

Verziltig van de twee waterwingebieden te Noordbergum (Friesland)

Onderzoek naar de oorzaken en naar de mogelijkheden tot bijsturing van het verziltingsproces

1. Inleiding

Het voorzieningsgebied van de NV Waterleiding Friesland omvat de gehele provincie Friesland, inclusief vier Waddeneilanden. In 1981 werd 43 miljoen m³ drinkwater geleverd waarvan meer dan 42 miljoen m³ door de vier pompstations op het vaste land (afb. 1). In Noordbergum, op circa 15 km ten oosten van Leeuwarden, bevindt zich het belangrijkste pompstation, genaamd jhr. E. C. Storm van 's Gravesande (afb. 2). In 1981 werd daar 23 miljoen m³ water gewonnen, 2 miljoen m³ minder dan volgens de vergunning is toegestaan.



DR. W. GEIRNAERT
IWACO BV
Rotterdam*



DRS. D. SPRONG
NV Waterleiding
Friesland, Leeuwarden*

Er zijn twee waterwingebieden in gebruik, namelijk het 'Oude Putterterrein' in de directe omgeving van het pompstation en het 'Ritskebosch' op 1,5 km ten zuidoosten van het pompstation (afb. 2). In het eerstgenoemde wingebied wordt sinds 1925 water gewonnen, in het laatstgenoemde sinds 1956. De productie van het pompstation is ongeveer gelijk verdeeld over de beide wingebieden. De putfilters bevinden zich op een diepte van 60 tot 90 m beneden maaiveld.

In 1977 werd bij een periodieke waterkwaliteitscontrole van de pompputten op het Oude Putterterrein in enkele putten een sterke stijging van het chloridegehalte geconstateerd. Er werden concentraties gemeten tot maximaal 350 mg/l, terwijl de natuurlijke chlorideconcentratie hier circa 40 mg/l bedraagt.

Gelet op deze ernstige verziltingsverschijnselen, werd door de NV Waterleiding Friesland besloten een grondig onderzoek in te stellen naar de oorzaken hiervan, naar de te verwachten ontwikkelingen in de toekomst en naar eventuele maatregelen ter bijsturing van het verziltingsproces om een blijvende, verantwoorde winning mogelijk te maken. De onderzoeksopdracht werd verstrekt aan het adviesbureau voor watervoorziening IWACO BV te Rotterdam en is uitgevoerd in de jaren 1978 en 1979. Het geologisch onderzoek werd verricht door drs. M. W.

ter Wee van de Rijks Geologische Dienst, district Noord, te Oosterwolde.

Het onderzoek werd in de beginfase bemoeilijkt door het ontbreken van voldoende (hydro-)geologische gegevens over met name de aard van de potkleigeul ten oosten van de waterwingebieden; ook waren er onvoldoende hydrochemische gegevens beschikbaar.

De co-auteurs die aan de verschillende hoofdstukken hebben meegewerkt, worden apart vermeld.

2. Hydrogeologische schematisatie

De waterwingebieden in Noordbergum liggen op een uitloper van het Noord-Nederlandse pleistocene zandgebied (afb. 1). In dit gebied is het grondwater zoet, in het holocene gebied is het overwegend brak of zout; de zoet-zout grens is in afb. 1 weergegeven. Bij de start van het onderzoek was de diepste verkenningsboring nabij de waterwingebieden N4 met een diepte van 200 m (afb. 2).

Teneinde meer inzicht te verkrijgen in de geologische opbouw van het gebied, werd een uitgebreid geo-elektrisch onderzoek verricht en werden 12 diepe verkenningsboringen uitgevoerd.

De geologische opbouw van het gebied kan in

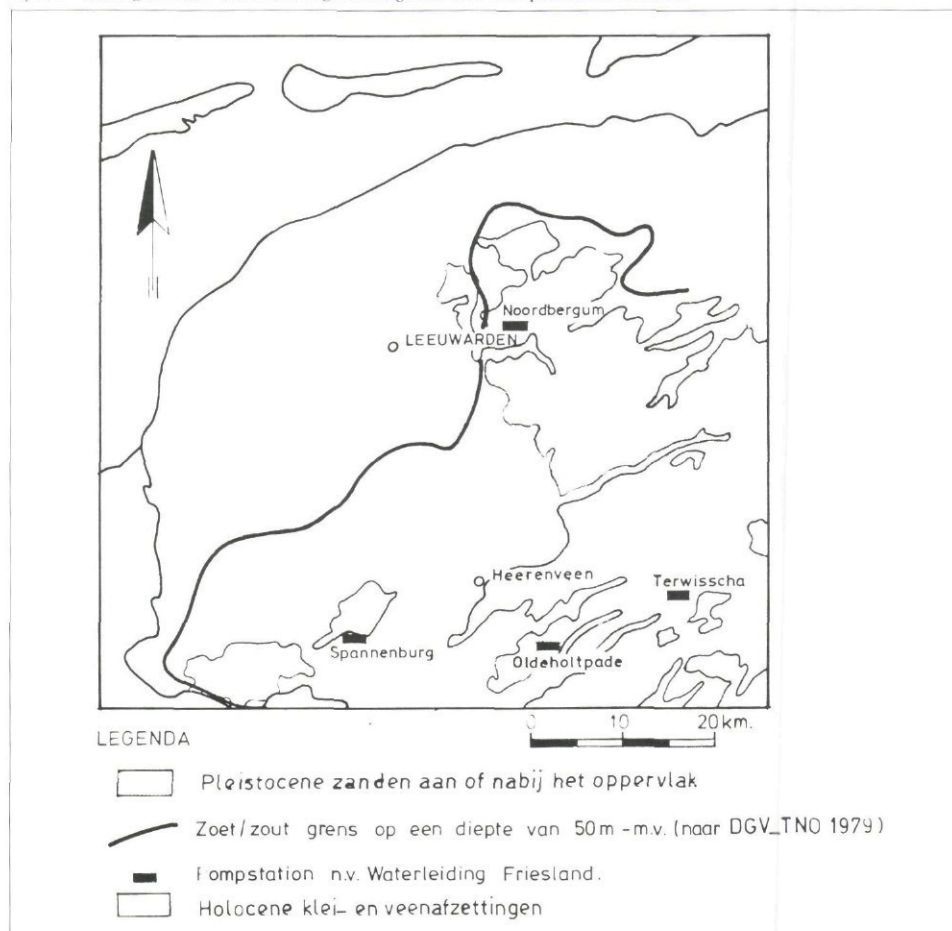
relatie met de hydrogeologie, in drie eenheden worden onderverdeeld:

1. de mariene afzettingen, waarin op 240 m diepte de hydrogeologische basis ligt op de overgang van zeeklei naar zeezand (respectievelijk behorend tot de Formatie van Oosterhout en van Maassluis);
2. de rivierzanden, waarin twee watervoerende pakketten voorkomen, op 60 tot 150 m en op 160 tot 240 m diepte;
3. de glaciaire afzettingen, die een afdekken-functie hebben.

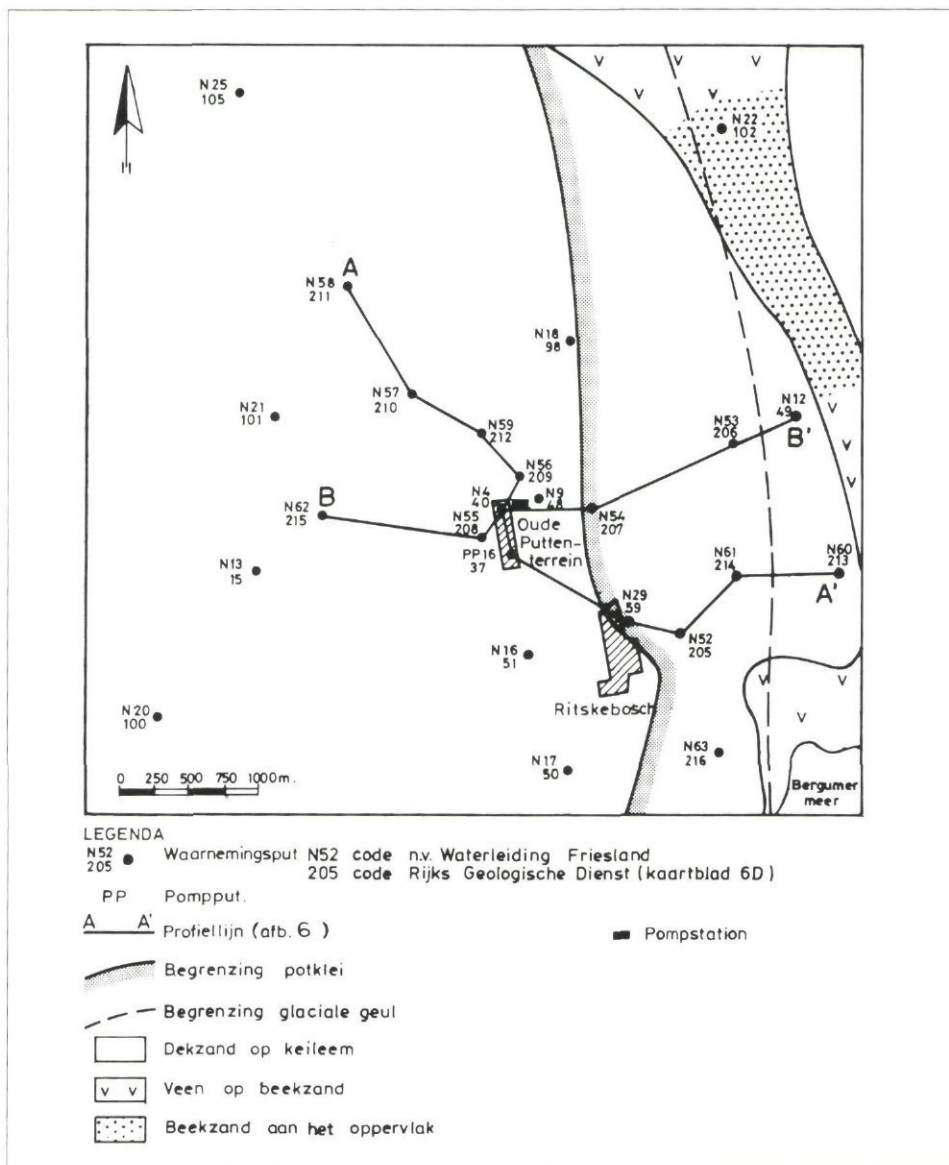
Zie ook de profielen in afb. 6.

De twee watervoerende pakketten bestaan uit over het algemeen grove zanden van de Formaties van Harderwijk, Enschede en Urk. Zij worden op een diepte van 150 tot 160 m gescheiden door de Tegelen-kleilaag die in alle boringen is aangetroffen. Het afdekkend pakket bestaat bijna geheel uit glaciaire afzettingen waarvan die van de Formatie van Peelo de belangrijkste zijn. Oostelijk van de waterwingebieden bestaat deze formatie uit een serie matig grove tot matig fijne zanden in afwisseling met forse kleilagen, die gelegen zijn in een zeer diepe geulvormige depressie. Bovenin deze geulopvulling ligt een zware stugge zwarte klei (potklei) die geleidelijk in westelijke richting overgaat in fijn leemig zand met kleilagen. De

Afb. 1 - Geologie en zoet-zout verdeling van het grondwater in de provincie Friesland.



* M.m.v. drs. S. J. de Jong (IWACO BV Rotterdam) en ir. J. S. Rus (IWACO BV Rotterdam).



Afb. 2 - Geologische overzichtskaart met de lokatie van de putterterreinen en de waarnemingsputten.

basis van deze geul was op een diepte van 350 m nog niet aangeboord. De ontstaanswijze van dergelijke diepe geulen is nog niet duidelijk. In de Noord-Duitse laagvlakte komen zij eveneens voor. Daar worden deze geulen, dit tot diep onder de grondmorene van het Elsterien landijs zijn uitgeschuurd, gezien als subglaciale smeltwaterdalen [Grube, 1979; Kuster en Meyer, 1979]. De grote diepte kon ontstaan door de druk van het bedekkende landijs. De geul bij Noordbergum doorsnijdt de beide watervoerende pakketten en de Tegelenkleilaag en vormt derhalve een kortsluiting. Genoemde afzettingen worden afgedekt door de zeer fijne zanden van de Formatie van Eindhoven (dikte 5 tot 10 m) en een keilempakket (Formatie van Drente) van enkele meters dikte. Daar overheen ligt een dunne laag dekzand (Formatie van Twente) en in de lagere delen ook nog restanten van het holocene veen.

3. Het hydrochemisch en geothermisch onderzoek m.m.v. drs. S. J. de Jong

3.1. Inleiding

Aanvullend op het verkennende (hydro-) geologisch en geo-elektrisch onderzoek diende het hydrochemisch en het geothermisch onderzoek inzicht te geven in de volgende facetten:

- De herkomst en de lokale stroming van het op het Oude Putterterrein en het Ritskebosch opgepompte brakke grondwater.
- De stroming van grondwater in de min of meer zandige afzettingen van de glaciale geul en in het bijzonder de stroming vanuit het tweede naar het eerste watervoerende pakket ten gevolge van de kortsluiting door deze geul.
- De verbreiding van de Tegelen-kleilaag. Deze kleilaag is in alle boringen aangetroffen. Op geologische gronden bestaan er echter twijfels over het aaneensluitend zijn van deze kleilaag. Lokale kortsluitingen

tussen het eerste en het tweede watervoerende pakket zouden grote invloed kunnen hebben op de grondwaterstroming. De temperatuurmetingen van het grondwater in zowel peilputten als pompputten zijn verricht in samenwerking met de vakgroep hydrogeologie van het Instituut voor Aardwetenschappen van de Vrije Universiteit te Amsterdam. De temperatuur van het opgepompte water van de pompputten is gemeten met een kwikthermometer met een afleesnauwkeurigheid van 0,1 K (0,1 °C). De temperatuur-dieptekrommen in de waarnemingsputten zijn bepaald met een temperatuurgevoelige weerstand (thermistor) met een afleesnauwkeurigheid van 0,01 K (0,01 °C). Deze metingen zijn geijkt aan de hand van door DGV-TNO in boring N52 verrichte temperatuurmetingen [DGV-TNO, 1981].

3.2. Het hydrochemisch onderzoek

Bij dit onderzoek zijn een aantal watertypen onderscheiden, ieder met een eigen ontstaanswijze. Hierbij is gebruik gemaakt van het Piper-diagram (afb. 3); [Piper, 1944]. Dit diagram is in kustgebieden waar verzilting en verzoeting optreden goed toepasbaar omdat het de processen van kationenuitwisseling duidelijk illustreert [Geirnaert, 1971]. Het principe van kationenuitwisseling berust op de verstoring van het evenwicht tussen de aan kleideeltjes en organisch materiaal geadsorbeerde kationen en de kationen in het grondwater. Een rivierafzetting bevat voornamelijk geadsorbeerde Ca-ionen; een marien sediment of een sediment waarin zich zout grondwater bevindt, heeft vooral Na-ionen geadsorbeerd.

Wanneer brak of zout NaCl-water infiltreert in een watervoerend pakket dat voorheen CaHCO₃-water (het normale eindproduct van geïnfiltrerd regenwater) bevatte, zal een deel van de Na-ionen in het infiltrerende water uitgewisseld worden tegen de aan klei geadsorbeerde Ca-ionen. Op het Piper-diagram verplaatsen de punten zich in de richting aangegeven door pijl 1. Grondwater dat op deze manier veranderd is, wordt CaCl₂-water genoemd.

Het omgekeerde proces treedt op wanneer zoet CaHCO₃-water het oorspronkelijke zoute water in een watervoerend pakket vervangt. In dit proces wordt de Ca uitgewisseld tegen de aan de kleien geadsorbeerde Na-ionen. Er ontstaat NaHCO₃-water en op het diagram verplaatsen de punten zich in de richting van pijl 2.

Tijdens alle stadia in het kationenuitwisselingsproces kan menging tussen verschillende watertypen plaatsvinden. Pijl 3 geeft de menging weer tussen CaHCO₃- en CaCl₂-water en pijl 4 tussen NaCl- en NaHCO₃-water. Menging tussen CaHCO₃- en NaCl-water zonder dat duidelijk kationen-

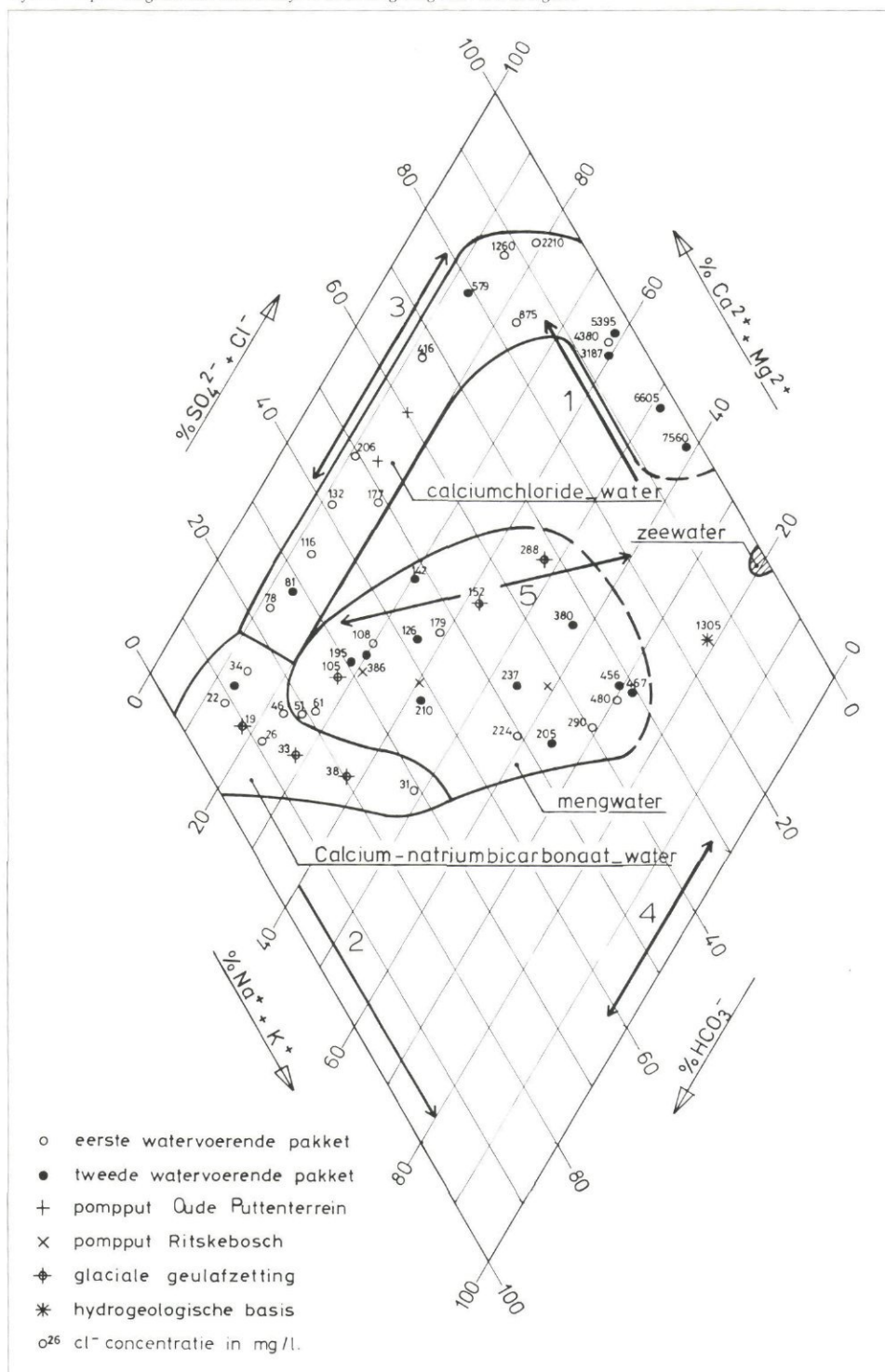
uitwisseling heeft plaatsgevonden, is aangegeven met pijl 5. Alleen dit type water wordt mengwater genoemd.

In het noorden van Friesland komt daar waar mariene holocene afzettingen liggen, overwegend het NaCl-type grondwater voor. Langs de randen hiervan komt CaCl₂-type grondwater voor, dat in de richting van het Drents plateau overgaat in CaHCO₃-water. In het tussenliggende gebied bij Noordbergum komt op veel plaatsen in het eerste watervoerende pakket grondwater voor met

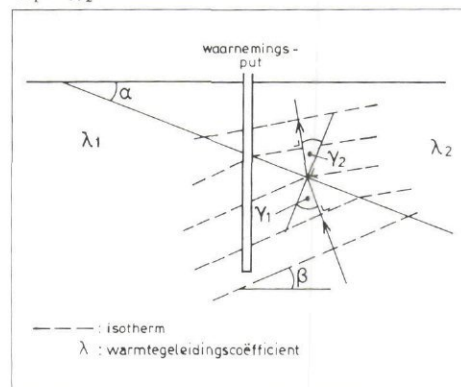
een geringe verrijking met Na. Het is mogelijk dat hier tijdens een transgressie van de zee (in het Cromerien, basis van de Formatie van Urk) Na geadsorbeerd is en dat nu de laatste fase van het verzoetingsproces zichtbaar is. Dit type water heet Ca/CaHCO₃-water.

De chemische analyses van het opgepompte water op het Oude Puttenterrein en op Ritskebosch vertonen grote verschillen. Op het Oude Puttenterrein wordt CaCl₂-type water gewonnen, op Ritskebosch het meng-

Afb. 3 - Piper-diagram met wateranalyses uit de omgeving van Noordbergum.



Afb. 4 - Breking van de isothermen bij een hellend scheidingsvlak tussen twee watervoerende pakketten; $\lambda_1 > \lambda_2$.



watertype. Op het Piperdiagram van afb. 3 zijn een aantal representatieve analyses uitgezet.

3.3. Het geothermisch onderzoek

Bij dit onderzoek is veel aandacht besteed aan de vorm van het oorspronkelijke temperatuurveld. Dit is het min of meer stationaire temperatuurveld dat in de ondergrond aanwezig was voordat met de winning van grondwater begonnen werd. Door de onttrekking van grondwater is het temperatuurveld in de omgeving van de putten velden in belangrijke mate niet-stationair geworden (vooral door verticale stroming van grondwater). De veranderde temperatuur van het grondwater geeft directe aanwijzingen over de door de onttrekkingen veroorzaakte grondwaterstromingen en dus over het verziltingsmechanisme. Temperatuur-dieptekrommen beneden de zone die wordt beïnvloed door seizoensfluctuaties (tot ca. 20 m diepte) lopen op plaatsen waar het temperatuurveld niet of in geringe mate is gewijzigd door de onttrekking van grondwater, binnen een lithologische eenheid min of meer lineair. De warmtestroming (door geleiding) wordt in deze stationaire situatie beschreven met de wet van Fourier:

$$q_z = -\lambda \frac{\delta T}{\delta z} \quad (1)$$

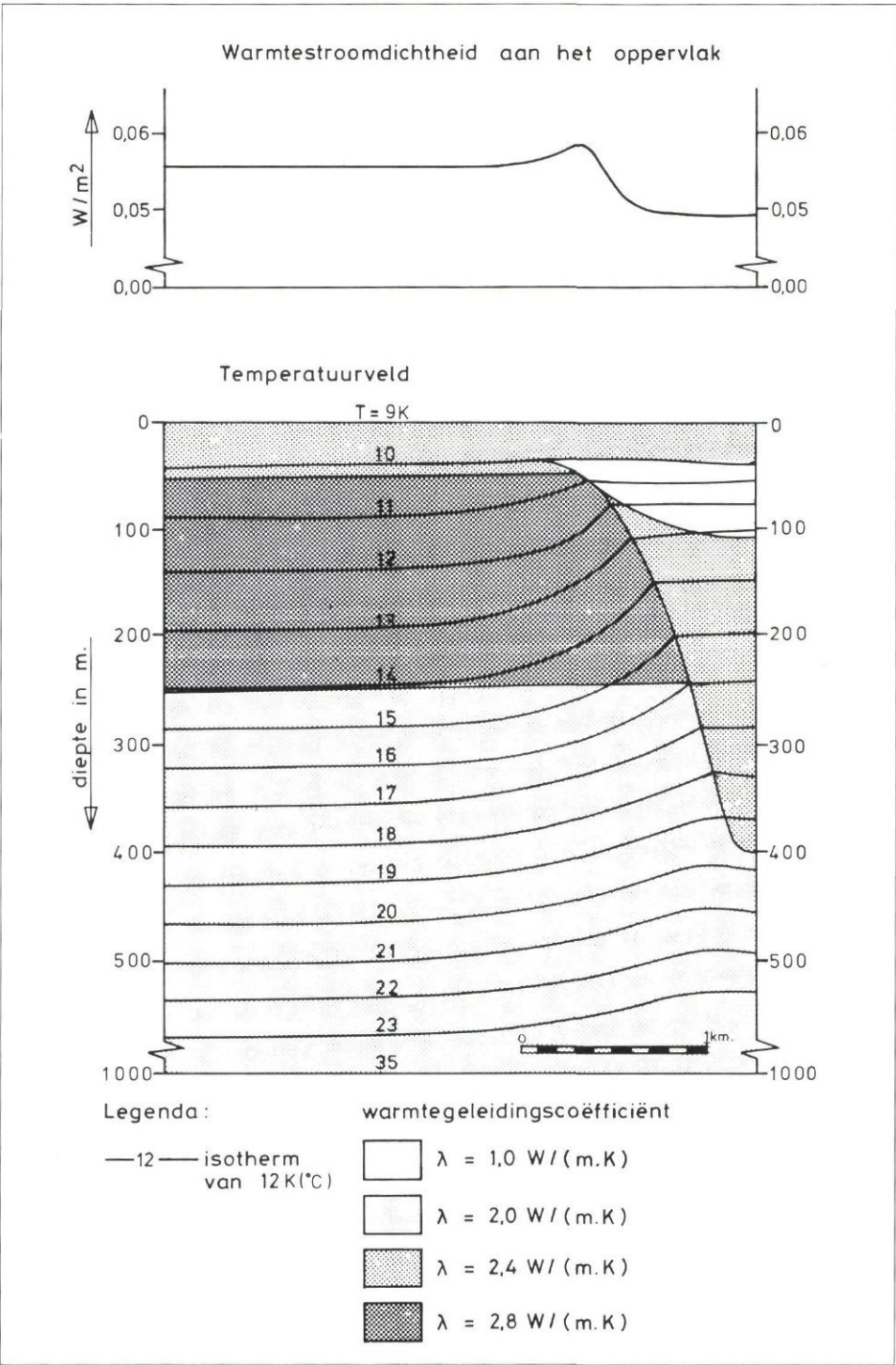
waarin:

q_z = warmtestroomdichtheid door geleiding in de z-richting [W/m²]

λ = warmtegeleidingscoëfficiënt [W/(m·K)]

$\frac{\delta T}{\delta z}$ = verticale temperatuurgradiënt [K/m]

De verticale temperatuurgradiënt kan eenvoudig bepaald worden aan de hand van de in waarnemingsputten bepaalde temperatuur-dieptekrommen. Van de warmtegeleidingscoëfficiënt λ zijn in Nederland voor de diepere afzettingen



Afb. 5 - Berekende warmtestroomdichtheid aan het oppervlak van de glaciale geul en berekend temperatuurveld door geleiding in een vlak loodrecht op de geul.

slechts weinig waarden bekend; voor grove, met water verzadigde kwartszanden (zoals in de watervoerende pakketten) wordt λ geschat op 2,8 W/(m · K). Voor twee aaneensluitende boven elkaar gelegen homogene en isotrope lagen geldt bij verticale stationaire warmtestroming dat:

$$q_z = -\lambda_1 \left(\frac{\delta T}{\delta z} \right)_1 = -\lambda_2 \left(\frac{\delta T}{\delta z} \right)_2 \quad (2)$$

Hierbij geven de indices 1 en 2 respectievelijk

de onderste en de bovenste laag aan. Indien de temperatuurgradiënten in beide lagen in een waarnemingsput gemeten zijn, dan kan met (2) de verhouding λ_1 en λ_2 eenvoudig bepaald worden. Als echter het scheidingsvlak tussen de twee lagen helt en/of de isothermen een helling hebben, zoals bij de glaciale geul, dan kunnen er complicaties optreden. Dit wordt toegelicht aan de hand van afb. 4. In deze afb. heeft het scheidingsvlak een helling α en hebben de isothermen

in de onderste laag een helling β . Op het scheidingsvlak treedt breking van de warmtestroomlijnen op welke beschreven worden door:

$$\frac{\tan \gamma_1}{\tan \gamma_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \quad (3)$$

Tevens geldt

$$\frac{\left(\frac{\delta T}{\delta z} \right)_1}{\left(\frac{\delta T}{\delta z} \right)_2} = R \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \quad (4)$$

waarbij

$$R = \frac{\cos \gamma_2 \cos \beta}{\cos(\alpha + \beta) \cos(\alpha - \gamma_2)} \quad (5)$$

De factor R is dus een maat voor de nauwkeurigheid waarmee λ_2/λ_1 bepaald wordt. Voor $\alpha = 0^\circ$ en β kleiner dan 10° , is R vrijwel gelijk aan 1 en kan (2) toegepast worden voor de analyse van de warmtegeleidingscoëfficiënt. In Noordbergum bedraagt α maximaal 25° (maximale helling van de wand van de glaciale geul). Voor dergelijke hellingshoeken kan R aanzienlijk van 1 afwijken; derhalve zijn de temperatuurmetingen in de waarnemingsputten N52 en N61 niet gebruikt voor een bepaling van λ_2/λ_1 . Met behulp van de genoemde waarde λ van beide watervoerende pakketten en met de temperatuurgegevens van een aantal geselecteerde waarnemingsputten, zijn de warmtegeleidingscoëfficiënten van de potklei en de zandige glaciale geulafzettingen bepaald. Deze waarnemingsputten bevinden zich in zones met min of meer stagnerend grondwater zoals in het centrale deel van de glaciale geul of op ver van de puttenvelden gelegen plaatsen. Voor het afdekkend pakket en de afzettingen beneden de hydrogeologische basis is λ geschat aan de hand van literatuurgegevens. Samenvattend zijn de volgende warmtegeleidingscoëfficiënten gebruikt:

	λ [W/m · K]
watervoerende pakketten	2,8
afdekkend pakket	2,4
potklei	1,0
zandige glaciale geulafzettingen	2,4
afzettingen beneden de hydrogeologische basis	2,0

Met behulp van deze waarden is het temperatuurveld met warmtestroming door geleiding berekend in een vlak loodrecht op de glaciale geul (afb. 5). De berekening is uitgevoerd met een eindig elementen model; de as van de glaciale geul is beschouwd als een symmetrie-as. De temperatuur van het aardoppervlak is gesteld op 9 K (9 °C), de

temperatuur op 1.000 m diepte op 35 K. Het berekende veld vertoont grote overeenkomst met het oorspronkelijke temperatuurveld zoals blijkt uit metingen in zones met stagnerend grondwater (zie profiel BB¹, afb. 6). Bij de puttenterreinen en langs de rand van de glaciale geul blijken tussen beide velden wel grote verschillen op te treden.

3.4. Resultaten

Verzilting van het Oude Puttenterrein

In het centrale deel van dit terrein is met name het opgepompte water van de oostelijke putten brak en heeft een hogere temperatuur dan dat van de overige (zoete) putten (afb. 3 en 7). Het warmere water is calciumchloride-water, het overige is calciumbicarbonaat-water. Uit de verzamelde gegevens blijkt dat de verzilting van de pompputten wordt veroorzaakt door aanstroming van brak water in het

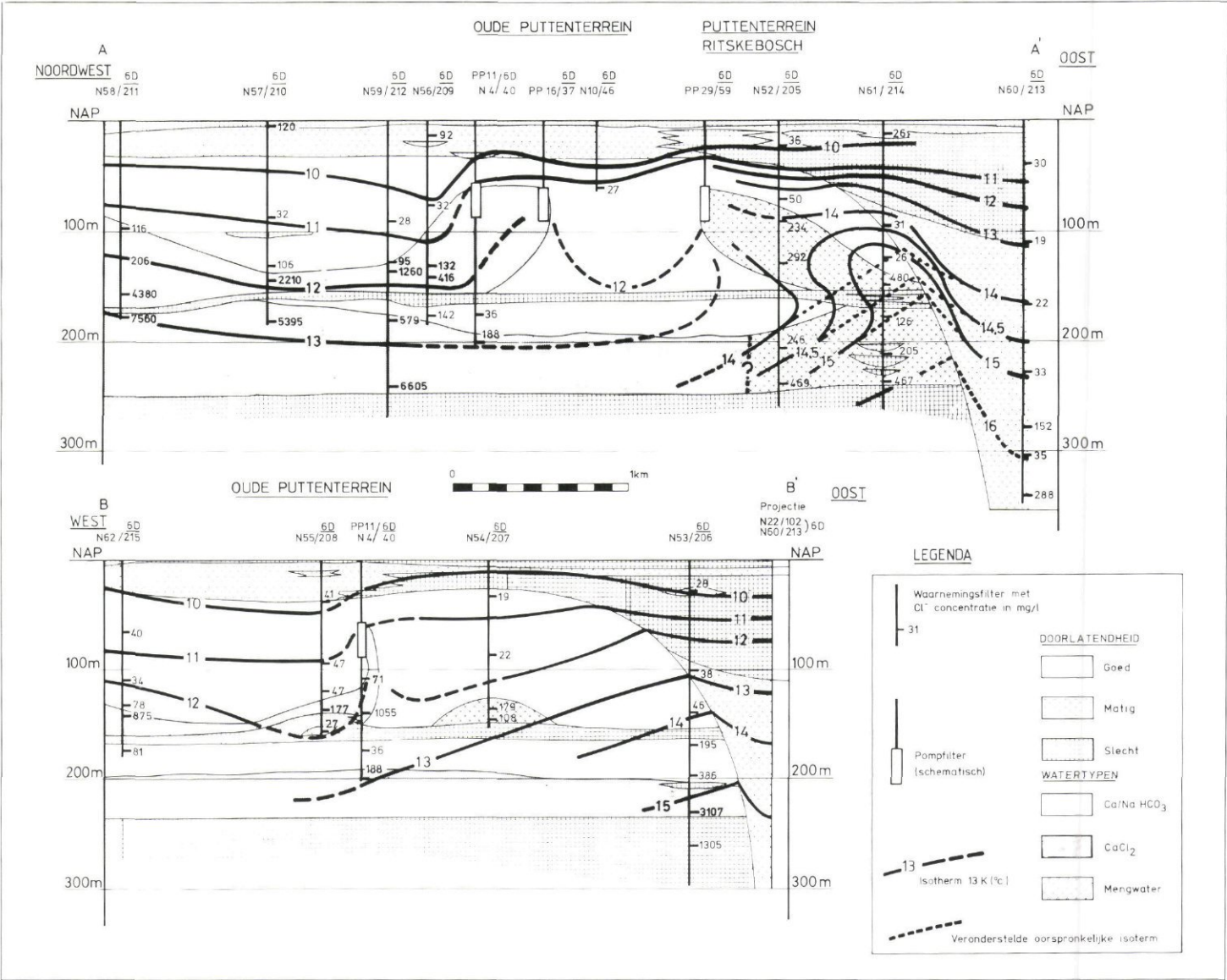
eerste watervoerende pakket vanuit voornamelijk noordwestelijke richting (afb. 6). De temperatuur van het brakke water bevestigt de aanstroomdiepte. Dat juist de oostelijke putten zijn verzilt, wordt verklaard in par. 4.2. Vanuit het tweede watervoerende pakket wordt geen water opgetrokken. In een uitgestrekt gebied komt namelijk vlak onder de Tegelen-kleilaag een dunne laag zoet calciumbicarbonaat-water voor, die het brakke calciumchloride-water scheidt dat zowel in het eerste als in het tweede watervoerende pakket voorkomt. De afwezigheid van 'gaten' in deze kleilaag wordt eveneens bevestigd door de aard van het temperatuurveld van de ondergrond en door de temperatuur van het gewonnen grondwater (afb. 6 en 7).

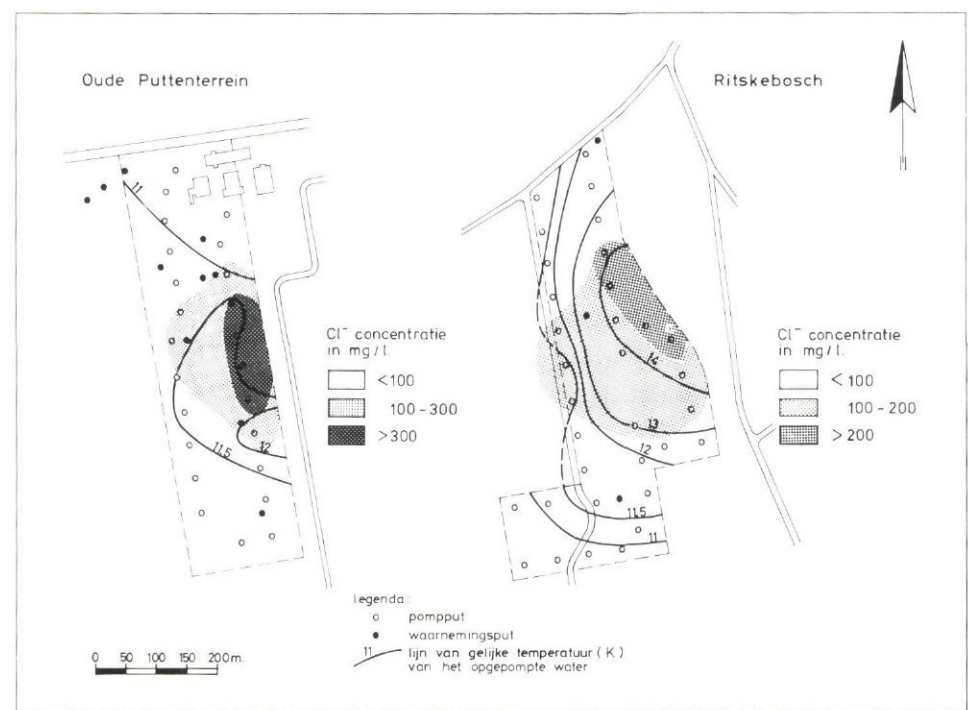
Uit profiel BB¹ van afb. 6 blijkt voorts dat ook geen opwaartse stroming langs de rand

van de glaciale zandige geulafzetting plaatsvindt. Dit volgt zowel uit het vrijwel onveranderde oorspronkelijke temperatuurveld in deze zone, als uit de hydrochemie (waarnemingsput N53). Dit betekent dat de verzilting van het Oude Puttenterrein niet is veroorzaakt door aanstroming van brak water uit de zone van de glaciale geul, via de genoemde kortsluitwerking.

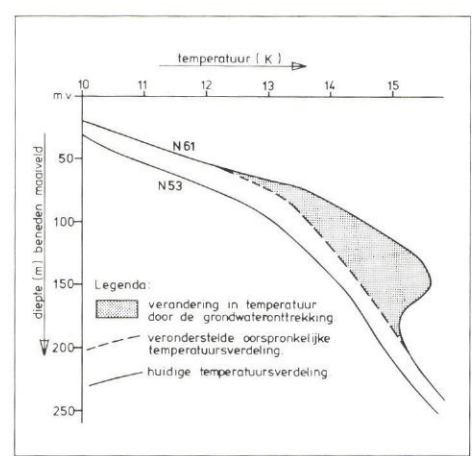
Verzilting van het puttenterrein Ritskebosch
Op het Ritskebosch is de temperatuur van het gewonnen water uit de afzonderlijke pompputten in de oostelijke puttenrij duidelijk hoger (gemiddeld 12,6 K) dan in de westelijke puttenrij (gemiddeld 11,2 K); (zie afb. 7). De hogere temperaturen komen overeen met hogere Cl⁻-concentraties. De invloed van de grondwateronttrekking op de temperatuurverdeling in de ondergrond blijkt duidelijk uit vergelijking van het

Afb. 6 - Hydrochemische-geothermische profielen; voor lokatie zie afb. 2.





Afb. 7 - Chlorideconcentratie en temperatuur van het opgepompte water op het Oude Puttenrein en op Ritskebosch.



Afb. 8 - Temperatuur-dieptekrommen van de waarnemingsputten N53 en N61 en de invloed van de grondwaterwinning bij N61.

temperatuur-diepteverloop in de bij het puttenveld gelegen waarnemingsput N61 met die in de noordelijker en nabij de glaciële geul gelegen N53 (afb. 8). N61 is ca. 1,5 K warmer. Het veronderstelde oorspronkelijke temperatuurveld is met stippellijnen aangegeven op het profiel AA¹ van afb. 6. Het verschil tussen de oorspronkelijke temperatuur en de gemeten temperatuur is voor de putten N52 en N61, liggend tussen puttenrein en de glaciële geul, aangegeven in afb. 9. Het bedraagt bij N52 maximaal 2,4 K en bij N61 1,3 K. De diepte van herkomst van het anomaal warme water in N61 is minimaal 200 m, minimaal omdat het stromende water warmte afgeeft aan de ondergrond en dus afkoelt. Uit profiel AA¹ van afb. 6 kan worden

afgeleid dat de verzilting van het Ritskebosch wordt veroorzaakt door het aantrekken van mengwater uit het tweede watervoerende pakket. Het brakke water stroomt ten oosten van N52 het eerste watervoerende pakket binnen. Waarschijnlijk vindt opwaartse stroming van brak grondwater plaats direct ten oosten van de wand van de glaciële geul. Er zijn, evenals bij het Oude Puttenrein, geen indicaties dat er in de Tegelen-kleilaag 'gaten' aanwezig zijn. Dat ook de zoete putten in oostelijke puttenrij relatief hoge watertemperaturen hebben, wordt veroorzaakt doordat het hier gewonnen water voornamelijk afkomstig is uit het gebied met de dikke potklei-afzettingen (zie ook afb. 5).

4. Prognoses verzilting puttenreinen m.m.v. ir. J. S. Rus

4.1. Inleiding

Voor verschillende alternatieven voor de produktieverdeling over beide puttenreinen zijn prognoseberekeringen gemaakt ten aanzien van het te verwachten chloridegehalte van het opgepompte water. De totale onttrekking is hierbij gesteld op 23 miljoen m³/a (de gemiddelde jaarproduktie sinds 1970). De berekeningen zijn gemaakt met behulp van een grondwaterstromingsmodel gecombineerd met de huidige verdeling van zoet en brak grondwater. Hierbij is verondersteld dat het water geen dichtheidsverschillen bezit. Voor het bepalen van de invoergegevens van het grondwaterstromingsmodel zijn naast de hydrochemische en geothermische onderzoeken, pompproeven, stijghoogte-registra-

ties, waterbalansstudies en korrelgrootte-analyses verricht.

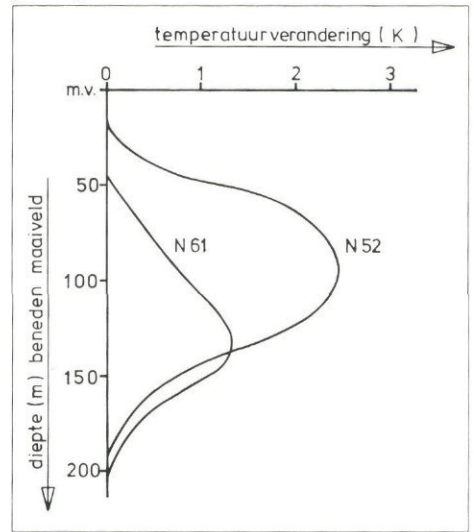
4.2. Geohydrologische bodemconstanten en lokale grondwaterstroming

Oude Puttenrein

Met pompproeven, gehouden op het Oude Puttenrein, is de doorlatendheid (kD-waarde) van het eerste watervoerende pakket bepaald op ca. 6×10^{-2} m²/s (5.000 m²/d). Uit korrelgrootte-analyses blijkt dat in dit pakket relatief beter doorlatende zones voorkomen op diepten van 65 tot 75 m en van 125 tot 145 m; deze laatste zone ligt juist boven de Tegelen-klei. In het topografisch hoger gelegen gebied nabij de puttenvelden is het niet duidelijk of het eerste watervoerende pakket semi-afgesloten water of freatisch water bevat. Buiten het hoge deel en ter plaatse van de potkleilagen bevat het waarschijnlijk semi-afgesloten water. In afb. 10 is de zoet/zout verdeling weergegeven. Op grond van korrelgrootteverdelingen wordt de doorlatendheid van het tweede watervoerende pakket geschat op 4×10^{-2} m²/s (3.500 m²/d); in afb. 11 is de zoet/zout verdeling in dit pakket weergegeven. De Tegelen-kleilaag tussen beide watervoerende pakketten heeft bij het Oude Puttenrein een duidelijke weerstand. Deze conclusie is getrokken op grond van de volgende overwegingen:

- de aanwezigheid van zoet CaHCO₃-water in het bovenste deel van het tweede watervoerende pakket terwijl in het onderste gedeelte van het eerste watervoerende pakket plaatselijk brak of zout grondwater voorkomt;
- een stijghoogteverschil over de kleilaag van ca. 2 m;
- een nauwelijks meetbare verlaging in het

Afb. 9 - Verschil tussen de oorspronkelijke temperatuur en de gemeten, huidige, temperatuur in twee waarnemingsputten liggend tussen het puttenrein Ritskebosch en de glaciële geul.



tweede watervoerende pakket tijdens de in het eerste watervoerende pakket gehouden pompproeven;

d. het tijdens de pompproeven duidelijk aanwezig zijn van het zogeheten Noordbergum-effect, zijnde een kortdurende tegengestelde stijghoogtereactie in het tweede watervoerende pakket in vergelijking met het eerste pakket. Het effect is het eerst waargenomen in Noordbergum en berust op de eigenschap van elastische berging van een watervoerende laag [Verruijt, 1969];

e. de relatief lage temperaturen van het opgepompte water op het Oude Putten-terrein zijn in overeenstemming met de gemeten temperaturen in N4, N54, N55 en N56 en wijzen niet op een belangrijke bijdrage van water uit het tweede watervoerende pakket.

De oostelijke puttenrij van het Oude Putten-terrein is relatief sterker verzilt (zie ook par. 3.4.). Dit kan als volgt verklaard worden. Vanwege de onvolkomenheid van de putten, de aanwezigheid van de door de grondwaterwinningen ontstane waterscheiding tussen het Oude Putten-terrein en het Ritskebosch en in mindere mate vanwege de aanwezigheid van de glaciële geul als barrière voor de grondwaterstroming uit het oosten, stroomt het brakke water over de Tegelen-klei onder de noordwestelijke putten naar de centrale putten in de oostelijke rij.

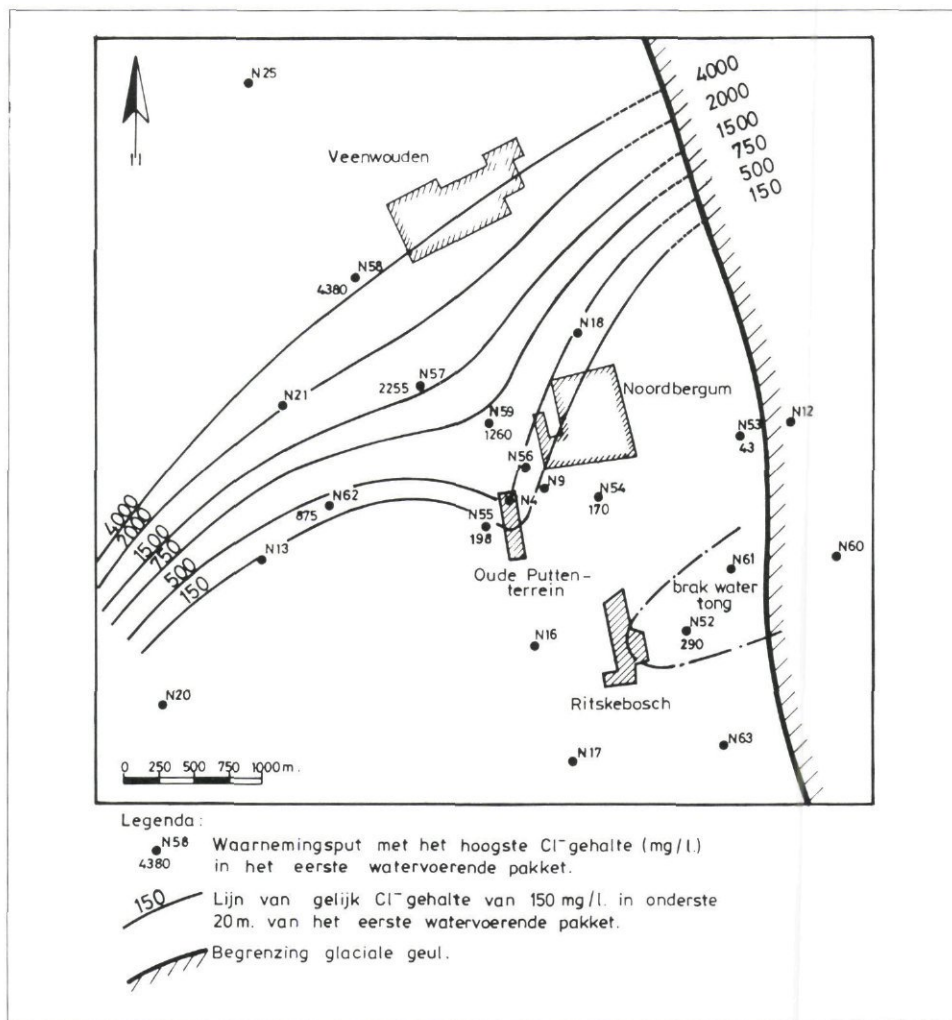
Putten-terrein Ritskebosch

Ter plaatse van de glaciële geulopvulling zijn het eerste en tweede watervoerende pakket kortgesloten. Dit blijkt vooral uit de hydrochemie en geothermie, die reeds ter sprake kwamen. Het blijkt ook uit continue stijghoogtereregistraties in beide pakketten in peilbuizen van waarnemingsput N52; ten gevolge van het starten en afslaan van pompen op het puttenveld treedt een zeer duidelijke verandering van de stijghoogte in het tweede watervoerende pakket op. De kortsluiting beïnvloedt ook het isohypsenpatroon van het tweede watervoerende pakket, dat een grondwaterstroming in zuid-oostelijke richting onder beide wingebieden door naar de rand van het glaciële bekken aangeeft.

Bij N52 is eveneens het Noordbergum-effect waargenomen; hieruit kan de conclusie worden getrokken dat de Tegelen-kleilaag tussen beide watervoerende pakketten ook hier een behoorlijke weerstand heeft.

4.3. Verbliftijdberekeningen

Voor de verbliftijdberekeningen zijn de twee putten-terreinen geschematiseerd tot ieder 8 onttrekkingspunten. Deze onttrekkingspunten zijn gespiegeld ten opzichte van een ondoorlatende wand om de potkleibarrière in rekening te brengen. Opgemerkt wordt dat



Afb. 10 - Chlorideconcentratie in de onderste 20 m van het eerste watervoerende pakket.

bij de berekeningen voor het puttenveld Ritskebosch twee verziltingsprocessen een rol spelen, namelijk de verzilting uit het tweede watervoerende pakket nabij de glaciële geul (huidige verzilting) en de laterale aantrekking van het zoutfront uit het noordwesten (mogelijk toekomstige verzilting).

Allereerst wordt met name ingegaan op het laatstgenoemde proces dat voor beide puttenvelden een belangrijke rol speelt. De berekeningen zijn uitgevoerd voor de ongeveer 20 m dikke grofzandige laag direct boven de Tegelen-klei waar de verzilting zich concentreert. De bodemconstanten van deze laag zijn: de effectieve porositeit $\mu = 0,35$ en de doorlatendheid $k = 8 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ (70 m/d). Bij de grondwateronttrekking uit het eerste watervoerende pakket treedt voeding op vanuit het freatisch grondwater en in geringe mate vanuit het tweede watervoerende pakket. Dit betreft kleine hoeveelheden die bij de berekeningen zijn verwaarloosd. Uit een waterbalansonderzoek is gebleken, dat 10 à 20% van de totale onttrekking op beide puttenvelden (23 miljoen m^3/a) afkomstig is van oppervlaktewater uit een

gebied ter grootte van 26 km^2 . Er is echter gerekend met een éénlagig grondwaterstromingsmodel zonder verticale voeding. Hierdoor worden de prognoses in veilige zin beïnvloed. Aangezien nabij de putten de stroming niet meer horizontaal is, is een extra verblijftijd van 1 à 2 jaar in rekening gebracht. In verband met de aanwezigheid van meerdere onttrekkingspunten is een numerieke benadering gebruikt; het computerprogramma FLOP-1, ontwikkeld door het RID, is hierbij behulpzaam geweest [Van den Akker, 1975]. De looptijden in het eerste watervoerende pakket zijn weergegeven in afb. 12.

Prognose verzilting Oude Putten-terrein

Op basis van de zoet/zout verdeling in het eerste watervoerende pakket (afb. 10) en met de met FLOP-1 berekende stroomlijnen en lijnen van gelijke verblijftijd (afb. 12), is de verziltingsprognose als volgt berekend:

1. Bepaling van de gemiddelde chloridegehalten van de onderste 20 m van het eerste watervoerende pakket langs de lijnen van gelijke verblijftijd. Dit behoefde alleen te

worden gedaan voor het verzilte gebied dat wordt begrensd door het zoutfront.

2. Schatting van het gemiddelde chloridegehalte van het overige (zoete) grondwater.

3. Bepaling van het gedeelte van de onttrekking dat wordt geleverd door de verzilte zone van het watervoerende pakket met een doorlatendheid $k_i D_i$. Indien het totale aantal stroomlijnen en dus ook stroombanen dat met het computerprogramma is bepaald, p bedraagt (waarbij p voldoende groot en gelijkmatig verdeeld over het stroomveld naar het centrum van het puttenterrein moet zijn), en indien in een gedeelte van de verziltingszone met eenzelfde chloridegehalte q stroomlijnen de lijn van gelijke verblijftijd t snijden, dan bedraagt na de tijd t het aandeel van dit gedeelte ongeveer:

$$\frac{k_i D_i}{kD_{\text{hele pakket}}} \times \frac{q}{p} \times V$$

waarbij V de totale onttrekking op het Oude Puttenterrein is.

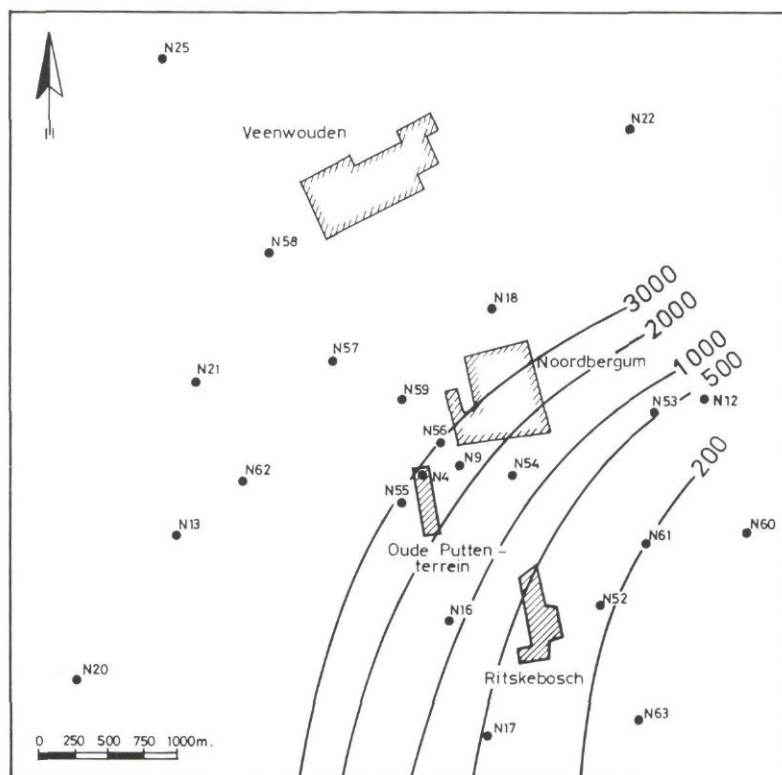
Dit is gebeurd voor een aantal aandelen in de winning met bijbehorende chloridegehalten en verblijftijden en hiermee is een gemiddelde

verandering van het chloridegehalte in de tijd voorspeld. Deze voorspelling is weergegeven in afb. 13.

Prognose verzilting puttenterrein Ritskebosch

De prognoseberekningen voor dit puttenterrein wijken af van die voor het Oude Puttenterrein omdat hier een extra aandeel in de winning gevormd wordt door toestroming van brak grondwater vanuit de reeds beschreven kortsluiting nabij de glaciale geul. Uit het isohypsenpatroon en de kD -waarde van het tweede watervoerende pakket is deze bijdrage voor 1978 op 2 miljoen m³ geschat. Het chloridegehalte van dit brakke water zal in de tijd toenemen. Op overeenkomstige wijze als reeds is beschreven voor het eerste watervoerende pakket, zijn verblijftijden berekend in het tweede pakket waarbij het onttrekkingspunt geschematiseerd is tot een puntbron op 800 m oostelijk van het puttenterrein, ter plaatse van de kortsluiting. Deze verblijftijden zijn vermeerderd met een extra reistijd in het eerste watervoerende pakket tussen het 'lek' en het puttenterrein. Op deze wijze is een prognose opgesteld van het toekomstige chloridegehalte van dit aandeel.

Afb. 11 - Schematische weergave van de chlorideconcentraties in het tweede watervoerende pakket.



Legenda:

- Waarnemingsput
- Lijn van gelijke Cl⁻ concentratie in het tweede watervoerende pakket in mg/l. (schematisch)
- /// Begrenzing glaciale geul

Uit de berekeningen is gebleken dat bij een gelijk aandeel in de winning van beide puttenvelden de verzilting via het eerste watervoerende pakket vanuit noordwestelijke richting het Ritskebosch pas na zeer lange tijd zal bereiken. Dit betekent dat voor de onderhavige prognoseberekningen het vanuit het noordwesten toestromende water als zoet beschouwd kan worden. Afb. 13 geeft de prognose van het chloridegehalte voor het Ritskebosch die is samengesteld als combinatie van de twee berekende aandelen in de winning.

4.4. Methoden tot bijsturing van het verziltingsproces

Teneinde het verziltingsproces van vooral het Oude Puttenterrein bij te sturen, komen een aantal ingrepen in aanmerking; zie ook afb. 13. Uiteraard betekent een verkleining van de totale onttrekking bij een gelijkblijvende onttrekkingsverhouding tussen de beide puttenterreinen globaal een evenredige verlenging van de tijdschaal in de eerste figuur van afb. 13.

Alternatief 1. Vergroting van de winning op Ritskebosch tot 75% van de totale winning. Opmerkelijk is dat dan het chloridegehalte op het Oude Puttenterrein sneller zal stijgen dan in de ongewijzigde situatie. Reden hiervoor is de verkleining van het beïnvloedingsgebied waarvoor de toestroming van zoet grondwater relatief minder wordt.

Alternatief 2. Realisering van de gehele winning op Ritskebosch: de verzilting vanuit het noordwesten wordt dan ca. 20 jaar uitgesteld.

Alternatief 3. Eén grote zoutwaterwinning (6 miljoen m³/a) op ca. 1 km ten noordwesten van het Oude Puttenterrein. Deze oplossing lijkt beter haalbaar dan een zoutwaterwinning van zeer grote omvang in de vorm van een puttenscherm in het zoutfront.

Alternatief 4. Een andere methode is de afvoer van brak grondwater vanaf het Oude Puttenterrein ter grootte van ca. 1,5 miljoen m³/a. Hiermee zou de waterkwaliteit op het resterende deel van het puttenterrein worden gestabiliseerd. Voor een goede onderbouwing van dit alternatief dient nog veel aanvullend onderzoek verricht te worden.

Alternatief 5. Infiltratie op het Oude Puttenterrein van een deel van het op Ritskebosch gewonnen water of van voor-gezuiverd oppervlaktewater. Hiermee wordt het zwaartepunt van de winning verplaatst naar een punt ten zuiden van Ritskebosch. Het brengt echter slechts een kleine verbetering teweeg in vergelijking met alternatief 2.

4.5. Conclusies

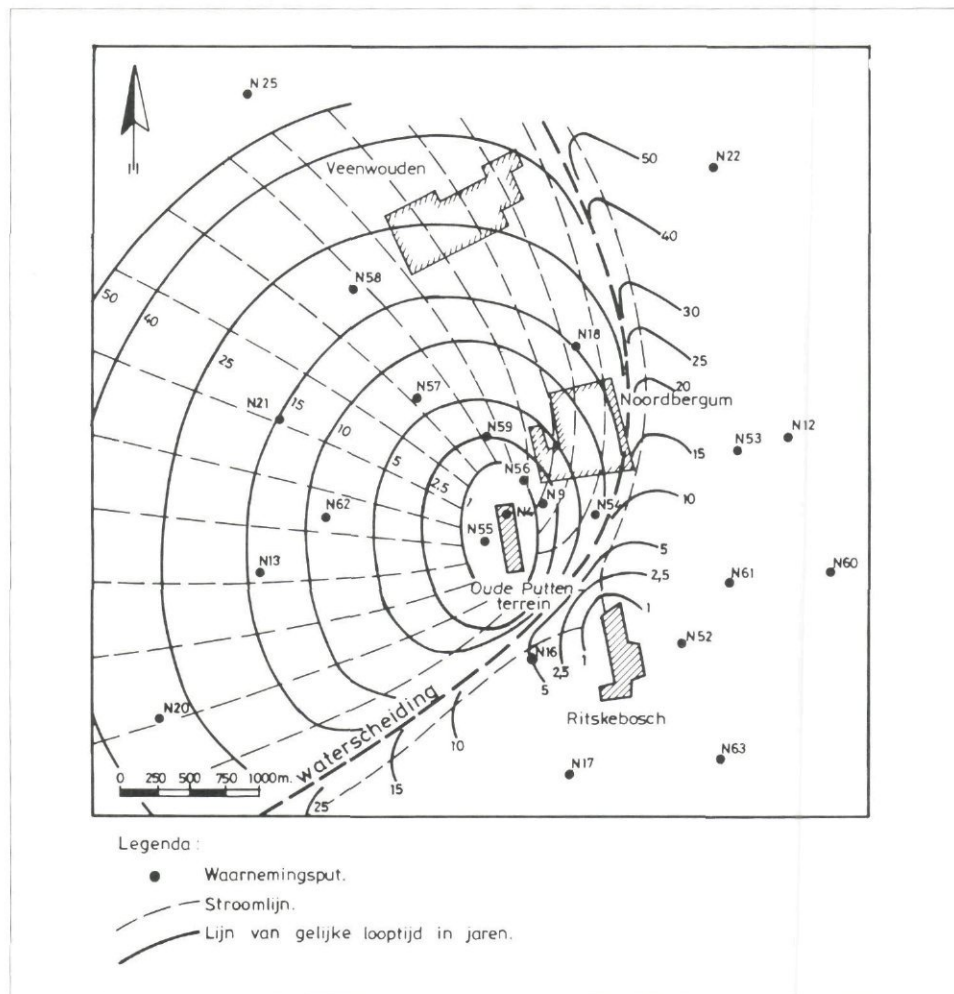
Bij een gelijk aandeel in de totale winning is de verzilting op het Oude Puttenterrein

ernstiger dan op Ritskebosch. Dit is een gevolg van de ligging van het zoet/zout front ten noordwesten van het Oude Terrein waardoor water met een hoog chloridegehalte (ca. 2.000 mg/l) aangetrokken wordt. De chloridegrens van 150 mg/l wordt, bij ongewijzigde winning, op het Oude Putten-terrein omstreeks 1985 bereikt en op het terrein Ritskebosch omstreeks het jaar 2015. Het brakke water dat vanuit het tweede pakket door Ritskebosch aangetrokken wordt, heeft een veel lager chloridegehalte terwijl de lange reistijd van dit brakke water de situatie gunstig beïnvloedt. Ook fungeert de onttrekking op het Oude Putten-terrein als kunstmatige barrière voor de toestroming van brak water uit het noordwesten naar het Ritskebosch. Dit komt duidelijk naar voren in afb. 13 waarin de prognose voor beide winningen aangegeven is. Een aantal methoden tot bijsturing van het verziltingsproces zijn geëvalueerd. Zoutwateronttrekking op het Oude Putten-terrein geeft de gunstigste vooruitzichten; deze maatregel vereist echter aanvullend onderzoek waarvoor de benodigde detailgegevens vooralsnog ontbreken.

5. Slotwoord

5.1. Beleidsbepaling

Uit de resultaten van het verziltingsonderzoek blijkt dat, bij handhaving van de huidige onttrekking, omstreeks 1990 de verzilting zodanig zal zijn toegenomen dat de ruwwaterkwaliteit de EG-norm voor het chloridegehalte van 150 mg/l zal overschrijden. Dit houdt in dat er ruim voor dit tijdstip maatregelen genomen moeten worden om de drinkwatervoorziening veilig te stellen. De besluitvorming hierover werd echter



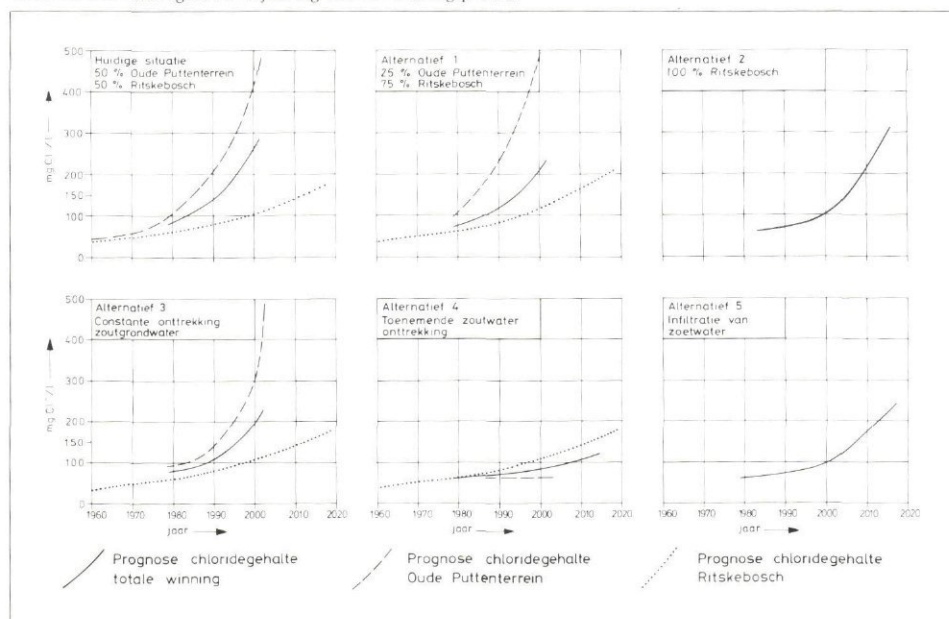
Afb. 12 - Berekende stroomlijnen en looptijden in de onderste 20 m van het eerste watervoerende pakket.

bemoelijkte doordat bij de evaluatie van de onderzoekresultaten bleek, dat de nauwkeurigheid hiervan beperkt wordt door

met name de geringe hoeveelheid hydrochemische gegevens. Er kon alleen een redelijk betrouwbaar beeld samengesteld worden van de situatie tijdens het onderzoek, maar de ontwikkeling van de verzilting in het verleden kon slechts zeer globaal geanalyseerd worden. Om de ontwikkelingen in de toekomst nauwkeurig te volgen, is een gericht waterbemonsteringsprogramma opgezet. Door de beperkte nauwkeurigheid is een juiste schatting van de betrouwbaarheid van het onderzoek onvoldoende mogelijk. Wel is duidelijk dat indien zou worden besloten dat omstreeks 1990 het Ritskebosch de totale productie van het Oude Putten-terrein moet overnemen, dit, voor zover nu bekend, slechts tot 2005 zal kunnen gebeuren. Deze oplossing is niet aantrekkelijk, mede gezien de investeringen die voor deze relatief korte tijd zouden moeten worden gedaan. Gekozen is uiteindelijk voor een oplossing die een maximale betrouwbaarheid van de drinkwatervoorziening op langere termijn zal garanderen.

Besloten is om vanaf 1990 de productie

Afb. 13 - Prognoseberekeningen van het toekomstige verloop van het chloridegehalte bij een ongewijzigde winning en na verschillende maatregelen tot bijsturing van het verziltingsproces.



Lewatit TP 207 voor zware metalen boven calcium.

Gelukkig zijn hier perspectieven voor verbetering. Er zijn namelijk verscheidene researchgroepen, ook in Nederland, die veel aandacht besteden aan het verbeteren van de selectiviteit van ionenwisselaars voor zware metalen.

Vandaar ook dat de verwijdering van zware metalen uit havenslib met behulp van ionenwisselaars in de toekomst een goed alternatief kan bieden voor de huidige oplossingen van het havenslibprobleem.

Dankbetuiging

Dit onderzoek is gedaan in het kader van het afstudeerwerk van de auteurs. Zij willen hierbij prof. dr. ir. N. W. F. Kossen, prof. dr. J. G. Kuenen, prof. ir. J. A. Wesselingh, dr. ir. G. M. van Rosmalen en dr. ir. J. W. de Leeuw bedanken voor hun begeleiding daarbij; drs. J. P. J. Nijssen voor de medewerking vanuit de gemeente Rotterdam; A. Klok en J. P. Koot voor de hulp bij de vele analyses en tenslotte Bayer Nederland en Dia Prosim voor de beschikbaar gestelde ionenwisselaars en Rijkswaterstaat voor de slibmonsters. In het bijzonder gaat hun dank uit naar dr. ir. G. M. van Rosmalen voor het kritisch lezen van het manuscript.

Literatuur

1. Salomons, W. and Förstner, U. (1980). *Environm. Techn. Letters* 1, 506.
2. Gambrell, R. P., Khalid, R. A. and Patrick, W. H. (1980). *Environm. Science & Technol.* 14, 431-436.
3. Kitano, Y., Sakata, M. and Matsundo, E. (1981). *Geochim. Cosmochim. Acta* 44, 1279-1285.
4. Boust, D. and Saast, A. (1981). *Int. Conf. on Heavy Metals in the Environment*, Amsterdam, chairman W. A. O. Ernst, 709-712.
5. Badri, M. A. en Aston, S. R. Ibid., 705-708.
6. Gemeentewerken, Rotterdam. Rapport 110.10-R8104 (1981). *Analyseresultaten monstercampagne 1980*.
7. Ellen, G. (1982). *Chemisch Magazine*, Juni, 347.
8. Klok, A., Kornblum, G. R. en Galan, L. de. *H₂O*, 14 (1981) 636-641.
9. Gommers, P. J. F., Hoek, G. L. M. van en Overwater, J. A. S. (1982). *Verwijdering van zware metalen uit Rotterdams havenslib – ionenwisselaars, een mogelijke oplossing –*. Afstudeerverslag Afd. Scheikundige Technologie, Technische Hogeschool Delft.

● ● ●

Verwijdering van NTA

● Slot van pagina 256

4. Pöpel, H. J. (1980). *Onderwijs en onderzoek bij de Vakgroep Gezondheidstechniek van de TH Delft*. *H₂O* 13, 161-165.
5. Haring, B. J. A. and Delft, W. v. (1977). *Determination of nitrilotriacetic acid in water by derivative pulse polarography at a hanging mercury drop electrode*. *Analytica Chimica Acta* 94, 2021-203.
6. NEN 3235. *Methoden voor de analyse van afvalwater*. Nederlands Normalisatie Instituut, okt. 1978.
7. Bouveng, H. O. e.a. (1968). *NTA in sewage treatment*. *Vatten* 24, 348-359.
8. Eden, G. A. e.a. (1972). *Effect of temperature on the removal of NTA (nitrilotriacetic acid) during the sewage treatment*. *Water Research* 6, 877-883.
9. Gudernatsch, H. (1974). *Biologischer Abbau von nitrilotriessigsäure*. *GWf Wasser/Abwasser* 115, 418-421.
10. Gudernatsch, H. (1970). *Verhalten von Nitrilotriessigsäure im Klarprozess und im Abwasser*. *GWf Wasser/Abwasser* 111, 511-516.

● ● ●

Verzilting Waterwingebieden

● Slot van pagina 252

geheel op Ritskebosch te concentreren met een omvang van 13 miljoen m³/a. Uit afb. 13 blijkt dat deze winning tot enkele tientallen jaren na 2005 gehandhaafd zal kunnen blijven (halvering van alternatief 2). De NV Waterleiding Friesland heeft nadrukkelijk de voorkeur om de produktieverminderingen en de groei in het waterverbruik op te vangen door het inrichten van nieuwe grondwaterwinningen. Daarom is het onderzoek naar nieuwe waterwingebieden met kracht ter hand genomen. Dit heeft hoopvolle resultaten opgeleverd, zodat naar verwachting de watervoorziening in Friesland ook in de toekomst kan worden verzorgd met grondwater.

Literatuur

- Akker, C. v. d. (1975). *Toelichting bij het rekenprogramma FLOP-1*. RID meded. 75-3.
- DGV-TNO (1979). *Optimalisatie landelijk waarnemingsnet voor grondwatergegevens; deel 2: provincie Friesland*. auteur G. Jousma.
- DGV-TNO (1981). *The shallow subsurface temperature field in the Netherlands*. Delft; auteur W. van Dalen.
- Geirnaert, W. (1971). *Het optreden van kathionen uitwisseling in grondwater*. *H₂O* (4), 118-127.
- Grube, F. (1979). *Übertiefe Täler in Hamburger Raum*. *Eiszeitalter und Gegenwart* 29, 157-172.
- IWACO BV (1979). *Geohydrologisch onderzoek inzake de verzilting van het pompstation jhr. E. C. Storm van 's Gravesande en mogelijke maatregelen ter bijsturing van het verziltingsproces*. Rotterdam.
- Kuster, H. en Meyer, K. D. (1979). *Glaziäre Rinnen im mittleren und nordöstlichen Niedersachsen*. *Eiszeitalter und Gegenwart* 29, 135-156.
- Piper, A. M. (1944). *A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses*. *Am. Geophys. Union Trans.* 25, p. 914-923.
- RGD (1975). *Toelichting bij geologische overzichtskaarten van Nederland*. Haarlem; onder redactie van W. H. Zagwijn en C. J. van Staalduinen.
- Verruijt, A. (1969). *Elastic storage of aquifers*. In: *Flow through porous media*. R. J. M. de Wiest (ed), Academic Press, New York, p. 331-376.

● ● ●

Agenda

6 - 10 juni 1983, Rotterdam: Symposium Integration of Ecological Aspects in Coastal Engineering Projects. Inl.: Symposium secretariaat, p.a. Waterloopkundig Laboratorium Delft, Postbus 177, 2600 MH Delft.

20 juni - 8 juli 1983, Amsterdam:

1st International Summer Programme on Health Services Evaluation 'The Evaluation of Drinking Water and Sanitation Projects'. Inl.: Dr. J. M. V. Oomen, Koninklijk Instituut voor de Tropen, Mauritskade 63, 1092 AD Amsterdam.

4 - 7 juli 1983, York, UK: Third River

Management Conference. Inl.: D. H. Newsome, 7th Floor, reading Bridge House, Reading, Berkshire RG1 5PS, UK.

12 - 14 juli 1983, London, UK: World Water '83, The World Problem, The first of a series of three congresses (1983, 1986, 1989) in support of the United Nations International Drinking Water Supply and Sanitation Decade 1981 - 1990. Inl.: Richard West, World Water Congress '83, County House, 10 Little Portland Street, London, W1N 5DF, UK.

14 - 20 augustus 1983, Boston, USA: Third International Symposium on Anaerobic Digestion. Inl.: Third Int. Symp. Anaerobic Digestion, 99 Erie Street, Cambridge, MA 02139 USA.

24 - 26 augustus 1983, Kopenhagen, Denemarken: Specialised Seminar 'Rain Fall as the Basis for Urban Run-off Design and Analysis'. Inl.: Prof. Poul Harremoes, Department of Sanitary Engineering, Building 115C, Technical University of Denmark, DK-2800 Lyngby, Denmark.

6 - 8 september 1983, Londen, UK:

International Symposium on the Sources, Transport Pathways, Properties and Effects of Highway Pollution. Inl.: Dr. R. Hamilton, Urban Pollution Research Centre, Middlesex Polytechnic Queensway, Enfield, Middlesex, EN3 4SF, UK.

6 - 9 september 1983, Heidelberg, BRD:

Heavy Metals in the Environment. Inl. CEP Consultants Ltd, 26 Albany Street, Edinburgh EH1 3QH, Scotland, UK.

12 - 16 september 1983, Brussel, België:

IWSA Specialised Conferences: Water Supply within National and International Legislation; Security in Water Supply; Distribution Problems in Water Supply. Inl.: IWSA, 1 Queen Anne's Gate London, SW1H 9BT, UK.

12 - 16 september 1983, Brussel, België:

Aqua-Expo, Internationale vakbeurs voor Watertechnieken, IWSA-NAVEWA. Internationale Jaarbeurs van Brussel, Tentoonstellingspark B-1020 Brussel, België.

19 - 23 september 1983, Wenen, Oostenrijk: Design and Operation of Large Waste Water Treatment Plants (workshop). Inl.: Prof. W. von der Emde, Institut für Wassergute und Landschaftswasserbau, Technische Universität Wien, Karlsplatz 13, A-1040, Wien, Oostenrijk.

26 - 28 september 1983, Paris, France:

Specialised Conference on Energy Savings in Water Pollution Control. Inl.: AGHTM (M. Bres), 9 Rue de Phalsbourg, 75854 Paris Cedex 17, France.

● ● ●