

(Frederikshavn, Skagen), de avond daarop in Zweden (Hönö). Op Hönö, de thuishaven, arriveren we al merkwaardig vroeg in de middag. De rest van de dag wordt door de bemanning benut om kreeft te vangen. Wetenschap en Samenleving.

De boten van Stena Line Ferry hebben een kleine tentoonstelling aan boord over het wel en voornamelijk wee van het Kattegat. Het logo staat levensgroot op de scheepshuid: een tuimelaar met het onderschrift "Levende Kattegatt".

Van iedere box-core worden twee niveaus gemonsterd: de bovenste 2 cm en een ietwat arbitrair niveau op 10 cm diepte. Gezien de gemiddeld hoge sedimentatiesnelheid in het gebied correspondeert dit onderste niveau met de jaren '70. Vergelijking met de oppervlaktelaag levert een goed beeld van de veranderingen in de laatste 15 - 20 jaar op. Afb. 1 geeft de nikkelconcentraties op beide niveaus weer. Na het contouren van de concentraties komt de vervuiler scherp in beeld: de scheepvaartindustrie in de haven van Göteborg.

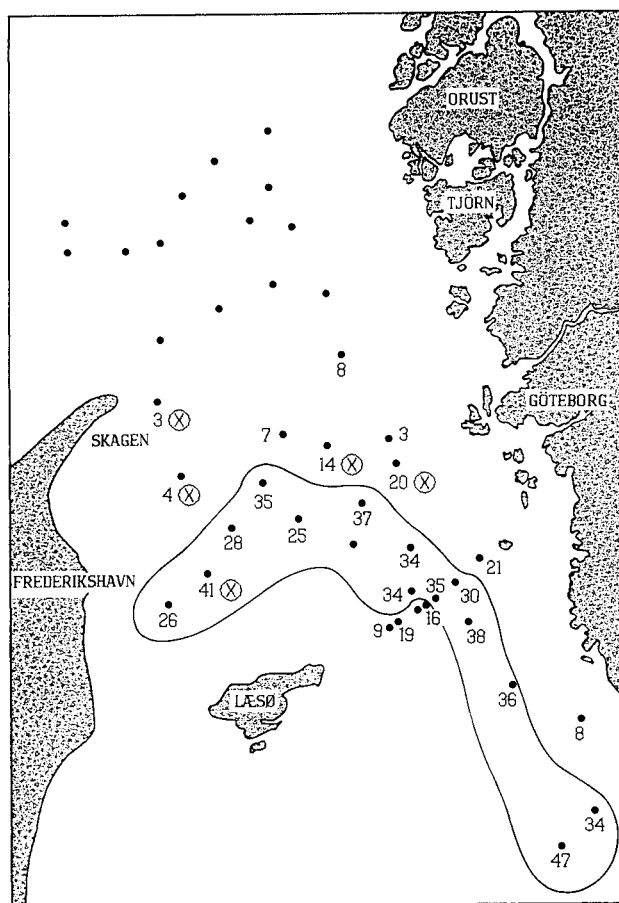
Afb. 2 toont de verspreiding van de benthonische foraminiferensoort *Bulimina marginata*. Deze soort kan beter dan de meeste andere soorten tegen lage zuurstofconcentraties nabij de zeebodem. De hoge percentages *Bulimina marginata* in de Kattegat-sedimenten zijn dan ook een aanwijzing voor de vrijwel anoxische condities.

Een dag vol box-cores met donkere, zuurstofarme sedimenten. Buizen van gravende wormen, wat zeesterren en zeeëgels. De avond op Hönö: een wandeling over de oude, geplooiden metamorfe gesteenten, langs fris geschilderde houten huizen. Fragmenten van oude dakpannen uit Halmstad. De "Svanic" keert in de haven terug. Zonder kreeft.

Geologie en milieuproblemen

Om een duidelijker beeld te krijgen over de herkomst van de sedimenten, de stromingen en de verspreidingsvormen van benthonische foraminiferen in het Kattegat is verder onderzoek ter plaatse nodig. Een volgende maal zullen we een aantal lange piston-cores nemen (monsters met een soort buis van 10 cm doorsnee om sedimentkernen tot 12 m te nemen). Want om een uitspraak te doen over veranderingen in recente tijden moeten we eerst een goed beeld krijgen over sedimentsamenstelling en fauna in perioden dat de mens zich nog niet zo drastisch met het aardse milieu bezig hield. Daar 70 % van het aardoppervlak uit water bestaat, is de wisselwerking tussen atmosfeer en hydrosfeer voor het aardse milieu van groot belang. Door tochten als

die van de "Svanic" en de "Aurelia", en ook door de "Tyros"-expeditie in het kader van JGOFS (CO₂-effect, in juni 1990) zijn geologen intens bij de problematiek van het toekomstige leefmilieu betrokken.



Afb. 2. Het voorkomen van de zeebodem-bewonende foraminifeer *Bulimina marginata*, in percentages van de totale foraminiferenpopulatie. ⊗: voorkomens van levende *B. m.*

Getijden in grondwater, gesteente en atmosfeer

door J.J. de Vries en A. Gieske

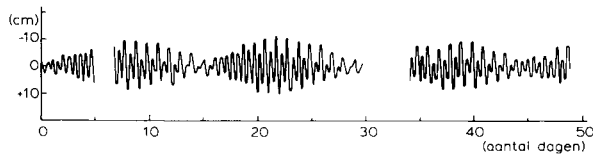
Bij grondwateronderzoek in Botswana werden in waarnemingsputten opmerkelijke, door een halfdaagse periodiciteit gedomineerde, grondwaterfluctuaties geregistreerd. De waterbewegingen in enkele putten vertoonden een sterke gelijkheid met het getij aan de kust, compleet met springtij en doodtij; de meeste andere waarnemingsreeksen gaven onregelmatiger oscillaties te zien. Een nader onderzoek leerde, dat we hier te maken hebben met een invloed van enerzijds de aantrekkingskracht van zon en maan (het aardgetij) en anderzijds de invloed van de zonnestraling op de atmosferische druk (het atmosferische getij). Door een bijzondere geologische en geografische gesteldheid zijn beide effecten in

Botswana uitzonderlijk sterk.

Voor een nadere beschouwing van beide fenomenen werden twee putten geselecteerd, waarvan de een een zuiver aardgetij en de ander een zuiver atmosferisch getij te zien gaf.

Het aardgetij

Welbekend is, dat eb en vloedbewegingen aan de kust zich in het aangrenzende grondwater kunnen voortplanten, waardoor putten nabij de kust vaak half-dagelijkse waterspiegelfluctuaties te zien geven. Minder bekend is, dat dergelijke periodieke bewegingen zich ook kunnen voordoen in putten in het centrum van de



Afb. 1. Grondwaterstandsfluctuaties in put Z4166 te Ramotswa, periode 30/10-19/11 1984.

continenten, ver verwijderd van de oceaan. Opmerkelijk is echter, dat de fluctuaties tegengesteld zijn aan die van de oceaan: de minimale waterstand treedt op wanneer de maan boven de put staat en dus haar maximale aantrekkingskracht uitoefent.

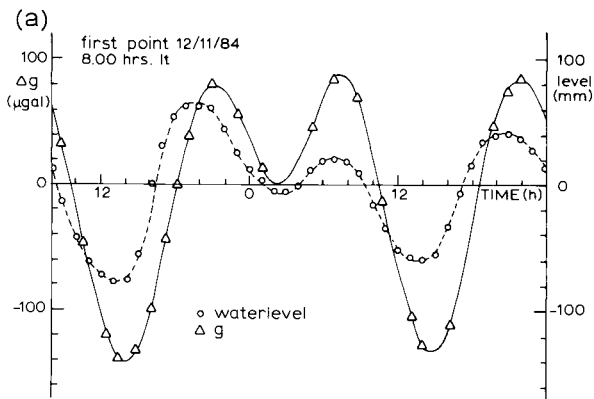
De verklaring is, dat niet het ondergrondse water doch het gesteente wordt aangetrokken. De maan, en in mindere mate de zon, veroorzaken een getijgolf in de vaste aarde, waardoor het gesteente periodiek wordt uitgerekt en samengedrukt. Grondwater dat zich in holten bevindt en dat onder druk staat door de afsluitende werking van omringende ondoorlatende lagen, zal op deze golf reageren met een drukverlaging bij het voorbijkomen van de getijdebult.

De grootte van dit zogenaamde aardgetijeffect in grondwater hangt samen met de structuur van de ondergrond en de samendrukbaarheid van het watervoerend pakket: hoe elastischer het gesteente, des te sterker zal de uitrekking zijn. Meestal zijn de aardgetijden in putten niet meer dan enkele millimeters en wordt een analyse van de waarnemingen verstoord door randeffecten. Het hier behandelde geval is uitzonderlijk door een maximale fluctuatie van maar liefst 25 cm en het nagenoeg ontbreken van storende invloeden. Bovendien vertonen de oscillaties in de put opmerkelijke fasevervroegingen, nl. 1 uur en 4 uur voor respectievelijk de 12-uurscomponent en de 24-uurscomponent van het getijspectrum. Op de oorzaak van dit fenomeen komen we later terug.

Waarnemingen

Afb. 1 toont de waterspiegelbewegingen in de geboorde put Z4166, zoals geregistreerd met behulp van een peilschrijver. Behalve de 12-uursfrequentie vallen de maandelijks terugkerende maxima en minima van springtij en doodtij op. Een spectraal-analyse van de gegevens (afb. 5 A) bevestigt, dat de belangrijkste componenten van het astronomisch getij in het putsignaal worden teruggevonden. De hoofdcomponenten zijn de half-daagse frequenties (M2) en (S2), respectievelijk geïnduceerd door de maan en de zon.

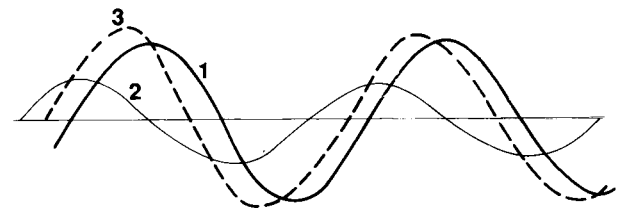
Afb. 2 geeft een detail van de grondwaterfluctuaties in vergelijking met de door het getij veroorzaakte veranderingen in het zwaartekrachtsveld, zoals dat ter plaatse werd gemeten. Uit deze waarnemingen blijkt de verrassende fasevervroeging van de waterbeweging in de put op het astronomisch getij.



Afb. 2. Waargenomen variaties in de versnelling van de zwaartekracht (g) en de grondwaterstand gedurende een 36-uurs periode.

De door ons ontwikkelde verklaring luidt als volgt. Waargenomen is, dat de sterke fluctuaties in de grondwaterdruk slechts binnen een cirkel met een straal van ongeveer 500 m rond een stelsel van kruisende breuken optreden. Hierdoor ontstaat een horizontale waterbeweging naar het omringende gebied gedurende de stijgingsfase van de waterdruk, terwijl vervolgens tijdens de dalingsfase het grondwater uit de omgeving toestroomt. We kunnen ons hierbij voorstellen dat het water zich in het centrum van het gebied in een gesteentespleet bevindt, die onder invloed van het getij open en dicht gaat. Hierdoor wordt het grondwater door de poreuze wand van de spleet afwisselend naar binnen en naar buiten geperst. In deze periodieke beweging treedt noodzakelijkerwijs een fasevertraging op. Deze in fase vertraagde beweging, gesuperponeerd op de drukverandering in de put die in fase is met het astronomisch getij, levert als resultante een waterbeweging in de put die in fase voorloopt.

Afb. 3 toont een grafische illustratie van deze verklaring.



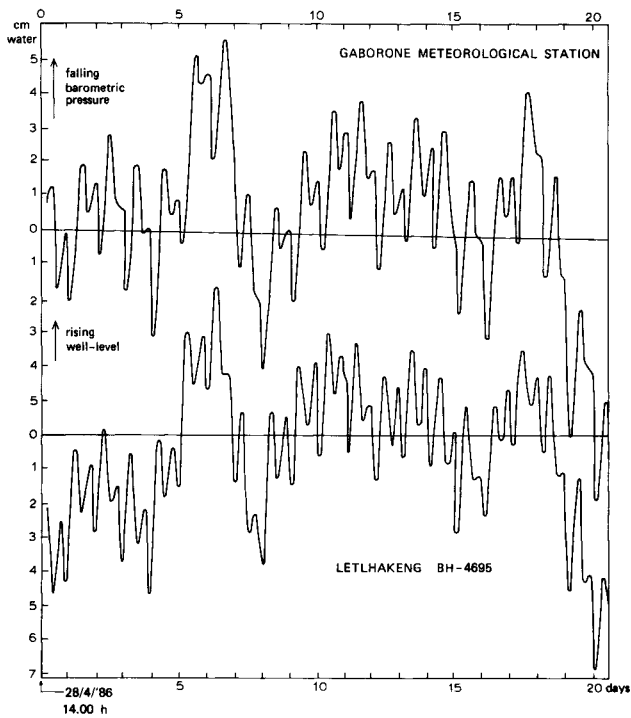
- 1 = astronomisch getij
- 2 = geïnduceerde grondwaterstroming
- 3 = resulterende beweging grondwater

Afb. 3. Grafische verklaring van de fasevervroeging in de put. De maximaal geïnduceerde grondwaterbeweging naar buiten (minimum in lijn 2), treedt vertraagd op nadat de spleetbreedte door het minimum is gegaan (culminatie in lijn 1).

Barometrisch getij

Reeds lang is bekend, dat veranderingen in atmosferische druk invloed kunnen uitoefenen op de waterstand in putten en op het debiet van bronnen, zodanig dat bij een stijging van de barometerdruk het waterniveau in een put zakt en de uitstroming van een bron vermindert. Deze reactie treedt vooral op in situaties waar het watervoerend pakket gescheiden wordt van een direct contact met de atmosfeer door een minder doorlatende, afsluitende laag. Een luchtdrukverhoging wordt via deze laag doorgegeven aan het daaronder gelegen watervoerende pakket. Is dit pakket volkomen rigide, dan vangt het gesteenteskelet de gehele drukverhoging op; is daarentegen deze laag elastisch, dan zal door samendrukking ervan een deel van de spanningstoename aan het water worden doorgegeven. Het percentage van de druktoename dat ten laste komt van het grondwater neemt toe naarmate de samendrukbaarheid van het gesteenteskelet groter is. Op het water in de put werkt de atmosferische druktoename echter voor 100 %, zodat er een drukgradiënt van de put naar het grondwater ontstaat. Door deze gradiënt zal het water vanuit de put het aquifer (de watervoerende laag) instromen, en dientengevolge daalt het waterniveau in de put. Zo veroorzaakt een toename van de barometerstand een afname van het debiet van een bron. Een daling van de luchtdruk gaat uiteraard gepaard met tegengestelde effecten. In een volkomen rigide aquifer heeft een wijziging in de barometerstand in het geheel geen invloed op de druk in het grondwater, en zal dus de verandering van het waterpeil in de put vrijwel gelijk zijn aan de verandering van de luchtdruk. Bij een toenemende samendrukbaarheid van het aquifer neemt de reactie van de put af.

Het barometrisch getij wordt gekenmerkt door een half-daagse fluctuatie in de barometerstand, waarbij geen dagelijkse verschuiving optreedt van het tijdstip van de maxima en minima zoals bij het aard- en oceanisch getij. Het verschijnsel doet zich over de



Afb. 4. Grondwaterstandsfluctuaties te Lethakeng en barometer-oscillaties te Gaborone.

gehele wereld voor, doch manifesteert zich het sterkst in de tropen en is het best zichtbaar in een stabiele atmosfeer. Zulke omstandigheden overheersen in de halfwoestijn van Botswana, en de dagelijkse fluctuaties in de luchtdruk liggen daar in de orde van 5 cm waterdruk. De oorzaak van dit barometrisch of atmosferisch getij is te vinden in het dagelijkse ritme van de inkomende zonnestraling en is dus geen gravitatief effect zoals het aardgetij; de maan speelt hierin dan ook geen rol. Een volledige verklaring voor het verschijnsel is nog niet gegeven, doch verondersteld wordt dat het een indirect gevolg is van de invloed van de zonnestraling op de ionosfeer, die vervolgens als drukverandering doorwerkt in de atmosfeer.

In het voorgaande is betoogd, dat het optreden van het aardgetij in een put sterker zal zijn naarmate het watervoerend pakket elastischer is. In een dergelijke situatie is het barometrisch effect minimaal. Omgekeerd zal in een zeer rigide pakket, waar het barometrisch effect 100% is, de invloed van het aardgetij verwaarloosbaar zijn. Voor een nadere bestudering van het barometrisch getij werd daarom een put geselecteerd waarin het barometrisch effect vrijwel 100% is en het aardgetij ontbreekt.

Waarnemingen

Afb. 4 toont de waterbeweging in put 4695 te Lethakeng tezamen met de barometrische fluctuaties op het meteorologisch station in het nabijgelegen Gaborone. De directe relatie tussen de beide oscillaties komt in deze afbeelding duidelijk tot uiting. De spectraalanalyse van beide golfbewegingen, die in afb. 5 B en 5 C zijn weergegeven, laat zien dat er vier componenten (S1 - S4) zijn te onderscheiden. Deze worden veroorzaakt door de zon. De 24-uurscomponent (S1) en de 12-uurscomponent (S2) zijn de belangrijkste. De meer-daagse fluctuaties die links in de grafiek geconcentreerd staan worden gevormd door luchtdrukveranderingen, die een meteorologische oorzaak hebben.

Vergelijken we de spectra van het aardgetij en het barometrisch getij, dan valt een duidelijk verschil in het oog: het aardgetij wordt gedomineerd door de 12-uursgolf (M2), die veroorzaakt wordt door de aantrekkingskracht van de maan; deze M2 ontbreekt in het atmosferisch getij. Het atmosferisch getij daarentegen wordt gedomineerd door de 24-uurs zonnecomponent (S1), die op zijn beurt in het aardgetij ontbreekt.

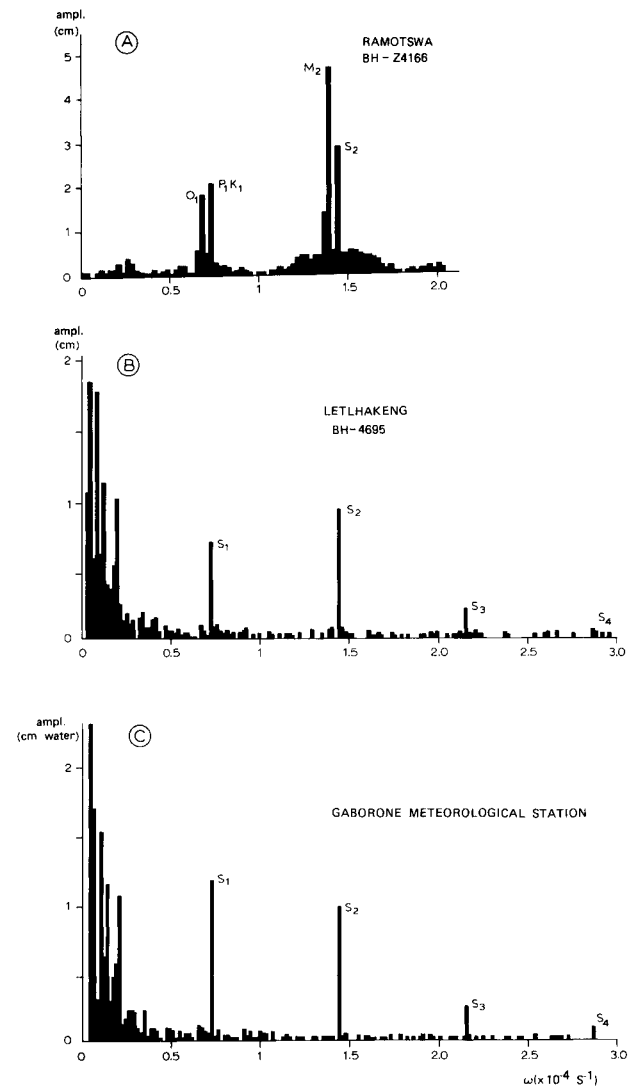
Slotopmerking

De Precambrische sedimenten, waarin het krachtige aardgetij is waargenomen, zijn op zich niet bijzonder elastisch, zodat de oorzaak waarschijnlijk gezocht moet worden in een sterke deformatie van breuksystemen. Opvallend is, dat het verschijnsel is waargenomen aan de flanken van grootschalige anticlinale structuren. Mogelijk ondervinden deze opwellingen een relatief sterke impuls van de getijgolf in de aardmantel.

Het nut van de bestudering van deze getijeffecten voor grondwateronderzoek is, dat inzicht verkregen kan worden in de grootschalige geologische structuren en de hydrogeologische eigenschappen van het betreffende gesteente, zoals elasticiteit, permeabiliteit, porositeit en bergingsfactor.

Literatuur

- A. Gieske and J.J. de Vries, 1985. An analysis of tidal-induced groundwater flow in Eastern Botswana. *J. Hydrology* 82:211-232.
 J.J. de Vries and A. Gieske, 1988. Barometric tides in partly-saturated confined aquifers in Botswana. *J. Hydrology* 104:17-32.



Afb. 5. Spectraalanalyses van: A) aardgetij in put te Ramotswa; B) atmosferisch getij in put te Lethakeng; C) atmosferisch getij in de luchtdruk te Gaborone.