

Verziltning in een deel van de duinwaterwinplaats van Gemeentewaterleidingen en modellering van de brakwatervorming

1. Inleiding

Gemeentewaterleidingen Amsterdam verzorgt de drinkwatervoorziening voor circa 1 miljoen inwoners in Amsterdam en wijde omgeving en beschikt daartoe over twee productie-eenheden, de rivier-duinwaterleiding en de rivier-plassenwaterleiding. Hiervan is de eerstgenoemde de grootste met een capaciteit van 83 miljoen m³/a. Aan de Duinwaterwinplaats (afb. 1) wordt al vanaf 1853 grondwater onttrokken door middel van een systeem van gegraven kanalen. Sinds 1903, 50 jaar later, wordt



J. W. KOOIMAN
Gemeentewaterleidingen
Amsterdam

tevens water onttrokken aan de diepe aquifers met behulp van diepe winputten. Het freatische en het diepe pakket worden gescheiden door een slecht doorlatende laag ('kleilaag') met hoge verticale weerstand, en onder deze laag bevindt zich een lens met zoet water, drijvende op het zwaardere zoute water. De hoeveelheid zoet water in de lens was beperkt, en omdat de grondwater-onttrekking de natuurlijke aanvulling ging overtreffen trad een sterke verziltning van het diepe pakket op, met als gevolg dat in een groot aantal putten het chloridegehalte zo sterk steeg dat de winning moest worden verminderd.

Om dit verziltingsproces tot staan te brengen wordt vanaf 1957 een deel van het freatische pakket kunstmatig aangevuld met voor-gezuiverd rivierwater uit de rivier de Rijn, circa 60 km van de winplaats. De onttrekking aan het diepe pakket werd tot een zeer laag niveau teruggebracht [Schuurmans, 1983]. In het diepe pakket bleef een grote hoeveelheid grondwater van goede kwaliteit aanwezig.

Het systeem van kunstmatige infiltratie loste het kwantitatieve probleem op, maar introduceerde wel een nieuw probleem, veroorzaakt door de slechte kwaliteit van het rivierwater. Het chloridegehalte van het rivierwater steeg in de loop der jaren, en om het chloridegehalte in het drinkwater onder een van te voren vastgestelde grens te houden (150 mg/l) moest steeds meer natuurlijk duinwater worden toegepast voor menging [Schuurmans, 1987]. Dat natuurlijke duinwater wordt gevonden in een aantal kanalen welke niet beïnvloed worden door de kunstmatige infiltratie, en in het diepe pakket. Het aantal onttrekkingseenheden voor dat natuurlijke duinwater is beperkt, en een intensief gebruik van de diepe winningen zal wederom een sterke upconing van het

Samenvatting

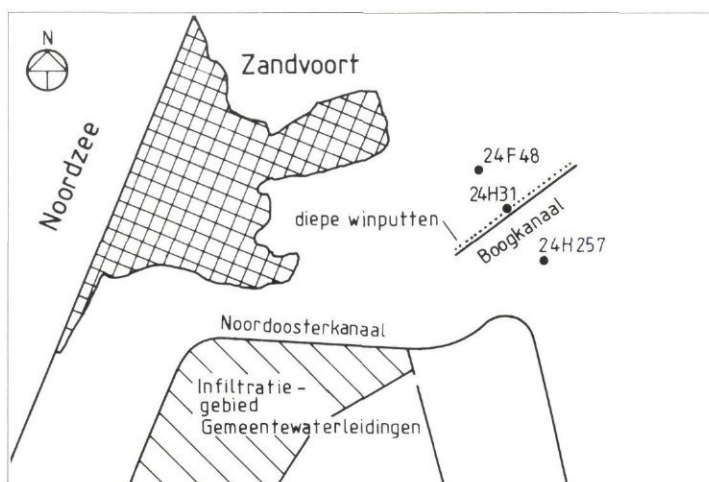
Voor de drinkwatervoorziening van Amsterdam wordt vanaf 1853 water onttrokken aan de duinwaterwinplaats nabij Zandvoort. Als gevolg van de steeds toenemende winning trad een sterke verziltning van het diepe pakket op, die eindigde in 1957 bij de invoering van de kunstmatige oppervlakte-infiltratie. Met een uitgebreide versie van het programma Konikow-Bredehoofd, waarin rekening wordt gehouden met dichtheidsverschillen tussen zoet, brak en zout grondwater, is het mogelijk de optimale aan het diepe pakket te onttrekken hoeveelheden te berekenen in situaties met verziltingsgevaar. De werking van het programma wordt geïllustreerd aan de hand van het winobject Boogkanaal. Met het geijkte model kan de verziltning gedurende 85 jaar worden gesimuleerd, en is het mogelijk de beste plaats voor een zoutwachter te bepalen. Verder is het een goed instrument bij het ontwerp van een diepinfiltratiesysteem. Tenslotte is aangetoond dat het verwaarlozen van dichtheidsverschillen tot grote verschillen in berekende chloridegehalten aanleiding kan geven.

brakke water tot gevolg hebben, met als gevolg een stijgend chloridegehalte. De vraag is dan ook hoe de bestaande diepe winningen op de meest optimale wijze kunnen worden ingezet.

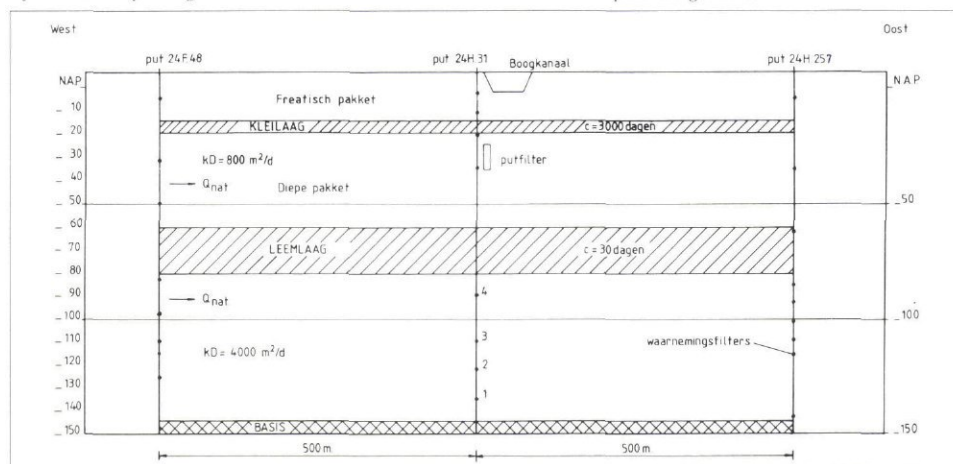
Het beantwoorden van deze vraag is de laatste jaren vergemakkelijkt door de ontwikkeling van computerprogramma's voor het berekenen van grondwaterstromingen met zoet en zout grondwater [IGWMC, 1987]. Een nadeel van de meeste

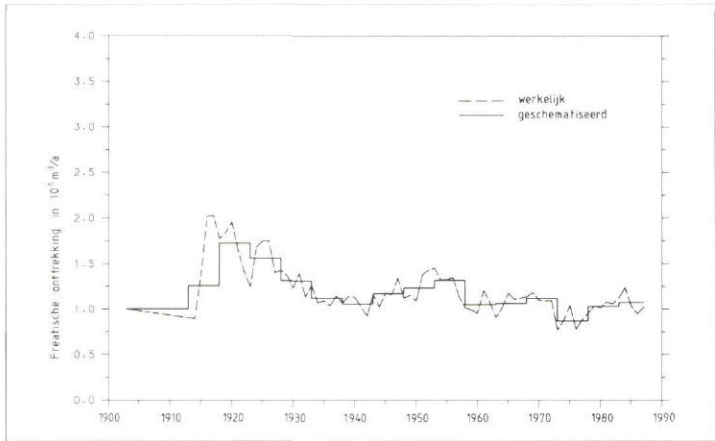
programma's is echter dat alleen met scherpe grensvlakken tussen zoet en zout grondwater wordt gerekend, en dat is een situatie die in de praktijk zelden benaderd wordt. Door deze eigenschap is van deze programma's in de drinkwatervoorziening niet veel gebruik gemaakt. De interesse gaat uit naar een programma dat juist ook het brakke water in rekening brengt. Een uitgebreide versie van het programma Konikow-Bredehoofd voldoet hieraan. In dit artikel wordt de

Afb. 1 - Locatie van het Boogkanaal.

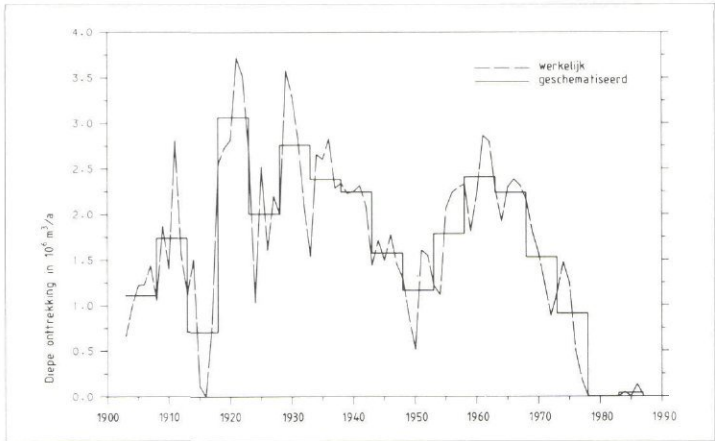


Afb. 2 - Geo-hydrologische schematisatie in een dwarsdoorsnede loodrecht op het Boogkanaal.





Afb. 3 - Jaarlijkse onttrekking van freatisch water aan het Boogkanaal.



Afb. 4 - Jaarlijkse onttrekking van diep water langs het Boogkanaal.

werking hiervan geïllustreerd aan de hand van een van de winobjecten voor natuurlijk duinwater, het Boogkanaal, en worden enkele toepassingen getoond.

2. Winobject Boogkanaal

Het Boogkanaal, gelegen in het noordelijke gedeelte van de duinwaterwinplaats (afb. 1), heeft een lengte van 1.000 meter en ligt min of meer evenwijdig aan de kust op een afstand van circa 2.500 meter. De geohydrologische situatie in een verticale doorsnede loodrecht op het kanaal is gegeven in afb. 2.

Het Boogkanaal is gegraven in 1887. Door het kanaalpeil kunstmatig laag te houden (NAP-1,70 m) werd aan het freatische pakket een hoeveelheid van 1 à 1,5 miljoen m³/a onttrokken (afb. 3). In 1903 startte de onttrekking aan het diepe pakket door middel van een rij artesische winputten langs het kanaal (afb. 4). De jaarlijks onttrokken hoeveelheden varieerden sterk als gevolg van putverstopping en het plaatsen van nieuwe putten (in 1903, 1909, 1929 en 1954). Vanwege het toenemende chloridegehalte van het onttrokken water van circa 40 mg/l tot circa 100 mg/l is vanaf 1978 de diepe

winning tijdelijk sterk verminderd om de invloed op de verminderde verzilting te onderzoeken.

De onttrekkingen aan het Boogkanaal, en vooral de in de loop der jaren wisselende diepe onttrekkingen, hadden merkbare gevolgen op de verdeling van het zoete, brakke en zoute water in de ondergrond. De bewegingen van het zoute, brakke en zoete water kunnen worden bestudeerd met behulp van een drietal waarnemingsputten in een lijn loodrecht op het midden van het Boogkanaal (afb. 1), nr. 24H.31 (direct naast het kanaal), nr. 24F.48 (500 meter ten westen) en nr. 24H.257 (500 meter ten oosten) [zie ook Roebert, 1972]. Chloridegehalten zijn beschikbaar vanaf het begin van deze eeuw op verschillende dieptes in de drie putten. Van een tweetal filters van put 31 zijn de gemeten gehalten gegeven in de afb. 5 en 6. Daarin is duidelijk de toenemende verzilting te zien. Filter 3 wordt helemaal zout (Cl⁻ = 17.000 mg/l). In filter 4 is de invloed van de afnemende diepe winning merkbaar in een verlaging van het chloridegehalte gedurende de laatste jaren.

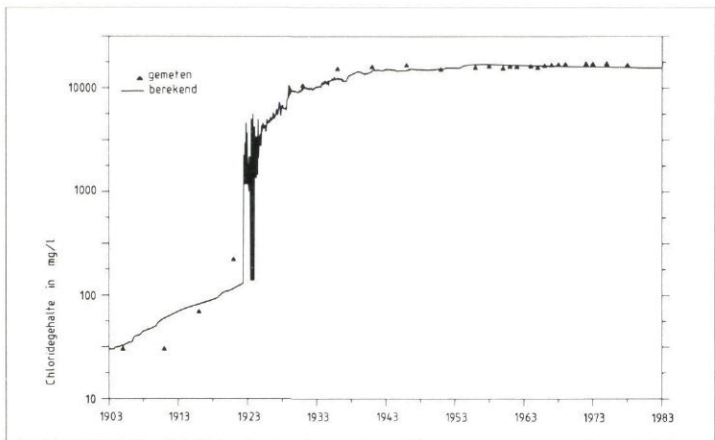
Vanwege de vele beschikbare gegevens rondom het Boogkanaal gedurende een

periode van 80 jaar is dit winobject uitstekend geschikt voor voorbeeldberekeningen met het programma Konikow-Bredehoeft.

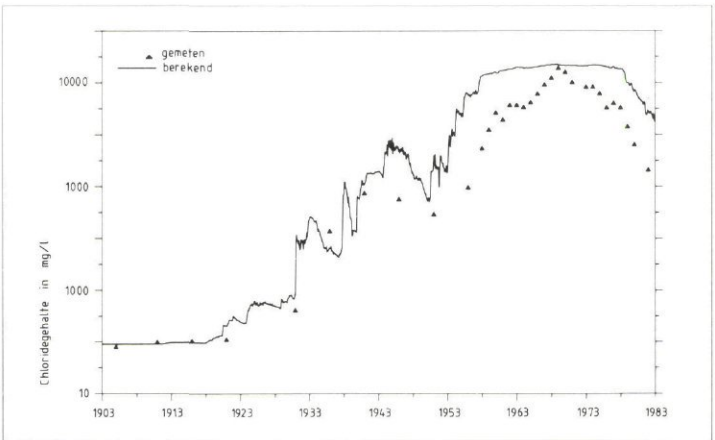
3. Schematisatie en ijking

Het programma Konikow-Bredehoeft berekent twee-dimensionaal het transport van een (opgeloste) stof in het verzadigde grondwater [Konikow and Bredehoeft, 1978]. Door uitbreidingen in het programma is het mogelijk in een verticale doorsnede het effect van dichtheidsverschillen in rekening te brengen [Lebbe, 1983, 1984]. Met een door het KIWA aangepaste versie is de ijking uitgevoerd en zijn berekeningen gemaakt voor het Boogkanaal [Kooiman et al., 1986]. Het modelgebied is een verticaal vlak, loodrecht op het midden van het Boogkanaal door de putten 48, 31 en 257 (afb. 1 en 2). De schematisatie van de ondergrond is gegeven in afb. 2: drie watervoerende pakketten gescheiden door twee slecht-doorlatende lagen ('kleilaag' en 'leemlaag'). De verticale doorlatendheid is tien maal kleiner dan de horizontale doorlatendheid (anisotropie). De longitudinale dispersiviteit is 0,02 m, de verticale 0,002 m. Het relatieve dichtheidsverschil tussen zoet en zout water bedraagt 2,5% bij een chloridegehalte van

Afb. 5 - Gemeten en berekend chloridegehalte in put 24H.31, filter 3 (NAP = 109 m).



Afb. 6 - Gemeten en berekend chloridegehalte in put 24H.31, filter 4 (NAP = 89 m).



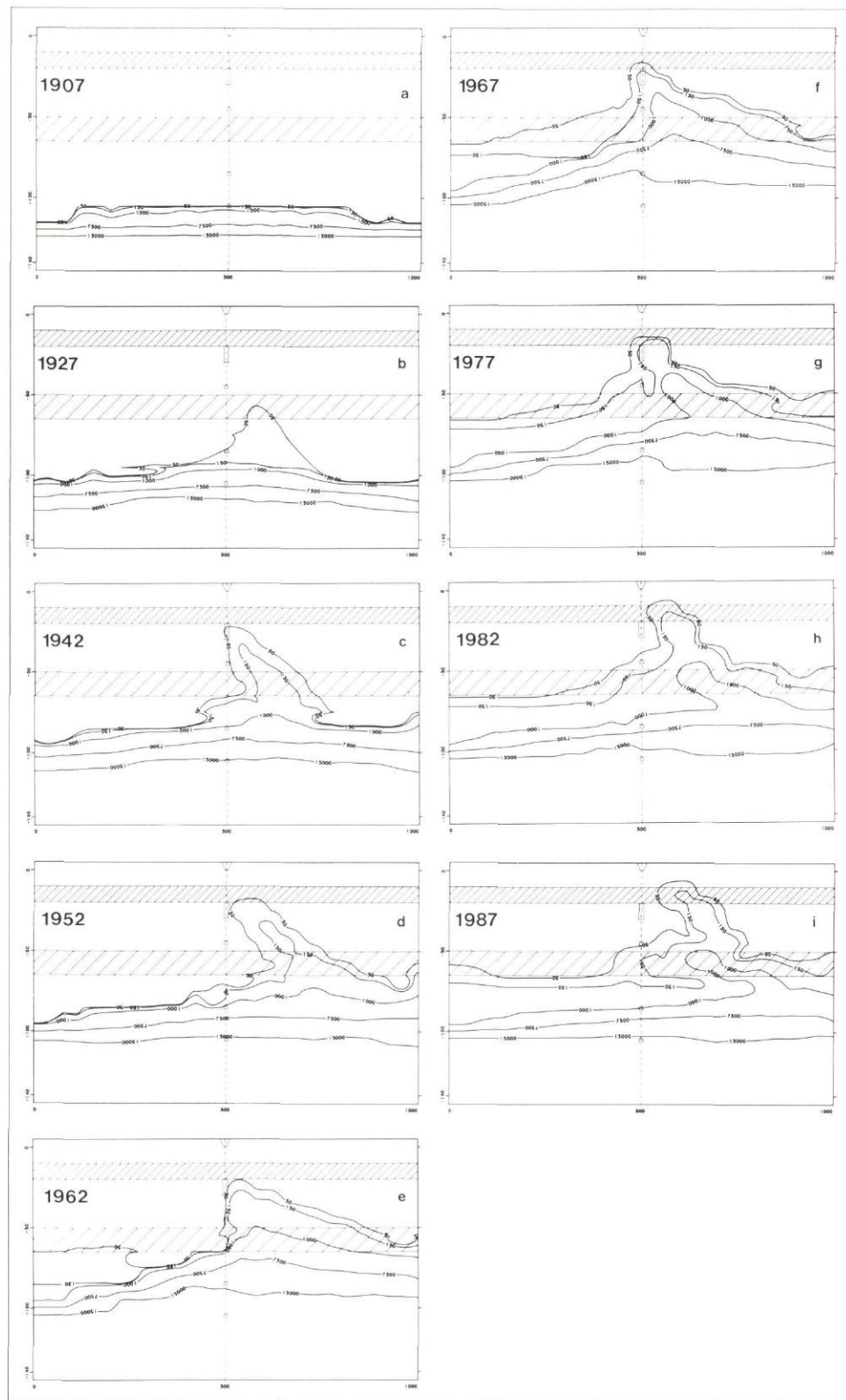
18.630 mg/l. De nuttige neerslag bedraagt 465 mm/a. Het modelgebied is opgedeeld in rechthoekige elementen van 40 m bij 10 m. Het aantal elementen in horizontale richting is 27, in verticale richting 16. Gestart is met een scherp grensvlak tussen zoet ($Cl' = 30$ mg/l) en zout ($Cl' = 17.000$ mg/l) grondwater. Er is sprake van een natuurlijke afstroming in het diepe pakket van west naar oost.

Ijkingsberekeningen zijn uitgevoerd voor een periode van 80 jaar (1903-1982), verdeeld in 16 tijdstappen van elk 5 jaar. In elke tijdstap zijn de onttrekkingen en randvoorwaarden constant (zie ook afb. 3 en 4). Met als randvoorwaarden de gegevens van de putten 48 (westrand) en 257 (ooststrand) zijn chloridegehalten berekend in put 31, en vergeleken met de gemeten waarden. Van de filters 3 en 4 zijn de resultaten van de ijkingsberekeningen gegeven in de afb. 5 en 6. Ondanks de grove schematisaties in ruimte en tijd is een zeer goede overeenkomst tussen berekende en gemeten waarden verkregen.

Het verloop van de verzilting in de ondergrond wordt in beeld gebracht door op bepaalde tijden de verdeling van de chloridegehalten in het modelgebied te berekenen. In afb. 7 is te zien hoe in de loop der jaren het brakke en zoute water verplaatst zijn onder invloed van de winningen (afb. 3 en 4) en de natuurlijke afstroming.

De startsituatie in 1903 is verkregen door aan de onderste drie rijen elementen een chloridegehalte van 17.000 mg/l toe te kennen en aan de overige 30 mg/l. Vanwege de hoogte van de elementen (10 m) is bij de start al sprake van een overgangszone van 10 meter. Dit komt overeen met de waarnemingen.

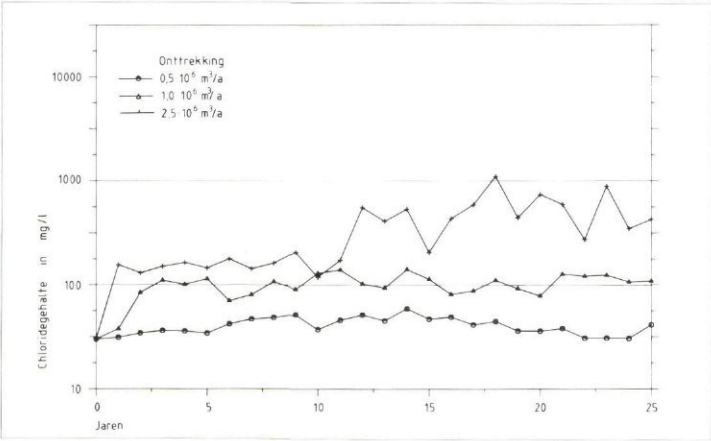
Na 5 jaar, eind 1907, heeft de overgangszone een dikte van 20 meter (afb. 7a). Hierin komt slechts weinig verandering in de daaropvolgende jaren. De hoge onttrekkingen, zowel freatisch als diep, resulteren in 1927 in een sterke optrekking van de 50 mg/l-grens (afb. 7b). In de daaropvolgende 15 jaren, met een diepe onttrekking van circa 2 miljoen m^3/a , zet deze ontwikkeling zich door en in 1942 breekt ook de 150 mg/l-grens door de leemlaag (afb. 7c). Door de lage onttrekkingen in de jaren veertig doet de invloed van de natuurlijke afstroming zich duidelijker gelden in een 'wegduwen' van de 50- en 150 mg/l-grens in oostelijke richting (1952, afb. 7d). De hoge onttrekkingen in de jaren vijftig en zestig 'corrigeren' dit weer, met als gevolg dat het chloridegehalte van de diepe winning, overeenkomstig de gemeten waarden, stijgt tot 50 mg/l in 1962 (afb. 7e), en dat de 1.000 mg/l-grens door de leemlaag wordt getrokken (1967, afb. 7f). Ondanks de afnemende onttrekking blijft het chloride-



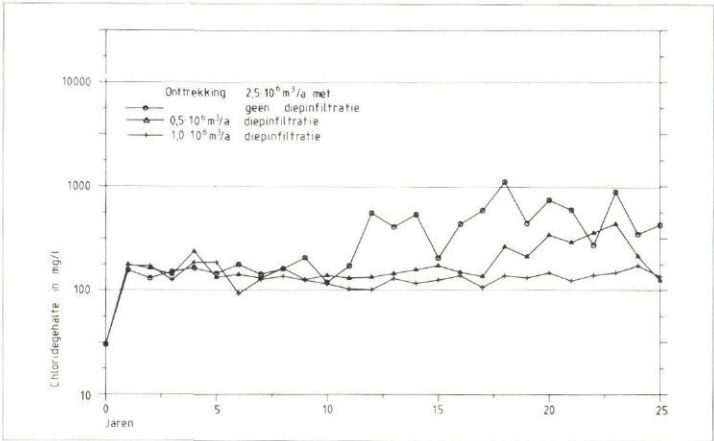
Afb. 7 - Berekende verdeling van het chloridegehalte in het modelgebied op een aantal tijdstippen. (Contourlijnen 50, 150, 1000, 7500, 15000 mg/l.).

gehalte van de diepe winning stijgen tot boven de 100 mg/l in 1977 (afb. 7g), waarna de diepe winning wordt stilgezet. De gevolgen hiervan zijn duidelijk te zien in 1982 (afb. 7h): een sterke verschuiving als gevolg van de natuurlijke afstroming en geen

'uitzakking' van de upconing. Daarvoor zijn de dichtheidsverschillen te klein. Grondwater met hoge chloridegehalten (50-150 mg/l) is dichterbij het onttrekkingsfilter gelegen dan uit de waarnemingen recht onder de winning blijkt, met als gevolg een groter gevaar voor



Afb. 8 - Chloridegehalte van de diepe winning voor een drietal onttrekkingsituaties.



Afb. 9 - Chloridegehalte van de diepe winning bij een hoge onttrekking met en zonder diepinfiltratie.

verzilting bij het opvoeren van de onttrekking. De genoemde verschijnselen zijn met de bestaande waarnemingsmiddelen niet te volgen.

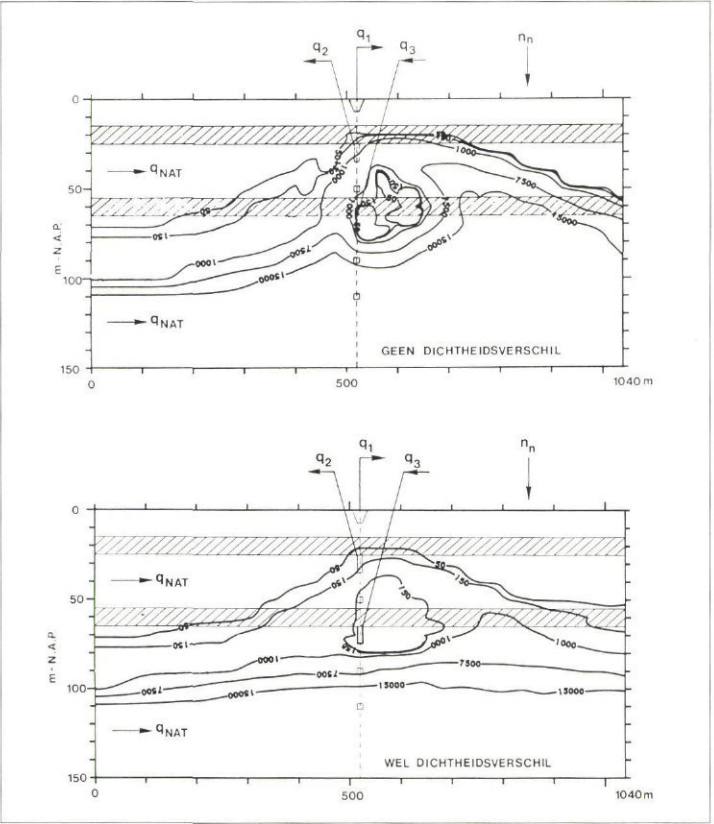
4. Toepassingen

In deze paragraaf zullen drie toepassingen worden gegeven van het geijkte model: het berekenen van de huidige situatie, het bepalen van de meest optimale onttrekkingsstrategie en het berekenen van de invloed van diepinfiltratie. Uitgangspunt is steeds de situatie zoals die in de vorige paragraaf is berekend voor eind 1982. Op dezelfde wijze als in de ijkingsberekeningen is de periode 1983-1987 doorgerekend. In afb. 7i is te zien dat de upconing nog verder oostwaarts is afgestroomd. Ook is te zien dat na verloop van tijd verhoogde chloridegehalten zijn te verwachten aan de oostrand in put 257 zonder dat sprake hoeft te zijn van diepe onttrekkingen. Dit verschijnsel is op andere plaatsen in de winplaats ook al opgetreden. Tenslotte is het ook mogelijk met dit model de beste plaats voor een zoutwachter te bepalen, waarmee dan niet de optrekking van onderaf wordt gecontroleerd, maar de toestrooming uit oostelijke richting.

De beide andere toepassingen betreffen voorspellingen. Over een periode van 25 jaar, waarin onttrekkingen en randvoorwaarden constant worden gehouden, wordt het chloridegehalte van de diepe winning berekend. De freatische onttrekking bedraagt steeds 1 miljoen m³/a. Voor het bepalen van de optimale grootte van de diepe onttrekking worden drie situaties doorgerekend: 0,5, 1,0 en 2,5 miljoen m³/a. Gezien de kwalitatieve eisen die aan het onttrokken water worden gesteld mag het chloridegehalte niet boven de 50 mg/l komen.

horizontaal aantrekken van brak water. Uit afb. 8 blijkt dat, uitgaande van de situatie eind 1982, de diepe winning langjarig niet meer dan 0,5 miljoen m³/a mag bedragen. Tevens is goed te zien dat de hoge onttrekking van 2,5 miljoen m³/a al binnen het jaar een chloridegehalte van 175 mg/l tot gevolg heeft. Bij de winning van 1 miljoen m³/a ligt het chloridegehalte na drie jaar al op en niveau van 100 mg/l. Eind 1987 (zie afb. 7i) is de situatie een stuk gunstiger dan eind 1982, zodat uitgaande van deze situatie langjarig een hogere onttrekking dan 0,5 miljoen m³/a mogelijk zou zijn. Een volgende toepassing betreft de invloed van diepinfiltratie, hoewel dit langs het

Boogkanaal niet wordt overwogen. De berekeningen dienen slechts om de mogelijkheden aan te geven. Momenteel vindt toepassing van de berekeningstechniek plaats voor een andere locatie in de Duinwaterwinplaats, waar wel diepinfiltratie is gepland. De diepinfiltratieberekeningen vinden plaats bij een diepe onttrekking van 2,5 miljoen m³/a. Het infiltratiefilter bevindt zich recht onder de winning, direct onder de leemlaag. De infiltratiehoeveelheden bedragen 0,5 en 1,0 miljoen m³/a, met een chloridegehalte van 125 mg/l. Uit afb. 9 blijkt dat het chloridegehalte van het onttrokken water duidelijk lager wordt, maar de onderlinge



Afb. 10 - Voorspelling van de verdeling van het chloridegehalte 25 jaar na de situatie '1982'. Vergelijking van 2 situaties met en zonder rekening te houden met dichtheidsverschillen.
 $q_1 = 1,0 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{a};$
 $q_2 = 2,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{a};$
 $q_3 = 1,0 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{a},$
 $[Cl^-] = 125 \text{ mg/l}.$

Problemen kunnen ontstaan door het

verschillen tussen beide infiltratiesituaties zijn niet erg groot en in beide gevallen blijft het chloridegehalte boven de 100 mg/l.

5. Invloed van dichtheidsverschillen

Het verzorgen van de invoer en het uitvoeren van de berekeningen met het programma Konikow-Bredehoeft zijn arbeidsintensief. Het gebruik van dit programma is alleen dan zinvol wanneer de uitkomsten beter zijn dan wanneer een eenvoudiger 'zoet' programma was toegepast. Daarom is de laatste situatie uit de vorige paragraaf ook doorgerekend zonder dichtheidsverschillen. Uit afb. 10 blijkt dat verwaarlozing van dichtheidsverschillen in deze situatie tot veel hogere waarden van het chloridegehalte van de diepe winning aanleiding geeft, en de voorspellende waarde van de berekening dan vrijwel nihil is.

6. Conclusies

- Het is mogelijk om met de uitgebreide versie van het programma Konikow-Bredehoeft een werkelijk opgetreden situatie door te rekenen. In dit artikel betreft het de brakwatervorming over een periode van 85 jaar, in een situatie waarin de winmiddelen tot lijnobjecten zijn geschematiseerd.
- In de hier beschreven situatie leidt het verwaarlozen van dichtheidsverschillen tussen zoet en zout grondwater tot grote verschillen in het chloridegehalte van het onttrokken water.
- Door het inzicht dat verkregen is in de brakwater beweging is een goede plaatsing van een zoutwachter mogelijk.
- Het geijkte model is een instrument voor het bepalen van de optimale onttrekkingshoeveelheden bij verziltingsgevaar.
- De gebruikte versie van het programma Konikow-Bredehoeft kan goede diensten bewijzen bij het ontwerp van een diep-infiltratiesysteem waarbij sprake is van grondwater met verschillende dichtheden.

7. Verantwoording

De aanpassing van het programma Konikow-Bredehoeft voor dichtheidsverschillen en de testberekeningen zijn uitgevoerd door ir. J. P. van der Eem van het KIWA in het kader van het speurwerkprogramma van de VEWIN, waarvan het diepinfiltratie-onderzoek gedeeltelijk door het ministerie van VROM wordt gesubsidieerd. De in dit artikel gebruikte versie is voor waterleiding-bedrijven beschikbaar op de KIWA-computer.

Literatuur

IGWMC (1987). *Short Course on: Modelling Fresh-Saline Groundwater Flow*. IGWMC en IHE, Delft.
Konikow, L. F. and Bredehoeft, J. D. (1978). *Chapter C2: Computer model of two-dimensional solute transport and dispersion in groundwater*. Book 7: Automated data processing and computations, Techniques of water-resources investigations of the United States Geological

Survey, U.S. Government printing office, Washington, 90 pp.

Kooiman, J. W., Peters, J. H. and Eem, J. P. van der (1986). *Upconing of brackish and salt water in the dune area of Amsterdam waterworks and Modelling with the Konikow-Bredehoeft program*. Proceedings of the 9th Salt Water Intrusion Meeting, Delft, pag. 343-360.

Lebbe, L. (1983). *Mathematical model of the evolution of the fresh water lens under the dunes and beach with semi-diurnal tides*. Proceedings of the 8th Salt Water Intrusion Meeting, Bari, p. 211-226.

Lebbe, L. (1984). *Numerische simulatie van grondwater-kwaliteitsproblemen als hulp bij het beheer van de water-vorraden in het vlaamse kustgebied*.

Tijdschrift BECEWA nr. 76, p. 67-88.

Roebert, A. J. (1972). *Fresh water winning and salt water encroachment in the Amsterdam dune water catchment area*. Geologie en Mijnbouw, Vol. 51(1), pag. 35-44.

Schuurmans, R. A. (1983). *Restoring a briny catchment area*. Proceedings of the 8th Salt Water Intrusion Meeting, Bari, pag. 169-182.

Schuurmans, R. A. (1987). *Gemeentewaterleidingen en het zout in de Rijn*. Intern rapport Gemeentewaterleidingen.

• • •

Aan krachtdadige Maas-commissie valt nog niet te denken

Aan een krachtdadige internationale Maas-commissie ter verbetering van de kwaliteit van het Maaswater valt vooralsnog niet te denken. Dat hebben Gedeputeerde Staten van Limburg op gezag van minister Smit-Kroes van Verkeer en Waterstaat geantwoord op vragen van leden van Provinciale Staten. Minister Smit-Kroes wijt het ontbreken van een krachtdadige commissie vooral aan de onduidelijke politieke situatie in België waar de Vlaamse en Waalse deelregeringen steeds meer bevoegdheden krijgen, met name op milieugebied. Hun waterbeleid is nog steeds niet bekend.

Bovendien maakt de kwestie van de kwaliteit van het Maaswater deel uit van een pakket van zogenaamde waterverdragen tussen Nederland en België. Die betreffen niet alleen de kwaliteit van het water in Maas en Schelde maar ook de verdieping van de Westerschelde en het Baalhoekkanaal. Al jarenlang is er sprake van stagnatie in de onderhandelingen met België over deze verdragen. Minister Smit-kroes heeft Gedeputeerde Staten van Limburg laten weten dat zij het van groot belang acht dat het overleg over Maas en Schelde tussen de beide landen eindelijk eens van de grond komt maar aan Belgische kant bestaan er nog teveel weerstanden. Intussen put zij enige hoop uit een passage in het recente akkoord van de nieuwe partners in de Belgische regering. Daaruit valt namelijk af te leiden dat de huidige Belgische regering de vaste wil heeft om de onderhandelingen met Nederland over Maas en Schelde tot een goed einde te brengen. (ANP)

Onkruidverdelgingsmiddel in Rijn

Door een storing bij het chemiebedrijf BASF in Ludwigshafen in de Westduitse deelstaat Rheinland-Pfalz is begin september bij de produktie van een onkruidverdelgingsmiddel 500 kilogram dichloorfenoxypropaanzuur in de rivier de Rijn terechtgekomen. Dat heeft het ministerie van milieu in Mainz bekendgemaakt.

De chemische verbinding is biologisch moeilijk afbreekbaar. Er zou geen gevaar bestaan voor de flora en fauna in de rivier, aldus het ministerie, dat eveneens zei geen gevaar te vrezen voor de volksgezondheid. Niettemin is als voorzorgsmaatregel het internationale waarschuwingssysteem voor de Rijn ingelicht. (DPA)

WRK staakte tijdelijk de inname van Rijnwater

De NV Watertransportmaatschappij Rijn-Kennemerland (WRK) heeft op 19 september jl. uit veiligheidsoverwegingen de inname van het Rijnwater uit de Lek in Nieuwegein ten behoeve van de drinkwatervoorziening stopgezet vanwege een geconstateerde verontreiniging met de chemische stof 2,4 dichloorfenoxypropionzuur. De stof behoort tot de groep van herbiciden en kan gebruikt worden als onkruidverdelger (o.a. klaver) voor graslanden, dijken en bermen en de bijgraanteelt. Op 13 september werd door de dienst Binnenwateren RIZA bij Lobith een concentratie gemeten van 4,2 microgram per liter. De te verwachten concentratie bij Nieuwegein zal 2,5 microgram per liter zijn. De innamegrens is 1 microgram per liter. Gedurende de onderbreking van de inname is de drinkwatervoorziening in Amsterdam (Gemeentewaterleidingen) en een deel van het voorzieningsgebied van de provincie Noord-Holland (Provinciaal waterleidingbedrijf van Noord-Holland) voortgezet uit de voorraden in de waterleidingduingebieden. De rechtstreeks op de WRK aangesloten industrieën werden door de WRK van voorgeinigd IJsselmeerwater voorzien vanuit het waterwinstation Prinses Juliana te Enkhuizen. Dit waterwinstation nam ook de toevoer van infiltratiewater naar het Noordhollands Duinreservaat gedeeltelijk over.