FACULTEIT INGENIEURSWETENSCHAPPEN
EN ARCHITECTUUR

Toepassing van de CEN daglichtnorm bij het ontwerp van schoolgebouwen.

Nele Van de Voorde
Studentennummer: 01610891

Promotor: prof. dr. ir. Arnold Janssens
Begeleider: Martijn Vyncke

Masterproef ingediend tot het behalen van de academische graad van
Master of Science in de ingenieurswetenschappen: architectuur

Academiejaar 2018-2019

UNIVERSITEIT
GENT

FACULTEIT INGENIEURSWETENSCHAPPEN
EN ARCHITECTUUR

Toepassing van de CEN daglichtnorm bij het ontwerp van schoolgebouwen.

Nele Van de Voorde
Studentennummer: 01610891

Promotor: prof. dr. ir. Arnold Janssens
Begeleider: Martijn Vyncke

Masterproef ingediend tot het behalen van de academische graad van
Master of Science in de ingenieurswetenschappen: architectuur

Academiejaar 2018-2019

UNIVERSITEIT
GENT

Toelating tot bruikleen

De auteur geeft de toelating deze masterproef voor consultatie beschikbaar te stellen en delen van de masterproef te kopiëren voor persoonlijk gebruik.
Elk ander gebruik valt onder de bepalingen van het auteursrecht, in het bijzonder met betrekking tot de verplichting de bron uitdrukkelijk te vermelden bij het aanhalen van resultaten uit deze masterproef.

The author gives permission to make this master dissertation available for consultation and to copy parts of this master dissertation for personal use. In all cases of other use, the copyright terms have to be respected, in particular with regard to the obligation to state explicitly the source when quoting results from this master dissertation.

Gent, 31 mei 2019
Nele Van de Voorde

Voorwoord

In juni 2016, ondertussen drie jaar geleden, behaalde ik met trots mijn masterdiploma Architectuur aan de Katholieke Universiteit Leuven. Ik was tevreden over het traject dat ik de afgelopen jaren had afgelegd maar was echter teleurgesteld in de beperkte technische kennis die ik tijdens mijn opleiding had bijgeleerd. In september besloot ik daarom om mijn studies verder te zetten aan de Universiteit Gent. Tijdens de afgelopen drie jaar heb ik ontzettend veel bijgeleerd mijn dank gaat daarom in eerste plaats uit naar alle professoren, assistenten en personeel van de Universiteit Gent. Gedurende deze drie jaar heb ik me voornamelijk proberen richten op de meer wetenschappelijke en technische aspecten van architectuur. In mijn eerste masterjaar koos ik ervoor om het Bijzonder Vraagstuk 'Daglicht in gebouwen' op te nemen. Ik raakte geboeid door het belang van daglicht en de actuele problematieken die ermee gepaard gaan. Toen ik de kans kreeg om me verder te verdiepen en om dit onderwerp nader te onderzoeken als masterproef heb ik dan ook niet lang moeten twijfelen.
Na maanden van hard werk heeft deze masterproef uiteindelijk zijn finale staat bereikt en vormt het tevens de eindmeet van mijn jarenlange studies. In dit voorwoord wil ik dan ook de kans nemen om enkele mensen in het bijzonder te bedanken zonder wiens hulp dit niet mogelijk was geweest.

Eerst en vooral wil ik mijn promotor prof. dr. ir. Arnold Janssens en begeleider Martijn Vyncke bedanken. Ze gaven me de kans om mijn eigen weg te zoeken tijdens dit proces maar stonden me tijdig bij met hun advies en uitgebreide vakkennis. Daarnaast wens ik ook Klaas De Jonge te bedanken voor de tijd die hij voor mij vrijmaakte om mij te helpen bij het opstellen van de uitgevoerde dynamische simulaties.

Bedankt ook aan al mijn vrienden op wie ik steeds kon rekenen en die van tijd tot tijd mijn gedachten even konden verzetten. Tot slot wil ik mijn ouders en zus bedanken voor hun steun, advies, motiverende woorden en het geloof dat ze steeds in mij hadden de afgelopen jaren. Mijn dankbaarheid voor hen is te groot om in deze paar woorden uit te drukken.

Nele Van de Voorde
Gent, 31 mei 2019

Toepassing van de CEN daglichtnorm bij het ontwerp van schoolgebouwen

Nele Van de Voorde

Promotor: prof. dr. ir. Arnold Janssens
Begeleider: Martijn Vyncke

Masterproef ingediend tot het behalen van de academische graad van Master of Science in de ingenieurswetenschappen: architectuur

Vakgroep Architectuur en Stedenbouw
Voorzitter: prof. dr. ir. Arnold Janssens
Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur Academiejaar 2018-2019
Universiteit Gent

Abstract

Deze studie doet onderzoek naar de daglichtkwaliteit en het gerelateerd zomercomfort in klaslokalen van nieuwbouwscholen en gerenoveerde scholen. Beide aspecten worden geëvalueerd aan de hand van een reeks simulaties. De modellen die hiervoor aangewend worden, zijn opgesteld op basis van voorgeschreven richtlijnen die gevonden werden voor beide schooltypologieën. In het eerste deel wordt een summier overzicht gegeven van de meest relevante daglichtnormen en worden de huidige problematieken inzake daglichttoetreding aangekaart. Vervolgens wordt het belang van daglicht in scholen wetenschappelijk onderbouwd en worden de verlichtingseisen in klaslokalen uitgelicht. Daarnaast wordt een overzicht gegeven van alle voorgeschreven ontwerprichtlijnen voor klaslokalen die effect hebben op de daglichtkwaliteit. In het derde en vierde deel van deze studie worden de daglicht- en binnenklimaatsimulaties en hun resultaten beschreven. De daglichtsimulaties onderzoeken hoe daglicht in klaslokalen geoptimaliseerd kan worden en wat de impact is van energetische ingrepen en ingrepen met het oog op het bevorderen van het binnenklimaat. De kwaliteit van de gesimuleerde daglichttoetreding wordt beoordeeld op basis van de CEN daglichtnorm. Het evaluatiecriterium voor het zomercomfort bestaat uit het bepalen van het aantal overschrijdingsuren. De studie toont aan dat het verenigen van voldoende daglicht en aanvaardbare binnentemperaturen in klaslokalen geen eenvoudige opgave is. Beide zaken dienen voortdurend ten opzichte van elkaar afgewogen te worden.

Trefwoorden: Daglichtkwaliteit, klaslokalen, CEN daglichtnorm, zomercomfort, oververhitting

Toepassing van de CEN daglichtnorm bij het ontwerp van schoolgebouwen

Nele Van de Voorde

Begeleiders: Prof. dr. ir. Anorld Janssens, Martijn Vyncke

Abstract **Deze studie onderzoekt de daglichtkwaliteit en het gerelateerde zomercomfort in klaslokalen van nieuwbouwscholen en gerenoveerde scholen. De evaluatie gebeurt op basis van (dynamische) simulaties.**

Trefwoorden **daglichtkwaliteit, klaslokalen, oververhitting, zomercomfort, CEN daglichtnorm**

I. Introductie

Daglicht vervult al sinds het menselijk bestaan een noodzakelijke rol in het dagelijkse leven van de mens. Het belang van daglicht reikt verder dan louter een hulpmiddel voor het zicht. Voldoende daglicht is nodig voor de gezondheid en het welzijn van de mens. Verschillende fysiologische en psychologische reacties in het menselijk lichaam zijn doorheen de tijd namelijk afgesteld op het spectrale karakter van de zonnestraling en de afwisseling tussen licht en duisternis. Tegenwoordig brengen mensen steeds meer tijd door in de binnenomgeving. Het gebrek aan daglicht in gebouwen en de impact die dit heeft op zijn gebruikers zijn niet verwaarloosbaar. Bovendien is daglicht een kosteloze en onuitputtelijke bron die nog te weinig ingezet wordt om het energieverbruik in gebouwen te reduceren. Daglicht is daarom van onschatbare waarde, als men gebouwen ontwerpt moet er altijd gestreefd worden naar lichtrijke binnenruimtes waarbij daglicht de belangrijkste bron van verlichting vertegenwoordigt.

Ook in scholen is daglicht onmisbaar. Verschillende onderzoeken tonen aan dat natuurlijk licht het gedrag en de leerprestaties van kinderen en jongeren kan bevorderen. Bovendien zijn kinderen bij een hoger daglichtniveau geconcentreerder en voelen ze zich minder slaperig. Over het algemeen wordt in klaslokalen met veel daglicht een vermindering van het ziekteverzuim vastgesteld. Aangezien kinderen en jongeren een groot deel van hun tijd op de schoolbanken doorbrengen, moeten er klaslokalen met een kwalitatief binnenmilieu ontworpen worden. Hierbij spelen ook het thermisch binnenklimaat en de luchtkwaliteit een belangrijke rol.

Het doel van deze studie is enerzijds om na te gaan hoe de daglichtkwaliteit in klaslokalen verbeterd kan worden en anderzijds om te onderzoeken hoe groot het effect is van ingrepen met het oog op de optimalisatie van het energieverbruik en van het binnenklimaat op de daglichttoetreding. Daarnaast wordt er achterhaald of er met de getroffen maatregelen in functie van de daglichttoetreding een aanvaardbaar binnenklimaat gerealiseerd kan worden.

II. Literatuur

A. Normen

Het belang van daglicht kent een groeiende aandacht in internationale en Europese normen. De gepubliceerde normen zijn steeds vrijblijvend, wettelijke eisen zijn tot op heden nog niet vastgelegd.

De in de normen behandelde onderdelen inzake daglicht zijn erg uiteenlopend, ze handelen onder andere over de verlichtingsvereisten voor werkplekken alsook over de spectrale gevoeligheid van licht. Wat dit onderzoek betreft is de belangrijkste de recent gepubliceerde norm EN 17037 [1]. Deze wordt namelijk volledig gewijd aan het belang van daglicht in gebouwen. De norm verschaft in de eerste plaats enkele richtlijnen over de daglichttoetreding. Aan de hand van de verlichtingssterkte wordt de kwaliteit van de daglichttoetreding in drie klassen onderverdeeld.

Tabel 1 Aanbevelingen daglichttoetreding verticale en hellende openingen

	E_T	F_{plane}	E_{TM}	F_{plane}	F_{time}
	(lux)	(%)	(lux)	(%)	(%)
Minimum	300	50	100	95	50
Gemiddeld	500	50	300	95	50
Hoog	750	50	500	95	50

Tabel 2 Aanbevelingen daglichttoetreding horizontale openingen

	E_T	F_{plane}	F_{time}
	(lux)	(%)	(%)
Minimum	300	95	50
Gemiddeld	500	95	50
Hoog	750	95	50

In termen van de daglichtfactor moet er voor het overtreffen van 100, 300, 500 en 700 lux in België een minimumwaarde van respectievelijk 0,7%, 2%, 3,3% en 5% behaald worden.

De voorschreven aanbevelingen worden gehanteerd voor het verdere onderzoek.

B. Problematieken en aandachtspunten

Ondanks de vele inspanningen staan verschillende zaken de optimalisatie van de daglichttoetreding alsnog in de weg. Opvallend is bovendien het heersende conflict tussen de daglichtkwaliteit en het thermisch comfort binnenin gebouwen.

De verschillende problematieken worden reeds uitvoerig in wetenschappelijke literatuur besproken. De voornaamste zijn:

1) Dagkanten

Als gevolg van de verstrengde energieprestatieregelgeving wordt er een sterke toename in de dikte van wanden van gebouwen waargenomen. De steeds breder wordende dagkanten hinderen echter de toetreding van daglicht.

2) Transmissie van de beglazing

De laatste decennia werden allerhande types beglazing op de markt gebracht zoals driedubbel glas en beglazingen met aangepaste coatings en gassen. De verbeterde kwaliteit op vlak van het energieverbruik gaat daarentegen gepaard met een opmerkelijke vermindering van de licht- en zonnetoetreding.

3) Glastinten

Grote glaspartijen zijn niet weg te denken uit de hedendaagse architectuur. Als reddingsmiddel tegen de overmatige zonnewinsten die hieraan gekoppeld zijn, werd zonwerend glas gelanceerd. De kleurweergave van het daglicht binnenshuis wordt echter aanzienlijk verstoord door verscheidene van deze technologische beglazingen. Deze wijzigingen kunnen belangrijke gevolgen teweegbrengen bij de perceptie van zowel het visuele als non-visuele systeem van de mens.

4) Uniformiteit

Bij evaluatie van de daglichttoetreding in binnenruimtes kan vastgesteld worden dat de uniformiteit van de verlichtingssterkte vaak ondermaats is. Te weinig aandacht voor de uniformiteit gaat gepaard met hinderlijke schaduwen op het werkvlak of vermoeidheid van de ogen.

5) Positie en grootte van ramen

Grote ramen zijn voordelig voor de daglichttoetreding, het reduceren van het elektriciteitsverbruik voor kunstverlichting, het uitzicht en de ruimtelijke beleving. Anderzijds leiden ze ook tot grotere warmtewinsten en warmteverliezen in de zomer en winter. Bij het bepalen van de afmetingen van ramen moet er meer gezocht worden naar een evenwicht tussen de daglichttoetreding en het thermisch binnencomfort.

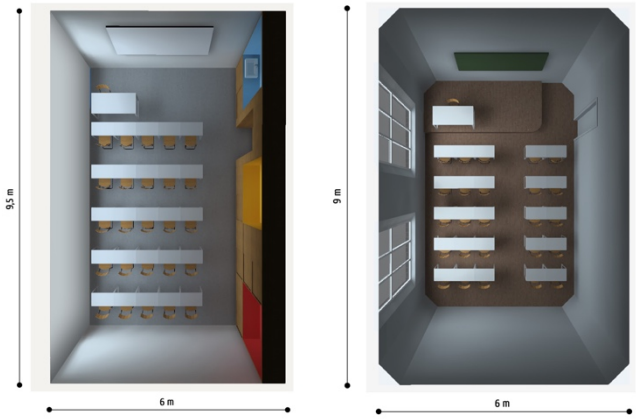
6) Innovatieve daglichtsystemen

Daglichtsystemen worden gebruikt om de lichtverdeling binnenin ruimtes te verbeteren en verblinding en oververhitting te voorkomen. Veel van deze technieken blokkeren echter een groot deel van het natuurlijk invallende licht en belemmeren het uitzicht naar de buitenomgeving.

III. Onderzoeksmethode

De daglichtkwaliteit en het zomercomfort in klaslokalen worden onderzocht met behulp van simulatiesoftware. Voor de daglichtsimulaties wordt gebruik gemaakt van het lichtberekeningsprogramma Dialux evo. Het zomercomfort wordt geëvalueerd met de modellerings- en simulatieomgeving van Modelica, deze wordt aangevuld met de IDEAS bibliotheek.

Om de twee variabelen te achterhalen aan de hand van de simulatiesoftware is er een basismodel vereist. Er wordt een representatief model opgesteld voor zowel een klaslokaal in een nieuwbouwschool als een klaslokaal in een gerenoveerde school. Als uitgangspunt voor het opstellen van het klasmodel in nieuwe scholen wordt gebruik gemaakt van enkele ontwerprichtlijnen uitgegeven door AGIOn, GO! en de KU Leuven [2]–[4]. Het gerenoveerde klasmodel wordt uitgewerkt op basis van ministeriële instructies en schooltraktaten uit de negentiende eeuw [5], [6]. De publicaties verschaffen voor beide modellen informatie over de ligging en omgeving van klaslokalen, de geometrie en indeling van leslokalen, de eigenschappen van wanden en oppervlakken, de grootte, positie en oriëntatie van openingen, het type openingen en de eigenschappen van de beglazing.



Figuur 1 Basismodel nieuw en gerenoveerd klaslokaal

Om de daglicht- en binnenklimaatsimulaties te kunnen uitvoeren zijn er naast het basismodel bijkomende parameters vereist.

A. Modelbeschrijving daglichtsimulaties

Om de daglichtkwaliteit te simuleren is het noodzakelijk om de positie en de grootte van de ramen in de software in te geven. Voor het gerenoveerde model werden deze reeds bepaald op basis van de ontwerprichtlijnen. Voor het nieuwe klaslokaal worden verschillende configuraties opgesteld op basis van het uitzicht en modellen uit het verleden. Aangezien de intensiteit en kleur van het natuurlijke licht varieert in functie van het seizoen en de dagelijkse beweging van de zon, moet er ook een locatie en tijdstip ingesteld worden. De simulaties worden uitgevoerd op 21 maart om 12 uur, de locatie wordt ingesteld op Brussel. Voor het berekenen van de daglichtfactoren wordt in de software het bewolkte hemeltype geselecteerd. Bij het uitvoeren van de daglichtsimulaties wordt onderzoek gedaan naar de invloed van volgende zaken; het glaspercentage, de omgeving, het type beglazing, verscheidene zonweringen, het type openingen, de eigenschappen van de wanden, de geometrie van de ruimte en toegepaste ruimtelijke elementen.

B. Modelbeschrijving binnenklimaatsimulaties

In eerste plaats worden de constructiesamenstellingen en bijhorende materiaaleigenschappen ingevoerd. Er wordt gekozen voor een traditionele opbouw met spouwmuur. De interne warmtewinsten worden bepaald op basis van de bezetting, er wordt rekening gehouden met 26 personen. Het model wordt verder aangevuld met een ventilatiesysteem D en een debiet overeenkomstig luchtkwaliteit IDA 2. Verder wordt een reëel klimaatbestand van Ukkel ingevoerd. Het zomercomfort wordt nagegaan voor de maanden april, mei en juni. Bij de evaluatie van het zomercomfort worden volgende zaken in rekening gebracht; het glaspercentage, de oriëntatie en het type openingen, eigenschappen van de beglazing, zonwering en ventilatie.

IV. Resultaten

A. Daglichtsimulaties

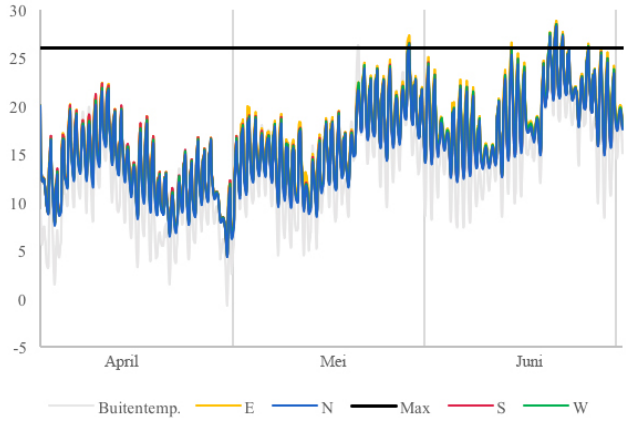
Zonder het gebruik van overmatige glasoppervlakken blijkt het geen evidentie om de minimale daglichtkwaliteit, gedefinieerd door de CEN daglichtnorm, te behalen. Eenzijdig belichte klaslokalen zijn hierbij de grootste uitdaging. Het toepassen van enkele doeltreffende ingrepen kan echter de daglichttoetreding in klaslokalen aanzienlijk optimaliseren. Bij het analyseren van de verschillende simulaties kan er opgemerkt worden dat kleine ingrepen zoals het plaatsen van diepe vensterbanken met een hoge reflectiefactor of het voorzien van lichte, heldere kleuren op de achterwand al een beduidend positief effect leveren. Ramen die doorgetrokken worden tot voorbij het verlaagd plafond zijn eveneens gunstig. Ook het afschuinen van de dagkanten kan bijdragen aan de daglichtkwaliteit. Een hoek van 45° is hierbij het meest aangewezen, de simulaties tonen daarenboven aan dat het geleverde voordeel steeds in relatie staat tot de afmetingen van de penanten. Hoe kleiner de afmetingen tussen twee openingen zijn, hoe groter de impact op de daglichtfactor. De daglichtkwaliteit in eenzijdig belichte leslokalen kan evenwel het best geoptimaliseerd worden door het plaatsen van interne ramen, de aangrenzende ruimte moet in dit geval uiteraard voorzien zijn van voldoende daglicht. Bovendien hebben ook de grootte en de positie van zowel de interne openingen als de gevelopeningen een belangrijke invloed.

Uit de resultaten van de daglichtsimulaties blijkt eveneens dat de ligging en de onmiddellijke omgeving van het klaslokaal een significante invloed hebben. Schoolgebouwen die gelegen zijn in een stedelijk gebied zullen bijgevolg de grootste problemen ondervinden bij het voorzien van voldoende natuurlijke verlichting. Het behalen van een minimale daglichtkwaliteit bij eenzijdig belichte klaslokalen die zich aan de straatzijde bevinden blijkt in dit geval praktisch onmogelijk. In nieuwbouwscholen worden deze ruimtes bijgevolg beter benut voor functies die minder daglicht vereisen.

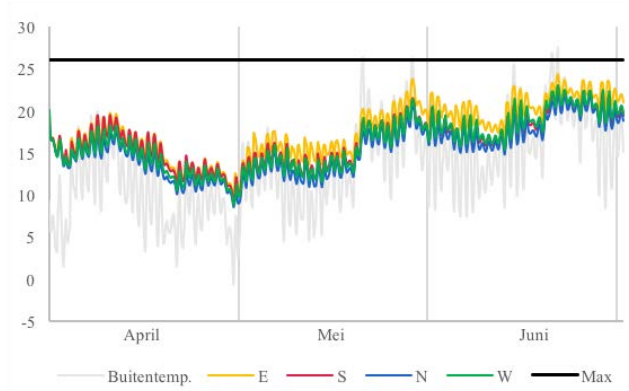
Het onderzoek naar de daglichtkwaliteit toont anderzijds ook aan dat energiebesparende ingrepen en ingrepen met het oog op de optimalisatie van het binnenklimaat de daglichttoetreding aanzienlijk beïnvloeden. Het effect van deze ingrepen mag in het bijzonder niet verwaarloosd worden bij de renovatie van schoolgebouwen. Zo zal het plaatsen van een sterk isolerende beglazing in de meeste gevallen gepaard gaan met een beduidende reductie van de daglichttoetreding. Ook bij het aanwenden van zonwerende beglazing wordt een daling van de daglichtfactor vastgesteld. Bovendien is er op de genereerde 3D visualisaties in de Dialuxsoftware een duidelijke kleurtransformatie van het invallende daglicht waar te nemen. Zonwerende beglazingen dienen derhalve in de mate van het mogelijke vermeden te worden. Zonwering in de vorm van screens of lamellen dienen eveneens vermeden te worden, de uitgevoerde simulaties tonen immers aan dat ze het klaslokaal te veel verduisteren en het uitzicht naar buiten te sterk belemmeren. Bescherming tegen de invallende zomerzon kan evenwel geboden worden door horizontale luifels of lichtplanken te voorzien. Lichtplanken hebben een lichte voorkeur aangezien deze tezelfdertijd het daglicht dieper in de ruimte sturen en een efficiënte bescherming bieden tegen de zon.

B. Binnenklimaatsimulaties

Oververhitting kan zowel optreden in nieuwe als gerenoveerde klaslokalen. De simulaties tonen algemeen aan dat de binnentemperaturen steeds schommelen in functie van de buitentemperaturen. Warme dagen resulteren bijgevolg in een reële kans op oververhitting. Als gevolg van de hoge bezettingsgraad kampen klaslokalen met hoge interne warmtewinsten, ze hebben zowaar de grootste invloed op het binnenklimaat. Klaslokalen moeten daarom in de eerste plaats voorzien worden van voldoende hygiënische ventilatie. De simulaties tonen aan dat een ventilatiedebiet volgens IDA 3 doorgaans ontoereikend is. Anderzijds kan het voorzien van voldoende thermische massa ook een oplossing bieden.



Figuur 2 Simulatie zomercomfort met bezetting



Figuur 3 Simulatie zomercomfort zonder bezetting

De oriëntatie van de openingen en het glaspercentage zijn ondergeschikt aan de interne warmtewinsten, hun impact is desondanks niet verwaarloosbaar. Ten gevolge van de lage zonnestand hebben klaslokalen met oost- en westgerichte openingen het meest kans op oververhitting. Oververhitting bij zuidgeoriënteerde openingen kan makkelijk beheerst worden door het plaatsen van luifels of lichtplanken. Zenitale openingen leiden al met een beperkt glasoppervlak tot te hoge binnentemperaturen, speciale aandacht is vereist om een comfortabel binnenklimaat te realiseren. Er dient daarnaast benadrukt te worden dat het aanvaardbare glaspercentage steeds afhankelijk is van de oriëntatie en de eigenschappen van de beglazing. De betrouwbaarheid van richtlijnen die eenvoudigweg glaspercentages voorschrijven is derhalve betwistbaar. Dynamische simulaties bieden voor complexe omgevingen, zoals schoolgebouwen, een correcter resultaat.

V. CONCLUSIE

In deze studie werd onderzoek verricht naar de daglichtkwaliteit in klaslokalen. Er werd nagegaan hoe deze verbeterd kan worden en wat de impact is van energiebesparende ingrepen en ingrepen ter optimalisatie van het thermisch comfort. Ten slotte werd achterhaald of er met de getroffen maatregelen in functie van de daglichttoetreding een aanvaardbaar binnenklimaat in klaslokalen gerealiseerd kon worden.

Er kan besloten worden dat het verenigen van voldoende daglicht en aanvaardbare binnentemperaturen in klaslokalen geen eenvoudige opgave is. Beide zaken dienen voortdurend ten opzichte van elkaar afgewogen te worden. Rekening houdend met zowel het daglicht- als het oververhittingsaspect genieten klaslokalen met noord- en zuidgeoriënteerde openingen de voorkeur. In deze situaties zijn de binnentemperaturen immers het makkelijkst te beheersen waardoor het mogelijk is om iets grotere openingen te voorzien die op hun buurt gunstig zijn voor de daglichtkwaliteit. Voor klaslokalen met zuidgeoriënteerde openingen resulteert dit in het plaatsten van lichtplanken. In het ideale geval wordt het klaslokaal bovendien uitgerust met transparante gordijnen om een oplossing te bieden tegen verblinding en schittering. Verduisterende gordijnen zijn daarnaast gunstig bij het gebruik van projectoren. Klaslokalen met noordgerichte openingen vergen geen bijkomende maatregelen, deze bezorgen de ruimte te allen tijde een diffuus en zacht licht. Er moet niettegenstaande opgemerkt worden dat de ruimte op geen enkel moment direct zonlicht ontvangt, wat in de CEN daglichtnorm daarentegen wel aangeraden wordt.

REFERENTIES

[1] CEN, "EN 17037. Daylight of buildings," 2018.

[2] AGION, "Daglicht en verlichting | AGION." [Online]. Available: https://www.agion.be/daglicht-en-verlichting. [Accessed: 14-Mar-2019].

[3] GO! onderwijs van de Vlaamse Gemeenschap; Agentschap voor Infrastructuur in het Onderwijs (AGION); evr-Architecten, *Naar een Inspirerende Leeromgeving: instrument voor duurzame scholenbouw*. Uitgeverij Politeia Editions, 2010.

[4] KU Leuven Technologiecampus Gent; Pixii vzw; Wetenschappelijk en Technisch Centrum voor het Bouwbedrijf, "Licht in scholen: van beginner tot expert," Gent, 2016.

[5] W. Janssens; Ministère de l'intérieur, *Instructions ministérielles concernant la construction des maisons d'écoles primaires communales suivies d'une instruction spéciale sur le chauffage et la ventilation des salles d'écoles, et d'une série de plans modèles, avec devis et texte explicat*. Brussel: Heger, J., 1852.

[6] F. Narjoux, *Les écoles publiques: construction et installation en Belgique et en Hollande*. Parijs: A. Morel, 1878.

Implementation of the CEN daylight standard in school design

Nele Van de Voorde

Supervisors: Prof. dr. ir. Anorld Janssens, Martijn Vyncke

Abstract **This study investigates the daylight quality and related summer comfort in classrooms of newly-built schools and renovated schools. The evaluation is based on (dynamic) simulations.**

Keywords **daylight quality, classrooms, CEN daylight standard, overheating, summer comfort**

I. Introduction

Since the dawn of humanity, daylight plays a crucial role in the everyday life of humans. The importance of daylight extends far beyond an aid to vision. Sufficient daylight is necessary for human health and well-being. Various physiological and psychological reactions in the human body have, over time, been adjusted to the spectral nature of the sun and the variation between light and darkness. Nowadays, however, people spend more and more time in the indoor environment. The lack of daylight in buildings and the impact that this has on its users are not negligible. Furthermore, daylight is a free and inexhaustible source, its potential to reduce energy consumption in buildings is not used to its full extent. Daylight is of inestimable value, when designing buildings one must always strive to create bright interior spaces where daylight represents the most important source of lighting.

Daylight also has a considerable influence in school buildings. Various studies demonstrate that natural light can significantly improve the behavior and learning performance of children and adolescents. On top of that, it is proven that higher daylight levels lead to a better concentration and less sleepiness. In general, it can be observed that there is a decrease in absenteeism in classrooms with sufficient daylight. As children and adolescents spend a great amount of their time inside school buildings, there is a need for classrooms with a qualitative indoor environment. The thermal indoor climate and air quality also play an important role in this.

The aim of this study is on the one hand to investigate how daylight quality in classrooms can be optimized and on the other hand to investigate the impact of energy saving measures and measures taken in the interest of the indoor climate on daylighting. In addition, it is being examined whether in classrooms an acceptable indoor climate can be achieved with the measures taken based on the daylight quality.

II. Literature

A. Standards

The importance of daylight is getting more and more attention in various international and European standards. The published standards are however not binding, legal requirements have not yet been laid down.

The daylight aspects discussed in the standards are very diverse and deal with different interests, they range from the lighting requirements for workplaces to the spectral sensitivity of light. Based on this research the most important norm is the recently published standard EN 17037 [1]. This standard focuses fully on the importance of daylight in buildings. In particular, the standard provides a number of guidelines regarding daylight provision. Based on the illuminance, the quality of the daylighting is divided into three classes.

Table 1 Recommendations of daylight provision by vertical and inclined window

	E_T	F_{plane}	E_{TM}	F_{plane}	F_{time}
	(lux)	(%)	(lux)	(%)	(%)
Minimum	300	50	100	95	50
Medium	500	50	300	95	50
High	750	50	500	95	50

Table 2 Recommendations of daylight provision by horizontal windows

	E_T	F_{plane}	F_{time}
	(lux)	(%)	(%)
Minimum	300	95	50
Medium	500	95	50
High	750	95	50

To exceed an illuminance level of 100, 300, 500 or 750 lux a minimum daylight factor of respectively 0.7%, 2%, 3.3% and 5% must be achieved in Belgium.

The prescribed recommendations are applied in further research.

B. Issues and concerns

Despite the many efforts, various issues still stand in the way of optimizing the daylighting. Furthermore, attention must be drawn to the prevailing conflict between the daylight quality and the thermal comfort within buildings. The various issues are already extensively discussed in today's scientific literature. The biggest weaknesses are:

1) Window reveals

As a result of the stricter energy performance regulations, a strong increase in the thickness of walls in buildings is observed. The widening of the reveal sides, however, disturbs the provision of daylight.

2) Transmittance of the glazing

In recent decades, different kinds of glazing, such as triple glazing and glazing with coatings and gases, have been brought on the market. The improved quality in terms of energy consumption, on the other hand, is accompanied by a remarkable reduction in light and solar energy transmittance.

3) Glass tint

Large windows are indispensable in contemporary architecture. As a solution for the excessive solar gains associated with it, sun control glass was introduced. However, in several cases the technological glazing significantly disturb the color rendering of the daylight indoors. The changes can have major consequences for the perception of both the visual and non-visual system of humans.

4) Uniformity

When evaluating the daylighting in indoor spaces, it can be perceived that the uniformity of the illumination level is often inadequate. When too little attention is given to the uniformity, it leads to disturbing shadows on the work plane and eye fatigue.

5) Position and size of windows

Large windows are beneficial for daylighting, reducing electricity consumption for artificial lighting, the view and the spatial experience. On the other hand, they result in greater heat gains and heat losses in summer and winter. When determining the dimensions of windows, more attention must be paid in creating a balance between daylighting and the thermal indoor comfort.

6) Innovative daylight systems

Daylight systems are used to improve light distribution within rooms and to prevent glare and overheating. However, many of these techniques block the natural incident daylight and obstruct the view to the outside environment.

III. Research method

The daylight quality and summer comfort in classrooms are examined using simulation software. The lighting calculation software Dialux evo is used for the daylight simulations. The indoor climate is evaluated by using the modeling and simulation environment of Modelica, which is supplemented with the IDEAS library.

To analyze both variables using simulation software, a base model is required. A representative model is created for both a classroom in a newly-built school and a classroom in a renovated school. A number of design guidelines published by AGIOn, GO! and the KU Leuven serve as a base for developing the classroom model in new schools [2]–[4]. The renovated class model is elaborated on the basis of ministerial instructions and school treaties from the nineteenth century [5], [6]. The publications provide for both models information about the location and environment of classrooms, the geometry and layout of classrooms, the properties of walls and surfaces, the size, position and orientation of openings, the type of openings and the properties of the glazing.

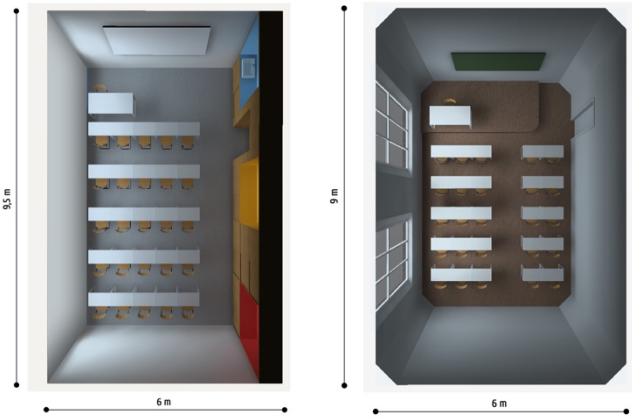


Figure 1 Base model new and renovated classroom

In order to perform daylight and indoor climate simulations, a few additional parameters are required to complement the basic model.

A. Model set-up daylight simulations

To simulate the daylight quality, it is essential to enter the position and size of the windows in the software. For the renovated classroom, these were already determined based on the design guidelines. For the new classroom, different configurations are set up based on the view-out and models from the past. Since the intensity and color of the natural light varies depending on the season and the daily movement of the sun, a location and time must be set. The simulations are performed on March 21 at 12 noon, the location is set to Brussels. The overcast sky is selected to calculate the daylight factors. The influence of following parameters are taken into account during the daylight simulations; the percentage of glass, the environment, the type of glazing, various sun blinds, the type of openings, the geometry of the room and added elements.

B. Model set-up indoor climate simulations

In the first place, the wall and floor constructions with associated material properties are determined. A traditional construction with a cavity wall is chosen. The internal heat gains are determined based on the occupancy, 26 people are taken into account. Next, the model is provided with a ventilation system D, the flow rate has an air quality according to IDA 2. Furthermore, a weather file from Uccle with realistic outdoor temperatures is imported. The indoor climate is examined for the months of April, May and June. The following items are taken into account when evaluating the thermal comfort; the percentage of glass, the orientation and type of openings, the properties of the glazing, sun blinds and ventilation.

IV. Results

A. Daylight simulations

Without the use of excessive glass surfaces, it appears to be difficult to achieve the minimum daylight quality, defined by the CEN daylight standard. Side-lit classrooms are the biggest challenge. However, the application of some effective

measures can optimize the daylight provision in classrooms significantly. When analyzing the different simulations, it can be noticed that small measures, such as placing deep window sills with a high reflection factor or light, bright colors on the back wall already provide a significant positive effect. Windows that extend beyond the false ceiling are also favorable. Beveled window reveals can also contribute to the daylight quality. An angle of 45° is most suitable, besides that the simulations also prove that the advantage is related to distance between the openings. The smaller the dimensions between two openings, the greater the impact on the daylight factor. However, the daylight quality in side-lit classrooms can best optimized by installing internal windows, in this case the adjacent room must of course be provided with sufficient daylight. Furthermore, the size and position of both the internal openings and the facade openings have an important effect.

The results of the daylight simulations also indicate that the location and environment of the classroom have a large impact. School buildings located in an urban area will therefore face the greatest difficulties in providing sufficient natural lighting. Achieving a minimum daylight quality within classrooms with openings on one side and located at the street side, appears to be practically impossible. In newly-built schools, these spaces are therefore better used for functions that require less daylight.

Furthermore, research into the daylight quality shows that energy-saving measures and measures beneficial to the indoor climate have a considerable impact on the daylighting. The effects of the interventions are especially not negligible when renovating school buildings. The installation of highly insulating glazing for example, will in most cases be accompanied by an important reduction of the daylight provision. A decrease in the daylight factor is also observed when using solar control glass. On top of that, the generated 3D visualizations in de Dialux software show that there is a clear color transformation of the incident daylight. Sun control glass should therefore be avoided. Sunshades in the form of screens or blinds should also be avoided, as the simulations indicate that they obscure the classroom too much and obstruct the view to the outside. However, protection against the incident summer sun can be provided by installing overhangs or light shelves. Light shelves are preferred as they send daylight deeper into the room and offer protection against the sun at the same time.

B. Indoor climate simulations

Overheating can occur in both new and renovated classrooms. In general, it can be observed that the indoor temperatures at all times fluctuate in function of the outdoor temperatures. Warm days therefore result in a real risk of overheating. Due to the high occupancy, classrooms suffer from high internal heat gains, they have the greatest impact on the indoor climate. Classrooms should therefore in the first place be provided with adequate hygienic ventilation. The simulations demonstrate that a ventilation rate in accordance with IDA 3 is usually insufficient. On the other hand, providing thermal mass can also offer a solution.

The orientation of the openings and the glass percentage are secondary to the internal heat gains, their impact is however not negligible. Due to the low sun position, classrooms with east and west facing openings have a high overheating risk. Overheating at south-facing openings can easily be controlled by installing overhangs or light shelves. Even with a limited glass surface, horizontal openings lead to excessive indoor temperatures, special attention is required to achieve a comfortable indoor climate. It must also be emphasized that the acceptable glass percentage always depends on the orientation and the properties of the glazing. The reliability of guidelines that simply prescribe glass percentages is therefore debatable. Dynamic simulations offer a more accurate result for complex systems, such as school buildings.

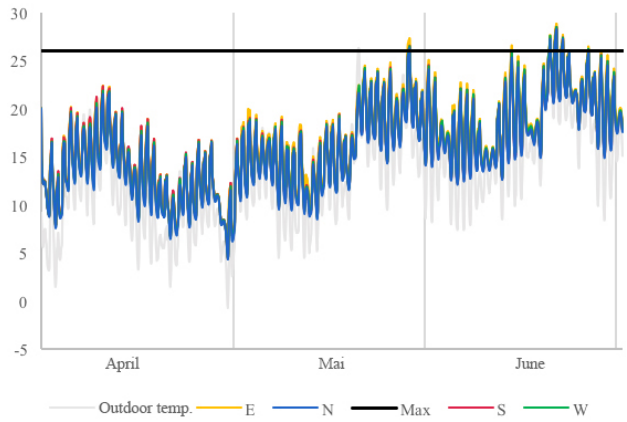


Figure 2 Simulation summer comfort with occupancy

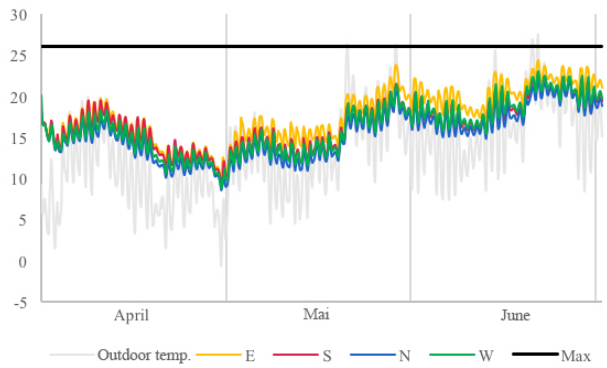


Figure 3 Simulation summer comfort without occupancy

V. Conclusion

In this study, research was done into the daylight quality in classrooms. It was examined how the daylight provision can be optimized and in what extent energy-saving measures and measures beneficial to the thermal comfort impact the daylighting. Finally, it was determined whether an acceptable indoor climate in classrooms could be achieved with the measures taken in function of the daylighting.

Based on the research it can be concluded that combining sufficient daylighting and acceptable indoor temperatures in classrooms is challenging. A balance must be sought at all times between both aspects. Taking into account both the daylight and the overheating aspect, classrooms with north and south oriented openings are preferred. In these configurations, the inside temperatures can be easily controlled, this makes it possible to provide slightly larger windows that are favorable for the daylight quality. To control the heat gains in classrooms with south-oriented openings, light shelves should be installed. In an ideal situation, the classroom is also equipped with transparent curtains to provide a solution against visual discomforts, such as glare. Blackout curtains are advantageous when using a projector. Classrooms with north-facing openings do not require any additional measures, the windows provide a diffuse and soft light at all times. However, it should be noted

that the room does not receive direct sunlight at any time, this is nevertheless recommended in the CEN daylight standard.

REFERENCES

[1] CEN, "EN 17037. Daylight of buildings," 2018.

[2] AGION, "Daglicht en verlichting | AGION." [Online]. Available: https://www.agion.be/daglicht-en-verlichting. [Accessed: 14-Mar-2019].

[3] GO! onderwijs van de Vlaamse Gemeenschap; Agentschap voor Infrastructuur in het Onderwijs (AGION); evr-Architecten, *Naar een Inspirerende Leeromgeving: instrument voor duurzame scholenbouw*. Uitgeverij Politeia Editions, 2010.

[4] KU Leuven Technologiecampus Gent; Pixii vzw; Wetenschappelijk en Technisch Centrum voor het Bouwbedrijf, "Licht in scholen: van beginner tot expert," Gent, 2016.

[5] W. Janssens; Ministère de l'intérieur, *Instructions ministérielles concernant la construction des maisons d'écoles primaires communales suivies d'une instruction spéciale sur le chauffage et la ventilation des salles d'écoles, et d'une série de plans modèles, avec devis et texte explicat*. Brussel: Heger, J., 1852.

[6] F. Narjoux, *Les écoles publiques: construction et installation en Belgique et en Hollande*. Parijs: A. Morel, 1878.

INHOUDSOPGAVE

DEEL 1: LITERATUURSTUDIE **1**

1. Inleiding **2**

2. Invloed van daglicht op het menselijk lichaam **3**

3. Normen **5**

3.1. ISO 8995 - Lighting of indoor work places 5

3.2. ISO 16817 - Building environment design — Indoor environment — Design process for the visual environment 5

3.3. NBN-EN 12464-1 – Light and lighting — Lighting of work places —Part 1: Indoor work places 6

3.4. EN 17037 - Daylight of buildings 6

4. Problematieken en aandachtspunten **8**

4.1. Dagkanten 8

4.2. Transmissie van glas 10

4.3. Glastinten 12

4.4. Uniformiteit 16

4.5. Positie en grootte van ramen 17

4.6. Innovatieve daglichtsystemen 19

DEEL 2: DAGLICHT IN SCHOLEN **21**

1. Inleiding **22**

1.1. Onderzoeksgebied 22

1.2. Impact van daglicht in scholen 23

1.2.1. Impact op het circadiane ritme van leerlingen 23

1.2.2. Impact op het ziekteverzuim van leerlingen 23

1.2.3. Impact op de concentratie van leerlingen 23

1.2.4. Impact op de leerprestaties van leerlingen 24

2. Verlichtingseisen in klaslokalen **26**

2.1. Verlichtingssterkte 26

2.2. Daglichtfactor 27

2.3. Uniformiteit 28

3. Richtlijnen bij het ontwerpen van klaslokalen **30**

3.1. Scholen voor de toekomst 30

3.1.1. Ontwikkeling van het klaslokaal 30

3.1.1.1. Ligging en omgeving 30

3.1.1.2. Geometrie en indeling van het klaslokaal 31

3.1.1.3. Eigenschappen van de wanden en oppervlakken ... 32
3.1.2. Gevelopbouw en daglichtopeningen ... 32
3.1.2.1. Grootte van de openingen ... 33
3.1.2.2. Positie van de openingen ... 33
3.1.2.3. Oriëntatie ... 34
3.1.2.4. Type ... 35
3.1.2.5. Eigenschappen van de beglazing ... 36
3.2. Scholen uit het verleden ... 37
3.2.1. Ontwikkeling van het negentiende-eeuwse klaslokaal ... 37
3.2.1.1. Omgeving en oriëntatie ... 37
3.2.1.2. Geometrie van het klaslokaal ... 38
3.2.1.3. Eigenschappen van de wanden en oppervlakken ... 39
3.2.2. Gevelopbouw en daglichtopeningen ... 39
3.2.2.1. Grootte en vormgeving van de openingen ... 40
3.2.2.2. Positie van de openingen ... 40
3.2.2.3. Type vensters ... 41

DEEL 3: DAGLICHTSIMULATIES ... 43

1. Inleiding ... 44

2. Berekeningsmethode ... 44
2.1. Lichtberekeningssoftware ... 44
2.2. Modelbeschrijving ... 45
2.2.1. Klaslokaal in nieuwbouwschool ... 45
2.2.2. Klaslokaal in negentiende-eeuwse school ... 46
2.3. Simulatieparameters ... 48
2.3.1. Hemeltype ... 48
2.3.2. Locatie en tijdstip ... 48
2.3.3. Berekeningsvlak en meetpunten ... 48

3. Bespreking daglichtsimulaties en hun resultaten ... 50
3.1. Daglichtsimulaties van klaslokaal in nieuwbouwschool ... 50
3.1.1. Gevelconfiguratie opgebouwd zoals in het verleden ... 50
3.1.2. Gevelconfiguratie op basis van uitzicht ... 52
3.1.3. Gevelconfiguratie op basis van uitzicht (optie 2) ... 60
3.2. Daglichtsimulaties van klaslokaal in de negentiende-eeuwse school ... 67
3.2.1. Model zonder context ... 67
3.2.2. Model met landelijke context ... 68
3.2.3. Model met stedelijke context ... 69
3.3. Maatregelen voor het behalen van een gemiddelde en hoge daglichtkwaliteit ... 72

DEEL 4: BINNENKLIMAATSIMULATIES ... 75

1. Inleiding ... 76
1.1. Oververhittingsgrens ... 76

2. Berekeningsmethode ... 78
2.1. Software ... 78
2.2. Modelbeschrijving ... 78
2.2.1. Klaslokaal in nieuwbouwschool ... 78
2.2.1.1. Ruimte en gebouwschil ... 79
2.2.1.2. Bezetting ... 81
2.2.1.3. Ventilatie ... 82
2.2.1.4. Verwarming ... 83
2.2.1.5. Locatie en klimaat ... 83
2.2.2. Klaslokaal in gerenoveerde school ... 84
2.2.2.1. Ruimte en gebouwschil ... 84
2.3. Simulatieparameters ... 85
2.3.1. Tijdstip ... 85

3. Bespreking oververhittingssimulaties en hun resultaten ... 86
3.1. Klaslokaal in nieuwbouwschool ... 86
3.1.1. Referentiemodel ... 86
3.1.2. Groter glaspercentage ... 89
3.1.3. Openingen in het dakvlak ... 91
3.1.4. Toepassen van zonwering ... 93
3.2. Klaslokaal in gerenoveerde school ... 94
3.3. Opmerkingen oververhittingssimulaties ... 96

DEEL 5: CONCLUSIE ... 97

BIJLAGE 1: RESULTATEN DAGLICHTSIMULATIES ... 100

Resultaten klaslokaal in nieuwbouwschool ... 100

Resultaten klaslokaal in de negentiende-eeuwse school ... 104

BIJLAGE 2: LICHTSTUDIES ... 106

REFERENTIES ... 110

Lijst van afbeeldingen

Afbeelding 1: Werking ipRGC cells ... 3
Afbeelding 2: Evolutie isolatienormen ... 8
Afbeelding 3: Invloed parameters op daglicht autonomie, verhouding daglicht autonomie - zonweringscoëfficiënt en de uniformiteit ... 9
Afbeelding 4: Spectrale transmissie van verschillende soorten beglazingen a) gelamineerde beglazing b) monolithische beglazing c) gecoate beglazing d) aangebrachte filmbeglazing ... 14
Afbeelding 5: Gemiddelde tijd gespendeerd in verschillende omgevingen ... 22
Afbeelding 6: Parameters die invloed uitoefenen op het leervermogen ... 24
Afbeelding 7: Type scholen a) de plattelandsschool b) de stadsschool ... 38
Afbeelding 8: Vormgeving dagkanten en vensterbank ... 40
Afbeelding 9: Negentiende-eeuws klaslokaal met typerende daglichtopeningen ... 40
Afbeelding 10: Type vensters a) guillotineraam b) pivoterend raam c) kipraam ... 42
Afbeelding 11: Geometrie en reflectiefactoren van het klaslokaal ... 46
Afbeelding 12: Geometrie en reflectiefactoren van klaslokalen uit het verleden ... 47
Afbeelding 13: Meetpunten op het berekeningsvlak van de modellen ... 49
Afbeelding 14: Overzicht van de verschillende ingrepen in testmodel 1 ... 51
Afbeelding 15: Afgeschuinde dagkanten (Back of the yards high school – Chicago, USA) ... 52
Afbeelding 16: Afgeschuinde bovenzijde buitenmuur (KU Leuven Campus Brugge – Brugge, België) ... 52
Afbeelding 17: Cirkelmethode voor het bepalen van de ramen op basis van het zicht ... 53
Afbeelding 18: Overzicht van de verschillende ingrepen in testmodel 2 ... 54
Afbeelding 19: Vensterbank als werktafel (kleuterschool – Prangins, Zwitserland) ... 56
Afbeelding 20: Vensterbank als opbergruimte en lichtplank (Thurston Elementary School – Springfield, USA) ... 56
Afbeelding 21: Overzicht van de verschillende ingrepen van testmodel 2 in een stedelijke context ... 57
Afbeelding 22: Doorlopende opening in dak (De Bloesem– Utrecht, Nederland) ... 59
Afbeelding 23: Trapsgewijs opgebouwde constructie (Sint Lucas Hogeschool – Gent, België) ... 59
Afbeelding 24: Cirkelmethode voor het bepalen van de ramen op basis van het zicht ... 60
Afbeelding 25: Overzicht van de verschillende ingrepen in testmodel 3 ... 61
Afbeelding 26: Hogere vrije hoogte aan ramen (De Groene School – Anderlecht, België) ... 62
Afbeelding 27: Uitsparing plafond ter hoogte van opening (Cebes School – Oporto, Portugal) ... 62
Afbeelding 28: Overzicht van de verschillende ingrepen in testmodel 3 met andere indeling ... 63
Afbeelding 29: Zenitaal verlichte verbindingsstraat (Brede School De Bunders – Oisterwijk, Nederland) ... 64
Afbeelding 30: Circulatie gang met interne ramen (Field Elementary School – Weston, USA) ... 64
Afbeelding 31: Overzicht resultaten van klaslokalen in nieuwbouwscholen ... 65
Afbeelding 32: Overzicht resultaten van klaslokalen in nieuwbouwscholen met stedelijke context ... 66
Afbeelding 33: Overzicht van de ingrepen in het testmodel betreffende de renovatie van klaslokalen ... 67
Afbeelding 34: Testmodel renovatie van klaslokalen in landelijke context ... 68
Afbeelding 35: Testmodel renovatie van klaslokalen in stedelijke context ... 69
Afbeelding 36: Smalle klaslokalen, voorzetramen en interne ramen (Dr Rijk Kramerschool – Amsterdam, Nederland) ... 70

Afbeelding 37: Renovatie school, interne ramen (BuBaO Sint-Lievenspoort – Gent, België) 70
Afbeelding 38: Overzicht resultaten betreffende de renovatie van oude klaslokalen 71
Afbeelding 39: Overzicht van ingrepen voor het behalen van een gemiddelde en hoge daglichtkwaliteit 72
Afbeelding 40: School met sheddaken (Kleuterschool Gekko – Bonheiden, België) 74
Afbeelding 41: Klaslokaal met gespreide daklichten (JSRACS Beechboro Kindergarten– Mirrabooka, Australië) 74
Afbeelding 42: Simulatiemodel klaslokaal 79
Afbeelding 43: Submodel ruimte en gebouwschil 80
Afbeelding 44: Interne warmtewinsten tijdens een winter- en zomerweek 82
Afbeelding 45: Weerprofiel Ukkel 84
Afbeelding 46: Binnentemperatuur referentiemodel zonder bezetting 86
Afbeelding 47: Binnentemperatuur referentiemodel met bezetting 87
Afbeelding 48: Warmtewinst op één raam (4,2m^2) 87
Afbeelding 49: Evaluatie zomercomfort in referentiemodel 88
Afbeelding 50: Binnentemperatuur klasmodel met WFR 24% 89
Afbeelding 51: Binnentemperatuur klasmodel met WFR 33% 90
Afbeelding 52: Evaluatie zomercomfort in klasmodellen met groter glaspercentage 91
Afbeelding 53: Binnentemperatuur klaslokalen met daklichten 91
Afbeelding 54: Vergelijking warmtewinst zenitale en laterale opening 92
Afbeelding 55: Evaluatie zomercomfort in klasmodellen met daklichten 93
Afbeelding 56: Binnentemperatuur klasmodel met zonwering 93
Afbeelding 57: Evaluatie zomercomfort in klasmodellen met zonwering 94
Afbeelding 58: Binnentemperatuur in gerenoveerd klaslokaal 95
Afbeelding 59: Evaluatie zomercomfort in gerenoveerd klaslokaal 95
Afbeelding 60: Lichtstudie basis testmodel 2 106
Afbeelding 61: Lichtstudie testmodel 2 met horizontale luifel 106
Afbeelding 62: Lichtstudie testmodel 2 met lichtplank 0,5 m op 2 m 107
Afbeelding 63: Lichtstudie testmodel 2 met lichtplank 0,5 m op 2,3 m 107
Afbeelding 64: Lichtstudie testmodel 2 met lichtplank 1 m op 2 m 108
Afbeelding 65: Lichtstudie testmodel 2 met lichtplank 1 m op 2,3 m 108
Afbeelding 66: Lichtstudie testmodel 2 met lichtplank los van buitenmuur 109
Afbeelding 67: Lichtstudie testmodel 2 met lamellen aan de buitenzijde 109

Lijst van tabellen

Tabel 1: Aanbevelingen voor daglichttoetreding door verticale en hellende openingen 6
Tabel 2: Aanbevelingen voor daglichttoetreding door horizontale openingen 6
Tabel 3: Eigenschappen lichttransmissie van verschillende types beglazingen 10
Tabel 4: Kleurkwaliteitsklassen op basis van CIE CRI waarden 13
Tabel 5: Kleurkwaliteit verschillende soorten beglazingen 13
Tabel 6: Licht geleidende systemen en hun kenmerken, overgenomen uit I. L. Wong [10] 20
Tabel 7: Eisen voor schoolgebouwen uit de norm NBN EN 12464-1 26
Tabel 8: Overzicht van taken in klaslokalen met de vereiste verlichtingssterkte 27
Tabel 9: Aanbevolen reflectiecoëffieciënten volgens NBN EN 12464-1 32
Tabel 10: Richtlijnen voor het bepalen van het rekenraster 49
Tabel 11: Resultaten van de daglichtsimulaties van testmodel 1 51
Tabel 12: Resultaten van de daglichtsimulaties van testmodel 2 55
Tabel 13: Resultaten van de daglichtsimulaties van testmodel 2 in een stedelijke context 58
Tabel 14: Resultaten van de daglichtsimulaties van testmodel 3 61
Tabel 15: Resultaten van de daglichtsimulaties van testmodel 3 met andere indeling 63
Tabel 16: Resultaten van de daglichtsimulaties van het testmodel betreffende de renovatie van klaslokalen 68
Tabel 17: Resultaten van de daglichtsimulaties van het testmodel betreffende de renovatie van klaslokalen (landelijke context) 69
Tabel 18: Resultaten van de daglichtsimulaties van het testmodel betreffende de renovatie van klaslokalen (stedelijke context) 70
Tabel 19: Resultaten daglichtsimulaties met gemiddelde/ hoge daglichtkwaliteit 73
Tabel 20: Bepaling comforttemperatuur 77
Tabel 21: Constructiesamenstelling van de componenten met bijhorende eigenschappen (nieuwbouwschool) 81
Tabel 22: Interne warmtewinsten klaslokaal 81
Tabel 23: Classificatie binnenluchtkwaliteit 83
Tabel 24: Constructiesamenstelling van de componenten met bijhorende eigenschappen (gerenoveerde school) 85

Lijst van symbolen

λ-waarde	Thermische geleidbaarheid [W/mK]
ρ	Dichtheid [kg/m^3]
d	Dikte [m]
DF	Daglichtfactor [%]
E_T	Gewenste verlichtingssterkte [lux]
E_{TM}	Minimale gewenste verlichtingssterkte [lux]
F_{plane}	Fractie van het referentievlak voor streefniveau van de verlichtingssterkte [%]
F_{time}	Fractie tijd waarvoor een bepaalde waarde van verlichtingssterkte wordt overschreden [%]
R_a	Kleurweergave-index
$R_{a,D65}$	Kleurweergave-index volgens D65
U_0	Uniformiteit

Lijst van afkortingen

AGION	Agentschap voor infrastructuur in het onderwijs
CL	Circadiane licht
CIE	Commission Colour de l'Eclairage
CRI	Colour Rendering Index
DA	Daglicht autonomie
DBFM	Design, Build, Finance and maintain
DGP	Daylight glare probability
Dymola	Dynamic Modeling Language
EPB	Energieprestatie en Binnenklimaat
IDA	InDoor Air Control
IDEAS	Integrated District Energy Assessment by Simulation
ipRGC's	Intrinsically photosensitive retinal ganglion cells
IWW	Interne warmtewinsten
LGS	Licht geleidende systemen
LTA	Lichttoetredingsfactor
LTS	Licht transporterende systemen
NIF	Non-image-forming
PMV	Predicted Mean Vote
PPD	Predicted percentage of dissatisfied
SRR	Skylight-to-roof-ratio
UGR	Unified Glare Rate (Verblindingsgraad)
VGI	Verbond van de glasindustrie
WFR	Window-to-floor-ratio
WTCB	Wetenschappelijk en Technisch Centrum voor het Bouwbedrijf
WWR	Window-to-wall-ratio
ZTA	Zonnetoetredingsfactor

Deel 1: Literatuurstudie

1. Inleiding

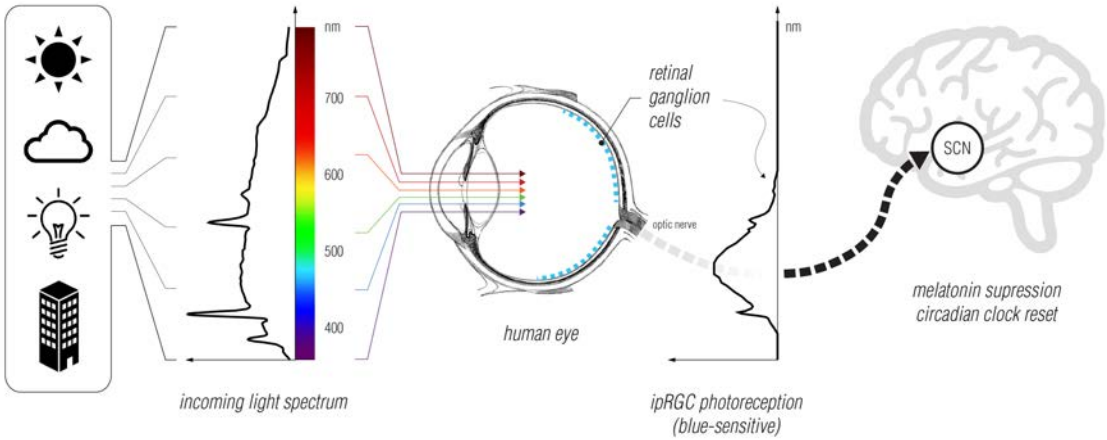
Al sinds het ontstaan van de mens vervult daglicht een cruciale rol binnen ons bestaan. Aangezien het leven zich vroeger steeds afspeelde onder invloed van het zonlicht, is het niet verrassend dat dieren en mensen een reeks fysiologische reacties ontwikkeld hebben die afgesteld zijn op het spectrale karakter van de zonnestraling en de dagelijkse en seizoensgebonden variaties. Omdat de mens vroeger steeds buiten leefde kon hij te allen tijde genieten van deze natuur en haar voordelen. Het menselijk wezen is van nature niet ingesteld op kunstlicht, zijn bioritme is sterk afhankelijk van enerzijds daglicht en anderzijds natuurlijke duisternis [1]. Een belangrijke verandering dringt zich op nu we steeds meer tijd doorbrengen in de binnenomgeving. Omdat natuurlijk daglicht ons veel voordelen kan bieden op vlak van welzijn is het fundamenteel om zo veel mogelijk daglicht in gebouwen te laten binnenvallen.

Daglicht vormt ook een belangrijke factor in de manier waarop we gebouwen en ruimtes ervaren. Door zijn voortdurende wisseling in intensiteit en kleur ontstaat een dynamische en energieke sfeer die speelt met de vormen, structuur en textuur van de binnenomgeving. Daarenboven is daglicht een bron die onuitputtelijk en kosteloos is. Het gebruik ervan leidt bovendien tot een maatregel om primaire energie te besparen en CO_2-uitstoot te verminderen. Op deze manier kunnen energiekosten voor een aanzienlijk deel beperkt worden.
In deel 1 wordt gefocust op de reeds aanwezige literatuur en worden de belangrijkste aandachtspunten uiteengezet voor het vervolg van deze thesis.

2. Invloed van daglicht op het menselijk lichaam

Het is vanzelfsprekend dat daglicht onmisbaar is om visuele taken uit te voeren, daarenboven bevordert het de ruimtebeleving en functionaliteit wat bijdraagt aan het algehele comfort. Anderzijds heeft de variatie in daglicht ook een grote impact op allerhande biologische processen, de factoren die hieraan gerelateerd zijn, zijn een stuk complexer. In dit geval spreekt men over de fysiologische en psychologische aspecten van daglicht.

De ontdekking van een nieuwe fotoreceptor in 2002 maakt deel uit van een belangrijke doorbraak in het onderzoek naar de invloed van daglicht op het menselijk lichaam. Naast de vertrouwde receptoren voor zicht, de staafjes en kegeltjes, speelt de nieuwe receptor een belangrijke rol in de niet-visuele effecten van licht. De receptor heeft een piekgevoeligheid van om en bij de 490 nm, gelegen in het zichtbare spectrum met kortere golflengtes (Afbeelding 1). Ze staan bekend als de 'intrinsically photosensitive retinal ganglion' cells (ipRGC's). De cellen bevatten het fotopigment melanopsine, waardoor ze direct op licht kunnen reageren [2]. Op een ingewikkelde manier wordt het licht omgezet in prikkels, de fotoreceptor heeft op die manier het vermogen om rechtstreeks te communiceren met de hersenen.



Afbeelding 1: Werking ipRGC cells

De afgelopen 25 jaar werden mede door de ontdekking van ipRGC's belangrijke ontwikkelingen achterhaald. Naast het essentieel belang van licht op het gezichtsvermogen, werd wetenschappelijk bewezen dat daglicht ook belangrijke biologische effecten uitoefent op de mens. Deze effecten zijn van belang voor de gezondheid van de mens, zijn prestaties en zijn welzijn, ze worden vaak benoemd als de "non-image-forming" (NIF) effecten van licht. Deze biologische effecten zijn afkomstig van het oog en differentiëren zich van de huidgerelateerde reacties zoals de productie van vitamine D, huidaandoeningen en zonneallergie. Ze zijn bovendien afhankelijk van de intensiteit, de spectrumverdeling, de ruimtelijke verdeling, de timing en duur van de blootstelling, de geschiedenis van blootstelling aan licht en persoonsspecifieke parameters zoals onze biologische klok, het circadiane ritme [3].

Daglicht vormt de krachtigste besturing voor de menselijke biologische klok en beïnvloedt zodoende allerlei processen in ons lichaam zoals de aanmaak van hormonen, vitaminen en andere stoffen. Daglicht kan cruciale verschuivingen teweegbrengen in het complex circadiane ritme en het bepaalt eveneens de timing van de slaap- en waakcyclus. Licht gedurende de dag is van groot belang voor het stimuleren van onze alertheid. Bovendien verhoogt het de productie van serotonine, het gelukshormoon, dat bijdraagt aan onze gevoelens en welzijn [4]. Licht in de avond verstoort daarentegen onze slaap doordat de nachtelijke productie van het slaaphormoon melatonine afneemt [5], [6]. In veel gebouwen is er een ondermaatse toetreding van daglicht waardoor er een te klein verschil tussen dag- en nachtverlichting heerst. Dit gebrek resulteert in een verzwakking van het menselijk circadiane ritme waardoor verschillende problemen met slaapstoornissen zoals DSPS (Delayed Sleep Phase Syndrome) of ASPS (Advanced Sleep Phase) Syndrome kunnen optreden [7]. Ongeveer 65% van de volwassenen in onze huidige samenleving ervaart verschillende vormen van slaapstoornissen.
Naast de invloed op onze slaapcyclus werd ook wetenschappelijk bewezen dat licht onze alertheid verbetert, de hartslag kan verhogen, seizoens- en niet-seizoensgebonden depressies kan verlichten, de thermoregulatie van het menselijk lichaam kan beïnvloeden en impact heeft op ons eetpatroon [8], [9]. Voldoende daglicht is dus niet enkel noodzakelijk voor de gezondheid en het welzijn van de mens, maar aangezien onze alertheid verbetert leidt het ook tot betere werkprestaties, minder fouten en een betere veiligheid [10].

De nieuwe fundamentele kennis over deze niet-visuele effecten van licht op de mens moet dringend in rekening gebracht worden bij het onderzoek naar de optimalisatie van daglichttoetreding in gebouwen. De hoeveelheid daglicht in gebouwen wordt beter niet louter bepaald worden op basis van de daglichtfactor. Daglicht heeft een dynamisch karakter en wisselt in intensiteit, spectrum en verdeling. Door de positie van de zon en afwisseling in weersomstandigheden varieert het licht gedurende de dag. Het cyclisch karakter prikkelt de mens en vormt een essentiële factor voor zijn fysiek en psychisch welzijn en zijn gezondheid. Geen enkele kunstverlichting, hoe geavanceerd ook, kan tippen aan de positieve effecten van natuurlijk daglicht.

3. Normen

Vandaag wordt reeds in verscheidene internationale en Europese normen het gebruik van daglicht aangemoedigd. Deze normen zijn steeds vrijblijvend, ze adviseren hoe daglicht op een correcte manier kan benut worden. Wettelijke eisen zijn tot op heden niet vastgelegd. Ze kunnen niettemin wel bindend worden indien ze opgenomen worden in het bestek of als er in de regelgeving naar verwezen wordt. Daarenboven kan vastgesteld worden dat de huidige normen, regelgeving en praktijk in de meeste gevallen focussen op visuele en energiebesparende aspecten van licht. Facetten die betrekking hebben op de 'non-image-forming' effecten worden vaak buiten beschouwing gelaten. Mocht men de negatieve effecten, te wijten aan een tekort aan daglicht, exacter kunnen bewijzen, zouden de normen mogelijks afdwingbaar kunnen gemaakt worden. Hieronder wordt een kort overzicht gegeven van de inhoud van de huidige belangrijkste normen.

3.1. ISO 8995 - Lighting of indoor work places

De internationale norm ISO 8995 CIE S 008/E [11] opgesteld door de internationale commissie voor verlichting omschrijft verlichtingsvereisten voor werkplekken binnenshuis zodat mensen comfortabel en op een veilige manier visuele taken efficiënt kunnen uitvoeren gedurende hun volledige werkperiode. De aangewende verlichting hiervoor kan zowel bestaan uit daglicht, kunstverlichting of een combinatie van beide. De verlichtingsvereisten worden aan de hand van verschillende lichtontwerpcriteria besproken, dit zijn; de verlichte omgeving, verlichtingsdistributie, verlichtingssterkte, verblinding, directionaliteit, kleuraspecten, daglicht, onderhoud, energieoverwegingen, lichtflikkering en stroboscopisch effecten en noodverlichting. In het onderdeel handelend over daglicht wordt het belang van visueel contact met de buitenwereld benadrukt, hierbij moet aandacht gevestigd worden op het vermijden van overmatige contrasten en thermisch ongemak. Verder wordt er vermeld dat in interieurs met zijramen de daglichtfactor (DF) niet minder dan 1% mag bedragen op het werkvlak op 3 m van de venstermuur en 1 m van de zijwanden. Ook niet onbelangrijk is de informatie betreffende de uniformiteit die meegegeven wordt in het onderdeel over de verlichtingssterkte. Hierbij wordt vermeld dat de verlichting op het werkvlak zo uniform mogelijk moet zijn en dat de waarde niet minder dan 0,7 mag bedragen. De uniformiteit van de onmiddellijke omgeving moet daarenboven een minimumwaarde van 0,5 hebben. In de norm wordt eveneens een gedetailleerde tabel weergegeven waarin voor verschillende types van gebouwen en activiteiten de verlichtingssterkte, de verblindingsgraad en de minimale kleurweergave-index vastgelegd worden.

3.2. ISO 16817 - Building environment design — Indoor environment — Design process for the visual environment

In de internationale norm, ISO 16817 [12], wordt een geïntegreerd ontwerpproces voorgesteld voor ontwerpteamleden om op een hoogwaardige manier een visuele binnenruimte te creëren. Het ontwerpproces wordt in de norm opgesplitst in vijf fases; de formulering van de projectdefinitie, het schematisch ontwerp, het gedetailleerd ontwerp, het finale ontwerp en het einde van het ontwerp. Binnen elke fase worden allerlei aspecten besproken en parameters meegegeven waar men rekening mee dient te houden. Er worden zowel architecturale als technische aspecten van daglicht en verlichtingssystemen gehanteerd voor het

optimaliseren van gebruikerstevredenheid, gezondheid, welzijn, productiviteit, energieprestaties en duurzaamheid van gebouwen.

3.3. NBN-EN 12464-1 – Light and lighting — Lighting of work places — Part 1: Indoor work places

De Europese norm, NBN EN 12464-1 [13], vervangt de internationale norm ISO 8995 waardoor ze een vrijwel gelijke inhoud vertonen. Naast de beoordeling van de kwantiteit en kwaliteit van de verlichting, worden eveneens aanbevelingen gegeven voor een goede lichttechniek. De vrijheid van de ontwerper wordt hierbij niet beperkt aangezien de norm geen specifieke oplossingen biedt. Nieuwe technieken en innovatieve apparatuur kunnen toegepast worden. In de norm wordt geen rekening gehouden met verlichtingsvereisten die betrekking hebben op de veiligheid en gezondheid van personen.

3.4. EN 17037 - Daylight of buildings

In de laatst gepubliceerde Europese norm, EN 17037 [14], focust men algemeen op daglicht binnenin ruimtes die gedurende langere periodes bezet worden door mensen. De norm biedt enkele nieuwe inzichten en criteria op vlak van daglichttoetreding, uitzicht, blootstelling aan zonlicht en limitatie van verblinding, deze werden voordien niet gepubliceerd. In eerste instantie worden enkele richtlijnen meegegeven in het belang van de daglichttoetreding. De kwaliteit van de daglichtvoorziening wordt opgedeeld in verschillende klassen aan de hand van de verlichtingssterkte.

Niveau aanbeveling voor verticale en hellende daglichtopening	**Gewenste verlichtingssterkte**	**Fractie ruimte gewenste niveau**	**Minimale verlichtingssterkte**	**Fractie ruimte minimale niveau**	**Fractie daglichturen**
	E_T	F_{plane}	E_{TM}	F_{plane}	F_{time}
	(lux)	(%)	(lux)	(%)	(%)
Minimum	300	50	100	95	50
Gemiddeld	500	50	300	95	50
Hoog	750	50	500	95	50

Tabel 1: Aanbevelingen voor daglichttoetreding door verticale en hellende openingen

Niveau aanbeveling voor horizontale daglichtopening	**Gewenste verlichtingssterkte**	**Fractie ruimte gewenste niveau**	**Fractie daglichturen**
	E_T	F_{plane}	F_{time}
	(lux)	(%)	(%)
Minimum	300	95	50
Gemiddeld	500	95	50
Hoog	750	95	50

Tabel 2: Aanbevelingen voor daglichttoetreding door horizontale openingen

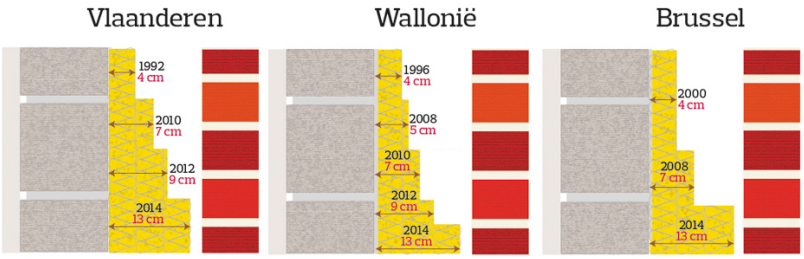
Voor het overtreffen van 100, 300, 500 en 750 lux moet er in termen van de daglichtfactor een minimumwaarde van respectievelijk 0,7%, 2%, 3,3% en 5% behaald worden in België. Deze daglichtfactoren werden bepaald op basis van klimatologische gegevens en verschillen daarom van land tot land. De norm vermeldt overeenkomstige waarden voor 33 Europese hoofdsteden. Voor laterale openingen en openingen in hellende vlakken moet de gewenste verlichtingssterkte en overeenkomstige daglichtfactor behaald worden voor minstens 50% van het werkoppervlak. De minimale verlichtingssterkte moet daarenboven bereikt worden voor 95% van het oppervlak. Voor zenitale openingen wordt enkel de gewenste verlichtingssterkte in rekening gebracht, deze moet gelden voor 95% van het werkoppervlak. In beide situaties moeten de waarden behaald worden voor 50% van de daglichturen. Daarnaast wordt in de norm voor het eerst een werkwijze vermeld hoe de kwaliteit van uitzichten beoordeeld kan worden. Volgens de Europese richtlijn kan de kwaliteit in drie klassen opgedeeld worden: minimaal, gemiddeld en hoog. Er zijn drie parameters die bepalen tot welke klasse het uitzicht behoort; de horizontale gezichtshoek, de buitenafstand van het uitzicht en het aantal lagen (hemel, landschap en grond) die te zien zijn vanaf ten minste 75% van het gebruikte oppervlak. Naast de kwaliteit van het uitzicht wordt in de aanbevelingen ook meer aandacht besteed aan het belang van zonlicht. Zonlicht heeft zowel een positieve invloed op de gebruikers, de helderheid van het interieur als op energiebesparende maatregelen. Als advies wordt meegegeven dat ruimtes voor menselijke bezetting blootgesteld moeten worden aan zonlicht voor minimum anderhalf tot maximum vier uur op een datum tussen 1 februari en 21 maart. Voor de limitatie van verblinding worden aanbevelingen gegeven op drie niveaus (minimum, gemiddeld en hoog). Bij de minimale aanbeveling voor bescherming tegen verblinding mag de kans op daglichtverblinding (DGP) voor de bezette ruimte een waarde van 0,45 niet overschrijden voor meer dan 5% van de bezettingstijd. Verder worden er in de norm meer specifieke richtlijnen beschreven omtrent deze vier aspecten.

4. Problematieken en aandachtspunten

Door de recente wetenschappelijke studies die verbanden aantonen tussen daglicht en onze gezondheid ontstond een belangrijke verschuiving in de manier waarop men omgaat met daglicht. Wereldwijd is de interesse voor het gebruik van daglicht opnieuw aangewakkerd.
Ondanks de geleverde inspanningen zijn er op verschillende vlakken nog pijnpunten die de volledige optimalisatie van daglichttoetreding verhinderen. Bovendien kan er opgemerkt worden dat er een beduidend conflict heerst tussen de optimalisatie van daglicht en de optimalisatie van het thermisch comfort binnenin een gebouw. Er dient dus een beter evenwicht tussen deze twee aspecten gecreëerd te worden. Hieronder worden de belangrijkste problematieken en aandachtspunten verhelderd en wordt verwezen naar de reeds bestaande literatuur die op deze onderwerpen focussen.

4.1. Dagkanten

Door de steeds strenger wordende eisen op vlak van energieprestaties is men vandaag verplicht een voldoende dik isolatiepakket te plaatsen. Als gevolg nemen de wanden van onze gebouwen sterk toe in dikte. Een spouwmuur in de jaren '90 bedroeg bijvoorbeeld ongeveer 30 cm, indien we vandaag een passief gebouw willen plaatsen zullen we rekening moeten houden met muren van 50 cm (Afbeelding 2). De strenge normen hebben een positieve invloed op het thermisch comfort binnenin gebouwen maar vormen een nadelig effect op de daglichttoetreding. De steeds breder wordende dagkanten hinderen de toetreding van daglicht waardoor de gemiddelde daglichtfactor sterk gereduceerd wordt.

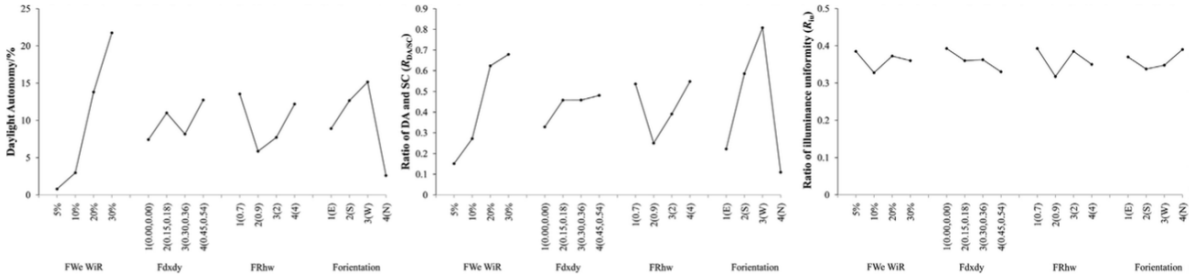


Afbeelding 2: Evolutie isolatienormen

Het afschuinen van de dagkanten van daglichtopeningen zou een oplossing kunnen bieden voor dit probleem. Deze techniek zou kunnen bijdragen aan een betere spreiding van het invallende daglicht en tevens zorgen voor een beter uitzicht naar buiten.

In de studie van Lingjiang Huang en Jiafen Wu [15] wordt onderzoek gevoerd naar de effecten van dit soort raamtype op vlak van de daglichttoetreding en de zonwering. De studie focust zich op zeer nauwe vensters met afgeschuinde dagkanten aan de binnenzijde die veelal gebruikt worden in de westelijke gevels van traditionele Tibetaanse gebouwen. Het klimaat in Tibet wordt gekenmerkt door veel zonnestraling en grote temperatuurvariaties. De smalle openingen zorgen ervoor dat invallende zonnestralen en warmteverliezen geminimaliseerd worden. Voorts worden privacy en veiligheid gewaarborgd en het risico op verblinding gelimiteerd. Aan de binnenzijde van de muur wordt de opening groter gemaakt zodat er een optimale

spreiding is van het daglicht. Het systeem biedt een gunstige combinatie van natuurlijke verlichting enerzijds en een eenvoudige zonwering anderzijds. In het onderzoek worden vier factoren in detail geëvalueerd om tot de meest gunstige situatie te komen. Deze factoren zijn; W_eW_iR, de verhouding van het buitenoppervlak tot het binnenoppervlak van de opening, d_x en d_y, de afstanden van de opening langs de buitenzijde tot de horizontale en verticale dagkanten, R_{hw}, de onderlinge verhouding van de hoogte tot de breedte van de opening en de oriëntatie waarin de opening geplaatst is (Afbeelding 3).
Bij de simulatie van de hoofdstad Lhasa (29° 39′ 40.3″ N, 91° 7′ 24.1″ E) blijkt dat W_eW_iR en de oriëntatie een aanzienlijke invloed hebben op de prestaties van het raamtype op vlak van daglichttoetreding en zonwering. De andere twee factoren blijken geen significant effect te hebben. Bijkomend wordt de westelijke oriëntatie als meest gunstig ervaren, aangezien de oriëntatie relatief meer zonlichturen telt en daarenboven een lagere zonnestand heeft. De zonlichturen met verschillende oriëntaties zijn in Lhasa; 3083 (Zuid), 2191 (West), 1460 (Oost) en 527 (Noord). Ondanks de aanwezigheid van direct zonlicht resulteert de westelijke oriëntatie toch in een slechtere uniformiteit. Oriëntaties met minder zonlichturen en diffuus licht, namelijk, het oosten en het noorden zullen een betere uniformiteit bieden. Dienovereenkomstig kan worden gesuggereerd dat dit venstertype werkend als zonwering meer geschikt is voor specifieke locaties op het noordelijk halfrond die gekenmerkt worden door een lage zonnestand en veel invallende zonuren. Omwille van de kleine golflengte en het zwakke diffractievermogen van licht op schaal van het gebouw hebben de afmetingen van de ruimte weinig invloed op de werking en prestaties daglichttoetreding. Dit betekent dat zowel kleine als grote ruimtes kunnen gebruik maken van dit venstertype.



Afbeelding 3: Invloed parameters op daglicht autonomie, verhouding daglicht autonomie - zonweringscoëfficiënt en de uniformiteit

De studie biedt interessante inzichten die meegenomen kunnen worden in het verdere verloop van deze scriptie. Er wordt bewezen dat het afschuinen van dagkanten een positief effect heeft op de daglichtvoorziening en er wordt een duidelijk beeld gegeven van de verschillende parameters die bestudeerd moeten worden om de verhouding van het venstertype en de hoeveelheid daglichttoetreding te optimaliseren. De concrete conclusies uit de studie mogen echter niet letterlijk overgenomen worden aangezien de klimaatcondities in de gesimuleerde situaties verschillen van de Belgische klimaatcondities. Eveneens moet achterhaald worden of het afschuinen van dagkanten negatieve gevolgen heeft op de detaillering van raamaansluitingen en thermische aspecten. Zo is het bijvoorbeeld van belang om na te gaan of dit venstertype meer aanleiding geeft tot oververhitting wanneer de dagkanten langs de buitenzijde worden afgeschuind.

4.2. Transmissie van glas

Het gebruik van glas was lange tijd geen evidentie. Pas rond 1200 vond glas zijn intrede in onze regio. Het was een luxemateriaal dat enkel gebruikt werd voor prestigieuze gebouwen zoals kerken en kloosters. De gewone burger leefde tijdens de middeleeuwen steeds met open ramen die in het beste geval afgesloten werden met perkament, varkensblaas of luiken. Pas vanaf de zestiende eeuw werden vensteropeningen in de burgerhuizen van de middenklasse volledig beglaasd. Tot het begin van de jaren '70 bleef het gebruik van enkele beglazing courant in de meeste woningen en utiliteitsgebouwen. Ten gevolge van de oliecrisis in 1973 en 1979 groeide het belang rond energiebesparingen, het was vanaf dat moment gebruikelijk dat dubbele beglazing geplaatst werd [16]. Doorheen de tijd werd steeds meer aandacht besteed aan het thermisch comfort van de binnenomgeving, om die reden bracht men allerhande types beglazing op de markt zoals driedubbel glas en beglazingen met aangepaste coatings en gassen. Als gevolg van de verbeterde kwaliteit van de transparante delen van de gebouwschil op vlak van energieverbruik is er een aanzienlijke reductie van de doorlaatbaarheid van licht- en zonnetoetreding. Bij gebruik van bepaalde hightech beglazingen kunnen zelfs volledige delen van het stralingsspectrum ontbreken. Voor het aanduiden van de doorlaatbaarheid van daglicht wordt bij beglazingen steeds de lichttransmissiefactor gebruikt, ze wordt weergegeven als de LTA-waarde of in bepaalde Europese normen ook als τ_v. De lichttransmissiefactor uitgedrukt in procent (%), toont aan hoeveel natuurlijk licht via de beglazing binnendringt. Hoe hoger deze waarde, hoe meer invallend daglicht en hoe minder beroep moet gedaan worden op kunstverlichting. Om in de winter zo veel mogelijk van gratis zonnewinsten en natuurlijk daglicht te kunnen genieten opteert men het best voor een beglazing met een hoge zontoetredingsfactor en hoge lichttransmissiefactor. Echter bestaat de kans dat deze soort beglazingen in de zomer gepaard gaan met oververhitting.
In onderstaande tabel, die gegevens bevat van het WTCB en VGI, wordt de evolutie van de licht- en zonnetoetredingsfactor (LTA en ZTA) van enkele veel voorkomende beglazingtypes opgelijst [17], [18]. Voor gewoon helder floatglas wordt ongeveer 90% van het invallende licht overgedragen. Ongeveer 8% van de energie wordt gereflecteerd en de resterende 2-3% wordt geabsorbeerd als warmte in het glas. Hoe meer beglazing gebruikt wordt, des te lager de transmissie is.

Omschrijving	**Dikte**	**Samenstelling**	**U**	**g (ZTA)**	**τ_v (LTA)**
	(mm)	(mm)	(kg/m^2)	(%)	(%)
Enkel glas	4-6	4/5/6	5,7	85	90
Dubbele beglazing	20	4-12-4	2,9	75	80
Dubbele HR-beglazing emissiviteit 3%	20	4-12-4	1,3	62	80
Dubbele HR-beglazing emissiviteit 1%	23	4-15-4	1,0	50	70
Dubbele veiligheids-HR-beglazing	29	6-15-44.2	1,1	57	77
Dubbele zonwerende beglazing	25	6-15-4	1,1	40	70
Dubbele zonwerende beglazing	25	6-15-4	1,1	20	40
Driedubbele beglazing	28	4-8-4-8-4	2,1	67	73
Driedubbele HR-beglazing	48	4-18-4-18-4	0,5	50	70
Viervoudige beglazing	46	4-10-4-10-4-10-4	1,3	59	66

Tabel 3: Eigenschappen lichttransmissie van verschillende types beglazingen

Omwille van hun isolerende eigenschappen worden vandaag in vele gevallen low e-coatings aangebracht op de beglazing, niettemin hebben ook deze een negatieve impact op de daglichtkwaliteit aangezien ze gepaard gaan met een verminderde LTA-waarde en zonnewinst. De lage daglichttransmissie dient bijgevolg gecompenseerd te worden door het hanteren van grotere ramen. Vanuit het energetisch oogpunt dienen dan weer extra isolerende maatregelen getroffen te worden om geen opofferingen te moeten doen aan de warmtevraag. Daarnaast brengen de isolerende coatings eveneens drastische wijzigingen in het daglichtspectrum met zich mee [19]. Vanuit het perspectief van daglichtoptimalisatie is het wenselijk de low e-coatings achterwege te laten.

In de analyse van Boyce et al. [20] werd onderzoek uitgevoerd naar de effecten die de verminderde transmissie van beglazingen kan teweegbrengen. In het experiment werd gezocht naar een beglazing die over een minimale aanvaardbare doorlatendheid beschikt, deze werd gedefinieerd door het criterium dat 85% van de mensen de doorlaatbaarheid acceptabel acht na een korte blootstelling. Voor de studie werd een schaalmodel van een kantoor gebruikt dat zicht had op een parking, een gebouw en delen van de lucht. In de vensteropening werden verscheidene beglazingstypes en filters met variërende doorlaatbaarheid geplaatst, de resulterende transmissies schommelden hierbij tussen 9% en 82%. Bij elk testmodel werd aan 25 proefpersonen gevraagd om het landschap en de lucht te bekijken door het raam van het modelbureau. De lucht en het landschap werden bekeken door helder glas, een glas met een verhoogde helderheid en een glas met een gereduceerde helderheid. Dit gebeurde onder twee hemelomstandigheden en met twee binnenverlichtingen. Op basis hiervan werd door de proefpersoon bepaald of de beglazing al dan niet aanvaardbaar was. Uit het onderzoek kon men afleiden dat de minimale aanvaardbare doorlatendheid gelegen is tussen 25% en 38%. De variatie in een minimaal aanvaardbare transmissie bleek geassocieerd te zijn met de luchtomstandigheden en het gebruikte beglazingstype.

In de studie van Bülow-Hübe [21] werd de impact van twee verschillende soorten raambeglazing bestudeerd. Twee kamers werden in een eerste experiment ingericht als kantoor, in een tweede experiment deden beide kamers dienst als slaapkamer. De kamers werden volledig identiek opgebouwd op de beglazing na. In de ene ruimte werd een standaardvenster met driedubbele heldere beglazing, elk van 4mm dik, geplaatst. Bij de tweede kamer werd een supergeïsoleerde vierdubbele beglazing met twee zilverarme coatings met lage emissie gebruikt. De lichttransmissie van de beglazingen bedroeg respectievelijk 73% en 55%. Zonder het werkelijke doel van de studie te kennen, konden 95 proefpersonen beide kamers betreden en observeren. De resultaten toonden aan dat mensen duidelijk in staat waren om onderscheid te maken tussen de twee beglazingstypes. De ruimte met de vierdubbele beglazing werd als meer ingesloten ervaren en het daglicht voelde minder sterk en helder aan. Bovendien werd ook de kleurwaarneming sterk beïnvloed, hierdoor oogden zowel de kleuren binnenin de ruimte als die van het uitzicht ingetogener en saaier. Uit spectrale metingen kon afgeleid worden dat de vierdubbele beglazing met lage emissie coatings een relatief hoger percentage van het groene deel van het spectrum uitzond. De resultaten kwamen overeen met de verwachtingen die men had op basis van de lagere transmissie en de verschillende spectrale verdelingen. Het verschil was dus groot genoeg opdat mensen het konden detecteren, maar hoe mensen op lange termijn worden beïnvloed en hoe ver men kan gaan met het verminderen van de transmissie van beglazingen, is echter nog steeds een onbeantwoorde vraag.

4.3. Glastinten

Naast de lichttransmissie van glas vormt ook de tint een belangrijk pijnpunt bij de toetreding van daglicht, beide fenomenen komen vaak terzelfder tijd voor. Glas biedt door zijn transparantie het voordeel dat een fysieke barrière tussen binnen en buiten kan gecreëerd worden zonder de toetreding van daglicht te elimineren. Om een gunstige binnenruimte te scheppen is het evenwel van belang dat deze barrière gevormd wordt zonder de kleur van het invallende licht te vervormen.

De laatste decennia wordt de opkomst van grote raampartijen binnen de architecturale wereld meer en meer waargenomen. De grote glaspartijen, vaak in afwezigheid van efficiënte zonwering, resulteren in overvloedige zonnewinsten en opmerkelijk variërende verwarmings- en koelbelastingen. Als oplossing werd het zonwerend glas geïntroduceerd. Zonwerend glas kan onder verschillende vormen gecreëerd worden, zo is er gelamineerd glas, monolithisch glas, gecoat glas en aangebrachte filmbeglazing. Gelaagd of gelamineerd glas wordt gemaakt door twee of meer glasplaten permanent aan elkaar te lijmen met daartussen een of meerdere transparante PVB-folies. Monolithische beglazing verwijst naar floatglas, acrylische beglazing en gesuspendeerde film zonder coating. Gecoate beglazingen worden gevormd door op het glas zeer fijne laagjes metaal en metaaloxides aan te brengen. Ze kunnen gebruikt worden om de zonnewarmtewinst te reduceren door het oppervlaktereflectievermogen van de coating te vergroten. Bij een aangebrachte filmbeglazing wordt een film met klevende zijde aangebracht op een monolithisch substraat. De toegepaste films kunnen het warmteverlies verminderen als een lage e-coating wordt aangebracht in de binnenste blootliggende laag van de film. Bovendien kan ultraviolette straling zeer effectief geblokkeerd worden en vermindert het ook verblinding en vermoeide ogen.
Indien ze correct geïntegreerd worden, hebben de geavanceerde beglazingssystemen het vermogen om energie te besparen en de kosten van verwarming, koeling en verlichting aanzienlijk te drukken. Eveneens beschikken ze over belangrijke voordelen ten opzichte van conventionele zonwering; er is geen visuele obstructie, er heersen lagere onderhoudsvereisten en er zijn geen beweegbare onderdelen of bedieningsgerelateerde geluiden. Er dient echter opgemerkt te worden dat de verscheidene technologische types beglazing de kleurweergave-eigenschappen van daglicht binnenshuis aanzienlijk verstoren, de spectrale samenstelling van het natuurlijke licht wordt gewijzigd vooraleer het de ogen en huid van de gebouwgebruikers bereikt. Deze wijzigingen kunnen belangrijke gevolgen teweegbrengen bij de perceptie van zowel het visuele als non-visuele systeem van de mens, zoals problemen met kleurweergave van objecten of verstoring van het circadiane ritme van de mens.

De kleurkwaliteit van het daglicht dat door getinte beglazing wordt doorgegeven, is cruciaal, ze kan worden bepaald aan de hand van de kleurgetrouwheid (kleurweergave), kleurdiscriminatie, kleurharmonie, kleurvoorkeur, visuele helderheid, kleuraanvaardbaarheid en helderheid. Momenteel wordt de kleurkwaliteit bepaald met behulp van de Commission Colour de l'Eclairage (CIE) Colour Rendering Index (CRI) [22]. Hoewel er meerdere methodes voorhanden zijn, is CIE CRI de enige internationaal erkende meetwaarde voor het meten en specificeren van de kleurweergave-eigenschappen van een lichtbron. De CIE CRI waarde kan variëren van 1 tot 100. Een waarde van 100 komt overeen met de ideale lichtbron, een hogere waarde impliceert dus een accurate kleurweergave. Aan de hand van enkele klassen wordt de kwaliteit van de kleurweergave opgedeeld (tabel 2).

Klasse	Omschrijving
90 – 100	Uitstekend, natuurgetrouwe kleurweergave
80 – 90	Goed, kleurweergave relatief natuurgetrouw
60 – 80	Matig, kleurweergave kan afwijken van de kleurechtheid
<60	Slecht, kleurweergave wijkt af van de kleurechtheid

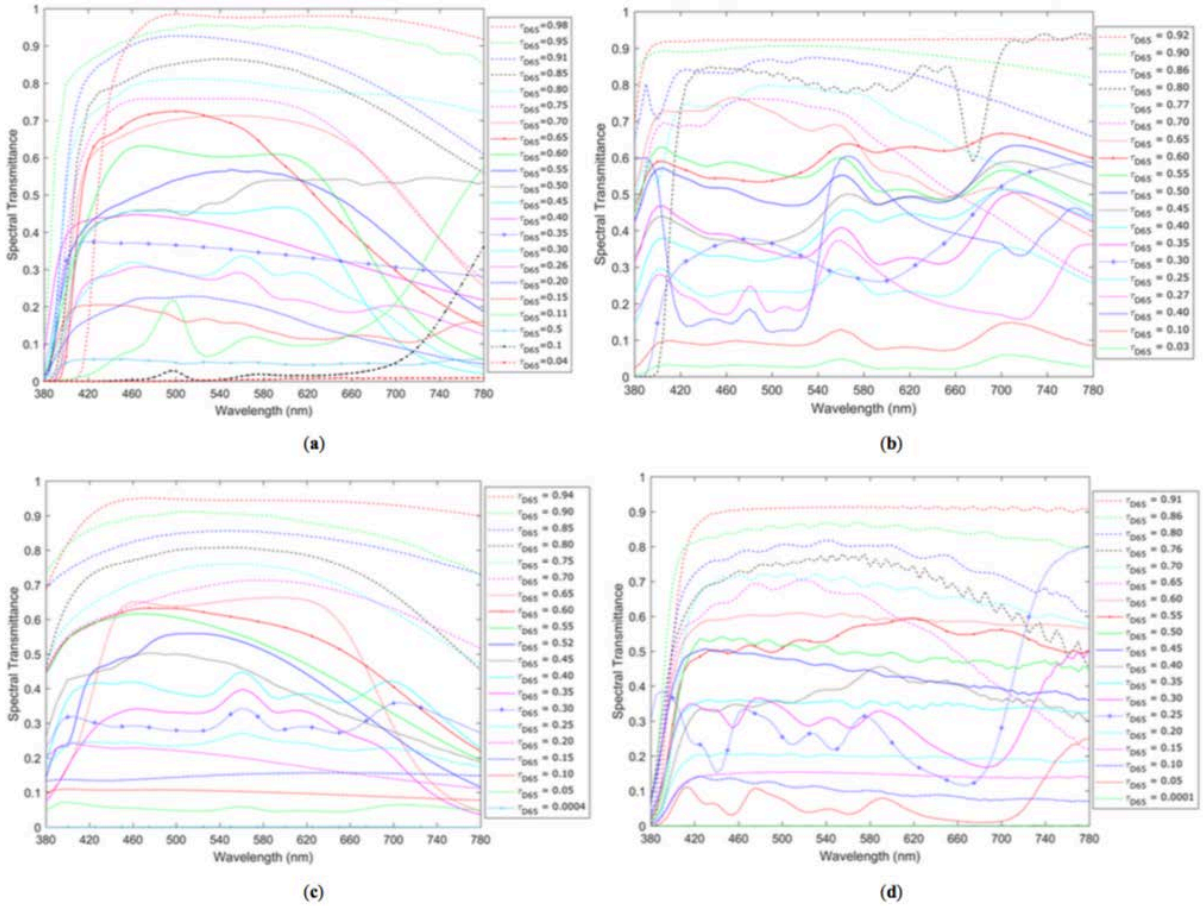
Tabel 4: Kleurkwaliteitsklassen op basis van CIE CRI waarden

In verschillende studies [23], [24] wordt echter aangetoond dat de CIE CRI niet altijd de geschikte methode is om de kleurkwaliteit van daglicht in gebouwen voor specifieke situaties uit te drukken. In het onderzoekswerk van R. Dangol et al. [23] wordt de kleurkwaliteit van het daglicht, doorgegeven door gelamineerde, monolithische, gecoate en aangebrachte filmbeglazing, geanalyseerd aan de hand van verschillende kleurkwaliteitscriteria (CIE CRI, $R_{a,D65}$, $R_{a,2012}$, D_{uv}, CCT en TM-30) (Afbeelding 4). Op basis van de CIE CRI-waarden blijken de geëvalueerde beglazingen in het onderzoek allen gekenmerkt door zeer goede kleurweergave-eigenschappen, het testen van andere criteria resulteert echter niet in dezelfde bevindingen voor enkele beglazingen. Geteste beglazingen met een CIE CRI-waarde van 80 lijken onder een testlichtbron de natuurlijke kleur van objecten sterk te verstoren waardoor ze er verzadigd uitzien of hun werkelijke kleureigenschap verliezen. Het in rekening brengen van CIE CRI-waarden volstaat dus niet om de kleurweergave-eigenschappen nauwkeurig te beoordelen.
De studie toont eveneens aan dat daglicht uitgezonden door gelamineerde beglazingen over een lage kleurkwaliteit beschikt, het is daarom noodzakelijk om speciale aandacht te besteden aan het ontwerpen van gelaagde beglazing.

Veel glasfabrikanten maken tegenwoordig gebruik van het kleurkwaliteitscriterium $R_{a,D65}$. Deze wordt op dezelfde manier berekend als CIE CRI maar maakt gebruik van de CIE-gestandaardiseerde lichtbron D65 die natuurlijk daglicht probeert te simuleren. De naam D65 duidt op de kleurtemperatuur. Onderstaande tabel met enkele voorbeelden uit een publicatie van AGC geeft een indicatie van de kleurkwaliteit van verschillende beglazingen [25].

Soort beglazing	Samenstelling	$R_{a,D65}$
(-)	(-)	(%)
Thermisch isolerend en zonwerend glas (kleur=neutraal)	6-16-4 (90% argon)	99
Thermisch isolerend en zonwerend glas (kleur=goud)	6-16-4 (90% argon)	85
Thermisch isolerend en zonwerend glas (kleur=neutraal)	6-14-4-14-4 (90% argon)	93
Thermisch isolerend en zonwerend glas (kleur=blauw)	6-14-4-14-4 (90% argon)	85
Zonwerend glas (kleur=lichtblauw)	6-16-4 (90% argon)	86
Reflecterend zonwerend glas (kleur=brons)	6-16-4 (90% argon)	84

Tabel 5: Kleurkwaliteit verschillende soorten beglazingen



Afbeelding 4: Spectrale transmissie van verschillende soorten beglazingen a) gelamineerde beglazing b) monolithische beglazing c) gecoate beglazing d) aangebrachte filmbeglazing

Om een beter beeld te verkrijgen van de impact van technologische beglazingstypes op de kwaliteit van het daglicht binnenshuis blijkt het essentieel om gebruikersacceptatiestudies uit te voeren in reële ruimtes met verschillende beglazingstypes. Een betrouwbare kleurkwaliteitsmaatstaf voor gefilterd daglicht zou daarenboven rekening moeten houden met andere aspecten zoals het energiebesparingspotentieel en het gereduceerde verblindingsrisico. Er moet bij de beoordeling van de kleurkwaliteit eveneens rekening gehouden worden met de jaarlijkse variatie van daglicht en de specifieke context waarin de ruimte zich bevindt. Geavanceerde klimaatafhankelijke daglichtsimulaties die zowel de energiebesparing als kleurkwaliteit van een systeem in rekening brengen zouden een interessante oplossing bieden om te voorkomen dat daglichtontwerpen gedurende een belangrijk deel van het jaar niet goed presteren.

Enkele gebruikersacceptiestudies met betrekking tot de invloed van gefilterd daglicht werden reeds uitgevoerd [26]–[28]. In de studie van Hélène Arsenault et al. [26] werd nagegaan wat de effecten van getint glas zijn op de daglichtkwaliteit, de mentale alertheid van personen en de inschakelpatronen van artificiële verlichting. Het experiment vond plaats in Quebec City in Canada. Het onderzoek werd uitgevoerd aan de hand van een schaalmodel waarin drie verschillende beglazingstypes geplaatst werden; een bronzen en blauw glasmonster van 6 mm dik en een neutrale glassoort bestaande uit twee glasplaten van 6 en 4 mm met daartussen een luchtspouw van 9 mm. De drie glasmonsters hadden allen een gelijkaardige visuele transmissie. In totaal namen 36 proefpersonen, tussen 19 en 33 jaar zonder grote zichtproblemen, deel aan het

experiment. De lichtkwaliteit werd tijdens het onderzoek getoetst aan vijf sleutelfactoren; het visueel comfort, de natuurlijkheid, de aangenaamheid, de precisie en het lichtniveau. Uit de resultaten bleek er een duidelijke voorkeur te zijn voor het bronzen glastype. Dat kwam zowel naar voor in termen van het visueel comfort, aangenaamheid en het lichtniveau. Op het gebied van de mentale alertheid vertoonde het blauwe glas een reductie in functie van de tijd.
De studie focust zich voornamelijk op de bevindingen van enkele gebruikers, maar vermeldt niks over de eventueel wetenschappelijk bewezen gevolgen van getint glas op het welzijn. Eveneens werden de personen maar voor beperkte tijd aan de verschillende glastypes blootgesteld waardoor de resultaten in vraag kunnen gesteld worden.

De experimentele studie van G. Chinazzo et al. [27] toont aan dat daglicht doorgelaten door gekleurde beglazing ook de thermische respons van mensen beïnvloedt onafhankelijk van de werkelijke temperatuur in de ruimte. Door de afwezigheid van duidelijk fysiologische reacties kunnen de effecten voornamelijk psychologisch verklaard worden. In vergelijking met een neutrale beglazing bezorgt invallend daglicht met een blauwe tint de ruimte een kouder gevoel dat minder comfortabel en acceptabel aanvoelt. Oranje getinte beglazingen leveren daarentegen hogere thermische sensaties en bieden een beter comfort. Uit vergelijking met een ander ongepubliceerd onderzoek van dezelfde auteurs kan echter vermoed worden dat seizoenen een belangrijke rol spelen in de perceptie van gekleurde beglazingen. In tegenstelling tot het huidige onderzoek is deze studie uitgevoerd tijdens de zomermaanden. Uit de beoordelingen komt voort dat oranje beglazingen minder acceptabel waren, dit in tegenstelling tot de huidige studie. Er kan geconcludeerd worden dat blauw getinte beglazingen de voorkeur genieten tijdens de zomermaanden en oranje getinte beglazingen optimaler zijn tijdens de winter. Ook in dit onderzoekswerk zijn de proefpersonen slechts gedurende beperkte tijd onderworpen aan het gekleurde daglicht.

In de studie van Figueiro et al. [28] werd aan de hand van gekleurde brillen onderzocht of het menselijk circadiaans ritme het onderliggende mechanisme is dat bepalend is voor de relatie tussen daglicht en de levens- en slaapkwaliteit van adolescenten. 23 leerlingen (9 vrouwen en 14 mannen, leeftijd 13-14 jaar) van de Smith Middle School namen deel aan het onderzoek. De school bevindt zich in Chapel Hil (35° 55′ 33″ N, 79° 2′ 22″ W), een grote stad gelegen in North Carolina. De Smith Middle School werd gekozen omwille van zijn architecturale vormgeving waarbij veel aandacht besteed werd aan daglichttoetreding en waardoor leerlingen blootgesteld worden aan zeer hoge lichtniveaus. Door middel van zuid gerichte dakopeningen worden de klaslokalen voorzien van voldoende natuurlijk licht. Direct en hinderlijk zonlicht wordt gereduceerd door gebruik te maken van baffle-systemen, hierdoor ontvangen de ruimtes voornamelijk diffuus licht. Tijdens het onderzoek werd kunstverlichting gedurende het grootste deel van de dag uitgeschakeld. Uit metingen bleek dat de horizontale verlichtingssterktes op de schoolbanken varieerden van 1330 tot 2150 lux en de verticale verlichtingssterktes op het schoolbord gelegen waren tussen 996 en 1265 lux. Voor het onderzoek werd de helft van de studenten een oranje bril aangeboden waarbij stralingen met golflengtes onder de 525 nm uitgefilterd werden. De ene helft van de studenten moest in februari gedurende een week de bril dragen voor en tijdens de schooluren, de andere helft van de deelnemende studenten droeg geen bril. Aan de hand van een daysimeter, gedragen door beide groepen, werd gedurende zeven opeenvolgende dagen de blootstelling aan circadiane en fotopische stralingen gemeten. Met behulp van verwerkingssoftware werden achteraf de circadiane licht (CL_A) niveaus bepaald. Zoals verwacht, bleken de

deelnemers die een oranje bril droegen beduidend minder CL_A te hebben ontvangen in de ochtend en gedurende de schooldag in vergelijking met de andere groep. Het circadiane ritme van de proefpersonen werd dus aanzienlijk vertraagd. Ondanks dat de studie aantoont dat er een duidelijk oorzakelijk verband bestaat tussen de blootstelling aan daglicht in klaslokalen en het circadiane ritme van de leerlingen, konden er geen betrouwbare conclusies getrokken worden betreffende het effect op slaapperioden, slaaptijd, prestaties op korte termijn, psychomotorische handelingen en het welbevinden van de leerlingen aangezien er geen significante verschillen gevonden werden tussen de beide groepen. Het gebrek aan duidelijke relaties is hoogstwaarschijnlijk te wijten aan externe persoonsspecifieke variabelen die deel uitmaken van het normale leven. De studie van Figueiro et al. toont duidelijk aan dat de zonwerende beglazingen met een specifieke spectrale transmissie een grote impact kunnen uitoefenen op de biologische klok van mensen. De gevolgen die hieruit voortvloeien, konden niet uit het onderzoek afgeleid worden. Het is noodzakelijk dat toekomstige onderzoeken, die zich focussen op dit onderwerp, de steekproefomvang vergroten en dat de diversiteit aan externe variabelen zo veel mogelijk gereduceerd wordt. Daarenboven is de Chapel Hil Smith Middle School met zijn hoge verlichtingssterktes een voorbeeld voor andere scholen. Het daglicht wordt in de school ten volle benut. Toch kan het toegepaste ontwerpprincipe niet zomaar voor eender welke school gehanteerd worden. In vergelijking met België staat de zon in North Carolina tijdens de zomer immers veel hoger (90° - 35° + 23,43°= 78,43°). Hierdoor valt het zonlicht minder binnen in de klaslokalen waardoor een diffuus licht verkregen wordt en de ruimtes minder risico hebben op oververhitting.

Het is duidelijk dat technologische beglazingen interessante oplossingen bieden voor energiebesparingen en het tegengaan van verblinding. Hoewel er vandaag nog veel onzekerheden en vragen bestaan over de mogelijke gevolgen van getinte beglazing blijken ze een grote invloed uit te oefenen op de mens, zowel op visuele als niet-visuele vlakken. Om de “non-image-forming” effecten zo weinig mogelijk nadelig te beïnvloeden, moet de spectrale transmissie van getinte beglazingen nauwkeuriger bestudeerd worden. Er kan verondersteld worden dat beglazingen die een zwakke spectrale transmissie hebben in het actieve golflengtegebied van de ipRGC’s vermeden dienen te worden in ruimtes waarin personen gedurende een langere tijd verblijven. Opvallend is dat beglazingen met een warme tint de voorkeur genieten in de verschillende studies, het zijn echter voornamelijk deze beglazingen die op basis van de ipRGC’s vermeden moeten worden.

4.4. Uniformiteit

De uniformiteit van de verlichtingssterkte binnenin gebouwen is de verhouding van de minimale tot de gemiddelde daglichtfactor, met andere woorden de lichtverdeling op het werkvlak. De grootheid van de uniformiteit is logischerwijze dimensieloos. De verlichtingssterkte en de uniformiteit van de verlichtingssterkte op het werkvlak en de omgeving bepalen in grote mate de snelheid, de veiligheid en het comfort waarmee taken uitgevoerd kunnen worden. In de Europese norm NBN EN 12464-1 worden waarden voor de gemiddelde verlichtingssterkte voorgeschreven die over het gehele werkvlak ten alle tijden gegarandeerd moeten worden. Eveneens worden hierbij waarden voor de gelijkmatigheid van deze verlichtingssterkte gedefinieerd. De vereiste uniformiteit is net zoals de verlichtingssterkte afhankelijk van de uit te voeren taak.

Bij de analyse van de daglichtfactor wordt doorgaans een exponentiële afname van de verlichtingssterkte waargenomen naarmate de afstand tot het raam groter wordt. In vele gevallen is de uniformiteit van de verlichtingssterkte ondermaats. Te weinig aandacht voor de uniformiteit van de binnenomgeving gaat gepaard met hinderlijke schaduwen op het werkvlak of vermoeidheid van de ogen. Zoeken naar een betere spreiding van natuurlijke verlichting is daarom noodzakelijk voor de optimalisatie van de daglichttoetreding.

Een mogelijke optie om een betere uniformiteit te verzekeren, is het bijsturen van de daglichttoetreding. Door een deel van het daglicht naar het plafond te richten, wordt het licht dieper in de ruimte gereflecteerd en wordt een betere daglichtfactor behaald. In een onderzoek van het Belgische studie- en adviesbureau Bureau Bouwtechniek en het laboratorium voor Lichttechnologie van de KU Leuven [29] werd reeds nagegaan of figuurglas een positieve invloed kan uitoefenen op de spreiding van daglicht. Eerst en vooral werd in deze studie een inventaris opgesteld van de bestaande glassoorten van vier verschillende fabrikanten. Op basis van de totale transmissie van deze glasramen werden drie types geselecteerd die verder geëvalueerd werden. Naast de beoordeling van de totale reflectie en doorlaatbaarheid, werden meer gedetailleerde transmissie-eigenschappen verkregen door metingen van de BTDF (bidirectional transmittance distribution function) onder verschillende invalshoeken. De resulterende BTDF-gegevens werden gecombineerd en getransformeerd tot een ray tracing model waarin de transmissieverdeling onder een diffuse hemel gesimuleerd kon worden. Op deze manier werd een geschikt formaat verworven dat op zijn buurt geïmplementeerd kon worden in lichtsimulatiesoftware. In deze software konden de effecten van het gebruik van figuurglas in specifieke condities eenvoudig nagegaan worden. In de studie werd als voorbeeld de implementatie van een specifiek beglazingsmonster in een kantoorruimte gesimuleerd. Hierin werden drie verschillende raamconfiguraties getest; geen figuurglas, onderaan figuurglas en bovenaan figuurglas. Uit de simulatie volgde dat het gebruik van figuurglas resulteert in een hogere daglichtfactor en een diepere lichtpenetratie in de ruimte. De gemiddelde verlichtingssterkte en de uniformiteit van de verlichtingssterkte op het werkvlak nemen overeenkomstig toe. Figuurglas dat ingewerkt wordt bovenaan het raam vertoont nog een iets betere lichtspreiding dan wanneer het glas zich onderaan in het raam bevindt.

In een andere studie van T. Rakha en K. Nassar [30] wordt onderzoek gedaan naar plafondgeometrie om via reflectie en diffusie de daglichtuniformiteit te optimaliseren. Het vinden van de geschikte plafondvorm gebeurt aan de hand van een genetisch algoritme. Tijdens het proces worden via verschillende controleknooppunten een aantal oplossingen gesimuleerd. Het optimalisatie-algoritme zoekt zowel naar plafondvormen die kromlijnig zijn als naar driedimensionele maasvormige plafondvormen. De procedure biedt een robuuste en toch nauwkeurige methode voor het vinden van de geschikte vorm. De verkregen resultaten bieden een grote diversiteit, wat de architect een verscheidenheid aan ontwerpkeuzes biedt.

4.5. Positie en grootte van ramen

Doorheen de verschillende eeuwen is er een duidelijke evolutie te zien in de grootte van raampartijen. In het verleden werden de afmetingen van raamopeningen sterk beperkt door enerzijds de productiemogelijkheden en anderzijds de kosten die ermee gepaard gingen. Zo was het lange tijd op financieel vlak geen voordeel om over grote ramen te beschikken. In 1798 werd immers een vensterbelasting ingevoerd. Hoe groter het glaspercentage van woningen was, hoe hoger de belastingen. Het aantal ramen was tenslotte een indicator

voor de grootte van de woning en dus de rijkdom van de bewoners. Als gevolg hiervan werden de openingen bij bestaande gebouwen veelal dichtgemetseld en werd de oppervlakte van vensters in nieuwe gebouwen opvallend geminimaliseerd. De vensterbelasting werd uiteindelijk na de Eerste Wereldoorlog afgeschaft. In termen van de productiemogelijkheden werd tot in het midden van de zeventiende eeuw hoofdzakelijk glas-in-loodraam toegepast in de kozijnen van herenhuizen en andere gebouwen. Pas bij aanvang van de industrialisatie in de negentiende eeuw werd het productieproces grondig geoptimaliseerd waardoor steeds grotere glasramen vervaardigd konden worden, tussenregels en stijlen verdwenen [16]. Tot enkele decennia geleden bleven de afmetingen van raamopeningen alsnog zo veel mogelijk beperkt om zonnewarmte en verblinding te weren. Daarenboven was kunstmatige verlichting in deze tijden zeer voorhanden en goedkoop en werd er nog geen aandacht besteed aan energieverbruik. Een wending in dit fenomeen ontstond echter enkele jaren geleden, grote kamerhoge ramen kenden een sterke groei in de architecturale wereld. De drijfveer achter deze trend kwam voort uit het verlangen om het binnen- en buitenhuis leven meer te verenigen. Grote ramen bieden op vele vlakken voordelen; ze bieden voldoende daglicht zodat minder elektriciteit nodig is voor kunstlicht, ze zorgen voor verse lucht, ze laten toe te genieten van uitzichten naar de buitenomgeving, ze zorgen voor een ruimtelijke en open look van het interieur en ze bieden in de winter zonnewarmte. Anderzijds brengen ze ook belangrijke nadelen met zich mee. Wie kiest voor grote ramen moet in ruil daarvoor een deel van zijn privacy opgeven. Gordijnen of andere afschermingen kunnen in dit geval wel een oplossing bieden maar deze hebben dan weer een nadelig effect op de toetreding van natuurlijk licht en het uitzicht naar buiten. Bovendien bestaat er een kans dat grote raampartijen in de zomer te grote zonnewinsten met zich meebrengen waardoor meer energie nodig is om gebouwen te koelen. Op koude dagen in de winterperiode zorgen grotere glaspercentages dan weer voor grotere warmteverliezen.
Uit het voorgaande wordt duidelijk dat het van belang is een evenwicht te vinden in de afmetingen van ramen, die zowel optimaal kunnen zijn voor de daglichttoetreding en het uitzicht als voor de thermische aspecten. Als richtlijn worden vandaag waarden voorgeschreven die de optimale verhouding tussen glas- en vloeroppervlakte uitdrukken, hierbij wordt geen rekening gehouden met de oriëntatie en eigenschappen van de ramen. Grote raamafmetingen in combinatie met hoge U-waarden zullen bijvoorbeeld zorgen voor een opmerkelijke stijging in ruimteverwarming, ramen met lage U-waarden zouden daarentegen grotere afmetingen kunnen hebben [31]. Evenwichtige afmetingen dragen eveneens bij aan de energetische aspecten van een gebouw. In een onderzoek van I. Acosta et al. [32] werd aan de hand van verschillende dynamische grootheden, gerelateerd aan daglicht, gezocht naar een optimaal vensterontwerp om het gebruik van kunstlicht te reduceren. Er werd hierbij rekening gehouden met de grootte, geometrie en positie van het raam, alsook de reflectie van binnenwanden. Deze vier verschillende parameters werden toegepast op een eenvoudige ruimte met een grondvlak van 3 op 6 m en een hoogte van 3 m. In totaal werden 28 verschillende modellen opgesteld, deze werden vergeleken op basis van de daglicht autonomie. De daglicht autonomie (DA) van een ruimte is het percentage van de gebruikerstijd waarin er voldoende daglicht aanwezig is zodat geen beroep moet gedaan worden op kunstverlichting.
De studie werd uitgevoerd in Londen, de Engelse stad wordt gekarakteriseerd door een overwegend bewolkte hemel, om deze juist in kaart te brengen bij de simulaties werd gebruik gemaakt van een klimaatbestand. In de studie werd aangetoond dat de verschillende geometrieën (vierkant, horizontaal en verticaal) gelijkaardige resultaten vertonen voor de daglichttoetreding op de centrale as van de ruimte. Horizontale ramen bezorgden bovendien ook goede waarden langs de zijkanten binnenin de ruimte. Dit zorgt voor een meer uniforme verlichting wat leidt tot meer effectieve energiebesparingen. Er werd vastgesteld dat het oppervlak van de

raampartij voornamelijk van belang is voor het achterste gedeelte van de ruimte. Hoe groter het raam, hoe minder kunstverlichting er in deze zone nodig was. Eveneens bleek uit de resultaten die handelen over de positie van het venster dat een hogere positie in de gevel kan leiden tot energiebesparingen van kunstlicht tot 30%. Als laatste werd de reflectie van binnenwanden in acht genomen. Hierbij werd geconstateerd dat ze geen effect hebben in de nabije omgeving van het raam, bij grote ramen kunnen ze wel een positief effect leveren voor het achterste gedeelte van de ruimte. Verder werden nog twee extra berekeningen uitgevoerd om de invloed van de oriëntatie en locatie in rekening te brengen. In geval van de oriëntatie werd aangetoond dat deze geen effect heeft indien de verhouding raam-gevel groter of gelijk is aan 40%, bij een lichtsterkte van 250 lux. Voor kleinere ramen daarentegen kan de daglicht autonomie bij de zuidoriëntatie het driedubbele bedragen van noord gerichte gevels. De impact van de locatie werd geïllustreerd door verschillende klimaatcondities in kaart te brengen; een voornamelijk heldere hemel, een overwegend bewolkte hemel en een variërende hemel. Hierbij werd opgemerkt dat de locatie enkel effect heeft op het achterste gedeelte van de ruimte. Afhankelijk van de verschillende breedtegraden en weercondities konden waarden met viervoudige verschillen worden waargenomen. Eveneens bleek dat de klimaatcondities een belangrijkere rol speelden dan de breedtegraad in de berekening van de daglicht autonomie.
De studie van I. Acosta et al. biedt interessante inzichten aangezien de breedtegraad en klimaatcondities van Londen (51° 30' 35.5140" N) en Brussel (50° 51' 1.62" N) gelijkaardig zijn. De bekomen resultaten kunnen derhalve ook fungeren voor het vervolg van deze thesis. Er dient echter wel opgemerkt te worden dat de testen steeds uitgevoerd werden met een diepe ruimte waarin telkens slechts een raam voorzien werd. Conclusies omtrent verschillende openingen en hun onderlinge positie dienen verder onderzocht te worden.

4.6. Innovatieve daglichtsystemen

De voorbije 40 jaar werd een groot gamma aan daglichtsystemen ontwikkeld die als doel hebben om de daglichtprestaties binnen interieurs te perfectioneren. Binnen deze daglichtsystemen kan er een onderscheid gemaakt worden tussen licht geleidende systemen (LGS) en licht transporterende systemen (LTS). LGS hebben de potentie om zonlicht te reflecteren, af te buigen en dieper in de ruimte te laten toetreden. Hun voornaamste doeleinde is bijgevolg om de lichtverdeling binnenin de ruimte te verbeteren, daarnaast kunnen ze ook aangewend worden om verblinding en oververhitting tegen te gaan of om meer privacy te creëren in de binnenruimte. Het zijn eenvoudige technologieën die makkelijk toe te passen zijn. LTS zijn complexer, ze kunnen zonlicht opvangen, transporteren en distribueren naar binnenomgevingen die geen directe toegang hebben tot muur- of dakopeningen.
In het belang van de optimalisatie van daglichttoetreding, dient er voornamelijk een betere aandacht besteed te worden aan de LGS. LGS kunnen toegepast worden onder een grote verscheidenheid van technieken. In onderstaande tabel worden de verschillende installaties en hun voornaamste kenmerken weergegeven.

Light guiding system	Tilt-able	Solar shading	Ease of application	Ease of maintenance	Thermal reduction	Allow view
Light guiding shade	No	Yes	Window	Easy	Yes	Yes
Reflective blinds	Yes	Yes	Window	Easy	Yes	Limited
Venetian blinds	Yes	Yes	Window	Easy	Yes	Limited
Movable blinds	Yes	Yes	Window	Easy	Yes	Limited
Light shelves	No	Yes	Window	Easy	Yes	Yes
Prismatic louvers	Yes	Potential	Window	Easy	Yes	Limited
Mirror systems	No	Yes	Fixed louvre	Difficult	Yes	Limited
Prismatic glazing	No	Potential	Window & roof	Difficult	Yes	Limited
Translucent louvers	Yes	Yes	Window	Difficult	Yes	Limited
Transparent insulated glazing	No	Potential	Inside double glazing	Easy	Potential	Limited
Toplight on roof	No	No	Roof	Difficult	Potential	Limited
Solar screens	No	Yes	Window	Difficult	Yes	Limited
Skylight on roof	No	No	Roof	Difficult	Potential	Limited
Lightscoop skylight	No	No	Roof	Difficult	Potential	Limited
Shed-type rooflight	No	No	Roof	Difficult	Potential	Yes
Holographic films	No	Yes	Inside double glazing	Easy	Potential	Yes
Active modular glazing panel	No	Yes	Window	Easy	Yes	Yes
Three-layered rooflight	No	No	Roof	Difficult	Potential	Limited
Façade panels with PCM	No	Potential	Inside double glazing	Easy	Potential	Limited

Tabel 6: Licht geleidende systemen en hun kenmerken, overgenomen uit I. L. Wong [10]

Bij het toepassen van daglicht- en zonweringssystemen opteert men in de meeste gebouwen voor conventionele systemen omdat deze eenvoudig, relatief goedkoop en gebruiksvriendelijk zijn. Onder conventionele systemen verstaat men hoofdzakelijk rolgordijnen, jaloezieën en screens. Er moet echter opgemerkt worden dat deze technieken een groot aandeel van het natuurlijke licht blokkeren en op deze manier de hoeveelheid invallend licht sterk teruggedrongen wordt. Naast deze gebruikelijke technieken bestaan er ook meer innovatieve en geavanceerde systemen zoals lichtplanken, vaste lamellen en licht sturende lamellen of glas. Deze systemen kunnen zowel intern als extern gemonteerd worden. Ze kunnen aangewend worden als oplossing voor lichtbegeleiding, zonnebescherming en om verblinding tegen te gaan. Ze bieden een uitstekende manier om in de winter daglicht binnen te brengen en in de zomer overtollig zonlicht terug te reflecteren, bijgevolg kan oververhitting van de binnenruimte verhinderd worden. Specifieke vormgeving van de lamellen kan ervoor zorgen dat daglicht dieper in de ruimte kan binnentreden. Anderzijds bestaan er ook enkele systemen die geïntegreerd kunnen worden in dubbele beglazing. De technieken zijn ontwikkeld om verschillende invalshoeken te benaderen, daarenboven zijn er minimale onderhoudseisen.

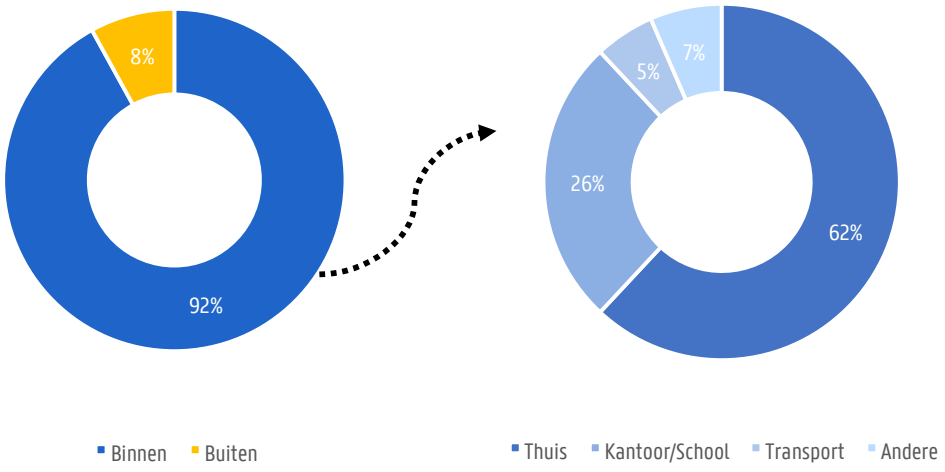
Er kan besloten worden dat het aanwenden van daglicht- en zonweringssystemen steeds met de nodige aandacht moet gebeuren. Men moet steeds streven naar een oplossing die enerzijds het invallende licht zo weinig mogelijk blokkeert en anderzijds het uitzicht naar buiten niet te sterk belemmert.

Deel 2: Daglicht in scholen

1. Inleiding

1.1. Onderzoeksgebied

Verschillende studies tonen aan dat we gemiddeld 90% van onze tijd in binnenruimtes doorbrengen [33], [34]. Het is bijgevolg cruciaal om ten alle tijden een gezonde binnenomgeving te creëren waarin voldoende natuurlijk licht aanwezig is. Het grootste deel van onze tijd brengen we door in onze eigen woning. De activiteiten waaraan we meest tijd spenderen in deze omgeving, zoals slapen en ontspannen, gebeuren in de meeste gevallen grotendeels wanneer het buiten donker is. Het bestuderen van de daglichtsituatie op kantoor en op school is derhalve meer aangewezen. Aangezien er reeds verscheidene publicaties en onderzoeken zijn omtrent daglicht in kantoren, zal deze thesis zich focussen op de kwalitatieve daglichttoetreding in scholen.



Afbeelding 5: Gemiddelde tijd gespendeerd in verschillende omgevingen

Afgezien van hun eigen woning spenderen kinderen nergens anders zoveel tijd als op school. Gemiddeld besteden kinderen en jongeren 200 dagen per jaar op school, 70% van deze tijd brengen ze door op de schoolbanken waar ze voorbereid worden op hun latere opleiding of beroep. Het begrijpen van de klasomgeving en de impact hiervan op de leerlingen is dan ook uiterst belangrijk om de gezondheid en het succes van de toekomstige generaties te garanderen. Door het gebrek aan subsidies worden scholen vaak low-budget gerealiseerd, de bezuinigingen leiden in vele gevallen tevergeefs tot een ondermaatse kwaliteit van het binnenmilieu. Uit onderzoek van het Franhofer Institute volgt dat de meerderheid van de 95 miljoen leerlingen in Europa in een klaslokaal vertoeft met een te hoog CO_2-gehalte en een tekort aan natuurlijke verlichting [35]. Bij het ontwerpen en renoveren van klaslokalen moet men in functie van de gezondheid en het welzijn van de leerlingen een binnenklimaat creëren waarbij daglicht en frisse lucht twee essentiële vereisten zijn. De ruimte moet bijdragen aan de groei, ontwikkeling en leerprestaties van kinderen en jongeren en mag hen op geen enkel mogelijke manier hinderen. In deze scriptie wordt onderzoek gedaan naar ontwerprichtlijnen die de daglichttoetreding in klaslokalen kan optimaliseren.

1.2. Impact van daglicht in scholen

Ruimtes met hoge lichtniveaus helpen een gevoel van fysiek en mentaal comfort te creëren. De voordelen van een goed daglichtontwerp blijken veel verder te reiken dan louter een hulpmiddel voor het zicht. Omwille van de vele voordelen, moet men trachten kunstverlichting zoveel mogelijk te reduceren en daglicht als belangrijkste bron van verlichting in te zetten. Algemeen wordt er immers waargenomen dat de afwezigheidspercentages verminderen bij hoge daglichtniveaus. Hieronder worden de belangrijkste effecten van daglicht in scholen besproken die reeds wetenschappelijk onderbouwd werden.

1.2.1. Impact op het circadiane ritme van leerlingen

Zoals reeds vermeld werd in de literatuurstudie is er een belangrijke relatie tussen daglicht en het circadiane ritme van de mens. De variatie in verlichtingsomstandigheden, zoals de subtiel veranderende intensiteit en kleur, die typisch zijn voor daglicht, blijken hierbij het belangrijkst te zijn. Het circadiane ritme zorgt ervoor dat het lichaam hormonen vrijgeeft en bepaalde lichamelijke functies activeert die onze dagen beheersen. Onderzoek toonde bijvoorbeeld aan dat het kortetermijngeheugen het best functioneert vanaf tien uur in de ochtend tot de middag, dit is positief in termen van de schoolprestaties en de concentratie die hierbij nodig is. De avonduren, in het bijzonder de uren tussen zes en twaalf uur, zijn dan weer het meest gunstig voor het langetermijngeheugen zodat studeren het best tijdens deze uren gebeurt [36]. De biologische klok speelt een nog belangrijkere rol bij kinderen aangezien ze bijzonder gevoelig zijn voor veranderingen. Zo zal bijvoorbeeld het melatoninegehalte, verantwoordelijk voor de slaap- en waakcyclus, bij kinderen sneller fluctueren. De aanwezigheid van natuurlijke verlichting in klaslokalen is dan ook van cruciaal belang voor het behoud van het ritme van deze biologische klok.

1.2.2. Impact op het ziekteverzuim van leerlingen

In een Canadese studie van W. Hathaway wordt gewezen op het belang van het spectrum van daglicht [37]. Het onderzoek toonde aan dat verlichting die de spectrale kenmerken van daglicht nabootste een positieve bijdrage leverde aan het leerproces bij schoolgaande kinderen. Leerlingen die aan dit type verlichting werden blootgesteld waren veel minder afwezig dan kinderen die les kregen in een klaslokaal met conventionele tl-verlichting. Volgens de studie zou het dalende ziekteverzuim ook kunnen verklaard worden door de productie van vitamine D of de bacteriedodende effecten van UV-licht. In elk geval werd er bewezen dat daglicht een grote impact heeft op de gezondheid van zowel kinderen als volwassenen.

1.2.3. Impact op de concentratie van leerlingen

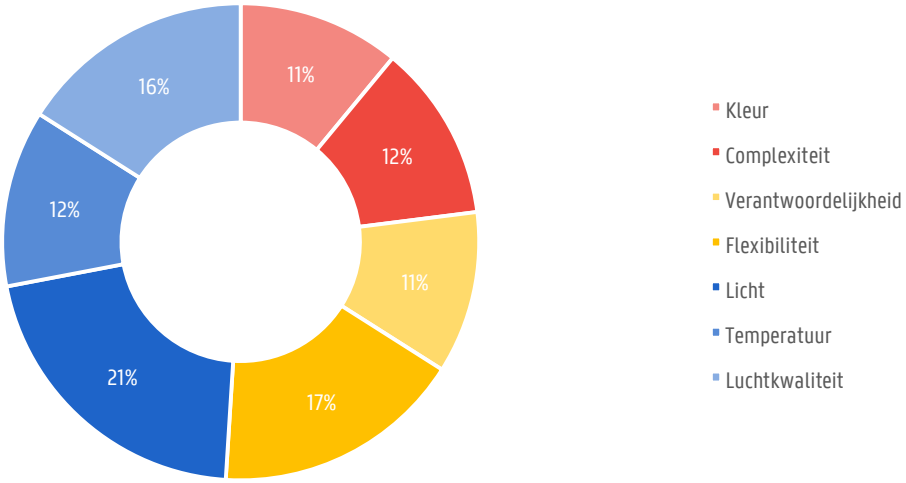
Onderzoek heeft aangetoond dat daglicht ook een belangrijke invloed uitoefent op cortisol, beter bekend als een van onze stresshormonen [38]. Het hormoon maakt het mogelijk om langere tijd alert te blijven en meer te kunnen presteren. Door de aanwezigheid van daglicht bedraagt de hoeveelheid cortisol in het lichaam overdag meer dan 's nachts. Eveneens is het cortisolniveau in de zomer hoger dan tijdens de wintermaanden. De productie van cortisol is dus niet op elk moment van de dag gelijk, het is direct gerelateerd aan het

circadiane ritme van het lichaam. Een Zweedse studie van R. Küller and C. Lindsten deed onderzoek naar de productie van cortisol bij schoolkinderen [39]. Hogere waarden van cortisol werden gerelateerd aan betere sociale vaardigheden en gemiddelde waarden zouden de concentratie en focus van de kinderen bevorderen. Zowel een te hoge als te lage dosis cortisol zorgen voor een negatieve impact op de concentratie. Een hormonaal onevenwicht beïnvloedt de concentratie en focus van de schoolkinderen, bovendien heeft het ook impact op hun groei en leidt het tot meer ziekteverzuim.

1.2.4. Impact op de leerprestaties van leerlingen

Een hoge intensiteit van daglicht stimuleert de alertheid wat resulteert in een betere concentratie en werk- en leerprestaties. Uit verschillende onderzoeken blijkt dat er een duidelijke correlatie bestaat tussen de daglichttoetreding in klaslokalen en de leerprestaties van studenten [40]–[42].

In een rapport, het HEAD-project, opgesteld door deskundigen van de Universiteit van Salford [41] zijn er bewijzen geformuleerd dat kinderen beter presteren op gebied van lezen, schrijven en rekenen bij goed ontworpen schoolgebouwen. Voor het onderzoek werd het leerproces van 3766 leerlingen uit het Verenigd Koninkrijk een jaar lang nauwkeurig geanalyseerd. De studie demonstreerde dat verschillen in de fysieke kenmerken van klaslokalen een verklaring bieden voor 16% van de variatie in het leerproces. Uit het onderzoek bleek dat de invloed op het leervermogen bepaald werd door 7 ontwerpparameters die tot 3 grotere categorieën teruggebracht konden worden. De categorie met de grootste invloed op het leervermogen (49 %), wordt beschreven als 'natuurlijkheid', deze omvat de parameters licht, temperatuur en luchtkwaliteit. De overige twee categorieën vertegenwoordigen een gelijkaardige impact op het leervermogen. De categorie 'individualisering' (28%) wordt verder onderverdeeld in flexibiliteit en verantwoordelijkheid en het onderdeel 'stimulering' (23%) omvat kleur en complexiteit.



Afbeelding 6: Parameters die invloed uitoefenen op het leervermogen

Er dient opgemerkt te worden dat verlichting de grootste individuele impact uitoefent op het leervermogen van kinderen. Volgens het onderzoek zijn de belangrijkste factoren waarmee rekening dient gehouden te

worden op het vlak van daglichttoetreding de beglazing, de beglazingsoriëntatie en verblindingsbeheersing. Schittering wordt de laatste jaren immers als een steeds groter probleem ervaren vanwege het wijdverspreide gebruik van interactieve whiteboards en computerprojectie.

Ook in het onderzoek van de Universiteit van Sorbonne [42] werd geduid op de belangrijke invloed die verlichting uitoefent op de prestaties van leerlingen, 2387 studenten uit dertien verschillende landen namen deel aan de studie. De conclusie luidde dat er een positieve relatie heerst tussen de verhouding raam-vloeroppervlak en de scores van de leerlingen, grote ramen leveren met andere woorden een positief effect op de leerlingen. Het positieve effect kan zowel te wijten zijn aan het overvloedige licht als aan het feit dat studenten zich minder opgesloten voelen in de ruimte. Daarenboven werd in de studie ook waargenomen dat ramen met een zuidelijke oriëntatie een lichte voorkeur genieten. Aangezien er bij de studie geen informatie was omtrent de hoogte van de ramen is het niet duidelijk in hoeverre het uitzicht van belang is en of er een verschil is met ramen die een uitzicht hebben op een groene of stedelijke omgeving.
In het onderzoek werd ook een belangrijk verband opgemerkt tussen de resultaten van de kinderen en het type zonwering. Klaslokalen met een zonwering langs de binnenzijde leverden betere resultaten op dan klaslokalen zonder of met externe zonwering. Klaslokalen waarin de hoeveelheid zonlicht gecontroleerd kan worden en waarbij verblinding vermeden kan worden leveren dus een voordeel.

In facto zijn veel van de bovenvermelde effecten onderling gerelateerd en zijn ze afhankelijk van elkaar op meerdere niveaus. De stoffen melatonine en cortisol zijn bijvoorbeeld omgekeerd evenredig aanwezig in het lichaam. Het circadiane ritme neemt één van de belangrijkste posities in aangezien dit mechanisme controle heeft over vele factoren en zo ons lichaam drastisch kan beïnvloeden. Vele functies overlappen en creëren kettingreacties die worden gestuurd door daglicht. Teneinde de recent verworven inzichten om te zetten naar praktische richtlijnen is er echter nog meer wetenschappelijk onderzoek nodig. Het blijft bijvoorbeeld de vraag hoeveel daglicht er exact nodig is om bovenvermelde effecten in werking te laten treden.

2. Verlichtingseisen in klaslokalen

Klaslokalen dienen gedurende de dag steeds voldoende verlicht te worden om taken op een comfortabele manier te kunnen uitvoeren. In de codex over het welzijn op het werk wordt in art. 33 het volgende vermeld; 'de werkgever zorgt ervoor dat er op de arbeidsplaats voldoende daglicht binnenkomt en dat, indien dit niet mogelijk is, er een adequate kunstverlichting aanwezig is' [43]. Er wordt verder niet gespecifieerd wat onder 'voldoende daglicht' verstaan wordt, er zijn met andere woorden geen wettelijke eisen omtrent de daglichttoetreding in klaslokalen. Het is dus de uitdaging voor de ontwerper om te zorgen dat voldoende daglicht kan binnentreden in zijn project. In verschillende normen worden wel visuele comfortcriteria voor binnenwerkplekken opgegeven die als richtlijn dienen.

2.1. Verlichtingssterkte

De grootheid die aangewend wordt om te bepalen of er voldoende licht aanwezig is op het werkvlak, is de verlichtingssterkte, ze wordt uitgedrukt in lm/m², of "lux". Deze grootheid dient steeds gemeten te worden ter hoogte van het werkvlak. In de norm NEN-EN 12464-1:2011 worden minimale verlichtingssterktes vermeld voor verschillende gebouwbestemmingen, voor het onderwijs worden volgende waarden voorgeschreven [13]:

Type omgeving / taak / activiteit	**E_m**	**UGR**	**U_o**	**R_a**
	(lux)	(-)	(-)	(-)
Klaslokalen	300	19	0,60	80
Klaslokalen voor avond- en volwassenonderwijs	500	19	0,60	80
Auditoria, hoorcollegezalen	500	19	0,60	80
Schoolborden: black boards, white boards	500	19	0,70	80
Kunstlokalen	500	19	0,60	80
Kunstlokalen in kunstscholen	750	19	0,70	90
Inkomhallen	200	22	0,40	80
Circulatieruimtes, gangen	100	25	0,40	80
Sporthallen, gymnasium, zwembaden	300	22	0,60	80
Schoolkantines	200	22	0,40	80
Keukens	500	22	0,60	80

Tabel 7: Eisen voor schoolgebouwen uit de norm NBN EN 12464-1

De voorgeschreven waarden in de norm zijn gemiddelde verlichtingssterktes die over het volledige werkvlak te allen tijde behaald moeten worden. Voor gewone klaslokalen wordt een gemiddelde waarde van 300 lux vooropgesteld. Er dient gewezen te worden op het feit dat de benodigde verlichtingssterkte sterk afhangt van de aard van de uitgevoerde taken. De gewenste lichtcondities in een klaslokaal zullen in werkelijkheid dus variëren naargelang het soort visuele taken die gedurende de dag uitgevoerd worden.

Taak lesgever	Taak leerling	Verlichtingssterkte	
		Klas	Algemeen
		(lux)	(lux)
Schrijven op het bord	Lezen/overnemen van het schoolbord	500 (verticaal)	200
Spreken voor de klas	Opletten wat verteld wordt	300	300
Tonen van presentaties	Kijken naar projectie	300/10	10
Controle over de leerlingen	Schrijven/lezen/tekenen/...	300	300
Beeldschermwerk begeleiden	Kijken naar beeldscherm/papier	50	300 boven PC
Voorbereiden/uitwerken van lessen	Niet aanwezig	300	50

Tabel 8: Overzicht van taken in klaslokalen met de vereiste verlichtingssterkte

Een goed lichtontwerp zou dus in de eerste plaats rekening moeten houden met de noden van de mens, het moet hen begeleiden bij de uit te voeren taken. Daarenboven moet ook vermeld worden dat de benodigde verlichtingssterkte voor een groot deel leeftijdsgebonden is. Een persoon van 60 jaar heeft bijvoorbeeld vier keer meer licht nodig dan iemand van 20 jaar. Aangezien een klaslokaal bezet wordt door verschillende leeftijdsklassen heersen er in principe verschillende vereiste verlichtingssterktes. Eveneens is de vereiste verlichtingssterkte afhankelijk van persoon tot persoon, zo kunnen kinderen met een visuele handicap nood hebben aan verlichtingssterktes die meer dan 300 lux bedragen. Een verlichttingssterkte van 300 lux moet daarom steeds als ondergrens beschouwd worden.
Volgens de laatste nieuwe norm inzake daglicht in gebouwen wordt voorgesteld dat een verlichtingssterkte van 300 lux voor minstens 50% van de daglichturen behaald moet worden om een minimale daglichtkwaliteit te behalen. Daarenboven moeten deze waarden bereikt worden voor minimum 50% van de oppervlakte [14]. Voor het creëren van een kwalitatieve daglichttoetreding in klaslokalen is het zelfs wenselijk om deze richtwaarden te behalen voor 80% of meer van het oppervlak.
De voorgeschreven minimumwaarde van 300 lux wordt door sommige specialisten in vraag gesteld. Volgens architect Peter Elemans, gespecialiseerd in onderwijsgebouwen, heeft het menselijk lichaam nood aan een veel hoger lichtniveau. De biologische klok in het lichaam wordt tenslotte maar geactiveerd bij een verlichtingssterkte van 1500 lux. “Het licht in klaslokalen is voldoende om te kunnen lezen, maar als je de leerprestaties wilt verhogen heb je veel meer licht nodig. Dat zijn andere normen en daaraan kun je niet met kunstlicht voldoen zonder dat het bergen energie kost” [44].

2.2. Daglichtfactor

Voor het aangeven van de hoeveelheid natuurlijke verlichting in klaslokalen, wordt in de meeste gevallen gebruik gemaakt van de daglichtfactor. De daglichtfactor geeft de minimale verlichtingssterkte onder ongunstige hemelcondities weer. De waarde wordt verkregen door de verlichtingssterkte in de ruimte te delen door de verlichtingssterkte die in het vrije veld op hetzelfde ogenblik heerst. De daglichtfactor varieert binnen een ruimte en is afhankelijk van enkele parameters, zoals de vorm en afmetingen van de ruimte, de grootte en positie van de openingen, de reflectie van binnenoppervlakken en de omgeving, in het bijzonder bomen, gebouwen en andere obstructies. De grootheid is daarentegen onafhankelijk van de oriëntatie van de ramen, het seizoen en het tijdstip van de dag. De te behalen richtwaarden die voorgeschreven worden voor de

daglichtfactor zijn bepaald aan de hand van klimatologische gegevens en zijn bijgevolg steeds klimaatafhankelijk. Waarden die gelden voor België kunnen dus bijvoorbeeld niet gehanteerd worden voor tropische landen.

Binnen Europa zijn er verschillende richtlijnen terug te vinden betreffende de daglichtfactoren in het onderwijs. Opmerkelijk hierbij is dat de aanbevolen waarden uiteenlopend zijn. Voor België vinden we onder andere enkele richtlijnen terug in het Instrument Duurzame Scholenbouw, uitgegeven door AGIOn en het GO! [45]. Zo is het aangeraden om een gemiddelde daglichtfactor van minimum 3% te behalen in klaslokalen. Op vlak van een kwalitatieve daglichttoetreding zal een gemiddelde daglichtfactor van 5% of hoger echter meer comfort bieden, in deze situatie hoeft kunstverlichting gedurende de dag niet ingeschakeld te worden. Voor het behalen van deze waarde zal het niettemin in de meeste gevallen noodzakelijk zijn dat de daglichttoetreding van meer dan één kant komt. Een klasruimte met een gemiddelde waarde tussen de 2% en 5% wordt doorgaans voorzien van voldoende daglicht, maar zal tijdens de maanden oktober tot maart regelmatig moeten aangevuld worden met artificiële verlichting. De handleiding vermeldt eveneens richtwaarden voor speciale vaklokalen zoals tekenklassen of technische ateliers. In deze ruimtes heersen strengere daglichtvereisten, er wordt een gemiddelde daglichtfactor van 10% voorgeschreven. Ruimtes die beschikken over een gemiddelde daglichtfactor die meer dan 7% bedraagt, moeten met de nodige voorzorgen ontworpen worden. Het risico op verblinding en te hoge contrasten zal in deze gevallen namelijk groter zijn. In de handleiding van BREEAM wordt voor klaslokalen een andere richtwaarde voorgeschreven. In dit geval moet er een minimale gemiddelde daglichtfactor van 2% behaald worden over 80% van het volledig te beoordelen grondoppervlak [46]. Dit principe komt eerder overeen met de richtlijnen die in de laatst gepubliceerde norm inzake daglicht in gebouwen voorgeschreven worden. Hier dient een gemiddelde daglichtfactor van 2% behaald te worden over 50% van het oppervlak om een minimale daglichtkwaliteit te voorzien met verlichtingssterkte van 300 lux.

Hoewel er in de meeste publicaties en richtlijnen verwezen wordt naar de gemiddelde daglichtfactor, doet deze geen uitspraak over de kwaliteit en de spreiding van het daglicht in de ruimte. Zeer hoge waarden nabij het raam of zeer lage waarden in de buurt van de achterwand van een eenzijdig belicht en diep lokaal kunnen bijvoorbeeld sterk doorwegen in de berekening van de gemiddelde daglichtfactor. Het louter vaststellen van de gemiddelde daglichtfactor volstaat bijgevolg niet om een duidelijk beeld te verkrijgen van het daglichtniveau in de ruimte. Bijkomende studie van de minimale daglichtfactor op het werkvlak kan correctere inzichten verschaffen in de daglichtkwaliteit. Het is aanbevolen om naast de daglichtfactor ook enkele analyses uit te voeren onder zonnige hemelcondities zodat het risico op oververhitting en verblinding onderzocht kan worden.

2.3. Uniformiteit

Naast de verlichtingssterkte en daglichtfactor is het ook interessant om de uniformiteit van het daglicht binnen het klaslokaal in rekening te brengen. De uniformiteit van een vertrek, voorzien van daglicht, toont aan of er gebieden aanwezig zijn die te donker zijn. De variabele kan op twee manieren in kaart gebracht worden. Enerzijds kan de uniformiteitsverhouding berekend worden, dit is de verhouding van de minimum

daglichtfactor tot de gemiddelde daglichtfactor. Voor klaslokalen die voorzien zijn van laterale openingen wordt een waarde tussen 0,3 en 0,4 aangeraden. Ruimtes die zenitaal licht ontvangen moeten een hogere uniformiteitsverhouding hebben, hier worden waarden rond 0,7 geadviseerd [47]. Anderzijds kan de uniformiteit ook aangetoond worden aan de hand van de 'no-sky line'. Dit is de scheidingslijn tussen het deel van de ruimte waarbij er visueel contact is met de hemel en het gedeelte waarbij de lucht niet direct zichtbaar is. De lijn wordt bepaald op basis van het werkvlakniveau. Het gedeelte achter de lijn ontvangt in de meeste gevallen weinig natuurlijk licht en heeft nood aan bijkomende verlichting. Als 50% van de ruimte of meer achter de lijn gelegen is, wordt de ruimte als duister en somber ervaren.

3. Richtlijnen bij het ontwerpen van klaslokalen

3.1. Scholen voor de toekomst

De laatste jaren heerst een groeiende belangstelling in de scholenbouw in Vlaanderen en worden opmerkelijk veel nieuwe schoolgebouwen opgetrokken. De nood aan een kwaliteitsvolle onderwijshuisvesting is groter dan ooit. Om kwaliteitsvolle scholen op te richten, moet men bij deze nieuwe gebouwen efficiënter omgaan met energie, water, grondstoffen, ruimte, financiële middelen en hun omgeving. Dit wel zeggen dat enkel nog duurzame scholen mogen gebouwd worden die over hun volledige levensduur kosteneffectief zijn. Het ontwerp en de constructie van de scholen voor de toekomst moeten eveneens duidelijk bijdragen aan de pedagogische en maatschappelijke visie, ze moeten de nodige kansen bieden om het leerproces en de ontwikkeling van kinderen en jongeren te stimuleren. In de praktijk blijkt de kwaliteit van het binnenmilieu hierin een grote rol te spelen. Licht, geluid, ergonomie, verwarming, koeling en kleurgebruik zijn belangrijke factoren die de gezondheid en het comfort van de gebruikers sterk beïnvloeden. De realisatie van nieuwbouwscholen is dus verre van een eenvoudige opdracht. Om bouwheren, architecten en ontwerpers te informeren, stimuleren en ondersteunen bij het hele proces worden door AGION verschillende richtlijnen geformuleerd. Ook voor het daglichtontwerp van nieuwbouwscholen wordt door het Vlaamse agentschap specifieke informatie meegegeven [48]. Daarnaast zijn er ook enkele publicaties waarin verschillende facetten van licht en verlichting in schoolgebouwen gedetailleerder behandeld worden. De publicatie 'Naar een inspirerende leeromgeving - Instrument voor duurzame scholenbouw' [45] bezorgt de scholenbouwer een inzicht in de technische eisen omtrent de daglichttoetreding en levert daarbij bruikbare tips. In 'Licht in scholen - Van beginner tot expert' [49] wordt informatie meegegeven over hoe moet worden omgegaan met licht en verlichting in schoolgebouwen, de publicatie fungeert als informatieve handleiding voor de gebouwbeheerders en architecten. Hieronder worden de verschillende onderdelen en bijhorende richtlijnen besproken die invloed uitoefenen op de daglichttoetreding van klaslokalen.

3.1.1. Ontwikkeling van het klaslokaal

3.1.1.1. Ligging en omgeving

De ligging en nabije omgeving van scholen hebben een cruciale impact op de daglichttoetreding van klaslokalen. Factoren uit de onmiddellijke omgeving zoals de topografie, omliggende gebouwen, de bodem en vegetatie bepalen in grote mate de aanwezige hoeveelheid daglicht in klaslokalen. De voornaamste eigenschappen die hierbij in rekening moeten gebracht worden, zijn de hoogte, de afstand tot en de materialiteit van de externe factoren.
Schaduwwerking van omliggende gebouwen, vegetatie en andere elementen kunnen een nadelig effect uitoefenen op de natuurlijke verlichting. Bij het ontwerpen van nieuwbouwscholen in een stedelijke context is het dan ook noodzakelijk de impact van omliggende gebouwen in kaart te brengen, eveneens moet rekening gehouden worden met de evolutie van de site in de toekomst. Ook bomen en andere vegetatie kunnen het beschikbare daglicht in een gebouw radicaal veranderen, niettemin dienen ze onderscheiden te worden van andere belemmeringen aangezien ze in de meeste gevallen seizoensgebonden zijn. In de winterperiode,

wanneer veel bomen en planten hun bladeren verliezen, zal de transmissie van het daglicht dan ook een veel hogere waarde bezitten dan in de zomerperiode. Daarenboven bezit vegetatie de eigenschap om licht veeleer te filteren dan te blokkeren, de stralingen worden deels geabsorbeerd en deels doorgelaten.
De omgeving kan daarentegen ook een positief effect hebben op de daglichttoetreding. Het gebruik van materialen met een hoge lichtreflectie, zoals wateroppervlakken en lichtgekleurde gevel- en vloerafwerkingen, kunnen het binnenvallende daglicht in gebouwen sterk bevorderen.
Indien mogelijk moet bij de inplanting van schoolgebouwen voldoende afstand vrijgelaten worden tussen omliggende gebouwen, op deze manier kan een uitzicht met onbelemmerde hemel gegarandeerd worden. Om de impact van de bebouwde omgeving na te gaan, kan er ook gebruik worden gemaakt van de 'no-sky line'.

3.1.1.2. Geometrie en indeling van het klaslokaal

Het grondplan van klaslokalen kan verschillende geometrische vormen aannemen, evenwel is de rechthoek de meest voorkomende en traditionele vorm. De rechthoekige vorm vereenvoudigt de inrichting door een rij en kolom opstelling van de schoolbanken mogelijk te maken en biedt vele voordelen op vlak van flexibiliteit van de ruimte. Daarenboven kan de lesgever een betere controle uitoefenen over de klas en verhoogt het de aandacht op de onderwijs- en leeractiviteiten.
Volgens het instrument duurzame scholenbouw moet er voor gewone klaslokalen in het basisonderwijs rekening gehouden worden met minimum 2 – 2,5 m^2 per leerling. Voor theorielokalen van het secundair onderwijs wordt als richtlijn 1,8 – 2 m^2 opgegeven. Indien lesmethodes met een open plan geprefereerd worden, kan er best rekening gehouden worden met een oppervlakte van 3 – 4,5 m^2 per leerling. De standaardoppervlaktes zijn op deze manier gelegen tussen 50 en 60 m^2, voor leslokalen met een open plan moet men rekenen met een oppervlakte van om en bij de 85 m^2.
Gezien de daglichttoetreding in een ruimte sterk afneemt naarmate de afstand tot de opening toeneemt, zullen de delen die zich het verst van de vensteropeningen bevinden het slechtst verlicht worden. Het is om deze reden dan ook belangrijk om de breedte van klaslokalen te beperken zodat aanvaardbare waarden voor de uniformiteit behaald kunnen worden. Bovendien zijn klaslokalen ook beter dieper dan breed voor zowel het gezichtsveld van de leerlingen als van de lesgevers. Het instrument duurzame scholenbouw voorziet een minimum breedte van 6 m, te smalle klaslokalen zijn immers niet wenselijk aangezien ze minder mogelijkheden bieden qua indeling. Indien een eenzijdig belicht klaslokaal breder is dan 6 m en het beschikt over een standaardhoogte worden de schoolbanken best niet verder dan 6 m van het raam geplaatst, dit zal immers moeilijkheden opleveren om de vereiste verlichtingssterkte op de werktafels te bereiken. Bij de opstelling van de schoolbanken moet er bovendien steeds op gelet worden dat leerlingen niet in hun eigen schaduw zitten bij het uitvoeren van hun taken.
Naast de breedte van klaslokalen is ook de hoogte van belang. Volgens Art. III.1-6 in de codex over het welzijn op het werk dienen werkplaatsen steeds een minimale hoogte van 2,5 m te hebben, deze wordt gerekend van vloer tot plafond [43]. In het instrument duurzame scholenbouw wordt echter een minimale vrije hoogte van 3 m voorgeschreven voor nieuwbouwscholen, deze waarde werd voorzien in het kader DBFM-programma 'Scholen van Morgen'.

3.1.1.3. Eigenschappen van de wanden en oppervlakken

Invallend daglicht wordt zowel gedeeltelijk geabsorbeerd als gereflecteerd door de verschillende oppervlakken binnen het lokaal. De mate waarin deze twee verschijnselen zich voordoen en zullen bepalen hoe de lichtverdeling zal geschieden is grotendeels afhankelijk van de aard en kleur van deze oppervlakken. Bij het ontwerpen van klaslokalen zal daarom ook de keuze van binnenafwerking een belangrijke rol spelen. Lichte muren en plafonds met matte oppervlakken hebben de voorkeur, ze zorgen voor bijkomende lichtreflecties en dus een betere daglichtdistributie. Daarenboven leiden lichte interieurs ook tot betere helderheidsverhoudingen en zijn ze visueel comfortabeler. Donkere kleuren kunnen gebruikt worden, maar deze bevinden zich best op een voldoende grote afstand van de daglichtopeningen zodat ze het invallende licht niet absorberen. Oppervlakken met een glanzende afwerking dienen zo veel mogelijk beperkt te worden om excessieve luminanties en verblinding te voorkomen. Bij het onderzoeken van de daglichtcondities in klaslokalen is het tevens van belang het meubilair in rekening te brengen voor een correcte studie. Zo wordt het vloeroppervlak bijvoorbeeld in de meeste gevallen grotendeels bedekt door de geplaatste inrichting. Het meubilair oefent hierdoor een grote invloed uit op de lichtverdeling en moet hierdoor vanaf het begin meegenomen worden in de lichtstudie.
Aan de hand van de reflectiecoëfficiënt kunnen de eigenschappen van de verschillende oppervlakken uitgedrukt worden. De reflectiecoëfficiënt van een oppervlak is afhankelijk van zowel de kleur als de textuur. In onderstaande tabel worden de waarden weergegeven die door norm NBN EN 12464-1 aanbevolen worden voor de verschillende types wanden.

Type wand	**Aanbevolen reflectiecoëfficiënt**
	(%)
Plafond	70 – 90
Muren	50 – 80
Vloeren	20 – 40
Meubels	20– 70

Tabel 9: Aanbevolen reflectiecoëffieciënten volgens NBN EN 12464-1

3.1.2. Gevelopbouw en daglichtopeningen

Een kwalitatieve daglichttoetreding begint bij een weloverwogen gevelontwerp. De architect speelt hierin een belangrijke rol, hij bepaalt tenslotte de grootte en vorm van de daglichtopeningen en dus hoeveel daglicht in het gebouw zal binnenvallen. Omwille van de energetische aspecten en de duurzaamheid van gebouwen is er tegenwoordig een groeiende aandacht voor de gevelopeningen. Er moet hierbij steeds gezocht worden naar een evenwichtige oplossing waarbij het visueel comfort van de uiteindelijke gebruikers niet uit het oog verloren wordt. De totale hoeveelheid daglicht die in een ruimte binnenvalt is naast de grootte en vorm ook afhankelijk van de positie, de oriëntatie, het type van de openingen en de eigenschappen van de beglazing. Om een goede daglichtkwaliteit te leveren zullen deze zaken bepaald moeten worden in functie van de oriëntatie van het gebouw, de inrichting, het type activiteiten van de gebruikers, de omgeving van het gebouw, … Kortom, het ontwerpen van de gevelopbouw en daglichtopeningen is geen gemakkelijke opgave.

3.1.2.1. Grootte van de openingen

De afmetingen van de vensteropeningen vormen de voornaamste parameter voor het bepalen van de daglichttoetreding. De grootte van de openingen is afhankelijk van verscheidene ontwerpfactoren, in het bijzonder de afmetingen van het klaslokaal. Op basis van twee grootheden kunnen de afmetingen van daglichtopeningen begroot worden. In een eerste geval wordt de grootte gerelateerd aan de geveloppervlakte, hierbij spreekt men over de 'window–to-wall-ratio' (WWR). Deze parameter wordt voornamelijk toegepast wanneer een ruimte langs een zijde van daglichtopeningen voorzien is. Voor het creëren van een klaslokaal met visueel comfort moet de waarde van WWR minimaal 20% tot 25% van het geveloppervlak bedragen. Een WWR van minder dan 20% zal in elk geval leiden tot een te lage daglichttoetreding. Verder wordt de bovengrens van de WWR-richtwaarde vastgesteld op 30% om thermische verliezen te beperken, bij een hoger percentage zal er bovendien risico op verblinding optreden. In regelgevingen uit enkele omringende landen worden bijkomende vereisten gedefinieerd. Zo raadt The British Code BS 8206-2 aan dat voor ruimtes met een diepte van minder dan 8 m het beglaasde oppervlak minstens 20% bedraagt en dat voor ruimtes dieper dan 14 m de WWR een waarde kan aannemen tot 35%. De Duitse norm DIN 5034 schrijft naast de minimum raamoppervlakte ook richtlijnen voor de hoogte en breedte van daglichtopeningen voor. De som van de breedtes van de verschillende openingen in het geveloppervlak moet volgens de norm minstens 55% bedragen van de breedte van de buitenmuur. Daarenboven moeten de openingen over een minimum glasoppervlak beschikken van 1,25 m^2 voor ruimtes met een diepte tot 5 m, bij diepere klaslokalen bedraagt het beglaasde oppervlak minimum 1,5 m^2.
In het tweede geval wordt de oppervlakte van de openingen geassocieerd met de vloeroppervlakte, dit is de 'window-to-floor-ratio' (WFR), gelijkaardig aan deze grootheid wordt ook de 'skylight-to-roof-ratio' (SRR) vastgesteld. In de meeste gevallen wordt een minimumwaarde van 10% voorgeschreven voor de WFR. De richtwaarde van de bovengrens wordt vastgesteld op 20% maar is klimaatafhankelijk. In "Advanced Energy Design Guide K-12 School Buildings" waar door de ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning) aanbevelingen voor scholen vermeld worden, wordt voor WFR een onderscheid gemaakt in oriëntatie. Voor een noordelijke oriëntatie worden waarden vermeld gelegen tussen 15% en 20%, terwijl voor de zuidelijke oriëntatie de WFR beperkt moet worden tot 8% à 11%.

3.1.2.2. Positie van de openingen

De kwaliteit van de daglichtcondities binnen klaslokalen is nauw verbonden met de plaatsing en vorm van de gevelopeningen, deze dienen dan ook op een doordachte manier gepositioneerd te worden. In het instrument duurzame scholenbouw wijst men op het feit dat hoge daglichtopeningen een betere kwaliteit bieden dan horizontale bandramen. Dit wordt veroorzaakt doordat de diepte van het invallend daglicht toeneemt met de hoogte van het venster. De daglichtdiepte bedraagt ongeveer 2 à 2,5 keer de lateihoogte. De daglichtopeningen dienen daarom best zo hoog mogelijk geplaatst te worden, vensteropeningen met een bovenrand tot aan het plafond zorgen namelijk voor een diepe lichtinval. De publicatie vermeld tevens dat brede lokalen van meer dan 7,2 m over vensteropeningen langs twee zijden van de ruimte dienen te beschikken. De openingen kunnen naast een realisatie in de gevelmuur ook voorzien worden in een binnenwand of in het dak. Bij het gebruik van daklichten moet er bovendien extra aandacht besteed worden aan de verdeling van het licht. Als leidraad kan aangenomen worden dat de openingen best gepositioneerd

worden met een tussenafstand van 1 tot 1,5 keer de plafondhoogte van de ruimte. Daarnaast moet bij de positionering van daglichtopeningen steevast voldoende aandacht besteed worden aan het zicht naar de buitenomgeving, de daglichtopening moet steeds beschouwd worden als een functionele grens tussen binnen en buiten. Het uitzicht naar buiten toe is van cruciaal belang voor het psychologisch welzijn van de leerlingen. Door verbinding met de buitenwereld kunnen veranderingen in het weer, het tijdstip van de dag en de seizoenen ervaren worden. Naast contact met de buitenwereld zorgt het uitzicht ook voor een focuspunt in de verte zodat de oogspieren van tijd tot tijd kunnen ontspannen. De ramen mogen hierdoor niet te hoog gepositioneerd worden aangezien er rekening gehouden moet worden met het gezichtsveld van zittende kinderen. Een uitzicht met meer gelaagde zichten en dynamische activiteiten hebben de voorkeur op statische zichten. Het kunnen zien van de lucht wordt beschouwd als een minimum vereiste. Bij het ontwerpen van de daglichtopeningen in klaslokalen moet er evenzeer belangstelling zijn voor de ritmering en tussenafstanden van de ramen. Het opsplitsen van grote raamoppervlakken kan immers zorgen voor een verandering in de beleving. Bij het opdelen van een groot raamoppervlak in kleinere openingen zal de gemiddelde verlichtingssterkte in de meeste gevallen weinig variëren, echter zal de lichtdistributie rondom de ramen anders geschieden. Omwille van de opsplitsing in afzonderlijke openingen ontstaat een grijze zone tussen de ramen, deze zone geeft in vele gevallen aanleiding tot problemen van het visueel comfort wegens contrastverschillen en het verblindingseffect.

Als bijkomende leidraad wordt in België vaak verwezen naar de Duitse norm die specifieke vereisten vermeld. In de Duitse norm dienen de daglichtopeningen op specifieke hoogtes aangezet te worden. De dorpelhoogte mag niet meer bedragen dan 0,9 m en de onderzijde van de beglazing mag niet hoger gelegen zijn dan 0,95 m. Verder dient de lateihoogte op minimum 2,2 m boven de afgewerkte vloerpas te liggen. Naast de positie worden ook waarden voor de afmetingen van de openingen meegegeven. Zo moeten de raamopeningen over een minimale breedte van 1 m beschikken. Indien men voor eenzelfde glasoppervlak de breedte van de openingen laat afnemen, zal de gemiddelde invallende lichttoetreding min of meer hetzelfde blijven, maar zal de daglichttoetreding minder uniform over de ruimte verdeeld worden.

3.1.2.3. Oriëntatie

Om optimaal te kunnen genieten van het aanwezige natuurlijke licht is het gewenst om bij het ontwerpen van een klaslokaal steeds aandacht te besteden aan de oriëntatie van het schoolgebouw. Naast de daglichttoetreding heeft de oriëntatie van het gebouw eveneens invloed op andere factoren zoals het thermische en akoestische comfort. De optimale oriëntatie dient bijgevolg gekozen te worden in functie van daglicht, zonbeheersing en akoestische aspecten.
Bij een bewolkte hemel oefent de oriëntatie van een klaslokaal geen belangrijke rol uit. In dit geval zullen alle ramen ongeacht hun oriëntatie dezelfde hoeveelheid daglicht opvangen en wordt de lichtstraling verspreid in alle richtingen. In het geval van een heldere hemel zal er daarentegen wel een direct verband bestaan tussen de oriëntatie van de daglichtopeningen en de hoeveelheid invallend daglicht. Noordelijk en zuidelijk gerichte daglichtopeningen blijken het meest interessant om volop te kunnen profiteren van het natuurlijke daglicht zonder dat hierbij te veel risico op lichthinder optreedt vanwege een laagstaande zon.
Naar het noorden gerichte vensteropeningen zijn nooit blootgesteld aan directe zonnestraling, hierdoor zal het licht er steeds diffuus en homogeen zijn. Om deze reden levert een ligging op het noorden dan ook de meest

constante lichtkwaliteit over het hele jaar. Als gevolg van het indirect invallende zonlicht is er bij klaslokalen met ramen op het noorden bovendien geen gevaar op verblinding. Naar het noorden gerichte klaslokalen zijn eveneens interessant omdat er tijdens de zomermaanden minder overlast tot oververhitting is, dit doordat de indirecte zonnestraling veel minder warmte bevat. Het licht dat tot stand komt in een ruimte die naar het noorden gericht is, zorgt eerder voor een koel en functioneel effect. De noordelijke oriëntatie kan het best ingezet worden voor ruimtes waar gevoeligheid heerst voor schaduwval, waar een constante homogene verlichting belangrijk is en waar verblinding geen storende factor mag vormen. Deze kenmerken zijn typisch voor lokalen met functies zoals ateliers en praktijklokalen. Daarnaast kunnen noordgerichte lokalen ook ingezet worden voor ruimtes met een hoge interne warmtelast, dit komt voornamelijk voor bij specifieke klaslokalen zoals computerlokalen en keukens.
Om ten volle te kunnen genieten van natuurlijke verlichting worden de daglichtopeningen het best naar het zuiden gericht, deze laten toe dat het daglicht maximaal kan binnenvallen. Door de lage zonnestand en diepe daglichtpenetratie in de winter kunnen de naar het zuiden gerichte daglichtopeningen maximaal zonlicht ontvangen, dit leidt eveneens tot gratis zonnewinsten. Dezelfde voordelen worden tevens bekomen in de tussenseizoenen. Door de lage zonnestand bestaat er evenwel risico op verblinding. Dit gevaar dient beter bekeken te worden in functie van de bezetting, indien nodig dienen gepaste maatregelen getroffen te worden. Dit kan bijvoorbeeld eenvoudig opgelost worden door een interne zonwering te voorzien in de vorm van transparante gordijnen of screens. Tijdens de zomermaanden zal daglicht veel minder diep in de ruimte binnenvallen omwille van de hoge zonnestand. Door middel van zonwering kan bij zuidelijk gerichte openingen de kans op oververhitting relatief makkelijk beheerst worden. Dit kan bijvoorbeeld met behulp van een vast gevelelement zoals een horizontale luifel of een dakoversteek of aan de hand van een regelbare zonwering zoals lamellen of screens.
Ruimtes die gericht zijn naar het oosten en westen vertonen vergelijkbare eigenschappen op vlak van daglichtprestaties. In de zomer bestaat ook hier het risico op verblinding en oververhitting. In vergelijking met de zuidelijke richting zullen daglichtopeningen met een oostelijke en westelijke oriëntatie meer daglicht opvangen bij een heldere hemel in de zomer, dit is te wijten aan de lagere zonnestand die optreedt bij deze oriëntaties. Bij oostelijke vertrekken, die genieten van de ochtendzon, is de lichtinval moeilijk te beheersen aangezien deze laag aan de horizon gebeurt. Ondanks de geringe zonnestraling in de wintermaanden, kunnen gratis zonnewinsten wel van tijd tot tijd opgevangen worden. Westelijke vertrekken zijn blootgesteld aan een directe lichtinval tijdens de late namiddag en avond. De westelijke oriëntatie kan ingezet worden voor klaslokalen waarbij men voor het gebruik een zacht en warm licht verkiest. Echter moet hierbij rekening gehouden worden met het feit dat verblinding en overmatige zonnewinsten een visueel en thermisch ongemak kunnen teweegbrengen. Verder dient men rekening te houden met het feit dat beglazing op het westen zonnewinsten met zich meebrengt op momenten waarop dit voor het merendeel van de schoolgebouwen minder nuttig is gezien de klaslokalen dan niet meer in gebruik zijn.

3.1.2.4. Type

Voor het ontwerpen van de gevelopeningen in klaslokalen kunnen zowel laterale als zenitale daglichtopeningen overwogen worden. Beide configuraties brengen voor- en nadelen met zich mee, ze worden hieronder kort besproken.
Daglichtopeningen dienen zo loodrecht mogelijk te staan ten opzichte van de invallende stralingen teneinde

de hoeveelheid natuurlijk licht binnen een klaslokaal te maximaliseren bij een heldere hemel. Bij een bewolkte hemel zal voornamelijk het zichtbare gedeelte lucht belangrijk zijn voor de daglichtprestaties.
Schoolgebouwen die meerdere verdiepingen tellen, beschikken over beperkte ontwerpmogelijkheden voor de gevelopeningen. In deze gevallen wendt men zich meestal tot klassieke en traditionele oplossingen met laterale daglichtopeningen in de zijgevel. In vergelijking met zenitale en hellende openingen zullen deze laterale glasramen zorgen voor een lagere lichtopbrengst. Bovendien gaat de zijdelingse instraling in bepaalde gevallen gepaard met tegenlicht of verblinding door schaduwwerking. Anderzijds laten laterale daglichtopeningen een betere driedimensionale diepte waarneming van objecten en kleuren toe en verschaffen ze meer gelaagde uitzichten. Klaslokalen die rechtstreeks in contact staan met het dakoppervlak kunnen gebruik maken van zenitale openingen. In vergelijking met laterale openingen zal de daglichtdistributie bij horizontale openingen veel homogener gebeuren. Daarnaast zal ook het risico op verblinding veel geringer zijn aangezien het zonlicht langs boven invalt. Hierbij mag de beglazing van het zenitale daklicht niet zichtbaar zijn onder een hoek kleiner dan 35° vanaf de horizontale, gezien vanuit het normale zichtpunt. Verblinding kan eveneens vermeden worden door de zenitale opening zo te ontwerpen dat zonlicht enkel indirect kan binnenvallen door middel van reflecties. Zenitale openingen zijn minder gunstig tijdens de wintermaanden, door de lage zonnestand zullen de daklichten minder licht opvangen. In de zomer daarentegen kan zonlicht ten volle binnentreden. Bijkomend kunnen er ventilatieopeningen in het zenitale daklicht voorzien worden die in staat zijn de warme lucht af te voeren. Op deze manier kan oververhitting gedeeltelijk voorkomen worden. Overmatige warmtewinsten kunnen ook gereduceerd worden door het dak op doordachte posities op te trekken en hierin laterale of hellende openingen met gunstigere oriëntaties te voorzien, denk hierbij bijvoorbeeld aan noordgerichte sheddaken.
Er kan besloten worden dat, indien dit mogelijk is, er best verschillende bronnen van daglicht ingezet worden om op een eenvoudige manier een goede daglichttoetreding te bereiken. Zo kan bij een combinatie van laterale en zenitale dagopeningen een homogene lichtdistributie gecreëerd worden enerzijds en kan er anderzijds een aangenaam uitzicht naar de buitenwereld verkregen worden.

3.1.2.5. Eigenschappen van de beglazing

Naast de grootte, positie en vorm van de transparante delen werden eveneens vereisten voor de lichttransmissie van beglazingen vooraf vastgelegd. Zoals eerder vermeld wordt de LTA-waarde beïnvloed door de glasdikte, glaskleur en eventuele toegevoegde coatings of screens. Voor klaslokalen waarbij het visueel comfort gerespecteerd wordt, stelt men een waarde van 70% voorop. Volgens het Instrument duurzame scholenbouw wordt echter een strengere waarde voorgeschreven, hierbij wordt aangeraden om hoog efficiëntieglas te gebruiken met een minimale lichttransmissiefactor van 80%.
Bij een lagere lichttransmissiefactor kan de daglichttoetreding gecompenseerd worden door grote daglichtopeningen te introduceren. Hierbij moet wel gelet worden op het feit dat de voorgeschreven bovengrens van de WWR/WFR overschreden kan worden.

3.2. Scholen uit het verleden

Het Vlaamse schoolpatrimonium bestaat uit een grote diversiteit aan gebouwen die doorheen de tijd gebouwd werden conform de geldende normen. Veel Vlaamse schoolgebouwen zijn echter verouderd en voldoen niet langer aan de kwaliteit die de dag van vandaag vereist wordt. De gebouwen zijn dringend toe aan renovatie en vernieuwing. Bij de renovatie dient het daglichtaspect net als in nieuwbouwscholen aandachtig bestudeerd te worden. Derhalve is het belangrijk om eerst te schetsen hoe klaslokalen uit het verleden opgebouwd werden. Vanaf de negentiende eeuw deden zich belangrijke ontwikkelingen voor in het onderwijs. Voor het eerst worden door de overheid specifieke reglementen uitgevaardigd voor een goede huisvesting van de scholen. In België verschijnen in 1852 de eerste ministeriële instructies [50], deze bevatten reglementeringen en eerste typeplannen. De reglementeringen zijn in detail uitgewerkte bestekken gaande over de vestigingsplaats, de afmetingen van de lokalen, lichtinval, verluchting en verwarming, inrichting en meubilair, … De bestekken waren voornamelijk nuttig voor metselaars op het platteland, deze vervulden vaak zowel de rol van de architect als de aannemer. De wettelijke reglementen werden via verscheidene schooltraktaten verspreid om een leidraad te verschaffen aan lokale overheden. Een van de eerste schooltraktaten waarin de Belgische school uitvoerig beschreven werd is dat van Felix Narjoux uit 1878 [51]. Zijn boek 'Les Ecoles Publiques en Belgique et en Hollande' sluit aan bij de wet van 14 augustus 1873, waarbij de regering een bedrag van 20 miljoen frank uittrok als subsidie voor de oprichting van schoolgebouwen. Eveneens wordt in zijn werk het vernieuwde programma van eisen van 25 november 1874 gepubliceerd.
In de verschillende teksten die handelen over de negentiende-eeuwse schoolarchitectuur kunnen allerlei richtlijnen teruggevonden worden omtrent de daglichttoetreding. De verschillende invloedsfactoren die betrekking hebben op de daglichttoetreding worden in de teksten verder uitgelicht, dit zijn; de inplanting van het gebouw, de geometrie van de ruimte, eigenschappen van de wanden, de oriëntatie en positie van openingen, de grootte en de vorm van de ramen en de opstelling van het schoolmeubilair.

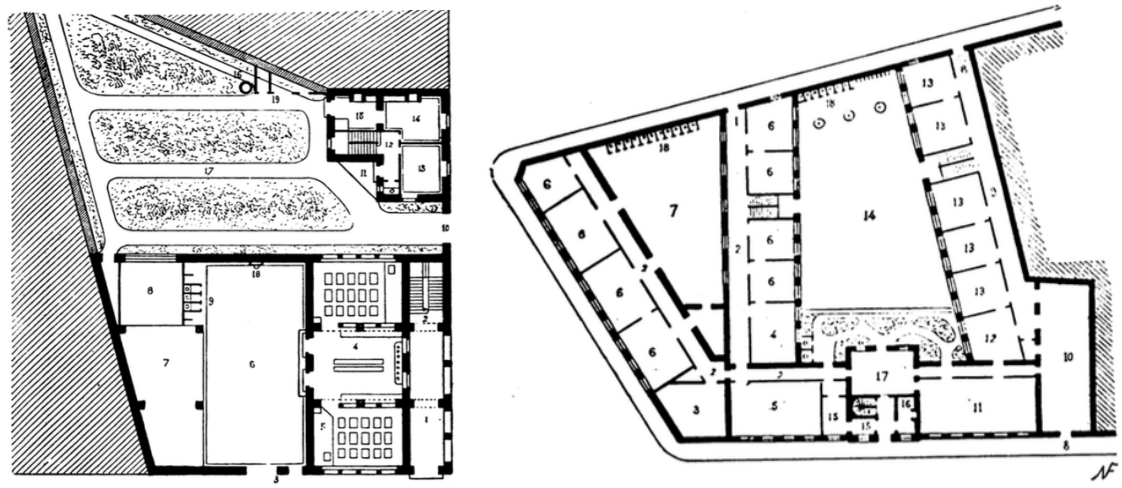
3.2.1. Ontwikkeling van het negentiende-eeuwse klaslokaal

3.2.1.1. Omgeving en oriëntatie

De omgeving en oriëntatie van het negentiende-eeuwse klaslokaal spelen een fundamentele rol bij de daglichttoetreding. Er dient hierbij een onderscheid gemaakt te worden tussen de stadsschool en de plattelandsschool. Op het platteland was het eenvoudig om een gezonde plek te creëren ver weg van een lawaaierige en gevaarlijke buurt. De school werd opgetrokken op een verhoogde en geïsoleerde omgeving. Bovendien werd naast het schoolgebouw een grote tuin voorzien. In de steden was de locatiekeuze echter niet zo voor de hand liggend. De stadsschool moest zich op wandelafstand bevinden van de woongelegenheid van de leerlingen, maar tevens afgesloten zijn van de naburige woningen zodat storende geluiden vermeden werden.
Hoewel de oriëntatie van de school meer vrijheid liet dan de locatie, was ook deze niet makkelijk te bepalen in geval van de stadsschool. Het typeplan van stedelijke scholen bestond uit een centrale koer waarrond de klaslokalen gebouwd werden, hierbij was het zelden mogelijk de ramen van de klassen te positioneren in de richting die de voorkeur genoot. Gunstige oriëntaties waren eerder uitzondering dan regel. Op het platteland

kon het schoolgebouw geplaatst worden volgens zijn meest gunstige positie. De ramen van de klassen moesten zoveel mogelijk in de zuidoostelijke en noordwestelijke richting gelegen zijn, dit om extreme koude en hitte te vermijden en zowel in de ochtend als middag te kunnen genieten van zonnestralen. Bovendien was het nuttig de westelijke richting te vermijden omwille van het storend geluid van wind en regen. De openingen van de plattelandsklassen gaven in de meeste gevallen uit op de weidse omgeving of de aangelegde tuin.
In latere geschriften werd voor de oriëntatie een onderscheid gemaakt tussen de verschillende types van lokalen. Zo zal men pleiten voor een noordelijke oriëntatie voor allerhande vaklokalen en werkplaatsen omwille van hun uniforme verlichting.

a) b)



Afbeelding 7: Type scholen a) de plattelandsschool b) de stadsschool

3.2.1.2. Geometrie van het klaslokaal

Volgens 'Les écoles publiques' van Narjoux wordt de klas gepresenteerd als de architecturale module die de elementaire bouwsteen van de nieuwe school vormt. De module wordt gevormd door een rechthoekige ruimte waarbij het licht invalt doorheen een van de lange zijden, de toegangsdeur van het klaslokaal bevindt zich aan de tegenovergestelde kant van de ramen en het platform, de plaats van de onderwijzer, is gelegen aan de voorzijde van de klas. In sommige scholen worden de klaslokalen rechtstreeks met elkaar in contact gesteld door communicatiedeuren, deze vergemakkelijken tevens het toezicht van de schooldirecteur. De rechthoekige vorm en afmetingen van het klaslokaal vloeien voort uit een efficiënte kennisoverdracht en controle. Volgens Art. 5. van het 'programma voor bouw en meubilering van schoolgebouwen' uit 1874 dient de grootte van het klaslokaal berekend te worden op basis van het aantal leerlingen. Per leerling moet een vloeroppervlakte van minimum 1 m^2 voorzien worden inclusief de ruimte voor circulatie, het platform voor de lesgever en bibliotheekkasten. Bovendien mag het volume per kind niet minder dan 4,5 m^3 bedragen, deze vereiste resulteert vaak in een minimale vrije hoogte van 4,5 m. In de praktijk wordt de voorgeschreven oppervlakte echter als onvoldoende ervaren en wordt deze in de meeste gevallen verhoogd. De oorzaak van het tekort kan hoofdzakelijk toegeschreven worden aan de evolutie van de schoolbanken. Bij het oude model waarop vier, vijf of acht leerlingen naast elkaar konden zitten, was het voorgeschreven oppervlak voldoende. De stoelen bleken evenwel niet ergonomisch te zijn en daarenboven werd de doorgang tussen twee opeenvolgende rijen geblokkeerd, waardoor controle door de leraar moeilijk uit te voeren was. Het nieuwe schoolmeubilair werd

ontworpen op maat van een of twee leerlingen waardoor meer plaats nodig was. In dit geval werd al snel gerekend met een oppervlakte van 1,4 m^2 tot en met 1,7 m^2 per leerling. De vereiste oppervlakte die voorzien moest worden per leerling was bijgevolg niet strikt absoluut; een klaslokaal bedoeld voor zeer jonge kinderen bedroeg vaak minder dan 1 m^2 per leerling terwijl klaslokalen voor jongeren een grotere oppervlakte vereisten. Het aantal leerlingen in de negentiende-eeuwse klas bedraagt tussen de 30 en 50. In de stedelijke scholen wordt deze bovengrens evenwel nooit behaald. De grootste klaslokalen zullen bijgevolg over een vloeroppervlakte van om en bij de 70 m^2 beschikken. Omwille van het beperkte stembereik van de onderwijzer en de vereiste leesbaarheid van het schoolbord voor kinderen op de achterste rij, heeft de diepte van het klaslokaal best een waarde tussen de 8 en de 10 m. De optimale breedte van het klaslokaal bedraagt tussen de 6 en 7 m, deze garandeert voldoende lichtinval en laat toe dat de volledige klas binnen het gezichtsveld van de leraar blijft. Bij het bepalen van de afmetingen, moest men steeds op de hoogte zijn van het te gebruiken schoolmeubilair. Enkel op deze manier ging er geen plaats verloren en kon het klaslokaal op efficiënte wijze gebruikt worden. Naast het aantal leerlingen bleek ook de locatie invloed te hebben op de grootte van de negentiende-eeuwse klassen. Schoolgebouwen die langs alle kanten omgeven werden door hoge constructies dienden te beschikken over klaslokalen met een grotere oppervlakte om voldoende licht en lucht te laten binnentreden. De hoogte van 4,5 m bleef algemeen aanvaard, aanpassingen hieraan kwamen zelden voor.

3.2.1.3. Eigenschappen van de wanden en oppervlakken

Om reflectie tegen te gaan en om op bepaalde plekken het licht te verstrooien werd reeds eind negentiende eeuw aandacht besteed aan het schilderwerk en de wanddecoratie. De kleuren van het schilderwerk mochten noch te licht, noch te donker zijn. Een zuivere witte kleur bijvoorbeeld zou het licht te veel weerspiegelen en om die reden het zicht vermoeien. Zodoende werden voornamelijk grijsgroene en blauwgrijze tinten aangebracht in de klaslokalen. Bovendien was het aanbevolen om de schilderwerken niet te decoreren, daar ze het zicht van de kinderen evenzeer zouden vermoeien. De plafonds bestonden uit houten latten die aan balken genageld werden en bedekt werden met een afwerking in pleisterwerk, ze werden steeds vlak uitgevoerd. Aangezien de muren een grijze kleur vertoonden, was het aangeraden het plafond van een witte kleur te voorzien om de diffusie van het licht te optimaliseren. De vloer van de negentiende-eeuwse klaslokalen werd uitgevoerd in zeer uiteenlopende materialen. In landelijke scholen werd in veel gevallen geopteerd voor terracottategels, grote stedelijke scholen daarentegen maakten vaak gebruik van eiken- of sparrenvloeren. Deze laatste werden bedekt met een soort gips op basis van rubber om het onderhoud te vergemakkelijken, lawaai te reduceren en de duurzaamheid van het hout te verlengen.
Bovendien dient opgemerkt te worden dat hoeken gecreëerd door muren, plafond, balken en ramen in vele gevallen zorgvuldig afgerond of afgeschuind werden. Deze afwerking werd voornamelijk aangewend om het schoonmaken te vergemakkelijken en de luchtcirculatie te bevorderen.

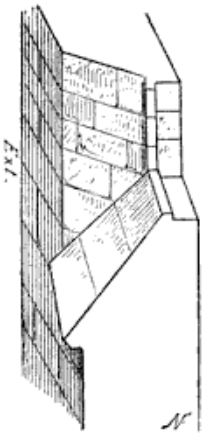
3.2.2. Gevelopbouw en daglichtopeningen

Al bij de eerste schooltraktaten werd opmerkelijk veel aandacht besteed aan het klasraam. De schoolgebouwen uit de tijd van Narjoux werden gezien als een binnenruimte die zicht afsloot van de buitenwereld, bijgevolg kregen de randen dan ook een bijzonder statuut. De ramen, het meest directe contactvlak tussen binnen en buiten, dienden nauwgezet gepositioneerd te worden teneinde de gewenste beslotenheid te garanderen. Eveneens groeide het belang van hygiëne in de schoolklas van de negentiende

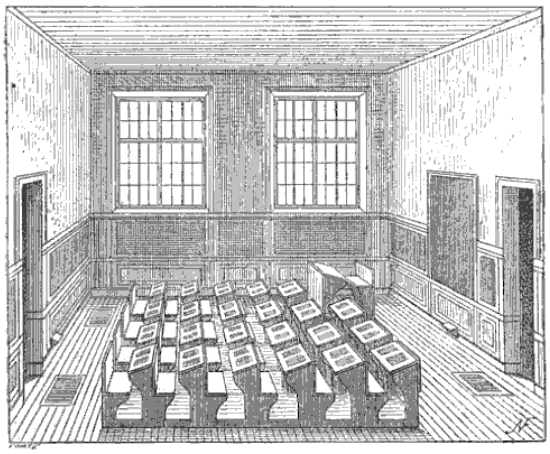
eeuw. Hierdoor werden de klaslokalen uitgerust met grote ramen die ten alle tijde open konden om de klas te ventileren. Het klasraam was met andere woorden een noodzakelijke bron om te voorzien in voldoende daglicht en verse buitenlucht.

3.2.2.1. Grootte en vormgeving van de openingen

Om voldoende licht te laten binnenvallen in het klaslokaal moest de beglazing over een zekere oppervlakte beschikken. Volgens Art. 6. van het programma van eisen, opgesteld in 1874, luidde het volgende: "Het oppervlak dat het beglaasde gedeelte van het venster vertegenwoordigt, moet ten minste gelijk zijn aan een twintigste van het volume van de ruimte". Om aan deze voorwaarde te voldoen was het noodzakelijk openingen met grote dimensies te voorzien of meerdere kleinere openingen te plaatsen. Krachtens de ministeriële instructies van 1852 hadden de openingen een breedte variërend van 1,2 tot 1,5 m en een hoogte tussen de 2,5 en 2,7 m. In de meeste gevallen werden de afmetingen van de ramen echter aangepast; hun breedte bedroeg vaak bijna 2 m en hun top reikte veelal tot niveau van het plafond.
Ook aan de vormgeving van de vensterbank en dagkanten werd bijzondere aandacht besteed. Krachtens het schooltraktaat van eind de negentiende eeuw zou het immers verboden zijn op de vensterbank voorwerpen van welke aard dan ook te plaatsen. Om te beletten dat van deze regel afgeweken werd, kwamen vensterbanken met een aanzienlijke helling tot stand. Het hellende vlak werd nauwgezet aangesloten op de dagkanten die eveneens afgeschuind uitgevoerd konden worden. De afgeschuinde vlakken vergemakkelijkten het binnenvallen van daglicht en bevorderden daarenboven het gemak om verse lucht te laten toetreden in de ruimte.



Afbeelding 8: Vormgeving dagkanten en vensterbank



Afbeelding 9: Negentiende-eeuws klaslokaal met typerende daglichtopeningen

3.2.2.2. Positie van de openingen

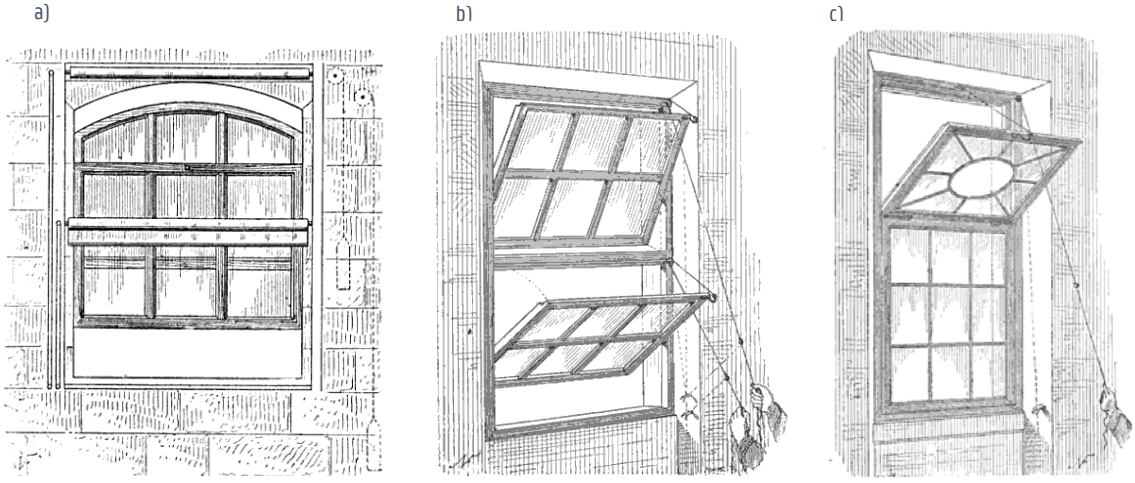
Bij het ontwerpen van de negentiende-eeuwse klaslokalen heerste een continue strijd tussen de belangrijkheid van de besloten school en de nood aan natuurlijke verlichting. De ramen moesten zowel dienstdoen als verlichting en verluchting zonder dat ze een uitzicht boden op de buitenwereld. Als gevolg dienden de daglichtopeningen hoge lambriseringen te hebben. Door de lambriseringen werd een grens gecreëerd

waardoor men tijdens het studeren niet kon worden afgeleid door de buitenwereld. Ze dienden zeker tot boven het tafelblad aangezet te worden en bij voorkeur moesten ze boven de ooghoogte van de zittende kinderen geplaatst worden. Zowel de hoogte van de ramen als de aangepaste textuur van de beglazing moesten beletten dat de leerlingen naar buiten zouden kunnen staren. De hoge positie van de daglichtopeningen werd door enkele onderwijzers fel bekritiseerd. Het gesloten karakter van stedelijke scholen werd aanvaard, maar volgens enkelingen dienden de landelijke scholen een uitzicht te bieden op de weidse velden. Zo ging een negentiende-eeuwse onderwijzer radicaal in tegen de bewering dat zijn leerlingen minder goed de les zouden volgen bij ramen die uitzicht boden op de buitenwereld. Integendeel, hij was ervan overtuigd dat het uitzicht de kinderen in staat stelde hun ogen te ontspannen en hun jonge geest te laten rusten. Hij beweerde daarenboven dat het zicht naar buiten toe een hoeveelheid aan ideeën voortbracht in het hoofd van de leerlingen, wat het werk- en leerproces enkel maar bevorderde. Het klaslokaal gezien als een gesloten doos was volgens de leraar een sombere omgeving die niet vruchtbaar was voor de kinderen.
Naast het creëren van een zekere geslotenheid werden de raampartijen eveneens op grote hoogte aangezet om storende lichtinval en ongunstige reflecties te beperken. Volgens de hygiënisten van de negentiende eeuw waren horizontale stralen en stralen die van beneden naar boven schijnen zeer storend en moesten deze vermeden worden. Door hun incidentie op de grond en de schoolbanken geven ze namelijk aanleiding tot sterke reflecties. Daarenboven zorgen lichtstralen die binnenkomen ter hoogte van het kind voor zeer hinderlijke schaduwen. Lichtstralen die binnenvallen via het bovenste deel van de daglichtopeningen hebben volgens de hygiënisten de voorkeur. Volgens de ministeriële instructies van 1852 dienen ramen bij voorkeur aan twee zijden voorzien te worden zodat het licht zijdelings op de schoolbanken binnenvalt. Indien dit onmogelijk is moeten de openingen op zijn minst links van de leerlingen geplaatst worden. In het schooltraktaat van Narjoux wordt verder vermeld dat de openingen zich op een hoogte van 1,5 m boven de afgewerkte vloerpas moeten bevinden. Volgens Art. 9 van het Nederlandse Staatdecreet van 19 november 1861 wordt daarenboven vermeld dat het penant tussen twee openingen om en bij de 0,45 m bedraagt.

3.2.2.3. Type vensters

Uit de studie van Narjoux blijkt dat er in de klaslokalen steeds geopteerd werd voor laterale openingen. Er bestond toen al een diversiteit aan toegepaste venstertypes met variërende werkingsmechanismen. Een van de veel voorkomende systemen was het guillotineraam. Het guillotineraam bestaat uit twee raamkaders die de gehele hoogte van het raam innemen, aan de hand van een tegengewicht kunnen de twee delen boven elkaar schuiven. Het tweedelige raam laat toe zowel de onder- als bovenzijde van de ruimte te ventileren. Er dient opgemerkt te worden dat het guillotinesysteem niet toelaat het volledige venster te openen. Een ander veel voorkomend type is het opendraaiende raam. Binnen deze categorie kunnen de eerste modellen teruggevonden worden van het pivoterende raam en het kipraam. Aan de hand van een eenvoudig mechanisme kan het raam volgens een gewenste hoek geopend worden. Het venstertype biedt verschillende voordelen; de installatie is goedkoop en de frames zijn eenvoudig te openen. Afhankelijk van de raamconfiguratie bestaat ook hier de mogelijkheid om zowel via het onderste als bovenste gedeelte te ventileren. In afwezigheid van de leerlingen kan de klas snel geventileerd worden via de onderzijde, bij aanwezigheid van de kinderen wordt het deel boven hun hoofd opgeheven zodat de ventilatie als niet storend wordt ervaren.
Bij de verschillende venstertypes valt bovendien op te merken dat het raam steeds door roeden in meerdere

vlakken opgedeeld wordt. Hierbij worden de onderste delen dikwijls uitgevoerd in matglas om te voorkomen dat externe objecten worden waargenomen. Het bovenste gedeelte van het raamkader wordt geplaatst zodat het naar believen kon worden geopend om ventilatie te vergemakkelijken.



Afbeelding 10: Type vensters a) guillotineraam b) pivoterend raam c) kipraam

DEEL 3: Daglichtsimulaties

1. Inleiding

In dit deel worden verschillende testen uitgevoerd om de hoeveelheid daglicht in klaslokalen te analyseren. Een goed daglichtontwerp brengt voldoende daglicht, verspreidt dit evenwijdig, maar vermijdt buitensporige glasoppervlaktes. De verschillende testen worden getoetst aan de daglichtkwaliteitsklassen volgens de CEN daglichtnorm. De testen onderzoeken hoe daglicht in klaslokalen geoptimaliseerd kan worden en gaan na wat de invloed is van energetische ingrepen op nieuwbouwscholen en bij de renovatie van oude scholen. Naast optimale daglichtniveaus wordt er bij de testen ook belang gehecht aan de aanwezigheid van een kwalitatief uitzicht. Dit zorgt er immers voor dat kinderen hun ogen tot rust kunnen komen en doorbreekt het karakter van de alledaagse binnenomgeving.

2. Berekeningsmethode

2.1. Lichtberekeningssoftware

Voor het berekenen van de hoeveelheid daglicht in klaslokalen wordt zowel overwogen om de Dialux als Relux software te hanteren. Onderzoek van I. Acosta et al. toont aan dat beide lichtberekeningssoftware gebruik maken van hetzelfde hemeltype, de traditioneel bewolkte hemel opgesteld door Moon-Spencer. Uit het onderzoek komt de Dialux software, ondanks enkele beperkingen, naar voor als een programma met aanvaardbare nauwkeurigheid. De Relux software levert ten opzichte van analytische berekeningen nauwkeurige resultaten voor daklichten, voor gevelopeningen vertonen de resultaten echter grotere foutmarges wat de nauwkeurigheid van het programma in vraag stelt [52]. Omwille van deze reden worden de daglichtsimulaties uitgevoerd met de Dialux software.

Dialux evo is een uitgebreid en gratis lichtberekeningsprogramma dat ingezet kan worden voor het maken van professionele lichtberekeningen. Typische parameters die gesimuleerd kunnen worden zijn de verlichtingssterkte op het werkvlak, de UGR en de luminantieverdeling in de ruimte. De software maakt zowel lichtberekeningen voor artificiële verlichting als voor natuurlijke verlichting en genereert bovendien realistische 3D visualisaties van de verlichting. De berekeningsmethode van het programma werkt aan de hand van “photon shooting”, het voordeel van dit principe is dat het nauw aansluit bij de werkelijkheid [53]. Zowel bij natuurlijke als kunstmatige lichtbronnen zal een straal van fotonen, kleine lichtdeeltjes, uitgestraald worden via een bepaald patroon. Afhankelijk van de materiaaleigenschappen van de oppervlakken waarop ze invallen, worden deze stralen diffuus weerkaatst, geabsorbeerd of doorgelaten. De talloze fotonen worden verzameld op de oppervlakken en er wordt een evaluatie van de dichtheid gemaakt. Het aantal fotonen per oppervlak en hun energie-inhoud bepalen uiteindelijk de luminantie of verlichtingssterkte.
Voor het berekenen van daglichtsimulaties wordt in Dialux evo een hemisfeer geïntroduceerd die opgedeeld is in driehoekige vlakken. De vlakken worden bepaald volgens een aantal voorgeschreven azimut- en hoogtehoeken, zoals deze ook terug te vinden zijn bij de aardbol. De software maakt gebruik van drie verschillende hemeltypes die bepaald zijn volgens CIE 110-1994 [54], dit zijn de ‘overcast sky’, de ‘clear sky’ en de ‘average sky’ [55]. Afhankelijk van het gekozen hemeltype wordt een bepaalde luminantie toegewezen, die

bepalend is voor de lichtverdeling. Voor het berekenen van daglichtfactoren wordt gebruik gemaakt van de CIE overcast sky, deze houdt geen rekening met direct zonlicht. De luminantieverdeling van dit hemeltype is bovendien onafhankelijk van de oriëntatie. De absolute waarde van de luminantie van de hemelkoepel wordt bepaald door de zonshoogte.

$$L_p = \frac{L_z * (1 + 2 \sin \theta)}{3}$$

Met: L_p de luminantie in punt P op de hemelkoepel [cd/m^2]
L_z de zenitale luminantie [cd/m^2]
θ de hoogte van punt P in graden

De overige twee hemeltypes laten daarentegen wel toe om direct zonlicht in rekening te brengen, hierbij wordt een van de driehoekige vlakken aangeduid als zon. De berekening van het directe licht rust op de fotometrische wet van de afstand, het uitgestraalde licht van de afzonderlijke hemelvlakken wordt overgedragen op de hele scène. Het simuleren van direct zonlicht maakt het mogelijk om de lichtinval en schaduwvorming te bestuderen.

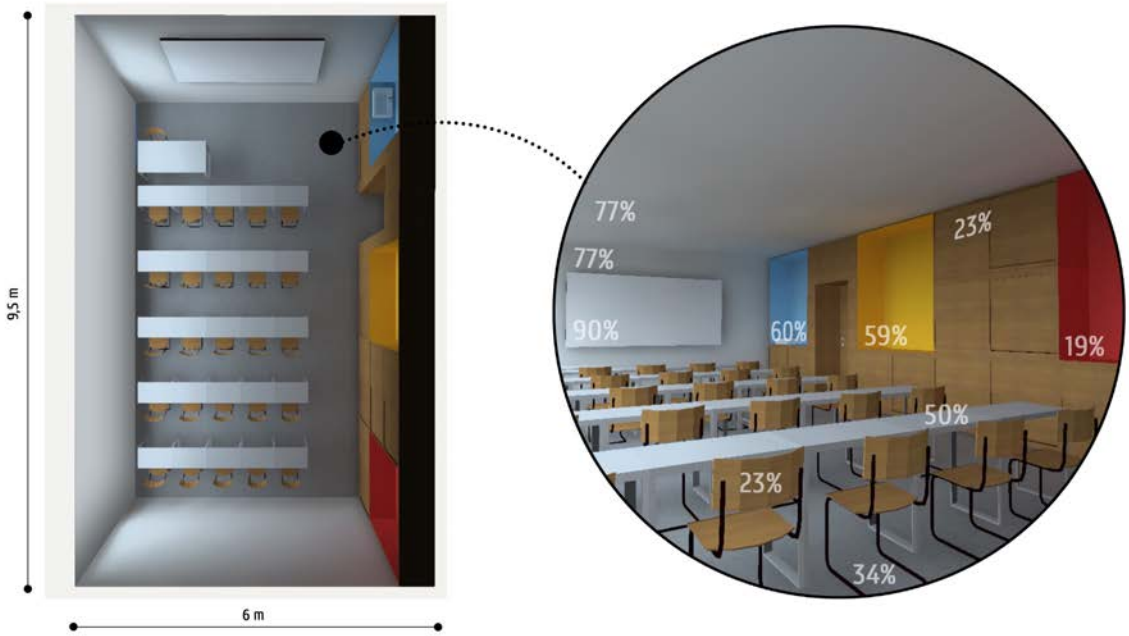
2.2. Modelbeschrijving

2.2.1. Klaslokaal in nieuwbouwschool

Voor het onderzoeken van de daglichtsituatie in hedendaagse schoolgebouwen wordt een fictieve klasruimte ontworpen aan de hand van de bestaande vereisten en richtlijnen. Het ontwikkelde klaslokaal beschikt over een rechthoekig grondplan waarvan de oppervlakte bepaald wordt aan de hand van het aantal leerlingen. De oppervlakte van de ruimte wordt ontworpen voor een groep van 25 leerlingen. Er wordt gerekend met een oppervlakte van ongeveer 2 m^2 per leerling zodat de klasruimte zowel geschikt is voor het basis- als voor het secundair onderwijs. Het grondplan bestaat uit een rechthoekige ruimte die 6 m breed en 9,5 m diep meet. De totale oppervlakte bedraagt bijgevolg 57 m^2. De vrije hoogte van de ruimte bedraagt 3 m.
Bij het ontwerpen van scholen voor de toekomst dient ook rekening gehouden te worden met de huidige isolatienormen, als gevolg hiervan hebben de buitenmuren een dikte van 50 cm. Om uit te gaan van de meest nadelige situatie fungeert in het model slechts een van de wanden als buitenwand, dit is bijgevolg de enige gevel waarin daglichtopeningen kunnen voorzien worden. De totale oppervlakte van deze lange zijwand bedraagt 28,5 m^2. Indien, zoals in de richtlijnen, de grootte van de gevelopeningen berekend worden aan de hand van een WWR van 20% - 30%, moeten de openingen over een totale oppervlakte van 5,77 tot 8,55 m^2 beschikken. Een berekening op basis van WFR leidt tot een oppervlakte van 5,7 – 11,4 m^2. In de simulaties zullen verschillende raamconfiguraties getest worden en zal nagegaan worden of deze richtlijnen voldoende daglicht toelaten.

De binnenwanden en het plafond van de klasruimte worden afgewerkt met een witte kleur die een hoge reflectiefactor bezit zodat het licht dieper in de ruimte kan binnenvallen. De vloer wordt afgewerkt met een grijze kunststofvloer die onderhoudsvriendelijk is en bijdraagt aan het akoestische comfort van het klaslokaal. Hij beschikt over een lage reflectiefactor zodat het licht niet naar boven weerkaatst wordt en er bijgevolg geen

hinderlijke reflecties kunnen optreden voor de leerlingen. De lange zijwand zonder openingen wordt uitgerust met een ingebouwde kast over de volledige lengte waarin didactisch materiaal bewaard kan worden. Ze wordt uitgevoerd in een houten afwerking, waarin drie uitsparingen voorzien worden in felle kleuren. Zowel het hout als de felle kleuren zorgen ervoor dat er geen monotone klasruimte ontstaat, ze helpen de klas op te fleuren en de leerlingen te stimuleren. Uit het reeds vermelde 'Head Project' blijkt immers dat een volledig wit klaslokaal vermeden dient te worden, het gebruik van enkele felle kleuraccenten zou de leerprestaties van kinderen positief beïnvloeden [41]. Verder wordt de klas ingericht met los meubilair zodat een flexibele klasinrichting gegarandeerd wordt. In het testmodel worden vijf bankenrijen voorzien die elk plaats bieden aan vijf leerlingen. Elke leerling beschikt over een werktafel van 76 cm breed en 46 cm diep, de hoogte van de werktafel bedraagt 72 cm. De schoolbanken worden naast elkaar geplaatst zonder tussenruimte zodat de afstand tot de ramen beperkt wordt. Vooraan in de klas wordt plaats voorzien voor de lesgever, deze bevindt zich vlak naast het raam omdat de vereiste verlichtingssterkte voor volwassenen hoger ligt dan voor kinderen en jongeren. Om een toegankelijke klasruimte te creëren wordt het meubilair zo geplaatst dat de vrije doorgangen steeds een minimale afmeting van 90 cm hebben. Verder wordt het klaslokaal aan de voorzijde uitgerust met een interactief whiteboard.



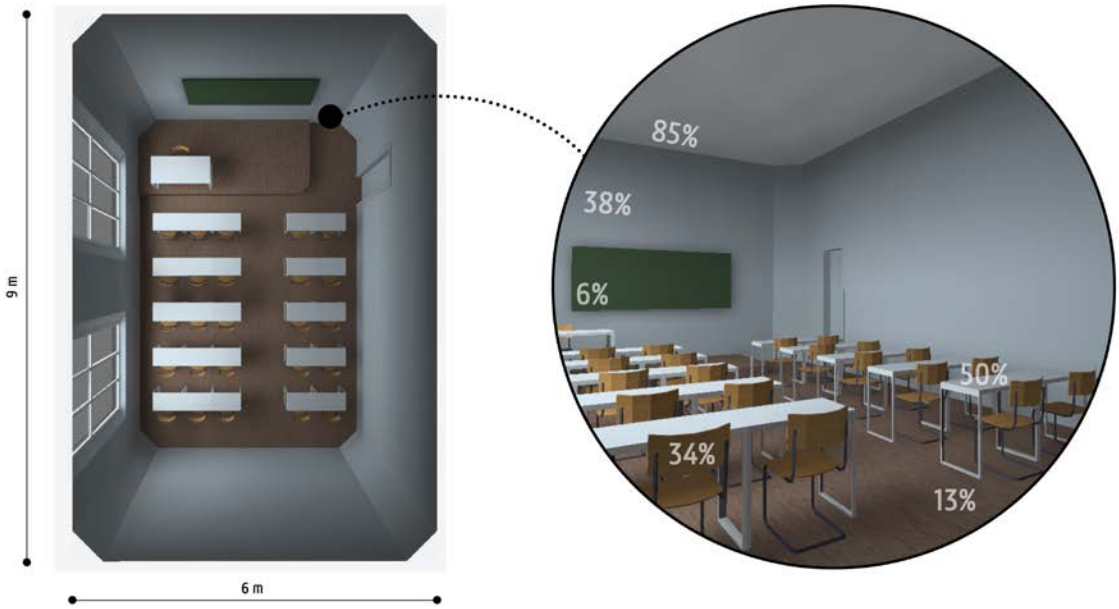
Afbeelding 11: Geometrie en reflectiefactoren van het klaslokaal

2.2.2. Klaslokaal in negentiende-eeuwse school

Om na te gaan wat de impact is van een renovatie op de daglichttoetreding, wordt een model ontwikkeld van een klaslokaal uit het verleden. Het model wordt opgebouwd aan de hand van de ministeriële instructies uit 1852 [50] en de richtlijnen die te vinden zijn in het boek van Narjoux [51]. Het klaslokaal bestaat uit een rechthoekige ruimte van 6 m diep en 9 m lang en heeft een vrije hoogte van 4,5 m. De hoeken van het rechthoekig grondplan worden afgeschuind daar dit kenmerkend is voor het negentiende-eeuwse klaslokaal. Een van de lange zijwanden staat in contact met de buitenomgeving en doet dus dienst als buitenmuur, de

dikte van de muur bedraagt 30 cm. Om de klas te voorzien van daglicht worden in deze muur twee grote openingen geplaatst. De totale glasoppervlakte van deze ramen wordt bepaald op basis van het volume, ze dienen over een oppervlakte te beschikken die een twintigste van het volume bedraagt. Aangezien de klasruimte een volume van 243 m^3 heeft, moeten de ramen een oppervlakte hebben van om en bij de 12,15 m^2. Deze verhouding komt trouwens overeen met de vandaag voorgeschreven WWR van 30%. De geplaatste ramen hebben een breedte van 2,1 m en een hoogte van 2,8 m, ze worden door roeden in verschillende vlakken opgedeeld. De openingen worden gepositioneerd in de lange zijwand zodat er een ritmiek ontstaat met gelijke afmetingen, hun positie zorgt er zo voor dat het invallende licht gelijkmatig over de ruimte verspreid wordt. Omdat het in de negentiende eeuw niet toegelaten was dat leerlingen naar buiten konden staren, worden de ramen in het model op een hoogte van 1,5 m boven de afgewerkte vloerpas geplaatst. Door de hoge aanzethoogte bevinden de bovenranden van de ramen zich nabij het plafond. De dagkanten van de raamopeningen worden afgeschuind zodat daglicht makkelijker kan binnentreden. Daarnaast worden in het model ook de vensterbanken onder een zwakke hoek afgeschuind naar beneden.

De binnenwanden van de klasruimte worden afgewerkt met een blauwgrijze verflaag, waarvan de reflectiefactor 38% bedraagt. Het plafond wordt daarentegen uitgevoerd in een witte kleur met een hoge reflectiefactor zodat het invallende licht voldoende gereflecteerd wordt. De vloer van het model wordt bekleed met een donkere eiken vloerbekleding die typerend is voor oude stadsscholen. Aan de voorzijde van het klaslokaal, waar zich het schoolbord bevindt, wordt een verhoogd platform gecreëerd voor de lesgever, ook dit deel wordt afgewerkt in de eiken vloerbekleding. Verder wordt het klaslokaal ingericht met los schoolmeubilair. Het klaslokaal biedt plaats aan 25 leerlingen, de schoolbanken worden opgesteld in vijf rijen van drie en van twee naast elkaar geplaatste tafels.



Afbeelding 12: Geometrie en reflectiefactoren van klaslokalen uit het verleden

2.3. Simulatieparameters

2.3.1. Hemeltype

Voor het berekenen van de daglichtfactoren wordt het bewolkte hemeltype ingesteld. Voor enkele bijkomende lichtstudies wordt het heldere hemeltype gehanteerd, hierbij wordt direct zonlicht in rekening gebracht.

2.3.2. Locatie en tijdstip

Vooraleer de daglichtkwaliteit gesimuleerd kan worden, is het noodzakelijk om de locatie en het tijdstip in te stellen. Dit zijn belangrijke parameters om de invloed van het daglicht correct weer te geven. De intensiteit en kleur van het natuurlijke licht variëren namelijk in functie van het seizoen en de dagelijkse beweging van de zon. De locatie van beide modellen wordt ingesteld op Brussel, wat overeenstemt met een breedtegraad van 50.80 en een lengtegraad van 4.30. De datum van de simulaties wordt ingesteld op 21 maart. Hoewel de hoeveelheid zenitaal licht verandert in functie van het tijdstip en de locatie, heeft dit geen invloed op de berekening van de daglichtfactor. Dit valt te verklaren doordat de verlichtingssterke die binnenvalt steeds in relatie staat tot het uitgestraalde zenitale licht en waardoor hun verhouding bijgevolg gelijk blijft. Het instellen van een tijdstip en locatie is bijgevolg belangrijker om de invloed van direct zonlicht te controleren en weer te geven. De juiste weergave van de zonnestand is immers van belang om bijvoorbeeld na te gaan of een lage zonnestand of hoge zonnestand problemen oplevert zoals oververhitting of een storende schaduw- en lichtinval. Voor het controleren van de invloed van direct zonlicht wordt het tijdstip ingesteld op 21 december en nadien op 21 juni. Dit zijn de momenten waarop de zon respectievelijk op haar laagste en hoogste punt staat.

2.3.3. Berekeningsvlak en meetpunten

Voor het berekenen van de daglichtkwaliteit op het werkblad, wordt een berekeningsvlak ingevoerd. Berekeningsvlakken in Dialux evo kunnen verschillende parameters berekenen, voor dit onderzoek zijn vooral de horizontale verlichtingssterkte en daglichtfactor van belang. Het ingevoerde vlak bevindt zich ter hoogte van de schoolbanken, namelijk op 72 cm. De parameters worden bepaald aan de hand van meetpunten die zich op het berekeningsvlak bevinden. Het aantal meetpunten en hun onderlinge afstand spelen een belangrijke rol aangezien de gemiddelde verlichtingssterkte en de bijhorende daglichtfactor en uniformiteit sterk afhangen van het rekenrooster. Het is bijgevolg cruciaal dat het rekenrooster voldoende nauwkeurig bepaald wordt om accurate resultaten te verkrijgen. In de norm NEN-EN 12464-1 is een methode terug te vinden voor het bepalen van het minimale aantal meetpunten [13]. De afstand kan ingeschat worden aan de hand van de vermelde tabel (tabel 9) of er kan een nauwkeurige berekening gemaakt worden volgens onderstaande vergelijking.

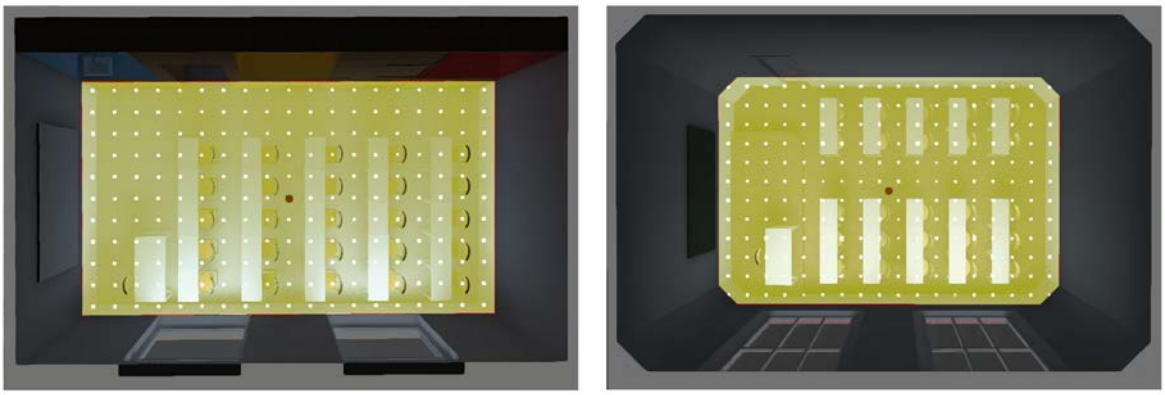
Lengte	Maximale afstand tussen rekenpunten	Minimaal aantal rekenpunten
(m)	(m)	(-)
0,40	0,15	3
0,60	0,20	3
1,00	0,20	5
2,00	0,30	6
5,00	0,60	8
10,00	1,00	10
25,00	2,00	12
50,00	3,00	17
100,00	5,00	20

Tabel 10: Richtlijnen voor het bepalen van het rekenraster

$$p = 0{,}2 \times 5^{\log(d)}$$

Met: p de maximale afstand tussen de meetpunten [m]
d de afmeting van de langste zijde van het rekenvlak [m]

Door gebruik te maken van de vergelijking wordt er voor de beide modellen een afgeronde waarde van 1 m verkregen voor de maximale afstand tussen de meetpunten. De afstand tussen de punten van het rekenraster dienen bij voorkeur in de lengte en breedte gelijk te zijn. Hun verhouding moet gelegen zijn tussen 0,5 en 2. Indien de verhouding toch meer dan 2 zou bedragen, moet voor d de lengte van de kortste zijde in rekening gebracht worden. In de Dialux software worden de meetpunten reeds automatisch aan de hand van deze norm ingesteld [56]. Een eenvoudige simulatie toont echter aan dat het verdubbelen van de meetpunten veel nauwkeurigere resultaten oplevert. Om deze reden worden de meetpunten zowel in de lengte- als breedterichting 0,5 m van elkaar geplaatst. De manier waarop de waarde van tussenliggende punten in de software bepaald wordt is overigens onduidelijk.



Afbeelding 13: Meetpunten op het berekeningsvlak van de modellen

3. Bespreking daglichtsimulaties en hun resultaten

De verschillende daglichtsimulaties die uitgevoerd werden om de daglichtkwaliteit in klaslokalen te controleren worden hieronder uitvoerig besproken. Eerst en vooral wordt de opbouw van het basismodel verduidelijkt en wordt er een overzicht gegeven van de verschillende ingrepen die toegepast werden op dit basismodel. Aansluitend worden de belangrijkste resultaten van de uitgevoerde simulaties weergegeven. In bijlage 1 kan een volledig overzicht gevonden worden van alle bekomen resultaten. Nadien worden enkele opmerkingen en mogelijke ontwerpregels meegegeven die door vormgevers en architecten gebruikt kunnen worden tijdens het ontwerpproces van scholen. Er worden ook enkele referenties van schoolgebouwen meegegeven ter illustratie. Na de bespreking van de simulaties volgt er zowel voor de nieuwbouwscholen als voor de renovatie van oude scholen een overzicht van alle resultaten getoetst aan de daglichtkwaliteit volgens de CEN daglichtnorm.

3.1. Daglichtsimulaties van klaslokaal in nieuwbouwschool

3.1.1. Gevelconfiguratie opgebouwd zoals in het verleden

Basismodel. Aangezien vroeger efficiënt gebruik werd gemaakt van daglicht, wordt in een eerste modeltest de raamconfiguratie bepaald op basis van modellen uit het verleden. Het klaslokaal wordt voorzien van twee grote openingen die een hoogte hebben van 2 m en een breedte van 2,1 m. De twee gevelopeningen hebben samen een totale glasoppervlakte van 8,4 m^2. Hierdoor bedraagt de WWR 30%, wat voldoet aan de voorgeschreven richtlijnen. De ramen worden aangezet op een hoogte van 0,9 m zodat de leerlingen kunnen genieten van een uitzicht naar de buitenomgeving. De lateihoogte bedraagt bijgevolg 2,9 m. De openingen worden voorzien van een dubbele beglazing met veiligheidsglas langs de binnenzijde, hun LTA bedraagt 80,5%. Vervolgens worden verschillende ingrepen uitgevoerd op het basismodel die kenmerkend zijn voor oude klaslokalen, dit met de intentie om de daglichttoetreding in het model te optimaliseren. **Stap 2.** Naar het voorbeeld van klaslokalen uit het verleden worden de horizontale dagkanten van de openingen in het testmodel langs de binnenzijde afgeschuind onder verschillende hoeken. **Stap 3.** Er wordt nagegaan wat de invloed is van het verticaal afschuinen van de vensterbank op de daglichttoetreding. Ook hierbij worden verschillende hoeken in rekening gebracht. **Stap 4.** Hoewel dit minder typerend is voor oude scholen wordt ook gecontroleerd wat het effect is van het afschuinen van de dagkanten aan de buitengevel. **Stap 5.** Ten slotte wordt de vrije hoogte van het lokaal met 1 m opgetrokken. Deze stap wordt gradueel uitgevoerd, er wordt steeds een toename van 10 cm toegepast. Proportioneel met de vrije hoogte worden ook de afmetingen van de ramen en de lateihoogte aangepast, op deze manier bedraagt de WWR steeds 30%.

Afbeelding 14: Overzicht van de verschillende ingrepen in testmodel 1

Beschrijving test	LTA	Gem. DF	Min. DF	Max. DF	Gem/Min DF	Opp. DF 2%
	(%)	(%)	(%)	(%)	(-)	(%)
Basismodel	80,5	2,317	0,462	11,325	0,22	35,2
Horizontaal afgeschuinde dagkanten (45°)	80,5	2,358	0,471	11,129	0,21	36
Verticaal afgeschuinde dagkant 100% (45°)	80,5	2,379	0,444	13,497	0,17	34,7
Afgeschuinde dagkanten buiten (35°)	80,5	2,373	0,483	12,258	0,21	35,8
Afgeschuinde dagkanten buiten (45°)	80,5	2,390	0,484	12,543	0,21	36,1
Buiten afgeschuinde bovenzijde 150% (56°)	80,5	2,441	0,483	11,766	0,21	36,7
Buiten afgeschuinde onderzijde 100% (45°)	80,5	2,314	0,458	11,316	0,22	35,1
Vrije hoogte 3,1 m	80,5	2,435	0,494	11,366	0,21	37,5
Vrije hoogte 3,5 m	80,5	2,788	0,532	12,324	0,18	43,8
Vrije hoogte 4 m	80,5	3,160	0,604	12,765	0,19	52,1

Tabel 11: Resultaten van de daglichtsimulaties van testmodel 1

Opmerkingen en conclusies:

- Het horizontaal afschuinen van de dagkanten leidt in deze situatie slechts tot een heel kleine toename van de daglichttoetreding. Afschuiningen die daarenboven meer bedragen dan 45° leveren geen bijkomend voordeel. Het afschuinen zorgt er wel voor dat de dagkanten worden aangelicht met strijklicht waardoor minder scherpe contrasten gecreëerd worden en er dus een groter visueel comfort voor de leerlingen heerst.
- De verticaal afgeschuinde dagkanten die vroeger gehanteerd werden om de ventilatie binnenin het lokaal te verbeteren, bieden vandaag geen voordelen meer. Op vlak van de daglichttoetreding wordt een kleine afname van de DF waargenomen doordat het invallende licht minder gereflecteerd wordt.

- Afgeschuinde dagkanten langs de buitenzijde verschaffen evenzeer slechts een kleine bijdrage aan de DF. Het afschuinen, zowel langs binnen als buiten, biedt daarnaast wel een positief effect op de kwaliteit van het uitzicht.
- Het afschuinen van de bovenzijde van de buitenmuur leidt tot een minimale verbetering van de daglichttoetreding. Een bijkomende test maakt echter duidelijk dat het effect van de ingreep wel opmerkelijk is indien er meer openingen aanwezig zijn over de lengte van de lange zijwand. Het afschuinen van de bovenzijde van de buitenmuur zorgt daarentegen wel dat de hoogstaande zon tijdens de zomermaanden makkelijker kan binnentreden en er bijgevolg een groter risico is op oververhitting.
- Naast de diepte van de ruimte is ook de vrije hoogte een belangrijke parameter voor het bepalen van de hoeveelheid natuurlijk licht in het vertrek. Openingen die hoog geplaatst kunnen worden, kunnen de ruimte immers dieper belichten. Indien de oppervlakte met een minimale DF van 2% in rekening gebracht wordt, leidt het verhogen van de ruimte tot een vrije hoogte van 4 m tot een verbetering van ongeveer 17% ten opzichte van de oorspronkelijke situatie. Het voordeel dat geleverd wordt moet echter wel afgewogen worden tegen de nodige kost, de tijd en het materiaalgebruik dat hier tegenover staat. Het is van belang om te vermelden dat de verbeterde daglichtfactor in dit geval voornamelijk te wijten is aan de hogere lateihoogte, het zuiver optrekken van de vrije hoogte volstaat niet.

Voorbeelden:

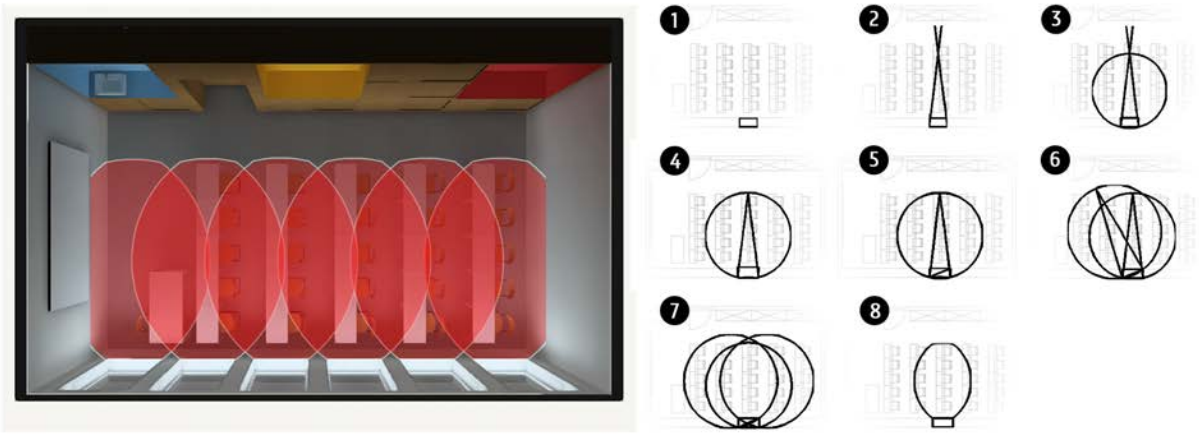
Afbeelding 15: Afgeschuinde dagkanten (Back of the yards high school – Chicago, USA)

Afbeelding 16: Afgeschuinde bovenzijde buitenmuur (KU Leuven Campus Brugge – Brugge, België)

3.1.2. Gevelconfiguratie op basis van uitzicht

Basismodel. De raamconfiguratie van het tweede testmodel wordt opgesteld op basis van het uitzicht. Opdat elke leerling een uitzicht zou hebben naar buiten, dienen de ramen over een bepaalde breedte te beschikken.

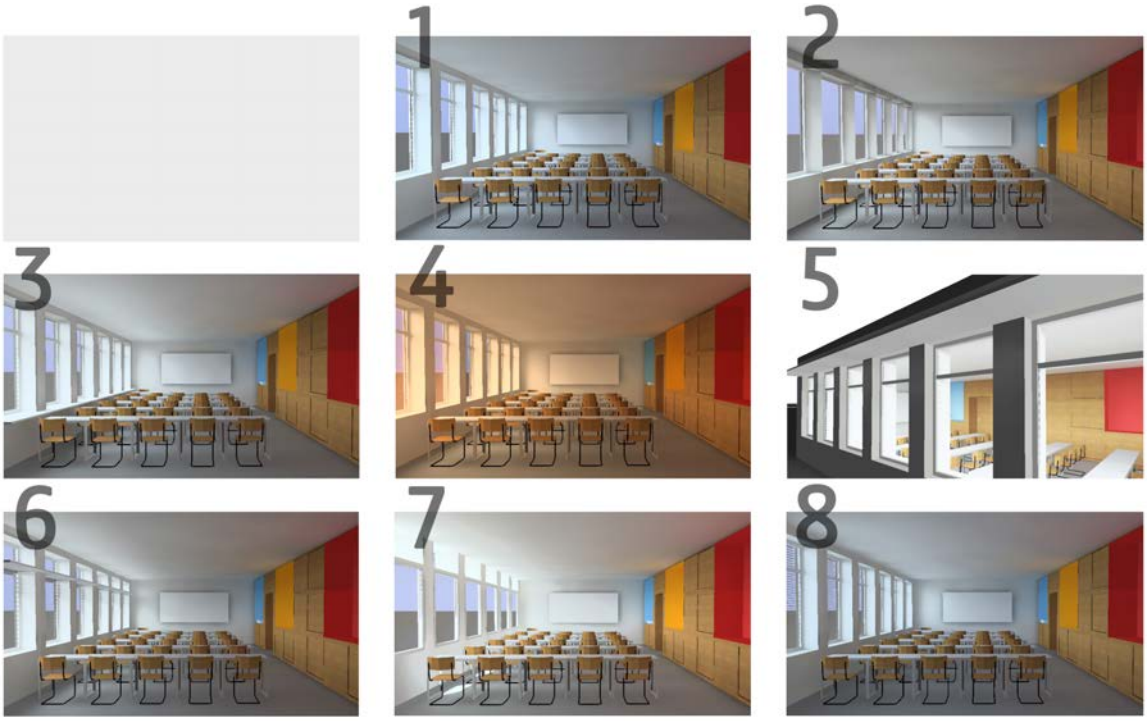
Deze afmeting kan gevonden worden aan de hand van een eenvoudige cirkelmethode (Afbeelding 15). In eerste instantie wordt er een opening met een breedte van 1 m getekend. Aan de eindpunten van de opening worden twee lijnen getekend onder een hoek van 7°. Vervolgens wordt een cirkel getekend die raakt aan het snijpunt van deze lijnen en de twee eindpunten. De cirkel en de opening van 1 m worden daarna verschaald zodat de schoolbank van de leerling die het verst verwijderd is van het raam binnen de cirkel valt. Hieruit volgt dat ramen van minimum 1,15 m nodig zijn om de achterste leerling uitzicht te kunnen bieden. Nadien wordt nagegaan hoeveel van deze ramen er geplaatst moeten worden. Er wordt hiervoor een schuine lijn getrokken die de buitenkant en de tegenovergestelde binnenzijde van de opening verbindt. De getekende cirkel wordt dan gekopieerd en volgens deze schuine lijn geplaatst. Hetzelfde wordt herhaald voor de andere schuine lijn die in de opening kan getekend worden. Het overlappende deel van de drie cirkels duidt het gebied aan waarbinnen het uitzicht van de opening waarneembaar is en geeft uiteindelijk de ruimte aan waarbinnen schoolbanken geplaatst kunnen worden. Om ervoor te zorgen dat elke leerling naar buiten kan kijken, worden er zes openingen geplaatst. Alle ramen bevinden zich 80 cm boven de afgewerkte vloerpas, hun hoogte bedraagt 2 m. Met een lateihoogte van 2,8 m reiken ze tot dicht bij het plafond waardoor het daglicht dieper in de ruimte kan binnenvallen. De totale oppervlakte van de beglazing telt 13,8 m^2, dit komt overeen met een WWR van 48%. De WWR ligt hiermee boven de voorgeschreven waarde. De openingen worden ingevuld met dubbele beglazing waarvan het binnenste glas veiligheidsglas is, de LTA bedraagt 80,5%. Hierna volgen enkele ingrepen die toegepast worden op het basismodel.



Afbeelding 17: Cirkelmethode voor het bepalen van de ramen op basis van het zicht

Stap 2. De penanten worden afgeschuind onder een hoek van 45°. **Stap 3.** Er wordt nagegaan of het introduceren van een vensterbank invloed heeft op de daglichtfactor. Er worden verschillende daglichtsimulaties gemaakt met een variërende vensterbanklengte. De invloed van de vensterbank wordt zowel langs de binnen- en buitenzijde onderzocht. De vensterbank wordt voorzien van een witte glanzende kleur, ze heeft een reflectiefactor van 85 %. **Stap 4.** Vervolgens ondergaat het model enkele ingrepen die toegepast kunnen worden naargelang de oriëntatie van de openingen. Indien de openingen zich in het westen of oosten bevinden, kan er geopteerd worden voor een zonwerende beglazing. Op deze manier kunnen overtollige zonnewinsten tegengegaan worden. Er worden simulaties uitgevoerd met dubbele en driedubbele zonwerende beglazingen. De beglazingen beschikken over een verschillende LTA en bijgevolg ook over een andere glastint. **Stap 5.** Indien de openingen zich in de zuidgevel bevinden kan geopteerd worden om een vaste

zonwering te plaatsen in de vorm van een horizontale luifel. De horizontale luifel zorgt voor een volledige zonwering tijdens de zomermaanden, in de winter kan de laagstaande zon en haar warmte nog binnendringen (zie Bijlage 2: lichtstudies). De luifel heeft een lengte van 60 cm en is doorgetrokken over de volledige lengte van de gevel. Ze wordt uitgevoerd in een witte kleur met een reflectiecoëfficiënt van 70%. **Stap 6.** Bij openingen in de zuidgevel kan ook een lichtplank geïntroduceerd worden. De openingen onder de lichtplank doen voornamelijk dienst als uitzicht naar buiten. Het transparante gedeelte boven de lichtplank zal zonlicht opvangen en het daglicht via de lichtplank tot de achterkant van de ruimte verspreiden door reflectie op het plafond. De plank biedt zonwering tegen direct zonlicht tijdens de zomermaanden en ook de kans op verblinding wordt gereduceerd [8], [36]. Om het effect van de lichtplank op de daglichtkwaliteit te controleren wordt het testmodel uitgerust met enkele lichtplanken met veranderende positie en breedte. Om de daglichtfactor te verbeteren worden er eveneens enkele varianten op de lichtplank gesimuleerd. Zo wordt een daglichtsimulatie uitgevoerd waarbij de bovenzijde van de buitenmuur afgeschuind wordt. Anderzijds wordt ook een model opgesteld waarbij de lichtplank zich los van de buitenmuur bevindt en een model waarin de combinatie van een lichtplank en vensterbank geanalyseerd wordt. De lichtplank wordt in alle gevallen uitgevoerd in een witte kleur met een hoge reflectiefactor van 85%. **Stap 7.** Er wordt een configuratie opgesteld met een gelijkaardige opzet als de lichtplank. Bovenaan, nabij het plafond, worden ramen voorzien in het buitenvlak van de gevel. Het zonlicht dat door deze openingen kan binnendringen wordt vervolgens gereflecteerd naar het plafond en dieper in de ruimte gestuurd. Onder deze bovenramen worden grotere openingen langs de binnenzijde van de muur aangebracht. Door het verdiepen van deze raampartijen kunnen directe zonnestralen het werkvlak minder makkelijk treffen. **Stap 8.** Een andere optie om de zon te weren is een regelbaar zonweringssysteem. Het klasmodel wordt voorzien van een buitenzonwering die bestaat uit lamellen die dynamisch op de stand van de zon afgesteld worden.



Afbeelding 18: Overzicht van de verschillende ingrepen in testmodel 2

Beschrijving test	LTA	Gem. DF	Min. DF	Max. DF	Gem/Min DF	Opp. DF 2%
	(%)	(%)	(%)	(%)	(-)	(%)
Basismodel	80,5	3,415	0,807	11,981	0,24	55,6
Afgeschuinde dagkanten (45°)	80,5	3,679	0,857	11,732	0,24	58,6
Vensterbank binnen (60 cm)	80,5	2,755	0,273	7,766	0,11	59,7
Vensterbank binnen (0,6 m) + buiten (0,2 m)	80,5	2,755	0,273	7,766	0,11	59,7
Zonwerende beglazing type 3	51,7	2,202	0,542	7,651	0,23	38,5
Driedubbele zonwerende beglazing 3	41,1	1,763	0,443	6,096	0,22	31,1
Buitenzonwering – horizontale luifel	80,5	2522	0,668	8,693	0,28	43,3
Lichtplank 1 m op 2 m	80,5	2,284	0,722	7,552	0,30	44,8
Lichtplank 1 m op 2,3 m + afgeschuinde bovenzijde buitenmuur	80,5	2,512	0,690	8,890	0,28	42,8
Lichtplank 1 m op 2,3 m+ vensterbank 0,6 m	80,5	2,016	0,201	5,569	0,10	46,5
Lichtplank 1 m op 2,3 m los van buitenmuur	80,5	2,781	0,708	10,697	0,25	42,9
Ramen langs buiten + ramen langs binnen	80,5	2,655	0,724	8,099	0,26	48,8
Buitenzonwering - lamellen	80,5	1,269	0,500	2,114	0,38	5,5

Tabel 12: Resultaten van de daglichtsimulaties van testmodel 2

Opmerkingen en conclusies:

- In tegenstelling tot het eerste testmodel, leveren de afgeschuinde dagkanten in dit model wel een aanzienlijk voordeel voor zowel de daglichtfactor als uniformiteit. Uit bijkomende testen kan er geconcludeerd worden dat het effect van afgeschuinde dagkanten in relatie staat tot de afmetingen van de penanten. Hoe kleiner de afstand tussen twee openingen, hoe beter het effect van de schuine zijden merkbaar zal zijn (zie Bijlage 1).
- Een aangepaste vormgeving van de vensterbanken kan een opmerkelijke optimalisatie van de daglichttoetreding teweegbrengen. Op basis van het oppervlak dat over een minimale daglichtfactor van 2% beschikt, wordt een verbetering van 4,1 % waargenomen wanneer een witgekleurde vensterbank van 60 cm toegepast wordt. Diepe vensterbanken hoeven niet gewoon uit een breed blad te bestaan, ze kunnen op een creatieve manier in het interieur geïmplementeerd worden. Zo kan de bovenzijde van een lage kastenwand of een verwarming ombouw dienstdoen als vensterbank. Afhankelijk van de hoogte van de opening kan ook een zitelement of werktafel gecreëerd worden.
- Zonwerende beglazing heeft een negatieve invloed op de daglichtkwaliteit. Afhankelijk van de transmissie van het glas kan de daglichttoetreding sterk teruggedrongen worden. De simulaties tonen daarnaast ook duidelijk aan dat de kleur van het licht aanzienlijk getransformeerd wordt. Dit type beglazing dient dan ook in de mate van het mogelijke vermeden te worden, indien dit niet mogelijk is moet er bijzondere aandacht besteed worden aan de glassamenstelling.
- Het toepassen van een lichtplank bij bewolkte hemel leidt niet tot een toename van de hoeveelheid daglicht in het klaslokaal. Er wordt niettegenstaande een hogere uniformiteit gerealiseerd doordat de lichtplank voor een betere lichtverdeling nabij de daglichtopening zorgt. Lichtplanken bieden dus een

oplossing voor de zeer helder verlichte delen die optreden bij eenzijdig belichte klaslokalen. De efficiëntie van de lichtplank kan eventueel nog vergroot worden door een gebogen geometrie te voorzien. Anderzijds kan men het daglichtsysteem ook optimaliseren door het als een beweegbaar element te realiseren. Dit maakt het mogelijk om de lichtinval en zontoetreding beter te controleren. De variërende hoek van de lichtplank biedt op deze manier meer mogelijkheden om een laagstaande zon tegen te houden. Om de lichtplank als zonwering te laten functioneren moet de plank evenwel voldoende breed zijn, uit de lichtstudies (Bijlage 2) blijkt een afmeting van 50 cm niet voldoende te zijn. In vergelijking met de gewone horizontale luifel biedt de lichtplank een klein voordeel op vlak van daglichttoetreding, er wordt een iets hogere daglichttoetreding achterin de ruimte waargenomen. Door de lichtplank los van de gevel te plaatsen is er een hogere daglichtfactor nabij de openingen op te merken, de daglichtfactor achterin de ruimte verandert daarentegen nauwelijks. Daarenboven biedt de lichtplank op deze manier niet voldoende zonwering tijdens de zomermaanden (zie Bijlage 2). Deze ingreep is derhalve niet bruikbaar om de daglichtkwaliteit achterin het klaslokaal te verbeteren. Ook bij het afschuinen van de bovenzijde van de buitengevel is er slechts een minimale verbetering waar te nemen die praktisch verwaarloosbaar is. Het voorzien van een lichtplank in combinatie met een diepere vensterbank biedt iets meer voordeel ten opzichte van de afzonderlijke lichtplank. De vensterbank is een eenvoudige en goedkope optie, de combinatie van beide elementen is dan ook aan te raden. De configuratie met openingen langs de binnen en buitenzijde van de gevel biedt te weinig voordeel voor zowel de daglichtkwaliteit als bescherming tegen de zon. Ramen in het gevelvlak zijn bovendien nadelig voor het oververhittingsaspect.

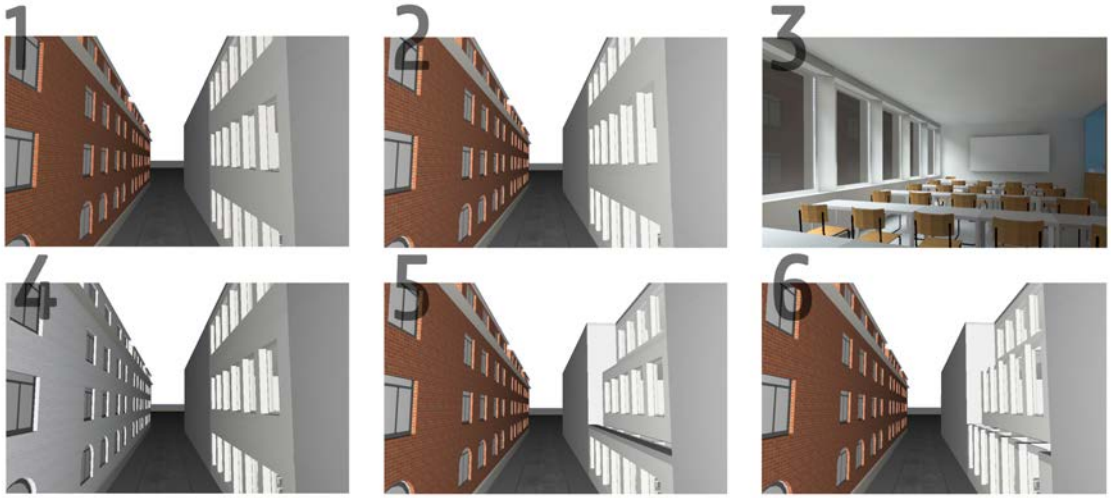
- Een buitenzonwering in de vorm van dynamische lamellen werkt uitstekend om zowel in de zomer als winter storend zonlicht tegen te houden (zie Bijlage 2). Er moet opgemerkt worden dat de daglichttoetreding drastisch gereduceerd wordt. Vaste systemen, die niet opgetrokken kunnen worden, zijn omwille van deze reden af te raden.
- De lichtstudies in Bijlage 2 tonen daarenboven aan dat de laagstaande zonnestand tijdens de wintermaanden zorgt voor een hinderlijke licht- en schaduwinval. Als gevolg zullen er te allen tijde regelbare lichtweringen geplaatst moeten worden, bij voorkeur langs de binnenzijde. Deze zijn bovendien ook gewenst wanneer het klaslokaal verduisterd dient te worden voor beamerpresentaties.

Voorbeelden:

Afbeelding 19: Vensterbank als werktafel (kleuterschool – Prangins, Zwitserland)

Afbeelding 20: Vensterbank als opbergruimte en lichtplank (Thurston Elementary School – Springfield, USA)

Basismodel. Om na te gaan welke invloed de omgeving uitoefent op de daglichtfactor van klaslokalen wordt het model nadien in een stedelijke context geplaatst. Het model wordt zonder wijzigingen in de hoogte tweemaal gekopieerd, waardoor een bouwvolume van drie verdiepingen ontstaat. Het tegenoverstaande gebouw telt eveneens drie verdiepingen en beschikt over een typerende rode baksteenmuur. De reflectiefactor hiervan bedraagt 17%. De verschillende ingrepen die nadien volgen op het basismodel worden telkens gesimuleerd met een straatbreedte van 6, 9 en 12 m. **Stap 2.** De totale hoogte van het bouwvolume blijft behouden maar de vrije hoogte van de afzonderlijke klaslokalen wordt aangepast. De vrije hoogtes van de klaslokalen op het gelijkvloers en de eerste verdieping worden opgetrokken tot 3,25 m. De lateihoogtes van de openingen worden eveneens 25 cm verhoogd. Het klaslokaal op de tweede verdieping krijgt een vrije hoogte van 2,5 m. De hoogte van de openingen bedraagt hierdoor 1,6 m, wat resulteert in een lateihoogte van 2,4 m. **Stap 3.** Er wordt nagegaan of de afgeschuinde dagkanten onder 45° ook een voordeel opleveren in een gebouwde omgeving. **Stap 4.** De afgeschuinde dagkanten worden behouden en het geveloppervlak van het tegenoverliggende gebouw wordt gemodelleerd met een witgeverfde baksteen, de reflectiefactor bedraagt 81%. **Stap 5.** De drie klasmodellen worden trapsgewijs bovenop elkaar geplaatst. Door deze opstelling is het mogelijk om de gelijkvloerse en eerste verdieping te voorzien van een smal daklicht. **Stap 6.** Het model wordt gelijkaardig aan de vorige situatie opgebouwd. De zes raampartijen worden naar boven toe uitgebreid en lopen zonder belemmering door in dakramen.



Afbeelding 21: Overzicht van de verschillende ingrepen van testmodel 2 in een stedelijke context

Basismodel in stedelijke omgeving						
Beschrijving test	**LTA**	**Gem. DF**	**Min. DF**	**Max. DF**	**Gem/Min DF**	**Opp. DF 2%**
	(%)	(%)	(%)	(%)	(-)	(%)
Straat 6 m (verdieping 1)	80,5	1,671	0,114	8,660	0,06	28,2
Straat 6 m (verdieping 2)	80,5	2,994	0,446	11,589	0,13	47,5
Straat 9 m (verdieping 2)	80,5	3,151	0,526	11,724	0,16	50,3
Straat 12 m (verdieping 1)	80,5	2,672	0,275	11,266	0,11	42
Straat 12 m (verdieping 2)	80,5	3,246	0,589	11,786	0,19	52

Model met verschillende vrije hoogtes in stedelijke omgeving						
Straat 6 m (gelijkvloers)	80,5	0,793	0,060	5,152	0	**14,6**
Straat 6 m (verdieping 2)	80,5	2,432	0,283	10,674	0,13	**37,9**
Straat 9 m (verdieping 2)	80,5	2,551	0,356	10,738	0,15	**40**
Straat 12 m (verdieping 1)	80,5	3,180	0,437	11,775	0,13	**50,3**
Straat 12 m (verdieping 2)	80,5	2,623	0,400	10,774	0,15	**41,2**
Model met afschuiningen in stedelijke omgeving						
Straat 6 m (verdieping 2)	80,5	3,147	0,450	11,420	0,13	**48,3**
Straat 9 m (verdieping 2)	80,5	3,306	0,540	11,543	0,15	**51,2**
Straat 12 m (verdieping 1)	80,5	2,817	0,272	11,043	0,11	**42,9**
Straat 12 m (verdieping 2)	80,5	3,399	0,601	11,587	0,18	**52,8**
Model met afschuiningen in stedelijke context (tegenoverliggend gebouw hoge reflectiefactor)						
Straat 6 m (verdieping 2)	80,5	3,148	0,450	11,421	0,16	**48,4**
Straat 9 m (verdieping 2)	80,5	3,306	0,540	11,545	0,15	**51,2**
Straat 12 m (verdieping 1)	80,5	2,817	0,272	11,043	0,11	**42,9**
Straat 12 m (verdieping 2)	80,5	3,400	0,601	11,587	0,18	**52,8**
Trapsgewijs gebouw met dakramen						
Straat 6 m (verdieping 2)	80,5	3,050	0,479	11,261	0,17	**47,8**
Straat 9 m (verdieping 2)	80,5	3,153	0,548	11,299	0,16	**49,7**
Straat 12 m (verdieping 1)	80,5	3,721	0,360	14,143	0,11	**47,2**
Straat 12 m (verdieping 2)	80,5	3,218	0,588	11,317	0,19	**50,8**
Trapsgewijs gebouw met doorlopende dakramen						
Straat 6 m (verdieping 1)	80,5	4,634	0,405	15,406	0,09	**56,6**
Straat 6 m (verdieping 2)	80,5	3,055	0,482	11,278	0,16	**47,9**
Straat 9 m (verdieping 1)	80,5	5,264	0,631	16,795	0,11	**63,8**
Straat 9 m (verdieping 2)	80,5	3,156	0,550	11,312	0,16	**49,7**
Straat 12 m (gelijkvloers)	80,5	4,424	0,308	14,808	0,07	**52,9**
Straat 12 m (verdieping 1)	80,5	5,610	0,788	17,224	0,14	**68,3**
Straat 12 m (verdieping 2)	80,5	3,221	0,586	11,339	0,19	**50,9**

Tabel 13: Resultaten van de daglichtsimulaties van testmodel 2 in een stedelijke context

Opmerkingen en conclusies:

- Er dient eerst en vooral opgemerkt te worden dat het toevoegen van een stedelijke context aan het model, een heel grote impact heeft op de daglichtkwaliteit. Er wordt bijgevolg een ondermaatse daglichtkwaliteit waargenomen bij een grote meerderheid van de uitgevoerde daglichtsimulaties.
- Modelconfiguraties met een straatbreedte van 6 m presteren slecht over de hele lijn. Op alle drie de verdiepingen worden resultaten bekomen die sterk onder de minimale daglichtkwaliteit volgens de CEN daglichtnorm liggen. Mits enige inspanning kan op de bovenste verdieping wel een klaslokaal met voldoende daglicht ontworpen worden. Er kunnen grotere ramen of daklichten geplaatst worden.

Het grote glaspercentage verhoogt evenwel de kans op oververhitting, het is dan ook van belang om dit uitvoerig na te gaan.

- Ook bij een straatbreedte van 9 en 12 m scoren de gelijkvloerse en eerste verdieping slecht. Enkel de laatste ingreep, waarbij het gebouw trapsgewijs opgebouwd wordt en de ramen doorlopen in het dak, levert een voldoende hoge kwaliteit. Op de tweede verdieping wordt de vereiste daglichttoetreding overigens wel in zo goed als alle testen gegarandeerd.
- Ingrepen zoals het afschuinen van de dagkanten en het wijzigen van reflectiefactoren resulteren in een geringe toename van de daglichtfactor die verwaarloosbaar is. Het veranderen van de vrije hoogtes en lateihoogtes levert een kleine verbetering maar volstaat niet om een voldoende daglichtkwaliteit te garanderen. Er moet bij deze ingreep ook opgemerkt worden dat daglichttoetreding op de tweede verdieping niet langer voldoende is door de verlaagde lateihoogte. Het trapsgewijs opbouwen van de verdiepingen biedt daarentegen wel een opmerkelijke verbetering. Dit is evenwel een grotere ingreep die bepalend is voor de constructie en structuur van het gebouw. Bovendien is deze bouwwijze sterk afhankelijk van de geldende bouwvoorschriften.
- Op vlak van de daglichtkwaliteit kan er besloten worden dat gelijkvloerse klaslokalen die enkelzijdig belicht worden en die zich aan de straatzijde binnen een bebouwde omgeving bevinden, ontoelaatbaar zijn. In deze situaties kan er immers nooit voldoende daglicht binnenvallen. Het oppervlak met een minimale daglichtfactor van 2% bij een klaslokaal met een volledig beglaasde gevel en een straatbreedte van 6 m bedraagt slechts 19,6%. Ook wanneer de straat 12 m breed is, kan er net niet voldoende daglicht voorzien worden. In dit geval bedraagt het oppervlak 46,3% van het totale oppervlak. De ligging kan dus beter benut worden voor functies die minder daglicht vereisen of voor ruimtes die minder diep zijn. Ook enkelzijdig belichte klaslokalen die zich op het eerste verdiep bevinden worden beter vermeden. De klaslokalen kunnen immers uitsluitend functioneren mits grote ingrepen. Op de bovenste verdieping zijn er geen problemen, hier kan te allen tijde een voldoende daglichtkwaliteit geboden worden, de ruimte dient in sommige gevallen wel aangevuld te worden met daklichten of grotere glaspercentages.

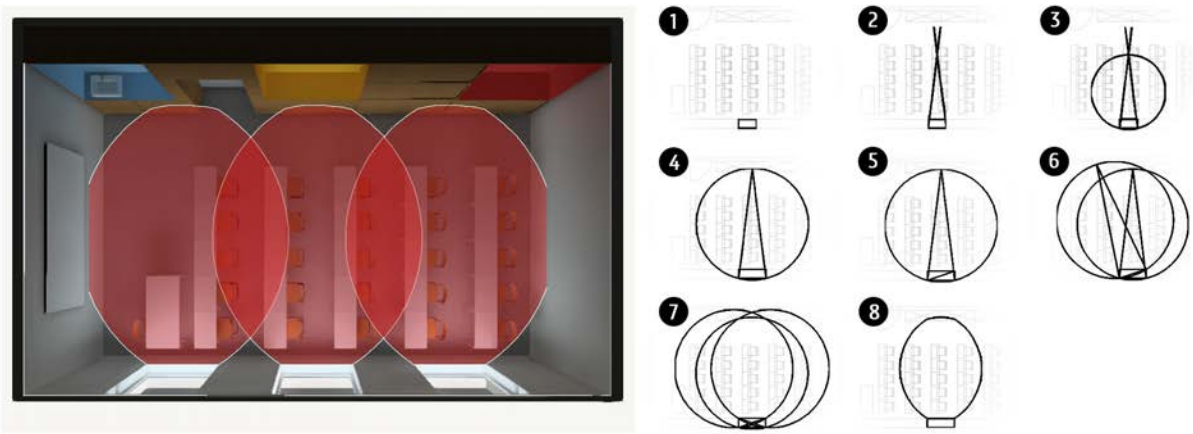
Voorbeelden:

Afbeelding 22: Doorlopende opening in dak (De Bloesem– Utrecht, Nederland)

Afbeelding 23: Trapsgewijs opgebouwde constructie (Sint Lucas Hogeschool – Gent, België)

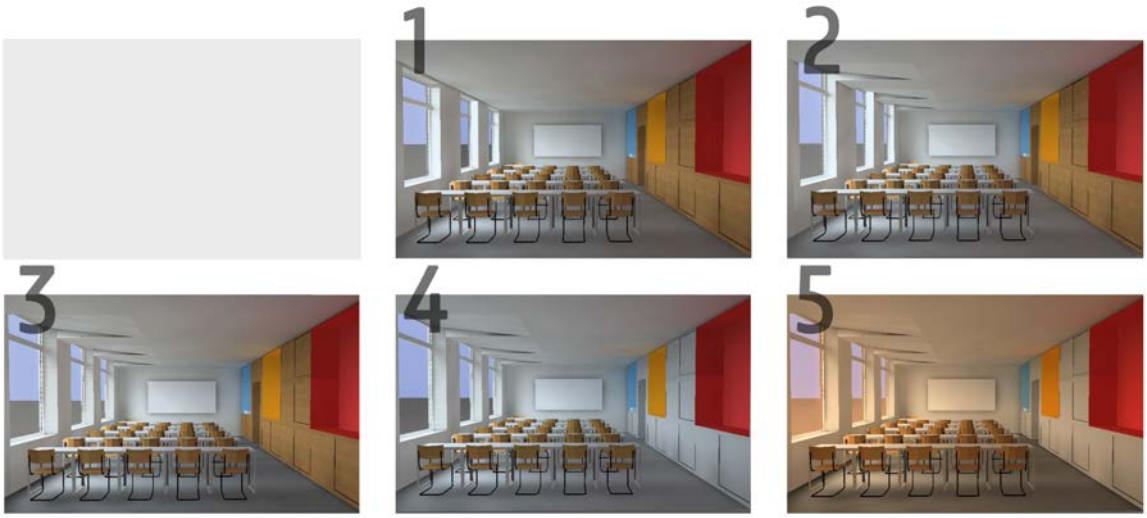
3.1.3. Gevelconfiguratie op basis van uitzicht (optie 2)

Basismodel. Het uitzicht vormt opnieuw het uitgangspunt voor de raamconfiguratie van het derde testmodel. De breedte van de ramen en het aantal openingen worden wederom bepaald op basis van de cirkelmethode. Aangezien vandaag de dag klaslokalen flexibel ontworpen dienen te worden en ze bovendien verschillende tafelopstellingen moeten toelaten, wordt er verondersteld dat er over de volledige diepte van het lokaal een kwalitatief uitzicht naar buiten kan geboden worden. De vereiste raambreedte die in dit geval nodig is kan eenvoudig ingeschat worden alvorens de cirkelmethode toe te passen. De breedte wordt verkregen door de afstand vanaf het geveloppervlak tot de kastenwand te delen door vier, op deze manier wordt een afmeting van 1,5 m gevonden. Om het aantal openingen te bepalen wordt uiteindelijk de cirkelmethode toegepast. De methode bevestigt dat ramen van 1,5 m nodig zijn om de volledige beschikbare diepte bruikbaar te maken en toont aan dat er minimaal drie openingen vereist zijn om de opstelling van schoolbanken over het volledige oppervlak mogelijk te maken. De ramen hebben een hoogte van 2,1 m en ze worden aangezet op 80 cm boven het vloeroppervlak, de lateihoogte van de openingen is dus 2,9 m. De totale oppervlakte van de openingen bedraagt 9,45 m^2, dit komt overeen met een WWR van 33%. De voorgeschreven waarde van 30% wordt dus voor een klein deel overschreden. De ramen worden opnieuw voorzien van een dubbele beglazing met veiligheidsglas langs de binnenzijde. De beglazing heeft een LTA-waarde van 80,5%.



Afbeelding 24: Cirkelmethode voor het bepalen van de ramen op basis van het zicht

Stap 2. Er wordt een ingreep uitgevoerd op het basismodel om de daglichttoetreding te optimaliseren. Om het invallende daglicht te maximaliseren steken de ramen uit boven het verlaagd plafond. De hoogtes van alle openingen worden vergroot tot 2,4 m, de lateihoogte bedraagt hierdoor 3,2 m. Het hoogteverschil tussen het raam en het plafond wordt weggewerkt met een schuine afwerking. **Stap 3.** De voorgaande ingreep wordt aangevuld met afgeschuinde dagkanten die aangebracht worden onder een hoek van 45°. **Stap 4.** Opnieuw wordt verdergegaan met de vorige stap. Om na te gaan of de achterwand veel impact heeft op de reflectie van invallend daglicht en zo een bijdrage levert aan de daglichtfactor wordt de kastenwand gemodelleerd met twee verschillende afwerkingsmaterialen met een witte kleur. De reflectiefactoren van de witte kleuren bedragen 50% en 85%. **Stap 5.** De verhoogde ramen, afgeschuinde dagkanten en kastenwand met reflectiefactor van 85% blijven behouden. De dubbele beglazing in het model wordt vervangen door zonwerende beglazing met variërende LTA-waarden.



Afbeelding 25: Overzicht van de verschillende ingrepen in testmodel 3

Beschrijving test	LTA	Gem. DF	Min. DF	Max. DF	Gem/Min DF	Opp. DF 2%
	(%)	(%)	(%)	(%)	(-)	(%)
Basismodel	80,5	2,544	0,588	13,381	0,24	39,3
Ramen > verlaagd plafond	80,5	2,940	0,704	13,867	0,24	47,6
Afgeschuinde dagkanten	80,5	3,068	0,736	13,566	0,23	50,9
Witte kastenwand (85%)	80,5	3,271	0,870	13,677	0,27	55,5
Driedubbele isolerende beglazing	68,2	2,772	0,747	11,588	0,25	45,8
Dubbele zonwerende beglazing type 3	51,7	2,107	0,564	8,780	0,29	33,7
Driedubbele zonwerende beglazing type 3	41,1	1,682	0,457	7,012	0,29	26,1

Tabel 14: Resultaten van de daglichtsimulaties van testmodel 3

Opmerkingen en conclusies:

- Ramen die uitschieten boven het vals plafond verschaffen een aanzienlijk voordeel in vergelijking met het basismodel. De lijn van de 2%-daglichtfactor neemt bijna een tiende meer in beslag van het werkoppervlak. De grotere lateihoogte zorgt ervoor dat het daglicht dieper in de ruimte kan binnenvallen. Anderzijds kan men in sommige gevallen ook een klaslokaal ontwerpen met aflopend plafond. De buitenwand en lateihoogte van de openingen kunnen hierdoor opgetrokken worden om zo het licht dieper in de ruimte te laten vallen.
- Aangezien de muurvlakken tussen de openingen vrij breed zijn, zullen schuin afgewerkte ramen slechts een kleine meerwaarde leveren aan de daglichtfactor.
- De impact van een wit afwerkingsmateriaal op de achterwand is sterk afhankelijk van de reflectiefactor. Een reflectiefactor van 50% bezorgt de ruimte een iets betere daglichtkwaliteit. Het voordeel is echter klein en niet noemenswaardig. Indien een materiaal met een reflectiefactor van 85% gebruikt wordt, kan de daglichttoetreding achterin de ruimte wel een stuk verbeterd worden. Als

men de daglichtkwaliteit in een klaslokaal dus wil verbeteren door een witte kleur te gebruiken, moet er voldoende aandacht geschonken worden aan de exacte tint en afwerkingslaag van het materiaal.

- Zoals reeds aangegeven zijn zonwerende beglazingen niet gunstig voor de daglichtkwaliteit. Indien er toch geopteerd wordt voor deze beglazing, moeten er in deze situatie grotere openingen gemaakt worden om voldoende daglichttoetreding in het klaslokaal te voorzien.

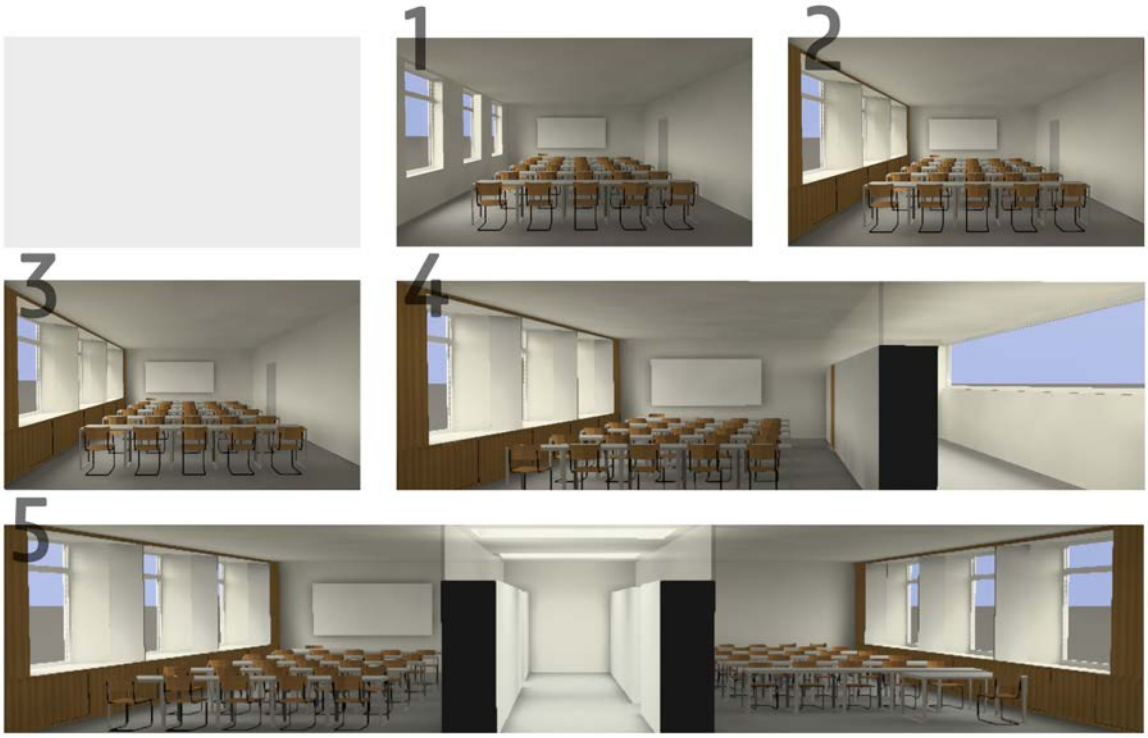
Voorbeelden:

Afbeelding 26: Hogere vrije hoogte aan ramen (De Groene School – Anderlecht, België)

Afbeelding 27: Uitsparing plafond ter hoogte van opening (Cebes School – Oporto, Portugal)

Basismodel. Het model wordt verder ook nog gesimuleerd met een andere indeling, de raamconfiguratie en het type beglazing blijven gewoon behouden. De kastenwand uit het originele model wordt verwijderd, de wand wordt net zoals de overige wanden afgewerkt met een witte verflaag. Bovendien worden de schoolbanken verplaatst naar het midden van de ruimte. **Stap 2.** Er wordt een element gecreëerd langs de lange zijwand waarin de ramen zijn geplaatst. Het onderste gedeelte van het element wordt ingericht als opbergruimte met een diepte van 60 cm. Het bovenste gedeelte van het element bestaat uit een groot kader die rond de openingen geplaatst wordt. De dagkanten van de ramen worden afgeschuind onder een hoek van 45° en lopen vloeiend door in de schuin afgewerkte randen van de kader. De schuine zijden, afgewerkt in een witte kleur, zorgen ervoor dat het invallende licht beter gereflecteerd wordt en zo dieper in de ruimte gestuurd wordt. **Stap 3.** Om na te gaan of de positie van het raam invloed heeft op de daglichtfactor wordt het venster in het gevelvlak geplaatst. **Stap 4.** Naast het klaslokaal wordt een circulatiegang gemodelleerd. Er wordt een laterale opening voorzien over de volledige lengte van de gang. De opening wordt ingevuld met hetzelfde type beglazing als in het klaslokaal. De scheiding tussen de gang en het klaslokaal wordt gevormd door een kastenwand die bereikbaar is vanaf de gang. Deze kan bijvoorbeeld dienstdoen als opbergruimte voor de jassen van de kinderen of als schoolkluisjes. Opdat het daglicht in de gang zou kunnen doorstromen naar het klaslokaal wordt het bovenste gedeelte van de scheidingswand gerealiseerd in glas. Het glas heeft initieel een lichttransmissiefactor van 70%. Om na te gaan of de software interne ramen kan berekenen wordt er nadien ook een simulatie uitgevoerd waarbij geen beglazing geplaatst wordt. Vervolgens worden ook testen uitgevoerd met grotere interne ramen en met een grotere opening in de circulatiegang. **Stap 5.** Het klaslokaal

wordt gespiegeld, waardoor een model ontstaat bestaande uit een klaslokaal - gang - klaslokaal. De scheidingswanden tussen de verschillende vertrekken worden opnieuw ingericht als kastenwand zoals bij de vorige ingreep. De gang wordt uitgerust met twee daklichten die een afmeting hebben van 1,5 op 3 m. De beglazing heeft een LTA-waarde van 80,5%. De daklichten hebben een voldoende grote breedte zodat het licht rechtstreeks kan binnenvallen op de bovenzijde van de kastenwand en zo gereflecteerd kan worden in de klaslokalen.



Afbeelding 28: Overzicht van de verschillende ingrepen in testmodel 3 met andere indeling

Beschrijving test	LTA	Gem. DF	Min. DF	Max. DF	Gem/Min DF	Opp. DF 2%
	(%)	(%)	(%)	(%)	(-)	(%)
Basismodel	80,5	2,506	0,725	13,147	0,28	33,6
Afgeschuinde dagkanten	80,5	2,269	0,970	7,857	0,43	36,4
Ramen in gevelvlak	80,5	2,329	1,037	7,342	0,43	39,4
Openingen 2 zijden (lateraal hoger raam)	80,5/70	2,487	1,054	7,567	0,44	42,9
Openingen 2 zijden (lateraal groter intern raam)	80,5/70	2,848	1,132	7,844	0,39	64,5
Openingen 2 zijden (daklicht gang)	80,5/70	2,764	1,160	7,496	0,43	69,3

Tabel 15: Resultaten van de daglichtsimulaties van testmodel 3 met andere indeling

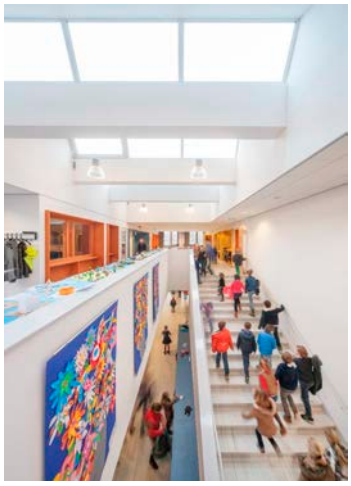
Opmerkingen en conclusies:

- In vergelijking met het originele basismodel verschaft deze indeling een lagere daglichtfactor maar wel een hogere uniformiteit. Het resultaat is toe te schrijven aan de witte wanden en het feit dat het

berekeningsvlak uitgebreid moet worden in de diepte aangezien de kastenwand verdwenen is.

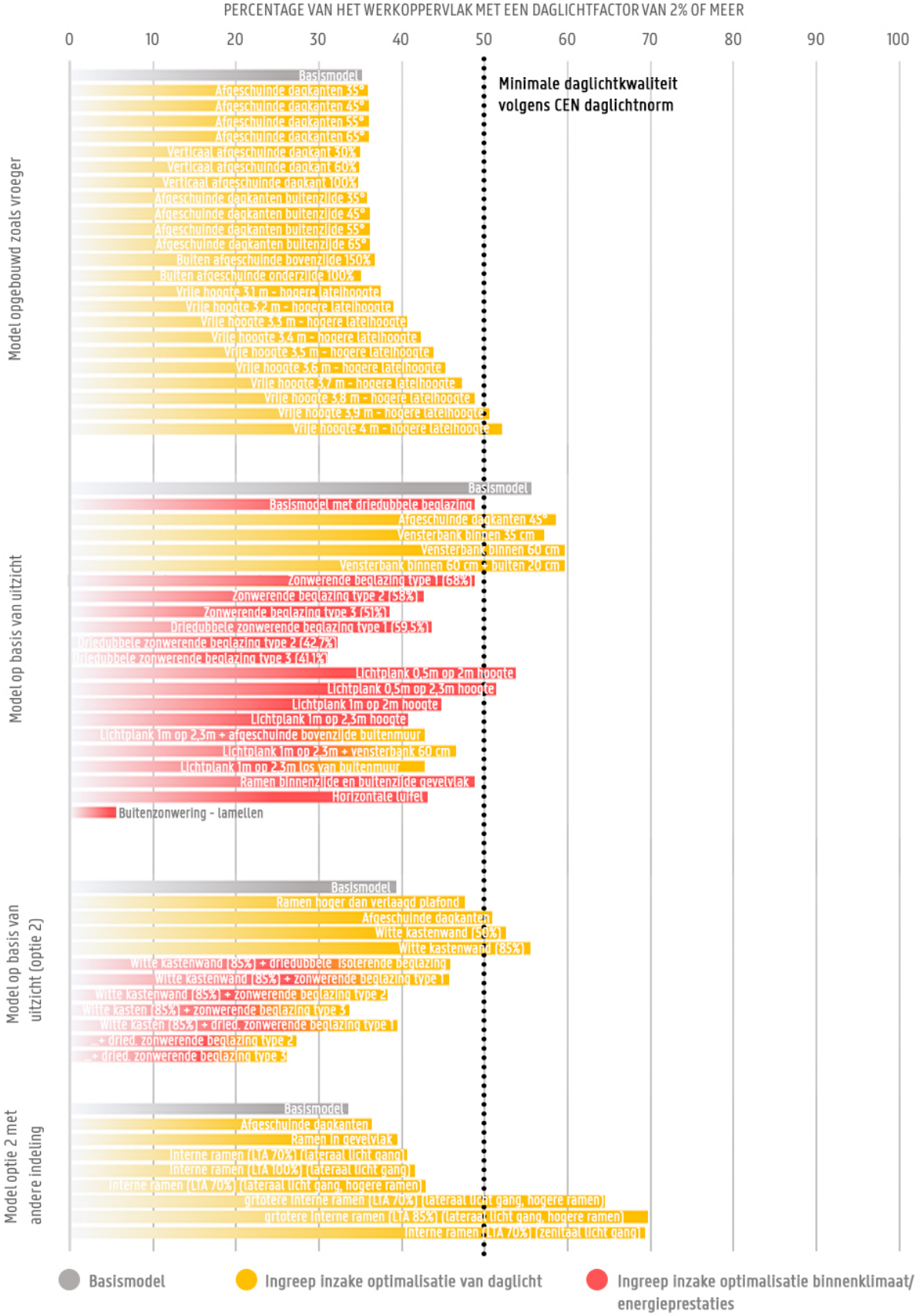
- Grote afgeschuinde zijden in combinatie met een diep vensterblad, beide in een witte reflecterende kleur, hebben een positief effect op de daglichtfactor. De opstelling laat het licht dieper in de ruimte binnentreden en bezorgt het klaslokaal een hogere uniformiteit.
- Uit de simulaties blijkt dat ramen die in het gevelvlak geplaatst worden betere resultaten verschaffen dan wanneer ze op traditionele wijze geïnstalleerd zijn. Daartegenover staat wel dat deze ingreep bouwtechnisch moeilijker uit te voeren is en dat het bovendien niet voordelig is op vlak van oververhitting.
- Het introduceren van interne ramen tussen een lokaal en circulatiegang kan een heel grote invloed hebben op de daglichtkwaliteit van klaslokalen. Deze aanpak kan voorkomen dat kinderen die ver verwijderd zijn van de daglichtopeningen hun taken in het donker moeten uitvoeren. Indien er gewerkt wordt met een combinatie van interne ramen en laterale openingen moet opgemerkt worden dat deze enkel voldoende invloed hebben als beide openingen voldoende groot zijn en zich op de juiste positie bevinden. Daglichtsimulaties met een grote laterale opening en interne ramen nabij het plafond, brengen verrassend genoeg geen grote stijging van de daglichtfactor op het werkvlak met zich mee. Ook wanneer de vrije hoogte van de gang en de afmetingen van het raam vergroot worden, is er geen opvallend voordeel vast te stellen. Om de daglichtkwaliteit op het werkvlak te beïnvloeden is het vooral van belang dat de interne ramen zich niet te hoog boven het werkvlak bevinden. Wanneer daklichten geplaatst worden, kunnen de interne ramen zich wel nabij het plafond bevinden. In dit geval levert dit geen nadelig effect op. Er dient bovendien opgemerkt te worden dat in deze situatie de kastenwand bijdraagt aan de daglichttoetreding binnenin het lokaal. Het licht dat via de daklichten invalt op de bovenzijde van de kastenwand wordt gereflecteerd richting het plafond van het klaslokaal en levert zo een betere daglichttoetreding. Het gebruik van daklichten en lichtstraten kan dus ingezet worden om een betere daglichtkwaliteit te bereiken. Anderzijds kan er qua architecturale ingreep ook gekozen worden voor een centraal en lichtrijk atrium waarrond de verschillende klaslokalen gepositioneerd worden.

Voorbeelden:

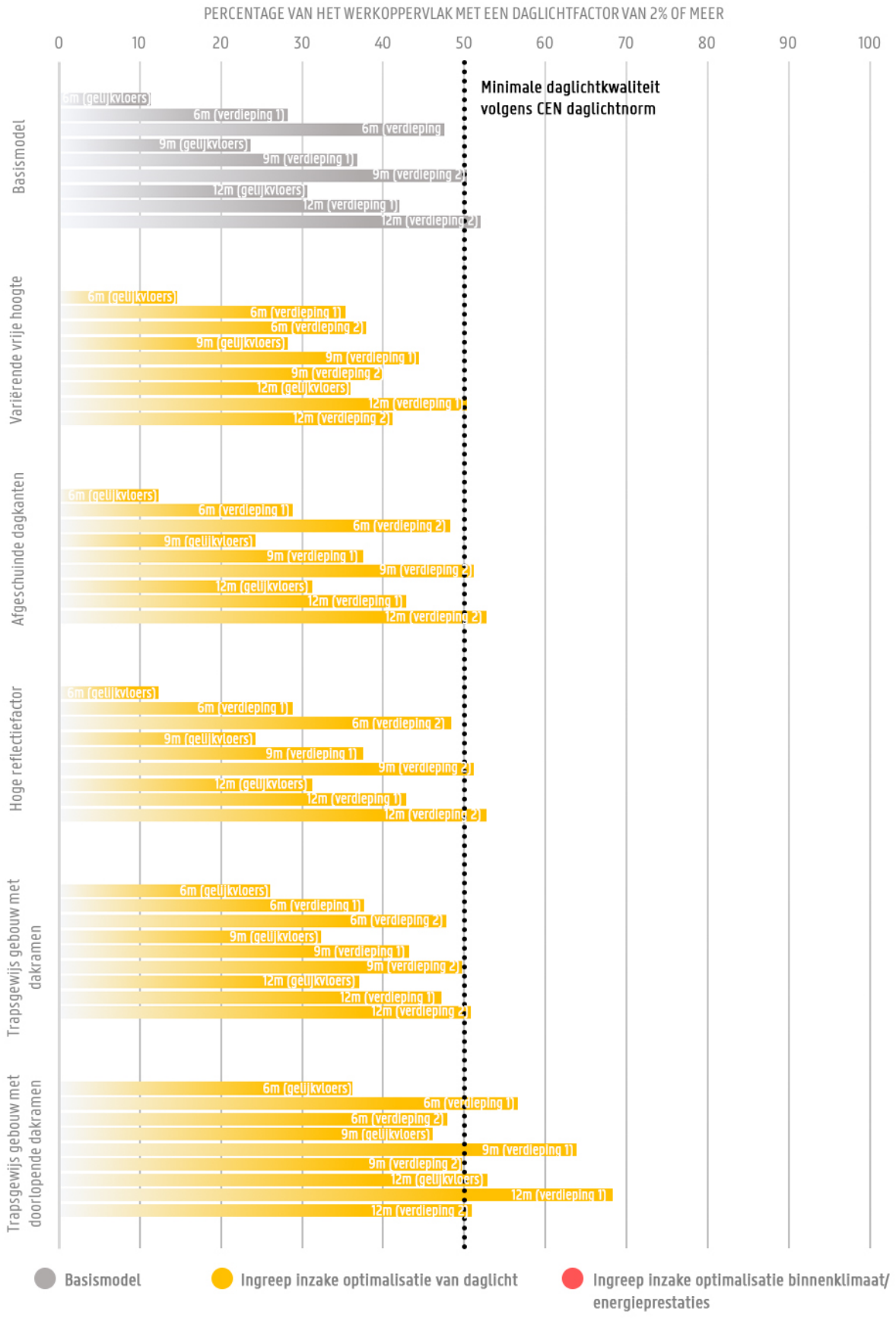


Afbeelding 29: Zenitaal verlichte verbindingsstraat (Brede School De Bunders – Oisterwijk, Nederland)

Afbeelding 30: Circulatie gang met interne ramen (Field Elementary School – Weston, USA)



Afbeelding 31: Overzicht resultaten van klaslokalen in nieuwbouwscholen

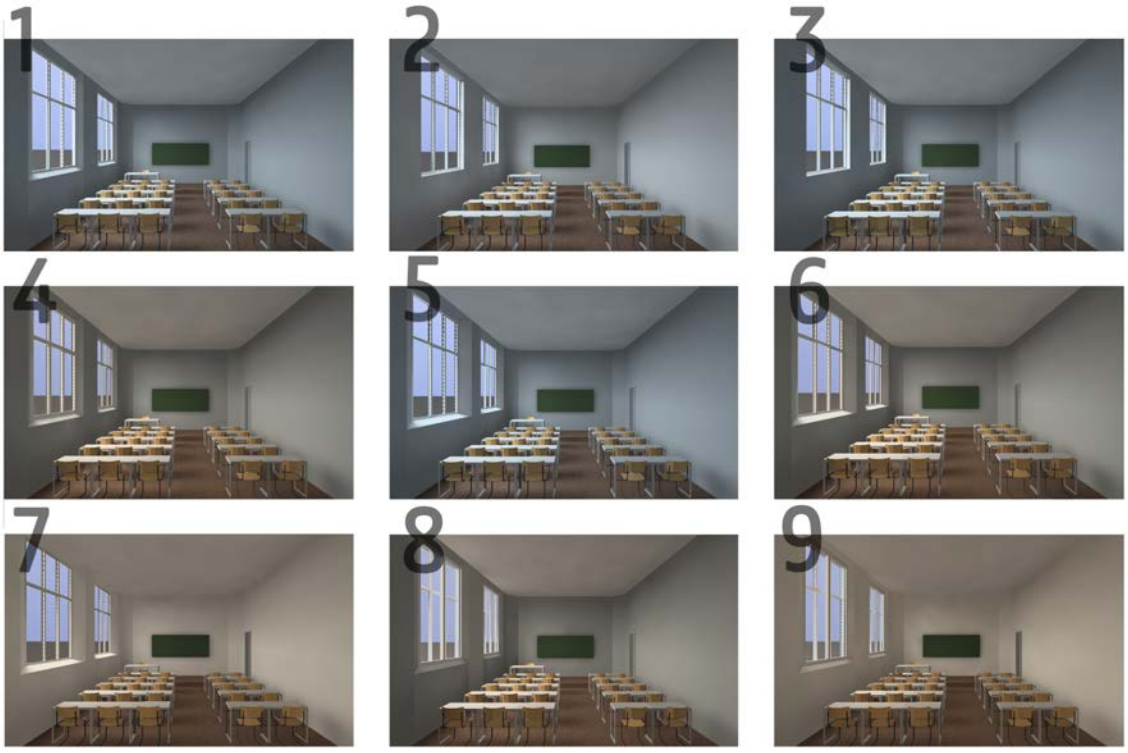


Afbeelding 32: Overzicht resultaten van klaslokalen in nieuwbouwscholen met stedelijke context

3.2. Daglichtsimulaties van klaslokaal in de negentiende-eeuwse school

3.2.1. Model zonder context

Basismodel. De beschrijving van het basismodel werd reeds besproken onder punt 2.2.2. bij de modelbeschrijving. **Stap 2.** In deze simulatie wordt nagegaan of de afgeschuinde hoeken die in het basismodel aanwezig zijn, zowel deze aan de ramen als deze aan de muren, een invloed uitoefenen op de daglichtfactor **Stap 3.** Vervolgens wordt het effect van de afgeschuinde dagkanten afzonderlijk nagegaan. **Stap 4.** De beglazing in het basismodel wordt vervangen door verschillende soorten dubbele en driedubbele isolerende beglazingen met variërende LTA-waarden. **Stap 5.** De lange zijwand, die als buitenmuur fungeert, wordt geïsoleerd langs de binnenzijde. De totale dikte van de wand na isolatie bedraagt 40 cm. Vanzelfsprekend worden de afgeschuinde dagkanten doorgetrokken. **Stap 6.** De twee voorgaande ingrepen worden toegepast in eenzelfde simulatie. Er wordt een isolerende beglazing met een LTA-waarde van 71,6% gebruikt. **Stap 7.** Om na te gaan in welke mate de reflectiefactoren van de wanden impact hebben op de daglichtfactor wordt de kleur van alle muren gewijzigd, het plafond blijft ongewijzigd. Er wordt een witte verflaag aangebracht met een reflectiefactor van 77%. De wijziging wordt toegepast op het voorgaande model waarin zowel de geïsoleerde wand als isolerende beglazing werd aangebracht. **Stap 8.** Indien de renovatie van een beschermd gebouw in rekening gebracht wordt, kan de beglazing niet door eender welke soort beglazing vervangen worden. Het basismodel wordt daarom aangevuld met isolerende ramen die voor de bestaande vensters geplaatst worden. De simulatie wordt uitgevoerd met een isolerende beglazing met LTA-waarde van 78% en een van 71,6%. **Stap 9.** Om de daglichtfactor te optimaliseren worden de wanden van het voorgaande model voorzien van een witte verflaag met een hoge reflectiefactor van 77%.



Afbeelding 33: Overzicht van de ingrepen in het testmodel betreffende de renovatie van klaslokalen

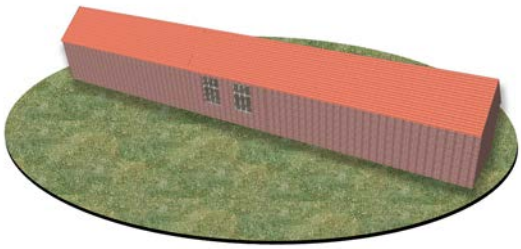
Beschrijving test	LTA	Gem. DF	Min. DF	Max. DF	Gem/Min DF	Opp. DF 2%
	(%)	(%)	(%)	(%)	(-)	(%)
Basismodel	90	3,069	0,107	10,050	0,03	56,7
Zonder afgeschuinde hoeken ruimte	90	3,030	0,427	9,789	0,13	56,5
Zonder afgeschuinde dagkanten	90	2,954	0,371	9,746	0,13	54,5
Isolatie binnenzijde buitenmuren	90	2,951	0,178	9,739	0,07	55,2
Isolerende dubbele beglazing	71,6	2,166	0,071	7,207	0,05	39,4
Isolerende driedubbele beglazing	68,2	2,062	0,068	6,863	0,05	37,5
Isolerende beglazing + isolatie buitenmuur	71,6	2,341	0,142	7,738	0,04	43,8
Vorige situatie + witte muren	71,6	2,864	0,328	8,204	0,10	60
Isolatie buitenmuur + voorzetraam	90 + 78	2,139	0	6,810	0	40,3
Vorige situatie + witte muren	90 + 78	2,590	0,843	7,348	0,31	53,3

Tabel 16: Resultaten van de daglichtsimulaties van het testmodel betreffende de renovatie van klaslokalen

Opmerkingen en conclusies:

- De resultaten tonen aan dat het vervangen van een enkele beglazing met een performante isolerende beglazing de daglichtfactor sterk reduceert. Dit is echter een noodzakelijke ingreep bij het renoveren van oude gebouwen die niet achterwege kan gelaten worden. Er zullen bijgevolg andere ingrepen moeten toegepast worden om daglichtkwaliteit terug te optimaliseren. Zo kan er bijvoorbeeld geopteerd worden om de wanden in een lichtere, meer reflecterende kleur te schilderen. Deze ingreep resulteert zowaar in een betere daglichtkwaliteit dan in het oorspronkelijke model.
- Bij het plaatsen van voorzetramen wordt het oppervlak met een minimale daglichtfactor van 2% sterk gereduceerd. Het aanbrengen van witte kleurtinten op de muren kan de daglichtfactor voor een groot deel herstellen. Er dient opgemerkt te worden dat de minimale daglichtkwaliteit enkel kan bekomen worden met een beglazing die over een voldoende hoge LTA-waarde beschikt.

3.2.2. Model met landelijke context



Afbeelding 34: Testmodel renovatie van klaslokalen in landelijke context

Het model wordt in een landelijke omgeving geplaatst en refereert naar de oude plattelandsschool. Aan weerszijden van het model wordt het schoolgebouw uitgebreid in de lengte. De gevels van het gebouw worden afgewerkt met een bakstenen bekleding. Bovenop het volume wordt een zadeldak gemodelleerd dat afgewerkt wordt met rode dakpannen. De uiteinden van het zadeldak steken een klein deel uit buiten het gevelvlak. Rondom het gebouw wordt een grasveld voorzien. Het gras heeft een reflectiefactor van 15%.

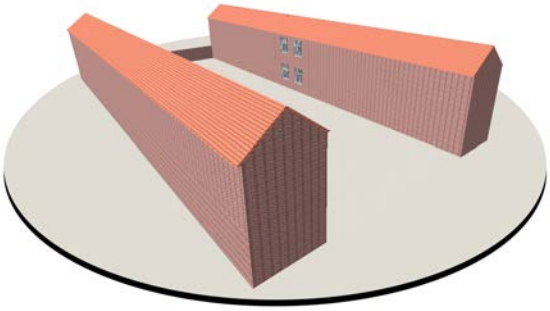
Beschrijving test	LTA	Gem. DF	Min. DF	Max. DF	Gem/Min DF	Opp. DF 2%
	(%)	(%)	(%)	(%)	(-)	(%)
Basismodel	90	2,932	0,390	9,594	0,14	54,5
Isolatie binnenzijde buitenmuur	90	2,869	0,143	9,286	0,03	54,2
Isolerende beglazing	71,6	2,096	0,280	6,891	0,14	38,6
Isolerende beglazing + isolatie buitenmuur	71,6	2,275	0,114	7,387	0,04	42,4
Vorige situatie + witte muren	71,6	2,790	0,114	7,865	0,04	58,7
Isolatie buitenmuur + voorzetraam	90 + 78	2,081	0	6,492	0	39,4
Vorige situatie + witte muren	90 + 78	2,512	0	6,828	0	52,1

Tabel 17: Resultaten van de daglichtsimulaties van het testmodel betreffende de renovatie van klaslokalen (landelijke context)

Opmerkingen en conclusies:

- Het landelijke model vertoont in vergelijking met het model zonder context weinig verschil. Er is een lichte daling waar te nemen bij de oppervlaktes met een minimale daglichtfactor van 2%. Enkele bijkomende testen toonden aan dat de daling voornamelijk te wijten is aan de kleine oversteek van het zadeldak. De lage reflectiecoëfficiënt van het gras bleek geen invloed te hebben op de daglichtkwaliteit in het klaslokaal.

3.2.3. Model met stedelijke context



Afbeelding 35: Testmodel renovatie van klaslokalen in stedelijke context

Het model wordt uitgebreid in de lengte en er wordt een tweede verdiep geconstrueerd. Net zoals in het model met de landelijke omgeving wordt het gebouw voorzien van een zadeldak en worden rode bakstenen en dakpannen gebruikt voor de afwerking. Vervolgens wordt op 20 m van het gebouw een identiek volume geplaatst. Tussenin de twee bouwblokken wordt een grote open speelplaats voorzien. De reflectiefactor van de stenen vloerbedekking bedraagt 45% en wordt nadien gewijzigd in een witte betonsteen met een reflectiefactor van 71%.

Beschrijving test	LTA	Gem. DF	Min. DF	Max. DF	Gem/Min DF	Opp. DF 2%
	(%)	(%)	(%)	(%)	(-)	(%)
Basismodel (gelijkvloers)	90	2,557	0,219	9,897	0,08	44,2
Basismodel (verdieping)	90	2,760	0,219	9,478	0,07	50,3
Isolatie binnenzijde buitenmuur (gelijkvloers)	90	2,468	0,439	9,617	0,16	43,5
Isolatie binnenzijde buitenmuur (verdieping)	90	2,691	0,408	9,123	0,15	49,8

Isolerende beglazing (gelijkvloers)	78	2,006	0,175	7,808	0,10	35,8
Isolerende beglazing (verdieping)	78	2,159	0,169	7,446	0,09	41,3
Isolerende beglazing + isolatie binnenzijde buitenmuur (gelijkvloers)	78	2,141	0,282	8,340	0,14	38,8
Isolerende beglazing + isolatie binnenzijde buitenmuur (verdieping)	78	2,335	0,232	7,962	0,09	44
Vorige situatie + witte muren (gelijkvloers)	78	2,438	0,642	8,607	0,25	45
Vorige situatie + witte muren (verdieping)	78	2,732	0,755	8,282	0,30	54
Isolatie binnenzijde buitenmuur + voorzetraam (gelijkvloers)	90 + 78	1,787	0,352	6,782	0,22	33,8
Isolatie binnenzijde buitenmuur + voorzetraam (verdieping)	90 + 78	1,862	0,316	6,384	0,16	36,8
Vorige situatie + witte muren (gelijkvloers)	90 + 78	2,004	0,408	6,848	0,20	36,4
Vorige situatie + witte muren (verdieping)	90 + 78	2,216	0,427	6,481	0,18	43,9
Vorige situatie + witte koer (gelijkvloers)	90 + 78	2,003	0,407	6,837	0,20	37,3
Vorige situatie + witte koer (verdieping)	90 + 78	2,219	0,438	6,639	0,18	43,9

Tabel 18: Resultaten van de daglichtsimulaties van het testmodel betreffende de renovatie van klaslokalen (stedelijke context)

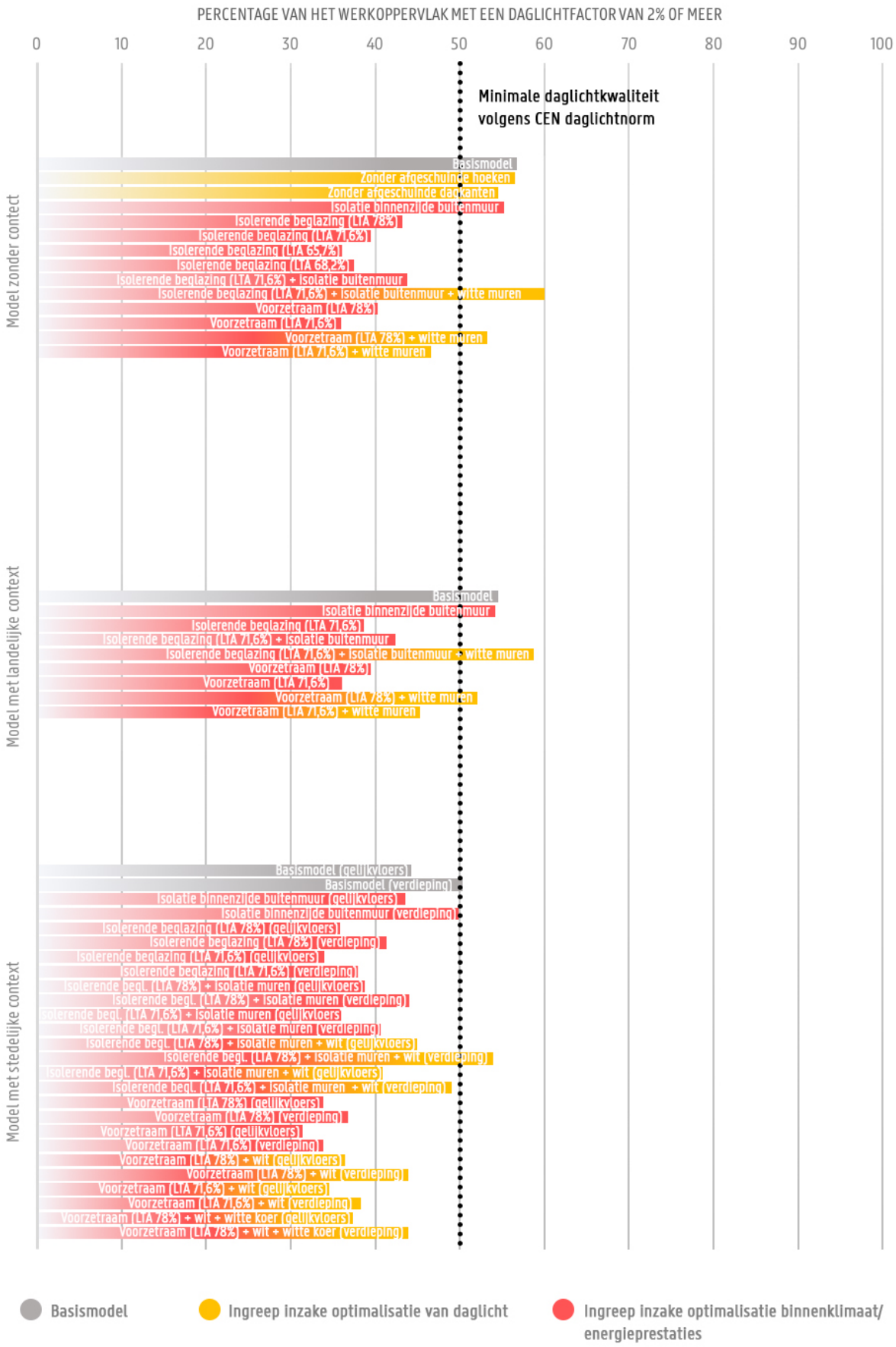
Opmerkingen en conclusies:

- De resultaten tonen aan dat het bij de renovatie van een stedelijke school moeilijk is om een voldoende hoge daglichtkwaliteit te bereiken. Op de gelijkvloerse verdieping is het zelfs onmogelijk om een kwalitatief klaslokaal te realiseren op vlak van daglichttoetreding. De daglichttoetreding kan in dit geval wel geoptimaliseerd worden door interne ramen te plaatsen. Indien dit niet mogelijk of deze oplossing ontoereikend is, moet het lokaal in principe versmald worden om te voldoen aan de minimale daglichtkwaliteit.

Voorbeelden:

Afbeelding 36: Smalle klaslokalen, voorzetramen en interne ramen (Dr Rijk Kramerschool – Amsterdam. Nederland)

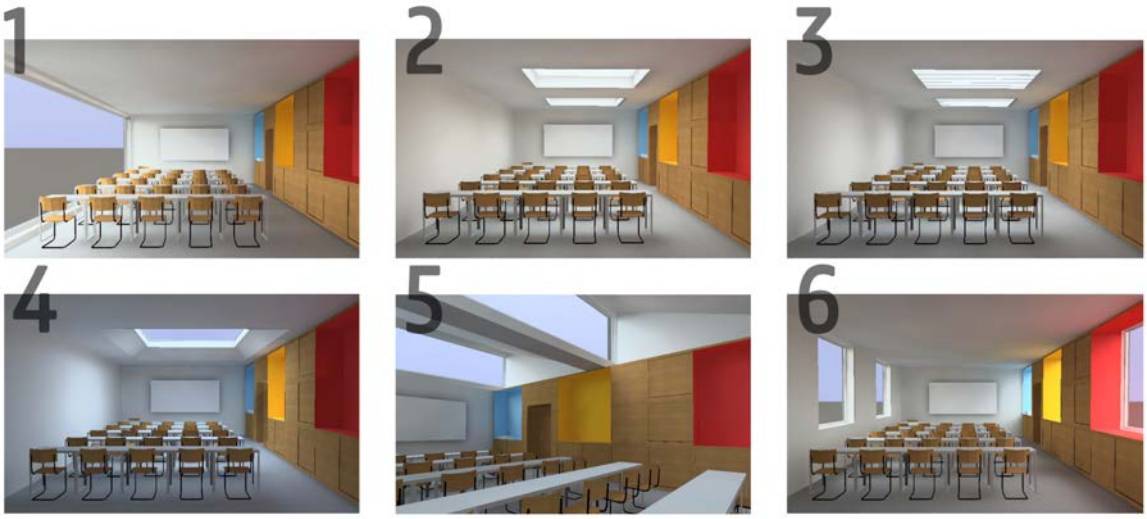
Afbeelding 37: Renovatie school, interne ramen (BuBaO Sint-Lievenspoort – Gent, België)



Afbeelding 38: Overzicht resultaten betreffende de renovatie van oude klaslokalen

3.3. Maatregelen voor het behalen van een gemiddelde en hoge daglichtkwaliteit

Bovenstaande resultaten tonen aan dat het behalen van een minimale daglichtkwaliteit niet vanzelfsprekend is wanneer uitgegaan wordt van een traditioneel eenzijdig belicht klaslokaal. De CEN daglichtnorm heeft het naast de minimale kwaliteit ook over een gemiddelde en hoge daglichtkwaliteit. Bij een gemiddelde kwaliteit moet de helft van het werkoppervlak over een minimale DF van 3,3% beschikken, dit komt overeen met een verlichtingssterkte van 500 lux. Daarenboven moet 95% van het werkoppervlak een minimale DF van 2% hebben, wat overeenstemt met 300 lux. De waarden moeten bereikt worden voor de helft van de daglichturen. Voor het behalen van een hoge daglichtkwaliteit wordt een werkoppervlak vereist waarbij minstens de helft van het oppervlak een verlichtingssterkte van 750 lux bezit. De waarde stemt overeen met een DF van 5%. Deze kwaliteitsklasse eist daarenboven dat 95% van het werkoppervlak een minimale daglichtfactor van 3,3% heeft. Ook hier moeten de waarden bereikt worden voor 50% van de daglichturen. De evaluatie voor zenitale openingen is daarentegen verschillend. Voor het behalen van een gemiddelde en een hoge daglichtkwaliteit moet 95% van het werkoppervlak respectievelijk een minimale daglichtfactor van 3,3% en 5% bezitten. Hieronder wordt de daglichtkwaliteit van enkele ingrepen nagegaan. De maatregelen worden geanalyseerd en besproken, ze kunnen eventueel toegepast worden in nieuwbouwscholen om een betere daglichtkwaliteit te behalen. De ingrepen worden toegepast op het basismodel dat reeds besproken werd onder punt 2.2.1.



Afbeelding 39: Overzicht van ingrepen voor het behalen van een gemiddelde en hoge daglichtkwaliteit

Model 1. Indien enkel de lange zijwand in contact staat met de buitenomgeving kan de volledige oppervlakte van de zijgevel voorzien worden van een laterale daglichtopening. De LTA-waarde van de beglazing bedraagt 80,5%.

Model 2. Ingeval het klaslokaal grenst aan het dakoppervlak kunnen daklichten toegepast worden. De ruimte wordt uitgerust met twee daklichten die een afmeting hebben van 2 op 2,5 m. De openingen worden in het midden van de ruimte geplaatst. Ook hier heeft het glas een LTA-waarde van 80,5%.

Model 3. Er worden bafflesystemen geplaatst in de openingen van model 2. De schermen hebben een witte kleur, ze bezitten een reflectiefactor van 70%.

Model 4. Het klaslokaal wordt voorzien van één grote centrale opening in het plafond. De opening heeft een afmeting van 3 op 3 m. Om de spreiding van het daglicht te optimaliseren worden de zijden afgeschuind onder een hoek van 45°.
Model 5. Als het klaslokaal op de bovenste verdieping gelegen is of als er maar een verdieping aanwezig is kan het dak ook als sheddak ontworpen worden. Het klaslokaal wordt voorzien van twee achter elkaar geplaatste zadeldaken. De steilste schilden van het dak worden over de volledige breedte uitgerust met noordgerichte daglichtopeningen.
Model 6. Wanneer het klaslokaal beschikt over twee buitenmuren, kunnen laterale openingen in deze beide wanden geplaatst worden. Er worden vijf openingen voorzien in de ruimte. De ramen zijn 2 m hoog en 1,9 m breed. Ze worden afwisselend tegenover elkaar geplaatst. De LTA-waarde van de beglazing bedraagt opnieuw 80,5%

Beschrijving test	**Opp. minimale DF 2%**	**Opp. minimale DF 3,3%**	**Opp. minimale DF 5%**	**Gemiddelde kwaliteit**	**Hoge kwaliteit**
	(%)	(%)	(%)	(-)	(-)
Eenzijdig, volledig beglaasd	87,5	60,9	48,3	✗	✗
Twee daklichten	100	96,5	79,7	✓	✗
Twee daklichten met baffles	95	81,4	50,5	✗	✗
Eén daklicht, afgeschuinde zijden	99,8	82,1	63	✗	✗
Sheddak	95,3	68,9	21,3	✓	✗
Ramen langs 2 zijden	95,2	78	28,6	✓	✗

Tabel 19: Resultaten daglichtsimulaties met gemiddelde/ hoge daglichtkwaliteit

Opmerkingen en conclusies:

- Het behalen van een hoge daglichtkwaliteit blijkt onhaalbaar met een beperkt glaspercentage, geen enkele ingreep voldoet aan deze kwaliteitsklasse.
- Eenzijdig belichte klaslokalen met een vrije hoogte van 3 m kunnen in geen enkel geval een gemiddelde of een hoge daglichtkwaliteit verschaffen. Bovendien zijn openingen met dergelijke afmetingen ontzettend nadelig voor de oververhitting van klaslokalen.
- Klaslokalen die gebruik maken van zenitaal daglicht kunnen moeiteloos een gemiddelde daglichtkwaliteit bieden. Het invallende daglicht wordt op deze manier beter verspreid over het werkoppervlak. De daglichtkwaliteit kan het eenvoudigst behaald worden door meerdere daklichten te spreiden over de ruimte. Het gebruik van bafflesystemen elimineert de kans op verblinding en zorgt voor een uniformere lichtverspreiding [57]. Bovendien bieden de schermen ook een akoestisch voordeel. Het introduceren van deze elementen leidt wel tot een reductie van de daglichtfactor waardoor de gemiddelde kwaliteit niet langer behaald kan worden zonder de openingen te vergroten. Om een kwaliteitsvol uitzicht naar buiten te bieden, kunnen de daklichten nog aangevuld worden met een of meerdere laterale openingen. Ingeval een klaslokaal in direct contact staat met het dakoppervlak is het gezien de gemiddelde daglichtkwaliteit ten zeerste aangeraden om gebruik te maken van zenitale daglichtopeningen.

- Het gebruik van sheddaken is vooral interessant bij technische werkplaatsen en praktijklokalen. Deze zijn immers gevoelig aan verblinding. Door de openingen naar het noorden te richten bezorgen ze de ruimte een zacht en diffuus licht.
- Bij het plaatsen van openingen in twee tegenoverliggende wanden, kan er een gemiddelde daglichtkwaliteit behaald worden. Er moet opgemerkt worden dat deze kwaliteit enkel behaald kan worden met een voldoende groot glaspercentage. De WFR bedraagt in dit geval 33,3 %. Bovendien is het moeilijk om op deze manier een goede uniformiteit te verkrijgen, het behalen van een hoge kwaliteit is bijgevolg praktisch onmogelijk.

Voorbeelden:

Afbeelding 40: School met sheddaken (Kleuterschool Gekko – Bonheiden, België)

Afbeelding 41: Klaslokaal met gespreide daklichten (JSRACS Beechboro Kindergarten– Mirrabooka, Australië)

Deel 4: Binnenklimaatsimulaties

1. Inleiding

In dit deel wordt het risico op oververhitting van het klaslokaal nagegaan. Algemeen wordt er vastgesteld dat oververhitting in lage-energiegebouwen een toenemend probleem is. De verbeterde isolatie en luchtdichtheid van de gebouwen hebben als gevolg dat hoge temperaturen binnenskamers vastgehouden worden waardoor het al snel te warm wordt. Het gebruik van grote raampartijen is voordelig op vlak van daglichttoetreding, anderzijds brengen ze ook grote warmtewinsten met zich mee die nadelig zijn voor oververhitting tijdens de zomermaanden. De hoge menselijke bezetting in klaslokalen en grote interne warmtewinsten die hiermee gepaard gaan, maken het voor scholen een nog grotere uitdaging om een aangenaam zomercomfort te creëren [58]. Daarenboven moet opgemerkt worden dat recente klimaatveranderingen en het stijgend aantal hittegolven een grote impact hebben op het oververhittingsrisico. Onderzoek toont immers aan dat op 50 jaar tijd de maximale zomertemperatuur op bepaalde plaatsen met meer dan 2°C steeg [59]. Het is dan ook noodzakelijk om, in de mate van het mogelijke, rekening te houden met deze veranderingen.

Een oververhittingsanalyse is van belang om na te gaan of er steeds voldoende comfort kan geboden worden aan de leerlingen en lesgever. Te warme klaslokalen hebben immers een negatieve impact op de gezondheid en het welzijn van de gebruikers. Uit onderzoek volgt dat overmatige warmte aanleiding heeft tot klachten zoals hoofdpijn, sufheid, ademhalingsproblemen, concentratiestoornissen en irritatie aan de ogen, oren, neus en keel [60]. Als gevolg van de opwarming van het klaslokaal gedurende de schooldag zullen kinderen zich vooral steeds minder kunnen concentreren, hierdoor zullen ook hun prestaties onvermijdelijk achteruitgaan. In extreme omstandigheden, wanneer het oververhittingsfenomeen gedurende langere tijd aanhoudt, kan zelfs het ziekteverzuim bij leerlingen en leerkrachten stijgen.
Zoals in deel 2 reeds aangegeven werd, heeft daglicht een grote impact op de concentratie en leerprestaties van kinderen en jongeren. Het is hierbij van belang te vermelden dat deze positieve invloed enkel kan behouden worden indien ook de binnentemperatuur onder controle kan worden gehouden. Grote raamopeningen die veel daglicht bieden, zullen bijgevolg niet eenvoudigweg leiden tot betere schoolprestaties.

Het oververhittingsrisico wordt gecontroleerd aan de hand van een dynamische simulatie. Hierbij wordt de inertie van het systeem in rekening gebracht en wordt het in de tijd variërende gedrag van het model gesimuleerd. Voor het onderzoek in deze scriptie worden de verschillende klasmodellen uit deel 3 gemodelleerd in Modelica met gebruik van de IDEAS Modelica bibliotheek. De modellen worden nauwkeurig geanalyseerd en vergeleken met elkaar.

1.1. Oververhittingsgrens

De maximale binnentemperatuur wordt bepaald op basis van de comfortnorm NBN EN ISO 7730 [61]. Volgens deze norm bedraagt de ideale comforttemperatuur in klaslokalen tijdens de zomer 24,5°C. De voorgeschreven temperatuur houdt rekening met de intensiteit van de uit te voeren taken en de kledij van de gebruikers. Voor kleuterscholen wordt overigens een temperatuur van 23,5°C vooropgesteld omwille van de actievere bezigheid van de kinderen. Daarnaast worden in de norm enkele comfortklassen vermeld die bepaald zijn op basis van de PMV (Predicted Mean Vote) en de PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied). Indien gekozen wordt voor een

comfortklasse B, waarbij 10% ontevredenen worden toegelaten, mag de ideale comforttemperatuur in het klaslokaal 1,5°C meer of minder bedragen. Als de binnentemperatuur bijgevolg meer dan 26°C bedraagt, zal er sprake zijn van oververhitting. Deze drempelwaarde wordt gebruikt voor het evalueren van de simulaties die hierna volgen.

Type gebouw/ruimte	**Activiteit**	**Categorie**	**Operatieve temperatuur**	
			Zomer	Winter
	(W/m^2)		(°C)	(°C)
Kantoor	70	A	24,5 ± 1,0	22,0 ± 1,0
Landschapskantoor				
Vergaderruimte		B	24,5 ± 1,5	22,0 ± 2,0
Auditorium				
Cafetaria		C	24,5 ± 2,5	22,0 ± 3,0
Klaslokaal				
Kleuterschool	81	A	23,5 ± 1,0	22,0 ± 1,0
		B	23,5 ± 2,0	22,0 ± 2,5
		C	23,5 ± 3,0	22,0 ± 3,5

Tabel 20: Bepaling comforttemperatuur

Om het zomercomfort in klaslokalen te evalueren wordt het totaal aantal uren bepaald waarbij de temperatuur van 26°C overschreden wordt. Hierbij worden enkel de uren in rekening gebracht die vallen binnen de bezettingsperiode. De overschrijdingsuren worden dan procentueel uitgedrukt ten opzichte van de bezettingsuren. Er gelden geen exacte bepalingen omtrent de maximale overschrijdingstijd, meestal streeft men naar een binnencomfort dat slecht 1% van de gebruikerstijd 28°C overschrijdt en waarbij maximaal 5% van de gebruikerstijd zich boven de 26°C bevindt. De 5%-waarde komt voort uit de eisen die opgesteld zijn voor passiefhuizen, ook in de norm NBN EN 15251 spreekt men van een toelaatbare afwijking van 3 of 5% [62].

2. Berekeningsmethode

2.1. Software

De kans op oververhitting wordt nagegaan door simulaties met Modelica. Modelica is een object-georiënteerde en op vergelijking gebaseerde modelleertaal die ingezet kan worden voor het modelleren van complexe systemen. De modelleertaal werd ontwikkeld met als doel om modellen en modelbibliotheken eenvoudig uit te wisselen. Op deze manier kunnen systemen uit verschillende ingenieursdomeinen met elkaar interageren. Specifiek wil dit zeggen dat systemen die mechanische, elektrische, elektronische, hydraulische, thermische en besturings- en procesgerichte subonderdelen bevatten gelijktijdig gesimuleerd kunnen worden. Dit biedt voordelen aangezien technische systemen tegenwoordig steeds complexer en specifieker worden, maar ze wel vaak in relatie staan tot elkaar [63], [64].

Modelica zelf is dus geen software. Om simulaties uit te voeren is er een modellerings- en simulatieomgeving nodig. Er zijn verschillende soorten commerciële software beschikbaar die de Modelica modelleertaal ondersteunen, voor dit onderzoek werd gebruik gemaakt van Dymola. Op modelleringsniveau van Dymola worden modellen samengesteld uit bibliotheekcomponenten, dit kunnen componenten zijn uit de standaardbibliotheek van Modelica of andere commerciële bibliotheken die eenvoudig toegevoegd kunnen worden [65]. In het kader van deze studie werd gebruik gemaakt van de IDEAS-bibliotheek. Deze bibliotheek werd ontwikkeld aan de Katholieke Universiteit Leuven. De IDEAS-bibliotheek is gemaakt in de modelleertaal Modelica omwille van de eenvoudige instel- en uitbreidbaarheid die dankzij de objectgeoriënteerde structuur en toegankelijkheid tot alle vergelijkingen geboden wordt [66]. De bibliotheek richt zich hoofdzakelijk op energieprestaties van gebouwen, ze omvat dan ook een groot gamma aan componenten die ingezet kunnen worden bij het maken van gebouwsimulaties. Ze kan onder andere gebruikt worden voor het maken van oververhittingssimulaties, het evalueren van de invloed van hernieuwbare energiebronnen, het controleren van het elektrisch verbruik, het berekenen en dimensioneren van ruimteverwarming en warm water voor huishoudelijk gebruik, … Op het simulatieniveau van Dymola worden op vergelijking steunende modellen omgezet in een efficiënte simulatiecode. Geavanceerde computeralgebra wordt hierbij ingezet om de zeer grote sets aan vergelijkingen te verwerken.

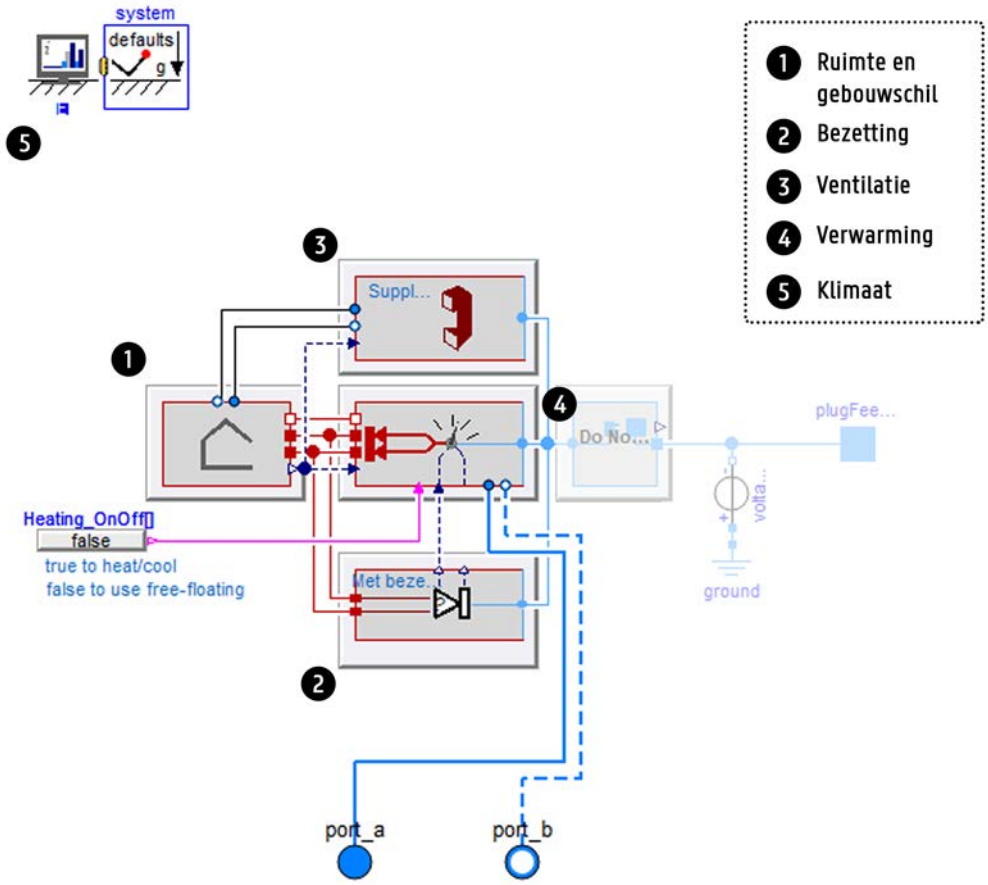
2.2. Modelbeschrijving

Net zoals in deel 3 wordt er een analyse gedaan van zowel de nieuwbouwschool als gerenoveerde school. Voor beide wordt een individueel model opgesteld, deze worden hieronder verder besproken.

2.2.1. Klaslokaal in nieuwbouwschool

Voor het maken van de simulaties wordt een referentiemodel opgesteld. Hiervoor zal het eerste testmodel uit deel 3 gebruikt worden. Dit is het model waarbij de gevelconfiguratie bepaald werd op basis van de ontwerpmethode uit het verleden. Dit model wordt geselecteerd omwille van zijn WWR. De verhouding van het

glasoppervlak tot de buitengevel bedraagt 30%, dit komt per slot van rekening overeen met de richtlijnen die vandaag voorgeschreven worden op basis van het thermisch comfort.
Het in Dymola opgebouwde simulatiemodel bestaat uit een geheel van verbonden componenten; de ruimte en gebouwschil, de bezetting, de ventilatie en de verwarming (Afbeelding 42). In de linkerbovenhoek van het simulatiemodel wordt de 'SimInfoManager' weergegeven. Dit onderdeel beheert alle simulatie-informatie, de weergegevensbestanden kunnen in deze component ingeladen worden. Bovendien staat de 'SimInfoManager' in voor het verwerken van deze klimaat- en tijdgegevens, zo past het transformaties toe voor het berekenen van de zonnestraling op de verschillende gemodelleerde ruimte-oppervlakken. De bovenvermelde componenten beschikken op hun beurt eveneens over een gedetailleerd model, ze worden hieronder verder toegelicht.



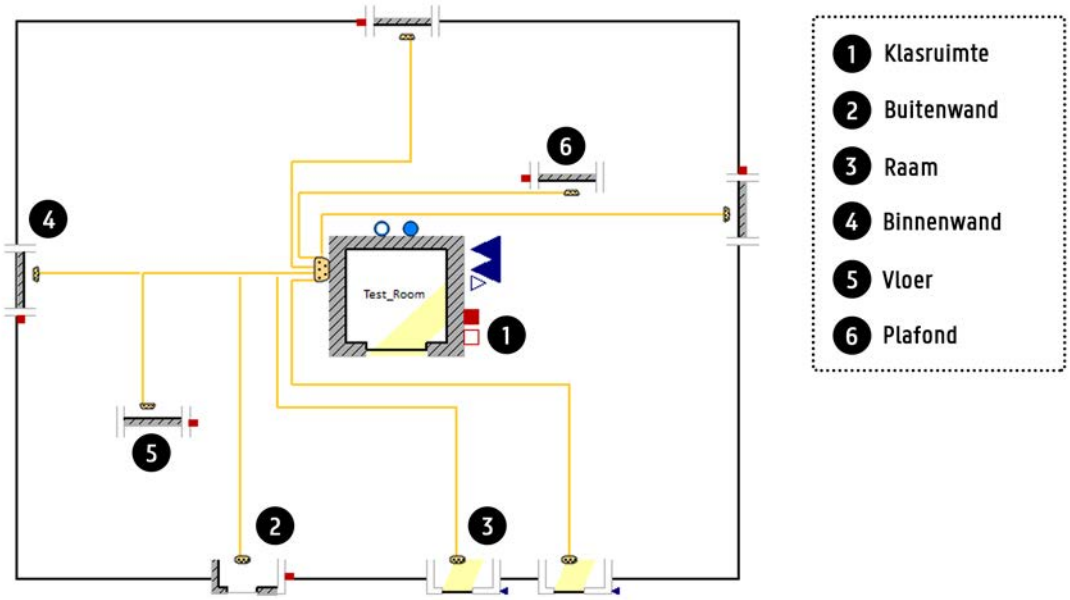
Afbeelding 42: Simulatiemodel klaslokaal

2.2.1.1. Ruimte en gebouwschil

Eerst en vooral wordt het structuurmodel opgesteld, hierin worden de ruimte en gebouwschil nader gedefinieerd (Afbeelding 43). Het model wordt opgebouwd als één zone die het klaslokaal vertegenwoordigt. Hieraan worden alle componenten gekoppeld die in direct contact staan met de ruimte; de buitenwand, de raamopeningen, de binnenwanden, de vloer en het plafond. Voor elk van deze componenten wordt de oppervlakte en oriëntatie ingegeven. Daarnaast wordt ook de constructiesamenstelling en bijhorende

materiaaleigenschappen (dikte, warmtegeleidingscoëffiënt, soortelijke warmte, ...) van elke component bepaald (Tabel 19).

Met behulp van de 'SimInfoManager' worden de buitenwand en de twee raamopeningen in contact gesteld met het buitenklimaat. De binnenwanden, vloer en het plafond worden daarentegen beschouwd als adiabatisch. Dit betekent dat er geen warmte-uitwisseling plaatsvindt tussen de wanden en de omgeving.



Afbeelding 43: Submodel ruimte en gebouwschil

Voor de constructie van de wanden en vloeren worden materialen gebruikt met een grote thermische massa. Als gevolg hiervan kunnen de massieve wanden gedurende da dag interne warmtewinsten en zonnewinsten opslaan. De grote warmtecapaciteit zorgt er zo voor dat een zekere hoeveelheid van de aanwezige warmte wordt opgenomen in de massa waardoor de opwarming van de ruimtetemperatuur vertraagd wordt en ze langzaam zal toenemen gedurende de dag. Wanneer het 's avonds buiten afkoelt zullen de wanden en vloeren hun opgenomen warmte terug afstaan. De klaslokalen bezitten zo opnieuw een frisse binnentemperatuur aan het begin van de schooldag.

Aangezien er wordt verondersteld dat de school voldoet aan de lage-energiestandaard zijn ook hier bijzondere maatregelen voor nodig. Om te beantwoorden aan de gestelde eisen moet er voldoende thermische isolatie voorzien worden. Er wordt een isolatiepakket van 18 cm minerale wol aangebracht in de spouwmuur. Op deze manier kan de vereiste U-waarde van 0,2 W/m^{2}K behaald worden. Daarnaast moeten ook de ramen over een voldoende lage U-waarde beschikken. De maximale U-waarde bij lage-energiegebouwen bedraagt 1,6 W/m^{2}K. Om deze waarde te verkrijgen wordt een dubbele beglazing met een U-waarde van 1,1 W/m^{2}K en een profiel met een U-waarde van 2,1 W/m^{2}K geselecteerd. De zonnetoetredingsfactor van de beglazing bedraagt 75,5%. De LTA-waarde van de beglazing wordt niet vermeld, uit tabel 3 kunnen we evenwel afleiden dat een ZTA-waarde van 75% voor een gewone dubbele beglazing overeenstemt met een lichttransmissiefactor van 80%. Dit komt overeen met de LTA-waarde die gebruikt wordt in de daglichtsimulaties. De ramen worden verdiept in de

buitengevel geplaats, op deze manier bereiken niet alle zonnestralen het beglazingsoppervlak en wordt een soort van minimale zonwering gecreëerd. Bij de instellingen van de openingen worden de afmetingen van de dagkanten ingegeven om deze bescherming correct in rekening te brengen.

Component	**Samenstelling**	**Dikte**	**λ-waarde**	**Soortelijke warmte**	**Dichtheid**
		(m)	(W/mK)	(J/kgK)	(kg/m^3)
Buitenwand	Baksteen	0,10	1,10	840	1850
	Spouw	0,03	0,024	1000	1,23
	Minerale wol	0,18	0,036	1030	110
	Baksteen	0,14	1,10	840	1850
	Pleisterlaag	0,01	0,60	840	975
Binnenwand	Pleisterlaag	0,01	0,60	840	975
	Baksteen	0,10	1,10	840	1850
	Pleisterlaag	0,01	0,60	840	975
Vloer/plafond	Tegelafwerking	0,02	1,40	1000	2100
	Dekvloer	0,04	0,60	860	1100
	Akoestische isolatie (PUR)	0,02	0,02	1470	30
	Betonnen vloerplaat	0,20	1,70	920	2400
	Pleisterlaag	0,01	0,60	840	975
Component	**Samenstelling**		**U-waarde**		**ZTA-waarde**
			(W/m^{2}K)		(%)
Raam	Beglazing 4-12-4		1,1		75,5
	Profiel		2,1		-

Tabel 21: Constructiesamenstelling van de componenten met bijhorende eigenschappen (nieuwbouwschool)

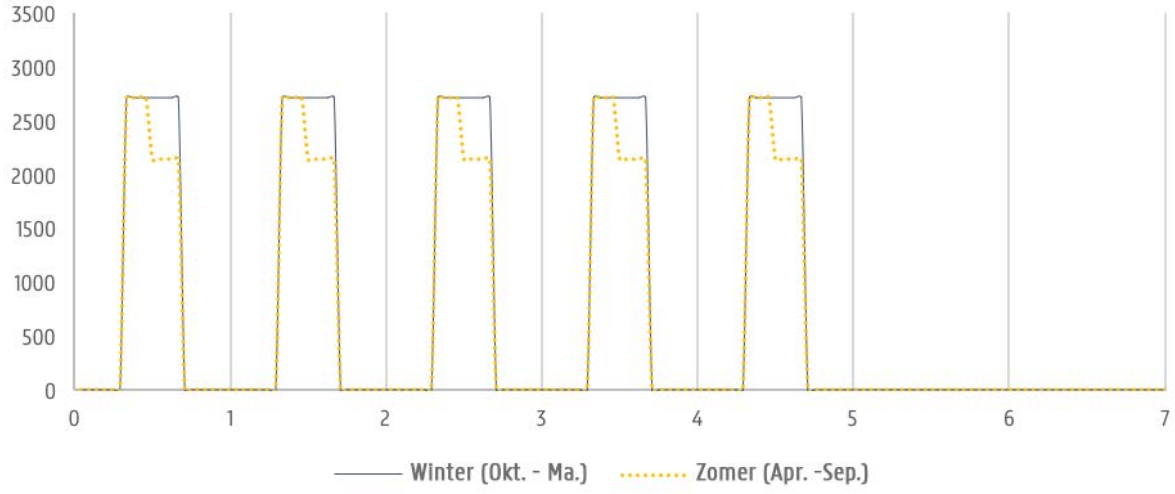
2.2.1.2. Bezetting

Omdat oververhitting in gebouwen voornamelijk optreedt wanneer het gebouw in gebruik is, is het uiterst noodzakelijk om de bezetting in rekening te brengen. In de bezettingscomponent van het model kunnen de interne warmtewinsten (IWW) ingegeven worden die geproduceerd worden wanneer het klaslokaal bezet is. Om de interne warmtewinsten te bepalen, moeten alle aanwezige warmtebronnen in rekening gebracht worden. Hieronder verstaan we de warmte van personen, kunstverlichting en elektrische toestellen. In de tabel hieronder wordt voor elke warmtebron een standaardwaarde weergegeven die terug te vinden is in de Duitse norm DIN V 18599 [67], de Europese norm EN ISO 13791 [68] en een ontwerphandleiding van de 'Chartered Institution of Building Services Engineers' [69].

Warmtebron		
Personen	W/pers	80
Kunstverlichting	W/m^2	10
Elektrische toestellen	W/m^2	1

Tabel 22: Interne warmtewinsten klaslokaal

Aangezien het klaslokaal een vloeroppervlakte van 57 m^2 heeft en plaats biedt aan 25 leerlingen en een lesgever wordt er een interne warmtewinst van 2707 W bekomen. Vanaf de maand april tot en met de maand september wordt verondersteld dat de artificiële verlichting de helft van de bezettingstijd wordt uitgeschakeld. Hierdoor wordt tijdens deze periodes een interne warmtewinst van 2137 W verkregen. De interne warmtewinsten worden gekoppeld aan een bezettingsschema. Voor de simulaties wordt er verondersteld dat er tijdens de weekdagen een continue bezetting is van 8 tot 16 uur. De middagpauze en vrije namiddag op woensdag worden buiten beschouwing gelaten. Buitenschoolse activiteiten na 16 uur of op zaterdag en zondag worden eveneens niet in rekening gebracht. Tijdens de zomervakantie in juli en augustus wordt er geen bezetting voorzien in het model, gedurende deze maanden worden er bijgevolg ook geen interne warmtewinsten geproduceerd.



Afbeelding 44: Interne warmtewinsten tijdens een winter- en zomerweek

2.2.1.3. Ventilatie

Uit verschillende onderzoeken blijkt de binnenluchtkwaliteit in klaslokalen ondermaats te zijn [70], [71]. De richtwaarden voor CO_2 en andere schadelijke stoffen worden in vele gevallen overschreden. Het probleem lijkt daarenboven nog delicater in lage-energiegebouwen, door de verbeterde isolatie kunnen de schadelijke stoffen immers niet ontsnappen waardoor de lucht sneller verontreinigd wordt. Bovendien zou de CO_2-concentratie in direct verband staan met de leerprestaties van de leerlingen. Het is derhalve belangrijk om speciale aandacht te besteden aan de kwaliteit van de binnenlucht, dit kan door regelmatig, gecontroleerd en correct te ventileren. Omwille van deze reden wordt het simulatiemodel uitgerust met een ventilatiesysteem D met warmteterugwinning. Dit betekent dat de lucht mechanisch wordt toe- en afgevoerd met behulp van een ventilator.

Op basis van de bezetting in het klaslokaal wordt het benodigde ventilatiedebiet bepaald. De waarden worden afgeleid uit de norm NBN EN 13779 [72] (Tabel 22). Deze norm onderscheidt vier klassen van binnenluchtkwaliteit, de classificatie gebeurt op basis van de hoeveelheid luchtverontreiniging ten gevolge van menselijke bezetting. Aan de hand van de luchtverontreiniging kan het vereiste ventilatievoud opgesteld worden. Krachtens de Vlaamse en Brusselse energieprestatieregelgeving (EPB) mag het ontwerpdebiet voor

niet-residentiële gebouwen niet minder bedragen dan het minimum debiet dat overeenkomt met de binnenluchtklasse IDA 3 [73], [74]. Voor ruimtes bestemd voor menselijke bezetting wil dit zeggen dat er dus gerekend moet worden met een minimum ontwerpdebiet van 22 m^3/h/persoon. De regelgeving is bovendien van toepassing op iedereen binnenin de ruimte, zowel leerlingen en lesgevers dienen dus in rekening gebracht te worden. Het instrument voor Duurzame Scholenbouw vermeld daarentegen een minimum ontwerpdebiet van 29 m^3/h/persoon voor klaslokalen, echter moet er volgens de handleiding eerder gestreefd worden naar de binnenluchtklasse IDA 2 [45]. In de outputspecificaties voor DBFM-projecten wordt eveneens een minimumkwaliteit IDA 2 voorgeschreven [75]. De ondergrens van het ventilatiedebiet bedraagt in dit geval 36 m^3/h/persoon. Teneinde een gezond binnenmilieu te verwezenlijken, zal deze waarde gehanteerd worden bij het opstellen van het ventilatiemodel voor de oververhittingssimulaties. Doordat er tijdens de bezettingsperiode in totaal 26 personen aanwezig zijn, wordt het ventilatiedebiet gedimensioneerd op 936 m^3/h.

Klasse	**Luchtkwaliteit**	**Δ CO_2 Binnen – Buiten**	**Verse lucht**
		(ppm)	(m^3/h p. p.)
IDA 1	Hoog	< 400	> 54
IDA 2	Matig	400 - 600	36 – 54
IDA 3	Aanvaardbaar	600 - 1000	22 – 36
IDA 4	Laag	> 1000	< 22

Tabel 23: Classificatie binnenluchtkwaliteit

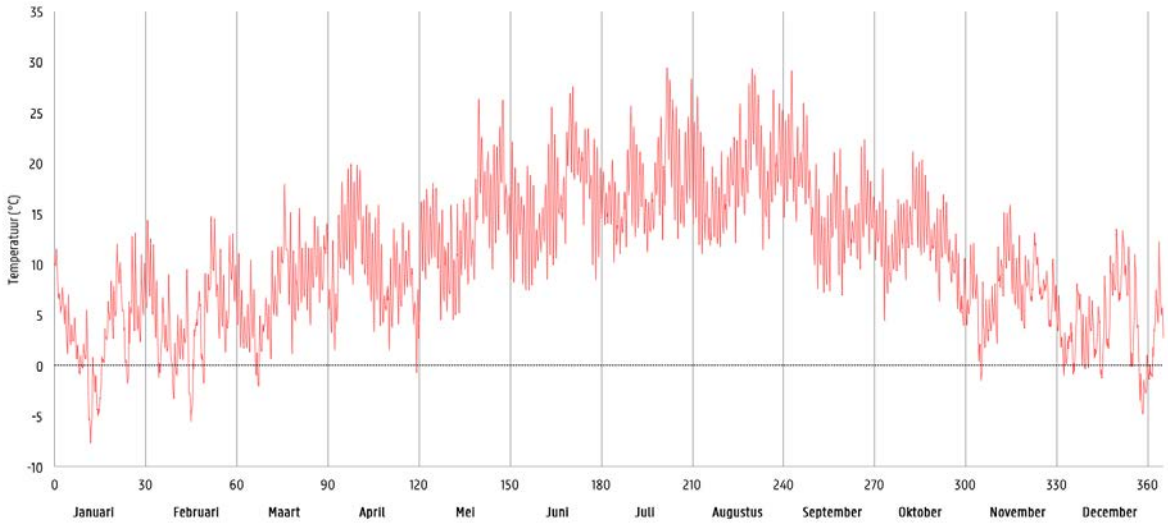
De oververhittingssimulaties zullen hoofdzakelijk van belang zijn gedurende de warmere maanden. Gedurende deze periodes zal een ventilatiesysteem met warmteterugwinning bijgevolg niet gewenst zijn. Het rendement van de bypass wordt daarom ingesteld op 0,00001. Op deze manier zal er geen warmte gerecupereerd worden en wordt de frisse buitenlucht rechtstreeks toegevoerd naar het klaslokaal. De 'ideale bypass' zal er dus voor zorgen dat er tijdens warme zomerdagen een lager risico heerst op oververhitting. In werkelijkheid kan dit verwezenlijkt worden door gebruik te maken van een automatische zomerbypass.

2.2.1.4. Verwarming

De kans op oververhitting zal zich voornamelijk voordoen buiten het verwarmingsseizoen, bijgevolg wordt de ruimteverwarming in het simulatiemodel uitgeschakeld.

2.2.1.5. Locatie en klimaat

In de 'SimInfoManager' wordt een TMY3-klimaatbestand van Ukkel ingevoerd. Het bestand bevat de breedtegraad, lengtegraad en de tijdzone van Ukkel. Het ingevoerde bestand is een reëel buitenklimaat, er wordt rekening gehouden met de opgemeten buitentemperatuur, de reële stand van de zon, de gemeten directe en indirecte straling, … Het typejaar is representatief voor het Belgische klimaat. Het wordt gekenmerkt door een grote afwisseling tussen warme en koude dagen, tijdens de zomermaanden worden enkele temperaturen boven de 25°C vastgesteld.



Afbeelding 45: Weerprofiel Ukkel

2.2.2. Klaslokaal in gerenoveerde school

Als referentiemodel voor het klaslokaal in een gerenoveerde school maken we gebruik van het model uit de daglichtsimulaties waarbij de binnenzijde van de buitenwand geïsoleerd wordt en er een isolerende beglazing geplaatst wordt. Het simulatiemodel dat opgesteld wordt, is in grote mate identiek aan het opgestelde klasmodel voor nieuwbouwscholen. De instellingen voor de bezetting, de ventilatie, de verwarming en het klimaat blijven behouden. Er worden uitsluitend enkele aanpassingen gedaan aan het structuurmodel, deze worden hieronder besproken.

2.2.2.1. Ruimte en gebouwschil

Bij het klasmodel waarbij de impact van een renovatie in beeld gebracht wordt, wordt er gefocust op schoolgebouwen uit de negentiende en begin twintigste eeuw. Hierbij wordt verondersteld dat de buitenwand bestaat uit een massieve bakstenen muur van 30 cm, er is in dit geval geen spouw aanwezig. Om een energiezuinige leeromgeving te realiseren met een aangenaam thermisch comfort wordt een isolatiepakket van 10 cm aangebracht langs de binnenzijde van de buitengevel. De wand wordt vervolgens afgewerkt door middel van gipsplaten. Naast het aanbrengen van isolatie wordt het energieverbruik ook gereduceerd door het plaatsen van nieuwe ramen. Hierbij wordt bijzondere aandacht besteed aan de isolatiewaarde van zowel de beglazing als van het raamprofiel. Er wordt een dubbele beglazing met argonvulling geselecteerd, op deze manier worden de isolatieprestaties verhoogd. De U-waarde van de beglazing en het raamprofiel bedragen respectievelijk 1 W/m^2K en 1,8 W/m^2K. Verder beschikt de beglazing over een ZTA-waarde van 50,8%. Uit tabel 3 kan afgeleid worden dat de glassamenstelling overeenstemt met een LTA-waarde van ongeveer 70%. Deze LTA-waarde werd ook gehanteerd bij de daglichtsimulaties van het klaslokaal. De binnenwanden, vloer en plafond zijn op dezelfde wijze opgebouwd als bij het klasmodel in nieuwbouwscholen.

Component	Samenstelling	Dikte	λ-waarde	Soortelijke warmte	Dichtheid
		(m)	(W/mK)	(J/kgK)	(kg/m^3)
Buitenwand	Baksteen	0,30	1,10	840	1850
	Minerale wol	0,10	0,036	1030	110
	Gipsplaat	0,012	0,60	840	975
Binnenwand	Pleisterlaag	0,01	0,60	840	975
	Baksteen	0,10	1,10	840	1850
	Pleisterlaag	0,01	0,60	840	975
Vloer/plafond	Tegelafwerking	0,02	1,40	1000	2100
	Dekvloer	0,04	0,60	860	1100
	Akoestische isolatie (PUR)	0,02	0,02	1470	30
	Betonnen vloerplaat	0,20	1,70	920	2400
	Pleisterlaag	0,01	0,60	840	975
Component	**Samenstelling**		**U-waarde**		**ZTA-waarde**
			(W/m^{2}K)		(%)
Raam	Beglazing 4-15-4		1,0		50,8
	Profiel		1,8		-

Tabel 24: Constructiesamenstelling van de componenten met bijhorende eigenschappen (gerenoveerde school)

2.3. Simulatieparameters

2.3.1. Tijdstip

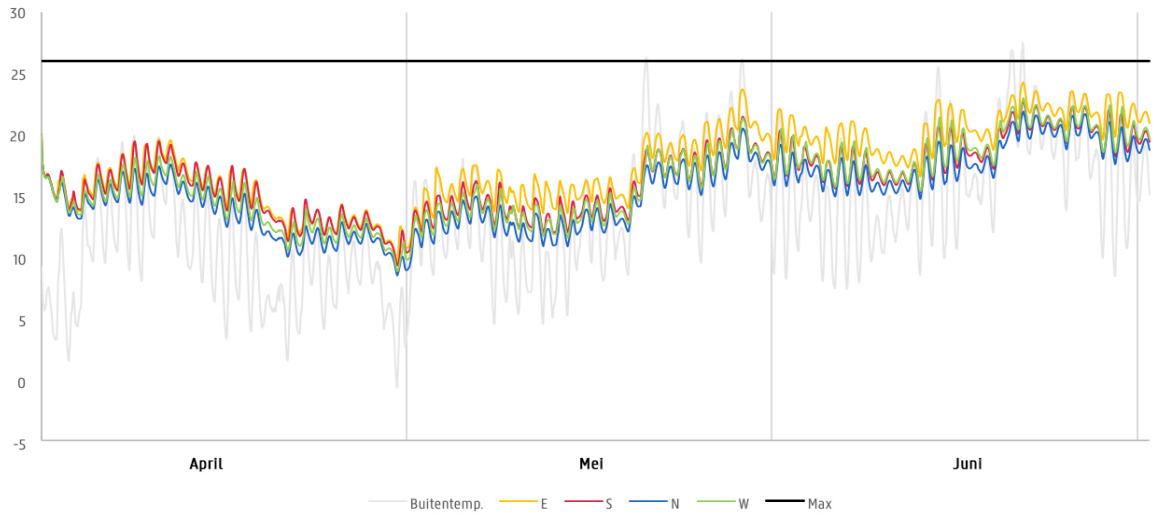
Het zomercomfort dient geëvalueerd te worden tijdens de maanden waarin de hoogste temperaturen terug te vinden zijn. Omdat er tijdens de maanden juli en augustus geen bezetting is worden deze maanden buiten beschouwing gelaten. De maanden mei en juni zijn bijgevolg de voornaamste maanden om het risico op oververhitting na te gaan. Desalniettemin worden er de laatste jaren steeds vaker hoge temperaturen waargenomen tijdens april en september, de septembermaand wordt voor deze studie echter buiten beschouwing gelaten De oververhittingssimulaties zullen daarom uitgevoerd worden vanaf de maand april tot en met de maand juni. Tijdens deze periode is er een totale bezettingstijd van 585 uren.

3. Bespreking oververhittingssimulaties en hun resultaten

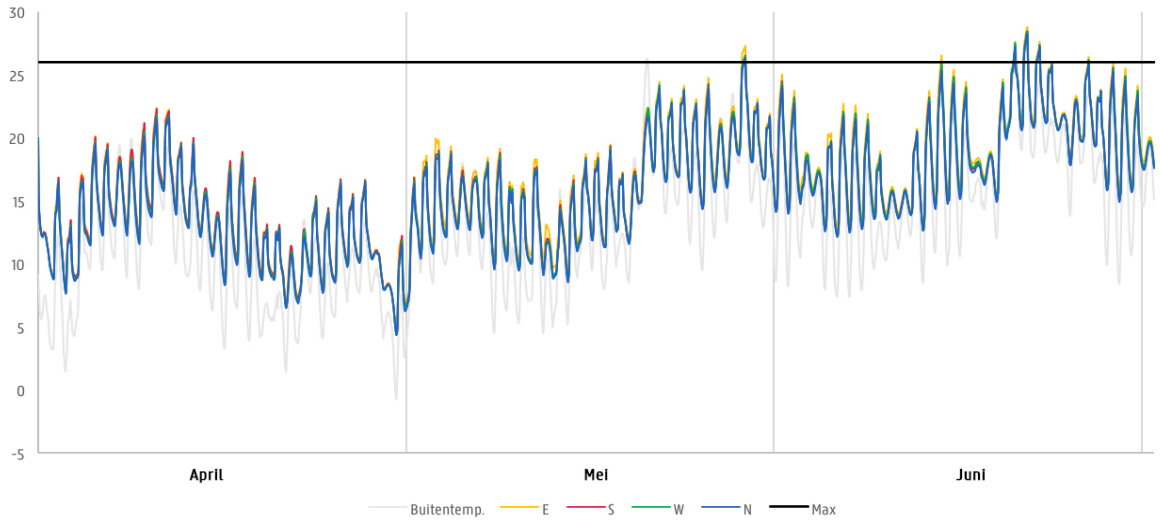
3.1. Klaslokaal in nieuwbouwschool

3.1.1. Referentiemodel

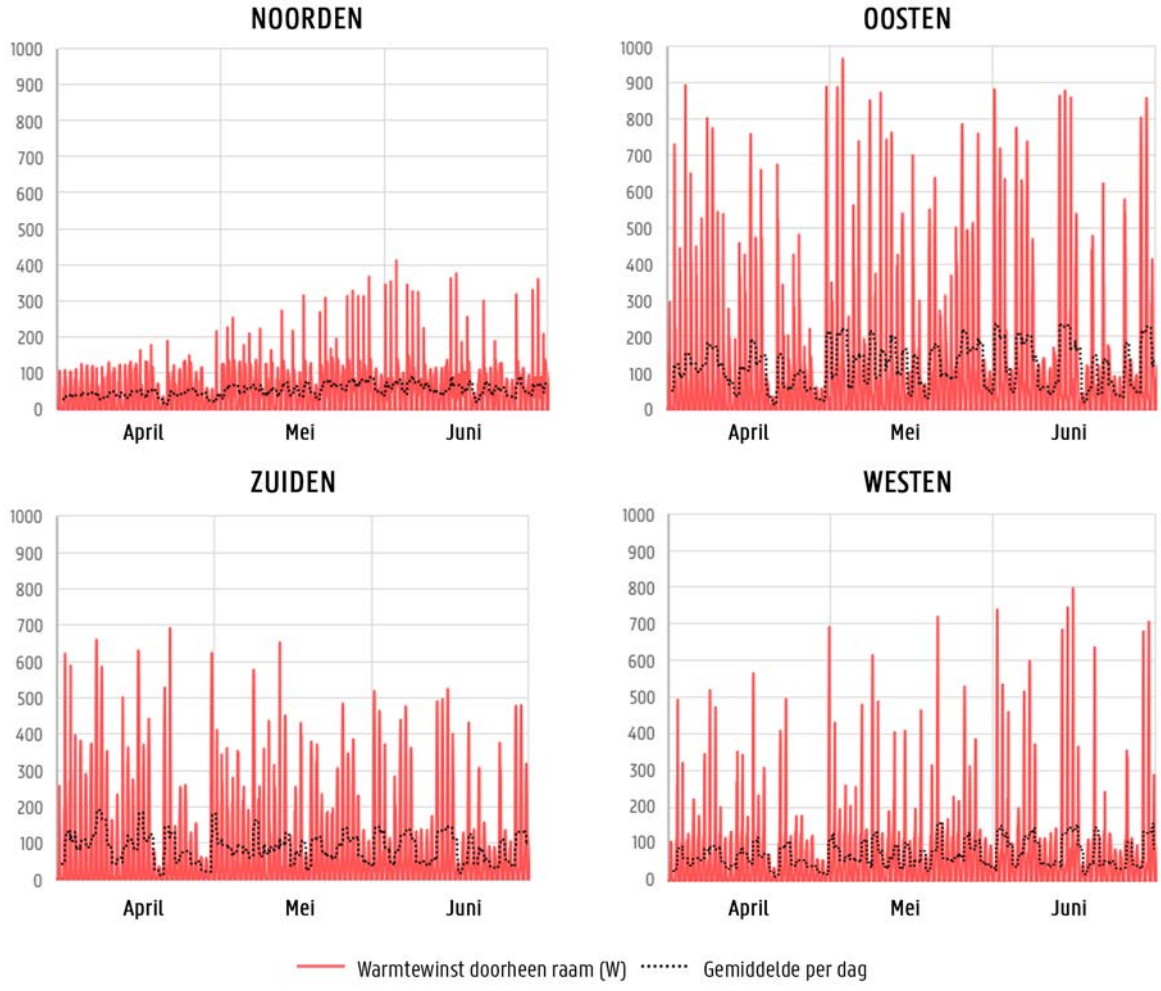
In de eerste plaats wordt het zomercomfort van het referentiemodel gesimuleerd. Er wordt zowel een simulatie uitgevoerd met (Afbeelding 47) als zonder bezetting (Afbeelding 48). Op deze manier kunnen er duidelijkere conclusies getrokken worden. De simulatie zonder bezetting houdt rekening met een aangepast ventilatiedebiet dat gedimensioneerd wordt op basis van de oppervlakte van het lokaal. In beide gevallen kan er duidelijk opgemerkt worden dat de binnentemperatuur in het klaslokaal steeds fluctueert in functie van de buitentemperatuur. De buitentemperatuur zal derhalve de belangrijkste factor zijn in het bepalen of er sprake is van oververhitting. Daarnaast kan er op basis van een vergelijking tussen de beide simulaties vastgesteld worden dat de bezetting en de interne warmtewinsten die hiermee samengaan een aanzienlijke impact hebben op het binnenklimaat van klaslokalen. De simulatie zonder bezetting toont immers aan dat de binnentemperaturen de maximumgrens van 26°C in geen elk geval overschrijden, de temperaturen liggen daarentegen nog behoorlijk onder deze bovengrens. In het geval dat er bezetting aanwezig is zien we sterke pieken tevoorschijn komen die uitschieten boven de maximumtemperatuur. Verder tonen de resultaten van de simulatie zonder bezetting aan dat er belangrijke verschillen zijn tussen de vier oriëntaties. Dit kan verklaard worden aan de hand van de verschillende warmtewinsten die de ramen opvangen naargelang hun oriëntatie (Afbeelding 48). Deze warmtewinsten worden veroorzaakt door zowel de directe als diffuse stralingen van de zon. De noordelijke oriëntatie levert, zoals verwacht, steeds de laagste temperaturen aangezien directe zonnestralen vrijwel ontbreken. De grootste warmtewinsten worden teruggevonden bij de oostelijke oriëntatie, door de lagere stand van de zon bereiken de stralingen immers makkelijker het beglazingsoppervlak. Dit is ook het geval voor de westelijke oriëntatie, de warmtewinsten zijn hier echter minder uitgesproken. Voor de zuidelijke oriëntatie kan er opgemerkt worden dat de impact op de binnentemperaturen het grootst is in de maand april en in de volgende maanden steeds meer afneemt. Dit is logisch aangezien de zon in juni op zijn hoogste punt staat, de instraling zal bijgevolg beperkter zijn.



Afbeelding 46: Binnentemperatuur referentiemodel zonder bezetting

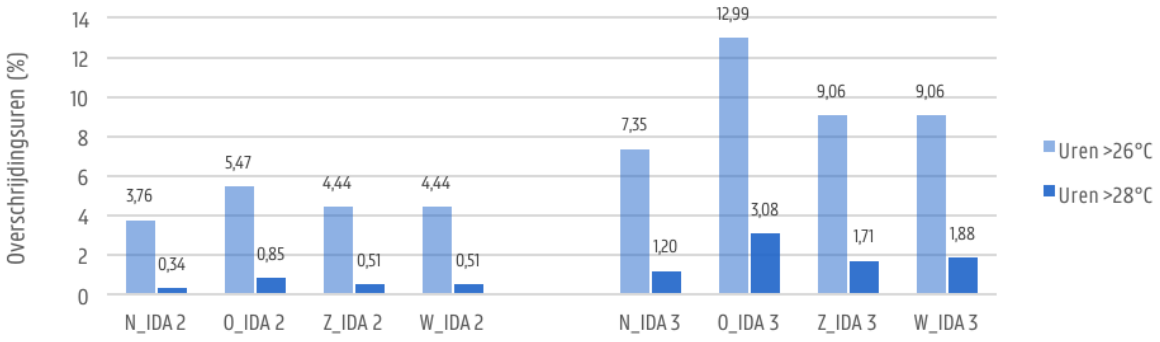


Afbeelding 47: Binnentemperatuur referentiemodel met bezetting



Afbeelding 48: Warmtewinst op één raam (4,2m²)

Bij analyse van de binnentemperatuur in het referentiemodel met de bezetting is het contrast tussen de verschillende oriëntaties moeilijker te onderscheiden. De pieken leiden evenwel tot dezelfde bevindingen als het model zonder bezetting; in de aprilmaand bezorgen openingen met een zuidelijke oriëntatie voor de hoogste binnentemperaturen terwijl in de maanden mei en juni de oostelijke oriëntatie doorslaggevend is. Bij evaluatie van het zomercomfort aan de hand van het aantal overschrijdingsuren kan het verschil in oriëntatie duidelijker vastgesteld worden (Afbeelding 49). In eerste instantie kan er opgemerkt worden dat in elke configuratie binnentemperaturen boven de 26°C gemeten worden. Daarnaast kan er vastgesteld worden dat de binnentemperatuur bij geen enkele oriëntatie de grens van 28°C overschrijdt voor meer dan 1% van de gebruikerstijd. De noordelijke, zuidelijke en westelijke oriëntatie blijven bovendien ook onder de overschrijdingsgrens van 5%. De oostelijke oriëntatie leidt daarentegen tot binnentemperaturen die de maximumgrens van 26°C voor een te groot deel van de bezettingstijd overschrijden. Het creëren van een klaslokaal dat beschikt over een comfortabel binnencomfort met oostgerichte openingen zal bijgevolg niet evident zijn en wordt indien mogelijk beter uitgesloten. Daarenboven kan er ook besloten worden dat de richtlijn die een WWR van 30% voorschrijft niet zomaar toegepast kan worden. Het aanvaardbare glaspercentage zal op vlak van oververhitting immers steeds bepaald worden door de oriëntatie en de eigenschappen van de beglazing.



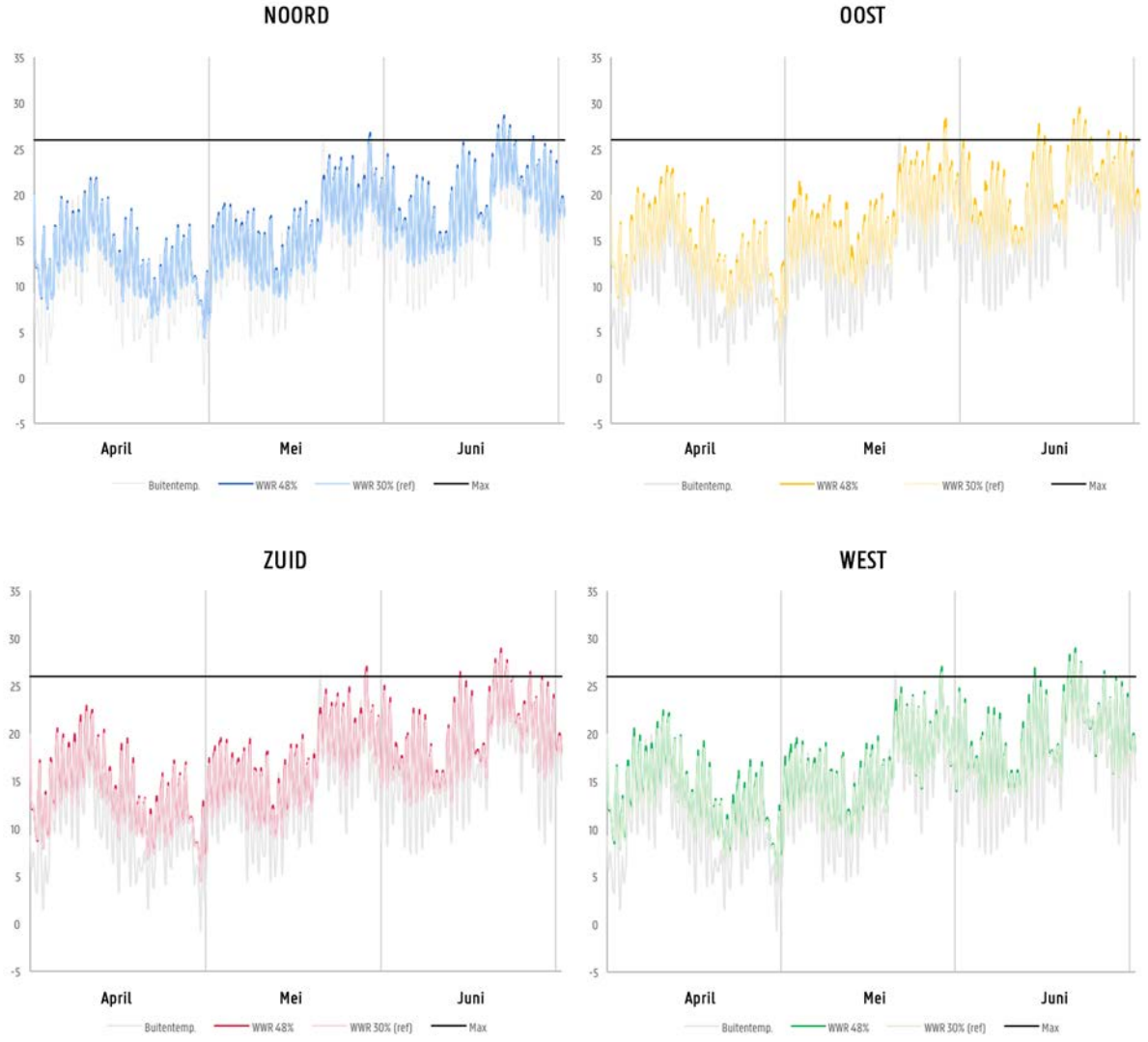
Afbeelding 49: Evaluatie zomercomfort in referentiemodel

De oriëntatie van gevelopeningen in klaslokalen is dus wel degelijk van belang, maar heeft een minder grote invloed in vergelijking met de geproduceerde warmte door de bezetting. In lage-energie schoolgebouwen zal het bijgevolg voornamelijk van belang zijn om de interne warmtewinsten onder controle te houden. Dit kan in de eerste plaats door voldoende ventilatie te voorzien, een ventilatiedebiet overeenkomstig met IDA 3 zal doorgaans ontoereikend zijn. De basisventilatie kan daarnaast ook aangevuld worden met enkele opengaande ramen zodat natuurlijke ventilatie kan voorzien worden tijdens piekmomenten of als nachtventilatie. Belangrijk hierbij is dat de opengaande ramen luchtdicht kunnen afgesloten worden en dat er voldoende aandacht geschonken wordt aan een goede doorstroom van de verse buitenlucht. Het voorzien van opengaande ramen wordt bovendien ook aangeraden vanuit AGION [58]. De luchtkwaliteit en -temperatuur kunnen ook geoptimaliseerd worden door voorspoeling te voorzien, hierbij wordt het volledige schoolgebouw na een nacht, weekend of vakantie door een aantal luchtwisselingen voorgespoeld zodat het luchtvolume voor ingebruikname volledig ververst is. De temperatuurpieken, die te wijten zijn aan continue wisselende bezetting, kunnen daarnaast ook deels afgevlakt worden door voldoende thermische massa te voorzien. Schoolgebouwen met een lichte constructie worden dus beter vermeden.

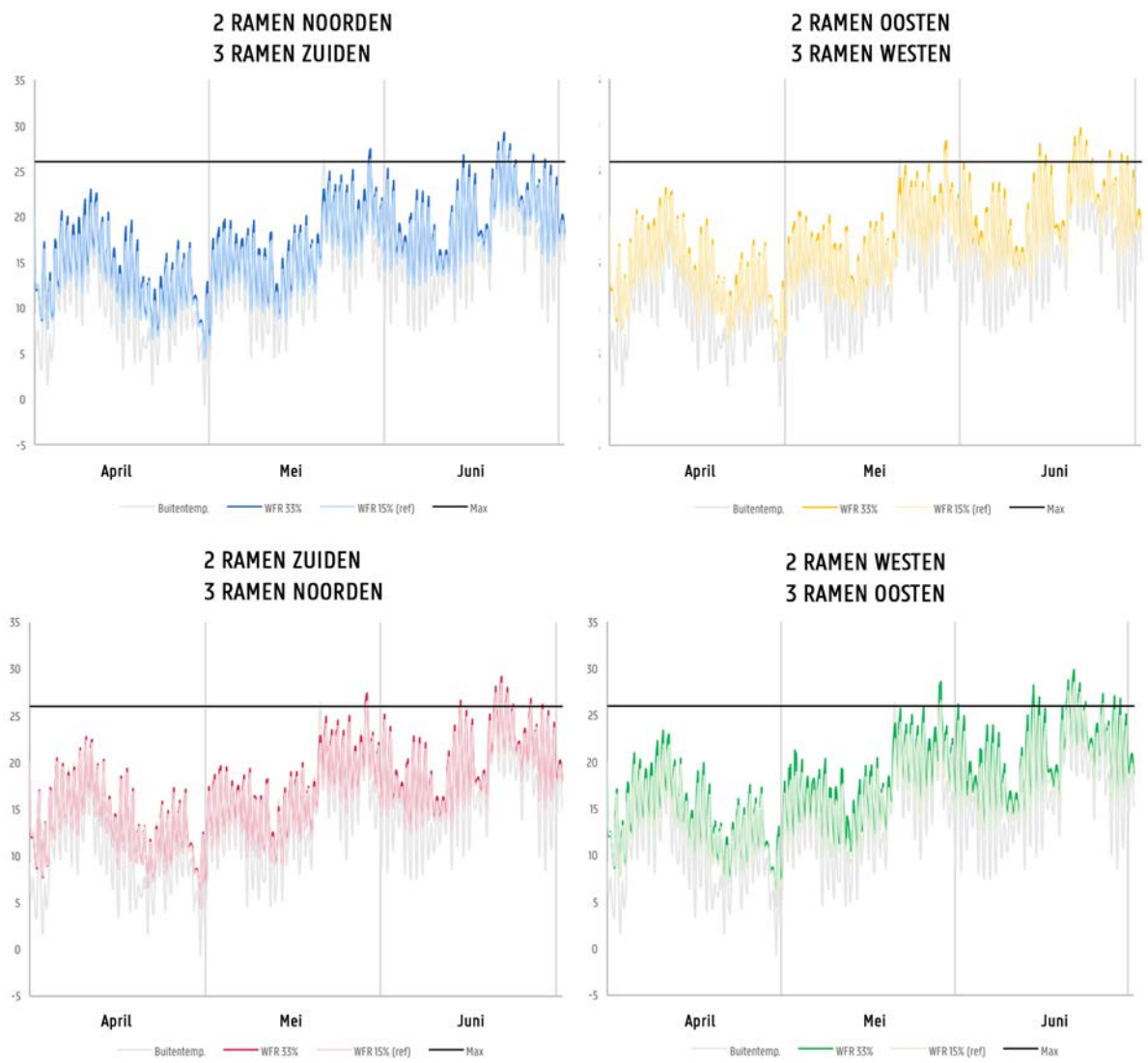
3.1.2. Groter glaspercentage

Vanuit het perspectief van de daglichtkwaliteit bieden grote gevelopeningen vele voordelen, tijdens de zomermaanden zijn ze echter minder gunstig voor het binnenklimaat. Het referentiemodel heeft een WFR van 15%, er wordt nagegaan hoe groot de impact is op het oververhittingsrisico ingeval dit glaspercentage verhoogd wordt. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van twee klasmodellen die reeds opgesteld werden in deel 3. Het betreft hier het model besproken onder punt 3.1.2, dat beschikt over zes gelijke ramen van 2 op 1,15 m en het model besproken onder punt 3.3 waarbij een gemiddelde daglichtkwaliteit kon behaald worden door aan weerszijden van het lokaal openingen te voorzien. De klaslokalen hebben respectievelijk een WFR van 24% en 33%.

De resultaten tonen aan dat naargelang de grootte van het glaspercentage de pieken geleidelijk toenemen (Afbeelding 50 en 51). De toename is voor beide modellen het meest uitgesproken bij de oost-oriëntatie. De stijging van de binnentemperaturen, in het bijzonder deze in het klaslokaal met een WFR van 24%, lijken evenwel heel miniem te zijn. Desondanks zullen de kleine bedragen toch beduidend zijn voor het aantal overschrijdingsuren aangezien de binnentemperaturen in het referentiemodel reeds dichtbij of boven de maximumgrens gelegen zijn.

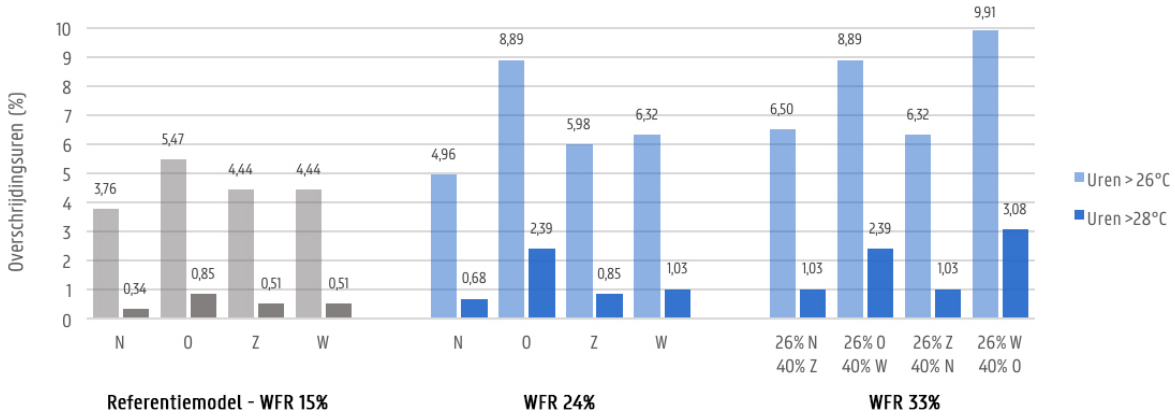


Afbeelding 50: Binnentemperatuur klasmodel met WFR 24%



Afbeelding 51: Binnentemperatuur klasmodel met WFR 33%

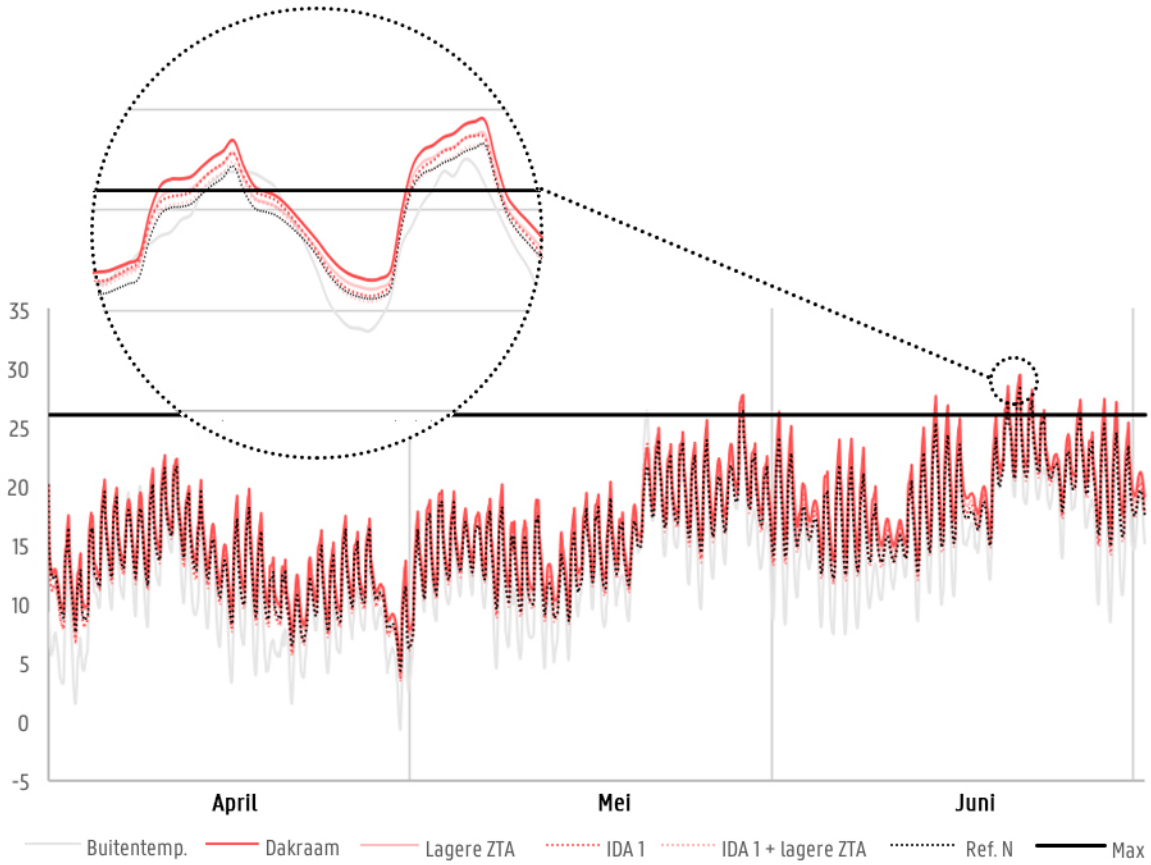
Bij de evaluatie van het zomercomfort kan er in vergelijking met het referentiemodel een aanzienlijke stijging van het aantal overschrijdingsuren opgemerkt worden (Afbeelding 52). Indien de beoordeling gebeurt op basis van de 5%-overschrijdingstijd voldoet enkel het klaslokaal met noordgerichte openingen en een WFR van 24% net aan het vereiste comfort. In de overige configuraties wordt de 5%-richtwaarde telkens overschreden. Grote glaspercentages zonder bijkomende maatregelen zullen tijdens warme dagen dan ook leiden tot onaangename binnenruimtes. Beglazing met een lagere ZTA-waarde kan een oplossing bieden om de warmtewinsten van de zon te beperken. Een reductie van de zonnetoetreding gaat in de meeste gevallen echter gepaard met een vermindering van de LTA-waarde. In dit geval zal men moeten afwegen of de grotere openingen in combinatie met de lagere ZTA-waarde nog voldoende voordeel opleveren voor de daglichttoetreding. Bij de zuidelijke oriëntatie kunnen de warmtewinsten anderzijds ook eenvoudig beheerst worden door een doeltreffende zonwering te voorzien, dit wordt verder meer in detail besproken. Een andere mogelijkheid om de binnentemperaturen te controleren is het voorzien van bijkomende ventilatie of door het aanwenden van een passief koelsysteem.



Afbeelding 52: Evaluatie zomercomfort in klasmodellen met groter glaspercentage

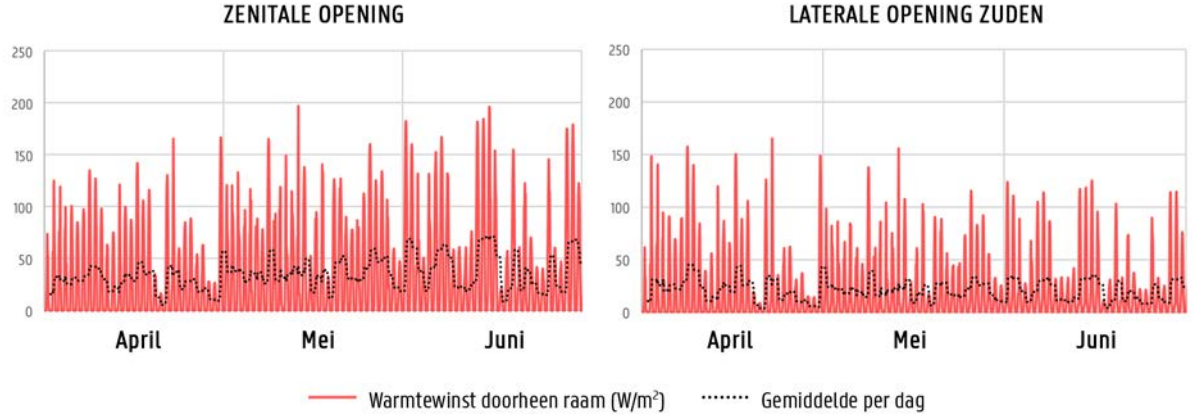
3.1.3. Openingen in het dakvlak

In het opzicht van de daglichtkwaliteit toonden de simulaties reeds aan dat het aanwenden van daklichten bijzondere voordelen kan leveren, met een beperkt glaspercentage kan er al een gemiddelde daglichtkwaliteit gerealiseerd worden. Er wordt nu nagegaan of er in een klaslokaal voorzien van zenitaal daglicht ook een comfortabel binnenklimaat verwezenlijkt kan worden. Het referentiemodel wordt aangepast overeenkomstig het klasmodel behandeld onder punt 3.3. Hierbij werd het klaslokaal uitgerust met twee daklichten die elk een afmeting hebben van 2 op 2,5 m, de SRR bedraagt bijgevolg 18%.



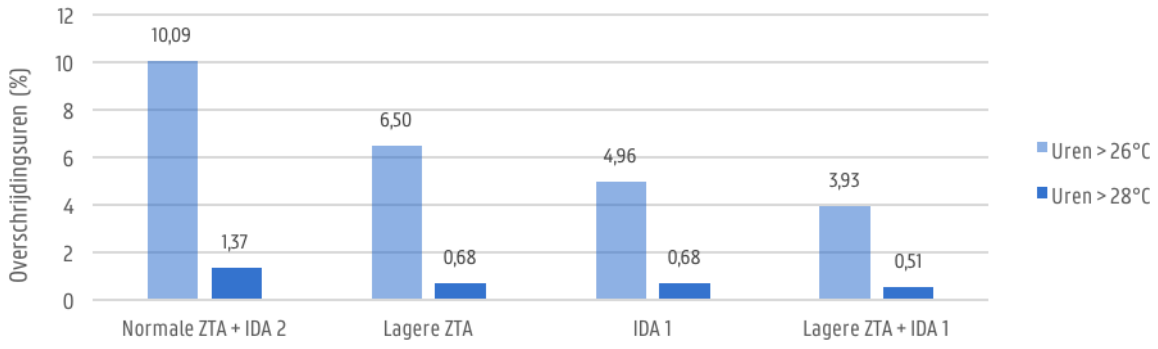
Afbeelding 53: Binnentemperatuur klaslokalen met daklichten

Bij het bestuderen van de resultaten van de dynamische simulatie zien we duidelijk dat meer pieken boven de maximumtemperatuur uitschieten. Wanneer de warmtewinsten van de transparante delen in rekening gebracht worden kan er duidelijk opgemerkt worden dat horizontale openingen veel grotere winsten meebrengen dan sommige laterale openingen (Afbeelding 54). De extra warmte is wenselijk in de winter, maar tijdens de maanden mei en juni leiden de te grote zonnewinsten op bepaalde momenten tot oververhitting.



Afbeelding 54: Vergelijking warmtewinst zenitale en laterale opening

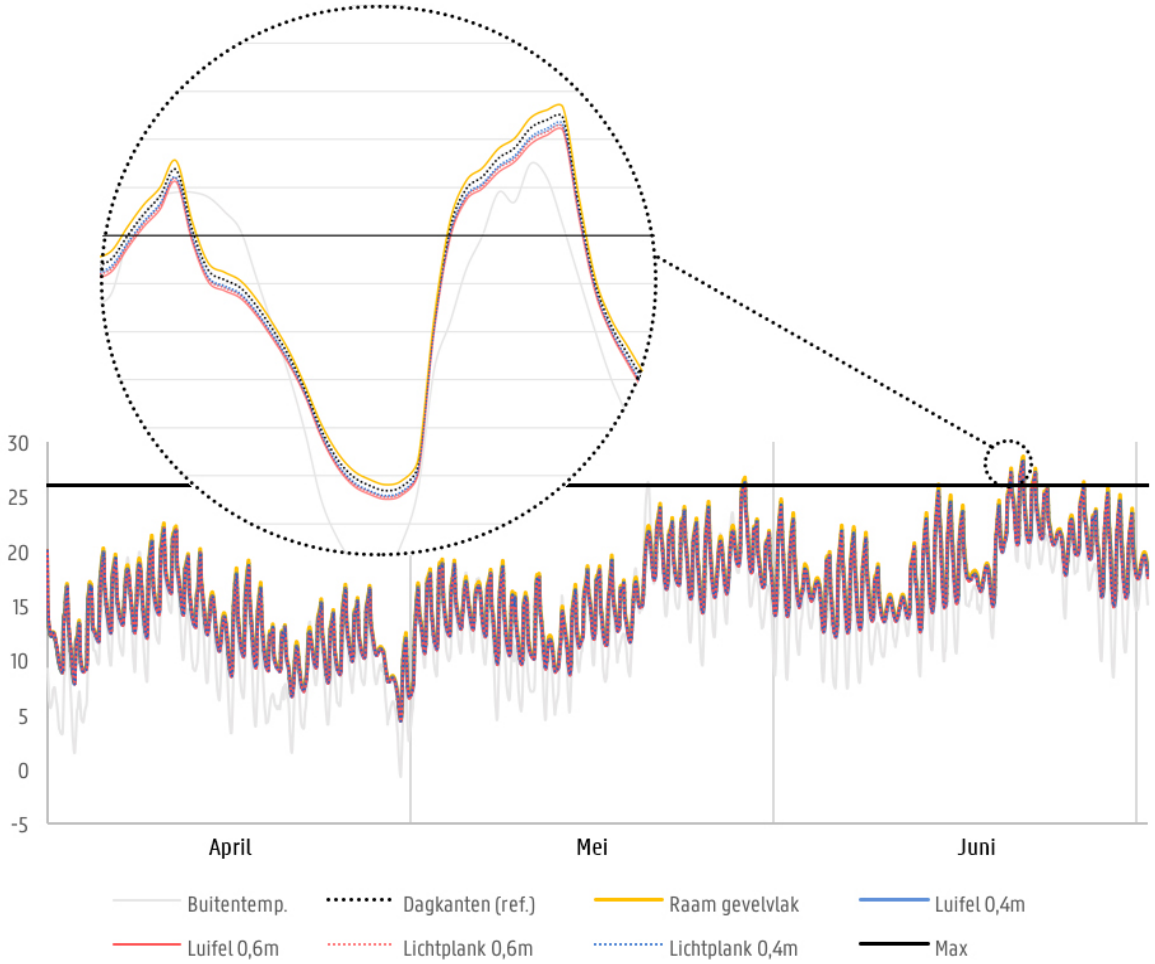
Zonder aangepaste maatregelen zal het klaslokaal met daklichten 10% van de bezettingstijd temperaturen bezitten boven de 26°C (Afbeelding 55). Uitgaande van een totale bezettingsperiode van 585 uur betekent dit dat er samengeteld meer dan zes volle schooldagen oververhitting is. Er zullen bijgevolg maatregelen moeten getroffen worden om het aantal overschrijdingsuren te reduceren. De meest toegepaste manier om oververhitting bij daklichten te voorkomen is het plaatsen van manueel bedienbare zonneschermen langs de buitenzijde. Het nadeel hiervan is echter dat ze het natuurlijke licht grotendeels of zelfs volledig blokkeren. Vanuit het standpunt van de daglichtkwaliteit is dit dan ook een optie die beter vermeden wordt. Het zomercomfort werd daarom geëvalueerd gebruikmakend van enkele maatregelen die de daglichtfactor minder negatief beïnvloeden. In eerste instantie wordt de zontoetreding gereduceerd door de ZTA-waarde van de beglazing van 75,5% te vervangen door een waarde van 40%. Aan de hand van een bijkomende test in de Dialux software kon er bovendien besloten worden dat met een lagere ZTA-waarde nog steeds een gemiddelde daglichtkwaliteit kan behaald worden. De overschrijdingsuren kunnen op deze manier voor een groot deel beperkt worden maar bedragen nog steeds meer dan 5% van de bezettingstijd. Anderzijds wordt een simulatie uitgevoerd waarbij het ventilatiedebiet aangepast wordt naar een luchtkwaliteit IDA 1. Op deze manier worden voornamelijk de interne warmtewinsten meer beheerst. De overschrijdingsuren kunnen op deze manier voor ongeveer 50% teruggeschroefd worden. Een hoger ventilatiedebiet zal daarentegen een hoger energieverbruik tot gevolg hebben, daartegenover staat wel dat het verbruik van kunstverlichting beperkt wordt aangezien er een hoge daglichtkwaliteit heerst. De combinatie van beide ingrepen kan bovendien leiden tot een verschil in overschrijdingsuren van ongeveer 60% ten opzichte van het klasmodel met daklichten zonder bijkomende maatregelen. De daklichten kunnen eventueel ook onder een bepaalde helling naar een zekere oriëntatie gericht worden. Op deze manier kan de instraling van de zon beter gecontroleerd worden. Er kan geconcludeerd worden dat het aanwenden van daklichten in klaslokalen een mogelijke optie is maar dat er bijkomende maatregelen moeten getroffen worden om het binnenklimaat te beheersen.



Afbeelding 55: Evaluatie zomercomfort in klasmodellen met daklichten

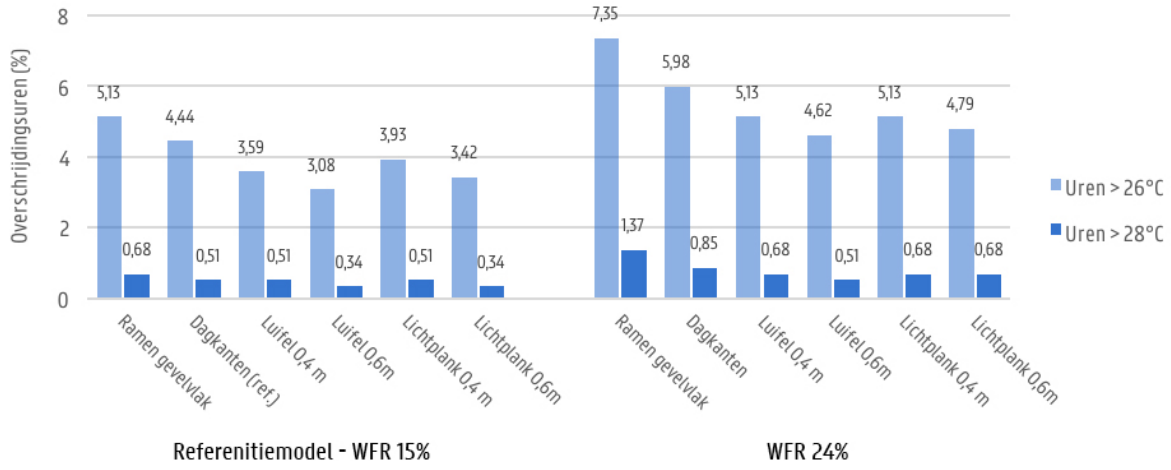
3.1.4. Toepassen van zonwering

Uit voorgaande resultaten kan reeds vastgesteld worden dat overmatige glaspercentages zonder efficiënte bescherming tegen zonnestraling voornamelijk in het zuiden, oosten en westen voor oververhittingsproblemen zorgen. Bij zuidgeoriënteerde openingen kan oververhitting evenwel makkelijk gecontroleerd worden. Aan de hand van een doeltreffende zonwering kan de instraling van de hoogstaande zomerzon voor een groot deel verminderd worden.



Afbeelding 56: Binnentemperatuur klasmodel met zonwering

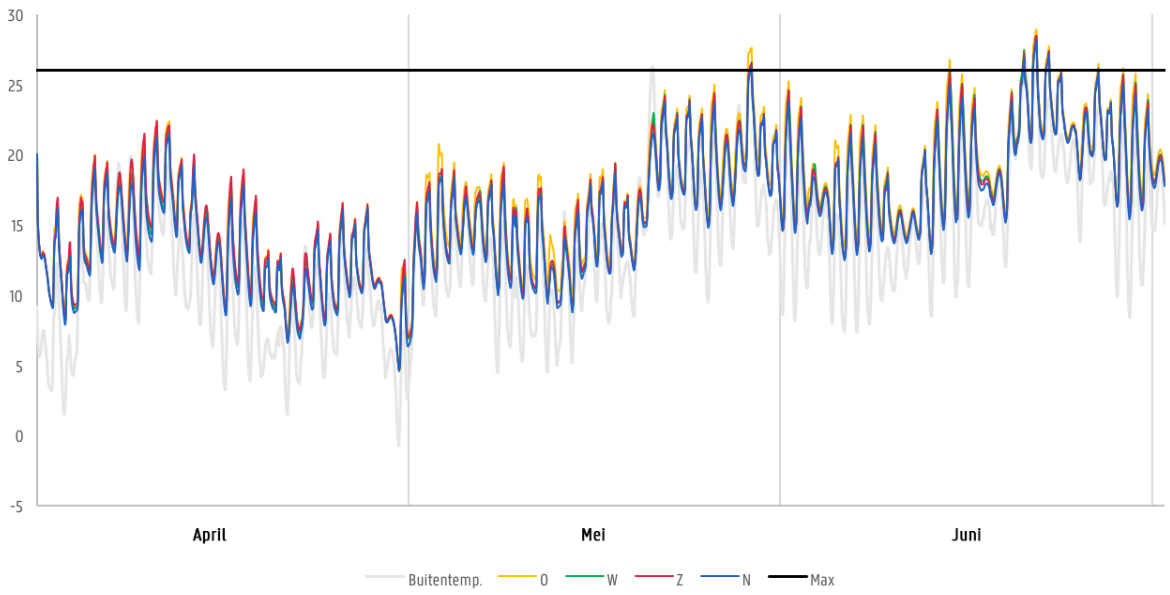
Er bestaat een grote verscheidenheid aan types zonwering, het is daarentegen belangrijk om een oplossing te kiezen waarbij de daglichttoetreding en de uitkijk naar buiten niet al te sterk beperkt worden. Omwille van deze reden worden er enkele simulaties uitgevoerd waarbij het referentiemodel uitgerust wordt met horizontale luifels en lichtplanken met variërende lengte. Daarnaast wordt er ook getest of er een verschil is met het referentiemodel wanneer de ramen in het gevelvlak geplaatst worden.
Net zoals bij de voorgaande resultaten zien we bij de grafiek die de binnentemperaturen weergeeft slechts subtiele verschillen (Afbeelding 56). Het aantal overschrijdingsuren geeft daarentegen een beter inzicht tussen de verschillende types zonwering (Afbeelding 57). Niettegenstaande het voordelig is voor de daglichttoetreding kan er in eerste instantie besloten worden dat ramen beter niet in het gevelvlak geplaatst worden. Er is immers een duidelijk verschil waar te nemen in vergelijking met het referentiemodel. Dagkanten bieden met andere woorden een niet te verwaarlozen bescherming tegen oververhitting. Verder kan er ook vastgesteld worden dat het verschil tussen het geleverde voordeel van horizontale luifels en lichtplanken beperkt is. Er moet echter wel opgemerkt worden dat de plaatsing van de lichtplank hierbij een cruciale rol speelt, hoe groter de openingen boven de lichtplank, hoe groter het verschil tussen de twee types zonwering zal zijn. Op voorwaarde dat lichtplanken voldoende bescherming kunnen bieden om oververhitting te voorkomen, kan er besloten worden dat ze de voorkeur genieten boven luifels aangezien ze gunstiger zijn voor de daglichttoetreding. Bij het hanteren van lichtplanken zal het bijgevolg essentieel zijn om te zoeken naar de meest optimale verhoudingen en afmetingen die zowel rekening houden met het daglicht- als het oververhittingsaspect.



Afbeelding 57: Evaluatie zomercomfort in klasmodellen met zonwering

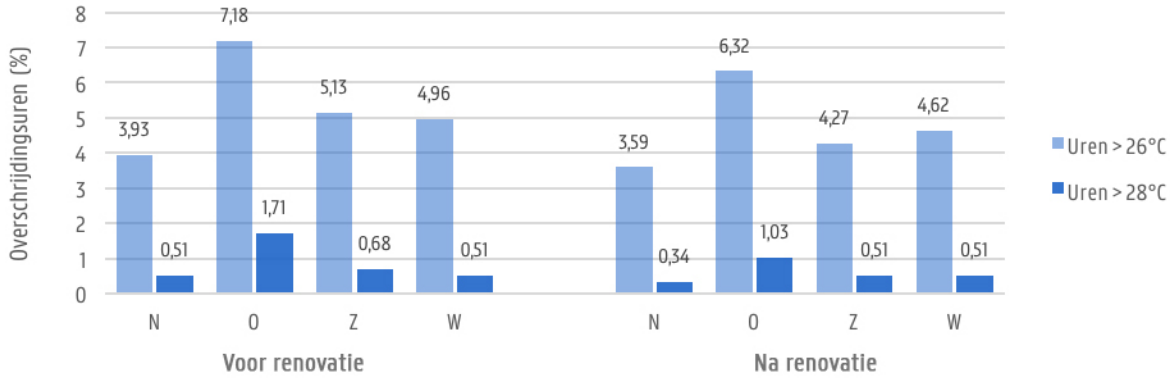
3.2. Klaslokaal in gerenoveerde school

Het model dat representatief is voor gerenoveerde klaslokalen heeft dezelfde WWR dan het referentiemodel voor nieuwbouwscholen. Wanneer de gesimuleerde binnentemperaturen van beide modellen met elkaar vergeleken worden, zijn er weinig verschillen op te merken. In beide klasmodellen worden de binnentemperaturen op exact dezelfde momenten overschreden. Oververhitting treedt bijgevolg niet enkel in passief of lage-energiescholen op. Daarentegen is er bij het gerenoveerde klaslokaal wel een iets duidelijker onderscheid waar te nemen tussen de verschillende oriëntaties (Afbeelding 58).



Afbeelding 58: Binnentemperatuur in gerenoveerd klaslokaal

Bij de evaluatie van het zomercomfort aan de hand van het aantal overschrijdingsuren valt op te merken dat het verschil tussen het klaslokaal voor en na de renovatie beperkt is (Afbeelding 59). Dit kan deels verklaard worden door de strijdige werking van de isolerende beglazing enerzijds en de aangebrachte isolatie langs de binnenzijde van de buitengevel anderzijds. Als gevolg van de lagere ZTA-waarde van de beglazing zullen de warmtewinsten van de zon immers gereduceerd worden, terwijl de geïsoleerde buitenwand er juist voor zal zorgen dat de warmtewinsten die binnenkamers geproduceerd worden moeilijker afgevoerd kunnen worden. Door de isolatie langs de binnenzijde te plaatsen is er bovendien minder thermische massa bereikbaar waarin de warmte kan opgeslagen worden. In principe is het dus voordeliger om langs de buitenzijde te isoleren. De resultaten tonen overigens aan dat er na de renovatie vooral problemen zullen optreden bij lokalen met oostgerichte gevelopeningen. Rekening houdend met zowel de daglichtkwaliteit als met het oververhittingsrisico kan er eventueel zonwerende beglazing voorzien worden. Screens zouden het klaslokaal immers te veel verduisteren. Bij het selecteren van de beglazing moet bijzondere aandacht besteed worden aan de spectrale samenstelling van het glas, glastinten die te veel afwijken van een neutrale beglazing moeten tenslotte vermeden worden.



Afbeelding 59: Evaluatie zomercomfort in gerenoveerd klaslokaal

3.3. Opmerkingen oververhittingssimulaties

Voor alle bovenstaande resultaten moet vermeld worden dat het gesimuleerde zomercomfort slechts een indicatie is. Het buitenklimaat, dat bepalend is voor het oververhittingsrisico, is immers steeds verschillend en de buitentemperaturen kunnen tijdens de zomermaanden van jaar tot jaar erg uiteenlopen. Het oververhittingsrisico kan dan wel beperkt worden maar de zekerheid om het volledig te voorkomen, zeker in het geval van aanhoudende hittegolven, is bij schoolgebouwen geen evidente opgave.

Daarnaast is het ook belangrijk om op te merken dat er geen specifiek opgelegde regels gelden die voorschrijven in welke periode het aantal overschrijdingsuren moeten bepaald worden. Dit maakt het moeilijker om conclusies te trekken ten opzichte van de aanbevolen waarden. Het in rekening brengen van extra tijd of het in mindering brengen van de periode kan immers resulteren in compleet verschillende uitkomsten. In dit onderzoek werd gekozen om het zomercomfort te evalueren voor de periode waarin oververhitting het meest te verwachten is.

Deel 5: Conclusie

Kinderen en jongeren brengen een groot deel van hun tijd door op de schoolbanken. Uit verschillende onderzoeken blijkt de kwaliteit van het binnenmilieu van klaslokalen cruciaal te zijn voor de gezondheid en het welzijn van de kinderen, daarnaast kan een gezonde omgeving ook de leerprestaties aanzienlijk verbeteren. De kwaliteit van het binnenmilieu wordt hoofdzakelijk bepaald door het thermisch binnenklimaat, de luchtkwaliteit en de hoeveelheid natuurlijk licht. Deze studie toont aan dat het creëren van een gezonde schoolomgeving, die rekening houdt met bovenstaande parameters, geen eenvoudige opgave is. Het ontwerpen van klaslokalen met een gezond binnenmilieu zal steeds een evenwichtsoefening zijn tussen het voorzien van voldoende daglicht en het creëren van een aanvaardbaar binnenklimaat.

In eerste instantie werd onderzoek gedaan naar de daglichtkwaliteit in klaslokalen, deze werd geëvalueerd aan de hand van de CEN daglichtnorm. De methode volgens de CEN daglichtnorm biedt een correcter evaluatiecriterium ten opzichte van een evaluatie op basis van de gemiddelde DF die vandaag nog te vaak toegepast wordt. De bekomen resultaten in deze studie tonen aan dat deze techniek onbetrouwbaar is.

Omwille van de vele voordelen die natuurlijk licht ons kan bieden moet er steeds gestreefd worden naar lichtrijke ruimtes waarbij daglicht de belangrijkste lichtbron vertegenwoordigt. Doorgaans wordt een goede daglichtverdeling bereikt door verschillende bronnen van daglicht aan te wenden, zoals een combinatie van dak- en gevelvenster. Dit zal bovendien het risico op verblinding en storende contrasten verminderen. Vanzelfsprekend is het in vele gevallen niet mogelijk om een verscheidenheid aan lichtbronnen te voorzien. Eenzijdig belichte klaslokalen blijken hierbij de grootste uitdaging te zijn, het behalen van een minimale daglichtkwaliteit is hier niet voor de hand liggend zonder dat overmatige glasoppervlakken toegepast worden. Derhalve werd onderzocht hoe daglicht in deze klaslokalen geoptimaliseerd kan worden. Kleine ingrepen zoals het plaatsen van diepe vensterbanken met een hoge reflectiefactor of het voorzien van lichte, heldere kleuren op de achterwand van het klaslokaal kunnen al een beduidend positief effect leveren. Daarnaast kan men de daglichttoetreding ook optimaliseren door de dagkanten van de openingen af te schuinen of door de openingen hoger te laten uitschieten dan het verlaagd plafond. De grootste verbetering wordt evenwel geleverd door het plaatsen van interne ramen, deze bieden uiteraard enkel voordeel wanneer er in de aangrenzende ruimte voldoende daglicht beschikbaar is. Bij eenzijdig belichte klaslokalen die zich aan de straatkant bevinden in schoolgebouwen met een stedelijke context blijken deze ingrepen evenwel niet voldoende. Het behalen van een minimale daglichtkwaliteit is voor klaslokalen op de gelijkvloerse en eerste verdieping in dit geval praktisch onhaalbaar. In nieuwbouwscholen worden de ruimtes die aan de straatzijde gelegen zijn bijgevolg beter benut voor functies die minder daglicht vereisen.

Anderzijds blijkt uit het onderzoek naar de daglichtkwaliteit ook dat energetische ingrepen en ingrepen ten voordele van het binnenklimaat een aanzienlijke impact hebben op de daglichttoetreding. Denk hierbij aan de toenemende dikte van buitenmuren het introduceren van sterk isolerende en zonwerende beglazingtypes of het plaatsen van zonwering. Het effect van deze ingrepen speelt bovendien een belangrijke rol bij de renovatie van klaslokalen aangezien aanpassingen hier over het algemeen moeilijker door te voeren zijn.
Het nadelige effect van dikkere wanden kan eenvoudig gecompenseerd worden door afgeschuinde dagkanten te voorzien. Het plaatsen van een performante beglazing gaat in de meeste gevallen gepaard met een lagere LTA-waarde, in dit geval moet men er zich van bewust zijn dat er eventueel grotere openingen zullen nodig zijn om een voldoende hoge daglichtkwaliteit te bereiken. Op basis van de uitgevoerde simulaties kan overigens

ook besloten worden dat zonwerende beglazingen in de mate van het mogelijke moeten vermeden worden, ze zorgen niet alleen voor een sterke reductie van de daglichtfactor maar veranderen ook de spectrale samenstelling van het daglicht. Zonwering in de vorm van screens of lamellen dienen eveneens vermeden te worden gezien deze het klaslokaal te veel verduisteren. Bescherming tegen de invallende zon kan anderzijds geboden worden door horizontale luifels of lichtplanken. Deze hebben immers een beperkte invloed op de daglichttoetreding en het uitzicht naar buiten.

Naast de daglichtsimulaties werd aanvullend het zomercomfort van de klaslokalen nauwkeuriger geanalyseerd. Warme zomerdagen resulteren in een reële kans op oververhitting. Door de hoge bezettingsgraad blijken de interne warmtewinsten de grootste invloed uit te oefenen op het binnenklimaat. Klaslokalen dienen daarom in de eerste plaats uitgerust te worden met een efficiënt ventilatiesysteem. Thermische massa kan eveneens een oplossing bieden. De oriëntatie van de openingen en het glaspercentage zijn ondergeschikt aan de interne warmtewinsten maar hun impact is desondanks niet verwaarloosbaar. Ten gevolge van de lage zonnestand hebben klaslokalen met oost- en westgerichte openingen het meest kans op oververhitting. Oververhitting bij zuidgeoriënteerde openingen kan makkelijk beheerst worden door het plaatsen van luifels of lichtplanken. Zenitale openingen leiden al met een beperkt glasoppervlak tot te hoge binnentemperaturen, speciale aandacht is vereist om een comfortabel binnenklimaat te realiseren. Er dient daarnaast benadrukt te worden dat het aanvaardbare glaspercentage steeds afhankelijk is van de oriëntatie en de eigenschappen van de beglazing. De betrouwbaarheid van richtlijnen die eenvoudigweg glaspercentages voorschrijven is derhalve betwistbaar. Dynamische simulaties bieden voor complexe omgevingen, zoals schoolgebouwen, een correcter resultaat.

Rekening houdend met zowel het daglicht- als het oververhittingsaspect genieten klaslokalen met noord- en zuidgeoriënteerde openingen de voorkeur. In deze situaties zijn de binnentemperaturen immers het makkelijkst te beheersen waardoor het mogelijk is om iets grote openingen te voorzien die op hun buurt gunstig zijn voor de daglichtkwaliteit. Voor klaslokalen met zuidgeoriënteerde openingen resulteert dit in het plaatsten van lichtplanken. In het ideale geval wordt het klaslokaal bovendien uitgerust met transparante gordijnen om een oplossing te bieden tegen verblinding en schittering. Verduisterende gordijnen zijn daarnaast gunstig voor bij het gebruik van projectoren. Klaslokalen met noordgerichte openingen vergen geen bijkomende maatregelen, deze bezorgen de ruimte te allen tijde een diffuus en zacht licht. Er dient echter wel opgemerkt te worden dat de ruimte op geen enkel moment direct zonlicht ontvangt, wat in de CEN daglichtnorm daarentegen wel aangeraden wordt.

De studie biedt een interessant inzicht in de daglichtkwaliteit van klaslokalen en verschaft ontwerprichtlijnen die aangewend kunnen worden tijdens het ontwerpproces. Bepaalde zaken eisen nog bijkomend onderzoek. Omwille van beperkingen in de software kon het effect van sommige ingrepen op de daglichtvoorziening immers niet gesimuleerd worden. Voorbeelden hiervan zijn; figuurglas, transparante gordijnen en screens met variërende openingsfactoren. Daarnaast biedt de software ook geen methode om de daglichtverblinding te evalueren, de klaslokalen konden bijgevolg op dit vlak niet getoetst worden aan de richtlijnen in de CEN daglichtnorm.

Bijlage 1: Resultaten daglichtsimulaties

Resultaten klaslokaal in nieuwbouwschool

Beschrijving test	LTA	Gem. DF	Min. DF	Max. DF	Gem/Min DF	Opp. DF 2%
	(%)	(%)	(%)	(%)	(-)	(%)
GEVELCONFIGURATIE OPGEBOUWD ZOALS IN HET VERLEDEN						
Basismodel	80,5	2,317	0,462	11,325	0,22	35,2
Horizontaal afgeschuinde dagkanten (35°)	80,5	2,359	0,469	11,178	0,21	35,9
Horizontaal afgeschuinde dagkanten (45°)	80,5	2,358	0,471	11,129	0,21	36
Horizontaal afgeschuinde dagkanten (55°)	80,5	2,361	0,483	11,109	0,21	36
Horizontaal afgeschuinde dagkanten (65°)	80,5	2,365	0,523	11,100	0,21	36
Verticaal afgeschuinde dagkant 30% (17°)	80,5	2,386	0,459	13,439	0,21	35
Verticaal afgeschuinde dagkant 60% (31°)	80,5	2,381	0,452	13,556	0,21	34,8
Verticaal afgeschuinde dagkant 100% (45°)	80,5	2,379	0,444	13,497	0,17	34,7
Afgeschuinde dagkanten buiten (35°)	80,5	2,373	0,483	12,258	0,21	35,8
Afgeschuinde dagkanten buiten (45°)	80,5	2,390	0,484	12,543	0,21	36,1
Afgeschuinde dagkanten buiten (55°)	80,5	2,400	0,488	12,723	0,21	36,1
Afgeschuinde dagkanten buiten (65°)	80,5	2,408	0,495	12,765	0,21	36,2
Buiten afgeschuinde bovenzijde 150% (56°)	80,5	2,441	0,483	11,766	0,21	36,7
Buiten afgeschuinde onderzijde 100% (45°)	80,5	2,314	0,458	11,316	0,22	35,1
Vrije hoogte 3,1 m	80,5	2,435	0,494	11,366	0,21	37,5
Vrije hoogte 3,2 m	80,5	2,536	0,504	11,903	0,20	39
Vrije hoogte 3,3 m	80,5	2,624	0,516	11,953	0,19	40,6
Vrije hoogte 3,4 m	80,5	2,705	0,528	12,015	0,19	42,3
Vrije hoogte 3,5 m	80,5	2,788	0,532	12,324	0,18	43,8
Vrije hoogte 3,6 m	80,5	2,859	0,541	12,402	0,17	45,3
Vrije hoogte 3,7 m	80,5	2,948	0,553	12,705	0,21	47,2
Vrije hoogte 3,8 m	80,5	3,023	0,574	12,750	0,20	48,8
Vrije hoogte 3,9 m	80,5	3,098	0,580	12,775	0,19	50,6
Vrije hoogte 4 m	80,5	3,160	0,604	12,765	0,19	52,1
GEVELCONFIGURATIE OP BASIS VAN UITZICHT						
Basismodel	80,5	3,415	0,807	11,981	0,24	55,6
Basismodel met driedubbele beglazing	68,2	2,898	0,695	10,069	0,24	48,8
Afgeschuinde dagkanten (45°)	80,5	3,679	0,857	11,732	0,24	58,6

Vensterbank binnen (35 cm)	80,5	3,365	0,841	10,033	0,24	57,2
Vensterbank binnen (60 cm)	80,5	2,755	0,273	7,766	0,11	59,7
Vensterbank binnen (0,6 m) + buiten (0,2 m)	80,5	2,755	0,273	7,766	0,11	59,7
Zonwerende beglazing type 1	68,2	2,888	0,697	10,048	0,24	48,7
Zonwerende beglazing type 2	58	2,464	0,598	8,577	0,24	42,6
Zonwerende beglazing type 3	51,7	2,202	0,542	7,651	0,23	38,5
Driedubbele zonwerende beglazing 1	59,5	2,530	0,619	8,784	0,24	43,6
Driedubbele zonwerende beglazing 2	42,7	1,831	0,458	6,336	0,28	32,3
Driedubbele zonwerende beglazing 3	41,1	1,763	0,443	6,096	0,22	31,1
Buitenzonwering – horizontale luifel	80,5	2522	0,668	8,693	0,28	43,3
Lichtplank 0,5 m op 2 m	80,5	2,875	0,806	9,773	0,28	53,8
Lichtplank 0,5 m op 2,3 m	80,5	3,001	0,775	10,664	0,27	51,4
Lichtplank 1 m op 2 m	80,5	2,284	0,722	7,552	0,30	44,8
Lichtplank 1 m op 2,3 m	80,5	2,443	0,680	8,754	0,29	40,7
Lichtplank 1 m op 2,3 m + afgeschuinde bovenzijde buitenmuur	80,5	2,512	0,690	8,890	0,28	42,8
Lichtplank 1 m op 2,3 m+ vensterbank 0,6 m	80,5	2,016	0,201	5,569	0,10	46,5
Lichtplank los van buitenmuur	80,5	2,509	0,671	8,769	0,28	42,9
Ramen langs buiten + ramen langs binnen	80,5	2,655	0,724	8,099	0,26	48,8
Buitenzonwering - lamellen	80,5	1,269	0,500	2,114	0,38	5,5
AANVULLENDE TEST – AFGESCHUINDE DAGKANTEN						
Klasmodel met 2 ramen	80,5	2,317	0,462	11,325	0,22	35,2
Klasmodel met 2 ramen en afgeschuinde dagkanten	80,5	2,358	0,471	11,129	0,21	36,0
Klasmodel met 3 ramen	80,5	1,947	0,398	12, 899	0,21	29,6
Klasmodel met 3 ramen en afgeschuinde dagkanten	80,5	2,045	0,444	12,781	0,2	31,1
Klasmodel met 4 openingen	80,5	2,182	0,479	12,362	0,23	35,1
Klasmodel met 4 openingen en afgeschuinde dagkanten	80,5	2,35	0,537	12,156	0,22	37,8
Klasmodel met 6 openingen	80,5	3,415	0,807	11,981	0,24	55,6
Klasmodel met 6 openingen en afgeschuinde dagkanten	80,5	3,679	0,857	11,732	0,24	58,6
GEVELCONFIGURATIE OP BASIS VAN UITZICHT IN STEDELIJKE OMGEVING						
Basismodel						
Straat 6 m (gelijkvloers)	80,5	0,640	0,046	4,717	0	11,4
Straat 6 m (verdieping 1)	80,5	1,671	0,114	8,660	0,06	28,2
Straat 6 m (verdieping 2)	80,5	2,994	0,446	11,589	0,13	47,5
Straat 9 m (gelijkvloers)	80,5	1,362	0,089	7,824	0,07	23,6
Straat 9 m (verdieping 1)	80,5	2,288	0,184	10,457	0,09	36,8
Straat 9 m (verdieping 2)	80,5	3,151	0,526	11,724	0,16	50,3

Straat 12 m (gelijkvloers)	80,5	1,862	0,122	9,467	0,05	30,6
Straat 12 m (verdieping 1)	80,5	2,672	0,275	11,266	0,11	42
Straat 12 m (verdieping 2)	80,5	3,246	0,589	11,786	0,19	52
Model met verschillende vrije hoogtes						
Straat 6 m (gelijkvloers)	80,5	0,793	0,060	5,152	0	14,6
Straat 6 m (verdieping 1)	80,5	2,117	0,156	9,245	0,10	35,4
Straat 6 m (verdieping 2)	80,5	2,432	0,283	10,674	0,13	37,9
Straat 9 m (gelijkvloers)	80,5	1,640	0,114	8,341	0,06	28,2
Straat 9 m (verdieping 1)	80,5	2,798	0,294	11,029	0,11	44,4
Straat 9 m (verdieping 2)	80,5	2,551	0,356	10,738	0,15	40
Straat 12 m (gelijkvloers)	80,5	2,205	0,161	9,900	0,09	36
Straat 12 m (verdieping 1)	80,5	3,180	0,437	11,775	0,13	50,3
Straat 12 m (verdieping 2)	80,5	2,623	0,400	10,774	0,15	41,2
Model met afgeschuinde dagkanten						
Straat 6 m (gelijkvloers)	80,5	0.689	0,045	4,651	0	12,3
Straat 6 m (verdieping 1)	80,5	1,772	0,112	8,505	0,06	28,9
Straat 6 m (verdieping 2)	80,5	3,147	0,450	11,420	0,13	48,3
Straat 9 m (gelijkvloers)	80,5	1,449	0,089	7,709	0,07	24,2
Straat 9 m (verdieping 1)	80,5	2,418	0,179	10,254	0,08	37,5
Straat 9 m (verdieping 2)	80,5	3,306	0,540	11,543	0,15	51,2
Straat 12 m (gelijkvloers)	80,5	1,977	0,121	9,313	0,05	31,3
Straat 12 m (verdieping 1)	80,5	2,817	0,272	11,043	0,11	42,9
Straat 12 m (verdieping 2)	80,5	3,399	0,601	11,587	0,18	52,8
Model met afgeschuinde dagkanten + tegenoverliggende gevel met hoge reflectiefactor						
Straat 6 m (gelijkvloers)	80,5	0,691	0,045	4,655	0	12,3
Straat 6 m (verdieping 1)	80,5	1,774	0,113	8,507	0,06	28,9
Straat 6 m (verdieping 2)	80,5	3,148	0,450	11,421	0,16	48,4
Straat 9 m (gelijkvloers)	80,5	1,449	0,089	7,710	0,07	24,2
Straat 9 m (verdieping 1)	80,5	2,419	0,180	10,254	0,08	37,5
Straat 9 m (verdieping 2)	80,5	3,306	0,540	11,545	0,15	51,2
Straat 12 m (gelijkvloers)	80,5	1,977	0,121	9,314	0,05	31,3
Straat 12 m (verdieping 1)	80,5	2,817	0,272	11,043	0,11	42,9
Straat 12 m (verdieping 2)	80,5	3,400	0,601	11,587	0,18	52,8
Model met trapsgewijze constructie en dakramen						
Straat 6 m (gelijkvloers)	80,5	1,562	0,109	7,177	0,06	26,1
Straat 6 m (verdieping 1)	80,5	2,879	0,195	12,348	0,07	37,6
Straat 6 m (verdieping 2)	80,5	3,050	0,479	11,261	0,17	47,8
Straat 9 m (gelijkvloers)	80,5	2,329	0,154	10,219	0,09	32,4
Straat 9 m (verdieping 1)	80,5	3,402	0,271	13,615	0,09	43,2

Straat 9 m (verdieping 2)	80,5	3,153	0,548	11,299	0,16	49,7
Straat 12 m (gelijkvloers)	80,5	2,857	0,192	11,866	0,07	37,1
Straat 12 m (verdieping 1)	80,5	3,721	0,360	14,143	0,11	47,2
Straat 12 m (verdieping 2)	80,5	3,218	0,588	11,317	0,19	50,8
Model met trapsgewijze constructie en doorlopende dakramen						
Straat 6 m (gelijkvloers)	80,5	2,611	0,170	10,081	0,08	36,2
Straat 6 m (verdieping 1)	80,5	4,634	0,405	15,406	0,09	56,6
Straat 6 m (verdieping 2)	80,5	3,055	0,482	11,278	0,16	47,9
Straat 9 m (gelijkvloers)	80,5	3,728	0,240	13,268	0,05	46,1
Straat 9 m (verdieping 1)	80,5	5,264	0,631	16,795	0,11	63,8
Straat 9 m (verdieping 2)	80,5	3,156	0,550	11,312	0,16	49,7
Straat 12 m (gelijkvloers)	80,5	4,424	0,308	14,808	0,07	52,9
Straat 12 m (verdieping 1)	80,5	5,610	0,788	17,224	0,14	68,3
Straat 12 m (verdieping 2)	80,5	3,221	0,586	11,339	0,19	50,9
GEVELCONFIGURATIE OP BASIS VAN UITZICHT (OPTIE 2)						
Basismodel	80,5	2,544	0,588	13,381	0,24	39,3
Ramen > verlaagd plafond	80,5	2,940	0,704	13,867	0,24	47,6
Afgeschuinde dagkanten	80,5	3,068	0,736	13,566	0,23	50,9
Witte kastenwand (50%)	80,5	3,150	0,781	13,606	0,26	52,6
Witte kastenwand (85%)	80,5	3,271	0,870	13,677	0,27	55,5
Driedubbele isolerende beglazing	68,2	2,772	0,747	11,588	0,25	45,8
Dubbele zonwerende beglazing type 1	68,2	2,769	0,748	11,575	0,25	45,7
Dubbele zonwerende beglazing type 2	58	2,362	0,665	9,853	0,29	38,3
Dubbele zonwerende beglazing type 3	51,7	2,107	0,564	8,780	0,29	33,7
Driedubbele zonwerende beglazing type 1	59,5	2,421	0,662	10,107	0,29	39,4
Driedubbele zonwerende beglazing type 2	42,7	1,747	0,465	7,284	0,29	27,3
Driedubbele zonwerende beglazing type 3	41,1	1,682	0,457	7,012	0,29	26,1
GEVELCONFIGURATIE OP BASIS VAN UITZICHT (OPTIE 2) – ANDERE INDELING						
Basismodel	80,5	2,506	0,725	13,147	0,28	33,6
Afgeschuinde dagkanten	80,5	2,269	0,970	7,857	0,43	36,4
Ramen in gevelvlak	80,5	2,329	1,037	7,342	0,43	39,4
Openingen 2 zijden (lateraal licht gang)	80,5/70	2,366	0,964	7,409	0,42	40,6
Openingen 2 zijden (lateraal licht gang)	80,5/100	2,412	1,007	7,447	0,42	41,6
Openingen 2 zijden (lateraal hoger raam)	80,5/70	2,487	1,054	7,567	0,44	42,9
Openingen 2 zijden (lateraal groter intern raam)	80,5/70	2,848	1,132	7,844	0,39	64,5
Openingen 2 zijden (lateraal groter intern raam)	80,5/85	3,004	1,210	7,972	0,40	69,7
Openingen 2 zijden (daklicht gang)	80,5/70	2,764	1,160	7,496	0,43	69,3

Resultaten klaslokaal in de negentiende-eeuwse school

Beschrijving test	LTA	Gem. DF	Min. DF	Max. DF	Gem/Min DF	Opp. DF 2%
	(%)	(%)	(%)	(%)	(-)	(%)
MODEL ZONDER CONTEXT						
Basismodel	90	3,069	0,107	10,050	0,03	56,7
Zonder afgeschuinde hoeken ruimte	90	3,030	0,427	9,789	0,13	56,5
Zonder afgeschuinde dagkanten	90	2,954	0,371	9,746	0,13	54,5
Isolatie binnenzijde buitenmuur	90	2,951	0,178	9,739	0,07	55,2
Isolerende dubbele beglazing	78	2,370	0,078	7,880	0,04	43,2
Isolerende dubbele beglazing	71,6	2,166	0,071	7,207	0,05	39,4
Isolerende dubbele beglazing	65,7	1,989	0,066	6,619	0,05	36,1
Isolerende driedubbele beglazing	68,2	2,062	0,068	6,863	0,05	37,5
Isolerende beglazing + isolatie binnenzijde buitenmuur	71,6	2,341	0,142	7,738	0,04	43,8
Vorige situatie + witte muren	71,6	2,864	0,328	8,204	0,10	60
Isolatie binnenzijde buitenmuur + voorzetraam	90 + 78	2,139	0	6,810	0	40,3
Isolatie binnenzijde buitenmuur + voorzetraam	90 + 71,6	1,958	0	6,294	0	36
Vorige situatie + witte muren	90 + 78	2,590	0,843	7,348	0,31	53,3
Vorige situatie + witte muren	90 + 71,6	2,369	0,795	6,818	0,33	46,6
MODEL MET LANDELIJKE CONTEXT						
Basismodel	90	2,932	0,390	9,594	0,14	54,5
Isolatie binnenzijde buitenmuur	90	2,869	0,143	9,286	0,03	54,2
Isolerende beglazing	71,6	2,096	0,280	6,891	0,14	38,6
Isolerende beglazing + isolatie binnenzijde buitenmuur	71,6	2,275	0,114	7,387	0,04	42,4
Vorige situatie + witte muren	71,6	2,790	0,114	7,865	0,04	58,7
Isolatie binnenzijde buitenmuur + voorzetraam	90 + 78	2,081	0	6,492	0	39,4
Isolatie binnenzijde buitenmuur + voorzetraam	90 + 71,6	1,908	0	5,845	0	36,1
Vorige situatie + witte muren	90 + 78	2,512	0	6,828	0	52,1
Vorige situatie + witte muren	90 + 71,6	2,298	0	6,247	0	45,3
MODEL MET STEDELIJKE CONTEXT						
Basismodel (gelijkvloers)	90	2,557	0,219	9,897	0,08	44,2
Basismodel (verdieping)	90	2,760	0,219	9,478	0,07	50,3
Isolatie binnenzijde buitenmuur (gelijkvloers)	90	2,468	0,439	9,617	0,16	43,5

Isolatie binnenzijde buitenmuur (verdieping)	90	2,691	0,408	9,123	0,15	**49,8**
Isolerende beglazing (gelijkvloers)	78	2,006	0,175	7,808	0,10	**35,8**
Isolerende beglazing (verdieping)	78	2,159	0,169	7,446	0,09	**41,3**
Isolerende beglazing (gelijkvloers)	71,6	1,833	0,160	7,144	0,11	**34**
Isolerende beglazing (verdieping)	71,6	1,972	0,152	6,814	0,10	**37,9**
Isolerende beglazing + isolatie binnenzijde buitenmuur (gelijkvloers)	78	2,141	0,282	8,340	0,14	**38,8**
Isolerende beglazing + isolatie binnenzijde buitenmuur (verdieping)	78	2,335	0,232	7,962	0,09	**44**
Isolerende beglazing + isolatie binnenzijde buitenmuur (gelijkvloers)	71,6	1,956	0,257	7,629	0,15	**36**
Isolerende beglazing + isolatie binnenzijde binnenmuren (verdieping)	71,6	2,133	0,213	7,282	0,10	**40,6**
Vorige situatie + witte muren (gelijkvloers)	78	2,438	0,642	8,607	0,25	**45**
Vorige situatie + witte muren (verdieping)	78	2,732	0,755	8,282	0,30	**54**
Vorige situatie + witte muren (gelijkvloers)	71,6	2,229	0,593	7,873	0,27	**40,9**
Vorige situatie + witte muren (verdieping)	71,6	2,500	0,714	7,577	0,28	**49**
Isolatie binnenzijde buitenmuur + voorzetraam (gelijkvloers)	90 + 78	1,787	0,352	6,782	0,22	**33,8**
Isolatie binnenzijde buitenmuur + voorzetraam (verdieping)	90 + 78	1,862	0,316	6,384	0,16	**36,8**
Isolatie binnenzijde buitenmuur + voorzetraam (gelijkvloers)	90 + 71,6	1,636	0,333	6,397	0,19	**31,4**
Isolatie binnenzijde buitenmuur + voorzetraam (verdieping)	90 + 71,6	1,706	0,303	5,890	0,18	**33,8**
Vorige situatie + witte muren (gelijkvloers)	90 + 78	2,004	0,408	6,848	0,20	**36,4**
Vorige situatie + witte muren (verdieping)	90 + 78	2,216	0,427	6,481	0,18	**43,9**
Vorige situatie + witte muren (gelijkvloers)	90 + 71,6	1,835	0,382	6,278	0,22	**34,6**
Vorige situatie + witte muren (verdieping)	90 + 71,6	2,025	0,399	5,959	0,20	**38,3**
Vorige situatie + witte koer (gelijkvloers)	90 + 78	2,003	0,407	6,837	0,20	**37,3**
Vorige situatie + witte koer (verdieping)	90 + 78	2,219	0,438	6,639	0,18	**43,9**

Bijlage 2: Lichtstudies

Afbeelding 60: Lichtstudie basis testmodel 2

Afbeelding 61: Lichtstudie testmodel 2 met horizontale luifel

Afbeelding 62: Lichtstudie testmodel 2 met lichtplank 0,5 m op 2 m

Afbeelding 63: Lichtstudie testmodel 2 met lichtplank 0,5 m op 2,3 m

Afbeelding 64: Lichtstudie testmodel 2 met lichtplank 1 m op 2 m

Afbeelding 65: Lichtstudie testmodel 2 met lichtplank 1 m op 2,3 m

Afbeelding 66: Lichtstudie testmodel 2 met lichtplank los van buitenmuur

Afbeelding 67: Lichtstudie testmodel 2 met lamellen aan de buitenzijde

Referenties

[1] R. J. Wurtman, "The Effects of Light on the Human Body," *Sci. Am.*, vol. 233, no. 1, pp. 68–79, 1975.

[2] J. M. Greeson *et al.*, "Action Spectrum for Melatonin Regulation in Humans: Evidence for a Novel Circadian Photoreceptor," *J. Neurosci.*, vol. 21, no. 16, pp. 6405–6412, 2001.

[3] J. Mardaljevic, M. Andersen, and J. Christoffersen, "A framework for predicting the non-visual effects of daylight - Part 2: photobiology- based model," *Light. Res. Technol.*, vol. 44, no. 1, pp. 37–53, 2012.

[4] A. Joarder, A. Price, and M. Mourshed, "Systematic study of the therapeutic impact of daylight associated with clinical recovery," *Proc. PhD Work. HaCIRIC's Int. Conf. 2009 Improv. Healthc. Infrastructures through Innov. HaCIRIC*, no. April, pp. 25–31, 2009.

[5] T. A. Wehr, D. Aeschbach, and W. C. Duncan Jr, "Evidence for a biological dawn and dusk in the human," *J. Physiol.*, vol. 535, no. 3, pp. 937–951, 2001.

[6] G. C. Sieck, "Functional genomics of sleep and circadian rhythms," *J. Appl. Physiol.*, vol. 92, no. 1, pp. 1–2, 2002.

[7] B. R. Birks, E. D. Chinoy, K. P. Wright, A. W. McHill, B. R. Griffin, and T. Rusterholz, "Entrainment of the Human Circadian Clock to the Natural Light-Dark Cycle," *Curr. Biol.*, vol. 23, no. 16, pp. 1554–1558, 2013.

[8] M. Boubekri, *Daylighting, Architecture and Health: Building Design Strategies*. Elsevier Ltd., 2008.

[9] K. Honma, S. Honma, M. Kohsaka, and N. Fukuda, "Seasonal variation in the human circadian rhythm: dissociation between sleep and temperature rhythm.," *Am. J. Physiol.*, vol. 262, no. 5 Pt 2, pp. R885-91, 1992.

[10] N. Shishegar and M. Boubekri, "Natural Light and Productivity: Analyzing the Impacts of Daylighting on Students' and Workers' Health and Alertness," in *International Journal of Advances in Chemical Engineering and Biological Sciences*, 2016, pp. 151–156.

[11] CIE, "ISO 8995. Lighting of indoor work places," 2002.

[12] ISO, "ISO 16817 Building environment design — Indoor environment — Design process for the visual environment," 2017.

[13] CEN, "NBN-EN 12464-1: Licht en verlichting - Werkplekverlichting - Deel 1: Binnenwerkplekken," 2003.

[14] CEN, "EN 17037. Daylight of buildings," 2018.

[15] L. Huang and J. Wu, "Effects of the splayed window type on daylighting and solar shading," *Build. Environ.*, vol. 81, pp. 436–447, 2014.

[16] K. Zagt, "Historische vensters isoleren," 2012.

[17] Verbond van de Glasindustrie, "Een andere kijk op beglazingen en hun functies," 2013.

[18] WTCB, "HR-glas: glas met hoog rendement," 1999.

[19] H. Bülow-hübe, "Energy-Efficient Window Systems in Buildings: Effects on Energy Use and Daylight in Buildings," 2001.

[20] P. Boyce, N. Eklund, S. Mangum, C. Saalfield, and L. Tang, "Minimum acceptable transmittance of glazing," *Light. Res. Technol.*, vol. 27, no. 3, pp. 145–152, Sep. 1995.

[21] H. Bülow-Hübe, "Subjective reactions to daylight in rooms: Effect of using low-emittance coatings on windows," *Light. Res. Technol.*, vol. 27, pp. 37–44, Mar. 1995.

[22] "CIE 13.3-1995: Method of Measuring and Specifying Colour Rendering Properties of Light Sources," Vienna: Commission Internationale de l'Eclairage, 1995.

[23] R. Dangol, T. Kruisselbrink, and A. Rosemann, “Effect of Window Glazing on Colour Quality of Transmitted Daylight,” *J. Daylighting*, vol. 4, no. 2, pp. 37–47, 2017.

[24] C. Cauwerts and S. Jost, “A color graphic informing on the impact of electric lighting and coated glazing in complex architectural scenes,” *Color Res. Appl.*, vol. 43, no. 6, pp. 885–898, 2018.

[25] AGC, “Productkiezer: Thermobel zonwerend en isolerend glas.” .

[26] H. Arsenault, M. Hébert, and M. C. Dubois, “Effects of glazing colour type on perception of daylight quality, arousal, and switch-on patterns of electric light in office rooms,” *Build. Environ.*, vol. 56, pp. 223–231, 2012.

[27] G. Chinazzo, J. Wienold, and M. Andersen, “Combined effects of daylight transmitted through coloured glazing and indoor temperature on thermal responses and overall comfort,” *Build. Environ.*, vol. 144, no. August, pp. 583–597, 2018.

[28] M. Figueiro, J. Brons, B. Plitnick, B. Donlan, R. Leslie, and M. Rea, “Measuring circadian light and its impact on adolescents,” *Light. Res. Technol.*, vol. 43, no. 2, pp. 201–215, 2011.

[29] M. Vyncke, M. Meulenbergs, J. Audenaert, and F. Leloup, “Accurate simulation of light diffusion effects of patterned glazing by implementation of bidirectional transmittance distribution functions into daylight calculation software,” *Proceedings of the 4th CIE Expert Symposium on Colour and Visual Appearance*. CIE, 2016.

[30] T. Rakha and K. Nassar, “Genetic algorithms for ceiling form optimization in response to daylight levels,” *Renew. Energy*, vol. 36, no. 9, pp. 2348–2356, 2011.

[31] L. Vanhoutteghem, G. C. J. Skarning, C. A. Hviid, and S. Svendsen, “Impact of façade window design on energy, daylighting and thermal comfort in nearly zero-energy houses,” *Energy Build.*, vol. 102, pp. 149–156, 2015.

[32] I. Acosta, M. Á. Campano, and J. F. Molina, “Window design in architecture: Analysis of energy savings for lighting and visual comfort in residential spaces,” *Appl. Energy*, vol. 168, pp. 493–506, 2016.

[33] M. J. Jantunen *et al.*, “Air pollution exposure in European cities: The ‘EXPOLIS’ study,” *J. Expo. Anal. Environ. Epidemiol.*, vol. 8, no. 4, pp. 495–518, 1998.

[34] N. E. Klepeis *et al.*, “The National Human Activity Pattern Survey: A Resource for Assessing Exposure to Environmental Pollutants,” *J. Expo. Anal. Environ. Epidemiol.*, vol. 11, no. 3, pp. 231–252, 2001.

[35] S. Urlaub and G. Grün, “Impact of the indoor environment on learning in schools in Europe,” Holzkirchen, 2015.

[36] M. Dudek, *Schools and Kindergartens: A Design Manual*. Birkhäuser Basel, 2007.

[37] W. E. Hathaway, “A study into the effects of types of light on children - A case of daylight robbery,” 1992.

[38] W. J. M. van Bommel, “Non-visual biological effect of lighting and the practical meaning for lighting for work,” *Appl. Ergon.*, vol. 37, no. 4, pp. 461–466, 2006.

[39] R. Küller and C. Lindsten, “Health and Behavior of Children in Classrooms With and Without Windows,” *J. Environ. Psychol.*, vol. 12, pp. 305–317, 1992.

[40] K. C. Tanner, “Effects of school design on student outcomes,” *J. Educ. Adm.*, vol. 47, no. 3, pp. 381–399, 2009.

[41] P. Barrett, Y. Zhang, D. F. Davies, and D. L. Barrett, “Clever Classrooms: Summary report of the HEAD Project (Holistic Evidence and Design),” 2015.

[42] C. Maesano and I. Annesi-maesano, “Impact of Lighting on School Performance in European

Classrooms," *Clima2016*, pp. 1–14, 2016.

[43] Federale Overheidsdienst Wergelegenheid - Arbeid en Sociaal Overleg., "afdeling 3 van boek III.-Arbeidsplaatsen, titel 1.-Basiseisen betreffende arbeidsplaatsen," in *Codex over het welzijn op het werk*, no. november, 1989.

[44] "Eerste 100% Schoonlicht school in Boxtel Peter Elemans, architect: 'Met veel daglicht en een goed binnenmilieu is De Maremak een comfortabele school,'" *schoolfacilities*, vol. 9, no. 28, pp. 8–9, Jun. 2012.

[45] GO! onderwijs van de Vlaamse Gemeenschap; Agentschap voor Infrastructuur in het Onderwijs (AGION); evr-Architecten, *Naar een Inspirerende Leeromgeving: instrument voor duurzame scholenbouw*. Uitgeverij Politeia Editions, 2010.

[46] Dutch Green Building Council, "BREEAM-NL Nieuwbouw en Renovatie: Keurmerk voor duurzame vastgoedobjecten - Beoordelingsrichtlijn september 2014 versie 1.01," 2014.

[47] Department for Education and Employment, "Lighting Design for Schools," *Build. Bull. 90*, vol. 90, 1999.

[48] AGION, "Daglicht en verlichting | AGION." [Online]. Available: https://www.agion.be/daglicht-en-verlichting. [Accessed: 14-Mar-2019].

[49] KU Leuven Technologiecampus Gent; Pixii vzw; Wetenschappelijk en Technisch Centrum voor het Bouwbedrijf, "Licht in scholen: van beginner tot expert," Gent, 2016.

[50] W. Janssens; Ministère de l'intérieur, *Instructions ministérielles concernant la construction des maisons d'écoles primaires communales suivies d'une instruction spéciale sur le chauffage et la ventilation des salles d'écoles, et d'une série de plans modèles, avec devis et texte explicat*. Brussel: Heger, J., 1852.

[51] F. Narjoux, *Les écoles publiques: construction et installation en Belgique et en Hollande*. Parijs: A. Morel, 1878.

[52] I. Acosta, C. Muñoz, P. Esquivias, D. Moreno, and J. Navarro, "Analysis of the accuracy of the sky component calculation in daylighting simulation programs," *Sol. Energy*, vol. 119, no. October 2017, pp. 54–67, 2015.

[53] D. Witzel, "DIALux evo – new calculation method," 2012. [Online]. Available: https://www.dial.de/fileadmin/documents/dialux/DIALux_downloads/DIALux_evo-_New_calculation_method.pdf. [Accessed: 11-Apr-2019].

[54] CIE, "CIE 110-1994 Spatial Distribution of Daylight - Luminance Distributions of Various Reference Skies," 1994.

[55] Dial, "Dialux 4 with new improved calculation kernel," 2005. [Online]. Available: http://archbps1.campuas.tue.nl/bpswiki/images/b/b8/DiaLux-calculation-kernel.pdf. [Accessed: 11-Apr-2019].

[56] DIAL, "DIALux evo 8: Version history." [Online]. Available: https://www.dial.de/es/software/dialux/download/.

[57] D. Guyon, "Daylight Dividends Case Study: Smith Middle School, Chapel Hill, N.C.," *J. Green Build.*, vol. 1, no. 1, pp. 33–38, 2006.

[58] AGION, "Pilootproject Passiefscholen: Bilan 2016-2017," 2017.

[59] R. S. McLeod, C. J. Hopfe, and A. Kwan, "An investigation into future performance and overheating risks in Passivhaus dwellings," *Build. Environ.*, vol. 70, pp. 189–209, 2013.

[60] S. Bidassey-Manilal, C. Y. Wright, J. C. Engelbrecht, P. N. Albers, R. M. Garland, and M. Matooane, "Students' perceived heat-health symptoms increased withwarmer classroom temperatures," *Int. J.*

Environ. Res. Public Health, vol. 13, no. 6, 2016.

[61] ISO, "NBN EN ISO 7730: Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria (ISO 7730:2005)," 2006.

[62] CEN, "NBN EN 15251: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics," 2007.

[63] S. E. Mattsson, H. Elmqvist, and M. Otter, "Physical system modeling with Modelica," *Control Eng. Pract.*, vol. 6, pp. 501–510, 1998.

[64] H. Elmqvist, "Modelica Evolution – From My Perspective Dynamic Modeling Language," pp. 17–26, 2014.

[65] D. Brück, H. Elmqvist, S. E. Mattsson, and H. Olsson, "Dymola for multi-engineering modeling and simulation," *Dtsch. Zent. fur Luft- und Raumfahrt e.V.*, pp. 1–8, 2002.

[66] F. Jorissen, G. Reynders, R. Baetens, D. Picard, D. Saelens, and L. Helsen, "Implementation and verification of the ideas building energy simulation library," *J. Build. Perform. Simul.*, vol. 11, no. 6, pp. 669–688, 2018.

[67] "DIN V 18599:2007-02.Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung," 2007.

[68] CEN, "EN ISO 13791: Thermal performance of buildings - Calculation of internal temperatures of a room in summer without mechanical cooling - General criteria and validation procedures," 2004.

[69] CIBSE, *Environment Design: CIBSE Guide A*. London, UK, 2006.

[70] M. Drijver, M. Verberk, and J. de Jongste, "Binnenluchtkwaliteit in basisscholen : Gezondheidsraad beoordeelt stand van kennis," *Tijdschr. voor gezondheidswetenschappen*, vol. 88, no. 8, pp. 422–424, 2010.

[71] M. Stranger *et al.*, "Binnenlucht in Basisscholen (BIBA)," 2010.

[72] CEN, "NBN EN 13779: Ventilation for non-residential buildings - Performance requirements for ventilation and room-conditioning systems," 2010.

[73] Vlaamse Overheid, "Energiebesluit: Bijlage X Ventilatievoorzieningen in niet-residentiële gebouwen : bepalingsmethode en eisen (Bijlage HVNR)," 2019.

[74] Brusselse regering, "Energiebesluit: Bijlage XX: Ventilatievoorzieningen in niet-residentiële gebouwen: Bepalingsmethode en eisen," 2019.

[75] AGIOn, "Studierapport: Ontwikkelen van specifieke randvoorwaarden voor scholen volgens de passiefhuisstandaard," 2010.