

Inhoud:	Geologische ervaringen van een Gea-lezer: Ivö in Skåne (zuid-Zweden).....61
Zoet en zout grondwater in Nederland.....41	Catastrofen en evolutie63
Gesteentewandelingen in en om Hoorn.....46	Het ei van Columbus.....64
De ertsvoorkomens van Spanje.....51	Vragen staat vrij.....65
De systematiek van mineralen VIII. Silicaten56	De GEA-Pionier, deel V. Mineralen determineren66
Micromounts ruilen, hoe doe je dat?.....59	Boekbespreking68
Een bijzondere lithofyse?60	Kwikzilver op de foto..... to.68

Zoet en zout grondwater in Nederland als afspiegeling van de paleo-hydrologische ontwikkelingen

door Dr. J. J. de Vries *)

Inleiding

Vrijwel overal in Nederland treft men in de ondergrond zowel zoet water afkomstig van de neerslag aan, als zout water dat zijn oorsprong vindt in zee. De onderlinge verdeling vertoont veelal een grillig patroon, waarvoor in grote lijnen geldt dat onder de Pleistocene zandgronden het zoute water normaliter op diepten van meer dan 100 m wordt aangetroffen, terwijl in het Holocene gebied dit watertype soms tot aan het oppervlak reikt. Zowel de genese als het patroon van voorkomen van het zoute water is reeds lang onderwerp van onderzoek en discussie, doch een allesomvattende verklaring is nog niet voorhanden (Maas, 1989). Duidelijk is wel dat afgezien van verzilt water in de omgeving van Permische steenzoutafzettingen, vrijwel al het zoute grondwater afkomstig is van Tertiaire en Kwartaire mariene transgressies. De huidige verdeling hangt zowel samen met het regionale patroon van deze zee-inbraken als met de latere herverdeling van zoet en zout water door grondwaterbewegingen. De stromingspatronen van het grondwater worden bepaald door zowel de geologische structuur van de ondergrond als door de geomorfologische situatie, en zijn daardoor onderhevig geweest aan alle veranderingen die zich in de loop van het Kwartair in de geologische omstandigheden hebben voorgedaan. Uit onderzoek is duidelijk geworden (o.a. de Vries, 1981) dat vooral de veranderingen in het reliëf en in de water-

huishoudkundige situatie gedurende de laatste 1000 jaar van grote invloed geweest zijn op de huidige verdeling van het zoete en het zoute water in de ondergrond. Vooral de vorming van de hoge jonge duinen en het ontstaan van de diepe polders zijn daarvoor verantwoordelijk geweest. In het volgende zal daarom allereerst ingegaan worden op de principes van de waterbeweging onder de duinen en onder de polders. Vervolgens zal een globale reconstructie worden gegeven van de processen die in de loop van de geologische geschiedenis hebben geleid tot de huidige distributie van het zoute grondwater.

De grondwatersituatie onder de duinen

Reeds lang is bekend dat een groot deel van de ondergrond van westelijk Nederland zout en brak grondwater bevat. Dit vrijwel alom aanwezige zoute water vormde in de vorige eeuw een groot probleem bij het vinden van geschikt drinkwater. Het enige zoetwatervoorkomen van betekenis in het westen van ons land werd onder de duinen aangetroffen, en voor de watervoorziening van de grote steden heeft men dan ook vanouds uit deze bron geput. Amsterdam startte als eerste in 1854 met een grondwaterwinning in de duinen ten westen van Haarlem. Bij de stichting van de duinwaterwinplaatsen beschikte men aanvankelijk nauwelijks over informatie met betrekking tot de omvang van het zoetwatervoorkomen, laat staan dat men enig inzicht had in de genese en

*) Dr. J.J. de Vries is hoogleraar hydrogeologie aan het Instituut voor Aardwetenschappen van de Vrije Universiteit, De Boelelaan 1085, 1081 HV Amsterdam.

Principe van Badon Ghijben

In vlak **AB** heerst evenwicht, dus: waterdruk in **A** = waterdruk in **B** of: $(y+H) \gamma_1 = y \gamma_2$

waarin: γ_1 = soortelijk gewicht

zoetwater
(1 g/cm³)

γ_2 = soortelijk gewicht

zeewater
(1,025 g/cm³)

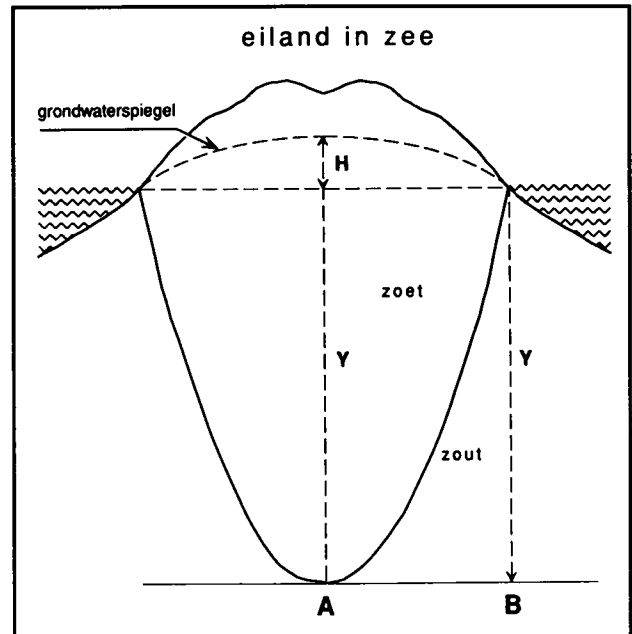
dus: $y = 40 H$



Afb. 1. Willem Badon Ghijben (1845 - 1907)

wetmatigheden die daaraan ten grondslag lagen. Bij de exploitatie van het duinwater liet men zich leiden door de gedachte dat het zoete water zich wel niet veel dieper dan zeeniveau zou uitstrekken, en om verzilting van de winplaats te voorkomen werd het water via draineerkanalen aan de ondiepe ondergrond onttrokken. In 1889 verschijnt het resultaat van een onderzoek van de genie naar het grondwater onder Amsterdam, dat uitgevoerd was met het oog op de plannen voor de inrichting van de noodwatervoorziening voor de Stelling Amsterdam in geval van een beleg. In deze studie van de officieren J. Drabbe en W. Badon Ghijben wordt terloops door Badon Ghijben een opmerkelijke hypothese geponoerd ten aanzien van het evenwicht tussen zoet en zout water en in het bijzonder tussen het zoete en het zoute water onder de duinen. Afb. 1. Hij betoogt dat de overdruk, die het zoete water in een duingebied ten opzichte van het omringende zeewater bezit doordat de grondwaterspiegel zich boven zeeniveau uitstrekt, ertoe moet leiden dat het zoute water onder de duinen door het zoete water wordt weggedrukt tot een diepte die gelijk is aan 40 maal de hoogte van de grondwaterspiegel boven zeeniveau (afb. 2). Dit betekent dat onder de hoogste duincomplexen, waar de grondwaterspiegel zo'n 5 m boven NAP reikt, het zoete grondwater tot een diepte van 200 m moet zijn doorgedrongen. Met andere woorden, in de evenwichtsituatie zou zich onder de duinen een zoetwaterlens bevinden, die door zijn geringere dichtheid op en in het hem omringende soortelijk zwaardere zoute water zou drijven, gelijk een ijsberg in zee. Aanvankelijk werd weinig geloof gehecht aan deze hypothese; men kon zich niet voorstellen dat het lichtere zoete water het zwaardere zoute water zou kunnen verdrijven. Eerst als de Duitse ingenieur A. Herzberg op het Noordzee-eiland Norderney tot zijn verrassing tot op meer dan 60 m diepte nog zoet water aantreft, en in 1901 in een publikatie eenzelfde verklaring hiervoor geeft als Badon Ghijben, komt het denkbeeld van het drijvende duinwater in de belangstelling en volgen hevige discussies over de juistheid van deze hypothese. Diepe exploratie van het duingebied toont uiteindelijk de juistheid aan van wat sedertdien bekend staat als het Ghijben-Herzberg principe. Overigens heeft het in ons land nog tot in de jaren '20 geduurd voordat algemeen geaccepteerd werd dat het diepe water onder de duinen

Afb. 3. Infiltratie en kwelstromingen rond een diepe polder.

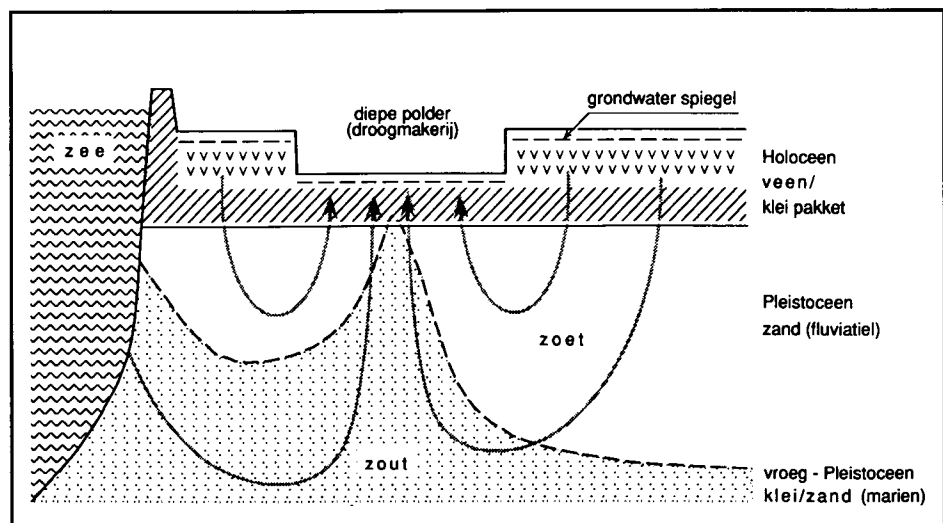


Afb. 2. Het evenwicht tussen zoet en zout grondwater in een kustgebied volgens het principe van Badon Ghijben. In vlak **AB** heerst evenwicht, dus: waterdruk in **A** = waterdruk in **B**, of: $(Y + H) \gamma_1 = Y \gamma_2$, waarin: γ_1 = soortelijk gewicht zoet water (1 g/cm³), en γ_2 = soortelijk gewicht zeewater (1,025 g/cm³). Dus: $Y = 40 H$. De afbeelding is niet op schaal.

afkomstig was van ter plaatse geïnfiltreerd regenwater, en dat derhalve de winbare hoeveelheden beperkt waren. Denkbeelden over onuitputtelijke waterhoeveelheden onder de duinen, die aangevuld zouden worden door diepe artesische grondwaterstromingen uit de hogere gronden van de Veluwe, Limburg en zelfs Duitsland, hebben een taai leven geleid en gedeeltelijk het handelen van waterleidingbedrijven beïnvloed. Zelfs politieke strubbelingen, in verband met de kwestie van al dan niet noodzakelijke onteigening van duinterreinen voor de uitbreiding van de waterwingebieden, zijn hiervan het gevolg geweest (de Vries, 1982).

Grondwatersituatie onder het polderland

Ons polderland wordt gekenmerkt door een lage ligging en een onregelmatig reliëf. Deze bijzondere topografische gesteldheid is het gevolg van zowel ontwatering en inklinking van vooral de uitgestrekte veengebieden, als van de drooglegging van door

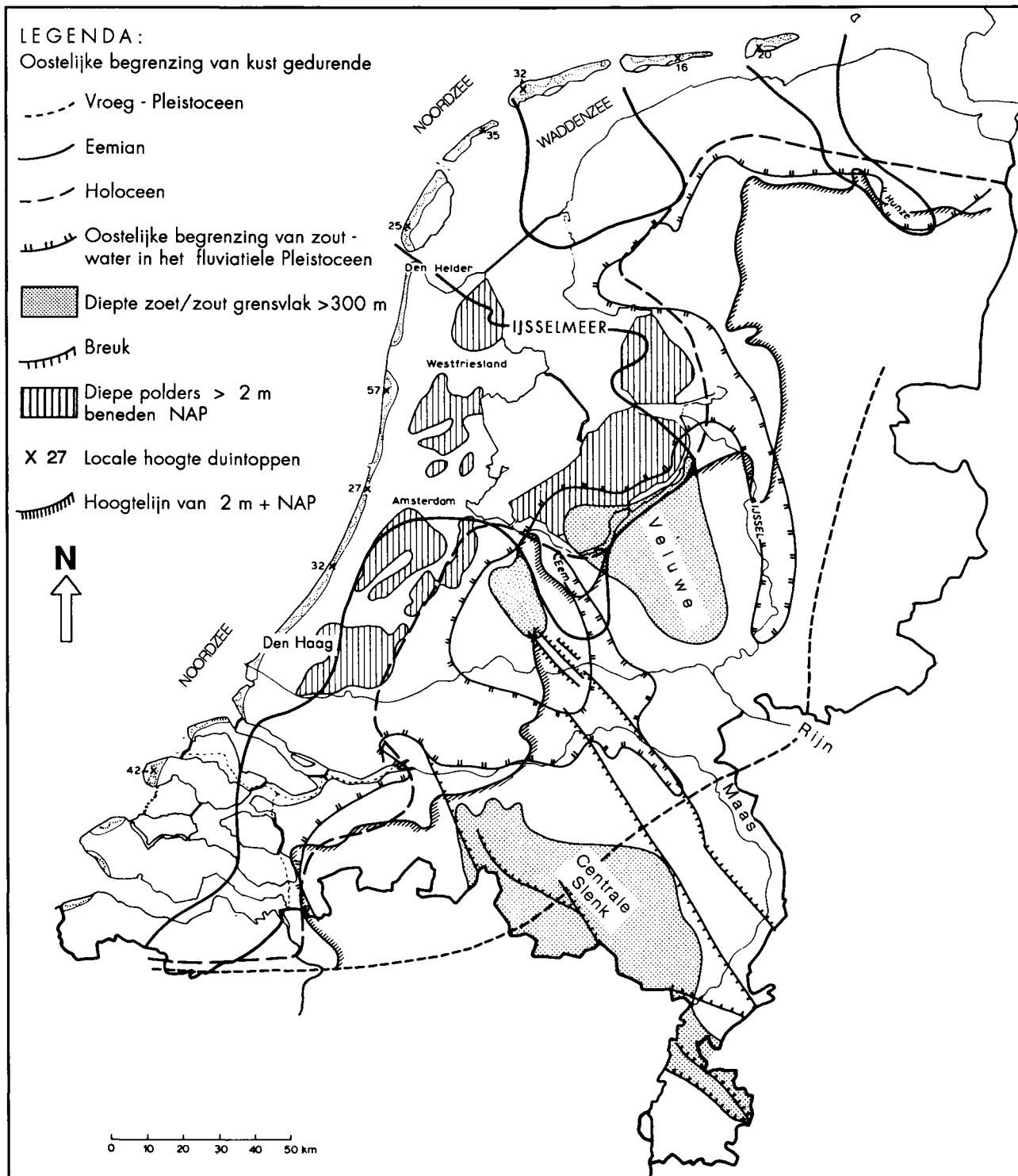


verving ontstane plassen en delen van de zeebodem. Diepe polders vormen in dit gebied depressies, die hydrologisch gezien vergeleken kunnen worden met enorme putten. De bemaling van deze lage polders zorgt ervoor dat de grondwaterdruk lager blijft dan die in de omgeving. Dientengevolge stroomt ondergronds water toe, dat zich vervolgens als kwelwater in de polder ontlast (afb. 3). De stroombanen van deze kwelwaterbeweging vormen zowel in het horizontale als in het verticale vlak een soort radiaal patroon, dat in de hogere infiltratiegebieden begint. De diepte tot waar de stroombanen doordringen neemt toe met de afstand tussen hun intrekgebied en de polder. De grondwaterstroming die op deze wijze in beweging is gezet kan zowel zoet als zout water meevoeren, afhankelijk van het soort water dat in het gebied van herkomst wordt aangetroffen. Ligt de polder dicht bij de kust, dan

kan zout water direkt uit zee worden aangetrokken; grenst de polder aan een gebied met overvloedig zoet water, dan wordt dat water aangetrokken, hetgeen aanleiding kan zijn tot verzoeting van de ondergrond.

Door de sterke opwaartse component van de grondwaterbeweging wordt, vooral onder het centrum van een diepe polder, water van grotere diepten aangevoerd. Dit geeft vaak aanleiding tot het optrekken van een zout-waterkegel vanuit de onderliggende mariene lagen (afb. 3). Zo vormen de diepe polders dus de tegenhanger

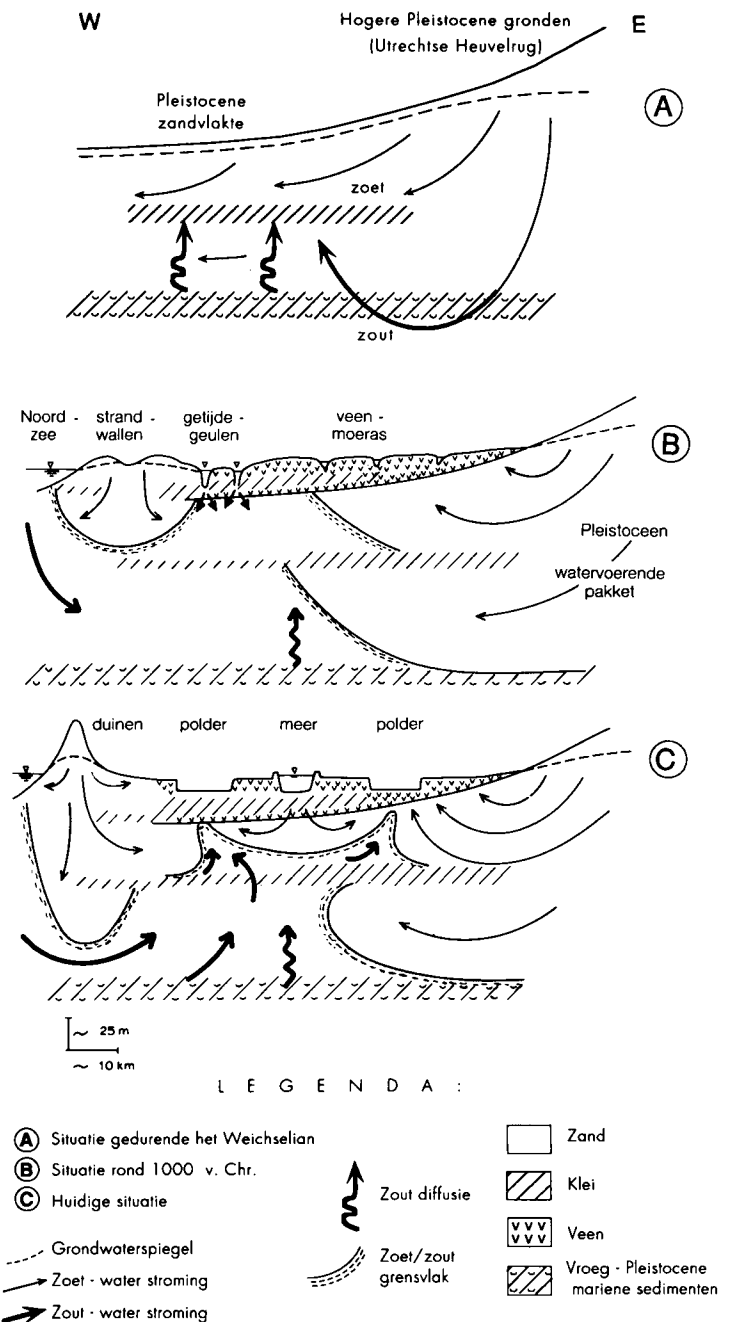
Afb. 4. Grootschalige topografische en geologische structuren, vroegere kustlijnen en de ligging van het zoet-zoutgrensvlak op grotere diepte.



van de duingebieden: verzoutende kwelgebieden tegenover verzoetende infiltratiegebieden. Dit verschil in hydrologisch gedrag geldt overigens in meer of mindere mate voor alle relatief laaggelegen gebieden tegenover relatief hooggelegen gebieden. Op regionale schaal gezien betekent de kwelstroming een netto verlies aan grondwater. In het kustgebied wordt dit verlies gecompenseerd door binnendringend zeewater, terwijl verder naar het oosten de aanvulling gerealiseerd wordt met zoet water vanuit de hogere zandgronden. Wat de snelheid van deze processen van verzilting en verzoeting betreft dient men te bedenken, dat voor horizontale grondwaterbewegingen op regionale schaal, gerekend moet worden met een grootte-orde van enkele meters per jaar. Dit betekent dat het grootste deel van het zoute kwelwater afkomstig is van zout grondwater dat reeds vóór het ontstaan van het polderland aanwezig is geweest. Door kwel binnengedrongen zeewater kon zich sedert het begin van de vorming van ons polderland niet verder landinwaarts verplaatst hebben dan een vijftal kilometers.

Reconstructie

Zoals gezegd is voor het begrijpen van de gecompliceerde verdeling van zoet en zout water in de Nederlandse ondergrond inzicht vereist in de ontwikkelingen in de geologie en de geomorfologie gedurende de laatste 2 miljoen jaar. Uit een hydrogeologisch gezichtspunt kan Nederland beschouwd worden als een halfcirkelvormig grondwaterbekken, dat open is naar het noorden en westen. Dit bekken is voornamelijk opgebouwd uit fluviatiele Pleistocene zanden, waarvan de dikte in noordwestelijke richting toeneemt tot meer dan 200 m. Aan de basis van dit doorlatende zandpakket bevinden zich slecht doorlatende, kleiige sedimenten van vroeg-Pleistocene en Tertiaire oorsprong. Naar het oosten en zuiden neemt de diepteligging van deze afzettingen af. Veelal zijn deze oudere sedimenten van mariene oorsprong en bevatten zij resten zout water (connaat water). Gedurende het grootste deel van het Pleistoceen zal er een westwaarts gerichte zoetwaterstroming door het Pleistocene zandpakket hebben geheerst in de richting van de algemene topografische helling, waarbij hoogstens door diffusie en dispersie enig zout vanuit de diepere mariene sedimenten in het fluviatiele pakket zal zijn doorgedrongen. De voornaamste onderbreking in deze situatie trad in tijdens het Eemian interglaciaal, de periode voorafgaand aan de laatste ijstijd, het Weichselian. Gedurende het Eemian drong de zee tot diep in ons kustgebied door en zal een groot deel van de ondergrond tot in de Gelderse Vallei en het Hunze Dal zijn verzilt (afb. 4). In de daaropvolgende periode van het Weichselian (die ca 70.000 jaar duurde) lag de zee weer ver naar het westen en herstelde de oude situatie zich (afb. 5A). Gedurende het Weichselian werd het overgrote deel van het Eemian-zout weer uitgespoeld. Op enkele plaatsen echter, waar het zoute water door kleilagen werd beschermd, bleven resten van dit water achter, zoals bijvoorbeeld in de Gelderse Vallei. Sedert het begin van het Holoceen, zo'n 10.000 jaar terug, steeg de zeespiegel en kwam het westen van ons land binnen de invloedssfeer van de zee. In dit lagunaire en estuarine milieu heeft zich een pakket klei en veen gevormd dat een maximale dikte van 20 m bereikt aan de kust en uitwigt tegen de Pleistocene zandgronden. Gedurende deze tijd is dit gebied herhaaldelijk het toneel geweest van mariene inbraken, die gepaard gingen met zowel sedimentatie als met erosie, met insnijdingen soms tot in de Pleistocene ondergrond (afb. 5B). Het is duidelijk dat in deze periode het grootste deel van het huidige zoute grondwater in westelijk Nederland is binnengedrongen. Vooral tijdens de jongere fase van het Holoceen, bij de vorming van de z.g. Afzettingen van Duinkerke, zijn diepe en brede getijdegeulen gevormd die zich tot in de Pleistocene ondergrond



Afb. 5. Schematische hydrologisch-topografische doorsneden door westelijk Nederland voor verschillende perioden in het Kwartair.

hebben ingesneden. Dit type geulen zal het meest hebben bijgedragen tot de verzilting van de ondergrond door de infiltratie van het soortelijk zwaardere zoute water via de Pleistocene zandlagen. Rustige transgressies over een beschermend klei- of veendek hebben in het algemeen geen aanleiding gegeven tot verticale neerwaartse bewegingen van zout water door dichtheidsstromingen. Dit blijkt bijvoorbeeld uit het verloop van het zoutgehalte met de diepte in het voormalige Zuiderzeegebied (afb. 6B). Vrijwel overal in deze voormalige zeeboezem neemt het zoutgehalte onder de Holoceen afzettingen met de diepte toe tot in de mariene vroeg-Pleistocene afzettingen op een diepte van ca 200 m. De gevonden gradiënt kan verklaard worden met opwaartse diffusie van zout vanuit de diepere mariene afzettingen naar een zandpakket waarin zich oorspronkelijk zoet water bevond en waarin weinig horizontale stroming optrad.

De vorming van de Zuiderzee, die in de Middeleeuwen begon, is gepaard gegaan met de afbraak van een voormalig veengebied. De daaronder gelegen Holocene kleiige afzettingen zijn bij deze inbraken van de zee echter nauwelijks doorsneden, waardoor verzilting van de Pleistocene ondergrond grotendeels achterwege bleef. Wel heeft naar beneden gerichte diffusie van Zuiderzeezout in de Holocene lagen plaatsgevonden (afb. 6A). Deze afbeelding toont voorts de verzoeting van de bovenste meters sedert de afsluiting van de Zuiderzee. Opmerkelijk zijn voorts de vele z.g. inversies, waarbij zout water boven zoet water voorkomt, doch daarvan is gescheiden door een slecht doorlatende horizont van klei of keileem. Deze situaties worden zowel in de Holocene als de Pleistocene afzettingen aangetroffen en getuigen waarschijnlijk van stagnatie van naar binnen gedrongen zout water.

De grote lijnen van het boven geschetste beeld worden weerspiegeld in de regionale verdeling van zoet en zout grondwater, zoals weergegeven in afb. 4: De oostelijke grens van de zoute grondwater in de fluviatiele Pleistocene zanden volgt ongeveer de oostelijke begrenzing van de Eemian en Holocene transgressies. De verder landwaarts doorgedrongen zouttongen in de Gelderse Vallei en in het dal van de IJssel zullen samenhangen met de opwaarts gerichte grondwaterbewegingen die onder deze depressies heersen, en waarmee zout water vanuit de diepere mariene lagen omhoog is getrokken. De grote diepte van het zoet-zout grensvlak onder de glaciële stuwheuvels is het gevolg van de diepe infiltratie van zoet water in deze topografisch hooggelegen gebieden, geheel volgens het Ghijben-Herzberg principe. Het dikke zoet-watervoorkomen in de Centrale Slenk zal een gevolg zijn van zowel de diepe ligging van de mariene sedimenten in deze tectonische depressie, als de relatief sterke grondwaterbeweging vanuit de aangrenzende hoger gelegen gebieden.

Een meer gedetailleerd genetisch beeld van de boven geschetste ontwikkelingen in het westen van ons land wordt weergegeven in afb. 5A en B. Daarnaast illustreert afb. 5C de sterke herverdeling en onderlinge verdringing van zoet en zout water die sedert de Middeleeuwen heeft plaats gevonden, vooral als gevolg van de veranderingen in het reliëf en de waterhuishouding.

Vóór deze periode vormde dit kustgebied een vlak moeras met weinig grondwaterbeweging. In de vroege Middeleeuwen werden de lage strandwallen omgevormd tot hoge kustduinen en begon de vorming van de zoet-waterlenzen langs de kust door de infiltratie van regenwater in het duingebied. Vervolgens ontstond door menselijke activiteiten het polderlandschap met zijn relatief diepe depressies. Dit alles initieerde een sterke grondwaterbeweging en daarmee een wijziging in de verdeling van zoet en zout water, die tot op de huidige dag doorgaat. Zo hebben recentelijk de aanleg van de IJsselmeerpolders ingrijpende veranderingen in het grondwater-regime geïnduceerd, en heeft het zoete grondwater onder de duinen een uitbreiding ondergaan door kunstmatige infiltratie met rivierwater.

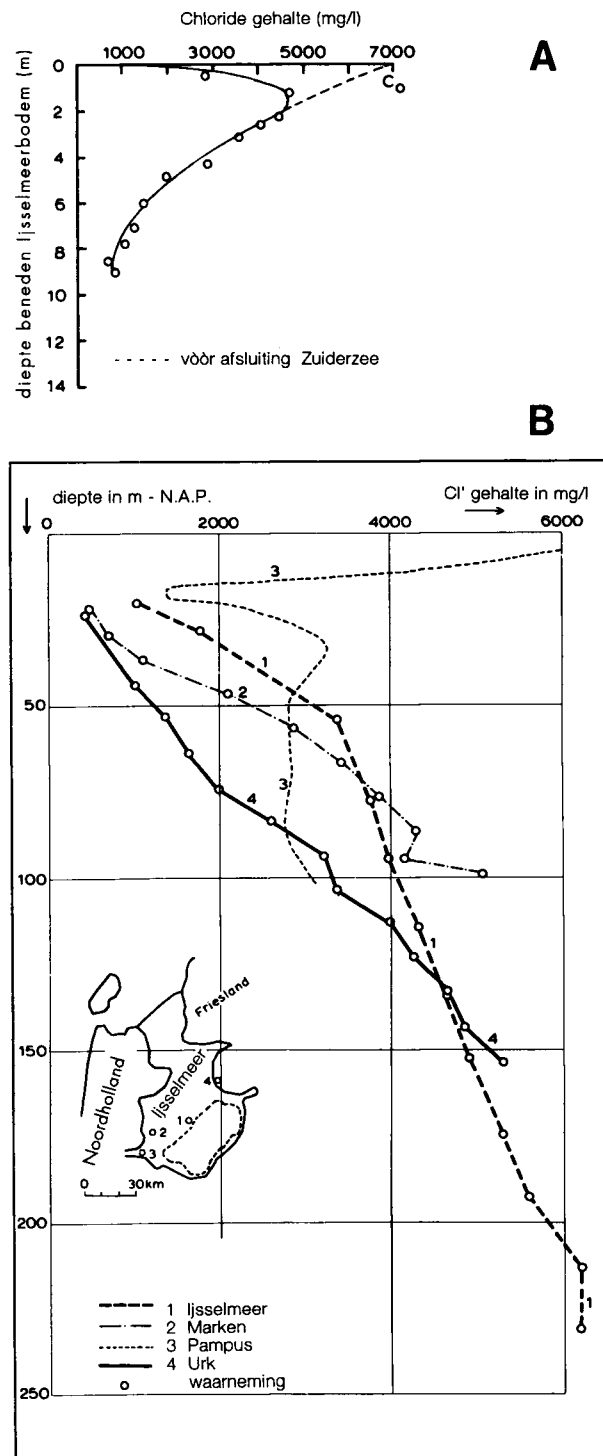
Slotbeschouwing

De aanwezigheid van zoet en zout grondwater onder ons land is het gevolg van het binnendringen van zeewater tijdens mariene transgressies in de lagere gebieden en van de infiltratie van zoet regenwater in de hoger gelegen gronden. De grillige onderlinge verdeling van deze twee watersoorten hangt samen met enerzijds het reliëf, dat de motor vormt voor de grondwaterbeweging, en anderzijds met het patroon van boven en naast elkaar gelegen goed doorlatende zandlagen en slecht doorlatende kleilagen, waardoor de stroming van grondwater in de ene richting wordt gestimuleerd, en in een andere wordt gehinderd.

De ontwikkeling van het polderland heeft geleid tot de vorming van een gebied dat beneden de zeespiegel is gelegen. Dit betekent dat er een netto instroming plaats vindt van zout grondwater in oostelijke richting vanuit zee, en van zoet grondwater in westelijke richting vanuit

de hogere Pleistocene gronden. Dit ondergronds aangevoerde water komt als kwelwater in de polders omhoog, en wordt tezamen met het water afkomstig van lokale kwelstromingen en het overtollig regenwater, door bemaling verwijderd.

De grootte van de kwelstroming neemt in het algemeen toe met de diepte van de polder en met een afname van de dikte van het onderliggende Holocene pakket. Gemiddeld bedraagt de kwelstroming in diepe polders enkele millimeters water per dag, en is daarmee enkele malen



Afb. 6. Vertikale chloride-profielen in de ondergrond van het gebied van de voormalige Zuiderzee.

groter dan het neerslagoverschot. Uitschieters worden gevonden aan de voet van de Utrechtse Heuvelrug, waar de combinatie van een sterke drukgradiënt en een dun Holoceen pakket de kwelstroming stimuleren. Zo vertonen de Béthunepolder en de Horstermeerpolder een kwel van meer dan 10 mm/dag. In de eerstgenoemde polder wordt dit water, dat omgerekend een hoeveelheid van 30 miljoen m³ per jaar vertegenwoordigt, gewonnen voor de drinkwatervoorziening van Amsterdam; de kwel in de Horstermeer is zout.

De totale hoeveelheid natriumchloride (keukenzout) die als gevolg van zoute kwel onze polders binnendringt en daarmee het polderwater belast, wordt geschat op 50 miljoen ton per jaar. Een deel van dit zout komt direct in de sloten, een ander deel verzilt de bodem. Het bodemzout wordt grotendeels uitgespoeld door het neerslagoverschot dat gedurende de winter in de grond dringt en vervolgens via het drainage-systeem weer wordt afgevoerd. De doorspoeling van de sloten en kanalen op hun beurt gebeurt met regenwater en ingelaten rivierwater.

Literatuur

Het boven gepresenteerde overzicht vormt een sterke schematisering van de werkelijke situatie, en een veralgemenisering van de processen die daartoe hebben geleid. Niet is ingegaan op details en op het hydraulisch en geochemisch onderzoek dat in

verschillende gebieden is verricht. Daarom wordt in de literatuurlijst, naast de hier aangehaalde publikaties, enige overzichtswerken en enkele meer op lokaal onderzoek gerichte artikelen gegeven.

- Beekman, H.E. (1991). Ion chromatography of fresh- and seawater intrusion. Dissertatie Vrije Universiteit, Amsterdam, 198 p.
- Commissie Hydrologisch Onderzoek TNO (1989). Water in the Netherlands. Den Haag, 96 p.
- Drabbe, J. en W. Badon Ghijben (1888/1889). Nota in verband met de voorgenomen putboring nabij Amsterdam. Tijdschrift Kon. Inst. v. Ingenieurs, Verh. 1888/1889, p. 8-22.
- Geirnaert, W. (1973). The hydrogeology and hydrochemistry of the Lower Rhine Fluvial Plain. Leidse Geolog. Med. 49, p. 59-84.
- Instituut voor Grondwater en Geo-Energie TNO. Grondwaterkaart van Nederland. Vele kaartbladen met toelichtingen. Linden, F. van der en C.A.J. Appelo (1988). Hydrochemie en herkomst van zout kwelwater in de Horstermeerpolder. H₂O 21, p. 671-675.
- Maas, C. (1989). Het voorkomen van zout grondwater in Nederland. H₂O 22, p.214-219.
- Vries, J.J. de (1980). Inleiding tot de Hydrologie van Nederland. Rodopi, Amsterdam, 127 p.
- Vries, J.J. de (1981). Fresh and salt groundwater in the Dutch coastal area in relation to geomorphological evolution. Geologie en Mijnbouw 60, p. 363-368.
- Vries, J.J. de (1982). Anderhalve Eeuw Hydrologisch Onderzoek in Nederland (1830-1980). Rodopi, Amsterdam, 195 p.

Gesteentewandelingen in en om Hoorn

door Dr. Jan Verhofstad

In de 16e eeuw stak Hoorn, als rijke koopmansstad, Amsterdam naar de kroon. Amsterdam bleek ten slotte sterker: de handel had een veel groter achterland en er was meer kapitaal voorhanden. Toch kan de Westfries



van thans tevreden zijn met wat resteert uit de bloeiperiode. Een overzichtelijk stadsplan en veel goed geconserveerde gevels in oude stijl garanderen al een interessante historische excursie langs Rode Steen, Sint Jan's

Gasthuis en Oosterpoort. Voor de liefhebbers van gesteenten wordt dit aangevuld met een gevarieerd aanbod van natuursteen in monumenten en in de winkelstraten. Een leerzame petrologische wandeling kan gevolgd worden door een bezoek aan de grandioze "expositie" van noordelijke zwerfkeien in de vernieuwde dijkvlooiingen bij Schellinkhout, op 5 km van Hoorn langs de IJsselmeerdijk, richting Enkhuizen. De binnenstad van Hoorn is betrekkelijk klein, waardoor de vele gesteenten op korte afstand met elkaar zijn te vergelijken. Ik aarzel dan ook niet u ietwat zigzaggend door de straten te leiden.

Afb. 1. "Kinderhoofdjes" van kwartsitische zandsteen in rijweg van Rode Steen te Hoorn. Middelste kassei vertoont kriskras-gelaagdheid.