# INZICHT IN Stromingsverdeling In Wko-bronnen

Gepaard met de toenemende interesse in wko-systemen in zowel binnen- als buitenland, neemt ook de behoefte toe aan beter inzicht in de prestatie en conditie van bodemzijdige componenten van bodemenergiesystemen, onder andere de bronfilters, met als doel een zo hoog mogelijk rendement te behalen. Glasvezel-DTS (distributed temperature sensing) is een veelbelovende techniek voor continue monitoring van de watertemperatuur binnen het bronsysteem die 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 zou de onderhoudsbehoefte van de bron kunnen worden bepaald.

Tekst: Robert Rijkenberg BSc, masterstudent Hydrology aan de Universiteit Utrecht, afstudeerder bij BAM Energy Systems, ir. Jorik van de Waerdt, technisch ontwikkelaar/adviseur bij BAM Energy Systems, drs. Pieter Doornenbal, projectingenieur bij Deltares Fotografie: Industrie

Voor het bepalen van de conditie van een bronfilter wordt veelal gebruik van een propellerflowmeter waarmee een stroomsnelheidsprofiel wordt gemeten. Dit is een ingrijpende en kostbare methode waarbij het meetinstrument naar de bodem van de bron wordt gelaten. Het wkosysteem moet tijdelijk worden stilgelegd omdat de pomp in de bron moet worden gedemonteerd (figuur 1). Glasvezeltemperatuurmetingen met 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 wordt geïnstalleerd in een bron kan de temperatuur over de gehele diepte van de bron worden bepaald. De belangrijkste vraag van dit onderzoek is: 'Kan glasvezel-DTS worden gebruikt om stroomsnelheden te bepalen en zo een uitspraak te doen over de onderhoudsbehoefte van de bron?'

### 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 elektronisch opgewekt temperatuurverschil.

## DE MEETOPSTELLING MAAKT GEBRUIK VAN TWEE GLASVEZELKABELS

### Passief meten

De passieve methode maakt gebruik van een enkele glasvezelkabel (figuur 2) voor het meten van de watertemperatuur in de bron. Voor de omzetting van temperatuur naar stromingsdata wordt nuttig gebruikgemaakt 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 3).



 2. Links: Constructie van de meetopstelling met passieve (onder) en actieve (boven) kabels uit elkaar gehouden op een vaste afstand van 40 mm door kunststofstandhouders geplaatst met een interval van 1 m.
e-interval, Met:

- Q = debiet (verticaal) [m<sup>3</sup>/s]
- r = straal stijgbuis [m]
- $v_{a}$  = axiale snelheid van het temperatuurfront [m/s]
- $\Delta x = afstand tussen punt x1 en x2 (interval) [m]$
- $\Delta t = tijdsverschil van passeren warmtefront tussen x1 en x2 [s]$

Na berekening van het debiet voor  $(Q_{in})$  en na het beschouwde interval  $(Q_{over})$  kan het uitstroomdebiet per interval worden berekend:

$$[3] Q_{uit} = Q_{in} - Q_{over}$$

De opstelling voor deze methodiek is als volgt (figuur 3, rechts):

In de pompkamer wordt de glasvezelkabel langs de rand van de pomp geleid. Een filterbuisje om de glasvezelkabel beschermt de kabel in dit gedeelte. Vervolgens wordt de

Wanneer in de bron langs elke willekeurige diepte-interval, op hoge frequentie, de temperatuur wordt gemeten, kan voor elke interval ook de axiale stroomsnelheid worden bepaald, resulterend in een stroomsnelheidverdeling over de gehele lengte van de bron. Omdat het axiale debiet direct afhankelijk is van de stroomsnelheid en het doorstromend oppervlak in de bron, kan op basis van de stroomsnelheidverdeling een uitspraak worden gedaan over het debietverlies per interval en zodoende over het (radiale) uitstroomdebiet over de gehele diepte van de bron. Het debiet kan op elk diepte-interval worden berekend aan de hand van de verplaatsingssnelheid van het temperatuurfront:

### [1] Q = $\pi r^2 * v_a$

Waarbij de snelheid  $\nu_{_{a}}$  als volgt is gedefinieerd:

[2] 
$$v_a = (x2-x1) / (t2-t1) = \Delta x / \Delta t$$

### INTEGRAAL



3. Principe methodiek omzetting temperatuur- naar debietprofiel (I) en meetopstelling omzetting temperatuur- naar debietprofiel (r). glasvezelkabel onder de pomp bevestigd om de kabel te centreren. In de stijgbuis bevindt de kabel zich verticaal in het midden van de buis. Een gecentreerd gewicht hangt onderin het bronsysteem aan de glasvezelkabel om deze gespannen te houden.

### Actief meten

De actieve meetmethode maakt gebruik van een tweetal parallelle glasvezelkabels (figuur 2). Een van de glasvezels is voorzien van interne gevlochten stalen draden die worden aangesloten op een spanningsbron om 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.

Om te controleren of het behaalde temperatuurverschil overeenkomt met wat theoretisch haalbaar is en om uit te sluiten dat thermische interferentie met het passieve signaal optreedt tijdens opwarmen, is een aantal berekeningen uitgevoerd. Als we uitgaan van 'steady state'warmtetransport door een kuststofcilinder met dikte  $r_2 - r_1$  en veronderstellen dat de temperatuur in de kern van de kabel gelijk is aan de oppervlaktetemperatuur van de interne metalen huls en warmte transport op het kabel-watergrensvlak voldoet aan de afkoelingswet van Newton, dan kan het temperatuurverschil tussen de kern van opwarmkabel en het omringende water als volgt worden uitgedrukt:

$$[4] T_1 - T_m = \Delta T = (Q / 2\pi) * \{(1 / h * r_2) + (1 / k_c) * \ln (r_2 / r_1)\}$$

### Waarbij:

- Q = warmte-input [W/m] naar de kabel is,
- $T_1 = temperatuur [°C] bij r1 [m],$
- $T_{\infty}$  = temperatuur [°C] van het water voorbij de thermische grenslaag,
- h = warmteoverdrachtscoëfficiënt [W/(m<sup>2</sup>\*K)], afhankelijk van het stromingsregime per locatie
- k<sub>c</sub> = de thermische conductiviteit [W/(m\*K)] van het materiaal tussen r, en r<sub>2</sub>.

## AANGETOOND IS DAT DE METHODE GESCHIKT IS VOOR HET CONSTRUEREN VAN STROMINGSDATA

Uitgaande van een warmteafgifte van 12 W/m, een buitendiameter van 7,5 mm en wanddikte van het isolatiemateriaal van 1,25 mm met een kc van 0,19 W/(m\*K), resulteert dit in een temperatuurverschil van 5,225 °C direct onder de injectiepomp, 5,999 °C halverwege de bron en 10,625 °C op een diepte van 60 m onderin de bron.

Dit toont aan dat de grootse temperatuurverschillen voorkomen onderin de bron en deze het sterkst toeneemt bij lagere stroomsnelheden.

De invloedradius van de opwarmkabel kan worden bepaald aan de hand van de dikte van de thermische grenslaag, uitgaande van een vereenvoudigde situatie voor turbulente stroming over een vlakke plaat met isoflux-randvoorwaarden en is uitgedrukt als:

### $[5] \, \delta t = L \, / \, Nu$

Waar de dikte van de thermische grenslaag is gedefinieerd als de afstand tussen het oppervlak van de opwarmkabel en het punt waar 99 procent van het temperatuurverschil tussen kabel en het omringende water is overbrugd, L de karakteristieke lengte is van het system, in dit geval de afstand tussen de afstandhouders waarachter de grenslaag opbouwt, en Nu het Nusselt-nummer dat afhankelijk is van de stroomsnelheid op die locatie in de bron. Na bepaling van het bovenstaande resulteert dit in grenslaagdiktes van 3,52 mm voor een punt direct onder de injectiepomp, 6,13 mm halverwege de bron en 22,35 mm op een diepte van 60 m onderin de bron. Geen van de bovengenoemde grenslaagdiktes overschrijdt de afstand van 40 mm tussen de parallelle kabels waaruit valt te concluderen dat er geen thermische interferentie op zal treden tussen de kabels tijdens verwarming van de actieve kabel.

### Experiment

Voorafgaand aan het veldonderzoek is een theoretisch stromingsprofiel van de bron opgesteld – gebaseerd op de lithologische samenstelling van de ondergrond op de onderzoekslocatie, en een propellerflowmeting (uitgevoerd door De Ruiter Grondwatertechniek) – als referentie voor de experimenteel afgeleide stromingsprofiel. De temperatuurmetingen zijn verricht in een operationele wko-bron op een van de onderzoekslocaties op Park Strijp-S in Eindhoven. De betreffende bron (I-O5) is ingesteld voor constante injectie met een gemiddeld debiet van 40 m<sup>3</sup>/h en heeft een totale diepte 62,1 m, waarvan 25,4 m bestaat uit open filter. Uitgaande van een hydrostatische drukverdeling zowel binnen de bron als in de omringende formatie en verondersteld dat de invloed van frictie op de stroomsnelheid verwaarloosbaar klein is, en de stroming wordt opgewekt door het door de injectiepomp geïnduceerde drukverschil, kan worden gesteld dat de stroomsnelheid in de bron direct afhankelijk is van de hydraulische conductiviteit van de ondergrond rondom de open filtersecties. In een homogeen verdeelde ondergrond neemt de stroomsnelheid van het geïnjecteerde water lineair af met diepte. Echter, in een heterogeen verdeelde ondergrond is de afname per sectie afhankelijk van de omliggende formatie en zal het stromingsprofiel ongelijkmatig verdeeld zijn als functie van de conductiviteit, waarbij lagen met een lagere conductiviteit een kleinere bijdrage leveren aan het totaal debiet wat wordt gecompenseerd door de beter doorlatende lagen en leidt tot een nog grotere ongelijkmatigheid in het stromingsprofiel. Een vergelijkbaar effect is te verwachten bij een (gedeeltelijke) verstopping van het bronfilter.

### Resultaten

Uit de data van de passieve temperatuurmetingen is een selectie gemaakt van 'events' waar de temperatuur van het geïnjecteerde water een grote variatie laat zien in een korte periode. Deze events zijn duidelijk waarneembaar (figuur 4) wanneer het water zich door het verbuisde deel van de bron verplaatst. Er wordt aangenomen dat de temperatuur van het geïnjecteerde water tijdens verplaatsing niet verandert en dat de invloed van menging is te verwaarlozen, waarmee door visualisatie van deze voortplantende golfbeweging stromingsdata kan worden afgeleid door de verplaatsing van de event door de bron per tijdsinterval te bepalen. Aan de hand van een analyse van de passieve temperatuurprofielen (figuur 4), is een stromingsprofiel voor de bron afgeleid (figuur 5). Het stromingsprofiel laat grofweg een lineaire afname in de stroomsnelheid zien langs de filterdelen 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 temperatuursnauwkeurigheid 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 te voren is uitgevoerd. Het profiel van het onderste filterdeel toont ook grote overeenkomsten met beide referentieprofielen, maar biedt niet dezelfde nauwkeurigheid. De temperatuurprofielen verkregen uit het actieve opwar-



4. Reeks van dertien opeenvolgende temperatuurprofielen, opgenomen door de passieve kabel met intervallen van 1 min tijdens een 'passieftemperatuurevent' met een amplitude van 1,3 °C op dieptes tussen 20 en 60 m. Een schematische weergave van de filterstilling is ingevoegd in de afbeelding met dichte delen in wit en gearceerde filter secties.



5. Gestileerde weergave van het stroomsnelheidsprofiel in de bron, afgeleid van passieve temperatuur metingen opgenomen door de Dätwyler-kabel tijdens een 'passieftemperatuurevent' voor diepten tussen 20 en 60 m. Een schematische weergave van de filterstilling is ingevoegd in de afbeelding met dichte delen in wit en gearceerde filtersecties.

mexperiment laten een duidelijk verschil in temperatuur zien over de gehele kabellengte (figuur 6). 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. Het valt op dat het temperatuurverschil tussen beide kabels over de gehele lengte van de bron nagenoeg constant blijft, in tegenstelling tot wat te verwachten is op basis van de vergelijking [4] waar het verschil in temperatuur toeneemt als functie van de stroomsnelheid in de bron.

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 meer wordt bepaald door de temperatuur van het langsstromende water, dan door de stroomsnelheid van het water. Er is wel een toename in  $\Delta T$ te zien vanaf een diepte van 45 m -mv, wat duidt op een verminderde warmteafvoer wat kan worden gerelateerd aan de lagere stroomsnelheden onderin de bron.

### Discussie en conclusies

Op basis van met glasvezel-DTS verkregen passieve temperatuurmetingen kan een snelheidsprofiel worden afgeleid in de onderzochte wko-bron. Door de configuratie van de meetopstelling en de hoge frequentie waarmee wordt gemeten hebben de snelheidsprofielen onderin de bron een lagere resolutie. De gereconstrueerde stroomsnelheidsprofielen zijn vergelijkbaar met de uitgevoerde flowmetingen en bieden daarmee een alternatieve meetmethode voor de stroming in bronsystemen. Het grote voordeel van het



6. Vergelijking van passieve en actieve temperatuurprofielen, opgenomen met een interval van 1 min. tijdens het opwarm-experiment op dieptes tussen 20 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 filtersecties.



7. Differentiële temperatuurprofielen op basis van actieve en passieve meetgegevens, gemeten met intervallen van 1 min. op dieptes tussen 20 en 60 m. Het passieve signaal is afgetrokken van het actieve signaal met als resultaat vier temperatuurprofielen 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 filtersecties.

meten met glasvezeltechniek is dat te allen tijde, zonder het uitbouwen van de pomp, een stromingsprofiel kan worden gemeten, waardoor dit een kostenbesparende methode kan zijn voor het verkrijgen van stroomsnelheden. De actieve meetopstelling zoals toegepast in dit experiment, maakt het niet mogelijk een betrouwbaar stroomsnelheidsprofiel te genereren, waarschijnlijk door een combinatie van hogere stroomsnelheden en een te laag toegepast vermogen. De opzet en ontwikkeling van de meetopstelling heeft echter wel de potentie om variaties in stroomsnelheden te detecteren en zou na verdere ontwikkeling mogelijk kunnen worden ingezet als monitoringstool voor stroming in bronsystemen. <<<

#### Auteurs

- Robert Rijkenberg BSc, masterstudent Hydrology aan de Universiteit Utrecht, afstudeerder bij BAM Energy Systems.
- ir. Jorik van de Waerdt, technisch ontwikkelaar/adviseur bij BAM Energy Systems.
- drs. Pieter Doornenbal, projectingenieur bij Deltares.

#### Bronnen en verwijzingen

Het hier beschreven onderzoek is uitgevoerd als onderdeel van een Master Thesis onderzoek aan de Universiteit Utrecht (master: Earth Surfaceand Water, track: Hydrology) en richt zich op werkpakket 3 (begeleidt door BAM Energy Systems in samenwerking met De Ruiter Grondwatertechniek) van het FOME-BES-project met als doel het verkrijgen van stromingsdata door middel van DTS-monitoring ten behoeve van het lokaliseren van verstoppingen en mogelijk voorspellen van de onderhoudsbehoefte in bodemenergiesystemen wat vroegtijdig ingrijpen mogelijk maakt en onderhoudskosten tot een minimum beperkt. Het opstarten en uitvoeren van de metingen is begeleid door Deltares. De Ruiter Grondwatertechniek heeft de flowmetingen uitgevoerd en geassisteerd bij het inbouwen van de glasvezelkabel. Zie ook:

 Waerdt J. van de, Woude M. van der, 'Bodemmonitoring met glasvezeltechniek', VV+, Zoetermeer, 2016.