NN31545.0512

NOTA 512 26 juni 1969
Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding

EEN ANALYSE VAN HET KWELPROBLEEM EN DE DAARMEDE SAMENHANGENDE VERZILTING VAN DE POLDERWATEREN IN NOORDOOST HUNSINGO

ir J.J. Kouwe

Nota's van het Instituut zijn inprincipe interne communicatiemiddelen, 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 nog van voorlopige aard zijn omdat het onderzoek nog niet is afgesloten.
Bepaalde nota's komen niet voor verspreiding buiten het Instituut in aanmerking

CENTRALE LANDBOUWCATALOGUS
0000 0102 0979

I N H O U D

	blz.
1. INLEIDING	1
2. DE CHLORIDE BELASTING AFGELEID UIT DE CHLORIDE BALANS	2
2.1. De balans voor de periode 31 maart t/m 14 april 1967	2
2.1.1.De chloride berging in het gebied	2
2.1.2. De chloride afvoer	5
2.1.3. Samenvatting van resultaten	7
2.2. De chloride belasting berekend volgens de methode van de 'moment-opname' op 14-4-1967	7
2.2.1. De chloride belasting van het stroomgebied van het Meedster Maar c.a.	8
2.2.2. De chloride belasting van het stroomgebied van het Boterdiep	10
2.3. De vergelijking van de chloride belasting van het gebied berekend volgens verschillende methoden	12
3. NABESCHOUWING	
4. DE BENADERING VAN DE VERZILTING EN DE KWEL ALS GROND-WATERSTROMINGSPROBLEEM	15
4.1. Inleiding	15
4.2. Schematisering van de hydrologische situatie	16
4.3. De mathematische formulering van het kwel- en verziltingsprobleem	19
4.3.1. Het chloride gehalte van het in een leiding uittredende water	20
4.3.2. De hoeveelheid kwel en de wegzijging uit het gebied	21
4.3.3. De chloride opbrengst van het gebied	23
4.3.4. De uit het gebied afgevoerde hoeveelheid water	23
4.3.5. Het chloride gehalte van het drainerende water	25
5. DE TOEPASSING OP HET GEBIED VAN ONDERZOEK	26
5.1. De formules van Bootsman en Dijkstra	26
5.2. Het berekenen van de afvoer	28
5.3. Het chloride gehalte van het drainage water	29

blz.

5.4. Het verband tussen het chloride gehalte en de afvoer 29

5.5. De wateraanvoer behoefte 31

6. EEN NADERE BESCHOUWING VAN HET VERZILTINGSPROBLEEM 34

7. VERDERE MOGELIJKHEDEN VAN BEWERKING 42

1. INLEIDING

In een nota nr 449 getiteld: 'De chloride belasting van Noordoost Hunsingo' werd een poging gedaan deze chloride belasting vast te stellen door de afvoer van overtollige neerslag en kwel uit het gebied te berekenen uit gemeten grondwater- en slootwaterstanden. De chloride belasting werd afgeleid uit de kwel en het chloride gehalte van het grondwater onder de slootbodem op 3 meter diepte onder maaiveld..Dit chloride gehalte werd op zijn beurt weer afgeleid uit het electrische geleidingsvermogen en de formatie constante van de grond. Op deze wijze werd voor een gebied van ca 9 000 ha bij een kwelhoeveelheid van ca 0,6 mm/dag een chloride belasting van 1,98 kg/sec gevonden.

Een nadere beschouwing van de volgens de beschreven methode gevonden chloride belasting leidde tot de conclusie dat de gevonden waarde te hoog was en dat het chloride gehalte van het grondwater op 3 meter diepte bij de sloot niet maatgevend mocht worden geacht voor het chloride gehalte van het kwelwater. De conclusie lag voor de hand dat het kwelprobleem samengestelder van aard was dan waarvan bij het schema van de geschetste berekeningsmethode was uitgegaan.

Derhalve werd het kwel en verziltingsprobleem aan een gedetailleerd onderzoek onderworpen. In een eerste poging werd uitgegaan van de methode van de chloride balans. Enerzijds werd deze gehanteerd voor het tijdsinterval tussen de twee chloride bemonsteringsdata 31/3 en 14/4 1967, waarbij dus rekening gehouden moest worden met de veranderingen in de chloride berging binnen het gebied in sloten en leidingen. Anderzijds werd een zelfde berekening verricht voor de datum 14-4-1967; een 'moment-opname' dus, waarbij de verandering in de chloride berging gedurende een etmaal gelijk nul wordt gesteld.

In een tweede poging werd het probleem benaderd door uit te gaan van de stromingswet van DARCY voor het grondwater.

In het navolgende zullen eerst de resultaten van de methode van de chloride balans worden vermeld. In een daaraanvolgende beschouwing zal uitvoeriger worden ingegaan op de methode van de stromingsanalyse als wijze van benadering van het kwel- en verziltingsprobleem.

2. DE CHLORIDE BELASTING AFGELEID UIT DE CHLORIDE BALANS

2.1. De balans voor de periode 31 maart t/m 14 april 1967

De chloride balans voor een zeker tijdsinterval luidt:

$$Cl^1\text{-beginvoorraad} + Cl^1\text{-aanvoer} - Cl^1\text{-afvoer} = Cl^1\text{-eindvoorraad}$$

Uit deze balans volgt:

$$Cl^1\text{-aanvoer} = \left\{ Cl^1\text{-eindvoorraad} - Cl^1\text{-beginvoorraad} \right\} + Cl^1\text{-afvoer}$$

waarin de Cl^1-aanvoer = Chloride belasting CB en de term tussen haakjes de verandering in de chloride berging in het polderwater van maren en sloten voorstelt.

2.1.1. De chloride berging in het gebied

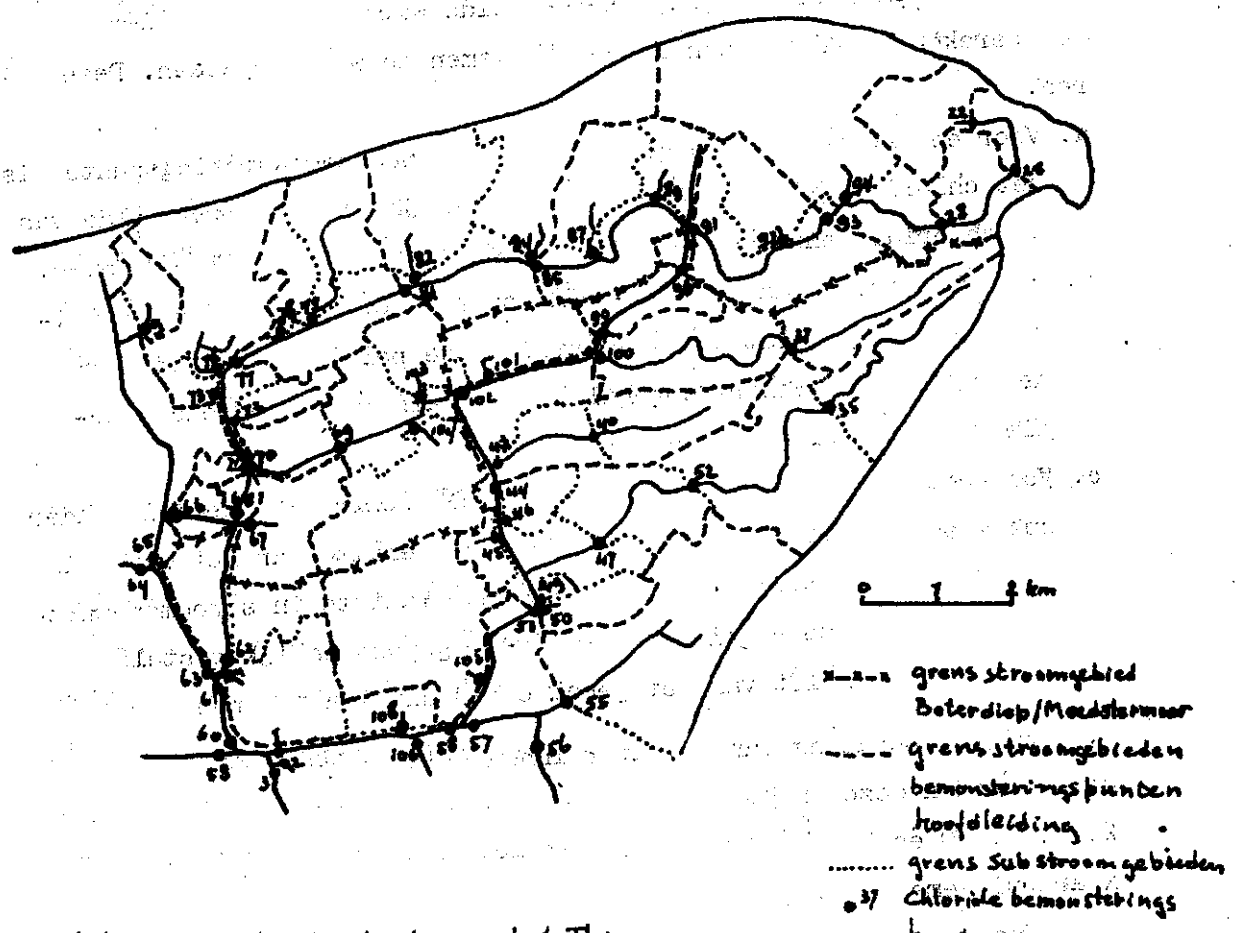
Om de verandering in de chloride berging in het gebied te kunnen berekenen moet de totale watervoorraad bekend zijn die in de maren en sloten aanwezig is en de chloride gehalten daarvan op de begin- en eind data van de balansperiode.

Door de Provinciale Waterstaat van Groningen werden gedurende de periode februari 1965 - 14 april 1967 regelmatig op een aantal punten in het leidingen stelsel van het gebied watermonsters genomen en op chloride gehalte onderzocht. Fig. 1A geeft hiervan een globaal overzicht. De stroomgebieden behorende bij deze punten staan eveneens aangegeven. Deze werden ontleend aan een stroomgebieden-kaart verstrekt door de Provinciale Waterstaat.

fig. 1.

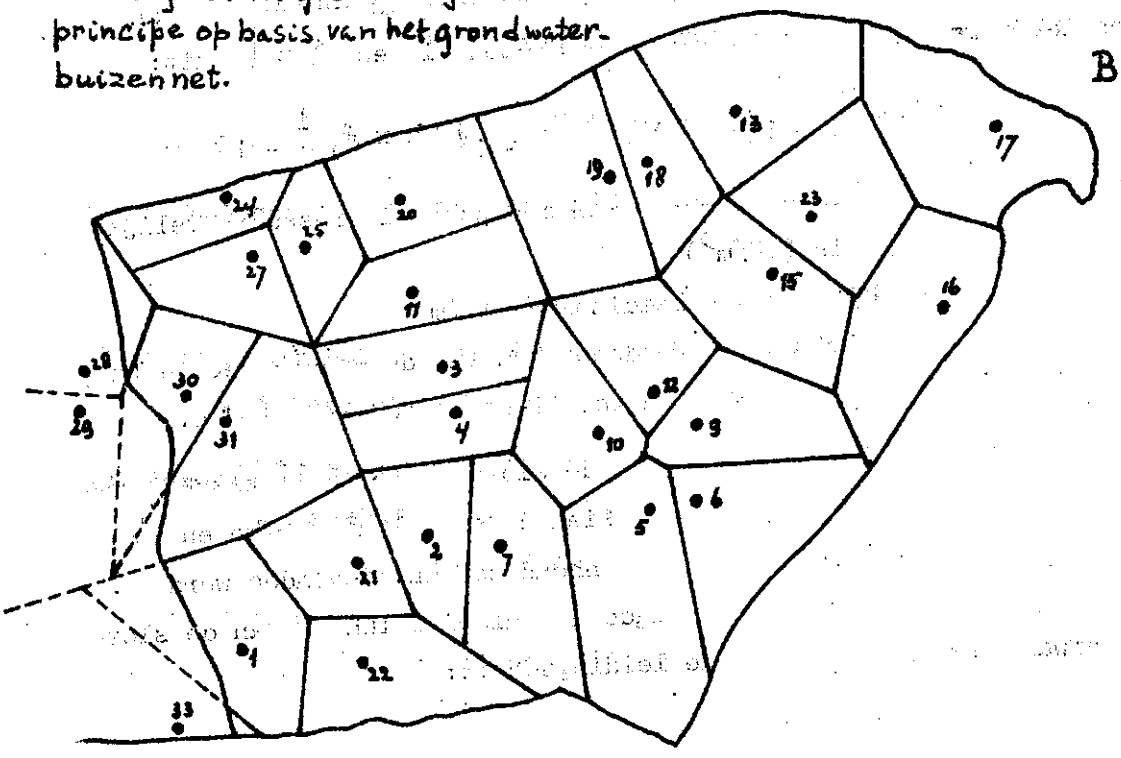
Vereenvoudigde overzichtskaart van N.O. Hunsingo met Chloride bemonsteringspunten ende daarbij behorende Stroomgebieden.

A.



Indeling van het gebied volgens het Thiessen-principe op basis van het grondwater-buizennet.

B.



Om de chloride berging in het polderwater van het gebied te kunnen berekenen dienden een aantal aannamen te worden gedaan. Deze waren:

a. Voor een leidingsectie gelegen tussen twee bemonsteringspunten is het chloride gehalte van het water gelijk aan het gemiddelde van de chloride gehalten van de beide de sectie begrenzende punten.
b. Voor het gebied dat rechtstreeks op een sectie van de hoofdleiding afwatert geldt dat het water in de poldersloten eveneens het gemiddelde chloride gehalte heeft als de betreffende sectie van de hoofdleiding.
c. Voor bemonsterde zijleidingen geldt het zelfde als gesteld onder sub a en b, behoudens dat het chloride gehalte van het water in de sloten bovenstrooms gelegen van het laatste in stroomopwaartse richting gaande gelegen bemonsteringspunt gelijk gesteld wordt aan de helft van het gehalte bij dit laatste punt gemeten.

Bij de bepaling van de water inhoud van de poldersloten en maren werden deze in 5 klassen ingedeeld met natte doorsneden van 2, 3, 5, 10 en 22 m^2. De lengten der leidingsecties werden op de kaart uitgemeten.

Voor een bepaald tijdstip volgt de chloride inhoud CIL van een leidingsectie gelegen tussen de punten i en i - 1 uit:

$$CIL \left(\begin{smallmatrix} i \\ i-1 \end{smallmatrix}\right) = \tfrac{1}{2} (C_i + C_{i-1}) \left\{ L \times F \right\}_{i-1}^{i}$$

waarin: C het chloride gehalte bij meetpunt i respectievelijk i - 1 is (gr/m^3)

L de lengte van de leidingsectie (m)

F de gemiddelde natte doorsnede van de leidingsectie (m^2)

Hierbij neemt i in stroomafwaartse richting toe van $1 \rightarrow n$.

Voor de inhoudsberekening van de sloten werd op 11 plekken van ieder 100 ha verspreid over het gebied de slootlengte gemeten en omgerekend in een gemiddelde slootinhoud per ha. Gevonden werd 70,3 m^3/ha. Op grond hiervan volgde de chloride inhoud van de sloten CIS afwaterend op een bepaalde leidingsectie:

$$CIS\left(\begin{smallmatrix} i \\ i-1 \end{smallmatrix}\right) = 70{,}3 \times O\left(\begin{smallmatrix} i \\ i-1 \end{smallmatrix}\right) \times CIL\left(\begin{smallmatrix} i \\ i-1 \end{smallmatrix}\right)$$

met $O\left(\begin{smallmatrix} i \\ i-1 \end{smallmatrix}\right)$ = oppervlak op de sectie afwaterend gebied (ha).

Door sommatie van de chloride inhoud van alle secties van de hoofdleiding en zijleidingen en van de sloten werd de totale chloride inhoud van het gebied op beide data berekend. Deze bedroeg in afgeronde bedragen:

op 31-3-1967 : 332 500 kg
14-4-1967 : 436 000 kg

Bergingstoename : 103 500 kg. Waarvan 55 850 kg binnen het stroomgebied van het Meedster Maar c.a.en 47 650 kg binnen het Boterdiep gebied

2.1.2. De chloride afvoer

De chloride afvoer wordt gevonden door vermenigvuldiging van het bij een meetpunt passerende water met het chloride gehalte Cp daarvan. Ten einde de totale hoeveelheid chloriden die dit punt passeren gedurende een tijdvak gelegen tussen de tijden t_1 en t_2 te kennen kan bij wijze van benadering het gemiddelde chloride gehalte $\bar{C}_p$ gedurende deze periode worden genomen, berekend volgens:

$$\bar{C}_p = \tfrac{1}{2}\left\{C_p\,(t_1) + C_p\,(t_2)\right\} \ldots\ldots (2.1)$$

De afvoer bepaling geschiedde door gebruik te maken van de afvoerfuncties voor de grondwaterbuizen, zoals vermeld in tabel 1 van nota 449. De algemene vorm daarvan was:

$$q_i = a\,H_i^2 \quad \text{of} \quad Q_i = 10.a_i\,H_i^2 \ldots\ldots (2.2)$$

waarin: q_i respectievelijk Q_i : de afvoer van overtollige neerslag plus kwelwater van buis i in mm/week, respectievelijk in m^3/ha. week.

a_i : een constante

H_i : de gemiddelde drukhoogte van het grondwater ten opzichte van slootpeil gerekend over een week (cm)

Een complicatie wordt gevormd door de omstandigheid dat op een oppervlak van 9 000 ha slechts van 30 grondwaterbuizen een afvoerberekening mogelijk was. Het was niet slechts van belang om voor het gehele gebied van onderzoek of voor de twee samenstellende stroomgebieden ervan, namelijk van het Meedster-/Helwerder-/Usquerder Maar (in het vervolg kortweg Meedster Maar c.a. te noemen) en van het Boterdiep, op bepaalde punten de afvoer te kunnen berekenen, doch dat dit tevens mogelijk zou zijn voor afzonderlijke stroomgebieden van zijleidingen en onderdelen daarvan.

Aan de voor iedere grondwaterbuis berekende afvoer hoeveelheid moest een zeker gebied worden toegekend, waardoor omrekening van mm/dag in m^3/dag mogelijk wordt. Het areaal waarvoor de buis representatief werd verondersteld werd gevonden door gebruik te maken van het Thiessennet principe. Met de grondwaterbuizen als hoekpunten wordt eerst een driehoeksnet geconstrueerd. Vervolgens worden de middelloodlijnen van deze verbindingslijnen getrokken waardoor een net van veelhoeken ontstaat met in het midden van ieder daarvan een grondwaterbuis. De afvoer berekend voor de buis wordt dan representatief geacht voor het oppervlak van zijn veelhoek. Dit Thiessen-net staat afgebeeld in fig. 1B. Dit net wordt op de stroomgebieden-kaart 1A geprojecteerd, waarna vervolgens van iedere combinatie van veelhoek-stroomgebied, zowel oppervlak als afvoer bekend is. De afvoer uit een stroomgebied Q_p volgt dan uit:

$$Q_p = \sum_1^n O_i \, Q_i \quad m^3/\text{week} \; \ldots\ldots \; (2.3)$$

waarin: O_i en Q_i het oppervlak in ha, respectievelijk de afvoer in m^3/ha. week van het deel van de veelhoek van buis i voorstellen vallende binnen de grenzen van het bestudeerde stroomgebied gelegen bovenstrooms van meetpunt p.

Tenslotte volgt dan de totale hoeveelheid chloriden die in het beschouwde tijdvak een meetpunt p passeert uit:

$$Cl_p \, (tot) = \bar{C}_p \, Q_p \; \ldots\ldots \; (2.4)$$

Voor de gemiddelde hoeveelheid afgevoerd water tijdens de periode 31/3 - 14/4 1967 werd op de aangegeven manier berekend voor het Meedster Maar c.a. met een stroomgebied van 4 164 ha 2,60 mm/dag en voor het Boterdiep met 3 280 ha afvoerend oppervlak 2,32 mm/dag.

2.1.3. Samenvatting van resultaten

In tabel 1 worden de reslutaten van de berekeningen samengevat.

Tabel 1. De totale chloride belasting over de periode 31/3 - 14/4-1967

Hoofdleiding	Meet-punt	opp. str. geb. ha	Afgevoerd water Gemidd. mm/dag	Afgevoerd water Totaal m^3	Hoeveelheid Chloride afgevoerd kg	Hoeveelheid Chloride geborgen kg	Hoeveelheid Chloride totaal kg	Chloor belasting gr/sec
Meedster Maar c.a.	66	4 164	2,60	1 515 700	450 150	55 850	506 000	420
Boterdiep	1	3 280	2,32	1 065 350	289 750	47 650	337 400	280
Totaal	-	7 444	2,48	2 581 050	739 900	103 500	843 400	700

Het blijkt dus dat in een 7 444 ha groot gebied 0,7 kg Cl^1 per seconde omhoog kwelt. Hierin is dus niet begrepen de hoeveelheid die eventueel tengevolge van de grondwaterstandsdaling in de bodem geborgen werd. Deze is met de gevolgde berekeningswijze niet te achterhalen.

2.2. De chloride belasting berekend volgens de methode van de 'momentopname' op 14-4-1967

De methode van de chloride balans voor de momentopname is een vereenvoudigde vorm van de berekeningswijze zoals in 2.1. werd beschreven. Van de op 14-4-1967 gemeten chloride gehalten van het bij de bemonsteringspunten passerende water wordt verondersteld dat deze gehalten gedurende het tijdsbestek van een etmaal constant zijn. Met veranderingen van de in de leidingen en sloten geborgen hoeveelheid chloriden wordt dan geen rekening gehouden. Een vraag kan zijn of beide methoden gelijkwaardige resultaten opleveren.

Wegens de geringere hoeveelheid rekenwerk aan de methode van de momentopname verbonden werd deze voor kleinere eenheden apart uitgevoerd.

Voor een bepaald stroomgebied geldt nu de balans formule:

Chloride aanvoer = Chloride afvoer

De berekening van de chloride afvoer volgt dezelfde procedure als onder 2.1. beschreven met dit verschil dat voor de afvoerberekening met vergelijking (2.1) $\bar{C}_p = C_p\ (t)$ en dat bij de afvoer berekening volgens formule (2.2) voor H_i genomen wordt de drukhoogte van het grondwater ten opzichte van slootpeil op 14-4-1967, waarna Q_i nog op m^3/dag moet worden omgerekend, zodat:

$$Q_i^1 = \frac{10}{7}\, a_i\, H_i^2 \quad m^3/\text{dag. ha} \quad \ldots\ldots (2.2.a)$$

Evenzo wordt (2.3) dan:

$$Q_p^1 = \sum_1^n O_i\, Q_i^1 \quad m^3/\text{dag} \quad \ldots\ldots (2.3.a)$$

en (2.4):

$$Cl_p^1\ (\text{tot}) = C_p\ (t)\, Q_p^1 \quad \ldots\ldots (2.4.b)$$

2.2.1. De chloride belasting van het stroomgebied van het Meedster Maar c.a.

In tabel 2 werden voor de chloride bemonsteringspunten van het Meedster Maar c.a. voor opklimmende grootte van het stroomgebied de chloride belasting berekend. Tevens werden de op deze punten gemeten chloride gehalten vermeld. Door aftrekking van de gevonden waarden voor de chloride belastingen en afvoerhoeveelheden op twee opeenvolgende punten wordt de chloride belasting en het waterbezwaar gevonden voor de sectie van het gebied dat tussen deze punten op het Maar afwatert. Uit deze gegevens kunnen de chloride belasting en het -gehalte van het tot afvoer komende water worden berekend. Ook deze staan in tabel 2 vermeld.

Tabel 2. De chloride belasting van delen van het stroomgebied van het Meedster Maar naar opklimmende grootte en voor de secties tussen de meetpunten. Het chloride gehalte van het uit deze gebieden tot afvoer komende drainage water

Monster-punt	opp. stroom-geb. ha	Chloride belasting gr/sec. totaal	Chloride belasting gr/sec. sectie	Chloride gehalte drain. water gr/m³ totaal	Chloride gehalte drain. water gr/m³ sectie
			13		255
22	128	13	11	255	216
25	261	24	38	235	2 766
28	406	62	35	530	204
93	1 030	97	50	335	403
91	1 400	147	155	355	1 288
85	1 790	302	42	565	153
81	2 465	344	-33	425	-281
77	2 855	311	44	335	335
70	3 340	355	63	335	336
68	3 930	418	24	345	270
66	4 164	442		340	

Uit deze tabel springen twee 'zoute' secties naar voren, namelijk die tussen de punten 25 en 28 en tussen 91 en 85. Volgens gegevens van Provinciale Waterstaat neemt het Meedster Maar over het hele traject tussen 25 en 85 veel zout water op. De invoer van veel zoeter water met een chloride gehalte van 250 gr/m³ door de zijleiding van meetpunt 94 maakt dat de sectie 28-93 een lagere chloride belasting te zien geeft. In de sectie 93-91 neemt deze weer toe.

De tabel laat voorts nog zien de merkwaardigheid van negatieve cijfers. Dit zou betekenen dat er in de betreffende sectie zout verdwijnt! Dit verschijnsel wordt veroorzaakt doordat hetzij op de betreffende leiding sectie te weinig water wordt afgevoerd, hetzij dat voor de voorgaande sectie een grotere afvoer werd berekend dan met de werkelijkheid overeen komt.

In het gegeven geval kunnen voor de negatieve chloride belastingen op sectie 81-71 van het Meedster Maar c.a. verantwoordelijk worden gesteld de grondwaterbuizen 19 en 20 die met respectievelijk 3,15 en 4,88 mm/dag, tegen een gemiddelde van ca 2,6 mm/dag van de omliggende buizen, een te hoge afvoer van water en daarmee van chloriden uit de stroomgebieden 87, 84, 82 en 79 veroorzaken. De accumulatie hiervan geeft er tenslotte aanleiding toe dat er bij punt 77 minder chloriden passeren dan bij punt 81 werden aangevoerd.

Een tweede mogelijkheid blijft dat het bewuste leidingpand gelegen tussen de meetpunten 85 en 77 inderdaad water verliest naar lager gelegen (bemalen) polders gelegen ten zuiden van het Maar. Dit is echter op grond van de beschikbare gegevens niet aan te tonen, zodat volstaan moet worden met het signaleren van deze mogelijkheid.

Een interessante mogelijkheid doet zich voor om de chloride belasting van het gebied bovenstrooms van punt 91 te vergelijken met die berekend door middel van de formule van Bootsman:

$$CB = 880.q^{-0,56} \times q \times 1\,400 \times 10 \times 86\,400^{-1}$$
$$= 142 \times q^{0,44}$$

voor q = 2,6 mm/dag volgt dan CB = 215 gr/sec. tegen 147 gr/sec. volgens de balans methode.

De chloride belasting voor het Meedster Maargebied c.a. berekend volgens de methode beschreven onder 2.1. kwam uit op 420 gr/sec., terwijl met de 'momentopname' methode 442 gr/sec. werd gevonden. De schatting omtrent de inhoud van de polderleidingen en sloten lijkt derhalve redelijk goed te zijn geweest.

2.2.2. De chloride belasting van het stroomgebied van het Boterdiep

Op dezelfde wijze als hiervoor beschreven werd ook de chloride belasting van het Boterdiep gebied verkregen. Hierbij werden de gegevens van enkele belangrijke Maren apart berekend. Er werd aangenomen dat al het water van het gebied gelegen ten zuiden van de kruising van het Meedster Maar en het Boterdiep in zuidelijke richting door laatstgenoemde waterweg wordt afgevoerd. Tabel 3 geeft een samenvatting van de verkregen resultaten.

Tabel 3. De chloride belasting en het chloride gehalte van het afgevoerde water van het stroomgebied van het Boterdiep en enkele onderdelen daarvan, alsmede van de stroomgebieden van een viertal van de belangrijkste Maren en de Polder Anderwereld

Monsterpunt		Stroomgeb. ha	Chloride belast. gr/sec. totaal	Chloride belast. gr/sec. sectie	Chloride geh. drain. water totaal	Chloride geh. drain. water sectie
	96	21	4	4	555	555
	99	104	43	39	911	971
	102	716	106	63	410	298
	44	1 088	142	36	365	276
	51	2 226	210	68	305	220
	58*	3 210	242	32	269	153
	1*	3 280	248	6	262	139
Eppenh. Maar	100	439	96	-	550	-
Bieske Maar	43	227	34	-	430	-
Startenh. Maar	47	671	59	-	245	-
Huizinge Maar	55	487	91	-	105	-
W.S. Anderwereld	105	381	21	-	220	-

*Ten zuiden van het gebied van onderzoek liggen twee gebieden waarvan de overtollige neerslag geheel of gedeeltelijk op het Boterdiep gelegen tussen de punten 51 en 1 tot afvoer komt. Het betreft de aanvoerpunten 56 (1 770 ha) in het Huizinge Maar en het punt 106 (2 700 ha) in het Boterdiep bij Fraamklap. De cijfers van de tabel hebben echter alleen betrekking op het gebied van onderzoek.

De tabel laat zien dat ook in dit geval de omgeving van het kruispunt Meedster Maar - Boterdiep, gelegen bovenstrooms van bemonsteringspunt 99, veel zout produceert. Te berekenen valt dat in het gebied afwaterend tussen de punten 96 en 99 per ha 0,47 gr cl^{1}/sec. op kwelt en dat deze hoeveelheid in stroomafwaartse richting geleidelijk afneemt tot dat in de sectie tussen de punten 51 en 58 slechts 0,03 gr cl^{1}/sec. ha wordt opgenomen. Deze trend weerspiegelt zich ook in de chloride gehalten van het afgevoerde water.

De totale chloride belasting berekend volgens de twee geschetste methoden komen weer goed met elkaar overeen. Volgens tabel 1 bedraagt de chloride belasting 280 gr/sec. terwijl met de 'moment-opname' methode 248 gr/sec. werd gevonden.

2.3. De vergelijking van de chloride belasting van het gebied berekend volgens verschillende methoden

Worden de resultaten van de verschillende methoden van berekening van de chloride belasting voor het gehele gebied bijeen gezet dan volgt het onderstaande overzicht.

Tabel 4. De chloride belasting van het gehele gebied van 7 444 ha berekend volgens verschillende methoden voor de datum 14 april 1967

	Chloride belasting gr/sec.
Chloride Balans	
'Moment-opname'	690
Periode 31/3 - 14/4	700
Nota 449	1 640 [1]
Formule Bootsman	1 050 [2]

1) De cijfers van Nota 449 ad. 1 980 gr/sec voor 9 000 ha gereduceerd voor het gebied van 7 444 ha.

2) De formule van Bootsman voor het gebied met een oppervlak van O_M = 1 400 ha gelegen bovenstrooms van punt 91 luidt $C = b_M \cdot q^{-a}$ met $b_M = 880$ en $a = 0{,}56$. Voor heel Hunsingo (O_H = 37 100 ha) is $b_H = 440$ en a eveneens gelijk 0,56. Ten einde voor het oppervlak van het gebied (O_G = 7 444 ha) een chloride belasting te kunnen berekenen werd tussen de waarden van b = 880 en 440 geïnterpoleerd. Hierbij werd gebruik gemaakt van de oppervlakten verzilt gebied van beide gebieden bepaald aan de hand van de C.O.L.N. verziltingskaart. Het gemiddeld oppervlak verzilt gebied bedraagt voor Hunsingo ca 60 % en voor het gebied van het Meedster Maar boven punt 91 100 % en van het 7 444 ha grote gebied ca 80 %. Uitgaande dat de gedachte dat de coëfficiënt b evenredig is met het verzilte oppervlak kan de volgende lineaire interpolatie worden uitgevoerd.

$$\frac{b_M - b_H}{b_G - b_H} = \frac{O_H \times 0{,}6 - O_M \times 1}{O_H \times 0{,}6 - O_G \times 0{,}8}$$

waaruit na herleiding en substitutie van de gegevens volgt,

$$b_G = \frac{(880 - 440)\ (37\ 100 \times 0{,}6 - 7\ 444 \times 0{,}8)}{37\ 100 \times 0{,}6 - 1\ 400 \times 1} + 440 = 785$$

Voor het 7 444 ha grote gebied is dus $C = 785\ q^{-0{,}56}$ en de chloride belasting $CB = 785\ q^{-0{,}56} \times q \times 7\ 444 \times 10 \times 86\ 400^{-1}$ $= 675\ q^{0{,}44}$ gr Cl^{1}/sec. Voor $q = 2{,}74$ mm/dag is $C = 385$ gr/m^3 en $CB = 1\ 050$ gr/sec.

2.4. Het verloop van de chloride belasting met de tijd

Het is een bekend verschijnsel dat de chloride belasting van een gebied gedurende de verschillende seizoenen van het jaar niet constant is. In de periode van het voorjaar tot het einde van de zomer vindt berging van zout in de bodem plaats. Onder invloed van een dalende grondwaterstand en dus een afnemend drukverschil tussen het zoete phreatische water en het zoute diepe water, beweegt het zoutfront in de bodem zich omhoog. Hierdoor neemt het relatieve aandeel van het zoute water in de totale afvoer toe; de verzilting van de polderleidingen neemt toe. De totale hoeveelheid zout die in de polderleidingen omhoog kwelt neemt echter af; de chloride belasting neemt af.

Onder invloed van de najaar regens stijgt de grondwaterstand; het zoutfront in de bodem wordt teruggedrongen. Dit gaat gepaard met uitspoeling. Hierdoor neemt de chloride belasting van de polderleidingen toe. Het hangt voorts af van de verhouding tussen de hoeveelheden zoet regenwater en zout kwelwater in de totale afvoer of ook de verzilting afneemt. In de regel is dit wel zo, waardoor het chloride gehalte van het polderwater weer terugzakt tot voorjaarsniveau.

In tabel 5 werden de gegevens van een vijftal bemonsteringsdata bijeengebracht, uit welk overzicht duidelijk het verloop van de verzilting en de chloride belasting met de seizoenen valt te zien. Hierbij werd in dit geval voor het Boterdiep meetpunt 51 met 2 226 ha afwaterend oppervlak genomen.

Tabel 5. Het verloop van de chloride belasting en het chloride gehalte van het afgevoerde water gedurende het jaar

	Meedster Maar mp. 66 4 164 ha			Boterdiep mp. 51 2 226 ha			Totaal 6 390 ha		
	afvoer mm/dag	Cl-bel. gr/sec	Cl-geh. gr/m^3	afvoer mm/dag	Cl-bel. gr/sec	Cl-geh. gr/m^3	afvoer mm/dag	Cl-bel. gr/sec	Cl-geh. gr/m^3
5 mei 1966	1,14	260	475	1,14	140	470	1,14	400	470
14 okt. 1966	1,36	270	410	0,97	170	725	1,21	440	500
12 nov. 1966	2,23	700	650	1,74	360	800	2,06	1 060	700
3 mrt. 1967	2,37	360	315	2,44	180	290	2,37	540	300
14 apr. 1967	2,70	440	340	2,66	210	305	2,68	650	330

3. NABESCHOUWING

De redelijk goede overeenstemming van de resultaten van de beide berekeningsmethoden volgens de chloride balans voor een veertien daagse periode en volgens de momentopname wijzen duidelijk in de richting dat de uitkomsten verkregen met behulp van de zoutsonderingen (nota 449) te hoog zijn, en wel ca 2,5 maal. Hierdoor is met voldoende zekerheid aangetoond dat het chloride gehalte van het grondwater onder de slootbodem op 3 m onder maaiveld niet maatgevend is voor het chloride gehalte van het kwelwater. Bovendien bereikt de kwel blijkbaar via een groter deel van de natte omtrek van de sloot het open water dan alleen via de bodem.

Een verdere conclusie die hieraan verbonden kan worden is dat de kwelstroom vermoedelijk uit water bestaat afkomstig van een drietal bronnen: namelijk de Waddenzee met een chloride gehalte van 18 gram/m^3, een brakke kwelstroom afkomstig van de hoger gelegen polders tussen de Waddenzee en de rug Warffum-Uithuizen een een vrijwel zoete kwelstroom uit deze rug zelf.

4. DE BENADERING VAN DE VERZILTING EN DE KWEL ALS GRONDWATERSTROMINGSPROBLEEM

4.1. Inleiding

Bij verziltingsproblemen zijn steeds belangrijke vragen:
Waar komt het zout vandaan?
Hoeveel zout komt er in een bepaald gebied binnen?
Door welke wetten wordt de zoute kwel beheerst?

Voor ieder gebied dat met verzilting van het polderwater te kampen heeft kunnen de antwoorden op de beide eerste vragen verschillend zijn, doch dat op de laatste vraag is in principe steeds hetzelfde, zij het dat de uitwerking hiervan van gebied tot gebied zijn speciale accenten dient te krijgen. De laatste vraag is dan ook de meest fundamentele die ook een fundamenteel antwoord vereist. Dit antwoord luidt dan: de verzilting wordt beheerst door de hydrologische stromingswetten welke op het grondwater van toepassing zijn. De basis voor deze wetten wordt gevormd door de wet van Darcy welke luidt: $q = k.i.f.$ of in woorden:
De bij de grondwaterstroom betrokken hoeveelheid water is rechtevenredig met de doorlatendheid van de grond (k), het verhang (i) en de dikte van de doorstroomde grondlaag (f). Bovenstaande formule kan voorts nog geschreven worden in de vorm

$$q = if\,(\frac{1}{k})^{-1}$$

of

$$q = if\,(\Sigma\frac{1}{k})^{-1}$$

waarin $\frac{1}{k}$ respectievelijk $\Sigma\frac{1}{k}$ de weerstand van het watervoerend grondpakket is die de stroming ondervindt.

Verder is van belang dat de kwelstroom ergens vandaan komt, de bron, en tenslotte ergens aan de dag treedt, het kwelgebied. Is de bron zout - bijvoorbeeld de zee - dan zal de kwel in het kwelgebied zout zijn, dan wel zodanig brak als overeen komt met de menging met zoet regenwater, welke plaats vindt op de stromingsweg tussen de bron en het kwelgebied.

Voor het gebied van Noordoost Hunsingo zijn bovenstaande vragen ook aan de orde gesteld, waarbij het accent ligt op de tweede vraag. Op grond hiervan zullen de maatregelen ter compensatie van de verzilting moeten worden bestudeerd.

Het lijkt echter interessant en nuttig het verziltingsprobleem van dit gebied ook aan de hand van vraag drie nader te analyseren en te formuleren.

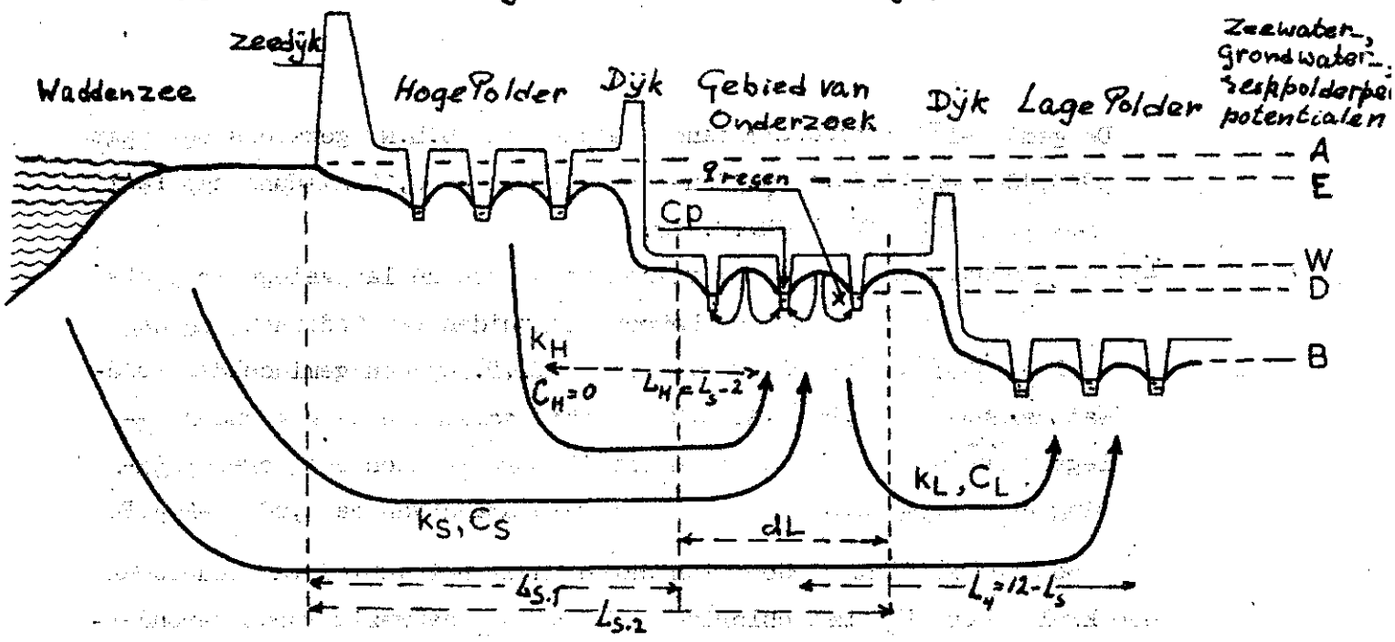
4.2. Schematisering van de hydrologische situatie

Het gebied van onderzoek wordt begrensd door de lijnen Warffum - Uithuizermeede - Huizinge - Onderdendam - Warffum en is gelegen tussen de hoger gelegen Noord Polder die aan de Waddenzee grenst en de lager gelegen veelal onder bemalen polders ten zuiden van Onderdendam. Deze situatie staat op fig. 2 schematisch weergegeven. In deze figuur staan tevens de hydrologische omstandigheden vermeld. Deze kunnen kort als volgt worden samengevat:

1. In het noorden is de Waddenzee gelegen, met wisselende eb en vloed peilen, doch waarvan de schorren en slikken bij de zeedijk een hoogteligging hebben welke vermoedelijk ca 1,20 m +N.A.P. zal zijn. Dit maakt dat ook de grondwaterstand in deze buitendijkse landen gemiddeld genomen omstreeks 1,20 m +N.A.P. zal bedragen.
2. Ten zuiden van de zeedijk zijn de Noord Polder en de Uiterdijkse landen gelegen over een breedte van 4 km met een hoogte ligging van ca 1,50 m +N.A.P. Volgens de C.O.L.N. gegevens bedraagt de gemiddelde grondwaterstand 0,45 m +N.A.P.
3. Ten zuiden van de lijn Warffum - Uithuizermeede ligt het gebied van onderzoek met een grootste breedte van 8 km en een hoogte ligging van globaal aflopend van 0,50 m +N.A.P. in het oosten tot 0,25 m +N.A.P. in het westen.

fig. 2.

Schematische weergave van het kwelstromingspatroon.



1. <u>Chloride gehalte van het in een leiding uittredende drainagewater</u>:

a. bovenstrooms v.e. meetpunt n : $C_{dr(n)} = \dfrac{C_{p.n} \sum_1^n q_i}{\sum_1^n q_i} = C_{p.n}$

b. in de sectie tussen mp. $n-1$ en n : $C_{dr(n-1/n)} = \dfrac{C_{p.n} \sum_1^n q_i - C_{p.(n-1)} \sum_1^{n-1} q_i}{\sum_1^n q_i - \sum_1^{n-1} q_i}$ ..... (2)

2. <u>De kwelhoeveelheid dK_s in een gebied met breedte b m en lengte dL m</u>:

$$dK_s = T_1 . b \frac{A-W}{L} dL \quad \text{of:} \quad K_s = T_1 . b . (A-W) \ln \frac{L_{s.2}}{L_{s.1}} \quad \ldots\ldots\ldots (3)$$

waarin $L_{s.2}$ en $L_{s.1}$ de op de grootste, resp. de kleinste afstand tot de Waddenzee gelegen grenzen van het gebied voorstellen. Wordt $K_1 D_1 b \ln \frac{L_{s.2}}{L_{s.1}} = \alpha$ gesteld dan is $K_s = \alpha(A-W)$.
b, L_{s2} en L_{s1} kunnen op de kaart uitgemeten worden.

3. <u>De hoeveelheid afgemerd Chloride</u>:
Aangenomen wordt dat $C_H = 0$

$$K_s . C_s - K_L . C_L = \alpha(A-W)C_s - \delta(W-B)C_L = C_{dr(n-1/n)} . q_{dr} \quad \ldots\ldots\ldots (4)$$

4. <u>De hoeveelheid afgeteerd water</u>:

$$q_{dr} = K_s + K_H + q_{regen} - q_L \text{ ; door meting bekend.}$$

of:

$$q_{dr} = \alpha(A-W) + \beta(E-W) + \gamma(W-D) - \delta(W-B) \quad \ldots\ldots\ldots (5)$$

met $\alpha = T_1 . b \ln \frac{L_{s.2}}{L_{s.1}}$; $\beta = T_2 . b \ln \frac{L_{s.2}-2}{L_{s.1}-2}$; $\gamma = T_3 . b (L_{s.2} - L_{s.1})$; $\delta = T_4 . b \ln \frac{12-L_{s.1}}{12-L_{s.2}}$.

5. <u>Het Chloride gehalte van het drainerende water</u>:
Door W uit (5) op te lossen en in (4) te substitueren volgt na omwerking en gelijkstelling met $C_{dr(n-1/n)}$ uit (2):

$$C_{dr(n-1/n)} = \underbrace{\frac{1}{\alpha+\beta-\gamma+\delta} \left\{ \begin{pmatrix} \beta(A-E) + \\ -\gamma(A-D) + \\ +\delta(A-B) \end{pmatrix} \alpha C_s - \begin{pmatrix} \alpha(A-B) + \\ +\beta(E-B) + \\ -\gamma(D-B) \end{pmatrix} \delta C_L \right\}}_{P} \times \frac{1}{q_{dr}} + \underbrace{\frac{\alpha C_s + \delta C_L}{\alpha+\beta-\gamma+\delta}}_{Q} \quad \ldots\ldots (6)$$

of: $$C_{dr(n-1/n)} = P \times \frac{1}{q_{dr}} + Q \quad \ldots\ldots (7)$$

De gemiddelde grondwaterstand volgens de C.O.L.N. gegevens bedraagt ca 0,40 m -N.A.P., terwijl het polderpeil ca 0,10 m +Hunsingo Peil (H.P.) of ca 0,80 m -N.A.P. is.

4. Ten zuiden van Onderdendam volgen tenslotte de laaggelegen polders van Midden Groningen. Deze hebben ten zuiden van Onderdendam een hoogte ligging van omstreeks 0,3 m -N.A.P. en een gemiddelde grondwaterstand van 0,95 m -N.A.P. Het ten oosten van deze gronden gelegen gebied van Fivelingo heeft in het algemeen een hogere ligging ca 0,5 m +N.A.P. en een grondwaterstand van ca 0,60 m -N.A.P.

Het schema laat verder zien dat er naar het gebied van onderzoek een kwelstroom K_s met chloride gehalte C_s aanwezig wordt verondersteld vanuit de Waddenzee naar het gebied van onderzoek. Tevens zal onder invloed van de peilverschillen tussen het grondwater in de hoge Noord Polder c.a. en die in het gebied in kwestie eveneens een kwelstroom (K_H) aanwezig zijn. Dit water wordt echter verondersteld zoet te zijn, zodat $C_H = 0$. Dit houdt dus in dat in het schema de Waddenzee als enige zoutbron wordt aangemerkt. Desgewenst kan men het schema complexer maken.

Onder invloed van de grondwaterpeil verschillen tussen de Waddenzee en het gebied van onderzoek komt het kwelwater met hoeveelheden k_s en K_H in het gebied van onderzoek in de sloten en polderleidingen terecht en veroorzaakt de verzilting daarvan. Het kwelwater vermengt zich op zijn weg naar de sloten met het zoete water van de overtollige neerslag. Het chloride gehalte van het polderwater hangt dus af van:

1. de intensiteit van de grondwater afvoer q_{dr}.
2. de intensiteit van de kwel en het chloride gehalte daarvan.

De eerste wordt beheerst door de klimaatsomstandigheden welke zich onder andere weerspiegelen in seizoen fluctuaties. Bij een vrijwel constant polderpeil wordt de q_{dr} dus in hoofdzaak bepaald door de grondwaterstand.

De kwelintensiteit wordt bepaald door het drukverschil tussen de zoutbron - de Waddenzee - respectievelijk kustpolders, de grondwaterstand in het kwelgebied, de afstand welke de kwelstroom moet doorlopen, het watervoerend vermogen van de ondergrond (kD) en de

doorlatendheid en de dikte van de afdekkende kleilaag. Het chloride gehalte C_s van het water van de kwelstroom afkomstig uit de Waddenzee is niet nauwkeurig bekend, doch aangenomen kan worden dat dit niet veel van het gehalte van 18 kg/m^3 chloor van het Noordzee water zal afwijken. Slecht bekend is verder de kD van de ondergrond. Informatie hieromtrent zou mogelijk verkregen kunnen worden door het verrichten van diepboringen, zoutsonderingen en grondwater potentiaalmetingen op verschillende diepten in het bodemprofiel. Bij afwezigheid van deze gegevens kan bij de bestudering van het kwel- en verziltingsprobleem een andere weg worden gevolgd, waarop in een volgende paragraaf nader zal worden ingegaan.

Veelal wordt bij gebrek aan informatie omtrent de kwelintensiteit, deze gedurende het gehele jaar constant verondersteld en wordt dan afgeleid uit de andere termen van de water- en de zoutbalans. De omstandigheid van een vrijwel constant waterpeil van de zoutbron en een wisselende grondwaterstand in het kwelgebied maakt dat de kwelintensiteit ook wisselend van grootte zal zijn. Hierop werd in het voorgaande ook reeds gewezen (zie 2.4.)

Het bestaan van een potentiaal verschil tussen het grondwater in het gebied van onderzoek en de lage polders verder zuidelijk gelegen is verantwoordelijk voor een stroming van grondwater (K_L), vanuit het gebied van onderzoek naar deze lage polders. Het chloride gehalte C_L van dit water zal eveneens niet bekend zijn.

4.3. De mathematische formulering van het kwel- en verziltingsprobleem

Op grond van de in de vorige paragraaf beschreven schematisering van de hydrologische situatie kan met behulp van eenvoudige formuleringen het kwel- en verziltingsprobleem nader geanalyseerd en voor berekening geschikt gemaakt worden. Hierbij zal ten behoeve van de overzichtelijkheid de volgende indeling worden aangehouden:

4.3.1. Het chloride gehalte van het in een leiding uittredende water.

4.3.2. De kwelhoeveelheid in een gebiedsdeel.

4.3.3. De chloride opbrengst van het gebied.

4.3.4. De hoeveelheid afgevoerd water.

4.3.5. Het chloride gehalte van het afgevoerde water.

De opdracht is nu om de relatie te vinden tussen het chloride gehalte van het door de grote leidingen afgevoerde water en een aantal gemakkelijk te verkrijgen gegevens. Deze zijn:

de (gemiddelde)potentiaal van het grondwater in:

de aanwassen van de Waddenzee	A
de hoge polder	E
het gebied van onderzoek	W
de lage polders zuidelijk daarvan	B
het polderpeil van het te onderzoeken gebied	D
het chloride gehalte van het water in een leiding op meetpunt i (waarbij i = 1, 2, 3, ...n)	$C_p.i$

4.3.1. Het chloride gehalte van het in een leiding uittredende water

Bij het onderzoek naar de verziltingstoestand van een polderleiding wordt op een aantal punten van die leiding door bemonstering het chloride gehalte van het water bepaald. Deze punten worden naar aantal en plaats en naar opname frequentie zo gekozen dat met de verkregen chloride gehalten $C_p.i.t$ een zo goed mogelijk inzicht wordt verkregen in de verdeling van de verziltingsintensiteit $C_p.i$ van het open water over het gebied en het verloop daarvan met het verstrijken der seizoenen (t).

De chloride belasting CB van een gebied dat bovenstrooms van een meetpunt i = n gelegen is volgt uit:

$$CB = C_{p.n} \times q_n \quad ..... (4.1)$$

waarin q_n de afvoerintensiteit is in m^3/tijdseenheid.
In dit geval is dushet gemeten chloride gehalte $C_{p.n}$ tevens het gemiddelde gehalte van het op het bovenstrooms daarvan gelegen leidinggedeelte drainerende water: $q_{dr} = q_n$; dus is

$$C_{p.n} = C_{dr.n}$$

Het chloride gehalte van het drainage water afwaterend op een sectie van een leiding begrensd door de bemonsteringspunten n - 1 en n is:

$$C_{dr}(n_n - 1) = \frac{C_{p.n} \sum_1^n q_i - C_{p.(n-1)} \sum_1^{n-1} q_i}{\sum_1^n q_i - \sum_1^{n-1} q_i} \quad \ldots\ldots (4.2)$$

Zou men op een of andere wijze beschikken over de chloride gehalten van het drainerende grondwater op de leidingsectie 1 tot n dan zou $C_{p.n}$ berekend kunnen worden volgens

$$C_{p.n} = \frac{\sum_1^n C_{dr.i} \times q_i - \sum_1^{n-1} C_{dr.i} \times q_i}{\sum_1^n q_i - \sum_1^{n-1} q_i} \quad \ldots\ldots (4.2a)$$

waarin q_i in dit geval de hoeveelheid water voorstelt die op de leidingsectie i tussen de punten i = 1 tot n tot afvoer komt.

4.3.2. De hoeveelheid kwel en de wegzijging uit het gebied

In het gebied van onderzoek zal een onderdeel van een hoeveelheid kwel uit de Waddenzee ontvangen, die weergegeven wordt door:

$$dK_s = T_1 b \frac{A - W}{L_s} dL_s$$

De totale kwel in dit gebied wordt verkregen door integratie tussen de grenzen $L_{s.1}$ en $L_{s.2}$:

$$K_s = T_1 b (A - W) \ln \frac{L_{s.2}}{L_{s.1}} \quad \ldots\ldots (4.3)$$

Hierin is:

K - de kwel uit de Waddenzee afkomstig

T_1 - het watervoerend vermogen van de grondlaag waarin de stroming naar het betreffende gebied plaats heeft;

b - de breedte van het gebied evenwijdig aan de zeekust;

$L_{s.2}$ respectievelijk $L_{s.1}$ de grootste respectievelijk de kleinste afstand in km van de gebieds grenzen tot de zeekust;

A - de potentiaal van het grondwater in de buitendijkse schorren en slikken;

W - de grondwaterstand in het kwelgebied.

Wordt $T_1 b \ln \frac{L_{s.2}}{L_{s.1}} = \alpha$ gesteld dan gaat formule (4.3) over in

$$K_s = \alpha (A - W) \quad ..... \quad (4.3.a)$$

Waarin α de betekenis heeft van geleidingsvermogen van de grond voor de grondwaterstroom onder invloed van het potentiaal-verschil (A - W).

Analoog aan het voorgaande kan bij wijze van benadering de hoeveelheid kwel welke het gebied uit de hoge polders ontvangt worden weergegeven:

$$K_H = T_2 \, b \, (E - W) \ln \frac{L_{H.2}}{L_{H.1}} \quad ..... \quad (4.3.b)$$

Waarbij $L_{H.2}$ en $L_{H.1}$ de grootste, respectievelijk kleinste afstand van de gebieds grenzen tot het midden van het hoge poldervoorland en (E - W) het bij benadering constante drukverschil van het grondwater tussen beide gebieden voorstellen.

Is

$$\beta = T_2 b \ln \frac{L_{H.2}}{L_{H.1}} \quad \text{met} \quad L_H = L_s - 2 \text{ km}$$

dan is

$$K_H = \beta (E - W) \quad ..... \quad (4.3.c)$$

stelt men E - W ook constant, dan is K_H constant.

De wegzijging uit het beschouwde gebied naar de verder zuidwaarts gelegen lagere polders kan als volgt benaderd worden weergegeven:

$$K_L = T_4 \, (W - B) b . \ln \frac{L_{4.1}}{L_{4.2}} = T_4 \, (W - B) b . \ln \frac{12 - L_{s.1}}{12 - L_{s.2}} \quad ..... \quad (4.3.d)$$

waarin dus $L_4 = (12 - L_s)$ km.

4.3.3. De chloride opbrengst van het gebied

Aangenomen wordt dat de Waddenzee de enige zoutbron is. Deze veronderstelling houdt in dat de hoge kustpolders zoet zijn, hetgeen een schematisering is. Het zout van deze polders wordt echter beschouwd eveneens te behoren tot de stroom vanuit de Waddenzee zodat mag worden aangenomen dat $C_H = 0$. (zie fig. 2). Men kan zich voorstellen dat de kustpolder gesplitst is geworden in een strook met een toestand die gelijk is aan die op de schorren en een zoet deel. De grens tussen land en zee is bij deze schematisering dus wat verschoven gedacht.

De chloride hoeveelheid welke het gebied belast wordt gevonden door het saldo van de aanvoer vanuit de Waddenzee en het verlies naar de lage polders.

$$C_{dr}(n_n - 1)\, q_{dr}(n_n - 1) = K_s C_s - K_L C_L = \alpha\,(A - W)C_s - \delta\,(W - B)C_L \quad \ldots (4.4)$$

waarin dus:

$q_{dr}(n_n - 1)$ = de afvoerintensiteit tussen de punten (n - 1) en (n) (m^3/dag);

$C_{dr}(n_n - 1)$ = het chloride gehalte en het drainage water tussen (n - 1) en (n) (gr/m^3);

C_s = het chloride gehalte van het kwelwater k_s (gr/m^3);

C_L = het chloride gehalte van het inzijgende water naar de lage polders (gr/m^3);

K_L = de intensiteit van de inzijgstroom (m^3/dag);

B = de potentiaal van het grondwater in de lage polders (m N.A.P.).

4.3.4. De uit het gebied afgevoerde hoeveelheid water

Het water dat uit het gebied tot afvoer komt bestaat uit:

$$q_{dr} = \text{zeekwel} + \text{polderkwel} + \text{overtollige neerslag} - \text{inzijging}$$

$$= K_s + K_H + q_{regen} - K_L$$

$$q_{dr} = \alpha(A - W) + \beta(E - W) + \gamma(W - D) - \delta(W - B) \quad \ldots(4.5)$$

waarin:

E : de potentiaal van het grondwater in de hoge polders;

D : het polderpeil;

α, β, γ en δ : constanten te vergelijken met het geleidend vermogen van de watervoerende lagen waarin de diverse stromingen plaats vinden:

$$\alpha = T_1 b \ln \frac{L_{s.2}}{L_{s.1}} \; ; \quad \beta = T_2 b \ln \frac{L_{s.2} - 2}{L_{s.1} - 2} \; ; \quad \delta = T_4 b \ln \frac{12 - L_1}{12 - L_2} \quad \ldots(4.5.a)$$

$$\gamma = \frac{b(L_2 - L_1}{\omega} \quad \ldots(4.5.b)$$

waarin ω = de totale weerstand is welke de drainage stroom tussen de sloten ondervindt.

Deze uitdrukking voor de drainagestroom q_{dr} is feitelijk niet geheel correct, doch als benadering wel aanvaardbaar aangezien de kwelintensiteit in de regel klein is ten opzichte van de af te voeren overtollige neerslag q_{regen}. Door het drukverschil (A - W) en (E - W) wordt het kwelwater tot 'onder' het kwelgebied gebracht. Vervolgens is er nog een zekere drukhoogte nodig om het kwelwater in de polderleidingen te brengen. Het drukverschil (W - D) zorgt hiervoor, doch tevens voor de afstroming van de overtollige neerslag q_{regen}. Juister ware het om bijvoorbeeld de kwelstroom K_s als volgt in te brengen

$$K_s = \frac{A - D}{\omega^1 + \frac{L_{dr}}{8k_3D_3}}$$

waarin $\frac{L}{8k_3D_3} = \frac{1}{\alpha}$ de horizontale en ω^1 de som van de radiale en de vertikale weerstanden voorstellen, welke bij de beschouwingswijze toegepast verwaarloosd worden.

4.3.5. Het chloride gehalte van het drainerende water

Door combinatie van de formules (4.2), (4.4) en (4.5) kan het chloride gehalte van het op een leidingsectie drainerende water worden uitgedrukt in de drukhoogte verschillen, het geleidongsvermogen van de doorstroomde grondlagen en de chloride gehalten van het zoute kwel- en inzijgingswater.

Hiertoe wordt W uit vergelijking (4.5) opgelost:

$$W = \frac{\alpha A + \beta E - \gamma D + \delta B - q_{dr}}{\alpha + \beta - \gamma + \delta}$$

uit vergelijking (4.4) volgt:

$$C_{dr} \cdot q_{dr} = \alpha AC_s + \delta BC_L - (\alpha C_s + \delta C_L)W$$

zodat door substitutie volgt:

$$C_{dr}q_{dr} = (\alpha AC_s + \delta BC_L) - \frac{\alpha C_s + \delta C_L}{\alpha + \beta - \gamma + \delta}(\alpha A + \beta E - \gamma D + \delta B - q_{dr})$$

vervolgens worden beide leden van deze vergelijking door q_{dr} gedeeld en alle termen van het rechter lid onder een noemer gebracht:

$$C_{dr}(^{n-1}_{nn}) = \frac{(\alpha AC_s + \delta BC_L)(\alpha+\beta-\gamma+\delta) - (\alpha C_s + \delta C_L)(\alpha A + \beta E - \gamma D + \delta B)}{\alpha + \beta - \gamma + \delta} \frac{1}{q_{dr}} + \frac{\alpha C_s + \delta C_L}{\alpha + \beta - \gamma + \delta}$$

Tenslotte wordt na uitvermenigvuldigen van de teller van de eerste term van het rechterlid en omwerking verkregen:

$$C_{dr}(^{n-1}_{n}) = \underbrace{\frac{1}{\alpha+\beta-\gamma+\delta}\left\{\begin{pmatrix}\beta(A-E)+\\ -\gamma(A-D)+\\ +\delta(A-B)\end{pmatrix} \cdot \alpha C_s - \begin{pmatrix}\alpha(A-B)+\\ +\beta(E-B)+\\ -\gamma(D-B)\end{pmatrix} \cdot \delta C_L\right\}}_{P} \frac{1}{q_{dr}} + \underbrace{\frac{\alpha C_s + \delta C_L}{\alpha+\beta-\gamma+\delta}}_{Q} \quad \ldots\ldots(4.6)$$

Deze vergelijking heeft de gedaante van:

$$C_{dr}(n_n - 1) = P^1 \cdot \frac{1}{q_{dr}} + Q \quad \ldots\ldots (4.7)$$

Zoals uit de vergelijking (4.6) valt op te maken heeft P^1 de dimensie gr Cl^1/dag en Q de dimensie gr Cl^1/m^3 indien q_{dr} in m^3/dag wordt genomen.

Het is echter ter wille van de eenvoud bij het soort formules als de betreffende meer gebruikelijk om q_{dr} in te voeren als mm/dag. Hierdoor wordt (4.7):

$$C_{dr}\ (n - 1) = P \frac{1}{q_{dr}} + Q \ldots\ldots (4.7a)$$

waarbij dan P de dimensie heeft van gr $Cl/_{m^3}.dg/mm$. De dimensie van Q blijft hierbij ongewijzigd.
Aangezien een afvoer van q m^3/dag afkomstig van O $(n_n - 1)$ha gelijk is aan $\frac{q}{10 \times O\ (n_n - 1)}$ mm/dag kan P als volgt in P^1 worden omgerekend:

$$P^1 = (10 \times O\ (n_n - 1))^{-1}\ P \text{ gr Cl/dag} \ldots\ldots (4.8)$$

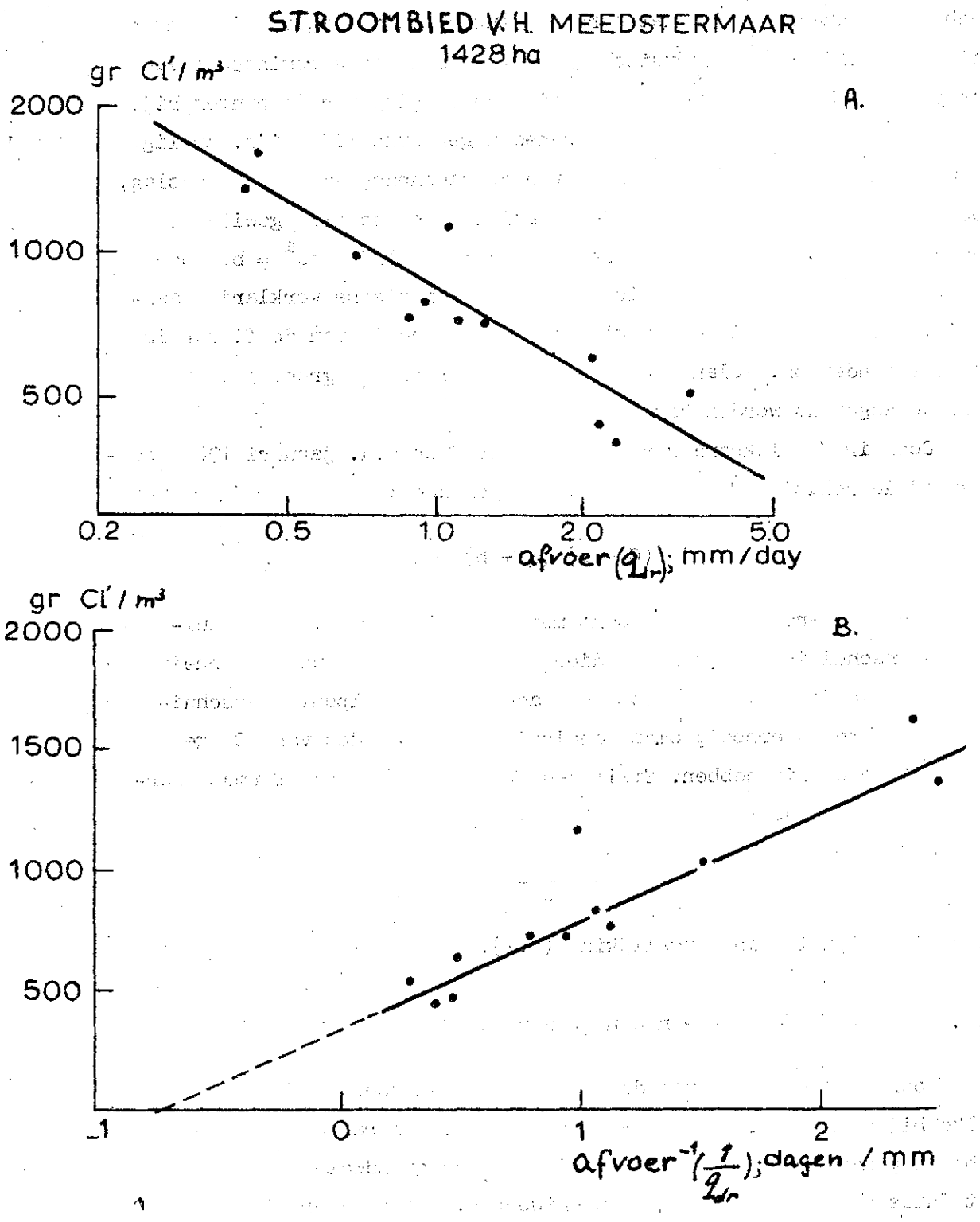
In deze formule is voor ieder beschouwd deelgebied Q een constante, daar de chloride concentraties C_s en C_L en de geleidingsvermogens α, β, γ en δ als constanten kunnen worden beschouwd. P is behalve van dezelfde grootheden tevens afhankelijk van de peilen A en D die als constant kunnen worden beschouwd en van de grondwaterpeilen B en E welke aan een seizoens fluctuatie onderhevig zijn. Daar A, D, B en E echter tevens met de afvoer intensiteit q_{dr} samenhangen volgens (4.5) zal ook P een constante waarde hebben.

5. DE TOEPASSING OP HET GEBIED VAN ONDERZOEK

5.1. De formules van Bootsman en Dijkstra

In eerste instantie werd formule (4.7) toegepast op de gegevens welke Bootsman* in figuur 4 van zijn rapport verstrekt, welke figuur betrekking heeft op het Meedstermaar bovenstrooms van het Boterdiep. In de fig. 3A zijn de chloride gehalten van het polderwater uitgezet tegen de afvoer, beide op logarithmische schalen, zoals Bootsman dit deed. In fig. 3B is het chloride gehalte uitgezet tegen $\frac{1}{q}$, beide op metrische schalen. In beide gevallen kan door de stippen zwermen een

*BOOTSMAN, M. De mogelijkheid van doorspoelen als maatregel ter bestrijding van verzilting in het noordelijk deel van het waterschap Hunsingo. (Interne Nota Prov. Waterstaat) (1966).



Het verband tussen Chloride gehalte van het afgevoerde water bij meetpunt g1 in het Meedster Maar en de afvoer intensiteit A. Logarithmische schalen volgens Bootsman; B. Metrische schalen waarbij de reciproke van de afvoer werd uitgezet. In beide figuren werden dezelfde gegevens gebruikt afkomstig uit het rapport van Bootsman.

rechte getrokken worden. Het verschil tussen beide figuren is echter dat fig. 2 B berust op fysische wetmatigheden: de stromingswet van Darcy. De lijn van fig. 3 A kan gezien de ligging van de punten bij $1/q = 1$ zeer goed een iets naar beneden gekromde lijn zijn. Er ligt geen veronderstelling ten aanzien van de samenhang aan ten grondslag, hoewel deze door de keuze van de logarithmische schalen gewild of ongewild feitelijk wel gesuggereerd wordt; namelijk $cq^a = b$. Voor de exponent $a < 1$ is dan ook geen fysische verklaring aanwezig. Hoe dit ook zij de praktische bruikbaarheid van de figuur is er niet minder om, zolang men maar blijft binnen de grenzen welke door de gegevens worden bestreken.

Door ir J. Dijkstra werd in een schrijven d.d. januari 1969 voorgesteld de relatie $C\,q^a = b$ te vervangen door:

$$(C + a)\ (q + b) = x$$

welke grote overeenkomst vertoont met vergelijking (4.7). De nulpunts-verschuiving b van q dient om te voorkomen dat C oneindig groot wordt indien q tot nul nadert. Deze nulpunts-verschuiving is echter overbodig omdat oneindig grote waarden van C geen fysische betekenis hebben. Stelt men $b = 0$ dan kan de formule worden weergegeven door:

$$c = \frac{x}{q} - a$$

welke identiek is aan vergelijking (4.7).

5.2. Het berekenen van de afvoer

Voor de berekening van de hoeveelheid afgevoerd drianagewater, welke bij de bemonsteringspunten in de leidingen passeren, werd weer gebruik gemaakt van de afvoerfuncties van de grondwaterbuizen en van het Thiessennet voor deze buizen ontworpen, zoals nader uiteengezet in paragraaf 2.1.2.

5.3. Het Chloride gehalte van het drainagewater

Onder het drainagewater wordt hier verstaan de hoeveelheid water die via een leidingsectie tussen twee meetpunten tot afvoer komt. Het chloride gehalte van dit water wordt berekend door middel van vergelijking (4.2.). Tijdens de periode mei 1966 t/m juni 1967 waarin de grondwaterbuizen werden waargenomen vond 15 maal een chloride bemonstering plaats; de laatste op 14-4-1967. Uit deze reeks gegevens werden vijf data uitgekozen, waarop een zo volledig mogelijk stel gegevens van zowel de chloride gehalten als van de grondwaterstanden aanwezig was. Deze data waren 5/5, 14/10, 11/11 1966 en 3/3 en 14/4 1967. Tevens werd hierbij gestreefd naar een zekere spreiding in de afvoerhoeveelheden. Het bleek bovendien dat de laatste voorjaarswaarneming in 1966 op 5/5 plaats vond, waarna eerst op 14/10 de bemonsteringen werden hervat met 14-daagse intervallen.

5.4. Het verband tussen het Chloride gehalte en de afvoer

Door voor een aantal stroomgebieden of onderdelen daarvan de chloride gehalten van het drainagewater berekend volgens (4.2) uit te zetten tegen de reciproke van de drainage intensiteit in mm/dag konden voor ieder onderscheiden stroomgebied de P en de Q worden afgeleid, hetzij door schatting, hetzij door berekening van de gemiddelde lijn volgens (4.7) In tabel 6 staan voor een aantal van zulke stroomgebieden P en Q vermeld. Tevens werd de natuurlijke afvoer intensiteit gegeven in mm/dag en m^3/sec, waarbij het chloride gehalte van het bij dit meetpunt passerende water 350 gr/m^3 bedraagt. De rubrieken A.1 en B.1 geven P en Q voor opklimmende grootte van het stroomgebied van het Meedstermaar c.a., respectievelijk het Boterdiep. Rubrieken A_2 en B_2 geven dezelfde gegevens voor een aantal zijleidingen en gebiedsonderdelen. In figuren 4.a en 4.b werden de betrekkingen (4.7) voor 20 van de in tabel 6 opgenomen gebieden grafisch weergegeven.

Tabel 6. Waarden voor P en Q voor opklimmende grootte van het stroomgebied van het Meedstermaar en het Boterdiep en voor een aantal andere stroomgebieden. Tevens werd vermeld de kritieke afvoer in mm/dag en m^3/sec, waarbij het chloride gehalte van het bij het bemonsteringspunt passerende water 350 gr/m^3 bedraagt (zie fig. 1A)

Monster punt	Afwat. opp. ha	P*	Q**	Afvoerintens. mm/dag	m^3/sec	Monster punt	Afwat. opp. ha	P	Q	Afvoerintens. mm/dag	m^3/sec
	A.1. MEEDSTERMAAR c.a.						B.1. BOTERDIEP				
22	128	2110	-475	2,56	0,04	96	21	1214	-14	3,33	0,01
25	261	3610	-1030	2,62	0,08	102	716	884	130	3,79	0,32
28	406	4805	-1410	2,73	0,13	44	1088	802	112	3,37	0,42
93	1030	1322	-310	2,02	0,23	51	2226	676	72	2,43	0,63
91	1400	1082	-36	2,81	0,46						
85	1788	1120	-16	3,06	0,63						
81	2465	1510	-214	2,68	0,77						
77	2856	1200	-110	2,61	0,86						
70	3341	1295	-180	2,45	0,95						
68	3932	643	160	3,38	1,54						
66	4164	280	220	2,16	1,04						
	A.2. ONDERDELEN						B.2. ONDERDELEN				
94	545	255	120	1,11	0,07	100 1)	439	1380	20	4,18	0,21
89	69	570	130	2,59	0,03	101 2)	145	130	270	1,63	0,03
87	165	545	242	5,05	0,10	43 3)	227	80	430	-1,00	neg.
84	293	1180	-84	2,72	0,09	47	771	420	80	1,55	0,14
82	270	1910	-110	4,15	0,18	45	58	40	248	0,39	0,003
79	161	2450	-550	2,72	0,05	46	60	110	160	0,58	0,004
78	82	560	20	1,70	0,02	50 4)	82	80	40	0,38	0,004
76	309	190	230	1,58	0,06	55	487	85	75	0,31	0,02
73	42	425	20	1,85	0,01	105	381	180	130	0,82	0,04
72	47	645	180	3,80	0,02						
103	110	129	496	-0,88	neg.	62	87	93	395	-2,06	neg.
104	263	245	330	12,25	0,37	4	197	720	70	2,57	0,06
71	25	720	70	2,57	0,07						
67	182	1695	-344	2,45	0,05						
69	523	460	144	2,23	0,14						

* gr Cl/m^3 (dg/mm)
** gr Cl/m^3

1) Eppenhuister Maar
2) Bieske Maar
3) Startenhuister Maar
4) Huizinge Maar

Voor ieder gebied van tabel 6 werd op grond van de vijf beschikbare punten de gemiddelde lijn bepaald onder aanname dat zowel C als q onzeker zijn (de zogenaamde tg 2φ-methode). Bij de visuele schatting van de gemiddelde lijn door een puntenzwerm wordt bewust of onbewust dezelfde methode toegepast.

Uit de gegevens van tabel 6 blijkt dat de afvoer bij meetpunt 66 meer dan ca 2,5 mm/dag of 1,2 m^3/sec moet bedragen wil het chloride gehalte beneden 350 gr Cl/m^3 blijven. Voor het Boterdiep zal de afvoer om dezelfde reden meer dan ca 3 mm/dag of 0,78 m^3/sec moeten zijn.

Van de zijleidingen vermeld onder A.2 vereisen de gebieden 87 en 82 veel water, 4 à 5 mm/dag, en gebied 104 zeer veel water namelijk ± 12 mm/dag, terwijl gebied 103 het kritieke chloride gehalte in het gebied niet op natuurlijke wijze bereikt wordt.

De onder rubriek B.2 vermelde stroomgebieden zijn met uitzondering van gebied 100 en 43, het Eppenhuister Maar respectievelijk Bieske Maar, veel minder verzilt. Een afvoer intensiteit voor het Eppenhuister Maar van 4,2 mm/dag of 0,21 m^3/sec zou nodig zijn om een chloride concentratie van 350 gram/m^3 te bewerkstelligen. Het Bieske Maar zal steeds zouter zijn dan overeenkomt met 350 gr Cl^1/m^3.

5.5. De wateraanvoer behoefte

Op grond van de relatie:

$$C = P\frac{1}{q} + Q$$

kan voor de in tabel 6 vermelde gebieden de hoeveelheid aan te voeren water berekend worden. Deze is afhankelijk van:
de natuurlijke afvoer intensiteit q_{dr}
het chloride gehalte van het doorspoelwater C_a
het toegestane chloride gehalte van het water bij het verlaten van het gebied C_m

De volgende vergelijking kan nu worden opgesteld:

Het verband $C = P.\frac{1}{q_{dr}} + Q$ (verg 6) van een aantal in tabel 6 vermelde stroomgebieden.

fig: 4a

{28 : Chloridebemonsteringspunt}

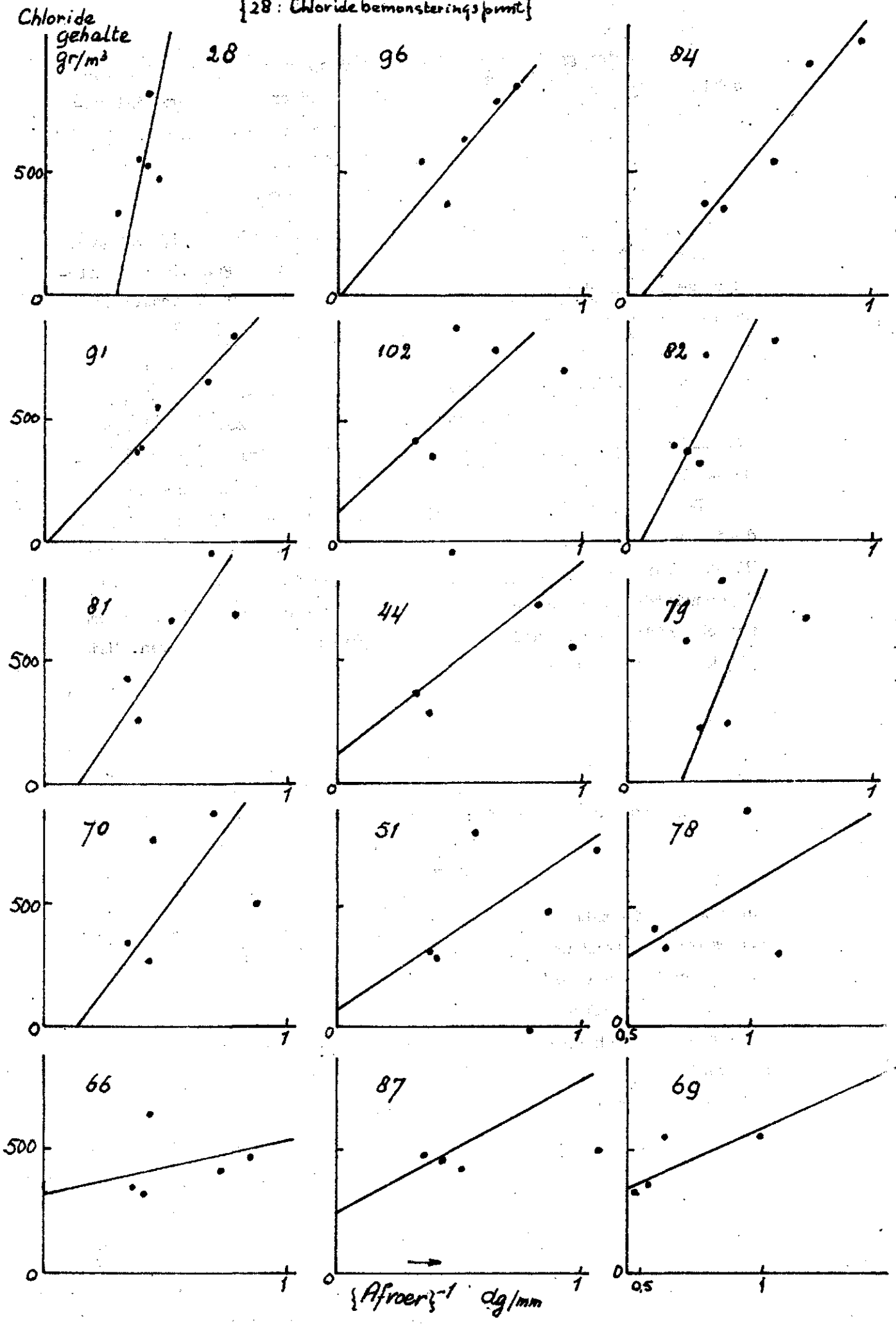
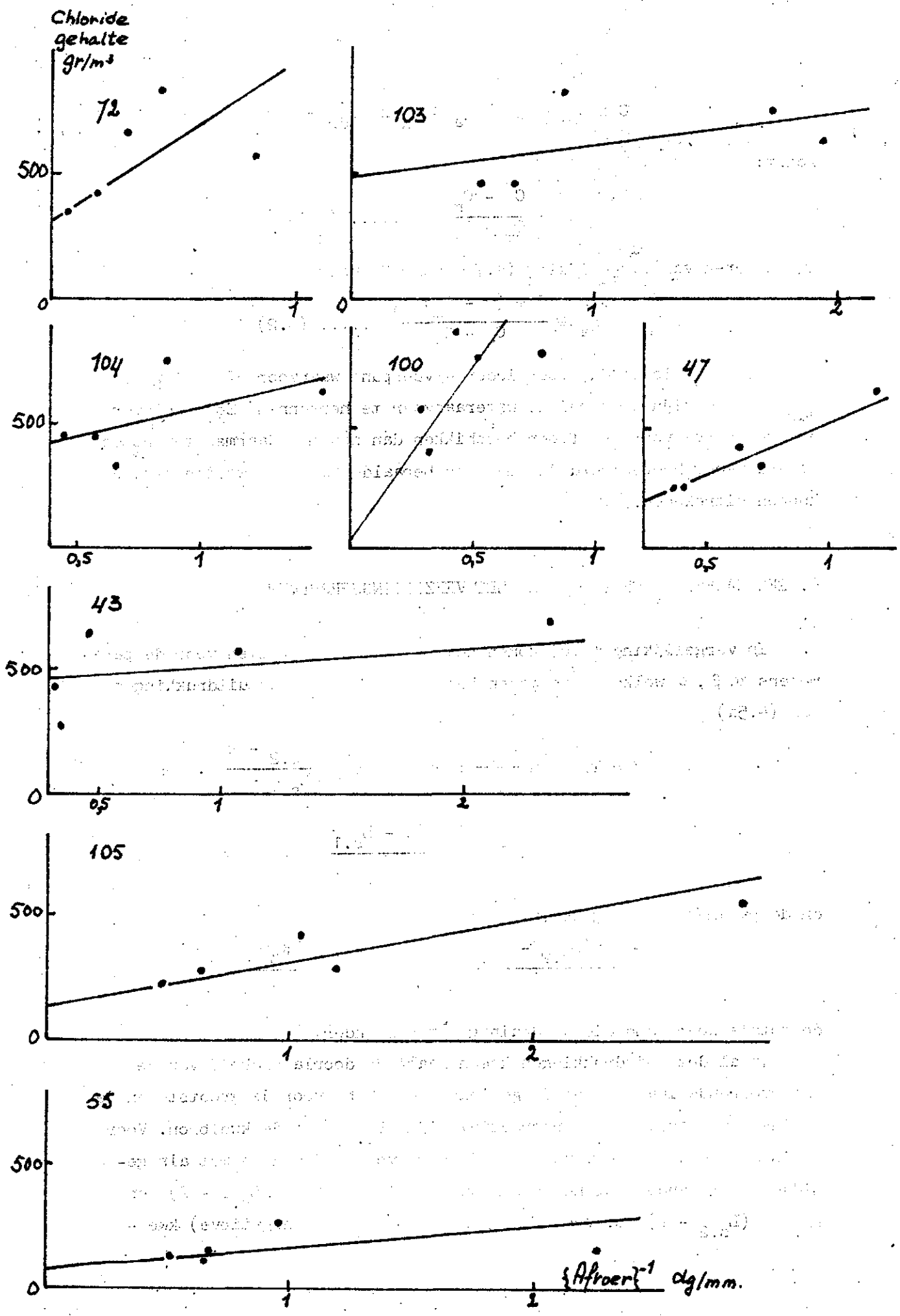


fig. 4.b


Chloride gehalte gr/m³
72
103
104
100
47
43
105
55
500
0
0,5
1
2
{Afroer}⁻¹ dg/mm.

$$C \times q_{dr} + C_a \times q_a = C_m \times (q_{dr} + q_a)$$

zodat:

$$q_a = \frac{C - C_m}{C_m - C_a} q_{dr} \quad \ldots\ldots (5.1)$$

na invoeren van vergelijking (4.7) voor C volgt:

$$q_a = \frac{P + (Q - C_m)\, q_{dr}}{C_m - C_a} \quad \ldots\ldots (5.2)$$

Met deze formule is dus voor ieder afvoerpunt waarvoor P en Q en q_{dr} bekend zijn de vereiste wateraanvoer te herkennen. Zou men over een kanscurve voor de afvoer beschikken dan zou men daarmee tevens de wateraanvoer hoeveelheid die met een bepaalde kans kan worden verwacht kunnen uitrekenen.

6. EEN NADERE BESCHOUWING VAN HET VERZILTINGSPROBLEEM

In vergelijking (4.6) komen naast de peilverschillen voor de parameters α, β, δ welke weergegeven kunnen worden door de uitdrukkingen van (4.5a)

$$\alpha = T_1\, b \ln \frac{L_{s.2}}{L_{s.1}} \; ; \quad \beta = T_2\, b \ln \frac{L_{s.2} - 2}{L_{s.1} - 2} \qquad \text{en}$$

$$\delta = T_4\, b \ln \frac{12 - L_{s.1}}{12 - L_{s.2}}$$

en de parameter γ volgens (4.5.b):

$$\gamma = \frac{b(L_{s.2} - L_{s.1}}{} \quad \text{met } \omega = \omega^1 + \frac{8K_3D_3}{L_{dr}}$$

de totale weerstand die de drainage stroom ondervindt.

In al deze uitdrukkingen komen naast de doorlatendheid van de watervoerende laag T en de gebiedsbreedte b voor de grootste en de kleinste afstand, $L_{s.2}$ respectievelijk $L_{s.1}$ tot de kwelbron. Voor α is dit de Waddenzee, voor β de hoge voorlandpolders met als gemiddelde afstanden tot het beschouwde gebied $L_{H.1} = (L_{s.1} - 2)$ en $L_{H.2} = (L_{s.2} - 2)$ km. Voor δ is het doel van de (negatieve) kwel-

stroom het lage polderland, waarvan de noordelijke begrenzing globaal op 12 km van de dijk van de Waddenzee is gelegen.

Daar de bovengenoemde parameters zowel in P als in Q van vergelijking (4.7) voorkomen, zou verwacht mogen worden dat er tussen P en Q een verband bestaat. Dit bleek inderdaad het geval. In fig. 5 werden de waarden van P en Q van tabel 6 aangevuld met die van nog 14 andere gebiedsonderdelen tegen elkaar uitgezet. Gevonden werd:

$$Q = aP + Q \quad .....(6.1)$$

met $a = -0{,}3625$, $Q_o = 300$ en $r = 0{,}943$.

De uitdrukkingen van(4.5a) en (4.5b) geven voorts aanleiding tot de veronderstelling dat P en Q een functie zijn van de afstand van het gebied tot de Waddenzee. Aangezien bovendien verwacht mag worden dat de kwelstroom en daarmee de verzilting met het toenemen van die afstand geleidelijk aan intensiteit inboet ligt de veronderstelling van een functie van exponentiële aard voor de hand. Dit blijkt inderdaad het geval te zijn.

Het invoeren van de dimensie L in fig.5 betekent dat de L_s-as loodrecht staat op het vlak van deze figuur. Uit een uitgevoerde controle bleek voorts dat aangenomen kan worden dat het vlak $V = f(P, Q, L_s)$ loodrecht op het PQ-vlak staat en dit volgens de lijn van vergelijking (6.1) snijdt.

Vervolgens werden de logarithmen van de afstanden l_k langs de lijn in fig. 5 van Q_o tot de projectie van ieder punt K op de lijn volgens vergelijking (6.1)(zie inzet fig. 5)uitgezet tegen de afstand van het gebied tot de Waddenzee en door de stippenzwerm een rechte lijn gerekend; fig. 6. Daarbij is de regressielijn berekend die de fout geheel in de l veronderstelt, iets wat geoorloofd is omdat de l niet zo zeer een stromingslengte als wel een som van stromingsweerstanden voorstelt. Deze kunnen ongetwijfeld flink varieren.

Dan is

$$\log l_k = m^1.L_s + \log l_o$$

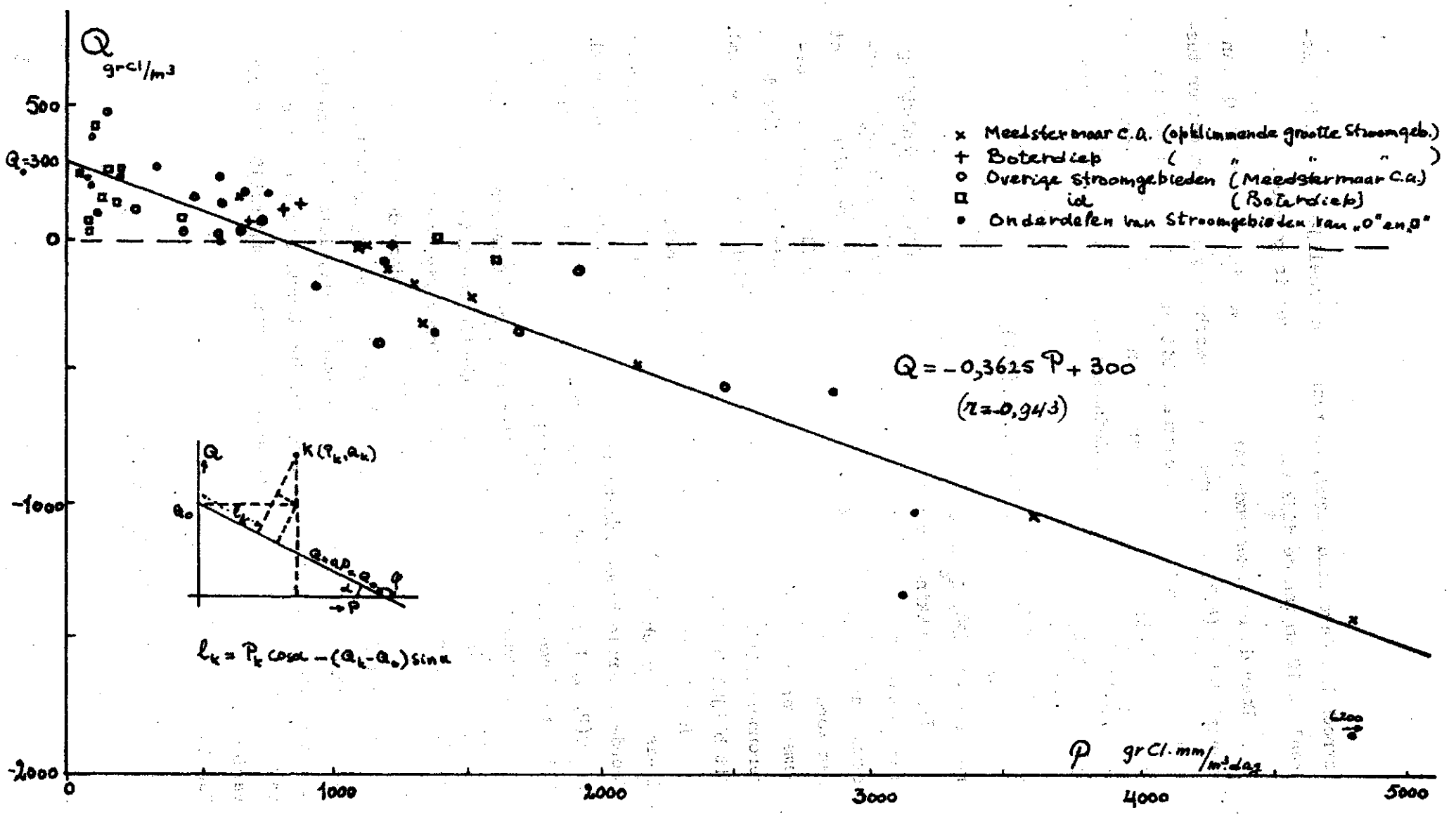


fig 5: Het verband tussen de hellingshoek P en het intercept Q uit de vergelijking (7) voor 56 stroomgebieden of onderdelen van stroomgebieden

of

$$l = l_o \, e^{m.L_s} \; \ldots\ldots \; (6.2)$$

Hierin blijkt: $l_o = 12\,000$ en $m = 2{,}3 \; m^1 = 0{,}384$

Uit (6.2) kunnen direct de waarden van P en Q worden afgeleid omdat:

$$P = l \cos \alpha \quad \text{en} \quad Q = Q_o - l \sin \alpha \; \ldots\ldots \; (6.2a)$$

Deze lijn voor P en Q als functie van L_s is weergegeven in fig. 7. Op de horizontale as staan de schalen voor P en Q afzonderlijk vermeld. Invoering van de vergelijkingen (6.2a) in (4.7a) geeft:

$$C = (\frac{1}{q} + a) \, l_o \cos \alpha . e^{mL_s} + Q_o \; \ldots\ldots \; (6.3)$$

Substitutie van de gevonden waarden voor a, , l_1, m en Q_o geeft tenslotte:

$$C = 11.280 \, (\frac{1}{q_{dr}} - 0{,}3625) \, e^{-0{,}384.L_s} + 300 \; \ldots\ldots \; (6.4)$$

De spreiding van de gegevens om de lijn van fig. 7 is tamelijk groot. Redenen hiervoor kunnen onder andere zijn:

1. Het samennemen van alle gegevens houdt feitelijk in de veronderstelling dat voor alle gebieden de stromingsweerstand per eenheid van lengte voor de kwelstroom gelijk is.
2. De schatting van de afstand van de gebieden tot de Waddenzee is niet geheel nauwkeurig door de onregelmatige vorm en de oriëntatie ten opzichte van de kustlijn.
3. De afvoer berekend op grond van de grond- en slootwaterstanden en het Thiessen-net principe de werkelijke toestand niet nauwkeurig benadert.

De gevonden betrekking (6.4) leent zich voorts nog voor het berekenen van het afvoer niveau dat noodzakelijk is wil het chloride gehalte bij een bepaald meetpunt een bepaalde gewenste waarde niet overschrijden. Hiertoe wordt (6.4) omgewerkt tot:

Tabel 7. De door middel van vergelijking (6.2), (6.2a) berekende waarden van P en Q voor dezelfde gebieden als in tabel 6 vermeld en de natuurlijke afvoer intensiteiten in mm/dag waarbij het chloride gehalte 350 gr/m^3 bedraagt

Monster punt	Afwat. opp. ha	P	Q	Afvoer mm/dag	Afvoer m^3/sec	Monster punt	Afwat. opp. ha	P	Q	Afvoer mm/dag	Afvoer m^3/sec
	A.1. MEEDSTER MAAR c.a.						B.1. BOTERDIEP				
22	128	1300	-170	2,60	0,04	96	21	955	-50	2,39	0,006
25	261	1120	-110	2,44	0,07	102	716	625	70	2,72	0,03
28	406	1030	-75	2,42	0,11	44	1088	580	90	2,23	0,28
93	1030	1250	-155	2,48	0,30	51	2226	380	160	2,00	0,52
91	1400	1250	-155	2,48	0,40						
85	1788	1350	-190	2,50	0,52						
81	2465	1350	-190	2,50	0,71						
77	2865	1400	-210	2,50	0,83						
70	3341	1400	-210	2,50	0,97						
68	3932	1300	-170	2,50	1,14						
66	4164	1250	-155	2,50	1,20						
	A.2. ONDERDELEN						B.2. ONDERDELEN				
94	545	1460	-230	2,52	0,16	100	439	515	110	2,15	0,11
89	69	1350	-190	2,50	0,03	101	145	885	-20	2,39	0,04
87	165	1400	-210	2,50	0,05	43	227	440	140	2,10	0,06
84	293	1770	-340	2,56	0,08	47	771	300	190	1,88	0,17
82	270	1400	-210	2,50	0,08	45	58	290	195	1,87	0,01
79	161	1840	-370	2,56	0,05	46	60	350	170	1,94	0,01
78	82	1575	-275	2,52	0,02	50	82	205	225	1,64	0,02
76	309	760	25	2,34	0,08	55	487	150	255	1,58	0,09
73	42	1030	-75	2,34	0,01	105	381	230	215	1,70	0,08
72	47	790	15	2,46	0,01						
103	110	885	-20	2,39	0,03	62	87	300	190	1,58	0,02
104	263	440	140	2,10	0,06	4	197	195	230	1,63	0,04
67	182	425	145	2,07	0,04						
69	523	580	90	2,23	0,14						
71	25	650	65	2,28	0,007						

$$q_{dr} = \frac{11\ 280}{(C - 300)e^{0,384.L_s} + 4100} \quad \ldots\ldots (6.5)$$

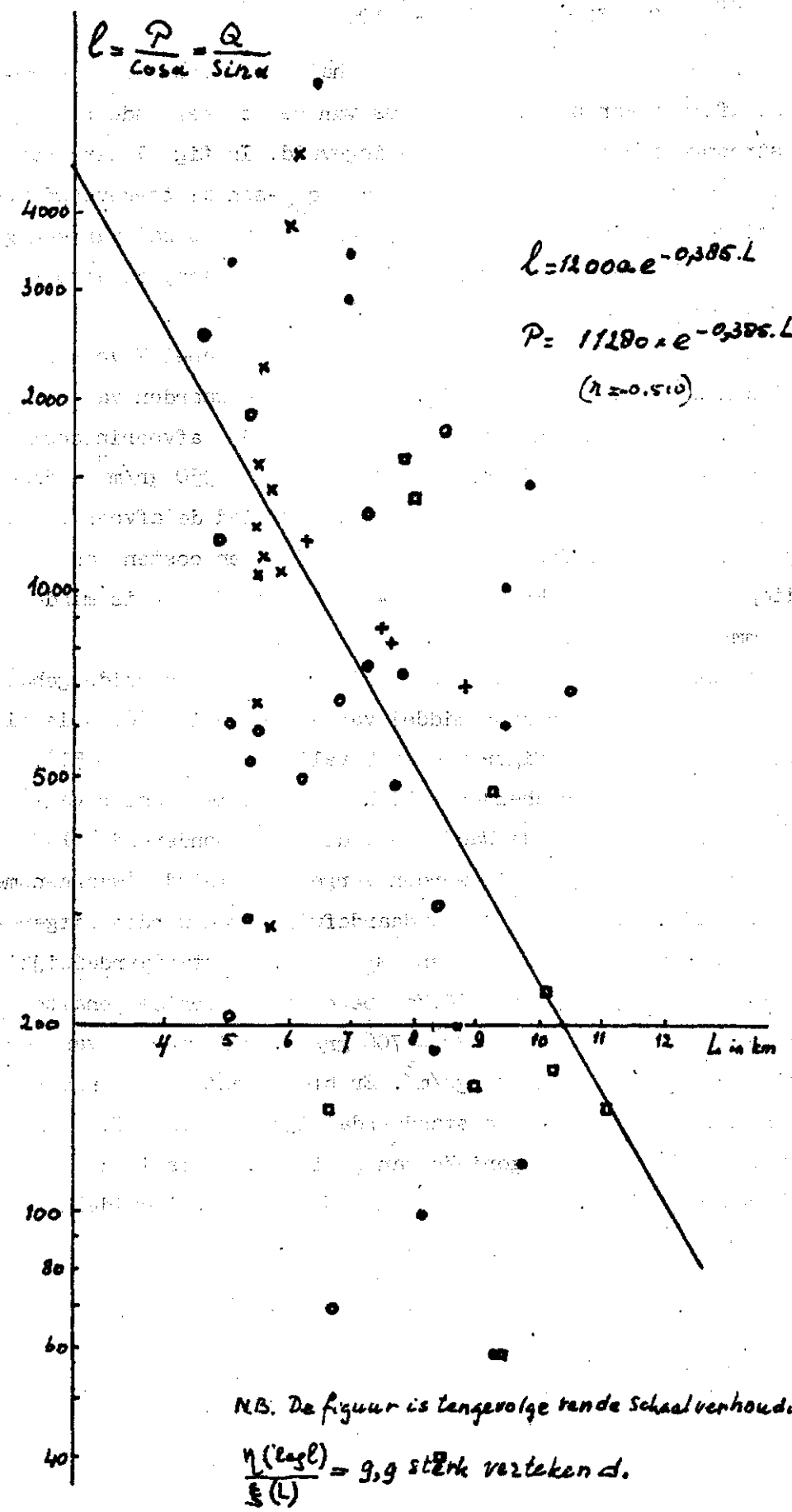
Voor C wordt het gewenste chloride gehalte, en voor L_s de gemiddelde afstand van het bovenstrooms van het betreffende punt gelegen stroomgebied tot de Waddenzee ingevuld. In fig. 7 werd naast de schalen voor P en Q bovendien de q_{dr}-schaal toegevoegd voor het kritieke chloride gehalte van 350 gr Cl^1/m^3. Zo zal van een gebied op een afstand 6,45 km van de Waddenzee gelegen, de afvoer minstens 2,4 mm/dag moeten bedragen (P = 936; Q = -40).

Evenals dit in tabel 6 gedaan is werden in tabel 7 voor dezelfde gebieden de op de lijn van fig. 7 vereffende waarden van P en Q vermeld, alsmede het niveau van de natuurlijke afvoerintensiteiten in mm/dag en m^3/sec waarbij het chloride gehalte 350 gr/m^3 bedraagt. Het blijkt dat voor het Meedster Maar c.a. gebied de afvoer ca 2,5 mm/dag moet bedragen. Voor de stroomgebiedjes ten oosten van het Boterdiep - behalve het Eppenhuister- en Bieske Maar - is minder dan 2,0 mm/dag vereist.

De nauwkeurigheid van de voorspelling van het chloride gehalte van het opgevoerde water door middel van vergelijking (6.4) is niet groot, zoals ook uit de figuren 6 en 7 valt te zien (r = 0,51). Voor ieder van de onderscheiden gebieden werden met behulp van de gemiddelde afstanden tot de Waddenzee, de corresponderende P- en Q-waarden afgelezen. Deze werden vergeleken met de 'waargenomen' waarden van fig. 5, waarna de standaardafwijkingen werden uitgerekend. Gevonden werd s_P = 1190 en s_Q = 455. De standaardafwijking van de met P en Q volgens (4.7a) berekende chloride gehalten voor de datum 14/10/1966 was s_C = 706 gr/m^3. Bij gebruik van vergelijking (6.5) was s_C = 685 gr/m^3. Er bleek echter een aanmerkelijk verschil te zijn voor de standaardafwijkingen van P, Q en C voor de verschillende categorieën van gebieden, zoals in de figuren 5 t/m 7 onderscheiden. Dit wordt in de volgende tabel duidelijk gedemonstreerd:

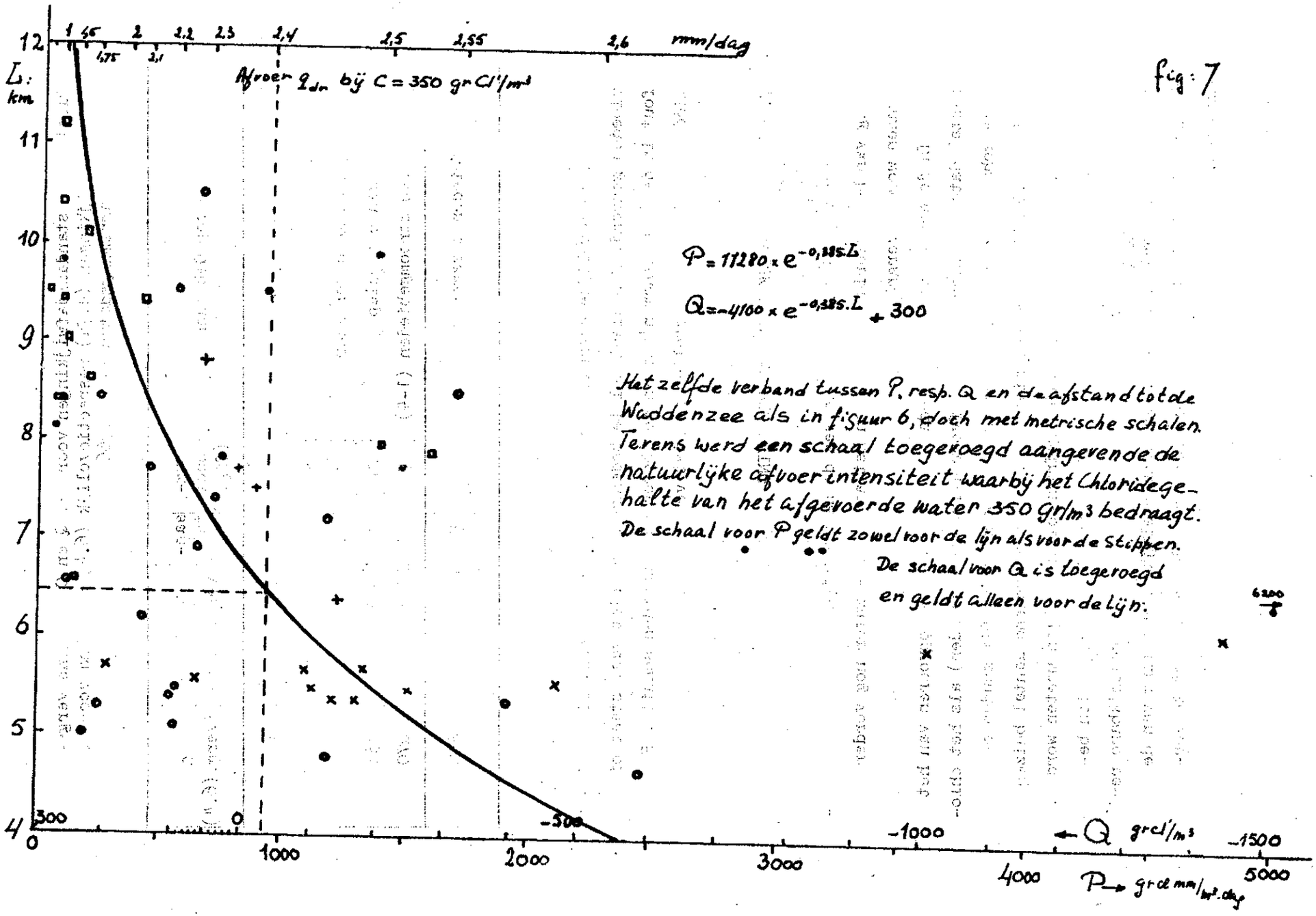
Het verband tussen P, resp. Q uit verg (7) voor 56 stroomgebieden of onderdelen daarvan en de afstand tot de Waddenzee.

fig.: 6



N.B. De figuur is tengevolge van de schaalverhouding $\frac{\eta(\log l)}{\xi(L)} = 9,9$ sterk verteken d.

fig: 7



Het zelfde verband tussen P, resp. Q en de afstand tot de Waddenzee als in figuur 6, doch met metrische schalen. Terens werd een schaal toegevoegd aangevende de natuurlijke afvoer intensiteit waarbij het Chloridegehalte van het afgevoerde water 350 gr/m³ bedraagt. De schaal voor P geldt zowel voor de lijn als voor de stippen. De schaal voor Q is toegevoegd en geldt alleen voor de lijn.

Tabel 8. De standaardafwijkingen voor P, Q en C volgens vergelijkingen (4.7a) respectievelijk (6.4) berekend voor de waarnemingsdatum 14-10-1966

Groep Gebieden	Symbool (fig.4)	aantal	s_P verg.	s_Q (4.7a)	s_C (verg.(6.4)
1 Meedster Maar c.a.	x	11	1450	552	185
2 Boterdiep	+	4	250	66	247
3 Zijleidingen Meedster Maar	o	17	845	305	567
4 Zijleidingen Boterdiep	□	13	559	173	855
5 Secties van stroomgebieden (1-4)	●	11	2036	805	1070
6 Alle gebieden tezamen		56	1190	455	685

Als de mogelijke oorzaken werden op blz. 37 een drietal invloeden genoemd. Men dient wel te bedenken, dat niet vast staat of de fout in de 'waargenomen' of in de 'berekende' waarden schuilt. Een middel om dit vast te stellen is niet voorhanden.

7. VERDERE MOGELIJKHEDEN VAN BEWERKING

De vraag rijst langs welke weg de nauwkeurigheid van de voorspelling van het chloride gehalte van het afgevoerde water nog verder zou kunnen worden vergroot.

In de eerste plaats kan gedacht worden aan het opvoeren van het aantal data waarvoor zowel de afvoer (grondwaterstanden) als het chloride gehalte van het afgevoerde water bekend zijn. Dit zouden er maximaal 10 zijn, ware het niet dat van een wisselend aantal buizen de ontbrekende grondwaterstanden geïnterpoleerd zullen moeten worden. Bovendien zal hiermede niet het traject waarbinnen q_{dr} zich beweegt worden vergroot, daar dit reeds door de uit de beschikbare reeks van gegevens gekozen data wordt bestreken. Een aanmerkelijke vergroting van de nauwkeurigheid in de enkele waarneming valt derhalve niet te verwachten.

Gemiddelde waarden, bijvoorbeeld voor de constanten, kunnen daardoor wel aan nauwkeurigheid winnen.

In de tweede plaats kan gedacht worden aan een onderzoek naar de oorzaken van de spreiding van de punten in fig. 7, welke oorzaken in de 3 punten van paragraaf 6 werden opgesomd. Vooral de veronderstelling van het homogeen zijn van de watervoerende ondergrond komt in aanmerking. De veronderstellingen van de afvoerverdeling volgens het Thiessen-net leent zich op grond van de beschikbare gegevens minder voor een nadere analyse.

Een nadere beschouwing van de invloed van het watervoerend pakket van de ondergrond komt neer op de vaststelling van de parameters α, β en δ respectievelijk γ van de vergelijkingen (4.5a) respectievelijk(4.5b). Hierbij dient uitgegaan te worden van de vergelijking (4.6). Voor de verschillende gebieden dienen dan waarden voor A, B, D en E bekend te zijn. Hiervan kunnen A en D als constant worden beschouwd. B en E echter zijn aan een seizoens fluctuatie onderhevig, zodat volstaan moet worden met het gebruik van een gemiddelde waarde. Het zal duidelijk zijn dat de wijze waarop de parameters α, β, γ en δ in vergelijking (4.6) voorkomen een explicite oplossing volgens een lineaire vereffenings procedure niet mogelijk is.

De oplossing lijkt verkregen te kunnen worden door eerst tot een schatting voor α te komen door bijvoorbeeld de wegzijging naar het lage midden van Groningen te verwaarlozen: $C_L = 0$. Hierdoor wordt (4.6) vereenvoudigd tot:

$$C_{dr}\left(\frac{n}{n-1}\right) = \frac{1}{\alpha + \beta - \gamma}\left\{\begin{matrix}\beta(A - E)+\\ -\gamma(A - D)\end{matrix}\right\}\alpha\ C_s\ \frac{1}{q_{dr}} + \frac{\alpha C_s}{\alpha + \beta - \gamma}$$

Door vervolgens een verdere vereenvoudiging in te voeren volgens $T_1 = T_2$ en voor γ en C_s geschatte waarden te substitueren, wordt voor $\alpha = \beta$ een eerste benadering gevonden. Via een stapsgewijs uitgevoerd iteratie proces zal dan gestreefd moeten worden naar een zo goed mogelijke aanpassing van de gegevens aan een lijn van het type van vergelijking (6.4).