

# Prestatie-indicatoren voor real-time monitoring van een WKO systeem

W.G. Planje<sup>1</sup>, F. Hoppenbrouwer<sup>2</sup>, J. Jongen<sup>3</sup>

**Abstract** – Drie verschillende prestatie-indicatoren voor WKO systemen op gebied van de COP van het warmtepompsysteem, het aandeel aan ondergrondse energie en de bodembalans zijn beschreven en bekeken op toepasbaarheid. Onder ander is de tijdsbasis onderzocht waarop deze indicatoren relevante informatie gaan geven voor beheerders die zullen gaan werken met een FEWS-based energiemodel. Uit de gesimuleerde toepassing van deze indicatoren voor een basis energieset komt naar voren dat een uurlijkse berekening en weergave teveel variaties geeft om uitspraken te doen omtrent werkzaamheid. Vanwege de complexe regeltechniek, aanwezigheid van buffers, afwezigheid van bepaalde sensoren en missende data in exportfiles is het voldoende om via 24 uren gemiddelden bepaalde prestaties vast te stellen.

## Verantwoording

Dit werk is uitgevoerd in het kader van het TKI-Urban Energy programma met projectnummer TEUE117014 in het thema Warmte/Koude-Opslag waarin het gebruik van het software platform FEWS (Deltares) wordt ingezet om model-gebaseerde optimalisaties voor WKO systemen uit te voeren.

## 1. Inleiding

Momenteel zijn meer dan 2000 WKO systemen operationeel in Nederland welk voorzien in zowel warmte als koude voor de utiliteit en woningbouw. Het is een duurzame alternatief voor de gasgestookte en compressie-gekoelde gebouwen omdat de ondergrond voor een groot aandeel bijdraagt in de thermische vraag. Gedurende het koelseizoen variëren seizoensprestaties ( $SPF_{\text{koeling}}$  of  $EER_{\text{koeling}}$ ) tussen de 10-20 omdat 'slechts' het gebruik van vloeistofpompen nodig is om de ondergrondse koude te verplaatsen naar het gebouw (zie ook figuur 2). Dit is energetisch gunstiger dan het inzetten van elektrische compressie koeling. We spreken ook wel over 'vrije' koeling. In de winterperiode varieert de  $COP_{\text{verwarmen}}$  tussen de 3.5 en 6.0 [2] in geval van een geoptimaliseerd systeem. Echter, het ontbreekt vaak aan kennis bij opdrachtgevers omtrent de technische oplever- en beheerprotocollen [1]. Naast de invloed op het milieu en de financiën komt ook de vergunning in het geding bij wanprestatie door een oplopende energetische onbalans in de ondergrond.

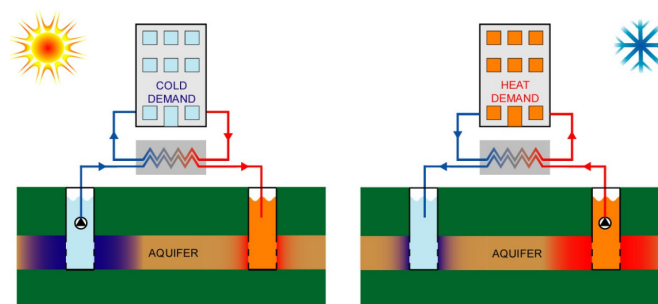


Figure 1: WKO systemen ondersteunen in de thermische vraag. Voor de winterperiode is een warmtepomp daarbij noodzakelijk.

In het MoBaMo-BES consortium (Deltares, DWA, KWA, Techniplan, HU) is het doel een open-source tool te ontwikkelen (software platform Delta-FEWS) waarbij zowel monitoring als ook bijstelling van parameters en regelingen voorzien kunnen worden voor een beter beheer. In dit rapport wordt een

1 Wilko Planje is onderzoeker aan de HU University of Applied Sciences Utrecht, Utrecht, 3584CH, Netherlands (phone: 0031-634952545); e-mail: [wilko.planje@hu.nl](mailto:wilko.planje@hu.nl))

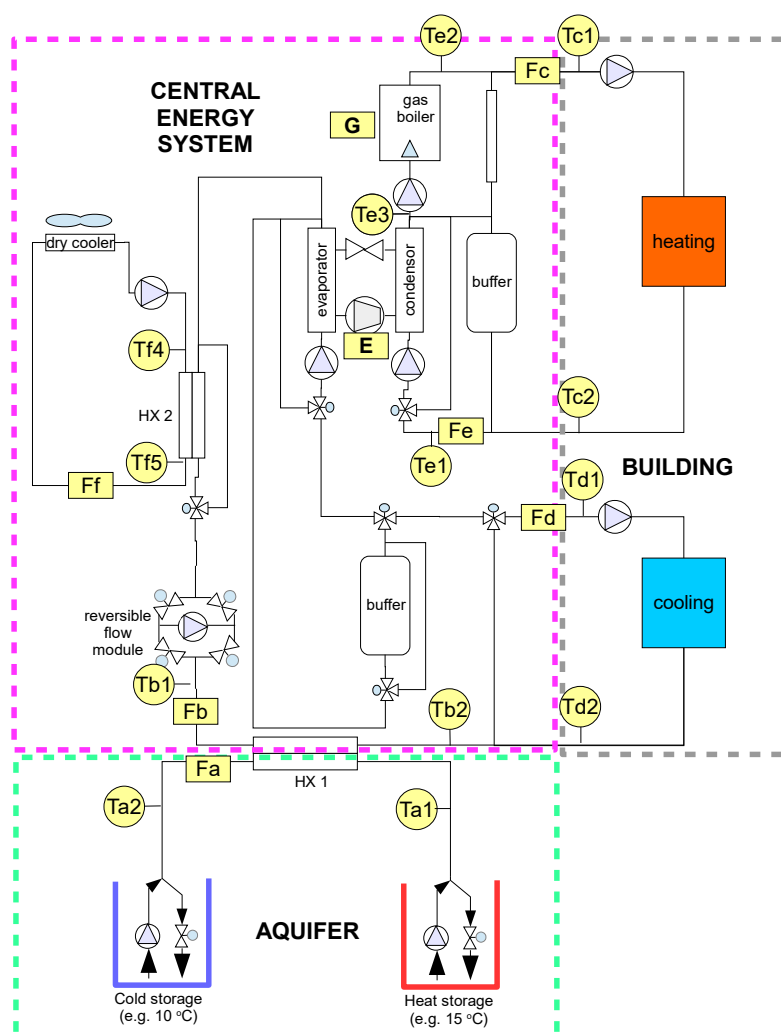
2 Floris Hoppenbrouwer is afstudeerder (bachelor phase) aan de HU University of Applied Sciences Utrecht, Utrecht, 3584CH, Netherlands in samenwerking met DWA ,Bodegraven

3 Joost Jongen is docent-onderzoeker aan de HU University of Applied Sciences Utrecht, Utrecht, 3584CH, Netherlands e-mail: [joost.jongen@hu.nl](mailto:joost.jongen@hu.nl))

minimale set van prestatie-indicatoren beschreven en bekeken welke toepasbaarheid deze kan gaan kennen in een Delta-FEWS omgeving. Deze controle vindt in eerste instantie plaats in een Excel omgeving waarbij indicatoren toegepast worden voor een werkelijke casus om de gewenste tijdsresolutie voor berekeningen vast te stellen.

## 2. Achtergrond

Een overzicht van een centraal energie systeem is gegeven in figuur 2 waarin we onderscheid maken in een ondergrondse sectie met twee thermische bronnen. De gebouwsectie is aangegeven in de rechterbox. Het centrale energiesysteem (linksboven) bevat o.a. de elektrisch aangedreven warmtepomp inclusief een gasgestookte verwarmingseenheid voor piekbelasting en backup. Wanneer koeling nodig is zullen alleen de distributie-pompen ingeschakeld worden om koude te onttrekken uit de ondergrond via de warmtewisselaar (HX1). De temperatuur is voldoende laag om niet actieve compressie koeling te hoeven toepassen.



*Figuur 2 Vereenvoudigde weergave van een energiecentrale dat de ondergrond en het gebouw met elkaar verbindt met karakteristieke werktuigen als warmtepomp, bijstook, drycooler en bijstook. Voor het doorgronden van het systeem zijn de aangegeven sensor posities van belang [3]*

De droge koeler wordt ingezet om de ondergrond energetisch jaarlijks te balanceren. Vanuit de wetgever wordt vereist dat onttrokken energie uit de ondergrond weer aangevuld wordt en vice versa. De provincie heeft daarbij de controlerende rol. Naast deze systemen zien we ook kleine buffers in de energiecentrale. Deze voorkomen pendelen van de warmtepomp en het overmatig switchen tussen de koel- en verwarmingsmodus. Bovendien voorzien ze in piekvermogens. In figuur 3 en 4 zijn de overzichten van de meest belangrijke actieve componenten weergegeven, inclusief de energie-stromen daarbij.

Voor de verwarmingsmodus zonder dry-cooler activiteit kunnen we voor een bepaalde periode  $[t_1; t_2]$  voor

de warmtevraag van het gebouw het volgende opstellen:

$$Q_{\text{warmtevraag}} = \int_{t_1}^{t_2} \dot{m} c (T_{\text{aanvoer}} - T_{\text{retour}}) = COP_{\text{verwarmen}} \cdot E_{\text{elektr}} + \eta \cdot G_{\text{gas}} \cdot E_{\text{HHV}} = Q_{\text{aquifer}} + E_{\text{elektr}} + \eta \cdot G_{\text{gas}} \cdot E_{\text{HHV}} \quad (1)$$

waarin  $Q$  de thermische vraag,  $E$  de opgenomen elektrische energie naar de warmtepomp met een  $COP_{\text{verwarmen}}$ , en  $G$  de aangevoerde hoeveelheid gas,  $\eta$  de efficiëntie van de gasunit en  $E_{\text{HHV}}$  de energetische inhoud van gas op bovenwaarde ( $E_{\text{HHV}} \sim 9,8 \text{ kWh/m}^3$ ).  $T$  is de temperatuur van en naar het gebouw met bijbehorend debiet  $\dot{m}$  met een soortelijke warmte capaciteit van het water  $c$ . Daarbij kan de onttrokken warmte uit de aquifer  $Q_{\text{aquifer}}$  gezien worden als duurzaam.

The  $COP_{\text{verwarmen}}$  wordt voor een bepaald tijdsinterval  $\Delta t_{\text{sample}}$  gedefinieerd als

$$COP_{\text{verwarmen}} = \frac{Q_{\text{verwarmen}}}{E_{\text{elektr}}} \quad (2)$$

waarin voornamelijk de compressor de elektriciteitsvraag heeft.

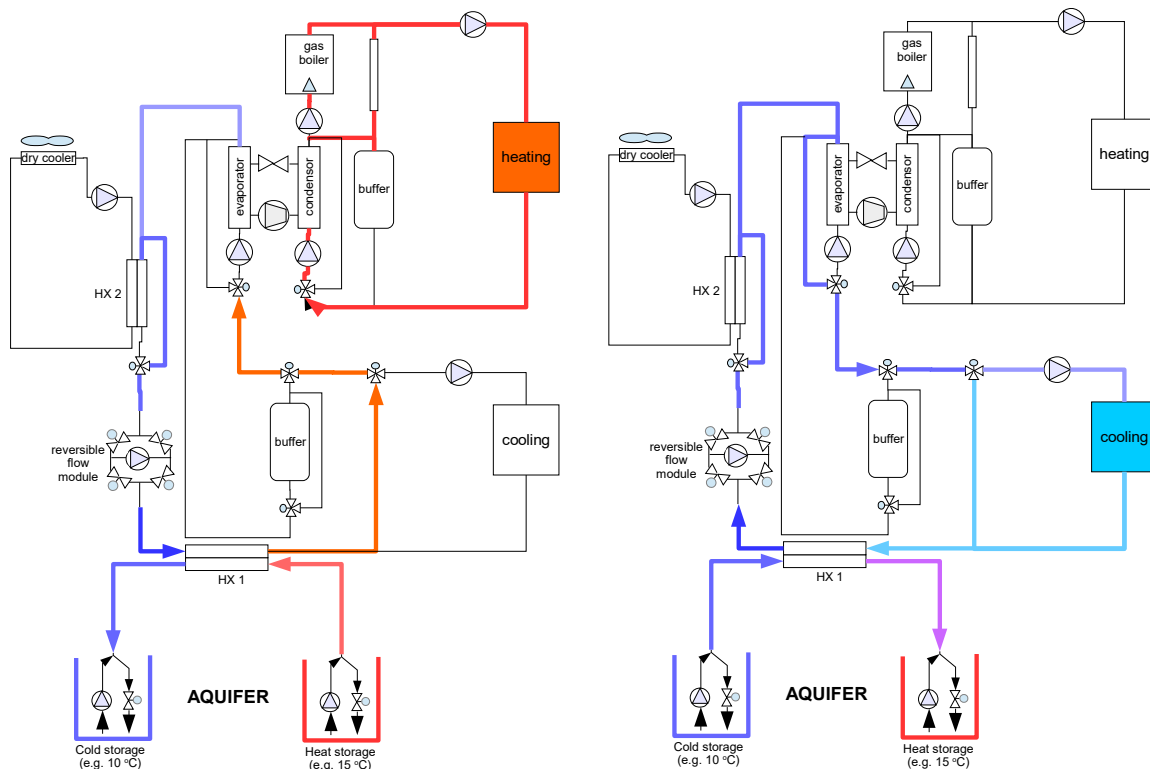
Voor de koelmodus kunnen we het volgende opstellen voor het gebouw,

$$Q_{\text{koelen}} = \int_{t_1}^{t_2} \dot{m} c (T_{\text{aanvoer}} - T_{\text{retour}}) = Q_{\text{aquifer}} - E_{\text{elektr}} = Q_{\text{aquifer}} / \left(1 + \frac{1}{COP_{\text{koelen}}}\right) \quad (3)$$

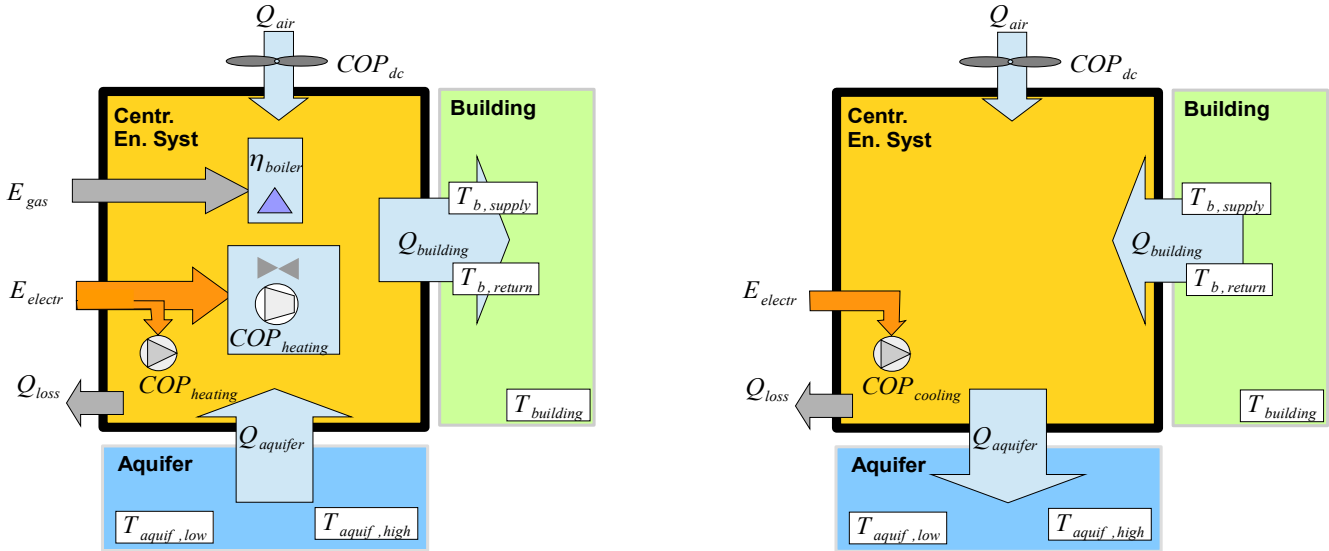
waarbij de ontwikkelde elektrische energie ook weggekoeld moet worden. Daarbij wordt de  $COP_{\text{koelen}}$  gedefinieerd als

$$COP_{\text{koelen}} = \frac{Q_{\text{koelen}}}{E_{\text{elektr}}} \quad (4)$$

dat vooral, in geval van WKO systemen, bepaald wordt door het rendement van de distributiepompen.



Figuur 3 De verwarmings- en de koelmodus voor een gebouw voorzien via een WKO systeem



Figuur 4: Actieve componenten en energie-stromen voor een WKO – energiecentrale.

### 3. Prestatie-indicatoren

De belangrijkste prestatie-indicatoren voor een WKO (Warmte Koude Opslag) of BES (Bodem Energie Systeem) zijn de COP waarden voor verwarming, koeling, het aandeel van duurzame energie vanuit de ondergrond en de jaarlijkse balans op de ondergrond. Daarnaast zijn er nog enkele waarden vrij eenvoudig te monitoren die snel inzicht geven in vermogensketen en warmteoverdrachten. Onder andere de berekenende verwarmings- en koelvermogens van de verschillende opwekkers als functie van de buitentemperatuur, de stooklijnen en de  $\Delta T$  over de bodemwarmtewisselaar geven hierin informatie.

#### 3.1 COP waarden

In het geval van COP waarden moeten we onderscheid maken welke tijdsbasis we daarvoor toepassen. Een COP op seizoensbasis is anders dan de COP voor een bepaald moment. De seizoens-COP is van belang voor de algemene prestatie. Variërende klimaatcondities, thermische vermogensvraag, schakelmomenten, buffers en inwendig of gebouwgerelateerde thermische massa's in het systeem hebben grote invloed op de instantane COP en betekenen een grote bandbreedte.

Daarnaast is de kadering aan opwekkers van invloed op de COP. De COP hierboven is gedefinieerd op basis van de totale geleverde warmte of koude gedeeld door de toegevoerde elektrische energie en eventueel extra bijstook via elektriciteit of gas. Maar we kunnen ons ook richten op de COP van een warmtepomp zelf via diens condensor-vermogen en opgenomen elektriciteit, te weten;

$$COP_{\text{warmtepomp, verwarmen}} = \frac{Q_{\text{condensor}}}{E_{\text{elektr, warmtepomp}}} \quad (5)$$

Het kan nuttig zijn de kwaliteit te kennen van een dergelijk belangrijk subsysteem in hoeverre deze goed presteert. Lage COP waarden voor de warmtepomp zelf ( $< 4.0$ ) kunnen duiden op hoge aanvoertemperaturen, te kleine buffers (frequente wisselingen), te lage bodemtemperaturen, te lage hydraulische debieten aan opwek- en/of afgiftezijde.

Door de aanwezigheid van parallelle buffers (zie figuur 2), waarvoor vaak specifiek gegevens op een voldoende kleine tijdbasis ontbreken, ontstaan er echter problemen om de warmtepompprestaties goed te beoordelen via uurlijkse berekende COPs. Het is dan noodzakelijk voor een langere periode  $\Delta t_{\text{period}} = N \cdot \Delta t_{\text{sample}}$ , met meerder samples, de gemiddelde COP te bepalen:

$$\langle COP_{\text{verwarmen}} \rangle_{\Delta t_{\text{period}}} = \sum_{i=1}^N Q_{i, \text{verwarmen}} / \sum_{i=1}^N E_{i, \text{electr}} \quad (6)$$

Het kan zelfs nuttig zijn om de seizoensprestatie van het warmtepompsysteem te bepalen voor het onderling vergelijken met andere systemen. Deze seizoens-COP wordt afgekort tot SPF (Seasonal Performance Factor) en is gedefinieerd als:

$$SPF_{heating} = \sum_{\Delta t_{heating\ season}} Q_{i,condensator} / \sum_{\Delta t_{heating\ season}} E_{i,electr} \quad (7)$$

Vergelijkbare definities kunnen opgesteld worden voor het koelsysteem met  $\langle COP_{koeling} \rangle_{\Delta t_{period}}$  en  $SPF_{koeling}$ . Soms kom je in de literatuur de afkortingen tegen met EER (Energy Efficiency Ratio) en SEER (Seasonal EER). Wij zullen ons houden aan de COP en SPF terminologie voor de koeling.

De COP en SPF waarden kunnen als functie van de tijd maar ook als functie van de buitentemperatuur weergegeven worden.

### 3.2 Relatief aandeel van duurzame warmte $Q_{aquifer}$

Een ander belangrijk prestatie-indicator, vooral in geval van hybride systemen, is de fractie van bodemenergie in de totale thermische vraag. Wanneer we alleen naar de COP van de warmtepomp kijken kan deze op zich goede waarden vertonen zonder dat het duurzaamheidsaandeel hoog is omdat bijvoorbeeld de gasketel een groot aandeel levert in die vraag. Uiteraard zou dit ook naar voren kunnen komen in de algemene COP. Maar door het expliciet te definiëren is er direct inzicht in het aandeel van lokale duurzame energie.

In figuur 5 zien we zowel een ideale en een niet-ideale situatie ingetekend in de zogenaamde jaarbelastingsduurkrommes. De gekleurde gebieden vertegenwoordigen de thermische energieën van de verschillende werktuigen, te weten  $Q_{gasboiler}$ ,  $Q_{warmtepomp}$ ,  $Q_{vrije\ koeling}$  and  $Q_{compressie\ koeling}$ . In de ideale situatie voorziet de warmtepomp 90% van de jaarlijkse warmtevraag (groene gebied). In geval van een  $SPF_{warmtepomp} = 4,0$  komt dit overeen met een aandeel van 70% aan ondergrondse energie.

Voor de koeling voorziet de aquifer nagenoeg de gehele koelvraag. In combinatie met een COP van 10-20 betekent dat er ongeveer 105-110% aan warmte wordt geïnjecteerd in de ondergrond.

De niet-ideale situatie is daaronder weergegeven. In dat geval is warmtepompvermogen niet toereikend en schakelt zichzelf uit zo gauw de bijstook erin komt bij lage buitentemperaturen. De gasgestookte eenheid neemt daarmee het grote grijs-gearceerde gebied voor zijn rekening. Ondanks eventueel goede COP waarden is het duurzaamheidsaandeel dan laag. Overigens zal de algemene COP, gedefinieerd als totale warmtevraag gedeeld door de optelling van elektriciteit en gas, ook niet hoog zijn.

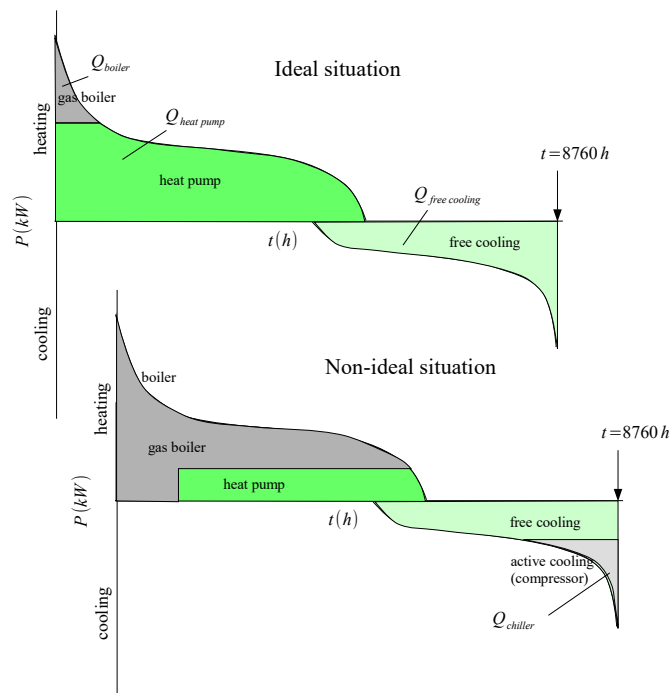
Voor de koeling zien we in het niet-ideale geval dat een compressor-gedreven chiller (dan wel de warmtepomp in reversed modus) actief wordt op de warmste dagen. Dit soort situaties dienen zich in de praktijk aan in geval van slecht geregelde WKO systemen.

Om inzicht te geven in het duurzaamheidsaandeel definiëren we de fractie  $\gamma$  als het aandeel bodemenergie ten opzicht van de totale thermische vraag. Voor de verwarmingsmodus geldt:

$$\langle \gamma_{verwarmen} \rangle_{\Delta t_{period}} = \frac{\sum_{\Delta t_{period}} (Q_{i,warmtepomp} - E_{i,electr})}{\sum_{\Delta t_{period}} Q_{i,verwarmen}} = \frac{\sum_{\Delta t_{period}} Q_{i,aquifer}}{\sum_{\Delta t_{period}} Q_{i,verwarmen}} \quad (8)$$

Voor de koelmodus krijgen we:

$$\langle \gamma_{koeling} \rangle_{\Delta t_{period}} = \frac{\sum_{\Delta t_{period}} Q_{i,aquifer}}{\sum_{\Delta t_{period}} Q_{i,koelen}} \quad (9)$$



Figuur 5: Schetsmatig een ideale en niet ideale jaarbelastingduurkromme met daarin aangegeven de verschillende opwekkers.

Bij de start van het stook seizoen zal de  $\gamma_{\text{verwarmen}}$  een relatief hoge waarde hebben, waarna deze vermindert in het midden van het stookseizoen en zich weer verbetert naar het einde van het stookseizoen.

Ook hierbij geldt dat de  $\gamma$  waarden weergegeven kunnen worden per dag, maand of seizoen. Ook kan overwogen worden waarden als functie van de buitentemperatuur te plotten. Verschillende display methoden zullen onderstaand geïllustreerd worden.

### 3.3 Thermische balans van de aquifer

Een laatste belangrijke basis-indicator voor een WKO is de thermische jaarbalans op de ondergrond. Hoewel een zich ontwikkelende balans niet direct informatie geeft over bepaalde prestaties is het in ieder geval een vereiste vanuit de wetgever dat er een jaarlijkse balans ontstaat.

De balans kunnen we als volgt bepalen:

$$B = \sum_{\Delta t_{\text{period}} = 1 \text{ yr}} (Q_{i, \text{laden, aquifer}} - Q_{i, \text{ontladen, aquifer}}) \quad (10)$$

waarbij het 'laden' staat voor het inbrengen van koude in de ondergrond .

Tussentijdse balanswaarden  $B(t_i)$  kunnen berekend worden. Bij afwijkende waarden kan de dry-cooler ingezet gaan worden. Een algoritme zal hier niet besproken worden.

### 3.4 Extra indicatoren

We kunnen de vermogensvraag van het gebouw als functie van de buitentemperatuur uitzetten en daarmee controleren of berekende vermogens overeenstemmen met ontworpen waarden. Indien gebouwvermogens veel lager uitvallen dan is pendelgedrag of veel deellastbedrijf te verwachten. Bij te hoge vermogens komt de bijstook er te vaak in of is er discomfort.

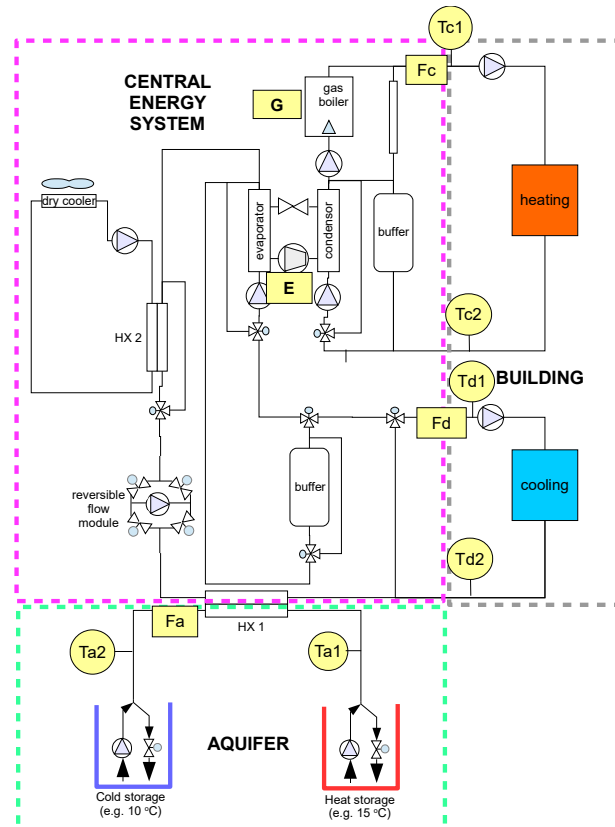
Ook de stooklijn zoals ontworpen kan worden vergeleken met de gemeten waarden. Het geeft informatie over de afgiftevermogens aan de gebouwzijde. Indien deze niet toereikend of juist overgedimensioneerd zijn zien we te hoge of te lage temperaturen op aanvoer en retour.

Als laatste zijn de temperatuurverschillen over de afgiftesystemen en de centrale warmtewisselaar van

het bodem-energie-systeem van belang te controleren i.v.m. bijvoorbeeld waterdebieten.

#### 4. Testen van indicatoren

Om de bovengenoemde indicatoren te testen zijn ze toegepast voor een WKO installatie voor een utiliteitsgebouw in Nederland met een doublet bron in combinatie met een Carrier warmtepomp (Aquasnap RW30/165kW), drycooler en 2 HR ketels van het type 115 kW Remeha Quinta Pro. Uurlijkse waarden konden verkregen worden uit het GBS voor het jaar 2016 voor de sensoren zoals aangegeven in figuur 6. Het betrof flowmetingen voor gebouwverwarming, -koeling met de aanvoer en retourtemperaturen en het debiet tussen de bronnen inclusief injectie- en onttrekkingstemperaturen. Daarnaast waren de elektriciteit naar de warmtepomp en het gas naar de ketels gelogd. Qua buitencondities zijn de buitentemperatuur en zoninstraling gemeten.



Figuur 6 Voor de casus konden de bovenstaande sensoruitkomsten gegeven worden.

In dataset ontbreekt informatie over de drycooler (overigens wel fysieke sensoren aanwezig) en de toestand van de kleine buffers (geen flow- en temperaturopnemers aan in- en uitlaatzijde). Ook de elektriciteitsverbruiken voor de distributiepompen waren niet vast te stellen.

Met de aangegeven opnemers zijn de warmte- en koudeleveringen naar het gebouw te bepalen, idem dito de mate van inzet van bodemenergie en bijstook. De stooklijnen, temperatuurverschillen en vermogens bij verschillende buitencondities zijn ook te plotten.

De COP van het totaalsysteem is te bepalen, conform ISSO 39 [3] door de toegevoerde gashoeveelheid voor de gasbijstook om te rekenen naar de hoeveelheid elektriciteit die opgewekt had kunnen worden met een elektriciteitscentrale (gemiddeld rendement ongeveer 52%) en dit op te tellen bij de elektriciteitstoevoer naar de warmtepomp.

$$COP_{\text{verwarmen}} = \frac{Q_{\text{verwarmen}}}{E_{\text{elektr}} + \eta_{\text{centrale}} \cdot G \cdot E_{\text{HHV}}} \quad (11)$$

Hierbij is  $E_{HHV} = 9,8 \text{ kWh/m}^3$  gas en  $G$  het aantal  $\text{m}^3$  aardgas.

Door het ontbreken van vermogensmetingen op de condensor is een directe COP bepaling van de warmtepomp niet mogelijk. Op een indirecte manier is de COP van de warmtepomp wel te bepalen, namelijk door het condensorvermogen af te schatten door de warmtevraag naar het gebouw te verminderen met de door de ketel geleverde warmte (met een geschat rendement van ongeveer 90%).

$$COP_{\text{warmtepompverwarmen}} = \frac{Q_{\text{condensor}}}{E_{\text{elektr}}} = \frac{Q_{\text{verwarmen}} - \eta_{\text{ketel}} \cdot G \cdot E_{\text{HHV}}}{E_{\text{elektr}}} \quad (12)$$

De geleverde vermogens naar het gebouw en cumulatieve vraag voor verwarmen en koelen zijn weergegeven in figuur 7. Daarbij lijken op  $t = 2100 \text{ h}$  en  $t = 3700 \text{ h}$  data verloren te zijn gegaan. Idem geldt dat voor de periode  $t = 7500 \text{ h} - 8100 \text{ h}$ .

In een eerste benadering lijkt het gebouw een gelijkwaardige vraag aan warmte ( $\sim 200 \text{ MWh}$ ) en koude ( $140 \text{ MWh}$ ) te hebben. Daarbij zijn de koelvermogens in het stookseizoen in het plaatje linksonder opvallend, maar lijkt de hoeveelheid betrokken koude mee te vallen op basis van de cumulatie-plot. De bulk aan koeling zit in de zomerse periode.

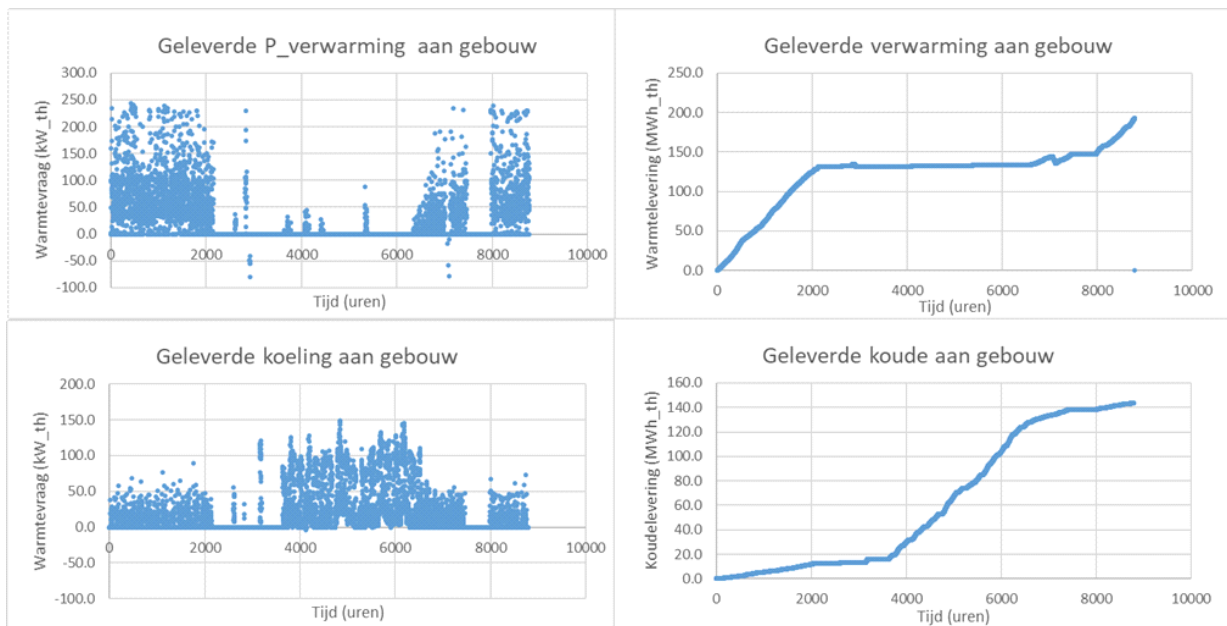


Figure 7 Geleverde vermogens (links) en cumulatieve energie (rechts) naar het gebouw voor verwarming (boven) en koeling (onder)

#### 4.1 COP waarden per uur en per etmaal

Op basis van de formules 11 en 12 zijn de uurlijkse en de 24-uurs gemiddelde COP waarden bepaald. Daarbij ontlopen deze formules elkaar niet veel omdat er slechts een  $3800 \text{ m}^3$  aardgas ( $\sim 37 \text{ GWh}$ ) gebruikt is in dat jaar. Een relatief klein aandeel in het geheel. Het gedrag bij de verschillende tijdsduren zijn weergegeven in figuur 8 zowel als functie van de tijd (bovenste figuren) als ook als functie van de buitentemperatuur (onderste deel).



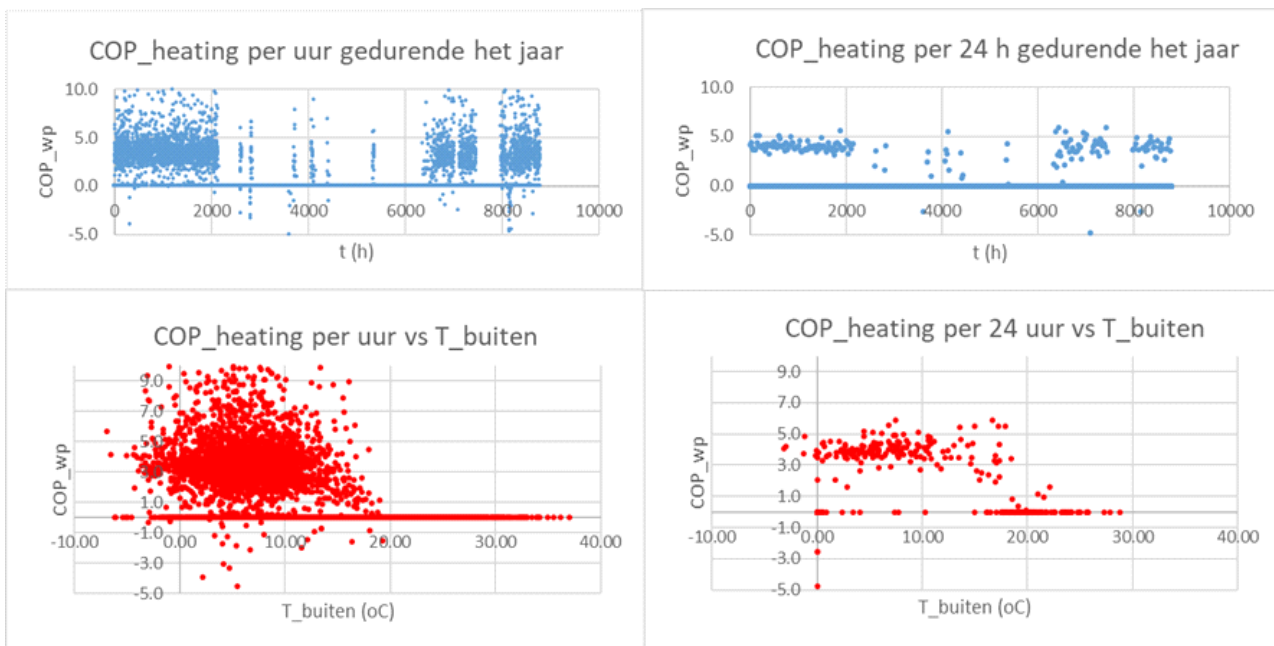


Figure 8: COP voor verwarmen als functie van de tijd (boven) en de buitentemperatuur (onder) in geval van 1 uur-waarden (links) en 24 uren gemiddelden (rechts).

Het is duidelijk dat de uurlijkse berekeningen op basis van de huidige gegevensset resulteren in veel spreiding wat het lastig maakt om zinnige informatie te geven aan bijvoorbeeld een gebouwbeheerder of operator. Daarentegen geven de 24 uren gemiddelden een rustiger profiel waarmee een goede (eerste) indicatie van de COP ontstaat. Het regelgedrag en de invloed van de thermische buffers wordt in die 24 uur weg- geïntegreerd.

De evoluerende  $SPF_{\text{verwarmen}}$  (cumulerend) is weergegeven in figuur 9 waarin gestart is met plotten vanaf de zomer op  $t = 4000$  h, welke doorloopt tot het einde van het jaar om vanaf daar weer via 0h tot 3999 h door te lopen. Daarbij zien we een onrustig beeld tot en met december door het wegvallen van o.a. de metingen. Pas vanaf januari (0h) wordt het beeld rustig. Tegelijkertijd verhuult de SPF in die beginperiode van het stookseizoen (vanaf 6000 h) dat de installatie qua monitoring een groot probleem lijkt te hebben. De 24-uurs COP metingen (zie bovenstaand figuur 8, rechtsboven) laten wel een duidelijk gat zien. Kortom, een zich ontwikkelende SPF kan problemen toedekken en daarmee optimalisatie tegenwerken.

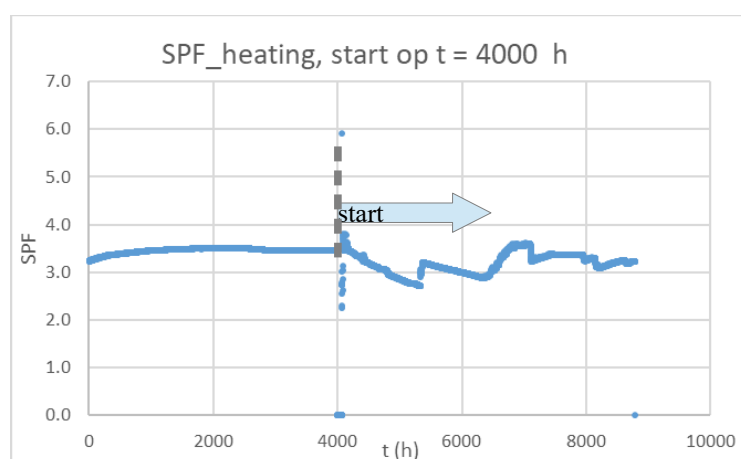


Figure 9: Ontwikkeling van SPF vanaf  $t = 4000$  h tot 8760 h en vandaar uit naar  $t = 3999$  h.

Gedurende het koelseizoen zijn er geen zinnige gegevens te genereren voor  $COP_{\text{koelen}}$  omdat de elektrische energie van de distributiepompen niet wordt gelogd. Overigens is deze "vrije" koeling met in de regel relatieve hoge COP waarden voor distributiepompen minder kritisch voor overmatig energieverbruik mits geen actieve koeling erin kan komen (wat het geval is voor deze casus).

## 4.2 Duurzaamheidsaandeel

Naast de prestaties van de warmtepomp is het duurzaamheidsaandeel een belangrijk element bij de aanschaf van WKO systemen. Gelijk de discussie van de COP van de warmtepomp kunnen we deze uurlijks, per etmaal en per seizoen berekenen (evoluerend vanaf de start van een stook- of koelseizoen).

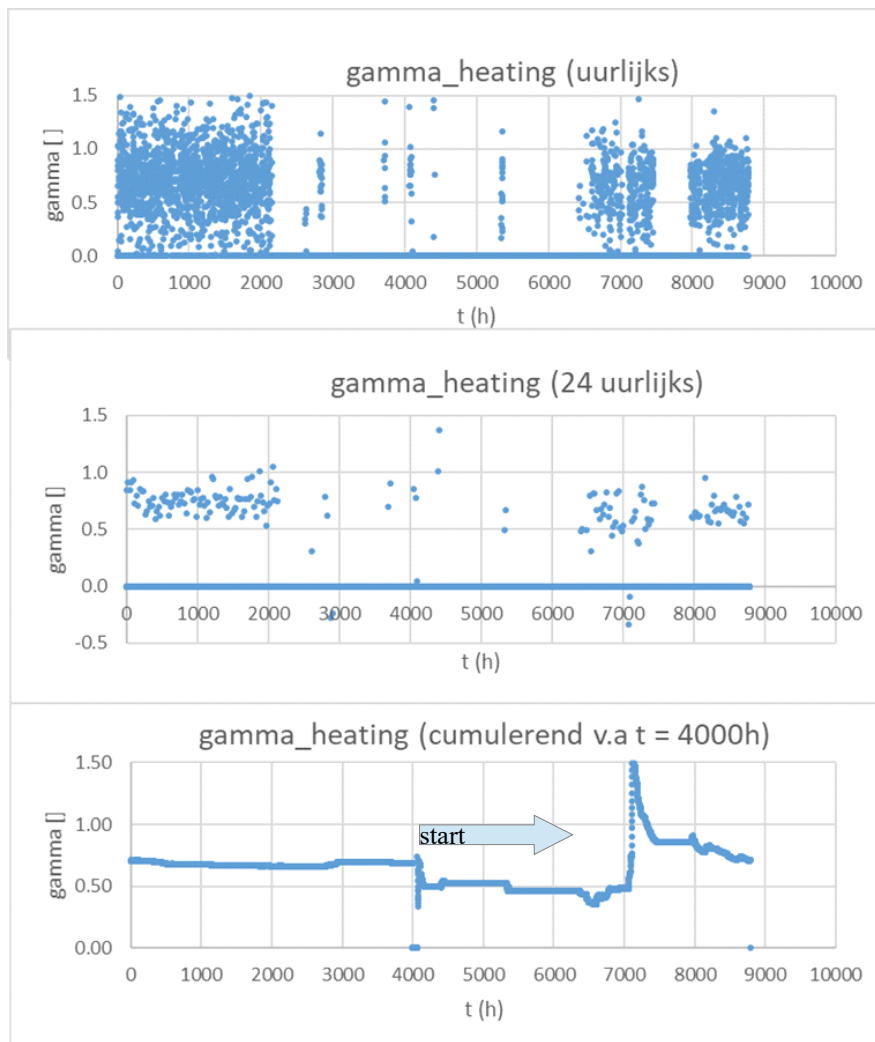


Figure 10: Duurzaamheidsaandeel (mate van ondergrondse energie) in de totale warmtevraag, uurlijks, per etmaal en zich ontwikkelend gedurende het jaar (v.a.  $t = 4000h$ ).

Daarbij zijn de uurlijkse waarden nietszeggend op basis van de huidige dataset, de 24 uren-waarden worden interessant wanneer een bepaalde bandbreedte te geven is op basis van de modellen. De cumulerende variant, startend vanaf  $t = 4000$  h, laat wispelturig gedrag zien in de eerste paar duizend uur door wegvallende metingen en wordt vanaf januari rustig in gedrag en laat een duurzaamheidsaandeel zien van ongeveer 70%. Wederom is deze cumulerende indicator minder geschikt voor optimalisatie via tussentijdse observaties. Wel is deze geschikt voor de jaarlijkse of seizoensmatige eind-controle.

Voor koeling zien we een vergelijkbaar verhaal, zie onderstaand figuur. Daarbij is de cumulerende variant gestart van januari maar laat "onzeker" gedrag zien door weinig koudevraag (zakkend zelfs onder de 1,0) totdat de koelvraag er goed in komt vanaf  $t = 4000$  h. Dan zien we de waarde zich stabiliseren leidend tot een eindwaarde van  $\gamma_{koeling} = 1,12$ . De waarde hoger dan 1 is ten gevolge van koude-transportverliezen en dissipatie van elektrische energie uit de energiecentrale.

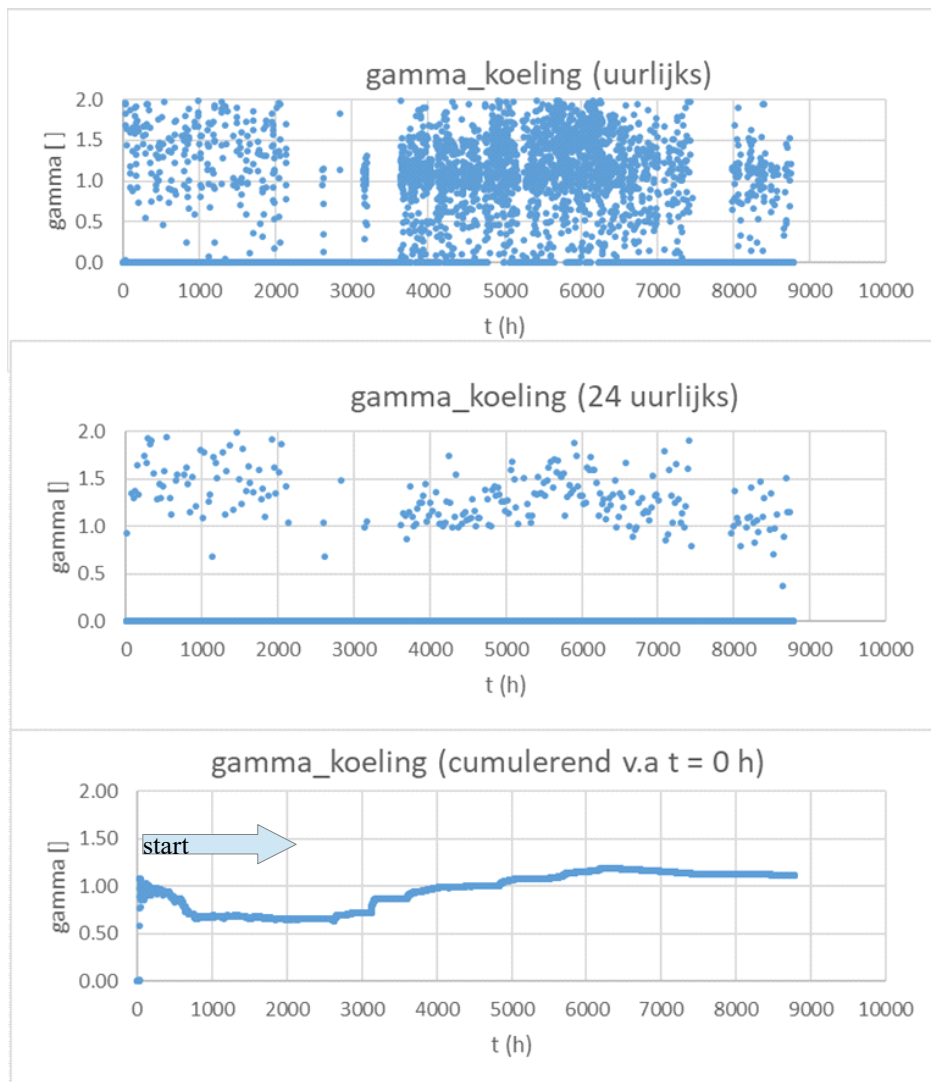


Figure 11: Duurzaamheids-aandeel in de koeling ( $\gamma$ ) per uur, per etmaal en cumulerend vanaf  $t = 0h$

### 4.3 Balans ondergrond

De laatste belangrijke parameter is de bodembalans. Gelijk als bij de cumulerende waarden voor de SPF en  $\gamma$  is dit een 'traag' verlopend proces waarbij niet direct informatie verkregen wordt over de dagelijks werkzaamheid van het systeem.

Het verloop van de bodembalans is onderstaand te zien waarbij blijkt dat aan het einde van het jaar (eind december) de bodem niet zover is afgekoeld dat er balans is bereikt. Op zich is dat geen probleem wanneer er een koude winterperiode volgt. Aan de andere kant moet er een keer besloten worden om te "balansen". Het algoritme daarvoor is hier nog niet ontwikkeld. Overigens is het, bij hoge waterstromingen in aquifer met geen omliggende WKO's in de buurt, de vraag of hierop geregeld zou moeten worden, anders dan de reden te voldoen aan de wettelijk verplichting.

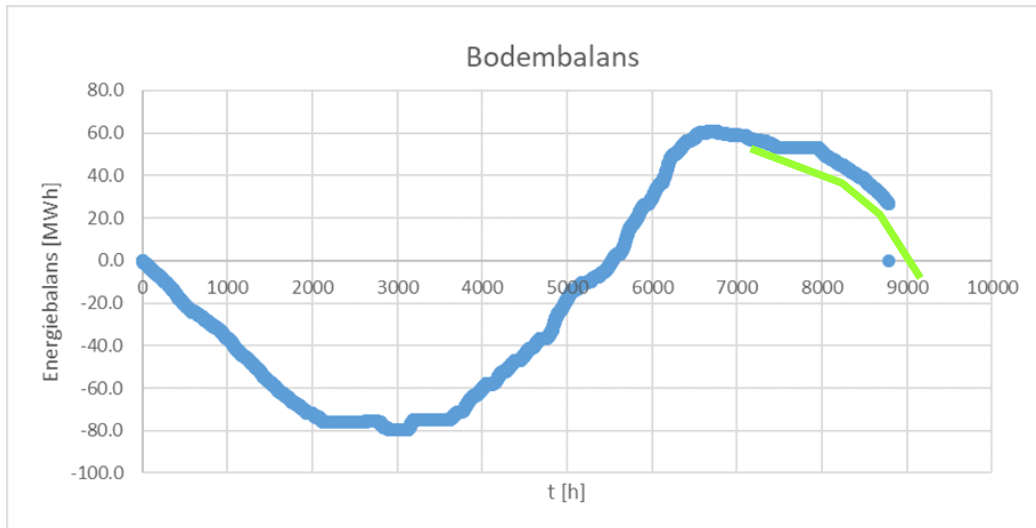


Figure 12 Energetische balans van de bodem gedurende het jaar. Duidelijk is er een onbalans aan het einde van het jaar. Correctie zou ingezet kunnen worden vanaf  $t = 7000$  h door koude te laden via de dry-cooler (groen). Er zou ook nog afgewacht kunnen worden hoe de winter zich verder ontwikkeld. Tegelijkertijd moeten tekorten of overschotten, zeker in geval van relatief weinig stromende aquifers, niet teveel oplopen.

#### 4.4 Overige indicatoren

Vanuit regeltechnische oogpunt is het interessant om te kijken hoe de vermogens en de aanvoer- en retourtemperaturen zich verhouden als functie van de buitentemperatuur. Ter illustratie zijn de gemeten stooklijnen geplot op basis van uurwaarden en etmaalgemiddelden. Uurlijkse waarden geven daarbij veel 'ruis'.

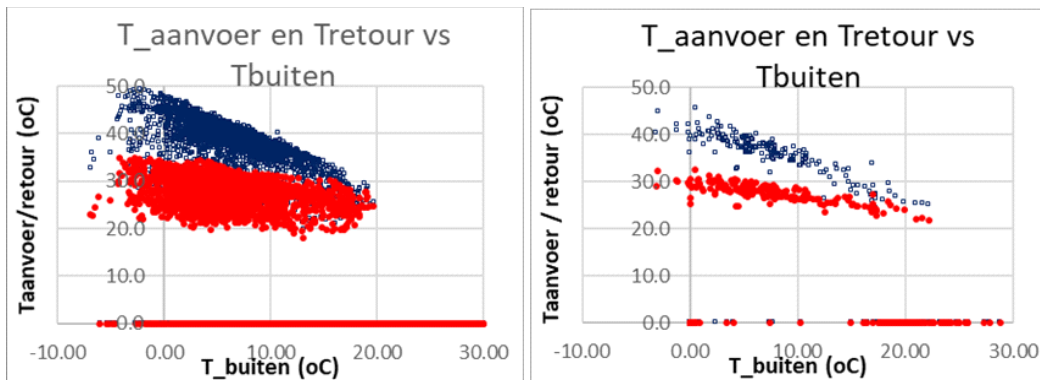


Figure 13: Gemeten stooklijnen voor uurlijkse waarden (links) en 24 uren gemiddelde waarden (rechts)

Als laatste is het temperatuurverschil over de bodemwarmtewisselaar bepaald voor beide tijds-spannes. Het geeft een vergelijkbaar resultaat dat de puntwolk aanzienlijk versmalt bij 24 uren gemiddelden.

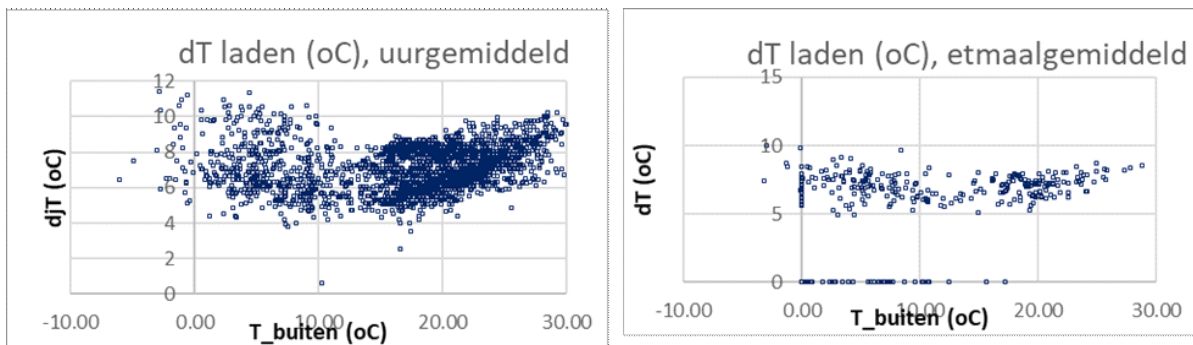


Figure 14: Temperatuurverschil over de bodemwarmtewisselaar als functie van de buitentemperatuur voor uurlijkse en etmaalgemiddelden.

## 5. Conclusies

De COP en het aandeel bodemenergie kunnen het beste bepaald worden op een etmaalgemiddelde. Fijnmaziger inzetten van deze indicatoren geeft een te grote bandbreedte. Deze kan alleen maar versmald worden als meer informatie uit het systeem onttrokken wordt zoals kleppenstanden, buffervolumes, bufferstromen, thermische massa's. Dat maakt het geheel in dat geval ook complexer en geeft niet een directe meerwaarde voor het controleren. Zo gauw COP waarden gedurende enkele weken voortdurend buiten de range liggen is maatwerkadvies van een verantwoordelijke partij sowieso noodzakelijk en zal er op dat moment gericht ingezoomd gaan worden in de monitoringssystemen.

Dat betekent ook dat voldoende loggers en opnemers aangebracht moeten zijn om deze controle te kunnen uitvoeren. Voor deze casus ontbrak het bijvoorbeeld aan flowmetingen voor de buffers. Ook het ontbreken van de elektriciteitsconsumptie van de distributiepompen maakte onmogelijk de COP<sub>koeling</sub> te bepalen.

Het aanbrengen van de modellen in relatie tot die 24 uren gemiddelde indicatoren en parameters lijkt het beste. Uurlijks simulaties zijn een stap te ver en niet nodig. Jaarlijkse prestaties, bepaald door cumulerende waarden, worden gedurende het verloop steeds minder gevoelig voor (ongewenste) variaties in het systeem en hebben als gevolg dat bepaalde problemen onontdekt kunnen blijven. Daarom zullen indicatoren zoals de bodembalans en SPF waarden ondersteund moeten blijven met 24 uren-gemiddelde metingen van de COP,  $\gamma$  (of vergelijkbaar) en de stooklijn/koellijnen.

Het uiteindelijk in balans van brengen van de ondergrond is een wettelijke verplichting. Het ontbreekt op dit moment nog aan goede algoritmen die dit geautomatiseerd goed uitvoert voor WKO's. Vanuit MoBaMo-BES zou een vervolg hierin voorzien kunnen gaan worden.

## 6. Literatuur

[1] Omgevingdienst Haaglanden. (2017, 03 27). Onderzoek naar het functioneren van klimaatinstallaties met bodem-energiesysteem (open WKO) in Zuid-Holland . Opgeroepen op 06 26, 2019, van Website van omgevingdienst Haaglanden:

[http://www.omgevingsdiensthaaglanden.nl/files/Documenten/ODH\\_Eindrapportage\\_functioneren\\_WKO.pdf](http://www.omgevingsdiensthaaglanden.nl/files/Documenten/ODH_Eindrapportage_functioneren_WKO.pdf)

[2] ir. Geelen, C., & ir. Braber, K. (2013, 12 20). Rapportage WKO inglastuinbouw, Monitoring van (energetische) prestaties en. Opgeroepen op 10 12, 2018, van kasalsenergiebron.nl:

[https://www.kasalsenergiebron.nl/content/research/14895\\_Rapportage\\_WKO\\_in\\_Glastuinbouw-anoniem\\_20december\\_2013.pdf](https://www.kasalsenergiebron.nl/content/research/14895_Rapportage_WKO_in_Glastuinbouw-anoniem_20december_2013.pdf)

[3] ISSO, kennisinstituut voor bouw- en installatietechniek. (2017). ISSO publicatie 39, energiecentrale met warmte en koudeopslag (WKO). Rotterdam: ISSO.

[4] ISSO, Kennisinstituut voor bouw- en installatietechniek. (2017). Ontwerpen en installeren van energiecentrales van bodemenergiesystemen en het beheren van bodemenergiesystemen. Rotterdam: KvINL. 2