

Basisprincipes van de kustwaterbouw

2. Getijden en getijstroom

Inleiding en theoretische achtergrond

De theorie van getijden zal in dit kader niet diepgaand behandeld worden. Er zal worden volstaan met een summier behandeling. Ten gevolge van de aantrekkingskracht die zon, maan en aarde op elkaar uitoefenen en ten gevolge van de slinging van het stelsel aarde-maan om een gemeenschappelijk zwaartepunt, zal het op aarde aanwezige water de vorm van een ellipsoïde trachten aan te nemen. Daarbij is de maansinvloed belangrijker dan de zonsinvloed. De invloeden verhouden zich ongeveer als 5 : 2. De navolgende

beschouwingen hebben betrekking op het systeem aarde-maan; voor het systeem aarde-zon zijn identieke beschouwingen op te stellen. Bij oppervlakkige beschouwing lijkt het alsof de maan om de aarde draait. Dit is echter niet het geval. Maan en aarde draaien om een gemeenschappelijk zwaartepunt (punt Z in fig. 2.1). Omdat de massa van de aarde echter veel groter is dan die van de maan, ligt dit gemeenschappelijke zwaartepunt veel dichterbij de aarde, dan bij de maan. Het ligt zelfs binnen de aarde. Het gevolg van deze draaiing om het gemeenschappelijk middelpunt betekent dat er op het

aardoppervlak een middelpunt vliedende kracht aangrijpt, waarvan de grootte afhangt van de afstand tot het gemeenschappelijke zwaartepunt Z. Hoe groter de afstand is tot het gemeenschappelijk zwaartepunt, hoe groter de kracht is. De richting van de kracht is evenwijdig aan het draaiingsvlak van aarde en maan. Omdat de afstand tot dit zwaartepunt op de van de maan afgekeerde zijde van de aarde het grootst is, is ook daar de middelpuntvliedende kracht het grootst. Figuur 2.1a geeft een beeld van de verdeling van deze kracht. Door de middelpuntvliedende kracht wordt het water naar de evenaar getrokken, en vooral naar de van de maan afgekeerde zijde.

Daarnaast wordt de watermassa ook direct door de aantrekkingskracht van de maan beïnvloed. Via zijn zwaartekracht trekt de maan aan alle waterdeeltjes. Deze kracht is overal naar de maan toe gericht, en is afhankelijk van de afstand tot de maan. Hoe dichterbij de maan, hoe groter de kracht. Deze krachten zijn weergegeven in figuur 2.1b.

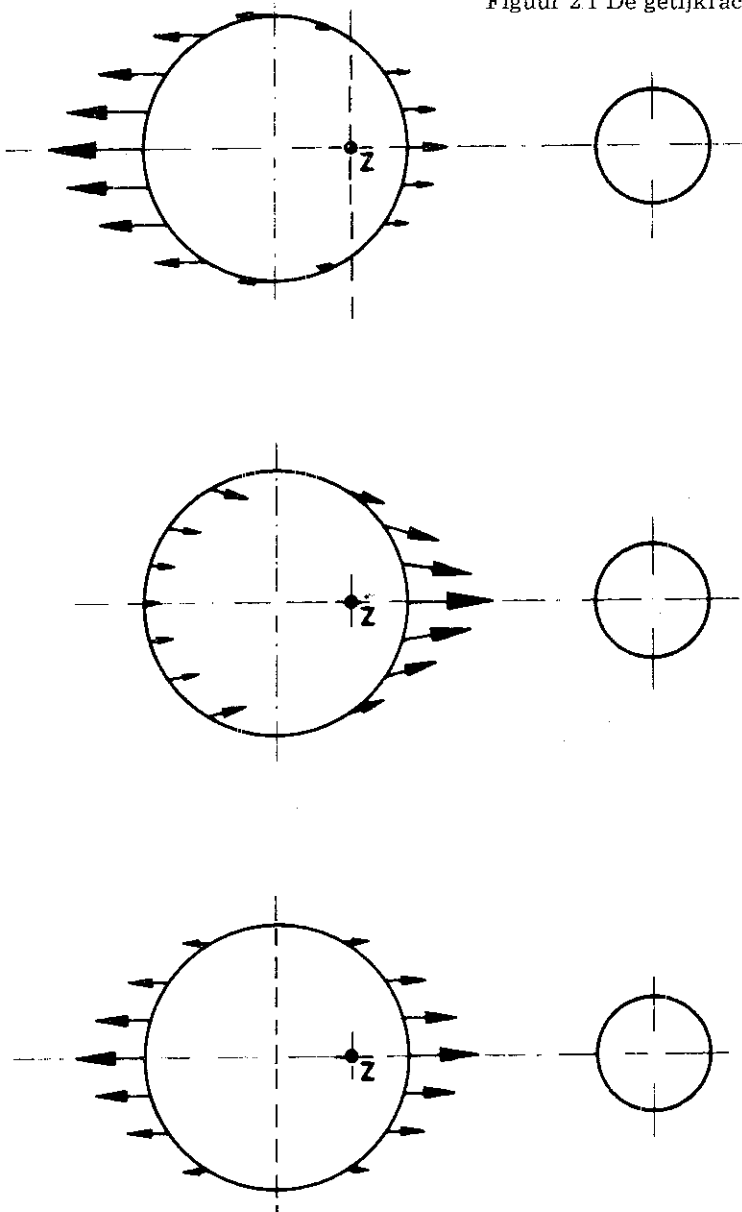
Door de draaiing van de aarde om haar eigen middelpunt ontstaat ook een middelpuntvliedende kracht. De grootte van deze kracht is afhankelijk van de afstand tot de aardas, ook hier geldt hoe groter de afstand, hoe groter de kracht. Deze krachten zijn geschilderd in figuur 2.1c.

Het effect van deze drie krachten samen is dat er een "berg" water om de aarde heen loopt, met een top aan de zijde van de maan en een tweede top precies aan de andere zijde van de aarde.

Als de aarde een mooie, ronde bol was, overal bedekt met een even dikke laag water, dan zou men via berekeningen van de krachten overal het getij op aarde kunnen berekenen. Het blijkt dat dan de getijverschillen maar een paar centimeter zijn. In werkelijkheid zijn de getijverschillen veel groter. Dit wordt veroorzaakt doordat de watermassa in de oceanen gaat slingeren en resoneren.

In deze analyse komen nog een paar complicerende factoren aan de orde, zoals het feit dat de aardas

Figuur 2.1 De getijkrachten



2.1a

2.1b

2.1c

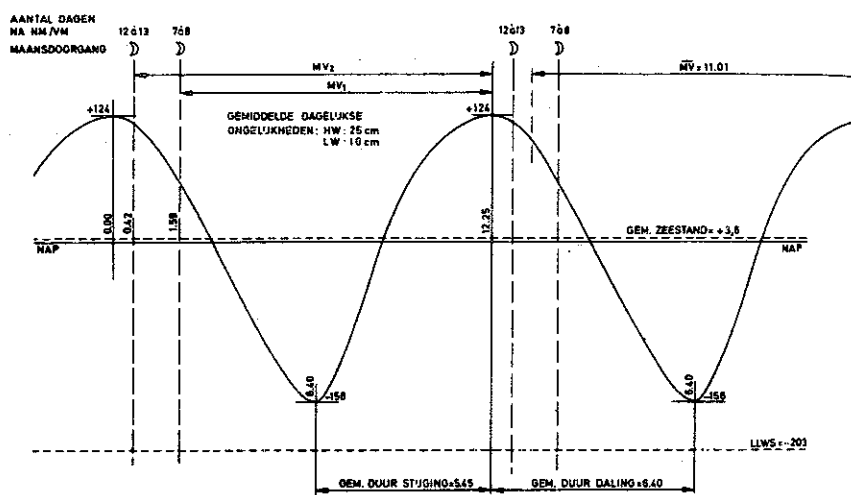
Figuur 2.2 Getijkrommen langs de Nederlandse kust

niet loodrecht op het vlak waarin de aarde en de maan draaien, en dat dit vlak niet samenvalt met het vlak waarin zon en aarde draaien. Uit deze analyses moet geconcludeerd worden dat het niet mogelijk is om aan de hand van astronomische factoren het getij te voorspellen. Wel kan men uit deze astronomische analyse afleiden welke getijcomponenten er aanwezig zijn, met welke periode het getij op en neer gaat. Het is dus duidelijk dat het getij enkeldagse en dubbel-dagse componenten moet bevatten. Met andere woorden, de beide hoogwaters op een dag zijn nooit even hoog. Dit verschil heet de **dagelijkse ongelijkheid**. Figuur 2.2 geeft enige voorbeelden van getijkrommen langs de Nederlandse kust, hierin is een en ander duidelijk te zien.

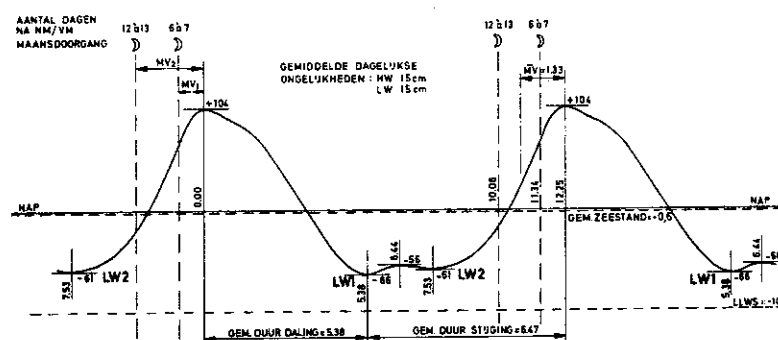
Uit deze figuur blijkt ook dat hoogwater niet optreedt op het moment dat de maan de meridiaan van het station passeert (de **culminatie**). Het tijdsverschil tussen de maandoorgang en het hoge water heet **havengetal**. Het havengetal is voor iedere plaats op aarde anders, maar voor die plaats wel constant in de tijd.

De interactie tussen zon en maan zorgt voor het verschil in **doodtij** en **springtij**. Springtij treedt op als de krachten van zon en maan samenvallen, doottij treedt op als zij elkaar tegenwerken. Omdat de maan in ongeveer 4 weken om de aarde draait, treedt springtij eens in de 2 weken op. Zie figuur 2.3. In figuur 2.4 is voor een Nederlands kuststation het verloop van het getij gedurende een maand aangegeven. Duidelijk is te zien dat het echte springtij later optreedt dan uit de stand van de maan valt af te leiden. Deze tijdsverschuiving wordt de **leeftijd** van het getij genoemd, en bedraagt normaliter 2 à 3 dagen.

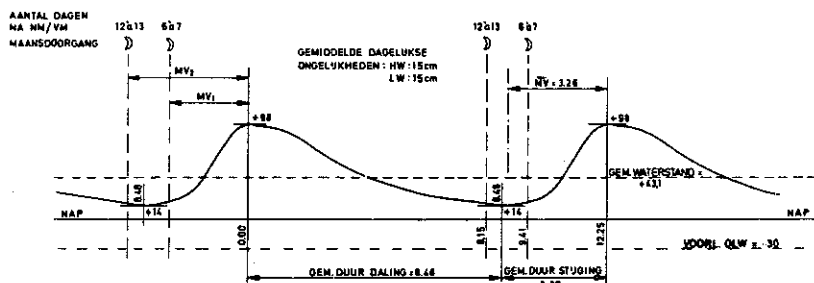
Ten opzichte van de zwaartekracht van de aarde zelf is de getijkracht zeer klein; ze verhouden zich als ongeveer $1 : 10^{-7}$. Ondanks deze geringe kracht is de getijbeweging groot te noemen. De getijgolf kan zich alleen op het zuidelijk halfrond min of meer ongestoord voortbewegen. Vanuit deze zone plant het getij zich voort in de noordelijke oceanen en de rand-



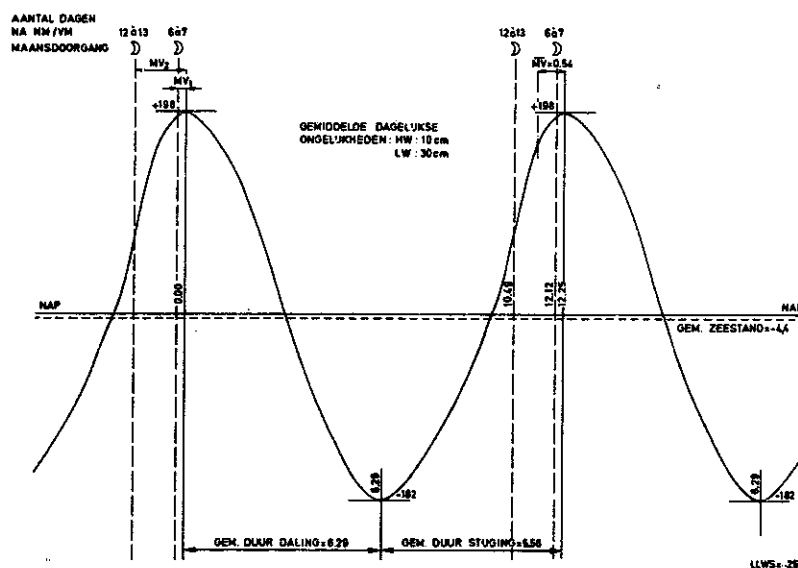
Gemiddelde getijkromme 71.0 te Delfzijl



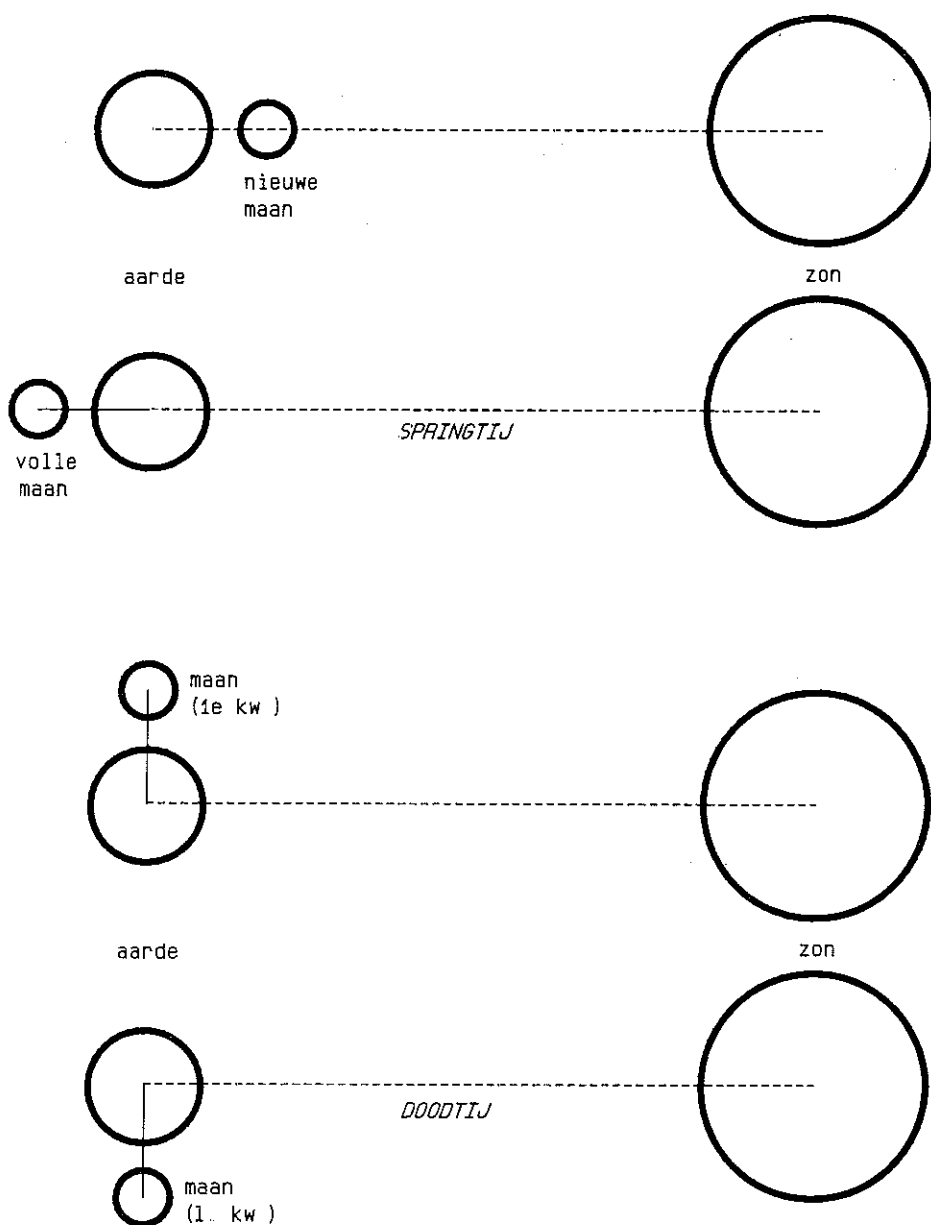
Gemiddelde getijkromme 76.0 te Hoek van Holland



Gemiddelde getijkromme 76.0 te Dordrecht

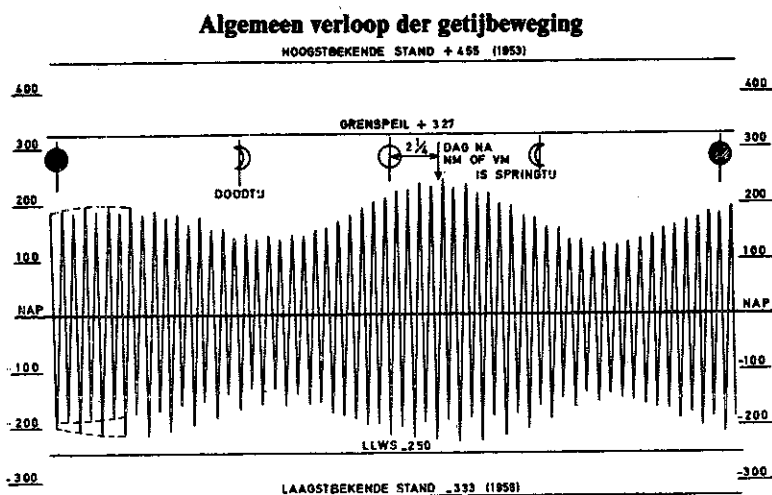


Gemiddelde getijkromme 71.0 te Vlissingen



SPRINGTIJ EN DOODTIJ EN DE DAARBIJ BEHORENDE MAANSTANDEN

Figuur 2 3 Springtij, doodtij en de maanstand



Figuur 2 4 Het verloop van het getij in Vlissingen gedurende een maand

zeeën. Mede door terugkaatsing en door resonantie ontstaan dan vaak heel gecompliceerde getijbeelden. Op de Noordzee ontwikkelt zich ten gevolge van de terugkaatsing een staande golf.

Onder invloed van de Coriolis-kracht ontstaat een waterbeweging om de zogenaamde punten van **amfidromie** heen. Op figuur 2.5 zijn deze amfidromische punten goed te zien. In een amfidromisch punt is dus geen getijverschil. De waterstand is daar onafhankelijk van het getij

In de monden van de zeearmen treedt de getijgolf binnen als een sinusgolf. Deze golf gedraagt zich als een ondiepwatergolf, omdat de waterdiepte zeer gering is t.o.v. de golflengte

In de zeearmen vindt gedeeltelijke of gehele terugkaatsing plaats, waardoor een gecompliceerd beeld ontstaat van de combinatie van een lopende en een staande golf. Bij een lopende golf treden de grootste horizontale snelheden (dit zijn dus de getijstroomsnelheden) op in de top en in het dal van de golf. Bij een staande golf treden zij op in de middenstand.

De **kenteringsmomenten**, dat zijn de punten waarin de horizontale stroomsnelheid tot nul is genaderd en van richting omkeert, liggen bij de lopende golf in de middenstand en bij de staande golf in top en dal. Bij een combinatie van lopende en staande golven zal de kentering kortere of langere tijd na het moment van hoog- of laagwater optreden.

De **vloedperiode** is de periode tussen de laagwaterkentering en de hoogwaterkentering. De **ebperiode** is de periode tussen de hoogwaterkentering en de laagwaterkentering.

Getijvoorspellingen, getijtafels

Uit het voorgaande volgde dat het met zuiver theoretische afleidingen niet mogelijk is om het getij te voorspellen. In de praktijk worden de getijvoorspellingen dan ook gebaseerd op meetgegevens in het desbetreffende stations. Dit doet men d.m.v. „**Harmonische Analyse**” of d.m.v. „**Fourier-Analyse**”. Voor getijvoorspellingen wordt meestal de „Harmonische Analyse” gebruikt, die heel kort besproken zal

worden, zonder in detail in te gaan op de wiskundige achtergrond De belangrijkste aandrijvende krachten zijn die van de zon en de maan. De omwentelingsperioden zijn 12 uur voor de zon en 12,421 uur voor de maan De bijbehorende hoeksnelheden zijn 30,000 graden/uur en 28,984 graden/uur. Naast deze twee frequenties zijn er nog erg veel secundaire componenten, die ontstaan door resonanties en interacties. De werkelijke getijbeweging wordt dan beschreven als de som van een groot aantal harmonische componenten:

$$h(t) = H_0 + \sum H_i \cos(\omega_i t + g_i)$$

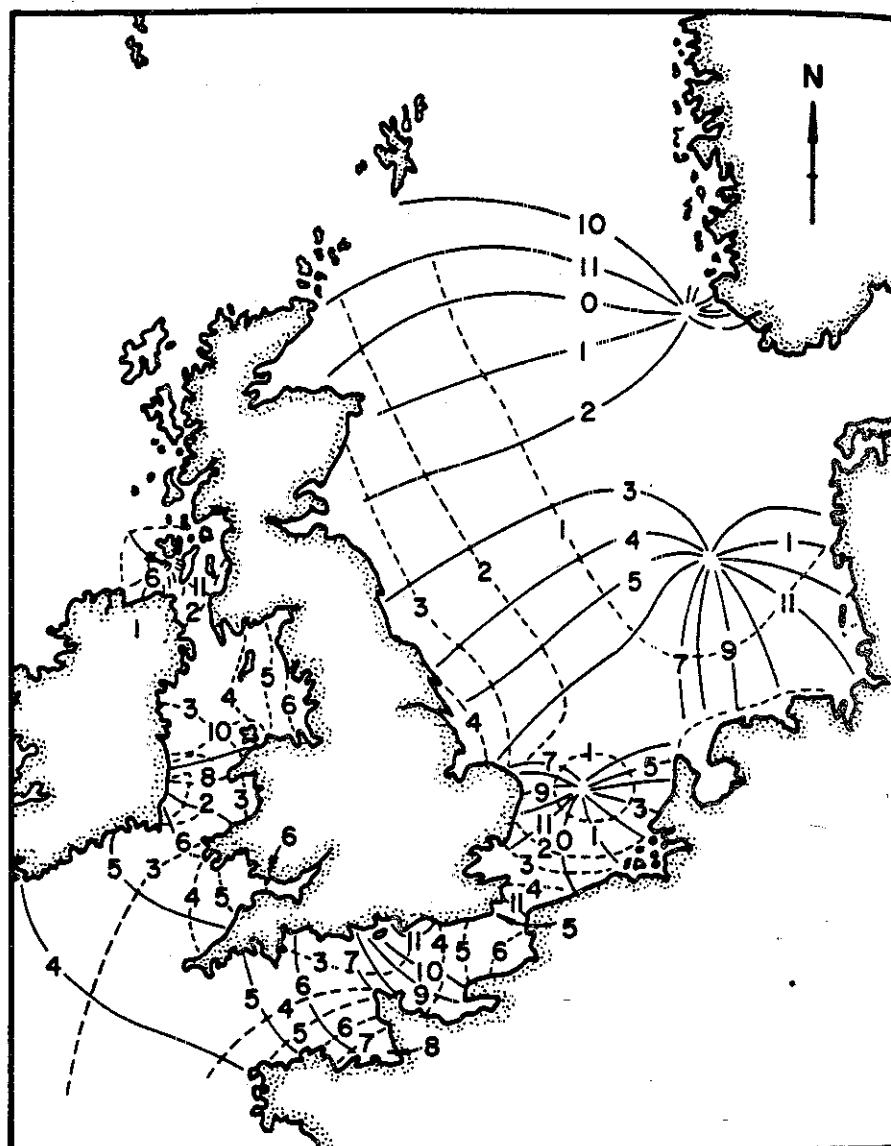
hierin is:

- $h(t)$ — de waterstand op getijstip t
- H_0 — middenstandsvlak (t.o.v. NAP)
- H_i — amplitude van component i (m)
- ω_i — hoeksnelheid van component i (graden/uur)
- g_i — correctieterm van component i (faseverschuiving, graden)

Als men nu van een bepaald station een lange waarnemingsreeks heeft, kan men daaruit voor iedere getijcomponent de parameters H_i , ω_i en g_i bepalen. Hoe langer de reeks is, des te nauwkeuriger kan men de parameters bepalen. Een veelvuldig aangehaalde methode is die van Doodson van de Britse Admiraliteit. Doodson geeft een rekenrecept om vanuit een waarnemingsreeks van 30 dagen met om het uur een waarneming, de belangrijkste getijcomponenten te bepalen. De getijvoorspellingen voor de Nederlandse stations worden met een zelfde soort methode uitgevoerd, maar gebaseerd op veel langere waarnemingsreeksen. Voor de standaard getijvoorspelling gebruikt men in Nederland 110 componenten. De belangrijkste hiervan zijn (gegevens voor Hoek van Holland):

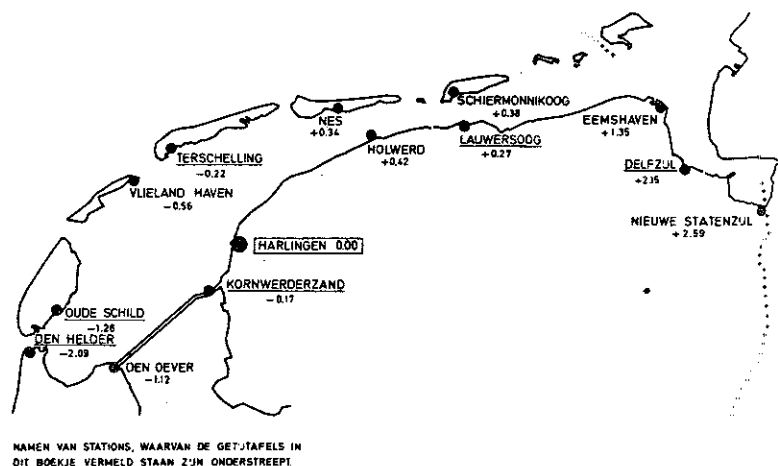
	h_i	ω_i	g_i
m_2	0,78	28,984	86
s_2	0,19	30,008	146
m_4	0,17	57,968	135
n_2	0,11	28,440	59
ms_4	0,10	58,984	219
o_1	0,10	13,943	189
sa	0,09	0,041	219

Uit deze tabel blijkt overduidelijk dat de invloed van de Maan (M_2



Figuur 2.5 Amfidromische punten in de Noordzee

GEMIDDELDE TIJDSVERSCHILLEN VAN HW MET HARLINGEN



NAMEN VAN STATIONS, WAARVAN DE GETJ-TAFELS IN DIT BOEKJE VERMELD STAAN ZIJN ONDERSTREEPT

— = VROEGER } DAN HARLINGEN IN UREN EN MINUTIEN
+ = LATER

HARLINGEN

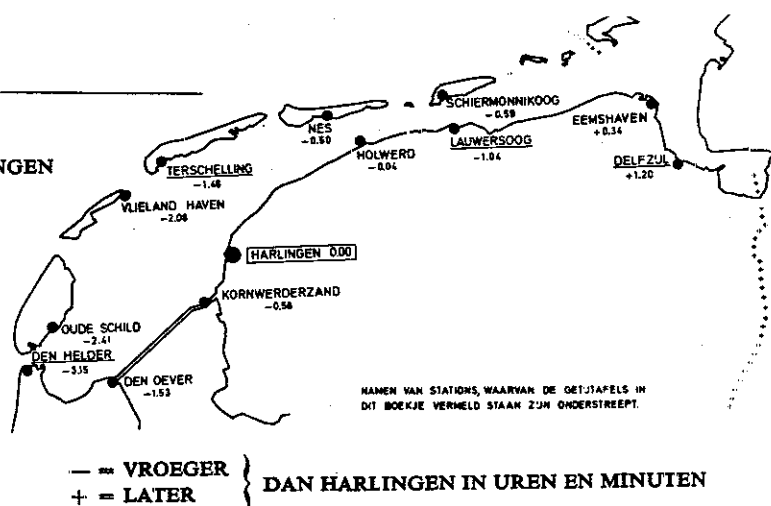
januari 1985

februari 1985

datum	hoogwater		laagwater	
	h min MET	NAP +cm	h min MET	NAP -cm
1 di	4 20	96	11.39	81
2 wo	5 18	92	0 02	92
3 do	6 17	88	1 10	94
4 vr	7 24	82	2 14	96
5 za	8 25	80	3 17	97
6 zo	9 18	78	4 12	100
7 ma	10 16	76	5 02	103
8 di	11 04	74	6 02	105
9 wo	12 09	72	7 02	107
10 do	1 14	70	8 02	109
11 vr	2 19	68	9 02	111
12 za	3 24	66	10 02	113
13 zo	4 29	64	11 02	115
14 ma	5 34	62	12 02	117
15 di	6 39	60	1 02	119
16 wo	7 44	58	2 02	121
17 do	8 49	56	3 02	123
18 vr	9 54	54	4 02	125
19 za	10 59	52	5 02	127
20 zo	12 04	50	6 02	129
21 ma	1 09	48	7 02	131
22 di	2 14	46	8 02	133
23 wo	3 19	44	9 02	135
24 do	4 24	42	10 02	137
25 vr	5 29	40	11 02	139
26 za	6 34	38	12 02	141
27 zo	7 39	36	1 02	143
28 ma	8 44	34	2 02	145
29 di	9 49	32	3 02	147
30 wo	10 54	30	4 02	149
31 do	11 59	28	5 02	151

I.L.WS=NAP-126 cm

GEMIDDELD DE TIJDSVERSCHILLEN VAN LW MET HARLINGEN



Figuur 2.6 Voorbeeld van een getijtafel

component) verreweg het belang-
rijkste is. De verhouding tussen
 M_2 en S_2 is een goede maat voor
het verschil in spring- en doottij
(voor Hoek van Holland
 $0,19/0,78 = 0,24$; voor Den Helder
is dit 0,28).

De berekende waarden worden
jaarlijks uitgegeven in een aantal
Rijkswaterstaatpublicaties. In het
"gele boekje" staat voor een aantal
stations per dag aangegeven het
tijdstip van hoog en laag water en
de verwachte waarde hiervan.
Voor een deel van de stations is
tijdstip van hoogwater gegeven.
De waterstanden voor deze stations
kan door interpolatie bepaald
worden.
Heel recent is de Rijkswaterstaat
begonnen met het uitgeven van
getijkrommen. Middels deze
krommen kan voor ieder tijdstip
voor het desbetreffende station de
waterstand worden afgelezen. Deze
uitgave is slechts voor een be-
perkt aantal stations beschikbaar
en is aan te vragen bij de Dienst
Getijdewateren, afd. IOS,
postbus 20907, 2500 EX Den Haag.
De waarden, die in deze tabellen en
grafieken staan zijn voorspellingen
voor het astronomisch getij. De
werkelijk optredende waterstand is
een optelsom van het astronomisch
getij en het windeffect (verhoging,
soms verlaging).

Het windeffect

Doordat de wind over het water-
oppervlak blaast ontstaat er een
kracht op dit oppervlak. Hierdoor
wordt het water opgestuwd. Aan
de lijzijde van een bekken ontstaat
dan een verlaging van de water-
stand en aan de loefzijde een ver-

Figuur 2.7 Voorbeeld van een voorspelde getijkromme

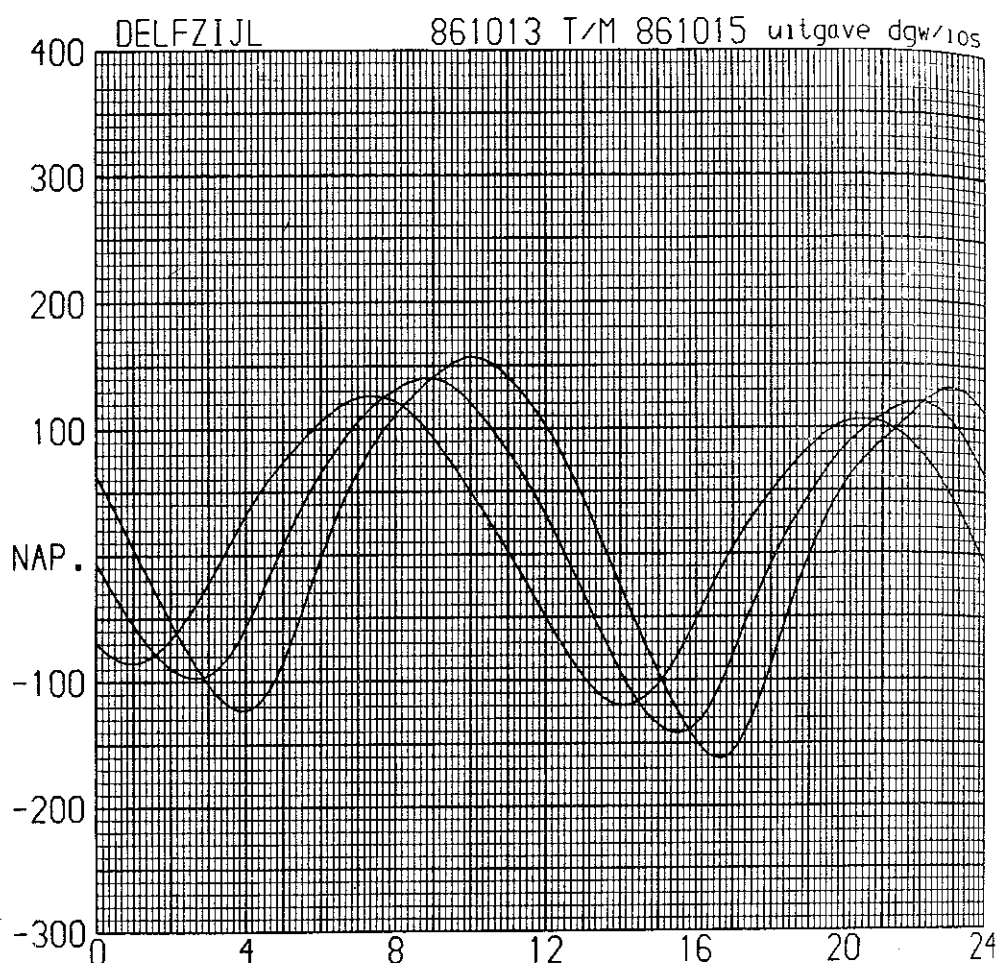
hoging. Er zijn bij het KNMI modellen operationeel om dit windeffect te berekenen. Dit wordt op routinebasis gedaan. Deze modellen hebben welliswaar een theoretische basis, maar er zitten nogal wat empirische coëfficiënten in. Doordat er veel ervaring is opgedaan zijn de voorspellingen desondanks redelijk betrouwbaar. Door deze afwijking kunnen aanzienlijk hogere waterstanden ontstaan dan volgens het astronomisch getij. Figuur 2b is hier een voorbeeld van.

De verwachte afwijkingen van de waterstanden worden door de stormvloed waarschuwingdienst (SVSD, onderdeel van de Dienst Getijdewateren in Den Haag) verwerkt. Als de waterstanden boven bepaalde niveaus komen worden waarschuwingen voor dijkbewaking uitgegeven.

De "waarschuwingdienst" wordt momenteel omgebouwd tot een "informatiedienst". Dat betekent dat voorspellingen van waterstanden on-line via een computersysteem en ook via teletekst opvraagbaar zijn. Iedere kust- en dijkbeheerder is dan zelf verantwoordelijk om na te gaan of er een verhoogde waterstand verwacht wordt. Dijkbewaking zal, als alle waterkeringen op deltatasterkte zijn, zelden voorkomen. Wel komen er oefeningen. Dit wordt geregeld in de nieuwe Wet op de Waterkering.

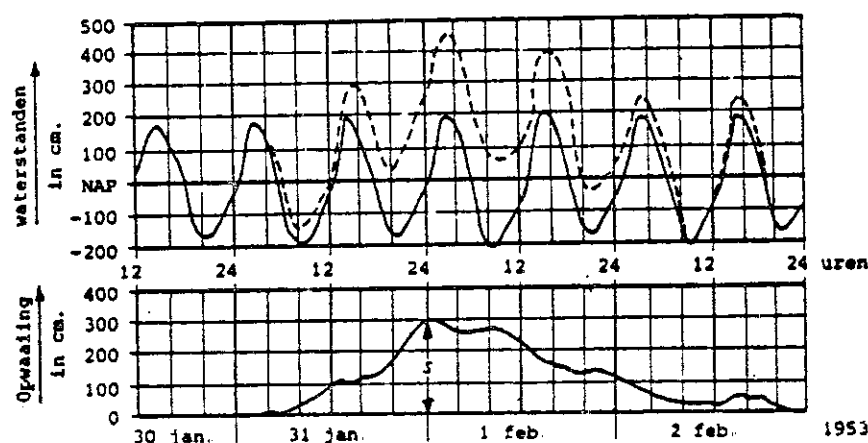
Getijstromen

Het is duidelijk dat door de getijwerking ook stromen ontstaan. Deze stroming is langs de Nederlandse kust bij opkomend water noordwaarts gericht en bij afgaand water zuidwaarts. Bij de

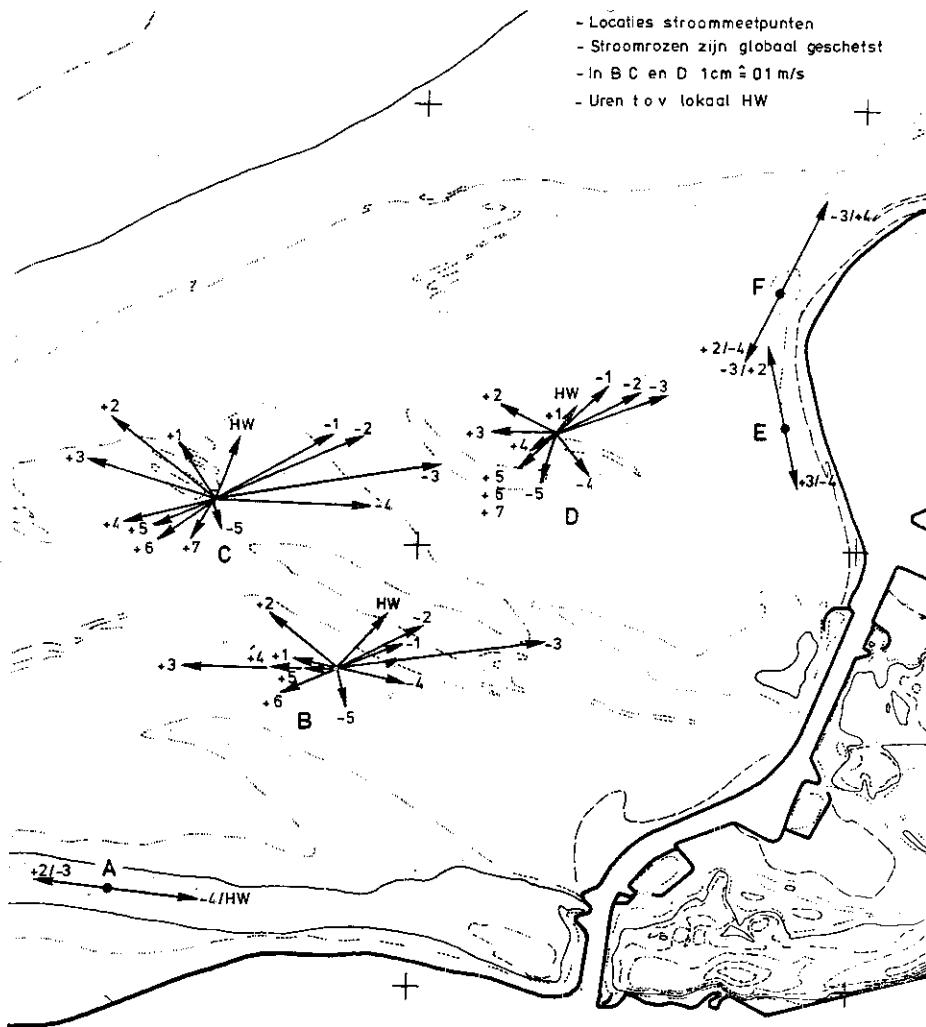


zeegaten is de oriëntatie natuurlijk gekoppeld aan de richting van de geul. De stroming is vaak erg grillig doordat door de veranderende waterstanden het doorstroomprofiel ook steeds een andere vorm heeft. Soms heeft de stroming een sterk driedimensionaal karakter. Langs de Nederlandse kust zijn op zeer veel plaatsen stroommetingen gedaan. Deze metingen kunnen gedurende langere tijd op een punt uitgevoerd worden, (bijv. gedurende een maand) met een zelfregistrerende stroommeter,

of met behulp van meetschepen op een aantal punten in de vertikaal. Deze laatste metingen worden meestal gedurende 1 getij uitgevoerd (13 uren-metingen). Aan de hand van dit soort meetgegevens kunnen **stroomatlassen** gemaakt worden. De Dienst der Hydrografie geeft deze atlanten uit. Om het half uur is een kaart getekend met daarin de stroomvectoren. Bij de pijltjes is de stroomsnelheid zowel bij spring als bij doodtij weergegeven. Voor specifieke doeleinden worden er soms gedetailleerde stroomatlassen gemaakt. Ook worden er atlanten gemaakt voor verschillende waterlagen. Voor kleine schepen is bijv. de gemiddelde snelheid in de bovenste 5 m van belang. De grote handelsvaart heeft meer behoefte aan de gemiddelde snelheid in de bovenste 20 m. Soms worden stroomsnelheden gepresenteerd als een **stroomroos**. Dan is voor ieder uur of half uur de stroomvector voor een bepaald punt getekend. Het tekenen van stroomrozen heeft alleen zin als



Figuur 2.8 Windopzet tijdens een storm



Figuur 2.9 Stroomrozen in het Brouwersdamgebied

binnen in noordwaartse richting door het Brouwershavense Gat (A) en via de Kous (B, C), in zuidwaartse richting door de kortsluitgeul (F) en ook door kleine geultjes in het bankengebied

- 2 Na ongeveer een uur stopt de toevoer van water door het bankengebied. De waterstand in het Brouwersdamgebied stijgt sneller dan in het Haringvlietgebied. Door dit faseverschil keert te stroming in de kortsluitgeul om. De snelheid neemt snel toe, totdat ca 2 uur voor Hw de waterstand voor Brouwersdam en Haringvliet minder uiteen gaan lopen. De vulsnelheid van het bekken via het Brouwershavense Gat en de Kous nemen af. Er blijft echter meer water langs de zuidkant binnenstromen dan er via de noordzijde uitstroomt.
- 3 Na hoogwater blijft het stroombeeld in principe gelijk, echter de toevoer van water door de zuidrand neemt sterk af, waardoor de waterstand gaat zakken.
- 4 Na 1 uur keert de stroomsnelheid Kous en Brouwershavense Gat om, er gaat nu ook water over de banken stromen, de noordwaartse stroming door de kortsluitgeul blijft nog instand. Er is dus nu uitstroming naar alle kanten.
- 5 Twee uur na hoogwater is de waterstand in het Brouwersdamgebied zover gezakt dat deze gelijk geworden is aan die in de Haringvlietmond. De stroomsnelheid in de kortsluitgeul keert om. Er is dus nu instroming via de kortsluitgeul en uitstroming via Brouwershavense Gat en

de stroom sterk in richting varieert. Als voorbeeld van zo'n gebied met variërende stroomgegevens wordt het zeegebied direct voor de Brouwersdam beschouwd. De gegevens voor deze analyse zijn allemaal ontleend aan de stroomatlas van Hydrografie.

Brouwersdamgebied

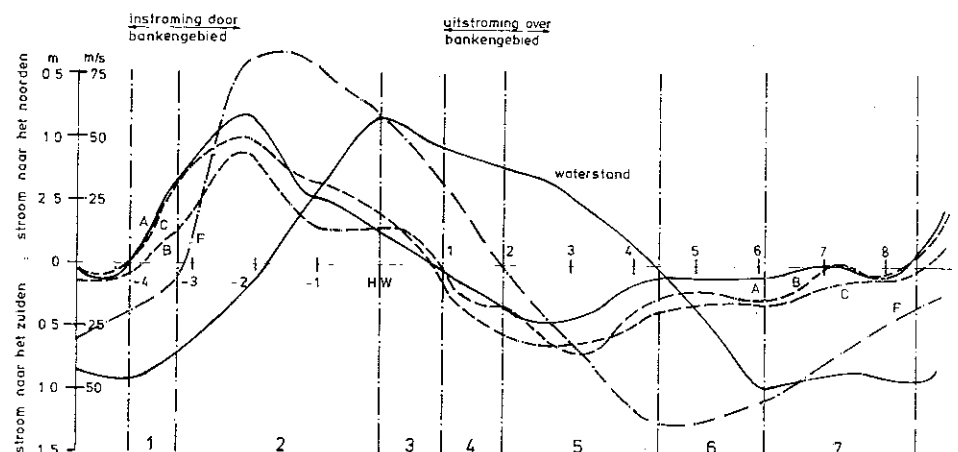
Om een indruk te krijgen van het stroombeeld in het gebied voor de Brouwersdam is een analyse gemaakt van de beschikbare stroommetingen. Hierbij is gebruik gemaakt van metingen t.b.v. de stroomatlas.

In het gebied liggen 6 stroommeetpunten, zie figuur 2.9. In de punten A, E en F is de richting van de stroom vrij konstant, na kentering verandert alleen het teken. In de punten B, C en D is de richting sterk variabel.

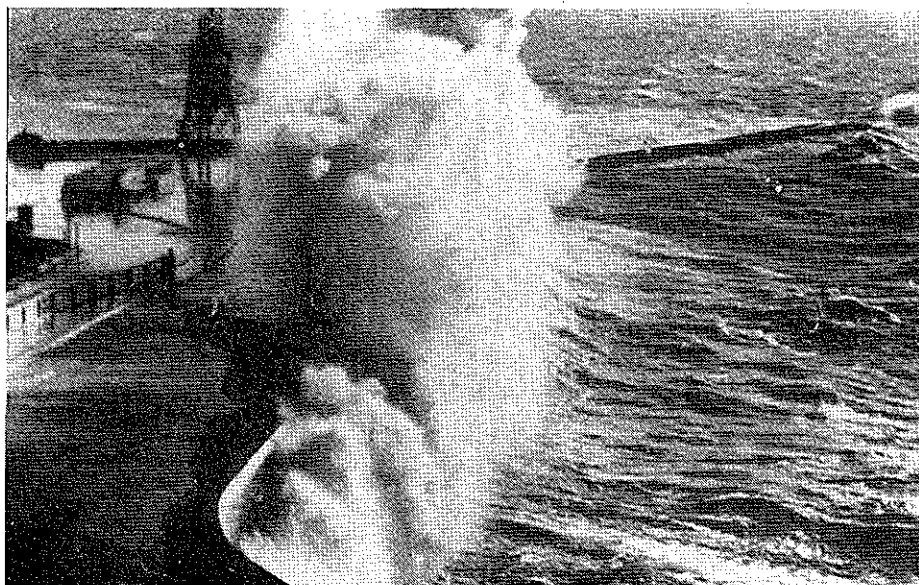
In figuur 2.10 is de stroomsnelheid van de punten A, B, C en F als

functie van de tijd gegeven, evenals het verloop van de waterstand. Hieruit blijkt dat in het getij een 7-tal fases te onderscheiden zijn. Deze fases zijn aangegeven in figuur 2.10 en zullen kort worden besproken.

1. Aan het begin van deze fase (ca 4 uur voor Hw) is de waterstand laag en begint te stijgen. Het bekken wordt gevuld van alle kanten. Er stroomt water



Figuur 2.10 Waterstanden en stroomsnelheden in het Brouwerdamgebied



- Kous. De uitstroming is veel groter dan de instroming; de waterstand blijft dan ook dalen
- 6 Zo'n 4½ uur na Hw heeft de waterstand de NAP-lijn bereikt. De uitstroming via Kous en Brouwershavense Gat zijn nu zeer klein geworden. Volgens figuur 2.10 blijft de snelheid konstant (ca. 10 cm/sec). De waterdiepte neemt af, dus zal ook het debiet afnemen. De stroomsnelheid in de kortsluitgeul is nog steeds groot, maar begint ook af te nemen
- 7 Zo'n 6 uur na Hw treedt er een merkwaardige toestand op. De waterstand blijft vrijwel constant en laag. De uitstroming via Brouwershavense Gat nadert naar nul en ook door de Kous stroomt nog maar heel weinig water. Door de Kortsluitgeul blijft echter water het gebied instromen. Dit gebeurt weliswaar met afnemende snelheid, maar er komt toch water naar binnen, zonder dat dit merkbare invloeden heeft op waterstand en uitstroming. Hieruit blijkt dat de invloed van de stroming door de kortsluitgeul van vrijwel geen betekenis is voor de hydraulica van het gebied

Geconcludeerd moet worden dat het gebied voor de Brouwersdam in hoofdzaak gevuld en geleegd wordt via de Kous en Brouwershavense Gat en dat er enige lek is over de banken en door de kortsluitgeul. Deze lek is van ondergeschikte betekenis. Als de bank omhoog komt en een doorgaande afsluiting geeft van de Steile Hoek tot aan Goeree, dan zal

er is weliswaar een verhang over deze zanddam ontstaan, maar het algehele hydraulische gedrag van het achterliggende gebied zal hierdoor niet veranderen. Doordat de kortsluitgeul dan niet meer stroomvoerend is maar alleen een functie vervult in het vullen en ledigen van het bekken is het profiel t.p.v. de stroommeetpunten E en F te wijden en zal daar enige sedimentatie optreden. Dit zal vermoedelijk gebeuren in de vorm van aanslibbing.

Het waddengebied

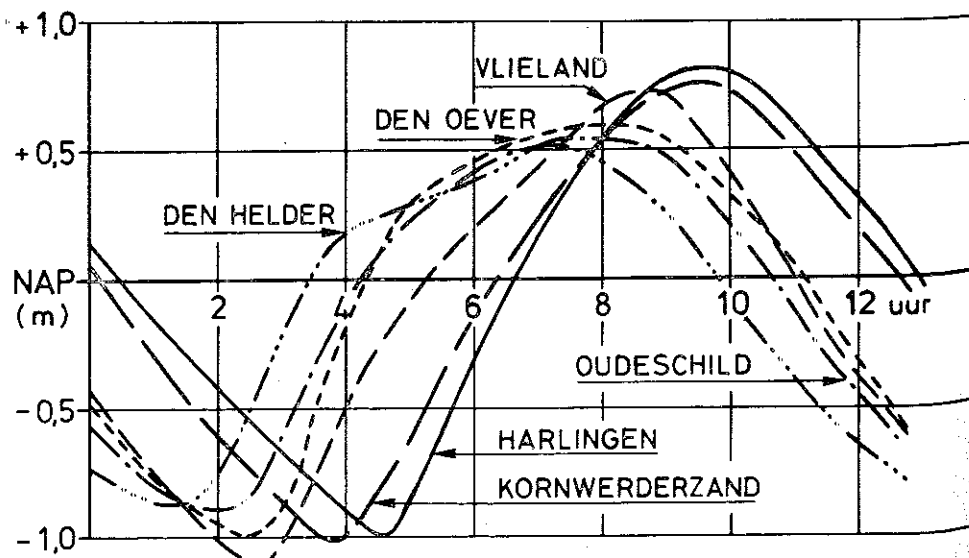
Het waddenbekken bestaat uit een aantal vloedkommen welke door middel van zeegaten met de

Noordzee in verbinding staan. Een vloedkom wordt begrensd door of alleen een wantij (Eijerlandse Gat) of door een wantij en de kust. Onder invloed van de verticale getijbeweging in de Noordzee worden de verschillende vloedkommen periodiek gevuld en geleegd, waardoor stromen van wisselende sterkte in de zeegaten ontstaan. De sterkte van deze getijstromen is afhankelijk van de grootte, vorm en hoogteligging van het kombergingsgebied, van de grootte van het zeegat en van de getijrijzing.

Evenals op de Noordzee het geval is, wordt de getijgolf die door de zeegaten van de Waddenzee binnendringt tegen de kust van het vasteland teruggekaatst. De optredende getijbeweging is dus het resultaat van de interferentie tussen de uit zee naar binnen lopende golf en de door de rand van het bekken teruggekaatste golf. Bij de voortplanting worden beide golven door de bodemwrijving gedempt. Er vindt ook enige demping plaats door de inwendige wrijving, doch in ondiep water, zoals in de Waddenzee, is deze invloed vergeleken met die van de bodemwrijving, te verwaarlozen. Door de demping neemt van beide golven de amplitude af in de voortplantingsrichting. Meestal overheerst één van beide componenten.

Nabij de zeegaten is dit de binnenkomende golf. In dat geval ontstaat er een verschuiving van de tijdstippen van hoog- en laagwater in de overeenkomstige richting. In figuur 2.11 is dit goed te zien even-

Figuur 2.11 Voortplanting van het gemiddelde verticale getij in de westelijke waddenzee



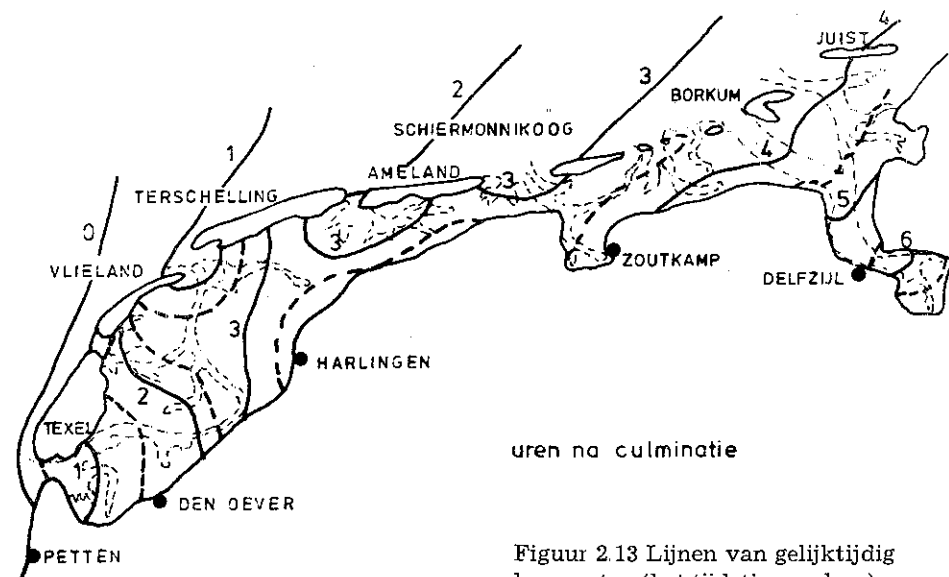
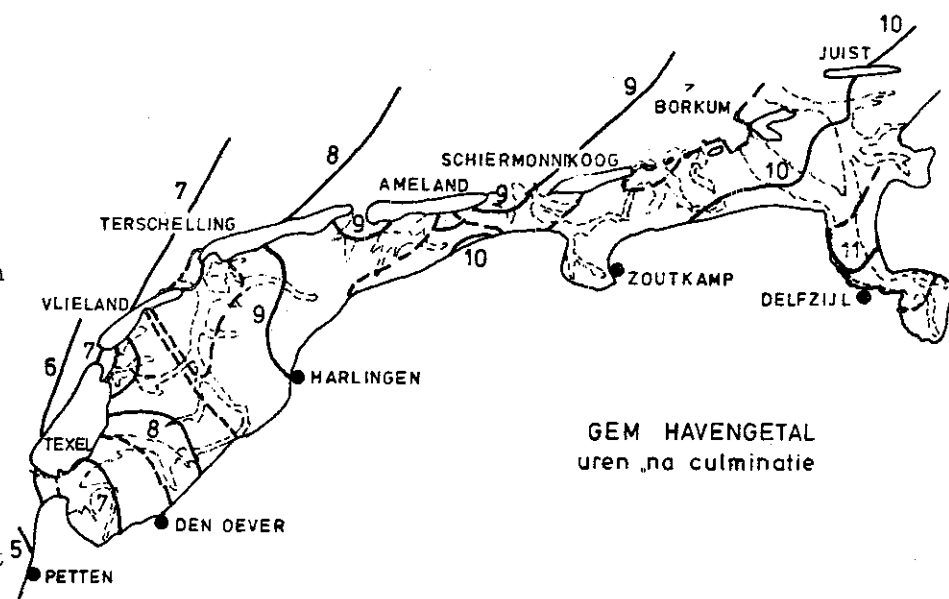
Figuur 2.12 Lijnen van gelijktijdig hoog water (het tijdstip van h w)

als de vervorming van de getijkromme en de als gevolg van de terugkaatsing optredende toename van het tijverskil in binnenwaartse richting.

Zie hiervoor ook de figuren 2.12 en 2.13. De voortplantingssnelheid van de getijgolf is afhankelijk van de diepte en van de plaats in het gebied en bedraagt voor het Waddengebied ca 5 - 8 m/sec. en voor de geulen in de zeegaten ca 15 m/sec. Door deze snelheid te vermenigvuldigen met de gemiddelde periode van het getij, zijnde 12 uur en 25 min, wordt de lengte van de getijgolf gevonden. Voor het Waddengebied bedraagt deze ca 300 km. Dat de voortplantingssnelheid in diepe delen groter is dan in ondiepe blijkt bij beschouwing van figuur 2.12 en 2.13 waarin lijnen van gelijktijdig hoog resp laagwater zijn getekend. Dit spreekt nog het sterkst bij de lijnen waarop het hoogwater 10 uur en het laagwater 4 uur na maanculminatie valt: ter plaatse van de diepe Ooster- en Westereems is het getij duidelijk vroeger dan op de aangrenzende platen. Om een indruk te krijgen van de hoogten van hoogwater en laagwater t.o.v. N.A.P. zijn in de figuren 2.14 en 2.15 lijnen van gelijk hoog- en laagwater getekend.

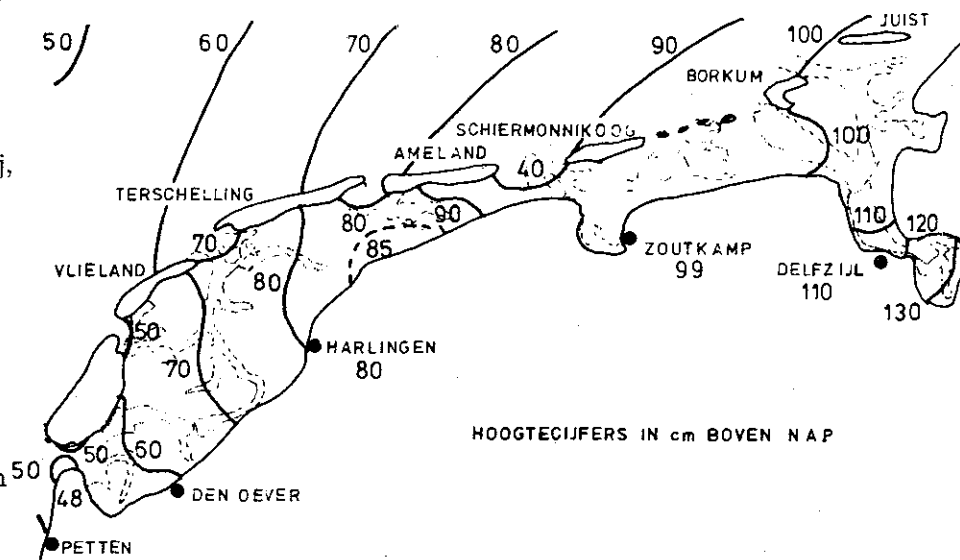
Wantijen

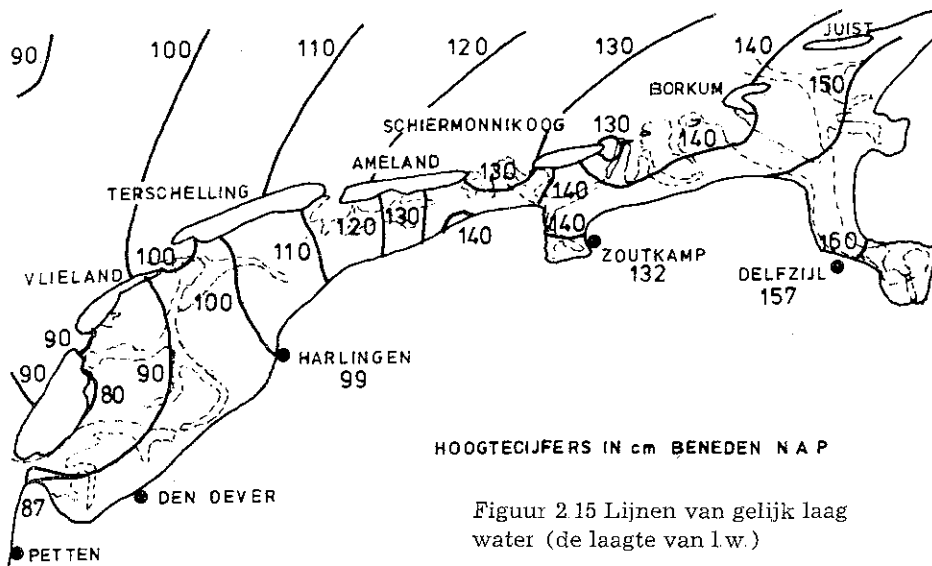
De getijgolven die door twee opvolgende zeegaten binnenlopen, buiten om het tussengelegen eiland heen en interfereren achter dit eiland. De plaats waar beide golven uit tegengestelde richtingen elkaar compenseren wat betreft het horizontale getij heet het wantij. Aan weerszijde van het wantij zijn de eb- en vloedstromen tegengesteld gericht. De golven versterken elkaar in het verticale getij, waardoor de verticale getijbeweging sterker wordt naarmate men dichter bij het wantij komt. In een wantij is dus geen stroming. De plaats van een wantij is geen vaste lijn doch schuift gedurende het getij enigszins heen en weer. De gemiddelde ligging van een wantij is op de kaart gemakkelijk te vinden: de plaats komt goed overeen met de hoogste punten van de scheiding tussen twee stroomgebieden.



Figuur 2.13 Lijnen van gelijktijdig laag water (het tijdstip van l.w.)

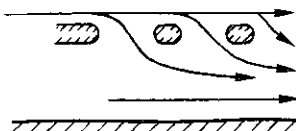
Figuur 2.14 Lijnen van gelijk hoog water (de hoogte van h.w.)



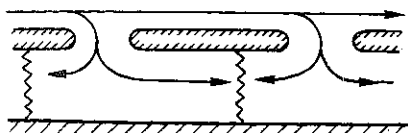


HOOGTECIJFERS IN cm BENEDEN N A P

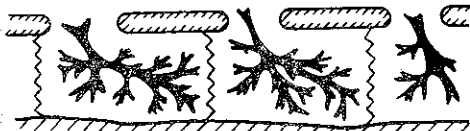
Figuur 2 15 Lijnen van gelijk laag water (de laagte van l.w.)



Figuur 2 16 Situatie zonder wantij



Figuur 2 17 Excentrische ligging van het wantij



Figuur 2 18 Prielen achter waddeneilanden

kan men zich verschillende vertakkingssystemen denken. Welke hier van werkelijk zal ontstaan hangt van de situatie en van toevalsfactoren af.

Een wantij is beter ontwikkeld naarmate het eiland waarachter het zich vormt langer is. Bij een zeer smal eilandje interfereren de twee getijgolven weliswaar op een zodanige manier dat de component van de snelheid in de richting loodrecht op de voortplantings-snelheid nul wordt, maar in de voortplantingsrichting trekken ze als het ware gezamenlijk verder zodat er een behoorlijke horizontale snelheid resulteert. (Zie figuur 2 15).

Zie b.v. de platen ten oosten van Schiermonnikoog. Achter een langwerpig eiland is de hoek waaronder de getijgolven elkaar ontmoeten nagenoeg 180° , zodat de horizontale snelheid geheel nihil wordt. (Zie figuur 2 17, waaruit tevens blijkt dat het wantij niet midden achter een eiland ligt. Het westelijke zeegat is in fase van het getij voor bij het Oostelijke waardoor het wantij zich vormt voorbij het midden van het eiland, gezien in de voortplantingsrichting van het getijgolf).

Het algemene beeld van het geulensysteem en het wantij achter een Waddeneiland is geschetst in fig. 2 18. Dit beeld treedt op in de Oostelijke Waddenzee.

Getij in zeearmen

Als een getijgolf een zeegat binnendringt, dan zal de getijamplitude over het algemeen groter worden. Heel duidelijk is dit te zien bij de Westerschelde. Het getijverschil

neemt van Vlissingen richting Antwerpen sterk toe. Het maximum wordt bereikt bij Rupelmonde, daarna neemt het verschil weer af. De toename van de amplitude wordt veroorzaakt doordat het dwarsprofiel stroomopwaarts steeds kleiner wordt en omdat dezelfde hoeveelheid water door een kleiner profiel moet. De afname komt door de wrijvingsweerstand. Een opvallend verschijnsel dat met name ook bij de Westerschelde waargenomen wordt is de stijging van het stormvloedniveau.

Het is bekend dat het gemiddeld zeeniveau voor de Nederlandse kust stijgt. De laatste eeuw is dit zo'n 22 cm geweest, voor de komende eeuw verwacht men een grotere stijging.

Maar afgezien van deze stijging blijkt ook de getijamplitude groter te worden. Hierdoor stijgt het hoogwater met zo'n 33 cm per eeuw. Het laagwater daalt op sommige plaatsen zelfs; bijv. bij Antwerpen. Dit laatste heeft grote consequenties voor de scheepvaart. Het verdiepen van aanlegplaatsen bij kades gaat soms niet zonder de stabiliteit van de kade in gevaar te brengen. Ook de drempels van sluizen geven problemen bij laag water.

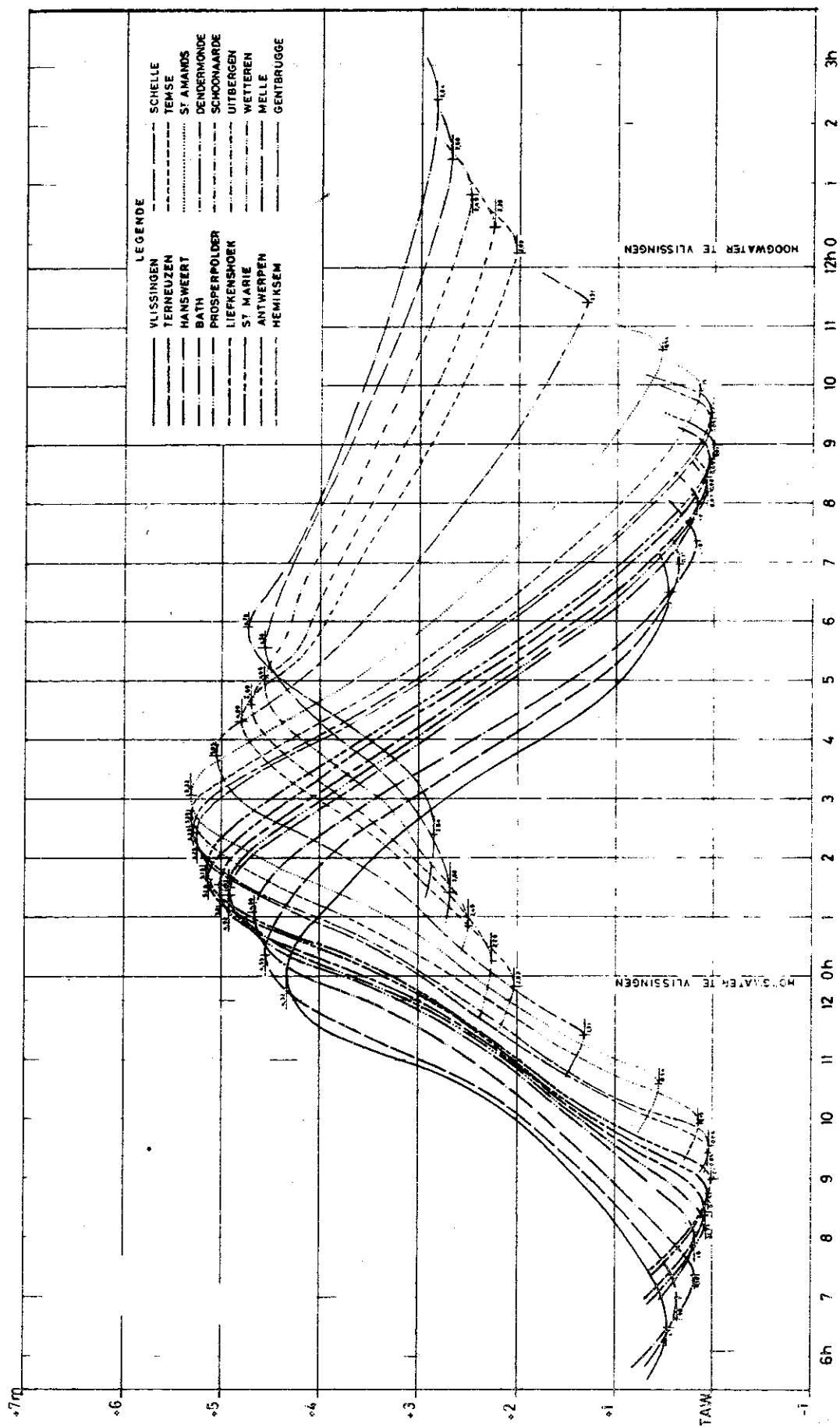
In figuur 2 19 is een grafiek van het getijverloop in de Westerschelde gegeven.

Berekening van getijstromen

Er zijn twee verschillende technieken beschikbaar om getijstromen (en waterstanden) in estuaria, zeegebieden, etc. te berekenen. Dit kan zowel één-dimensionaal als twee-dimensionaal gebeuren.

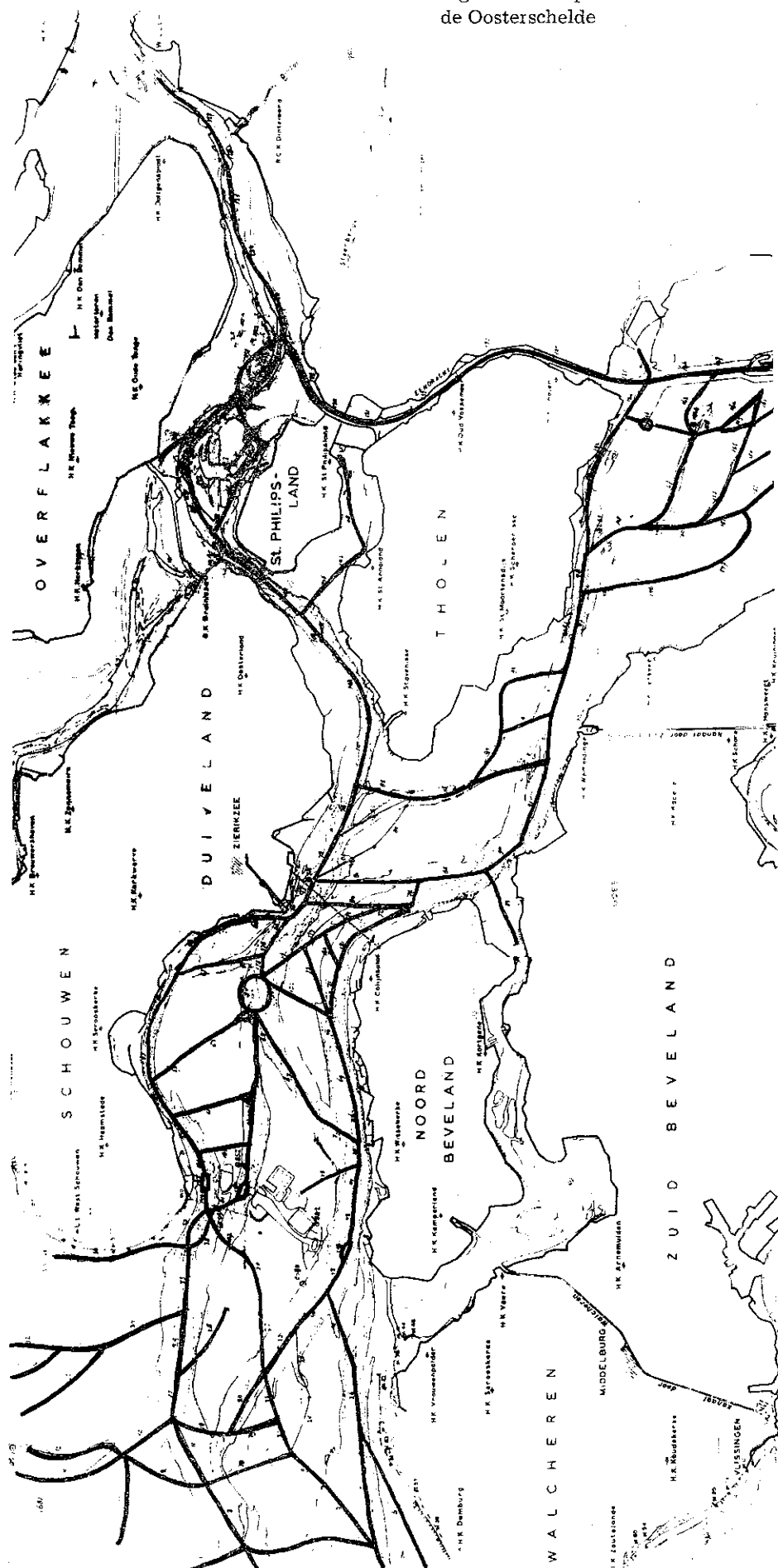
Bij één-dimensionale berekeningen (het computermodel IMPLIC) wordt een gebied geschematiseerd als een netwerk met (rechte) gelijkvormige kanalen. Ieder kanaal heeft wel een eigen lengte en een eigen dwarsprofiel. Op knooppunten kunnen meerdere geulen samen komen. De berging van water (bijv. boven platen) dat niet meedoet aan de stroming wordt als een aparte bergingsparameter bij ieder geulvak opgenomen. Eventuele sluizen, stuwen, etc. kunnen in het netwerk opgenomen worden. Het geheel wordt aangedreven door randvoorwaarden; d.w.z. waarden van waterstanden of stroomsnelheden aan de

Ter plaatse van het wantij zijn de stromen nul of zeer klein. Bodemtransport treedt daarom niet op zodat geen geulen kunnen ontstaan en zand- en slibdeeltjes de gelegenheid krijgen te bezinken. Verder van het wantij af neemt de watersnelheid toe; op een bepaalde afstand zal deze snelheid zo groot zijn dat onder normale omstandigheden zand in beweging wordt gebracht. Hier ligt dan de oorsprong van een geul, want er treedt geulvorming op zodra de bodem in beweging komt. De onderlinge afstand der geulen of prielen zal zich zodanig instellen dat op het wad bij de maatgevende toestand geen bodemtransport kan optreden. Door samenvoeging van prielen



Figuur 2.19 Plaatselijke getijkrommen in de Westerschelde, gemiddeld over het getij

Figuur 2 20 Implic schematisatie van de Oosterschelde



randen van het gebied. Een en ander wordt zonedig aangevuld met de windinvloed op het bekken. Deze randvoorwaarden kunnen in het verleden gemeten waarden zijn of berusten op een getij- of stormvoorspelling.

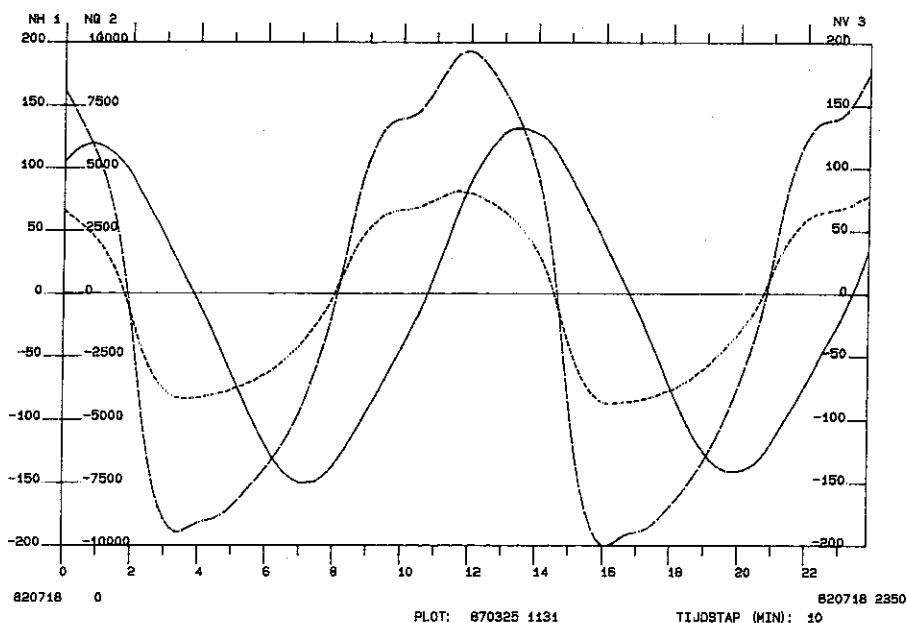
In de kanalen wordt één-dimensionale stroming verondersteld, d.w.z. dat de gemiddelde stroming evenwijdig is aan de lengte as van het kanaal.

De berekeningen berusten op het oplossen van een stelsel ondiep-watervergelijkingen, nl een continuïteitsvergelijking en een bewegingsvergelijking. Bij het programma IMPLIC worden deze met de zgn. impliciete methode opgelost. Op de achterliggende wiskunde zal hier niet ingegaan worden. De berekeningen worden uitgevoerd met vaste tijdstippen, bijv. 10 minuten. D.w.z. om de 10 minuten worden alle waterstanden en stroomsnelheden berekend in alle kanalen. Het model rekent heel snel. Een berekening van het getij over enkele dagen is in een paar minuten klaar. Het model is beschikbaar op de Sperry-machine in Rijswijk van de Dienst Informatie verwerking maar ook op kleinere HP 1000-computers. Een versie voor een PC is nog niet beschikbaar, maar in principe wel te maken.

Bij de Oosterscheldewerken is IMPLIC veelvuldig gebruikt, onder andere voor het maken van operationele voorspellingen tijdens het sluiten van de compartimenteringsdammen. Als voorbeeld is de Oosterschelde-schematisatie uitgetekend, evenals een aantal uitvoer-plotjes (figuur 2.20 en 2.21). Bij twee-dimensionale berekeningen (bijv. het model WAQUA) wordt een gebied geschematiseerd in een raster. In ieder rasterpunt wordt de diepte opgegeven. Het model berekent in alle punten voor iedere tijdstap de waterstand, de stroomsnelheid en de stroomrichting. Om rekentechnische redenen moet de tijdstap bij WAQUA veel kleiner zijn dan bij IMPLIC (orde-minuut). Het WAQUA model vereist een grote, snelle computer. Het model draait op de Sperry in Rijswijk. Voor de grote modellen (met veel rasterpunten) wordt ook gewerkt met de Cyber-supercomputer van SARA in Amsterdam. De maaswijdte van WAQUA-modellen varieert van 50-5000 m.

OPC OPC SORT EENK LIJN VAKNR VAKNAAM
K13 NH 1 CM 145 2 YERSEKE
K13 NG 2 M3/S 190 1 KRAHM. -A
K13 NV 3 CM/S 105 1 ZIJPE

Figuur 2 21 Uitvoer van het implic-programma



Belangrijk om te realiseren is dat de rekentijd een derde de macht is van de maaswijdte. Dus als ik de maaswijdte halveer, voor een bepaald gebied, dan wordt de rekentijd 8 x zo lang!

Naast de waterbeweging kan WAQUA ook de verspreiding van opgeloste stoffen berekenen. Het kan dus gebruikt worden voor waterkwaliteitsberekeningen. Overigens wordt de kwaliteitsroutine van WAQUA weinig gebruikt, omdat er vaak efficiëntere

methodes zijn om de verspreiding van stoffen te berekenen. WAQUA gebruikt in principe een vierkant rooster. Er zijn echter technieken ontwikkeld om ook met kromlijnige roosters te rekenen. Dit wordt wel gebruikt bij rivieren. Het is echter vrij omslachtig. Naast de vierkanten-net methode bestaat ook de mogelijkheid om twee-dimensionale waterbeweging te berekenen met een eindige elementenmethode. Het gebied wordt dan geschematiseerd in drie-

hoekjes. Deze methode wordt niet bij de Rijkswaterstaat toegepast, maar wel bij een aantal ingenieursbureaus en het Waterloopkundig Laboratorium. Voorbeelden van WAQUA berekeningen zijn er zeer veel. Als illustratie zijn enkele stroombeelden opgenomen (figuur 2 22 en 2 23).

Het maken van een bodemschematisatie voor een WAQUA model is een flinke klus, evenals het afregelen. Er moet gedacht worden aan enkele maanden werk. Het maken van een detail-model in een bestaand model is eenvoudiger en gaat daarom ook veel sneller. IMPLIC-schematisaties zijn wat eenvoudiger te maken, maar ook het opstarten van een nieuw IMPLIC-model kost de nodige weken. Het voordeel van IMPLIC is verder dat de rekentijden veel korter zijn, een aantal berekeningen kunnen op één dag uitgevoerd worden, terwijl men bij WAQUA vaak aangewezen is op de nacht-uren.

Als er dus sprake is van een goed te schematiseren geulensysteem, en de belangstelling vooral uitgaat naar waterstanden en stroomsnelheden in geulen, dan geniet IMPLIC de voorkeur. Is juist het twee-dimensionale stroombeeld belangrijk, dan moet WAQUA gebruikt worden.

Drie-dimensionale modellen zijn in ontwikkeling. Zij vragen echter ongelofelijk veel rekentijd en zijn moeilijk af te regelen. Bovendien is de meerwaarde van 3-d informatie in veel gevallen beperkt. Een zinvolle toepassing is bijv. bij de uitstroomopening van spuisluizen. Routinematige toepassing van 3-d modellen is dan ook voorlopig niet te verwachten.

Een andere ontwikkeling is het gelaagd 2-d model (bijv. het model RISULA). Dit is een waqua-achtig model waar bij stroomsnelheden op 2 of 3 dieptes berekend worden. Dit soort modellen zijn belangrijk voor het doen van morfologische voorspellingen (want dan is meestal de stroming dicht bij de bodem maatgevend), bij problemen waar de interactie tussen zoet en zout water voor een gelaagdheid zorgt (bijv. bij de mond van het Har ingvliet) en bij problemen waar bij grote temperatuurschommelingen optreden (bijv. in meren met diepe putten).

Figuur 2 23 Met waqua berekende stroomsnelheden in de Hammen

