

# Geofysisch onderzoek ter bepaling van bodemconstanten

Voordracht uit de 28ste vakantiecursus in drinkwatervoorziening 'De winning en aanvulling van grondwater en beïnvloeding van de omgeving', die op 8 en 9 januari 1976 werd gehouden aan de TH Delft.

## Vakantiecursus Afvalwater '77 Milieu en economie

De 12e Vakantiecursus in behandeling van afvalwater heeft als thema: 'Milieu en economie in het spanningsveld van onze maatschappij'. De cursus wordt gehouden op 14 en 15 april 1977 aan de TH Delft. Het programma luidt als volgt:

14 april 1977

drs. J. C. Kroes, coördinator van de activiteitengroep ontwikkeling bedrijfsleven van het VNO: Het milieu als facet van economisch structuurbeleid;  
dr. ir. F. Dijkstra, chef van de afdeling milieu-research van het Centraal Laboratorium van DSM: Zuivering en zuiveringskosten bij DSM;  
dr. L. Ginjaar, prof. mr. B. M. Telders-stichting: Milieu, groei en schaarste;  
mr. H. Versloot, lid van de Eerste Kamer voor de PvdA: Milieu, bestuur en ingezetene.

15 april 1977

ir. J. van Selm, hoofd van de technologische dienst waterschap Regge en Dinkel: Regge en Dinkel, waterkwaliteit in verleden, heden en toekomst;  
ir. J. B. M. Wiggers, hoofd van de afdeling waterloopkunde, hoofdafdeling gezondheidstechniek van DHV: Studie Kromme Rijn - Nieuwe Vecht; een perspectief?;  
ir. K. C. Zijlstra, hoofdingenieur directeur van het RIZA: Waterkwaliteitszorg in de toekomst;  
ir. L. J. Huijzen, secretaris van de Rijn-commissie Waterleidingbedrijven: De Rijnvervuiling, een nationaal en internationaal probleem.

Inlichtingen worden na 1 maart verstrekt door het Secretariaat van de Vakantiecursussen in behandeling van afvalwater. Telefoon 015 - 133222, toestel 3346, b.g.g. 3347. Ook alle correspondentie dient aan dit adres te worden gericht.

## 'Abwasserbiologische Einführungskurs'

In München wordt door de Bayerische Biologische Versuchsanstalt van 7 t/m 11 maart a.s. de 'Abwasserbiologische Einführungskurs' georganiseerd. Inlichtingen bij prof. dr. M. Ruf, Bayerische Biologische Versuchsanstalt München, Kaulbachstrasse 37, 8000 München 22.



### 1. Inleiding

Algemeen gesteld wordt geofysisch onderzoek uitgevoerd voor drie doeleinden:

- het uitsparen van boringen;
- het bewerkstelligen, dat aan de bemonstering van boringen minder hoge eisen behoeven te worden gesteld;
- het verkrijgen van gegevens betreffende relevante fysische grootheden van de aardlagen. Daarbij gaat het om gegevens die op een andere wijze moeilijk of niet zijn te



DRS. F. WALTER  
Dienst Grondwaterverkenning  
TNO

verkrijgen.

Geofysisch onderzoek kan op tweeërlei wijze worden uitgevoerd: vanaf het aardoppervlak en in boorgaten of putten. Er is een groot assortiment onderzoeksmethoden; van de geohydrologische situatie hangt evenwel af, welke methoden nuttige informatie opleveren. Bepaalde methoden kunnen uitsluitend òf aan het aardoppervlak òf bij het onderzoek in boorgaten worden toegepast; andere lenen zich voor beide types onderzoek, zoals de geo-elektrische en de thermische methode. De mogelijkheden tot evaluatie van de met deze methoden verkregen gegevens verschillen echter sterk voor de twee soorten onderzoek, zoals hieronder zal blijken. Dat betekent, dat de nauwkeurigheid waarmee bodemconstanten als laagdikte en permeabiliteit kunnen worden bepaald of afgeleid, voor de twee soorten onderzoek uiteenlopen. Hieronder zullen de belangrijkste methoden die zich lenen voor onderzoek van niet verkitte aardlagen worden toegelicht.

### 2. Geofysisch oppervlakte-onderzoek

#### De geo-elektrische methode

Niet alleen in Nederland maar in geheel Europa is de belangrijkste geofysische methode van onderzoek vanaf het aardoppervlak ten behoeve van geohydrologische studies de geo-elektrische methode vanwege de aard van de informatie die wordt verkregen, de eenvoudige wijze van toepassing en de kostprijs.

Een geo-elektrische meting of sondering wordt in principe uitgevoerd met vier elektroden, waarvan twee dienen voor stroomdoorgang door de bodem en twee voor de bepaling van de potentiaalverdeling tussen de stroomelektroden. De elektroden worden

symmetrisch en in een rechte lijn opgesteld: de stroomelektroden op een onderlinge afstand, die tenminste driemaal zo groot is als de afstand tussen de potentiaalelektroden. Aangevangen wordt met een stroomelektrodenafstand van ca. 3 m; de sondering wordt doorgaans beëindigd bij een stroomelektrodenafstand van 600 à 1.200 m. Bij een twintigtal stroomelektrodenafstanden wordt de sterkte van de stroom die door de bodem gaat en het opgewekte potentiaalverschil tussen de meetelektroden bepaald en daaruit wordt een schijnbare elektrische bodemweerstand berekend. De berekende weerstanden worden in een grafiek uitgezet als functie van de stroomelektrodenafstand. Doordat de ondergrond doorgaans is opgebouwd uit een aantal lagen met onderling verschillende weerstanden en de stroom met toenemende stroomelektrodenafstand dieper in de ondergrond doordringt, wordt een meer of minder gecompliceerde weerstandscurve verkregen, die met behulp van hulpdiagrammen, een elektronische calculator of een computer op meer of minder eenduidige wijze kan worden geïnterpreteerd. Dit houdt in, dat de weerstandsopbouw ter plaatse van een sondering uit de betreffende curve wordt afgeleid in termen van laagdikten en laagweerstand. Over het algemeen zullen de uitkomsten van de interpretatie nauwkeuriger zijn naarmate het weerstandsprofiel eenvoudiger is: een gering aantal lagen (bij voorkeur niet meer dan 4 à 5), waarvan de dikten ongeveer in de orde van grootte zijn van de diepte waarop zij voorkomen en waarvan de weerstanden onderling flinke verschillen vertonen, beperkt de ambivalentie in de interpretatie. Enige ambivalentie blijft over het algemeen aanwezig: een dunne laag met een hoge weerstand tussen formaties met lage weerstanden kan een meetcurve in vrijwel gelijke mate beïnvloeden als een wat dikere laag met iets minder hoge weerstand. Dit is van grote betekenis bij de verdere geohydrologische evaluatie van gevonden laagweerstand, zoals uit het onderstaande moge blijken.

De elektrische weerstand van een aardlaag ( $\rho_t$ ) wordt bepaald door de elektrische weerstand van het poriënwater in die laag ( $\rho_1$ ) en de zogenaamde formatiefactor (F):

$$\rho_t = F \times \rho_1 \quad (1)$$

Bij slibvrije, volledig met water verzadigde afzettingen geldt de volgende relatie:

$$F = T \cdot \gamma^m \quad (2)$$

waarin T = tortuositeit

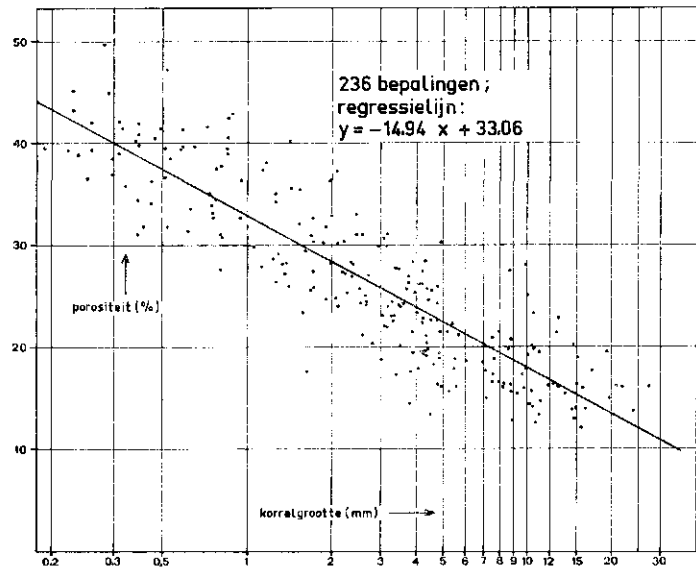
$\gamma$  = porositeit (verhouding poriënvolume — totale volume)

m = cementatiefactor

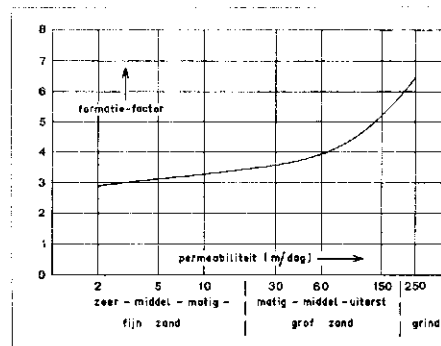
Bij laboratoriumproeven werden voor Nederlands rivier- en duinzand voor T en m

respectievelijk waarden van 1,26 en 1,20 gevonden (De Haan, 1974). Bij onderzoeken in Nederland is gebleken, dat de formatiefactor afhankelijk is van de grofte van de afzettingen; voor fijnere zanden bedraagt  $F = 3$ , voor grove is  $F = 5$ . Dat porositeitsverschillen als oorzaak moeten worden beschouwd, kan worden afgeleid uit onderzoeken in de Verenigde Staten van Noord-Amerika (Eckis, 1934), waarbij een groot aantal porositeitsbepalingen aan rivierzanden in situ werden uitgevoerd. Enige uitkomsten van het onderzoek zijn weergegeven in afb. 1. De grafiek maakt duidelijk, dat er een lineair verband bestaat tussen de porositeit en de logaritme van de korrelgrootte. Gebruikmakende van de uitkomsten van dit onderzoek vindt men bij toepassing van formule 2 en de voor T en m vermelde cijfers voor F waarden, die in zeer goede overeenstemming zijn met in Nederland gevonden empirische cijfers voor de relatie formatiefactor — korrelgrootte.

Anderzijds bestaat er ook een verband tussen korrelgrootte en permeabiliteit. Deze relatie kan theoretisch worden afgeleid; er zijn evenwel ook empirische cijfers beschikbaar. Combinatie van gegevens leidt tot het in afb. 2 weergegeven verband tussen formatiefactor en permeabiliteit. Uit deze figuur blijkt, dat een geringe verandering in F aanleiding geeft tot een sterke toe- of afname van de permeabiliteit. Een redelijke schatting van de permeabiliteit uit de formatiefactor kan derhalve alleen worden gemaakt als F nauwkeurig kan worden bepaald. Dit is in de regel wel mogelijk bij fysisch boorgatonderzoek maar niet bij geo-elektrisch oppervlakte-onderzoek: zoals reeds vermeld kan de elektrische weerstand van een bepaalde laag, bijvoorbeeld een zandafzetting, vaak niet nauwkeurig worden afgeleid en bovendien is doorgaans de weerstand van het poriënwater in de betreffende laag niet of slechts bij benadering bekend, waardoor de berekening van F met behulp van formule 1 tot een twijfelachtig resultaat leidt. Bij kleien en in mindere mate bij slibhoudende zanden is de formatiefactor afhankelijk van de elektrische weerstand van het poriënwater, doordat kleideeltjes elektrisch niet neutraal zijn. Bij zoet poriënwater heeft de formatiefactor van een kleilaag een aanmerkelijk lagere waarde dan op grond van de porositeit kan worden verwacht; naarmate het poriënwater een hoger zoutgehalte heeft, neemt de formatiefactor toe. Bij een zoutconcentratie als van zeewater wordt F uitsluitend door het poriënvolume bepaald en verschilt de elektrische weerstand van een enigszins compacte kleilaag niet of nauwelijks van die van een zandpakket.



Afb. 1 - Verband tussen de porositeit en de korrelgrootte (rekenkundig gemiddelde bij gebruik van de Phi-schaal) van fluviale afzettingen naar gegevens van Eckis, 1934.



Afb. 2 - Verband tussen de formatiefactor en de permeabiliteit.

Geo-elektrisch oppervlakte-onderzoek kan in Nederland worden toegepast:

- voor de globale bepaling van de lithologische opbouw in een zoet milieu: o.m. de bepaling van dikte, diepte en uitgestrektheid van een kleilaag en de opsporing van een met zand opgevulde geul in kleiige afzettingen;
- voor een ruwe schatting van het zoutgehalte van het poriënwater in de diverse afzettingen, die in een gebied voorkomen (totale hardheid in gebieden met zoet grondwater; chloridegehalte in gebieden met zout grondwater) en voor de bepaling van de diepte, waarop belangrijke veranderingen in de zoutconcentraties van het grondwater voorkomen. In dit verband kan worden genoemd het grensvlak zoet-zout water, dat in Nederland wordt gevonden op diepten variërende van enige decimeters tot enige honderden meters. Als zeer fraai voorbeeld voor hetgeen met behulp van de geo-elektrische methode kan worden bereikt, kan dienen een onderzoek

dat enige jaren geleden in de omgeving van het pompstation Fickersdries bij Driel werd uitgevoerd.

Bepaald konden worden:

- de diepte tot het zoute grondwater, welke bleek te variëren van ca. 100 m tot 300 m-mv;
- de verbreiding van het uit het Noordelijke Massief afkomstige water van het stuwwaltype;
- de dikte en uitgestrektheid van een kleilaag op ca. 30 m diepte;
- de plaatsen waar zandige afzettingen voorkomen in het holocene kleidek.

#### Temperatuuronderzoek

Temperatuuronderzoek door metingen op ca. 1 m onder het aardoppervlak verschaft geohydrologische informatie in geval van ondiepe kwel. Worden de meetgegevens in kaart gebracht, dan worden anomalieën in het kaartbeeld gevonden waar grondwater opstijgt: relatief hoge temperaturen als de metingen aan het einde van het winterseizoen hebben plaatsgevonden; relatief lage temperaturen als het onderzoek is uitgevoerd aan het einde van het zomerseizoen.

De meetresultaten geven slechts kwalitatieve informatie; zijn kwantitatieve gegevens nodig, dan kan dit type temperatuuronderzoek slechts dienen als leidraad voor verder onderzoek.

#### Reflectie-seismisch onderzoek

Ten behoeve van de exploratie van de diepe ondergrond van Nederland wordt in opdracht van aardoliemaatschappijen

reflectie-seismisch onderzoek uitgevoerd. Uit de opnamen die daarbij worden gemaakt kan de looptijd van de longitudinale golven naar en van reflecterende grensvlakken in de ondergrond worden afgeleid. Is de voortplantingssnelheid bekend, dan kan uit de looptijd de diepte tot zulk een reflecterend grensvlak worden berekend. De ondiepste reflectoren, die in de opnamen kunnen worden onderkend, bevinden zich in het Tertiair. Dit impliceert, dat men in sommige gedeelten van het land een indicatie kan krijgen over de diepte tot de ondoorlatende (of slecht doorlatende) basis van het watervoerend pakket. Van veel belang is de informatie die verkregen wordt aangaande geologische structuren zoals breuken en zoutdome.

### 3. Geofysisch onderzoek in boorgaten en putten

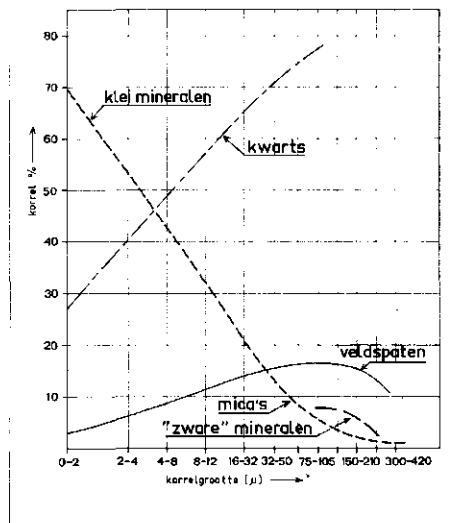
#### Geofysisch onderzoek in het open boorgat

Dit omvat in de regel de continue opname van de volgende grootheden als functie van de diepte met behulp van een meerpenlijnschrijver:

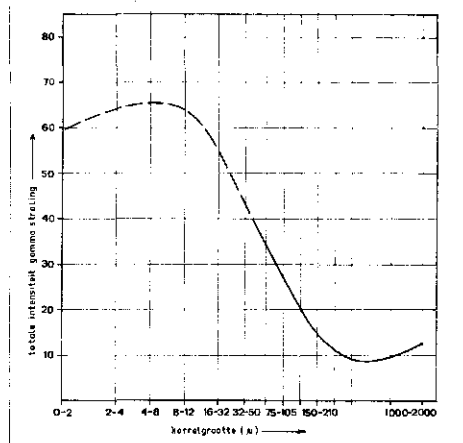
- de elektrische potentiaal ten opzichte van de potentiaal in een punt aan het aardoppervlak (S.P.);
- de schijnbare elektrische weerstand bij twee verschillende elektroden-configuraties;
- de totale intensiteit van de natuurlijke gammastraling;
- de boorgatdiameter.

De S.P. (afkorting van 'spontane potentiaal') ontstaat door concentratieverschillen tussen de spoelingsvloeistof in het boorgat en het poriënwater in de diverse formaties. Vaak zijn deze concentratieverschillen gering, doordat de spoeling is aangemaakt met zoet water (bijv. grondwater dat afkomstig is uit een werkwaterput) en de doorboorde formaties ook zoet water bevatten. De opgenomen S.P. is dan vrijwel een rechte lijn. Bij voor de S.P. gunstiger condities kunnen klei- en veenlagen worden onderscheiden van zandlagen. Een kwalitatieve evaluatie van de S.P. in termen van totaal zoutgehalte van het grondwater, slibgehalte van de afzettingen of doorlatendheid is tot op heden niet mogelijk gebleken.

Uit de schijnbare elektrische weerstand, die bij 2 verschillende elektrodenafstanden wordt gemeten en enige andere gegevens kan de elektrische weerstand van de diverse doorboorde formaties vrij nauwkeurig worden afgeleid. Is de elektrische weerstand van het poriënwater in de verschillende watervoerende lagen bekend uit bepalingen aan watermonsters onttrokken aan bijv. waarnemingsfilters, dan kan de formatie-



Afb. 3 - Schematisch verband tussen korrelgrootte en korrelpercentage van de hoofdbestanddelen van Rijn-afzettingen.



Afb. 4 - Relatie korrelgrootte — intensiteit natuurlijke gammastraling (schematisch).

faktor worden berekend en kan met behulp van de eerder toegelichte grafiek, die het verband geeft tussen formatiefactor en doorlatendheid (afb. 2), deze laatste worden afgeleid voor zover het zoet-watervoerende lagen betreft. Zijn (nog) geen wateranalyses beschikbaar, dan dient F te worden afgeleid uit het totaalbeeld der geofysische logs (S.P., weerstand en gamma), eventueel aangevuld met informatie verkregen van de uit de boorspoeling of anderszins verkregen grondmonsters.

De natuurlijke gammastraling die in het boorgat wordt gemeten, is afkomstig van radio-actieve bestanddelen in de mineralen, waaruit de afzettingen zijn opgebouwd. Het gaat daarbij om de radio-actieve isotopen  $U^{238}$  en  $Th^{232}$  met radio-actieve dochterproducten en  $K^{40}$ . Het gehalte aan radio-actieve isotopen varieert voor de verschillende mineralen; bovendien kunnen er niet onaanzienlijke variaties optreden

voor één bepaald mineraal. De minerale samenstelling van de in de ondergrond van Nederland voorkomende formaties, bijvoorbeeld als functie van de korrelgrootte, is nog vrij slecht bekend. Ook over het gehalte aan radio-actieve bestanddelen van de mineralen ontbreekt de nodige informatie. Een en ander heeft tot gevolg, dat een nauwkeurige evaluatie van de gamma-opnamen nog niet mogelijk is. In afbeelding 3 is schematisch weergegeven het verband tussen het gehalte aan de hoofdbestanddelen mica- en kleimineralen, veldspaten, kwarts alsmede de zware mineralen en de korrelgrootte. Buiten beschouwing gelaten zijn o.m. gesteente-fragmenten, die bij toenemende korrelgrootte van belang worden. Van de weergegeven componenten geven de mica- en kleimineralen en de zware mineralen relatief veel straling af, kwarts weinig en veldspaten een hoeveelheid die afhankelijk is van het K-gehalte, dus van de aanwezige veldspaatsoorten (orthoklaas en microklien bevatten tot ca. 11 % K).

In afbeelding 4 is, voor zover momenteel mogelijk, het verband tussen de totale intensiteit van de natuurlijke gammastraling, zoals vastgelegd met een gammasonde van het gebruikelijke type, en de korrelgrootte bij Rijnafzettingen weergegeven. Komt de korrelgrootte onder ca. 200  $\mu$ , dan neemt de stralingsintensiteit geleidelijk toe. Dit moet een gevolg zijn van de toename van het gehalte aan mica- (biotiet en muscoviet)korrels. Er zijn indicaties, dat deze meer straling afgeven dan de kleimineralen, die onder een grootte van 2  $\mu$  voorkomen. Een maximum in de stralingsintensiteit is te verwachten voor de korrelgroottefractie van 10  $\mu$ .

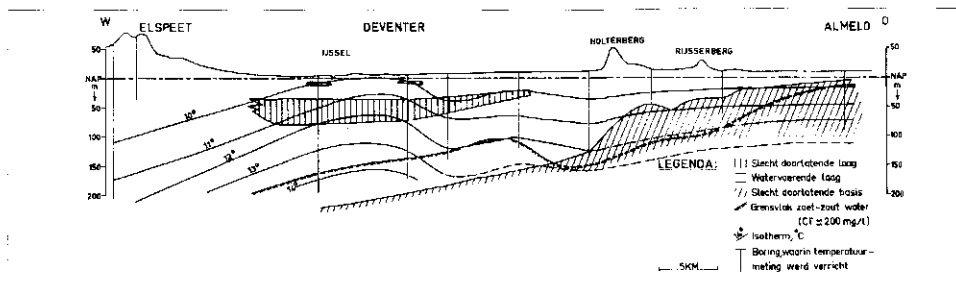
Voor andere dan Rijnafzettingen zullen de corresponderende curven ietwat verschillen. Er zal nog veel onderzoek nodig zijn om de verbanden vast te leggen en om eventueel te komen tot een relatie tussen natuurlijke gammastralingsintensiteit en korrelgrootte van een bepaalde afzetting.

#### Geofysisch onderzoek in afgewerkte putten

Daarbij kunnen, eveneens met behulp van een lijnschrijver, o.m. de volgende grootheden als functie van de diepte worden geregistreerd:

- de elektrische weerstand van het water (in rusttoestand of opwaarts stromend);
- de verticale stroomsnelheid in een injectie- of pompput;
- de temperatuur.

Hieronder zal slechts worden ingegaan op het temperatuuronderzoek in waarnemingsputten, waarin de temperatuur op een bepaalde diepte gelijk is aan de



Afb. 5 - Temperatuurverdeling in de ondergrond langs een profiel van Elspeet tot Almelo.

oorspronkelijke bodemtemperatuur.

De bodemtemperatuur aan het aardoppervlak wordt bepaald door het invallende zonlicht enerzijds en de warmtestroom vanuit de diepte anderzijds.

De geabsorbeerde zonnewarmte varieert binnen een etmaal en binnen een jaar; diensgevolge komen er aan het oppervlak temperatuurfluctuaties voor die zich tot een bepaalde diepte (ca. 20 m-mv) voortplanten. Beneden die diepte neemt de temperatuur met ongeveer 3 °C per 100 m toe.

Warmtetransport in de bodem vindt op tweeërlei wijze plaats: door geleiding en door convectie. Convectie treedt op bij stromende poriënvloeistoffen of gassen, bijv. circulerend grondwater. Stijgt water op van een bepaalde diepte, dan worden op geringere diepten relatief hoge bodemtemperaturen gevonden. Ook zal de temperatuurgradiënt lager zijn.

Vindt op een bepaalde plaats inzijing van water plaats, bijv. in infiltratiegebieden, dan treft men relatief lage bodemtemperaturen aan. Dit wordt gedemonstreerd in afbeelding 5, dat het geohydrologisch profiel van Elspeet tot Almelo schematisch weergeeft. Een normaal temperatuurverloop tengevolge van het ontbreken van convectief warmtetransport wordt gevonden bij Almelo; relatief lage temperaturen komen voor onder de infiltratiegebieden bij Elspeet en de Holterberg. Relatief hoge temperaturen tengevolge van opstijgend grondwater treden op bij Deventer.

Bij zuiver verticale grondwaterstroming (bijv. in een slecht doorlatende laag) kan de stroomsnelheid van het water op zeer eenvoudige wijze uit de gradiënt worden afgeleid. Is ook de grondwaterpotentiaalgradiënt in de betreffende laag bekend dan kan de permeabiliteit van deze laag worden berekend. Minder eenvoudig maar theoretisch wel mogelijk is het om de grondwaterstroming in een gebied uit de temperatuurindeling in de ondergrond te kwantificeren door numerieke simulatie in een model met behulp van een computer.

#### 4. Slot

In deze uiteenzetting kon slechts in grote

lijnen worden aangegeven in hoeverre de exploratiegeofysica een bijdrage kan geven in de kennis van de ondergrond, in het bijzonder voor wat betreft doorlatendheid en dikte van aardlagen.

In de afgelopen jaren zijn er belangrijke ontwikkelingen geweest in het bijzonder wat betreft interpretatietechnieken. Veel onderzoek is echter nog nodig om de gegevens die in het veld kunnen worden verzameld tot het uiterste te benutten.

#### Literatuur

- Eckis, R. P., *South Coastal Basin Investigation*, Calif. Bull. 45 (1934), pp. 84 - 116.  
 Haan, K. E. de, *Betrekking doorlatendheid — formatiefactor — porositeit van enkele zandfrakties* (1974), Dienst Grondwaterverkenning TNO, Delft.



## Symposium Vermindering van algengroei in spaarbekkens

De NV Waterwinningbedrijf Brabantse Biesbosch (WBB) houdt met de DVGW op het bedrijfsterrein Petrusplaat te Werkendam van 27 - 29 april a.s. een symposium onder de titel: *Mogelijkheden zur Verminderung der Algenentwicklung in Speicherbecken und Talsperren*. De voertaal is Duits.

Het programma luidt als volgt:

### 27 april 1977

#### I. Planktonproduktionsmodelle und ihre Anwendung in der Praxis

Modellvorstellungen zur Entwicklungskinetik von Algen, door drs. G. Oskam, WBB.

Planktonproduktionsmodell für die Beschreibung von Planktonzyklen in künstlichen Seen, door ir. J. H. G. Verhagen, WL Wageningen.

Application of Simple Plankton Models in the Management of the Thames Valley Reservoirs, door J. A. Steel M.Sc., West Molesey.

#### II. Praktische Erfahrungen mit der Steuerung der Algenentwicklung am Beispiel der Biesbosch Speicherbecken

Das Speicherbeckenprojekt Brabantse Biesbosch, door prof. ir. P. L. Knoppert, WBB.

Erfahrungen mit punktförmigem Luft-eintrag zur Wasserumwälzung am Beispiel der Biesbosch Speicherbecken, door ir. L. J. H. Goossens, Delft.

Die Vorausberechnung der Algenbiomasse in den Biesbosch Speicherbecken: Theorie und Praxis, door drs. G. Oskam, WBB.

### 28 april 1977

#### III. Verminderung der Nährstoffbelastung stehender Gewässer durch Vorsperren

Grundlagen der biologischen Phosphoreliminierung in Vorsperren, door dr. H. Müller, Konstanz.

Die Wirksamkeit von Vorsperren zur Nährstoffeliminierung, door dipl.-biol. Wilhelmus, Bensberg.

### 29 april 1977

#### IV. Verminderung der Nährstoffkonzentration in stehenden Gewässern durch Fällmittelzusatz

Algenbekämpfung im Berenplaat Speicherbecken durch Zusatz von Eisen-II-sulfat, door drs. J. J. Rook, Rotterdam en ir. A. Havelaar, Rotterdam.

Beschränkung der Algenentwicklung in den Braakman Speicherbecken durch Fällung der Phosphate, door drs. W. Bassie, WMZ.

Erfahrungen mit Fällmittelzusatz im Grote Rug Speicherbecken und vergleichende Untersuchungen in drei Modellreservoirs nach Lund, door drs. J. G. van der Vlugt, RWS.

Nadere inlichtingen: WBB, Postbus 61 Werkendam, telefoon 01835 - 2144.

