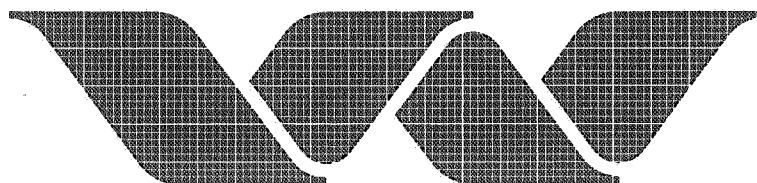


R1230-1



waterloopkundig laboratorium delft hydraulics laboratory

MODELLERING ZOUTINDRINGING ROTTERDAMSCHER WATERWEG
TEN BEHOEVE VAN DE PAWN-STUDIE

Concept verslag onderzoek

R 1230-1

maart 1979

INHOUD

	blz
<u>1</u> <u>Inleiding</u>	1
<u>2</u> <u>Algemene beschrijving modellering</u>	4
2.1 Enkele overwegingen	4
2.2 Keuze van de procedure	5
<u>3</u> <u>Overzicht en oorsprong van de gebruikte gegevens</u>	8
3.1 Huidige infrastructuur	8
3.2 Situatie met afgesloten Oude Maas	11
<u>4</u> <u>Reproduktiemodel Van der Burgh</u>	12
4.1 Korte samenvatting Methode Van der Burgh	12
4.2 Beschrijving van het Reproductiemodel	13
4.3 Kalibratie Reproductiemodel	20
4.4 Relatie voor zoutgehalte monding Hollandsche IJssel	21
<u>5</u> <u>Relatie tussen zoutgehalte mond Hollandsche IJssel en Gouda</u>	22
5.1 Relatie bij konstante rivierafvoeren	22
5.2 Relatie bij variërende rivierafvoeren	25
LITERATUUR	30
TABELLEN	32
FIGUREN	43

1 Inleiding

De modellering die in dit verslag beschreven is, vormt een onderdeel van de activiteiten in het kader van de PAWN-studie (PAWN: Policy Analysis of the Watermanagement of the Netherlands). Het valt buiten de draagwijdte van dit verslag om de doelstelling van de PAWN-studie uitgebreid aan te geven. Kort samengevat is het doel van de studie om voldoende informatie te verzamelen om een keuze uit een aantal veelbelovende waterhuishoudkundige strategieën te kunnen maken. Onder een strategie wordt dan verstaan: een bepaalde combinatie van maatregelen op waterhuishoudkundig gebied. De studie moet de verschillende strategieën die mogelijk zijn, onderling vergelijken en op overzichtelijke wijze een inzicht geven in de gevolgen van deze strategieën. De strategieën bevatten maatregelen die betrekking hebben op het gebruik van de huidige waterhuishoudkundige infrastructuur, maar ook op veranderingen van deze infrastructuur. Meer informatie over de PAWN-studie is gegeven in [1], [2] en [3].

Probleemstelling

De zoutindringing op de Rotterdamsche Waterweg speelt een belangrijke rol bij de waterhuishouding van Nederland. De watervoorziening van het Midden-Westen van Nederland vindt op dit moment voor een belangrijk gedeelte plaats via de inlaat bij Gouda aan de Hollandsche IJssel. De Hollandsche IJssel staat in direkte verbinding met de Nieuwe Maas en de Nieuwe Waterweg. Bij lage afvoeren van de Rijn en de Maas dringt het zout vanuit zee op naar de monding van de Hollandsche IJssel. Verzilting van de Hollandsche IJssel heeft gevolgen voor de watergebruikers en de beheerders. De beheerders hebben in de huidige infrastructuur beperkte mogelijkheden om langs andere wegen (de noodvoorzieningen) water naar het gebied te transporteren. Indien deze noodaanvoer niet voldoende is, zijn ze genoodzaakt toch water in te laten vanuit de verzilte Hollandsche IJssel in verband met de noodzakelijke peilbeheersing van de boezem- en poldergebieden van Midden-West Nederland. Verzilting van het boezem- en polderwater van dit gebied heeft ernstige gevolgen voor de watergebruikers van dit gebied, met name de tuinbouw onder glas.

In principe is het mogelijk om veranderingen in de huidige infrastructuur aan te brengen zodanig dat òf de kans op verzilting van de Hollandsche IJssel verminderd wordt (b.v. een afsluiting van de Oude Maas) òf een alternatieve aanvoerroute beschikbaar komt voor de watervoorziening (b.v. een kanaal door

de Krimpenerwaard). Naast maatregelen die door de beheerders genomen kunnen worden, zijn er maatregelen denkbaar aan de kant van de gebruikers. Het is een onderdeel van de PAWN-studie deze mogelijke maatregelen te inventariseren, te combineren tot strategieën en de strategieën te vergelijken door de gevolgen ervan zichtbaar te maken.

Hoewel de verzilting van de Hollandsche IJssel gezien wordt als het belangrijkste probleem ten gevolge van de zoutindringing vanuit zee, zijn er nog andere inlaatpunten langs de Oude en Nieuwe Maas waarbij verhoging van het zoutgehalte problemen kan opleveren voor de watergebruikers. Om de gevolgen van de verzilting vanuit zee voor de gebruikers te kunnen vaststellen, is het nodig om te weten welk zoutgehalte aanwezig is op de verschillende plaatsen langs de Nieuwe Waterweg, de Oude en Nieuwe Maas, aan de monding van de Hollandsche IJssel en bij de inlaat te Gouda.

Deze zoutgehaltenes moeten bekend zijn voor alle mogelijke combinaties van rivierafvoeren in het gebied van de Rotterdamsche Waterweg, die het gevolg zijn van:

- variaties van de afvoeren van de Rijn en de Maas
- beheersmaatregelen die zorgen voor de waterverdeling binnen de Nederlandse waterhuishoudkundige infrastructuur (b.v. door de keuze van het stuwprogramma te Driel)
- de verschillende onttrekkingen die plaatsvinden (b.v. doorspoeling van een zoet Zoommeer)
- technische maatregelen die de huidige infrastructuur wijzigen (b.v. afsluiting Oude Maas).

De zoutgehaltenes in dit gebied worden echter niet alleen bepaald door de afvoerverdeling over de Oude Maas, de Nieuwe Maas en de Nieuwe Waterweg. Ook het getij op zee speelt daarbij een belangrijke rol. Daarnaast hebben stormen een belangrijke invloed op de gemiddelde waterstanden op zee en daarmee op de zoutindringing op de Rotterdamsche Waterweg.

De waterverdeling binnen de Nederlandse waterhuishoudkundige infrastructuur, die het gevolg is van bovengenoemde factoren, wordt bij de PAWN-studie gesimuleerd door het waterverdelingsmodel.

Doelstelling

De modellering, die in dit verslag beschreven is, heeft als doel om gegeven de waterverdeling in de Nederlandse waterhuishoudkundige infrastructuur en

met name de afvoerverdeling in het gebied van de Rotterdamsche Waterweg, aan te geven wat het zoutgehalte is op de verschillende plaatsen langs de Nieuwe Waterweg, de Oude en Nieuwe Maas, aan de monding van de Hollandsche IJssel en bij de inlaat te Gouda. Het betreft hier het zoutgehalte of de verhoging van het zoutgehalte ten gevolge van de zoutindringing vanuit zee.

De PAWN-studie wordt uitgevoerd in opdracht van Rijkswaterstaat, Directie Waterhuishouding en Waterbeweging door de Rand Corporation uit Santa Monica, U.S.A., in samenwerking met verschillende diensten van Rijkswaterstaat en het Waterloopkundig Laboratorium te Delft.

Dit onderdeel van de studie is verzorgd door J.P. Koenis van het Waterloopkundig Laboratorium en T. Kirkwood van de Rand Corporation.

De modellering is opgezet in nauwe samenwerking met Rijkswaterstaat, Directie Waterhuishouding en Waterbeweging, Distrikt Zuidwest waarbij met name J. van Weerden een belangrijke bijdrage heeft geleverd wat betreft de opzet van de modellering en het toeleveren van gegevens uit natuurmetingen. Voor een tweetal deelfacetten zijn onderzoeken uitgevoerd door het Waterloopkundig Laboratorium. Dit betreft ten eerste het onderzoek naar de zoutindringing in de Rotterdamsche Waterweg bij afgesloten Oude Maas, dat uitgevoerd is in het Getijmodel Rijnmond onder leiding van P. de Jong [4]. Op de tweede plaats is er een gevoeligheidsonderzoek gedaan met een mathematisch model om inzicht te krijgen in de relatie tussen het zoutgehalte aan de monding van de Hollandsche IJssel en het zoutgehalte bij de inlaat te Gouda. Dit onderzoek is uitgevoerd door N. Nederveen [5].

Dit verslag is samengesteld door J.P. Koenis.

2 Algemene Beschrijving Modellerings

2.1 Enkele overwegingen

In de PAWN-studie wordt bij de analyse van de verschillende waterhuishoudkundige strategieën een centrale rol gespeeld door twee modellen: het Waterverdelingsmodel en het Strategie-ontwerp-model.

Het Waterverdelingsmodel simuleert de waterbeweging in de Nederlandse waterhuishoudkundige infrastructuur.

Hierbij wordt onder ander uitgegaan van:

- een bepaald aanbod van water (Rijn, Maas en regenval)
- een bepaalde vraag naar water van de kant van de gebruikers
- een zekere toestand van de infrastructuur (b.v.: wel of geen IJsselkanalisatie enz.)
- een bepaalde combinatie van maatregelen (een strategie).

Naast de waterbeweging wordt tevens de kwaliteit van het water bepaald, met name het zoutgehalte op de verschillende plaatsen. Het Strategie-ontwerp-model optimaliseert zowel de waterverdeling als ook de combinatie van maatregelen.

Hierbij wordt onder ander uitgegaan van:

- een bepaalde aanbod van water (Rijn, Maas en regenval)
- een bepaalde vraag naar water van de kant van de gebruikers
- een zekere toestand van de infrastructuur.

Ook in dit model wordt de waterkwaliteit meegenomen. Een uitgebreide beschrijving van beide modellen wordt te zijner tijd gegeven in de rapportering van de PAWN-studie [3].

Bij beide modellen is het nodig om de zoutgehalten in het gebied van de Rotterdamsche Waterweg te bepalen als functie van de afvoerverdeling en andere maatgevende omstandigheden. Om het mogelijk te maken met beide modellen vele alternatieven te onderzoeken, is het nodig dat de rekenprocedure voor deze zoutgehalten zo eenvoudig mogelijk is.

Daartegenover staat, dat de zoutindringing op de Rotterdamsche Waterweg een zeer complex fysisch probleem is. Er is door metingen en onderzoek reeds veel kennis verkregen over wat er in de natuur gebeurt. Deze kennis geeft ^{echter} nog geen afdoende antwoord op alle vragen die naar voren komen wat betreft de waterbeweging en in nog sterkere mate wat betreft de zoutbeweging in dit gebied. Het gevolg hiervan is dat ook de modellering van de water- en zoutbeweging

nog onderwerp van studie is. Het Getijmodel Rijnmond van het Waterloopkundig Laboratorium is een fysisch schaalmodel waarin de water- en zoutbeweging gesimuleerd kunnen worden. De kwaliteit van deze simulatie kan goed genoemd worden, zoals is gebleken uit het onderzoek tot nu toe. De modellering van de waterbeweging door middel van mathematische modellen (computer-modellen) levert ook goede resultaten op. Daarnaast bestaan er verschillende mathematische modellen voor de zoutbeweging. Het vertrouwen in deze modellen wat betreft de algemene toepasbaarheid is echter nog onvoldoende met name, omdat van de mechanismen, die een rol spelen en de parameters, die daarbij van belang zijn, nog onvoldoende kwantitatieve kennis aanwezig is.

2.2 Keuze van de procedure

Gekozen is voor een aanpak waarbij zoveel mogelijk gebruik gemaakt is van de beschikbare natuurmetingen. Een aantal natuurmetingen zijn gereproduceerd in het Getijmodel Rijnmond. Ook van de metingen van deze modelproeven is gebruik gemaakt. Daarnaast zijn er proeven in het Getijmodel Rijnmond uitgevoerd voor de situatie met afgesloten Oude Maas. Al deze metingen vormen het basismateriaal voor het bepalen van de zoutgehalten in het gebied van de Rotterdamsche Waterweg ten behoeve van de PAWN-studie. Elke meting in de natuur of in het Getijmodel geeft de zoutgehalten bij een bepaald set van randkondities (getij op zee; grootte en verdeling van de rivierafvoeren gemiddeld over een getijperiode). Omdat in werkelijkheid allerlei combinaties van randkondities mogelijk zijn en dus in de PAWN-studie onderzocht moeten kunnen worden, was het nodig om te interpoleren tussen bepaalde metingen en eventueel te extrapoleren buiten het gebied van de metingen. Voor de representatie van alle bovenstaande basisgegevens en voor de interpolatie en extrapolatie van deze gegevens, is een zogenaamd Reproductie-model gekozen, namelijk een gewijzigde versie van het zoutindringingsmodel van Van der Burgh. Het bestaande model van Van der Burgh is wat betreft de formulering en de coëfficiënten zodanig gewijzigd dat een zo goed mogelijke reproductie van de meetgegevens is verkregen.

Voor het gebruik van het model van Van der Burgh als reproductiemodel is gekozen om de volgende redenen:

- het model heeft een eenvoudige rekenprocedure voor de berekening van de zoutgehalten langs de Nieuwe Waterweg, de Nieuwe Maas en de Oude Maas
- het resultaat van de berekening is een gemiddeld zoutgehalte voor de gehele dwarsdoorsnede van de riviertak en tevens gemiddeld over een getijperiode

(ééndimensionaal, quasi-stationair model). Voor de overige modellen van de PAWN-studie (Distributiemodel en Strategie-ontwerp-model) is meer detail niet nodig en ook niet mogelijk om mee te nemen;

- gebleken is dat de structuur van het model voldoende mogelijkheden biedt om de resultaten van het model zodanig aan te passen dat alle basisgegevens (natuur- en modelmetingen) voldoende nauwkeurig gereproduceerd kunnen worden;
- door het onderzoek in het Getijmodel Rijnmond met een afgesloten Oude Maas was het mogelijk het model van Van der Burgh te kalibreren voor zowel de situatie met afgesloten Oude Maas (modelmetingen) als ook voor de bestaande situatie (metingen in de natuur en in het Getijmodel). Andere technische maatregelen, waarbij de getijbeweging in het gebied van de Rotterdamsche Waterweg in belangrijke mate zal veranderen, kunnen niet met de huidige versies van het model van Van der Burgh onderzocht worden, omdat geen metingen beschikbaar zijn om het model te kalibreren. Een voorbeeld van een dergelijke technische maatregel is de afsluiting van de Nieuwe Maas.

Rekenprocedure

De gevolgde rekenprocedure ziet er nu als volgt uit:

- De waterbeweging wordt berekend door het Distributiemodel en/of door het Strategie-ontwerp-model. Deze waterbeweging betreft de rivierafvoeren in de verschillende takken van het gebied van de Rotterdamsche Waterweg en de onttrekkingen die in dit gebied plaatsvinden. De afvoeren en de onttrekkingen zijn gemiddeld over verschillende getijperiodes bij gemiddelde getij-omstandigheden. De tijdstap die in deze modellen gebruikt wordt, is minimaal één week of 10 dagen.
- Gegeven deze waterbeweging (met name de gemiddelde rivierafvoeren via de Oude en Nieuwe Maas en de Nieuwe Waterweg) berekent het model van Van der Burgh de zoutgehalten op de drie bovengenoemde riviertakken. Deze zoutgehalten zijn de waarden gemiddeld over de dwarsdoorsnede en gemiddeld over het getij.
- Met behulp van een gevoeligheidsonderzoek is bepaald wat de relatie is tussen het zoutgehalte bij de inlaat te Gouda en het zoutgehalte aan de monding van de Hollandsche IJssel zoals dat berekend is met het model van Van der burgh.

Deze relatie geldt voor de situatie waarbij geen gebruik gemaakt is van de stormvloedkering in het begin van de Hollandsche IJssel. Over het effect van

van het gebruik van deze stormvloedkering op de zoutindringing op de Hollandsche IJssel is nog onvoldoende bekend.

- Voor het zoutgehalte bij andere onttrekkingspunten langs de Oude en Nieuwe Maas en de Nieuwe Waterweg kan direkt gebruik gemaakt worden van de resultaten van het model van Van der Burgh.
- De koppeling tussen enerzijds het Distributiemodel of het Strategie-ontwerpmodel en anderzijds de berekening van de zoutgehaltenes (model van Van der Burgh; relatie voor het zoutgehalte bij Gouda) is als volgt tot stand gebracht. De rekenprocedures van het model van Van der Burgh en de relaties voor het zoutgehalte te Gouda zijn niet ingebouwd in de beide modellen. Om de rekentijd van beide modellen te beperken, is gekozen voor gescheiden berekeningen. Dit is als volgt gedaan. Voor allerlei combinaties van rivierafvoeren via de Oude Maas, de Nieuwe Maas en de Nieuwe Waterweg die mogelijk zijn bij een bepaalde infrastructuur, is berekend wat het zoutgehalte is bij de inlaat te Gouda met behulp van het model van Van der Burgh en de relaties tussen het zoutgehalte aan de monding van de Hollandsche IJssel en het zoutgehalte te Gouda. Per infrastructuur (de huidige situatie en de situatie met afgesloten Oude Maas) zijn de resultaten samengevat in een tabel. Deze tabellen zijn opgenomen in de beide modellen. Voor een bepaalde combinatie van afvoeren kan dan door middel van interpolatie tussen de resultaten in de tabellen bepaald worden wat het zoutgehalte is. Indien nodig kunnen vergelijkbare tabellen gemaakt worden voor andere onttrekkingspunten in het gebied.

In de volgende hoofdstukken is in meer detail ingegaan op verschillende aspecten die hiervoor in meer algemene termen beschreven zijn.

3 Overzicht en Oorsprong van de gebruikte Gegevens

3.1 Huidige infrastructuur

Voor de huidige infrastructuur wat betreft het gebied van de Rotterdamsche Waterweg is het model van Van der Burgh gekalibreerd met behulp van metingen in de natuur en in het Getijmodel Rijnmond. Deze metingen van zoutgehaltes kunnen ingedeeld worden in drie groepen:

- natuurmetingen met behulp van de kontinu registrerende zoutopnemers langs de oevers van de Rotterdamsche Waterweg;
- natuurmetingen, uitgevoerd op bepaalde dagen. Bij deze metingen is het zoutgehalte gemeten over de gehele dwarsdoorsnede en als funktie van de tijd op verschillende plaatsen langs de Nieuwe Waterweg en de Oude en Nieuwe Maas. Deze metingen zijn gereproduceerd in het Getijmodel Rijnmond;
- metingen in het Getijmodel Rijnmond in het kader van het onderzoek naar het effect op de zoutindringing van het afsluiten van de Oude Maas [4].

Deze drie groepen van gegevens zijn hierna onder a, b en c iets uitgebreider beschreven.

a. natuurmetingen met kontinu registrerende zoutopnemers.

Op verschillende plaatsen langs de Nieuwe Waterweg, de Oude en Nieuwe Maas en ook langs andere takken van het gebied van de benedenrivieren staan instrumenten opgesteld die op één of meerdere dieptes kontinu het zoutgehalte registreren. Deze metingen worden uitgevoerd en verwerkt door Rijkswaterstaat. De metingen die uitgevoerd worden aan de oever of op de peilers van bruggen, zijn niet direkt representatief voor het gemiddelde zoutgehalte van de gehele dwarsdoorsnede van de rivier daar ter plaatse. Met behulp van metingen van de gehele dwarsdoorsnede is het mogelijk de relatie te bepalen tussen de meetwaarde van de kontinu registrerende zoutopnemer(s) en het gemiddelde zoutgehalte van de dwarsdoorsnede. Met deze relaties is het mogelijk de meetwaarden van de zoutopnemers zodanig te korrigeren dat deze representatief zijn voor het gemiddelde over de dwarsdoorsnede.

Van een aantal jaren rd ~~re~~ 1970 zijn voor drie verschillende hoogtes van de rivierafvoer via de Nieuwe Waterweg de gemeten zoutgehaltes van de vaste meetstations verzameld en gekorrigeerd. Per afvoer is het gemiddelde bepaald over alle beschikbare metingen. Dit is gedaan voor de afvoeren: 600, 1000 en 1600 m³/s. De resultaten van bovenstaande aanpak zijn weergegeven

in tabel 1. De bijbehorende gemiddelde afvoeren via de Oude en Nieuwe Maas zijn bepaald op grond van een systematisch onderzoek naar de waterbeweging in het Noordelijk Deltagebied. De waterverdeling, die met dit onderzoek bepaald is bij verschillende rivierafvoeren van de Rijn en de Maas en bij bepaalde onttrekkingen, wordt genoemd: de verdeling volgens NLP'70 (Normaal Lozings Programma 1970). Dit heeft betrekking op het lozingsprogramma van de spuiscuizen van het Haringvliet. Bij NLP'70 is verondersteld dat bij de stuw te Driel het stuwprogramma S 250 wordt gebruikt. De stuw te Driel regelt binnen bepaalde grenzen de afvoerverdeling van het water van de Rijn over de IJssel, de Nederrijn (en Lek) en de Waal. Stuwprogramma S 250 betekent dat de stuw zodanig ingesteld is, dat de afvoer via de IJssel bij lage afvoeren via de Rijn zo lang mogelijk op $250 \text{ m}^3/\text{s}$ gehandhaafd wordt. De afvoerverdeling volgens NLP'70 is representatief voor de afvoerverdeling in de periode van bovengenoemde metingen.

De zoutgehalten in tabel 1 geven de verhoging weer van het zoutgehalte ten gevolge van de invloed van het zoute zeewater.

Het zoutgehalte van het water ten gevolge van de zoutgehalten van het Rijn- en Maaswater, is afgetrokken van de gemeten waarden.

b. natuurmetingen gehele dwarsdoorsnede; reproductie door Getijmodel Rijnmodel

In de periode 1970-1978 zijn regelmatig (± 6 keer) uitgebreide metingen uitgevoerd in de Rotterdamsche Waterweg. Bij elk van deze metingen is gedurende de twee dagen van een weekend als volgt gemeten. Op de ene dag zijn een aantal dwarsdoorsnedes doorgemeten van de Nieuwe Waterweg (± 4) en van de Oude Maas (± 3). Op de andere dag een aantal dwarsdoorsnedes van de Nieuwe Maas (± 4) en minstens één dwarsdoorsnede van zowel de Nieuwe Waterweg als ook de Oude Maas. Per dwarsdoorsnede zijn gedurende een getijperiode van ongeveer 12,5 uur enkele vertikalen (3 à 4) over de gehele waterdiepte doorgemeten. Per meetpunt is het zoutgehalte en de snelheid gemeten. Op deze manier is door beide meetdagen te combineren een zo volledig mogelijk beeld verkregen van de zoutindringing en het snelheidsveld als functie van de tijd en de plaats op de Rotterdamsche Waterweg onder de omstandigheden van getij- en rivierafvoeren die dat weekend aanwezig waren.

Deze metingen zijn uitgevoerd voor het verkrijgen van inzicht in de zoutindringing en voor de ijking en verificatie van de modellen die gebruikt worden of in ontwikkeling zijn voor de simulatie van deze zoutindringing. Dit betreft in eerste instantie het Getijmodel Rijnmond. Verschillende

mathematische modellen zijn nog in ontwikkeling of zijn nog niet voldoende geverifieerd.

Een aantal van de bovengenoemde metingen zijn in het Getijmodel Rijnmond gereproduceerd. Dit zijn de metingen van 16 en 17 juni 1973, 22 en 23 juni 1974 en 24 en 25 april 1976. Omdat de metingen in het model van 24 en 25 april 1976 nog niet beschikbaar waren, zijn deze verder buiten beschouwing gelaten. Gebleken is dat de reproductie van de natuurmetingen door het Getijmodel goed was. Elke meetdag is in het model afzonderlijk gereproduceerd.

Voor het kalibreren van het model van Van der Burgh is gebruik gemaakt van de meetresultaten van de vier proeven in het Getijmodel Rijnmond. Er is gekozen voor de metingen van de proeven in plaats van de natuurmetingen om de volgende redenen:

- de zoutindringing in het model was een goede reproductie van de natuurmetingen;
- bij de natuurmetingen was per meetdag slechts een beperkt aantal meetraaien gemeten, terwijl bij de proeven de meetraaien van alle takken (Nieuwe Waterweg, Oude- en Nieuwe Maas) beschikbaar waren;
- de meetnauwkeurigheid in het model is groter dan bij de natuurmetingen vanwege de beter gekonditioneerde meet- en verwerkingssituatie bij het model ten opzichte van de situatie bij de natuurmetingen waarbij met vele bootjes onder moeilijke omstandigheden gemeten is.

De resultaten van bovengenoemde metingen zijn weergegeven in tabel 2. Ook in deze tabel is het zoutgehalte van het rivierwater afgetrokken, zodat alleen de verhoging van het zoutgehalte ten gevolge van de zee-invloed is weergegeven.

c. metingen in het Getijmodel Rijnmond

In het kader van het onderzoek naar het effect op de zoutindringing van het afsluiten van de Oude Maas, zijn ook twee proeven uitgevoerd zonder de afgesloten Oude Maas. Het doel van deze proeven was om bij gelijke randvoorwaarden (getij op zee; rivierafvoeren en onttrekkingen) het verschil in zoutindringing zichtbaar te maken tussen de bestaande situatie en de situatie met afgesloten Oude Maas. Daarmee waren beide proeven ook beschikbaar om het model van Van der Burgh voor de bestaande infrastructuur te kalibreren.

De randvoorwaarden en de metingen van de zoutgehalten zijn weergegeven in tabel 3.

3.2 Situatie met afgesloten Oude Maas

Om inzicht te krijgen in de verandering van de zoutindringing op de Rotterdamsche Waterweg ten gevolge van het afsluiten van de Oude Maas, is een onderzoek uitgevoerd in het Getijmodel Rijnmond van het Waterloopkundig Laboratorium. Bij de opzet van het onderzoek is naast wensen vanuit de PAWN-studie ook rekening gehouden met vragen ten aanzien van de afsluiting bij de beheerder van de Rotterdamsche Waterweg (Rijkswaterstaat, Directie Benedenrivieren). Daarnaast is het onderzoek zodanig opgezet, dat de resultaten ervan ook gebruikt kunnen worden bij de ontwikkeling en verifikatie van mathematische modellen, die de zoutbeweging in dit estuarium beschrijven. Een belangrijke beperking bij dit onderzoek, zowel voor de PAWN-studie als voor de andere gebruikers van de resultaten van het onderzoek, was dat met de huidige begrenzings van het Getijmodel Rijnmond het niet mogelijk was het onderzoek uit te voeren bij lage rivierafvoeren. In tabel 4 is een kort overzicht gegeven van het onderzoeksprogramma. Het onderzoek is gerapporteerd in [4].

Voor het kalibreren van het model van Van der Burgh ten behoeve van de PAWN-studie zijn 7 proeven gebruikt. Dit zijn de twee proeven bij open Oude Maas die hiervoor reeds vermeld zijn (de proeven T0 en T11; zie onder 3.1.C) en vijf proeven bij een afgesloten Oude Maas (T2, T3, T4, T5 en T6). Van deze 5 proeven zijn er 3 uitgevoerd bij ongeveer gemiddelde getij-omstandigheden. Bij deze proeven zijn de rivierafvoeren zodanig gekozen dat de afvoer via de Nieuwe Waterweg en de Nieuwe Maas varieerde van 630, via 935 tot 1267 m³/s gemiddeld over een getijperiode van ongeveer 25 uur. (T6, T2 en T5). Daarnaast geven 3 proeven (T2, T3 en T4) inzicht over de verandering van de zoutindringing bij verschillende getij-omstandigheden (gemiddeld getij, dood- en springtij). De gegevens van de proeven en de resultaten van de zoutmetingen zijn weergegeven in tabel 5.

4 Reproductiemodel Van der Burgh

4.1 Korte samenvatting Methode Van der Burgh

Het ééndimensionale rekenmodel dat door Van der Burgh ontwikkeld is, gaat uit van de over de getijperiode gemiddelde ééndimensionale zoutbalansvergelijking:

$$D(x) \frac{dc(x)}{dx} = - u_{riv}(x) c(x) \quad (4.1)$$

waarbij

- $D(x)$: longitudinale dispersiecoëfficiënt als functie van x
- $c(x)$: zoutconcentratie gemiddeld over het getij en over de dwarsdoorsnede als functie van x
- x : koördinaat in de lengterichting
- $u_{riv}(x)$: getij-gemiddelde snelheid ten gevolge van de rivierafvoer als functie van x .

Uit de vele veldmetingen in de Nederlandse estuaria bepaalde Van der Burgh de volgende empirische relatie voor de dispersiecoëfficiënt:

$$D(x) = D_0 - k_1 D_1(x) = k_0 (\alpha g)^{0.5} d^{1.5} - k_1 \int_0^x u_{riv} dx \quad (4.2)$$

met

$$\alpha = \frac{Q_{riv} \cdot T}{P(T)} \quad (4.3)$$

waarbij

- D_0 : dispersiecoëfficiënt in de monding van de getijrivier (α en d genomen ter plaatse van de monding).
- $-k_1 D_1$: afname van de dispersiecoëfficiënt met toenemende x (afstand van de monding).
- k_0, k_1 : dimensieloze parameters
- α : vloedgetal
- g : versnelling van de zwaartekracht $g = 9.81 \text{ m/s}^2$
- d : diepte in de monding van het estuarium
- Q_{riv} : rivierafvoer
- T : getijperiode
- $P(T)$: vloedvolumen

Om de getijgemiddelde concentratieverdeling te berekenen is nog een randconditie nodig ter plaatse van de monding. Voor de relatie tussen de concentratie in de monding en de concentratie op zee bepaalde Van der Burgh de volgende uitdrukking:

$$c(\text{mond}) = c(\text{zee}) \cdot e^{-k_2 \alpha} \quad (4.4)$$

Op grond van metingen in de Rotterdamsche Waterweg gebruikte Van der Burgh voor k_0 , k_1 en k_2 de volgende waarden

$$k_0 = 26, k_1 = 0.9 \text{ en } k_2 = 0.5 \quad (4.5)$$

Een meer uitgebreide beschrijving van het model en de achtergronden is gegeven in [7]. Daarnaast is ook aandacht besteed aan de methode en de toetsing ervan in [8] en [9].

4.2 Beschrijving van het Reproductiemodel

Ten behoeve van de PAWN-studie is gebruik gemaakt van de karakteristieken van het in paragraaf 4.1 beschreven model. Echter, om een zo goed mogelijke reproductie te krijgen van de beschikbare gegevens (zie hoofdstuk 3), is het nodig gebleken het model aan te passen zowel wat betreft de structuur van het model als wat betreft de te gebruiken coëfficiënten. Eén en ander is hierna beschreven. Om een onderscheid te kunnen maken tussen het oorspronkelijke model van Van der Burgh zoals dat beschreven is in paragraaf 4.1 en het model dat gebruikt is bij de PAWN-studie, is dit laatste model genoemd: het reproductiemodel van Van der Burgh. Hiermee is tot uitdrukking gebracht, dat het model op de eerste plaats zo goed mogelijk de gegevens van de natuur- en modelmetingen moet reproduceren. Aanpassingen van het model ten behoeve van deze reproductie zijn uitgevoerd zonder daarbij te onderzoeken of deze aanpassingen in overeenstemming zijn met de bestaande fysische kennis van de zoutindringing in estuaria. Hierbij kan echter opgemerkt worden dat ook de fysische grondslag van het model van Van der Burgh aan twijfel onderhevig is. Zie onder ander [8]. Zolang echter de reproductie van de beschikbare metingen voldoende is en het model niet gebruikt wordt voor situaties die duidelijk verschillen van die van de metingen, vormt dit geen beperking voor het gebruik van het reproductiemodel ten behoeve van de PAWN-studie.

Hierna zijn de volgende onderwerpen behandeld:

- a) Uitgangspunt.
- b) Randkonditie bij de zee.
- c) Relatie voor de Dispersiecoëfficiënt.
- d) Uitdrukking voor het Vloedvolumen.
- e) Benodigde gegevens (geometrie enz.).

a) Uitgangspunt

Het uitgangspunt bij het reproductiemodel is gebleven de over de getijperiode gemiddelde ééndimensionale zoutbalansvergelijking (4.1):

$$D(x) \frac{dc(x)}{dx} = - u_{riv}(x) \cdot c(x) \quad (4.1)$$

b) Randkonditie bij de zee

In het model van Van der Burgh is de concentratie in de monding gerelateerd aan de concentratie op zee via vergelijking (4.4):

$$c(\text{mond}) = c(\text{zee}) \cdot e^{-k_2 \cdot \alpha} \quad (4.4)$$

Hierbij is voor de plaats van de monding kilometerraai (kmr) 1034 gekozen. Bij het reproductiemodel ten behoeve van de PAWN-studie is gekozen voor kmr. 1029, omdat dit de dichtst bij zee gelegen raai was, waarvoor bij alle metingen het zoutgehalte beschikbaar was. In figuur 1.a is het zoutgehalte van kmr. 1029 ($c(1029)$) van alle metingen uitgezet tegen de waarde van het vloedgetal α . De gegevens voor de berekening van α (zie formule 4.3) en de waarden voor $c(1029)$ zijn ontleend aan de tabellen 1, 2, 3 en 5.

Deze gegevens zijn samengevat in tabel 6. In figuur 1.a zijn tevens de lijnen gegeven van formule (4.4) voor k_2 is 0.5, 0.6 en 0.7, waarbij $c(\text{zee})$ gesteld is op $19 \text{ kg Cl}^-/\text{m}^3$. Uit de spreiding van de metingen blijkt dat formule (4.4) geen goede uitdrukking is voor het bepalen van de randkonditie, dat wil zeggen het chloridegehalte in kmr. 1029. De standaardafwijking van de metingen ten opzichte van de lijn met $k_2 = 0.6$ bedraagt $0,84 \text{ kg Cl}^-/\text{m}^3$.

In figuur 1.b is het chloridegehalte in kmr. 1029 uitgezet tegen de gemiddelde rivierafvoer via de Nieuwe Waterweg ($Q(\text{NWW})$). Hieruit blijkt dat de meetresultaten voor beide situaties (zowel bij open als bij gesloten Oude Maas) redelijk weergegeven kunnen worden door de vergelijking:

$$c(1029) = c(\text{zee}) e^{-0.00165 \times (Q(\text{NWW}))^{0.8}} \quad (4.6)$$

wanneer $c(1029)$ en $c(\text{zee})$ in $\text{kg Cl}^-/\text{m}^3$ en $Q(\text{NWW})$ in m^3/s gegeven zijn. De macht van e is niet dimensieloos, tenzij er wordt aangenomen dat de coëfficiënt 0.00165 een zodanige dimensie heeft dat de gehele macht wel dimensieloos is of dat $Q(\text{NWW})$ dimensieloos is gemaakt door één of meerdere parameters. Bovenstaande geeft aan dat de fysische onderbouwing van vergelijking (4.6) niet goed is. Anderzijds laat figuur 1.b zien dat vergelijking (4.6) een betere relatie oplevert voor $c(1029)$ dan vergelijking (4.4). Van vergelijking (4.4) zijn de dimensies wel goed, maar is de fysische onderbouwing ook twijfelachtig gezien figuur 1.a. De standaardafwijking van de metingen ten opzichte van formule (4.6) bedraagt $0,20 \text{ kg Cl}^-/\text{m}^3$.

Voor het reproductiemodel is gebruik gemaakt van vergelijking (4.6) voor de randconditie bij de zee ($c(1029)$) omdat de beschikbare gegevens hierdoor goed weergegeven worden (zie figuur 1b), ondanks bovengenoemde onvolkomenheden.

c) Relatie voor de Dispersiecoëfficiënt

In het model van Van der Burgh wordt de volgende empirische relatie voor de dispersiecoëfficiënt gebruikt:

$$D(x) = k_0 \cdot (\alpha g)^{0.5} \cdot d^{1.5} - k_1 \int_0^x u_{\text{riv}} dx \quad (4.2)$$

De waarden voor α en d hebben betrekking op de situatie aan de monding van de Nieuwe Waterweg. De empirisch bepaalde waarden voor k_0 en k_1 gelden voor de Nieuwe Waterweg, maar ook voor de Oude en Nieuwe Maas.

Bij het reproductiemodel is gekozen voor een andere aanpak. Daarbij is aangenomen, dat voor elk van de riviertakken (Nieuwe Waterweg, Oude en Nieuwe Maas) de dispersie verschillend kan zijn. Daarvoor is er wel uitgegaan van vergelijking (4.2), maar voor elk van de takken zijn de waarden genomen voor het vloedgetal (α) en de waterdiepte (d), zoals die bij de monding van die tak aanwezig zijn. Op grond van de beschikbare metingen zijn daarna voor elk van de riviertakken afzonderlijk de waarden voor k_0 en k_1 bepaald. Voor alle takken gelden dus in principe niet dezelfde waarden

voor k_0 en k_1 .

Bovenstaande aanpassing van het model van Van der Burgh ten behoeve van het reproductiemodel is gedaan op fysische en praktische gronden. Het dispersief zouttransport in getijrivieren wordt in belangrijke mate bepaald door geometrische grootheden zoals de waterdiepte, de breedte-diepte-verhouding en de ruwheid en door de stromingscondities zoals de gemiddelde snelheid ten gevolge van de rivierafvoer (u_{riv}) en de verhouding tussen de snelheid ten gevolge van de getijbeweging en deze u_{riv} . Deze verhouding is weergegeven door het vloedgetal α . De meesten van bovenstaande parameters komen in één of andere vorm voor in de vergelijking voor de dispersiecoëfficiënt (4.2). Het valt buiten de draagwijdte van dit verslag om de vraag te beantwoorden of vergelijking (4.2) de fysische werkelijkheid in voldoende mate weergeeft. Er zijn belangrijke verschillen tussen de geometrische grootheden en de stromingscondities van de drie riviertakken (Nieuwe Waterweg, Oude en Nieuwe Maas). Daarom is het niet waarschijnlijk dat een zelfde vergelijking, die gebaseerd is op condities aan de mond van de Nieuwe Waterweg (α ; d) en met gelijkblijvende konstantes (k_0 ; k_1), de dispersie op de drie riviertakken op de juiste wijze weergeeft. Bovenstaande is ook door de praktijk bevestigd. Het is gebleken dat een betere reproductie van de metingen mogelijk was door voor elke riviertak in de formule voor de dispersiecoëfficiënt verschillende waarden voor α , d , k_0 en k_1 te nemen.

Bij het kalibreren van het reproductiemodel is bovendien gebleken dat voor een goede reproductie van de metingen het nodig was om de macht van α in de formule van de dispersiecoëfficiënt te veranderen. Zonder deze aanpassing was het niet goed mogelijk bij alle rivierafvoeren een goede reproductie te verkrijgen. Bij het reproductiemodel is daarom gebruik gemaakt van de volgende dispersiecoëfficiënt:

$$D_x = k_0 \cdot \alpha \cdot k_3 g^{0.5} \cdot d^{1.5} - k_1 \int_0^x u_{riv} dx \quad (4.7)$$

d. Uitdrukking voor het vloedvolumen P

Het vloedgetal α is als volgt gedefinieerd:

$$\alpha = \frac{Q_{riv} \cdot T}{P} \quad (4.3)$$

waarbij: Q_{riv} : over het getij gemiddelde rivierafvoer
T : getijperiode; $T \approx 12,5$ uur = 45 000 sec.
P : vloedvolumen gedurende periode T.

Om α te kunnen berekenen, is het nodig te weten wat het vloedvolumen P is als functie van de rivierafvoer Q_{riv} en de getij-omstandigheden. Voor de situatie met open Oude Maas is een algemene uitdrukking voor P als volgt met IMPLIC bepaald. IMPLIC is een mathematisch model voor de berekening van de ééndimensionale waterbeweging in een stelsel van rivieren en/of kanalen. Met dit model zijn door Rijkswaterstaat, Directie Waterhuishouding en Waterbeweging, Distrikt Zuidwest negen berekeningen uitgevoerd met drie verschillende getij-omstandigheden (gemiddeld getij, spring- en doodtij) en met drie verschillende rivierafvoeren via de Nieuwe Waterweg (600, 1000 en 1600 m³/s).

De schematisatie van de infrastructuur van de Rotterdamsche Waterweg ten behoeve van het model is gekarakteriseerd door:

Deltaplan stadium I, fase 1. Dat wil zeggen: de situatie zoals die aanwezig was in de periode 1973/1974; de bodemverhoging van de Nieuwe Maas en de Nieuwe Waterweg (trapjeslijn) voltooid; Dordsche Kil niet verruimd; Hartelkanaal gesloten; het Spui open. Voor de vorm van de verschillende getijkrommes te Hoek van Holland is gebruik gemaakt van de zogenaamde 1971.0 getijden. Deze getijkrommes zijn ontstaan door middeling van gemeten waterstanden bij gemiddeld getij, spring- en doodtij.

Enkele resultaten van bovenstaande berekeningen zijn samengevat in tabel 7. Meer gegevens zijn gegeven in DW 346 van de PAWN-dokumentatie. Uit de gegevens van tabel 7 zijn de volgende vergelijkingen afgeleid voor gemiddelde getij-omstandigheden (berekeningen 2,5 en 8 van tabel 7):

$$P(NWW) = 81.3 \times 10^6 - 16\ 700 \times Q(NWW) \quad (4.8)$$

$$P(NM) = (0.00005 \times Q(NWW) + 0,58) \times P(NWW) \quad (4.9)$$

$$P(OM) = (-0.00008 \times Q(NWW) \times P(NWW)) \quad (4.10)$$

waarbij

P(NWW) : vloedvolumen bij de monding van de Nieuwe Waterweg in m³
Q(NWW) : gemiddelde rivierafvoer van de Nieuwe Waterweg in m³/s
P(NM) : vloedvolumen bij de monding van de Nieuwe Maas [m³]

$P(OM)$: vloedvolumen bij de monding van de Oude Maas [m^3].

Voor alle getij-omstandigheden is de volgende uitdrukking afgeleid (zie figuur 2.a):

$$P(NWW) = (6.57 - 0.0160 \times Q(NWW) + 44.3 \times 2a_o) \times 10^6 \quad (4.11)$$

waarbij $2a_o$: getijverschil te Hoek van Holland in meters.

De vergelijkingen (4.8) en (4.11) moeten gezien worden als een zeer globaal middel om de waarde van het vloedvolumen af te schatten.

Het is niet mogelijk de onnauwkeurigheid exakt aan te geven, omdat deze relaties gebaseerd zijn op slechts enkele berekeningen en omdat voor het opstellen van de relaties gewerkt is met een eenvoudige regressie (zie figuur 2a). Bij het kalibreren van het reproductiemodel met de beschikbare gegevens is gebruik gemaakt van vergelijking (4.11). Voor de berekeningen met het model ten behoeve van de PAWN-studie is gewerkt met vergelijking (4.8), omdat in de studie uitgegaan wordt van gemiddelde getij-omstandigheden (zie hierover ook hoofdstuk 6). Van de proeven, die uitgevoerd zijn in het getijmodel Rijnmond, is ook met IMPLIC het vloedvolumen berekend. De vergelijking van deze berekeningen met de resultaten van vergelijking (4.11) heeft opgeleverd dat vergelijking (4.11) systematisch een lagere waarde voorspelde. Het verschil was $-(10 \pm 5)\%$. Deze systematische fout is verdiskonteerd in de coëfficiënten k_o en k_1 , omdat bij het kalibreren van het reproductiemodel, gebruik makend van vergelijking (4.11), een zodanig set van coëfficiënten is bepaald dat de metingen zo goed mogelijk gereproduceerd werden.

Voor de situatie met afgesloten Oude Maas is de uitdrukking voor het vloedvolumen P als volgt bepaald. Met IMPLIC zijn voor de 5 proeven de vloedvolumina berekend (zie tabel 5). Van de 3 proeven (T2, T5 en T6) met ongeveer gemiddeld getij is het vloedvolumen gekorreleerd aan de afvoer van de Nieuwe Waterweg. Dit is weergegeven in figuur 2.b. Dit leverde de volgende uitdrukking op voor het vloedvolumen P .

$$P(NWW) = 72.9 \times 10^6 - 12\,500 Q(NWW) \quad (4.12)$$

Bij het kalibreren van het reproductiemodel voor de situatie met afgesloten Oude Maas met behulp van de beschikbare meetresultaten is gebruik gemaakt

van de waarden voor het vloedvolumen zoals die berekend zijn met IMPLIC (zie tabel 5). Voor de berekeningen met het model ten behoeve van de PAWN-studie is gebruik gemaakt van vergelijking (4.12). Bij de monding van de Nieuwe Maas is gewerkt met dezelfde vergelijking (4.12). De reductie van het vloedvolumen ter plaatse van de monding van de Nieuwe Maas is zodoende verwerkt in de koëfficiënt k_0 .

e) Benodigde gegevens (geometrie enz.)

Voor de berekeningen met het reproductiemodel zijn een aantal gegevens nodig wat betreft de geometrie en enkele konstanten. Deze gegevens zijn samengevat in tabel 8.

Voor de dispersiecoëfficiënt D_x (zie vergelijking (4.7)) moeten de dieptes d van de riviertakken ter plaatse van de monding bekend zijn. Deze waarden zijn ontleend aan de schematisatie van het gebied ten behoeve van het model IMPLIC. Voor de diepte d is de waarde gekozen van de hydraulische straal van het profiel ten opzichte van het vlak N.A.P.. Bij een groot getal voor de verhouding tussen de breedte en de diepte van een dwarsdoorsnede van een rivier en een nagenoeg rechthoekig dwarsprofiel is de hydraulische straal ongeveer gelijk aan de gemiddelde diepte. Voor de profielen, waar het hier om gaat, is redelijk aan deze voorwaarden voldaan. Overigens zou een andere keuze voor de diepte d geen gevolgen hebben gehad voor het reproductiemodel anders dan dat in dat geval bij het kalibreren van het model een andere waarde voor k_0 in vergelijking (4.7) gevonden zou zijn. Bij het gebruik van het reproductiemodel ten behoeve van de PAWN-studie is voor geen van de riviertakken de waarde van d gevarieerd met het doel daarbij te onderzoeken wat het effect is op de zoutindringing van veranderingen van de diepte. Er is onvoldoende vertrouwen dat het model het effect van veranderingen van de geometrie op de zoutindringing kan voorspellen (zie hiervoor onder andere [8]).

De getij-gemiddelde snelheid ten gevolge van de rivierafvoer (u_{riv}) is als volgt bepaald:

$$u_{riv} = \frac{Q_{riv}}{A} \quad (4.13)$$

met : A : de oppervlakte van de dwarsdoorsnede ten opzichte van N.A.P. in m^2
 Q_{riv} : rivierafvoer gemiddeld over de getijperiode.

De rivierafvoer wordt per riviertak bepaald door het distributiemodel. De waarden voor A zijn ontleend aan de IMPLIC-schematisatie. Daarbij is elke riviertak opgesplitst in verschillende sekties. Per sektie is de gemiddelde dwarsdoorsnede bepaald ten opzichte van N.A.P.. Het betreft hier het stroomvoerende dwarsprofiel. Bovenstaande gegevens zijn weergegeven in tabel 8. Tevens is de waarde van de integraal $I(x)$ weergegeven. $I(x)$ is als volgt afgeleid van vergelijking (4.7):

$$k_1 \int_0^x u_{riv} dx = k_1 \int_0^x \frac{Q_{riv}}{A(x)} dx = k_1 Q_{riv} \int_0^x \frac{1}{A(x)} dx = k_1 \cdot Q_{riv} \cdot I(x) \quad (4.14)$$

Vergelijking (4.14) geldt per riviertak omdat dan Q_{riv} konstant is.

De duur van de getijperiode is gesteld op 12.5 uur. Hieruit volgt dat $T = 45\ 000$ sec.

De versnelling van de zwaartekracht: $g = 9.81\ m/s^2$.

4.3 Kalibratie Reproductiemodel

Het reproductiemodel, zoals dat beschreven is in paragraaf 4.2, is kort samengevat in tabel 9. Met behulp van de beschikbare metingen (zie hoofdstuk 3) en de gegevens van paragraaf 4.2.c zijn de coëfficiënten k_0 , k_1 en k_3 bepaald. Deze coëfficiënten zijn hieronder weergegeven en tevens opgenomen in tabel 9.

	Oude Maas Open			Oude Maas Afgesloten		
	k_0	k_1	k_3	k_0	k_1	k_3
- Nieuwe Waterweg	29.5	1.0	0.3	32	1.0	0.3
- Nieuwe Maas	6	0.2	0.3	13.1	0.4	0.075
- Oude Maas	7	2.0	0.3	-	-	-

De vergelijking tussen de metingen en het reproductiemodel na de kalibratie is weergegeven in de figuren 3 tot en met 11 voor de situatie met open Oude Maas en in de figuren 12, 13 en 14 voor de situatie met afgesloten Oude Maas.

Een listing van het programma voor de situatie met open Oude Maas is gegeven in bijlage 1; voor de situatie met afgesloten Oude Maas in bijlage 2. De computertaal die hierbij gebruikt is, heet JOSS. Dit is een door de Rand Corporation ontwikkelde taal ten behoeve van het gebruik op de eigen IBM-computer.

4.4 Relatie voor zoutgehalte monding Hollandsche IJssel

Met het reproductiemodel van Van der Burgh, zoals dat is beschreven in de paragrafen 4.2 en 4.3, zijn berekeningen uitgevoerd met vele combinaties van afvoeren via de Nieuwe Waterweg, de Oude en Nieuwe Maas voor de situatie met open Oude Maas. Ook zijn er berekeningen gedaan met verschillende afvoeren via de Nieuwe Maas en de Nieuwe Waterweg voor de situatie met afgesloten Oude Maas. Met deze berekeningen is bepaald wat het zoutgehalte is ter plaatse van de monding van de Hollandsche IJssel, gemiddeld over het getij en over de dwarsdoorsnede. Deze resultaten zijn weergegeven door de volgende vergelijkingen:

a) Open Oude Maas

$$c(\text{m.H.IJ.}) = \exp. (0.318 - 0.00106 Q(\text{NWW})) \cdot \exp. (2.14 - 0.0111 Q(\text{NM})) \quad (4.15)$$

voor $300 \leq Q(\text{NWW}) \leq 800$ en $80 \leq Q(\text{NM}) \leq 290$

waarbij : $c(\text{m.H.IJ.})$: gemiddeld chloridegehalte bij de monding van de Hollandsche IJssel ($\text{kg Cl}^-/\text{m}^3$)
 $Q(\text{NWW})$: gemiddelde rivierafvoer via de Nieuwe Waterweg (m^3/s)
 $Q(\text{NM})$: gemiddelde rivierafvoer via de Nieuwe Maas (m^3/s)

Voor bovengenoemde waarden van $Q(\text{NWW})$ en $Q(\text{NM})$, waarbij $Q(\text{NM})$ ongeveer 30 à 35% van $Q(\text{NWW})$ bedraagt, is het verschil tussen de vergelijking (4.15) en de rekenresultaten van het reproductiemodel kleiner dan 2%.

b) Afgesloten Oude Maas

$$c(\text{m.H.IJ.}) = \sum_{i=0}^5 a_i Q(\text{NWW})^i; \quad c(\text{m.H.IJ.}) \geq 0 \quad (4.16)$$

voor $250 \leq Q(\text{NWW}) \leq 800$

waarbij: $c(\text{m.H.IJ.})$: gemiddeld chloridegehalte bij de monding van de Hollandsche IJssel ($\text{kg Cl}^-/\text{m}^3$)
 $Q(\text{NWW})$: gemiddelde rivierafvoer van de Nieuwe Waterweg (m^3/s)

a_i : koëfficiënten met de waarden:

$$a_0 = + 15.97$$

$$a_1 = - 0.07826$$

$$a_2 = + 0.1827 \times 10^{-3}$$

$$a_3 = - 0.2725 \times 10^{-6}$$

$$a_4 = + 0.2489 \times 10^{-9}$$

$$a_5 = - 0.1005 \times 10^{-12}$$

Het maximale verschil tussen bovenstaande vergelijking en de rekenresultaten van het reproductiemodel is kleiner dan 4%.

5 Relatie tussen zoutgehalte mond Hollandsche IJssel en Gouda

5.1 Relatie bij konstante rivierafvoeren

Het reproductiemodel, zoals beschreven in hoofdstuk 4, geeft een schatting van het gemiddelde zoutgehalte op de Nieuwe Waterweg, de Nieuwe Maas en de Oude Maas afhankelijk van de rivierafvoer via de verschillende riviertakken. Zo doende berekent het model ook het gemiddelde zoutgehalte bij de monding van de Hollandsche IJssel ter plaatse van Kralingse Veer. Ongeveer aan de andere kant van de Hollandsche IJssel ter plaatse van Gouda bevindt zich de waterinlaat voor de Hoogheemraadschappen Rijnland, Delfland en Schieland. De gemiddelde capaciteit van deze inlaat bedraagt op dit moment $35 \text{ m}^3/\text{s}$. Het ingelaten water is bestemd voor de peilbeheersing in de boezems en polders van dit gebied, voor de doorspoeling ter bestrijding van de interne vervuiling en voor de verziltingsbestrijding bij schut- en spuisluizen op die plaatsen waar het gebied grenst aan zout of brak water. Met name voor de tuinbouw in dit gebied is het belangrijk te weten op welk moment en in welke mate het ingelaten water te Gouda verzilt wordt vanuit zee. Sinds de afsluiting van het Haringvliet en het Volkerak (± 1970) is een aantal keren een verzilting van de Hollandsche IJssel ter plaatse van Gouda opgetreden. Dit is geweest in 1971, 1972 en 1976. De gegevens hierover zijn echter nog zo beperkt, dat het niet mogelijk was hieruit een relatie te bepalen tussen het gemiddelde zoutgehalte aan de monding van de Hollandsche IJssel en het gemiddelde zoutgehalte ter plaatse van de inlaat bij Gouda. Onderzoek hierover door Rijkswaterstaat is gerapporteerd in [10, 11].

Voor de PAWN-studie is de volgende aanpak gekozen. Er is gebruik gemaakt van een mathematisch model voor de beschrijving van de waterbeweging en het zoutgehalte op de Hollandsche IJssel. Het was een ééndimensionaal model, dat als functie van de tijd de snelheden (debieten) en de zoutconcentraties langs de Hollandsche IJssel berekende. Daarbij was de waterbeweging zodanig vereenvoudigd dat er sprake was van een zogenaamde kombergingsberekening (verwaarlozing van traagheidseffekten). Dat wil zeggen dat de waterstanden als functie van de tijd voor elke plaats langs de riviertak gelijk waren. Bij de zoutbeweging is zowel het advektief als ook het dispersief transport meegenomen. Het advektief transport veroorzaakt een verandering van de zoutconcentratie doordat het zout door de gemiddelde waterbeweging wordt meegevoerd. Het dispersief transport veroorzaakt een extra spreiding in de lengterichting van de riviertak. Deze spreiding wordt veroorzaakt door verschillen tussen

enerzijds de lokale snelheid en zoutconcentratie en anderzijds de over de dwarsdoorsnede gemiddelde snelheid en concentratie. Deze verschillen worden veroorzaakt door de invloed van de bodem en de oevers op de snelheidsverdeling en door dichtheidseffekten. De mate van gemengdheid in de dwarsdoorsnede is op de Hollandsche IJssel echter zodanig dat aangenomen kan worden dat dichtheidseffekten geen belangrijke rol spelen. Het dispersief transport is in het model verwerkt door een dispersiekoëfficiënt. De grootte van deze koëfficiënt is bij het onderzoek gevarieerd om zodoende de gevoeligheid van deze koëfficiënt op het resultaat te weten. De dispersiekoëfficiënt was:

$$D(x,t) = k \cdot |u_s| \cdot h_s \quad (5.1)$$

waarbij: $D(x,t)$: dispersiekoëfficiënt als functie van de lengterichting x en de tijd t .

k : dispersiekontante.

u_s : gemiddelde snelheid in het stroomvoerend oppervlak.

h_s : gemiddelde waterdiepte van het stroomvoerend oppervlak.

Ter plaatse van de mond van de Hollandsche IJssel moeten de waterstand en het zoutgehalte als functie van de tijd opgegeven worden aan het model. Voor de situatie met open Oude Maas zijn deze gegevens ontleend aan natuurmetingen (de waterstanden bij de stormvloedkering te Krimpen en de zoutgehaltes bij de Van Brienoordbrug) en modelmetingen [4]. Voor de situatie met afgesloten Oude Maas zijn deze gegevens ontleend aan modelmetingen, [4]. Bij enkele berekeningen is onderzocht wat het effect is op het zoutgehalte te Gouda van een faseverschuiving van de waterstand-kromme ten opzichte van de kromme van het zoutgehalte. Voor de faseverschuiving is een half uur gekozen.

Bij de inlaat te Gouda is een onttrekkingsdebiet van 20 of 40 m³/s ingesteld. De meeste berekeningen zijn uitgevoerd met 20 m³/s. Bij enkele berekeningen is bij overigens gelijkblijvende omstandigheden het debiet gesteld op 40 m³/s om zodoende het effect van de grootte van het onttrekkingsdebiet op het zoutgehalte bij Gouda te bepalen.

De gegevens voor en de resultaten van de berekeningen zijn samengevat in tabel 10. De resultaten zijn tevens weergegeven in figuur 15. Het onderzoek is in uitgebreidere vorm beschreven in [5]. Uit dit verslag zijn de volgende konklusies overgenomen:

- Met behulp van het rekenprogramma is het mechanisme van verzilting van de Hollandsche IJssel goed te beschrijven en kan vergelijkend onderzoek uitgevoerd worden.
- Het resultaat van de berekeningen is nagenoeg ongevoelig voor de grootte van de gebruikte dispersiecoëfficiënten (berekening 8 en 9).
- De verandering van het zoutgehalte te Gouda bij variatie van het onttrekkingsdebiet (20-40 m³/s) is gering. (De berekeningen 5 en 8, 17 en 18 of 19 en 20). De grootte van het debiet heeft wel effect op de tijd die verstrijkt voordat bij Gouda de verzilting waargenomen wordt. Bij 20 m³/s duurt het ruim 3 dagen; bij 40 m³/s ongeveer 2 dagen. Na 6 dagen is een evenwichtstoestand bereikt, dat wil zeggen dat de zoutconcentratie bij het onttrekkingspunt nauwelijks meer verandert.
- De gevoeligheid van het zoutgehalte te Gouda voor het juiste faseverschil tussen de waterstand en zoutkromme is aanzienlijk (berekening 5 ten opzichte van 7).
- Op grond van bovenstaande mag verwacht worden dat het gebruikte model een redelijke voorspelling geeft van het zoutgehalte te Gouda als functie van het gemiddelde zoutgehalte aan de mond van de Hollandsche IJssel.
- Volgens de berekeningen (zie ook figuur 15) treedt verzilting bij Gouda eerder op bij open Oude Maas dan bij afgesloten Oude Maas. Of dit resultaat significant is, is moeilijk aan te geven omdat de betrouwbaarheidsintervallen niet te bepalen zijn op grond van dit beperkte onderzoek.
- Onder normale omstandigheden heeft de top van de zoutkromme bij de monding geen invloed op de verzilting van het onttrekkingspunt, omdat dit hoge zoutgehalte bij vloed naar binnen stroomt en bij eb er weer uit. De verzilting van de Hollandsche IJssel wordt bepaald door het einde van de dalende flank van de zoutkromme en door het dal in de zoutkromme tijdens laagwater (zie figuur 19). Dit leidt tevens tot de voorlopige konklusie dat onder normale omstandigheden de verzilting van de Hollandsche IJssel niet is tegen te gaan door het gebruik van de stormvloedkering te Krimpen.

De resultaten van tabel 10 zijn weergegeven door de volgende vergelijkingen voor de situatie met afgesloten Oude Maas (chloride gehalten in kg/m³):

$$\begin{array}{ll} \text{Als} & c(\text{m.H.IJ.}) \leq 1.270 \text{ dan} \\ & c(\text{Gouda}) = 0 \end{array} \quad (5.2)$$

$$\begin{array}{ll} \text{Als} & 1.270 < c(\text{m.H.IJ.}) \leq 3.000 \text{ dan} \\ & c(\text{Gouda}) = 0.46 c(\text{m.H.IJ.}) - 0.580 \end{array} \quad (5.3)$$

$$\begin{aligned} \text{Als} \quad & 3.000 < c(\text{m.H.IJ.}) \leq 5.675 \quad \text{dan} \\ & c(\text{Gouda}) = 1.83 c(\text{m.H.IJ.}) - 4.710 \end{aligned} \quad (5.4)$$

$$\begin{aligned} \text{Als} \quad & c(\text{m.H.IJ.}) > 5.675 \quad \text{dan} \\ & c(\text{Gouda}) = c(\text{m.H.IJ.}) \end{aligned} \quad (5.5)$$

Voor de situatie met open Oude Maas zijn de volgende vergelijkingen bepaald:

$$\begin{aligned} \text{Als} \quad & c(\text{m.H.IJ.}) \leq 0.915 \quad \text{dan} \\ & c(\text{Gouda}) = 0 \end{aligned} \quad (5.6)$$

$$\begin{aligned} \text{Als} \quad & 0.915 < c(\text{m.H.IJ.}) \leq 2.800 \quad \text{dan} \\ & c(\text{Gouda}) = 0.53 c(\text{m.H.IJ.}) - 0.460 \end{aligned} \quad (5.7)$$

Voor hogere zoutgehaltenes aan de mond van de Hollandsche IJssel zijn geen gegevens beschikbaar. Waarschijnlijk levert dat geen problemen op omdat hogere zoutgehaltenes zeer onwaarschijnlijk zijn. Mocht het toch nodig blijken met hogere waarden te werken, dan kan aangenomen worden dat dezelfde helling geldt als in de situatie met afgesloten Oude Maas. Dit geeft dan:

$$\begin{aligned} \text{Als} \quad & 2.800 < c(\text{m.H.IJ.}) \leq 4.940 \quad \text{dan} \\ & c(\text{Gouda}) = 1.83 c(\text{m.H.IJ.}) - 4.100 \end{aligned} \quad (5.8)$$

$$\begin{aligned} \text{Als} \quad & c(\text{m.H.IJ.}) > 4.940 \quad \text{dan} \\ & c(\text{Gouda}) = c(\text{m.H.IJ.}) \end{aligned} \quad (5.9)$$

Hierbij is: $c(\text{m.H.IJ.})$: gemiddeld chloridegehalte aan de monding van de Hollandsche IJssel.

$c(\text{Gouda})$: gemiddeld chloridegehalte bij het onttrekkingspunt te Gouda.

Bovenstaande resultaten gelden voor de situatie waarbij de rivierafvoeren via de Nieuwe Waterweg en de Oude en Nieuwe Maas konstant verondersteld zijn over een langere periode.

5.2 Relatie bij variërende rivierafvoeren

In paragraaf 5.1 zijn de relaties gegeven tussen het zoutgehalte te Gouda en het zoutgehalte bij de monding van de Hollandsche IJssel.

Deze relaties gelden voor de situatie dat gedurende een bepaalde periode (bijvoorbeeld de periode van 10 dagen die bij PAWN gebruikt wordt) de afvoeren via

de Rotterdamsche Waterweg niet variëren. In werkelijkheid variëren deze afvoeren wel. Deze variaties worden voornamelijk veroorzaakt door de volgende twee verschijnselen:

- de variatie van het getij op zee
- de variaties van de rivierafvoeren van de Rijn en de Maas.

De variatie van het getij op zee ten gevolge van de wisselwerking tussen het water van de wereldzeeën en de zon en de maan uit zich door een variatie van het getijverschil te Hoek van Holland. Van doodtij, met een gemiddeld getijverschil van 1,34 m, neemt het getij toe tot 1,84 m gemiddeld bij springtij en daarna weer af tot doodtij. Deze variatie heeft een periode van ongeveer 14 dagen. Mogelijk treedt er naast de variatie van het getijverschil ook een variatie op van de gemiddelde waterstand te Hoek van Holland. Dit is op dit moment nog in onderzoek. De variatie van het getij op zee veroorzaakt een variatie van de waterstand op het Haringvliet en het Hollandsch Diep.

Door het grote bergende oppervlakte van beide wateren wordt bij stijgende waterstand een gedeelte van het afstromende water van de Rijn (via Waal en Lek) en de Maas geborgen in dit gebied. Hierdoor vermindert de gemiddelde rivierafvoer via de Oude en Nieuwe Maas en de Nieuwe Waterweg. Bij dalende waterstand treedt het omgekeerde effect op. Dit wordt wel het Haringvliet-effekt genoemd. Bovengenoemd verschijnsel is nog onvoldoende onderzocht, zodat nog niet bekend is hoe precies de samenhang is tussen de variaties van het getij en de variaties van de waterstanden op het Haringvliet en het Hollandsch Diep.

Ook is nog niet bekend in hoeverre variaties van de rivierafvoeren dit verschijnsel beïnvloeden. Op grond van enkele berekeningen met gerijreeksen ten behoeve van het onderzoek afsluiting Oude Maas in het Getijmodel Rijnmond is vastgesteld dat het Haringvliet-effekt een variatie van de afvoer van de Nieuwe Waterweg kan veroorzaken van ongeveer plus of min $250 \text{ m}^3/\text{s}$ ten opzichte van de evenwichtswaarde (bijvoorbeeld ten opzichte van NLP '70). Deze waarden van + of - $250 \text{ m}^3/\text{s}$ gelden voor de situatie met open Oude Maas. Voor de situatie met afgesloten Oude Maas is geconstateerd dat de variatie gereduceerd wordt met ongeveer 40%. De resterende variatie bedraagt dan + of - $150 \text{ m}^3/\text{s}$. Hoewel op dit moment nog niet voldoende kennis aanwezig is van dit zogenaamde Haringvliet-effekt, is toch ten behoeve van de PAWN-studie op grond van de beschikbare gegevens gewerkt met de volgende schematisatie:

- Het Haringvliet-effekt veroorzaakt een variatie van de afvoer via de Nieuwe Waterweg, die verloopt volgens een sinus met een periode van 14 dagen. De maximale waarden van de variatie zijn plus of min $250 \text{ m}^3/\text{s}$ voor de situatie met open Oude Maas ($250 \sin(\frac{x}{14} \cdot 360^\circ)$; x zijn de dagen) en plus of min $150 \text{ m}^3/\text{s}$

voor de situatie met afgesloten Oude Maas ($150 \sin(\frac{x}{14} \cdot 360^\circ)$).

- De afvoerverdeling over de Oude en Nieuwe Maas voor de situatie met open Oude Maas wordt niet beïnvloed door dit verschijnsel.

De rivierafvoeren van de Rijn en de Maas variëren continu. Bij de PAWN-studie wordt gewerkt met konstante waarden voor een periode van 10 dagen. Binnen de periode van 10 dagen zal dus in werkelijkheid ook de afvoeren variëren. De relaties tussen de afvoeren en het zoutgehalte bij de mond van de Hollandsche IJssel en tussen dit zoutgehalte en het zoutgehalte bij de inlaat te Gouda zijn niet lineair (zie de vergelijkingen 4-15, 4-16 en figuur 15). Daarom kan door het werken met alleen de gemiddelde waarden over 10 dagen een onjuiste schatting verkregen worden van het gemiddelde zoutgehalte te Gouda. De grootte van deze variatie binnen 10 dagen is als volgt bepaald. Er is gekeken naar het verschil tussen decade-gemiddelden van de afvoeren van de Rijn en de Maas bij lage afvoeren via de Rijn (kleiner dan $900 \text{ m}^3/\text{s}$). Hieruit blijkt dat een verschil van $200 \text{ m}^3/\text{s}$ of hoger een kans van voorkomen heeft die kleiner is dan %.

Bovenstaande is als volgt geschematiseerd:

- Variaties van de rivierafvoeren van de Rijn en de Maas veroorzaken een lineaire variatie van de rivierafvoeren via de Nieuwe Waterweg en de Oude en Nieuwe Maas ten opzichte van het decade-gemiddelde. De variatie bedraagt plus of min $100 \text{ m}^3/\text{s}$ aan het begin van een decade en min of plus $100 \text{ m}^3/\text{s}$ aan het einde. Het totale verschil tussen het begin en het einde van de periode bedraagt dus $200 \text{ m}^3/\text{s}$. Dit geldt voor open en afgesloten Oude Maas.
- De afvoerverdeling over de Oude en Nieuwe Maas voor de situatie met open Oude Maas wordt niet beïnvloed door deze variatie.

Om te onderzoeken wat het effect is van beide bovenstaande verschijnselen op de relatie tussen de afvoeren via de Rotterdamsche Waterweg en het zoutgehalte bij de inlaat te Gouda, zijn de volgende drie situaties onderscheiden:

a) De zeer ongunstige situatie

Hierbij is aangenomen dat beide verschijnselen optreden gedurende de decade en daarbij zodanig samenvallen dat voor de verzilting van de Hollandsche IJssel de meest ongunstige situatie ontstaat. Deze situatie is weergegeven in figuur 16.a. Hierbij vallen de laagste afvoeren van de sinus en van het lineaire verloop samen. Het resultaat hiervan is gesuperponeerd op de gemiddelde afvoer via de Rotterdamsche Waterweg. De afvoeren via de Oude en Nieuwe Maas zijn daarna bepaald waarbij de oorspronkelijke verhouding is gehandhaafd (NLP '70).

b) De zeer gunstige situatie

Hierbij vallen de beide verschijnselen zodanig samen dat voor de verzilting van de Hollandsche IJssel de meest gunstige situatie ontstaat. Deze situatie is weergegeven in figuur 16.b. Hierbij ontbreken de laagste (negatieve) afvoeren van de sinus en worden de overblijvende laagste afvoeren zoveel mogelijk gecompenseerd door positieve afvoeren van het lineaire verloop.

c) De gemiddelde situatie

Hierbij is het lineaire verloop weggelaten. Het sinusvormig verloop over de volle 14 dagen is gesuperponeerd op de gemiddelde afvoersituatie volgens NLP '70.

Voor deze drie situaties is per dag (a. en b. 10 dagen; c. 14 dagen) de gemiddelde afvoer berekend voor de Nieuwe Waterweg, de Nieuwe en Oude Maas. Met behulp van de vergelijkingen 4.15 en 4.16 en figuur 15 (vergelijkingen 5.2 tot en met 5.9) is daarna het gemiddelde chloridegehalte bepaald bij de inlaat te Gouda. Van de zo gevonden waarden van de 10 of 14 dagen is het rekenkundig gemiddelde bepaald. De resultaten van bovenstaande procedure voor verschillende afvoeren via de Rotterdamsche Waterweg zijn weergegeven in tabel 11 en de figuren 17 en 18.

Bij de bovenstaande aanpak is uitgegaan van de volgende veronderstellingen.

- Het zoutgehalte bij de monding van de Hollandsche IJssel past zich momentaan (per dag) aan de verandering van de rivierafvoeren aan.
- De relatie voor het zoutgehalte van de inlaat te Gouda, die bepaald is voor een evenwichtssituatie (per getijperiode hetzelfde verloop van debieten, waterstanden en zoutgehaltes), geldt ook bij dagelijkse variaties.

Op grond van het onderzoek naar de zoutindringing in het gebied van de Rotterdamsche Waterweg zoals dat uitgevoerd is door de Rijkswaterstaat en het Waterloopkundig Laboratorium, kan gesteld worden dat van de eerste veronderstelling uitgegaan mag worden. Overigens is deze veronderstelling ook reeks^a gemaakt bij de manier waarop het reproductiemodel van Van der Burgh gekalibreerd is. Meer detail hierover is te vinden in [12].

Wat betreft de tweede veronderstelling kan het volgende gezegd worden.

Bij het onderzoek naar de relatie voor het zoutgehalte te Gouda [5] is gekonstateerd dat het zoutgehalte te Gouda bepaald wordt door het zoutgehalte bij

de monding van de Hollandsche IJssel ten tijde van laagwater. Dat is wat betreft het zoutgehalte als functie van de tijd gedurende een getijperiode het einde van de dalende flank en het dal van de zoutkromme (zie hiervoor figuur 19). Door de onttrekking bij Gouda ontstaat er een resulterende stroming van water de Hollandsche IJssel op. Het water dat daardoor per getij netto de Hollandsche IJssel opstroomt, heeft bovengenoemd zoutgehalte. De hoeveelheid water wordt bepaald door het onttrekkingsdebiet te Gouda. Wanneer in een volgend getij een andere zoutkromme aanwezig is bij de monding van de Hollandsche IJssel in verband met een verandering van de rivierafvoeren, krijgt het water dat netto naar binnen stroomt een ander zoutgehalte. Wanneer nu over een periode van 10 dagen een konstant onttrekkingsdebiet bij Gouda aanwezig is, mag van de tweede veronderstelling uitgegaan worden. De hoeveelheden per dag zijn dan konstant en alleen het gemiddelde zoutgehalte per dag of per getij zal variëren. Wel is het zo dat het water, dat netto de Hollandsche IJssel opstroomt, er enige dagen over doet om de inlaat bij Gouda te bereiken. Er treedt dus een faseverschuiving op tussen het moment van verzilten van de monding en van de inlaat. Deze faseverschuiving heeft in de PAWN-studie geen effect op de schatting van de totale landbouwschade per jaar ten gevolge van een hoger zoutgehalte. Daarom is deze faseverschuiving verwaarloosd bij de studie, doordat aangenomen is dat de verzilting bij Gouda samenvalt met die bij de monding.

In werkelijkheid heeft de beheerder de mogelijkheid om in te spelen op bovenstaand verschijnsel door niet over bijvoorbeeld 10 dagen een konstant inlaatdebiet te handhaven, wanneer de waterbehoefte daar naar is. Afhankelijk van de afvoer via de Nieuwe Maas en de Nieuwe Waterweg ten gevolge van het Haringvliet-effekt en de variaties van de afvoeren van Rijn en Maas, zal het gemiddelde zoutgehalte bij de monding van de Hollandsche IJssel variëren. Hierop kan de beheerder dan zijn wijze van inlaten afstemmen. Voordat dit echter in de praktijk toepasbaar is, is het nodig dat er door onderzoek meer inzicht wordt verkregen over het zogenaamde Haringvliet-effekt en het mechanisme van de zoutindringing op de Hollandsche IJssel.

Literatuur

1. Rand Corporation: Policy Analysis of the Watermanagement of the Netherlands (PAWN); A study Design, april 1977.
2. Rijkswaterstaat, Directie Waterhuishouding en Waterbeweging: Voortgangsverslag PAWN-werkzaamheden, 26 april 1978.
3. B. Goeller e.a.: Policy Analysis of the Watermanagement of the Netherlands; Summary report, april 1981 (nog niet verschenen).
4. Waterloopkundig Laboratorium: Oriënterend onderzoek Afsluiting Oude Maas ten behoeve van gebruik rekenmodellen; M 1552-1 (nog niet verschenen).
5. Waterloopkundig Laboratorium: Zoutindringing op de Hollandsche IJssel, R 1230-2, maart 1979.
6. Rijkswaterstaat, Deltadienst, Systematisch onderzoek van het Noordelijk Deltagebied, Delta projekt fase 2, deel 1.
7. P. v.d. Burgh, Ontwikkeling van een methode voor het voorspellen van zoutverdelingen in estuaria, kanalen en zeeën, Rijkswaterstaat, Deltadienst, Afdeling Waterhuishouding, rapport 01-72, januari 1972.
8. Waterloopkundig Laboratorium, Reproductie zouttoestand getijrivieren; Toetsing ééndimensionale en tweedimensionale stationaire rekenmodellen aan getijgootresultaten, M 896-20, september 1973.
9. Rijkswaterstaat; Empirische methoden ter voorspelling van de zoutbeweging in estuaria; Rijkswaterstaat, Deltadienst, Waterloopkundige afdeling, sectie waterbeheersing.
10. Rijkswaterstaat; Globaal onderzoek naar de verziltingsfrequentie van de Hollandsche IJssel; Rijkswaterstaat, Directie Waterhuishouding en Waterbeweging, District Zuidwest; notanummer 11.002.05, oktober 1977.
11. Rijkswaterstaat; Toetsing resultaten van het onderzoek verziltings situatie Hollandsche IJssel aan de opgetreden situatie in 1976; Rijkswaterstaat, Directie Waterhuishouding en Waterbeweging, District Zuidwest, notanummer 11.002.04, augustus 1978.

12. Waterloopkundig Laboratorium, Getijgootonderzoek, de nota's:

- Tijdschaal aanpassing dichtheidsverdeling bij variatie rivierafvoer, M 896, april 1977.
- Tijdschaal voor veranderingen in de zoutverdeling in de getijgoot, M 896, februari 1975.

Tabel 1: Natuurmetingen met vaste zoutopnemers

Rivierafvoeren [m ³ /s]				
Nieuwe Waterweg	600	1000	1600	
Oude Maas	435	700	975	
Nieuwe Maas	165	300	625	
Getij-omstandigheden				
Getijverschil [m]. Er is gemiddeld over alle getij-omstandigheden				
Vloedvolumen ¹⁾ [10 ⁶ m ³]				
- Nieuwe Waterweg (kmr. 1030, 100)	71,3	64,7	54,6	
- Oude Maas (kmr. 1006, 450)	20,8	16,5	11,6	
- Nieuwe Maas (kmr. 1012, 900)	43,1	40,8	35,4	
Zoutgehalte ²⁾ [kg Cl ⁻ /m ³]				
Nieuwe Waterweg	kmr. 1029.00	15.1	13.0	10.3
	1024.75	14.7	12.4	9.6
	1023.00	12.8	9.8	6.6
	1020.50	10.7	7.4	4.2
	1018.50	11.9	8.8	5.6
	1015.75	9.5	6.0	2.9
	1013.60	8.7	5.1	-
Nieuwe Maas	kmr. 1012.00	7.4	5.6	2.8
	1010.00	5.6	3.8	1.5
	1006.50	4.6	2.6	0.7
	1002.60	3.7	1.6	0.2
	1002.10	3.9	1.7	0.2
	999.30	3.6	1.2	0
	998.60	2.7	0.6	0
Oude Maas	kmr. 1005.40	4.3	1.7	0.65
	1002.25	2.1	0.6	0.10
	999.00	0.55	0	0
	996.60	0.20	0	0
	994.50	0.05	0	0

1) Bepaald met Implic-berekeningen voor gemiddelde getij-omstandigheden (DW 346).

2) Dit zijn de verhogingen van het zoutgehalte door de zee-invloed. Het zogenaamde achtergrond-zoutgehalte (afkomstig van Rijn en Maas) is afgetrokken.

Tabel 2: Natuurmetingen, gereproduceerd in Getijmodel Rijnmond

Datum van meting	16 juni 1973	17 juni 1973	22 juni 1974	23 juni 1974
Rivierafvoeren [m^3/s]				
Nieuwe Waterweg	1650	1325	935	1055
Nieuwe Maas	735	595	415	460
Oude Maas	915	730	520	600
Getij-omstandigheden				
Getijverschil [m]	1.75	1.71	1.98	1.96
Vloedvolumen [$10^6 m^3$] 1)				
Nieuwe Waterweg (kmr. 1030.10)	64.2	70.2	77.1	77.8
Nieuwe Maas (kmr. 1012.90)	41.3	44.3	45.6	46.1
Oude Maas (kmr. 1006.45)	16.0	17.5	22.7	22.4
Zoutgehalte 2) [$kg Cl^-/m^2$]				
Nieuwe Waterweg kmr. 1029.00	8.98	10.48	11.97	11.86
1024.75	7.53	9.12	10.20	9.74
1020.50	4.90	6.13	7.85	7.14
1015.75	2.20	3.58	4.95	4.40
Nieuwe Maas kmr. 1012.00	0.94	2.15	3.77	3.24
1008.25	0.04	0.32	1.99	1.23
1002.125	0.04	0.07	0.50	0.27
998.00	0	0	0	0
Oude Maas kmr. 1005.50	0.43	1.20	2.36	1.98
1002.25	0.09	0.44	1.22	0.87
999.00	0.07	0.11	0.56	0.36
996.70	0	0.04	0.22	0.15

1) Gebaseerd op Deltar-berekeningen ten behoeve van het modelonderzoek. De Deltar-uitkomsten (gelden voor ~ 25 uur) zijn door 2 gedeeld.

2) Verhoging van het zoutgehalte ten gevolge van zee-invloed. Achtergrond-zoutgehalte is afgetrokken ($0.200 kg Cl^-/m^3$).

Tabel 3: Modelmetingen bij open Oude Maas

Proefnummer 1)	T0	T11
Rivierafvoeren [m ³ /s]		
Nieuwe Waterweg	1359	1014
Nieuwe Maas	499	342
Oude Maas	860	672
Getij-omstandigheden 2)		
Getijverschil [m]	1.75	1.75
Vloedvolumen [10 ⁶ m ²] 3)		
Nieuwe Waterweg	70.3	70.84
Nieuwe Maas	44.8	47.2
Oude Maas	15.8	19.1
Zoutgehalte [kg Cl ⁻ /m ³] 4)		
Nieuwe Waterweg kmr. 1029.00	11.65	12.79
1024.75	9.54	10.89
1020.50	6.79	8.39
1015.75	3.94	5.66
Nieuwe Maas kmr. 1012.00	2.43	4.19
1008.25	0.62	2.98
1002.125	0.22	0.99
998.00	0.02	0.38
994.10	0	0.14
Oude Maas kmr. 1005.50	1.06	2.05
1002.25	0.27	0.85
999.00	0.06	0.19
996.70	0	0

- 1) Voor proevenprogramma zie tabel 4.
- 2) Bij de proeven is het getij van 16 juni 1973 gebruikt.
- 3) Gebaseerd op Implic-berekeningen ten behoeve van het modelonderzoek.
- 4) Verhoging van het zoutgehalte ten gevolge van zee-invloed. Achtergrond-zoutgehalte is afgetrokken.

Tabel 4: Proevenprogramma van het onderzoek afsluiting Oude Maas in Getijmodel Rijnmond (M 1552)

Proefnummer	T0	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11
<u>Afsluiting Oude Maas</u>												
Geen afsluiting	X	X							X			X
Wel afsluiting; door- spoeldebiet 0 m ³ /s			X	X	X	X	X			X	X	
Wel afsluiting; door- spoeldebiet 100 m ³ /s								X				
<u>Getij-omstandigheden</u> (Hoek van Holland)												
doodtij: 28 augustus 1974 (1.35 m) ²⁾				X								
normaal tij (t): 16 juni 1973 (1.75 m)	X	X	X			X	X	X			X ¹⁾	X
springtij: 22 juni 1974 (1.98 m)					X							
12,5-uursgetij: 1971.0 (1.65 m)									X	X		
<u>Afvoeren</u> m ³ /s												
Bovenrijn (Lobith)	1400	1400	1025	1025	1025	1400	650	1025	1400	1400	1025	1025
Maas (Lith)	145	145	95	95	95	145	45	95	145	145	95	95
Nieuwe Waterweg	1359	1359	935	1114	803	1267	630	942	1201	1183	934	1014
Nieuwe Maas	499	543	935	1114	803	1267	630	842	437	1183	934	342
Oude Maas	860	816	0	0	0	0	0	100	764	0	0	672
Onttrekking Gouda	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45
<u>Geometrie</u>												
Huidige situatie	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Verruiming noord		X										

1) Getij Hoek van Holland gekorrigeerd voor invloed afsluiting Oude Maas op dit getij.

2) Getijverschil.

Tabel 5: Modelmetingen bij gesloten Oude Maas

Proefnummer ¹⁾	T2	T3	T4	T5	T6
Rivierafvoeren [m ³ /s]					
Nieuwe Waterweg	935	1114	803	1267	630
Nieuwe Maas	935	1114	803	1267	630
Oude Maas	0	0	0	0	0
Getij-omstandigheden					
Getijverschil [m]	1.75	1.35	1.98	1.75	1.75
Vloedvolume [10 ⁶ m ³] ²⁾					
Nieuwe Waterweg	61.2	40.9	63.1	56.9	65.0
Nieuwe Maas	41.4	26.7	44.3	37.3	45.4
Oude Maas	0	0	0	0	0
Zoutgehalte [kg Cl ⁻ /m ²] ³⁾					
Nieuwe Waterweg kmr. 1029.00	12.62	12.23	13.05	11.64	13.98
1024.75	10.99	10.90	11.30	9.85	12.49
1020.50	9.12	9.39	9.14	7.68	10.84
1015.75	6.71	7.28	6.70	5.37	8.76
Nieuwe Maas kmr. 1012.00	5.22	5.76	5.42	3.74	7.78
1008.25	3.89	4.74	4.01	1.81	6.58
1002.125	0.87	1.21	1.22	0.29	2.89
998.00	0.11	0.07	0.37	0.03	1.31
994.10	0.07	0.06	0.12	0.07	0.48
991.00	0	0	0	0	0.03

1) Voor proevenprogramma: zie tabel 4.

2) Gebaseerd op Implic-berekeningen ten behoeve van het modelonderzoek.

3) Verhoging van het zoutgehalte ten gevolge van zee-invloed. Achtergrond-zoutgehalte is afgetrokken.

Tabel 6: Samenvatting gegevens ten behoeve van figuur 1

Meting/Proef	zoutgehalte kmr. 1029 C(1029) [kg Cl ⁻ /m ³]	Rivierafvoer N. Waterweg Q(NWW) [m ³ /s]	Vloedvolumen 1) monding N. Waterweg P(T) [10 ⁶ m ³]	Vloedgetal 2) α
Oude Maas open				
600 m ³ /s	15.1	~ 600	71.3 3)	0.38
1000 m ³ /s	13.0	~ 1000	64.7 3)	0.70
1600 m ³ /s	10.3	~ 1600	54.6 3)	1.32
16/6/73	9.45	1650	64.2	1.16
17/6/73	11.07	1325	70.2	0.85
22/6/74	12.61	935	77.1	0.54
23/6/74	12.52	1055	77.8	0.61
T0	11.65	1359	70.3	0.87
T11	12.79	1014	70.8	0.64
Oude Maas afgesloten				
T2	12.62	935	61.2	0.69
T3	12.23	1114	40.9	1.23
T4	13.05	803	63.1	0.57
T5	11.64	1267	56.9	1.00
T6	13.98	630	65.0	0.44

1) Gebaseerd op Implic-berekeningen ten behoeve van het modelonderzoek.

$$2) \alpha = \frac{Q(NWW) \times T}{P(T)} ; T \approx 12,5 \text{ uur}$$

3) Bepaald met Implic-berekeningen voor gemiddelde getij-omstandigheden (DW 346).

Tabel 7: Vloedvolumen voor verschillende takken van de Rotterdamsche Waterweg

IMPLIC bereke- ning	Getij- verschil $2a_0$ [m]	Afvoer Nieuwe Waterweg $Q(NWW)$ [m ³ /s]	Vloedvolumen bij monding van:			$P(NM)$	$P(OM)$
			Nieuwe Waterweg $P(NWW)$ [10 ⁶ m ³ /s]	Nieuwe Maas $P(NM)$ [10 ⁶ m ³ /s]	Oude Maas $P(OM)$ [10 ⁶ m ³ /s]	$P(NWW)$	$P(NWW)$
1	1.34	600	55.6	34.7	16.3	0.62	0.29
2	1.65	600	71.3	43.1	20.8	0.60	0.29
3	1.84	600	76.5	45.8	22.5	0.60	0.29
4	1.34	1000	48.7	32.1	12.0	0.66	0.25
5	1.65	1000	64.7	40.8	16.5	0.63	0.26
6	1.84	1000	70.4	43.5	18.5	0.62	0.26
7	1.34	1600	38.1	26.3	7.1	0.69	0.19
8	1.65	1600	54.6	35.4	11.6	0.65	0.21
9	1.84	1600	60.7	38.3	13.8	0.63	0.23

Tabel 8: Gegevens ten behoeve van het Reproductiemodel

<u>Waterdiepte ter plaatse van de monding (d)</u>				
- Nieuwe Waterweg : 13.59 m				
- Nieuwe Maas : 11.70 m				
- Oude Maas : 9.06 m				
<u>Gemiddelde stroomvoerend dwarsprofiel per sectie: A(x)</u>				
Riviertak	Sektielgrens	Afstand sektielgrens tot begin riviertak	Gemiddeld stroomvoerend profiel van voorafgaande sectie	$\int_0^x \frac{1}{A(x)} dx$
	[kmr.]	x [km]	A(x) [m ²]	I(x) [m ⁻¹]
Nieuwe Waterweg	1029.000	0	-	-
	1027.37	1.63	6876	0.232
	1020.53	8.47	6150	1.342
	1016.60	12.40	5506	2.057
	1012.70	16.30	6410	2.639
Nieuwe Maas	1012.70	0	-	-
	1008.57	4.13	5756	0.715
	1003.22	9.48	5063	1.773
	999.16	13.54	4055	2.773
	994.24	18.46	2818	4.518
	989.01	23.69	2816	6.338
Oude Maas	1006.50	0	-	-
	1003.58	2.92	2655	1.10
	1002.68	3.82	2990	1.40
	995.36	11.14	2361	4.50
Getijperiode : T ≈ 12.5 uur = 45 000 s				
Versnelling zwaartekracht : g = 9.81 m/s ²				

Tabel 9: Samenvatting Reproductiemodel van Van der Burgh

Reproductiemodel						
<u>Uitgangspunt</u>						
$D(x) \cdot \frac{dc(x)}{dx} = - u_{riv}(x) \cdot c(x)$						(4.1)
<u>Randkonditie</u>						
$c(1029) = c(zee) \cdot e^{-0.00165 \cdot (Q(NWW))^{0.8}}$						(4.6)
$c(zee) = 19 \text{ kg Cl}^-/\text{m}^3$						
<u>Dispersiecoëfficiënt</u>						
$D(x) = k_o \cdot \alpha^{k_3} \cdot g^{0.5} \cdot d^{1.5} - k_1 \int_0^x u_{riv} dx$						(4.7)
$\alpha = \frac{Q_{riv} \cdot T}{P}$						(4.3)
$u_{riv} = \frac{Q_{riv}}{A}$						(4.13)
<u>Open Oude Maas</u>						
$P(NWW) = 81.3 \times 10^6 - 16\,700 \cdot Q(NWW)$						(4.8)
$P(NM) = (0.00005 \cdot Q(NWW) + 0.58) \cdot P(NWW)$						(4.9)
$P(OM) = (-0.00008 \cdot Q(NWW) + 0.34) \cdot P(NWW)$						(4.10)
<u>Afgesloten Oude Maas</u>						
$P(NWW) = 72.9 \times 10^6 - 12\,500 Q(NWW)$						(4.12)
$P(NM) = P(NWW)$						
Koëfficiënten						
	Oude Maas Open			Oude Maas Afgesloten		
	k_o	k_1	k_3	k_o	k_1	k_3
- Nieuwe Waterweg	29.5	1.0	0.3	32	1.0	0.3
- Nieuwe Maas	6	0.2	0.3	13.1	0.4	0.075
- Oude Maas	7	2.0	0.3	-	-	-

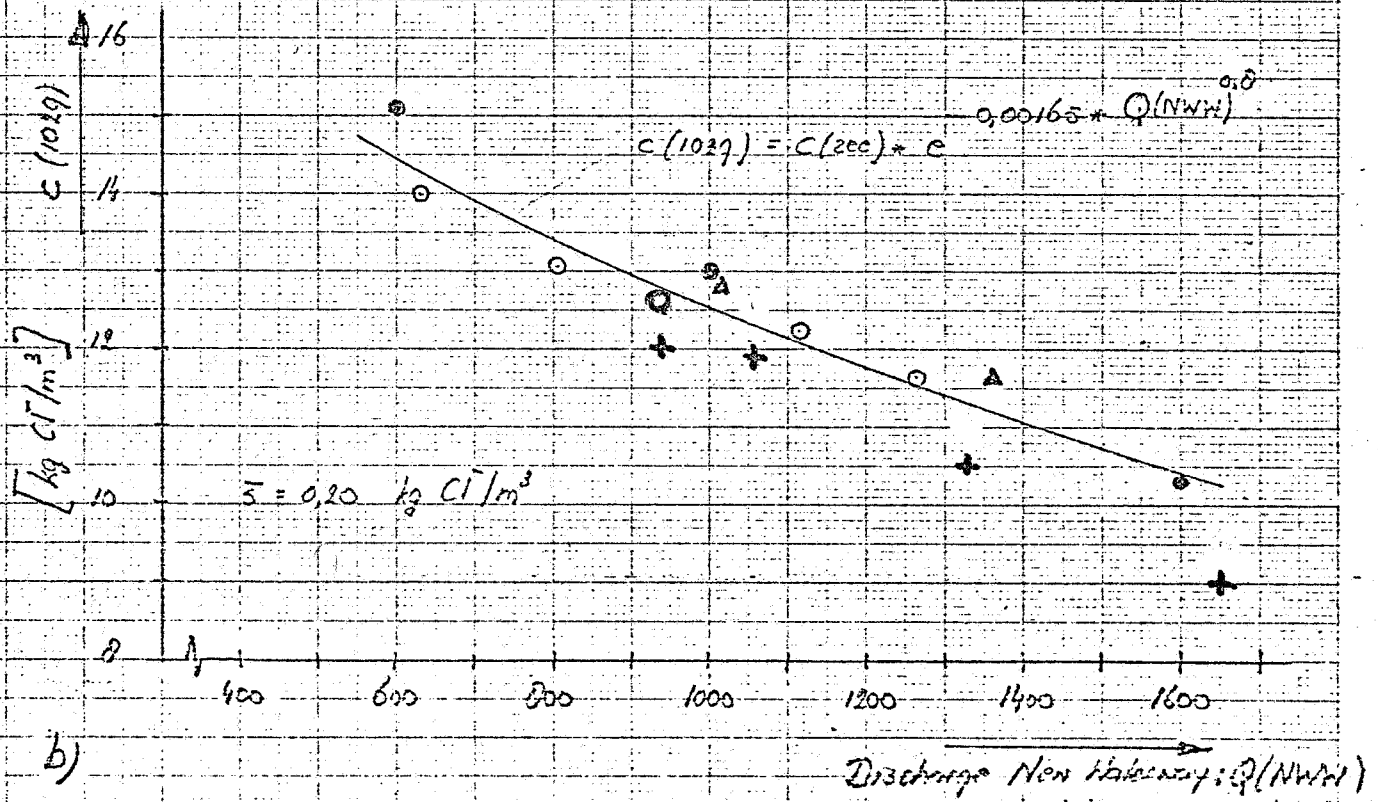
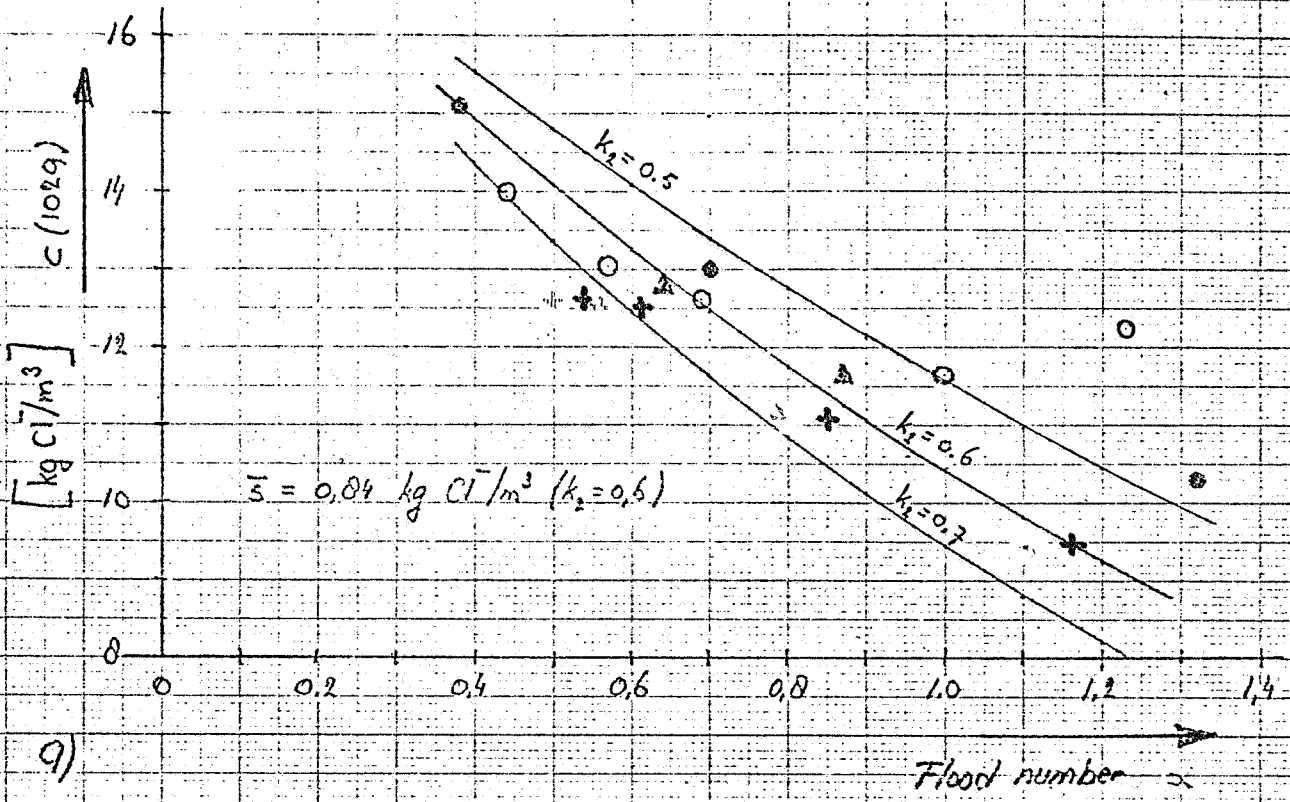
Tabel 10: Relatie zoutgehaltes mond Hollandsche IJssel en inlaat Gouda;
gegevens en resultaten

Berekening	Oorsprong gegevens - Waterstand - Zoutgehalte bij mond H.IJssel M=modelonderzoek N=natuurmeting	fasever- schuiving	Onttrek- king Gouda m ³ /s	Dispersie konstante	Gemiddeld zoutgehalte mond H.IJssel c(m.H.IJ.) kg/m ³	Gemiddeld zoutgehalte inlaat Gouda c(Gouda) kg/m ³
<u>Oude Maas afgesloten</u>						
1	M : proef T6 ¹⁾	-	20	20	0.430	0
2	"	-	40	20	1.265	0.012
3	"	-	20	20	"	0.007
4	"	½ uur	20	20	"	0.003
5	"	-	20	20	3.000	0.660
7	"	½ uur	20	20	"	0.970
8	"	-	40	20	"	0.780
9	"	-	40	5	"	0.737
10	"	-	20	20	4.320	3.580
11	"	-	20	20	"	2.840
<u>Oude Maas Open</u>						
15	M : proef T11 ¹⁾	-	20	20	0.910	0.008
16	"	-	20	20	1.050	0.025
17	N : 15 nov. '71	-	20	20	0.850	0.030
18	N : "	-	40	20	"	0.035
19	N : 22 okt. '72	-	20	20	2.800	1.000
20	N : "	-	40	20	"	1.050

1) Zie tabel 4.

Table 11: Salinity at Gouda with varying river discharges

Discharge N.Waterweg/ N.Maas	Chloride content mouth H.IJssel $\frac{\text{kg Cl}^-}{\text{m}^3}$	Chloride content at Gouda $\frac{\text{kg Cl}^-}{\text{m}^3}$		
		Case a	Case b	Case c
Oude Maas open				
800/245	0.330	0.059	0	0.004
700/215	0.511	0.186	0	0.073
625/194	0.699	0.364	0.029	0.167
550/170	0.988	0.972	0.096	0.348
500/155	1.231	1.526	0.169	0.671
450/140	1.533	2.121	0.284	1.164
Oude Maas closed				
600	0.368	0.091	0	0
550	0.580	-	-	0.041
500	0.874	0.568	0.039	0.134
400	1.797	2.082	0.313	0.869
350	2.478	2.968	0.677	1.750
300	3.348	4.098	1.301	2.848



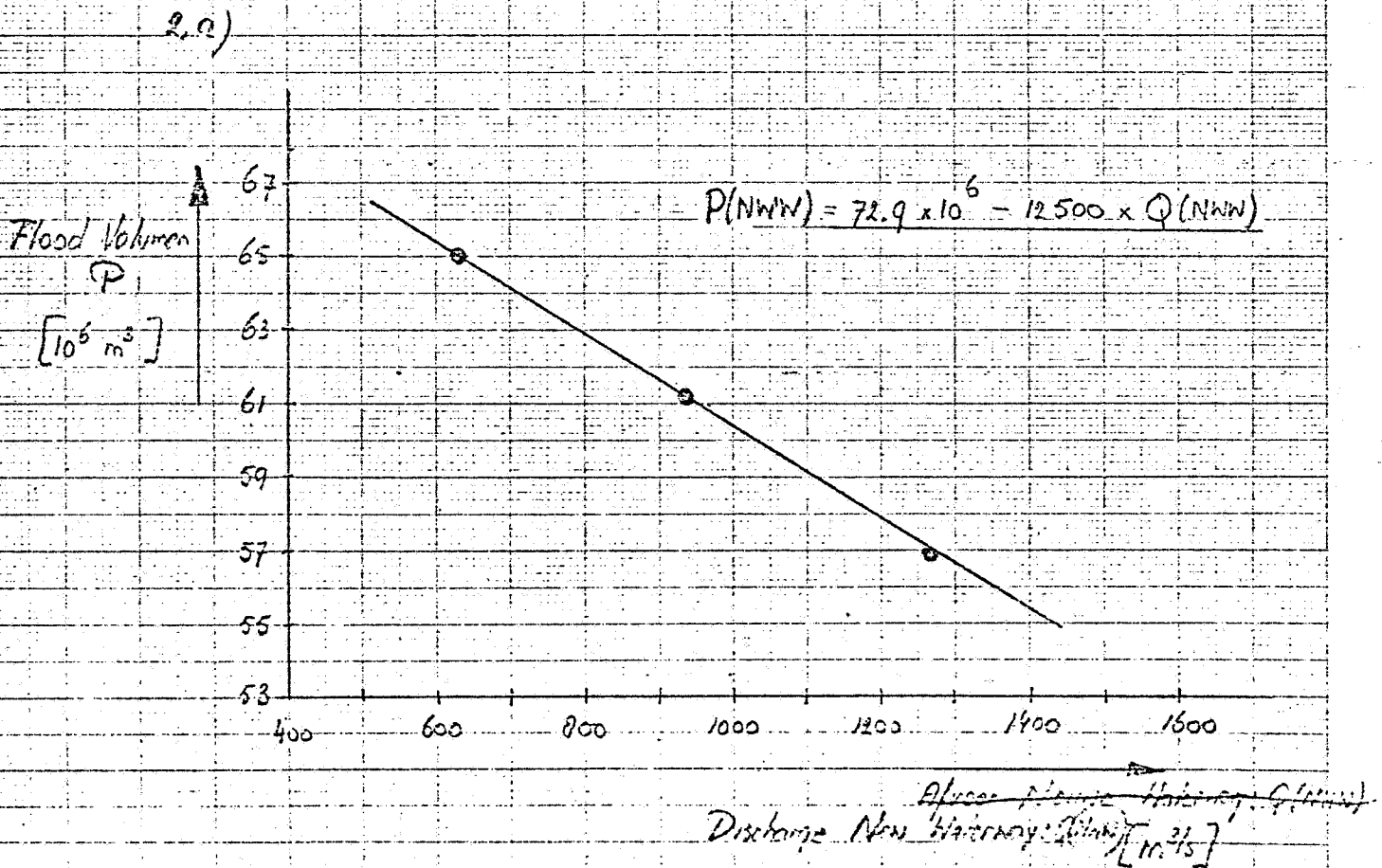
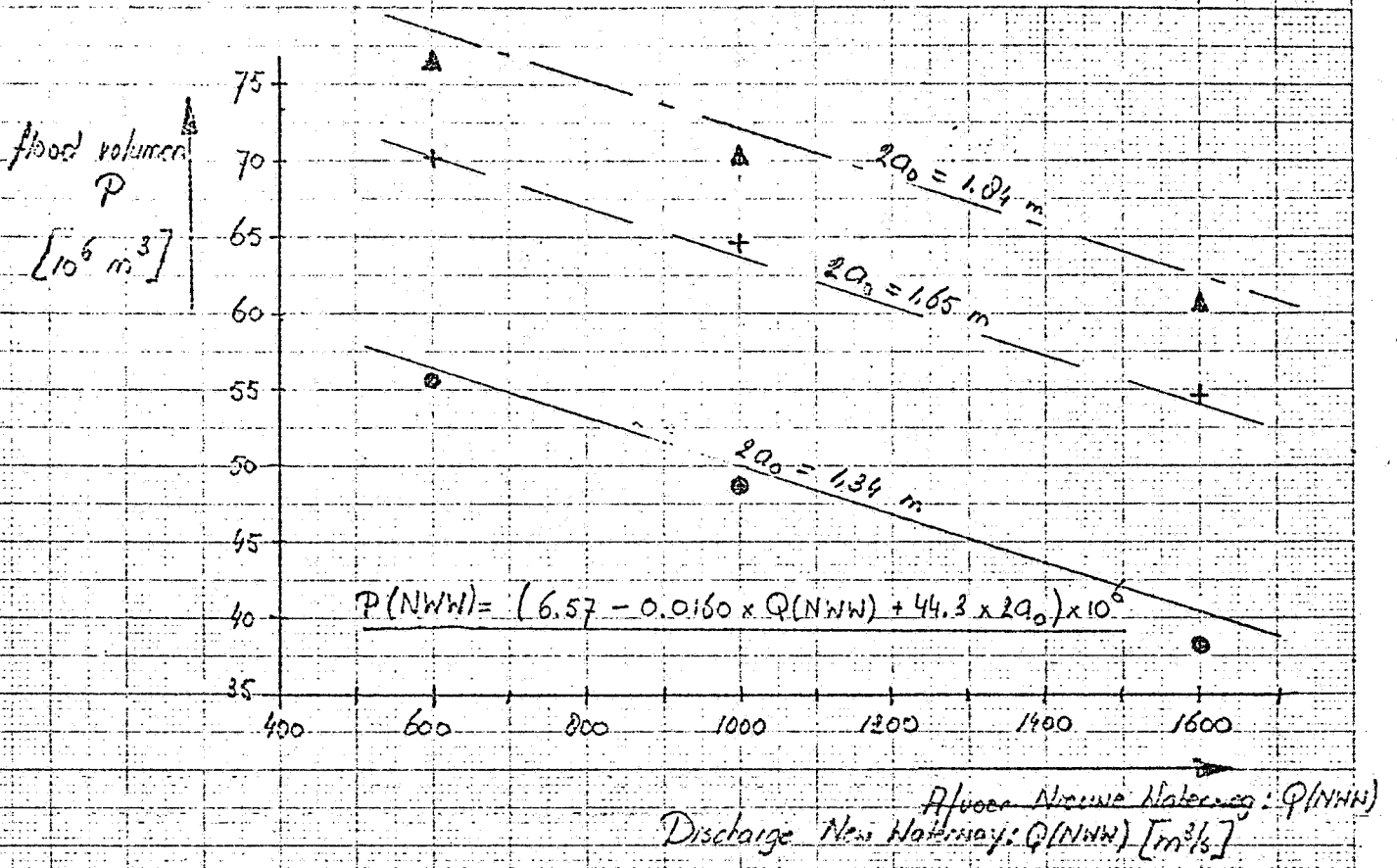
Old Meers Open $\left\{ \begin{array}{l} \circ \text{ nature measurements (600, 1000 and 1600 m}^3/\text{s)} \\ + \text{ " " reproduced in salinity model Rijnmond} \\ \Delta \text{ model tests (T}_0, \text{T}_1) \end{array} \right.$

Old Meers closed \circ model tests

Chlorosity kilometeraai 1029 ($c(1029)$) versus
 a) flood number: α
 b) Discharge New Waterway = $Q(\text{NWW})$

DHL

figuur 1-amb

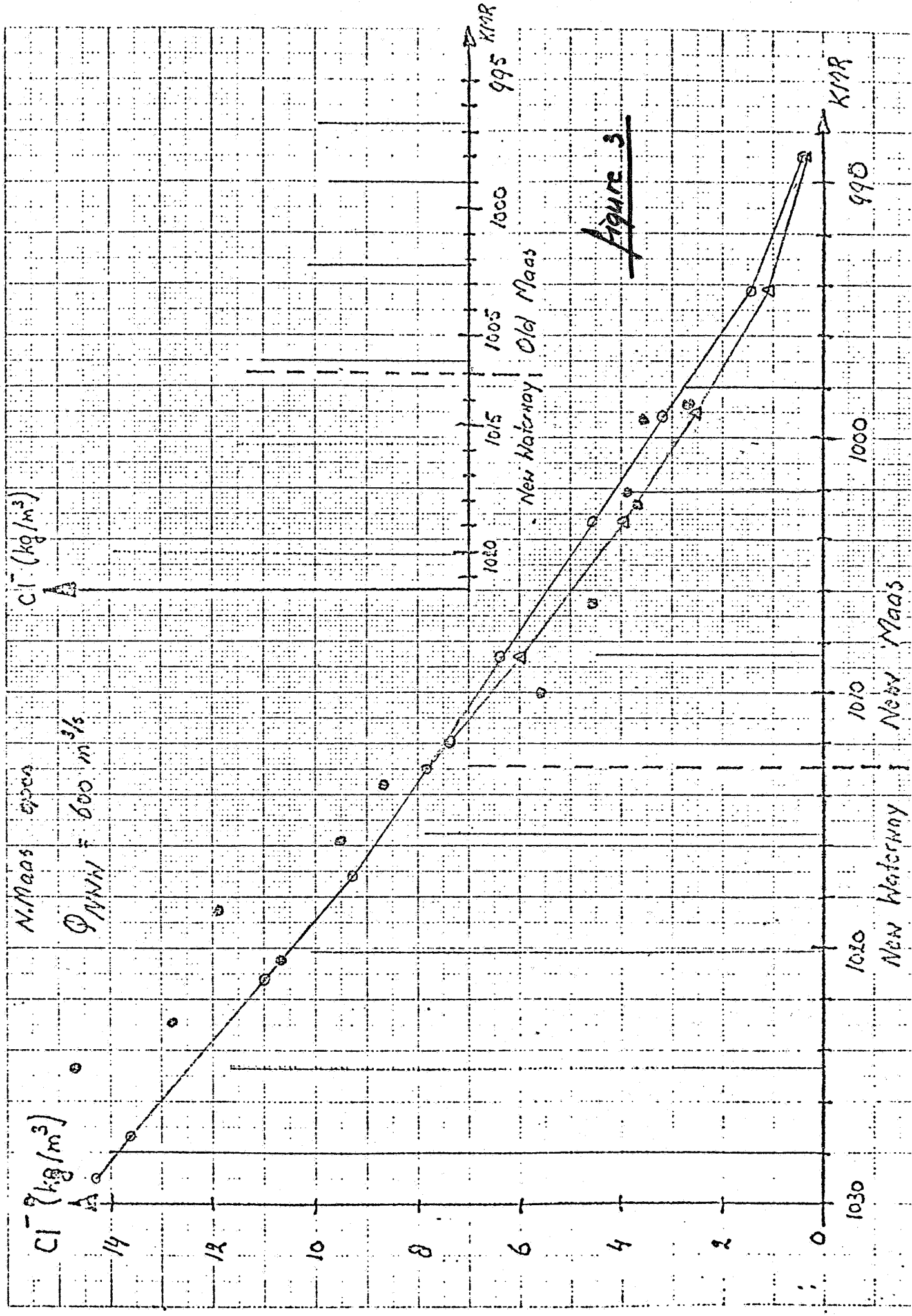


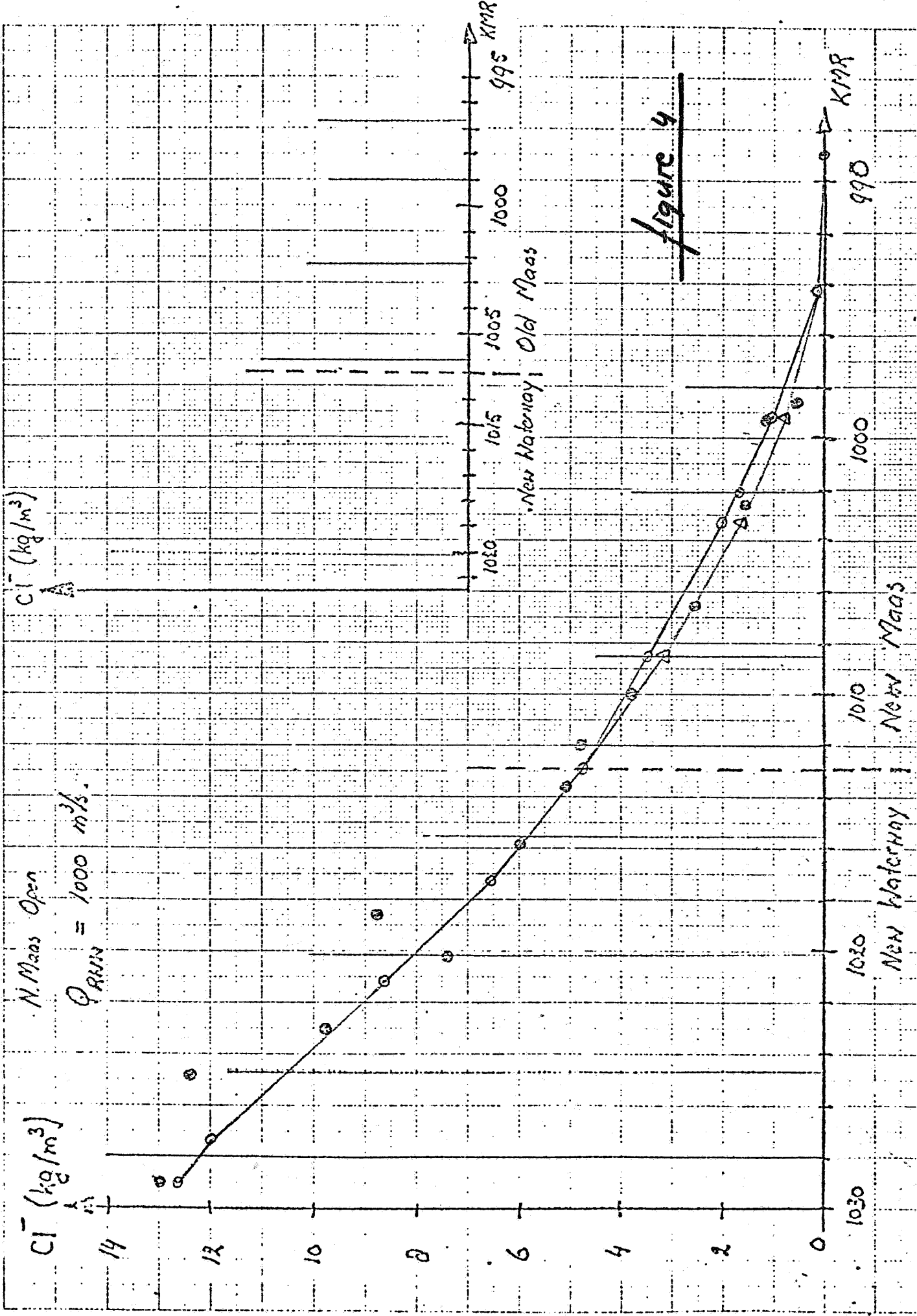
Flood volume $P(\text{NNW})$ versus discharge New Waterway $Q(\text{NNW})$

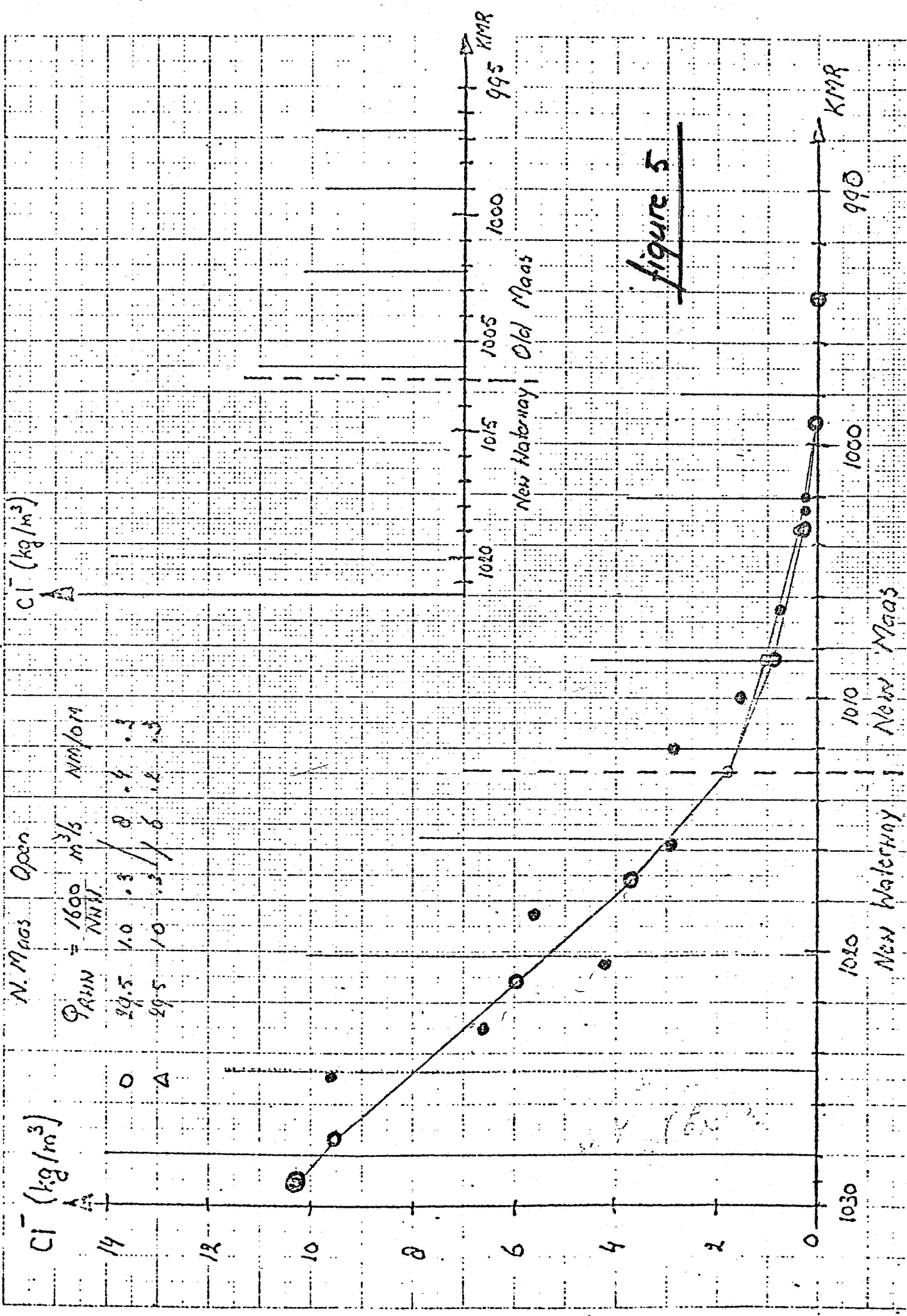
- a) Old Mass Open
- b) Old Mass closed

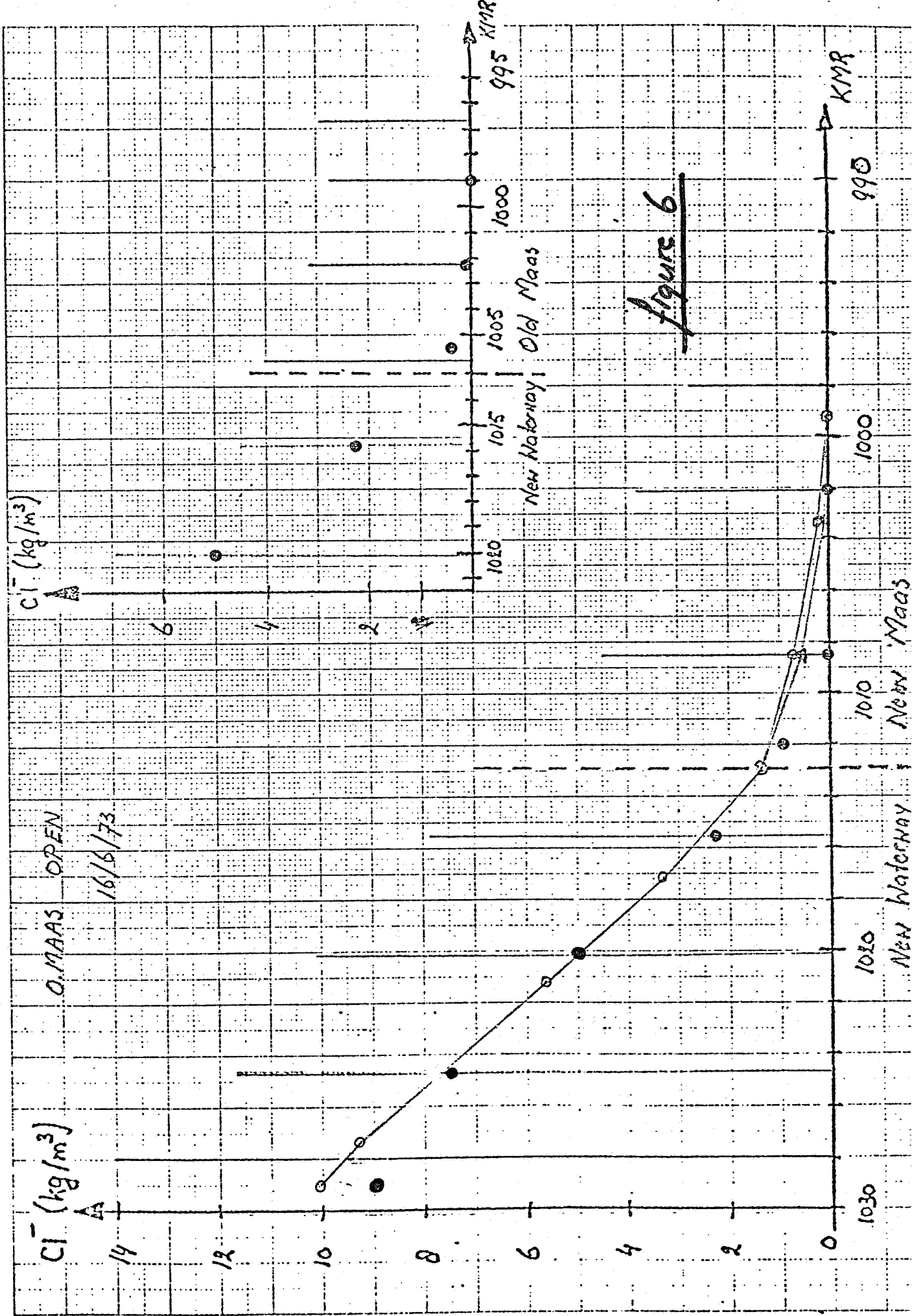
D.H.L.

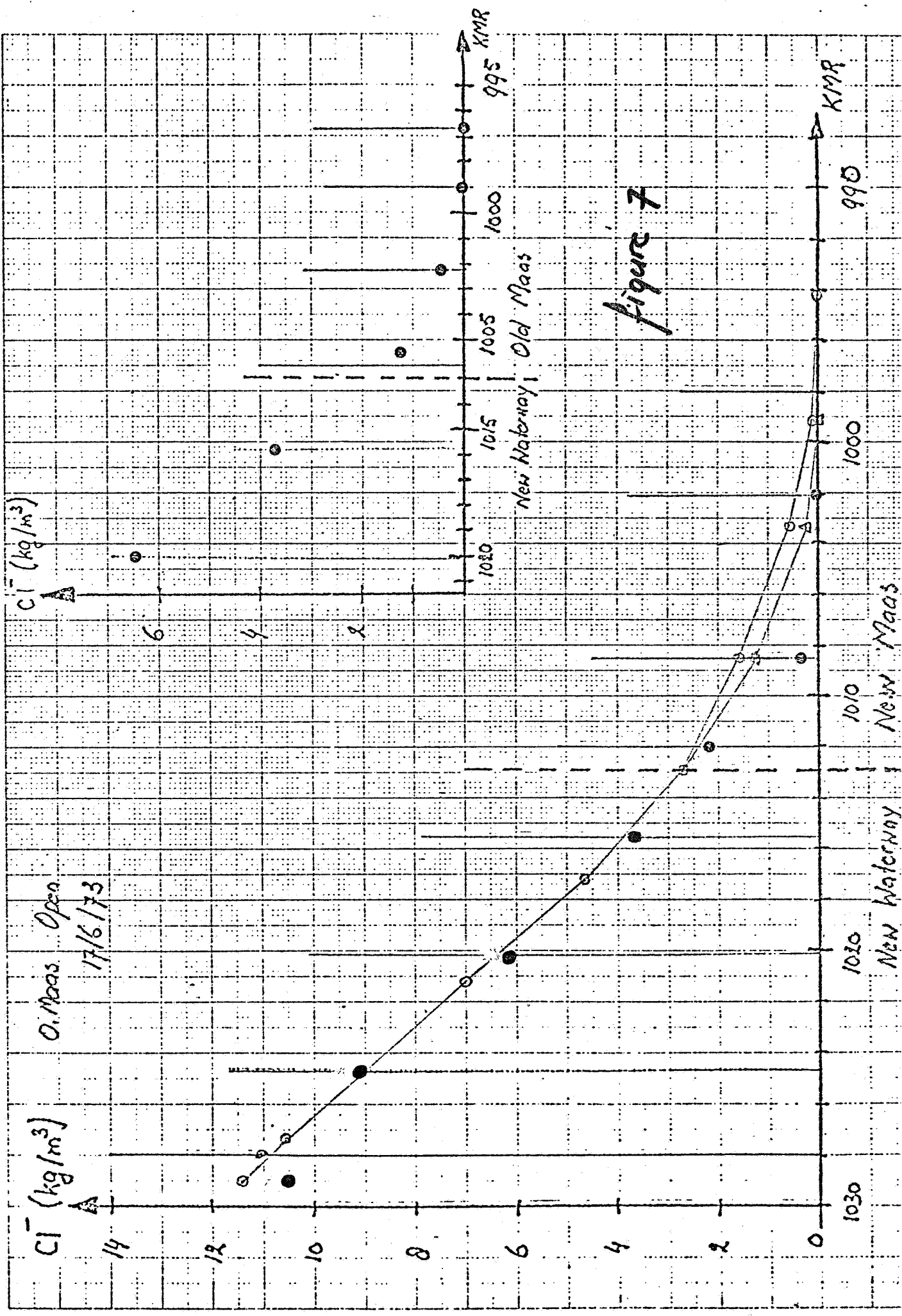
17.2 a, b











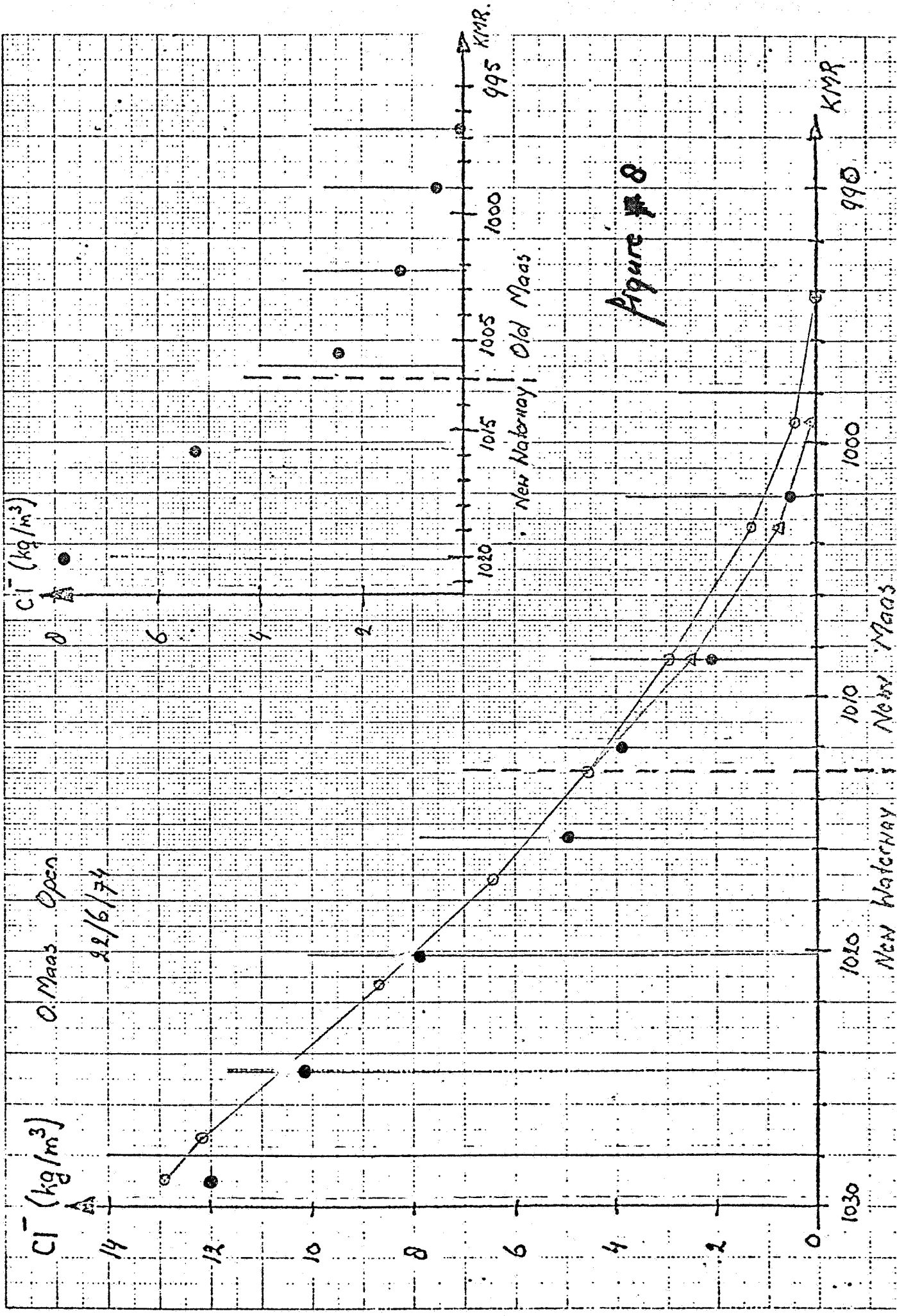


Figure # 8

O. Maas Open 22/6/74

Cl^- (kg/m^3)

Cl^- (kg/m^3)

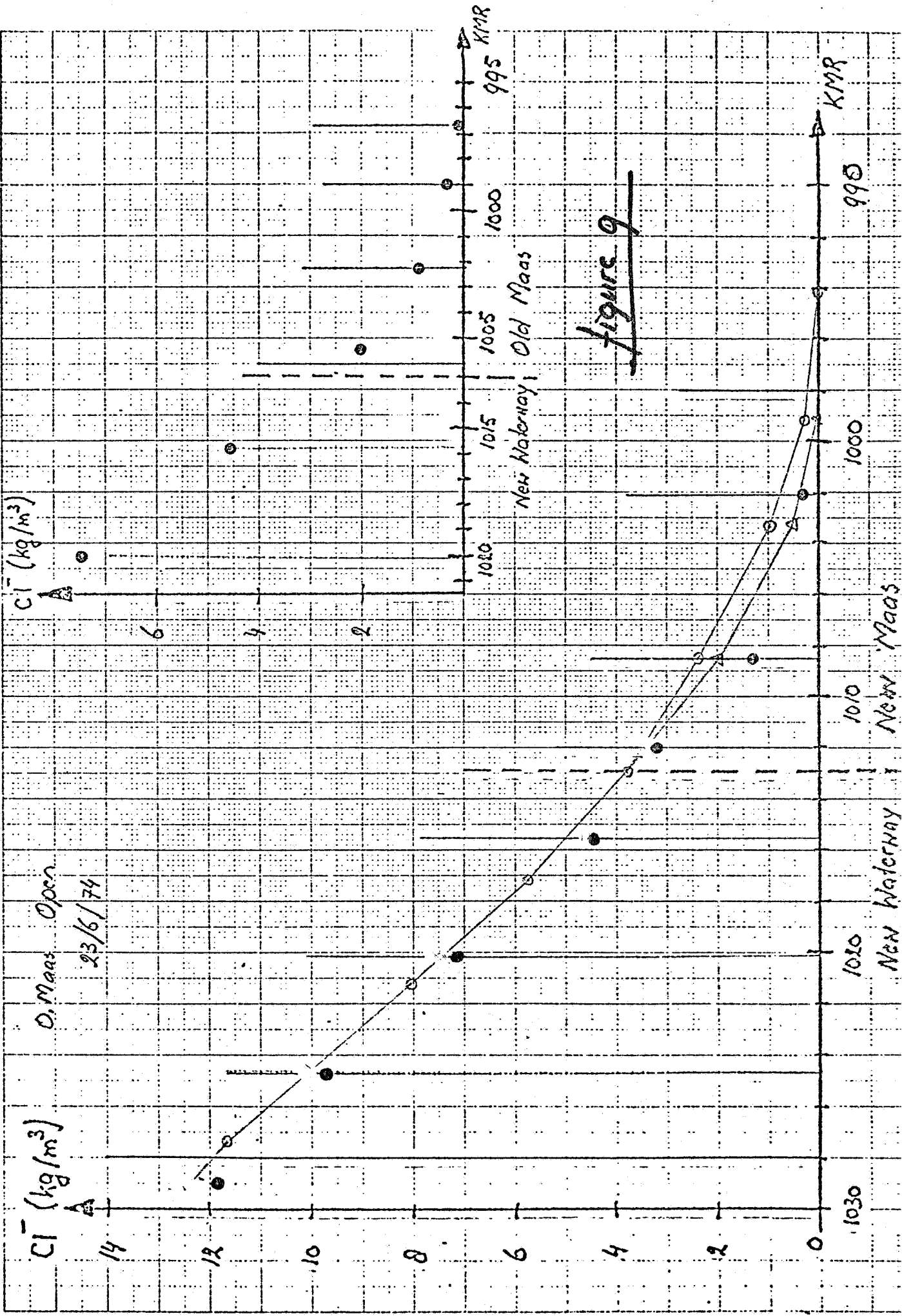
KMR

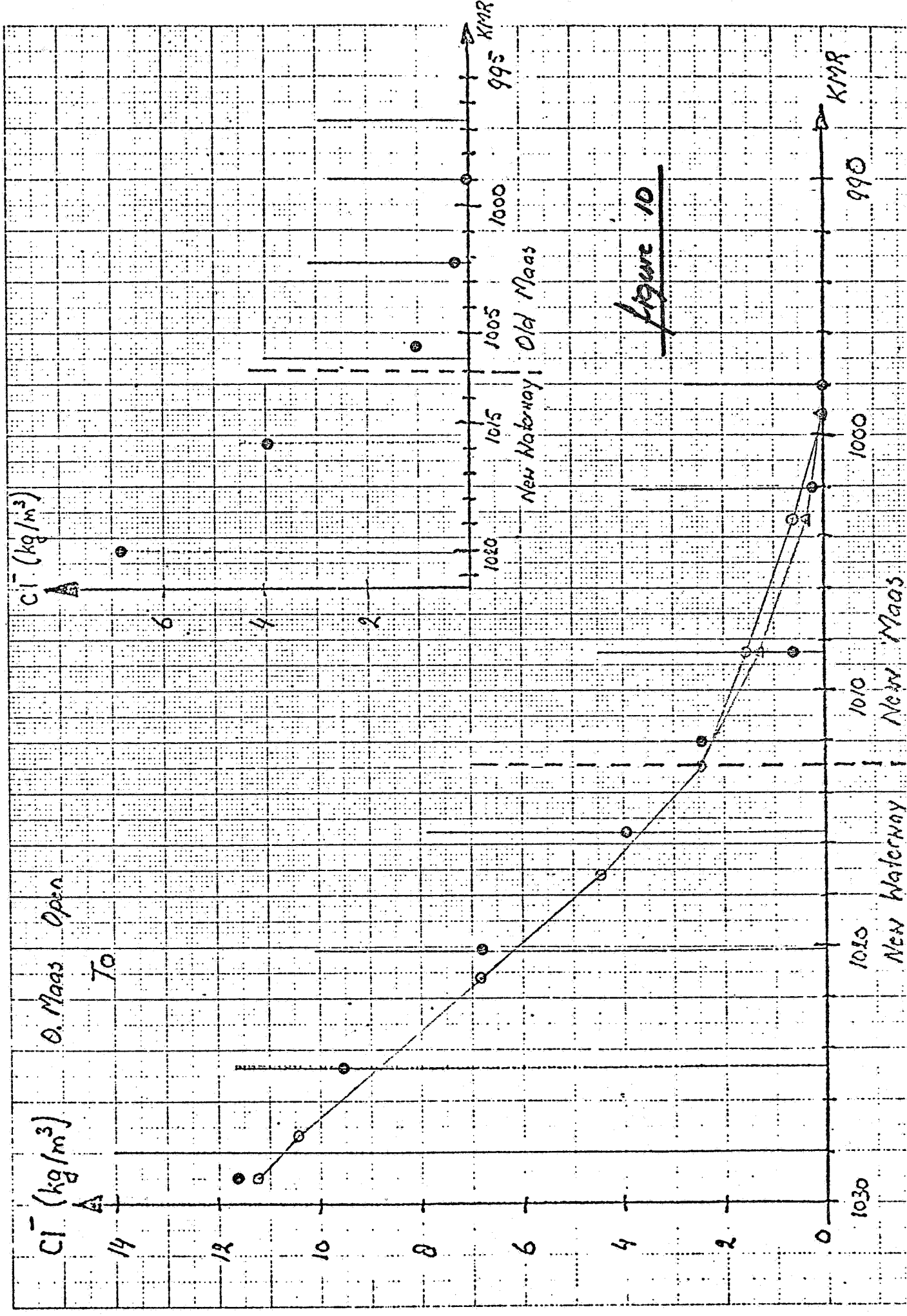
KMR

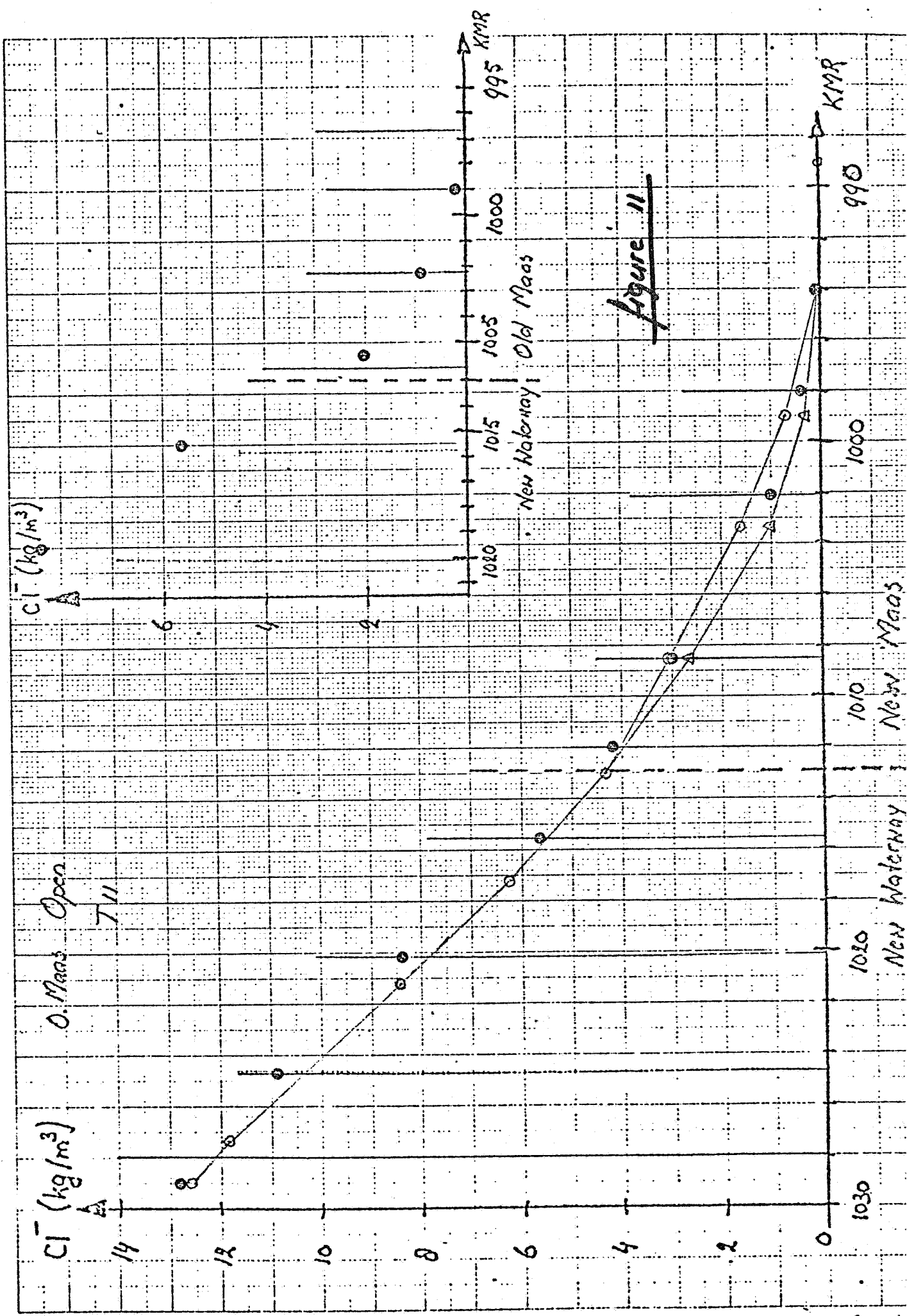
New Waterway, Old Maas

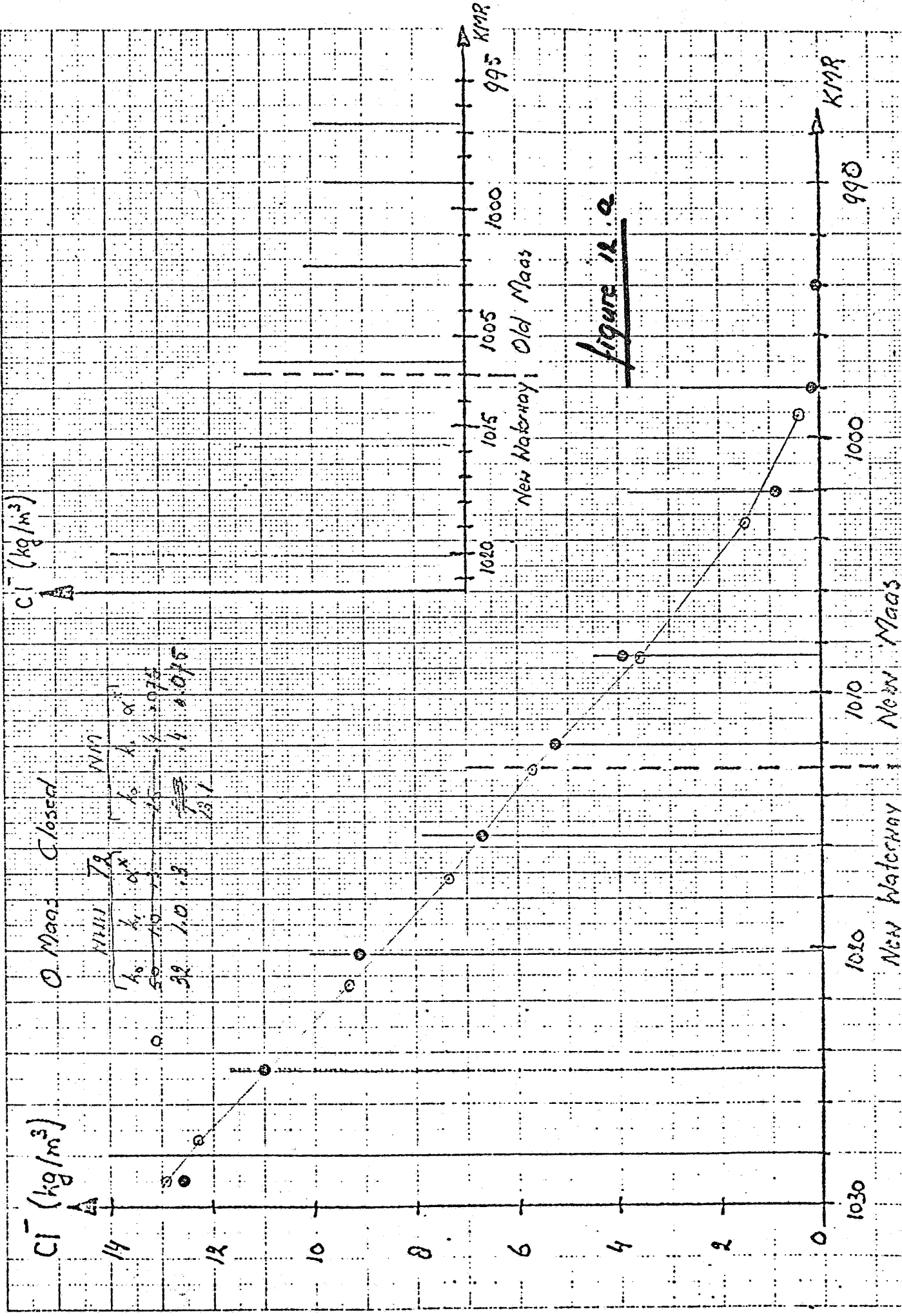
New Maas

New Waterway









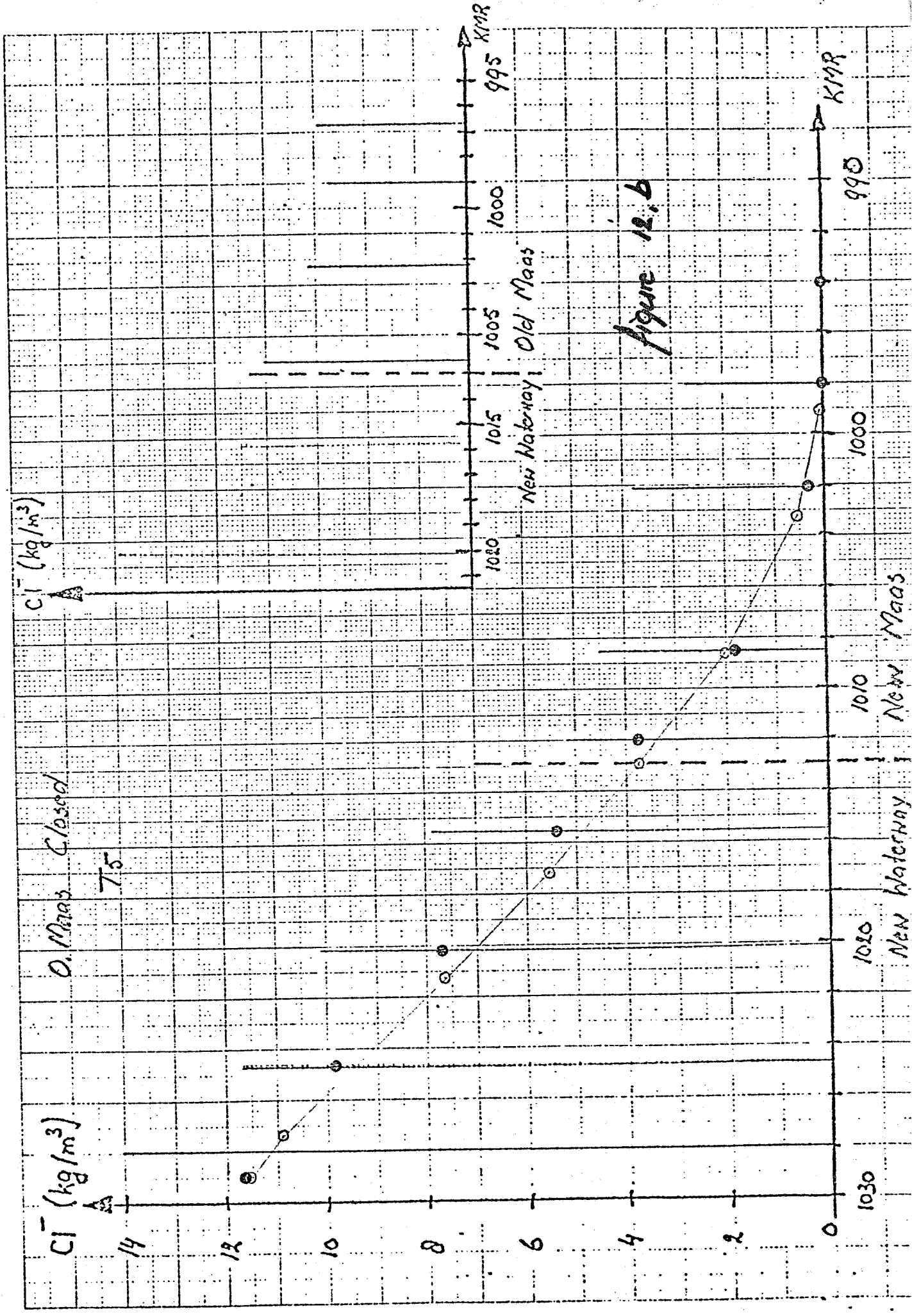
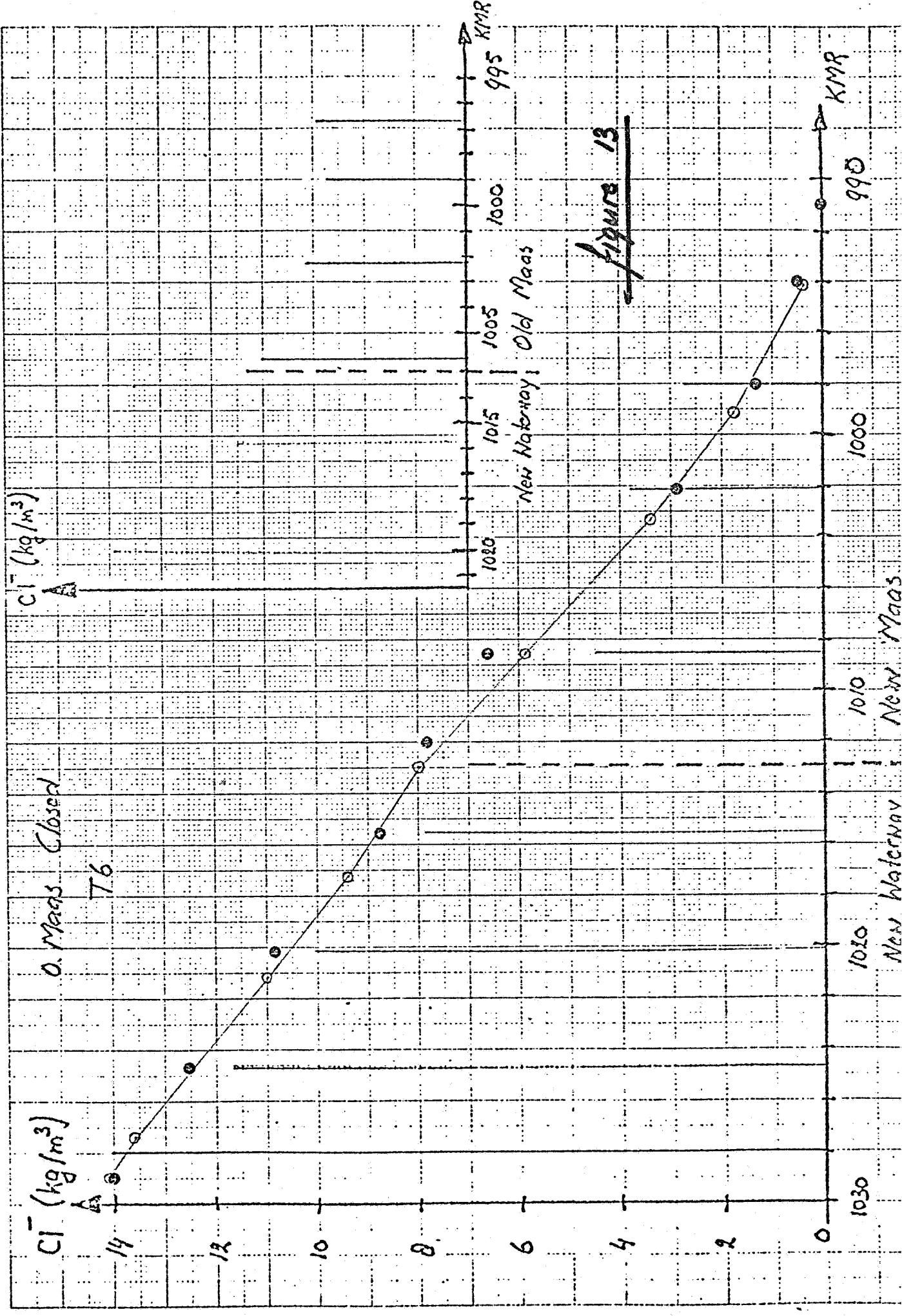
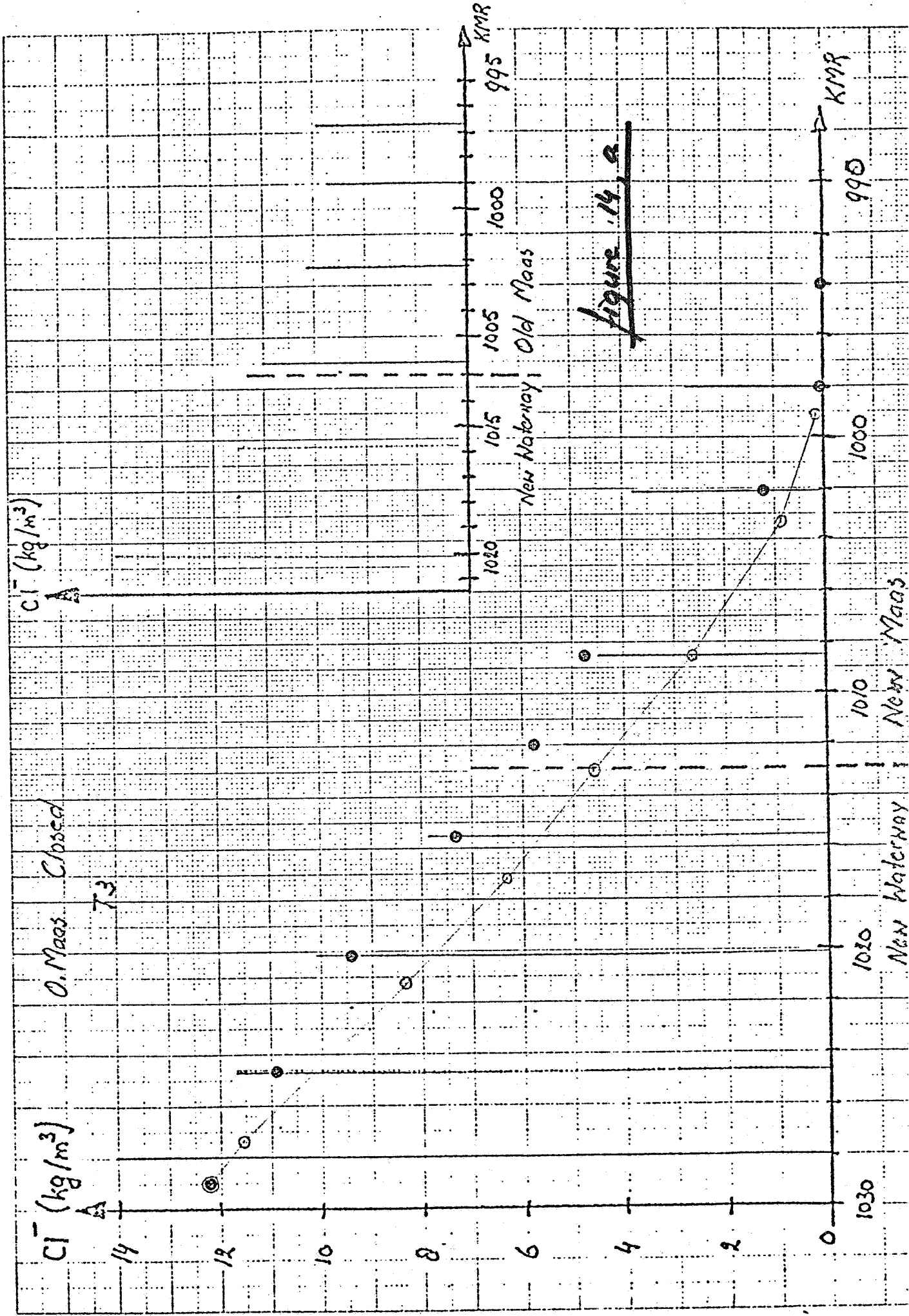
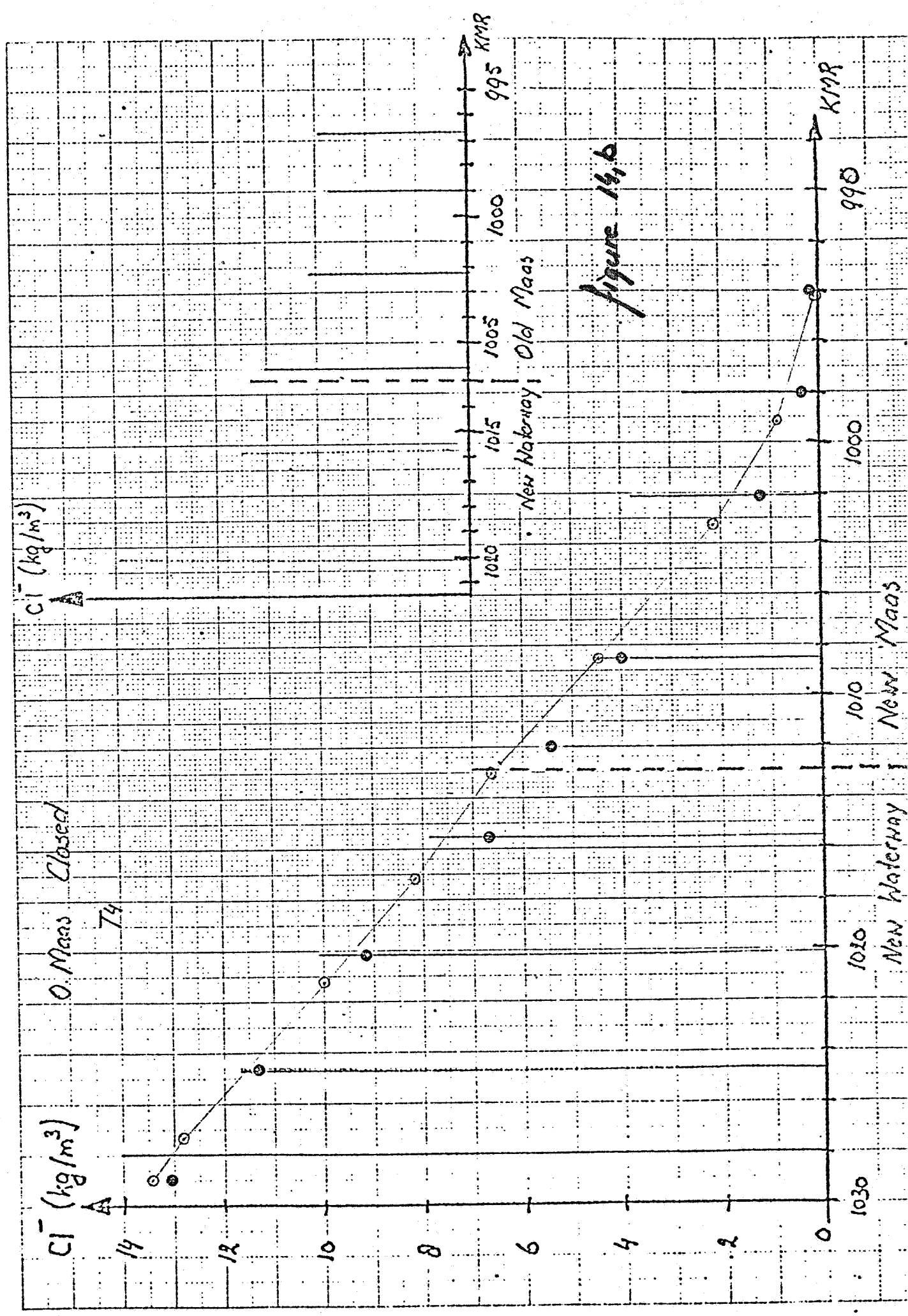
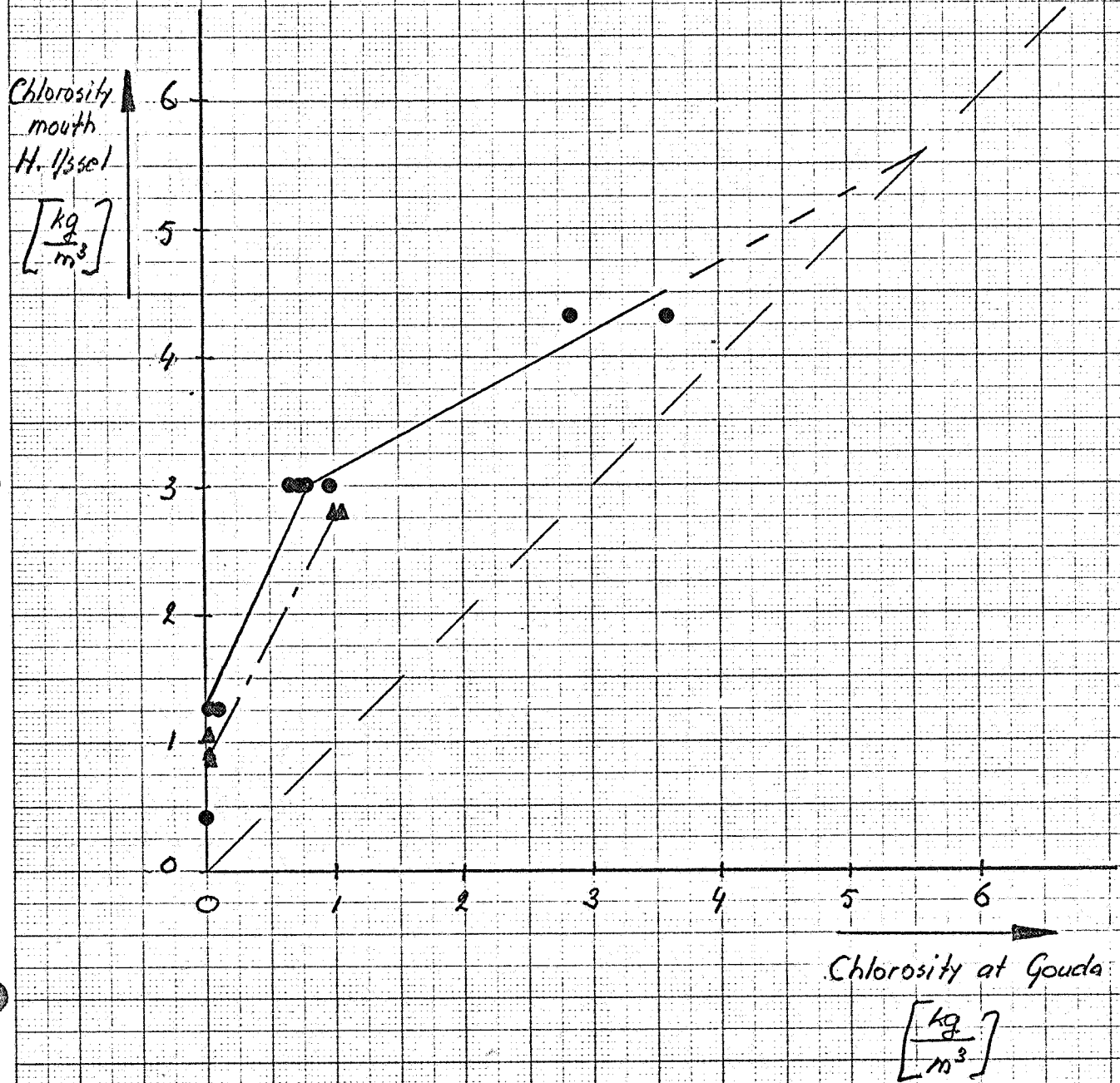


Figure 12.6



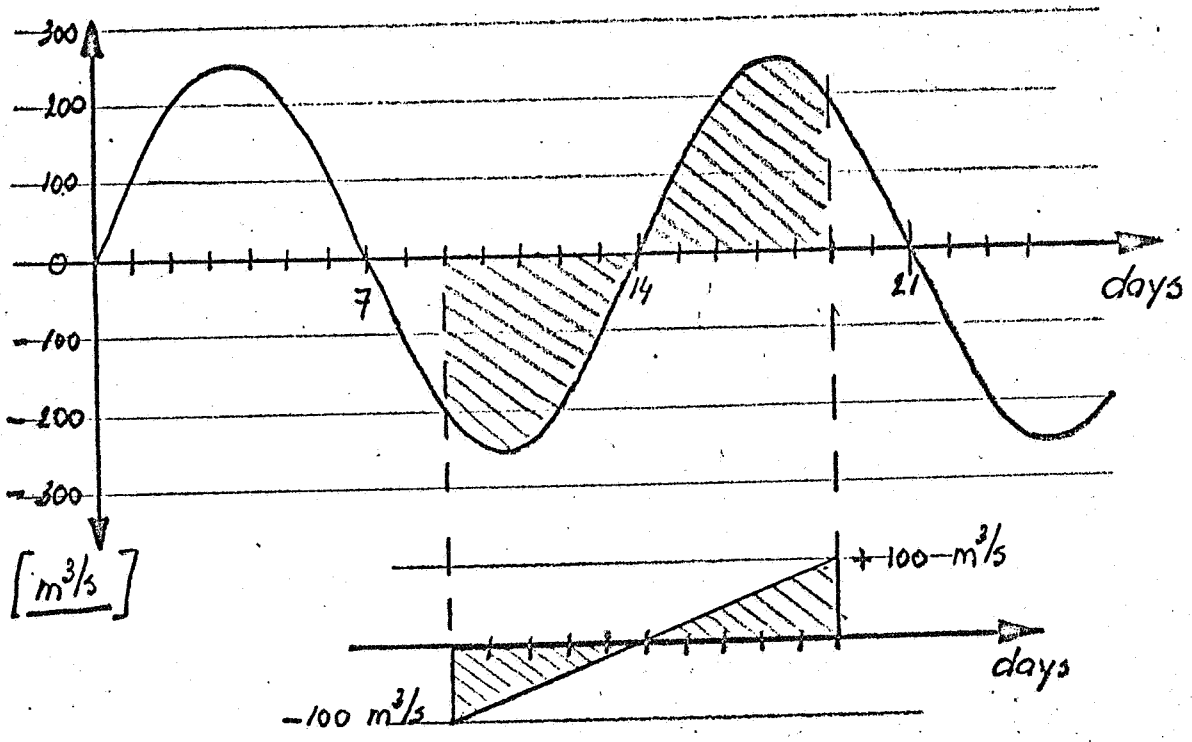




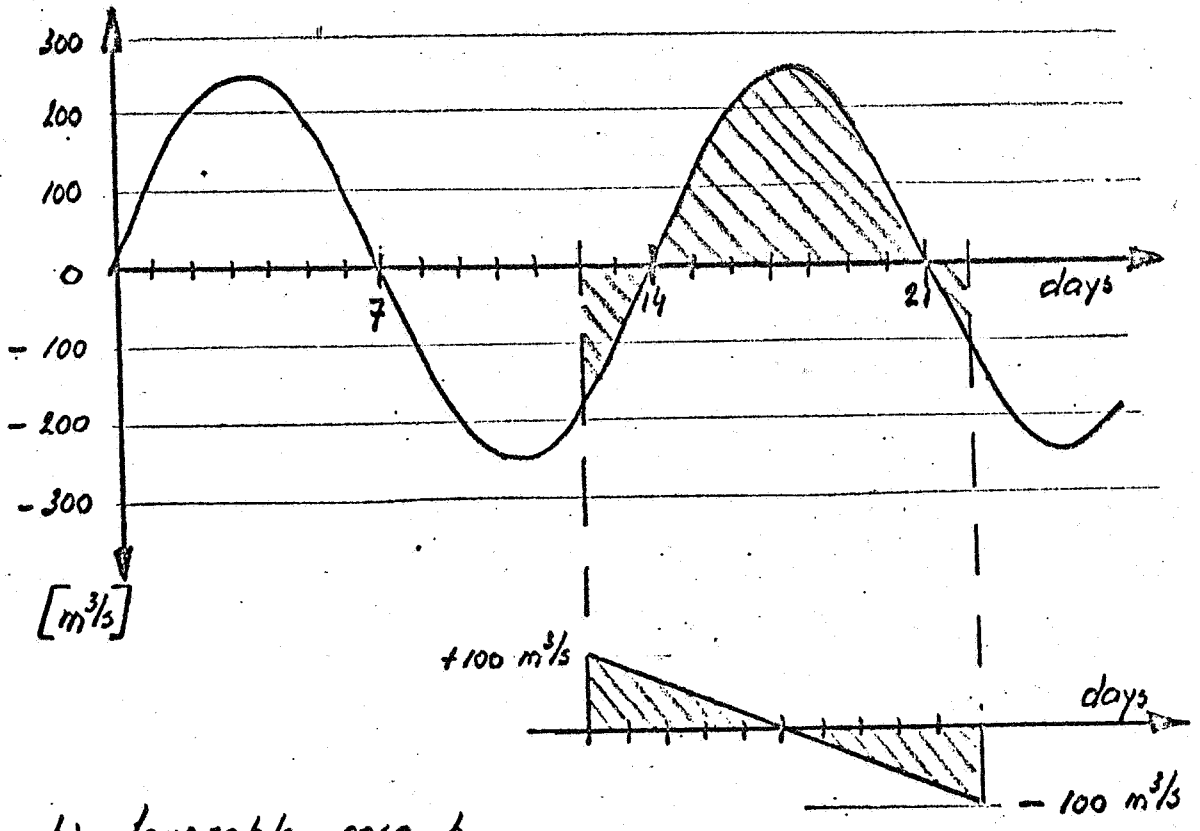


● ——— Oude Maas closed
 ▲ - - - Oude Maas open

Chlorosity Salinity at mouth Hollandsche IJssel versus chlorosity salinity at Gouda.

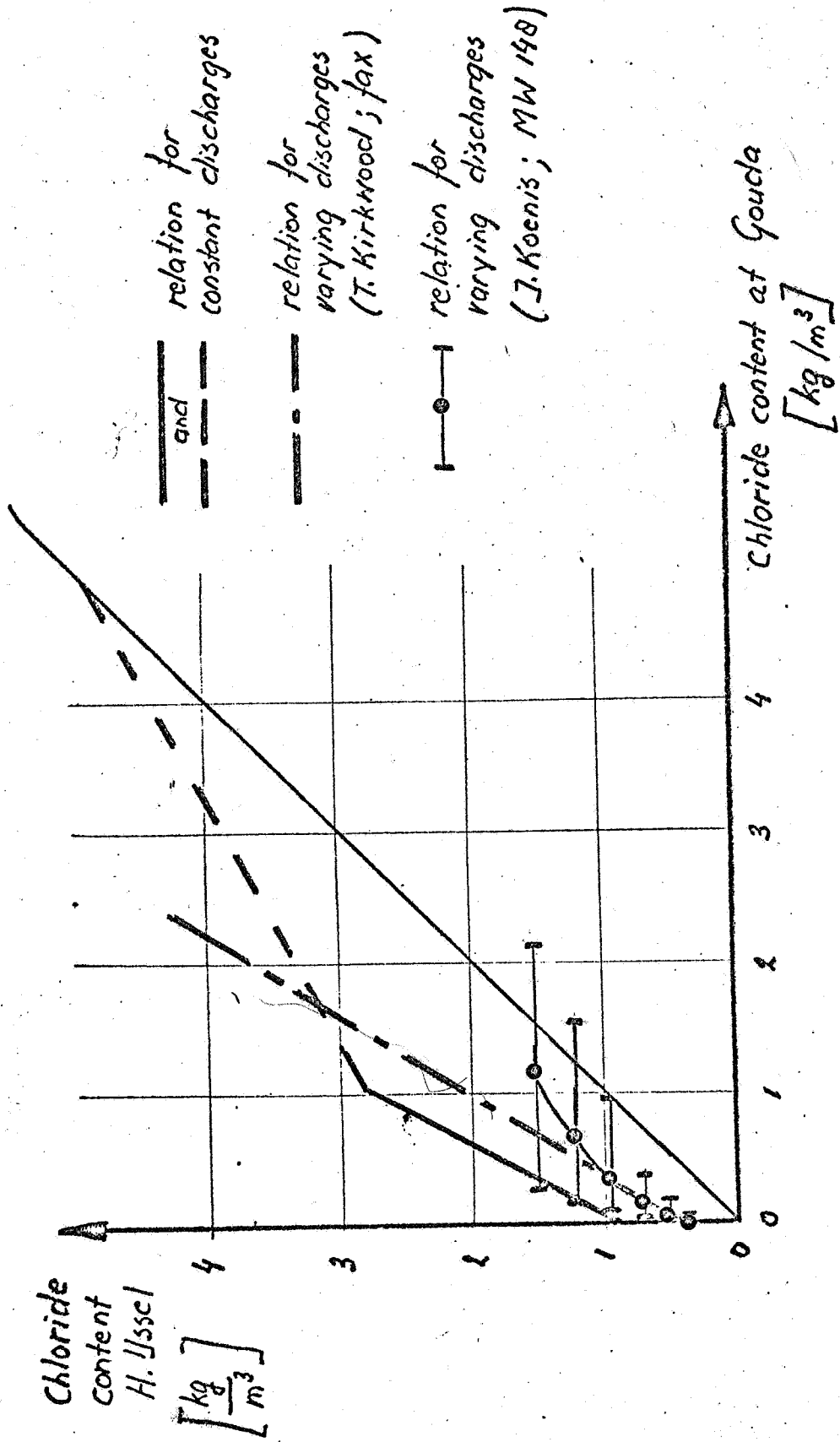


a) Unfavorable case a



b) favorable case b

figure 16 a en b



OLDE MAAS OPEN

figure 17

figure 17

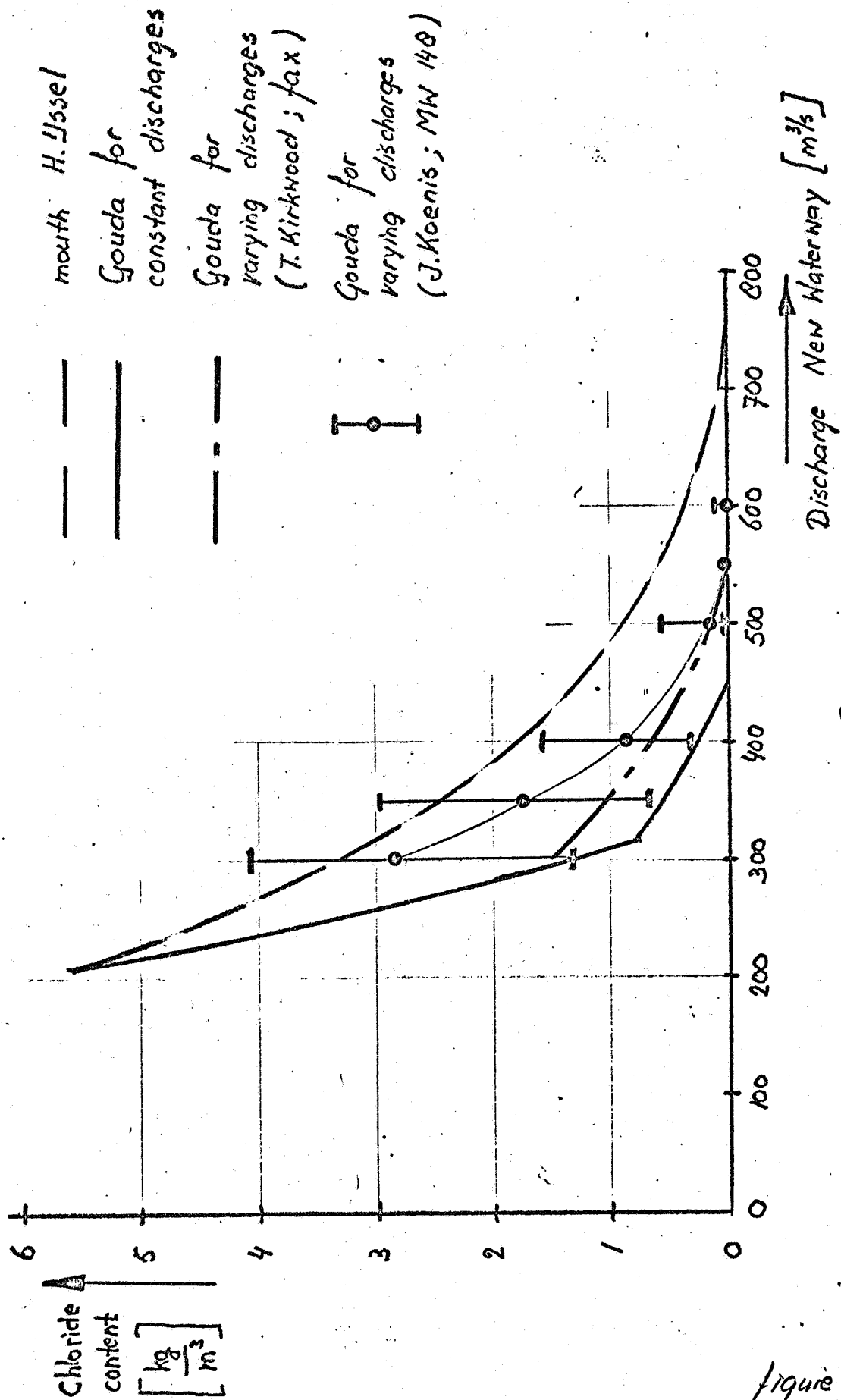
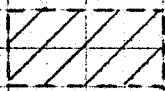
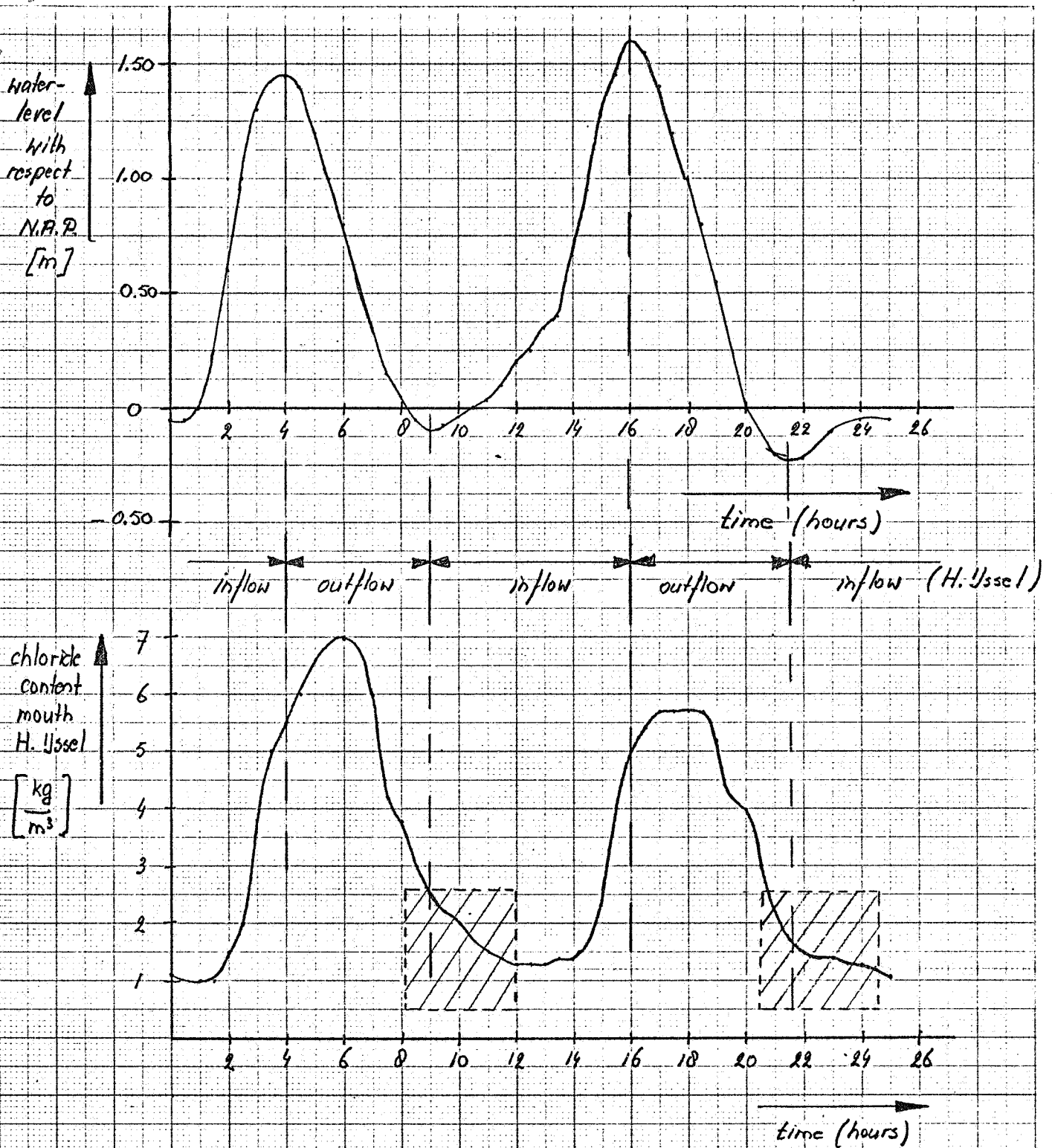


figure 18

figure 18



The chloride content at Goucke will be determined mainly by the chloride content during this period.

Waterlevel and chloride content at mouth Hollandsche IJssel. (date of 22 October 1972)

