

CONTRIBUTION III

BIJDRAGEN III

RIJKSWATERSTAAT

BESCHOUWINGEN OVER STORMVLOEDEN EN GETIJBEWEGING

CONTRIBUTION III

RIJKSWATERSTAAT

GETIJONDERZOEK

DOOR MIDDEL VAN DE

HYDRAULISCH-ELEKTRISCHE

ANALOGIE

INHOUDSOVERZICHT

0.1 Inhoudsoverzicht	211
0.2 Overzicht van de figuren	211
0.3 Literatuur	211
0.4 Summary	212
0.5 Résumé	212
1.0 Samenstelling van de bijdrage	213
1.1 Historisch overzicht.	213
1.2 Inhoud van de bijdrage	213
1.3 Auteurs	213
2.0 Getijberekening als probleem van informatieverwerking	213
3.0 De hydraulisch-elektrische analogie	215
4.0 Algemene opzet van de Deltar	219
5.0 Het rekenproces in de Deltar	223
0.2 OVERZICHT VAN DE FIGUREN	
3.0.1 Elektrische elementen: a. Paralleltak; b. Serietak	215
3.0.2 Analoge voorstelling: a. Riviervak; b. Elektrische vierpool	217
3.0.3 Elementaire vierpoolschakelingen: a. Π -sectie, b. T-sectie, c. X-sectie	218
4.0.1 Algemeen blokschema van de informatieverwerking.	220
4.0.2 Schematische voorstelling van het dwarsprofiel van een rivier.	221
5.0.1 Illustratie van de vakvergelijkingen.	226
5.0.2 Schema van het rekenproces in een sectie	227
5.0.3 Voorbeeld van de behandeling van een vertakte rivier: a. Schema van de rivier; b. Schema van de schakeling van de machine-elementen.	229
0.3 LITERATUUR De verwijzing in de tekst is aangegeven door []	
1. <i>J. P. Mazure</i>	De berekening van getijden en stormvloed op benedenrivieren. Proefschrift, Delft, 1937.
2. <i>J. C. Schönfeld</i>	Analogy of hydraulic, mechanical, acoustic and electric systems. Appl. Sci. Res., B., Vol. 3, 417-450, 1953.
3. <i>J. C. Schönfeld</i> and <i>C. M. Verhagen</i>	Development of the tidal analogue technique in Holland. 2nd Int. Analogue Computation Meetings, Straatsburg, 1957.
4. <i>Staatscommissie-Zuiderzee</i>	Verslag 1918-1922. 's-Gravenhage, 1926.
5. <i>H. J. Stroband</i>	De voortplanting van het getij bepaald met behulp van de elektro-techniek, met inachtneming van de kwadratische weerstandswet. Polytechnisch Tijdschrift, uitg. B., nrs. 45-46 en 47-48, 1948.
6. <i>J. van Veen</i>	Elektrische nabootsing van getijden. De Ingenieur nr. 3, 1946.

0.4 SUMMARY

Tidal research by means of the hydraulic-electric analogy

The present contribution provides a rough outline of the application of the analogue computing technique to tidal problems such as are encountered in the preparation and execution of the Delta Works.

Chapter 2.0 shows how tidal research may be approached as a practical problem of data processing. The initial information, the information sought, and the quantity of the material to be processed, are discussed. The part to be played by the new tidal analogue computer called the Deltar is indicated.

Chapter 3.0 deals with the principles of the hydraulic-electric analogy. The scale rules of an analogue model are discussed. The electronic tidal model is briefly mentioned.

Chapter 4.0 deals with the general design of the Deltar. The composition of the machine and the general procedure used with it are outlined.

Chapter 5.0 examines the computing process as it is performed by each of the standard sections of the Deltar. The technical operation is briefly discussed in relation to the tidal equations.

This contribution has been prepared by Dr. Ir. J. C. Schönfeld and H. J. Stroband Ing.

0.5 RÉSUMÉ

Examen des marées à l'aide de l'analogie hydro-électrique

Cette contribution tend à donner une impression de l'application de la technique du calcul analogique aux problèmes des marées, tels que ceux-ci se présentent dans la préparation et l'exécution des Travaux du Delta.

Au chapitre 2.0, on explique comment l'étude des marées peut se présenter pratiquement comme un problème de conversion d'un grand nombre d'informations. Les données de base, les résultats que l'on désire obtenir et l'étendue des informations à convertir, sont examinés dans ce chapitre. On y indique également le rôle qui devra jouer la nouvelle machine Deltar, machine pour le calcul analogique des marées.

Le chapitre 3.0 traite des principes de l'analogie entre les systèmes électriques et hydrauliques. On y indique les lois d'échelle qui régissent un modèle analogique et on y reprend brièvement le modèle électronique à marées.

Le chapitre 4.0 décrit la nouvelle calculatrice Deltar et la façon dont elle convertit les informations qu'on lui confie.

Au chapitre 5.0, on étudie le développement des calculs tels qu'ils se font dans chacune des sections de la Deltar. On y indique sommairement la réalisation technique, en partant des équations des marées.

Les auteurs de cette contribution sont Dr. Ir. J. C. Schönfeld et H. J. Stroband Ing.

1.0 SAMENSTELLING VAN DE BIJDRAGE

1.1 Historisch overzicht

Reeds in de eerste stadia van het onderzoek van de bewegende elektriciteit heeft men intuïtief de overeenkomst beseft met vloeistoffen en gassen in beweging. Dit blijkt uit de keuze van benamingen als stroom en spanning.

Ofschoon in het rapport van de Staatscommissie-Zuiderzee [4] deze overeenkomst niet met zoveel woorden genoemd wordt, spreekt uit de behandeling van het getijprobleem de aanwezigheid van dezelfde fundamentele inzichten, die ook aan de behandeling van problemen uit de communicatietechniek ten grondslag liggen.

Na de Eerste Wereldoorlog is in de elektro-akoustiek veel systematisch onderzoek verricht naar de analogie tussen elektrische, mechanische en akoustische systemen, mede om tot een beter inzicht te komen van systemen van gemengde aard. In deze periode is bij de toenmalige Studiedienst van de directie Benedenrivieren onder VAN VEEN het denkbeeld levend geworden, problemen van getijvoortplanting op te lossen door middel van een elektrisch model [6]. In de Tweede Wereldoorlog is de technische realisering van dit denkbeeld door STROBAND ter hand genomen [5] met steun vanuit het gebied der elektro-akoustiek door GELUK (thans Chef Laboratorium N.R.U.).

Voortzetting van deze ontwikkeling na de oorlog heeft geleid tot de opbouw van een elektronisch analogiemodel, dat sinds zijn voltooiing in 1954 bij het getijonderzoek voor de deltawerken gebruikt is.

Een nadere principiële beschouwing over de analogie van hydraulische systemen met elektrische, mechanische en akoustische systemen is in deze periode door SCHÖNFELD gegeven [2].

Na de stormvloed van 1953 werd de behoefte aan verdere ontwikkeling gevoeld en is aan een instrumentatiegroep van de Technisch Fysische Dienst T.N.O.-T.H. te Delft onder leiding van VERHAGEN, opdracht gegeven tot een onderzoek naar verdere technische mogelijkheden [3]. Dit onderzoek heeft geleid tot de bouw van een nieuwe analoge rekenmachine, de Deltar (*Delta-tij-analagon-rekenmachine*), die op het ogenblik van het schrijven van deze bijdrage zijn voltooiing nadert.

1.2 Inhoud van de bijdrage

Deze bijdrage beoogt een indruk te geven van de toepassing van de analoge rekentechniek op getijvraagstukken, zoals deze zich voordoen bij de voorbereiding en uitvoering van de deltawerken.

In 2.0 wordt aangegeven hoe het getijonderzoek praktisch benaderd kan worden als een probleem van informatieverwerking. De gegevens, waarvan men uitgaat, de uitkomsten, die men beoogt, en de omvang van het te verwerken materiaal worden besproken. De rol, die de nieuwe analoge getijrekenmachine Deltar zal moeten spelen, wordt aangegeven.

Hoofdstuk 3.0 behandelt de beginselen van de hydraulisch-elektrische analogie. De schaalwetten van een analogiemodel worden besproken. Het elektronische getijmodel wordt kort gereleveerd.

Hoofdstuk 4.0 behandelt de algemene opzet van de nieuwe rekenmachine, de Deltar. De opbouw van de machine wordt besproken en de algemene gang van de informatieverwerking wordt aangegeven.

In 5.0 wordt het rekenproces, zoals zich dit in elk der standaardsecties van de Deltar afspeelt, nagegaan. Uitgaande van de getijvergelijkingen, wordt de technische realisering in het kort aangegeven.

1.3 Auteurs

Deze bijdrage is samengesteld door Dr. Ir. J. C. Schönfeld en H. J. Stroband Ing.

De hier gegeven meer summier beschrijving van de Deltar is gebaseerd op materiaal, dat volledig gepubliceerd zal worden in 1961. In die publikatie zullen het voor de Deltar verrichte onderzoek en de constructie der machine door Ir. C. M. Verhagen en zijn medewerkers verantwoord worden, terwijl door de eerstgenoemde auteur van de onderhavige bijdrage een meer uitvoerige analyse van het rekenproces en de nauwkeurigheid daarvan gegeven zal worden.

2.0 GETIJBEREKENING ALS PROBLEEM VAN INFORMATIEVERWERKING

Het getijonderzoek heeft in het algemeen een tweeledig doel. Enerzijds gaat het, kwalitatief, om het verwerven van inzicht, anderzijds is het onderzoek gericht op het verkrijgen van kwantitatieve uit-

komsten. In de praktijk van het getijonderzoek zijn deze twee aspecten niet te scheiden, doch wel kan het accent soms meer op het ene, dan weer meer op het andere aspect vallen.

Wij willen ons hier nu in het bijzonder bezighouden met een problematiek, die vooral naar voren komt bij het kwantitatieve aspect van het getijonderzoek.

In het algemeen kan gesteld worden, dat men hierbij uitgaat van bepaalde gegeven grootheden ten einde daaruit andere, gevraagde grootheden af te leiden. Een procedure, waarmee dit bereikt wordt, noemt men wel informatieverwerking. De gegeven grootheden vormen de ingaande informatie en de gevraagde grootheden de uitgaande informatie.

Dit kan nader worden toegelicht aan een geval als het Deltaplan. Met de uitvoering van dit plan beoogt men het scheppen van een nieuw getijregime in het deltagebied. Van belang is hierbij, dat niet alleen de passieve eigenschappen van het systeem gewijzigd worden bijv. door het maken van afsluitingen, doch dat men bovendien door het aanbrengen van regelorganen, o.a. de sluizen in het Haringvliet, actief op de getijbeweging wil kunnen ingrijpen. Het vrije, min of meer natuurlijke regime wordt aldus vervangen door een kunstmatig geleid regime.

Hierbij doet zich de noodzaak voor van het maken van diverse prognoses. Reeds in het stadium van de ontwikkeling en voorbereiding van een dergelijk plan gevoelt men daaraan behoefte, ten einde een verantwoorde keuze tussen allerlei varianten te kunnen maken, alsmede om een goed beeld te verkrijgen van de waterbewegingen, die zich tijdens de uitvoering kunnen voordoen. Doch ook in latere stadia blijft de behoefte aan verdere prognoses bestaan. In het bijzonder zal men zich bij het ingrijpen door middel van de regelorganen van te voren nauwkeurig rekenschap wensen te geven van de gevolgen, die dit ingrijpen onder verschillende omstandigheden kan hebben. Later zal dit ingrijpen meer een routinekarakter krijgen, doch onder bijzondere omstandigheden, bijvoorbeeld bij een naderende stormvloed, zal een snelle prognose weer van belang zijn.

In deze gevallen wordt de ingaande informatie allereerst gevormd door de afmetingen en wrijvingscoëfficiënten van het rivierenstelsel. Vervolgens moet men hiertoe rekenen de karakteristieken en besturingsprogramma's der regelorganen. Voorts behoren hiertoe getijden of stormvloeden in zee, die men verwacht of die representatief geoordeeld worden, alsmede zonodig het windveld boven het rivierenstelsel en ten slotte de oppervlatafvoeren der grote rivieren.

De uitgaande informatie bestaat voornamelijk uit de verticale getijden op diverse punten en de stromen door diverse profielen in het rivierenstelsel.

Om verschillende redenen kan er aanleiding zijn de informatieverwerking als een technisch probleem onder het oog te zien. Hiertoe kan een grote omvang van de te verwerken informatie leiden of wel de gecompliceerdheid van het verwerkingsproces, dan wel de snelheid, waarmee dit moet worden uitgevoerd.

De omvang van de te verwerken informatie wordt bij het getijonderzoek eensdeels bepaald door de uitgestrektheid en de vorm van het rivierenstelsel, waardoor het nodig kan zijn, een groot aantal profielen en wrijvingscoëfficiënten te verwerken. Anderdeels wordt de omvang van deze informatie bepaald door het aantal getijden en stormvloeden, dat men wil behandelen in verband met allerlei omstandigheden.

De verwerkingsprocedure wordt gecompliceerd door het niet-lineaire karakter van de differentiaalvergelijkingen, die de getijbeweging beschrijven, alsmede door de min of meer onregelmatige vormen der rivieren, de aanwezigheid van splitsingen en samenvloeiingen, enzovoorts.

De eis van een snelle verwerking komt in de eerste plaats naar voren in verband met de voorbereiding en uitvoering van de werken, die vaak op korte termijn uitkomsten vragen. Klemmend kan deze eis vooral mettertijd worden bij het anticiperend besturen der regelorganen wanneer een stormvloed verwacht wordt.

Bezien we nu de beschikbare middelen voor het gestelde probleem van informatieverwerking.

Getijberekeningen, waarbij het rekenwerk overwegend door menselijke arbeid wordt verricht, komen bij de omvang van het verwerkingsprobleem, zoals zich dit bij het Deltaplan voordoet, praktisch niet meer in aanmerking uit het oogpunt van verwerkingscapaciteit. Uiteraard blijven dergelijke berekeningen onmisbaar, onder meer om in bepaalde gevallen tot een verantwoorde interpretatie te komen van uitkomsten, die met andere middelen verkregen zijn.

Een belangrijke verwerkingscapaciteit is verkregen door de ontwikkeling van het hydraulische getijmodel. De efficiëntie van dit verwerkingsapparaat berust allereerst op de wijze waarop de differen-

tiaalvergelijkingen worden geïntegreerd, namelijk doordat het model hierin de natuur nabootst. Daarbij heeft de automatisatie van randvoorwaarde-apparatuur en meetinstrumenten de efficiëntie nog aanmerkelijk vergroot.

Door deze eigenschappen heeft het getijmodel in het Waterloopkundig Laboratorium te Delft een belangrijke rol kunnen spelen bij de voorbereiding van het Deltaplan, een rol, die ook gedurende de uitvoering van de werken nog niet ten einde is.

Daarentegen doet zich, vooral bij de problemen in verband met de waterhuishouding, de behoefte gevoelen aan een nog efficiënter bepaling van afvoeren en getijstromen, terwijl ook het snel kunnen wijzigen van profielafmetingen en dergelijke parameters gewenst zou zijn. Hiervoor lijkt de modeltechniek voorshands nog geen afdoende oplossing te bieden.

Daarom komen naast het hydraulische model ook de digitale en analoge rekentechnieken („computers”) in aanmerking voor het verwerken van de getij-informatie.

Van beide vormen van rekentechniek wordt geregeld gebruik gemaakt bij het getijonderzoek. Langs beide wegen zou ook de gewenste grotere verwerkingscapaciteit verkregen kunnen worden.

Het is hier niet de plaats om dieper in te gaan op de merites van de beide rekentechnieken. Volstaan wordt met de opmerking, dat, bij de tegenwoordige stand van de techniek, de bouw van een grote analoge getijrekenmachine verantwoord werd geacht. Deze machine, de Deltar, zal in de loop van 1961 in bedrijf komen.

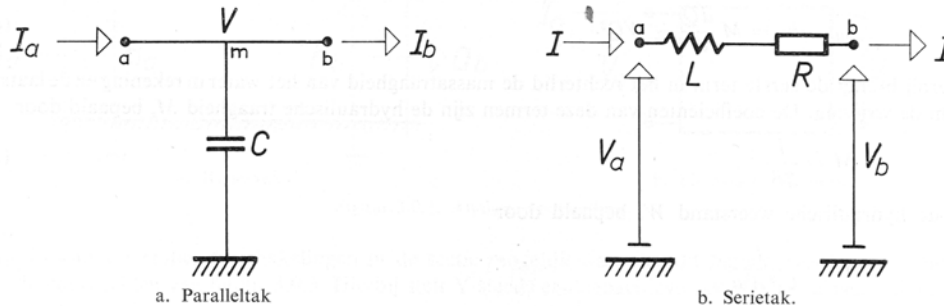
Reeds vóór de Tweede Wereldoorlog heeft VAN VEEN de mogelijkheid naar voren gebracht om tot een snellere behandeling van getijvraagstukken te geraken door toepassing van een in principe bekende analogie tussen elektrische en hydraulische systemen. Dit is aanleiding geworden tot het ontwikkelen van enige elektrische analogiemodellen. Deze ontwikkeling heeft een voorlopige afsluiting gekregen door de bouw van een elektronisch analogiemodel, dat nu verscheidene jaren dienst heeft gedaan.

Aan dit analogiemodel zijn evenwel nog verschillende beperkingen inherent van zodanig gewicht, dat een verdere ontwikkeling noodzakelijk geacht werd, waartoe aan de Technisch-Physische Dienst T.N.O.-T.H. een opdracht verstrekt werd. Deze opdracht, die in nauwe samenwerking met de Rijks-waterstaat is uitgevoerd, heeft de weg gebaad voor de bouw van de Deltar.

Hierbij zijn andere en ten dele nieuwe wegen ingeslagen om tot een technische realisering te komen. Daar evenwel bepaalde gedachten, die mede door de voorafgaande ontwikkeling gerijpt zijn, ook in de opzet van de nieuwe machine zijn terug te vinden, zal hierna eerst een kort overzicht van het principe der analogiemodellen gegeven worden, zonder op de technische realisering daarvan in te gaan. Na deze inleiding volgt dan een bespreking van de Deltar.

3.0 DE HYDRAULISCH-ELEKTRISCHE ANALOGIE

We beschouwen een vak van een rivier met een lengte l , een dwarsprofiel A en een bergend oppervlak B . Het vak wordt begrensd gedacht door twee dwarsprofielen, waarvan we het bovenste met de index a en het benedenste met de index b zullen aangeven. De lengte l zij klein, onder andere zo klein, dat de variaties in het verval over het riviervak klein zijn, vergeleken met de getij-amplitude.



Figuur 3.0.1. Elektrische elementen

Laat Q_a de ogenblikkelijke afvoer door het bovenste en Q_b evenzo door het benedenste dwarsprofiel zijn. In het algemeen zullen deze afvoeren op een willekeurig ogenblik verschillend zijn en dit geeft aanleiding tot stijgen of dalen van de waterspiegel in het vak. Hiervoor geldt:

$$Q_a - Q_b = B \frac{dh}{dt} \quad (1)$$

Hierbij stelt h de gemiddelde waterstand in het vak voor.

Vervolgens beschouwen we een elektrische condensator met capaciteit C , geschakeld als aangegeven in figuur 3.0.1a.

Wanneer de stroom I_a , die aan de klem a wordt toegevoerd, verschilt van de stroom I_b , die aan de klem b onttrokken wordt, dan zal dit aanleiding geven tot toeneming of afneming van de lading, die zich in de condensator heeft opgehoopt. Evenredig met deze lading zal ook de spanning V over de condensator, dat is dus samen het punt m en aarde, veranderen. Hiervoor geldt:

$$I_a - I_b = C \frac{dV}{dt'} \quad (2)$$

waarbij t' de tijd is, waarin het elektrisch verschijnsel zich afspeelt.

De overeenkomst tussen de vergelijkingen (1) en (2) stelt ons in staat door middel van de condensator het kombergingsverschijnsel in het riviervak na te bootsen. Daarbij zullen de elektrische stromen I de variërende afvoeren Q voorstellen en de elektrische spanning V zal de gemiddelde waterstand h voorstellen.

Laat hierbij elke m^3/sec in de afvoer met α ampère elektrische stroom worden gelijkgesteld en elke m in de waterstand met β volt in de spanning. Dan is dus

$$I_a = \alpha Q_a; \quad I_b = \alpha Q_b; \quad V = \beta h.$$

De schaalfactoren α en β zijn in dit geval dus benoemde getallen, uitgedrukt in A/(m^3/sec), respectievelijk V/m.

Uit (1) en (2) is dan gemakkelijk in te zien, dat

$$\frac{t'}{t} = \frac{\beta}{\alpha} \frac{C}{B} \quad (3)$$

Dit betekent, dat de variatie van de waterstand in verloop van tijd wordt weergegeven door de variatie van de spanning, op een tijdschaal, die door (3) bepaald wordt.

Deze schaal hangt dus samen met de gekozen schalen voor stromen en spanningen, alsmede met de voor het weergeven van de komberging B gekozen capaciteit C (de schaal voor de capaciteiten).

We bezien vervolgens het verval over het vak, dat is dus het verschil tussen de waterstand h_a aan het boveinde en de waterstand h_b aan het benedeneinde.

Dit verval heeft ten gevolge, dat er een kracht op het water in het riviervak werkt. Deze kracht kan samengesteld gedacht worden uit een kracht, die de wrijvingsweerstand in het vak overwint en een tweede kracht, die aan het water een versnelling (of vertraging) geeft. Uit dit krachtenspel is, na enkele vereenvoudigingen, die hier buiten beschouwing worden gelaten, af te leiden, dat

$$h_a - h_b = M \frac{dQ}{dt} \pm WQ^2 \quad (4)$$

Hierbij brengt de eerste term in het rechterlid de massastraagheid van het water in rekening en de laatste term de wrijving. De coëfficiënten van deze termen zijn de hydraulische traagheid M , bepaald door

$$M = \frac{l}{gA} \quad (5)$$

en de hydraulische weerstand W , bepaald door

$$W = \frac{l}{C_1^2 A^2 a} \quad (6)$$

waarin C_1 een wrijvingscoëfficiënt en a de diepte is.

De weerstandsterm $\pm WQ^2$ moet positief, respectievelijk negatief gerekend worden als de stroom Q positief, respectievelijk negatief is. Derhalve kan deze term ook als $W|Q|Q$ worden geschreven.

We beschouwen ter vergelijking een elektrische serieschakeling van een zelfinductie L met een weerstand R , als aangegeven in figuur 3.0.1b. Over deze serietak staat een spanning $V_a - V_b$, waarbij V_a de spanning van de klem a ten opzichte van aarde is en evenzo V_b de spanning van klem b. De stroom door de tak zij I .

Over de weerstand R treedt krachtens de wet van Ohm een spanningsval RI op. Verder reageert de zelfinductie op elke verandering van de stroom I , met een tegenspanning $L \frac{dI}{dt}$. Het totale spanningsverschil bedraagt dus

$$V_a - V_b = L \frac{dI}{dt} + RI. \quad (7)$$

Laten we voorlopig de weerstandsterm $\pm WQ^2$ in (4) en de weerstandsterm RI in (7) buiten beschouwing, dan zijn (4) en (7) van dezelfde vorm.

De zelfinductie kan aldus dienen om de massatraagheid van het water na te bootsen op overeenkomstige wijze als de capaciteit kon dienen om de komberging na te bootsen. Analoog aan (3) zal derhalve ook

$$\frac{I'}{I} = \frac{\alpha}{\beta} \frac{L}{M} \quad (8)$$

gelden.

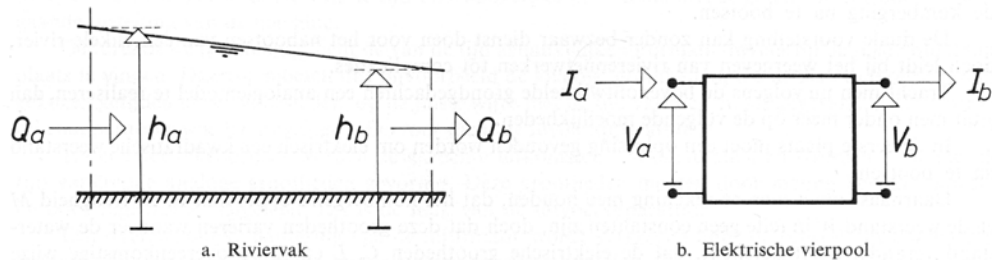
De weerstandstermen in (4) en (7) zijn verschillend van vorm, daar in (4) een kwadratische uitdrukking in Q en in (7) een lineaire uitdrukking in I staat. Laten we nu, zonder ons te verdiepen in de technische moeilijkheden, aannemen, dat het mogelijk zou zijn de elektrische weerstandscoefficiënt R evenredig met de stroomsterkte I te doen variëren, dus

$$R = K |I|.$$

Dan zou door de elektrische weerstand het hydraulische weerstandsverschijnsel op de juiste schaal worden nagebootst, indien

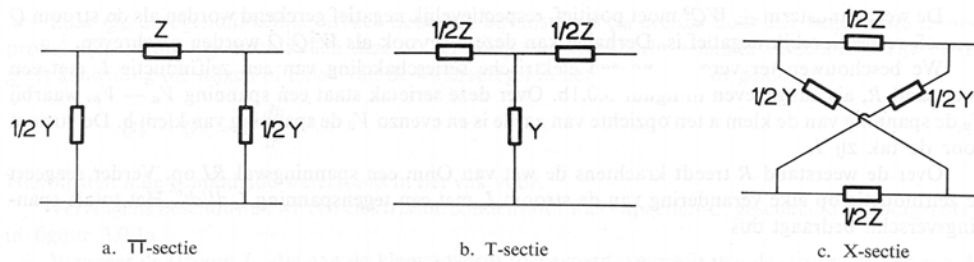
$$\frac{K}{W} = \frac{\beta}{\alpha^2} \quad (10)$$

Het gaat er nu nog om, een zodanige combinatie van capacatieve met inductieve en resistieve elektrische elementen te vinden, dat komberging en traagheid met weerstand gelijktijdig worden nagebootst. Het riviervak (zie figuur 3.0.2a) moet derhalve worden nagebootst door middel van een elektrische sectie met twee paar klemmen, als aangegeven in figuur 3.0.2b. Door het ene paar klemmen wordt met een spanning V_a een stroom I_a in de sectie gebracht, terwijl door het andere paar klemmen een stroom I_b wordt afgegeven met een spanning V_b , zodanig, dat V_a en V_b met h_a en h_b overeenkomen, alsmede I_a en I_b met Q_a en Q_b .



Figuur 3.0.2. Analoge voorstelling

Er zijn verschillende schakelingen in de sectie mogelijk waarmee dit bereikt wordt, zoals blijkt uit de voorbeelden van figuur 3.0.3. Hierbij stelt Y steeds een capacatieve tak voor en Z een inductieve en resistieve tak.



Figuur 3.0.3. Elementaire vierpoelenschakelingen

Een rivier, bestaande uit een reeks vakken, kan dan vervolgens worden nagebootst door een aantal elektrische secties tot een keten aaneen te schakelen, zodat de uitgangsklemmen van de ene sectie en de ingangsklemmen van de volgende sectie dezelfde spanning krijgen en daarenboven de stroom, die de ene sectie verlaat, in de volgende sectie doorvloeit.

Vloeien twee rivieren samen tot een derde of splitst een rivier zich in enkele takken, dan zijn de elektrische sectieketens, die de verschillende rivieren voorstellen, gemakkelijk op overeenkomstige wijze aan elkaar te schakelen.

Op deze wijze is een elektrisch model van een rivierenstelsel te ontwerpen, waarin de variërende waterstanden (verticale getijden) door analoog variërende elektrische spanningen worden nagebootst en evenzo de variërende afvoeren (getijstroom) door analoog variërende elektrische stromen.

De modelwetten van dit analogiemodel zijn vervat in (3), (8) en (10).

Uit (3) en (8) volgt

$$\frac{t'}{t} = \sqrt{\frac{LC}{MB}} \quad (11)$$

Hieruit blijkt, dat de tijdschaal van het model onafhankelijk van de schalen voor spanningen en stromen kan worden uitgedrukt in de schalen voor capaciteiten en zelfinducties. In feite zijn het dus deze elementen, die de tijdschaal bepalen.

Voorts moge nog worden opgemerkt, dat het in principe ook mogelijk is de waterstanden door elektrische stromen en de afvoeren door elektrische spanningen na te bootsen. Dit blijkt uit de overeenkomst tussen (1) en (7), indien R verwaarloosd mag worden. Het is dan evenwel noodzakelijk in de schakeling van figuur 3.0.1a parallel met de condensator een weerstandselement op te nemen, om te bereiken, dat (2) wordt uitgebreid met een term, die het, bij een geschikte karakteristiek van het gekozen weerstandselement, mogelijk maakt de gewijzigde vergelijking (2) met (4) te doen overeenkomen.

Bij deze zogenaamde duale voorstelling dient de capaciteit om de traagheid en de zelfinductie om de komberging na te bootsen.

De duale voorstelling kan zonder bezwaar dienst doen voor het nabootsen van een enkele rivier, doch leidt bij het weergeven van rivierennetwerken tot complicaties.

Tracht men nu volgens de bovenontwikkelde grondgedachten een analogiemodel te realiseren, dan stuit men onder meer op de volgende moeilijkheden.

In de eerste plaats moet een oplossing gevonden worden om elektrisch een kwadratische weerstand na te bootsen.

Daarnaast moet men er rekening mee houden, dat het kombergend oppervlak B , de traagheid M en de weerstand W in feite geen constanten zijn, doch dat deze grootheden variëren wanneer de waterstand verandert. Dit betekent, dat de elektrische grootheden C , L en K op overeenkomstige wijze moeten variëren, afhankelijk van de spanning.

Dan kan het voorts nog nodig zijn met de kracht van Bernoulli rekening te houden of met de schuifkracht, die door het plaatselijke windveld op de waterspiegel wordt uitgeoefend.

In het bestaande elektronische model zijn voor deze moeilijkheden gedeeltelijk oplossingen gevonden, onder andere door gebruik te maken van niet-lineaire eigenschappen van elektronenbuizen.

Langs deze weg is het evenwel niet goed mogelijk de gewenste nauwkeurigheid en vooral de gewenste reproduceerbaarheid te bereiken. Dit heeft een belangrijke terugslag op de uiteindelijke efficiëntie van het model.

Daarenboven waren ook de instel- en regelbereiken van de vakcoëfficiënten onvoldoende.

Toen bij een nadere analyse van het probleem de mogelijkheid bleek langs andere wegen tot een veel efficiënter opzet te kunnen geraken, is dan ook van een verdere ontwikkeling van het elektronische model afgezien.

4.0 ALGEMENE OPZET VAN DE DELTAR

Bij de analoge rekentechniek wordt de te verwerken informatie voorgesteld door middel van meetbare fysische grootheden. De meetbare waarde van zulk een grootheid bepaalt in getalvorm een stukje informatie.

In principe kan elke meetbare grootheid als analoge representatie dienst doen. In de analoge rekentechniek komen voor dit doel echter vooral elektrische grootheden in aanmerking.

Een belangrijk aspect van het langs analoge weg integreren van differentiaalvergelijkingen door middel van elektrische grootheden is daarin gelegen, dat de tijd, die gedurende het rekenproces verloopt, zelf als analoge voorstelling van een der onafhankelijke variabelen dienst kan doen.

Bij getijberekeningen ligt het voor de hand hiervan gebruik te maken, door met de tijd, die in de machine verloopt, een voorstelling op schaal te geven van de tijd in het getijprobleem.

In verband hiermee kan dan de te verwerken informatie gesplitst worden in enerzijds de informatie, die afhangt van de tijd, en anderzijds de informatie, die als onafhankelijk van de tijd behandeld mag worden. Tot de eerste categorie behoren de getijden in zee, die als randvoorwaarden dienst doen, en eventueel een variërend windveld. Tot de tweede categorie behoren onder andere de parameters, die vorm en afmetingen van de rivieren beschrijven, en de daarbij behorende weerstandscoefficienten.

In verband met de wenselijkheid deze tweede categorie van informatie niet nodeloos omvangrijk te maken, is uitgegaan van de praktijk van de getijberekeningen. Daarbij wordt een rivierenstelsel geschematiseerd voorgesteld door een aantal vakken, die elk door een betrekkelijk beperkt aantal karakteristieke functies en parameters worden bepaald. Op deze basis kunnen in principe betrouwbare uitkomsten verkregen worden over waterstanden en over verplaatste hoeveelheden water.

We komen nu dus tot een algemene opzet van de informatieverwerking als aangegeven in figuur 4.0.1.

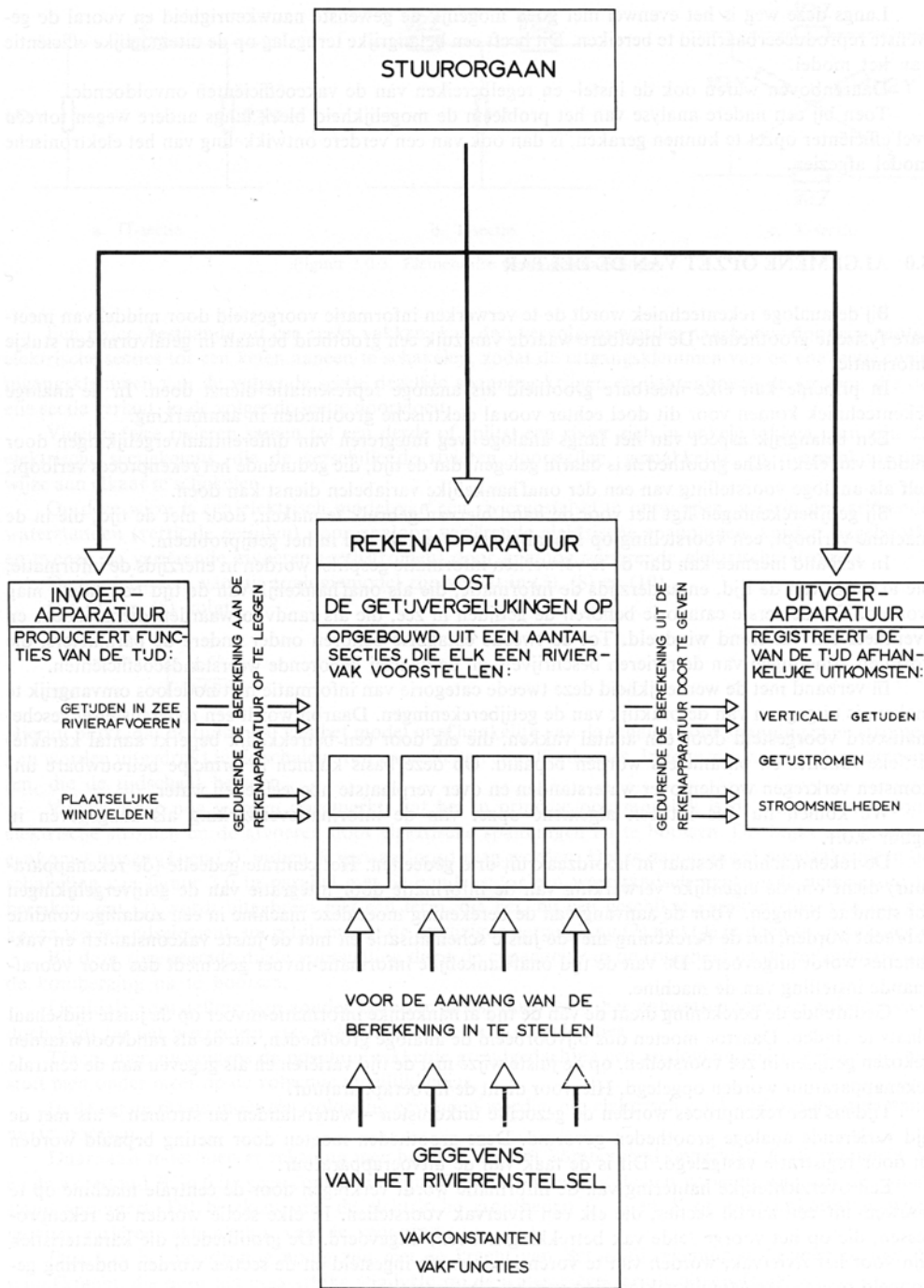
De rekenmachine bestaat in hoofdzaak uit drie gedeelten. Het centrale gedeelte (de rekenapparatuur) dient om de eigenlijke verwerking van de informatie door integratie van de getijvergelijkingen tot stand te brengen. Voor de aanvang van de berekening moet deze machine in een zodanige conditie gebracht worden, dat de berekening met de juiste schematisatie en met de juiste vakconstanten en vakfuncties wordt uitgevoerd. De van de tijd onafhankelijke informatie-invoer geschiedt dus door voorafgaande instelling van de machine.

Gedurende de berekening dient de van de tijd afhankelijke informatie-invoer op de juiste tijdschaal plaats te vinden. Daartoe moeten dus bijvoorbeeld de analoge grootheden, die de als randvoorwaarden gekozen getijden in zee voorstellen, op de juiste wijze met de tijd variëren en als gegeven aan de centrale rekenapparatuur worden opgelegd. Hiervoor dient de invoerapparatuur.

Tijdens het rekenproces worden de gezochte uitkomsten – waterstanden en stromen – als met de tijd variërende analoge grootheden gevormd. Deze grootheden moeten door meting bepaald worden en door registratie vastgelegd. Dit is de taak van de uitvoerapparatuur.

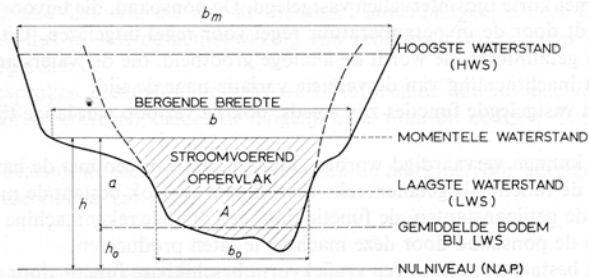
Een overzichtelijke hantering van de informatie wordt verkregen door de centrale machine op te bouwen uit een aantal secties, die elk een riviervak voorstellen. In elke sectie worden de rekenprocessen, die op het voorgestelde vak betrekking hebben, uitgevoerd. De grootheden, die karakteristiek zijn voor het riviervak, worden van te voren in de sectie ingesteld en de secties worden onderling gekoppeld overeenkomstig de vakindeling van het rivierenstelsel.

In figuur 4.0.2 is schematisch het gemiddelde dwarsprofiel van een vak voorgesteld. Hierbij zijn aangegeven de grootheden, die in de sectie worden ingesteld. Dit zijn vijf vakconstanten, alsmede drie



Figuur 4.0.1. Algemeen blokschema van de informatieverwerking

coëfficiënten, die als functies van de waterstand variëren. Op de betekenis van deze grootheden komen we in het volgende hoofdstuk nog terug.



In te stellen grootheden:

- Lengte: l
- Bergend oppervlak bij HWS: $B_m = lb_m$
- Stroomvoerende breedte bij LWS: b_0
- Coëfficiënt van De Chézy bij LWS: C_0
- Gemiddelde bodemhoogte bij LWS: h_0
- Automatisch te regelen functies:
- Bergingscoëfficiënt: $\beta = b/b_m$
- Vormcoëfficiënt stroomvoerend profiel: $a = A/b_0a$
- Weerstandcoëfficiënt: $\eta = C_0^2 a / C^2 a_r$

Figuur 4.0.2 Schematische voorstelling van het dwarsprofiel van een rivier

De gehele machine wordt in bedrijf gebracht en gehouden met behulp van een stuurorgaan, dat onder meer tot taak heeft het samengaan van de verschillende onderdelen der machine te regelen, alsmede het treffen van bepaalde beveiligingsmaatregelen, wanneer een gedurende het rekenproces optredende storing daar aanleiding toe geeft.

Voor een beoordeling van de productiviteit van de machine dienen we te letten op elk der vier aspecten: voorafgaande instelling, invoer, uitvoer, rekenproces.

Bij het gereedmaken van de machine voor de behandeling van een systeem als het deltagebied, moeten honderden vakconstanten en vakfuncties worden ingesteld. Het is om twee redenen van belang, dat dit snel kan geschieden.

In de eerste plaats rijst bij een onderzoek, bijvoorbeeld met betrekking tot het deltagebied, herhaaldelijk de behoefte één of meer parameters te wijzigen. Allereerst betreft dit de wrijvingscoëfficiënten, die door vergelijking met waarnemingen in de bestaande toestand empirisch moeten worden afgeregeld. Ook de waarden van andere parameters kunnen soms langs die weg verbeterd worden. Daarnaast bestaat de behoefte om zich rekenschap te geven van de invloed, die mogelijke profielwijzigingen zullen hebben.

In de tweede plaats zal men van de mogelijkheid gebruik willen maken, verschillende rivierenstelsels met dezelfde machine te behandelen. Dit brengt evenwel mede, dat een geheel ander stel parameters moet worden ingesteld. Wanneer dus snel kan worden ingesteld, betekent dit weinig tijdverlies bij het overstappen op een ander probleem.

Van minstens even groot gewicht als de snelheid van instellen, is de stabiliteit der instelling. Een eenmaal ingestelde waarde behoort over lange tijd constant te blijven, daar men anders vervalt in frequente en tijdrovende ijkingen.

In de Deltar wordt elke vakconstante ingesteld op een verdeelde schaal. De nauwkeurigheid en de stabiliteit zijn zodanig, dat najking van de ingestelde waarde achterwege kan blijven.

De vakfuncties worden ingesteld door aanbrengen van gemodelleerde schijfjes. Deze schijfjes kunnen met een speciale freesmachine vervaardigd worden.

De door de invoerapparatuur te verwerken informatie omvat allereerst de als gegeven aangenomen getijlijnen in zee. Voorts worden langs deze weg ook de gegeven afvoeren der bovenrivieren ingevoerd, alsmede, bij het behandelen van stormvloeden, de windkracht en de windrichting boven het behandelde gebied, als gegeven functies van de tijd.

Bij de Deltar wordt deze informatie aangeboden door middel van ponsbanden. Op de ponsband, die een bepaalde functie van de tijd moet weergeven, zijn door ponsingen in een bepaalde code de waarden der functie met korte tijdsintervallen vastgelegd. De ponsband, die bijvoorbeeld een waterstand in zee voorstelt, wordt door de invoerapparatuur regel voor regel uitgelezen. Uit de aldus op gezette tijdstippen verkregen getalinformatie wordt de analoge grootheid, die de waterstand in zee moet voorstellen, gevormd met inachtneming van de vereiste variatie naar de tijd.

De op ponsband vastgelegde functies zijn steeds, ook na verloop van lange tijd, volledig reproduceerbaar.

De ponsbanden kunnen vervaardigd worden door middel van een met de hand bediende speciale ponsmachine, indien de functie als getallenreeks beschikbaar is. Ook bestaat de mogelijkheid, bijvoorbeeld uitgaande van de getijconstanten, de functie door een digitale rekenmachine („digital computer”) te doen berekenen en de ponsband door deze machine te laten produceren.

De mogelijkheid bestaat om een in een grafiekvorm beschikbare functie door middel van een analoge digitaal-omzetter op ponsband over te brengen. Dit kan van belang zijn bijvoorbeeld voor prognoses bij stormvloedverwachting.

Ten slotte kunnen ponsbanden geleverd worden door de uitvoerapparatuur, zoals hieronder zal blijken.

De uitvoer van de machine omvat in hoofdzaak het vastleggen van verticale getijden, stromen en stroomsnelheden in een aantal dwarsprofielen. Het is van praktisch belang deze uitkomsten te verkrijgen in een vorm, die afgestemd is op het gebruik, dat men er van wil maken.

Een der middelen van uitvoer bij de Deltar wordt gevormd door een aantal schrijvers, waarmee verticale getijkrommen verkregen kunnen worden, of krommen, die het verloop van de totale stroom of van de gemiddelde snelheid in een dwarsprofiel weergeven.

Elke schrijver kan gedurende het rekenproces gelijktijdig zes variërende grootheden, getijden of stromen registreren. De aldus verkregen diagrammen zijn voor diverse praktische doeleinden direct bruikbaar.

Naast de uitvoer door schrijvers, is ook een uitvoer op ponsbanden mogelijk. Deze kunnen onder meer onmiddellijk dienen als invoer voor een digitale rekenmachine, waarmee verdere analyses der uitkomsten kunnen worden uitgevoerd.

De aldus verkregen ponsbanden zijn ook bruikbaar als invoer, indien de vastgelegde getijgrootheden weer als randvoorwaarden moeten dienen. Het is daardoor bijvoorbeeld mogelijk een groot gebied eerst met een wat grovere schematisatie in zijn geheel te behandelen en later op bepaalde gedeelten met een fijnere schematisatie meer gedetailleerd in te gaan.

De snelheid, waarmee de eigenlijke berekening verloopt, wordt bepaald door de tijdschaal van de machine. Immers, deze bepaalt in eerste aanleg het aantal getijden, dat in een gegeven tijdsbestek zou kunnen worden doorgerekend. Uiteraard komt dit echter slechts tot zijn recht voor zover het aanbieden van gegevens aan de machine en het bruikbaar maken van de uitkomsten gelijke tred kan houden met de eigenlijke rekensnelheid.

Het elektronische model vormt een voorbeeld, waarbij aan de genoemde voorwaarde niet voldaan is. In dit model is de tijdschaal zodanig, dat de simulatie van één halfdaags getij zich in 0,001 sec voltrekt. Dit zou betekenen, dat ieder uur enige miljoenen getijden doorgerekend zouden kunnen worden, ware het niet, dat de andere stadia van de gehele verwerkingsgang naar verhouding veel langzamer verlopen, zodat de grote rekensnelheid bij lange na niet kan worden uitgebuit.

Een betere uitbuiting van de met elektronische middelen bereikbare rekensnelheden zou alleen mogelijk zijn bij een meer volledige beheersing van het rekenproces en efficiënter in- en uitvoerprocedures.

In verband met de wiskundige complicaties van de getijvergelijkingen en het grote aantal vakken welke moeten worden voorgesteld, moeten in het analoge rekenproces zeer vele niet-lineaire functies worden gerealiseerd. Dit is met voldoende stabiele elektronische middelen moeilijk te verwerklijken en in elk geval zou dit uiterst kostbaar worden.

Overeenkomstige overwegingen gelden ten aanzien van het in een doelmatige vorm in- en uitvoeren bij grote rekensnelheden. Daarbij moet worden opgemerkt, dat een volledig uitbuiten van de met elektronische middelen bereikbare rekensnelheden voor het getijonderzoek geenszins noodzakelijk is.

Een doelmatige oplossing van het probleem van de informatieverwerking bij het getijonderzoek bleek dan ook gevonden te kunnen worden door een veel kleinere rekensnelheid te aanvaarden. Op

deze basis is voor het rekenproces een geschikte oplossing te vinden, zoals in het volgende hoofdstuk nader zal worden uiteengezet.

Na afwegen van alle factoren, die met de tijdschaal samenhangen, is deze ten slotte gesteld op 1 tegen 100. Dit houdt dus in, dat de getijbeweging van een etmaal in ongeveer een kwartier door de machine wordt doorgerekend.

De hiervoor besproken methoden, volgens welke informatie aan de machine wordt aangeboden en uit de machine wordt verkregen, bieden de mogelijkheid, waar dit nodig is, de rekensnelheid volledig uit te buiten.

Verwacht mag daarom worden, dat de snelheid van de machine voor het maken van prognoses op korte termijn ook toereikend zal zijn.

5.0 HET REKENPROCES IN DE DELTAR

De eigenlijke getijberekening vindt bij de Deltar plaats in de secties, die elk een riviervak voorstellen. We willen hier het rekenproces nagaan, dat in zulk een sectie wordt gesimuleerd.

Het bouwen van een machine naast het elektronische model en de andere reeds bestaande modellen van getijonderzoek, kon slechts zin hebben, indien met deze machine niet alleen de gewone getijbeweging, doch ook stormvloedendoelende nauwkeurig zouden kunnen worden behandeld. Met het oog hierop zouden in elk geval de navolgende twee niet-lineaire problemen moeten worden opgelost: de kwadratische weerstand en de variaties van de kombergingsbreedte en van het stroomvoerend profiel met de waterstand. Daarnaast werd het invoeren van de directe invloed van de wind zeer wenselijk geacht. Toen het bij het ontwerpen mogelijk bleek ook de snelheidshoogte (de kracht van Bernoulli) zonder grote complicaties in te voeren, werd besloten ook deze term mede te nemen.

Verder moet rekening gehouden worden met grote regel- en instelbereiken. Vakconstanten als bijvoorbeeld de bergende breedte en de diepte van de geul, die geregeld moeten worden, afhankelijk van de waterstand, kunnen daarbij in aanzienlijke mate variëren. Verder moet instelling mogelijk zijn zowel voor smalle, ondiepe rivieren, als voor brede, diepe zeearmen, welke gelijktijdig in een zelfde voorstelling kunnen voorkomen.

Deze grote instel- en regelbereiken brengen bovendien een verzwaring van de nauwkeurigheidseisen mede, omdat, ook wanneer een grootheid binnen zijn variatie-interval een kleine waarde krijgt, deze met een zekere waarde van nauwkeurigheid moet worden gerealiseerd. Ten opzichte van de grootste waarden, die de grootheid kan aannemen, wordt deze nauwkeurigheidseis evenwel relatief veel zwaarder. Variëert bijvoorbeeld een grootheid 1 op 10, dan komt de eis van ca. 2% nauwkeurigheid bij de laagste waarde er op neer, dat de fout niet meer dan 0,2% van de grootste waarde mag zijn.

De vergelijkingen die moeten worden opgelost, zijn zoals bekend, respectievelijk de bewegingsvergelijking en de continuïteitsvergelijking:

$$\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{|v|v}{C^2 a_r} = \frac{\gamma}{g} \frac{V^2}{a_r} \cos(\theta - \varphi) \quad (1)$$

en

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + b \frac{\partial h}{\partial t} = 0. \quad (2)$$

Hierbij gelden nog de betrekkingen:

$$H = h + \frac{v^2}{2g} \quad (3)$$

n

$$Q = vA. \quad (4)$$

In deze formules is:

t = de tijd

x = de afstand langs de geulas

h = de waterstand boven het gegeven nulvlak (N.A.P.)

- v = de gemiddelde stroomsnelheid in een dwarsprofiel
 H = de energiehoogte boven het nulvlak
 Q = de totale ogenblikkelijke afvoer
 a_r = de diepte van het dwarsprofiel onder de waterspiegel
 A = het oppervlak van het stroomvoerende profiel
 b = de bergende breedte
 g = de versnelling van de zwaartekracht
 C = de coëfficiënt van De Chézy
 V = de windsnelheid
 θ = de windrichting
 φ = de richting van de geulas
 γ = een coëfficiënt (onbenoemd) waarvan de waarde op bijv. 3,6. 10^{-6} gesteld kan worden.

Uit (1) en (2) zijn op verschillende manieren vergelijkingen af te leiden voor een riviervak. In het algemeen leggen zulke vakvergelijkingen verband tussen getij en stroom aan het ene vakuiteinde en getij en stroom aan het andere vakuiteinde. Ten aanzien van deze vakvergelijkingen komt bij het analoge rekenproces een belangrijk gezichtspunt naar voren, dat we hier kort willen bespreken.

We beschouwen een dwarsprofiel, dat in gedachten de scheiding vormt van twee riviervakken. Door dit grensvak heen zal zich het getij van beneden naar boven toe kunnen voortplanten. Doch ook met de mogelijkheid van voortplanting in de andere richting moet rekening worden gehouden, onder meer omdat bijvoorbeeld een verandering van de afvoer ook benedenstrooms zijn invloed zal uitoefenen.

Dit betekent, bij het analoog op tijdschaal simuleren van het rivierenstelsel, dat twee secties, die aan elkaar geschakeld worden, op de juiste wijze wederkerig invloed op elkaar moeten kunnen uitoefenen. Dit hangt onmiddellijk samen met de wijze, waarop de analoge grootheden, die getij en stroom aan het ene uiteinde der sectie voorstellen, inwerken op de analoge grootheden aan het andere einde, of anders gezegd: met de wijze, waarop de voortplanting door de sectie heen gesimuleerd wordt.

Er zijn verschillende manieren denkbaar, waarop de simulatie der voortplanting technisch tot stand kan worden gebracht, samenhangend met de mathematische formulering van de vakvergelijkingen. Dit aspect van de voortplanting laat zich behandelen door gebruik te maken van de theorie der karakteristieken van het stelsel vergelijkingen (1) en (2). Bij de technische vormgeving op deze basis stuit men evenwel, mede door het niet-lineaire karakter der differentiaalvergelijkingen, op diverse moeilijkheden, waarvoor nog geen bevredigende oplossing gevonden werd.

Een theoretisch minder doorzichtige oplossing, waarbij evenwel met een minimum aan middelen de niet-lineaire functies worden verwerkt, kan verkregen worden door nauwer te blijven aansluiten bij de analogiemodellen, als hiervoor besproken, namelijk door tussen twee secties stroom en spanning aan eenzelfde klem uit te wisselen. Op deze grondslag werkt de Deltar.

De vakvergelijkingen, waarvan wordt uitgegaan, zijn uit (1) en (2) verkregen door de differentiaties naar x met centrale differenties te benaderen. Aldus wordt gevonden:

$$H_a - H_b = \frac{l}{g} \frac{dv}{dt} + l \frac{|v| v - U}{C^2 a_r}, \quad (5)$$

$$Q_a - Q_b = B \frac{dh}{dt}, \quad (6)$$

alsmede

$$\frac{H_a + H_b}{2} = h + \frac{v^2}{2g} \quad (7)$$

en

$$\frac{Q_a + Q_b}{2} = vA. \quad (8)$$

Hierin is l de vaklengte en $B = lb$ het bergend oppervlak. De grootheden B , A en $C^2 a_r$ zijn gegeven functies van de waterstand.

De grootheid

$$U = \gamma \frac{C^2}{g} V^2 \cos(\Theta - \varphi) \quad (9)$$

geeft zo nodig de windinvloed weer.

Deze vakvergelijkingen worden nader toegelicht door figuur 5.0.1; de windinvloed is hierbij voor het ogenblik buiten beschouwing gelaten. Onderaan in deze figuur is de opbouw van de analoge sectie in principe aangegeven. Deze bestaat uit drie takken.

De energiehoogten H_a en H_b aan de vakuiteinden worden weergegeven door spanningen op de aansluitklemmen der sectie. De door deze klemmen over te dragen stromen stellen de ogenblikkelijke afvoeren Q_a en Q_b voor. De spanning op het middelpunt van de sectie stelt de waterstand h in het midden van het riviervak voor. De beide serietakken van de sectie dienen dus spanningsverschillen, evenredig met $H_a - h$, respectievelijk $H_b - h$, op te nemen, terwijl de paralleltak een stroom moet doen vloeien van het middenpunt naar aarde, die evenredig is met de komberging $Q_a - Q_b$.

Dit wordt bereikt doordat zich in elk der drie takken een versterker bevindt, die zodanig bestuurd wordt, dat de door deze versterkers geleverde spanningen in de serietakken en de geleverde stroom in de paralleltak zich steeds blijven aanpassen aan de variaties der stromen en spanningen aan de begin- en de eindklem.

In figuur 5.0.2 is nader aangegeven hoe de besturing van de versterkers in de sectie verloopt. Behalve de versterkers A, B en C in de drie hoofdtakken bevinden zich daartoe in de sectie nog een servo-apparatuur S, een vierde versterker T en een groep rekenorganen R.

De servo-apparatuur S dient voor het realiseren van de functieregelingen voor $B(h)$, $A(h)$ en $C^2 a_r(h)$. Het centrale orgaan van deze apparatuur is een as, waaraan mechanisch een aantal potentiometers is gekoppeld. Een dezer potentiometers levert een spanning af, die de waterstand h moet voorstellen. Door de servomotor wordt de stand van de as zodanig bijgesteld, dat de juist genoemde potentiometer-spanning steeds blijft overeenstemmen met de spanning van het middenpunt van de sectie. Hierdoor wordt bereikt, dat de stand van de as eveneens een analoge voorstelling van de waterstand h vormt.

De andere aan de servo-as gekoppelde potentiometers geven de grootheden B , A en $C^2 a_r$ weer. De potentiometers voor B en A dienen ter besturing van de versterkers C en T, terwijl potentiometers voor de grootheid $C^2 a_r$ in de schakeling van R zijn opgenomen.

In verband met de grote variatie van het dwarsprofiel A , wordt dit voorgesteld door een produkt:

$$A = b_0 (h - h_0) \alpha(h). \quad (10)$$

Hierbij wordt de gemiddelde bodembreedte b_0 (zie figuur 4.0.2) als constante waarde van te voren in de sectie ingesteld. De variatie met de waterstand komt in hoofdzaak tot stand door middel van een zeer nauwkeurige, direct met de servo-as verbonden potentiometer, die evenredig met de diepte $(h - h_0)$ varieert. Ten slotte kan de vorm van het dwarsprofiel in rekening worden gebracht door middel van een tweede potentiometer, die de vormcoëfficiënt $\alpha(h)$ weergeeft. Deze potentiometer wordt aangedreven door de servo-as door tussenkomst van een gemodelleerd schijfje, waarvan de vorm bepaald is door de functie $\alpha(h)$. Op overeenkomstige wijze wordt de grootheid $C^2 a_r$ voorgesteld door

$$C^2 a_r = C_0^2 (h - h_0) \frac{1}{\eta(h)} \quad (11)$$

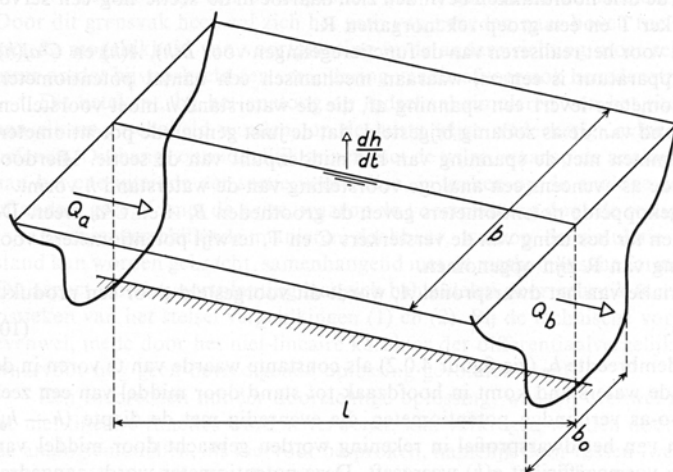
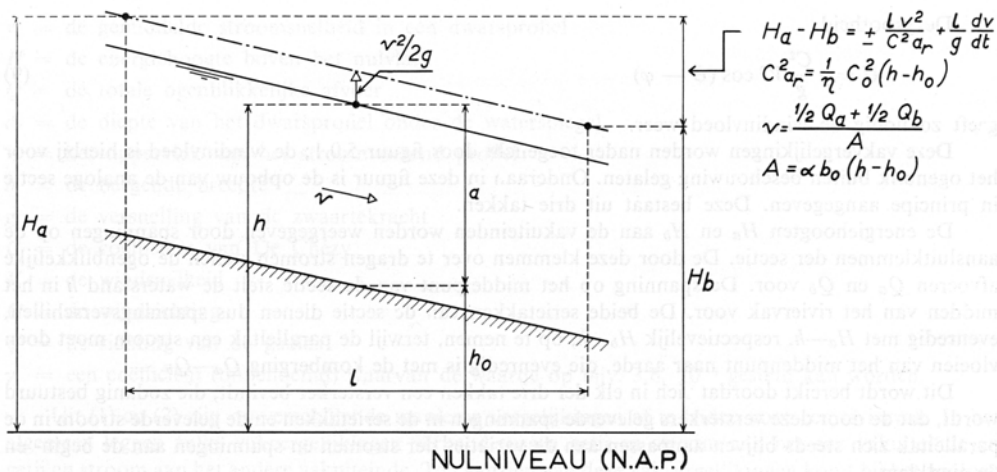
Hierbij wordt C_0^2 van te voren ingesteld en $\eta(h)$ door middel van een gemodelleerd schijfje automatisch ingevoerd.

Het bergend oppervlak wordt voorgesteld door

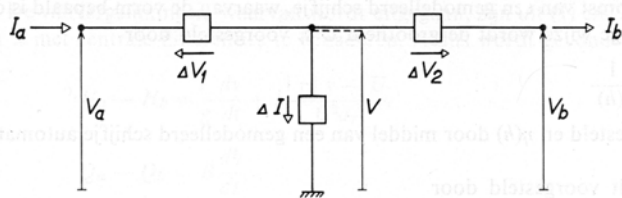
$$B = B_m \beta(h), \quad (12)$$

waarbij B_m wordt ingesteld en $\beta(h)$ met een schijfje wordt ingevoerd.

In de ingang van de versterker C is een tussen het middenpunt der sectie en aarde geschakelde capaciteit opgenomen. Naar deze capaciteit vloeit dus een stroom, die evenredig is met dh/dt (vergelijk wat in 3.0 bij vergelijking (2) werd opgemerkt). Deze stroom wordt versterkt, waarbij de versterkingsfactor evenredig is met het bergend oppervlak B . Dit wordt bereikt doordat in het circuit van de versterker C potentiometer-weerstand zijn opgenomen, die te zamen de grootheid B volgens (12) bepalen.



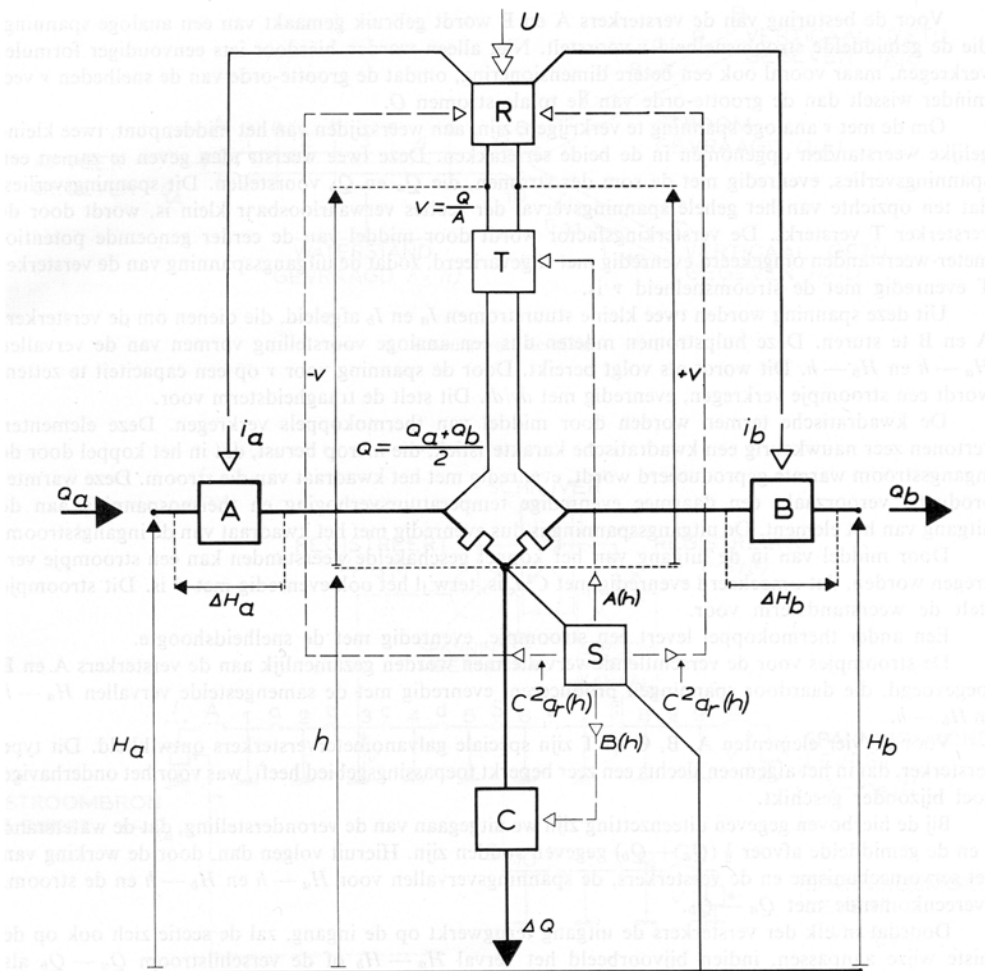
$Q_a - Q_b = B \frac{dh}{dt}$
 $B = bl = \beta B_m$



$I_a \sim Q_a$
 $I_b \sim Q_b$
 $V_a \sim H_a$
 $V_b \sim H_b$
 $V \sim h$
 $\Delta I \sim B \frac{dh}{dt}$

$\Delta V_1 \sim H_a - h = \pm \frac{1}{2} \frac{L v^2}{C^2 a_r} + \frac{1}{2} \frac{L}{g} \frac{dv}{dt} + \frac{v^2}{2g}$
 $-\Delta V_2 \sim h - H_b = \pm \frac{1}{2} \frac{L v^2}{C^2 a_r} + \frac{1}{2} \frac{L}{g} \frac{dv}{dt} - \frac{v^2}{2g}$

Figuur 5.0.1. Illustratie van de vakvergelijkingen



$$H_a - h \equiv \Delta H_a = \frac{v^2}{2g} + \frac{L}{2g} \frac{dv}{dt} + \frac{L}{2} \frac{v|v-U}{C^2 q_r}$$

$$H_b - h \equiv \Delta H_b = \frac{v^2}{2g} - \frac{L}{2g} \frac{dv}{dt} - \frac{L}{2} \frac{v|v-U}{C^2 q_r}$$

$$Q_a - Q_b \equiv \Delta Q = B \frac{dh}{dt}$$

- | | | | |
|--------|--------------------|--------|--------------|
| ————— | HOOFDCIRCUIT | ————— | SPANNINGEN |
| ————— | HULPCIRCUIT | ————— | HOOFDSTROMEN |
| -----> | REGEL-INGREPEN | -----> | HULPSTROMEN |
| -----> | INGREEP VAN BUITEN | | |

Figuur 5.0.2. Schema van het rekenproces in een sectie

Voor de besturing van de versterkers A en B wordt gebruik gemaakt van een analoge spanning, die de gemiddelde stroomsnelheid v voorstelt. Niet alleen worden hierdoor iets eenvoudiger formules verkregen, maar vooral ook een betere dimensionering, omdat de grootte-orde van de snelheden v veel minder wisselt dan de grootte-orde van de totale stromen Q .

Om de met v analoge spanning te verkrijgen, zijn, aan weerszijden van het middenpunt, twee kleine gelijke weerstanden opgepomen in de beide serietakken. Deze twee weerstanden geven te zamen een spanningsverlies, evenredig met de som der stromen, die Q_a en Q_b voorstellen. Dit spanningsverlies, dat ten opzichte van het gehele spanningsverval der secties verwaarloosbaar klein is, wordt door de versterker T versterkt. De versterkingsfactor wordt door middel van de eerder genoemde potentiometer-weerstanden omgekeerd evenredig met A gevarieerd, zodat de uitgangsspanning van de versterker T evenredig met de stroomsnelheid v is.

Uit deze spanning worden twee kleine stroomstromen I_a en I_b afgeleid, die dienen om de versterkers A en B te sturen. Deze hulpstromen moeten dus een analoge voorstelling vormen van de vervallen $H_a - h$ en $H_b - h$. Dit wordt als volgt bereikt. Door de spanning voor v op een capaciteit te zetten, wordt een stroompje verkregen, evenredig met dv/dt . Dit stelt de traagheidsterm voor.

De kwadratische termen worden door middel van thermokoppels verkregen. Deze elementen vertonen zeer nauwkeurig een kwadratische karakteristiek, die hierop berust, dat in het koppel door de ingangsstroom warmte geproduceerd wordt, evenredig met het kwadraat van die stroom. Deze warmteproductie veroorzaakt een daarmee evenredige temperatuursverhoging en thermospanning aan de uitgang van het element. De uitgangsspanning is dus evenredig met het kwadraat van de ingangsstroom.

Door middel van in de uitgang van het koppel geschakelde weerstanden kan een stroompje verkregen worden, dat omgekeerd evenredig met $C^2 a_r$ is, terwijl het ook evenredig met v^2 is. Dit stroompje stelt de weerstandsterm voor.

Een ander thermokoppel levert een stroompje, evenredig met de snelheidshoogte.

De stroompjes voor de verschillende vervaltermen worden gezamenlijk aan de versterkers A en B toegevoegd, die daardoor spanningen produceren, evenredig met de samengestelde vervallen $H_a - h$ en $H_b - h$.

Voor de vier elementen A, B, C en T zijn speciale galvanometerversterkers ontwikkeld. Dit type versterker, dat in het algemeen slechts een zeer beperkt toepassingsgebied heeft, was voor het onderhavige doel bijzonder geschikt.

Bij de hierboven gegeven uiteenzetting zijn we uitgegaan van de veronderstelling, dat de waterstand h en de gemiddelde afvoer $\frac{1}{2}(Q_a + Q_b)$ gegeven zouden zijn. Hieruit volgen dan, door de werking van het servomechanisme en de versterkers, de spanningsvervallen voor $H_a - h$ en $H_b - h$ en de stroom, overeenkomende met $Q_a - Q_b$.

Doordat in elk der versterkers de uitgang terugwerkt op de ingang, zal de sectie zich ook op de juiste wijze aanpassen, indien bijvoorbeeld het verval $H_a - H_b$ of de verschilstroom $Q_a - Q_b$ als gegeven wordt opgelegd.

Op de regeltechnische problemen, die moesten worden opgelost om dit te bereiken, zal elders worden ingegaan.

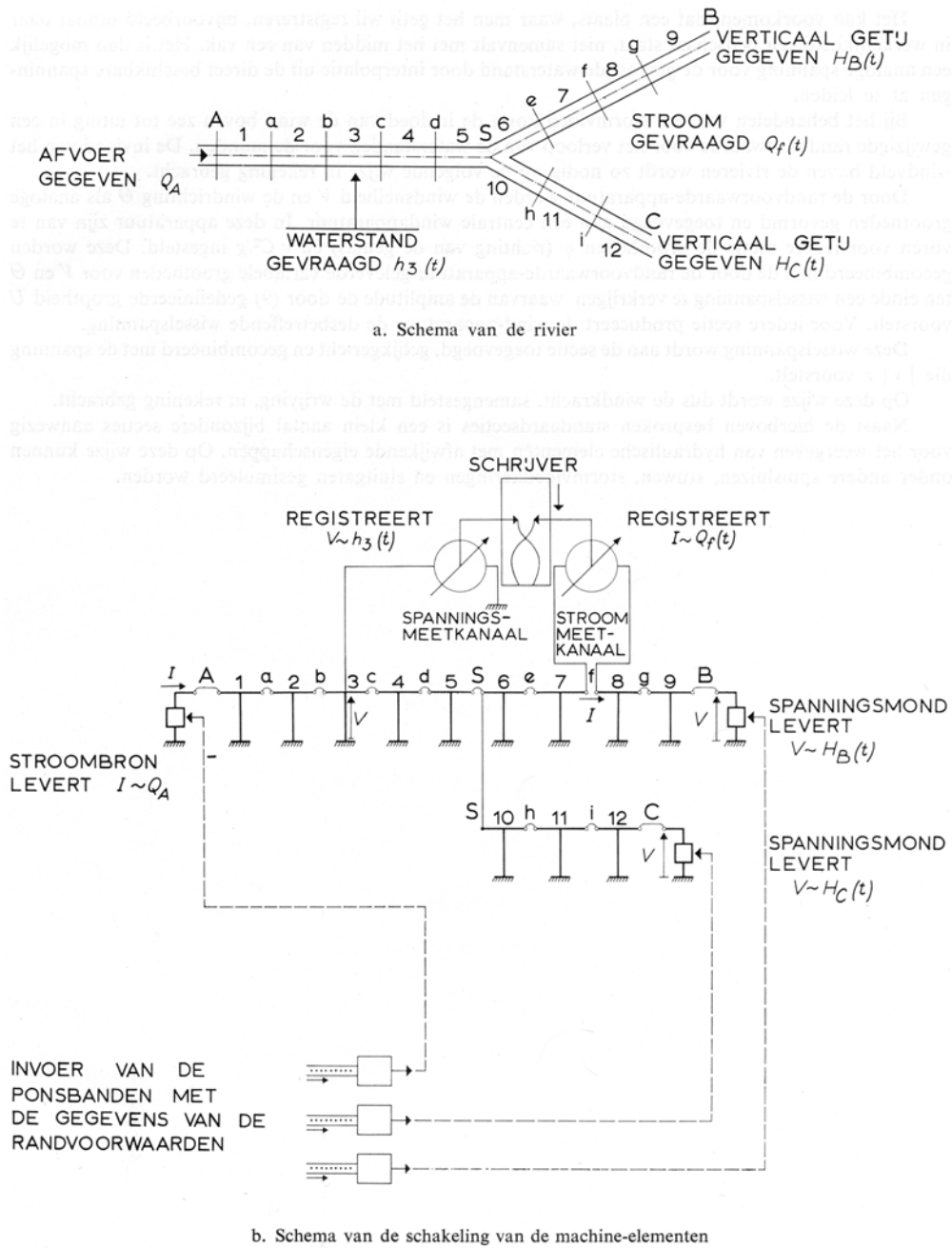
Secties, die aaneensluitende riviervakken voorstellen, worden eenvoudig doorverbonden, zoals dit bij een analogiemodel (zie 3.0) geschiedt. Op deze wijze zijn ook ingewikkelde vertakte rivierenstelsels op eenvoudige wijze door aaneenschakeling van secties weer te geven.

In figuur 5.0.3 is dit schematisch voorgesteld voor een rivier, die zich in twee takken splitst.

De getijden in zee worden ingevoerd door spanningsgeneratoren, die, zoals in het vorige hoofdstuk werd beschreven, bestuurd worden door middel van ponsbanden.

De afvoer van de rivier wordt op overeenkomstige wijze ingevoerd door een stroombron. De besturing van deze stroombron door een ponsband maakt het mogelijk de afvoer te variëren. Dit kan van nut zijn bijvoorbeeld bij het onderzoeken van veertiendaagse spuiprogramma's, waarbij met was of val van de rivier gerekend wordt.

Zoals hiervoor is uiteengezet, zijn bij iedere sectie zes grootheden voor directe meting beschikbaar. Dit zijn de beide energiehogten aan de uiteinden, alsmede de waterstand en stroomsnelheid in het midden van het vak als analoge spanningen en de stromen aan de uiteinden als analoge stromen. In figuur 5.0.3 is schematisch voor twee van zulke meetgrootheden aangegeven hoe zij geregistreerd worden.



Figuur 5.0.3. Voorbeeld van de behandeling van een vertakte rivier

Het kan voorkomen, dat een plaats, waar men het getij wil registreren, bijvoorbeeld omdat daar in werkelijkheid een peilschaal staat, niet samenvalt met het midden van een vak. Het is dan mogelijk een analoge spanning voor de gevraagde waterstand door interpolatie uit de direct beschikbare spanningen af te leiden.

Bij het behandelen van een stormvloed komt de invloed van de wind boven zee tot uiting in een gewijzigde randvoorwaarde voor het verloop van de waterstanden voor de monden. De invloed van het windveld boven de rivieren wordt zo nodig op de volgende wijze in rekening gebracht.

Door de randvoorwaarde-apparatuur worden de windsnelheid V en de windrichting θ als analoge grootheden gevormd en toegevoegd aan een centrale windapparatuur. In deze apparatuur zijn van te voren voor iedere sectie de grootheden φ (richting van de geulas) en $\gamma C^2/g$ ingesteld. Deze worden gecombineerd met de door de randvoorwaarde-apparatuur geleverde variabele grootheden voor V en θ ten einde een wisselspanning te verkrijgen, waarvan de amplitude de door (9) gedefinieerde grootheid U voorstelt. Voor iedere sectie produceert de wind-apparatuur de desbetreffende wisselspanning.

Deze wisselspanning wordt aan de sectie toegevoegd, gelijkgericht en gecombineerd met de spanning die $|v|$ voorstelt.

Op deze wijze wordt dus de windkracht, samengesteld met de wrijving, in rekening gebracht.

Naast de hierboven besproken standaardsecties is een klein aantal bijzondere secties aanwezig voor het weergeven van hydraulische elementen met afwijkende eigenschappen. Op deze wijze kunnen onder andere spuisluizen, stuwen, stormvloedkeringen en sluitgaten gesimuleerd worden.