

April 1982

NOTA 1339

Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding
Wageningen

HYDROLOGISCH ONDERZOEK TEN BEHOEVE
VAN DE VERVANGING VAN HET GOESE SAS
I DE INVLOED VAN HET GETIJDE OP DE
OOSTERSCHELDE OP DE GRONDWATERSTANDEN
VAN HET OOSTELIJKE DEEL VAN DE WILHELMINA POLDER

ir. J.J. Kouwe

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

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

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

I N H O U D

	blz.
1. INLEIDING	1
2. HET GETIJ	1
3. DE INVLOED VAN HET GETIJDE OP DE GRONDWATERSTAND	3
4. DE BEPALING VAN α EN β	6
5. OPZET VAN HET ONDERZOEK	8
5.1. Het net van peilbuizen en het waarnemingsschema	8
5.2. De bewerking van de gegevens	8
5.3. Het bepalen van de amplitude-damping en de fase- vertraging	9
5.4. De bepaling van de constanten α en β	11
6. DE CORRECTIE VAN GEMETEN GRONDWATERSTANDEN	14
6.1. Een praktische en eenvoudige correctiemethode	15
6.2. De correctie in de praktijk	16
7. NABESCHOUWING	17
LITERATUUR	18

1. INLEIDING

In verband met de plannen tot vervanging van de schutsluis "Het Goese Sas", in het havenkanaal van Goes werd een hydrologisch onderzoek opgezet. Dit in verband met de wens de invloed op de grondwaterstanden van de wateronttrekking ten behoeve van het drooghouden van de bouwput voor de sluis te kunnen vaststellen. Het gebied van onderzoek grenst aan de Oosterschelde, waarvan het waterpeil onderhevig is aan een getijdeschommeling. Bij springtij beweegt zich het buitenwaterpeil tussen + 2,00 m en - 2,00 m NAP en tijdens doodtij tussen + 1,30 m en - 1,30 m NAP, peilverschillen dus van + 4,00 respectievelijk 2,60 m. Verwacht mag worden dat deze waterstandswisseling, welke zich vier maal per etmaal voltrekt, zich als een drukgolf in het grondwater van de aangrenzende polders zal voortplanten. In principe dienen de grondwaterstanden op de getij-invloed gecorrigeerd te worden, alvorens bij verdere bewerkingen te worden gebruikt.

2. HET GETIJ

De getij-beweging wordt veroorzaakt door de aantrekkingskracht welke de maan en de zon op de watermassa's van de zeeën en grote binnenwateren uitoefenen. Hierbij is de invloed van de maan het grootst, zodat deze als criterium wordt gebruikt voor het optreden van hoog- en laagwater. Onder het maansverloop wordt verstaan het aantal uren ná maansdoorgang, waarop HW respectievelijk LW-water optreedt. Daar deze grootheid gedurende de cyclus springtij-gemiddeldtij- doodtij een zekere variatie vertoont, wordt ter karakterisering van de vertraging het gemiddeld maansverloop gekarakteriseerd. In de getijtafels wordt in plaats van het gemiddeld maansverloop het gemid-

deld havengetal vermeld. Dit is het aantal uren dat HW respectievelijk LW optreedt na de maansdoorgang van de 5° OL-meridiaan.

Het getij-verloop vertoont voor elke plaats langs de kust verschillende karakteristieke verschijnselen. Deze worden veroorzaakt door de verdeling van het land- en zee-oppervlak, waardoor de getijstromingen worden beïnvloed. Hierdoor kan de getijdecurve in meerdere of mindere mate afwijken van het sinus-vormige verloop dat zal optreden aan een rechte kustlijn tegenover de open zee.

Verdere bijzonderheden van de getij-curve zijn:

- beurtelings ongelijke opeenvolgende HW- respectievelijk LW-standen;
- ongelijke tijdsintervallen tussen HW-LW en LW-HW, terwijl deze zelf ook weer een zekere fluctuatie om hun gemiddelde vertonen;
- de getijperiode (HW-LW) vertoont eveneens een zekere fluctuatie om een gemiddelde.

Voorts worden de waterstanden beïnvloed door de windrichting en de windkracht, doch deze invloeden en overige genoemde bijzonderheden zullen verder buiten beschouwing blijven.

Enkele van de getij-karakteristieke gegevens voor het station Wemeldinge staan afgebeeld in figuur 1.

Voor de waterstanden op de Oosterschelde ter plaatse van het Goese Sas is het peilstation Wemeldinge representatief. Het ligt 6 km oostelijk van de monding van het Goese Haven Kanaal. Vergelijking van frequente waarnemingen van de peilschaal bij de sluis op 12 en 13 juni 1979 met de registratiestroken van de peilschrijver te Wemeldinge hebben dit aangetoond. Figuur 2 geeft beide getij-curven voor 12 en 13 juni 1979; Wemeldinge (MET) en Goese Sas (MEZT).

Het gemiddelde HHW bedraagt volgens de getijtafel van 1981 + 2,15 m NAP en het LLW - 2,16 m NAP. Uit de getijcurven van figuur 2 valt af te lezen dat voor op 12 en 13 juni 1979 HW de maximale waarde + 1,93 m NAP was en dat de laagste waarde voor LW - 2,01 m NAP heeft bedragen.

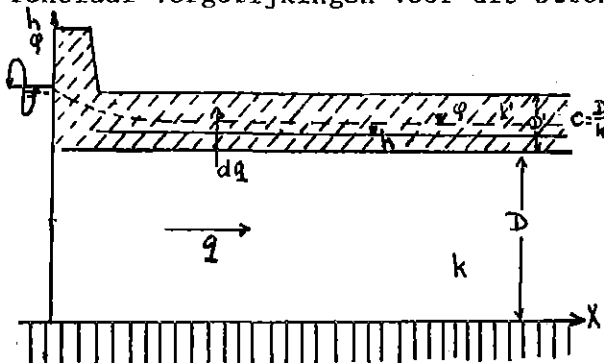
De getijde-periode bedraagt voor Wemeldinge 12^u25^m . Voor 12 en 13 juni 1979 was het tijdsinterval HW-LW: 5^u40^m en LW-HW: 6^u45^m .

De grondwaterstanden werden overwegend waargenomen tussen 13 en 15 uur op elke 14^{de} en 28^{ste} van de maand. Wanneer het getijde verloop op de Oosterschelde een merkbare invloed heeft op de stijghoogte van het grondwater, dan dient deze laatste op de getijde invloed te worden gecorrigeerd, alvorens bij verdere bewerkingen te kunnen worden gebruikt. Om deze correctie te kunnen uitvoeren dienen de tijden van HW en LW tussen welke de waarnemingen plaats vonden bekend te zijn. Deze kunnen uit de getijtafels worden afgelezen, terwijl uit deze tafels eveneens de berekende vloed- en ebstanden bekend zijn. Tevens dient voor een juiste correctie het exacte tijdstip van waarneming bekend te zijn.

3. DE INVLOED VAN HET GETIJDE OP DE GRONDWATERSTAND

De getijdewerking van het buitenwater veroorzaakt een drukgolf, die zich landinwaarts verplaatst in het grondwater. Vergeleken met de getijde curve wordt de drukgolf in het grondwater in fase vertraagd en ondergaat de amplitude ervan een demping. In het algemeen nemen zowel de fasevertraging als de amplitudedemping met toenemende afstand tot het open water toe.

Het eenvoudigste geval van dit probleem wordt gevormd door de situatie van het hollands profiel: een watervoerende laag afgedekt door een slecht doorlatende kleilaag en een constant polderpil. De differentiaal vergelijkingen voor dit stromingsgeval luiden:



$$q = kD \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (1)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} = \mu \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2)$$

$$\mu \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial - h}{c} \quad (3)$$

Steggewentz (1933) vond met bovenstaande vergelijkingen en $\phi_o = M + U_o \sin nt$ voor het buitenwater de volgende oplossing:

$$\phi_x = M + U_o e^{-\alpha x} \sin (nt - \beta x) \quad (4)$$

Hierin zijn:

- ϕ_o : de stijghoogte van het buitenwater;
- ϕ_x : de stijghoogte van het grondwater in de watervoerende laag op afstand x ;
- h : de stijghoogte van het grondwater in de afdekkende laag;
- M : het gemiddelde peil van het buitenwater;
- U_o : de amplitude van de getij-beweging op het buitenwater;
- x : de afstand van het meetpunt tot het buitenwater;
- n : $\frac{2\pi}{T}$;
- T : de periode lengte van een complete getijde golf;
- t : de tijd in uren na het begin van de metingen;
- c : de verticale weerstand van de afdekkende kleilaag;
- kD : het doorlatend vermogen van de watervoerende laag;
- μ : de bergingscoëfficiënt van de afdekkende kleilaag;
- α en β : constanten.

$$\alpha = \sqrt{\frac{\mu n}{2kD} \cdot \frac{\sqrt{1 + (\mu n)^2} + \mu n}{1 + (\mu n)^2}} \text{ en } \beta = \sqrt{\frac{\mu n}{2kD} \cdot \frac{\sqrt{1 + (\mu n)^2} - \mu n}{1 + (\mu n)^2}} \quad (5)$$

Uit deze betrekkingen volgt voor $c = 0$ $\alpha = \beta = \sqrt{\frac{\mu n}{2kD}}$ en voorts:

$$(\alpha^2 + \beta^2)^2 = \left(\frac{\mu n}{kD}\right)^2 \cdot \frac{1}{1 + (\mu n)^2} \quad (5a)$$

$$\text{en } 2\alpha\beta = \frac{\mu n}{kD} \cdot \frac{1}{1 + (\mu n)^2} \quad (5b)$$

Door Bosch (1951) werd aan dit model uitbreiding gegeven door de invoering van een constant polderpeil h_p en een "bergingscoëfficiënt" S_1 voor de watervoerende laag. Ook werd rekening gehouden met de sa-

menndrukbaarheid van de grond en van water:

$$S_1 = \rho g D \left(\frac{\epsilon}{E_w} + \frac{1}{E_s} \right) \quad (6)$$

met:

ρ : de soortelijke dichtheid van de grond

g : de versnelling van de zwaartekracht

D : de dikte van de watervoerende laag

ϵ : het poriengetal van de grond

E_w en E_s : de elasticiteitsmoduli van respectievelijk water^{en} het bodem-skelet

Als oplossing van (3) wordt gevonden:

$$\phi_x = h_p + U_o \cdot e^{-\alpha x} (\sin nt - \beta x) \quad (7)$$

waarin thans de constanten α en β samenhangen volgens:

$$\alpha^2 + \beta^2 = \frac{1}{kDc} \text{ en } 2\alpha\beta = \frac{S_1 n}{kD} \quad (8)$$

Vervolgens werd door Wesseling (1959) aan het model van Bosch nog weer een uitbreiding gegeven door het polderpeil h_p variabel te stellen en de invloed daarvan op de samendrukking van de watervoerende laag te verantwoorden door invoering van een tweede "bergings"-coëfficiënt: $S_2 = \rho g D \cdot \frac{\mu}{E_s}$.

De volumeveranderingen van de afdekkende laag als gevolg van de fluctuaties van h_p worden buiten beschouwing gelaten in verband met de geringe dikte daarvan ten opzichte van de dikte van het watervoerend pakket.

Er wordt zowel voor de stijghoogte h van het freatische water als voor het diepe grondwater ϕ een algemene oplossing gevonden:

$$h_x = M + \frac{U_o}{1 + (\mu cn)^2} e^{-\alpha x} (\sin nt - \beta x - a \sin t \cos (\mu cn)) \quad (9)$$

en

$$\phi_x = M + U_0 e^{-\alpha x} \sin (nt - \beta x) \quad (10)$$

welke laatste identiek is aan (4).

De waarden van α en β voldoen nu aan:

$$\alpha^2 - \beta^2 = \frac{(\mu A c - B)n^2}{1 + (\mu n c)^2}$$

$$2\alpha\beta = \frac{n(A + \mu B c n^2)}{1 + (\mu n c)^2} \quad (11)$$

waarin:

$$A = \frac{1}{kD} \cdot \{\mu + S_1 + S_2\}$$

$$B = \frac{\mu c}{kD} \cdot S_1$$

In de oplossingen (4), (7) en (10) kan α als een dempingscoëfficiënt worden beschouwd en β als een coëfficiënt die de fasevertraging bepaalt. In oplossing (9) wordt de amplitudedemping van het freatisch grondwater beschreven door de factor:

$$e^{-\alpha x} / (1 + (\mu n c)^2) = \exp - \{\alpha x + \ln (1 + (\mu n c)^2)\} \quad (12)$$

en de fasevertraging ervan door:

$$\beta x + \arctg (\mu n c) \quad (13)$$

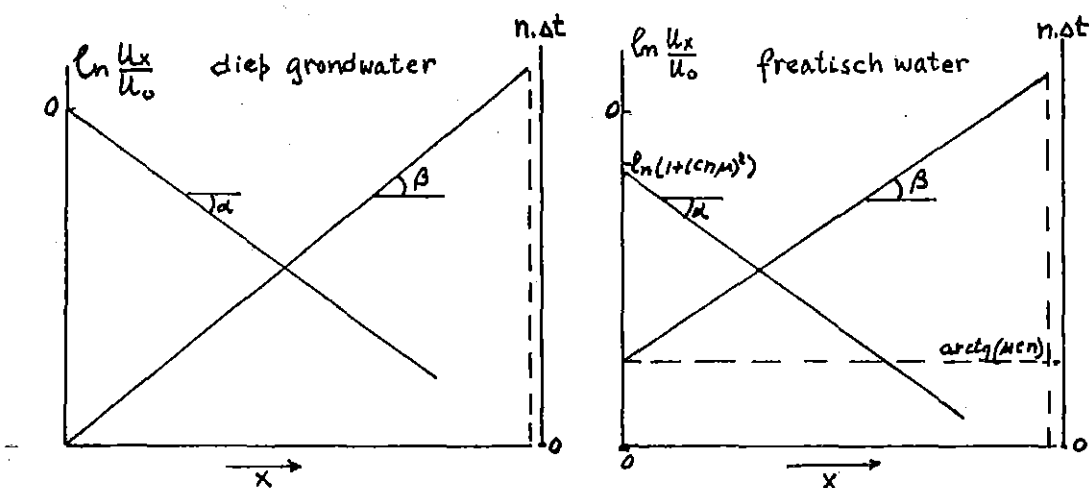
4. DE BEPALING VAN α EN β

De constanten α en β kunnen uit grondwaterstandswaarnemingen gevonden worden. Daartoe worden op een aantal plekken, gelegen op toenemende afstand tot het open water, dat aan getijdeschommeling onderhevig is, grondwaterstandswaarnemingen verricht. Dit dient te geschie-

den met een zodanige frequentie dat uit de tijdstijghoogtecurven de amplitude van de golfbeweging en de vertraging daarvan ten opzichte van het buitenwater met voldoende nauwkeurigheid is vast te stellen. De waarnemingsperiode dient minstens één volledige golfbeweging te omvatten, doch bij voorkeur meer dan één.

Wordt nu de natuurlijke logarithme van de amplitude verhouding U_x/U_0 in een assenkruis uitgezet tegen de afstand x dan kan door de stippen een rechte lijn worden getrokken die met de x -as een hoek α zal maken. Deze lijn gaat volgens (10) voor het diepe grondwater door de oorsprong, maar snijdt voor het freatische water (12) van de y -as een stuk $\ln(1 + (\mu cn)^2)$ af.

Evenzo kan β worden bepaald door de gemeten vertraging in uren (of minuten) om te rekenen in radialen en deze waarden eveneens tegen de afstand tot het buitenwater uit te zetten. De gemiddelde lijn door de punten getrokken zal dan een hoek β met de x -as maken. Voor het freatisch water zal deze lijn de y -as ($x=0$) snijden bij $y = \arctg(\mu cn)$ radialen.



Uit de betrekkingen (8) respectievelijk (11) kunnen de bodemcondansen worden berekend wanneer μ , ρ , ϵ , E_s en E_w bekend zijn. Dit is in de regel niet het geval. Aangezien voor minerale gronden voor μ , ϵ en ρ schattingen mogelijk zijn en kD - en c -waarden door pompproeven bekend kunnen zijn zou men dus ϵ , E_s en E_w kunnen berekenen.

5. OPZET VAN HET ONDERZOEK

5.1. H e t n e t v a n p e i l b u i z e n e n h e t w a a r - n e m i n g s s c h e m a

In het gebied van de Wilhelmina Polder, nabij de monding van het havenkanaal van Goes, werden op 16 plekken door het Laboratorium voor Grondmechanica tot een diepte van 10 m sonderingen verricht en werden door middel van het sondeerapparaat peilfilters geplaatst reikend tot in de zandondergrond. Indien op grond van het sondeerdiagram geconcludeerd werd tot de aanwezigheid van een slecht doorlatende kleilaag tussen de afdekkende laag en 10 m diepte, dan werd beneden deze slecht doorlatende laag een tweede filter geplaatst (filter 2).

In het onderzoek werden eveneens betrokken de voormalige ICW peilbuizen K133, K139 en K145, ieder met filters op circa 40, 30, 18 en 2 m-maaiveld. Figuur 3 geeft de ligging van de peilbuizen weer.

Als periode voor het verrichten van een onderzoek naar de voortplanting van de getijdegolf in het grondwater werd gekozen: het springtij van 12 en 13 juni 1979. De metingen van grondwaterstanden in peilbuizen en van de buitenwaterstand aan de peilschaal van het Goese Sas werden verricht van 8 uur op 12/6 tot 10 uur op 13/6. De frequentie van waarnemen werd zo gekozen dat ten tijde van hoog- en laagwater in de periode van 1 uur vóór tot 1½ uur ná deze uiterste standen elk kwartier werd gemeten. Tussen deze perioden werd elk half uur waargenomen.

De metingen werden georganiseerd door het Ingenieursbureau Witteveen en Bos te Deventer in samenwerking met Gemeentewerken van Goes en de leerlingen van de technische school.

5.2. D e b e w e r k i n g v a n d e g e g e v e n s

De verzamelde grond- en buitenwaterstanden werden verwerkt tot tijd-stijghoogtelijnen (figuur 4 A tot en met J). In deze figuren werden telkens 2 of meer tijd-stijghoogtelijnen van peilbuizen, voor de duidelijkheid zonodig ten opzichte van elkaar verschoven, bijeen gebracht. Bij iedere groep lijnen werd steeds de lijn voor het buiten-

water afgebeeld, teneinde een gemakkelijke visuele onderlinge vergelijking mogelijk te maken. Hierbij is de verticale schaal voor de peilbuizen 1:10 en voor de Oosterschelde 1:40 genomen.

Op grond van deze lijnen kan reeds aanstonds het volgende worden opgemerkt:

1. Slechts de peilbuizen gelegen op korte afstand van de Zeedijk vertonen een duidelijke golfbeweging te weten: 101, 110.1, 114.2, K139.1-3 en K145.1-4.
2. Een geringe doch toch nog onderkenbare golfbeweging vertonen de peilbuizen die op groter afstand van het buitenwater zijn gelegen: 102.1 en 2, 104.2, 108, 111, 112, 113, 115, 116, K133.1-4 en K139.4.
3. Geen reactie vertonen: 104.1, 103, 1 en 2, 107.1 en 2, 109, 117.1 en 2.
4. Een aantal peilbuizen reageert duidelijk op neerslag die in de nacht van 12 op 13 juni na $\pm$ 02,30 uur begon te vallen: 107.1 en 2, 109.2 en zeer opvallend 117.1.
5. Enkele peilfilters vertonen gedurende de gehele meetperiode duidelijk een vrijwel constante stijging: 117.2 en 118.2.

Teneinde van ieder meetpunt een reeks gegevens te krijgen met constante gelijke tijdsintervallen werd tussen de half-uur waarnemingen lineair geïnterpoleerd. Op deze wijze werden dus 105 kwartier "waarnemingen" verkregen.

5.3. H e t b e p a l e n v a n d e a m p l i t u d e - d e m - p i n g e n d e f a s e - v e r t r a g i n g

De gegevens van de peilbuizen, aangevuld met de op de kwartieren geïnterpoleerde waarden, werden met de computer bewerkt ten einde de constanten α (amplitudedamping) en β (fasevertraging) uit vergelijking (4) te bepalen. Hiervoor werd gebruik gemaakt van correlatieberekeningen volgens de methode van de kleinste kwadraten met de betrekking:

$$P_{x, t' + \Delta t'} = A_1 S_{o, t'} + A_o$$

waarin:

- $P_{x, t' + \Delta t'}$: de peilbuisstand gemeten op x m uit de hoogwaterlijn van het buitenwater;
 S_o, t' : de stand van het buitenwater op de peilschaal bij het Goese Sas op tijd t' ;
 t' : de tijd in kwartieren na het begin der waarnemingen;
 $\Delta t'$: de vertraging in kwartieren ten opzichte van het buitenwater;
 A_1 : de amplitudedemping U_x/U_o ;
 A_o : het intercept.

Door de reeks van de peilbuisgegevens met opklimmende waarden voor $\Delta t'$ ten opzichte van die van de reeks van het buitenwater te verschuiven kon voor iedere vergeleken positie de waarden voor A_1 en A_o en de correlatiecoëfficiënt R worden berekend. De verschuiving $\frac{1}{2} i x \Delta t'_x = \Delta t$ uren waarvoor de hoogste waarde voor R werd gevonden leverde de fasevertraging van het grondwater op. Voor het grondwater in de watervoerende laag is, uitgaande van (10), de waarde van

$$A_1 = U_x/U_o = e^{-\alpha x} \quad (14)$$

en van

$$n \cdot \Delta t_x = \beta x \text{ radialen} \quad (15)$$

In figuren 5 A tot en met C werden de waarden van R, A_1 en A_o tegen Δt_x (in uren) uitgezet. Uit de figuren valt af te zien dat:

1. R en A_1 een duidelijke optimum curve vertonen;
2. dat de filters 108, 111, 112, K133dd en K133md negatieve vertragingen vertonen: dus schijnbaar vóórlopen op de getij-beweging;
3. het intercept A_o weinig varieert behalve voor K133.d;
4. enkele curven voor R onregelmatigheden vertonen, 103.1, 110.2, 118.1 en K133.od.

De tweetoppigheid van de R-curven voor 103.1 en 118.1 zou kunnen worden veroorzaakt doordat de drukgolf van het getij in het grondwater met een verschil in fase uit twee verschillende richtingen het meetpunt bereikt. Het gedrag van 110.2 (5,80 m-mv) ¹. Gezien het zeer vlakke beloop van de tijd-stijghoogtecurve lijkt de veronderstelling gewettigd dat dit filter ten gevolge van een hoge weerstand slechts langzaam reageert op stijghoogteveranderingen van het grondwater. Tenslotte bereikte de curve voor R van K133.0d na een toegepaste vertraging van $3\frac{1}{2}$ uur de waarde 0,24, zodat een eventueel te bereiken maximum wellicht omstreeks een vertraging van $4\frac{1}{2}$ à 5 uren zal liggen bij een maximum voor R dat weinig hoger ligt dan 0,24. Er is voor dit filter dus weinig samenhang tussen de stijghoogte van het ondiepe grondwater en het buitenwater.

De gegevens van de correlatieberekeningen werden in tabel 1 samengevat, gerangschikt naar toenemende afstand.

5.4. De bepaling van de constanten α en β

Uitgaande van de vergelijking (10) kan de constante α grafisch worden bepaald. Wordt, zoals in par. 4 is uiteengezet, voor een aantal waarnemingspunten in een raai loodrecht op de zeedijk de natuurlijke logaritme van de amplitude verhouding $A_1 = U_x/U_0 = e^{-\alpha x}$ uitgezet tegen de afstand tot de dijk, dan kan door de verkregen stippen een gemiddelde lijn worden getrokken. Deze lijn maakt een hoek α met de x-as. Evenzo wordt een rechte lijn verkregen indien de fasevertraging $n \cdot At_x$ (rad.) wordt uitgezet tegen de afstand. Deze rechte lijn maakt een hoek β met de x-as.

Deze bewerking werd uitgevoerd voor de raaien I tot en met V en voor alle peilbuizen met filters tussen 2 en 20 m-mv (figuur 6). De gevonden waarden voor α , β en de intercepten γ en δ alsmede de correlatiecoëfficiënten voor beide relaties werden in tabel 2a samengevat.

Bij deze figuren dient aanstonds te worden aangetekend dat de in tabel 1 vermelde fasevertragingen van de buizen op afstanden tussen 500 en 800 m vanaf de zeedijk met de waarde 2π werden verhoogd en die op afstanden groter dan 800 m met 4π .

¹ wijkt wel zeer af van het ondieper gestelde filter 110.1

De betreffende peilbuizen werden in tabel 2 met een "*" respectievelijk "**" gemerkt. Deze vermeerdering met 2π , respectievelijk 4π wil dus zeggen dat de betreffende peilbuizen geacht worden $n \cdot \Delta t_x + 2\pi$, respectievelijk $n \cdot \Delta t_x + 4\pi$ radialen achter te lopen bij het getij. Werd deze "correctie" niet uitgevoerd dan zouden voor de fasevertraging negatieve waarden voor de constante β worden gevonden. Dit zou inhouden dat bij toenemende afstand de fasevertraging afneemt, waardoor op grote afstanden tot het open water zelfs negatieve vertragingen zouden voorkomen. Het grondwater zou daar dan voorlopen op het getij.

Bij de beschouwing van de diagrammen van figuur 6 kan het volgende worden opgemerkt:

1. De lijnen voor de fasevertraging gaan niet door de oorsprong van het assenkruis;
2. De constante β is voor de raaien I-V een factor 3,7-39,4 maal zo groot als α , voor alle gegevens tezamen is deze factor 6,5;
3. De correlatiecoëfficiënten (tabel 2) voor de lijnen voor zowel de fasevertraging als voor de amplitudedemping zijn hoog ($> 0,95$);
4. De berekende waarden voor x waarvoor $U/U_0 = 1$ en $\Delta t_x = 0$ vertonen zeer grote verschillen.

ad 1. Dat de lijnen voor de fasevertraging niet door de oorsprong van het assenkruis zouden gaan viel te verwachten. De zeedijk valt niet samen met het nulpunt voor de afstand tot het open water, doordat zich een schor of wad voor de dijk bevindt. Bij vloed staat het water van de Oosterschelde tegen de dijk, doch bij eb trekt de waterlijn zich terug tot deze bij de stroomgeul komt te liggen, die op wisselende afstanden (enkele tientallen tot honderdtallen meters) van de dijk is gelegen. De stijghoogte van het grondwater in het wad zakt ten gevolge van de grote drainageweerstand, slechts weinig beneden het maaiveld, wellicht slechts enkele decimeters. Dit maakt dat de neerwaarts gerichte tak van de getijdegolf als het ware door het wad wordt afgeknot. De "scheve" tijd-stijghoogtelijn van peilbuis 110.1 lijkt dit verschijnsel te tonen en in mindere mate peilbuis 114.2 (fi-

guur 4). Hoe hoger het wad of de schor gelegen is, hoe sterker de dempende werking op de drukgolf die onder de zeedijk door de polder bereikt.

Een verder complicatie kan zijn gelegen in de vorm van de kustlijn. Zo is het denkbaar dat de peilbuizen in het gebied ten noorden van de Goese Haven door de drukgolf van het getij afkomstig van verschillende kustgedeelten wordt bereikt, waarbij de mogelijkheid van interferentie niet uitgesloten moet worden geacht.

ad 2. Volgens de theorie neergelegd in de vergelijkingen (5), (8) en (11) kan β niet groter zijn dan α . Eveneens onwaarschijnlijk is het geval dat β negatief zou zijn. De "kunstgreep" om dit te verhelpen door de eerder besproken correcties van 2π en 4π toe te passen leidt echter tot waarden van β die groter zijn dan die van α . Dit zou er op kunnen wijzen dat de bodemopbouw van de Wilhelmina Polder en van het voor de dijk aanwezige wad of schorregebied gecompliceerder is dan bij de schematisering ten behoeve van de ontwikkelde theoretische berekeningen werd aangenomen. Deze veronderstelling vindt voorts nog bevestiging in het feit dat de lijnen voor de fasevertraging ondanks de 2π respectievelijk 4π correctie negatieve intercepten hebben, tenzij de afstanden van respectievelijk 0-400 à 500 m, 400 à 500-800 à 100 m en > 1000 m.

De lijnen voor de amplitudedemping van figuur 6 geven voor de vijf raaien waarden voor α , waarvan de hoogste en de laagste een factor 6,5 verschillen met een gemiddelde van 0,00178. De amplitudedempingen voor $x = 0$ m liggen een factor 8,75 uit elkaar, bij een gemiddelde van 0,063. Dit zijn beide nogal flinke spreidingen.

Dezelfde bewerking als boven geschetst werd ook uitgevoerd voor de drie diepe boringen K133, K139 en K145. De resultaten staan vermeld in tabel 2b. Ook hier weer werden voor de afstand van 400 m (K139) en 1000 m (K133) "correcties" van respectievelijk 2π en 4π op de fasevertraging toegepast. De berekende α - en β -waarden, behalve de negatieve waarde van α voor de middeldie-

als correcties 2π , 4π en 6π worden toegepast voor

pe filters, en bijbehorende intercepten passen goed bij die voor de ondiepere peilfilters van tabel 2a. De berekende lijnen voor de fasevertraging gaan bijna door de oorsprong.

- ad 3. De correlatie coëfficiënten voor de lijnen van figuur 6 zijn alle hoog, behalve die voor de middeldiepe filters van tabel 2b. Er blijkt dus een duidelijk verband tussen de afstand van de filters tot de dijk en respectievelijk de amplitudedamping en de fasevertraging.
- ad 4. Bij een juiste schematisering zou men mogen verwachten dat de nulpunts verschuivingen voor zowel de amplitudedamping als de fasevertraging voor de raaien gelijke waarden zouden vertonen. Dit is niet het geval. De correcties van 2π en 4π voor de fasevertraging geven voor $\Delta t = 0$ voor x waarden > 0 . Dit duidt er op dat genoemde correcties niet juist zijn. Een extra correctie van 2π brengt de waarden van x dichterbij elkaar doch leidt tot onwaarschijnlijk grote fasevertragingen.

6. DE CORRECTIE VAN GEMETEN GRONDWATERSTANDEN

Bij studies betreffende de waterhuishouding van een gebied en van de opbrengsten van gewassen onder invloed van regenval, verdamping, bodemgesteldheid en waterhuishouding worden gegevens betreffende de stijghoogte van het grondwater of de ontwateringsdiepte van de grond gebruikt. De onderzoeker is bij zulke studies geïnteresseerd in die gegevens, die een inzicht geven in de grondwaterbeweging, naar richting en intensiteit daarvan, en in de waterbeweging in de onverzadigde zone van de grond. Naast de bodemopbouw en de eigenschappen der samenstellende lagen wordt de capillaire vochtstroom mede bepaald door de diepte waarop zich het grondwatervlak beneden maaiveld, c.q. de onderzijde van de doorwortelde grondlaag, bevindt.

Voor dergelijke studies als boven bedoeld vormen de relatief kortdurende en vaak kleine periodieke schommelingen van het grondwater veroorzaakt door de zich landinwaarts voortplantende drukgolf van de getij beweging slechts een storend element. Grondwaterstandsgegevens

dienen dan ook op deze "getij fluctuaties" gecorrigeerd te worden. De "opgeschoonde" gegevens geven dan weer de grondwaterstanden en grondwaterbeweging zoals die tot standkomen onder invloed van klimaats factoren, topografie van het gebied en het patroon van ontwaterings- en afwateringsmiddelen.

6.1. Een praktische en eenvoudige correctiemethode

Voorwaarde voor een correctie van gemeten grondwaterstanden op getijde invloeden is dat men naast de relatie tussen de afstand tot het buitenwater de amplitudedemping en fasevertraging van de drukgolf van het getij ook het juiste tijdstip van de waarneming kent. Uit de getijde tafels kan dan voor het dichtstbijzijnde waarnemingspunt van het getij - in ons geval Wemeldinge - worden afgelezen: de tijdstippen van hoog- en laagwater waartussen de eigen waarnemingen liggen en de berekende standen van hoog- en laagwater.

Door de getijde golf en de daardoor veroorzaakte drukgolf in het grondwater als een cosinus functie te benaderen kunnen, rekening houdend met fasevertraging en amplitudedemping de correcties op de gemeten grondwaterstanden worden berekend met de volgende formule:

$$\Delta h_{x, t} = \left\{ \frac{H_2 + H_1}{2} - \frac{H_2 - H_1}{2} \cos \frac{\pi}{t_2 - t_1} (t - \Delta t_x - t_1) \right\} e^{-\alpha_x x} + \gamma_x \quad (16)$$

met:

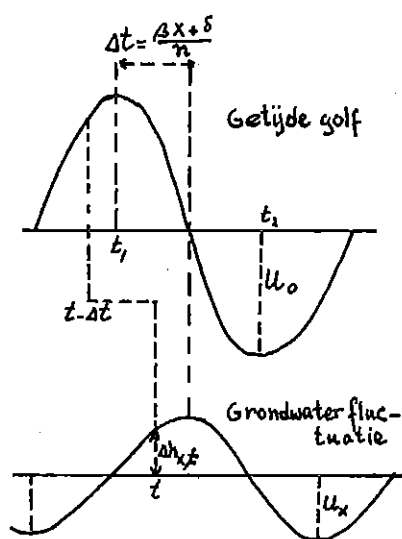
$$\Delta t_x = \frac{\beta_x \cdot X + \delta}{n} \text{ uren}$$

zodat

$$h_{x, t} = h_{x, t}^l - \Delta h_{x, t} \quad (17)$$

H_1 resp. H_2 : de hoog- resp. laagwaterstand of laag-, resp. hoogwaterstand (m NAP)

t_1 resp. t_2 : de tijdstippen van H_1 resp. H_2



- t_x : het tijdstip waarneming grondwaterstand (m NAP) op x m van de zeedijk (uren)
- Δt_x : de fasevertraging in uren op x m afstand
- $\Delta h_{x, t}$: de verhoging c.q. verlaging van de grondwaterstand t.g.v. de getijde golf op tijd t en afstand x m van de zeedijk
- $h^1_{x, t}$: de gemeten grondwaterstijghoogte op tijd t en x m afstand (m NAP)
- $h_{x, t}$: de gecorrigeerde stijghoogte (m NAP)

6.2. De correcties in de praktijk

De mogelijkheid om de gemeten grondwaterstanden te kunnen corrigeren op de getijde in vloed wordt, bij bekende amplitudedempingen en fasevertragingsrelaties, voornamelijk bepaald door een nauwkeurige tijdwaarneming bij het waarnemen. Bij springtij is er op de Oosterschelde een getij amplitude van 1,80 m. De maximale peilverandering bedraagt dan bij half tij 26 cm per kwartier. Strekken de waarnemingen zich uit over een periode van 3 uren (meestal werd waargenomen tussen 13 en 16 uur) dan kan in dat tijdsinterval de variatie van het buitenwaterpeil maximaal circa 2,80 m bedragen (zie figuur 1). Wanneer men, wegens de onbekendheid van het juiste tijdstip van waarneming alle waarnemingen fixeerd op het midden van de waarnemingsperiode dan dient men rekening te houden met een maximale fout van $1,40 \times U_x/U_0$. Voor 29 van 36 peilfilters van tabel 2 bedraagt de maximale fout bij springtij dan minder dan ± 5 cm. Bij de overige 7 mag men dan een fout van $\pm (10-20)$ cm verwachten.

7. NABESCHOUWING

Het onderzoek naar de voortplanting van de getijde golf in het grondwater van de Wilhelmina Polder heeft twee opmerkelijke verschijnselen opgeleverd.

1. De sterk amplitudedemping reeds op korte afstand van de zeedijk.
2. De fasevertraging, die zich niet gedraagt conform de theorie.

Er zijn een aantal factoren aan te wijzen voor het afwijkend gedrag van de reactie van het grondwater op de drukgolf van het getij op de Oosterschelde:

- a. De aanwezigheid van een wad of schor voor de dijk.
- b. De intensieve drainage van de polder.
- c. Een gecompliceerde bodemopbouw die niet overeenkomt met de schematisering daarvan zoals voor de theorie toegepast.
- d. De samendrukbaarheid van de afdekkende klei- en slibhoudende zandlagen heeft grote invloed en mag niet verwaarloosd worden.
- e. De kustvorm waardoor de drukgolf, uit verschillende punten afkomstig, zou kunnen interfereren.
- f. De kwaliteit en betrouwbaarheid van de peilbuizen.
- g. Invloeden van barometerstands- en temperatuurswisselingen en voorts het aardgetijde.

Een aantal van deze punten is in het voorgaande reeds ter sprake gekomen. De grote demping van de drukgolf van het getij kan mede het gevolg zijn van de intensieve drainage van de polder, waarvan drainage afstanden variëren van 8,5 tot 15 m.

Ten aanzien van de bodemopbouw is bekend uit sonderingen ten behoeve van het grondonderzoek voor de bouwput en voor het plaatsen van de grondwaterbuizen, dat de eerste 6-10 m bestaat uit, kleilagen en slibhoudend wad zand (sondeerwaarde $< 5 \text{ MN m}^{-2}$). Deze lagen kunnen wellicht een niet verwaarloosbare samendrukbaarheid hebben.

Voorts kan nog een vraagteken geplaatst worden bij de kwaliteit van de peilfilters. Deze bestaan uit stalen buizen van 2,5 cm diameter.

Ze werden met het sondeerapparaat de grond in gedrukt tot de vereiste diepte. Dit maakt dat er in klei- en slibhoudend zand kans is op het dichtsmeren van deze filters. Niet bekend is de constructie ervan. Tijdens het nemen van watermonsters uit de peilfilters bleek dat de toestroming vanuit de grond naar de peilbuis bij een aantal erg traag verliep. Een hoge weerstand in en rond het filter kan er de oorzaak van zijn dat een grotere demping van de amplitude van de drukgolf van het getij wordt gemeten dan zich ter plaatse in werkelijkheid voordoet. Een indicatie hiervoor vormen de peilbuizen in tabel 1 waar- bij "geen reactie" werd vermeld. Deze blijken op "alle" afstanden voor te komen (zie ook figuur 4 A-J).

De laatst genoemde invloeden zijn in de regel klein en verwaar- loosbaar. Tijdens de waarnemingsperiode van 12 op 13 juni daalde de barometerstand 10 mb. Volgens Ernst (1962) kan dit een stijging van het freatisch vlak ten gevolge gehad hebben van 1-3 cm. Gezien de kleine amplitude's (minder dan 5 cm) van een niet onbelangrijk aan- tal peilfilters van tabel 1, kan men zich afvragen in hoeverre de barometerstand de uitkomsten van de proef hebben beïnvloed. Via een regressieberekening van de gemeten grondwaterstanden op de tijd kon worden afgeleid dat de meeste peilbuizen een gemiddelde stijging ver- toonden van 0,1 - 0,3 cm per uur, maar ook dat enkelen veel grotere stijgingen vertoonden, welke gezien de geleidelijkheid ervan niet aan de om 02.30 uur invallende regen kan worden geweten. (Figuur 4.)

Gezien de diepte van het grondwatervlak onder maaiveld kan de invloed van de temperatuur fluctuatie verwaarloosd worden, terwijl omtrent het aardgetijde in het geheel geen informatie voorhanden is.

LITERATUUR

- BOSCH, H. (1951). Geo-hydrologisch onderzoek Bergambacht. Hydrol. Coll. (5) nr. 255A 1951 typescr.
- ERNST, L.F. (1962). Grondwaterstromingen in de verzadigde zone en hun berekening bij aanwezigheid van horizontale evenwijdige open leidingen. Diss. R.U. Utrecht.

- STEGGERWENTZ, J.H. De invloed van de getij-beweging van zeeën en getijrivieren op de stijghoogte van het grondwater. Diss. Delft 1933.
- WESSELING, J. (1959). The transmission of tidal waves in elastic artesian basins. Neth. Journ. of Agric. Science Vol. 7 no. 1 (Feb. 1959) (p. 22-32).
- WESSELING, J. (1960). Enkele resultaten van de bepaling van hydrologische constanten uit getijwaarnemingen in het Prunjegebied (Schouwen-Duiveland) Geol. en Mijnb. 39 pg. nov. 1960 (p. 640-630).

Tabel 1. De kortste afstand van de peilfilters tot de Zeedijk, de amplitude van de grondwaterbeweging, de verhouding daarvan tot die van het getij op de Oosterschelde en de fasevertragingen

Peilbuis nr	Afstand m	Amplitude cm	Intercept cm	Amplitude verhouding		Fase-vertraging		Correlatie coëfficiënt	Raai
				U_x/U_o	$\ln U_x/U_o$	uren	radialen		
110.1	70	29,2	25,2	0,1546	- 1,867	2,50	1,265	0,92	II
.2	70	Geen reactie / Negatieve reactie							
114.1	100	Peilbuis defect							
.2	100	7,2	- 30,4	0,0378	- 3,275	3,25	1,644	0,72	III
101.	200	16,5	- 5,1	0,0870	- 2,442	2,00	1,012	0,97	I
K145 dd	200	26,2	- 15,3	0,1381	- 1,980	1,25	0,632	0,98	
md	200	1,8	- 14,2	0,0094	- 4,667	1,75	0,885	0,99	
d	200	23,7	- 13,3	0,1251	- 2,079	1,25	0,632	0,98	
od	200	14,8	- 11,9	0,0782	- 2,548	2,00	1,012	0,98	I
113	350	3,3	- 28,1	0,0173	- 4,057	3,00	1,518	0,69	III
116	400	4,0	- 42,6	0,0209	- 3,868	2,00	1,012	0,92	IV
* K139 dd	400	7,3	- 34,1	0,0384	- 3,260	1,25	0,632	0,94	
* md	400	5,3	- 37,7	0,0279	- 3,579	1,00	0,506	0,93	
* d	400	5,1	- 40,0	0,0267	- 3,623	1,25	0,632	0,94	V
* od	400	2,3	- 67,0	0,0119	- 4,431	1,75	0,885	0,80	V
103.1	450	2,6	- 13,0	0,0140	- 4,269	2,75	1,391	0,72	
.2	450	Geen reactie							
109.1	500	Geen reactie							
.2	500	Geen reactie							
* 102.1	700	4,0	- 37,0	0,0210	- 3,863	0,25	0,126	0,90	I
* .2	700	4,2	- 31,5	0,0223	- 3,803	0,75	0,379	0,86	I
* 112	700	3,0	- 2,1	0,0159	- 4,141	- 0,50	- 0,253	0,91	III
* 115	750	2,6	- 18,8	0,0138	- 4,283	0,25	0,126	0,80	IV
104.1	1000	Geen reactie							
** .2	1000	3,1	16,4	0,0163	- 4,117	1,00	0,506	0,85	I, V
** K133 dd	1000	4,7	- 18,9	0,0251	- 3,685	- 0,75	- 0,379	0,85	
** md	1000	4,4	- 10,0	0,0231	- 3,768	- 0,75	- 0,379	0,79	
** d	1000	3,4	0,59	0,0179	- 4,023	0,75	0,379	0,68	V
** od	1000	Geen reactie / geleidelijke stijging							
** 108	1100	1,6	20,7	0,0085	- 4,768	- 0,75	- 0,379	0,73	I, II, V
** 118.1	1150	1,7	26,0	0,0088	- 4,733	0,25	0,126	0,58	IV
** .2	1150	Geen reactie / geleidelijke stijging							
** 111	1150	2,0	- 2,1	0,0106	- 4,547	- 0,25	- 0,126	0,85	III
107.1	1500	Geen reactie							
.2	1500	Geen reactie							
117.1	2000	Geen reactie / geleidelijke stijging							
.2	2000	Geen reactie / geleidelijke stijging							

Amplitude Getij: 181 cm

1 uur = 0,50589 radialen

Bij een aantal buizen werd op de waarde voor de fasevertraging nog een "correctie" toegepast; gemerkt met:

*: + 2 π en **: + 4 π

Tabel 2. De waarden voor α en β en de correlatie coëfficiënt R voor de betrekkingen: 1 $U_x/U_o = -\alpha x + \gamma$, respectievelijk $n \cdot \Delta t = \beta x + \delta$ voor het ondiepe grondwater.

A. Peilfilters 2-20 m-mv

Raai	Peilbuizen	$\alpha \times 10^3$	γ	R	$\beta \times 10^2$	δ	R	voor $n \cdot \Delta t = 0$ $x: m$
I	101, 102.1* en 2*, 104.2** 108** en K145.od	2,35	- 2,07	- 0,98	1,33	- 1,94	0,98	145
II	108** en 110.1	2,82	- 1,67	- 1,00	1,06	- 0,52	1,00	- 49
III	111**, 112*, 113 en 114.2	1,07	- 3,39	- 0,91	1,09	- 0,86	0,97	79
IV	115*, 116, 118.1**	1,15	- 3,41	- 0,99	1,56	- 5,24	0,99	335
V	104.2**, 108**, K133.d**, K139.od* en K139.d*	0,44	- 3,84	- 0,98	1,733	- 5,82	0,98	335
Alle bovengenoemde nummers		1,78	- 2,76	- 0,96	1,244	- 1,75	0,96	140

B. Diepe boringen K133, K139 en K145

Diepste filters	: 40 m-mv	1,80	- 2,01	0,85	1,31	- 0,43	0,95	33
Middeldiepste filters:	30 m-mv	- 0,79	- 4,43	0,57	1,29	- 0,33	0,95	22
Diep filters	: 20 m-mv	2,02	- 2,16	0,82	1,42	- 0,72	0,96	50

C. De waarden voor x waarbij $U/U_x = 1$ en $\Delta t_x = 0$

	x voor	
	$U/U_x = 1$	$\Delta t_x = 0$
Raai I	- 880	145
II	- 585	- 49
III	- 3168	79
IV	- 2965	335
V	- 8727	335
Alle gegevens	- 1550	140

Diepste filters	- 1116	33
Middeldiepe filters	+ 5607	22
diepe filters	- 1069	50

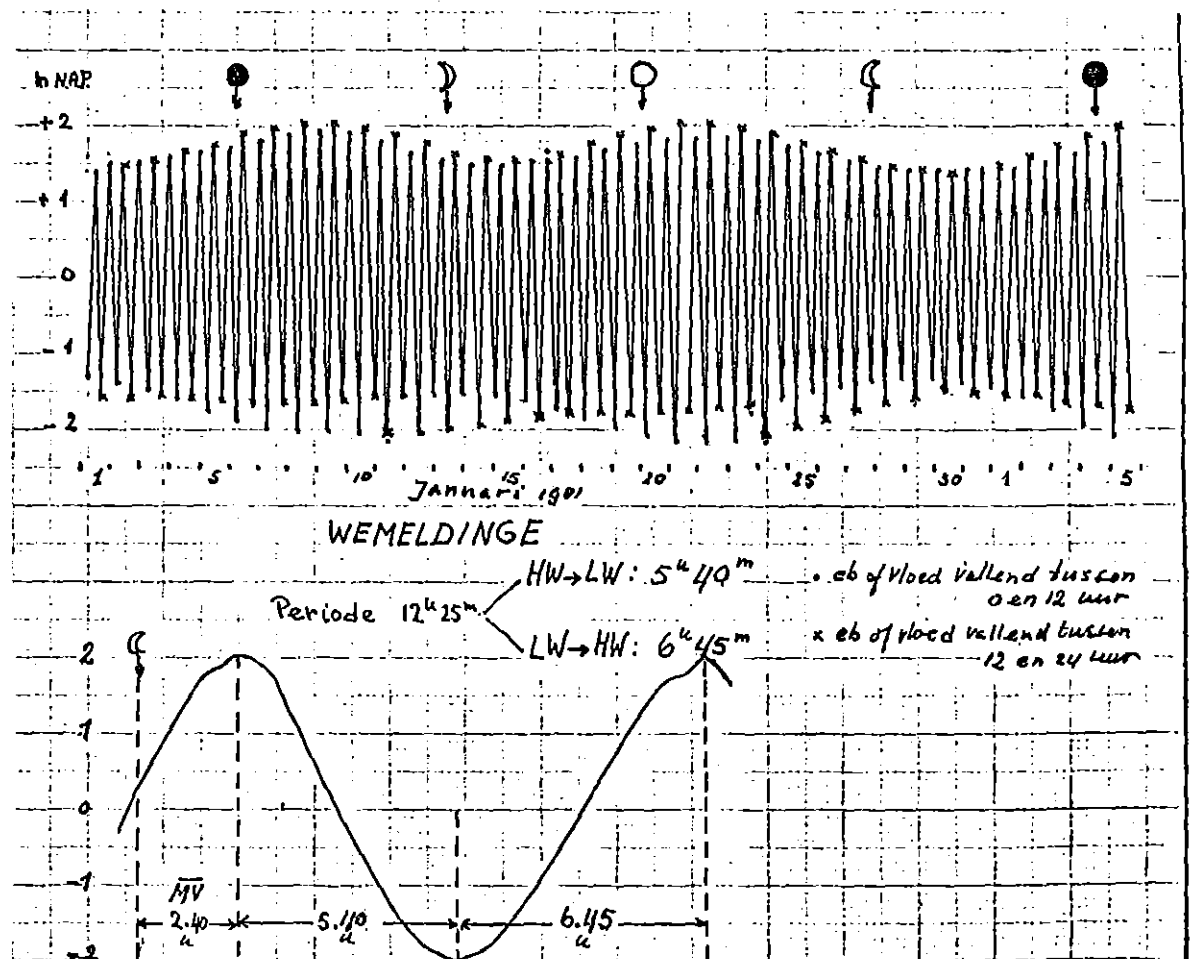


Fig 1.: Enkele karakteristieke gegevens omtrent het getijde verloop op de Oosterschelde zoals gemeten wordt bij Wemeldinge (Bron: Getijtafels van Nederland; staatsuitgeverij, Den Haag)

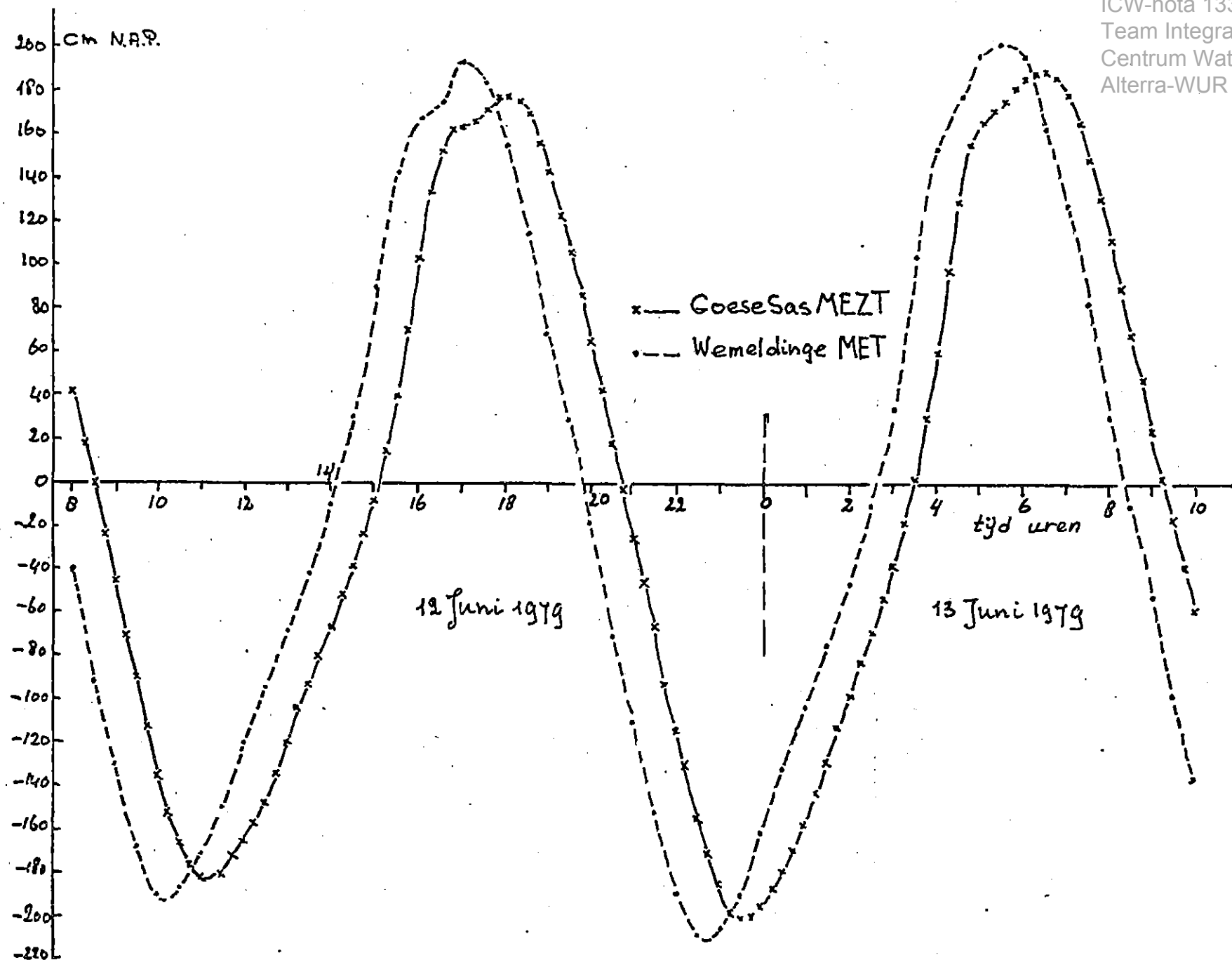


Fig. 2 : De getijde curven voor Goese Sas en Wemeldinge voor 12 en 13 Juni 1979

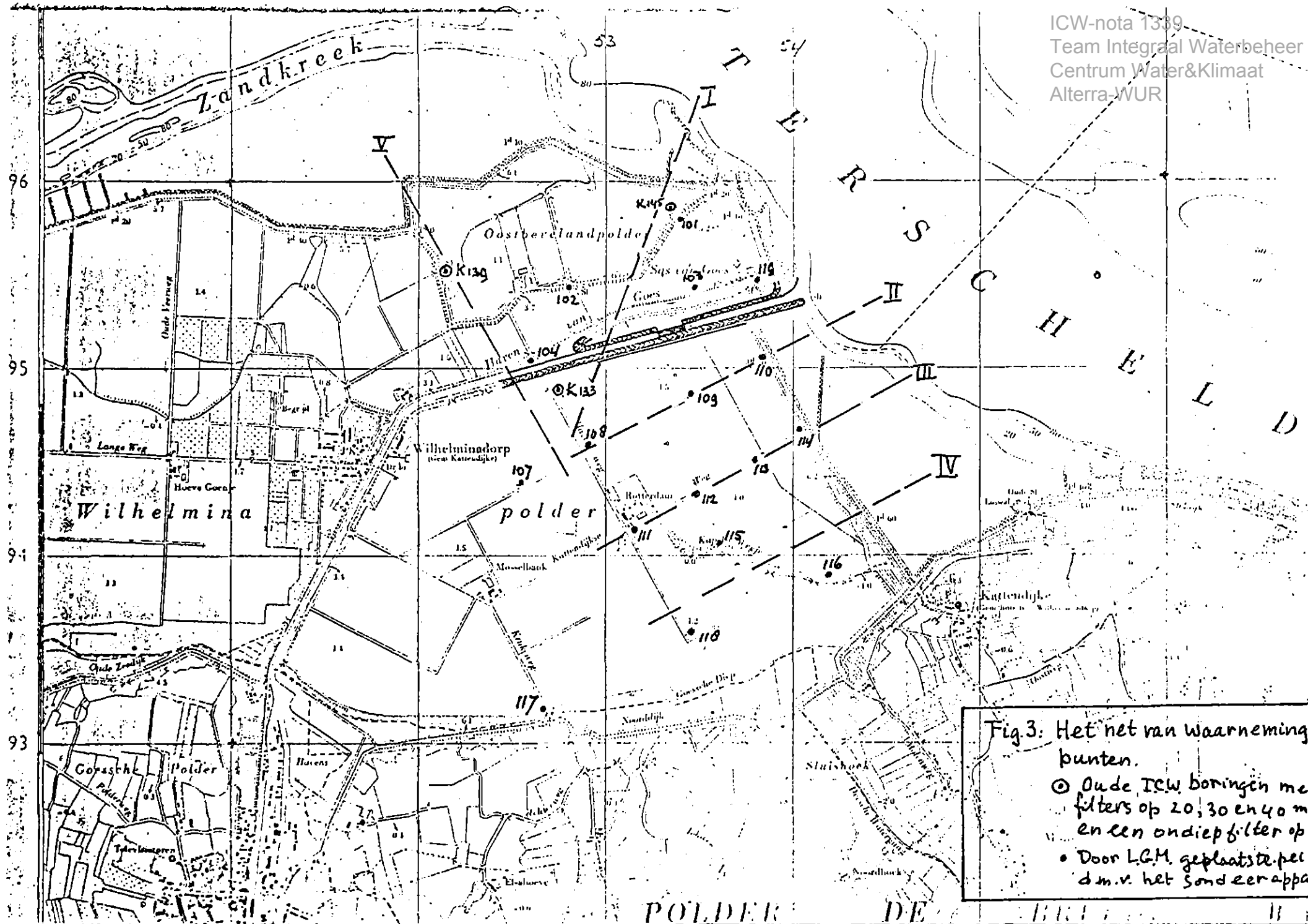
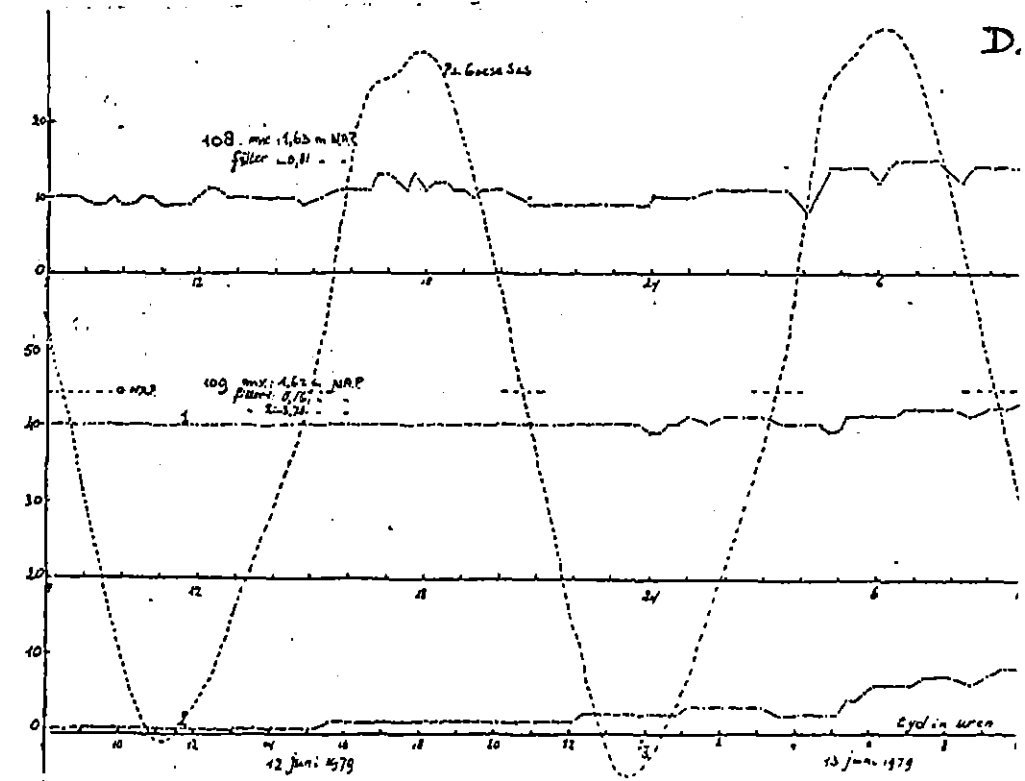
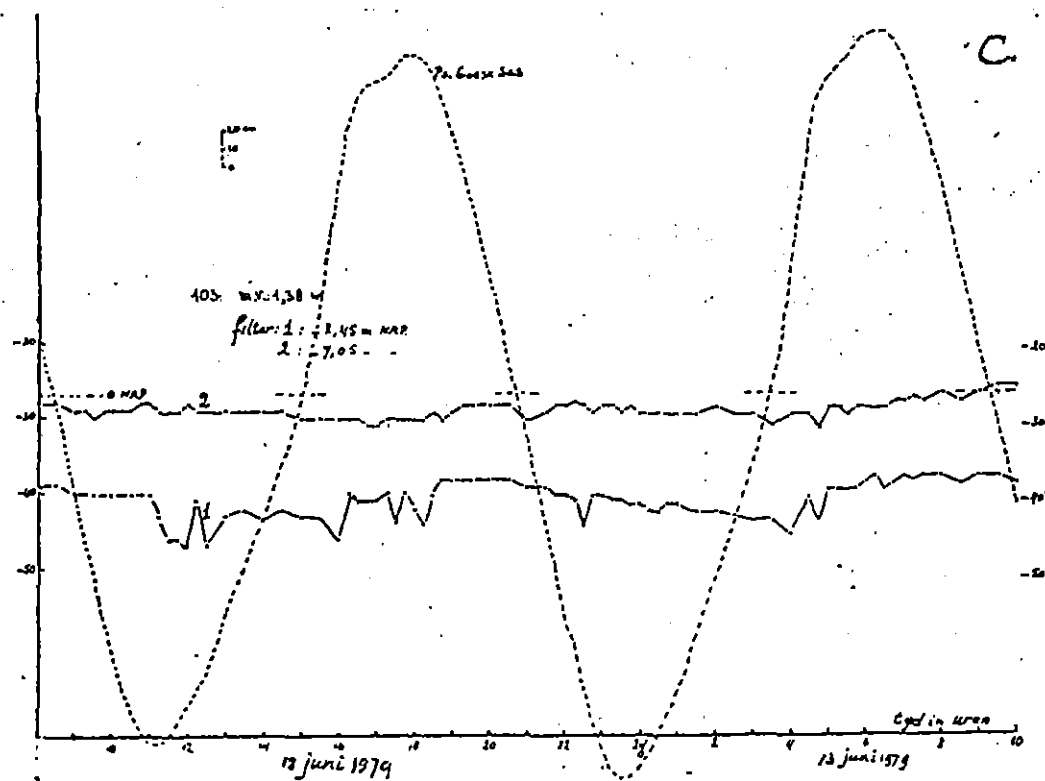
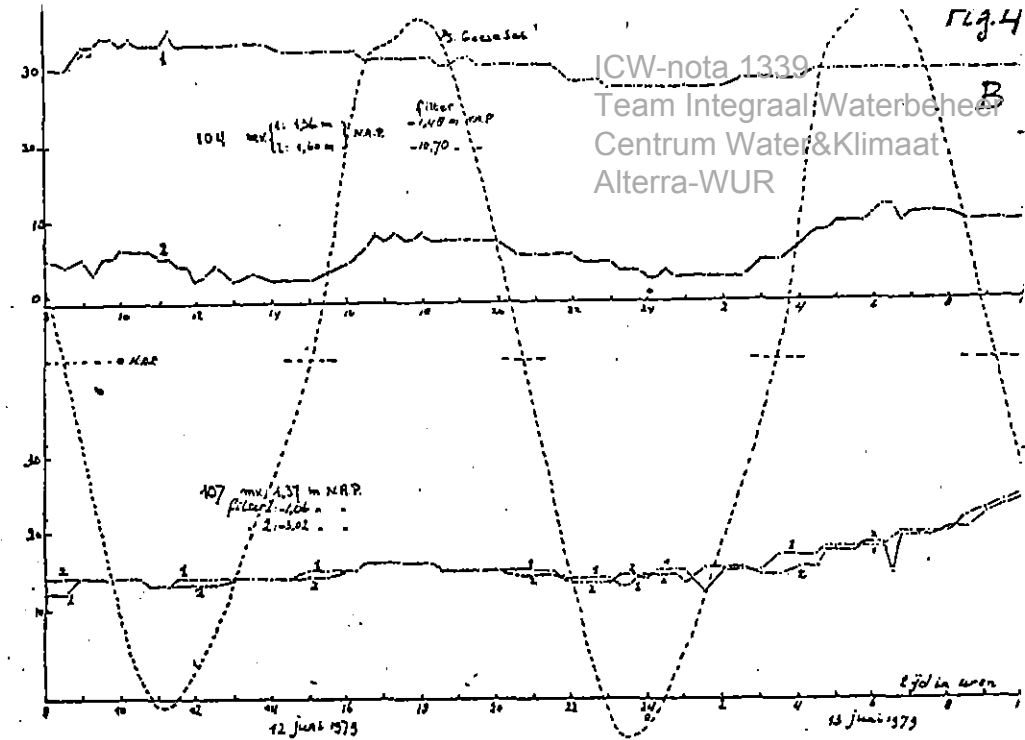
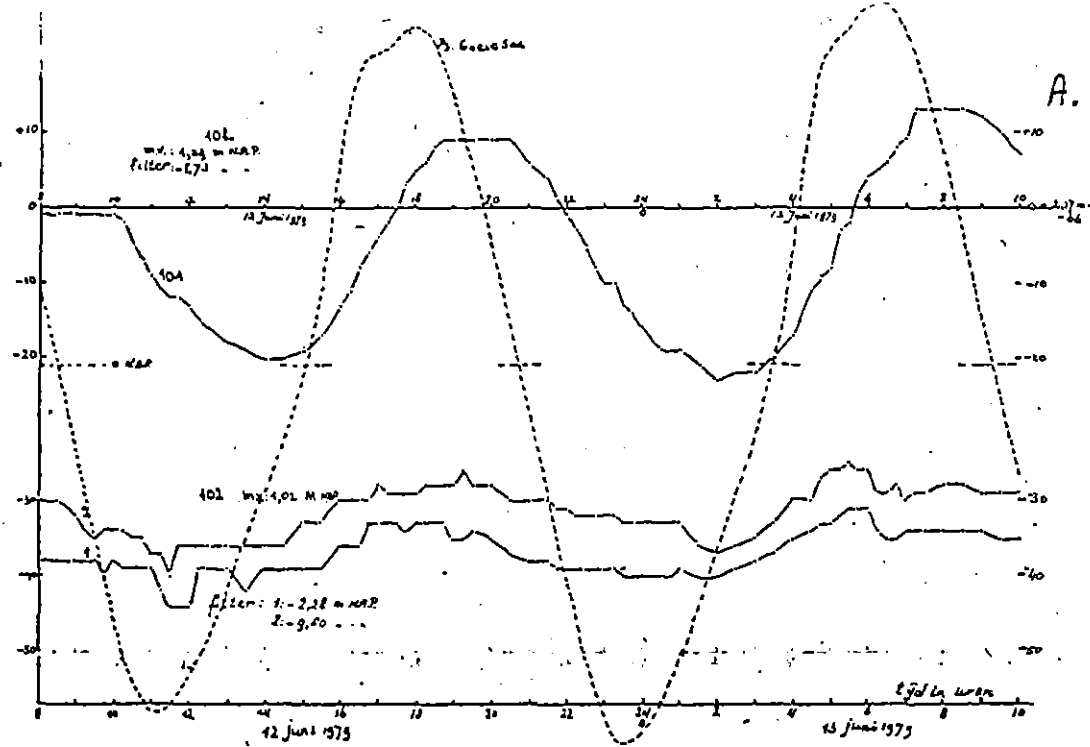


Fig.3: Het net van waarnemingspunten.

- ⊙ Oude ICW boringen met filters op 20, 30 en 40 m en een ondiep filter op
- Door L.G.M. geplaatste peet d.m.v. het sondeerappa



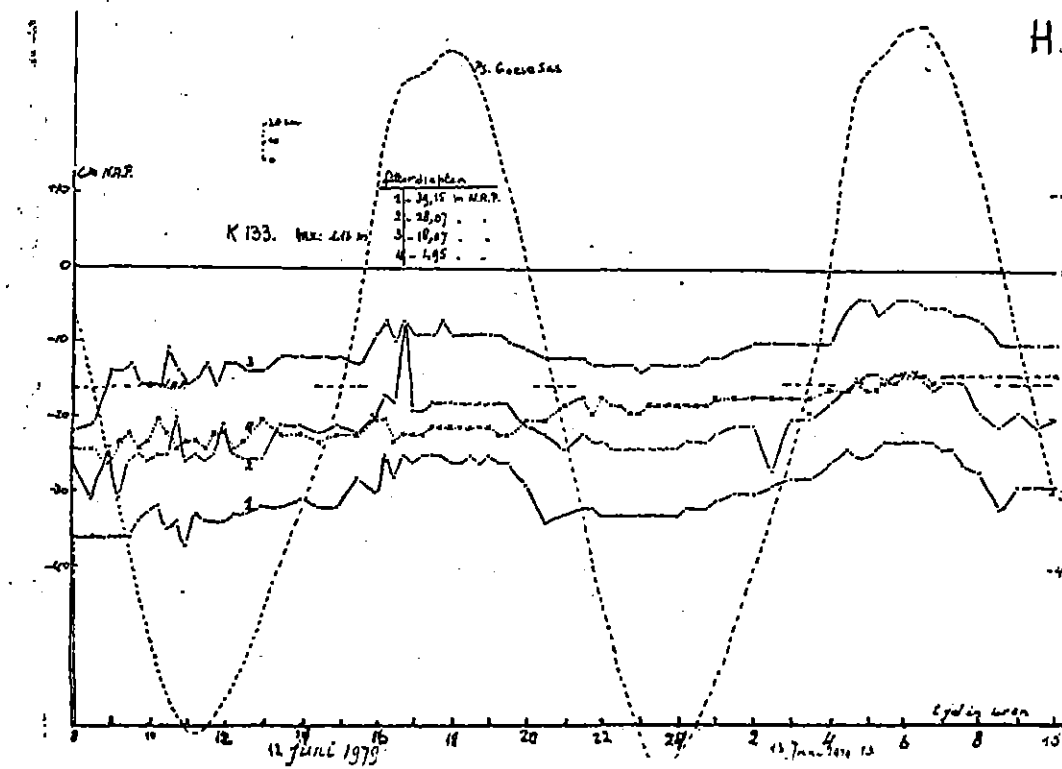
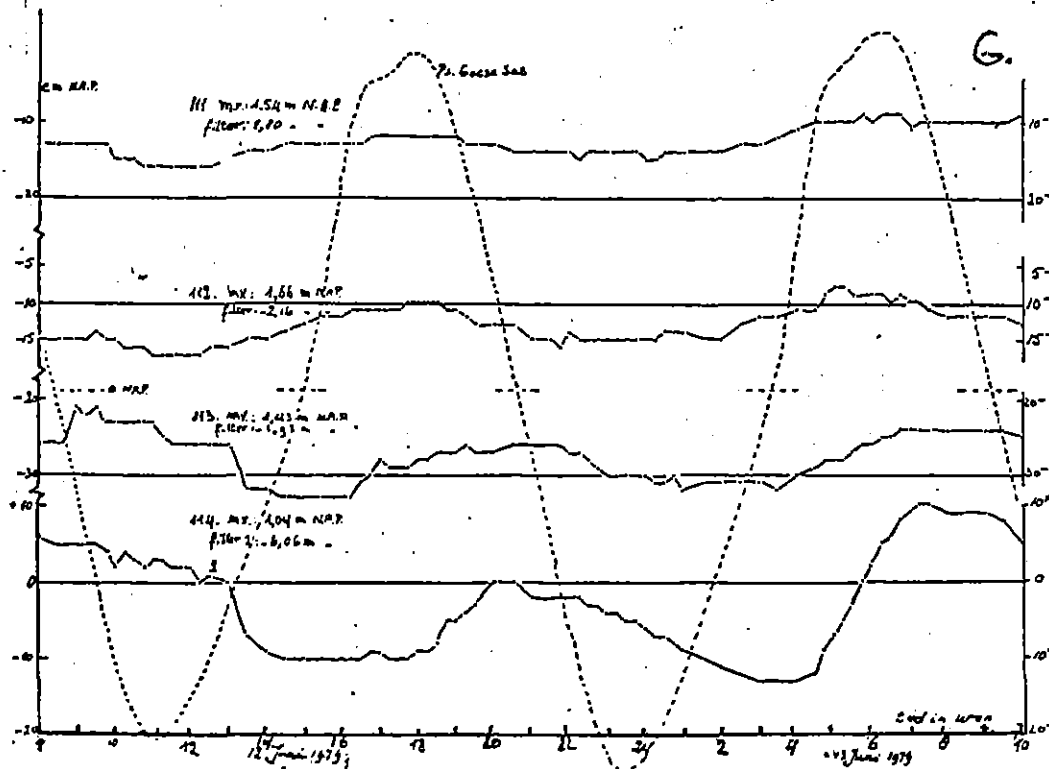
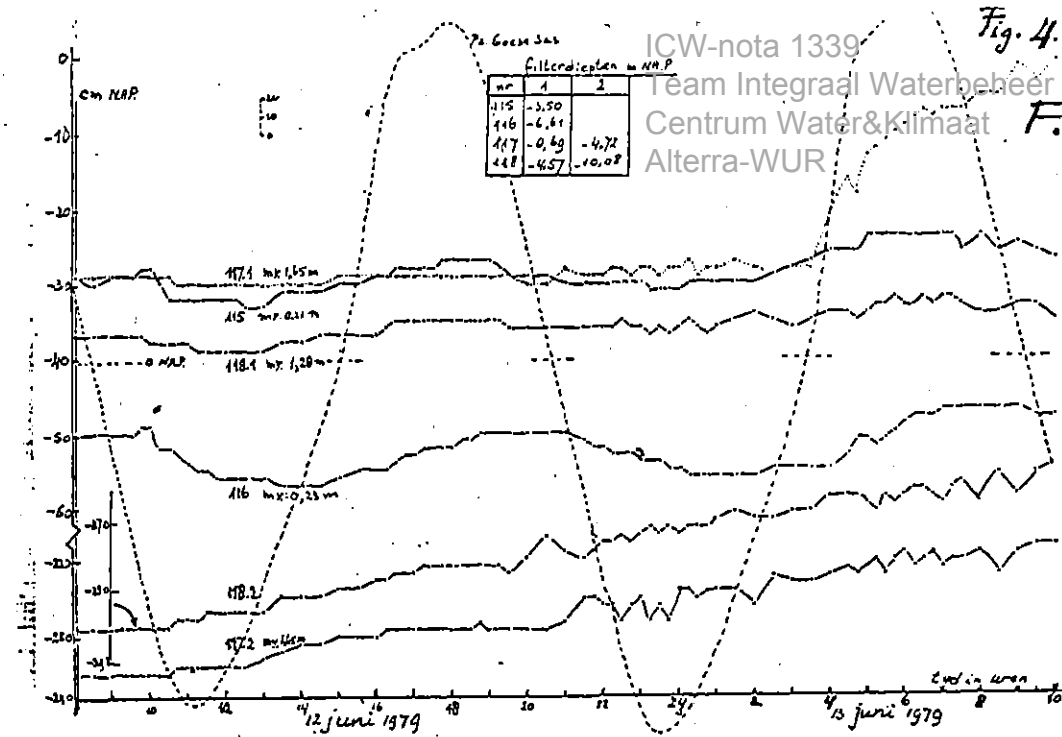
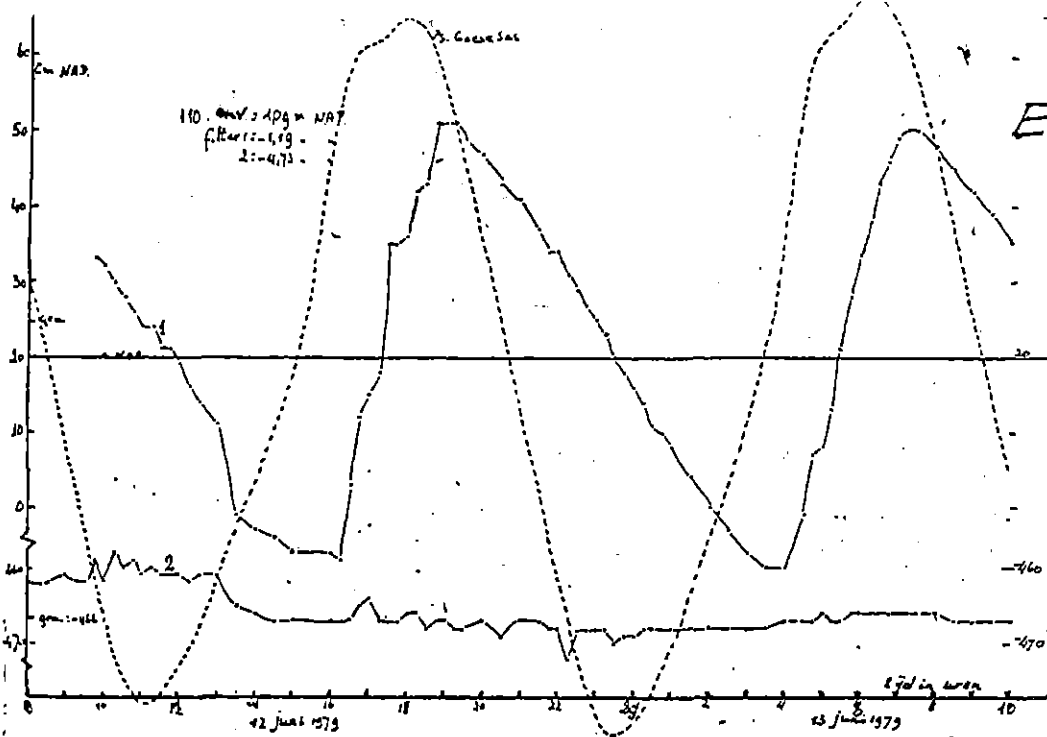
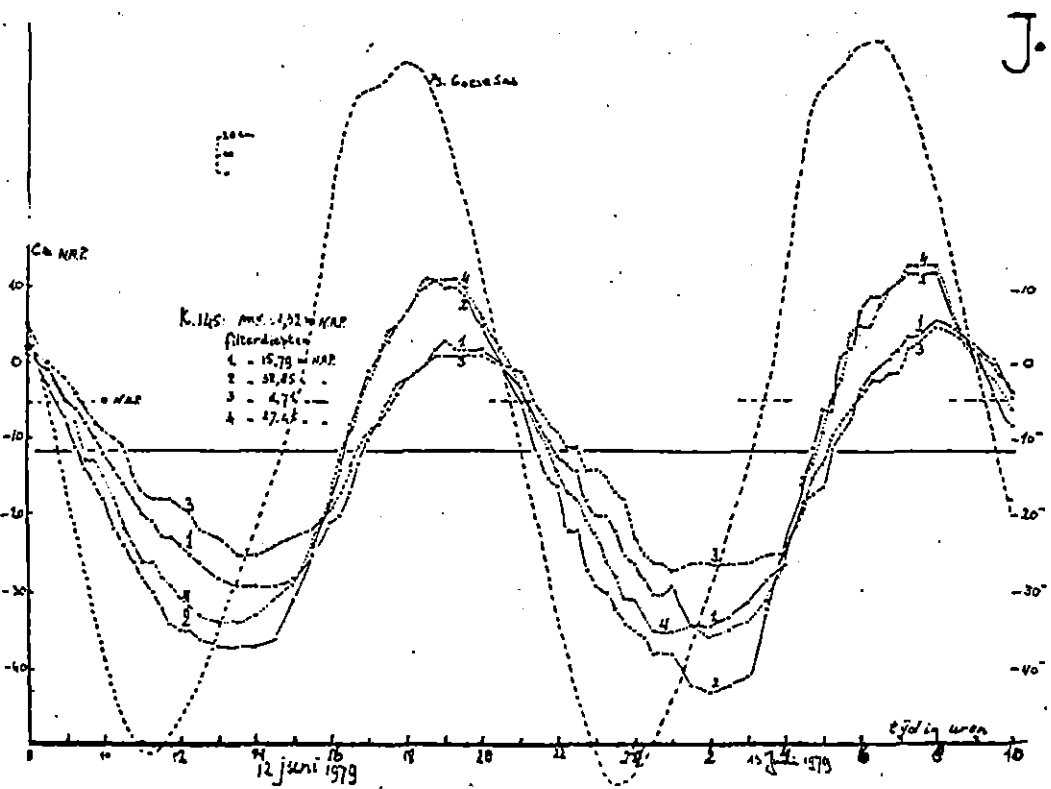
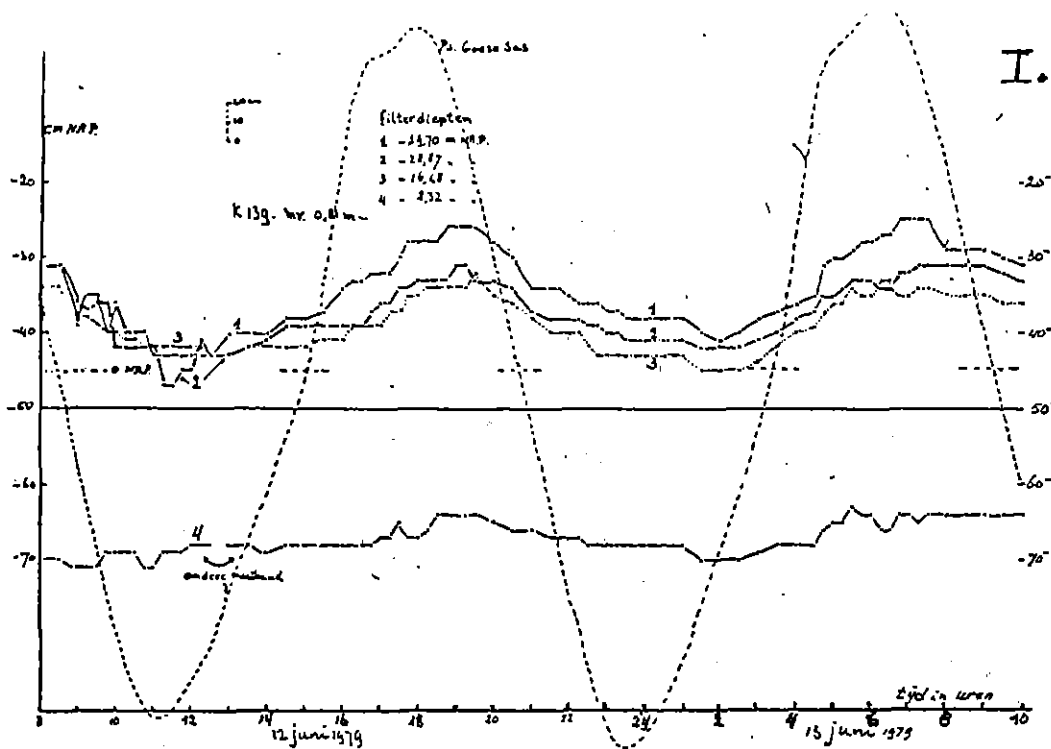


Fig. 4



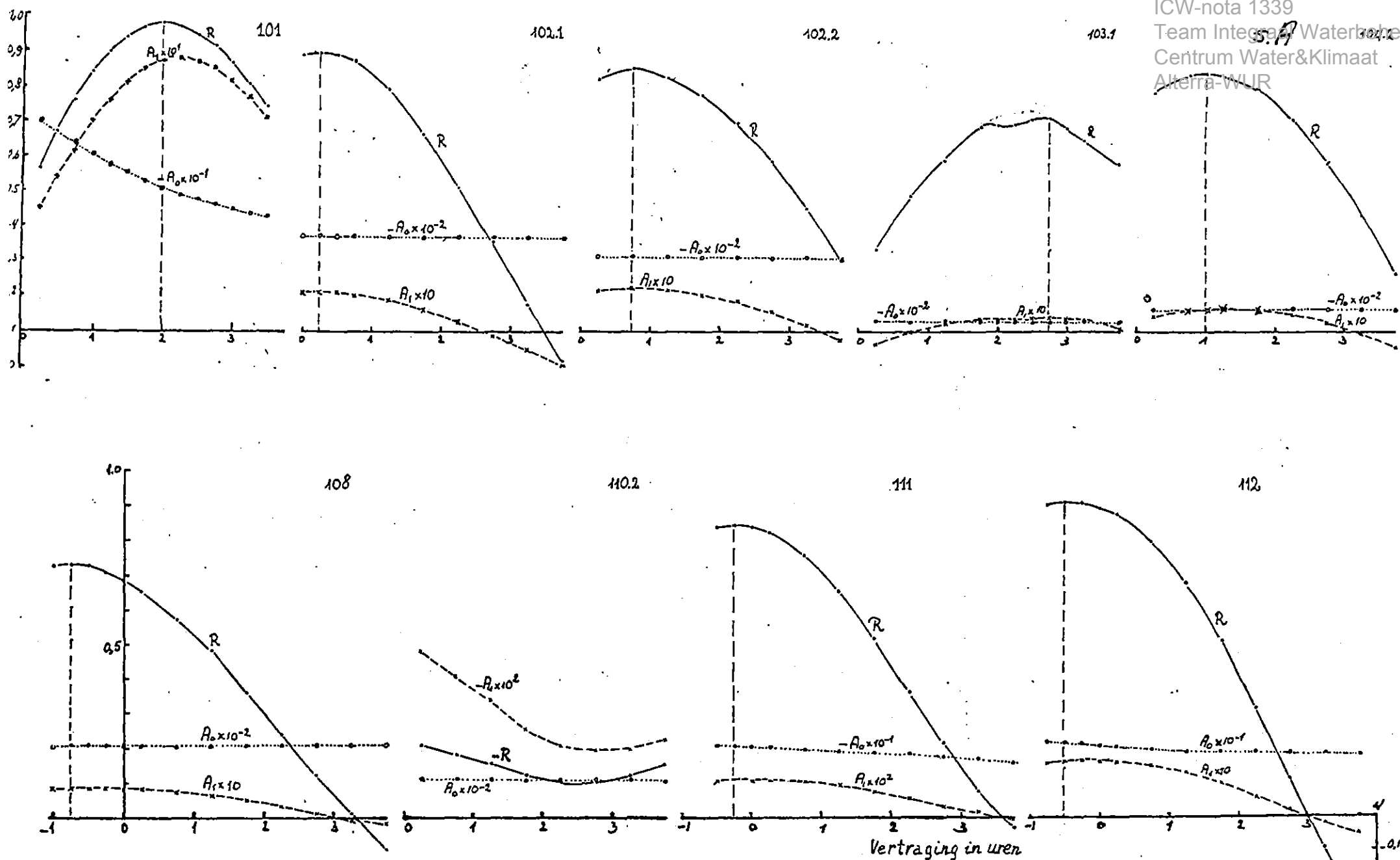
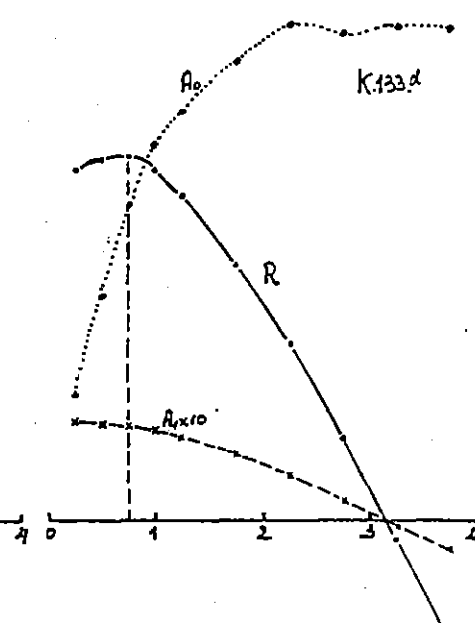
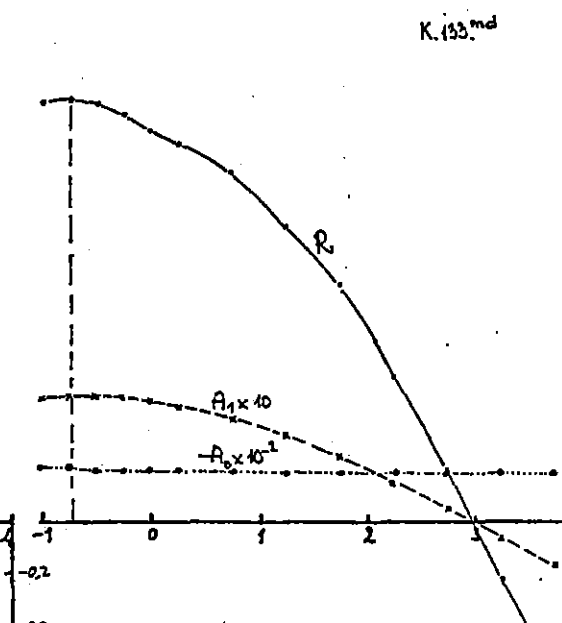
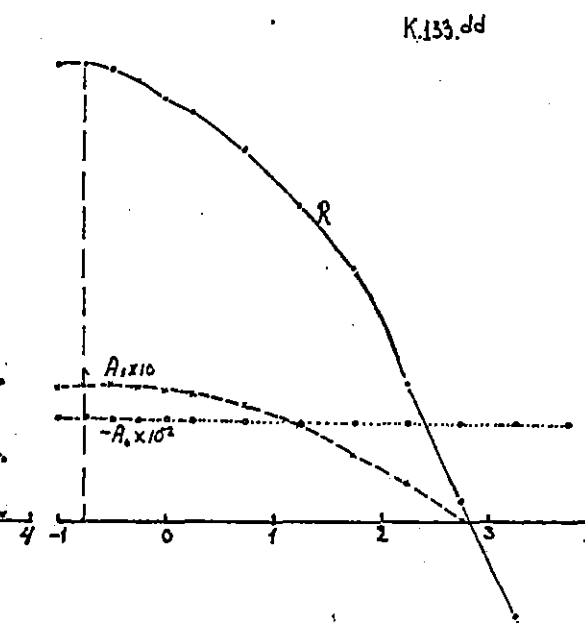
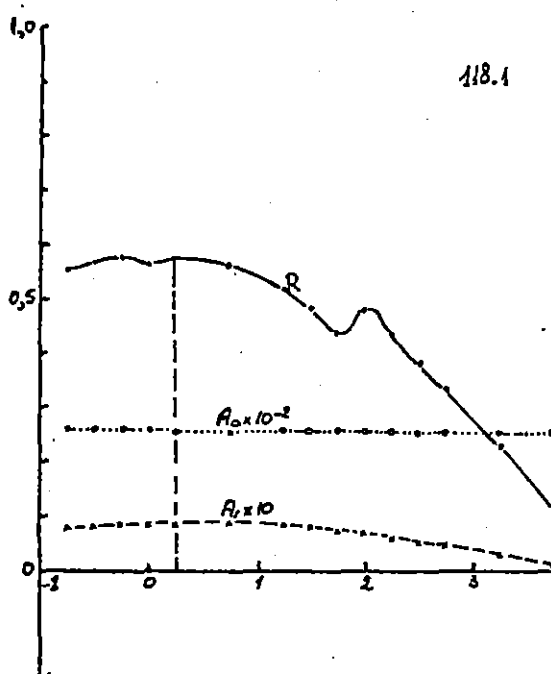
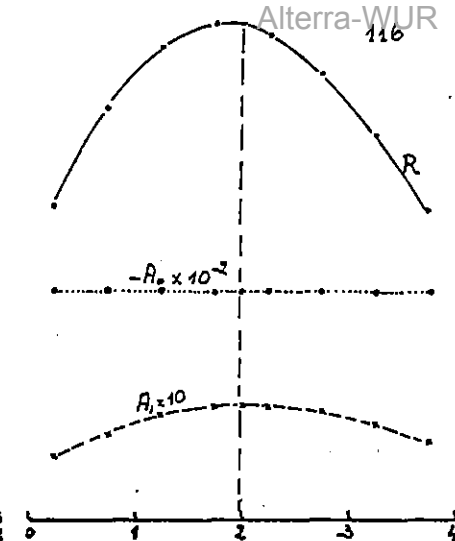
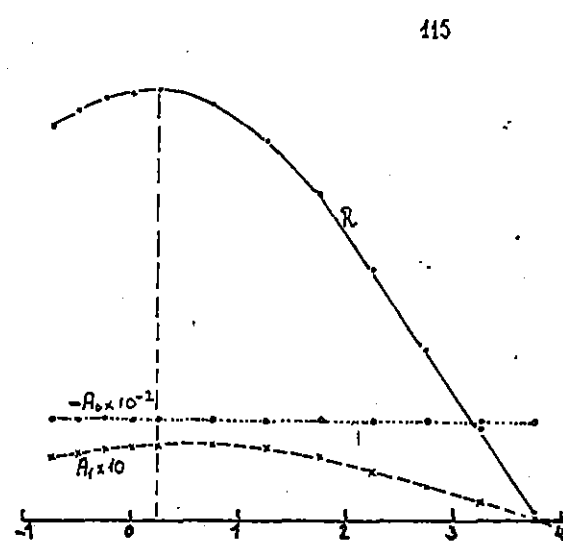
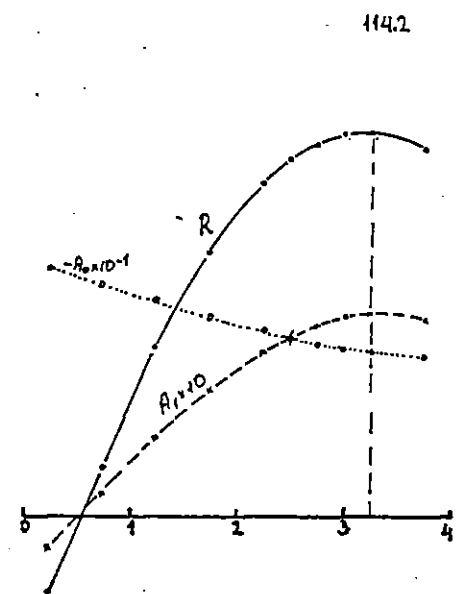
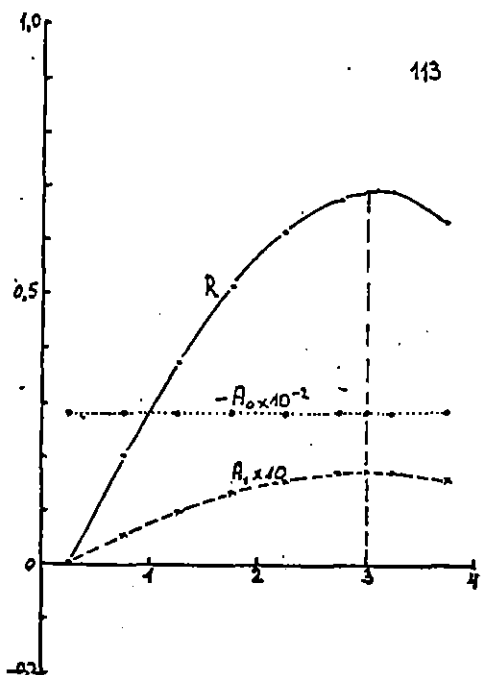
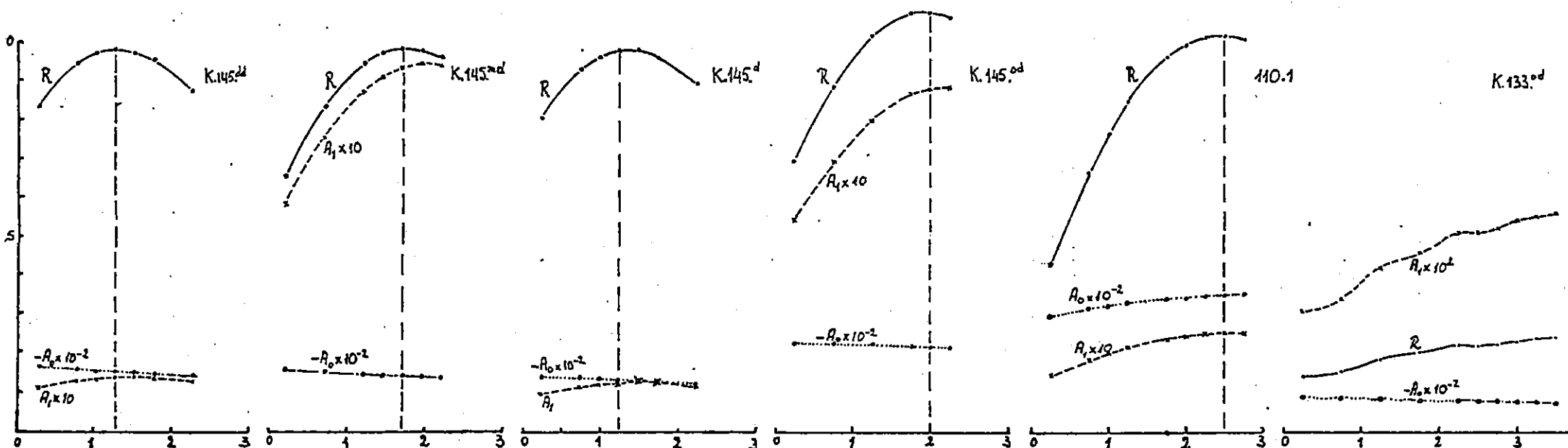
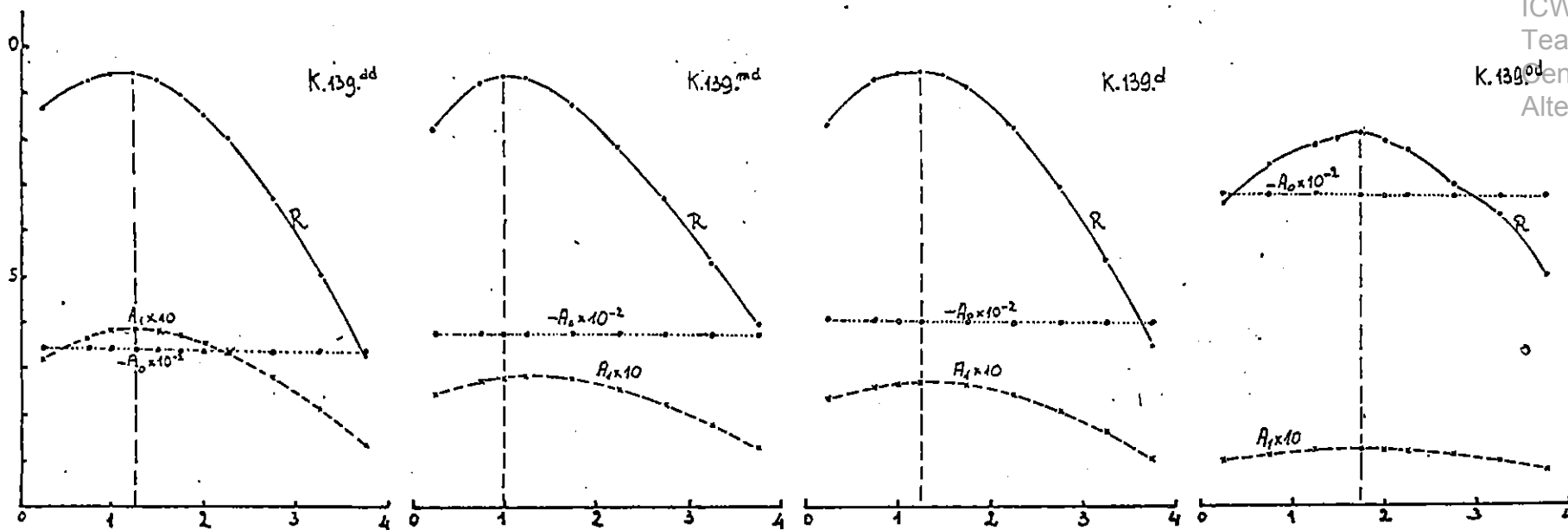


Fig.5: Met formule (q) berekende correlatie coëfficiënten (R), amplitude verhoudingen ($A_1 = u_x/u_0$) en het intercept (A_0) voor opklimmende waarden van de fase vertraging Δt_x

5.8



S.C.



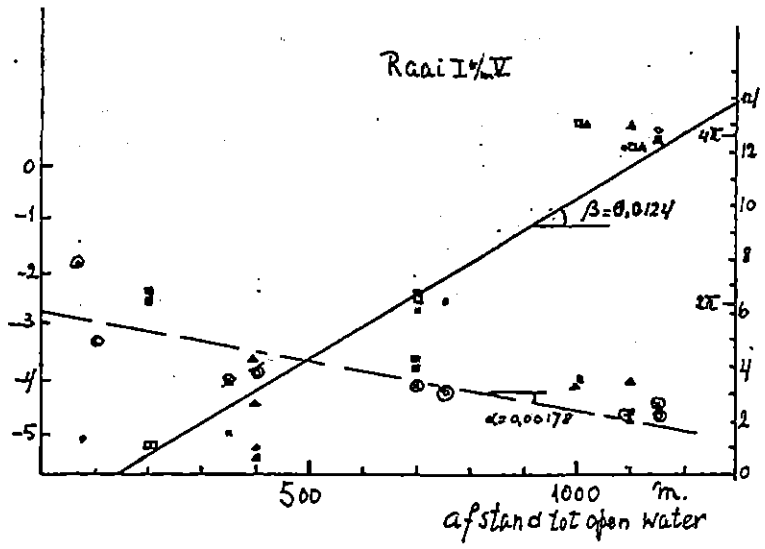
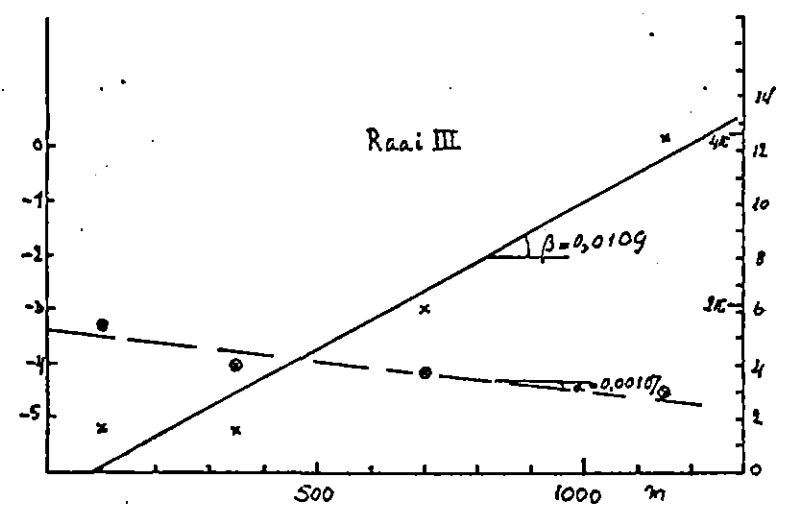
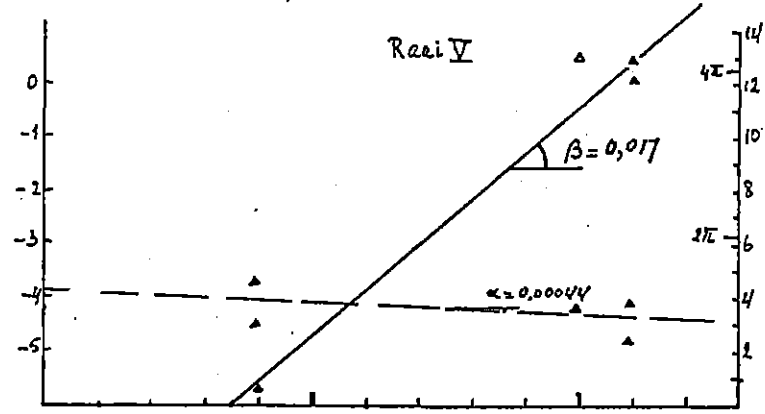
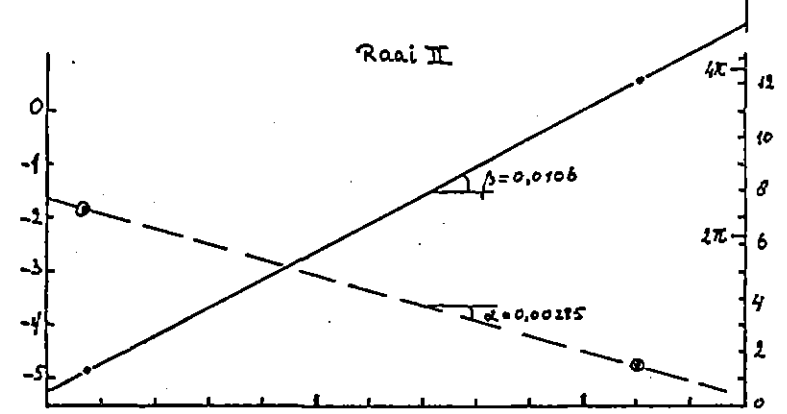
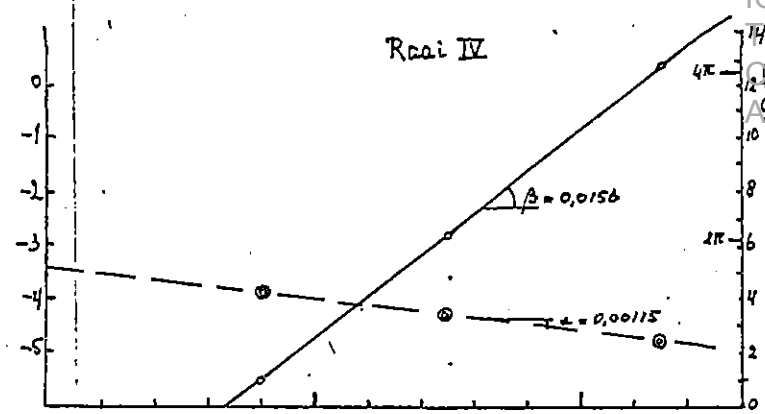
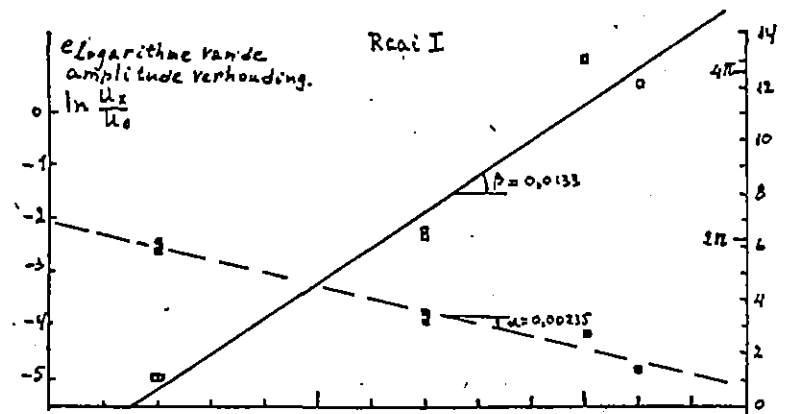


Fig. 6.
Het verband tussen de logarithme van de amplitudeverhouding u_x/u_0 , respectievelijk de fasevertraging van de getidegolf in radialen met de afstand tot open water voor een vijftal raaien afzonderlijk en voor alle gegevens tezamen.
Symbolen: fasevertraging 0, x, 0 en rechter schaal; log. amplitudeverhouding: 0, 0, 0, 0, en 0 linker schaal.

$$\ln \frac{u_x}{u_0} = -\alpha x + \delta$$

$$\frac{2\pi}{T} \Delta t = \beta x + \delta$$

