RAPPORT

FIBRE OPTIC MONITORING ENERGIEBALANS EN -PRESTATIES BODEMENERGIESYSTEMEN

Eindrapport - openbaar

Klant:	Rijksdienst voor Ondernemend Nederland - Topsector Energie - TKI EnerGO
Referentie:	TEGB113002
Versie:	0.1/definitief
Datum	28 september 2017

Inhoud

1 Samenvatting 1

2 Inleiding 2

2.1 Aanleiding 2

2.2 Probleemstelling 3

3 Doelstelling 6

4 Resultaten en knelpunten 7

4.1 Validatie van theoretische simulatiemodellen (werkpakket 1) 7

4.2 Integraal monitoringinstrument energiebalans en -prestaties (werkpakket 2) 11

4.3 Algoritme voor de voorspelling onderhoudsbehoefte en verhoging rendement (werkpakket 3) 14

4.4 Juridisch geborgd model beheerprotocol en nieuw verdienmodel (werkpakket 4) 19

4.5 Communicatie en versterking Nederlandse kennispositie 20

5 Perspectief van de toepassing 22

6 Bijdrage van het project aan de doelstellingen van de subsidieregeling 24

6.1 Bijdrage aan de duurzame energiehuishouding 24

6.2 Bijdrage aan de versterking van de kennispositie 24

7 Spin-off 26

7.1 Spin-off binnen de sector 26

7.2 Spin-off buiten de sector 26

8 Publicaties 26

Projectgegevens	
Projectnummer	TEGB113002
Projecttitel	Fibre-Optic Monitoring Energiebalans en -prestaties van bodemenergiesystemen (FOME-BES)
Penvoerder	Stichting Deltares
Medeaanvragers	Universiteit Utrecht / USI (aanvrager) Royal HaskoningDHV (projectleider) BAM Techniek BV Priva BV CMS Derks Star Busmann ASR (deelnemer Stichting Kantorenpark Rijnsweerd) Park Strijp Energy CV Gemeente Utrecht
Projectperiode	1-1-2014 tot 31-6-2017
Contactpersoon	Jelle Buma, +31(0)88335 7792
Bestellen exemplaren	Via contactpersoon
Het project is uitgevoerd met subsidie van het Ministerie van Economische Zaken, Nationale regelingen EZ-subsidies, Topsector Energie uitgevoerd door Rijksdienst voor Ondernemend Nederland	

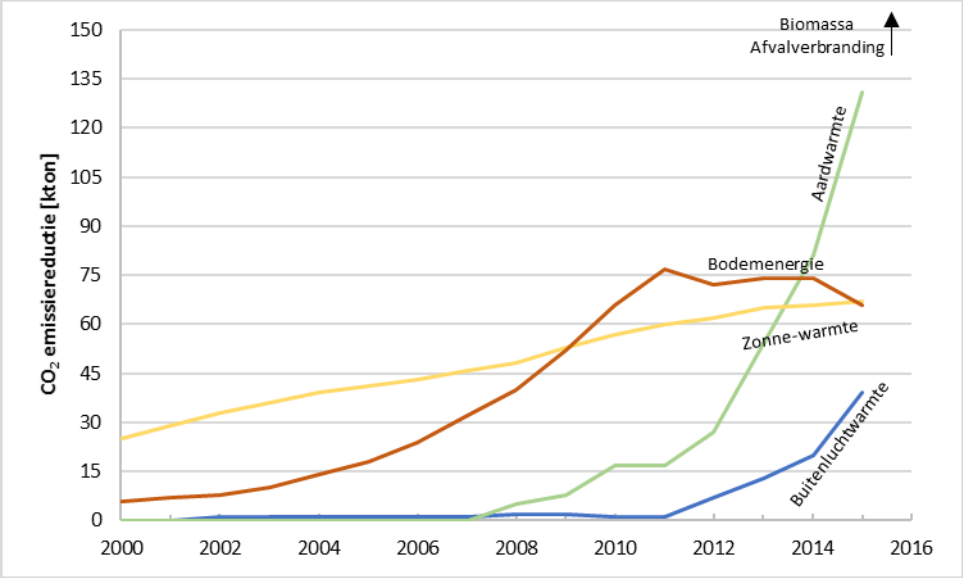
1 Samenvatting

Bodemenergie is in Nederland de derde grootste bron van duurzame energie. Het potentieel van bodemenergie is echter nog aanzienlijk groter dan wat op dit moment gerealiseerd wordt en kan bij optimale benutting een CO_2-reductie in de gebouwde omgeving van circa 10 procent realiseren. Het realiseren van een bodemenergiesysteem met warmte- en koudeopslag (WKO) kent verschillende fasen: ontwerp, vergunningaanvraag, realisatie en beheerfase. Elke fase kent zijn specifieke uitdagingen, maar een knelpunt dat in alle fasen speelt is het gebrek aan inzicht in wat zich nu werkelijk in de ondergrond afspeelt: hoe ontwikkelen zich de temperatuurprofielen en de energiebalans in een gebied met een of meer WKO-systemen in de loop van de jaren? In dit project is onderzoek gedaan naar de mogelijkheden om met DTS-glasvezeltechnologie ('spatially distributed temperature sensing') de energiebalans van WKO- en andere bodemenergiesystemen continu en kostenefficiënt te bewaken om optimaal gebruik te maken van het energiepotentieel in de bodem.
Het onderzoek is uitgevoerd door een consortium bestaande uit de kennisinstellingen Deltares, Universiteit Utrecht en het Utrecht Sustainability Institute, ingenieursbureau Royal HaskoningDHV, de bedrijven BAM Techniek, Priva, CMS Derks Star Busmann, ASR en Park Strijp Energy en de Gemeente Utrecht.
Het onderzoek heeft de meerwaarde aangetoond van DTS-glasvezeltechnologie ('distributed temperature sensing') voor ondergrondse monitoring van warmte-koude opslagsystemen (WKO). Gebleken is dat deze innovatieve technologie bovengronds een betrouwbaar beeld realiseert van de ontwikkeling van warmte- en koudebronnen in de ondergrond, door de seizoenen heen. En daarmee van de mate waarin het bodemenergiepotentieel ter plaatse wordt benut. DTS-monitoring geeft exploitanten de mogelijkheid het functioneren van hun WKO te monitoren en te verbeteren. Ook biedt het gemeenten en provincies de mogelijkheid om kansen voor verdichting op gebiedsniveau te beoordelen en te vergroten.

2 Inleiding

2.1 Aanleiding

In het SER-akkoord gesloten op 4 september 2013 is overeengekomen dat in 2023 16% van de energievoorziening wordt opgewekt met duurzaam geproduceerde energie. Na windenergie en energie uit biomassa is op dit moment bodemenergie in Nederland de derde grootste bron van duurzame energie (Figuur). Het potentieel van bodemenergie is echter nog aanzienlijk groter dan wat op dit moment gerealiseerd wordt en kan bij optimale benutting een CO_2-reductie in de gebouwde omgeving van circa 10 procent realiseren.



Figuur 2.1 Bijdrage bodemenergie aan de duurzame energieopwekking (CBS, 2016)[1]

Groei van de hoeveelheid opgewekte bodemenergie leidt tot vergroting van de bedrijvigheid in de bodemenergiesector (installatiebedrijven), versterking van de concurrentiepositie van het bedrijfsleven (waterbedrijven, energiebedrijven, advieswereld), versterking van de internationale kennispositie en betekent daarmee economische groei en innovatiekracht.

De genoemde potentiële bijdrage van bodemenergie aan de totale duurzame energievoorziening kan echter alleen gerealiseerd worden als een aantal barrières voor het verdergaand grootschalig ontwikkelen ervan wordt weggenomen. Deze worden in de probleemstelling nader geduid.

Benutting van ondiepe bodemenergie is mogelijk met open en gesloten bodemenergiesystemen[2]. Met open bodemenergiesystemen wordt grondwater opgepompt en, nadat er warmte of koude aan is onttrokken, weer teruggebracht. Bij gesloten bodemenergiesystemen wordt een bodemwarmtewisselaar in de bodem gebracht. Hier wordt dus geen water rondgepompt. Open bronsystemen voor warmte-koudeopslag (WKO-systemen) zijn geschikt voor relatief grote vermogens (gemiddeld 150 kW). Daarom vinden WKO-systemen veel toepassing in utiliteitsgebouwen en - m.b.v. een warmtenet - in collectieve woningbouwprojecten. Gesloten systemen worden vooral toegepast voor kleinere vermogens, bijvoorbeeld voor individuele woningen. Een derde categorie bodemenergiesystemen maakt gebruik van warmteopslag op midden- of hogere temperaturen (MTO/HTO). Dit

[1] *www.cbs.nl*
[2] *Wko 3x beter; beter bedenken, beter bouwen en beter beheren, Lente Akkoord, augustus 2013*

onderzoeksproject legt de focus op open WKO-systemen; de onderzoeksresultaten zijn echter ook toepasbaar voor gesloten systemen en MTO/HTO.

2.2 Probleemstelling

Terwijl in toenemende mate gebruik gemaakt wordt van bodemenergiesystemen, met name warmte- en koudeopslagsystemen (WKO), blijken niet alle systemen naar behoren te functioneren. In deze onderzoeken beschreven belangrijke oorzaken zijn 1) niet goed ontworpen WKO-systemen door onvoldoende kennis over de werkelijke warmte-koude situatie in de ondergrond, 2) gebrek aan goede methoden voor het integraal monitoren van de energiebalans en energieprestaties van WKO-systemen in relatie tot de warmte- en koudevraag in de gebouwen die zij verwarmen en koelen, 3) niet optimaal onderhouden WKO-systemen door onvoldoende zicht op de onderhoudsbehoefte en hoge onderhoudskosten en 4) slecht ingeregelde WKO-systemen door onvoldoende prestatie- en monitoringafspraken tussen leverancier en exploitant.

Deze problemen bestaan voor enkelvoudige WKO-systemen. Voor interacterende WKO-systemen en collectieve WKO-systemen is het gebrek aan inzicht en monitoringmogelijkheden vanwege het risico op interferentie tussen de warmte- en koudebronnen van verschillende systemen nog problematischer.

Probleemeigenaren

Deze problemen spelen bij diverse partijen in de keten van betrokkenen bij totstandkoming tot beheer van WKO-systemen parten. De **bevoegde overheden**, provincies vanuit de Waterwet en gemeenten vanuit de Wet Milieubeheer, streven naar doelmatig grondwatergebruik en goed gebruik van het energiepotentieel in de gebieden waarvoor zij verantwoordelijk zijn. Bij vergunningverlening blijkt dat initiatiefnemers door onvoldoende inzicht over de huidige en toekomstige energiebalans een overgedimensioneerde grondwaterclaim doen; een factor vier te veel komt voor. In de huidige praktijk ligt de grondwaterclaim daarna vast; ook als de initiatiefnemer deze niet, deels of niet optimaal benut kan zijn (toekomstige) buurman hierop geen aanspraak meer maken, wat een suboptimale verdeling van het energiepotentieel betekent. Ook leidt dit tot druk om niet alleen het eerste maar ook de overige watervoerende pakketten te benutten voor WKO-systemen, wat bevoegde gezagen zorgen baart vanwege mogelijke grondwaterverontreiniging of interactie met andere grondwaterfuncties zoals drinkwaterwinning

Voor **initiatiefnemers** van WKO-systemen en hun **adviseurs** leidt het gebrek aan inzicht in de bestaande en zich ontwikkelende energiebalans tot overmatige grondwaterclaims en onzekerheid over de dichtheid aan WKO-systemen die in een specifiek gebied mogelijk is; daardoor kunnen in drukke gebieden minder WKO's worden toegepast dan gewenst. Realistische simulatiemodellen in de ontwerpfase en energiebalansmonitoring in de beheerfase zouden een betere verdichting mogelijk maken. Een ander ontwerpprobleem is de locatiekeuze van de bronsystemen. In de ontwerpfase werken adviseurs met theoretische rekenmodellen die niet met werkelijke meetgegevens zijn gevalideerd en derhalve een beperkte voorspellende waarde hebben. Wat er vervolgens tijdens exploitatie van het systeem werkelijk in de loop van de tijd gebeurt met het warmte- en koudepotentieel rond de doubletten is onbekend; een instrument voor energiebalansmonitoring bestaat nog niet.

Ook **exploitanten** en **beheerders** van WKO-systemen hebben behoefte aan kennis over en inzicht in de zich ontwikkelende energiebalans en energieprestaties van WKO-systemen. Onvoldoende inzicht in de ondergrondse energiebalans betekent onvoldoende zicht op de noodzaak tot, mogelijkheden voor en effecten van regeneratie van het warmte- of koudepotentieel in de bodem. Beschikbare methoden om energieprestaties van WKO-systeem te monitoren zijn onvoldoende effectief om goed beheer en goede prestatieafspraken te borgen. In principe geeft monitoring van de temperaturen van de bronsysteemfilters een goede indicatie van het functioneren van het

systeem als geheel en is daarom van groot belang. Echter, het is gebruikelijk om enkele peilbuizen aan te leggen bij de doubletten en daarin op een vaste diepte temperaturen te meten. Deze wettelijk verplichte werkwijze is onvoldoende effectief in de zin dat deze weinig inzicht biedt in de werkelijke situatie in de ondergrond: ten eerste zijn temperatuurwisselingen niet continu te volgen, ten tweede geven de metingen een beeld van de temperatuur op slechts één punt in plaats van over de gehele diepte van het bronsysteem.

Een andere belangrijke onzekere factor in de beheerfase is het **onderhoud** van het bronsysteem. Er zijn geen indicatoren, die de noodzaak tot onderhoud van de bronfilters voorspellen; kennis hierover ontbreekt. Een fundamentele onderzoeksvraag is of onverwachte temperatuurwisselingen rond de filters een indicatie zijn van verstopping van de filters; indien ja dan zou men de onderhoudsbehoefte van het bronsysteem kunnen voorspellen zodat onderhoud tijdig, planmatig, locatiegericht en kostenefficiënt kan plaatsvinden. Bovendien krijgt het WKO-systeem dan een beter rendement doordat de filters goed werken en het systeem niet hoeft te worden stilgelegd

Dit alles heeft nadelige gevolgen voor de **eindgebruikers** van WKO-systemen. Suboptimale ontwerpen door gebrek aan realistische modellen voor simulatie van de energiebalans van WKO-systemen en slecht beheer door gebrek aan een betaalbaar monitoringinstrument dat voldoende inzicht biedt in de energieprestaties van WKO-systemen zorgen voor hogere gebruikskosten en lager gebruikscomfort dan berekend.

Samengevat zijn de gevolgen van onvoldoende kennis over en inzicht in de energiebalans en –prestaties van WKO-systemen a) hogere energielasten dan geprognotiseerd voor de exploitant, eigenaar en/of huurder, b) interferentierisico doordat warmte- en koudebronnen van naastgelegen WKO-systemen elkaar beïnvloeden met als gevolg lagere energieprestaties door een verstoorde energiebalans, c) onnodig grote grondwaterclaims om voldoende warmte/koudepotentieel in de toekomst zeker te stellen waardoor nieuwe WKO-initiatieven op belendende percelen worden belemmerd.

Oplossingsrichting

Glasvezel-DTS biedt de mogelijkheid om veranderende temperatuurprofielen in de ondergrond te volgen over de gehele diepte van het bronsysteem, en in een gebied. Hierdoor ontstaat de mogelijkheden om:

- Inzicht te krijgen in hoe de energiebalans zich in de loop der jaren ontwikkelt, zeer belangrijk in een gebied waar verschillende WKO-systemen elkaar mogelijk beïnvloeden.
- Vroegtijdig interferentieproblemen en onbalans te signaleren en om de effecten van regeneratiemaatregelen volgen.
- Theoretische simulatiemodellen te valideren en een hogere voorspellende waarde te geven. Dit bevordert correcte grondwaterclaims, doelmatig grondwatergebruik en een betere benutting van het bodemenergiepotentieel.
- Te onderzoeken of de temperatuurmetingen een indicator vormen voor het voorspellen van de onderhoudsbehoefte van het bronsysteem.
- Te onderzoeken of opdrachtgevers, leveranciers, exploitanten en gebruikers betere afspraken over energieprestaties en risicoverdeling kunnen maken als zij inzicht hebben in het verloop van de energiebalans in de bodem gedurende de jaren dat het systeem wordt geëxploiteerd.

Glasvezel-DTS

Fibre Optic Spatially Distributed Temperature Sensing of te wel glasvezel-DTS is afkomstig uit de olie- en gaswinning. Een laserstraal wordt de glasvezelkabel ingezonden. Het verschil in brekingsindex tussen de kern en mantel van de glasvezelkabel maakt het mogelijk uit het gereflecteerde licht de temperaturen in de glasvezelkabel

af te leiden[3]. Op basis van de bekende lichtsnelheid en de verstreken tijd tussen laserpuls en reflectie kan bovendien de positie van het teruggekaatste temperatuursignaal langs de glasvezelkabel worden vastgesteld. Om de met glasvezel gemeten temperatuurwaarden te ijken zijn in elk meetnet platina (Pt100) temperatuursensoren ingebouwd.

Consortium

Het realiseren van een WKO-systeem kent verschillende fasen: ontwerp (concept ontwerp, definitief ontwerp), vergunningaanvraag, realisatie en beheerfase. Het onderzoek is uitgevoerd door een consortium, waarin deze fasen vertegenwoordigd zijn. Bestaande uit de kennisinstellingen Deltares, Universiteit Utrecht en het Utrecht Sustainability Institute, ingenieursbureau Royal HaskoningDHV, de bedrijven BAM Techniek, Priva, CMS Derks Star Busmann, a.s.r. en Park Strijp Energy en de Gemeente Utrecht.

[3] *G. Brown, Downhole Temperatures from Optical Fiber, Oilfield Review, 2008: 20, no.4*

3 Doelstelling

Doelstelling
Onderzoeken van de mogelijkheden van glasvezeltechnologie voor 'spatially distributed temperature sensing' (glasvezel-DTS) voor bewaking van de ondergrondse energiebalans bij bestaande en nieuwe bodemenergiesystemen, individueel maar ook op gebiedsniveau.

Het beoogde effect zijn doelmatige en efficiënte bodemenergiesystemen, die alle spelers in de keten van initiatiefnemer tot eindgebruiker een optimaal rendement bieden en voldoen aan de eisen van de bevoegde overheden. Doelmatig in de zin dat correct gebruik van het bodemenergiepotentieel en grondwater wordt gemaakt; efficiënt in de zin dat de energetische rendementen van bodemenergiesystemen toenemen terwijl de onderhoudskosten afnemen.

Subdoelen
1. Valideren en verbeteren van theoretische simulatiemodellen van de energiebalans van bodemenergiesystemen (werkpakket 1).
2. Ontwikkelen van een integraal monitoringssysteem voor de bewaking en verbetering van de energieprestaties van het WKO-systeem (zowel bovengrondse als ondergrondse installatie) in de beheerfase van het systeem (werkpakket 2).
3. Onderzoek naar een algoritme dat met behulp van de het temperatuurprofiel van een WKO-bron en gemeten met glasvezel-DTS de onderhoudsbehoefte van een bronsysteem voorspelt (werkpakket 3).
4. Juridische borging van een beheerprotocol met daarin energieprestatie-afspraken (werkpakket 4).
5. Kennisborging, doorwerking en projectcommunicatie (werkpakket 5).

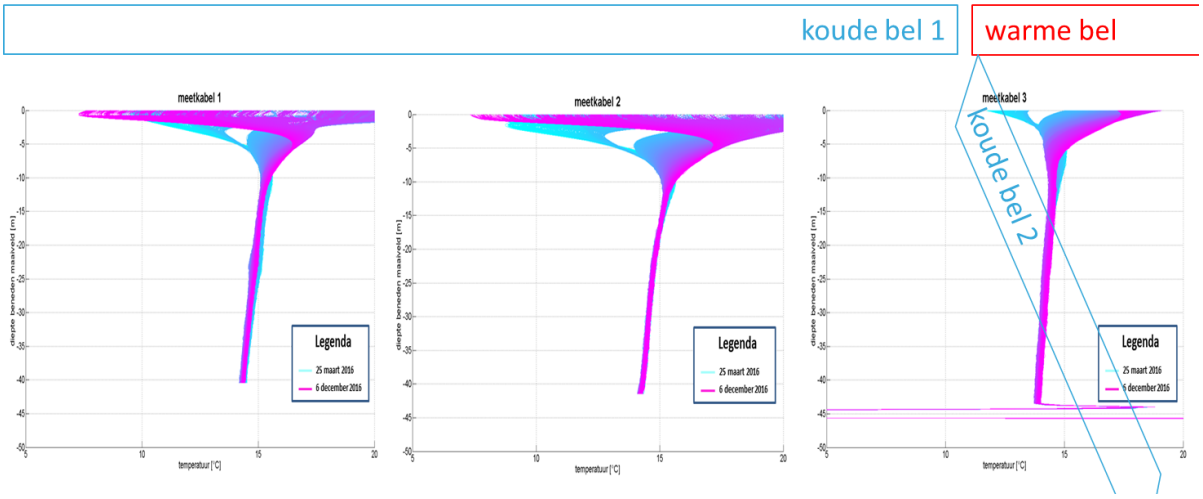
4 Resultaten en knelpunten

4.1 Validatie van theoretische simulatiemodellen (werkpakket 1)

4.1.1 Resultaten

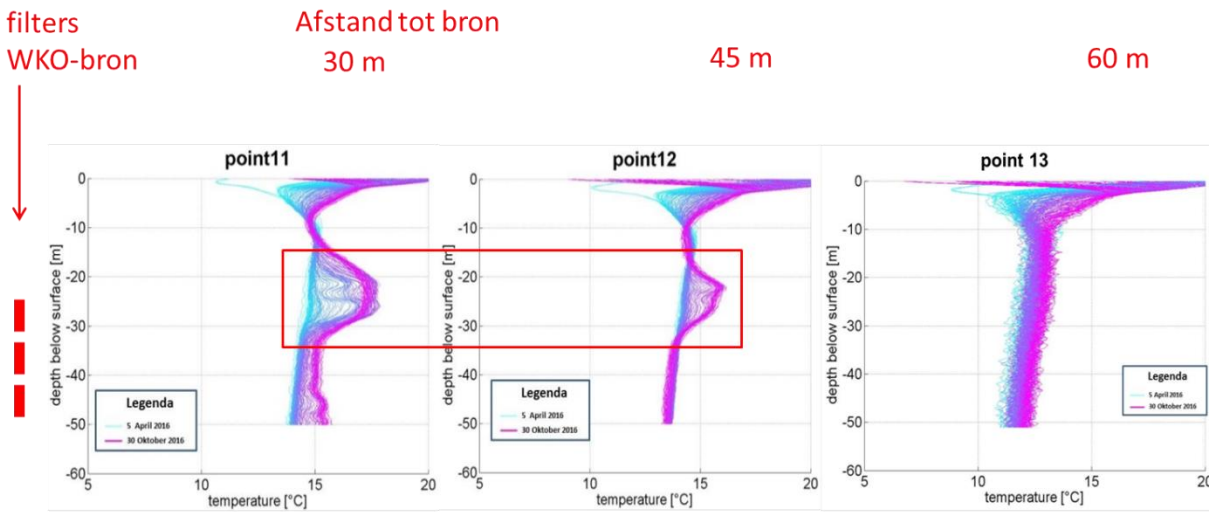
Ten aanzien van het doelmatig gebruik van de ondergrond, is door FOME-BES:

1 De onderbenutting van WKO's direct zichtbaar gemaakt (Figuur 4.1). De theorie/vergunning toont aan dat het druk is in de ondergrond, terwijl in de praktijk de ondergrond minder benut is. Dit bevestigt de strategie om bij de aanleg te overdimensioneren en meerdere veiligheidsmarges in te bouwen. De onderbenutting van de bemeten WKO-systemen kan ook op basis van gegevens uit het GBS worden vastgesteld. De glasvezelmetingen bieden wel een visueel aansprekende en mogelijk toegankelijkere manier om onderbenutting aan te tonen. Verder bieden de metingen inzicht in de beïnvloeding rond individuele WKO-bronnen, waarvan de debieten niet standaard afzonderlijk worden geregistreerd in het GBS. Ook kan de invloed van externe invloeden zoals bouwputbemalingen worden gedetecteerd. Dergelijke invloeden worden niet opgemerkt door het GBS.



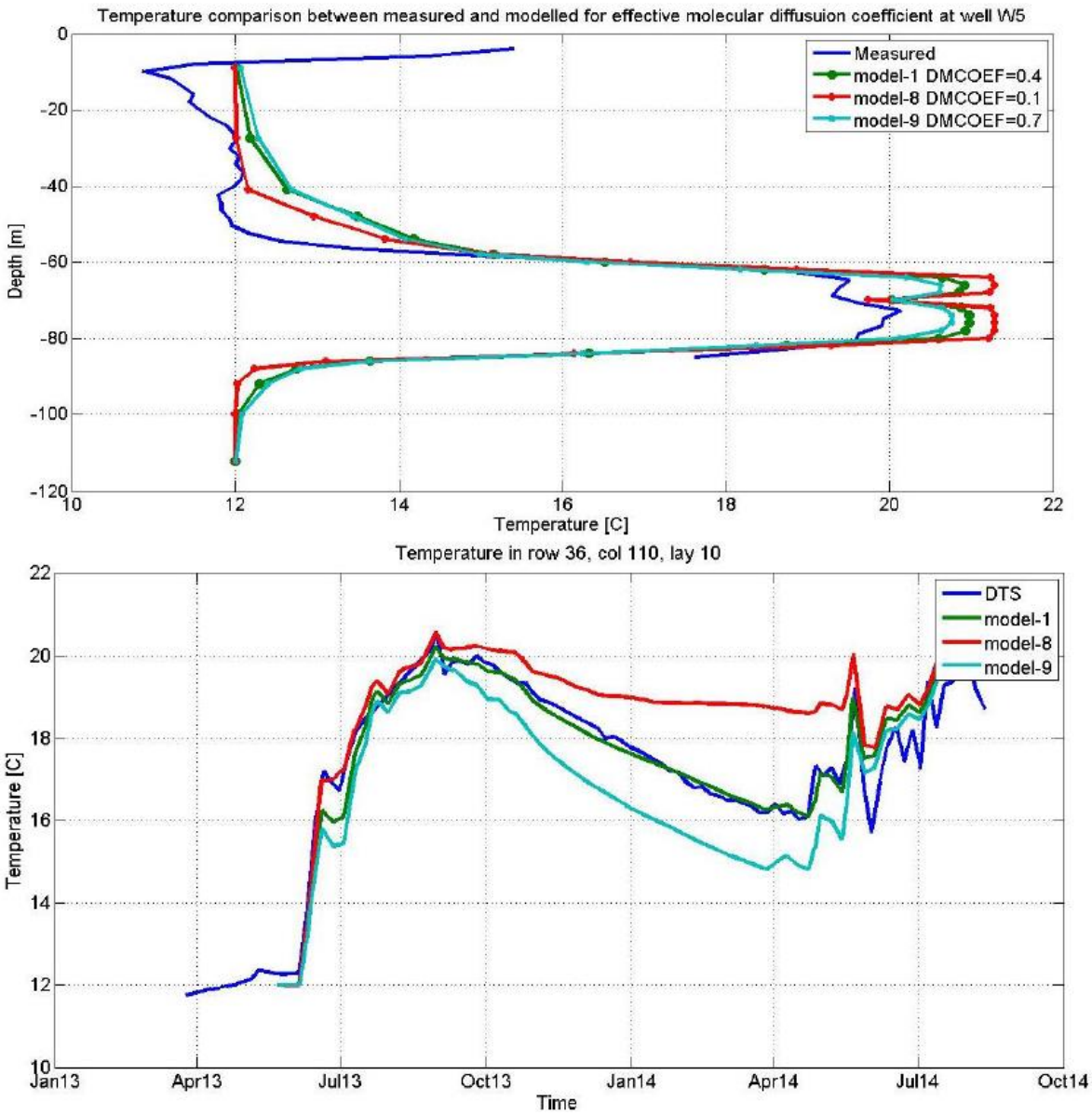
Figuur 4.1. Bodemtemperatuurprofielen gemeten in Utrecht Stationsgebied. Tussen maart en december 2016 zijn geen effecten op de temperatuur waargenomen in de meetpunten die op papier in de tehrmische invloedsgebieden van nabije WKO-systemen liggen.

2 De invloed van heterogeniteit op thermische invloedsgebieden van WKO's aangetoond. Deze is significant en blijft niet beperkt tot de randen van de invloedsgebieden. Bij de onderzochte WKO's leidt dit niet tot interferentie omdat er sprake is van onderbenutting of van losstaande WKO-systemen. De aangetoonde heterogeniteit kan in gebieden met veel WKO-systemen de kans op interferentie doen toenemen: hetzelfde volume wordt geïnjecteerd over een geringer dieptebereik.



Figuur 4.2. Hogere bodemtemperaturen als gevolg van warmte-injectie door de WKO beperken zich tot het dieptebereik 20 tot 30 m – mv, bij een injectiefilterstelling van 20 tot meer dan 40 m – mv.

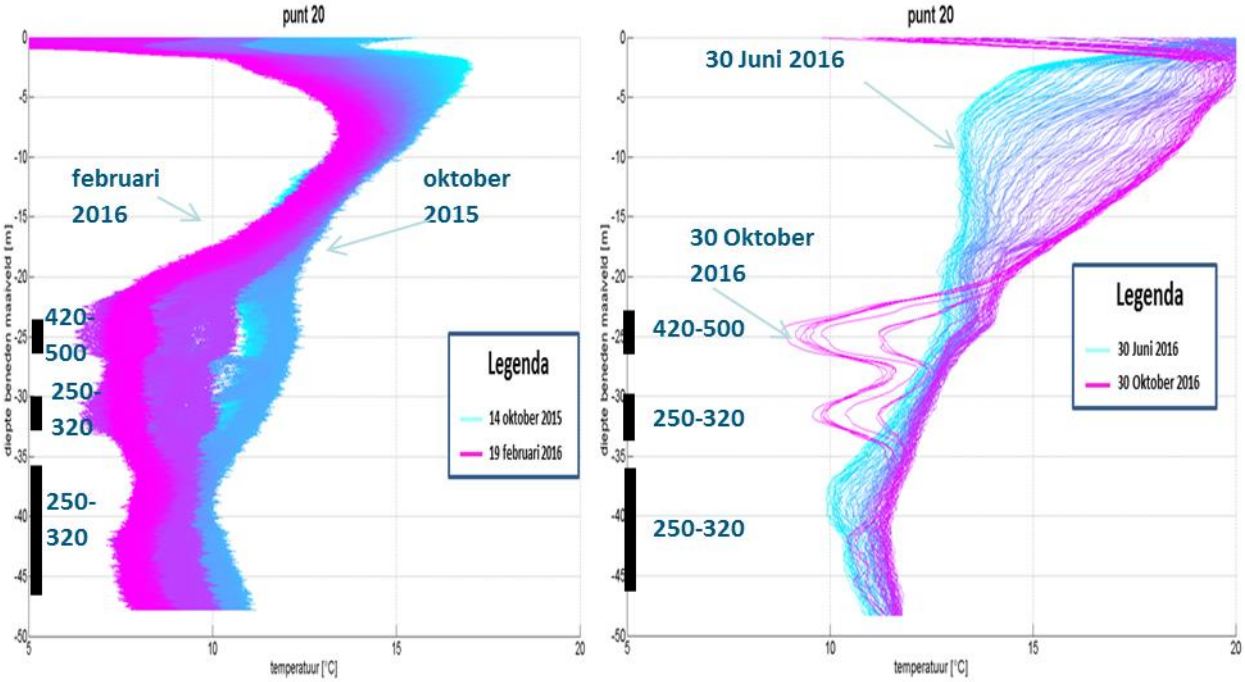
3 Aangetoond is dat de onzekerheid van invloedrijke bodemparameters (met name de porositeit en de warmtediffusiecoëfficiënt) verkleind kan worden door kalibratie van theoretische modellen op de temperatuurmetingen.



Figuur 4.3 Vergelijking tussen glasvezeltemeparatuurmetingen en modelresultaten met verschillende waarden voor de warmtediffusiecoëfficiënt. Een warmtediffusiecoëfficiënt van 0.4 blijkt de beste resultaten te geven. Bron: Pande (2015).

Ten aanzien van de efficiëntie van bodemenergie systemen, is door FOME-BES

1 Het afwijkende gedrag van warmte en koude rond de bronfilters in beeld gebracht.



Figuur 4.4 Gemeten bodemtemperatuurprofielen, winter 2015/2016 en zomer 2016, meetlocatie op circa 4 m afstand van een WKO-koudebron. Zwart: filterstelling en zandmediaan (in µm) uit de boorbeschrijving van de betreffende bron. Injectie van koude vindt gelijkmatig over het filtertraject plaats (links), maar na onttrekking blijkt onderin meer koude te zitten dan bovenin (rechts).

4.1.2 Knelpunten

- Watergangen, eigendomsgrenzen, verharde wegen en de aanwezigheid van kabels en leidingen legden ruimtelijke beperkingen op, waardoor (enigszins) suboptimale meetnetconfiguraties ontstonden. Dergelijke beperkingen zijn alleen tegen aanzienlijke meerkosten op te heffen, en het is dan een locatie specifieke afweging of de extra gegevens deze meerkosten rechtvaardigen. Op de FOME-BES-meetlocaties is steeds gekozen om binnen de ruimtelijke beperkingen aan te leggen en de suboptimale situatie te accepteren. Een uitzondering is Utrecht Stationsgebied. Daar zijn kabels, leidingen en verhardingen zo alomtegenwoordig dat kostbare maatregelen met de toenmalige stand der techniek onontkoombaar waren om een meetnet van acceptabele omvang te realiseren. Sindsdien is het financieel haalbaarder geworden om meerdere beamers / units te installeren, met kleinere, minder kwetsbare horizontale kabelcircuits en minder noodzaak om barrières met kostbare maatregelen over te steken.
- Op de meetlocatie Utrecht Rijnsweerd is enkele malen schade aan de meetopstelling ontstaan door kabelbreuken als gevolg van bouw- en maaiactiviteiten. De bouwactiviteiten waren al gaande tijdens de aanleg van het meetnet, en incidentele schade was dan ook ingecalculeerd, te meer omdat het niet overal mogelijk bleek om de horizontale verbindingen tussen de meetkabels ondergronds aan te leggen. Het aantal malen schade viel echter hoger uit dan verwacht. Na het plaatsen van waarschuwingsbordjes is er geen maaischade meer opgetreden.
- De meetapparatuur bleek na stroomstoringen niet altijd weer correct op te starten. Daardoor zijn enkele malen gaten in de meetreeksen ontstaan.
- In het Stationsgebied van Utrecht zijn veel bouwactiviteiten gaande. De aanleg van het meetnet moest worden ingepast in de planning van deze activiteiten, inclusief verkeersafzettingen, communicatie met de omgeving, en veiligheidsmaatregelen. Dit heeft geleid tot aanzienlijke vertraging en extra kosten bij de aanleg op deze meetlocatie.

4.2 Integraal monitoringinstrument energiebalans en -prestaties (werkpakket 2)

Werkpakket 2 heeft zich gericht op het ontwikkelen van een integraal monitoringsinstrument dat informatie van de ondergrondse installatie en die van de bovengrondse installatie samenbrengt. De meetdata van de gebouwenbeheerssystemen van de WKO-installaties van Deltares te Delft en a.s.r. te Utrecht heeft geleid tot de opzet van enkele dashboards waarin het functioneren van de installaties in een aantal grafieken is samengebracht, zodat in een oogopslag kan worden beoordeeld of de WKO-installatie naar behoren functioneert.

4.2.1 Resultaten

Het functioneren van de warme en koude bronnen in een WKO systeem, is sterk gerelateerd aan het functioneren van de 'bovengrondse' installatie. Door glasvezelmonitoring is niet alleen aangetoond dat de watertemperaturen onder de grond causaal gerelateerd zijn aan het laden en ontladen van de bronnen, maar ook dat de brontemperaturen zijn gerelateerd aan de rendementen van de aanwezige warmtepompen. Dezelfde causale relaties zijn eveneens zichtbaar bij foutief/ongewenst gedrag van de bronnen, de bronwisselaar en de warmtepompen. Hiermee is vastgesteld dat het functioneren van deze installatieonderdelen vanuit hun integrale werking dient te worden beoordeeld, dus op het systeemniveau. Centraal in de beoordeling van de performance op systeemniveau zijn de volgende 3 Kritische Proces Indicatoren (KPI's):

1. Aquiferflow, debiet tussen de warme en koude bronnen;
2. Retourtemperatuur bij het verwarmen van het gebouw;
3. Retourtemperatuur bij het koelen van het gebouw.

Operationele regeltechniek vraagt metingen op minuutbasis en ook directe relaties tussen meting en sturing, terwijl het DTS een resolutie heeft van meerdere uren en reactietijden van enkele dagen. Om deze reden kon in de KPI's geen glasvezelmonitoring worden toegepast. Om de dezelfde reden kunnen geen (meet – en regeltechnische) onderdelen worden vermeden bij de toepassing van glasvezel DTS.

Verder is theoretisch aangetoond dat de efficiency van het WKO systeem, uitgedrukt als elektriciteitsverbruik in relatie met hoeveelheid warmte en koude die in de bronnen kan worden opgeslagen, sterk gerelateerd is aan de hierboven genoemde 3 KPI's.

Bij de vertaling van deze drie KPI-gerelateerde beoordeling naar de praktijk op basis van de meetdata, de installatieschema's en de ontwerpwaarden voor het Deltares- en het a.s.r.-gebouw is gebleken dat de volgende aandachtspunten van belang zijn:

- Timing van de meetdata:
    - Een meetinterval van 8 minuten voor de 'bovengrondse' installaties lijkt soms te lang om het functioneren te beoordelen. Met name de reactietijd van de warmtepompen ligt ruim binnen dit tijdinterval;
    - Een meetinterval van 8 uur voor de DTS-data bemoeilijkt het vaststellen van de causale relatie tussen het 'ondergrondse' en 'bovengrondse' gedeelte van het WKO-systeem;
- Ontbreken van meetgegevens:
    - In de set meetwaarden voor zowel het Deltares- als het a.s.r.-gebouw ontbreken metingen die van belang zijn om de prestaties van de WKO-installatie vast te stellen. Dit is ondervangen door de modelmatige oplossing.

Bovenstaande aandachtspunten zijn meegenomen door enerzijds toepassing van een modelgebaseerde aanpak (grey-box methodiek, waarbij de veronderstelde relaties als uitgangspunt worden genomen) in combinatie met ontwerpwaarden. Deze model-gebaseerde aanpak is alleen toegepast bij de analyse van de relaties tussen de onderdelen van het WKO-systeem. Bij de uiteindelijke visualisatie van het functioneren zijn geen modelmatige waarden gebruikt, maar metingen die wél beschikbaar zijn.

Bij de visualisatie van het functioneren van het WKO systeem in een dashboard is gekozen voor een vorm die enerzijds het centrale doel van het project meeneemt en anderzijds eenvoudig toegankelijk zonder veel voorkennis van de specifieke installatie:

- Bij opstellen van een dashboard is gefocust op de uiteindelijk voor het project meest relevante resultaat namelijk de voorraad warmte en koude in de bronnen gerepresenteerd als de ingaande temperaturen van de warme en koude bronnen bij respectievelijke het laden en ontladen van warmte en koude. Uiteraard spelen de 3 hierboven genoemde KPI's een belangrijke rol bij het tot stand komen van deze resulterende brontemperaturen.
- Verder is het verband tussen deze ingaande brontemperaturen en de retourtemperatuur bij het verwarmen en koelen van het gebouw meegenomen door deze ingaande temperaturen in een dashboard weer te geven als functie van de buitentemperatuur.

Bovengenoemd dashboard is bruikbaar als een *first-line-of-defense* mechanisme dat kan worden gebruikt bij detectie van afwijkingen. De 3 KPI's ondersteunen het opsporen van mogelijke oorzaken van deze afwijkingen.

De causale relaties tussen de diverse installatie-onderdelen, zowel bij normaal bedrijf als bij foutief/ongewenst bedrijf is vastgesteld in een aantal analyses:

- Een grafiek-gebaseerde analyse laat zien dat er een relatie is tussen de verhouding tussen de debieten aan beide zijden ('bovengrondse' en 'ondergrondse' zijde) van de bronwisselaar enerzijds en de rendementen van de warmtepompen anderzijds. Dit betekent dat de *KPI: aquifer flow* gerelateerd is aan de rendementen van de warmtepompen;
- De ingaande temperatuur van de verdamper van iedere warmtepomp is gerelateerd aan het rendement van deze warmtepomp. Hiermee is tevens aangetoond dat zowel de temperatuur uit de warme bronnen als (zowel direct als indirect) de *KPI: retourtemperatuur uit het gebouw tijdens koeling* het rendement van de warmtepompen beïnvloedt;
- In zowel het Deltares- als het a.s.r.-gebouw treden situaties op die afwijkend zijn, maar niet per definitie foutief of ongewenst. Voorbeelden zijn koeling, laden van warme bronnen, in de winter en aanvullende koeling met de warmtepomp(en) in de zomer. Normaal gesproken zouden beide situaties niet nodig dienen te zijn, maar mogelijk is koeling in de winter toegepast om de warme bronnen extra te laden en aanvullende koeling door warmtepompen in de zomer bij een relatief hoge koudevraag door het gebouw. Analyse toont aan dat beide afwijkende situaties naast de genoemde voordelige effecten ook nadelig zijn voor het rendement van de warmtepompen en de laadtemperaturen van de bronnen;
- Bij de installaties van zowel het Deltares- als het a.s.r.-gebouw is er sprake van 'kortsluiting' tussen warme en koude bronnen, met andere woorden een uitwisseling tussen warme en koude bronnen zonder warmteuitwisseling via de warmtewisselaar. Direct ongewenst gevolg hiervan is het koelen van de warme bronnen en opwarmen van de koude bronnen. Goede detectie van deze kritische situaties vraagt om meten van:
    - Intredetemperatuur warmtewisselaar bodemzijde;
    - Uittredetemperatuur warmtewisselaar bodemzijde;

- Intredetemperatuur warmtewisselaar gebouwzijde;
- Uittredetemperatuur warmtewisselaar gebouwzijde;
- Debiet warmtewisselaar bodemzijde;
- Debiet warmtewisselaar gebouwzijde.

Het aanbevolen tijdsinterval voor bovenstaande metingen is vijf minuten.

Bestaande monitoring systemen voor WKO systemen zijn vaak complex, hebben veel data nodig, vaak over een langere tijd gemeten, en vragen ook veel voorkennis om te installeren en configureren. Dit rapport introduceert een monitoring systeem in de vorm van een dashboard met hierin een beperkte set metingen, die het mogelijk maakt om snel en zonder veel voorwerk en voorkennis afwijkend / ongewenst gedrag van het WKO-systeem op te sporen.

Op basis van het onderzoek naar de samenhang tussen de onder- en bovengrondse systemen lijkt de meerwaarde van de glasvezelmetingen te vinden op het tactische en strategische vlak. Deze zijn:

- Controle van de status in de opstartfase;
- Het tijdig constateren van uitputting van een bron;
- Het vaststellen van afwijkingen van homogeniteit van de energievoorraad in de bodem die een rol speelt bij het ontladen van deze energie;
- Het tijdig constateren van interferentie van bodemsystemen.

Bovenstaande inzichten kunnen worden meegenomen bij het nemen van besluiten op tactisch en strategisch niveau.

Het dashboard is gericht op het operationele functioneren van de WKO-installatie via het GBS. De focus van het huidige dashboard is detectie van niet gewenste situaties. Voor verdere analyse van gedetecteerde afwijkende situaties is nu nog een deskundige nodig. Een volgende stap is het automatiseren van de beoordeling, bijvoorbeeld met behulp van machine learning.

Het ontwikkelen van een tactisch, strategisch adviessysteem voor eindgebruikers op basis van glasvezelmetingen. Hierbij gaat het om maatregelen die ingrijpen op de bedrijfsvoering van het GBS. Bijvoorbeeld een aanpassing in de koelstrategie in het GBS voor een effectievere verdeling van een beperkte voorraad resterende koude energie door tijdige constatering hiervan.

4.2.2 Knelpunten

1. De analyse van het samenbrengen van de glasvezelmetingen en de GBS-data levert niet die informatie op die nodig is binnen de operationele regeltechniek. Operationele regeltechniek vraagt metingen op basis van vijf minuten en ook directe relaties tussen meting en sturing, terwijl het DTS een resolutie heeft van meerdere uren en reactietijden van enkele dagen. Hierdoor was het onderzoek naar de mogelijkheden om bepaalde onderdelen (zoals temperatuursensoren en drukopnemers) van een bronsysteem bij gebruik van glasvezel-DTS te vermijden weinig zinvol (onderzoeksvraag 2). Om toch de meerwaarde van het systeem te onderzoeken op tactisch en strategisch niveau is ingezoomd op de causale relatie tussen de onder- en de bovengrond.

2. In de meetsets van Deltares en a.s.r. ontbraken belangrijke metingen. Deze zijn door aanvullende modelering ingevuld. Dit was een noodzakelijke, maar ongeplande en niet in het oorspronkelijke onderzoeksplan opgenomen activiteit. Hierdoor kon geen specifiek onderzoek meer gedaan worden naar retrofitsituaties (onderzoeksvraag 3: het gebruiken van bestaande peilbuizen en observatiefilters om DTS aan te leggen) en naar de specificaties van de hardware (onderdeel onderzoeksvraag 4).

4.3 Algoritme voor de voorspelling onderhoudsbehoefte en verhoging rendement (werkpakket 3)

4.3.1 Resultaten

Door de toename van Warmte Koude Opslag (WKO)-systemen in zowel binnen- als buitenland, neemt ook de onderhoudsbehoefte van deze systemen toe. Continu inzicht in de prestatie van de bodemzijdige componenten van het energiesysteem, zou het mogelijk maken te bepalen wanneer er onderhoud nodig is. Dit inzicht zou ten goede komen aan de efficiëntie van het onderhoud van het energiesysteem. Glasvezel temperatuur monitoring met de DTS (Distributed Temperature Sensing) techniek is een veelbelovende techniek voor continue monitoring van de watertemperatuur binnen de bron en kan worden gebruikt voor het genereren van een stromingsprofiel. Door analyse van de stromingsprofielen in de tijd kan inzicht worden verkregen in het functioneren van de bron en zo zou de onderhoudsbehoefte van de bron kunnen worden bepaald.

Voor het bepalen van de conditie van een filter in bron, wordt veelal gebruik van een propeller flowmeter waarmee een stroomsnelheidsprofiel wordt gemeten. Dit is een ingrijpende en kostbare methode waarbij het meetinstrument naar de bodem van de bron wordt gelaten. Het WKO-systeem moet tijdelijk worden stilgelegd omdat de pomp in de bron moet worden gedemonteerd (figuur 4.5).

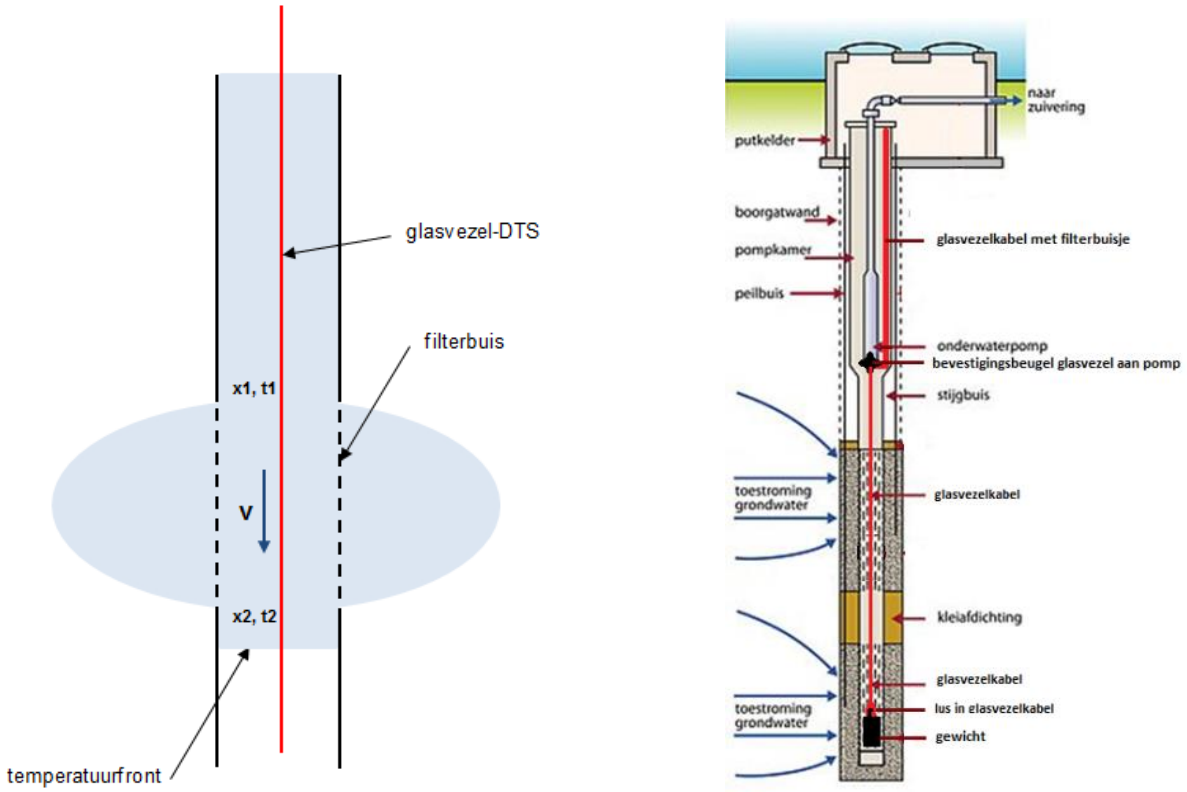
Glasvezel temperatuurmetingen met de DTS techniek biedt de mogelijkheid om continu, met een hoge frequentie in de tijd en met een hoge resolutie in de ruimte de temperatuur te meten over de gehele lengte van de glasvezelkabel. Wanneer de glasvezel geïnstalleerd wordt in een bron kan de temperatuur over de gehele diepte van de bron bepaald worden.

De belangrijkste vraag van dit onderzoek is: 'Kan glasvezel DTS worden gebruikt om op stroomsnelheden te bepalen en zo een uitspraak te doen over de onderhoudsbehoefte van de bron?'

Theorie: Actief en passief meten
De meetopstelling die in dit onderzoek is toegepast, maakt gebruik van een tweetal glasvezelkabels zodat zowel passief als actief stroming kan worden gemeten. De passieve methode is gebaseerd op temperatuurvariaties van het geïnjecteerde water. De actieve methode maakt gebruik van een elektrisch opgewekt temperatuurverschil.

Figuur 4.5: Installatie van de meetopstelling in injectiebron I-05 op onderzoekslocatie park Strijp-S Eindhoven.

Figuur 4.6: Constructie van de meetopstelling met passieve (onder) en actieve (boven) kabels uit elkaar gehouden op een vaste afstand van 40 [mm] door kunststof standhouders geplaats met een interval van 1 [m].



Figuur 4.7: Principe methodiek omzetting temperatuur- naar debietprofiel (l) en Meetopstelling omzetting temperatuur- naar debietprofiel (r).

Passief meten

De passieve methode maakt gebruik van een enkele glasvezelkabel (DAETWyler cable) (figuur 4.6) voor het meten van de watertemperatuur in de bron. Voor de omzetting van temperatuur naar stromingsdata wordt nuttig gebruik gemaakt van temperatuurvariaties in het geïnjecteerde water (in de orde van 1,5 °C) door te kijken naar de axiale verplaatsing van het temperatuurfront door de bron (figuur 4.7).

Actief meten

De actieve meetmethode maakt gebruik van een tweetal parallelle glasvezelkabels (figuur 4.6). Een van de glasvezels (Deltares TGG nr. 9565911 508M) is voorzien van een interne gevlochten stalen draden die aangesloten worden op een spanningsbron om zo de kabel op te warmen. Door de kabel op te warmen kan ook het langsstromende water worden opgewarmd. De opwarming van de kabel is afhankelijk van het langsstromende water. De kabels worden op een constante afstand van 40 mm gehouden om thermische interferentie tussen de kabels en contact met de bronwand te voorkomen.

De opstelling met twee kabels biedt de mogelijkheid om zowel passief als actief te meten, waarbij, tijdens opwarming, de passieve kabel de temperatuur van het langsstromende water registreert en bij de actieve kabel het omgevingssignaal als het op het verhoogde, actieve, signaal wordt gesuperponeerd zodat een differentieel temperatuurprofiel kan worden gemaakt die de invloed van de stroomsnelheid op de warmteafgifte van de actieve kabel laat zien. Omdat het temperatuurverschil tussen de actieve kabel en het omringende water een functie is van het vermogen van de omgeving om warmte af te voeren, is het theoretisch mogelijk om op basis van het differentieel temperatuurprofiel een stroomsnelheid af te leiden.

Onderzoek

De temperatuurmetingen zijn verricht in een operationele WKO-bron op Park Strijp-S in Eindhoven. De betreffende bron (I-05) is ingesteld voor constante injectie met een gemiddeld debiet van 40 m^3/h en heeft een totale diepte van 62,1 m, waarvan de onderste 25,4 m bestaat uit een filter.

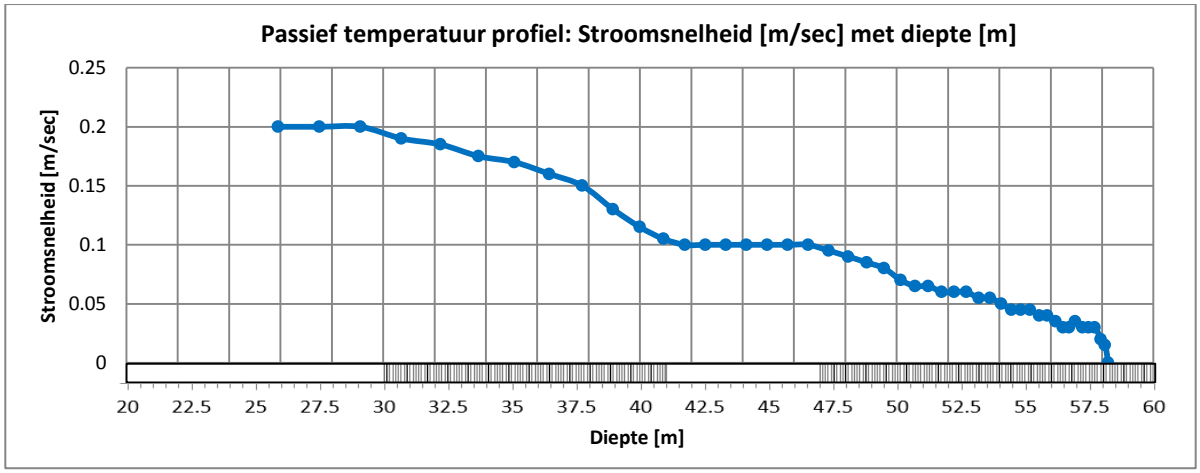
4.3.2 Resultaten

Aan de hand van een analyse van de passieve temperatuurprofielen, is een stromingsprofiel voor de bron afgeleid (figuur 4.8). Het stromingsprofiel laat grofweg een lineaire afname in de stroomsnelheid zien langs de filter delen voor diepten tussen 30 en 41 m beneden maaiveld (-mv) en tussen 47 en 60 m -mv. In het verbuisde deel tussen 41 en 47 m -mv diepte is de stroomsnelheid stabiel op circa 50 procent van de oorspronkelijke stroomsnelheid.

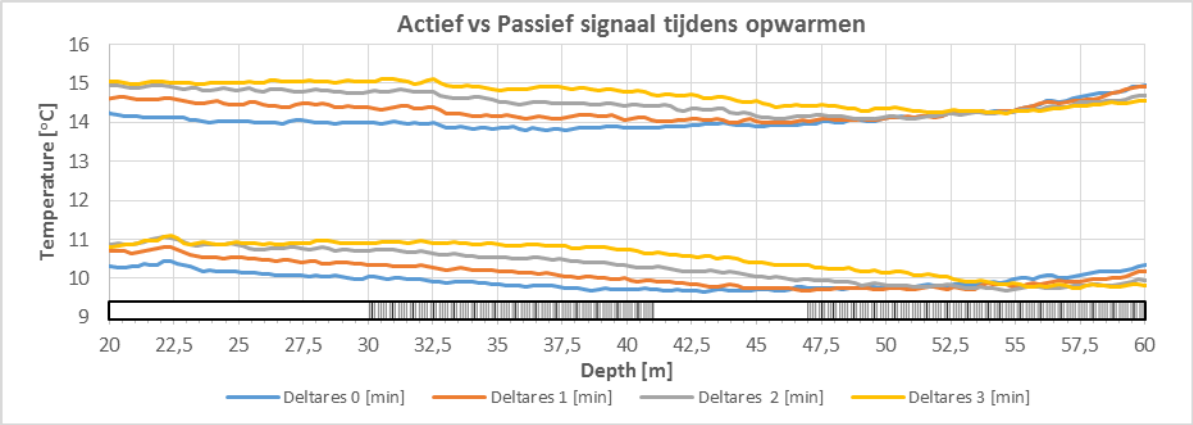
In het onderste deel van de bron is de nauwkeurigheid van de temperatuurdata lager. De stroomsnelheden zijn laag waardoor de temperatuurprofielen in de tijd dicht op elkaar staan. In combinatie met de lagere temperatuur nauwkeurigheid maakt dit het moeilijk stroomsnelheden af te leiden. Ondanks deze beperkingen komt het stromingsprofiel van het bovenste filterdeel toch nagenoeg perfect overeen met zowel het theoretische stromingsprofiel als de flowmeting die van tevoren is uitgevoerd door De Ruitergrondwatertechniek. Het profiel van het onderste filterdeel toont ook grote overeenkomsten met beide referentieprofielen, maar biedt niet dezelfde nauwkeurigheid.

De temperatuurprofielen verkregen uit het actieve opwarm-experiment laten een duidelijk verschil in temperatuur zien over de gehele lengte van de kabel (figuur 4.9). Dit toont aan dat het opwarmend vermogen van de actieve kabel in elk geval voldoende is om de kerntemperatuur van de kabel met een verschil van 4 °C te verhogen.
Door de temperaturen van beide kabels van elkaar af te trekken wordt een indruk verkregen van het verloop van het temperatuurverschil over de diepte van de bron. Het temperatuurverschil van 4 °C in de bovenste sectie van de bron komt goed overeen met de theorie en blijft nagenoeg stabiel tot een diepte van 40 m -mv.

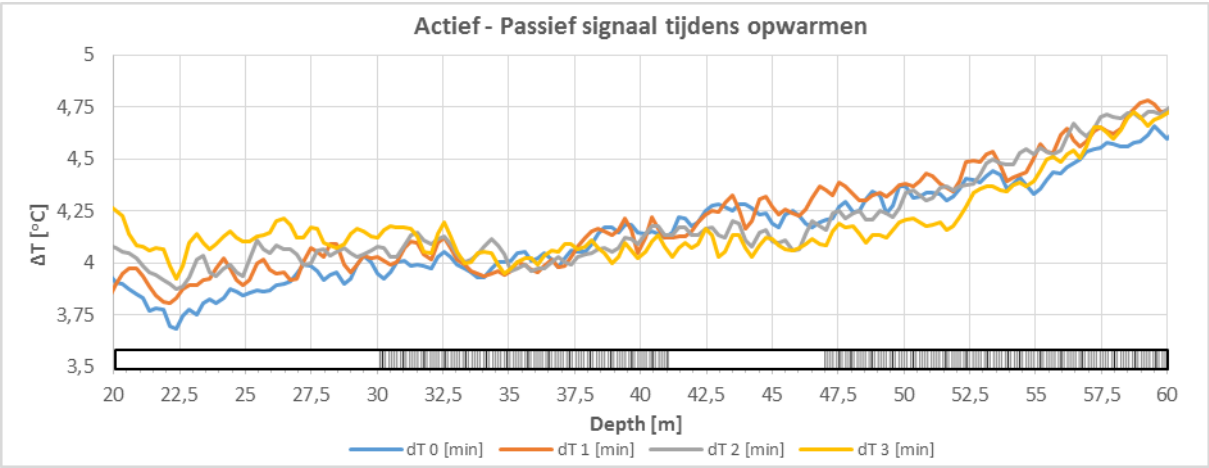
Het verloop in het onderste deel blijft achter bij het theoretisch berekende verschil, wat mogelijk te verklaren is door het beperkte opwarmend vermogen van de kabel (12 W/m). Het vermogen blijkt ontoereikend om het omringende water met een significant verschil op te warmen waardoor het temperatuurverschil voornamelijk wordt bepaald door de temperatuur van het langsstromende water, dan door de stroomsnelheid van het water. Er is wel een toename in ΔT te zien vanaf een diepte van 45 m -mv, wat duidt op een verminderde warmteafvoer wat gerelateerd kan worden aan de lagere stroomsnelheden onder in de bron (figuur 4.10).



Figuur 4.8: Gestileerde weergave van het stroomsnelheidsprofiel in de bron, afgeleid van passieve temperatuur metingen opgenomen door de DAETWyler kabel tijdens een passief temperatuur 'event' voor diepten tussen 20 [m] en 60 [m]. Een schematische weergave van de filterstilling is ingevoegd in de afbeelding met dichte delen in wit en gearceerde filter secties.



Figuur 4.9: Vergelijking van Passieve en Actieve temperatuurprofielen opgenomen met een interval van 1[min] tijdens het opwarm experiment op dieptes tussen 20 [m] en 60 [m]. De data is niet gecompenseerd voor een mogelijk verschil in responstijd tussen het signaal van beide kabels. Een schematische weergave van de filterstilling is ingevoegd in de afbeelding met dichte delen in wit en gearceerde filter secties.



Figuur 4.10: Differentiële temperatuur profielen op basis van Actieve en Passieve meetgegevens, gemeten met intervallen van 1 [min] op dieptes tussen 20 [m] en 60 [m]. Het passieve signaal is afgetrokken van het actieve signaal met als resultaat 4 temperatuur profielen die het relatieve temperatuurverschil met diepte tussen beide kabels laten zien. Een schematische weergave van de filterstilling is ingevoegd in de afbeelding met dichte delen in wit en gearceerde filter secties.

Conclusies

Uit het onderzoek van werkpakket 3 of glasvezel-DTS iets kan zeggen over de onderhoudsbehoefte en of de onderhoudsbehoefte van een WKO voorspeld kan worden kan het volgende geconcludeerd worden:

- Uit de deskstudie volgt dat het stroomprofiel over de filterlengte van de bron een indicator vormt voor verstopping en daarmee de onderhoudsbehoefte.
- Een temperatuurprofiel gemeten met glasvezel-DTS kan omgezet worden naar een stromingsprofiel over de lengte van het filter. Er kan met glasvezel-DTS en het gehanteerde meetprincipe een stromingsprofiel geconstrueerd worden zoals in de praktijk uitgevoerd bij de WKO van gebouw Strijp-S in Eindhoven. Het meetprincipe werkt zoals in theorie bedacht.
- Uit onderzoek en het experiment is gebleken dat het passief meten gebruikmakend van de axiale verplaatsing van het temperatuurfront in de bron de enige oplossing is om eventuele verstopping in de bron te meten.
- Het meetprincipe werkt in de praktijk zoals theoretisch bedacht. Echter de onnauwkeurigheid van de bepaling van de stroomsnelheid in de onderste gedeelten van de filters (bij lage snelheden) is groot. Dit is het gebied waar juist verstoppingen optreden.
- Tijdens het experiment is er geen verstopping opgetreden of was er geen trend te herkennen waarbij het stromingsprofiel veranderde. Er is dus geen onderhoudsbehoefte herkend in het experiment. Het zou ook een toevalstreffer zijn als dat zou zijn gebeurd.
- Het meetprincipe zoals hier toegepast is nog niet klaar om direct toe te passen. De nauwkeurigheid bij het meten van lage snelheden dient verhoogd te worden.
- Door het niet herkennen van een onderhoudsbehoefte tijdens het experiment kan er niet echt een algoritme beschreven worden. Het enige dat gedaan kan worden is regelmatig maandelijks met glasvezel-DTS een stromingsprofiel worden gemaakt. Deze kan dan vergeleken worden met het stromingsprofiel gemeten met de propellerflowmeting. In de loop van de tijd (jaren) kan hier misschien een trend worden herkend. Uit de trend zou dan een grenswaarde bepaald worden en als die wordt onder- of overschreden kan een alarm uit dat de bron gaat verstoppen.
- De investeringsindicatie voor een glasvezel-DTS was ten tijde van FOME-BES ongeveer € 40.000,-. Om dit binnen vijf jaar terug te verdienen (gangbaar in deze branche) zal € 8.000,- per jaar bespaard moeten

worden. Regulier onderhoud aan de WKO (bodemzijdig) kost in de regel minder dan € 8.000,- per jaar. De besparing kon ten tijde van FOME-BES dus niet uit, maar recente doorontwikkelingen van de laser beamer / uitlees unit, waardoor de aanschafprijs is afgenomen, bieden betere perspectieven.

- Bij voldoende nauwkeurigheid kan glasvezel-DTS met dit meetprincipe de volgende meerwaarde bieden:
    - Meer inzicht in de gezondheid van het systeem;
    - Het beter plannen van onderhoud, *predictive maintenance*;
    - Na de eerste flowmeting en implementatie van dit meetprincipe zijn er geen verdere kostbare propellerflowmetingen nodig tijdens exploitatie van een WKO. Dit resulteert uiteindelijk in goedkoper onderhoud;
    - Het werkelijke gemeten stromingsprofiel kan vergeleken worden met het ontwerp om zo betere ontwerpkeuzes (andere filterstellingen) te maken.

4.3.3 Knelpunten

Tijdens het uitvoeren van het project zijn er geen noemenswaardige technische problemen opgetreden. De dataverwerking was een tijdrovende klus maar heeft uiteindelijk tot resultaat geleid.

4.4 Juridisch geborgd model beheerprotocol en nieuw verdienmodel (werkpakket 4)

Resultaten

In dit onderzoek zijn de huidige beheerafspraken bekeken van de WKO Deltares (Delft), de WKO a.s.r. (Utrecht) en WKO Uithof (Utrecht). In de beheerafspraken van de drie onderzochte WKO's zijn er geen specifieke prestatie-indicatoren afgesproken en is er geen sprake van een risicoverdeling. De kostenverantwoordelijkheid ligt bij de eigenaar van de bron.

Op grond van de data die zijn verzameld middels DTS is gebleken dat DTS in zijn huidige vorm geen voordelen oplevert voor het voorspellen van de onderhoudsbehoefte. In de toekomst zal DTS wellicht voordelen voor partijen kunnen opleveren maar daar is verder onderzoek bij een duidelijke schakelende bron en doorontwikkeling voor nodig. Daarbij is dan de vraag of de meerkosten van DTS voordelen zullen opleveren boven de meet- en regelsystemen zoals die momenteel gebruikt worden. Het aangeven van de diepte van de verstopping zal in de praktijk slechts weinig voordeel opleveren aangezien de bron in zijn geheel doorgespoeld dient te worden, ongeacht op welke diepte de verstopping zich bevindt. Op grond van deze resultaten zijn er dan ook geen aanbevelingen om de contractuele verhoudingen met betrekking tot het onderhoud van WKO bronnen aan te passen. Wel dient opgemerkt te worden dat aan de hand van DTS meer inzicht verkregen kan worden in de beschikbaarheid van de bron door de onderhoudspartij.

Tevens is het ruimtegebruik van de WKO van a.s.r. en de gevolgen van negatieve interferentie onderzocht. In de directe omgeving van de WKO van a.s.r. zijn (vooralsnog) geen andere WKO's aanwezig, hetgeen naar verwachting tot gevolg zal hebben dat er geen interferentie problemen optreden als een nieuwe WKO wordt gevestigd nabij de WKO van a.s.r. Dit is niet specifiek onderzocht. Om negatieve interferentie zoveel mogelijk te voorkomen, worden vergunningen voor een WKO op grond van de waterwetregelgeving verleend volgens het principe 'wie het eerst komt, wie het eerst pompt' wat betekent dat nieuwe systemen zich moeten aanpassen aan reeds aanwezige systemen. Dit kan ongewenste effecten hebben op het gebruik van de grond. Om een duurzaam ruimtegebruik te bevorderen, heeft het bevoegd gezag derhalve meerdere maatregelen tot haar beschikking. Zo kan zij de WKO-vergunning intrekken voor zover de vergunde hoeveelheden in de vergunning niet worden benut. Ook kan zij voorschriften verbinden aan de vergunning, zodat een doelmatige behoefte aan warmte of koude wordt gegarandeerd. Deze maatregelen lijken vooralsnog niet nodig voor de locatie waar de WKO van a.s.r. is gesitueerd.

4.5 Communicatie en versterking Nederlandse kennispositie

Resultaten

Door het delen van de onderzoeksresultaten met kennisinstellingen, bedrijven en overheden versterken we de Nederlandse kennispositie. Hieronder volgt een overzicht van de gerealiseerde communicatie voor het project FOME-BES:

Gerealiseerde communicatieresultaten:

- Kennisdeling van projectdocumenten tussen project partners via Box (RH DHV).
- Website www.fomebes.nl
- nieuwsbrieven (2015-2016-2017) naar ruim 60 contacten (projectpartners en geïnteresseerden die zich hebben aangemeld voor de nieuwsbrief). Een laatste nieuwsbrief met alle projectresultaten wordt deze zomer verstuurd.
- Projectvideo in het Nederlands: https://www.youtube.com/watch?v=4tqkBdr7dro (ook beschikbaar op de website www.fomebes.nl). Engelse versie van de video: https://www.youtube.com/watch?v=7nc791-eTVM
- Diverse publicaties, zie lijst in hoofdstuk 8.
- Presentaties tijdens conferenties en deelname aan diverse evenementen, zie lijst hieronder.

Presentaties en deelname aan evenementen:

- Presentatie FOME-BES eindresultaten tijdens Maintenance for Energy Event bij a.s.r. in Utrecht – 22 juni 2017
- Presentatie FOME-BES resultaten tijdens Kennisbijeenkomst van Kennisplatform Bodemenergie bij Deltares in Utrecht – 31 mei 2017
- Excursie TU Delft Energy Club naar FOME-BES onderzoekslocatie a.s.r. in Utrecht – 24 april 2017
- Tour met toelichting demonstrator glasvezeltechnologie tijdens bijeenkomst in Utrecht van Europese districteigenaren uit het SSD netwerk – 27 oktober 2016
- Demonstratie glasvezeltechnologie tijdens Innovation Expo in Amsterdam – 14 april 2016
- Presentatie themabijeenkomst 'Efficiënt bodemgebruik & interferentie' van BodemenergieNL - 1 december 2015
- Presentatie symposium 'Infrastructure for Water & Energy' onderdeel van Delft Software Days 2015 - 5 november 2015
- Deelname aan de infomarkt tijdens de UU International Conference on Sustainability – 27 oktober 2015
- Presentatie en paneldiscussie tijdens 'New Energy Lab – Bodemenergie in Utrecht' – 7 oktober 2015
- Workshop 'Ondergrondse monitoring van WKO's in Utrecht' tijdens medewerkersdag DGMI – 30 juni 2015
- Workshop 'Duurzame innovatie – de kracht van de regio' tijdens Nationale Milieudag 2015 - 11 juni 2015
- Film a.s.r. tijdens Conferentie Duurzame Bedrijvigheid - 24 november 2014
- Presentatie 'Energiebalans en –prestaties van bodemenergiesystemen' tijdens SURE– 9 oktober 2014

Bereik

Bovenstaande communicatie-uitingen hebben geresulteerd in bekendheid van het FOME-BES onderzoek en de resultaten onder:

- Gemeenten, provincies en andere organisaties die regie voeren op de ondergrond
- Gebruikers en beheerders van WKO-systemen
- Bedrijven, overheden, instellingen en overige organisaties geïnteresseerd in WKO-toepassing
- Producenten en installateurs van bodemenergiesystemen (ingenieur tot beslisser)

- Wetenschappers en professionals op het gebied van bodem/bodemenergie/ bodemenergiesystemen (geologen, hydrologen etc), duurzame energie, asset management / onderhoud en milieu in brede zin

Op basis van de projectresultaten worden in de tweede helft van 2017 nog diverse publicaties verwacht. Ook wordt een laatste nieuwsbrief met de projectresultaten verstuurd. Daarnaast zullen de onderzoeksresultaten bij diverse conferenties en andere evenementen worden gedeeld. Deze activiteiten zijn ten tijde van het opstellen van de rapportage nog in voorbereiding.

5 Perspectief van de toepassing

Het beoogde effect van dit project was om bij te dragen aan een doelmatig en efficiënt gebruik van bodemenergiesystemen. Waarbij verschillende spelers in de keten van initiatiefnemer tot eindgebruiker een optimaal rendement hebben en voldoen aan de eisen van de bevoegde overheden. Doelmatig in de zin dat correct gebruik van het bodemenergiepotentieel en grondwater wordt gemaakt; efficiënt in de zin dat de energetische rendementen van bodemenergiesystemen toenemen terwijl de onderhoudskosten afnemen.

Ten aanzien van het doelmatig gebruik van de ondergrond, is door FOME-BES:

4 De onderbenutting van WKO's direct zichtbaar gemaakt. De theorie/vergunning toont aan dat het druk is in de ondergrond, terwijl in de praktijk de ondergrond minder benut is. Dit bevestigt de strategie om bij de aanleg te overdimensioneren en meerdere veiligheidsmarges in te bouwen. De onderbenutting van de bemeten WKO-systemen kan ook op basis van gegevens uit het GBS worden vastgesteld. De glasvezelmetingen bieden wel een visueel aansprekende en mogelijk toegankelijkere manier om onderbenutting aan te tonen. Verder bieden de metingen inzicht in de beïnvloeding rond individuele WKO-bronnen, waarvan de debieten niet standaard afzonderlijk worden geregistreerd in het GBS. Ook kan de invloed van externe invloeden zoals bouwputbemalingen worden gedetecteerd. Dergelijke invloeden worden niet opgemerkt door het GBS.

5 De invloed van heterogeniteit op thermische invloedsgebieden van WKO's aangetoond. Deze is significant en blijft niet beperkt tot de randen van de invloedsgebieden. Bij de onderzochte WKO's leidt dit niet tot interferentie omdat er sprake is van onderbenutting of van losstaande WKO-systemen. De aangetoonde heterogeniteit kan in gebieden met veel WKO-systemen de kans op interferentie doen toenemen.

6 Aangetoond is dat de onzekerheid van invloedrijke bodemparameters verkleind kan worden door kalibratie van theoretische modellen op de temperatuurmetingen.

Meerwaarde, van de glasvezelmetingen ten bate van doelmatig gebruik van de ondergrond:

1 Ruimte voor uitbreiding en nieuwe WKO's signaleren. Inzicht in heterogeniteit en reductie van onzekerheden in de bodem kunnen bijdragen aan een doelmatiger gebruik van de ondergrond met minder onnodig grote veiligheidsmarges.

2 Collectieve systemen komen nu nog moeilijk van de grond, wellicht speelt hier een gebrek aan vertrouwen tussen potentiële betrokkenen een rol. De glasvezelmetingen zijn objectief en transparant, en kunnen bijdragen aan vergroting van het onderlinge vertrouwen.

3 Glasvezelmetingen kunnen een tool zijn om op gebieds- of masterplanniveau de efficiëntie van WKO's in de gaten te houden. Dit geldt in geval van negatieve, maar ook bij positieve interferentie. Welke warmte of koude zit er nog in de grond en gaat mijn buurman er niet met mijn warmte of koude vandoor? Dit biedt op zijn beurt ook aanknopingspunten voor beheerprotocollen en afspraken op gebiedsniveau.

4 De glasvezelmetingen signaleren omgevingsinvloeden tijdig of kunnen daar achteraf objectieve informatie over verschaffen.

Ten aanzien van de efficiëntie van bodemenergie systemen, is door FOME-BES

2 De potentie voor voorspelling van de onderhoudsbehoefte door omzetting van temperatuur- in stroomsnelheidsprofielen aangetoond. Onderhoud aan de bodemzijdige bron kan naar schatting efficiënter indien de meerkosten van glasvezeltemperatuurmonitoring niet meer dan circa 5% van de aanlegkosten van de WKO bedragen. De besparing woog ten tijde van FOME-BES niet op tegen de meerkosten, maar recente doorontwikkelingen van de laser beamer / uitlees unit, waardoor de aanschafprijs is afgenomen, bieden betere perspectieven. Daarnaast kan efficiëntie worden behaald

door de glasvezelkabels in de WKO-bronnen te installeren direct bij aanleg van de bronnen of tijdens groot onderhoud. Dan hoeven er geen kosten worden gemaakt voor het tijdelijk ontruimen van de bron.

3 De doorwerking van ingrepen in het bovengrondse beheerssysteem op de temperatuurverdeling in de ondergrond gekwantificeerd

4 Het afwijkende gedrag van warmte en koude rond de bronfilters in beeld gebracht.

5 Een dashboard ontwikkeld dat inzicht geeft in de aansturing van het bovengrondse WKO-systeem door het GBS om zo potentiële problemen in de ondergrond te voorkomen.

Meerwaarde van de glasvezelmetingen ten bate van de efficiëntie van bodemenergie systemen:

1 Aanvulling op GBS (controle / signalering / sturing) op tactisch en strategisch niveau. Met behulp van glasvezel kan worden onderzocht of omgevingsinvloeden een rol spelen in het onderpresteren van een systeem of dat bv onderhoud/regeneratie zinvol is om de prestatie van het systeem te verhogen. Ook kan de glasvezelmeting uitkomst bieden om bij problemen te onderzoeken of het probleem veroorzaakt wordt door het bovengrondse werking of ondergrondse werking van het systeem. Op basis van gegevens uit het GBS kan de energiebalans in principe goed worden bijgehouden. Externe invloeden zoals achtergrondstroming, grondwaterbemalingen, seizoensinvloeden (bijvoorbeeld oppervlaktewater) en de verdeling van geclusterd gemeten debieten over individuele bronnen kunnen echter de balans op bronniveau versluieren. Visuele weergaven van bodemtemperatuurprofielen kunnen dan bijdragen aan een duidelijk en actueel beeld van de onbalans. De financiële meerwaarde varieert per WKO-systeem, zowel aan de bron- als gebouwzijde. Een ruwe indicatieschatting: maximaal 10%, of orde van grootte enkele duizenden euro’s per jaar (enkele tienduizenden euro’s netto contante waarde over 20 jaar).

2 Glasvezel metingen maken het mogelijk om de uitgangspunten van het ontwerp van de WKO weer te ijken op het gebouw. Vaak worden namelijk extra energiebesparende maatregelen in het gebouw genomen (voorbeeld ASR), nadat WKO ontworpen /aangelegd is.

3 Dit onderzoek toont aan dat de bron in sommige gevallen niet goed benut wordt. Een mogelijk vervolg zou zijn om naar een andere inrichting van de bron te kijken. Bijvoorbeeld door het ontwikkelen van bronsturing op diepte waardoor gericht injecteren en onttrekken warmte/koude mogelijk voor efficiëntere energie-opslag en –onttrekking. Of bijvoorbeeld grove en fijne filters aanbrengen. De financiële meerwaarde per WKO-bron wordt geschat op een orde van grootte van enkele honderden euro’s per bron per jaar of enkele duizenden euro’s netto contante waarde over 20 jaar.

4 In het verdienmodel voor een nieuw WKO-systeem moeten de kosten van het glasvezelmeetnet worden meegenomen. Op basis van indicatieve berekeningen en uitgaande van de huidige stand der techniek wordt een toename van de terugverdientijd met 10 tot 20% (meestal is dit enkele jaren) ingeschat als deze kosten worden toegevoegd aan de WKO-investering. Hierbij wordt er, mogelijk ten onrechte, van uitgegaan dat de glasvezelmeetkosten geheel voor rekening komen van de nieuwe WKO-eigenaar, zonder bijdrage van andere (publieke) belanghebbende partijen.

6 Bijdrage van het project aan de doelstellingen van de subsidieregeling

6.1 Bijdrage aan de duurzame energiehuishouding

De resultaten van FOME-BES dragen potentieel bij aan een doelmatiger gebruik van de ondergrond in gebieden met intensief gebruik van de ondergrond door meerdere WKO-systemen en eventueel andere gebruiksvormen zoals (permanente) bemalingen. Driedimensionale, visueel aansprekende gegevens van bodemtemperaturen en thermische beïnvloeding dragen in dit type gebieden potentieel bij aan samenwerking tussen verschillende belanghebbenden op het gebied van bodemenergie, omdat alle partijen kunnen beschikken over dezelfde, objectieve informatie. Bovendien kan actuele informatie over bodemtemperaturen helpen bij het voorkomen van negatieve effecten van interferentie op de energieprestaties van WKO, zowel op het niveau van individuele systemen als op gebiedsniveau. In Nederland zijn weliswaar veel locaties op grond van verleende WKO-vergunningen als 'druk' aan te merken, maar in de praktijk blijkt nog nauwelijks sprake te zijn van interferentie. Verwacht wordt echter dat dit binnen enkele jaren zal veranderen, door een toenemende vraag naar bodemenergie onder invloed van de beoogde energietransitie op nationaal niveau. De beschreven bijdragen kunnen dan ook worden gekenschetst als 'nabije-toekomstmuziek'.

De bijdrage van de resultaten van FOME-BES aan efficiëntere WKO-systemen op gebouw- c.q. installatieniveau zijn vooralsnog minder duidelijk. Veel efficiëntiewinst kan bovengronds worden behaald met het optimaal benutten van de WKO-installatie, inclusief de warmtepompen. Warmtepompen zijn gevoelig voor de ingaande watertemperaturen aan de verdamper- en condensorzijde Als deze temperaturen afwijken van de ontwerptemperaturen dan kan dit leiden tot een hoger energieverbruik van de WKO-installatie voor dezelfde te produceren hoeveelheid energie. De in dit onderzoek ontwikkelde dashboards bieden inzicht, waarmee kan worden voorkomen dat het grondwater onnodig wordt verplaatst zonder warmteoverdracht. Het niet koud of warm laden van de bronnen kost relatief veel transportenergie.

De glasvezeltemperatuurmetingen bieden wel inzicht in processen, die niet met het GBS kunnen worden waargenomen, zoals inzichten in het gedrag van warmte en koude direct nabij de bronnen, en inzicht in de stroomsnelheden in de bronfilters zelf. Eerstgenoemd inzicht leidt naar verwachting niet tot significante efficiëntieverhoging. Door het toepassen van glasvezelmonitoring kan de onderhoudsbehoefte beter inzichtelijk worden gemaakt. Door meer inzicht in de onderhoudsbehoefte kan onderhoud en stilstand van de WKO wellicht voorkomen worden. Hierdoor kan de WKO meer ingezet worden voor levering van duurzamere energie.

Tenslotte bieden de resultaten van FOME-BES perspectieven voor toepassing bij de (momenteel in opkomst zijnde) opslag van energie onder hoge temperaturen (40 tot 70 graden) in diepe aquifers. Monitoring van de thermische effecten van deze opslag op ondiepere aquifers is van groot belang voor het veilig stellen van andere watergebruikers, zoals de drinkwater- en industriële winningen. De in FOME-BES opgedane kennis en ervaring is hier zeer bruikbaar voor.

6.2 Bijdrage aan de versterking van de kennispositie

Het project draagt positief bij aan de (nu al vooraanstaande) internationale kennispositie van Nederland op het gebied van ondiepe warmte en koudeopslag met open systemen. Dit geldt voor de kennisaspecten:

- relatie tussen heterogeniteit van de ondergrond en thermische beïnvloeding door WKO-systemen;
- reductie onzekerheid van ondergrondparameters door validatie van theoretische modellen met glasvezeltemperatuurmetingen;

- hydraulica van stroming in een verticale pijp met filters, in relatie tot voorkeursstroming bij hoger t.o.v. lager afgestelde filters. Het toepassingsbereik hiervan reikt verder dan alleen WKO, bijvoorbeeld ook winning van drink- en industriewater;
- identificatie van prestatie-indicatoren voor het functioneren van WKO-systemen;
- omzetting van temperatuur- naar stroomsnelheidsprofielen, waarvan het toepassingsbereik verder reikt dan alleen WKO;

Een concreet voorbeeld van internationale uitstraling is de opname van de glasvezelmeetlocatie Utrecht Stationsgebied als 'Demonstrator' in het Climate-KIC project 'Smart Sustainable Districts'. In dit project wordt kennis over verduurzaming, energietransitie, klimaatadaptatie en vergroting van de leefbaarheid van (hoog)stedelijke gebieden ontwikkeld en uitgewisseld tussen een groot aantal Europese steden (zie http://ssd-utrecht.nl/over-smart-sustainable-districts/het-ssd-project/?lang=nl).

7 Spin-off

7.1 Spin-off binnen de sector

Er is de volgende spin-off binnen de sector:
1. Animo bij diverse potentiële eindgebruikers van de technologie (Alliander, Rijksvastgoedbedrijf, Gemeente Utrecht, Provincie Utrecht, Royal HaskoningDHV, Buro Bron, Inventec, Gemeente Den Haag) om de marktpotentie van de in FOME-BES verworven kennis en ervaring nader te onderzoeken.
2. Door middel van het binnen FOME-BES ontwikkelde dashboard in combinatie met de binnen FOME-BES ontwikkelde kennis op het gebied van de wisselwerking tussen het onder- en bovengrondse deel van de WKO-installatie kan in één oogopslag worden beoordeeld of de WKO-installatie naar behoren functioneert.
3. Enthousiasme over het verrichte onderzoek en opgedane kennis bij partners als De Ruitergrondwatertechniek en Deltares en binnen BAM zelf.

7.2 Spin-off buiten de sector

Er is de volgende spin-off buiten de sector:
1. Perspectieven voor toepassing van de in FOME-BES opgedane inzichten m.b.t. hydraulica van stroming in pijpen met filters bij drinkwaterbedrijven en industriële onttrekkers.
2. Doorontwikkeling van de glasvezeltechnologie om deze ook in te zetten voor het meten van stroomsnelheden, en zoet en zout grondwater.
3. Doorontwikkeling en verfijnen van modellen, die de dynamische relatie beschrijven tussen de warmte en koude in de bodem enerzijds en het gedrag van de installatie en het gebouwklimaat anderzijds. Binnen FOME-BES zijn hiertoe een aantal belangrijke stappen gemaakt. Deze modellen kunnen vervolgens worden gebruikt voor planmatige opslag van warmte en koude als onderdeel van het verder verduurzamen en kosten-efficiënt maken van de totale energiehuishouding voor het gebouw.

8 Publicaties

- ‘Inzicht in stromingsverdeling in WKO-bronnen’ – artikel in VV+, juli 2016
- Brochure met Utrechtse innovaties in het Stationsgebied en op Utrecht Science Park – april 2016
- ‘Bodemmonitoring met glasvezeltechniek’ – artikel in VV+, maart 2016
- ‘Bodemwarmte: eerlijk delen’ – artikel in K&S, februari 2016‘
- Naar intensief gebruik van de bodem voor warmte koude opslag’ - artikel in Geo.Brief, september 2015
- '3D temperatuurmetingen in de ondergrond' - artikel in iMaintain nr. 5-2015
- 'Utrecht neemt WKO onder de loep' - artikel in Ensoc magazine december 2014
- 'Glasvezel meet temperatuur grondwater voor WKO-systemen' - artikel in Land + Water nr. 11-2014

Deze publicaties zijn ook terug te vinden op de website www.fomebes.nl.