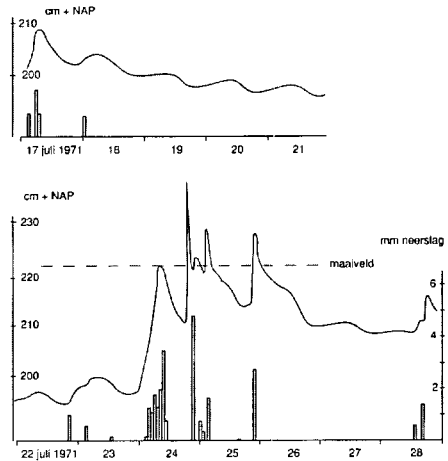


kon niet worden aangetoond; de barometerstand laat overigens ook geen duidelijke dagelijkse gang zien. De gevoeligheid van de grondwaterdruk voor spanningsveranderingen in de onverzadigde zone blijkt uit het feit dat op de strandvlakte een aantal malen het zogenaamde 'Lisse-effect' is waargenomen. Hiermee wordt bedoeld het verschijnsel dat na lichte regenval de druk op het freatisch vlak zodanig toe nam, dat het niveau in de peilbuis tot boven maaiveld steeg (figuur 2). Dit fenomeen werd voor het eerst door Volkersz (1929) te Lisse waargenomen. De verklaring voor dit effect is dat het binnendringende vocht het volume ingesloten lucht zodanig verkleint, dat de druk hierin toeneemt en de druk op het freatisch vlak wordt verhoogd. Professor Thal Larsen, die in 1931 als eerste het Lisse-effect beschreef en verklaarde, nam overigens te Wageningen ook een dagelijkse gang in het freatisch vlak waar. Hij schreef het verschijnsel toe aan een verlaging van de capillaire spanning door dauwvorming. Men zou zich kunnen afvragen of de dagelijkse gang in het freatisch vlak verwant zou kunnen zijn aan het proces dat het Lisse-effect veroorzaakt, waarbij dauwvorming de neerslag vertegenwoordigt.

Overigens is het enkeldaagse effect slechts het gevolg van een eerste-orde-proces. Vaak doet zich vroeg in de middag gedurende enige tijd een vertraging in de daling of zelfs een lichte stijging in de grondwaterstand voor. Een verklaring zou kunnen zijn dat de capillaire opstijging stagneert doordat nabij het oppervlak de capillaire zuigspanning door de temperatuursverhoging verlaagd wordt, terwijl tevens het capillair geleidingsvermogen afneemt door uitdroging. Voorts zou de druk op het freatisch vlak verhoogd kunnen worden door het uitzetten van de bodemlucht als gevolg van de temperatuursverhoging in de bovenste bodemlaag.



Figuur 2: Grondwaterstand op de strandvlakte van Schiermonnikoog ten westen van paal 10, van 17-21 juli 1971. Neerslag op 24-25 juli leidde tot het Lisse-effect met 'artesische druk'. (Waarnemingen Pieter Tollenaar, Vrije Universiteit)

Het is duidelijk dat wij hier te maken hebben met een complex van processen als gevolg van de dagelijkse variatie in meteorologische omstandigheden, waarbij de dagelijkse gang zich manifesteert in een dagelijkse fluctuatie van het freatisch vlak.

Rare reeks 3: Getijbewegingen in de woestijn

Door het stabiele klimaat en de geringe voeding van het grondwater doen zich in (semi-)aride gebieden soms hoogfrequente signalen voor die op onze breedten door seizoenale effecten worden gemaskeerd, maar waarvan de onderliggende processen onder specifieke omstandigheden ook hier een niet-verwaarloosbare invloed op het grondwater kunnen hebben.

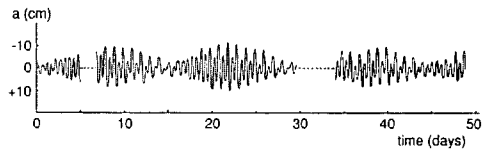
Zo ontdekte ik in het semi-aride Botswana in veel putten dagelijks optredende complexe fluctuaties met een maximale variatie van circa 25 cm. Al snel rees het vermoeden van een combinatie van aard- en atmosferische getijden. Het aardgetij wordt

veroorzaakt door de zwaartekrachtsgolf die zich als gevolg van de aantrekkingskracht van de maan (en in mindere mate de zon) door de aardkorst voortplant en daarmee de aardkorst tweemaal daags zodanig oplicht dat de waterdruk ter plaatse verlaagd wordt. Anders dan bij het oceanisch getij daalt de waterspiegel dus bij toenemende aantrekkingskracht en is de directe invloed van de hemellichamen op het water zelf verwaarloosbaar. Wel treedt bij het aardgetij uiteraard ook de dagelijkse verschuiving op in het tijdstip van de maxima en minima.

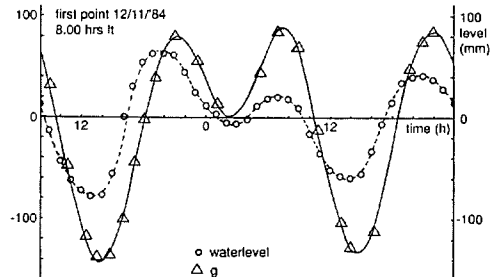
Het atmosferisch getij is het gevolg van een drukgolf in de atmosfeer onder invloed van de dagelijkse gang in de zonne-instraling. Anders dan bij het aardgetij komen hierbij geen dagelijkse fase verschuivingen voor. Een daling van de luchtdruk komt in het beschouwde gebied overeen met een stijging van de grondwaterstand, waarbij de maximale halfdaagse fluctuatie in de grondwaterstand in de orde van 5 cm is.

Na selectie van een put met een zuiver aardgetijsignaal (Ramotswa- Z 4166, waterstand circa 10 m -mv) en een put met een zuiver atmosferisch getij (Letlhakeng- 4695, waterstand circa 75 m -mv), hebben Ambro Gieske (toentertijd docent wis- en natuurkunde aan de Universiteit van Botswana; tegenwoordig docent ITC) en ik deze signalen verder geanalyseerd. Uit een vergelijking van het verloop van de waterhoogten met gelijktijdig uitgevoerde gravimetrische en barometrische waarnemingen (figuren 3, 4 en 5), alsmede via een spectraalanalyse van de signalen (figuur 6), bleek onomstotelijk dat wij hier met de beide veronderstelde effecten van doen hadden.

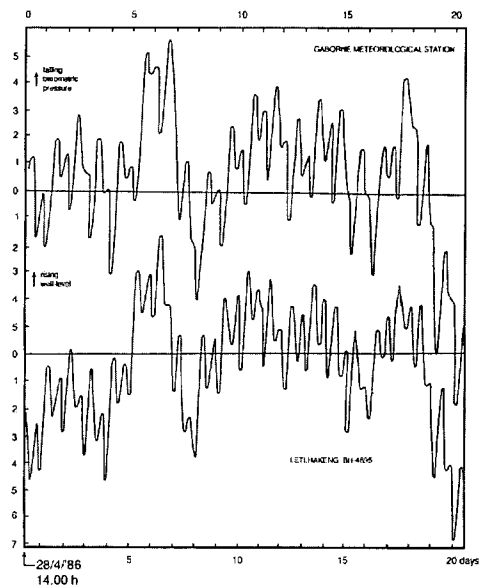
Op zich was de detectie van de invloed van het aardgetij op het grondwaterniveau niet nieuw; zij is eerder beschreven door Bredehoeft in 1967. Uitzonderlijk echter is de (deels onverklaarde) grootte van het effect in Botswana en de zuiverheid van het



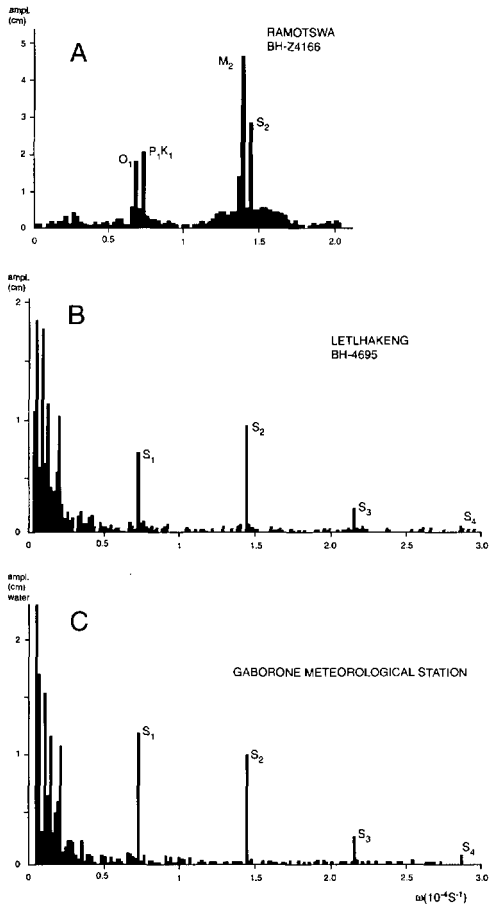
Figuur 3: Grondwaterstandsfluctuaties in put Z 4166 te Ramotswa, periode 30 oktober-19 november 1984. (Naar Gieske en De Vries, 1985)



Figuur 4: Waargenomen variaties in de versnelling van de zwaartekracht (g) en de grondwaterstand in Z 4166 gedurende een 36-uurs periode. (Naar Gieske en De Vries, 1985)



Figuur 5: Waargenomen barometerdruk te Gaborone en grondwaterstandsfluctuaties in BH 4695 te Letlhakeng, periode 28 april-18 mei 1986. (Naar De Vries en Gieske, 1988)



Figuur 6: Spectraalanalyses van: A) aardgetij in put te Ramotswa met dominant de half-daagse invloeden van maan M2 en zon S2; B) atmosferisch getij in put te Letlhakeng en C) atmosferisch getij in de luchtdruk te Gaborone met dominant de enkel-daagse en half-daagse zoninvloed S2 en S1. (Naar De Vries en Gieske, 1988)

signaal waardoor een nadere analyse mogelijk was. Normaliter beperken de aardgetij-effecten in de stijghoogte zich tot enkele millimeters.

Aardgetij

Voor aardgetijden betekent 25 cm dat de dilatatie van de aardkorst ter plaatse 30 maal sterker is dan de gemiddelde uitrek-

king van de aardkorst, die voor homogeen gesteente ongeveer 10^{-8} bedraagt. Een dergelijk grote dilatatie wijst op een grote samendrukbaarheid van het gesteente, terwijl de sterke reactie van het grondwater de aanwezigheid van spanningswater doet veronderstellen. Het gesteente ter plaatse bestaat echter uit uiterst rigide en weinig doorlatende precambrische schalies en de put reageert bij pompproeven als freatisch water met een *storage factor* van circa 5%. Het zou kunnen zijn dat het breuksysteem waarin de put zich bevindt uitzonderlijk elastische eigenschappen bezit. Daarmee is echter niet verklaard dat het verschijnsel zich over geheel Botswana en aangrenzende delen van Zuid-Afrika voordoet, waarbij de maximale fluctuatie van 25 cm zich op meerdere locaties manifesteert. De voor de hand liggende veronderstelling is dat het verschijnsel samenhangt met het feit dat de gesteenten ter plaatse deel uitmaken van het Zuidafrikaanse precambrische schild met een ouderdom van meer dan 2 miljard jaar, waarin bijzondere geo-dynamische omstandigheden heersen en geheerst hebben. De aard van deze condities is vooralsnog echter niet duidelijk.

Atmosferisch getij

Een dagelijkse fluctuatie van 5 cm water equivalent voor het atmosferisch getij in de tropen is niet uitzonderlijk. Wel is opmerkelijk dat de barometrische efficiency in de put te Letlhakeng voor het halfdagse getij 96% bedraagt. Een dergelijk sterk effect mag verwacht worden in een afgesloten rigide aquifer. Hier echter hebben we te maken met een freatisch pakket met een 75 m diepe grondwaterspiegel in een breuksysteem in precambrische zandsteen. Als verklaring zou kunnen worden verondersteld dat zich hogerop in de onverzadigde zone weerstandbiedende lagen bevinden die de atmosferische drukvoortplanting naar het

aquifer door de dikke onverzadigde zone verhinderen, zodat het aquifer beschouwd kan worden als 'partly saturated confined'.

Een evenzo aan de barometerdruk gerelateerde grondwaterstandbeweging van 1,5–6 cm, maar met een enkeldaags regime, werd in een circa 50 cm diep freatisch vlak in de Bonneville Salt Flats (Utah) aangetroffen en beschreven door Turk in 1975. In dit geval werd een correlatie gevonden tussen een stijgende grondwaterstand en een dalende luchtdruk en gelijktijdig stijgende luchttemperatuur, zodanig dat grondwaterstand in de peilbuis in de middag haar maximum bereikte.

Als verklaring suggereerde Turk, dat een dalende luchtdruk (en in mindere mate de stijgende temperatuur) zou leiden tot een expansie van de ingesloten lucht in de bodem, met als gevolg minder ruimte voor capillair water. Dit zou leiden tot een beweging van capillair water naar de verzadigde zone. De temperatuurstijging werd hierbij in de eerste plaats beschouwd als de oorzaak van de luchtdrukdaling en daarmee als indirecte oorzaak van de stijging van het freatisch vlak. De directe invloed van de temperatuur op het freatisch vlak werd als secundaire oorzaak beschouwd vanwege de vertraging die optreedt bij de voortplanting van de temperatuur in de bodem. Het is duidelijk dat een dergelijke verklaring, waarbij stroming van capillair water een rol speelt, voor het diepe grondwatervlak in Letlhakeng niet voldoet.

Fasevervroeging

In beide Botswanaanse putten deden zich overigens aanzienlijke fasevervroegingen voor (figuur 4). Dit op het eerste gezicht opmerkelijke verschijnsel is bevredigend te verklaren (en te modelleren) door aan te nemen dat de lokaal sterke drukvariëaties laterale heen- en weergaande grondwaterbewegingen induceren naar de omliggende

gebieden die niet of in mindere mate door het getij beïnvloed worden.

Voor een verdere analyse van bovengenoemde beschouwingen wordt verder verwezen naar de onderstaande literatuur.

Slotopmerking

Uit het bovenstaande blijkt dat een aantal relatief snel fluctuerende atmosferische en extraterrestrische verschijnselen invloed uitoefenen op de situatie in de onverzadigde zone en de grondwaterstand. Veelal worden deze verschijnselen niet opgemerkt doordat de invloed op de grondwaterstand gemaskeerd worden door meer trendmatige processen van neerslag, verdamping en afstroming. In andere gevallen worden de resulterende grondwaterstandfluctuaties wel waargenomen maar vervolgens bij gebrek aan een verklaring, of omdat verschillende verschijnselen interfereren zodat zich geen herkenbaar signaal voordoet, onder de term ruis geclassificeerd. Inmiddels echter is ons meetinstrumentarium zodanig vervolmaakt dat het continu waarnemen van temperaturen en spanningen in bodemvocht en bodemlucht mogelijk moet zijn, zodat we meer begrip krijgen van een aantal processen die in het verleden buiten beschouwing bleven of fout werden geïnterpreteerd, maar die wel degelijk – zoals hier blijkt – een niet-verwaarloosbare component kunnen zijn in grondwaterstand en grondwaterbeweging.

Referenties

- Bredehoeft, J.D. (1967)** Response of well-aquifer systems to earth tides; in: *Journal of Geophysical Research*, vol 72, pag 3075–3087.
- Gieske, A. en J.J. de Vries (1985)** An analysis of earth-tide induced groundwater flow in Eastern Botswana; in: *Jour-*

- nal of Hydrology*, vol 82, pag 211–232.
- Louw, P.G.B. de, R.J. Stuurman en J.L. van der Meij (2004)** Rare reeks 1: Dagelijkse fluctuatie van de freatische grondwaterstand; in: *Stromingen*, jrg 10, nr 2, pag 64–67.
- Thal Larsen, J.H. (1931)** Over den invloed van regenval op den grondwaterstand; in: *Landbouwkundig Tijdschrift*, vol 43, pag 222–240.
- Thal Larsen, J.H. (1935)** Fluctuations in the level of the phreatic surface with an atmospheric deposit in the form of dew; *Proceedings International Society of Soil Science*, vol 4 (30), pag 223–233.
- Turk, L.J. (1975)** Diurnal fluctuations of water tables induced by atmospheric pressure changes; in: *Journal of Hydrology*, vol 26, pag 1–16.
- Volkersz, K. (1929)** Merkwaardige grondwaterstandswaarnemingen in de proefschooltuin te Lisse; in: *Weekblad Kon. Ned. Mij voor Tuinbouw en Plantkunde*, pag 87–90.
- Vries, J.J. de en A. Gieske (1988)** Barometric tides in partly-saturated confined aquifers in Botswana; in: *Journal of Hydrology*, vol 104, pag 17–32.
-