

Stroomsnelheid bepalen door temperatuurmetingen met opwarm-glasvezelkabels

Pieter Doornenbal, Wijnb Sommer, Miguel Dionisio Pires, Chris Mesdag, Ivo Pothof (Deltares)

Het meten van temperatuur met glasvezelkabels kent vele toepassingen. Deltares bedacht een nieuwe: het meten van de stroomsnelheid van oppervlaktewater. Als deze toepassing werkelijkheid wordt, zijn continue en nauwkeurige metingen van rivierafvoeren mogelijk, en betere voorspellingen.

In deltagebieden over de gehele wereld komen jaarlijks veel mensen om door overstromingen. Daarnaast treedt voor miljoenen euro's schade op. Door het meten van stroomsnelheden in oppervlaktewater kan men inzicht krijgen in de trends van hoeveelheden water die passeren en daardoor een beeld krijgen van wat er verwacht kan worden. Het meten van de stroomsnelheid in oppervlaktewater gebeurt veelal door het uitvoeren van puntmetingen. Om tot een duidelijk beeld te komen van het stromingspatroon in de rivier worden er meerdere metingen uitgevoerd die na extrapolatie een stroomsnelheidsprofiel opleveren.

De kabels waarmee Deltares stroomsnelheden wil meten, zijn zogenaamde 'opwarm-glasvezelkabels'. Dat zijn kabels met koperdraden en glasvezels die kilometers lang kunnen zijn. Met de koperdraden is het mogelijk om gecontroleerde warmtepulsen af te geven over de hele lengte van de kabel. De glasvezelcomponent meet tegelijkertijd, ook over de gehele lengte, de temperatuurverandering van de kabel.

Het afleiden van stroomsnelheden uit temperatuurmetingen berust op de theorie dat, bij een constant elektrisch vermogen, de kabel opwarmt totdat warmteverliezen door conductie en convectie gelijk zijn aan het toegevoerde vermogen. Op plaatsen waar het water harder stroomt, wordt de warmte sneller afgevoerd en heeft de kabel een lagere temperatuur. Uit de gemeten temperatuurverschillen kunnen dan verschillen in stroomsnelheden worden afgeleid. Dit zou tot een nieuwe monitoringstrategie kunnen leiden voor stroomsnelheden in oppervlaktewateren en grondwater. Het grote voordeel van de nieuwe toepassing is de mogelijkheid om een continue monitoring uit te voeren. Het meten van temperatuur met de glasvezelkabel (ook wel bekend als Distributed Temperature Sensing) is een bewezen techniek. Er kan gemeten worden met een nauwkeurigheid van 0,01 °C. Behalve dat continue gemeten kan worden, is de ruimtelijke dekking van de meting potentieel zeer groot. Deltares werkt met een apparaat waar 4 kabels van ieder 5 km op aangesloten kunnen worden. Door een grid te ontwerpen kunnen grote oppervlakten gemonitord worden.

Met modelproeven en laboratoriumproeven zijn de mogelijkheden van het meten van stroomsnelheden met de opwarm-glasvezelkabel onderzocht. In dit artikel wordt verslag gedaan van deze proeven. Vervolgens wordt er ook een mogelijke toepassing besproken van een glasvezelgrid in een uiterwaard.

Computersimulatie: modelopzet

De toepasbaarheid van stroomsnelheidsmeting met behulp van de opwarm-glasvezelkabel is allereerst verkend met computersimulaties. De gemodelleerde situatie is die van een opwarm-kabel die dwars op de stroomrichting staat. Omdat de kabel veel langer is dan dik kan deze situatie versimpeld worden naar een 2D model loodrecht op de kabel. Om een inschatting te maken van de invloed van de stroomsnelheid op het temperatuurverloop in de opwarmkabel is een aantal simulaties gedaan voor stroomsnelheden tussen de 0,01 en 10 mm/s (tabel 1), een toegepast vermogen van 10 W/m en een kabeldoorsnede van 15 mm². Berekeningen zijn

gemaakt met het (grond)waterstroming- en transportmodel Modflow [1] en MT3DMS [2]). Vanwege de analogie tussen de vergelijkingen voor stof- en warmtetransport kunnen deze modellen ook worden gebruikt voor berekeningen van warmtetransport [3].

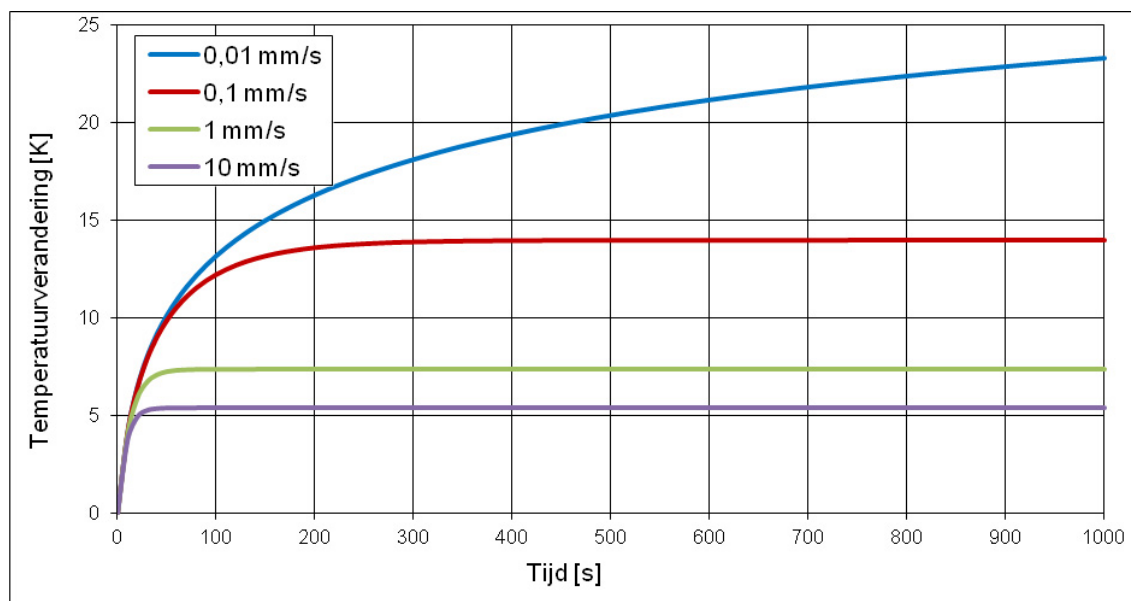
Scenario	Stroomsnelheid (mm/s)
V1	0.01
V2	0.1
V3	1
V4	10

Tabel 1. Overzicht van de scenario's met de bijbehorende stroomsnelheden

Modelresultaat

Het temperatuurverloop in de kabel met een constant toegevoerd vermogen is weergegeven in afbeelding 1. Te zien is dat de temperatuur toeneemt totdat op een gegeven moment een constante waarde wordt bereikt. Alleen bij een lage stroomsnelheid van 0,01 mm/s is 1000 seconden niet lang genoeg om een constante waarde te bereiken. Ook is te zien dat als het water sneller stroomt, er sneller een evenwichtssituatie bereikt wordt en de eindtemperatuur lager is.

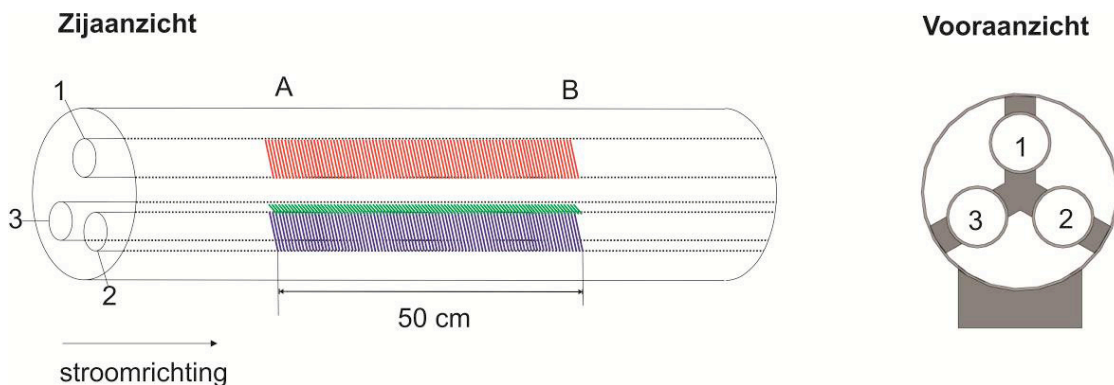
Onder de gebruikte parameterwaarden laat de modellering zien dat stroomsnelheid invloed heeft op zowel 1) de maximale temperatuur die een opwarmkabel bereikt als 2) de tijd die het kost om die temperatuur te bereiken. In principe zijn dus beide parameters te gebruiken als indicator voor de stroomsnelheidsbepaling. De methode is het meest gevoelig bij stroomsnelheden lager dan 1 mm/s bij een toegevoerd vermogen van 10 W/m. Bij hogere stroomsnelheden zal een groter vermogen toegevoerd moeten worden om de stroomsnelheid nauwkeurig te kunnen bepalen. Bovendien kan dan niet alleen de absolute temperatuur, maar ook de temperatuurgrediënt gebruikt worden voor de snelheidsmeting. Afhankelijk van de te verwachten stroomsnelheden en de lengte van de kabel moet dan het toegevoerde vermogen bepaald worden.



Afbeelding 1. Temperatuurverloop op een punt in de kabel voor verschillende stroomsnelheden (mm/s) bij een gelijke warmtepuls

Laboratoriumopstelling

Om aan te tonen dat het ook in de praktijk mogelijk is om stroomsnelheidsverschillen waar te nemen met de opwarm-glasvezelkabel is een laboratoriumopstelling gemaakt. De opstelling bestaat uit een doorzichtige plastic buis van 15 cm doorsnede met daarin de opwarm glasvezelkabel. De opwarm-glasvezelkabel is over een halve meter om 3 kleinere buizen gewikkeld om de opstelling compact te houden (afbeelding 2).. Daarmee is het ook mogelijk om verschillen tussen de 3 buizen te meten. Per buis is 48 meter kabel strak tegen elkaar gewikkeld, wat inhoudt dat er een resolutie is van bijna 1 meting per cm. De stroomsnelheid in de buis is gevarieerd tussen de 1 en 25 mm/s (tabel 2). Bij elke snelheid is een warmtepuls gegeven totdat een stabiele eindtemperatuur bereikt is.



Afbeelding 2. Twee illustraties van de meetopstelling

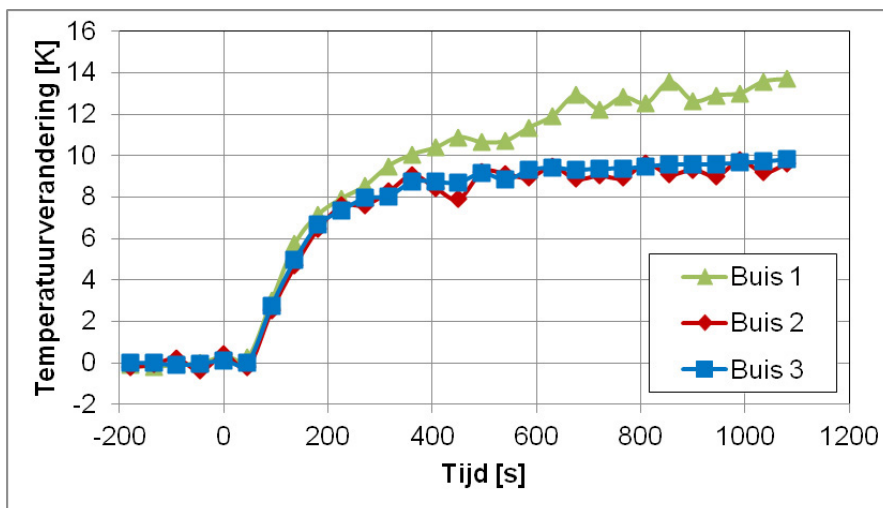
Te zien is de doorzichtige buis met daarin de drie met glasvezelkabel omwikkelde buizen. Het water stroomt door de grote buis en de 3 kleine buizen.

Tabel 2. De stroomsnelheden van het water in het laboratoriumexperiment

Proef #	Stroomsnelheid (mm/s)
1	1,1
2	6,0
3	14,5
4	24,5

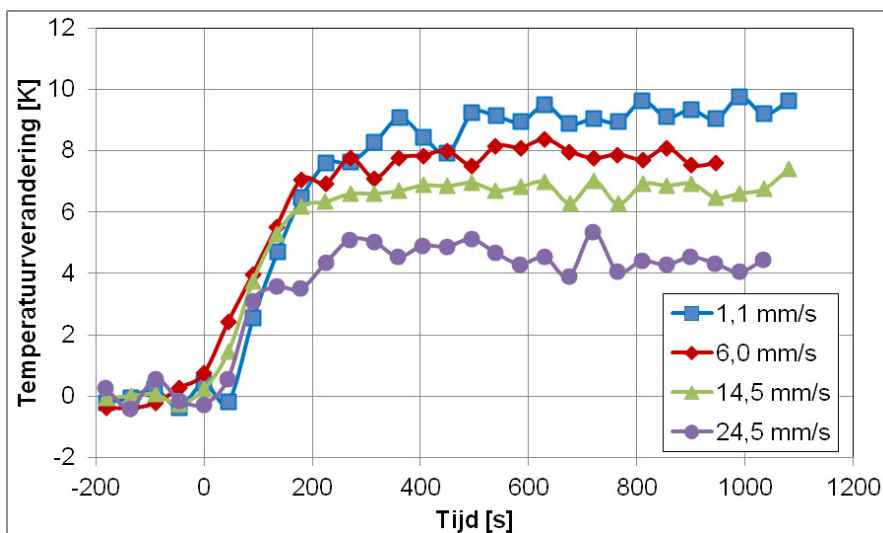
Laboratoriumresultaten

Het water in de buis blijkt niet gelijkmatig te stromen. Dit komt doordat de aansluiting zich aan de onderkant bevindt. Dit is terug te zien in afbeelding 3, waarin van drie overeenkomstige punten op de buizen de opwarmcurve is geplot. In de afbeelding valt op dat de opwarmcurve bij buis 2 en 3 eenzelfde patroon laten zien, waarbij de temperatuur naar een constante waarde gaat. Er stroomt hier duidelijk meer water langs dan bij buis 1, waar de temperatuur na 1000 seconden nog niet constant is. Hieruit kunnen we opmaken dat het water onder in de buis (buizen 2 en 3) sneller stroomt dan het water boven in de buis (buis 1).



Afbeelding 3. Relatief temperatuurverloop voor punten met dezelfde ligging op de drie buizen (bij gelijke warmtepuls)

Het temperatuurverloop voor eenzelfde punt op één van de onderste buizen bij verschillende stroomsnelheden is te zien in afbeelding 4. Net als de modelsimulaties laten de laboratoriumproeven zien dat de temperatuur toeneemt totdat er op een gegeven moment een constante temperatuur wordt bereikt. Alleen bij de proeven met de lage stroomsnelheid van 1 mm/s is er nog geen constante waarde bereikt. Ook is te zien dat als het water sneller stroomt, er sneller een evenwichtssituatie bereikt wordt en de eindtemperatuur lager is.



Afbeelding 4. Relatief temperatuurverloop voor eenzelfde punt op één van de onderste buizen bij de verschillende stroomsnelheden (bij gelijke warmtepuls)

Theoretische achtergrond

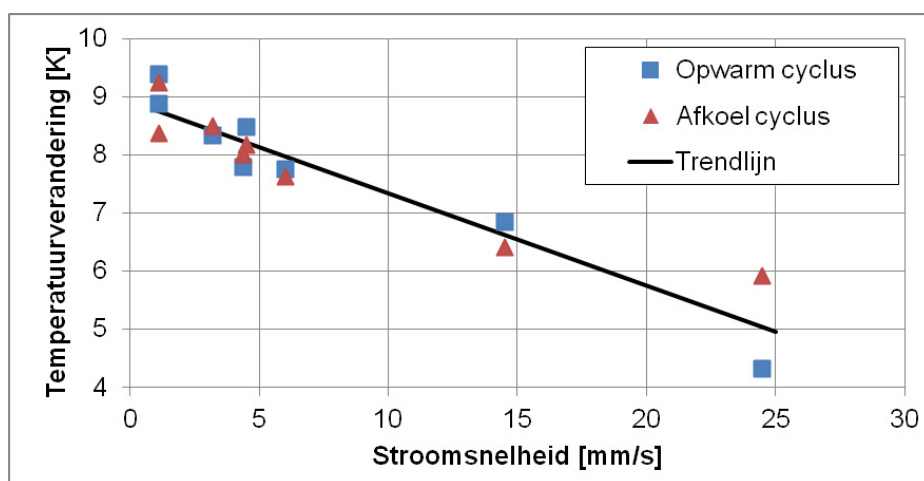
Na het inschakelen van de stroom neemt de temperatuur van de kabel toe, totdat warmteverliezen door geleiding en afstroming gelijk zijn aan het toegevoerd elektrisch vermogen (een opwarmcurve). Na het uitschakelen van de stroom neemt de temperatuur in de kabel weer af naar de temperatuur van het omringende water (een afkoelcurve). In het geval

dat de radiale temperatuurgradiënt in de kabel verwaarloosbaar is, wordt in beide situaties de temperatuurverandering in de kabel gegeven door de volgende formule (analoog aan de warmtewet van Newton):

$$\Delta T = \frac{P}{h_c \times A}$$

Hierbij is ΔT de temperatuurverandering in de kabel (K), P het toegevoerde vermogen (W/m), A het oppervlak van de kabel (m^2/m) en h_c de warmteoverdracht-coëfficiënt ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$). De formule laat zien dat bij een hoger toegevoerd vermogen het gemeten temperatuurverschil zal toenemen. De warmteoverdracht-coëfficiënt wordt bepaald door de thermische eigenschappen van het water, de specifieke opstelling van de kabel en de stroomsnelheid van het water. Bij een hogere stroomsnelheid wordt de grenslaag rondom de kabel dunner, wat zich uit in een grotere warmteoverdracht-coëfficiënt, en dus een kleiner temperatuurverschil in de kabel.

Het verband tussen de warmteoverdracht-coëfficiënt en stroomsnelheid zal in de meeste gevallen experimenteel bepaald moeten worden. De metingen in het laboratoriumexperiment laten zien dat de temperatuurverandering omgekeerd evenredig is met de stroomsnelheid in het domein waarin de metingen zijn verricht (zie afbeelding 5). Dit is niet noodzakelijk ook het geval als gebruikt wordt gemaakt van een ander type kabel, een andere opstelling of een stroomsnelheid die hoger of lager is (bij hele lage of hele hoge stroomsnelheden is de temperatuurverandering complexer). In alle gevallen is het van belang de materialen en het elektrische vermogen zo te kiezen dat deze passen bij de te verwachte stroomsnelheden.



Afbeelding 5. Relatie temperatuurverandering - stroomsnelheid

De gemeten temperatuurverandering in de opwarm-glasvezelkabel bij verschillende stroomsnelheden laat in de laboratoriumproef een lineaire trend zien, zowel bij het opwarmen als bij het afkoelen. De temperatuurverandering is omgekeerd evenredig met de stroomsnelheid.

Toepassen van een glasvezelgrid in een uiterwaard

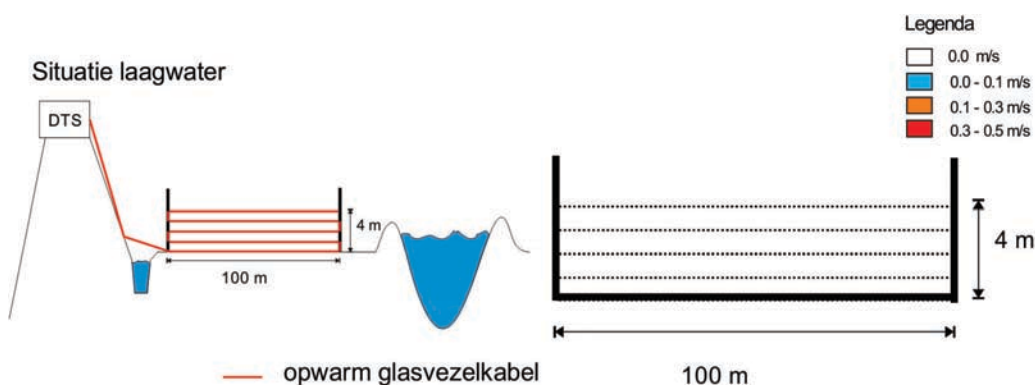
Een voorbeeld van een praktijksituatie waar de toepassing van opwarmglasvezel in stroomsnelheidsmonitoring nieuwe inzichten kan bieden is in de uiterwaarden. Bij hoge waterstanden, als de uiterwaarden onderstromen, worden momenteel de hoeveelheden water geschat. Het meten van stroomsnelheden zou hier betere debietmetingen en betere verwachtingen kunnen opleveren. Door het ontwerpen en aanleggen van een glasvezelgrid kan

over een grote oppervlakte de stroomsnelheid gemeten worden. Voordat er een grid geconfigureerd kan worden moet er een voorstudie gedaan worden naar:

- welk type kabel er nodig is
- hoe nauwkeurig de stroomsnelheid gemeten moet worden
- in welke richtingen de stroomsnelheid gemeten moet worden (horizontaal, verticaal of beide).

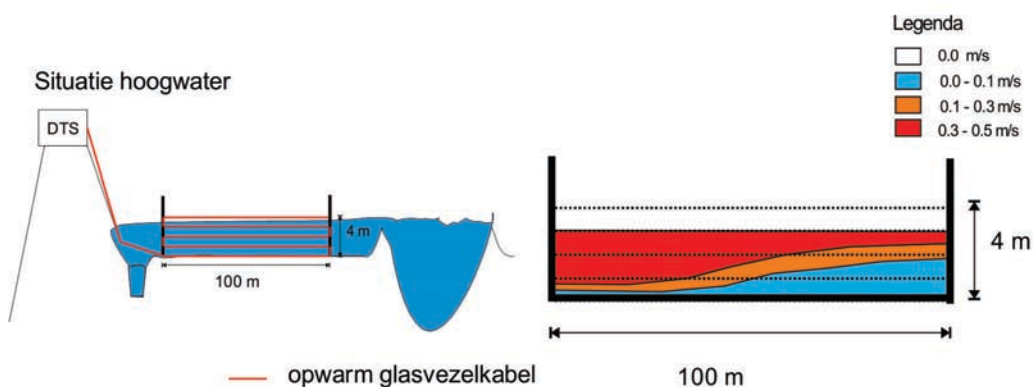
Deze voorstudie is nodig om af te stemmen hoe warm de kabel gemaakt kan worden en welke hittepuls afgegeven moet worden, om meting van de stroomsnelheid mogelijk te maken.

In de afbeeldingen 6 en 7 is een voorbeeld van een verticaal grid te zien in een uiterwaard. Tussen twee palen met een onderlinge afstand van 100 meter wordt een glasvezel gespannen. De verticale resolutie is hier op 1 meter gezet, wat inhoudt dat er een kabel gespannen moet worden van +/- 500 m. De glasvezel wordt verbonden met een Distributed Temperature Sensing (DTS) meetapparaat op de dijk. De snelheidsmeting die bij de situatie hoort waarbij er geen water in de uiterwaard stroomt (laagwater), is ook te zien (afbeelding 6).



Afbeelding 6. Layout van een verticaal grid van opwarm-glasvezelkabel in een uiterwaard tijdens laagwater

Omdat er geen water stroomt wordt er geen snelheid gemeten.



Afbeelding 7. Layout van een verticaal grid van opwarmglasvezelkabel in een uiterwaard tijdens hoogwater

Rechts een mogelijk patroon van stroomsnelheden..

Conclusies

De mogelijkheden van het meten van de stroomsnelheid van water met opwarm-glasvezelkabels zijn onderzocht. Er zijn verschillende modelscenario's doorgerekend waaruit blijkt dat de stroomsnelheid invloed heeft op de maximale temperatuur die de opwarmkabel bereikt en op de tijd om deze maximale temperatuur te bereiken. Behalve modelberekeningen zijn ook laboratoriumproeven gedaan. De opwarm-glasvezelkabel is getest onder verschillende stroomsnelheden. Wanneer de opwarmcurves geanalyseerd worden komt duidelijk naar voren dat:

- bij een hoge stroomsnelheid er eerder een constante temperatuur bereikt wordt dan bij een lagere stroomsnelheid; bovendien is deze eindtemperatuur lager naarmate de stroomsnelheid hoger is.

Om de opwarmkabel toe te passen in de praktijk moet vooraf bepaald worden:

- wat de te verwachten stroomsnelheden zijn
- hoe nauwkeurig de stroomsnelheden gemeten moeten worden
- welk type kabel nodig is
- hoe nauwkeurig en in welke richting de stroomsnelheid gemeten moet worden.

Samenvatting

Deltares doet onderzoek naar het meten van de stroomsnelheid van oppervlaktewater met *Distributed Temperature Sensing* (DTS). Als deze toepassing werkelijkheid wordt, zijn continue en nauwkeurige *real time* metingen van rivierafvoeren mogelijk, en betere voorspellingen. Het onderzoek maakt gebruik van opwarm-glasvezelkabels. Dat zijn lange kabels met koperdraden en glasvezels. De koperdraden voeren warmte toe over de hele lengte van de kabel, de glasvezels meten de temperatuur van de kabel eveneens over de hele lengte. Uit computersimulaties en laboratoriumexperimenten blijkt dat bij een bekende warmtepuls de eindtemperatuur van de kabel afhangt van de stroomsnelheid van het water: hoe hoger de stroomsnelheid, hoe lager de eindtemperatuur. Bovendien gaat de temperatuur bij een hoge stroomsnelheid sneller naar een constante waarde dan bij lagere snelheden. Het omgekeerd evenredige verband tussen eindtemperatuur en stroomsnelheid maakt het mogelijk om door het meten van een temperatuurverandering de stroomsnelheid te bepalen.

Literatuur

[1] Harbaugh, A.W. (2000), Modflow-2000, the U.S. Geological Survey modular ground-water model: user guide to modularization concepts and the ground-water flow process, vii, 121 p. pp., U.S. Geological Survey, Branch of Information Services (distributor), Reston, VA, Denver, CO.

[2] Zheng, C., and P.P. Wang (1999), MT3DMS: A Modular Three-Dimensional Multispecies Transport Model for Simulation of Advection, Dispersion, and Chemical Reactions of Contaminants in Groundwater Systems; Documentation and User's GuideRep., Tuscaloosa, Alabama.

[3] Thorne, D., C.D. Langevin, and M.C. Sukop (2006), Addition of simultaneous heat and solute transport and variable fluid viscosity to SEAWAT, Comput Geosci-Uk, 32(10), 1758-1768.

[4] Perzlaier, S., (2005), Distributed flow velocity measurement. Annual meeting of the European Working Group internal Erosion in Embankment Dams.