

UNIVERSITEIT ANTWERPEN

FACULTEIT TOEGEPASTE INGENIEURSWETENSCHAPPEN

Remediëring oververhittingsrisico passiefschool op basis van dynamische simulaties

Greg De Reys

Masterproef voorgedragen tot het bekomen
van de graad van:

Master of Science in de industriële wetenschappen
Bouwkunde

Promotor(en): Dr. ir. Stijn Verbeke

UNIVERSITEIT ANTWERPEN

FACULTEIT TOEGEPASTE INGENIEURSWETENSCHAPPEN

Remediëring oververhittingsrisico passiefschool op basis van dynamische simulaties

Greg De Reys

Masterproef voorgedragen tot het bekomen
van de graad van:

Master of Science in de industriële wetenschappen
Bouwkunde

Promotor(en): Dr. ir. Stijn Verbeke

VOORWOORD

Voor u ligt een thesis die is opgesteld in het kader van het opleidingsonderdeel 'II-Masterproef'. Dit opleidingsonderdeel vormt het sluitstuk van de masteropleiding Bouwkunde aan de faculteit toegepaste ingenieurswetenschappen van de Universiteit Antwerpen.

Het onderwerp van deze masterproef luidt als volgt 'Remediëring oververhittingsrisico passiefschool op basis van dynamische simulaties'

Ik prefereerde dit onderwerp omdat het in de lijn lag met mijn interesse voor de transitie en evolutie van de bouwwereld naar het energieneutraal bouwen. Een evolutie die gericht is op de toekomst. Mijn kennis over het onderzoeksdomein was beperkt tot statische en gebruiksvriendelijke software. Dynamische simulaties waren onbekend terrein, desalniettemin sprong dit onderwerp er voor mij met kop en schouders bovenuit. Het was wel omkaderd en toepassingsgericht in een thematiek die erg nauw aanleunt tot mijn interessegebied. De uitgebreide simulatiesoftware bleek echter complexer te zijn dan verwacht en de literatuur rond passiefscholen was eerder schaars, waardoor er weinig houvast was bij aanvang van mijn onderzoek. Het schrijven van deze thesis heeft enorm veel tijd en moeite gekost, wat gepaard ging met de nodige frustraties. Toch ben ik na het finaliseren van deze scriptie enorm trots op het resultaat van mijn geleverd werk.

De totstandkoming van deze thesis ging gepaard met veel tijd en energie. Anderzijds zou de realisatie van dit sluitstuk niet mogelijk zijn geweest zonder de medewerking en steun van enkele personen. Om te starten wil ik graag even stil staan bij de personen die me het afgelopen jaar enorm hebben bijgestaan om dit naslagwerk tot een goed einde te brengen. In eerste instantie gaat mijn dank uit naar mijn externe begeleiders, arch. Annemie Tormans, dhr. Rudi Vantvelt, dhr. Erik Kuppens, mevr. Kim Van Malderen, die me de nodige documentatie over de topsportschool aanleverden en steeds klaar stonden om vragen te beantwoorden. Verder bedank ik mijn begeleider en promotor Stijn Verbeke voor zijn fijne begeleiding en feedback op dit eindwerk. Ik wil ook graag mijn ouders en grootvader bedanken voor hun steun bij het opstellen en het nalezen van dit naslagwerk.

Tot slot nog een dankwoord aan alle andere personen waar ik met vragen terecht kon en hierboven niet persoonlijk vermeld staan.

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

Datum:

Naam en handtekening:

Remedy Overheating Risk of a Passive School Based on Dynamic Simulations

G.DE REYS ^a, S.VERBEKE ^a, A.AUDENAERT ^a

^a Faculty of Applied Engineering: Construction, University of Antwerp,
Groenenborgerlaan 171, 2020 Antwerp, BELGIUM

Contact: greg.dereys@student.uantwerpen.be

Abstract: Over the last decades, global warming has become a major topic of discussion in global politics. Due to the association between global warming and energy, man has no choice but to reduce his energy consumption. Due to this mind set, a transition from a traditional building concept to passive buildings occurred. Despite the advantage of a lower energy consumption, a new problem has arisen with the use of these passive buildings. Multiple reports from all over Europe show that these buildings are sensitive to overheating. This work examined a case study of a passive school for athletes suffering from a significant overheating problem. An EnergyPlus dynamic building model was compiled and calibrated using ASHRAE Guide 14 indices to achieve Cumulative Variation of Root Mean Square Error (CV(RMSE)) values below 8% and Mean Bias Error (MBE) values within $\pm 4\%$. The model was subjected to an innovative assessment criterion to indicate which zones were suffering from overheating. Finally, dynamic building simulations were performed to compose a set of mitigating measures to increase thermal comfort while decreasing energy consumption. A combination of increased night ventilation and dynamic controlled exterior solar screens was proposed to guarantee thermal comfort during summer.

Keywords: overheating, passive school, thermal comfort, case study building, EnergyPlus, model calibration, local weather data

1 Introduction

The average global temperature has risen nearly twice as fast as it did 50 years ago [1]. Therefore, global warming has become a major topic of discussion in global politics. Climate change is mainly caused through the emission of greenhouse gasses. Due to association between global warming and energy, man has no choice but to reduce his energy consumption. Currently, about 40% of the energy consumption in Europe can be attributed to buildings [2]. Improving the energy performance of buildings is therefore an absolute necessity to reduce global warming. One way to decrease this significant use of energy and maintain thermal comfort is to resort to passive and low-energy systems. Due to this mind set, a transition to low-energy buildings was set in motion. To accelerate an upgrade of the building stock in Europe, a Performance of Buildings Directive (EPBD) was compiled. Due to coercive measures in this standard, members of the European Union are obligated to construct energy-efficient buildings and contribute to the fight against global warming. However, the standards have to be adjusted by the competent authority of each Member State in order to take local climatic conditions into account and make use of all resources as cost-efficiently as possible [3].

In 2007, the Flemish Government launched a Pilot Project Passive Schools in order to anticipate on further restrictions of the energy performance regulation. On the one hand, this project functions as a learning process to optimize design decisions of energy-efficient schools. On the other hand, it promotes energy-efficient buildings in the private sector. During this learning process, it became clear that passive schools are sensitive to overheating. This problem manifests itself due to extensive insulation and airtightness in combination with high internal and external heat gains [4, 5].

1.1 Passive school

A passive school is defined as a very energy-efficient school infrastructure that guarantees a comfortable indoor climate throughout the annual cycle while energy consumption has been reduced to a minimum. To comply with the passive standard following limits have to be respected [4, 5, 6]:

- Heating ≤ 15 kWh/m²
- Cooling ≤ 15 kWh/m²
- E-level ≤ 55

To meet all requirements in their entirety, as cost-efficient as possible, an intelligent design is of fundamental value. Trias Energetica is used as a starting point, which follows following plan of action step-by-step:

- Step 1. Limit the energy demand
- Step 2. Use renewable energy
- Step 3. Use finite energy sources efficiently

Passive construction attempts to push the initiating step to the limit with an extensive insulation and airtightness. This results in minimal transmission and ventilation losses, but increases the risk of overheating significantly [7]. It can be compared to a huge thermos flask. The extensive insulation and airtightness traps heat captured by windows during the day and heat produced by people, lighting and equipment, resulting in a heat build-up and high internal temperatures. This is a phenomenon that has been confirmed several times in recent decades by various authorities from all over Europe [4, 8].

Therefore, careful use of passive heat gains will be crucial to avoid overheating problems of passive buildings in the future. Cautious placement of glazing, consistently fitted with solar protection screens, use of thermal mass and passive cooling techniques must bring relief to solve this problem in an energy-friendly way. Validation of critical zones with dynamic simulations will become indispensable to avoid overheating in the future [9].

1.2 Standards

Before initiation of the Passive Schools project, calculation methods for passive constructions were mainly focused on buildings with residential and office functions. It soon became clear that the boundary conditions of these building types negatively affected the calculated quality criteria, and were therefore not suitable for schools [10]. In contrast to a house or office building, a school is characterized by a high occupancy rate, which results in high internal heat gains that differ greatly between different types of rooms. In combination with high levels of glazing, there is a need for large hygienic ventilation flows, while the building only is in use for a short period of time (8h vs. 16-24h for dwellings) [9]. Due to the wide range of room types, it was therefore necessary to develop a comprehensive set of boundary conditions adapted to this specific characteristics. After all, each type of space is burdened in a different way by a variety of internal heat gains.

In order to create a framework of boundary conditions for passive schools, various international standards have been consulted to ensure international compatibility. In this way, passive schools can benefit from broad quality recognition.

Table 1 summarizes all the guideline values for space cooling of classrooms, common offices and open learning centres from the various standards consulted for this framework. Table 2 provides a summary of all the guide values for space cooling of a sports hall [10].

Table 1 Guideline values for space cooling of classrooms, common offices and open learning centres

Standard / software	Classrooms / Common Offices / Open Learning Centres					
	Cooling					
	Winter			Summer		
	General	6% PPD	10% PPD	General	6% PPD	10% PPD
Belgium – EPB	23			23		
Belgium – PHPP	25			25		
The Netherlands – NEN 2916	24			24		
Germany – EnEV – DIN V 18599	24			24		
Germany – PHI	25			25		
Belgium – ARAB	30			30		
Belgium – NBN-ISO 7730:2006		24	26		26	28
Belgium – NBN EN 15251:2007		23	24		25	26
Belgium – Indoor environmental decree (BS 19.X.04)	24			26		
The Netherlands – Requirements Fresh Schools	23 ($T_e < 20$) $T_e + 3$ ($T_e > 20$)			23 ($T_e < 20$) $T_e + 3$ ($T_e > 20$)		
Conclusion framework	24			24		

Table 2 Guideline values for space cooling of sports halls

Standard / software	Sports hall					
	Cooling					
	Low intensity sports			Intensive sports		
	General	6% PPD	10% PPD	General	6% PPD	10% PPD
Belgium – EPB	23			23		
Belgium – PHPP	25			25		
The Netherlands – NEN 2916	24			24		
The Netherlands – KVLO standards gymnasiums	25			25		
Germany – EnEV – DIN V 18599	24			24		
Germany – PHI	25			25		
Belgium – ARAB	26,7			26,7		
Belgium – NBN-ISO 7730:2006		24	24		20	22
Belgium – Indoor environmental decree (BS 19.X.04)	24			26		
Output specifications DBFM school infrastructure	26			26		
Bloso Dixit Michel Van Espen	16			16		
Presentation Energy Care at School (Cenergie)	17			17		
Conditions and planning aspects of passive house gymnasiums (PHI)	18			18		
Conclusion framework	24			24		

1.3 Assessment criterion

Based on all assessment methods and standards found in the literature, this dissertation composed its own assessment method to estimate overheating. Due to the nature of the project to be assessed, which is a top-class sports school focused on excellent results, strict criteria are opted for. The foundation of the criterion is based on the first assessment method in standard NBN EN 15251 [11], the temperature exceedance criterion (TO), which implies one fixed comfort limit is set per room type. After all, top-class sports and education must take place under ideal conditions, regardless of the outdoor climate. An adaptive model is therefore excluded. The room dependency of the criterion is derived

from an alternative model of Peeters et al. [12] defining different comfort scales for rooms with distinct functions. In addition, an exponential scale is applied to each exceedance of the comfort limit according to the severity of the exceedance. A higher scale corresponds to a more severe exceedance. This approach is suggested by Nicol et al. [13] and derived from the second assessment method described in NBN EN 15251. However, indirectly, this affects the proposed discomfort indicator, since high temperature peaks will also yield in a longer period of overheating due to thermal inertia. All these aspects are finally implemented in the innovative criterion developed by S. Verbeke to determine the percentage of exceedance [14].

The discomfort indicator is calculated according to equation (1).

$$D_{\text{roomtype}_i, \text{period}} = \frac{\sum_{\text{zone } x} \sum_{\text{timesteps}}^{\text{period}} g_t \cdot I_{\text{discomfort, zone}_x, \text{timestep}_y}}{\sum_{\text{timesteps}}^{\text{period}} n_{\text{people, zone}_x, \text{timestep}_y}} \quad (1)$$

Where the number of attendees who experience discomfort $I_{\text{discomfort, zone } x, \text{timestep } y}$ are defined by equation (2).

$$\begin{cases} \text{If } \theta_{\text{OT, zone}_x, \text{timestep}_y} > \theta_{\text{lim, roomtype}_i}: I_{\text{discomfort, zone}_x, \text{timestep}_y} = n_{\text{people, zone}_x, \text{timestep}_y} \\ \text{If } \theta_{\text{OT, zone}_x, \text{timestep}_y} \leq \theta_{\text{lim, roomtype}_i}: I_{\text{discomfort, zone}_x, \text{timestep}_y} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

Where

$D_{\text{roomtype } i, \text{period}}$	=	the ratio of hours spent by occupants outside the comfort limit set for room typology 'i' [h] compared to the total amount of hours spent in the room throughout a given period	
$\theta_{\text{lim, roomtype } i}$	=	the maximum permissible operating temperature for room typology 'i'	[°C]
$n_{\text{people, zone } x, \text{ timestep } y}$	=	the number of persons present in zone 'x' during period 'y'	[-]
g_t	=	the exponential scale in function of the comfort limit exceedance	[-]

The exponential scale is calculated according to equation (3).

$$\begin{cases} \text{If } \theta_{\text{OT, zone } x, \text{ timestep } y} \leq [\theta_{\text{lim, roomtype } i} + 1]: g_t = 1 \\ \text{If } \theta_{\text{OT, zone } x, \text{ timestep } y} > [\theta_{\text{lim, roomtype } i} + 1]: g_t = 1 + \frac{(\theta_{\text{OP, zone } x, \text{ timestep } y} - \theta_{\text{lim, roomtype } i, 0})}{10} \end{cases} \quad (3)$$

The assessment of summer comfort will therefore only be considered when the affected area is occupied. Temperature surpluses that manifest themselves during unoccupied periods are not included in the assessment of thermal comfort. The maximum percentage of exceedance is set at the normalized 5% of the occupancy time according to the passive standard and NBN EN 15251 [10, 11].

Now that the assessment method has been framed, all that remained was to define the comfort limits. The conclusion of the reference framework for passive schools, in which a target value of 24°C is examined as reference value for cooling of both classrooms and sports halls, was taken into consideration for this purpose [10]. Due to the intensive nature of top-class sports, it was decided to use this 24°C as threshold for overheating. The sports halls are located in the lower part of the building, consisting of a considerably heavy concrete structure which, apart from the gymnasium, contains only a few windows. Despite the fact that the gymnasium has a large glass wall, it is equipped with active cooling in order to maintain an optimal indoor climate. In other words, the building has a wide range of means at its disposal to guarantee this temperature. For the classrooms, 24°C is slightly too low and a comfort limit of 25°C has been set, which corresponds to comfort category I for classrooms in standard NBN EN 15251, and does not affect productivity according to Y. Al Horr et al. [15] Note that the operative temperature (OT) has to respect these thresholds. This temperature indicates temperature sensation 'felt' by a human body and is calculated according to equation (4) as a weighted mean of air temperature (MAT) and radiant temperature (MRT).

$$OT = \frac{MAT + MRT}{2} \quad (4)$$

2 Research methodology

The research methodology in this article consists of two successive parts. In the first part, a calibration process is performed to approach reality with the compiled energetic model. This involves an iterative process to bring the simulated temperature within an acceptable range of the actual measured temperature. In the second part of the study, the calibrated model is subjected to the innovative assessment criterion to indicate which zones are suffering from overheating. Finally, dynamic building simulations are carried out to compile a set of mitigating measures to increase thermal comfort as efficient as possible while reducing energy consumption.

2.1 Software

For the modelling in this dissertation, EnergyPlus, one of the most widely used instruments in the world for advanced simulations, was chosen as simulation engine. EnergyPlus is managed by the National Renewable Energy Laboratory (NREL) and financed by the U.S. Department of Energy (DOE) Building Technologies Office (BTO). Continued active user support groups and the open source character of the tool contributed to the choice of this simulation engine, but the detailed solar gain model with shadow and reflection analysis was its ultimate asset [14].

2.1.1 Plug-ins

In order to ease the composition of the configuration file, an interaction between EnergyPlus and plug-ins with a more advanced interface was used. OpenStudio is one of many plug-ins for EnergyPlus that makes it possible to finish an extensive fraction of the configuration file in a graphically superior environment and was used for the compilation of the HVAC system [16].

Euclid is an extension for SketchUp that makes it possible to draw a three-dimensional model in SketchUp and convert it to a corresponding geometric configuration consisting of coordinates only. This geometric description can afterwards be included in the configuration file [17].

2.1.2 Energy Management System

EMS is a component of EnergyPlus in which advanced controls can be programmed. The EnergyPlus Runtime Language, a simplified programming language, is used for this purpose. This component makes it possible to overwrite control schedules of technical installations and dynamic solar screens in order to optimize energy control.

2.2 Weather files

Outdoor conditions are driving forces of the indoor climate, therefore an accurate weather file is crucial in order to perform reliable dynamic building simulations.

Since there are many web servers that provide weather data using an API, there were plenty of possibilities to compile weather files. The main obstacle was collecting the weather data, which is a very time consuming job. To automate this process, a script was developed in Python that automatically retrieves historical weather data and collects it in just one text file. Subsequently, this data could be used to compile actual meteorological years (AMY) using the software tool Elements, which verifies the physical relationships between the weather parameters, ensuring that the weather file complies with the physical laws.

A Dark Sky API was used to retrieve most of the weather parameters [18]. Due to a lack of data on the solar radiation, a second API was used, provided by Solcast [19].

2.3 Input Data

To perform dynamic building simulation, a configuration file is required. This file consist of data that describes every aspect of the simulated building ranging from geometry, material characteristics, internal heat sources, HVAC components to operation schedules. This section specifies the configuration file that was composed for this case study.

2.3.1 Simulation parameters

In order to compare measured data of loggers, which were placed in the school to measure temperature and humidity, with simulated data, 12 steps per hour were simulated. This means that a full energy calculation of the simulation model is performed every 5 minutes.

2.3.2 Geometry and thermal zones

The case study consists of a passive school with top-class sports facilities and a protected volume of 32.409,62 m³. For the energy model, the volume was divided into 23 thermal zone as shown in Figure 1 on the next page.

2.3.3 Materials

In order to approximate the energetic progression in reality as accurately as possible, constructions must be described with care in the configuration file. After all, structural elements such as walls, floors and roof structures, as well as joinery and glazing, have a significant impact on the energy flow. Table 3 gives an overview of the calculated heat transfer coefficients for partition structures adjacent to the outdoor environment. A comparison with the most recent regulation for energy performance of dwellings (2018) again emphasizes the far-reaching insulation shell of the passive school, while the permit year dates from 2014.

Table 3 Comparison between calculated heat transfer coefficients and most recent regulation for energy performances of dwelling (2018)

Partition structures	Calculated U-value[W/m ² K]	Maximum permitted U-value [W/m ² K]
Foundation	0.10	0.24
Exterior wall (above ground)	0.12	0.24
Floor terrace	0.16	0.24
Roof terrace	0.13	0.24
Floor patio	0.12	0.24
Exterior wall (underground)	0.10	0.24
Glazing	0.60	1.10
Doors	1.20	2.00

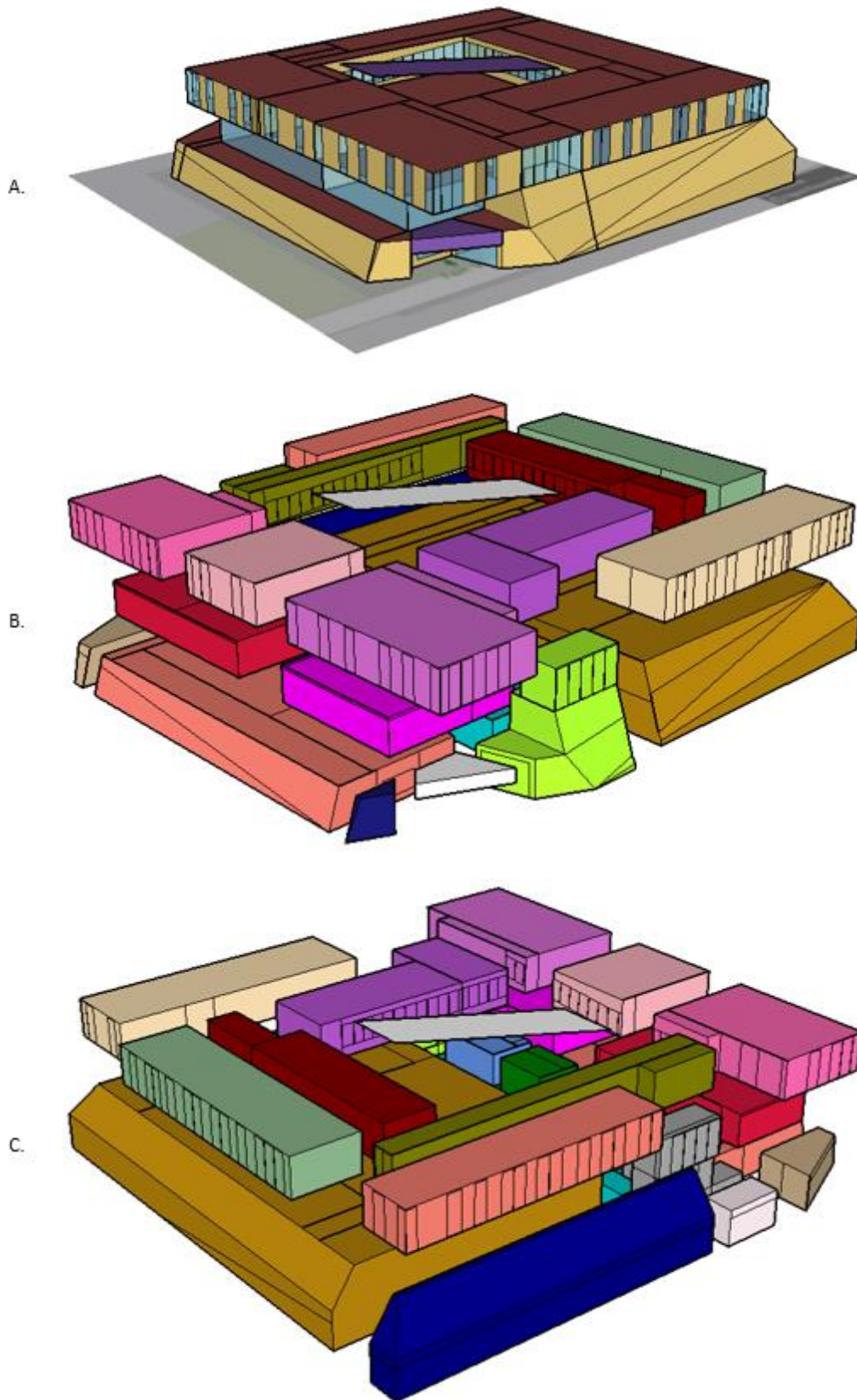


Figure 1 Geometry and thermal zones

- A. Three-dimensional model of reality
- B. Exploded three-dimensional model in 23 thermal zones - front isometric projection
- C. Exploded three-dimensional model in 23 thermal zones - rear isometric projection

2.3.4 Thermal inertia

Since materials have already been assigned to the partition structures between different zones and between zones and the outdoor environment, the largest thermal mass is already integrated in the configuration file. However, by means of some rough measurements and logical reasoning, an estimate is made of the interior in order to include the influence of this in the configuration file.

2.3.5 HVAC

The school is equipped with five air handling units for indoor installation, four of them have a cross flow plate heat exchanger with an efficiency $\eta > 78\%$, wet $\eta \geq 90\%$, and a double bypass valve. In addition, these four air handling units are equipped with an adiabatic cooling system, which indirectly cools the extraction air with an efficiency of at least 90%, and a heating coil. The remaining air handling unit, which is responsible for air-conditioning of the big sports hall, only has a rotor wheel heat exchanger with a tangible efficiency $\eta \geq 91\%$, and a latent $\eta \geq 70\%$, but does not contain any indirect adiabatic cooling or heating coil. For all efficiencies, the configuration file is based on a worst-case scenario, i.e. the lower limit is taken.

If the capacity of the air handling units is not sufficient, additional heating is provided by radiators, except in the sports hall and the dressing rooms, which are equipped with an underfloor heating system. Due to a lack of information about the flow rates and temperature gradients in the pipes, which leads to an enormous number of error messages during simulation, an electric underfloor heating and electric radiators were opted for.

Since the school is equipped with a building management system (BMS), the operation of all radiators, floor heating and ventilation system components are fully automated. In order to equip the energetic model with a similar control system, several programmes were developed in the energy management system (EMS) of EnergyPlus. These controls will override the activation of the various components, which are originally based on thermostat schedules with fixed demand temperature for a certain timeframe.

2.3.6 Infiltration flowrate

The infiltration flow rate is calculated based on the results of the blower door test as shown in equation (5).

$$\text{ACH} = \frac{n_{50}}{20} = \frac{0.5}{20} = 0.025 \text{ h}^{-1} \quad (5)$$

2.3.7 Output

For calibration purpose, the indoor air temperature is used to approximate the measured temperature trend of the loggers. Afterwards, a switch is been made to the operative temperature to subject the simulated temperatures to the innovative assessment criterion.

2.4 Calibration method

D. Marini, Mustafaraj, G. et al. [20] provide one of the most lucid explanations of a three-staged calibration method. The initial stage starts with an input parameter screening by populating as-built fabric, occupancy and HVAC values into the configuration file. In a second stage, the most influential parameters are identified based on sensitivity analyses. Eventually, a reiterative process of adjustments is been made to approximate measurement data and establish a calibrated model. The same calibration methodology was used for this study.

The ASHRAE Guideline 14-2002 is used to indicate when a model has been calibrated. This guideline highlights two dimensionless error indicators, the mean bias error or MBE and cross-validated root mean square error or CV(RMSE) calculated according to equations (6 and (7 [21].

$$\text{MBE} = \frac{\sum_{i=1}^{N_i} (M_i - S_i)}{\sum_{i=1}^{N_i} M_i} \quad (6)$$

$$\text{CV(RMSE)} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_i} [(M_i - S_i)]^2}{\sum_{i=1}^{N_i} M_i}}}{\sum_{i=1}^{N_i} M_i} \quad (7)$$

Where

- M_i = measured data at moment 'i'.
- S_i = simulated data at moment 'i'.
- N_i = number of values used in the calculation

The building model is considered calibrated if the hourly MBE is within $\pm 5\%$ and the $\text{CV(RMSE)} \leq 20\%$. The MBE provides an indication of the average error with respect to the measured values, but suffers from the cancellation effect between negative and positive values. The CV(RMSE) index, however, indicates the size of the normalised accumulated error. As such the CV(RMSE) better reflects the magnitude of the accumulated error and is therefore a better indicator of the overall prediction accuracy of the building model [22].

3 Calibration

As mentioned in section 2.4 a three-staged calibration method was used. The first stage focused on the calibration of the building management system by integrating operation systems for thermostats, (night) ventilation and interior blinds into EMS as well as switch-on moments for heating and cooling components. In stage two a sensitivity analysis of the internal and external heat gains and the flow rate of night ventilation was carried out. Finally, the assessment criterion for overheating was included into the calibration process and a reiterative process of adjustments was performed to approximate measurement data and establish a calibrated model.

As Figure 2 shows, the model meets the calibration limits. In order to focus the calibration on summer comfort, the overheating criterion was involved in the calibration process. The discomfort indicator was calculated and compared for both actual and simulated temperature progression. Subsequently, iterative work was carried out to reduce the difference in discomfort indicators as well as the MBE and the CV(RMSE). In addition, the number of hours above the set temperature thresholds were also taken into account. Figure 2, Figure 3 and Figure 4, show the smallest possible margin of error that could be achieved by taking these four parameters into account.

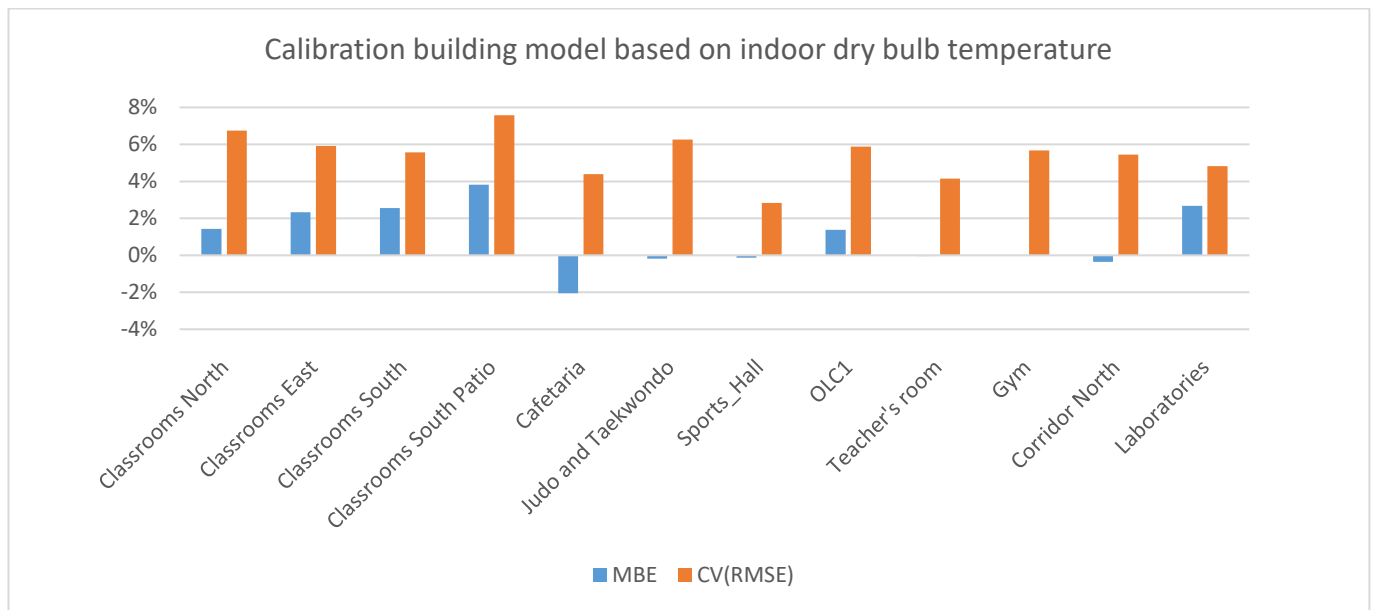


Figure 2 MBE en CV(RMSE) between actual and simulated temperature progression

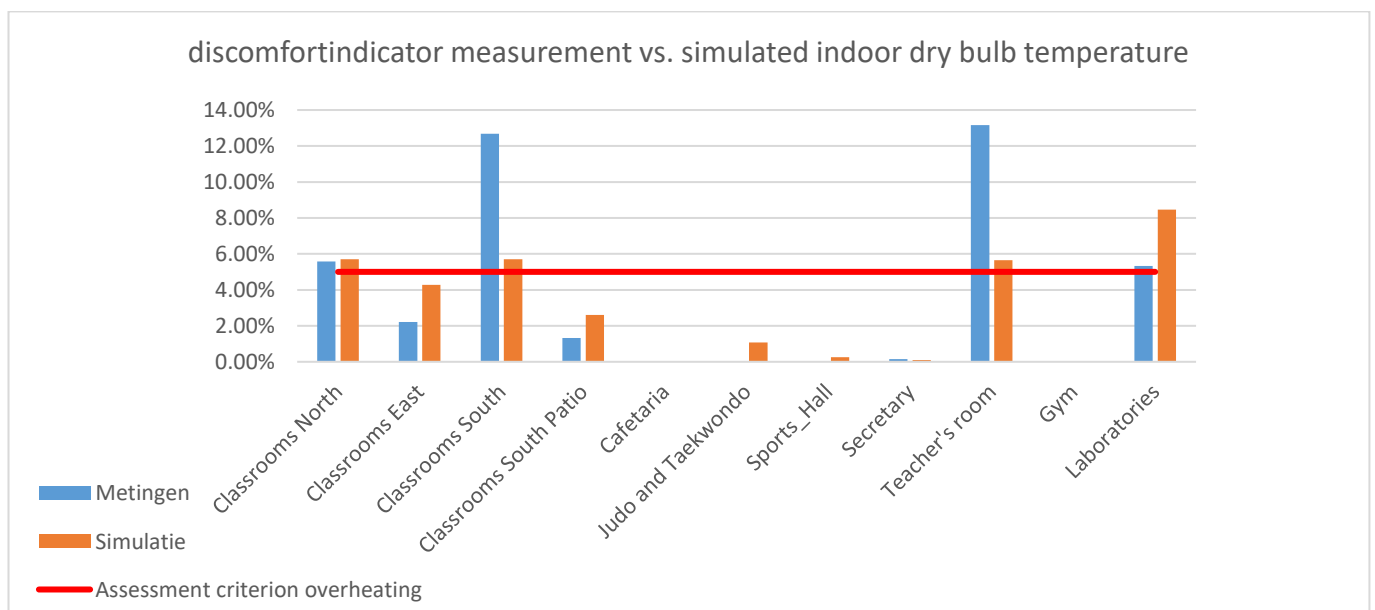


Figure 3 Comparison of overheating between actual and simulated temperature progression

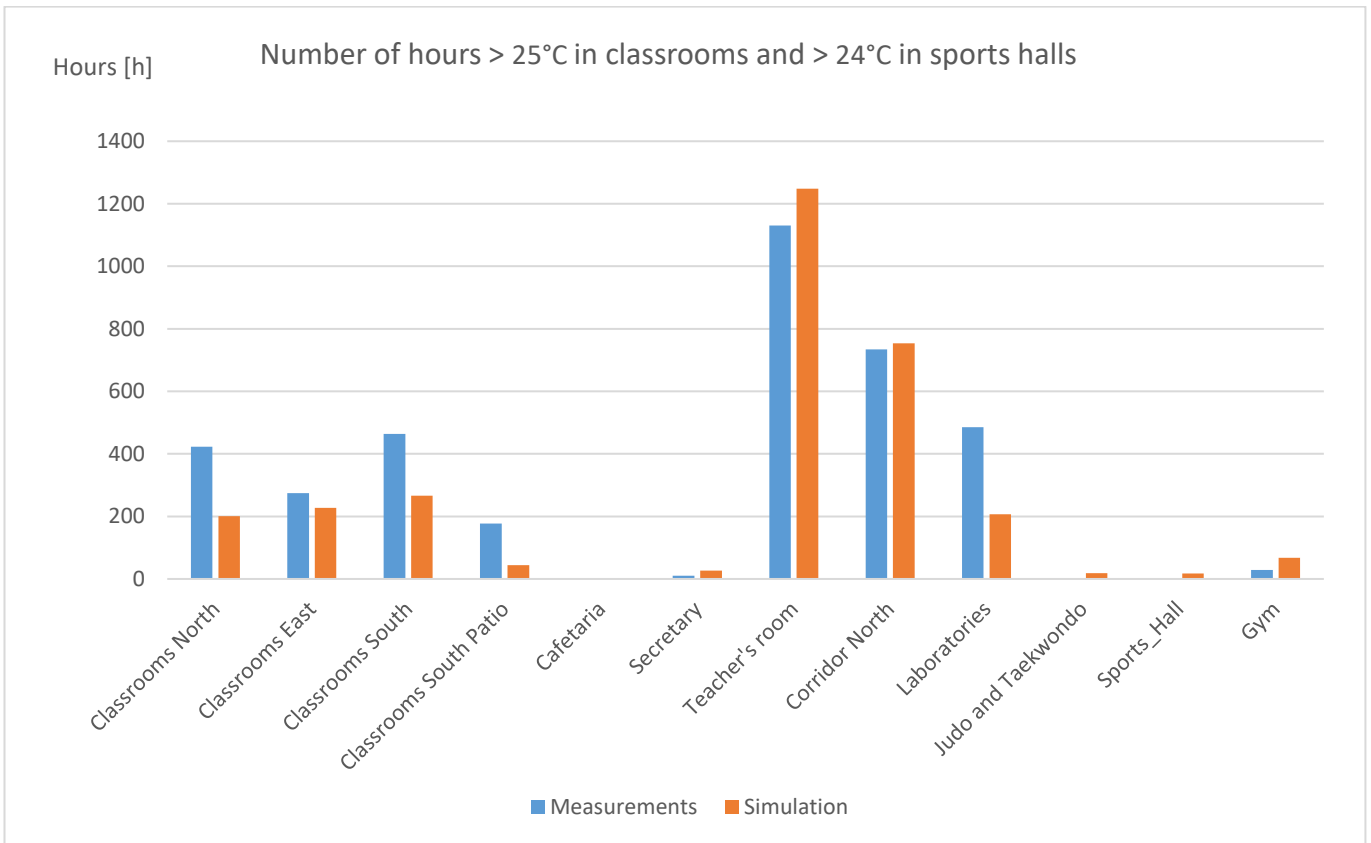


Figure 4 Comparison of hours above temperature thresholds between actual and simulated temperature progression

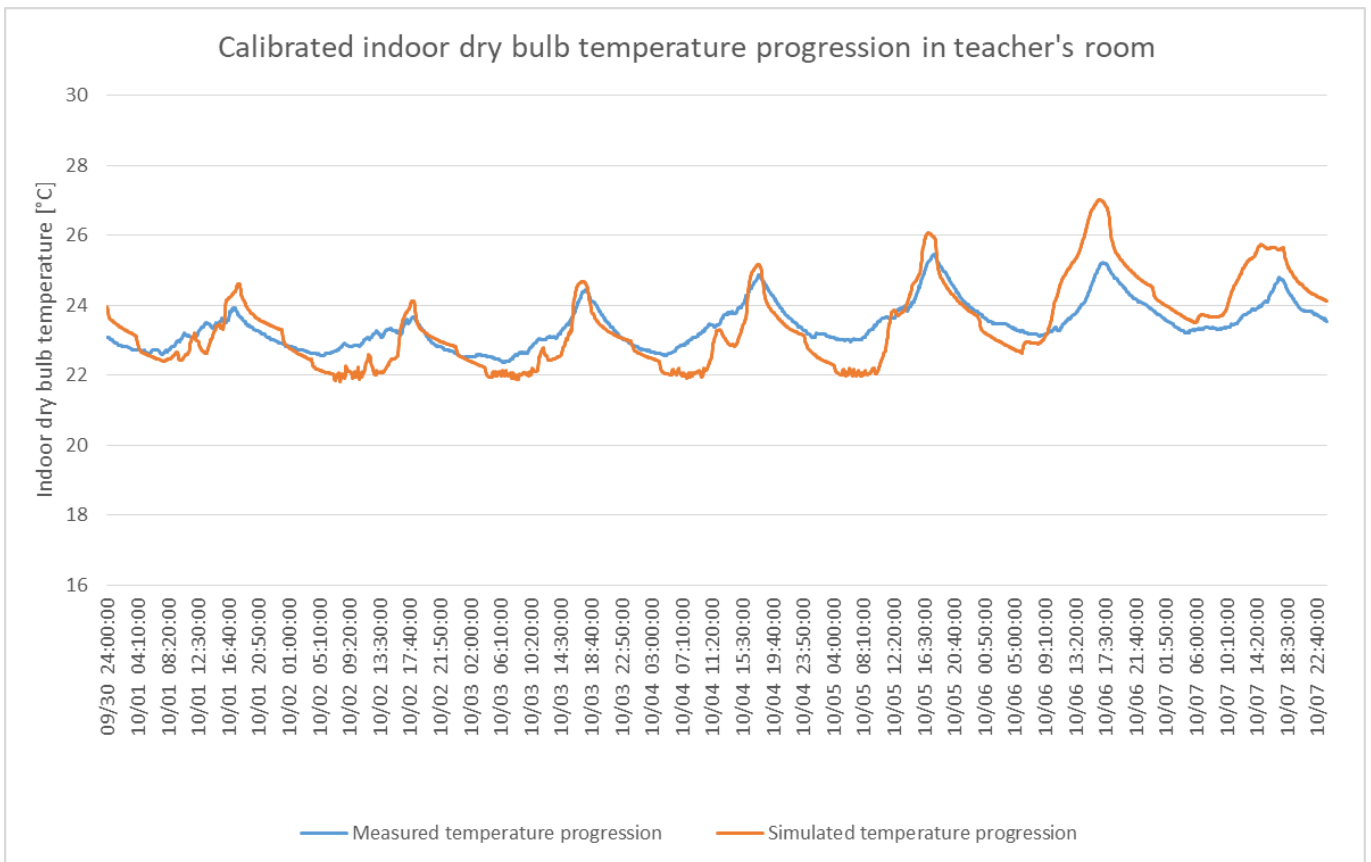


Figure 5 Calibrated indoor dry bulb temperature regression in teacher's room for the 1st week of October

4 Mitigating measure

After an extensive analysis of the school, a set of mitigating measures is assembled in order to reduce the overheating risk during summer as efficiently as possible, while the current infrastructure is maintained. The aim is to increase thermal comfort during summer, while maintaining or even reducing the annual energy demand. Several measures were implemented in the model and analysed, but only a carefully chosen fraction is described in this summary paper.

4.1 Reference scenario

The discomfort indicators of the different zones were recalculated with the operative temperature to fulfil the boundary conditions of the overheating criterion.

Figure 6 shows that it are mainly the classrooms with glass curtains oriented to the south and west that cannot guarantee thermal comfort during summer. This indicates that the overheating is caused due to excessive solar gains.

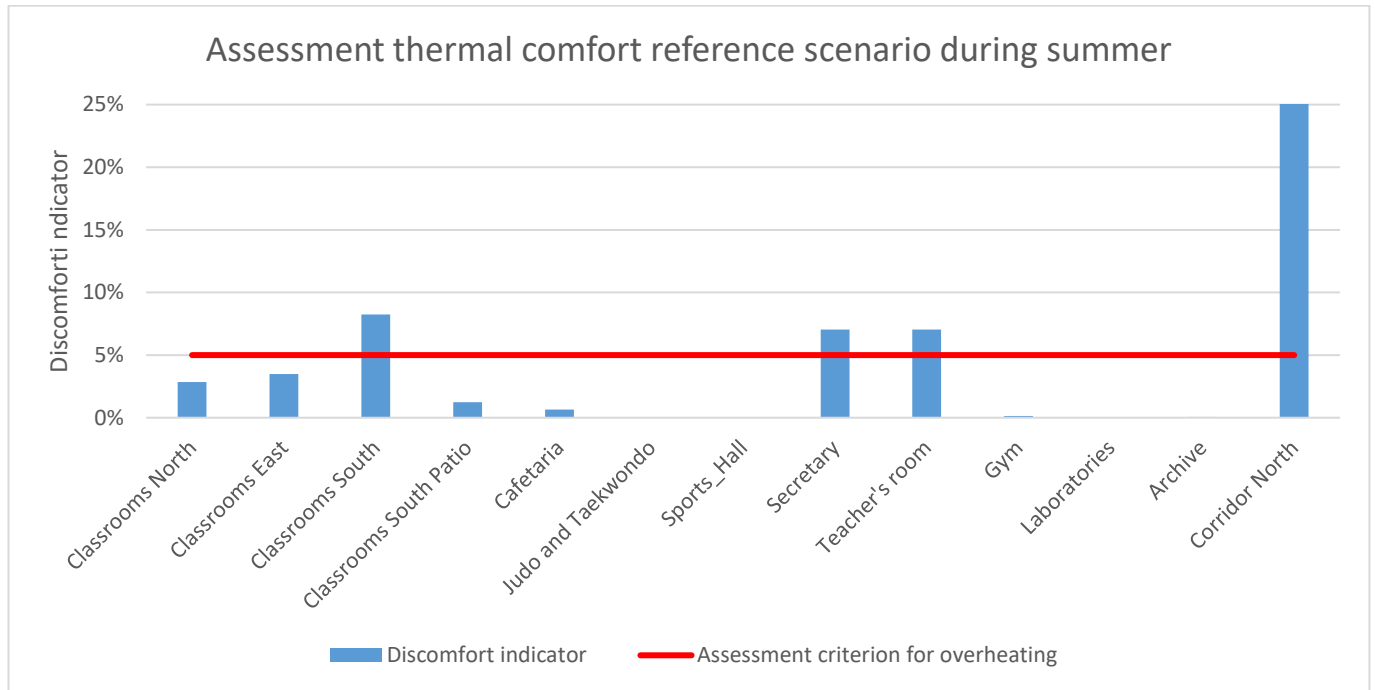


Figure 6 Discomfort indicators of thermal zones in reference scenario

4.2 Night ventilation

This section analyses the impact of a 10% incremental increase in night ventilation flowrate on the simulated temperature progression. The increase is implemented until the maximum achievable flow rates of the air handling units have been reached. In order to switch on the night ventilation, a management system has been developed in EMS. This system ensures that from 1 April to 1 November the air handling units are switched off and a bypass is triggered to draw cold air in directly from outside. However, the bypass will only be active when all boundary conditions have been fulfilled. This includes that the average exhaust air must be above 19 °C as well as above the outdoor air temperature and the outside air must be at least 5 °C. The night ventilation switches off when the exhaust air temperature reaches 17 °C.

Figure 7 shows that the increase in night ventilation flow rate has a significant impact on the discomfort indicator. It should also be noted that the decrease is proportional to the

original size of the discomfort indicator. For example, there is a stronger decrease in zones with a big initial discomfort indicator and a smaller decrease in zones with a small initial discomfort indicator. Only the southern classrooms does not pursue this trend and shows a smaller decrease compared to the size of the initial indicator. This deviation in the southern classrooms is caused by excessive solar gains that heat up the air in this zone very fast, making pre-cooling less efficient.

When the impact of the increased night ventilation flow rate on the energy demand is examined, as shown in Figure 8, can be concluded that the management settings of the night ventilation need to be optimised. Due to an excessive drop in temperature during the night, additional heating is required as the night ventilation flow increases. As a result, more energy is lost to heating than recovered to cooling. Increasing the set point temperature of the night ventilation can avoid this problem.

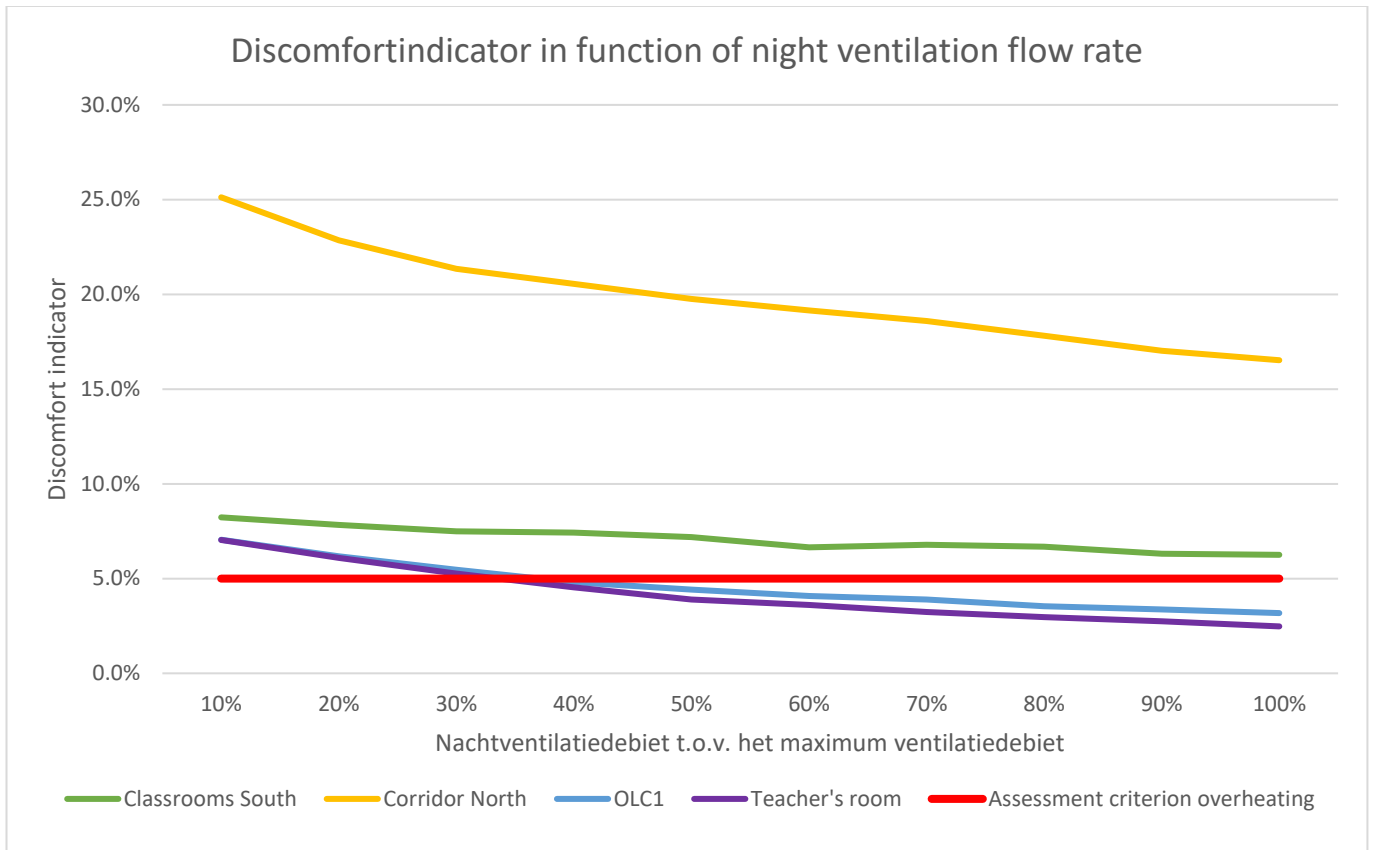


Figure 7 Impact of increased night ventilation flow rate on discomfort indicator

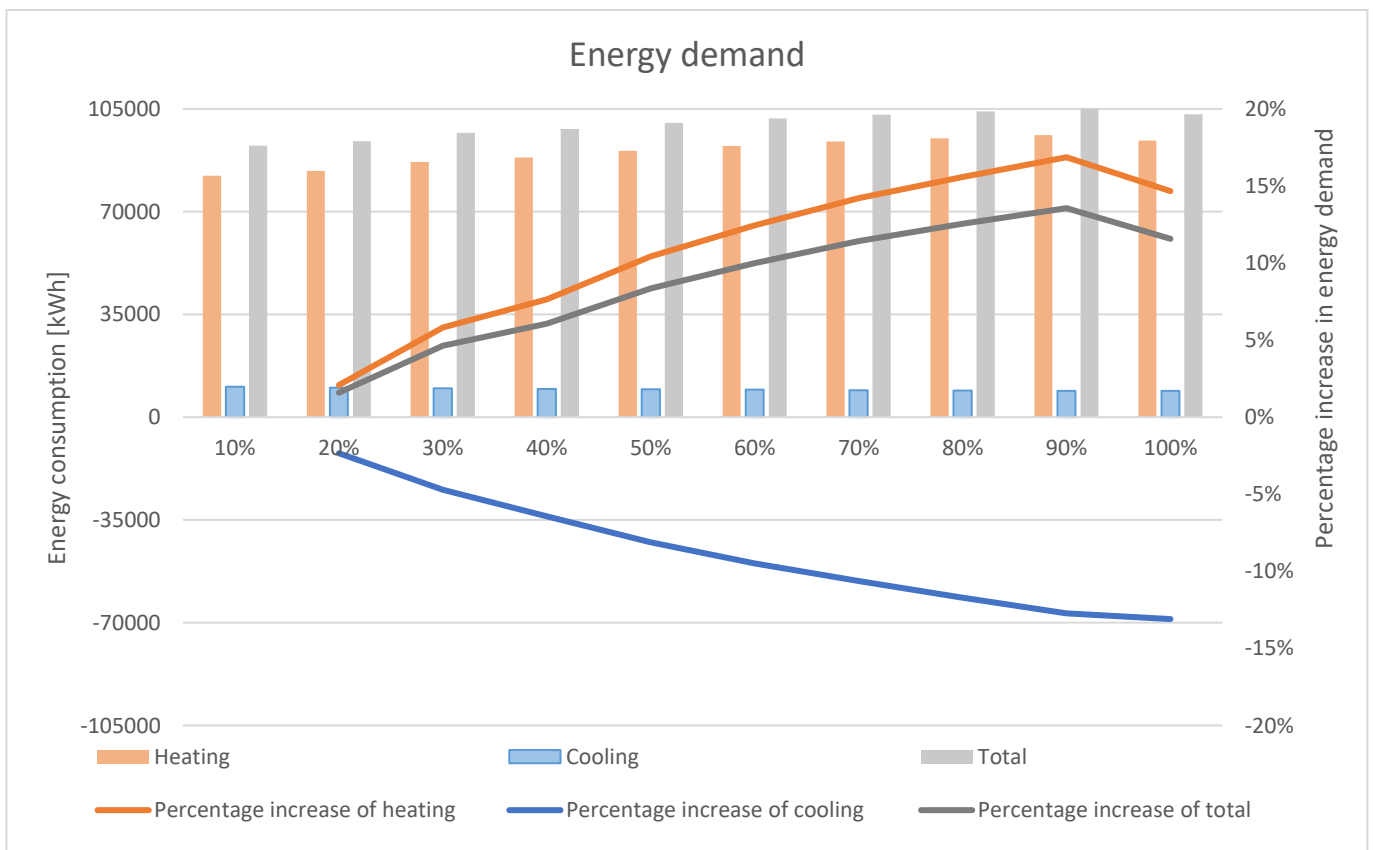


Figure 8 Impact of increased night ventilation on energy demand

4.3 Dynamic exterior solar screens

In this last analysis, an extensive set of outdoor shading configurations was tested. The simulations varied with the boundary conditions of the management system to optimise solar gains and reduce the total energy demand for cooling and heating to a minimum.

In the analysis, seven scenarios were compared against the reference scenario. All scenarios, with the exception of the reference scenario, are equipped with exterior solar screens on the western, southern and eastern facades of both the patio and the perimeter. In the first scenario, shading is activated when the average air temperature in the room exceeds 22°C. In the second, third and fourth scenarios, an additional boundary condition for illumination was added. Shading is only activated in these scenarios when the average air temperature is above 22 °C and the illumination is above 10.000, 15.000 and 20.000 lux respectively. In the fifth, sixth and seventh scenarios, boundary conditions for illumination were replaced by irradiance criteria. Shading activation in the these scenarios only takes place when the average air temperature exceeds 22 °C and the irradiance exceeds 50, 100 and 150 W/m² respectively.

As shown in Figure 9 and Figure 10 a management system based only on air temperature, guarantees the best summer

comfort, but also significantly increases the energy demand for heating. When an additional boundary condition for illumination is added, it is noticeable that the least strict boundary condition of 10.000 lux has the most significant impact on the discomfort indicator. As a result almost all thermal zones meet the assessment criterion. An increase of the boundary condition to 15.000 lux results in a much smaller decrease of the overheating risk. When the boundary condition of illumination is set to 20.000 lux there is even an increase in overheating risk. This phenomenon is caused by the absence of interior blinds, which were removed from the original model in order to reduce the complexity of the management system. Furthermore, it can be noticed that an increase of the boundary condition for irradiance has almost no impact on the discomfort indicator. Finally, it can be concluded that the results for irradiance as an additional boundary condition are very similar to the results of 10.000 lux as an additional boundary condition.

Since illumination is much easier to measure in reality than irradiance, this parameter is preferred as second boundary condition for the management system. Overall, it can be concluded that a combination of 22 °C as temperature threshold and 10 000 lux as threshold for illuminance, both in terms of comfort and energy, provides the best results.

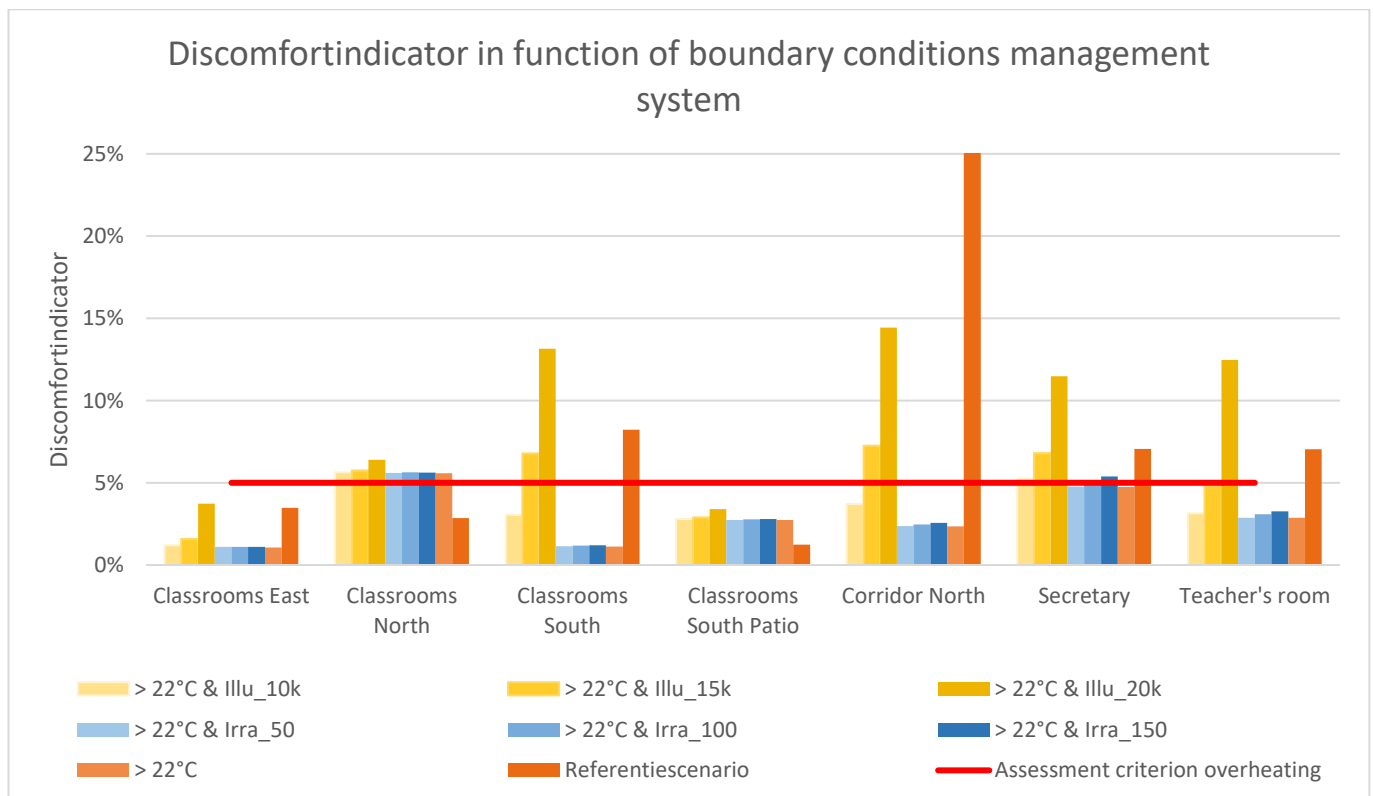


Figure 9 Impact of boundary conditions for management system of dynamic exterior solar screens on overheating risk

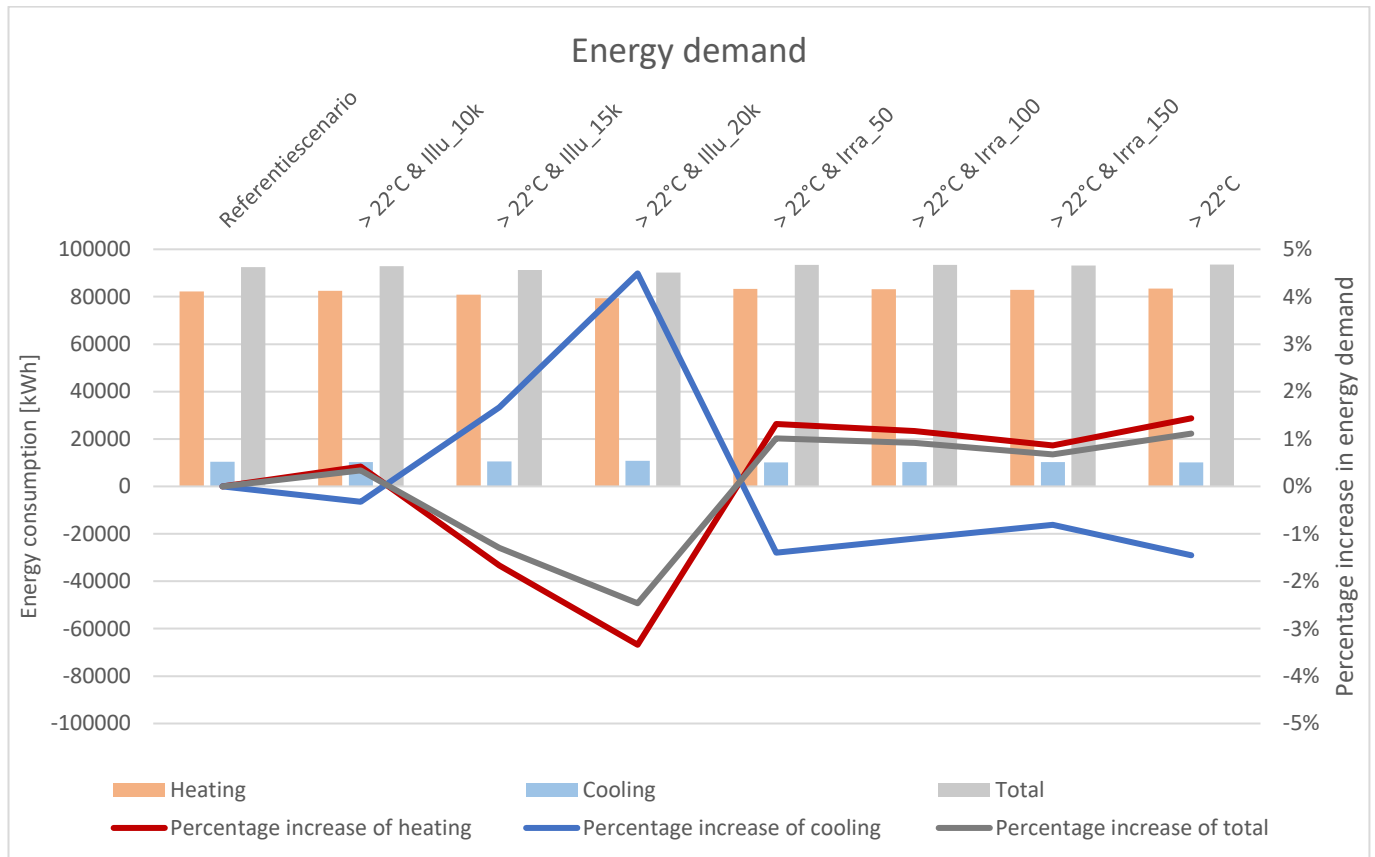


Figure 10 Impact of boundary conditions for management system of dynamic exterior solar screens on energy demand

5 Conclusion

In this dissertation, an answer was formulated to the following research question:

"How detailed does a dynamic simulation model in EnergyPlus need to be to simulate the actual temperature progression in a passive school for athletes? And how can an overheating problem in a passive school for athletes be solved as efficiently as possible?"

The first aspect of this research question deals with the calibration process of the dynamic building model. In this dissertation an energetic model of a highly insulated and conditioned passive school for athletes was composed. In order to be able to imitate the influence of these excellent building properties in a dynamic simulation, the following matters are recommended:

- Use enough thermal zones, especially in passive buildings with a lot of glazing and restricted heat transfer due to insulation materials. Wrap rooms that meet the following criteria into one zone:
 - Conditioned by the same ventilation system;
 - No significant difference in terms of glazing orientation;
 - No widely differing activities.

- Use a geometrically correct model of the building.
- Use a complete configuration of the existing HVAC system and building management system. Use EMS to develop a management system.
- Use precise parameters for mass, heat conduction and heat storage of partition structures;
- Use detailed schedules of internal gains such as occupants, domestic hot water, electric equipment and lighting. Use EMS to control the lighting.
- An estimate of the furniture for the internal mass is sufficient.
- Use precise ventilation and infiltration flow rates.

The second aspect of the research question focuses on advice for compiling a set of mitigating measures to remedy the overheating problem in the school. A combination of increased night ventilation and dynamic controlled solar shading is proposed to guarantee thermal comfort during summer. As an additional recommendation, it is advisable to use the average air temperature and illuminance, with 22 °C and 10.000 lux respectively as threshold values, as boundary conditions to manage the exterior solar screens.

Acknowledgments

A lot of time and energy was put into the creation of this thesis. The realization of this final piece would not have been possible without the cooperation and support of a few people. I would like to pay tribute to these people who have helped me enormously in the past year to bring this thesis to a successful conclusion. First of all, I would like to thank my external supervisors arch. A. Tormans, R. Vantvelt, E. Kuppens and K. Van Malderen, who provided me with the necessary documentation about the school and who were always there to answer questions. I would also like to thank my promotor Dr. ir. S. Verbeke for his feedback and guidance on this thesis. Finally, I would like to thank my parents and grandfather for proofreading this master's thesis and supporting me at all time.

References

- [1] H. Riebeek and R. Simmon, "Global Warming," *National Aeronautics and Space Administration (NASA)*, 2010. Retrieved from <https://earthobservatory.nasa.gov/features/GlobalWarming/page2.php>. [Accessed on 10 April 2019]
- [2] European Commission, "Energy performance of buildings," 2014. Retrieved from <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency/energy-performance-of-buildings>. [Accessed on 24 October 2019]
- [3] Vlaams Energieagentschap (VEA), "Revisie van de EPBD-richtlijn," 2010. [Accessed on 10 April 2019]
- [4] W. V. Belleghem, "Passiefscholen," *Vlaamse overheid, Ministerie van Onderwijs en Vorming*, 2007. [Accessed on 9 April 2019]
- [5] G. P. Hannah Bohez, Annelies Geerts and Tom De Smidt, "Pilotproject Passiefscholen Bilan 2015," *Agentschap voor Infrastructuur in het Onderwijs (AGION)*, 2015. [Accessed on 12 April 2019]
- [6] L. Mueller and T. Berker, "Passive House at the crossroads: The past and the present of a voluntary standard that managed to bridge the energy efficiency gap," *Energy policy*, vol. 60, pp. 586-593, 2013. [Accessed on 8 April 2019]
- [7] K. M. S. Chvatal and H. Corvacho, "The impact of increasing the building envelope insulation upon the risk of overheating in summer and an increased energy consumption," *Journal of Building Performance Simulation*, vol. 2, no. 4, pp. 267-282, 2009. [Accessed on 3 March 2019]
- [8] European Solar Shading Organization (ES-SO), "Overheating risk in low energy buildings to combat," 2016. [Accessed on 12 April 2019]
- [9] H. Breesch, "Zomercomfort in scholen," *KU Leuven*, 2018. Retrieved from <https://www.schoolbouwformule.be/workshop-zomercomfort-in-passiefscholen-een-lastig-huwelijk/>. [Accessed on 20 April 2019]
- [10] B. Wauman, H. Breesch, J. Poppe, S. Van Loon, A. Versele, and D. Saelens, "Ontwikkelen van specifieke randvoorwaarden voor scholen volgens de passiefstandaard," 2010. [Accessed on 10 March 2019]
- [11] Belgisch Instituut voor Normalisatie, "NBN EN 15251: Binnenmilieu - gerelateerde inputparameters voor ontwerp en beoordeling van energieprestatie van gebouwen voor de kwaliteit van binnenlucht, het thermisch comfort, de verlichting en akoestiek," *Brussels, Belgium*, 2007. [Accessed on 20 February 2019]
- [12] L. Peeters, R. De Dear, J. Hensen, and W. D'haeseleer, "Thermal comfort in residential buildings: Comfort values and scales for building energy simulation," *Applied energy*, vol. 86, no. 5, pp. 772-780, 2009. [Accessed on 11 April 2019]
- [13] J. F. Nicol, J. Hacker, B. Spires, and H. Davies, "Suggestion for new approach to overheating diagnostics," *Building Research & Information*, vol. 37, no. 4, pp. 348-357, 2009. [Accessed on 30 November 2018]
- [14] S. Verbeke, "Thermal inertia in dwellings Quantifying the relative effects of building thermal mass on energy use and overheating risk in a temperate climate Thermal inertia in dwellings," *University of Antwerp*, 2017. [Accessed on 24 March 2019]
- [15] Y. Al Horr, M. Arif, A. Kaushik, A. Mazroei, M. Katafygiotou, and E. Elsarrag, "Occupant productivity and office indoor environment quality: A review of the literature," *Building and environment*, vol. 105, pp. 369-389, 2016. [Accessed on 10 May 2019]
- [16] NREL, "OpenStudio," *National Laboratory of the U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy*, 2008. Retrieved from <https://www.openstudio.net/>. [Accessed on 25 April 2019]
- [17] BigLadder, "Euclid," 2017. Retrieved from <https://bigladdersoftware.com/projects/euclid/>. [Accessed on 10 October 2018]
- [18] The Dark Sky Company, "Dark Sky API," 2012. Retrieved from <https://darksky.net/dev>. [Accessed on 20 May 2019]
- [19] Solcast, "Global solar irradiance data and PV system power output data," 2019. Retrieved from <https://solcast.com/>. [Accessed on 22 May 2019]
- [20] G. Mustafaraj, D. Marini, A. Costa, and M. Keane, "Model calibration for building energy efficiency simulation," *Applied Energy*, vol. 130, pp. 72-85, 2014. [Accessed on 13 May 2019]
- [21] ASHRAE, "ASHRAE Standard 55-2004, Thermal environmental conditions for human occupancy," 2004. [Accessed on 16 March 2019]
- [22] M. Royapoor and T. Roskilly, "Building model calibration using energy and environmental data," *Energy and Buildings*, vol. 94, pp. 109-120, 2015. [Accessed on 10 May 2019]

INHOUD

VOORWOORD		
INHOUD		1
VERKLARING VAN AFKORTINGEN EN SYMBOLEN		4
1	INLEIDING	6
1.1	Op weg naar een duurzame maatschappij...	6
1.2	Doel en structurering	7
2	FYSISCHE ACHTERGROND EN LITERATUURSTUDIE	8
2.1	Passief standaard	8
2.1.1	Historiek	8
2.1.2	Passiefschool	8
2.1.3	Validatie passiefscholen	10
2.2	Warmtetransport	10
2.3	Thermisch comfort	11
2.3.1	Lichamelijke warmtebalans	11
2.3.2	De comforttheorie van Fanger	12
2.4	Oververhitting	14
2.4.1	Inleiding	14
2.4.2	Zomercomfort passiefbouw	14
2.4.3	Normering	15
2.4.4	Beoordeling zomercomfort	17
2.4.5	Luchtvochtigheid	20
2.5	Remediëringsmaatregelen	21
2.5.1	Inleiding	21
2.5.2	Beschaduwing	21
2.5.3	Nachtventilatie	23
2.6	Evaluatiecriteria	24
2.6.1	Inleiding	24
2.6.2	Oververhittingscriterium	24
2.6.3	Toegepaste remediëringsmaatregelen	25

3	METHODOLOGIE – OPBOUW EN KALIBRATIE	26
3.1	Rekenmodellen	26
3.1.1	Stationaire rekenmodellen	26
3.1.2	Dynamische rekenmodellen	26
3.2	Simulatiesoftware	27
3.2.1	EnergyPlus	27
3.2.2	OpenStudio	27
3.2.3	Energy Management System (EMS)	27
3.3	Weerbestand	28
3.4	Input EnergyPlus	29
3.4.1	Referentiescenario	29
3.4.2	Simulatieparameters	29
3.4.3	Geometrie en thermische zones	31
3.4.4	Interne warmtewinsten	31
3.4.5	Materialen	31
3.4.6	Thermische inertie	32
3.4.7	HVAC	33
3.4.8	Uitvoerparameters	33
3.5	Kalibratie	34
3.5.1	Limitatie van simulaties	34
3.5.2	Kalibratietechnieken	34
3.5.3	Kalibratie van een energetisch model	35
3.5.4	Kalibratie topsportschool	36
4	ANALYSE VAN MITIGERENDE MAATREGELEN	40
4.1	Referentiescenario	40
4.2	Mitigerende maatregelen	42
4.2.1	Nachtventilatie	42
4.2.2	Aangepaste g-waarde voor de beglazing	44
4.2.3	Vaste delen	45
4.2.4	Aangepaste binnenzonwering	46
4.2.5	Buitenzonwering	47

5	CONCLUSIE EN ONDERZOEKSAANBEVELINGEN	50
5.1	Conclusie	50
5.2	Onderzoeksaanbevelingen	51
	REFERENTIES	52
	BIJLAGEN	55
	LIJST FIGUREN	70
	LIJST TABELLEN	71
	LIJST VERGELIJKINGEN	72

VERKLARING VAN AFKORTINGEN EN SYMBOLEN

Afkortingen

AGIO	Agentschap voor Infrastructuur in het Onderwijs
ACH	air changes per hour
AMY	actual meteorological year
API	application programming interface
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers
BEN	bijna-energie-neutraal
BIM	building integration model
BMS	building management system
CSV	comma-separated value
CV(RMSE)	cross-validation root mean square error
EMS	Energy Management System
EPB	EnergiePrestatie en Binnenklimaat
EPBD	Energy Performance of Buildings Directive
ES-SO	European Solar-Shading Organisation
GO!	Onderwijs van de Vlaamse Gemeenschap
HVAC	heating, ventilation and air conditioning
IDF	input data files
JSON	JavaScript Object Notation
KAHO St-Lieven	Katholieke Hogeschool Sint-Lieven
MAT	mean air temperature
MBE	mean bias error
MRT	mean radiant temperature
nm	nanometer
NREL	National Renewable Energy Laboratory
OT	operative temperature
PMV	predicted mean vote
PPD	percentage of people dissatisfied
ppm	parts per million
RBC	rule based control
TU Delft	Technische Universiteit Delft
VEA	Vlaams Energieagentschap
WWR	Window-to-Wall-Ratio

Vreemde termen

air changes per hour	luchtuitwisselingen per uur
building management system	gebouwbeheersysteem
Energy Performance of Buildings Directive	Richtlijn Energieprestatie van gebouwen
garbage in = garbage out	rommel in = rommel uit
heating, ventilation and air conditioning	verwarming, ventilatie en koeling
input/output	invoer/uitvoer
mean air temperature	gemiddelde luchttemperatuur
mean radiant temperature	gemiddelde stralingstemperatuur
operative temperature	operatieve temperatuur

Griekse letters

α	constante	[-]
ϵ_i	de absolute fout	[-]
θ_c	comforttemperatuur	[°C]
θ_{ed-1}	de dagelijks gemiddelde buitentemperatuur van de vorige dag	[°C]
$\theta_{lim,cat\ i}$	de maximale toegestane operationele temperatuur voor categorie 'i'	[°C]
$\theta_{lim,roomtype\ i}$	de maximale toegestane operationele temperatuur voor lokaaltypologie 'i'	[°C]
θ_{MAT}	gemiddelde luchttemperatuur	[°C]
θ_{MRT}	gemiddelde stralingstemperatuur	[°C]
θ_{OT}	operationele temperatuur	[°C]
θ_{rm}	de lopende gemiddelde temperatuur van de vorige dag	[°C]

Symbolen

ACH	uurlijkse luchtwisselingen	[h ⁻¹]
$b_{gewogen}$	gewogen temperatuurfactor	[°C]
C	warmteverlies door convectie	[W/m ²]
C_{res}	voelbare warmte verloren via de ademhaling	[W/m ²]
CV(RMSE)	de gemiddelde kwadratische fout	[-]
$D_{roomtype\ i,period}$	de discomfortindicator	[-]
E_{dif}	latente warmte verloren via dampdiffusie door de huid	[W/m ²]
E_{res}	latente warmte verloren via de ademhaling	[W/m ²]
E_{sw}	latente warmte verloren door transpiratie	[W/m ²]
g_i	de gewichtsfactor van de maand in rang i	[-]
g_t	de gewichtsfactor in functie van de temperatuuroverschrijding	[-]
M	warmteproductie ten gevolge van het metabolisme	[W/m ²]
MBE	de gemiddelde fout	[-]
M_i	de gemeten gegevens op ogenblik 'i'	[-]
N_i	het aantal waarden gebruikt in de berekening	[-]
$n_{people,zone\ x, timestep\ y}$	het aantal aanwezigen in zone 'x' gedurende periode 'y'	[-]
R	warmteverlies door straling	[W/m ²]
S_i	de gesimuleerde gegevens op ogenblik 'i'	[-]
T_{maxgr}	de bovengrenstemperatuur	[°C]
T_{r_i}	de gemiddelde temperatuur in rang i	[°C]
$T_{r_{mean}}$	de gewogen gemiddelde maximum temperatuur	[°C]
W	warmteverlies aan een externe bron	[W/m ²]
X	het temperatuuroverschrijdingspercentage	[-]
Δt_i	het tijdsinterval horend bij t_i	[-]
Δt_{mean}^r	het gemiddelde gewogen tijdsinterval	[h]

Indices

cat	category	categorie
diff	diffuse	diffuse
ed	daily exterior	dagelijks buiten
res	respiration	ademhaling
rm	running mean	lopend gemiddelde

1 INLEIDING

Om een beeld te krijgen van de thematiek waarin het onderzoek zich bevindt en het onderwerp van deze scriptie hierin te situeren vangt de inleiding aan met een algemene context. Na het scheppen van een algemeen beeld wordt de structuur en het doel van het onderzoek uitgelijnd en duidelijk omkaderd.

1.1 Op weg naar een duurzame maatschappij...

De wereldwijde gemiddelde temperatuur stijgt bijna tweemaal zo snel als 50 jaar geleden [1]. Daarom is het broeikaseffect een belangrijk gespreksonderwerp geworden in de mondiale politiek. De uitstoot van broeikasgassen staat bekend als de hoofdoorzaak van deze klimaatveranderingen. Vanwege zijn associatie met energie, heeft de mens geen andere keus dan zijn energieverbruik te verminderen. Momenteel is ongeveer 40% van het totale energieverbruik in Europa te wijten aan gebouwen. Het verbeteren van de energieprestaties van gebouwen is dus een absolute noodzaak om de CO₂-emissie terug te dringen [2]. Om het energieverbruik te reduceren en het thermisch comfort te behouden, zal er toevlucht moeten worden genomen tot passieve en energiezuinige systemen. Deze denkwijze zorgde voor een transitie van de traditionele bouwwijze. De eerste laag-energiegebouwen werden geboren. Door de eisen stelselmatig te verstrengen werden de BEN- of bijna-energie neutrale gebouwen geïntroduceerd. De optimalisatie van bijna-energie neutrale gebouwen leidde uiteindelijk tot de passiefstandaard, waarbij de jaarlijkse energievraag en de luchtdichtheid verder wordt beperkt om warmteverliezen tegen te gaan. Dit, in combinatie met maximale zonnewinsten door zuidgerichte beglazing, leidt tot een minimale energievraag voor verwarming. Als einddoel wordt er gestreefd naar energieneutrale gebouwen die de resterende energievraag voor koeling en verwarming compenseren door lokaal opgewekte hernieuwbare energie [3, 4].

De transitie naar energiezuinig bouwen werd in gang gezet door dwingende maatregelen, vastgelegd in de Europese richtlijn betreffende de energieprestaties van gebouwen (EPBD of Energy Performance of Buildings Directive), goedgekeurd op 16 december 2002. Op de lentetop van maart 2007 werden er enkele maatregelen voorgesteld om de energie-efficiëntie in de Europese Unie performanter te maken [5]. Dit resulteerde in een gewijzigde Europese energieprestatie richtlijn (EPBD 2010/31/EU), goedgekeurd door Europa op 19 mei 2010. Met behulp van de eisen in deze richtlijn wil de Europese Unie zijn lidstaten stimuleren om de energie-efficiëntie van hun gebouwen op te waarderen. Dit op een zo kostenefficiënt mogelijke manier, rekening houdend met klimaatomstandigheden en eisen voor het binnenklimaat.

Om te anticiperen op een toekomstige verstrenging van de energieprestatieregelgeving lanceerde de Vlaamse Regering in 2007 het Pilotproject Passiefscholen. Een project dat, enerzijds functioneert als leerproces om het ontwerp van energiezuinige scholen te optimaliseren, en anderzijds energiezuinig bouwen moet promoten in de private sector. Ter uitvoering van het decreet van 7 december 2007 betreffende energieprestaties in scholen werd in het besluit van de Vlaamse regering vastgelegd dat het Agentschap voor Infrastructuur in het Onderwijs (AGION) en het onderwijs van de Vlaamse Gemeenschap (GO!) instaan voor de opvolging van dit pilotproject [4].

Gedurende dit leerproces werd al snel duidelijk dat passiefscholen en een behaaglijk zomercomfort een moeilijk huwelijk vormen. Om de criteria van passiefbouw te kunnen bereiken is immers een doorgedreven isolatie en luchtdichtheid van het gebouw noodzakelijk. Dit zorgt enerzijds voor lage transmissie- en ventilatieverliezen, wat resulteert in de lagere energievraag. Anderzijds kunnen deze maatregelen de kans op oververhitting van het gebouw aanzienlijk verhogen, wat nadelig is voor het thermisch comfort gedurende warme periodes [3].

1.2 Doel en structurering

In dit naslagwerk wordt een dynamische simulatie uitgevoerd van een passiefschool voor topsporters die te kampen heeft met oververhittingsproblemen. Meer bepaald wordt er een antwoord geformuleerd op de volgende onderzoeksvragen:

“Hoe gedetailleerd moet een dynamisch simulatiemodel in EnergyPlus zijn om het werkelijke verloop van temperatuur in een passiefschool met topsportfaciliteiten na te bootsen? En hoe kan het oververhittingsprobleem in een passiefschool met topsportfaciliteiten zo efficiënt mogelijk worden opgelost?”

Het onderzoek vat aan met een literatuurstudie over de kenmerken van de passiefbouw. In eerste instantie wordt er een overzicht gemaakt van de gangbare eisen en normeringen. De aandacht gaat logischerwijs naar de bouwkundige, en meer bepaald de bouwfysische en bouwtechnische eisen, die een invloed zullen hebben op het comfort in en het energieverbruik van een gebouw. Uit een grondig literatuuronderzoek van alle thematieken, die bij de concipiëring van een gebouw aan bod komen, werd de uiteindelijke doelstelling geformuleerd. Door terug te koppelen naar de omkadering van thermisch comfort wordt oververhitting afgebakend, waar het oververhittingscriterium uit voortvloeit. Vervolgens worden de oorzaken en gevolgen van oververhitting blootgelegd. De literatuurbespreking wordt afgesloten met een zorgvuldige selectie van remediëringsmaatregelen.

Met de verworven informatie uit het verkennende literatuuronderzoek en het as-built dossier wordt een energetische model samengesteld in de dynamische rekensoftware EnergyPlus. Na toekenning van de nodige randvoorwaarden, technische gegevens en gebruiksprofielen wordt het model gekalibreerd om de werkelijkheid zo nauwkeurig mogelijk te benaderen. Tot slot worden de verschillende remediëringsmaatregelen uitgetest om een gepaste set van mitigerende maatregelen samen te stellen die het oververhittingsrisico zo efficiënt mogelijk verhelpt.

2 FYSISCHE ACHTERGROND EN LITERAATUURSTUDIE

Om zich een weg te banen door de evoluerende bouwwereld met steeds strengere energetische eisen, innovatieve bouwtechnieken en complexe rekensoftware voor simulaties wordt er van start gegaan met een diepgaand onderzoek van de literatuur.

2.1 Passief standaard

2.1.1 Historiek

De ontwikkeling van passiefbouw kent volgens de literatuur zijn oorsprong in China en is na een bezoek van de Zweedse Professor Bo Adamson overgebracht naar onze westerse contreien. Aan het zuidelijk gedeelte van Yangtze Rivier hadden bewoners, door een schaarste aan middelen en een relatief mild klimaat, niet het recht om hun woningen te verwarmen. Ondanks het gematigd klimaat kon het gedurende de winterperiode onaangenaam koud worden, terwijl tijdens de zomerperiode de woningen dermate werden opgewarmd, dat actieve koeling noodzakelijk was om een comfortabel binnenklimaat te creëren. Adamson werd door de Chinese overheid aangesteld om een oplossing te ontwikkelen zodat de inwoners konden genieten van een verbeterd thermisch comfort zonder het gebruik van brandstoffen. Na zijn terugkeer naar Europa, ontmoette Adamson de Duitse natuurkundige Wolfgang Feist, en samen ontwikkelden ze het passiefhuisconcept waar de passiefstandaard uit voortvloeide [6].

2.1.2 Passiefschool

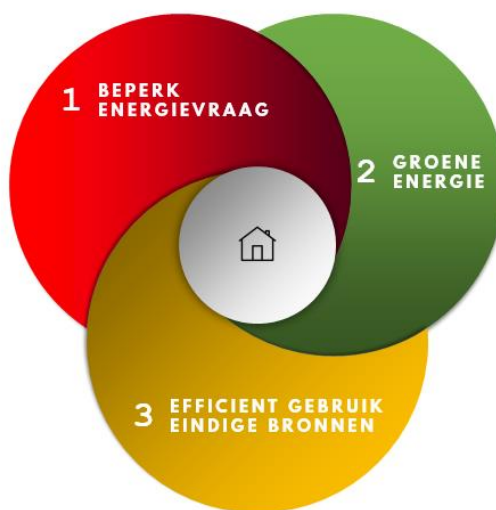
Een passiefschool wordt gedefinieerd als een zéér energiezuinige schoolinfrastructuur die met een minimaal energieverbruik, een behaaglijk binnenklimaat garandeert gedurende de gehele jaarcyclus. Een filosofie die wordt verwezenlijkt met een doordacht gebouwontwerp dat optimaal gebruik maakt van passieve strategieën om warmteverliezen en –winsten te balanceren [4].

Om te voldoen aan de passief standaard mag het brutogebruik voor verwarming van de school niet hoger liggen dan 15 kWh/m² per jaar en is het E-peil beperkt tot E55. De bruto energiebehoefte voor koeling mag eveneens de kaap van 15 kWh/m² per jaar niet overschrijden. Verder wordt er een beperking van 120 kWh/m² per jaar opgelegd aan de primaire energievraag voor ruimteverwarming, sanitair warm water (SWW) en elektrische apparaten. Tot slot moet de luchtdichtheid van de school voldoende performant zijn zodat er niet meer dan 0,6 gebouwvolumes per uur worden uitgewisseld met de buitenomgeving [3, 7].



Figuur 2-1 Eisen passiefschool

Om aan deze eisen in hun totaliteit, zo kostenefficiënt mogelijk, te kunnen voldoen is een intelligent ontwerp van fundamenteel belang. Als uitgangspunt wordt er gebruik gemaakt van de Trias Energetica methodiek, een strategie die efficiëntie in al zijn facetten beoogt, gaande van duurzaamheid tot kosteneffectiviteit. Hierbij wordt het volgende stappenplan doorlopen:



Figuur 2-2 Trias Energetica methodiek

- Stap 1. Beperk de energievraag
- Stap 2. Gebruik hernieuwbare energie
- Stap 3. Gebruik eindige energiebronnen efficiënt

Novem (E. Lysen) introduceerde het begrip in 1996, de strategie werd verder uitgewerkt door de TU Delft (C. Duijvenstein) die de volgorde van het stappenplan benadrukte [4, 8].

Passiefbouw tracht, met een doorgedreven isolatieschil en performante luchtdichtheid, de initiërende stap tot het uiterste te drijven. Dit om transmissie- en ventilatieverliezen tot een absoluut minimum te herleiden. De isolatiedikte kan oplopen tot 30 à 35 cm afhankelijk van de gebruikte constructie- en isolatiematerialen. Vensters zijn voorzien van driedubbele beglazing en het schrijnwerk wordt extra geïsoleerd om koudebruggen te vermijden. Dit geheel wordt vervolgens afgewerkt, met luchtdichte folies en tochtstrips aan ramen en deuren, tot een bunker voor warmte. Het kan vergeleken worden met een enorm grote thermosfles [3, 9]. De doorgedreven isolatie en luchtdichtheid zorgt er immers voor dat de kans op warmteopbouw tijdens warme dagen met overtollige zonnewinsten enorm toeneemt. Een fenomeen dat het laatste decennia meermaals werd bevestigd door verscheidende instanties afkomstig uit heel Europa [3, 10].

Deze oververhitting wordt deels veroorzaakt door interne warmtewinsten afkomstig van verlichting, toestellen en personen. Voeg daar de zonnewinsten bij, die met oost-, zuid- en westwaarts georiënteerde beglazing zoveel mogelijk worden benut om de warmtevraag tijdens koude dagen te beperken, en de temperatuur loopt al snel op. De passieve warmtewinsten compenseren immers ongeveer 40% van de warmteverliezen van het gebouw [3].

Doordacht omspringen met passieve warmtewinsten is dus van cruciaal belang om oververhitting van passiefscholen in toekomst te vermijden. Overdachte plaatsing van beglazing die consequent is voorzien van zonwering, het gebruik van thermische massa en passieve koeltechnieken moeten soelaas brengen om dit probleem op een energievriendelijke manier te verhelpen. Tot slot zal validatie van kritieke zones met dynamische simulaties onontbeerlijk worden om dit probleem in de toekomst te vermijden [11].

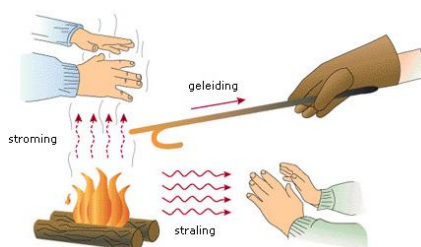
2.1.3 Validatie passiefscholen

Voor er van start werd gegaan met het pilootproject Passiefscholen waren berekeningsmethodes voor passiefbouw hoofdzakelijk toegespitst op gebouwen met woon- en kantoorfuncties. Al snel werd duidelijk dat de randvoorwaarden van deze bouwtypes een slechte invloed hadden op de berekende kwaliteitscriteria en niet geschikt waren voor scholen. Een school wordt, in tegenstelling tot een woning of kantoorgebouw, immers gekarakteriseerd door een hoge bezettingsgraad, wat resulteert in hoge interne warmtewinsten, die sterk variëren tussen de verschillende lokaaltypes. In combinatie met de hoge beglazingsgraad is er nood aan grote hygiënische ventilatiegebieten. Dat, terwijl het gebouw slechts een korte gebruikstijd doorloopt (8h vs. 16 à 24h voor woningen) [11]. Wegens het uitgebreid gamma aan lokaaltypologieën moest er dus een uitgebreid pakket aan randvoorwaarden worden ontwikkeld aangepast aan deze specifieke karakteristieken. Elk lokaaltipe wordt immers op een andere wijze belast door een variëteit aan interne warmtewinsten [12].

Om een referentiekader van randvoorwaarden te creëren werden verscheidende internationale normeringen aangewend om internationale compatibiliteit te garanderen. Op deze manier kunnen passiefscholen genieten van een brede kwaliteitserkenning. De studie werd uitgevoerd onder leiding van KAHO St-Lieven in samenwerking met de Katholieke Universiteit Leuven, de Vrije Universiteit Brussel en het Passiefhuisplatform. Gecoördineerd door afgevaardigden van GO!, AGIO en VEA met een terugkoppeling naar een reflectiegroep bestaande uit coördinerende figuren van de verschillende pilootprojecten (studiebureaus, architecten en bouwheren), de BIM, de dienst volksgezondheid, de koepels en LNE dienst milieu en gezondheid [12]. De normen en software waaruit randvoorwaarden werden aangewend zijn terug te vinden in bijlage A.

2.2 Warmtetransport

Thermische energie is gekoppeld aan de kinetische energie van atomen. Warmteoverdracht verloopt steeds van een midden op hogere naar een midden op lagere temperatuur ter vereffening van het temperatuurverschil en berust op drie mechanismen: conductie, convectie en radiatie.



Figuur 2-3 Soorten warmtetransport [13]

Conductie of geleiding duidt op de energietransport van een materiedeeltje met meer thermische agitatie naar een materiedeeltje met minder thermische agitatie binnen eenzelfde materie, die zelf macroscopisch niet in beweging is. Conductie vindt plaats zowel bij gassen, vloeistoffen als bij vaste stoffen. Dit proces vormt de voornaamste oorzaak van warmteverlies in een gebouw.

Convectie of stroming omvat het energietransport van een warmtedragend fluïdum (gas of vloeistof) dat zich verplaatst. Zowel een temperatuurverschil, verschil in dichtheid als een drukverschil kan de drijvende kracht zijn achter de verplaatsing.

Bij **radiatie of straling** vindt de energie-uitwisseling plaats door middel van elektromagnetische stralen. Elk oppervlak, met een oppervlaktetemperatuur verschillend van 0 kelvin straalt en wordt bestraald. Net zoals bij geleiding wordt er energie getransporteerd van een oppervlak op hogere naar een oppervlak op lagere temperatuur om het temperatuurverschil te vereffenen [14].

2.3 Thermisch comfort

De hoofdfuncties die een gebouw moet uitvoeren zijn het bieden van onderdak en het beschermen van inwoners tegen weersinvloeden. Aanvullend moet het gebouw zorgen dat de inwoners kunnen genieten van een comfortabel binnenklimaat. De kwaliteit van het binnenklimaat kan worden toegeschreven aan vier verschillende subcategorieën, elks voorzien van hun eigen parameters en hindernissen om het algemeen comfort te vrijwaren van nefaste invloeden. Wanneer deze vier subcategorieën worden opgelijst volgens afnemende impact op het algemeen comfort van het binnenklimaat, wordt volgende lijst verkregen:

1. Thermisch comfort
2. Luchtkwaliteit
3. Akoestisch comfort
4. Visueel comfort

Deze scriptie beperkt zich tot de eerste subcategorie. Voor het onderzoek wordt er gebruik gemaakt van het Amerikaanse modelprogramma EnergyPlus dat is opgebouwd rond de Amerikaanse norm voor thermisch comfort (ASHREA 55). Samen met de Europese norm (ISO EN 7730) definiëren deze normeringen thermisch comfort gebaseerd op de comfortvergelijking van Fanger [15]. De omgevingsparameters die van toepassing zijn voor het ontwerpen, exploiteren en ingebruikname van een omgeving die als thermisch behaaglijk wordt ervaren zijn welomschreven vastgelegd in de 'ASHRAE Standard 55: Thermal Environmental Conditions for Human occupancy'. ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers) omschrijft thermische behaaglijkheid als een gemoedstoestand waarbij men tevreden is over de thermische eigenschappen van de omgeving [16]. De invloed van lokaal thermisch discomfort (vloertemperaturen, tocht, stralingsasymmetrie en verticale temperatuurverschillen) en de snelheid van temperatuurwijzigingen wordt in dit naslagwerk buiten beschouwing gelaten [17].

2.3.1 Lichamelijke warmtebalans

Het lichaam tracht te allen tijden een temperatuur van 37 °C te behouden, mits enkele fluctuaties ten gevolge van dagelijkse acclimatisatie en fysieke arbeid. Thermoreceptoren meten voortdurend de temperaturen op verschillende plaatsen in ons lichaam. Aan de hand van deze gegevens sturen de hersenen onze 'autonome' lichaamsreacties aan. Indien het lichaam aanhoudend wordt afgekoeld, verminderd de doorbloeding en verhoogt de spieractiviteit. Aanhoudende opwarming van het lichaam daarentegen, verhoogt onze doorbloeding en laat ons transpireren. De huidtemperatuur en zweetafscheiding vormen met andere woorden de twee fysiologische parameters om de warmtebalans van ons lichaam te handhaven [14].

Onderstaande gelijkheid omvat de gehele warmtebalans van het lichaam waarop de omkadering van thermisch comfort wordt gebaseerd. Het lichaam zal thermisch comfort ervaren indien er voldaan is aan deze warmtebalans [12, 14].

$$M (-W) - C_{res} - E_{res} - E_{dif} - E_{sw} = R + C \quad (2.1)$$

Met:

M	=	warmteproductie ten gevolge van het metabolisme	[W/m ²]
W	=	warmteverlies aan een externe bron	[W/m ²]
C _{res}	=	voelbare warmte verloren via de ademhaling	[W/m ²]
E _{res}	=	latente warmte verloren via de ademhaling	[W/m ²]
E _{dif}	=	latente warmte verloren via dampdiffusie door de huid	[W/m ²]
E _{sw}	=	latente warmte verloren door transpiratie	[W/m ²]
R	=	warmteverlies door straling	[W/m ²]
C	=	warmteverlies door convectie	[W/m ²]

2.3.2 De comforttheorie van Fanger

Met thermisch comfort wordt gepeild naar het behaaglijkheidsgevoel van de mens in een thermische omgeving. Om een omgeving te creëren die als aangenaam wordt ervaren door de mens moet het samenspel tussen de omgevingstemperatuur, de relatieve vochtigheid, de gemiddelde stralingstemperatuur, de relatieve luchtsnelheid, het activiteitsniveau van de mens en de thermische isolatiewaarde van de kledij worden geoptimaliseerd.

P. Ole Fanger slaagde erin om deze zes parameters te bundelen tot een sluitend model. Wanneer wordt voldaan aan “de comfortvergelijking van Fanger”, die is voortgevloeid uit de warmtebalans van het lichaam, kan de thermische omgeving beschouwd worden als behaaglijk. De vergelijking vormt het fundament voor de norm NBN EN ISO 7730 [18].

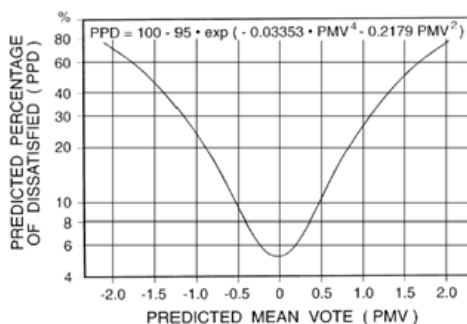
Technisch en economisch gezien is het niet altijd mogelijk om aan de comfortvergelijking te voldoen. Daarom wordt met behulp van de PMV-index (Predicted Mean Vote) en de PPD-index (Predicted Percentage Dissatisfied) geschat welke mate van ontevredenheid zich zal manifesteren binnen een groep indien er wordt afgeweken van de comfortvergelijking. Om begrip te krijgen van deze indices en hun waardeoordeel wordt de norm NBN EN ISO 7730 geraadpleegd [14].

De PMV-index geeft het waardeoordeel voor de temperatuurbeleving van de groep aanwezigen weer. De gemiddelde score van de groep wordt uitgezet op een psychofysische 7-puntenschaal die de appreciatie weergeeft, gaande van koud (-3), koel (-2), lichtelijk koel (-1) over neutraal (0) tot lichtelijk warm (+1), warm (+2) en heet (+3). Evenwicht van de warmtebalans wordt enkel verkregen indien de interne warmteproductie van het lichaam gelijk is aan de warmteafgifte aan de omgeving. Daar het niet mogelijk is om een continue optimaal thermisch comfort te vrijwaren, zal voor nieuwe gebouwen en renovaties gestreefd worden naar een PMV-index gelegen tussen -0,5 en +0,5.



Figuur 2-4 PMV-index¹

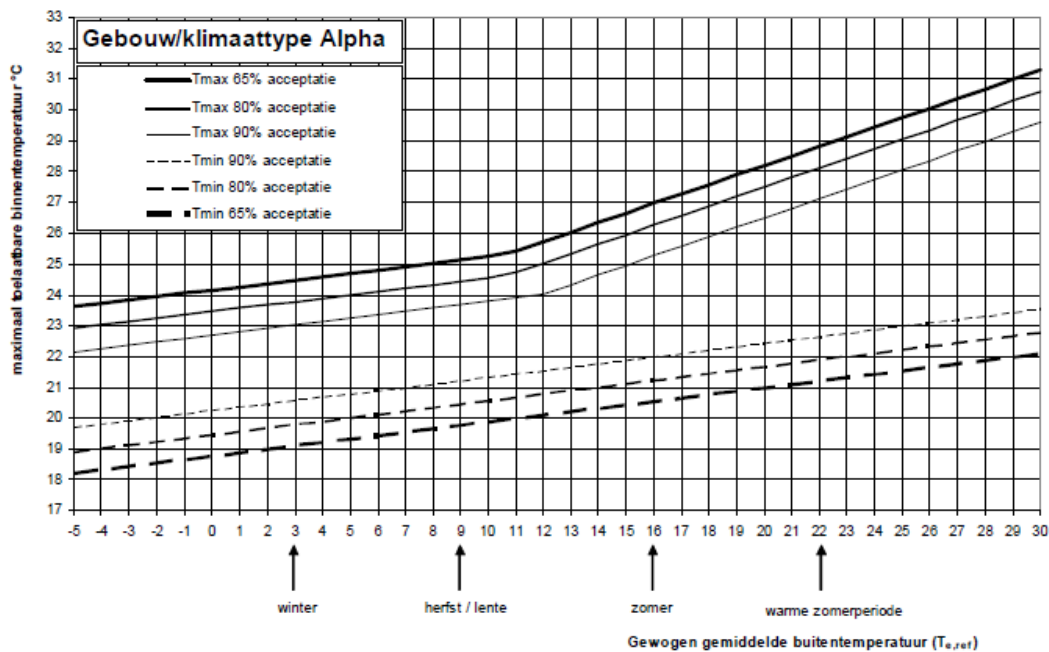
De PPD-index geeft een kwantitatieve inschatting van het aantal personen die thermisch onbehagen ervaren in een bepaalde thermische omgeving. Het geeft met andere woorden een schatting van het aantal ontevreden bij een bepaald binnenklimaat. Indien voldaan wordt aan de comfortvergelijking van Fanger is de PMV-index gelijk aan 0 en de PPD-index gelijk aan 5%. Concreet betekent dit dat 5% van de aanwezige groep personen geen thermisch comfort zal ervaren bij een PMV-index gelijk aan nul. De resterende fractie ervaart behaaglijk thermisch comfort. De relatie tussen de PMV-index en de PPD-index wordt weergegeven in Grafiek 2-1 [14].



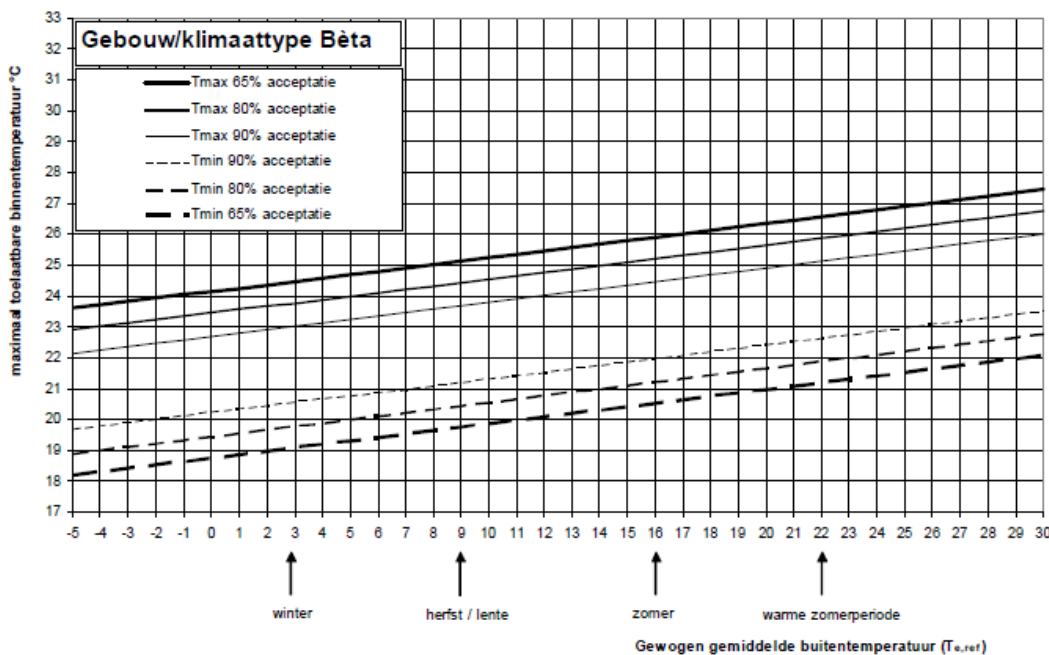
Grafiek 2-1 Koppeling tussen de PMV- en PPD-index [19]

¹ De exacte berekening van de PMV- en PPD-index kan teruggevonden worden in de norm NBN EN ISO 7730.

Ondanks dat de comfortvergelijking van Fanger een sterk theoretisch model is om thermisch comfort te beoordelen, is de comforttheorie niet altijd toepasbaar. De Dear en Branger toonden aan dat er een sterke correlatie bestaat tussen de comforttemperatuur binnen en de buitentemperatuur. Zoals eerder aangetoond acclimiseert het menselijk lichaam zich aan zijn omgeving, zowel psychologisch als gedragsmatig. Het is deze thermische adaptie die aan de grond ligt van correlatie tussen comfort- en buitentemperatuur. De kritiek van de Dear en Branger op het model van Fanger resulteerde in de ontwikkeling van de adaptieve comforttheorie. Dit model houdt rekening met de thermische adaptie van de mens, zoals het openen van ramen en wijzigen van kledij tijdens warme periodes, waardoor er een knik in de grafiek ontstaat [11, 20].



Grafiek 2-2 Adaptieve comforttheorie – Gebouw/klimaatype Alpha [21]



Grafiek 2-3 Adaptieve comforttheorie – Gebouw/klimaatype Bèta [21]

2.4 Oververhitting

2.4.1 Inleiding

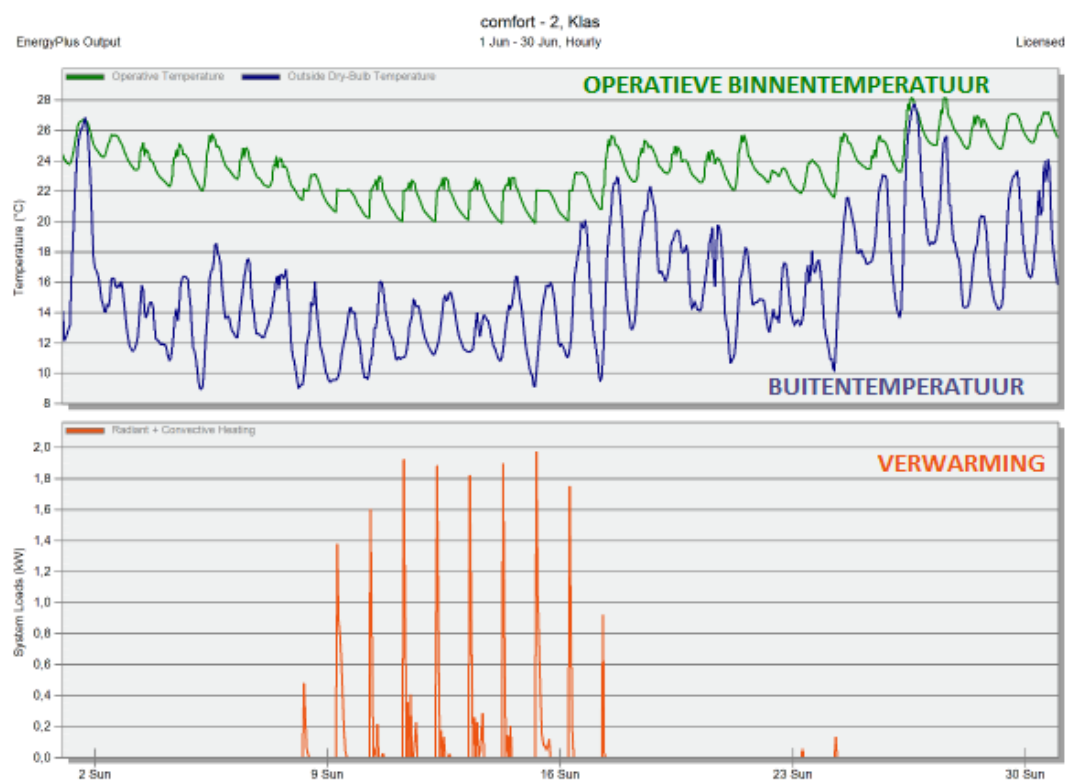
Oververhitting in gebouwen ligt aan de basis van tal van problemen, variërend van thermisch ongemak en productiviteitsvermindering tot ziekte en overlijden. Naar verwachting zal deze ongewenste toestand van het binnenklimaat zich meer en meer gaan manifesteren naarmate de opwarming van de aarde doorgaat. Logischerwijs gaat oververhitting van een gebouw hand in hand met oververhitting van zijn gebruikers.

Het menselijk lichaam raakt oververhit indien het zijn optimale lichaamstemperatuur van 37 °C niet meer kan handhaven. Wanneer externe invloeden ervoor zorgen dat de temperatuur van ons lichaam oploopt tot boven 37 °C, zullen er lichamelijke reacties optreden. Door transpiratie, stress en dorst zal ons lichaam trachten de evenwichtstemperatuur te herstellen. Wanneer het lichaam er niet in slaagt om de temperatuur te reguleren, kunnen er ernstige gevolgen optreden voor onze gezondheid. Zowel lichamelijk als mentaal.

Een te hoge omgevingstemperatuur ligt aan de basis van dit verschijnsel en wordt veroorzaakt door externe en interne warmtewinsten. De maximale nominale waarde die de omgevingstemperatuur mag aannemen ligt niet eenduidig vast en is sterk afhankelijk van de gebouw- en ruimtetypologie [4, 22].

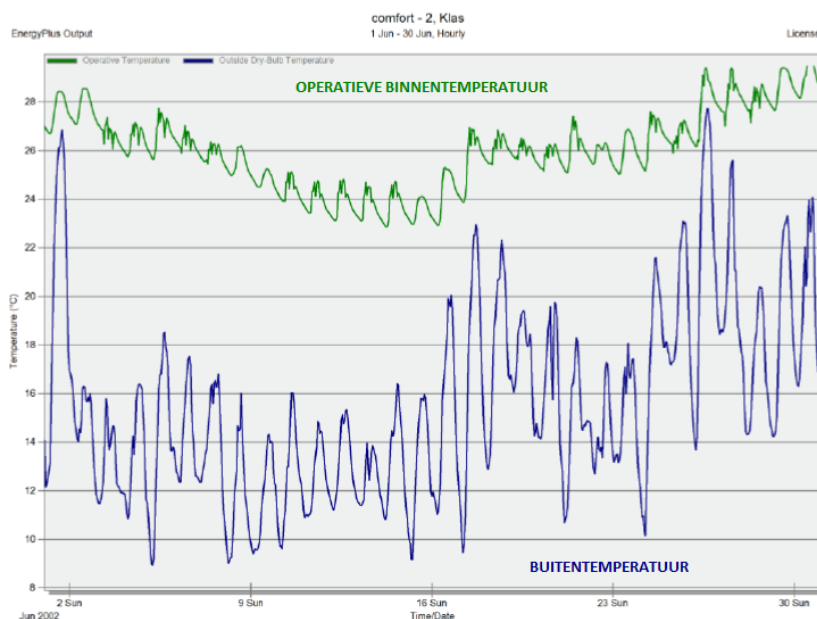
2.4.2 Zomercomfort passiefbouw

Eerder werd een passiefschool reeds vergeleken met een thermosfles, de sterk geïsoleerde en luchtdichte opbouw zorgt er immers voor dat de kans op warmteopbouw tijdens warme zomerdagen met overtollige zonnewinsten enorm toeneemt. In een vergelijkende studie tussen een school gebouwd volgens de principes van de jaren 80 en een school gebouwd volgens de EPB-regelgeving in 2016 is reeds te zien dat er minder spontane afkoeling plaats vindt en zowel de gemiddelde als maximale operatieve temperatuur² 2 °C hoger ligt in de maand juni. Desalniettemin, moet er niet meer worden verwarmd gedurende de tweede week van juni.



Figuur 2-5 Dynamische simulatie van een school uit de jaren 80'

² Het gemiddelde van de luchttemperatuur en de stralingstemperatuur. Dit indiceert de gevoelstemperatuur.



Figuur 2-6 Dynamische simulatie van een school volgens de wetgeving van 2016

Ook deze studie geeft aan dat het oververhittingsverschijnsel van passiefscholen hoofdzakelijk veroorzaakt wordt door de grote warmtelasten in scholen. Een klas met 20 kinderen zou resulteren in een warmte winst van 20 Watt per m² uitzonderlijk geleverd door de kinderen zelf. In combinatie met zonnewinsten die kunnen oplopen tot 50 Watt per m², warmte van elektrische apparatuur en een ventilatie die beperkt is tot 15 Watt per m² koeling stijgt de kans op oververhitting aanzienlijk. De toepassing van zomercomfortstrategieën is met andere woorden onontbeerlijk bij passiefscholen.

Naast de juiste ontwerpkeuze, speelt eveneens de continue bijsturing van HVAC-systemen en zonwering een cruciale rol. Zo moeten luchtgroepen onderhouden worden zodat ze te allen tijden de ventilatiedebieten kunnen garanderen, interne warmtelasten worden beperkt en overtollige zonnewinsten worden vermeden. Bijkomend kunnen luchtgroepen worden gebruikt als nachtventilatie [23].

2.4.3 Normering

Door het specifiek gebruiksprofiel, de gebouweigenschappen en variëteit aan lokaaltypologieën moet er bij passiefscholen voldoende aandacht worden besteed aan het thermisch zomercomfort zodat de prestaties van leerlingen niet in het gedrang komen. Scholen worden immers gekarakteriseerd door een hoge bezetting gedurende korte periodes (8h) en een hoog beglazingspercentage zodat daglicht optimaal kan worden benut. Deze combinatie drijft de koelvraag zowel tijdens de zomer, maar ook tijdens de tussenseizoenen, drastisch de hoogte in indien er niet voldoende passieve maatregelen worden genomen [4].

De drempelwaarde voor een maximale operatieve temperatuur in NBN EN 15251 voor niet-residentiële gebouwen³ van klasse II, wat duidt op nieuwe en gerenoveerde gebouwen, bedraagt 26,0 °C [24].

Outputspecificaties DBFM

Volgens het DBFM-programma scholenbouw mogen de temperaturen maximaal 5% van de verblijftijd 25,5°C overschrijden en 1% van de verblijftijd de kaap van 28°C [12].

PHPP

Bij de berekeningsmethode die wordt toegepast voor de evaluatie van de passiefnorm mag de grens van 25°C niet meer dan 5% van de gebruikstijd, ingeschat op 1600h, worden overschreden [12].

³ De categorie waaronder onderwijsgebouwen worden gecategoriseerd.

In Tabel 2-1 worden alle richtwaarden voor koeling van klaslokalen, kantoren met een gemeenschappelijke bureau en open leercentra, terug te vinden in de verschillende normeringen die werden geraadpleegd bij de ontwikkeling van het referentiekader aan randvoorwaarden voor passiefscholen, samengevat [12].

Tabel 2-1 Richtwaarden ruimtekoeling klaslokalen, bureaus en OLC

Klaslokalen / kantoor (gemeenschappelijke bureau) / OLC						
Norm / software	Koeling					
	Winter			Zomer		
	Algemeen	6% PPD	10% PPD	Algemeen	6% PPD	10% PPD
EPB	23			23		
PHPP	25			25		
Nederland – NEN 2916	24			24		
Duitsland – EnEV – DIN V 18599	24			24		
Duitsland – PHI	25			25		
ARAB	30			30		
NBN-ISO 7730:2006		24	26		26	28
NBN EN 15251:2007		23	24		25	26
Binnenmilieudecreet (BS 19.X.04)	24			26		
Nederland – Senternovem Eisen Frisse scholen	23 ($T_e < 20$) $T_e + 3$ ($T_e > 20$)			23 ($T_e < 20$) $T_e + 3$ ($T_e > 20$)		
Conclusie referentiekader	24			24		

Tabel 2-2 geeft een samenvatting van alle richtwaarden voor ruimtekoeling van een sporthal [12].

Tabel 2-2 Richtwaarde ruimtekoeling sporthal

Sporthal						
Norm / software	Koeling					
	lichte sport			middelzware sport		
	Algemeen	6% PPD	10% PPD	Algemeen	6% PPD	10% PPD
EPB	23			23		
PHPP	25			25		
Nederland – NEN 2916	24			24		
Nederland – KVLO normen gymzalen	25			25		
Duitsland – EnEV – DIN V 18599	24			24		
Duitsland – PHI	25			25		
ARAB	26,7			26,7		
NBN-ISO 7730:2006		24	24		20	22
Binnenmilieudecreet (BS 19.X.04)	24			26		
Outputspecificaties DBFM scholenbouw	26			26		
Bloso Dixit Michel Van Espen	16			16		
Presentatie Energiezorg op school (Cenergie)	17			17		
Conditions and planning aspects of passive house gymnasiums (PHI)	18			18		
Conclusie referentiekader	24			24		

2.4.4 Beoordeling zomercomfort

Om het thermisch zomercomfort concreet te beoordelen bestaan er drie methodes die terug te vinden zijn in de norm NBN EN 15251. Voor de selectie van methode moet de verwachte comfortcategorie worden vastgelegd. Er is keuze uit drie comfortcategorieën zoals weergegeven in Tabel 2-3.

Tabel 2-3 Comfortcategorieën comfortbeoordeling [24, 25]

Comfort categorie	Beschrijving	Toegelaten actieradius T_c	PPD [%]	PMV
Categorie I	Hoge verwachtingsgraad – voor ruimtes bezet door erg kwetsbare personen met speciale vereisten	$\pm 2^\circ\text{C}$	< 6	± 0.2
Categorie II	Normale verwachtingsgraad – voor nieuwbouw en renovaties	$\pm 3^\circ\text{C}$	< 10	± 0.5
Categorie III	Matige verwachtingsgraad – voor bestaande gebouwen	$\pm 4^\circ\text{C}$	< 15	± 0.7

De eerste beoordelingsmethode van het thermisch comfort, het temperatuuroverschrijdingscriterium (TO), berust op de comfortvergelijking van Fanger en berekent het percentage aan uren waarbij de PMV-index of de operationele temperatuur buiten het opgelegde temperatuurinterval voor de ruimte valt. Het toegelaten overschrijdingspercentage van de grenzen daalt indien er een hogere comfortcategorie moet worden gewaarborgd.

Facultatief kan bij deze methode het temperatuurinterval worden gedefinieerd in functie van de externe bedrijfsgemiddelde temperatuur θ_{rm} , meer bepaald het exponentieel gewogen lopende gemiddelde van de dagelijkse buitentemperatuur:

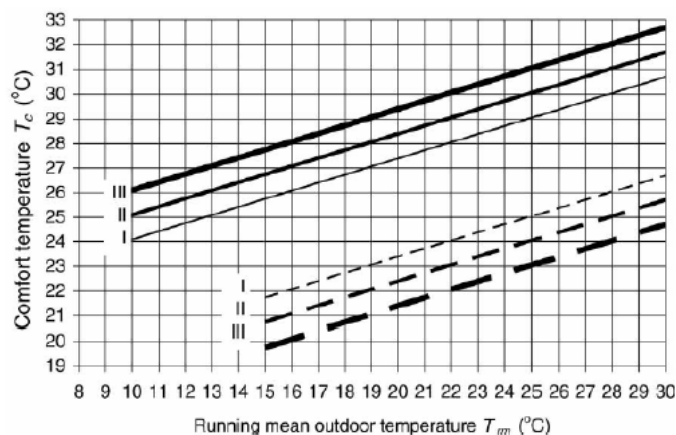
$$\theta_{rm} = (1 - \alpha) \cdot \theta_{ed-1} + \alpha \cdot \theta_{rm-1} \quad (2.2)$$

Met:

θ_{rm}	=	de lopende gemiddelde temperatuur van de vorige dag	[°C]
θ_{ed-1}	=	de dagelijks gemiddelde buitentemperatuur van de vorige dag	[°C]
α	=	constante gelijkgesteld aan 0.8 zoals aanbevolen in de norm	[-]

In vergelijking (2.3) wordt, in functie van θ_{rm} , een comforttemperatuur θ_c samengesteld die onderhevig is aan dagelijkse schommelingen. Deze comforttemperatuur θ_c wordt vervolgens uitgerust met een boven- en ondergrens afhankelijk van θ_{rm} . Na toepassing van de comfortcategorieën uit Tabel 2-3 wordt Figuur 2-7 verkregen [11, 24].

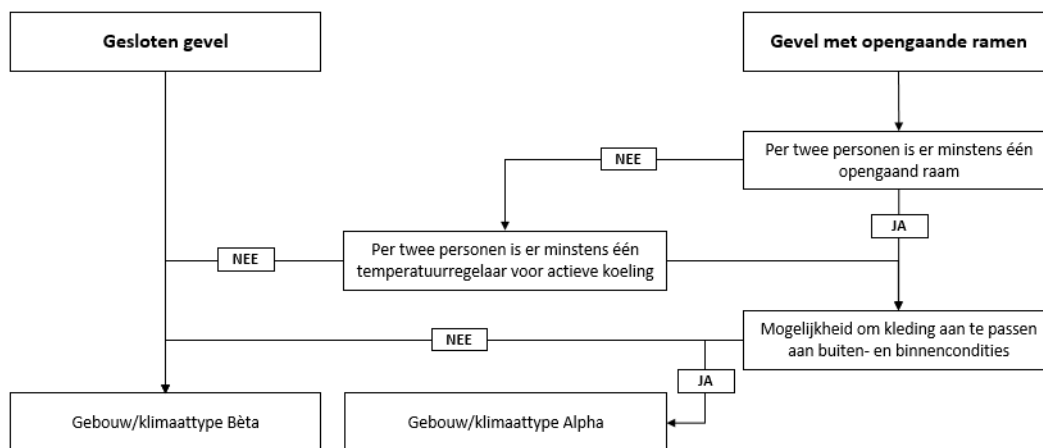
$$\theta_c = 0.33 \cdot \theta_{rm} + 18.8 \quad (2.3)$$



Figuur 2-7 Grenzen binnentemperatuur voor niet-mechanisch gekoelde gebouwen in free-running [24]

De tweede beoordelingsmethode, de gewogen temperatuuroverschrijding (GTO), ligt in dezelfde lijn als de eerste methode. Desalniettemin, wordt er een wegingsfactor toegevoegd aan elke overschrijding van het temperatuurbereik. Deze factor varieert naargelang de ernst van de overschrijding. Een grotere wegingsfactor komt overeen met een ernstigere overschrijding. Een variant hierop weegt de tijdsperiode, waarbij de PMV-index de comfortgrenzen overschrijdt, met een factor in functie van de PPD-index [24].

Een derde mogelijkheid is het gebruik van de adaptieve temperatuurgrenswaarde indicator (ATG) die berust op de adaptieve comforttheorie. Voor aanvang van de beoordeling moet het gebouw worden geëvalueerd aan de hand van onderstaande flowchart ter selectie van het geschikte model. Aan de hand van dit model worden de grenzen vastgelegd, zie Grafiek 2-2 en Grafiek 2-3 op pagina 13, waarmee volgens de reeds besproken methodes het aantal overschrijdingsuren kan worden bepaald.



Figuur 2-8 Flowchart selectie geschikt model voor ATG-methode [11]

EPB

In de Vlaamse berekeningsmethode, toegepast in het softwarepakket EPB 3G, wordt er met behulp van een oververhittingsindicator aangegeven of het gebouw gevoelig is voor oververhitting. Deze indicator is echter enkel van toepassing op woningen en wordt berekend per energiesector, waardoor oververhitting van één bepaald lokaal niet wordt uitgesloten [12].

PHPP

De berekeningsmethode die wordt toegepast voor de evaluatie van de passiefnorm maakt gebruik van een temperatuuroverschrijdingsfrequentie ter evaluatie van het oververhittingsgevaar. De berekening is quasi-stationair, waarbij er wordt gerekend met maandgemiddelde waarden aangevuld met een piekperiode tijdens de zomer. In de standaard PHPP-berekening wordt de piekperiode geïmplementeerd in juli. De piekperiode bestaat uit een overschrijding van de gemiddelde temperatuur gedurende 12 dagen met 1,5°C, gedurende 4 dagen met 3°C en 1 dag met 6°C. Daarbovenop wordt tijdens deze periode een toename van de zonnestraling doorgevoerd van respectievelijk 10%, 20% en 30%. De berekeningsmethodiek vloeit voort uit de Passivhaus-Sommervverfahren PHIS. De randvoorwaarden die worden gebruikt zijn vastgelegd door van Blümel et al. in een studie waarin verschillende testjaren tegenover elkaar werden afgewogen [12, 26].

Bij de ontwikkeling van het referentiekader voor de randvoorwaarden van passiefscholen werden alle criteria tegen elkaar afgewogen, waaruit een voorstel werd opgemaakt voor de beoordeling van het zomercomfort. De evaluatie zou bestaan uit een stappenplan, waarbij in de initiërende stap de meest kritieke zones worden vastgelegd met behulp van de PHPP-berekening gebruikmakend van maandgemiddelde binnentemperaturen. Hierbij wordt gebruik gemaakt van PHPP-software aangepast aan de randvoorwaarden van passiefscholen en uitgebreid naar lokaalniveau. Vervolgens worden de meest kritieke lokalen onderworpen aan een dynamische simulatie zodat het zomercomfort in deze lokalen wordt gegarandeerd [12].

Voor de selectie van de kritieke lokalen wordt er verondersteld dat interne warmtewinsten, zonnewinsten en ventilatie de drie bepalende factoren zijn voor het optreden van oververhitting in een lokaal. Voor elke maand in de zomerperiode (mei t.e.m. oktober) wordt er een typische zonnige warme dag bepaald en toegepast voor de berekening van deze drie factoren. Vervolgens worden de maximale en gecumuleerde winsten op dagbasis geanalyseerd. De lokalen die in deze analyse de hoogste maximale en gecumuleerde winsten verwerven, worden in detail bekeken in de PHPP-berekening. Indien eenzelfde lokaal zowel de hoogste maximale alsmede de hoogste gecumuleerde winsten behaalt, moet er slechts één lokaal in detail worden bekeken [12].

Voor berekening van het temperatuuroverschrijdingspercentage op jaarbasis wordt er in de PHPP-berekening gebruik gemaakt van volgende formule:

$$X = \frac{T_{\maxgr} - b_{\text{gewogen}}}{m_{\text{gewogen}} \cdot 8760} \quad (2.4)$$

Met:

X	=	het temperatuuroverschrijdingspercentage	[-]
T_{\maxgr}	=	de bovengrenstemperatuur, in dit geval 25 °C	[°C]
b_{gewogen}	=	gewogen temperatuurfactor	[°C]

$$b_{\text{gewogen}} = T_{\text{mean}}^r - \Delta t_{\text{mean}}^r \cdot m_{\text{gewogen}} \quad (2.5)$$

$$m_{\text{gewogen}} = \frac{[\sum_{i=1}^r (g_i \cdot \Delta t_i^r \cdot T_i^r) - \sum_{i=1}^r g_i \cdot \Delta t_{\text{mean}}^r \cdot T_{\text{mean}}^r]}{[\sum_{i=1}^r (g_i \cdot \{\Delta t_i^r\}^2) - \sum_{i=1}^r g_i \cdot \{\Delta t_{\text{mean}}^r\}^2]} \quad (2.6)$$

Met:

Δt_i^r	=	het tijdsinterval horend bij T_i^r	[-]
T_i^r	=	de gemiddelde temperatuur in rang i^4	[°C]
Δt_{mean}^r	=	het gemiddelde gewogen tijdsinterval	[-]
T_{mean}^r	=	de gewogen gemiddelde maximum temperatuur	[°C]
g_i	=	de gewichtsfactor van de maand in rang i , gelijkgesteld aan 1	[-]

$$\Delta t_{\text{mean}}^r = \frac{\sum_{i=1}^r (g_i \cdot \Delta t_i^r)}{\sum_{i=1}^r g_i} \quad (2.7)$$

$$T_{\text{mean}}^r = \frac{\sum_{i=1}^r (g_i \cdot T_i^r)}{\sum_{i=1}^r g_i} \quad (2.8)$$

Na een eerder beperkte testcase stelt het eindrapport, waarin een referentiekader aan randvoorwaarden voor passiefscholen wordt uitgewerkt, voor om alle lokalen met een maandgemiddelde binnentemperatuur in juni hoger dan 23,5°C of een overschrijdingspercentage dat boven de grens van 10% ligt, te onderwerpen aan een dynamische berekening om het zomercomfort te verifiëren [12].

⁴ Dit zijn de gemiddelde eindtemperaturen per maand per tijdsinterval gerangschikt van klein naar groot.

Andere beoordelingsmethodes

S. Verbeke, die het effect van thermische inertie onderzocht in een gematigd klimaat, ontwikkelde zelf een criterium voor het beoordelen van oververhitting. Dit innovatieve oververhittingscriterium maakt gebruik van de adaptieve comforttheorie gepresenteerd in bijlage A van de NBN EN 15251 normering voor het definiëren van de aanvaardbare temperatuurbereiken [24]. Als alternatief werd het gebruik van een model, ontwikkeld door Peeters et al. [27], dat aparte comfortschalen hanteert voor ruimtes met een verschillende functie in een woongebouw (badkamers, slaapkamers en 'andere kamers') overwogen. Ondanks dat deze benadering veelbelovend leek, werd het model niet geselecteerd door de minder kwalitatieve verhouding met het sterk vereenvoudigde gebouwmodel dat werd toegepast. Het innovatief criterium van S. Verbeke wordt hieronder toegelicht [25].

De beoordeling van het zomercomfort zal enkel worden beschouwd indien de getroffen ruimte effectief bezet is. Temperatuuroverschotten die zich manifesteren gedurende periodes dat mensen buiten de woning aan het werken zijn, worden niet opgenomen in de beoordeling van het thermisch comfort, noch bovenmatige temperaturen in de slaapkamers terwijl mensen in de woonkamer verblijven. De adaptieve limietgrenzen van de operationele temperatuur maken het mogelijk om het comfort op één specifiek tijdstip te beoordelen. In het proefschrift van S. Verbeke wordt een geaggregeerde (dis)comfortmetriek geïntroduceerd voor de analyse van het zomercomfort, die een weergave voor het algehele comfortniveau van een gebouw met meerdere zones geeft over een bepaalde periode. Deze discomfortindicator $D_{cat,i}$ wordt gedefinieerd als de verhouding tussen het aantal uren dat aanwezig vertoeven buiten de maximale limietgrens van de temperatuur, die wordt vastgelegd door het adaptieve comfortmodel, en het totaal aantal verblijfsuren in het gebouw [25].

$$D_{cat,i,period} = \frac{\sum_{zone\ x} \sum_{timesteps}^{period} I_{discomfort,zone\ x,timestep\ y}}{\sum_{timesteps}^{period} n_{people,zone\ x,timestep\ y}} \quad (2.9)$$

Waarbij het aantal aanwezigen die discomfort ervaren $I_{discomfort,zone\ x,timestep\ y}$ worden gedefinieerd door:

$$\begin{cases} \text{If } \theta_{OT,zone\ x,timestep\ y} > \theta_{lim,cat,i,timestep\ y}: I_{discomfort,zone\ x,timestep\ y} = n_{people,zone\ x,timestep\ y} \\ \text{If } \theta_{OT,zone\ x,timestep\ y} \leq \theta_{lim,cat,i,timestep\ y}: I_{discomfort,zone\ x,timestep\ y} = 0 \end{cases} \quad (2.10)$$

Met:

$\theta_{lim,cat\ i}$	=	de maximale toegestane operationele temperatuur voor categorie 'i' volgens het adaptieve comfortmodel	[°C]
$n_{people,zone\ x,timestep\ y}$	=	het aantal aanwezigen in zone 'x' gedurende periode 'y'	[-]
θ_{OT}	=	operationele temperatuur	[°C]

2.4.5 Luchtvochtigheid

Ondanks dat luchtvochtigheid is opgenomen in de formule voor berekening van de PMV, is de invloed van deze parameter beperkt indien er slechts lichte activiteiten worden uitgeoefend bij temperaturen onder de 26 °C. Een toename van 10% vertaalt zich in een waargenomen temperatuursverhoging van slechts 0,3 °C. Algemeen wordt er gerekend met een relatieve vochtigheid van 60% gedurende de zomerperiode en 40% gedurende de winterperiode. Volgens de NBN EN 15251 richtlijn is bevochtiging van de binnenlucht meestal niet noodzakelijk. Een te hoge luchtvochtigheid geeft aanleiding tot microbiologische groei, terwijl een te lage luchtvochtigheid droogheid en irritatie van de ogen, huid en luchtwegen veroorzaakt [17, 18, 24]. Voor dit onderzoek zal de luchtvochtigheid niet mee worden opgenomen in de analyse.

2.5 Remediëringsmaatregelen

2.5.1 Inleiding

Aangezien dit onderzoek kadert in het zoeken naar een gepaste remediëringsset om het oververhittingsrisico van een bestaand gebouw zo efficiënt mogelijk te verhelpen zullen niet alle mogelijkheden even relevant zijn. De remediëringsmaatregelen moeten immers implementeerbaar zijn in een bestaand gebouw zonder de huidige structuur te wijzigen. Het overzicht, opgesteld voor dit naslagwerk, is dus zorgvuldig geselecteerd uit reeds bestaande technieken en niet limiterend.

Hoewel de relatief nieuwe passiefschool in dit onderzoek reeds beschikt over zorgvuldig gekozen isolerende beglazing wordt hier toch kort de invloed van beglazing vermeld, gevolgd door een toelichting van een innoverende techniek die zowel het zomer- als het wintercomfort ten goede komt.

De zonnewinsten via beglazing kunnen beperkt worden door de beglazing zorgvuldig te kiezen aan de hand van haar eigenschappen. De g -waarde of zontoetredingsfactor (ZTA) van het glas legt immers vast hoeveel warmte er toetreedt. Een lagere g -waarde resulteert in een lagere doorlaatstroom van infraroodstraling. Dit effect is echter statisch, wat duidt op een permanent afkoelend effect, en neemt vaak een gedeelte van het zichtbaar licht weg. Nadelige effecten waardoor zonwerende beglazing niet altijd gewenst is. Zonnewinsten kunnen namelijk erg nuttig zijn in de tussenseizoenen om het gebouw te verwarmen [22].

De slimme zonwerende ramen van Khandelwal zijn een innovatieve techniek die binnen dit en enkele jaren een oplossing kan bieden op dit probleem. De ramen kunnen licht met een golflengte van 700 tot 1400 nm tegenhouden. Deze golflengten bevinden zich in het onzichtbare infraroodspectrum en bevatten 50% van de energie afkomstig uit zonlicht. Vernieuwend aan de ramen is dat ze aan- en uit kunnen worden geschakeld. Dit, in combinatie met een geautomatiseerde schakeling die wordt aangestuurd door middel van sensoren, kan de zonnewinsten maximaliseren terwijl de kans op oververhitting tot een minimum wordt beperkt.

Het selectief tegenhouden van bepaalde golflengten uit licht is mogelijk gemaakt door de verwerking van organische vloeibare kristallen, afkomstig uit smartphones, in de zonwerende laag. De kristallen worden, na het aanbrengen van een elektrische spanning, georiënteerd volgens een bepaald patroon zodat ze bepaalde golflengten van het zonlicht reflecteren. Door een mengeling aan kristallen toe te voegen is Khandelwal erin geslaagd om bijna 100% van het zonlicht tussen van 700 tot 1400 nm tegen te houden, terwijl circa 90% van het zichtbaar licht wordt doorgelaten. Dit staat equivalent met de transparantie van dubbele beglazing [28].

Voor de theoretische achtergrond van stralingsenergie, zonwering en beglazing, wordt er verwezen naar hoofdstuk 2 "Literatuurstudie" uit de masterproef "De optimalisatie van de sturing van zonwerende schermen en bijkomende technieken om de oververhitting in BEN-woningen tegen te gaan" [29].

2.5.2 Beschaduwning

Het plaatsen van zonwering kan op verschillende manieren gebeuren. Wanneer zonwering aan de binnenzijde wordt geplaatst heeft dit eerder een beperkte invloed. De infraroodstraling is immers al binnengedrongen in de ruimte, waardoor de warmte zich reeds achter glas bevindt. Buitenzonwering voorkomt daarentegen de toetreding van infraroodstraling en is hierdoor efficiënter om oververhitting te vermijden [22].

Om de marge in potentiële energiebesparing tussen binnen- en buitenzonweringen bloot te leggen werd in 2014 een onderzoek verricht door de ES-SO (European Solar-Shading Organisation) naar de impact van dynamische zonwering op de energieprestaties van energie-efficiënte gebouwen. Hierbij werd onder meer het thermisch comfort, de CO₂-uitstoot, het energieverbruik en de emissiekost onder de loep genomen. De studie omvat een uitgebreid testprogramma voor zes referentie beglazingen uitgerust met zowel binnen- als buitenzonwering [27].

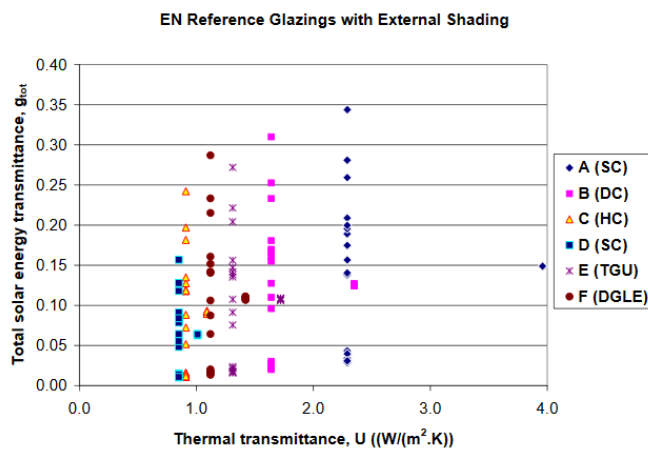
Tabel 2-4 Gemiddelde jaarlijkse energiebesparing voor koeling met binnenzonwering [30]

Beglazing Code	Enkelvoudig A	Dubbel B	Warmtewerend C	Zonwerend D	Driedubbel E	Dubbel lage-emissie F
Rome	36%	33%	35%	31%	32%	33%
Brussel	31%	25%	24%	24%	24%	25%
Stockholm	33%	29%	29%	25%	28%	29%
Boedapest	32%	27%	27%	26%	26%	27%

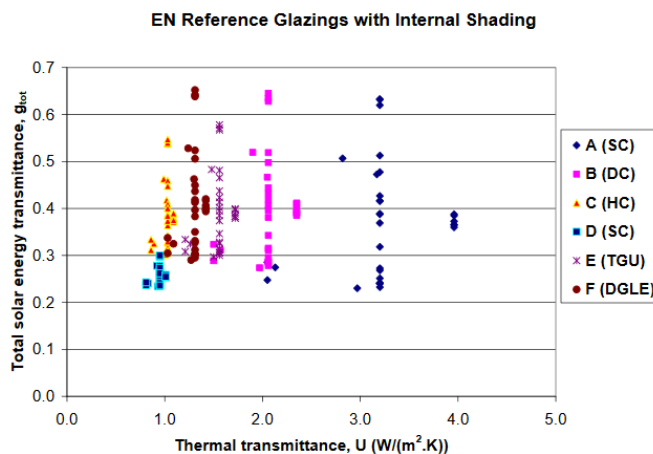
Tabel 2-5 Maximale jaarlijkse besparing koelenergie met zuid-west geörienteerde buitenzonwering [30]

Beglazing Code	Enkelvoudig A	Dubbel B	Warmtewerend C	Zonwerend D	Driedubbel E	Dubbel lage-emissie F
Rome	71%	70%	67%	63%	68%	69%
Brussel	64%	59%	53%	51%	56%	55%
Stockholm	66%	65%	61%	58%	63%	63%
Boedapest	65%	62%	57%	54%	59%	59%

Uit Tabel 2-4 en Tabel 2-5 kan afgeleid worden dat de energiebesparing voor koeling beduidend hoger ligt bij het gebruik van buiten- in tegenstelling tot binnenzonwering. Een voor de hand liggend gegeven wanneer Figuur 2-9 en Figuur 2-10 wordt betrokken in de analyse, de buitenzonwering resulteert immers in een veel lagere zontoetredingsfactor. Toch wordt er met de percentages een vertekend beeld gecreëerd. Tabel 2-4 spreekt immers over gemiddelde percentages, terwijl in Tabel 2-5 gewerkt wordt met maximale jaarlijkse percentages voor buitenzonwering aan de zonnekant, het zuidwesten.

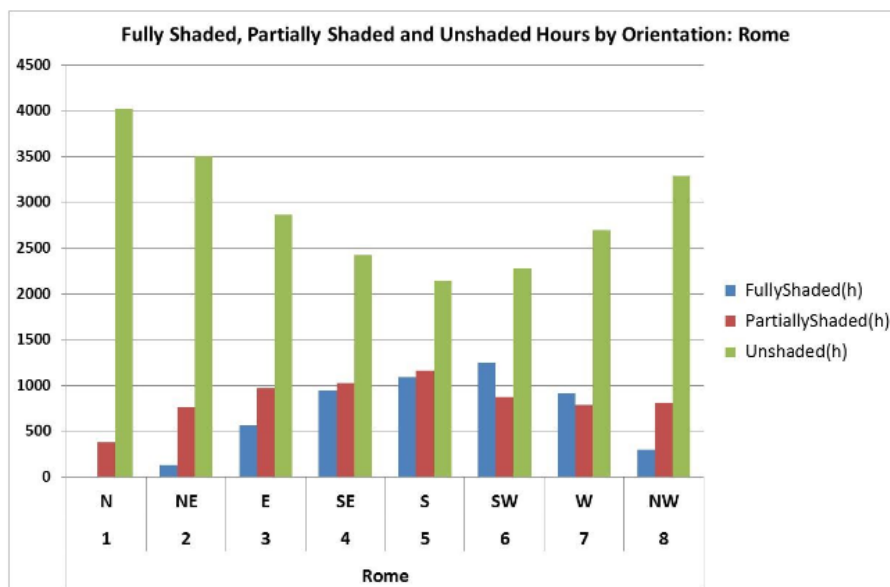


Figuur 2-9 Relatie tussen g- en U-waarde van zes referentie beglazingen met buitenzonwering [30]



Figuur 2-10 Relatie tussen g- en U-waarde van zes referentie beglazingen met binnenzonwering [30]

Globaal kan geconcludeerd worden dat externe zonwering een positieve impact heeft op de energievraag voor koeling, ongeacht de oriëntatie. Maximale besparingen worden waargenomen bij buitenzonweringen met een zuidwestelijke oriëntatie. Uit Figuur 2-11 kan worden geconcludeerd dat zuidoostelijke tot westelijke georiënteerde beglazing het grootste aandeel van de zonnewinsten draagt, de dynamische zonwering is hier immers het meest gesloten of gedeeltelijk gesloten. Zuidwestelijk georiënteerde zonwering heeft hiervan de grootste impact op de energiebesparing voor koeling. Een doordachte positionering van de zonwering is dus onontbeerlijk.



Figuur 2-11 Stand dynamische zonwering (gesloten, gedeeltelijk gesloten of open) i.f.v. bezonning [30]

Verder vermeldt het onderzoek nog dat de zonwering als dynamische isolatielaag kan worden gebruikt. Zo kan tijdens warme periodes de zonwering 's nachts best open blijven, anders verhoogt de thermische weerstand en koelt het gebouw trager af. De afname in U-waarde door het neerlaten van de zonwering hangt uiteraard sterk af van de beglazing. Bij sterk isolerende beglazing is het effect eerder beperkt [30].

2.5.3 Nachtventilatie

Zoals reeds aangehaald valt passiefbouw te vergelijken met een grote thermosfles, de warmte dringt er van buitenaf moeilijk in, maar eens het geheel is opgewarmd, koelt het ook slechts heel gestaag terug af. Koelen om oververhitting te vermijden blijft dus een absolute noodzaak. Natuurlijke nachtventilatie blijft hiervoor, volgens tal van studies en ervaringen, de goedkoopste en meest efficiënte oplossing. Gedurende de nacht, wanneer de buitenluchttemperatuur beduidend lager ligt dan de binnenluchttemperatuur, wordt het gebouw gekoeld met een onverwarmde luchtdoorstroming. Hierbij wordt niet enkel de lucht, maar eveneens de thermische massa van en in het gebouw afgekoeld. De voorcoeling van de thermische massa brengt eveneens met zich mee dat het thermisch comfort overdag langer kan worden behouden. Intensieve nachtventilatie kan zowel natuurlijk als mechanisch worden gerealiseerd. Natuurlijke nachtventilatie wordt gerealiseerd door het openen van ramen of deuren waardoor er, ten gevolge van een drukverschil, een luchtstroom ontstaat. Dit drukverschil kan ontstaan door de wind of door een schoorsteeneffect als gevolg van een temperatuur- of vochtigheidsverschil. Hierdoor zal het debiet erg variabel zijn, ook de luchtstroom zal voortdurend wijzigen in functie van deze parameters en de openingsoppervlakten. Bij intensieve mechanische nachtventilatie daarentegen ontstaat het drukverschil door ventilatoren, waardoor het debiet en het stromingspatroon nagenoeg gelijk blijven. Het ventilatiesysteem dient hiervoor echter voorzien te zijn van een bypass om de warmterecuperatie-unit uit te schakelen.

2.6 Evaluatiecriteria

2.6.1 Inleiding

In dit onderzoek is het niet noodzakelijk om het thermisch comfort te beschrijven op een specifiek moment in de tijd. Er wordt eerder bedoeld naar de ontwikkeling van een algemene indicator die de waarschijnlijkheid weergeeft dat het verloop van de operationele temperatuur in dermate buiten de grenzen van een behaaglijk zomercomfort zal vallen, dat het thermisch comfort gedurende warme dagen niet meer is gegarandeerd. De indicator maakt hiervoor uitsluitend gebruik van de gemiddelde luchttemperatuur binnen een thermische zone en de gewogen gemiddelde stralingstemperatuur in functie van de oppervlakte van de aanwezige scheidingsconstructies. Lokale thermische hinderaspecten zoals asymmetrische straling, tocht- of specifieke eigenschappen van inzittende zoals kleding worden hierbij buiten beschouwing gelaten [25].

2.6.2 Oververhittingscriterium

Gebaseerd op alle hoger beschreven beoordelingsmethodes en normen wordt er in dit proefschrift een eigen beoordelingsmethode samengesteld voor de beoordeling van het zomercomfort. Wegens de aard van het te beoordelen project, een topsportschool gericht op uitmuntende resultaten, wordt er geopteerd voor strenge criteria waarbij de lokaaltypologie in beschouwing wordt genomen. De fundering van de criteria ligt bij de eerste beoordelingsmethode uit de norm NBN EN 15251, het temperatuuroverschrijdingscriterium (TO), met andere woorden wordt er per lokaal één vaste overschrijdingstemperatuur vastgelegd. Topsport en educatie moet immers onder ideale omstandigheden plaatsvinden, ongeacht het buitenklimaat, om optimaal te kunnen presteren. Een adaptief model wordt hierdoor uitgesloten. De afhankelijkheid van de ruimtelfunctie vloeit voort uit het alternatief model van Peeters et al. [24]. Verder wordt er een wegingsfactor toegepast op elke overschrijding van het temperatuurbereik. Deze varieert naargelang de ernst van de overschrijding. Een grotere wegingsfactor komt overeen met een ernstigere overschrijding. Identiek aan de tweede methode uit NBN EN 15251 en gesuggereerd door Nicol et al. [30]. De discomfortindicator wordt hierdoor echter indirect beïnvloed door de thermische inertie van de aanwezige massa, een hogere piek in de binnentemperatuur zal namelijk een langere periode van oververhitting opleveren ten gevolge van de thermische traagheid. Al deze facetten worden tot slot geïmplementeerd in het innovatief criterium ontwikkeld door S. Verbeke om het overschrijdingspercentage te bepalen [25]. Ingevuld in vergelijkingen (2.9 en (2.10 geeft dit:

$$D_{\text{roomtype}_i, \text{period}} = \frac{\sum_{\text{zone } x}^{\# \text{ zones}} \sum_{\text{timesteps}}^{\text{period}} g_t \cdot I_{\text{discomfort, zone } x, \text{ timestep } y}}{\sum_{\text{timesteps}}^{\text{period}} n_{\text{people, zone } x, \text{ timestep } y}} \quad (2.11)$$

Waarbij het aantal aanwezigen die discomfort ervaren $I_{\text{discomfort, zone } x, \text{ timestep } y}$ worden gedefinieerd door:

$$\begin{cases} \text{If } \theta_{OT, \text{zone } x, \text{ timestep } y} > \theta_{\text{lim, roomtype } i}: I_{\text{discomfort, zone } x, \text{ timestep } y} = n_{\text{people, zone } x, \text{ timestep } y} \\ \text{If } \theta_{OT, \text{zone } x, \text{ timestep } y} \leq \theta_{\text{lim, roomtype } i}: I_{\text{discomfort, zone } x, \text{ timestep } y} = 0 \end{cases} \quad (2.12)$$

Met:

$D_{\text{roomtype } i, \text{period}}$	=	de verhouding tussen het aantal uren dat aanwezigen vertoeven buiten de maximale limietgrens van de temperatuur die werd vastgelegd voor lokaaltypologie 'i' en het totaal aantal verblijfsuren in het gebouw.	[-]
$\theta_{\text{lim, roomtype } i}$	=	de maximale toegestane operationele temperatuur voor lokaaltypologie 'i'	[°C]
$n_{\text{people, zone } x, \text{ timestep } y}$	=	het aantal aanwezigen in zone 'x' gedurende periode 'y'	[-]
g_t	=	de gewichtsfactor in functie van de temperatuuroverschrijding	[-]

De gewichtsfactor zal als volgt worden berekend:

$$\begin{cases} \text{If } \theta_{OT,zone_x,timestep_y} \leq [\theta_{lim,roomtype_i} + 1]: g_t = 1 \\ \text{If } \theta_{OT,zone_x,timestep_y} > [\theta_{lim,roomtype_i} + 1]: g_t = 1 + (\theta_{OP,zone_x,timestep_y} - \theta_{lim,roomtype_i})/10 \end{cases} \quad (2.13)$$

De beoordeling van het zomercomfort zal dus enkel worden beschouwd indien de getroffen ruimte effectief bezet is. Temperatuuroverschotten die zich manifesteren gedurende periodes zonder aanwezig worden niet opgenomen in de beoordeling van het thermisch comfort. Het maximale overschrijdingspercentage wordt vastgelegd op de klassieke 5% van de bezettingstijd volgens de passiefstandaard en NBN EN 15251.

Nu de beoordelingsmethode is omkaderd, moeten enkel de bovengrenzen voor de lokaaltypologieën nog worden vastgelegd. Hiervoor wordt de conclusie van het referentiekader voor passiefscholen in beschouwing genomen, waarin een richtwaarde van 24°C wordt doorgelicht als referentiewaarde voor koeling van zowel klaslokalen als sporthallen. Wegens het intensief karakter van topsport wordt er geopteerd om deze 24°C te gebruiken als bovengrens voor oververhitting. Daarbij liggen de sporthallen in het onderste gedeelte van de topsportschool bestaande uit een aanzienlijk zware betonnen constructie met slechts enkele ramen. Enkel de fitness beschikt over een grote glazenwand, maar is echter wel voorzien van actieve koeling om een optimaal binnenklimaat te handhaven. Het gebouw beschikt met andere woorden over een breed scala aan middelen om deze temperatuur te garanderen. Voor de klaslokalen ligt de grens van 24°C net iets te laag en wordt een bovengrens van 25°C vooropgesteld, wat overeenkomt met comfortcategorie I voor klaslokalen in de norm NBN EN 15251, en de productiviteit niet beïnvloedt volgens Y. Al Horr et al. [31]. Er moet in acht worden genomen dat de operationele temperatuur (θ_{OT}) deze drempelwaarden moet respecteren. Deze indiceert de gevoelstemperatuur en wordt berekend door het gemiddelde te nemen van de gemiddelde luchttemperatuur (θ_{MAT} = mean air temperature) en de gemiddelde stralingstemperatuur (θ_{MRT} = mean radiant temperature):

$$\theta_{OT} = \frac{\theta_{MAT} + \theta_{MRT}}{2} \quad (2.14)$$

De berekening van de discomfortindicator werd volledig geautomatiseerd door gebruik te maken van een macro in Microsoft Excel. De code voor deze macro is terug te vinden in bijlage B.

2.6.3 Toegepaste remediëringsmaatregelen

Na een uitgebreide analyse van het gebouw zal er een set aan maatregelen worden samengesteld om het binnenklimaat zo efficiënt mogelijk te verbeteren en een eventueel oververhittingsprobleem te verhelpen. Dit met het oog op het doorvoeren van zo weinig mogelijk wijzigingen aan de huidige infrastructuur. Volgende maatregelen worden geïntegreerd in het model en onderworpen aan een uitgebreide analyse:

- Intensieve mechanische nachtventilatie, de huidige technische installatie is immers voorzien van een bypass voor de warmterecuperatie-unit wordt uitgeschakeld. Daarbij is het gebouw voorzien van een piekventilatie om de sporthal snel en efficiënt te kunnen voorzien van verse lucht als het koolstofdioxidegehalte de grenswaarde van 1200 ppm overschrijdt;
- Variantie in g-waarde van de beglazing;
- Gebruik van vaste delen boven de ramen om de zonnwinsten te belemmeren;
- Optimalisatie van de huidige binnenzonwering of vervanging ervan door efficiëntere zonwerende binnenzonwering aangestuurd met een regel-gebaseerde sturing (RBC). Deze eenvoudige regel-gebaseerde sturing bestaat uit een koppeling tussen een voorwaarden (IF) en een actie (THEN);
- Gebruik van buitenzonwering aangestuurd met een regel-gebaseerde sturing (RBC).

3 METHODOLOGIE – OPBOUW EN KALIBRATIE

Idealiter zou de evaluatie van de energieprestaties van gebouwen en hun inwendig comfort moeten gebeuren met empirische data ingewonnen via omvangrijke veldstudies. Dergelijke evaluatie methodiek zou echter een enorme kostprijs met zich meebrengen en veel tijd in beslag nemen, waardoor de rendabiliteit te wensen overlaat. Bovendien blijft de invloed van een omvangrijke hoeveelheid aan parameters onzeker. Denk aan de lokale weersomstandigheden, gebruikersgedrag, werkelijke interne warmtewinsten en thermische inertie. Als gevolg hiervan zal de evaluatie gebeuren aan de hand van energiesimulaties die afhangen van een breed scala aan randvoorwaarden omtrent gebruikersprofielen en bouwfysische processen. De hedendaagse evolutie van dergelijke energiemodellen tracht de marge tussen het werkelijke en voorspelde gebouwgedrag tot een minimum te herleiden. Om dit te verwezenlijken moeten onzekere invloedparameters worden omgezet naar fysisch meetbare grootheden [32, 33].

3.1 Rekenmodellen

3.1.1 Stationaire rekenmodellen

Om snel en efficiënt een eerste beeld te verkrijgen van de energieprestaties van een gebouw wordt er gebruik gemaakt van eenvoudige stationaire rekenprogramma's. Deze berekeningsmethodes zijn over het algemeen eenvoudiger en vereisen geen diepgaande vakkennis in vergelijking met meer geavanceerde methodes [25]. De theoretische achtergrond van deze stationaire rekensoftware berust op maandelijks berekeningen zoals omschreven in EN ISO 13790 of meer recent, de nieuwe normenreeks van M480. Maandelijks berekeningen steunen op stationaire energiestromen die met algebraïsche vergelijkingen worden omschreven door het vastleggen van maandelijks gemiddelde waarden voor temperaturen en materiaalkarakteristieken [32]. In deze normering wordt welomschreven welke methodiek wordt gehanteerd voor het jaarlijks energieverbruik en de jaarlijkse energievraag van koeling en verwarming, de berekening van warmtestromen ten gevolge van transmissie en ventilatie en de inrekening van zonne- en interne warmtewinsten.

Het begrip stationair duidt op de tijdonafhankelijkheid van de energiestromen. Er wordt met andere woorden geen rekening gehouden met dynamische effecten bij de bepaling van de materiaalkarakteristieken. Om de dynamische effecten toch enigszins in rekening te brengen wordt er gebruik gemaakt van correlatiefactoren, hierbij wordt er gesproken van semi-stationaire berekeningsmethodes. Zo wordt er een corrigerende factor toegepast op de interne warmtewinsten en zonnewinsten, door het feit dat deze slechts gedeeltelijk bijdragen tot de opwarming van het gebouw en dus niet geheel bijdragen tot een vermindering van de energievraag voor verwarming. De resterende fractie leidt tot een ongewenste stijging van de binnentemperatuur boven de instelwaarde. In tegenstelling tot verwarming wordt er bij koeling een corrigerende factor toegepast op de transmissie- en ventilatieverliezen naar de buitenomgeving. Slechts een fractie hiervan draagt bij tot reductie van de koelvraag. De resterende fractie, waaronder nachtelijke verliezen, draagt hier niet toe bij [34].

3.1.2 Dynamische rekenmodellen

Meer geavanceerde berekeningsmethodes maken gebruik van dynamische simulaties die, in tegenstelling tot de maandelijks energiebalans bij een stationair rekenmodel, werken met veel kortere tijdspannes. Dit biedt de mogelijkheid om transiënte effecten, waaronder thermische inertie van bouwmaterialen, in beschouwing te nemen. Dynamisch simulatiemodellen bieden hierdoor de opportuniteit om de energiehuishouding van een gebouw in detail uit te lijnen door een uitgebreid scala aan mogelijkheden aan te bieden voor het ingeven van gebouw- en materiaalspecifieke eigenschappen en randvoorwaarden. Zo kan voor elke thermische zone het verloop van de stralings- en oppervlaktetemperatuur voorspeld worden, waardoor het thermisch welzijn van aanwezige gebruikers kan worden ingeschat. Ondanks dat dynamische rekenmodellen tegenwoordig zeer geavanceerd en betrouwbaar zijn, moeten ze omzichtig worden gebruikt. Hoogwaardige 'output' kan immers enkel worden verkregen met hoog kwalitatieve 'input' gegevens ("*garbage in = garbage out*") [35].

3.2 Simulatiesoftware

Uit vorige paragraaf vloeit voort dat er een uitgebreid scala aan mogelijkheden is om het energetische aspect van een gebouw in kaart te brengen. Door het diepgaand karakter van dit proefschrift is de keuze echter iets beperkter. Voor diepliggende energetisch analyses zijn immers dynamische rekenmodellen vereist. In dit naslagwerk wordt er geopteerd voor een energetisch model in de dynamische rekensoftware EnergyPlus.

3.2.1 EnergyPlus

EnergyPlus is een dynamische rekensoftware die in 1996 werd ontwikkeld door de U.S. Department of Energy Building Technologies Office voor onderzoeksdoeleinden. Deze geavanceerde en alomvattende software maakt het mogelijk om volledige gebouwstructuren te implementeren met alle daarbij horende parameters om het energetische verloop van het gebouw te simuleren. Zowel de implementatie van het gebouw als de technische installatie gebeurt aan de hand van een uitgebreid tekstbestand. Bijkomend is EnergyPlus uitgerust met een IDF-editor, een zéér eenvoudige interface om het configuratiebestand te genereren. De keuze tussen de fundamentele tekstbewerker en de IDF-editor hangt voornamelijk af van het soort werk dat wordt verricht. Voor het dupliceren van grote fracties werkt de tekstverwerker sneller. De IDF-editor is daarentegen meer onderlegd voor het verrichten van precisiewerk. Om de compositie van het configuratiebestand enigszins te verlichten werd er gebruik gemaakt van de wisselwerking tussen EnergyPlus en enkele programma's met een geavanceerdere interface. Na het compileren van het configuratiebestand kan, op voorwaarde dat er een complementaire weerbestand (EPW-bestand) aanwezig is, een dynamische simulatie worden uitgevoerd van het energetisch model met behulp van "EP-Launch".

3.2.2 OpenStudio

Zoals reeds aangehaald wordt er een uitgebreid softwarepakket gebruikt om het compileerwerk enigszins te verlichten. OpenStudio behoort tot één van de vele plug-ins voor EnergyPlus die het mogelijk maakt om een uitgebreide fractie van het configuratiebestand af te werken in een grafisch hoogstaandere omgeving en werd gebruikt voor de compilatie van het HVAC-systeem. Het nadeel aan deze plug-in is de slechts gedeeltelijke compatibiliteit met EnergyPlus. Om dit te omzeilen moeten de afgewerkte en geëxporteerde delen uit de plug-ins vaak eerst worden omgezet naar de meest recente versie van EnergyPlus. Vervolgens kunnen de verschillende delen één voor één worden gedupliceerd naar het uiteindelijke configuratiebestand [36].

Euclid

Euclid is een extensie voor SketchUp die het mogelijk maakt om een driedimensionaal model te tekenen in SketchUp en vervolgens te converteren naar een overeenkomstig geometrische configuratie bestaande uit louter coördinaten. Deze geometrische beschrijving kan dan worden opgenomen in het configuratiebestand. De extensie is ontwikkeld door Big Ladder Software en gebaseerd op de OpenStudio Legacy extensie van het National Renewable Energy Laboratory (NREL). De laatste versie van Euclid ondersteunt EnergyPlus 8.6 en 8.7 en werd uitgebracht op 13 april 2017. Door het gebruik van EnergyPlus 9.0 was een omzetting naar de juiste versie vereist voor duplicatie van de geometrische beschrijving naar het configuratiebestand. Om nadien de geometrie nog visueel te kunnen bewerken, werd er gebruik gemaakt van de OpenStudio extensie voor SketchUp. Deze is wel compatibel met EnergyPlus 9.0 [37].

3.2.3 Energy Management System (EMS)

Het Energy Management System (EMS) is een component van EnergyPlus waarin geavanceerde sturingen geprogrammeerd kunnen worden. Hiervoor wordt er gebruik gemaakt van de EnergyPlus Runtime Language, een vereenvoudigde programmeertaal. Deze component maakt het mogelijk om de aansturingen van een technische installatie of zonwering te overschrijven en zo de energieregeling te optimaliseren. De EnergyPlus Runtime Language beschikt over een uitgebreid pakket aan functies en wordt aangestuurd met variabelen die het mogelijk maken om geavanceerde sturingen uit te bouwen. EMS vormt een sterke component en zal in dit proefschrift worden aangewend voor de aansturing van de zonweringen en het HVAC-systeem.

3.3 Weerbestand

Om een betrouwbare energetische simulatie van een gebouw te verrichten, is een relevant weerbestand van cruciaal belang. De buitencondities vormen immers de stuurkrachten van het binnenklimaat. In januari 2019 werd er een actual meteorological year bestand (AMY) aangekocht van het voorbije jaar (2018) voor de luchthaven van Deurne. Deze bevindt zich binnen een aannemelijke afstand van topsportschool in Wilrijk en kon zonder meer worden toegepast voor de simulatie. Al snel bleek dat dit echter niet volstond aangezien de kalibratie en de remediëeringsmaatregelen zouden moeten getest worden tijdens de zomermaanden van het huidige jaar. De kalibratie van het gebouw zou daarvoor minstens één zomerperiode of een gedeelte ervan moeten doorlopen om met zekerheid te kunnen stellen dat het temperatuurverloop van de simulatie, en vooral wanneer de technische installatie zich in koelfase bevindt, binnen aannemelijke grenzen ligt rond het werkelijke temperatuurverloop. Om dit te realiseren moest er een weerbestand van het huidige jaar (2019) worden samengesteld. De temperatuurmetingen waren immers pas gestart in september 2018.

Aangezien er tal van webservern zijn die weerdata ter beschikking stellen met behulp van een API, zijn er mogelijkheden genoeg om eigenhandig weerbestanden te kunnen compileren. Het ophalen van de weerdata is echter een hinderpaal. Alle parameters dienen immers manueel te worden opgevraagd via de webservern, wat erg tijdrovend is. Dit probleem werd verholpen door G. Gorris die, parallel met dit proefschrift, onderzoek deed naar de implementatie van predictieve sturing in de gebouwautomatisatie om het comfort te verhogen en het energieverbruik te verlagen [38]. Met het script dat G. Gorris heeft geschreven in Python kan actuele en voorspelde weerdata automatisch worden opgehaald via deze API's. Op basis hiervan werd er eigenhandig een script samengesteld in Python zodat ook historische weerdata automatisch kan worden opgevraagd. De code van dit script in Python wordt weergegeven in bijlage D.

Tijdens het lopen van dit script wordt de data automatisch opgevraagd via onderstaande API-link en weggeschreven in een tekstbestand in JSON-formaat. Om van deze faciliteit te kunnen genieten in toekomstig onderzoek werd er een stappenplan samengesteld voor het gebruik van het Python-script.

[https://api.darksky.net/forecast/\[uw API-key\]/51.1777,4.4145](https://api.darksky.net/forecast/[uw API-key]/51.1777,4.4145)

Tabel 3-1 geeft een overzicht van de historische weergegevens die worden opgehaald met dit Python-script:

Tabel 3-1 Opgehaalde weergegevens via Darksky API

Weergegevens via Dark Sky API		
Tijd (UNIX-formaat)	Windsnelheid	Windstoten
Dauwpunt	Gevoelstemperatuur	Droge bol temperatuur
Hoeveelheid bewolking	UV-index	Zichtbaarheid
Relatieve vochtigheid	Druk	Ozon
Kans op neerslag	Type neerslag	Neerslagintensiteit

Als locatie werd er gekozen voor de geografische ligging van Gebouw Z op Campus Groenenborger gelegen te Wilrijk: [Breedtegraad; Lengtegraad] = [51.178; 4.422]. Er werd gebruik gemaakt van een API van Dark Sky voor het overgrote deel van de weerparameters op te halen [39]. Om nieuwe weergegevens op te vragen, dient een API telkens opnieuw aangeroepen te worden. Door het gebruik van een gratis profiel wordt er een limitatie van 1000 aanroepen per dag opgelegd door Dark Sky. Het gaat om uurlijkse weerdata waardoor er per dag 1000h aan historische weerdata kan worden opgevraagd. Aangezien een jaar bestaat uit 8760h (365 dagen x 24h) zijn er minstens 9 dagen nodig voor er een AMY kan worden opgesteld. Het ophalen zelf is geheel automatisch, er moet enkel een script worden geactiveerd via de opdrachtprompt, het script zelf loopt slechts enkele minuten. De opgehaalde gegevens kunnen tot slot rechtstreeks worden geïmporteerd in Excel 2016 of recenter. Excel 365 beschikt eveneens over de noodzakelijke query's om dit te verwezenlijken.

Door een gebrek aan gegevens over de zonnestraling bij de opgehaalde weerdata via Dark Sky, werd er een tweede API aangewend, geleverd door Solcast. Solcast heeft als voordeel dat, op het gebied van historische weerdata, de weerdata niet uur per uur moet worden opgevraagd via de API [40]. De API service maakt het mogelijk om een geheel jaar aan historische weerdata rechtstreeks te downloaden van de website. Dit echter tegen betaling, tenzij er geregistreerd wordt met een e-mailadres van een onderzoekscentrum of universiteit. Studenten en onderzoekers genieten van een beperkte hoeveelheid credits, waarmee ter waarde van \$500 aan weerdata kan worden opgehaald. De opgehaalde weerdata staat onmiddellijk in CSV-formaat, waardoor een omzetting niet meer noodzakelijk is. Tabel 3-2 geeft een overzicht van de historische weergegevens die worden opgehaald via de API van Solcast.

Tabel 3-2 Opgehaalde weergegevens via Solcast API

Weergegevens via Solcast API		
Directe normale instraling	Diffuse horizontale instraling	Globale horizontale instraling
Zenithoek	Azimuthoek	Bewolking

Met deze gegevens kan tot slot een weerbestand worden gecompileerd. Hier zijn twee mogelijkheden voor. In eerste instantie kan een bestaand weerbestand worden geïmporteerd in Excel, waarin vervolgens de data kan worden aangepast en tot slot worden opgeslagen als een CSV-bestand. Ontbrekende waarden worden vervangen door een combinatie van x-aantal keer een "9" [41]. De ontwerpcondities in de hoofding kon in dit proefschrift over worden genomen uit het aangekochte weerbestand. Deze klimatologische ontwerpcondities zijn eveneens terug te vinden in het ASHRAE 2013 handboek [42]. Een tweede mogelijkheid is het gebruik van de softwaretool Elements. Een programma dat specifiek werd ontwikkeld voor de compilatie en modificatie van weerbestanden die worden gebruikt in energetische modelleerprogramma's. Deze methodiek hanteert een identiek proces als het vorige, echter geniet deze methode van het bijkomend voordeel dat Elements de fysische relaties tussen de weerparameters controleert waardoor het weerbestand met zekerheid voldoet aan de fysische wetten. Aangezien de tweede methodiek de voorkeur prefereert werd er voor deze procedure eveneens een stappenplan ontwikkeld.

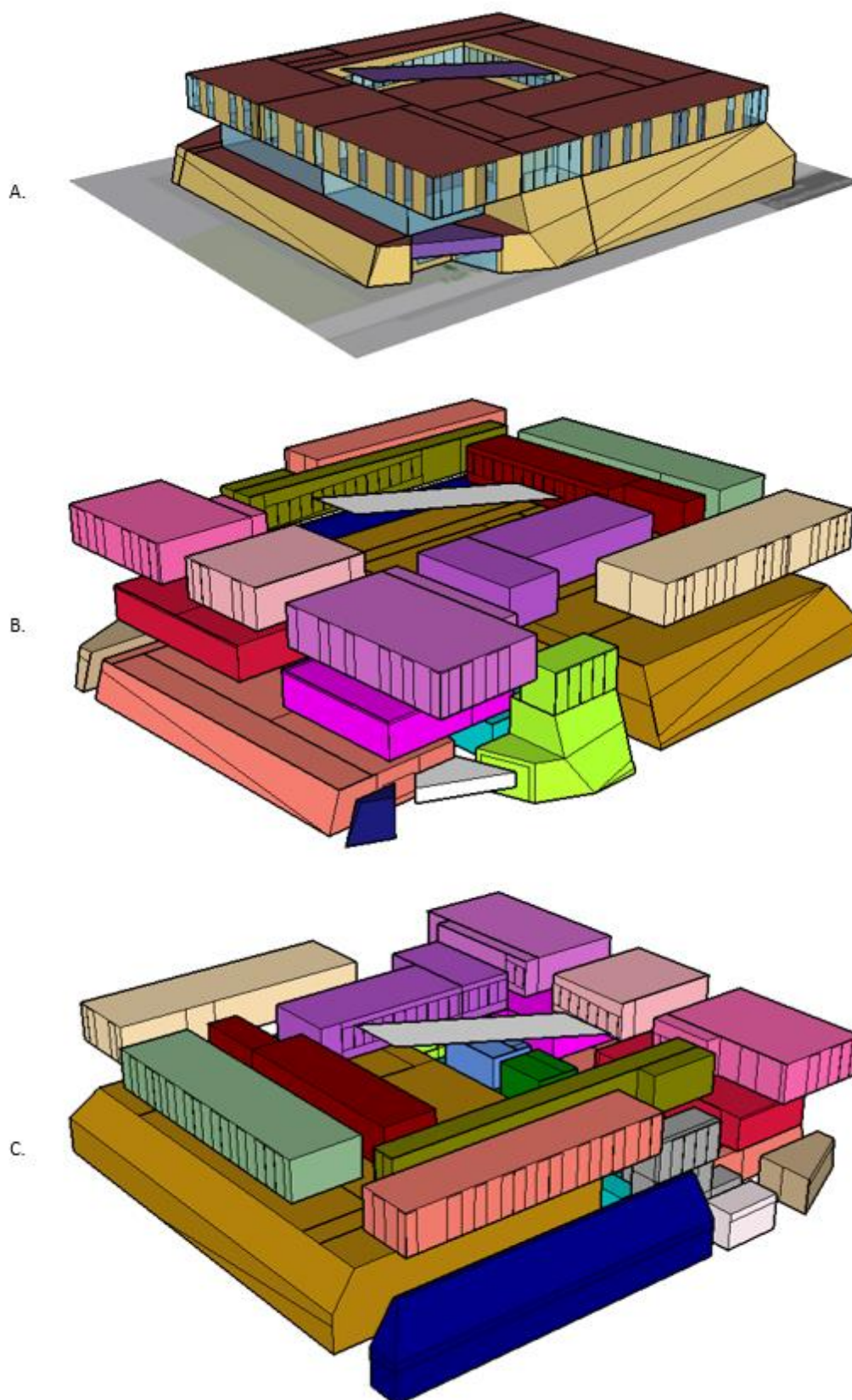
3.4 Input EnergyPlus

3.4.1 Referentiescenario

Voor een set aan mitigerende maatregelen kan worden samengesteld moet er een referentiescenario worden ontwikkeld dat de huidige energetische toestand van het gebouw omschrijft. Vervolgens kunnen wijzigingen worden doorgevoerd aan de huidige parameters, om de sturing van de temperatuurregulerende maatregelen te optimaliseren, en nieuwe technieken worden geïntegreerd. Het gebouw betreft een passiefschool uitgerust met topsportfaciliteiten en een beschermd volume van 32.409,62 m³. De grondplannen van het gebouw, waarop de opsplitsing in thermische zones is aangegeven, zijn terug te vinden in bijlage C. Voor helder begrip van het verder verloop in dit proefschrift is het aangeraden om deze plannen te bestuderen.

3.4.2 Simulatieparameters

Om de data van de loggers, die in de topsportschool werden geplaatst voor de temperatuur en vochtigheid te meten, rechtstreeks te kunnen vergelijken met de simulaties worden er 12 tijdstappen per uur gesimuleerd. Dit betekent dat er elke 5 minuten een volledige energetische berekening van simulatiemodel wordt verricht. Aangezien de loggers door het jaar heen enkele keren werden verplaatst, wordt de simulatieduur aangepast aan de meetperiodes. De weerfile die wordt gebruikt in de simulaties werd eigenhandig samengesteld met opgehaalde weerdata via de API's zoals uitvoerig werd beschreven in 3.3.



Figuur 3-1 Geometrie en thermische zones:
A. Driedimensionaal model van de realiteit
B. Ontploft driedimensionaal model in 23 thermische zones – isometrische projectie vooraan
C. Ontploft driedimensionaal model in 23 thermische zones – isometrische projectie achteraan

3.4.3 Geometrie en thermische zones

De topsportschool kan worden onderverdeeld in twee compartimenten. Het bovenste compartiment, dat langs de buitenzijde volledig is omgeven met glaswand en binnenin voorzien is van een patio als speelplaats, functioneert als schoolgedeelte. Het onderste compartiment is over het algemeen omgeven door een sterk geïsoleerde betonschil en bevat de sportzalen, kleedkamers, eetzaal en keuken. Enkel de fitness en eetzaal worden omgeven door een glaswand in dit compartiment, maar zijn voorzien van een actief koelsysteem en vaste delen die toetreding van de zon belemmeren gedurende de zomermaanden.

Het energetisch model bevat 23 thermische zones zoals weergegeven in Figuur 3-1 op vorige bladzijde. Er zijn echter slechts 22 thermische zones relevant. De kleine donkerblauwe zone (zie B.) is een rookwarmteafvoer (RWA) en werd louter toegevoegd om de geometrie overeen te laten stemmen met de werkelijkheid. Het klimatologisch verloop in deze zone is irrelevant en wordt genegeerd in de analyses.

Bijlage E bevat gedetailleerdere informatie over de geometrische gegevens van de zones. Een thermische zone wordt gekarakteriseerd door een volledig gemixte lucht en een uniforme binnenluchttemperatuur.

3.4.4 Interne warmtewinsten

Op basis van de sport- en lessenroosters werd, per thermische zone, een uitgebreid gamma aan tijds- en gebruiksschema's opgesteld om de warmteontwikkeling door personen mee in beschouwing te nemen. Ook voor elektrische toestellen en het verbruik van sanitair warm water werden er tal van tijds- en gebruiksschema's geconfigureerd. De verlichting daarentegen wordt aangestuurd met een EMS om rekening te kunnen houden met zowel daglicht als de aanwezigheid van personen.

3.4.5 Materialen

Om het energetisch verloop in de realiteit zo nauwkeurig mogelijk te kunnen benaderen, moet de constructie nauwgezet worden opgenomen in het configuratiebestand. Zowel scheidingsconstructies, waaronder muren, schrijnwerk, vloerplaten en dakopbouw, als interieur hebben een belangrijke invloed op het energieverloop. Tabel 3-3 geeft een overzicht van de berekende warmtedoorgangscoefficienten voor scheidingsconstructies grenzend aan de buitenomgeving. Een vergelijking hiervan met de meest recente EPB-eisen voor woningen (2018) benadrukt opnieuw de doorgedreven isolatieschil van de passiefschool, terwijl het vergunningsjaar dateert van maart 2014.

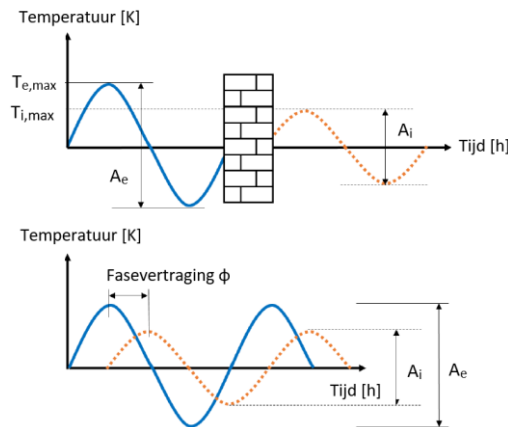
Tabel 3-3 Vergelijking berekende warmtedoorgangscoefficienten met EPB-eisen 2018 [43]

Scheidingsconstructie	U-waarde scheidingsconstructie [W/m ² K]	Maximale toegelaten U-waarde [W/m ² K]
Funderingsplaat	0.10	0.24
Buitenmuur (bovengronds)	0.12	0.24
Vloer van het terras	0.16	0.24
Dak van het terras	0.13	0.24
Vloer patio	0.12	0.24
Buitenmuur (ondergronds)	0.10	0.24
Gordijngevels	0.60	1.10
Deuren	1.20	2.00

3.4.6 Thermische inertie

Om de werkelijkheid zo goed mogelijk te kunnen benaderen met het dynamisch model is het van belang om de configuratie van het gebouw en zijn inwendige massa zo nauwkeurig mogelijk te omschrijven. Zodoende kan de vertraging die optreedt ten gevolge van de thermische capaciteit van het gebouw in rekening worden gebracht. Ondanks dat er geen eenduidige definitie kan worden toegewezen aan thermische massa, wordt het begrip vaak toegepast door wetenschappers in de bouwwereld [32].

De vertraging die optreedt ten gevolge van thermische capaciteit kan worden toegeschreven aan één van de vier componenten uit de warmtebalans van het binnenklimaat. De vier warmtestromen die het binnenklimaat beheersen zijn namelijk niet constant. Waar zonnestraling en convectiestromen gelijkmatig fluctueren met de buitenomgeving, treedt er een vertraging op tijdens het conductieproces. Een gedeelte van de warmte die zich doorheen een materiaal verplaatst wordt geabsorbeerd in het materiaal zelf, waardoor er een kleine temperatuurtoename van het materiaal optreedt. Dit fenomeen zorgt ervoor dat personen in een gebouw slechts worden blootgesteld aan een fractie van de eigenlijke temperatuurpiek, terwijl de resterende fractie tijdelijk wordt opgeslagen in de aanwezige materialen en pas later wordt afgegeven aan de binnenomgeving, zoals weergegeven in Figuur 3-2 [32].



Figuur 3-2 Thermische respons op een sinusoidale warmtegolft die zich voorplant door een muur [32]

Thermische inertie draagt hierdoor bij tot de creatie van een behaaglijk binnenklimaat en valt binnen de categorie van passieve warmtehuishoudingssystemen. Ondanks dat deze parameter vooral effect heeft in landen waar een klimaat met grote temperatuurschommeling heerst, kan de invloed van thermische inertie op de koelvraag niet worden verwaarloosd. Dit effect kan zowel positief als negatief zijn afhankelijk van de hoeveelheid warmte die reeds is opgeslagen in de materialen. Enerzijds zorgt de opslag van warmte ervoor dat temperatuurpieken worden uitgevlakt, anderzijds leidt de afgifte ervan tijdens koelere periodes tot een toename van de koellast. Het zal dus langer duren voor een gebouw is afgekoeld tot de gewenste operationele binnentemperatuur [32].

Thermische massa is het geheel aan massa waaruit een gebouw is opgebouwd en functioneert als indicator voor de thermische inertie van het gebouw. Deze indicator geeft het vermogen weer van een materiaal, of een gebouw in zijn geheel, om thermische energie te absorberen en tijdelijk op te slaan. De kwaliteit van deze indicator wordt gekarakteriseerd door, enerzijds de thermische capaciteit en anderzijds de snelheid waarmee het warmte kan absorberen of afgeven. Thermische capaciteit duidt op de hoeveelheid warmte dat een materiaal moet absorberen vooraleer de eigen temperatuur met één Kelvin stijgt. Op dit moment is er geen SI-eenheid erkend voor de thermische inertie, waardoor meestal gebruik wordt gemaakt van de thermische capaciteit, uitgedrukt in J/K, als maatstaaf. Thermische capaciteit wordt op zijn beurt gekarakteriseerd door de hoeveelheid thermische energie dat 1 kg van een materiaal nodig heeft om zijn temperatuur met 1 K te doen toenemen [32].

Aangezien er reeds materialen werden toegekend aan de scheidingsconstructies tussen verschillende zones onderling en tussen de zones en de buitenomgeving, is de grootste thermische massa reeds geïntegreerd in het configuratiebestand. Toch wordt er, aan de hand van enkele ruwe metingen en logische redentatie, een inschatting gedaan van het interieur om ook de invloed hiervan mee op te nemen in het configuratiebestand. Het betreft vooral voorwerpen met een grote massa of materialen die in grote hoeveelheden aanwezig zijn en beschikken over een aanzienlijk oppervlakte, denk aan tafels, stoelen, gewichten, binnenmuren, banken, wc-hokjes en glazenwanden.

3.4.7 HVAC

Zoals reeds aangehaald, wordt voor de modellering van het HVAC-systeem gebruik gemaakt van OpenStudio. Enkel kleine componenten zoals verwarmingselementen werden handmatig ingegeven via de IDF-editor. De topsportschool is uitgerust met vijf luchtbehandelingskasten voor binnenopstelling, vier hiervan beschikken over een kruisstroom platenwisselaar uit polypropyleen met een rendement $\eta > 78\%$, nat $\eta \geq 90\%$, en een dubbele bypassklep. Verder zijn deze vier luchtbehandelingskasten uitgerust met een adiabatische koeling, die de extractielucht voor de warmterecuperator indirect afkoelt met een rendement van minimaal 90%, en een verwarmingsbatterij. De resterende luchtbehandelingskast, die instaat voor de klimatisatie van de grote sporthal, beschikt enkel over een warmtewiel uit polypropyleen met een voelbaar rendement $\eta \geq 91\%$, en een latent $\eta \geq 70\%$, maar bevat verder geen indirecte adiabatische koeling of verwarmingsbatterij. Voor alle rendementen wordt er in het configuratiebestand uitgegaan van worst-case-scenario, met andere woorden wordt de ondergrens genomen.

Indien de capaciteit van de luchtbehandelingskasten niet voldoet, wordt er bijverwarmd met radiatoren, uitgezonderd in de grote sporthal en de kleedkamers, deze zijn uitgerust met vloerverwarming. Door gebrek aan informatie over de stromingssnelheden en temperatuurgradiënten in de leidingen, wat leidt tot enorm veel foutmeldingen tijdens het simuleren, wordt er gebruik gemaakt van een elektrische vloerverwarming en elektrische radiatoren. Dit brengt met zich mee dat de toe- of afname in verbruik zal worden voorgesteld met percentages aangezien reële cijfers niet direct verband houden met de realiteit.

Aangezien de topsportschool volledig is uitgerust met een gebouwbeheersysteem of building management system (BMS) worden alle componenten van het ventilatiesysteem, de radiatoren en de vloerverwarming geheel aangestuurd via het energy management system (EMS) in EnergyPlus. Deze sturingen gaan de activatie van de verschillende componenten, die oorspronkelijk berust op thermostaatschema's met een 'setpoint' temperatuur voor een bepaald tijdframe, overschrijven. De thermostaatschema's en sturingen zijn terug te vinden in de bijgevoegde configuratiebestanden.

Het infiltratiedebiet wordt berekend op basis van het resultaat van de luchtdichtheidstest. Deze test stelde 0.5 luchtuitwisselingen vast van het netto volume van de topsportschool ($n_{50} = 0.5 \text{ h}^{-1}$) bij een drukverschil van 50 Pascal. De vuistregel in vergelijking (3.1 geeft een benadering van het gemiddelde infiltratiedebiet in aantal luchtuitwisselingen per uur of air changes per hour (ACH) [44, 45].

$$\text{ACH} = \frac{n_{50}}{20} = \frac{0.5}{20} = 0.025 \text{ h}^{-1} \quad (3.1)$$

De ventilatiedebieten werden rechtstreeks overgenomen uit het as-built dossier en zijn berekend rekening houdend met de norm NBN D50-001 [46].

3.4.8 Uitvoerparameters

EnergyPlus biedt de mogelijkheid om zelf te kiezen welke variabelen worden uitgelezen. Voor de kalibratie wordt er gewerkt met de binnenluchttemperatuur om het gemeten temperatuurverloop van de loggers te kunnen benaderen. Nadien wordt er overgeschakeld op de operationele temperatuur die wordt gebruikt in het eigen ontwikkelde oververhittingscriterium [47].

3.5 Kalibratie

3.5.1 Limitatie van simulaties

Een gebouwmodel vangt slechts een willekeurig en beperkt gedeelte van de verscheidenheid aan dynamische effecten op, waaronder fabrieksinstellingen, probabilistische weergegevens en stochastische aanwezigheden. Resultierend in onnauwkeurigheden en onzekerheden. Invoergegevens, software beperkingen en weerdata vormen de meest voorkomende oorzaken van simulatieonvolkomenheden. De fysische processen van vocht en warmte zijn immers uiterst complex en kunnen slechts worden benaderd met theoretische modellen. Beperkingen van hygrothermische modellen vloeien voort uit volgende niet limitatieve opsomming:

1. De veronderstelling, in de meeste numerieke modellen, dat eigenschappen van bouwmaterialen constant blijven. In de realiteit zijn deze sterk afhankelijk van temperatuur- en vochtgehalte;
2. De complexiteit om eenduidige randvoorwaarden te definiëren en gebrek aan kennis over de invloed van het wijzigende klimaat;
3. Fouten in de achterliggende vergelijkingen van de software;
4. Onzekerheden in verband met de luchtstroom ten gevolgen van ventilatie en infiltratie [48].

3.5.2 Kalibratietechnieken

Vroeger werd er bij kalibratie van energetische simulaties vooral toegespitst op het benaderen van gemeten energiedata en werd het subjectieve oordeel van de analist toegestaan. De laatste jaren ontstaat er echter meer en meer een gemeenschappelijk consensus over het gebruik van de 'ASHRAE guide 14 method'. Om het kalibratieproces in te korten wordt het gebruik van invoerparameter optimalisatie evenals onzekerheids- en gevoeligheidsanalyses aangeraden. Samengevat bestaan er drie verschillende kalibratiemethodes, waaronder manueel iteratief, geautomatiseerd en ten slotte de grafische en statistische methode. In deze scriptie wordt er hoofdzakelijk toegespitst op de manueel iteratieve methode waarbij eveneens gebruik wordt gemaakt van grafieken om de kalibratie te visualiseren en statistische indicatoren om de minimale kalibratiegrenzen af te bakenen. D. Marini, Mustafaraj, G. et al. [49] bieden een heldere uiteenzetting van hun kalibratiemethode. Er wordt gestart met de invoer van het model aan de hand van het aanwezigheidsroosters, het as-built dossier en de instellingen van de technische installatie. Vervolgens worden de meest invloedrijke parameters bepaald met behulp van een gevoeligheidsanalyse. Tot slot wordt er een iteratief proces van aanpassingen uitgevoerd om het gekalibreerd model te realiseren. Dit naslagwerk zal in grote lijnen deze kalibratiemethodiek volgen.

Wanneer gemeten en gesimuleerde waarden op elkaar worden afgestemd, zijn er twee bronnen van fouten waar rekening mee moet worden gehouden. Enerzijds is er de meetfout en anderzijds de modelfout afkomstig van het simulatieproces. Meetfouten kunnen achterhaald worden aan de hand van fabrikantliteratuur of door de apparatuur te kalibreren. Opsporing van modelfouten is daarentegen veel complexer door de intrinsieke onzekerheden. Er zijn drie soorten van onzekerheden:

1. Specificatie gerelateerde onzekerheden die ontstaan wanneer gebouwen en technische installaties slechts gedeeltelijk of onjuist worden geïmplementeerd;
2. Scenario gerelateerde onzekerheden door het afwijkend karakter van externe (e.g. klimaat) en interne (e.g. bezetting) parameters ten opzichte van de werkelijkheid;
3. Software gerelateerde onzekerheden die voortvloeien uit de vereenvoudigde beschrijving van de werkelijkheid [49].

3.5.3 Kalibratie van een energetisch model

Binnen het onderzoek “Building model calibration using energy and environmental data” door M. Royapoor en T. Roskilly [48], wordt de kalibratie van een energetisch model in EnergyPlus voor een bestaand gebouw uitgebreid besproken. De casestudy betreft een kantoorgebouw opgebouwd uit kalkzandsteen en bestaande uit respectievelijk 54%, 29%, 87% en 42% beglazing in noord, oost, zuid en westelijke oriëntatie. Dit resulteert, globaal gezien, in een ‘Window-to-Wall-Ratio’ (WWR) van 53%. De binneninrichting bestaat uit open kantoren verspreid over 8.365 m³ vloeroppervlakte die 500 medewerkers huisvesten. De weerdata werd verzameld via een mobiel weerstation dat op het dak werd geplaatst. De parameters werden elke tien minuten opgemeten. Het gebouw bevat een hoog glaspercentage en leunt dus qua opbouw aan tegen de topsportschool.

Om de kalibratie aan te duiden wanneer een model gekalibreerd is, wordt er gebruik gemaakt van de ASHRAE Guideline 14-2002. Deze richtlijn schuift twee dimensieloze foutindicatoren, de mean bias error of MBE en de cross-validated root mean square error of CV(RMSE), naar voren [48].

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^{N_i} (M_i - S_i)}{\sum_{i=1}^{N_i} M_i} \tag{3.2}$$

$$CV(RMSE) = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_i} [(M_i - S_i)]^2}{\sum_{i=1}^{N_i} M_i}}}{\sum_{i=1}^{N_i} M_i} \tag{3.3}$$

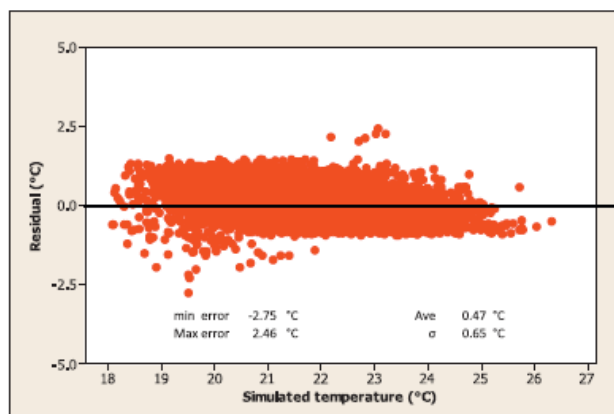
Met:

- M_i = de gemeten gegevens op ogenblik ‘i’
- S_i = de gesimuleerde gegevens op ogenblik ‘i’
- N_i = het aantal waarden gebruikt in de berekening

ASHRAE Guide 14 beschouwt een gebouwmodel als gekalibreerd indien de uurlijkse MBE binnen de ± 10% valt en de CV(RMSE) ≤ 30%. De MBE geeft een indicatie van de gemiddelde fout ten opzichte van de gemeten waarden, maar lijdt aan het opheffingseffect tussen negatieve en positieve waarden. De CV(RMSE) index geeft daarentegen de grootte van de genormaliseerde opgebouwde fout weer. De CV(RMSE) weerspiegelt hierdoor beter de grootte van de geaccumuleerde fout en vormt hierdoor een betere indicator voor de algehele voorspellingsnauwkeurigheid van het energetisch model. Als derde indicator wordt er gebruik gemaakt van de absolute fout, hierbij wordt de gemeten waarde afgetrokken van de gesimuleerde waarde [48].

$$\epsilon_i = M_i - S_i \tag{3.4}$$

Door de uitstekende resultaten van de kalibratie, zoals weergegeven in Figuur 3-3, waarbij de luchttemperatuur van de simulatie bijna 99.5% van de tijd binnen de marge van ± 1.5 °C en 93.2% van de tijd binnen de marge van ± 1 °C rond de gemeten temperatuur ligt, werd er door M. Royapoor en T. Roskilly voorgesteld om de ASHREA acceptatiegrenzen te verkleinen naar ± 5% voor de MBE en ≤ 20% voor de CV(RMSE). Dit voorstel zal worden gebruikt om de kalibratie in dit proefschrift te beoordelen [48].



Figuur 3-3 Scatterplot van gemeten vs. gesimuleerde temperaturen

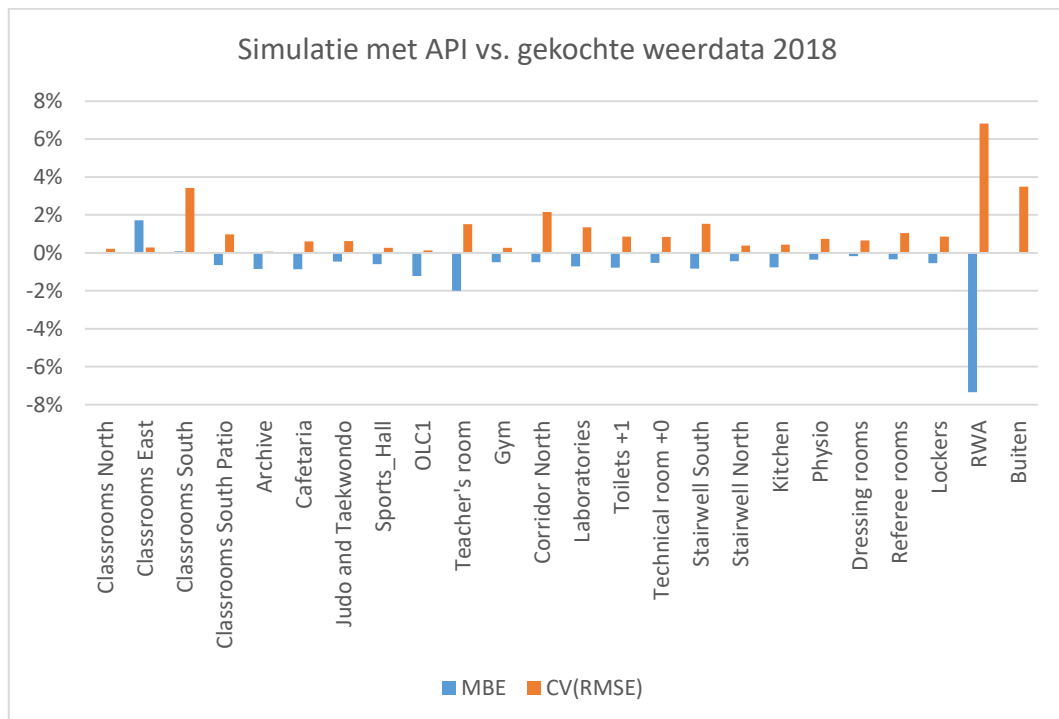
3.5.4 Kalibratie topsportschool

Na het samenstellen van een ruw energetisch model volgens het as-built dossier en de instellingen van de technische installatie, die raadpleegbaar waren, kon de kalibratie van het model aanvangen. Doordat er geen energiefacturen of meetgegevens voorhanden waren, moest het model volledig gekalibreerd worden op basis van het temperatuurverloop gemeten door loggers die in de lokalen en sportruimten van de school werden geplaatst. De loggers werden steeds, op circa drie meter hoogte, in het midden van een ruimte geplaatst om ze te onttrekken uit de invloedszone van het ventilatiesysteem en het oog van de leerlingen. Na het uitlezen van de metingen kon het eigenlijke kalibratieproces aanvangen.

Om doelgericht en efficiënt te kalibreren werd er procesmatig gewerkt. In de eerste fase werd er toegespitst op de optimale afstelling van het HVAC-systeem. Hierbij werden de thermostaten afgesteld op de ondergrens van de temperaturen, de stooklijnen en nachtventilatie geïntegreerd in EMS alsmede de bediening van de binnenzonwering en de inschakelmomenten van verwarming en koeling gemodelleerd. Ook de ‘setpoints’ van de resterende HVAC-componenten werden geïntegreerd zodat het geheel optimaal wordt aangestuurd. Vervolgens kon er worden overgegaan op fase twee waarin een sensitiviteitsanalyse van de warmtewinsten en het nachtdebiet werd uitgevoerd. Tot slot kon er worden overgeschakeld op het scherp stellen van het model door het oververhittingscriterium mee te betrekken in het kalibratieproces.

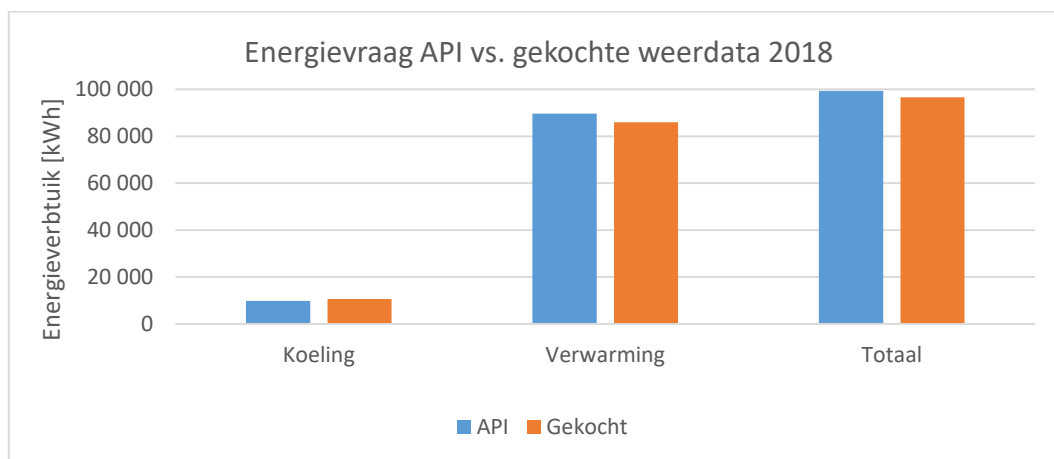
In deze laatste fase werden er enkele interessante constataties gedaan. Het was immers niet mogelijk om het werkelijk temperatuurverloop na te bootsen zonder enkele gebouw-eigen parameters te modificeren, meer bepaald de g-waarde van de beglazing en de debieten van de nachtventilatie moesten worden verlaagd om de zonnepwinsten en nachtelijke verliezen binnen de marge te houden.

Na een diepliggender onderzoek werden er enkele mogelijke oorzaken blootgelegd voor beide factoren. De uitgesproken zonnepwinsten kunnen voortvloeien uit de weerbestanden, afkomstig zijn door een fout in de simulatiesoftware of de g-waarden van de geplaatste beglazing liggen lager dan aangegeven in het as-built dossier. De eerste mogelijkheid is het meest voor de hand liggend, aangezien de weerbestanden zelf werden samengesteld, werd er een korte analyse uitgevoerd om de betrouwbaarheid hiervan te toetsen.



Figuur 3-4 Simulatie met een eigenhandig vs. aangekocht weerbestand van 2018

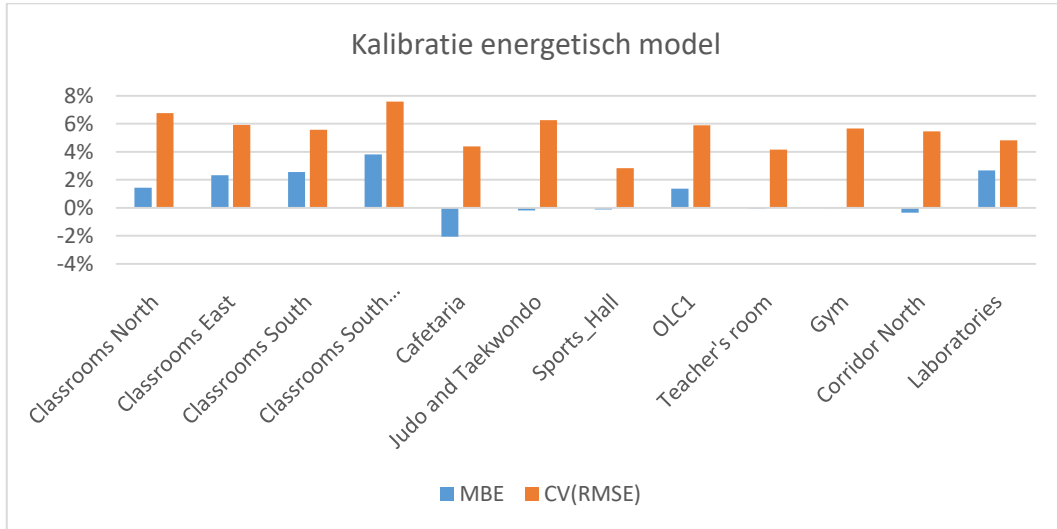
De berekende CV(RMSE) en MBE tussen het gesimuleerd temperatuurverloop van het energetisch model met het eigenhandig samengestelde weerbestand en het aangekochte weerbestand van 2018 in Figuur 3-4 geven op het eerste zicht weer dat de correlatie tussen beide binnen een aanvaardbare marge liggen. Beide factoren vallen voor 21 van de 24 thermische zones immers binnen de grens van $\pm 2\%$. Toch vertoont de buitentemperatuur met 3.49% een beduidend grotere foutmarge dan de ruimtes zelf. De meest significante afwijking treedt op in de rookwarmteafvoer (RWA). Deze zone is niet geconditioneerd en hangt volledig af van de buitencondities en de omliggende zones. Dit duidt op het misleidend karakter van de statistische parameters. De topsportschool wordt sterk geconditioneerd waardoor beperkte afwijkingen teniet gaan ten gevolge van de reagerende HVAC-installatie. Een analyse van de energievraag in Figuur 3-5 bevestigt deze constatactie. Bij het gebruik van het aangekochte weerbestand neemt de energievraag voor koeling met 8,6% toe en voor verwarming met 4,24% af ten opzichte van de simulatie met het eigenhandig samengestelde weerbestand. Dit resulteert in een afname van de totale energievraag voor verwarming en koeling met 2,82%, of in reële cijfers 2728 kWh, wat overeenstemt met 80% van het jaarlijkse energieverbruik van een gemiddeld Vlaams gezin. Door de toename van het benodigd koelvermogen bij het gebruik van weerdata opgehaald met de API zou de oorzaak van de grote zonnewinsten afkomstig kunnen zijn uit het weerbestand. Al kan dit niet met zekerheid worden vastgesteld aangezien de geografische ligging van het aangekochte weerbestand (luchthaven Deurne) niet 100% overeenstemt met dat van de opgehaalde weerdata (Campus Groenenborger, te Wilrijk). Daarbij is het eveneens niet zeker of de aangekochte weerbestand 100% betrouwbaar is.



Figuur 3-5 Verschuiving energievraag API vs. gekocht

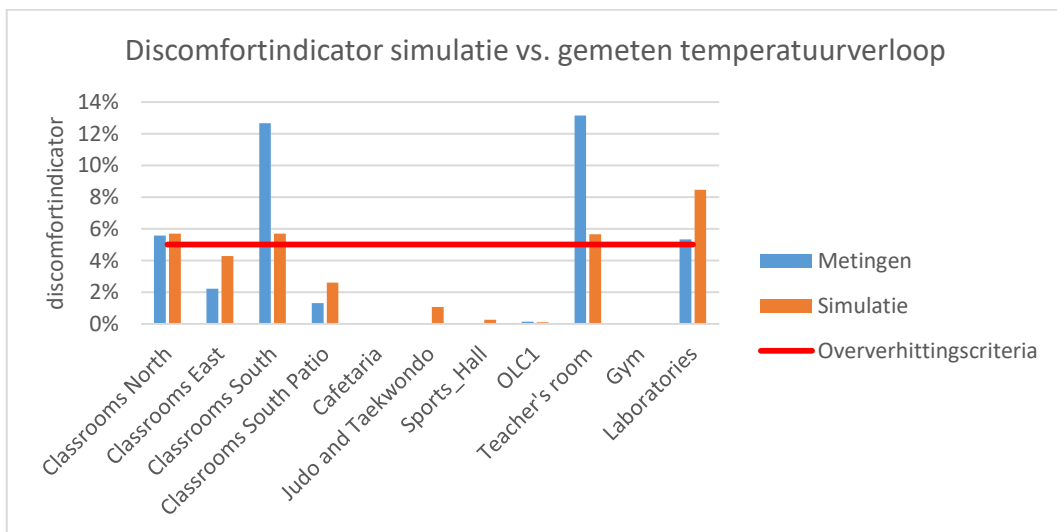
In tegenstelling tot de g -waarde die slechts verlaagd moest worden voor enkele oriëntaties, is de reductie van de nachtventilatie veel meer uitgesproken. De nachtventilatie na kalibratie bedraagt immers slechts 10% van de oorspronkelijke debieten die door de luchtbehandelingskasten worden behaald. Van de technische dienst werd echter vernomen dat de inblaaslucht eerst in een ondergrondse ruimte wordt aangezogen en pas daarna gebruikt wordt als ventilatielucht. De noodzakelijke debietvermindering zou dus een compensatie kunnen zijn van een verminderd koelvermogen door een voorverwarmde buitenlucht. Aangezien dit een zéér specifieke toepassing is en er geen meetgegevens zijn van deze ondergrondse ruimte kon deze maatregel niet worden geïmplementeerd in het energetisch model. Een andere mogelijkheid spits zich toe op de disfunctie van het ventilatiesysteem. Met andere woorden, wordt er in dit geval verondersteld dat in de realiteit eveneens de gewenste ventilatiedebieten gedurende de nacht niet worden behaald. Een combinatie van beide vormt een derde mogelijkheid. Om dit te achterhalen zullen er debietmetingen moeten plaatsvinden in het gebouw zelf en temperatuurmetingen in de ondergrondse ruimte. Indien de opwarming in de ondergrondse ruimte de problematiek veroorzaakt, kan er eventueel een extra kanaal worden aangelegd om voor de nachtventilatie rechtstreeks lucht van buitenaf aan te zuigen. Hoewel het configuratiebestand nauwkeurig parameter per parameter werd geverifieerd kan het probleem zich uiteraard ook situeren in het energetisch model zelf of in de achterliggende software. In dit naslagwerk werd uiteindelijk, na een uitgebreide analyse van het model, besloten om verder te werken met de gemodificeerde g -waarden en de verminderd nachtdebieten.

Om aan te duiden wanneer het energetisch model is gekalibreerd wordt er, zoals vermeld in 3.5.3, gebruik gemaakt van de twee dimensieloze foutindicatoren, de mean bias error of MBE en cross-validated root mean square error of CV(RMSE). Het model kan gekalibreerd worden beschouwd indien er wordt voldaan aan de verstrengde ASHREA acceptatiegrenzen. Hierbij moet de MBE tussen $\pm 5\%$ liggen en $CV(RMSE) \leq 20\%$. Zoals wordt weergegeven in Figuur 3-6 voldoet het model aan de vooropgestelde grenzen en zelf ruimschoots op het vlak van de CV(RMSE).



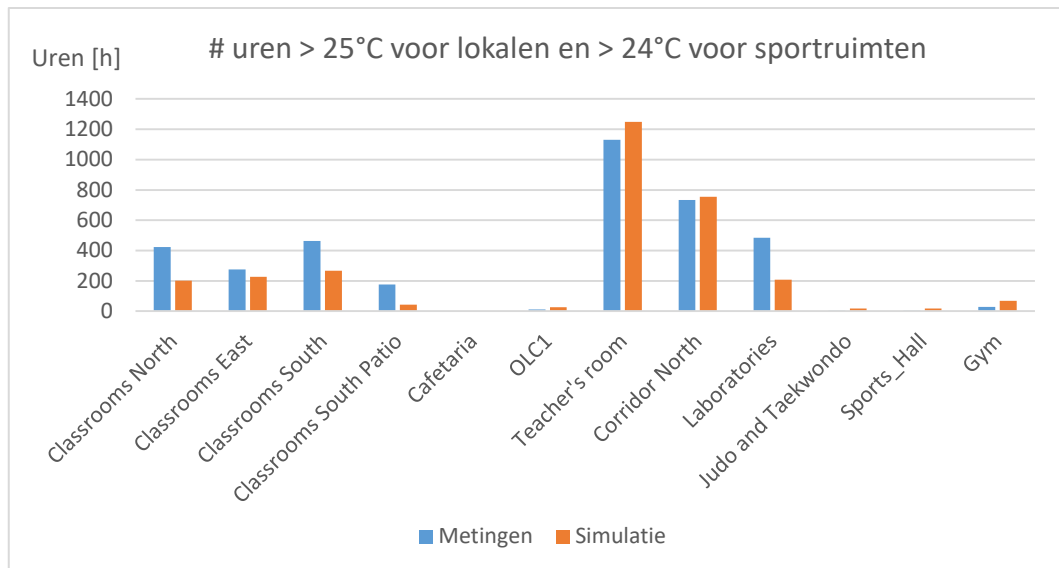
Figuur 3-6 MBE en CV(RMSE) tussen het werkelijke en gesimuleerde temperatuurverloop

Om de kalibratie toe te spitsen op het zomercomfort werd het oververhittingscriterium, opgesteld in 2.6.2, betrokken bij het kalibratieproces. Zowel voor het werkelijke als het gesimuleerde temperatuurverloop werd het percentage oververhittingsuren berekend en met elkaar vergeleken. Vervolgens werd er iteratief gewerkt om zowel het verschil in discomfortindicatoren als de MBE en de CV(RMSE) te reduceren. Daarbovenop werd er eveneens rekening gehouden met het aantal uren boven de vooropgestelde temperatuurgrenzen. Figuur 3-7 en Figuur 3-8 tonen samen met Figuur 3-6 de kleinste mogelijke foutmarge die kon worden bereikt bij het in rekening brengen van deze vier parameters. Opgelet! Tijdens de kalibratie wordt er gewerkt met de gemiddelde luchttemperatuur in een zone om te kunnen vergelijken met de metingen, na de kalibratie zal er worden overgeschakeld op de operationele temperatuur bij het berekenen van de discomfortindicator.



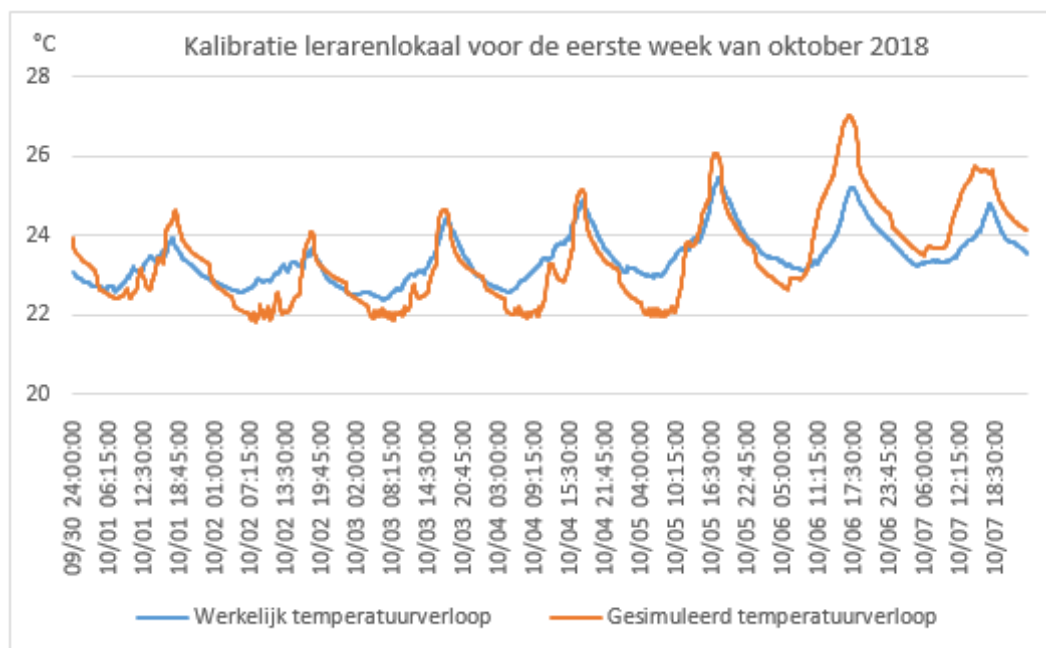
Figuur 3-7 Vergelijking oververhitting gemeten vs. gesimuleerd temperatuurverloop

Wordt Figuur 3-7 en Figuur 3-8 in beschouwing genomen dan valt op dat de discomfortindicator van de zuidelijke klassen en het lerarenlokaal beduidend hoog ligt, terwijl het aantal uren boven de 25°C bijna gelijk ligt. Dit vloeit voort uit het oververhittingscriterium dat enkel rekening houdt met de bezette uren en de onbezette buiten beschouwing laat. Aangezien de simulatie slechts een benadering is van de werkelijkheid kan het zijn dat de temperatuur op het ogenblik van bezetting juist onder de 25 °C ligt in de simulatie en daardoor niet wordt opgenomen in het oververhittingscriterium, terwijl deze in werkelijkheid er juist boven ligt en wel wordt opgenomen in het oververhittingscriterium. Dit verklaart het significante verschil tussen de simulatie en de metingen.



Figuur 3-8 Vergelijking # uren > oververhittingsgrens werkelijk en gesimuleerd temperatuurverloop

Uit Figuur 3-7 kan worden opgemaakt dat de noordelijke klassen, de zuidelijke klassen, het lerarenlokaal en de laboratoria lijden aan oververhitting en geen behaaglijk zomercomfort kunnen garanderen. In Figuur 3-9 wordt de kalibratie van het temperatuurverloop voor de eerste week van oktober 2018 in de lerarenkamer weergegeven, dit om zicht te krijgen op detaillering van het kalibratieproces.



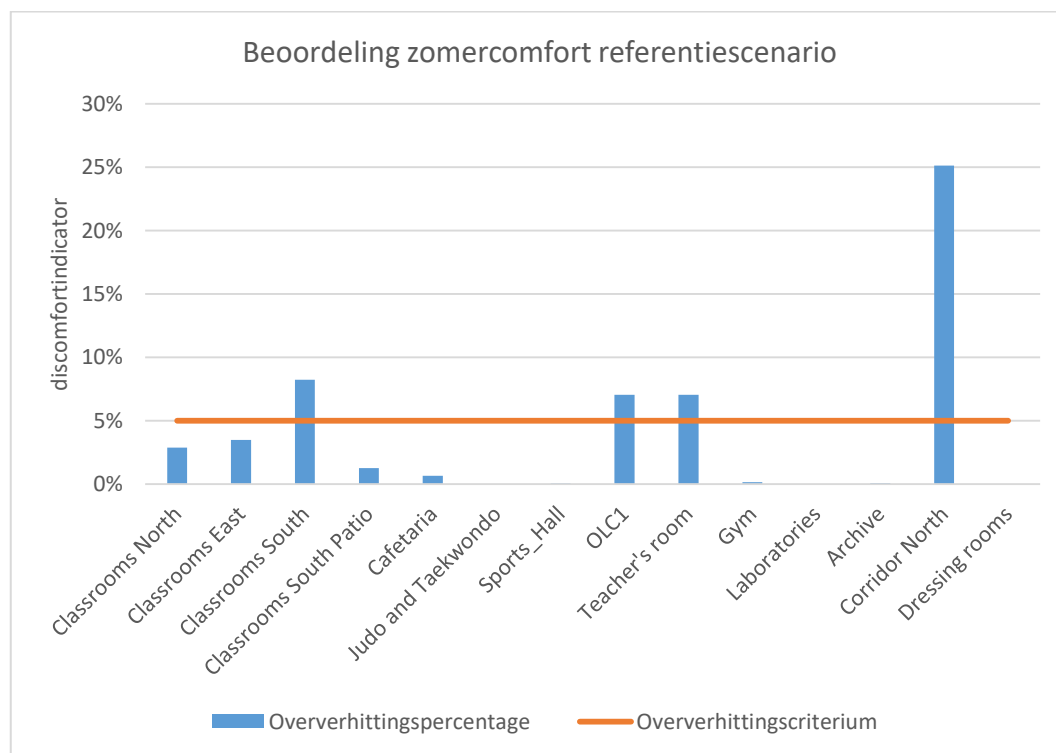
Figuur 3-9 Kalibratie temperatuurverloop lerarenlokaal

4 ANALYSE VAN MITIGERENDE MAATREGELEN

Om de bouwheer van de topsportschool een ruim assortiment aan mogelijkheden aan te bieden wordt er voor elke mitigerende maatregel in het remediëringspakket opbouwend gewerkt. Zo kan de bouwheer zelf de grootteorde van de mitigerende maatregelen bepalen afhankelijk van zijn budget. Bij de analyses zal steeds rekening gehouden worden met de eventuele 'drawbacks' op het energieverbruik zodat er geen verkeerd beeld wordt geschept. Nu het energetisch model is gekalibreerd wordt er overgeschakeld op de simulatie van de operationele temperatuur voor de evaluatie van de discomfortindicator.

4.1 Referentiescenario

Het configuratiebestand van het referentiescenario en de kalibratie ten opzichte van de werkelijkheid werd reeds uitvoerig besproken in paragrafen 3.4 en 3.5. Om het zomercomfort op elkaar af te stemmen werd het vooropgestelde oververhittingscriterium eveneens betrokken bij de kalibratie. Hierbij werd er echter gebruik gemaakt van de gemiddelde luchttemperatuur om een vergelijking te kunnen maken met de meetgegevens. De discomfortindicatoren van de verschillende zones zullen hierdoor opnieuw moeten worden berekend met de operationele temperatuur zodat er aan alle randvoorwaarden van het oververhittingscriterium wordt voldaan. Als simulatieperiode wordt er geopteerd voor de periode tussen 1 augustus 2018 en 31 juli 2019. Zo wordt er gewerkt met een volledig jaar waarin de gekalibreerde periode gaande van 21 september 2018 tot 30 juli 2019 volledig is opgenomen. Ook het weerbestand bestaat hierbinnen uit de aangekochte weerdata van 2018 en de opgehaalde weerdata van 1 januari 2019 tot en met 31 juli 2019. Met andere woorden wordt er gebruik gemaakt van identieke gegevens als de kalibratie aangevuld met een kleine uitbreiding voor de maand augustus. Deze uitbreiding kan enkel de discomfortindicator van de sportruimten beïnvloeden, aangezien enkel de bezette periodes in beschouwing worden genomen voor oververhitting en augustus deel uitmaakt van een vakantieperiode voor het secundair onderwijs in België.

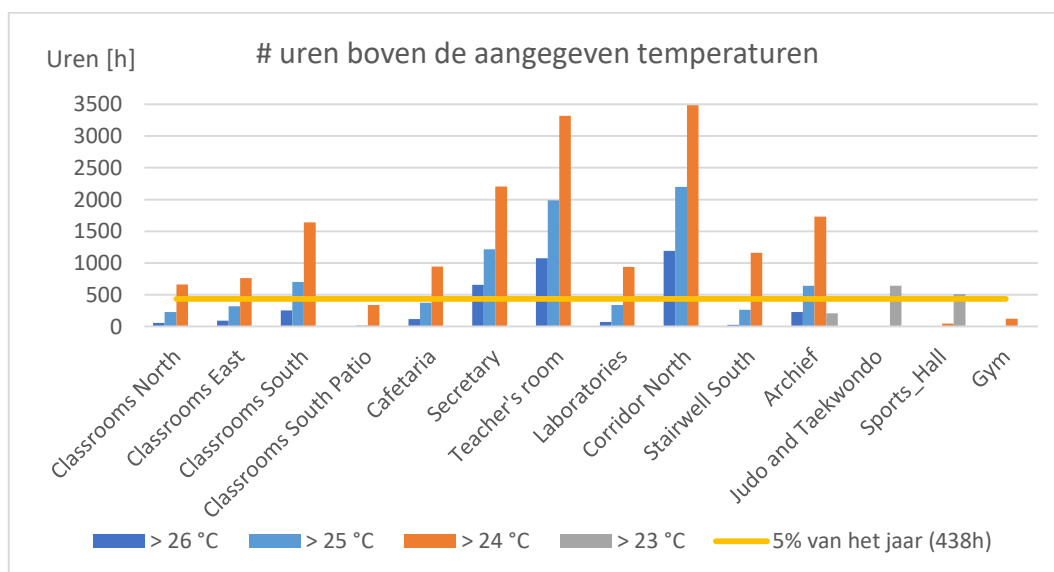


Figuur 4-1 Zomercomfort referentiescenario

Figuur 4-1 geeft aan dat hoofdzakelijk de lokalen met zuidelijk en westelijk georiënteerde glaswanden een behaaglijk zomercomfort niet kunnen garanderen. Dit wijst in de richting van overmatige zonnwinsten. De mitigerende maatregelen zullen trachten deze onder controle te krijgen. Verder valt op dat de sportruimten ruim voldoen aan het vooropgestelde criterium. De klachten in deze ruimten houden, volgens de simulaties, geen verband met de temperatuur en zullen afkomstig zijn van een andere factor zoals bijvoorbeeld een te hoog CO₂-gehalte. Te klein ventilatiedebieten of een slechte luchtcirculatie kan in combinatie met overmatige bezetting aan de basis liggen van dit probleem. Aangezien de extractie- en pulsieroosters niet kruislings zijn opgesteld in de sportruimten is de luchtcirculatie niet optimaal, evenals de ventilatiedebieten die reeds in vraag werden gesteld bij de kalibratie van het model. Een combinatie van al deze factoren zal vermoedelijk aan de basis liggen van de klachten. De remediëring van dit probleem vormt echter een onderzoek op zich en wordt louter meegegeven als onderzoeksaanbeveling.

Opmerkelijk aan Figuur 4-1 is de afwezigheid van een groot aantal zones, waaronder de technische ruimte, de toiletten op +1, de lokalen van de scheidsrechters, de lockerruimte, de trappenhallen, de kinézaal en de keuken. De oorzaak hiervan ligt bij de afwezigheid van een bezettingsprofiel in het configuratiebestand. Voor deze zones werd namelijk geen aanwezigheidsrooster gecompileerd omdat dit niet voorspelbaar is, niet repetitief is doorheen de weken en de aanwezigheid slechts van korte duur is. Eveneens moet vermeld worden dat het bezettingsprofiel van de noordelijke klassen werd gebruikt voor het berekenen van de discomfortindicator voor de noordelijke gang, deze zone is in de simulatie immers niet voorzien van een aanwezigheidsrooster omdat deze louter als doorgang functioneert. Toch was het noodzakelijk om deze gang te betrekken bij de analyse aangezien deze enorm grote zonnwinsten capteert en de omliggende lokalen sterk beïnvloedt.

Ter verificatie werd er een tweede analyse uitgevoerd van de thermische zones, waarbij de uren boven de voorgestelde drempelwaarde en de temperatuur 1 °C onder deze drempelwaarde werden bestudeerd. De thermische zones die afwezig zijn in Figuur 4-2, omdat ze dermate weinig uren boven de drempelwaarde van de temperatuur verminderd met 1°C bezitten, garanderen te allen tijde een behaaglijk zomercomfort en worden niet meer opgenomen in verdere analyses. Ook de sportruimten beschikken circa 95% van de tijd over een temperatuur die 1°C onder de drempelwaarde ligt en moeten niet specifiek worden voorzien van bijkomstige mitigerende maatregelen. Het schoolgedeelte daarentegen heeft een groot deel van het jaar temperaturen die boven de 24°C liggen. Dit hoofdstuk zal zich daarom toespitsen op het samenstellen van een remediërsset voor de beheersing van het zomercomfort in het schoolgedeelte, met de nadruk op de zones voorzien van zuidelijke en/of westelijke beglazing.



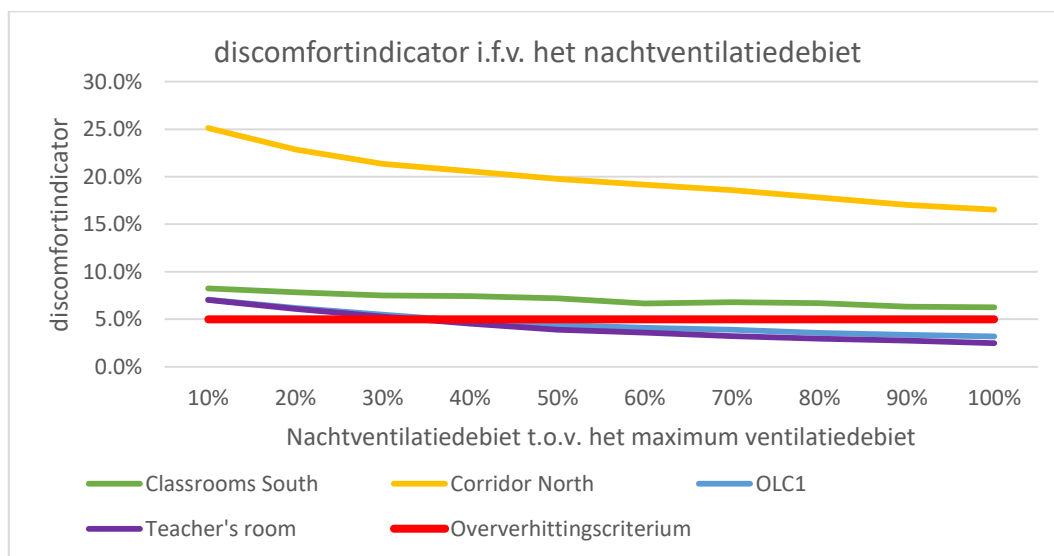
Figuur 4-2 Analyse overschrijding drempelwaarde temperatuur en drempelwaarde - 1°C

4.2 Mitigerende maatregelen

In dit subhoofdstuk wordt de invloed van verschillende mitigerende maatregelen geanalyseerd, zodat er een geschikte set van maatregelen kan worden samengesteld om het zomercomfort van de topsportschool beter te reguleren. Dit zodat een behaaglijk thermisch comfort onder 'normale' buitencondities te allen tijde kan worden gegarandeerd.

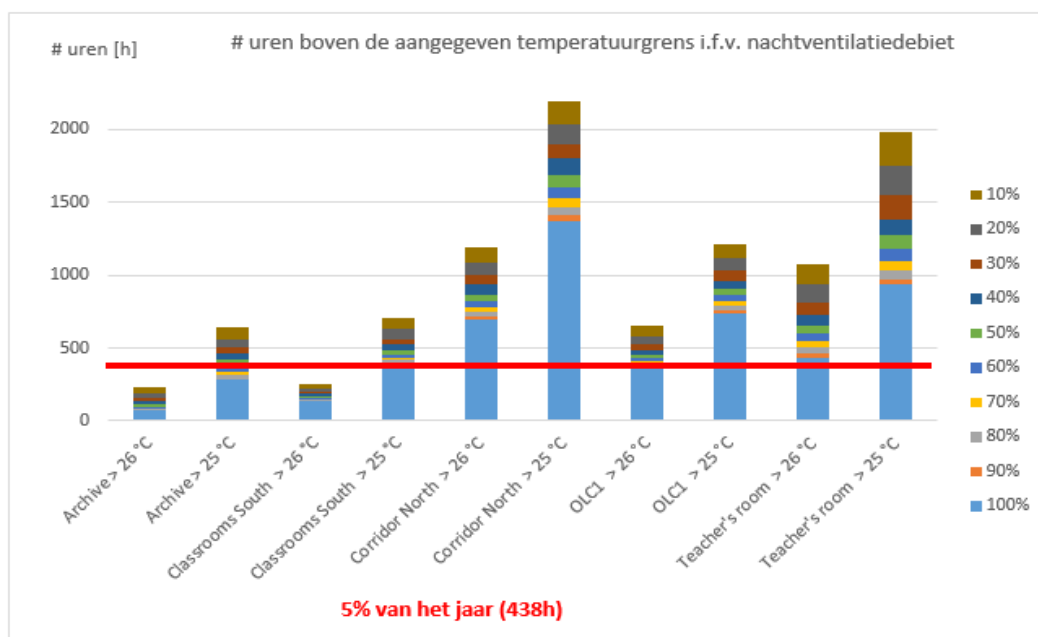
4.2.1 Nachtventilatie

Zoals reeds eerder werd aangehaald, moesten de debieten van de nachtventilatie gereduceerd worden naar slechts 10% van de oorspronkelijke debieten, die door de luchtbehandelingskasten worden behaald, voor de kalibratie van het energetisch model. Het gebouwbeheersysteem geeft tijdens een nachtelijke raadpleging nochtans aan dat de maximale ventilatiedebieten werden gebruikt. Dit zou kunnen duiden op een probleem in het ventilatiesysteem. Het probleem zou zich ook kunnen manifesteren door een voorverwarming van de inblaaslucht in de ondergrondse ruimte. In deze paragraaf wordt er geanalyseerd welke invloed een stapsgewijze toename, met 10%, van het nachtventilatiedebiet heeft op de gesimuleerde temperatuur. De toename wordt doorgevoerd tot de maximum haalbare debieten van de luchtgroepen zijn bereikt. Om de nachtventilatie in te schakelen werd er een sturing ontwikkeld in het EMS van EnergyPlus. Deze sturing zorgt ervoor dat vanaf 1 april tot en met 1 november de luchtgroepen worden uitgeschakeld en een bypass in werking treedt om de koude lucht van buitenaf rechtstreeks binnen te trekken. De bypass treedt echter pas in werking wanneer er wordt voldaan aan alle randvoorwaarden. Zo moet de gemiddelde temperatuur van de afvoerlucht boven de 19 °C liggen, boven de temperatuur van de buitenlucht liggen en de buitenlucht moet minstens 5 °C bedragen. De nachtventilatie schakelt uit als de afvoerlucht een temperatuur van 17 °C heeft bereikt. Deze randvoorwaarden werden rechtstreeks overgenomen uit het gebouwbeheersysteem. De analyse zal zich beperken tot de meest kritische zones, bepaald aan de hand van het referentiescenario, om een duidelijke grafiek te construeren.



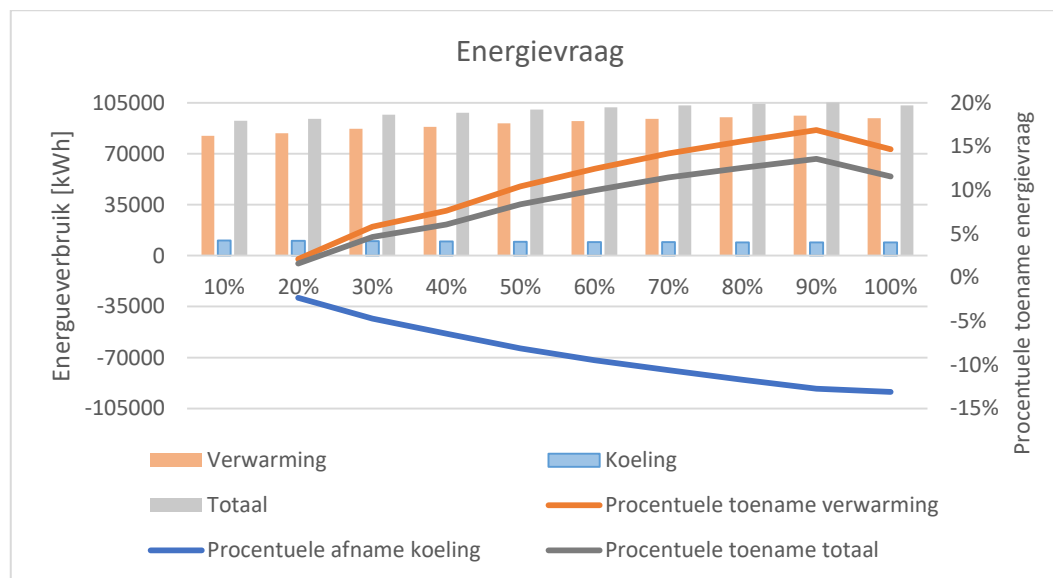
Figuur 4-3 Invloed toename nachtventilatiedebiet op de discomfortindicator

In Figuur 4-3 wordt vastgesteld dat de toename van het nachtventilatiedebiet een significante invloed heeft op de discomfortindicator. Verder valt op dat de daling in verhouding staat met de oorspronkelijke grootte ervan. Zo treedt er een sterkere daling op bij zones met een grotere oorspronkelijke discomfortindicator en een zwakkere daling bij zones met een kleinere oorspronkelijke discomfortindicator. Enkel de zone van de zuidelijke klaslokalen volgt deze trend niet en vertoont een zwakkere daling ten opzichte van de grootte van de oorspronkelijke discomfortindicator. De grote zonnewinsten in deze zone liggen aan de basis van dit afwijkend gedrag. De lucht wordt hier sterk opgewarmd waardoor voorcoeling ervan minder efficiënt is.



Figuur 4-4 Daling # uren > aangegeven temperatuur i.f.v. het toenemend nachtventilatie

Wanneer de onbezette uren mee in beschouwing worden genomen, dan wordt een significante stijging van het aantal uren boven de 25 °C en eveneens 26 °C waargenomen. De periode juli t.e.m. augustus, die niet mee in beschouwing wordt genomen in Figuur 4-3 omdat dit een vakantieperiode is, ligt uiteraard aan de basis van deze significante toename. Uit de resultaten van Figuur 4-4 kan worden vastgesteld dat vooral de zones van het open leercentrum, de noordelijke gang en het lerarenlokaal overmatige zonnewinsten capteren. In mindere mate leiden eveneens de zones van de zuidelijke klaslokalen en het archief hieraan.

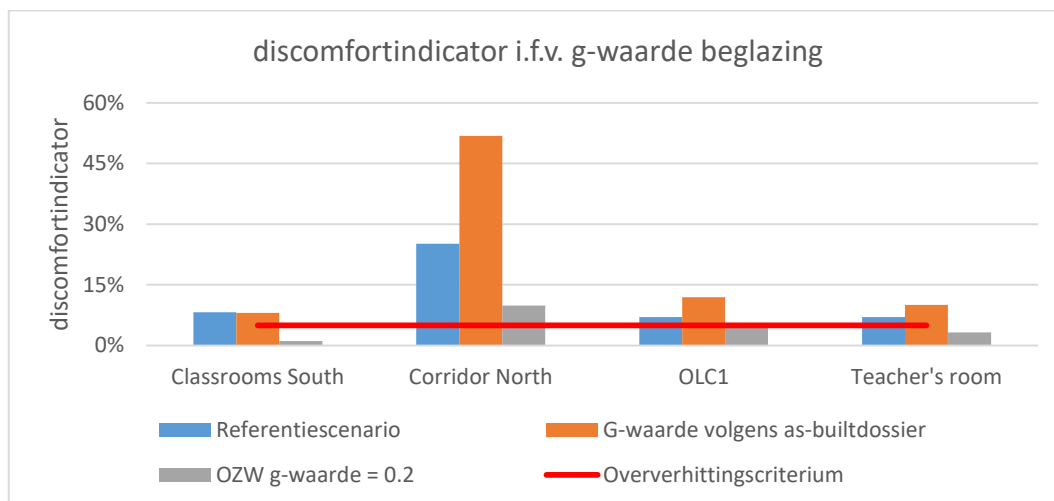


Figuur 4-5 Energievraag i.f.v. nachtventilatie

Wanneer de invloed van het stijgend nachtventilatie op de energievrage, in Figuur 4-5, onder de loep wordt genomen, dan kan er worden geconcludeerd dat de instellingen van de nachtventilatie niet optimaal zijn. Door een te grote temperatuurdaling gedurende de nacht moet er, naarmate het nachtventilatie toeneemt, meer en meer worden bijverwarmd. Hierdoor gaat er meer energie verloren aan verwarming dan dat er wordt gerecupereerd aan koeling. Wanneer de in- uitschakeltemperatuur van de nachtventilatie worden verhoogt treedt dit probleem niet meer op.

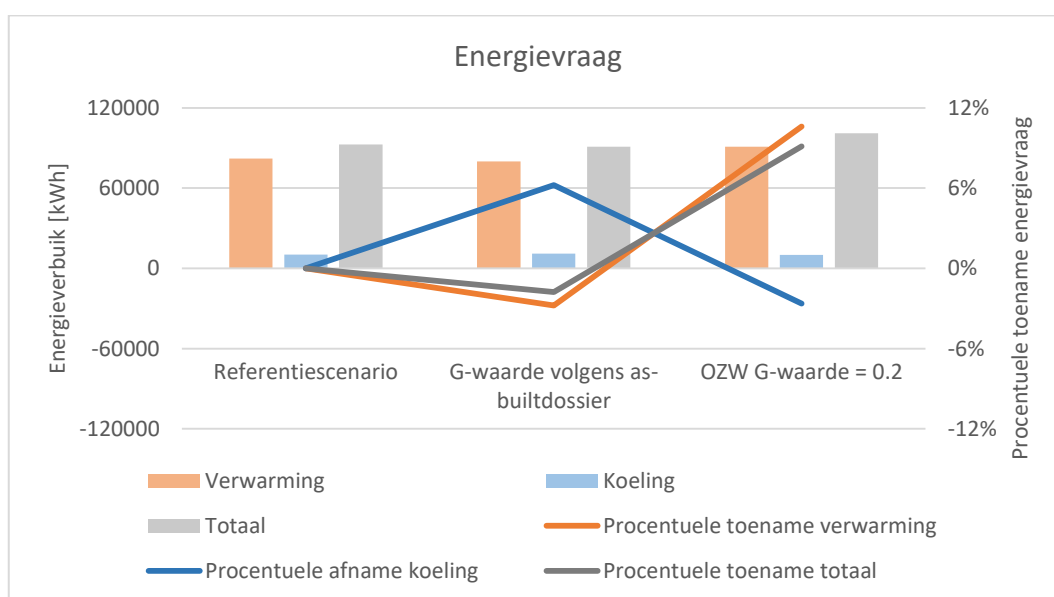
4.2.2 Aangepaste g-waarde voor de beglazing

In 3.5.4 werden de g-waarden van enkele gordijngelvels gereduceerd om het model te kalibreren. In deze paragraaf zal de invloed van een gemodificeerde g-waarde worden onderzocht. Er worden drie scenario's met elkaar vergeleken. Enerzijds het kalibratiemodel met aangepaste g-waarden (referentiescenario), anderzijds een scenario waarbij de g-waarden van de westelijke en zuidelijke georiënteerde beglazing gelijkgesteld wordt met de zér lage g-waarde ($g = 0.2$) van de oostelijke georiënteerde beglazing en tot slot een model met de g-waarde zoals aangegeven in het as-buit dossier. Zie bijlage F voor een samenvatting van de modificaties.



Figuur 4-6 discomfortindicator i.f.v. de g-waarde van de beglazing

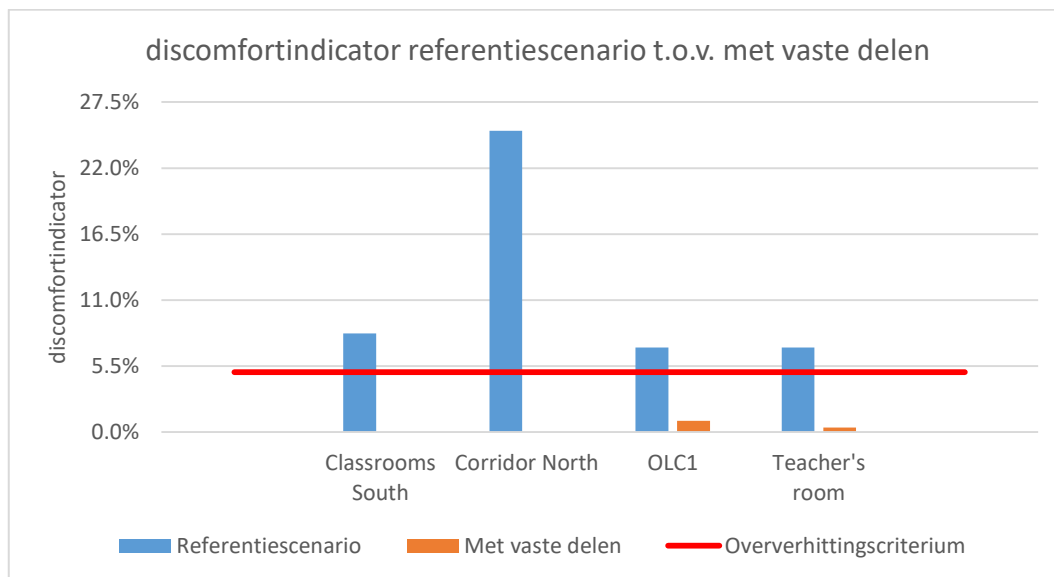
Figuur 4-6 toont aan dat de modificatie van de g-waarde een significante impact heeft op de zonnewinsten en de oververhitting die daardoor ontstaat in sterke mate doet afnemen. De resultaten van de analyse wijzen in de richting van een beperking van de zonnewinsten als meest efficiënte mitigerende maatregel. Wanneer Figuur 4-7 mee wordt betrokken in de analyse, kan er worden geconcludeerd dat een dynamisch systeem de voorkeur geniet. De resultaten in Figuur 4-7 tonen immers aan dat de afname in energievraag voor koeling niet opweegt tegen de toename van de energievraag voor verwarming. De nuttige zonnewinsten gedurende de winter zijn, op energetisch gebied, duidelijk veel groter dan de overtollige zonnewinsten tijdens de zomer. Een vaste beperking van de zonnewinsten wordt hierdoor niet aangeraden.



Figuur 4-7 Energievraag i.f.v. de g-waarde van de beglazing

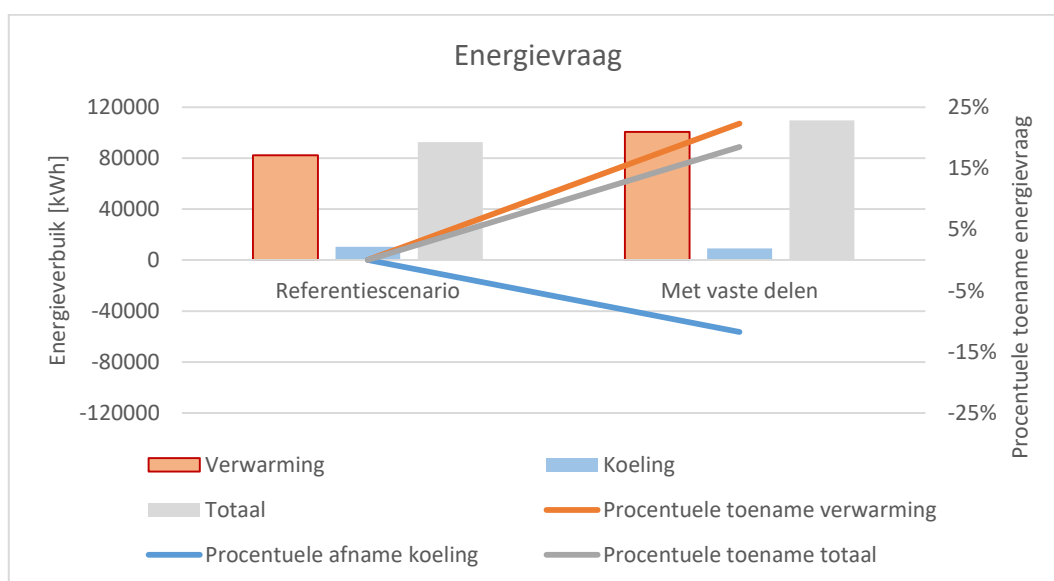
4.2.3 Vaste delen

Om het aandeel van de zonnewinsten nogmaals te benadrukken werd er eveneens een vergelijking gemaakt tussen het referentiescenario en een scenario waarbij vaste zonneluifels werden geïnstalleerd. Bij dit laatste scenario wordt de gehele patio overkoepeld en de gehele perimeter voorzien van zonneluifels onder een hoek van 45°. Zie bijlage G voor een visuele voorstelling van de geïnstalleerde vaste delen.



Figuur 4-8 Vergelijking discomfortindicator referentiescenario vs. model met vaste delen

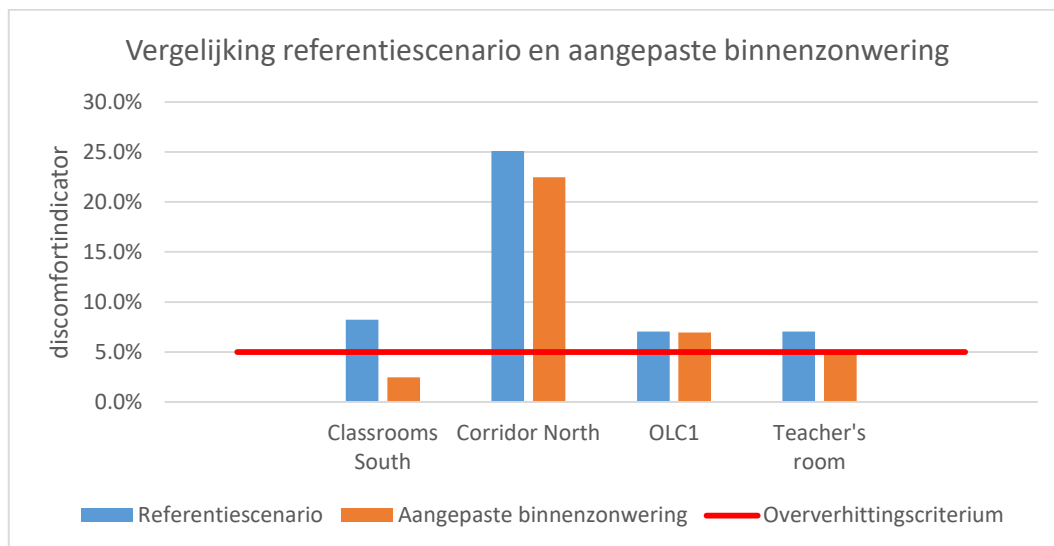
De evolutie van de discomfortindicator in Figuur 4-8 toont aan dat, bij het wegnemen van de zonnewinsten, het oververhittingsprobleem volledig is opgelost. Wanneer de impact op de energievraag wordt betrokken, wordt het belang van een dynamisch systeem wederom benadrukt. In Figuur 4-9 wordt immers een stijging van 22.30% waargenomen voor de energievraag van de verwarming, terwijl de energievraag voor koeling slechts krimpt met 11.80%. Verder moet worden opgemerkt dat het relatieve percentages betreft en de oorspronkelijke energievraag voor verwarming achtmaal zo groot is als de energievraag voor koeling. Indien al deze factoren mee in beschouwing wordt genomen is de besparing aan koelenergie verwaarloosbaar ten opzichte van de energietoename voor verwarming. Een vaste zonnewering wordt hierdoor uitgesloten.



Figuur 4-9 Energievraag vóór en na installatie van vaste delen

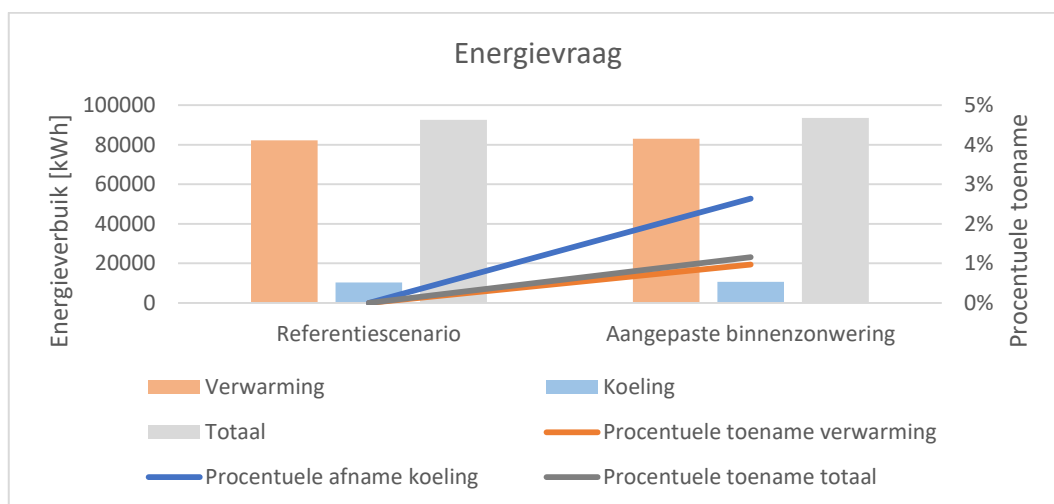
4.2.4 Aangepaste binnenzonwering

Aangezien alle gordijngevels van het schoolgedeelte van het gebouw, uitgezonderd de zuidelijk en oostelijk georiënteerde gordijngevels grenzend aan de patio, reeds voorzien zijn van een binnenzonwering, wordt er gekeken of een optimalisatie van dit bestaande systeem deel kan uitmaken van de remediëringsset. In deze analyse zal er een vergelijking worden gemaakt tussen het referentiescenario en een alternatief scenario waarbij de zuidelijk en oostelijk georiënteerde gordijngevels grenzend aan de patio eveneens worden voorzien van binnenzonwering. Daarbovenop worden alle screendoeken vervangen door doeken met betere zonwerende eigenschappen. Zie bijlage H voor gedetailleerde informatie van de screendoeken [50].



Figuur 4-10 discomfortindicator aangepaste binnenzonwering vs. referentiescenario

De impact van de geoptimaliseerde binnenzonwering op de discomfortindicator is, zoals weergegeven in Figuur 4-10, eerder gering. Opmerkelijk is de omvang van daling bij de zuidelijke klassen, deze is beduidend groter dan bij andere thermische zones. De reden hiertoe werd echter niet achterhaald. Er kan een mogelijk verband bestaan tussen de stand van de zon en de efficiëntie van de binnenzonwering, maar deze assumptie kon niet wetenschappelijk worden onderbouwd. Een bijkomende analyse van de invloed op de energievraag duidt op het belang van het dynamisch systeem. Doordat de zonwering slechts inschakelt boven de 22 °C is de impact op de energievraag veel kleiner dan de vaste systemen. De nuttige zonwinsten tijdens de winter komen hierdoor niet in het gedrang, waardoor de energievraag voor verwarming niet onnodig toeneemt.



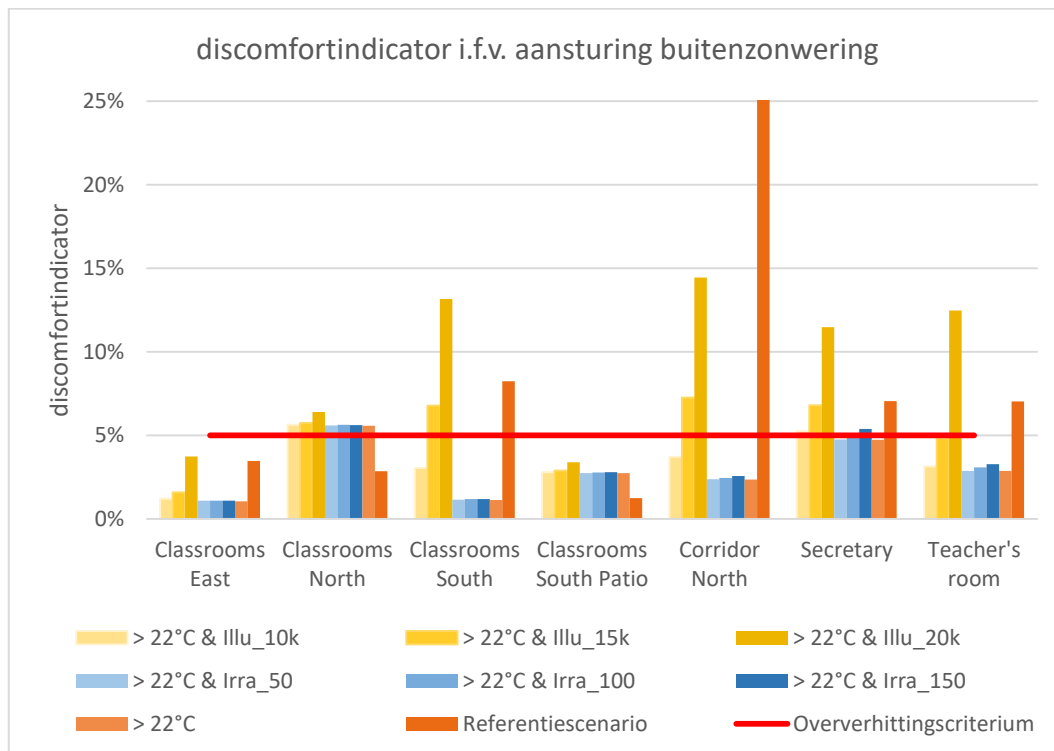
Figuur 4-11 Energievraag vóór en na de optimalisatie van de binnenzonwering

4.2.5 Buitenzonwering

Nu vast staat dat overtollige zonnewinsten aan de basis liggen van het oververhittingsprobleem, wordt er in deze laatste paragraaf een uitgebreid pakket aan buitenzonweringconfiguraties getest. Bij de simulaties zal er worden gevarieerd met de randvoorwaarden van de besturingsysteem zodat de totale energievraag tot een minimum kan worden herleid. De gegevens uit het proefschrift van B.D. Backer, waarin onderzoek werd verricht naar “de optimalisatie van de sturing van zonwerende schermen en bijkomende technieken om de oververhitting in BEN-woningen tegen te gaan”, werden gebruikt als grondslag van deze analyse [29]. Bijlage I bevat gedetailleerde informatie over de screendoek dat werd toegepast voor de buitenzonwering.

In de analyse worden er zeven scenario's afgewogen ten opzichte van het referentiescenario. Alle scenario's, uitgezonderd het referentiescenario, zijn uitgerust met buitenzonwering aan de westelijke, zuidelijke en oostelijke gevels van zowel de patio als de perimeter. Bij het eerste scenario wordt de zonwering geactiveerd wanneer de gemiddelde luchttemperatuur in de ruimte hoger ligt dan 22 °C. Aan het tweede, derde en vierde scenario werd een bijkomstige randvoorwaarde toegevoegd voor de illuminatie⁵. De zonwering wordt bij deze scenario's slechts geactiveerd wanneer de gemiddelde luchttemperatuur hoger ligt dan 22 °C en de illuminatie hoger ligt dan respectievelijk 10.000, 15.000 en 20.000 lux. Bij het vijfde, zesde en zevende scenario werd de randvoorwaarde voor illuminatie vervangen door een criterium voor de irradiantie. De activatie van de zonwering bij deze laatstgenoemde scenario's vindt slechts plaats wanneer de gemiddelde luchttemperatuur hoger ligt dan 22 °C en de irradiantie hoger ligt dan respectievelijk 50, 100 en 150 W/m².

Om de grafieken overzichtelijk te houden werden enkel de thermische zones met significante wijzigingen opgenomen. Zo werden de thermische zones van het archief en de laboratoria weggelaten uit Figuur 4-12, omdat de discomfortindicator van deze ruimtes nadert naar nul. Verder moet worden vermeld dat de binnenzonwering werd verwijderd uit de energetische modellen uitgerust met buitenzonwering om de aansturing niet nodeloos complex te maken.

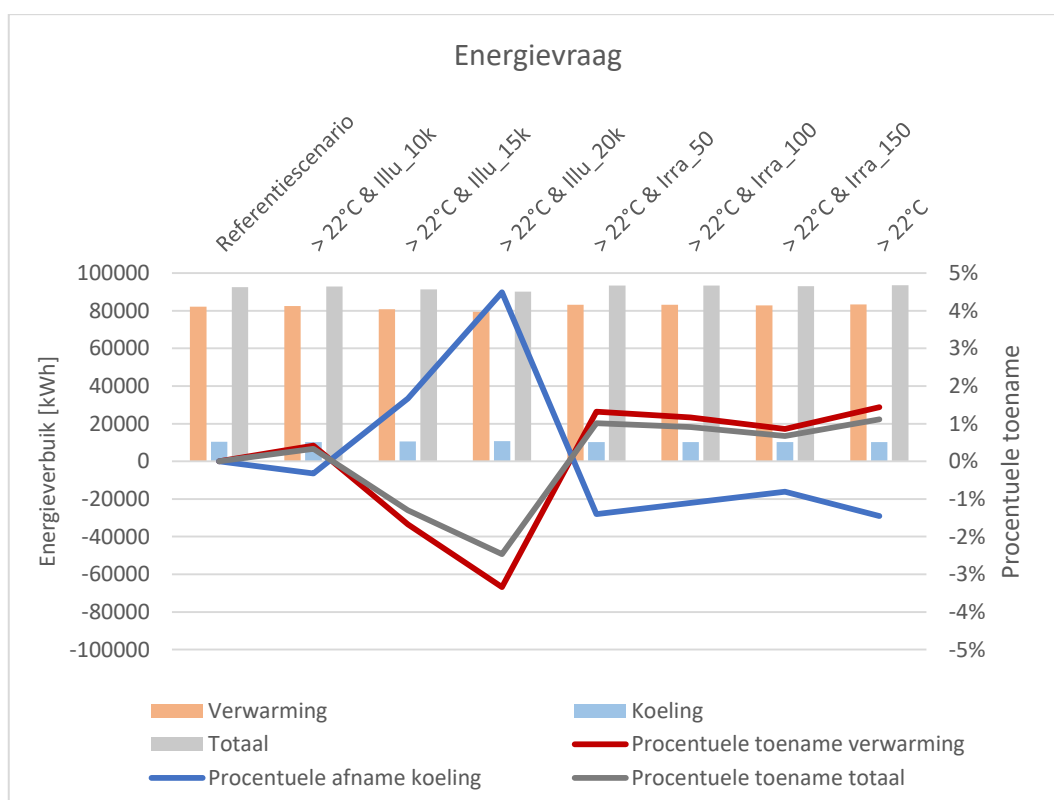


Figuur 4-12 discomfortindicator i.f.v. aansturing buitenzonwering

⁵ De illuminatie of verlichtingssterkte is de hoeveelheid aan invallende lichtstroom op een bepaald oppervlak.

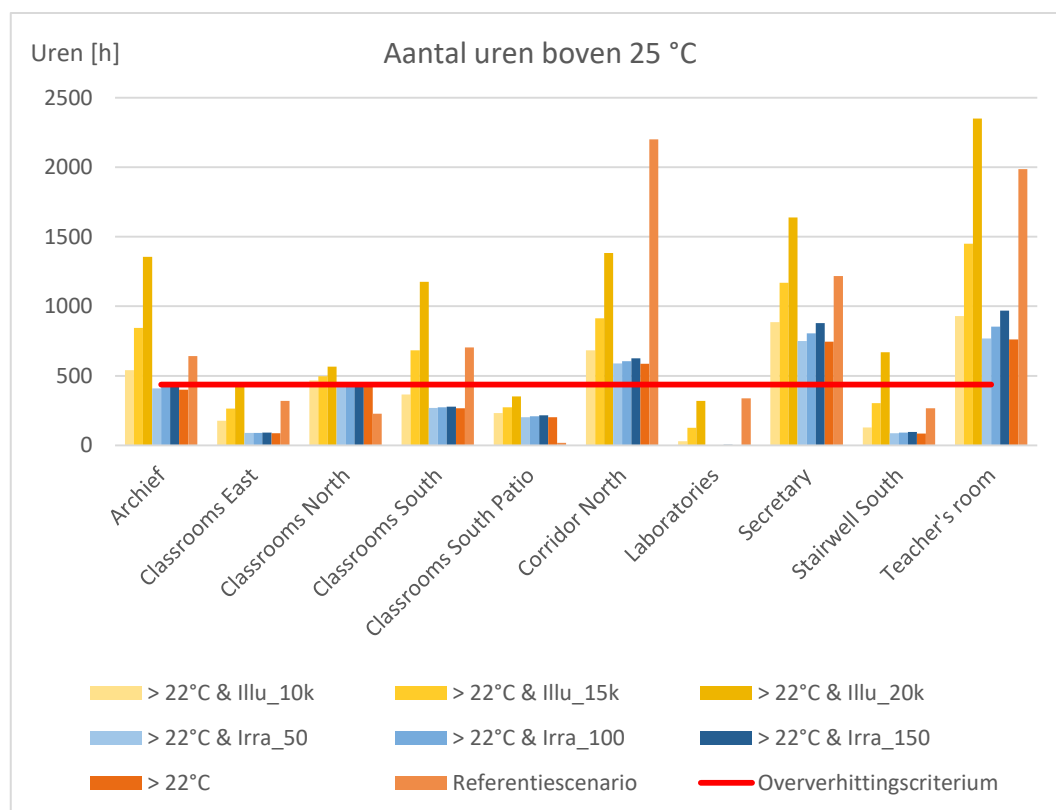
Uit Figuur 4-12 en Figuur 4-13 kan worden opgemaakt dat de meest eenvoudige sturing van de zonwering, op basis van de luchttemperatuur, het beste zomercomfort garandeert. Op energetisch vlak moet er echter een kanttekening worden gemaakt, aangezien deze sturing de meest significante stijging in energievraag voor verwarming met zich meebrengt. Wanneer de scenario's voorzien van een bijkomende randvoorwaarde voor illuminatie in beschouwing worden genomen, valt op dat de minst strenge eis van 10.000 lux zorgt voor een aanzienlijke daling van de discomfortindicator waardoor quasi alle thermische zones onder het criterium voor oververhitting vallen. Een verhoging van de randvoorwaarde tot 15.000 lux leidt tot een veel kleinere afname van het oververhittingsrisico. Wanneer de grenswaarde op 20.000 lux wordt ingesteld, treedt er zelfs een stijging van de discomfortindicator op. Dit fenomeen manifesteert zich klaarblijkelijk door de afwezigheid van de binnenzonwering. De buitenzonwering wordt bij deze strenge eis slechts zelden geactiveerd waardoor de warmte rechtstreeks kan toetreden tot de zone, die niet meer geniet van een extra bescherming ten gevolge van de reflectie op de binnenzonwering. Verder kan worden opgemerkt dat de invloed van de variatie bij de eis voor irradiantie nihil is. Tot slot kan worden vastgesteld dat de resultaten, bij het gebruik van de irradiantie als bijkomende randvoorwaarde, sterk aanleunen bij de resultaten van het scenario dat gebruik maakt van de 10.000 lux als bijkomende randvoorwaarde.

Aangezien illuminatie veel eenvoudiger te meten is in de realiteit dan irradiantie, geniet deze parameter de voorkeur als tweede randvoorwaarde voor de aansturing. Globaal gezien kan worden geconcludeerd dat het gebruik van 22 °C als grenstemperatuur en 10.000 lux als drempel voor de verlichtingssterkte, zowel in termen van comfort als in termen van energie, de beste resultaten oplevert.



Figuur 4-13 Energievraag i.f.v. sturing buitenzonwering

Om het comfort van de resterende ruimtes, die in het model niet werden voorzien van een bezettingsprofiel, mee te betrekken in de analyse, werd de invloed van de verschillende sturingen op het aantal uren boven de 25 °C bepaald. Deze cijfers, weergegeven in Figuur 4-14, duiden op het gebruik van de irradiantie als meest invloedrijke parameter voor de aansturing van de zonwering. Aangezien dit in de realiteit niet meetbaar is met eenvoudige apparatuur, wordt de voorkeur voor de sturing met 22 °C als grenstemperatuur en 10.000 lux als drempel voor de verlichtingssterkte bevestigd.



Figuur 4-14 Aantal uren boven de 25 °C i.f.v. sturing zonwering

5 CONCLUSIE EN ONDERZOEKSAANBEVELINGEN

Dit afsluitend hoofdstuk formuleert een allesomvattend besluit dat het geheel aan vaststellingen vloeiend uit de analyses in dit naslagwerk omkadert en bundelt tot gerichte richtlijnen ter remediëring van het gestelde probleem. Hierbij wordt er een antwoord geformuleerd op alle aspecten van de onderzoeksvraag, met in het bijzonder wetenschappelijk onderbouwd advies voor investeringen in de topsportschool Wilrijk om behaaglijk zomercomfort te allen tijde te kunnen garanderen in de toekomst, zonder het energieverbruik onnodig te doen toenemen. Tot slot worden er nog enkele suggesties aangekaart voor toekomstig onderzoek.

5.1 Conclusie

In dit proefschrift werd er een antwoord geformuleerd op de volgende onderzoeksvraag:

“Hoe gedetailleerd moet een dynamisch simulatiemodel in EnergyPlus zijn om het werkelijke verloop van temperatuur in een passiefschool met topsportfaciliteiten na te bootsen? En hoe kan oververhitting in een passiefschool met topsportfaciliteiten zo efficiënt mogelijk worden opgelost?”

Het eerste aspect van deze onderzoeksvraag behandelt het kalibratieproces van het energetisch model. In dit proefschrift werd er een energetisch model samengesteld van een sterk geïsoleerde en geklimatiseerde passiefschool met topsportfaciliteiten. Om de invloed van deze uitmuntende gebouweigenschappen in een dynamische simulatie te kunnen nabootsen, worden volgende zaken aanbevolen:

- Gebruik voldoende thermische zones, zeker in passiefgebouwen waarin veel beglazing aanwezig is en de warmteoverdracht sterk wordt gehinderd door isolatiematerialen. Bundel ruimtes die voldoen aan volgende criteria:
 - Geconditioneerd door éénzelfde ventilatiesysteem;
 - Geen sterk afwijkende oriëntatie qua beglazing;
 - Geen sterk uiteenlopende activiteiten.
- Gebruik een geometrisch correct driedimensionaal model van het gebouw.
- Gebruik een volledige configuratie van het bestaande HVAC-systeem met bijhorende aansturing. Maak hierbij gebruik van EMS voor het ontwikkelen van stooklijnen en dergelijke meer.
- Gebruik nauwkeurige parameters voor massa, warmtegeleiding en -opslag van scheidingsconstructies;
- Gebruik gedetailleerde gebruiksschema's van interne warmtewinsten zoals mensen, sanitair warm water, toestellen en verlichting. Maak gebruik van EMS voor het aansturen van de verlichting.
- Een inschatting van het meubilair voor de interne massa volstaat.
- Gebruik nauwkeurige ventilatie- en infiltratiedebieten.

Het tweede aspect van de onderzoeksvraag spitst zich toe op advies voor het samenstellen van een set aan mitigerende maatregelen ter remediëring van de oververhittingsproblematiek in de topsportschool. Uit het kalibratieproces blijkt dat het vooropgestelde koelvermogen van de nachtventilatie niet wordt behaald. Een onderzoek naar de mogelijke oorzaak hiervan dringt zich op en kan leiden tot een gedeeltelijke oplossing van het oververhittingsprobleem. Verder werd in de analyses vastgesteld dat, de installatie van een dynamische buitenzonwering, de meest efficiënte oplossing vormt ter preventie van oververhitting in de toekomst, terwijl de energievraag tot een minimum kan worden beperkt. Hierbij wordt er als bijkomstig advies gegeven om de buitenzonwering aan te sturen aan de hand van de gemiddelde luchttemperatuur en de verlichtingssterkte, waarbij respectievelijk 22 °C en 10.000 lux worden gebruikt als drempelwaarden.

5.2 Onderzoeksaanbevelingen

De combinatie tussen het wisselend gebruikskarakter van de school met topsportfaciliteiten, de uitgesproken klimaatopwarming, die zich de laatste jaren vertaald in steeds extremer wordende weeromstandigheden, en het hoge beglazingspercentage van het schoolgedeelte, zorgt ervoor dat de HVAC-systeem ettelijke keren per jaar moet worden bijgesteld door de technische dienst. Om dit tijdrovende werk in te korten, of onder ideale omstandigheden volledig teniet te doen, zou de implementatie van een volledig autonome gebouwaansturing soelaas kunnen brengen. Voor dit project zou er uiteraard een wisselwerking moeten plaatsvinden tussen bouwprofessionals en ICT-specialisten. Het proefschrift van G. Gorris 'Voorkomen is beter dan genezen: gebouwsturing op basis van weersvoorspellingen' kan alvast een grondslag vormen voor dit zéér uitgebreid onderzoeksprogramma. Verder kan het omvangrijk energetisch model dat werd opgebouwd in dit naslagwerk dienen als fundering voor een eerste testcase [38].

Parallel met dit onderzoeksprogramma zou de betrouwbaarheid van de weerdata, die wordt opgehaald met behulp van de API's, verder moeten worden geverifieerd. Een eerste blik op de relatie tussen de eigenhandig samengestelde weerbestanden en een aangekochte versie leidt immers tot de constatacie dat er uitgesproken verschillen aanwezig zijn. Toch kan niet met zekerheid worden gesteld dat aangekochte weerbestanden zonder meer mogen worden aangenomen als referentiescenario. Ook deze bestanden worden gecompileerd aan de hand van opgehaalde weerdata en kunnen onnauwkeurigheden bevatten. Een samenwerkingsakkoord met de ontwikkelaars van de API's alsmede de compiler van de aangekochte weersbestanden dringt zich op. Deze studie kan verder worden doorgetrokken naar de verificatie van de voorspelde weerdata die werd opgehaald door G. Gorris om zijn gebouwautomatisatie aan te sturen in EnergyPlus [38].

Teruggekoppeld naar dit naslagwerk, zou er eveneens een studie omtrent de eventuele optimalisatie van de oververhittingscriteria in de norm NBN EN 15251 kunnen worden verricht. De transitie en evolutie van de bouwwereld naar het energieneutraal bouwen zorgt immers voor een kentering qua energievraag. Al snel werd duidelijk dat energieneutrale gebouwen en een behaaglijk zomercomfort een moeilijk huwelijk vormen. De doorgedreven isolatieschil zorgt er immers voor dat de warmte veel langer blijft hangen. Het zou dus kunnen dat een bijstelling van de oververhittingscriteria zich opdringt. Dit onderzoek kan worden verdergezet naar de verificatie van de normen omtrent gewenste ventilatiedebieten.

Tot slot kunnen er nog enkele economisch gerelateerde studies worden uitgevoerd. Zo moet de economische impact van een energetische studie, zoals verricht in dit naslagwerk, worden nagegaan. Verder moet er een kosten-batenanalyse worden opgemaakt of een volledige autonome gebouwaansturing wel economisch verantwoord is. Hierbij is het belangrijk om de kosten voor technisch onderhoud en het wegvallen van de manuele bijsturing op te nemen. Ook bij de laatst genoemde studie omtrent de bijstelling van de normen moet een kanttekening worden gemaakt, en zal de impact op de energievraag en de daarbij horende kosten moeten worden nagegaan.

REFERENTIES

- [1] H. Riebeek and R. Simmon, "Global Warming," *National Aeronautics and Space Administration (NASA)*, 2010. Retrieved from <https://earthobservatory.nasa.gov/features/GlobalWarming/page2.php>. [Accessed on 10 April 2019]
- [2] European Commission, "Energy performance of buildings," 2014. Retrieved from <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency/energy-performance-of-buildings>. [Accessed on 24 October 2019]
- [3] W. V. Belleghem, "Passiefscholen," *Vlaamse overheid, Ministerie van Onderwijs en Vorming*, 2007. [Accessed on 9 April 2019]
- [4] G. P. Hannah Bohez, Annelies Geerts and Tom De Smidt, "Pilotproject Passiefscholen Bilan 2015," *Agentschap voor Infrastructuur in het Onderwijs (AGION)*, 2015. [Accessed on 12 April 2019]
- [5] Vlaams Energieagentschap (VEA), "Revisie van de EPBD-richtlijn," 2010. [Accessed on 10 April 2019]
- [6] PIXII, "Portaal Vlaamse Passiefscholen," 2010. Retrieved from <https://pixii.be/ontdek/kennis/portaal-vlaamse-passiefscholen>. [Accessed on 9 April 2019]
- [7] L. Mueller and T. Berker, "Passive House at the crossroads: The past and the present of a voluntary standard that managed to bridge the energy efficiency gap," *Energy policy*, vol. 60, pp. 586-593, 2013. [Accessed on 8 April 2019]
- [8] Rijksdienst voor Ondernemend Nederland, "Infoblad Trias Energetica en energieneutraal bouwen," 2015. [Accessed on 12 April 2019]
- [9] K. M. S. Chvatal and H. Corvacho, "The impact of increasing the building envelope insulation upon the risk of overheating in summer and an increased energy consumption," *Journal of Building Performance Simulation*, vol. 2, no. 4, pp. 267-282, 2009. [Accessed on 3 March 2019]
- [10] European Solar Shading Organization (ES-SO), "Overheating risk in low energy buildings to combat," 2016. [Accessed on 12 April 2019]
- [11] H. Breesch, "Zomercomfort in scholen: achtergrond & onderzoek," *KU Leuven*, 2018. Retrieved from <https://www.schoolbouwformule.be/workshop-zomercomfort-in-passiefscholen-eeen-lastig-huwelijk/>. [Accessed on 20 April 2019]
- [12] B. Wauman, H. Breesch, J. Poppe, S. Van Loon, A. Versele, and D. Saelens, "Ontwikkelen van specifieke randvoorwaarden voor scholen volgens de passiefstandaard," 2010. [Accessed on 10 March 2019]
- [13] Aljevrage.nl, "Welke vormen van warmtetransport zijn er?," 2010. Retrieved from <https://www.aljevrage.nl/na/warmte/THE012.html>. [Accessed on 10 November 2018]
- [14] L. Allonsius, "4-Bouwfysica," *University of Antwerp*, 2016. [Accessed on 5 April 2019]
- [15] A. A. Gino Maes, and Giovanni Litti,, "Binnenklimaat in historische gebouwen met kantoorfunctie - focus op thermisch comfort," *University of Antwerp*, 2016. [Accessed on 28 April 2019]
- [16] ASHRAE, "ASHRAE Standard 55-2004, Thermal environmental conditions for human occupancy," *Am. Soc. Heating, Refrig. AirConditioning Eng. Inc.*, 2004. [Accessed on 16 March 2019]
- [17] G. P. J. Dijkema, "Dictaat Technische Installaties," *Technische Universiteit Delft*, 2012. [Accessed on 24 March 2019]

- [18] Belgisch Instituut voor Normalisatie, "NBN EN ISO 7730:2006: 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)," *Brussels, Belgium*, 2006. [Accessed on 8 April 2019]
- [19] Autodesk, "Assessing Thermal Comfort Results," 2019. Retrieved from <http://help.autodesk.com/view/SCDSE/2019/ENU/?guid=GUID-3283C0AF-B483-4897-970B-16A663ACF14E>. [Accessed on 18 April 2019]
- [20] S. Arslan, "Behaaglijkheden gezondheid in een 0-energiewoning," *Hogeschool Rotterdam*, 2012. [Accessed on 18 April 2019]
- [21] S. Kurvers, A. van der Lindenn, A. Boerstra, and A. Raue, "Adaptieve Temperatuurgrenswaarden (ATG)," *ISSO 74: een nieuwe richtlijn voor de beoordeling van het thermisch binnenklimaat. Deel 1: Theoretische achtergronden*, 2005. [Accessed on 11 April 2019]
- [22] V. Vanwelde, "Het thermisch comfort in de zomer handhaven," *Het Wetenschappelijk en Technisch Centrum voor het Bouwbedrijf (WTCB)*, 2018. Retrieved from <https://www.bouw-energie.be/nl/blog/post/oververhitting-in-woonruimtes-beter-voorkomen-dan-genezen>. [Accessed on 10 November 2018]
- [23] METIZ, "Waarom passiefscholen soms te warm worden," 2016. [Accessed on 15 April 2019]
- [24] Belgisch Instituut voor Normalisatie, "NBN EN 15251: Binnenmilieu - gerelateerde inputparameters voor ontwerp en beoordeling van energieprestatie van gebouwen voor de kwaliteit van binnenlucht, het thermisch comfort, de verlichting en akoestiek," *Brussels, Belgium*, 2007. [Accessed on 20 February 2019]
- [25] S. Verbeke, "Thermal inertia in dwellings Quantifying the relative effects of building thermal mass on energy use and overheating risk in a temperate climate Thermal inertia in dwellings," *University of Antwerp*, 2017. [Accessed on 24 March 2019]
- [26] K. Blümel, E. Hollan, M. Kähler, R. Peter, and A. Jahn, "Entwicklung von Testreferenzjahren (TRY) für Klimaregionen der Bundesrepublik Deutschland," *Bericht des Bundesministeriums für Forschung und Technologie BMFT-FB*, vol. 86, p. 051, 1986. [Accessed on 27 April 2019]
- [27] M. Hutchins, "High performancedynamic shading solutions for energy efficiency and comfort in buildings," *European Solar Shading Organization (ES-SO)*, 2015. [Accessed on 8 March 2019]
- [28] R. Visscher, "Zijn dit de slimme ramen van de toekomst?," *Kennislink*, 2017. Retrieved from <https://www.nemokennislink.nl/publicaties/zijn-dit-de-slimme-ramen-van-de-toekomst/>. [Accessed on 21 April 2019]
- [29] B. D. Backer, "De optimalisatie van de sturing van zonwerende schermen en bijkomende technieken om de oververhitting in BEN-woningen tegen te gaan," *University of Antwerp*, 2017. [Accessed on 15 August 2019]
- [30] J. F. Nicol, J. Hacker, B. Spires, and H. Davies, "Suggestion for new approach to overheating diagnostics," *Building Research & Information*, vol. 37, no. 4, pp. 348-357, 2009. [Accessed on 30 November 2018]
- [31] Y. Al Horr, M. Arif, A. Kaushik, A. Mazroei, M. Kafatygiotou, and E. Elsarrag, "Occupant productivity and office indoor environment quality: A review of the literature," *Building and environment*, vol. 105, pp. 369-389, 2016. [Accessed on 10 May 2019]
- [32] S. Verbeke and A. Audenaert, "Thermal inertia in buildings: A review of impacts across climate and building use," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, pp. 2300-2318, 2018. [Accessed on 19 March 2019]

- [33] A. Mavrogianni *et al.*, "The impact of occupancy patterns, occupant-controlled ventilation and shading on indoor overheating risk in domestic environments," *Building and Environment*, vol. 78, pp. 183-198, 2014. [Accessed on 3 March 2019]
- [34] Belgisch Instituut voor Normalisatie, "NBN EN ISO 13790:2008: Energieprestatie van gebouwen - Berekening van het energiegebruik voor verwarming en koeling," *Brussels, Belgium*, 2008. [Accessed on 4 April 2019]
- [35] A. a. Stijn Verbeke, "5-Energieprestatie van gebouwen," *University of Antwerp*, 2017. [Accessed on 26 April 2019]
- [36] NREL, "OpenStudio," *National Laboratory of the U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, operated by the Alliance for Sustainable Energy, LLC*, 2008. Retrieved from <https://www.openstudio.net/>. [Accessed on 25 April 2019]
- [37] BigLadder, "Euclid," 2017. Retrieved from <https://bigladdersoftware.com/projects/euclid/>. [Accessed on 10 October 2018]
- [38] G. Gorris, "Voorkomen is beter dan genezen: gebouwsturing op basis van weervoorspellingen," *University of Antwerp*, 2019. [Accessed on 20 July 2019]
- [39] The Dark Sky Company, "Dark Sky API," 2012. Retrieved from <https://darksky.net/dev>. [Accessed on 20 May 2019]
- [40] Solcast, "Global solar irradiance data and PV system power output data," 2019. Retrieved from <https://solcast.com/>. [Accessed on 22 May 2019]
- [41] U.S. Department of Energy Building Technologies Office, "EnergyPlus Weather File Format," *EnergyPlus Documentation*, 2015. Retrieved from <https://bigladdersoftware.com/epx/docs/8-3/auxiliary-programs/energyplus-weather-file-epw-data-dictionary.html>. [Accessed on 21 May 2019]
- [42] ASHRAE, "Fundamentals, ASHRAE Handbook," 2005. [Accessed on 17 December 2019]
- [43] Vlaams Energieagentschap, "U-waarden vanaf 2018," 2018. Retrieved from <https://www.energiesparen.be/sites/default/files/atoms/files/epbuwaarden2018.pdf>. [Accessed on 20 July 2019]
- [44] M. Sherman, "The Use of Blower-Door Data 1," *Indoor Air*, vol. 5, no. 3, pp. 215-224, 1995. [Accessed on 10 March 2019]
- [45] Eurabo, "Waarde n50," 2015. Retrieved from <https://www.eurabo.be/nl/lexicon/n50-waarde>. [Accessed on 10 March 2019]
- [46] Belgisch Instituut voor Normalisatie, "NBN D50-001: Ventilatievoorzieningen in woongebouwen," *Brussels, Belgium*, 1991. [Accessed on 19 March 2019]
- [47] U.S. Department of Energy Building Technologies Office, "Input Output Reference," *EnergyPlus Documentation*, 2018. [Accessed on 10 October 2018]
- [48] M. Royapoor and T. Roskilly, "Building model calibration using energy and environmental data," *Energy and Buildings*, vol. 94, pp. 109-120, 2015. [Accessed on 10 May 2019]
- [49] G. Mustafaraj, D. Marini, A. Costa, and M. Keane, "Model calibration for building energy efficiency simulation," *Applied Energy*, vol. 130, pp. 72-85, 2014. [Accessed on 13 May 2019]
- [50] MERMET, "M-screen," 2018. Retrieved from <https://www.sunscreen-mermet.com/media/brochure-2018-2021-gb/screen-design-m-screen-8501-8503-8505-gb-v2.pdf>. [Accessed on 10 August 2019]

BIJLAGEN

Bijlage A: Overzicht geraadpleegde normen voor referentiekader	56
Bijlage B: Macro voor het berekenen van de discomfortindicator	57
Bijlage C: Grondplannen Topsportschool Wilrijk	61
Bijlage D: Python-script om historische weerdata op te halen	64
Bijlage E: Geometrische gegevens thermische zones	65
Bijlage F: G-waarden van de drie scenario's in 4.2.2	66
Bijlage G: Installatie van vaste delen	67
Bijlage H: Screendoeken	68
Bijlage I: Buitenzonwering	69

Bijlage A: Overzicht geraadpleegde normen voor referentiekader

België	'EnergiePrestatie en Binnenklimaat' regelgeving (EPB)
	'PassiefHuis ProjecteringsPakket' of 'Passive House Planning Package' (PHPP)
	Outputspecificaties DBFM-programma scholenbouw 'Scholen van Morgen'
	EPICOOL-project: herziening EPB-berekeningsmethode koeling en oververhitting
	Binnenmilieudecreet (BS 19.X.04)
	NBN-ISO 7730:2006: 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
Nederland	NBN EN 15251:2007: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics
	NEN 2916: Energieprestatie van utiliteitsgebouwen - Bepalingsmethode
Duitsland	Senternovem Eisen Frisse scholen
	EnEV – DIN V 18599: Energy Performance of Buildings
	Passive House Institute (PHI)

Bijlage B: Macro voor het berekenen van de discomfortindicator

Macro voor de thermische zones waar sportactiviteiten plaats vinden

```

Sub TotNenTSport()

Dim teller2, LaatsteRij2, TotNoemer2, TotTeller2, aantalkerenGroter2, aantalkerenGroterdan25,
aantalkerenGroterdan23 As Long
Dim gewichtsfactor2 As Single
' Bepalen hoeveel rijen er data bevatten

If WorksheetFunction.CountA(Cells) > 0 Then
    LaatsteRij2 = Cells.Find(What:="*", After:=[A1], SearchOrder:=xlByRows, SearchDirection:=xlPrevious).Row
End If

aantalkerenGroter2 = 0
aantalkerenGroterdan25 = 0
aantalkerenGroterdan23 = 0
TotNoemer2 = 0
TotTeller2 = 0

TotNoemer2 = Cells(2, 2).Value ' beginwaarde TotNoemer
gewichtsfactor2 = 1

Cells(14, 4).Value = "T"
Cells(14, 5).Value = "N"

Cells(21, 6).Value = "teller"

Cells(23, 6).Value = "aantal lijnen"
Cells(23, 7).Value = LaatsteRij2

For teller2 = 3 To LaatsteRij2
    Cells(21, 7).Value = teller2 ' laat tellen van de lijnen zien

    If Cells(teller2, 3).Value > 24 Then ' als de waarde > 24
        If Cells(teller2, 3).Value > 25 Then ' als de waarde > 25 dan wordt
            gewichtsfactor2 = 1 + ((Cells(teller2, 3).Value - 24) / 10) ' gewichtsfactor = 1 + (Temperatuur - 24) / 10
            aantalkerenGroterdan25 = aantalkerenGroterdan25 + 1
        End If
        TotTeller2 = TotTeller2 + (Cells(teller2, 2).Value * gewichtsfactor2) ' indien > 24 dan wordt TotTeller
        ' verhoogd met aantalpersonen

        aantalkerenGroter2 = aantalkerenGroter2 + 1
    End If

    If Cells(teller2, 3).Value > 23 Then
        aantalkerenGroterdan23 = aantalkerenGroterdan23 + 1
    End If
End For

```

```
TotNoemer2 = TotNoemer2 + Cells(teller2, 2).Value
gewichtsfactor2 = 1
Next teller2

Range("D15").Activate
ActiveCell.Value = TotTeller2

Range("E15").Activate
ActiveCell.Value = TotNoemer2

Cells(15, 6).Value = (TotTeller2 / TotNoemer2) * 100
Cells(15, 7).Value = "%"

Cells(17, 6).Value = "ak > 25"
Cells(17, 7).Value = aantalkerenGroterdan25 / 12 ' aantal uren met een temperatuur > 25 °C wordt geplot

Cells(18, 6).Value = "ak > 24"
Cells(18, 7).Value = aantalkerenGroter2 / 12 ' aantal uren met een temperatuur > 24 °C wordt geplot

Cells(19, 6).Value = "ak > 23"
Cells(19, 7).Value = aantalkerenGroterdan23 / 12 ' aantal uren met een temperatuur > 23 °C wordt geplot

End Sub
```



```
Range("D15").Activate  
ActiveCell.Value = TotTeller
```

```
Range("E15").Activate  
ActiveCell.Value = TotNoemer
```

```
Cells(15, 6).Value = (TotTeller / TotNoemer) * 100  
Cells(15, 7).Value = "%"
```

```
Cells(17, 6).Value = "ak > 26"  
Cells(17, 7).Value = aantalkerenGroterdan26 / 12 ' aantal uren met een temperatuur > 26 °C wordt geplot
```

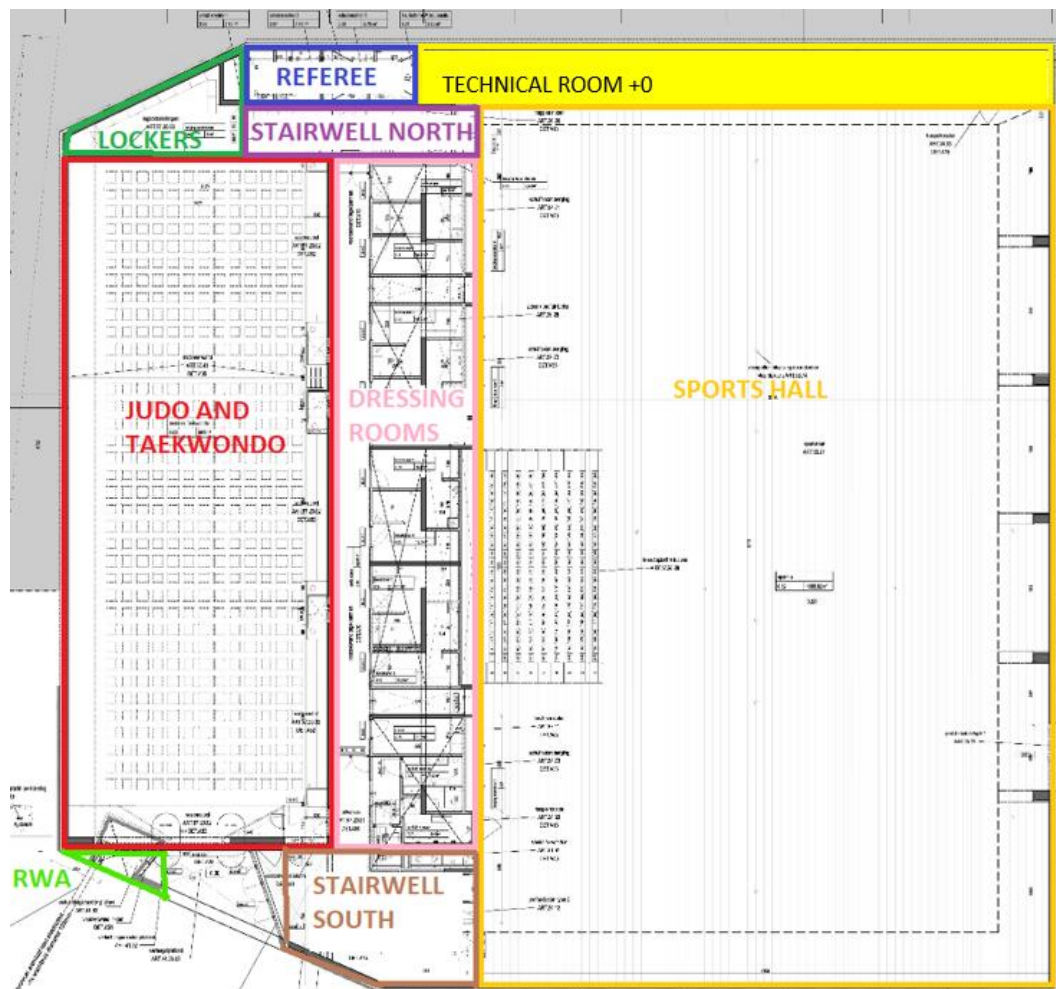
```
Cells(18, 6).Value = "ak > 25"  
Cells(18, 7).Value = aantalkerenGroter / 12 ' aantal uren met een temperatuur > 25 °C wordt geplot
```

```
Cells(19, 6).Value = "ak > 24"  
Cells(19, 7).Value = aantalkerenGroterdan24 / 12 ' aantal uren met een temperatuur > 24 °C wordt geplot
```

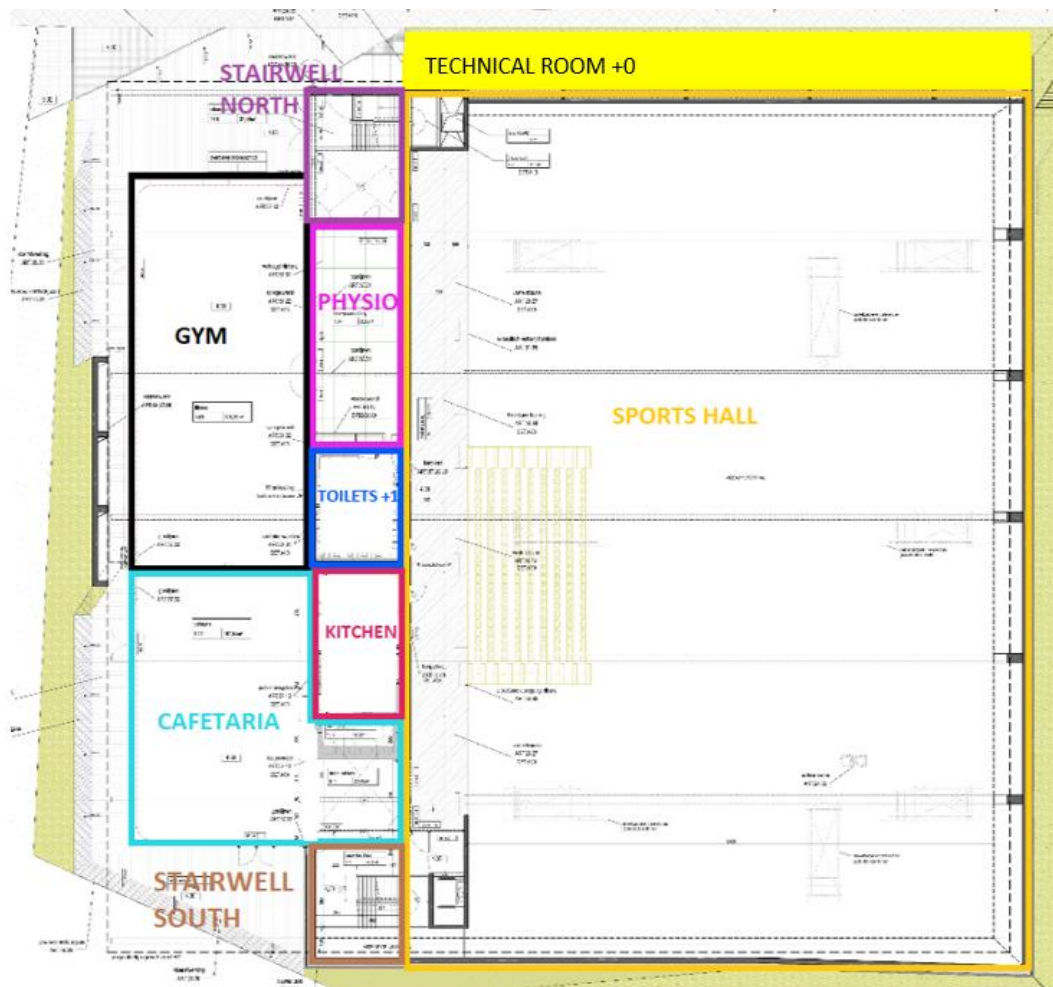
```
End Sub
```

Bijlage C: Grondplannen Topsportschool Wilrijk

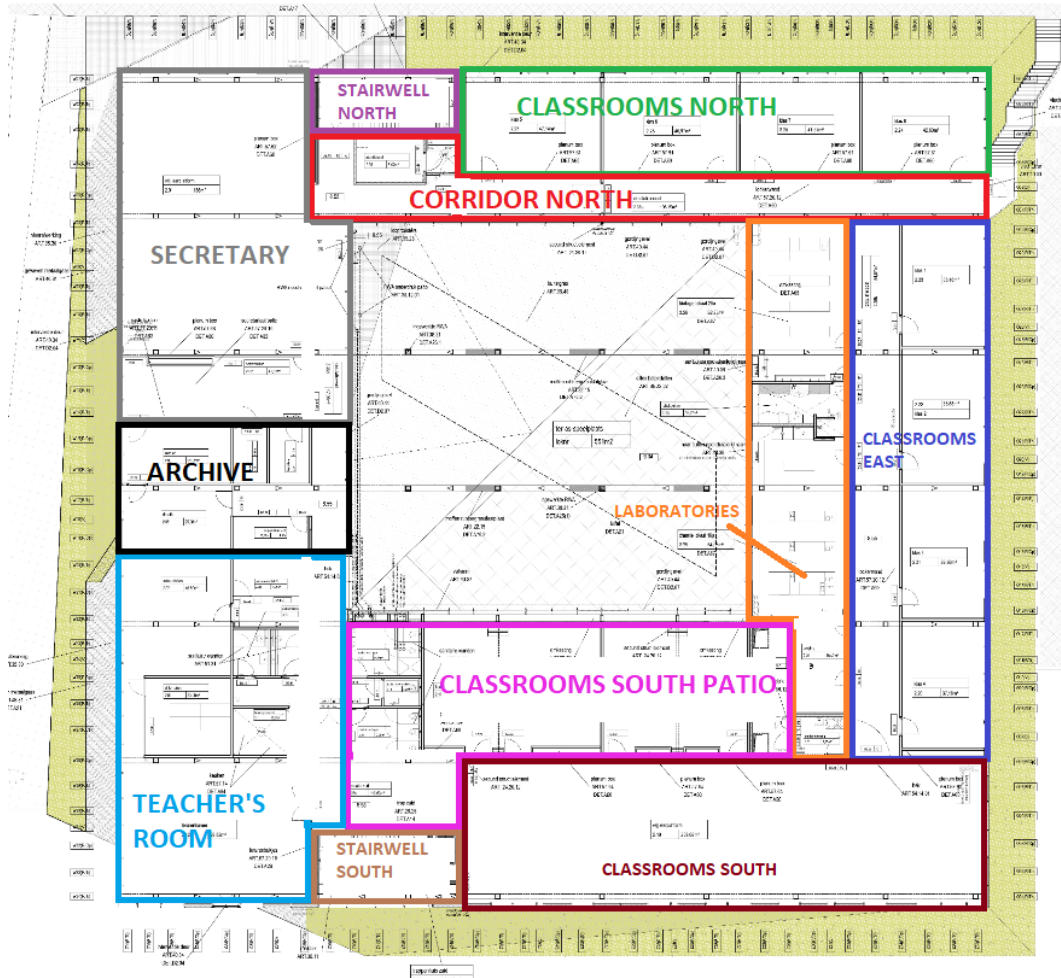
Grondplan +0



Grondplan +1



Grondplan +2



Bijlage D: Python-script om historische weerdata op te halen

```
import requests
import json

par1 = "https://api.darksky.net/forecast/86ec032040cc02ca7fa53d02f6d61166/51.178,4.422,"
tijd = 1531432800
aantalkeren = 1000

for aantalmetingen in range (1,aantalkeren + 1) :
    tijd = tijd + 3600
    par2 = str(tijd)
    url = par1 + par2
    response = requests.get(url)
    currently_data = response.text
    currently_parsed = json.loads(currently_data)
    curr_data = currently_parsed['currently']

with open('C:\Users\Greg De Reys\Documents\Python\Darksky\historical_log.txt', 'a+') as outfile:
    json.dump(curr_data, outfile)
    outfile.write(",\n")
```

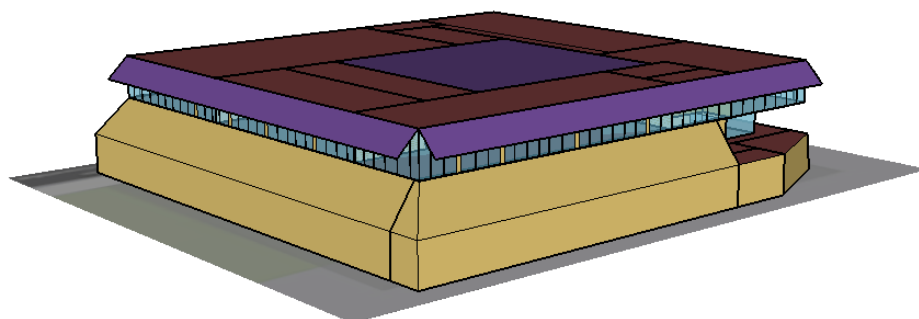
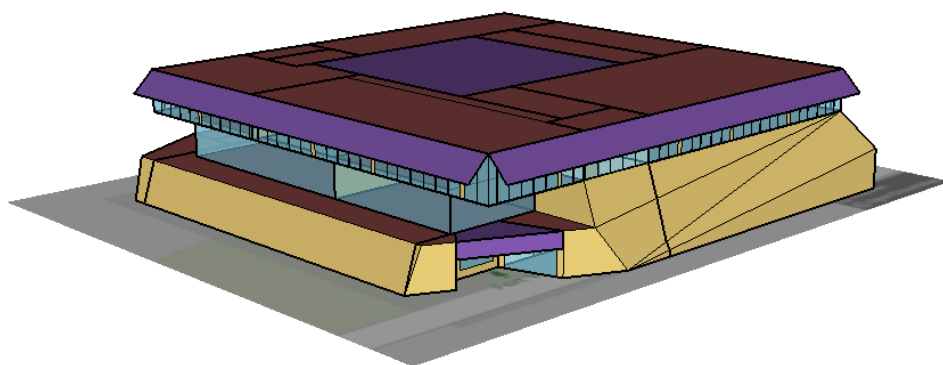
Bijlage E: Geometrische gegevens thermische zones

Thermische zone	Oppervlakte [m ²]	Volume [m ³]
ARCHIVE	157.29	707.8
CAFETARIA	207.58	830.32
CLASSROOMS EAST	253.55	1140.96
CLASSROOMS NORTH	194.22	873.98
CLASSROOMS SOUTH	279.52	1257.84
CLASSROOMS SOUTH PATIO	257.06	1156.76
CORRIDOR NORTH	135.89	611.5
DRESSING ROOMS	349.66	1503.54
GYM	234.37	937.48
JUDO AND TAEKWONDO	632.74	2602.27
KITCHEN	50.66	202.64
LABORATORIES	174.66	785.98
LOCKERS	46.75	195.56
PHYSIO	70.43	281.71
REFEREE ROOMS	26.13	112.35
RWA	5.89	24.67
SECRETARY	216.19	972.87
SPORTSHALL	1871.44	14436.81
STAIRWELL NORTH	74.19	551.21
STAIRWELL SOUTH	99.32	819.64
TEACHER'S ROOM	282.88	1272.97
TECHNICAL ROOM +0	148.19	976.39
TOILETS +1	38.59	154.38
Totaal	5807.2	32409.62
Geconditioneerd totaal	5801.31	32384.96
Ongeconditioneerd totaal	5.89	24.67

Bijlage F: G-waarden van de drie scenario's in 4.2.2

Beglazing	G-waarde		
	Referentiescenario	Volgens as-built dossier	Verlaagde g-waarde
Curtain Patio West	0.37	0.43	0.20
Curtain Patio South	0.258	0.43	0.20
Curtain Patio North	0.43	0.43	0.43
Curtain Patio East	0.43	0.43	0.20
Curtain Cafeteria & Gym	0.49	0.49	0.49
Curtain Translucent East	0.50	0.50	0.20
Curtain Translucent West	0.50	0.50	0.20
Curtain Translucent South	0.49	0.49	0.20
Curtain Translucent North	0.50	0.50	0.50
Curtain Transparant West	0.30	0.37	0.20
Curtain Transparant East	0.20	0.20	0.20
Curtain Transparant South	0.45	0.45	0.20
Curtain Transparant North	0.40	0.40	0.40
Door Entrée +1	0.49	0.49	0.49
Door Entrée +0	0.33	0.33	0.33
Window Judo	0.33	0.33	0.33

Bijlage G: Installatie van vaste delen



Bijlage H: Screendoeken

Eigenschappen	Referentiescenario	Aangepaste screendoeken
Name	SCREEN_THERMIC S2_3%	M-SCREEN ULTIMETAL
Solar Transmittance	0.24	0.04
Solar Reflectance	0.67	0.83
Visible Transmittance	0.25	0.04
Visible Reflectance	0.74	0.95
Infrared Hemispherical Emissivity	0.97	0.97
Infrared Transmittance	0	0
Thickness	0.0058	0.0058
Conductivity	0.1	0.1
Shade tot Glass Distance	0.05	0.05
Top Opening Multiplier	0.5	0.5
Borrom Opening Multiplier	0.5	0.5
Left-Side Opening Multiplier	0.5	0.5
Right-Side Opening Multiplier	0.5	0.5

Bijlage I: Buitenzonwering

Eigenschappen	Buitenzonwering
Name	SCREEN_SOLTIS86
Solar Transmittance	0.21
Solar Reflectance	0.43
Visible Transmittance	0.14
Visible Reflectance	0.80
Infrared Hemispherical Emissivity	0.90
Infrared Transmittance	0
Thickness	0.005
Shade tot Glass Distance	0.05
Top Opening Multiplier	0.5
Borrom Opening Multiplier	0.5
Left-Side Opening Multiplier	0.5
Right-Side Opening Multiplier	0.5

LIJST FIGUREN

Figuur 2-1 Eisen passiefschool	8
Figuur 2-2 Trias Energetica methodiek	9
Figuur 2-3 Soorten warmtetransport [13]	10
Figuur 2-4 PMV-index	12
Figuur 2-5 Dynamische simulatie van een school uit de jaren 80'	14
Figuur 2-6 Dynamische simulatie van een school volgens de wetgeving van 2016	15
Figuur 2-7 Grenzen binnentemperatuur voor niet-mechanisch gekoelde gebouwen in free-running [24].....	17
Figuur 2-8 Flowchart selectie geschikt model voor ATG-methode [11].....	18
Figuur 2-9 Relatie tussen g- en U-waarde van zes referentie beglazingen met buitenzonwering [30].....	22
Figuur 2-10 Relatie tussen g- en U-waarde van zes referentie beglazingen met binnenzonwering [30].....	22
Figuur 2-11 Stand dynamische zonwering (gesloten, gedeeltelijk gesloten of open) i.f.v. bezonning [30]	23
Figuur 3-1 Geometrie en thermische zones:.....	30
Figuur 3-2 Thermische respons op een sinusoidale warmtegolf die zich voorplant door een muur [32].....	32
Figuur 3-3 Scatterplot van gemeten vs. gesimuleerde temperaturen	35
Figuur 3-4 Simulatie met een eigenhandig vs. aangekocht weerbestand van 2018	36
Figuur 3-5 Verschuiving energievraag API vs. gekocht.....	37
Figuur 3-6 MBE en CV(RMSE) tussen het werkelijke en gesimuleerde temperatuurverloop	38
Figuur 3-7 Vergelijking oververhitting gemeten vs. gesimuleerd temperatuurverloop.....	38
Figuur 3-8 Vergelijking # uren > oververhittingsgrens werkelijk en gesimuleerd temperatuurverloop	39
Figuur 3-9 Kalibratie temperatuurverloop lerarenlokaal	39
Figuur 4-1 Zomercomfort referentiescenario	40
Figuur 4-2 Analyse overschrijding drempelwaarde temperatuur en drempelwaarde - 1°C	41
Figuur 4-3 Invloed toename nachtventilatie-debiet op de discomfortindicator	42
Figuur 4-4 Daling # uren > aangegeven temperatuur i.f.v. het toenemend nachtventilatie-debiet	43
Figuur 4-5 Energievraag i.f.v. nachtventilatie-debiet	43
Figuur 4-6 discomfortindicator i.f.v. de g-waarde van de beglazing	44
Figuur 4-7 Energievraag i.f.v. de g-waarde van de beglazing	44
Figuur 4-8 Vergelijking discomfortindicator referentiescenario vs. model met vaste delen	45
Figuur 4-9 Energievraag vóór en na installatie van vaste delen.....	45
Figuur 4-10 discomfortindicator aangepaste binnenzonwering vs. referentiescenario	46
Figuur 4-11 Energievraag vóór en na de optimalisatie van de binnenzonwering	46
Figuur 4-12 discomfortindicator i.f.v. aansturing buitenzonwering	47
Figuur 4-13 Energievraag i.f.v. sturing buitenzonwering	48
Figuur 4-14 Aantal uren boven de 25 °C i.f.v. sturing zonwering.....	49

LIJST TABELLEN

Tabel 2-1 Richtwaarden ruimtekoeling klaslokalen, bureaus en OLC	16
Tabel 2-2 Richtwaarde ruimtekoeling sporthal.....	16
Tabel 2-3 Comfortcategorieën comfortbeoordeling [24, 25].....	17
Tabel 2-4 Gemiddelde jaarlijkse energiebesparing voor koeling met binnenzonwering [30].....	22
Tabel 2-5 Maximale jaarlijkse besparing koelenergie met zuid-west geïoriënteerde buitenzonwering [30] ...	22
Tabel 3-1 Opgehaalde weergegevens via Darksky API.....	28
Tabel 3-2 Opgehaalde weergegevens via Solcast API	29
Tabel 3-3 Vergelijking berekende warmtedoorgangscoefficienten met EPB-eisen 2018 [43].....	31

LIJST VERGELIJKINGEN

Vergelijking 2.1 Lichamelijke warmtebalans	11
Vergelijking 2.2 Lopende gemiddelde temperatuur	17
Vergelijking 2.3 Comforttemperatuur	17
Vergelijking 2.4 Temperatuuroverschrijdingspercentage	19
Vergelijking 2.5 Gewogen temperatuurfactor	19
Vergelijking 2.6 Gemiddelde maandelijkse wegingsfactor	19
Vergelijking 2.7 Gemiddeld gewogen tijdsinterval	19
Vergelijking 2.8 Gewogen gemiddelde maximum temperatuur	19
Vergelijking 2.9 Discomfortindicator	20
Vergelijking 2.10 Criterium voor ervaring van discomfort	20
Vergelijking 2.11 Hervormde discomfortindicator.....	24
Vergelijking 2.12 Hervormt criterium voor ervaring van discomfort	24
Vergelijking 2.13 Gewogen discomfortfactor	25
Vergelijking 2.14 Operatieve temperatuur	25
Vergelijking 3.1 Infiltratiedebiet	33
Vergelijking 3.2 Mean bias error.....	35
Vergelijking 3.3 Cross-validated root mean square error	35
Vergelijking 3.4 Absolute fout.....	35

