

Bepalen chloridegehalte in grondwater met elektrische geleidbaarheidssondering

MEVR. IR. M.H. MEERBURG (THANS WERKZAAM BIJ HOLLAND RAILCONSULT B.V.)

IR. H.G.J.W.A. WOLFS (FUGRO INGENIEURSBUREAU B.V.)

IR R.H. BOEKELMAN (TU DELFT)

Om het verplaatsen van het zoet/zout grensvlak te volgen of om te kunnen voldoen aan wettelijke waterkwaliteitsnormen bij onttrekkingen is het van belang het chloridegehalte in grondwater te bepalen. In de praktijk wordt dit meestal gedaan aan de hand van peilbuisonderzoek of met behulp van zoutwachters. Het maken van geleidbaarheidssonderingen is voor dit doel een veelbelovende techniek. Dit artikel behandelt in het kort hoe uit de resultaten van een geleidbaarheidssondering een schatting gemaakt kan worden van het chloridegehalte met de diepte van de sondering. Voor de praktijk lijkt het veelbelovend de technieken te combineren om optimaal van de voordelen van de verschillende methoden gebruik te maken. Hiermee kan een goed beeld van het chloridegehalte met de diepte, in laterale zin en in de tijd verkregen worden.

In Nederland wordt grondwater onttrokken voor diverse doeleinden zoals drink- en industriewatervoorziening of warmte-koude opslag. Bij bemalingen moet opgepompt water geloosd worden. In alle gevallen moet het grondwater voldoen aan wettelijke kwaliteitsnormen. Naast maatgevende componenten als ijzergehalte, nitraatgehalte, en dergelijke is chloride een belangrijke component in gebieden met een verziltingsprobleem. Bijvoorbeeld, voor het gebruik als drinkwater mag het chloridegehalte niet hoger zijn dan 150 mg/l (smaakgrens). Een ander voorbeeld betreft het lozen van bemalingswater op oppervlaktewater; hierbij mag het chloridegehalte van het bemalingswater niet hoger zijn dan dat van het oppervlaktewater om te voorkomen dat het oppervlaktewater in kwaliteit achteruit gaat. Alvorens in deze gebieden tot oppompen van het grondwater over te gaan, is het van belang informatie te verkrijgen over het verloop van het chloridegehalte met de diepte.

Huidige bepaling chloridegehalte

Er zijn meerdere methoden om het chloridegehalte in grondwater te bepalen, bijvoorbeeld door het chemisch analyseren van watermonsters genomen uit peilbuizen of middels het analyseren van de resultaten van zout-

wachters met de diepte en de tijd.

Peilbuizen

Peilbuizen (NEN 5120) zijn buizen, met aan de onderzijde een filter, die in een geboord gat geplaatst worden. Na afdichting van het boorgat, kan aan de ondergrond ter plaatse van het filter water onttrokken worden. Van dit opgepompte water kunnen monsters genomen worden waarvan in het laboratorium de chemische samenstelling (onder andere chloridegehalte) kan worden bepaald. Meestal worden meerdere peilbuizen op verschillende diepten in een boorgat geplaatst.

Beperkingen: Om de chemische samenstelling van een monster te bepalen moet men een gat boren, filters plaatsen op de goede diepte, gat afdichten, afpompen, monsters nemen, transporteren en laten analyseren waardoor fouten geïntroduceerd kunnen worden (Kunst en Olie, 1996). Daarnaast heeft deze methode als nadeel dat alleen ter plaatse van een filter een beeld verkregen wordt van de waterkwaliteit. Indien interesse bestaat in het verloop van het chloridegehalte met de diepte dan moeten op veel niveaus peilbuizen geplaatst worden wat hoge kosten met zich meebrengt. Verder is de methode nogal tijdrovend en arbeidsintensief en daardoor duur.

Zoutwachters

Een andere methode maakt gebruik van een lange kabel die wordt neergelaten in een boorgat waarop zich, op regelmatige afstanden, elektrodenparen bevinden. Het gat wordt opgevuld en de kabel blijft permanent in de ondergrond achter. Via de elektroden wordt een elektrische stroom door het omliggende grondpakket gestuurd. De weerstand die de stroom ondervindt is afhankelijk van de plaatselijke grondsoort en de weerstand van het grondwater. Hiermee kan op ieder gewenst moment de elektrische geleidbaarheid (reciproke van de gemeten weerstand) van de omgeving van het gebruikte elektrodenpaar bepaald worden. Doordat altijd op dezelfde punten wordt gemeten wordt duidelijk of de geleidbaarheid van bodem met water verandert in de tijd.

Aangezien de eigenschappen van de vaste materie als onveranderlijk worden beschouwd wordt een verandering van elektrische geleidbaarheid veroorzaakt door een verandering van grondwatergeleidbaarheid. Dit systeem wordt wel zoutwachter genoemd. De zoutwachter wordt bijvoorbeeld gebruikt om vast te stellen of het zoet-zout grensvlak onder de duinen van plaats verandert. Verondersteld wordt hierbij dat de gemeten grondwaterkwaliteitsverandering veroorzaakt wordt door een toename van de twee chemische componenten natrium en chloride.

Beperkingen: Toename in geleidbaarheid kan ook veroorzaakt worden door andere ionen dan natrium en chloride. Voor meer details omtrent de geleidbaarheidsverandering zal men andere methoden, zoals monsteranalyse, moeten toepassen. Daarnaast blijft de kabel permanent achter in de grond en kan dus niet worden hergebruikt. Bij deze methode geldt wederom dat om een verloop over de diepte te kunnen bepalen veel elektrodenparen geplaatst moeten worden wat kosten met zich meebrengt.

Voordeel van beide bovengenoemde methoden is dat het gaat om permanente opstellingen waardoor het verloop in de tijd vast gesteld kan worden. Nadeel hiervan is echter dat permanente opstellingen kostbaar zijn. Een ander nadeel van de methoden is dat onduidelijkheid bestaat over het verloop van het chloridegehalte met de diepte als er niet op veel punten wordt gemeten. Om enkele van deze nadelen te ondervangen is onderzocht of met eenmalige en minder kostbare metingen, het verloop van het chloridegehalte over de diepte bepaald kan worden. Een dergelijke methode is beschikbaar middels de sondeer-techniek.

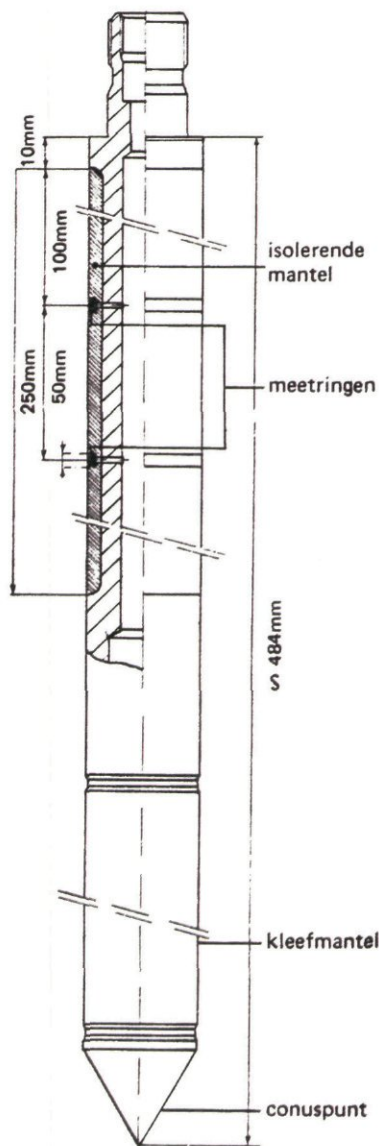
Alternatieve chloridebepaling Sonderen

Sonderen (NEN 5140) is een genormeerde meetmethode waarmee men inzicht krijgt in de bodemopbouw met de diepte door een sondeerconus de grond in te drukken waarbij iedere twee centimeter metingen worden verricht. Uit de druk op de punt van de conus (conusweerstand) en de plaatselijke wrijving langs de conuswand (kleef) kan een indicatie verkregen worden van de bodemopbouw. Dit wordt meestal aan de hand van het wrijvingsgetal (verhouding tussen conusweerstand en kleef) gedaan waarbij bepaalde waarden indicatief zijn voor een bepaalde grondsoort.

Globaal kan, afhankelijk van de grondsoort, tot op een diepte van 50 tot 80 meter onder maaiveld gesondeerd worden. De methode verstoort de oorspronkelijke situatie niet of nauwelijks. Bij het terugtrekken van de conus kan het gat opgevuld worden met ben-

toniet waardoor ook de hydrologische situatie niet verstoord wordt.

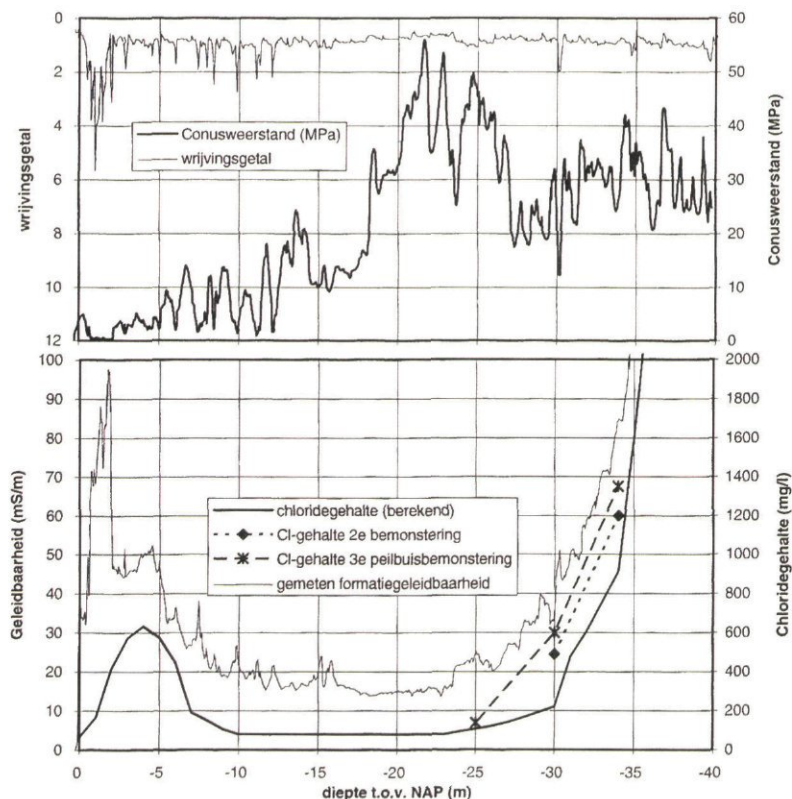
Een sondeerconus kan ook voorzien worden van andere meetinstrumenten voor specifieke doeleinden. Bijvoorbeeld temperatuursensors om de bodemtemperatuur te meten, waterspanningsmeters om dunne kleilaagjes in een zandpakket te detecteren of elektroden om de geleidbaarheid van de ondergrond te meten.



Afb. 1 Geleidbaarheidsconus

Geleidbaarheidssonderingen

Een sondeerconus kan voorzien worden van twee elektroden die in een isolerende mantel boven de kleefmantel worden geplaatst (Afbbeelding 1). Tussen de twee elektroden wordt een wisselspanning aangebracht. De wisselspanning veroorzaakt een stroom, via de omliggende grond, tussen de elektroden. De stroomsterkte is een maat voor de elektrische geleiding. Op deze wijze kan over de hele diepte



Afb. 2 Geleidbaarheidssondering

te een continu beeld verkregen worden van de elektrische geleidbaarheid. Een voorbeeld van een geleidbaarheidssondering is weergegeven in afbeelding 2. De tijdens het sonderen geregistreeerde geleidbaarheid wordt formatiegeleidbaarheid genoemd.

Gemeten formatiegeleidbaarheid

De formatiegeleidbaarheid is afhankelijk van de formatie ter plaatse, oftewel van geleidbaarheid van het korrelmateriaal, van het poriënwater (watergeleidbaarheid) en van het poriënvolume. De geleidbaarheid van het korrelmateriaal is afhankelijk van de grondsoort. De geleidbaarheid van het poriënwater is afhankelijk van de hoeveelheid en het soort ionen in het grondwater en van de ter plaatse heersende temperatuur. De ionen die de meeste invloed hebben op de elektrische geleidbaarheid van grondwater zijn chloride, bicarbonaat, sulfaat, natrium, calcium, magnesium en kalium. Andere (van nature minder aanwezige) stoffen, bijvoorbeeld zware metalen, kunnen echter ook van invloed zijn op de elektrische geleidbaarheid.

In de huidige praktijk worden geleidbaarheidssonderingen toegepast voor globale verkenning; de resultaten van de geleidbaarheidssondering worden gebruikt om de strategie te bepalen voor het plaatsen van peilfilters. Meerburg (1996) heeft aangegeven hoe uit geleidbaarheidssonderingen ook een kwantita-

tieve waarde van het chloridegehalte afgeleid kan worden. Daartoe wordt de gemeten formatiegeleidbaarheid omgerekend tot watergeleidbaarheid. Deze berekende watergeleidbaarheid wordt gebruikt om een schatting van het chloridegehalte te maken.

Watergeleidbaarheid bepalen uit gemeten formatiegeleidbaarheid

Formatie- en watergeleidbaarheid zijn nauw gerelateerd. Enerzijds vormt de geleidbaarheid van de poriënvloeistof een onderdeel van de formatiegeleidbaarheid, anderzijds beïnvloedt de watergeleidbaarheid in sommige gevallen het elektrochemisch gedrag van de grond.

Introductie Formatiefactor

Archie (1942) heeft empirisch vastgesteld dat er een relatie bestaat tussen de watergeleidbaarheid en de formatiegeleidbaarheid volgens vergelijking 1:

$$F = \frac{\sigma_w}{\sigma_f}$$

(1) met: F = formatiefactor (-)

σ_w = watergeleidbaarheid (mS/m)

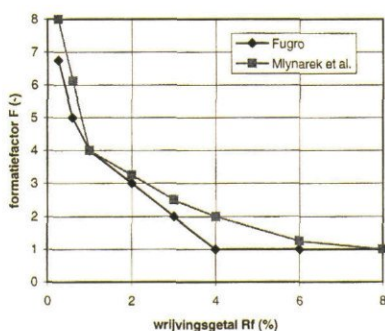
σ_f = formatiegeleidbaarheid (mS/m)

De formatiefactor is waardevol als men na het meten van de formatiegeleidbaarheid de plaatselijke watergeleidbaarheid wil bepalen.

De formatiefactor F blijkt voor een bepaalde formatie een constante waarde te hebben. Onder andere Archie (1942), Jackson et al. (1978) en Cambell en Lehr (1973) hebben getracht de formatiefactor vast te stellen op basis van een relatie tussen eigenschappen zoals korrelvorm, korrelgrootte, porositeit, cementatiegraad en specifieke oppervlaktegeleidbaarheid van de korrels. Uitgebreid (grond)onderzoek is nodig om op basis hiervan de watergeleidbaarheid te bepalen en daardoor niet toepasbaar in de praktijk.

Bepaling van de formatiefactor met behulp van sondeergegevens

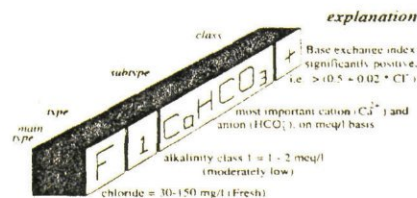
In de praktijk kunnen, uit metingen en met de nodige ervaring, aan specifieke grondsoorten bepaalde waarden van de formatiefactor toegekend worden. In Meerburg (1996) wordt de formatiefactor F afgeleid uit gegevens die verkregen kunnen worden met sonden zoals conusweerstand, kleeft en waterspanning. Door een relatie te leggen tussen het wrijvingsgetal (verhouding tussen conusweerstand en kleeft) en de formatiefactor ontstaat het beeld zoals weergegeven in afbeelding 3. Hierbij zijn de relaties afkomstig van twee verschillende bronnen (Fugro, 1986, Mlynarek et al., 1995). Beide relaties vertonen echter dezelfde tendens.



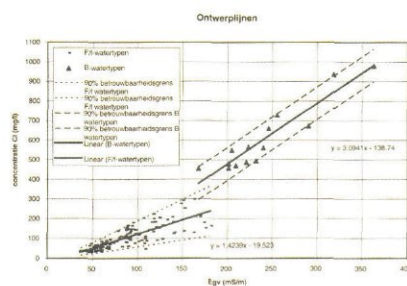
Afb. 3 Relatie tussen wrijvingsgetal en formatiefactor

Bepaling van de watergeleidbaarheid

Watergeleidbaarheid lijkt nu eenvoudig te bepalen; met het wrijvingsgetal wordt de formatiefactor bepaald waarna deze vermenigvuldigd wordt met de gemeten formatiegeleidbaarheid op dezelfde plaats in de diepte. De watergeleidbaarheid kan echter alleen bepaald worden als een representatieve waarde van de formatiegeleidbaarheid en een representatieve waarde voor de formatiefactor met elkaar vermenigvuldigd kunnen worden. Hierbij ligt de nadruk op de representativiteit. Uit Keller en Frischknecht (1966) blijkt dat bij de overgang van lagen met verschillende geleidbaarheid de gemeten geleidbaarheid verloopt. De representatieve geleid-



Afb. 4 Onderzoeksgegevens en daaruit afgeleide relatie tussen watergeleidbaarheid en chloridegehalte met betrouwbaarheidsinterval



Afb. 5 Verschillende relaties tussen watergeleidbaarheid en chloridegehalte, voor verschillende alkaliniteitsklassen

baarheid wordt pas bereikt bij lagen van meer dan 10 maal de afstand tussen de elektroden.

Aan de hand van het wrijvingsgetal kan globaal bepaald worden of een laag uniform is. De aanwezigheid van dunne afwijkende laagjes kan echter niet uit het wrijvingsgetal worden afgeleid terwijl deze wel van invloed zijn op de gemeten geleidbaarheid. Door de grootte en de aard van het meetelement geeft een meting van waterspanning een nauwkeuriger beeld van de gelaagdheid ter plaatse. Daarom is het aan te bevelen om bij een geleidbaarheidssondering ook de waterspanning (bij voorkeur in de conuspunt) te meten. Hierdoor kan de aanwezigheid van stoorlaagjes, en dus voor deze berekening niet bruikbare delen van de sondering, gemakkelijker worden herkend.

Chloridegehalte bepalen

Nadat de watergeleidbaarheid is bepaald uit de formatiegeleidbaarheid moet het chloridegehalte uit de watergeleidbaarheid worden bepaald. Er is weinig bekend over de relatie tussen watergeleidbaarheid en chloridegehalte voor natuurlijk grondwater. Voor verschillende oplossingen, zoals NaCl (Landolt-Börnstein, 1936), zijn wel relaties bekend maar deze zijn niet toepasbaar op natuurlijk grondwater omdat dit een mix van verschillende ionen bevat. Natuurlijk water kan op basis van onder andere ionencompositie ingedeeld worden in verschillende watertypen (Stuyfzand 1986).

Relaties tussen watergeleidbaarheid en chloridegehalte voor een selectie watertypen

Voor een aantal watertypen (met een Cl-gehalte van 30 tot 1000 mg/l (watertypen beginnend met F, f of B)) is onderzocht welke relatie tussen watergeleidbaarheid en chloridegehalte bestaat en wat het effect is van eventuele andere ionen (Meerburg 1996). Hiervoor is een selectie gemaakt van een groot aantal watermonsters afkomstig uit de kustzone van west Nederland, verdeeld over negen veel voorkomende watertypen (Stuyfzand 1993).

Voor deze monsters tezamen is een relatie gevonden tussen watergeleidbaarheid en chloridegehalte zoals weergegeven in afbeelding 4. Deze relatie bestaat uit twee lineaire delen. De eerste tot een geleidbaarheid van 175 mS/m voor zoetwatertypen en daarboven een lijn van 175 tot 360 mS/m voor brakwatertypen. Daarbij zijn tevens de 90 procent betrouwbaarheidsgrenzen aangegeven; bij de 'zoetwatertypen' op procentuele basis en bij de 'brakwatertypen' met een absolute fout.

Differentiatie in de relatie naar bicarbonaatgehalte

Omdat een hogere bicarbonaatklasse een hogere geleidbaarheid tot gevolg heeft bij eenzelfde chloridegehalte kan, als het bicarbonaatgehalte bekend is, een nauwkeuriger schatting van het chloridegehalte aan de hand van de watergeleidbaarheid worden gegeven. Hiervoor zijn de trendlijnen voor de watertypen met een alkaliniteit '3' (244 tot 488 mg HCO_3^-/l) en '4' (488 tot 976 mg HCO_3^-/l) weergegeven in afbeelding 5.

De invloed van andere ionen dan chloride en bicarbonaat op de watergeleidbaarheid blijkt minder groot te zijn.

Resultaat

Door gemeten formatiegeleidbaarheid naar watergeleidbaarheid om te rekenen en dit resultaat te gebruiken om chloridegehalte te berekenen, is het mogelijk een compleet beeld te krijgen van het verloop van het chloridegehalte over de diepte.

Bepalingen: Doordat formatiegeleidbaarheid sterk door andere ionen (zoals in geval van verontreinigingen) wordt beïnvloed, kunnen deze bewerkingen niet zonder meer toegepast worden. Een zeer hoge formatiegeleidbaarheid zou bijvoorbeeld kunnen wijzen op een lokale verontreiniging en niet op een hoog chloridegehalte zoals uit de berekeningen kan blijken. Bij de uitkomsten moet rekening gehouden worden met een foutenmarge die in grootte varieert, afhankelijk van grondsoort en chloridegehalte.

Toepassing

In Meerburg (1996) wordt een onderzoek

beschreven waarbij voor een lokatie in het westen van Nederland zowel een geleidbaarheidssondering als een peilbuisonderzoek is uitgevoerd. Het doel van dit onderzoek was het vaststellen en controleren of het zoet-zout grensvlak optrok na het starten van een bemaling.

Strategie

Allereerst is ter plaatse een geleidbaarheidssondering gemaakt. Aan de hand van de sondering (conusweerstand, kleeft en geleidbaarheid) kon de diepte van de filters van de peilbuizen optimaal bepaald worden. Hierna zijn in verschillende stadia, voor en tijdens de bemaling, monsters genomen uit de peilbuizen die vervolgens chemisch geanalyseerd zijn. De resultaten van de berekening die aan de hand van de geleidbaarheidssondering zijn gemaakt zijn vervolgens vergeleken met de chloridegehalten van de chemisch geanalyseerde monsters uit de peilbuizen.

Resultaten

Na vergelijken van de peilbuisgegevens met de gemeten geleidbaarheid bleken enkele peilbuisgegevens sterk af te wijken waarna de chemische samenstelling van enkele watermonsters nader is bestudeerd. Hieruit bleek dat enkele peilbuisgegevens incorrect waren en derhalve niet representatief (zonder vergelijking met een geleidbaarheidssondering zou deze conclusie niet getrokken kunnen worden). De overgebleven resultaten zijn naast elkaar gezet zoals te zien is in afbeelding 2. De geleidbaarheidssondering is gemaakt voor het starten van de bemaling terwijl de twee peilbuismonsters genomen zijn nadat de bemaling reeds gestart was. In dit voorbeeld is duidelijk te zien dat beide methoden hetzelfde beeld vertonen en dat de bemaling tot gevolg heeft dat het zoet-zout grensvlak optrekt. Het extreem hoge (berekende) chloridegehalte op een diepte van -4 m is niet juist en wordt hoogst waarschijnlijk door een verontreiniging veroorzaakt.

Conclusies

Het onderzoek naar de bepaling van het

chloridegehalte met behulp van geleidbaarheidssonderingen heeft aangetoond dat bij een kleine toename in watergeleidbaarheid, het chloridegehalte fors kan toenemen.

Geleidbaarheidssonderingen zijn een waardevolle aanvulling op peilbuisgegevens als het gaat om het bepalen van het verloop van het chloridegehalte in grondwater. Geleidbaarheidssonderingen geven, in tegenstelling tot de peilbuismethode, na berekening een totaal beeld van het verloop van het chloridegehalte over de diepte. Door de meting meerdere malen uit te voeren kan ook het verloop in de tijd vastgesteld worden.

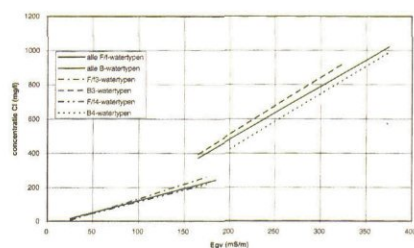
Voor de praktijk mag worden verwacht dat het combineren van peilbuisonderzoek, zoutwachters en geleidbaarheidssonderingen waardevol zal zijn. Na voorverkenning met geleidbaarheidssonderingen kan optimaal bepaald worden op welke diepten en op welke locaties peilfilters en/of zoutwachters geplaatst moeten worden. Tevens kan op een bouwterrein bijvoorbeeld besloten worden om op slechts een of een beperkt aantal plaatsen boorgaten met meerdere peilbuizen in te richten en de rest van het terrein te verkennen met behulp van geleidbaarheidssonderingen. Zo kunnen de resultaten onderling vergeleken worden en kan een compleet beeld van het verloop van het chloridegehalte zowel over de diepte als in laterale zin worden verkregen. Op deze wijze kunnen de kosten relatief laag blijven. Ook voor het onderzoeken van een groot gebied, bijvoorbeeld een polder, is optimalisatie door goed gebruik van de beschikbare methoden van belang.

Geleidbaarheidssonderingen lenen zich goed voor onderzoek naar chloridegehalten in de ondiepe ondergrond. Door de toegepaste sondeertechniek is de diepte beperkt tot ongeveer 80 meter, afhankelijk van de lokale ondergrond.

Het blijft van groot belang dat geleidbaarheidssonderingen voor de juiste doeleinden gebruikt en correct geïnterpreteerd worden. Een hoge gemeten geleidbaarheid kan indicatief zijn voor een hoog chloridegehalte maar kan ook veroorzaakt worden door een lokale verontreiniging. Om dit te kunnen onder-

scheiden blijft een uitgebreide hydrologische interpretatie van de betreffende situatie noodzakelijk.

- Archie G.E. (1942), The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics, *Trans Am. Inst. Min. Metall. Engrs*, 146, 1942, pag. 54-62.
- Campbell M.D. en Lehr J.H. (1973), *Water well technology*, McGraw-Hill, New York, 1973, pag. 184.
- Fugro (1986), *Gebruiksmogelijkheden van de elektrische geleidbaarheidssconus*, intern Fugro-rapport.
- Jackson J.D., Taylor Smith D. en Stanford P.N. (1978), *Resistivity-porosity-particle shape relationships for marine sands*, *Geophysics*, vol. 43, no. 6, 1978, pag. 1250-1268.
- Keller G.V. en Frischknecht F.C. (1966), *Electrical methods in geophysical prospecting*, Pergamon press.
- Kunst D.J. en Olie J.J. (1996), *Gebruik peilbuismethode dubieus*, *Land en Water*, no. 1 en 2, 1996, pag. 24-25.
- Landolt-Börnstein (1936), *Fysikalisch-chemische tabellen*, Ergänzungsband IIIc, Springer, Berlin, 1936.
- Meerburg M.H. (1996), *Bepaling van het chloridegehalte in grondwater met behulp van een elektrische geleidbaarheidssondering*, afstudeerrapport TU Delft, faculteit Civiele Techniek, vakgroep WMG, Hydrologie, 144 pag.
- Mlynarek Z., Tschuschke W. en Welling E. (1995), *Conductivity piezocone penetration test for evaluation of soil contamination*, *Int. Symp. on Cone Penetration Testing*, Swedish geotechnical society, Linköping, Zeden, 1995, vol. 2, pag. 233-237.
- Stuyfzand P.J. (1993), *Hydrochemistry and hydrology of the coastal dune area of the western Netherlands*, academisch proefschrift, VU van Amsterdam en KIWA, 366 pag.
- Stuyfzand P.J. (1986), *Een nieuwe hydrochemische classificatie van watertypen, met Nederlandse voorbeelden van toepassing*, *H₂O* (19) 1986 no. 23, pag. 562-568.
- Thomas B.D., Thompson T.G. en Utterback C.L. (1934), *The electrical conductivity of seawater*, *J. Consul. Perm. pour l'Expl. de la mer*, vol. 9, 1934.
- Verruijt A. (1990), *Grondmechanica*, Delftse Uitgevers Maatschappij, derde druk, 1990, pag. 282.



Afb. 6

Summary

For monitoring the location of fresh and salt groundwater or to be able to adapt to water quality standards for extraction purposes it is important to know the chloride content of groundwater. The two common methods used are observation wells and permanent electrode systems. Measurements made with an electrical conductivity probe appear to give promising results. This article explains how measurements, made with an electrical conductivity probe, can be converted into an estimate of the chloride content of groundwater with depth. Combining the three methods on site appears to be an efficient way to get a good impression of the chloride content with depth, time and lateral position.