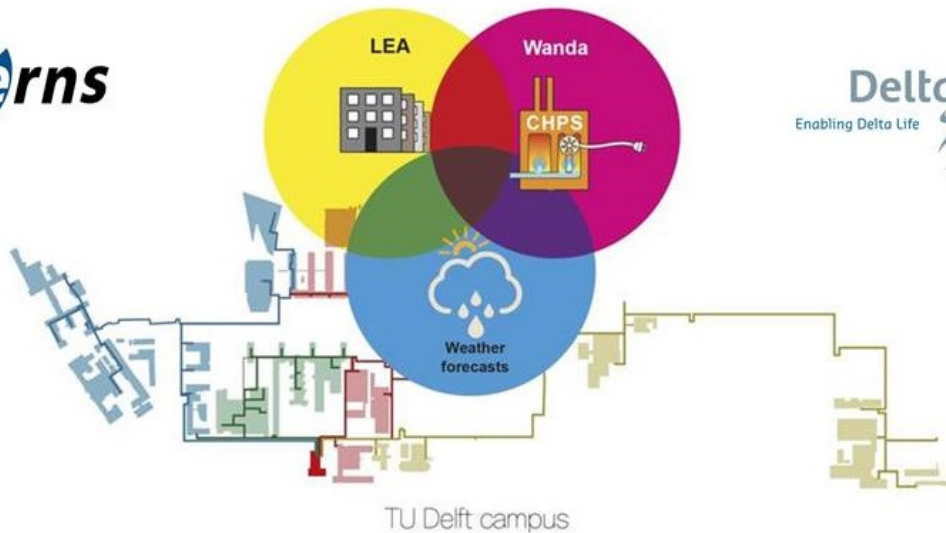


23 december 2016

Intelligent Warmtenet Campus TU Delft





Intelligent Warmtenet Campus TU Delft

Ir. Paul Stoelinga (Deerns)
Ir. Renske Kind (Deerns)
Ir. Roman Aalbers (Deerns)
Ir. David Wesdorp (Deerns)
Ir. Sam van der Zwan (Deltares)
Dr. Ir. Ivo Pothof (Deltares)

Martin Staal (Kuijpers)
Michel Beekwilder (Kuijpers)
Ing. Gerard van der Hoeven (Priva)
Mariëlle Veldkamp (Van Beek)

Contact

Paul Stoelinga
Penvoerder
paul.stoelinga@deerns.com
+31 88 3740438

Deerns Nederland B.V.

Rijswijk, 23 december 2016

Projectnr: RNL.160.12.04043.04
IPINS01013-eindrapportage-20161223-v1.0

Inhoud

Deel A Projectgegevens

| | | |
|------------|------------------------|----------|
| A-1 | Projectgegevens | 7 |
|------------|------------------------|----------|

Deel B Inhoudelijk eindrapport

| | | |
|------------|---|-----------|
| | Verklaring van afkortingen | 10 |
| | Samenvatting | 11 |
| B-1 | Inleiding | 13 |
| B-1.1 | Doelstelling | 13 |
| B-1.2 | Layout warmtenet | 14 |
| B-1.3 | Leeswijzer | 14 |
| B-2 | Werkwijze | 15 |
| B-2.1 | Scenariostudie | 15 |
| B-2.2 | Ontwikkeling dynamische warmtenetregeling | 18 |
| B-2.3 | Inrichting monitoringsysteem | 23 |
| B-2.4 | Modificatie van de warmtekrachtcentrale | 26 |
| B-2.5 | Koppeling DWNR en WKC | 29 |
| B-2.6 | Praktijktest in gebouw 32 | 29 |
| B-2.7 | Implementatie in tak noord 2 | 30 |
| B-3 | Resultaten | 31 |
| B-3.1 | Resultaten scenariostudie | 31 |
| B-3.2 | Resultaten praktijktest gebouw 32 | 37 |
| B-3.3 | Resultaten implementatie tak noord 2 | 41 |
| B-4 | Mogelijkheden voor spin off en vervolgactiviteiten | 48 |
| B-4.1 | Uitbreiding warmtenetregeling TU Delft | 48 |
| B-4.2 | Verdere ontwikkeling van de dynamische warmtenetregeling | 48 |
| B-4.3 | Marktpotentie van de dynamische warmtenetregeling | 48 |
| B-5 | Conclusies en aanbevelingen | 49 |
| B-5.1 | Potentieel van de dynamische warmtenetregeling | 49 |
| B-5.2 | Implementatie van de dynamische warmtenetregeling | 50 |
| B-5.3 | Aanbevelingen | 50 |
| | Literatuur | 54 |

Deel C Uitvoering van het project

| | | |
|------------|--|-----------|
| C-1 | Problemen en oplossingen | 56 |
| C-1.1 | Organisatorische problemen en hun oplossingen | 56 |
| C-1.2 | Technische problemen en hun oplossingen | 57 |
| C-2 | Wijzigingen ten opzichte van het projectplan | 59 |
| C-2.1 | scope | 59 |
| C-2.2 | Doelstellingen | 59 |
| C-3 | Verschillen tussen de begroting en de werkelijk gemaakte kosten | 62 |
| C-4 | Wijze van kennisverspreiding | 63 |

Bijlagen

| | | |
|------------------|---|-----------|
| Bijlage 1 | Heating prediction in buildings through statistical models | 65 |
| Bijlage 2 | Schermafdrucken warmtenetregeling | 73 |
| Bijlage 3 | Monitoring voorbeelden | 75 |

Intelligent Warmtenet Campus TU Delft

Deel A

Projectgegevens

A-1 Projectgegevens

| | | |
|-----------------------|---|---|
| <i>Projectnummer</i> | IPINS01013 | Kenmerken beschikking: 14 dec 2011 : IPINS1103UQY4U/ 8 juli 2016 : IPINS1606HKNCU |
| <i>Projecttitel</i> | Intelligent warmtenet Campus TU Delft | |
| <i>Penvoerder</i> | Deerns Nederland B.V. | David Wesdorp |
| <i>Medeaanvragers</i> | Technische Universiteit Delft Stichting Deltares Kuijpers installaties Utrecht B.V. Priva B.V. | |
| <i>Projectperiode</i> | 14 december 2011 – 8 juli 2016 8 juli 2016 - 30 september 2016 | Oorspronkelijk project Gewijzigd project |

Bovengenoemde partijen en hun vertegenwoordiger worden hieronder nader aangeduid.

Deerns Nederland B.V., gevestigd te Rijswijk, vertegenwoordigd door H.H.J.Lousberg, algemeen directeur, geregistreerd bij de Kamer van Koophandel onder nummer 27047671, hierna te noemen "DEERNS",

en

Kuijpers Installaties Utrecht B.V., gevestigd te De Meern, vertegenwoordigd door M.L. Beekwilder, Regiodirecteur, geregistreerd bij de Kamer van Koophandel onder nummer 30082611, hierna te noemen "KUIJPERS",

en

Stichting Deltares, gevestigd te Delft, vertegenwoordigd door W.M.K. Tilmans, directeur, geregistreerd bij de Kamer van Koophandel onder nummer: 41146461, hierna te noemen "DELTARES",

en

Priva B.V., gevestigd te De Lier, vertegenwoordigd door R. Prins, directeur, geregistreerd bij de Kamer van Koophandel onder nummer: 27218816, hierna te noemen "PRIVA",

en

de Technische Universiteit Delft, gevestigd en kantoorhoudende te Delft aan de Stevinweg 1 aldaar voor deze overeenkomst rechtsgeldig vertegenwoordigd door mevr. Ir. J.G. Stokkers, directeur FMVG geregistreerd bij de Kamer van Koophandel onder nummer: 27364265, hierna te noemen "TU DELFT" die gemachtigd is om deze overeenkomst namens de TU Delft te ondertekenen,

Intelligent Warmtenet Campus TU Delft

Deel B

Inhoudelijk eindrapport

Verklaring van afkortingen

| | |
|------|--|
| DWNR | dynamische warmtenetregeling |
| GBS | gebouwbeheersysteem |
| IPIN | Innovatieprogramma Intelligente Netten |
| LBK | luchtbehandelingskast |
| WKC | warmtekrachtcentrale |
| WKK | warmtekrachtkoppeling |

Samenvatting

TU Delft werkt aan verduurzaming van de campus. Eén van de verduurzamingsprojecten betreft de verwarming van de gebouwen. Een groot aantal gebouwen wordt verwarmd door middel van centrale warmteopwekking in de warmtekrachtcentrale (WKC) en distributie van deze warmte via een warmtenet. Dit systeem werkt momenteel met hoge temperaturen (130 °C bij een buitentemperatuur van -10 °C) en zonder dat er afstemming plaatsvindt tussen de gebouwen en de WKC. Hierdoor worden de aanwezige opwekkingsinstallaties - twee warmtekrachteenheden (WKK's) en drie gasgestookte ketels - niet optimaal ingezet. Bovendien staat deze opzet de integratie van duurzame energiebronnen, bijvoorbeeld een geothermische installatie, in de weg.

Om de efficiëntie van het systeem te vergroten en de inzet van duurzame bronnen mogelijk te maken, is een verlaging van het temperatuurniveau noodzakelijk. Om dit te bereiken, zonder zeer kostbare renovaties van alle gebouwen of een verlies aan comfort, is nieuwe regeling ontworpen, de dynamische warmtenetregeling (DWNR). Deze intelligente regeling stuurt op integrale, intelligente en anticiperende wijze zowel het warmtenet als de gebouwinstallaties aan, waarbij de vraag en het aanbod van warmte optimaal op elkaar worden afgestemd. In de DWNR wordt de verwachte warmtevraag door middel van real-time simulaties berekend op basis van een groot aantal parameters, zoals de gebouweigenschappen, gebruikspatronen en weersomstandigheden. Bovendien wordt ook rekening gehouden met de dynamische aspecten, door niet alleen de actuele situatie te beschouwen, maar tevens een aantal uur historie en de verwachting voor de komende 24 uur.

Potentieel van de dynamische warmtenetregeling

Scenariostudies voor de warmtenetomgeving van TU Delft met DWNR en de gebouwmodellen laten zien dat substantiële verlaging van de temperaturen van het warmtenet gedurende een groot deel van het jaar mogelijk is, waardoor de WKK's meer kunnen worden ingezet. Dit resulteert in een reductie van het primaire energiegebruik van circa 31% ten opzichte van de huidige situatie. De totale CO₂-uitstoot wordt gereduceerd met circa 49%. Dit wordt met name veroorzaakt door vermeden (landelijke) elektriciteitsproductie.

Over het geheel bezien resulteert de toepassing van de DWNR in een jaarlijkse kostenbesparing van circa € 300.000. Dit komt overeen met een kostenreductie van 33% ten opzichte van de huidige situatie. De kostenreductie wordt veroorzaakt door vermeden elektriciteitsinkoop.

De scenariostudie laat tevens zien dat de DWNR kan bijdragen aan de haalbaarheid van de toepassing van een geothermische installatie. Deze installatie zou circa 67.000 GJ van de benodigde warmte kunnen leveren. Dit zou resulteren in een reductie van het primaire energiegebruik van circa 60% en de reductie van de CO₂-uitstoot van circa 58% ten opzichte van de situatie voor implementatie van de DWNR.

De DWNR geeft een beeld over de realistische of potentiële energievraag van dat gebouw. Vergelijking van de potentiële met de werkelijke energievraag kan aan het licht brengen of een gebouw goed functioneert of niet en in welke richting de oorzaak gezocht moet worden. Dat inzicht kan worden gebruikt om de gebouwen en hun (regel)installaties te verbeteren en energiezuiniger te maken.

Implementatie van de dynamische warmtenetregeling

Na een succesvol verloop van een praktijktest in gebouw IO, is het volledige prototype van DWNR geïmplementeerd in een volledige tak van het warmtenet. De gehele technische implementatie is relatief snel en voorspoedig verlopen.

Met de implementatie in tak noord 2 is de technische haalbaarheid van de DWNR aangetoond. Technisch gezien functioneert de DWNR. Op grond van de opgedane ervaringen is er geen aanleiding om de structuur van het ontwerp ingrijpend te herzien. Wel blijkt het nodig om een aantal modificaties uit te voeren.

Op dit moment doorloopt het systeem een validatieperiode. Een groot deel van het systeem functioneert goed en tot nu toe geconstateerde gebreken en onvolkomenheden lijken oplosbaar, of zijn gaande het validatieproces al verholpen. Niettemin kan dit moment nog niet worden gesproken van bevredigend functioneren. De validatieperiode loopt tot eind februari. Op grond van de bevindingen aan het eind van de validatieperiode wordt door TU Delft besloten of de DWNR ook in de andere takken van het warmtenet zal worden geïmplementeerd.

De DWNR bevindt zich in een staat van prototype, verkeert in een testfase en is nog verre van optimaal, maar draait wel in een operationele omgeving, die het primaire proces van TU Delft direct faciliteert. Dit is een situatie die eigenlijk voorkomen zou moeten worden.

Aanbevelingen

De DWNR lijkt te kunnen zorgen voor een substantiële reductie van de energiekosten en een even substantiële verhoging van de duurzaamheid van de warmtevoorziening van TU Delft. Er wordt dan ook geadviseerd om het operationele prototype gedurende de komende winterperiode intensief te monitoren. Op basis van de resultaten van de validatie kan een uitspraak worden gedaan met betrekking tot de werking van de modellen en de effecten van de DWNR op het comfort in de gebouwen. Vervolgens kan een besluit worden genomen over de uitrol van de DWNR over de andere takken van het warmtenet en de noodzakelijke functionaliteiten.

B-1 Inleiding

TU Delft werkt aan verduurzaming van de campus. De universiteit heeft de ambitie om in 2020 een kwart van de dan bestaande energievraag zelf op te wekken, op duurzame wijze. Ook wil zij 40% energie besparen en haar CO₂-uitstoot met de helft terugbrengen. Eén van de verduurzamingsprojecten betreft de verwarming van de gebouwen. Een groot aantal gebouwen wordt verwarmd door middel van centrale warmteopwekking in de warmtekrachtcentrale (WKC) en distributie van deze warmte via een warmtenet. Dit systeem werkt momenteel met hoge temperaturen (130 °C bij een buitentemperatuur van -10 °C) en zonder dat er afstemming plaatsvindt tussen de gebouwen en de WKC. Hierdoor worden de aanwezige energie-opwekkers niet optimaal ingezet. Bovendien staat deze opzet de integratie van duurzame energiebronnen in de weg.

Om de efficiëntie van het systeem te vergroten en de inzet van duurzame bronnen mogelijk te maken, is een verlaging van het temperatuurniveau noodzakelijk. Het eenvoudigweg verlagen van het temperatuurtraject zal in de - grotendeels oude - gebouwen echter leiden tot een sterk verminderd comfort. Dit is dan ook geen optie. Grootschalige renovatie van alle gebouwen is mogelijk en energetisch wellicht het meest voor de hand liggend, maar vergt een zeer grote investering. Om deze bezwaren te overkomen is besloten de oplossing te zoeken in de aansturing van de installaties. Dit heeft geresulteerd in de ontwikkeling van een zogenaamde dynamische warmtenetregeling (DWNR). Deze intelligente regeling stuurt op integrale wijze zowel het warmtenet als de gebouwinstallaties aan, waarbij de vraag en het aanbod van warmte optimaal op elkaar worden afgestemd.

Het project is uitgevoerd in het kader van het door de overheid geïnitieerde programma Innovatieprogramma Intelligente Netten (IPIN), door een samenwerkingsverband tussen TU Delft, Deerns, Deltares, Kuijpers, Priva en Van Beek.

B-1.1 Doelstelling

De doelstelling van het project is de ontwikkeling van een werkend prototype van een dynamische warmtenetregeling (DWNR) en de implementatie daarvan in één van de takken van het warmtenet (tak noord 2). Deze regeling moet in staat zijn het warmtenet en de CV-installaties van de op het warmtenet aangesloten gebouwen op integrale, intelligente en anticiperende wijze aan te sturen.

Met de toepassing van de DWNR wordt beoogd het temperatuurtraject van het warmtenet, wanneer mogelijk, naar een zodanig laag niveau worden gebracht, dat de inzet van de preferente warmteopwekkingsinstallaties wordt gemaximaliseerd. Tegelijkertijd dient de regeling te waarborgen dat het thermisch comfortniveau ten minste gelijk is aan het niveau vóór implementatie van de DWNR.

De strategie die ten grondslag ligt aan de DWNR is een optimale afstemming van de vraag naar en het aanbod van warmte, zowel wat betreft temperatuurniveau als de hoeveelheid energie. Voorheen werkte de WKC op basis van een stooklijn, waarbij de temperatuur werd bepaald op basis van de buitentemperatuur. In de DWNR worden veel meer factoren meegenomen, zoals de gebouweigenschappen, gebruikspatronen en weersomstandigheden. Bovendien wordt ook rekening gehouden met de dynamische aspecten, door niet alleen de actuele situatie te beschouwen, maar tevens de historie en de verwachting voor de komende 24 uur.

De warmteopwekkingsinstallatie in de WKC bestaat uit twee warmtekrachtinstallaties (WKK's) en drie gasgestookte ketels. Hoewel de WKK's per eenheid geproduceerde warmte meer gas gebruiken dan de ketels, produceren ze naast warmte ook elektriciteit. Aannemende dat hiermee in een gedeelte van de elektriciteitsvraag kan worden voorzien, betekent dit dat er minder elektriciteit hoeft te worden ingekocht. Dit resulteert in een lagere elektriciteitsrekening en, afhankelijk van het type ingekochte elektriciteit, mogelijk ook een kleinere CO₂-uitstoot. Inzet van de WKK's geniet daarom de voorkeur

boven inzet van de ketels. De WKK's kunnen uitsluitend functioneren als de retourtemperatuur in het warmtenet lager is dan 83 °C. In de voormalige situatie schakelden de WKK's vaak uit vanwege een te hoge retourtemperatuur. Door toepassing van de DWNR wordt beoogd de totale jaarlijkse tijdsduur dat aan bovengenoemde conditie wordt voldaan te maximaliseren, zodat de WKK's maximaal kunnen worden ingezet.

TU Delft onderzoekt tevens de mogelijkheid tot het aanleggen van een geothermische installatie. Deze installatie zal warmte produceren met een temperatuur van 70 °C. De retourtemperatuur mag niet hoger zijn dan 65 °C. Door toepassing van de DWNR wordt beoogd de inzet van deze eventuele geothermische installatie te maximaliseren.

B-1.2 Layout warmtenet

Het warmtenet op de campus van de TU Delft voorziet een groot aantal gebouwen van warmte. Deze warmte wordt centraal opgewekt in de warmtekrachtcentrale (WKC). De opwekkinginstallaties hebben een totaal thermisch vermogen van 84 MW_{th} en bestaan uit de volgende onderdelen:

- 3 verwarmingsketels met vermogens van respectievelijk 15, 30 en 35 MW_{th};
- 2 WKK-eenheden, beide met een vermogen van 2 MW_{th}.

De centraal opgewekte warmte wordt via het warmtenet naar de diverse afnemers gedistribueerd. Het warmtenet bestaat uit vier takken, als volgt:

- tak noord 1 (n1);
- tak noord 2 (n2);
- tak zuid 1 (z1);
- tak zuid 2 (z2).

De warmte uit het warmtenet wordt via warmtewisselaars overgedragen aan het CV-net van de aangesloten gebouwen. Momenteel staan er 101 warmtewisselaars opgesteld met een totaal vermogen van 91.534 kW.

B-1.3 Leeswijzer

In de hoofdstukken B-2 en B-3 worden achtereenvolgend de werkwijze en de resultaten van het project beschreven. In hoofdstuk B-4 worden de resultaten in een breder perspectief beschouwd, namelijk in de vorm van mogelijkheden voor spin-off en vervolgactiviteiten. Hoofdstuk B-5 omvat de conclusies en aanbevelingen.

B-2 Werkwijze

Het project is uitgevoerd in een aantal stappen, namelijk:

1. scenariostudie;
2. ontwikkeling van het dynamische warmtenetmodel;
3. ombouw van de WKC;
4. praktijktest in gebouw 32;
5. implementatie in tak noord 2.

In dit hoofdstuk wordt voor iedere stap de werkwijze beschreven.

B-2.1 Scenariostudie

De haalbaarheid en het potentieel van het verlagen van het temperatuurtraject van het warmtenet is getoetst middels een scenariostudie. Hierbij zijn verschillende scenario's geformuleerd, die zich van elkaar onderscheiden door de strategie met betrekking tot het bepalen van de temperatuur van het warmtenet. Deze scenario's zijn vervolgens bestudeerd middels simulaties van zowel de energiehuishouding in de op het warmtenet aangesloten gebouwen als het gedrag van het warmtenet. Daarbij is onderzocht in hoeverre verlaging van het temperatuurtraject mogelijk is, zonder dat dit resulteert in een verlies aan algemeen thermisch comfort in de gebouwen. Het comfort wordt beoordeeld op basis van de methode van Fanger [1] en uitgedrukt in het aantal gewogen overschrijdingsuren (GTO-uren).

Uit de scenariostudie volgt voor ieder scenario het aantal vollasturen van de diverse energiebronnen. Dit is vervolgens omgerekend naar energiegebruik, CO₂-uitstoot en energiekosten. Aangezien de gebruikte modellen een vereenvoudiging zijn van de werkelijkheid en gebaseerd op diverse aannamen, wordt met deze resultaten niet beoogd een voorspelling te geven van het energiegebruik. Wel geven de resultaten een indicatie van de verschillen tussen de diverse scenario's.

De simulaties zijn uitgevoerd met een combinatie van twee simulatiepakketten. De gebouwsimulaties zijn uitgevoerd in LEA, ontwikkeld door Deerns; de simulaties van het warmtenet zijn uitgevoerd in Wanda, ontwikkeld door Deltares. De simulatiemodellen zijn op zodanige wijze aangepast, dat uitwisseling van data tussen beide pakketten mogelijk is. Zodoende kan een integrale simulatie worden uitgevoerd.

De simulaties zijn uitgevoerd over een geheel jaar. Als referentie-klimaatjaar is gebruik gemaakt van het klimaatbestand in NEN 5060:2008, bijlage B, met een onder-/overschrijdingskans van 5% [2].

B-2.1.1 Beschrijving Scenario's

Hieronder volgt een beschrijving van de bestudeerde scenario's.

Scenario 1

Dit betreft de huidige situatie. De aanvoertemperaturen van het warmtenet worden bepaald door de hogetemperatuur-stooklijn (HT-stooklijn). Deze temperaturen worden aangeboden aan het gebouw, waarna wordt berekend welke binnentemperaturen hiermee worden gerealiseerd. Het algemeen thermisch comfort, uitgedrukt als het aantal GTO-uren, dat hieruit volgt, wordt als acceptabel beschouwd en gebruikt als referentiecomfort.

Scenario 2

Dit betreft de situatie waarbij de aanvoertemperaturen van het warmtenet worden bepaald door de middentemperatuur-stooklijn (MT-stooklijn). Er worden geen maatregelen getroffen om het comfort te verbeteren; het comfort is mogelijk lager dan het referentiecomfort.

Scenario 3

In dit scenario wordt niet met een stooklijn gewerkt. In plaats daarvan wordt voor ieder gebouw en voor ieder uur met simulaties bepaald welke aanvoertemperatuur minimaal benodigd is om een acceptabel comfort te realiseren bij een minimaal energiegebruik. Daarbij wordt geen gebruik gemaakt van de mogelijkheid tot vervroegd aanwarmen.

Scenario 4

In dit scenario wordt niet met een stooklijn gewerkt. Voor ieder gebouw en voor ieder uur wordt de minimaal benodigde aanvoertemperatuur berekend, met als doel een acceptabel comfort te realiseren bij een minimale overschrijding van de grenswaarde voor de aanvoertemperaturen van het warmtenet van 103 °C. Om overschrijding van de grenswaarde te minimaliseren wordt, wanneer dit zinvol is, gebruik gemaakt van de mogelijkheid tot vervroegd aanwarmen. Het doel van dit scenario is de inzet van de WKK's te maximaliseren. De WKK's kunnen worden ingezet zolang de retourtemperatuur van het warmtenet niet hoger is dan 83 °C. Uitgaande van een temperatuurverschil tussen aanvoer en retour van 20 °C, komt dit overeen met een maximale aanvoertemperatuur van 103 °C.

Scenario 5

In dit scenario wordt niet met een stooklijn gewerkt. Voor ieder gebouw en voor ieder uur wordt de minimaal benodigde aanvoertemperatuur berekend, met als doel een acceptabel comfort te realiseren bij een minimale overschrijding van de grenswaarde voor de aanvoertemperaturen van het warmtenet van 67 °C. Om overschrijding van de grenswaarde te minimaliseren wordt, wanneer dit zinvol is, gebruik gemaakt van de mogelijkheid tot vervroegd aanwarmen. Het doel van dit scenario is de inzet van een geothermisch installatie te maximaliseren. Aangenomen is dat de geothermische installatie een maximale aanvoertemperatuur levert van 70 °C. Uitgaande van een temperatuurverlies in het warmtenet van maximaal 3 °C, komt dit overeen met een aanvoertemperatuur ter plaatse van de gebouwen van 67 °C.

B-2.1.2 Gebouwsimulaties

LEA (Low Energy Architecture) is een simulatieprogramma voor het uitvoeren van globale simulaties van de gebouwgebonden energiehuishouding van gebouwen. LEA berekent de uurlijkse energiebehoefte voor verwarming, bevochtiging, verlichting, koeling, ventilatie en apparatuur. LEA is opgezet als een zogenaamd éénknoopsmodel. Dit betekent dat het gehele gebouw wordt gerepresenteerd door een enkel punt, de 'gebouwknoop', waarvoor per tijdstap een energiebalans wordt opgesteld. Alle bijdragen aan de energiebalans worden op de gebouwknoop betrokken. Er wordt dus geen onderscheid gemaakt tussen verschillende ruimten in het gebouw. Verondersteld wordt dat alle ruimten in het gebouw dezelfde gebruiksfunctie hebben en dat in alle ruimten hetzelfde binnenklimaat heerst. De simulaties worden uitgevoerd met tijdstappen van een uur. Door deze opzet is LEA in staat om met beperkte rekenkracht indicatieve energieberekeningen te maken voor een groot aantal gebouwen tegelijk.

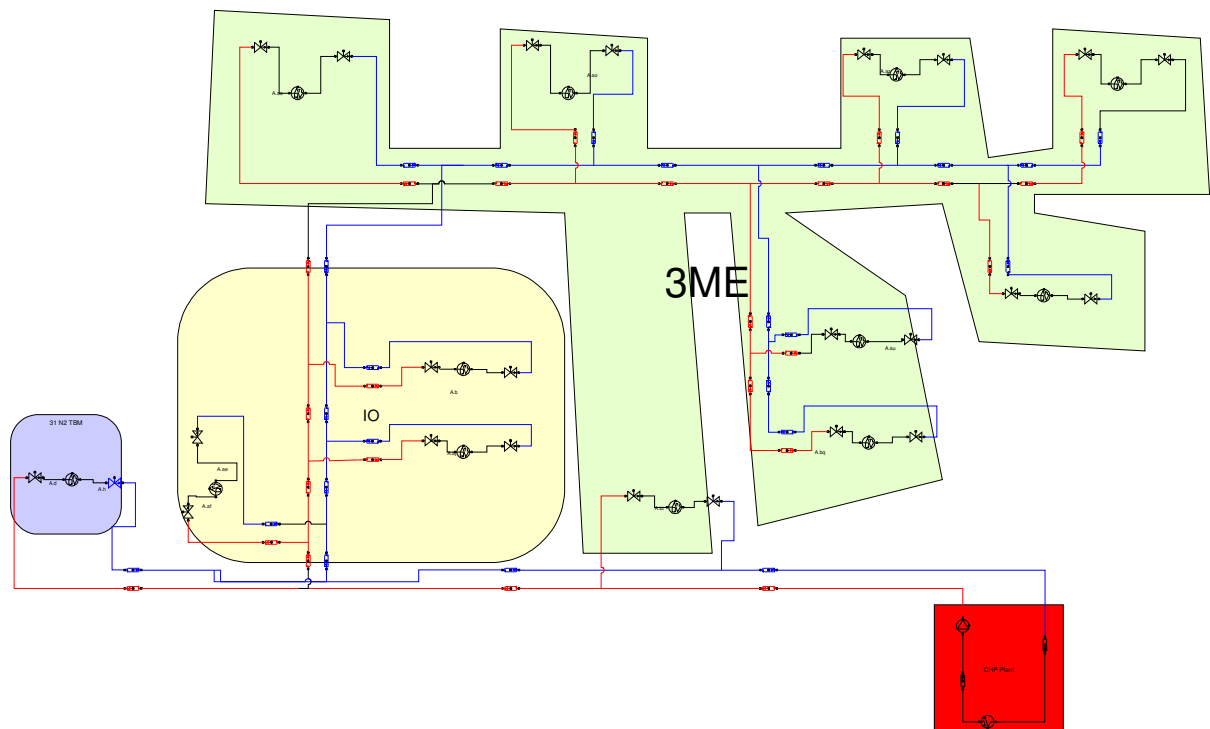
Om de gebouwen goed te simuleren zijn deze geïventariseerd en zijn de gebouweigenschappen ingevoerd. Vervolgens zijn de modellen gekalibreerd en gevalideerd door gebruik te maken van beschikbare meetdata, in combinatie met klimaatgegevens van het betreffende jaar.

In de simulaties is een optimalisatie toegepast, met als doel de minimale aanvoertemperaturen van het warmtenet te bepalen, waarbij nog net aan het comfortcriterium wordt voldaan. Het aantal GTO-uren in de geoptimaliseerde scenario's (de scenario's 3, 4 en 5) mag niet groter zijn dan de referentiewaarde. Dit leidt ertoe dat het algemeen thermisch comfort over het gehele jaar in de verschillende geoptimaliseerde scenario's vergelijkbaar is. Doordat het aantal GTO-uren wordt

berekend over een geheel jaar, kan de verdeling van eventuele overschrijdingen van de comfortgrens over het jaar wel verschillen. Ook kan het zo zijn dat in ene scenario gedurende een groot aantal uren een kleine overschrijding plaatsvindt, terwijl in het andere scenario grotere overschrijdingen plaatsvinden, maar slechts gedurende de klein aantal uren.

B-2.1.3 Warmtenetsimulaties

Wanda is het leidingssimulatie softwarepakket ontwikkeld door Deltares. Er is een hydraulisch model van het warmtenetwerk gemaakt in Wanda. Een overzicht van het model van tak noord 2 is te zien in figuur 1. In dit model zijn de relevante details van het leidingnet inclusief pompen en afleverstations meegenomen. Op basis van de input van LEA (warmtevraag per gebouw en aanvoer- en retourtemperaturen) zijn er voor een standaard klimaatjaar simulaties gedraaid om te bepalen wat de retourtemperatuur en het gevraagde thermische vermogen is bij de WKC. Dit is vervolgens omgerekend naar een broninzet. Zie voor een uitgebreide beschrijving van het Wanda model en de opzet van de simulaties [3].



Figuur 1 Overzicht van het hydraulisch model van tak noord 2.

B-2.1.4 Uitgangspunten energiegebruik, energiekosten en CO₂-uitstoot

Voor de berekeningen wordt uitgegaan van de specificaties van de diverse opwekkingsinstallaties zoals aangegeven in tabel 1. De gehanteerde kentallen voor de CO₂-emissiefactoren, kosten CO₂-emissierechten, energieprijzen en onderhoudskosten van de installaties zijn gegeven in tabel 2.

Tabel 1 Uitgangspunten voor de specificaties van de diverse warmte-opwekkingsinstallaties.

| Bron | Maximaal thermisch vermogen (MW) | Maximale temperatuur water invoer (°C) | Thermisch rendement | Elektrisch rendement | COP |
|---------------------------|----------------------------------|--|---------------------|----------------------|-----|
| WKK 1 | 2 | 83 | 45% | 40% | |
| WKK 2 | 2 | 83 | 45% | 40% | |
| Ketel 1 | | n.v.t. | 75% | | |
| Ketel 2 | 30 | n.v.t. | 75% | | |
| Ketel 3 | 35 | n.v.t. | 75% | | |
| Geothermische installatie | 14 | 70 | | | 20 |
| Ingekochte elektriciteit | | | | 45,7% * | |

* Rendement op primair fossiel (bovenste verbrandingswaarde) in 2014, volgens de integrale (gemiddelde) methode [4].

Tabel 2 Aannamen met betrekking tot de CO₂-emissiefactoren, kosten CO₂-emissierechten, energieprijzen en onderhoudskosten van de installaties.

| | |
|--|-----------------------------|
| CO ₂ -emissiefactor aardgas | 1,884 kg/Nm ³ ** |
| CO ₂ -emissiefactor elektriciteit (grijze stroom) | 0,526 kg/kWh ** |
| Kosten CO ₂ -emissierechten | 5,15 €/ton |
| Gasprijs (inclusief belastingen) | 0,21 €/m ³ |
| Elektriciteitsprijs (inclusief belastingen) | 0,06 €/kWh |
| Onderhoudskosten WKK | 16,60 €/vollastuur |
| Onderhoudskosten ketel | 3,00 €/vollastuur |

** Well to wheel CO₂-emissiefactoren [5].

B-2.2 Ontwikkeling dynamische warmtenetregeling

Nadat het potentieel van het verlagen van het temperatuurtraject in de scenariostudie was bestudeerd, is besloten over te gaan tot de ontwikkeling van een intelligente regeling. Uit de scenariostudie is gebleken dat een regeling op basis van een enkel aan de buitentemperatuur gerelateerde stooklijn niet mogelijk is zonder verlies aan comfort. Verlaging is wel mogelijk door gebruik te maken van een dynamische regeling, waarbij tevens rekening wordt gehouden met de gebouweigenschappen, de gebruikskarakteristieken en uitgebreide weersomstandigheden. Deze uitgangspunten hebben geleid tot de ontwikkeling van de dynamische warmtenetregeling (DWNR). Deze warmtenetregeling moet de zorgen voor het bepalen van de setpoints, de datacommunicatie en de daadwerkelijke aansturen van de WKC en de CV-installaties van de gebouwen. De implementatie van de DWNR heeft ook fysieke aanpassingen van de WKC en het warmtenet nodig.

B-2.2.1 Ontwikkeling simulatieomgeving voor gebruik in de regeling

De simulatieomgeving bestaat uit de gebouwmodellen in LEA en het warmtenetmodel in Wanda. Deze modellen zijn ondergebracht op een tweetal virtuele servers in de ICT-omgeving van de TU Delft.

De simulatiemodellen, zoals gebruikt in de scenariostudie, zijn geschikt gemaakt voor gebruik in de regeling. In de scenariostudie werden alleen simulaties uitgevoerd over een geheel jaar met een vaste starttijd, namelijk 1 januari om 00:00 uur. De simulaties in de regeling worden uitgevoerd over een korte tijdsperiode en met een wisselende starttijd.

De simulaties worden ieder uur uitgevoerd in de volgende stappen:

- 1 Inlezen actuele ruimtetemperatuur;
- 2 Inlezen weersverwachting;
- 3 Gebouwsimulaties;
- 4 Uitvoer van de setpoints voor de gebouwinstallaties;
- 5 Dataoverdracht van LEA naar Wanda;
- 6 Warmtenetsimulatie;
- 7 Uitvoer van de setpoints voor het warmtenet.

De diverse stappen worden hieronder beschreven.

1 Inlezen actuele ruimtetemperatuur

De gewogen gemiddelde actuele ruimtetemperatuur in ieder gebouw wordt ingelezen vanuit het GBS en dient als input voor de gebouwsimulaties.

2 Inlezen weersverwachting

De weersverwachting voor de komende 24 uur wordt ingelezen vanaf een centrale meteodienst en dient als input voor de gebouwsimulaties.

3 Gebouwsimulaties

LEA voert voor ieder gebouw een simulatie uit met tijdstappen van een uur over een fictieve tijdsperiode van 30 uur. 6 uur daarvan is historie, de overige 24 uur betreft een verwachting. Het in de berekening meenemen van de recente historie is nodig in verband met het dynamische gedrag van het gebouw, in het bijzonder de warmteaccumulatie. Door 24 uur vooruit te simuleren kan worden geanticipeerd op de te verwachten warmtevraag. Dit heeft de volgende voordelen: bij een verwachte piek in de warmtevraag kan eerder worden begonnen met aanwarmen (peak shaving); daarnaast kan rekening worden gehouden met de traagheid van het warmtenet en eventueel de opwekkingsinstallaties; ten slotte wordt hiermee voorkomen dat er bij een korte storing in de simulatieomgeving geen data beschikbaar is. Gezien de variërende starttijd van de simulaties leest LEA de actuele tijd in en past de tijdsafhankelijke variabelen, zoals de zonnestand en de bedrijfstoestand, daarop aan. Vervolgens wordt de simulatie uitgevoerd.

4 Uitvoer van de setpoints voor de gebouwinstallaties

De door LEA gegenereerde setpoints voor de CV-installaties van de gebouwen worden naar de betreffende warmtenetregelaars gestuurd voor de aansturing van de installaties. Per gebouw betreft dit de volgende data:

- de benodigde aanvoertemperatuur van de CV-installatie voor het komende uur.

5 Dataoverdracht van LEA naar Wanda

Een deel van de output van LEA wordt aan Wanda beschikbaar gesteld als input voor de warmtenetsimulatie. Aangezien LEA en Wanda niet op dezelfde server draaien, wordt deze output als XML van de ene server naar de andere server verplaatst. Per gebouw betreft dit de volgende data, voor de komende 24 uur:

- de warmtevraag;
- de benodigde aanvoertemperatuur van de CV-installatie (de secundaire aanvoertemperatuur);
- de benodigde retourtemperatuur van de CV-installatie (de secundaire retourtemperatuur);
- de benodigde aanvoertemperatuur van het warmtenet (de primaire aanvoertemperatuur).

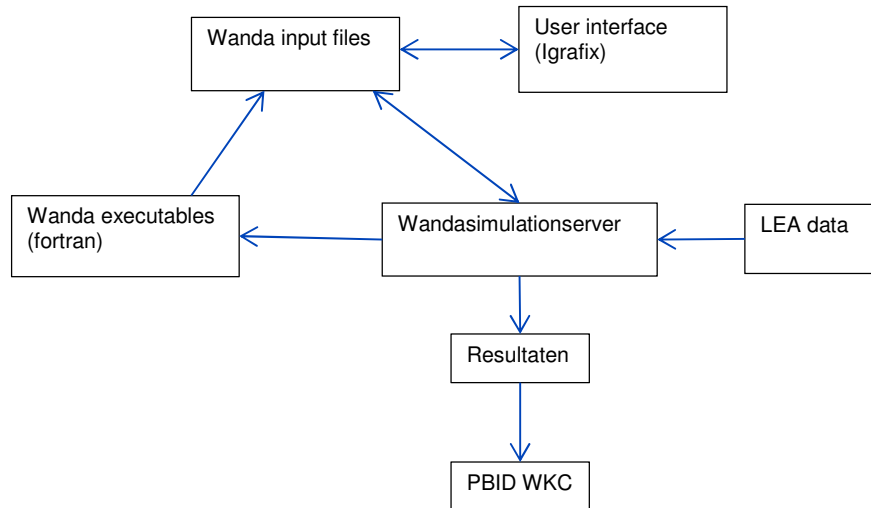
6 Warmtenetsimulatie

Wanda leest de door LEA geleverde data in en zet de tijdstap om van een uur naar vijf minuten. Daarna wordt de warmtenetsimulatie uitgevoerd. Zie voor een gedetailleerde beschrijving van de simulaties in Wanda [6].

7 Uitvoer van de setpoints voor het warmtenet

De door Wanda gegenereerde setpoints worden naar de warmtenetregelaar in de WKC gestuurd voor de aansturing van de opwekkingsinstallaties en het warmtenet. Per tak betreft dit de volgende data:

- de benodigde aanvoertemperatuur van het warmtenet bij de WKC voor het komende uur;
- de retourtemperatuur van het warmtenet bij de WKC voor het komende uur;
- het debiet in het warmtenet bij de WKC voor het komende uur.



Figuur 2 Schematisch overzicht van de implementatie van het Wanda gedeelte van de DWNR.

B-2.2.2 Systemconfiguratie

In de centrale ICT-omgeving van de TU Delft zijn een drietal virtuele servers ingericht, waarop de centrale applicaties van de DWNR zijn geïnstalleerd, als volgt:

- virtuele server ten behoeve van de LEA-omgeving (gebouwmodellen);
- virtuele server ten behoeve van WANDA-omgeving (warmtenetmodel);
- virtuele server ten behoeve van centrale Priva GBS-omgeving.

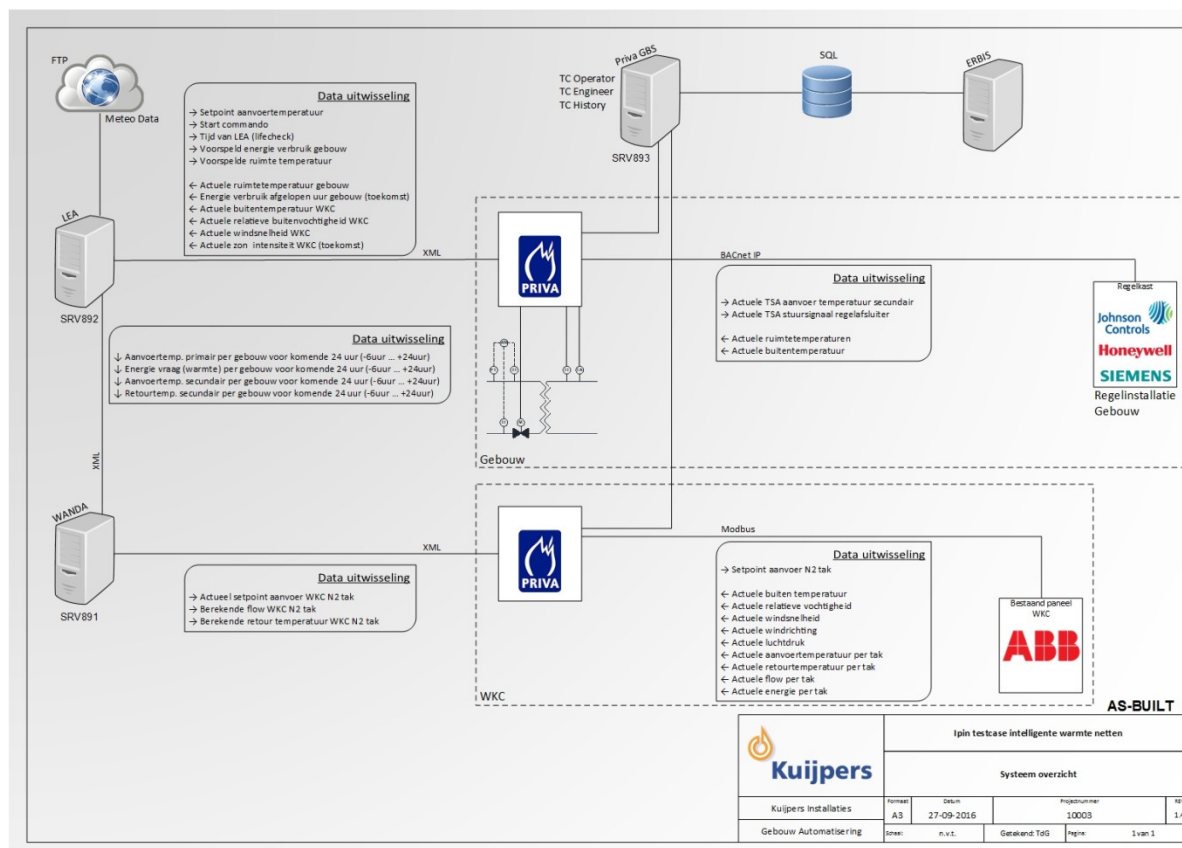
Op de centrale Priva GBS-server is de centrale GBS-software voor de historische opslag van data (TCHistory) en de centrale bediening en visualisatie van de regelingen (TCOperator) geïnstalleerd. De uit de warmtenetregeling verzamelde data wordt weggeschreven in een SQL database in de centrale ICT omgeving van de TUD, van waaruit deze beschikbaar is voor monitoring. In verband met het geldende ICT beleid binnen de TU Delft is op deze centrale server tevens de TopControl engineering software van Priva (TCEngineer) geïnstalleerd, zodat van daaruit de software in de individuele regelaars kan worden geladen.

Om het door Wanda berekende setpoint door te geven aan de besturing van de WKC, is een centrale warmtenetregelaar aangebracht in de WKC, die het setpoint inleest en doorgeeft aan de ABB-besturing van de WKC.

Om de door LEA gegenereerde setpoints te laten resulteren in een fysieke aansturing van de warmteafleverstations in de gebouwen, is bij elk van deze warmteafleverstations een warmtenetregelaar aangebracht. Het door LEA gegenereerde setpoint wordt doorgegeven aan de betreffende warmtenetregelaar. Deze stuurt vervolgens de tweeweg-regelafsluiter aan de primaire zijde van de warmtewisselaar aan, zodanig dat aan de secundaire zijde de door het LEA model berekende aanvoertemperatuur wordt gerealiseerd. Daarnaast verzorgt deze warmtenetregelaar de communicatie met de bestaande gebouwregelinstallatie.

Voor de regelaars wordt gebruik gemaakt van IP-gebaseerde DDC controllers van het fabricaat Priva, type S10. Elk van de Priva S10 controllers is gemonteerd in een afsluitbare plaatstalen kast met afmetingen van 760 x 760 x 300mm³. Deze kasten zijn gemonteerd in de directe nabijheid van de warmtewisselaars in de gebouwen. De elektrische voeding (230 Vac) voor de Priva regelaars wordt betrokken van de dichtstbijzijnde regelkast van de gebouwregelininstallatie, waarin hiervoor een extra 230 Vac groep is aangebracht.

In figuur 3 is schematisch weergegeven hoe de aansturing van de installaties is opgebouwd.



Figuur 3 Schematische weergave van de systeemconfiguratie.

B-2.2.3 Communicatie

Datakoppeling tussen de simulatieomgeving en de warmtenetregeling

De communicatie tussen de simulatieomgeving en de warmtenetregelaars vindt plaats via XML. De volgende data-uitwisselingen vinden plaats:

- een aantal actuele meetwaarden uit de installaties wordt vanuit de warmtenetregeling vanuit de installaties aangeboden aan LEA en Wanda als input voor de berekeningen;
- LEA geeft elk uur per gebouw het berekende setpoint voor het komende uur door aan één van de warmtenetregelaars bij de warmte-afleverstations in het betreffende gebouw (master). Vanuit deze regelaar wordt dit setpoint vervolgens doorgegeven aan de andere warmtenetregelaars in het gebouw (slave);
- Wanda geeft elke 5 minuten het setpoint voor de primaire aanvoertemperatuur van tak noord 2 door aan de warmtenetregelaar in de WKC.

Datakoppeling tussen de warmtenetregeling en de gebouwregelininstallaties

De datakoppeling tussen de warmtenetregeling en de gebouwregelininstallaties wordt gerealiseerd middels BAC-net. Via deze koppeling vinden de volgende data-uitwisselingen plaats:

- een aantal actuele meetwaarden wordt vanuit de gebouwregelinstallatie beschikbaar gesteld aan de warmtenetregeling. Dit betreft de volgende gegevens:
 - de actuele ruimtetemperatuur in het betreffende gebouw: deze is nodig als input in de LEA-simulatie. Om geen nieuwe opnemers in het gebouw te hoeven plaatsen, wordt gebruik gemaakt van de in de bestaande GBS-systemen beschikbare ruimtetemperaturen;
 - de actuele buitentemperatuur: deze wordt gebruikt in geval van een storing in de simulatieomgeving, waarbij wordt teruggevallen op een weersafhankelijke regeling van de secundaire aanvoertemperatuur.
- de gemeten secundaire aanvoertemperatuur en het stuursignaal van de regelafsluiter worden vanuit de warmtenetregeling beschikbaar gesteld aan de gebouwregelinstallatie en weergegeven in het bestaande GBS. Hiermee wordt de werking van het afleverstation van de DWNR gevisualiseerd voor de gebouwbeheerder.

In de gebouwen 32 (IO) en 34 (3mE) van tak noord 2 is een bestaande regelinstallatie van JohnsonControls (productlijn Metasys-NCE) aanwezig. In gebouw 31 (TBM) is een bestaande regelinstallatie van het fabricaat Siemens (productlijn Desigo-PX) aanwezig. Voor het realiseren van de koppelingen met deze installaties is samengewerkt met de leveranciers van de bestaande gebouwregelinstallaties.

Datakoppeling tussen de warmtenetregeling en de besturing van de WKC

In de ABB besturing van de WKC is geen BACnet-poort aanwezig. Daarom is voor de datakoppeling tussen de warmtenetregelaar in de WKC en de bestaande besturing van de WKC gekozen voor een koppeling op basis van MODbus. Via deze koppeling vinden de volgende data-uitwisselingen plaats:

- een aantal actuele meetwaarden wordt vanuit de besturing van de WKC beschikbaar gesteld aan de warmtenetregelaar. Dit betreft de volgende meetwaarden:
 - actuele buitentemperatuur in °C;
 - actuele relatieve vochtigheid buiten in %;
 - actuele windrichting in graden;
 - actuele windsnelheid in m/s;
 - actuele luchtdruk in hPa;
 - actuele aanvoertemperatuur per tak (N1, N2, Z1, Z2) in °C;
 - actuele retourtemperatuur per tak (N1, N2, Z1, Z2) in °C;
 - actuele massaflow per tak (N1, N2, Z1, Z2) in kg/s;
 - actuele energiehoeveelheid per tak (N1, N2, Z1, Z2) in kW;
- het vanuit Wanda berekende setpoint voor de aanvoertemperatuur van tak noord 2 wordt vanuit de warmtenetregelaar beschikbaar gesteld aan de besturing van de WKC.

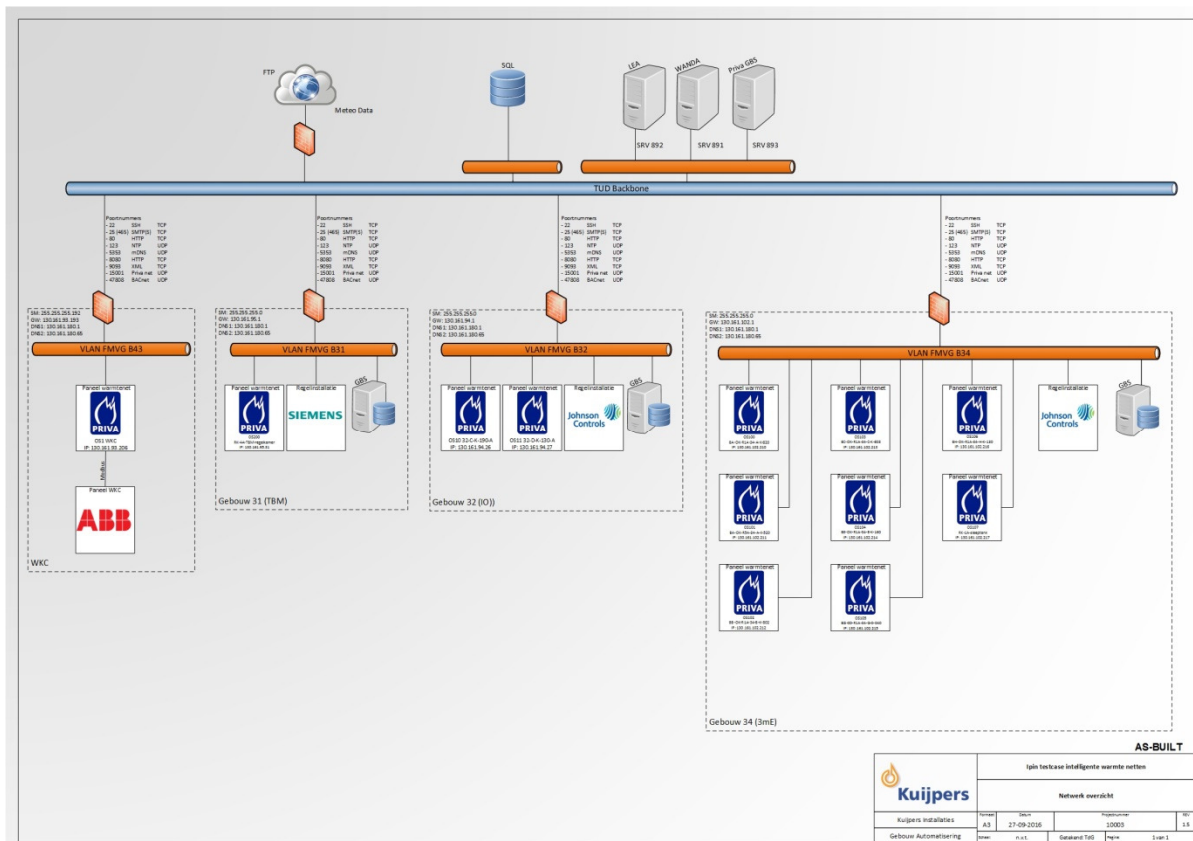
B-2.2.4 Netwerktopologie

Voor het uitwisselen van data tussen LEA, Wanda en de warmtenetregelaars wordt gebruik gemaakt van het algemene ICT-netwerk van de TU Delft op basis van XML.

De warmtenetregelaars voor de warmte-afleverstations zijn aangesloten op de aanwezige VLAN's in de gebouwen, waarop ook de gebouwregelinstallaties zijn aangesloten (VLAN FMVGxx). Via de TU Delft-backbone kunnen de warmtenetregelaars in de gebouwen en de warmtenetregelaar in de WKC onderling data uitwisselen.

De BACnet-communicatie tussen de warmtenetregelaars en de gebouwregelinstallaties in de gebouwen verloopt eveneens via de TU Delft-backbone, op basis van BACnet/IP.

De netwerktopologie is schematisch weergegeven in figuur 4.



Figuur 4 Netwerkoverzicht

B-2.2.5 Aanvullend onderzoek

Het gebouwmodel in LEA is een fysisch model dat volledig afhankelijk is van de input die er is gegeven. Parallel aan de ontwikkeling van de simulatiemodellen is daarom in samenwerking met wetenschappers van TU Delft, een studie gedaan naar de correlatie van de input met de verkregen resultaten. In het onderzoek is gekeken naar de mogelijkheid om een eenvoudig wiskundig model te maken aan de hand van de resultaten voor de warmtevraag, berekend door LEA. Hiermee wordt meer inzicht verkregen in de respons van de diverse gebouwen op uiteenlopende omstandigheden.

In het onderzoek wordt gebruik gemaakt van een regressiemethode. De resultaten zijn deels bevredigend: indien gebruik wordt gemaakt van de oppervlaktetemperatuur van de vloer, dan wordt een nauwkeurigheid van ongeveer 99% verkregen. De oppervlaktetemperatuur is echter geen invoerparameter. Indien voor de regressie alleen de invoerparameters worden gebruikt, wordt een nauwkeurigheid van ongeveer 60% behaald. Dit is onvoldoende om te kunnen worden gebruikt. Aanvullend onderzoek nodig om tot bruikbare resultaten te komen. Een (Engelstalige) samenvatting van het onderzoek is te vinden in bijlage 1.

B-2.3 Inrichting monitoringsysteem

Monitoring stelt in staat terugkoppeling te verkrijgen over hoe de DWNR in praktijk uitpakt en geeft inzicht in de verschillen tussen de twee modellen LEA en WANDA en de realisatie. Dit inzicht kan aansluitend gebruikt worden om te analyseren waar mogelijke verschillen vandaan komen en indien noodzakelijk bij te sturen.

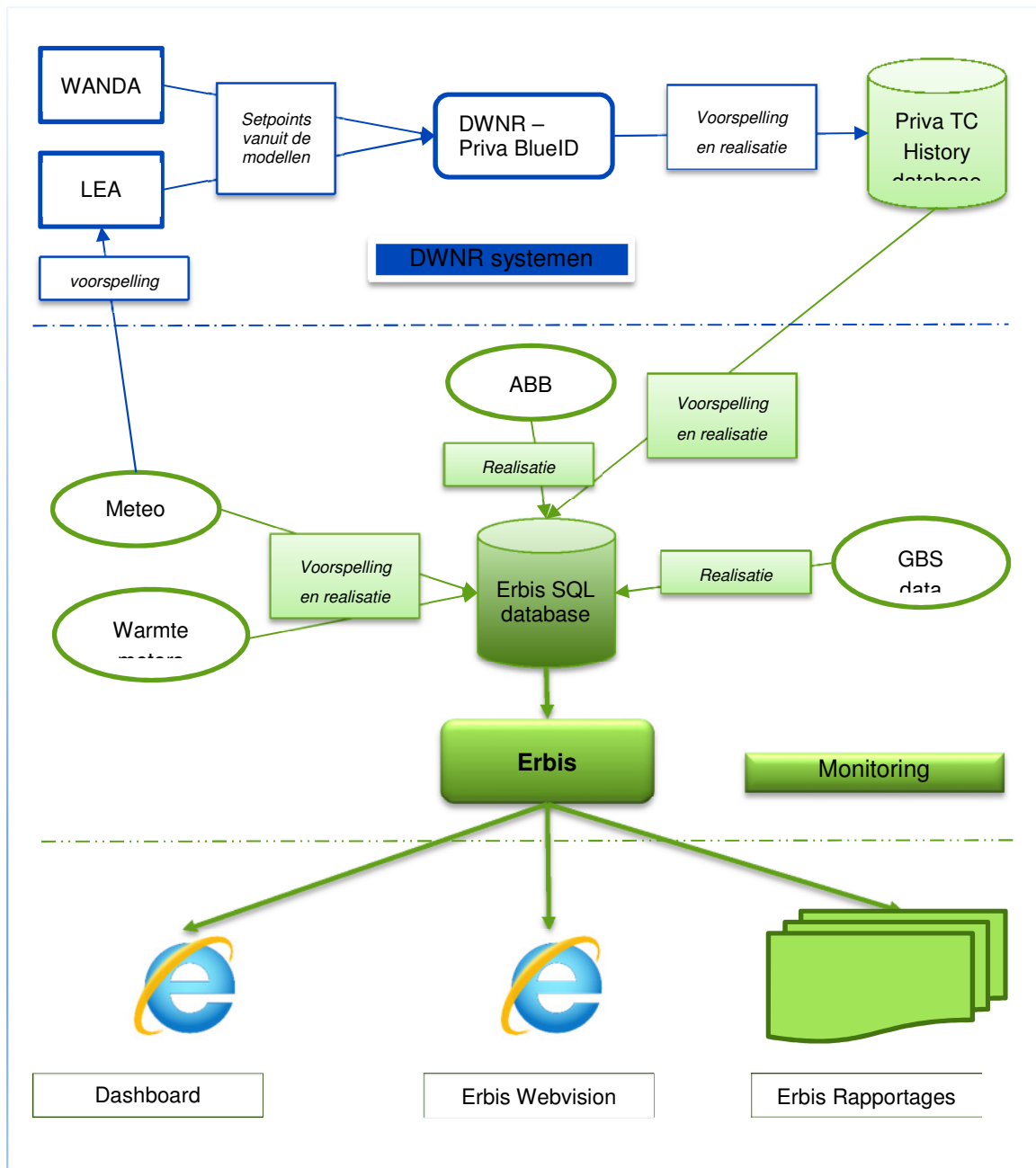
De doelstelling van monitoring is:

- 1 Verantwoording resultaten IPIN;
- 2 Visuele output ten behoeve van project en publieke communicatie;
- 3 Actuele monitoring ten behoeve van project alsmede lange termijn monitoring

Binnen het gehele proces van de DWNR, van zowel de modellen als de realisatie, wordt gebruik gemaakt van meerdere systemen en in de systemen wordt verschillende data gelogd. Monitoring is ingericht in Erbis, met als doelstelling om de data uit alle verschillende systemen gezamenlijk en gecombineerd te kunnen volgen en te kunnen presenteren. De monitoring is op deze wijze onafhankelijk van gebruikte systemen. Vanuit de praktijktest in gebouw 32 en de implementatie in tak noord 2 is de data afkomstig uit de volgende bronnen:

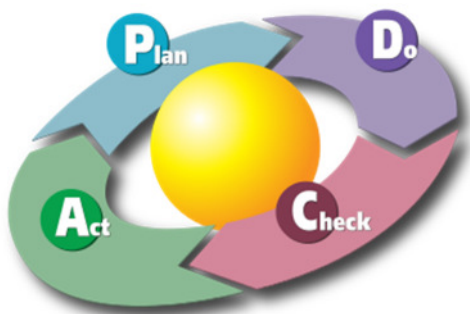
- LEA: Gebouwsimulatie; data betreft o.a. setpoints (aanvoertemperatuur secundair in het gebouw en verwachte energiehoeveelheden per gebouw.
- Lokaal GBS: Gebouwbeheersysteem (GBS) ten behoeve van de besturing van het gebouw (afhankelijk van het gebouw is dat op het TU Delft campus Johnson Controls, Siemens of Honeywell); data betreft o.a. ruimtetemperaturen, klepstanden en stooklijnen vanuit het GBS
- WANDA: Netwerksimulatie: data betreft o.a. benodigde aanvoertemperatuur per warmtetak en energiehoeveelheden.
- ABB: Besturing van de installaties in de WKC; tevens data logging van de installaties in de WKC, waaronder: aanvoer- en retourtemperaturen van de warmtenettakken N1, N2, Z1 en Z2; drukken, energiehoeveelheden naar de verschillende takken toe, temperaturen en warmtehoeveelheden van de WKK's en ketels
- Priva: Sturing van de installaties en gebouwen op basis van LEA en WANDA. Datalogging betreft o.a. de input vanuit LEA en WANDA, setpoints die daadwerkelijk gestuurd worden naar de gebouwen en klepstanden van de warmtewisselaars
- GMC meters Datacollectiesysteem van warmtemeters en elektriciteitsmeters van TU Delft. Per warmtemeter worden vier parameters gelogd: aanvoertemperatuur, retourtemperatuur, Flow en de daaruit berekende hoeveelheid afgenomen energie.
- Meteo: Meteo voorspelling (input voor LEA) en gerealiseerde buitentemperaturen.

In figuur 5 is schematisch aangegeven op welke wijze deze data bij elkaar verzameld wordt.



Figuur 5 Datastromen ten behoeve van monitoring DWNR.

Door middel van de PDCA (Plan – DO – Check – Act) methodiek kan tijdens de praktijktest en de implementatie in tak noord 2 (zie volgende hoofdstukken) de werking van de DWNR gevolgd en geanalyseerd worden:



- Plan: Planning van benodigde energie en temperaturen in de gebouwen, in het netwerk en totaal benodigd vanuit de warmtekrachtcentrale (WKC) door LEA en WANDA
- Do: Sturing van de warmtetoevoer naar de gebouwen en de installaties in de WKC door de Priva Blue ID
- Check: Controle of gewenste temperaturen en energiehoeveelheden tussen de modellen (LEA en WANDA) overeenkomen met de realisatie (werkelijk afgenomen hoeveelheden energie, aanvoertemperaturen, in combinatie met gerealiseerde binnentemperaturen in de gebouwen (comfort)
- Act: Analyse en (bij)sturing op basis van geconstateerde afwijkingen

De monitoring is van overzichts niveau naar detail op volgende niveaus beschikbaar:

- 1 Dashboard: Publiek toegankelijk dashboard: <https://ipin-tudelft.erbis.nl/>
- 2 Erbis Webvision Voorgedefinieerde rapportages achter inlog: <https://erbis.tudelft.nl/>
- 3 Erbis Rapportages Voorgedefinieerde en zelf te maken rapportages vanuit Erbis van alle beschikbare informatie, op lokale TU Delft server

Voorbeelden van monitoring: zie bijlage 3.

Het dashboard bestaat uit:

- Hoofdpagina: Plattegrond van TU Delft met warmtenetten N1, N2, Z1, Z2
- Gebouwmonitoring: Per gebouw info met model versus realisatie
- WKC monitoring WKC installaties: WKK's en ketels

In Erbis Webvision kan een stap dieper de gegevens vanuit de DWNR en realisatie gemonitord worden:

- Keuze WKC of gebouw
- Detail per meting
- Samengestelde rapportage
- Periode zelf instelbaar (beperkte periode)

Tot slot kan in Erbis rapportages gebouwd en bekeken worden:

- Combinatie alle gelogde meetpunten mogelijk
- Periode en interval (uur/dag/maand etc.) zelf instelbaar
- Aantal rapporten voorgedefinieerd

Vanuit deze informatie kan de DWNR gemonitord en geanalyseerd worden.

B-2.4 Modificatie van de warmtekrachtcentrale

B-2.4.1 Aanleiding

De toevoertemperatuur van een warmtenet wordt gedictieerd door het gebouw dat de hoogste temperatuur nodig heeft. Het warmtenet van TU Delft bestaat uit vier takken. Dit biedt de mogelijkheid om die hoge temperatuur alleen voor die tak te maken waarop het betreffende gebouw is aangesloten en de andere takken een lagere temperatuur te geven.

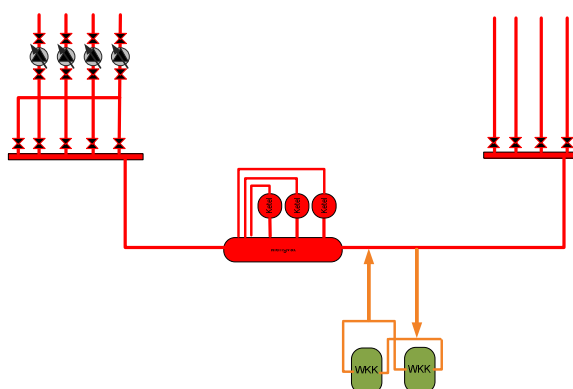
Om dit mogelijk te maken is als onderdeel van het project het plan "Modificatie WKC" ontwikkeld en uitgevoerd. De installatie voorzagt in één temperatuur voor het gehele net. Dus alle vier de takken kregen dezelfde temperatuur.

B-2.4.2 Plan

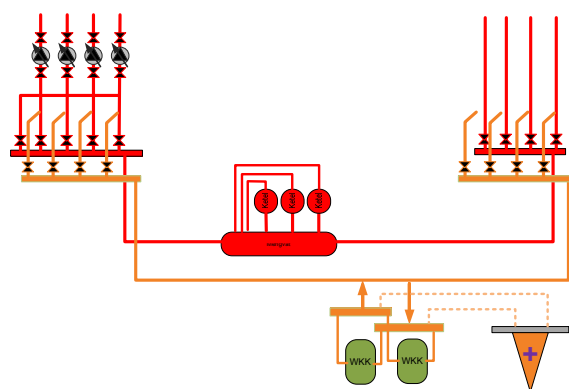
De warmteopwekkingsinstallatie van TU Delft (de "WKC") heeft twee typen warmteopwekkers: ketels en warmtekrachteenheden (WKK's). De ketels maken hoge temperatuur ($\leq 100\text{-}130\text{ }^{\circ}\text{C}$) en de WKK's lagere temperatuur ($\leq 80\text{-}100\text{ }^{\circ}\text{C}$).

In de huidige situatie staan de WKK's "rijdend" aangesloten op de toevoer naar de ketel. Dat wil zeggen dat de WKK's het retourwater uit het warmtenet opwarmen voordat het naar de ketels gaat. De ketels warmen het water vervolgens verder op tot de gewenste toevoertemperatuur. De ketels staan daarbij supplerend geschakeld op een bypass. Er is sprake van één waterstroom die verdeeld wordt over de viertakken van het warmtenet. Dit is weergegeven in figuur 6.

Met de modificatie ontstaat de volgende situatie: door de door de opwekkers geproduceerde warmwaterdebieten te mengen, ontstaat een temperatuur die tussen de hoge en de lagere temperatuur inligt. Door de verhouding tussen de stromen te veranderen, kan de temperatuur binnen de grenzen "hoog" en "lager" worden gekozen. Het hydraulisch systeem van de WKC is ingrijpend aangepast om dit mogelijk te maken. Dit is schematisch weergegeven in figuur 7.



Figuur 6 Schematische weergave van het hydraulisch systeem van de oude situatie.



Figuur 7 Schematische weergave van het hydraulisch systeem van de nieuwe situatie.

Het warmwater dat wordt geproduceerd door de WKK's wordt naar een nieuwe verdeler geleid; De bestaande verdeler krijgt daardoor alleen het warmwater van de ketel. Water wordt nu per tak gemaakt door water uit beide verdelers te mengen met zo'n verhouding dat de gewenste temperatuur wordt gemaakt. Iedere tak heeft daarbij zijn eigen mengverhouding en iedere tak krijgt daardoor zijn eigen temperatuur. Op de foto's hieronder is de oude en de nieuwe situatie van de verdeler(s) te zien. De rechterfoto laat de mengsectie van hoge en middeltemperatuur zien van een van de takken en ook een deel van de nieuwe verdeler (de metaalkleurige delen zijn nieuw).

Het retourwater uit het warmtenet wordt op dezelfde manier gescheiden. Er bestaat daarbij de mogelijkheid om de waterstroom uit de tak met de laagste temperatuur preferent naar de WKK, en/of (in de toekomst) naar de duurzame opwekker te leiden, zodat deze de allerlaagste temperatuur krijgt aangeboden en zijn inzet verhoogd kan worden. De inzet van de WKK en/of duurzame opwekker wordt namelijk beperkt of verhinderd door een te hoge aanvoertemperatuur naar die opwekker: als bijvoorbeeld de aan een WKK aangeboden temperatuur hoger is dan 85 °C, valt de WKK uit. Zodra de aan geothermie aangeboden temperatuur hoger is dan 40 °C, begint het beschikbaar vermogen af te nemen, totdat het vermogen nihil is bij 70 °C.

De installatie is ook voorbereid op een derde stroom warm water, afkomstig van een duurzame opwekker (bijvoorbeeld geothermie) met lage temperatuur. Hiertoe zijn in de verzamelaar aftakkingen opgenomen, die in de toekomst retourwater naar de duurzame opwekker voeren.



Figuur 8 Detail van de verdeler van de WKC in de oude situatie met de leiding van de verdeler naar een van de takken.



Figuur 9 Detail van de verdeler van de WKC in de nieuwe situatie. Hier is zowel de oude als de nieuwe verdeler te zien en de mengsectie van een van de takken.

B-2.4.3 Realisatie en organisatie

De werkzaamheden zijn uitgevoerd in de periode maart 2015 tot mei 2016. de werkzaamheden zijn september 2016 opgeleverd. Er is substantiële vertraging opgelopen door het faillissement van IPIN partner Imtech. Door het werk anders te organiseren, kon de vertraging (en meerkosten) beperkt blijven. complicerende factor was dat de werkzaamheden voornamelijk tijdens het zomerreces, als de WKC buiten bedrijf is, konden worden uitgevoerd. Door het faillissement lukte dit niet en zijn de werkzaamheden gesplitst in werkzaamheden die buiten bedrijf zijn van de installatie vereisen, en werkzaamheden waarvoor dat niet nodig is. De eerstgenoemde werkzaamheden zijn uitgevoerd door installateur Verkerk. Om de werkzaamheden tijdens bedrijf mogelijk te maken moesten extra voorzieningen (afsluiters) aan de installatie worden aangebracht, waardoor delen waaraan gewerkt moest worden, afzonderlijk buiten bedrijf gesteld en afgetapt konden worden.

B-2.4.4 Projectorganisatie en Uitvoering

De uitgevoerde werkzaamheden omvatten de volgende disciplines:

- werktuigbouwkundig;
- elektrotechnisch;
- regeltechnisch;
- constructief/bouwkundig.

Werkzaamheden van het failliete Imtech zijn overgenomen door de IPIN partners Deerns en Kuijpers. Kuijpers Installatietechniek Utrecht heeft de werktuigkundige en elektrotechnische installatiewerkzaamheden uitgevoerd. ABB de regeltechnische werkzaamheden; Aronsohn heeft de constructieve aanpassingen geadviseerd. Daarnaast hebben er in de interim-periode tussen Imtech en Kuijpers verschillende directieverenigingen plaatsgevonden, om de voortgang niet te zeer te verstoren. Deerns heeft het detailontwerp gemaakt en de rol van uitvoerder op zich genomen. Door deze constructie kon tijd worden gewonnen, maar moest TU Delft risico en garantie voor eigen rekening nemen.

Het modificatieproces omvatte de volgende werkzaamheden:

- 1 Voorontwerp
- 2 Definitief ontwerp
- 3 Bestek
- 4 Aanbesteding
- 5 Detailontwerp
- 6 Werkvoorbereiding
- 7 Uitvoering
- 8 Oplevering en ingebruikname
- 9 Nazorg

Het project is mei 2016 opgeleverd. Op het moment van schrijven van dit rapport loopt de nazorgperiode. Aandachtspunten zijn tuning van de regeling. Ook traden er aanvankelijk veel storingen op in de kleppen van de mengregeling. Dit lijkt verholpen door de regelkringen te tunen.

B-2.5 Koppeling DNWR en WKC

Naast de installatietechnische modificatie van de WKC met de daarbij behorende aanpassing van de regeltechnische besturing, is de besturing ook aangepast om aansturing vanuit de DNWR mogelijk te maken. De aanpassing omvat het overnemen van de door de DNWR bepaalde en aangeboden setpoint voor de aanvoertemperatuur per tak. Het aanbieden van de setpoints geschiedt eens per 6 minuten. De besturing omvat verder een voorziening waarbij geschakeld kan worden tussen de eigen stooklijngestuurde regeling en de DNWR gestuurde regeling. De communicatie tussen DWR en de WKC besturing geschiedt via MODbus.

De aanpassingen en uitbreidingen van de regeling zijn ontworpen door Deerns en uitgevoerd door ABB en partner Kuijpers Installaties.

B-2.6 Praktijktest in gebouw 32

In maart 2016 is een eerste praktijktest uitgevoerd van een gedeelte van de regeling. Deze test betrof het gebouwgerelateerde gedeelte van de regeling voor één van de gebouwen, namelijk gebouw 32 (Industrieel Ontwerpen). Tijdens de test is de LEA regelomgeving geïmplementeerd, inclusief de koppeling met de gebouwregeling. De door LEA gegenereerde setpoints zijn gebruikt in de aansturing van de CV-installatie van het gebouw. De warmtenetsimulatie in Wanda en de koppeling met de regeling van de WKC zijn tijdens deze test nog niet geïmplementeerd.

Gebouw 32 heeft twee aansluitingen op het warmtenet. Voor de praktijktest is bij beide aansluitingen de primaire regelafsluiter van de warmtewisselaar losgekoppeld van de bestaande gebouwregelinstallatie en aangesloten op een nieuw aangebrachte warmtenetregelaar. Vanwege het tijdelijke karakter van de test en het beperken van de kosten, is ervoor gekozen om geen mechanische aanpassingen aan het leidingwerk uit te voeren. De nieuwe aanvoertemperatuuropnemer voor de regeling is geplaatst in de dompelbuis van een bestaande thermometer, die hiervoor tijdelijk is verwijderd. Daarnaast is er aan de buitenzijde van de leiding met behulp van een klemband een extra maximaalthermostaat gemonteerd.

Voor het realiseren van de (BACnet) datakoppeling tussen de bestaande gebouwregelinstallatie en de warmtenetregeling in samenwerking met de leverancier van de gebouwregelinstallatie, JohnsonControls, een bezoek ter plaatse gebracht. Daarbij zijn de beschikbare BACnet adressen uit de regelaars in kaart gebracht en verzameld in een EDE-file. Op basis van deze file zijn de benodigde BACnet adressen in de warmtenetregelaar aangemaakt.

De doelstellingen van de praktijktest waren als volgt:

- het testen van de robuustheid van de LEA-simulaties binnen de regelomgeving;
- het testen van de diverse datakoppelingen;

- het testen van de praktische uitvoerbaarheid van de aansturing van de CV-installatie op basis van het door LEA gegenereerde setpoint;
- toetsing van de doelmatigheid van de regeling (kan de temperatuur van het CV-net van gebouw 32 worden verlaagd volgens de opgave door LEA, zonder dat er een significante toename optreedt in comfortklachten?);
- verbeterde validatie van het gebouwmodel op basis van monitoringgegevens van de testperiode.

B-2.7 Implementatie in tak noord 2

Na een succesvol verloop van de praktijktest in gebouw 32 is een operationeel prototype van de optimaliserende DWNR ontwikkeld en geïmplementeerd in een volledige tak van het warmtenet, namelijk tak noord 2. Hierbij zijn tevens het WANDA model en de centrale warmtenetregelaar in de WKC geïmplementeerd. Deze test is een eerste praktijktoets van de effectiviteit van de werking van de DWNR en levert inzicht over de wijze waarop het systeem verder geïmplementeerd moet worden.

Op tak noord 2 zijn in totaal 11 warmte-afleverstations aangesloten, als volgt:

- gebouw 31 (TBM): 1 afleverstation;
- gebouw 32 (IO): 2 afleverstations;
- gebouw 34 (3mE): 8 afleverstations;

De primaire regelafsluiters van de warmtewisselaars bij de beide afleverstations van gebouw 32 waren voor de eerste praktijktest al losgekoppeld van de bestaande gebouwregelinstallatie en aangesloten op een nieuw aangebrachte warmtenetregelaar. Voor de implementatie in tak noord 2 is dit zelfde gedaan voor de negen aanvullende afleverstations.

Tijdens de praktijktest in gebouw 32 is geconstateerd dat een koppeling met de status van de circulatiepomp in het secundaire circuit (het CV-net) noodzakelijk is. Tijdens de implementatie van tak noord 2 is daarom in de bestaande regelkasten van de gebouwregelinstallatie de bedrijfsmelding van de pomp en het contact van de maximaalthermostaat in het secundaire circuit verdubbeld. Beide worden ingelezen op de warmtenetregelaar. Als de pomp niet in bedrijf is of de maximaalthermostaat in het secundaire circuit aanspreekt, wordt de regelafsluiter in het primaire circuit dichtgestuurd.

De implementatie in tak noord 2 had de volgende doelstellingen:

- het testen van de robuustheid van de LEA-simulaties en de WANDA-simulaties binnen de regelomgeving;
- het testen van de diverse datakoppelingen;
- het testen van de praktische uitvoerbaarheid van de aansturing van de CV-installaties op basis van de door LEA gegenereerde setpoints;
- het testen van de praktische uitvoerbaarheid van de aansturing van de WKC op basis van het door Wanda gegenereerde setpoint;
- toetsing van de doelmatigheid van de regeling (kan de temperatuur van het CV-net van de betreffende gebouwen worden verlaagd volgens de opgave door LEA, zonder dat er een significante toename optreedt in comfortklachten?);
- verbeterde validatie van de gebouwmodellen op basis van monitoringgegevens van de testperiode;
- verbeterde validatie van het warmtenetmodel op basis van monitoringgegevens van de testperiode;
- analyseren van hotspots in gebouwen op basis van LEA simulaties.

B-3 Resultaten

B-3.1 Resultaten scenariostudie

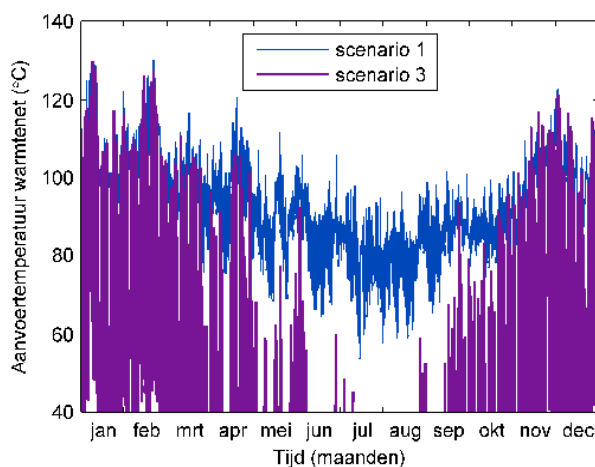
B-3.1.1 Simulatieresultaten

In de scenario's 1 en 2 worden de temperaturen bepaald met respectievelijk de HT-stooklijn en de MT-stooklijn. De resultaten van de simulaties laten zien dat scenario 2 voor alle gebouwen gedurende een groot deel van het jaar leidt tot sterk verlaagde binnentemperaturen en daarmee een sterk verlaagd comfort ten opzichte van scenario 1. Dit betekent dat de conventionele regelstrategie op basis van een eenvoudige, aan de buitentemperatuur gerelateerde stooklijn geen mogelijkheid biedt tot het verlagen van het temperatuurtraject, zonder dat dit resulteert in een verlies van comfort.

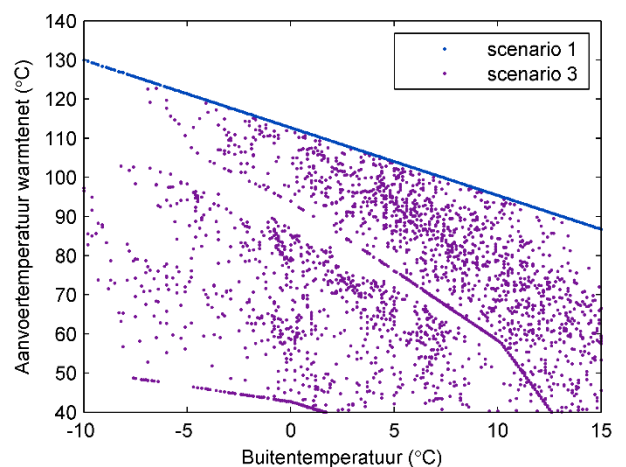
In scenario 3 is bepaald welke aanvoertemperaturen van het warmtenet daadwerkelijk nodig zijn om het beoogde comfort te realiseren. Figuur 10 en figuur 11 tonen het resultaat voor één van de gebouwen. De overige gebouwen vertonen een soortgelijk gedrag. In figuur 10 zijn de benodigde temperaturen uitgezet in de tijd. Ter referentie zijn ook de temperaturen uit scenario 1 aangegeven. Door de aanvoertemperaturen uit te zetten tegen de buitentemperatuur, zoals in figuur 11, ontstaat bij de meeste gebouwen een wolk aan punten. Dit betekent dat de benodigde aanvoertemperatuur slechts gedeeltelijk is gerelateerd aan de buitentemperatuur. Het gebruik van een stooklijn die uitsluitend rekening houdt met de buitentemperatuur is dus niet optimaal.

Opvallend is dat de wolk niet optreedt wanneer de verwarmingsbatterijen in de luchtbehandelingskasten maatgevend zijn voor de benodigde temperatuur. In dat geval is er wél een directe relatie met de buitentemperatuur. Dit komt doordat de hoeveelheid energie die benodigd is om een bepaalde hoeveelheid lucht op temperatuur te brengen, uitsluitend afhankelijk is van de temperatuur die deze lucht heeft bij het betreden van de verwarmingsbatterij.

Uit de figuren kan worden opgemaakt dat de benodigde aanvoertemperaturen regelmatig op het niveau van de HT-stooklijn liggen. Dit geldt voor het merendeel van de gebouwen. Tegelijkertijd laten de figuren ook zien dat de temperaturen gedurende een veel groter deel van de tijd wél aanzienlijk omlaag kunnen ten opzichte van de referentiesituatie.

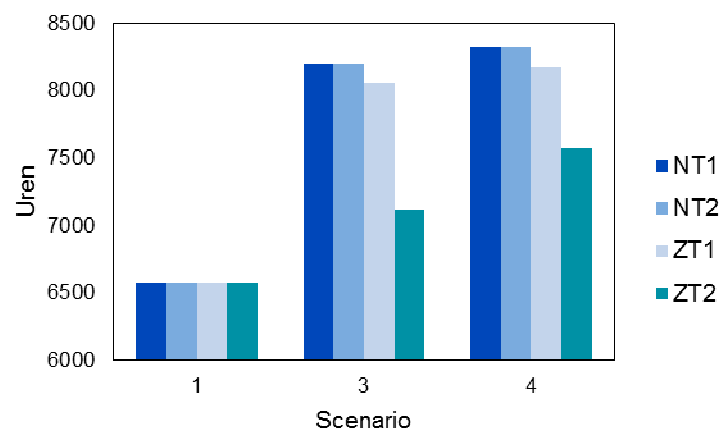


Figuur 10 Uurlijkse aanvoertemperaturen van het warmtenet.



Figuur 11 Uurlijkse aanvoertemperaturen van het warmtenet als functie van de buitentemperatuur.

Scenario 4 laat zien dat vervroegd aanwarmen kan bijdragen aan het maximaliseren van het aantal uren dat de benodigde primaire aanvoertemperatuur in de verschillende takken gelijk is aan of lager is dan 103 °C, zoals te zien is in figuur 12. Aangezien vervroegd aanwarmen wel leidt tot een groter energieverlies naar de omgeving, neemt het energiegebruik iets toe. In gebouwen waarin de klimatisering volledig plaatsvindt met behulp van geconditioneerde lucht (een all-air systeem, dus zonder gebruik te maken van lokale afgifte-installaties, zoals radiatoren) heeft aanwarmen geen effect. Vervroegd aanwarmen kan ook averechts werken. Hoewel de piek vlak voor openingstijd vrijwel altijd lager wordt, worden de temperaturen tijdens de gehele periode van aanwarmen hoger. Soms komen deze temperaturen daardoor boven de gestelde grenswaarde te liggen. Het is daarom belangrijk om niet standaard vervroegd aan te warmen, maar voor iedere dag op basis van de omstandigheden te bepalen of het gunstig is.



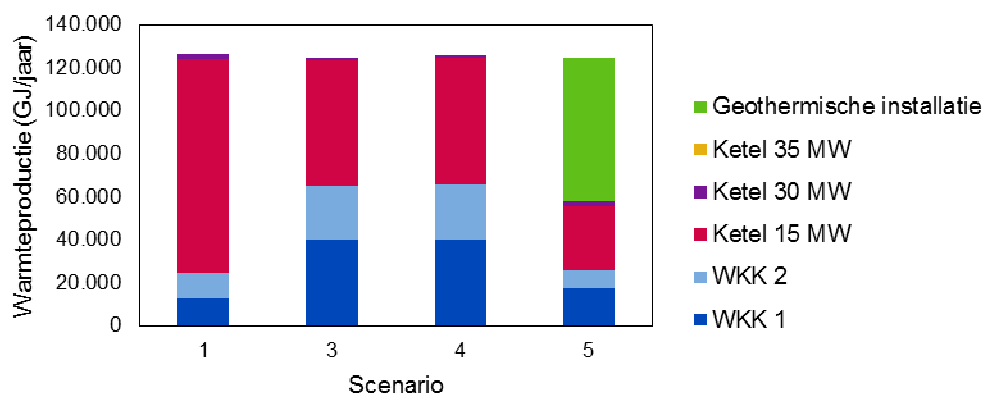
Figuur 12 Aantal uren dat de benodigde primaire aanvoertemperatuur lager is dan 103 C per tak, voor de scenario's 1 (referentiesituatie), 3 (toepassing DWNR, exclusief slim aanwarmen) en 4 (toepassing DWNR, inclusief slim aanwarmen).

Volgend op de gebouwsimulaties zijn simulaties uitgevoerd van het warmtenet. Voor een uitgebreide beschrijving van de resultaten van de gebouwsimulaties wordt verwezen naar [7]. Een uitgebreide beschrijving van de resultaten van de warmtenetsimulaties is te vinden in [3] en [8].

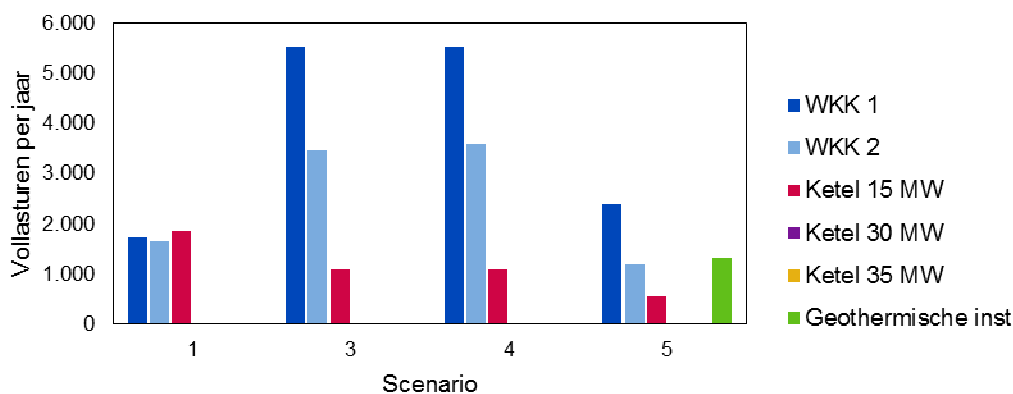
B-3.1.2 Inzet warmteopwekkingsinstallaties

Op basis van de simulatieresultaten is voor de verschillende scenario's voor ieder uur in het referentiejaar berekend hoeveel warmte er moet worden geleverd en met welke temperatuur. Hieruit is vervolgens afgeleid hoeveel van deze warmte door de WKK's kan worden geleverd en hoeveel warmte door de ketels moet worden geleverd. In scenario 5 is tevens bepaald hoeveel van de benodigde warmte door een geothermische bron zou kunnen worden geleverd. Het resultaat is weergegeven in Figuur 13. Ook is voor iedere opwekkingsinstallatie het aantal vollasturen bepaald, zoals weergegeven in Figuur 14.

Uit de resultaten blijkt dat de toepassing van de DWNR (scenario 3) leidt tot een aanzienlijke toename van de inzet van de beide WKK's ten opzichte van de referentiesituatie (scenario 1). Slim aanwarmen (scenario 4) is gunstig, maar het voordeel is minimaal. De resultaten van scenario 5 laten zien dat circa 67.000 GJ van de benodigde warmte zou kunnen worden geleverd door een geothermische installatie.



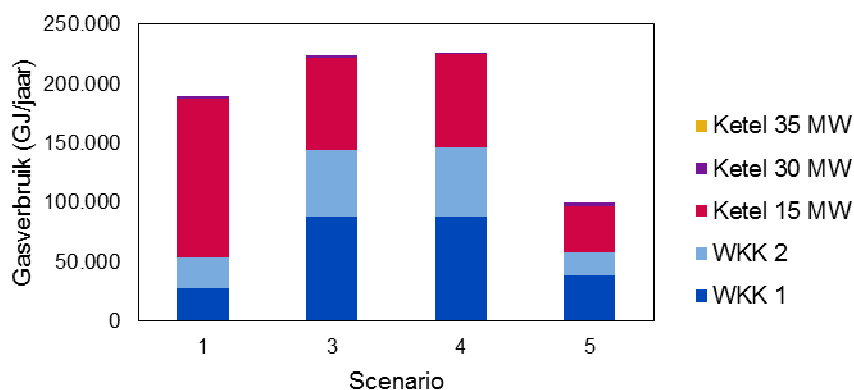
Figuur 13 Warmteproductie in GJ per jaar door de diverse opwekkingsinstallaties voor de scenario's 1 (referentiesituatie), 3 (toepassing DWNR, exclusief slim aanwarmen), 4 (toepassing DWNR, inclusief slim aanwarmen) en 5 (toepassing DWNR, inclusief slim aanwarmen en implementatie van een geothermische installatie).



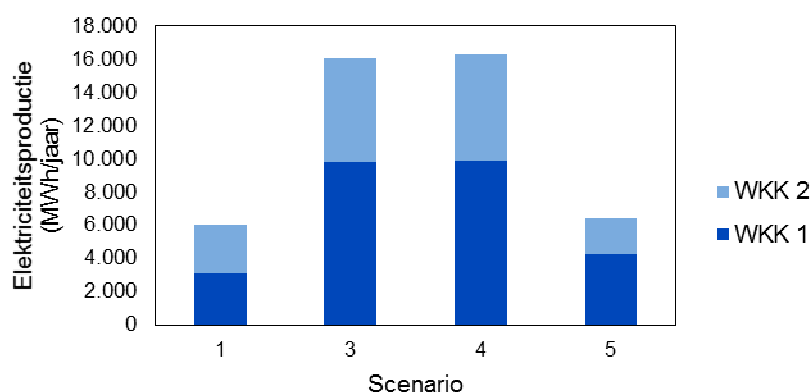
Figuur 14 Vollasturen van de diverse opwekkingsinstallaties voor de scenario's 1 (referentiesituatie), 3 (toepassing DWNR, exclusief slim aanwarmen), 4 (toepassing DWNR, inclusief slim aanwarmen) en 5 (toepassing DWNR, inclusief slim aanwarmen en implementatie van een geothermische installatie).

B-3.1.3 Verbruik en productie van gas en elektriciteit

De energieproductie door de diverse opwekkingsinstallaties is omgerekend naar het verbruik en de productie van gas en elektriciteit. Het resultaat is weergegeven in figuur 15 en figuur 16. Hieruit blijkt dat de toegenomen inzet van de WKK's door toepassing van de DWNR (de scenario's 3 en 4) leidt tot een toename van het gasverbruik. Dit is te verklaren doordat het thermisch rendement van de WKK's kleiner is dan het thermisch rendement van ketels. Daar staat tegenover dat de elektriciteitsproductie in deze scenario's ook toeneemt. Inzet van een geothermische installatie (scenario 5) leidt, zoals verwacht, tot een afname van het gasverbruik.



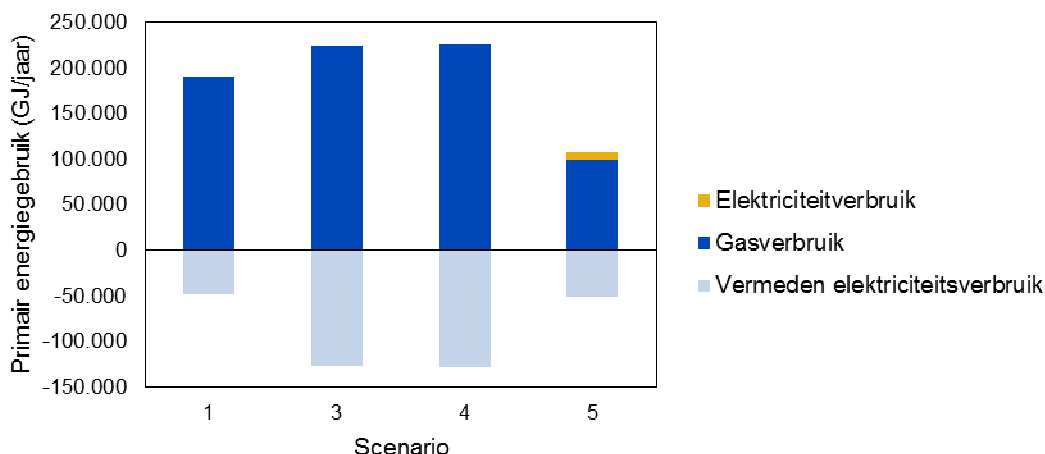
Figuur 15 Gasverbruik in de scenario's 1 (referentiesituatie), 3 (toepassing DWNR, exclusief slim aanwarmen), 4 (toepassing DWNR, inclusief slim aanwarmen) en 5 (toepassing DWNR, inclusief slim aanwarmen en implementatie van een geothermische installatie).



Figuur 16 Elektriciteitsproductie van de WKK's in de scenario's 1 (referentiesituatie), 3 (toepassing DWNR, exclusief slim aanwarmen), 4 (toepassing DWNR, inclusief slim aanwarmen) en 5 (toepassing DWNR, inclusief slim aanwarmen en implementatie van een geothermische installatie).

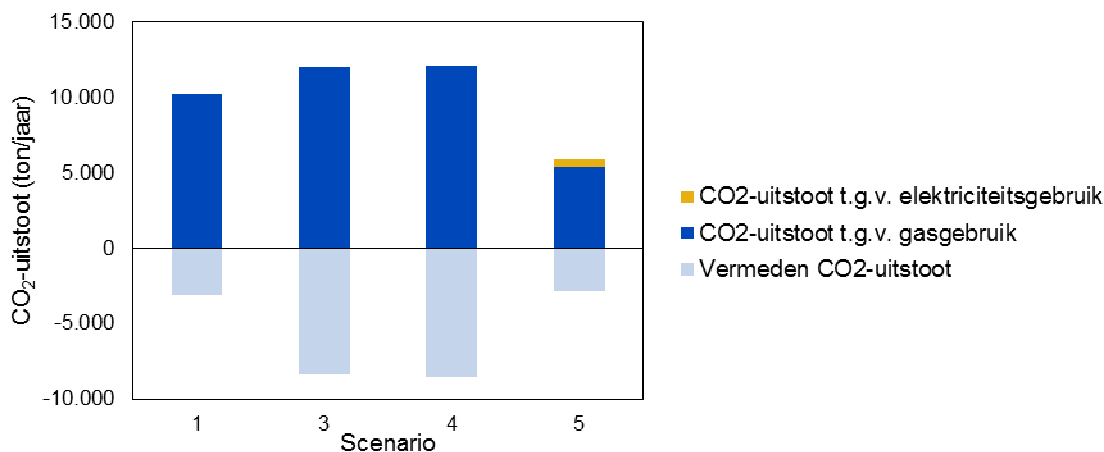
B-3.1.4 Duurzaamheid

Om te beoordelen hoe groot de bijdrage van de DWNR is aan de duurzaamheid van het systeem is het gebruik en de productie van gas en elektriciteit omgerekend naar primaire energiegebruiken. Hierbij is rekening gehouden met het opwekkingsrendement van de ingekochte elektriciteit. Het resultaat is te zien in figuur 17. Het vermeden energiegebruik ten gevolge van de productie van elektriciteit door de WKK's is weergegeven als een negatieve bijdrage. Deze elektriciteit hoeft immers niet meer in een elektriciteitscentrale te worden opgewekt. Wanneer dit vermeden energiegebruik van het totaal wordt afgetrokken, blijkt dat toepassing van de DWNR resulteert in een reductie van het primaire energiegebruik van circa 31%. Bij toepassing van een geothermische installatie loopt deze reductie op tot circa 60%.



Figuur 17 Primair energiegebruik in de scenario's 1 (referentiesituatie), 3 (toepassing DWNR, exclusief slim aanwarmen), 4 (toepassing DWNR, inclusief slim aanwarmen) en 5 (toepassing DWNR, inclusief slim aanwarmen en implementatie van een geothermische installatie). De negatieve waarden in het diagram betreffen het primaire energiegebruik dat is vermeden door de elektriciteitsproductie van de WKK's; deze elektriciteit hoeft immers niet meer in een elektriciteitscentrale te worden opgewekt.

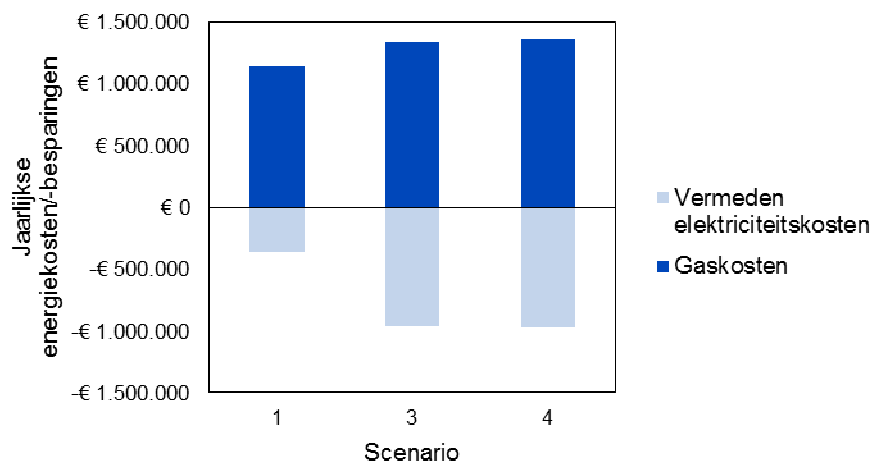
Ook is de CO₂-uitstoot berekend. Hierbij is tevens rekening gehouden met de CO₂-uitstoot die het gevolg is van de elektriciteitsproductie in energiecentrales. De totale CO₂-uitstoot is weergegeven in Figuur 18. De CO₂-uitstoot die is vermeden door de productie van elektriciteit door de WKK's is weergegeven als negatief. Wanneer deze vermeden uitstoot van het totaal wordt afgetrokken, blijkt dat toepassing van de DWNR resulteert in een reductie van de CO₂-uitstoot van circa 49%. Bij toepassing van een geothermische installatie loopt deze reductie op tot circa 58%.



Figuur 18 CO₂-uitstoot in de scenario's 1 (referentiesituatie), 3 (toepassing DWNR, exclusief slim aanwarmen), 4 (toepassing DWNR, inclusief slim aanwarmen) en 5 (toepassing DWNR, inclusief slim aanwarmen; geothermische installatie). De negatieve waarden in het diagram betreffen de CO₂-uitstoot die is vermeden door de elektriciteitsproductie van de WKK's; deze elektriciteit hoeft immers niet meer in een elektriciteitscentrale te worden opgewekt.

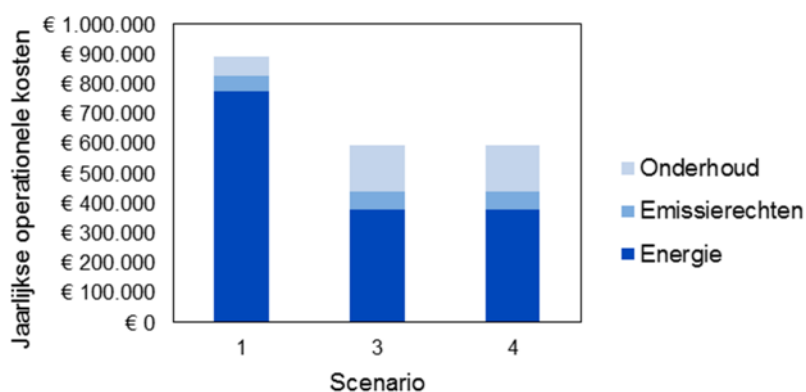
B-3.1.5 Kosten

De gas- en elektriciteitsverbruiken zijn omgerekend tot jaarlijkse energiekosten. De resultaten zijn weergegeven in figuur 19. Uit de resultaten blijkt dat toepassing van de DWNR (scenario 3) leidt tot een indicatieve besparing op de energiekosten van circa € 400.000 per jaar ten opzichte van de referentiesituatie (scenario 1).



Figuur 19 Weergave van de jaarlijkse energiekosten in de scenario's 1 (referentiesituatie), 3 (toepassing DWNR, exclusief slim aanwarmen) en 4 (toepassing DWNR, inclusief slim aanwarmen). De negatieve waarden in het diagram betreffen de kosten die zijn vermeden door de elektriciteitsproductie van de WKK's; deze elektriciteit hoeft immers niet meer te worden ingekocht.

Om de totale operationele kosten te beoordelen worden naast de energiekosten tevens de onderhoudskosten van de installaties en de kosten van de CO₂-emissierechten meegenomen. Scenario 5, dat uitgaat van de implementatie van een geothermische installatie, is hierbij buiten beschouwing gelaten. Aangenomen wordt dat de door de WKK's geproduceerde elektriciteit volledig wordt gebruikt en daarmee leidt tot een reductie in de elektriciteitsinkoop. Er wordt dus niets terug geleverd aan het openbare elektriciteitsnet. De totale jaarlijkse operationele kosten zijn weergegeven in Figuur 20. In de figuur is te zien dat de vergrote inzet van de WKK's door toepassing van de DWNR leidt tot hogere onderhoudskosten en hogere kosten ten gevolge van de CO₂-uitstoot. De energiekosten zijn echter aanzienlijk lager. Dit alles bij elkaar leidt ertoe dat de toepassing van de DWNR leidt tot een jaarlijkse kostenbesparing van circa € 300.000. Dit komt overeen met een kostenreductie van 33% ten opzichte van de referentiesituatie.



Figuur 20 Weergave van de jaarlijkse operationele kosten in de scenario's 1 (referentiesituatie), 3 (toepassing DWNR, exclusief slim aanwarmen) en 4 (toepassing DWNR, inclusief slim aanwarmen).

B-3.2 Resultaten praktijktest gebouw 32

B-3.2.1 Technische implementatie

Tijdens de praktijktest hebben zich enkele praktische problemen voorgedaan. Deze problemen konden allemaal worden opgelost. De praktijktest heeft daarmee aangetoond dat de LEA simulatieomgeving, de datakoppelingen en de fysieke aansturing van de installaties vanuit technisch oogpunt functioneren zoals beoogd. Hieronder worden de praktische problemen beschreven, alsmede de wijze waarop deze zijn opgelost.

Datakoppeling tussen de LEA simulatieomgeving en de warmtenetregeling

De data-uitwisseling tussen de LEA simulatieomgeving en de warmtenetregeling, die verloopt op basis van XML via het IP netwerk van de TU Delft, bleek bij aanvang van de praktijktest niet stabiel te verlopen. Hierdoor liep het LEA model vast en ontving de warmtenetregelaar regelmatig geen actueel setpoint. Om dit op te lossen is binnen de LEA programmatuur de data-uitwisseling losgekoppeld van de daadwerkelijke berekening, zodat zichtbaar werd waar het probleem zat. Dit bleek een probleem in de XML module van Priva te zijn. Priva heeft vervolgens een patch ontwikkeld, die halverwege mei is geïnstalleerd op de beide warmtenetregelaars. Sindsdien verloopt de data-uitwisseling stabiel. Overigens is in de warmtenetregelaars een veiligheid geprogrammeerd, die ervoor zorgt dat bij het wegvallen van de communicatie met de simulatieomgeving automatisch wordt overgeschakeld op het oorspronkelijke weersafhankelijke setpoint. Hierdoor zal de warmtelevering nooit wegvallen.

Datakoppeling tussen de warmtenetregeling en de gebouwregelinstallaties

Als alternatief voor de BACnet-koppeling tussen de warmtenetregeling en de gebouwregelinstallaties is tijdens de praktijktest een proef gedaan om de ruimtetemperaturen vanuit het bestaande GBS via Erbis terug te koppelen naar LEA. Daarbij is geconstateerd dat de uitwisseling tussen Erbis en LEA lastig is vanwege het verschil in dataformaat. Bovendien bleek dat deze werkwijze niet stabiel is. De koppeling bleek na een update van JohnsonControls in het GBS niet meer te werken. Ook introduceert deze werkwijze een aantal extra schakels in de keten die de betrouwbaarheid van de gehele warmtenetregeling negatief beïnvloeden. Verder is de oplossing niet universeel, omdat de regelinstallatie van Siemens die in de andere gebouwen aanwezig is zonder aanvullende software geen mogelijkheid biedt voor een dergelijke koppeling. Ook wat betreft kosten levert deze werkwijze geen voordeel op voor het project, vanwege de noodzakelijke extra werkzaamheden in het GBS, op de servers, in de Erbis omgeving en in LEA. In het projectteam is daarom besloten dat op basis van technische en financiële overwegingen voor dit project een BACnet koppeling de beste manier is om de actuele ruimtetemperaturen in te lezen en terug te koppelen naar LEA, indien de gebouwregelinstallatie hiervoor geschikt is. In gebouwen waar de gebouwregelinstallatie niet voorzien is van een mogelijkheid is om een BACnet koppeling te maken, zullen separate metingen moeten worden gemaakt. Afhankelijk van de kosten hiervoor kan daarbij worden gekozen voor een conventioneel bedrade oplossing of een draadloze variant.

Terugkoppeling actuele ruimtetemperatuur

Voor de simulaties in LEA wordt gebruik gemaakt van de actuele ruimtetemperatuur als invoer. LEA gaat uit van een uniforme ruimtetemperatuur in het gehele gebouw. In werkelijkheid kan de temperatuur per ruimte verschillen. In de bestaande gebouwregelinstallatie zijn diverse temperatuuropnemers aanwezig. Om te komen tot een enkele waarde die LEA als input kan gebruiken, wordt in de warmtenetregelaar de gewogen gemiddelde ruimtetemperatuur berekend. Daarbij kan per temperatuuropnehmer een weegfactor worden ingesteld. Tijdens de praktijktest bleek dat de teruggekoppelde ruimtetemperatuur structureel hoger lag dan de door LEA berekende ruimtetemperatuur. Op basis van deze constatering is een opname langs de opnemers gedaan, om te bepalen welke opnemers het meest representatief zijn en daarmee geschikt om mee te nemen in de berekening van de gemiddelde ruimtetemperatuur. Daaruit bleek dat een aantal opnemers een te hoge temperatuur aangeven. Om een juiste terugkoppeling te krijgen dienen de metingen van de ruimtetemperatuur te worden gecontroleerd met een referentiemeting.

Data-opslag SQL

In de praktijktest is geconstateerd dat het wegschrijven van de data naar de SQL database regelmatig werd onderbroken. Dit bleek te worden veroorzaakt doordat de centrale SQL server regelmatig kortstondig niet beschikbaar was in verband met de installatie van updates. Deze korte onderbrekingen resulteren op zichzelf niet in een verlies van data, maar wel bleek dat TCHistory na iedere keer na het uitvoeren van een update op de SQL server moet worden herstart. Priva heeft daarom een aanpassing doorgevoerd in TCHistory, die ervoor moet zorgen dat de verbinding met de SQL server automatisch opnieuw wordt gemaakt zodra de SQL server weer beschikbaar is. Het alternatief zou zijn om dit procedureel op te lossen door de beheerder van de SQL database de afdeling FMVG te laten informeren bij een update aan de SQL server, zodat TCHistory handmatig kan worden herstart.

Koppeling met secundair circuit warmtewisselaar

Tijdens de praktijktest is gebleken dat LEA geen rekening houdt met vakantiedagen en feestdagen. Hierdoor kon het gebeuren dat LEA een warmtevraag voorspelde die er in werkelijkheid niet was. Indien de regelafsluiter in het primaire circuit wordt opengestuurd terwijl er in het secundaire circuit geen afname is, resulteert dit in een hoge retourtemperatuur in het primaire circuit. Dit is nadelig voor de inzet van de WKK (en in de toekomst de inzet van een eventuele geothermische installatie). Dit probleem is opgelost door een terugkoppeling van de status van de circulatiepomp in het secundaire circuit. Deze wordt ingelezen via de BACnet-koppeling. Indien de circulatiepomp niet in bedrijf is, zoals het geval is wanneer er geen warmtevraag is, wordt de primaire regelafsluiter dichtgestuurd.

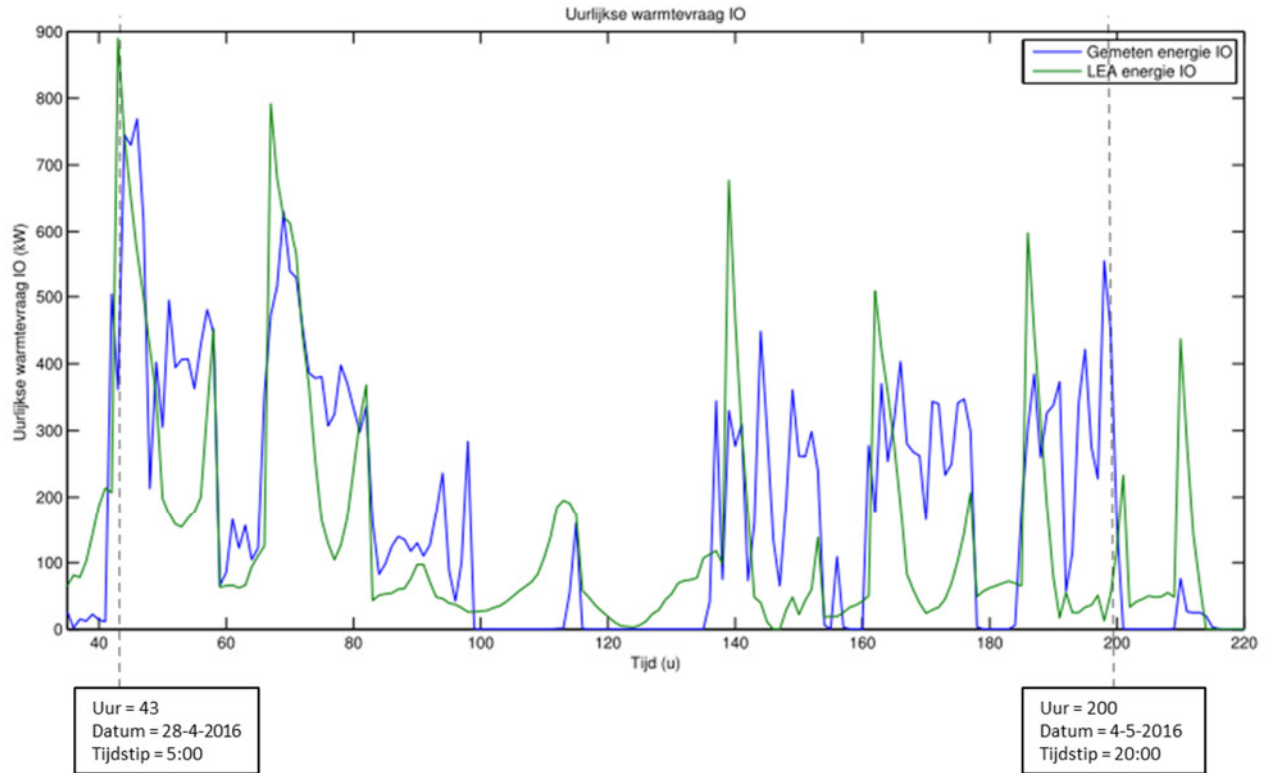
B-3.2.2 CV-temperaturen

Het GBS bepaalt de benodigde CV aanvoertemperatuur met behulp van een stooklijn, afhankelijk van de buitentemperatuur. Uit de praktijktest is gebleken dat de door LEA gegeven aanvoertemperatuur aanzienlijk lager ligt dan de door het GBS berekende temperatuur.

B-3.2.3 Energievraag

Patroon van de energievraag

Als we de uurlijkse warmtevraag vergelijken, zien we dat er verschillen zijn tussen de door LEA berekende waarden en de gemeten waarden. LEA volgt een vast patroon van een piek in de ochtend en een kleinere piek later in de middag. De gemeten energievraag laat een constanter profiel over de dag zien, met name de daling in de middag is kleiner dan in de simulaties.



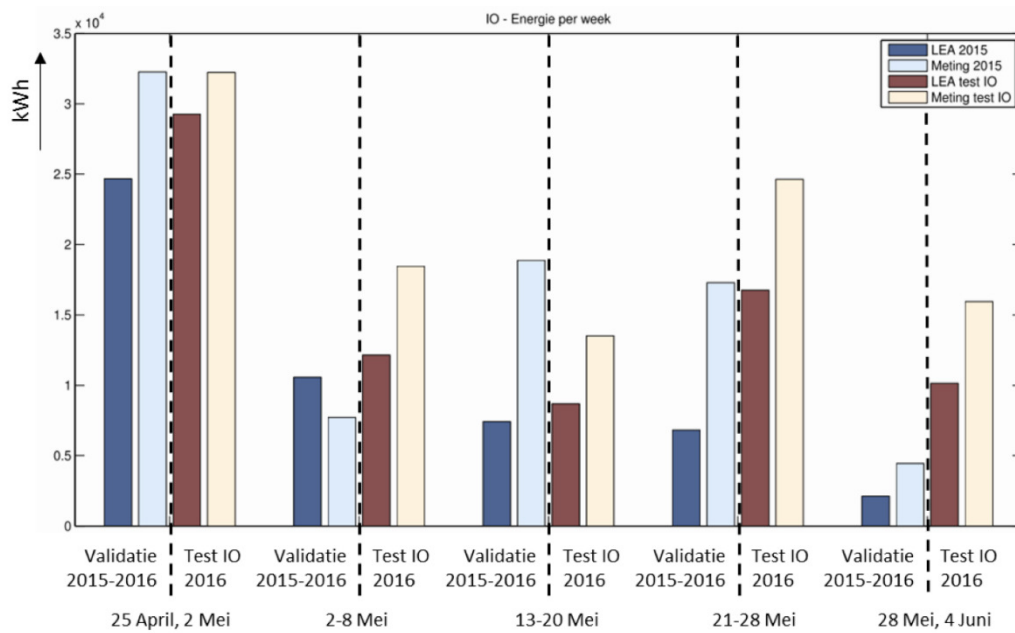
Figuur 21 Voorspelde warmtevraag LEA ten opzichte van de gemeten energie IO.

Opvallend is dat de gemeten binnentemperaturen tijdens de testperiode vrij hoog zijn. Op momenten dat de binnentemperatuur ruim boven de 20°C uitkomt, geeft LEA geen warmtevraag aan, terwijl er wel een energiegebruik is gemeten. In LEA wordt uitgegaan van een bepaald setpoint voor de binnentemperatuur. Door dit setpoint te verhogen, neemt ook de energievraag toe. Mogelijk is het setpoint dat in LEA werd gehanteerd lager dan het werkelijke setpoint. Overigens is het werkelijke setpoint moeilijk eenduidig vast te stellen, omdat dit niet centraal wordt ingesteld. Gebruikers kunnen zelf de ruimtetemperatuur bepalen door de radiatorcransen open of dicht te draaien.

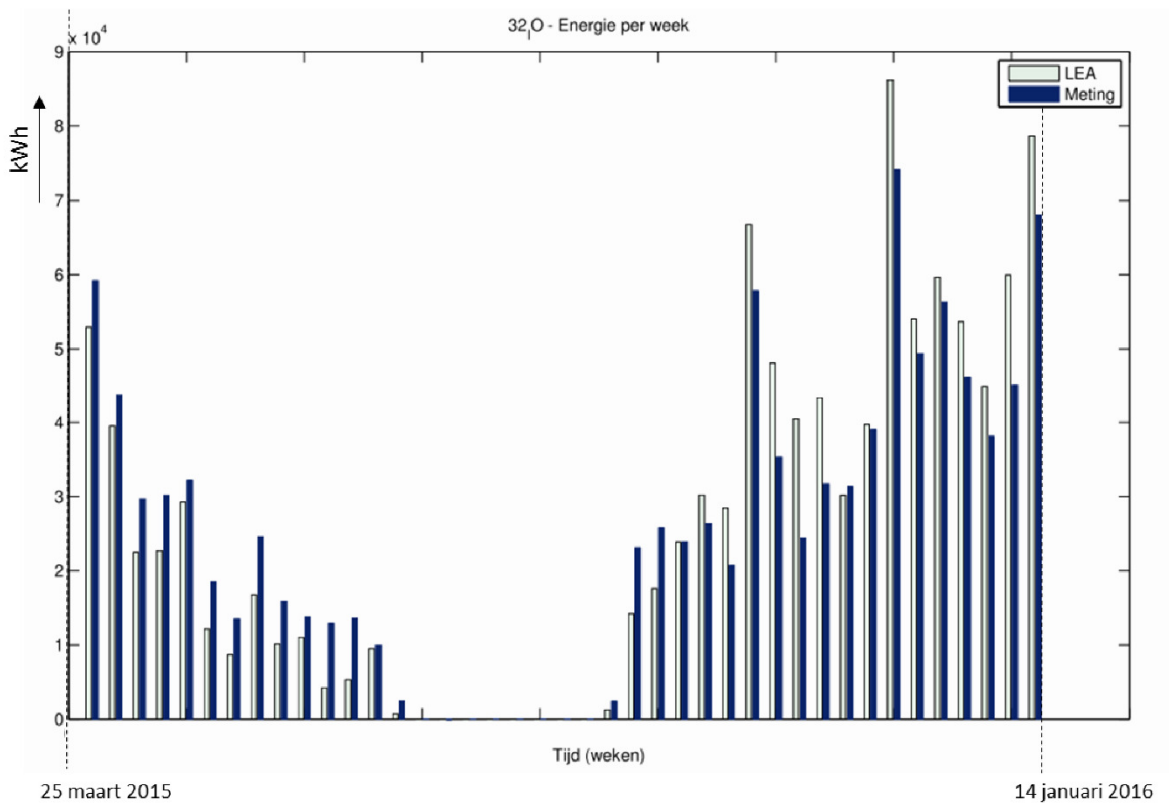
De warmteafgifte, en daarmee de energievraag, is gelimiteerd door de CV-temperatuur. Bij een lagere CV-temperatuur kan er minder warmte worden afgegeven. Dit is de basis waarmee LEA de CV-temperatuur berekent. Op sommige momenten was de warmteafname groter dan mogelijk zou moeten zijn op basis van de CV-temperatuur. Bovendien zijn er op de momenten van hoge warmtevraag hoge binnentemperaturen gemeten. Waar de warmteafname bij relatief hoge binnentemperatuur vandaan komt is op het moment nog onduidelijk. De pieken in de warmtevraag zijn echter incidenteel en komen vooral voor in de periode net voor de zomer (ook zichtbaar in de validatie van 2015-2016 van IO).

Cumulatieve energievraag

Naast het verloop van de energievraag over de dag, hebben we de cumulatieve energievraag per week berekend. Het laat zien dat de door LEA berekende waarden tijdens de testperiode iets lager lagen dan de gemeten waarden. Dit komt overeen met wat eerder al bleek uit de validatie. Uit een vergelijking van de simulatieresultaten met de meetwaarden over een geheel jaar, bleek dat de door LEA berekende waarden in het voorjaar en het najaar iets lager liggen dan de gemeten waarden; in de winter lagen de door LEA berekende waarden juist iets hoger dan de gemeten waarden.



Figuur 22 Cumulatieve energievraag per week (test IO).



Figuur 23 Figuur cumulatieve energievraag per week (validatie IO 2015-2016).

B-3.2.4 Binnenklimaat en comfort

Tijdens de praktijktest zijn geen comfortklachten opgetreden. Daarbij moet wel opgemerkt worden dat de buitentemperaturen tijdens de testperiode relatief hoog waren.

B-3.3 Resultaten implementatie tak noord 2

B-3.3.1 Technische implementatie

De gehele technische implementatie in tak noord 2 is in een relatief korte periode, namelijk van april 2016 tot en met juli 2016, uitgevoerd en is voorspoedig verlopen. De complete netwerkarchitectuur en BACnet-koppeling met de gebouwregelinstallatie was tijdens de praktijktest in gebouw 32 reeds uitgewerkt, zodat daar tijdens deze verdere uitrol op voortgeborduurd kon worden.

Na een eerste evaluatie kon worden geconcludeerd dat de simulaties draaien, de datakoppelingen werken en de fysieke aansturing van de installaties functioneert. Daarmee is de technische haalbaarheid van de DWNR aangetoond. Wel hebben zich gedurende de eerste maanden na de implementatie een aantal problemen voorgedaan met betrekking tot de stabiliteit van de simulatieomgeving. Deze problemen worden hieronder beschreven, alsmede de wijze waarop ze zijn opgelost.

Stabiliteit van de simulatieomgeving

Gebleken is dat de simulatieomgeving onvoldoende stabiel was om in een operationele regeling te worden ingezet. Het is regelmatig voorgekomen dat de modellen niet draaiden en er dus geen setpoints beschikbaar kwamen. Vaak was de oorzaak een externe verstoring, die het gevolg was van het feit dat de modellen draaien op servers in de ICT-omgeving van TU Delft. De oorzaken van de stabiliteitsproblemen waren als volgt:

- tijdens de ontwerpfase is gebruik gemaakt van het Wanda rekenhart in dll formaat. Tijdens het testen bleek deze regelmatig instabiel. Daarom is tijdens de implementatie besloten om de standaard executables van Wanda te gebruiken. Het voordeel daarvan is dat bij een crash niet de hele omgeving stopt;
- de servers van de TU Delft worden op regelmatige tijden herstart. Aangezien Wanda continu draait, resulteert een herstart van de server dat Wanda stopt. Als oplossing is ervoor gezorgd dat Wanda bij het opstarten van de server automatisch wordt gestart. Ook wordt ieder uur gecontroleerd of Wanda nog draait;
- in de ICT-omgeving van de TU Delft worden regelmatig updates uitgevoerd. Gestructureerde communicatie met IT is noodzakelijk om op dit soort onderbrekingen te kunnen anticiperen;
- één van de temperatuuropnemers was defect en gaf daardoor corrupte data door als input voor de simulaties. Dit veroorzaakte een crash van de modellen. Om dit probleem in de toekomst te verhelpen zijn er modificaties gedaan aan de software gedaan ter verhoging van de robuustheid. Onder andere zijn filters geplaatst die de ontvangen input controleren.

B-3.3.2 CV-temperaturen

Voor de implementatie van de regeling voor de drie gebouwen van tak noord 2 is na een eerste validatie met data uit 2012, een extra validatie uitgevoerd op basis van nieuwe meetgegevens (de jaren 2015-2016). Uit die laatste validatie zijn de modellen uit 2012 aangepast en dit is de basis voor de berekeningen met LEA. De CV-temperaturen zijn significant lager dan opgegeven door de oorspronkelijke GBS-regeling, maar dit heeft verscheidene gevolgen gehad in de gebouwen die niet waren voorzien. Hieronder een aantal aspecten die het gevolg zijn van het implementeren van de regeling bij tak noord 2:

- de verwarmingsbatterijen in de luchtbehandelingskasten kregen in sommige gevallen een te lage CV-temperatuur aangeboden. Dit kan bijvoorbeeld het gevolg zijn van een te kleine verwarmingsbatterij in de kast. Belangrijk om te concluderen is dat het LEA-model in sommige gevallen niet de werkelijke situatie benadert. Een voorbeeld is een ruimte waarbij de verwarming volledig wordt voorzien door de LBK, zonder radiatoren;
- het beschikbaar radiatorvermogen is mogelijk overschat (of onderschat), waardoor lagere (of juist te hoge) aanvoertemperaturen worden berekend.
- voor verschillende ruimten zijn er luchtbehandelingskasten die 24/7 warmte moeten leveren. Binnen LEA zijn de bedrijfstijden een instelling en hier wordt geen 24/7 bedrijf verondersteld. De berekening geeft dan aan dat een lage CV-temperatuur volstaat terwijl een enkele LBK in het

gebouw toch een warmtevraag heeft. Deze LBK haalt dan bij lange na niet de beoogde inblaasttemperatuur;

- voor de primaire aanvoertemperatuur is er een factor verondersteld afhankelijk van de secundaire aanvoertemperatuur. In veel gevallen blijkt dat deze factor erg afwijkt van de werkelijke situatie. Een verklaring hiervoor is dat de factor alleen geldig is voor de uiterste situatie bij een lage buitentemperatuur en dus grote warmtevraag. Een verbeterd model voor de warmtewisselaar kan hiervoor uitkomst bieden.

B-3.3.3 Energievraag

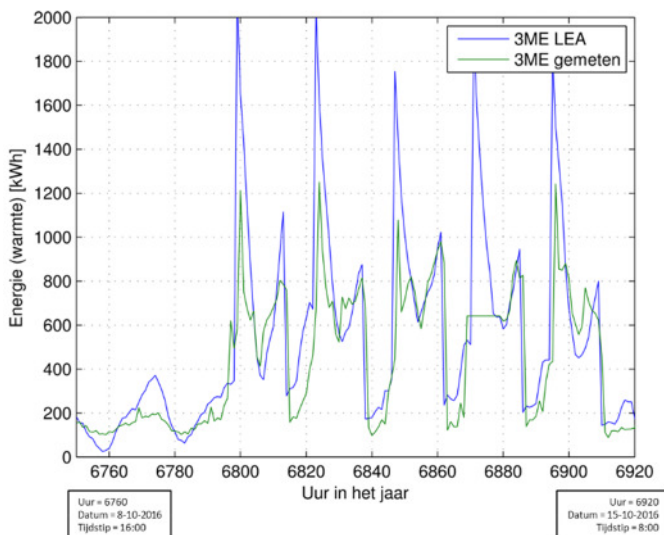
Er is nog geen volledige validatie uitgevoerd van de resultaten. Hieronder worden enkele voorlopige resultaten beschreven.

3mE

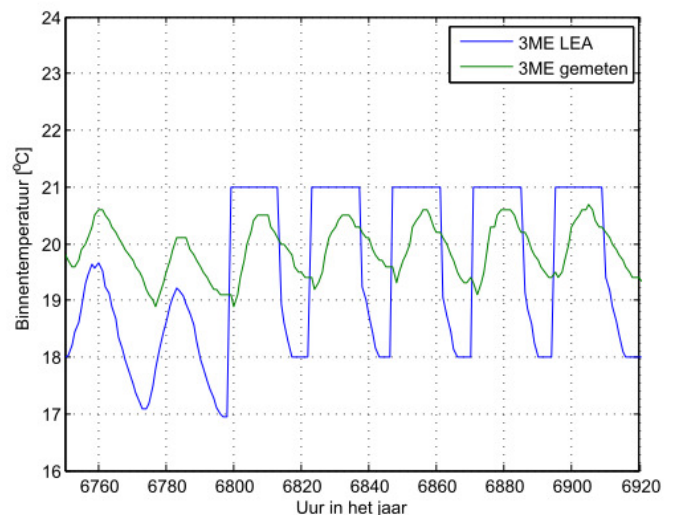
In figuur 24 is de gesimuleerde warmtevraag en de daadwerkelijk gemeten energie-afname in 3mE weergegeven voor een week in oktober. Figuur 25 toont de gesimuleerde en gemeten binnentemperaturen voor dezelfde periode in oktober. De metingen lijken niet betrouwbaar. Voor de laatste periode in november zijn er geen bruikbare meetresultaten te presenteren en metingen in oktober lijken ook niet volledig juist te zijn. Zoals te zien in figuur 24 vallen de meetresultaten een heel stuk lager uit dan wat LEA voorspelt en dan vooral de piek in de ochtend. Tijdens de validatie zal hier extra aandacht aan besteed worden. De piek die LEA laat zien voor de warmtevraag wordt niet gehaald in de metingen, maar zoals gezegd is het onzeker of de metingen juist zijn. Bij de validatie van 3mE van 2015-2016 zijn dergelijke verschillen niet waargenomen.

Het patroon in figuur 25 laat zien dat de traagheid van het gebouw nog niet goed overeenkomt met wat LEA voorspelt. Ook klopt de invoer zo te zien niet, want het gebouw gaat eerder uit en de temperatuur staat waarschijnlijk lager ingesteld dan in het gebouwmodel is aangehouden.

Conclusie is dat voor de validatie van 3ME de metingen geanalyseerd moeten worden, zodat er bruikbare meetresultaten zijn. De binnentemperatuur metingen laten grote afwijkingen zien van de voorspelde binnentemperatuur, daar moet met de validatie aandacht aan worden besteed.



Figuur 24 Energiegebruik in gebouw 3mE, simulatieresultaten versus gemeten waarden gedurende een week in oktober.



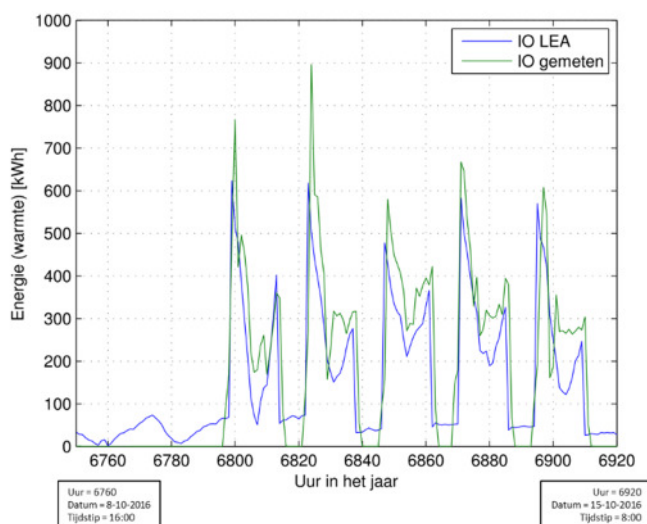
Figuur 25 Binnentemperatuur in gebouw 3mE, simulatieresultaten versus gemeten waarden gedurende een week in oktober.

IO

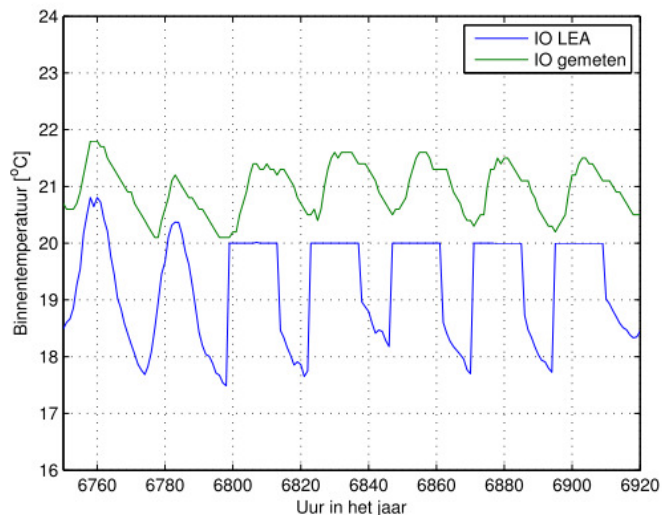
In figuur 26 is de gesimuleerde warmtevraag en de daadwerkelijk gemeten energie-afname in IO weergegeven voor een week in oktober. Figuur 27 toont de gesimuleerde en gemeten binnentemperaturen voor dezelfde periode in oktober. Figuur 28 en figuur 29 geven dezelfde gegevens weer voor een week in november.

Uit de praktijktest IO was geconcludeerd dat de simulatie in LEA in de tussenseizoenen (lente en herfst) een lagere warmtevraag opleverde dan de gemeten waarden. In de validatie 2015-2016 was te zien dat in de winter de voorspelling van LEA juist hoger was dan de gemeten waarden. De grafieken hier laten zien dat zowel oktober als november de gemeten waarden hoger liggen dan de voorspelde waarden.

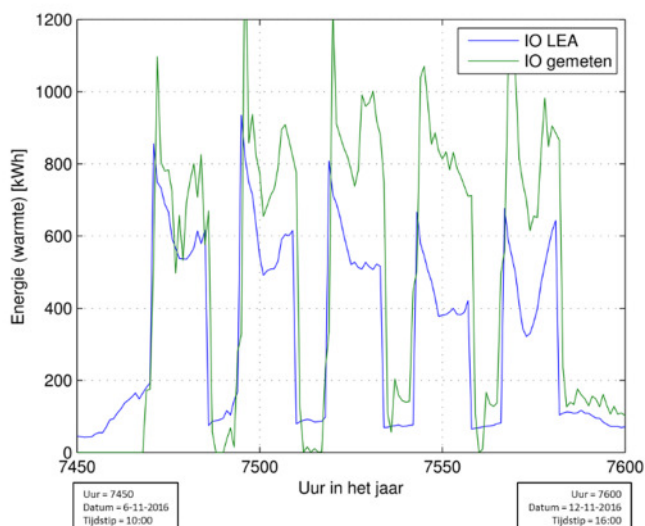
De grafieken laten zien dat de binnentemperatuur die LEA voorspelt (en waarop geregeld wordt !) een stuk lager ligt dan wat uiteindelijk is gemeten. Dit kan ook het verschil verklaren tussen de energie die LEA voorspelt en de energie die gemeten is. De figuur met de energiestromen laat dit duidelijk zien. Om een hogere binnentemperatuur te krijgen is meer energie nodig. Vooral in de week van november is te zien dat de gemeten energie en binnentemperatuur toeneemt. Het gevolg is ook dat LEA een lagere warmtevraag voorspelt, omdat de binnentemperatuur die wordt teruggelezen relatief hoog ligt.



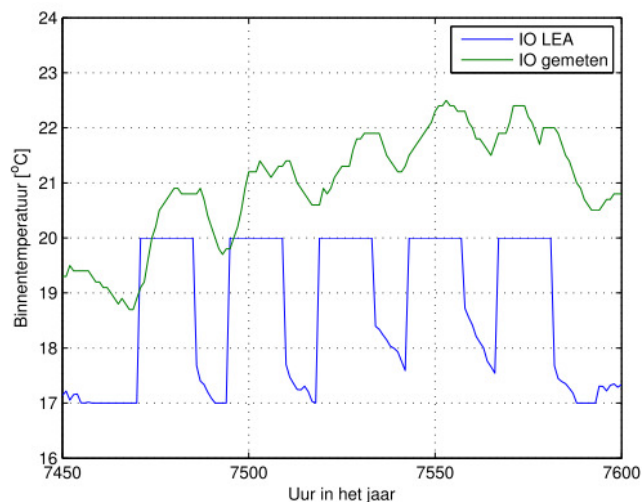
Figuur 26 Energiegebruik in gebouw IO, simulatieresultaten versus gemeten waarden gedurende een week in oktober.



Figuur 27 Binnentemperatuur in gebouw IO, simulatieresultaten versus gemeten waarden gedurende een week in oktober.



Figuur 28 Energiegebruik in gebouw IO, simulatieresultaten versus gemeten waarden gedurende een week in november.

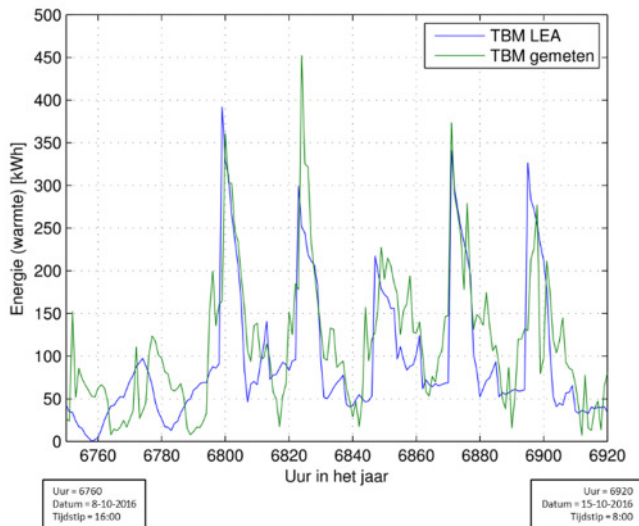


Figuur 29 Binnentemperatuur in gebouw IO, simulatieresultaten versus gemeten waarden gedurende een week in november.

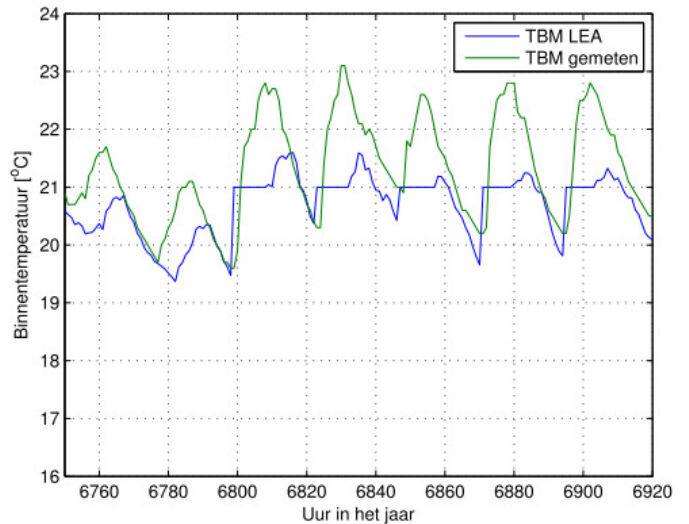
TBM

Bij TBM zijn de resultaten het meest overeenkomstig en bovendien zijn er in dit gebouw ook geen klachten gehoord. TBM is ook het enige gebouw waarbij het GBS geregeld wordt door het teruglezen van de binnentemperatuur.

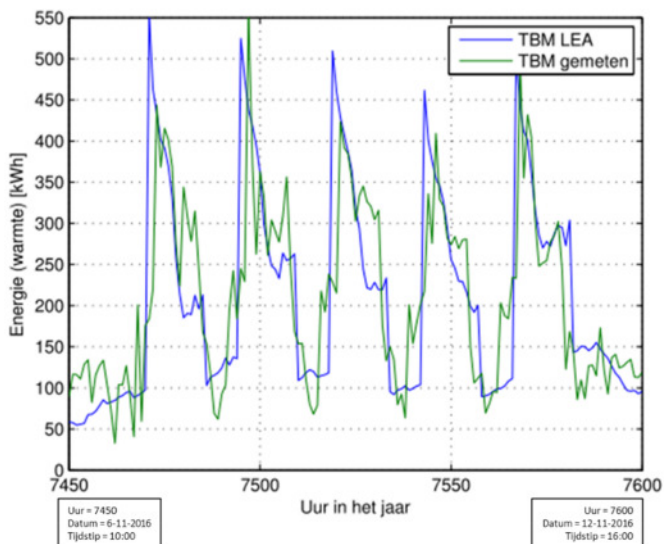
Het is goed te zien dat ook hier de binnentemperatuur meer toeneemt dan wat nodig is. Voor de comforteisen is een binnentemperatuur van 21 °C voldoende en dit zijn de opgegeven eisen in LEA. De feedback die LEA krijgt vanuit het gebouw is hier goed terug te zien. De hoge gemeten binnentemperatuur is het startpunt van de LEA berekening van zes uur later. Het gevolg is dat LEA geen/weinig energie nodig heeft voor het verwarmen (enkel voor het verwarmen van lucht in de luchtbehandelingskasten) en LEA laat een piek zien voor de binnentemperatuur. LEA laat het gebouw afkoelen tot de waarde die is ingesteld. Het dynamisch gedrag van het gebouw komt in tegenstelling tot wat zichtbaar is bij IO en 3ME wel goed overeen. Met dynamisch gedrag wordt bedoeld de snelheid waarmee een gebouw opwarmt en afkoelt.



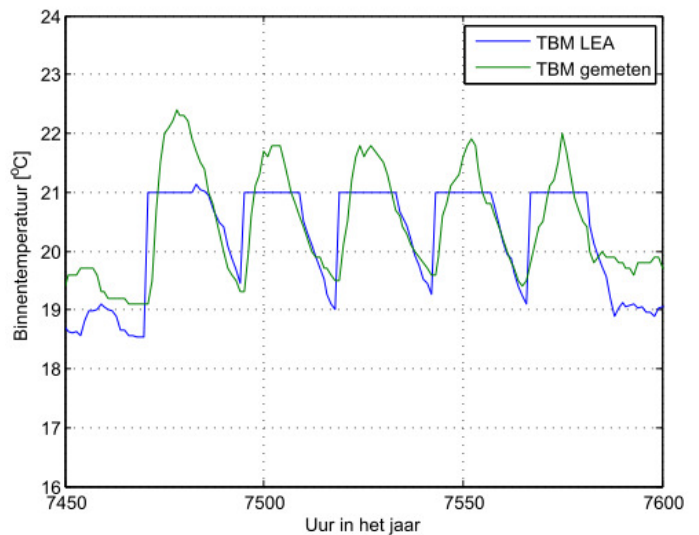
Figuur 30 Energiegebruik in gebouw TBM, simulatieresultaten versus gemeten waarden gedurende een week in oktober.



Figuur 31 Binnentemperatuur in gebouw TBM, simulatieresultaten versus gemeten waarden gedurende een week in oktober.



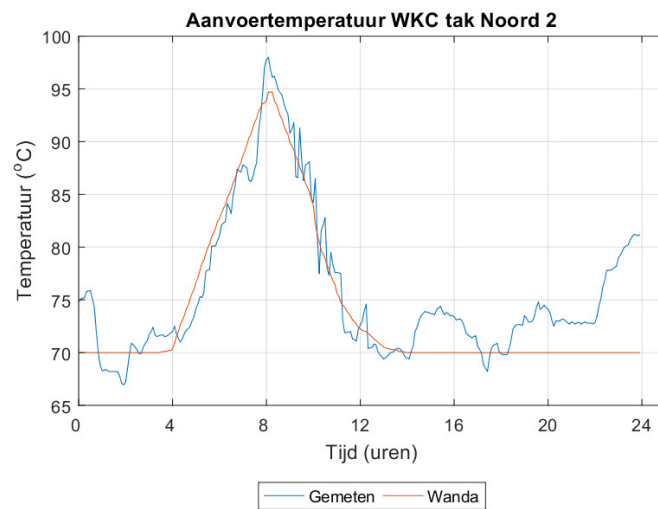
Figuur 32 Energiegebruik in gebouw TBM, simulatieresultaten versus gemeten waarden gedurende een week in november.



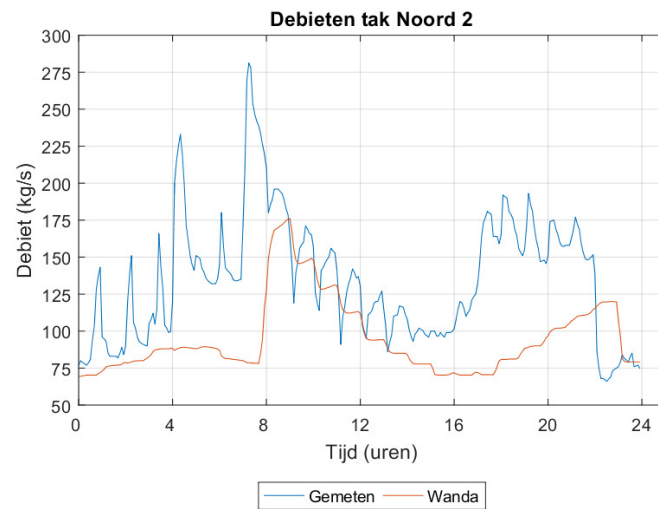
Figuur 33 Binnentemperatuur in gebouw TBM, simulatieresultaten versus gemeten waarden gedurende een week in november.

B-3.3.4 Temperaturen en debieten warmtenet

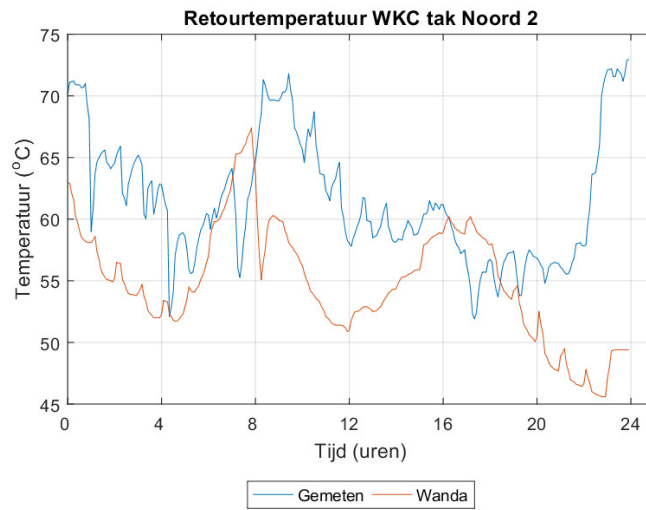
De figuren 34, 35 en 36 laten een eerste vergelijking zien tussen de gemeten waarden en de Wanda resultaten. De resultaten laten zien dat er een beperkte match is. Tijdens de validatieperiode zal verder uitgezocht worden hoe dit kan worden verklaard.



Figuur 34 Vergelijking tussen de gemeten aanvoertemperatuur en het setpoint vanuit Wanda voor 31 oktober.



Figuur 35 Vergelijking tussen de gemeten debieten en de berekende vanuit Wanda voor 31 oktober.



Figuur 36 Vergelijking tussen de gemeten retourtemperatuur en de berekende vanuit Wanda voor 31 oktober.

B-4 Mogelijkheden voor spin off en vervolgactiviteiten

B-4.1 Uitbreiding warmtenetregeling TU Delft

De meest voor de hand liggende vervolgactiviteit vanuit dit project is het realiseren van een volledig operationele warmtenetregeling voor het gehele warmtenet van de TU Delft.

B-4.2 Verdere ontwikkeling van de dynamische warmtenetregeling

Verdere integratie van de modellen

In het huidige prototype wordt gebruik gemaakt van aparte modellen voor de gebouwen en het warmtenet. Verdere integratie van beide modellen maakt een betere systeemoptimalisatie mogelijk. Aanvullend onderzoek kan uitwijzen of hiermee nog betere resultaten kunnen worden behaald.

Ontwikkeling gestandaardiseerd platform voor data-uitwisseling

Binnen het project zijn simulatieomgevingen gekoppeld met een operationele besturing. Mogelijke vervolgtrajecten hierop zijn het ontwikkelen van een gestandaardiseerde data-exchange laag waarmee vanuit meerdere modelomgevingen kan worden ingegrepen op een operationele aansturing van een warmtenet of een gebouw. Verder is het interessant om te onderzoeken welke aanvullende mogelijkheden er zijn wanneer de intelligentie wordt ondergebracht in een cloud-omgeving. Hierdoor kunnen meerdere databronnen en applicaties worden ingezet voor een verdere optimalisatie van de warmtenetregeling.

B-4.3 Marktpotentie van de dynamische warmtenetregeling

De DWNR biedt potentie voor andere warmtenetten, in zowel Nederland als het buitenland. In principe geldt dit voor alle warmtenetten. Van belang is echter dat zowel de vraag- als de aanbodkant integraal kan worden bestuurd. Daarom lijkt de DNWR vooral geschikt voor campussen, waar één eigenaar is van alle gebouwen. Ook voor grote gebouwcomplexen, waarbij warmte centraal wordt opgewekt en daar de diverse afnemers wordt gedistribueerd. Een voorbeeld van een dergelijk gebouwcomplex is een ziekenhuis.

B-5 Conclusies en aanbevelingen

B-5.1 Potentieel van de dynamische warmtenetregeling

De resultaten van de scenariostudie geven een indicatie van het potentieel van de DWNR bij het gekozen referentieklimaatjaar. Aangenomen wordt dat alle elektriciteit die door de WKK's wordt geproduceerd volledig wordt gebruikt en daarmee leidt tot een reductie in de elektriciteitsinkoop. Dit betekent dat er niets wordt teruggeleverd aan het openbare elektriciteitsnet.

Uit de scenariostudie is gebleken dat de CV-temperatuur van de gebouwen en daaruit volgend de warmtenet-temperatuur gedurende een groot aantal uren significant kan worden verlaagd ten opzichte van de situatie voor implementatie van de DWNR.

- 1 De verlaging van de temperaturen van het warmtenet maakt een vergrote inzet van de WKK's mogelijk. Hoewel dit leidt tot een groter gasverbruik, produceren de WKK's ook elektriciteit, waardoor wordt bespaard op de inkoop van elektriciteit. Over het geheel bezien resulteert dit in een reductie van het primaire energiegebruik van circa 31%. De totale CO₂-uitstoot wordt gereduceerd met circa 49%. De besparingen worden veroorzaakt door vermeden elektriciteitsinkoop en elektriciteitsproductie in het openbare net.
- 2 De energiekosten zijn, vanwege de vermeden elektriciteitskosten, aanzienlijk lager. Wel leidt de grotere inzet van de WKK's tot hogere onderhoudskosten en hogere kosten in verband met CO₂-emissierechten. Over het geheel bezien resulteert de toepassing van de DWNR in een jaarlijkse kostenbesparing van circa € 300.000. Dit komt overeen met een kostenreductie van 33% ten opzichte van de situatie voor implementatie van de DWNR.
- 3 Inzet van een geothermische installatie leidt, zoals verwacht, tot een afname van het gasverbruik. De resultaten van de scenariostudie laten zien dat circa 67.000 GJ van de benodigde warmte zou kunnen worden geleverd door een geothermische installatie. Over het geheel bezien resulteert dit in een reductie van het primaire energiegebruik van circa 60% en de reductie van de CO₂-uitstoot van circa 58% ten opzichte van de situatie voor implementatie van de DWNR. De DWNR kan bijdragen aan de haalbaarheid van de toepassing van een geothermische installatie.
- 4 Met de DWNR krijgt een gebouw 'uit onafhankelijke hoek' een beeld over de realistische energievraag van dat gebouw. Dat beeld kan worden gebruikt om vast te stellen of er energetisch iets aan de hand met de installatie en/of het gebouw. Met andere woorden, de DWNR kan aan het licht brengen of een gebouw goed functioneert of niet en in welke richting de oorzaak gezocht moet worden. Dat inzicht kan worden gebruikt om de gebouwen en hun (regel)installaties te verbeteren. En dat leidt dan ook weer tot een verbetering van het comfort en/of energiebesparing.

Opmerking: De numerieke waarden genoemd in de conclusies 1 t/m 3 van deze paragraaf zijn gebaseerd op de resultaten van de scenariostudie. Die geven een indicatie van het potentieel van de DWNR bij het gekozen referentieklimaatjaar [2]. De kostenreductie komt voort uit een hogere inzet van de WKK's dan in de referentie. In werkelijkheid draait de WKK in de referentiesituatie meer uren dan uit scenario 1 van de studie volgt. Echter, ook de WKK-draaiuren met de DWNR zijn volgens scenario 3 relatief laag. Dit lijkt te worden veroorzaakt doordat het effect van een verbeterd model voor de warmtewisselaars nog niet in de resultaten is verwerkt. De verwachting is dat met dat betere

model, de WKK-draaiuren in beide situaties (referentie en met DWNR) zal toenemen. Als dat in gelijke mate is, dan veranderen de uitkomsten niet.

1. Het ontwerp levert een werkbaar systeem op. Voornamelijk is er op grond van de opgedane ervaringen geen aanleiding om de structuur van het ontwerp ingrijpend te herzien. Wel blijkt het nodig om een aantal modificaties uit te voeren. Deze zijn benoemd in paragraaf B-5.3.

B-5.2 Implementatie van de dynamische warmtenetregeling

- 1 Als eerste praktijktest is het gebouwgerelateerde gedeelte van de DWNR geïmplementeerd in één van de gebouwen. Na een succesvol verloop van deze test is het volledige prototype geïmplementeerd in een gehele tak van het warmtenet. De technische implementatie is relatief snel en voorspoedig verlopen.
- 2 Met de implementatie in tak noord 2 is de technische haalbaarheid van de DWNR aangetoond. Alle communicatie functioneert en er vinden realistische sturingen plaats. Nadat de simulatieomgeving aanvankelijk onvoldoende stabiel bleek te zijn, zijn aanpassingen in de software uitgevoerd, waarmee de stabiliteit aanzienlijk is verbeterd.
- 3 Of het systeem leidt tot een acceptabel binnenklimaat moet nog worden uitgewezen. Een evaluatie van de door de modellen berekende temperaturen en de gevolgen daarvan voor het comfort in de gebouwen heeft nog niet plaats kunnen vinden, vanwege het ontbreken van een representatieve (koude) periode.
- 4 Op dit moment doorloopt het systeem een validatieperiode waarin het functioneren en de functionaliteit worden getest en de prestaties gemonitord. Een groot deel van het systeem functioneert goed en tot nu toe geconstateerde gebreken en onvolkomenheden lijken oplosbaar, of zijn gedurende het validatieproces al verholpen.
- 5 Niettemin kan dit moment nog niet worden gesproken van bevredigend functioneren. De validatieperiode loopt tot eind februari en wordt afgesloten met een analyse van de resultaten en daaruit volgende aanbevelingen voor verdere verbeteringen. Op grond van de bevindingen aan het eind van de validatieperiode wordt door TU Delft besloten of de DWNR ook in de andere takken van het warmtenet zal worden geïmplementeerd.
- 6 De DWNR bevindt zich in een staat van prototype, verkeert in een testfase en is nog verre van optimaal, maar draait wel in een operationele omgeving, die het primaire proces van TU Delft direct faciliteert. Dit is een situatie die eigenlijk voorkomen zou moeten worden.

B-5.3 Aanbevelingen

B-5.3.1 Aanbevelingen met betrekking tot het operationele prototype

- a) *Validatie van de resultaten van het operationele prototype.*

De DWNR lijkt te kunnen zorgen voor een substantiële reductie van de energiekosten en een even substantiële verhoging van de duurzaamheid van de warmtevoorziening van TU Delft. Hoewel er nog kan worden verbeterd aan het functioneren van de DWNR, zijn tot nu toe geen zaken aan het licht gekomen waarvoor geen relatief eenvoudige oplossing bedacht kon worden. Geadviseerd wordt om het operationele prototype gedurende de komende winterperiode intensief te monitoren. Op basis van de resultaten van de validatie kan een uitspraak worden gedaan met betrekking tot de werking van de modellen, de effecten van de DWNR op het comfort in de gebouwen en de energetische prestatie. Vervolgens kan een besluit worden genomen over de uitrol van de DWNR over de andere takken van het warmtenet, alsmede de noodzakelijke functionaliteiten.

b) *Verificatie van de weersverwachtingen*
Geadviseerd wordt de voorspellingen van Meteogroup met de gemeten waarden uit de WKC te verifiëren.

c) *Inrichten beheersomgeving*
De werking van alle systemen is gedurende de testperiode op regelmatige basis door de verschillende partijen gecontroleerd. Voor het gebruik van de regeling in een operationele omgeving moeten voorzieningen worden aangebracht om storingen in het systeem automatisch door te melden naar een beheersorganisatie. Ook moeten er afspraken worden gemaakt over de ondersteuning binnen en buiten kantoor tijden. Het inrichten van een dergelijke beheersomgeving is geen onderdeel geweest van het project, maar is voor het operationeel gebruik van de DWNR wel aan te bevelen.

B-5.3.2 Aanbevelingen ten behoeve van de verdere uitrol van de dynamische warmtenetregeling

a) *Kalibratie/validatie van de gebouwmodellen*
Voor het bepalen van de juiste setpoints is het van belang dat de simulatieresultaten de werkelijkheid zoveel mogelijk benaderen. Om dit te bereiken zijn de modellen gekalibreerd en gevalideerd met behulp van meetresultaten uit 2012. Gebleken is dat deze meetresultaten niet betrouwbaar zijn. Inmiddels zijn betere, actuele meetwaarden beschikbaar. De gebouwmodellen van tak noord 2 zijn reeds met deze actuele metingen gekalibreerd. Geadviseerd wordt ook de overige modellen te kalibreren met betrouwbare, actuele meetdata.

b) *Kalibratie/validatie van het warmtenetmodel*
Het warmtenetmodel is nog niet gevalideerd, omdat de beschikbare meetdata te beperkt bleek te zijn. Door het huidige monitoringsysteem is de benodigde meetdata inmiddels wel beschikbaar, zodat de validatie alsnog plaats kan vinden.

c) *Uitbreiding warmtenetmodel*
Momenteel zijn de vier takken afzonderlijk gemodelleerd in Wanda. Geadviseerd wordt het model uit te breiden met een koppeling tussen de verschillende takken. Hierdoor kunnen operationele veranderingen gemakkelijk in de DWNR worden opgenomen.

d) *Ontwikkeling van een user-interface*
De huidige simulatieomgeving is niet voorzien van een user-interface. Geadviseerd wordt een user-interface te ontwikkelen, waarmee de resultaten van de simulaties helder kunnen worden gepresenteerd. Tevens is het wenselijk dat deze user-interface het ingrijpen op de regeling of de instellingen eenvoudig mogelijk maakt.

e) *Vakantiedagen / bijzondere openingstijden*
Vanuit de beheersorganisatie is de wens aangegeven om op een eenduidige en gebruiksvriendelijke manier de kloktijden, vakantiedagen en eventuele bijzondere openingstijden voor het gebouw in te stellen en deze vervolgens zowel in het GBS van het gebouw als in de DWNR te gebruiken. Geadviseerd wordt te onderzoeken wat hiervoor de beste oplossing is. Daarbij kunnen ook aspecten zoals de mogelijkheden voor een automatische koppeling met het roostersysteem, worden betrokken.

f) *BACnet koppeling met de gebouwregelinstallatie*
Voor het terugkoppelen van de actuele ruimtetemperatuur in de gebouwen is een koppeling met de bestaande gebouwregelinstallatie nodig. Gebleken is dat er geen uniforme opzet/structuur is

van de gebouwregelinstallaties van de verschillende gebouwen en dat ook een functionele documentatie ontbreekt. Dit maakt de koppeling arbeidsintensief. Voor de gebouwen van tak Noord 2 is gekozen voor een BACnet-koppeling, aangezien de gebouwregelinstallaties van deze gebouwen zijn voorzien van een BACnet/IP interface. Voor de gebouwen waar dit niet het geval is, zal per gebouw moeten worden bepaald of de bestaande regelinstallatie geschikt wordt gemaakt voor de BACnet-koppeling. Als alternatief kan de koppeling op een andere wijze worden gemaakt, of er kan voor de DWNR een separate ruimtetemperatuurmetering worden aangebracht.

g) *Betrouwbaarheid temperatuurmetingen*

Om te voorkomen dat het model wordt gevoed met onjuiste waarden zal bij de implementatie van toekomstige gebouwen per gebouw moeten worden bepaald welke van de in het GBS aanwezige opnemers geschikt zijn om te worden gebruikt voor de referentiemeting. Aanvullend dient met behulp van een referentiemeting te worden gecontroleerd of deze opnemers de juiste waarde weergeven.

h) *Begrenzing primaire retourtemperatuur*

Voor een efficiënte inzet van de WKK's en een eventuele geothermische installatie is de begrenzing van de primaire retourtemperatuur van groot belang. In het eerste ontwerp van de DWNR was een actieve begrenzing van de primaire retourtemperatuur van de warmteafleverstations voorzien. Deze functionaliteit is in het gerealiseerde prototype echter niet meegenomen. De reden hiervoor was de hoge kosten voor het aanbrengen van een aanvullende temperatuurmetering in het primaire net of het inlezen van deze temperatuur vanuit de bestaande energiemetingen. Geadviseerd wordt deze functionaliteit wel toe te voegen in de verdere uitrol van de DWNR. Daarbij zal onderzocht moeten worden of de temperatuur vanuit de bestaande energiemetingen kan worden ingelezen of dat er een aanvullende opnemer moet worden aangebracht in het leidingwerk van het primaire circuit.

i) *Vervroegd aanwarmen*

Het aantal uren dat de primaire aanvoertemperatuur beneden een bepaalde grenswaarde ligt, kan verder worden vergroot door het slim aanwarmen van de gebouwen. LEA kan bepalen wat, per gebouw per dag, de optimale aanwarmtijd is. Voor de aansturing van de gebouwen op basis van deze berekende aanwarmtijden zijn aanpassingen in de bestaande regelinstallaties en de GBS-en van de gebouwen noodzakelijk. Vanwege de kosten die hiermee gemoeid zijn is deze functionaliteit in het gerealiseerde prototype niet meegenomen. Indien een verdere verlaging van de temperatuur gewenst is, bijvoorbeeld voor het maximaliseren van de inzet van een geothermische installatie, wordt geadviseerd deze functionaliteit alsnog te implementeren.

j) *Pre- en postprocessing*

Pre-processing op de input en postprocessing op de output. De eerste om een robuuster systeem te krijgen door de input op validiteit te controleren, de laatste om ervoor te zorgen dat de aan de WKC aangeboden setpoints een vloeiend verloop hebben en grote gradiënten vermeden worden.

k) *Uitbreiding functionaliteit BACnet koppeling*

De koppeling met de GBS'sen moet worden uitgebreid: op dit moment wordt alleen informatie uit de GBS'sen ontvangen. Het is echter essentieel dat ook de GBS'sen kunnen worden aangestuurd. Dit betreft dan het aanpassen/overrulen van de tijdsklokken, zodat met name het dynamisch aanwarmen goed wordt ondersteund.

l) *Setpoint-offset*

De gebouwmodellen en -simulatie zijn bewust simpel gehouden. Ook zijn de niet de gebouw/installatiekenmerken niet altijd juist, waardoor de setpoints structureel afwijken van de gewenste waarde. Dit kan worden gecorrigeerd door voor een gebouw een stelselmatige verhoging of verlaging van het setpoint toe te passen. Deze voorziening kan het beste in de regelunit van de warmtewisselaars worden aangebracht.

m) Herziening MODbus-koppeling

De MODbus koppeling moet worden herzien: nu wordt één setpointwaarde gestuurd. Uit het oogpunt van robuustheid moet de centrale voor een reeks van uren setpoints ontvangen, die de WKC-regeling dan gebruikt indien tijdelijk geen data is ontvangen.

Literatuur

- [1] Nederlands Normalisatie-instituut, „NEN-EN-ISO 7730:2005 Klimaatomstandigheden - Analytische bepaling en interpretatie van thermische behaaglijkheid door berekeningen van de PMV en PPD-waarden en lokale thermische behaaglijkheid,” 2005.
- [2] Nederlands Normalisatie-instituut, „NEN 5060:2008 nl, Hygrothermische eigenschappen van gebouwen – Referentieklimaatgegevens,” 2008.
- [3] Deltares, „1220197-000-HYE-0005 - Smart thermal grid University of Technology Delft”.
- [4] CBS, „Rendementen en CO2-emissie elektriciteitsproductie 2014,” 21 April 2016. [Online]. Available: <https://www.cbs.nl/nl-nl/achtergrond/2016/16/rendementen-en-co2-emissie-elektriciteitsproductie-2014>. [Geopend December 2016].
- [5] „Lijst emissiefactoren,” Mei 2016. [Online]. Available: http://co2emissiefactoren.nl/lijst-emissiefactoren/#totale_lijst. [Geopend december 2016].
- [6] Deltares, „1220197-000-HYE-0010 - Dynamische warmtenetregeling beschrijving Wanda software”.
- [7] Deerns, „Intelligent warmtenet campus TU Delft, Fase 1, Studie naar de potentie van de transitie middels gebouwssimulaties,” Rijswijk, 2015.
- [8] Deltares, „1220197-000-HYE-0011 - Addendum to report Smart thermal grid DUT, Wanda simulations and results).”.

Intelligent Warmtenet Campus TU Delft

Deel C

Uitvoering van het project

C-1 Problemen en oplossingen

Geen project verloopt zonder problemen. Zo moesten ook dit project de nodige hindernissen overwonnen worden. In deze paragraaf worden de relevante problemen en hun oplossing beschreven. Er wordt daarbij onderscheid gemaakt tussen technische problemen en organisatorische problemen.

In dit deel van het rapport wordt alleen ingegaan op de problemen en oplossingen die optraden na de doorvoer van de projectwijziging die op 14 juli 2016 formeel ingegaan is. De projectwijziging is doorgevoerd om alle daarvoor optredende problemen op te lossen. De problemen die aanleiding gaven tot de projectwijziging én de oplossingen, zijn uitvoerig beschreven in de motivatie en het plan van aanpak die deel uitmaakten van het verzoek tot wijziging (ingediend op 25 april en aangevuld op 19 mei 2016) en worden hier om die reden niet herhaald.

C-1.1 Organisatorische problemen en hun oplossingen

- 1 Al voor de herstart is door het projectteam een uitgebreide risico-inventarisatie met weging uitgevoerd. De als zwaarstwegende geïdentificeerde risico's waren financieel van aard: onzekerheid over de toekenning van de subsidie, subsidieverlies door de doorstart, verrassingen in het warmtenet die tot hogere kosten leiden, onvoldoende borging van de financiële randvoorwaarden, leidend tot arbitrage zaken.

Oplossing: De risico's zijn in de stuurgroep gemonitord en er is actie ondernomen om adequaat te reageren: zo is een gedetailleerde begroting gemaakt en maandelijks bijgehouden, de kosten van oplossingen en uitvoeringen zijn van tevoren goed in beeld gebracht en zo nodig is gekozen voor een alternatieve of versoberde uitvoering; ook zijn inventarisaties op het warmtenet uitgevoerd om verrassingen te voorkomen.

- 2 In april is het prototype van de (inmiddels zo gedoopte) Dynamische Warmtenetregeling- DNWR, geïmplementeerd in de faculteit Industrieel ontwerpen (IO). Vanwege het (warme weer) gaf de implementatie gaf wel (positieve) inzichten, maar niet voldoende om het ontwerp te herzien. De uitrol van DNWR over de hele tak Noord 2 van het warmtenet, vond daarom plaats met dezelfde specificaties als bij IO. Het net werd als gebruikelijk begin september in gebruik genomen. Omdat september ook een warme maand was, konden de prestaties van de DNWR vóór de formele afronding van het project niet anders dan "technisch" worden getest. (ofwel alles functioneerde).

Oplossing: het project is voortgezet/uitgebreid met een validatiefase. Pas in oktober begon het stookseizoen en kon met testen worden begonnen.

- 3 Het tweede probleem is zeer serieus en wordt vooral veroorzaakt doordat is dat een prototype van een innovatief systeem direct in een operationele omgeving moet worden ingezet om te testen. er is geen ruimte om rustig te testen en te beschouwen. Niet goed functioneren leidt direct tot verstoringen van het primaire proces van TU Delft. Dit leidt begrijpelijkerwijs tot een weliswaar (zeer) welwillende, maar ook kritische houding van de voor de dit deel van de bedrijfsvoering verantwoordelijken: de facilitaire dienst van TU Delft. Omdat het testen / validatie tijdens vol bedrijf van het warmtenet plaatsvindt, leiden storingen onmiddellijk tot klachten. Technische- en comfortproblemen moeten dus adequaat en snel worden opgelost. De oorspronkelijke IPIN-organisatiestructuur met partners, was een samenwerkingsstructuur gericht op ontwikkeling en functioneerde daar goed – dankzij professionele

partners. Echter de bestaande structuur zonder hiërarchie bleek niet geschikt voor het test- en validatieproces, want te weinig besluit- en slagvaardig. Dat er een discrepantie is tussen het in gebruik nemen van een “product met garanties” en een prototype of pilot systeem met gebreken, komt nu wel aan het licht.

Oplossing: Er is besloten tot een andere organisatiestructuur, waarbij TU Delft vetorecht heeft over modificaties aan het systeem en één persoon beslist, wat er moet gebeuren om een probleem technisch gezien op te lossen. Hij wordt daarbij geholpen en van advies voorzien door de partners. Er wordt daarbij gestreefd naar instant oplossingen. Noodverbanden zijn toegestaan, omdat het zaak is om de DNWR in de lucht te houden: zonder dat wordt draagvlak verloren en wordt te weinig informatie uit de validatie verkregen om na de winterperiode te kunnen beslissen of het project voortgezet, verder uitgerold dan wel stopgezet moet worden.

C-1.2 Technische problemen en hun oplossingen

In het algemeen zijn technische problemen terug te voeren tot een discrepantie tussen een systeem dat in de fase van prototype verkeert en de functionele eisen die aan een operationeel systeem worden gesteld.

- 4 Door het in de vorige paragraaf uiteengezette probleem van testen in een operationele omgeving waarin het project draait, is uitval van de DNWR of anderszins verstoring bedrijf is, geen optie. Dit is niet acceptabel. Toch gebeurt het regelmatig dat de DNWR niet functioneert als gewenst.

Oplossing: de DNWR is voorzien van nodige “noodknoppen”, waarmee de staf van de WKC automatisch of handmatig de controle over de warmtevoorziening indien nodig, direct kan overnemen en daarbij overschakelt op de oorspronkelijke bedrijfswijze.

- 5 De server van de TUD wordt op regelmatige tijden herstart. Aangezien het Wanda gedeelte continu draait moet deze automatisch herstart worden als de server opnieuw is opgestart.

Oplossing : In de Task scheduler is een taak toegevoegd die het Wanda gedeelte start als de server wordt opgestart. Daarnaast is hierin toegevoegd dat elk uur wordt gecontroleerd of het Wanda gedeelte nog draait. Aangezien netwerk communicatie noodzakelijk is, wordt deze taak uitgevoerd met de hoogste privileges.

- 6 Hoewel de modules WANDA en LEA op zich stabiel draaien, komt het regelmatig voor dat LEA en WANDA uitvallen en niet automatisch herstarten. Dit wordt vooral veroorzaakt door externe verstoringen. Zo draaien deze modules op servers van de IT omgeving van TU Delft. In die omgeving worden regelmatig updates uitgevoerd, die als gevolg hebben dat se DNWR software opnieuw gestart moet worden.

Oplossing: oplossing van het probleem vereist gestructureerde communicatie met IT, Waardoor op dit soort onderbrekingen geanticipeerd kan worden.

- 7 Stabiliteit van de regeling. Tijdens de ontwerpfase is er gebruik gemaakt van het Wanda rekenhart in dll formaat. Echter tijdens het testen kon deze instabiel zijn (crashen).

Oplossing: tijdens de implementatie fase is voor gekozen om de standaard executables van Wanda te gebruiken. Bij een crash in deze zal niet de hele omgeving stoppen, wat uiteindelijk leid tot een stabielere omgeving.

- 8 Hoewel de modules WANDA en LEA op zich stabiel draaien, komt het regelmatig voor dat LEA of WANDA uitvalt en niet automatisch herstart. Dit wordt vooral veroorzaakt door externe

verstoringen. Een van de oorzaken is corrupte data input. Bijvoorbeeld omdat een (temperatuur)opnemer defect is en daardoor foute data doorgeeft.

Oplossing: Er zijn modificaties aan de software gedaan ter verhoging van de robuustheid. Onder andere zijn filters geplaatst die een “*sanity check*” uitvoeren op de (dynamische) invoerdata.

- 9 In sommige gebouwen is sprake van comfortklachten, die worden veroorzaakt doordat LEA een te laag setpoint voorschrijft.

Oplossing: Dit probleem kan vele oorzaken hebben. Een van de oorzaken is dat de verwarmingsbatterij van een luchtbehandelingskast, minder capaciteit heeft dan (op basis van de gebouwopname) werd aangehouden. De LBK krijgt dan een te lage CV temperatuur aangeboden, en kan de ventilatielucht onvoldoende voorverwarmen. Zo'n situatie wordt geïdentificeerd als een “*Hot Spot*”. een definitieve

- 10 Op het moment dat er onderhoud wordt gepleegd aan de server met de SQL omgeving is het niet mogelijk dat TC History data kan wegschrijven. Dit veroorzaakt een hiaat in de monitoring.

Oplossing: Er wordt een aanpassing gemaakt in TC History die middels een update in november 2016 (TC 8.5.8) beschikbaar is gekomen.

C-2 Wijzigingen ten opzichte van het projectplan

C-2.1 scope

In het projectplan van 21 april 2016, bijlage bij het verzoek tot wijziging, is in hoofdstuk 2 de scope van het project omschreven. De scope is niet gewijzigd en gerealiseerd conform het plan van aanpak. Hieronder zijn de vier hoofdonderdelen van de scope uit het plan van aanpak weergegeven:

11 *“Een operationeel prototype van de optimaliserende DWNR gemaakt en geïmplementeerd voor tak Noord 2 van het warmtenet. De modificatie van de warmtecentrale en het geschikt maken van de warmtewisselaars en hun aansturing van het betrokken deel van het warmtenet maakt hier deel van uit. Het gedrag van de DWNR, aangesloten gebouwen en de WKC wordt gemonitord en de prestaties geanalyseerd. De simulatie van alle gebouwen en het complete warmtenet is gereed, geïnstalleerd en klaar voor gebruik”.*

12 *“De ontwikkeling van DWNR wordt gebaseerd op de computerprogramma's LEA en WANDA en omvat een voorspellend computermodel dat regelinformatie levert, datacommunicatie tussen regelservers en de gebouwen organiseert. Daarnaast zijn fysieke aanpassingen aan de WKC en het warmtenet uitgevoerd. De opzet van het systeem is schematisch weergegeven in figuur 1.”*

13 *“In het kader van IPIN wordt in fase 2 wordt een operationeel prototype van de optimaliserende DWNR in het warmtenet van TU Delft gemaakt. Met daartoe uitgebreide LEA en WANDA programma's zijn gebouwen en warmtenet van de campus gemodelleerd en met die modellen zijn eerste uitkomsten vanuit de modellering gerealiseerd in fase 1 van het project. De volgende stap is het inrichten van de warmtenetregeling, die er voor zorgt dat de Warmtekrachtcentrale (WKC) en gebouwen ook gestuurd worden naar een efficiëntere (lagere) temperatuur, op basis van de weer-, WKC en gebouwd data. De tweede fase van het project heeft als scope om noordtak 2, werkend als prototype, uit te voeren volgens de ontwikkelde opzet van de warmtenetregeling. Hieraan vooraf wordt vanaf maart 2016 een test uitgevoerd van een gedeelte van de regeling bij het IO gebouw. Deze test is een eerste praktijktoets van de effectiviteit van de werking van de boogde DWNR en levert inzicht over de wijze waarop het systeem geïmplementeerd moet worden”*

14 *“Daarnaast wordt het gemodelleerde warmtenet van de gehele campus overgedragen aan de TU Delft”*

De onderdelen 1 tot en met 4 zijn gerealiseerd en de LEA modellen en software is overgedragen aan TU Delft. Met betrekking tot Wanda is op de volgende wijze voorzien in ondersteuning van TU Delft: als iemand bij de TUD aan de slag wil met de Wanda modellen kan contact opgenomen worden met Deltares; de modellen worden dan overgedragen en men wordt op weg geholpen.

C-2.2 Doelstellingen

In het projectplan van 21 april 2016, bijlage bij het verzoek tot wijziging, zijn in hoofdstuk 3 de doelstellingen van het project omschreven. De doelstellingen zijn niet gewijzigd en gerealiseerd conform het plan van aanpak. Hieronder zijn de doelstellingen uit het plan van aanpak weergegeven.

Algemeen

“Het IPIN project heeft als hoofddoel om proefondervindelijk te bepalen in hoeverre het warmtenet van de Technische Universiteit Delft met een integrale, intelligente, anticiperende regeling naar midden temperatuur gebracht kan worden”... “..is het doel van de DWNR om door middel van

anticiperend aanwarmen gedurende een substantieel deel van de tijd de benodigde CV-aanvoertemperatuur van een gebouw te verlagen”.

Deze doelstelling is niet gewijzigd.

Specifiek

15 Een praktijktest bij gebouw 32: de faculteit Industrieel Ontwerpen (IO), waarbij de gebouwregeling werkend is met geslaagde communicatie tussen LEA en Priva Blue/ID. De test voor IO is geslaagd als:

- o de communicatie goed verloopt en het model niet vastloopt.*
- o de temperatuur van het CV net van gebouw 32 gestuurd/verlaagd kan worden volgens de opgave door LEA terwijl de klachten over het comfort niet significant meer zijn dan normaal, dan wel dat de heersende ruimtetemperaturen als beoogd zijn.*
- o weeredata, gebouwinformatie wordt juist ingelesen en LEA geeft elk uur een nieuwe output die gebruikt wordt voor sturing van de CV temperatuur van IO.*
- o model kalibratie van LEA met gereduceerde aanvoertemperatuur op basis van monitoringsperiode van de IO test.*
- o kalibratie van het Wandamodel op basis van monitoringsperiode van de IO test.*

16 Uiterlijk in de zomer moet voor heel Tak Noord 2 DNWR geïmplementeerd zijn.

17 Kwantificeren van het effect van o.a. peakshaving met behulp van totale systeemoptimalisatie op basis van performancevoorspellingen van LEA/WANDA voor het gehele warmtenet

18 Analyseren van hotspots in gebouwen op basis van LEA simulaties.

Ad 1. De praktijktest voor IO is uitgevoerd en alle onderdelen zijn uitgevoerd. Wel is de test een maand later uitgevoerd dan gepland. De vertraging werd veroorzaakt door discussie over de noodzakelijke functionaliteit.

Ad 2. De DNWR is in de zomer compleet geïmplementeerd in Tak noord 2. De implementatie omvatte het aansluiten/ modifieren van de warmtewisselaars van de gebouwen IO, 3ME en TBM. Daarnaast is ook met een MODbus koppeling, de regeltechnische koppeling met de Warmtekrachtcentrale tot stand gebracht. Via deze koppeling stuurt de DNWR het setpoint van Tak Noord 2 aan.

Ad. 3. Tijdens de implementatie fase is er een start gemaakt met een onderzoek naar het effect van totale systeemoptimalisatie op de broninzet. Met totale systeemoptimalisatie wordt bedoeld dat er 1 integraal (simpel) model van de hele campus wordt gemaakt met zowel de leidingen als de gebouwen. Dit model kan dan worden gebruikt om een zogenoemde kostenfunctie te minimaliseren. Deze kostenfunctie kan bijvoorbeeld de CO₂ uitstoot van de bronnen zijn, of de echte kosten. Met de systeemoptimalisatie wordt een optimale balans gevonden tussen voorverwarming met peakshaving en kosten. Bovendien kan de systeemoptimalisatie gebruik maken van de informatie dat verschillende gebouwen op dezelfde track noodzakelijkerwijs dezelfde aanvoertemperatuur zullen krijgen; daar wordt met de huidige gebouw-optimalisatie geen gebruik van gemaakt.

Doel van deze stap is om te analyseren hoeveel extra WKK-inzet of geothermie-inzet gecreëerd kan worden met een integraal model in plaats van met losse gebouw-modellen, die pas in de laatste stap aan elkaar gekoppeld worden in Wanda. Met dit besparingspotentieel zal beoordeeld worden of de meerwaarde voldoende is om tot realisatie van de systeemoptimalisatie over te gaan.

Om dit vraagstuk op te lossen wordt gebruik gemaakt van RTC tools ¹. Hiervoor wordt een gelineariseerd model gemaakt. Dit is noodzakelijk omdat er dan met behulp van optimalisaties routines een stabiele oplossing gevonden kan worden.

¹ RTC-Tools is een open-source toolbox ontwikkeld door Deltares voor de sturing en optimalisatie van controleerbare systemen waarbij rekening gehouden kan worden met conflicterende doelen

Tijdens eerste model opzetten bleek het lastig om het model met behoud van voldoende accuratesse volledig te lineariseren en zo tot een oplossing te komen. Hierdoor kon er binnen het IPIN project geen volledig model gemaakt worden en was het dus niet mogelijk om dit onderdeel binnen het IPIN gedeelte af te ronden en mee te nemen in deze rapportage. Een tweede reden voor de vertraging in de systeemoptimalisatie is de vertraagde release van RTC 2.0 door Deltares, waarmee de modellering veel toegankelijker wordt voor de eindgebruikers; dat voordeel weegt ruimschoots op tegen het gebruik van RTC Tools 1.0, dat slecht toegankelijk was voor eindgebruikers.

Ad. 4. Dit onderdeel is anders uitgevoerd. LEA geeft een onvoldoende genuanceerd Er wordt nu tijdens de validatie gekeken op welke plekken de aangeboden temperatuur te laag is en wat hiervan de oorzaak is. De reden is dat in de praktijk blijkt dat pas in de praktijk "hot spots" naar voren komen. Hotspots treden op in een deel van een gebouw. Een voorbeeld is een luchtbehandelingskast die 24/7 aan staat om proceswarmte te leveren. Het gebouw gaat buiten bedrijfstijd over op een lage buitentemperatuur (waarbij er vanuit wordt gegaan dat de LBK's uit staan). De in bedrijf zijnde LBK krijgt nu warmte van een te lage temperatuur aangeboden en levert lucht met een te lage temperatuur.

In een andere situatie betreft de hydraulische koppeling in een luchtbehandelingskast in IO waarbij de warmterugwinning is gekoppeld aan het koudeladen van een WKO systeem: de vorstbeveiliging vereist een minimumtemperatuur. Ook als het gebouw "buiten bedrijf" is.

C-3 Verschillen tussen de begroting en de werkelijk gemaakte kosten

De werkelijk gemaakte projectkosten zijn € 2.048.846,- Een specificatie van deze kosten en de oorspronkelijk gebudgetteerde bedragen per partij is in onderstaande tabel gegeven.

| Partner | Gerealiseerd | Begroting | Vershil |
|------------------------------------|---------------------|---------------------|------------------|
| TU Delft | 385.966,18 | 740.052,00 | -354.085,82 |
| Imtech | 154.912,00 | 122.501,00 | 32.411,00 |
| Priva | 151.719,00 | 167.419,00 | -15.700,00 |
| Deltares | 354.469,00 | 354.419,00 | 50,00 |
| Kuijpers Installaties Utrecht | 76.557,91 | 122.501,00 | -45.943,09 |
| Deerns Nederland | 503.580,41 | 457.597,00 | 45.983,41 |
| Projectkosten samenwerkingsverband | 421.642,09 | 0,00 | 421.642,09 |
| Totaal | 2.048.846,59 | 1.964.489,00 | 84.357,59 |

Uit de tabel blijkt dat de totale projectkosten 4% hoger zijn dan de begroting. Priva en Kuijpers hebben minder kosten en TU Delft en Deerns meer kosten gemaakt dan begroot. De extra kosten van Deerns zijn veroorzaakt in fase 1 bij de inventarisatie (2012/2013) en door meer intensieve werkzaamheden door de nieuwe penvoerder, als gevolg van de administratieve belasting die ontstond door het faillissement van Imtech en de doorstart. De extra kosten van TU Delft werden veroorzaakt door een intensievere managementinspanning dan voorzien. Algemeen legde de organisatiestructuur, gericht op partnerschap en met een projectteamoverleg, ontwerpteamoverleg en stuurgroep een groter beslag op het budget dan voorzien. Dit geldt voor alle partners. De extra kosten van Deerns en TU Delft zijn voor eigen rekening genomen: de toegekende budgetten waren taakstellend.

Daarnaast zijn er posten verschoven. Dit betreft met name de kosten van modificaties aan de technische installaties, nodig voor de realisatie van de DNWR. In de begroting waren deze kosten toegeschreven aan TU Delft. Bij de uitvoering is er om administratieve reden voor gekozen om de inkoop hiervan bij de penvoerder onder te brengen. De betreffende kosten zijn opgenomen in de regel "projectkosten samenwerkingsverband". Verder zijn de kosten van Imtech door hun faillissement en daardoor voortijdig afhaken, minder dan destijds begroot; de betreffende werkzaamheden zijn overgenomen door Deerns.

C-4 Wijze van kennisverspreiding

Het systeem is – met alle invoer en open source code- overgedragen aan TU Delft. Studenten en wetenschappers van de universiteit kunnen met behulp van het monitoringsysteem het gedrag van het systeem volgen en analyseren. Ook kan met de code van LEA en de sturing van de regel-units voor studiedoeleinden geëxperimenteerd worden.

Naast deze hands-on wetenschappelijke kennisverspreiding, is DNWR op congressen over het systeem gepresenteerd en is in vakliteratuur gepubliceerd.

19 Smart Energy System & 4th generation District Heating; Session keynote; “Transformation of conventional District heating system to mid-temperature District heating system using Model-Predictive Control”; Aalborg- Denemarken, 27.09.2016. Publicatie van abstract in Energy – The International Journal.

20 Presentatie op de conferentie “Duurzaam gebouwd”, in Almere, 16 november 2016.

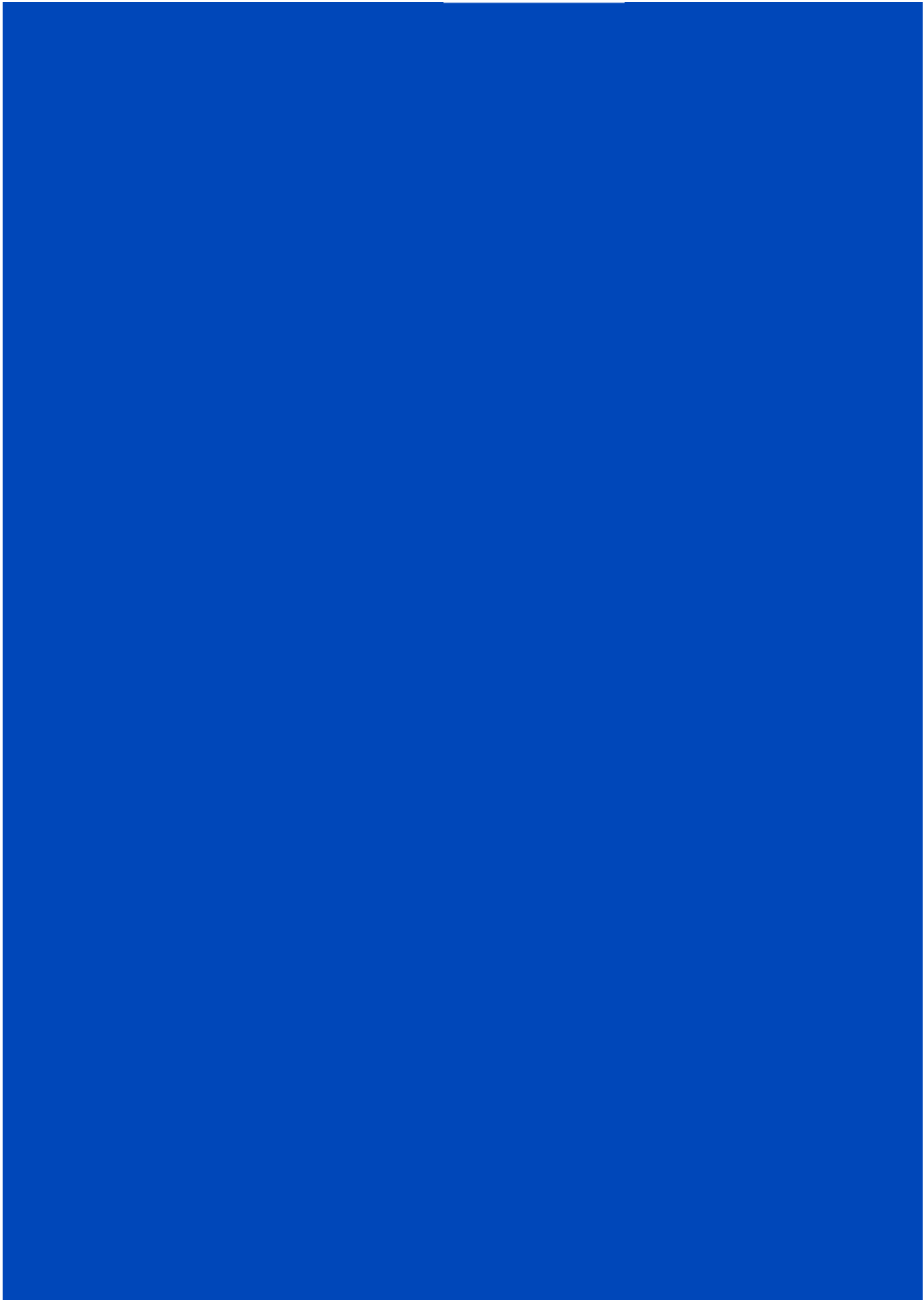
21 Stand op afsluitend IPIN symposium, in Apeldoorn, 24 september 2015.

22 Presentatie aan wetenschappelijke staf TU Delft op 3 september 2015.

23 Artikel in Technisch weekblad

PR project en verdere PR-mogelijkheden

Naast de PR door de publicaties en congressen, ziet vooral ieder van de partijen voor zich, mogelijkheden om zich met de ontwikkelde (deel)systemen te profileren en zich via eigen publicaties en relatienetwerk de mogelijkheden van DNWR onder de aandacht van hun klanten te brengen.



Bijlage 1 Heating prediction in buildings through statistical models

IPIN aims at minimizing the supply temperature in order to optimize the use of different heat sources on campus, and therefore the introduction of sustainable energy sources. In order to enable this, a model predictive control (MPC) system is required. This MPC system is formed by two simulation packages, LEA (Low Energy Architecture) which minimizes the supply temperature and Wanda which simulates hydraulic and thermal transients in pipeline systems. Based on the results of a LEA simulation for each building, Wanda is used to determine the source usage and the required supply temperature.

LEA is a physical-based model which gives good estimates of the thermal energy demand of the building. However, as every physics-based model, LEA requires certain input information, such as building characteristics parameters, internal heat gains (occupancy, lighting and equipment) and operating conditions, which are uncertain in real life. In order to estimate these uncertain parameters, a validation with measured consumption data was done for each of the buildings. This task demanded a considerable amount of time and required tedious expert work. With the purpose of simplifying this process and getting a better insight of the influence of the different parameters in the building response, this research work was proposed.

For this research the possibility of using simple and fast mathematical models obtained from a heating demand database was studied. In contrast to physical models, which are based on the analysis of physical processes such as heat transfer (law-driven models), these prediction models (data-driven) have a lower amount of inputs and are very suitable to do fast parametric analysis.

1.1 Prediction model technique selected

For the last decade, several statistical (mathematical) models have been used for thermal energy demand prediction. The methods most commonly used are regression models, Fourier series models and neural network models. During this study, both regression and Fourier series models were explored. Both models present one equation dependent on multiple independent variables. The multivariable regression model combines the different independent variables according to a linear or polynomial relation between the independent and dependent variable. In the Fourier series approach, the relation between the independent variable and the dependent variable is a combination of sine and cosine functions. This could be useful to model the daily and annual periodicity of the variables in order to obtain the profiles of thermal heating demand. The functional form of these two approaches are represented as follows:

Regression approach:

$$Q(h) = constant + \sum_{i=1}^n C_i \cdot X_i$$

Where $Q(h)$ is the hourly thermal energy demand, C_i are the corresponding coefficients of the dependent variable, X is the dependent parameter and i the index of dependent variables selected for the model.

Fourier series approach:

$$Q(h) = constant + \sum_{i=1}^n X_i \left[\sum_{x=1}^{182} \left[\alpha_x \cdot \sin\left(\frac{2\pi d}{P_x}\right) + \beta_x \cdot \cos\left(\frac{2\pi d}{P_x}\right) \right] + \sum_{y=1}^{11} \left[\gamma_y \cdot \sin\left(\frac{2\pi h}{P_y}\right) + \delta_y \cdot \cos\left(\frac{2\pi h}{P_y}\right) \right] \right]$$

Where the first Fourier series with subscript x represent the annual periodicity and the second Fourier series with subscript y the diurnal periodicity. d is the number of the day with respect the year (from 1 to 365) and h is the hour with respect the day (from 1 to 24). P_x is the annual periodicity and P_y the diurnal periodicity for a specific frequency.

The Fourier series approach is more complex than the regression approach since it contains several terms for every parameter, increasing the total number of parameters to be analysed. The advantage of this approach is that it can achieve a single equation able to predict the thermal energy demand all year round since it takes into account the annual periodicity of the different variables. However, this advantage was not useful for this project since the heating demand data set available was limited to the seasons when only heating demand was required, neglecting the periods when both heating and cooling are required. Therefore, it was decided to build the mathematical model following the regression approach.

1.2 Boundaries

Since the scope of IPIN is limited to the heating demand, the mathematical model presented in this study predicts the heating demand (no cooling demand). A different mathematical model will be needed to calculate the cooling demand since the most influential parameters for the cooling demand differs from the ones for the heating demand.

Each operating mode of a building requires a different equation. The TU Delft buildings present 3 different operating mode: (1) weekdays during opening hours, (2) weekends during opening hours, (3) closing hours. During the different operating modes, the temperature set point varies, affecting the correlation between the variables (equation coefficients) and therefore, the model accuracy (eg. when the set point temperature is 15 °C and the outdoor temperature is 15 °C, the building may not require heating, however if the temperature set point is 25 °C the building is releasing heat to the outdoor environment, therefore, heat may be required). In order to increase the accuracy of the model, three different equations to predict the heating demand are built for each of the buildings studied. After studying the different operating systems of the three buildings analyzed, it was concluded that the simulated heating demand and the actual energy consumption are only comparable in buildings operated with an indoor temperature controller (TPM). For buildings operated without indoor temperature controller (IO and 3mE), the simulated heating demand and the actual heating demand are not comparable since the variables influencing the indoor temperature do not influence the heating demand. This fact was not taken into account for the estimation of the inputs parameters required in LEA during the validation process. Therefore, some of the most influencing parameters such as the internal heat gains were not properly estimated. As a result, it was decided to build the model using LEA as the emulator (instead of the actual heating demand).

1.3 Selection of parameters and model development

There are numerous factors that influence the energy performance of a building, such as the building's thermal characteristics, architecture, the operation of systems, building use and outdoor weather conditions. The major challenge of this study was to find the most influencing variables and the combination between them. In the first place, the influence of several outdoor weather parameters, indoor temperature and internal heat gain was studied. Several models with different linear and polynomial combinations were built, but the accuracy reached was not higher than 60%. Therefore, it was decided to create a combination of parameters based on a simplified thermal energy balance of a building.

Model based on building's thermal energy balance principle

The building's heating demand depends on the amount of heat transferred through the building and accumulated in the building. Therefore, these heat flux can be divided in 5 main categories: internal heat gains ($Q_{internal}$), solar heat gains (Q_{solar}), envelop losses/gains ($Q_{ground} + Q_{envelop}$), ventilation ($Q_{ventilation}$) and infiltrations ($Q_{infiltrations}$). The indoor thermal mass accumulates the heat absorbed by the solar radiation, internal heat gains and indoor temperature. This heat flux ($Q_{thermal\ mass}$) can be assumed to be transferred only with the indoor climate through the total surface of the indoor thermal mass. The thermal energy balance described can be written as follows:

$$Q_{demand} = Q_{ground} + Q_{envelop} + Q_{infiltrations} + Q_{ventilation} + Q_{thermal\ mass} + Q_{solar} + Q_{internal}$$

This equation can be written in function of the temperature differences corresponding to each heat flux as follows.

$$Q_{demand} \left[\frac{W}{m^3} \right] = const + C_1 (T_{ground} - T_{indoor}) + C_2 (T_{outdoor} - T_{indoor}) + C_3 V_{wind} + C_4 (T_{out\ AHU} - T_{indoor}) + C_5 (T_{indoor\ surfaces} - T_{indoor}) + C_6 Q_{solar} + C_7 Q_{internal}$$

Where C_i are the coefficients corresponding for each parameter, T_{ground} the surface ground temperature, T_{indoor} indoor temperature, $T_{outdoor}$ outdoor temperature, $T_{out\ AHU}$ the temperature of the air coming from the Air Handling Unit (AHU) and $T_{indoor\ surfaces}$ the temperature of the indoor surfaces which influences the most in to the indoor thermal mass of the building. The coefficients of each of the defined parameters were obtained by using the matlab function 'stepwise' (available in statistical toolbox). The equation obtained showed very promising results for each of the buildings evaluated at the different operating modes: 98.07% on the IO simulation, a 99.4% on 3mE simulation and a 96.11% on TPM.

The high accuracy of this model make this equation able to be implemented. However, the temperature of the indoor surfaces is a parameter which is not available in existing buildings. When the variable ($T_{indoor\ surfaces} - T_{indoor}$) is neglected from the equation, the fitting drops to 65% of accuracy due to the influence of the thermal mass on the heating demand.

Model improvement toward application in practice

With the purpose of facilitating the implementation of the model in practice, it was decided to take one step forward and develop a model where the indoor surfaces temperature could be replaced. The next model developed includes the same variables, however the input parameters correspond to the independent temperatures (instead of the temperature differences). This is written as follows:

$$Q_{demand} \left[\frac{W}{m^3} \right] = const + C_1 (T_{outdoor}) + C_2 (T_{indoor}) + C_3 (V_{wind}) + C_4 (T_{ground}) + C_5 (T_{out\ AHU}) + C_6 (T_{indoor\ surfaces}) + C_7 (Q_{solar}) + C_8 (Q_{internal})$$

The accuracy of this equation is very similar to the previous one for each of the buildings. When the indoor surface temperature was neglected, the accuracy of the model for IO and 3Me was decreasing in a similar range than in the previous model (around a 65% for TPM and 3Me), only for IO the accuracy was still close to 80%.

In order to replace the indoor surface temperature by other equations, the relation between the daily pattern of the variables influencing the thermal mass accumulation (internal & solar heat gains and indoor temperature) and the indoor surface temperature was analyzed. Figure 1 shows the daily pattern of the variables mentioned for IO during a representative week.

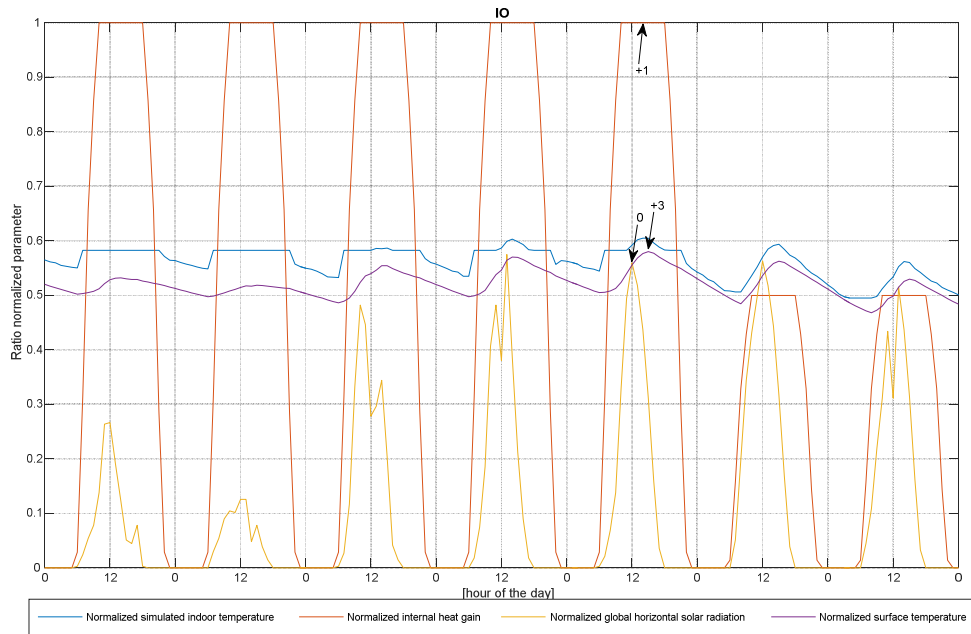


Figure 1 Normalized profiles of the indoor temperature, internal heat gain, global horizontal solar radiation and surface temperature (modelled in LEA) for IO during a representative week (5th - 11th October '15)

It was observed that the surface indoor temperature is in phase with the indoor temperature, 1 hour delayed with respect to the middle point of the internal heat gain and 3 hours delayed with respect the maximum solar radiation (midday). The solar radiation diphas with respect the surface temperature varies a slightly for each of the buildings studied, this could be due to the different building orientation and windows percentage and a different indoor temperature pattern.

According to these observations, the indoor surface temperature was replaced by the internal heat gain 1 hour in advance ($Q_{internal,1a}$), the solar heat gain 3 hours in advanced ($Q_{solar,3a}$) and the indoor temperature. In order to analyse the accuracy of this replacement, a linear regression analysis was built for the indoor temperature surface. The best fitting was found for IO during opening hours (52.44%). Figure 2 shows the comparison between the surface temperature regression model versus the surface temperature physical model for IO in the weekends and during opening hours corresponding to the following equation:

$$T_{indoor\ surface} = -26.3 + 0.04 (Q_{internal,1a}) + 2.25 (T_{indoor}) + 0.004(Q_{solar,3a})$$

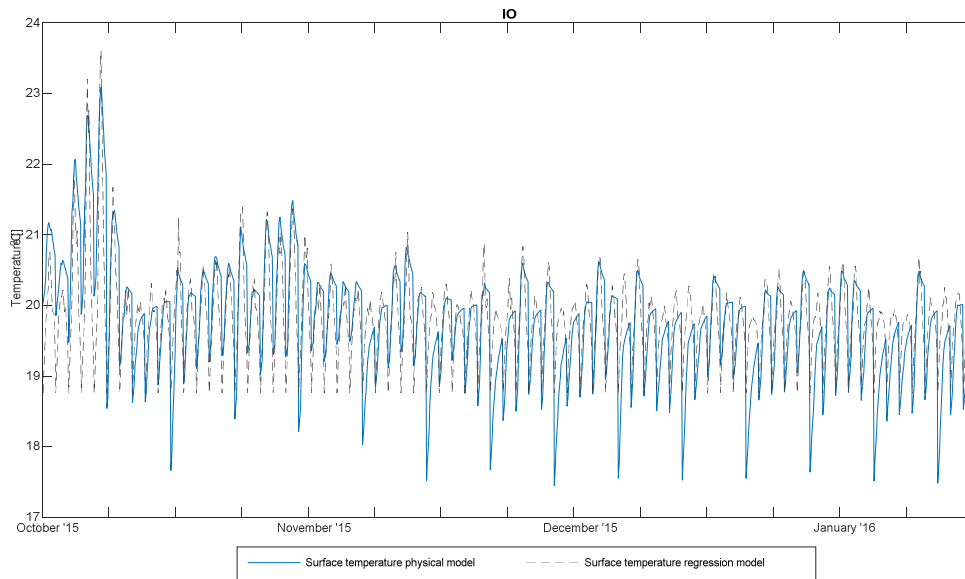


Figure 2 comparison surface temperature regression model versus the surface temperature physical model.

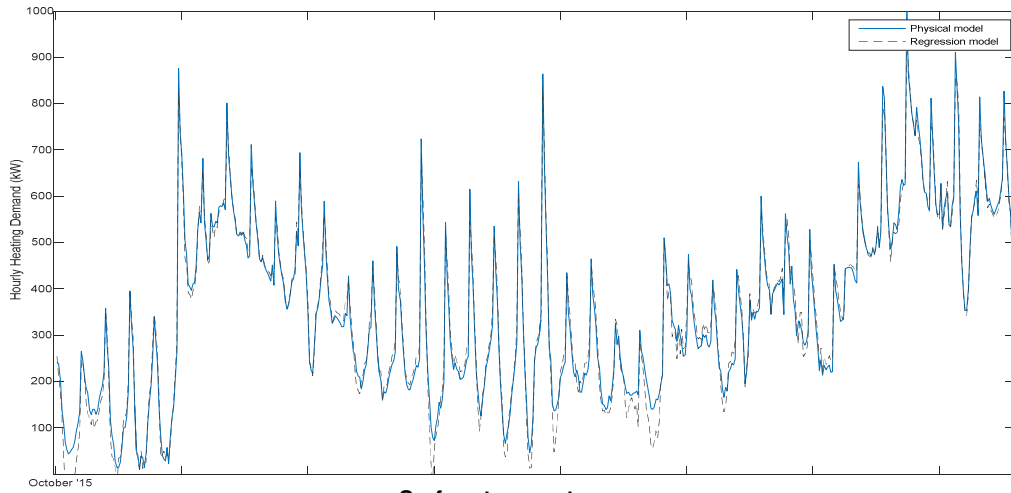
When the surface temperature was replaced by the three above mentioned variables, the accuracy of the model is increased by 8 % in the case of IO. The model with the surface temperature replaced is expressed as follows:

$$Q_{demand} \left[\frac{W}{m^3} \right] = 56.58 - 0.89 (T_{outdoor}) - 1.82 (T_{indoor}) + 0.21 (V_{wind}) - 5.96 (Q_{internal,1a}) - 0.007 (Q_{solar,3a})$$

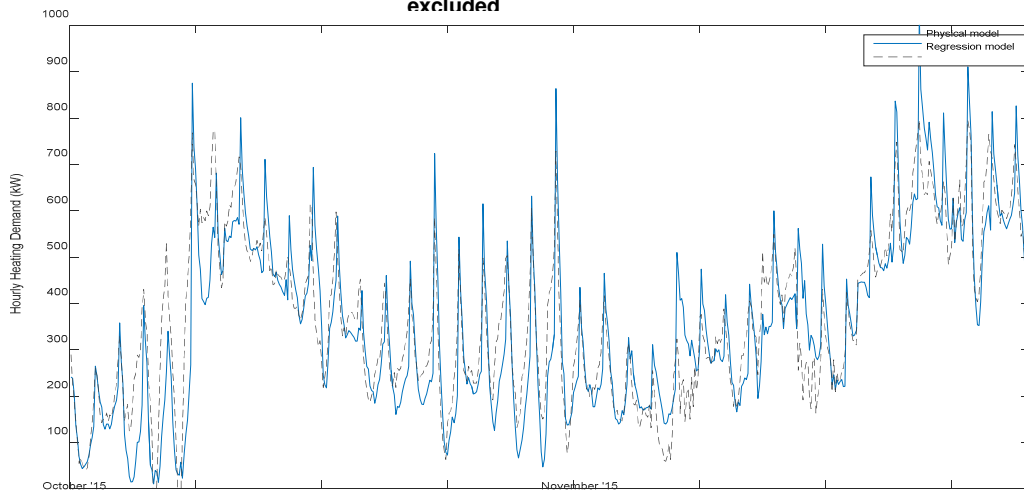
For this new model, the coefficients of T_{ground} and $T_{out AHU}$ results 0, simplifying the model by taking into account only 5 parameters.

Figure 3 shows the fitting profile for the three above mentioned models: including, excluding and replacing the indoor temperature surface for the data set from 5th of October 2015 until 14th of January 2016.

Surface temperature included



Surface temperature excluded



Surface temperature replaced

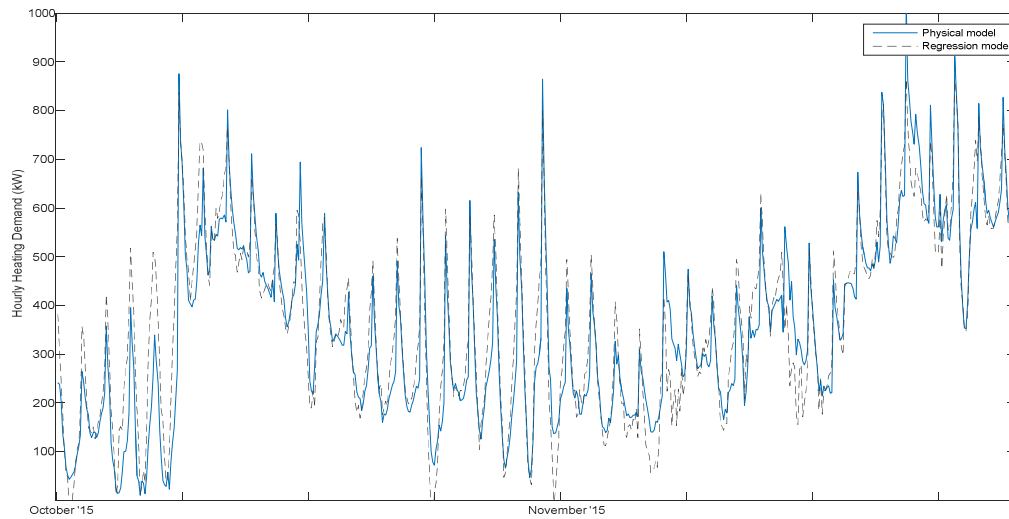


Figure 3 Comparison of the three regression models' fit to the physical model

1.4 Model prediction test

The above described prediction models are built with the data set from 5th of October 2015 until 14th of January 2016 (a total of 1095 opening hours). In order to test the minimum amount of hours needed to obtain a similar prediction, a new regression was done. It was shown that for this data set and model, it is needed a minimum of 825 opening hours (corresponding to 2.5 months) in order to predict the next 270 opening hours (approx. 1 month). This means that previous seasons are able to predict with high accuracy level the next period of time.

Table 1 presents the coefficients of the parameters corresponding to the regression model based on a population of 825 and 1095 data, respectively.

Table 1 Multivariate regression models for the specific heating demand (W/m^3) prediction of IO

| | 825 data | 1095 data |
|------------------------------|---------------|-------------|
| constant | 51.70 | 56.58 |
| T_o | -0.92 | -0.89 |
| T_i | -1.55 | -1.82 |
| V_{wind} | 0.18 | 0.21 |
| Q_{int,1a} | -6.17 | -5.96 |
| Q_{global,3a} | -0.00781 | -0.00724 |
| R² | 0.8802 | 0.87 |

Figure 4 shows the fitting profile of the model based on the data set from October-December 2015 over the whole data set (from October-December 2015). It is observed that the historical data used are fitting with a high accuracy the next month.

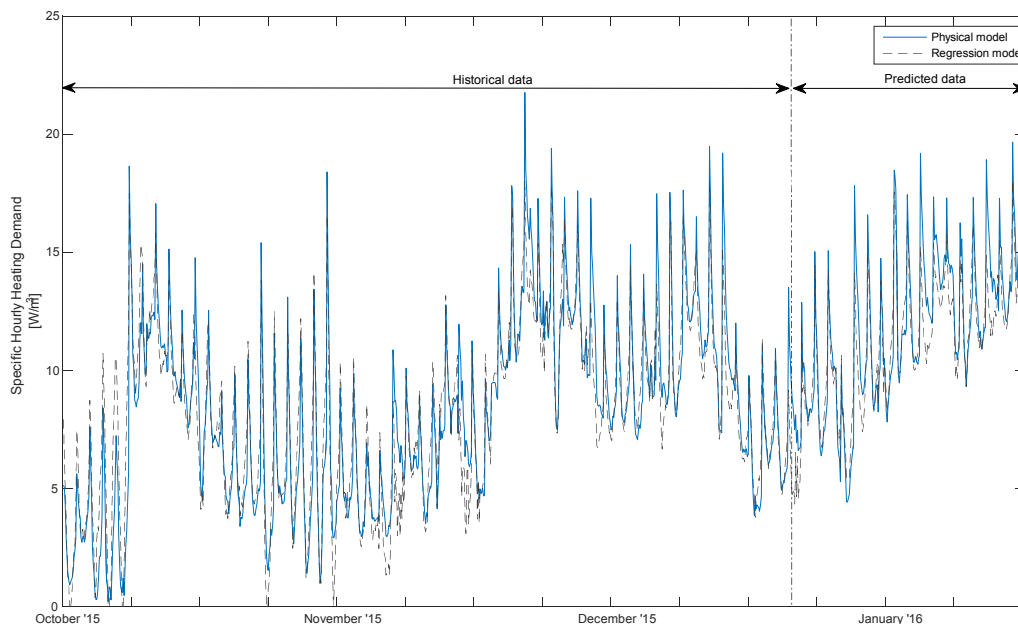
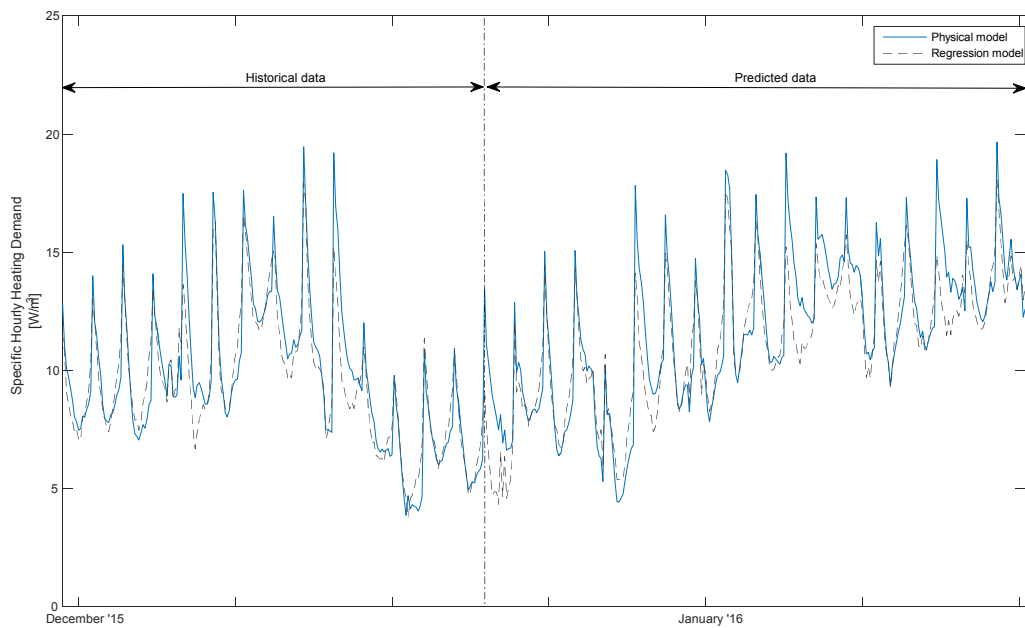


Figure 4 Fitting profile of regression model based on data set from October-December 2015 (historical data)



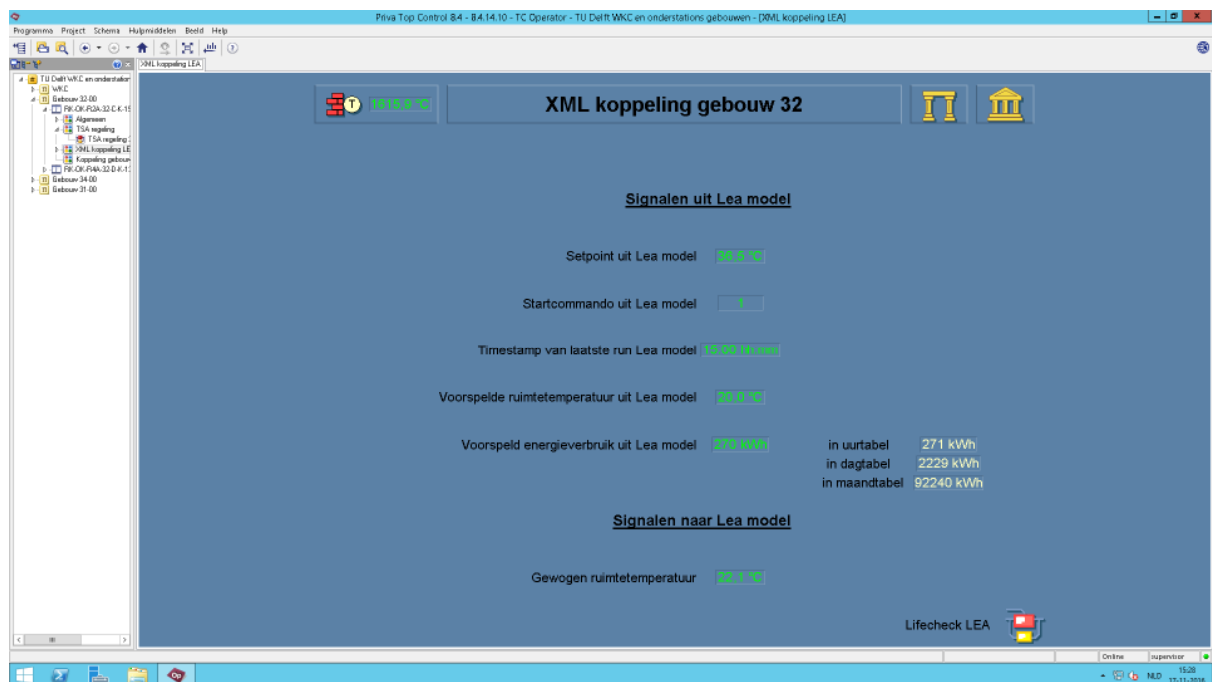
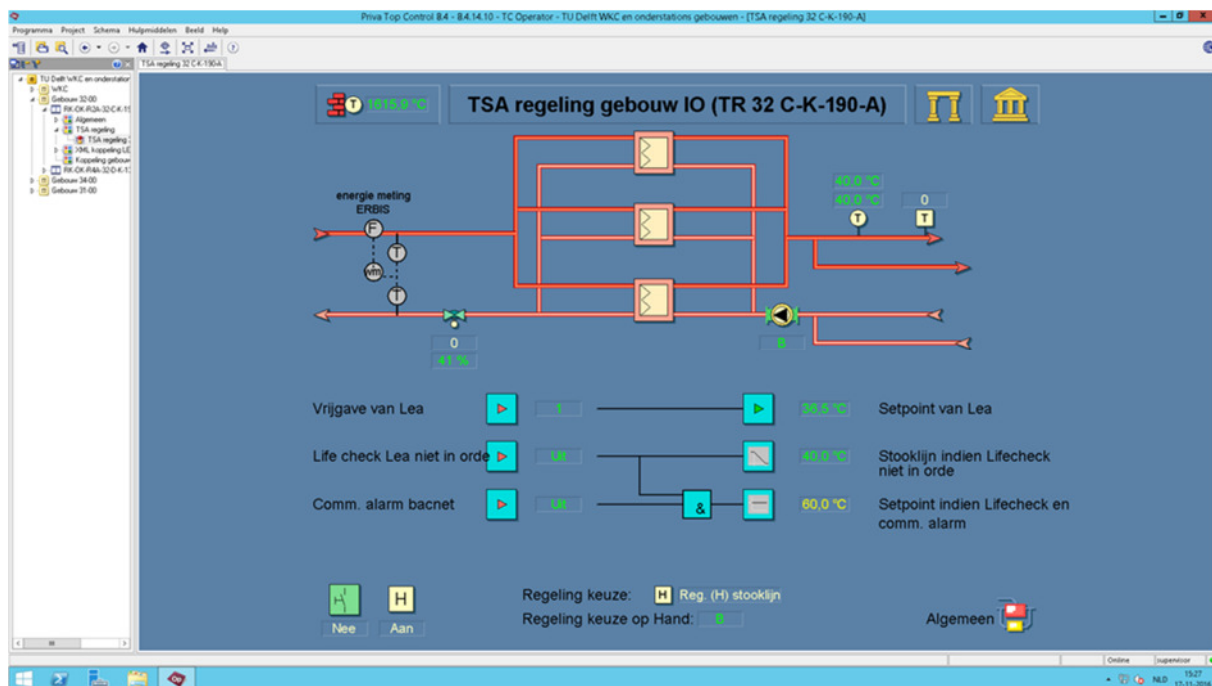
1.5 Conclusions

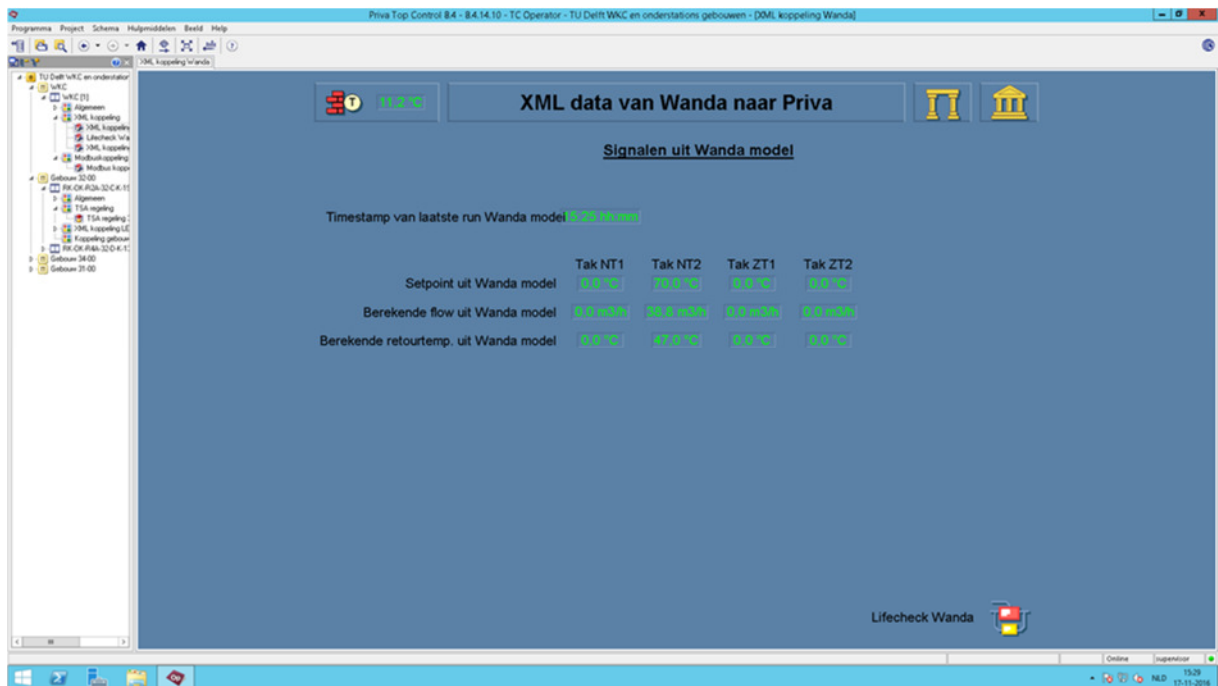
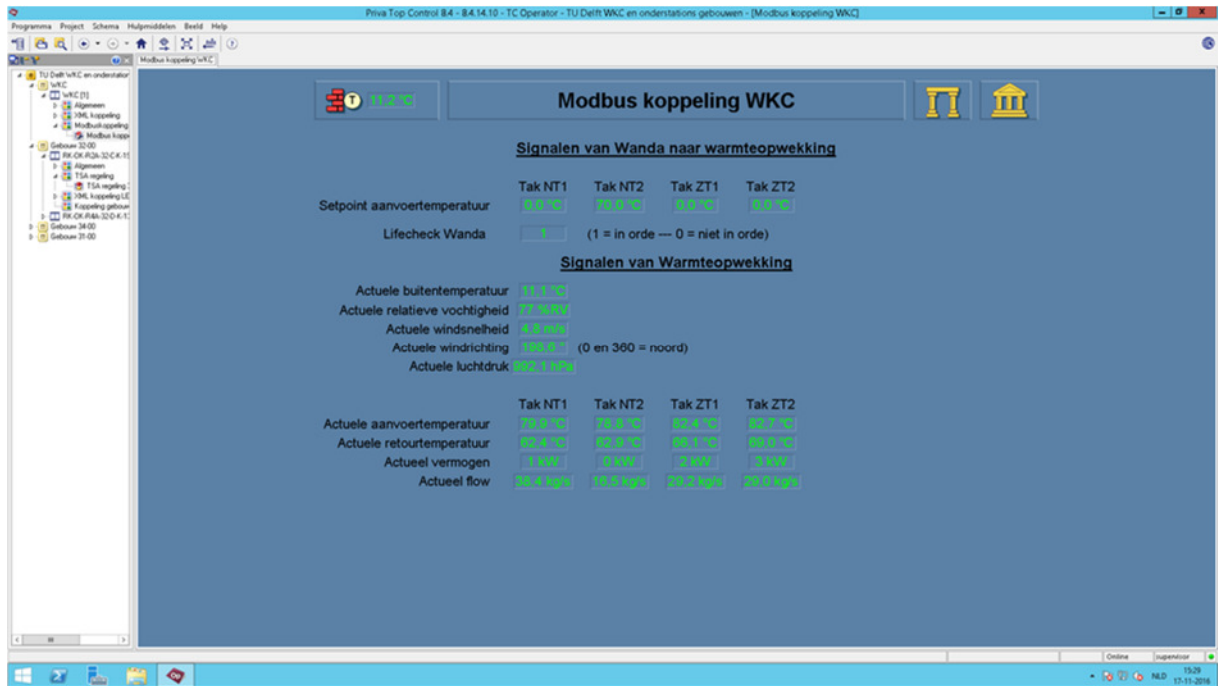
This study leads to the following main conclusions:

- The comparison of simulated heating demand (by a physical model) and the actual energy consumption are only comparable in buildings operated with an indoor temperature controller, not for buildings operated without indoor temperature controller.
- The major challenge of a regression analysis study is finding the most influencing variables and the combination between them. It is advisable to follow a physical reasoning in order to decrease the amount of time invested in the process and increase the accuracy degree.
- The optimal size of the data set used to build a linear regression around 3 months (seasonal period). A smaller size could decrease the accuracy if the period selected is not representative while a higher size will decrease its accuracy due to the annual periodicity presented in the outdoor weather parameters.

A detailed report of this study is in progress.

Bijlage 2 Schermafdrucken warmtenetregeling



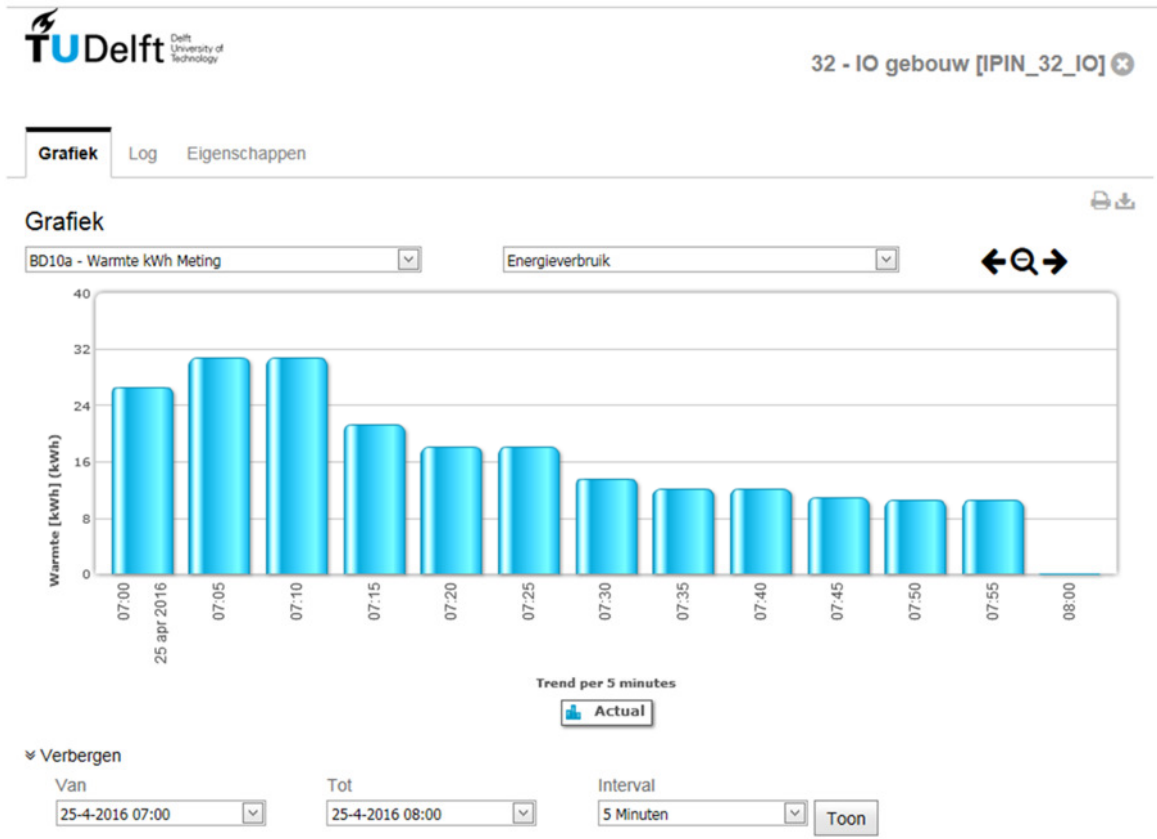


Bijlage 3 Monitoring voorbeelden

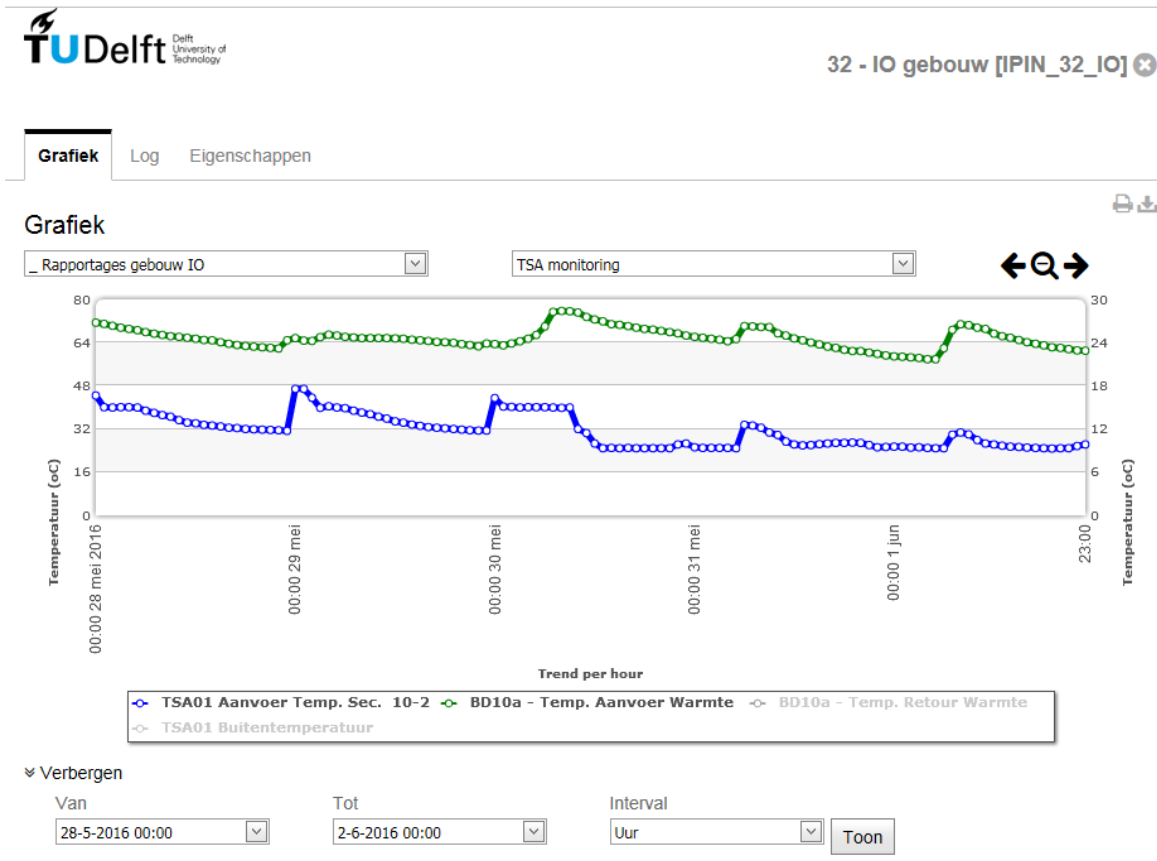
1. Dashboard: <https://ipin-tudelft.erbis.nl/>

The screenshot shows a web browser window displaying the IPIN dashboard for TU Delft. The browser address bar shows the URL <https://ipin-tudelft.erbis.nl/>. The dashboard features a blue header with the TU Delft logo and a home icon. The main content area displays a floor plan of the TU Delft campus with a compass rose. A pop-up window titled 'Industrieel Ontwerp' shows a photograph of a building and a text box that reads: 'Het gebouw van de faculteit Industrieel Ontwerpen uit 1973 ligt naast het gebouw van de faculteit 3mE en maakt deel uit van hetzelfde complex. Een grote renovatie is uitgevoerd in 2006.' Below the floor plan, there are three monitoring categories: 'Comfort specifiek gebouw' (with a sub-option 'TBM Gebouw'), 'WKC installatie' (with a sub-option 'Warmtekracht installatie overzicht'), and 'Zon PV' (with a sub-option 'Opbrengst zonnepanelen').

2. Erbis Webvision <https://erbis.tudelft.nl/>
 - Per meting gegevens, inzoomen door op staven te klikken



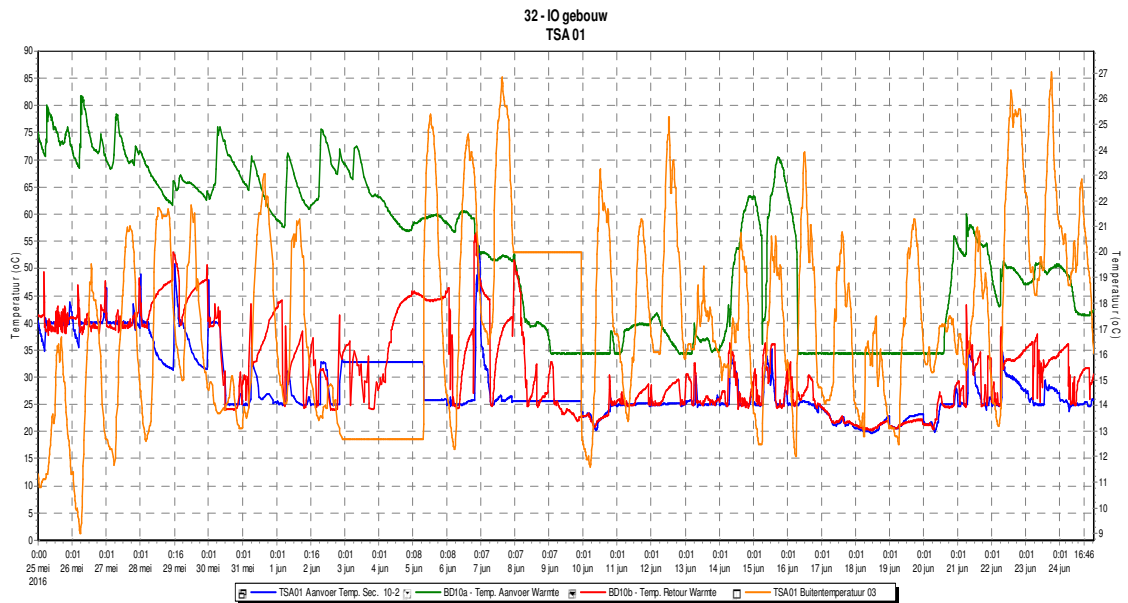
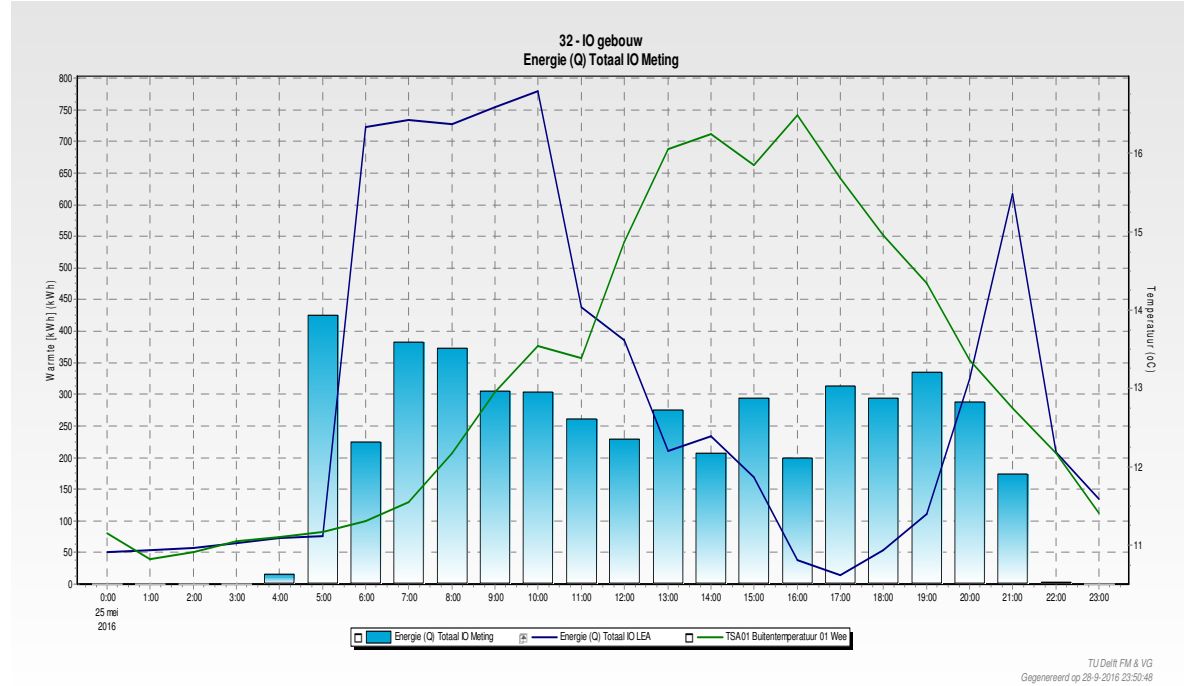
- Voorgedefinieerde grafieken met gecombineerde data:



3. Erbis Rapportages

- Alle gelogde data
- Interval & periode zelf te kiezen
- Rapportages meetpunten & combinaties van meetpunten
 - o Voorgedefinieerde rapportages
 - o Of zelf eenvoudig aan te maken

Voorbeeld:



Verloop per opname

