



Thomas de Meij, Provincie Overijssel

Jos von Asmuth, KWR Watercycle Research Institute

Correctie van eigen luchtdrukmetingen is noodzakelijk

Grondwatermeetpunten worden steeds vaker uitgerust met een automatische drukopnemer. Die meet de druk onder de grondwaterspiegel, waaruit de grondwaterstand is te berekenen. Daarvoor moet ook de luchtdruk boven het grondwater bekend zijn. Waterbeheerders en drinkwaterbedrijven verrichten daarom zelf waarnemingen van de luchtdruk. KWR heeft luchtdrukmetingen van Overijsselse waterbeheerders vergeleken met die van het KNMI. Daaruit blijkt dat de eigen ongecorrigeerde waarnemingen vaak onnauwkeurig en onbetrouwbaar zijn. Grote verbeteringen zijn mogelijk door meetreeksen te corrigeren met behulp van de KNMI-reeksen. Dit artikel geeft een overzicht van de belangrijkste meetfouten die zijn aangetroffen en beschrijft een procedure voor correctie van eigen luchtdrukreeksen.

Tot eind jaren negentig werden grondwaterstanden met de hand gemeten. Twee keer per maand liepen honderden waarnemers met een peilklokje langs alle peilbuizen om de diepte van het water in de buis te registreren. Tegenwoordig zijn steeds meer peilbuizen voorzien van een automatische drukopnemer. Dit instrument meet dagelijks of elk uur de druk onder water en slaat deze op in een geheugen. Twee of drie keer per jaar worden de drukmetingen uitgelezen en omgerekend naar een grondwaterstand. De automatische drukopnemer betekent een grote vooruitgang, maar er zijn ook nadelen. Bij handmatige waarnemingen is duidelijk wat de gemeten waarde voorstelt; de diepte van het grondwater ten opzichte van de bovenkant van de peilbuis. Fouten ontstaan wanneer de hoogte van de peilbuis verkeerd is ingemeten of doordat het meetlint van het peilklokje niet de juiste lengte heeft of onjuist wordt afgelezen.

Metten met een drukopnemer is veel complexer, waardoor er ook meer fout kan gaan. Een automatische drukopnemer meet de druk in een peilbuis op enige diepte onder water. Die meetwaarde bestaat uit twee componenten: de druk van de waterschijf boven de sensor en de luchtdruk. Om de grondwaterstand te berekenen wordt de luchtdruk afgetrokken van de gemeten druk onder water. Een beheerder van een geautomatiseerd grondwatermeetnet zorgt

er daarom voor dat ook meetwaarden van de luchtdruk beschikbaar zijn. Dat kan op drie manieren, afhankelijk van het gebruikte instrument.

Bij de Diver van Van Essen/Schlumberger wordt de luchtdruk gemeten met een afzonderlijk instrument, de Barodiver. Deze wordt opgehangen op een plek waar de luchtdruk naar verwachting gelijk is aan die in de peilbuis. Bovenin de schutkoker van een peilbuis is een veelgebruikte plek, maar ook in werkschuren hangen Barodivers. Het tweede type drukopnemer is de Keller. Dit instrument heeft twee druksensoren, één bovenin de peilbuis voor de luchtdruk en één onder het grondwater voor de druk in het grondwater. Het apparaat meet dus zowel de luchtdruk als de waterdruk en trekt beide waarden van elkaar af. De meetnetbeheerder hoeft niet achteraf een bewerking uit te voeren. Helaas wordt vaak vergeten dat er wel degelijk een luchtdrukmeting is verricht en dat daar een fout in kan zitten. Het derde type instrument is de Leveltroll. Hier brengt een luchtslang de luchtdruk naar de drukopnemer onder water en de sensor meet rechtstreeks het verschil tussen luchtdruk en totale druk onder water. Er wordt maar één meting verricht waardoor de meetfout kleiner is. Nadeel van deze methode is dat de luchtdruk achteraf niet meer bekend is. Als er iets mis gaat in de verschilmeting, bijvoorbeeld als de luchtdruk door een knik in de luchtslang niet goed

wordt overgebracht, zijn de meetwaarden onbruikbaar.

Nauwkeurigheid van drukopnemers

Zijn grondwaterstanden van een meetpunt met een drukopnemer net zo nauwkeurig en betrouwbaar als handmatige metingen met een peilklokje? Dat lijkt onwaarschijnlijk, alleen al doordat bij gebruik van een drukopnemer twee metingen worden verricht. Toch suggereren de specificaties die leveranciers opgeven, een hoge nauwkeurigheid. Onafhankelijk vergelijkend onderzoek is echter niet beschikbaar. Voor een indruk van de kwaliteit van drukopnemers zijn we daarom aangewezen op een vergelijking met onafhankelijke waarnemingen van de grondwaterstand en de luchtdruk.

Veel meetnetbeheerders verrichten ter controle van drukwaarnemingen ook handmatige waarnemingen van de grondwaterstand met een peilklokje. Dat gebeurt meestal alleen tijdens het uitlezen van de instrumenten, hooguit drie tot vier keer per jaar. Men veronderstelt dat een drukopnemer goed functioneert, zolang de berekende grondwaterstand overeenkomt met de handwaarneming. Dat is niet altijd terecht. Fouten die op het moment van de handwaarneming toevallig tegen elkaar wegvallen, worden niet geconstateerd, evenmin als fouten die zich af en toe voordoen. Afzonderlijke fouten in de luchtdruk en de waterdruk

	Leeuwarden	Lelystad	Deelen	Volkel	Eindhoven	Maastricht
afstand (km)	35	112	153	196	218	278
minimaal en maximaal verschil (cm)	-2,2 tot 3,1	-4,2 tot 8,2	-5,8 tot 10,2	-12 tot 12,6	-7,5 tot 13,9	-9,4 tot 17,1
gemiddeld verschil (cm)	0,2	0,6	0,8	1,0	1,1	1,4
afwijking (2 sigma, cm)	+/- 0,9	+/- 2,8	+/- 4,0	+/- 5,0	+/- 5,5	+/- 6,9
gemiddeld absoluut verschil (cm)	0,4	1,2	1,7	2,1	2,3	2,9

Luchtdrukverschil in centimeters waterdruk tussen KNMI-station Hoorn (Terschelling) en vijf zuidelijker gelegen stations. Cijfers gebaseerd op vergelijking van uurwaarden over een periode van tien jaar.

zijn niet van elkaar te onderscheiden. Handwaarnemingen alleen zijn dus niet voldoende om de meetwaarden van een drukopnemer te controleren.

Luchtdrukmetingen van het KNMI

Sinds 2009 zijn uurwaarden van de luchtdruk vrij beschikbaar op de internetpagina van het KNMI. Deze metingen geven onafhankelijk gemeten waarden van de luchtdruk. Meetnetbeheerders kunnen deze gebruiken om hun eigen waarnemingen te valideren. De nauwkeurigheid van de drukwaarnemingen van het KNMI is te vinden in het Handboek waarnemingen¹⁾. Daaruit blijkt dat de meetfout van het instrument kleiner is dan ééntiende millimeter waterdruk. In de praktijk kan de meetfout in het veld bij harde wind oplopen tot maximaal één centimeter. De luchtdruk die het KNMI publiceert, geeft dus een zeer nauwkeurige weergave van de werkelijke luchtdruk bij het meetstation. Binnen een afstand van enkele tientallen kilometers van het eigen meetpunt ligt meestal wel een meetstation van het KNMI. De werkelijke luchtdruk tussen beide locaties zal verschillen. Analyse van tien jaar uurwaarden van de luchtdruk van het KNMI laat zien dat deze verschillen relatief klein zijn. Over een afstand van ongeveer honderd kilometer is het verschil in luchtdruk tussen twee locaties gemiddeld slechts 0,6 cm waterdruk. Die afwijking geldt voor de noord-zuidrichting; van oost naar west zijn de verschillen kleiner.

De variatie in de luchtdruk over enkele tientallen kilometers is relatief klein. Bovendien zijn de verschillen grotendeels willekeurig en voor correctie van meetreeksen zijn vooral de systematische verschillen van belang. Meetreeksen van de luchtdruk van het KNMI bieden een nauwkeurige en onafhankelijke basis voor het ijken en corrigeren van de eigen luchtdrukwaarnemingen.

Onderzoek naar luchtdrukmetingen

Om een indruk te krijgen van de kwaliteit van eigen luchtdrukwaarnemingen heeft KWR in opdracht van de Provincie Overijssel de kwaliteit van beschikbare meetreeksen onderzocht. Hiervoor zijn reeksen van de drukopnemer van Keller gebruikt van Provincie Overijssel en Divers van Waterschap Velt en Vecht en KWR. Provincie Zeeland stelde reeksen van de Leveltroll beschikbaar. Het onderzoek richtte zich op het bepalen van de belangrijkste foutenbronnen en het opstellen van een procedure om die fouten te voorkomen en achteraf te corrigeren. Er

is niet specifiek gekeken naar verschillen in kwaliteit tussen de drie typen instrumenten. De voorbeelden in dit artikel illustreren voorkomende fouten bij drukopnemers in algemene zin en impliceren geen oordeel over het gebruikte instrument.

In de beoordeelde meetreeksen blijken drie typen meetfouten veel voor te komen: bias (een constant verschil tussen de werkelijke en de gemeten waarde), drift (een geleidelijk toenemende afwijking van de meetwaarde in de tijd) en meetfouten door variaties in de omgevingstemperatuur. Daarnaast blijken klokken van drukopnemers te verlopen, waardoor metingen op een ander tijdstip worden verricht dan de tijdswaarde van de sensor aangeeft. We beschrijven de meest voorkomende fouten aan de hand van voorbeelden.

Bias en drift

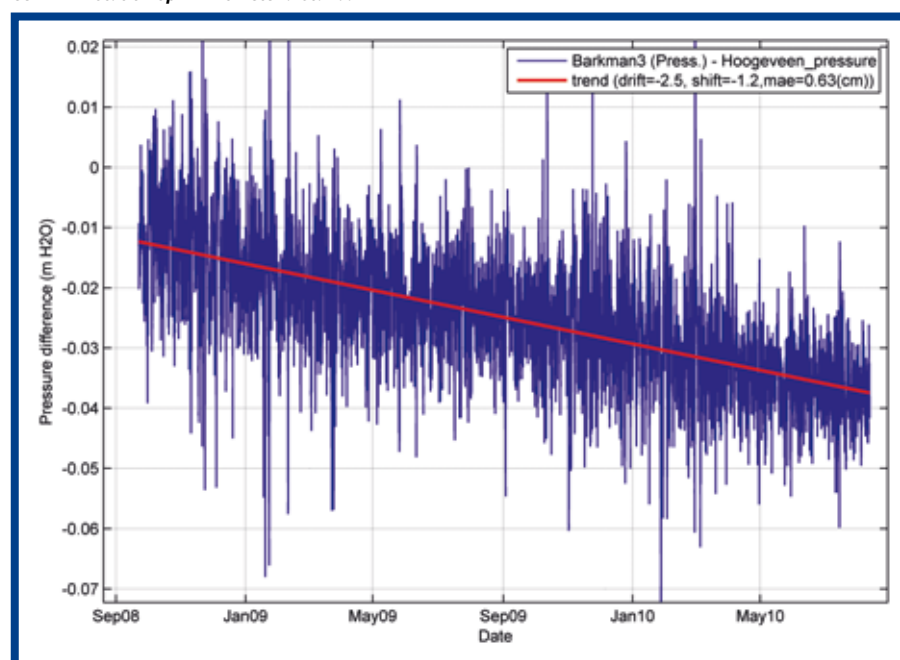
Beoordeling van honderden luchtdrukreeksen van zowel Keller-drukopnemers als Divers laat zien dat een groot deel van de instrumenten systematische afwijkingen vertoont van enkele centimeters. De fout kan oplopen tot meer dan tien, soms 30 centimeter. Vaak neemt de afwijking geleidelijk toe in de tijd, we spreken dan van drift.

Afbeelding 1 geeft een verschilreeks voor een Keller-drukopnemer die is opgehangen

in een peilbuis boven de grondwaterspiegel. De reeks toont het verschil tussen de meetwaarden van deze drukopnemer en de luchtdruk die is gemeten door het KNMI. De verschilreeks zou een horizontale lijn moeten geven, met enige variatie rond de nullijn door toevallige meetfouten. In werkelijkheid beginnen de metingen op 1,2 cm onder de nullijn en laat de reeks een dalende trend zien. De afwijking neemt geleidelijk toe met ongeveer 1,3 cm per jaar. De meetruis, berekend als het gemiddelde van de absolute afwijkingen, bedraagt minder dan een centimeter. Dat is in overeenstemming met de specificaties van de leverancier. Het kan lang duren voordat de systematische fouten van dit instrument worden opgemerkt. Stel dat een meetnetbeheerder een verschil van vijf centimeter met de handwaarneming nog accepteert. Dan komt hij bij dit instrument pas na drie jaar tot de conclusie dat de drukopnemer vervangen moet worden. De meetreeks van het grondwater laat over die meetperiode een trendmatige daling in de grondwaterstand zien.

Keller-drukopnemers bieden de mogelijkheid om in het veld bij het uitlezen het referentieniveau van de drukopnemer opnieuw in te stellen, zodat de berekende grondwaterstand weer gelijk is aan de handwaarneming. Meetnetbeheerders die daarvan gebruik

Afb. 1: Bias en drift van een lokale luchtdrukmeting. De reeks toont het verschil in centimeters waterdruk met een KNMI-station op 14 kilometer afstand.

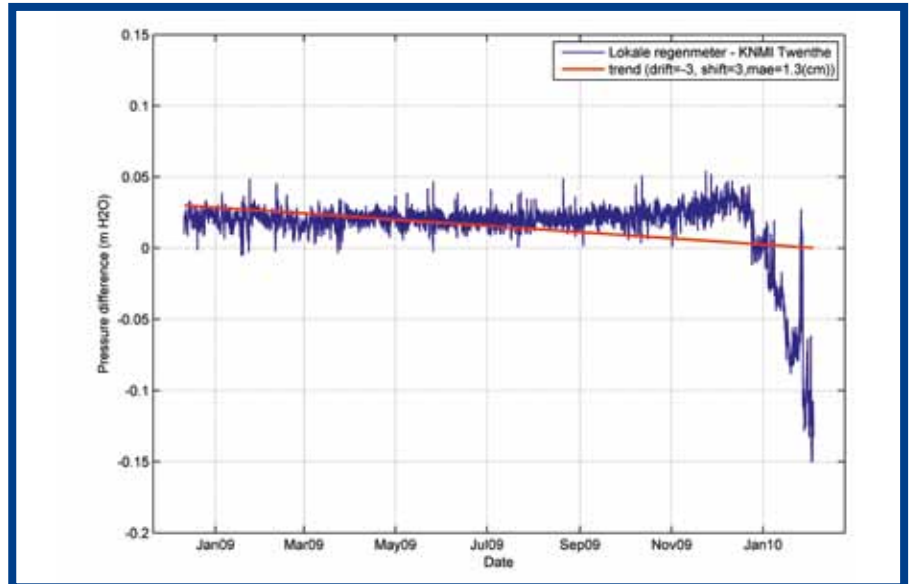


maken, kunnen jarenlang werken met een instrument dat een dalende trend vertoont. Voor de eindgebruiker van meetreeksen is het vrijwel onmogelijk om fouten in deze reeksen achteraf nog te ontdekken en te corrigeren.

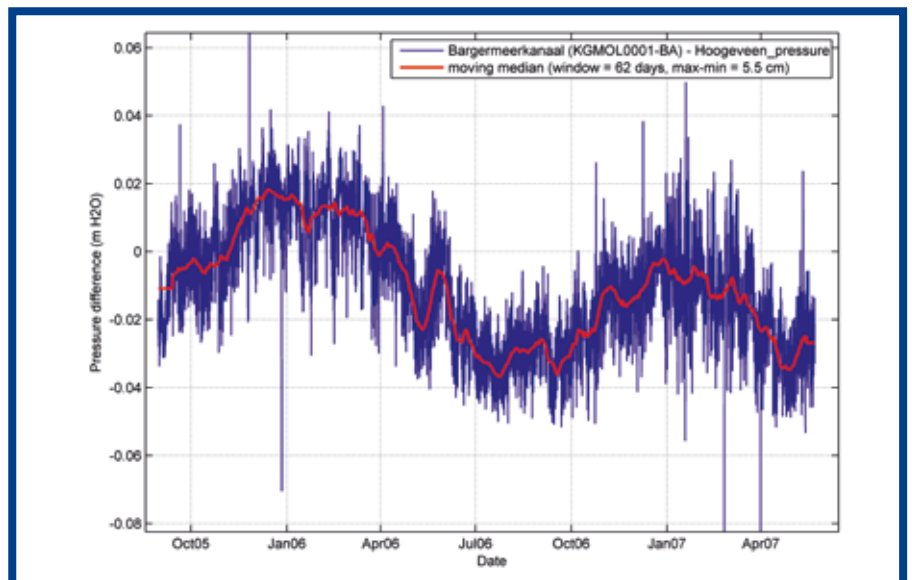
Temperatuurfouten

Een druksensor bestaat in essentie uit een vacuüm metalen doosje dat wordt ingedrukt door de luchtdruk. De mate waarin het oppervlak van de druksensor vervormt, is een maat voor de luchtdruk. Helaas verandert de druk die nodig is voor vervorming, omdat de stugheid van het materiaal verandert met de temperatuur. Een drukopnemer meet daarom ook altijd de omgevingstemperatuur en corrigeert daarmee de drukwaarde. Correctie voor temperatuurverschillen is slechts mogelijk binnen bepaalde grenzen. Volgens de specificaties liggen die voor drukopnemers tussen 0 en 50°C. Op een zonnige zomerdag kan het bovenin een schutkoker erg heet worden en 's winters daalt de temperatuur onder nul. In beide situaties is de luchtdrukwaarneming mogelijk onbruikbaar, maar meetnetbeheerders zijn zich daar niet altijd van bewust. Aan de leveranciers ligt het niet; die vermelden deze beperking in de specificaties.

Afbeelding 2 toont een luchtdrukreeks die er in eerste instantie betrouwbaar uit ziet. De lijn is horizontaal met kleine schommelingen. De gemeten luchtdruk is gemiddeld twee centimeter te hoog, wat in de praktijk geldt als een acceptabele fout. Maar in december 2009 registreert het instrument plotseling een veel te lage luchtdruk. Het verschil neemt toe tot 15 centimeter in januari 2010. Schaatsliefhebbers herinneren zich dat we in deze periode een ongekend lange vorstperiode hebben gehad. Na de vorst zal de drukopnemer waarschijnlijk weer gewoon zijn werk doen. Bij visuele beoordeling achteraf valt een fout van 15 cm in de berekende grondwaterstand niet direct op,

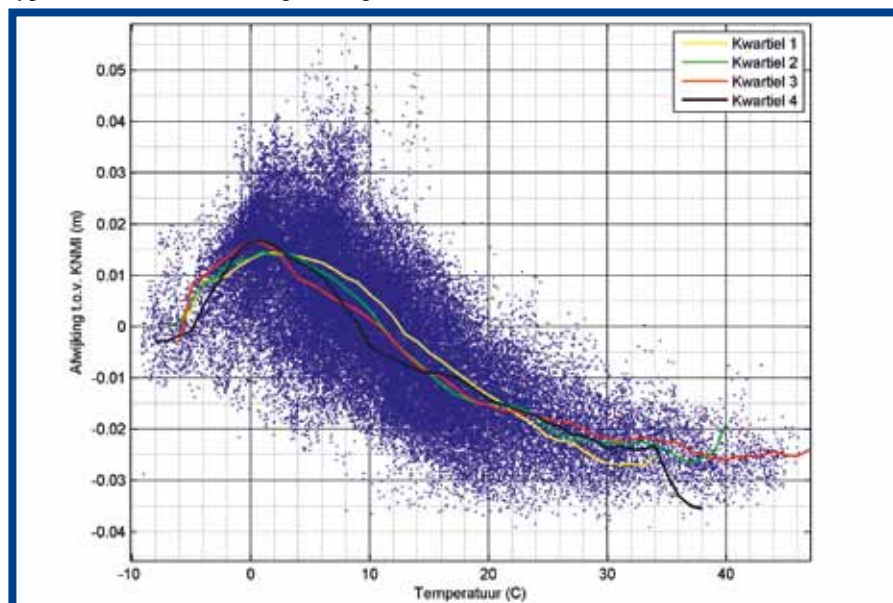


Afb. 2: Effect van strenge vorst op de gemeten luchtdruk. De reeks toont het verschil in lokaal gemeten luchtdruk met de luchtdruk van KNMI-station Twenthe in centimeters waterdruk.



Afb. 3: Seizoensfluctuatie in de gemeten luchtdruk door sterk wisselende omgevingstemperatuur.

Afb. 4: Fout in de gemeten luchtdruk bij verschillende temperaturen en drukwaarden. De vier lijnen geven de mediaan voor de vier kwartielen van alle gemeten drukwaarden. De reeks is afkomstig van een Barodiver opgesteld in een metalen behuizing van een gemaal.



doordat de fluctuaties van het grondwater veel groter zijn.

Afbeelding 3 toont een drukreeks met een duidelijke seizoensfluctuatie. In de zomer is de fout positief en in de winter negatief. Daarnaast is er een dalende trend van ongeveer twee centimeter per jaar. Die is door de seizoensfluctuatie nauwelijks terug te zien in de meetreeksen. Deze drukopnemer is opgehangen in de kast van een gemaal, een onverwarmde ruimte met een wand van metaal. In de zomer stijgt de temperatuur tot bijna 50°C, 's winters vriest het. Een uitgelezen kans om het effect van temperatuurwisselingen in beeld te brengen.

In afbeelding 4 is de afwijking in de luchtdruk uitgezet tegen de temperatuur. Bij temperaturen tussen 0 en 10°C is de gemeten luchtdruk te hoog, boven de 10°C te laag. De temperatuurfout van dit instrument (een Barodiver) blijft bij alle temperaturen beperkt tot enkele centimeters waterdruk. De vier lijnen zijn berekend voor verschillende niveaus van de gemeten druk. Ze lopen niet

gelijk. Dat betekent dat de temperatuurfout ook afhankelijk is van de grootte van de druk zelf. Bij een hoge druk moet de temperatuur dus anders worden gecorrigeerd dan bij een lage druk.

Temperatuurfouten zijn een belangrijke foutenbron in meetreeksen van de luchtdruk, omdat de temperatuur van de lucht sterk kan fluctueren, afhankelijk van de ruimte waarin een instrument is opgehangen. Een luchtdruksensor moet altijd worden opgesteld in een ruimte met een zo constant mogelijke temperatuur, liefst tussen 0 en 10°C.

Praktijkvoorbeeld luchtdrukcorrectie

Afbeelding 5 toont drie keer fouten in dezelfde reeks van gemeten luchtdruk onderin een drooggevallen peilbuis, dus een omgeving met een constante temperatuur. De verschillen ontstaan doordat steeds andere luchtdrukmetingen zijn gebruikt om de meetreeks te compenseren. Bij de groene lijn is een luchtdrukreeks gebruikt van een drukopnemer die op korte afstand is opgehangen bovenin een schutkoker. Deze reeks toont grote temperatuurfouten. Voor de rode lijn is een nabijgelegen luchtdrukmeting onderin een droge peilbuis gebruikt, zonder temperatuurfouten. Het verschil tussen de rode en de groene reeks toont dus het effect van temperatuurfouten op de gemeten luchtdruk.

De zwarte lijn is verkregen na compensatie met meetwaarden van KNMI-station Eelde op 21 km afstand. Deze reeks toont een grotere ruis (ongeveer 2 cm) dan de rode lijn (ongeveer 0,4 cm).

De meest nauwkeurige schatting van de werkelijke luchtdruk ontstaat op basis van de rode reeks, na correctie voor bias en drift met behulp van de zwarte lijn. Een lokale luchtdrukmeting onder stabiele omstandigheden, gecorrigeerd voor systematische afwijkingen op basis van een KNMI-reeks, geeft hier het meest nauwkeurige resultaat.

Procedure voor correctie van meetreeksen

Gezien de geconstateerde fouten in de gemeten luchtdruk is het sterk aan te bevelen eigen meetreeksen achteraf te bewerken. Validatie en correctie verlopen in drie stappen:

- Maak een verschilreeks van de lokale luchtdruk en uurwaarden van het KNMI. Houd er rekening mee dat de tijdsaanwijzing bij de KNMI-waarden is uitgedrukt in UTM en dat de luchtdruk is omgerekend naar zeeniveau. In de verschilreeks van de luchtdruk zijn systematische fouten in de eigen meetreeks zoals bias, drift en temperatuurfouten, direct te zien. Corrigeer de lokale meetreeks voor de gemiddelde bias en drift. Kies voor een andere luchtdrukreeks bij grote temperatuurfouten;
- Bereken de grondwaterstand uit het verschil van de gecorrigeerde luchtdruk en de gemeten druk onder water. Deze reeks bevat alleen nog meetfouten door bias en drift van de drukopnemer in het grondwater;
- Corrigeer de grondwaterstandreeks voor bias en drift op basis van de handwaarnemingen van de grondwaterstand.

Correctie van reeksen achteraf volgens deze procedure hoeft niet veel werk te kosten. De berekeningen zijn grotendeels te automatiseren. De beheerder beslist alleen of een berekende correctie wordt toegepast. In het softwarepakket Menyanthes is de benodigde functionaliteit om bias en drift te berekenen inmiddels opgenomen, waardoor snel gevalideerde grondwaterstandreeksen zijn te maken op basis van uitleesbestanden en handwaarnemingen.

Een goede correctie van reeksen begint in het veld, met een betrouwbare administratie van kabellengtes en serienummers van gebruikte instrumenten. Bovendien moeten handwaarnemingen van de grondwaterstand worden verricht, uiteraard



voordat de drukopnemer eventueel uit de peilbuis wordt gehaald. Het resetten van het nulpunt van instrumenten in het veld op basis van de handwaarneming is af te raden. Meetfouten van het instrument zijn daardoor achteraf vrijwel niet meer te corrigeren. Drukopnemers moeten worden opgesteld in een ruimte met een constante omgevings-temperatuur, bij voorkeur onderin een droge peilbuis. In de praktijk blijken niet alle meetnetbeheerders zich te houden aan deze uitgangspunten.

Conclusies

Met de opkomst van drukopnemers beschikken we over steeds meer hoogfrequente reeksen van de grondwaterstand. Deze bevatten waardevolle gegevens over ons grondwater. Om die informatie goed te benutten, moeten meetnetbeheerders meer aandacht besteden aan correctie van gemeten drukwaarden. De onafhankelijke waarnemingen van de luchtdruk van het KNMI zijn daarvoor zeer geschikt. Correctie van de luchtdruk zorgt ervoor dat alle resterende systematische fouten uitsluitend zijn toe te schrijven aan meetfouten van de drukopnemer in het grondwater. Die afwijkingen zijn minder groot, vanwege geringe temperatuurvariaties. Ze zijn eenvoudig te corrigeren met behulp van handwaarnemingen van de grondwaterstand.

Het rapport van KWR²⁾ met daarin meer voorbeelden van geconstateerde afwijkingen, is te vinden op internet: www.menyanth.es.nl.

LITERATUUR

- 1) KNMI (2000). Handboek waarnemingen.
- 2) Von Asmuth J. (2010). Over de kwaliteit, frequentie en validatie van druksensorreeksen. KWR Watercycle Research Institute. Rapport 2010.001.

Afb. 5: Meetfouten in de luchtdruk door temperatuurverschillen en afstandsverschil (in meter waterdruk).

