

STICHTING POSTAKADEMIALE VORMING
GEZONDHEIDSTECHNIEK

Cursus Zout Grondwater I 1970-1971

ZG 13 Meet- en karteermethoden

Fysisch boorgatonderzoek:
metingen door middel van diverse meetsystemen,
waaronder "Zoutwachters"
(tekst)

Drs. F. Walter

1. INLEIDING

Vergelijkt men de diverse eigenschappen van "zout" water met die van "zoet" water, dan blijken vele slechts weinig te verschillen. De specifieke elektrische weerstand is echter een duidelijke uitzondering. Globaal neemt het geleidingsvermogen (dat is de reciproke waarde van de weerstand) evenredig toe met het totale zoutgehalte, uitgedrukt in milli-equivalenten per liter.

Het is daarom niet verwonderlijk, dat de diverse meetsystemen die in Nederland en in het buitenland zijn ontwikkeld om het zoutgehalte van het grondwater in situ te bepalen door middel van metingen in een boorgat, gebaseerd zijn op de elektrische weerstandsmeting.

Deze kan op tweeërlei wijze worden uitgevoerd: met behulp van een aantal elektroden, die dienen om een stroom door het te onderzoeken medium te leiden of met behulp van een spoel, waarmee zwerfstromen in het te onderzoeken medium worden opgewekt. Bij de laatstgenoemde wijze van onderzoek wordt derhalve gebruik gemaakt van inductieverschijnselen. Naast deze methoden bestaat er een nucleaire waarmee het mogelijk is om het chloridegehalte te bepalen.

Van de hierboven genoemde methoden wordt de weerstandsmethode met behulp van elektroden verreweg het meest toegepast. De metingen kunnen op tweeërlei wijze worden uitgevoerd:

a. Met behulp van 2 elektroden (zie fig. 1a). Gemeten worden de sterkte van de stroom I die door het medium wordt geleid, en het potentiaalverschil ΔV tussen deze elektroden. De specifieke weerstand, uitgedrukt in Ohmcm of Ohmm, wordt gevonden met behulp van de volgende formule:

$$\rho_F = \frac{\Delta V}{I} \cdot C \quad (1)$$

C is de zogenaamde celconstante, die afhankelijk is van de vorm en grootte van de elektroden. De waarde van C wordt experimenteel bepaald.

Dit meetsysteem wordt veel toegepast bij laboratoriumweerstandsmetingen. Ter vermindering van polarisatie aan de elektroden ondergaan deze een speciale behandeling (ze worden geplatineerd); bovendien wordt gebruik gemaakt van wisselstroom met een frequentie van 1000 Hz. Door vervuiling van de elektroden bij herhaald gebruik verloopt de celconstante, die bovendien afhankelijk gaat worden van de zoutconcentratie.

Het gebruik van de tweepuntsceel vraagt zorg en onderhoud.

b. Met behulp van 4 elektroden (zie fig. 1b). Daarvan worden twee gebruikt voor het leiden van de stroom door het medium en twee voor de spanningsmeting. De specifieke elektrische weerstand volgt uit onderstaande formule:

$$\rho_f = \frac{\Delta V}{I} \cdot C' \quad (2)$$

C' is uitsluitend afhankelijk van de afstanden van de 4 elektroden ten opzichte van elkaar; uitgangspunt voor de berekening is de wet van Ohm. Vervuiling van de elektroden is niet van invloed op het meetresultaat. Men dient er bij de metingen slechts zorg voor te dragen, dat het meetapparaat waarmee het potentiaalverschil wordt bepaald, een hoge ingangsweerstand heeft.

De metingen, waarbij gebruik wordt gemaakt van inductie, worden in principe aldus uitgevoerd.

Door een spoel (de z.g. transmissie spoel) wordt een wisselstroom van 20 kHz geleid. De spoel is toroidaal, d.w.z. de kern is ringvormig. Door het wisselende magnetische veld ontstaan in het medium om de spoel stromen, die cirkelvormige banen doorlopen. Het wisselende magnetische veld, dat het gevolg is van de stromen, veroorzaakt vervolgens een stroompje in een tweede, eveneens toroidale spoel op enige afstand van de transmissie spoel (zie fig. 2). De grootte van het stroompje is een maat voor het geleidingsvermogen van het medium, dat de spoelen omgeeft.

De inductiemethode wordt toegepast voor bepalingen van de formatieweerstand in olieboringen bij gebruik van spoelingen met een hoge specifieke elektrische weerstand (bij spoelingen op oliebasis). Toepassingen op geohydrologisch gebied zijn schrijver dezes niet bekend. De methode zou wellicht kunnen worden gebruikt voor metingen in plastic stijgbuizen.

De nucleaire methode ter bepaling van het chloridegehalte van het grondwater is in het kort aldus.

In het te onderzoeken medium wordt een neutronenbron geplaatst. De neutronen die in het medium dringen, verliezen geleidelijk kinetische energie door elastische botsingen met atoomkernen. Naarmate meer lichte kernen voorkomen, is het energieverlies over een bepaalde afstand groter. De lichte kernen in een gesteentematrix, waarvan de poriën zijn gevuld met water, zijn de waterstofkernen. Gebleken is nu, dat de intensiteit van de neutronenstraling met een bepaald energieniveau op enige afstand van de bron een nauwkeurige maat is voor het waterstof- en daarmee het watergehalte van het medium. Op zekere afstand van de bron is het energieniveau van de neutronenstraling gezakt tot het thermische niveau.

In dit stadium worden de neutronen ingevangen door atoomkernen, waarbij gammastraling vrijkomt. De energie van de gammastraling is voor de diverse atoomsoorten verschillend; het energieniveau van de gammastraling, afkomstig van chloorkernen, is hoger dan van kernen van de meeste andere elementen. Bovendien is de waarschijnlijkheid, dat een neutron wordt ingevangen door een chloorkern, aanzienlijk groter dan dat een neutron wordt ingevangen door bijv. een zuurstof-, silicium- of waterstofkern. Een en ander maakt het mogelijk om de hoeveelheid chloor in het medium na te gaan. Uit het chloorcijfer en het watergehalte kan vervolgens het chloridegehalte van het formatiewater worden afgeleid. Helaas is deze nucleaire methode (nog) slechts bruikbaar voor de bepaling van chloridegehalten, die groter zijn dan 20.000 mg/l bij porositeiten van ca. 30%.

Voor het geohydrologische onderzoek is de methode derhalve (nog) niet van belang. In het hierna volgende zullen de inductieve en de nucleaire methoden niet verder worden behandeld.

2. TOEPASSINGEN VAN DE ELEKTRISCHE-WEERSTANDSMETHODE DOOR MIDDEL VAN ELEKTRODEN-SYSTEMEN

De methode kan op tweeërlei wijze worden toegepast:

- a) om de elektrische weerstand van de waterkolom in een put als functie van de diepte te bepalen. Het doel daarbij zou kunnen zijn om de diepte tot het grensvlak zoet-zout water vast te leggen.
- b) om de elektrische formatieweerstand als functie van de diepte na te gaan. Daarbij zou men kunnen beogen om het zoutgehalte van het formatiewater te leren kennen.

De eerstgenoemde toepassing is de eenvoudigste; men behoeft slechts de relatie tussen de elektrische weerstand en het totale zoutgehalte of het chloridegehalte voor het betreffende type water na te gaan. Bij de tweede toepassing wordt in principe de formatieweerstand gevonden, waaruit vervolgens de waterweerstand moet worden afgeleid waaruit dan weer het totale zoutgehalte of het chloridegehalte moet worden gededuceerd.

Door de eenvoud zowel wat betreft het meetstelsel als de verwerking van de meetgegevens, verdient eerstgenoemde toepassing de voorkeur. De tweede toepassing is echter veel universeler bruikbaar en kent dientengevolge vele vormen.

Die toepassingsvormen zijn:

1. Metingen in pulsboringen tijdens de boorvordering als alternatief voor de werkwijze met proeffilters.

2. Metingen in pulsboringen na het trekken van de verbuizing, ter verkrijging van een continu beeld van de verandering van het zoutgehalte met de diepte.
3. Metingen in o verbuisde spoel-, spuit- of zuigboringen na het trekken van de boorstangen, ter bepaling van de lithologie en het zoutgehalte van het grondwater als functie van de diepte, in combinatie met andere fysische metingen.
4. Metingen aan permanente elektrodensystemen (z.g. "zoutwachters"), die al dan niet tezamen met waarnemingsfilters in boorgaten worden geplaatst.

Een van de eisen, die worden gesteld bij het gebruik van de onder beschouwing zijnde weerstandsmethoden, is hierboven terloops ter sprake gekomen: in de invloedssfeer van het meetsysteem mogen geen blanke metalen geleiders zoals staalkabels, stalen buizen, koperen filters of koperen tressengas voorkomen. Een tweede eis is, dat het meetsysteem niet volledig omgeven mag zijn met een isolator: metingen in een plastic filter of in de omgeving van plastic buizen geven bruikbare resultaten, doch metingen in plastic stijgbuizen ter bepaling van de weerstand van het medium daarbuiten geven waardeloze resultaten.

Alvorens verder zal worden ingegaan op de hiervoor genoemde toepassingen en toepassingsvormen dienen de relatie formatieweerstand/waterweerstand en het verband tussen waterweerstand en zoutgehalte i.e. chloridegehalte nader te worden gezien.

3. VAN FORMATIEWEERSTAND TOT CHLORIDEGEHALTE

3.1 Relatie tussen formatieweerstand en waterweerstand

De elektrische stroom, die door de bodem wordt geleid, wordt geheel door de ionen in het poriënwater getransporteerd (althans bij de in Nederland voorkomende sedimenten). Zandkorrels, grind en stenen in grove afzettingen geven op geen enkele wijze een bijdrage in het geleidingsvermogen; dien-
tengevolge is de specifieke elektrische weerstand van het poriënwater in die afzetting:

$$\rho_f = F \cdot \rho_1 \quad (3)$$

ρ_f = specifieke el. formatieweerstand in Ohm m^2/m

ρ_1 = specifieke el. weerstand van het poriënwater

F = formatiefactor

Het is duidelijk dat de formatiefactor afhankelijk is van de porositeit van de afzetting: verdicht men in een proefbakje een met water verzadigd zandmonster, dan zal de specifieke elektrische weerstand toenemen. Ook kan men verwachten dat 2 zandmonsters met dezelfde porositeit en eenzelfde specifieke weerstand van het poriënwater toch verschillende weerstanden bezitten als het ene monster uit korrels van dezelfde grootte bestaat en het andere monster uit sterk in korrelgrootte variërend materiaal: de kronkeligheid van het pad, dat de ionen volgen (de z.g. tortuositeit) verschilt. Ook de mate, waarin de korrels verkit zijn, moet van invloed zijn op F.

Tussen de verschillende grootheden bestaat het volgende verband:

$$F = T \cdot \phi^{-m} \quad (4)$$

T = tortuositeit; $0,62 < T < 1$

ϕ = porositeit (fractie van het poriënvolume)

m = cementatiefactor; voor ongeconsolideerd sediment: $1,3 < m < 1,5$

Formule (4) is empirisch; het proevenmateriaal, waarop deze formule steunt, is voor wat betreft de ongeconsolideerde sedimenten van geringe omvang.

De korrelgrootte van het sediment komt in form. (4) niet voor.

Toch blijkt er een verband te bestaan tussen de grofte en de formatiefactor:

fijn zand	F = 3,5
grof zand	F = 5,0
grof zand met grind	F = 6,5
grind met zand	F = 7,5

In tegenstelling tot de zandkorrels en grindstukken zijn vele deeltjes in klei elektrisch niet neutraal. Het zijn de deeltjes, die bestaan uit de kleimineralen illiet en montmorilloniet. Zij zijn negatief geladen en trekken diensgevolge lading van positief teken aan: kationen als Na^+ , Ca^{++} en Mg^{++} maar ook polaire waterdeeltjes. Ten dele zijn deze kationen sterk gebonden; de buitenste van de wolk om een kleideeltje kunnen echter deelnemen in het stroomtransport door het sediment.

Hun bijdrage in het totale transport varieert echter relatief en absoluut met de ionenconcentratie van het poriënwater in de klei.

De formatiefactor van kleiïge (en ook venige) afzettingen is diensgevolge mede afhankelijk van de specifieke elektrische weerstand van het poriënwater:

$$\log F = \log T \cdot \phi^{-m} + b(\log \rho_1)^2 \quad (5)$$

b = constante, afhankelijk van bepaalde hoedanigheden van de klei.

In fig. 3 is het verband tussen de specifieke elektrische weerstand van enige sedimenttypen en de specifieke elektrische weerstand van het poriënwater weergegeven. Uit de grafiek blijkt, dat er bij een relatief hoge weerstand van het poriënwater een duidelijk weerstandskontrast tussen grove en fijne slibhoudende afzettingen voorkomt. Bij een specifieke waterweerstand van 20 Ohmm, corresponderend met een geleidingsvermogen van $500\mu\text{S}$, is het weerstandskontrast tussen een grof zand en een zware klei met een tamelijk hoog watergehalte ca. 10. Dit contrast neemt echter af als de elektrische weerstand van het water lager wordt.

Is de elektrische weerstand van het poriënwater gelijk aan die van zeewater en is de porositeit van de klei laag, dan is de formatiefactor gelijk aan die van zand.

3.2 De relatie tussen waterweerstand en chloridegehalte

De specifieke elektrische weerstand van (grond) water en dus ook de reciproke waarde, het geleidingsvermogen, worden bepaald door:

1. De hoeveelheid ionen in het water
2. De ionensoorten
3. De temperatuur

Sub. 1.

Het geleidingsvermogen is slechts bij benadering evenredig met de concentratie. De ionen reduceren door onderlinge beïnvloeding elkaars activiteit; het geleidingsvermogen per ion neemt met toenemende ionenconcentratie af. Dit wordt gedemonstreerd in fig. 4, waarin het verband tussen het chloridegehalte en het geleidingsvermogen van keukenzoutoplossingen bij een temperatuur van 18°C is weergegeven. De gegevens werden ontleend aan Landolt, Börnstein, Roth en Schul (lit. 1).

Sub. 2.

Het equivalent-geleidingsvermogen (d.i. het geleidingsvermogen per gram-equivalent in 1 cm^3 water) loopt voor de verschillende ionensoorten vrij sterk uiteen, zoals uit onderstaand overzicht blijkt:

ionen- soort	eq. gel. vermogen bij ∞ -verdunning	ionen soort	eq. gel. vermogen bij ∞ -verdunning
Na	$43,4\Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$	Cl	$65,5\Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$ bij 18°C
Ca	51,9 "	SO ₄	68,5 "
Mg	45,9 "	HCO ₃	39,0 "

Er bestaat geen algemene formule, aan de hand waarvan men met behulp van bovenstaande cijfers en bekende concentraties het geleidingsvermogen van een bepaalde oplossing waarin verscheidene ionensoorten voorkomen, kan berekenen. Doelgerichte laboratoriumbepalingen zijn derhalve onmisbaar.

Sub. 3.

Het geleidingsvermogen van een bepaalde oplossing neemt toe met de temperatuur. De temperatuurafhankelijkheid komt tot uitdrukking in de volgende empirische formule:

$$K_t = K_{t_0} \left[1 + a(t-t_0) + b(t-t_0)^2 \right] \quad (6)$$

waarin: K_t = specifiek geleidingsvermogen bij t $^{\circ}\text{C}$.

$t_0 = 18^{\circ}\text{C}$

$a, b = \text{constanten.}$

Hieronder volgen enige waarden voor a en b :

zoutopl.	$a \times 10^4$	$b \times 10^6$
NaCl	226	84
MgSO ₄	238	95
CaCl ₂	229	-
NaNO ₃	220	75

De cijfers lopen niet al te zeer uiteen; zonder al te grote fouten te maken kan men onderstaande formule gebruiken, ongeacht de zouten in oplossing:

$$K_t = K_{t_0} \left[1 + 0.023 (t - t_0) \right] \quad (7)$$

Ook voor verdund zeewater kan deze formule worden toegepast.

Na deze algemene inleiding zal nu worden ingegaan op welke wijze het verband tussen chloridegehalte en geleidingsvermogen van het water in een bepaalde aquifer in een bepaald gebied kan worden geconstrueerd aan de hand van een minimale hoeveelheid beschikbare gegevens.

Deze gegevens bestaan uit analyses van watermonsters, waarvan het chloridegehalte vaak weinig gespreid is.

In fig. 5 is het geleidingsvermogen weergegeven als functie van het chloridegehalte van enige tientallen watermonsters, afkomstig uit een duingebied in Zuid-Holland. De punten zijn niet fraai over de chlorideschaal gespreid maar vormen twee zwermen.

De watermonsters werden min of meer volledig geanalyseerd. Het volgende kan worden geconstateerd:

- a. Als het chloridegehalte laag is ontbreken sulfaten.
- b. Het hydrocarbonaatgehalte van de monsters met een laag chloridegehalte bedraagt 200-300 mg/l; het verschilt weinig van de monsters met een hoger chloridegehalte.
- c. De enige zouten, die geacht kunnen worden een bijdrage te geven in het geleidingsvermogen van het water met een laag chloridegehalte, zijn de chloriden en de hydrocarbonaten.

Op grond van deze constatering wordt nu aangenomen, dat het water in de betreffende aquifer mag worden beschouwd als verdund zeewater met een hydrocarbonaatgehalte van 250 mg/l HCO_3^- , ongeacht het chloridegehalte. Het geleidingsvermogen K_c bij een chlorideconcentratie c kan dan als volgt worden geschreven:

$$K_c = K_z + K_h \quad (8)$$

waarin: K_z = geleidingsvermogen verdund zeewater met chloridegehalte c .

K_h = extra geleidingsvermogen tengevolge van hydrocarbonaat met HCO_3^- gehalte = 250 mg/l.

Het verband tussen het chloridegehalte en het geleidingsvermogen van mengsels van zeewater en gedistilleerd water is zeer nauwkeurig bepaald door Thomas, Thompson en Utterback (lit. 2). In fig. 4 zijn hun uitkomsten grafisch weergegeven. Daarmee wordt het mogelijk om K_h te berekenen uit de analysegegevens van de watermonsters uit het betreffende duingebied met een laag chloridegehalte. Stelt men nu K_h constant, dus onafhankelijk van de totale zoutconcentratie, dan kan het verband tussen het chloridegehalte en het geleidingsvermogen bij bepaalde hydrocarbonaatgehalten worden geconstrueerd.

Het resultaat is weergegeven in fig. 5. De nauwkeurigheid van de chloridebepaling uit de geleidbaarheid c.q. elektrische weerstand is afhankelijk van de optredende variaties in het hydrocarbonaatgehalte; relatief zijn deze variaties van weinig belang bij hoger chloridegehalte. Soortgelijke redeneringen als voor het hydrocarbonaatgehalte kunnen ook worden gegeven voor eventuele voorkomende sulfaatgehalten.

Het extra geleidingsvermogen van sulfaten met een SO_4^{--} - gehalte van 100 mg/l is ongeveer equivalent met het geleidingsvermogen van hydrocarbonaat met een HCO_3^- - gehalte van 150 mg/l.

4. VOORBEELDEN VAN TOEPASSINGEN

Metingen van de waterweerstand in putten

4.1. Metingen met behulp van een vast elektrodensysteem

Een toepassing is beschreven door F. Munck (lit. 3). In de Camarque werd een twintigtal putten van een dergelijk systeem voorzien. Gebruik werd gemaakt van een veeladerige kabel, waaraan op onderlinge afstanden van 50 cm 20 stuks meeteenheden werden gemonteerd.

Een meeteenheid bestaat uit 3 ringetjes om de kabel, die elk met een ader van de kabel zijn verbonden. Zij bevinden zich op onderlinge afstanden van 1 cm. Een laagfrequente wisselstroom, waarvan de sterkte op een bepaalde waarde wordt ingesteld, wordt tussen twee ringetjes geleid. De spanning die tengevolge van het opgewekte elektrische veld ter plaatse van het derde ringetje bestaat, wordt gemeten ten opzichte van een referentie-elektrode aan de oppervlakte. Het potentiaal-verschil V wordt versterkt en vervolgens geregistreerd als functie van de tijd. Het potentiaalverschil is een maat voor de specifieke weerstand van het water (zie form. 2).

De temperatuur van het water wordt niet gemeten; evenmin is er een temperatuurcompensatie ingebouwd. Een en ander is van weinig praktisch belang door de geringe temperatuurvariaties ($\pm 1^\circ\text{C}$).

In de publicatie is niet meegedeeld op welke wijze de putten zijn afgewerkt; evenmin of is nagegaan of de zoutgradiënt van het water in de put gelijk is aan die van het water in de formatie.

4.2. Metingen met behulp van een bewegend elektrodensysteem

Dergelijke metingen zouden van belang kunnen zijn, indien men een toename van het chloridegehalte van het water uit een bepaalde pompput constateert. Een voorbeeld zal worden gepubliceerd in het jaarverslag 1970 van de Dienst Grondwaterverkenning.

Metingen van de formatieweerstand

4.3. Metingen in pulsboringen tijdens de boorvordering

Bij het uitvoeren van boringen in de duingebieden komt het vaak voor, dat men de boringen wil doorzetten tot in het zoute grondwater.

De diepte, waarop het zoute grondwater zal worden bereikt, is doorgaans slechts globaal bekend. Daarom pleegt men in de regel regelmatig (bijv. vanaf een bepaalde diepte om de 5 meter) een proeffilter te plaatsen. Met het inbouwen van een filter, het onttrekken van een betrouwbaar te achten watermonster, de analyse daarvan ter plaatse of in een laboratorium, en vervolgens het verwijderen van het filter, is veel tijd gemoeid. Veel sneller werkt men aldus.

Wanneer de diepte waarop men een bepaling wenst is bereikt, wordt een meet-systeem aan een kabel met voldoende treksterkte in het (verbuisde) boorgat neergelaten. Vervolgens wordt de verbuizing enige meters getrokken en wordt een weerstandsmeting in het dichtgevalen gedeelte verricht.

Deze meting vergt ca. 2 minuten. De meetuitkomst wordt ter plaatse geanalyseerd, waarmee niet meer dan 10 minuten gemoeid is. Daarna kan de kabel worden getrokken en kunnen de boorwerkzaamheden worden hervat.

De meetwerkzaamheden zijn eenvoudig; zij kunnen door een opzichter bij de boring worden uitgevoerd. Dat geldt ook voor de interpretatie. Deze verloopt aldus.

Aan de hand van de grondmonsters, verkregen van het traject waarin de meetopstelling is aangebracht, wordt de formatiefactor geschat. Indien men een nauwkeuriger bepaling wenst, kan de formatiefactor door middel van een proefbakje snel worden nagegaan. Met behulp van de aldus verkregen formatiefactor kan uit de formatieweerstand, die uit de meting aan de tijdelijke elektrodenopstelling is berekend, de specifieke elektrische weerstand van het poriënwater ter plaatse van de elektrodenopstelling worden bepaald. Aan de hand van een van te voren opgestelde grafiek kan vervolgens het chloridegehalte uit de waterweerstand worden afgeleid.

In de berekening dient ook de bodemtemperatuur ter plaatse van de elektrodenopstelling te worden betrokken. Men zou deze kunnen meten door middel van een temperatuurvoeler, die in het meetsysteem is ingebouwd, doch noodzakelijk is dat niet. De bodemtemperatuur kan met de vereiste mate van nauwkeurigheid (d.w.z. tot 1 à 2°C nauwkeurig) worden geschat.

Bij een puls boring in een duingebied is enige jaren geleden een vergelijkende proef uitgevoerd. Op 7 verschillende diepten werd zowel een proeffilter als een tijdelijke meetopstelling geplaatst; de boring werd tenslotte voorzien van een vaste elektrodenopstelling en een aantal waarnemingsfilters.

In fig. 6 zijn enige resultaten van de proefnemingen weergegeven.

In de betreffende grafieken zijn ingetekend:

- a. De specifieke elektrische formatieweerstanden, afgeleid uit metingen aan de tijdelijke meetopstellingen voor en na het pompen aan de respectieve proeffilters.
- b. De specifieke elektrische formatieweerstanden, afgeleid uit een serie metingen aan de vaste elektrodenopstelling. De serie werd gemeten ongeveer 1 jaar na de beëindiging der boring.
- c. De specifieke elektrische weerstand bij 18°C van watermonsters, onttrokken aan de proeffilters bij beëindiging van het pompen. Het pompen werd gestaakt als de waterweerstand niet meer noemenswaard veranderde. Dat was veelal na 1 à 2 uur.
- d. De specifieke elektrische weerstand bij 18°C van watermonsters, die ca. 1 jaar na beëindiging van de boring aan waarnemingsfilters werden onttrokken.

Uit het beschikbare waarnemingsmateriaal blijkt, dat er voor wat betreft de zoet-zoutverdeling na een jaar een stabiele toestand is ingetreden.

Neemt men nu aan dat deze gelijk is aan de situatie van voor het uitvoeren van de boring, dan kan het volgende worden geconstateerd:

1. De uitkomsten van de metingen, die aan de tijdelijke elektrodenopstelling werden verricht voor de onttrekking van water aan de proeffilters, benaderen de werkelijke situatie, zoals bekend uit metingen aan de vaste elektrodenopstelling, veel beter dan de uitkomsten van de metingen na afloop van het pompen.
2. De weerstandswaarden van enige der watermonsters, onttrokken aan de proeffilters, passen zeer slecht in het totale beeld, dat de metingen aan de elektrodenopstelling, en de weerstandsbepalingen aan watermonsters uit de waarnemingsfilters verschaffen.

De conclusie moet luiden, dat het pompen aan proeffilters de zoet-zoutverdeling sterk kan beïnvloeden, ook al wordt er slechts ca. 1 uur gepompt. Het heeft derhalve weinig zin om een aan een proeffilter onttrokken monster nauwkeurig in het laboratorium op chloridegehalte te onderzoeken. De uitkomsten van de metingen aan de tijdelijke elektrodenopstellingen lijken systematisch aan de lage kant. Dit is wellicht een gevolg van de hogere porositeit van het materiaal in de naaste omgeving van de opstellingen. Aan de hand van wat meer vergelijkende metingen zou men kunnen besluiten tot een systematische correctie. Overigens geven de metingen aan de tijdelijke elektrodenopstellingen een beter beeld omtrent de veranderingen van het zoutgehalte met de diepte dan de watermonsters, onttrokken aan de proeffilters.

4.4. Metingen in pulsboringen na het trekken van de verbuizing

In het begin van de zestiger jaren werd door de Werkgroep Geo-elektrisch Onderzoek TNO een systeem ontwikkeld om continue weerstandsprofielen in pulsboringen op te nemen (lit. 4). Dergelijke profielen zijn van het grootste belang voor de interpretatie van de geo-elektrische metingen, die aan het aardoppervlak worden uitgevoerd. Bovendien geven zij, zowel in gebieden met zoet als met zout grondwater een niet onbelangrijke hoeveelheid detailinformatie betreffende zoutgehalteveranderingen met de diepte: informatie, die door middel van een groter aantal filters dan normaal wordt geplaatst evenmin kan worden verkregen. Destijds bestond er behoefte aan een systeem voor weerstandsmetingen in pulsboringen, daar vrijwel alle boringen volgens de zogenaamde pulsmethode werden uitgevoerd.

De procedure was als volgt. Vóór het trekken van de verbuizing werd een kabel met aan het uiteinde een meetsysteem in de boring afgelaten. Het gat werd op de normale wijze afgewerkt en opgevuld. Na enige tijd werd de kabel met een speciale lier uit de grond getrokken. Gelijktijdig werd de elektrische weerstand als functie van de diepte geregistreerd. Een en ander maakte het onmogelijk om de metingen indien nodig te herhalen; bovendien was er een grens aan de diepte tot waar de methode kon worden toegepast. Deze bedroeg ca. 90 m.

Nu voor vrijwel alle boringen van meer dan 60 m diepte roterende boor-systemen worden toegepast waarbij het gat niet meer hoeft te worden verbuisd, kunnen de metingen op eenvoudige wijze worden uitgevoerd en heeft het onder beschouwing zijnde meetsysteem zijn praktisch belang vrijwel verloren.

Een voorbeeld van een opname is weergegeven in fig. 7. De gemeten weerstander benaderen de specifieke formatieweerstanden zeer dicht ten gevolge van de veelal geringe weerstandsverschillen tussen de ongestoorde formatie en de gatopvulling; metingen bij verschillende elektrodenafstanden hebben de juistheid van deze aanname aangetoond. De afgebeelde opname kwam tot stand met een meetsysteem van 2 elektroden aan de kabel en 2 elektroden aan het aardoppervlak. De afstand tussen de 2 elektroden aan de kabel bedroeg 20 cm. De opname toont onder meer de overgang zoet-zout water op ca. 35 m - M.V. in een boring in de omgeving van Zutphen.

4.5. Metingen in onverbuisde boringen

Bij het maken van verkenningsboringen wordt momenteel in Nederland zeer veel gebruik gemaakt van de roterende spoelboormethode. Deze methode werkt bijzonder snel; in één week tijds kan één boorinstallatie ca. 1000 m boren bij bodenomstandigheden zoals die in Nederland worden gevonden.

Nu gaat het bij het maken van een verkenningsboring slechts ten dele om het gat; een belangrijk doel is om de lithologie meter na meter, liefst decimeter na decimeter, nauwkeurig te leren kennen. Dat levert bij de toepassing van de roterende spoelboormethode moeilijkheden op, als alle informatie moet komen uit wat de spoeling boven brengt.

Zeker is het mogelijk om een globaal beeld van de doorboorde afzettingen te verkrijgen; wordt bijv. een zandlaag van diverse meters dikte doorboord, dan bevat de spoeling tijdens de boorvordering in die laag vanzelfsprekend veel materiaal daaruit, ook al kan verontreiniging door naval en ontmenging tijdens het transport van het boorgruis naar boven zijn opgetreden. De problemen schuilen voor een belangrijk gedeelte in de detailinformatie: dunne en soms ook enkele meters dikke kleilagen worden ongemerkt gepasseerd; van grindrijke afzettingen komt het grind vertraagd omhoog.

Om de hier gesignaleerde nadelen te ondervangen is aanvullend onderzoek nodig. Dit zou kunnen bestaan uit het regelmatig steken van kernen uit de bodem van het boorgat tijdens de boorvordering of uit het nemen van monsters uit de wand van het boorgat als de boring op diepte is gekomen. Beide methoden zijn of tijdrovend of onvolledig.

Een alternatief biedt fysisch boorgatonderzoek, dat na beëindiging van de boring of gedurende een boorpauze kan worden uitgevoerd. Door de continue registratie van drie fysische variabelen, die elk een functie zijn van de weerstand van het grondwater en/of een lithologie, blijkt het mogelijk om de bodemsituatie zodanig vast te leggen dat nog maar weinig aanvullende informatie noodzakelijk is.

De drie variabelen zijn:

- a. De spontane potentiaal (S.P.), die in het boorgat wordt opgewekt door zoutconcentratieverschillen tussen de spoeling en het formatiewater.
- b. De elektrische weerstand van de doorboorde afzettingen
- c. De natuurlijke gammastraling van de aardlagen.

Aan de hand van de S.P.-curve kunnen veen- en kleilagen van zanden worden onderscheiden. De kwaliteit van de curven laat helaas vaak te wensen over als gevolg van de geringe zoutconcentratieverschillen tussen spoeling en formatiewater, in het bijzonder voor wat betreft de trajecten met zoet poriënwater.

De gammacurve maakt het mogelijk om te differentiëren tussen kleilagen en zand- en veenlagen. De stralingsintensiteit van kleilagen is enige malen groter dan die van zandafzettingen.

De S.P.- en gammacurven geven derhalve informatie omtrent de lithologie van de doorboorde afzettingen; met behulp van deze informatie kan vervolgens uit de formatieweerstanden de elektrische weerstand van het grondwater als functie van de diepte worden nagegaan.

Betreffende de metingen van de elektrische formatieweerstand dient het volgende te worden vermeld.

Bij de afleiding van formule 2 is uitgegaan van een homogeen medium, dat het elektrodensysteem omgeeft. Aan deze voorwaarden wordt bij het meten in open boorgaten niet meer voldaan. Dit impliceert, dat bij gebruik van deze formule een schijnbare specifieke weerstand wordt gevonden, die al naar gelang de omstandigheden, meer of minder afwijkt van de specifieke weerstand van de formatie ter hoogte van het meetsysteem. De volgende factoren zijn daarbij van belang:

1. De elektrodenafstand AM (zie fig. 1b) ten opzichte van de diameter van het gat;
2. Het weerstandscontrast tussen de ongestoorde formatie en de spoeling;
3. De dikte van de formatie ten opzichte van de afstand tussen de boorgatelektroden;
4. De omvang van de zone, waarin het oorspronkelijke formatiewater is verdrongen door spoelingsfiltraat.

Uit fig. 8 kan het verband tussen de schijnbare weerstand en de elektrodenafstand AM bij verschillende contrasten tussen de weerstand van de formatie en de weerstand van de spoeling worden nagegaan. De curven hebben betrekking op de situatie, dat geen spoelingfiltraat in de formatie is doorgedrongen en de formatie een grote dikte heeft.

Het blijkt dat de schijnbare weerstand bij kleine elektrodenafstanden sterk wordt beïnvloed door de spoeling; bij grote elektrodenafstanden is de invloed echter gering.

Een relatief grote elektrodenafstand is daarom gunstig voor een nauwkeurige bepaling van de elektrische weerstand van zandlagen die een redelijke dikte hebben.

Een argument om daarnaast eveneens de schijnbare weerstand bij een kleinere elektrodenafstand te bepalen is, dat dunnere lagen daar beter tot hun recht komen.

Is er spoelingsfiltraat in de formatie binnengedrongen dan moet men trouwens de beschikking hebben over de schijnbare weerstand bij 2 verschillende elektrodenafstanden om de juiste curvenserie voor de bepaling van de specifieke formatieweerstand te kunnen kiezen.

De 2 opnamen kunnen gelijktijdig worden gemaakt bij gebruikmaking van een tweepens schrijver en een meetstelsel, bestaande uit 1 stroom- en 2 meetelektroden. Als elektroden dienen een drietal metalen ringen op een niet geleidend zwaarstuk. Het geheel wordt sonde genoemd. De opname bij de korte elektrodenafstand draagt de benaming "short normal" (SN), de opname bij lange elektrodenafstand "long normal" (LN). Bij TNO zijn 2 typen sondes in gebruik. De "korte" sonde doet dienst in boringen met een diameter van maximaal 20 cm; de elektrodenafstand voor de SN- en LN-opnamen bedragen resp. 20 cm. en 100 cm. De "lange" sonde wordt gebruikt in boringen met grote diameter; de elektrodenafstanden bedragen 40 cm en 200 cm.

Enige voorbeelden van fysische metingen in boorgaten zijn weergegeven in fig. 9 en 10. Inmiddels is het z.g. loggen van boringen in Nederland ten dienste van geo-hydrologisch onderzoek routine geworden; het aantal meters dat in 1970 is gelogd, heeft de tienduizend overschreden.

4.6. Metingen met behulp van vaste elektrodenopstellingen

In de laatste jaren zijn tientallen zogenaamde vaste elektrodenopstellingen in boringen aangebracht of horizontaal op een bepaalde diepte uitgelegd om veranderingen van het zoutgehalte van het grondwater ter plaatse van de opstellingen met de tijd te kunnen volgen. Metingen met behulp van een vaste elektrodenopstelling zijn een goedkoop alternatief voor de laboratoriumbepalingen aan watermonsters, onttrokken aan waarnemingsfilters. Een elektrodenopstelling bestaat uit een veeladrige kabel, waarop paarsgewijs een aantal spiraalvormige elektroden is aangebracht. De afstand tussen de elektroden, die één waarnemingspaar vormen, bedraagt doorgaans 15 cm. De afstand tussen de elektrodenparen varieert, al naar gelang de situatie vereist.

Eén elektrode van een paar fungeert als stroomelektrode, de andere als meetelektrode. De retourstroomelektrode en de referentie-meetelektrode worden op geruime onderlinge afstand aan het aardoppervlak of elders geplaatst. Er wordt derhalve gebruik gemaakt van de vierpuntsmethode. Hier volgen nog enige technische details. Er wordt uitgegaan van twee typen kabel: een veertien-aderige, derhalve geschikt voor 7 waarnemingspunten, en een zesentwintig-aderige. De kabels worden in lengten van ca. 2 km in een fabriek van speciaalkabel voor DGV-TNO vervaardigd, overeenkomstig de specificaties van de Dienst Grondwaterverkenning. De aders van de kabel bestaan uit massief koperdraad met een omspuiting van een nylonachtige kunststof. Zij zijn samengeslagen en vervolgens omspoten met P.V.C. De ruimte tussen de aders is gevuld met een rubber compound. De verwerking van de kabels tot elektrodenopstellingen geschiedt in de werkplaats van de Afdeling Geofysisch Onderzoek van de Dienst Grondwaterverkenning TNO. Hier worden pluggen en elektroden gemonteerd. De elektroden worden met behulp van P.V.C. moffen op de kabel bevestigd. De moffen vormen één geheel met de kabelmantel, na het "bakken" in een spuitgietsmal. Met een elektrodenopstelling kan een meetapparaat worden meegeleverd. Dit is een apparaat uit de serieproductie van een Duitse fabriek. Het wordt voorzien van een keuzeschakelaar voor 7 of 13 afstanden en een plug, passend bij die van de elektrodenopstelling. Het verrichten van de waarnemingen is bijzonder simpel en kan zonder enig bezwaar door elke instantie in eigen beheer worden uitgevoerd. Een serie waarnemingen kost niet meer tijd dan vijf minuten. Indien gewenst, wordt een hulpgrafiek voor de interpretatie van de afgelezen waarden bijgeleverd. Zo'n grafiek geeft het verband tussen de afgelezen waarden in Ohms en bijvoorbeeld het chloridgehalte.

Hieronder zullen de resultaten van de metingen aan enige elektrodenopstellingen worden weergegeven. Voor verdere voorbeelden wordt verwezen naar lit. 4.

Opstelling in boring D.V. (duingebied Zuid-Holland)

In figuur 11 zijn de uitkomsten van de metingen op vier data gedurende het eerste jaar na de plaatsing van de elektrodenopstelling weergegeven. Er blijken in deze periode op diverse diepten formatieweerstandsveranderingen te zijn opgetreden, die slechts ten dele een systematisch verloop hebben. Wat betreft de 5 diepste waarnemingspunten kan worden opgemerkt, dat de weerstandswaarden in de eerste vier maanden zijn teruggelopen doch daarna vrijwel constant zijn gebleven. Het teruglopen van de weerstandswaarden moet een gevolg zijn geweest van een vermindering van de weerstand van het poriënwater, dus een toename van het zoutgehalte.

De conclusie moet luiden dat tijdens het boren water met een hogere specifieke elektrische weerstand (dus lager zoutgehalte) dan het oorspronkelijke formatiewater is ingebracht en dat het ca. vier maanden heeft geduurd alvorens dit ingebrachte water zich heeft opgelost of verplaatst. In zeer fijne, slibhoudende afzettingen kan dit proces enkele jaren vergen.

Omtrent de resultaten van de metingen aan de bovenste 6 elektrodenparen kan het volgende worden opgemerkt.

Op ca. 66 m diepte is een brakwaterlens doorboord. Het brakke water is tijdens de boorwerkzaamheden in de onderliggende zoete lagen doorgedrongen. In het bijzonder is dit het geval geweest tussen ca. 68 m en 71 m diepte. Het gehele beeld wijst niet op het indringen van brak of zout water afkomstig van grotere diepte in de lagen boven ca. 75 m diepte bij het trekken van de verbuizing, zoals vaak bij pulsboringen kan worden waargenomen.

In fig. 12 zijn de variaties in de meetuitkomsten gedurende het tweede jaar na plaatsing van de opstelling weergegeven. Zij verschillen van waarnemingspunt tot waarnemingspunt vrij aanzienlijk. Over het geheel genomen zijn de veranderingen met de tijd veel groter dan doorgaans aan elektrodenopstellingen worden gemeten. De specifieke elektrische weerstand van de watermonsters, onttrokken aan enige filters, varieert in vrijwel dezelfde mate. De grootste variatie hebben de metingen aan waarnemingspunt 9 van de vaste elektrodenopstelling opgeleverd. Voor een verdere analyse zijn de uitkomsten als functie van de tijd weergegeven in fig. 13. Ter vergelijking zijn ook de waarnemingen aan meetpunt 10 uitgezet in dezelfde figuur. Uit de 2 meetseries kan worden geconcludeerd, dat de waargenomen variaties trendmatig zijn en niet kunnen worden toegeschreven aan onnauwkeurigheid in de metingen. Slechts een of twee meetwaarden lijken minder betrouwbaar. Merkwaardig is dat de bewegingen op de twee waarnemingspunten op bepaalde data (12/10, 29/3) tegen elkaar ingaan. Uit de waarnemingen aan meetpunt 9 wordt gevonden, dat het chloridegehalte in de onder beschouwing zijnde periode heeft gevarieerd van ca. 60 mg/l tot ruim 200 mg/l. In fig. 13 zijn de uitkomsten van elektrische weerstands- en chloridegehaltebepalingen van watermonsters uit het tussen de waarnemingspunten 9 en 10 geplaatste filter weergegeven. De weerstandsvariaties zijn gering, de veranderingen zijn regelmatig. De chloridegehaltebepalingen vertonen een wat grotere spreiding en lijken daarom wat minder nauwkeurig. De zoutwaterintrusie op ca. 66 m diepte wordt niet opgemerkt.

Opstelling in een waarnemingsboring naast een injectieput

Op korte afstand van een injectieput werd een vaste elektrodenopstelling geplaatst in de overgangszone van zoet naar zout water. Betrekkelijk kort nadat de elektrodenopstelling werd aangebracht, werd begonnen met het injecteren van (zoet) water. De uitkomsten van de metingen bij de aanvang van de injectieproef en na resp. $\frac{1}{2}$, $1\frac{1}{2}$, $2\frac{1}{2}$ en $12\frac{1}{2}$ week zijn weergegeven in fig. 14.

Onder meer kan het volgende worden waargenomen:

- a. Bij de bovenste drie waarnemingspunten neemt aanvankelijk de weerstand iets toe om vervolgens af te nemen tot onder de uitgangswaarde. Daaraan kan de volgende uitleg worden gegeven. Eerst passeert het oorspronkelijke formatiewater, dat het nog aanwezige "vreemde" water tengevolge van de boorwerkzaamheden voor zich uit drijft. Het "vreemde" water heeft kennelijk een wat lagere elektrische weerstand. Na het oorspronkelijke formatiewater passeert het geïnjecteerde water, dat eveneens een lagere weerstand heeft dan het formatiewater.
- b. Bij de diepere waarnemingspunten ziet men eveneens eerst een verdringing van het brakke of zoute water door zoet formatiewater en daarna een verdringing daarvan door het geïnjecteerde water.

De uitkomsten tonen op fraaie wijze aan, dat het mogelijk is om met behulp van elektrodenopstellingen watersnelheden in de bodem te meten bij bijvoorbeeld injectieproeven.

SLOTBESCHOUWING

Voor de bepaling van het zoutgehalte van het grondwater in situ leent zich bij uitstek de elektrische weerstandsmethode. De benodigde meetopstelling kan gemakkelijk worden aangepast aan de eisen, die door de omstandigheden worden gesteld. De meetapparatuur is goedkoop in de aanschaf en eenvoudig te bedienen, zolang men niet verlangt dat de meetuitkomsten worden geregistreerd, bijvoorbeeld als functie van de diepte of van de tijd. Bij de bodemsituatie, zoals die in Nederland wordt gevonden, zal men er vrijwel steeds genoeg mee moeten nemen dat de elektrische weerstand van grondwater plus bodemmatrix en niet de elektrische weerstand van het water alleen wordt bepaald. De afleiding van de waterweerstand uit de formatieweerstand kan echter vrij nauwkeurig geschieden: met een onnauwkeurigheid van naar schatting omstreeks $\pm 10\%$ moet echter wel rekening worden gehouden.

De conversie van waterweerstand (of geleidingsvermogens) naar totale zoutgehalten uitgedrukt in milliequivalenten per liter, kan nauwkeurig geschieden; helaas heeft het totale zoutgehalte als beoordelings-criterium (nog) geen ingang gevonden en pleegt men te denken en te rekenen in termen van totale hardheid bij zoet grondwater en chloridegehalte bij brak of zout grondwater. Doorgaans is er echter wel een voldoende goede correlatie tussen de elektrische weerstand van het grondwater en het chloridegehalte of de totale hardheid in een bepaald gebied, zodat deze hindernis zonder al te veel schade kan worden genomen.

FIGUREN

- 1a. Principeschema tweepuntsmetingen
- 1b. Principeschema vierpuntsmetingen
2. Het inductielog
3. Het verband tussen de specifieke elektrische weerstand van enige sedimenttypen en de specifieke elektrische weerstand van het poriënwater
4. Verband tussen chloridegehalte en geleidingsvermogen van keukenzoutoplossingen bij 18°C; idem voor zeewater
5. Verband tussen chloridegehalte en geleidingsvermogen van watermonsters uit een duingebied in Zuid-Holland
6. Resultaten van proefnemingen met tijdelijke elektrodenopstellingen
7. Resultaten van metingen in een puls boring bij Zutphen
8. Interpretatiecurven voor elektrische boorgatmetingen
9. Resultaten van fysische metingen in een boring in Friesland
10. Resultaten van fysische metingen in een boring in het rivieren-gebied
11. Boring D.V.: Uitkomsten van metingen aan een vaste elektrodenopstelling gedurende het eerste jaar
12. Boring D.V.: waargenomen variaties aan een vaste elektrodenopstelling in het tweede jaar.
13. Boring D.V.: uitkomsten van metingen en wateranalysen
14. Waarnemingen aan een vaste elektrodenopstelling bij injectieproeven

LITERATUUR

1. LANDOLT, BÖRNSTEIN, ROTH en SCHUL:
Physikalisch-Chemische Tabellen.
2. THOMAS, B.D.; THOMPSON, Th.G.; UTTERBACK, C.L.:
The electrical conductivity of sea water
J. Conseil. Perm. Internat. p.l'Expl. de la Mer, V.9, 1934.
3. MUNCK, F.:
Quelques exemples d'Applications Geophysiques nouvelles dans la recherche
d'eau douce en zone littorale Française de la Méditerranée.
Boedapest 1969, voordracht
4. WALTER, F.:
Elektrische boorgatmetingen.
Walter, 51e jaargang, nr. 2 - 1967