

Unit Building Physics and Services
Postbus 513
5600 MB Eindhoven
www.tue.nl

Auteurs
S.B. de Vries
R.C.G.M. Loonen

Datum
12 juni 2018

TKI iDEEGO: Intelligent energieregelsysteem voor maximale energiebesparing en comfort met geautomatiseerde binnenzonwering

Inhoudsopgave

Titel
TKI iDEEGO: Intelligent
energieregelsysteem voor maximale
energiebesparing en comfort met
geautomatiseerde binnenzonwering

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | SAMENVATTING | 3 |
| 2 | ACHTERGROND EN DOEL..... | 4 |
| 3 | HET ONTWIKKELDE FOURC REGELALGORITME..... | 5 |
| 4 | METHODE | 8 |
| 4.1 | GEVOELIGHEIDSANALYSE MIDDELS SIMULATIEMODELLEN | 8 |
| 4.2 | HET CO-SIMULATIEMODEL..... | 8 |
| 4.3 | UITGANGSPUNTEN EN AANNAMES | 9 |
| 4.4 | CASE STUDIE | 12 |
| 4.5 | PRESTATIE-INDICATOREN | 13 |
| 5 | RESULTATEN | 15 |
| 5.1 | INTEGRALE PRESTATIEBEOORDELING VAN DE FOURC REGELSTRATEGIE | 15 |
| 5.1.1 | <i>Energieverbruik.....</i> | 16 |
| 5.1.2 | <i>Daglichttoetreding en uitzicht</i> | 22 |
| 5.1.4 | <i>Verblinding</i> | 27 |
| 5.1.5 | <i>Conclusies</i> | 30 |
| 5.2 | EFFECTEN VAN REGELPARAMETERS OP GEBOUWPRESTATIES | 31 |
| 5.2.1 | <i>Gevoeligheidsanalyse ‘glare safe depth’ en gebouwkarakteristieken</i> | 31 |
| 5.2.2 | <i>Conclusie.....</i> | 35 |
| 5.3 | VERKENNING VAN VERDERE OPTIMALISATIE VAN HET FOURC ALGORITME | 36 |
| 5.3.1 | <i>Conclusie.....</i> | 41 |
| 6 | VERVOLGACTIVITEITEN | 43 |
| 7 | LITERATUURVERWIJZING | 44 |

1 Samenvatting

In dit rapport worden de resultaten van een reeks simulatiestudies, uitgevoerd door de Technische Universiteit Eindhoven, besproken. In deze studies zijn de prestaties, ten aanzien van visueel comfort en energieverbruik, van het FourC regelsysteem voor rolgordijnen geanalyseerd. De prestaties van het FourC regelsysteem zijn hiertoe vergeleken met die van een conventionele regeling. Middels gevoeligheids- en onzekerheidsanalyse zijn de prestaties van het systeem onderzocht in relatie tot oriëntatie, gebouweigenschappen en instellingen voor de regelparameters.

Uit de vergelijking met een conventionele regeling is gebleken dat het FourC regelsysteem, in de onderzochte toepassingen, kan leiden tot een toename tot 28% (sDA300/50) in de mate van daglichttoetreding. Verder bleek uit de simulatie studies een toename van 14% in de gebruikstijd met onbelemmerd uitzicht voor de gebruiker. Wat betreft energie besparing kon uit deze studie geconcludeerd worden dat het FourC systeem, voor de onderzochte gebouwtypen, een besparing van 4-16% op het primaire energieverbruik voor koeling, verlichting en ruimteverwarming bewerkstelligt. Wat betreft verblinding vertoont het FourC systeem vergelijkbare prestaties als een conventioneel systeem.

De grootste prestatieverbeteringen ten aanzien van visueel comfort en energiebesparing, zijn te zien bij een gevel oriëntatie op het zuiden. Deze verbeteringen nemen af richting het westen en oosten en zijn verwaarloosbaar bij noordelijke oriëntaties. De besparingen in de energievraag zijn in sterke mate afhankelijk van geveleigenschappen, de interne warmtelast en de wijze waarop er gekoeld wordt. Geconcludeerd kon worden dat het FourC systeem leidt tot een besparing op zowel koeling als verlichting in een gebouw waar de interne warmtelast door verlichting maatgevend is. In een gebouw waarin de externe warmtelast bepalender is werd echter een toename in de energievraag voor koeling geconstateerd. In alle scenario's werd een afname in de energievraag voor verwarming waargenomen. Ten aanzien van verblinding is uit deze studie gebleken dat de prestaties van het FourC systeem in sterke mate afhankelijk zijn van de blikrichting van de gebruiker.

In deze studie is aangetoond dat de prestaties van het FourC systeem verder verbeterd kunnen worden wanneer de regelparameters worden aangepast aan de specifieke toepassing. Door regelparameters aan te passen kon, bij gelijke prestaties ten aanzien van verblinding, een 6% grotere verbetering bereikt worden ten aanzien daglichttoetreding (sDA500/50) en het primaire energieverbruik voor koeling, verlichting, verwarming. Voor deze studie zijn ook de mogelijkheden voor verdere verbeteringen van het systeem onderzocht. Om verblinding in verdere mate tegen te gaan zou er binnen het systeem regelacties verbonden kunnen worden aan momenten met een zeer heldere hemelkoepel. Gebleken is dat het blokkeren van direct zonlicht in deze situaties niet altijd toereikend is. Wat betreft energieverbruik zou eventuele verbetering gezocht kunnen worden in het verder verkleinen van de zontoetreding tijdens het koelseizoen. Ook hier lijkt het zonvolgende algoritme niet altijd toereikend. De prestaties ten aanzien van daglichttoetreding, verblinding en energieverbruik zijn echter in sterke mate aan elkaar verbonden. Dit betekent dat er altijd sprake zal zijn van een afweging tussen prestatiedoelen. Eén van de meest veelbelovende richtingen voor verdere verbeteringen is dan ook om toepassingen met meerdere rolgordijnen te onderzoeken waarmee een grotere hoeveelheid optische en thermische geveleigenschappen bereikt kunnen worden. Ook zouden gunstigere prestatieverhoudingen gevonden kunnen worden door het regelalgoritme te vertalen naar andere fysieke zonweringsystemen.

2 Achtergrond en doel

Tot 25% van het totale energieverbruik in gebouwen kan bespaard worden door zonwering. (Kim et al. 2009; Lee, DiBartolomeo, and Selkowitz 1998). Voorwaarde hiervoor is dat de zonwering geautomatiseerd is en dat deze op de juiste manier aangestuurd wordt. Een regelingsconcept dat theoretisch energie bespaart maar dit doet ten koste van het welzijn en de productiviteit van de gebruiker zal in de praktijk leiden tot teleurstellende energieprestaties en tegenvallende marktacceptatie. Het besparingspotentieel van zonwering zal dan ook alleen ontsloten kunnen worden middels intelligente regelsystemen die een balans weten te vinden tussen tegenstrijdige prestatiedoelen op het gebied van visueel comfort, thermisch comfort en energieprestaties.

Dit project heeft tot doel een modelgebaseerd regelsysteem te ontwikkelen waarin deze prestatiedoelen optimaal op elkaar, op het gebouw en op de gebruiker kunnen worden afgestemd. Door koppeling van de regeling aan een innovatief, draadloos motoriseringsconcept ontstaat een kansrijke propositie.

Dit project is uitgevoerd door de Verosol Fabrics BV SolarSwing Holding BV en TU Eindhoven (TU/e). De TU/e heeft op basis van virtuele experimenten met geavanceerde modellen onderzoek gedaan naar alternatieve regelstrategieën en het effect op gebouwprestaties in verschillende representatieve situaties. Gebruik makende van de studieresultaten en modellen van de TU/e heeft SolarSwing een regelalgoritme, genaamd FourC, ontwikkeld voor het gemetalliseerde Verosol rolgordijn. Ook is de benodigde software infrastructuur ontwikkeld voor de implementatie van deze regeling in een echt gebouw. Het resultaat van dit TKI-project is een geoptimaliseerd regelsysteem in combinatie met een draadloze motorisering voor binnenzonwering.

Dit rapport geeft een samenvatting van de onderzoeksactiviteiten van de TU/e. De ontwikkelde simulatiemodellen zullen worden toegelicht, alsook de bijbehorende uitgangspunten en aannames. Er zal een integrale prestatiebeoordeling van het ontwikkelde systeem gepresenteerd worden waarin de prestaties op het gebied van daglichttoetreding, visueel comfort en energieverbruik geanalyseerd worden voor een reeks representatieve gevallen. Er zal worden geïllustreerd hoe de regelparameters in het ontwikkelde systeem gebruikt kunnen worden om het systeem te optimaliseren ten aanzien van specifieke gebouwkenmerken, prestatiedoelen en gebruikersvoorkeuren. Ook zullen de uit het proces voortvloeiende inzichten besproken worden die richting geven voor verdere optimalisatie van het systeem. Tot slot worden in dit rapport de resultaten van een gevoeligheids- en onzekerheidsstudie naar het toepassingsgebied van het draadloze motoriseringsconcept gepresenteerd.

3 Het ontwikkelde FourC regelalgoritme

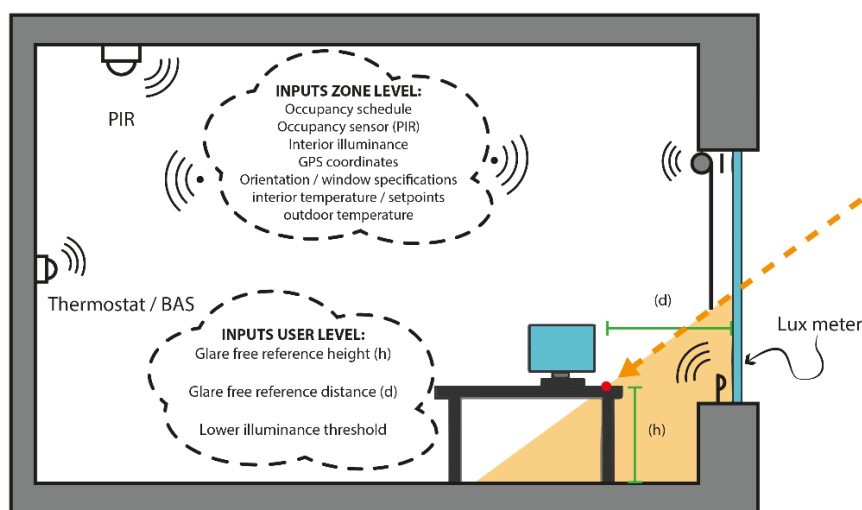
In deze paragraaf zal het ontwikkelde FourC regelalgoritme beknopt worden toegelicht. Een uitvoerige omschrijving van het algoritme, en een onderbouwing van de regels en parameters binnen het algoritme, kan gevonden worden in de *'Algorithm directives'* en de *'Light Sensor Application Directives'*.

Het regelalgoritme is ontwikkeld aan de hand van een reeks uitgangspunten. Eén daarvan is dat, wanneer er een gebruiker in de ruimte aanwezig is, het systeem prioriteit dient te geven aan visueel comfort. Het algoritme heeft dan als doel om verblinding tegen te gaan en tegelijkertijd daglichttoetreding en uitzicht te maximaliseren. Wanneer een ruimte niet bezet is dient het systeem er echter op gericht te zijn om energieverbruik te reduceren. Verder dient het rolgordijn na zonsondergang gesloten te zijn omwille van privacy.

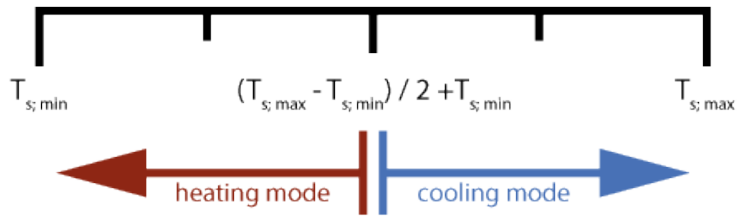
Het FourC systeem kan in verscheidene varianten worden uitgevoerd, afhankelijk van het type sensoren dat beschikbaar is. In de simulatiestudies die in dit rapport besproken worden is de meest gangbare uitvoering van het algoritme als uitgangspunt gebruikt (Figuur 1). Te zien zijn de sensoren waar het FourC systeem gebruik van kan maken: een verlichtingssterktesensor (lux) bij het raam, een PIR aanwezigheidssensor en een thermostaat. De luxsensor wordt in het FourC systeem gebruikt om de weersomstandigheden te meten en het dimmen van de verlichting aan te sturen. De thermostaat wordt gebruikt om te bepalen welke acties het systeem buiten kantooruren het gunstigst zijn om energie te besparen. Hiervoor heeft het systeem ook de buitentemperatuur nodig. Deze ontvangt het systeem via het internet.

Figuur 3 geeft een overzicht van het beslissingsalgoritme dat het systeem doorloopt om de hoogte van het rolgordijn te bepalen. Hiertoe evalueert het systeem of, op dat moment, voldaan wordt aan een aantal voorwaarden. Allereerst beoordeelt het systeem of het op dat moment dag of nacht is, dat wil zeggen: of de zon reeds is ondergegaan. Dit wordt aan de hand van de locatie en tijd door het systeem berekend. Indien de zon is ondergegaan, wordt het rolgordijn volledig gesloten omwille van privacy. Indien dit niet het geval is, dan bepaalt het systeem of er een gebruiker in de ruimte aanwezig is. Dit wordt beoordeeld aan de hand van een aanwezigheidssensor of door middel van een voorgeprogrammeerd rooster en het tijdstip. Als er een gebruiker aanwezig is; zal het systeem visueel comfort trachten te optimaliseren. Deze modus wordt 'comfort mode' genoemd. Binnen deze modus moet eerst worden bepaald of de zon in het zicht van de gebruiker valt. Hiertoe berekent het systeem aan de hand het tijdstip en de locatie waar de zon zich op dat moment bevindt. Indien de zon zich achter de gevel bevindt, of door het overstek boven een raam buiten het zicht van de gebruiker valt, zal het rolgordijn volledig geopend worden omwille van daglichttoetreding en uitzicht. Indien de zon wel in het zichtveld het de gevel valt, dan zal het systeem aan de hand van de meting van de luxsensor proberen te achterhalen of er sprake is van een bewolkte hemelkoepel waarbij de zon door wolken bedekt wordt. Hiervoor gebruikt het systeem een grenswaarde van 6000 lux die door de gebruiker kan worden aangepast. Indien geconcludeerd wordt dat de hemelkoepel bewolkt is zal het rolgordijn volledig geopend worden. Wanneer de zon in zicht is, en er sprake is van een heldere hemelkoepel, zal het systeem het rolgordijn tot zoverre laten zakken dat de zon buiten het blikveld van de gebruiker wordt gehouden. Deze modus wordt '*glare safe mode*' genoemd. Het systeem laat dan direct zonlicht slechts tot een vooraf bepaalde diepte de ruimte binnendringen (zie Figuur 1). Hierdoor worden verblinding door direct zonlicht en reflecties van het tafelblad voorkomen. Tegelijk kan door het onbedekte deel van het raam alsnog daglicht toetreden en behoudt de gebruiker een deel van zijn zicht naar buiten. In deze modus wordt de hoogte van het

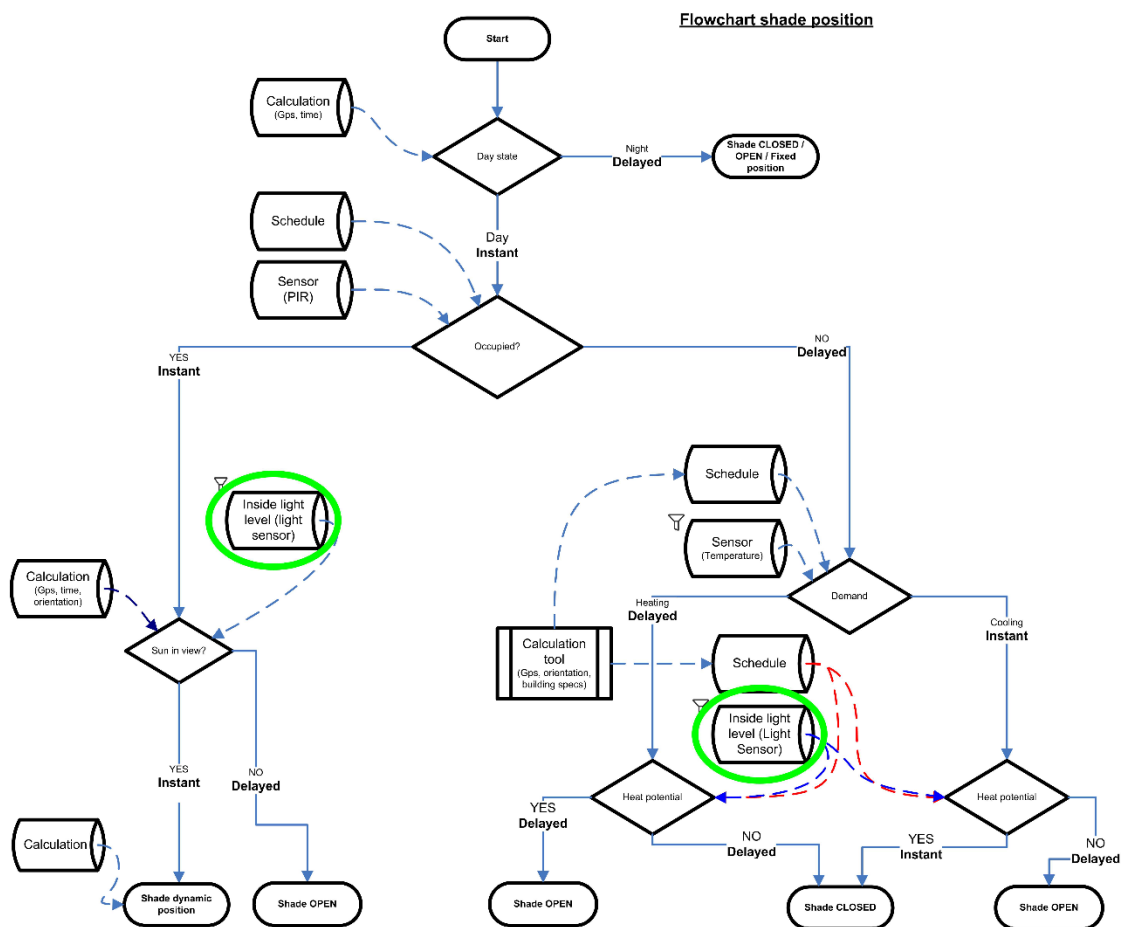
rolgordijn bepaald aan de hand van de berekende positie van de zon en de door de gebruiker ingestelde 'glare safe depth' en een 'glare safe height' (respectievelijk d en h in Figuur 1). Als het beslialgoritme concludeert dat er geen gebruiker in de ruimte aanwezig is, dan zal het systeem het energieverbruik proberen te minimaliseren. Deze modus wordt 'energy mode' genoemd. De beslissingen binnen deze modus zijn erop gericht de netto warmtestroom door het raam de bevorderen of te verlagen afhankelijk van of warmteopbouw binnen de ruimte op dat moment gewenst is. Hiertoe wordt gebruikgemaakt van een vereenvoudigde warmtebalans. Aan de hand van de gemeten luchttemperatuur en de ingestelde thermostaattemperaturen voor koelen en verwarmen, wordt bepaald of warmteopbouw gewenst of ongewenst is. Het omslagpunt hiertussen ligt halverwege de ongevoeligheidsmarge van de thermostaat (zie Figuur 2). Vervolgens berekent het systeem middels een vereenvoudigde warmtebalans in welke richting de netto warmtestroom door het raam plaatsvindt. Het systeem bepaalt hiertoe de globale straling die door het raam wordt doorgelaten en daar wordt de transmissiewarmtestroom bij opgeteld. De doorgelaten straling wordt berekend aan de hand van de lichtsterkte die binnen door de luxsensor gemeten wordt, gebruikmakende van de optische eigenschappen van het raam. De warmtestroom door transmissie wordt berekend gebruikmakende van de U-waarde van het raam, de binnentemperatuur en de buitentemperatuur. Wanneer het systeem concludeert dat warmteopbouw gewenst is en de netto warmtestroom door het raam naar binnen gericht is, zal het rolgordijn volledig geopend worden om zontoetreding te bevorderen. Als in hetzelfde geval de warmtestroom naar buiten gericht is, zal het systeem het rolgordijn volledig omlaag zetten om transmissie door het raam iets te verlagen. Wanneer geconcludeerd wordt dat warmteopbouw ongewenst is, dan zal het systeem het rolgordijn omlaag zetten wanneer de warmtestroom naar binnen gericht is, en het gordijn omhoog zetten wanneer er een warmtestroom naar buiten plaatsvindt.



Figuur 1 Systeemoverzicht. Toont de sensoren en invoer die door het regelalgoritme gebruikt worden. Ook wordt geïllustreerd hoe binnen 'glare safe mode' de hoogte van het rolgordijn bepaald wordt in relatie tot de positie van de zon.



Figuur 2 Illustratie van de wijze waarop binnen 'energy mode' bepaald wordt of warmteopbouw al dan niet gewenst is. Dit wordt bepaald middels het ongevoeligheidsgebied tussen de thermostaat temperaturen voor koeling en verwarming. In de bovenste helft van dit gebied (blauw) is warmteopbouw ongewenst. In de onderste helft (rood) is warmteopbouw wel gewenst.



Figuur 3 Beslisboom waarmee binnen het regelalgoritme de hoogte van het rolgordijn bepaald wordt.

4 Methode

4.1 Gevoeligheidsanalyse middels simulatiemodellen

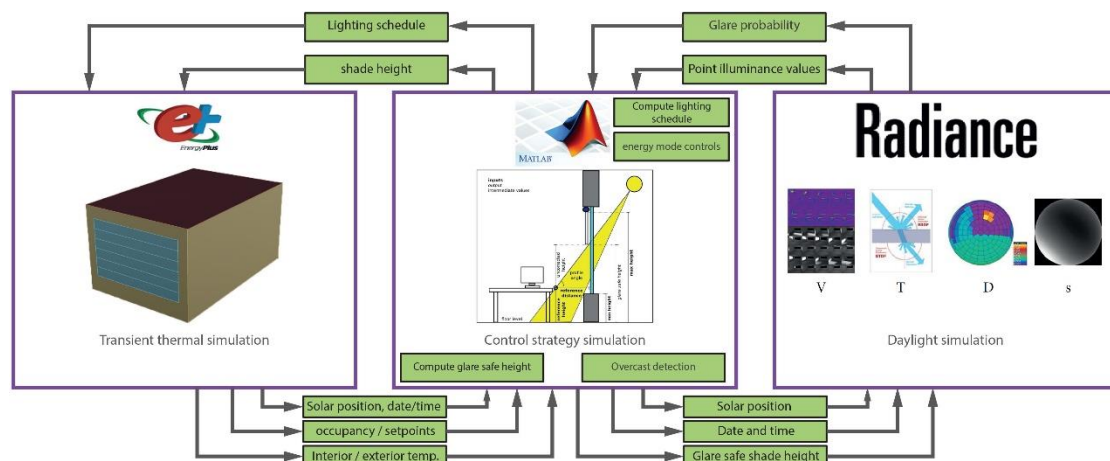
Om binnen een korte ontwikkelingsperiode tot grote verbeteringen in het regelsysteem te komen is het essentieel om korte studies te kunnen uitvoeren waarin snel inzicht verkregen kan worden in effecten van een regelactie op gebouwprestaties. Ook is het van belang om de prestaties en gevoeligheden van het uiteindelijk ontwikkelde systeem te kunnen beoordelen in uiteenlopende situaties en toepassingen. Een virtuele testomgeving die gebruik maakt van bestaande numerieke modellen biedt een aantrekkelijke mogelijkheid om deze doelen te bereiken.

Voor dit project is er een virtueel testbed (VTB) opgesteld waarmee de prestaties van het FourC regelalgoritme op het gebied van daglichttoetreding, verblinding en energieverbruik integraal beoordeeld kunnen worden. Door middel van een gevoeligheidsanalyse zal worden aangetoond hoe deze prestaties variëren voor verschillende geveloriëntaties, gebouwweigenschappen, regelparameters en posities van de gebruiker.

Alhoewel in dit rapport de nadruk ligt op de prestatiebeoordeling van de ontwikkelde FourC regelstrategie is het van belang om op te merken dat het VTB uitvoerig is ingezet tijdens het ontwikkelingsproces van de regelstrategie.

4.2 Het co-simulatiemodel

Het gebruik van bestaande simulatieomgevingen brengt enkele uitdagingen met zich mee. Het doel van dit project is om tot een systeem te komen dat prestaties op het gebied van daglicht en energieprestaties op elkaar afstemt. Deze prestaties volgen uit fysieke processen die plaatsvinden in verschillende domeinen maar elkaar wederzijds beïnvloeden. Binnen bestaande thermische simulatieomgevingen worden ten aanzien van dag- en kunstlicht veelal vereenvoudigende aannames gemaakt die het onmogelijk maken om de verbeterde prestaties van een innovatief zonweringsconcept betrouwbaar te kunnen beoordelen. In dit project wordt daarom gebruik gemaakt van een co-simulatie methode waarbij geavanceerde modellen voor thermische prestaties en daglichttoetreding aan elkaar worden gekoppeld.



Figuur 4 het co-simulatie model

Het co-simulatie model (Figuur 4) maakt gebruik van een koppeling tussen een viertal bestaande software omgevingen waarbij er tijdens simulatie informatie wordt uitgewisseld tussen de verschillende modellen. Voor simulatie van het thermische gedrag en de energieprestaties van het systeem wordt gebruik gemaakt van EnergyPlus, een programma voor dynamische gebouwsimulatie ontwikkeld namens het Department of Energy. Voor het beschrijven van het gedrag van daglicht maakt het co-simulatie model gebruik van Radiance. Radiance is een verzameling programma's waarmee door 'backward raytracing' nauwkeurige voorspellingen gemaakt kunnen worden ten aanzien van daglichttoetreding, verblinding en de hoeveelheid benodigde kunstverlichting. Voor het implementeren van het regelalgoritme is gebruikgemaakt van Matlab, een wiskundige programmeeromgeving. De informatie-uitwisseling binnen het co-simulatie model wordt mogelijk gemaakt door de software-omgeving BCVTB (in Figuur 4 gevisualiseerd middels pijlen).

In dit onderzoek wordt binnen Radiance gebruik gemaakt van de 'Three phase method'. Hierbij worden, voorafgaand aan de co-simulatie, de lichtreflecties, -transmissies en -brekingen éénmaal berekend voor een heel jaar. Dit in tegenstelling tot de traditionele methode waarbij dit voor iedere tijdstip moet gebeuren. Hierdoor kan de simulatietijd zeer sterk worden gereduceerd. Om dit mogelijk te maken wordt de hemelkoepel opgedeeld in een reeks segmenten en wordt voor ieder segment de bijdrage aan iedere invalrichting op de voorkant van het raam bepaald en omschreven in een matrix van coëfficiënten (de 'daylight matrix' D). Op vergelijkbare wijze wordt de contributie van iedere lichtinvalrichting op de buitenzijde van het raam middels een matrix met coëfficiënten gekoppeld aan alle lichtuitvalrichtingen aan de binnenzijde van het raam (de 'transmission matrix' T). Tot slot wordt in een laatste reeks coëfficiënten (de 'view matrix' V) de bijdrage omschreven aan de lichtsterkte op ieder van de meetpunten ten gevolge van ieder van de uitgaande lichtstralingen aan de binnenzijde van het raam. Op deze manier kan tijdens de co-simulatie volstaan worden met matrixvermenigvuldigingen waarbij een numerieke omschrijving van de hemelkoepel wordt vermenigvuldigd met de eerdergenoemde coëfficiëntmatrixen om de lichtsterkte op de meetpunten te bepalen.

4.3 Uitgangspunten en aannames

In deze studie is gebruik gemaakt het referentiekantoorgebouw dat door de International Energy Agency (IEA) is ontwikkeld. Het IEA heeft deze referentie ontwikkeld binnen zijn Solar Heating and Cooling program onder Task 56 - part C met als doel dat deze als uitgangspunt kan dienen voor het beoordelen, middels simulatiemodellen, van gevelsystemen waarin de toetreding van zonne-energie op innovatieve wijze beheerst of toegepast wordt (D'Antoni et al. 2018). Tabel 1 toont de belangrijkste uitgangspunten. Op enkele vlakken is in deze studie afgeweken van de omschrijving van het Task 56 – part C referentiekantoor. In tegenstelling tot Task 56 is voor de glaseigenschappen uitgegaan van glastypen C en D uit NEN-EN-14501 en de fysische eigenschappen van het raam en de gevel zijn gekozen conform het Nederlandse bouwbesluit en in Nederland gangbare bouwmethoden (CEN 2002). Ook zijn de afmetingen en het aantal ramen enigszins gewijzigd om de implementatie van het innovatieve zonweringsconcept te vergemakkelijken. Dergelijke wijzigingen worden in de Task 56 omschrijving aangeraden om nieuwe technieken te kunnen beoordelen in een specifieke lokale context.

In het thermische model is uitgegaan van een geïdealiseerd klimaatbeheersingssysteem. Dit wil zeggen dat er een systeem gemodelleerd is dat te allen tijde de benodigde warmte- of koudevraag kan leveren om de ruimtetemperatuur binnen de thermostaattemperaturen te houden. Verder wordt deze warmte zonder verliezen aan de ruimte en de omgeving geleverd en onttrokken. Een dergelijke benadering vergemakkelijkt de interpretatie van de resultaten

en stelt ons in staat om in algemene zin uitspraken te doen over de energieprestaties van het systeem.

Voor zowel het thermische als het daglicht model is gebruikt gemaakt van uurlijkse klimaatgegevens voor Amsterdam afkomstig uit de IWECC database van ASHRAE. Deze gegevens zijn gebaseerd op metingen van weerstations en zijn opgesteld voor thermische energie berekeningen (Huang 2012).

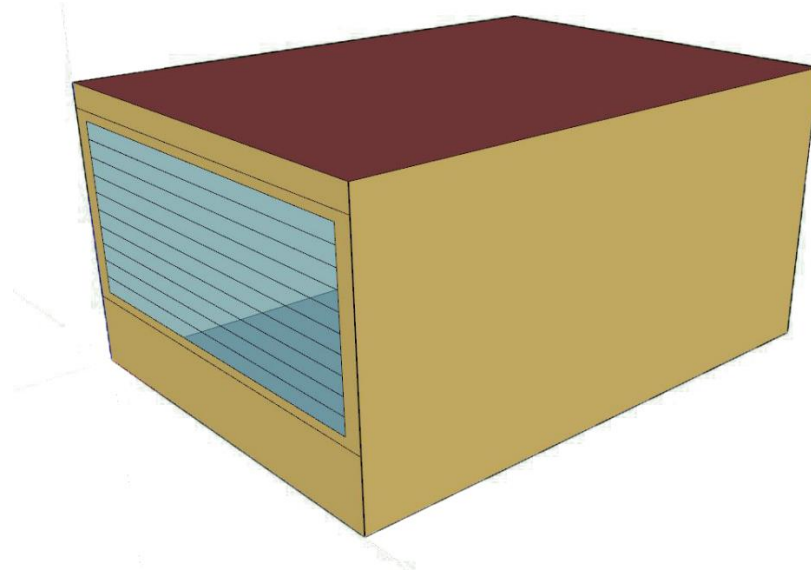
Voor het bepalen van de gedetailleerde optische en thermische eigenschappen van het raampakket en de zonwering, is gebruik gemaakt van de software Window 7, de 'International Glazing Database' (IGDB) en de 'Complex Glazing Database' (CGDB) (Mitchell 2017, 2018). De eigenschappen van het glas en het zonweringsproduct zijn gebaseerd op metingen. Uit deze meetgegevens worden de eigenschappen van het totale raampakket berekend met Window 7 zodat deze gebruikt kunnen worden in Radiance. Het rolgordijn dat gebruikt wordt in deze studie is het Silverscreen 205 EC01 van Verosol (ID 20012 in de CGDB).

| Uitgangspunten referentie gebouw (IEA task 56) | |
|--|---|
| Geometrie | Afmetingen ruimte: Breedte: 4.5m; Diepte: 6m; Opp.: 27 m ² ; Hoogte: 3m |
| | Fractie glasoppervlak: 65% Bruto, (55% Netto) |
| | Borstwering: 85cm |
| Raam | Type: Low-E (pos. 3) dubbelglas met argon Zonwerend (pos. 2) dubbelglas met argon |
| | U-waarde: (incl. conv. coeff.) 1.2 W/m ² K 1.1 W/m ² K |
| | Spectrale eigenschappen: [] = met rolgordijn ZTA: 0.62 [0.26] ZTA: 0.31 [0.12] LTA (T-vis): 0.82 [0.05] LTA (T-vis): 0.69 [0.04] |
| | Kozijn: Aluminium kozijn 10 cm, U: 1.5 W/m ² K |
| Plafond | Constructie: 350 mm beton, 120 mm dekvloer, 5 mm tapijt |
| | Reflectivity (radiance): 0.8 |
| Vloer | Constructie: 5 mm tapijt, 120 mm dekvloer, 350 mm concrete |
| | Reflectivity (radiance): 0.2 |
| Scheidingswanden | Constructie: Gipsplaat, 80 mm minerale wol, Gipsplaat |
| | Reflectivity (radiance): 0.5 |
| Gevel | Constructie: 120 mm lichtgewicht beton, 120 mm minerale wol, 100 mm lichtgewicht beton buitenspouwblad, |
| | Reflectivity (radiance): 0.5 |
| | Rc-value: (incl. convect. coeff.) Rc = 4.5 m ² K/W |
| Interne warmtelast | Aantal mensen: 3 (variabele bezetting). 120 W/pers. |
| | Bezetting: weekdays 8:00-19:00 (2860 uren/jaar) |
| | Verlichting: 10.9 W/m ² Dimming (lineair) en aanwezigheidssensor |
| | Apparatuur: 7.0 W/m ² |
| Installaties en overige | Thermostaat setpoints: Onderste setpoint: 21 (constant: geen nachtverlaging) Bovenste setpoint: 25 (constant: geen nachtverlaging) |
| | Ventilatie: Vraaggestuurd 40 m ³ /(h*pers.), n: 1 (gemiddelde tijdens bezetting) Voelbare warmte terugwinning, eff: 70% |
| | Infiltratie: ACH: 0.15 |

Tabel 1 Uitgangspunten voor het simulatiemodel. Gebaseerd op (D'Antoni et al. 2018) en het Nederlandse bouwbesluit.

4.4 Case studie

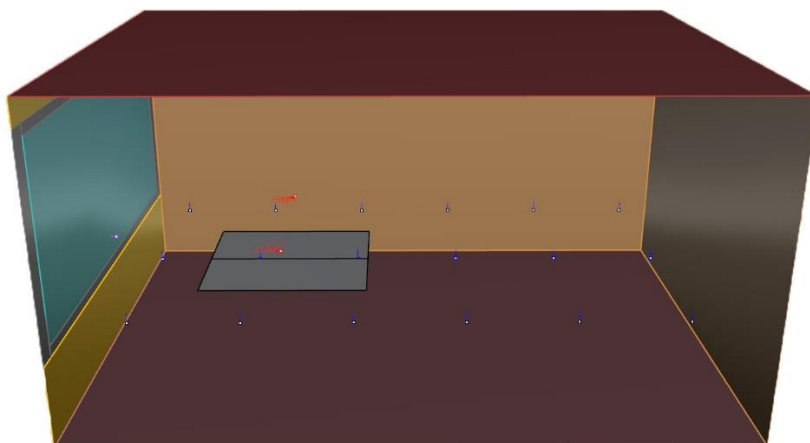
Figuur 5 toont een grafische weergave van de geometrie die gebruikt is in het thermische simulatiemodel. Te zien is dat het raam is opgedeeld in een tiental segmenten. Deze aanpak was noodzakelijk aangezien het in de huidige thermische simulatiesoftware het niet mogelijk is om een raam te modelleren waarvan de zonwering gedeeltelijk naar beneden staat. Daarom is binnen EnergyPlus het raam opgedeeld in segmenten die elk geheel open of geheel dicht staan.



Figuur 5 Grafische weergave van de geometrie in het thermische model (EnergyPlus)

Dezelfde opdeling van het raam in segmenten is ook voor de daglichtsimulaties in Radiance gebruikt. Tijdens de simulatie wordt voor ieder segment apart de daglichtcontributie bepaald. Door deze onderlinge contributies vervolgens bij elkaar op te tellen wordt de lichtsterkte op de meetpunten gevonden. Door de opdeling in raamsegmenten zal de zonweringshoogte in de simulatiemodellen afwijken van de werkelijke zonweringshoogte. Alhoewel deze afwijking te verkleinen is door het aantal raamsegmenten te vergroten neemt de simulatietijd hierdoor disproportioneel toe. Omdat het voor het beoordelen en verbeteren van het algoritme wenselijk is om meerdere simulaties uit te voeren is er naar gestreefd de benodigde simulatietijd zoveel mogelijk te beperken. De foutmarge die ontstaat door het opdelen van het raam is middels een gevoeligheidsanalyse onderzocht in zowel EnergyPlus als Radiance. De opdeling in tien segmenten is gekozen omdat de foutmarge die hieruit volgt in verhouding is met de foutmarge afkomstig van andere aannames en onzekerheden.

Voor het beoordelen van de daglichttoetreding is in Radiance gebruik gemaakt van achttien meetpunten verdeeld over drie bij zes rijen (blauw in Figuur 6). Het tweede en vierde punt van de middelste rijen bevinden zich op het middelpunt van, respectievelijk, de voorste en de achterste helften van de ruimte. Tijdens de simulatie wordt de lichtsterkte op deze twee punten gebruikt voor de schakeling van de verlichting. Het uitgangspunt is dat dag- en kunstlicht samen voor een lichtsterkte van minstens 500 lux moeten zorgen. Voor het beoordelen van verblinding zijn twee gebruikersposities gebruikt (rood in Figuur 6). Voor iedere positie zijn vijf kijkrichtingen beoordeeld, variërend van gericht op het raam tot gericht op de zijwand. Tot slot is binnen Radiance een naar buiten gericht meetpunt vlak voor het raam opgenomen dat de luxsensor in het werkelijke systeem vertegenwoordigt (paars in Figuur 6).



Figuur 6 Grafische weergave van de experimentele opstelling in het daglicht model (Radiance).

Blauw: een grid van 18 horizontale lichtsterkte sensor punten voor het beoordelen van de daglichttoetreding.

Rood: Twee 'waaiers' met verticale lichtsterktesensoren voor het beoordelen van verblinding in verschillende kijkrichtingen.

Paars: Eén verticale lichtsterktesensor bij het raam voor het aansturen van de zonwering en de verlichting.

4.5 Prestatie-indicatoren

Voor het beoordelen van de prestaties van het FourC systeem zijn een reeks prestatie indicatoren geselecteerd. Voor het kwantificeren van de mate van daglichttoetreding zal in deze studie gebruik gemaakt worden van 'daylight autonomy' (DA) en 'spatial daylight autonomy' (sDA). Deze indicatoren zijn gekozen omdat zij recht doen aan de tijdsafhankelijke prestaties van het FourC systeem alsook aan de ruimtelijke variaties hierin. Daylight autonomy is gedefinieerd als het percentage van de bezette tijd dat, ten gevolge van daglichttoetreding, op een meetpunt minstens een bepaalde lichtsterkte wordt bereikt. Als grenswaarden worden veelal 300 of 500 lux gebruikt. Daylight autonomy kan worden geïnterpreteerd als het percentage van de tijd dat een meetpunt 'voldoende' daglicht ontvangt. Voor deze indicator wordt veelal de afkorting DA300 gebruikt waar 300 staat voor het aantal lux dat als grenswaarde is gesteld. 'Spatial daylight autonomy' stelt ons in staat om om de daglichttoetreding voor een ruimte als geheel in één getal uit te drukken. Het wordt gedefinieerd als het percentage van het vloeroppervlak met een daylight autonomy hoger dan vijftig procent. 'Spatial daylight autonomy' kan geïnterpreteerd worden als de fractie van het vloeroppervlak dat het merendeel van de tijd voldoende daglicht ontvangt. (Reinhart, Mardaljevic, and Rogers 2006) Voor deze indicator wordt veelal de afkorting sDA 300/50 gebruikt waar 300 staat voor de grenswaarde in lux en 50 voor het vereiste overschrijdingspercentage van de gebruikstijd.

In dit rapport wordt voor het beoordelen van het risico op verblinding gebruik gemaakt van twee indicatoren: 'daylight glare probability' (DGP) en 'daylight glare probability simplified' (DGPs). Alhoewel nog veel onbekend is op het gebied van verblinding is zeker dat verblinding samenhangt met hoge luminantieverschillen in het beeldveld, met de totale lichtsterkte op het oog, alsook met de positie van verblindende luminantiebronnen in relatie tot het focusgebied van de oogtaak. Door het gebruik van een empirische formule kan aan de hand van echte (en gesimuleerde) high definition range afbeeldingen, het risico op verblinding beoordeeld worden. Dit wordt dan uitgedrukt in de Daylight glare probability (DGP). (Wienold 2009) In gevallen waarin de zon niet in het blikveld van de gebruiker komt kan echter ook volstaan worden met een vereenvoudigde methode waar gebruik wordt gemaakt van een empirische

formule die het risico op verblinding uitsluitend als een functie van de totale verticale lichtsterkte op het oog uitdrukt. Deze indicator wordt 'daylight glare probability simplified' genoemd. (Wienold 2009) In enkele paragrafen in dit rapport wordt voor het beoordelen van verblinding verder gebruik gemaakt van overschrijdingsuren, of het percentage van de gebruikstijd dat bepaalde grenswaarden overschreden wordt. Hierbij is gebruik gemaakt van een 2860 kantooruren per jaar voor de totale gebruikstijd.

Energieprestaties worden in deze studie beoordeeld aan de hand van de energievraag voor verlichting, koeling en verwarming op ruimteniveau in combinatie met een raming van het primaire energieverbruik uitgaande van enkele aannames ten aanzien van systeemrendementen. De energievraag op ruimteniveau geeft inzicht in het besparingspotentieel in algemene zin. Deze kan gebruikt worden om de werkelijke energie- en kostenbesparingen in te schatten wanneer het FourC systeem toegepast wordt in combinatie met een specifiek klimaatbeheersingsconcept. Om ook inzicht te krijgen in het maatschappelijke besparingspotentieel is tevens gekeken naar het primaire energieverbruik. Hiervoor is gebruik gemaakt van de volgende referentiegetallen. (Beck et al. 2010; Aa van der 2012)

$$E_{Prim} = \frac{E_{Light}}{\eta_e} + \frac{E_{cool}}{\eta_e \eta_c COP} + \frac{E_{heat}}{\eta_h} \quad \text{met: } \eta_e = 0.39, \quad \eta_c = 0.7, \quad COP = 3, \quad \eta_h = 0.95$$

5 Resultaten

5.1 Integrale prestatiebeoordeling van de FourC regelstrategie

In deze paragraaf zullen de resultaten van een gevoeligheidsanalyse naar de prestaties van het FourC systeem gepresenteerd worden. De prestaties van FourC zijn gesimuleerd voor alle combinaties van acht geveloriëntaties (N, NW, W, ZW, Z, ZO, O, NO) en twee raamvarianten. Ter referentie zijn dezelfde varianten ook gesimuleerd voor een situatie zonder zonwering en een situatie met hetzelfde zonweringsproduct maar met een traditionele geautomatiseerde regeling. In deze regeling wordt de zonwering aangestuurd gebruik makende van een verticale pyranometer op de gevel. Wanneer tijdens kantooruren een grenswaarde van 200 W/m² globale verticale straling op de gevel wordt overschreden wordt de zonwering volledig gesloten. Onder deze waarde wordt de zonwering volledig geopend. Buiten kantooruren is de zonwering altijd gesloten. Het scenario zonder zonwering geeft vooral inzicht in de karakteristieken van het referentiegebouw. Het geeft inzicht in de maximaal haalbare prestaties op het gebied van daglichttoetreding en de energievraag voor verlichting en verwarming. Dit scenario zal in de praktijk, bij zuidelijke geveloriëntaties, echter niet veel voorkomen. In dit soort situaties zullen gebruikers veelal een vorm van handmatig bediende lichtwering toepassen. Het scenario zonder zonwering is vooral geschikt om de prestaties van het FourC systeem te duiden en te identificeren waar ruimte is voor verdere verbetering.

De raamvarianten die in deze studie geanalyseerd worden zijn HR++ en zonwerend HR++ (zie Tabel 1). Voor het referentiekantoor vertegenwoordigen deze twee raamvarianten wat betreft energieprestaties twee gebouwen met verschillende karakteristieken. In de variant met HR++ glas is de externe warmtelast maatgevend voor de koellast en in de zonwerende variant is de interne warmtelast het bepalendst. Middels deze twee glastypen kan enig inzicht verkregen worden in de uiterste prestaties van een breed spectrum aan gevelmogelijkheden. De ervaring van de projectpartners is echter dat de tweede variant, met zonwerend glas, verreweg het meeste voorkomt bij nieuwbouw kantoren in Nederland.

5.1.1 Energieverbruik

Figuur 7 toont de energievraag in relatie tot de geveloriëntatie bij een HR++ raam voor de drie zonweringstrategieën (geen, traditioneel geautomatiseerd en FourC). Te zien is dat, voor een oriëntatie op het zuiden er bij het FourC systeem meer energie verbruikt wordt voor koeling dan bij de traditionele regelstrategie. Dit komt omdat in het FourC systeem de zonwering in de zomermaanden relatief hoog staat terwijl de zonwering in een traditioneel systeem dan veelal geheel gesloten is. Bij een gebouw waar de externe warmtelast maatgevend is leidt dit tot een hogere koudevraag. Bij noordelijke oriëntaties zien we bij beide regelstrategieën vergelijkbare prestaties. In de grafiek is verder te zien dat de hoeveelheid energie die nodig is voor verlichting hoger wordt wanneer er zonwering wordt toegepast. Verder is zichtbaar dat er in de variant zonder zonwering minder energie voor verlichting verbruikt wordt naarmate het gebouw meer naar het zuiden gericht staat. In de varianten met zonwering is een tegengesteld patroon te zien waarbij het energieverbruik voor verlichting toeneemt bij zuidelijke oriëntaties doordat de zonwering op het zuiden vaker dicht zal staan.

Opvallend is dat, in vergelijking met de traditionele regelstrategie, de energievraag voor verlichting bij het FourC systeem minder hoog is en dat afhankelijkheid van oriëntatie meer neigt naar een situatie zonder zonwering. Dit komt omdat in het FourC systeem de zonwering zelden volledig gesloten wordt, waardoor er meer daglicht de ruimte binnentreedt. Ook de energievraag voor verwarming is lager bij het FourC systeem dan bij een traditioneel systeem. Dit kan verklaard worden door de grotere mate van zontoetreding tijdens *Comfort mode* maar ook door het gedrag van het systeem wanneer het in *Energy mode* draait.

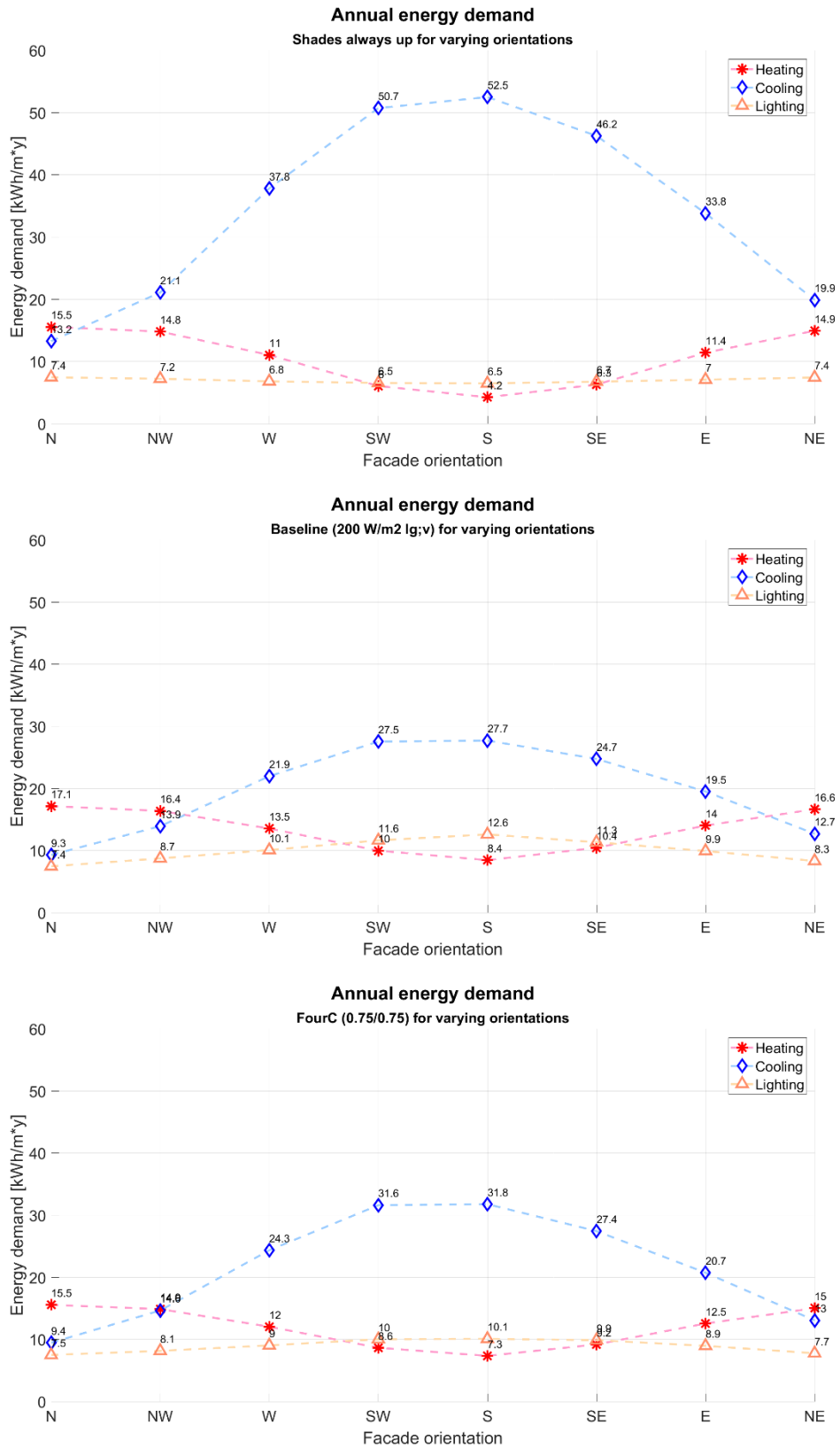
Als we naar het primaire energieverbruik kijken (Figuur 9) dan zien we dat er bij het FourC systeem zo'n 2.3% minder primaire energie verbruikt wordt dan bij het traditionele zonweringsconcept en dat er 3.7% bespaard wordt op het primaire energieverbruik voor koeling, verlichting en verwarming. Uit Figuur 9 is verder op te maken dat, alhoewel de toepassing van geautomatiseerde zonwering leidt tot een besparing op het primaire verbruik voor koeling, deze besparing gedeeltelijk te niet worden gedaan door een toename in het energieverbruik voor verlichting en verwarming. De verbeterde prestaties van het FourC systeem, in vergelijking tot de referentiestrategie, komen dan ook vooral voort uit een gunstigere verhouding tussen deze posten.

Figuur 8 toont de energievraag voor een gebouw met zonwerende beglazing. De energievraag voor koeling wordt in deze variant vooral bepaald door de interne warmtelast. Verder is koeling in deze variant minder bepalend voor het totale primaire energieverbruik en is de invloed van verlichting relatief groot (Figuur 10). In tegenstelling tot de situatie bij heldere beglazing wordt bij zonwerende beglazing ook bespaard op het energieverbruik op koeling. Deze besparing op koeling is een gevolg van de lagere warmteopbouw door verlichting. Verder zijn bij zonwerende beglazing vergelijkbare besparingen te zien op de energievraag voor verwarming en verlichting als bij heldere beglazing. Figuur 10 laat zien dat er voor het FourC systeem in combinatie met zonwerende beglazing tot 9.4% minder primaire energie gebruikt wordt dan bij een conventionele geautomatiseerde regeling. Als alleen naar koeling, verwarming en verlichting gekeken wordt is tot 16.0% besparing op het primaire energieverbruik mogelijk.

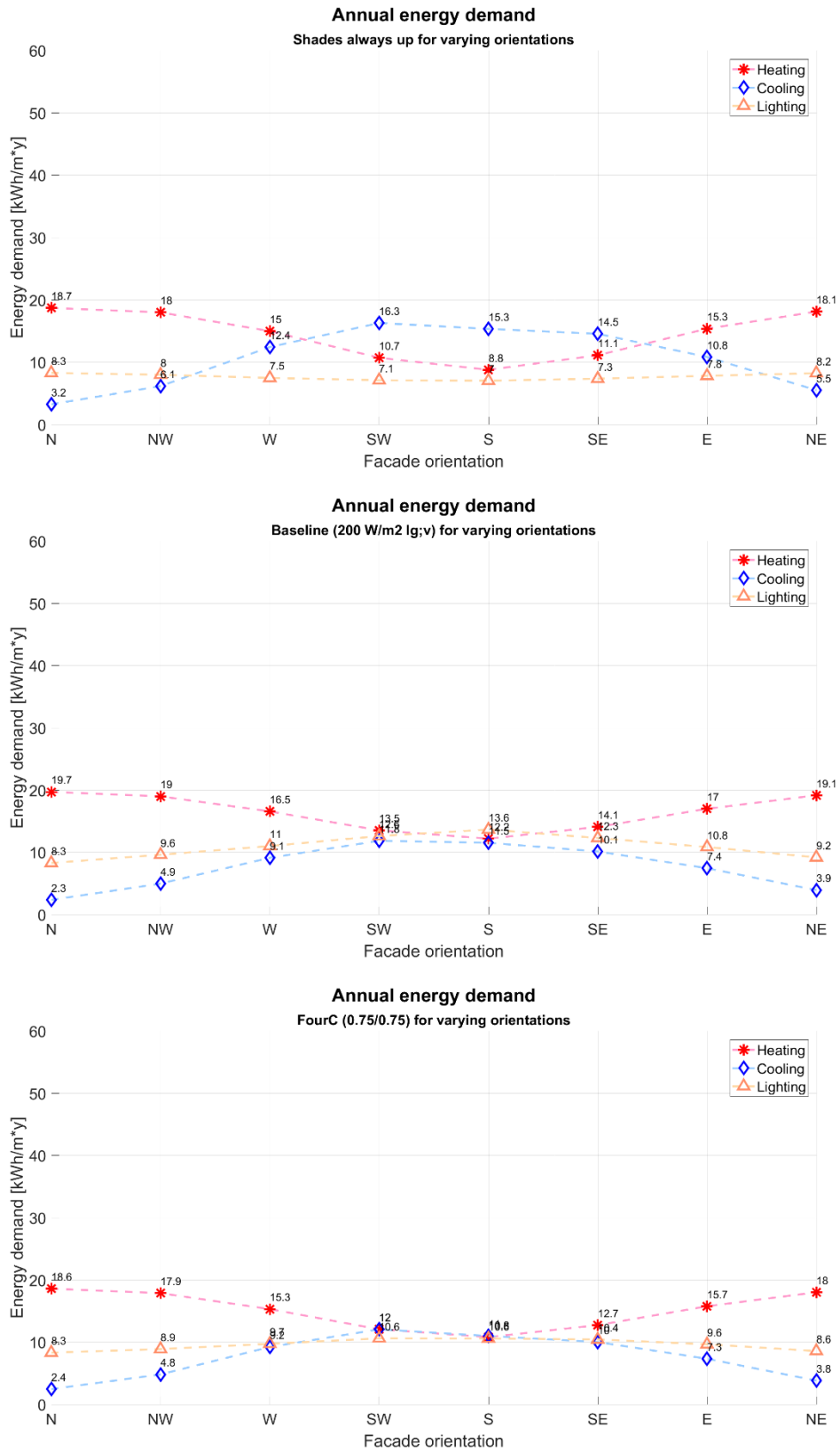
De besparingen op energieverbruik die in deze paragraaf genoemd werden hangen in sterke mate af van de aannamen die in deze studie gemaakt zijn. Beide varianten in deze studie gaan uit van een bouwfysische en installatietechnische kwaliteit die kenmerkend is voor nieuwbouw. Zo zijn zal in de bestaande bouw de gebouwschil vaak minder isolerend zijn en zal warmteterugwinning niet altijd aanwezig zijn. In deze gevallen zal het energieverbruik voor verwarming dominant worden in het totale verbruik. Het is te verwachten dat ook in deze gevallen het FourC systeem tot betere energieprestaties zal leiden dan een conventionele

regeling aangezien er bij het FourC systeem sprake is van een grotere mate van zontoetreding. Ook bij nieuwbouw zijn situaties mogelijk waar de prestaties wat betreft het primaire energieverbruik zouden afwijken van wat er hier gepresenteerd is. Wanneer er gebruik wordt gemaakt van duurzame technieken voor verwarming en koeling, zoals bijvoorbeeld warmtekoudeopslag, zal verlichting een relatief grotere invloed hebben op het primaire energieverbruik. Daarom is te verwachten dat het FourC systeem ook in deze gevallen beter presteert dan een conventionele regeling. Er zijn echter ook situaties mogelijk waar het FourC systeem niet zou leiden tot een besparing op het energieverbruik. In een gebouw waar geen gebruik wordt gemaakt van daglichtafhankelijke schakeling van de verlichting, of waar uitsluitend zeer efficiënte ledverlichting gebruikt wordt, in combinatie met een lage energievraag voor verwarming en een inefficiënte koeling, is het mogelijk dat er geen verbetering optreedt.

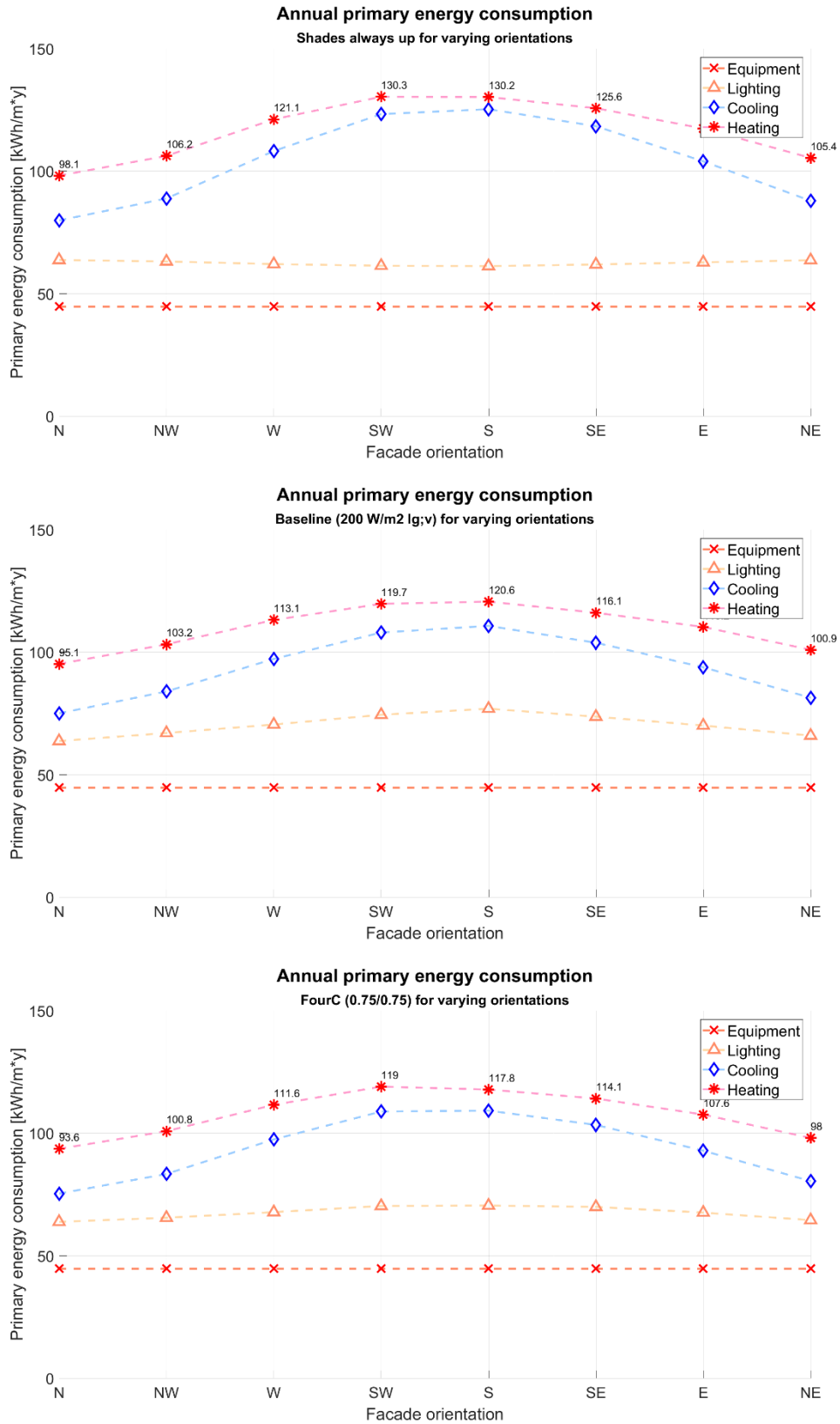
De verbeterde energieprestaties die in dit rapport gepresenteerd worden zijn niet direct te vertalen naar verbeteringen in EPC-scores. De dynamisch variërende prestaties van het FourC systeem kunnen niet gemakkelijk opgenomen worden in de huidige EPC bepalingsmethodiek (NEN 7120) waarin voor het doorrekenen van het effect van zonweringsfactoren gebruik gemaakt wordt van referentiegetallen die constant zijn over het jaar heen. De komende jaren zal de bepalingmethode voor de EPC gewijzigd worden (NTA 8800) en zullen er strengere eisen opgesteld worden ten aanzien van de energieprestaties van gebouwen (BENG). De nieuwe bepalingmethode zal iets meer ruimte bieden voor het kwalificeren van innovatieve zonweringsstrategieën doordat gebruik gemaakt kan worden van een variërende gebruiksduur op maandniveau. Aangezien echter nog veel onduidelijk is over de precieze invulling van de nieuwe methode is voor deze studie geen poging gedaan om de eventuele EPC verbetering te kwantificeren. Ook is het de vraag of het mogelijk is om de energieprestaties van het FourC systeem op een betrouwbare manier te kwantificeren middels een quasi-dynamische berekening, gebaseerd op een energiebalans op maandbasis. De methode voor de bepaling van de energieprestaties die in dit rapport gepresenteerd is kan wel als indicatief worden beschouwd voor de beoordeling van energieprestaties binnen de BREEAM-NL en LEED beoordelingsraamwerken voor de duurzaamheid van gebouwen. Binnen LEED wordt in verreweg de meeste gevallen gebruik gemaakt van dynamische gebouwssimulatie software. Binnen BREEAM-NL wordt deze aanpak minder toegepast maar de methodiek staat dit wel toe.



Figuur 7 Jaarlijkse energievraag in relatie tot geveloriëntatie. Regelstrategie in combinatie met helder HR++ glas.
 Boven: geen zonwering. Midden: referentie regelstrategie (volledig dicht bij I_{g,v} > 200 W/m²). Onder: FourC.

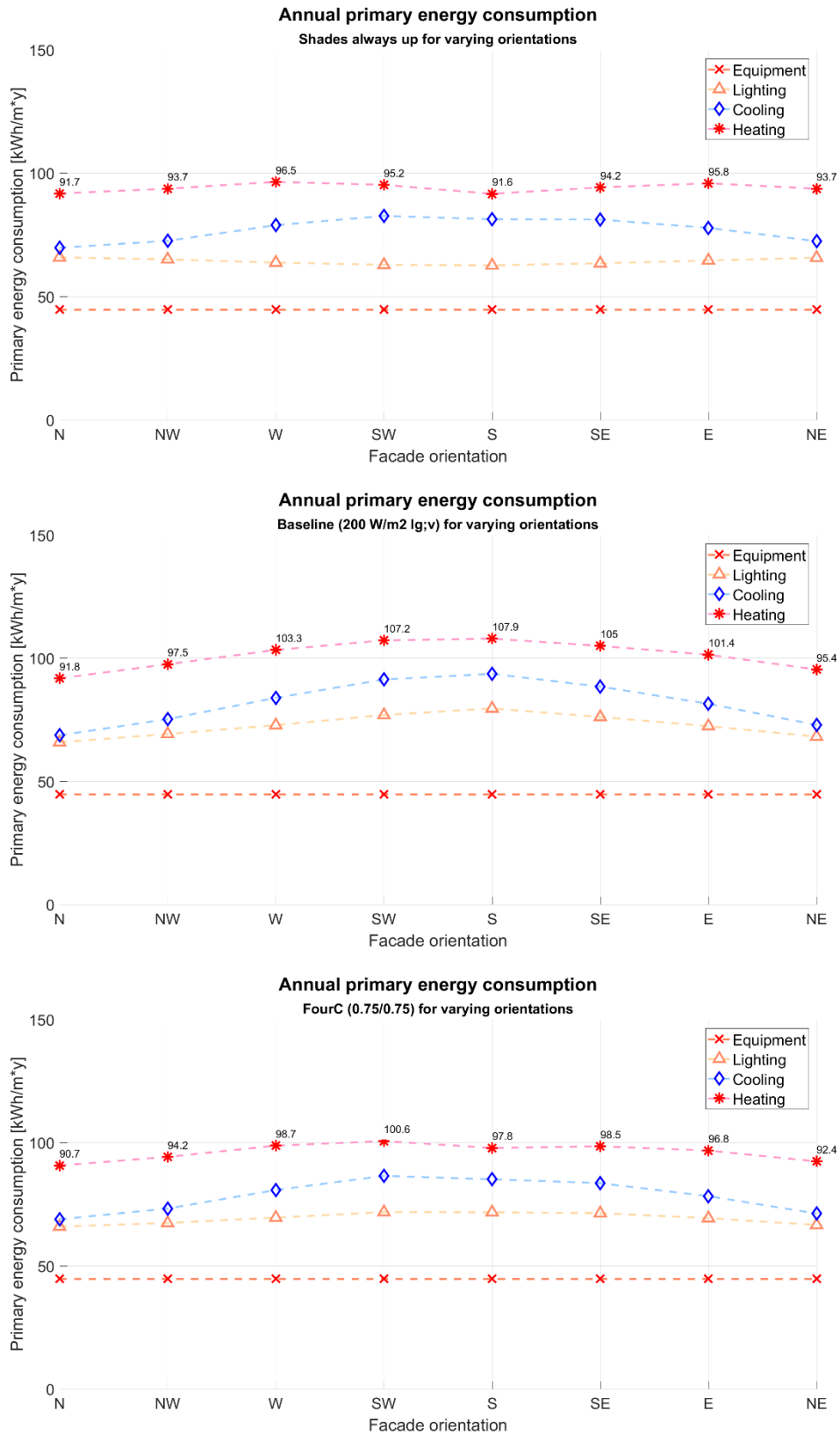


Figuur 8 Jaarlijkse energievraag in relatie tot geveloriëntatie. Regelstrategie in combinatie met zonwerend HR++ glas.
 Boven: geen zonwering. Midden: referentie regelstrategie (volledig dicht bij $I_{g,v} > 200 \text{ W/m}^2$.) Onder: FourC.



Figuur 9 Jaarlijkse primaire energieverbruik in relatie tot geveloriëntatie. Regelstrategie in combinatie met helder HR++ glas.

Boven: geen zonwering. Midden: referentie regelstrategie (volledig dicht bij $I_{g,v} > 200 \text{ W/m}^2$). Onder: FourC.



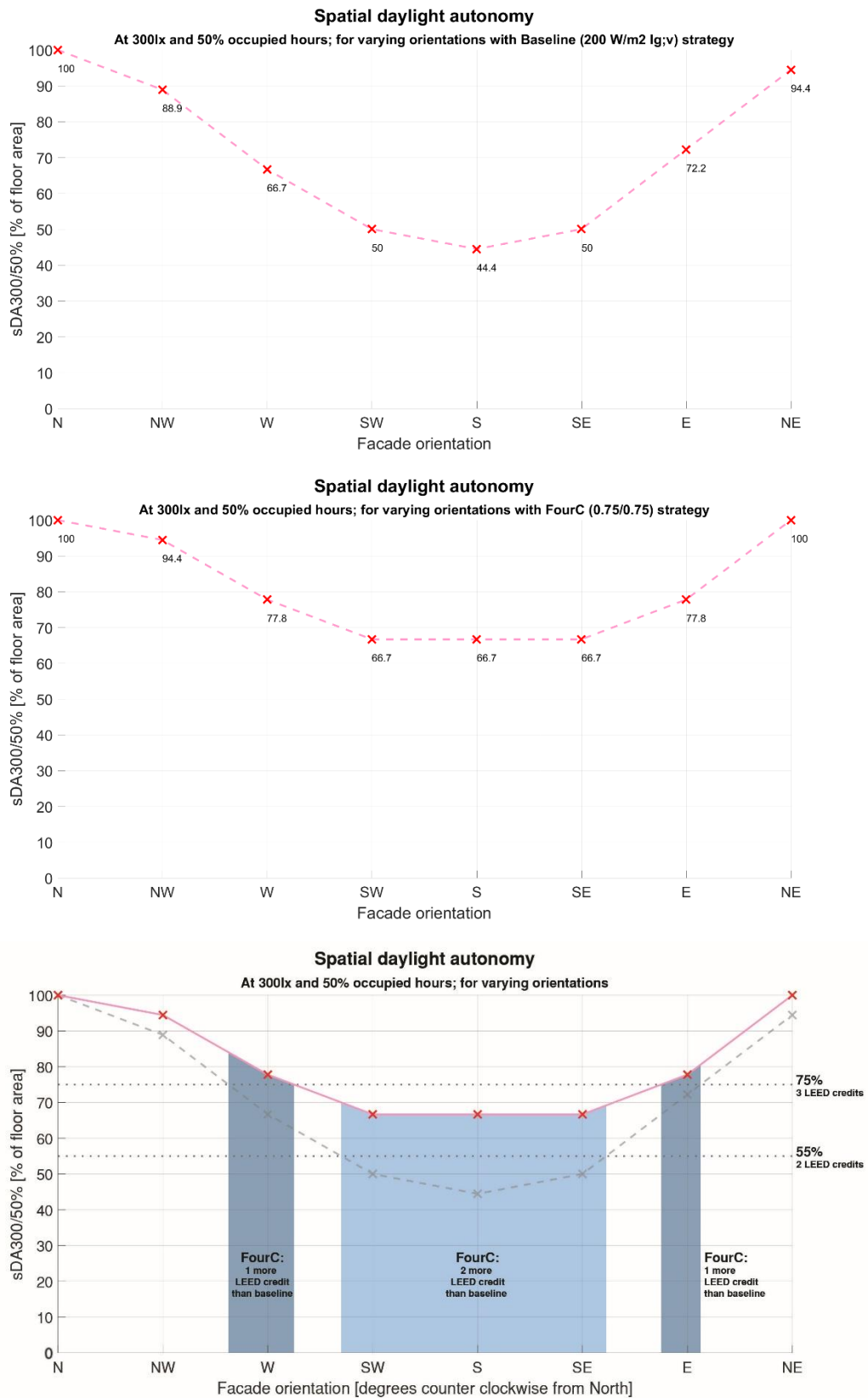
Figuur 10 Jaarlijkse primaire energieverbruik in relatie tot geveloriëntatie. Regelstrategie in combinatie met zonwerend HR++ glas.
 Boven: geen zonwering. Midden: referentie regelstrategie (volledig dicht bij I_{g,v} > 200 W/m²). Onder: FourC.

5.1.2 Daglichttoetreding en uitzicht

Figuur 11 toont voor een situatie met heldere HR++ het percentage van het vloeroppervlak met voldoende daglichttoetreding (spatial daylight autonomy 300lx/50%) in relatie tot de oriëntatie van de gevel. Te zien is dat er bij het FourC systeem sprake is van een grotere mate van daglichttoetreding en dat de mate van deze prestatieverbetering afhankelijk is van de oriëntatie van de gevel. De grootste toename in daglichttoetreding is te zien bij een gevel op het zuiden, waar het FourC systeem 22% beter presteert dan een conventionele regeling. De prestatieverbetering neemt af bij noordelijke geveloriëntaties (5-6% op het Noordwesten en Noordoosten). Bij een gebouw met zonwerende beglazing is de prestatieverbetering nog groter: 28% op het Zuiden en 6% op het Noordwesten. Dit laat zien dat de verbetering in daglichttoetreding ten gevolge van het FourC algoritme toeneemt naarmate de lichttransmissie van glaspakket en zonwering lager wordt. Het is dan ook waarschijnlijk dat het FourC algoritme zich nog meer zal onderscheiden wanneer er een volledig verduisterend doek wordt toegepast, en dat de verbetering in daglichttoetreding iets zal afnemen wanneer er een transparanter doek wordt toegepast. Opvallend is dat, alhoewel de daglichtprestaties over het algemeen variëren voor verschillende geveloriëntaties, deze prestaties bij het FourC constant lijken te zijn voor geveloriëntaties rondom het Zuiden. Dit komt doordat de daglichttoetreding bij het FourC systeem een vrij sterke daling vertoont halverwege de ruimte, in combinatie met het discrete aantal meetpunten en de wijze waarop spatial Daylight Autonomy gedefinieerd is (zie Figuur 17).

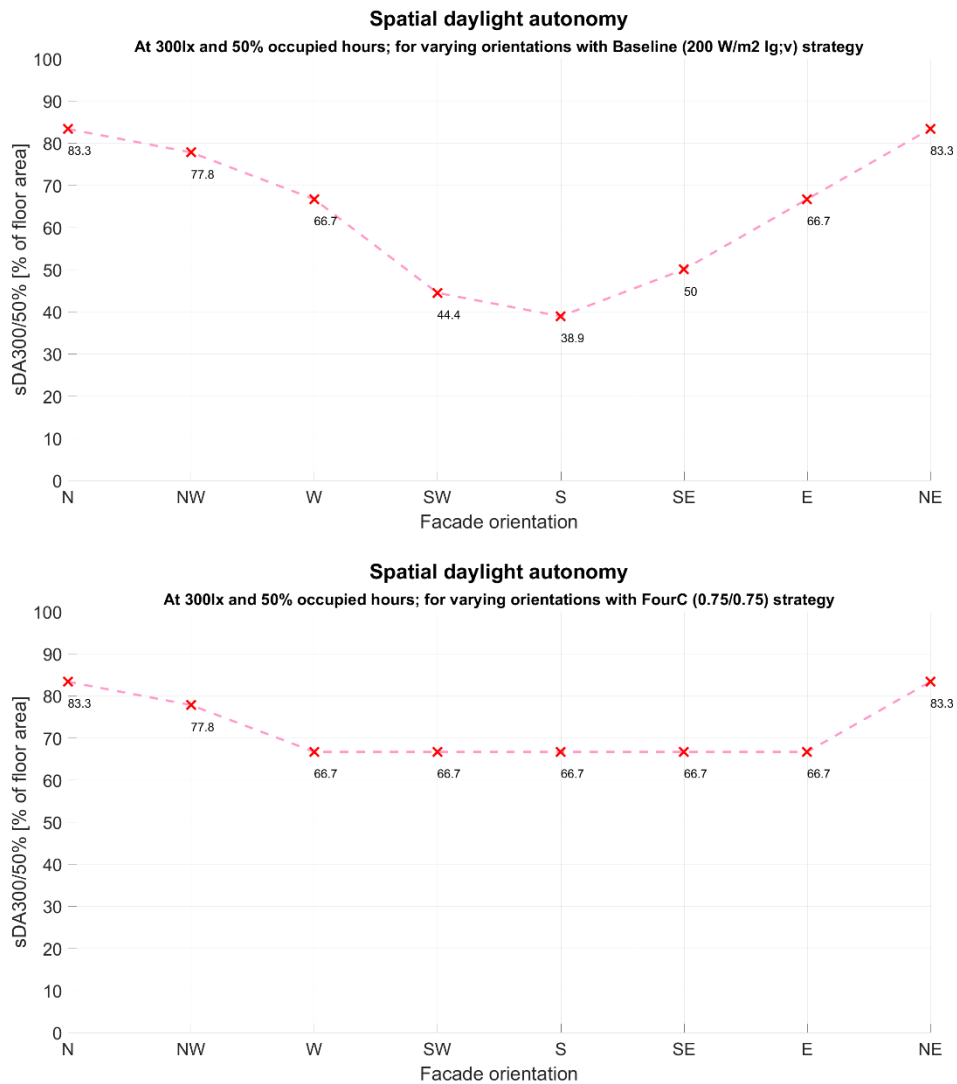
Figuur 13 en Figuur 14 tonen het percentage van de kantooruren dat de zonwering zich boven de 1.2 meter bevindt. Te zien is dat de zonwering tot 14% (400 uur) meer tijd doorbrengt boven ooghoogte niveau. Ook hier is weer te zien dat de prestatieverbeteringen het grootst zijn voor een op het Zuiden gerichte gevel doordat een conventioneel systeem bij deze geveloriëntatie het vaak volledig gesloten zal zijn.

De in Nederland meest gangbare normen en duurzaamheidslabels bieden op het gebied van daglicht en uitzicht niet voldoende mogelijkheden om de prestaties van het FourC systeem te waarderen. Het Nederlandse bouwbesluit en BREEAM-NL gebruiken statische methodes die niet in staat zijn om de invloed van het dynamische gedrag van zonwering en veranderlijke weersomstandigheden in de beoordeling op te nemen. Het LEED beoordelingsraamwerk biedt deze mogelijkheid wel en gebruikt hiervoor dezelfde indicator- en simulatiemethode die in deze studie gebruikt wordt. Figuur 11 toont, voor de bestudeerde ruimte, het verschil in het aantal LEED daglichtpunten die met het FourC systeem behaald zouden kunnen worden in vergelijking tot het aantal punten bij de conventionele regeling. Vergelijkbare methoden worden momenteel in een Europese norm betreft daglicht in gebouwen opgenomen. Het is dan ook waarschijnlijk dat, in de nabije toekomst, de verbeterde prestaties van het FourC systeem ook in andere beoordelingsraamwerken gewaardeerd zullen worden (CEN/TC 2014).



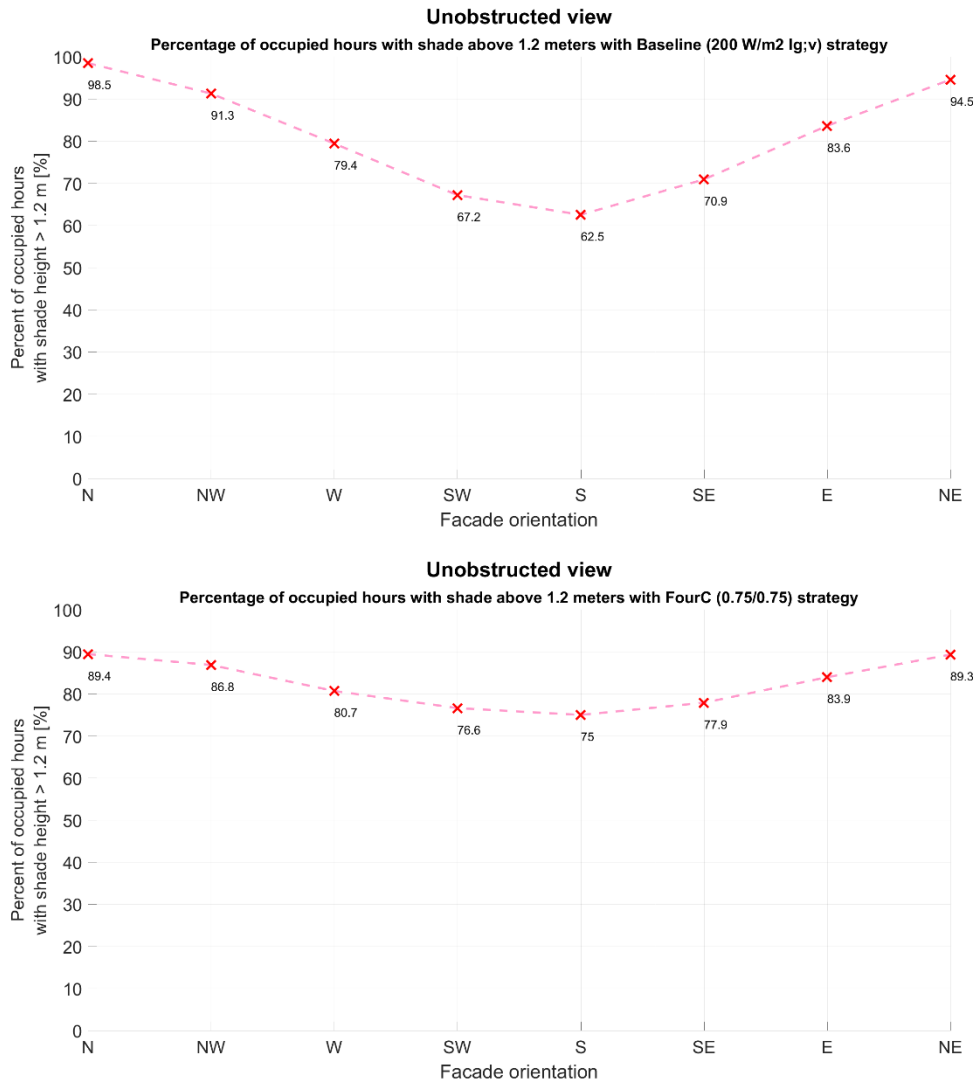
Figuur 11 Percentage vloer oppervlak met voldoende daglichttoetreding (spatial daylight autonomy 300lx/50%) in relatie tot geveloriëntatie met helder HR++ glas.

Boven: referentie regelstrategie (volledig dicht bij $I_{g,v} > 200 \text{ W/m}^2$). Midden: FourC. Onder: Verbetering ten aanzien van het referentie scenario, uitgedrukt in het aantal extra behaalde LEED daglicht credits. (USGBC 2018)

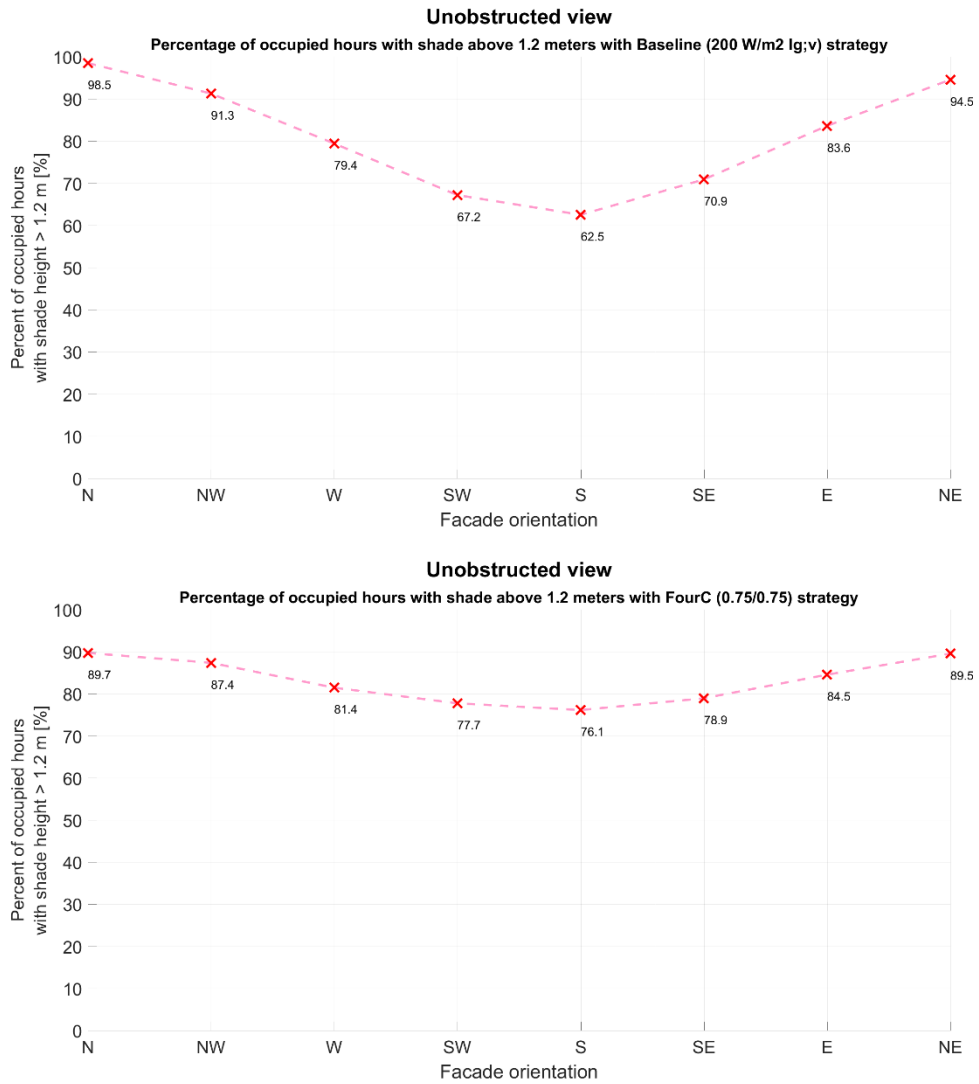


Figuur 12 Percentage vloer oppervlak met voldoende daglichttoetreding (spatial daylight autonomy 300lx/50%) in relatie tot geveloriëntatie met zonwerend HR++ glas.

Boven: geen zonwering. Midden: referentie regelstrategie (volledig dicht bij $I_{g,v} > 200 \text{ W/m}^2$) Onder: FourC



Figuur 13 Percentage van de jaarlijkse aantal kantoor uren met onbelemmerd uitzicht (zonweringshoogte ≥ 1.2 meter) in relatie tot oriëntatie met helder HR++ glas.
 Boven: geen zonwering. Midden: referentie regelstrategie (volledig dicht bij $I_{g,v} > 200 \text{ W/m}^2$). Onder: FourC.



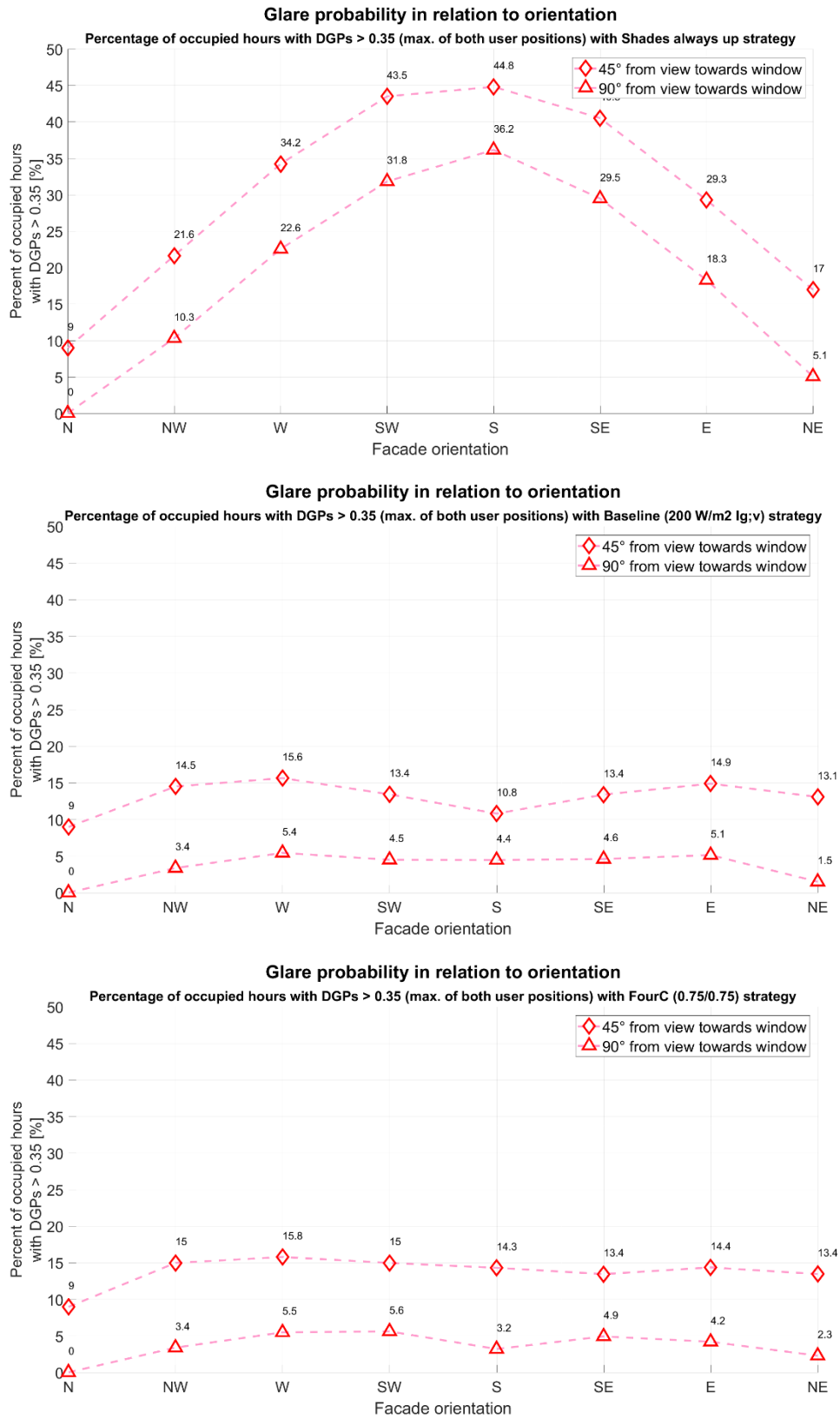
Figuur 14 Percentage van de jaarlijkse aantal kantoor uren met onbelemmerd uitzicht (zonweringshoogte ≥ 1.2 meter) in relatie tot oriëntatie met zonwerend HR++ glas.
 Boven: geen zonwering. Midden: referentie regelstrategie (volledig dicht bij $I_{g,v} > 200 \text{ W/m}^2$). Onder: FourC.

5.1.4 Verblinding

Figuur 15 en Figuur 16 tonen voor de twee raamvarianten het percentage van de jaarlijkse kantooruren waarop er minstens kans is op merkbare verblinding. De bovenste grafieken tonen de situatie zonder zonwering, de middelste grafieken die bij een conventioneel geregelde zonwering en de onderste die bij het FourC systeem. Deze grafieken tonen voor iedere geveloriëntatie de maximale gebruikstijd waarbij er kans op verblinding voor een tweetal gebruikersposities (Figuur 6) en een tweetal blikrichtingen voor ieder van deze posities. Voor beide gebruikers is een blikrichting naar een zijwand geanalyseerd en één blikrichting die vijfenveertig graden naar het raam toe is gedraaid. Doordat de gebruikers, afhankelijk van de geveloriëntatie, steeds op een andere wijze worden blootgesteld aan de lage ochtend- of avondzon, is in deze studie het maximum genomen van de over het jaar optredende aantal uren met verblinding voor de twee gebruikersposities. Ieder van de twee gestippelde lijnen tonen dus het percentage van de tijd dat er ten minste merkbare verblinding optreedt voor een bepaalde blikrichting, waarbij dit percentage een maximum is van de twee gebruikersposities.

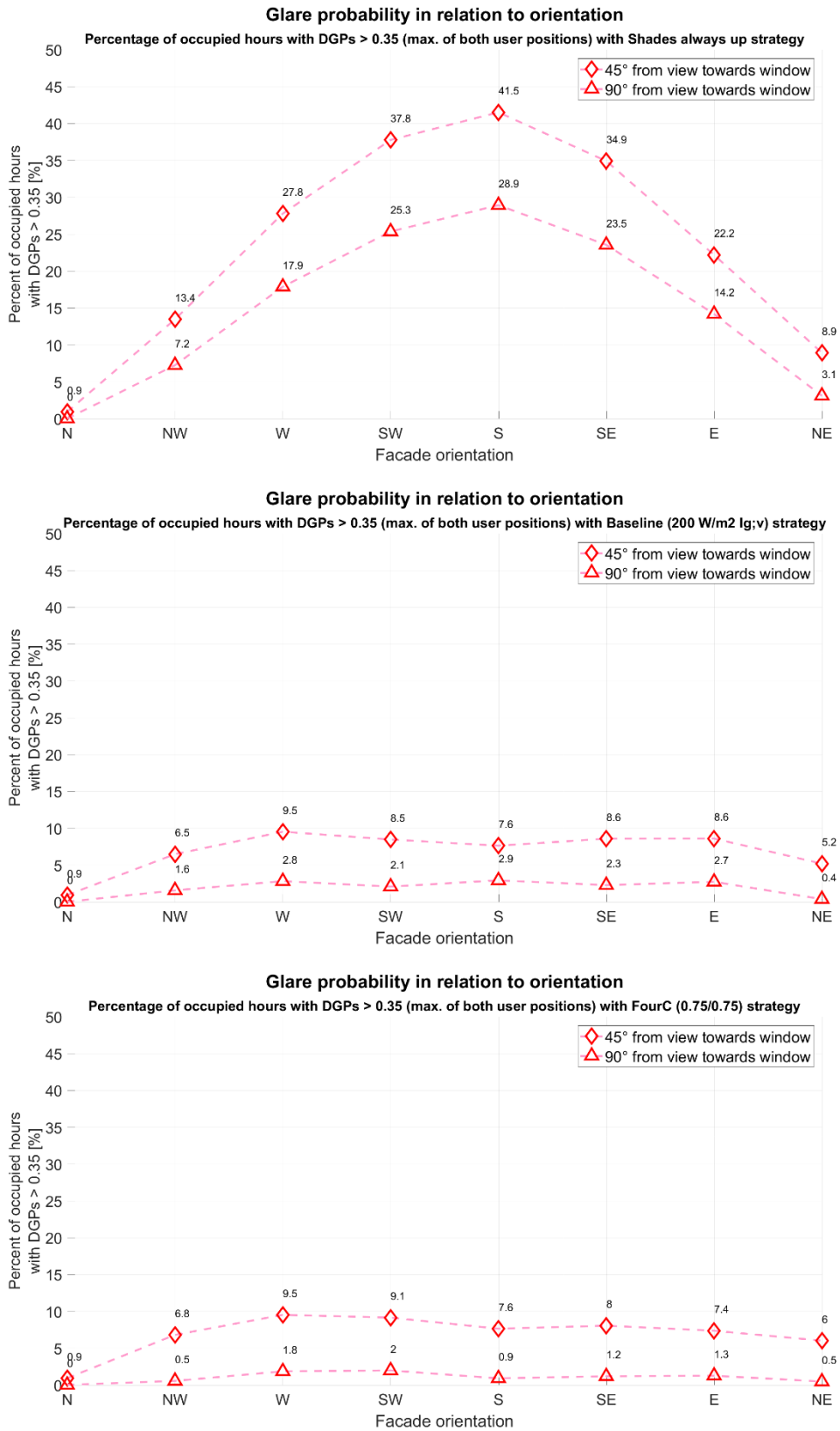
In de grafieken is te zien dat de kans op verblinding zeer sterk afneemt bij de toepassing van geautomatiseerde zonwering. Deze kans neemt, voor de meest problematische situatie zonder zonwering, af met zo'n 34%. De prestaties van het FourC systeem en het conventionele systeem lopen niet erg ver uiteen. In het algemeen lijkt het FourC systeem iets beter te presteren bij een blikrichting naar een zijwand. Het conventionele systeem lijkt echter veelal iets beter te presteren bij een blikrichting naar raam. Opvallend is dat deze prestatieverschillen niet een volledig eenduidig patroon volgen en dat de situatie varieert afhankelijk van blikrichting, geveloriëntatie en glastypen. Geconcludeerd kan worden dat er enkele situaties zijn waar het FourC systeem ten aanzien van verblinding dusdanig goed presteert, dat het wellicht raadzaam kan zijn om het systeem minder streng af te stellen om zo meer daglicht toe te laten. Zo treedt bij een geveloriëntatie op het zuiden met zonwerende beglazing nog maar 0.9% (26 uur/jaar) van de tijd een kans op merkbare verblinding op voor een blikrichting naar de wand, waar dit bij een conventioneel systeem 2.9% (57 uur/jaar) van de tijd het geval zou zijn. Er zijn echter ook risicovolle situaties te zien waar het FourC systeem minder goed presteert dan de traditionele regeling. Bij een blikrichting naar de het raam, een geveloriëntatie op het Zuiden en heldere beglazing zou bij het FourC systeem tot 3.5% (100 uren) vaker een risico op verblinding optreden. In deze gevallen zou het systeem bijvoorbeeld misschien strenger afgesteld kunnen worden om tot vergelijkbare prestaties te komen.

Alhoewel het tegengaan van verblinding in de Nederlandse beoordelingsraamwerken voor duurzaamheid en comfort is opgenomen worden hieraan geen kwantificeerbare eisen gesteld. Eventuele prestatieverschillen tussen geautomatiseerde regelingen zijn hier dan ook niet in opgenomen. In de aankomende Europese norm betreft daglicht in gebouwen wordt wel een beoordelingsmethodiek voor verblinding opgenomen. Deze sluit aan bij de methode die is toegepast in deze rapportage. Het is waarschijnlijk dat deze methode op den duur ook navolging zal vinden in het BREEAM-NL beoordelingsraamwerk.



Figuur 15 Percentage van jaarlijkse kantooruren met kans op merkbare verblinding (daylight glare probability simplified ≥ 0.35) in relatie tot oriëntatie met helder HR++ glas.

Boven: geen zonwering. Midden: referentie regelstrategie (volledig dicht bij $I_{g,v} > 200 \text{ W/m}^2$). Onder: FourC.



Figuur 16 Percentage van jaarlijkse kantooruren met kans op merkbare verblinding (daylight glare probability simplified ≥ 0.35) in relatie tot oriëntatie met zonwerend HR++ glas.

Boven: geen zonwering. Midden: referentie regelstrategie (volledig dicht bij $I_{g,v} > 200 \text{ W/m}^2$). Onder: FourC.

5.1.5 Conclusies

Uit deze studie kan geconcludeerd worden dat het FourC systeem in het algemeen leidt tot besparingen in het primaire energieverbruik. Ook zou er in de bestudeerde gevallen een besparing optreden in de energiekosten voor de exploitant van het gebouw. Het is echter duidelijk dat eventuele kostenbesparingen en reducties van het primaire energie afhankelijk zijn van het gebouw waarin het systeem wordt toegepast en met name van de wijze waarop het wordt gekoeld. Dit roept de vraag op of het systeem, middels zijn regelparameters, zou kunnen worden aangepast aan het gebouw waarin het geïmplementeerd wordt. Verder zou ook onderzocht kunnen worden of de prestatie ten aanzien van koeling verbeterd zouden kunnen worden door aanvullingen op de regelstrategie.

De prestaties waarin het FourC systeem zich het meest onderscheidt van een conventionele regeling is de mate van daglichttoetreding en het behoud van uitzicht. Het is echter nog niet duidelijk in hoeverre eventuele verbeteringen ten aanzien van het energieverbruik of verblinding ten koste zouden gaan van de gunstige prestaties op het gebied van daglicht en uitzicht. Ook dit vraagt om verdere studie naar de gevoeligheid van de prestaties voor de regelparameters van het systeem.

Ten aanzien van verblinding bleken de prestaties van het FourC systeem vergelijkbaar met die van een conventioneel systeem. Er blijft enige onduidelijkheid over waarom het systeem in sommige gevallen beter presteert dan een conventionele regeling, maar in andere gevallen slechter. Ook lijkt het enigszins tegen de intuïtie in te gaan dat er risico op verblinding bestaat bij een systeem waarin de zon nooit in het zicht van de gebruiker is. Dit roept de vraag op waarom er bij het FourC systeem nog altijd verblinding optreedt en hoe dit verholpen zou kunnen worden.

5.2 Effecten van regelparameters op gebouwprestaties

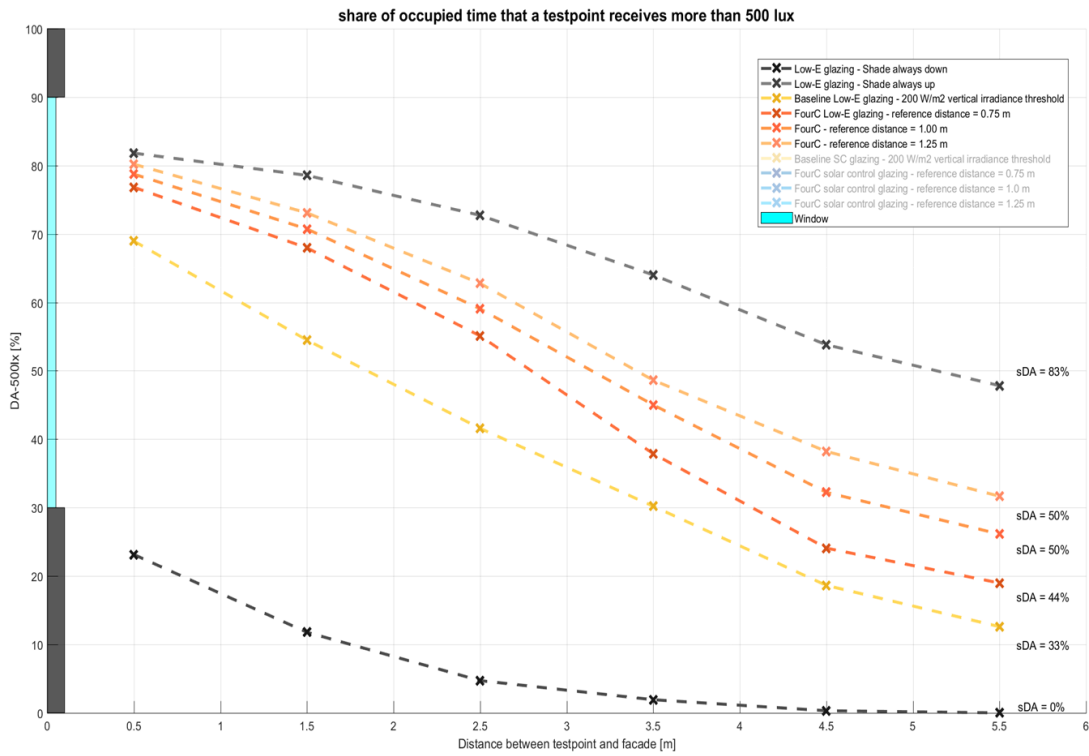
In de voorafgaande paragraaf bleek dat de prestaties van het FourC systeem afhankelijk zijn van de karakteristieken van het gebouw waarin het geïmplementeerd is. Ook kon worden opgemaakt dat prestaties van het systeem op verschillende gebieden met elkaar verbonden zijn en dat er dus een uitruil gemaakt kan worden tussen verschillende prestatiedoelen. In deze paragraaf wordt een studie gepresenteerd naar hoe de 'glare safe distance' kan worden ingezet om het systeem aan te passen aan een specifiek gebouw of een bepaalde doelstelling. Hiertoe zijn voor een oriëntatie op het Zuiden de gevoeligheden van de prestaties ten aanzien van de 'glare safe distance' onderzocht voor dezelfde twee gebouwvarianten als in de vorige studie (heldere en zonwerende HR++ beglazing). De 'glare safe distance' geeft de diepte waartoe de zon de ruimte mag binnendringen. Deze parameter staat standaard ingesteld op 0.75 meter maar hierin kan per installatie gevarieerd worden. In deze studie zijn simulaties uitgevoerd met een 'glare safe distance' van 0.75, 1.0 en 1.25 meter welke vergeleken zijn met hetzelfde referentie scenario als in de vorige studie.

5.2.1 Gevoeligheidsanalyse 'glare safe depth' en gebouwkarakteristieken

Figuur 17 en Figuur 18 tonen de daglichtprestaties bij verschillende instellingen van de 'glare safe depth' bij heldere HR++ beglazing (rood) en zonwerende HR++ beglazing (blauw) in vergelijking tot het scenario met een conventionele regeling (geel). Ter referentie zijn in Figuur 17 ook de prestaties te zien voor de situaties waarin de zonwering altijd omhoog of omlaag staat (zwart). In deze studie is de daglicht indicator anders gedefinieerd dan in de vorige studie. In plaats van 300lx is er nu 500lx gebruikt als grenswaarde voor het bepalen van daglichtautonomie. In de grafieken is te zien hoe een hogere 'glare safe depth' leidt tot een aanzienlijke toename in de mate van daglichttoetreding, wat uitgedrukt kan worden in sDA 500/50 lx die tot 14% hoger ligt.

Figuur 19 en Figuur 20 geven de frequentie waarin het risico op verblinding optreedt voor de verschillende instellingen van de regelparameter bij een blikrichting naar een zijwand. Op de grafieken zijn verblindingsduurkrommes te zien waarbij de horizontale as de mate van het risico op verblinding weergeeft (in DGPs) en de verticale as het percentage van de gebruikstijd dat een bepaalde waarde overschreden wordt. De grijze gebieden in de grafieken geven verschillende regionen aan waarin het risico op verblinding in een bepaalde klassering valt. Hierbij is de volgende klassering aangehouden: 'perceptible' (merkbaar maar meestal niet storend), 'disturbing' (meestal storend), en 'intolerable' (veelal ondragelijk). Uit de grafieken is op te maken dat bij een bepaalde verblindingsdoelstelling een hogere 'glare safe distance' kan worden gebruikt bij zonwerende beglazing dan bij heldere beglazing. De 'glare safe distance' kan dan ook gebruikt worden om de mate van daglichttoetreding te optimaliseren afhankelijk van het toegepaste glas en de doelstellingen ten aanzien van verblinding. Een mogelijk geval is bijvoorbeeld dat de blikrichting naar een zijwand maatgevend is, en dat men het acceptabel vindt dat er 1% (29 uur/jaar) van de bezette uren kans is op hinderlijke verblinding. In deze situatie zou bij heldere beglazing de regelparameter op maximaal 0.75 meter ingesteld moeten worden waar bij zonwerende beglazing ook 1.25 nog zou volstaan. Uit de daglichtgrafieken kan opgemaakt worden dat het eerste zou leiden tot een sDA_{500/50} van 44% waar in het laatste geval de sDA_{500/50} wel 50% zou zijn.

Ook op het gebied van energieprestaties zijn grote verbeteringen te zien wanneer het FourC systeem aan de hand van gebouw eigenschappen verder ingeregeld wordt. Figuur 21 toont

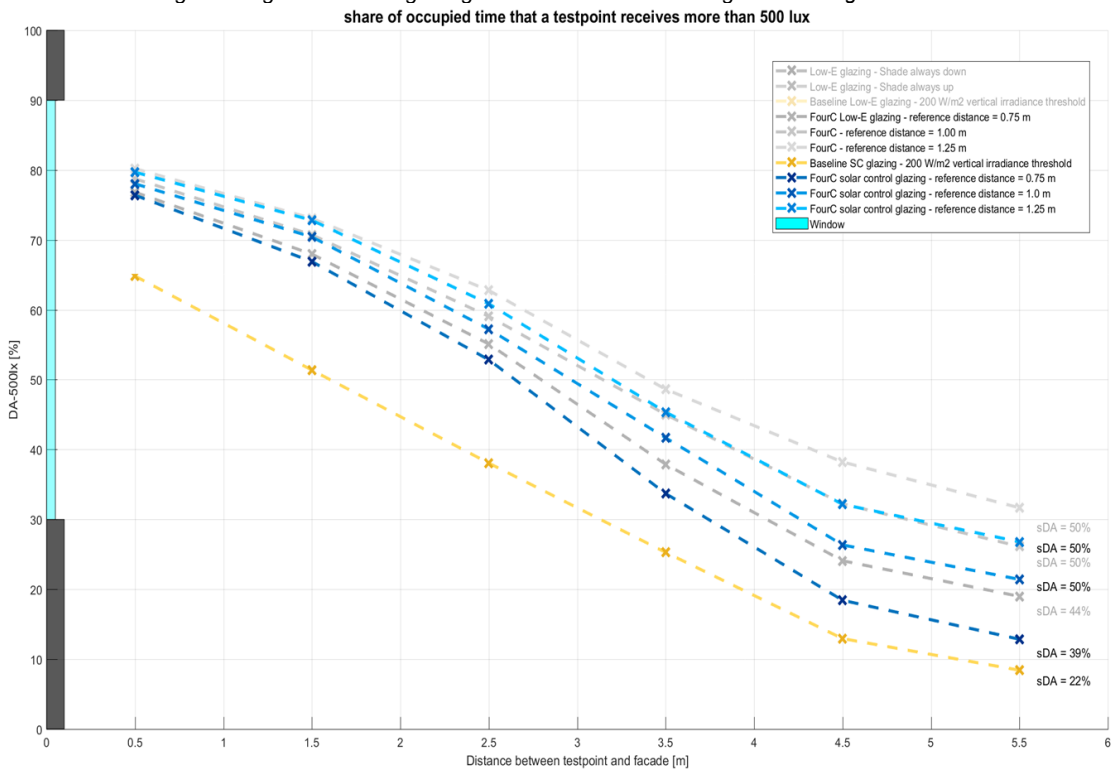


Figuur 17 Daylight autonomy 500 lx (Verticaal) op verschillende diepten in de ruimte (horizontaal).

Zwart: geen zonwering (boven) of zonwering altijd omlaag (onder).

Geel: conventionele geautomatiseerde regeling (200 W/m² glob Irr. grenswaarde).

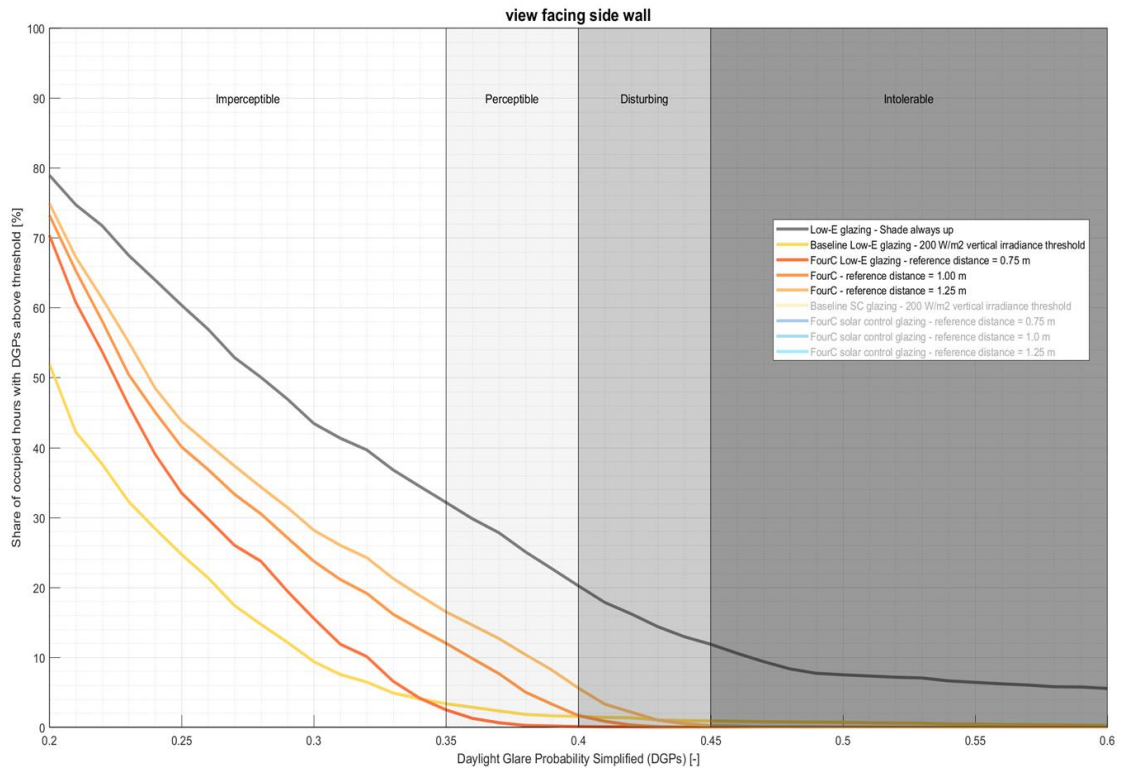
Rood: FourC regel strategie + Low-E beglazing met verschillende instellingen voor de 'glare safe distance'.



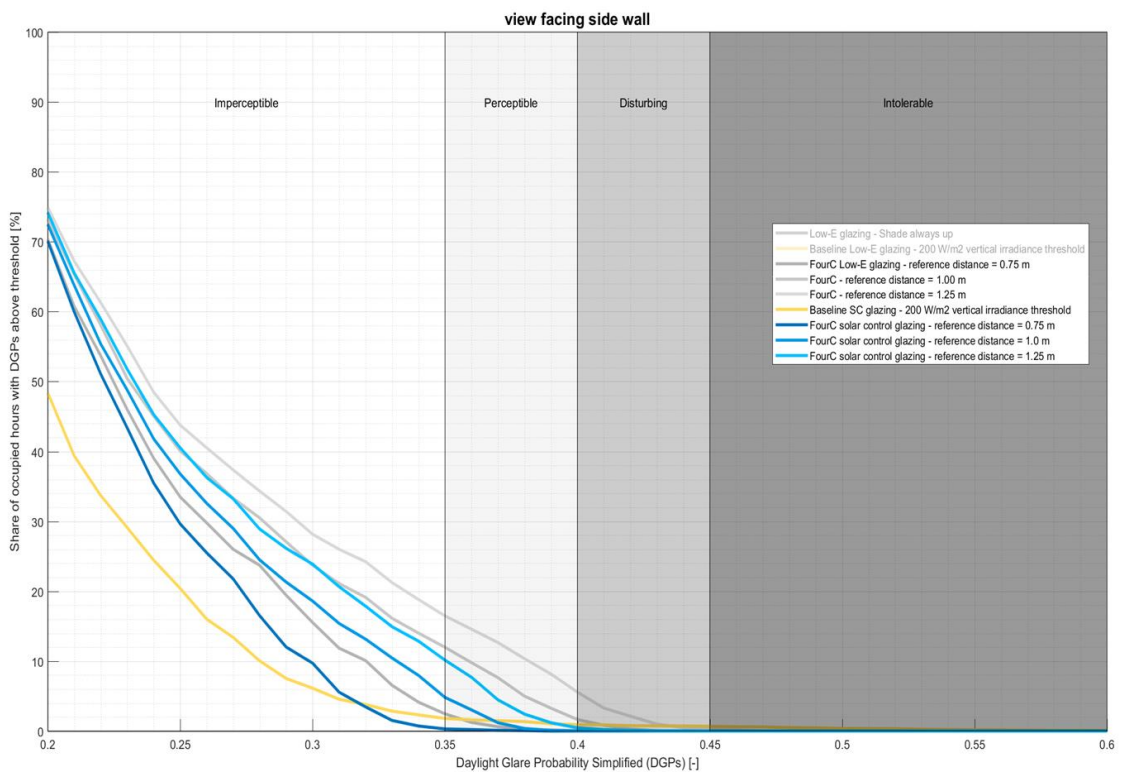
Figuur 18 Daylight autonomy 500 lx (Verticaal) op verschillende diepten in de ruimte (horizontaal).

Blauw: FourC regel strategie + Zonwerende beglazing met verschillende instellingen voor de 'glare safe distance'.

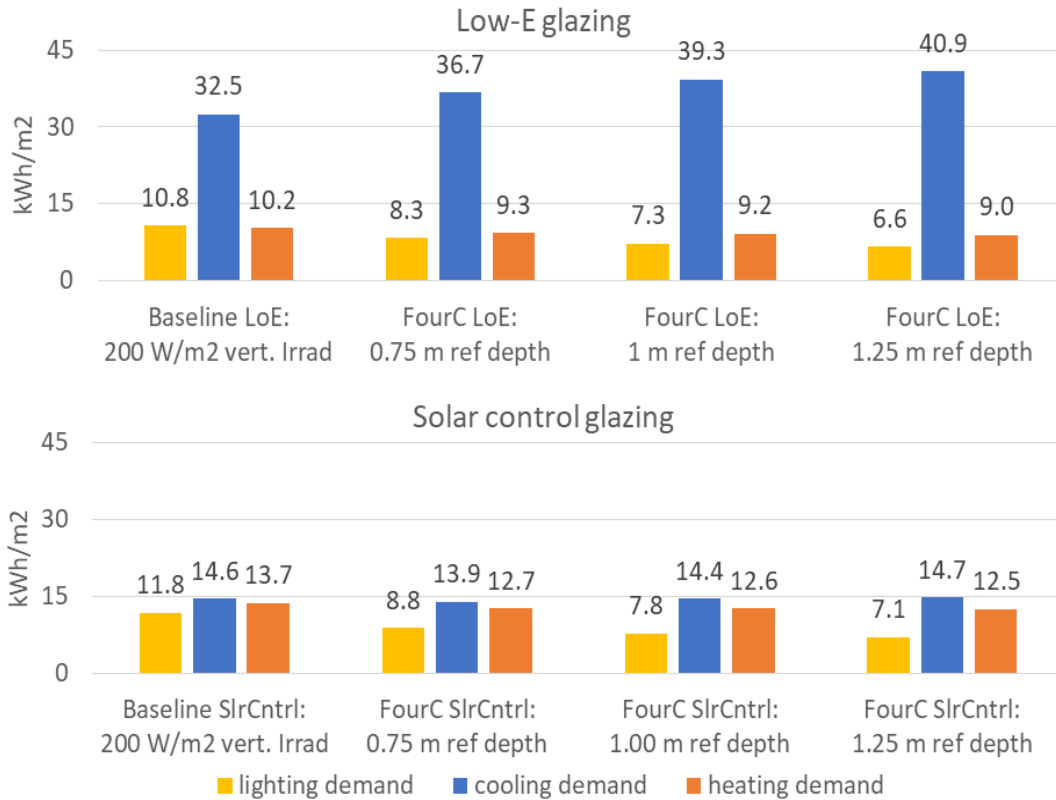
Grijs: FourC regel strategie + Low-E beglazing met verschillende instellingen voor de 'glare safe distance'.



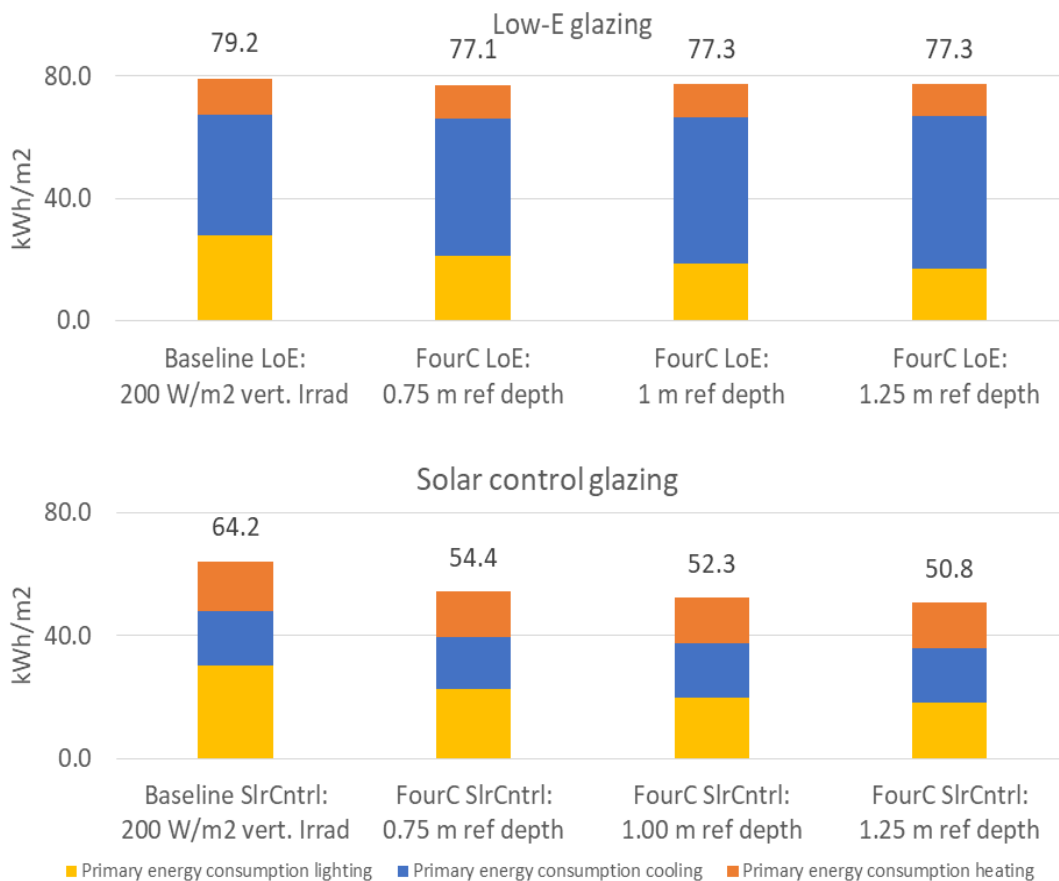
Figuur 19 Duurkromme van het risico op verblinding (DGPs) tijdens kantooruren voor een situatie met heldere HR++ beglazing en: een conventionele regeling (geel), de FourC regeling met een 'glare safe distance' ingesteld op 0.75 m (rood), 1.00 m (oranje) en 1.25 m (licht oranje), geen zonwering (zwart).



Figuur 20 Duurkromme van het risico op verblinding (DGPs) tijdens kantoor uren voor een situatie met zonwerende HR++ beglazing en: een conventionele regeling (geel), de FourC regeling met een 'glare safe distance' ingesteld op 0.75 m (rood), 1.00 m (oranje) en 1.25 m (licht oranje), geen zonwering (zwart).



Figuur 21 Energievraag voor ruimteverwarming, ruimtekoeling en verlichting



Figuur 22 Primairenergieverbruik voor ruimteverwarming, ruimtekoeling en verlichting

voor heldere en zonwerende beglazing hoe de energievraag op ruimteniveau varieert afhankelijk van de instelling van de regelparameter. Te zien is dat voor beide raamvarianten de energievraag voor verwarming en verlichting afneemt wanneer de regelparameter hoger wordt ingesteld doordat er dan meer direct zonlicht en zonnewarmte binnenkomen en dieper de ruimte in treden. Ten aanzien van de energievraag voor koeling is een tegengesteld effect van de regelparameter te zien bij de twee beglazingstypen. Waar bij heldere beglazing de energievraag voor koeling toeneemt, neemt bij zonwerende beglazing de energievraag voor koeling juist af wanneer de 'glare safe distance' hoger wordt ingesteld. Dit komt doordat in het eerste geval de externe warmtelast maatgevend is voor de energievraag voor koeling, terwijl die in het tweede geval vooral bepaald wordt door de interne warmtelast. Dit komt ook tot uiting in het effect van de regelparameter op de primaire energievraag (Figuur 22). Hier is te zien dat bij heldere beglazing een hogere 'glare safe distance' de energieprestaties negatief beïnvloedt terwijl bij zonwerende beglazing een positieve relatie te zien is. Bij heldere beglazing is de invloed niet erg groot maar bij zonwerende beglazing kan de besparing op primair energieverbruik voor verwarming, koeling en verlichting, ten opzichte van een conventionele regeling (16%) met 6% verhoogd worden door het systeem op 1.25 meter in te stellen.

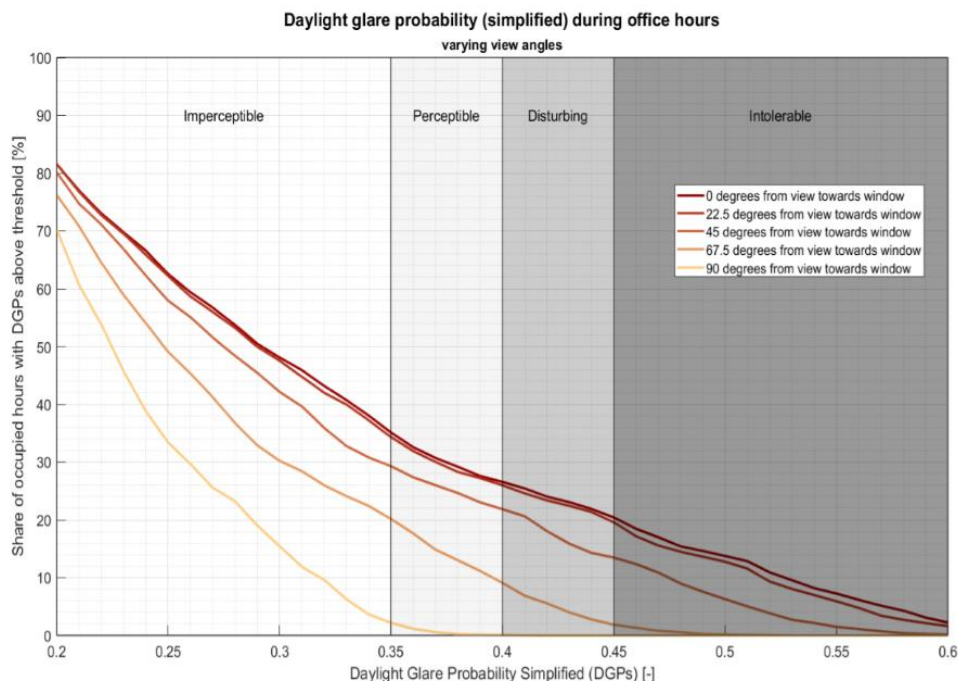
5.2.2 Conclusie

Uit deze studie kan geconcludeerd worden dat de FourC regelstrategie veel potentie heeft om het systeem te optimaliseren aan de hand van gebouwkarakteristieken, gebruikersvoorkeuren en doelstellingen. De mogelijkheden op het gebied van energiebesparing en het optimaliseren van gebruikerscomfort kunnen aanzienlijk vergroot worden. Alhoewel deze studie inzicht geeft in de omvang van deze potentie zijn de specificaties en het aantal varianten te beperkt om in de praktijk op gebouwniveau zeer gedetailleerd te optimaliseren. Het doorontwikkelen van de gebruikte simulatiemodellen tot hulpmiddelen lijkt hiervoor een kansrijke propositie.

5.3 Verkenning van verdere optimalisatie van het FourC algoritme

De resultaten van de voorafgaande studies suggereren dat het FourC systeem nog ruimte biedt voor verdere verbetering van het regelalgoritme. In deze paragraaf zal een verdiepende studie ten aanzien van verblinding gepresenteerd worden. In deze studie is getracht om te achterhalen wanneer het risico op verblinding optreedt in het FourC systeem, welke mechanismen hier achter zitten en wat potentiële richtingen zouden kunnen zijn voor verbeteringen. Ook ten aanzien van energieprestaties zullen in deze paragraaf enkele voorstellen voor verder onderzoek worden gepresenteerd.

Uit de eerdere resultaten bleek dat het risico op verblinding afhankelijk is van de kijkhoek en dat ook de prestatieverbetering ten aanzien van een traditioneel systeem hierdoor bepaald wordt. De duurkromme in Figuur 23 geeft meer inzicht in de gevoeligheid van verblindingsrisico voor de kijkrichting van de gebruiker. De lijnen in de grafiek variëren in kleur van geel tot rood en vertegenwoordigen verschillende kijkrichtingen, oplopend met 22.5 graden tussen een blikrichting naar de wand (geel) en een blikrichting naar het raam (rood). Te zien is dat het risico op verblinding zeer sterk uiteenloopt tussen deze kijkrichtingen. Ook lijkt de relatie tussen kijkhoek en verblindingsrisico niet lineair, en een kijkhoek van 45 graden geeft zeer vergelijkbare prestaties als de kijkhoek loodrecht op het raam. In werkelijkheid worden bureaus zelden kijkend in de richting van een raam opgesteld en deze resultaten geven dus vooral inzicht in het meest negatieve denkbare scenario. In dit scenario wordt echter wel goed zichtbaar waar het FourC systeem mogelijk nog verbeterd kan worden.



Figuur 23 Duurkromme van het risico op verblinding tijdens kantoor uren voor verschillende kijkrichtingen.

Verticale as: percentage van de bezette uren dat een waarde overschreden wordt.

Horizontale as: Daylight Glare Probability simplified (DGPs).

Wit: geen kans op merkbare verblinding.

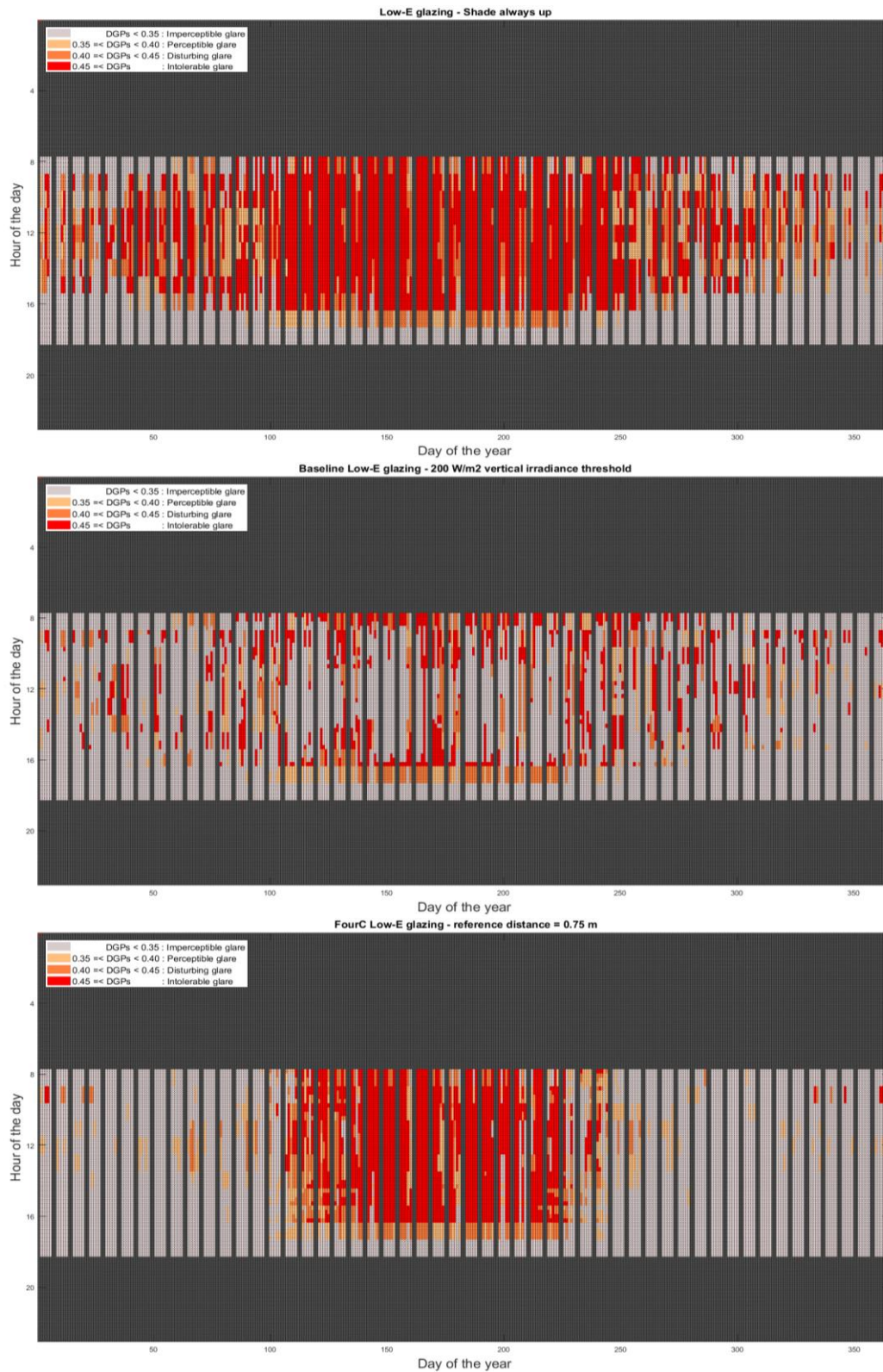
Lichtgrijs: kans op merkbare maar niet storende verblinding.

Grijs: kans op storende verblinding.

Donker Grijs: kans op ondragelijke verblinding.

Figuur 24 toont, voor een blikrichting naar het raam, hoe het risico op verblinding varieert over een jaar. In de figuur zijn drie afbeeldingen te zien voor een situatie zonder zonwering, met een conventioneel geregelde zonwering en met de FourC regeling. De oranje tot rode gebieden tonen momenten waarop er een risico op merkbare tot ondragelijke verblinding optreedt. In de bovenste afbeeldingen is te zien dat, wanneer er geen zonwering wordt toegepast, verblinding gedurende het gehele jaar op kan treden. Het risico lijkt het grootst tijdens de zomermaanden en is in deze periode over de gehele dag aanwezig. Tijdens de wintermaanden lijkt dit risico het sterkst tijdens de ochtend en avond, wanneer de zon het laagst aan de hemel staat. In het scenario met een traditioneel geregelde zonwering is te zien dat het risico op verblinding vaker, en in sterkere mate, voorkomt tijdens de vroege ochtend en avond. Ook lijkt deze situatie zich vaker voor te doen tijdens de zomer dan in de winter. Het risico op verblinding treedt bij de conventionele regeling op wanneer de zon in zicht is van de gebruiker, maar de stralingsintensiteit niet hoog genoeg is om de 200 W/m² grenswaarde te bereiken. Deze situatie doet zich voor bij gedeeltelijke bewolking maar ook bij heldere momenten dicht bij zonsopgang en zonsondergang. Bij de FourC regeling is een ander patroon te zien. Het risico op verblinding lijkt bijna uitsluitend in de zomermaanden voor te komen. Verder lijkt het risico, tijdens deze periode, over de gehele dag voor te komen. In tegenstelling tot de conventionele regeling lijkt bij het FourC systeem het risico op verblinding niet beperkt tot momenten met een lage stralingsintensiteit, en het risico doet zich voor wanneer 'glare safe mode' actief is.

Figuur 25 en Figuur 26 geven meer inzicht in de oorzaak van de verblinding die optreedt binnen het FourC systeem. Deze afbeeldingen tonen resultaten uit een studie naar verblinding waarbij gebruik gemaakt is van een geavanceerdere beoordelingsmethode. Hierbij wordt het risico op verblinding beoordeeld gebruik makende van helderheidsverschillen in een gesimuleerde 'high definition range' (HDR) afbeelding. Figuur 25 laat, voor een momentopname, zien hoe de beoordeling te werk gaat. Aan de hand van een gesimuleerde HDR afbeelding met werkelijke helderheid (links) wordt eerst beoordeeld welke delen van het beeld positief bijdragen aan verblinding (rechts). Vervolgens wordt de helderheid van iedere pixel (midden) ten aanzien van zijn positie binnen het beeld gewogen in relatie tot de totale lichtsterkte op het netvlies van de gebruiker. Hiervoor wordt een empirische formule gebruikt. Figuur 26 toont het verloop van de op deze wijze bepaalde DGP over 21 juni. In de afbeeldingen is te zien dat, alhoewel de zon niet in het zicht van de gebruiker komt, er alsnog verblindingsrisico optreedt door de hoge helderheid van de hemelkoepel. Aangezien in deze periode van het jaar de zon erg hoog staat zal de zonwering maar een klein deel van het raam bedekken. Door de zonwering verder omlaag te zetten kan dit verblindingsrisico worden verlaagd. Uit deze studie bleek dat het verlagen van de zonwering tot ooghoogte in de meeste gevallen voldoende zou zijn. In veel gevallen is een hoogte tussen de 'glare safe height' en ooghoogte echter ook voldoende. Dit laatste zou wenselijker zijn vanwege daglichttoetreding en uitzicht.



Figuur 24 Variatie in het risico op verblinding (DGPs) over een jaar voor een kijkrichting naar het raam.

Verticale as: uren van dag. Horizontale as: dagen van het jaar.

Boven: zonder zonwering.

Midden: traditionele regeling.

Onder: FourC.

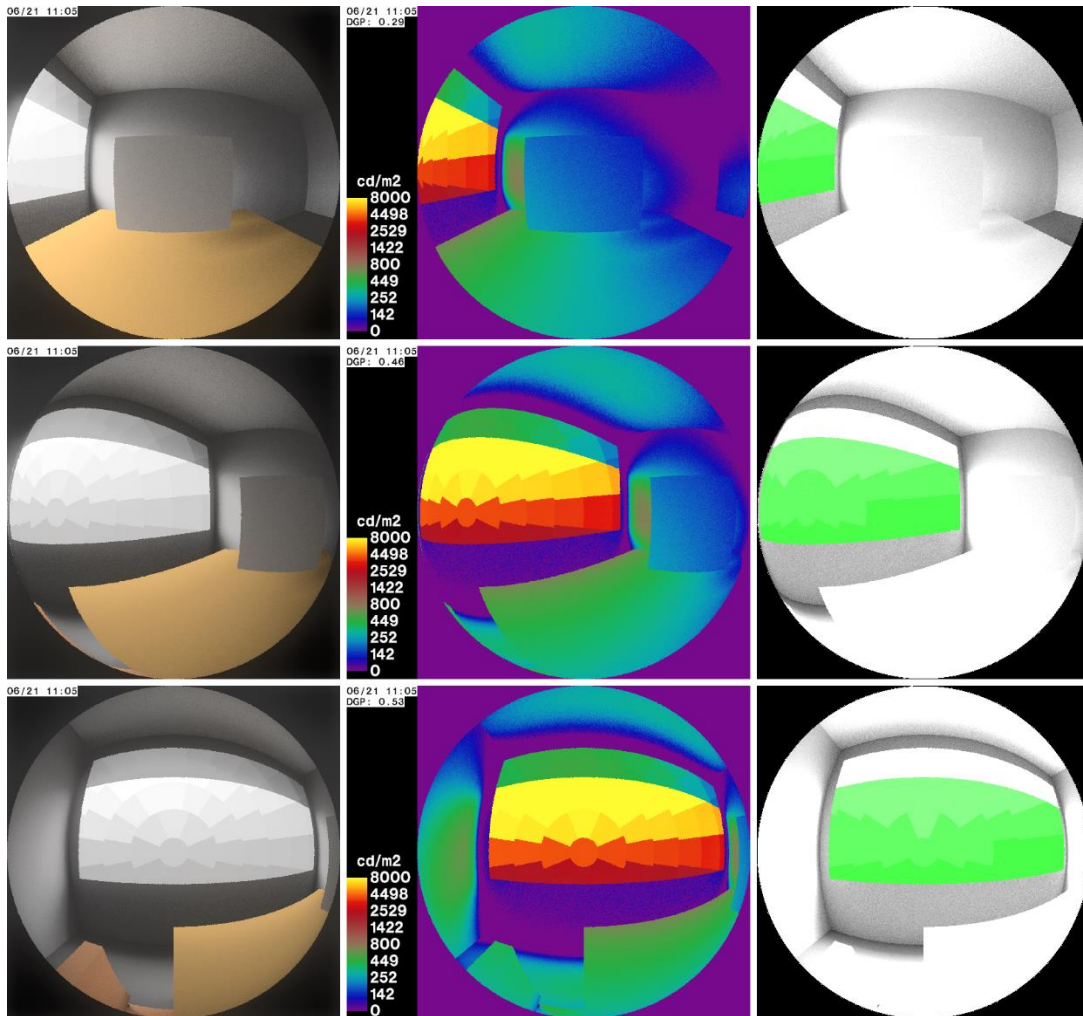
Grijs: DGPs < 0.35.

Licht Oranje: 0.35 < DGPs < 0.40.

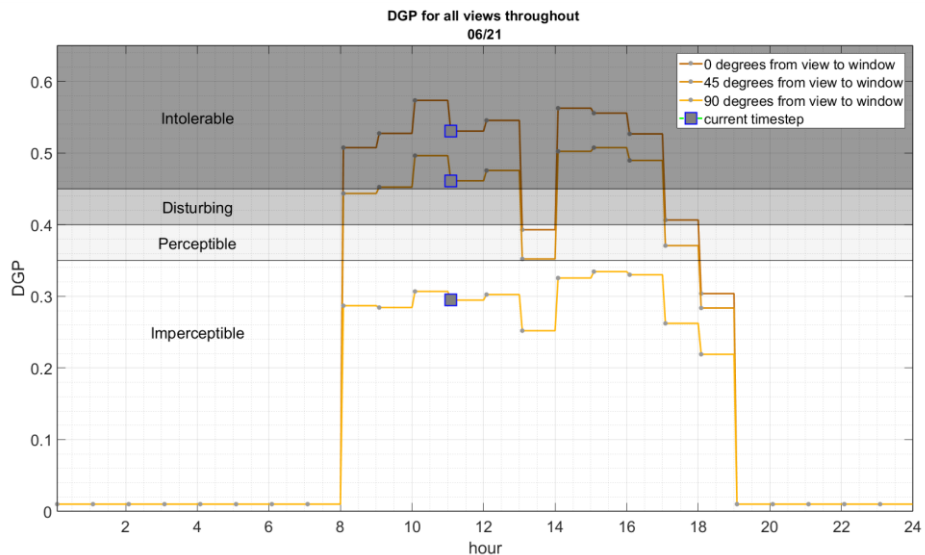
Oranje: 0.40 < DGPs < 0.45.

Rood: 0.45 < DGPs.

Zwart: buiten kantooruren.

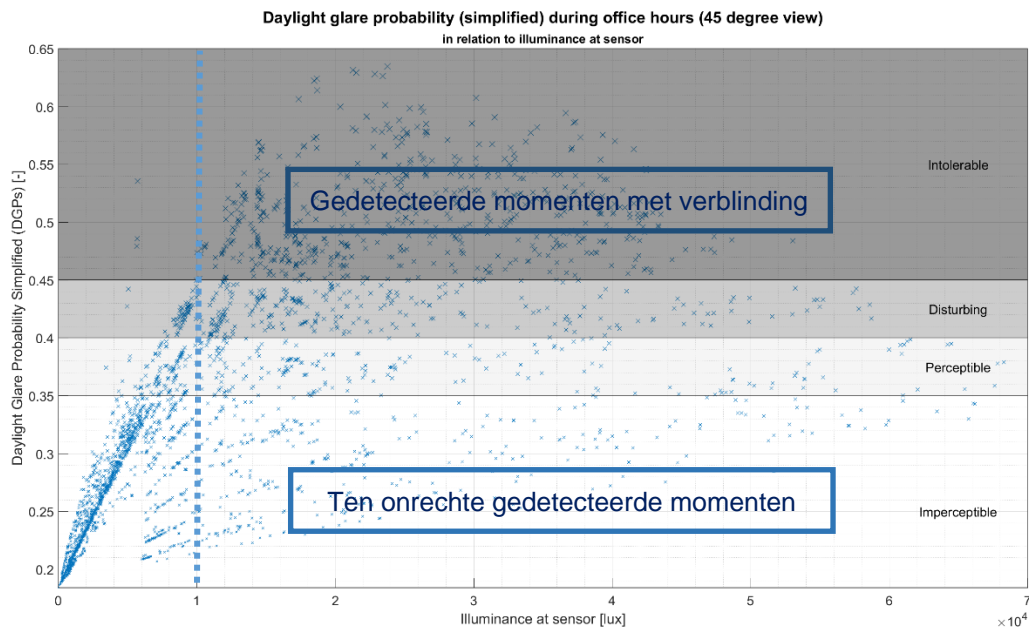


Figuur 25 Verblindingsstudie op basis van helderheidsverschillen middels gesimuleerde HDR afbeeldingen. Links: afbeelding waarin helderheid gewogen is om de menselijke waarneming te benaderen. Midden: schematische kleurweergave van helderheid. De gele gebieden dragen het sterkst bij aan verblinding. Rechts: delen van het beeld die bijdragen aan verblinding. De helderheid en de positie binnen het beeld (midden) bepalen de mate waarin een gebied bijdraagt aan verblinding.



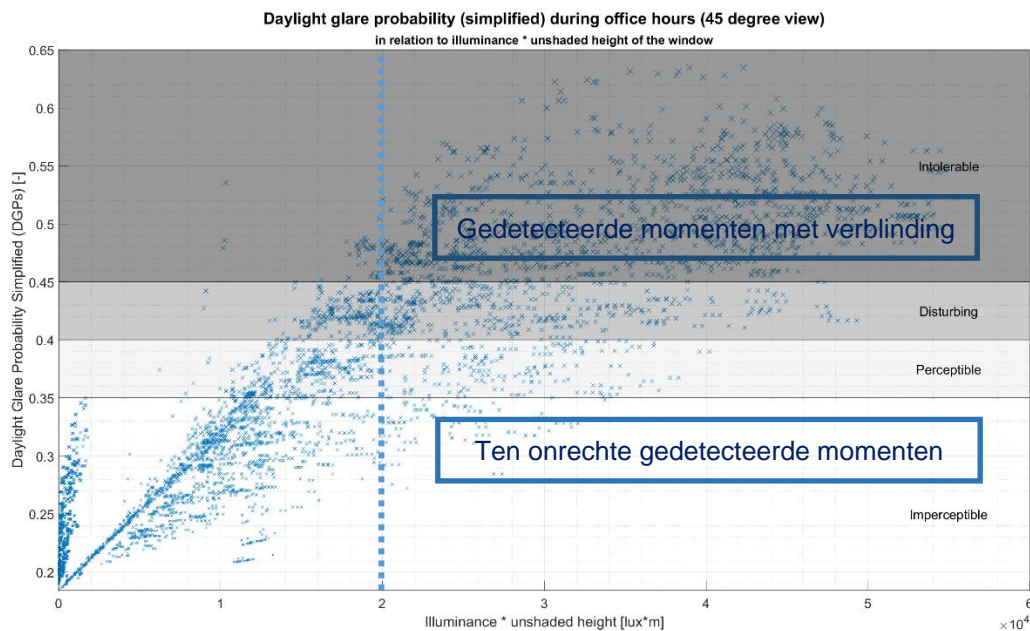
Figuur 26 Verloop van daylight glare probability over 21 Juni. Gebaseerd op HDR afbeeldingen.

In situaties waar het risico op verblinding kritisch is, bijvoorbeeld wanneer de gebruiker meer in de richting het raam gepositioneerd is, kan de 'glare safe distance' conservatiever ingesteld worden. Ook zou een maximumhoogte ingesteld kunnen worden. Met deze maatregelen is het echter moeilijk om het risico op verblinding tegen te gaan zonder dat dit ten koste gaat van daglichttoetreding en uitzicht. Het zou dan ook wenselijk kunnen zijn om de regeling uit te breiden. De vraag rijst dan echter bij welke sensorwaarde het systeem hiervoor zou moeten reageren om verblinding in deze gevallen tegen te gaan. Figuur 27 illustreert deze problematiek. In deze grafiek is, gebruikmakende van een jaarsimulatie van het FourC systeem, het risico op verblinding uitgezet tegen de lichtsterkte die door de luxsensor van het FourC systeem wordt gemeten. De grafiek laat zien dat een maximum sensorwaarde gebruikt kan worden om de momenten te detecteren waarin er een groot risico is op verblinding. De grafiek toont echter ook dat er veel momenten gedetecteerd zullen worden waarop er geen risico op verblinding is. Als het systeem zich op deze momenten zou sluiten zou er onnodig daglichttoetreding en uitzicht verloren gaan.



Figuur 27 Puntgrafiek met het risico op verblinding (DGPs) uitgezet tegen de luxsensorwaarde die op de momenten werden uitgelezen. Data uit de simulatie van een jaar voor het FourC systeem. Gestippelde lijn laat zien welke situaties worden gedetecteerd als 10,000 lux gebruikt zou worden als indicator voor 'hoog verblindingsrisico'.

Mogelijk zou het nadelige effect hiervan beperkt kunnen worden door een maximale grenswaarde alleen in de risicovolle periode tijdens de zomer te gebruiken. Een andere richting die verkend kan worden is om ook de hoogte van het niet bedekte raamdeel in de grenswaarde op te nemen. Een mogelijkheid zou bijvoorbeeld kunnen zijn om de gemeten lichtsterkte te vermenigvuldigen met de hoogte van het onbedekte deel van het raam. Figuur 28 laat zien welke situaties gedetecteerd zouden worden als deze sensorparameter gebruikt zou worden (hier ingesteld op 20,000 lux-meter). Te zien is dat er in deze situatie minder momenten zijn waar ten onrechte een risico op verblinding wordt gedetecteerd.



Figuur 28 Puntgrafiek met het risico op verblinding (DGPs) uitgezet tegen de luxsensor waarde die op het moment werden uitgelezen vermenigvuldigd met de hoogte van het onbedekte raamdeel (in lux m). Data uit de simulatie van een jaar voor het FourC systeem. Gestippelde lijn laat zien welke situaties worden gedetecteerd als 20,000 lux meter gebruikt zou worden als indicator voor 'hoog verblindingsrisico'.

5.3.1 Conclusie

Uit deze studie kan geconcludeerd worden dat bij het FourC systeem het risico op verblinding kan optreden voor blikrichtingen gericht op het raam. Dit risico doet zich echter uitsluitend voor in en rondom de zomermaanden. De reden hiervoor is dat zon erg hoog aan de hemel staat waardoor de zonwering maar een klein deel van het raam bedekt. Op momenten dat de hemelkoepel erg helder is kan dit leiden tot verblinding. Om deze verblinding tegen te gaan zou het systeem op helderheid moeten reageren. Alhoewel het niet haalbaar is de nodige sensoren hiervoor in het systeem op te nemen is in deze studie onderzocht of de lichtsterkesensor voor dit doel gebruikt kan worden. Aangetoond is dat verblindingsrisico eventueel gedetecteerd zou kunnen worden door de sensorwaarde te combineren met andere parameters, zoals het seizoen of de hoogte van het onbedekte raamdeel. Interessant is dat de zomerperiode waarin er in het FourC systeem een risico op verblinding bestaat ook de periode is waar de grootste verschillen in het energieverbruik voor verlichting en koeling optreden in vergelijking tot een conventionele regeling. Dit geeft aan dat het belangrijk is om eventuele verbeteringen op het gebied van verblinding af te wegen tegen een mogelijke achteruitgang in de daglichttoetreding. Er zou echter mogelijk ook op meerdere fronten winst gemaakt kunnen worden. Zo was eerder te zien dat het FourC systeem leidt tot besparingen op het energieverbruik voor verlichting maar dat er voor koeling in sommige gevallen meer energie verbruikt wordt doordat de zonwering vrij ver open staat het midden van de zomer. Een van de uitdagingen in de verdere verbeteringen van het algoritme zal zijn om verblinding verder te beperken en gelijktijdig een verbetering te realiseren in de verhouding tussen het energieverbruik voor koeling en dat voor verlichting. Mogelijk zou ook de door het systeem gemeten binnentemperatuur hier een rol in kunnen spelen. In de huidige regeling wordt er alleen op de binnentemperatuur geregeld wanneer het systeem zich in 'energy mode' bevindt. Dit zou echter ook aangevuld kunnen worden met temperatuur gedreven regels voor wanneer er een gebruiker aanwezig is.

Uit één en ander wordt duidelijk dat het optimaliseren van uiteenlopende prestatiedoelinden, gebruik makende van een enkel doek met statische eigenschappen, zijn beperkingen kent. Een interessante verbetering op het systeem zou dan ook kunnen zijn om meerdere rolgordijnen te gebruiken, die zich ieder richten op een specifiek prestatiedoel. Zo zou bijvoorbeeld een enkel zeer reflecterend maar lichtdoorlatend doek gebruikt kunnen worden om de toetreding van zonnewarmte tegen te gaan, en een absorberend doek om verblinding tegen te gaan maar zonnewarmte te absorberen. De rolgordijnen hoeven dan ook niet dezelfde hoogte te volgen. Ook zou grote winst gemaakt kunnen worden door één van de rolgordijnen vóór of in de gevel op te nemen.

Een andere veelbelovende richting voor verdere ontwikkeling is om het regelalgoritme aan te passen aan andere fysieke zonweringssystemen. Een nadeel van een rolgordijn is namelijk dat, om de zon buiten het beeld van de gebruiker te houden, een groot deel van de waarin de zon niet zichtbaar is bedekt moet worden. Bij lamellen en valluiken is dit in mindere mate het geval. Ook zou de combinatie van verschillende statische en dynamische zonweringstypen prestaties kunnen bieden die afzonderlijk niet bereikt kunnen worden.

6 Vervolgactiviteiten

De betrokken project partners blijven actief in de ontwikkeling van het FourC regelalgoritme. Een aantal van de verbeteringsrichtingen die in paragraaf 5.3 besproken worden momenteel verder uitgewerkt. Nieuwe simulatiegebaseerde onderzoekstrajecten zijn reeds gestart ten aanzien van het verkennen van oplossingen met meerdere rolgordijnen, alsook het uitbreiden van het algoritme naar andere zonweringstypen. Het ontwikkelde virtuele testbed wordt in deze activiteiten verder ingezet en uitgebreid. Ook zal het FourC regelalgoritme de komende drie jaar als onderzoek casus gebruikt worden binnen een promotieonderzoek aan de TU/e. Model gebaseerde regelingen en het afwegen van conflicterende prestatie doelen onder onzekerheid blijven een van de centrale thema's binnen dit promotieonderzoek en verder kennisdeling tussen de TU/e, Verosol en SolarSwing zal dan ook blijven plaatsvinden.

7 Literatuurverwijzing

- Aa van der, R. 2012. "NEN 7120+ C2: Energieprestatie van gebouwen-Bepalingsmethode." In. Delft: Stichting Nederlands Normalisatie-instituut (NEN/CEN).
- Beck, W, D Dolmans, G Dutoo, A Hall, and O Seppänen. 2010. "Solar Shading. REHVA Guidebook 12." In.: Forssa, Finland.
- CEN. 2002. "NEN-EN 14501: Zonneschermen en luiken - Thermisch en visueel comfort - Prestatiekenmerken en classificatie." In. Delft: NEN.
- CEN/TC. 2014. "CEN/TC 169/WG 11 -Daylight of buildings." In. Brussels: CEN.
- D'Antoni, Matteo, Paolo Bonato, David Geisler-Moroder, Roel Loonen, and Fabian Ochs. 2018. "IEA SHC T56 - System Simulation Models: part C." In. Paris: IEA.
- Huang, Y.J. . 2012. "International Weather for Energy Calculations (IWECC) version 2.0." In. Moraga, California: ASHRAE.
- Kim, Ji-Hyun, Young-Joon Park, Myoung-Souk Yeo, and Kwang-Woo Kim. 2009. 'An experimental study on the environmental performance of the automated blind in summer', *Building and Environment*, 44: 1517-27.
- Lee, E. S., D. L. DiBartolomeo, and S. E. Selkowitz. 1998. 'Thermal and daylighting performance of an automated venetian blind and lighting system in a full-scale private office', *Energy and Buildings*, 29: 47-63.
- Mitchell, Robin. 2017. "Complex glazing database (CGDB) version 10.0." In. Berkeley: Lawrence Berkeley National Laboratory.
- . 2018. "International glazing database (IGDB) version 59.0." In. Berkeley: Lawrence Berkeley National Laboratory.
- Reinhart, Christoph F, John Mardaljevic, and Zack Rogers. 2006. 'Dynamic daylight performance metrics for sustainable building design', *Leukos*, 3: 7-31.
- USGBC. 2018. 'LEED V4.0 Daylight credits', USGBC.
<https://www.usgbc.org/credits/healthcare/v4-draft/eqc-0>.
- Wienold, J. 2009. *Daylight glare in offices*. (Fraunhofer and Universität Karlsruhe (TH): Freiburg, Germany).