

9860

Waterbouwkundig Laboratorium
Bergerhout

BIBLIOTHEEK

OPENBAAR AMBT

Algemene directie voor selectie en vorming

0307 015 2850



HET GETIJ IN DE SCHELDE

ir. J. CLAESSENS

Ministerie van Openbare Werken

Antwerpse Zeediensten

1979

1421

Waterbouwkundig Laboratorium
Borgerhout

BIBLIOTHEEK

99877

OPENBAAR AMBT

Algemene directie voor selectie en vorming

HET GETIJ IN DE SCHELDE

ir. J. CLAESSENS

Ministerie van Openbare Werken

Antwerpse Zeediensten

1979

STAGEVERSLAG

HET GETIJ IN DE SCHELDE

- | | |
|---|--------|
| 1. Beschrijving van het aan getij
onderhevig gedeelte van de Schelde
en haar bijrivieren. | blz. 1 |
| 2. Hydrologische kenmerken van het
Scheldebekken. | 6 |
| 3. Beschrijving van het getij in de
Schelde. | 9 |
| 4. Verklaring van het getijver-
schijnsel in het algemeen. | 15 |
| 5. Verklaring van het getij in de Schelde. | 20 |
| 6. Evolutie van het getij in de Schelde. | 27 |
| 7. De voorspelling van het getij. | 31 |
| 8. Stormvloeden op de Schelde. | 40 |

1. Beschrijving van het aan getij onderhevig gedeelte van de Schelde en haar bijrivieren.

De Schelde is de belangrijkste rivier van laag en midden België. Ze ontspringt in het Franse Aisne-departement op een hoogte van ongeveer 100 m. Haar totale lengte van de bron tot de monding in haar estuarium nabij het Nederlandse Vlissingen bedraagt 344 km, waarvan 160 km onderhevig is aan getij.

Tussen de bron en de monding verandert de Schelde verschillende keren grondig van uitzicht alsook van benaming. Het gedeelte van de rivier op Nederlands grondgebied wordt Westerschelde genoemd en heeft de vorm van een zeearm. Dit gedeelte van de rivier is zeer breed en kent een ingewikkeld hydraulisch regime met een stelsel van geulen, scharen en platen. Vanaf de Belgisch-Nederlandse grens tot aan de stuw te Gentbrugge wordt de benaming Zeeschelde gebruikt. Dit riviergedeelte is veel minder breed dan de Westerschelde en heeft ook een veel regelmatigere bedding. Westerschelde en Zeeschelde vormen samen het aan tij onderhevig gedeelte van de Schelde. Vanaf Gent is de Schelde gecanaliseerd over een afstand van 152 km, waarvan 92 km op Belgisch grondgebied. Dit gecanaliseerde gedeelte, te samen met het nog resterende gedeelte van de rivier tot de bron heet Bovenschelde. Bijlage 1 geeft een schematisch overzicht van deze benamingen.

Bijlage 2 toont een liggingplan van de Westerschelde en de Zeeschelde alsook van de aan getij onderworpen bijrivieren. Deze bijlage geeft tevens een overzicht van de plaatsen waar door de Antwerpse Zeediensten getijwaarnemingen worden verricht.

Zoals uit deze figuur blijkt heeft de Zeeschelde drie belangrijke bijrivieren, nl. de Rupel, de Durme en de Dender. Verder staat ze in verbinding met de rest van het Belgisch en Europees waterwegen-net door middel van een aantal kanalen. Te Vlissingen en Hansweert komen respectievelijk de kanalen van Walcheren en Zuid-Beveland in de Westerschelde. Deze beide kanalen vormen een verbinding met de Oosterschelde. Te Terneuzen mondt het kanaal van Gent naar Terneuzen uit in de Westerschelde. Dit kanaal geeft aansluiting met de Haven van Gent, alsook met de kanalen van het Gentse achterland. De Haven van Antwerpen staat in verbinding met de Zeeschelde door middel van verschillende zeesluizen. Vanuit de haven vertrekt het kanaal van de Schelde-Rijnverbinding naar de Oosterschelde en Rotterdam. Ook het Albertkanaal dat de verbinding vormt met de Maas vertrekt vanuit de Antwerpse Haven. Al deze kanalen zijn uiteraard niet aan getij onderhevig.

Zoals hoger vermeld eindigt de Zeeschelde aan de stuwen van Gent. In een rivier kan de getijgolf op twee manieren ophouden te bestaan, nl. ofwel door uitsterven ofwel door een stuw of een ander kunstwerk dat de verdere doorgang van de golf verspert. Te gent wordt de getijgolf in de Schelde tegengehouden door een stuw, alhoewel de getijgolf hier nog lang niet aan uitsterven toe is. De stuw van Gentbrugge staat op de Schelde onmiddellijk afwaarts de stad Gent en is reeds sedert vorige eeuw in werking. Deze stuw vormt de scheiding tussen Zeeschelde en Bovenschelde. De kruin van het kunstwerk bevindt zich op het peil (NKD + 4,60 m)[■]. Het hoogwater in de Zeeschelde bereikt tegenwoordig echter praktisch steeds een hogere waarde zodat deze stuw het getij

■ NKD : het referentievlak van het Krijgsdepot, zie verder hoofdstuk 3.

toch niet helemaal tegenhoudt en er dus opwaarts van de stuw een klein getij kan waargenomen worden. Sedert 1969 is ook de ringvaart rond Gent in dienst getreden. Dit kanaal rond de stad werd aangelegd om de stad van overstromingen te vrijwaren en de scheepvaart te vergemakkelijken. Het sluit aan op de Zeeschelde te Melle. Tussen Melle en Merelbeke is het aan getij onderhevig. Te Merelbeke bevindt zich een stuw- en sluiscomplex dat toegang geeft tot de verdere ringvaart. Deze stuw wordt zo geregeld dat het waterpeil op de ringvaart (NKD + 5,61 m) bedraagt zodat ook op de ringvaart een licht getij kan waargenomen worden, afhankelijk van het getij in de Zeeschelde en van de stuwstand. Tussen Merelbeke en Zwijnaarde op de Bovenschelde is er nog een tijarm van de Zeeschelde aangelegd die van de Bovenschelde gescheiden is door de stuw van Zwijnaarde. Deze stuw bevindt zich in de praktijk steeds in gesloten stand zodat hier het getij definitief wordt tegengehouden.

Van de drie bijrivieren welke in de Zeeschelde uitmonden zijn er twee die aan getijbeweging onderhevig zijn, nl. de Rupel en de Durme, en één die gecanaliseerd is en waar bijgevolg geen getij voorkomt, de Dender.

De Rupel mondt uit in de Schelde te Schelle. Zij heeft een lengte van 11,5 km tot Walem waar zij gevormd wordt door de samenvloeiing van Beneden Nete en Dijle. Er is getijdewerking over de ganse lengte van de rivier. Tussen de Rupel en de stad Brussel is het Zeekanaal naar Brussel aangelegd. Dit kanaal staat in verbinding met de Rupel door middel van twee sluizen, nl. één te Wintham en één te Willebroek.

De Dijle mondt uit in de Rupel te Walem. De totale lengte van de Dijle bedraagt 90 km waarvan 28 km, tot de samenvloeiing van Dijle en Demer te Werchter, aan getijdewerking onderhevig zijn. Op de Dijle sterft het getij langzaam uit. Om de stad Mechelen te beschermen tegen overstromingen, veroorzaakt zowel door wassen als door stormvloeden, alsook om de toenmalige scheepvaart te vergemakkelijken werd vorige eeuw een omleidingskanaal rond de stad aangelegd. Op de eigenlijke Dijle die door de stad vloeit bevindt zich aan de afwaartse zijde van de stad een sluis waardoor het getij wordt tegengehouden. Op het afleidingskanaal bevindt zich juist afwaarts van de splitsing een stuw waardoor het waterpeil in de Bovendijle kan geregeld worden en die de getijdegolf verzwakt. Deze stuw houdt het getij dus niet volledig tegen.

De belangrijkste bijrivier van de Dijle, die nog aan getij onderhevig is, is de Zenne (totale lengte 85 km). De Zenne mondt uit in de Dijle ter hoogte van het Zennegat, afwaarts Mechelen, waar ook het kanaal Mechelen-Leuven in de Dijle uitmondt. In de Zenne sterft de getijgolf na ongeveer 12 km langzaam uit tussen Zemst en Eppegem.

De Beneden Nete, welke te samen met de Dijle te Walem in de Rupel uitmondt heeft een lengte van 16 km tot Lier waar hij gevormd wordt door de samenvloeiing van Kleine en Grote Nete. Te Duffel mondt het Netekanaal, dat een scheepvaartverbinding vormt tussen Beneden Nete en het Albertkanaal, in de Nete uit. Zowel Kleine Nete (totale lengte 48 km) als Grote Nete (totale lengte 77 km) kruisen opwaarts Lier het Netekanaal door middel van een duiker waardoor het getij verzwakt wordt. Op de Kleine Nete is het getij

voelbaar tot Grobbendonk (14 km opwaarts Lier) en op de Grote Nete tot Itegem (17 km opwaarts Lier). Op beide rivieren sterft het getij geleidelijk uit. Rond Lier is er tussen de Kleine Nete en de Beneden Nete een omleidingskanaal aangelegd om het overstromingsgevaar bij wassen te verminderen.

De tweede aan getij onderhevige bijrivier van de Schelde is de Durme die te Tielrode langs de linker-oever uitmondt in de Schelde. Er is getijdewerking tot de afdamming van de rivier te Lokeren (14 km opwaarts van de monding). De totale lengte van de Durme bedraagt 26 km van de monding tot de Splettersput te Dacknam waar zij gevormd wordt door de samenvloeiing van Zuidlede en Moervaert. Vóór de constructie van de dam te Lokeren in 1955 liet het getij zich gevoelen op Zuidlede, Moervaert en kanaal van Stekene (bijrivier van de Moervaert) tot 10 km opwaarts van de Splettersput.

Tenslotte is ook de Dender een belangrijke bijrivier van de Zeeschelde. Op de Dender (totale lengte 87 km) is er geen getij daar de rivier volledig gecanaliseerd is. De rivier mondt uit in de Zeeschelde te Dendermonde. Sedert 1978 is er een afleiding in werking waardoor de stad Dendermonde door de scheepvaart kan vermeden worden. De uitmonding van deze afleiding in de Schelde bevindt zich opwaarts van de stad.

2. Hydrologische kenmerken van het Scheldebekken.

Vooraleer het getij in de Zeeschelde te bespreken is het nuttig enige aandacht te besteden aan de bovendebieten van de Schelde en haar bijrivieren.

Door de Antwerpse Zeediensten worden sedert 1949 permanent de bovendebieten van de Schelde en haar bijrivieren bepaald zodat deze debieten thans vrij goed gekend zijn. Deze debieten worden bepaald, ofwel door ijkgrafieken van stuwstanden (Bovenschelde en Dender) die in een laboratorium worden bepaald, ofwel door correlaties tussen waterpeil en debiet (Zenne, Dijle, Grote en Kleine Nete) welke door middel van metingen in situ worden opgesteld en regelmatig dienen gecontroleerd en aangepast. Het debiet van de Durme, alsook van de zijbekkens van Schelde en Rupel, wordt bepaald als een percentage van de debieten berekend in de nabijgelegen rivieren.

De gemiddelde dertigjarige debieten in de verschillende meetraaien, die gelegen zijn aan de uiteinden van het getijgebied, zijn samengevat in onderstaande tabel I. In deze tabel is ook het debiet van de Schelde te Schelle opgenomen.

TABEL I

<u>Gemiddeld dertigjarig debiet</u>		<u>periode 1949 - 1978</u>
<u>Rivier</u>	<u>Meetraai</u>	<u>Debiet (m³/s)</u>
Bovenschelde	Gentbrugge, Merelbeke, Zwijnaarde	30,1
Dender	Denderbelle	8,2
Zenne	Eppegem	11,4
Dijle	Haacht	21,2
Grote Nete	Itegem	5,4
Kleine Nete	Grobbendonk	6,9

Schelde te Schelle		100

Deze debieten verschillen uiteraard van jaar tot jaar en zijn ook niet constant in de loop van het jaar. Tabel II geeft voor de periode 1974-1978 het jaargemiddeld en het kwartaalgemiddeld debiet te Schelle weer. Hieruit blijkt dat er een vrij grote spreiding kan voorkomen op deze debieten.

TABEL II

Bovendebiet Schelde te Schelle

Jaar	Kwartaalgemiddelde				Jaargemiddelde
	I	II	III	IV	
1974	114	38	53	298	126
1975	192	120	46	85	110
1976	97	41	31	52	55
1977	95	89	54	105	86
1978	114	103	49	65	83

Het is duidelijk dat er een verband moet bestaan tussen de oppervlakte van het hydrografisch bekken, de neerslag en het debiet in de rivier. Dit verband is echter zeer ingewikkeld en wordt beïnvloed door tal van factoren die niet onmiddellijk goed gekend zijn. Zo wordt bijvoorbeeld een groot gedeelte van het debiet van Bovenschelde en Leie gebruikt voor de voeding van de kanalen in Noord-Frankrijk en Oost- en West-Vlaanderen, waardoor deze debieten helemaal niet in verhouding staan tot de oppervlakte van het hydrografisch bekken. Bijlage 3 geeft het diagram van Stecher, d.i. een schematische voorstelling van de verschillende hydrografische bekkens in het stroomgebied van de Schelde, weer. Hieruit volgt een duidelijke voorstelling van de belangrijkheid op hydrologisch gebied van de verschillende bijrivieren van de Zeeschelde. Het diagram geeft in vertikale zin de lengte van de rivier weer en in horizontale zin de oppervlakte van het stroomgebied opwaarts van het

beschouwde punt van de langsas. Ook de bijrivieren worden op deze manier in het diagram verwerkt.

De kaart in bijvoegsel "stroomgebied van de Schelde te Schelle" geeft een planzicht van deze hydrografische bekkens.* Beide bijlagen geven slechts gegevens over het stroomgebied van de Schelde opwaarts Schelle omdat het totale boven-debiet van de Schelde daar bepaald wordt.

* Deze beide bijlagen werden overgenomen uit het verslag "Topografische kenmerken van het Scheldebekken", Waterbouwkundig Laboratorium, door ir. P. ROOVERS, ir. I. COEN en ir. J. CLAESSENS.

3. Beschrijving van het getij in de Schelde.

Het getij in de Schelde wordt gekenmerkt door zijn halfdaags karakter, d.w.z. dat in ongeveer een halve dag het waterpeil in een bepaald punt gedurende een zekere tijd stijgt tot een maximum bereikt wordt : de hoogwaterstand, waarna het water terug daalt tot een minimumhoogte : de laagwaterstand. Hierna herbegint de cyclus. Het verschil in hoogte tussen hoog- en laagwater is het tijverschil en de gemiddelde waterstand, berekend over de ganse getijgolf, is de middenstand. De bepaling van deze middenstand is echter vrij bewerkelijk; daarom werd een benadering gedefinieerd : de halftijhoogte, die het gemiddelde is van de hoog- en laagwaterstand. Tabel III geeft de cijferwaarde van deze grootheden in enkele belangrijke punten van de Schelde en haar bijrivieren voor het gemiddelde van alle tijen van 1961 t.o.m.1970. Al deze peilen zijn uitgedrukt t.o.v. het vergelijkingsvlak van het Krijgsdepot (NKD). Dit is het niveauvlak dat is vastgelegd op 7,900 m onder het merkteken 15/3 p 10 (bronzen plaatje), geplaatst op de deksteen van het noordelijk buitenhoofd van de Kattendijksluis te Antwerpen en dat gebruikt wordt voor de tijwaarnemingen langs de Zeeschelde.

De grafische voorstelling van de verandering van het waterpeil in functie van de tijd in een welbepaald punt van de rivier wordt de lokale getijkromme genoemd en de omhullende van alle lokale getijkrommen langs de langsas van de rivier is de meetkundige plaats van hoog- en laagwater. Bijlage 4 geeft de plaatselijke getijkromme weer in enkele punten van de Schelde en de bijlagen 5 en 6 geven de meetkundige plaats van hoog- en laagwater weer van de

TABEL III

Gemiddelde getijgegevens 1961 - 1970.

		HW (m)	LW (m)	Tijverschil (m)	Halftijhoogte (m)	Duur		Vertraging op Vlissingen	
						Stijging h min	Daling h min	h min	h min
SCHELDE	VLISSINGEN	4,38	0,58	3,80	2,48	5.56	6.29	0.00	0.00
	HANSWEERT	4,72	0,31	4,41	2,52	6.03	6.22	0.59	0.52
	PROSPERPOLDER	5,03	0,39	4,64	2,71	5.39	6.46	1.27	1.44
	ANTWERPEN	5,15	0,25	4,90	2,70	5.15	7.10	1.53	2.34
	DENDERMONDE	5,13	1,68	3,45	3,41	4.39	7.46	3.47	5.04
	GENTBRUGGE	5,16	3,20	1,96	4,18	3.18	9.07	5.43	8.21
RUPEL	WALEM	5,30	0,88	4,42	3,09	4.56	7.29	3.09	4.09
DURME	WAASMUNSTER	5,47	2,91	2,56	4,19	2.18	10.07	3.13	6.51

* Overgenomen uit : Overzicht van de tijwaarnemingen in het Zeescheldebekken gedurende het tijdperk 1961 - 1970.

** Waterstanden t.o.v. het vergelijkingsvlak NKD.

van de Schelde en haar bijrivieren. Hieruit blijkt dat, uitgenomen de periode van de getijcyclus, alle karakteristieken van de getijgolf veranderingen ondergaan langs de loop van de rivier.

Zoals uitgelegd in hoofdstuk 4 wordt het getij opgewekt door de aantrekkingskracht van zon en maan en is deze kracht veranderlijk in functie van de relatieve stand van deze hemellichamen. Even na de syzigieën, tijdstippen van volle en nieuwe maan, zijn de tijverschillen maximaal : springtij. Even na de kwadratuur, eerste en laatste kwartier, zijn zij minimaal : doodtij. Dit gaat tevens gepaard met resp. een maximale en minimale hoogwaterstand en, in het afwaarts gedeelte van de rivier, met resp. een minimale of maximale laagwaterstand. In tabel IV zijn de gemiddelde spring- en doodtijgegevens van de periode 1961 - 1970 in enkele punten van de Schelde weergegeven. De vertraging, waarmee het springtij zich na de syzigie voordoet (ouderdom van het getij), bedraagt te Antwerpen 62 uur. Op de Schelde wordt het springtij dan ook gedefinieerd als het eerste hoogwater te Antwerpen dat onmiddellijk volgt op de vijfde maansdoorgang te rekenen vanaf het tijdstip van volle of nieuwe maan. Het daaropvolgende laagwater is het laagwaterspring. Het doodtij wordt op dezelfde manier gedefinieerd t.o.v. het tijdstip van eerste en laatste kwartier. De coëfficiënt van het gemiddeld springtij (verhouding van het tijverschil van het beschouwde getij t.o.v. het tijverschil van het gemiddeld tij) is voor de periode 1961-1970 te Antwerpen gelijk aan 1,11 en deze van het gemiddeld doodtij : 0,84.

TABEL IV

Spring- en Doodtij 1961 - 1970.

		Gemiddeld springtij			Gemiddeld doodtij		
		HW	LW	TV	HW	LW	TV
SCHELDE	VLISSINGEN	4,77	0,35	4,42	3,88	0,92	2,96
	HANSWEERT	5,07	0,07	5,00	4,25	0,67	3,58
	PROSPERPOLDER	5,42	0,22	5,20	4,52	0,67	3,85
	ANTWERPEN	5,52	0,08	5,44	4,67	0,53	4,14
	DENDERMONDE	5,42	1,73	3,69	4,75	1,63	3,12
	GENTBRUGGE	5,42	3,25	2,17	4,84	3,14	1,70
RUPEL	WALEM	5,63	0,50	5,13	4,88	0,91	3,97
DURME	WAASMUNSTER	5,86	2,93	2,93	4,98	2,87	2,11

* Overgenomen uit : Overzicht van de tijwaarnemingen in het Zeescheldebekken gedurende het tijdperk 1961 - 1970.

** Waterstanden t.o.v. het vergelijkingsvlak NKD.

De duur van een getijcyclus bedraagt gemiddeld 12h25min zijnde de gemiddelde tijdsduur tussen twee opeenvolgende doorgangen van de maan door een meridiaan. Bij spring- en doodtij is deze periode gemiddeld resp. 12h10min en 12h40min.

Buiten het periodisch stijgen en dalen van de waterspiegel (vertikaal getij), is er ook een alternatieve beweging naar opwaarts en afwaarts van de waterdeeltjes in de rivier (horizontaal getij). Tijdens de vloed stroomt het water van afwaarts naar opwaarts en tijdens eb in omgekeerde richting. Het ogenblik waarop de stroomrichting van het water verandert is de kentering, resp. vloed- en ebbekentering.

Vloed en eb komen niet overeen met het stijgend en het dalend gedeelte van de getijkrommen. De kentering valt, uitgenomen in het uiterste opwaarts gedeelte van het getijgebied, na de ogenblikken van hoog- en laagwater zodat in het begin van de daling van de getijkromme nog vloedstroom waargenomen wordt (en vice versa). In tabel V zijn de voornaamste kenmerken van het horizontaal getij, berekend aan de hand van het gemiddeld getij van 1950, samengevat. Ook deze kenmerken variëren naargelang men zich verplaatst op de rivier, alsook in functie van de getijcoëfficiënt.

Uit deze tabel blijkt eveneens dat het bovendebiet in de Schelde helemaal niet in verhouding staat tot de getijdebieten. Alleen in het opwaarts gedeelte kan de invloed van het bovendebiet merkbaar zijn. Men noemt dit het fluvio-maritiem gedeelte van de rivier, in tegenstelling tot het maritiem gedeelte waar het bovendebiet geen invloed heeft. Op de Schelde situeert de overgang tussen beide gebieden zich tussen St.-Amands en Dendermonde.

TABEL V

Gemiddeld tij 1950.

		HW (m)	LW (m)	Tijvolume		Boven- debiet m ³ /s	Gem. debiet		Max. debiet		Vertraging kentering	
				vloed 10 ⁶ m ³	eb 10 ⁶ m ³		vloed m ³ /s	eb m ³ /s	vloed m ³ /s	eb m ³ /s	vloed na HW h min	eb na LW h min
SCHELDE	VLISSINGEN	4,28	0,62	1065	1071	118	47750	47800	95300	71500	1.07	0.50
	HANSWEERT	4,62	0,34	357	362	95,5	16860	15350	32300	21700	0.33	0.34
	PROSPERPOLDER	4,82	0,38	134	138	89,6	6570	5710	10900	8550	0.38	0.34
	ANTWERPEN	4,95	0,28	63	66	80,5	3060	2745	4800	4075	0.56	0.32
	DENDERMONDE	4,85	1,68	4	5	26,7	266	199	446	282	0.37	0.50
	5 km afw. GENTBRUGGE	4,76	2,94	0,1	1	25,8	9	34	14	51	-0.17	1.07
RUPEL	WALEM	5,09	0,77	5	7	38,5	289	253	505	403	0.22	0.25
DURME	WAASMUNSTER	5,19	1,36	0,7	0,8	1,5	50	26	90	73	0.13	0.09

* Overgenomen uit : Stormvloeden op de Schelde, deel IV. Kubatuurberekening.

4. Verklaring van het getijverschijnsel in het algemeen.

De periodische beweging van de watermassa's op de aarde, getij genoemd, wordt veroorzaakt door de aantrekkingskracht van zon en maan op de waterdeeltjes van de aarde. Deze krachten zijn volledig gekend en werden reeds beschreven door Newton; hun invloed en gevolgen echter op de waterbeweging kunnen nog niet volledig wiskundig beschreven worden.

Geven we hier bondig de krachtentheorie weer en beperken we ons vooreerst tot de krachten veroorzaakt door de maan.

Elk elementair deeltje van de aarde wordt volgens de wet van Newton met een welbepaalde kracht aangetrokken door de maan. Deze kracht is functie van de afstand van het deeltje tot het middelpunt van de maan en is naar dit middelpunt gericht.

Anderzijds voeren aarde en maan een maandelijkse rotatie uit rond hun gemeenschappelijk zwaartepunt, anders zouden zij met elkaar in botsing komen. Door deze rotatie wordt hogergenoemd deeltje onderworpen aan een centrifugale kracht die gericht is naar de as waarrond de rotatie geschiedt en waarvan de grootte functie is van de afstand van het deeltje tot deze as.

Voor elk elementair deeltje van de aarde is de resultante r van deze beide krachten verschillend van nul en zij verschilt voor elk deeltje zowel in grootte als in richting. De som van al deze krachten over de ganse aarde zorgt echter voor een perfect evenwicht in de beweging van aarde en maan.

Wanneer de maan in het zenith staat (punt A, fig. 1, bijlage 7) is de aantrekkingskracht van de maan groter dan de centrifugale kracht. De resultante is dus naar de maan gericht en staat loodrecht op het aardoppervlak. In het nadir (punt B) echter is de centrifugale kracht groter dan de aantrekkingskracht van de maan zodat de resultante r hier naar de andere kant gericht is, dus eveneens weg van het middelpunt van de aarde en loodrecht op het aardoppervlak. In de punten C en D is de resultante naar het middelpunt van de aarde toe gericht. In alle andere punten van deze doorsnede heeft de resultante r een componente loodrecht op het aardoppervlak en een componente evenwijdig aan het aardoppervlak. Het is deze horizontale componente (r') die het getij veroorzaakt.

Op fig. 2 is de verdeling van de horizontale componente r' over het aardoppervlak weergegeven. Zij is nul in het zenith en het nadir, alsook langs de grote cirkel op 90° van de punten A en B. Zij is maximaal op de twee cirkels die zich bevinden op 45° van de punten A en B. Dit krachtenveld wordt dus volledig bepaald door de stand van de maan. Fig. 3 toont ditzelfde veld als de maan zich op een hoogte van $28^\circ 30'$ (haar maximale hoogte) bevindt. Het krachtenveld wordt dan asymmetrisch ten opzichte van de evenaar.

Buiten de reeds hogergenoemde beweging draait de aarde om haar as in 24 uur. Een waarnemer geplaatst in punt 1 (fig. 2) ondervindt een kleine horizontale kracht r' . Na drie uur bevindt hij zich in punt 2 waar r' maximaal is. Tussen punt 1 en 2 is r' geleidelijk gestegen. Op weg naar punt 3 daalt de kracht terug en na 6 uur is de waarnemer

in punt 3 waar $r' = 0$. De kracht r' verandert nu van teken en na negen uur is de waarnemer in punt 4 en is de kracht terug maximaal doch met een ander teken dan in punt 2. Na 24 uur is de waarnemer terug in punt 1 en is de kracht r' periodisch van grootte en van richting veranderd. De draaiing van de aarde om haar as veroorzaakt dus een halfdaagse verandering van de krachten die een waarnemer of een waterdeeltje ondervinden. Deze halfdaagse verandering van de krachten r' is de oorzaak van het halfdaagse maansgetij (M2 genoemd). Daar de maan na 24 zonne-uren niet meer op haar oorspronkelijke plaats staat is de periode van dit halfdaags getij niet gelijk aan 12 zonne-uren doch wel gemiddeld 12 uur 25 minuten.

Indien de maan niet in het evenaarsvlak staat zijn de krachten die de waarnemer tegenkomt ook niet meer symmetrisch wat de dagelijkse ongelijkheid van het getij verklaart.

Gans bovenstaande redenering is opgebouwd rond de relatieve beweging van aarde en maan, doch ook de zon veroorzaakt een gelijkaardig krachtenveld op de aarde. Ook de zon oefent periodische krachten uit op de waterdeeltjes van de aarde, krachten die echter veel kleiner zijn dan deze veroorzaakt door de maan. Men onderscheidt dus ook een halfdaags en een daags zonnegetij.

De onderlinge stand van zon en maan kan de twee krachtenvelden elkaar doen versterken of verzwakken wat de oorzaak is van spring- en doodtij.

Het resulterende krachtenveld, opgewekt door zon en maan, is dus niet constant maar varieert voortdurend t.o.v. de aarde zowel wat de grootte als wat de richting van de krachten betreft. Daar alle bewegingen

van aarde en maan t.o.v. elkaar en van de zon periodisch zijn, is de configuratie van het resulterende krachtenveld ook periodisch. De periode hiervan bedraagt 18,61 jaar wat de oorzaak is van de gekende 18-jarige cyclus in de getijbeweging.

Wat nu de gevolgen betreft van deze krachten op de watermassa's van de aarde, hiervoor stelde Newton een statische theorie op die er van uitging dat onder invloed van de krachten r' de waterdeeltjes zich in de richting van de punten A en B begeven. Dit veroorzaakt een opeenhoping van water tot het natuurlijk verhang, onder invloed van de zwaartekracht, een evenwichtstoestand instelt. Ter hoogte van de punten A en B is er dus een golftop en ter hoogte van de grote cirkel op 90° is er een golfdal. De gevormde golftop blijft steeds naar de maan gericht, (deze van punt B weg van de maan), en draait in gemiddeld 24 uur 50 min rond de aarde. Deze theorie laat toe tal van verschijnselen te verklaren doch zij houdt geen rekening met de inertie van het water, noch met de aanwezigheid van de continenten. Daarom stelde Laplace een dynamische theorie op die stelt dat onder invloed van een periodische kracht, het zeeoppervlak een beweging zal maken met dezelfde periode als de kracht. De getijgolf wordt dus uiteengetrokken in een hele reeks zuiver sinusoidale golven die door superpositie van hun invloed het waterpeil in een bepaald punt van de aarde bepalen. Elk van deze elementaire golven wordt gekenmerkt door een coëfficiënt die in verband staat met de grootte van de kracht en door een fazeverschil tussen de doorgang van de kracht en het ogenblik waarop haar invloed zich laat gevoelen. Deze grootheden

zijn voor elk punt van de aarde verschillend voor elke golf. De voornaamste van deze elementaire golven zijn in onderstaande tabel VI samengevat.

TABEL VI

Voornaamste golven die de getijgolf samenstellen.

<u>Benaming</u>	<u>symbool</u>	<u>periode in zonne-uren</u>
Gemiddeld maansgetij	M2	12h25min
Gemiddeld zonnegetij	S2	12h00min
Elliptisch maansgetij	N2	12h39min
Declinatie maans- en zonnegetij	K2	11h58min
Declinatie maans- en zonnegetij	K1	23h56min
Declinatie maansgetij	O1	25h49min
Declinatie zonnegetij	P1	24h04min
Halfmaandelijks getij	Mf	327h52min
1e Harmonische van M2	M4	6h12min

5. Verklaring van het getij in de Schelde.

De watermassa in de Schelde is te klein opdat er rechtstreeks een astronomisch getij zou kunnen opgewekt worden. Zelfs de Noordzee vormt hiervoor een te klein bekken. Het getij in de Noordzee wordt gevormd door het indringen vanuit het noorden, langs de kust van Schotland, van de getijgolf uit de Atlantische Oceaan. De getijgolf die langs het Kanaal de Noordzee binnen dringt is veel minder krachtig doch zij superponeert zich wel op de getijgolf in het zuiden van de Noordzee waarvan zij de amplitudes versterkt. De getijbeweging in de Noordzee is een vrij ingewikkeld verschijnsel daar deze zee dient beschouwd te worden als een resonantiebekken met drie amfidromische punten (punten waar geen veranderingen van het waterpeil ten gevolge van het getij zijn waar te nemen), waarrond de getijgolf in tegenuurwijzerszin draait (bijlage 8). Voor de Belgische kust loopt de getijgolf dus van West naar Oost.

Wanneer de vloedgolf voor de kust voorbij de monding van de Schelde komt, dringt een gedeelte van deze golf in de Westerschelde binnen. De massa water die op deze wijze gedurende een getij te Vlissingen in en uit de Schelde vloeit bedraagt meer dan 1 miljard m³. In tegenstelling met de getijgolf in de oceanen, die een periodische oscillatiegolf is, vertoont de getijgolf in de Schelde veel meer gelijkenis met een translatiegolf, zonder er echter alle eigenschappen van te bezitten.* We hebben dus te doen met een afgeleide golf die totaal andere kenmerken vertoont dan de golf in zee.

* oscillatiegolf : golf die zich zowel boven als onder het initiële wateroppervlak beweegt.

translatiegolf : golf die zich ofwel volledig boven ofwel volledig onder het initiële wateroppervlak beweegt.

Een eerste verschil tussen de getijgolf in de zee en deze in de Schelde is het ogenblik van de kentering. In volle oceaan vallen de kenteringen samen met de ogenblikken van halftij. In de Schelde, zoals blijkt uit tabel V, naderen de kenteringen de ogenblikken van hoog- en laagwater. Deze verschuiving wordt des te groter naarmate men zich opwaarts beweegt. Vanaf een bepaald punt langs de rivier valt de vloedkentering zelfs vóór het ogenblik van hoogwater. Nog verder valt de vloedkentering samen met de ebbekentering waarna er helemaal geen omkeren van de stroomrichting meer is. Er is dan nog alleen maar een periodisch stijgen en dalen van de waterspiegel waar te nemen tot ook dit verticale getij na enige afstand ophoudt te bestaan.

Deze verschuiving van de kenteringen kan verklaard worden door de getijbeweging in de rivier te beschouwen als een superpositie van een zuivere golfbeweging en een beweging veroorzaakt door een stroming met verhang. Indien de golf in de Schelde zich zou gedragen als een zuivere translatiegolf, zoals bijvoorbeeld de golf veroorzaakt door het schutten van een sluis, (wat een zelfde oorzaak van de golf is, nl. het inbrengen van een hoeveelheid water in een kanaal), zouden de watersnelheden in gelijk welk punt van de golf dezelfde richting kennen. Dit is duidelijk niet het geval daar op de Schelde sprake is van ebbe en vloed. De reden hiervan is dat de translatiegolf in feite slechts gedefinieerd is voor een kleine golf die zich voortplant in een relatief breed en diep kanaal. De Schelde is niet zo'n kanaal, integendeel, zij heeft een trechtervorm waardoor haar breedte en diepte geleidelijk afneemt naar opwaarts toe. Ook de weerstanden die de golf moet overwinnen zijn veel groter dan deze waarvoor de

translatiegolf gedefinieerd is. Door dit grote energieverlies vanwege de wrijving, vermindert het volume van de getijgolf gevoelig naar opwaarts toe (cfr. tabel V). Bij de voortgang van de getijgolf blijft dus steeds een gedeelte van het watervolume achter dat helemaal niet meer aan de wetten van de golfbeweging gehoorzaamt doch dat, onder invloed van de zwaartekracht, neiging zal hebben om naar zee terug te stromen volgens de wetten van de stroming met verhang. Het ogenblik van de kentering verklaart zich dan als volgt.

Op het ogenblik van laagwater aan de monding, of in een ander willekeurig punt van de rivier, is er nog een groot gedeelte van het watervolume van de voorgaande getijgolf in de rivier aanwezig. Daar er voor dit volume slechts één uitweg uit de rivier is, nl. langs de monding terug in zee vloeien, is er op dat ogenblik een verhang, alsook een stroming, naar afwaarts toe gericht. Het waterpeil aan de monding begint nu, onder invloed van de getijgolf in zee, te stijgen doch deze stijging is vooralsnog te klein om de heersende afwaarts gerichte stroming tegen te houden. Op een bepaald ogenblik wordt de inkomende stroming echter toch sterk genoeg om de heersende ebstroom te neutraliseren. Dit is het ogenblik van ebbekentering. Daar eb- en vloedstroom niet over de ganse breedte van de rivier dezelfde kracht bezitten, vooral niet in de Westerschelde met haar stelsel van ebgeulen en vloedscharen, doet de ebbekentering zich niet noodzakelijk op hetzelfde ogenblik voor in alle punten van eenzelfde dwarsdoorsnede. Vanaf het ogenblik van ebbekentering is de inkomende stroming sterker en wordt er een vloedstroom waargenomen die echter steeds geremd wordt

door het watervolume dat zich nog in de rivier bevindt en dat terug naar zee zou willen stromen. Hierdoor zijn de stroomsnelheden beperkt en alleszins kleiner dan deze die met de formules van de zuivere translatiegolf zouden berekend worden. Deze vloedstroom blijft bestaan tot op het ogenblik dat de achterblijvende watervolumes per tijds-eenheid, vermeerderd met het bovendebiet, groter worden dan het opwaarts stromende debiet van de golf dat na de golftop steeds kleiner wordt. Dit is het ogenblik van de vloedkentering. Ook de vloedkentering vindt niet noodzakelijk op hetzelfde ogenblik plaats in alle punten van eenzelfde dwarsdoorsnede.

De ebbekentering moet dus na het laagwater vallen terwijl de vloedkentering minder goed gedefinieerd is en in het fluvio-maritiem gedeelte van de rivier sterk beïnvloed wordt door het bovendebiet. In het zuiver maritiem gedeelte van de rivier valt de vloedkentering even na hoogwater.

Ook de ogenblikken van maximum stroomsnelheid vallen in de Schelde niet samen met hoog- en laagwater zoals in de oceaan, doch zij vallen enige tijd vroeger. Zij doen zich namelijk voor op het ogenblik dat de helling van de getijgolf (verhang) maximaal is. Tijdens de vloed is dit in het zuiver maritiem gedeelte van de Schelde 1 tot 1.30h vóór hoogwater. De maximale ebsnelheid is kleiner dan de maximum vloedsnelheid en zij doet zich voor ongeveer bij halftij in het afwaarts gedeelte van de Schelde. In het opwaarts gedeelte van de rivier valt het ogenblik van maximum ebstroom dichterbij de vloedkentering.

De vermindering van de gemiddelde vloedvolumes en het terug leeglopen van de rivier verklaart dus het ogenblik van de kenteringen in een getijrivier. Ook de stijging van de halftijhoogte (cfr. tabel III), die een benadering is van de middenstand, naar opwaarts toe wordt hierdoor verklaard. Inderdaad de bovendebieten zijn te klein om deze stijging te kunnen verklaren doch de achtergebleven watervolumes voegen zich bij het bovendebiet, waardoor wel een sterk stijgende gemiddelde verhanglijn ontstaat. Daar de getijdebieten bij doodtij belangrijk kleiner zijn dan bij springtij, is ook de halftijhoogte kleiner bij doodtij dan bij springtij. Te Antwerpen is deze bij springtij (NKD + 2,80 m), bij gemiddeld tij (NKD + 2,70 m) en bij doodtij (NKD + 2,60 m).

De vermindering van de secties en de wrijvingsweerstand hebben niet alleen gevolgen voor het ogenblik van de kentering en de halftijstand, doch zij hebben ook hun invloed op het tijverschil. Inderdaad de verminderingen van het debiet en de secties vereffenen elkaar niet volkomen met als gevolg een vergroting of verkleining van het tijverschil (zie bijlage 9).

Tussen Vlissingen en de Rupelmonding zijn de diepten van de Schelde vrij groot en vernauwt de breedte van de rivier regelmatig. Daar de wrijvingsweerstand niet voldoende zijn om de energie van de getijgolf in dezelfde mate te doen dalen stijgt het tijverschil van de golf naarmate men zich stroomopwaarts verplaatst. Voorbij Hemiksem splitst het debiet zich in een deel dat in de Rupel stroomt en een deel dat verder in de Schelde stroomt; bovendien nemen de diepten veel sneller af wat grotere wrijvingsverliezen met zich brengt. Hier vermindert

de totale energie van de getijgolf dus gevoelig wat zich uit in een daling van de tijverschillen.

De vergroting van het tijverschil tussen Vlissingen en Hemiksem gaat gepaard met een lichte daling van de laagwaterstanden en een sterke stijging van de hoogwaters (bijlage 5). Deze stijging van de hoogwaters gaat verder tot een punt ter hoogte van de Durmemonding waarna zij terug beginnen dalen tot Wetteren en dan, onder invloed van het bovendebiet, terug lichtjes stijgen. Opwaarts Hemiksem vertonen de laagwaters een onafgebroken stijging. Hier is de vermindering van het tijverschil dus voornamelijk te wijten aan de sterke stijging van de laagwaterstanden.

Tijdens haar weg door de Schelde ondergaat de getijgolf dus allerlei veranderingen. Dit wordt eveneens duidelijk geïllustreerd door bijlage 4, die de plaatselijke getijkrommen in enkele punten langs de rivier weergeeft. Deze bijlage toont aan dat niet alleen het tijverschil verandert in functie van de plaats doch ook de duur van stijging en daling van het waterpeil. Het stijgen van het water duurt steeds korter en het dalen steeds langer naarmate men zich opwaarts verplaatst. De verklaring hiervoor ligt in het feit dat de voortplantingssnelheid (celeriteit) van de golf evenredig is met de vierkantswortel van de diepte. Bij hoogwater kan de diepte, vooral in het opwaarts gedeelte van de rivier, belangrijk groter zijn dan bij laagwater. Indien men de getijgolf beschouwt, niet als één grote golf, maar wel als een hele reeks elkaar opvolgende kleine translatiegolven, is het duidelijk dat de celeriteit te samen met het waterpeil stijgt en dat de golfkam het voorafgaande golfdal zal willen inhalen. Hierdoor ontstaat een bijkomende ver-

vorming van de getijgolf. Het verschil in snelheid tussen hoog- en laagwater is des te groter naarmate de diepte onder laagwater kleiner is. Dit laatste is voornamelijk het geval in het opwaarts gedeelte van de rivier zodat ook hier de grootste vervormingen waar te nemen zijn.

Tenslotte is ook de celeriteit van de golf aan veranderingen onderhevig. Zij varieert inderdaad, zoals hoger vermeld, met de diepte doch ook met de weerstanden (wrijving en bovendebiet) die de golf ondervindt. Om deze reden is de celeriteit van de getijgolf in de Schelde vrij wisselvallig in functie van de plaats en is zij groter voor de golfkam dan voor het golfdal. Tussen Vlissingen en Gentbrugge bedraagt de celeriteit voor de periode 1961 - 1970 gemiddeld 7,66 m/s voor de golfkam en 5,24 m/s voor het golfdal.

Opmerking

In voorgaande paragraaf werd de getijgolf in de Schelde vergeleken met deze op zee. In dit verband dient erop gewezen dat hierbij steeds het getij in volle oceaan bedoeld werd. Inderdaad, het getij in de Noordzee is zelf reeds afgeleid van dat van de Atlantische Oceaan. Bovendien is de Noordzee een ondiepe zee met niet te verwaarlozen wrijvingsweerstandens zodat de getijgolf voor de monding van de Westerschelde geen zuivere oscillatiegolf is doch ook reeds lichte afwijkingen vertoont in dezelfde zin als in de Schelde.

6. Evolutie van het getij in de Schelde.

In de loop der jaren heeft het bed van de Schelde verscheidene veranderingen ondergaan. Als meest spectaculaire kunnen we hier het feit vernoemen dat in de middeleeuwen de scheepvaart naar Antwerpen langs de Oosterschelde verliep en dat de Westerschelde toen een onbelangrijke zeearm was, terwijl nu alle scheepvaart langs de Westerschelde geschiedt en de Oosterschelde sedert 1867 volledig van de Zeeschelde is afgesloten.

Deze veranderingen aan het bed van de rivier moeten zich inderdaad doen gevoelen in de getijbeweging. Door de Antwerpse Zeediensten worden sedert 1888 regelmatig de getijwaarnemingen gepubliceerd in tienjarige overzichten zodat vanaf dat jaar de veranderingen in de getijbeweging kunnen gevolgd worden.

Als voornaamste veranderingen aan het bed van de Schelde in de 20e eeuw kunnen vernoemd worden : Het verdwijnen van de tijarmen van het Sloe te Vlissingen en de Braeckman te Terneuzen alsook van een groot aantal schorren door dijkwerken. Ook de baggerwerken kunnen hier vermeld worden. Verder dient te worden aangestipt dat in het ganse zuidelijk bekken van de Noordzee een stijging van het gemiddeld zeeniveau t.o.v. de bodem is waar te nemen van ongeveer 30 cm/eeuw. Of dit te wijten is aan een dalen van de bodem, dan wel aan een verhogen van het zeeniveau, is tot op heden niet afdoende aangetoond.

In bijgaande tabellen VI en VII is de verandering van enkele karakteristieken van het getij in enkele posten weergegeven voor de periode 1891 - 1970. Het betreft hier steeds tienjarige gemiddelden.

TABEL VI

Evolutie van enkele gemiddelde getijkarakteristieken op de Schelde.

Periode	1891	1901	1911	1921	1931	1941	1951	1961
	1900	1910	1920	1930	1940	1950	1960	1970
<u>Hoogwater</u>								
VLISSINGEN	4,12	4,19	4,19	4,24	4,26	4,26	4,35	4,38
ANTWERPEN	4,76	4,80	4,91	4,93	4,98	4,98	5,04	5,15
DENDERMONDE	4,38	4,50	4,65	4,67	4,70	4,82	4,95	5,13
GENTBRUGGE	4,17	4,38	4,70	4,71	4,69	4,82	4,98	5,16
<u>Laagwater</u>								
VLISSINGEN	0,44	0,44	0,47	0,48	0,54	0,55	0,56	0,58
ANTWERPEN	0,37	0,31	0,32	0,28	0,26	0,25	0,23	0,25
DENDERMONDE	1,61	1,69	1,70	1,63	1,56	1,61	1,65	1,68
GENTBRUGGE	2,62	2,80	3,04	2,88	2,74	2,87	3,00	3,20
<u>Tijverschil</u>								
VLISSINGEN	3,68	3,75	3,72	3,76	3,72	3,73	3,79	3,80
ANTWERPEN	4,39	4,49	4,59	4,65	4,72	4,73	4,81	4,90
DENDERMONDE	2,77	2,81	2,95	3,04	3,14	3,21	3,30	3,45
GENTBRUGGE	1,55	1,58	1,66	1,83	1,95	1,95	1,98	1,96
<u>Halftijhoogte</u>								
VLISSINGEN	2,28	2,32	2,33	2,36	2,40	2,42	2,46	2,48
ANTWERPEN	2,57	2,56	2,61	2,60	2,62	2,61	2,64	2,70
DENDERMONDE	3,00	3,10	3,17	3,15	3,13	3,22	3,30	3,91
GENTBRUGGE	3,40	3,59	3,87	3,79	3,72	3,84	3,99	4,18

* Waterstanden t.o.v. het vergelijkingsvlak NKD.

TABEL VII

Gemiddelde celeriteit van de getijgolf tussen
Vlissingen en Gentbrugge

Periode	celeriteit van de top van de golf m/s	celeriteit van het dal van de golf m/s
1901 - 1910	6,72	4,88
1911 - 1920	6,97	4,95
1921 - 1930	7,16	5,07
1931 - 1940	7,19	5,11
1941 - 1950	7,12	5,11
1951 - 1960	7,23	5,15
1961 - 1970	7,66	5,24

Uit deze tabellen blijkt dat :

- 1) De celeriteit, zowel van de top als van het dal van de getijgolf, is voortdurend toegenomen.
- 2) De hoogwaterstanden zijn voortdurend toegenomen.
- 3) De laagwaterstanden te Vlissingen zijn gestegen en te Antwerpen gedaald. Te Dendermonde en Gentbrugge is deze karakteristiek te zeer afhankelijk van het bovendebiet om duidelijk besluiten te trekken.
- 4) De tijverschillen nemen overal toe.
- 5) De halftijhoogten nemen ook overal toe. Indien we echter de stijging aangeven t.o.v. de halftijhoogte te Vlissingen blijkt deze te Antwerpen gedaald te zijn.

Hieruit volgt dat, zeker in het zuiver maritiem gedeelte van de Schelde, het hydraulisch vermogen van de stroom is toegenomen wat zich doet gevoelen in een verhoging van de hoogwaters, een verlaging van de laagwaters en een vergroting van de celeriteit van de getijgolf onder invloed van een vermindering van de weerstand van de rivier.

7. De voorspelling van het getij.

Het is duidelijk van het grootste belang voorspellingen te kunnen maken in verband met de ogenblikken en de hoogten van hoog- en laagwater. Daar de getijden worden veroorzaakt door astronomische verschijnselen en de bewegingen van aarde, maan en zon t.o.v. elkaar reeds jaren op voorhand gekend zijn in de sterrekunde (efemeriden) moet het mogelijk zijn wiskundige verbanden te leggen tussen de stand van zon en maan en de beweging van het water in een bepaald punt op de aarde.

Vóór 1880 werden in België geen getijden voorspeld. De scheepvaart vergenoegde zich, bij gebrek aan beter, een constante tijd toe te voegen aan het voorspelde uur van hoogwater te London Bridge (berekend door de Britse admiraliteit). Dat deze werkwijze uiterst onnauwkeurige resultaten opleverde hoeft geen betoog.

Tussen 1880 en 1930 werden de getijvoorspellingen in België berekend en gepubliceerd door de Koninklijke Sterrewacht van België. Deze instelling voorspelde de uren van hoogwater te Oostende en te Antwerpen en gaf tevens een tabel met getijcoëfficiënten van de springtijden. De gebruikte methode was gebaseerd op een ganse reeks waarnemingen, waaruit de halfmaandelijke variatie van het havengetal (tijdspanne die verloopt tussen de maansdoorgang en het uur van hoogwater in een bepaald punt. Te Antwerpen is dit gemiddeld 2 uur 47 min) was bepaald. Hiermede werd dan, uitgaande van de maansdoorgang, het uur van hoogwater berekend.

Sedert 1930 worden de getijvoorspellingen te Antwerpen uitgegeven door de Antwerpse Zeediensten en zij worden berekend door het "Institute of Oceanographic Sciences" in Engeland. Dit instituut gebruikt voor zijn getijvoorspellingen de Methode van de Harmonische Constanten. Deze methode is opgesteld op basis van de getijden theorie van Laplace en kan als volgt samengesteld worden :

De getijkromme in een punt van de aarde kan bepaald worden door superpositie van een aantal sinusoiden die elk de invloed weergeven van een afzonderlijk fictief hemellichaam dat zich met een constante gekende snelheid in een cirkelvormige baan in het evenaarsvlak rond de aarde beweegt. Elk fictief hemellichaam komt overeen met een periodiek astronomisch verschijnsel (draaiing van de maan rond de aarde, draaiing van de aarde rond de zon, periodieke afwijking van parallax, declinatie en precessie, enz..). De golven die door deze fictieve hemellichamen worden voortgebracht worden door onderstaande vergelijking voorgesteld :

$$H_1 = h_1 \cos \left(\frac{2\pi}{T_1} t + g_1 \right)$$

De totale getijkromme in een punt ziet er dan als volgt uit :

$$H = h_1 \cos \left(\frac{2\pi}{T_1} t + g_1 \right)$$

waarin H : waterpeil op het ogenblik t t.o.v. een gemiddeld aangenomen niveau

t : tijd

h_1 : halve amplitude van de elementaire golf

T_1 : periode " " "

g_1 : fazeverschuiving " " "

De periodes T_1 zijn op voorhand gekend en zij zijn gelijk aan deze van de verschillende astronomische verschijnselen waardoor ze opgewekt worden. De grootheden h_1 en g_1 zijn de harmonische constanten van elke elementaire golf en zij dienen voor elke gewenste plaats bepaald te worden met een harmonische analyse van de waargenomen getijkromme. Een ononderbroken waarneming van minimum 1 jaar is hiervoor noodzakelijk.

Bij de harmonische analyse gaat men als volgt te werk : Zij T de periode van de gezochte samenstellende golf. Nu meet men met gelijke tussenafstanden T de waargenomen waterhoogten $h_1, h_2, h_3, \text{enz.}$ en maakt hiervan het rekenkundig gemiddelde. Dit is een eerste punt van de gezochte golf. Men herhaalt deze bewerking met een kleine translatie in de tijd. Dit geeft een tweede punt van de samenstellende golf. Door zo verder te werken bekomt men zoveel punten als nodig om haar harmonische constanten te bepalen. Deze op deze wijze verkregen golf bevat echter buiten de bijzonderste gezochte golf ook al haar harmonischen (golven met een periode waarvan de periode van de bijzonderste golf een veelvoud is). De gevonden golf zal dus geen sinusofde zijn doch een al dan niet belangrijke vervorming vertonen. Deze harmonischen dienen dan met een verdere analyse van de belangrijkste golf gescheiden te worden.

Men herbegint nu de ganse procedure voor alle samenstellende golven met verschillende perioden.

De bepaling van de harmonische constanten is dus een vrij lange bewerking, vooral indien een grote nauwkeurigheid gewenst is en dus vele golven moeten uitgefilterd worden.

Als de harmonische constanten bepaald zijn kan met behulp van bovenstaande formule het getij in een welbepaald punt voorspeld worden. Voor kusthavens met diep water wordt het getij voornamelijk bepaald door astronomische krachten en vertoont het weinig vervormingen. Bijgevolg brengt de toepassing van de eenvoudige methode van de Harmonische Constanten hier

weinig problemen met zich. Het aantal componenten is beperkt en deze componenten staan in direct verband met het hemelverschijnsel of worden veroorzaakt door eenvoudige interacties (harmonischen van een lage graad) tussen eerstgenoemde componenten.

In ondiep water en getijrivieren echter ondergaat de getijgolf belangrijke vervormingen onder invloed van het rivierbed (cfr. hoofdstuk 5). Zo wordt het stijgend gedeelte van de golf steeds steiler en loopt het hoogwater steeds meer vooruit op zijn oorspronkelijke positie in de golf. Dit heeft voor gevolg dat de harmonischen van hogere orde aan belang winnen.

In bijlage 10 is een samenstellende golf (vb. M2) sinusoidaal weergegeven (kromme b). Kromme a is dezelfde golf zoals ze uit de harmonische analyse naar voren komt. Deze golf is vervormd. Indien we beide krommen laten samenvallen in het middenstandsvlak is het hoogwater vervroegd en het laagwater vertraagd. De kromme c geeft het verschil weer tussen de krommen a en b; dit is de eerste harmonische (M4 genoemd) en haar periode is gelijk aan de helft van deze van de oorspronkelijke golf. De kromme c is op haar beurt ook geen sinus, doch kan hierdoor benaderd worden door de kromme d. Het verschil tussen c en d is de kromme e, de tweede harmonische (M6) met een periode gelijk aan een derde van de golf M2. Op deze wijze vindt men de harmonischen M8, M10, enz.. Hetzelfde geldt voor de zonnegolf S2. Er zijn zelfs gecombineerde harmonischen, zoals de golf MS4.

In ondiep water dienen dus veel meer golven in rekening gebracht te worden dan in diep water. Dit vereist een veel uitgebreidere harmonische analyse, als ook het gebruik van meer termen bij de getijberekening.

Om deze reden werd door Dr. Doodson van het hogergenoemd instituut de "Harmonic Shallow Water Correction Method" (HSWCM) op punt gesteld. In deze methode wordt een basisgetij berekend met een beperkt aantal componenten waarna met een reeks correctiefactoren een correctie wordt aangebracht op de tijden en hoogten van hoog- en laagwater. Deze correctiefactoren zijn zelf ook periodisch en omvatten de invloed van een hele reeks harmonischen op het hoog- en laagwater. Zij zijn functie van de maanstand en van de amplitude van de basisgolf. Deze methode levert vrij goede resultaten voor rivieren waarin de M2 component dominant is zoals in de Schelde. De grote beperking van de HSWCM is echter dat zij enkel hoogten en tijden van hoog- en laagwater kan leveren. Een uurlijkse berekening van het getij kan onmogelijk met deze methode bekomen worden.

Er dient echter op gewezen te worden dat deze methode bedoeld en geschikt was om met relatief eenvoudige middelen, haast manueel, een getijvoerspelling te maken. Inderdaad, de harmonische analyse van de waarnemingen gebeurde manueel zodat slechts een beperkt aantal componenten uit de kromme kon gefilterd worden. Verder werd het getij berekend met de gekende mechanische "Tide predictor" van Lord Kelvin die ook maar een beperkt aantal componenten aankon. De HSWCM liet toe de basiscomponenten, te samen met een aantal correctiefactoren ineens te verwerken tot een grafische getijvoerspelling die dan nog slechts in cijfers hoefde omgezet te worden.

Ondertussen echter, met de komst van computers en andere elektronische hulpmiddelen, kan de waargenomen getijkromme aan een veel diepgaander harmonische analyse onderworpen worden, zodat ook veel meer com-

ponenten uit de waarnemingen kunnen gefilterd. Ook de berekening van het getij kan nu met een computer gebeuren. Dit heeft geleid tot het opstellen door het Institute of Oceanographic Sciences van de "Extended Harmonic Method (EHM)" die gebaseerd is op een harmonische analyse tot 104 componenten. Deze methode vraagt geen verdere correcties en kan bijgevolg uurlijkse waterstanden voorspellen, wat een belangrijk voordeel is, o.a. in geval van stormtij.

Vanaf 1930 wordt het getij te Antwerpen voorspeld met de HSWC methode. Op het getij van 1/1 t.e.m. 1/12/1926 werd een harmonische analyse toegepast en hiermede werden de 60 belangrijkste componenten bepaald voor Antwerpen (Tabel VIII). Met behulp van 26 van deze golven werd het basisgetij voor Antwerpen berekend waarna door middel van 19 correctiefactoren de juiste hoog- en laagwaters bepaald werden.

De 26 basiscomponenten van 1926 zijn steeds dezelfde gebleven doch de correcties dienden regelmatig aangepast te worden om de veranderingen die de getijgolf in de loop der jaren onderging in rekening te brengen.

Vanaf 1975 wordt ook het getij te Prosperpolder voorspeld. Men maakt hiervoor gebruik van de 26 basisgolven die bepaald werden voor Antwerpen en past specifieke correctiefactoren toe voor Prosperpolder.

Daar de stations Prosperpolder en Antwerpen dicht bij elkaar zijn gelegen en de voorspelling van het getij vrij onafhankelijk geschiedde kan deze methode echter tot anomalieën tussen beide stations leiden. Daarom werd door ondergetekende een methode opgesteld om vertrekkend van de getijvoorspellingen te Prosperpolder, die nauwkeuriger waren dan deze van Antwerpen, het getij te Antwerpen te voorspellen.

TABEL VIII

Harmonische constanten te Antwerpen

Fundamentele golven				Harmonischen			
Naam	$2\pi/T$ ° / h	h cm	g °	Naam	$2\pi/T$ ° / h	h cm	g °
Sa*	0,041	6,0	163,1	OQ2	27,342	2,5	347,3
Ssa*	0,082	2,8	313,4	OP2	28,902	3,0	85,3
Mm	0,544	5,9	11,6	2SM2*	31,016	5,5	23,3
Mf	1,098	3,3	99,3	MK3*	44,025	4,1	28,6
MSf	1,016	9,0	44,2	2MK3*	42,927	4,4	231,4
K1*	15,041	6,1	29,0	SK3	45,041	0,6	91,2
O1*	13,943	9,1	223,2	SO3	43,943	1,9	198,4
P1*	14,959	4,6	22,0	M4*	57,968	13,1	121,1
Q1*	13,399	3,6	158,4	MS4*	58,984	8,6	183,0
J1*	15,585	0,8	199,2	MN4*	57,424	4,8	82,0
M1	14,492	0,5	138,7	MK4	59,066	2,5	187,6
OO1	16,139	1,0	172,1	S4	60,000	0,4	153,7
P1	13,472	1,0	113,3	SN4	58,440	1,4	257,1
σ1	12,927	0,8	356,1	SK4	60,082	0,6	269,5
π1	14,918	0,4	20,1	M6*	86,952	8,7	265,3
2Q1	12,854	1,0	88,3	2MS6*	87,968	7,0	310,9
φ1	15,123	0,6	117,9	2MN6*	86,408	4,6	230,2
χ1	14,570	0,5	198,3	2SM6	88,984	1,0	336,2
θ1	15,513	1,4	254,5	MSN6	87,424	1,3	294,8
SO1	16,057	1,4	250,3	2MK6	88,050	2,6	305,6
MP1	14,025	0,6	306,9	MSK6	89,066	1,7	337,4
S1*	15,000	0,9	26,0				
ψ1	15,082	0,8	47,8	MSN2	27,424	3,3	5,6
				MKS2	29,066	2,0	239,8
M2*	28,984	196,3	86,9				
S2*	30,000	47,7	149,8				
N2*	28,440	30,0	60,5				
K2*	30,082	15,6	153,0				
V2*	28,513	14,2	52,9				

TABEL VIII (vervolg)

Harmonische constanten te Antwerpen

Fundamentele golven				Harmonischen			
Naam	$2 / T$ ° / h	h cm	g °	Naam	$2 / T$ ° / h	h cm	g °
$\mu 2^*$	27,968	22,0	187,3	Middenstand : 265,2 cm			
L2*	29,528	19,0	116,3				
T2*	29,959	4,0	118,3				
2N2*	27,895	9,0	105,8				
MNS2	27,424	4,5	150,4				
$\lambda 2$	29,456	8,1	103,4				
KJ2	30,627	1,0	29,2				
K2	30,082	1,0	326,9				
M3	43,476	0,7	179,6				

Berekend door het "Institute of Oceanographic Sciences".

* Gebruikt bij de getijvoorspelling volgens de HSWCM.

Op basis van de waarnemingen van 1970 t.e.m. 1974 wordt in functie van de maanstand en het voorspelde hoogwaterpeil te Prosperpolder een aanpassing aangebracht aan de cijfers van Prosperpolder waardoor de getijvoorspelling van Antwerpen verkregen wordt. Deze methode bleek zeer bevredigende resultaten op te leveren en wordt bijgevolg sedert 1976 gebruikt voor de getijvoorspellingen te Antwerpen.

Zoals hoger vermeld kan tegenwoordig gebruik worden gemaakt van de EHM die wel uurlijkse voorspellingen mogelijk maakt. Daarom werd voor 1978 een vergelijking gemaakt tussen de EHM en de HSWC methode. Het blijkt dat beide methodes evenwaardig zijn wat betreft de hoog- en laagwaters, zodat wegens het voordeel van de uurlijkse voorspellingen vanaf 1981 het getij te Prosperpolder met deze nieuwe methode zal voorspeld worden.

8. Stormvloeden op de Schelde.

Buiten de astronomische krachten kunnen ook meteorologische factoren het getij beïnvloeden. Dit komt dan vooral tot uiting onder een verhoging of verlaging van de voorspelde waterstand of van een vervroegd of vertraagd oogenblik van hoog- of laagwater. Op de Schelde veroorzaakt een sterke en aanhoudende oostenwind een verlaging en een vertraging van het getij, terwijl een sterke en aanhoudende westenwind een verhoging en een vervroeging tot gevolg heeft. Bij deze afwijkingen van de voorspelde waarden is vooral de verlaging van het getij van belang voor de scheepvaart, terwijl de verhogingen van het getij de oorzaak kunnen zijn van overstromingen. Het zijn vooral de noordwestenstormen op de Noordzee die hier een katastrofale rol spelen.

In het noorden van de Atlantische Oceaan worden regelmatig lagedrukgebieden gevormd die zich vervolgens in oostelijke richting verplaatsen. Meestal draaien deze depressies ten noorden van Schotland af naar het noordoosten en hebben verder geen gevolgen voor de getijbeweging in de Zuidelijke Noordzee en de Schelde. Soms echter draaien zij af naar het zuidoosten waardoor zij zich over de Noordzee verplaatsen. In dit geval hebben zij wel gevolgen voor het Scheldebekken. Tijdens de doorgang van het lagedrukgebied boven de Noordzee draait de windrichting van ZW naar NW. Door de noordwestenwind wordt een grote hoeveelheid water vanuit de Atlantische Oceaan in de Noordzee gestuwd die zich op het aldaar heersende getij superponeert. De afmetingen van de Noordzee nemen af naar het zuiden toe zodat het waterpeil nog meer verhoogd wordt. Het is deze verhoogde waterstand in de Noordzee die dan in de Schelde dringt en daar ook een belangrijke verhoging van de waterstand tot gevolg heeft.

Bijlage 11 geeft de baan weer van de depressies die de drie hoogst gekende waterstanden te Antwerpen veroorzaakten en bijlage 12 geeft de meetkundige plaats van de bereikte waterstanden langsheen de Schelde en haar bijrivieren.

De stormvloeden die het gevolg zijn van de stormen boven de Noordzee worden onderverdeeld in twee categorieën naargelang het waterpeil dat zij te Antwerpen bereiken :

- 1) gewone stormvloed : De hoogwaterstand te Antwerpen overschrijdt het peil (NKD + 6,50 m)
- 2) buitengewone stormvloed : De hoogwaterstand te Antwerpen overschrijdt het peil (NKD + 7,00 m)

De hoogte die het water in de Schelde bereikt hangt voornamelijk af van de windkracht die ontwikkeld wordt, de duur van de storm en de kracht van het heersende getij (springtij, doodtij, enz..). Ook de voorgeschiedenis van de stormvloed (verhoogde voorgaande laagwaterstand) en een eventuele opwaaiing op de Westerschelde zelf spelen een rol. In het opwaartse gedeelte van de Schelde en haar bijrivieren kunnen eventuele wassen van het bovendebiet nog voor een belangrijke bijkomende verhoging van het waterpeil zorgen.

Sedert 1900 zijn op de Schelde 74 stormvloeden voorgekomen waarvan 13 buitengewone. Onderstaande tabel IX geeft hiervan de frequentie.

TABEL IX

Aantal stormvloeden op de Schelde.

<u>periode</u>	<u>stormvloed</u>	<u>buitengewone stormvloed</u>
1900 - 1949	26	6
1950 - 1959	6	2
1960 - 1969	13	1
1970 - zomer 1979	29	4

Uit deze tabel blijkt dat de huidige decade wel een bijzonder stormachtig karakter heeft.

De zeven buitengewone stormvloeden die zijn voorgekomen sedert 1950 zijn samengevat in volgende tabel X.

TABEL X

Buitengewone stormvloeden sedert 1950.

<u>datum</u>	<u>waterstand te Antwerpen</u>		<u>verhoging</u>
1/2/53	NKD	+ 7,85 m	2,79 m
23/12/54		7,11 m	2,23 m
16/11/66		7,03 m	1,55 m
14/12/73		7,18 m	1,51 m
3/1/76		7,39 m	1,80 m
15/11/77		7,32 m	1,62 m
2/1/79		7,02 m	1,47 m

Het blijkt dat de opzet (verhoging van de hoogwaterstand t.o.v. de voorspelde) aanzienlijk kan zijn. Op 1/2/1953 bereikte hij een waarde van 2,79 m. De toen bereikte waterstand te Antwerpen is tot op heden de hoogst gekende.

BIBLIOGRAFIE

- Overzicht van de tijwaarnemingen in het Zeescheldebekken gedurende het tijdperk 1961 - 1970.
ir. J. THEUNS, ir. I. COEN.
- Stormvloeden op de Schelde.
Bestuur der Waterwegen.
- De debieten van het Scheldebekken.
Antwerpse Zeediensten.
- Topografische kenmerken van het Scheldebekken.
ir. P. ROOVERS, ir. I. COEN, ir. J. CLAESSENS.
- Bouwwerken der Burgerlijke Genie.
ir. DE BEER.
- Contribution à l'étude théorique des fleuves à marée et application aux rivières à marée du bassin de l'Escaut Maritime.
ir. L. BONNET.
- Les Marées.
ir. A. STERLING.
- Atlas van België.
Noordzee, Kust/Scheldemonding, Zeeschelde.
ir. R. CODDE, L. DE KEYSER.
- Admiralty Manual of Tides.
A.T. DOODSON, H.D. WARBURG.

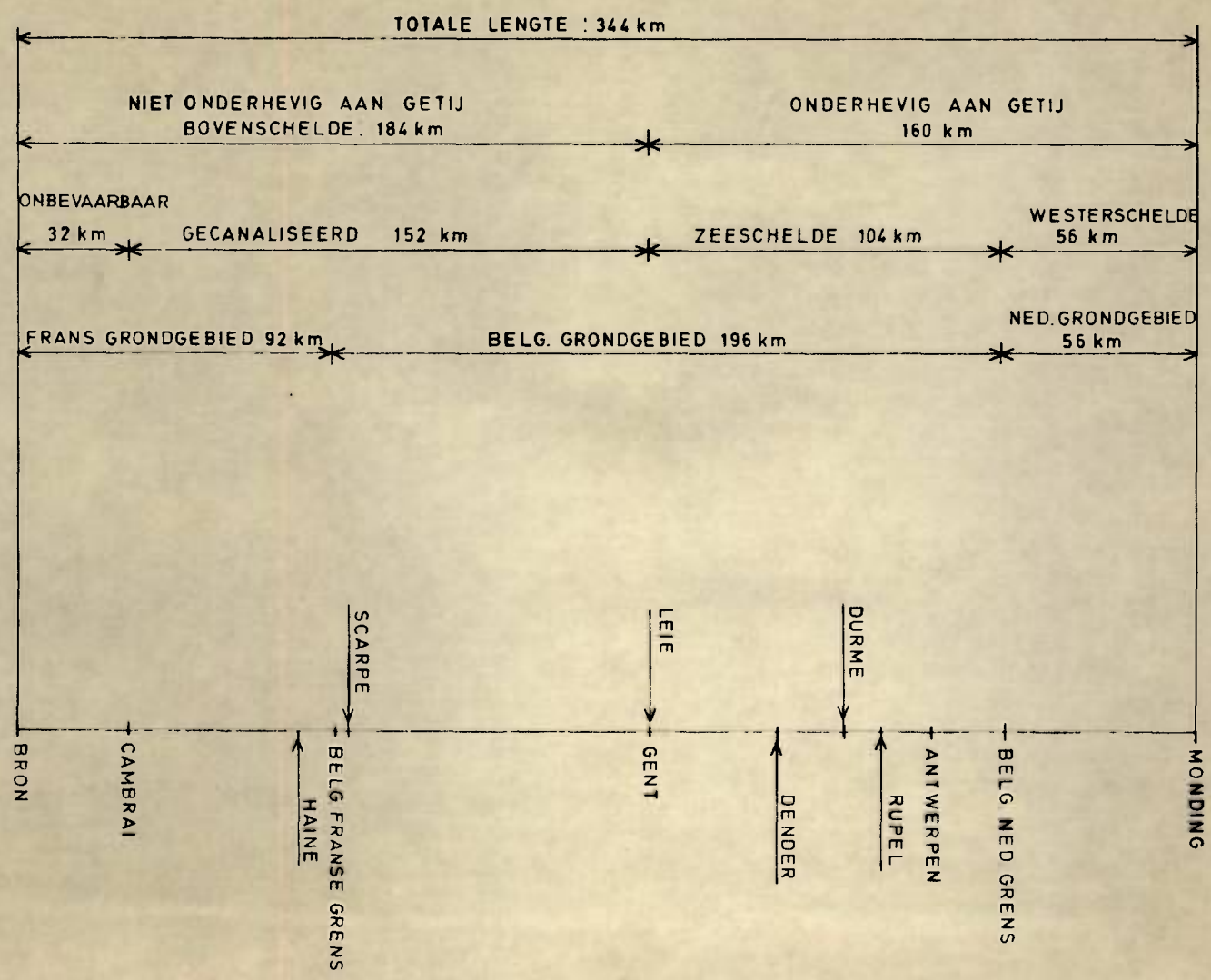
LIJST DER BIJLAGEN

<u>nr.</u>	<u>Omschrijving</u>
1	Schematische voorstelling van de Schelde.
2	Liggingsplan Zeeschelde en bijrivieren.
3	Diagram van Stecher.
4	Plaatselijke getijkrommen.
5	Meetkundige plaats van hoog- en laagwater : Schelde.
6	" " " " Bijrivieren.
7	Krachten die het M2 getij veroorzaken.
8	Het getij in de Noordzee.
9	Tijverschil in de Schelde.
10	Splitsing van een golf in haar harmonischen.
11	Baan van de stormdepressie op 1/2/1953, 3/1/1976 en 15/11/1977.
12	Meetkundige plaats van de hoogwaters van de stormvloed van 1/2/1953, 3/1/1976 en 15/11/1977.

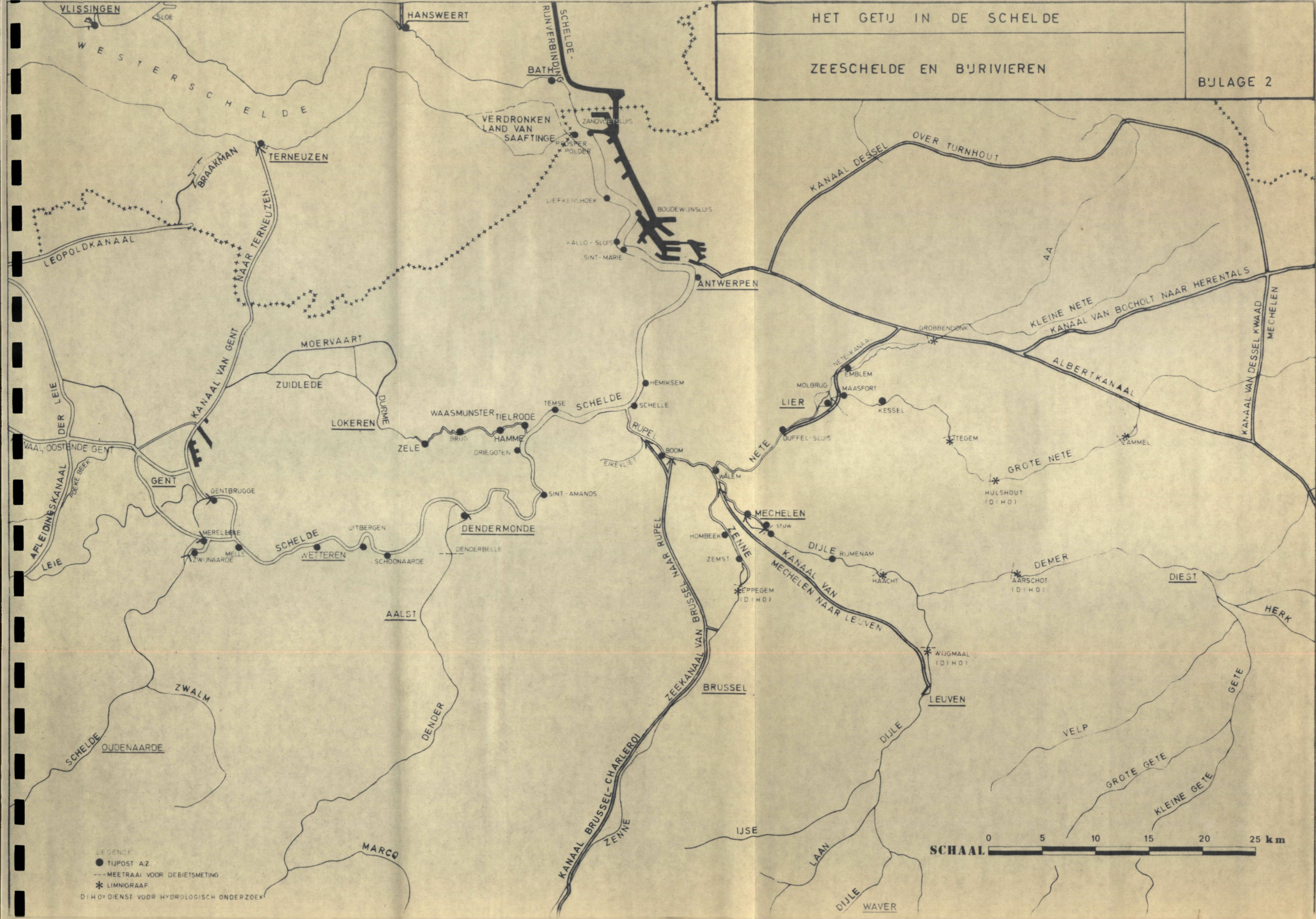
Bijvoegsel : Stroomgebied van de Schelde te Schelle.
Uittreksel uit "Topografische Kenmerken
van het Scheldebekken."

HET GETIJ IN DE SCHELDE

SCHEMATISCHE VOORSTELLING
VAN DE SCHELDE

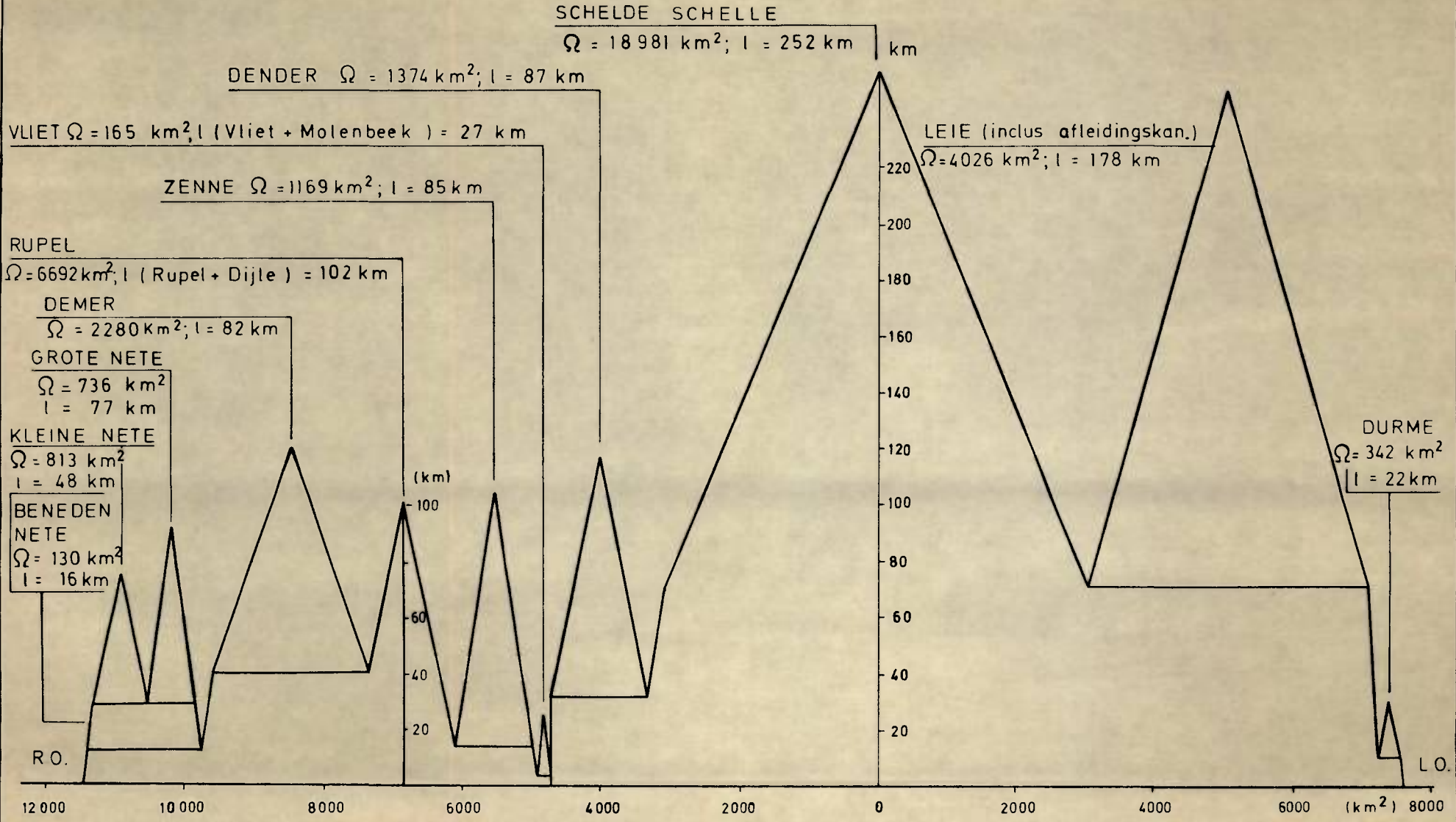


BIJLAGE I



LEGENDE
 ● TIJPOST AZ
 --- MEETRAAI VOOR DEBIETSMETING
 * LIMNIGRAAF
 DIHO = DIENST VOOR HYDROLOGISCH ONDERZOEK

SCHAAL 0 5 10 15 20 25 km



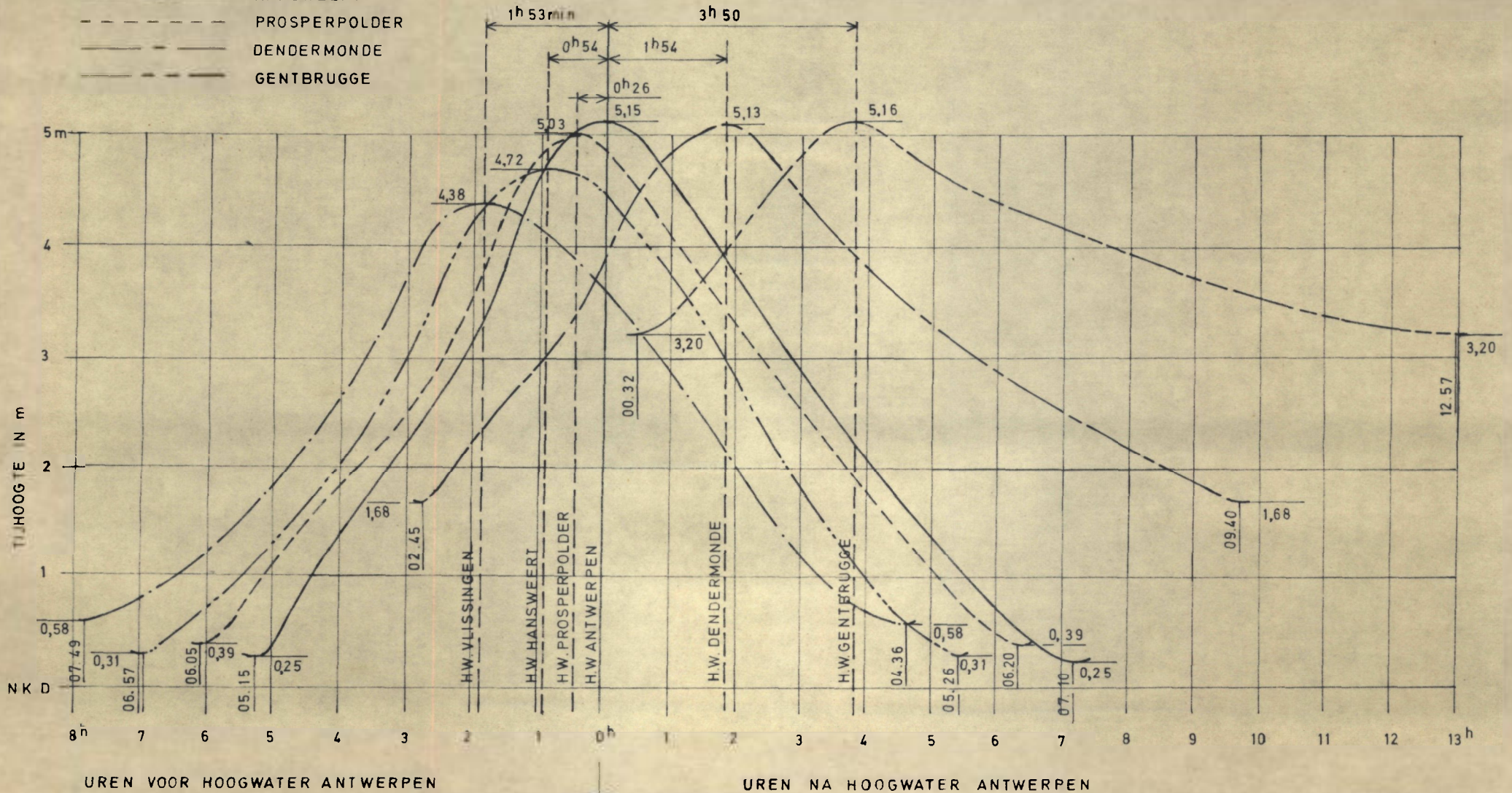
LEGENDE TIJKROMMEN

- ANTWERPEN
- - - VLISSINGEN
- · - · HANSWEERT
- - - PROSPERPOLDER
- · - · DENDERMONDE
- - - GENTBRUGGE

HET GETIJ IN DE SCHELDE

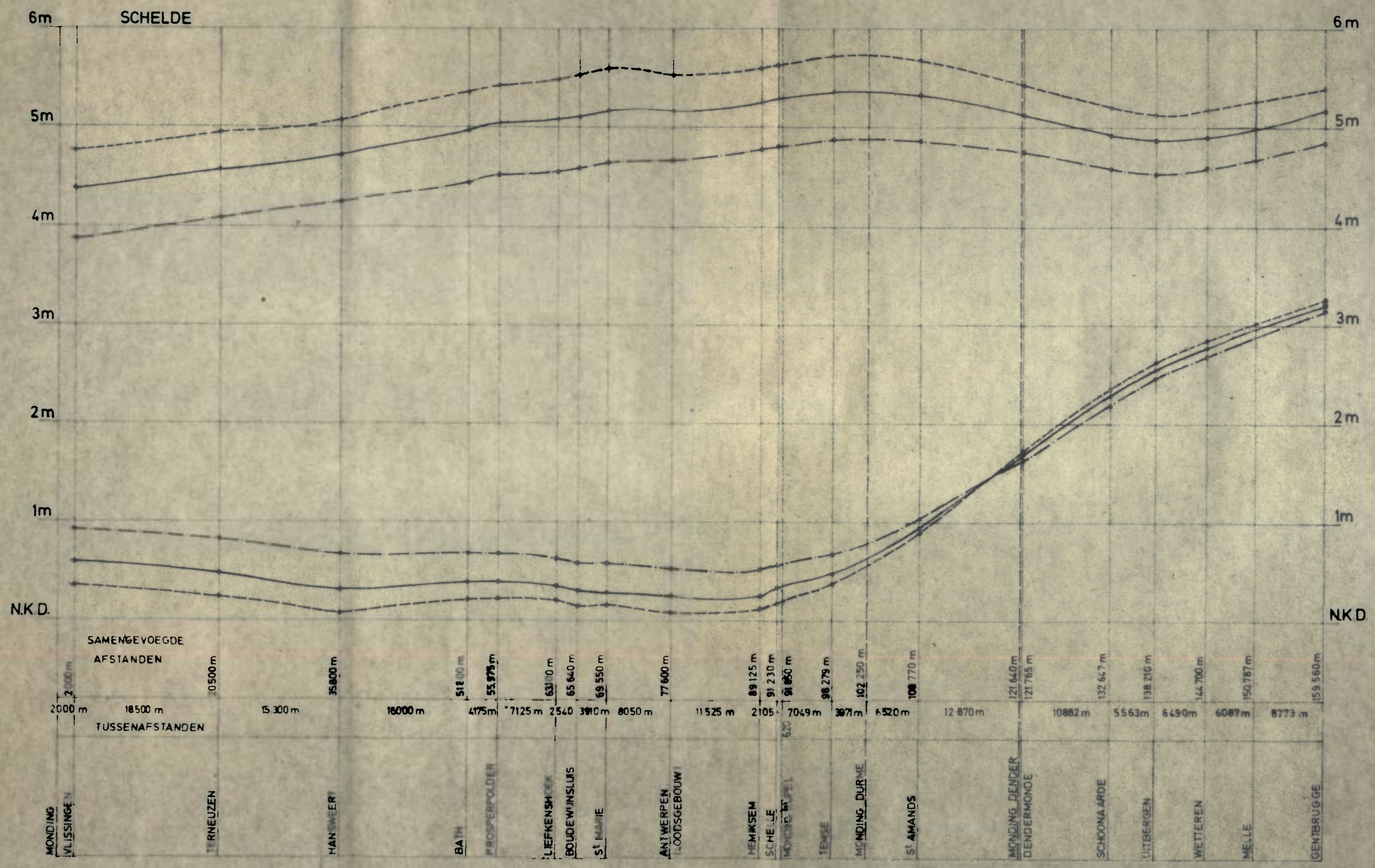
PLAATSELIJKE GETIJKROMMEN
1961 - 1970

BIJLAGE 4

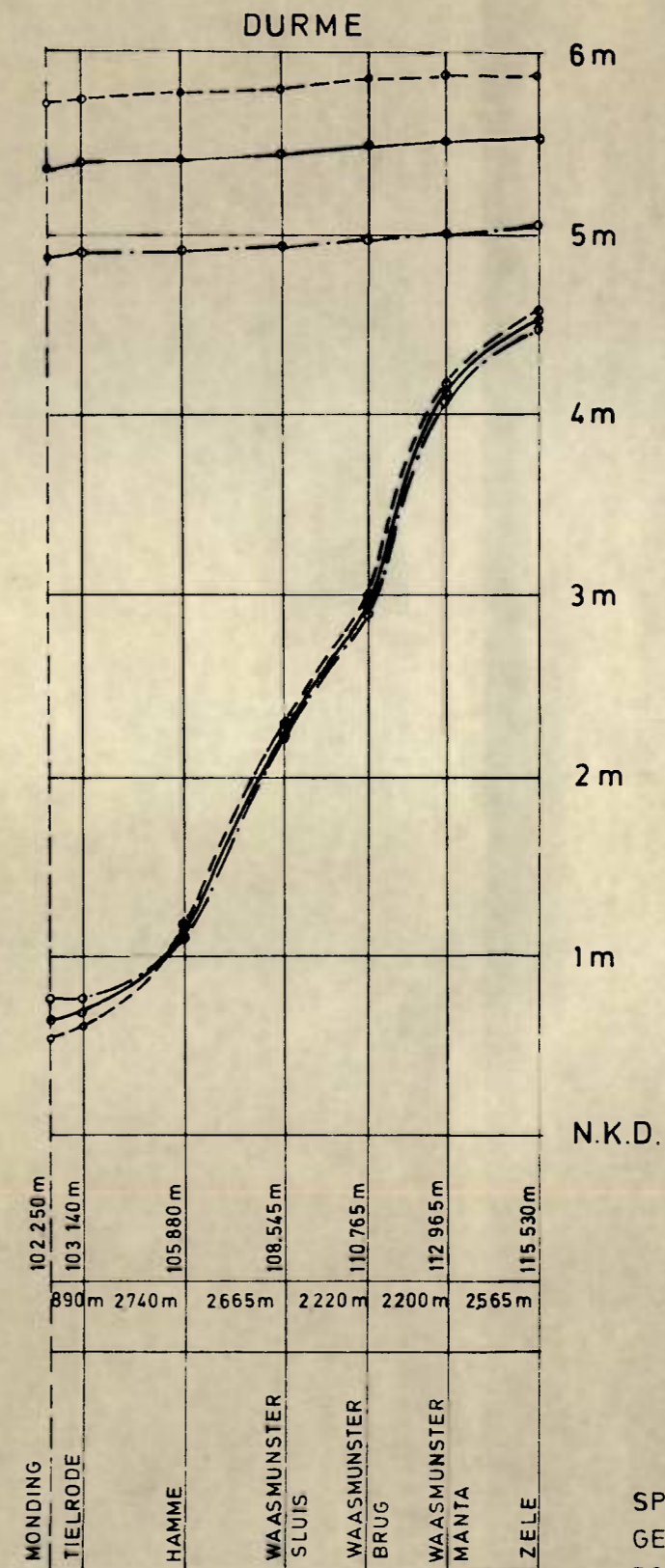
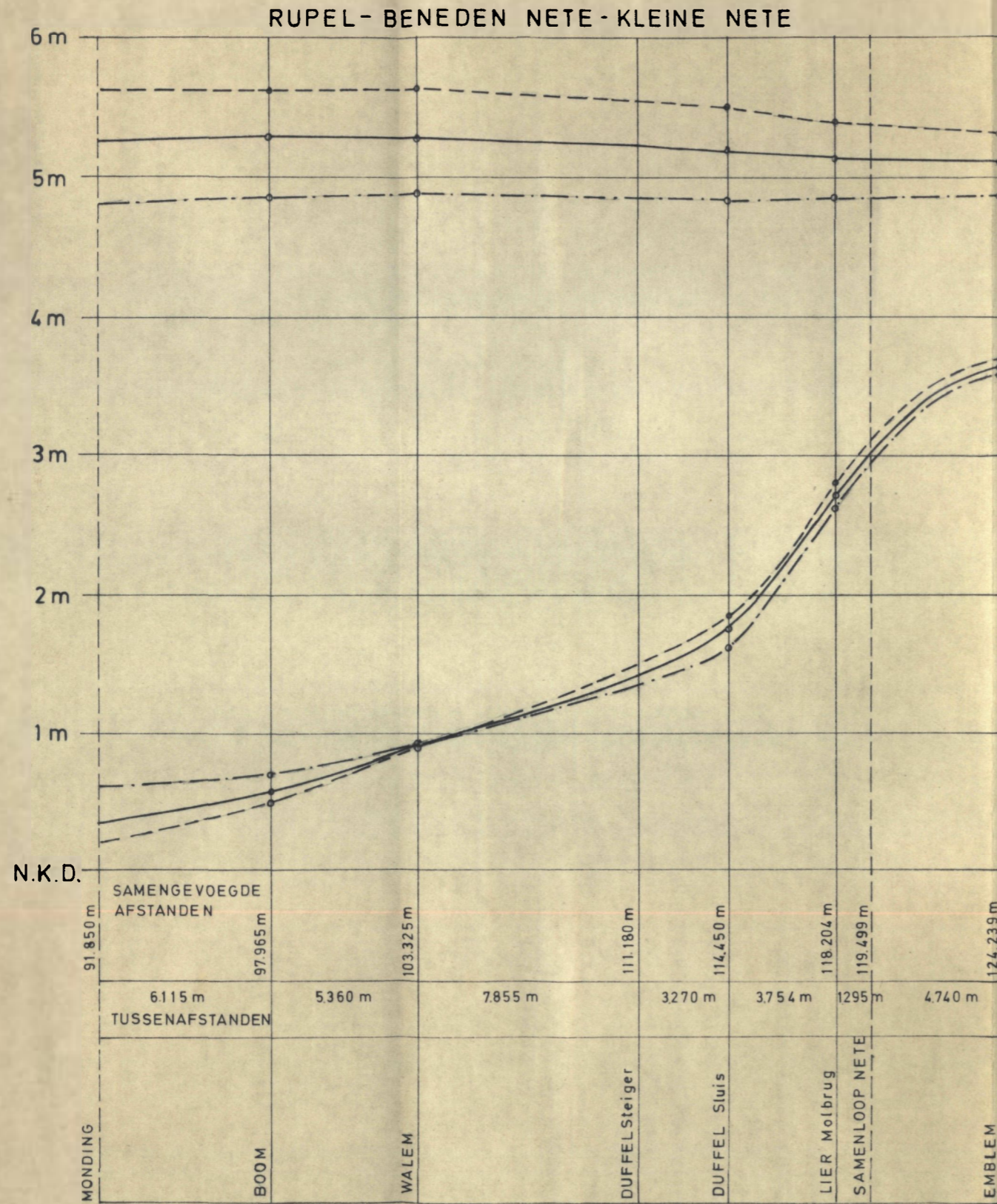


HET GETIJ IN DE SCHELDE
 MEETKUNDIGE PLAATSEN VAN HOOG- EN LAAGWATER
 VOOR SPRING-, GEMIDDELD- EN DOODTIJ
 1961 - 1970

BIJLAGE 5



LEGENDE: SPRINGTIJ (---)
 GEMIDDELD TIJ (—)
 DOODTIJ (-.-)



LEGENDE

- SPRINGTIJ
- GEMIDDELD TIJ
- DOODTIJ

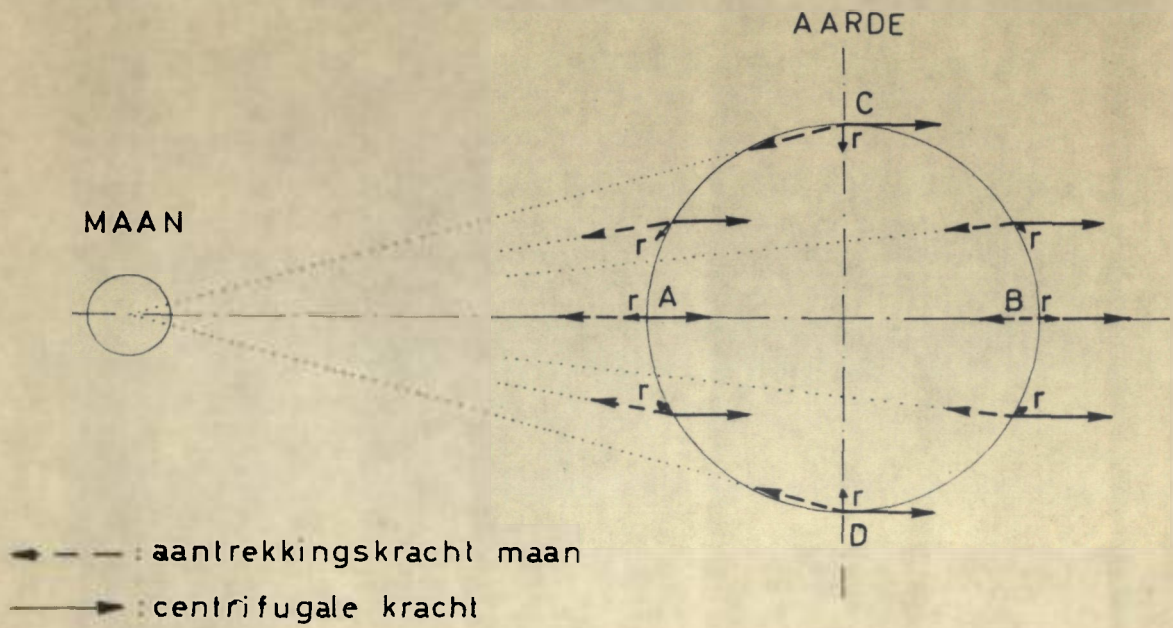


FIG: 1

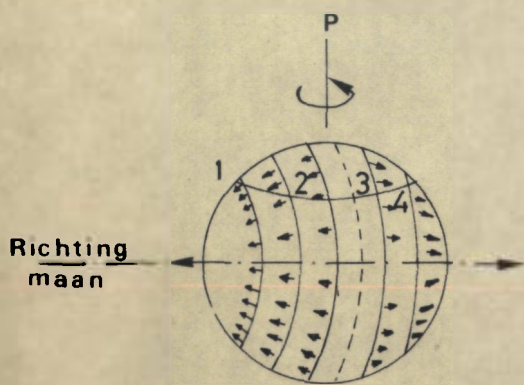


FIG: 2

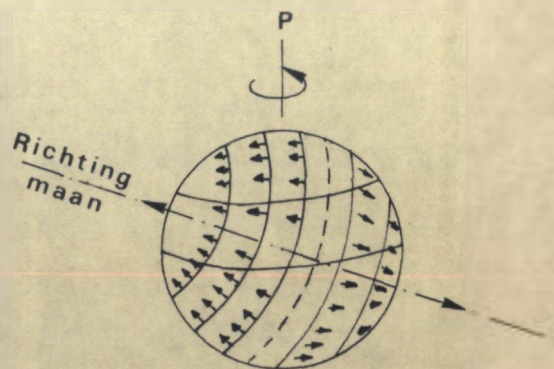


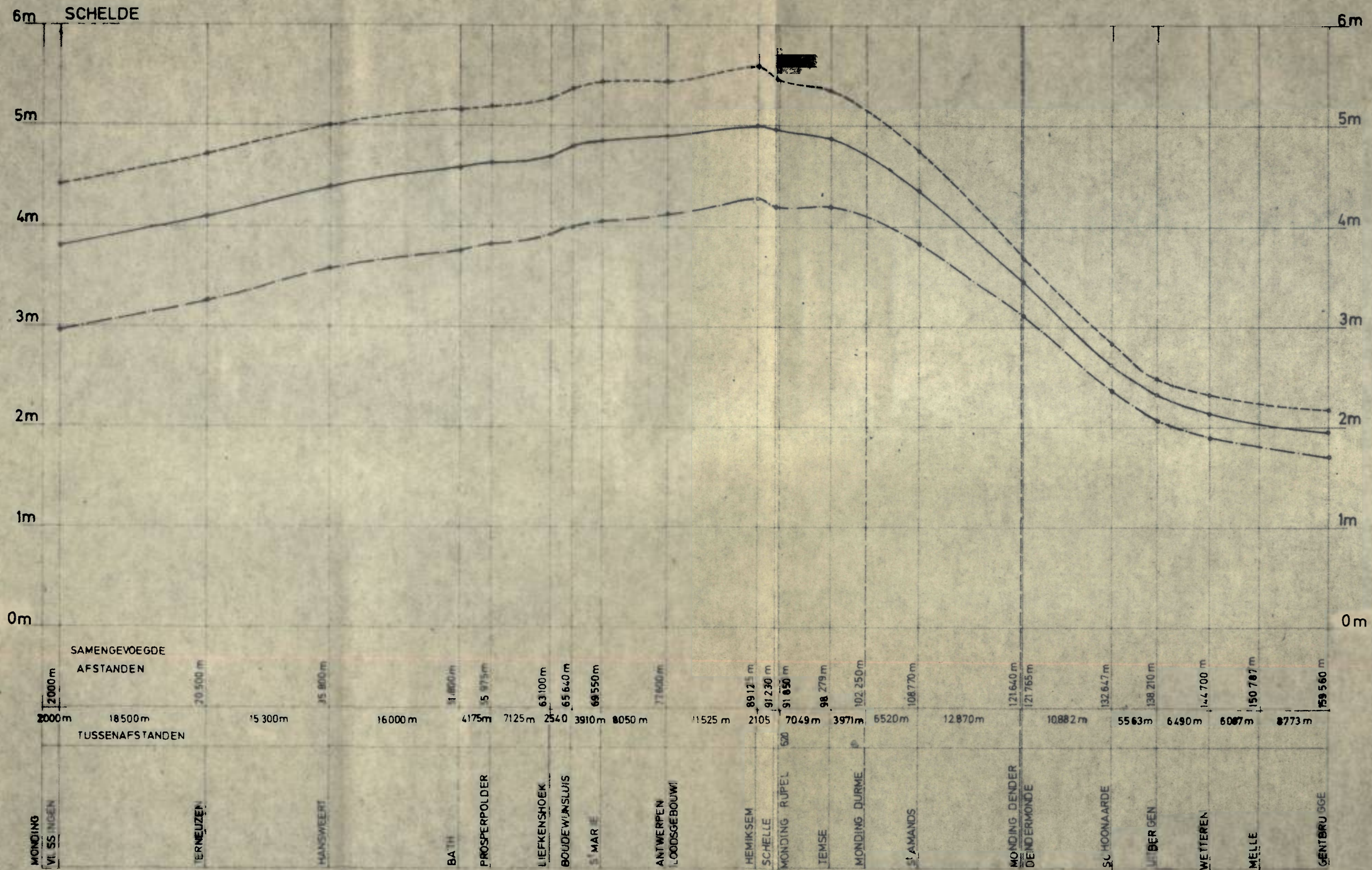
FIG: 3

HET GETIJ IN DE SCHELDE

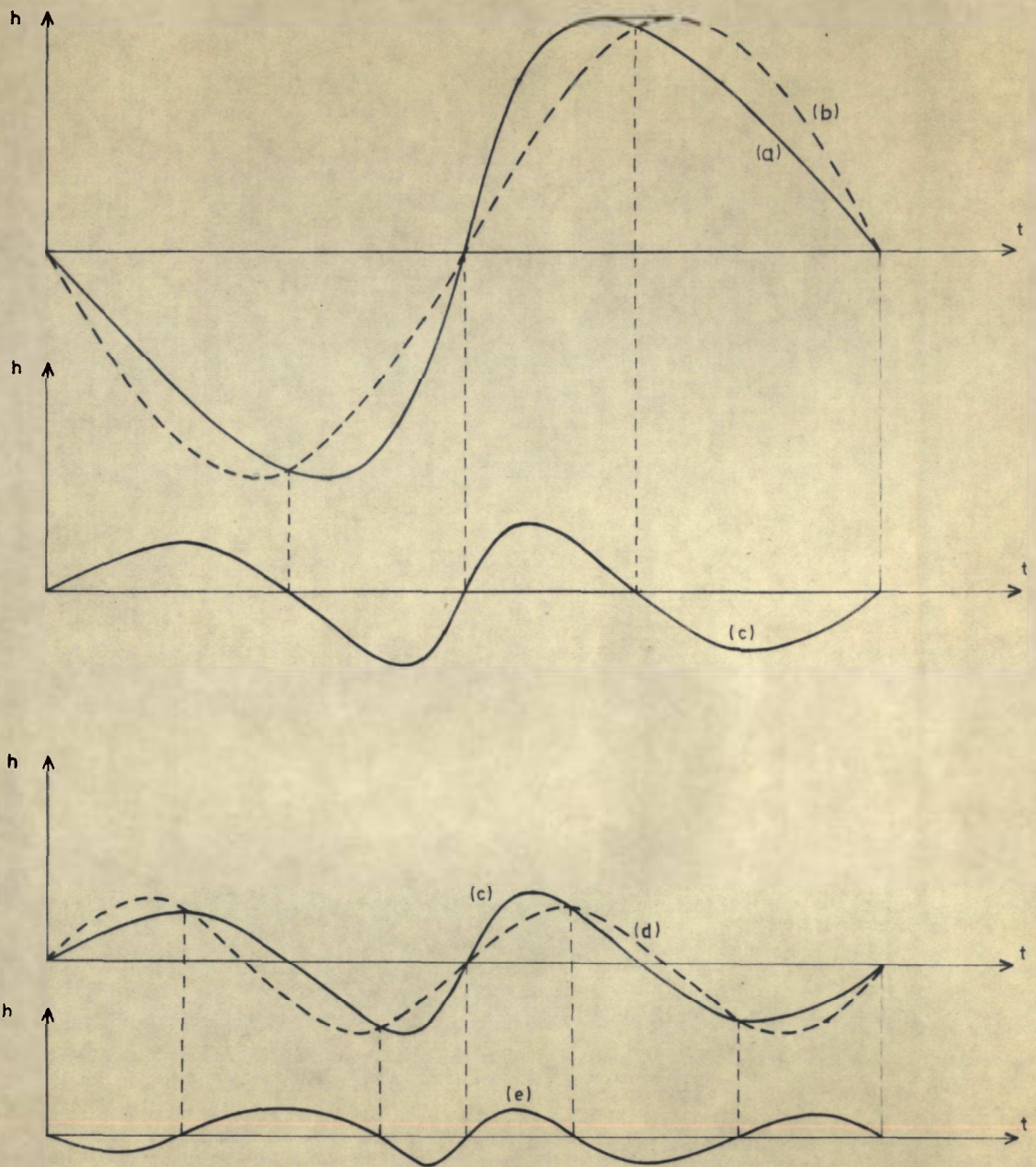
DE GETUGOLF IN DE NOORDZEE

BIJLAGE 8





LEGENDE
 SPRINGTIJ (dashed line)
 GEMIDDELD TIJ (solid line)
 DOODTIJ (dotted line)



(a): samenstellende golf, voortkomend uit een harmonische analyse

(b): benadering van de golf (a) door een sinusoïde

(c): eerste harmonische van de golf (a) $(c) = (a) - (b)$

(d): benadering van de golf (c) door een sinusoïde

(e): tweede harmonische van de golf (a) $(e) = (c) - (d)$

HET GETIJ IN DE SCHELDE

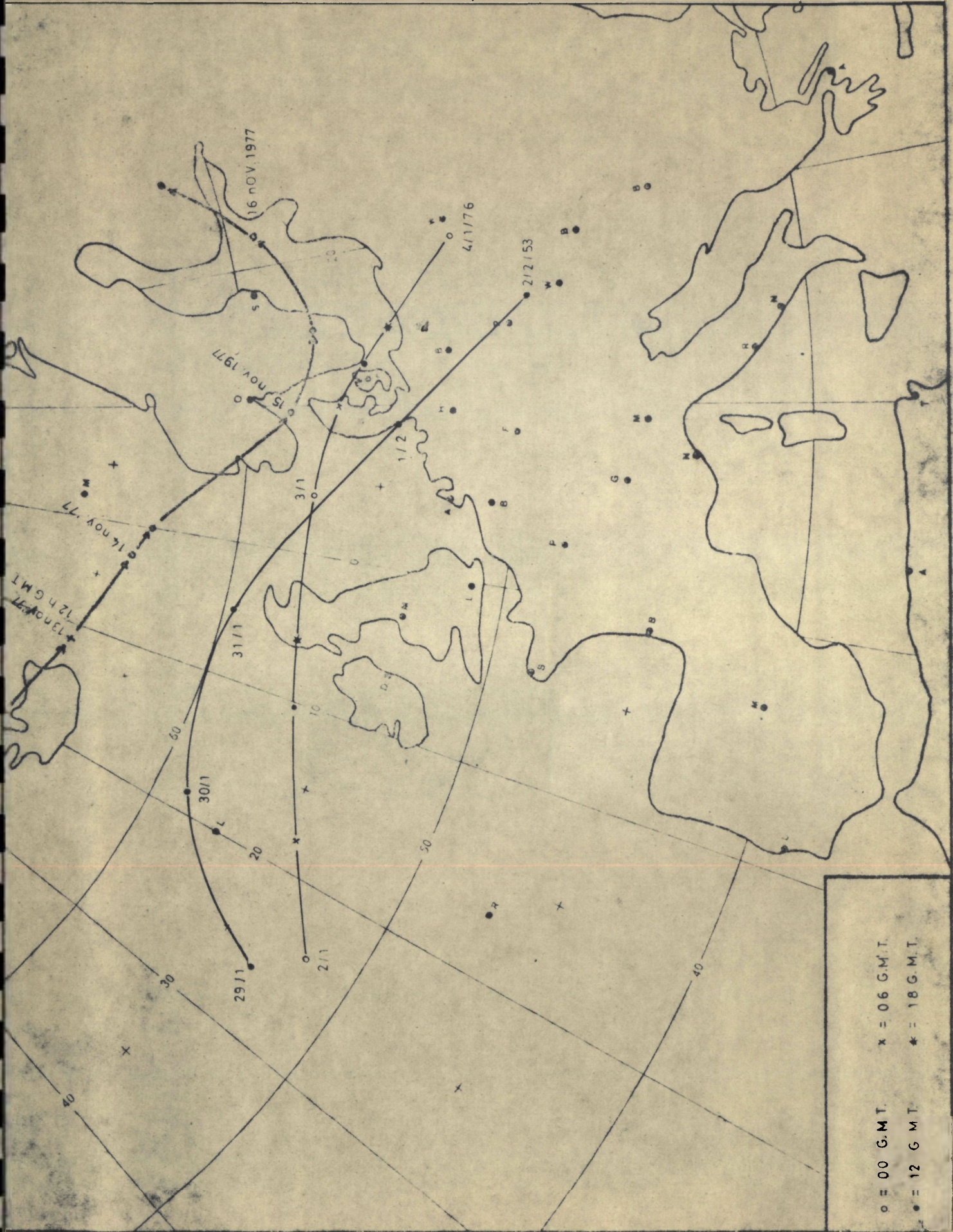
BAAN VAN DE STORMDEPRESSIES BUITENGEWONE STORMVLOEDEN

1 - 2 - 1953 a.m.

3 - 1 - 1976 p.m.

15 - 11 - 1977 a.m.

BULAGE 11



○ = 00 G.M.T. x = 06 G.M.T.
● = 12 G.M.T. * = 18 G.M.T.

HET GETIJ IN DE SCHELDE

MEETKUNDIGE PLAATSEN HW BUITENGEWONE STORMVLOEDEN

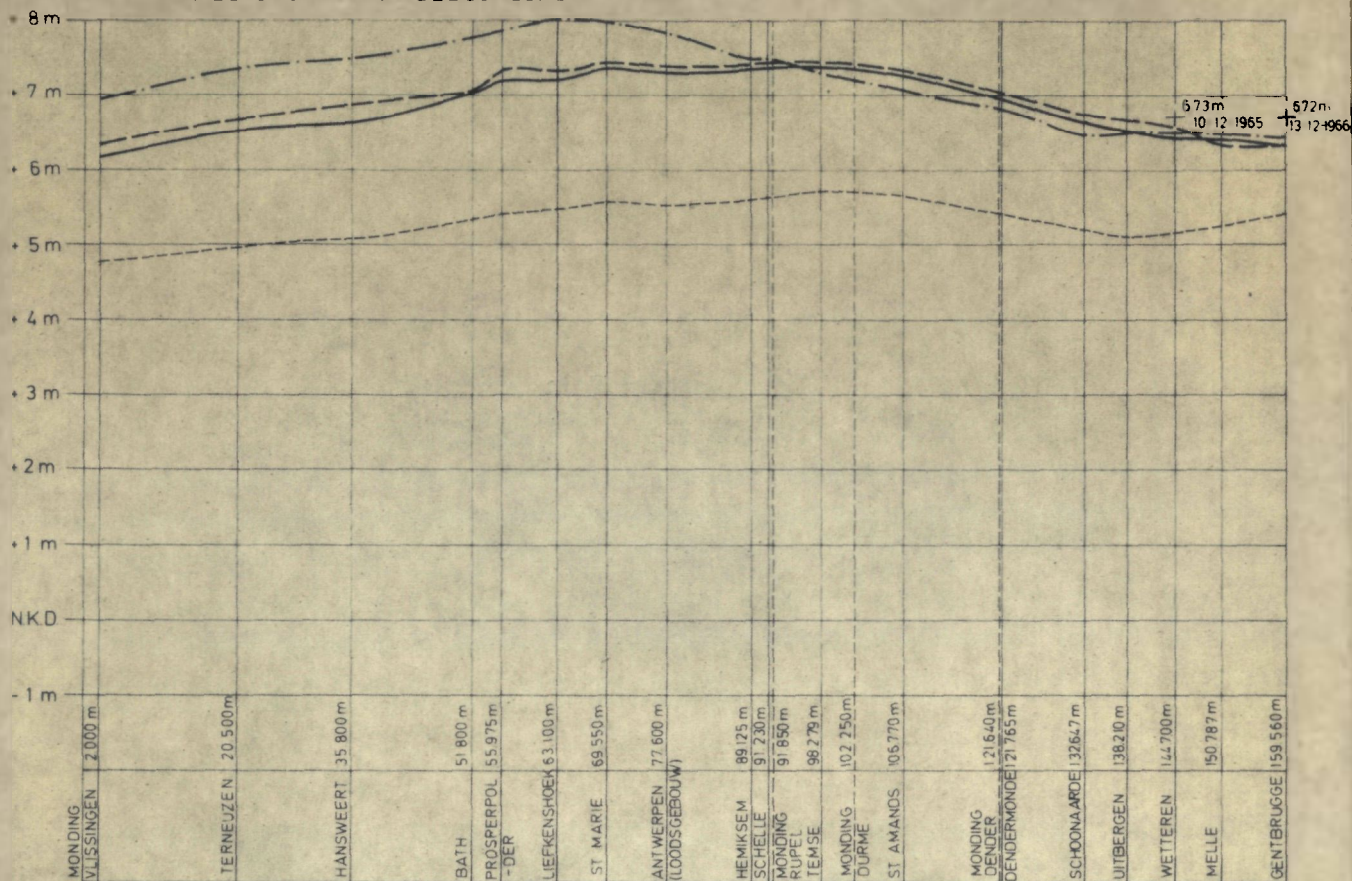
1 - 2 - 1953 a.m.

3 - 1 - 1976 p.m.

15 - 11 - 1977 a.m.

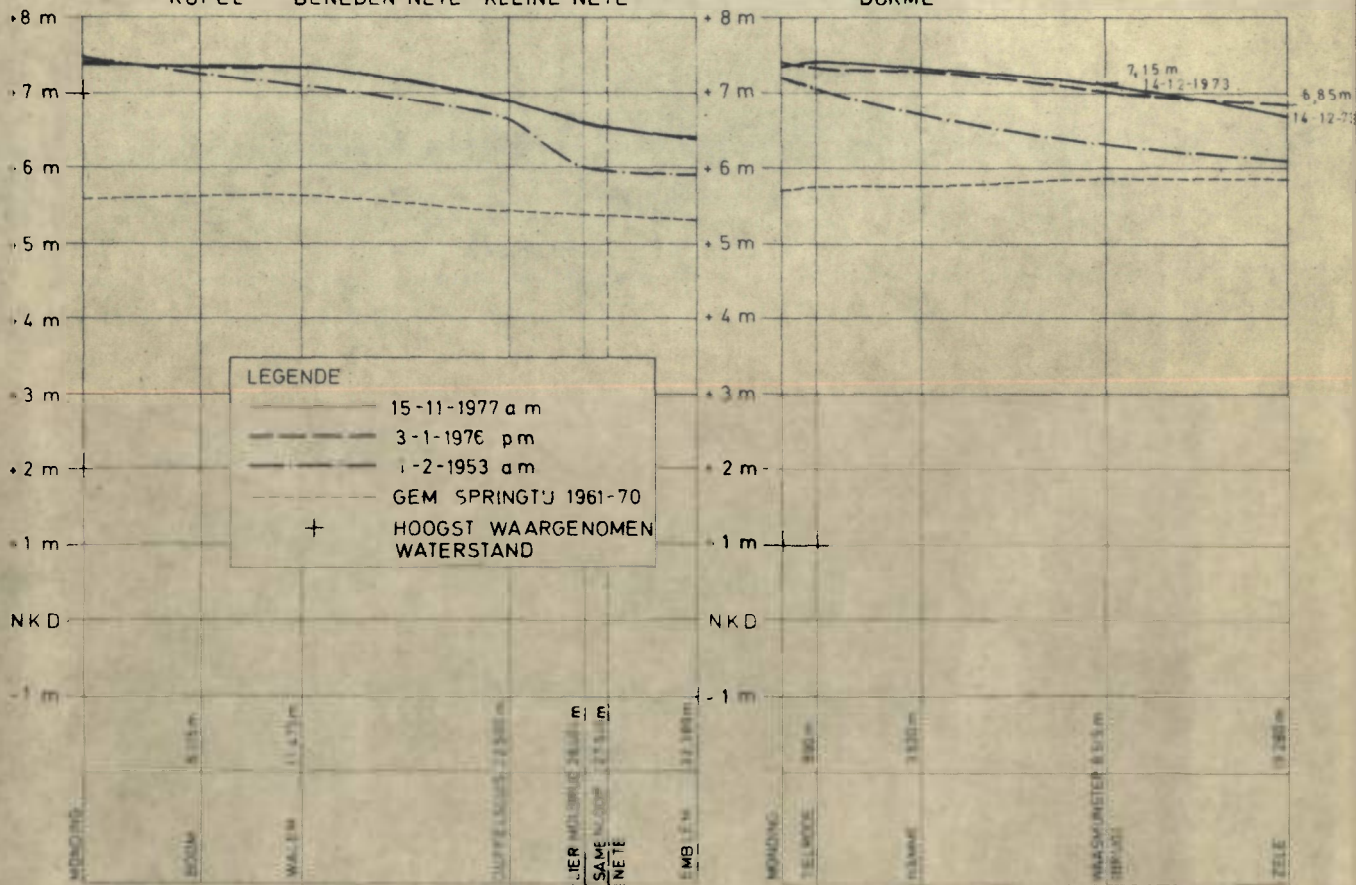
BIJLAGE 12

WESTERSCHELDE ZEE SCHELDE



RUPEL - BENEDEN NETE - KLEINE NETE

DURME



LEGENDE

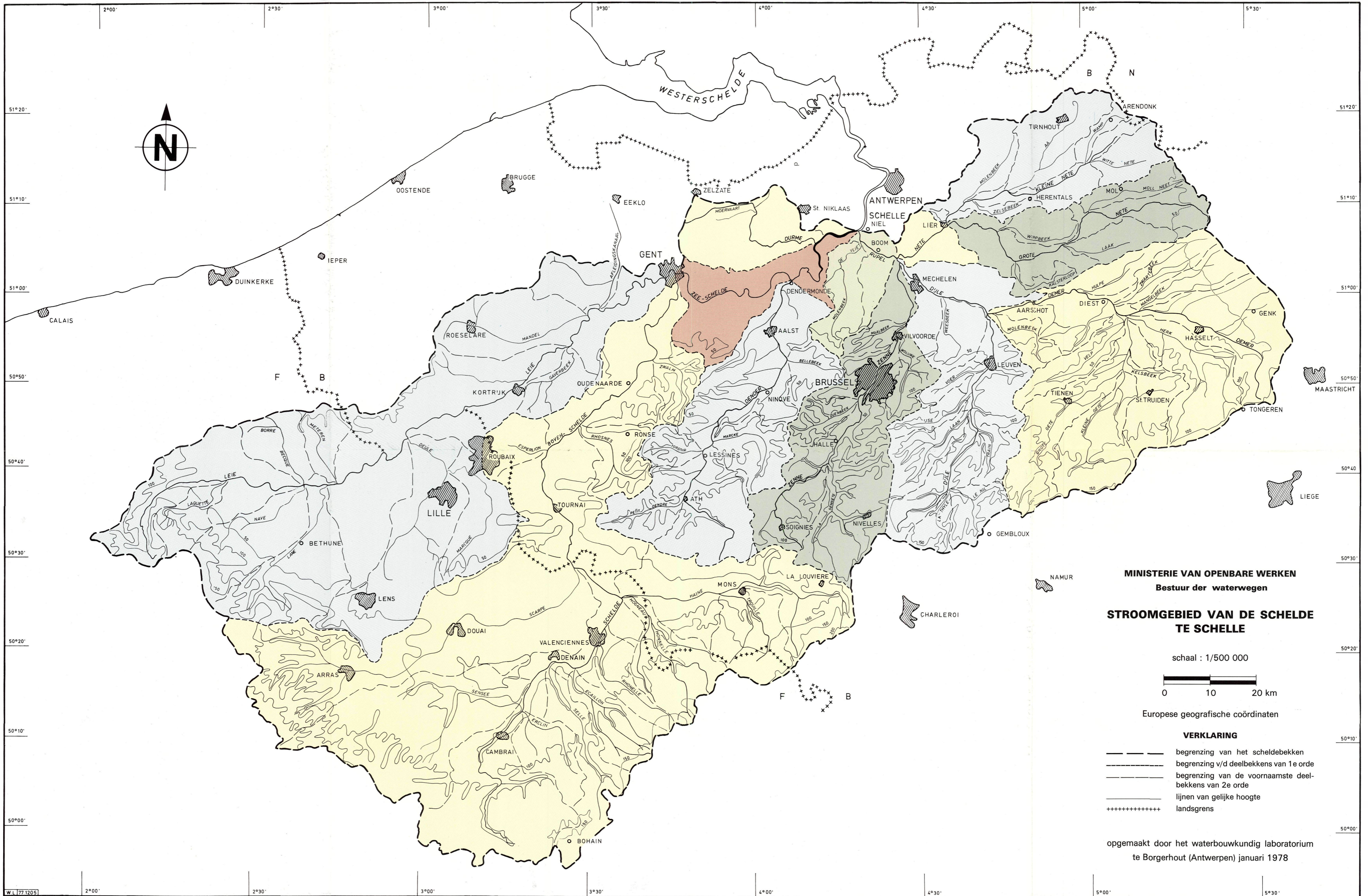
15-11-1977 a.m.

3-1-1976 p.m.

1-2-1953 a.m.

GEM. SPRINGTJ 1961-70

+ HOOGST WAARGENOMEN WATERSTAND



MINISTERIE VAN OPENBARE WERKEN
Bestuur der waterwegen

**STROOMGEBIED VAN DE SCHELDE
TE SCHELLE**

schaal : 1/500 000



Europese geografische coördinaten

VERKLARING

- begrenzing van het scheldebekken
- begrenzing v/d deelbekkens van 1e orde
- begrenzing van de voornaamste deelbekkens van 2e orde
- lijnen van gelijke hoogte
- +++++++ landsgrens

opgemaakt door het waterbouwkundig laboratorium
te Borgerhout (Antwerpen) januari 1978