

Het zoutwatervoorkomen in de ondergrond van de lage gedeelten van Nederland

Een belangrijk aspect bij de winning van grondwater voor de openbare drinkwatervoorziening in Nederland is het voorkomen van zout of brak water in de ondergrond. Er zijn een aantal waterwinplaatsen te noemen waar het opgepompte grondwater geleidelijk zouter is geworden, waarna het debiet van de desbetreffende putten moest worden verminderd of het gebruik van bepaalde putten geheel moest worden opgegeven. Deze problematiek speelt in nagenoeg geheel Nederland, maar komt veelvuldig voor in het westelijke lage gedeelte (de provincies Noord- en Zuid-Holland).

Een algemeen geldende theorie om het voorkomen van het zoutgehalte in het grondwater te verklaren, is niet aanwezig. Dit houdt verband met het feit dat Nederland in de loop van de geologische geschiedenis herhaaldelijk door zeeën bedekt geweest is, waardoor het mogelijk is een aantal (deel-)oorzaken, elk op één of andere wijze met een dergelijke transgressie van de zee verbonden, aan te wijzen voor de verbreiding van het huidige zoute grondwater. Het hangt van de onderzoeker (en zijn gebied van onderzoek) af op welke oorzaak de meeste nadruk wordt gelegd. De laatste bijdrage in deze rij wordt geleverd door Geirnaert in zijn proefschrift [4]. Hierin wordt de opvatting verdedigd dat het zoute grondwater in west-Nederland afkomstig is van zee-water dat tijdens recente transgressie in het fluviatiele Pleistocene lagenpakket infiltreerde en daarna door een uit de hogere delen van het land komende zoete grondwaterstroming weer gedeeltelijk werd verdreven.

Omdat echter ook deze theorie niet met een aantal van de in de natuur waargenomen verschijnselen in overeenstemming te brengen is (zoals nader zal worden uiteengezet), zullen in dit artikel de meest gangbare meningen omtrent het zoute grondwater kritisch worden bezien. Daarna zal een hypothese worden beschreven ten aanzien van het mechanisme waardoor het zoute grondwater in de lage gedeelten van Nederland kan zijn ontstaan. Deze hypothese is voor een groot deel gebaseerd op de theorie zoals die door Mazure en vooral Volker (Dienst der Zuiderzeewerken) is ontwikkeld [1 en 2]; deze theorie zal daarom als eerste worden samengevat en kritisch beoordeeld.

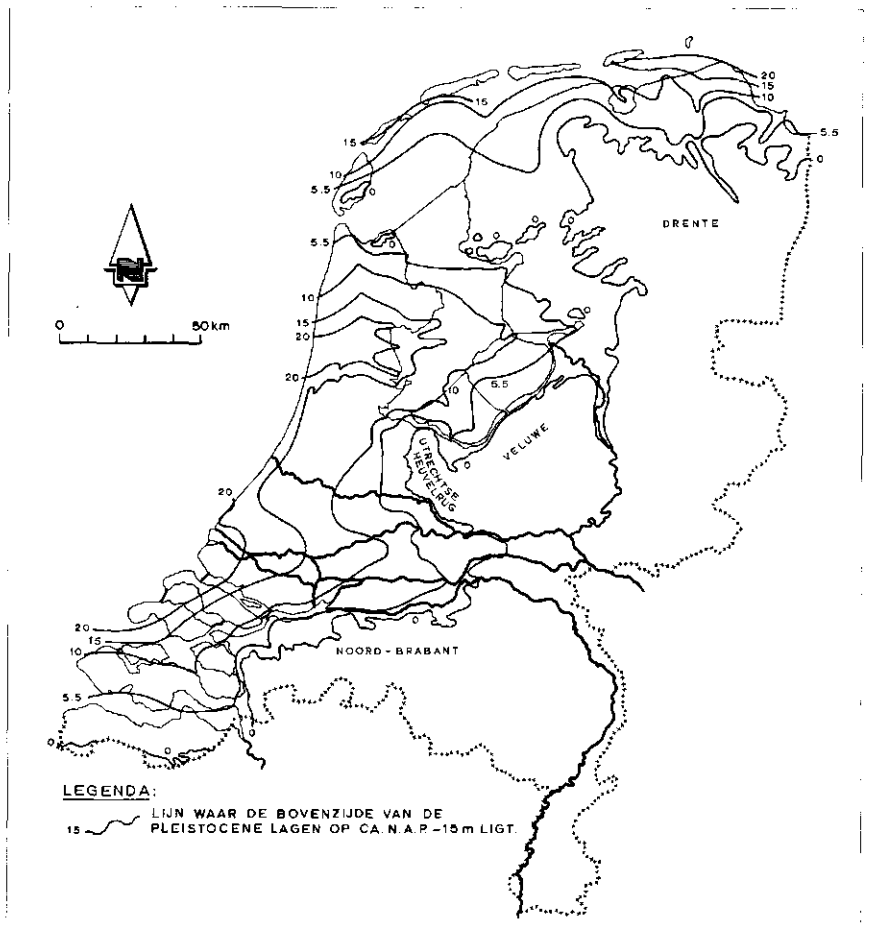
De theorie van Volker

Het is een bekend verschijnsel dat, als men twee vloeistoffen naast elkaar plaatst, waarvan er één zeer veel ionen in oplossing bevat en de ander weinig,

en deze vloeistoffen van elkaar gescheiden zijn door een semi-permeabele wand waar doorheen wel ionentransport maar geen waterstroming plaats kan vinden, door middel van moleculaire diffusie een nivellering optreedt waardoor na lange tijd het gehalte aan ionen in beide vloeistoffen nagenoeg even groot is. Het is Volker en Mazure gelukt om de verzilting van het grondwater in de bovenste lagen van de voormalige Zuiderzeebodem, evenals de daar weer opvolgende verzoeting van het grondwater na de afsluiting (toen het grondwater relatief zout was t.o.v. het IJsselmeerwater) kwalitatief, maar ook kwantitatief te bepalen aan de hand van dit verschijnsel. Voor de berekening waren nodig, de periode van het bestaan van de (zoute) Zuiderzee (vanaf ca. 1300 tot 1932), het gehalte aan Cl^- -ionen van het Zuiderzeewater (gemiddeld ca. 6000 mg per liter) en een diffusieconstante van de bodem. (Deze werd bepaald in het laboratorium en

bleek voor de diverse voorkomende grondsoorten ongeveer even groot te zijn). Met deze gegevens kon worden bepaald welk Cl^- -gehalte op een bepaalde diepte en op een bepaald tijdstip aanwezig zou moeten zijn. Dit gehalte bleek zeer goed overeen te stemmen met de in bepaalde jaren in de ondergrond van het IJsselmeer waargenomen waarden. (Een aantal metingen is, nadat enige jaren waren verlopen, herhaald). Hieruit bleek dus dat de diffusietheorie een voldoende verklaring bood voor de verzilting van de bovenste lagen van de ondergrond tijdens en na de Zuiderzeetransgressie en de daarop volgende verzoeting na de afsluiting. De overeenstemming tussen theorie en waarneming is in deze gekompliceerde situatie zelfs zo goed dat iedere andere verklaring, met name de infiltratie van zout (zee-)water in het zoet water bevattende pakket, geacht mag worden onjuist te zijn. In de diepere lagen van de ondergrond,

Afb. 1 - De ligging van de bovenkant van de Pleistocene lagen in m - NAP, volgens Pons et al.



die tot globaal NAP-200 m uit fluviatiele (dus van oorsprong zoet water bevattende) Pleistocene afzettingen bestaan, bleek echter een Cl^- -gehalte in het grondwater aanwezig te zijn dat niet met behulp van deze theorie door de aanwezigheid van de Zuiderzee verklaard kon worden. Kenmerkend voor het zoutgehalte in de diepere lagen was (en is) dat het vrijwel steeds naar de diepte toeneemt. Van dit zoutgehalte werd door Volker aangenomen dat het via diffusie afkomstig is uit de onder de fluviatiele lagen gelegen mariene afzettingen van grote dikte, die uiteraard oorspronkelijk zout water hebben bevat. Met behulp van de diffusietheorie zou een naar de diepte toenemend zoutgehalte verklaard kunnen worden, waarbij de fluviatiele lagen gedeeltelijk verzilten van onderaf en de mariene lagen van boven af relatief zoeter worden. Tegen deze visie van Volker zijn echter twee bedenkingen aan te voeren:

a. Indien de diffusieconstante voor elke grondsoort ongeveer gelijk is (zoals aannemelijk is gemaakt bij de bestudering van de diffusie van het Zuiderzeezout) en de geologische geschiedenis van het Zuiderzeegebied in grote lijnen dezelfde is, mag de zoutverdeling in de ondergrond van plaats tot plaats maar

zeer weinig verschillen indien alleen diffusie als het verdelingsmechanisme optreedt. Dit is niet het geval; er bestaan van plaats tot plaats niet te verwaarlozen verschillen in het verloop van het zoutgehalte naar de diepte (dit verschijnsel is door Volker zelf reeds opgemerkt).

b. De invloed van de diffusie, indien deze over een lang traject plaats moet vinden (d.w.z. over de dikte van het fluviatiele Pleistocene pakket), wordt pas merkbaar na verloop van zeer lange tijd. Door Volker werd daarom aangenomen dat tenminste gedurende en na de Saale-ijstijd (dat is over een periode van ca. 200.000 jaar) in het laaggelegen gedeelte van Nederland geen grondwaterstroming heeft plaatsgevonden omdat het terrein toen zo vlak was dat er zich geen verval van betekenis kon ontwikkelen. Deze veronderstelling is echter aanvechtbaar, zoals blijkt uit afb. 1. Er mag worden aangenomen dat er aan het einde van het Pleistocene tijdperk (dat is ongeveer 10.000 jaar geleden) een helling van ongeveer 5 m over 25 km in het landniveau aanwezig was. (N.B. Afb. 1 geeft niet de absolute hoogteligging van het landniveau maar wel de helling ervan). Het is niet waarschijnlijk dat de helling van het piezometrisch niveau van het grondwater in het Pleis-

tocene lagenpakket hiervan in die tijd veel is afgeweken. (Het grondwater zal waarschijnlijk tamelijk dicht onder maaiveld hebben gelegen.) Indien de doorlatendheidscoëfficiënt van dit pakket op gemiddeld 30 m per dag wordt geschat, is (volgens de wet van Darcy) een grondwaterstroming aanwezig die naar het westen en het noordwesten is gericht

$$\text{en waarvan het specifiek debiet } \frac{1}{5000} \times$$

$30 \times 365 = \text{ca. } 2 \text{ m per jaar bedraagt.}$ De werkelijke snelheid zal groter zijn geweest, bijvoorbeeld 6 m per jaar. Dit betekent dat het grondwater er aan het einde van het Pleistoceen ca. 10.000 jaar over deed om vanaf de Utrechtse Heuvelrug of de Veluwe de huidige kustlijn te bereiken.

Aangenomen mag worden dat de stuwheuvelds van de Utrechtse Heuvelrug en de Veluwe toen reeds volledig verzoet waren. Bij deze 10.000 jaar „verblijftijd” van het naar het westen afstromend grondwater kan de periode van het Holoceen (10.000 jaar) opgeteld worden. In die periode was de snelheid van de grondwaterstroming nagenoeg nihil (het land, c.q. het moerasniveau was toen veel vlakker en dus ook het piezometrisch niveau). Er heeft dus diffusie plaats kunnen vinden gedurende 20.000 jaar in plaats van 200.000 jaar, zoals Volker veronderstelde; 20.000 jaar is echter te kort om de verdeling van het zoutgehalte in de diepere ondergrond van Nederland volgens de diffusietheorie te kunnen verklaren.

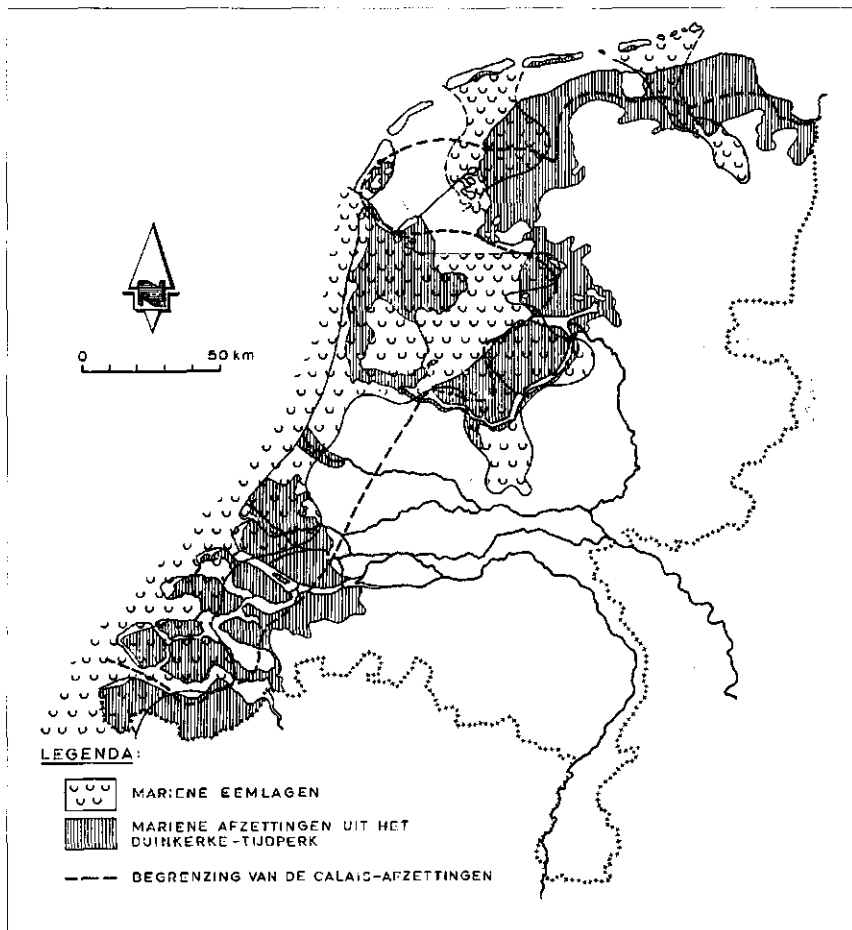
Overige bestaande opvattingen

Nu de mogelijkheid om het ontstaan van het zoute grondwater in de ondergrond van het lage gedeelte van Nederland volledig volgens het mechanisme van de diffusie te verklaren, onwaarschijnlijk is geworden, zijn er een aantal andere theorieën ter verklaring mogelijk. Dit zijn o.a. de volgende twee.

A. Het zoute grondwater zou west-

Nederland vanuit zee zijn binnengedrongen nadat door inpolderingen en bemalingen polderpeilen waren gekreept die enkele meters beneden zee-niveau lagen, waardoor een landwaarts gericht verhang in het piezometrisch niveau van het grondwater ontstond. Een extreem voorbeeld daarvan zou de Haarlemmermeerpolder zijn, waarvan het polderpeil ca. NAP - 6 m bedraagt en die op korte afstand (ca. 10 km) van zee ligt. Zeer globaal kan met behulp van de wet van Darcy worden bepaald dat de werkelijke snelheid van de vanuit zee gerichte grondwaterstroming na de inpoldering ca. 15 m per jaar bedraagt. In de ongeveer 100 jaar dat de polder bestaat, is het zoute grondwater dus ca. 1,5 km opgeschoven. Een aantal droogmakerijen is van oudere datum. (De diepe zijn echter vrijwel nooit meer dan 300 jaar oud.) De opschuiving van het zoute grondwater zou daardoor iets

Afb. 2 - De grens tussen land en zee tijdens recente transgressieperioden, volgens Zonneveld en Jelgersma et al.



groter kunnen zijn; het is echter onmogelijk om hiermee het uitgebreide zoutwater voorkomen in de ondergrond van de west-Nederlandse polders te verklaren.

B. Het zoute grondwater zou veroorzaakt zijn doordat ten tijde van transgressies van de zee (bekend zijn in het Pleistoceen de Eemzee en in het Holoceen de Calais- en de Duinkerken-transgressies (zie afb. 2) zout water in het watervoerend pakket is geïnfilteerd. Infiltratie zou plaats kunnen vinden doordat zout zeewater met een hoger soortelijk gewicht het onderliggende zoete grondwater plaatselijk verdringt en zich daarna in horizontale zin in het watervoerend pakket verbreedt en zodoende zelfs via zoutwigen tot onder het niet door de zee bedekte land kan doordringen. Dat het grondwater niet even zout is als zeewater in eens door de zee bedekte gebieden, wordt dan

verklaard doordat tijdens de infiltratie menging met zoet water is opgetreden en bovendien doordat na terugtrekking van de zee weer een zoete grondwaterstroming op gang komt. Tegen deze theorie zijn een aantal argumenten in te brengen.

a. Infiltratie van zeewater in het zoete watervoerende pakket houdt in dat zoet water wordt verdrongen. Er is echter in een onder een vlakke zeebodem liggend zoet water voerend pakket i.h.a. geen mechanisme aanwezig dat de voor deze verdringing benodigde grondwaterstroming kan opwekken, ondanks het feit dat zout water boven zoet in feite een instabiele toestand veregenwoordigt.

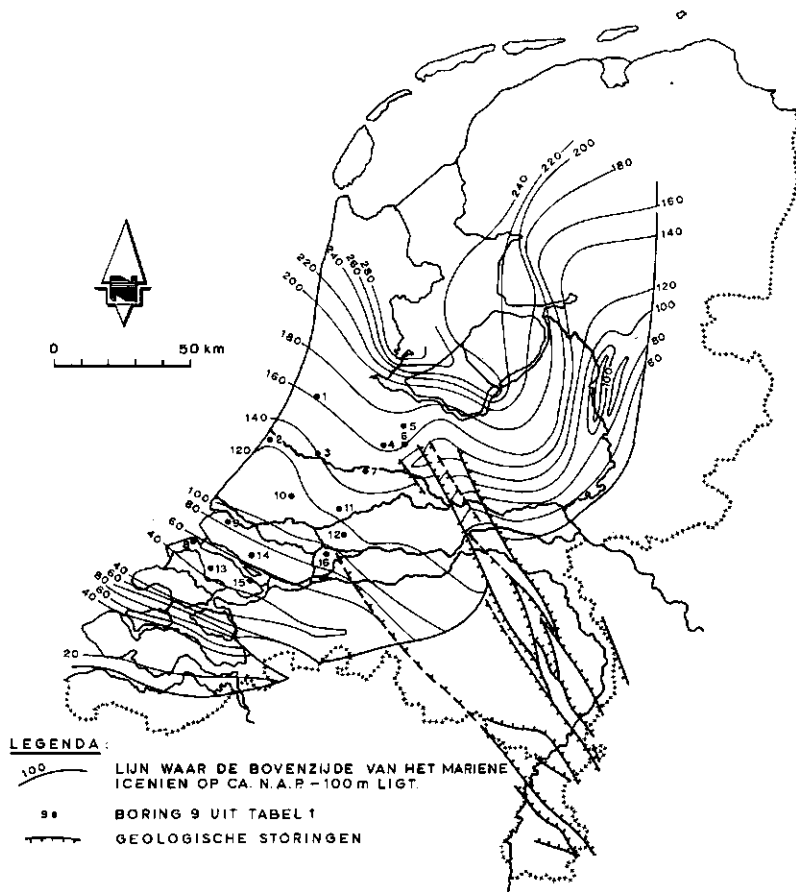
b. Zoals eerder is vermeld, kan de indringing van zout in de bovenlagen van de ondergrond van het IJsselmeer volledig worden verklaard door de dif-

fusie van zout naar de diepte na het ontstaan van de Zuiderzee. Door deze verklaring moet infiltratie van zout zeewater op grote schaal tijdens de Zuiderzeetransgressie uitgesloten worden geacht. Het is niet waarschijnlijk dat de indringing van zout water gedurende eerdere Holocene (en wellicht ook de Eemzee-)transgressies via een geheel ander mechanisme plaats zou hebben gevonden, omdat er geen aanwijzingen kunnen worden gevonden dat er een essentieel verschil in de omstandigheden waaronder de indringing plaatsvond, aanwezig is geweest. De lengte van de periode waarin de zee het land bedekt, is alleen bepalend voor de mate van verzilting maar niet voor de manier waarop de verzilting tot stand komt.

c. Indien infiltratie van zeewater in een oorspronkelijk zoet grondwater bevattend pakket optreedt, zou men verwachten dat het zoutgehalte ter plaatse

TABEL I - Het chloridegehalte in mg/l van monsters water uit diepe boringen in West-Nederland.

| Archiefno. RID | 25C 12 | 30E 38/39 | 31C 164 | 31E 127 | 31F 183 | 31F 173 | 31G 128 | 26H 87 | 37D 134 | 37F 104 | 38B 64 | 38D 262 | 43A 46 | 43B 40 | 43B 41 | 44A 111 |
|-------------------------|-----------|--------------|------------|------------|------------|------------|------------|-----------|------------|------------|-----------|------------|-----------|-----------|-----------|------------|
| Aanduiding op afb. 3 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
| MV | | | | | | | | | | | | | | | | |
| — 10 | 237 | | 178 | | | | | | | | | | 12550 | | 5310 | |
| — 20 | 354 | | 88 | | | | | 257 | 1632 | | | 28 | 634 | 14690 | | 1930 |
| — 30 | 177 | | | | 28 | 13 | | 2940 | | 388 | | | 14280 | 3440 | 9290 | |
| — 40 | 269 | | | | | | | 3270 | 5050 | 576 | 11 | 870 | | 4750 | 8550 | |
| — 50 | 439 | 39 | 117 | | | | | 11470 | | 812 | | | 11190 | 5720 | | 8 |
| — 60 | 4360 | 43 | | 32 | | | | 9320 | | | 10 | 990 | | 5520 | 9660 | |
| — 70 | 8224 | | | | | | | | 8400 | 1505 | | 1150 | 11340 | 5800 | | |
| — 80 | 9000 | 15300 | 1500 | 28 | | | | 12760 | | | 79 | | | 6250 | 9840 | |
| — 90 | 379 | | | 31 | 25 | 16 | | 12310 | | | | | 12770 | | | |
| — 100 | 344 | 16500 | | 48 | | | | | 7140 | | 572 | | | 6700 | 9540 | |
| — 110 | 936 | | | 35 | | | | | | | | | 13220 | 6810 | | |
| — 120 | 7440 | | | 66 | | | | 14620 | 8230 | 2660 | | 1240 | 13310 | 7400 | 9390 | 15 |
| — 130 | 11980 | | | 2003 | 25 | 14 | | | 9300 | 2754 | | | | | | 9570 |
| — 140 | 13820 | | | 2540 | | | 100 | | | | | | 13600 | 8280 | | |
| — 150 | 14530 | | | | | | 200 | | | | | | | | | 9050 |
| — 160 | 15040 | | | | | 14 | | 16340 | 9320 | | | | | 8720 | | 82 |
| — 170 | | | | | | | 500 | | | | | | 13660 | 9220 | 9770 | 157 |
| — 180 | | | | | | | | | 11000 | | | | 11680 | | | 460 |
| — 190 | | | | | | | | | | | | | | 9990 | 10280 | 637 |
| — 200 | | | | | | 15 | | | | | | | | | | |
| — 210 | | | | | 12 | | | | 9810 | | | | | | | |
| — 220 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| — 230 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| — 240 | | | | | | | | | 7040 | | | | | | | |
| — 250 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| — 260 | | | | | | | | | 8490 | | | | | | | |



Afb. 3 - De bovenzijde van het mariene Icenien volgens Zonneveld en de ligging van de in tabel 1 genoemde boringen.

van de infiltratie afneemt naar de diepte zodat aan de basis van het pakket het laagste zoutgehalte wordt aangetroffen. Ten hoogste zou daardoor, ook na een daarop volgende verzoeting door de aanvoer van zoet grondwater, een gelijkmatige zoutverdeling over het gehele pakket kunnen voorkomen. Het moet onwaarschijnlijk worden geacht dat in zo'n geval een toeneming van het zoutgehalte naar de diepte optreedt. Een dergelijk verschijnsel is niettemin algemeen voorkomend in de diepere gedeelten van de fluviatiele Pleistocene lagen in de ondergrond van west-Nederland, zoals tabel I laat zien en zoals door Volker voor het IJsselmeergebied is aangetoond.

d. In het fluviatiele Pleistocene pakket komt in de provincie Zuid-Holland zout water voor in de diepere lagen op tien en meer kilometers afstand van de verst doorgedrongen kustlijn (zie tabel I en de afb. 2 en 3). Het is onwaarschijnlijk dat dit zout daar gebracht is door de werking van een zoutwrig of een incidentele stormvloed.

Bovengenoemde bezwaren maken het minder waarschijnlijk dat het voorkomen van zout grondwater in de lage gedeelten van Nederland volledig, of

zelfs grotendeels verklaard kan worden door infiltratie van zeewater tijdens recente (Holocene en Pleistocene) transgressies.

Een mogelijke verklaring voor de verzilting van de diepere lagen

Voor het opstellen van een meer waarschijnlijke verklaring voor het voorkomen van het zoute grondwater moet een scheiding worden aangebracht tussen de tijd vóór het begin der inpolderingen en bedijkingen (ca. 1200 AD) en de tijd erna. Voor ca. 1200 kan volstaan worden met een algemene beschrijving van de laaggelegen delen van Nederland; erna zijn door menselijk ingrijpen plaatselijk grote verschillen in het freatisch niveau (polderpeilen) gekreëerd en daarmee ook een stromingstoestand die steeds lokaal moet worden bezien.

Aan het einde van de Pleistocene periode was in het fluviatiele Pleistocene pakket waarschijnlijk een zodanig sterke grondwaterstroming aanwezig, dat van verzilting door middel van diffusie alleen nauwelijks sprake kan zijn geweest. Het is echter aannemelijk dat toch een zekere verzilting is opgetreden door een combinatie van diffusie en stroming van grondwater. Dit verschijnsel wordt dispersie genoemd. Het wordt

veroorzaakt doordat de baan van een waterdeeltje in een watervoerend pakket niet rechthoekig is; het water moet zijn weg zoeken door de inhomogene ondergrond. Een deeltje dat afkomstig is uit een zouter gedeelte kan daardoor plaatselijk gedurende enige tijd in de nabijheid komen van een stroomlijntje dat uit een zoeter gedeelte afkomstig is. Tijdens die contacttijd is moleculaire diffusie mogelijk, waardoor zoutionen a.h.w. overstappen van het zoute stroombaantje naar het zoete. Het dispersieverschijnsel is dus nauw verwant met de diffusie, alleen wordt door de grondwaterstroming een versterking van de diffusiesnelheid te wege gebracht. De verzilting van het zoete gedeelte blijft echter beperkt, doordat anderzijds ook steeds zoet water wordt aangevoerd.

Zeer eenvoudig geschematiseerd kan de grondwaterbeweging aan het einde van het Pleistocene tijdperk worden opgevat als een zeewaarts gerichte stroming die gevoed wordt door de neerslag in de hooggelegen infiltratiegebieden en die aan de onderzijde wordt begrensd door een grensvlak waaronder zich zout water in rust bevindt. Door dit grensvlak worden steeds zout-ionen afgegeven aan de zoete stroom, die hierdoor van onderaf verzilt. De toevoer van zout-ionen vanuit de zoute basislaag zou dan moeten geschieden door diffusie. Door A. Verrijt [3] is een theoretische oplossing gegeven voor het probleem van de dispersie langs een scheidingsvlak. Hij onderscheidt twee gevallen; in het eerste bewegen de twee vloeistoffen, waarvan er bijv. één zout is en één zoet, zich met gelijke snelheid en evenwijdig voort, in het tweede is het zoute water in rust. De conclusies uit deze studie die voor het onderhavige probleem relevant zijn, zijn de volgende:

1. de verzilting van de oorspronkelijke zoete vloeistof neemt steeds in verticale zin af vanaf het scheidingsvlak;
2. in horizontale zin neemt de verzilting, bij gelijkblijvende afstand tot het scheidingsvlak, toe naarmate de afstand tot het eerste ontmoetingspunt tussen de zoete en de zoute vloeistof groter is;
3. bij grotere snelheid van de zoete grondwaterstroming zal een geringer deel van deze stroming verzilten; er ontstaat bij grotere snelheid een beperkte overgangszone, met een laag zoutgehalte bovenin.

Het is niet goed mogelijk om met behulp van deze theorie een kwantitatief beeld te geven van het zoutgehalte in de fluviatiele Pleistocene lagen in de ondergrond van Nederland. Daartoe ontbreken te veel gegevens, terwijl bovendien het probleem aanzienlijk gecompliceerder is dan met de hiervoor aangegeven schematisering is aangeduid. Een van de vraagpunten is bijvoorbeeld de diepte en de uitgestrektheid van de zoetwater-

zak, die, tengevolge van de neerwaarts gerichte component van de grondwaterstroming, onder de stuwheuvels is ontstaan. Het grensvlak tussen zoet en zout grondwater ligt hier vermoedelijk enkele honderden meters dieper dan in de omringende gebieden. Het is bovendien niet ondenkbaar dat de verzoeting van de ondergrond van de stuwheuvels en de daarmee gepaard gaande verdrijving van het oorspronkelijk daar aanwezige zoute water nog steeds te merken is in de verzilting van bepaalde gedeelten van het fluviatiele pakket in de ondergrond van de lage gedeelten van Nederland. De verzilting door middel van dispersie kan iets groter zijn geweest in het Holocene tijdperk. In die periode heeft de uitmonding van de rivieren zich verplaatst naar de Nederlandse kust. Het verhang in de rivieren zal flauwer zijn geworden en daarmee gelijkblijvend ook de helling van het landoppervlak. Deze zal wellicht in orde van grootte 10^{-4} à 10^{-5} zijn geweest. De snelheid van de grondwaterstroming wordt daarmee gereduceerd tot $1/2$ à $1/20$ van die in de voorafgaande Pleistocene periode en dus zal, volgens een van de conclusies uit de studie van Verruijt, de verzilting van het fluviatiele pakket groter zijn.

Verzilting van de diepere fluviatiele lagen door dispersie van zout dat afkomstig is uit de mariene afzettingen eronder geeft een verklaring voor de volgende verschijnselen. In de diepere lagen van het fluviatiele Pleistocene pakket wordt steeds een toeneming van het zoutgehalte naar de diepte geconstateerd, waarbij meestal een vloeiende overgang naar het zoutgehalte van de mariene afzettingen optreedt. Deze afzettingen bevatten vaak grondwater met een zoutgehalte dat geringer is dan dat van zee-water, wat kan betekenen dat ze gedeeltelijk maar (nog) niet geheel zijn verzoet. De zoutverdeling is echter niet overal gelijk; er zijn aanwijzingen dat het zoutgehalte op een bepaald niveau toeneemt in de richting van de kust (d.w.z. in de vermoedelijke richting van de grondwaterstroming). Een dergelijke aanwijzing kan worden gevonden in de studie van Volker [2], die aangeeft dat het chloridegehalte in de ondergrond van het IJsselmeer (gemeten te Urk, Lelystad, Marken en Pampus, alle op ongeveer dezelfde afstand van de Veluwe en 't Gooi) op 100 m diepte ongeveer 4000 mg per liter bedraagt, terwijl het chloridegehalte in boringen in de Wieringermeerpolder op dezelfde diepte ongeveer 8000 mg/l bedraagt. Met behulp van de dispersietheorie is het eveneens mogelijk om eventuele diskontinuiteiten in de zoutverdeling te verklaren uit de grootte en de intensiteit van de grondwaterstroming en de veranderingen daarin die in de loop der tijd zijn opgetreden.

Andere oorzaken van verzilting

Op plaatsen waar Holocene transgressies zijn doorgedrongen, zal van bovenaf,

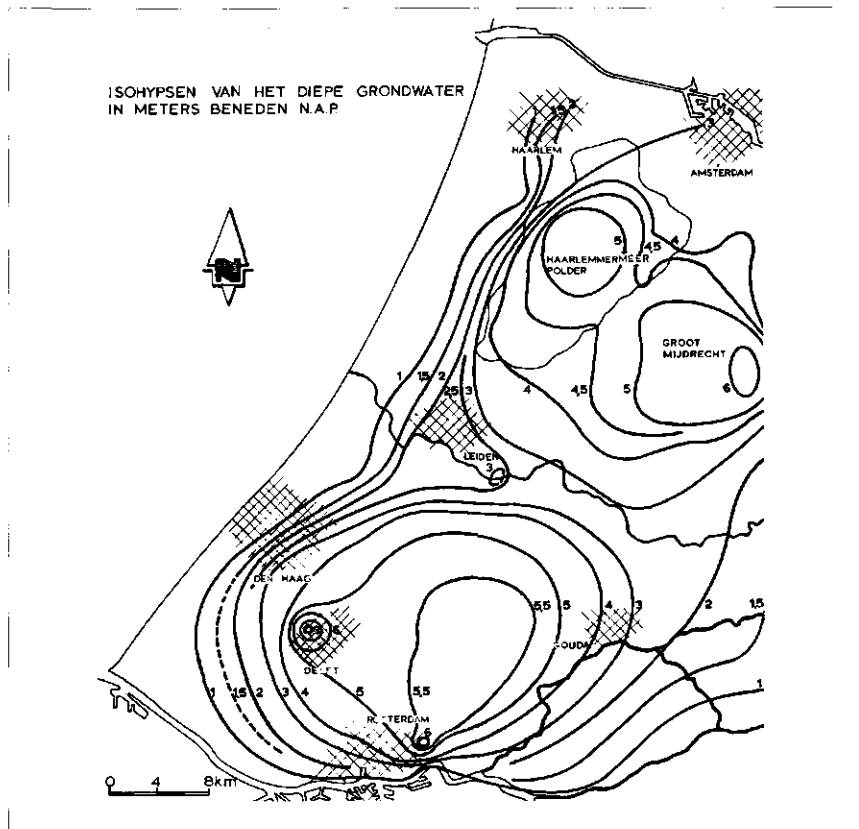
hoofdzakelijk ten gevolge van diffusie, verzilting van de ondergrond hebben plaatsgevonden. Dispersie zal nauwelijks een rol hebben gespeeld, omdat grondwaterstroming in een gebied dat door zee wordt bedekt, in het algemeen geheel afwezig zal zijn.

Deze verzilting versterkte de reeds aanwezige maar waarschijnlijk lage verzilting door middel van dispersie van onderaf. Na de terugtrekking van de zee zal verzoeting zijn opgetreden en, zodra weer een grondwaterstroming is ontstaan, eveneens door dispersie. De hoogte van het huidige zoutgehalte op een bepaald niveau in de ondergrond wordt dus bepaald door ten eerste de tijdsduur van de transgressie maar ook door de lengte van de daarop volgende landperiode. Het gebied waar grondwater met een verhoogd zoutgehalte ten gevolge van Holocene transgressies wordt aangetroffen, is in eerste instantie bepaald door de verbreiding van de zee tijdens deze transgressies. Daarnaast moet echter rekening worden gehouden met de stromingstoestand van het grondwater na het terugtrekken van de zee. De beweging van het grondwater, die vóór ca. 1200 AD zeer gering zal zijn geweest, is na die tijd door menselijk ingrijpen belangrijk gewijzigd, doordat bedijkingen en inpolderingen hebben plaatsgevonden. Enerzijds werden diepe polders gekreëerd, anderzijds werd door tussen dijken opgesloten rivieren het stroombed steeds verhoogd. Over korte

afstand ontstonden grote verschillen tussen het rivierpeil en het polderpeil en daarmee relatief steile verhangen in het grondwater. Infiltratie treedt op ter plaatse van de rivieren en in ondiepe polders die naast diepe zijn gelegen, waarbij de algemene stroomrichting van het grondwater in het Pleistocene pakket naar de diepe polders is gericht. Illustratief is een door het ICW te Wageningen [6] samengestelde isohypsenkaart, die in afb. 4 is afgebeeld. Dit stromingspatroon heeft tot gevolg dat verzoeting optreedt ter plaatse van de infiltratiegebieden en een verplaatsing van de in de ondergrond aanwezige zoutlichamen in de richting van de diepe polders.

De bovengeschetste gang van zaken kan worden toegelicht aan een eveneens door het ICW samengestelde kaart die het chloridegehalte van het grondwater op een diepte van NAP - 20 m weergeeft; zie afb. 5. In het gebied waar de Calais-transgressie (zie afb. 2) is doorgedrongen, wordt nu nog relatief zout grondwater aangetroffen. Grondwater met een veel hoger chloridegehalte (enige duizenden mg/l) wordt aangetroffen in het Westland, dat bedekt is geweest door de (veel latere) Duinkerketransgressie. Eveneens wordt grondwater met een chloridegehalte van enige duizenden mg/l aangetroffen ter weerszijden van de Oude Rijn. Langs deze rivierarm is de Duinkerketransgressie eveneens doorgedrongen. Opvallend is dat de oostelijke begrenzing van deze transgressie en die

Afb. 4 - De isohypsen van het diepe grondwater in m - NAP, volgens Couwenhoven en Toussaint.



van de verbreiding van het zoute grondwater met een hoog chloridegehalte goed met elkaar overeenkomen. Het zoutlichaam is echter gesplitst in een noordelijk en een zuidelijk deel, die ten opzichte van het gebied van de Duinkerkentransgressie langs de Oude Rijn naar het noorden en het zuiden zijn verschoven. Dit kan verklaard worden uit het stromingspatroon van het grondwater. Ter plaatse van de Oude Rijn en de ondiepe polders ernaast zijn rivierwater en neerslag geïnfilteerd, die de ondergrond hebben verzoet. Het zoutlichaam is enkele kilometers in noordelijke en zuidelijke richting verplaatst door een vanaf de Oude Rijn gerichte grondwaterstroming (zie afb. 4). Een dergelijk verschijnsel is minder duidelijk merkbaar in het Westland; het grondwaterstromingsveld gaf er geen aanleiding toe. In de ondergrond van Rotterdam kan het Duinkerkenzout zijn weggeduwd door infiltratie vanuit de Nieuwe Maas.

Het afmalen van de zeer diepe polders heeft nog een ander gevolg gehad voor de verdeling van het zout in de ondergrond. Er is namelijk een intensieve grondwaterstroming gekreëerd in de richting van deze polders. De diepste (en langste) stroombaan hiervan zal wellicht door het op grotere diepte aanwezige zoute grondwater lopen. Deze stroombaan eindigt in het middengedeelte van de polder en hier kan dus gedurende (zeer) vele jaren relatief zout

grondwater opkwellen. Ook na de verzoeting van de diepste stroombaan zal echter nog verzilting door dispersie op kunnen treden, indien deze stroombaan aan de onderzijde in aanraking komt met zout grondwater bevattende lagen. Via dit mechanisme is te verklaren dat in het centrum van de diepe polders Haarlemmermeer en Groot-Mijdrecht ondiep grondwater met een hoog zoutgehalte voorkomt. Soortgelijke condities bestaan eveneens in de Alblasserwaard en de Bommelerwaard, waar plaatselijk een opwelling van het grensvlak tussen zoet en zout grondwater is geconstateerd. Er moet nog worden opgemerkt dat het optrekken van zout grondwater uit de diepere lagen ook mogelijk is indien door de natuur een vergelijkbare situatie is geschapen, bijvoorbeeld waar een hooggelegen infiltratiegebied met een steile helling overgaat naar een laaggelegen kwelgebied.

De verzilting van het fluviatiele Pleistocene pakket door middel van dispersie van onderaf, waarvan werd aangenomen dat deze in het eerste gedeelte van het Holoceen vanwege de geringe snelheid van de grondwaterstroming aanzienlijk is geweest, zal in de periode na ca. 1200 AD weer worden teruggedrongen. De grondwaterstroming wordt dan op meerdere plaatsen van bovenaf gevoed met zoet water en zal daardoor sterker zijn. Deze invloed is uiteraard alleen te merken in gebieden waar door inpolderingen en bedijkingen peilverschillen zijn ge-

kreëerd; dit was bijvoorbeeld in het IJsselmeergebied tot voor kort niet het geval. Een aanwijzing dat in de laatste tijd verzoeting optreedt, wordt gevormd door het feit dat in het fluviatiele pakket door Geirnaert [4] op zeer vele plaatsen grondwater wordt aangetroffen dat onderhevig is geweest aan $Ca^{++} \rightarrow Na^{+}$ -uitwisseling, waarvan verondersteld wordt dat deze wordt veroorzaakt doordat zoet water door sedimenten stroomt waarin zich eerder zout water heeft bevonden. Tenslotte moet nog worden opgemerkt dat het zoutgehalte in het water van de Rijn de laatste 100 jaar zodanig is opgelopen dat er bij deze rivier ook min of meer van verzilting kan worden gesproken, die eveneens merkbaar is in het grondwater dat door infiltratie uit de rivier afkomstig is. Deze verzilting blijft echter beperkt tot smalle stroken langs de rivierarmen van de Rijn.

Conclusies

Het huidige zoutgehalte van het grondwater in de fluviatiele Pleistocene lagen in de ondergrond van de lage gedeelten van Nederland is teweeg gebracht door een combinatie van een aantal oorzaken. De volgende factoren hebben invloed uitgeoefend.

1. Er is een verzilting opgetreden door dispersie langs een diepgelegen grensvlak tussen zoet en zout grondwater waarbij in ieder geval het zoete in beweging is (geweest). Het zoute grondwater is aanwezig in de mariene sedimenten die in de aanvang van de Pleistocene periode en daarvoor zijn afgezet. Deze verzilting neemt in het algemeen toe naar de diepte en in de richting van de grondwaterstroming die de oorzaak van de dispersie is (geweest). In het laatste gedeelte van de Pleistocene en in de Holoceen periode tot ca. 1200 AD is een doorgaande grondwaterstroming aanwezig geweest in de richting van de kust.

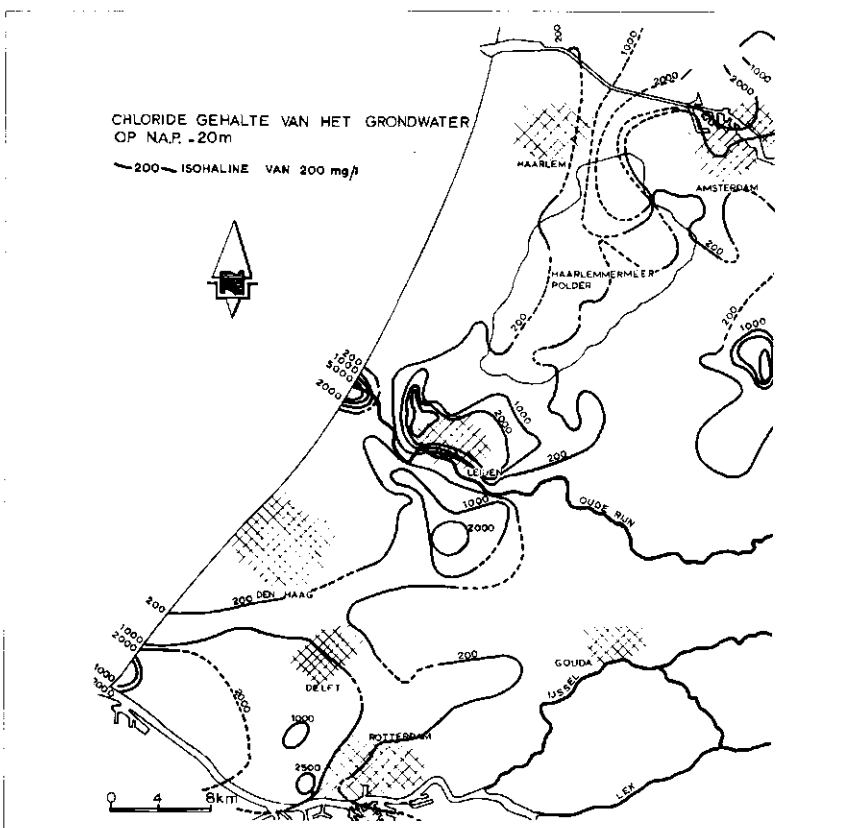
- 2a. In gebieden waar, in het Holoceen, de zee is doorgedrongen tot binnen de huidige kustlijn, is zout naar de ondergrond gediffundeerd doordat een verschil in zoutgehalte aanwezig was tussen zeewater en grondwater.

- 2b. Nadat de zee zich uit deze gebieden had teruggetrokken, is eveneens door diffusie een verzoeting opgetreden doordat de zoutconcentratie in het zoete bovenwater en het verzilte grondwater verschilde.

3. De relatief intense grondwaterstromingen die zich tengevolge van inpolderingen en bedijkingen hebben ingesteld, hebben een verplaatsing en verspreiding (door dispersie) van de voordien gevormde zoutwaterlichamen in de ondergrond teweeg gebracht.

De invloed van de bovengenoemde factoren zal op verschillende plaatsen (zowel in horizontale zin als naar de diepte)

Afb. 5 - Het chloridegehalte van het grondwater op ca. NAP - 20 m, volgens Couwenhoven en Toussaint.



op verschillende wijze tot uiting komen. Zo zullen de diepste gedeelten van het fluviatiele Pleistoceen, waar dit grenst aan nog niet volledig verzoete mariene sedimenten, voornamelijk verzilt zijn tengevolge van het dispersieverschijnsel. De ondiepe lagen zullen vooral ter plaatse van kort geleden door zee bedekte gebieden een hoger zoutgehalte vertonen tengevolge van diffusie van zout uit het desbetreffende zeewater. De invloed van het grondwaterstromingspatroon na ca. 1200 AD is zichtbaar in een verzoeting van de ondergrond van de infiltratiegebieden en een verzilting van het grondwater onder de diepe polders.

Toestroming van zout grondwater vanuit zee en van verzilt rivierwater heeft alleen betekenis in smalle stroken langs de kust en langs de armen van de Rijn.

Literatuur

1. Mazure, J. Bijlage IX van het Rapport van de Commissie Drinkwatervoorziening Westen des Lands, 1940.
2. Volker, A. *Source of brackish groundwater in Pleistocene formations beneath the Dutch polderland*, Economic Geology, Vol 56, 1961.
3. Jelgersma, S. *Zoutwaterindringing uit zee tijdens tertiair-kwartair*, Cursus Zout Grondwater in Nederland, deel II, van de Stichting Postacademiale Vorming Gezondheidstechniek, Delft, 1971.
4. Geirnaert, W. *The hydrology and hydrochemistry of the lower Rhine fluvial plain*, Leidse Geologische Mededelingen, 1973.
5. Verruijt, A. *Steady dispersion across an interface in a porous medium*, Journal of Hydrology 14 (1971) 337-347.
6. Couwenhoven, T. en Toussaint, C. G. *Water en zoutbelasting poldergebied Midden-West-Nederland*, Nota 530 van het Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding, 1969.
7. Zonneveld, J. I. S. *Lithostratigrafische eenheden in het Nederlandse Pleistoceen*, Med. van de Geol. St., Nieuwe Serie no. 12, 459.
8. Jelgersma, S. et al. *The coastal dunes of the Western Netherlands*, Med. van de Geol. St. Nieuwe Serie no. 21, 1970.
9. Pons, L. J., Jelgersma, S., Wiggers, A. J. en Jong, J. D. de. *Evolution of the Netherlands coastal area during the Holocene*, Verh. Kon. Ned. Geol. Mijnb. G.S. 21 - 2, 1963.