

De QH-relatie zijn langste tijd gehad? Op weg naar het Qf-tijdperk voor de Rijntakken

IR. WOUT VAN VUUREN, RIZA ARNHEM

IR. ROELOF MOLL, HASKONING BV NIJMEGEN

IR. HERALD VERVOORN, HASKONING BV NIJMEGEN

Sinds jaar en dag worden door Rijkswaterstaat op een aantal locaties langs de Rijntakken periodieke afvoermetingen verricht met behulp van Ott-molens. Op basis hiervan worden QH-relaties bepaald waarmee vervolgens de meer continu gemeten waterstanden (H) worden geconverteerd naar afvoeren (Q). De resultaten hiervan (de in de praktijk gebruikte afvoerreeksen) zijn o.m. vastgelegd in het DONAR-bestand. Nader onderzoek van de QH-relaties heeft opgeleverd dat aan deze cijfers de nodige onnauwkeurigheden kleven als gevolg van onder meer het verwaarlozen van hysteresis en het onvoldoende in rekening brengen van bodemveranderingen. Een heranalyse van de oorspronkelijke afvoermetinggegevens voor de stations langs de Rijntakken over de periode 1956-1998 heeft niet alleen geresulteerd in op de genoemde punten verbeterde afvoercijfers, maar ook in een heel nieuw concept voor de bepaling van QH-relaties: de Qf-relatie.

Hierin speelt dus niet slechts de waterstand, maar ook een aantal andere parameters een rol. Eén en ander is uitgevoerd aan de hand van een conventionele meervoudige regressietechniek, maar een eerste verkennende analyse met een neurale netwerk leverde een vergelijkbaar resultaat op. Neurale netwerken kunnen een groot operationeel voordeel hebben t.o.v. de regressietechniek waar het gaat om het bijhouden van de Qf-

relatie in de loop van de tijd. De (on)nauwkeurigheid van de afvoercijfers is door de verbetering van de analysemethodiek afgenomen van ca 8% (DONAR-cijfers) tot ca 3%, en daarmee tot bijna het niveau van de meetfouten (afvoermetingen) die als absolute ondergrens voor de te bereiken (on)nauwkeurigheid moet worden beschouwd.

Het belang van nauwkeurige afvoergegevens

Langs de Nederlandse Rijntakken wordt op een aantal locaties waterstanden gemeten. Op de hoofdstations (MSW) gebeurt dit momenteel in de vorm van 10 min waarnemingen, die desgewenst tot uur- of dagcijfers worden uitgemiddeld. Op een beperkt aantal locaties worden periodieke afvoermetingen verricht met behulp van Ott-molens. Voor

deze locaties wordt vervolgens een QH-relatie opgesteld aan de hand waarvan de waterstanden kunnen worden geconverteerd naar afvoeren. De afvoergegevens zijn als basisinformatie van direct belang voor het dagelijkse waterbeheer, maar ook voor het uitvoeren van waterhuishoudkundige beleidsanalyses, rivierkundig (ecologisch) onderzoek, en in het bijzonder ook voor het afregelen van de hydraulische modellen (WAQUA, SOBEK) waarmee de maatgevend hoogwaterstanden (MHW's) worden berekend in het kader van de wettelijk verplichte 5-jaarlijkse toetsing van de veiligheid van de rivierdijken.

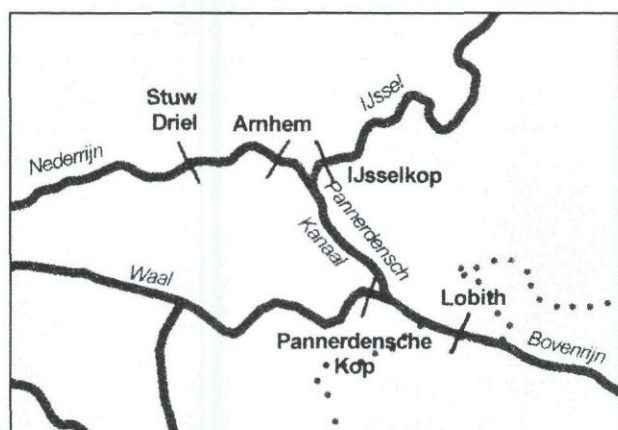
Tijdens analyses, uitgevoerd in het kader van het afregelen van de hydraulische modellen voor de bepaling van MHW's, is gebleken dat de nauwkeurigheid van de afvoergegevens onvoldoende is, en dat dit waarschijnlijk ook voor andere toepassingen het geval is. In dit artikel wordt gekeken naar de QH-relaties voor de meetstations rond de splitsingspunten Bovenrijn-Waal/ Pannerdensch Kanaal (zie Afb 1) en Pannerdensch Kanaal-Nederrijn/IJssel, daar deze stations cruciaal zijn voor de verdeling van de Bovenrijnafvoer over de verschillende takken, en daarmee voor de berekening van MHW's.

Traditionele methode en problemen

Bij de traditionele aanpak wordt periodiek (in termen van jaren) op basis van de recent verrichte afvoermetingen bekeken of de geldende QH-relatie aanpassing behoeft. Is dat het geval, dan wordt een nieuwe relatie vastgesteld over de periode dat de metingen significant af beginnen te wijken van de bestaande QH-relatie. In het andere geval blijft de oude relatie van kracht. De analyse-methode die hierbij gebruikt wordt, is gebaseerd op een handmatige regressieanalyse waarbij de afvoer Qeenduidig wordt gerelateerd aan (een polynoom in) de waterstand H. Deze aanpak heeft de volgende bezwaren:

- Door alleen de waterstand in beschouwing te nemen verwaarloost men het verschijnsel van de hysteresis, waardoor bij een gegeven waterstand in de wassende fase van een afvoergolf een te lage afvoer wordt berekend, en een te hoge afvoer in de vallende fase. Deze onder/overschatting van de afvoer kan voor de Bovenrijn bij Lobith oplopen tot ca 500 m³/s. Afb 2 geeft een voorbeeld hiervan;
- Op de Rijntakken treedt al sinds ca 100 jaar een min of meer systematische bodemdaling op. Door het periodiek herzien van de QH-relatie wordt daar in principe rekening mee gehouden. Daar echter verreweg de meeste afvoermetingen worden uitgevoerd tijdens hoogwaterperiodes ontstaat er mede door het

Afb. 1. Situatie splitsingspunten.



voorgaande een zodanig grote spreiding in de QH-puntenwolk dat minder snel tot aanpassing van de QH-relatie wordt besloten dan eigenlijk zou moeten. Hierdoor ijlt de aanpassing van de relatie systematisch na ten opzichte van de optredende bodemdaling;

- Door het gebruik van een vaste relatie binnen een QH-periode ontstaan op de grenzen van de periodes hikkels in het afvoerverloop, doordat bij een zelfde waterstand een verschillende afvoer wordt berekend.
- Dit heeft er toe geleid dat een integrale heranalyse van de QH-relaties is gestart op basis van de oorspronkelijke afvoermetingen, waarbij expliciet rekening gehouden is met de invloed van bodemdaling en hysteresis.

Heranalyse van QH-relaties voor de Rijntakken over de periode 1956-1998

In de periode 1997-1999 is door HASKONING te Nijmegen, in opdracht van en tevens in nauwe samenwerking met het RIZA, een integrale heranalyse van de afvoermetinggegevens voor de Rijntakken uitgevoerd, waarover gerapporteerd is (1).

Fysische invloedsfactoren

Afgezien van significante ingrepen in de laterale geometrie van een rivier wordt de relatie tussen de waterstand en de afvoer op een bepaalde locatie en een bepaald tijdstip in hoofdzaak beïnvloed door:

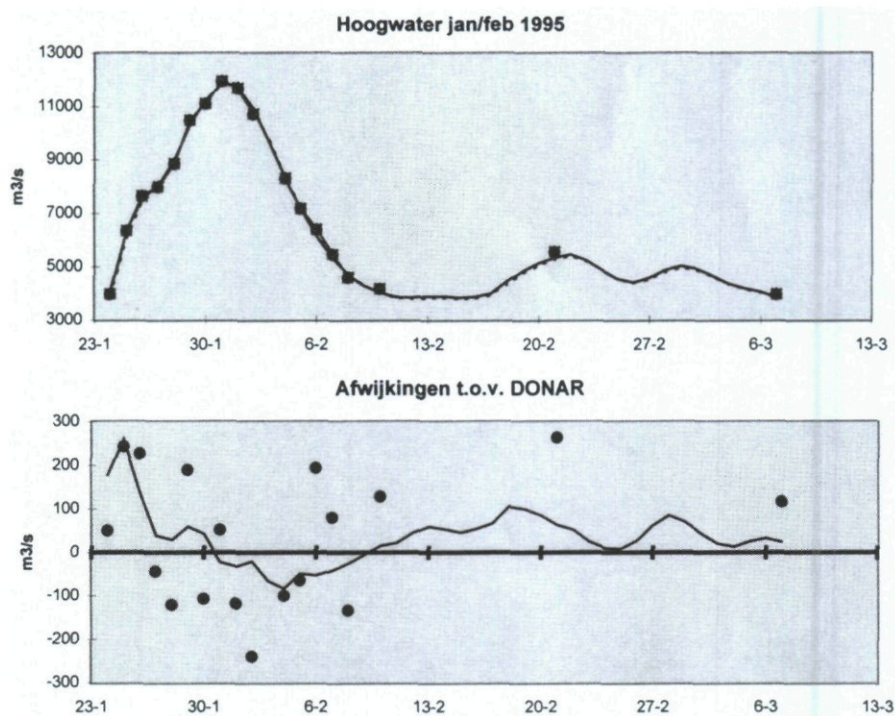
- De bodemligging ter plaatse;
- De toestand van was of val waarin de rivier zich ten tijde van het tijdstip van waarneming bevindt (hysteresis);
- Het eventuele optreden van op- of afwaaiing door wind.

De invloed van deze factoren is in de analyses meegenomen. Voor wat betreft hysteresis zij vermeld dat vanuit de fysica het ruimtelijk verhang $\partial H/\partial x$ in de waterstand gebruikt zou moeten worden als representatieve parameter. Deze is echter erg moeilijk met enige nauwkeurigheid te bepalen, zodat met de waterstandsverandering in de tijd $\partial H/\partial t$ is gewerkt, die in de meeste gevallen een goede benadering is voor $\partial H/\partial x$.

Inventarisatie en screening basisgegevens

Uit een uitgebreide inventarisatie van historische bronnen (Jaarboeken der waterhoogten, archiefmateriaal Regionale Directie Oost-Nederland) resulteerde een redelijk complete dataset over de periode 1956-heden, die in totaal ruim 8000 metingen omvatte voor 7 stations langs de Rijntakken.

Voor het meetstation Lobith betrof dit ca 1500 metingen. Afvoermetingen van vóór 1956



Afb 2 Weergave afvoermetingen (stippen) door berekende DONAR-afvoeren (stippellijn) voor het hoogwater van januari-februari 1995 (Bovenrijn, Lobith). De getrokken lijn geeft de voorspelling van het extrapolatiemodel aan. De onderste figuur laat zien dat de oorspronkelijk grote afwijkingen van DONAR al in behoorlijke mate worden geëlimineerd door het extrapolatiemodel.

zijn, wanneer deze überhaupt nog te traceren zijn, op zijn hoogst door intensief speurwerk boven water te halen. Alle metingen zijn per station gescreend aan de hand van met name een controle op de opgegeven waterstand en de aansluiting met de waterstanden van naastliggende stations, waarna de niet aan bepaalde eisen voldoende uitbijters werden geëlimineerd.

In de meeste gevallen kon een goede fysische verklaring worden gevonden voor de afwijkingen, bijvoorbeeld in het geval van ijsgang, waarbij de QH-relatie per definitie verloopt. Voor het station Lobith bleven er ca 20 metingen over die zonder sluitende verklaring uit de reeks verwijderd moesten worden. Dit is statistisch gezien een gering aantal, en aangenomen wordt dat het in die gevallen fouten in de afvoermetingen zelf betrof.

De nieuwe aanpak: Qf-relaties

Waar de QH-relatie staat voor een eenduidige relatie $Q(H)$ is in dit geval sprake van een Qf-relatie met de volgende variabelen:

- De waterstand H in de vorm van een (maximaal) 4e graads polynoom;
- De variabele $\partial H/\partial t$, waarbij de waterstandsverandering van de voorgaande dag tot op de dag van meting het best bleek te voldoen;
- De variabele $dagnr$ (dagnummer sedert 1-1-1956), die de bodemveranderingen representeert.

Voor wat betreft de invloed van wind werd

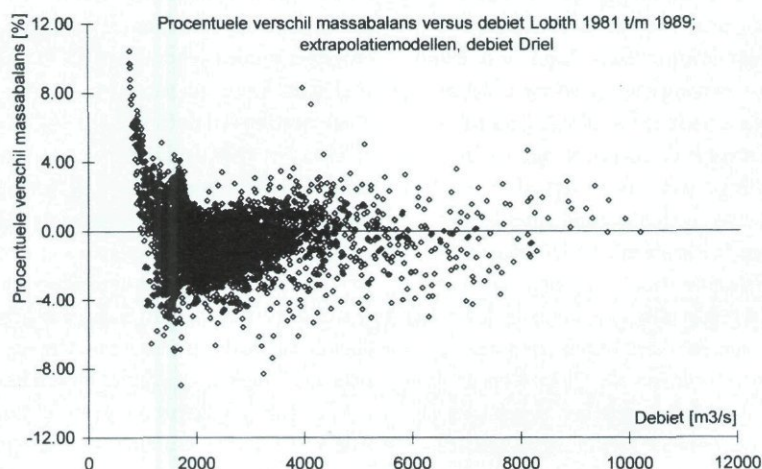
de windsterkte en -richting op het KNMI-station Deelen meegenomen bij de eerste analyses, maar deze bleek bij het geldende ruisniveau in de gegevens geen significante invloed te hebben.

Op deze wijze werd voor elk station een set regressieverbanden bepaald van de vorm:

$$Q = a_0 + a_1 H + a_2 H^2 + a_3 H^3 + a_4 H^4 + a_5 \frac{\partial H}{\partial t} + a_6 dagnr$$

Voor het station Lobith bleek ook het stuwbijdrift te Driel invloed te hebben, zodat in dat geval het verval $dH_{Driel} = (H_{boven} - H_{beneden})$ over de stuw als extra term werd meegenomen: $a_7 (dH_{Driel})^2$. Al in een vroeg stadium van de analyses is gebleken dat er voor wat betreft het volgen van de bodemontwikkeling een indeling in deelperiodes zinvol is, waarvoor nauwkeuriger regressierelaties kunnen worden bepaald dan voor de hele periode ineens.

De regressieverbanden voor de deelperiodes, kort gezegd het deelperiodemodel, zijn gebruikt voor het berekenen van de historische afvoerreeksen. Nu bestond er binnen de afregeling van WAQUA echter behoefte aan om extreme afvoeren te kunnen voorspellen voor periodes waarin die niet daadwerkelijk opgetreden zijn. De deelperiodemodellen leverden daarvoor veelal geen zinnige resultaten op omdat deze te gevoelig zijn voor het opgetreden bereik. Daarom is voor elk station tevens een overkoepelend model opgesteld, het extrapolatiemodel, dat zich met inlevering van



Afb. 3. Het verloop van de sluitfout in de massabalans over de splitsingspunten volgens het extrapolatiemodel in de periode 1981-1990. Voor de afvoer van de Nederrijn is het gemeten debiet bij stuw Driel genomen.

slechts weinig nauwkeurigheid veel robuuster gedraagt. Dit model blijkt tevens betere resultaten te geven voor het voorspellen van de Qf-relatie in de (meest recente) periode waarvan de afvoermetingen nog niet verwerkt zijn.

Rol van de massabalans

Bij het uitvoeren van een regressieanalyse wordt in principe de hoogste nauwkeurigheid nagestreefd die met het inbrengen van variabelen kan worden bereikt. Gebleken is echter dat wanneer dit zonder meer tot de laatste decimaal gedaan wordt, de massabalans over de splitsingspunten onnauwkeurig wordt. De variabele hiervoor is de sluitfout. In Afb 3 is het verloop hiervan over het afvoerbereik voor Lobith weergegeven. Bij de uiteindelijke afregeling is het optimum gezocht van de beide (on)nauwkeurigheden. Daarbij bleek dat slechts een klein beetje ingeleverd hoefde te worden op de nauwkeurigheid van de regres-

sieverbanden om een aanvaardbare sluitfout in de massabalans te verkrijgen.

Verbetering overall-nauwkeurigheid

Uit een confrontatie van DONAR-afvoeren op afvoermeetdagen met de gemeten afvoeren op die dagen volgde een overal-(on)nauwkeurigheid van ca 8%, uitgedrukt als percentage van de gemiddelde gemeten afvoer over de gehele periode 1956-1998. Deze (on)nauwkeurigheid is na het uitvoeren van de heranalyse verbeterd tot 3-4%. Dit mag worden beschouwd als een zeer significante verbetering. Als ondergrens voor te bereiken nauwkeurigheid geldt de meetruis in de afvoermetingen, die bij het gemiddelde afvoerniveau van 2000 m³/s ca 1.5% bedraagt.

Verschillen tussen oude en nieuwe afvoeren

Om te laten zien wat de winst van de uitgevoerde heranalyses is, zijn de verschillen

tussen de DONAR-afvoeren en die volgens de nieuwe Qf-relaties op dagbasis berekend over de gehele periode 1956-1998. Er zijn dan twee typen verschillen te onderscheiden:

- Systematische verschillen over langere periodes. Deze hebben in hoofdzaak met bodemveranderingen van doen;
- Verschillen in de weergave van hoogwatergolven als gevolg van hysteresis.

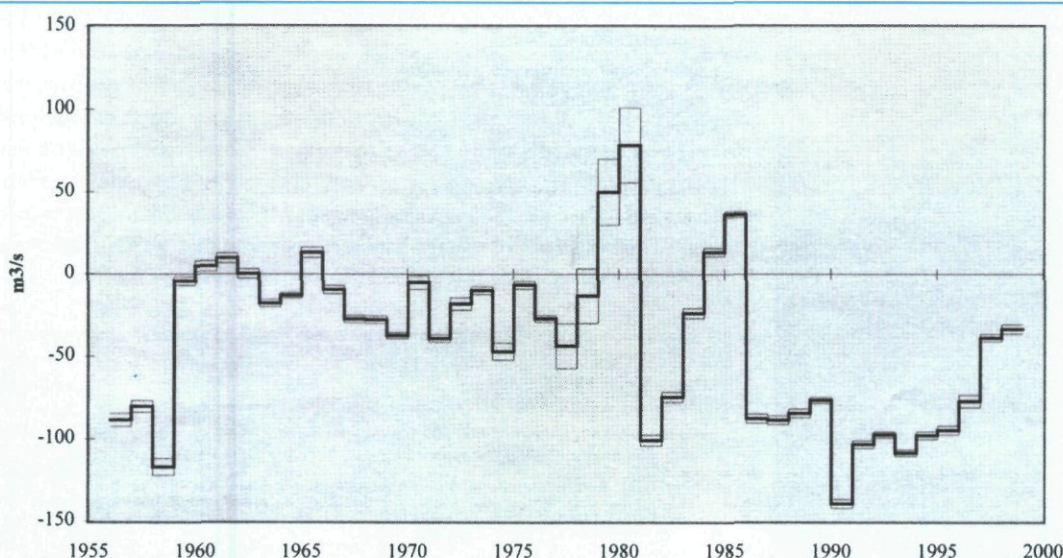
Afb 4 toont de jaargemiddelde verschillen over genoemde periode voor het extrapolatiemodel. Er is goed te zien dat DONAR over langjarige periodes sterk kan afwijken, hetgeen zoals hiervoor gezegd vooral geweten mag worden aan een onvoldoende in rekening brengen van de bodemveranderingen. Als gevolg van een systematisch najlen t.o.v. de bodemdaling resulteert een onderschatting van ca 40 m³/s over de gehele periode. Heel opvallend is echter de periode 1986-1996 waarvoor een onderschatting van ca 100 m³/s optreedt. Dit komt zowel qua orde van grootte als qua richting goed overeen met een reeds bekend verschil tussen de afvoeren zoals die door de Duitsers voor Lobith worden gehanteerd en die van Rijkswaterstaat, zodat dit probleem met de heranalyse is opgelost.

De systematische verschillen beperken zich tot een orde van grootte van 100-150 m³/s op jaarbasis. De kortdurende afwijkingen als gevolg van hysteresis zijn echter een stuk groter, zoals Afb 2 reeds liet zien. Afhankelijk van de grootte van de waterstandsverandering $\partial H/\partial t$ kan dit oplopen tot ca 300 m³/s onderschatting in de wassende fase of overschatting in de vallende fase van de hoogwatergolf. In Afb 2 is goed waar te nemen hoe het extrapolatiemodel de afwijkingen van DONAR met de metingen al heel behoorlijk elimineert. Deze onder/overschatting leverde met name stabiliteitsproblemen op bij het afregelen van modellen als WAQUA, maar heeft meer algemeen gezien tot gevolg dat de vorm van de hoogwatergolf in feite verkeerd werd weergegeven door de DONAR-afvoeren.

Mogelijkheden van een aanpak met neurale netwerken

Naast de conventionele regressie-analyse is ook een eerste oriënterende exercitie met een neurale netwerk uitgevoerd om te kijken in hoeverre dat tot vergelijkbare resultaten leidt. De achtergrond hierbij is dat een Qf-methodiek op basis van een neurale netwerk

Afb. 4. Jaarlijkse verschillen tussen DONAR- en Qf-(dag)afvoeren over de periode 1956-1999. (Extrapolatiemodel). De standaardfout is berekend als $s.e. = S_e/\sqrt{N}$, waarin S_e de standaardafwijking van de verschillen per dag en N het aantal dagen in betrokken periode.



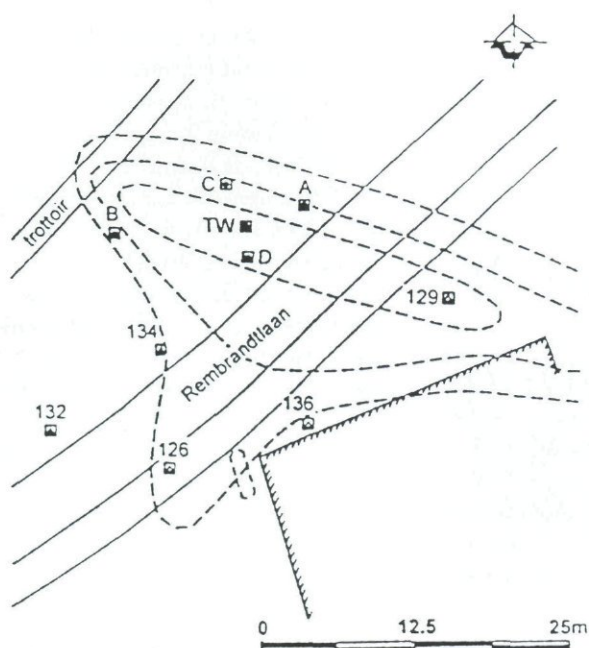


Fig. 2.

zestal peilbuizen de grondwaterstroming gemeten in de periode april tot december 1997. Eén diep filter is gemeten, namelijk in peilbuis B1003; filter 110 - 115 m -mv. De bestaande ideeën m.b.t. de grondwaterstroming op de lokatie zijn gebaseerd op een interpolatie van Olga/TNO-peilbuisgegevens. De dichtstbijzijnde peilbuizen bevinden zich op 2,5 kilometer ten westen, respectievelijk 4 kilometer ten oosten en zuidoosten van de lokatie. Deze interpolatie wijst op een noordelijke tot noord-oostelijke afstroming. De meetresultaten geven aan dat metingen in een driedaagse periode bij één put (nr. 416) reproduceerbaar zijn binnen circa 15 graden en 0,07 m/dag, en wijzen op een west-noordwestwaartse afstroming met een snelheid van circa 0,24 m/dag (303 graden-0,24).

Metingen in één filter over een tijdsopname van augustus tot en met december, bijvoorbeeld in peilbuis 412, duiden op een fluctuerende grondwaterstromingssnelheid (namelijk van 0,30 tot 0,47 meter per dag) en een fluctuerende stromingsrichting (van 323 graden NW - 35 graden NNO). Ofschoon reproduceerbaarheid van metingen enig vertrouwen geeft wat betreft het resultaat, is het verschil tussen de inschatting van de stromingsrichting op grond van de isohypsenkaart en de met Geoflo gevonden richting (60 tot 90 graden verschil) opmerkelijk. Vermoedelijk is het onjuist om de grondwaterstroming net onder het freatisch vlak op de lokatie in te schatten op grond van de gradiënt van een regionale isohypsenkaart. Temeer omdat in het onderhavige geval de isohypsenkaart gebaseerd is op peilen die een jaargemiddelde betreffen (1985).

Dat grondwaterstanden fluctueren is een gegeven, dat de richting van grondwater-

stroming op één lokatie gedurende een jaar over een bereik van 70 tot 80 graden kan fluctueren (peilbuis 412) ligt minder voor de hand.

Discussie

We kunnen ons wel de mechanismen voorstellen die voor fluctuatie van stromingsrichting zouden kunnen zorgen, maar beschouwen, zo lijkt het althans, deze grootheid toch als een statisch gegeven, en houden ons niet echt bezig met mogelijke consequenties. Als mechanisme kan lokaal variabele aanvulling gezien worden, of een populierenbos dat in het groeiseizoen enorm 'dorstig' is en in de winter geen of weinig water vraagt, etc. etc. Een mogelijke conclusie is dat de 3-dimensionale vorm van een grondwaterverontreiniging niet alleen, of slechts in geringe mate, veroorzaakt is door dispersie, maar te maken heeft met de fluctuatie van de grondwaterstromingsrichting. Een literatuurverkenning n.a.v. de gevonden fluctuaties heeft geleid tot een duidelijke onderbouwing van het voorkomen van dit soort fluctuaties.

Uit een rapportage van het Bureau of Economic Geology (lit. 1), een statistische studie van sites met verontreinigd grondwater in Texas (USA), kwam naar voren dat op 13 procent van de sites de variatie van de grondwaterstromingsrichting tussen de 80 en 100 graden is, en op 25 procent van de sites tussen de 60 en 100 graden.

Toepassingsgebieden

De hier gepresenteerde voorbeelden van toepassing van het Geoflo-instrument komen uit de bodemsaneringswereld. De toegevoegde

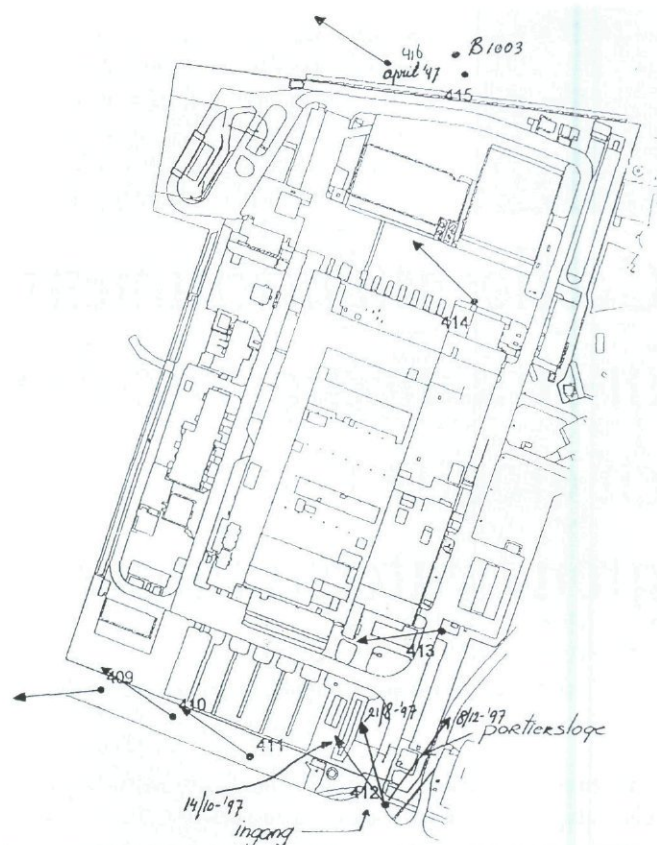


Fig. 3.

waarde voor bijvoorbeeld de drinkwaterindustrie in het kader van de vastlegging van de 25-jaars beschermingszone is evident. Daar waar tot nu toe de omvang van dit soort zones gebaseerd is op modelmatige berekeningen, kan nu een effectieve onderbouwing worden gegeven. Projecten waarbij drinkwater geproduceerd wordt uit open- of diepinfiltratie van voorgezuiverd oppervlaktewater, waarbij een minimale verblijftijd van 60 tot 90 dagen vereist wordt, kunnen m.b.t. dit laatste aspect beter onderbouwd worden. De verblijftijd tussen infiltratie en winning kan daadwerkelijk bepaald worden door op een voldoende aantal punten de snelheid van grondwaterstroming te meten.

Conclusie

Uit de hier gepresenteerde meetresultaten blijkt de bruikbaarheid van het Geoflo-instrument. Het kan snel inzicht verschaffen in de aan- of afwezigheid van grondwaterstromingspatronen die samen zouden moeten hangen met ingrepen in het hydrologische systeem. Op grond van betrekkelijk geringe inspanningen kan het voorkomen en belang van een fluctuerende grondwaterstromingsrichting en grootte aangegeven worden.

LITERATUUR

'Extent, mass and duration of hydrocarbon Plumes from Leaking Petroleum Storage Tank Sites in Texas', Geological Circular 97-1, Bureau of Economic Geology 1997.