

OfficeComfort
D2.1
Thermische modellen en
energieverbruik

1 Inleiding

Gebouwen dragen bij aan een significant deel van het nationale energieverbruik en specifiek de utiliteitsbouw, respectievelijk 36% en 14% [1]. Daarnaast ondergaat ons energiesysteem grote verandering door de ingezette energietransitie, om klimaatverandering tegen te gaan, waardoor de vraag naar energiereductie en energieflexibilisering steeds groter wordt. Een groot gedeelte van de energievraag binnen de utiliteitsbouw wordt gebruikt voor klimaatbeheersing om een hoog niveau van thermisch comfort van de gebruikers te garanderen. In de praktijk blijkt vaak dat dit deel van het energieverbruik veel efficiënter kan. Als voorbeeld wordt de verwarming 's ochtends vaak op een vaste tijd in en uitschakelt waardoor het gebouw soms te vroeg of te laat op temperatuur is.

Het doel van dit werkpakket is om interventiestrategieën te bepalen die het energieverbruik binnen de utiliteitsbouw verlagen en/of flexibiliseren zonder hierbij het ervaren thermische comfort significant te verslechteren. Om dit te realiseren is een model nodig van het ervaren thermische comfort. Op basis van sensor data verkregen binnen het project bepalen we in dit document een thermisch model van het gebouw. Uit dit model bepalen we vervolgens een KPI voor ervaren thermisch comfort. Deze KPI wordt vervolgens gebruikt om te bepalen op welke manieren we de energievraag voor klimaatbeheersing kunnen verkleinen en/of flexibiliseren.

In het volgende hoofdstuk beschrijven wij de modellen die gemaakt zijn om het thermische gedrag van het bestudeerde gebouw te berekenen en daaruit een KPI voor het ervaren thermische comfort te bepalen. Vervolgens, in hoofdstuk 3, beschrijven we interventiestrategieën die we onderzocht hebben om het energiegebruik voor klimaatbeheersing te verminderen en/of flexibiliseren. Tenslotte sluiten we af met een conclusie en discussie hoofdstuk.

2 Modellen

In dit hoofdstuk beschrijven we de modellen gebruikt in het OfficeComfort project om het gebouw te beschrijven. Allereerst beschrijven we een model van het thermische gedrag van het gebouw. We hebben alleen data van de luchttemperaturen binnen één van de kantoortuinen in het gebouw. Om het thermische gedrag te kunnen bepalen gaan we er vanuit dat alleen de vloer een significante thermische massa heeft. Daardoor kunnen we het thermische gedrag schatten van de vloer op basis van de gemeten data in Sectie 2.1. Vervolgens gebruiken we deze data om de operationele temperatuur te bepalen in de ruimte. Dit proces beschrijven we in Sectie 2.2

2.1 Thermisch model

Op basis van de data verzameld binnen één kantoortuin in het Acanthus gebouw van ING willen we het thermische gedrag van deze ruimte modelleren. Hiervoor

gebruiken we een model met twee capaciteiten en drie weerstanden. Het model beschrijven we als:

$$C_1 \frac{dT_1}{dt} = -H_{12}(T_1 - T_2) - H_{13}(T_1 - T_3) + Q_1 A_1$$

$$C_2 \frac{dT_2}{dt} = H_{12}(T_1 - T_2) - H_{23}(T_2 - T_3) + Q_s A_2$$

Hier geldt:

- T_1, T_2 en T_3 zijn de binnentemperatuur, de temperatuur van de vloer en de buitentemperatuur respectievelijk.
- C_1 en C_2 zijn de thermische capaciteiten van de ruimte en van de vloer.
- H_{12}, H_{13} en H_{23} zijn de geleidingscoëfficiënten respectievelijk tussen de vloer en de ruimte, tussen de ruimte en de buitenlucht en tussen de vloer en de buitenlucht
- Q_1 en A_1 zijn de thermische invoeren op de ruimtetemperatuur met coëfficiënt en Q_s en A_2 zijn dit voor de vloer (Q_s bedraagt alleen overdracht door zonnestraling). Dit model is gefit op de data die beschikbaar is.

2.2 Model fitting

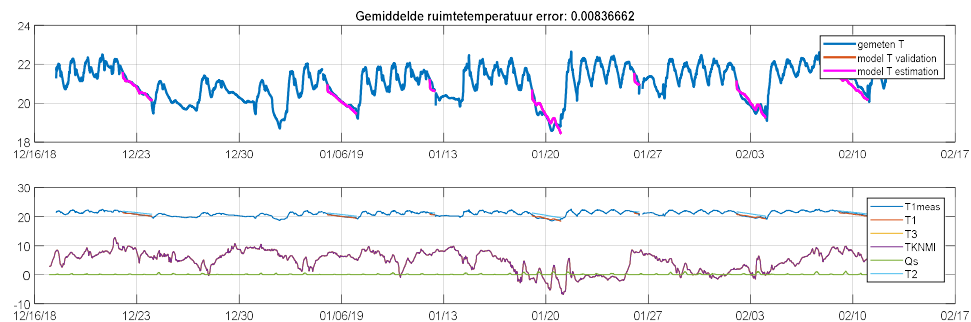
De bovenstaande modelstructuur dient te worden gekalibreerd. Dit houdt in dat de verschillende parameters ($H_{12}, H_{13}, H_{23}, C_1, C_2, A_1$ en A_2) zodanig moeten worden ingesteld dat de simulatieresultaten van het model zo goed mogelijk overeenkomen met de werkelijke metingen aan het gebouw. Hiervoor is het ook nodig om de verschillende inputs (T_1, T_2, T_3, Q_1, Q_s) te kunnen meten. Helaas beschikken wij niet over gedetailleerde informatie van de lokale verwarming en koeling. Dit omdat deze data niet gemeten wordt. Daarnaast slaat het GBS systeem van het bemeten gebouw maar zeer beperkt data op, wat het nog moeilijker maakt om het thermische model te fitten. Door deze redenen is het praktisch onmogelijk om na te gaan wat er tijdens kantooruren gebeurt. Wel kunnen we aannemen dat de verwarming en koeling uit staan in het weekend waardoor deze data gebruikt kan worden om de parameters in het model te schatten, minus de coëfficiënten voor warmte invoer. Dus op basis van de gemeten data in het weekend bepalen we C_1, C_2, H_{12}, H_{13} en H_{23} . Dit doen we doormiddel van een least squares fit. Hiervoor schrijven we de differentiaalvergelijkingen om in verschilvergelijkingen. Vervolgens formuleren we het vinden van de parameters als een optimalisatie probleem waarbij het doel is om de kwadratische verschillen tussen modeluitkomst en gemeten waarden zo klein mogelijk te maken. Hierbij hebben we dus steeds de waarden van Q_1, Q_s, A_1 en A_2 op 0 gezet.

Ook hebben we alleen data van de gemeten ruimtetemperatuur en geen data over de temperatuur van de vloer. We hebben de ruimtetemperatuur gemeten op verschillende werkplekken in het kantoor met sensoren op verschillende hoogten (ongeveer 0.1, 0.6 en 1.1 meter hoogte). De ruimtetemperatuur hebben we genomen als het gemiddelde van de sensor waarden op hoogte 0.6 en 1.1 meter (zie Figuur 5 in de Appendix). We hebben dus alleen een tijdsreeks met data voor T_1 en niet voor T_2 . Voor T_3 hebben we data gebruikt van het KNMI met metingen van het weerstation Schiphol (zie Figuur 6 in de Appendix). Om toch

het model te kunnen fitten hebben we een eerste inschatting gemaakt van T_2 op basis van de ruimtetemperatuur. Hiermee zijn we gaan fitten om vervolgens nieuwe waarden voor T_2 te berekenen op basis van de parameters. Zo ontstaat een iteratief proces waarmee we de parameters hebben bepaald. Merk op dat het proces niet gegarandeerd naar een globaal optimum convergeert.

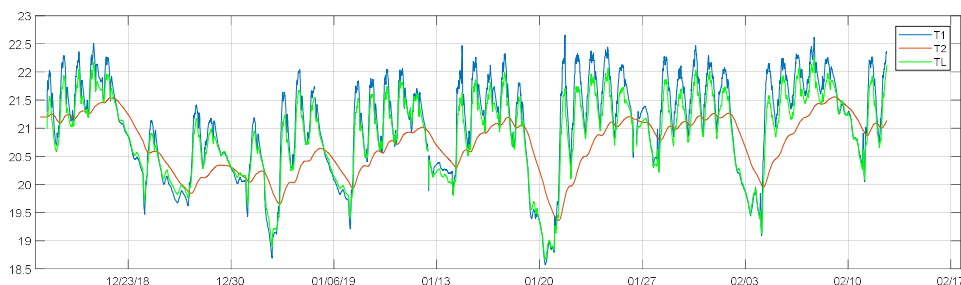
2.3 Model resultaten

De resultaten van de model fit staan in Figuur 1 (een grotere versie is bijgevoegd als Figuur 7 in de Appendix).



Figuur 1: Uitkomsten van de model fit.

Er valt te zien dat de fit redelijk goed is. Op basis van de bepaalde parameters en de tijdsreeks aan data van T_1 kan nu voor elk alle tijdsintervallen de waarde van T_2 worden bepaald, zie Figuur 2.



Figuur 2: Uitkomsten van het thermische model.

Naast de waarden van T_1 en T_2 staat in deze figuur ook de gemiddelde waarde van de temperatuur van de sensoren die dicht bij de grond hangen. Op de moment dat T_1 onder T_2 uitkomt verwacht je dat deze temperatuur wat hoger zal liggen dan T_2 omdat deze meer beïnvloed wordt door de temperatuur van de vloer dan T_1 .

2.4 Model voor operationele temperatuur

De operationele temperatuur wordt in de literatuur geciteerd als de temperatuur die mensen ervaren en die binnen bepaalde grenzen moet liggen om genoeg thermisch comfort te garanderen [2]. Deze temperatuur is het gemiddelde van de luchttemperatuur en de stralingstemperatuur. Binnen de bestudeerde afdeling hebben we alleen data van de luchttemperatuur. Daarnaast kunnen we het model dat hierboven is bepaald gebruiken om de vloertemperatuur te

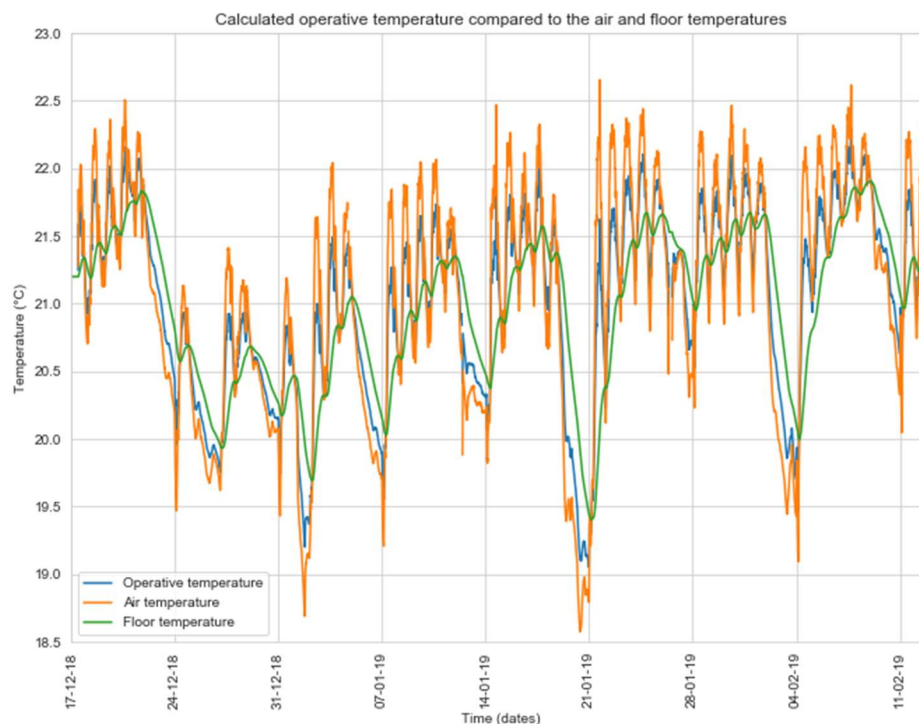
bepalen. Om nu de stralingstemperatuur te bepalen nemen we aan dat de thermische massa van de wanden en het plafond te verwaarlozen valt (net als in het model hierboven). Voor de bepaling van de stralingstemperatuur gebruiken we de methode beschreven in [2]. Om de stralingstemperatuur te kunnen berekenen hebben we zogeheten geometrische factoren nodig tussen een persoon en de vlakken in de ruimte. Deze factoren hangen af van de positie van de persoon in de ruimte. Omdat we aannemen dat de thermische massa van de wanden en het plafond verwaarloosbaar is, kunnen we de temperatuur van deze vlakken gelijkstellen aan de ruimte temperatuur. De stralingstemperatuur valt nu te bepalen volgens

$$T_r = \alpha T_2 + (1 - \alpha)T_1,$$

waarbij T_r de stralingstemperatuur is en α de geometrische factor van de vloer. Een nauwkeurige beschrijving van de bepaling van deze factor geven we in de appendix. De waarde van α is gelijk aan 0.4. Op basis van deze factor kunnen we nu het verloop van de operationele temperatuur, geven door T_o , als

$$T_o = \frac{1}{2}T_r + \frac{1}{2}T_1.$$

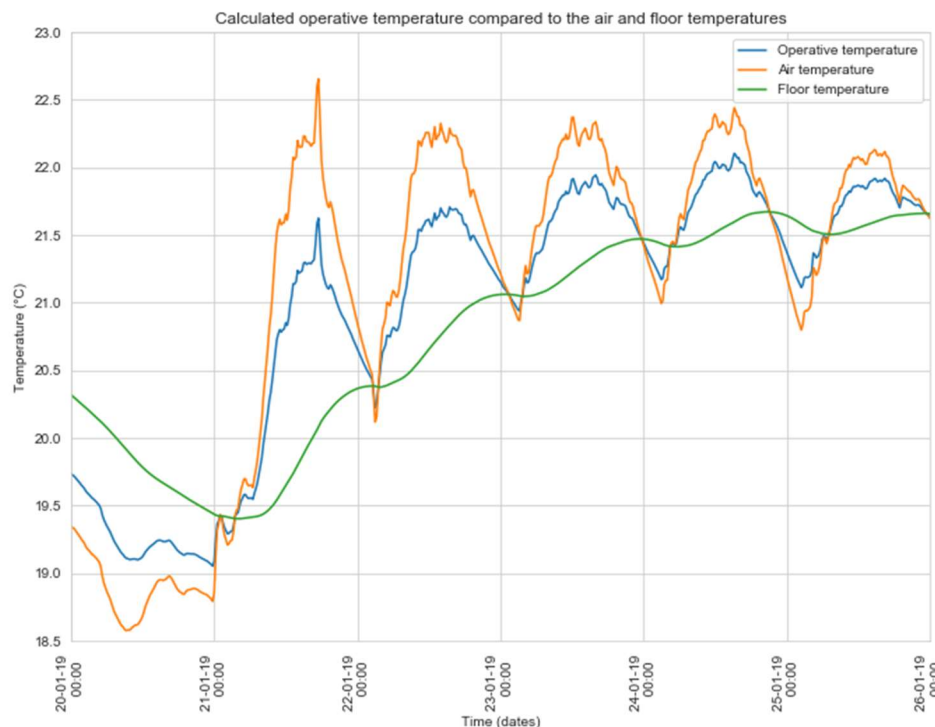
Het verloop van T_o over de periode waarin het model is gefit is gegeven in Figuur 3.



Figuur 3: Vergelijking tussen berekende operationele temperatuur, de berekende vloertemperatuur en de gemeten luchttemperatuur.

We zoomen nu verder in op de week na het koude weekend van 19 en 20 januari, zie Figuur 4. We zien dat de operationele temperatuur op maandagochtend achterloopt op de luchttemperatuur omdat het gebouw in zijn geheel nog niet is opgewarmd na het koude weekend. Dit duidt aan dat er koude klachten kunnen zijn na het weekend en/of feestdagen omdat de gebouwmassa nog niet op

temperatuur is. Daarnaast zien we dat het gebouw doordeweeks in de nachten nauwelijks afkoelt.



Figuur 4: De operatieve temperatuur loopt na een koud weekend achter op de luchttemperatuur.

3 Interventiestrategieën

Energiebesparingen en flexibilisering van de energievraag is een belangrijk onderwerp om te garanderen dat de utiliteitsbouw haar duurzaamheidsdoelstelling behaalt. Klimaatbeheersing vraagt een groot deel van het energieverbruik binnen de utiliteitsbouw. Daardoor zijn interventiestrategieën om dit verbruik te verkleinen en flexibiliseren kansrijk om de uiteindelijke doelen van de gehele energietransitie te halen.

3.1 Gekozen interventiestrategieën

Het gebouw waarin metingen zijn verricht bevat een groot aantal kantoortuinen, waaronder de afdeling waarop onze metingen zijn gedaan. Op zulke afdelingen is het van belang dat het klimaat van opening tot sluit goed is, zodat goed functioneren van de medewerkers wordt gegarandeerd. Door de grootte van de ruimte en het aantal medewerkers dat zich doorgaans in een kantoortuin bevindt is het zeer lastig om naar hele specifieke strategieën te kijken. Zo is het bijvoorbeeld zeer moeilijk om lokaal de temperatuur te beïnvloeden zonder dat dit effecten heeft op de temperatuur in de rest van de ruimte. Hierdoor hebben wij naar de mogelijkheid gekeken om twee algemene interventiestrategieën toe te passen.

De eerste strategie die wij hebben bekeken is het verschuiven van de inschakeltijd van de verwarmingsinstallatie. Om te zorgen dat het gebouw 's ochtends, bij binnenkomst van de eerste medewerkers, op temperatuur is gaat de verwarming 's nachts al aan. Echter, gebeurt dit te vroeg dan wordt er energie verspild in het te lang op temperatuur houden van het gebouw. Anderzijds, als dit te laat gebeurt is het gebouw nog niet op temperatuur op het moment dat de eerste mensen binnen komen, wat voor discomfort en uiteindelijk verlies van productiviteit kan zorgen. In Sectie 3.2 gaan we verder in op deze strategie.

De tweede strategie die is bekeken is de flexibilisering van de energievraag. Binnen het veranderende energiesysteem wordt flexibiliteit in de vraag naar elektriciteit steeds waardevoller. Over het algemeen leggen de comfort eisen op het binnenklimaat van een kantoor grenzen op de operationele temperatuur. Het is dus mogelijk om de verwarming of koeling tijdelijk uit te zetten, zolang de grenzen niet overschreden worden. Merk op dat na het tijdelijk uitzetten van de installaties vaak een rebound effect optreedt, waarin de energie die eerder niet gebruikt is alsnog nodig is om ervoor te zorgen het binnenklimaat weer gecorrigeerd wordt richting het ingestelde klimaat.

Om een degelijk inschatting te maken van de mogelijkheid tot het tijdelijk uitzetten van de klimaatinstallaties is een model nodig van de invloed van deze installaties op de operationele temperatuur. Helaas beschikt het GBS systeem van het gebouw waarin de metingen gedaan zijn niet over gedetailleerde informatie over de lokale verwarming of koeling op de afdelingen waar onze metingen zijn gedaan. Hierdoor is het voor ons niet mogelijk gebleken om na te gaan wat het effect zou zijn van het tijdelijk uitzetten van deze installaties. Als gevolg hebben wij niet kunnen bepalen in hoeverre de energievraag van de klimaatinstallaties valt te verschuiven.

3.2 Starttijden verschuiven van de verwarming

Om te bepalen hoeveel de starttijden van de klimaatinstallaties kunnen worden verschoven gebruiken we het thermische model dat beschreven staat in Hoofdstuk 2. We gebruiken nogmaals [2], waaruit we bepalen dat het in de winter (bij een lopend gemiddelde buitentemperatuur tot 10°C) comfortabel is bij een operationele temperatuur tussen de 20°C en 24°C. In ons geval is de ondergrens van belang. Voor elk van de dagen waarvoor we de operationele temperatuur hebben bepalen we allereerst hoe lang het duurt voordat deze temperatuur boven de 20°C ligt. Als dit later is dan 7:00, dan is het gebouw niet op tijd op temperatuur en moet het gebouw eerder aan. Dit gebeurt op 2 dagen in de dataset; 2 januari en 21 januari. Beide dagen zijn niet verassend: De installaties hebben uitgestaan op 29 en 30 december en op 1 januari en de bezetting is zeer waarschijnlijk heel laag geweest op 31 december. Daarnaast was het in het weekend van 19 en 20 januari erg koud, waardoor het gebouw toen flink is afgekoeld. Op 2 januari was het gebouw om 8:00 pas op temperatuur en op 21 januari duurde het tot 8:15. De verwarming zou dus in deze gevallen 1 uur of 1 uur en 15 minuten eerder aan moeten respectievelijk. Merk op dat we voor deze berekening uitgaan van de gemiddelde operationele temperatuur in de ruimte (we nemen de gemiddelde luchttemperatuur en bepalen de stralingstemperatuur op basis van gemiddelde geometrische factoren). Het kan

dus goed dat er volgens lokale metingen langer een operationele temperatuur onder de 20°C voorkomt. Dit effect hebben we voor nu niet meegenomen in deze beschouwing.

Wat ook opvalt als er gekeken wordt naar Figuur 4 is dat de gebouwmassa gedurende de week over de dagen steeds warmer wordt. Dit impliceert dat het mogelijk is gedurende de week later de klimaatinstallaties aan te zetten. Om te kunnen bepalen hoeveel later dit kan gebruiken we ons thermische model. We bepalen eerst voor elke werkdag wanneer de klimaatbehandeling is aangegaan. We nemen aan dat dit het moment is 's nachts dat het gebouw stopt met afkoelen volgens een exponentiële curve (zoals beschreven in ons thermische model). De bepaling is handmatig gedaan en de resultaten daarvan staan in Tabel 1, waarbij een vraagteken aangeeft dat we de starttijd niet hebben kunnen bepalen en NA zijn geen werkdagen geweest. Let op dat een tijd tussen 20:00 en 24:00 een tijdstip op de vorige dag aangeeft. Verder gaan we er vanuit dat vanaf 6:00 het gebouw in gebruik is, waardoor we dit als laatste mogelijke starttijd hebben genomen.

Week nr	Maandag	Dinsdag	Woensdag	Donderdag	Vrijdag
51	?	2:15	3:00	2:30	3:30
52	3:00	NA	NA	1:45	2:00
1	3:00	NA	20:00	2:00	2:15
2	3:00	3:30	3:15	3:30	3:15
3	?	3:30	3:00	4:00	3:30
4	23:45	3:00	3:15	3:00	2:30
5	?	3:00	2:45	3:15	1:45
6	0:00	2:15	2:45	2:00	3:00

Tabel 1: Starttijden van de verwarming van het gebouw

Na inspectie blijkt het afkoel gedrag van het gebouw gedurende de weken in de nacht anders te zijn dan het gedrag in het weekend. Dit duidt erop dat er bepaalde installaties zijn die 's nachts nog blijven draaien op werkdagen en die in het weekend wel helemaal uit gaan. Om dit effect mee te nemen hebben we per nacht apart een fit gemaakt van ons thermische model op basis van de afkoeling van die nacht. Hierin gebruik we voor de vloertemperatuur de eerder berekende temperatuur. Met deze nieuwe fit bepalen we nu wat het gedrag zou zijn van de luchttemperatuur als we later zouden beginnen met klimatiseren. Op basis van de data bepalen voor een gegeven aantal kwartieren dat we de installaties later aanzetten wat de operationele temperatuur om 7:00 is. We zoeken nu de maximale verschuiving in de tijd van het aanzetten van de installaties zodat de operationele temperatuur om 7:00 niet onder 20°C ligt. Hierbij gaan we er vanuit dat de installaties op zijn laatste om 6:00 worden ingeschakeld, zodat ze volledig operationeel zijn wanneer het gebouw in gebruik wordt genomen. Naar welke tijd er verschoven kan worden per dag waarvoor deze analyse is uitgevoerd is terug te vinden in Tabel 2. Zie de appendix voor een gedetailleerdere beschrijving van bovenstaande procedure.

Week nr	Maandag	Dinsdag	Woensdag	Donderdag	Vrijdag
51	NA	6:00	6:00	6:00	6:00

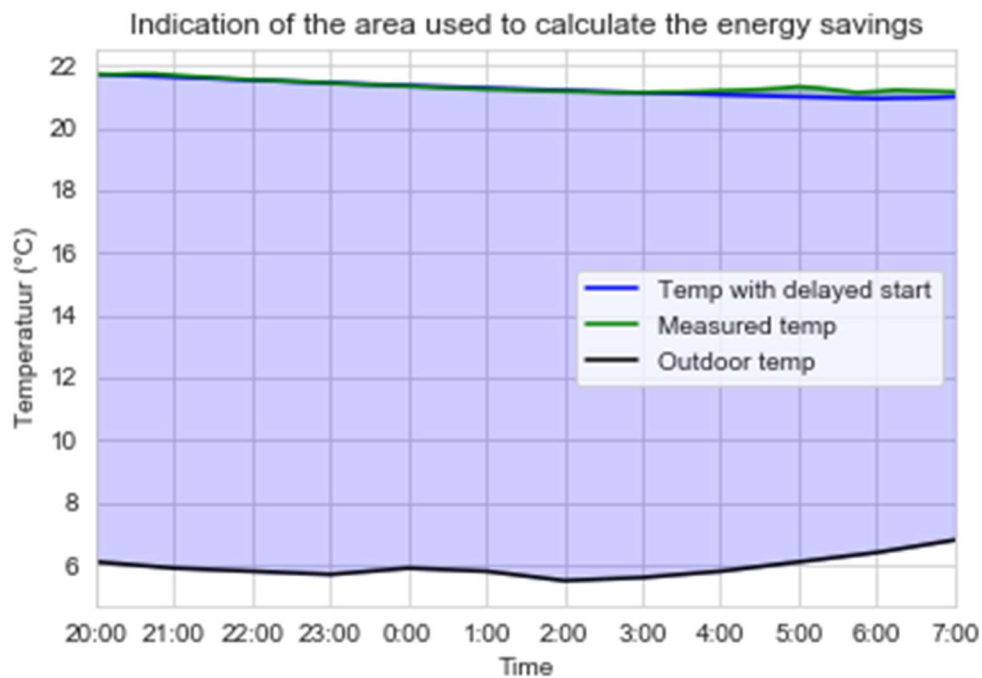
52	4:00	NA	NA	2:45	6:00
1	3:45	NA	NA	6:00	6:00
2	3:00	6:00	6:00	6:00	6:00
3	NA	6:00	6:00	6:00	6:00
4	NA	6:00	6:00	5:30	5:15
5	NA	6:00	6:00	6:00	6:00
6	2:30	6:00	6:00	6:00	6:00

Tabel 2: Maximale tijd dat de klimaatinstallaties later aan kunnen.

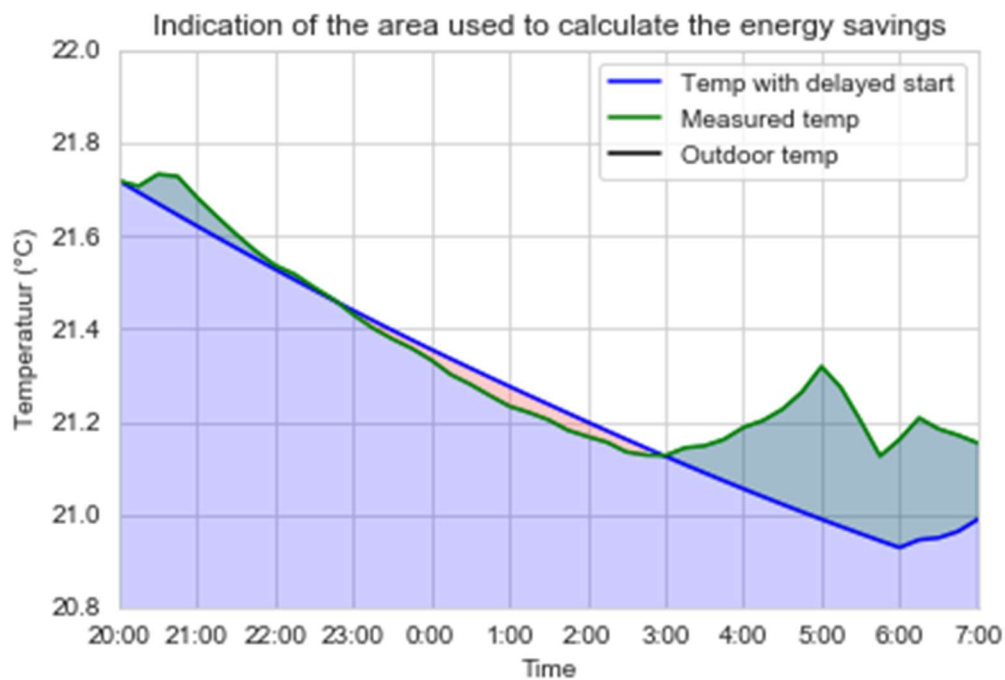
Merk op dat de voor de gemeten ruimte de klimaatinstallaties over het algemeen na zon- en feestdagen niet veel verschoven zouden kunnen worden terwijl de temperatuur doordeweeks prima behouden wordt, waardoor voorverwarmen volgens de normen niet nodig zou zijn. Daarnaast valt op dat in week 4 de verwarming wel een aantal keer vroeger dan 6:00 aan moet, dit omdat dit een koude week was.

Uit bovenstaande berekening proberen we nog een schatting te maken van de energiebesparing door het later inschakelen van de klimaatinstallaties. Bij deze berekening gaan we er vanuit dat de verwarming in de ochtend moet compenseren door de warmte die verloren wordt door het verschil tussen binnen- en buitentemperatuur. Als dit verschil kleiner is dan moet er dus minder verwarmd worden. Als indicatie nemen we de integraal over het verschil tussen de binnen- en buitentemperatuur voor zowel de gemeten situatie als de berekende situatie waarin de installaties later aan gaan. Vervolgens vergelijken we de uitkomsten om te kijken hoeveel energie er bespaard wordt.

Ter verduidelijking hebben we Figuren 5 en 6 toegevoegd. In Figuur 5 een plot van de buitentemperatuur, de gemeten binnentemperatuur en de berekende binnentemperatuur. De energiebesparing bepalen we nu door de integraal tussen de curves van de gemeten binnentemperatuur en buitentemperatuur te vergelijken met de integraal tussen de curves van de gemodelleerde binnentemperatuur en de buitentemperatuur te vergelijken. In Figuur 6 zoomen we in om het verschil tussen de gemeten en berekende binnentemperatuur te bepalen. Het grote blauwe vlak is het totaal, waarbij positief verschil wordt weergegeven met een groen vlak en negatief verschil met een rood vlak. De besparing is nu de oppervlakte van het groene deel min de oppervlakte van het rode deel als percentage van het oppervlakte van het gehele blauwe deel. Deze besparing komt uit op 1.1%.



Figuur 5: Indicatie van het gebied waarover de integraal is genomen om de energiebesparing d.m.v. het later aanzetten van de installaties.



Figuur 6: Zoom van Figuur 5 voor verduidelijking van de verschillen.

4 Conclusies & discussie

Om te kunnen bepalen welke interventiestrategieën er mogelijk zijn om de energievraag binnen een kantoorgebouw te verlagen en/of te flexibiliseren was het doel om een thermisch model van het gebouw te bepalen. Met dit model kan

vervolgens worden bepaald wat er gebeurt als bepaalde strategieën worden toegepast.

Vanwege het missen van historische data van het GBS systeem van het gebouw is het helaas niet mogelijk gebleken om een uitgebreid thermisch model van het gebouw te fitten op de gehele periode waarvoor we metingen hebben gedaan in het gebouw. Wel hebben we een fit kunnen maken op basis van perioden waarin we aan kunnen nemen dat de klimaatinstallaties van een gebouw niet of nauwelijks in bedrijf zijn. Een schatting van het gedrag van de significante thermische massa op de bementen afdeling, de vloer, is gemaakt op basis van gemeten data in het weekend.

Er zijn twee mogelijke interventiestrategieën geïdentificeerd op basis van het model. De eerste strategie omhelst het verlaten van het startmoment van de installaties, dus het moment 's ochtends waarop het gebouw geconditioneerd wordt om het gewenste binnenklimaat te bereiken. Op basis van het eerder bepaalde thermische model en een inschatting van de tijden waarop de installaties aan gaan is een inschatting gemaakt van de mogelijk verschuiving. In veel gevallen bleek dat de installaties na zon- en feestdagen tijdig aan moeten om het gewenste binnenklimaat tijdig te bereiken. Echter, door de significante thermische massa van het gebouw is het mogelijk om later in de week later te beginnen met het klimatiseren van het gebouw. De resultaten geven aan dat er energiebesparing mogelijk is, alhoewel de geschatte waarde beperkt is. Daarnaast worden de klimaatinstallaties in het gebouw bediend zodat het gehele gebouw aan het begin van de werkdag op temperatuur is. Omdat wij alleen over data beschikken van een enkele afdeling is het mogelijk dat de installaties weldegelijk op de bepaalde tijdstippen aan moeten om de rest van het gebouw juist te conditioneren.

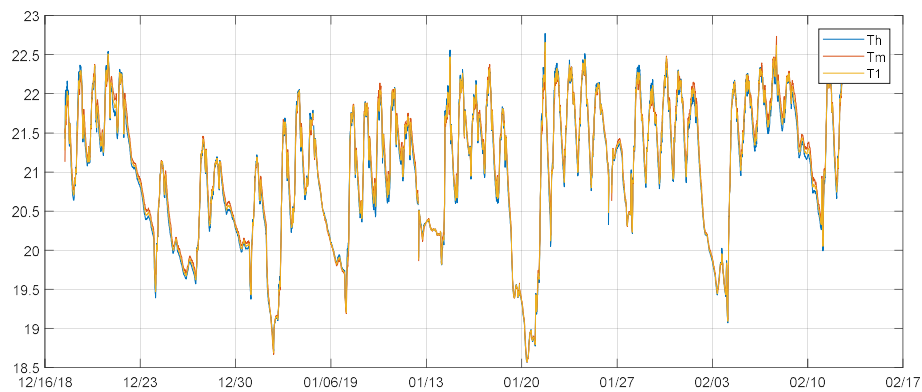
De tweede strategie omvat het verschuiven van de energievraag door tijdelijk de draaiende installaties uit te zetten. Helaas is het niet mogelijk gebleken om deze strategie verder te onderzoeken omdat hiervoor de ontbrekende GBS data essentieel bleek.

5 Geciteerde werken

- [1] R. v. O. Nederland, „Monitor Energiebesparing Gebouwde Omgeving,” RVO, 2018.
- [2] ISSO, „Thermisch binnenklimaat, aanbevelingen,” Rotterdam, 2006.

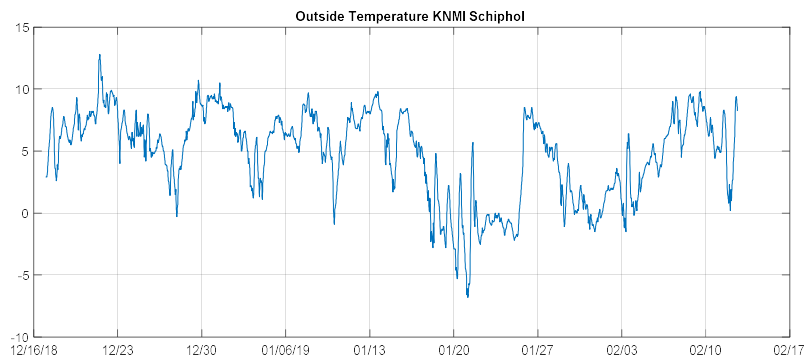
Appendix

Als model input hebben we sensor data gebruikt van de sensoren die op verschillende hoogten hingen in het kantoor. Een plot van de data staat in Figuur 7. De gemiddelde waarde is berekend voor ieder tijdstip waarop gemeten is en deze is als input gebruikt voor het thermische model.

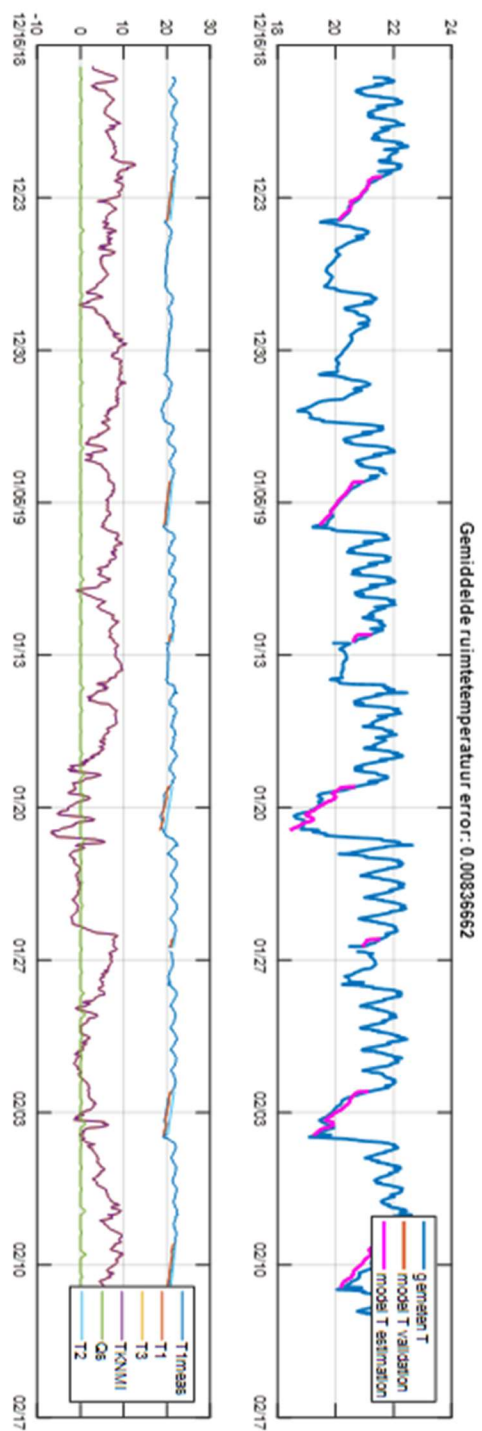


Figuur 7: Input data voor het themische model van de ruimtetemperatuur.

Naast de binnentemperatuur is ook de buitentemperatuur as input in het model ingevoerd. Voor deze temperatuur hebben we gegevens gebruikt van het weerstation Schiphol. De data is geïnterpoleerd om de juiste resolutie te krijgen. Een plot van de data is te vinden in Figuur 8.



Figuur 8: Gebruikte weersdata voor de buitentemperatuur van het weerstation Schiphol.



Figuur 9: Model resultaten.

Bepaling geometrische factoren stralingstemperatuur

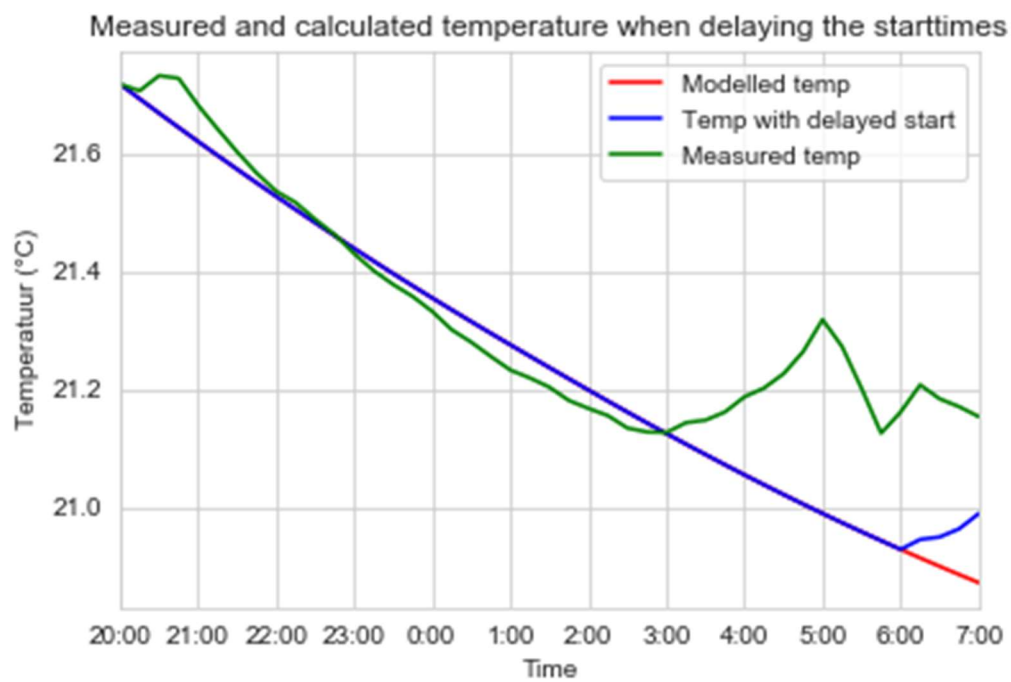
Om exact de geometrische factoren te bepalen zoals beschreven in [2], zijn exact gegevens nodig van de afmetingen van de omliggende oppervlakken en van de positie in de ruimte. Daarnaast worden berekeningen gecompliceerder als de ruimte niet de vorm heeft van een balk. Daarom zijn we in de berekeningen van de geometrische factor uitgegaan van een kantoor van 17m x 12.75m x 2,65m. We gaan er vanuit dat de meeste werkzaamheden zittend worden uitgevoerd, dus de hoogte van de persoon waarvoor we de factoren willen bepalen hebben we genomen op 1.1m. Daarnaast hebben we positie in de ruimte gevarieerd over verschillende plekken van midden in de ruimte tot dichtbij de muur. De geometrische factoren die hieruit kwamen voor de vloer variëren tussen de 0.38 en 0.46. Omdat meer mensen dicht bij de muur zitten hebben we gekozen voor een benadering van de factor door de waarde 0.5 te nemen.

Bepaling verschuiven starttijden klimaatinstallaties.

Om te schatten hoeveel later de klimaatinstallaties aan kunnen zonder dat de operationele temperatuur op de bemeten afdeling buiten de normen valt hebben we de volgende aanpak gebruikt.

- 1) Voor elke nacht is een aparte fit gemaakt van het thermische model zoals beschreven in Hoofdstuk 2. Voor deze fit hebben we de berekende waarden van T_2 uit Hoofdstuk 2 gebruikt. Voor T_1 en T_3 gebruiken we dezelfde data als voorheen. De modelparameters worden ook nu geschat met een least squares fit, waarbij we de eerder gevonden parameters als startpositie gebruiken om snelle convergentie te bereiken.
- 2) Op basis van het gefitte model voor de nacht in kwestie wordt nu bepaald wat de luchttemperatuur is op het moment van starten van de klimaatinstallaties. Merk op dat dit dus later kan zijn dan het moment waarop we hebben bepaald dat de installaties daadwerkelijk zijn aangegaan.
- 3) Achter het gegenereerde profiel van de binnentemperatuur, op basis van ons model, hebben we vervolgens het gedrag van draaiende klimaatinstallaties gefit. Hiervoor hebben we naar de gemeten binnentemperatuur gekeken vanaf het moment dat de installaties aan zijn gegaan. Nu hebben vanuit deze gemeten binnentemperatuur steeds het verschil per tijdsinterval bepaald. Dit verschil hebben we vervolgens steeds toegepast op de berekende temperatuur aan de hand van ons model, om zo de gegenereerde tijdsreeks voort te zetten vanaf het moment dat de installaties verlaat aan gaan.

Ter verduidelijking, zie Figuur 10. In dit figuur geeft de groene lijn de gemeten (gemiddelde) binnentemperatuur weer. De rode lijn is de output van de ons gefitte model als de verwarming helemaal niet aan gaat en de blauwe lijn geeft het gemodelleerde verloop van de binnentemperatuur als we de verwarming later aanzetten (in dit geval om 6:00). Om de stralingstemperatuur om 7:00 in dit scenario te berekenen gebruiken we de output van ons model (hier de blauwe lijn) samen met de vloertemperatuur zoals berekend in Hoofdstuk 2.



Figuur 10: Model output voor de nacht van 19-12-2018 voor het verlaten van de starttijd.