

# Towards Real Energy performance and Control by predicting, monitoring, comparing and controlling for Offices and Public Buildings (TRECO Office)

---

## Openbaar Eindrapport

29-03-2018

---



## Colofon

### Projecttitel

*Towards Real Energy performance and Control by predicting, monitoring, comparing and controlling for Offices and Public Buildings (TRECO Office)*

### Projectnummer

TEGB114007

### Penvoerder

Huygen Installatie Adviseurs (HIA) / de Haas & Partners (dH&P)  
Eric Willems en Frans de Haas

### Project deelnemers

- DWA
- ABT
- TU-Eindhoven
- DEMO Consultants
- Webeasy
- Stichting ISSO

### Projectperiode

01-01-2014 t/m 31-12-2017

### Opdrachtgever

"Het project is uitgevoerd met subsidie van het Ministerie van Economische Zaken, Nationale regelingen EZ-subsidies, Topsector Energie uitgevoerd door Rijksdienst voor Ondernemend Nederland."





## Inhoudsopgave

|                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Colofon .....                                                                                        | 2  |
| 1 Aanleiding TKI TRECO Office .....                                                                  | 5  |
| 2 Opbouw van de rapportage .....                                                                     | 6  |
| 2.1 Deelrapporten en artikelen .....                                                                 | 7  |
| 3 Samenvatting .....                                                                                 | 8  |
| 3.1 Inleiding .....                                                                                  | 8  |
| 3.2 Doelstelling conform het projectplan .....                                                       | 8  |
| 3.3 Werkwijze .....                                                                                  | 8  |
| 3.4 Deelnemers consortium TRECO Office .....                                                         | 9  |
| 3.5 Resultaten .....                                                                                 | 10 |
| 3.6 Bijdrage aan de doelstellingen van TKI-Energo .....                                              | 12 |
| 3.6.1 Duurzame energiehuishouding .....                                                              | 12 |
| 3.6.2 Versterking kennispositie .....                                                                | 13 |
| 3.6.2.1 Nationaal .....                                                                              | 13 |
| 3.6.2.2 Internationaal .....                                                                         | 13 |
| 3.7 Conclusie en aanbevelingen .....                                                                 | 13 |
| 4 Resultaten per werkpakket .....                                                                    | 16 |
| 4.1 Dataverzameling en databeoordeling gebouw en installatie (HUYGEN) .....                          | 16 |
| 4.1.1 Analyse datacollectie, verwerking en reductie .....                                            | 16 |
| 4.1.2 Karakterisering en dataverzameling gebouwomhulling .....                                       | 18 |
| 4.1.3 Karakterisering en dataverzameling installaties .....                                          | 19 |
| 4.1.4 Ontwikkeling nauwkeurige en kosteneffectieve monitoringsysteem voort lokaal microklimaat ..... | 22 |
| 4.1.5 Ontwikkeling richtlijnen voor uitbreiding/aanpassing smart meterings systemen .....            | 25 |
| 4.2 Dataverzameling en databeoordeling gebruikersgedrag (ABT) .....                                  | 28 |
| 4.2.1 Inventarisatie data en parameters gebruikersgedrag .....                                       | 28 |
| 4.2.2 Analyseren en vaststellen essentiële parameters en lacunes .....                               | 30 |
| 4.2.3 Vertalen van data naar rekenmodules en opstellen (standaard-)profielen .....                   | 34 |
| 4.2.4 Opstellen rekenmodel/rekenroutine om gebruikersgedrag te bepalen en implementeren .....        | 41 |
| 4.3 Faaldiagnose afwijkingen energiegebruik (DWA) .....                                              | 43 |
| 4.3.1 Categoriseren faalgedrag in relatie tot het energiegebruik .....                               | 43 |
| 4.3.2 Onderzoek naar faalgedrag in praktijkcases .....                                               | 45 |
| 4.3.3 Simulaties van faalgedrag in distributie en afgifte .....                                      | 48 |
| 4.3.4 Ontwikkeling faaldiagnoseparameters .....                                                      | 51 |
| 4.3.5 Reken- en dataverwerkingsmethodes faaldiagnose .....                                           | 55 |
| 4.4 Rekenmodellen, simulaties en gebruikersgedrag (TU/e) .....                                       | 57 |
| 4.4.1 Onderzoek bestaande modellen .....                                                             | 57 |

|                                                                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.4.2 Onderzoek naar factoren die modelkeuze beïnvloeden .....                                                          | 60 |
| 4.4.3 Onderzoek naar invloed van onzekerheden .....                                                                     | 65 |
| 4.4.4 Resultaten .....                                                                                                  | 66 |
| 4.4.5 Case studies .....                                                                                                | 67 |
| 4.4.6 Resultaten .....                                                                                                  | 68 |
| 4.5 Product- en dienstontwikkeling (DEMO) .....                                                                         | 72 |
| 4.5.1 Ontwikkeling uitbreidingsets voor (bestaande) software applicaties en smart-metering systemen voor kantoren ..... | 72 |
| 4.5.2 Inrichting van database, vergelijkingsapplicaties/ modules en integratie met BIM .....                            | 75 |
| 4.5.3 Opzet voor een raamwerk voor certificering/kwaliteitskeurmerk en contractmodel voor energiediensten (ISSO) .....  | 80 |
| 4.6 Discussie van de resultaten .....                                                                                   | 85 |



## 1 Aanleiding TKI TRECO Office

Het afremmen van de klimaatverandering en bij voorkeur het stoppen van die verandering heeft ook consequenties voor de kantorensector. Bestaande kantoren moeten energiezuiniger worden (minimaal label C in 2023) en vanaf 2021 moet, conform de Europese richtlijn EPBD, alle nieuwbouw bijna energieneutraal zijn (EPC=0).

De toets of aan deze eisen wordt voldaan is een rekenkundige exercitie. De praktijk leert dat dit nog niet zo veel zegt over het werkelijke energiegebruik. De uitgangspunten van de rekenmethoden kunnen in de praktijk zelden worden nagekomen.

Naast overheden, die eisen aan de energiezuinigheid van kantoorgebouwen stellen, zijn er ook steeds meer aanbieders en gebruikers van kantoren die vanuit het 'maatschappelijk verantwoord ondernemen' of vanuit imago een bijdrage willen leveren aan het terugdringen van de klimaatverandering. Zij nemen echter geen genoegen met een label of certificaat, maar willen er letterlijk op aangesproken en afgerekend kunnen worden. Aanbieders van kantoren willen kunnen 'garanderen' hoeveel energie er jaarlijks gebruikt gaat worden en gebruikers willen vooraf zekerheid over hun energiegebruik en energiekosten.

Het voorgaande vereist gedetailleerde kennis van de factoren die bepalend zijn voor het werkelijke energiegebruik en prestaties in de gebruiksfase van kantoren. Dit inzicht maakt niet alleen nauwkeurig voorspellen mogelijk, maar biedt ook de handvaten hoe in te grijpen op die invloedsfactoren om efficiënt de energiezuinigheid te kunnen optimaliseren.

Uitgangspunt voor TRECO-Office is dan ook dat investeerders, beleggers en huurders economische waarde toekennen aan de werkelijke energieprestaties van een gebouw wanneer deze prestaties ook gegarandeerd worden. Het kunnen garanderen van de energieprestaties creëert voor projectontwikkelaars en verhuurders de mogelijkheid om:

- Hun gebouwen aan te bieden voor een prijs inclusief het energiegebruik
  - Te investeren in energiebesparing, duurzame energie en het, op optimalisatie, gericht regelen en beheren van het energiesysteem
  - De investeringen zo in te richten dat ze een winstgevend onderdeel van hun business case vormen.
- Daarnaast biedt het continu monitoren van de energie- en regelsystemen plus de prestatie-indicatoren, de data waarop het binnenklimaat optimaal geregeld en beheerst kan worden.

TRECO-Office heeft zich dan ook gericht op het verwerven van inzicht en kennis t.a.v.:

- De relevante factoren en data nodig om 'voldoende' nauwkeurig te kunnen voorspellen
  - De relevante factoren en data nodig om de sturing te kunnen optimaliseren en falen tijdig te signaleren
  - Methoden om gebouwprestaties en gebruikersinvloeden te kunnen modelleren
  - Producten en diensten om de opgedane kennis en inzichten in de praktijk toepasbaar te maken
- De aanpak vond plaats in een cyclus van voorspellen, monitoren, vergelijken, handelen, leren.

Binnen TRECO Office is een grote stap gezet door de combinatie van geavanceerde simulatiemodellen voor ontwerpende partijen en monitoringssystemen die gericht faalgedrag detecteren en inzicht geven op het werkelijke energiegebruik van kantoren en openbare gebouwen. Hiermee draagt TRECO-Office bij aan:

- het leveren van virtuele gebouwen waarbij BIM en (energie)simulatiemodellen in het ontwerpstadium aan elkaar gekoppeld zijn,
- het gedurende de exploitatiefase monitoren van de werkelijke prestaties en door inzet van simulaties en slimme dataverwerking gericht kijken (op maandbasis) naar afwijkingen en het effect van herstelacties.
- rekentools die in risicodragende projecten verantwoording kunnen nemen voor de exploitatie.

Binnen TRECO-Office zijn de volgende thema's beschouwd

1. energievraag (simulatie warmte / koude / elektravraag)
2. distributie en afgifte (foutendiagnose)
3. opwekking (simulatie en foutendiagnose)
4. gebruikersgedrag
5. koppeling met BIM

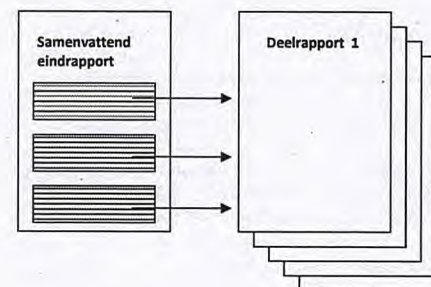
TRECO-Office levert de volgende toepassingsresultaten:

1. In de praktijk toepasbare faaldiagnose parameters in relatie tot afwijkingen in het energiegebruik (DWA).
2. Reken- en data verwerkingsmethodes behorend bij de in de praktijk toepasbare faaldiagnose parameters. Deze leggen de basis voor algoritmes die faalgedrag kunnen detecteren (excl. Softwareontwikkeling) (DWA, TUe).
3. Een BIM-protocol met meetpunten en meetmethoden specifiek gericht op de diagnose van faalgedrag (DMO, DWA, HIA).
4. Energiediensten gebaseerd op deze applicatie waarbij gegarandeerd energiegebruik en prestaties en daarop gebaseerde energieprestatie contracten worden aangeboden. Deze contracten kunnen ook gebruikt worden voor ESCO concepten voor renovatie en herinrichting van kantoren. Het vormt ook een solide basis voor innovatieve financieringsconstructies, gebaseerd op de werkelijke waardebeoordeling van vastgoed (Allen).
5. Een beknopt raamwerk om met de beoogde stappen tot een eenheid te komen van één methodiek om het werkelijke energiegebruik in gebouwen (zowel woningen als kantoren) dan wel een kwaliteitskeurmerk voor methoden te komen (ISSO, allen).

Het project is uitgevoerd met subsidie van het Ministerie van Economische Zaken, Nationale regelingen EZ-subsidies, Topsector Energie uitgevoerd door Rijksdienst voor Ondernemend Nederland.

## 2 Opbouw van de rapportage

Dit onderzoeksrapport is het samenvattend eindrapport van het onderzoeksproject TKI TRECO Office. In dit rapport verwijzen we naar de bijbehorende deelrapporten.





## 2.1 Deelrapporten en artikelen

Er is binnen TRECO gewerkt in een structuur met werkpakketten en daarin taken. De resultaten zijn vastgelegd in deelrapporten en artikelen. Deze zijn gestructureerd terug te vinden via onderstaand overzicht met de opgeleverde rapportages, tools en illustraties per deliverable. De nummering komt overeen met de nummers van de bijbehorende documenten.

| Nummer    | Titel                                                                                                       | Auteur     | Status        |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|---------------|
| 2.1.1     | Analytische methode datacollectie en reductie (TRECO-Office)                                                | Huygen     | Vertrouwelijk |
| 2.1.2     | Analytische methode datacollectie en reductie (TRECO)                                                       | Huygen     | Vertrouwelijk |
| 2.2.1     | Karakterisering gebouwomhulling                                                                             | ABT        | Vertrouwelijk |
| 2.3.1     | Karakterisering en data verzameling installaties                                                            | Huygen     | Vertrouwelijk |
| 2.3.2     | Bijlage I Dataverzameling Installaties - Rapportage                                                         | DWA        | Vertrouwelijk |
| 2.3.3     | Bijlage II Dataverzameling Installaties_INPUT_WISHLIST                                                      | DWA        | Vertrouwelijk |
| 2.4.1     | Methodology for data collection and handling micro climate                                                  | Huygen     | Vertrouwelijk |
| 2.5.1     | Richtlijnen voor uitbreiding smart metering systemen (TRECO-Office)                                         | Huygen     | Vertrouwelijk |
| 3.1.1     | Gebruikersgedrag in kantoorgebouwen                                                                         | ABT        | Vertrouwelijk |
| 3.2.1     | The influence of Occupant_behavior_in_ABT_Office                                                            | ABT        | Openbaar      |
| 4.1 - R1  | Categorisch_overzicht_faalgedrag_en_focus                                                                   | DWA        | Vertrouwelijk |
| 3.2.2     | IEA EBC Annex 66: Definition and simulation of occupant behaviour in buildings NVBV Bouwfysica 2 2016       | ABT/Huygen | Openbaar      |
| 4.2 - R2  | Cases eerste exercities en benodigde meetdata_                                                              | DWA        | Vertrouwelijk |
| 4.2 - R   | Detectie en diagnose faalgedrag praktijkcasus                                                               | DWA        | Vertrouwelijk |
| 4.2 - R4  | ARTIKEL_Energiekosten-garanderen-in-prestatiecontracten-VVplus-juli-2017                                    | DWA        | Openbaar      |
| 4.3 - R5  | Comparison of HYSOPT TRNSYS and Dymola for TRECO project                                                    | TUE        | Openbaar      |
| 4.3 - R6  | Research note_Dymola_model-based_AHU_FDD                                                                    | TUE        | Openbaar      |
| 4.3 - R7  | Simulatie hydraulische schakelingen ISSO 44 en Hysopt                                                       | DWA        | Vertrouwelijk |
| 4.4 - R8  | Notitie Rule-based FDD approach for AHU's                                                                   | TUE        | Openbaar      |
| 4.4 - R9  | Top-down_faaldiagnose_signatures                                                                            | DWA        | Vertrouwelijk |
| 4.4 - R10 | Top-down faaldiagnose met behulp van machine learning                                                       | DWA        | Vertrouwelijk |
| 4.4 - R11 | Bottom-up rule-based + machine learning                                                                     | DWA        | Vertrouwelijk |
| 4.5 - R12 | Processing van data voor faaldiagnose                                                                       | DWA        | Vertrouwelijk |
| 5.1 - R1  | Report - Review of existing occupant behavior models                                                        | TUE        | Openbaar      |
| 5.1 - R2  | Journal article - Occupant behavior in building energy simulation                                           | TUE        | Openbaar      |
| 5.2 - R3  | Report - Research into factors influencing model choice                                                     | TUE        | Openbaar      |
| 5.2 - R4  | Journal article - On the sensitivity to different aspects of occupant behavior                              | TUE        | Openbaar      |
| 5.2 - R5  | Conference paper 2017-08 - Introducing and testing a strategy for fit-for-purpose OB                        | TUE        | Openbaar      |
| 5.2 - R6  | Journal article 2017-10- A simulation method for estimating the influence of - submitted                    | TUE        | Openbaar      |
| 5.4 - R7  | Energieprestaties-garanderen-hoe-moeilijk-is-dat-VVplus-juni-2017                                           | DWA        | Openbaar      |
| 5.4 - R8  | Simulaties vs monitoring Casus 2                                                                            | DWA        | Vertrouwelijk |
| 5.4 - R9  | Occupant behavior in ABT Office                                                                             | ABT        | Openbaar      |
| 6.        | Informatievideo TRECO-Office                                                                                | DEMO       | Openbaar      |
| 6.1.1     | Smartmetering systemen voor kantoren en ontwikkeling uitbreidingssets voor (bestaande) software applicaties | DEMO       | Openbaar      |
| 6.2.1     | Inrichting van database, vergelijkingsapplicaties en integratie met BIM                                     | DEMO       | Openbaar      |
| 6.3.1     | Blauwdruk voor het raamwerk protocollen                                                                     | ISSO       | Openbaar      |

## 3 Samenvatting

### 3.1 Inleiding

Het belang van de energetische kwaliteit en het werkelijke energiegebruik van een kantoorgebouw neemt snel toe. Dit kent meerdere oorzaken:

- Aanbieders van kantoorruimte willen huisvesting 'all-in' kunnen aanbieden. De energiekosten zijn daarbij onderdeel van die 'all-in prijs'. Om financieel risico te beperken en mogelijk om zelfs een financieel voordeel te realiseren, dient het werkelijke energiegebruik nauwkeurig voorspelbaar te zijn
- Gebruikers en aanbieders van kantoren willen 'duurzaam ondernemen'. Daarbij hoort een duurzame- energiezuinige huisvesting
- Het beleid van de rijksoverheid is erop gericht dat de gebouwde omgeving energieneutraal en gasloos wordt
- De energielasten vormen een substantieel onderdeel van de servicekosten van een kantoor. Lagere energiekosten verbeteren de marktpositie van een kantoorgebouw.

Het voorgaande vormt de aanleiding voor TRECO-Office. Een onderzoeks- en ontwikkeltraject dat gericht is op:

- Het ontwikkelen van inzicht in de factoren die verantwoordelijk zijn voor het werkelijke energiegebruik.
- Onderzoek naar de wijze waarop monitoren van invloedfactoren kan plaatsvinden.
- Het ontwikkelen van tools en diensten om deze kennis in de markt aan te bieden.

Dit eindrapport geeft inzicht in de loop van het onderzoek, de resultaten en de publiciteit die eraan is gegeven. Tevens worden er per werkpakket de belangrijkste ontwikkelingen beschreven.

### 3.2 Doelstelling conform het projectplan

De onderstaande doelstellingen zijn overgenomen uit het projectplan. De centrale kwalitatieve doelstellingen van TRECO zijn:

1. Door inzicht in en garanties op werkelijke energieprestaties een transitie bewerkstelligen van 'jaarlijkse energiekosten' naar 'investeringen in energiebesparing en klimaatbeheersing' en een herwaardering van vastgoed op werkelijke prestaties.
2. Het kunnen voorspellen van het werkelijk en realistisch energiegebruik van complexe gebouwen met inzicht in de invloed van gebruikersgedrag en hoe dit te modelleren
3. Ontwikkeling van faaldiagnosesystemen die gericht de gebouw- en installatie specifieke oorzaken van afwijkingen in het energiegebruik kunnen detecteren.

### 3.3 Werkwijze

In het onderzoek is gewerkt vanuit 6 werkpakketten (WP).

1. Management, Coördinatie en Communicatie
2. Dataverzameling en databeoordeling gebouw en installaties
3. Dataverzameling en databeoordeling gebruikersgedrag
4. Faaldiagnose afwijkingen energiegebruik
5. Rekenmodellen, simulaties en gebruikersgedrag
6. Product en dienstontwikkeling



Na een gezamenlijke startbijeenkomst zijn de werkpakketten min of meer parallel uitgevoerd met minimaal halfjaarlijkse bijeenkomsten om bevindingen met elkaar te delen en feedback uit te wisselen vanuit de verschillende werkpakketten.

Resultaten WP2 zijn in hoofdzaak gebaseerd op de resultaten van het TKI-project TRECO-HOME. Op onderdelen, zoals de toe te passen sensoren, is de kennis vertaald naar de toepassing voor kantoorgebouwen.

WP2 vormde input voor WP4 om de voorspellende berekeningen en monitoring in te kunnen richten. Op hun beurt zijn WP2 en WP4 weer input voor WP5 en WP6 waarin de product/dienststopwikkeling is beschreven en de uitbreidingssets op de slimme meter zijn gedefinieerd.

Werkpakket 3, dataverzameling en beoordeling gebruikersgedrag, heeft plaatsgevonden in het internationale kader van IEA Annex 53 'Total energy use in Buildings' en IEA Annex 66 'Definition and simulation of occupant behavior in buildings' en er is gebruikgemaakt van kennis ontwikkeld in het kader van het TKI project TRECO HOME door de afdeling Humane biologie van de Universiteit van Maastricht.

Het eerste werkpakket is er voor het bewerkstelligen van een inhoudelijke en consistente samenhang tussen de werkpakketten.

### 3.4 Deelnemers consortium TRECO Office

| Naam deelnemer                           | Rol in project                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Huygen Installatie Adviseurs             | Penvoerder.<br>WP2: Analytische vergelijking werkelijk voorspeld energiegebruik, karakterisering gebouw en installatieparameters                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Uitbestedingsrelatie: De Haas & Partners | Coördinator, afstemming met andere relevante (TKI) projecten, klankbordgroep Afstemming met TRECO                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| ABT                                      | WP3: Dataverzameling en analyse gebruikersgedrag, bijdragen aan WP2 dataverzameling gebouwen en WP5 rekenmethodieken                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| DWA                                      | WP4: Faal diagnose en afwijkingen energiegebruik<br>Geavanceerde simulaties energiegebruik, ontwikkeling faal diagnose instrumenten, onderzoek naar faal diagnose, leiding werkpakket met betrekking tot faal diagnose. Bijdrage aan de thema's:<br>Energievraag (simulatie warmte / koude / elektravraag).<br>Distributie en afgifte (foutdiagnose)<br>Opwekking (simulatie en foutdiagnose)<br>Koppeling met BIM<br>Diverse Casestudies |
| TU Eindhoven                             | WP5: Modelleren gebruikersgedrag<br>Fundamenteel onderzoek naar te gebruiken modellen<br>Integratie gebruikersgedrag in modellen                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| DEMO consultants                         | WP6: Producten en diensten<br>Het ontwikkelen van web applicaties en apps, met name gericht op ondersteuning van het facility management en technisch beheer.<br>Koppeling van ontwerpdocumentatie aan semantic BIM (IFC/CMO) en doorkoppeling aan softwaretools voor de exploitatiefase                                                                                                                                                  |
| Webeasy                                  | Ontwikkeling software en hardware voor het besturen en bewaken van gebouwgebonden installaties.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| ISSO                                     | Valorisatie<br>Inbreng van kennis van nationale en Europese EPBD-normen                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |

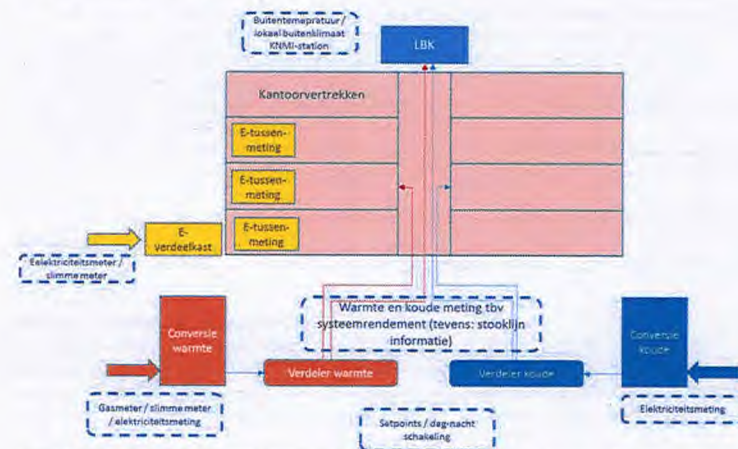
### 3.5 Resultaten

Binnen TRECO Office is een grote stap gezet door de combinatie van geavanceerde simulatiemodellen voor ontwerpende partijen en monitoringssystemen die gericht faalgedrag detecteren en inzicht geven op het werkelijke energiegebruik van kantoren en openbare gebouwen. Hiermee draagt TRECO-Office bij aan:

- het leveren van virtuele gebouwen waarbij BIM en (energie)simulatiemodellen in het ontwerp stadium aan elkaar gekoppeld zijn,
- het gedurende de exploitatiefase monitoren van de werkelijke prestaties en door inzet van simulaties en slimme dataverwerking gericht kijken (op maandbasis) naar afwijkingen en het effect van herstelacties.
- rekentools die in risicodragende projecten verantwoording kunnen nemen voor de exploitatie.

Zonder het kennen van het gebruik van een kantoorgebouw zijn gebruikspatronen goed herkenbaar in data van slimme meters. Hoe regelmatig het gebruikspatroon hoe beter het energiegebruik kan worden voorspeld. Dit houdt in dat voor het voorspellen op basis van historische data er niet meer nodig is dan data van een slimme meter.

Voor het zoeken naar mogelijkheden voor energiebesparing, en voor het bijsturen van gebruikersgedrag dat energie efficiënter is, zijn data over de toestand en werking van de installaties en het gebruik (setpoints e.d.) vanuit het gebouw en de installatie noodzakelijk. Deze nadere analyse is onderzocht in WP3 en WP4.



Figuur 1. Monitoringsensoren voor het bepalen van de opwekkings- en distributierendementen (Bron: Huygen)

Voor het correct kunnen vaststellen van een energiebalans zijn een groot aantal sensoren nodig. Naast de energiebalans is het ook nodig om op deelniveau het functioneren van de installatie te kennen. Een soort indirecte aanwijzing voor energie-efficiënt gedrag zoals het volgen van een stooklijn.

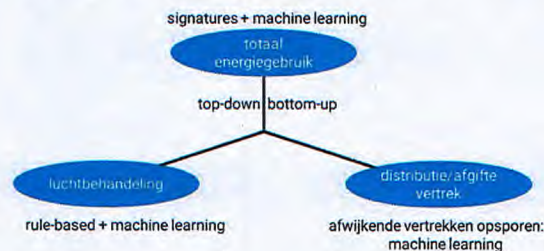
Uit de praktijk blijkt dat in de meeste gebouwen waar data wordt verzameld deze over een periode van 1 a 2 weken wordt bewaard en daarna wordt overschreden. In veel gebouwen wordt de data al per dag overschreven.



Voor een goede analyse is een dataverzameling per seizoen noodzakelijk. En dan met een monitoringfrequentie van ca. 30 minuten tot 1 uur. In veel gevallen wordt in de analyse gemiddeld naar uurlijkse of dagelijkse waarden, waarbij rekening wordt gehouden met de bedrijfswijze. Bijvoorbeeld gemiddeld voor openingstijden en gemiddeld per nachtperiode en weekenden. Deze middeling heeft te maken met de tijdconstanten van regeling en gebouw. De regeling werkt meestal met korte tijdconstanten (< uur). Door middeling over een dag kan de ruis in de data op deze manier worden gedempt. Daarnaast kent een gebouw een tijdconstante van dagdelen gerelateerd aan de temperatuurverandering van het buitenklimaat (winterperiode) en van de zoninstraling (zomerperiodes). In de winter ontstaan goede relaties tussen warmtevraag en buitentemperaturen. Voor de zomerperiode geeft dat meer spreiding omdat de zoninstraling een grilliger patroon vertoont dan de buitentemperaturen.

TRECO-Office levert een methodiek van dataverzameling en dataopnemers (sensoren) waarmee voldoende betrouwbaar het energiegebruik kan worden voorspeld op maandbasis en jaarbasis.

Voor een faaldiagnose zijn meerdere data noodzakelijk en is een veel korter tijdinterval nodig, zie bijvoorbeeld faaldiagnose bij hydraulische systemen taak 4.3 - R6.



Figuur 2. Schematische weergave van de top-down en bottom-up benadering (Bron: DWA)

Meerdere vormen van faalgedrag kunnen verantwoordelijk zijn voor een gedetecteerde afwijking. In de "top-down"-aanpak zit de beperking in het volgende: faalgedrag met een relatief kleine impact op het totale energiegebruik "verdwijnt" in de onnauwkeurigheidsmarge van de simulaties/algoritmes. "Bottom-up" zit de beperking in het feit dat het moeilijk te bepalen is of een afwijking impact heeft op het totale energiegebruik van een pand. De combinatie van "top-down" en "bottom-up" zorgt hier voor een krachtige aanpak. Met het toepassen van machine learning is in dit werkpakket een belangrijke vernieuwende stap gezet. Aanbevolen wordt om de mogelijkheden hiervan verder uit te werken in een mogelijk vervolgtraject. De model-based approach blijft noodzakelijk, omdat toepassing van machine learning voldoende historische data vraagt om een oordeel te kunnen vellen. In de "top-down" benadering is machine learning op gebouwniveau bovendien voorlopig nog beperkt doordat er geen sprake is van een onafhankelijke benchmark. De "status-quo" wordt getraind, dit in plaats van gewenste situatie. Simulatiemodellen kunnen, afgezien van de onnauwkeurigheidsmarge, wel een benchmark geven voor de gewenste situatie. Een aanbeveling voor de ontwikkeling van simulatiemodellen betreft de modellering van het elektriciteitsverbruik. Voor veel processen in het gebouw (tapwater, liften, parkeergarages, pompenergie en ventilatoren) worden soms (sterk) vereenvoudigde modellen gebruikt, althans in de toegepaste software binnen werkpakket 4.4 (VABI Elements). Dit beperkt de mogelijkheden voor het toepassen van model-based faaldiagnose op basis van het elektriciteitsverbruik.

Aanbieders van kantoorruimte willen huisvesting 'all-in' kunnen aanbieden. De energiekosten zijn daarbij onderdeel van die 'all-in prijs'. Om financieel risico te beperken en mogelijk om zelfs een financieel voordeel te realiseren, dient het werkelijke energiegebruik nauwkeurig voorspelbaar te zijn en tussentijds gemonitord te worden.

Er is, om de huisvesting 'all-in' te kunnen aanbieden, behoefte aan een door de markt breed geaccepteerde richtlijn hoe men het werkelijk energiegebruik kan voorspellen. Aanbeveling is om vanuit de blauwdruk die ISSO in het kader van de TRECO-Office heeft ontwikkeld, deze verder te ontwikkelen tot een volwaardige ISSO-publicatie en een Beoordelingsrichtlijn (BRL), zodat deze dienstverlening, het voorspellen van het werkelijke energiegebruik, voor de prestatiecontracten, door de marktpartijen ook onder certificering kan plaatsvinden.

Voor de dataverzameling zijn diverse technieken toepasbaar. Moderne gebouwbeheersystemen hebben een history-module waarmee data bewaard kan worden. Daarnaast zijn verschillende bedrijven actief zoals Huygen en Simaxx met het koppelen van een database aan deze gebouwbeheersystemen. Deze database-omgeving maakt de weg vrij voor analyse van data met diverse statistische technieken zoals Matlab.

Vanuit de onderzoeken in verschillende werkpakketten levert TRECO-Office de volgende toepassingsresultaten:

1. In de praktijk toepasbare faaldiagnose parameters in relatie tot afwijkingen in het energiegebruik (DWA).
2. Reken- en data verwerkingsmethodes behorend bij de in de praktijk toepasbare faaldiagnose parameters. Deze leggen de basis voor algoritmes die faalgedrag kunnen detecteren (excl. Softwareontwikkeling) (DWA, TUe).
3. Een BIM-protocol met meetpunten en meetmethoden specifiek gericht op de diagnose van faalgedrag (DMO, DWA, HIA).
4. Energiediensten gebaseerd op deze applicatie waarbij gegarandeerd energiegebruik en prestaties en daarop gebaseerde energieprestatie contracten worden aangeboden. Deze contracten kunnen ook gebruikt worden voor ESCO concepten voor renovatie en herinrichting van kantoren. Het vormt ook een solide basis voor innovatieve financieringsconstructies, gebaseerd op de werkelijke waardebeoordeling van vastgoed (Allen).
5. Een beknopt raamwerk om met de beoogde stappen tot een eenheid te komen van één methodiek om het werkelijke energiegebruik in gebouwen (zowel woningen als kantoren) dan wel een kwaliteitskeurmerk voor methoden te komen (ISSO, allen).

### 3.6 Bijdrage aan de doelstellingen van TKI-Energie

#### 3.6.1 Duurzame energiehuishouding

TRECO-Office heeft kennis ontwikkeld dan de hand van drie casussen uit de dagelijkse praktijk van bestaande gebouwen. In elk van deze gebouwen zijn door data-analyse besparingsmaatregelen aangetoond en getroffen die 5-10% energiebesparing met zich mee brachten op de klimatisering. Ook in andere onderzoeken, vaak jaren geleden, is een dergelijk potentieel tot aan 30% aangetoond. Een besparingspotentieel dat voor eeuwig verborgen blijft als er niet gemeten wordt aan gebouwen en hun installaties. (\* B. Elkhuizen, et al. Comfortabel en energiezuinig regelen VV+ maart 2007).

We durven daarom te stellen dat TRECO-Office aannemelijk maakt dat er in kantoren en openbare gebouwen gemiddeld tot 20% energiebesparing te bereiken is door alleen al te kiezen voor de juiste instellingen op basis van data-analyse. Denk hierbij aan tijdschema's van aangeschakelde ventilatoren, verlichting, setpoints van de stooklijnen en de binnentemperatuur.



In een toekomst, waarin duurzame energiebronnen dominant gaan worden, is een doelmatig gebruik van energie steeds belangrijker. Bovendien zijn demand-response en energieopslag technieken die de totale energievraag van gebouwen zullen gaan afstemmen op de energieproductie van deze duurzame bronnen. De tools van TRECO-Office zijn hiervoor een onmisbare schakel bij het bereiken van bewustwording en het creëren van deze nieuwe technische oplossingen. Een interessant aspect van het resultaat van TRECO-Office is dat de ontwikkelde methode is vastgelegd in een blauwdruk door Stichting ISSO. Dit maakt de weg vrij naar een bredere toetsing en acceptatie door de gebouw- en installatiesector.

### 3.6.2 Versterking kennispositie

#### 3.6.2.1 Nationaal

Gebouwbeheer richt zich meestal op een kwaliteitsniveau dat een huurder vraagt op het gebied van facilitymanagement: schoonmaak, presentatie, liften, parkeren, binnenklimaat (temperatuur, geluid), bereikbaarheid en contacten tussen huurders onderling. Energiekosten zijn maar een klein onderdeel in dit geheel aan kosten en krijgt weinig aandacht. Bij klachten over het binnenklimaat wordt in de praktijk net zolang aan allerlei settings gedraaid totdat de klachten over zijn. De energiezuinigheid heeft daar sterk onder te leiden.

Met de TRECO-Office kennis zal de aanpak anders zijn, en gaat bijvoorbeeld het oplossen van klimaatsklachten hand in hand met het handhaven of verbeteren van de energie-efficiency.

#### 3.6.2.2 Internationaal

Gebruikersgedrag is nog een weinig begrepen invloed op het energiegebruik. Internationaal, verzameld in IEA Annex66, doen veel instituten voornamelijk theoretisch onderzoek. Meer en meer blijkt het modelleren van de individuele gebruiker niet haalbaar. Wat wel haalbaar lijkt, is het bepalen van gedragspatronen, gekoppeld aan de mate van invloed die een gebruiker kan uitoefenen op zijn binnenklimaat en daarmee zijn energiegebruik.

Het onderzoek van de TUE heeft geleid tot een fit for purpose benadering die ook in IEA Annex66 goed is ontvangen. Hiermee zijn we met TRECO-Office in staat om in contact te blijven met de laatste stand van internationaal onderzoek, en daar ook aan bij te dragen.

### 3.7 Conclusie en aanbevelingen

De ambities van de gebouwde omgeving om energie te besparen, zijn al decennia aanwezig. Aanvankelijk is veel inspanning gestoken in ontwikkeling van betere techniek zoals: cv-ketels, HR++ beglazing, kozijnen en detaillering, balansventilatie en regeling. Deze technieken brachten al een forse stap in energiebesparing die vrijwel direct op de energiemeter merkbaar was. Noodzaak tot geavanceerde monitoring leek er toen nog niet te zijn.

Gebouwen zijn nu veel energiezuiniger geworden en we zien dat de technische ontwikkeling bij de huidige technieken zijn grenzen aan het bereiken is. De volgende stap is het toepassen van PV-panelen die in de meeste gevallen noodzakelijk zijn om aan de huidige eisen uit het Bouwbesluit en de ambitie van het Lente-Akkoord te voldoen.

In de huidige markt zijn vastgoedeigenaren op zoek naar methodes om de energieprestatie in de praktijk te voorspellen. De uitvoering van een project en de interactie tussen gebouw en installaties zijn meer bepaald voor de energieprestatie dan de prestaties van de individuele componenten, zoals ca. 30 jaar geleden het geval was. Vanuit het ontwerp worden vaak onrealistisch lage energiegebruiken berekend. Er is daarom meer monitoring nodig dan af en toe de energiemeterstand noteren.

Een andere ontwikkeling is de verregaande automatisering van gebouwregelsystemen in het GBS. Met een klein gemak kunnen tieltallen en zelfs honderden datapunten worden verzameld in

willekeurige tijdintervallen tot een seconden toe. Dit geeft een vermoeden dat we met al deze data tot zeer nauwkeurige voorspellingen kunnen komen. Desalniettemin, niks blijkt minder waar. Elke data heeft zijn onnauwkeurigheid, en elke data vergt een tijd om deze een interpretatie te geven. Bij een grote hoeveelheid datapunten gaat door een optelling van onnauwkeurigheden de waarde van de voorspelling afnemen. Bovendien neemt de tijd die aan de interpretatie wordt besteed per datapunt meer dan evenredig toe. Dit maakt dat er een grote behoefte is aan een minimale set aan datapunten waarmee voor de markt betrouwbare voorspellingen van het energiegebruik kunnen worden gedaan.

Om de prestaties van een gebouw nauwkeurig te kunnen voorspellen, is het voor veel gebouwen dus erg belangrijk om het gebouwgebruik goed te begrijpen. De resultaten van de casestudie laten echter ook zien dat dit niet voor alle gebouwen belangrijk is.

De resultaten van de casestudie laten zien dat onzekerheid in het gebouwgebruik in veel gevallen een grotere invloed heeft op de berekende spreiding in de KPI, dan de onzekerheid in de materiaaleigenschappen. Om de prestaties van een gebouw nauwkeurig te kunnen voorspellen, is het voor veel gebouwen dus erg belangrijk om het gebouwgebruik goed te begrijpen. De resultaten van de casestudie laten echter ook zien dat dit niet voor alle gebouwen belangrijk is; dit wordt ook duidelijk uit de casestudie van het ABT/Demo gebouw.

De laatste jaren is de penetratie van de slimme meter sterk toegenomen. Dit is een eerste stap in de data verzameling t.b.v. data analyse. Toch zijn daarmee lang niet alle aspecten die energiegebruik beïnvloeden te achterhalen. In TRECO-Office is het de ambitie geweest om te bepalen met minimale set aan data, welke frequentie en nauwkeurigheid nodig is om een voorspelde energieprestatie contractueel te kunnen vastleggen.

Het resultaat van TRECO-Office is dat, uitgaande van een slimme meter, en voor een kantoorgebouw een minimale set aan energiedeelmeters, is gedefinieerd (warmte, koude en elektriciteit) waarmee energiegebruik kan worden voorspeld en verklaard. We gaan hierbij uit van een goed functionerend gebouw en installatie, en van een voor de gebruikers acceptabel binnenklimaat. Deze werkwijze is vastgelegd in een blauwdruk die zich leent om in een standaard te worden beschreven.

Vervolgens is nagegaan hoe je het goed functioneren van een installatie kunt bepalen. Met faaldiagnose en invloed van gebruikersgedrag zijn kennis en tools ontwikkeld om oorzaken van disfunctioneren te achterhalen.

Tenslotte is ook onderzocht hoe de dataverzameling en modelontwikkeling kan worden gekoppeld aan de actuele mogelijkheden van BIM. Het blijft dat data in BIM kan worden verzameld. Maar de uitwisseling van data (interoperabiliteit) is een obstakel dat een forse ICT-inspanning vergt van de softwareontwikkelaars in de markt.

TRECO-Office levert uiteindelijk op:

- Faaldiagnose parameters voor verschillende installatieonderdelen zoals luchtbehandelingskasten en hydraulische schakelingen en profielen van warmte, koude en elektriciteitsgebruik. (WP4)
- In de praktijk toepasbare faaldiagnose op basis van machine learning, signatures en hoge resolutie simulaties van hydraulische systemen. (WP2 en WP4)
- Tonen van meetpunten in een BIM-model van een bestand gebouw. (WP6)
- Beschrijving van een energiedienst op basis van jaarlijkse en maandelijkse energiegebruiken voor verwarmen, koelen en elektriciteit, waarbij rekening kan worden gehouden met aanwezigheid van personen. (WP2, WP3 en WP6)
- Beschrijving van een raamwerk met activiteiten en benodigde sensoren en bemetering om een energieprestatiecontract overeen te kunnen komen. (WP6)

In TRECO-Office hebben we met drie casus-projecten kunnen werken. Hoewel er goede resultaten zijn geboekt, is het opdoen van meer ervaring een belangrijks stap naar de bevestiging van de generieke TRECO-Office aanpak voor energieprestatiecontracten in kantoren. Hierbij is een



detailonderzoek naar het effect van bezetting van gebouwen wenselijk per regeling (individueel of centraal) van de installaties.

Over het kunnen beoordelen van het gedrag van installaties ligt een wereld aan technieken open. De controle op de energetisch efficiënte werking van installaties, de kwaliteit van het binnenmilieu en de faal diagnose, aan de hand van detailinformatie uit GBS, is veelbelovend. Over de effecten van een falen van de installatie in termen van energiegebruik, comfortbeleving en luchtkwaliteit is nog veel ervaring op te doen en van daaruit generieke kennis te ontwikkelen.

## 4 Resultaten per werkpakket

Hierna is per werkpakket de in het projectplan genoemde deliverables beschreven, hoe daaraan is gewerkt, wat het resultaat is en indien relevant, hoe die te vermarkten.

### 4.1 Dataverzameling en databeoordeling gebouw en installatie (HUYGEN)

Conform het projectplan kent werkpakket 2 de onderstaande taken:

- 2.1 Analyse van datacollectie en verwerking en onderzoek naar mogelijkheden voor datareductie zonder dat de betrouwbaarheid van de voorspelling afneemt. (Deze taak is in TRECO HOME uitgevoerd)
- 2.2 Onderzoek naar de karakterisering en dataverzameling gebouwmhulling. (Deze taak is in TRECO HOME uitgevoerd en is aangevuld met specifieke gegevens voor kantoren)
- 2.3 Onderzoek naar de karakterisering en dataverzameling installaties. (Deze taak is in TRECO HOME uitgevoerd en wordt aangevuld met specifieke gegevens voor kantoren)
- 2.4 Ontwikkeling nauwkeurige en kosteneffectieve monitoringsysteem voor lokaal microklimaat. (Deze taak is in TRECO HOME uitgevoerd en is aangevuld met specifieke gegevens voor kantoren)
- 2.5 Opstellen richtlijnen voor uitbreiding/aanpassing smart meterings systemen.

Bovenstaande taken resulteren in onderstaande projectresultaten:

| Nr.  | Titel/omschrijving                                               | Bijbehorende taak/ taken                                                                 |
|------|------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| D2.1 | Analytische methode voor datacollectie en reductie               | Analyse datacollectie, verwerking en reductie                                            |
| D2.2 | Methodiek dataverzameling en verwerking gebouwschil              | Karakterisering en dataverzameling gebouwmhulling                                        |
| D2.3 | Methodiek dataverzameling en verwerking installaties             | Karakterisering en dataverzameling installaties                                          |
| D2.4 | Methodiek dataverzameling en verwerking microklimaat             | Ontwikkeling nauwkeurige en kosteneffectieve monitoringsysteem voort lokaal microklimaat |
| D2.5 | Richtlijnen voor uitbreiding/aanpassing smart meterings systemen | Ontwikkeling richtlijnen voor uitbreiding/aanpassing smart meterings systemen            |

In onderstaande paragrafen wordt beschreven hoe, aan de hand van de verschillende taken, deze projectresultaten gerealiseerd zijn. Achtereenvolgens worden behandeld:

- Samenvatting;
- Inleiding en doelstelling;
- Werkwijze;
- Resultaten;
- Discussie, conclusie en aanbevelingen.

#### 4.1.1 Analyse datacollectie, verwerking en reductie

##### *Inleiding en doelstelling*

Deze taak betreft een fundamenteel onderzoek naar de wijze waarop tot een zo efficiënt en kosteneffectief mogelijke dataverzameling en dataverwerking kan worden gekomen. Onderdeel daarvan is onderzoek naar een verantwoorde datareductie om binnen een toelaatbare marge toch voldoende nauwkeurig berekeningen uit te kunnen voeren.



Uit TRECO-HOME is gebleken dat linearisering van modeldata al tot hoge correlatiefactoren leidt zoals R<sup>2</sup> groter dan 70% op basis van de buitentemperatuur of meer specifiek de  $\Delta T$  tussen buiten en binnen daar waar deze binnentemperatuur een onregelmatiger karakter draagt.

#### Werkwijze

Tot op heden is het energiebeheer van gebouwen meestal gebaseerd op het controleren van de jaarlijkse facturen. De introductie van de slimme energiemeter - voor gas in uurlijkse waarden en voor elektriciteit in kwartierwaarden, bevordert al de bewustwording. Met behulp van data van de slimme meter zijn uurlijkse waarde voor het gasgebruik en elektriciteitsgebruik verzameld.

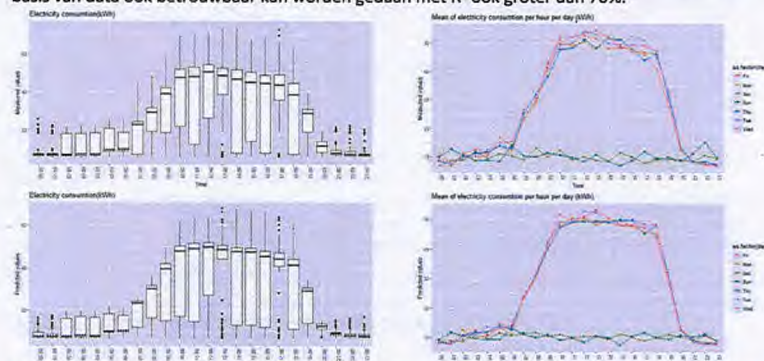
Deze data is in uurlijkse profielen weergegeven waarna met machine learning technieken (in analyse software 'R') een voorspelling op basis van deze data kan worden uitgevoerd.

#### Resultaten

Op basis van statistiek (machine learning) kan uit data van slimme meters (die verzameld kan worden zonder achter de voordeur van een gebouw te hoeven komen) al het nodige worden afgeleid t.a.v. de karakteristiek van het energiegebruik.

Data voor verwarmen (linker grafieken uit figuur 3): door lineaire regressie zijn verbanden zichtbaar met R<sup>2</sup> van meer dan 70%.

Uit gebruik van elektriciteit per uur zijn gebruikspatronen zichtbaar waarmee een voorspelling op basis van data ook betrouwbaar kan worden gedaan met R<sup>2</sup> ook groter dan 70%.



Figuur 3: Het gemiddelde van de gemeten en voorspelde waarden van het gasgebruik (boven) en het elektriciteitsgebruik (onder) voor elk uur van de dag (Bron: Huygen).

|        | Corresponderende bijlage                                                           |
|--------|------------------------------------------------------------------------------------|
| WP 2.1 | 2.1.1 Analytische methode datacollectie en reductie (TRECO-Office) (vertrouwelijk) |

#### Discussie, conclusie en aanbevelingen

Zonder het kennen van het gebruik van een kantoorgebouw zijn gebruikspatronen goed herkenbaar in data van slimme meters. Hoe regelmatig het gebruikspatroon hoe beter het energiegebruik kan worden voorspeld. Dit houdt in dat voor het voorspellen op basis van historische data er niet meer nodig is dan data van een slimme meter.

Voor het zoeken naar mogelijkheden voor energiebesparing, en voor het bijsturen van gebruikersgedrag dat energie efficiënter is, zijn data over de toestand en werking van de installaties

en het gebruik (setpoints e.d.) vanuit het gebouw en de installatie noodzakelijk. Deze nadere analyse is onderzocht in WP3 en WP4.

Deze verbeteringen in de energy efficiency kunnen we dan terugzien in gewijzigde energieprofielen zoals in figuur 3.

#### 4.1.2 Karakterisering en dataverzameling gebouwomhulling

##### Inleiding en doelstelling

Deze taak betreft de karakterisering en bepaling van (de afwijkingen in) thermodynamische eigenschappen van de gebouwschil:

- Detecteren en vaststellen van mogelijke discrepanties tussen ontwerp en in-situ eigenschappen van de gebouwomhulling met betrekking tot de verschillen in ontwerpuitgangspunten ('lab' gegevens) en praktijk omstandigheden t.a.v. werkelijke prestaties;
- Systematisch overzicht van gestandaardiseerde monitoringmethoden voor in-situ bepaling van de thermodynamische eigenschappen van gebouwdelen;
- Het ontwikkelen van vereenvoudigde methoden voor de bepaling van het meest beïnvloed thermodynamische eigenschappen van de gebouwschil (bijv. voor informatie naar energiemanagers en gebruikers);
- Ontwikkelen multiparametrische model van thermodynamische eigenschappen van de gebouwschil die integratie mogelijk maakt in de bestaande (smart) meteringsystemen, BEMS voor woongebouwen etc.
- Het ontwikkelen van minimale set van fysieke variabelen in situ voor het bepalen van verschillen in de thermodynamische eigenschappen van gebouwschil met een optimale verhouding tussen kosten en nauwkeurigheid;
- Bepaling van discrepanties in de betrouwbaarheidsintervallen tussen gestandaardiseerde (bijv. EN 15203) en in-situ waarden.

##### Methode en aanpak

Steady state eigenschappen van gebouwschil wordt vergeleken met de dynamische karakteristiek in de praktijk met verschillende simulatiehulpmiddelen en in-situ experimenten.

##### Werkwijze

Aan de hand van literatuuronderzoek is een overzicht samengesteld van bouwkundige invloedfactoren op het totale energiegebruik. Er kunnen verschillen optreden in het berekende en werkelijk energiegebruik doordat de uitgangspunten voor de berekening en de uiteindelijke realisatie verschillen. Ook kan door degradatie van de gebouwomhulling of door veranderingen aan het gebouw door de tijd heen het energiegebruik variëren.

Deze deliverable geeft een analyse van de thermodynamische eigenschappen van de gebouwschil die invloed hebben op de gebouwprestaties. Hierbij worden de mogelijke afwijkingen geanalyseerd tussen de ontwerpuitgangspunten en de werkelijke prestaties. Tevens worden methoden, om het energiegebruik gedetailleerd te berekenen en te meten, weergegeven.

##### Resultaten

In dit rapport zijn de bouwkundige elementen onderzocht die van invloed zijn op het verschil tussen berekend en werkelijk of gemeten energieverbruik:

- Degradatie van de U-waarde van glas is mogelijk, vooral met grote glasvlakken, wat van invloed is op het energiegebruik.
- Beschaduwning van glazen delen kunnen invloed hebben op het energiegebruik. De werkelijke invloed zal echter beperkt zijn, tenzij er zeer grote verschillen tussen berekende en werkelijke beschaduwning door bijvoorbeeld bomen of andere gebouwen in de omgeving.
- In de nacht kunnen gordijnen voor een verhoging van de isolatiewaarde zorgen. Overdag moeten ze openblijven om voor opwarming te zorgen. Gordijnen of andere zonwering wordt bij kantoren echter niet vaak 's nachts toegepast, waardoor het in normale gevallen van zeer beperkte invloed is.



- Degradatie van isolatie kan van invloed zijn op het werkelijke energiegebruik. Er is geen onderzoek bekend naar de degradatie van isolatiemateriaal en het effect op het energiegebruik.
- Door koudebruggen forfaitair te berekenen, kan het afwijken van het werkelijk energiegebruik. Ook is het mogelijk dat er in werkelijkheid meer koudebruggen voorkomen door fouten in het werk of door het fout berekenen van de U-waarde door de koudebruggen. Deze effecten kunnen tot maximaal 5% bijdragen aan de transmissieverliezen. Het effect op het comfort en schimmelvorming kan substantieel zijn, maar is geen onderwerp van deze studie
- Het veranderen van type verlichting door de tijd, bijvoorbeeld van onzuinig naar zeer energiezuinig, heeft veel invloed op het uiteindelijk totale energiegebruik voor verlichting. Vooral als de verwarming- en koelingsinstallaties een hoog rendement hebben, is het aandeel verlichting in het totale energiegebruik substantieel.
- De thermische massa kan in werkelijkheid verschillen in vergelijking met de berekende waarde. Dit komt bijvoorbeeld door het toepassen van tapijt of het aftimmeren van het plafond. Dit kan tot 30% bijdragen aan een hoger energiegebruik voor koeling t.b.v. klimatisering van kantoorruimten.

|        |                                                      |
|--------|------------------------------------------------------|
|        | Corresponderende bijlage                             |
| WP 2.2 | 2.2.1 Karakterisering gebouwmhulling (vertrouwelijk) |

#### Discussie, conclusie en aanbevelingen

In TRECO-Office zijn de installatie-aspecten het hoofdonderwerp. De bouwkundige aspecten zijn in de casussen niet aan verandering onderhevig. Uit dit onderzoek van taak 2.2 blijkt dat, binnen de tijdsduur van het project, de effecten van veroudering e.d. niet merkbaar zullen zijn. Dat bepaalde eigenschappen niet volgens ontwerpgegevens kunnen zijn uitgevoerd, is geen onderwerp van onderzoek, tijdens de monitoringperiode zijn geen veranderingen aan de bouwkundige situatie uitgevoerd.

### 4.1.3 Karakterisering en dataverzameling installaties

#### Inleiding en doelstelling

Deze taak betreft de karakterisering en bepaling van (de afwijking in) energie-efficiëntie van installaties.

Redenen voor verschillen in ontwerp en praktijk prestaties van installaties worden onderzocht en verklaard. Dit leidt tot een tijd- en kosteneffectieve methode m.b.t. procedures en bepaling van de indicatoren voor de monitoring van de werkelijke (in-situ) installatieprestaties in de praktijk en de tijd.

#### Werkwijze

In deze taak maken we gebruik van de resultaten van TRECO-HOME waarna die zijn toegepast op kantoorgebouwen.

Voor deze systemen zullen energie-prestatie-indicatoren (EPI) worden ontwikkeld om een evaluatie op twee niveaus mogelijk te maken:

- 1) het gebruik van aanwezige slimme energiemeter of data gebouwbeheersystemen;
- 2) vereenvoudigde monitoring voor low-cost prestatiebeoordeling.

De klimaatsystemen die worden onderzocht zijn ingedeeld in hoofdgroepen.

Hierbij zijn de belangrijkste parameters, die verschillen tussen energie-efficiëntie ontwerp en praktijk veroorzaken, geanalyseerd en vastgesteld met behulp van een analytische benadering en numerieke simulaties. Dit vormt de basis voor de meest geschikte indicatoren.

DWA heeft onderzoek gedaan naar karakterisering van de data met behulp van modellen.

Aan de hand van casusdata zijn de volgende modellen op bruikbaarheid onderzocht.

- Een vereenvoudigd model op basis van het benodigde verwarmingsvermogen voor transmissie, infiltratie en ventilatie.
  - o Dit betreft een statisch model waarbij de effecten van thermische massa en zonbelasting niet zijn meegenomen in het model (figuur 4).
  - o Met betrekking tot het koelvermogen is het benodigde vermogen voor de koelbatterij van de luchtbehandeling uitgewerkt. Het benodigde vermogen voor koude-afgifte in de ruimtes is niet meegenomen.
  - o Het model is eventueel bruikbaar als benchmark voor de bovengrens van de warmtevraag (data op 24-uurs-basis). Dit is verder niet uitgewerkt binnen het kader van TRECO-Office.
- Een vereenvoudigd model op basis van lineaire regressie met betrekking tot de warmtevraag, dit op basis van zonbelasting en buitentemperatuur.
  - o Hierbij is gebruikgemaakt van de methode zoals beschreven in IEA Annex 53 [1].
  - o In deze methode wordt voor een aantal ranges van de zonbelasting een lineaire regressie toegepast. Dit zou verder kunnen worden uitgewerkt om op basis van de hellingshoek een warmteverlies-coëfficiënt van het gebouw te bepalen. In de literatuur wordt dit gebruikt om gebouwen onderling te benchmarken [1]. Dit is in het kader van TRECO-Office niet verder uitgewerkt.
- Fysisch hoog-resolutiemodel (Vabi Elements).
  - o Hier is sprake van dynamische simulaties waarbij op uurlijkse basis het gehele gebouw wordt doorgerekend. Hierbij wordt ook de dynamiek van de thermische massa, interne warmtelast en zonbelasting meegenomen, evenals het schakelgedrag van de installatie op basis van setpoints voor verwarming en koeling. Het thermisch comfort volgt ook uit de simulaties, door middel van PMV-waarden of operationele temperaturen, alsmede het elektriciteitsverbruik voor verlichting, apparatuur.

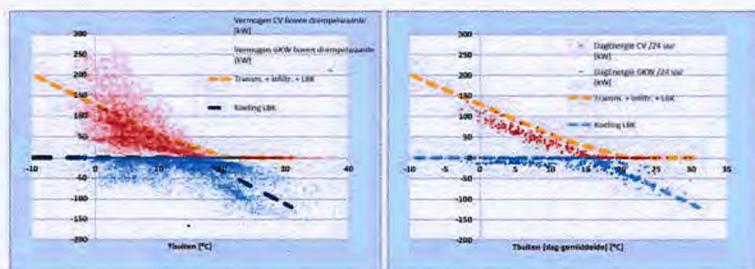
#### Resultaten

De meting van de warmte en koude stromen in een installatie geeft een duidelijker beeld van de energievraag van een gebouw dan op basis van de ingaande energiestromen zoals aardgas en elektriciteit (warmtepomp). Ook blijkt dat het toepassen van daggemiddelden deze data minder ruis heeft. De uurlijkse data is vaak vervuild door regeltechnische eigenschappen, traagheden en tijdconstanten en met deze aanwezige ruis minder bruikbaar voor analyse.

Op basis van de resultaten van de analyse zoals uitgevoerd door DWA kan het volgende geconcludeerd worden:

- Het geëvalueerde vereenvoudigde (statische) model is niet goed in staat de impact van zonbelasting, interne warmtelast, thermische massa en regeltechnische parameters te modelleren in samenhang met het thermisch comfort.
- Het lineaire regressiemodel met betrekking tot het energiegebruik heeft deze beperking ook en geeft bovendien de situatie weer 'zoals ze is' en niet 'zoals ze zou moeten zijn'. De geëvalueerde vereenvoudigde modellen zijn daarom niet geschikt om de impact van het bijsturen van de installatie op het energiegebruik door te rekenen.
- Het geëvalueerde fysische hoge-resolutiemodel is wel geschikt voor dit doel. Dit model is ook in staat de impact van het bijsturen van de installatie op het thermisch comfort te modelleren (overschrijdingsuren van de PMV-waarde en/of de ATG-methode).

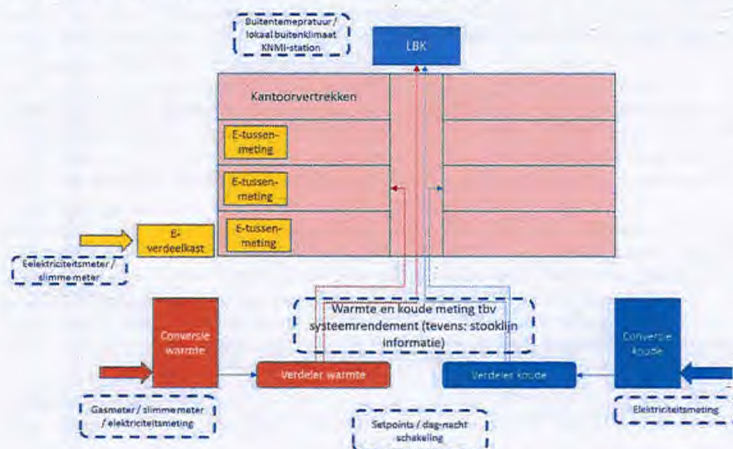




Figuur 4 Evaluatie energievraag met behulp van een vereenvoudigd model op basis van transmissie, infiltratie en benodigde vermogen voor de luchtbehandeling. Uurlijkse data (links), geaggregeerde 24-uurs-data (rechts) Bron: DWA

Figuur 4 geeft een voorbeeld waarbij de uurlijkse data (links) is gemiddeld naar dagwaarden (rechts). De data komt er een stuk netter uit te zien, waardoor een betere relatie is te leggen met de totale specifieke energieverliezen, uitgedrukt in kWh/K.

De meetdata van de gasmeter kan sterk vervuild zijn door regeltechnische aspecten en door een beperkt modulair schakelgedrag van de cv-ketels, de compensatie van de traagheid waarmee water wordt verwarmd en belastingswisselingen worden opgevangen.



Figuur 5 Overzicht van sensoren voor opwekkings- en distributierendement (Bron: Huygen)

Daarom wordt aanbevolen om een deelbeteringsprincipe aan te houden volgens figuur 5. De energiemeting valt in drie delen uiteen:

1. Bepalen van de efficiency van de energieconversie-apparaten (Warmtepompen, gasketels, WKO etc.) door meting van aardgas of elektriciteit en geproduceerde warmte en koude. Zie bijvoorbeeld ook ISSO-publicatie 39.

2. Meten van de warmte en koude naar alle afgaande groepen in het gebouw.
3. Meten van de elektriciteit voor gebruikersenergie, apart van de elektriciteit voor klimatisering. Dit gebruikersdeel per verdieping deelbeteren.

Voor de elektriciteitsdata voor koeling is een aparte tussenmeter onmisbaar. Het herleiden van elektriciteitsgebruik voor de koelmachine uit slimme meter data is niet mogelijk bij kantoorgebouwen.

|        | Corresponderende bijlage                                               |
|--------|------------------------------------------------------------------------|
| WP 2.3 | 2.3.1 Karakterisering en data verzameling installaties (vertrouwelijk) |

#### Discussie, conclusie en aanbevelingen

Gezien de ervaringen in de DWA-casus met het toepassen van vereenvoudigde modellen in vergelijking met het fysische hoge-resolutiemodel, is het niet aan te bevelen het spoor van vereenvoudigde fysische modellen verder uit te werken binnen TRECO-Office. Voor prestatiecontracten wordt toepassing van fysische hoge-resolutiemodellen aanbevolen voor analyse van de meetdata en het onderbouwen van voorstellen voor het bijsturen van de installatie. Wat tijdschaal betreft, zijn voor de werktuigkundige installatie meetgegevens benodigd op een tijdschaal van maximaal een uur. De evaluatie met modellen geeft goede resultaten op 24-uursbasis (faaldetectie). Voor faaldiagnose is het aan te bevelen ook de uurlijkse data te analyseren.

Voor de energiemeting zijn de volgende KPI's vastgesteld:

1. Jaarlijkse energievraag voor verwarmen.
2. Jaarlijkse energievraag voor koeling.
3. Jaarlijks elektriciteitsgebruik.
4. Allen weergeven van het aantal TO-uren (Binnentemperatuur hoger dan 25C) ter indicatie van het zomercomfort.

Met de geschetste bemeteringsplannen kunnen deze KPI's worden vastgesteld.

#### Literatuur

- [1] Danov et al. Building energy performance evaluation using daily consumption data in nine individual Office buildings in Spain. In: *ECB Annex 53, Total Energy Use in Buildings, Volume III Case Studies Buildings*.

#### 4.1.4 Ontwikkeling nauwkeurige en kosteneffectieve monitoringsysteem voort lokaal microklimaat

##### Inleiding en doelstelling

Deze taak betreft het onderzoeken van de invloed van het microklimaat op het totaal energiegebruik. Dit betreft zowel de invloed op warmteverliezen als warmtewinsten alsmede de invloed op lokale energieproductie en de sturing en regeling hiervan. Vandaar uit wordt een kosteneffectief monitoring en regelsysteem ontwikkeld waarmee:

- de invloed op werkelijk energiegebruik van de micro-klimatologische omstandigheden kan worden bepaald en waarmee het voorspelde (individuele) energiegebruik kan worden gecorrigeerd
- energiemanagementsystemen, installaties en apparatuur van kantoren kunnen worden aangestuurd, bijvoorbeeld om waarde van opgewekte elektriciteit te maximaliseren en inkoop te minimaliseren, communicabel met smart grids
- actieve multifunctionele bouwdeelen aan te sturen, zoals ((nacht)ventilatie, zonwering, etc.



### Werkwijze

Bij conventionele klimaatregelingen vormen wisselingen in het weer een storende factor, welke gecorrigeerd dienen te worden op basis van actuele parameters. Dit corrigeren gebeurt vaak op een energie inefficiënte wijze, en met discomfort.

- energie-inefficiënt door de noodzaak van snel corrigeren (onnodig hoge/lage temperaturen nodig om snel te kunnen corrigeren)
- discomfort door het te laat corrigeren (op actuele afwijkingen)

Een mogelijke oplossing is het regelen van het binnenklimaat mede op basis van weersvoorspellingen.

Er is een vergelijking gemaakt tussen meetdata van weerstations op gebouwen (Kantoorgebouw ABT en een eengezinswoning in Heerlen uit TRECO HOME). Van deze meetgegevens is de luchttemperatuur vergeleken met de luchttemperatuur van het meest nabijgelegen KNMI-klimaatstation. Voor hoger gelegen meetstations op daken van utiliteitsgebouwen blijkt dat deze data goed overeenkomen met nabijgelegen KNMI meteostations. In binnenstedelijk gebied en in woonwijken kunnen systematische afwijkingen optreden waarbij de lokale metingen in de winter ca. 1-2 K hoger kunnen zijn.

Daarnaast is een analyse van de zoninstraling uitgevoerd waaruit blijkt dat in de 4 wintermaanden het aandeel zonne-energie in de verwarming verwaarloosbaar is, en daardoor ook in de regeling geen rol hoeft te spelen. Verder is de zoninstraling in de winter geanalyseerd. Te zien is dat in de wintermaanden de energie van de zontoetreding een orde 10 lager is dan de verwarmingsenergie. Daarom kan de zontoetreding in de maanden nov, dec, jan en feb genegeerd worden in de energievoorspelling en de binnenklimaatregeling.

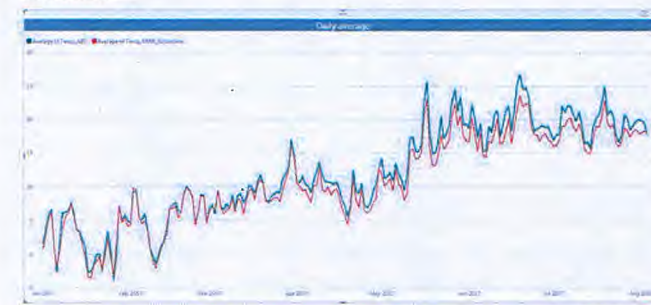
In de tussenseizoenen en in de zomerperiode is dit uiteraard wel belangrijk voor het goed kunnen regelen van het thermisch binnenklimaat. Hoewel de mate van energie-inefficiëntie niet leidt tot een groot onnodig energiegebruik omdat in deze periode de  $\Delta T$  met de buitentemperatuur gering is. Voor de zomerperiode is alleen bij volledige airconditioning de regeling belangrijk. Bij topkoeling met een vast debiet en inblaasttemperatuur ligt het energiegebruik voor koeling vast op basis van de gekozen instelling.

Bij gebouwen met traag werkende afgiftesystemen zoals betonkernactivering wordt gebruik gemaakt van de buitentemperatuur op basis van een driedaags gemiddelde.

Er is een inventarisatie uitgevoerd van de mogelijkheden van een weersvoorspellende regeling. Deze techniek, hoewel aangeboden door sommige regelfabrikanten, staat nog in de kinderschoenen.

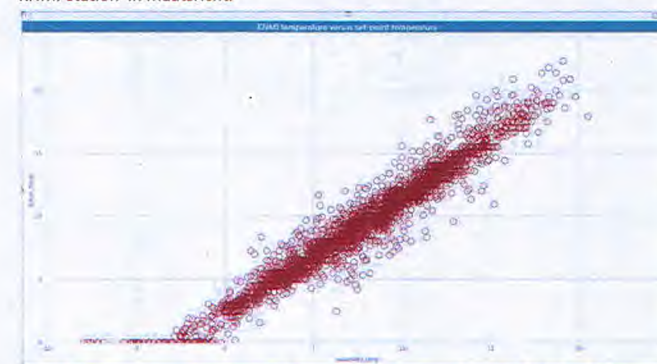
### Resultaten

Figuur 6. geeft de vergelijking van de gemeten weerdata op het ABT-gebouw met het KNMI-station van Rotterdam.



Figuur 6. Vergelijking van weerdata van een knmi-station en een weerstation op het ABT-gebouw

Figuur 7 geeft de uurlijkse weerdata op de gevel van een woning in een woonwijk in Heerlen met het KNMI-station in Maatsricht.



Figuur 7. Vergelijking van weerdata van een knmi-station en een weerstation op het ABT-gebouw

Uit de resultaten is af te leiden dat de positie van een meteostation zorgvuldig moet worden gekozen. Vaak kent de dakopbouw van een gebouw allerlei obstakels waardoor een goede meteometing wordt belemmerd. Het kan daarom interessant zijn om data van commerciële weerstations te betrekken en via een data abonnement in een regelsysteem toe te passen.

|        |                                                                                  |
|--------|----------------------------------------------------------------------------------|
|        | Corresponderende bijlage                                                         |
| WP 2.4 | 2.4.1 Methodology for data collection and handling micro climate (vertrouwelijk) |



### Discussie, conclusie en aanbevelingen

#### Stand techniek:

- Er zijn reeds meteorologische instituten welke lokale weersvoorspellingen doen en deze informatie digitaal beschikbaar stellen ((bijvoorbeeld Meteovista).
- Internetkoppeling is een voorwaarde voor continue data-uitwisseling.
- Welke parameters, de termijn, en de betrouwbaarheid is nog te onderzoeken om daadwerkelijk tot een voorspellende regeling van klimaatinstallaties op weerverwachting te realiseren.
- Op dit moment wordt alleen de temperatuur voorspeld. Te onderzoeken is of dit voldoende is.
  - o Voor het stookseizoen heeft de bezonning nauwelijks invloed op het energiegebruik
  - o Windsnelheid KNMI versus windsnelheid gemeten op de gevel. Voor het bepalen van de infiltratie is dit belangrijk maar technisch complex om dat te meten.
  - o De buitentemperatuur is mede bepalend voor de binnen temperatuur afhankelijk van de isolatiewaarde, van invloed op het energiegebruik. Het voorspellen van de buitentemperatuur is goed mogelijk op basis van data van meteorologische instituten.
- Bijpassende regelalgoritmen binnen de regeltechniek voor de klimaatinstallaties zijn nog te optimaliseren.

#### 4.1.5 Ontwikkeling richtlijnen voor uitbreiding/aanpassing smart meterings systemen

##### Inleiding en doelstelling

De taken 2.1 t/m 2.4 leiden tot een set van richtlijnen voor de uitbreiding of aanpassing van smart metering systemen voor het monitoren en verwerken van de meest essentiële data die het totale energiegebruik van - kantoren bepalen. Deze taak vormt de input voor werkpakket 6.

##### Werkwijze

Uit de resultaten van de taken 1 t/m 4 volgt dat voor diverse doelen er verschillende sensoren en meetsystemen nodig zijn. Er is een samenvatting gemaakt van de doelen van het data verzamelen, en vervolgens welke sensoren en meetsystemen daarbij horen.

##### Resultaten

Er zijn energiemeters voor:

- Elektriciteit Slimme meter per kwartier of P1 poort op kleiner tijdsinterval
- Gasmeter Slimme meter alleen per uur
- Warmte Warmtemeter per uur, of  $\Delta T$  en flow uit GBS (minder nauwkeurig)
- Koude Warmtemeter per uur, of  $\Delta T$  en flow uit GBS (minder nauwkeurig)
- Luchttemperatuur Sensoren op representatieve plaatsen in de leefruimten
- CO<sub>2</sub>-concentratie Sensoren op representatieve plaatsen in de leefruimten

Balans elektriciteit over verschillende gebruikers:

- Tussensmeters per verdieping
- Tussensmeters voor verlichting en WCD's
- Tussenmeter voor koelmachines en warmtepompen en andere grote verbruikers zoals serverruimten/data centrum

Voor analyse van de energiebalans aardgasgebruik, elektriciteitsgebruik en opgewekte warmte en koude:

- Warmtemeter per warmte- en koudeopwekker
- Warmte- koudemeter per hoofdgroep op een verdeler zoals LBK's, radiatoren en/of BKA

Voor correcties van het lokale klimaat:

- Toepassen van een goed geplaatst meteorostation
- Gebruikmaken van data van een dienstverlener van klimaatdata met een weerstation binnen een straal van 30 km

Voor analyse gebruikersgedrag:

- Toepassen van aanwezigheidsdetectie om te meten hoeveel personen er in het gebouw zijn en in welke zone van de klimaatinstallatie ze zich bevinden.

Voor de goede werking van de installaties:

- Sensoren voor het kunnen vaststellen van de stooklijnen van de transportgroepen voor warmte en koude groepen.
- Sensoren voor het kunnen vaststellen van de stooklijnen van de distributie voor warmte en koude groepen.
- Sensoren voor het kunnen vaststellen van de stooklijnen door LBK's.
- Meten van de flow van pompen en registreren van klepstanden.
- Bepalen van de bedrijfstoestand (Neutraal, verwarmen, koelen) en daaraan de pomp- en klepstanden koppelen.

|        | Corresponderende bijlage                                                                               |
|--------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| WP 2.5 | 2.5.1 Richtlijnen voor uitbreiding smart metering systemen (TREC-Office) (vertrouwelijk); zie ook D6.3 |

### Discussie, conclusie en aanbevelingen

Voor het correct kunnen vaststellen van een energiebalans, is een groot aantal sensoren nodig. Naast de energiebalans is het ook nodig om op deelniveau het functioneren van de installatie te kennen. Een soort indirecte aanwijzing voor energie-efficiënt gedrag zoals het volgen van een stooklijn.

Het verdient de aanbeveling om in de ontwerpfase voor elke toepassing de sensoren apart te kiezen in het ontwerp. Zoals op basis van ISO-31 kent elke functie zijn eigen sensor. Pas na het kennen van alle sensorbehoeftes kan bekeken worden welke sensoren een dubbelfunctie kunnen vervullen. Dit om ook kosten-efficiënt te installeren.

Uit de praktijk blijkt dat in de meeste gebouwen waar data wordt verzameld deze over een periode van 1 a 2 weken wordt bewaard en daarna wordt overschreden. In veel gebouwen wordt de data al per dag overschreven.

Voor een goede analyse is een dataverzameling per seizoen noodzakelijk. En dan met een monitoringfrequentie van ca. 30 minuten tot 1 uur. In veel gevallen wordt in de analyse gemiddeld naar uurlijkse of dagelijkse waarden gekeken, waarbij rekening wordt gehouden met de bedrijfswijze. Bijvoorbeeld gemiddeld voor openingstijden en gemiddeld per nachtperiode en weekenden. Deze middeling heeft te maken met de tijdconstanten van regeling en gebouw. De regeling werkt meestal met korte tijdconstanten (< uur). Door middeling over een dag kan de ruis in de data op deze manier worden gedompt. Daarnaast kent een gebouw een tijdconstante van dagdelen gerelateerd aan de temperatuurverandering van het buitenklimaat (winterperiode) en van de zoninstraling (zomerperiodes). In de winter ontstaan goede relaties tussen warmtevraag en buitentemperaturen. Voor de zomerperiode geeft dat meer spreiding omdat de zoninstraling een grilliger patroon vertoont dan de buitentemperaturen.



TRECO-Office levert een methodiek van dataverzameling en dataopnemers (sensoren) waarmee voldoende betrouwbaar het energiegebruik kan worden voorspeld op maandbasis en jaarbasis.

Voor een faaldiagnose zijn meerdere data noodzakelijk en is een veel korter tijdsinterval nodig, zie bijvoorbeeld faaldiagnose bij hydraulische systemen taak 4.3 - R6.

Uit WP3 concluderen we dat gebruikersgedrag voor het energiegebruik een beperkte invloed heeft. Anderzijds is de aanwezigheid wel bepalend voor het elektriciteitsgebruik. Aanwezigheid voor energiegebruik van klimatisering is alleen van belang bij gebouwen die een volledige individuele regeling kennen. Bij gebouwen die semi-centraal of centraal zijn geregeld (invloed van gebruikers op setpoints verwaarloosbaar, regeling door klokprogramma's, in de meeste gebouwen in Nederland) is aanwezigheid niet van invloed op het energiegebruik. Daarom is in WP3 ook de Fit-for-Purpose gedachte uitgewerkt voor de modelkeuze van gebruikersgedrag.

## 4.2 Dataverzameling en databeoordeling gebruikersgedrag (ABT)

Conform het projectplan kent werkpakket 3 onderstaande taken:

- 3.1 Inventarisatie data en parameters gebruikersgedrag
- 3.2 Analyseren en vaststellen essentiële parameters en lacunes
- 3.3 Vertalen van data naar rekenmodules en opstellen (standaard-)profielen
- 3.4 Opstellen rekenmodel/rekenroutine om gebruikersgedrag te bepalen en implementeren

| Nr.  | Titel/omschrijving                                              | Bijbehorende taak/ taken                                                          |
|------|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| D3.1 | Analytische methode voor datacollectie van het gebruikersgedrag | Inventarisatie data en parameters gebruikersgedrag                                |
| D3.2 | Methodiek essentiële parameters en lacunes                      | Analyseren en vaststellen essentiële parameters en lacunes                        |
| D3.3 | Methodiek rekenmodules en (standaard-)profielen                 | Vertalen van data naar rekenmodules en opstellen (standaard)profielen             |
| D3.4 | Rekenmodel/rekenroutine om gebruikersgedrag te bepalen          | Opstellen rekenmodel/rekenroutine om gebruikersgedrag te bepalen en implementeren |

In onderstaande paragrafen wordt beschreven hoe aan de hand van de verschillende taken deze projectresultaten gerealiseerd zijn. Achtereenvolgens worden behandeld:

- Samenvatting;
- Inleiding en doelstelling;
- Werkwijze;
- Resultaten;
- Discussie, conclusie en aanbevelingen.

### 4.2.1 Inventarisatie data en parameters gebruikersgedrag

#### Inleiding en doelstelling

Deze taak toont een inventarisatie van de beschikbare gegevens over het gebruikersgedrag op kantoor. De inventarisatie zal ook informatie bevatten welke is verkregen in het kader van IEA Annex 53: "Totaal energieverbruik in gebouwen" en de gegevens die zijn verkregen in het TKI *energo-project TRECO* van de afdeling *Human Biology & Movement Sciences* van de Universiteit Maastricht. De parameters voor energiegebruik met betrekking tot verwarming, ventilatie, koeling, verlichting, verlichting, apparatuur en leidingwater, zullen worden onderzocht.

#### Werkwijze

Er is een literatuurstudie uitgevoerd om een inventarisatie te maken van de beschikbare data met betrekking tot de correlatie tussen het gebruikersgedrag en energiegebruik in kantoorgebouwen (Andersen, 2009) (Dick & Thomas, 1951) (Fabi, Andersen, Corgnati, & Olesen, 2012) (Haldi & Robinson, 2008) (Herkel, Knapp, & Pfafferott, 2005) (Hoes, Hensen, Loomans, de Vries, & Bourgeois, 2008) (Hunt, 1979) (Mahdavi & Pröglhof, 2009) (Nicol, 2011) (Pigg, Reed, & Eilers, 1996) (Polinder, et al., 2013) (Reinhart & Voss, 2003) (Schweiker, 2010) (Schweiker & Shukuya, 2010) (Stranger, et al., 2012) (Tokel, 2006) (Warren & Parkins, 1984) (Yao, 2014). Dit literatuuronderzoek dient als basis om een kwalitatieve analyse te maken van de invloed van het gedrag van de gebouwgebruiker op de energievraag volgens het aantal parameters dat in een kantoorgebouw kan worden gevarieerd.

IEA Annex 66 "Occupant behavior in buildings" bestaat uit een internationaal samenwerkingsverband tussen onderzoeksinstituten, universiteiten en ingenieursbureaus die in het energieonderzoeksprogramma *Energy in Buildings and Communities* gezamenlijk onderzoek doen naar gebruikersgedrag en de gevolgen daarvan op het energiegebruik in gebouwen. Aan dit onderzoeksthema waarvoor internationaal veel belangstelling was, hebben meegewerkt de volgende



landen: Verenigde Staten, China, Australië, Canada, Denemarken, Duitsland, Italië, Nederland, Polen, Spanje, Nieuw Zeeland, Korea, Noorwegen en het Verenigd Koninkrijk.

Doelstelling van Annex66 was om een platform op te zetten, om te komen tot een standaard met betrekking tot occupant behavior in buildings, een methodologie te ontwikkelen de simulatie van occupant behavior en de invloedsfactoren en invloed van occupant behavior te onderzoeken op het energiegebruik in gebouwen.

Het werk was daartoe onderverdeeld in de volgende werkgroepen

- Subtask A: Occupant movement and presence models
- Subtask B: Occupant action models in residential buildings
- Subtask C: Occupant action models in commercial buildings
- Subtask D: Integration of occupant behavior models with current building energy modeling programs
- Subtask E: Applications in building design and operations

De deelname aan IEA Annex 66 in het kader van TRECO-Office heeft geleid tot wederzijdse kennisuitwisseling op het thema. Zo is de methodologie, kennis en meet- en simulatieresultaten die zijn opgedaan rondom de casestudy van het Kantoor van ABT in Delft gedeeld in de verschillende subtaken van de Annex, is een bijdrage geleverd aan de rapportage, maar is anderzijds ook kennis opgedaan van de vanuit andere landen ingebrachte kennis en knowhow. Daarnaast is door deze samenwerking aansluiting verkregen bij het internationale platform dat tot stand is gekomen. De resultaten worden in 2018 gepubliceerd op website [www.annex66.org](http://www.annex66.org).

De resultaten van Annex66 zijn van academisch niveau. Desondanks hebben de resultaten van de TRECO-Office en de case studies de voorlopige resultaten van Annex 66 bevestigd dat de impact van gebruikersgedrag in veel gevallen beperkter is dan we voorheen hadden verwacht.

#### Resultaten

Uit het literatuuronderzoek wordt geconcludeerd dat de volgende parameters in een gebouw kunnen worden aangepast, waarbij de genoemde factoren invloed kunnen hebben:

- Ramen openen. Deze parameter is afhankelijk van het tijdstip van de dag, de binnentemperatuur, de buitentemperatuur, de binnen luchtkwaliteit, de bezetting en de windsnelheid buiten.
- Thermostaatinstellingen. Variatie van deze parameter als functie van de buitentemperatuur, het thermisch comfort en de bezetting in de kamer.
- Verlichtingsinstellingen. De instelling van de binnenverlichting hangt af van het daglicht dat binnendringt in de ruimte en het tijdstip van de dag.
- Zonneschermen. Variatie van zonneschermen is afhankelijk van de zonnestraling, de diepte waarover de zonnestraling het gebouw binnendringt, de verticale natuurlijke lichtsterkte en de binnen- en buitentemperatuur.
- Variatie van ventilatiesysteem. De variatie van deze parameter is afhankelijk van tocht, geluidsproductie (van de installatie zelf of van buitenaf) en luchtkwaliteit.
- Gebruik liften. Alleen afhankelijk van de gebruiker.
- Computergebruik. Alleen afhankelijk van de gebruiker (servers en datacenters niet inbegrepen).

|        |                                                                                                          |
|--------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|        | Corresponderende bijlage                                                                                 |
| WP 3.1 | 20160204_gebruikersgedrag in kantoorgebouwen (vertrouwelijk)                                             |
| 3.2.2  | IEA EBC Annex 66: Definition and simulation of occupant behaviour in buildings<br>NVBV Bouwfysica 2 2016 |

## 4.2.2 Analyseren en vaststellen essentiële parameters en lacunes

### Inleiding en doelstelling

Deze taak analyseert de belangrijkste parameters en dominante factoren voor het energieverbruik in kantoorgebouwen in Nederland. Bovendien wordt bepaald welke parameters eventueel ontbreken en wordt de methode voorgesteld voor het verzamelen van deze parameters.

### Werkwijze

In deze paragraaf wordt kwalitatief de invloed van het gedrag van de bewoner op de energievraag geanalyseerd aan de hand van het aantal parameters dat in het gebouw kan worden gemanipuleerd en de impact ervan op basis van het aantal gebruikers in het gebouw.

### Resultaten

Analyse van de belangrijkste en meest dominante parameters

De belangrijkste factoren die van invloed zijn op de energievraag van kantoorgebouwen kunnen in de volgende 4 groepen worden ingedeeld:

1. (Automatiseringsniveau van de) gebouwinstallaties
2. Buitenklimaat
3. Kenmerken van het gebouw
4. Gebruikersgedrag

Deze factoren gaan een wisselwerking met elkaar aan en variëren de invloed van het gebruikersgedrag op de totale energievraag van het gebouw. Het automatiseringsniveau van de installaties in een gebouw wordt beschouwd als de factor met de grootste invloed van het gebruikersgedrag op de energievraag. Het automatiseringsniveau van de installaties van het gebouw bepaalt immers de combinatie en hoeveelheid parameters die de gebruiker kan manipuleren. In deze studie worden drie bouwcategorieën gedefinieerd: (1) Volledig handmatig bediend gebouw, (2) volledig geautomatiseerd gecontroleerd gebouw en (3) semiautomatisch gebouw. In een volledig handmatig gestuurd gebouw wordt aangenomen dat alle parameters kunnen worden gevarieerd, terwijl in een volledig geautomatiseerd gebouw de gebruiker bijna geen enkele parameter kan beïnvloeden. De parameters die in een halfautomatisch gebouw kunnen worden gevarieerd, worden verondersteld de gebruikersgerelateerde parameters te zijn in het gebouw van de huidige casestudy (TRECO-Office).

Tabel 1 en Tabel 2 geven een kwantificering van de bezetting-gerelateerde parameters, die van invloed zijn op de vraag naar elektrische en thermische energie voor gebouwen met verschillende automatiseringsniveaus. De beïnvloedende parameters met betrekking tot het gebouwgebruik kunnen worden ingedeeld in 2 groepen: (1) gebaseerd op aanwezigheid ('presence-based') en (2) gedragsgericht ('behaviour-based'). De parameters die worden beïnvloed door de aanwezigheid van mensen in het gebouw kunnen worden bewaakt door de bezetting van het gebouw, terwijl de gedragsparameters variëren afhankelijk van het individuele gebruik en invloed op de energiesystemen.



Tabel 1 Parameters gerelateerd aan bezetting die van invloed zijn op de thermische energievraag van een gebouw.

| Type            | Parameters                                        | Fully manual<br>Controlled<br>building | Semi-<br>automated<br>controlled<br>building | Fully<br>automated<br>controlled<br>building |
|-----------------|---------------------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|
| Presence-based  | Internal heat gains lightings (presence control)* | x                                      | ✓                                            | ✓                                            |
|                 | Internal heat gains people                        | ✓                                      | ✓                                            | ✓                                            |
|                 | Internal heat gains equipment (kitchen)           | ✓                                      | ✓                                            | ✓                                            |
| Behaviour-based | Internal heat gains lightings (manual switch)*    | ✓                                      | x                                            | x                                            |
|                 | Internal heat gains equipment (computer use)      | ✓                                      | ✓                                            | ✓                                            |
|                 | Manipulation radiators                            | ✓                                      | x                                            | x                                            |
|                 | Manipulation indoor temperature set points        | ✓                                      | x                                            | x                                            |
|                 | Manipulation mechanical ventilation               | ✓                                      | x                                            | x                                            |
|                 | Manipulation windows                              | ✓                                      | ✓                                            | x                                            |
|                 | Manipulation solar shadings                       | ✓                                      | ✓                                            | x                                            |
|                 |                                                   |                                        |                                              |                                              |

\*Parameter that can be classified as presence- or behaviour-based, depending on the type automation level of the system.

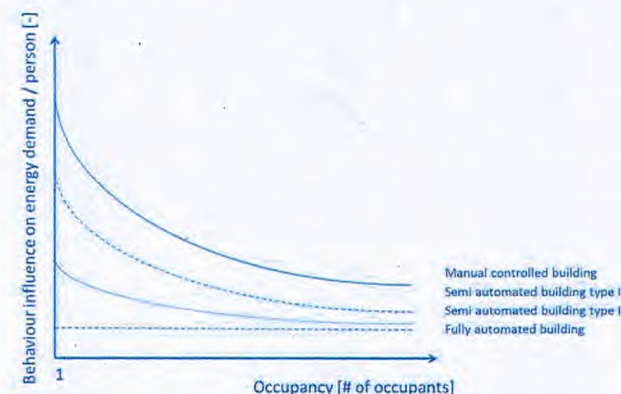
Tabel 2 Parameters gerelateerd aan bezetting die van invloed zijn op de elektrische energievraag van een gebouw.

| Type            | Parameters                          | Fully manual<br>building | Semi-automated<br>building<br>(case study) | Fully automated<br>building |
|-----------------|-------------------------------------|--------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------|
| Presence-based  | Lightings use (presence control)*   | x                        | ✓                                          | ✓                           |
|                 | Cooking equipment                   | ✓                        | ✓                                          | ✓                           |
| Behaviour-based | Lighting use (manual switch)*       | ✓                        | x                                          | x                           |
|                 | Manipulation mechanical ventilation | ✓                        | x                                          | x                           |
|                 | Computer use                        | ✓                        | ✓                                          | ✓                           |
|                 | Lift use                            | ✓                        | ✓                                          | ✓                           |

\*Parameter that can be classified as presence- or behaviour-based, depending on the type automation level of the system.

De impact van de bovengenoemde parameters met betrekking tot het energiegebruik hangt af van het aantal personen en de verschillende zones in het gebouw. Zo is bijvoorbeeld in een gebouw met aanwezigheidsdetectie voor verlichting zonder indeling in zones (open kantoor), de impact van één persoon gelijk aan een volledige bezetting. Daarentegen is de interne warmtelast door persoonsbezetting evenredig met de bezetting van het gebouw. Hiermee vormt elke variabele een andere correlatie (patroon) tussen de invloed op het energiegebruik en de bezetting van het gebouw.

Door de kwantiteit van de beïnvloede parameters en het patroon van elke parameter te analyseren, wordt verwacht dat de invloed van het gedrag van de gebruiker per persoon ten opzichte van de bezetting in het gebouw het patroon volgt zoals weergegeven in 8.



Figuur 8 Behaviour influence on energy demand per occupant versus occupancy for different automation levels

Gemeten parameters

Tabel 3 toont de dataset in het kantoor van ABT tijdens dit project.

Tabel 3 Meetdataset verkregen van het kantoorgebouw van ABT.

|                                               | Source                          | Time resolution                           | Measurement period                                              |
|-----------------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| Electricity                                   | Utility bills                   | monthly                                   | 2010 - 2016                                                     |
|                                               | Smart meters (incl. generation) | 15 minutes                                | September 2016 - today                                          |
|                                               | Plug load meters                | 10 minutes                                | January - March 2017                                            |
| Gas                                           | Utility bills                   | annually                                  | 2010 - 2016                                                     |
|                                               | Automated gas-metering reading  | 10 minutes                                | March 2017 - today                                              |
| Thermal energy*                               | Heating                         | hourly                                    | April 2016 - today (daily)<br>January 2017 - today (hourly)     |
|                                               | Cooling                         | hourly                                    | September 2016 - today (daily)<br>January 2017 - today (hourly) |
| Temperatures (indoor air, inlet/outlet flows) | Building Management System      | hourly                                    | March 2016 - today                                              |
| Occupancy                                     | Movement detection and tracking | Continuous (every time there is a change) | March 2017 - today                                              |

\*Estimated heating and cooling demand assuming constant flow.

#### Ontbrekende parameters

Om het bezettingsgedrag te analyseren op de energievraag, is het nodig om de aanwezigheids- en gedragsparameters afzonderlijk te monitoren. Tabel 4 en Tabel 5 geven de aanwezigheids- en gedragsparameters weer die in deze casestudy aanvullend moeten worden gemeten en de bijbehorende meetmethode voor respectievelijk de thermische en elektrische energie.



Tabel 4 Parameters gerelateerd aan bezetting die van invloed zijn op de thermische energievraag van een gebouw.

| Type            | Parameters                                           | Measurement method                                  |
|-----------------|------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Presence-based  | Internal heat gains equipment (computer and kitchen) | Plug-loads computers and schedule cooking equipment |
|                 | Internal heat gains lightings                        | Plug loads lightings                                |
| Behaviour-based | Manipulation windows                                 | Monitoring opening windows                          |
|                 | Manipulation solar shadings                          | Monitoring solar shadings                           |

Tabel 5 Parameters gerelateerd aan bezetting die van invloed zijn op de elektrische energievraag van een gebouw.

| Type            | Parameters          | Measurement method         |
|-----------------|---------------------|----------------------------|
| Presence-based  | Lightings use       | Plug loads lightings       |
|                 | Equipment (kitchen) | schedule cooking equipment |
| Behaviour-based | Computer use        | Plug loads computers       |
|                 | Lift use            | Plug loads lift            |

|        |                                              |
|--------|----------------------------------------------|
|        | Corresponderende bijlage                     |
| WP 3.2 | 20160204_gebruikersgedrag in kantoorgebouwen |

#### Discussie, conclusie en aanbevelingen

Belangrijkste parameters:

- De belangrijkste parameters die van invloed zijn op de energievraag van kantoorgebouwen worden ingedeeld in de volgende 4 groepen:
  - Buitenklimaat
  - Kenmerken van het gebouw
  - (Automatiseringsniveau van de) gebouwinstallaties
  - Gebruikersgedrag
- De verschillende parameters gaan een wisselwerking met elkaar aan en variëren de invloed van het gebruikersgedrag op de totale energievraag van het gebouw.
- De impact van de gedragsparameters neemt af naarmate het automatiseringsniveau van het gebouw toeneemt. Tabel 1 en tabel 2 laten zien dat, hoe hoger het automatiseringsniveau van de gebouwssystemen, hoe lager de hoeveelheid gedragsparameters die in het gebouw gemanipuleerd kunnen worden. In een volledig handmatig gestuurd gebouw daarentegen zullen de gedragsparameters naar verwachting een grotere invloed hebben omdat ze allemaal kunnen worden aangepast. Daarnaast is er een verschil in invloed tussen een open en een gesloten kantoorindeling. De impact van de gedragsparameters zijn kleiner in een open kantoorindeling.
- Het aantal aanwezigen in het gebouw is mede bepalend voor de mate van invloed van de gedragsparameters per persoon (specifieke gebruikers gerelateerde energie [kWh/persoon]) op het energieverbruik van het gebouw.
- Figuur toont de verwachte invloed door gebruikersgedrag per persoon ten opzichte van de bezetting, voor verschillende automatiseringsniveaus. De invloed van gebruikersgedrag op de energievraag per persoon neemt af naarmate de bezettingsgraad toeneemt. Dit verschijnsel wordt verder bestudeerd voor TRECO-Office casestudy in taak 3.3.

Gemeten en ontbrekende parameters:

- Elk van de instelbare parameters in Tabel 1 en Tabel 2 kunnen een verschillende impact hebben op het totale verbruik van elektrische en thermische energie. Om dit effect te kwantificeren, moeten de instelbare parameters worden gemonitord. Tabel 4 en Tabel 5 tonen de parameters en meetmethode voor die moeten worden gemonitord.

#### 4.2.3 Vertalen van data naar rekenmodules en opstellen (standaard-)profielen

##### Inleiding en doelstelling

Het doel van deze taak is onderzoeken hoe het gebruikersgedrag kan worden geïmplementeerd in energiesimulatiemodellen voor het energieverbruik in kantoorgebouwen. Hiervoor worden verschillende berekeningsmethodes gebruikt om (1) een patroon te vinden van het energieverbruik ten opzichte van de bezettingsgraad en (2) de invloed van de aanwezigheids- en gedragsparameters op het energieverbruik te kwantificeren.

##### Werkwijze

Deze studie is verdeeld in de volgende 2 hoofdonderdelen:

- Analyse van het energiegebruik per persoon [kWh/persoon] op basis van de bezetting.
- Kwantificering van de invloed van de bezettingsgraad op het totale energieverbruik van het ABT-kantoorgebouw (casestudy).

Alle analyses in dit hoofdstuk zijn gebaseerd op gemeten en gesimuleerde datasets. De meetdataset komt overeen met de monitoringsdata afkomstig van het ABT-kantoor (Delft, Nederland) dat een semiautomatisch gebouw is. Dit gebouw wordt verwarmd door gasketels en gekoeld door een elektrische koelmachine. Het gebouwbeheersysteem (GBS) regelt de verwarming en koeling van het gebouw volgens de setpoints van de luchttemperatuur in de ruimte. Tabel 3 toont de gemonitorde data in het ABT-kantoor. Wanneer er geen meetgegevens beschikbaar zijn, worden gesimuleerde gegevens gebruikt. De gesimuleerde datasets worden verkregen door gebruik te maken van gebouwssimulatiesoftware (Energy Plus) om een volledig gekalibreerd simulatiemodel van het ABT-kantoorgebouw te genereren.

Voor het eerste deel wordt het patroon en de spreiding van het energieverbruik geanalyseerd op basis van het aantal aanwezige personen. Voor het tweede deel worden de volgende verschillende methoden gebruikt voor de behoefte aan elektra, warmte en koeling.

##### Kwantificering van de invloed van de bezettingsgraad op de elektriciteitsvraag

De invloed van het gebruikersgedrag op het gebruik van elektrische energie wordt verklaard door het 'ontleden' van het gemeten elektriciteitsverbruik door experimenten uit te voeren waarbij de instellingen van de installaties in het gebouwbeheersysteem (GBS) worden gewijzigd.

##### Kwantificering van de invloed van de bezettingsgraad op de koelvraag

Om de invloed van het gebruikersgedrag op de koelvraag te bepalen, wordt een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd met een gekalibreerd gebouwssimulatiemodel dat in EnergyPlus is ontwikkeld. Het gedrag van de gebruikers in het model wordt weergegeven door het gebruik van verlichting en apparatuur en de aanwezigheid van mensen (interne warmteproductie). Het basisscenario is het gekalibreerde model en wordt gerepresenteerd door de typische bezettingsgraad van het gebouw. Het basisscenario wordt vergeleken met de volgende 2 verschillende scenario's: (1) Hoge bezetting: +25% bezettingsgraad (meer aanwezigheid van mensen, materieel en lichtgebruik)



dan in het basisscenario, en (2) Lage bezetting: -25% bezettingsgraad (minder aanwezigheid van mensen, materieel en lichtgebruik) dan in het basisscenario.

Deze gevoeligheidsanalyse geeft een geschatte invloed weer van de bezettingsgraad op de koelvraag in de werkelijkheid. Om de nauwkeurigheid van deze studie te vergroten, zal een parametrische analyse met werkelijke data (meetwaarden) moeten worden ontwikkeld. Voor deze studie moeten de koelvraaguren tijdens sluitingstijd worden gemonitord (met ingeschakelde klimaatregeling). Deze dataset is niet beschikbaar voor 2017.

#### Kwantificering van de invloed van de bezettingsgraad op de warmtevraag

De invloed van de bezettingsgraad op de warmtevraag wordt geanalyseerd op basis van meetgegevens. De gebruikte methodologie is een parametrische analyse. Hiervoor zijn drie verschillende multivariate lineaire regressiemodellen gebouwd op basis van de beschikbare meetgegevens (ABT-kantoor).

Voor de parametrische analyse van de verwarmingsvraag zijn de multivariate lineaire regressiemodellen gebaseerd op het model uitgedrukt door (formule 1). Dit model kan met een nauwkeurigheid van meer dan 70% de werkelijke verwarmingsvraag van een gebouw berekenen met een dataset van ongeveer 800 uur (Jurado López, 2017). Wanneer het nauwkeurigheidsniveau hoger is dan 70%, is het mogelijk om de invloed te kwantificeren van een van de variabelen uit de vergelijking. Dit is mogelijk door het opnemen en uitsluiten van dergelijke variabelen uit de vergelijking.

$$Q_{demand}^t = constant + C_1 (T_{outdoor}^t) + C_2 (T_{indoor}^t) + C_3 (V_{wind}^t) + C_4 (T_{outlet AHU}^t) + C_5 (Q_{internal}^{t-h}) + C_6 (Q_{solar}^{t-h}) + C_7 (Q_{solar}^t) + C_8 (Q_{internal}^t)$$

(Formule 1) (Jurado López, 2017)

Hierin is  $T_{outdoor}^t$  de buitentemperatuur [°C],  $T_{indoor}^t$  de temperatuur van de binnenlucht [°C],  $T_{outlet AHU}^t$  de uittredetemperatuur van de luchtbehandelingskast (LBK) [°C],  $V_{wind}^t$  windsnelheid [m/s],  $Q_{solar}^t$  zonnestraling op het horizontale vlak [kW/m²], en  $Q_{internal}^t$  interne warmteproductie (personen, verlichting en apparatuur) [kW/m²]. De bovenste index 't-h' verwijst naar de interne warmtelast die in de thermische massa van het gebouw is opgebouwd tijdens de vorige tijdstappen (thermische energieopslag). De  $C_i$  zijn de coëfficiënten behorend bij elke parameter welke kenmerkend zijn voor elke gebouw en bedrijfsmodus (binnentemperatuur setpoint en ventilatiedebiet). Deze parameters worden verkregen door het model te trainen met werkelijke meetgegevens.

Het model beschreven in (formule 1) is aangepast aan de huidige casestudy en de beschikbare dataset. Daarom worden de volgende wijzigingen gedaan ten opzichte van het originele model:

1. Interne warmtelast (personen + verlichting + apparatuur) worden vervangen door de bezettingsgraad;
2. Toevoeging van 2 buitentemperaturen: (1) voorspeld door het KNMI (Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut) en (2) temperatuur gemeten op het dak van het gebouw (donker dak, dus wordt het dakvlak beïnvloed door het hitte-eiland effect).

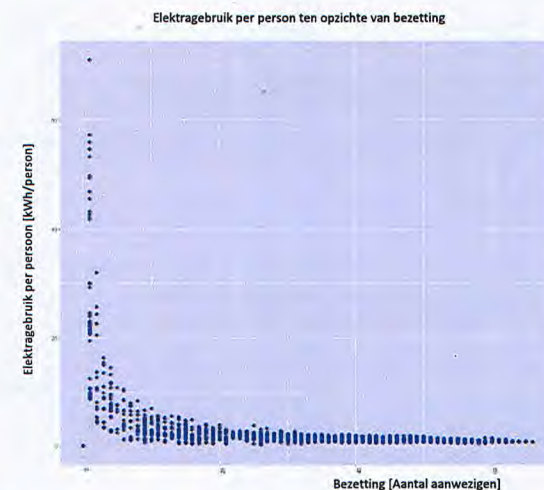
Het model is gebouwd gebruikmakend van een zoekprocedure gebaseerd op statistische criteria (zie (Jurado López, 2017) voor meer details). De volgende drie modellen zijn opgesteld voor deze studie:

1. Model 1: op doordeweekse dagen en openingstijd. Het model bevat de bezettingsvariabelen en is gebouwd op basis van 126 uur;
2. Model 2: op doordeweekse dagen en openingstijd. Het model is exclusief de bezettingsvariabelen en is gebouwd op basis van 126 uur;
3. Model 3: gedurende weekenden en sluitingstijd. Het model is gebouwd op 11 uur (één weekend).

#### Resultaten

##### Deel 1: Analyse van het energiegebruik per person [kWh/person] op basis van de bezetting

Figuur 9, **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.** 10 en Figuur 11 geven inzicht in de mate van gebruikersinvloed op het gebruik van elektra, warmte en koude [kWh/persoon] en respectievelijk ten opzichte van het aantal personen in het gebouw.

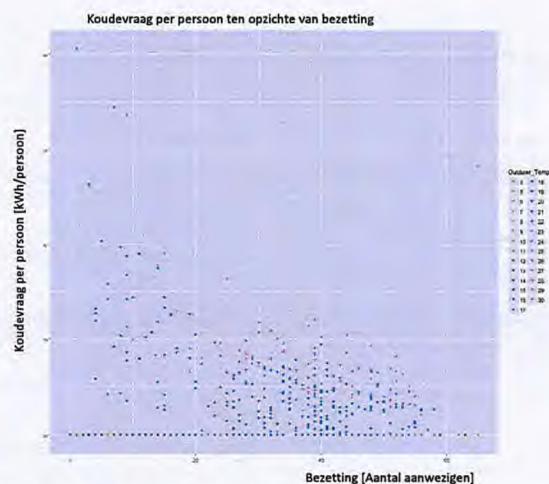


Figuur 9 Invloed van de bezetting op het elektra gebruik voor een gebouw met een semiautomatische regeling (case study). Dataset: van januari 2017 tot eerste week december 2017). Bron: Huygen





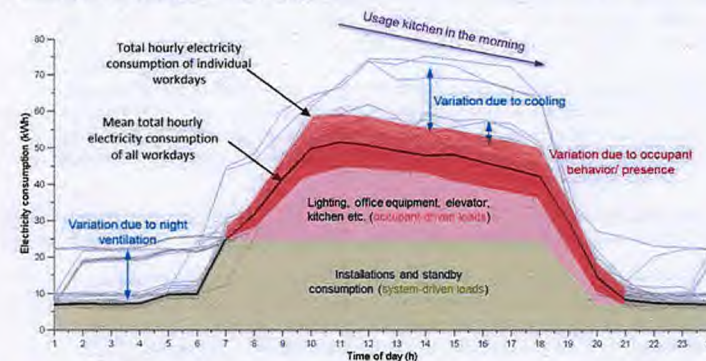
Figuur 10 Invloed van de gebruiker op de warmtevraag voor een gebouw met een semiautomatische regeling (case study). Dataset: van mei tot september 2017. Bron: Huygen



Figuur 11 Invloed van de gebruiker op de koudevraag voor een gebouw met een semiautomatische regeling (case study). Dataset: van mei tot september 2017. Bron: Huygen

## Deel 2: Kwantificering van de invloed van de bezettingsgraad op het totale energieverbruik van het ABT-kantoorgebouw (casestudy)

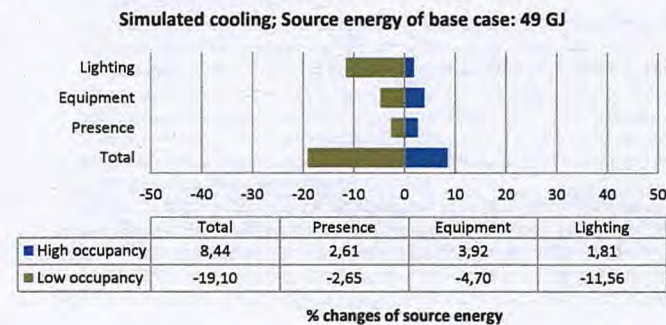
Figuur 12 toont het elektriciteitsverbruik en variatie in het verbruik als gevolg van het gedrag of aanwezigheid van de gebouwgebruikers.



Figuur 12 Uitsplitsing van het elektriciteitsverbruik op basis van het gemeten elektriciteitsverbruik per uur en het gemiddelde verbruik gedurende de bezette dagen Bron: ABT

### Koeling

Figuur 13 illustreert de gevoeligheidsanalyse voor de koelvraag. De resultaten van de simulaties worden weergegeven als percentage van de veranderingen in de bronenergie van het scenario met lage bezettingsgraad en het scenario met hoge bezettingsgraad, ten opzichte van het basisscenario, voor het individuele gebruikersgedrag.



Figuur 13 Veranderingen van bronenergie voor de gesimuleerde koelvraag



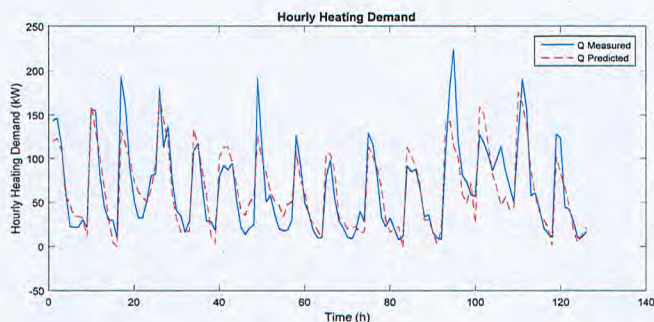
## Verwarming

Formule 2 toont het model verkregen uit de regressieanalyse getraind met de corresponderende dataset voor model 1, 2 en 3. Tabel 6 toont de coëfficiënten en bijgestelde-R<sup>2</sup> van de verschillende multivariate regressiemodellen die zijn ontwikkeld. Figuur 14 toont het fittingsprofiel van model 1 (Q<sub>simulated</sub>) ten opzichte van de meetdata (Q<sub>measured</sub>).

$$Q_{demand} [kW \cdot h] = Constant + C_1 (T_{outdoor KNMI}^t) + C_2 (T_{outdoor roof}^t) + C_3 (Q_{solar}^{t-3}) + C_4 (Occupancy^t) + C_5 (Occupancy^{t-3}) + C_6 (T_{indoor air}^t) \quad (\text{Formule 2})$$

Tabel 6 Coëfficiënten en bijgestelde-R<sup>2</sup> van de ontwikkelde multivariate regressiemodellen.

| Coefficients            | Weekdays & occupancy included (model 1) | Weekdays & occupancy excluded (model 2) | Weekend & no occupancy (model 3) |
|-------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------|
| Constant                | 120.96                                  | -248.89                                 | -163.42                          |
| C <sub>1</sub>          | -2.32                                   | -2.85                                   | 17.75                            |
| C <sub>2</sub>          | -8.14                                   | -10.57                                  | 6.56                             |
| C <sub>3</sub>          | -39.92                                  | -94.11                                  | -119.42                          |
| C <sub>4</sub>          | 0,43                                    | -                                       | 0                                |
| C <sub>5</sub>          | -0.76                                   | -                                       | 0                                |
| C <sub>6</sub>          | 8.94                                    | 61.67                                   | 26.32                            |
| Adjusted-R <sup>2</sup> | 76.84%                                  | 73.93%                                  | 72.1%                            |



Figuur 14 Gemeten en voorspelde verwarmingsbehoefte per uur voor de in model 1 gebruikte dataset (bezetting beschikbaar, weekdays tijdens openingstijden).

|        | Corresponderende bijlage        |
|--------|---------------------------------|
| WP 3.3 | Occupant_behavior_in_AB_TOffice |

## Discussie, conclusie en aanbevelingen

Uit de analyse van het energieverbruik per person [kWh/person] op basis van de bezetting worden de volgende conclusies getrokken:

- Uit de resultaten blijkt dat de thermische gegevens een hogere spreiding vertonen dan de elektrische gegevens. Dit betekent dat de thermische data een zwakkere correlatie met de bezetting laten zien dan de elektrische data. Dit komt door de volgende 2 zaken:
  - Het thermisch energieverbruik hangt af van een groter aantal parameters (zoals buitentemperatuur, thermische traagheid, etc.) dan het elektriciteitsverbruik, wat leidt tot een grotere spreiding in de data.
  - De thermische traagheid van het gebouw (een van de bovengenoemde afhankelijke parameters) veroorzaakt een vertraging op het thermische verbruikspatroon. Het thermisch verbruik wordt ongeveer 3 uur vertraagd (in deze casestudy) ten opzichte van de bezetting. De spreiding van de data is hoger voor het koelverbruik dan voor het verwarmingsverbruik omdat de thermische traagheid van het gebouw een grotere invloed heeft op het koelverbruik dan op het verwarmingsverbruik. Het elektriciteitsverbruik reageert direct op de bezettingsgraad en dus toont deze een sterkere correlatie met de bezetting.
- Hoe lager de bezetting, hoe hoger de specifieke invloed van het gebruikersgedrag op de energievraag, en omgekeerd. In alle gevallen is de spreiding van de gegevens zeer groot wanneer de bezetting laag is. Deze spreiding neemt geleidelijk af naarmate de bezettingsgraad toeneemt, waarbij een constante trend wordt benaderd. Als gevolg van dit verschijnsel wordt het volgende geconcludeerd:
  - De kloof tussen gesimuleerde en reële data zal naar verwachting hoger zijn voor gebouwen met een lage bezettingsgraad dan voor gebouwen met een hoge bezettingsgraad.
  - Elk gebouw vertoont een specifiek kantelpunt voor de bezetting van waaruit de gedragsparameters convergeren naar een gemiddelde en dus een verwaarloosbare invloed hebben op de energievraag. Voor deze casestudy kan de invloed van de gedragsparameters per gebruiker als verwaarloosbaar worden beschouwd wanneer de bezetting 35 personen overstijgt (bezettingsbreekpunt). Deze invloed kan groter zijn voor de koelvraag. De verwachting is dat elk gebouw een ander bezettingsbreekpunt vertoont, die vooral afhankelijk is van de oppervlakte van het gebouw en het automatiseringsniveau.

Met betrekking tot de kwantitatieve analyse van de invloed van de bezettingsgraad op het totale energieverbruik van het ABT-kantoorgebouw (casestudy) wordt het volgende geconcludeerd:

- Invloed van de bezettingsgraad op het elektriciteitsverbruik. De resultaten van dit onderzoek tonen aan dat de invloed van het gebruikersgedrag op de elektrische vraag voor het kantoorgebouw van ABT (semiautomatisch systeem) minimaal is. Volgens deze resultaten heeft het gebruikersgedrag een invloed op de elektrische energie tot 12% per uur, 4,7% per maand en 8% per jaar.
- Invloed van de bezettingsgraad op het koelverbruik. Uit Figuur wordt geconcludeerd dat het gedrag van de gebruikers de koelvraag tot 20% kan beïnvloeden. De koelvraag lijkt het meest te worden beïnvloed door de verlichting, terwijl de aanwezigheid van mensen het minste impact op de koelvraag laat zien.
- Invloed van de bezettingsgraad op het warmteverbruik.



- d. De invloed van de aanwezigheid van personen op de warmtevraag is minder dan 3%. Het effect van de bezetting op het fittingprofiel wordt geanalyseerd door vergelijking van de bijgestelde-  $R^2$  van model 1 en model 2. Model 1 en model 2 zijn allebei gebaseerd op dezelfde dataset (openingsuren en bezettingsgegevens beschikbaar). Model 1 bevat de bezettingsparameters, terwijl in model 2 de bezettingsgraad niet wordt meegenomen. Het verschil tussen beide bijgestelde- $R^2$  geeft daarom aan welke invloed de aanwezigheid van mensen heeft op de verwarmingsvraag (minder dan 3%). De op het gebruikersgedrag gebaseerde parameters (bedienen van ramen en zonneschermen) kunnen niet van de aanwezigheid worden gescheiden omdat deze parameters niet worden gemonitord en dus niet in de vergelijking kunnen worden ingevoerd.
- e. Ten minste 72,1% van de werkelijke warmtevraag kan worden verklaard door de buitentemperatuur, zoninstraling en binnenluchttemperatuur, en is onafhankelijk van de interne warmtelast en het gebruikersgedrag. Model 3 is gebouwd om de reikwijdte van de invloed van gebruikersgedrag te analyseren. De gekozen dataset is daarbij onafhankelijk van de bezetting (sluistijd en verwarmingstoestellen ingeschakeld). De warmtevraag is dus onafhankelijk van interne warmtelast en gebruikersgedrag.
- f. Door model 1 en 3 te vergelijken wordt geconstateerd dat de fitting zeer gelijkwaardig is, wat erop kan wijzen dat gebruikersgedrag een minimale of verwaarloosbare impact heeft op de warmtevraag. Om een eerlijke vergelijking tussen model 1 en model 3 mogelijk te maken, is echter een hoger aantal uren in de gegevensreeks nodig (Jurado López, 2017).

#### 4.2.4 Opstellen rekenmodel/rekenroutine om gebruikersgedrag te bepalen en implementeren

##### Samenvatting

Het oorspronkelijke doel van dit werkpakket is om een rekenmodel/ rekenroutine op te stellen om het energie gerelateerd gebruikersgedrag in kantoorgebouwen te modelleren. Deze taak bouwt voort op het onderzoek dat wordt gedaan in werkpakket 5.

In werkpakket 5.1 is onderzocht welke (sub)modellen beschikbaar zijn om gebruikersinvloeden te modelleren en wanneer deze modellen kunnen worden toegepast. Uit het onderzoek blijkt dat het noodzakelijk is om per case study te onderzoeken welke modelcomplexiteit nodig is voor de verschillende gebruikersaspecten: een zogenaamde 'fit-for-purpose' modelkeuze. Hieruit volgt dus ook dat het niet mogelijk is om één uniform rekenmodel/ rekenroutine op te stellen die voor alle kantoorgebouwen zal werken. In werkpakket 5.2 wordt daarom een methodologie voorgesteld (en getest) om de keuze tussen de verschillende gebruikersmodellen te ondersteunen. Het gebruik van deze methodologie in combinatie met een bouwprestatiesimulatiepakket (bijvoorbeeld Vabi Elements of EnergyPlus) kan worden gebruikt om de invloed van de gebruikers op de bouwprestaties op een relevante manier te voorspellen.

Aangezien het opstellen van één uniforme rekenmodule/ rekenroutine niet tot betrouwbare voorspellingen zal leiden, heeft het uitvoeren van deze taak weinig betekenis meer. De resultaten van WP3 maken het werken in deze taak overbodig, de resultaten van WP3 zijn in feite de uitkomst van de probleemstelling van deze taak. Een extra inspanning is daarom in de taak 3.2 uitgevoerd in de data verzameling en data-analyse van de bezettingsgraad, in afstemming met de PCC.

##### Referenties

Andersen, R. (2009). *Occupant behavior with regard to control of the indoor environment*. Kongens Lyngby: International Centre for Indoor Environment and Energy.

IEA Annex 66, Definition and Simulation of Occupant Behavior in Buildings; [www.annex66.org](http://www.annex66.org)

- Dick, J., & Thomas, D. (1951). Ventilation Research in occupied houses. *Institution of Heating and Ventilating Engineers journal*, 279-305.
- Fabi, V., Andersen, R., Corgnati, S., & Olesen, B. (2012). Occupant's window opening behaviour: A literature review of factors influencing occupant behaviour models. *Building and environment*, 188-198.
- Haldi, F., & Robinson, D. (2008). On the behaviour en occupation of Office occupants. *Building and Environment*, 2-28.
- Herkel, S., Knapp, U., & Pfafferott, J. (2005). A preliminary model of user behaviour regarding the manual control of windows in Office buildings. *Buildings simulation*, 403-410.
- Herkel, S., Knapp, U., & Pfafferott, J. (2005). A preliminary model of user behaviour regarding the manual control of windows in Office buildings. *Buildings simulation*, 403-410.
- Hoes, P., Hensen, J., Loomans, M., de Vries, B., & Bourgeois, D. (2008). User behavior in whole building simulation. *Energy and buildings*, 1-8.
- Hunt, D. (1979). The use of artificial lighting in relation to daylight levels and occupancy. *Building and Environment*, 21-33.
- Jurado López, C. (2017). *Data-driven predictive control for heating demand in buildings*. Delft, The Netherlands. Retrieved from: <https://doi.org/10.1115/1.5000000>
- Mahdavi, A., & Pröglhof, C. (2009). User behavior and energy performance in buildings. *International Energiewirtschaftstagung an der TU Wien*, 13.
- Nicol, J. (2011). Characterising occupant behaviour in buildings: towards a stochastic model of occupant use of windows, lights, blinds, heaters and fans. *Seventh International IBPSA Conference* (pp. 1073-1078). Rio de Janeiro: Building Simulation.
- Pigg, S., Reed, J., & Eilers, M. (1996). Behavioral Aspects of Lighting and Occupancy Sensors in Private Offices: A Case Study of a University Office Building. *ACEEE 1996 Summer Study on Energy Efficiency in Buildings*.
- Polinder, H., Schweiker, M., Van der Aa, A., Schakib-Ekbatan, K., Fabi, V., Andersen, R., et al. (2013). *Occupant behavior and modeling*. Paris: IEA.
- Reinhart, C., & Voss, K. (2003). Monitoring Manual Control of Electric Lighting and Blinds. *International Journal Lighting Research & Technology*, 243-260.
- Schweiker, M. (2010). *Occupant behavior and the related reference levels for heating and cooling*. Tokyo: Tokyo City University.
- Schweiker, M., & Shukuya, M. (2010). Comparative effects of building envelope improvements and occupant behavioural changes on the exergy consumption for heating and cooling. *Energy Policy*, 2976-2986.
- Stranger, M., Verbeke, S., Täubel, M., Laverge, J., Wuyts, D., Geyskens, F., et al. (2012). *Clean Air, Low Energy – Schone Lucht, Lage Energie*. Boeretang: VITO.
- Tokel, H. (2006). *User Control Actions in Buildings: A Case Study of Shading*. Vienna: TU Vienna.
- Warren, P., & Parkins, L. (1984). Window opening behaviour in Office buildings. *ASHRAE Transactions*, (pp. 1056-1076).
- Yao, J. (2014). Determining the energy performance of manually controlled solar shades: A stochastic model based co-simulation analysis. *Applied Energy*, 64-80.



### 4.3 Faal diagnose afwijkingen energiegebruik (DWA)

Conform het projectplan kent werkpakket 4 onderstaande taken:

- 4.1 Categoriseren faalgedrag in relatie tot het energiegebruik
- 4.2 Onderzoek naar faalgedrag in praktijkcases
- 4.3 Simulaties van faalgedrag in distributie en afgifte
- 4.4 Ontwikkeling faaldiagnoseparameters
- 4.5 Vertaling naar reken- en dataverwerkingsmethodes faal diagnose

In onderstaande paragrafen wordt beschreven hoe, aan de hand van de verschillende taken, deze projectresultaten gerealiseerd zijn. Achtereenvolgens worden behandeld:

- Samenvatting;
- Inleiding en doelstelling;
- Werkwijze;
- Resultaten;
- Discussie, conclusie en aanbevelingen.

| Nr.  | Titel/omschrijving                                                            | Bijbehorende taak/ taken                                       |
|------|-------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| D4.1 | Categorisch overzicht faalgedrag in relatie tot afwijkingen energiegebruik    | Categoriseren faalgedrag in relatie tot het energiegebruik     |
| D4.2 | Analyse faalgedrag praktijkcases (terugkoppeling met WP 5)                    | Onderzoek naar faalgedrag in praktijkcases                     |
| D4.3 | Simulatiemodellen van distributie en afgifte die faalgedrag kunnen modelleren | Simulaties van faalgedrag in distributie en afgifte            |
| D4.4 | In de praktijk toepasbare faaldiagnoseparameters                              | Ontwikkeling faaldiagnoseparameters                            |
| D4.5 | Reken- en dataverwerkingsmethodes behorend bij de faaldiagnoseparameters      | Vertaling naar reken- en dataverwerkingsmethodes faal diagnose |

#### 4.3.1 Categoriseren faalgedrag in relatie tot het energiegebruik

| Nr.  | Titel/omschrijving                                                         |
|------|----------------------------------------------------------------------------|
| D4.1 | Categorisch overzicht faalgedrag in relatie tot afwijkingen energiegebruik |

##### Samenvatting

Het categorisch overzicht van het faalgedrag geeft inzicht in welk faalgedrag er in de praktijk veel voor komt. Gebleken is dat veel faalgedrag opgelost kan worden door zogenoemde 'manual commissioning', werken conform goed vakmanschap. De instrumenten van TRECO-Office richten zich op commissioning met het GebouwBeheersysteem (GBS) in combinatie met simulatiemodellen. Focusgebieden hierbij zijn de automatische werking van de installatie, afgifte- en distributie en de interactie tussen verschillende componenten (system level).

##### Inleiding en doelstelling

Het doel van het categorisch overzicht van het faalgedrag is bepaling van de focus voor de overige taken binnen het werkpakket 4. Het werkpakket betreft faal diagnose met betrekking tot afwijkingen in het energiegebruik (installatie-specifieke oorzaken). Simulaties van faalgedrag en ontwikkeling van faaldiagnoseparameters/systemen spelen een belangrijke rol in het werkpakket. Het is onmogelijk om alle denkbare vormen van falen van de installaties mee te nemen. Waar gaat het werkpakket faal diagnose zich binnen TRECO-Office specifiek op richten?

##### Werkwijze

De uitvoerende partijen (DWA en WebEasy) hebben een inventarisatie gemaakt van het faalgedrag dat zij in de praktijk tegenkomen. Verder is een korte inventarisatie gemaakt van het type faalgedrag dat in de (wetenschappelijke) literatuur te vinden is.

Vervolgens zijn de volgende twee vragen behandeld.

- 1 Welk faalgedrag komt veel voor en wat is de impact op het energiegebruik?
- 2 Welk faalgedrag is meetbaar?

##### Resultaten

Dat er een verband tussen faalgedrag en afwijkend energiegebruik is, wordt duidelijk uit de commissioningsliteratuur (zie Mills et al.). Besparingen na genomen maatregelen liggen gemiddeld genomen in de orde van grootte van 14 - 18% op het totale energiegebruik (US). Voor de Nederlandse situatie geldt een schatting van 25% afwijking van het energiegebruik ten opzichte van ontwerpwaarden. Voor individuele gevallen kan dit nog veel verder oplopen. Falen van gebouwinstallaties in relatie tot het energiegebruik kent diverse oorzaken, zo leert ook het ervaringsoverzicht. Niet-technische oorzaken spelen daarbij een belangrijke rol. In het overzicht van de ervaringskennis zijn de volgende vormen van falen te onderscheiden.

- 'Procesfalen'.
- 'Falen van de techniek'.
- 'Falen van de bediening van de techniek'.
- 'Afwijkend gebouwgebruik'.

Met 'procesfalen' wordt hier alle fouten in het organisatorische proces en het communicatieproces tussen de verschillende partijen bedoeld. Niet werken conform goed vakmanschap, niet maken wat op tekening staat, afspraken niet nakomen, restpunten openlaten et cetera. Faal diagnose binnen TRECO-Office gaat zich niet richten op dit type falen.

##### Literatuur

Mills, E., et al. The cost-effectiveness of commercial-buildings commissioning. A Meta-Analysis of Energy and Non-Energy Impacts in Existing Buildings and New Construction in the United States. LBNL – 56637 (Rev.), 2004

##### Discussie, conclusie en aanbevelingen

De rapportage geeft als conclusie een voorstel voor de volgende drie focuspunten van TRECO-Office:

- Automatische werking van de installatie.
- Systeemniveau van de installatie (interactie van componenten).
- Afgifte en distributie.

Een verdere afbakening wordt gegeven door het feit dat het faalgedrag (redelijkerwijs) meetbaar en registreerbaar moet zijn. Als eerste vertrekpunt wordt daarbij uitgegaan van meetvoorzieningen die bij de huidige installatiepraktijk of stand van de techniek gangbaar (kunnen) zijn. De onderstaande afbeelding (figuur 14) geeft de samenvatting weer van focuspunten en positionering. Inbedding van



TRECO-Office binnen een totaaltraject van commissioning is daarbij essentieel. 'Manual commissioning' door middel van procesbegeleiding, interviews, checklists en visuele inspecties is een belangrijke randvoorwaarde voor de nieuwe instrumenten van TRECO-Office.



figuur 15 Samenvatting positionering en focus TRECO-Office in relatie tot faalgedrag (bron: DWA)

|        |                                                              |
|--------|--------------------------------------------------------------|
|        | Corresponderende bijlage                                     |
| WP 4.1 | Notitie DWA Categorisch overzicht faalgedrag (vertrouwelijk) |

#### 4.3.2 Onderzoek naar faalgedrag in praktijkcases

| Nr.  | Titel/omschrijving                                         |
|------|------------------------------------------------------------|
| D4.2 | Analyse faalgedrag praktijkcases (terugkoppeling met WP 5) |

##### Samenvatting

Het faalgedrag van de 3 praktijkcases is geanalyseerd, en gecombineerd met het verschil tussen de simulaties en metingen (analyse in taak 5.4). Gebleken is dat, voor het totaal van de energierekening - inclusief apparatuur en verlichting -, de gebruikersprofielen de eerste belangrijke invloedsfactor vormen. Het faalgedrag van de werktuigkundige installatie was voor de onderzochte panden een secundaire invloedsfactor op het totaal van de energierekening, maar heeft een duidelijk significante impact op de warmte- en koudevraag. Faal diagnose van de werktuigkundige installatie is daarom belangrijk om prestatiecontracten met betrekking tot (stads)warmte- en koude operationeel te maken.

##### Inleiding en doelstelling

In WP5 worden een aantal praktijkcases doorgerekend. In deze taak wordt het afwijkende energiegebruik in verband gebracht met mogelijk faalgedrag van de specifieke (werktuigkundige) installatie van de cases. De resultaten vormen een terugkoppeling op het resultaat van 4.1 (categorisch overzicht faalgedrag installatie).

##### Werkwijze

In het kader van de verdere uitwerking van de aanpak van WP4 (faal diagnose) heeft DWA eerst een exercitie gedaan met data van een (kandidaat)-casus.

Het doel hiervan was een (eerste) antwoord op de volgende vragen:

- 1 Welke meetdata hebben we nodig voor een goede faalanalyse?
- 2 Welke analyse kunnen we daarmee uitvoeren? Levert dat een bruikbare aanpak?
- 3 Wat voor soort feedback kunnen we hieruit geven aan de beheerder of gebruiker?
  - a Naar aanleiding hiervan is de aanbeveling gedaan om voor TRECO-Office instrumenten te ontwikkelen voor feedback aan technisch beheerders van prestatiecontracten en niet zozeer aan de individuele gebruiker van het gebouw.

Op basis hiervan zijn twee casussen door DWA geselecteerd. Het betreft allebei volledig geklimatiseerde gebouwen. De focus lag hierbij op het warmte- en koudegebruik van het gebouw. Door ABT/DEMO is een derde casus ingebracht. Hierbij lag de focus op analyse van de impact van het gebruikersgedrag, dit in verband met werkpakket 3. Het monitoringstraject heeft echter 'lessons learned' opgeleverd. Deze zijn relevant als voor andere cases de ontwikkelde instrumenten en methodes van TRECO-Office toegepast worden.

De belangrijkste 'lessons learned' uit de casus van het ABT/DEMO-gebouw waren de volgende:

- Als conclusie, bevestigt het TRECO-Office onderzoek de hypothese dat "de invloed van gebruikersgedrag op het werkelijke energiegebruik van het ABT/DEMO-kantoor - een door de gebruiker zwak te beïnvloeden klimaatinstallatie, naar verwachting minder groot is dan in kantoorgebouwen waar installaties hoofdzakelijk individueel regelbaar zijn". De resultaten toonden aan dat de schommelingen, als gevolg van het bewonersgedrag, laag zijn en worden ook beschouwd als laag in vergelijking met andere bevindingen in de literatuur.

|                                                                             |
|-----------------------------------------------------------------------------|
| Corresponderende bijlage                                                    |
| 4.2 - R2 -DWA_Cases eerste exercities en benodigde meetdata (vertrouwelijk) |
| Notitie ABT/DEMO-gebouw "Lessons learned bij monitoring ABT/DEMO-gebouw"    |

Het faalgedrag van de installatie in relatie tot het energiegebruik is onderzocht middels de MonaVisa-software en/of data via een rechtstreekse download uit het GebouwbeheerSysteem. Het Gebouw Beheer Systeem is ook geraadpleegd voor controle van de automatische werking van de installatie (regelinstellingen). Verder is, door toepassing van het simulatiemodel, faalgedrag opgespoord (Vabi-Elements).

##### Resultaten

De resultaten laten zich het beste illustreren aan de hand van een voorbeeld uit één van de casussen.

Hierin was sprake van het volgende faalgedrag:

- Afwijkende bedrijfstijd van de luchtbehandelingskast (LBK);
- Setpoints en een veegpuls die leiden tot extra warmte- en koudevraag;
- Bewust geïntroduceerd faalgedrag voor sturing van de ondergrondse energiebalans;
- Faalgedrag: extra gasverbruik van de ketel;
- Beperkte capaciteit van de vloerkoeling.



In de bijlage "Detectie en diagnose van het faalgedrag" is weergegeven hoe faalgedrag gedetecteerd en gediagnosticeerd is. De bovenstaande opsomming laat zien dat de automatische werking van de installatie in combinatie met afgifte en distributie een belangrijke rol spelen in het faalgedrag. Dit komt overeen met de analyse in WP4.1.

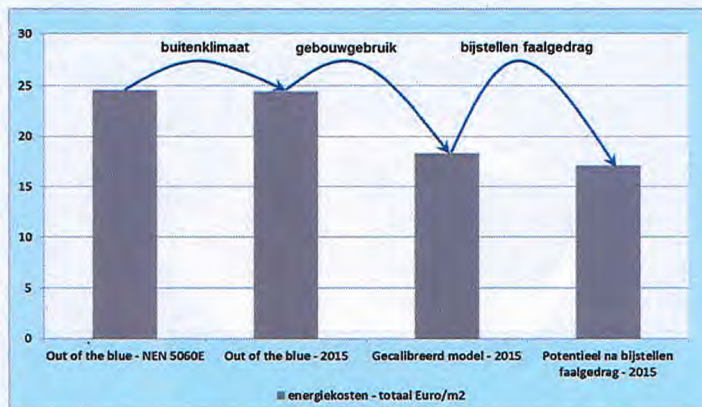
In de bijlage "Energiekosten-garanderen-in-prestatiecontracten" is de impact van het (bijstellen van) het faalgedrag op de totale energiekosten weergegeven. Daarnaast is de impact op de warmte- en koudevraag weergegeven. Het resultaat is samengevat in Figuur 16 en Figuur 17. Hieruit blijkt dat het geconstateerde faalgedrag de grootste impact heeft op de warmte- en koudevraag. Ten opzichte van de 'out-of-the-blue' variant heeft het gebouwgebruik echter een veel grotere impact op de totale energiekosten dan het geconstateerde faalgedrag. Dat benadrukt het belang van het toepassen van de juiste gebruikersprofielen voor prestatiecontracten (werkpakket 3).

De tweede casus, zoals geanalyseerd door DWA, heeft geleid tot vergelijkbare conclusies. De afwijkingen tussen de metingen en simulaties zijn geanalyseerd, dit in relatie tot het faalgedrag, gebruikersgedrag en de beperkingen van het simulatiemodel. Faalgedrag betreft met name de bedrijfstijden van de luchtbehandeling (net als in casus 1). Ook bij deze casus blijkt dus dat de automatische werking van de installatie een belangrijke factor is in het faalgedrag van de installatie. Hierbij moet worden opgemerkt dat de opwekking van energie buiten de analyse viel, dit omdat hier geen data van beschikbaar was. Net als bij de 1<sup>e</sup> casus blijkt echter ook dat de gebruikersprofielen een grotere impact hebben dan het faalgedrag. Het gebruikersgedrag komt verder tot uitdrukking in het gebruik van de ruimtethermostaat. Dit gedrag is uitgemiddeld in het model opgenomen en dit vormt een beperking in de analyse van de impact hiervan. Verdere beperkingen van het simulatiemodel betreffen het deellastgedrag van de installatie. In werkelijkheid kan de installatie tot een bepaald minimum debiet terug regelen, in het simulatiemodel is geen ondergrens voor energielevering opgenomen.

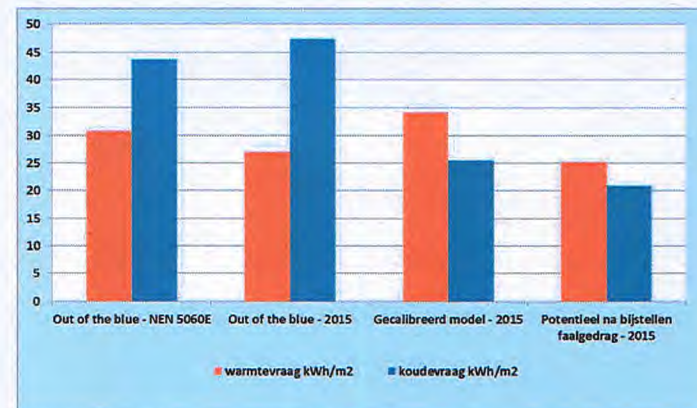
Corresponderende bijlage

Notitie DWA "Detectie en diagnose van het faalgedrag" (vertrouwelijk)

Artikel DWA "Energiekosten garanderen in prestatiecontracten" VVplus juli 2017



Figuur 16 Impact gebouwgebruik en faalgedrag op totale energiekosten (bron: DWA)



Figuur 17 Impact gebouwgebruik en faalgedrag op warmte- en koudevraag (bron: DWA)

#### Discussie, conclusie en aanbevelingen

Voor het vormgeven van prestatiecontracten is gebleken dat kennis van de bezettingsgraad en gebouwgebruik essentieel zijn voor het maken van goede prognoses. In het geval van het casusvoorbeeld was het verschil tussen de geprognosticeerde werkelijke energiekosten als gevolg hiervan ruim 6 euro/m<sup>2</sup>. De uitdaging bij het vooraf maken van prognoses is met name om grip te krijgen op het elektraverbruik van apparatuur en verlichting, en daarmee op de interne warmtelast. Voor prestatiecontracten, die uitgaan van stadswarmte of -koude, komen er extra onzekerheidsfactoren bij, namelijk het buitenklimaat en het faalgedrag van de werktuigkundige installatie. Faaldiagnose biedt kansen om prestaties en energiekosten bij te sturen tijdens de exploitatie. Met faaldiagnose kon in het voorbeeld van de casus 1 - 2 euro/m<sup>2</sup> worden bespaard op 'out-of-the-pocket'-kosten van de totale energierekening.

Bovenstaande conclusies zijn geldig voor gebouwen met een goede gebouwschil en energiezuinige opwekking van warmte en koude. Grofweg kan men zeggen: voor gebouwen die voldoen aan een EPC-eis van de laatste 5 jaar. Voor oudere gebouwen is de warmtevraag een veel grotere factor en heeft het faalgedrag en het buitenklimaat naar verwachting een veel grotere impact op de totale energiekosten. Een verdere beperking van de analyse ligt in het feit dat er in de onderzochte casussen geen gebruik wordt gemaakt van natuurlijke ventilatie. Voor het toepassen van prestatiecontracten op gebouwen met natuurlijke ventilatie is nader onderzoek vereist.

#### 4.3.3 Simulaties van faalgedrag in distributie en afgifte

##### Samenvatting

Met metingen op uurlijkse basis geven Hysopt-simulaties een benchmark om faalgedrag middels afwijkende temperatuurverschillen en debieten te signaleren. Verder is het mogelijk om met Hysopt faalgedrag in het hydraulische circuit door rekenen en middels de zogenoemde 'characteristic signatures' de impact op het energiegebruik te analyseren. Voorlopig ontbreken modules voor luchtbehandeling in Hysopt. Zolang dat het geval is, kunnen benchmarkwaarden voor het temperatuurverschil en debiet ook afgeleid worden op basis van ISSO 44. Dit is een voorlopig alternatief, dat vooral bij (zeer lage) deellast minder nauwkeurige resultaten oplevert.



### Inleiding en doelstelling

In deze taak zijn simulatiemodellen van distributie en afgifte verder uitgedetailleerd op basis van de regelstrategieën en hydraulische schema's. Centraal staan hierbij de volgende vragen:

- Hoe accuraat kunnen de modellen temperatuurverschillen en debieten voorspellen?
- Kunnen uit de simulaties benchmarkwaardes voor temperatuurverschillen over distributienetten afgeleid worden op basis waarvan faalgedrag gedetecteerd kan worden?
- Wat is de impact van faalgedrag in het hydraulische circuit op het energiegebruik?

### Werkwijze

In het projectvoorstel wordt melding gemaakt van het gebruik van TRNSYS als simulatieomgeving. TUE heeft een verkenning uitgevoerd naar geschikte simulatiepakketten. Conclusie is dat TRNSYS zeer beperkt bruikbaar is voor simulatie van het in kaart gebrachte faalgedrag (wp 4.1). Dymola en Hysopt zijn de aangewezen pakketten voor de gestelde doelen. In de TUE-notitie zijn de mogelijkheden van de verschillende simulatiepakketten voor de verschillende vormen van faalgedrag verder uitgewerkt. Om meer eenvoudig af te leiden benchmarkwaardes te ontwikkelen, heeft DWA tevens een rekenmodel ontwikkeld op basis van ISSO-publicatie 44. DWA heeft simulaties uitgevoerd met behulp van Hysopt en het vereenvoudigde ISSO-44-model. Reden hiervoor was ook dat de luchtbehandelingskasten in de beschikbare Hysopt-versie nog niet waren opgenomen. In eerste instantie was het plan dat TUE simulaties zou uitvoeren voor luchtbehandelingskasten, dit met behulp van Dymola. Dit heeft geen praktisch toepasbare resultaten opgeleverd, onder meer omdat systemen voor warmteterugwinning niet standaard zijn opgenomen in de libraries van Dymola.

| ISSO 44                                                              | Hysopt                                                                                                                  |
|----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ontwerpmethode voor hydraulische schakelingen voor verwarmen         | Hydronic System Optimization software                                                                                   |
| Vollast en deellast                                                  | Vollast en deellast                                                                                                     |
| Gestandaardiseerde modules voor opwekkers, distributie en gebruikers | Gestandaardiseerde modules voor opwekkers, distributie en gebruikers worden gekoppeld aan gebouwprestatiesimulatiemodel |
|                                                                      | Beoordeling van energieverbruik, thermisch comfort en regeling van de ontworpen installatie                             |
| Statische methode                                                    | Tijdstap simulatie = 15 minuten                                                                                         |

Figuur 16 Vergelijking methode op basis van ISSO 44 versus Hysopt (bron DWA)

|        | Corresponderende bijlage                                             |
|--------|----------------------------------------------------------------------|
| WP 4.3 | Notitie TUE Comparison of HYSOPT TRNSYS and Dymola for TRECO project |
|        | Notitie TUE Use of Dymola for AHU FDD                                |

### Resultaten

Er is veel geïnvesteerd in validatie van de uitgevoerde simulaties (conform het 'towards real'-karakter van TRECO-Office). Op basis van data van één van de case-studies is een vergelijking gemaakt tussen de uitkomsten van het ISSO-44-model, het HYSOPT-model en gemeten waarden. De vergelijking betreft temperatuurverschillen en debieten over het distributienet.

De vergelijkende studie tussen het rekenmodel gebaseerd op ISSO 44 en het simulatiemodel Hysopt laat zien dat Hysopt beter in staat is complex gedrag van de installatie te berekenen dan ISSO 44. Hysopt biedt uitgebreidere mogelijkheden om eigenschappen van de installatie, zoals de pompregeling en de kleppen, te specificeren. De mogelijkheden voor het simuleren van faalgedrag zijn dan ook aanzienlijk groter. Het vereenvoudigde model van de hydraulische installatie in Hysopt rekent snel en geeft de benchmarks van temperatuurverschillen en volumestromen als functie van het geleverd

vermogen. Door het ontbreken van een mogelijkheid om warmteterugwinning te simuleren is Hysopt nog niet geschikt voor het doorrekenen van luchtbehandelingssystemen.

HYSOPT-simulaties zijn ook toegepast voor het simuleren van faalgedrag.

Om de impact van het faalgedrag in het hydraulisch circuit op het energiegebruik te bepalen, zijn zogenaamde characteristic signatures afgeleid voor de verschillende simulatievarianten (zie voor een toelichting hiervan: werkpakket 4.4).

De volgende vormen van faalgedrag zijn onderzocht:

- Afwijkingen in de regelstrategie (automatische werking): stooklijnen
- Afwijkingen in de hydraulische eigenschappen van het systeem (zogenaamde Kv-waardes van kleppen)

Van het gesimuleerde faalgedrag heeft de wijziging van de stooklijnen het meest impact op de temperatuurverschillen en debieten. De impact op het energiegebruik was in de doorgerekende casus beperkt.

|        | Corresponderende bijlage                                                          |
|--------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| WP 4.3 | Notitie DWA Simulatie hydraulische schakelingen ISSO 44 en Hysopt (vertrouwelijk) |

### Discussie, conclusie en aanbevelingen

Met behulp van Hysopt is het mogelijk temperatuurverschillen en debieten van het hoofddistributienet accuraat genoeg te simuleren en de impact van mogelijk faalgedrag inzichtelijk te maken. De beperkingen zitten vooral in de benadering van de minimum-vraag van het distributienet en de tijdschaal van beschikbare meetgegevens (uurlijkse waardes). Om de nauwkeurigheid verder te verhogen, is het noodzakelijk de analyse naar kleinere tijdschalen uit te breiden.

Er is uitgegaan van een vereenvoudigd model in Hysopt, dit vanuit het oogpunt van praktische toepasbaarheid. Aan de hand van het casusvoorbeeld kan dat als volgt toegelicht worden. In het vereenvoudigde model is uitgegaan van één zone waaraan warmte of koude wordt afgegeven. In de werkelijke situatie bestaat het kantoorgebouw uit ruim 100 ruimtes met bijbehorende vloervelden met een variërende warmte- en koudevraag, die worden geregeld met een toerengeregelde pomp en open/dicht-kleppen. Dit verklaart hoogstwaarschijnlijk de afwijkingen tussen metingen en simulaties in subcircuits van het hydraulische systeem.

Daarnaast zijn de metingen alleen voor weekenddagen geanalyseerd (luchtbehandeling uit bedrijf). Omdat op deze dagen het kantoorgebouw niet in gebruik is, is de warmte- en koudevraag (zeer) beperkt. Dit betekent dat er wordt gekeken naar minimale deellastsituaties, waarin de regeling meer fluctueert. De meetgegevens op uurlijkse basis geven hierdoor mogelijk ook een vertekend beeld in vergelijking met de simulaties.

Voor een volledige analyse van temperatuurverschillen en debieten over distributienetten is het noodzakelijk dat de geavanceerde simulatiepakketten zoals Hysopt en Dymola doorontwikkeld worden, zodanig dat ook luchtbehandelingskasten met warmteterugwinning doorgerekend kunnen worden. De methode op basis van ISSO 44 geeft hierbij voorlopig een alternatief voor het afleiden van benchmarkwaardes voor temperatuurverschillen over distributienetten.



#### 4.3.4 Ontwikkeling faaldiagnoseparameters

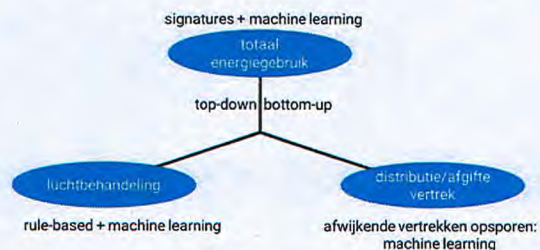
| Nr.  | Titel / omschrijving                             |
|------|--------------------------------------------------|
| D4.4 | In de praktijk toepasbare faaldiagnoseparameters |

##### Samenvatting

De volgende faaldiagnoseparameters zijn geïntroduceerd en onderzocht (figuur 18):

- Top-down:
  - o calibration en characteristic signatures
    - deze aanpak biedt een methode om, in aanvulling op de maandelijkse vergelijking in het TRECO-Office dashboard, de afwijkingen tussen metingen en simulaties systematisch te analyseren;
  - o afwijking tussen het door machine learning algoritmes voorspelde energiegebruik en het gemeten energiegebruik.
- Bottom-up: temperaturen en stuursignalen voor kleppen van distributie- en afgiftesystemen. Deze parameters zijn als input gebruikt voor
  - o rule-based monitoring;
  - o toepassing van machine learning algoritmes, met als resultaat een prototype van een diagnosesysteem voor luchtbehandelingskasten.

De combinatie van top-down + bottom-up aanpak is noodzakelijk om de stap van detectie naar diagnose te kunnen maken.



Figuur 18 Combinatie van top-down met bottom-up faaldiagnose zorgt voor een extra robuust concept (bron: DWA)

##### Inleiding en doelstelling

De doelstelling van werkpakket 4 als totaal is: Ontwikkeling van faaldiagnosesystemen die gericht de installatie-specifieke oorzaken van afwijkingen in het energiegebruik kunnen detecteren. Er wordt gebruik gemaakt van zowel simulaties als van slimme monitoring op basis van praktijkdata (citaat projectplan). Na het in kaart brengen van het faalgedrag -generiek en in praktijkcases, wordt in dit deelwerkpakket 4.4 onderzocht welke faaldiagnoseparameters in de praktijk toegepast kunnen worden. CV- en GKW-netten met temperaturen en klepstanden van afgiftesystemen bevatten veel informatie over het (faal)gedrag van installaties, echter het is vrij complex om een verband te leggen met het totale energiegebruik van een pand. Dat laatste onderwerp vormt met name de focus van TRECO-Office. De uitdaging van dit werkpakket is om faaldiagnosesystemen te ontwikkelen die beide abstractieniveaus in de analyse betrekken. De tweede uitdaging is het in de praktijk toepasbaar maken.

##### Werkwijze

In de literatuur voor Fault Detection and Diagnosis (FDD) zijn twee hoofdlijnen zichtbaar.

- Top-down aanpak/whole building fault detection.
  - 'Whole building fault detection' vergelijkt het totale energiegebruik (gas, elektriciteit, gekoeld water) om de energie-efficiency van het gebouw te beoordelen. Van 'building level' wordt een beweging gemaakt richting 'component level'.
- Bottom-up aanpak. In de bottom-up aanpak is het componentniveau het basisuitgangspunt en is de beweging omgekeerd. Vanuit 'component level' wordt gewerkt richting 'building level'.

In TRECO-Office zijn voor beide niveaus instrumenten ontwikkeld (top-down en bottom-up vanuit de componenten).

In samenhang met de andere werkpakketten heeft DWA een totaalconcept voor TRECO-Office ontwikkeld (zie figuur 19). Hierin is diagnose van het faalgedrag zowel onderdeel van het monitoringssysteem als van het simulatiemodel.

De 'top-down'-aanpak heeft voornamelijk betrekking op het gebruik van de simulatiemodellen. De faaldiagnose op componentniveau vindt hoofdzakelijk plaats in het deel 'monitoring'.

Voor de 'top-down' faaldiagnoseparameters heeft DWA gebruikgemaakt van zogenoemde characteristic signatures (Figuur 20). Hierin worden de uitkomsten van simulatievarianten met elkaar vergeleken en uitgezet tegen de buitentemperatuur. Door verschillende vormen van faalgedrag door te rekenen, wordt voor elke vorm van mogelijk faalgedrag een 'characteristic signature' verkregen. De 'calibration signature' geeft een vergelijking tussen de metingen en berekeningen. Door 'calibration signature' te vergelijken met de 'characteristic signature', kan blijken welke vorm van faalgedrag mogelijk verantwoordelijk is voor de afwijking tussen metingen en simulaties.

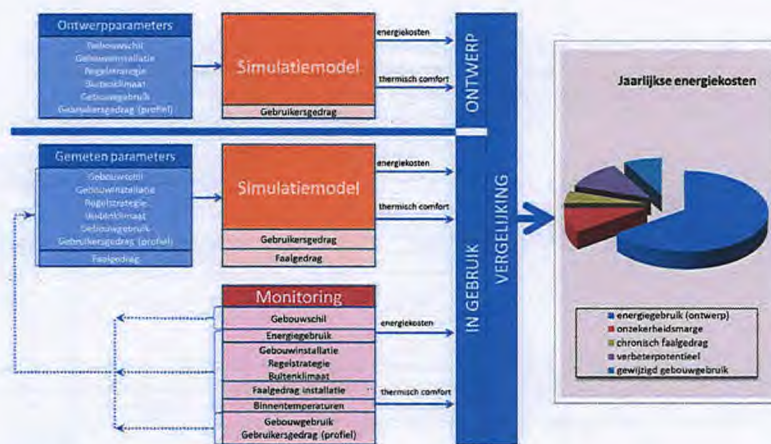
Daarnaast heeft DWA een verkenning uitgevoerd naar de toepasbaarheid van een methode zoals ontwikkeld door Lin&Claridge [1]. Dit concept is een verdere uitwerking van het 'signatures'-concept om faalgedrag op te sporen. Dit is echter niet verder uitgewerkt, omdat de methode niet duidelijk beschrijft hoe deze in de praktijk toegepast kan worden. Verder is de methode beperkt door de sterke focus op de buitentemperatuur en dat naar aanleiding van een periode van slechts 20 dagen. De warmte- en koudevraag zijn sterk afhankelijk van de buitentemperatuur, en daarom zeer beperkt te evalueren op basis van zo'n korte 'base-line' periode. Voor de verdere uitwerking heeft DWA daarom de toepasbaarheid van machine learning onderzocht voor het analyseren van het totaalverbruik. Met behulp van machine learning algoritmes is het mogelijk de invloed van diverse parameters integraal mee te nemen (buitentemperatuur, zonnestraling, bewolkingsgraad etc.).

In de FDD-literatuur wordt verder vaak onderscheid gemaakt tussen (Katipamula et al. (2005)):

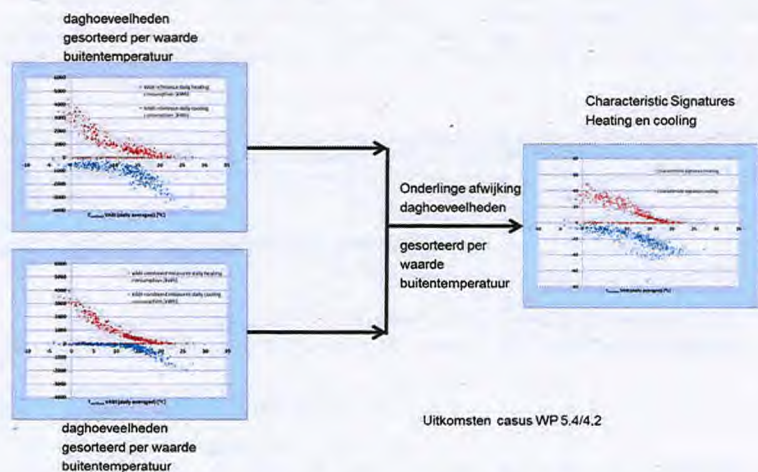
- Quantitative Model-based diagnosis
- Qualitative Model-based diagnosis
  - o Een mogelijk vorm hiervan is 'Rule-based monitoring'
- Process History Based

Voor monitoring op component niveau heeft DWA gebruik gemaakt van zowel rule-based monitoring als proces history based monitoring (machine learning). TUE heeft voor luchtbehandelingskasten tests uitgevoerd met de zogenoemde APAR-rules.





Figuur 19. Totaalconcept TRECO-Office (bron: DWA)



Uitkomsten casus WP 5.4/4.2

Figuur 20 Vergelijking tussen simulatievarianten geeft een zogenoemde 'Characteristic Signature' (bron: DWA)

## Resultaten

Het concept van de signatures is getest aan de hand van praktijkdata van de casussen zoals geanalyseerd door DWA in werkpakket 4.2. In één casus is er sprake van een bekende afwijking (de bedrijfstijd van de luchtbehandelingskast). Tevens is er data beschikbaar van de periode na bijstelling van de bedrijfstijd. De volgende vragenstellingen zijn onderzocht:

- Hoe robuust zijn signatures door jaren heen? Dat bleken ze inderdaad te zijn. Tevens geeft dit inzicht in de onnauwkeurigheidsmarge van de simulaties.
- Kunnen met de signatures (bekende) afwijkingen gedetecteerd worden? De signatures lieten duidelijk afwijkend gedrag in het weekend zien. Voor de verdere diagnose van de installatie-specifieke oorzaak is het nodig om verder door te steken naar het componentniveau (bottom-up approach). Het detecteren van de (bekende) afwijkende bedrijfstijd van de luchtbehandelingskast met behulp van signatures bleek complexer dan gedacht. De impact op het totale gebruik voor warmte en koude van deze afwijking is van dezelfde orde van grootte als de onnauwkeurigheidsmarge van de simulaties. De impact op het elektriciteitsverbruik is ook onderzocht, niet alleen op basis van de signatures, maar tevens met behulp van een getraind machine learning algoritme. Dat laatste bleek een goed alternatief te zijn voor het gebruik van de signature. Uit de resultaten van het algoritme bleek de impact op het totale elektraverbruik kleiner dan gedacht op basis van het simulatiemodel. Oorzaak hiervan is waarschijnlijk dat de luchtbehandelingskast tijdens deeltijdbedrijf bij opstart aanzienlijk minder energie vraagt dan tijdens het aangenomen vollastbedrijf in het simulatiemodel. Algemeen geldt dat faalgedrag met een relatief kleine impact op het totale energiegebruik "verdwijnt" in de onnauwkeurigheidsmarge van de simulaties/algoritmes. Dat beperkt de mogelijkheden voor detectie en diagnose. De positieve keerzijde hiervan is dat faalgedrag met een beperkte impact ook minder aandacht behoeft in het kader van een afgesproken energieprestatie.

De "bottom-up" approach van DWA heeft de volgende resultaten opgeleverd:

- Een prototype van een diagnosesysteem voor luchtbehandelingskasten met warmteretrouwwinning, dit op basis van machine learning. Ten opzichte van de rule-based approach biedt dit de nodige voordelen. Er hoeven geen aannames gedaan te worden voor opwarming van de ventilator en andere moeilijk te modelleren factoren zoals de bijdrage van bevochtiging. Voorwaarde is wel dat er een 'fault-free' dataset nodig is die representatief is voor de betreffende luchtbehandelingskast.
- Een 'proof-of-principle' van het detecteren van afwijkende vertrekken in een gebouw met behulp van machine learning. Dit biedt perspectief voor gebouwen met mogelijkheden tot persoonlijke beïnvloeding middels ruimtethermostaten. De vele ruimtethermostaten en bijbehorende setpoints bepalen het in- en uitschakelen van de warmte- en koudevraag. Met behulp van machine learning is het mogelijk afwijkende vertrekken te detecteren die 'hardnekkig' blijven vragen om warmte of koude. Om dit 'proof-of-principle' verder uit te werken tot 'prototype', is aanvullend onderzoek noodzakelijk. Een voorwaarde voor deze aanpak is de beschikbaarheid van voldoende data van de individuele vertrekken.

|        | Corresponderende bijlage                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|--------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| WP 4.4 | Notitie TUE Rule-based FDD approach for AHU's<br>Notitie DWA Top-down faaldiagnose met behulp van signatures (vertrouwelijk)<br>Notitie DWA Top-down faaldiagnose met behulp van machine learning (vertrouwelijk)<br>Notitie DWA Bottom-up faaldiagnose: rule-based + machine learning (vertrouwelijk) |

## Discussie, conclusie en aanbevelingen

Meerdere vormen van faalgedrag kunnen verantwoordelijk zijn voor een gedetecteerde afwijking. In de "top-down"-aanpak zit de beperking in het volgende: faalgedrag met een relatief kleine impact op het totale energiegebruik "verdwijnt" in de onnauwkeurigheidsmarge van de simulaties/algoritmes. "Bottom-up" zit de beperking in het feit dat het moeilijk te bepalen is of een afwijking impact heeft op het totale energiegebruik van een pand. De combinatie van 'top-down' en 'bottom-up' zorgt hier voor een krachtige aanpak. Met het toepassen van machine learning is in dit werkpakket een belangrijke vernieuwende stap gezet. Aanbevolen wordt om de mogelijkheden hiervan verder uit te werken in een mogelijk vervolgetraject. De model-based approach blijft noodzakelijk, omdat toepassing van machine learning voldoende historische data vraagt om een oordeel te kunnen vellen. In de 'top-down' benadering is machine learning op gebouwniveau bovendien voorlopig nog beperkt doordat er geen sprake is van een onafhankelijke benchmark. De 'status-quo' wordt getraind, dit in



plaats van gewenste situatie. Simulatiemodellen kunnen, afgezien van de onnauwkeurigheidsmarge, wel een benchmark geven voor de gewenste situatie. Een aanbeveling voor de ontwikkeling van simulatiemodellen betreft de modellering van het elektriciteitsverbruik. Voor veel processen in het gebouw (tapwater, liften, parkeergarages, pompenergie en ventilatoren) worden soms (sterk) vereenvoudigde modellen gebruikt, althans in de toegepaste software binnen werkpakket 4.4 (VABI Elements). Dit beperkt de mogelijkheden voor het toepassen van model-based faaldiagnose op basis van het elektriciteitsverbruik.

#### Literatuur

- [1] Lin, G., Claridge, D.E. A temperature-based approach to detect abnormal building energy consumption. Energy and Buildings, 93 (2015).
- [2] Methods for Fault Detection, diagnostics, and Prognostics for building Systems - A review, Katipamula, S., Brambley, M.R. Part I. HVAC&R Research, Volume 11, nr. 1, 2005.
- [3] Methods for Fault Detection, diagnostics, and Prognostics for building Systems - A review, Katipamula, S., Brambley, M.R. Part II. HVAC&R Research, Volume 11, nr. 2, 2005.

#### 4.3.5 Reken- en dataverwerkingsmethodes faaldiagnose

##### Samenvatting

Dit deelwerkpakket heeft als resultaat een set van praktische aanbevelingen voor het toepassen en verwerken van uurlijkse data. Voor energieprestatiecontracten is het aan te bevelen de datavoorziening en opslag goed te waarborgen. Verder is het van belang kwaliteitscriteria voor het toepassen van machine learning in een mogelijk vervolg verder uit te werken voor de installatiesector.

##### Inleiding en doelstelling

Voor de implementatie van de faaldiagnoseparameters in de praktijk is het belangrijk te weten hoe data bewerkt moet worden. In de gehanteerde monitoringssystemen in werkpakket 4 is gewerkt met uurlijkse gegevens. Dat brengt een aantal beperkingen met zich mee. Doel van dit deelwerkpakket is inzicht te geven hoe met deze beperkingen kan worden omgegaan en welke knelpunten in de praktijkcases opgetreden zijn. Tevens wordt inzicht gegeven in de mogelijkheden die machine learning biedt voor het verwerken van data.

##### Werkwijze

Dit deelwerkpakket is uitgevoerd door DWA. Er is gekozen voor een praktische uitwerking. Aan de hand van de ervaringen met de casusdata wordt in kort bestek inzicht gegeven in de pre-processing van data (van minutenwaardes naar uurlijkse waardes). In combinatie met een korte introductie van machine learning wordt aangegeven hoe de resultaten van machine learning praktisch verwerkt kunnen worden en welke aandachtspunten er bij toepassing gelden.

##### Resultaten

De resultaten zijn beschreven in een notitie als bijlage bij dit rapport.

|        |                                                                   |
|--------|-------------------------------------------------------------------|
|        | Corresponderende bijlage                                          |
| WP 4.5 | Notitie DWA Processing van data voor faaldiagnose (vertrouwelijk) |

##### Discussie, conclusie en aanbevelingen

Voor pre-processing zijn de volgende zaken van belang:

- Voor het weergegeven van de data in grafieken is het belangrijk filters toe te passen, zodanig dat alleen die data worden weergegeven wanneer het desbetreffende systeem in bedrijf is.
- Bij de vertaling van minutenwaardes naar uurlijkse data wordt de informatie van het dynamisch gedrag binnen het betreffende uur uitgemiddeld. Dat is een belangrijke kanttekening bij het

interpreteren van de data. Voor een deel kan dit ondervangen worden door de eerdergenoemde datafilters zodanig in te richten dat de opstart- en afschakelfase van componenten er uit gefilterd wordt.

- In de huidige monitoringspraktijk blijkt dat het wegvallen van data een belangrijk knelpunt is. Het opslaan van trenddata is slechts voor deel 'common practice'. De primaire data wordt vaak lokaal op hardware van gebouwbeheersystemen opgeslagen. In verband met beperkte data-buffers van die systemen gaat in de praktijk onnodig data verloren. Verwacht wordt dat dit een tijdelijk probleem is, opslag in de cloud is een voor de hand liggende oplossing. Voor energieprestatiecontracten is het echter aan te bevelen om clausules op te nemen die de primaire brondata en trending veiligstellen. Verder is het van belang het functioneren van bemetering te testen. Een praktisch aandachtspunt hierbij is het weergeven van eenheden. Te vaak wordt in de monitoringssoftware energiehoeveelheden weergegeven als GJ, dit zonder cijfers achter de komma. Op een kleine tijdschaal gaat dan veel waardevolle informatie verloren.

Machine learning biedt verder mogelijkheden om grote hoeveelheden data te analyseren en complexe verbanden af te leiden. Bij toepassing ervan is het van belang oog te hebben voor de volgende aspecten:

- Resultaten mogen niet alleen beoordeeld worden op de trainingset. De prestaties van een algoritme dienen minimaal beoordeeld te worden met zogenoemde cross-validation.
- Om mogelijke 'overfitting' te voorkomen wordt een algoritme bij voorkeur ook getest op een onafhankelijke dataset. Een getraind model dat last heeft van overfitting presteert slechter in nieuwe situaties (zoals vastgelegd in een testdataset).
- Een éénzijdig samengestelde dataset kan uitmuntende prestaties van een algoritme suggereren. Onder andere omstandigheden kan dit heel anders uitpakken. Voldoende diversiteit in de invoerdata is daarom belangrijk.
- Aanbevolen wordt om aanvullende kwaliteitscriteria voor de installatiesector in een mogelijk vervolg verder uit te werken. Als verdere praktische aanbeveling geldt dat het belangrijk is om de resultaten van algoritmes in grafieken uit te zetten en op deze wijze steekproefsgewijs te inspecteren (post-processing).



#### 4.4 Rekenmodellen, simulaties en gebruikersgedrag (TUE)

Deze paragraaf geeft een toelichting op:

- Overzicht taken en deliverables WP5
- Onderzoeksproces en de eindproducten
- Belangrijkste conclusies t.a.v. werkzaamheden en resultaten per taak van WP5.

Conform het projectplan kent werkpakket 5 onderstaande taken:

- 5.1 Onderzoek bestaande modellen
- 5.2 Onderzoek naar factoren die modelkeuze beïnvloeden
- 5.3 Onderzoek naar invloed van onzekerheden
- 5.4 Casestudies

| Nr.  | Titel/omschrijving                                                                                                   | Bijbehorende taak/ taken                           |
|------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| DS.1 | Een overzicht en kritische analyse van de huidige methoden om gebouwprestaties en gebruikersinvloeden te modelleren. | Onderzoek bestaande modellen                       |
| DS.2 | Kennis om de keuze voor een gebouwmodel te ondersteunen.                                                             | Onderzoek naar factoren die modelkeuze beïnvloeden |
| DS.3 | Kennis over de invloed van model onzekerheden in de berekende energieprestatie.                                      | Onderzoek naar invloed van onzekerheden            |
| DS.4 | Kennis over invloedrijke parameters uit praktijk cases.                                                              | Casestudies                                        |

##### 4.4.1 Onderzoek bestaande modellen

###### Samenvatting

Er is een uitgebreid literatuuronderzoek uitgevoerd naar de verschillende bestaande modellen om gebruikersinvloeden in gebouwprestatiesimulatie mee te nemen. De modellen zijn onder andere gecategoriseerd naar het type gedrag dat wordt gemodelleerd (openen van ramen, setpoints van verwarming, gebruik verlichting, etc.) en de complexiteit van het model. Het literatuuronderzoek geeft een goed beeld van de bestaande modellen om gebruikersinvloeden te modelleren. De resultaten bevestigen echter ook dat het noodzakelijk is om per casestudie te onderzoeken welke modelcomplexiteit nodig is om zo onnodige onzekerheden in de berekende resultaten te voorkomen: een zogenaamde 'fit-for-purpose' modelkeuze is noodzakelijk. In WP 5.2 wordt onderzocht welke factoren deze 'fit-for-purpose' modelkeuze beïnvloeden.

###### Inleiding en doelstelling

Het doel van deze taak is om een overzicht te geven van de bestaande en meest relevante methoden om gebruikersinvloeden op gebouwprestaties te modelleren.

###### Werkwijze

Er is een (literatuur)onderzoek uitgevoerd om de voor- en nadelen in kaart te brengen van de bestaande methoden om gebruikersinvloeden te modelleren. In het onderzoek wordt onder andere aangegeven hoe de methoden van elkaar verschillen, bijvoorbeeld modelresolutie, complexiteit en toepassingsgebied.

###### Resultaten

Er is een uitgebreid literatuuronderzoek uitgevoerd naar de verschillende bestaande modellen om gebruikersinvloeden in gebouwprestatiesimulatie mee te nemen. De modellen zijn onder andere gecategoriseerd naar het type gedrag dat wordt gemodelleerd (openen van ramen, setpoints van verwarming, gebruik verlichting, etc.) en de complexiteit van het model. In tabel 8 wordt een overzicht

gegeven van de meest gebruikte modeltypen om gebruikersinvloeden te modelleren. In het voortgangsrapport 'Review of existing occupant behavior models' van januari 2016 (T5.1 – R1) worden deze modeltypen uitgebreid beschreven en is een overzicht te vinden van ca. 60 verschillende modellen die te vinden zijn in de literatuur.

Tabel 8: Overzicht van de meest gebruikte type modellen om gebruikersinvloeden te modelleren en de bijbehorende modelresolutie en modelcomplexiteit (van laag naar hoog).

| Simulation framework | Type of model            | Size | Resolution | Complexity |
|----------------------|--------------------------|------|------------|------------|
| Conventional         | Schedules                | •    | •          | •          |
|                      | Deterministic            | •    | ↑          | ↑          |
|                      | Non-probabilistic        | •    | ↑          | ↑          |
|                      | Probabilistic/stochastic | •    | ↑↑↑        | ↑↑↑        |
| Agent-based          | Agent-based stochastic   | ↑↑↑  | ↑↑↑        | ↑↑↑↑↑↑↑↑   |

In de literatuur wordt aangenomen dat een verkeerde modelkeuze kan leiden tot onnodig grote onzekerheden in de berekende resultaten. In dit onderzoek is daarom onderzocht of er in de literatuur aanbevelingen worden gedaan voor de keuze van een bepaald modeltype. Uit de resultaten blijkt dat het echter niet eenduidig is welk modeltype moet worden gebruikt. Het ene onderzoek geeft de voorkeur aan complexe modellen, terwijl het andere onderzoek de voorkeur geeft aan eenvoudigere modellen (zie tabel 9). Hierbij moet echter worden opgemerkt dat de onderzoeken niet zijn gebaseerd op hetzelfde gebouw, verder is ook het doel van de simulatie (aim of simulation) verschillend per onderzoek. Dit laat zien dat de keuze voor een modeltype sterk afhankelijk kan zijn van de casestudie (het gebouw, de gebruiker en de te onderzoeken KPI). In dit onderzoek wordt daarom voorgesteld om per casestudie te bepalen welk modeltype het meest geschikt is (ook wel 'fit-for-purpose' genoemd); in Taak 5.2 wordt hier verder op ingegaan. Naast het eerdergenoemde voortgangsrapport zijn de resultaten van deze taak ook gepubliceerd in het journal artikel 'Occupant behavior in building energy simulation - Towards a fit-for-purpose modeling strategy' (T5.1 – R2).



Tabel 9: Vergelijking van het gebruik van verschillende type modellen in de literatuur. Het vinkje (✓) geeft aan welk type model de voorkeur heeft in het genoemde onderzoek.

| Author(s) year [Ref.]      | Type of behavior                           | Aim of simulation; performance indicator; building typology                                                      | Models considered for comparison |                   |                                       |                                     |
|----------------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|-------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|
|                            |                                            |                                                                                                                  | Schedules                        | Non-probabilistic | Probabilistic                         | Agent-based                         |
| Mahdavi and Tahmasebi [16] | Occupancy                                  | Systems control; daily occupancy profile; (single, semi-closed, open-plan) Office                                |                                  | ✓                 | ×                                     |                                     |
| Tahmasebi et al. [68]      | Occupancy, lighting and plug-loads         | Annual and peak energy demand for heating and cooling; Office                                                    | ✓                                |                   | ✓                                     |                                     |
| Duarte et al. [2]          | Occupancy                                  | Daily occupancy profile; (single, open-plan) Office                                                              | ×                                | ✓                 | ×                                     |                                     |
| D'Oca et al. [58]          | Window opening and thermostat adjustment   | Design; energy demand for heating; household                                                                     | ×                                |                   | ✓                                     |                                     |
| Langevin et al. [59]       | User behavior                              | Energy demand and thermal acceptability; Office                                                                  | ×                                |                   |                                       | ✓                                   |
| Chapman et al. [55]        | User behavior                              | Design; energy demand; Office and household                                                                      | ×                                |                   |                                       | ✓                                   |
| Azar and Menassa [41]      | Blinds regulation, lighting/equipment, DHW | Electric/gas demand; university                                                                                  | ×                                |                   |                                       | ✓                                   |
| Yamaguchi et al. [43]      | User behavior                              | Behavior duration, start/end time, number of transitions, probability distribution, number of different patterns |                                  |                   | ✓<br>(behavior duration, transitions) | ✓<br>(variety of behavior patterns) |

#### Discussie, conclusie en aanbevelingen

Het literatuuronderzoek geeft een goed beeld van de bestaande modellen om gebruikersinvloeden te modelleren. De resultaten bevestigen dat het noodzakelijk is om per casestudie te onderzoeken welke modelcomplexiteit nodig is: een zogenaamde 'fit-for-purpose' modelkeuze. In WP 5.2 wordt onderzocht welke factoren deze 'fit-for-purpose' modelkeuze beïnvloeden.

#### Resultaten

|           |                 |                                                                                                                                                                                    |
|-----------|-----------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| T5.1 - R1 | Rapport         | Review of existing occupant behavior models                                                                                                                                        |
| T5.1 - R2 | Journal artikel | Gaetani, I., Hoes, P., & Hensen, J. L.M. (2016). Occupant behavior in building energy simulation: Towards a fit-for-purpose modeling strategy. Energy and Buildings, 121, 188-204. |

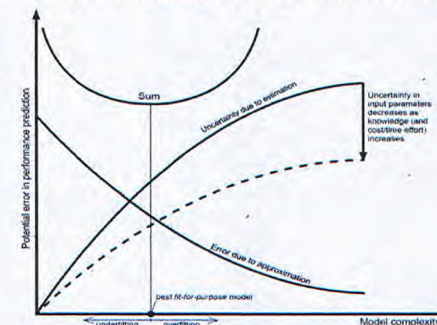
#### 4.4.2 Onderzoek naar factoren die modelkeuze beïnvloeden

##### Samenvatting

Een verkeerde modelkeuze/modelcomplexiteit kan leiden tot een model met een onnodig grote onzekerheid in de berekende resultaten en dat kan leiden tot een groot verschil tussen gemeten en gesimuleerde gebouwprestaties. Om dit verschil te verkleinen, moet onderzocht worden welk model wanneer geschikt is. Verschillende factoren kunnen de modelkeuze beïnvloeden, bijvoorbeeld het type gebouwgebruiker, bepaalde gebouw gerelateerde aspecten of te onderzoeken KPI. In deze taak is een methodologie voorgesteld en getest waarmee de invloed van deze factoren kan worden onderzocht en waarmee de keuze voor een model kan worden ondersteund. De methodologie is gebaseerd op de fit-for-purpose gedachte en maakt gebruik van verschillende gevoeligheidsanalyses. De methodologie laat de gevoeligheid van de KPI zien voor verschillende aspecten van het gebruikersgedrag (gebruik verlichting, gebruik zonwering, gebruik ramen, etc.). De hypothese is vervolgens dat de fit-for-purpose modelcomplexiteit afhangt van deze gevoeligheid. Een grotere gevoeligheid vraagt om een hogere modelcomplexiteit voor dat aspect van het gebruikersgedrag. Uit de resultaten blijkt dat de voorgestelde methodologie goed werkt en inzicht geeft in de gevoeligheid van de KPI voor de verschillende aspecten van het gebruikersgedrag.

##### Inleiding en doelstelling

Een verkeerde modelkeuze/modelcomplexiteit kan leiden tot een model met een onnodig grote onzekerheid in de berekende resultaten. Ter illustratie toont Figuur 21 een schematische weergave van de modelkeuze met de kleinste onzekerheid in de resultaten: de 'fit-for-purpose' modelkeuze. Een verkeerde modelkeuze kan leiden tot een (groot) verschil tussen gemeten en gesimuleerde gebouwprestaties. Om dit verschil te verkleinen, moet onderzocht worden welk model wanneer geschikt is. In deze taak is onderzocht welke factoren de modelkeuze kunnen beïnvloeden en of er een methodologie kan worden opgesteld waarmee de keuze voor een model kan worden ondersteund.

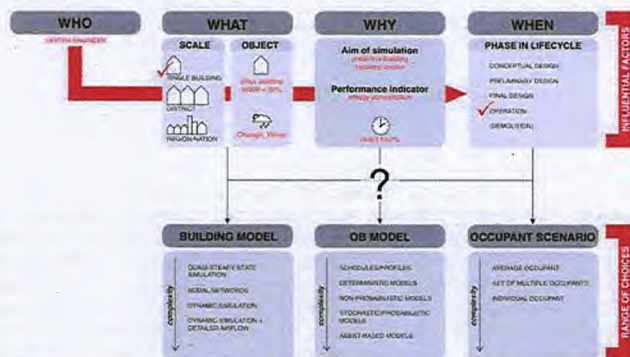


Figuur 21: Schematische weergave van de onzekerheid in de berekende resultaten vs. de model complexiteit.



## Werkwijze

Verschiede factoren kunnen de 'fit-for-purpose' modelkeuze beïnvloeden, bijvoorbeeld het type gebouwgebruiker, bepaalde gebouw gerelateerde aspecten of de onderzochte KPI. Figuur 22 geeft een overzicht van enkele van deze mogelijke invloedrijke factoren in relatie tot de modelkeuze (in de context van gebouwprestatiesimulatie). Deze relatie is nu nog onbekend (het vraagtteken). In deze taak wordt een methodologie voorgesteld en getest waarmee deze relatie kan worden onderzocht. De methodologie is gebaseerd op de fit-for-purpose gedachte en maakt gebruik van verschillende gevoeligheidsanalyses.

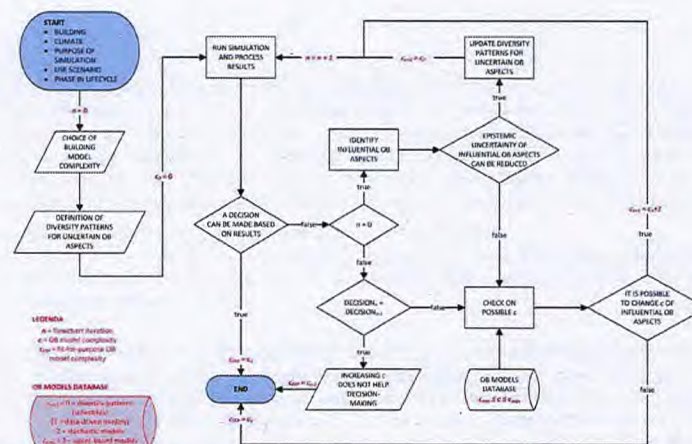


Figuur 22: Schematische weergave van de invloedrijke factoren op de modelkeuze.

## Resultaten

In het voortgangsrapport 'Research into factors influencing model choice' van januari 2016 (T5.2 – R3) is een eerste aanzet gegeven voor de zogenaamde 'fit-for-purpose occupant behavior modeling' methodologie. De voorgestelde methodologie maakt gebruik van vooraf gedefinieerde gebruikersscenario's, gebruiksprofielen en een gevoeligheidsanalyse d.m.v. de Mann-Whitney test. In de navolgende periode is de methodologie verder uitgewerkt. De resultaten van dit onderzoek zijn beschreven in het journal artikel 'On the sensitivity to different aspects of occupant behavior for selecting the appropriate modeling complexity in building performance predictions' (T5.2 – R4) en in het congres artikel 'Introducing and testing a strategy for fit-for-purpose occupant behavior modeling in a simulation-aided building design process' (T5.2 – R5). Hieronder volgt een korte samenvatting van de resultaten.

In figuur 23 is de laatste versie weergegeven van de 'fit-for-purpose occupant behavior modeling' methodologie. De methodologie onderzoekt de gevoeligheid van de KPI voor verschillende aspecten van het gebruikersgedrag (gebruik verlichting, gebruik zonwering, gebruik ramen, etc.). De hypothese is dat de fit-for-purpose modelcomplexiteit afhangt van deze gevoeligheid. Een grotere gevoeligheid vraagt om een hogere modelcomplexiteit voor dat aspect van het gebruikersgedrag. De voorgestelde methodologie is getest door middel van een experiment op 16 varianten van een referentie kantoorgebouw. Variaties zijn gemaakt in Rc-waarden van de gebouwschil, raamgrootte en het geïnstalleerde vermogen van verlichting en apparatuur (zie tabel 8). Hierbij wordt verwacht dat de verschillende gebouwvarianten een andere gevoeligheid hebben voor het gebruikersgedrag.



Figuur 23: Flowchart van de 'fit-for-purpose occupant behavior modeling' methodologie. Deze methodologie kan worden gebruikt om de keuze te ondersteunen voor een fit-for-purpose

Tabel 8: Onderzochte gebouwvarianten waarmee de fit-for-purpose methodologie is getest.

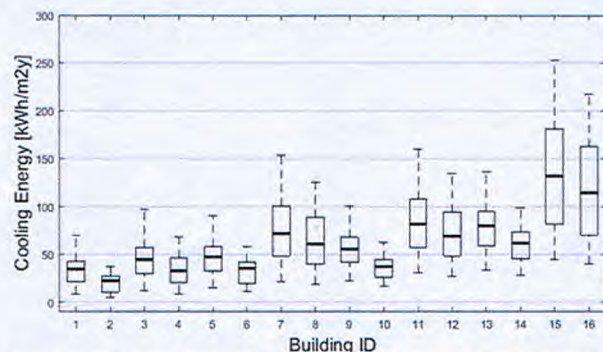
| ID | WWR [%]* | Climate   | Thermal isolation** | Power Density*** |
|----|----------|-----------|---------------------|------------------|
| 1  | 40       | Amsterdam | High                | High             |
| 2  | 40       | Amsterdam | High                | Low              |
| 3  | 40       | Amsterdam | Low                 | High             |
| 4  | 40       | Amsterdam | Low                 | Low              |
| 5  | 40       | Rome      | High                | High             |
| 6  | 40       | Rome      | High                | Low              |
| 7  | 40       | Rome      | Low                 | High             |
| 8  | 40       | Rome      | Low                 | Low              |
| 9  | 80       | Amsterdam | High                | High             |
| 10 | 80       | Amsterdam | High                | Low              |
| 11 | 80       | Amsterdam | Low                 | High             |
| 12 | 80       | Amsterdam | Low                 | Low              |
| 13 | 80       | Rome      | High                | High             |
| 14 | 80       | Rome      | High                | Low              |
| 15 | 80       | Rome      | Low                 | High             |
| 16 | 80       | Rome      | Low                 | Low              |

Where

- \* WWR window-to-wall (40% – 80%)
- \*\* Thermal isolation between indoor and outdoor, in terms of R-value (1.3 – 4 m<sup>2</sup>K/W), U-value (3 – 1.1 W/m<sup>2</sup>K), g-value (0.73 – 0.29) and visual transmittance (0.75 – 0.48)
- \*\*\* Power density for both equipment (3 – 10 W/m<sup>2</sup>) and lights (5 – 15 W/m<sup>2</sup>)

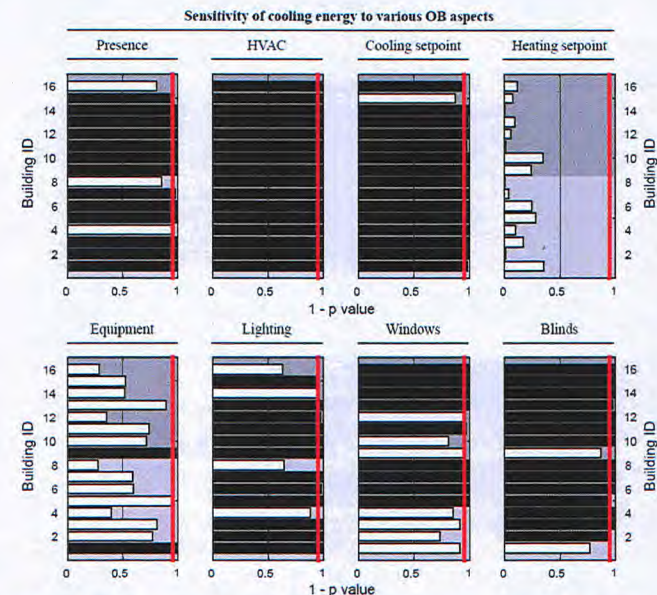
Eén van de eerste stappen in de methodologie is een eenvoudige gevoeligheidsanalyse met behulp van extreme gebruikspatronen ('Definition of diversity patterns...' en 'Run simulation...'). In Figuur 24 wordt als voorbeeld het berekende energiegebruik voor koeling weergegeven voor de 16 gebouwvarianten. De getoonde spreiding wordt veroorzaakt door de verschillende gebruikspatronen. De figuur laat zien dat de invloed van de gebruiker sterk kan variëren per gebouwvariant. Vergelijk bijvoorbeeld gebouw 13 met gebouw 15 (het enige verschil is de Rc waarde van de gebouwschil); de invloed van de gebouwgebruiker, in absolute zin, is veel groter voor gebouw 15 dan voor gebouw 13.





Figuur 24: Invloed van verschillende gebruikspatronen op het energiegebruik voor koeling voor 16 verschillende gebouwvarianten.

Indien uit de vorige stap (de eenvoudige gevoeligheidsanalyse) blijkt dat de gebruiker geen of weinig invloed heeft op de KPI, dan kan er gekozen worden voor een lage modelcomplexiteit. Als er echter nog geen duidelijke beslissing kan worden genomen, dan dient er een vervolg stap te worden genomen. De volgende stap in de methodologie is een uitgebreidere gevoeligheidsanalyse ('Identify influential OB aspects') door middel van een Mann-Whitney test. Deze gevoeligheidsanalyse laat zien welke aspecten van het gebruikersgedrag (bijvoorbeeld gebruik van apparatuur, aanwezigheid, etc.) een sterke invloed hebben op de KPI. Een sterke invloed kan betekenen dat een hogere modelresolutie nodig is voor dat aspect van het gebruikersgedrag. In figuur 25 zijn de resultaten te zien van de gevoeligheidsanalyse voor de 16 gebouwvarianten (op het energiegebruik voor koeling). Een waarde groter dan 0,95 betekent dat het gebouw (de koelbehoefte) gevoelig is voor dat aspect van het gebruikersgedrag. In de figuur is bijvoorbeeld te zien dat slechts twee gebouwen gevoelig zijn voor het gebruik van apparatuur (*equipment*; de zwart gearceerde horizontale balken), en dat er twee gebouwen niet gevoelig zijn voor het gebruik van de zonwering (*blinds*).



Figuur 25: Gevoeligheid van koeling voor de verschillende aspecten van gebruikersgedrag; 1-p > 0,95 betekent dat het gebouw gevoelig is voor het betreffende aspect.

In de laatste periode van het TRECO project is een eenvoudige screening methode ontwikkeld die kan worden toegepast als een allereerste stap in de voorgestelde methodologie (dus vóór de eenvoudige gevoeligheidsanalyse d.m.v. de extreme gebruikspatronen). De screening methode kan een snelle eerste schatting geven over de invloed van gebouwgebruikers op de bouwprestaties. De screening methode is gebaseerd op een analyse van de energiebalans van het gebouw en kan worden uitgevoerd aan de hand van de resultaten van één simulatie run. In sommige gevallen kan daarmee worden voorkomen dat de uitgebreidere gevoeligheidsanalyses dienen te worden uitgevoerd. Deze screening methode is beschreven in het journal artikel 'A simulation method for estimating the influence of occupant behavior on building heating and cooling energy' (T5.2 – R6)(submitted/under review).

#### Discussie, conclusie en aanbevelingen

Uit de resultaten blijkt dat de voorgestelde methodologie goed werkt en inzicht geeft in de gevoeligheid van de KPI voor de verschillende aspecten van het gebruikersgedrag. De methodologie biedt daarmee ondersteuning bij het kiezen van een modelcomplexiteit.

De gevoeligheidsanalyses uit deze methodologie kunnen overigens ook bruikbaar zijn bij het opstellen van prestatiecontracten. De informatie over de gevoeligheid van de KPI kan bijvoorbeeld worden gebruikt om in te schatten of er bepaalde risico's moeten worden afgedekt m.b.t. het gebruikersgedrag. Bij een hoge gevoeligheid voor het gebruikersgedrag zouden er bijvoorbeeld specifieke voorwaarden m.b.t. gebruikersgedrag kunnen worden opgenomen in het contract, terwijl er bij een lage gevoeligheid geen rekening met het gebruikersgedrag hoeft te worden gehouden.



## Resultaten

|                 |                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|-----------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Rapport         | Research into factors influencing model choice                                                                                                                                                                                                                         |
| Journal artikel | Gaetani, I., Hoes, P., & Hensen, J. L.M. (2016). On the sensitivity to different aspects of occupant behavior for selecting the appropriate modeling complexity in building performance predictions. Journal of Building Performance Simulation, Vol. 10, pp. 601-611. |
| Congres artikel | Gaetani, I., Hoes, P., & Hensen, J. L.M. (2017). Introducing and testing a strategy for fit-for-purpose occupant behavior modeling in a simulation-aided building design process. Building simulation 2017, August 7-9, San Francisco, USA.                            |
| Journal artikel | Gaetani, I., Hoes, P., & Hensen, J. L.M. (2017). A simulation method for estimating the influence of occupant behavior on building heating and cooling energy. Submitted/under review.                                                                                 |

### 4.4.3 Onderzoek naar invloed van onzekerheden

#### Samenvatting

In deze taak is een methode voorgesteld waarmee kan worden onderzocht hoe sterk onzekerheden (in bijvoorbeeld de thermodynamische eigenschappen van de gebouwomhulling) doorwerken in het berekende energiegebruik (de bandbreedte). Als methode wordt een Monte Carlo analyse voorgesteld in combinatie Latin Hypercube sampling. De methode is gedemonstreerd voor een casestudie van een kantoorgebouw (en verschillende varianten van het gebouw). De methode kan echter onafhankelijk van het type gebouw worden toegepast. De resultaten van de casestudie laten zien dat onzekerheid in het gebouwgebruik in veel gevallen een grotere invloed heeft op de berekende spreiding in de KPI, dan de onzekerheid in de materiaaleigenschappen. Om de prestaties van een gebouw nauwkeurig te kunnen voorspellen, is het voor veel gebouwen dus erg belangrijk om het gebouwgebruik goed te begrijpen. De resultaten van de casestudie laten echter ook zien dat dit niet voor alle gebouwen belangrijk is.

#### Inleiding en doelstelling

In WP2 worden verschillende onzekerheden onderzocht en gekarakteriseerd (thermodynamische eigenschappen van de gebouwomhulling, afwijking in energie-efficiëntie van installaties). In deze taak wordt een methode voorgesteld waarmee kan worden onderzocht hoe sterk deze onzekerheden doorwerken in het berekende energiegebruik (de bandbreedte).

#### Werkwijze

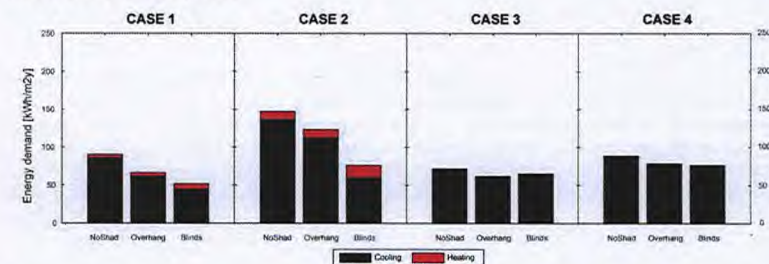
In deze taak wordt door middel van gebouwprestatiesimulaties en een Monte Carlo analyse onderzocht hoe groot de invloed is van onzekerheden in de thermodynamische eigenschappen van de materialen op de berekende energievraag van het gebouw. Aangezien de invloed van de onzekerheden afhankelijk is van het te onderzoeken gebouw, is in deze taak de methode gedemonstreerd voor vier varianten van een kantoorgebouw in Amsterdam (case 1, 2, 3 en 4); zie tabel 9. Per variant zijn vervolgens nog variaties gemaakt met betrekking tot de zonwering: geen zonwering, een overstek en handmatige zonwering. Deze methode kan echter onafhankelijk van het type gebouw worden toegepast. De methode en de casestudies zijn in meer detail beschreven in het eerdergenoemde congres artikel (5.2 – R5).

Tabel 9: Beschrijving van vier varianten van het kantoorgebouw.

|           | CASE 1 | CASE 2 | CASE 3 | CASE 4 |
|-----------|--------|--------|--------|--------|
| WWR = 40% | x      |        | x      |        |
| WWR = 80% |        | x      |        | x      |
| LOW TI    | x      | x      |        |        |
| HIGH TI   |        |        | x      | x      |

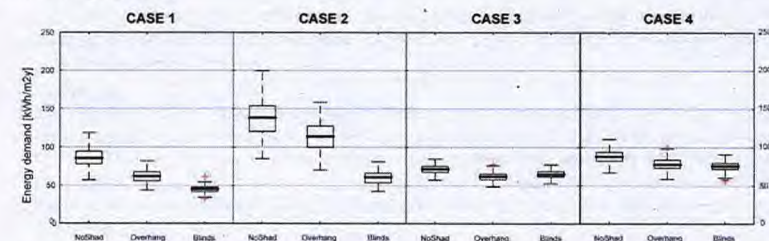
### 4.4.4 Resultaten

In figuur 26 zijn de resultaten te zien voor de energievraag (koeling en verwarming) zonder rekening te houden met onzekerheden.



Figuur 26: De energievraag voor verwarming en koeling voor de vier gebouwvarianten (cases) zonder onzekerheden. Per gebouwvariant is gekeken naar drie subvarianten: geen zonwering, een overstek en handmatige zonwering.

Vervolgens is er een Monte Carlo analyse uitgevoerd om de onzekerheid (spreiding) in de resultaten te onderzoeken. De aangenomen onzekerheid per parameter ( $\mu$  en  $\sigma$  waardes) zijn terug te vinden in het artikel (TS.2 – R5). Allereerst is er een sample gemaakt d.m.v. Latin Hypercube sampling om een goede verdeling over de parameter range te verkrijgen (200 waarden per parameter). Vervolgens is de energievraag voor de gehele sample berekend. In figuur 27 is de spreiding te zien veroorzaakt door de onzekerheden in de materiaaleigenschappen. Case 2 laat de grootste spreiding zien in de resultaten.



Figuur 27: Invloed van de onzekerheid in de materiaaleigenschappen op de energievraag voor koeling en verwarming.



Vervolgens is er een vergelijking gemaakt met de onzekerheid veroorzaakt door gebruikersinvloeden. In het eerdergenoemde artikel (5.2 – R5) zijn de aangenomen gebruikersscenario's weergegeven. In figuur 28 is de invloed van de gebouwgebruikers te zien op het energiegebruik. De spreiding veroorzaakt door de gebruikers is in de meeste gevallen groter dan de spreiding veroorzaakt door de onzekerheid in de materiaaleigenschappen.



Figuur 28: Invloed van de gebouwgebruikers op de energievraag voor koeling en verwarming.

#### Discussie, conclusie en aanbevelingen

De voorgestelde Monte Carlo methode in combinatie met Latin Hypercube sampling kan worden gebruikt om de invloed van onzekerheden te kwantificeren. Deze methode kan onafhankelijk van het type gebouw worden toegepast. De resultaten van de casestudie laten zien dat onzekerheid in het gebouwgebruik in veel gevallen een grotere invloed heeft op de berekende spreiding in de KPI, dan de onzekerheid in de materiaaleigenschappen. Om de prestaties van een gebouw nauwkeurig te kunnen voorspellen, is het voor veel gebouwen dus erg belangrijk om het gebouwgebruik goed te begrijpen. De resultaten van de casestudie laten echter ook zien dat dit niet voor alle gebouwen belangrijk is; dit wordt ook duidelijk uit de casestudie van het ABT/Demo gebouw in Taak 5.4.

#### 4.4.5 Case studies

##### Samenvatting

Twee gebouwen zijn 'out of the blue' doorgerekend met geavanceerde pakketten, zonder kennis van het werkelijke verbruik. DWA heeft een simulatiemodel opgezet van een bestaand kantoorgebouw in het simulatieprogramma Vabi Elements. ABT en de TU/e hebben een simulatiemodel opgezet voor het ABT/DEMO gebouw in het simulatieprogramma EnergyPlus. Uit de resultaten blijkt dat het goed mogelijk is om het gat tussen de voorspellingen en de metingen te verkleinen. In het geval van het eerste gebouw is daar echter wel kennis voor nodig over het werkelijke gebruik van het gebouw, het gebruik van de gebouwinstallaties en het gebruikersgedrag. De moeilijkheid in het vooraf garanderen van prestaties is uiteraard dat deze laatste factoren dan nog niet goed bekend zijn. De prestaties van het tweede gebouw zijn minder gevoelig voor het gebruikersgedrag. Het zal voor dit gebouw dan ook eenvoudiger zijn om prestatiegaranties af te spreken.

##### Inleiding en doelstelling

Een aantal gebouwen worden 'out of the blue' doorgerekend met geavanceerde pakketten, zonder kennis van het werkelijke verbruik. Vervolgens wordt een vergelijking gemaakt van het werkelijke verbruik en monitoring faalgedrag (zie thema Afgifte en distributie: foutendiagnose). Hieruit blijkt welke thema's (gebruikersgedrag, verlichting, apparatuur, gebouwinstallatie - distributie, afgifte, lokale buitenklimaat en het binnenklimaat) belangrijk zijn/invloed hebben op het verschil tussen de berekende en gemeten prestaties.

#### Werkwijze

Er zijn drie gebouwen doorgerekend waarbij het berekende energiegebruik is vergeleken met het gemeten energiegebruik:

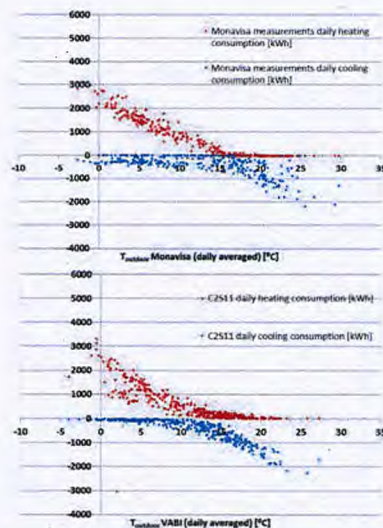
- Case study 1: kantoorgebouw  
DWA heeft een simulatiemodel opgezet van een bestaand kantoorgebouw in het simulatieprogramma Vabi Elements. Vervolgens is er een vergelijking gemaakt met de meetdata van het gebouw (in WP4.2 wordt hetzelfde gebouw gebruikt). Hieronder volgt een korte samenvatting van de resultaten. Een uitgebreidere omschrijving is terug te vinden in het gepubliceerde artikel 'Energieprestaties garanderen: hoe moeilijk is dat?' (T5.4 – R7) in het vakblad VV+.
- Case study 2: kantoorgebouw  
DWA heeft een simulatiemodel opgezet van nog een ander bestaand kantoorgebouw in het simulatieprogramma Vabi Elements. Vervolgens is er een vergelijking gemaakt met de meetdata van het gebouw. Een uitgebreide omschrijving is terug te vinden in de notitie 'WP5.4 Simulaties vs. monitoring Casus 2 DWA' (5.4 – R8).
- Case study 3: ABT/DEMO gebouw in Delft  
ABT en de TU/e hebben een simulatiemodel opgezet voor het ABT/DEMO gebouw in het simulatieprogramma EnergyPlus. De verschillen tussen het berekende en gemeten gebruik zijn vervolgens onderzocht. Specifiek is gekeken naar de invloed van de gebouwgebruikers op het totale energiegebruik van het gebouw (gas en elektriciteit). Het onderzoek is uitgebreid beschreven in het rapport 'The influence of occupant behavior on the total energy consumption in Offices – a case study for the ABT Office' (5.4 – R9).

#### 4.4.6 Resultaten

##### Casestudie 1: kantoorgebouw

Figuur 29 laat het gemeten en het berekende warmte en koudeverbruik zien. Een vergelijking tussen het gemeten en het gesimuleerde jaarlijkse energiegebruik laat zien dat het voorspelde warmtegebruik over de gehele meetperiode 14,9% lager is dan het gemeten gebruik. Het jaarlijkse koudeverbruik wordt 3,5% hoger voorspeld dan het gemeten koudeverbruik. Wanneer het gemeten en gesimuleerde verbruik alleen op werkdagen wordt vergeleken, dan is het gesimuleerde verbruik 1,5% lager voor warmte en 5,1% lager voor koude vergeleken met de metingen.





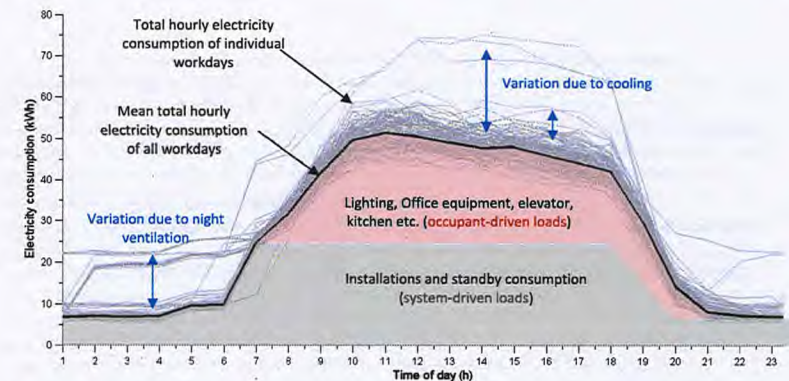
Figuur 29: Vergelijking van berekende en gemeten energie voor verwarming en koeling voor kantoorgebouw case study 1. Bron: DWA

#### Casestudie 2: kantoorgebouw

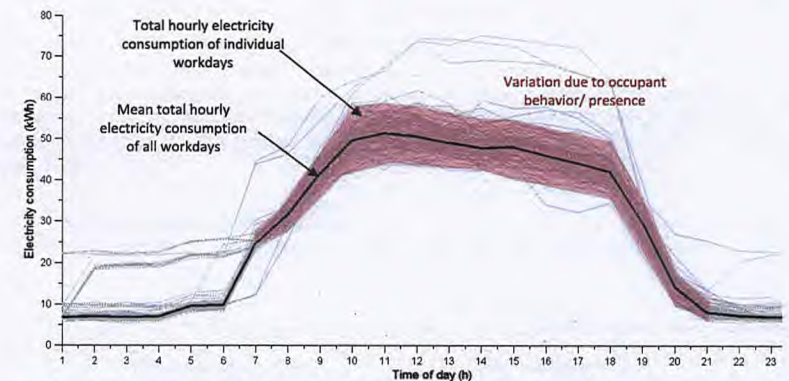
Deze casestudie laat vergelijkbare resultaten zien als casestudie 1. De afwijking is wel iets groter: voor de warmtevraag tussen het gekalibreerde model en de metingen 23% en voor de koudevraag 6%. Dit heeft waarschijnlijk te maken met beperkingen in de modelering van de vraaggestuurde ventilatie en het distributieverlies.

#### Casestudie 3: ABT en DEMO in Delft

In figuren 30 en 31 wordt het gemeten elektriciteitsverbruik getoond. Door middel van een gevoeligheidsanalyse met een simulatiemodel is vervolgens onderzocht welke aspecten de grootste invloed hebben op het totale verbruik. In de figuren wordt aangegeven uit welke onderdelen het elektriciteitsverbruik bestaat en welke variatie door de gebruiker wordt veroorzaakt. Voor dit gebouw is de invloed van de gebruiker op het elektriciteitsverbruik relatief klein: variaties van 12% op uurlijkse waarden en variaties van 4,7% op maandelijkse waarden.



Figuur 30: Monitored hourly electricity consumption of all occupied days vs. the mean consumption - 'breakdown' electricity consumption



Figuur 31: Monitored hourly electricity consumption of all occupied days vs. the mean consumption - variation due to occupant behavior/ presence.



#### Discussie, conclusie en aanbevelingen

Kantoor 1 heeft een individuele klimaatregeling per vertrek, waar de gebruiker binnen bandbreedte de setpoints kan bepalen. M.a.w. een grote beïnvloeding door de gebruiker.

In kantoor 2 is een vraaggestuurde ventilatie aanwezig. Hierdoor varieert het gebruik ook met de bezetting.

In kantoor 3 kan de gebruiker geen invloed uitoefenen op de klimaatinstallatie.

Uit de resultaten blijkt dat het goed mogelijk is om het gat tussen de voorspellingen en de metingen te verkleinen. In het geval van het eerste en tweede gebouw is daar echter wel kennis voor nodig over het werkelijke gebruik van het gebouw, het gebruik van de gebouwinstallaties en het gebruikersgedrag. De moeilijkheid in het vooraf garanderen van prestaties is uiteraard dat deze laatste factoren dan nog niet goed bekend zijn. De prestaties van het derde gebouw zijn minder gevoelig voor het gebruikersgedrag. Het zal voor dit gebouw dan ook eenvoudiger zijn om prestatiegaranties af te spreken.

#### Resultaten

|         |                                                                                                                 |
|---------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Artikel | Huijbregts, Z. & Wisse, K. (2017). Energieprestaties garanderen: hoe moeilijk is dat? VV+, juni 2017.           |
| Notitie | WP5.4 Simulaties vs. monitoring Casus 2 DWA (vertrouwelijk)                                                     |
| Rapport | The influence of occupant behavior on the total energy consumption in Offices – a case study for the ABT Office |

#### 4.5 Product- en dienstontwikkeling (DEMO)

Conform het projectplan kent werkpakket 6 onderstaande taken:

- 6.1 Ontwikkeling uitbreidingssets voor (bestaande) software applicaties en smart metering systemen voor kantoren
- 6.2 Inrichting van database, vergelijkingsapplicaties/ modules en integratie met BIM
- 6.3 Opzet voor een raamwerk voor certificering/kwaliteitskeurmerk en contractmodel voor energiediensten

| Nr.  | Titel / omschrijving                                                                                                  | Bijbehorende taak/ taken                                                                                     |
|------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| D6.1 | Uitbreidingssets voor software applicaties (RE Suite en Monavisa) en smart-metering systemen voor kantoren            | Ontwikkeling uitbreidingssets voor (bestaande) software applicaties en smart metering systemen voor kantoren |
| D6.2 | Inrichting van database, vergelijkingsapplicaties/modules en interfaces voor integratie met BIM                       | Inrichting van database, vergelijkingsapplicaties/modules en integratie met BIM                              |
| D6.3 | Blauwdruk voor het raamwerk protocollen en E-LCM contract met voorbeeld business casussen voor nieuwbouw en renovatie | Opzet voor een raamwerk voor certificering/kwaliteitskeurmerk en contractmodel voor energiediensten          |

##### 4.5.1 Ontwikkeling uitbreidingssets voor (bestaande) software applicaties en smart-metering systemen voor kantoren

#### Samenvatting

Taak 6.1 onderzoekt de meest haalbare manier om de gebouw- en gebruikersgegevens te verzamelen via het GBS, sensoren, smart-meters, en gebruikersquestionnaires. Tegelijkertijd wordt er gekeken naar de benodigde uitbreidingen en koppelingen tussen de software tools (DEMO RE Suite, DWA MonaVisa/ Simaxx, en een energierekentool zoals TRNSYS).

Deze taak is uitgevoerd binnen twee hoofdactiviteiten, namelijk:

- Analyse huidig (smart)-metering systeem en voorstel uitbreidingsset voor casestudie IFD kantoorgebouw te Delft
- Uitbreidingsset voor de software tools (DEMO RE Suite en DWA MonaVisa/Simaxx)

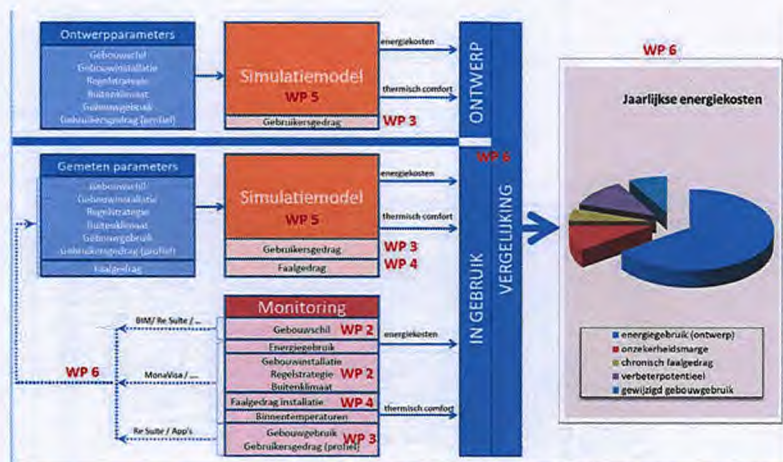
#### Inleiding en doelstelling

WP6 wordt uitgevoerd volgens het algemene schema van het TRECO-Office project zoals vastgesteld en besproken in de voorafgaande projectbijeenkomsten (zie onderstaand schema). Start van ontwikkelingen is het berekenen van de energieprestatie volgens ontwerp (de "theoretische situatie") in een simulatiemodel (WP5). Op basis van deze energieprestatie kan een voorspelling gedaan worden van de energiekosten op gebouwniveau evenals het thermisch comfort. In de gebruiksfase worden gegevens verzameld over: de staat van de gebouwschil en gebouwinstallaties, het energieverbruik, het faalgedrag van de installatie, en de binnentemperatuur. WP2-3-4 bepalen samen de meest essentiële en zinvolle technische parameters die gemonitord moeten worden m.b.t. gebouw- en installatieprestaties, klimaat, en gebruikersgedrag (aanwezigheid).

Vervolgens worden analysemethoden ontwikkeld en ingezet om het gemeten energieverbruik te vergelijken met het voorspelde energieverbruik. Op basis van deze analyse en vergelijking wordt een raamwerk voor een prestatiecontract voor kantoorgebouwen voorgesteld. Voor de exploitatie is het van belang dat de energieprestatie in de pas blijft lopen met het voorspelde jaarverbruik op gebouwniveau, zodat de energieprestatie gewaarborgd kan blijven. In WP6 worden de TRECO-Office Key Performance Indicators (KPI's) gedefinieerd ten behoeve van prestatiecontract voor



kantoorgebouw. Binnen de RE Suite van DEMO worden deze KPI's weergegeven in een Dashboard ter ondersteuning van monitoring en besluitvorming in het kader van prestatiecontract.



Figuur 32 Werkwijze voor het vergelijken van het werkelijk energiegebruik en de resultaten van energiemodellen

#### Werkwijze

Om de ontwikkelingen binnen dit werkpakket in goede banen te leiden, is besloten een casestudie aanpak te hanteren. Het kantoor van DEMO Consultants en ABT aan het Delftechpark in Delft is daarvoor geschikt gebleken. Ten opzichte van andere kantoren heeft dit gebouw de volgende voordelen:

- ABT en DEMO zijn eigenaar van het gebouw (via aandeelhoudersconstructie in IFD Holding).
- ABT en DEMO zijn huurder van het gebouw (als adviesbureaus).
- Enkele werknemers van ABT en DEMO zijn gebruiker van het gebouw en direct aan TRECO verbonden.
- Tekeningen en gebouwspecificaties zijn beschikbaar.
- Een BIM model op basis van Revit is opgesteld door ABT en verrijkt met relevante parameters.
- Een IFC transformatie van het Revit-BIM model is beschikbaar en al ingevoerd in de RE Suite, en zal gebruikt worden voor het Dashboard en gebruikersfeedback van WP6.
- Energieverbruiksgegevens zijn beschikbaar.
- Het nieuwe gebouwbeheersysteem (GBS) in dit gebouw is geïnstalleerd door WebEasy, lid van het TRECO-Office projectconsortium.

Door WebEasy is in kaart gebracht welke sensortechniek er momenteel in het gebouw aanwezig is en wat voor een goede energiemonitoring aanwezig zou moeten zijn. Vanaf de bouw had het pand een Siemens PRU regelsysteem. Dit is een wat verouderde lijn waar niet direct mee gecommuniceerd kan worden. Het bleek complex (technische en organisatorisch) om het Siemens-systeem te voorzien van een BACnet gateway waardoor communicatie met dit systeem wel mogelijk zou zijn. Vervolgens zou er dan nog een koppeling nodig zijn op basis van BACnet zodat data vanuit Siemens naar de RE Suite ingelezen kan worden.

Een vernieuwd systeem —zoals inmiddels opgeleverd door WebEasy en volledig operationeel— is web-based, en voorziet in standaard koppelingen op zowel veldbus als automatiseringsniveau. Dit maakt het mogelijk om data in te lezen uit energieverbruiksystemen van derden. Dit kan bv. door een BACnet of oBix (XML) koppeling te maken. Ook zijn koppelingen op database niveau mogelijk (SQL, ORACLE etc.). Maar ook koppelingen naar LON, KNX etc. zijn beschikbaar voor integratie met bijvoorbeeld zonwering en verlichting.

Sinds 5 april 2016 is het nieuwe WebEasy systeem in bedrijf genomen. Actuele data worden verzameld en geanalyseerd door ABT. Deze data worden vergeleken met de 'wish list' zoals door DWA is opgesteld. Een analyse wordt gemaakt welke gegevens kunnen worden geleverd uit/via het GBS, of deze gegevens voldoende zijn, en hoe deze gegevens ingezet zouden kunnen worden voor verdere energieanalyse naar TRECO-Office behoeften.

#### Resultaten

- Bevindingen uit analyse huidige (smart)-metering systeem en voorstel uitbreidingsset voor casestudie IFD kantoorgebouw te Delft:  
Analyse pilot case IFD-kantoorgebouw te Delft: ABT levert de gegevens uit WebEasy GBS (actueel energieverbruik en de werking van het installatiesysteem) en BIM (eigenschappen gebouwschil) aan DWA om de 'DWA wish list' in te vullen met actuele data. DWA geeft vervolgens aan of de actuele gegevens voldoende zijn om een berekening van het actuele energieverbruik volgens TRECO-Office methodiek te maken.

De energieanalyses voor het IFD-kantoorgebouw worden uitgevoerd door ABT en HIA als onderdeel van de werkzaamheden onder de werkpakketten 4 en 5. DWA voert geen energieanalyses uit voor het IFD-gebouw, omdat ze twee andere casussen in de werkpakketten 4 en 5 gaat uitvoeren.

- Uitbreidingsset voor de software tools (DEMO RE Suite en DWA MonaVisa/Simaxx):  
Bij DWA is de organisatorische situatie veranderd. MonaVisa is verzelfstandigd en staat nu op de markt onder de naam Simaxx (<http://www.simaxx.com/>).
- De oplossing voor de dataflow en benodigde uitbreidingen c.q. aanpassingen van de software tools van DEMO en DWA zijn als volgt:
1. Dynamische data (actuele waarden van sensoren en GBS) worden opgeslagen in de WebEasy database; via een koppeling op SQL-niveau worden deze gegevens door DEMO RE Suite geraadpleegd.
  2. De gegevens over de gebouwschil, oppervlakte, volume, etc. komen uit het BIM-model en zijn beschikbaar in de DEMO RE Suite; DEMO heeft deze gegevens aangeleverd aan DWA/ABT/HIA in Excel format. DWA/ABT/HIA heeft aangegeven welke gegevens precies benodigd zijn (bijv. identificatie van een ruimte e.d.)
  3. DWA/ABT/HIA gebruikt deze gegevens ook voor het maken van de energieanalyse zoals aangegeven in (3.2.1).
  4. DWA/ABT/HIA levert berekeningsresultaten uit de energieanalyse in Excel format aan DEMO; DEMO slaat deze resultaten op de database van RE Suite en gebruikt deze om de TRECO-Office KPI's te vullen met echte waarden.
  5. Vervolgens zal een KPI Dashboard voor TRECO-Office ingericht worden in RE Suite. De gebruikers kunnen de waarden van de KPI's zien op het Dashboard, en tevens een vergelijking maken tussen verschillende situaties/scenario's.

|        | Corresponderende bijlage                                                                                                    |
|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| WP 6.1 | D6.1 Smartmetering systemen voor kantoren en ontwikkeling uitbreidingssets voor (bestaande) software applicaties (openbaar) |



#### Discussie, conclusie en aanbevelingen

Simaxx kan een koppeling maken met het platform van WebEasy ten behoeve van het automatisch uitlezen van de GBS gegevens ten behoeve van energieanalyse met behulp van een rekenmodel/tool (bijv. TRNSYS). Er wordt geen software koppeling gerealiseerd tussen RE Suite en Simaxx omdat deze systemen zelfstandig hun data uit het Webeasy-systeem kunnen betrekken.

#### 4.5.2 Inrichting van database, vergelijkingsapplicaties/ modules en integratie met BIM

##### Samenvatting

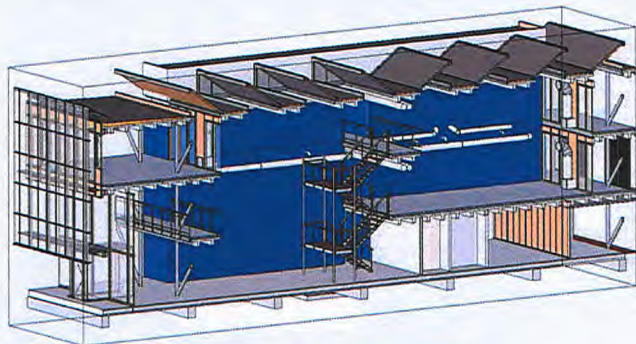
De praktische inzet van BIM wordt bestudeerd aan de hand van een reëel BIM-model van het IFD-kantoorgebouw te Delft, als casestudie. Het BIM-model is opgezet in Revit en vervolgens geëxporteerd naar IFC format. Het model is verrijkt door de plaatsing van "TRECO-Office sensoren" in het model. Er is tevens gekeken naar de mogelijkheid om zoveel mogelijk benodigde TRECO-Office gegevens op te slaan in het model door uitbreiding van de 'object properties'.

Deze taak is uitgevoerd binnen twee hoofdactiviteiten, namelijk:

- Samenstellen gebruikersprofiel/gedragsprofiel
- BIM en database

##### Inleiding en doelstelling

Voor een goede opzet van een BIM is allereerst een goed digitaal gebouwmodel nodig. Er was een digitaal model voorhanden, maar dit bleek bij nader inzien onvoldoende gedetailleerd om het in te zetten als BIM. ABT en DEMO hebben daarop sterk ingezet op verbetering van het model, met succes. Er ligt nu een digitaal gebouwmodel dat gebruikt kan worden voor het BIM. Dit model is inmiddels verrijkt naar TRECO-Office behoeften. Er is tevens een Virtual Reality (VR) versie beschikbaar van het IFD-kantoorgebouw.



Figuur 33. Doorsnede van het BIM-model van het ABT/DEMO kantoorgebouw



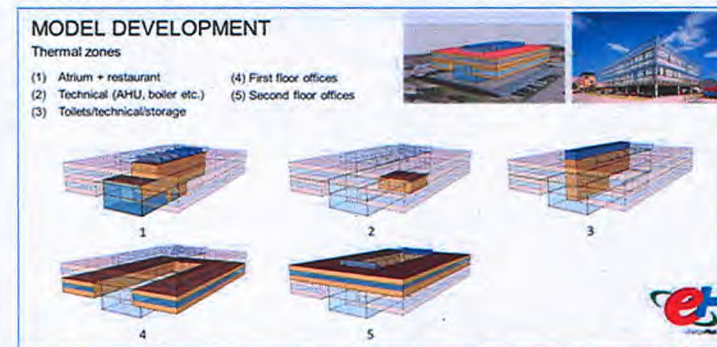
Figuur 34. Dakweergave en rendering van het interieur op basis van het BIM-model

##### Werkwijze

Samenstellen gebruikersprofiel/gedragsprofiel:

Door de aanwezigheid van personen in het kantoorgebouw in kaart te brengen, kan er gekeken worden naar de invloed van het aantal mensen, en de locaties waar ze zich bevinden binnen het gebouw, op het energieverbruik. ABT gebruikt daarbij een bottom-up benadering. Vervolgens wordt 3D visualisatie gemaakt van 'gebruikersgedrag vs. energieverbruik' aan de hand van BIM IFD-kantoorgebouw.

In het demonstratiecasus IFD-kantoorgebouw te Delft zijn er 5 "thermal zones" gedefinieerd voor de cameraopname ten behoeve van analyse van aanwezigheid van gebouwgebruikers vs. energieverbruik (focus op elektriciteitsverbruik in het huidige experiment). Deze zones worden aangegeven in het BIM-model.



Figuur 35. Thermal zones in het 3D model van het IFD-kantoorgebouw te Delft (bron: ABT, Ad van der Aa).

De uitkomst van de analyse van aantal gebruikers vs. energieverbruik wordt drie-dimensioneel weergegeven aan de hand van het BIM-model, bijvoorbeeld met behulp van verschillende kleuren om aan te geven dat het energieverbruik voor een bepaalde zone gelijk-met of boven of onder de gewenste/afgesproken waarde volgens het prestatiecontract. Deze 3D visualisatie kan ook gerepresenteerd worden ter aanvulling van de overige informatie in de KPI Dashboard.





Figuur 36. Cameraopname in het IFD-kantoorgebouw te Delft.

#### BIM en database:

BIM van de casestudie IFD-kantoorgebouw te Delft bevat de gegevens over de gebouwschil, oppervlakte, volume, etc. Het IFC BIM model kan ingelezen worden in DEMO RE Suite. Cruciaal is echter dat de gegevens, die nodig zijn voor de verrijking van het geometrische model, ook zijn 'mee geconverteerd' naar het IFC model. Dit was nog niet voor alle onderdelen mogelijk. ABT en DEMO modelleren de sensoren in het Revit model, die ná conversie ook in het IFC bestand terechtkomen. Dit vormt de basis voor de verrijking van het geometrische model met de sensordata.

#### Resultaten

##### • Samenstellen gebruikersprofiel/gedragprofiel –resultaten bereikt in samenwerking met WP3:

- Een Excel-sheet met energieverbruik per uur. Deze is verder uitgesplitst naar:
  - Energieverbruik van het netwerk
  - Energieopwekking van de PV-panelen
  - Energie terug levering van de PV-panelen
  - Totale energieverbruik.
- Een Excel-sheet met data van het aantal aanwezigen in het gebouw. In deze sheet is een regel gelogd wanneer er een verandering plaatsvindt; er zijn dus geen reguliere tijdsintervallen. In de sheet is de volgende data aanwezig:
  - Aantal aanwezigen op verdieping 1
  - Aantal aanwezigen op verdieping 2
  - Totale aantal aanwezigen

- Een Excel-sheet met uitgebreide thermische data per uur. Deze bevat de volgende elementen:
  - Buitentemperatuur
  - Temperaturen (inlet/outlet) van verscheidene klimaatinstallaties
  - Binnentemperaturen van thermische zones

#### • BIM en database:

##### - Datacorrectie en –integratie

De eerste stap om de ontvangen data te kunnen gebruiken in de DEMO RE Suite, is het corrigeren, integreren en omvormen naar een eenduidige format van deze data. Mijn idee is om deze terug te brengen naar data per dag. Dit betekent dat voor data, die nu per uur is aangeleverd, een gemiddelde per dag zal worden genomen. Hiermee gaat dus enig detailniveau verloren, maar dit zou voor de TRECO showcase voldoende moeten zijn.

Het voorstel is om de volgende data per dag op te nemen:

- Totale energieverbruik
- Maximale aantal aanwezigen op verdieping 1
- Maximale aantal aanwezigen op verdieping 2
- Maximale totale aantal aanwezigen

We zouden ook een gemiddeld aantal aanwezigen kunnen berekenen, maar aangezien de aangeleverde data niet gebaseerd is op een regulier tijdsinterval, zullen we dit zelf moeten samenstellen en omvormen. Daarnaast is er nog het vraagstuk hoe we omgaan met nachten; dan zijn er natuurlijk minder aanwezigen maar dit is natuurlijk logisch, maar dit beïnvloedt wel het gemiddelde. Dit is dus gecompliceerder dan uitgaan van het maximale aantal aanwezigen.

Met deze data zouden we de volgende (K)PI's kunnen berekenen en visualiseren:

- Totale energieverbruik
- Aantal aanwezigen (gesplitst per verdieping)
- Energieverbruik/totaal aantal aanwezigen (energieverbruik per aanwezige)
- Energieverbruik i.r.t. prestatiecontract

##### - Data-import en indicator configuratie

Wanneer de data eenmaal naar een bruikbaar format is omgezet, moet deze geïmporteerd worden in de DEMO RE Suite en gereedgemaakt voor ontsluiting. Ons idee is om dit via de bestaande functionaliteit voor de berekening van indicatoren te doen (o.a. gebruikt in dashboard en MCA-analyse). Hiervoor moet dan een dataset worden aangemaakt en indicatoren worden geconfigureerd.

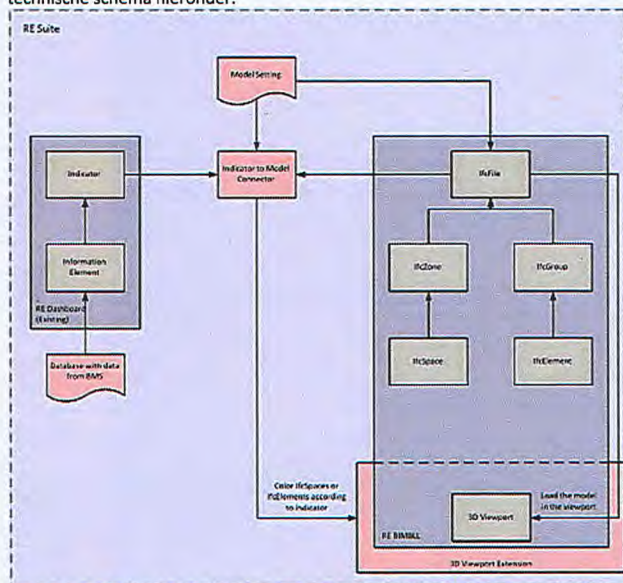
##### - Modelvoorbereiding

Om de indicatoren te kunnen koppelen aan elementen in het BIM(IFC)-model van het IFD-gebouw, is het nodig om in het model zones te definiëren. Vervolgens worden dan de ruimtes in het gebouw toegewezen aan deze zones. Dit kan gedaan worden in Revit, en vervolgens het model weer exporteren naar IFC. Het interpreteren van deze zones in de RE Suite is al ontwikkeld in het kader van de STREAMER LCC-berekening (uit het EU FP7-project van DEMO); deze logica kan een op een hergebruikt worden.



- 3D-viewport  
Onze analyse van het 3D-viewport is dat deze op dit moment al alle benodigde functionaliteiten bevat om de (K)PI's te visualiseren, namelijk het kunnen kleuren van viewport objecten.  
Wél is het mogelijk noodzakelijk om een extensie van dit viewport te maken die ervoor zorgt dat dit proces ook van buitenaf te controleren is. Voorwaarde daarbij is dat deze extensie absoluut geen functionaliteit bevat die bij het 3D-viewport zelf hoort; deze moet enkel het doorgeefluik van een 'commando' zijn.

- Connector  
De Connector verbindt het BMS (links) en de 3D Viewport (rechts) zoals weergegeven in het technische schema hieronder.



Legenda:  
Groen: Bestaande componenten  
Oranje: Te ontwikkelen componenten/in te richten database

Figuur 37 Technisch schema van de connector tussen BMS en 3D-viewport

|        |                                                                                          |
|--------|------------------------------------------------------------------------------------------|
|        | Corresponderende bijlage                                                                 |
| WP 6.2 | D 6.2 Inrichting van database, vergelijkingsapplicaties en integratie met BIM (openbaar) |

#### Discussie, conclusie en aanbevelingen

Om de operationele implementatie te realiseren, zijn de te ontwikkelen onderdelen, zoals ook gevisualiseerd in het vorige diagram:

- Database
- Data uit het GBS, zie hoofdstuk 3
- Model Setting
- Een nieuw databasetype welke informatie bevat welk IFC-model dient te worden gebruikt
- Indicator to Model Connector
- Bestaande uit:
  - Een databasetype waarin geconfigureerd kan worden welke indicator gerelateerd moet worden aan welke IfcZone of IfcGroup uit een specifiek Model Setting
  - Een (elements)panel waarin deze databasetypes kunnen worden aangemaakt, gewijzigd, en verwijderd
- 3D Viewport Extension

#### 4.5.3 Opzet voor een raamwerk voor certificering/kwaliteitskeurmerk en contractmodel voor energiediensten (ISSO)

##### Samenvatting

In TRECO-Office hebben we een verkenning gedaan naar de blauwdruk voor dynamische contractvormen volgens Energiegericht Lifecyclemanagement. De eerste opzet van energiediensten is opgesteld aan de hand van een RvO-publicatie. Dit is een zeer uitgebreide lijst waarbij een deel 'energie en comfort' betreft. Afstemming moet plaatsvinden over de inrichting van de monitoring per energiedienst. De hoofdtak van ISSO is vervolgens om, op basis van de ervaringen in het project, in kaart te brengen hoe om te gaan met de metingen (wanneer meten, intervallen, etc.) om de betrouwbaarheid te waarborgen. Tevens is een klankbordgroep bijeenkomst gehouden.

Deze taak is uitgevoerd in twee hoofdactiviteiten, namelijk:

- Prestatiecontract voor kantoren
- KPI-algoritmes en Dashboard

##### Inleiding en doelstelling

In de afgelopen periode is veel inspanning verricht ten behoeve van het inventariseren van benodigde data voor goede simulaties waarop de energieprestatiecontracten gebaseerd worden. Bij deze inventarisaties is duidelijk geworden dat voor de ontwikkeling van rekenmodellen juist begonnen moet worden met het vormgeven van (concept) energieprestatiecontracten, in het bijzonder wat daarin opgenomen moet worden qua prestatie-indicatoren. Als dat bekend is, is ook bekend wat er precies berekend moet worden, hoe de modellen ingericht moeten worden, en wat er gemeten moet worden.

Vervolgens hebben ISSO en DEMO gewerkt aan de definitie van de TRECO-Office KPI's die in het KPI Dashboard opgenomen zullen worden. Deze KPI's zijn geselecteerd op basis van de minimumeisen uit prestatiecontract. Er zijn in totaal vier KPI's gedefinieerd.



### Werkwijze

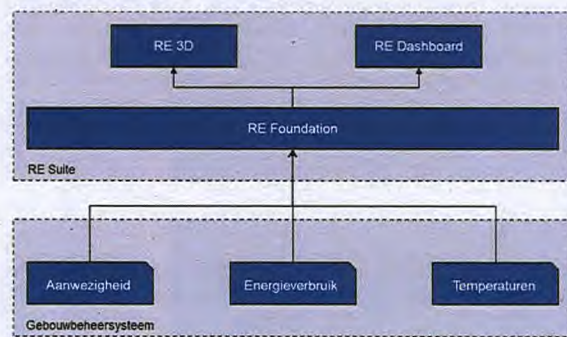
- Concretisering van de KPI's voornamelijk de diepgang en bronnen van de KPI-waarden.
- Raamwerk protocol voor certificering/kwaliteitskeurmerk. Het protocol baseert zich op de onderzoeksresultaten en zorgt ervoor dat deze op generieke wijze vastgelegd worden.

DEMO RE Suite software bevat een flexibel te configureren KPI Dashboard. Afhankelijk van de uitwerking van de KPI's voor TRECO-Office, wordt dit Dashboard verder ingericht. Op basis van de gemeten waarden in de KPI's wordt bijgehouden wat de afwijking is van het 'baseline' scenario, om zodoende in te kunnen grijpen en gedrag of energiegebruik te kunnen sturen.

Voor de vergelijkingapplicatie is een concept ontwikkeld op basis van twee niveaus:

- Een managementlaag, waar technische beheerders en contractmanagers kunnen monitoren hoe de bouwprestaties m.b.t. energiegebruik en comfort zich verhouden tot de afspraken in het contract;
- Een technische laag, waar technisch specialisten, in het geval van afwijkingen, diepere analyses kunnen uitvoeren om deze afwijkingen te corrigeren.

ISSO heeft de KPI's voor TRECO-presentatiecontract uitgewerkt, en deze ingevuld met pilot data uit de demonstratiecasussen. Vervolgens heeft DEMO de KPI Dashboard ingericht incl. BIM/3D viewer en deze operationeel gemaakt in RE Suite.



Figuur 38 Koppeling tussen RE-suite en de 3Dviewer

### Resultaten

TRECO-Office Key Performance Indicators (KPI's) voor prestatiecontracten zijn geselecteerd, gedefinieerd en uitgewerkt.

Tabel 9. Data van het dashboard en de brongegevens

| KPI (Dashboard)                                |                                                                                                                                                  | Brongegevens                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. Warmte<br>Warmte/(m2. Fte)                  | Jaargebruik volgens contract.<br><br>Jaargebruik op meter<br><br>Nodig: uitvoer jaargebruik uit dynamisch simulatiemodel (VA114, TRNSYS enz)     | Energiegebruik op maandbasis.<br>Efficiency/COP van warmte-opwekker                                                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Prognose Maandgebruik volgens contract</li> <li>- Maand gebruik op meter</li> <li>- Prognose Cumulatief maand gebruik volgens contract</li> <li>- Cumulatief maand gebruik volgens meter</li> <li>- Nodig: Uitvoer maand- gebruik uit dynamisch simulatiemodel (VA114, TRNSYS enz.)</li> <li>- Efficiency volgens berekening (energie uit/energie in)</li> <li>- COP volgens meting (energie uit/energie in)</li> </ul> |
| 2. Koude                                       | Jaargebruik volgens contract.<br><br>Cumulatief jaargebruik op meter<br><br>Uitvoer jaargebruik uit dynamisch simulatiemodel (VA114, TRNSYS enz) | Energiegebruik op maandbasis.<br>Efficiency/COP van koude-opwekker                                                            | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Prognose Maandgebruik volgens contract</li> <li>- Maand gebruik op meter</li> <li>- Prognose Cumulatief maand gebruik volgens contract</li> <li>- Cumulatief maand gebruik volgens meter</li> <li>- Nodig: Uitvoer maand- gebruik uit dynamisch simulatiemodel (VA114, TRNSYS enz.)</li> <li>- Efficiency volgens berekening (energie uit/energie in)</li> <li>- COP volgens meting (energie uit/energie in)</li> </ul> |
| 3. Elektriciteit                               | Jaargebruik volgens contract.<br><br>Cumulatief jaargebruik op meter                                                                             | Energiegebruik op maandbasis.<br>Deelbemetereing per bouwdeel/verdieping<br>Deelbemetereing apparaten                         | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Prognose Maandgebruik volgens contract</li> <li>- Maand gebruik op meter</li> <li>- Prognose Cumulatief maand gebruik volgens contract</li> <li>- Cumulatief maand gebruik volgens meter</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                     |
| 4. Thermisch comfort<br><br>Binnen-temperatuur |                                                                                                                                                  | Representatief vertrek:<br>Winter: gemiddelde minimum binnentemperatuur tijdens kantooruren<br>Zomer: ATG tijdens kantooruren |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |

De KPI's worden ingevuld met pilot data uit het demonstratiecasus IFD-kantoorgebouw te Delft. T.b.v. het opstellen van de KPI Dashboard, maken we vergelijking tussen de Actuele waarde (o.b.v. gegevens uit gebouwbeheersysteem) en Simulatie waarde (o.b.v. berekening VA114, Trnsys o.i.d.).



## Voorbeeld datasheet als input voor de KPI Dashboard

Tabel 10. Voorbeeld van een dataset van metingen en modelberekeningen op basis van metingen aan het ABT-kantoor

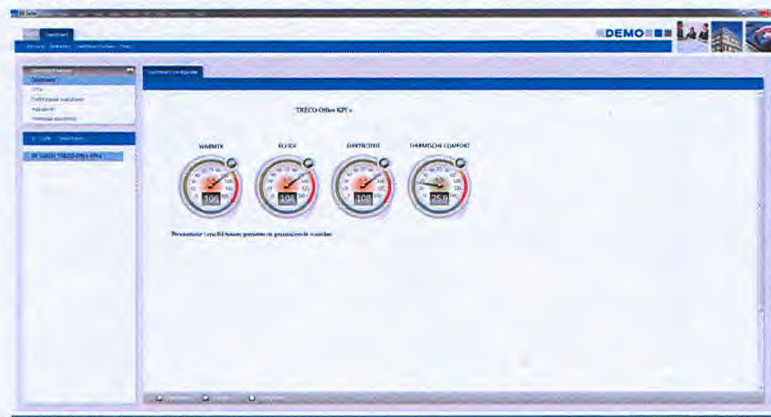
| TRECO-Office Data |        |           |        |           |               |           |                            |             |
|-------------------|--------|-----------|--------|-----------|---------------|-----------|----------------------------|-------------|
| Maand             | Warmte |           | Koude  |           | Elektriciteit |           | Thermisch comfort Kantoren |             |
|                   | Meting | Simulatie | Meting | Simulatie | Meting        | Simulatie | Meting                     | Simulatie   |
| Unit              | [kWh]  | [kWh]     | [kWh]  | [kWh]     | [kWh]         | [kWh]     | hours T>25C                | hours T>25C |
| Jan               | 29414  | 27355     | 0      | 0         | 16275         | 15136     | 0,0                        | 0,0         |
| Feb               | 27133  | 25233     | 0      | 0         | 14781         | 13746     | 0,0                        | 0,0         |
| Mar               | 18325  | 17042     | 262    | 244       | 16271         | 15132     | 0,0                        | 0,0         |
| Apr               | 13981  | 13003     | 2      | 1         | 13817         | 12850     | 0,0                        | 0,0         |
| Mei               | 7029   | 6537      | 2750   | 2558      | 18022         | 16761     | 2,0                        | 5,0         |
| Jun               | 1496   | 1391      | 5286   | 4916      | 20137         | 18727     | 3,0                        | 10,0        |
| Jul               | 260    | 242       | 5189   | 4826      | 19852         | 18462     | 10,0                       | 20,0        |
| Aug               | 1496   | 1391      | 5286   | 4916      | 20137         | 18727     | 5,0                        | 30,0        |
| Sep               | 7029   | 6537      | 2750   | 2558      | 18022         | 16761     | 2,0                        | 20,0        |
| Okt               | 18325  | 17042     | 262    | 244       | 16271         | 15132     | 0,0                        | 0,0         |
| Nov               | 27133  | 25233     | 0      | 0         | 14781         | 13746     | 0,0                        | 0,0         |
| Dec               | 29414  | 27355     | 0      | 0         | 16275         | 15136     | 0,0                        | 0,0         |
| SOM               | 181035 | 168362    | 21767  | 20262     | 204642        | 190317    | 22,0                       | 85,0        |
| KPI               | 1,08   |           | 1,08   |           | 1,08          |           | 0,26                       |             |

Note1: the indoor temperature set points (thermisch comfort, actueel) shown in the table corresponds to the time slot during opening hours. During closing hours the climatation system turns off letting the building to cold down up to 15oC.

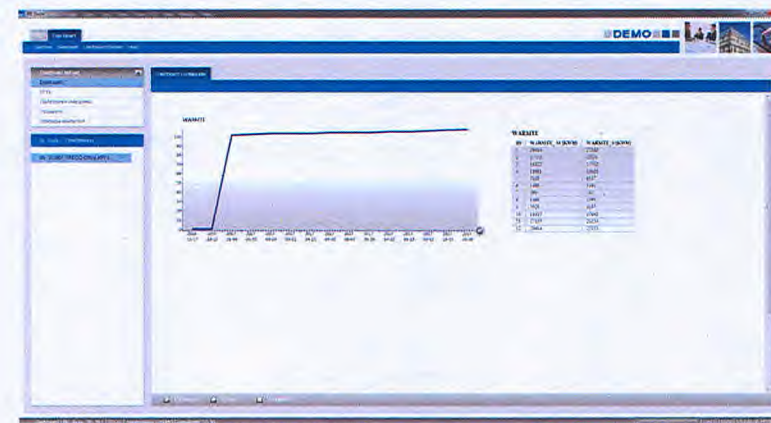
Note2: The first 5 days of January are missing in 'warmte actueel'. This could cause a -16% of deviation in the data.

De KPI's worden ingevuld met pilot data uit het demonstratiecasus IFD-kantoorgebouw te Delft. T.b.v. het opstellen van de KPI Dashboard, maken we vergelijking tussen de Actuele waarde (o.b.v. gegevens uit gebouwbeheersysteem) en Simulatie waarde (o.b.v. berekening VA114, Trnsys o.i.d.).

Een KPI Dashboard incl. BIM/3D viewer is ingericht en operationeel gemaakt in DEMO RE Suite software. Het voorbeeld van de TRECO Dashboard en Trend en drilldown van één KPI zijn afgebeeld hieronder.



Figuur 39. Hoofdpagina van het dashboard



Figuur 39 Grafische weergave van de data op het dashboard

|                          |                                                                  |
|--------------------------|------------------------------------------------------------------|
| Corresponderende bijlage |                                                                  |
| WP 6.3                   | 6.3.1 Blauwdruk voor raamwerk protocollen (openbaar via website) |

## Discussie, conclusie en aanbevelingen

Aanbieders van kantoorruimte willen huisvesting 'all-in' kunnen aanbieden. De energiekosten zijn daarbij onderdeel van die 'all-in prijs'. Om financieel risico te beperken en mogelijk om zelfs een financieel voordeel te realiseren, dient het werkelijke energiegebruik nauwkeurig voorspelbaar te zijn en tussentijds gemonitord te worden.

Er is om de huisvesting 'all-in' te kunnen aanbieden behoefte aan een door de markt breed geaccepteerde richtlijn hoe men het werkelijk energiegebruik kan voorspellen. Aanbeveling is om vanuit de blauwdruk die ISSO in het kader van de TRECO-Office heeft ontwikkeld, deze verder te ontwikkelen tot een volwaardige ISSO-publicatie en een Beoordelingsrichtlijn (BRL), zodat deze dienstverlening, het voorspellen van het werkelijke energiegebruik, voor de prestatiecontracten, door de marktpartijen ook onder certificering kan plaatsvinden.



#### 4.6 Discussie van de resultaten

##### *Meten is niet altijd weten*

De TRECO-Office projecten tonen aan dat het meer meten meestal niet tot meer inzicht leidt. Op delen van een installatie (zoals de opwekkingsrendementen, of de warmteafgifte aan een bouwdeel) is voorspellen goed mogelijk. Maar voor het gebouw als geheel blijkt dit een lastig proces.

Daarom is een begin gemaakt met data-analyse. De modelvorming vanuit analytisch oogpunt is daarmee losgelaten. We kijken alleen naar de data en proberen uit de data een model te achterhalen. Voor gebouwen, waar weinig data over het algemeen beschikbaar is, staat dit nog in de kinderschoenen.

##### *Energiegebruik en gebruikersgedrag*

In TRECO-Office bestudeerden we de invloed van gebruikersgedrag op de energievraag. Voor dit doel zijn metingen en analytische methodes ontwikkeld. Dit leidt tot de volgende resultaten:

1. Een low-cost toolset is ontwikkeld om de gewenste parameters te meten. De meetmethode kan in vergelijkbare gebouwen worden toegepast, met wat oudere installaties en analoge energiemeters.
  - a. Gas meter. Data van analoge gasmeters zijn digital opgenomen met een camera en beeld herkenning technieken.
  - b. Aanwezigheidsmeting. De bezetting van het gebouw is gemonitord en geregistreerd met een camera met herkenningstechniek.
  - c. Elektriciteitsmeters. De elektrische energy die is verbruikt is gemonitord en geregistreerd met tussenmeters.
  - d. Het gedateerde BMS is vervangen door een state-of-art BMS dat diverse meetdata uit de gebouwinstallatie kan registreren en bewaren.
2. De volgende analytische methoden zijn ontwikkeld:
  - a. Patroon en dispersie analyse. Onderzoeken van patroon en dispersie relaties samen met onderzoek van het energie gebruik per persoon [kWh/persoon] gekoppeld aan het aantal aanwezigen. Deze analyse is gedaan met werkelijk gemeten data.
  - b. Onderverdeling van het elektriciteitsgebruik naar verbruikers op basis van werkelijk gemeten data.
  - c. Gevoeligheidsanalyse van de koudevraag. Deze analyse is gebaseerd op modelmatig onderzoek.
  - d. Parameter analyse van de warmtevraag op basis van werkelijk gemeten data.
3. Uit deze studie zijn de volgende conclusies getrokken:
  - a. De invloed van de bezetting op de energievraag is geringer dan verwacht. De gebruikersinvloed op het uurlijkse energiegebruik in deze TRECO-Office democase is geraamd op 12% voor elektriciteit, 20% voor koeling en 3% voor verwarming.
  - b. De impact van gebruikersgedrag is verwacht geringer te zijn naar mate het niveau van regeling meer centraal geregeld is.
  - c. Om het gebruikersgedrag nader te analyseren zijn ook gebruikparameters van het openen van ramen en de bediening van de zonwering noodzakelijk.

##### *Het leggen van verbanden tussen data analyse van meetdata en data uit gebouwssimulaties*

Behalve met de toepassing van machine learning is met betrekking tot simulaties op gebouwniveau vooruitgang geboekt. Zogenoemde hoge-resolutiemodellen werden in het verleden enkel toegepast voor comfortberekeningen op vertrek niveau (temperatuuroverschrijdingsberekeningen). In TRECO-Office is aangetoond dat 'whole building simulation' ook in de praktijk toepasbaar is. Dit was zeker

niet vanzelfsprekend omdat, met betrekking tot beschikbare commerciële software, gedurende de loop van het project ook stappen gezet zijn met betrekking tot rekensnelheid (Vabi Elements). In TRECO-Office is niet alleen aangetoond dat 'whole building simulation' in de praktijk toepasbaar is, op basis van de data uit de diverse casussen is ook gebleken wat de kritische factoren zijn voor de zogenoemde 'performance gap'. Verder is er een vernieuwende stap gezet door de simulatiresultaten van Hysopt voor hydraulische schema's te vergelijken met meetdata en ook daarvoor de performance gap inzichtelijk te maken.

Gebleken is dat, voor het totaal van de energierekening - inclusief apparatuur en verlichting, de gebruikersprofielen de eerste belangrijke invloedsfactor vormen. Het faalgedrag van de werktuigkundige installatie was voor de onderzochte panden een secundaire invloedsfactor op het totaal van de energierekening, maar heeft een duidelijk significante impact op de warmte- en koudevraag. Faal diagnose van de werktuigkundige installatie is daarom belangrijk om prestatiecontracten met betrekking tot (stads)warmte- en koude operationeel te maken.

##### *Faal diagnose*

Met betrekking tot faal diagnose blijkt het toepassen van machine learning een snelle en effectieve methode. De model-based approach blijft noodzakelijk, omdat toepassing van machine learning voldoende historische data vraagt om een oordeel te kunnen vellen. De model-based approach blijft verder van belang in verband met onafhankelijke benchmarking van de energieprestaties ten opzichte van het ontwerp.

Inbedding van de ontwikkelde methodes en tools binnen een totaaltraject van commissioning is verder essentieel. 'Manual commissioning' door middel van procesbegeleiding, interviews, checklists en visuele inspecties is een belangrijke randvoorwaarde voor toepassing van de nieuwe instrumenten van TRECO-Office.

Uit de resultaten blijkt dat de voorgestelde methodologie goed werkt en ondersteuning biedt bij het kiezen van een modelcomplexiteit. Ook geeft de methodologie inzicht in de gevoeligheid van de KPI voor de verschillende aspecten van het gebruikersgedrag. De resultaten van de case studies laten zien dat onzekerheid in het gebouwgebruik in veel gevallen een grotere invloed heeft op de berekende spreiding in de KPI, dan de onzekerheid in de materiaaleigenschappen. Om de prestaties van een gebouw nauwkeurig te kunnen voorspellen is het voor veel gebouwen dus erg belangrijk om het gebouwgebruik goed te begrijpen. De resultaten van de case studies laten echter ook zien dat dit niet voor alle gebouwen belangrijk is. Het is dus altijd van de belang om te onderzoeken voor welke aspecten de KPI's gevoelig zijn.

##### *Visualisatie van KPI's en blauwdruk prestatiecontract*

TRECO-Office laat het zien dat de dataconnectie tussen het GBS, BIM en KPI Dashboard mogelijk is. Echter is dit nog een "eenrichtingsverkeer" of met andere woorden geen mogelijkheid voor aansturing van het GBS op basis van de inzichten in BIM/KPI Dashboard. In de toekomst zou deze (semi)automatische optimalisatie ook mogelijk zijn via 'BIM-based Internet of Things (IoT) control systems'.

Er is om de huisvesting 'all-in' te kunnen aanbieden behoefte aan een door de markt breed geaccepteerde richtlijn hoe men het werkelijk energiegebruik kan voorspellen. Aanbeveling is om vanuit de blauwdruk die ISSO in het kader van de TRECO-Office heeft ontwikkeld, deze verder te ontwikkelen tot een volwaardige ISSO-publicatie en een Beoordelingsrichtlijn (BRL), zodat deze dienstverlening, het voorspellen van het werkelijke energiegebruik, voor de prestatiecontracten, door de marktpartijen ook onder certificering kan plaatsvinden.