

NOTA-1323

januari 1982

Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding
Wageningen

WERKGROEP NOORD-HOLLAND XXXV

HET VERZILTINGSPROCES IN DE ONDERGROND VAN NOORD-HOLLAND

H. Witt en ing. K.E. Wit

500000 7305

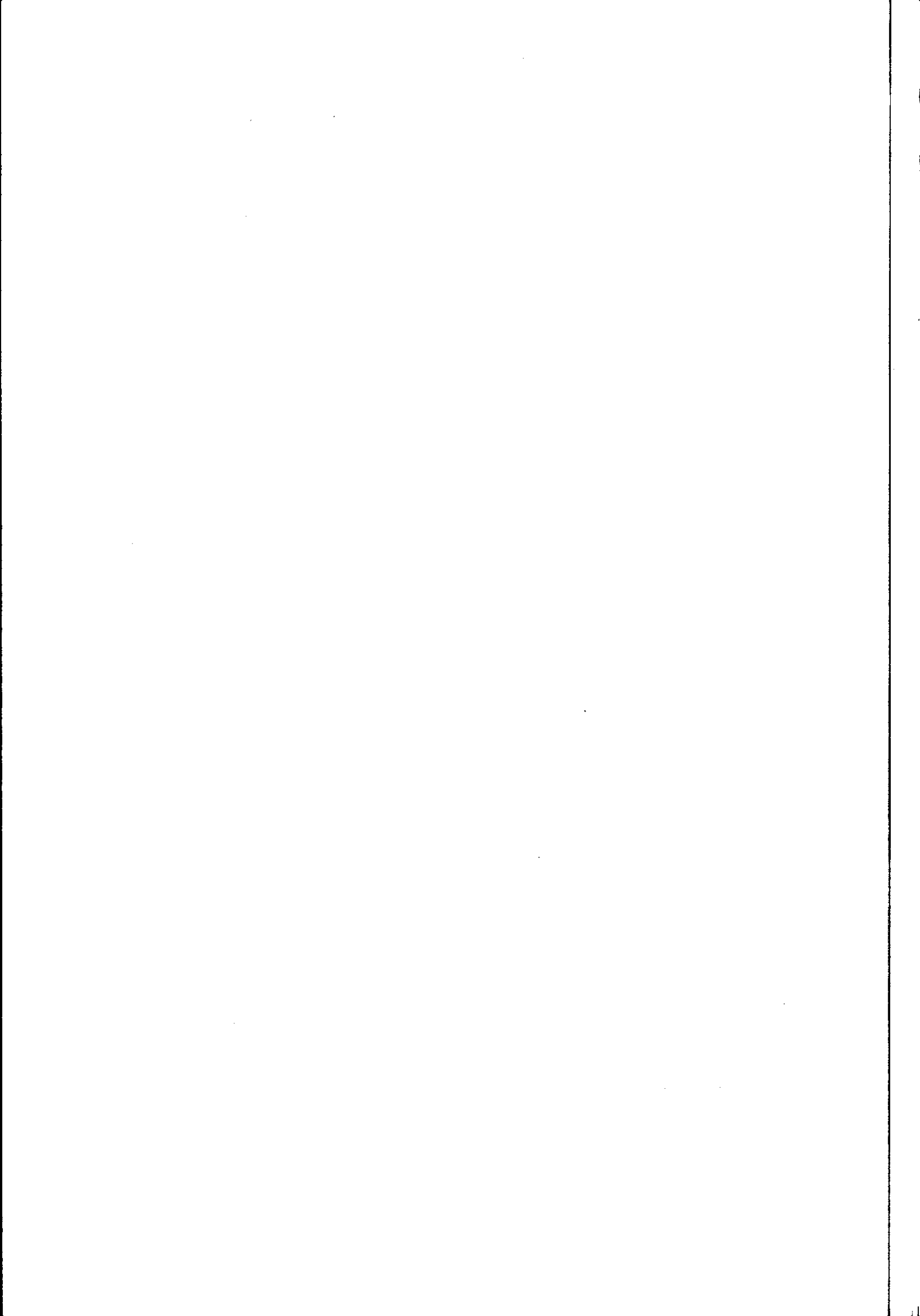
Nota's van het Instituut zijn in principe interne communicatie-
middelen, dus geen officiële publikaties.

Hun inhoud varieert sterk en kan zowel betrekking hebben op een
eenvoudige weergave van cijferreeksen, als op een concluderende
discussie van onderzoeksresultaten. In de meeste gevallen zullen
de conclusies echter van voorlopige aard zijn omdat het onderzoek
nog niet is afgesloten.

Bepaalde nota's komen niet voor verspreiding buiten het Instituut
in aanmerking

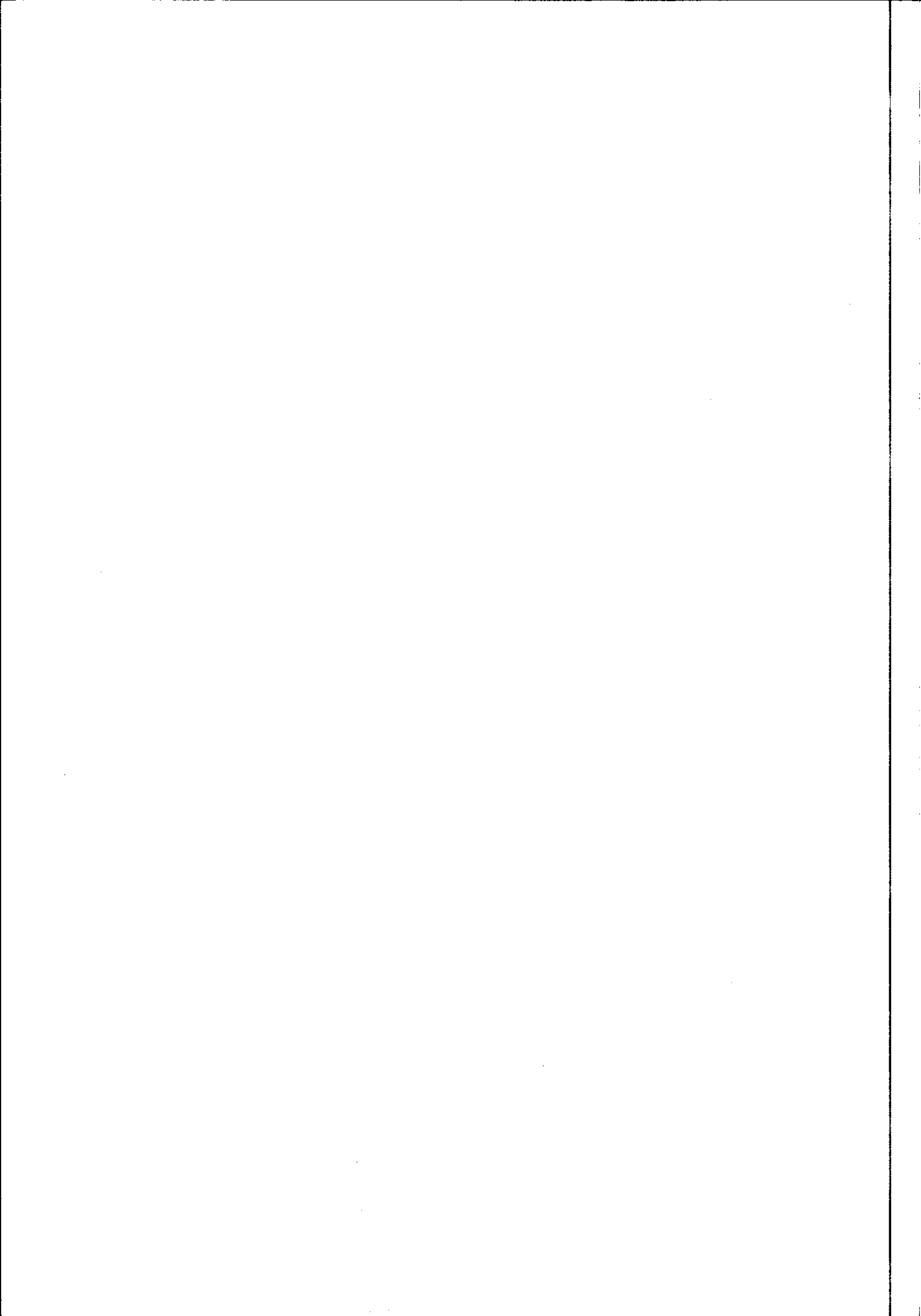
ISBN 156232-02





I N H O U D

	Blz.
1. INLEIDING	1
2. BESCHRIJVING VAN DE VERZILTING	3
3. BESTAANDE THEORIEËN BETREFFENDE DE VERZILTING	10
4. VERZILTING TENGEVOLGE VAN GRONDWATERSTROMING	13
5. RELATIE TUSSEN DE GEOLOGISCHE OPBOUW EN DE VERDELING VAN DE CHLORIDECONCENTRATIES	22
6. HET ZOET WATERVOORKOMEN BIJ HOORN	24
7. SAMENVATTING	30
LITERATUUR	33



1. INLEIDING

In het kader van het Noord-Holland onderzoek heeft de kwaliteit van het grondwater en wel in het bijzonder de verzilting de nodige aandacht gekregen. Het accent kwam hierbij vooral te liggen op een beschrijving van het stadium waarin de verzilting verkeert (WITT, 1980) en de veranderingen die hierin tengevolge van hydrologische processen plaatsvinden (WITT e.a., 1981).

Bij een analyse van de hydrologische processen in de ondergrond is komen vast te staan dat stijghoogteverschillen in horizontale en verticale richting, die verantwoordelijk zijn voor de optredende grondwaterstromingen, gedeeltelijk kunnen worden toegeschreven aan de verdeling van het zoute en zoete grondwater (WIT en WIJNSMA, 1981). Dit houdt in, dat reeds ver voor het ontstaan van de eerste droogmakerijen een grondwaterstroming aanwezig was, geactiveerd door het verschil in dichtheid tussen het aanwezige zoute water buiten het gebied in de ondergrond en het zoete grondwater in de van oorsprong fluvia-tiele afzettingen binnen het gebied. De hier bedoelde zoute grondwaterstroming was landinwaarts gericht; dit in tegenstelling tot de onder invloed van reliëf en klimatologische factoren bestaande zeewaarts gerichte zoete grondwaterstroming. Deze twee grondwaterstromingen en de zich als gevolg hiervan voltrekkende verzilting in de ondergrond zijn in wezen vergelijkbaar met de zoete en zoute stromingen in riviermondingen en de verzilting die als gevolg van deze stromingen in de benedenloop van rivieren kan plaatsvinden door het stroomopwaarts binnendringen van een 'zoute tong' (WIBAUT-ISEBREE MOENS, 1935).

In deze nota zal een poging worden ondernomen om bovengenoemde opvattingen betreffende de verzilting in de ondergrond te onderbouwen met een uiteenzetting van het hierbij betrokken mechanisme in relatie met de geologische opbouw van het gebied.

Voor het geven van een compleet beeld van de processen, die bij de verzilting zijn betrokken, wordt een deel van het gebied van de voormalige Zuiderzee eveneens in de beschouwing betrokken.

Naast de in deze nota besproken bron voor de verzilting zal een overzicht worden gegeven van reeds bestaande theorieën over de verzilting van de ondergrond. Tenslotte wordt in het laatste hoofdstuk de mogelijke herkomst van het zoetwatervoorkomen bij Hoorn besproken.

2. BESCHRIJVING VAN DE VERZILTING

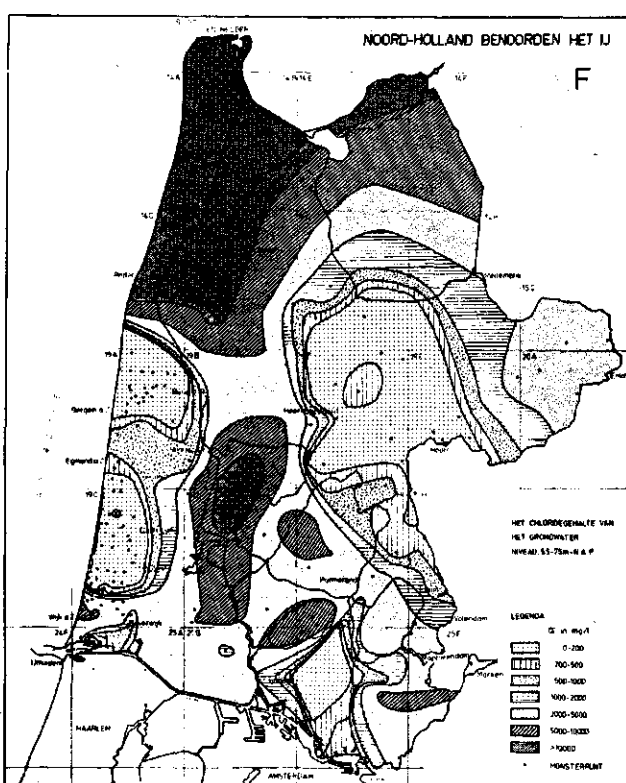
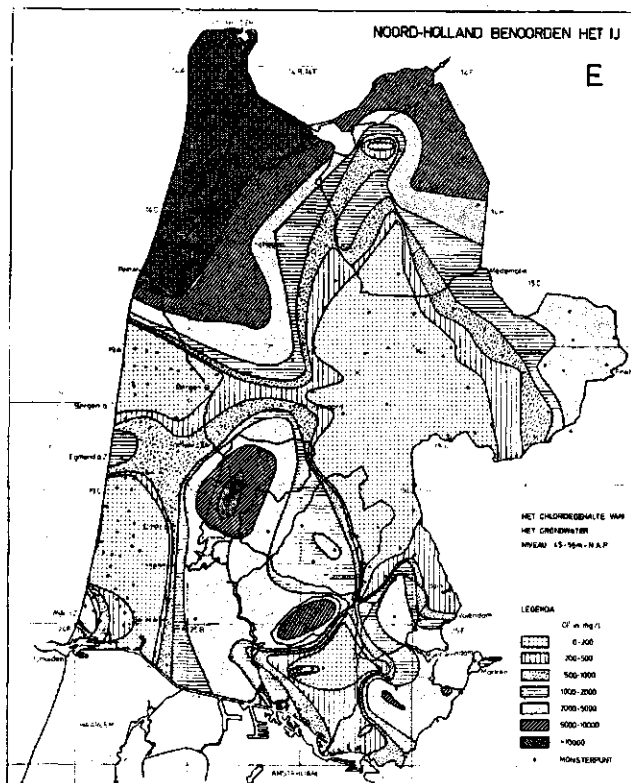
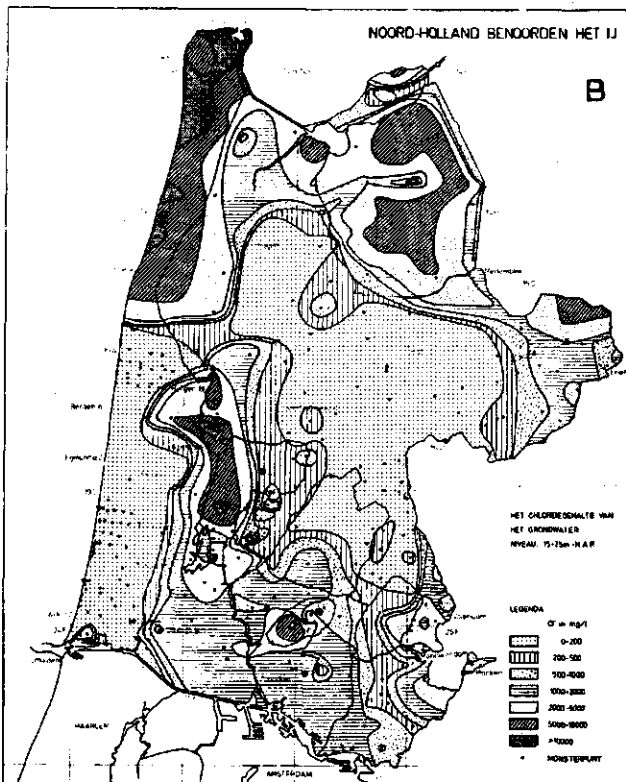
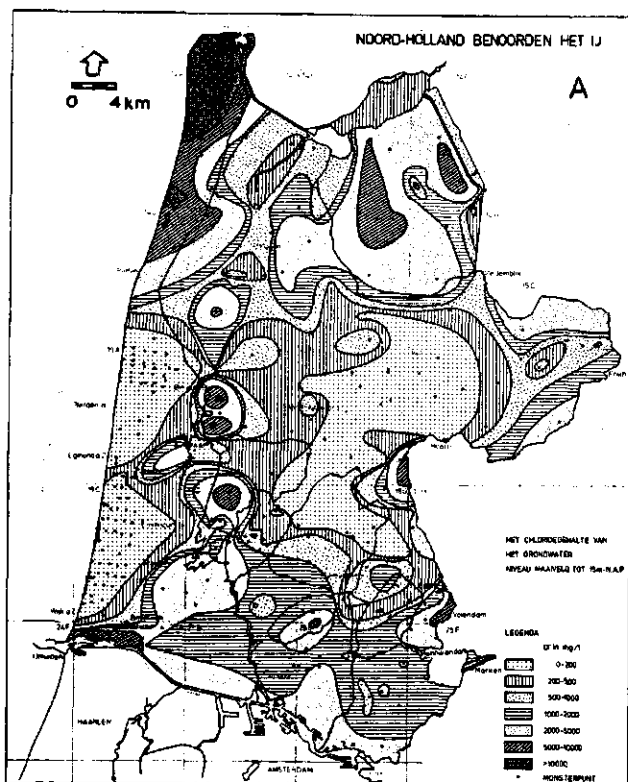
Hoewel grote delen van het onderzochte gebied in meer of mindere mate verzilt zijn, wordt het toch gekenmerkt door de aanwezigheid van twee grote en een kleiner zoetwaterlichaam en een tussen Den Helder en Petten gelegen, van west of noordwest naar zuid of zuidoost, opdringend zoutfront.

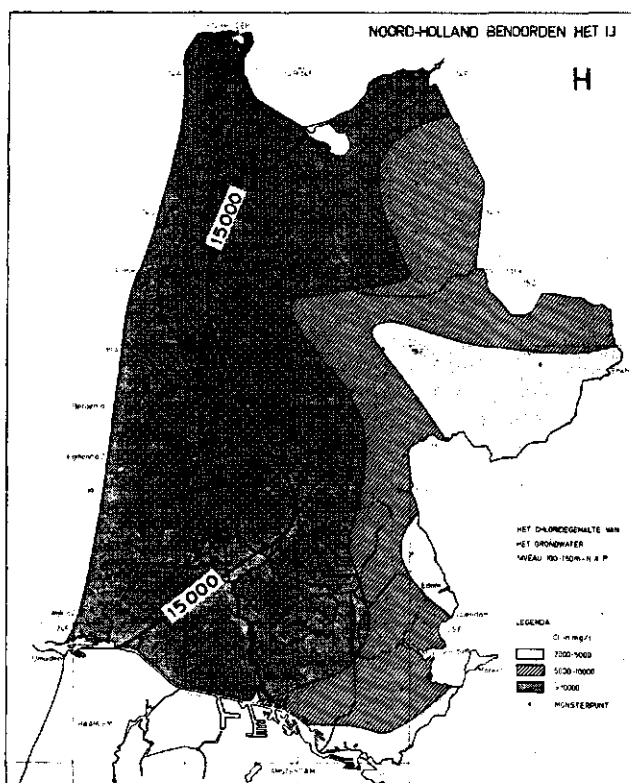
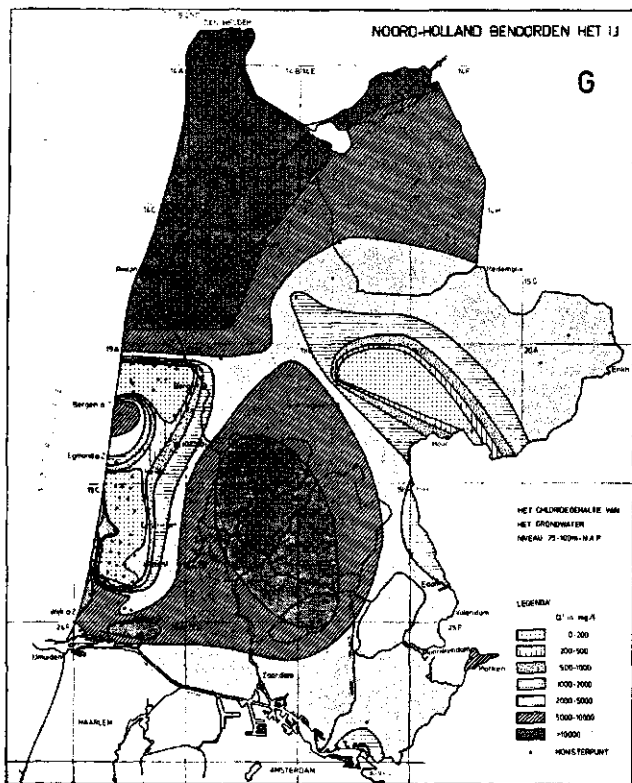
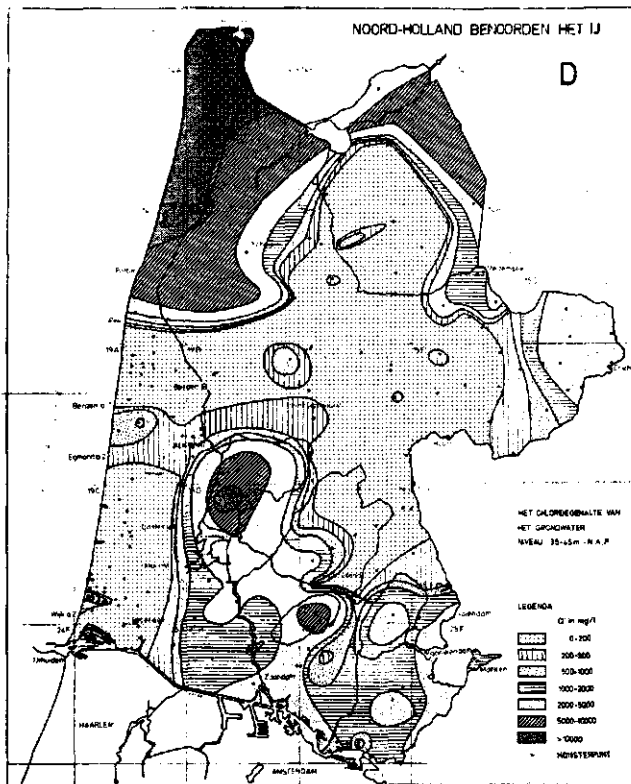
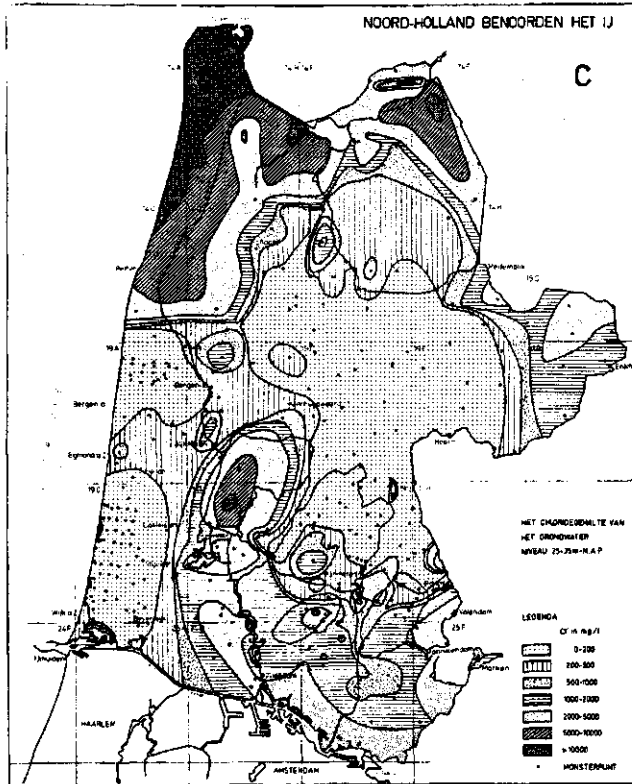
Eén zoet waterlichaam ligt tussen Camperduin en Wijk aan Zee onder de duinen. Het tweede ligt ten noorden, westen en zuidwesten van Hoorn en is grillig van vorm. Uit de fig. 1A tot en met D blijkt dat het vanaf maaiveld naar beneden in omvang toeneemt, en op een niveau van 35-45 m-NAP zijn grootste omvang heeft. Op grotere diepte neemt het weer in omvang af (fig. 1E t/m G). Dieper dan 100 m-NAP komt geen zoet water meer voor (fig. 1H). Het derde en kleinere zoet waterlichaam komt alleen op een diepte tussen 45 en 75 m-NAP voor en ligt ten noorden van Amsterdam en ten oosten van Zaandam (fig. 1E en F).

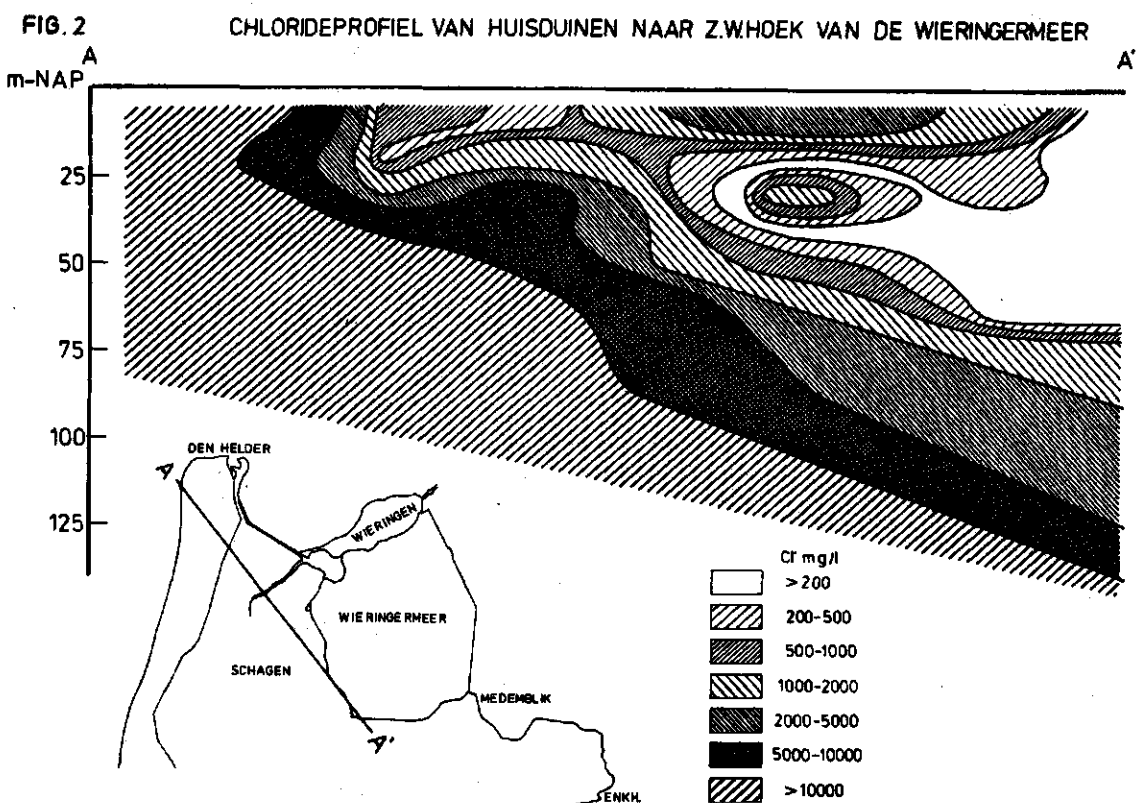
De aanwezigheid van het zoutfront tussen Den Helder en Petten blijkt duidelijk uit de fig. 1A tot en met H. In de bovenste grondlagen is het grondwater in een enkele kilometers brede strook langs de kust zout tot zeer brak. Vanaf ongeveer 25 m-NAP breidt deze zoute strook zich met toenemende diepte steeds verder naar het oosten uit. Fig. 2 geeft een chlorideprofiel waarop dit goed te zien is.

Uit fig. 1H blijkt, dat in het grootste westelijke deel van het onderzochte gebied het grondwater op een diepte tussen 100 en 150 m een chloridegehalte heeft van meer dan $10\ 000\ \text{mg.l}^{-1}$. Het nog op twee plaatsen onder de duinen op deze diepte voorkomende zoete water is in deze figuur om praktische redenen niet weergegeven. In het noorden is er langs de kust een ongeveer 6 km brede strook waarin het chloridegehalte van het grondwater meer dan $15\ 000\ \text{mg.l}^{-1}$ bedraagt. Ter hoogte van de grote droogmakerijen is het gebied met chloridegehalten boven $15\ 000\ \text{mg.l}^{-1}$ veel breder en omvat het grootste deel van de Schermer. Verder naar het zuiden wordt de breedte van dit gebied weer minder. In de duinen bereikt het zoete water op enkele plaatsen een diepte van 130 m-NAP, maar op 140 m-NAP is ook hier het chloridegehalte weer hoger dan $15\ 000\ \text{mg.l}^{-1}$. Het zoetwaterlichaam in de duinen schermt

CHLORIDEGEHALTEN OP 8 NIVEAUS





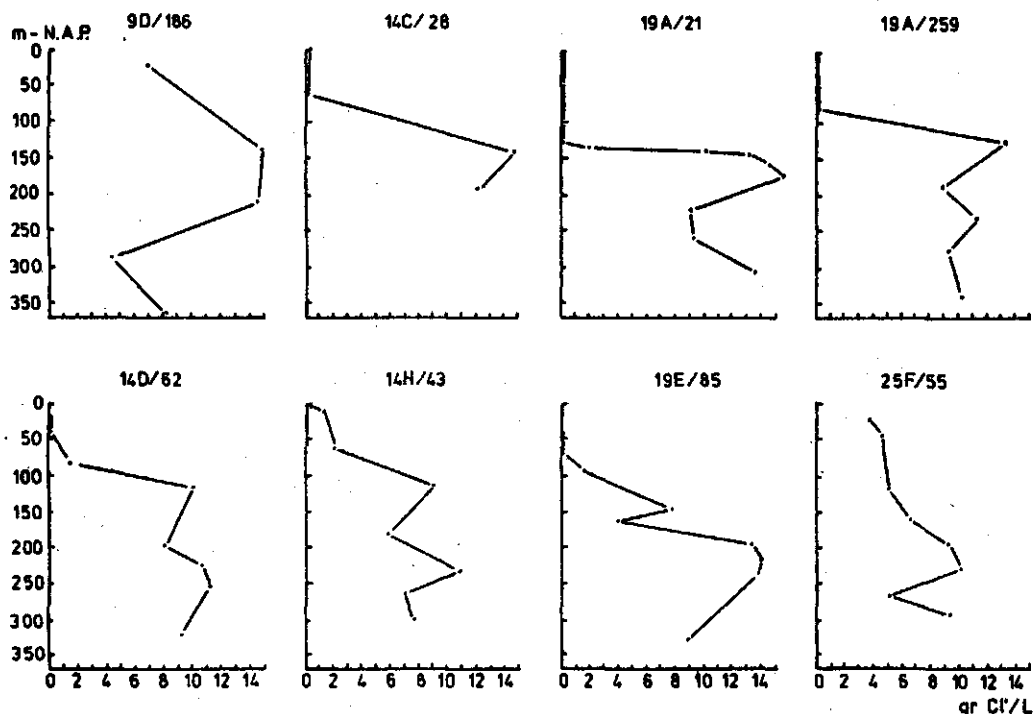


het achter de duinen gelegen gebied tot een diepte van ongeveer 130 m-NAP af tegen verzilting; onder het zoetwaterlichaam is er echter wel een toestroming van zout water in oostelijke richting.

In fig. 3 zijn de chlorideanalyses van de watermonsters uit een achttal diepe boringen grafisch weergegeven. Uit deze grafieken blijkt dat bij de in het westen gelegen boringen 9D-186, 14C-28, 19A-21 en 259 (voor lokatie zie fig. 6) tussen 100 en 100 m-NAP de hoogste chloridecijfers ($13\ 000-16\ 000\ \text{mg.l}^{-1}$) voorkomen. Van 200 tot 300 m-NAP bevat het water slechts $5000-9000\ \text{mg.l}^{-1}$. Beneden 300 m-NAP stijgt het chloridegehalte weer. Bij de boring 14D-62, die in het midden van het gebied ligt, en bij de boringen 14H-43, 19E-85 en 25F-55 (fig. 6), gelegen nabij de IJsselmeerkust zijn de hoogste chloridecijfers op een diepte van 220-250 m-NAP aangetroffen. Behalve bij boring 25F-55 komen onder dit niveau dan weer lagere waarden voor.

De fig. 4 en 5 zijn ontleend aan een nota van de Dienst der Zuiderzeewerken (RIJKSWATERSTAAT, 1976) en tonen het chloridegehalte van het grondwater op een diepte van respectievelijk 0-30 m-NAP en 30-60 m-NAP. De kaarten betreffen een deel van Noord-Holland benoorden

FIG 3 CHLORIDEGRAFIIEKEN VAN 8 DIEPE BORINGEN



het IJ, het grootste deel van het IJsselmeer, het westelijk deel van Oost-Flevoland en geheel Zuid-Flevoland. De isohalinen van deze figuren verschillen op twee punten met die van de fig. 1. Er is een isohaline van 100 mg in plaats van 200 mg, terwijl de isohaline van 10 000 mg ontbreekt.

Op beide figuren is te zien dat het zoet waterlichaam bij Hoorn zich voortzet tot onder het IJsselmeer. Ongeveer onder het midden van het IJsselmeer komt een groot langgerekt gebied met vrij hoge chloridegehalten voor, dat zich van noord naar zuid uitstrekt. Het komt het duidelijkst tot uiting in fig. 5 (niveau 30-60 m-NAP), waar het ook onder het oostelijk deel van Westfriesland ligt en reikt tot in Oost-Flevoland en onder een groot deel van Zuid-Flevoland. Onder Zuid-Flevoland is er een snelle overgang naar zoet water. Zoet water komt eveneens voor onder Friesland en het noorden van de Noordoostpolder. De hoogste chloridegehalten (meer dan 5000 mg.l^{-1}) komen in het noorden van het IJsselmeer voor.

FIG. 4 CHLORIDEGEHALTEN IN DE ONDERGROND VAN HET ISSSELMEER EN NOORD-HOLLAND

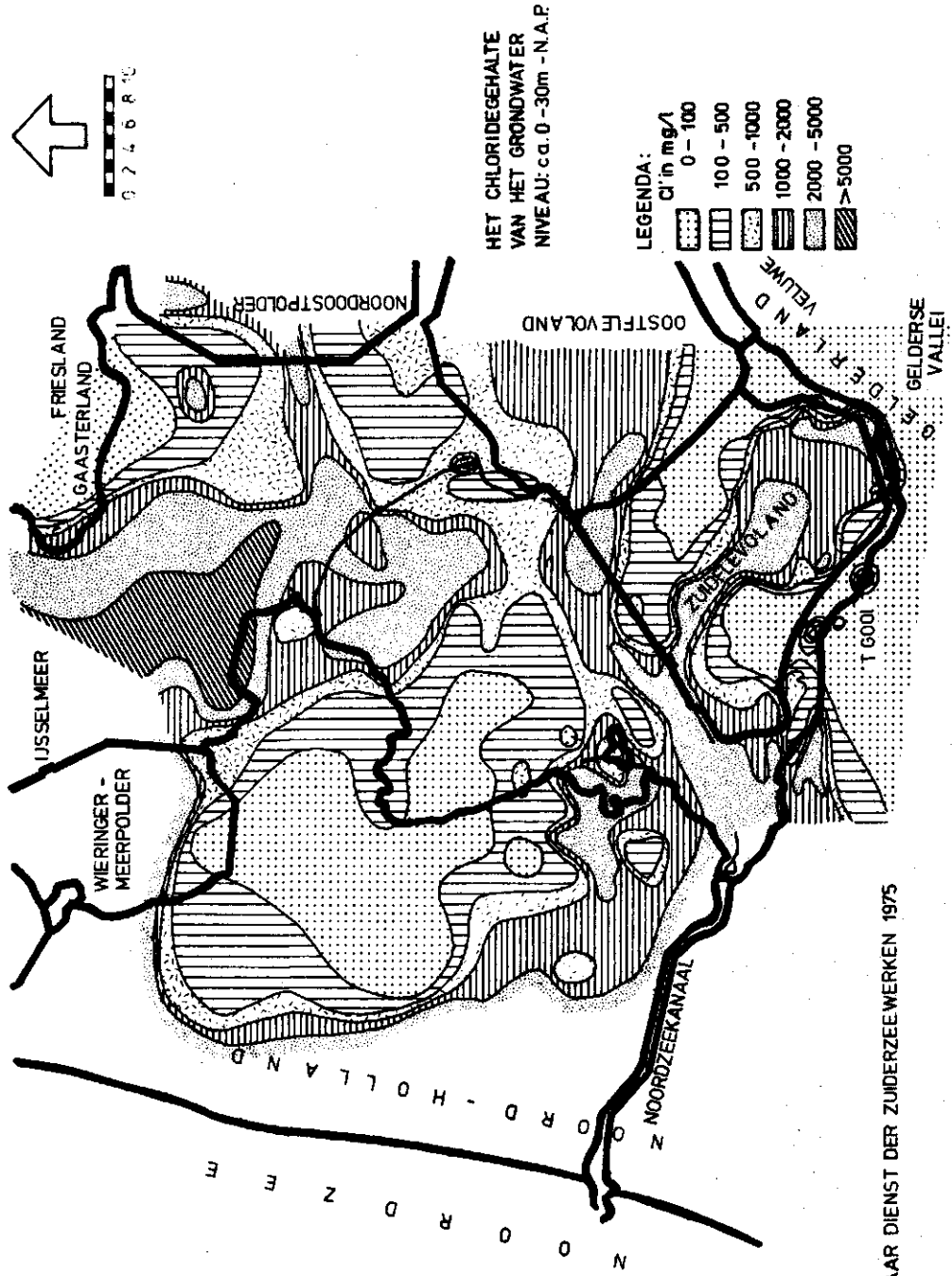
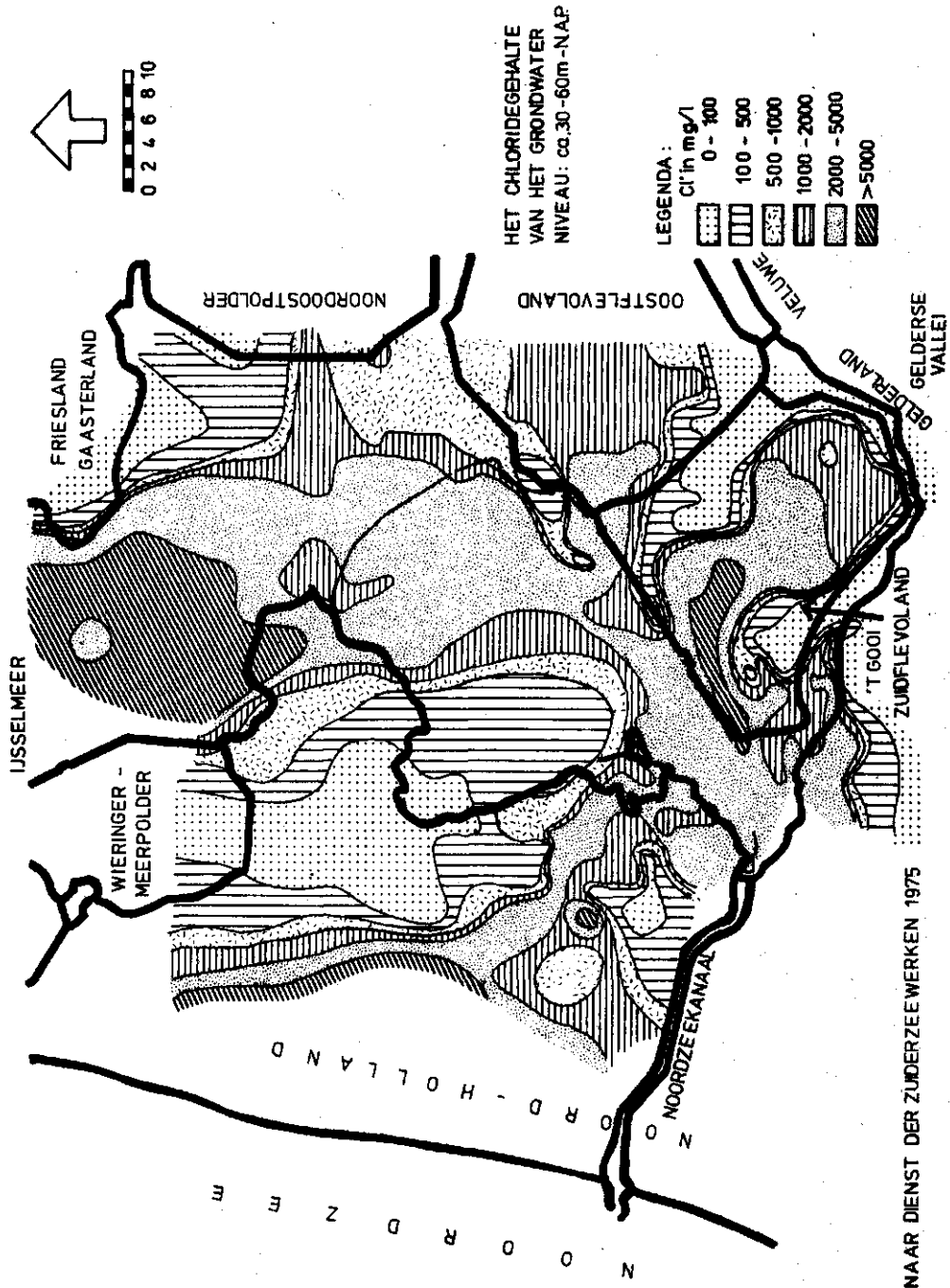


FIG.5 CHLORIDEGEHALTEN IN DE ONDERGROND VAN HET IJSSELMEER EN NOORD-HOLLAND



3. BESTAANDE THEORIEËN BETREFFENDE DE VERZILTING

In hoofdstuk 2 is de mate van verzilting van de ondergrond aangegeven. Ten aanzien van de processen die hiertoe hebben geleid, worden in de literatuur verschillende theorieën genoemd.

Volgens VOLKER (1961) is de verzilting teweeggebracht onder invloed van diffusie; dit verschijnsel omvat verplaatsing van ionen onder invloed van gradiënten in concentraties in stilstaand water. Kenmerkend voor het proces is dat vanaf de mariene afzettingen, van waaruit de verzilting plaats heeft, de concentratie naar boven afneemt.

Door MEINARDI (1973, 1974, 1975) wordt de dispersie als verklaring van de verzilting genoemd. Hieronder wordt een verzilting verstaan onder invloed van een combinatie van diffusie en een grondwaterstroming. De grondwaterstroming die ontstaat tengevolge van het natuurlijke reliëf activeert het proces, doordat de bij de grondwaterstroming behorende stroombanen een grillig verloop hebben. Indien een zoetwaterdeeltje van een stroombaan in aanraking komt met een zout gedeelte en dan weer met een zoet gedeelte in het medium dan treedt hierbij uitwisseling op en levert het oorspronkelijk zoetwaterdeeltje in de loop van zijn stroombaan een bijdrage aan een horizontale en verticale verplaatsing van zout.

Zowel bij diffusie als bij dispersie, betreft het een verplaatsing van zout binnen de grenzen van het vasteland vanuit de mariene afzettingen naar boven in de richting van de van nature aanwezige grondwaterstroming. Kenmerkend is verder een toename van het zoutgehalte met de diepte en in de richting van de grondwaterstroming.

Een andere verklaring voor de verzilting is het infiltreren van zeewater in de ondergrond tijdens transgressies van de zee (JELGERSMA, 1971; GEIRNAERT, 1973). In tegenstelling tot de bovenomschreven diffusie en dispersie-processen neemt hier de totale zoutvoorraad in de grond toe.

Naast bovengenoemde factoren, die van invloed zijn geweest op de verzilting in de ondergrond van het onderzochte gebied, kan de intensieve grondwaterstroming worden genoemd, die is begonnen na het ontstaan van de eerste polders en droogmakerijen (MEINARDI, 1973). Uit de beschrijving van de verzilting (WITT, 1980) blijkt een indringing

van zout grondwater ten tijde van een meer of mindere zoute Zuiderzee op een aantal plaatsen duidelijk aanwezig.

Bij een toetsing van de hierboven genoemde theorieën en de daarbij behorende kenmerken met het in hoofdstuk 2 gegeven beeld van de verzilting zijn enige opmerkingen te plaatsen.

Allereerst moet ten aanzien van de verzilting tengevolge van dispersie vanuit de Formatie van Maassluis (tabel 1) naar de daarboven liggende fluviatiele afzettingen, worden gewezen op het voorkomen van een inversie in de nabijheid van het grensvlak van de mariene en fluviatiele afzettingen. Dit betekent dat een toename van de verzilting met de diepte ter plaatse niet voorkomt omdat hier een laag relatief zoet grondwater aanwezig is. In de formatie van Maassluis wordt met de diepte weer zouter grondwater aangetroffen. Het zoutgehalte van het grondwater in de Formatie van Maassluis, globaal $5000-10\ 000\ \text{mg.l}^{-1}$ ligt echter overwegend op een lager niveau dan dat van het grondwater in het oude gedeelte van de Formatie van Harderwijk. Het bovengenoemde en wel in het bijzonder de relatief zoete zone in het grondwater op de grens van de mariene en fluviatiele afzettingen, maakt de toeschrijving van de verzilting van de fluviatiele afzettingen alleen aan dispersie, twijfelachtig. De aanwezigheid van een strook met brak grondwater onder het midden van het IJsselmeer is ook in strijd met het dispersie-proces. Tengevolge van dit proces moet er namelijk vanaf de Noordzeekust een afname van de verzilting in oostelijke richting zijn.

De verzilting tengevolge van de transgressies van de zee is wellicht plaatselijk van betekenis geweest. Uit het door WITT (1980) verricht onderzoek blijkt dat in de ondergrond tot een diepte van 25m-NAP plaatselijk gebieden met brak water worden aangetroffen, die door praktisch zoet water worden geïsoleerd van het omringende aaneengesloten zoute grondwater.

Uit het voorgaande moge duidelijk zijn geworden dat de verzilting van de ondergrond van Noord-Holland niet kan worden toegeschreven aan slechts één verschijnsel, maar dat, afhankelijk van de hydrologische situatie tijdens en na het ontstaan van het gebied, meer factoren hieraan hebben bijgedragen. De verzilting tengevolge van een grondwaterstroming die ontstaat door een verschil in dichtheid van het grondwater, zal als een nieuwe factor, aan de reeds genoemde moeten worden toegevoegd.

Tabel 1. Stratigrafische tabel (RGD, 1975)

Chronostratigrafie			Afzettingen in verband met landijs		Afzettingen van lokale herkomst		Afzettingen van grote rivieren		Afzettingen in zee en bij de kust		
			N	Z	N	Z	N	Z	N	Z	
KWARTAIR	HOLOCEEN				Formatie van Kootwijk E Formatie van Singraven B Formatie van Griendtsveen V	Betuwe Formatie R + M		Westland Formatie			
		Boven	Weichselien*			Formatie van Twente E + V + P + B	Formatie van Kreftenheya R + M				
	Eemien				Formatie van Asten V			Eem Formatie			
	MIDDEN	Saalien*	F. v. Drente								
		Holsteinien			Formatie van Eindhoven E + P B + V		Formatie van Urk R	Formatie van Veghel M	***		
		Elsterien*	F. v. Peelo						***		
		'Cromerien complex**						Formatie van Sterksel R + M			
		Menapien*			Form. van Kedichem (ten dele) B + P + V		Formatie van Enschede O	Formatie van Kedichem R + M			
	ONDER	Waalien					Formatie van Harderwijk O				
		Eburonien*						Formatie van Tegelen R + M			
		Tiglien								Formatie van Maassluis	
		Praetiglien*									
	TERTIAIR	PLIOCEEN	Boven (Reuverien)					Form. van Scheemda O	Kiezeloöliet Form. R + M		Formatie van Oosterhout
			Onder (Brunssumien)								
MIOCEEN		Boven									
		Midden					Form. van Heksenberg			Formatie van Breda (ten dele)	
		Onder									

E = eolische afzettingen
 P = periglaciale afzettingen
 B = beekafzettingen
 V = veen

R = Rijn
 M = Maas
 O = oostelijke noordduitse rivieren en voortlopers

*koude tijd
 **complexe eenheid bestaande uit tenminste 4 warme en 3 koude tijden
 ***nog onbenoemd, voorlopig bij Formatie van Urk

4. VERZILTING TENGEVOLGE VAN GRONDWATERSTROMING

Onder verzilting tengevolge van grondwaterstroming wordt primair een verdringing van zoet door zout grondwater verstaan. Secundair kan verzilting tengevolge van dispersie plaatsvinden. Beperken we ons tot het primaire aspect dan zal overwegend verdringing van zoet door zout grondwater plaatshebben vanuit de richting van de bron, namelijk de Noordzee. Daarnaast kan echter tengevolge van ingrepen in het oppervlaktewaterregiem ondergrondse aanvoer van zout water uit oostelijke richting voorkomen.

In het voorgaande is reeds de aandacht gevestigd op het ontstaan van een grondwaterstroming als gevolg van de diepe polders en de droogmakerijen. Deze grondwaterstroming heeft geleid tot het binnendringen van zout water vanuit de Noordzee en de voormalige Zuiderzee. Na de voltooiing van de Afsluitdijk en de verzoeting van het IJsselmeer wordt de verzilting vanuit oostelijke richting mede bepaald door de mate waarin zout grondwater wordt verdrongen door zoet grondwater.

Uit een analyse van de hydrologische processen in de ondergrond is gebleken dat de grondwaterstromingen ontstaan door twee factoren:

- . Het verschil in stijghoogte van het oppervlaktewater binnen het gebied en van die daarbuiten. Overwegend heeft de stijghoogte van het oppervlaktewater betrekking op polderpeilen en het niveau van de Noordzee en het IJsselmeer.
- . Verschillen in dichtheid van het grondwater, toe te schrijven aan het zoute grondwater ter plaatse van de Noordzee en het oorspronkelijk zoete grondwater in het onderzoeksgebied.

Behalve beide in het gehele gebied werkzame factoren kunnen de peilverlagingen tengevolge van grondwateronttrekkingen plaatselijk een belangrijke rol spelen.

Ter illustratie van het bovenstaande zijn in een profiel B-B¹ van de Noordzee naar het IJsselmeer (fig. 6 en 7) zowel stijghoogteverschillen in horizontale als verticale richting aangegeven, alsmede de verschillen tussen het polderpeil in een deel van de Wieringermeer nabij Middenmeer en dat van het aangrenzende open water van de Noordzee en het IJsselmeer. De stijghoogteverschillen in horizontale

richting in de 1e tot en met 3e watervoerende laag zijn afgeleid uit isohypsenkaarten en de verticale stijghoogteverschillen uit stijghoogteverschillenkaarten tussen de onderscheiden watervoerende lagen (WIJNSMA e.a., 1981). De verticale stijghoogteverschillen ter plaatse van de Noordzee zijn berekend uit de isohypsenkaarten en een dichtheid van $1,025 \text{ kg.m}^3$ voor het grondwater. Voor de berekening van die bij het IJsselmeer is onder meer gebruik gemaakt van het verloop van de dichtheid in de gecorrigeerde zoetwaterstijghoogte in boring 14H/43 (fig. 6).

Uit fig. 7 volgt een peilverschil tussen het oppervlaktewater van de Wieringermeer enerzijds en dat van de Noordzee en het IJsselmeer anderzijds van respectievelijk 5,20 en 4,90 m. In geval het grondwater dezelfde dichtheid heeft, zou - onafhankelijk van de transportweg door de onderscheiden watervoerende lagen - de som van de verticale en horizontale stijghoogteverschillen gelijk moeten zijn aan bovengenoemde bedragen, waarbij de transportweg vanuit de Noordzee en die vanuit het IJsselmeer afzonderlijk in ogenschouw worden genomen. Uit fig. 7 blijkt echter dat de som van de verticale en de horizontale stijghoogteverschillen van de 3e watervoerende laag groter is dan die van de 1e watervoerende laag, in geval een stroombaan wordt gevolgd vanuit de Noordzee. Bij een identieke situatie bij een stroombaan vanuit het IJsselmeer blijkt daarentegen het omgekeerde. In de tabellen 2 en 3 zijn de stijghoogteverschillen weergegeven.

LOKATIEKAART

FIG. 6

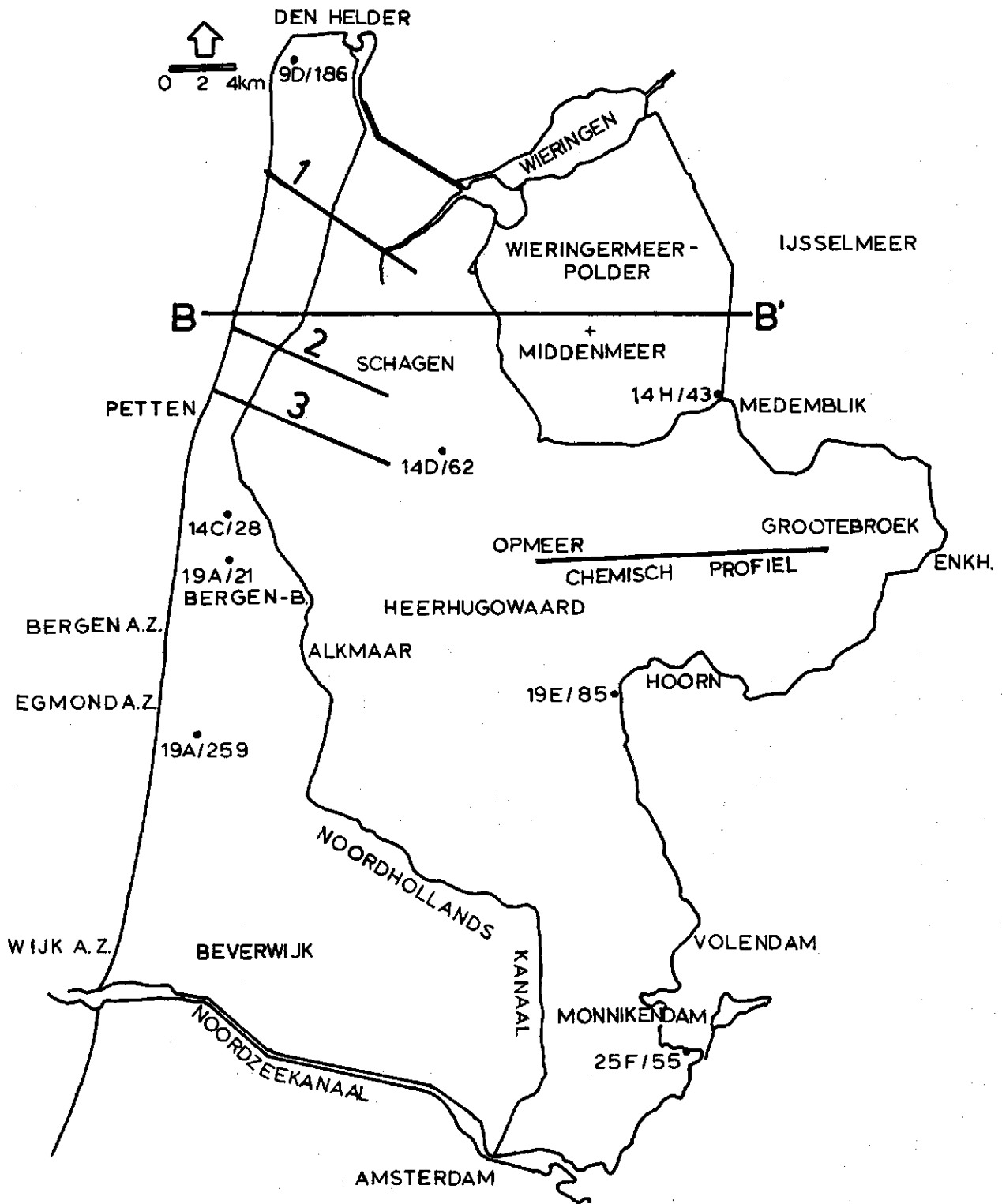
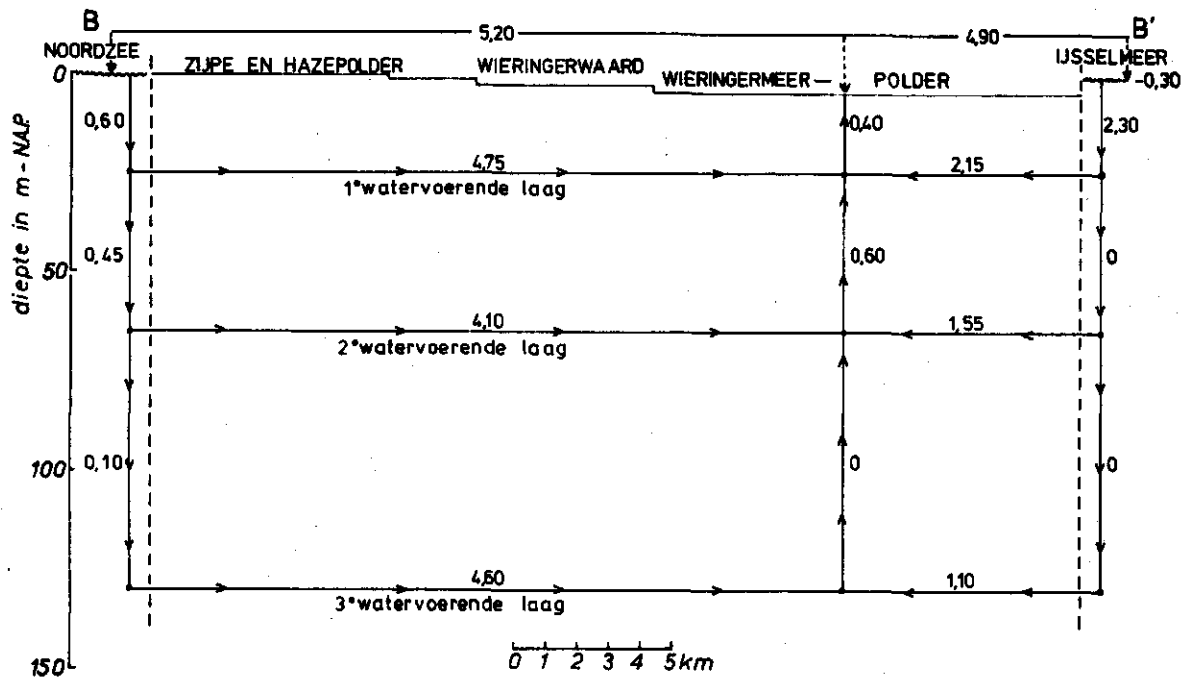


FIG. 7 STIJGHOOGTEVERSCHILLEN (HORIZONTAAL EN VERTICAAL) IN M



Tabel 2. Grondwaterstroming van de Noordzee naar de Wieringermeer

	Noordzee (infiltratie) $\Delta h(\text{vert})$ in m	$\Delta h(\text{hor})$ in m	Wieringermeer (kwel) $\Delta h(\text{vert})$ in m	$[\Delta h(\text{vert}) + \Delta h(\text{hor})]$ in m	Peilversch. oppervl. water in m	Afwijking (m)
1e w.l.	0,60	4,75	0,40	5,75	5,20	0,55
2e w.l.	0,45	4,10	0,60	6,15	5,20	0,95
3e w.l.	0,10	4,60	0	6,75	5,20	1,55

Tabel 3. Grondwaterstroming van het IJsselmeer naar de Wieringermeer

	IJsselmeer (infiltratie) $\Delta h(\text{vert})$ in m	$\Delta h(\text{hor})$ in m	Wieringermeer (kwel) $\Delta h(\text{vert})$ in m	$[\Delta h(\text{vert}) + \Delta h(\text{hor})]$ in m	Peilversch. oppervl. water in m	Afwijking (m)
1e w.l.	2,30	2,15	0,40	4,85	4,90	-0,05
2e w.l.	0	1,55	0,60	4,85	4,90	-0,05
3e w.l.	0	1,10	0	4,40	4,90	-0,50

Uit de tabellen blijkt dat bij de grondwaterstroming vanuit de Noordzee naar de Wieringermeer tengevolge van de verschillen in de dichtheid van het grondwater een extra stijghoogteverschil bestaat, dat van 0,55 m voor de 1e watervoerende laag oploopt tot 1,55 m voor de 3e watervoerende laag. Voor de grondwaterstroming van het IJsselmeer naar de Wieringermeer is de afwijking voor de 1e en 2e watervoerende laag gering; voor de 3e watervoerende laag wordt geen extra stijghoogteverschil maar een negatieve waarde gevonden. Dit laatste is in overeenstemming met het uitgangspunt dat het extra stijghoogteverschil positief werkt in de richting van het voortschrijden van de verzilting (fig. 7) en negatief in tegenovergestelde richting.

Globaal kan worden gesteld dat de grondwaterstroming van de Noordzee naar de Wieringermeer in de 1e tot en met de 3e watervoerende laag door de verschillen in de dichtheid van het grondwater wordt geactiveerd met een bijdrage van respectievelijk 10, 15 en 30%. Bij de grondwaterstroming vanuit het IJsselmeer is voor de 3e watervoerende laag een negatieve bijdrage van 10% geconstateerd.

In de voorgaande beschouwingen is de invloed van de polders, gelegen tussen de Wieringermeer en de Noordzee, verwaarloosd op grond van het isohypsenpatroon voor de onderscheiden watervoerende lagen (WIJNSMA e.a., 1981).

Nu een splitsing in de grondwaterstroming is doorgevoerd naar de onderscheiden mechanismen, kan samenhangend daarmee een berekening worden opgezet met betrekking tot de voortschrijding van de verzilting.

De stroomsnelheid v_p in de poriën is te berekenen met de volgende vergelijking:

$$v_p = -3k \frac{\Delta h}{\Delta x} \quad (1)$$

waarin: v_p = stroomsnelheid in de poriën ($m \cdot d^{-1}$)

$\frac{\Delta h}{\Delta x}$ = stijghoogte gradiënt

Δh = horizontaal stijghoogteverschil over de afstand Δx (m)

Δx = de afstand met als horizontaal stijghoogteverschil Δh (m)

k = doorlaatfactor ($m \cdot d^{-1}$)

De factor 3 is ontleend aan de aanname dat het medium voor 33% is opgebouwd uit een vloeibare fase en voor 67% uit een vaste fase.

Voor de 1e en 2e watervoerende laag volgt uit fig. 7 als gemiddelde voor $\frac{\Delta h}{\Delta x}$ een waarde -2×10^{-4} . Over drie andere raaien, globaal gesitueerd Anna Paulownapolder (1), onder Schagen (2) en de noordzijde van het Geestmerambacht (3) (fig. 6), zijn de grondwatergradiënten in het eerste en tweede watervoerende pakket bepaald, naast de voor de betreffende lagen geldende kD-waarden (POMPER, 1979).

Tabel 4. Gradiënten in de onderscheiden lagen en de kD-waarden van het totale pakket

Raai	Gradiënt		kD(m ² /dag)	
	1e w.l.	2e w.l.	1e w.l.	2e w.l.
1	-0,0003	-0,0002	750	2000
2	-0,00017	-0,00019	350	2500
3	-0,00011	-0,00015	350	3000
Gemidd.	-0,00019	-0,00018	483	2500

De waarde van $-1,9 \times 10^{-4}$ uit tabel 4 sluit aan bij de reeds genoemde waarde van $-2,0 \times 10^{-4}$ uit fig. 7.

De kD-waarde voor de 1e en 2e watervoerende laag bedraagt gemiddeld rond $3000 \text{ m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$. De onderkant van de 2e watervoerende laag ligt op ongeveer 130 m-NAP. Bij een dikte van 20 m voor het afdekkende pakket heeft de kD-waarde betrekking op een laag van 110 m, hetgeen leidt tot een gemiddelde k-factor van $27 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$. Voor de 3e watervoerende laag is een gemiddelde factor vastgesteld van $50 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$, de gradiënt van het grondwater is in dezelfde grootte-orde als die van de 1e en 2e watervoerende laag, namelijk -2×10^{-4} .

Substitutie van de bekende waarden in (1) geeft als resultaat:

- voor de 1e en 2e watervoerende laag

$$v_p = 3 \times 27 \times 2 \times 10^{-4} = 0,016 \text{ m.d}^{-1}$$

- voor de 3e watervoerende laag

$$v_p = 3 \times 50 \times 2 \times 10^{-4} = 0,03 \text{ m.d}^{-1}$$

Per jaar is de horizontale verplaatsing van een denkbeeldig verticale front in de 1e en 2e watervoerende laag gemiddeld 5,8 m en in de 3e watervoerende laag 11 m. Volgens reeds genoemde procentuele bijdragen is hiervan voor de 1e en 2e watervoerende laag gemiddeld 0,75 m en voor de 3e watervoerende laag 3,3 m per jaar toe te schrijven aan de dichtheidsverschillen in het grondwater. Een vrijwel gelijk bedrag voor de 3e watervoerende laag wordt ook gevonden door het effect van de grondwaterstroming vanuit het IJsselmeer naar de Wieringermeer uit te werken (zie tabel 3). We vinden dan

$$v_p^1 = 3 \times 50 \times 6,25 \times 10^{-5} \times 365 = 3,4 \text{ m.j}^{-1}$$

Uit de in het voorgaande uitgevoerde berekeningen is duidelijk gemaakt dat vanuit de Noordzee in oostelijke richting een voortschrijding van de verzilting plaats heeft tengevolge van dichtheidsverschillen, te weten:

$$\approx 0,75 \text{ m.j}^{-1} \text{ voor de 1e watervoerende laag en 2e watervoerende laag}$$

$$\approx 3,3 \text{ m.j}^{-1} \text{ voor de 3e watervoerende laag}$$

Het is niet uitgesloten dat onder in de 3e watervoerende laag hogere waarden kunnen voorkomen. Daarnaast dient te worden bedacht dat elders in het onderzoeksgebied andere waarden kunnen worden aangetroffen.

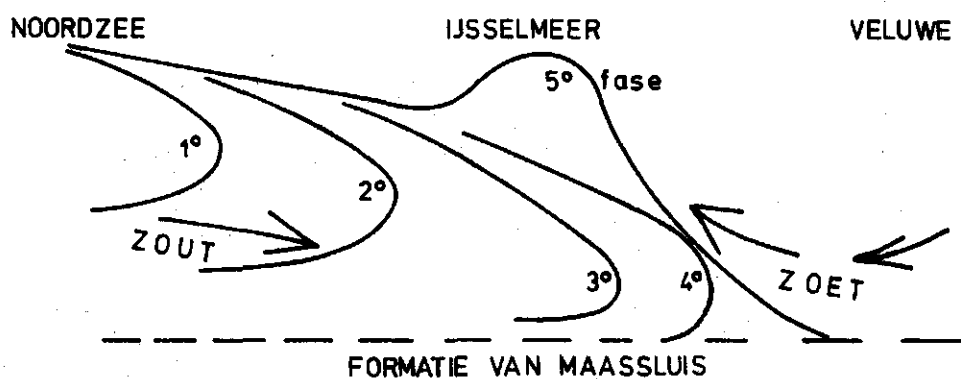
Een vraag die nog beantwoord dient te worden, is of de berekende waarden ook golden voor de situatie dat van inpolderingen en droogmakerijen nog geen sprake was. Veranderingen in het oppervlaktewaterregiem kunnen namelijk hebben doorgewerkt in een wijziging van de c-waarde van het afdekkend pakket; bijvoorbeeld sloten of kanalen hebben een gedeelte van de c-waarde van het afdekkende pakket geëlimineerd.

Het gedeelte van de Wieringermeer dat in fig. 7 werd behandeld heeft een c-waarde van 2500-5000 dagen. Gemiddeld is in het gehele onderzochte gebied de c-waarde een factor 2 à 3 hoger. Wordt dit gegeven verdisconteerd in de verticale en horizontale stromingsweerstand dan neemt de voortschrijding van een verticaal front af met 10 tot 20%.

Een voortschrijding van de verzilting van 2 à 3 m.j⁻¹ tengevolge van dichtheidsverschillen in de periode voorafgaande aan de eerste droogmakerijen lijkt niet onmogelijk. Dit houdt in dat gedurende het Holoceen de verzilting in oostelijke richting enkele tientallen kilometers kan zijn opgedrongen.

De in oostelijke richting plaatsvindende verzilting is tot stilstand gekomen onder het IJsselmeer door de van nature aanwezige grondwaterstroming van de hoger gelegen gronden in het oosten (het Veluwe-massief en het Gooi), en wel daar, waar de drukhoogte in het zoutfront in evenwicht is met de drukhoogte in het van het oosten afstromende zoete grondwater. De 'botsing' van deze twee grondwaterstromingen heeft geleid tot een opstuwning van de zouttong (fig. 8). Deze opstuwning kan wellicht grotendeels worden toegeschreven aan dispersie en manifesteert zich in de ondergrond van het IJsselmeer als een van noord naar zuid verlopend gebied met vrij hoge chloridegehalten (fig. 4 en 5). In beide figuren is te zien dat vanuit het Gooi en de Veluwe afstromend zoet water het vanuit het westen verder opdringen van het zoute water heeft verhinderd. Vanuit de Gelderse Vallei is deze afstroming van zoet water veel geringer. Het gevolg is dan ook geweest, dat tegenover de Gelderse Vallei in Zuid-Flevoland het zoute water verder naar het oosten heeft kunnen uitstromen. In Friesland heeft het naar het zuidwesten afstromende zoete water van het hooggelegen Gaasterland eenzelfde invloed als dat van het Gooi en de Veluwe.

FIG. 8
VERSCHILLENDE FASEN IN DE VOORTSCHRIFDING VAN DE
VERZILTING ONDER NOORD-HOLLAND EN HET IJSSELMEER



5. RELATIE TUSSEN DE GEOLOGISCHE OPBOUW EN DE VERDELING VAN DE CHLORIDECONCENTRATIES

Om tot een meer logische verklaring van de totstandkoming van het huidige chloridepatroon in de ondergrond van het onderzoeksgebied te komen, is het noodzakelijk in het kort de geologische opbouw te behandelen.

Op de mariene en dus in een zout milieu afgezette Formatie van Maassluis (tabel 1) werden tijdens het Onder- en Midden-Pleistoceen fluviatiele afzettingen gevormd, dus in een zoet milieu. Volgens de huidige inzichten heeft er tijdens deze lange periode in dit gebied geen transgressie van de Noordzee plaatsgevonden, waardoor het zoete water in deze afzettingen zich kon handhaven.

Tijdens de vorming van deze fluviatiele afzettingen is mogelijk door infiltratie van rivier- en regenwater en tengevolge van diffusie en dispersie de verzilting van de bovenkant van de Formatie van Maassluis afgenomen. Tijdens de koude fasen van het Pleistoceen was het zeeniveau waarschijnlijk lager dan de toenmalige hoogteligging van de Formatie van Maassluis, waardoor deze infiltratie goed mogelijk werd. Dit zou een verklaring kunnen zijn voor de huidige chloridegehalten ($5000-10\ 000\ \text{mg.l}^{-1}$) in de formatie van Maassluis, die lager zijn dan die van zeewater (ca. $17\ 000\ \text{mg.l}^{-1}$).

Tegen het einde van het Saalien was een Rijntak ontstaan, die vanuit het oosten over Westfriesland via Bergen naar de Noordzee liep. In het begin van het Boven-Pleistoceen (Eemien) steeg het zeeniveau. In deze tijd is waarschijnlijk de horizontale verdringing van het fluviatiele zoete grondwater begonnen. Daar het niveau van de Noordzee eerst nog laag was als gevolg van de ijstijd, heeft dit proces ver ten westen van de huidige kustlijn in de onderste fluviatiele afzettingen een aanvang genomen. De grofste afzettingen en dus de grootste doorlatendheden komen voor in het jonge deel van de Formatie van Harderwijk en de hierboven gelegen Formatie van Enschede. De onderkant van dit grove pakket ligt op ongeveer 180 à 200 m-NAP en de bovenkant op 80 à 100 m-NAP (BREEUWER en JELGERSMA, 1979; POMPER, 1979). Het is aannemelijk dat het zoutfront in dit grove pakket het verst naar het oosten is kunnen opdringen. In de figuren 1H, 2 en 3 is te zien dat dit overeenkomt met de huidige toestand.

Bovengenoemde Rijntak vormde een diep dal waarin lokaal diepe erosie plaats vond (BREEUWER en JELGERSMA, 1979). Voordat dit dal weer werd opgevuld (Formatie van Kreftenheye I) heeft het een sterk drainerende werking op de wijde omtrek gehad. Het van fluviatiele oorsprong en dus zoete water dat in het genoemde grove pakket door het opdringende zoutfront verdrongen werd, kon op veel plaatsen niet vrij naar de oppervlakte wegstromen. Hier was in de voorafgaande ijstijd (Saalien) een afdekkend pakket van keileem (Formatie van Drente) gevormd, waardoor afvoer naar de oppervlakte werd gestagneerd. Veel zoet water stroomde daardoor ondergronds naar de Rijntak en werd zo afgevoerd. Voor dit proces voltooid was, vulde, onder invloed van het stijgende zeewater, het dal weer op, waarop de drainerende werking minder groot werd.

In de hierop volgende fase van het Eemien overspoelde de zee het land. Het in deze periode gevormde sediment, onder andere bestaande uit kleiïge en zandige afzettingen, werd in een zout milieu afgezet. Later trok de zee zich terug onder invloed van de naderende Weichsel-IJstijd en stroomde de Rijntak, nu over een iets zuidelijker tracé, weer over het onderzoeksgebied. De in de vorige fase gevormde Eemklei werd hierbij voor een groot deel opgeruimd en een dun fluviatiel zandig pakket (Formatie van Kreftenheye II) werd gesedimenteerd.

Tijdens deze laatste ijstijd daalde de zeespiegel zover, dat de verzilting in de ondergrond stagneerde. Aan de oppervlakte werden voornamelijk afzettingen van lokale herkomst gevormd, waarbij de invloed op het grondwater gering zal zijn geweest.

In het Holoceen steeg het zeeniveau en werden afwisselend in zoet en zout milieu afzettingen gevormd. De verzilting van de ondergrond door het vanuit het westen opdringende zoutfront kon nu weer voortgang vinden en dit proces gaat tot op de huidige dag door.

De in het Holoceen gevormde afzettingen bestaan uit het basisveen waarboven fijne zandlagen met kleilagen zijn afgezet. Deze zijn weer afgedekt met klei- en veenlagen. De holocene afzettingen zijn matig tot slecht doorlatend en vormen het afdekkend pakket.

6. HET ZOETWATERVOORKOMEN BIJ HOORN

Twee verklaringen voor de aanwezigheid van het zoetwaterlichaam bij Hoorn zijn mogelijk:

1. door infiltratie van regenwater, op dezelfde manier als in de duinen;
2. het zoete water is een restant van het rivierwater uit het Oud- en Midden-Pleistoceen en het begin van het Jonge-Pleistoceen (de periode van Kreftenheye I).

Daar voor de eerste verklaring de omstandigheden zoals deze in de duinen bestaan, niet aanwezig zijn, lijkt deze ontstaanswijze niet waarschijnlijk. Ook de vorm van het zoetwaterlichaam tussen 15 en 25 m-NAP met een uitloper naar Schagen (fig. 1B) en de verbreiding ver naar het noorden en het zuiden tussen 35 en 45 m-NAP (fig. 1D) zijn in strijd met deze verklaring.

Er van uitgaande dat de tweede verklaring de juiste is, zal getracht worden deze te onderbouwen.

Zoals in het voorgaande hoofdstuk is aangetoond, bevatte een deel van de ondergrond oorspronkelijk zoet water. De ondergrens van dit zoete water werd gevormd door de bovenkant van de Formatie van Maassluis. De bovengrens was de onderkant van de Eemformatie. Dit zoete water werd aan onder- en bovenzijde begrensd door brak water en werd door de vanuit het westen op een diepte van 100-200 m-NAP opschuivende zouttong verdrongen en voor een deel door de drainerende werking van de Rijntak afgevoerd.

Deze afvoer werd veel geringer - respectievelijk eindigde door het opvullen van het Rijndal en de transgressie van de Eemzee. In het noorden van het onderzoeksgebied was het zoete water toen grotendeels verdreven. Ter hoogte van de Rijntak en in het zuiden was het zoutfront waarschijnlijk nog niet zo ver gevorderd. In het centrum en oosten van Westfriesland en op enkele plaatsen ten zuiden van Hoorn was het zoete fluviatiele water nog aanwezig. Daar in deze tijd een pakket Eemklei werd afgezet, werd de afvoer van het zoete water nog verder bemoeilijkt. Deze Eemklei werd later weer opgeruimd, maar tijdens het Holoceen werd wederom een uit veen-, klei- en fijne zand-

lagen bestaand afdekkend pakket gevormd, waardoor een snelle afvoer van het ondergrondse zoete water onmogelijk bleef.

Tengevolge van de in hoofdstuk 4 beschreven opstuwning van de zout-tong onder het IJsselmeer en het oostelijk deel van Westfriesland, ontstond een geïsoleerd gebied met zoet water, dat zich ten zuiden van Hoorn voor een deel onder het IJsselmeer uitstrekt.

In open water zal, door de geringere dichtheid van zoet water ten opzichte van zout water, het zoete water boven het zoute water komen te liggen, en onder gunstige omstandigheden in een overal even dikke laag. Dit zal in de ondergrond ook gebeuren, maar door de geringe stroomsnelheid is dit een zeer langdurig proces, dat bij de aanwezigheid van slecht doorlatende lagen een afwijkend patroon laat zien.

Tengevolge van het opdringende zoutfront en de bovenomschreven opwaartse druk stroomde het zoete fluviatiele water vanuit zijn oorspronkelijke ligging naar bovenliggende lagen en verdrong het oorspronkelijk bovenliggende zoute water in de Eemformatie.

Op een niveau van 35-45 m-NAP stroomde het naar het noorden onder de keileem in de tegenwoordige Wieringermeerpolder in horizontale richting uit, en heeft op dit niveau tot op de huidige dag zijn grootste verbreiding (fig. 1D). Hetzelfde gebeurde onder het afdekkend pakket op het niveau van 15-25 m-mv in noordwestelijke richting tot voorbij Schagen (fig. 1B). In een gebied, dat in het noorden bijna tot de Wieringermeerpolder reikt en in het zuiden tot halverwege de Beemster, is door het opwaartsstromende zoete water het in het afdekkend pakket aanwezige zoute of brakke water verdreven (fig. 1A).

In het kort gezegd is het restant fluviatiele zoete water dat zich na de sedimentatie van de Formatie van Kreftenheye I nog tot op grote diepte in de ondergrond bevond, door de opwaartse druk naar de grondlagen boven 100 m-NAP gestroomd en is tussen 15-55 m-NAP in verscheidene richtingen, maar vooral naar het noorden onder slecht doorlatende lagen horizontaal uitgestroomd. Het op deze diepten aanwezige brakke of zoute water werd door het zoete water vervangen. Daar bij de vervanging van zout water door zoet water een uitwisseling van ionen tussen het grondwater en de bodemdeeltjes plaats heeft, kan dit proces met een kaart met ionendiagrammen aangetoond worden.

Naar gelang bepaalde anionen en kationen in het grondwater domineren, kunnen verschillende grondwatertypen worden onderscheiden. In de ondergrond van het onderzochte gebied zijn de belangrijkste typen: calciumbicarbonaat, natriumbicarbonaat, magnesiumbicarbonaat, calciumchloride en natriumchloride (VAN REES VELLINGA en WITT, 1980).

De vijf watertypen en de overgangen daartussen zijn in ionendiagrammen (STIFF, 1951) weergegeven in fig. 9 (in achterflap).

Het NaCl-type komt in deze figuur overeen met brak en zout grondwater. Het $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ -type ontstaat na een langer verblijf van regen en/of rivierwater in de grond. Wordt zout of brak grondwater vervangen door $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ -type grondwater dan ontstaat door uitwisseling van Ca^{2-} -ionen van het grondwater met Na-ionen van het bodemcomplex het NaHCO_3 -type grondwater. De aanwezigheid van NaHCO_3 -water in de grond wijst er dus op dat hier zout of brak water is vervangen door zoet water (GEIRNAERT, 1972). Nadat de Na-ionen van het bodemcomplex grotendeels zijn uitgewisseld tegen de Ca^{2-} -ionen in het grondwater, worden de aan het bodemcomplex gebonden Mg^{2-} -ionen uitgewisseld tegen de Ca^{2-} -ionen van het grondwater. Er ontstaat dan een $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ -watertype. In de ondergrond kan het $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ -watertype alleen ontstaan indien er gedurende een zeer lange tijd zoet water door een afzetting stroomt waar voordien brak of zout water aanwezig was.

Het CaCl_2 -grondwatertype ontstaat in een formatie waarin het zoete water door brak water wordt vervangen, waarbij de Na-ionen in het grondwater worden vervangen door Ca^{2-} -ionen van het bodemcomplex (GEIRNAERT, 1972). Daar de in het brakke water aanwezige hoeveelheid Na-ionen meestal groter is dan de opgenomen Ca^{2-} -ionen, komt dit watertype slechts sporadisch in de ondergrond van Noord-Holland voor.

Fig. 9 toont dat op een diepte tussen 15 en 45 m-NAP, behalve in de duinen, ook in Westfriesland een gebied ligt met $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ -water. Dit gebied in Westfriesland ligt ongeveer tussen de Wieringermeerpolder en de Beemster en tussen Hoorn en Heerhugowaard. Rond dit gebied met $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ -water komen monsterpunten voor met een $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ -watertype. Hier omheen liggen in alle richtingen gebieden met NaHCO_3 -water, terwijl het geheel omvat wordt met grondlagen die het NaCl-watertype bevatten. Alleen in de Schermer ontbreekt het NaHCO_3 - en het $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ -watertype.

Daar in het traject van 15-45 m-NAP naast andere formaties, de Eemformatie ligt en boven dit niveau holocene afzettingen voorkomen, moet het formatiewater als gevolg van de transgressies in deze perioden oorspronkelijk zout of brak geweest zijn en tot het NaCl-type hebben behoord.

Het fluviatiele zoete grondwater van het $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ -type veranderde in het NaHCO_3 -type toen het onder invloed van de opwaartse druk het niveau met brak water binnendrong. De aanwezigheid van $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ -water in het niveau 15-45 m-NAP kenmerkt de plaatsen waar het fluviatiele water vanuit diepere lagen binnendrong en van hieruit in alle richtingen horizontaal onder de slecht doorlatende lagen uitstroomde. Op deze plaatsen werd door de langdurige stroming de uitwisseling van Ca^{2+} -ionen in het grondwater tegen Na- en Mg^{2+} -ionen van de bodemdeeltjes voltooid, waardoor het hierna binnentredende water het $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ -type behield. Daar waar de uitwisseling van Na-ionen wel en van Mg^{2+} -ionen nog niet voltooid was ontstond $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ -water. Vandaar het voorkomen in fig. 9 van $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ -water tussen gebieden met $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ en NaHCO_3 -water in.

In fig. 10 zijn de milliëquivalenten van het grondwater, aangetroffen in 8 boringen gelegen in een raai tussen Opmeer en Grootebroek (fig. 6), grafisch weergegeven. In deze grafiek neemt de concentratie van Na-ionen van west naar oost regelmatig en sterk toe.

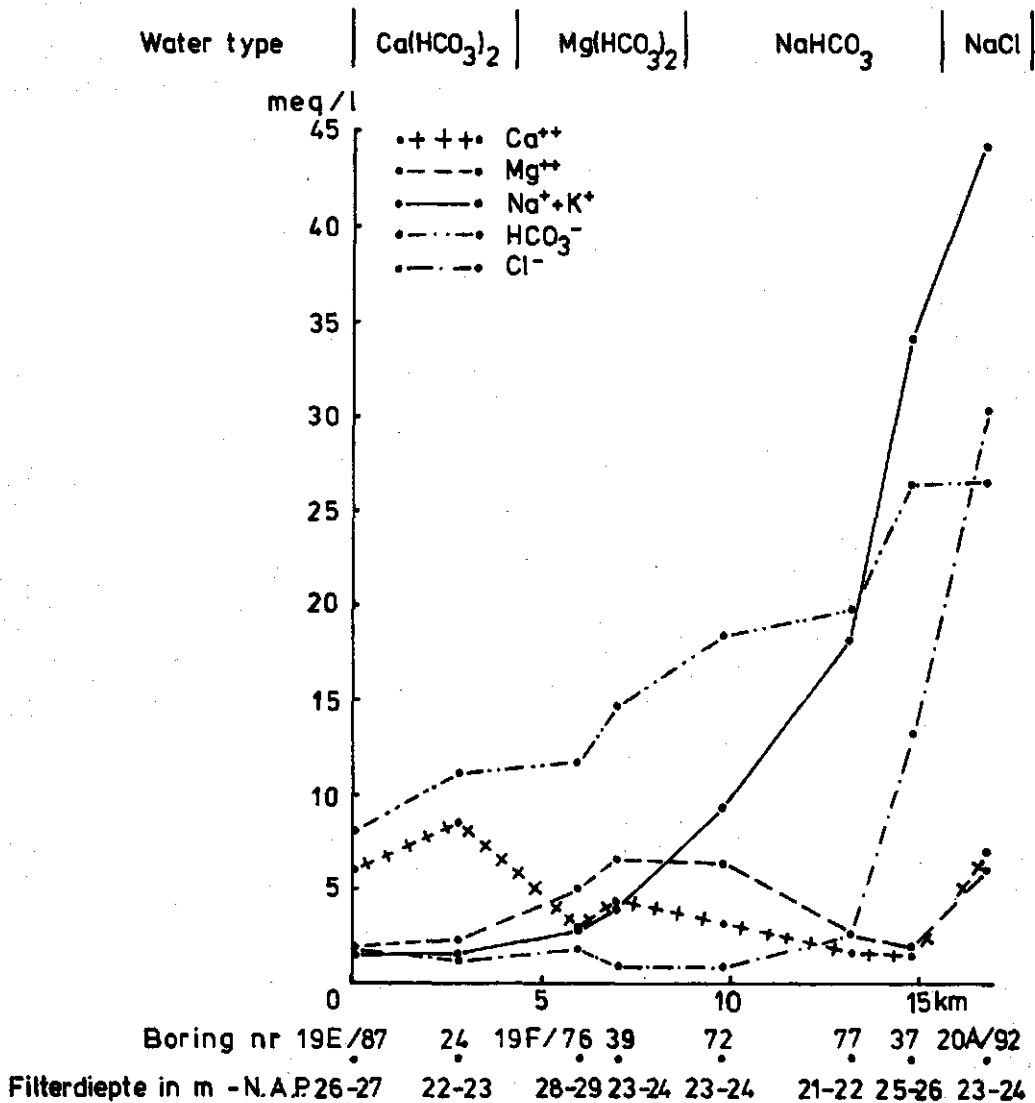
De Ca^{2+} -ionenconcentratie daarentegen neemt van west naar oost af. In dezelfde richting neemt de magnesiumconcentratie eerst toe en daarna weer af. Dit klopt dus volkomen met de hier verwachte stromingsrichting van west naar oost en de daarbij optredende ionenuitwisseling. De hoeveelheid HCO_3^- -ionen neemt van west naar oost toe. Ook dit komt overeen met de theorie, daar de benodigde hoeveelheid CO_2 voor de evenwichtstoestand in $\text{Na}^+ - \text{HCO}_3^-$ geringer is dan voor die in $\text{Ca}^{2+} - \text{HCO}_3^-$. Het zo beschikbare CO_2 brengt meer HCO_3^- -ionen in oplossing (GEIRNAERT, 1972).

Deze grafiek en de figuur met ionendiagrammen ondersteunen de stelling dat vanuit het gebied tussen Wieringermeerpolder en Beemster zoet water horizontaal in alle richtingen is uitgestroomd.

Een dergelijk maar veel kleiner gebied zou ten oosten van de Beemster kunnen liggen, waar een monsterpunt met $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ -water en twee monsterpunten met $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ -water voorkomen.

FIG. 10

CHEMISCH PROFIEL TUSSEN OPMEER EN GROOTE BROEK



Tussen de Purmer en Amsterdam ligt nog een geïsoleerd gebied met NaHCO_3 -water en enkele punten met tussenvormen. Ook dit kan een restant zoet tot licht brak water zijn dat lang geleden van grotere diepte omhoog gestroomd is.

Ten noorden van Amsterdam en ten oosten van Zaandam op een diepte tussen 45 tot 75 m-NAP ligt een geïsoleerd gebied met zoet water van 6 à 8 km doorsnee (fig. 1E en F). Dit zoete water moet van dezelfde fossiele fluviatiele oorsprong zijn als het zoete water in de onder-

grond van Westfriesland bij Hoorn. Het bijzondere van dit geïsoleerde zoet water is, dat het ingesloten ligt tussen twee tot respectievelijk 110 m en 80 m-NAP reikende glaciale kleibekkens (BREEUWER en JELGERSMA, 1979). Waarschijnlijk werd het zoete water door de aanwezige kleibekkens verhinderd af te stromen, ondanks de ook hier aanwezige opwaartse druk van het zoute water.

7. SAMENVATTING

Bij het onderzoek in Noord-Holland benoorden het IJ is gebleken dat de verdeling van het zoute en het zoete grondwater in de ondergrond een van de oorzaken is van het ontstaan van grondwaterstromingen.

Uit de geologische opbouw volgt dat een dik pakket van afzettingen tussen de Formatie van Maassluis (ca. 250 à 300 m-NAP) en de onderkant van de Eemformatie (ca. 30 à 70 m-NAP), van fluviatiele en voor een klein deel van glaciële oorsprong is en daarom zoet water moet hebben bevat.

Door de stijging van het zeeniveau tijdens het Eemien en, na de laatste ijstijd, tijdens het Holoceen kon het zeewater, tengevolge van het verschil in dichtheid het zoete water in de fluviatiele afzettingen in horizontale richting verdringen. Dit verdringingsproces begon waarschijnlijk ver ten westen van de huidige kustlijn, waar de fluviatiele afzettingen dagzomen.

De zanden met de grootste korrelgrootte en dus de grootste doorlatendheid komen voor in de Formaties van Enschede en Harderwijk (jong), op een diepte tussen 80 à 100 m en 180 à 200 m-NAP. In dit grove pakket kon de verzilting het snelst horizontaal in oostelijke richting voortgang vinden. Deze verzilting kwam tot stilstand onder het IJsselmeer tengevolge van de ontmoeting met de naar het westen gerichte grondwaterstroming vanaf de hoger gelegen gronden.

De 'botsing' van deze twee grondwaterstromen heeft geleid tot een opstuwning van het zoute water. Deze opstuwning manifesteert zich in de ondergrond van het IJsselmeer als een van noord naar zuid verlopende strook met hoge chloridegehalten (fig. 4 en 5).

De bovenomschreven verzilting heeft in het derde watervoerend pakket tussen 100 en 200 m-NAP onder het gehele onderzoeksgebied plaats. In het noordwesten tussen Den Helder en Petten komt ook in de hogere grondlagen (het eerste en tweede watervoerend pakket) een van west naar oost wigvormig opdringend zoutfront voor.

Door inpolderingen ontstonden ook grondwaterstromingen en wel door het verschil in stijghoogte van het oppervlaktewater binnen het gebied en van dat daarbuiten. Met behulp van het profiel B-B¹ (fig. 6 en 7) is de bijdrage berekend aan de grondwaterstroming van

elk der twee veroorzakende factoren. Het blijkt dat de grondwaterstroming van de Noordzee naar de Wieringermeerpolder in het 1e tot en met het 3e watervoerende pakket door de verschillen in dichtheid van het grondwater globaal wordt versterkt met een bijdrage van respectievelijk 10, 15 en 30%.

Van de raaien 1, 2 en 3 (fig. 6) gelegen tussen Den Helder en Petten, is de gemiddelde jaarlijkse verplaatsing van het zoutfront berekend met gebruikmaking van bekende kD -waarden en stijghoogtegradiënten van het grondwater. De uitkomsten van deze berekening zijn voor het 1e en 2e watervoerend pakket 5,8 m en voor het 3e watervoerend pakket 11 m per jaar. Verrekening met de vastgestelde percentages geeft een verplaatsing tengevolge van dichtheidsverschillen van ongeveer $0,75 \text{ m.jr}^{-1}$ voor het 1e en 2e watervoerende pakket en ongeveer $3,3 \text{ m.jr}^{-1}$ voor het 3e watervoerende pakket.

De berekende cijfers gelden alleen voor de kop van Noord-Holland. In het overige deel van het onderzoeksgebied zullen iets lagere waarden gelden in verband met de hogere c -waarden die daar voorkomen. Een voortschrijding van de verzilting tengevolge van dichtheidsverschillen van 2 à 3 m per jaar in de periode voorafgaande aan de eerste droogmakerijen lijkt niet onmogelijk. Bijgevolg zou de verzilting zich gedurende het Holoceen enkele tientallen kilometers in oostelijke richting kunnen hebben uitgebreid.

In het westen en noorden van het besproken gebied werd het oorspronkelijk aanwezige zoete water geheel door het vanuit het westen opschuivende zoutfront verdreven. Door veranderende geologische en hydrologische omstandigheden kon het zoete water zich onder het midden van Westfriesland en ten zuiden hiervan in een strook langs en onder de huidige IJsselmeerkust handhaven. Het opdringende zoutfront en de opwaartse druk tengevolge van het verschil in dichtheid veroorzaakten wel dat het zoete water vanuit de oorspronkelijke diepteligging omhoog stroomde, en het zoute water in de Eemafzetting en de Holocene afzettingen verdrong. Tevens stroomde het zoete water onder het keileem in de Wieringermeerpolder en op andere plaatsen onder het afdekkend pakket in noordwestelijke, noordelijke en oostelijke richting uit. Daarbij veranderde dit zoete grondwater, tengevolge van ionenuitwisseling met de bodemdeeltjes, van watertype.

In fig. 9 markeert het $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ -water in Westfriesland en ten oosten van de Beemster de plaatsen waar het zoete water omhoog stroomde. Het NaHCO_3 -water komt dáár voor, waar het zoete water in lagen is gedrongen die oorspronkelijk brak of zout water bevatten. $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ -water komt voor tussen gebieden met $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ -water en met NaHCO_3 -water en ontstaat daar waar de uitwisseling van Na-ionen tegen Ca^{2+} -ionen is voltooid, waarna de aan de bodemdeeltjes gebonden Mg^{2+} -ionen uitgewisseld worden tegen Ca^{2+} -ionen in het grondwater. Het verloop van de ionenconcentraties in een profiel is weergegeven in fig. 10.

LITERATUUR

- BREEUWER, J.B. en S. JELGERSMA, 1979. Geologie van de provincie Noord-Holland. Rapport RGD nr. OP7106. Rijks Geologische Dienst.
- DAM, J.C. VAN en S. JELGERSMA, 1964. Geo-elektrisch en geologisch onderzoek van de polder Geestmerambacht. Rapport no. 364 II. Rijkswaterstaat, Dienst voor de Waterhuishouding en Geologische Dienst
- GEIRNAERT, W., 1973. The hydrology and hydrochemistry of the lower Rhine fluvial plain. Leidse Geologische Mededelingen
- JELGERSMA, S., 1971. Zoutwaterindringing uit zee tijdens tertiair-kwartair. Cursus zout grondwater in Nederland, deel II, van de Stichting Postacademiale Vorming Gezondheidstechniek, Delft
- MEINARDI, C.R., 1973. Het zoutwater voorkomen in de ondergrond van de lage gedeelten van Nederland, H₂O(6) nr. 18
- _____ 1974. The origin of brackish groundwater in the lower parts of the Netherlands. RID mededeling 74-6. Rijks Instituut voor Drinkwatervoorziening
- _____ 1975. Brackish groundwater bodies as a result of geological history and hydrological conditions. RID mededeling 75-1. Rijks Instituut voor Drinkwatervoorziening
- POMPER, A.B., 1979. De Geologische en de geo-hydrologische opbouw van Noord-Holland benoorden het Noordzeekanaal. Nota ICW 1135
- REES VELLINGA, E. VAN en H. WITT, 1980. De chemische samenstelling van het grondwater in Hollands noorderkwartier. Nota ICW 1258

- RIJKSGEOLOGISCHE DIENST, 1975. Geologische overzichtskaarten van Nederland.
- RIJKSWATERSTAAT, 1976. Dienst der Zuiderzeewerken. Geohydrologische gevolgen van de aanleg van de Markerwaard. Nota 287
- STIFF Jr., Henry A., 1951. The interpretation of chemical water analyses by means of patterns. Journ. of Petr. Techn. Nota 84.
- VOLKER, A., 1961. Source of brackish groundwater in Pleistocene formations beneath the Dutch polderland. Economic Geology Vol. 56
- WIBAUT-ISEBREE MOENS, N.L., 1931, 1932, 1934, 1936 en 1939. Zoutgehalte van boezem- en polderwater in Noord-Holland. Verslagen en mededeelingen van de Zuiderzeecommissie der Nederlandsche Botanische Vereeniging nos. 13, 17, 22, 32 en 40 (Ned. Kruidkundig Archief, 1931, 1932, 1934, 1936, 1939).
- _____ 1935. Blijft het water in Noord-Holland brak? Nederlands Tijdschrift voor Geneeskunde no. 79, februari 1935
- _____ 1935 en 1937. Blijft het polderwater in Noord-Holland brak? De Ingenieur 1935 no. 26 en 1937 no. 18
- WIT, K.E. en M. WIJNSMA, 1981. Hydrologische berekeningen in Noord-Holland benoorden het IJ. ICW Nota (in voorbereiding)
- WITT, H., 1980. Het chloridegehalte van het grondwater in Noord-Holland benoorden het IJ en het Noordzeekanaal. Nota ICW 1173
- _____ , E. VAN REES VELLINGA en K.E. WIT, 1981. Toename en afname door grondwaterstroming van chloride, stikstof en fosfaat in de ondergrond van Hollands Noorderkwartier. Nota ICW 1285
- WIJNSMA, M., K.E. WIT en E. VAN REES VELLINGA, 1981. Ischyphen- en drukverschillenkaarten van het grondwater in Noord-Holland benoorden het IJ. Nota ICW 1244