

Een kijk op lange termijn

Dit artikel handelt over de optimale regeling van warmtepompsystemen gekoppeld aan een boorveld met verticale warmtesondes, waarbij de focus ligt op het bodemaspect. Het doel van de regeling is om de jaarlijkse energiekosten voor een gegeven warmte- en koudevraagprofiel te minimaliseren. Er wordt rekening gehouden met de invloed van de brontemperatuur op de prestatie van de warmtepomp en van de passieve koeling. Maar ook met de lange termijn impact van thermische onbalans op de brontemperatuur. De resultaten geven een antwoord op de vraag wanneer de warmtepomp, de passieve koeling en het backup systeem kunnen worden gebruikt, en wat de bijhorende optimale evenwichtstemperatuur is van het boorveld.

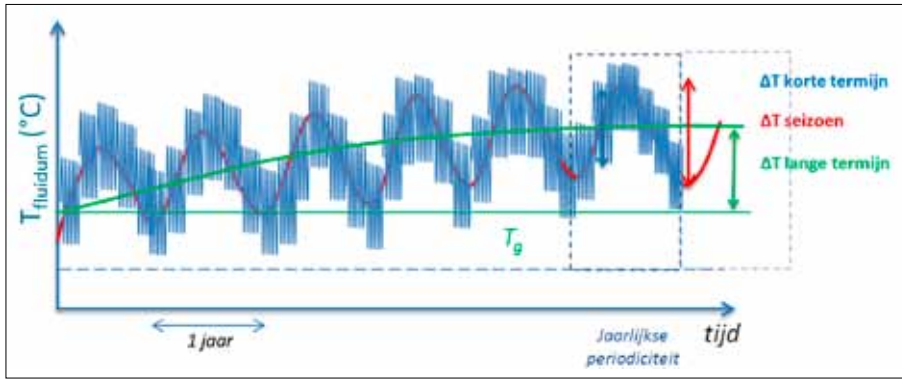
Dr.ir. S.D. (Clara) Verhelst en prof.dr.ir. L.M.L. (Lieve) Helsen, Katholieke Universiteit Leuven (KU Leuven), Dep. Werktuigkunde, Afd. Toegepaste Mechanica en Energieconversie, België

Het verloop van de fluïdumtemperatuur aan de uitlaat van een boorveld wordt gekenmerkt door drie dominante tijdschalen (zie figuur 1). De snelste variaties, met een tijdschaal van enkele minuten tot dagen, zijn die tengevolge van het aan- en uitschakelen van de warmtepomp (WP) en de passieve koeling (PK). Daarna volgen de seizoensvariaties, met een tijdschaal van een jaar. De traagste temperatuursvariatie, met een tijdschaal van meerdere jaren, wordt veroorzaakt door een onbalans op jaarbasis tussen de hoeveelheid geïnjecteerde en onttrokken warmte. Het verloop van de fluïdumtemperatuur is bij de huidige regeling van GGWP-systemen een natuurlijk gevolg van de werking van het systeem. De regeling schenkt met andere woorden geen expliciete aandacht aan de impact van dit verloop op het systeemrendement op korte, middellange en lange termijn. Bij het ontwerp van een grondgekoppeld

warmtepompsysteem (GGWP) wordt wel met dit temperatuursverloop rekening gehouden. In het geval dat het boorveld gedomineerd wordt om de volledige warmte- en koudevraag te dekken, is de bijhorende regeling van de installatie eenvoudig. Alle warmte wordt door de WP geleverd en alle koeling gebeurt passief. Bij een warmtevraag gedomineerd gebouw zal het boorveld geleidelijk afkoelen totdat er een thermisch evenwicht ontstaat tussen de netto warmte-extractie op jaarbasis, en de netto warmte-diffusie naar het boorveld vanuit de omringende bodem. Op analoge wijze zal bij een koeling gedomineerd gebouw het boorveld langzaam opwarmen tot een thermisch evenwicht tussen de netto warmtetoevoer vanuit het gebouw en de netto warmte-diffusie naar de omringende bodem is bereikt. De temperatuursdaling van de bodem zorgt voor een daling van het rendement van de warmtepomp (COP_{wp}), een temperatuurs-

stijging voor een daling van het rendement van de passieve koeling (COP_{pk}). In het geval van een HyGGWP-systeem wordt het boorveld gedomineerd om slechts een deel van de warmte- en/of koudevraag te dekken. Omdat er nu een supplementaire verwarmings- en/of koelinstallatie parallel aan de warmtepomp en de passieve koeling beschikbaar zijn/is, dient de regeling een juiste keuze te maken tussen het gebruik van de warmtepomp en de passieve koeling enerzijds, en het supplementaire systeem anderzijds. Dit zowel op de korte, middellange als lange termijn. Hoe ziet de regeling van een (hybride) grondgekoppeld warmtepompsysteem er optimaal uit? Rekening houdend met de drie voornoemde tijdschalen, wordt deze vraag opgedeeld in volgende deelvragen:

- *lange termijn*: Welke gemiddelde boorveldtemperatuur resulteert in een optimaal systeemrendement op jaarbasis? Als we



-Figuur 1- Het verloop van de fluidumtemperatuur over de jaren heen wordt gekenmerkt door drie dominante tijdschalen: de snelste variaties ten gevolge van de vermogenvariaties op uur- en dagbasis, de seizoensvariaties en de variatie op lange termijn ten gevolge van een onbalans tussen de geïnjecteerde en onttrokken warmte op jaarbasis. Op het ogenblik dat deze onbalans gecompenseerd wordt door de warmtewisseling tussen het boorveld en de omringende bodem, is het boorveld in thermisch evenwicht en blijven enkel nog de korte termijn- en seizoenvariaties over. Het bijhorende temperatuurprofiel heeft een periodicititeit van een jaar en kan daarom – de intra-jaarlijkse variabiliteit van het vraagprofiel verwaarlozend – blijvend herhaald worden.

- deze boorveldtemperatuur als evenwichtstemperatuur willen, kennen we – voor een gegeven boorveldconfiguratie en bodemgesteldheid – ook het bijhorende niveau van onbalans tussen de jaarlijkse hoeveelheid geïnjecteerde en onttrokken warmte;
- *middellange termijn*: Hoe spreiden we het gebruik van de warmtepomp, de passieve koeling en het supplementaire verwarmings- en koelsysteem op jaarbasis. Wat zijn de opportuniteiten voor seizoensopslag van warmte en/of koude?;
- *korte termijn*: Hoe spreiden we het gebruik van deze componenten op dagbasis? Wat zijn de opportuniteiten voor thermische opslag van warmte en/of koude in de BKA?

■ OPTIMALE REGELING

- De gekozen methodiek om deze vragen te beantwoorden is die van optimale regeling. Deze definieert voor elk tijdstip van de regelhorizon de waarde van de te optimaliseren regelvariabele(n), rekening houdend met de objectieven, de systeemdynamica (m.b.v. simulatiemodel), de systeemkenmerken, en de beperkingen. Voor onze toepassing zijn dit:
- regelvariabelen: het thermisch vermogen geleverd door de warmtepomp, de passieve koeling, de supplementaire gasketel en de supplementaire koelmachine;
 - objectief: minimaliseren van de totale jaarlijkse energiekosten;
 - systeemdynamica:
 - bronzijde: dynamisch boorputmodel dat de respons van de fluidumtemperatuur op het vermogensprofiel (bronzijde) berekent;
 - afgiftezijde: dynamisch gebouwmodel dat de respons van de zonetemperatuur op het vermogensprofiel (afgiftezijde) berekent;
 - systeemkenmerken: stationaire modellen voor de COP van de warmtepomp (COP_{WP}),

- van de passieve koeling (COP_{PK}), van de koelmachine (COP_{KM}), telkens in functie van de bron- en/of afgiftemtemperatuur;
- systeembeperkingen:
 - bronzijde: periodische randvoorwaarden voor het temperatuurprofiel in het boorveld (zie figuur 1: jaarlijkse periodicititeit); minimale en maximale fluidumtemperatuur;
 - afgiftezijde: zonetemperatuur binnen de thermische comfortgrenzen.

Al deze aspecten integreren in één groot optimalisatieprobleem is omwille van de benodigde rekenkracht niet mogelijk, gezien de combinatie van een groot aantal te optimaliseren variabelen (regeltijdsstap 1 uur, regelhorizon 1 jaar) en niet-lineariteiten (ten gevolge van de temperatuursafhankelijkheid van de COP's). Daarom werden telkens deelaspecten van het optimalisatieprobleem bestudeerd, met aandacht voor een correcte extrapolatie van de resultaten van het deelniveau naar het globale niveau.

■ SAMENVATTING RESULTATEN

Uit de optimalisatieresultaten komen relatief eenvoudige vuistregels voor de regeling van het bestudeerde HyGGWP systeem (combinatie van een warmtepomp, passieve koeling, gasketel en lucht-gekoppelde koelmachine), naar voren. Het blijkt dat de korte termijn het gedrag op lange termijn dicteert.

Lange termijn

Hoe evolueert de boorveldtemperatuur op lange termijn?

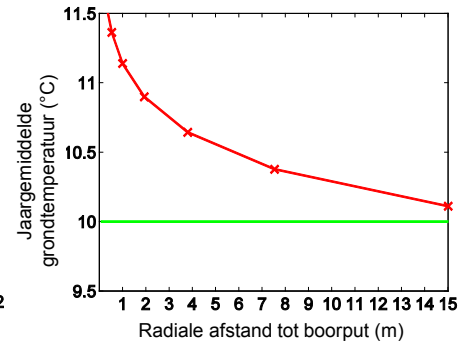
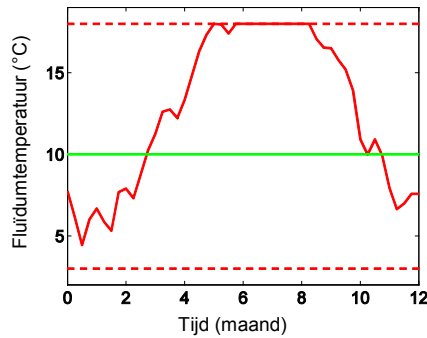
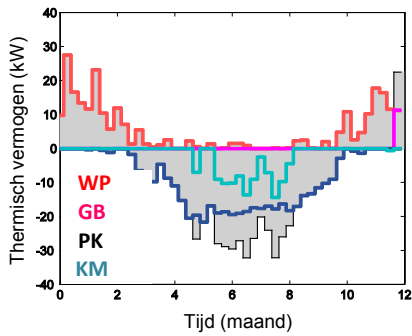
Voor gebouwen waar de warmtevraag domineert, mag het boorveld op termijn afkoelen. Dit blijkt uit het feit dat de optimale evenwichtsboorveldtemperatuur lager is dan deze

van de omringende bodem. Hierdoor vloeit er op jaarbasis netto warmte van de omringende bodem naar het boorveld, wat toelaat om op jaarbasis meer warmte uit het boorveld te onttrekken dan te injecteren. Voor gebouwen waar de koudevraag domineert, is het net omgekeerd. De optimale evenwichtstemperatuur is hoger dan deze van de omringende bodem (zie figuur 2, rechts). Het netto warmteverlies naar de omliggende bodem laat op jaarbasis toe om meer warmte in het boorveld te injecteren dan er onttrokken wordt. De negatieve impact op het globale systeemrendement van COP_{WP} -afname door het afkoelen van het boorveld, respectievelijk COP_{PK} -afname door het opwarmen van het boorveld, weegt hier niet op tegen de positieve impact van een groter aandeel van de WP en de PK in het dekken van de warmte- en koudevraag. De verhoogde warmtewisseling van het boorveld met de omringende bodem (gedreven door het heersende temperatuursverschil) vangt deze thermische onbalans op. Dit temperatuursverschil hangt af van de grootte van de thermische onbalans en van de bodemeigenschappen. Hoe groter de warmtegeleidbaarheid van de bodem, hoe kleiner dit temperatuursverschil. Een goede warmtedissipatie in de bodem komt het systeemrendement dus ten goede. Het boorveld fungeert bij deze HyGGWP-configuratie dus als 'dissipator' en niet als medium voor warmte- of koudeopslag.

Middellange termijn

Hoe spreiden we het gebruik van de warmtepomp en passieve koeling over het jaar?

De warmtepomp en passieve koeling dekken de basislast (zie figuur 2, links). De gasketel of de koelmachine helpen enkel bij het dekken van de vermogenspieken. Het exacte moment waarop de backup wordt ingeschakeld blijkt gedicteerd te zijn door de fluidumtemperatuur in de bodemwarmtewisselaars. Zodra de fluidumtemperatuur een bepaalde waarde bereikt (een ondergrens in het geval van verwarming, een bovengrens in het geval van koeling), wordt het vermogen van de warmtepomp, resp. de passieve koeling, gemoduleerd om de fluidumtemperatuur op deze grenswaarde te houden (zie figuur 2, midden). Het resterende vermogen wordt door de backup geleverd. De exacte waarde van deze onder- en bovengrens is ofwel bepaald door fysische beperkingen (bijvoorbeeld het vriespunt van het fluidum of de maximale temperatuur koelwater), of door optimalisatie-overwegingen, afhankelijk van welk van beide het meest limiterend is. Uit recent onderzoek blijkt dat de optimalisatie gebaseerde temperatuurgrenzen analytisch kunnen worden bepaald, en functie zijn van drie parameters: (1) de ongestoorde bodem-



Warmtepomp en passieve koeling dekken basislast

Grenzen op fluidumtemperatuur bepalen het gebruik van de warmtepomp en passieve koeling

Boorveldtemperatuur zal wijzigen ten gevolge van thermische onbalans

-Figuur 2- Optimale werking van een hybride grondgekoppeld warmtepompsysteem voor een opgelegd vraagprofiel. De warmtepomp (WP) en passieve koeling (PK) dekken de basislast voor verwarming en koeling (zie grafiek links, met verwarming > 0 en koeling < 0). Wanneer de fluidumtemperatuur een zekere waarde $T_{f,max}$ bereikt, wordt het PK vermogen gemoduleerd om deze waarde aan te houden (zie grafiek midden). De koelmachine (KM) dekt dan de overblijvende vermogensvraag. $T_{f,max}$ is voor het geïllustreerde geval bepaald door de maximale vertrektemperatuur voor koeling aan gebouwzijde. Voor dit koudevraag gedomineerd profiel geeft optimale regeling aanleiding tot een jaarlijkse netto-injectie van warmte naar het boorveld. Deze thermische onbalans aan installatiezijde wordt gecompenseerd door thermische diffusie in de bodem. De jaargemiddelde grondtemperatuur rondom de boorput (zie grafiek rechts) is immers hoger dan deze van de ongestoorde bodem (hier 10°C , zie groene lijn).

temperatuur, (2) de COP (COP_{WP} , resp. COP_{PK}) en diens sensitiviteit aan de fluidumtemperatuur en (3) het rendement van de backup installatie (η_{CK} , resp. COP_{KM}). Het maximaal benutten van het boorveld binnen deze temperatuurgrenzen blijkt dus de drijvende kracht te zijn, zowel op korte als lange termijn. Tot zover hebben we, voor de door ons bestudeerde scenario's, geen aanzet tot seizoensopslag van warmte en/of koude kunnen afleiden.

Korte termijn

Hoe spreiden we het gebruik van de warmtepomp en passieve koeling over de dag?

De observatie op middellange termijn dat de backup in het optimale geval enkel wordt ingeschakeld om te vermijden dat de fluidumtemperatuur een bepaalde minimumwaarde onderschrijft/maximumwaarde overschrijft,

heeft ook consequenties op de optimale regeling op korte termijn. In deze tijdsschaal, gaande van uren tot enkele dagen, speelt de dynamica aan gebouwzijde een belangrijke rol. De regeling kan de thermische capaciteit in actieve opslagelamenten (bijvoorbeeld een warmwaterbuffer) en/of passieve opslagelamenten (bijvoorbeeld BKA) benutten om de warmte- en koellasten te dekken met een zo vlak mogelijk profiel. Vlakke vermogensprofielen leiden niet enkel tot kleinere temperatuurverschillen over de warmtewisselaars (met hogere COP_{WP} , COP_{PK} , COP_{KM} en η_{CK} als gevolg), maar ook tot beperktere variaties in de fluidumtemperatuur aan bronzijde waardoor de warmtepomp en de passieve koeling een groter aandeel van de warmtevraag, respectievelijk koudevraag kunnen dekken. In het artikel 'Grondgekoppelde warmtepompsystemen;

ontwerp, regeling en langetermijnprestatie' elders in deze uitgave, wordt aangetoond dat huidige stooklijngebaseerde regelstrategieën moeite hebben om deze doelstelling te realiseren, wat bijgevolg grote implicaties heeft op de globale systeemprestatie. Een model gebaseerde, predictieve regeling (MPC) is voor deze toepassing een veelbelovend alternatief.

DANKWOORD

De auteurs bedanken het Instituut voor de Aanmoediging van Innovatie door Wetenschap en Technologie in Vlaanderen (IWT-Vlaanderen) voor de financiële steun in het kader van de doctoraatsbeurs 'Modelgebaseerde Predictieve regeling van grondgekoppelde warmtepompsystemen in kantoorgebouwen' van auteur Clara Verhelst en het EraSME – Geotabs-project (100403).

Bij Solid Air is elke luchtbehandelingskast uniek



Bij Solid Air Luchtbehandeling doen we niet aan standaardoplossingen. Ieder apparaat is uniek, omdat iedere klantvraag dat ook is. Wij leveren modulaire luchtbehandelingskasten op maat, al of niet met generatieve wtw of met wtw op basis van adiabatische koeling.

Solid Air is ook de bedenker en producent van de Aeolus; de enige compacte HR wtw-unit die werkelijk compleet en geheel stekkerklaar wordt geleverd.



tel +31 (0)20 696 69 95
mail@solid-air.nl
www.solid-air.nl

Good climate. better performance!