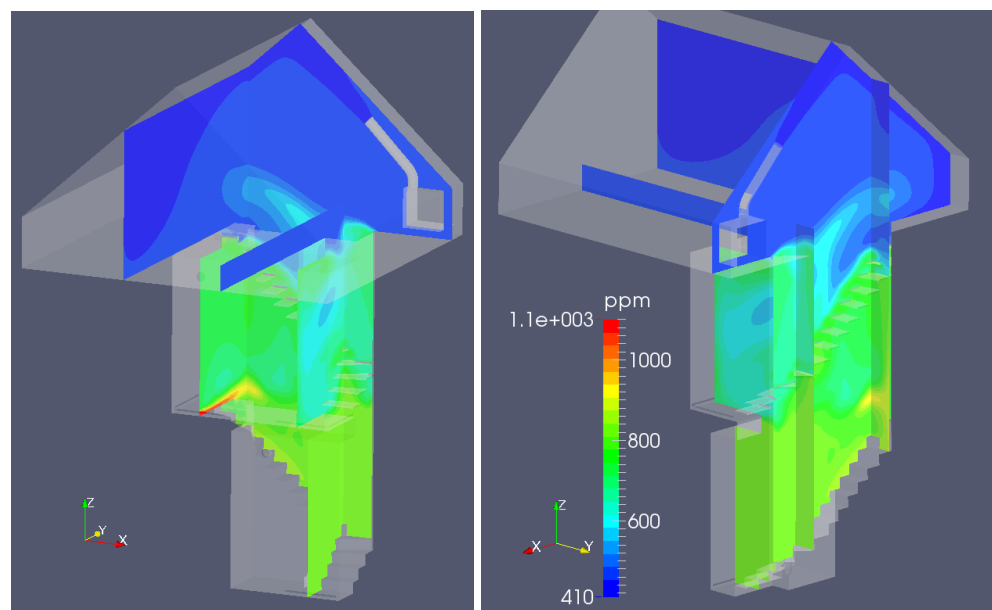
Experiment 4

Het eenvoudigste experiment is experiment 4 (met 2 personen in de slaapkamer) omdat hier alleen vervuilde volumestroom over de deurspleet en mengventilator wordt uitgewisseld in de verder afgesloten slaapkamer. Gemeten en berekende waarden van de CO₂-concentraties zijn gegeven in Tabel 2.

Tabel 2: Experiment 4, vergelijking gemeten en berekende CO₂-concentraties

meetlocatie	gemeten [ppm]	CFD [ppm]
inblaas	410	410
woonkamer	570	660
Begane grond	630	815
1 ^e verdieping	685	665
2 ^e verdieping	510	450
slaapkamer	1050	1115
Overloop 1 ^e verdieping	670	720
verschil slaapkamer in/out	380	400

De CO₂-concentraties worden vanuit de slaapkamer verspreid naar het trappenhuis, ook de zolder heeft nog een opmengfunctie (Figuur 18). Naast het afzuigen door de badkamer wordt ook een groot gedeelte via de woonkamer afgezogen; ook op de begane grond vinden we verhoogde CO₂-concentraties. De berekende CO₂-concentraties zijn gevisualiseerd in Figuur 18.

Figuur 18: CFD CO₂ concentraties voor EXP 4 (twee invalshoeken)

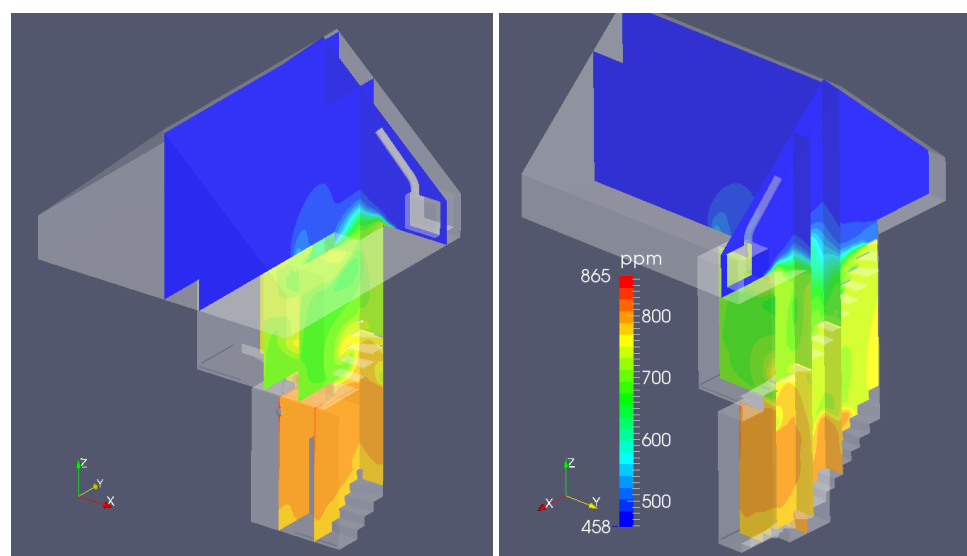
Experiment 1

In het experiment 1 waren beide onderzoekers in de woonkamer aanwezig. De gemeten concentraties in de woonkamer zijn in dit experiment het laagst omdat slechts een relatief klein deel van de vervuilde lucht wordt afgevoerd via de mengventilator en het trappenhuis en een relatief groot deel via de keukenafzuiging. De gemeten en berekende CO₂-concentraties zijn gegeven in Tabel 3.

Tabel 3: Experiment 1, vergelijking tussen gemeten en berekende CO₂-concentraties

meetlocatie	gemeten [ppm]	CFD [ppm]
inblaas	440	440
woonkamer	950	865
Begane grond	640	780
1 ^e verdieping	590	720
2 ^e verdieping	560	470
hal laag	650	790

De opmenging vindt vooral plaats op de begane grond, de menging via de zolderverdieping is zwak, waardoor de CO₂-concentraties daar laag blijven. De berekende CO₂-concentraties zijn gevisualiseerd in Figuur 19.



Figuur 19: CFD CO₂ concentraties voor EXP 1 (twee invalshoeken)

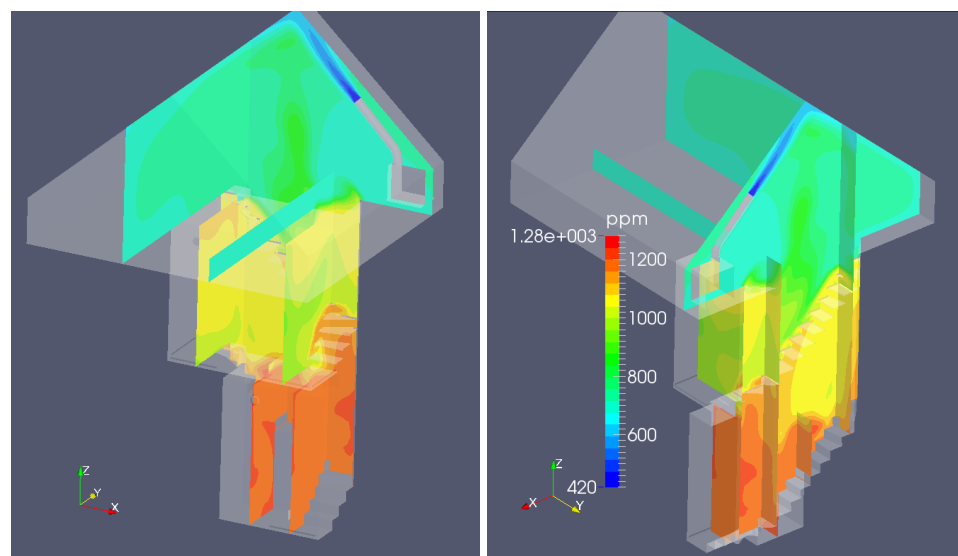
Experiment 6

Ook in experiment 6 waren beide onderzoekers in de woonkamer aanwezig en was de afzuiging in de keuken afgeplakt, waardoor de woonkamer alleen via de mengventilator werd geventileerd. De CO₂-concentraties zijn weergegeven in Tabel 4.

Tabel 4: Experiment 6, vergelijking tussen gemeten en berekende CO₂-concentraties

meetlocatie	gemeten [ppm]	CFD [ppm]
inblaas	420	420
woonkamer	1100	1280
Begane grond	780	1170
1 ^e verdieping	860	1020
2 ^e verdieping	705	700
hal laag	850	1185

De berekende CO₂-concentraties zijn gevisualiseerd in Figuur 20. Door de opmenging in het trappenhuis buiten de woonkamerdeur lopen de concentraties daar op. Het traphuis en zolder worden niet optimaal benut voor een goede opmenging met de verse lucht. De CO₂-concentraties in de woonkamer lopen verder niet op omdat een groot gedeelte van de ventilatiestroom door de lepe hoeken vanaf zolder wordt aangezogen.



Figuur 20: CFD CO₂ concentraties voor EXP 6 (twee invalshoeken)

De analyse van de ventilatiestromen laat verder zien dat de gekozen radiaalventilator een relatief sterke opmenging van de lucht in het trappenhuis buiten de woonkamerdeur veroorzaakt. Dit leidt tot ongewenste kortsluiting van vervuilde lucht buiten het vertrek.

Een brede uitstroomopeningen en een horizontale uitstroom van lucht verdienen de voorkeur. Beter is daarom gebruik te maken van een tangentiële ventilator, zoals geïllustreerd in Figuur 21.



Figuur 21: Tangentiële ventilator

6.6 Conclusies Innovatief ventilatiesysteem

Er zijn in totaal 6 experimenten uitgevoerd. Opgemerkt moet worden dat op een aantal punten is afgeweken van het normaal functioneren van het ventilatiesysteem om een vergelijking met CFD berekeningen te vergemakkelijken.

Zo zijn de ingestelde debieten van de warmteterugwin-unit bewust lager ingesteld dan het bouwbesluit voorschrijft. Verder is in alle experimenten de afzuigopening in het toilet op de begane grond afgeplakt. En in een tweetal experimenten is de afzuiging van de keuken (via de afzuigkap) afgeplakt, waardoor de ventilatie van de proefwoning verder werd verminderd.

De metingen en de berekeningen aan het 'mengen over binnendeuren' ventilatieconcept leiden tot de volgende conclusies:

- Ondanks de hierboven beschreven afwijkingen van het normaal functioneren van het ventilatiesysteem, bleven de CO₂-concentraties door de aanwezigheid van twee onderzoekers in alle metingen (ook met afgeplakte ventilatie in de keuken/woonkamer) onder de 1100 ppm ⁴.
- De vergelijking tussen metingen en CFD-berekeningen toonde aan dat het ventilatieconcept werkt voor de slaapkamer. Voor de woonkamer was dit moeilijker vanwege versturende luchtstromingen o.a. door infiltratie en via

⁴ In de experimenten met afgeplakte afzuigkap was er aan het eind van het experiment nog geen evenwichtconcentratie bereikt. De verwachting is dat de CO₂-concentratie uiteindelijk een waarde van ca. 1200 ppm zou bereiken

de lepe hoek. Hiervoor zijn metingen nodig onder beter gecontroleerde omstandigheden (o.a. afdichten lepe hoeken, windstil weer).

- Het 'mengen over binnendeuren' ventilatieconcept werkt het best als de afvoer van vervuilde lucht uit de vertrekken naar het trappenhuis plaatsvindt aan de bovenkant van het vertrek, en de toevoer van relatief schone lucht naar het vertrek onder de deur via de overstroomopening. Op die manier wordt ongewenste kortsluiting van vervuilde lucht buiten het vertrek vermeden.
- De prototypes van de radiale mengventilatoren zorgen voor een relatief sterke lokale opmenging van lucht buiten het vertrek, wat tot (ongewenste) kortsluiting van vervuilde lucht leidt. Om die reden heeft toepassing van een tangentialventilator met een brede uitstroomopening de voorkeur.
- De prototypes van de mengventilatoren bleken ook om andere redenen minder geschikt: bij lage toerentallen bleken ze lastig te regelen en bij debieten vanaf ca. 70 m³/uur bleken ze niet zo stil als gewenst.

7 Bijlage B. Geavanceerde binnenzonwering

7.1 Verbreding fundamentele kennis

Er is een literatuuronderzoek verricht naar ramen met complexe, gelaagde zonweringen. De bestaande kennis is in kaart gebracht van reflecterende, isolerende en spectraal selectieve lagen uit praktijkstudies, modelstudies en lab experimenten.

Belangrijke parameters voor een raam zijn de U-waarde en de g-waarde. De U-waarde is de warmtedoorgangscoefficiënt (in $\text{W/m}^2\text{K}$), de warmtestroom (in W) door een raamoppervlak van 1 m^2 bij een temperatuurverschil van 1 K (of 1°C).

De g-waarde of de zonnetoetredingsfactor (voorheen de ZTA-waarde) is het deel van de op het raam vallende stralingsenergie van de zon dat direct wordt doorgelaten plus het deel van de genoemde straling die in het raamsysteem wordt geabsorbeerd en zijn weg via geleiding, straling en convectie naar binnen vindt. Het gaat hierbij om de totale stralingsenergie van de zon (UV-straling, zichtbaar licht en infrarood straling).

De centrale vraag was of met een slim ontworpen binnenzonwering, die gebruik maakt van spectraal selectieve, IR-reflecterende en/of isolerende lagen, een effectieve zonwering (lage g-waarde) kan worden gerealiseerd en zo ja, welke parameters bepalend zijn voor een goede werking ervan.

De bestudeerde literatuur geeft hierop geen éénduidig antwoord. Aan de ene kant zijn er studies (Yunyang, 2015) die concluderen dat de prestatie van binnenzonwering vergelijkbaar kan zijn met die van buitenzonwering mits aan een aantal voorwaarden wordt voldaan. De belangrijkste hiervan zijn: een hoge reflectiecoëfficiënt van de zonweringen een goede afdichting van de ruimte tussen de zonwering en het raam om secundaire warmteoverdracht naar het vertrek te minimaliseren.

Experimenten (Koene, 2005), (Manning, 2005) wijzen op hoge temperaturen die kunnen optreden bij binnen- en tussenzonwering, die mogelijk leiden tot thermische spanningen in het glas. Deze ruimte zal mogelijk geventileerd moeten worden op zomerse dagen om dit te voorkomen.

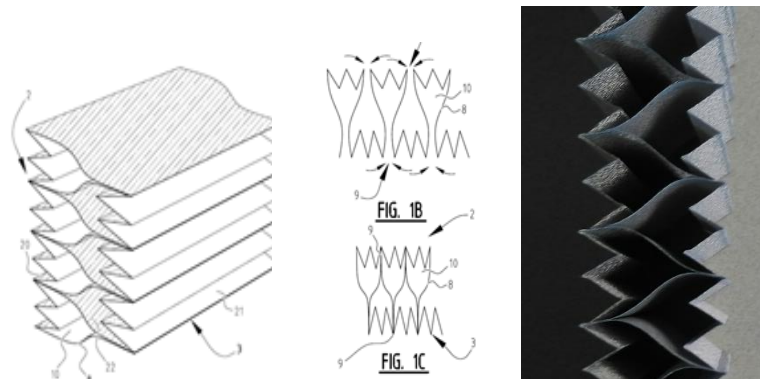
Voor een verhoging van de thermische isolatie door de zonwering is het van belang om de ruimte tussen zonwering en glas goed af te sluiten om te voorkomen dat er door convectie warmte lekt van het vertrek naar buiten (of kou naar binnen lekt).

7.2 Prototype innovatieve binnenzonwering

Op basis van de opgedane fundamentele kennis heeft Verosol een innovatieve binnenzonwering ontwikkeld waarbij de zonweringsfunctie is verbeterd door toepassing van een hoog-reflecterende laag.

Verder is de thermische isolatie tussen raam en vertrek verhoogd door een celstructuur met twee luchtlagen voorzien van een low E-coating, die warmte uit het

vertrek naar binnen reflecteert (zie Figuur 22) en is de ruimte tussen raam en zonwering goed afgesloten met geleiders voorzien van met borstels.

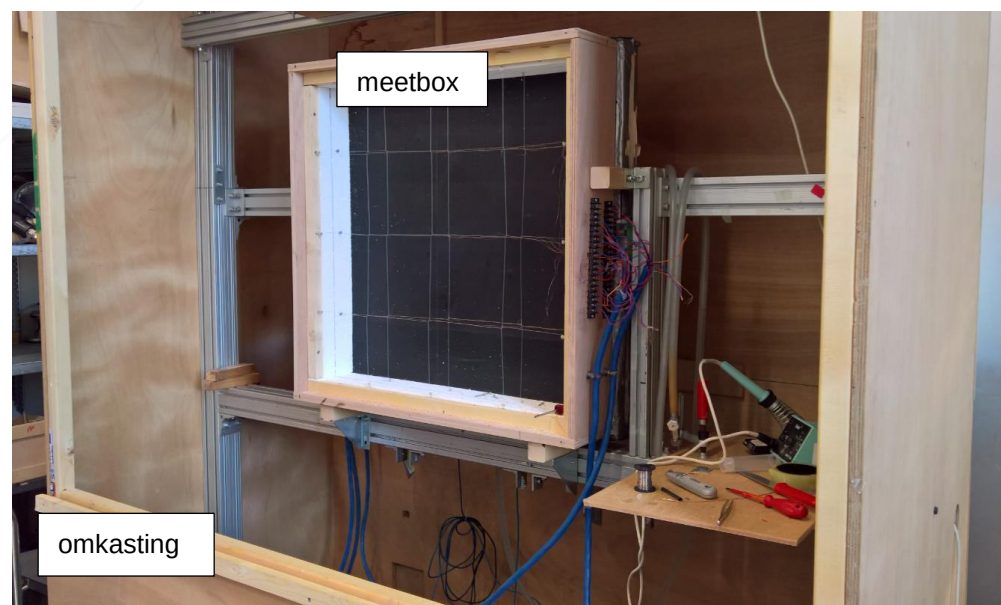


Figuur 22: Verosol innovatieve meerlaagse binnenzonwering met low-e coating.

De thermisch-energetische eigenschappen van deze zonwering in combinatie met beglazing (U en g-waarden) zijn gemeten door TNO.

7.3 Metingen Zonwering in TNO-lab

Er is een testsample van de zonwering getest in combinatie met een raam van $0.8 \times 0.8 \text{ m}^2$. Het raam met zonwering is ingebouwd in een speciaal voor dat doel gebouwde meetopstelling, weergegeven in Figuur 23.



Figuur 23: Meetopstelling bestaande uit een meetbox met daaromheen een omkasting. De voorkant van de omkasting wordt afgesloten met een perspex plaat (niet zichtbaar). Ook te zien zijn de roosters van 3×3 temperatuursensoren om de temperatuur in de spouw tussen glas en binnenzonwering te meten.

Voor het bepalen van de U-waarde van het raam wordt de meetbox op een bepaalde temperatuur gebracht. Warmte die ontsnapt via de zij- en achterwanden is zo klein mogelijk gemaakt door een hoge mate van thermische isolatie (ca. 10 cm EPS, U-waarde ca. 0,3 W/m²K). De isolatiewaarde hiervan is gemeten door een dummy glas (dichte plaat) met bekende U-waarde in plaats van een echt raam in de opstelling te plaatsen en het warmteverlies te meten. Tijdens de meting met een echt raam wordt hier vervolgens voor gecorrigeerd.

Voor het bepalen van de g-waarde van het raam wordt dezelfde meetopstelling gebruikt, en wordt het raam beschienen met een kunstzon, waarvan de straling zo goed mogelijk de straling van de echte zon dient na te bootsen. De hoeveelheid licht (zichtbaar en infrarood, ultraviolet wordt deels geabsorbeerd) die door het raam wordt doorgelaten wordt geabsorbeerd door de koelplaat aan de achterkant van de meetbox. De koelplaat wordt op een vaste temperatuur gehouden met een thermostaatbad.

De hoeveelheid afgevoerde warmte is dan gelijk aan de door het raam doorgelaten energie en kan worden berekend uit het gemeten waterdebiet en het temperatuurverschil tussen aanvoer en retour van het koelwater. Hieruit kan de g-waarde worden bepaald.

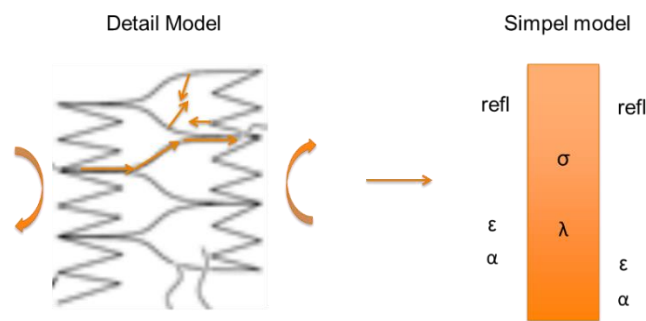
Bij de meting van de g-waarde wordt een perspex plaat geplaatst om de hoeveelheid warmtestraling van de kunstzon te verminderen. Mede door het gebruik van de perspex plaat is de maximale waarde van de straling van de kunstzon ca. 200 W/m². Dit is een factor 5 lager dan de zonnestraling op een onbewolkte zonnige dag in Nederland op een verticaal oppervlak op het zuiden.

7.4 Modelleren van de innovatieve zonwering

Het berekenen van thermisch-energetische eigenschappen van ramen met zonwering kan voor de meeste zonweringen, zoals bijvoorbeeld rolschermen en lamellen, worden uitgevoerd met WIS⁵. Echter, geavanceerde zonweringen, met meervoudige reflectie of zonweringen met dwarsverbanden of koudebruggen kunnen hiermee niet worden gemodelleerd.

De gevolgde aanpak is dat de eigenschappen van de meerlaagse zonwering worden bepaald en vertaald naar een vereenvoudigd element dat wel in WIS kan worden ingevoerd. Het voordeel hiervan is dat deze zonwering dan ook kan worden doorgerekend met b.v. andere beglazing of met de zonwering op een andere positie (b.v. tussen de glaslagen) etc.

⁵ Window Information System WIS is ontwikkeld door TNO

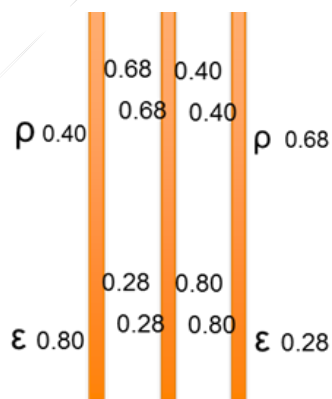


Figuur 24: Vertaling meerlaagse zonwering naar een vereenvoudigd WIS object.

De warmtestroom van buiten naar binnen wordt bepaald door geleiding, straling en convectie

Het blijkt dat de *warmtegeleiding* door de stilstaande lucht overheerst boven de warmtegeleiding door het (polyester) doek. In WIS verdisconteren we de aanwezigheid van het polyester doek door aanpassing van de afstand van de luchtsponw.

Naast warmtegeleiding vindt ook warmte-uitwisseling door *straling* plaats. Omdat slechts 13% van de warmtegeleiding door het polyester gaat, verwaarlozen we bij de vereenvoudigde benadering de koudebruggeffecten van het horizontale doek. Hierdoor kunnen de berekeningen van de warmtestralingsuitwisseling met WIS worden uitgevoerd door de zonwering te modelleren als drie afzonderlijke zonweringen (verticale doeken), zoals geïllustreerd in Figuur 25.



Figuur 25.: Benadering warmte uitwisseling door straling als een 3-laagse-zonwering

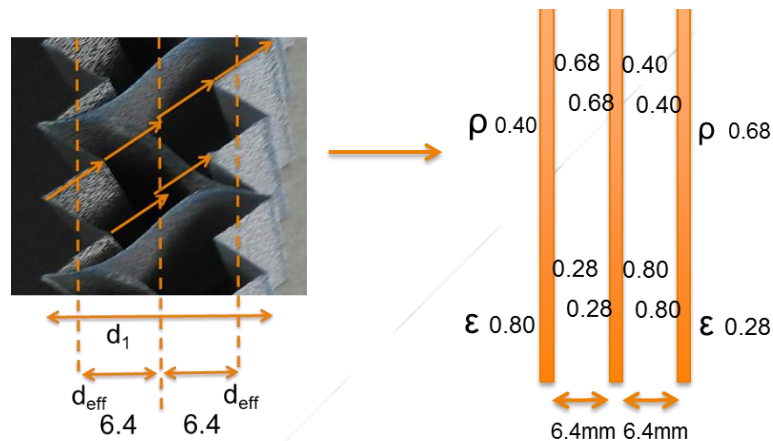
In de cellen van de zonwering vindt *natuurlijke convectie* plaats als bijvoorbeeld de binnenzijde op een hogere temperatuur is dan de buitenzijde. Lucht in een cel warmt dan op aan de binnenzijde, stijgt op en daalt weer aan de buitenzijde onder het afgeven van warmte. Op die manier wordt er door convectie warmte overgedragen van binnenzijde naar buitenzijde.

Het Nusselt-getal een dimensieloos getal is dat een maat is voor de warmteoverdracht door convectie en geleiding t.o.v. de warmteoverdracht door

geleiding en convectie. Voor de geometrie van de zonwering kan op basis van het Nusselt-getal worden afgeleid dat de warmteoverdracht door convectie kan worden verwaarloosd.

Integraal vereenvoudigd model

Door vereenvoudiging van de drie mechanismen van warmtetransport wordt een integraal vereenvoudigd model verkregen, geïllustreerd in Figuur 26.



Figuur 26: Integraal vereenvoudigd model van een 3-laagse-zonwering

7.5 Vergelijking metingen en berekeningen

Uit de metingen zijn de U-waarde en de g-waarde van gebruikte Pilkington Insulight glas bepaald. Volgens fabrieksopgave is de U-waarde van dit glas 1,12 W/m²K en de g-waarde 0,63.

Het Pilkington Insulight glas is gemeten zonder zonwering, met de zonwering omhoog (waarbij het bovenste deel van het raam werd afgeschermd door de behuizing van de zonwering) en met de zonwering omlaag. De resultaten zijn vergeleken met de berekende waarden in Tabel 5.

Tabel 5: Gemeten U-waarde en g-waarde van Pilkington Insulight glas met en zonder zonwering.

Scenario	U [$\text{W/m}^2\text{K}$]		g [-]	
	Meting	Berek	Meting	Berek
Pilkington Insulight 4-15A-*4 (opg. fabr) ¹		1,12 ²		0,63 ²
Centrum glas	1,1±0,1 ³			
Glas zonder zonwering in meetbox	1,9±0,3	1,5 ⁴	0,52±0,04	0,63 ⁴
Glas met zonwering omhoog in meetbox	1,9±0,5		0,51±0,05	
Glas met zonwering omlaag in meetbox	1,0±0,2	1,0 ⁴	0,24±0,03	0,17 ⁴

¹ A = 90% Ar-vulling, * = coatingzijde² Berekend (WIS) beglazing zonder spacer en raamframe³ Gemeten met een 'caloriplate' opstelling⁴ Berekend (WIS) beglazing met spacer ($\psi = 0,81 \text{ W/m}^2\text{K}$, opgave fabrikant)

U-waarde

De U-waarde van het centrum van het glas, gemeten met de caloriplate ($1,1\pm0,1 \text{ W/m}^2\text{K}$) komt goed overeen met de fabrieksopgave van het gebruikte glas ($1,12 \text{ W/m}^2\text{K}$).

Daarentegen blijkt de U-waarde die in de meetbox is gemeten ($1,9\pm0,3 \text{ W/m}^2\text{K}$) ruim 70% hoger dan de waarde voor centrum glas. In de WIS berekeningen is daarom het effect van de Aluminium spacers van het glas meegenomen (ψ -waarde van $0,81 \text{ W/m}^2\text{K}$, opgave fabrikant). Het resultaat is een U-waarde van $1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$, wat net niet binnen de foutmarge van de metingen valt.

Bij toepassing van de zonwering is eerst gekeken naar het effect van de aluminium geleiders van de zonwering. Deze zouden in theorie een (gering) koudebrug effect kunnen hebben. Hiervan is echter in de metingen niets gebleken: ook met gemonteerde geleiders (en de zonwering omhoog) is een U-waarde gemeten van $1,9\pm0,5 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Tenslotte is de U-waarde gemeten van het raam met de zonwering omlaag. De totale U-waarde halveerde bijna tot $1,0\pm0,2 \text{ W/m}^2\text{K}$. Hiermee is het effect vergelijkbaar met de toepassing van drievoudig glas. Ook de WIS-berekening (weer

met het effect van de Al-spacer meegenomen) komt op een U-waarde van $1 \text{ W/m}^2\text{K}$, in goede overeenstemming met de meting.

g-waarde

De g-waarde van de beglazing bedraagt volgens de fabrikant 0,63 voor centrum glas (zonder randeffecten van de spacer ed.). De in de meetbox gemeten g-waarde ligt met $0,52 \pm 0,04$ ca. 17% lager, wat gezien het aantal potentieel versturende factoren (warmteverlies door de spacer en wanden van de meetbox, meting van de met het thermostaatbad afgevoerde warmte) redelijk genoemd mag worden. Ook hier is er weinig verschil gevonden tussen de situatie zonder zonwering en de situatie met gemonteerde, maar opgehaalde zonwering.

De g-waarde van de combinatie van beglazing met zonwering blijkt in de meting omlaag te gaan naar $0,24 \pm 0,03$ en in de berekening naar 0,17. De WIS berekeningen overschatten dus het effect van de zonwering met ca. 35%. Het verschil is vermoedelijk toe te schrijven aan de secundaire warmteoverdracht die lastig is te meten.

In de NTA8800 wordt een tabel gepresenteerd met forfaitaire waarden voor de reductiefactor voor de totale zontoetredingsfactor voor uitvalschermen en knikarmschermen bij verschillende oriëntaties, zie Tabel 6.

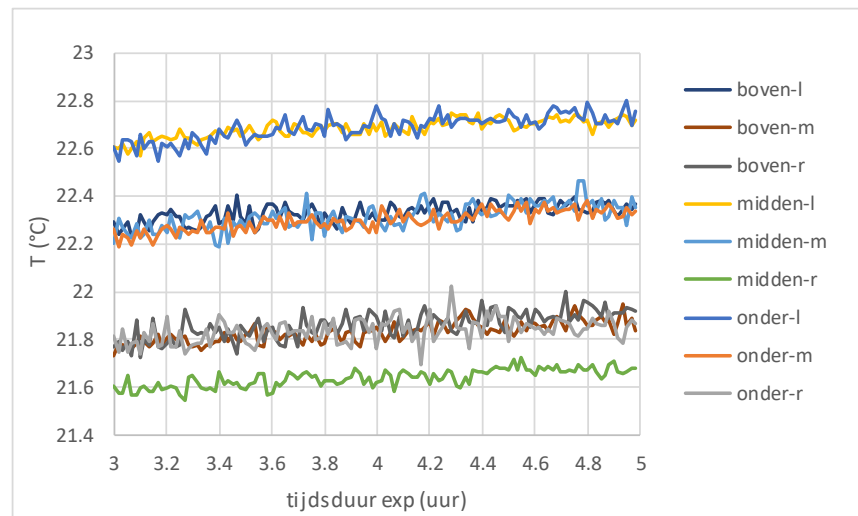
Tabel 6: Forfaitaire waarden voor de reductiefactor voor de totale zontoetredingsfactor, voor uitvalschermen en knikarmschermen (Tabel 7.6 uit NTA8800, febr. 2019)

	Fc				
Type zonwering	N	NO, NW	O, W	ZO, ZW	Z
Uitvalschermen	0,50	0,45	0,35	0,35	0,35
Knikarmschermen	0,90	0,80	0,65	0,55	0,50

Hieruit leiden we af dat goede buitenzonwering een g-waarde haalt van typisch 0,3-0,35 (afhankelijk van oriëntatie, type zonwering, kleur, openheid en materiaal van het doek). In combinatie met het gebruikte glas (g-waarde 0,63) zou buitenzonwering een g-waarde van de combinatie van glas en buitenzonwering van 0,19-0,22 halen. De Verosol-binnenzonwering haalt daarmee nog niet de prestatie van buitenzonwering, maar komt wel in de buurt ervan.

Temperatuurmetingen

Tijdens de metingen zijn temperaturen in een rooster van 3x3 meetpunten over het glasoppervlak gemeten. Ter illustratie zijn in Figuur 27 de gemeten temperaturen weergegeven van 3 tot 5 uur tijdens het experiment zonder zonwering. Gedurende deze periode wordt een stabiele situatie bereikt.



Figuur 27: Temperaturen in de spouw zonder zonwering.

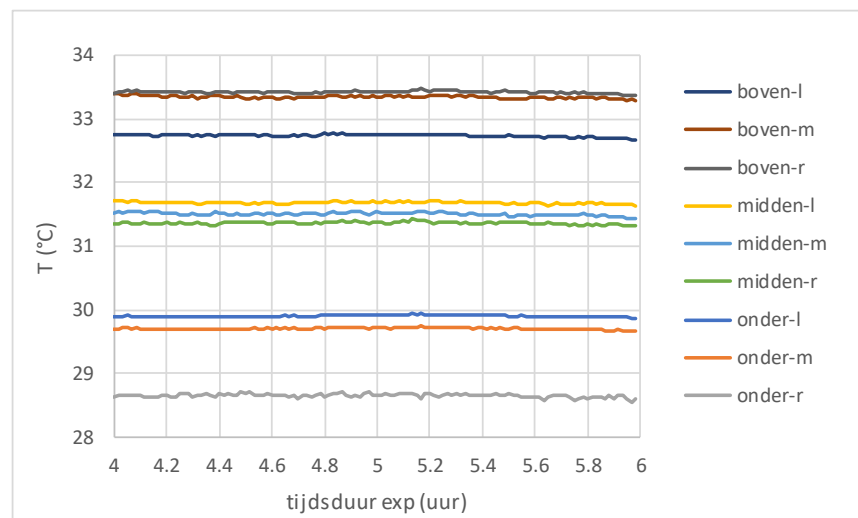
Tabel 7 toont de gemiddelde temperaturen in dit tijdsinterval in hetzelfde 3x3 rooster als de positie van de sensoren.

Tabel 7: Gemiddelde van de temperaturen in de spouw zonder zonwering (Figuur 27, van 3 tot 5 uur).

positie	links	midden	rechts
boven	22,3	21,8	21,9
midden	22,7	22,3	21,6
onder	22,7	22,3	21,8

Te zien is dat de temperaturen weinig verschillen over de hoogte. Er is een licht temperatuurverloop van links naar rechts, waarbij de temperaturen aan de linkerkant 0,5-1°C hoger zijn dan die aan de rechterkant.

In Figuur 28 zijn de gemeten temperaturen weergegeven tijdens de meting met zonwering omlaag.



Figuur 28: Temperaturen in de spouw bij zonwering omlaag.

Tabel 8 toont de gemiddelde temperaturen in dit tijdsinterval in hetzelfde 3x3 rooster als de positie van de sensoren.

Tabel 8: Gemiddelde van de temperaturen in de spouw met zonwering omlaag (Figuur 28, van 3 tot 5 uur). Duidelijk te zien is de stratificatie van de lucht in de spouw met temperaturen van ca. 33 $^{\circ}\text{C}$ boven in de spouw.

positie	links	midden	rechts
boven	32,7	33,3	33,4
midden	31,7	31,5	31,4
onder	29,9	29,7	28,7

Tabel 8 toont dat er in de spouw tussen glas en zonwering een stratificatie ontstaat van warme lucht met een verschil tussen bovenkant en onderkant van de spouw van ca. 3 $^{\circ}\text{C}$. Er is weinig verschil in temperatuur tussen de linker- en de rechterkant van de spouw.

De gemeten temperatuurverschillen zijn niet zo hoog dat er al sprake is van thermische spanningen in het glas. Aan de andere kant duidt de stratificatie er op dat er weinig lek van lucht vanuit de spouw naar de achterliggende ruimte. Blijkbaar sluit de geleiding de lucht in de spouw goed op en voorkomt daarmee een secundaire warmtestroom van spouw naar ruimte.

De maximale waarde van de zonnestraling die met de kunstzon kan worden bereikt ca. 200 W/m^2 . Dit is een factor 5 lager dan de zonnestraling op een onbewolkte zonnige dag in Nederland op een verticaal oppervlak op het zuiden. De verwachting is dat onder die omstandigheden de temperatuur in de spouw aanzienlijk hoger zal oplopen, zoals ook in de literatuur gerapporteerd.

7.6 Toepassing geavanceerde zonwering in het NeroZero-lab

Het prototype van de hoog-reflecterende en isolerende zonwering is toegepast op de achtergevel (zuid-oost) op de begane grond in het Nerozero-lab, maar er zijn geen metingen aan verricht, zie Figuur 29 en Figuur 30.



Figuur 29: Verosol zonwering aan de achterzijde van de woonkamer in het NeroZero-lab



Figuur 30: Celstructuur van de Verosol-zonwering. In deze opstelling ontbreekt nog de geleiding aan de zijkant van de zonwering.

Volgende stap is de praktijkbeproeving van de zonwering in het NeroZero-lab (niet voorzien in het Kameleo project). Het ligt voor de hand de temperaturen in de proefwoning en het energiegebruik met en zonder zonwering te vergelijken. Echter, gezien de variatie in weersomstandigheden (buiten temperatuur, zoninstraling etc.) en het dempend effect van de thermische massa van de proefwoning zal het een uitdaging zijn om verschillen in thermisch comfort en of energiegebruik met en zonder zonwering met voldoende nauwkeurigheid te meten.

7.7 Conclusies geavanceerde zonwering

De metingen en de berekeningen aan de Verosol zonwering leiden tot de volgende conclusies.

- De *gemeten* U-waarde van de combinatie zonwering-glas halveert bijna ten opzichte van beglazing zonder zonwering (van $1,9 \text{ W/m}^2\text{K}$ naar $1,0 \text{ W/m}^2\text{K}$). De *berekende* isolerende werking van de zonwering is minder (van

1,5 W/m²K naar 1,0 W/m²K), maar nog steeds aanzienlijk. De zonwering biedt daarmee een goede extra thermische isolatie in de winter, mede door de goede opsluiting van de lucht in de spouw tussen glas en (binnen)zonwering.

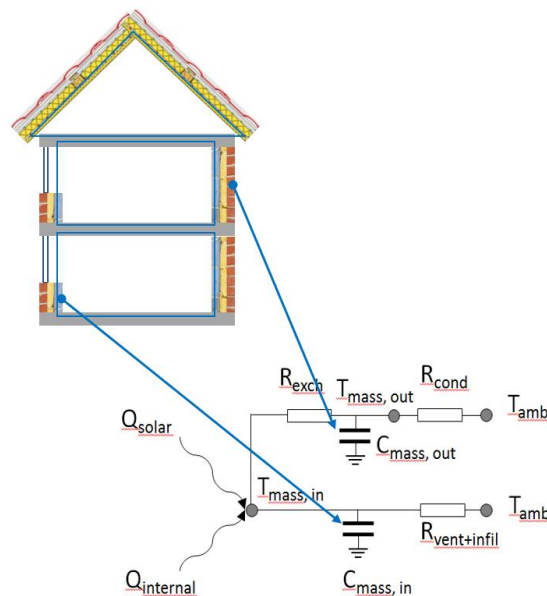
- De berekende g-waarde van de combinatie van glas met zonwering is 0,17, de gemeten waarde is 0,24. Het verschil is vermoedelijk toe te schrijven aan de secundaire warmteoverdracht die lastig is te meten. De geavanceerde binnenzonwering haalt daarmee nog niet de prestatie van buitenzonwering in combinatie met het gebruikte glas (0,19-0,22), maar komt wel in de buurt ervan.
- Een aandachtspunt zijn de temperaturen in de spouw onder zomerse omstandigheden. Bij de uitgevoerde experimenten bedroeg de zoninstraling ca. 200 W/m², en werden beperkt verhoogde temperaturen en stratificatie van de luchtlaag in de spouw tussen glas en zonwering gemeten. De verwachting is dat onder zomerse omstandigheden de temperatuur in de spouw aanzienlijk hoger kan oplopen, wat in extreme omstandigheden kan leiden tot risico's op thermische spanningen en glasbreuk.
- Samenvattend voldoet de zonwering grotendeels aan de twee gestelde doelen, namelijk een lage g-waarde, die in de buurt komt van buitenzonwering en een goede thermische isolatie in de winter.

8 Bijlage C. Berekening energiebesparing

Voor de berekening van de energiebesparing is een dynamisch gebouwmodel gebruikt dat de warmtestromen in een woning van uur tot uur berekent. Dat is met name van belang om een eventuele oververhitting van de woning ten gevolge van zoninstraling goed in kaart te brengen.

8.1 Gebruikte rekenmodel

Het gebruikte rekenmodel is een zogenaamd RC-model, waarbij de thermische massa van de woning wordt gerepresenteerd door twee capaciteiten C en drie warmteweerstanden R , geïllustreerd in Figuur 31.



Figuur 31: Gebruikte RC-rekenmodel

De totale thermische massa woning wordt afgeschat aan de hand van het volume van de woning. Deze massa wordt in twee delen gesplitst, namelijk in een binnenmassa ($C_{mass,in}$) die de binnenste 2-3 cm van vloer, plafond, binnenmuren en meubilair representeert, en die dezelfde temperatuur heeft als de binnenlucht. De buitenmassa ($C_{mass,out}$) vormt de resterende massa, die doorgaans op een lagere temperatuur is en trager op temperatuurwisselingen binnen en buiten reageert.

In de simulaties zijn gemeten temperatuur en zoninstraling gebruikt van 2018 van KNMI-weerstation De Bilt. De setpointtemperatuur in de woning overdag is 19°C verondersteld, 's nachts 15°C.

8.2 Gemodelleerde woningen

Er is een drietal woningen gemodelleerd uit de brochure 'Voorbeeldwoningen 2011 Bestaande bouw' van Agentschap NL (AG-NL, 2011).

4. Vrijstaande woning 1965-1974 + besparingspakket, label A.
5. Rijwoning 1975-1991, label D.
6. Rijwoning gebouwd tot en met 1945, label G.

Typische voorbeelden van deze woningen zijn in Figuur 32, Figuur 33 en Figuur 34 weergegeven.



Figuur 32: Typische voorbeeld van een vrijstaande woning 1965-1974. Foto uit brochure Voorbeeldwoningen 2011 Bestaande bouw van Agentschap NL.



Figuur 33: Typische voorbeeld van een rijwoning 1975-1991. Foto uit brochure Voorbeeldwoningen 2011 Bestaande bouw van Agentschap NL.



Figuur 34: Typische voorbeeld van een rijwoning gebouwd t/m 1945. Foto uit brochure Voorbeeldwoningen 2011 Bestaande bouw van Agentschap NL.

8.3 Varianten berekeningen en resultaten gasverbruik

In de basisvarianten zijn de drie woningen gemodelleerd aan de hand van oppervlakken en isolatiewaarden zoals aangegeven in de brochure van AG-NL. Verder is aangenomen dat alle woningen buitenzonwering hebben op de zuid-, west- en oostgevel met een g-waarde van 0,3. Voor de (gerenoveerde) vrijstaande woning 1965-1974 met een ZTA-waarde van het glas van 0,63, is gerekend met een totale g-waarde van glas+zonwering van $0,63 * 0,3 = 0,19$, hetzelfde als de waarde van de geavanceerde (glas+) binnenzonwering in Tabel 5. De beide andere woningen hebben hogere ZTA waarden van het glas (resp. 0,75 en 0,9), en is gerekend met een ZTA waarde van glas+zonwering van resp. $0,75 * 0,3$ en $0,9 * 0,3$. Verder is verondersteld dat de zonwering op een gevel automatisch naar beneden gaat als de zoninstraling op de betreffende gevel meer is dan 300 W/m^2 én de buiten temperatuur hoger is dan 15°C . Zo kan de zon in de winter de woning mee helpen verwarmen.

In Tabel 9 is in de meest rechtse kolom het door AG-NL berekende gasverbruik van de drie woningen weergegeven. Het blijkt dat de met het RC-model berekende gasverbruiken, onder de genoemde aannames, 9-15% afwijken van die van AG-NL. Dit heeft te maken met verschillen in aannames ten aanzien van bijvoorbeeld tapwatergebruik, setpointtemperatuur, gebruik van zonwering etc. Deze verschillen zijn zeer acceptabel ⁶.

⁶ Voor het berekenen van de energiebesparing door toepassing van de nieuwe concepten zijn deze afwijkingen niet relevant omdat de energiebesparing wordt berekend ten opzichte van de met het RC-model berekende basisvariant.

Vervolgens is voor elke woning een aantal varianten doorgerekend, namelijk met geavanceerde isolerende zonwering, met het innovatieve ventilatiesysteem via een warmteterugwin-unit ('mengen over binnendeuren') en met beiden.

De energiebesparing door gebruik van de geavanceerde binnenzonwering komt door de isolerende werking als de zonwering 's nachts (tussen 23:00 en 07:00 uur) wordt neergelaten. Dit alleen in het stookseizoen, d.w.z. als de buitentemperatuur lager is dan 15°C). De energiebesparing door gebruik van het innovatieve ventilatiesysteem komt door toepassing van de warmteterugwin-unit, waarbij een rendement van 70% (een in de praktijk gevonden waarde) is verondersteld.

De varianten in de berekeningen en de resultaten van het gasverbruik en de energiebesparing zijn in Tabel 9 weergegeven.

Tabel 9: Varianten berekeningen en resultaten gasverbruik

Nr.	Woning	Varianten					Resultaten				
		Label	U raam (W/m²K)	Vent debiet m³/uur	Rendement wtw. (%)	Infiltr. vout (ach)	Q _{rw} (kWh/jr)	besparing rw (%)	gasverbr * (m³/jr)	gasverbr vlg. AG-NL (m³/jr)	t.o.v AG-NL
1	Vrijstaande woning 1965-1974, besparingspakket	A	1.8	150	0%	0.20	8691	-	1391	1602	115%
2	met isolerende binnenzonwering		1.0	150	0%	0.20	8074	7%	1324		
3	met mengen over binnendeuren ventilatie via wtw.		1.8	150	70%	0.20	6792	22%	1185		
4	met hoogrefl zonw EN wtw		1.0	150	70%	0.20	6212	29%	1123		
5	Rijwoning 1975-1991	D	2.9	150	0%	0.40	11134	-	1656	1542	93%
6	met isolerende binnenzonwering		1.2	150	0%	0.40	10366	7%	1572		
7	met mengen over binnendeuren ventilatie via wtw.		2.9	150	70%	0.40	9127	18%	1438		
8	met hoogrefl zonw EN wtw		1.2	150	70%	0.40	8360	25%	1355		
9	Rijwoning tot en met 1945	G	2.9	0 **	0%	0.50	29855	-	3682	3337	91%
10	met isolerende binnenzonwering		1.2	0 **	0%	0.50	28999	3%	3590		
11	met mengen over binnendeuren ventilatie via wtw.		2.9	150	70%	0.25 ***	29549	1%	3649		
12	met hoogrefl zonw EN wtw		1.2	150	70%	0.25 ***	28692	4%	3557		

* gasverbruik = $Q_{rw} / 95\%$ (rendement HR107) + 450 m³/jr voor warm tapw. en koken

** $U_{raam} (glas+zonw.) = (U_{glas}^{-1} + 0,47)^{-1}$, met 0,47 de extra R_c -waarde door de isolerende zonwering

*** in basisvariant geen mechanische ventilatie

**** bij toepassing warmtewisselaar is de woning luchtdichter gemaakt

De berekende besparing door isolerende zonwering op de warmtevraag voor ruimteverwarming is ca. 3-7%.

De berekende besparing op ruimteverwarming door toepassen van het 'mengen over binnendeuren' ventilatiesysteem bedraagt 18-22%. Er is geen besparing bij de label G woning omdat deze in de basisvariant geen mechanisch ventilatiesysteem heeft (enkel natuurlijke ventilatie) waarvan de ventilatieverliezen met een warmteterugwin unit kunnen worden gereduceerd. Wel is aangenomen dat de gerenoveerde woning luchtdichter wordt gemaakt, zodat de infiltratieverliezen minder worden. Het grote voordeel van toepassing van het 'mengen over binnendeuren' ventilatiesysteem in deze woning is een betere ventilatie en dus een betere binnenluchtkwaliteit.

8.4 Conclusies energiebesparing

De berekende besparing door isolerende zonwering op de warmtevraag voor ruimteverwarming is 3-7%, die door toepassen van het 'mengen over binnendeuren' ventilatiesysteem 18-22%. Beide maatregelen zijn vrijwel onafhankelijk dus de besparing door toepassing van beiden is de som van de aparte besparingen.

9 Referenties

Koene, F.G.H. Eindverslag Actieve gevels voor de woningbouw, ECN projectnummer BTS01016, juni 2005

Manning, M. et al., Assessment of Reflective Interior Shades at the Canadian Centre for Housing Technology, NRC Publications Archive, <http://dx.doi.org/10.4224/20377337>

NTA 8800:2018 nl rekenmethode energieprestatie gebouwen, februari 2019

Yunyang Ye et al., Experimental study on the effectiveness of internal shading devices, Tongji University, Shanghai, Energy and Buildings 111 (2016) 154–163

Voorbeeldwoningen 2011 Bestaande bouw van Agentschap NL.