

Bewerking van de zout- en snelheidswaarnemingen
van April 1951 bij de Westsluis in Terneuzen.

door

Dr. Ir. J. C. Schönfeld



Inhoud.

1. Inleiding
 2. De Waarnemingen
 - 2,1 De zoutwaarnemingen
 - 2,2 De Snelheidswaarnemingen
 3. Theoretische beschouwing
 - 3,1 Beschrijving van het uitwisselingsverschijnsel
 - 3,2 Elementaire theorie
 - 3,3 Dimensieloze behandeling
 - 3,4 Invloed van de vorm van de sluis
 4. De uitwisselingsafvoer
 - 4,1 Het drijvende dichtheidsverschil
 - 4,2 Bewerking van de gemeten afvoeren
 5. De uitwisselingscoëfficiënt
 - 5,1 Uitwisseling van de Westsluis afgeleid uit de gemeten afvoeren
 - 5,2 Uitwisseling van de Westsluis afgeleid uit de gemeten chloorinhouden
 - 5,3 Uitwisseling van de Zeevaartsluis
 6. Bijvullen en aflaten
 - 6,1 Bijvullen en aflaten in de Westsluis
 - 6,2 Bijvullen en aflaten in de Zeevaartsluis
 7. De zoutbezwaarcoëfficiënt
 - 7,1 De zoutbezwaarcoëfficiënt van de Westsluis
 - 7,2 De zoutbezwaarcoëfficiënt van de Zeevaartsluis
 - 7,3 Invloed van herhaald openen der deuren
 8. Slotbeschouwingen
 - 8,1 Nadere beschouwing van de waarnemingen
 - 8,2 Interpretatie van de uitkomsten
- Referenties
Samenvatting

Bijlagen:

1. Dichtheid van zeewater als functie van chloriniteit en temperatuur
2. Dichtheidsverticalen, 16 April 1951
3. Dichtheidsverticalen, 19 April 1951
4. Dichtheidsverticalen, 23 April 1951
5. Gemiddelde dichtheden.
6. Uitwisselingsafvoeren
7. Dimensieloze bewerking uitwisselingsafvoeren, kolk-buitenhaven
8. Dimensieloze bewerking uitwisselingsafvoeren, kolkkanaal
9. Samenvatting bewerkte uitwisselingsafvoeren, Westsluis
10. Dimensieloze bewerking uitwisselingscoëfficiënten, kolk-buitenhaven
11. Dimensieloze bewerking uitwisselingscoëfficiënten, kolkkanaal
12. Samenvatting bewerkte uitwisselingscoëfficiënten, Westsluis
13. Voorspelling uitwisselingscoëfficiënten, Zeevaartsluis
14. Bijvullen en aflaten, Westsluis
15. Hulpgrafieken bij de bepaling van het zoutbezwaar der Westsluis

16. Zoutbezwaarcoëfficiënt, Westsluis
17. Hulpgrafieken bij de bepaling van het zoutbezwaar der Zeevaartsluis
18. Zoutbezwaarcoëfficiënt, Zeevaartsluis
19. Uitwisseling bij herhaald openen der deuren
20. Herziene bewerking uitwisselingsafvoeren kolk-buitenhaven
21. Herziene bewerking uitwisselingscoëfficiënten kolk- buitenhaven
22. Herziene samenvatting uitwisselingsafvoeren Westsluis
23. Herziene samenvatting uitwisselingscoëfficiënten Westsluis
24. Lijst van symbolen. Afmetingen der sluisen.

1. Inleiding.

Teneinde nadere gegevens te verkrijgen over het zoutbezwaar op het kanaal Gent - Terneuzen als gevolg van het schutten met de sluisen van Terneuzen, zijn in April 1951 metingen van zoutgehalten en stroomsnelheden bij genoemde sluisen verricht, in samenwerking met elkaar door het Arrondissement Terneuzen van de Rijkswaterstaat, de Hydrometrische afdeling van de Algemene Dienst van de Rijkswaterstaat, en het Waterbouwkundig Laboratorium van Bruggen en Wegen.

Van deze metingen zijn tot nu toe drie bewerkingen gegeven (zie Ref. 1, 2 en 3 achter in deze nota).

Ter verantwoording van het verschijnen van deze vierde nota over hetzelfde onderwerp, moge het volgende worden opgemerkt:

Het bepalen van het zoutbezwaar door het schutten met een sluis, komt in hoofdzaak daarop neer, dat men nagaat welke veranderingen de zoutinhoud van de kolk gedurende de verschillende fasen van het schutbedrijf ondergaat. (zie Ref. 4 achter in deze nota). De voornaamste veranderingen zijn de uitwisselingen die plaats vinden, enerzijds tussen kolk en buitenhaven bij het openstaan der buitendeuren, en anderzijds tussen kolk en kanaal bij het openstaan der binnendeuren. Het is vooral om hierover nadere gegevens te verkrijgen, dat de beschouwde metingen zijn uitgevoerd.

Nu zijn er in principe twee mogelijkheden om uit de beschikbare gegevens (voor een overzicht hiervan zie par. 2 van deze nota) de uitwisseling nader te leren kennen.

Enerzijds kan men de zoutinhoud van de kolk vóór en na het openstaan van de deuren, bepalen uit de zoutwaarnemingen; daaruit kan dan worden afgeleid in welke mate de kolk-inhoud is uitgewisseld met de buitenhaven of met het kanaal. Dit is in hoofdzaak de door Boswinkel (Ref. 1) gevolgde weg geweest.

Anderzijds kan men uit de stroomwaarnemingen de hoeveelheden water berekenen die gedurende het openstaan der deuren uitgewisseld worden; met een schatting van het verschil in zoutgehalte tussen in- en uit-stromend water kan dan ook weer de uitwisseling van zout worden afgeleid. Dit is in hoofdzaak de weg geweest die Wemelsfelder (Ref. 2) en Swine (Ref. 3) gevolgd hebben.

In deze nota hebben wij in de eerste plaats getracht de zout- en snelheidswaarnemingen zoveel mogelijk in samenhang met elkaar te bewerken.

In de tweede plaats hebben wij getracht zoveel mogelijk de waarnemingen zelf tót hun recht te doen komen, zonder te trachten ze in te passen in een vooraf opgestelde conceptie van het verloop van het verschijnsel. Evenwel, geen enkele wijze van bewerken kan het geheel zonder theoretische basis stellen; van de door ons gekozen basis hebben we in par. 3 verantwoording trachten af te leggen.

In de derde plaats hebben wij er naar gestreefd ons zo goed mogelijk rekenschap te geven van de onzekerheden die in de waarnemingen, en in de wijze van bewerken schuilen.

Wa hebben ons in deze nota beperkt tot het bewerken van de gegevens van de Westsluis, omdat deze de grootste en de belangrijkste van de drie sluisen is, en omdat de beide andere sluisen, de Oostsluis en de Middensluis, zeer sterk afwijken van wat volgens de hedendaagse opvattingen een zeesluis behoort te zijn.

- 2. De waarnemingen.
- 2,1 De zoutwaarnemingen.

De zoutwaarnemingen zijn verricht op twee plaatsen in het kanaal, twee plaatsen in de buitenhaven, en drie plaatsen in de kolk, steeds over de gehele verticaal. Van deze waarnemingen zijn door het Arrondissement Terneuzen overzichten samengesteld, in de vorm van lijnen van gelijk chloorgehalte, getrokken in de langs-doorsnede van de kolk en de aansluitende gedeelten van kanaal en buitenhaven.

De chloor- of zout-gehalten zijn in dubbel opzicht van belang voor ons probleem. In de eerste plaats: wanneer een hoeveelheid water met gegeven chloor- of zoutgehalte b.v. van de buitenhaven naar het kanaal verplaatst wordt, dan bepaalt het gehalte hoeveel chloor of zout daarmee op het kanaal gebracht wordt.

In de tweede plaats geven verschillen in chloor- of zoutgehalte ook dichtheidsverschillen en daarmee verschillen in soortelijk gewicht, en het zijn juist deze verschillen in soortelijk gewicht die bij het openstaan der deuren de uitwisseling van zouter en zoeter water ten gevolge hebben.

Het zout in het zeewater in de oceanen en in het algemeen ook van de maritieme binnen-wateren heeft een zeer weinig wisselende samenstelling, zodat er nagenoeg evenredigheid is tussen zoutgehalte (Z) en chloorgehalte (chlorositeit, C):

$$(1) \quad x = 1,81C$$

Voor praktische doeleinden kan het chloorgehalte (chlorositeit) in kg/m³ gelijkgesteld worden aan de gewichtsfractie chloor (chloriniteit, C) in %

De dichtheid van zeewater hangt, behalve van het chloor- of zoutgehalte, ook nog van de temperatuur af. In bijlage 1 is dit grafisch weergegeven. Met een voor technische doeleinden toereikende nauwkeurigheid kan het verband ook worden uitgedrukt door

$$(2) \quad \rho = 1000 + 1,455C - 0,0065(\theta + 0,4C - 4)^2$$

waarin ρ de dichtheid in kg/m³, C de gewichtsfractie chloor (chloriniteit) in per mille's, en θ de temperatuur in graden Celsius is.

Het verschil in temperatuur tussen buitenhaven en kanaal zal doorgaans wel niet meer dan enige graden bedragen, en uit bijlage 1 is onmiddellijk te zien dat de invloed hiervan wel verwaarloosd mag worden t.o.v. de invloed van de chloriniteit op de dichtheid.

Het verband tussen chloriniteit en dichtheid is nagenoeg lineair, zoals blijkt uit onderstaande tabel, die bepaald is uit (2):

<u>Tabel 1.</u>	$t = 0^{\circ}\text{C}$	10°C	20°C
$C = 0 \text{ ‰}$	$\frac{d\rho}{dC} = 1,43$	1,38	1,33
10 ‰	1,46	1,40	1,35
20 ‰	1,48	1,42	1,37

In de praktijk zijn we meestal wel voldoende nauwkeurig als we ten aanzien van verschillen in dichtheid en verschillen in chloorgehalte werken met:

$$(3) \quad \Delta\rho \approx 1,4 \Delta C.$$

De hierin schuilende onnauwkeurigheden zijn niet meer dan enkele procenten, en het zal uit het vervolg wel duidelijk worden dat zulke onnauwkeurigheden in het niet vallen vergeleken bij de strooïing in de waarnemingen. Daarom hebben we de opgegeven chloorgehalten met (3) tot dichtheden herleid.

De toestand van de kolk vóór of ná een uitwisseling, moet worden afgeleid uit de dichtheidsverticalen van de drie (soms minder) meetplaatsen in de kolk. Wij hebben uit deze verticalen zo goed mogelijk een gemiddelde verticaal bepaald, die representatief is voor de beschouwde toestand. Hetzelfde hebben we gedaan voor het kanaal en voor de buitenhaven. Deze representatieve dichtheidsverticalen zijn weergegeven in de bijlagen 2, 3 en 4.

Uit elke voor de kolk representatieve verticaal is door planimetreren een gemiddelde dichtheid afgeleid. Deze gemiddelden zijn in de bijlagen 2, 3 en 4 aangegeven.

Uit de mate waarin de verticalen der meetplaatsen afwijken van de representatieve verticaal in de kolk, is een schatting gemaakt van de standaard onzekerheid in het uit de representatieve verticaal bepaalde gemiddelde. Deze standaard-onzekerheid is tussen haakjes bij het gemiddelde vermeld. Bij het gemiddelde vóór de uitwisseling is nog een tweede onzekerheid opgegeven, waarop we in par. 4 terugkomen.

De twee representatieve verticalen, de een vóór en de ander ná het uitwisselen, in de buitenhaven of het kanaal, zijn ook elk gemiddeld. Daarbij is niet het gemiddelde van waterspiegel tot kanaalbodem bepaald, maar het gemiddelde van waterspiegel tot kolkbodem, teneinde het gemiddelde te krijgen dat in de kolk zou zijn geweest, indien de deuren steeds open waren geweest; in verband daarmee is zondig het verloop van de verticaal tussen de niveaus van drempel en kolkbodem aangevuld, of iets gewijzigd aangenomen wanneer de onderlaag in het kanaal zouter was dan de onderlaag in de kolk.

Bovendien is nog voor de twee representatieve verticalen van kanaal of buitenhaven een gemeenschappelijk gemiddelde bepaald, aangegeven door een streepstip-lijn, dat in par. 4 nader verklaard wordt.

Sommige meetreeksen waren niet volledig. Deze zijn zo goed mogelijk door berekening en schatting aangevuld. Hierbij is gebruik gemaakt van de uitkomsten van par. 6. Uiteraard is bij het bepalen van de onzekerheid in de aanvullingen rekening gehouden met de wijze waarop die aanvullingen zijn afgeleid.

De gemiddelde zoutgehalten zijn, naar de tijd gerangschikt, samengevat in bijlage 5.

De uitwisselingen zijn genummerd met getallen van twee cijfers. Het eerste cijfer geeft de meet-dag aan, en het tweede cijfer het rangnummer van de uitwisseling op die dag. De oneven getallen geven uitwisselingen tussen kolk en buitenhaven aan, en de even getallen uitwisselingen tussen kolk en kanaal.

2,2 De snelheidswaarnemingen.

Gemeten werd een snelheidsverticaal in het sluishoofd, gedurende het openstaan der deuren. Deze meting is bij verscheidene uitwisselingen meer dan eenmaal per uitwisseling uitgevoerd. De gegevens omtrent deze snelheidsverticalen hebben we ontleend aan het rapport van Wemelsfelder (Ref. 2).

Uit de snelheidsverticalen zijn uitwisselingsafvoeren afgeleid. Bij elke afvoer hebben wij een standaard-onzekerheid geschat, hoofdzakelijk uit de strooiing der meetpunten om de snelheidsverticaal.

Het bepalen van een snelheidsverticaal nam enige minuten in beslag. Dit betekent dat de gemeten snelheden op verschillende tijdstippen bepaald zijn. Wanneer we dus uit die snelheden een afvoer afleiden, dan is dit niet de afvoer op één tijdstip, maar een of andere gemiddelde afvoer over het tijdsverloop van de meting. Toch zullen we de afgeleide afvoer beschouwen als een afvoer op één tijdstip, doch met in acht nemen van een onzekerheid in dat tijdstip.

In bijlage 6 hebben we de uitwisselings-afvoeren samengevat. Deze bijlage geeft tevens een overzicht van de opvolging der schutfasen in verloop van tijd, op de meetdagen.

Elke afvoer is in bijlage 6 uitgezet als een rechthoekig blokje, waarvan de lengte de duur van de snelheidsmeting en de hoogte de geschatte standaard-onzekerheid in de waarde van de afvoer weergeeft.

De afvoerbepalingen zijn in deze nota genummerd met getallen van drie cijfers. De eerste twee cijfers geven het nummer van de uitwisseling aan (zie hiervoor par. 2.1), en het derde cijfer geeft de volgorde van de metingen bij de beschouwde uitwisseling aan. Dit nummer van drie cijfers is boven het blokje voor de betreffende afvoerbepaling geplaatst. Onder het blokje is ter referentie het nummer volgens Wemelsfelder vermeld.

Wij zullen ons in deze note er van onthouden uitvoerig in te gaan op onze theoretische inzichten, zoals die op dit ogenblik gevorderd zijn, omdat die inzichten nog niet toereikend zijn om alle aspecten van het uitwisselingsverschijnsel geheel te begrijpen.

Toch menen wij de theorie niet stilzwijgend te mogen voorbijgaan, omdat het bewerken van waarnemingsmateriaal altijd bestaat in het toepassen van een ordenend principe op dat materiaal, en zulk een ordenend principe berust steeds op zekere theoretische overwegingen.

Wij geven daarom wel een kort overzicht van ons huidig theoretisch inzicht, maar gaan daarbij niet in op allerlei details.

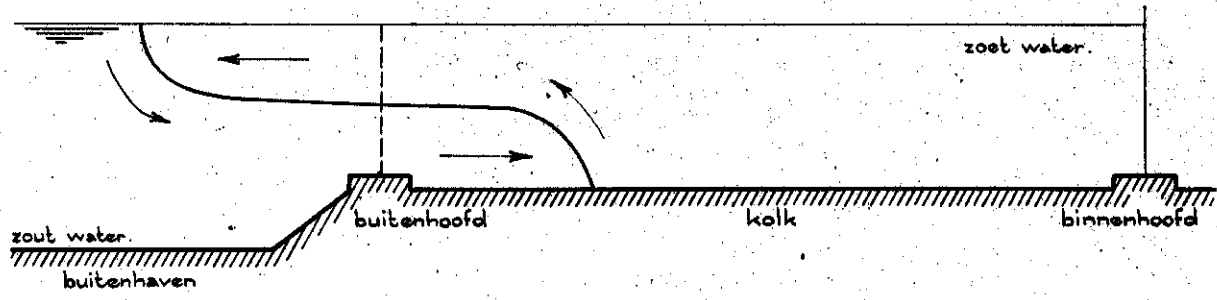
3,1 Beschrijving van het uitwisselings-verschijnsel.

Op grond van waarnemingen en beschouwingen van Mazure (Ref.5), O'Brien en Chernov (Ref.6), Notenboom (Ref.7) en Swine (Ref.8), en op grond van eigen theoretische onderzoeken, hebben wij ons een beeld gevormd van de vermoedelijke gang van zaken bij het uitwisselingsproces.

Beschouw, om de gedachte te bepalen, het geval van een min of meer zoete kolk, die door het openen der buitendeuren in verbinding gebracht wordt met de veel zoutere buitenhaven.

Bij het openen der deuren begint zout water uit de buitenhaven naar beneden te zakken, en langs de bodem de kolk binnen te dringen, terwijl zoet water uit de kolk begint op te stijgen en langs de oppervlakte de buitenhaven binnen te dringen. Deze beginfase is enigszins gecompliceerd; ten eerste door de beweging van de deuren, en ten tweede door de verticale versnelingen die het water krijgt.

Na enige tijd, wanneer de deuren open zijn, is de beweging overzichtelijker geworden. Er is dan een laag zout water uit de buitenhaven bezig als een golf langs de bodem in de kolk door te dringen, en een laag zoet water uit de kolk is bezig als een golf langs de oppervlakte in de buitenhaven door te dringen. De kop van de in de kolk binnendringende golf zout water heeft het karakter van een soort interne watersprong. Deze zoute golf stuwt het zoete water voor zich omhoog, zodanig dat dit een naar de buitenhaven gerichte beweging krijgt. Ook de kop van de zoete golf die in de buitenhaven doordringt heeft het karakter van een interne watersprong; dit is dan een sprong omlaag, zoals de interne zoutwatersprong en de gewone oppervlakte-watersprong sprongen omhoog zijn. De kop van de zoete golf drukt het zoute water voor zich omlaag, zodanig dat dit een naar de kolk gerichte beweging krijgt. (zie fig.1)

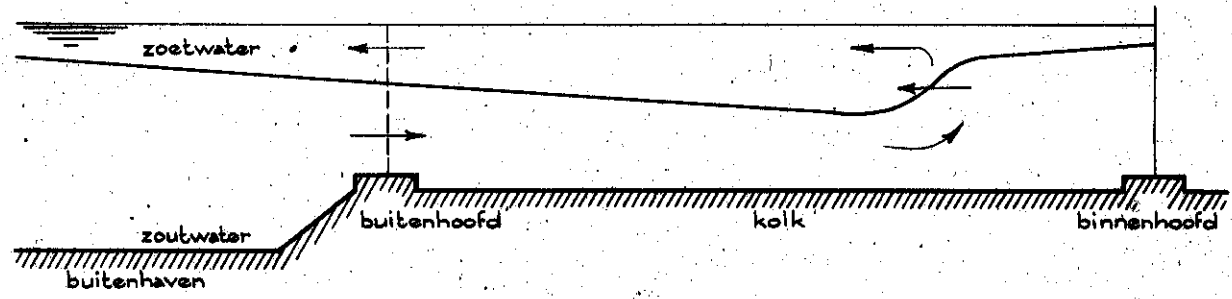


FIGUUR 1.

Door de wrijving oefenen de beide lagen langs hun grensvlak op elkaar krachten uit die de beweging tegenwerken. De onderste laag ondervindt bovendien een wrijvingskracht langs de bodem, en beide lagen ondervinden ook nog enige wrijving langs de wanden. Verder kunnen bij het sluishoofd, dat in den regel nauwer en minder diep is dan de buitenhaven, en wellicht ook nauwer en minder diep dan de kolk, vertragsverliezen ontstaan.

De turbulentie, die oorzaak is van de wrijvingsverliezen, heeft ook menging der lagen ten gevolge, waardoor de onderlaag zout afstaat, en de bovenlaag zout opneemt.

Na enige tijd heeft de zoute golf de binnendeuren bereikt. De golf kaatst daar terug en loopt dan over zichzelf heen weer naar de buitendeuren. (zie fig. 2). Hier loopt de golf gedeeltelijk door de deuren de kolk uit, en gedeeltelijk wordt de golf weer teruggekaatst. Het is denkbaar dat in sommige gevallen een volledige terugkaatsing plaats vindt.



FIGUUR 2.

Gedurende het heen en weer lopen van de golf in de kolk, wordt door de wrijving en de menging, de sprong aan de kop van de golf geleidelijk vervaagd, en de eindfase van het uitwisselingsproces zal langzamer en geleidelijker verlopen dan de beginfase.

Behalve door de reeds genoemde factoren, kan het verschijnsel nog gecompliceerd worden door het reeds voor het openen der deuren niet homogeen zijn van het water in de kolk en in de buitenhaven; verder door de wind, die

aan de oppervlakte een kracht uitoefent op de bovenlaag; voorts door schepen in de kolk, die zowel een complicerende invloed hebben op de voortplanting (partiële terugkaatsingen), als op de wrijving, als op de menging (werking van de schroeven); en ten slotte door vullings- en ledigingsstromen en daarmee gepaard gaande oppervlaktegolven, die het gevolg zijn van rijzingen en dalingen van de waterspiegel buiten de kolk, of van een onvoldoend vereffend zijn van het niveau-verschil aan weerszijde der deuren, op het ogenblik dat deze open gaan.

Bij het openstaan der binnendeuren vindt een uitwisselingsproces plaats, dat analoog is aan het proces bij de buitendeuren. Bij het openen der binnendeuren gaat een zoete golf uit het kanaal de kolk binnendringen langs de oppervlakte, terwijl een zoute golf uit de kolk in het kanaal doordringt langs de bodem. Na enige tijd bereikt de zoete golf de buitendeuren, kaatst daar terug, en gaat vervolgens diepere lagen in de kolk verzoeten.

3,2 Elementaire theorie.

Men kan tot een elementaire theorie van het verschijnsel komen, door een aantal complicerende factoren buiten beschouwing te laten.

De interne golven en de oppervlaktegolven hangen samen in die zin, dat een interne golf een storing in de waterspiegel en een oppervlaktegolf een storing in het interne grensvlak ten gevolge heeft. De theorie leert echter, dat deze wederzijdse beïnvloeding afneemt naarmate de verhouding van het dichtheidsverschil tot de dichtheid zelf, kleiner wordt. Deze verhouding is in ons geval slechts ongeveer een op honderd, zodat de interne golven slechts heel weinig invloed van de begeleidende oppervlaktegolven ondervinden. Daar nu bovendien de theorie der interne golven door het in rekening brengen der oppervlaktegolven aanzienlijk gecompliceerd zou worden, ligt het voor de hand de oppervlaktegolven buiten beschouwing te laten. De consequentie brengt dan mee dat we de dichtheidsverschillen steeds als verwaarloosbaar ten opzichte van de dichtheid zelf beschouwen.

Natuurlijk mag het dichtheidsverschil niet overal in de theorie verwaarloosd worden. Het spreekt vanzelf dat, waar we in de theorie te maken hebben met de krachten die het gevolg zijn van het uit het dichtheidsverschil voortvloeiende verschil in soortelijk gewicht, het dichtheidsverschil niet verwaarloosd mag worden. Doch, als we in de theorie te maken hebben met de dichtheid in verband met de massa van het in beweging gebrachte water, dan mogen we er van afzien onderscheid te maken tussen het zoete water en het iets dichtere zoute water.

Een tweede, veel ingrijpender vereenvoudiging, zal daarin bestaan, dat we de wrijving buiten beschouwing laten. Ook de menging, die evenals de wrijving in hoofdzaak een gevolg is van de turbulentie, zullen we niet in de beschouwing betrekken. In verband hiermee ligt het voor de hand verder nog af te zien van het niet homogeen zijn van het water in de buitenhaven of in het kanaal, en van het water in de kolk.

Ten slotte houden we ook geen rekening met de invloed van wind en scheepvaart.

Een geval dat elementair behandeld kan worden, is het geval waarbij de kolk, het sluishoofd, en het kanaal of de buitenhaven, alle even breed en even diep zijn.

Beschouw hier een zoute sprong die vóór zich zoet water in rust aantreft. Dan is de snelheid van de sprong

$$(4) \quad v_2 = \frac{h_2}{h} u,$$

met

$$u = \sqrt{egh},$$

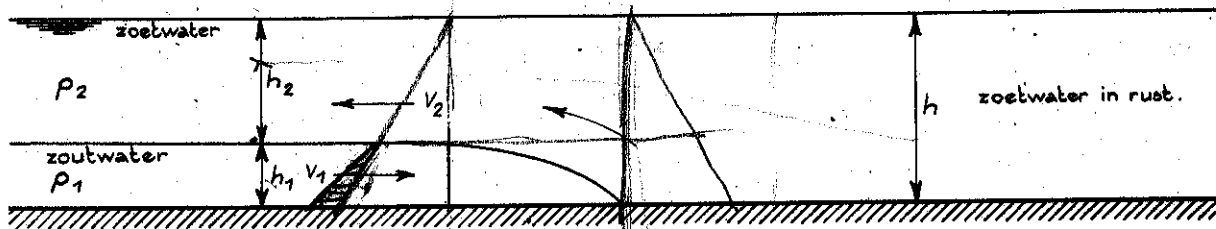
en

$$E = 2 \frac{P_1 - P_2}{P_1 + P_2} \approx \frac{P_1 - P_2}{P_1} \approx \frac{P_1 - P_2}{P_2} \approx \frac{P_1 - P_2}{1000}$$

(zie verder fig.3 en zie ook de lijst van symbolen op bijlage 24), terwijl het zoete water een snelheid

$$(5) \quad v_1 = \frac{h_1}{h} u$$

krijgt. Dit is af te leiden door een met de sprong mee bewegend assenstelsel in te voeren, en op de ten opzichte van dat stelsel stationnaire beweging de continuïteitsvergelijkingen der twee lagen afzonderlijk, de impulsvergelijking der lagen gezamenlijk, en de energievergelijking (Bernoulli) der bovenste laag toe te passen.



FIGUUR 3.

$$P_2 = (P_2 - P_1) g \frac{h_1}{2}$$

$$2g \frac{(P_1 - P_2)}{\rho} \frac{h_1}{2} + \frac{(v_1 + v_2)^2}{2} = \frac{v_2^2}{2} + \dots \quad v_1 h_1 = v_2 h_2$$

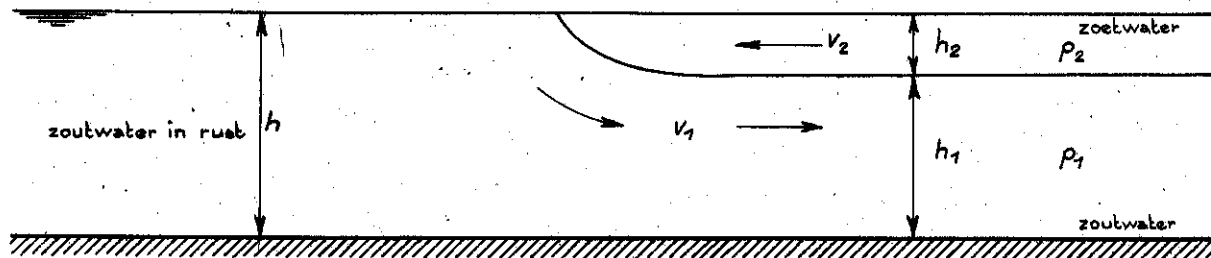
$$v_2 = \frac{v_1 h_1}{h_2}$$

$$\frac{P_1 - P_2}{\rho_1} g h_1 + v_1^2 \frac{(h_2 + h_1)^2}{h_2^2} = \frac{v_1^2 h_1^2}{h_2^2} + \frac{h_1}{h_2} = \frac{h_1}{h_2}$$

$$\frac{P_1 - P_2}{\rho_1} g h_1 = v_1^2 \left\{ \frac{h_2^2}{h_2^2} - \frac{h_1^2}{h_2^2} \right\} = -v_1^2 \frac{h_2^2 - h_1^2}{h_2^2}$$

$$v_1^2 = \frac{P_1 - P_2}{\rho_1} g \frac{(h_2 - h_1) h_2^2}{(h_2 + h_1)(h_2 - h_1)}$$

Voor een zoete sprong als afgebeeld in fig 4 gelden verder eveneens (4) en (5).



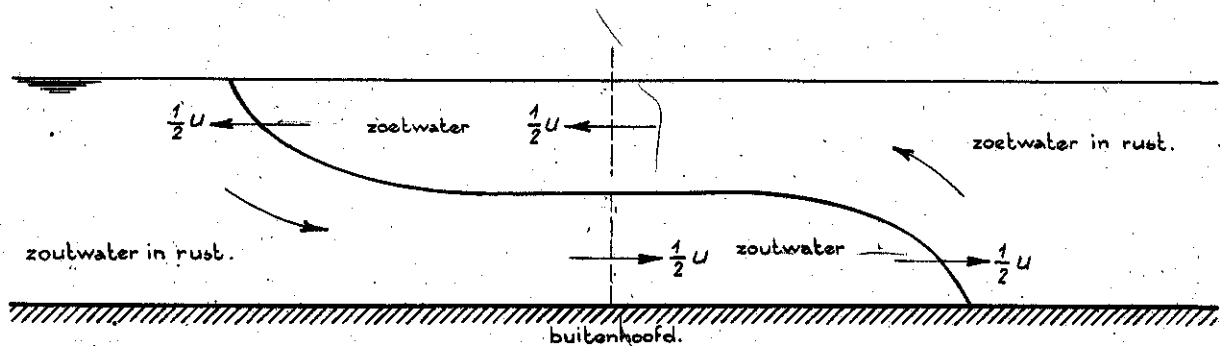
FIGUUR 4.

De twee sprongen vormen dus tesamen juist een oplossing met een zoute en een zoete sprong die in tegengestelde richtingen lopen. Om symmetrieredenen ligt het voor de hand $h_1 = h_2$ te stellen; dit steunt ook o.a. op de theorie van de dubbelkritische stroming die we verderop beschrijven.

Met $h_1 = h_2$ vinden we een zoute sprong die naar rechts, en een zoete sprong die naar links loopt met een snelheid $\frac{1}{2} u$ (zie fig.5). De uitwisselingsafvoer is dan

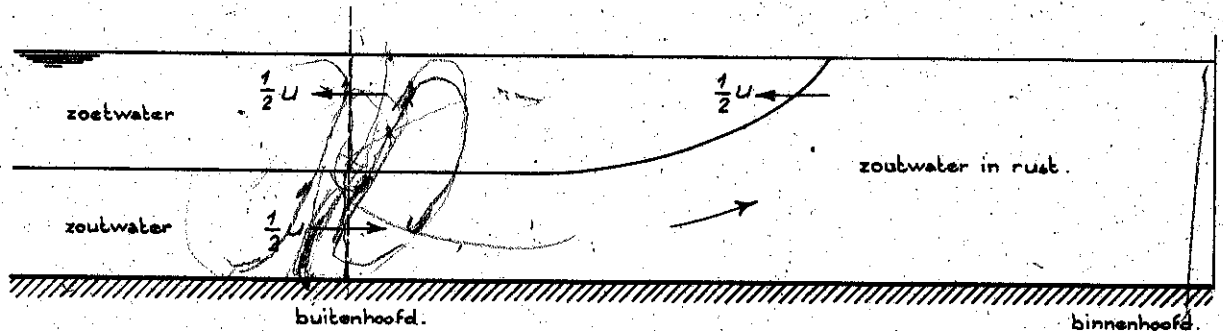
$$(6) \quad Q_0 = \frac{1}{4} A u$$

waarin A het dwarsoppervlak van het sluishoofd is.



FIGUUR 5.

Op soortelijke wijze is ook de teruggekaatste sprong te behandelen. Ook deze loopt met snelheid $\frac{1}{2}u$ en zij reikt tot de waterspiegel in geval van uitwisseling door de buitendeuren (zie fig. 6), resp. de bodem in geval van uitwisseling door de binnendeuren.



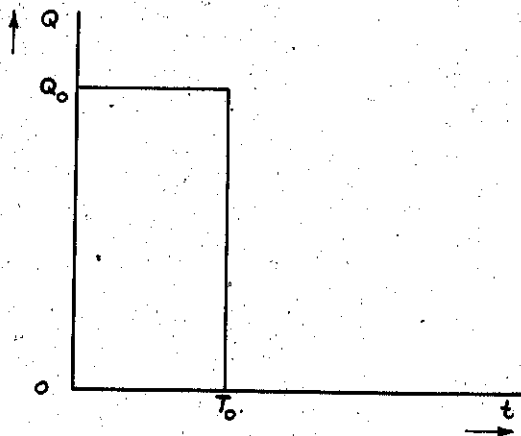
FIGUUR 6.

Het gehele uitwisselingsproces is afgelopen als de teruggekaatste golf weer terug is bij de openstaande buitendeuren. De tijd die nodig is voor een volledige uitwisseling bedraagt dus

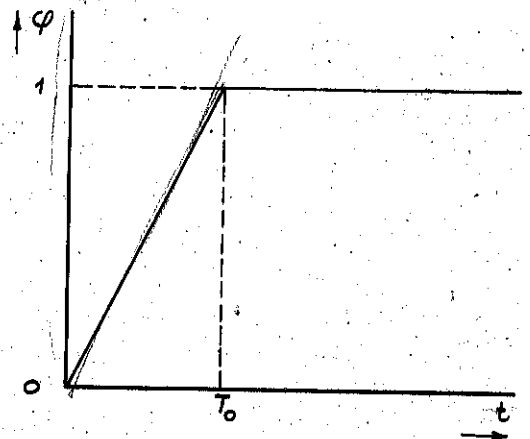
$$(7) \quad T_0 = \frac{2l}{\frac{1}{2}u} = 4 \frac{V}{Au} = \frac{V}{Q_0},$$

waarin l de lengte en V de inhoud van de kolk is.

De uitwisselings-afvoer door het sluishoofd uitgezet tegen de tijd, geeft in dit geval een grafiek als afgebeeld in fig. 7, en de uitwisselingscoëfficiënt tegen de tijd geeft een grafiek als in fig. 8.



FIGUUR 7.

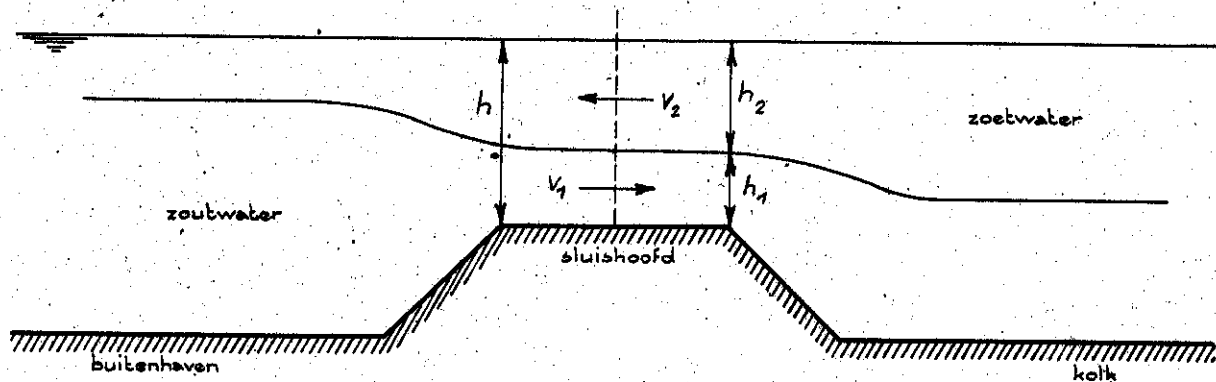


FIGUUR 8.

Een ander eenvoudig geval is het geval van een sluishoofd dat aanzienlijk nauwer en ondieper is dan kolk en kanaal of buitenhaven. De uitwisselings-stroming in het sluishoofd behandelen we op een soortgelijke wijze als de gewone spui-stroming in een sluishoofd.

Zoals bekend, neemt die spui-stroming bij gegeven bovenwaterstand toe wanneer de benedenwaterstand daalt, totdat een bepaalde kritische waarde bereikt is; daalt de benedenwaterstand beneden die kritische waarde, dan neemt de afvoer niet verder toe.

Ook bij de uitwisselings-afvoer in een systeem van twee gescheiden lagen kan een dergelijk geval van kritische afvoer optreden. Beschouw het geval van fig.9.



FIGUUR 9.

Het zoute water uit de buitenhaven stroomt versneld op het sluishoofd toe, waarbij potentiële in kinetische energie wordt omgezet; daarna wordt het zoute water bij het stromen in de kolk, in verband met het aangenomen grote verschil in wijde vrijwel geheel tot rust vertraagd, waarbij dus nagenoeg volledige vertraging-verliezen optreden.

Het zoete water stroomt op een analoge wijze uit de kolk versneld het sluishoofd in, en komt daarna nagenoeg geheel vertraagd in de buitenhaven terecht.

Bij een klein verschil in hoogte van het scheidingsvlak tussen buitenhaven en kolk, zal een verhoging van het scheidingsvlak in de buitenhaven een vergroting van de afvoer ten gevolge hebben; ook een verlaging van het scheidingsvlak in de kolk geeft een grotere afvoer.

Daalt het scheidingsvlak in de kolk echter beneden een bepaalde kritische waarde, dan heeft een verdere verlaging geen verdere vergroting van de afvoer ten gevolge. De stroming in het sluishoofd is dan kritisch, ongevoelig naar de zijde van de kolk.

Er is een vergaande analogie tussen de stroming van het zoute water en de stroming van het zoete water. Zo is het naar beneden zakken van zout water als een verzwakte val op te vatten; het opstijgen van zoet water is hiermee analoog. Evenzo is de invloed van de hoogte van het scheidingsvlak in de buitenhaven op de zoete stroming, analoog aan de invloed van de hoogte van het scheidingsvlak in de kolk op de zoute stroming, en de theorie van de uitwisselings-afvoer leert, dat er ook voor de hoogte van het scheidingsvlak in de

buitenhaven een kritische waarde is. Verhoging van dit scheidingsvlak boven de kritische waarde heeft geen verdere verhoging van de afvoer ten gevolge. De stroming in het sluishoofd is dan kritisch, ongevoelig naar de zijde van de buitenhaven.

Er is één stromingstoestand die naar beide zijden ongevoelig is. Bij deze dubbel-kritische stromingstoestand is

$$v_1 = v_2 = \frac{1}{2} u$$

$$h_1 = h_2 = \frac{1}{2} h$$

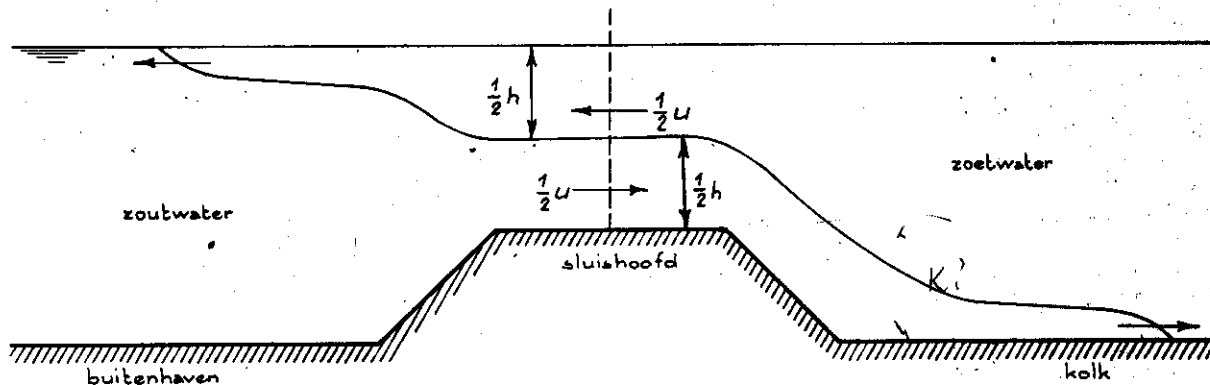
en dus is

$$(8) \quad Q_0 = \frac{1}{4} A u$$

de dubbel-kritische afvoer. Dit komt overeen met (6). Deze dubbel-kritische stromings-toestand treedt in het limietgeval dat kolk en buitenhaven oneindig veel wijder zijn dan het sluishoofd op, indien het scheidingsvlak in de kolk beneden $\frac{3}{8} h$, en in de buitenhaven boven $\frac{5}{8} h$ t.o.v. de bodem van het sluishoofd ligt.

Het uitwisselingsproces verloopt nu aldus:

De hoogte der sprongen die na het openen der buitendeuren kolk en buitenhaven binnenlopen, is, in verband met het grote verschil in breedte, belangrijk kleiner dan $\frac{3}{8} h$ (zie fig. 10). Er stelt zich dus bij het openen der buitendeuren de dubbel-kritische stromingstoestand in het sluishoofd in.



FIGUUR 10.

De sprong die de kolk in loopt, kaatst bij de binnendeuren terug, doch ook die teruggekaatste sprong is laag, en zal, bij een voldoende wijde kolk, nog geen niveau boven $\frac{3}{8} h$ boven de bodem van het sluishoofd geven, en dus bij aankomst aan het buitenhoofd, geen verandering in de dubbel-kritische stroming in dat sluishoofd brengen. De sprong zal dan ook bij het buitenhoofd weer terugkaatsen en opnieuw naar het binnenhoofd gaan lopen.

De zoute sprong blijft op die wijze heen en weer lopen zonder wijziging in de stroming in het buitenhoofd te brengen, daarbij het scheidingsvlak in de kolk steeds verder verhogende, totdat dit scheidingsvlak de kritische waarde van $\frac{3}{8}h$ boven de bodem van het sluishoofd bereikt. Daarna geeft de verdere stijging een min of meer geleidelijke afname van de uitwisselingsafvoer. De stroming in het sluishoofd blijft daarbij enkel-kritisch, ongevoelig naar de zijde van de buitenhaven. Het verband tussen de hoogte h_k van het scheidingsvlak in de kolk boven de bodem van het sluishoofd, en de afvoer, wordt nu door een nogal ingewikkelde formule weergegeven, waarvoor echter een zeer goede eenvoudige benadering gegeven kan worden

We krijgen zo:

$$Q = Q_0 \quad \text{als} \quad h_k \leq \frac{3}{8}h$$

$$Q \approx Q_0 \quad \text{als} \quad \frac{3}{8}h \leq h_k \leq 0,4h$$

$$Q \approx 2,15 Q_0 \left(\frac{h - h_k}{h} \right)^{3/2} \quad \text{als} \quad 0,4h \leq h_k$$

Weer aannemende dat de sprongen in de kolk te verwaarlozen klein zijn, geldt verder

$$Q = 13 \frac{dV}{dt}$$

Integratie geeft dan

$$Q \approx Q_0$$

$$\text{als} \quad t \leq T_1 = (0,4 + 0,6k)T_0$$

$$\varphi \approx \frac{t}{T_0}$$

$$Q \approx 1,73 Q_0 \frac{(1-k)^3}{\left(\frac{t}{T_0} + 0,8 - 1,8k \right)^3}$$

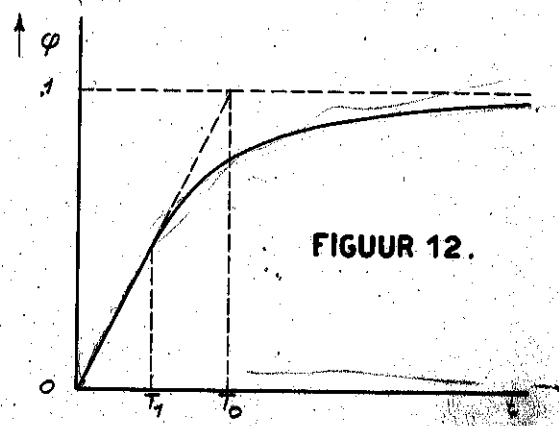
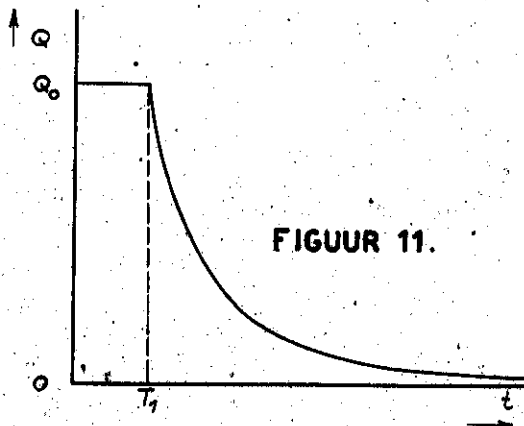
$$\text{als} \quad t \geq T_1 = (0,4 + 0,6k)T_0$$

$$\varphi \approx 1 - \frac{0,865 (1-k)^3}{\left(\frac{t}{T_0} + 0,8 - 1,8k \right)^2}$$

waarin weer evenals bij (7)

$$T_0 = \frac{V}{Q_0}$$

is met V voor het totale volumen van de kolk, terwijl kV het volumen van de kolk beneden de hoogte van de bodem van het sluishoofd voorstelt. Het verloop van Q en φ is aangegeven in fig. 11 en 12. De knik in de Q -lijn is eigenlijk enigszins afgerond.



Bij het binnenhoofd krijgen we in hoofdzaak dezelfde behandeling, doch nu moet \checkmark voor het volumen van de kolk boven de binnendrempel gesteld worden, en *k.o.*

3,3 Dimensieloze behandeling.

We veronderstellen dat het getal van Reynolds zó groot is, dat er een goed ontwikkelde turbulentie is, en dat ook bij bodem en wanden van de sluis de viscositeit geen invloed heeft (hydraulisch ruwe oppervlakken). Aan deze voorwaarde is in sluizen op ware grootte in het algemeen voldaan, doch bij modellen op kleine schaal is dit dubieus.

Ten tweede veronderstellen we dat het diffusie-getal,

$$D_i = \frac{\text{kinematische moleculaire diffusie-coëfficiënt}}{\text{kinematische viscositeit}}$$

niet sterk variëert. Aan deze voorwaarde is in het algemeen voldaan, daar we steeds met hetzelfde medium (water) te maken hebben.

Zoals we hiervoor in par. 3,2 reeds betoogden, zijn de oppervlaktegolven slechts van onbetekenende invloed, zodat het getal van Froude voor de oppervlakte hier niet van veel belang is. Daarentegen is het getal van Froude voor de interne golven wél van essentiële betekenis. We definiëren dit als volgt:

$$Fr (int) = \frac{v^2}{g h}$$

Het is uit de algemene model-theorie onmiddellijk duidelijk, dat we, als we even afzien van wrijving en menging, in twee geometrisch gelijkvormige sluizen gelijkvormig verloopende uitwisselingen krijgen, wanneer het getal van Froude, $Fr (int)$, in beide gevallen dezelfde waarde heeft. We zullen nu aantonen, dat dit ook nog geldt als we wrijving en menging wél in aanmerking nemen:

In een vorige studie (Ref. 9) toonden we aan, dat het turbulentiepatroon in een gelaagde stroming afhangt van de parameter van Richardson,

$$r = \frac{-g \frac{dp}{dz}}{\rho \left(\frac{dv}{dz}\right)^2}$$

Is op twee plaatsen in dezelfde stroming of in verschillende stromingen de waarde van r gelijk, dan zal de turbulentie op de twee plaatsen een gelijkvormig patroon vertonen.

Laat nu de index 1 op de eerste sluis betrekking hebben, en de index 2 op de tweede sluis. Veronderstel dat er gelijkvormige uitwisselingen in de twee sluizen zijn. Dan geldt op overeenkomstige plaatsen in de twee sluizen:

$$\left(\frac{dp}{dz}\right)_1 : \left(\frac{dp}{dz}\right)_2 = \frac{\epsilon_1 \rho_1}{h_1} :: \frac{\epsilon_2 \rho_2}{h_2}$$

$$\left(\frac{dv}{dz}\right)_1 : \left(\frac{dv}{dz}\right)_2 = \frac{\epsilon_1 g h_1}{v_1^2} :: \frac{\epsilon_2 g h_2}{v_2^2}$$

Hieruit volgt dat op overeenkomstige plaatsen

$$\alpha_1 : \alpha_2 = \frac{\epsilon_1 g h_1}{u_1^2} : \frac{\epsilon_2 g h_2}{u_2^2}$$

Dus, wanneer Fr (int) voor beide sluisen dezelfde waarde heeft, dan zal de parameter van Richardson op overeenkomstige plaatsen in de twee sluisen een gelijke waarde aannemen, en dan zal dus de gelijkvormigheid zich ook tot het turbulentiepatroon uitstrekken. De modelregel van Froude wordt derhalve door de wrijving en de menging niet aangetast.

Beschouw nu een aantal gelijkvormige sluisen, ofwel één sluis bij verschillende waarden van ϵ . We veronderstellen dat er geen uitwendige invloeden (wind, schepen) op het uitwisselingsverschijnsel ingrijpen, en dat de aanvangstoestanden in de beschouwde gevallen onderling gelijkvormig zijn volgens de modelregel van Froude, met Fr (int). Dan zal ook de uitwisseling in al die gevallen gelijkvormig volgens de modelregel van Froude verlopen.

We voeren daarom als maat voor de snelheden in

$$u = \sqrt{\epsilon g h}$$

als maat voor de afvoeren

$$Q_0 = \frac{1}{4} R u,$$

en als maat voor de tijden:

$$T_0 = \frac{V}{Q_0}$$

wanneer we dan in al de beschouwde gevallen $\psi = Q : Q_0$ of φ als functies van $\tau = t : T_0$ uitzetten, dan zullen we steeds dezelfde kromme moeten vinden.

Voor het bewerken van de waarnemingen in Terneuzen zullen we van deze twee dimensieloze diagrammen, het afvoer-diagram ($Q : Q_0$ tegen $t : T_0$) en het uitwisselings-diagram (φ tegen $t : T_0$), gebruik maken.

Voor de uitwisseling kolk-buitenhaven moeten we voor ϵ rekenen met

$$\epsilon_1 = 2 \frac{P_1 - P_a}{P_1 + P_a} \approx \frac{P_1 - P_a}{1000},$$

en bij de uitwisseling kolk-kanaal met

$$\epsilon_2 = 2 \frac{P_c - P_2}{P_c + P_2} \approx \frac{P_c - P_2}{1000}.$$

(Voor de symbolen zie de lijst op bijlage 24). De hierbij in rekening te brengen dichtheid in de kolk, P_a of P_c , hangt bij elke uitwisseling af van de voorgeschiedenis der kolk. Daarmee varieert dus eveneens de grootte van T_0 . Om nu ook over een meer constante kenmerkende tijd te beschikken, voeren we in:

$$\epsilon_m = 2 \frac{P_1 - P_2}{P_1 + P_2} \approx \frac{P_1 - P_2}{1000}$$

en

$$T_m = \frac{4 V}{A \sqrt{\epsilon_m g h}}$$

Dit is de theoretische uitwisselingstijd, indien de kolk vóór het openen der buitendeuren met kanaalwater, of vóór het openen der binnendeuren met buitenwater gevuld is. De tijd T_m is voor buitenhoofd en binnenhoofd in het algemeen nog verschillend (T_{m1} en T_{m2}).

Laat η de zoutfractie in de kolk vóór het openen der buitendeuren zijn en η' de zoutfractie in de kolk vóór het openen der binnendeuren (zie Ref.4). Dan kan, met toepassing van (3)

$$\eta = \frac{\rho_a - \rho_2}{\rho_1 - \rho_2} = 1 - \frac{E_1}{E_m}$$

en

$$\eta' = \frac{\rho_a^c - \rho_2}{\rho_1 - \rho_2} = \frac{E_2}{E_m}$$

gesteld worden. Hieruit volgt

$$(10) \quad T_o = \frac{T_{m1}}{\sqrt{1-\eta}}$$

voor de uitwisseling kolk-buitenhaven, en

$$(11) \quad T_o = \frac{T_{m2}}{\sqrt{\eta'}}$$

voor de uitwisseling kolk-kanaal.

3,4 Invloed van de vorm van de sluis.

Wanneer we twee geometrisch ongelijkvormige sluisen, of éézelfde sluis bij twee verschillende waterstanden beschouwen, dan zullen we in het algemeen in het afvoer-diagram of in het uitwisselings-diagram ook verschillende krommen vinden.

De vorm van de kromme in elk der twee genoemde diagrammen hangt af van allerlei geometrische verhoudingen. Dit blijkt, ook nog afgezien van wrijving en menging, uit de figuren 7, 8, 11 en 12 uit par. 3,2. Het is niet wel mogelijk de invloed van al die verhoudingen na te gaan. Wij beperken er ons hier toe, de invloed na te gaan van de twee meest elementaire verhoudingen, de verhouding van lengte tot diepte en de verhouding van breedte tot diepte.

Beschouw eens twee sluisen, 1 en 2, waarvan de tweede een grotere waarde voor de verhouding l/h heeft dan de eerste, doch die overigens onderling gelijkvormig zijn.

We gaan nu in gedachte met deze twee sluisen drie proeven nemen, waarbij we van gelijkvormige begintoestanden uitgaan.

In de eerste proef (1) laten we de eerste sluis uitwisselen. We verwerken de uitkomsten in het afvoer-diagram en het uitwisselings-diagram.

In de tweede proef (1a) laten we de tweede sluis uitwisselen, en we zorgen er daarbij door bepaalde uitwendige middelen (toevoer of afvoer van energie of van water met bepaalde zoutgehalten) voor, dat de uitwisseling gelijkvormig (volgens de modelregel van Froude) met de uitwisseling in de eerste sluis (proef 1) verloopt. We vinden dan bij deze proef (1a) natuurlijk dezelfde krommen in het afvoer-diagram en het uitwisselings-diagram als bij de eerste proef (1).

In de derde proef (2) laten we de tweede sluis uitwisselen zonder van buitenaf op het proces in te grijpen. We zullen dan andere krommen in de twee diagrammen vinden dan bij de voorafgaande proeven.

Vergelijk nu de proeven 1 en 1a. We gaan eerst de wrijving na. De turbulente schuifspanning is

$$s = \rho L^2 \left| \frac{dv}{dz} \right| \frac{dv}{dz} F(\alpha)$$

(zie Ref.9), en de energie-dissipatie hierdoor is

$$D = s \frac{dv}{dz} = \rho L^2 \left| \frac{dv}{dz} \right|^3 F(\alpha),$$

gerekend per eenheid van volumen en per eenheid van tijd. In deze formules is z de verticale coördinaat, v de horizontale snelheid, L de mengweg, en F een bepaalde functie van de parameter van Richardson. Op grond van de gelijkvormigheid is

$$v_1 = v_{1a}$$

$$h_1 : h_{1a} = h_1 : h_2 \quad (h_{1a} = h_2 !)$$

$$\left(\frac{dv}{dz} \right)_1 : \left(\frac{dv}{dz} \right)_{1a} = \frac{v_1}{h_1} : \frac{v_{1a}}{h_2},$$

en dus

$$(12) \quad D_1 : D_{1a} = \rho_1 \frac{v_1^3}{h_1} : \rho_2 \frac{v_{1a}^3}{h_2}$$

Voor de kinetische energie per eenheid van volumen, K , geldt

$$K_1 : K_{1a} = \rho_1 v_1^2 : \rho_2 v_{1a}^2,$$

en voor de verandering per eenheid van tijd hiervan geldt

$$(13) \quad \left(\frac{\partial K_1}{\partial t} \right) : \left(\frac{\partial K_{1a}}{\partial t} \right) = \rho_1 \frac{v_1^3}{L_1} : \rho_2 \frac{v_{1a}^3}{L_2},$$

aangezien

$$t_1 : t_{1a} = \frac{L_1}{v_1} : \frac{L_2}{v_{1a}}$$

Wil er gelijkvormigheid zijn, dan moet er evenredigheid bestaan tussen de verandering per tijdseenheid van de kinetische energie, en de dissipatie. Door vergelijking van (13) en (12) blijkt echter dat de energie-dissipatie in sluis 2 te groot is, omdat $L_2 : h_2$ groter is dan $L_1 : h_1$. Om toch gelijkvormigheid te bereiken, moeten we dus in sluis 2, bij proef 1a, van buitenaf energie toevoeren om de turbulente dissipatie gedeeltelijk te compenseren. Daar het slechts een gedachte-experiment is, kunnen we in het midden laten of, en hoe dit uitvoerbaar zou zijn.

We vergelijken vervolgens de menging bij de proeven 1 en 1a. Het verticale transport van massa per eenheid van tijd en per eenheid van horizontaal oppervlak als gevolg van de turbulentie, is

$$m = - L^2 \left| \frac{dv}{dz} \right| \frac{d\rho}{dz} f(\alpha).$$

Op grond van de gelijkvormigheid is

$$m_1 : m_{1a} = \rho_1 v_1 : \rho_2 v_{1a}$$

Voor de veranderingen in de dichtheid in verloop van tijd als gevolg van de menging, geldt dan:

$$(14) \left(\frac{\partial \rho}{\partial t}\right)_1^{(m)} : \left(\frac{\partial \rho}{\partial t}\right)_{1a}^{(m)} = \left(\frac{\partial m}{\partial x}\right)_1 : \left(\frac{\partial m}{\partial x}\right)_{1a} = \frac{\rho_1 v_1}{h_1} : \frac{\rho_2 v_{1a}}{h_2}$$

Voor de verandering in de dichtheid als gevolg van convectie geldt

$$\left(\frac{\partial \rho}{\partial t}\right)^{(c)} = - \frac{\partial(\rho v)}{\partial x}$$

(x is de coördinaat in de lengterichting van de kolk) en dus

$$(15) \left(\frac{\partial \rho}{\partial t}\right)_1^{(c)} : \left(\frac{\partial \rho}{\partial t}\right)_{1a}^{(c)} = \frac{\rho_1 v_1}{l_1} : \frac{\rho_2 v_{1a}}{l_2}$$

Uit vergelijking van (15) en (14) blijkt dat de menging in proef 1a te groot is in verhouding tot de convectie, daar $l_2 : h_2$ groter is dan $l_1 : h_1$. Om toch gelijkvormigheid te bereiken, moesten we dus bij proef 1a de menging gedeeltelijk compenseren, door zoetwater aan de bovenste lagen en zout water aan de onderste lagen toe te voeren, en uit de tussenlagen gemengd water te verwijderen.

We gaan nu over tot de vergelijking van de proeven 1a en 2.

Bij proef 2 blijft de extra energie-toevoer van proef 1a achterwege. Het gevolg daarvan zal zijn, dat de snelheden bij proef 2 de neiging zullen hebben sneller af te nemen dan bij proef 1a het geval was.

De extra af- en aanvoeren van water ter compensering van de menging, blijven eveneens bij proef 2 achterwege, en het gevolg daarvan zal zijn, dat het dichtheidsverschil tussen boven- en onderlaag sneller zal afnemen dan bij proef 1a. Het drijvende verschil in soortelijk gewicht neemt dus sneller af, en, gezien bovendien de grotere invloed van de dissipatie, mag dus stellig verwacht worden dat de snelheden bij proef 2 sneller af zullen nemen dan bij proef 1a. Ook de afvoer neemt sneller af, en, daar het gehalte-verschil tussen boven- en onderlaag sneller afneemt, verloopt de uitwisseling langzamer.

We mogen hieruit afleiden, dat bij vergroting van de verhouding $l:h$, de kromme in het afvoer-diagram, zowel als de kromme in het uitwisselings-diagram, lager komt te liggen.

Na het voorgaande is de invloed van de verhouding $l:h$ gemakkelijk te overzien.

Bij vergroting van de verhouding $l:h$, wordt de relatieve invloed van de wandwrijving kleiner, zodat de totale dissipatie door wrijving afneemt. Ook de menging zal afnemen. Het effect van een vergroting van de verhouding $l:h$, is dus tegengesteld aan de invloed van een vergroting van de verhouding $l:h$.

Om een indruk van de grootte-orde van de invloed van de verhouding $l:h$ te krijgen, kan men beter niet deze verhouding zelf beschouwen, maar de verhouding van breedte tot natte omtrek, ofwel van

de verhouding van hydraulische straal tot diepte, daar

$$\frac{R}{h_t} = \frac{\frac{b h_t}{b + 2 h_t}}{h_t} = \frac{b}{b + 2 h_t}$$

4. De uitwisselingsafvoer.

4,1 Het drijvende dichtheidsverschil.

Bij de bewerking van de afvoer-metingen volgens par. 33 moeten we het dichtheidsverschijnsel tussen de kolk vóór de uitwisseling, en de buitenhaven of het kanaal kennen. Evenwel noch de dichtheid in de kolk, noch de dichtheid in buitenhaven of kanaal is een eenduidig bepaalde grootte, omdat de dichtheid zowel in horizontale als vooral ook in verticale richting verschillen vertoont.

In de kolk zijn we uitgegaan van de gemiddelde dichtheid, bepaald uit de representatieve dichtheidsverticaal. Dit is stellig niet geheel juist, omdat de drijvende kracht voor lichtere lagen niet gelijk is aan die voor zwaardere lagen, en ook de gemiddelde drijvende kracht voor alle lagen samen, niet precies gelijk zal zijn aan de drijvende kracht die zou werken wanneer alle lagen een dichtheid gelijk aan de gemiddelde dichtheid hadden. We hebben op grond van theoretische inzichten getracht de grootte-orde van de gemaakte fout te schatten. Dit is de tweede onzekerheid die in de bijlagen 2, 3 en 4 is aangegeven bij de gemiddelde dichtheid van de kolk voor een uitwisseling.

In het kanaal en de buitenhaven zijn we nog anders te werk gegaan. We zagen immers bij de theorie van de kritische afvoer (zie par.3,2) dat bij scherp gescheiden lagen, een niet te dikke zoete laag aan de oppervlakte in de buitenhaven, of een niet te dikke zoute laag op de bodem van het kanaal, geen invloed op de afvoer van het sluishoofd zal hebben, daar de buitenhaven en het kanaal belangrijk wijder zijn dan het sluishoofd.

Nu is het waar, dat de lagen niet scherp gescheiden zullen zijn, en dat daardoor wellicht een zoete bovenlaag in de buitenhaven en een zoute onderlaag in het kanaal toch nog enige invloed zullen hebben. We hebben daarom gepoogd bij elke uitwisseling een gemiddelde dichtheid in buitenhaven of kanaal te schatten, zodanig dat de bovenlagen in de buitenhaven, of de onderlagen in het kanaal, in verminderde mate in rekening zijn gebracht, en wel des te minder naarmate die lagen scherper onderscheiden aanwezig waren. De aldus bepaalde gemiddelden zijn door verticale streep-stip-lijnen in de bijlagen 2, 3 en 4 aangegeven. Bij de waarde van dit gemiddelde is een geschatte onzekerheid vermeld.

We komen op de kwestie van het drijvende dichtheidsverschil nog terug in par.53.

4,2 Dimensieloze bewerking van de gemeten afvoeren.

Uit de afmetingen van het sluishoofd (zie enerzijds de bijlagen 2, 3 en 4 voor de waterstanden en anderzijds bijlage 24 voor de overige afmetingen) en het verschil tussen de gemiddelde dichtheid in de kolk vóór de uitwisseling, en de gemiddelde dichtheid volgens par.41 in de buitenhaven of het kanaal (zie de bijlagen 2, 3 en 4, of 5) kon voor iedere uitwisseling Q_0 bepaald worden. De gemeten afvoeren Q (zie bijlage 6) zijn hierdoor gedeeld.

De tijd van uitwisseling, t , is bepaald door het verschil te nemen tussen het gemiddelde tijdstip van de snelheidsmeting en het tijdstip van opengaan der deuren (zie bijlage 6), en dit verschil te verminderen met 0,8 min. teneinde rekening te houden met de openingstijd der deuren die volgens Boswinkel (ref.1) 1,5 min. bedraagt. De aldus bepaalde tijd t is gedeeld door de theoretische uitwisselingstijd T_0 , die volgt uit de inhoud van de kolk en de theoretische afvoer Q_0 .

Hierna is voor elke afvoermeting $\nu = Q_0 \cdot Q_0$ tegen $\tau = t \cdot T_0$ uitgezet, in bijlage 7 voor de uitwisseling kolk-buitenhaven, en in bijlage 8 voor de uitwisseling kolk-kanaal.

Voor iedere afvoermeting is verder een onzekerheid in de abscis τ bepaald, evenals een onzekerheid in de ordinaat ν .

Laat hierna Δ een (in het algemeen onbekende) fout in een grootheid aangeven, en δ de standaard-onzekerheid, d.w.z. de standaard-deviatie van Δ . Dus Δt stelt de fout in t voor, en δt de standaard-onzekerheid in t , dus $(\delta t)^2$ is het gemiddelde van de quadraten van de mogelijke fouten, $(\Delta t)^2$.

Nu is

$$\frac{\Delta \tau}{\tau} = \frac{\Delta t}{t} - \frac{\Delta T_0}{T_0},$$

en dus, daar we mogen aannemen dat er geen correlatie tussen de onzekerheden in t en in T_0 is, geldt verder:

$$(16) \quad \frac{\delta \tau}{\tau} = \sqrt{\left(\frac{\delta t}{t}\right)^2 + \left(\frac{\delta T_0}{T_0}\right)^2}.$$

De onzekerheid in t is een combinatie van twee factoren. In de eerste plaats is er de onzekerheid in het tijdstip van de meting. Laat θ de duur van het meetinterval zijn, dat dan derhalve loopt van $\Delta t = -\frac{1}{2}\theta$ tot $\Delta t = \frac{1}{2}\theta$. Alle tijdstippen in dit interval kunnen in gelijke mate hebben bijgedragen tot de meting, en de standaard-deviatie van deze tijdstippen volgt dus uit

$$(\delta t_1)^2 = \frac{1}{\theta} \int_{-\frac{1}{2}\theta}^{\frac{1}{2}\theta} (\Delta t)^2 d(\Delta t) = \frac{1}{12} \theta^2$$

en dus is

$$\delta t_1 = \frac{\theta}{\sqrt{12}} \approx 0,3 \theta,$$

de standaard-onzekerheid in het tijdstip van meting.

In de tweede plaats is er de duur van het openen der deuren. Hiervoor geldt een soortgelijke redenering als voor de duur van de meting, en, daar de duur van het openen 1,5 min is, stellen we

$$\delta t_0 = 0,3 \times 1,5 = 0,4 \text{ min}$$

als standaard-onzekerheid in het tijdstip van aanvang der uitwisseling.

De fout in t is:

$$\Delta t = \Delta t_1 - \Delta t_0,$$

en daar er geen reden is correlatie tussen Δt en Δt_0 aan te nemen, geldt

$$\delta t = \sqrt{(\delta t_1)^2 + (\delta t_0)^2}.$$

De onzekerheid in T_0 is in hoofdzaak een gevolg van de onzekerheid in u ,

$$\frac{\delta T_0}{T_0} = - \frac{\delta u}{u},$$

en deze is een gevolg van de onzekerheden in ε en h :

$$\frac{\delta u}{u} = \frac{1}{2} \frac{\delta \varepsilon}{\varepsilon} + \frac{1}{2} \frac{\delta h}{h}.$$

De onzekerheid in ε volgt uit de onzekerheden in de gemiddelde dichtheden. Laat $\delta \rho_1$ de standaard-onzekerheid in ρ_1 zijn; laat $\delta \rho_a$ de standaard-onzekerheid in het gemiddelde van de dichtheid in de kolk vóór de uitwisseling zijn, en laat $\delta' \rho_a$ de in par. 41 genoemde theoretische onzekerheid zijn. Dan stellen we

$$\frac{\delta \varepsilon_1}{\varepsilon_1} = \frac{\sqrt{(\delta \rho_1)^2 + (\delta \rho_a)^2 + (\delta' \rho_a)^2}}{\rho_1 - \rho_a}.$$

De onzekerheid in ε_2 wordt op overeenkomstige wijze bepaald.

De onzekerheid in h is alleen van belang bij de uitwisseling kolk-buitenhaven, omdat hierbij de waterstand ten gevolge van de getijbeweging varieert. Laat ρ het peilverschil tussen openen en sluiten der deuren zijn, dan stellen we

$$\delta h = 0,3\rho.$$

We hebben hierna

$$\frac{\delta u}{u} = \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{\delta \varepsilon}{\varepsilon}\right)^2 + \left(\frac{\delta h}{h}\right)^2},$$

en vervolgens

$$\frac{\delta T_0}{T_0} = \frac{\delta u}{u},$$

waarna de onzekerheid in de abscis volgt uit (16).

De standaard-onzekerheid in de ordinaat wordt op overeenkomstige wijze bepaald. Allereerst is δQ aangegeven in bijlage 6.

De onzekerheid in Q_0 is in hoofdzaak bepaald door de onzekerheden in ε en h :

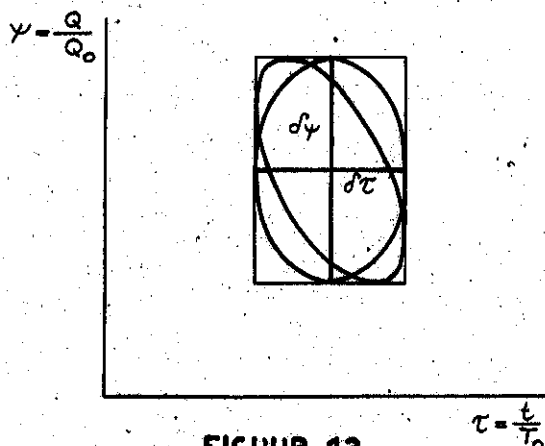
$$\frac{\delta Q_0}{Q_0} = \sqrt{\left(\frac{1}{2} \frac{\delta \varepsilon}{\varepsilon}\right)^2 + \left(\frac{3}{2} \frac{\delta h}{h}\right)^2}.$$

Hierna volgt de onzekerheid in de ordinaat uit

$$\frac{\delta y}{y} = \sqrt{\left(\frac{\delta Q}{Q}\right)^2 + \left(\frac{\delta Q_0}{Q_0}\right)^2}.$$

De standaard-onzekerheden en in abscis en ordinaat zijn bij elk meetpunt in bijlage 7 of 8 aangegeven door lijnstukken naar rechts en links, en naar boven en onder (zie fig. 13).

De onzekerheden in abscis en ordinaat zijn enigszins gecorreleerd, daar beide gedeeltelijk een gevolg zijn van de onzekerheid in ω . We zullen deze complicatie verder buiten beschouwing laten, en aannemen dat de onzekerheids-ellips de hierboven genoemde lijnstukken tot hoofdassen heeft (zie fig. 13). De eigenlijke onzekerheids-ellips ligt met schuinstaande hoofdassen rakend binnen de rechthoek op de twee lijnstukken als middenkruis. (zie stippellijn in fig. 13).



FIGUUR 13.

Het is, gezien de onvoldoende theoretische grondslag, niet bij voorbaat bekend welke vorm de regressie-curve van de meetpunten zal hebben, en door de grote strooiing geeft de grafiek zelf hier ook slechts een tamelijk vaag beeld van. Teneinde enigszins een indruk te krijgen van de vorm der regressie-curve, hebben we de meetpunten min of meer op het oog in groepen verdeeld, aangegeven door de dunne stippellijnen in de bijlagen 7 en 8. Van elke groep hebben we het zwaartepunt bepaald, en verder hebben we standaard-onzekerheden $\delta\tau_m$ en $\delta\psi_m$ in abscis en ordinaat van het zwaartepunt bepaald volgens

$$\delta\tau_m = \sqrt{\frac{\sum (\delta\tau)^2}{n(n-1)}}$$

$$\delta\psi_m = \sqrt{\frac{\sum (\delta\psi)^2}{n(n-1)}}$$

waarin n het aantal punten van de groep is. De ellips op δx_m en δy_m als hoofdassen is voor elke groep getekend (de hoofdassen zelf zijn voor de duidelijkheid niet getekend).

Een rechte regressielijn lijkt, gezien de onzekerheden, even aannemelijk als lijnen van andere vorm. De volgetrokken lijn in bijlage 7 of 8 geeft de op het oog getrokken regressielijn van de groepszwaartepunten weer.

Vervolgens is voor ieder meetpunt van de groep de afwijking z van de regressielijn, genomen in de richting die ten opzichte van de onzekerheids-ellips der groep is toegevoegd aan de richting van de regressielijn, bepaald, en daarna is een standaard-afwijking voor de groep bepaald volgens

$$z_m = \sqrt{\frac{\sum z^2}{n(n-1)}}$$

Deze afwijking is als een haltervormig lijnstuk bij de onzekerheids-ellips aangegeven.

Deze haltervormige lijnstukken geven een indruk van de nauwkeurigheid van de regressielijn. Om dit nader uit te werken hebben we ter weerszijden van de regressielijn streep - streep - lijnen getrokken, op afstanden van ten naaste bij tweemaal de standaard-onzekerheid.

Bij de interpretatie van deze streep - streep - lijnen kan men bedenken, dat er bij een normale foutenverdeling, een kans van 95% is dat de fout binnen tweemaal de standaard-afwijking van het gemiddelde ligt. We menen er dus tamelijk zeker van te kunnen zijn dat de regressielijn tussen de twee streep - streep - lijnen ligt. De streep - streep - lijnen vatten we daarom als bovengrens en ondergrens op waar de regressielijn waarschijnlijk binnen ligt.

De twee regressielijnen uit de bijlagen 7 en 8 met hun grenzen zijn samengevat in bijlage 9.

5. De uitwisselingscoëfficiënt.

5,1 Uitwisseling van de Westsluis afgeleid uit de gemeten afvoeren.

Teneinde de afvoermetingen in verband te brengen met de gemeten chloorinhouden van de kolk, trachten we de chloorinhouden af te leiden uit de bewerkte afvoermetingen.

Om van de uitwisselingsafvoer tot een uitwisselingscoëfficiënt te komen, moeten we het verschil in dichtheid tussen onder- en bovenstroom in het sluishoofd kennen. Aangezien er geen dichtheden in het sluishoofd gemeten zijn, moeten we met aannamen werken.

Allereerst trachten we een hoge aanname te doen. We kunnen er vrijwel zeker van zijn, dat de dichtheid van de bovenstroom bij de uitwisseling kolk-buitenhaven over het algemeen niet onder de aanvankelijke dichtheid in de kolk zal hebben gelegen. Evenzo kunnen we er van uitgaan, dat het gehalte van de onderstroom wel niet boven de dichtheid van de buitenhaven zal hebben gelegen. Zo is dus $\rho_1 - \rho_2$ een vrij stellige schatting van de hoogste waarde van het dichtheidverschil.

De chloorinhoud (in kg) van de kolk vóór de uitwisseling met de buitenhaven kan op

$$M_a = 0,7(\rho_2 - 1000) V$$

gesteld worden. De toevoer van chloor door de uitwisseling bedraagt volgens bovengenoemde eerste aanname

$$0,7(\rho_1 - \rho_2) Q,$$

gerekend per tijdseenheid. Na een uitwisselingstijd t is de chloorinhoud dus:

$$M = 0,7(\rho_2 - 1000) V + 0,7(\rho_1 - \rho_2) \int_0^t Q dt.$$

De zoutinhoud na volledige uitwisseling is

$$M_0 = 0,7(\rho_1 - 1000) V,$$

en de uitwisselingscoëfficiënt na de tijd t is dus

$$\varphi = \frac{M - M_a}{M_0 - M_a} = \frac{1}{V} \int_0^t Q dt,$$

ofwel

$$(17) \varphi = \int_0^{\tau} \psi d\tau.$$

Tot dezelfde formule komen we bij de uitwisseling kolk-kanaal, wanneer we daar als hoge schatting van het dichtheidsverschil tussen boven en onderstroom $\rho_1 - \rho_2$ invoeren.

De zouden tot nog hogere waarden van φ komen, wanneer we er rekening mee hielden, dat het volumen dat uitgewisseld kan worden, verminderd wordt door de aanwezigheid van schepen. We hadden dus in plaats van V , het gereduceerde volumen $V' = V - V_w$ (waarin V_w de waterverplaatsing der schepen is) kunnen nemen. We hebben dit niet gedaan, omdat naar ons gevoelen de waarden van φ volgens (17) ook zonder die correctie reeds aan de hoge kant zijn.

Ter vergelijking willen we tegenover de hoge schatting van het dichtheidsverschil ook een lagere schatting stellen: Bij een zeer sterke menging zal het dichtheidsverschil tussen de twee lagen in het buitenhoofd aanzienlijk beneden het dichtheidsverschil $\rho_1 - \rho_a$ liggen. Een stellige ondergrens hiervoor is moeilijk aan te geven, doch een tamelijk lage schatting is wel te maken:

Neem eens aan, dat het zoete water in de tamelijk wijde buitenhaven zich zo snel verspreidt, dat het zoute water dat langs de bodem uit de buitenhaven de kolk binnendringt, zich nog niet in betekende mate met het uitstromende zoete water heeft kunnen mengen; dan is de dichtheid van de onderstroom in het sluishoofd dus ρ_1 .

Neem nu daarentegen aan dat het water in de kolk steeds volledig gemengd is, zodat het bovenwater in het sluishoofd een dichtheid heeft gelijk aan de gemiddelde dichtheid in de kolk.

Laat φ de uitwisselingcoëfficiënt op zeker tijdstip t zijn. Dan is de chloorinhoud op dat tijdstip

$$M = M_a + \varphi(M_o - M_a) = \rho_1 V [\rho_a - 1000 + \varphi(\rho_1 - \rho_a)],$$

en de gemiddelde dichtheid in de kolk is

$$\rho = \frac{M}{\rho_1 V} + 1000 = \rho_a + \varphi(\rho_1 - \rho_a).$$

Het dichtheidsverschil tussen boven- en onderstroom is dan volgens de tweede aanname $\rho_1 - \rho$, en de chloortoevoer per eenheid van tijd is

$$\rho_1 (\rho_1 - \rho) Q = \rho_1 (1 - \varphi) (\rho_1 - \rho_a) Q.$$

Dit is gelijk aan

$$\rho_1 (1 - \varphi) (\rho_1 - \rho_a) Q = \frac{dM}{dt} = \rho_1 V (\rho_1 - \rho_a) \frac{d\varphi}{dt},$$

en dus is

$$(1 - \varphi) \varphi = \frac{d\varphi}{d\tau}.$$

Integratie hiervan geeft:

$$(18) \quad \varphi = 1 - e^{-\int_0^\tau \varphi d\tau}.$$

We komen ook voor de uitwisseling kolk-kanaal tot (18), wanneer we aannemen dat het zoete bovenwater uit het kanaal, in het binnenhoofd nog vrijwel ongemengd is, doch dat daarentegen het water in de kolk steeds geheel gemengd is.

We hebben de in bijlagen 7 en 8 weergegeven resultaten van de afvoermetingen met bovenstaande formules (17) en (18) verder verwerkt. Daarbij hebben we (17) op de bovenste streep-streep-lijn, en (18) op de onderste streep-streep-lijn uit bijlage 7, resp. 8, toegepast. De resultaten hiervan zijn weergegeven door streep-stip-lijnen in de bijlagen 10 en 11.

Deze streep-stip-lijnen hebben dus min of meer het karakter van vermoedelijke boven- en ondergrenzen voor de krommen in het uitwisselings-diagram.

De streep-stip-lijnen divergeren naar rechts toe. Zij hebben dus vooral waarde voor de bepaling van de uitwisselingscoëfficiënt bij kleine uitwisselingstijden der deuren. Zoals we hierna zullen zien, geven de gemeten chloorinhouden een goede aanvulling juist voor grotere uitwisselingstijden.

5,2 Uitwisseling van de Westsluis afgeleid uit de gemeten chloorinhouden.

De uitwisselingscoëfficiënt is bepaald uit de gemeten gemiddelde dichtheden vóór en na de uitwisseling, volgens -

$$(19) \quad \varphi_1 = \frac{\rho_b - \rho_a}{\rho_1 - \rho_a}$$

voor de uitwisseling kolk-buitenhaven, en volgens

$$(20) \quad \varphi_2 = \frac{\rho_c - \rho_d}{\rho_c - \rho_2}$$

voor de uitwisseling kolk-kanaal.

Volgens deze definitie blijft in het algemeen φ kleiner dan 1, ook al wordt de dichtheidsverticaal in de kolk gelijk aan die in de buitenhaven of het kanaal. Om die reden zou men er de voorkeur aan kunnen geven, in plaats van ρ_1 en ρ_2 in (19) en (20) ρ'_1 en ρ'_2 in te voeren.

We hebben dat niet gedaan, om de samenhang tussen de verwerking van de afvoeren en de verwerking van de zoutinhouden niet te verbreken.

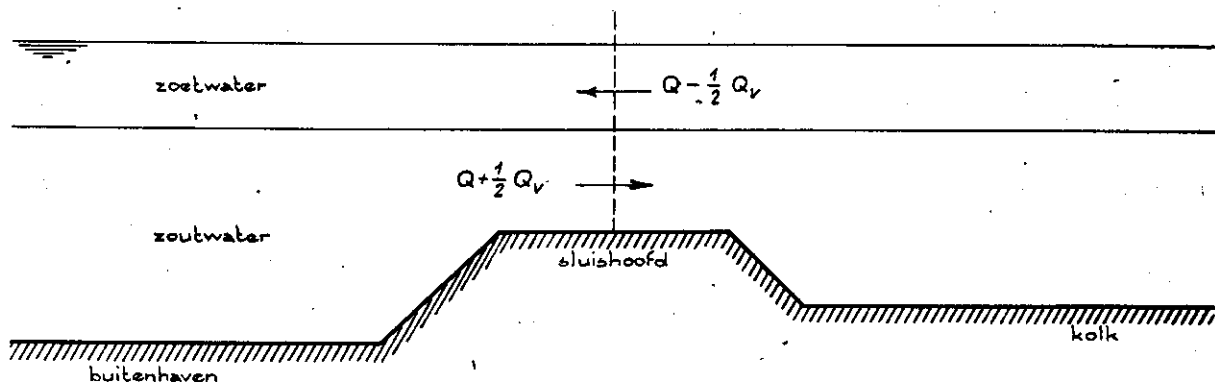
In par. 53 komen we echter nog op deze kwestie terug.

Voor de uitwisseling kolk-buitenhaven moeten we in (19) nog een kleine correctie aanbrengen, indien de waterstand gedurende de uitwisseling veranderd is, als gevolg van de getijbeweging.

Laat Q_v de vullings-afvoer zijn,

$$Q_v = B \frac{dh}{dt},$$

en laat Q de uitwisselings-afvoer zijn. Dan is de afvoer in de bovenlaag $Q - \frac{1}{2} Q_v$, en de afvoer in de onderlaag $Q + \frac{1}{2} Q_v$ (zie fig. 14).



FIGUUR 14.

We nemen aan, dat de onderlaag een dichtheid ρ_1 heeft, en de bovenlaag een dichtheid ρ_a . De chloortoevoer per eenheid van tijd is dan

$$0,7[(\rho_1 - 1000)(Q + \frac{1}{2}Q_v) - (\rho_a - 1000)(Q - \frac{1}{2}Q_v)] = 0,7(\rho_1 - \rho_a)Q + 0,7 \frac{\rho_1 + \rho_a}{2} Q_v$$

Was er geen vullings-afvoer, dan was de chloor-toevoer slechts

$$0,7(\rho_1 - \rho_a) Q$$

De vullings-stroom geeft dus een extra chloortoevoer

$$0,7 \frac{\rho_1 + \rho_a}{2} Q_v$$

De totale extra chloortoevoer door de verandering van waterstand bedraagt dus

$$(21) \quad 0,7 \frac{\rho_1 + \rho_a}{2} B p$$

waarin p het peilverschil tussen de toestand na, en de toestand vóór het openstaan der buitendeuren is.

Wanneer de dichtheid van de bovenstroom kleiner is dan ρ_1 , en de dichtheid van de onderstroom eenzelfde bedrag groter dan ρ_a is, dan blijft (21) gelden. Alleen wanneer de bovenstroom en de onderstroom in ongelijke mate bijgemengd zijn, zal (21) niet meer geheel juist zijn. Dit kunnen we echter gerust buiten beschouwing laten, omdat het hier slechts om een kleine correctie gaat.

Het gehalte ρ_b moet nu gecorrigeerd worden tot

$$\rho_b - \frac{\rho_1 + \rho_a}{2} \frac{B p}{V}$$

De gegeven formules gelden zowel voor stijgend buitenwater (vulling, $p > 0$), als voor vallend buitenwater (lediging, $p < 0$).

Voor de fout in ρ_1 geldt volgens (19):

$$\begin{aligned} \frac{\Delta \rho_1}{\rho_1} &= \frac{\Delta \rho_b - \Delta \rho_a}{\rho_b - \rho_a} - \frac{\Delta \rho_1 - \Delta \rho_a}{\rho_1 - \rho_a} \\ &= \frac{\frac{1}{\varphi} (\Delta \rho_b - \Delta \rho_a) - (\Delta \rho_1 - \Delta \rho_a)}{\rho_1 - \rho_a} \\ &= \frac{\frac{1}{\varphi} \Delta \rho_b - \frac{1-\varphi}{\varphi} \Delta \rho_a - \Delta \rho_1}{\rho_1 - \rho_a} \end{aligned}$$

Er is geen reden om correlatie tussen de fouten in ρ_b , ρ_a en ρ_1 aan te nemen, en dus is

$$\frac{\delta \rho_1}{\rho_1} = \frac{\sqrt{(\frac{1}{\varphi} \delta \rho_b)^2 + (\frac{1-\varphi}{\varphi} \delta \rho_a)^2 + (\delta \rho_1)^2}}{\rho_1 - \rho_a}$$

Als uitwisselingstijd hebben we de tijd van het openstaan der deuren genomen, verminderd met 1,5 min, dat is éénmaal de tijd nodig voor openen of sluiten der deuren. De onzekerheid in τ hebben we gesteld op

$$\delta^2 \tau = 1 \text{ min.}$$

De standaard-onzekerheid in τ volgt dan uit

$$\frac{\delta \tau}{\tau} = \sqrt{\left(\frac{\delta^2 \tau}{\tau}\right)^2 + \left(\frac{\delta^2 T_0}{T_0}\right)^2}$$

De meetpunten zijn in de bijlagen 10 en 11 uitgezet met de standaard-onzekerheden in abscis en ordinat, op overeenkomstige wijze als in de bijlagen 7 en 8.

We hebben ook weer, eveneens op soortgelijke wijze, de meetpunten in groepen verdeeld, en voor elke groep het zwaartepunt met zijn onzekerheids-ellipsa bepaald.

Daarna hebben we, afgaande op de groepszwaartepunten, en op de streep-stip-lijnen, op het oog een regressiecurve in bijlage 10, en evenzo in bijlage 11 getrokken.

Daarna zijn weer de afwijkingen van deze curven, groeps-gewijze bepaald, en aangeduid door halter- of lijnstukken. Hierna zijn op het oog voor elk der beide regressiecurven een boven- en een ondergrens getrokken; voor de ondergrens in bijlage 10 hebben we de ondergrens streep-stip-lijn aangehouden; verder zijn de grenzen door streep-streep-lijnen aangegeven.

De regressielijnen met hun grenzen zijn samengevoegd in de bijlage 12. De dunne getrokken lijn geeft een gemiddelde voor buiten- en binnen-hoofd aan; de dunne streep-streep-lijnen zijn de daarbij aangenomen grenzen.

5,3 Uitwisseling van de Zeevaartsluis.

Verschillende factoren die het uitwisselingsproces bepalen, zullen bij de overwogen nieuwe Zeevaartsluis anders zijn dan bij de Westsluis.

Het is o.a. de bedoeling, dat er bij de Zeevaartsluis een plaatselijke verdieping in het kanaal komt teneinde daarin het zoute water dat door het schuifdeur binnendringt, op te vangen en te beletten dat dit water verder in het kanaal doordringt.

Het gevolg hiervan zal zijn, dat de zoute onderlaag in het kanaal in hoofdzaak beneden de drempel van het binnenhoofd zal komen te liggen, zodat het verschil tussen de dichtheid van de bovenlaag, ρ_2 , en de gemiddelde dichtheid in de kolk na volledige uitwisseling ρ_2' , weinig zullen verschillen, in tegenstelling met wat we nu bij de Westsluis vinden. We gaan de invloed hiervan na:

Wij menen op grond van de theorie van de kritische uitwisselingsafvoer (zie par. 32), dat de dichtheid der bovenlagen in het kanaal, ρ_2 , bij het begin van de uitwisseling bepalend zal zijn voor het drijvende dichtheidsverschil. Evenwel, naarmate de uitwisseling vordert, zullen de diepere lagen in het kanaal meer en meer invloed gaan krijgen. Immers, bij volledige uitwisseling zal de kolk een dichtheidsverticaal krijgen die nagelsgelyk zal zijn aan die in het kanaal, althans boven de drempel van het binnenhoofd.

Er is dus reden om aan te nemen, dat de uitwisseling anders verloopt bij homogeen water in het kanaal, dan bij een uitgesproken gelaagdheid. Om dit in rekening te brengen gaan we als volgt te werk:

Voor een coëfficiënt f in,

$$f_1 = \frac{P_1 - P_2}{P_1' - P_2'}$$

voor de uitwisseling kolk-buithaven, en

$$f_2 = \frac{P_c - P_2}{P_c - P_2'}$$

voor de uitwisseling kolk-kanaal. De waarden van f_1 en f_2 zijn dag voor dag bepaald in tabel 2.

<u>Tabel 2.</u>	16 April '51	19 April '51	23 April '51	gemidd.
<u>kolk-buithaven</u>				
P_1	1020,1	1016,2	1016,8	1017,7
P_1'	1019,7	1013,8	1015,8	1016,4
P_2	1004,9	1003,9	1005,1	
$P_1 - P_2$	15,2	12,3	11,7	^{16,3} ₁₅
$P_1' - P_2$	14,8	9,9	10,7	
f_1	1,03	1,24	1,09	1,12
<u>kolk-kanaal</u>				
P_2	1001,2	1001,2	1001,8	1001,4
P_2'	1003,1	1003,3	1004,0	1003,5
P_c	1011,7	1013,8	1015,8	
$P_c - P_2$	10,5	12,6	14,0	
$P_c - P_2'$	8,6	10,5	11,8	
f_2	1,22	1,20	1,19	1,20
<u>kanaal-buithaven</u>				
$P_1 - P_2$	18,9	15,0	15,0	16,3
$P_1' - P_2'$	16,6	10,5	11,8	13,0
$(P_1 - P_2) - (P_1' - P_2')$	2,3	4,5	3,2	3,3

Op de getallen op de onderste drie regels komen we in par. 71 terug.

Uit de tabel blijkt dat de gemiddelde waarde van f voor de uitwisseling kolk-buithaven 1,12 en voor de uitwisseling kolk-kanaal 1,20 is. We nemen het gemiddelde van de twee uitwisselingen, en hiervoor is $f = 1,16$. We mogen de dun getrokken lijn in bijlage 12 dus opvatten als behorende bij de waarde $f = 1,16$. We hebben deze lijn overgenomen in bijlage 13.

Wanneer we in de buithaven en in het kanaal homogeen water gehad hadden, zodanig dat P_1' gelijk aan P_1 en P_2' gelijk aan P_2 was geweest, dan waren, vooral bij de grote openingstijden, grotere uitwisselingen mogelijk geweest.

We hebben nu in bijlage 13 de waarden van φ volgens de kromme voor $f=1/16$, vergroot met de factor 1,16; dit gaf de dun getrokken hulplijn. We mogen aannemen, dat, bij homogeen water in kanaal en buitenhaven, dus $f=1$, de uitwisseling aanvankelijk weinig anders zou zijn verlopen dan bij $f=1/16$, doch dat bij grotere waarden van t meer de grotere uitwisselingen volgens de hulplijn verkregen zouden zijn. We hebben daarom schattenderwijs een lijn getrokken, die zich in het begin aansluit bij de lijn voor $f=1/16$, doch die later geleidelijk overloopt naar de hulplijn. De aldus getrokken lijn beschouwen we als de lijn behorende bij $f=1$.

Tussen de lijnen voor $f=1$ en voor $f=1/16$ hebben we nog een lijn voor $f=1/8$ getrokken.

We mogen aannemen dat bij de nieuwe Zeevaartsluis f_1 niet veel zal veranderen, doch dat f_2 als gevolg van de zoutwaterzak in het kanaal, vrij dicht bij 1 zal komen te liggen. We zullen aannemen dat het gemiddelde van f_1 en f_2 bij de Zeevaartsluis in de buurt van 1,08 zal liggen.

Ook de geometrische verhoudingen zullen bij de Zeevaartsluis enigszins afwijken van die bij de Westsluis (zie bijlage 24). Dit is samengevat in tabel 3.

Tabel 3.		kolk buitenh.	kolk kanaal.	gemiddeld
lengte tot diepte kolk $l:h_k$	Westsluis Zeevaartsluis	19 25	17 21	18 23
lengtemaat tot diepte sluishoofd $l_m:h$	Westsluis Zeevaartsluis	28 26	31,5 29	30 27,5
hydraulische straal tot diepte kolk $R:h_k$	Westsluis Zeevaartsluis	0,56 0,59	0,50 0,55	0,53 0,57

Uit deze tabel blijkt, dat er factoren zijn ($l_m:h$ en $R:h_k$) die in de Zeevaartsluis een relatief grotere uitwisseling doen verwachten doch andere factoren ($l:h_k$) die een kleinere uitwisseling doen verwachten (zie par. 34). Gezien de grootte-orde der verschillen, en in aanmerking nemende dat de beschouwingen van par. 34 in hoofdzaak slechts kwalitatieve waarde hebben, is er geen aanleiding op grond van de geometrische verhoudingen te besluiten tot een beslist grotere, noch tot een beslist kleinere uitwisseling. We zullen dus de lijn voor $f=1/8$ in bijlage 13 aanvaarden als vermoedelijke uitwisselingskromme van de nieuwe Zeevaartsluis.

Uit de verschillen in geometrische verhoudingen vloeit echter wel een nieuwe onzekerheid ten aanzien van de uitwisselingskromme voort. We hebben daarom de onzekerheidsmarge voor de Zeevaartsluis ruimer genomen dan voor de Westsluis, en zo zijn we schattenderwijs tot de streep-streep-lijnen van bijlage 13 gekomen.

6. Bijvullen en aflaten.

6.1 Bijvullen en aflaten in de Westsluis.

Uit de gemeten chloorinhouden kan worden nagegaan, welke dichtheid het water, waarmee de kolk is bijgevuld of afgelaten, heeft gehad.

De chloorinhoud van de kolk vóór het bijvullen is

$$M_b = 0,7 (P_b - 1000) V_1.$$

Laat ρ_i de dichtheid zijn van het water waarmee bijgevuld wordt, dan neemt de chloorinhoud dus toe met

$$0,7 (P_i - 1000) (V_2 - V_1).$$

De chloorinhoud na het bijvullen is dan

$$M_c = 0,7 [P_b V_1 + P_i (V_2 - V_1) - 1000 V_2].$$

De chloorinhoud na het bijvullen is ook te schrijven als

$$M_c = 0,7 [P_c - 1000] V_2,$$

zodat de gelijkheid

$$(22) \quad P_c = P_b \frac{V_1}{V_2} + P_i \frac{V_2 - V_1}{V_2}$$

moet bestaan.

De chloorinhoud van de kolk vóór het aflaten is

$$M_d = 0,7 (P_d - 1000) V_2.$$

Laat P_u de dichtheid van het afgelaten water zijn, dan vermindert de chloorinhoud met

$$0,7 (P_u - 1000) (V_2 - V_1),$$

en na het aflaten is de chloorinhoud dus

$$M_a = 0,7 [P_d V_2 - P_u (V_2 - V_1) - 1000 V_1].$$

Voor deze chloorinhoud is ook

$$M_a = 0,7 [P_a - 1000] V_1$$

te schrijven, zodat we de gelijkheid

$$(23) \quad P_a = P_d \frac{V_2}{V_1} - P_u \frac{V_2 - V_1}{V_1}$$

kunnen afleiden.

Teneinde de dichtheid ρ_i van het bijvullen in de Westsluis te bepalen, hebben we in bijlage 14 (bovenste helft) voor elk van een aantal schuttingen drie waarden van de dichtheid P_c uitgezet:

1. volgens de metingen;
2. berekend met (22) volgens de aanname $P_i = P_2$;
3. berekend met (22) volgens de aanname $P_i = P_1$.

De breedte van de blokjes in bijlage 14 geeft de standaard-onzekerheid weer.

We zien hieruit, de onzekerheden in aanmerking genomen, dat de werkelijke dichtheid in de kolk nagenoeg overeenkomt met de dichtheid die volgt uit de aanname dat met zoet water met de dichtheid P_2 zou zijn bijgevuld.

Evenzo hebben we in bijlage 14 (onderste helft) voor elk van een aantal schuttingen drie waarden van P_a uitgezet:

1. volgens de metingen;
2. berekend met (23) volgens de aanname $\rho_u = \rho_d$;
3. berekend met (23) volgens de aanname $\rho_u = \rho_f$.

De breedte van de blokjes geeft weer de onzekerheid weer.

Het blijkt dat we, voorzover de nauwkeurigheid der metingen ons veroorlooft, mogen aannemen dat de kolk is afgelaten met water van een dichtheid nagenoeg gelijk aan de gemiddelde dichtheid in de kolk vóór het aflaten.

We concluderen dus, dat we bij de Westsluis voor de coëfficiënten γ en θ (zie Ref.4)

$$\gamma = 0$$

$$\theta = 0$$

moeten stellen.

6,2 Bijvullen en aflaten in de Zeevaartsluis.

Voor het bijvullen van de Zeevaartsluis zal men in het gunstigste geval gebruik kunnen maken van de onderste lagen in de zoutwaterzak van het kanaal.

Uit de bijlagen 2, 3 en 4 blijkt, dat de dichtheid op de bodem van het kanaal varieerde tussen ongeveer 1010 en 1015 kg/m³.

Bij aanwezigheid van een zoutwaterzak, zou het zoute water zich minder goed hebben kunnen verspreiden door het kanaal, en dan zou wellicht op de bodem van die zak een gemiddelde dichtheid van 1015 kg/m³ wel bereikt zijn.

Indien we met dat bodemwater hadden kunnen bijvullen, dus met $\rho_i = 1015 \text{ kg/m}^3$, dan was de coëfficiënt van het bijvullen

$$\gamma = \frac{\rho_i - \rho_2}{\rho_1 - \rho_2} \approx \frac{1015 - 1007,5}{1018 - 1007,5} = 0,8$$

gewest.

Dit zal echter vermoedelijk niet bereikbaar zijn. Immers, ten eerste zal men niet uitsluitend uit de aller-onderste lagen van het kanaal kunnen bijvullen. En ten tweede wordt aan de onderste lagen uit de zoutwaterzak doorlopend water onttrokken door schutten en spuien, waarvoor water dat minder zout is in de plaats komt. We menen dan ook γ niet hoger dan ongeveer 0,5 te mogen stellen.

Het water voor het aflaten van de kolk zal in het gunstigste geval afkomstig zijn uit de onderste lagen van de kolk. Om ons hierover te oriënteren hebben we de dichtheidsverticalen in de Westsluis beschouwd (bijlagen 2, 3 en 4).

Wanneer we de Westsluis met 2 m hadden willen aflaten op zo gunstig mogelijke wijze, dan hadden we de onderste laag ter dikte van 2m uit de kolk moeten verwijderen. We hebben de gemiddelde dichtheid van die laag vergeleken met de gemiddelde dichtheid van de gehele kolk vóór het aflaten. Het verschil was gemiddeld ongeveer 4 kg/m³.

Stellen we dus $\rho_u - \rho_d = 4 \text{ kg/m}^3$, dan is

$$\theta = \frac{\rho_u - \rho_d}{\rho_1 - \rho_d} \approx \frac{4}{1018 - 1004,5} = 0,3$$

Dit is vermoedelijk te hoog, omdat het niet zal lukken nauwkeurig de onderste lagen af te laten, en we menen θ dus iets lager te moeten stellen.

We zullen voor de Zeevaartsluis

$$\gamma = 0,5$$

$$\theta = 0,25$$

stellen.

7. De zoutbezwaar-coëfficiënt.

7.1 De zoutbezwaar-coëfficiënt van de Westsluis.

Het zoutbezwaar van de Westsluis kan nu bepaald worden door middel van de zoutbezwaar-coëfficiënt, λ , die we in een vorige nota (Ref.4) invoerden.

In par.61 leidden we af dat de kolk zoet wordt bijgevuld; en gemengd afgelaten ($\gamma=0, \theta=0$).

De zoutverticalen in de Westsluis duiden niet op een sterk zak-effect in de kolk. Bij de berekening van de uitwisselingscoëfficiënt (par.52), hebben we dan ook met de gehele inhoud van de kolk gerekend, en dus geen zak-effect in rekening gebracht. Ook in deze paragraaf laten we het zak-effect buiten beschouwing ($\beta=0$).

Uit het volumen van de kolk bij de gemiddelde buitenwaterstand, V_1 , en het volumen bij kanaalpeil, V_2 , (zie de bijlage 24) volgt

$$\alpha = \frac{39000 - 36000}{36000} = 0,08$$

voor de coëfficiënt van het schutwater.

De uitwisselingscoëfficiënten φ_1 en φ_2 zijn in het algemeen natuurlijk verschillend. Ter vereenvoudiging van de behandeling, zullen we φ_1 en φ_2 elk vervangen door een middelwaarde φ van φ_1 en φ_2 . Dit betekent dat als de ene uitwisselingscoëfficiënt te groot, de andere te klein in rekening wordt gebracht. Dit resulteert dan tenslotte in een kleine fout, doch die fout is te verwaarlozen ten opzichte van de onzekerheden in de waarde van φ_1 en φ_2 .

We bepalen nu dus λ als functie van φ volgens formule (8) van onze vorige nota, die ons hier geeft:

$$\lambda = \frac{\varphi^2}{1 - \frac{(1-\varphi)^2}{1,08}}$$

Dit verband is grafisch uitgezet in bijlage 15.

De uitwisselingscoëfficiënten hangen af van de openingstijden van de deuren. Dit volgt uit het uitwisselingsdiagram van bijlage 12. Hierin houden we de dun getrokken lijn aan, daar we φ_1 en φ_2 gelijk stellen (zie boven).

Langs de abscissen - as van het uitwisselingsdiagram is niet onmiddellijk een tijdschaal te leggen, omdat de tijdmaat, T_0 , nog afhangt van de dichtheid in de kolk vóór de uitwisseling; en dus nog van de voorafgaande uitwisseling. Dit is weergegeven in de formules (10) en (11).

De zoutwaterfractie vóór de uitwisseling met de buitenhaven, volgt uit formule (7) van onze vorige nota

$$\eta = \frac{\varphi(1-\varphi)}{1,08 - (1-\varphi)^2}$$

Hierna is de zoutwaterfractie vóór de uitwisseling met het kanaal volgens de beschouwing uit onze vorige nota (p.8)

$$\eta' = \frac{\eta + \varphi(1-\eta)}{1,08}$$

We hebben de functies $\sqrt{1-\eta}$ en $\sqrt{\eta}$ in bijlage 15 grafisch uitgezet tegen φ . Deze twee functies verschillen niet veel, en in verband met de door ons aangenomen gedragslijn om φ_1 en φ_2 gelijk te stellen, hebben we een gemiddelde van $\sqrt{1-\eta}$ en $\sqrt{\eta}$ bepaald. Met dit gemiddelde zullen we, zowel voor de uitwisseling kolk-buitenhaven, als voor de uitwisseling kolk-kanaal, $\tau = t : T_0$ omrekenen in $t : T_m$.

We gaan dus uit van een waarde van φ , bepalen daarbij uit bijlage 15 de bijbehorende waarde van de omrekenfactor $T_m : T_0$, vervolgens uit bijlage 12 de bij φ behorende waarde van $t : T_0$, en berekenen hiermee

$$\frac{t}{T_m} = \frac{t}{T_0} \cdot \frac{T_m}{T_0}$$

De beschouwde waarde van φ zetten we uit tegen de gevonden waarde van $t : T_m$. Dit herhalen we voor andere waarden van φ . Aldus is de dun getrokken kromme in bijlage 16 geconstrueerd.

Hierna is met behulp van het verband tussen λ en φ dat weergegeven is in de bijlage 15, λ als functie van $t : T_m$ uitgezet, eveneens in bijlage 16 weergegeven.

Op overeenkomstige wijze zijn uit de grenskrommen in het uitwisselings-diagram, ook grenskrommen voor λ bepaald (streep-streep-lijnen in bijlage 16).

We kunnen nu de abscissen-schaal $t : T_m$ omzetten in een tijdschaal, door T_m te bepalen.

We hebben het chloorgehalte bij kentering van vloed op eb in de Schelde voor Terneuzen, over het jaar 1950 nagegaan, en daarbij gelet op de chloorgehalte's die gedurende een maand of meer overschreden zijn. Het hoogste aldus gevonden chloorgehalte was ongeveer 17 kg./m³. Op grond van vergelijkende metingen van het chloorgehalte in de Schelde en in buitenhaven, zijn we er toe gekomen als maatgevende waarde van het chloorgehalte in de buitenhaven, overwegend rekening gehouden met de onderlagen, 15,5 kg/m³ te stellen.

We hebben gemeend het gemiddelde chloorgehalte in het kanaal nabij de sluizen op 2,5 kg/m³, en, met in acht nemen van de dichtheidsverticalen van de bijlagen 2, 3 en 4, stellen we dan het chloorgehalte van de bovenlagen op 1 kg/m³.

Het verschil in chloorgehalte tussen kanaal en buitenhaven wordt dan 15,5 - 1 = 14,5 kg/m³, wat neerkomt op 1,4 x 14,5 = 20 kg/m³ dichtheidsverschil, dus

Dit chloorgehalte van 14,5 kg/m³ is 2 kg/m³ meer dan bij een vorige gelegenheid (Ref.10) is aangenomen. Dit verschil is in hoofdzaak toe te schrijven aan de andere bepaling van het drijvende dichtheidsverschil; immers, uit tabel(2) (zie par.53) blijkt dat er tussen het gemiddelde dichtheidsverschil en het dichtheidsverschil dat in deze nota als drijvend verschil is aangenomen, een verschil van ongeveer 3 kg/m³ is, wat neerkomt op ongeveer 2 kg/m³ verschil in chloorgehalte.

De tijdfactor van de Westsluis bedraagt volgens bijlage 24 voor de buitenzijde 105 sec, en voor de binnenzijde 115 sec. Het gemiddelde kan dus op 110 sec. gesteld worden. We vinden dan

$$T_m = 110 : \sqrt{0,020} = 780 \text{ sec} = 13 \text{ min.}$$

Hiermee is de tijdschaal in bijlage 16 bepaald.

Het nulpunt van de tijdschaal hebben we 1,5 min naar links geschoven, om rekening te houden met de tijd die nodig is voor het openen en sluiten der deuren.

De openingstijd van de deuren varieert, en hangt van verschillende factoren af. Wij menen dat het gewenst is de wetmatigheden hierin nog verder in studie te nemen dan tot nu toe geschied is, doch inmiddels hebben we getracht uit de ons ter beschikking staande gegevens een redelijke aanname voor de openingstijd in de Westsluis te doen.

Door Swine (Ref.3) zijn gedurende een maand openingstijden van de binnendeuren van de Westsluis waargenomen. Uit deze waarnemingen willen wij een representatieve openingstijd afleiden, zodanig dat de bij die tijd behorende waarde van λ de gemiddelde waarde van λ is.

Nu zullen we hierbij rekening moeten houden met het feit dat de openingstijd van de binnendeuren bij een schutting in het algemeen verschilt van de openingstijd van de buitendeuren. Dit betekent in de eerste plaats dat we in het algemeen geen gesloten schut-cyclus hebben, en in de tweede plaats dat φ_1 en φ_2 min of meer onafhankelijk van elkaar veranderen.

Het niet gesloten zijn van de schut-cyclus hebben we nader onderzocht door een vergelijking te maken tussert en eerste de gesloten cyclus met $\varphi_1 = \varphi_2 = 0,6$, ten tweede een periodieke opeenvolging van schut-cycli waarbij afwisselend $\varphi_1 = 0,4$ en $\varphi_2 = 0,8$ is en dan weer $\varphi_1 = 0,8$ en $\varphi_2 = 0,4$, en ten derde een periodieke opeenvolging van schut-cycli waarbij afwisselend $\varphi_1 = \varphi_2 = 0,4$, en dan weer $\varphi_1 = \varphi_2 = 0,8$ is.

Hierbij hebben we ter wille van de eenvoud $\alpha = 0$ gesteld.

In het eerste geval vonden we $\lambda = 0,429$, in het tweede geval vonden we een gemiddelde voor λ gelijk aan 0,446, en in het derde geval een gemiddelde λ van 0,445. Gezien de grote variatie in de elkaar op-eenvolgende schut-cycli zoals deze bij de gevallen twee en drie werd aangenomen, mag wel geconcludeerd worden dat de gesloten cyclus behoorlijk representatief is voor de gemiddelde invloed van een reeks van niet gesloten cycli.

Om de invloed van het min of meer onafhankelijk van elkaar zijn van φ_1 en φ_2 na te gaan, maken we gebruik van het feit dat λ voor niet te kleine waarden van φ_1 en φ_2 bij benadering evenredig met $\varphi_1 \varphi_2$ varieert.

Veronderstel nu eens, dat φ_1 en φ_2 gelijke frequentieverdelingen hebben, zodat zij hetzelfde gemiddelde,

$$\bar{\varphi}_1 = \bar{\varphi}_2 = \bar{\varphi}$$

hebben, en dezelfde standaard-deviatie,

$$(\varphi_1 - \bar{\varphi})^2 = (\varphi_2 - \bar{\varphi})^2 = (\varphi - \bar{\varphi})^2 = (\delta\varphi)^2.$$

Een overstreping geeft hier een gemiddelde aan.

We hebben nu:

$$\begin{aligned} \overline{\varphi_1 \varphi_2} &= \overline{[\bar{\varphi} + (\varphi_1 - \bar{\varphi})][\bar{\varphi} + (\varphi_2 - \bar{\varphi})]} \\ &= \overline{\bar{\varphi}^2 + \bar{\varphi}(\varphi_1 - \bar{\varphi}) + \bar{\varphi}(\varphi_2 - \bar{\varphi}) + (\varphi_1 - \bar{\varphi})(\varphi_2 - \bar{\varphi})} \\ &= \overline{\bar{\varphi}^2 + (\varphi_1 - \bar{\varphi})(\varphi_2 - \bar{\varphi})} \end{aligned}$$

Na invoeren van de correlatiecoëfficiënt tussen φ_1 en φ_2 ,

$$\tau = \frac{(\varphi_1 - \bar{\varphi})(\varphi_2 - \bar{\varphi})}{\sqrt{(\varphi_1 - \bar{\varphi})^2 (\varphi_2 - \bar{\varphi})^2}} = \frac{(\varphi_1 - \bar{\varphi})(\varphi_2 - \bar{\varphi})}{(\sigma^2 \varphi)^2}$$

kunnen we

$$\overline{\varphi_1 \varphi_2} = \bar{\varphi}^2 + \tau (\sigma^2 \varphi)^2$$

schrijven.

Zou er geen samenhang tussen de openingstijd van de buitendeuren en die van de binnendeuren zijn, dan zou er geen correlatie tussen φ_1 en φ_2 zijn, dus $\tau = 0$, en dan zou

$$\overline{\varphi_1 \varphi_2} = \bar{\varphi}^2$$

gelden.

Zouden daarentegen de twee openingstijden steeds gelijk zijn, dan zou er een volledige correlatie tussen φ_1 en φ_2 zijn, dus $\tau = 1$. Dan zou

$$\overline{\varphi_1 \varphi_2} = \bar{\varphi}^2 + (\sigma^2 \varphi)^2$$

gelden, en aangezien we

$$\begin{aligned} \overline{\varphi^2} &= \overline{[\bar{\varphi} + (\varphi - \bar{\varphi})]^2} \\ &= \overline{[\bar{\varphi}^2 + 2\bar{\varphi}(\varphi - \bar{\varphi}) + (\varphi - \bar{\varphi})^2]} \\ &= \bar{\varphi}^2 + (\sigma^2 \varphi)^2 \end{aligned}$$

hebben, kunnen we dus in dit geval tot

$$\overline{\varphi_1 \varphi_2} = \overline{\varphi^2}$$

besluiten.

We leiden uit deze uitkomsten af, dat we bij afwezigheid van correlatie tussen de twee openingstijden en dus tussen φ_1 en φ_2 eerst φ moeten middelen, en daarna met behulp van bijlage 15 λ uit φ moeten afleiden, doch dat we bij een volledige correlatie tussen de openingstijden en dus tussen φ_1 en φ_2 eerst λ uit φ moeten afleiden, en daarna λ moeten middelen. In het eerste geval moeten we de representatieve tijd met behulp van de dun getrokken kromme in bijlage 16 uit $\bar{\varphi}$ afleiden, en in het tweede geval met de dik getrokken kromme uit $\bar{\lambda}$.

We hebben de waarnemingen van Swine volgens bovenstaande richtlijnen bewerkt in tabel 4.

Tabel 4.			Openingstijden binnendeuren Westaluis 11 April tot 11 Mei 1951					
n	t min.	nt	t- \bar{t}	$\frac{(t-\bar{t})^2}{n}$	100 φ	n φ	100 λ	n λ
6	5	30	-21,5	28	13	1	5	
32	10	320	-16,5	87	31	10	17	6
31	15	465	-11,5	41	46	14	39	12
42	20	860	-6,5	18	59	25	41	17
33	25	825	-1,5	1	66	22	49	16
25	30	750	3,5	3	71	18	55	14
19	35	665	8,5	14	74	14	59	11
20	40	800	13,5	36	76	15	61	12
19	45	855	18,5	65	77	15	63	12
9	50	450	23,5	50	79	7	65	6
5	55	275	28,5	41	80	4	67	3
0	60		33,5		82		69	
1	65	65	38,5	15	83	1	71	1
1	70	70	43,5	19	84	1	73	1
243		6430		418		147		111
$\bar{t} = 26,5$			$\sigma_{\bar{t}} = 13,1$		$\bar{\varphi} = 0,605$		$\bar{\lambda} = 0,455$	
			$\sigma_{\bar{t}} = 0,8$		$t_{\bar{\varphi}} = 21$		$t_{\bar{\lambda}} = 22,5$	

De eerste en tweede kolom zijn ontleend aan Swine. We hebben deze gegevens zó opgevat, dat n in de eerste kolom het aantal keren aangeeft, dat de openingstijd de in de tweede kolom aangeduide waarde heeft gehad, of minder dan 2,5 min. daarvan heeft afgeweken. De bij deze tijden behorende waarden van φ en λ zijn afgeleid met bijlage 16, en in de zesde en achtste kolom aangegeven. De gemiddelden $\bar{\varphi}$ en $\bar{\lambda}$ zijn door middel van de zevende en negende kolom bepaald. Hierna zijn de daarbij behorende openingstijden met behulp van bijlage 16 teruggezocht.

In-geval de openingstijd der buitendeuren onafhankelijk van die der binnendeuren zou zijn, zou de representatieve openingstijd op 21 min gesteld kunnen worden; dit komt overeen met wat Swine vindt. Zou steeds de openingstijd der buitendeuren gelijk zijn aan die der binnendeuren, dan zou de representatieve tijd 22,5 min zijn.

Vermoedelijk zal de waarheid wel tussen deze twee gevallen in liggen, doch we weten niet waar. Dit betekent dus een onzekerheid in de representatieve openingstijd.

Er zijn echter meer onzekerheden in die tijd. Zo is er de beperktheid van het materiaal van Swine. We hebben met behulp van de vijfde kolom in tabel 3 de standaarddeviatie van de tijd \bar{t} bepaald. Door deze te delen door $\sqrt{243}$ vinden we de standaard-onzekerheid in het gemiddelde van \bar{t} . Dit blijkt ongeveer 1 min te zijn. Ook in de uit $\bar{\varphi}$ en $\bar{\lambda}$ bepaalde representatieve tijden zal een dergelijke onzekerheid schuilen.

Verder is het de vraag in hoeverre de waarnemingen van Swine in één maand representatief zijn voor

het gehele jaar, of voor de maanden die voor het zoutbezwaar het ongunstigste zijn.

Het is in verband met deze twee onzekerheden opmerkelijk dat Boswinkel in bijlage 2 van zijn nota (Ref.1) een representatieve tijd van ongeveer 16 min aangeeft, die op overeenkomstige wijze geïnterpreteerd moet worden als de tijd van 21 min die we hierboven vonden.

Tenslotte is het de vraag of de waarnemingen aan de binnendeuren ook representatief zijn voor de openingstijden der buitendeuren.

We hebben, na het bovenstaande overwogen te hebben, de vermoedelijke representatieve openingstijd op 20 min gesteld, met een standaard-onzekerheid van 2 à 3 min. Dit houdt in, dat we er vrij zeker van menen te kunnen zijn dat de representatieve openingstijd van de Westsluis groter is dan 15 min, en kleiner dan 25 min.

Uit bijlage 16 zien we dat de vermoedelijke zoutbezwaarcoëfficiënt bij $t = 20$ min, de waarde 0,43 heeft, met een onzekerheidsmarge van ongeveer 0,11. Een verdere onzekerheid in λ vloeit voort uit de onzekerheid in t . Bij een variatie van t tussen 15 min en 25 min, varieert de vermoedelijke waarde van λ tussen ongeveer 0,37 en 0,51; we kunnen de onzekerheid in λ als gevolg van de onzekerheid in t dus ook op 0,10 stellen.

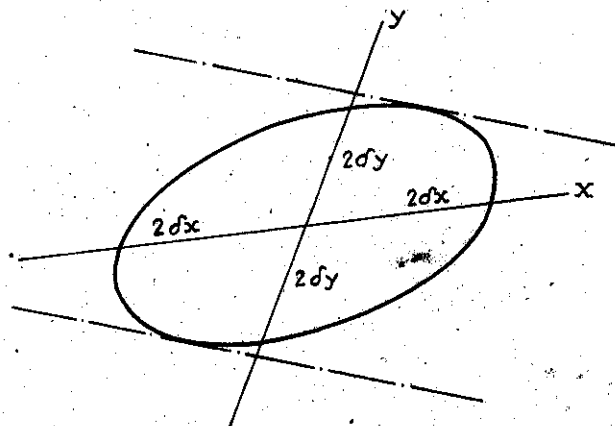
Er is geen aanleiding toe een correlatie tussen de twee onzekerheden aan te nemen, en de resulterende onzekerheid is dus $\sqrt{0,11^2 + 0,10^2} = 0,15$.

We kunnen de onzekerheidsmarge in λ ook vinden door tussen de twee grenskrommen (de streep-streep-lijnen in bijlage 16) en tussen de grenswaarden van t , 15 min en 25 min, een eivormige kromme in te passen, als benadering voor de twee-standaard-onzekerheids-ellips.

Om een indruk te krijgen van de betekenis van deze eivormige kromme, vergeleken we haar met de twee-standaard-onzekerheids-ellips in het geval van een tweedimensionale normale verdeling, dus een verdeling waarvan

$$\frac{1}{2\pi} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x}{\sigma_x}\right)^2 - \frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2} dx dy$$

de frequentie in het gebied $dx dy$ is (zie fig.15).



FIGUUR 15.

De totale frequentie van het gebied tussen twee evenwijdige raaklijnen aan de twee-standaard-onzekerheids-ellips zoals de twee streep-stip-lijnen in fig.15, is ongeveer 95%. De totale frequentie van het gebied binnen de ellips zelf is ongeveer 87%.

We kunnen dus met een tamelijk grote mate van waarschijnlijkheid aannemen dat de waarde van λ tussen de beide door de streep-stip-lijnen in bijlage 16 aangegeven waarden, te weten 0,28 en 0,58; ligt.

Om uit de gevonden waarde van λ het gemiddelde zoutbezwaar per schut-cyclus te bepalen, moet deze coëfficiënt vermenigvuldigd worden met het gemiddelde volumen dat zich bij het openen der buitendeuren met zout water kan vullen, en met het verschil in zout- of chloorgehalte tussen buitenhaven en kanaal.

Het gemiddelde volumen dat zich met zout water kan vullen is het volumen V_t van de kolk bij gemiddeld buitenpeil, verminderd met het gemiddelde volumen der opgeschutte schepen per schutting.

Volgens Boswinkel (Ref.1) moet het gemiddelde volumen der schepen per schutting (V_w) op ongeveer 3000 m³ gesteld worden. Het gereduceerde volumen is dus (zie ook bijlage 24)

$$V_t' = V_t - V_w = 36000 - 3000 = 33000 \text{ m}^3.$$

Wil men het zoutbezwaar berekenen door λ met het ongereduceerde volumen V_t te vermenigvuldigen, dan moeten de gevonden waarden van λ ongeveer in de verhouding 11/12, dus met enige procenten, verminderd worden.

Bij het bepalen van het verschil in chloorgehalte tussen buitenhaven en kanaal waarmee λ vermenigvuldigd moet worden, moeten, in overeenstemming met de gevolgde afleiding van λ , de oppervlakkige lagen in de buitenhaven en de diepere lagen in het kanaal buiten beschouwing worden gelaten. We moeten dus het hiervoor afgeleide verschil in chloorgehalte van 14,5 kg/m³ nemen.

7,2 De zoutbezwaar-coëfficiënt van de Zeevaartsluis.

We gaan nu het zoutbezwaar van de Zeevaartsluis beschouwen, en wel in het bijzonder wanneer met de gehele kolk zal worden geschut.

In par.6,2 namen we voor het bijvullen en aflaten $\gamma = 0,5$ en $\theta = 0,25$ aan.

Het verschil in hoogte tussen de bodems van de sluis- hoofden en de bodem van de kolk zal bij de Zeevaartsluis relatief niet groter zijn dan bij de Westsluis, en we laten dus ook bij de Zeevaartsluis het zak-effect buiten beschouwing ($\beta = 0$).

Uit bijlage 24 volgt voor de coëfficiënt van het schutwater:

$$\alpha = \frac{148000 - 126000}{126000} = 0,175.$$

Evenals bij de Westsluis, vervangen we φ_1 en φ_2 door een middelwaarde φ .

Het verband tussen λ en φ wordt nu volgens formule (12) uit onze vorige nota (Ref.4) na enige omwerking

$$\lambda = 1,12 \frac{(\varphi - 0,175)(\varphi + 0,05)}{1 - 0,89(1 - \varphi)^2}.$$

Dit is grafisch uitgezet in bijlage 17.

Om over te gaan van de tijdmaat T_0 op de tijdmaat T_m , hebben we weer η en η' bepaald. Volgens formule (11) van onze vorige nota is

$$\eta = \frac{0,89(1-\varphi)(\varphi + 0,09) - 0,04}{1 - 0,89(1-\varphi)^2}$$

Verder volgt uit de beschouwingen van die nota (p.13):

$$\eta' = 0,85[\varphi + 0,09 + (1-\varphi)\eta]$$

De functies $\sqrt{1-\eta}$ en $\sqrt{\eta'}$ zijn in bijlage 17 grafisch uitgezet tegen φ , en een gemiddelde der twee functies is bepaald. Hiermee is de abscis $t:T_0$ van bijlage 13 omgerekend tot de abscis $t:T_m$ van bijlage 18, en de functie φ hiertegen uitgezet.

Uit φ volgt met behulp van bijlage 17 λ als functie van $t:T_m$ in bijlage 18. Hierbij zijn ook weer grenskrommen aangegeven.

Enige reden om het werkzame dichtheidsverschil voor de zeevaartsluis iets lager te stellen dan voor de Westsluis is daarin gelegen dat met de Zeevaartsluis gedurende het gehele getij zal worden geschut terwijl met de Westsluis alleen omstreeks hoogwater geschut wordt, en het zoutgehalte van de Schelde voor Terneuzen bij laagwater doorgaans lager is dan bij hoogwater.

Daar staat echter tegenover dat de buitenhaven bij de Zeevaartsluis ruimer zal zijn en dus wellicht gemakkelijker het zoute water uit de Schelde op zal nemen dan de tegenwoordige buitenhaven. Bovendien zal met zouter water gespuid worden, waarvan een minder verzotende invloed zal uitgaan dan tegenwoordig.

We menen daarom het dichtheidsverschil voor de Zeevaartsluis ook wel op ongeveer 20 kg/m³ te kunnen stellen.

Uit bijlage 24 blijkt, dat de tijffactor van de Zeevaartsluis bij openen der buitendeuren 115 sec, en bij openen der binnendeuren 125 sec. is. Gemiddeld dus 120 sec.

Voor de tijdmaat van de Zeevaartsluis vinden we nu

$$T_m = 120 : \sqrt{0,020} = 850 \text{ sec} = 14,2 \text{ min.}$$

Hiermee is de tijdschaal in bijlage 18 bepaald, waarbij weer 1,5 min voor het openen en sluiten der deuren in rekening is gebracht.

De representatieve openingstijd van de Zeevaartsluis is momenteel nog meer in het ongewisse dan de openingstijd van de Westsluis.

Het is misschien door een systematische analyse van het schutbedrijf mogelijk nadere instructies vast te stellen waardoor de openingstijden der Zeevaartsluis nog iets meer beperkt zouden worden dan nu al reeds bij de Westsluis het geval is. Hoeveel dit zou schelen, is moeilijk nu reeds te voorzien.

Daar staat evenwel tegenover dat bij de Zeevaartsluis vaak met een der deelen zal worden geschut, en dat dus de grote kolk vooral gebruikt zal worden voor schutten van meer dan een schip, of wanneer er een zeer groot schip geschut moet worden, dus juist in die gevallen

dat de openingstijd der deuren vrij groot zal zijn. Het is bij de huidige kennis ook weer niet goed mogelijk dit te voorzien.

Bovendien zal de Zeevaartsluis uitsluitend dienen voor het schutten van zeeschepen, in tegenstelling tot de Westsluis, waar ook de binnenvaart gebruik van maakt. De invloed hiervan op het schutbedrijf moeten wij hier ook in het midden laten.

Zonder dus te willen beweren dat de Zeevaartsluis eenzelfde representatieve openingstijd zal hebben als de Westsluis, kunnen we, alleen om een partiële vergelijking te maken, eens voor een ogenblik aannemen dat de Zeevaartsluis ook een representatieve openingstijd van 15 à 25 min zou hebben. In dat geval zouden we de dun gestippelde eivormige onzekerheids-kromme van bijlage 18 krijgen, en dan zou de representatieve waarde van λ voor de Zeevaartsluis dus vermoedelijk tussen 0,21 en 0,56 liggen.

Hierbij zou dan weer enige reductie kunnen worden toegepast voor de invloed van de scheepvaart.

Bij het verschil in chloorgehalte voor de berekening van het zoutbezwaar zou men weer moeten nemen het verschil tussen de buitenhaven zonder de oppervlakkige lagen mee te rekenen, en het kanaal, zonder de diepere lagen mee te rekenen. Dit zou dus weer ongeveer het verschil in chloorgehalte van 14,5 kg/m³ zijn.

7,3 Invloed van herhaald openen der deuren.

Ten aanzien van het openstaan der deuren kunnen verschillende gevallen onderscheiden worden. Beschouw bij voorbeeld het geval dat de laatste schutting die plaats vond, een opschutting was. Na het uitvoeren der geschutte schepen zijn dan de volgende gevallen denkbaar:

1. Er zijn afvarende of opvarende schepen aangekomen of in aantocht nabij. Dit is nog nader te onderscheiden als volgt:
 - 1a. Er zijn afvarende schepen aangekomen of in aantocht nabij. De binnendeuren blijven dan na het uitvoeren der opvarende schepen open om de afvarende schepen in te laten varen. Daarna wordt de schut-cyclus vervolgd met aflaten van de kolk;
 - 1b. Er zijn opvarende schepen aangekomen of in aantocht nabij, en er zijn geen afvarende schepen in de nabijheid. Dan worden de binnendeuren na het uitvoeren terstond gesloten, en wordt de schut-cyclus vervolgd met aflaten van de kolk, waarna de tweede opschutting volgt.
2. Er zijn noch afvarende, noch nieuwe opvarende schepen in de nabijheid. De binnendeuren worden dan, om het zoutbezwaar te beperken, terstond na het uitvoeren gesloten, en de kolk blijft, in afwachting van de eerstkomende schepen, op hoog peil. Er zijn dan nog twee gevallen nader te onderscheiden:
 - 2a. Na enige tijd komen afvarende schepen aan. De binnendeuren worden dan opnieuw geopend om de nieuw aangekomen schepen op te nemen, en daarna weer gesloten. Eerst hierna wordt de schut-cyclus vervolgd met aflaten van de kolk.

2b. Na enige tijd komen opvarende schepen aan. De schut-cyclus wordt dan onmiddellijk vervolgd met aflaten van de kolk, waarna de tweede opschutting volgt.

Na een afschutting kunnen we op overeenkomstige wijze vier gevallen onderscheiden.

Wat het openstaan der deuren tussen bijvullen en aflaten van de kolk betreft, zijn er dus vier mogelijkheden:

- A. De deuren staan eenmaal open voor het uitvaren.
- B. De deuren staan eenmaal open voor het invaren.
- C. De deuren staan eenmaal open voor het uitvaren en direct daarop volgende invaren.
- D. De deuren staan tweemaal open, eerst voor het uitvaren, later nog eens voor het invaren.

De eerste drie mogelijkheden onderscheiden zich, afgezien van de invloed van de scheepvaart op het uitwisselingsproces, alleen in de duur van de uitwisseling. Bij de laatste mogelijkheid evenwel wordt het uitwisselingsproces tot stilstand gebracht, waarna de kolk tot rust komt, en later wordt het uitwisselingsproces opnieuw op gang gebracht. We zullen nagaan hoeveel verschil dit geeft ten opzichte van een enkele uitwisseling die even lang geduurd zou hebben als de twee uitwisselingen samen.

Laat ε het drijvende relatieve dichtheidsverschil bij de eerste opening zijn, en T_0 de daaruit volgende tijdmaat:

$$T_0 = \frac{t_m}{\sqrt{\varepsilon}}$$

Laat verder t_1 de eerste uitwisselingstijd zijn. Dan is, als ϕ de functie, b.v. van bijlage 12 voorstelt,

$$\varphi_1 = \phi\left(\frac{t_1}{T_0}\right)$$

de uitwisseling na de eerste opening.

Bij de aanvang van de tweede opening is het relatieve dichtheidsverschil slechts

$$\varepsilon' = (1 - \varphi_1) \varepsilon,$$

en de tijdmaat van de tweede uitwisseling is dus

$$T_0' = \frac{t_m}{\sqrt{\varepsilon'}} = \frac{T_0}{\sqrt{1 - \varphi_1}},$$

dus groter dan bij de eerste uitwisseling. Het tweede uitwisselingsproces verloopt dus langzamer dan het eerste. Na een tweede uitwisselingstijd t_2 , is de uitwisseling t.o.v. de oorspronkelijke zoutinhoud,

$$\varphi_2 = 1 - (1 - \varphi_1) \phi\left(\frac{t_2}{T_0'}\right).$$

In bijlage 19 hebben we, uitgaande van de dunne lijn in bijlage 12 voor de functie $\phi, \frac{1}{2}$ uitgezet tegen $(\tau_1 + \tau_2) : \tau_0$. We hebben dit gedaan voor het geval $\tau_1 : \tau_0 = 0,5$ (dunne streep-stip-lijn) en voor het geval $\tau_1 : \tau_0 = 1,0$ (dunne streep-stip-stip-stip-lijn). De dikke lijn in bijlage 19 is de dunne lijn uit bijlage 12.

We zien uit bijlage 19 dat de uiteindelijke uitwisseling na een korte tweede openingstijd kleiner is dan het geval zou zijn geweest bij een ononderbroken uitwisseling van in totaal dezelfde duur. Bij een lange tweede openingstijd evenwel, geeft het tweemaal openen een grotere uitwisseling dan een in totaal even lang enkelvoudig openen.

De verschillen tussen de onderbroken en de niet onderbroken uitwisseling vallen binnen de onzekerheidsmarge van het gevonden uitwisselings-diagram, zoals uit bijlage 19 blijkt door vergelijking van de dunne lijnen met de streep-streep-lijnen.

We zien hieruit dat er weliswaar verschil is tussen een herhaalde opening en een in totaal even lange doorlopende opening, doch dat het eerst zin zal hebben hierop nader in te gaan, wanneer onze kennis van het uitwisselingsproces nauwkeuriger zal zijn dan nu het geval is.

8 Slotbeschouwingen

8,1 Nadere beschouwingen van de waarnemingen

Bij de bewerking van de waarnemingen zijn we uitgegaan van de veronderstelling, dat elke verrichte waarneming betrouwbaar is binnen een zekere marge van vermoedelijke nauwkeurigheid. We dienen echter de vraag onder het oog te zien, of elke verrichte waarneming dit vertrouwen verdient.

Voor de beantwoording van deze vraag staan in principe twee wegen open. In de eerste plaats kan men het tot stand komen van iedere waarneming kritisch analyseren, en daaruit de betrouwbaarheid afleiden. Dit veronderstelt evenwel een gedetailleerde kennis van de feitelijke toedracht van de zaak, die wij in dit geval niet bezitten; bovendien menen wij ons op het standpunt te mogen stellen dat de verrichte waarnemingen reeds zo goed mogelijk van dit gezichtspunt uit gezien zijn door degenen die de leiding bij het waarnemen hadden.

In de tweede plaats kan iedere waarneming gezien worden in verband met het geheel van beschikbare waarnemingen, gebruik makende van de uit de bewerking gebleken samenhang. De betrouwbaarheid kan dus worden afgeleid uit de mate waarin de beschouwde waarneming zich in het geheel voegt, met in acht nemen van de redelijk te verwachten nauwkeurigheid.

Wij hebben op de laatstgenoemde wijze de betrouwbaarheid der waarnemingen getoetst, door de mate waarin de punten in de bijlagen 7, 8, 10 en 11 afwijken van de regressielijnen, te vergelijken met de vermoedelijke onzekerheid in die punten. We gaan dus bij ieder punt uit van een -standaard- onzekerheidsellips bepaald door het in de figuur gegeven kruis, bepalen de richting die t.o.v. de ellips toegevoegd is aan de richting van de regressielijn, en meten in deze toegevoegde richting de afstand van de regressielijn, en de afstand van de omtrek van de ellips, beide tot het middelpunt van de ellips. De verhouding tussen deze twee afstanden is de afwijking van het punt uitgedrukt in de standaard-deviatie.

Teneinde de significantie bij onze betrouwbaarheidstest nader te bepalen, kunnen we overwegen, dat bij een normale verdeling de kans op een twee-standaard-afwijking 5%, en de kans op een drie-standaard-afwijking 0,3% is, maar dat dat bij niet normale verdelingen veel groter kan worden en wel, volgens Tchebycheff's ongelijkheid (zie Hoel, ref. 11, p.172-173), tot 25%, resp. 11% kan bedragen. Nemen we bovendien in aanmerking dat de aangegeven standaard-onzekerheden der punten gedeeltelijk op schattingen berusten, dan is het duidelijk dat afwijkingen kleiner dan driemaal de standaard-deviatie, nog in het geheel niet overtuigend op onbetrouwbaarheid wijzen. We zullen daarom al vast de punten met afwijkingen van minder dan drie maal de standaard-deviatie voor onze betrouwbaarheidstest buiten beschouwing laten. Alleen in de bijlagen 8 en 10 komen punten met grotere afwijkingen voor, en deze zullen we nader op hun betrouwbaarheid onderzoeken.

In de bijlage 8 komen vijf punten voor, te weten de punten 303, 142, 222, 281 en 282, welke afwijking meer dan drie maal de standaard-deviatie bedraagt, doch van geen hunner is de afwijking meer dan vier maal de standaard-deviatie. De mate van uit de toonvallen is dus nog niet groot. Bovendien geeft het laten vallen van deze punten geen belangrijke wijziging in de ligging van de regressielijn, zodat het er weinig toe doet of we de punten wel of niet als betrouwbaar beschouwen.

In de bijlage 10 komen eveneens vijf punten met afwijkingen van meer dan drie maal de standaard-deviatie voor, te weten de punten 33, 23, 13, 11 en 15, met respectievelijk 6, 5, 6, 10 en 6 maal de

standaard-deviatie. Vooral de betrouwbaarheid van de punten 13, 11 en 15 komt sterk in het licht der twijfel te staan, te meer omdat deze punten alle drie van dezelfde dag (16 April) zijn, en in dezelfde zin afwijken. Zouden we deze drie punten laten vervallen, dan komt de regressielijn zoveel hoger te liggen, dat de twee andere twijfelachtige punten, 33 en 23, niet langer uit de toon vallen. Bij laten vervallen van de punten 33 en 23 daarentegen, blijven de punten 13, 11 en 15 uit de toon vallen. Beschouwen we ook de andere punten van 16 April, in de bijlagen 7, 8 en 11, dan blijken daaruit geen opvallende systematische afwijkingen. We komen dus tot het vermoeden, dat de zoutwaarnemingen in de buitenhaven op 16 April systematisch fout zouden zijn geweest, of dat er een andere oorzaak voor een systematische afwijking juist van deze waarnemingen zou zijn geweest.

We hebben deze kwestie voorgelegd aan Ir Boswinkel, die ons ten eerste mededeelde, dat noch in het weer, noch in de scheepvaart een oorzaak van systematische afwijkingen te zien is geweest, en ten tweede dat de betrouwbaarheid der dubieuze waarnemingen in tegenstelling tot die van andere waarnemingen niet door vergelijking van instrumenten gecontroleerd is. Dit laat dus ruimte voor de veronderstelling dat de zoutwaarnemingen op 16 April in de buitenhaven fout zijn geweest.

Al zou het naar onze mening te ver gaan de dubieuze waarnemingen met stelligheid als fout te kwalificeren, het komt ons voor, dat er ^{wa} alle reden is deze waarnemingen als minder betrouwbaar dan de andere te beschouwen.

Laten we de zoutwaarnemingen in de buitenhaven op 16 April vervallen, dan vervallen tevens de punten in het afvoerdiagram (bijlage 7) van de uitwisselingen kolk-buitenhaven op 16 April. De bijlagen 7 en 10 zijn daarom herzien in de bijlagen 20 en 21. In de bijlagen 22 en 23 zijn de herziene uitkomsten voor de uitwisseling kolk-buitenhaven vergeleken met de eerste uitkomsten, en met de uitkomsten voor de uitwisseling kolk-kanaal.

De hier ondernomen herziening vindt achteraf ook nog steun in het verdwijnen van een anomalie. Bij de eerste bewerking lag namelijk de regressielijn voor de afvoer kolk-kanaal beneden die voor de afvoer kolk-buitenhaven, doch de regressielijn voor de uitwisseling lag gedeeltelijk hoger. Na de herziening ligt zowel de regressielijn voor de afvoer als die voor de uitwisseling kolk-kanaal boven de overeenkomstige regressielijn voor het geval kolk-buitenhaven.

De herziening resulteert in hogere gemiddelden voor de uitwisseling, doch tevens in een wat kleinere onzekerheidsmarge. Het gevolg hiervan is, dat de bovengrens voor de uitwisseling weinig verandert, doch de ondergrens enkele procenten hoger komt te liggen.

8,2 Interpretatie van de uitkomsten

Uit de afvoer- diagrammen 20 en 8 blijkt, dat de afvoer belangrijk lager blijft dan de waarde die de afvoer volgens de theorie zou hebben bij afwezigheid van wrijving en menging. Het ligt voor de hand deze vermindering op rekening van wrijving en menging te stellen.

Verder blijkt dat de afvoer in verloop van tijd afneemt. Men krijgt enigszins de indruk dat reeds vrijwel terstond na het begin van de uitwisseling, een geleidelijke afname van de afvoer inzet. Toch kan niet met stelligheid tot zulk een verloop van de afvoer geconcludeerd worden, omdat de waarnemingen zich, gezien de nauwkeurigheid, ook wel verenigen laten met de aanname van een periode van ongeveer constante afvoer, gevolgd door een periode van geleidelijk afnemende afvoer.

Het verloop van de uitwisselingscoëfficiënt is iets nauwkeuriger aan te geven. De uitwisseling neemt aanvankelijk volgens een rechte of zwak gebogen lijn, vrij snel toe. Na verloop van een periode, ten

naasten bij gelijk aan de theoretische uitwisselingstijd, gaat de uitwisseling vrij plotseling in een zwakker tempo over.

Met enige waarschijnlijkheid mag verder geconcludeerd worden tot een relatief sterkere uitwisseling door de buitendeuren dan door de binnendeuren. Dit zou zowel verklaard kunnen worden (zie par. 3, 4 en tabel 3) doordat de kolkinhoud, beschouwd in verband met de afmetingen van het sluishoofd, bij de uitwisseling met de buitenhaven kleiner is dan bij de uitwisseling met het kanaal (zie de verhouding $l_m : h$ in tabel 3), alsook doordat de zijdelingse wandwrijving door de lagere waterstanden relatief minder invloed heeft bij de uitwisseling naar buiten dan bij de uitwisseling naar binnen (zie de verhouding $R : h$ in tabel 3).

Resumerende komen wij dus tot de conclusie, dat de verrichte waarnemingen, niettegenstaande hun uitvoerigheid, toch nog geen volledig duidelijk beeld van het verloop van het uitwisselingsverschijnsel geven, en dat verdere waarnemingen dus gewenst zijn.

Ook is de nauwkeurigheid waarmee de coëfficiënt van het zoutbezwaar uit de metingen kan worden afgeleid, nog betrekkelijk gering. Ook dit kan alleen door meer gedetailleerde waarnemingen verbeterd worden.

Ten aanzien van de theorie zijn we op grond van de waarnemingen tot de slotsom gekomen, dat een toereikende theoretische behandeling alleen mogelijk zal zijn wanneer met weerstand en menging rekening wordt gehouden. Deze factoren zijn bij de huidige stand van het onderzoek nog onvoldoende bekend, en verdere studie op dit punt is dus gewenst.

Referenties

1. Boswinkel, E.K.F., Rapport betreffende de metingen van April 1951 in verband met de verzouting van het kanaal van Terneuzen (rapport van 20-11-1950).
2. Wemelsfelder, P.J., onderzoek naar het zoutuitwisselingsproces in de zeesluizen te Terneuzen door middel van stroomsnelheidsmetingen (Rapport van 10-10-1951; Supplement rapport van 3-3-1952).
3. Swine, J. Interpretatie der waarnemingen van April 1951 aan de Westsluis te Terneuzen. Uitwisseling aan het binnenhoofd. (ontwerp-nota, 11-1-1952)
4. Schönfeld, J.C., Zoutbezwaar van een zeesluis (Nota van Januari 1952)
5. Mazure, J.P., De invloed van schuttingen op de verzouting van het binnenwater (De Ingenieur, 1934, no. 23)
6. O'Brien and Chernov, Model law for motion of salt water through fresh (Proc. Am. Soc. Civ. Eng., 1932)
7. Notenboom, W., Ontziltten van binnenwater (Rapport van December 1950)
8. Swine, J., Nieuwe zeesluis te Terneuzen. Verruimen en verdiepen van het kanaal (Nota V)
9. Schönfeld, J.C., De Turbulentie in de zout- en zoutwaterbeweging (Voordracht voor het turbulentiocolloquium, Delft, 1950)
10. Schijf, J.B. Nota betreffende de zouthuishouding op het verruimde kanaal van Terneuzen.
11. Hoel, P.G., Introduction to mathematical Statistics, 1946.

Samenvatting

Na een inleiding over het doel van deze nota, wordt een overzicht gegeven van de verrichte waarnemingen van zoutgehalten en uitwisselingssnelheden bij het openstaan van de binnen- of buitendeuren. (par. 1 en 2)

Een beknopte theoretische beschouwing van het uitwisselen van zout en zoet water wordt gegeven, aanvangende met een beschrijving van het verschijnsel. Hierna wordt de elementaire theorie besproken, waarbij de wrijving, en de menging van zout en zoet water, buiten beschouwing worden gelaten; twee bijzondere gevallen worden nader behandeld. Door middel van een dimensieloze analyse, waarbij wrijving en menging wel in aanmerking genomen worden, wordt aangegeven hoe de waarnemingen in twee diagrammen verwerkt kunnen worden, met een minimum aan theoretische vooronderstellingen. De invloed van de vorm van de sluis wordt nagegaan (par. 3)

Met behulp van het eerste dimensieloze diagram worden de metingen van de uitwisselings-snelheden verwerkt. De nauwkeurigheid van de resultaten wordt geanalyseerd (par. 4)

Met behulp van het tweede dimensieloze diagram worden de gemeten zoutgehalten verwerkt. Ook van de uitkomsten hiervan wordt de nauwkeurigheid geanalyseerd. De gemeten zoutgehalten worden in verband gebracht met de gemeten snelheden. Een prognose van de uitwisseling in de in studie zijnde nieuwe Zeevaartsluis wordt gemaakt (par. 5)

Het zoutgehalte van het water waarmee de Westsluis wordt bijgevuld of afgelaten, wordt uit de waarnemingen afgeleid. Een prognose voor de zeevaartsluis wordt gemaakt (par. 6)

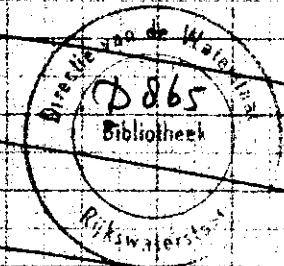
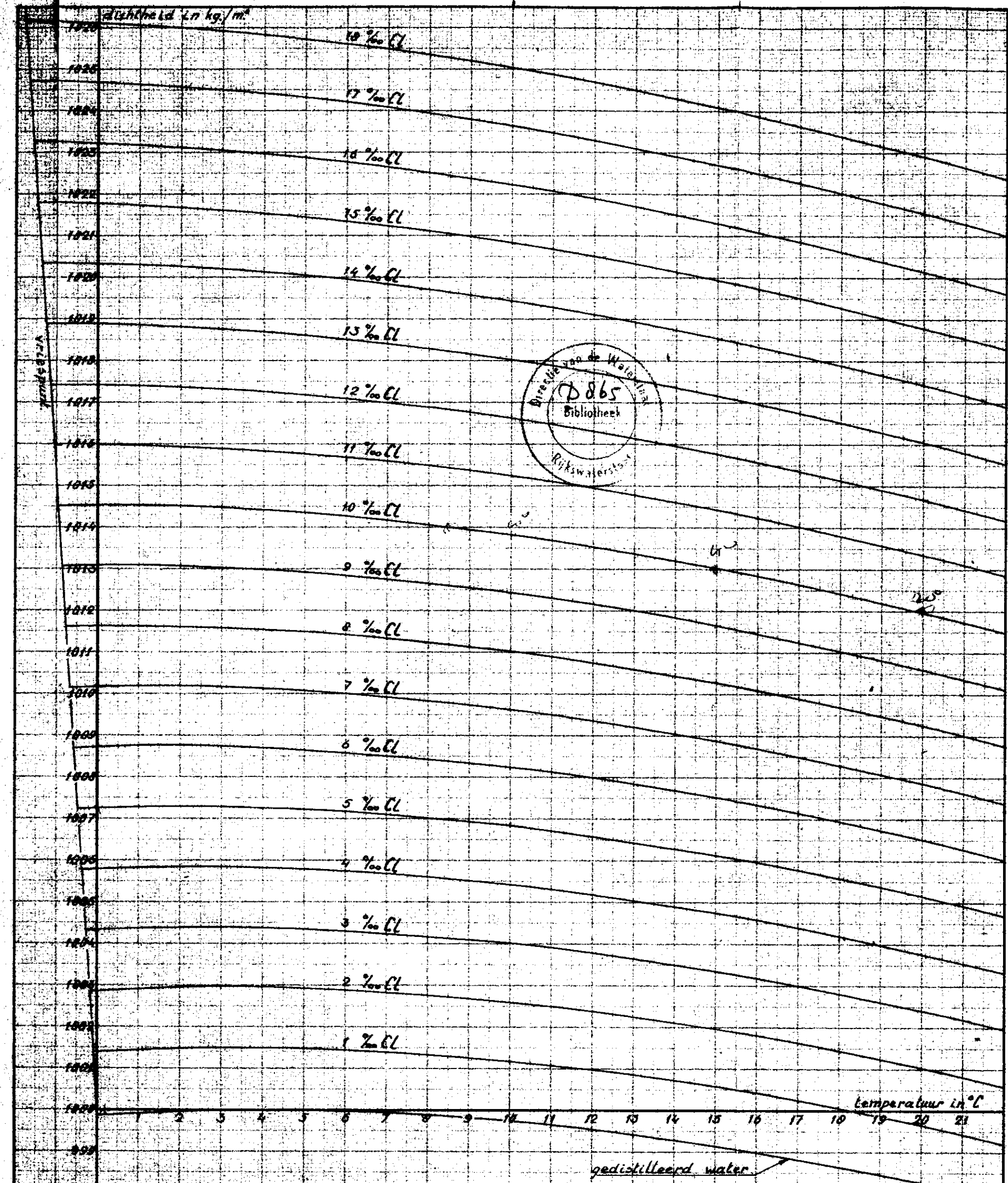
Uit de gevonden waarden van de uitwisseling en die van het bijvullen en aflatens, wordt de coëfficiënt van het zoutbezwaar door de Westsluis bepaald, als functie van de openingstijd van de deuren. Door middel van enkele gegevens over deze openingstijd, wordt een schatting van het zoutbezwaar gemaakt.

De coëfficiënt hiervan heeft vermoedelijk een waarde van omstreeks 43% met een onzekerheidsmarge van $\pm 15\%$ (dus 28 à 58%); hierbij is geen aftrek voor het volumen der geschutte schepen toegepast. Voor de Zeevaartsluis wordt eveneens de coëfficiënt van het zoutbezwaar als functie van de openingstijd afgeleid. Zou de Zeevaartsluis dezelfde openingstijden hebben als de Westsluis (hetgeen nog geenszins zeker is), dan zou de coëfficiënt voor deze sluis vermoedelijk tussen 21 en 56% liggen. De invloed van herhaald openstaan van de deuren wordt afzonderlijk nagegaan en blijkt gering te zijn. (par. 7)

Aan de hand van de verkregen uitkomsten, wordt de betrouwbaarheid van de waarnemingen nader besproken. Ten slotte wordt een samenvattende interpretatie van de uitkomsten gegeven, waarbij op de wenselijkheid van verder onderzoek, empirisch en theoretisch, gewezen wordt. (par. 8)

BIJLAGE 1

Dichtheid van zeewater als functie van chloriniteit en temperatuur



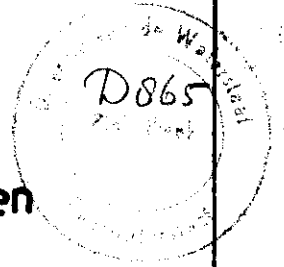
$\rho = 1 + 1.4 \cdot C$
 $\rho_{15} = \dots - 1$
 $\rho_{20} = \dots - 2$

gedistilleerd water

BIJLAGE 2

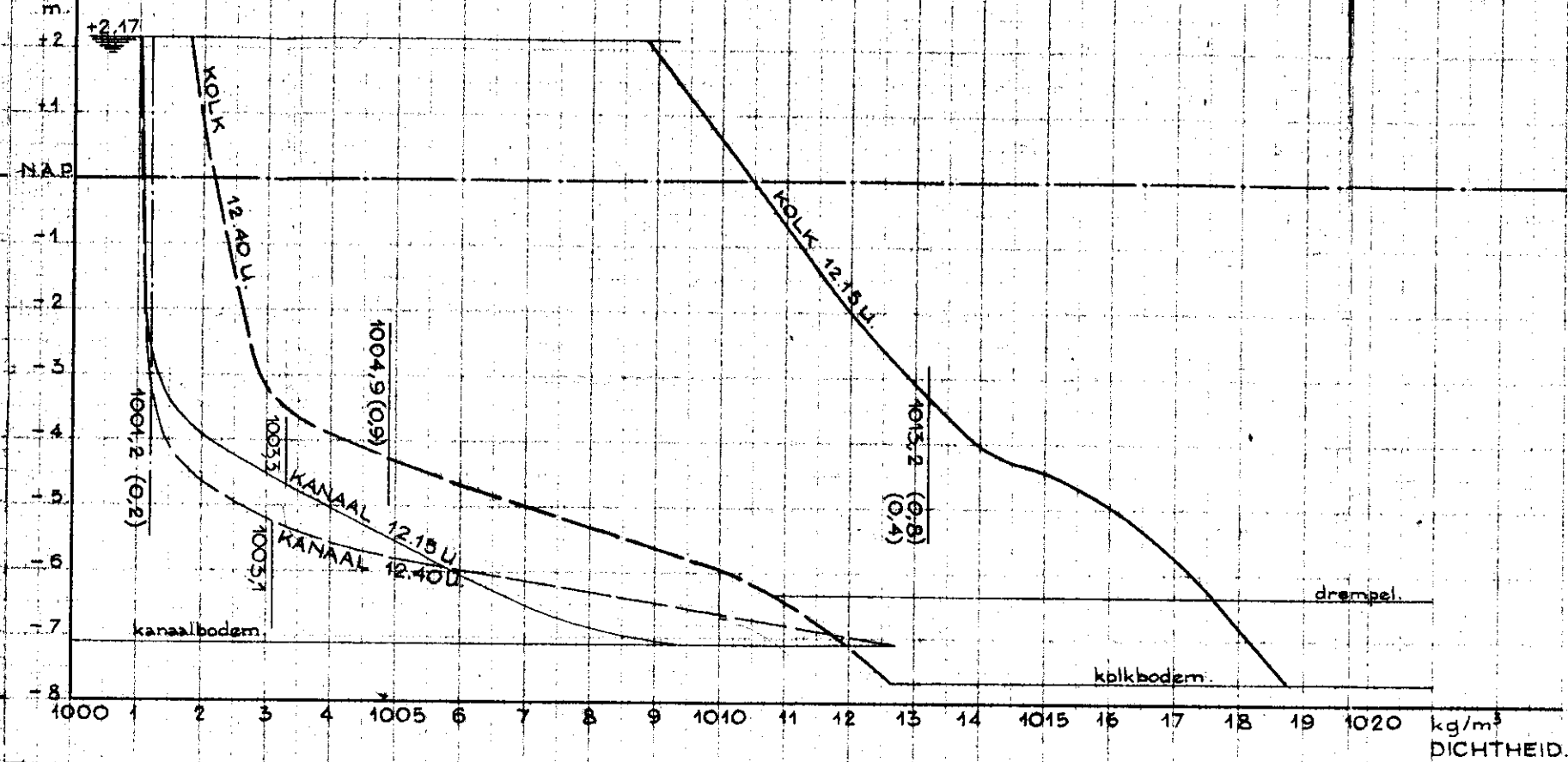
Dichtheidsverticalen

16 April 1951



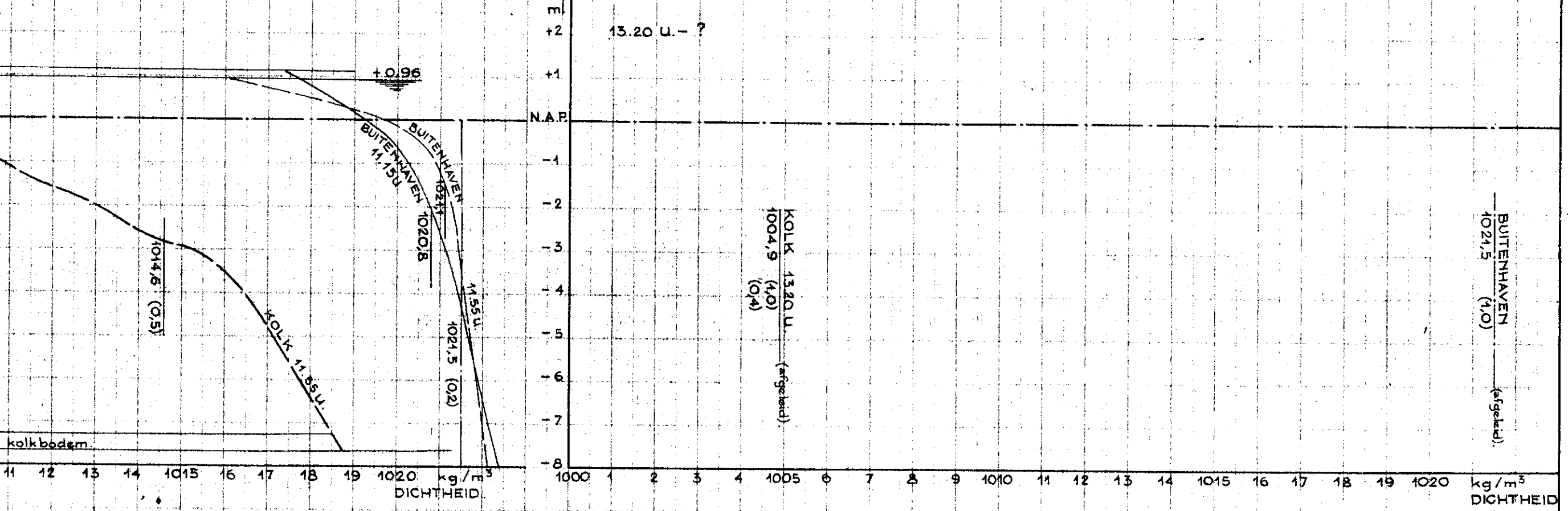
16

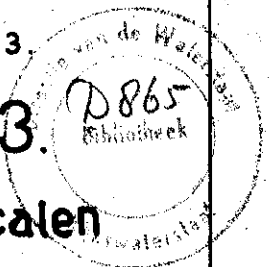
12.15 - 12.40 U. (25 MIN.)



17

13.20 U. - ?



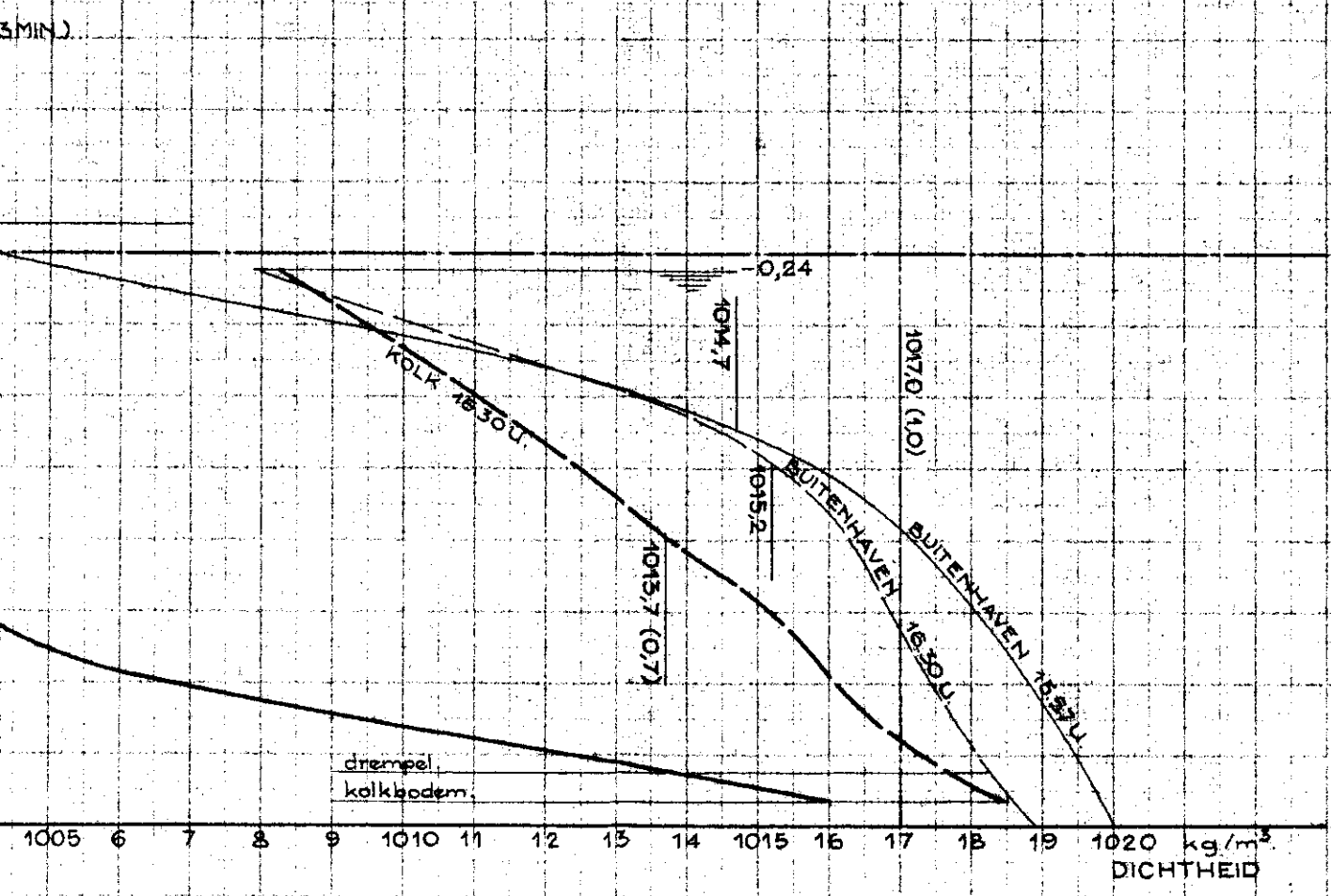
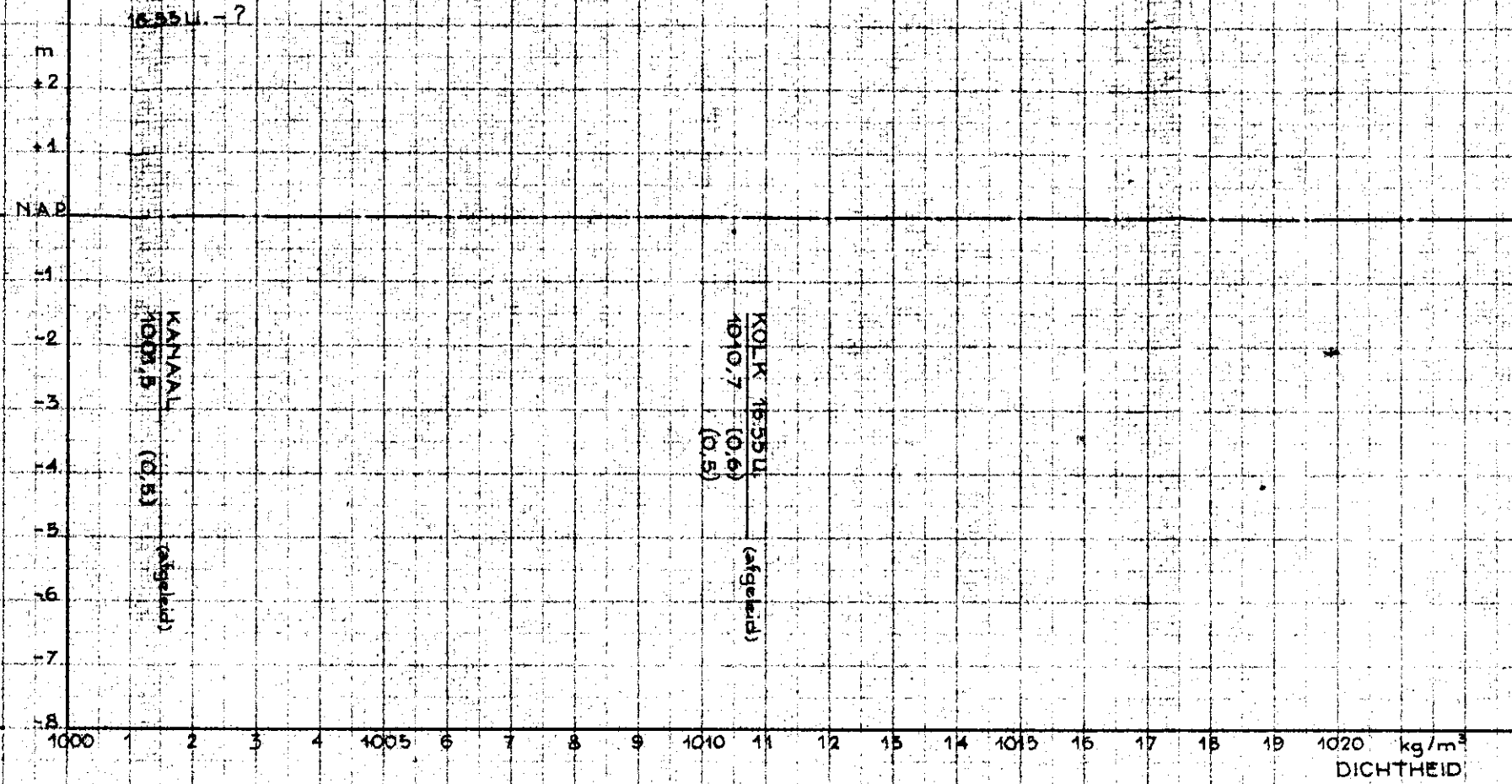


BIJLAGE 3.

Dichtheidsverticalen

19 April 1951.

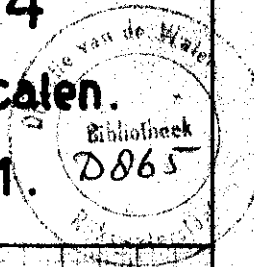
28



BIJLAGE 4

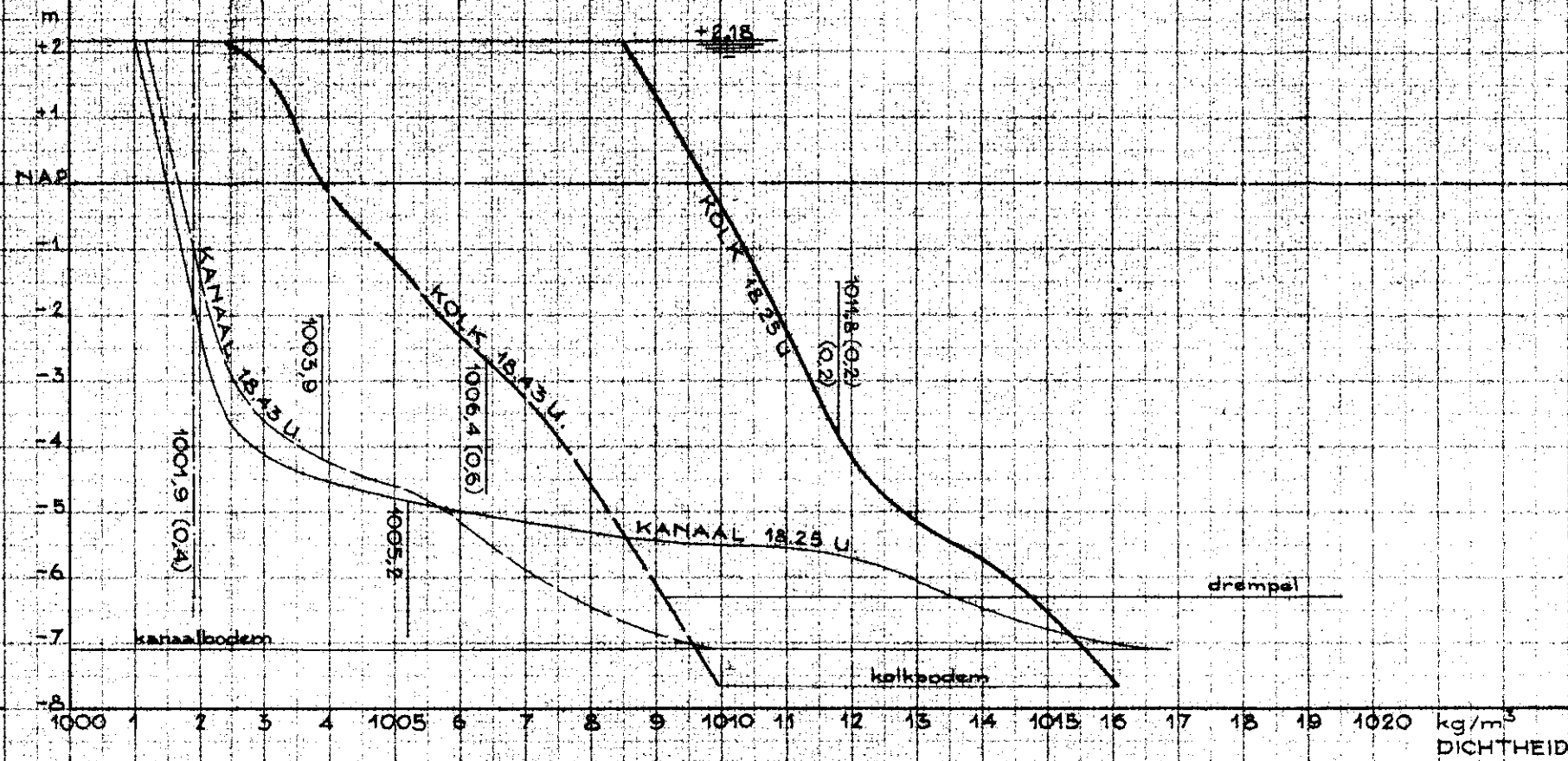
Dichtheidsverticalen.

23 April 1951.



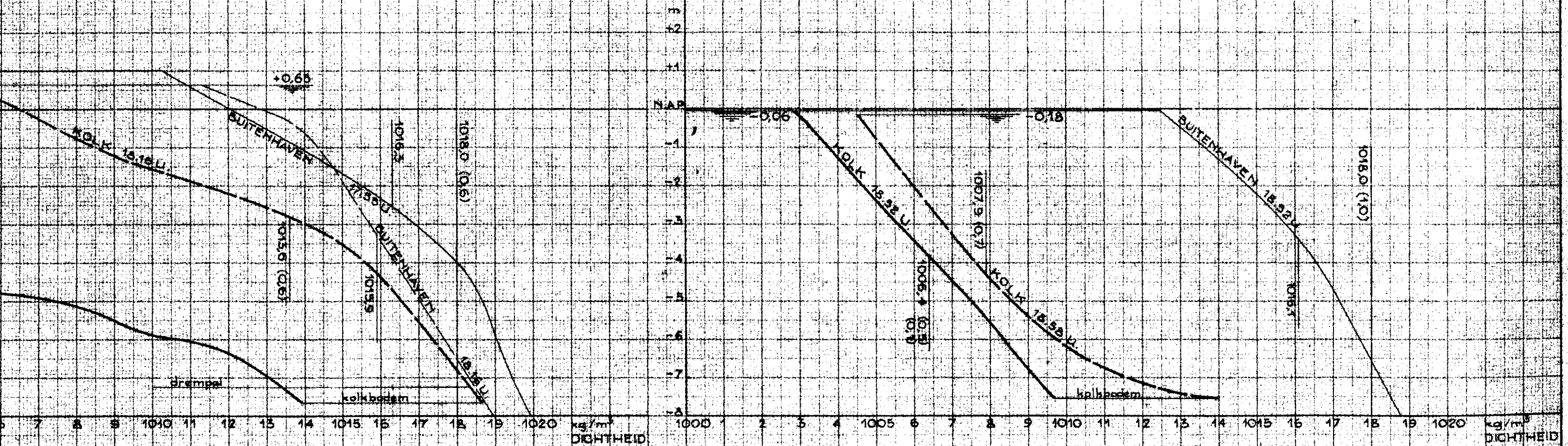
38

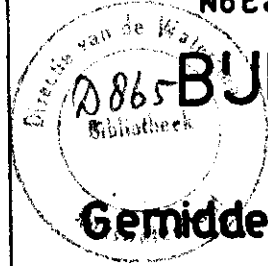
18.25 - 18.45 U. (18 MIN.)



39

18.52 - 18.58 U. (6 MIN.)





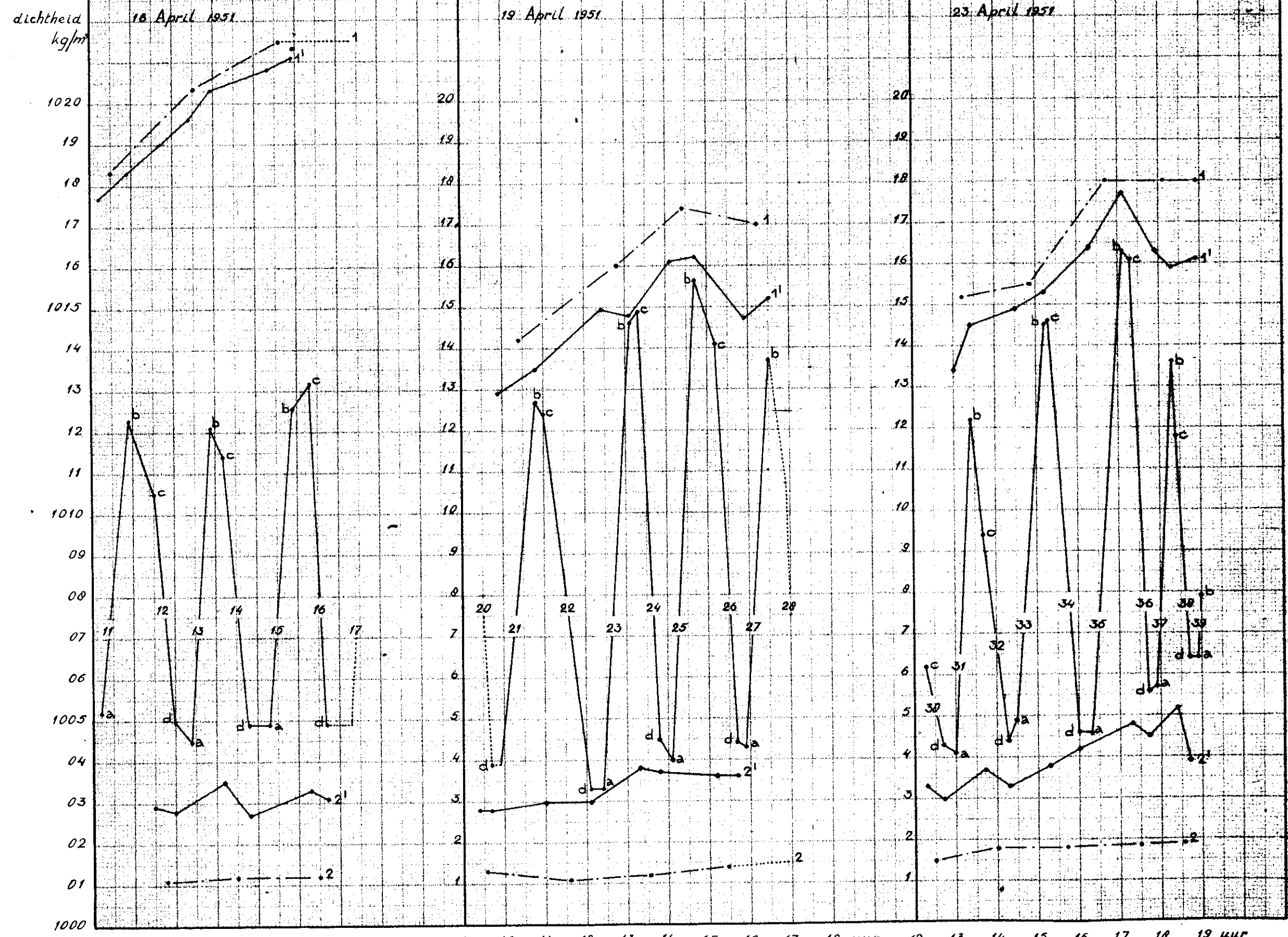
BUJLAGE 5

Gemiddelde dichtheden

- 1. buitenhaven, onderlagen overwegend.
- 1¹. buitenhaven, boven kolkbodem.
- 2. kanaal, bovenlagen overwegend.
- 2¹. kanaal, boven kolkbodem.

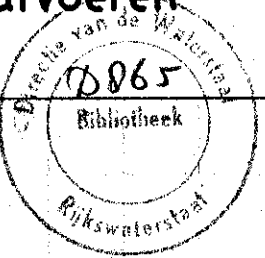
- a. kolk, vóór uitwisseling met buitenhaven.
- b. kolk, na uitwisseling met buitenhaven.
- c. kolk, vóór uitwisseling met kanaal.
- d. kolk, na uitwisseling met kanaal.

2865



BIJLAGE 6

Uitwisselingsafvoeren



UITWISSELEN KOLK - BUITENHAVEN 131 3 132 4 13	BU-VULLEN 10	UITWISSELEN KOLK - KANAAL 141 5 142 6 14	AFLATEN 11	UITWISSELEN KOLK - BUITENHAVEN 151 7 152 8 15	BU-VULLEN 12	UITWISSELEN KOLK - KANAAL 161 9 16	AFLATEN 13	UITWISSELEN KOLK - BUITENHAVEN 171 10 17	14 UUR
---------------------------------------------------------------------	------------------------	----------------------------------------------------------------	----------------------	---------------------------------------------------------------------	------------------------	----------------------------------------------------	----------------------	----------------------------------------------------------	---------------

UITWISSELEN KOLK - KANAAL 223 15 23	AFLATEN 231 16 232 17 23	UITWISSELEN KOLK - BUITENHAVEN 233 18 234 19 23	BU-VULLEN 24	UITWISSELEN KOLK - KANAAL 241 19 242 20 24	AFLATEN 25	UITWISSELEN KOLK - BUITENHAVEN 251 21 252 22 25	BU-VULLEN 26	UITWISSELEN KOLK - KANAAL 261 23 262 24 263 25 26	AFLATEN 27	UITWISSELEN KOLK - BUITENHAVEN 271 26 272 27 27	BU-VULLEN 28	UITWISSELEN KOLK - KANAAL 281 28 282 29 28	18 UUR
-----------------------------------------------------	------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------	------------------------	------------------------------------------------------------------	----------------------	-----------------------------------------------------------------------	------------------------	-------------------------------------------------------------------------------	----------------------	-----------------------------------------------------------------------	------------------------	------------------------------------------------------------------	---------------

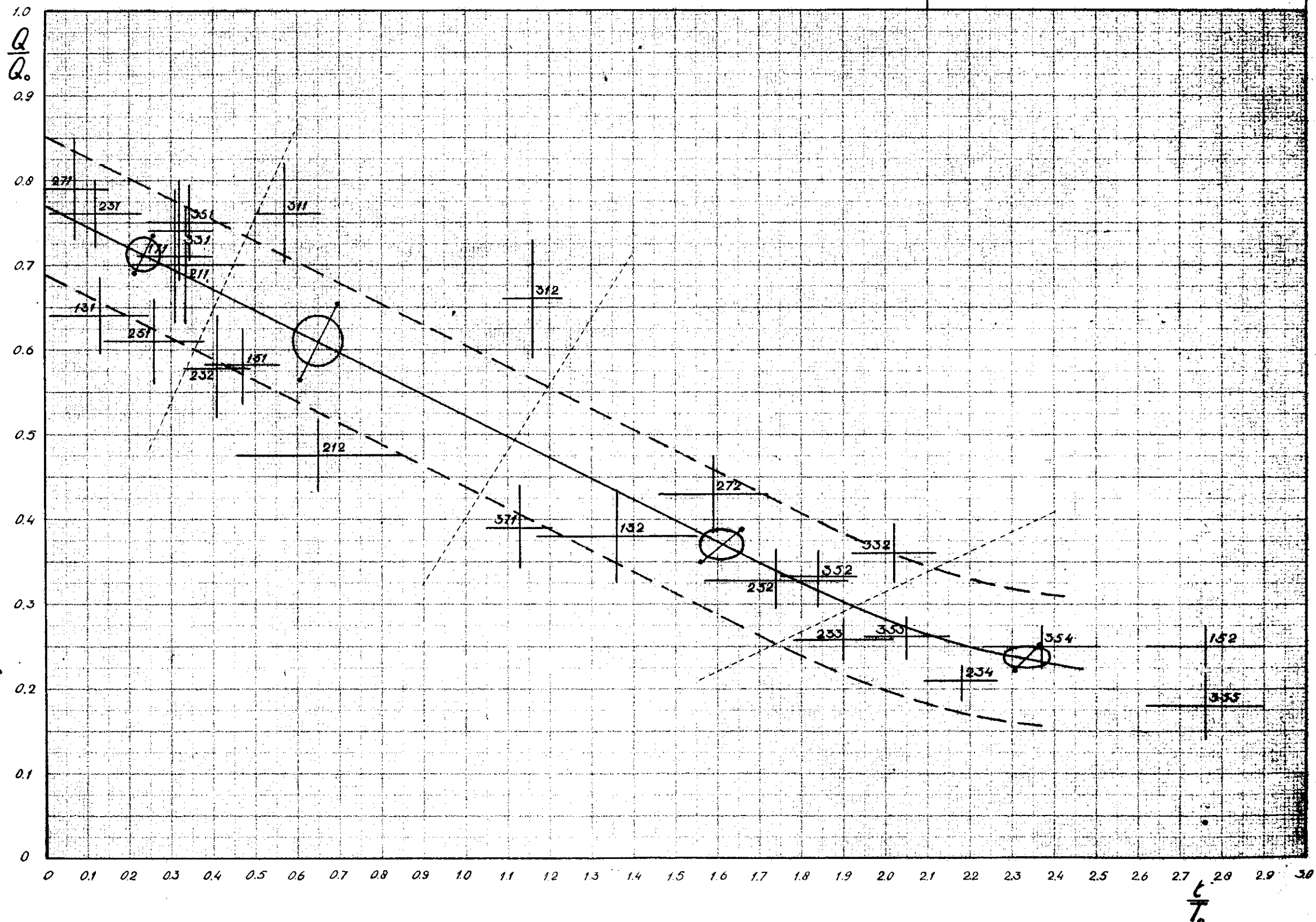
AFLATEN 33	UITWISSELEN KOLK - BUITENHAVEN 331 38 332 39 33	BU-VULLEN 34	UITWISSELEN KOLK - KANAAL 341 40 342 41 34	AFLATEN 35	UITWISSELEN KOLK - BUITENHAVEN 351 42 352 43 353 44 354 45 355 46 35	BU-VULLEN 36	UITWISSELEN KOLK - KANAAL 361 47 362 48 36	AFLATEN 37	UITWISSELEN KOLK - BUITENHAVEN 371 49 37	BU-VULLEN 38	UITWISSELEN KOLK - KANAAL 38	AFLATEN 39	UITWISSELEN KOLK - BUITENHAVEN 39	19 UUR
----------------------	-----------------------------------------------------------------------	------------------------	------------------------------------------------------------------	----------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------	------------------------------------------------------------------	----------------------	----------------------------------------------------------	------------------------	----------------------------------------	----------------------	---------------------------------------------	---------------

B'JLAGE 7

Dimensieloze bewerking
uitwisselingsafvoeren
kolk - buitenhaven

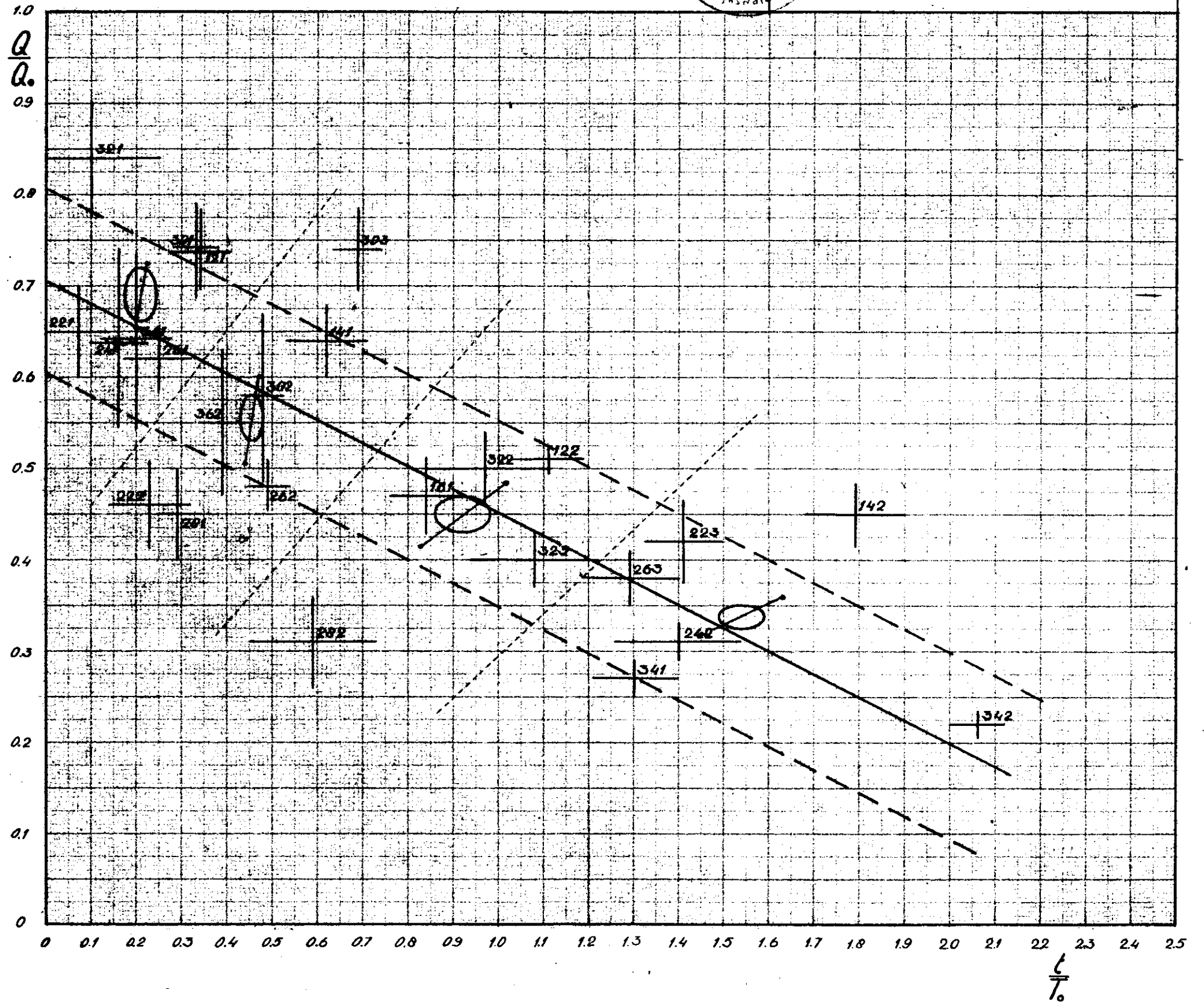
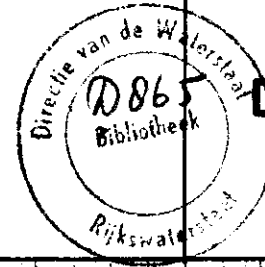
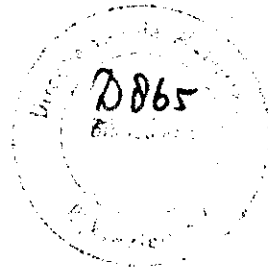
D865

D865



BIJLAGE 8

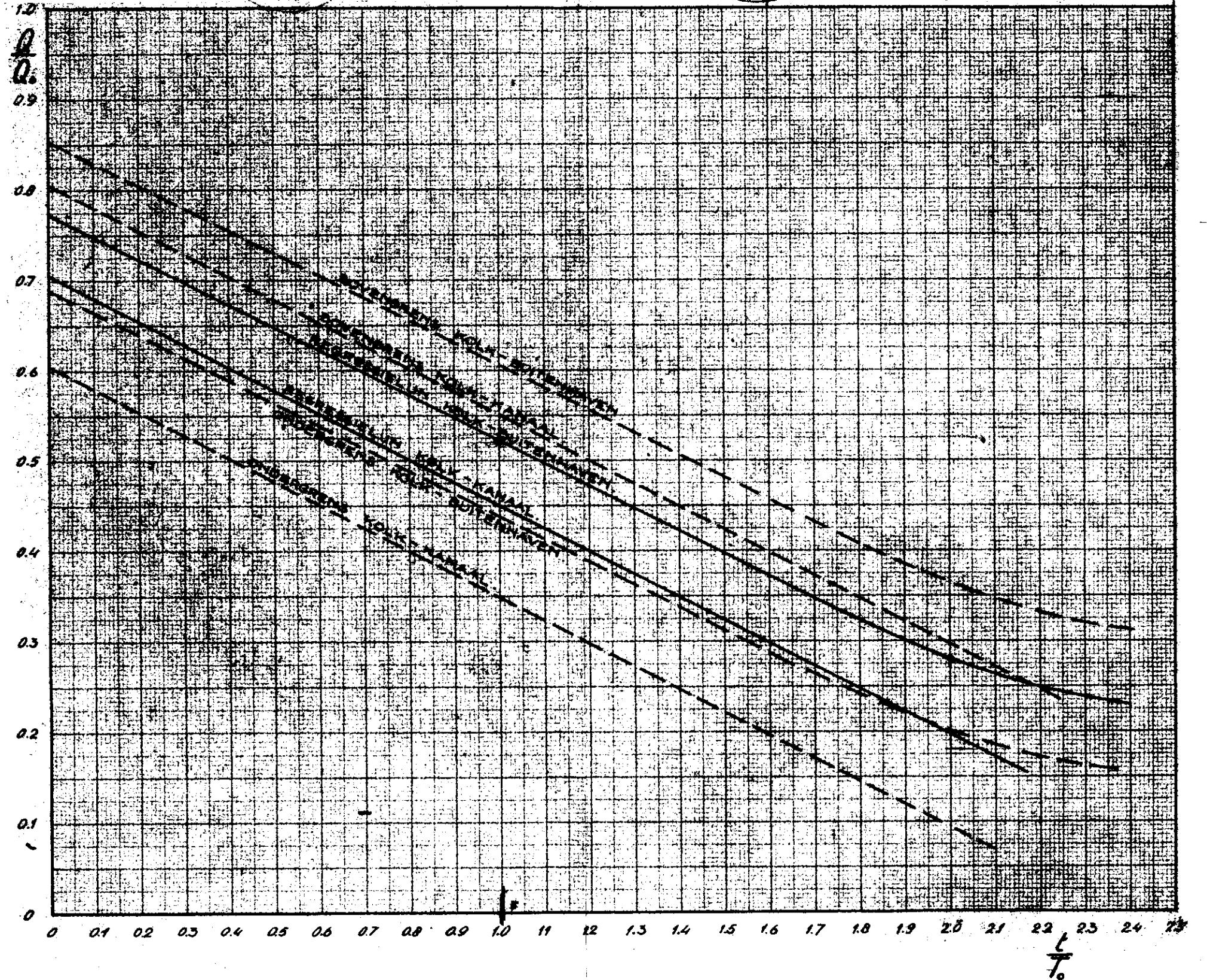
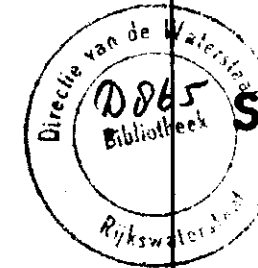
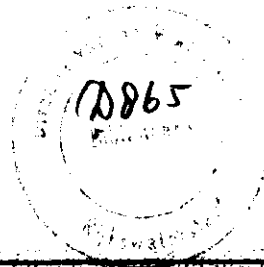
Dimensieloze bewerking
uitwisselingsafvoeren
kolk - kanaal



Nota C.S.D. 52-3.

BIJLAGE 9

Samenvatting bewerkte
uitwisselingsafvoeren
Westsluis.



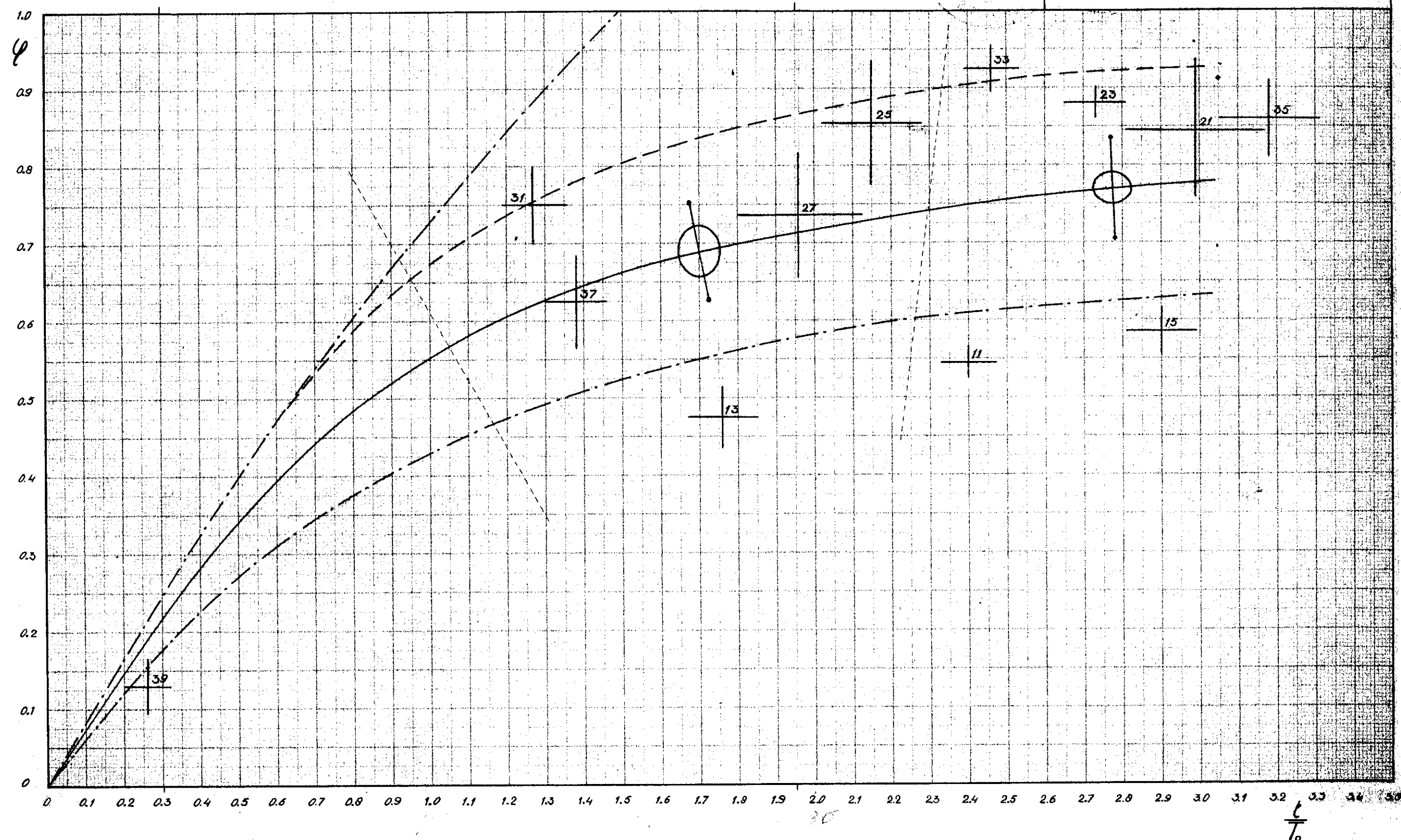
Nota C.S.D. 52-3.

B'JLAGE 10

Dimensieloze bewerking
uitwisselingscoëfficiënten
kolk - buitenhaven

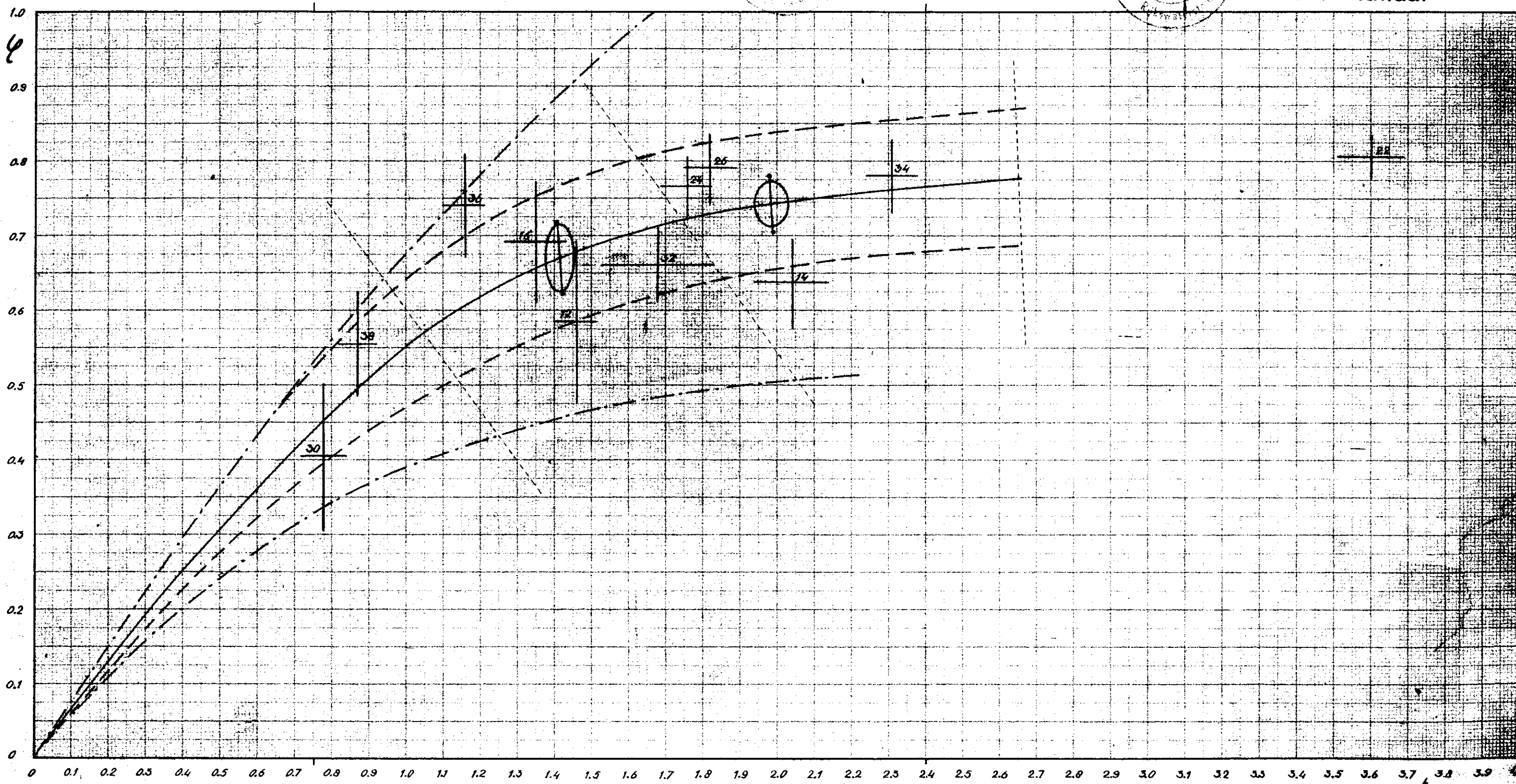
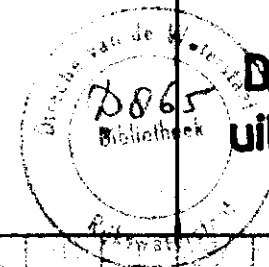
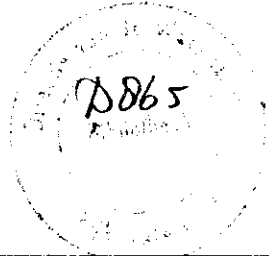
0865

0865



B'JLAGE 11

Dimensieloze bewerking
uitwisselingscoëfficiënten
kolk - kanaal



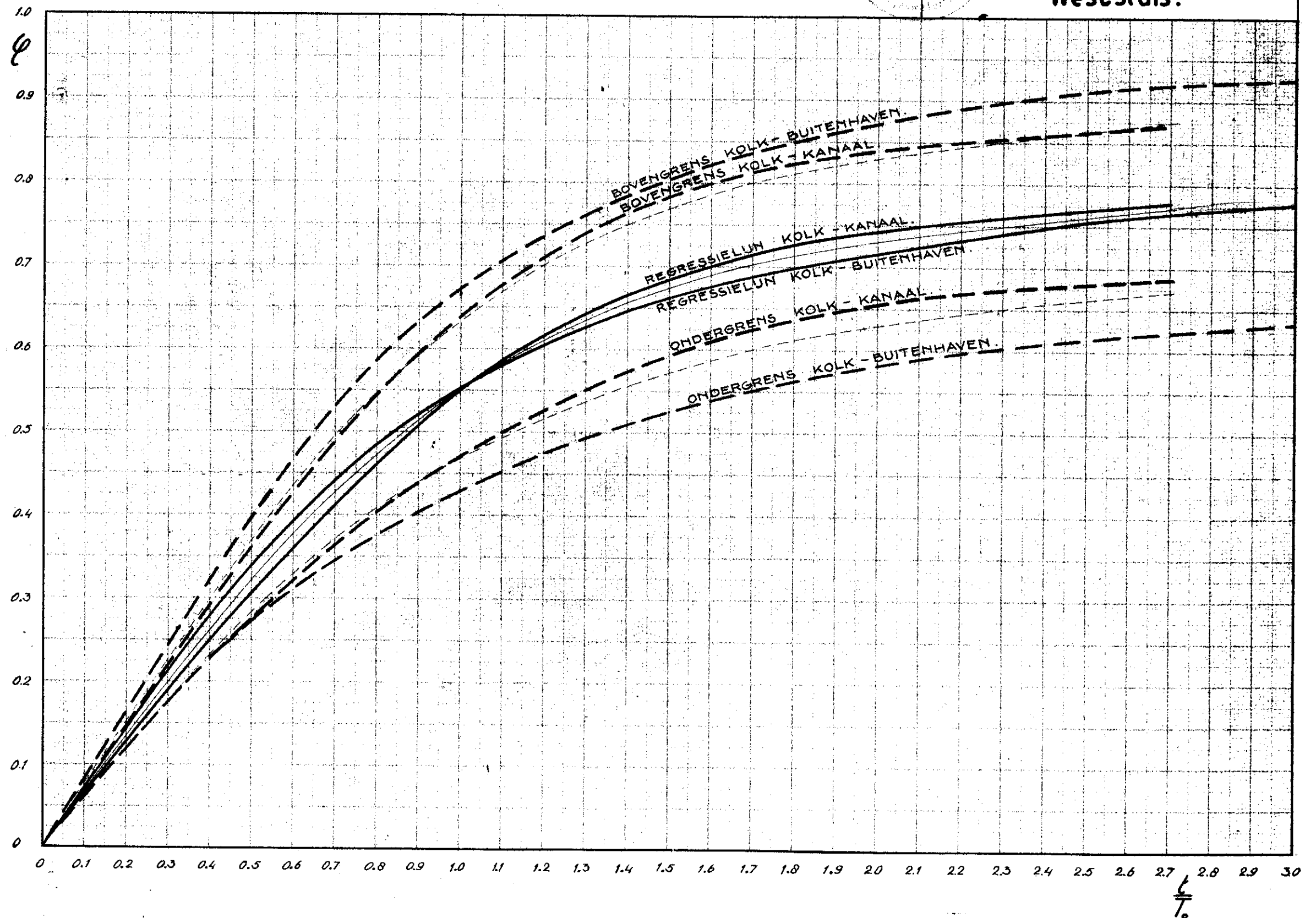
$\frac{\tau}{T_0}$

BIJLAGE 12

Samenvatting bewerkte
uitwisselingscoëfficiënten
Westsluis.

7865

7865



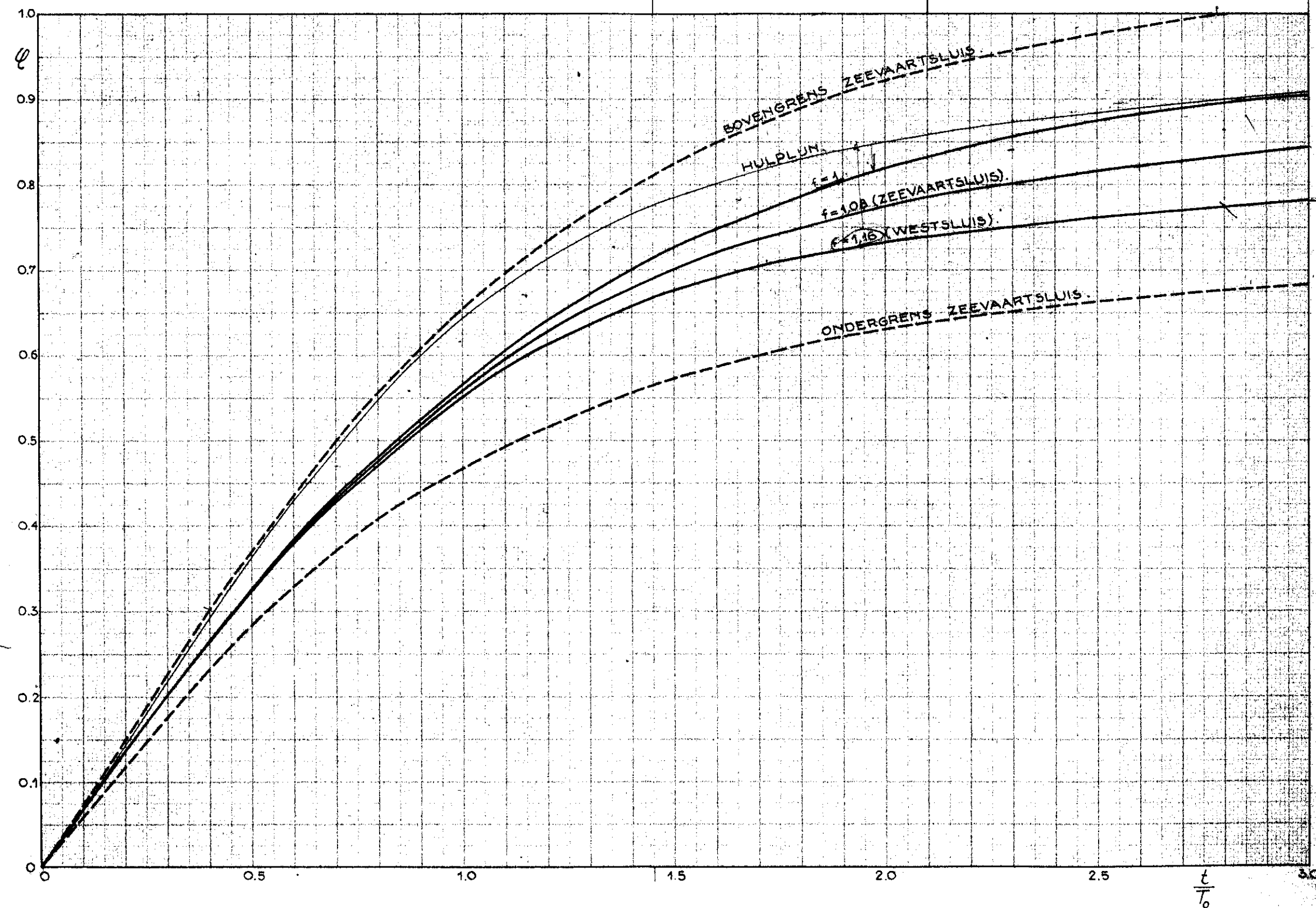
Nota C.S.D. 52-3.

BIJLAGE 13

Voorspelling uitwisselingscoëfficiënten Zeevaartsluis.



D865



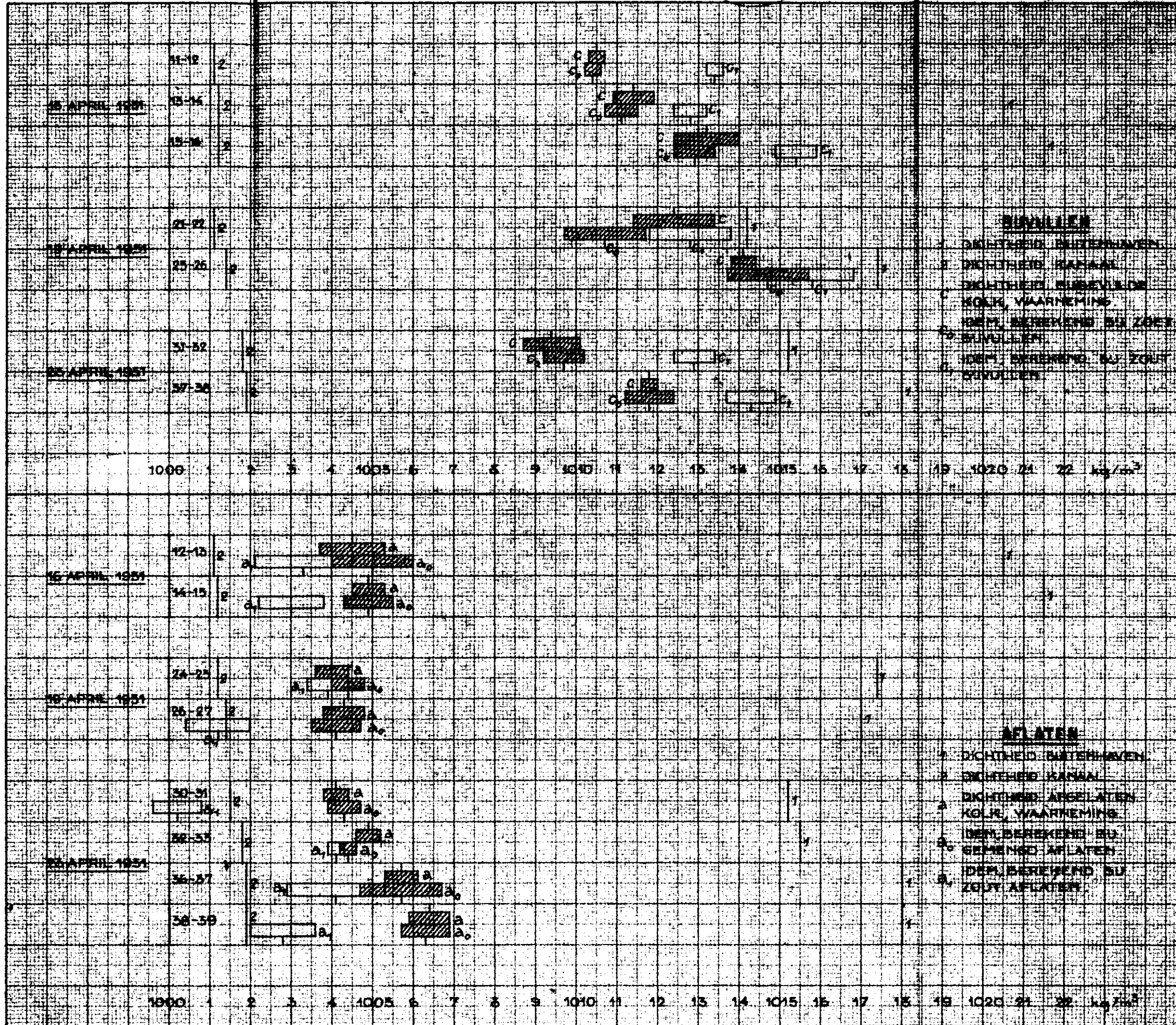
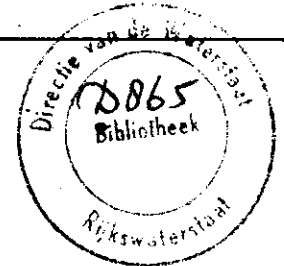


Nota C.S.D. 52-3.

BIJLAGE 14

Bijvullen en aflaten

Westsluis.



BIJVULLEN

- 1 DICHTHEID BUITERHAVEN
- 2 DICHTHEID KANAAL
- a DICHTHEID AFGELATEN
- a₀ KOLR. WAARNEMING
- c DEEL BEREKEND BIJ ZOUT BIJVULLEN
- c₀ DEEL BEREKEND BIJ ZOUT AFLATEN

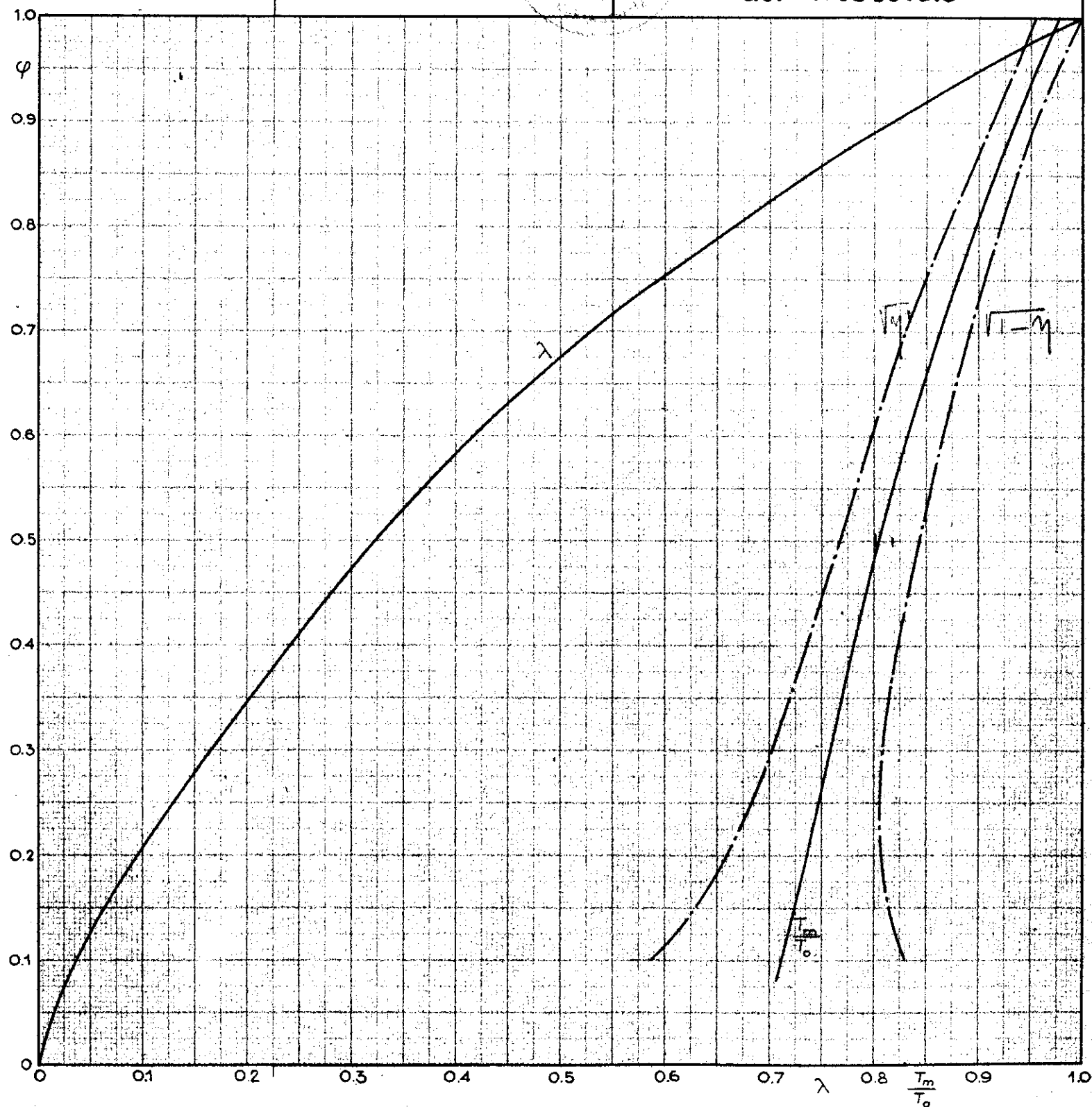
AFLATEN

- 1 DICHTHEID BUITERHAVEN
- 2 DICHTHEID KANAAL
- a DICHTHEID AFGELATEN
- a₀ KOLR. WAARNEMING
- c DEEL BEREKEND BIJ GEMENGD AFLATEN
- c₀ DEEL BEREKEND BIJ ZOUT AFLATEN

Nota CSD 52-3.

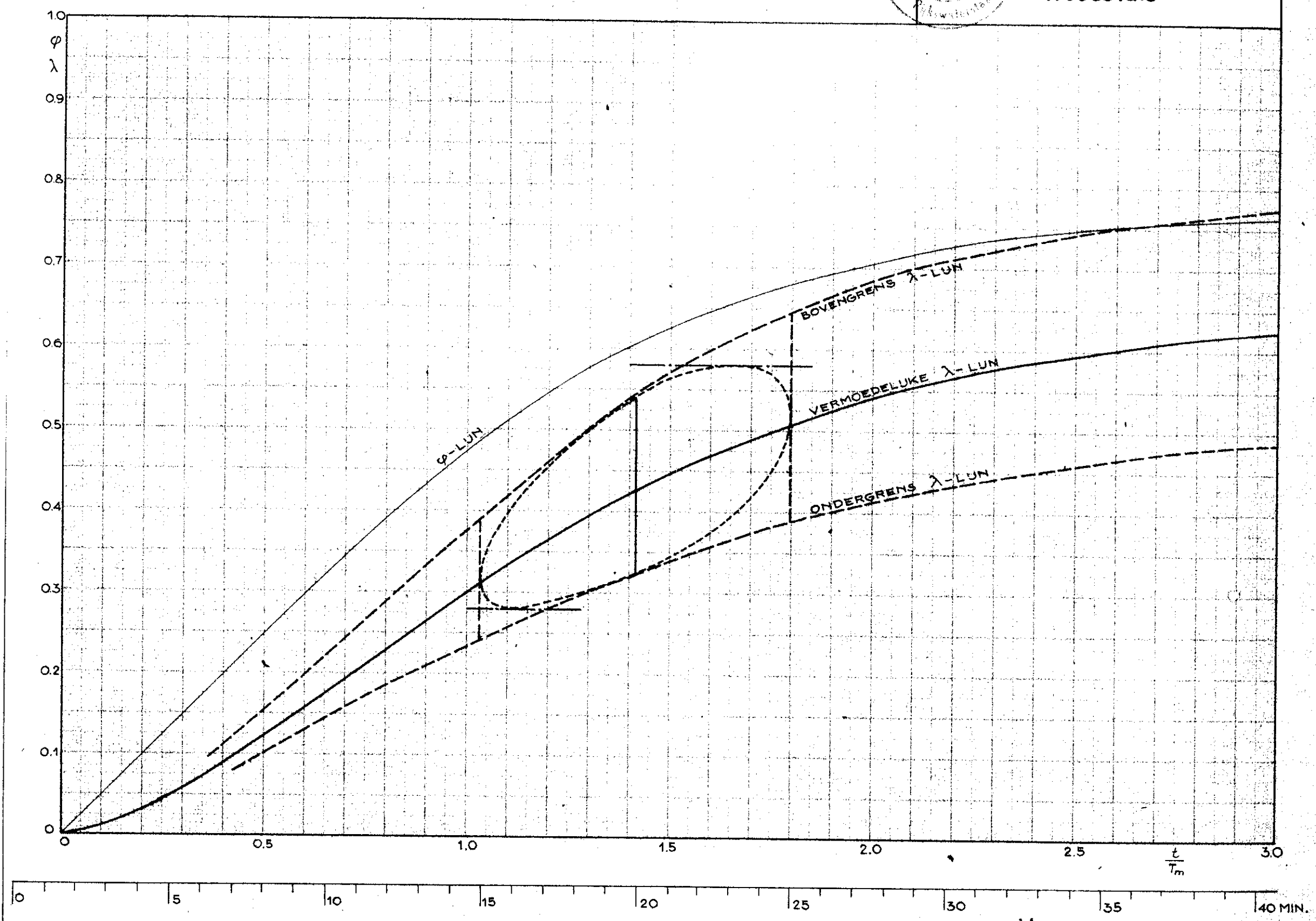
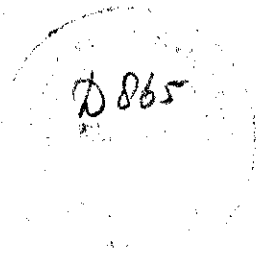
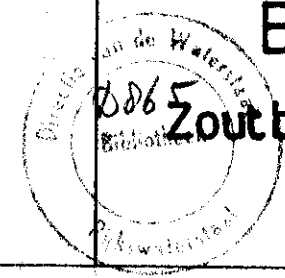
B'JLAGE 15

Hulpgrafieken bij de bepaling van het zoutbezwaar der Westsluis



BIJLAGE 16

Zout bezwaarcoëfficiënt
Westsluis

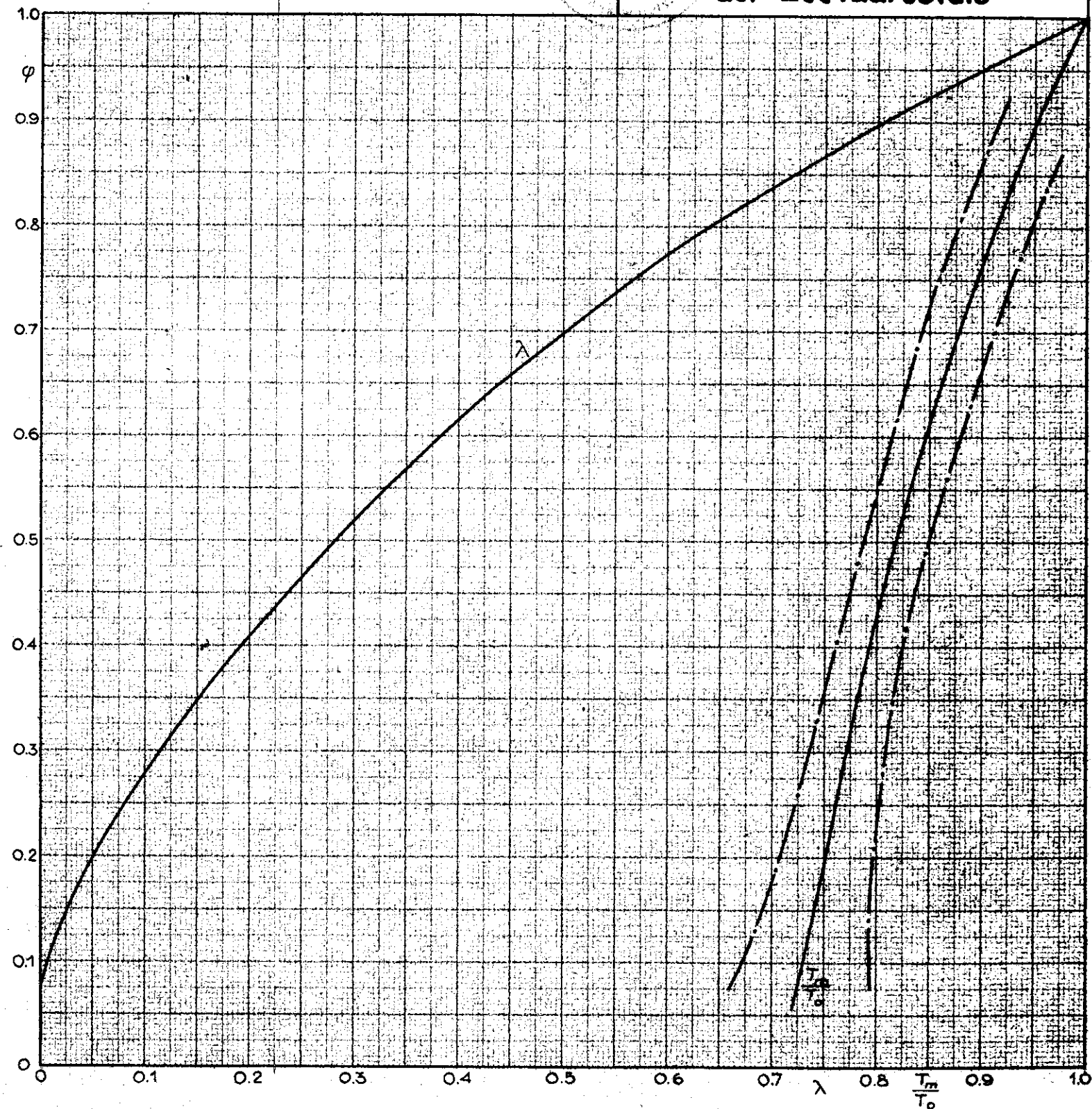
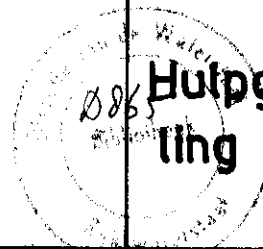


Nota C.S.O. 52-3.

BIJLAGE 17

Hulpgrafieken bij de bepaling van het zoutbezwaar der Zeevaartsluis

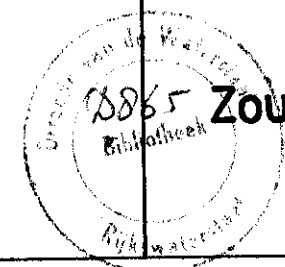
7865



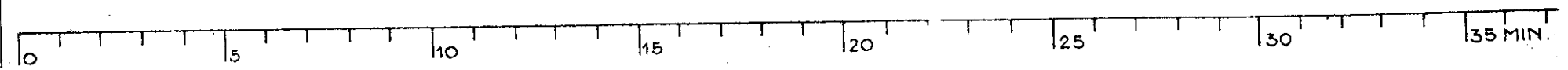
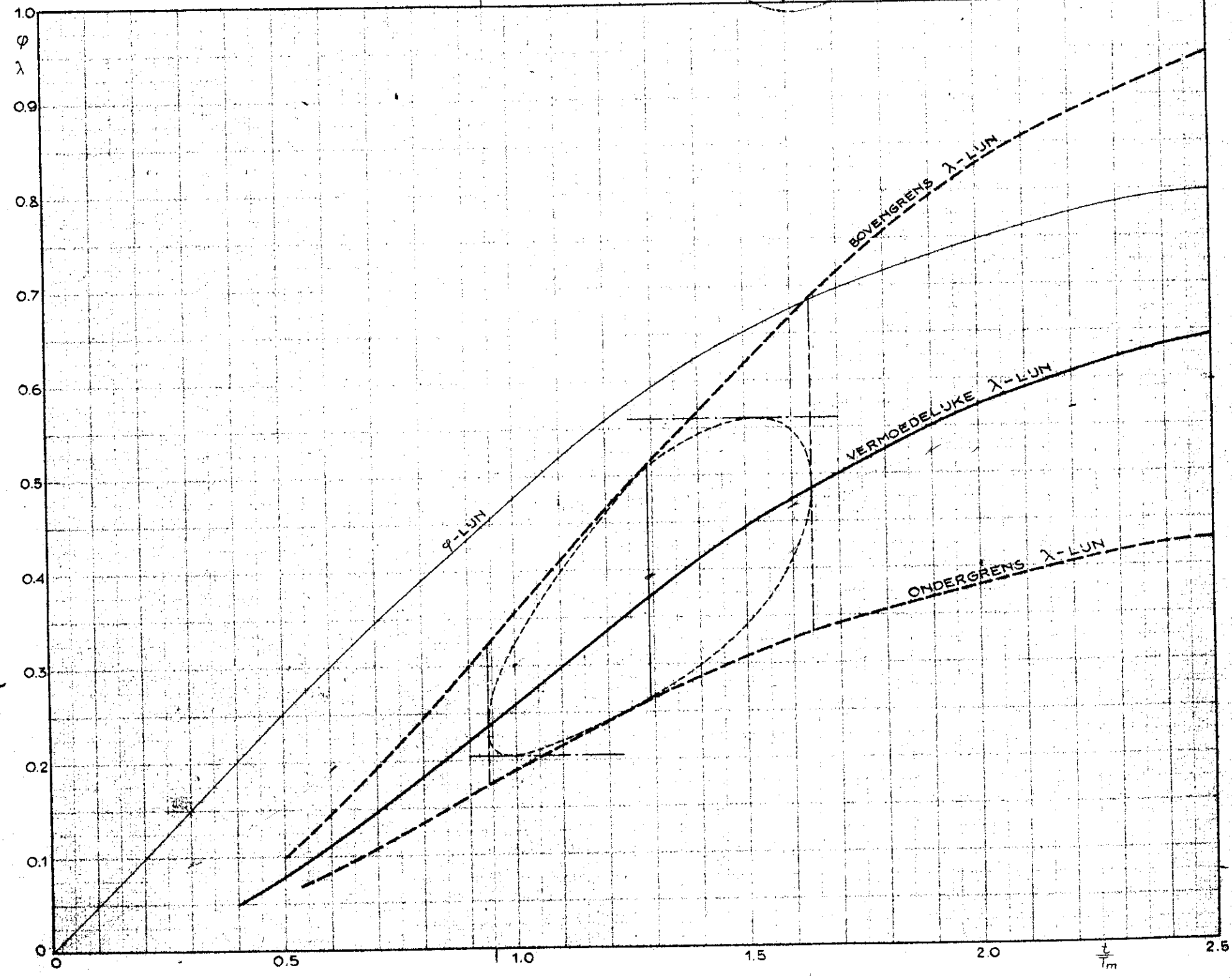
Nota C.S.D. 52-3.

B'JLAGE 18

Zoutbezwaarcoëfficiënt Zeevaartsluis



20865

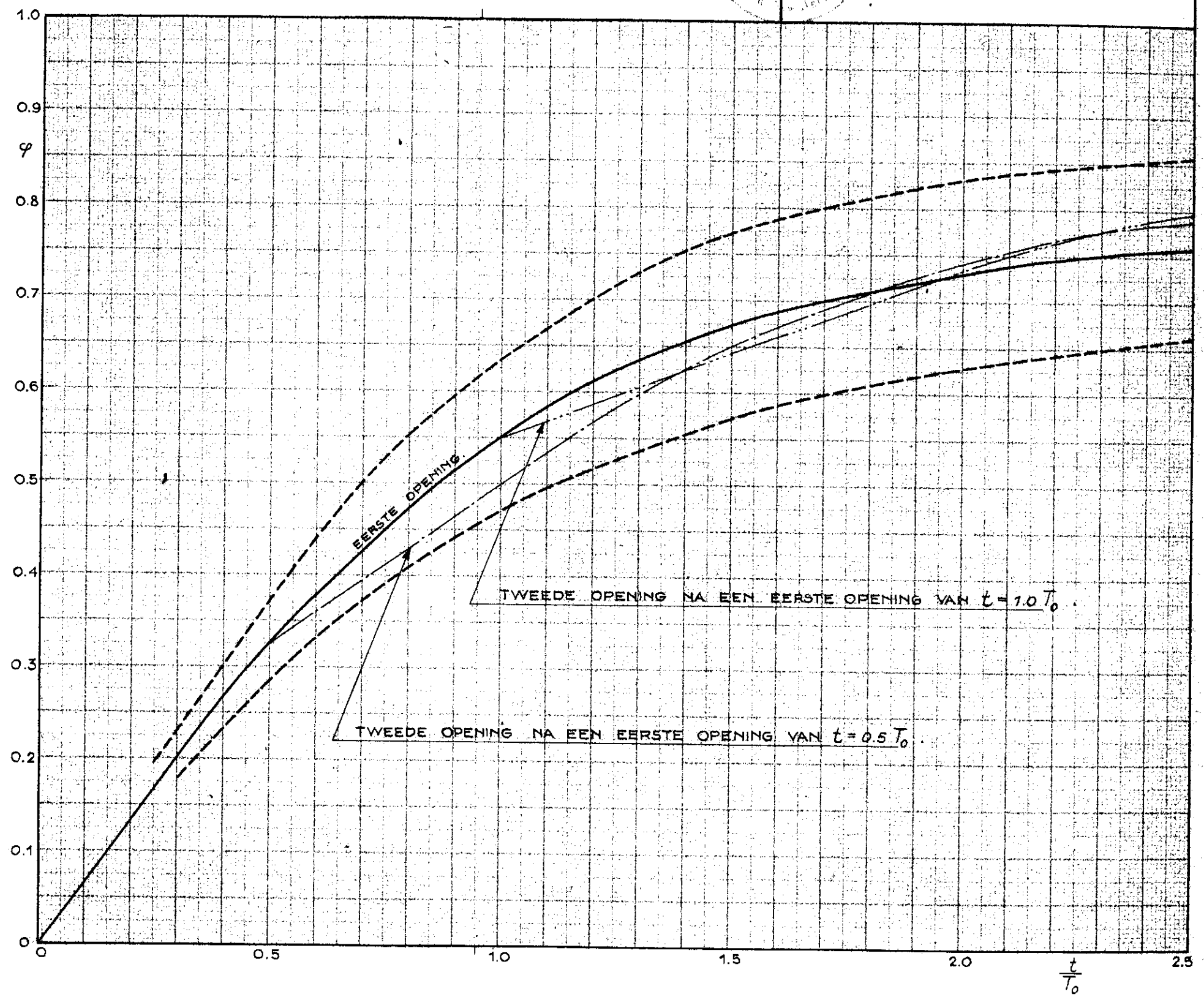
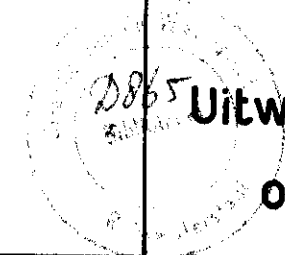


0865

Nota C.S.D. 52-3.

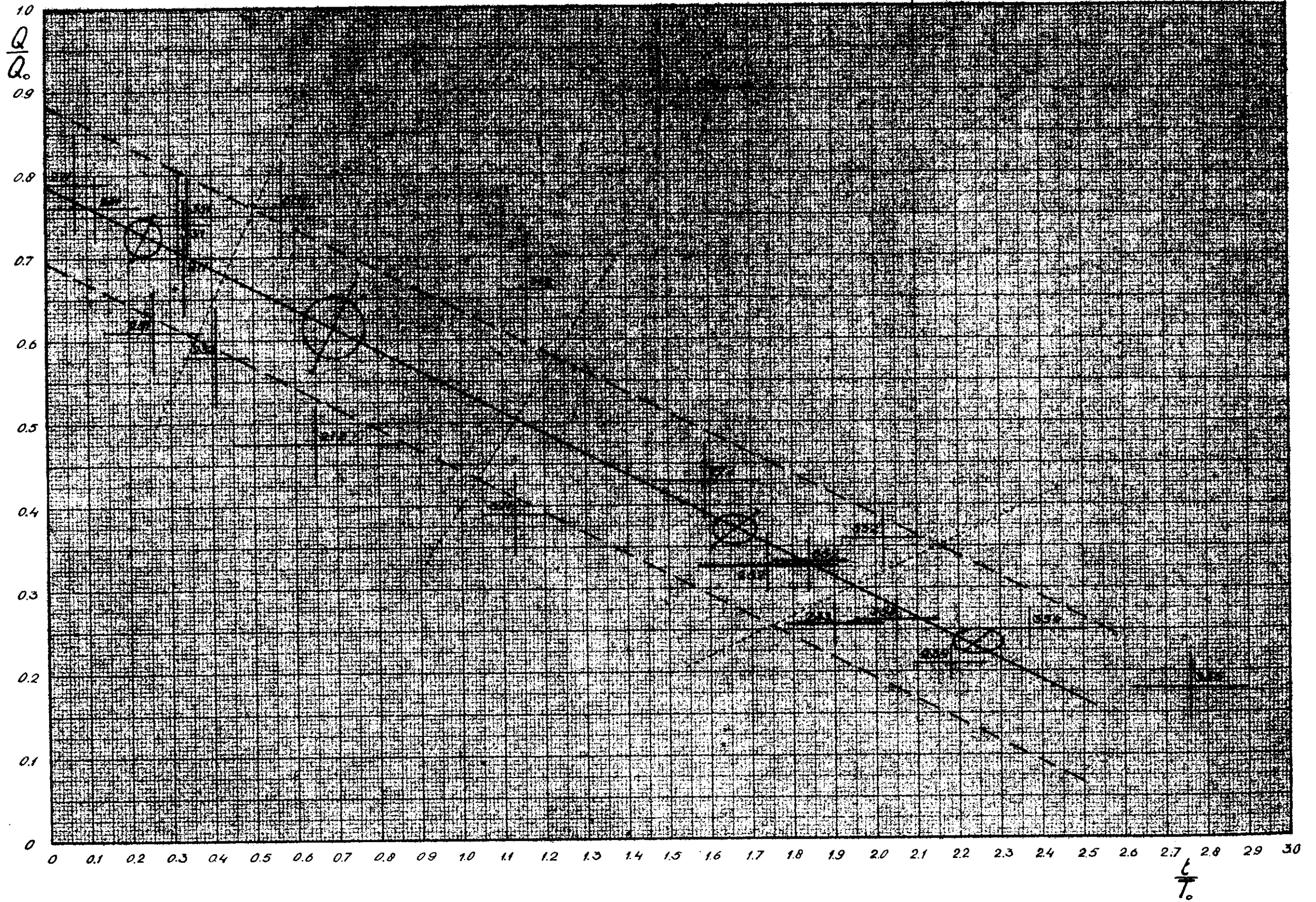
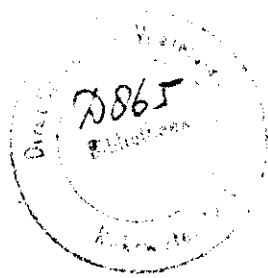
BIJLAGE 19

Uitwisseling bij herhaald
openen der deuren



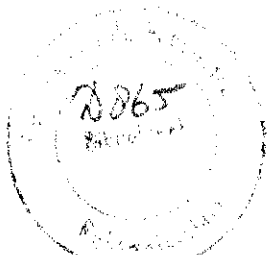
BIJLAGE 20

2065 Herziene bewerking
uitwisselingsafvoeren
kolk - buitenhaven

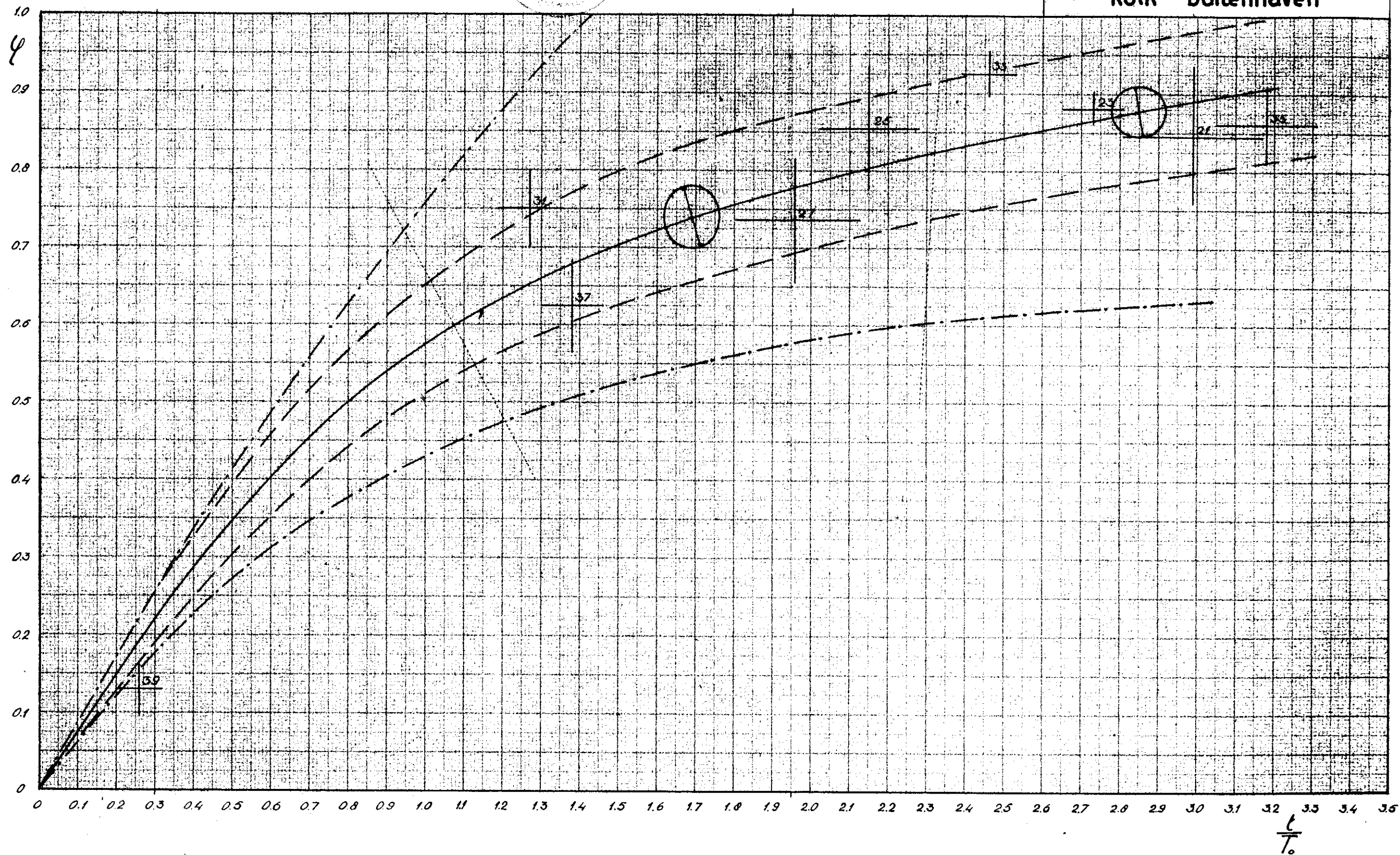


BIJLAGE 21

Herziene bewerking
uitwisselingscoëfficiënten
kolk - buitenhaven



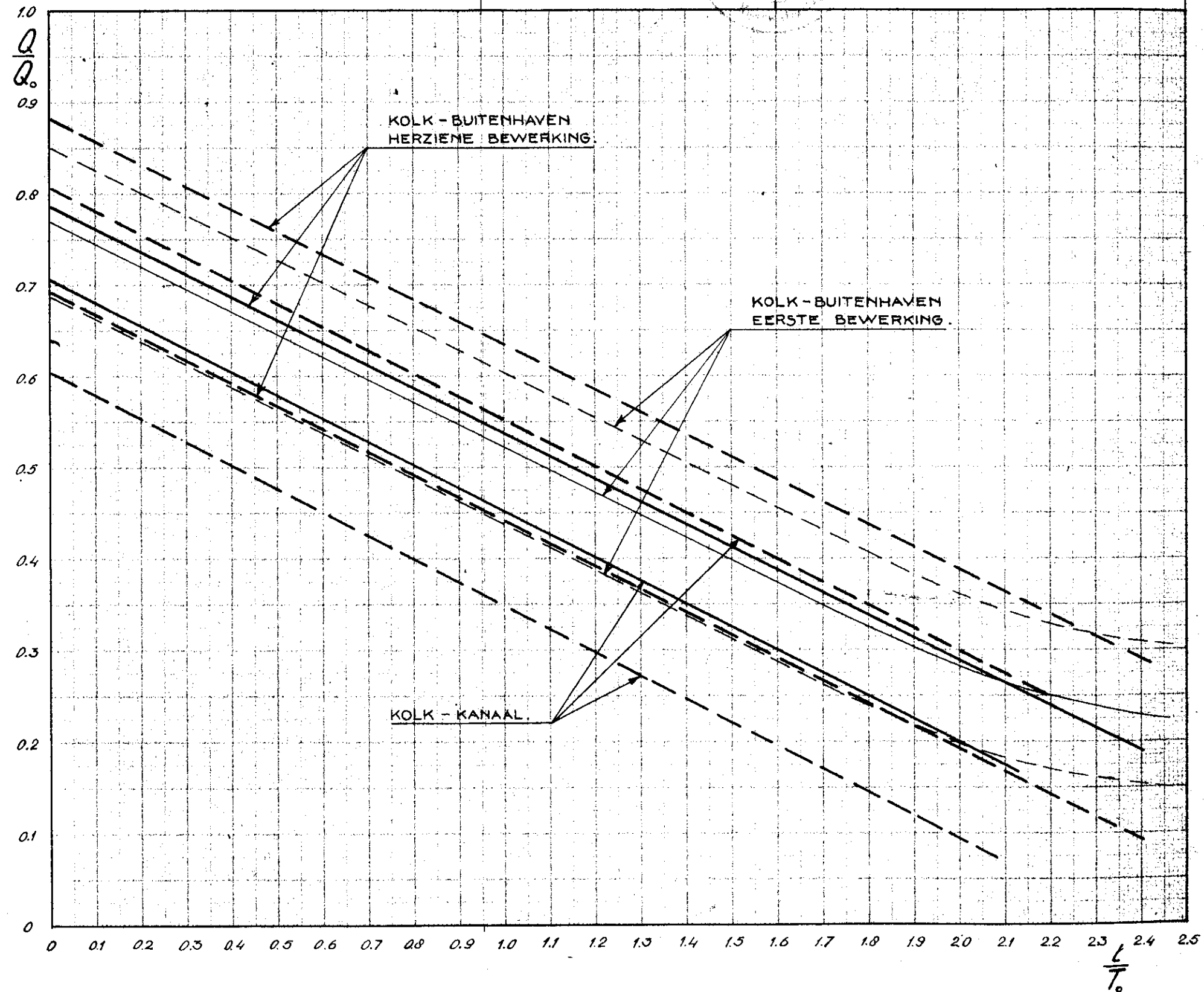
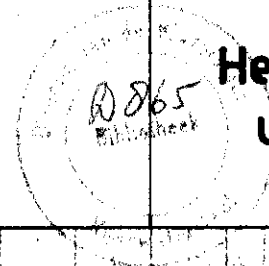
2065



BIJLAGE 22

Herziene samenvatting uitwisselingsafvoeren Westsluis

0865

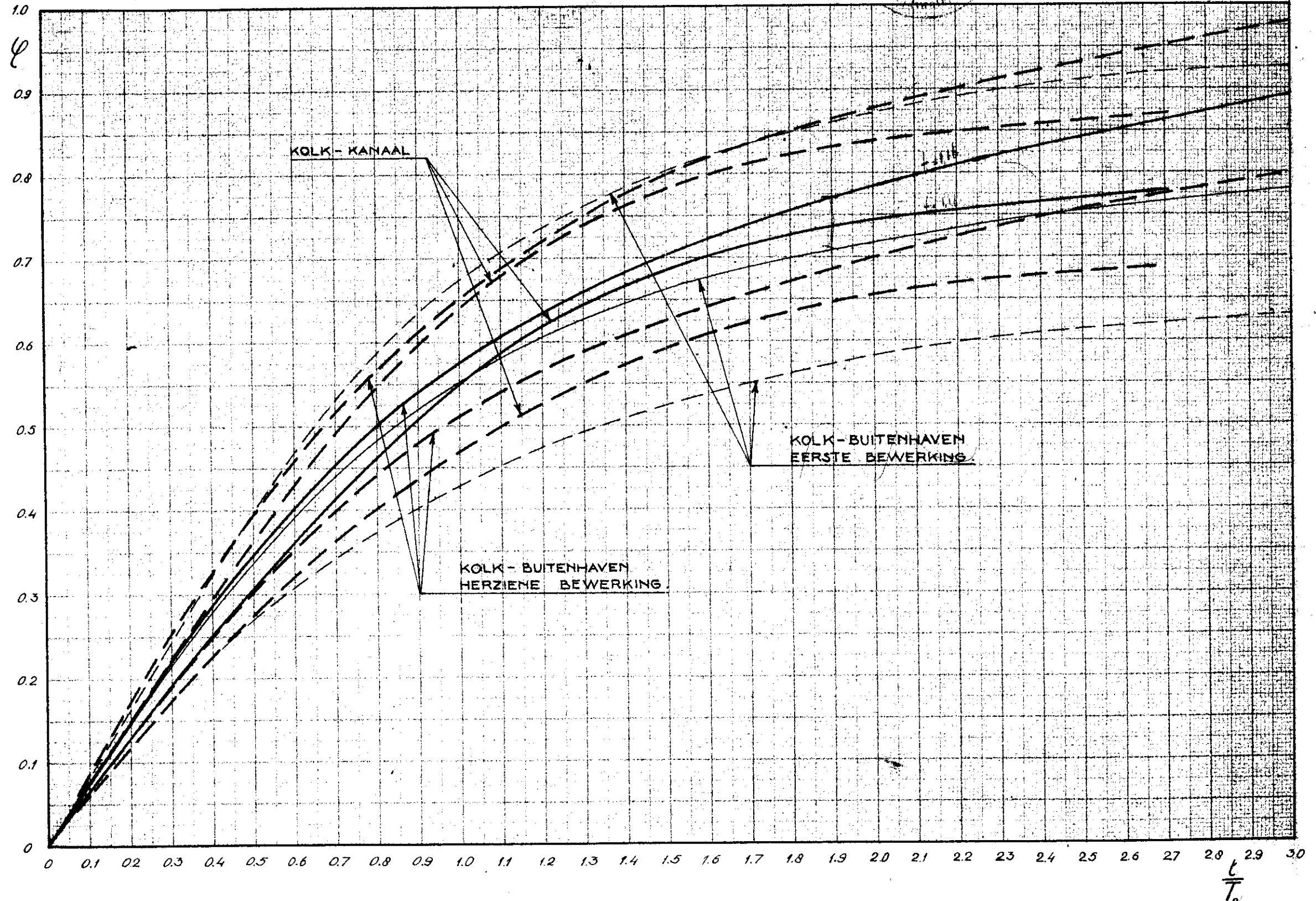


BIJLAGE 23

Herziene samenvatting
uitwisselingscoëfficiënten
Westsluis

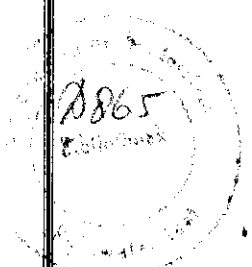
0865

0865



BIJLAGE 24

Lijst van symbolen Afmetingen der sluisen



Symbool	Omschrijving	Eenheid	Formule
A	oppervlak dwarsprofiel sluishoofd	m ²	
b	breedte sluiskolk	m	
B	bergend oppervlak sluiskolk	m ²	
c	chloorgehalte (chlorositeit)	kg/m ³	
C	chloor-gewichtsfractie (chloriniteit)	o/oo	
f	factor voor niet homogeniteit van het water in buitenhaven of kanaal		$f_1 = (\rho_1 - \rho_a) : (\rho_1' - \rho_a)$ $f_2 = (\rho_c - \rho_2) : (\rho_c - \rho_2')$
g	versnelling van de zwaartekracht	m/sec ²	
h	diepte sluishoofd	m	
h _k	diepte sluiskolk	m	
l	lengte sluiskolk	m	
l _m	lengtemaat van de sluis	m	$l_m = V : A$
M	chloorinhoud van de kolk	kg	$M = cV$
Q	uitwisselingsafvoer	m ³ /sec	
Q _o	afvoermaat van de uitwisseling	m ³ /sec	$Q_o = \frac{1}{4} A u$
R	hydraulische straal sluiskolk	m	
t	tijd	sec (min)	
t _m	tijdfactor van de sluis	sec (min)	$t_m = 4l_m : \sqrt{gh}$
T _o	tijdmaat van de uitwisseling	sec (min)	$T_o = V : Q_o = 4l_m : u$
T _m	tijdmaat van de sluis <i>inwendige tijd van kolk</i>	sec (min)	$T_m = t_m : \sqrt{\epsilon_m} = \frac{4V}{u}$
u	fundamentele snelheid van het sluishoofd	m/sec	$u = \sqrt{\epsilon gh}$
V	volumen van de sluiskolk	m ³	
V ₁	volumen bij buitenpeil	m ³	
V ₂	volumen bij kanaalpeil	m ³	
z	zoutgehalte	kg/m ³	
ε	relatief dichtheidsverschil		$\epsilon_1 = 2(\rho_1 - \rho_a) : (\rho_1 + \rho_a)$ $\epsilon_2 = 2(\rho_c - \rho_2) : (\rho_c + \rho_2)$ $\epsilon_m = 2(\rho_1 - \rho_2) : (\rho_1 + \rho_2)$
λ	zoutbezwaarcoëfficiënt van de sluis		
ρ	dichtheid	kg/m ³	
ρ ₁	dichtheid buitenhaven, onderlagen overwegend	kg/m ³	
ρ ₁ '	dichtheid buitenhaven, gemiddeld boven kolkbodem	kg/m ³	
ρ ₂	dichtheid kanaal, bovenlagen overwegend	kg/m ³	
ρ ₂ '	dichtheid kanaal, gemiddeld boven kolkbodem	kg/m ³	
ρ _a	dichtheid kolk vóór openen buitendeuren	kg/m ³	
ρ _b	dichtheid kolk na openen buitendeuren	kg/m ³	
ρ _c	dichtheid kolk vóór openen binnendeuren	kg/m ³	
ρ _d	dichtheid kolk na openen binnendeuren	kg/m ³	

Symbol	Westsluis		Zeevaartsluis	
	buitenhoofd	binnenhoofd	buitenhoofd	binnenhoofd
l	170 m		300 m	
b	25 m		35 m	
B	4000 m ²		10500 m ²	
	N.A.P. - 7,7 m		N.A.P. - 12,0 m	
	18 m	18 m	35 m	35 m
	N.A.P. - 7,2 m	N.A.P. - 6,2 m	N.A.P. - 11,8 m	N.A.P. - 10,1 m
	N.A.P. + 1,2 m	N.A.P. + 2,1 m	N.A.P. - 0,10	N.A.P. + 2,1 m
h	8,4 m	8,3 m	11,8 m	12,2 m
A	150 m ²	150 m ²	410 m ²	430 m ²
h _k	8,9 m	9,8 m	12,0 m	14,1 m
V	36000 m ³	39000 m ³	126000 m ³	148000 m ³
R	5,0 m	4,9 m	7,1 m	7,8 m
l _m	240 m	260 m	310 m	350 m
t _m	105 sec	115 sec	115 sec	125 sec