

SEDIMENTTRANSPORTMETINGEN IN DE SCHELDE

M. SAS
International Marine & Dredging Consultants N.V.
Wilrijkstraat 37-45 bus 4
2140 Borgerhout

1

INLEIDING

Sinds zijn ontstaan heeft International Marine and Dredging Consultants zich toegelegd op het adviseren van baggerprojecten en het uitvoeren van studies in de maritieme sector. Vanuit het bewustzijn dat louter empirische kennis niet kan volstaan om de invloed van baggerwerken en maritieme constructies op het natuurlijk milieu te voorspellen, heeft IMDC zich gespecialiseerd in het op punt stellen van mathematische modellen, die toelaten de realiteit te simuleren. Hierbij wordt steeds uitgegaan van de basisfilosofie dat de eerste stap die nodig is om tot goede simulaties te komen erin bestaat voldoende metingen in situ uit te voeren.

Zo werd het aanslibbingsmechanisme in de toegangsgemaal naar de Kallosluis bestudeerd om diverse 'low cost' technieken voor onderhoudsbaggerwerken te evalueren. De milieu-impact van de berging van slib in onderwatercellen werd geanalyseerd door het simuleren van de grondwaterhuishouding in het havengebied op linkeroever en het transport van pollutanten via het grondwater. Voor de toegangsgemaal van de Berendrechtshuis werd een uitgebreide meetcampagne uitgevoerd om het aanslibbingsmechanisme vast te stellen (zie resp. lit. /1.8/-/1.10/).

Voor de Liefkenshoektunnel werd IMDC door de Tijdelijke Vereniging De Meyer - Van Laere - Betonac belast met het morfologisch onderzoek van de sleuf (zie lit. /1.1/ t.e.m. /1.7/). Dit onderzoek omvatte het uitvoeren van stroom- en sedimentmetingen voor de start der baggerwerken, het berekenen van de sedimentatie in de sleuf met behulp van 2D-modellen voor getij, slib- en zandtransport en tenslotte het opvolgen van de sedimentatie in de sleuf tijdens de bagger- en afzinkwerken van de tunnel.

Meer recent werd IMDC tesamen met het Waterbouwkundig Laboratorium te Borgerhout belast met het hydraulisch-morfologisch onderzoek i.v.m. de bouw van een tweede containerkaai langs de Schelde (zie lit. /1.11/).

In het kader van deze morfologisch onderzoeken werden diverse sedimenttransportmetingen uitgevoerd over het volledig getij, bij spring- en doodtij, over de volledige breedte van de Schelde, in de sleuf of bij normale waterdiepten. Daarnaast werden continue metingen uitgevoerd over meerdere maanden. Hiertoe werd gebruik gemaakt van recente technologische ontwikkelingen inzake meettechnieken voor sedimenttransport, meer bepaald werd een evaluatie gemaakt van bestaande instrumenten om slib- en zandtransport te meten en werd nagegaan op welke wijze ogenblikkelijke fluctuaties en periodieke variaties konden ingeschat worden.

In deze tekst zullen de verschillende meettechnieken toegelicht worden : gebruik van turbiditeitsmeters, van Akoestische Zandtransportmeter en van Slibmonitor. Daarnaast zal ingegaan worden op de variabiliteit van de gemeten grootheden en zal het verband tussen getij-amplitude, snelheid en sedimentconcentratie worden besproken.

2 DE NOODZAAK VAN METINGEN

2.1 ALGEMENE PRINCIPES INZAKE ONDERZOEK EN RAMING VAN DE SEDIMENTATIE IN EEN ESTUARIUM

De complexiteit van het sedimentregime in een estuarium noodzaakt elke ontwerper tot een grondige analyse van de stromingen en de aard en hoeveelheid van de sedimenten. Betrouwbare prognoses inzake sedimentatie in een sleuf of langsheen een kaaimuur zijn slechts mogelijk wanneer voorafgaandelijk een voldoende kwantitatieve kennis bestaat van het estuarien sediment en al zijn eigenschappen. Het effect van de menselijke ingreep op het stromingspatroon kan berekend worden met behulp van een 2-dimensionaal mathematisch model, zoals het FINEL model voor Liefkenshoek en de containerkaai ten noorden van de Zandvlietsluis - zie lit. /1.3/ en /2.1/) (fig. 1) of kan gesimuleerd worden in een hydraulisch fysisch model zoals datgene van de sleuf in het Waterbouwkundig Laboratorium te Borgerhout. Zodra inzicht bekomen is in het hydraulisch gedrag, kan dan de sedimentatie berekend worden. Van uitermate groot belang blijft evenwel het feit dat elk rekenschema, fysisch of mathematisch model moet geijkt worden en dat de betrouwbaarheid dient nagegaan te worden op basis van in situ metingen.

2.2 BESCHIKBARE GEGEVENS INZAKE SEDIMENTTRANSPORT IN DE SCHELDE

Tijdens de evaluatie van de beschikbare gegevens voor de Liefkenshoektunnel werd duidelijk dat er een grondige kennis was van het hydraulisch regime van de Schelde, met voldoende gegevens om een hydraulisch model af te ijken (zie ondermeer lit. /2.2./ en /2.3/).

Met betrekking tot het sedimenttransport bleek er een tekort aan gegevens. Er is geen continue registratie van het slibtransport in de Schelde, noch wat betreft langsprofielen noch inzake dwarsverdeling, noch op het vlak van variaties in de tijd in vaste meetstations. De gegevens beperkten zich voor de omgeving van Liefkenshoek tot één 13-uursmeting (28 april 1987), gedurende dewelke er in één meetpunt turbiditeit werd gemeten (zie lit. /2.2/). Aangezien tijdens de vloed een aantal meetwaarden ontbraken, werd op 16 mei 1988 gedurende één vloedfase in één meetpunt de turbiditeit en het sedimentgehalte over de verticaal gemeten. Voor Oosterweel, naar aanleiding van de studie van de stormvloedkering, waren gegevens ter beschikking uit een meetcampagne die uitgevoerd werd door Hydraulics Research (zie lit. /2.4/). Ter hoogte van de Drempel van Zandvliet werden recent stroom- en sedimentmetingen uitgevoerd door het Studieconsortium IMDC-WL Borgerhout (zie lit. /2.5/) die een aanvulling vormen bij de gegevens die verzameld werden ter hoogte van de toegangsgeul Zandvliet-Berendrecht (zie lit. /1.10/).

Inzake zandtransport waren er nauwelijks gegevens te vinden. Enkel gedurende de aanvullende meting van 16 mei 1988 werd de zandconcentratie gemeten in één meetpunt, in een beperkt aantal punten over de verticaal.

Deze uiterst beperkte serie gegevens leidde ertoe dat het ééndimensionaal model voor de berekening van de aanzanding in de sleuf moeilijk kon gecalibreerd worden. De ijkparameters dienden zeer sterk af te wijken van de gebruikelijke waarden. Nochtans kon niet worden gezegd of deze afwijking inherent is aan het bodemmateriaal ter hoogte van Liefkenshoek (een zand/slib mengsel), of dat de afwijking te wijten was aan de kwali-

teit van de beschikbare meetgegevens.

2.3 BESCHIKBARE MEETTECHNIEKEN

Gezien het gebrek aan gegevens werd nagegaan of het mogelijk was de onzekerheid over de te verwachten sedimentatie te reduceren door het uitvoeren van een aantal metingen in situ. Deze metingen dienden tevens een antwoord te geven op de gelijktijdige aanwezigheid van zand en slib in suspensie. Hiertoe werd een evaluatie gemaakt van de voorwaarden, waaraan dergelijke metingen dienden te voldoen, met daaraan gekoppeld een evaluatie van de beschikbare meettechnieken.

Inzake beschikbare meettechnieken voor het meten van sediment in suspensie bleek al vlug dat onderscheid kon gemaakt worden tussen vier grote klassen van meettechnieken (zie lit. /2.6/ en /2.7/):

1. het vullen van flessen op de gewenste diepte
2. het oppompen van water/sediment monsters
3. het oppompen van monsters en in situ scheiden van water en sediment (fig. 2)
4. directe meting van de sedimentconcentratie

De derde techniek kon niet gebruikt worden omwille van het gelijktijdig voorkomen van slib en zand, zodat elk pomp-filter systeem colmateert. De eerste twee methoden vergen een uitgebreide labo-analyse en zijn bijgevolg kost- en arbeidsintensief en tijdrovend. Daarom werd geopteerd voor directe meting van de sedimentconcentratie.

2.3.1 Toestellen voor zandpartikels

Omwille van de keuze om een directe meting van de sedimentconcentratie uit te voeren, bleven slechts twee types van meetapparaten over: de AKOESTISCHE ZANDTRANSPORTMETER (zie lit. /2.8/) en de IMPACT METER (zie lit. /2.9/), waarbij geopteerd werd voor de AZTM omwille van praktische overwegingen.

De IMPACT METER is gebaseerd op het principe van momentumtransfer. De hoge dichtheid van de zandpartikels bezorgt de partikels een extra momentum t.o.v. het water waardoor zij de neiging hebben op de transducent te botsen. Door de botsing wordt een deel van het momentum overgebracht naar een piezo-electrisch keramisch element dat op zijn beurt een elektrisch signaal produceert. Het uitgangssignaal telt het aantal botsingen, dat afhankelijk is van de massa, de snelheid en de invalshoek van de partikels. Een apart instrument is nodig om de snelheid te meten.

De AKOESTISCHE ZANDTRANSPORTMETER (AZTM) is gebaseerd op de verstrooiing van ultrasone energie door zwevende zanddeeltjes. Hieruit kunnen gelijktijdig en continu de concentratie en de snelheid van deze zanddeeltjes bepaald worden. Het transport wordt hieruit berekend langs elektronische weg. De AZTM is optimaal ontworpen voor toepassingen waarbij de diameter van de zandkorrels ligt tussen 80 en 210 μm . Versturende invloeden van bijvoorbeeld slib zijn verwaarloosbaar (zie lit. /2.10/). De AZTM (fig. 3) omvat enerzijds de drie transducenten voor het zandtransport en anderzijds een kompas voor de bepaling van de stroomrichting, een drukopnemer voor de dieptemeting en een echolood voor het meten van de hoogte boven de bodem. Zonder in te gaan op de details, kan het principe van de meting als volgt worden samengevat:

1. door meting van de intensiteit van de verstrooiing van akoestische energie en de intensiteit van de transmissiebundel wordt de concentratie van het aanwezige zand bepaald (het bekomen signaal is lineair met de zandconcentratie, onafhankelijk van de slibconcentratie en nagenoeg onafhankelijk van de eigenschappen van het water).
2. de bepaling van de snelheid van de zanddeeltjes is gebaseerd op het Doppler-principe : wanneer deeltjes zich bewegen t.o.v. het systeem zender/ontvanger, heeft het ontvangen signaal een frequentie welke iets afwijkt van de zenderfrequentie.

2.3.2 Toestellen voor slibconcentratie

De elementaire methoden (zoals fles of pompsystemen) zijn uiteraard bruikbaar voor het bepalen van de slibconcentratie, maar de analyse van de monsters vergt een arbeidsintensieve filtering en droging. Meer gevorderde technieken maken gebruik van de rechtstreekse meting van de slibconcentratie, zoals turbiditeitsmeters, die na calibratie een directe omrekening van de gemeten lichtabsorptie naar slibconcentratie mogelijk maken. De meeste van deze toestellen hebben wel het nadeel dat ze gevoelig zijn voor het omgevingslicht, voor verontreiniging van de sensoren en voor fluctuaties in de turbiditeit van het water.

De belangrijkste turbiditeitsmeters werden door het WL-Delft getest (Partech, Eurcontrol, Metrawatt en Monitek) (zie lit. /2.7/). De meeste toestellen hebben een goede lineariteit, maar zijn gevoelig voor het verlopen van het nulpunt. Het effectieve meetbereik ligt hierdoor tussen 100 en 1000 tot 3000 mg/l. De turbiditeitsmeters blijken ongevoelig voor zandpartikels.

3 DE METINGEN VOOR DE BAGGERWERKEN VAN DE LIEFKENSHOEKTUNNEL

3.1 ALGEMENE BESCHOUWINGEN

Bij het analyseren van de grootheden resulterend uit de vroegere stroom- en sedimentmeting en meer specifiek van het sediment in suspensie, bleek duidelijk het dynamisch karakter van de Schelde, waardoor de sedimentconcentratie in een welbepaald punt, op een willekeurig tijdstip in het getij afhankelijk is van :

1. de lokaal geërodeerde hoeveelheid sediment, die door turbulentie diffundeert in de verticaal
2. de hoeveelheid sediment die uitzakt vanuit hogere lagen in de verticaal
3. de hoeveelheid suspensiemateriaal die door de stroming meegevoerd wordt

Bovendien variëren deze concentraties gedurende het getij, gedurende de cyclus van springtij naar doodtij, over de breedte en de waterdiepte. Dergelijke fluctuaties in de sedimentconcentraties werden reeds herhaaldelijk aangetoond. Ondermeer door Hydraulics Research werden voor de Thames ogenblikkelijke variaties t.o.v. de gemiddelde concentratie gerapporteerd welke $\pm 22\%$ bedragen (zie lit. /3.1/).

Daarom werd tijdens het morfologisch onderzoek, voorafgaand aan de baggerwerken, geopteerd voor het uitvoeren van een langdurige stroom- en sedimentmeting ter hoogte van de steiger van Liefkenshoek. Daarnaast werd een 13-uursmeting uitgevoerd in de as van de tunnel. Gedurende deze meting werd vanop drie meetschepen met behulp van een akoestische zand-

transportmeter (AZTM) en een turbiditeitsmeter (type Partech) het zand- en slibgehalte gemeten. Gelijktijdig werden twee verticaalmetingen uitgevoerd in de directe omgeving van de sleuf : één af- en één opwaarts van de tunnelas. De bekomen meetgegevens werden gebruikt om het hydraulisch twee-dimensionaal model te calibreren, evenals het slib- en het zandtransportmodel, resp. TRASIL en ZANDLIEF2D.

3.2 DE 13-UURSMETING VAN 25/01/89

3.2.1 Beschrijving van de meting

De metingen werden uitgevoerd van kentering hoogwater over laagwater tot kentering hoogwater, gedurende een gemiddeld springtij.

Het meetschema kan als volgt worden samengevat :

- elke 20 minuten werd de verticaal gemeten op vaste begintijden
- er werd gemeten in de verticaal op volgende dieptes :
 - 1/2m, 1m en 2m boven de bodem
 - 1/3 en 2/3 van de waterdiepte
 - 1m onder het wateroppervlak
- 3 controlemonsters voor de AZTM werden genomen tijdens de vloed en de eb, door gebruik te maken van een pompfiltersysteem
- voor de turbiditeitsmeter werd 1 ijkmonster genomen per verticaal

3.2.2 Meetresultaten

De gemeten zandconcentraties en de daaruit afgeleide zandtransporten zijn voor de drie instrumenten gecorrigeerd op basis van de ijklijnen. De Partech-turbiditeiten zijn uitgezet tegen de hoeveelheden slib uit de genomen monsters. Daaruit werden ijklijnen geconstrueerd waaruit slibconcentraties en slibtransporten berekend werden.

Enkele van de aldus bekomen meetresultaten zijn weergegeven in figuur 4.1 en 4.2. In de volgende tabel wordt een samenvattend overzicht gegeven van de meest karakteristieke snelheden, zand- en slibconcentraties.

Meetpunt Tunnelsectie		1 3/4	2 5/5	3 6/6
Diepte (m)	HW	16.2	15.4	14.1
	LW	10.0	9.7	8.5
Max. snelheid (m/s)	EB	0.89	1.04	1.21
	VLOED	1.31	1.49	1.32
Max. gemiddelde zandconcentratie (mg/l)	EB	109	152	90
	VLOED	110	218	217
Max. bodemzandcon- centratie (mg/l)	EB	300	500	380
	VLOED	1100	720	780

Meetpunt Tunnelsectie		1 3/4	2 5/5	3 6/6	4 AFW	5 OPW
Max. gemiddelde slibconcentratie (mg/l)	EB	281	332	271	365	347
	VLOED	567	414	689	361	>1250
Max. bodemslibcon- centratie (mg/l)	EB	408	738	357	1100	>1250
	VLOED	1200	892	1246	737	>1250

3.3 LANGDURIGE STROOM-EN SEDIMENTMETING

3.3.1 Beschrijving van de meting

De metingen vonden plaats van 08/02/89 tot 25/05/89. Gedurende deze periode werden 8 doodtij-springtij cycli bemonsterd. Gedurende de meetcampagne werden zowel een Akoestische Zandtransportmeter als een Slibmonitor ingezet om het zand- en slibtransport in de omgeving van de Liefkenshoek tunnel te meten (fig. 5.1 en 5.2).

De Slibmonitor werd speciaal voor deze opstelling ontwikkeld en maakt gebruik van de meest recente technische ontwikkelingen van onderwatermetingen. De Slibmonitor meet de temperatuur en de conductiviteit van het water en de turbiditeit op 2 verschillende dieptes. De gemeten grootheden worden opgeslagen in een waterdichte klok en na het ophalen van het meettoestel doorgestuurd naar een personal computer.

Het meetschema kan als volgt worden samengevat :

- elke 10 minuten worden de verschillende grootheden gemeten op vaste begintijden
- voor de AZTM wordt gemeten gedurende 5 minuten met een sample rate van 2 metingen per seconde. Van deze 600 metingen worden de ongeldige meetwaarden geëlimineerd, waarna het gemiddelde en de standaardafwijking worden bepaald en opgeslagen. Alle grootheden worden gemeten op 1m boven de bodem. De sensoren bevinden zich op een diepte van 13.15m-TAW (bodempcil 14.15m-TAW).
- voor de Slibmonitor worden 24 metingen uitgevoerd gedurende 4 minuten. Vervolgens wordt een gemiddelde waarde bepaald en opgeslagen voor verwerking. De turbiditeitsondes bevinden zich op respectievelijk 1m en 3m boven de bodem, de temperatuur- en conductiviteitssonde op 3.5m boven de bodem (bodempcil 11m-TAW).

3.3.2 Meetresultaten

Alle gemeten grootheden werden samengevoegd in een databestand dat moest toelaten dagrapporten te maken. De meetresultaten werden per dag weergegeven (zie fig. 6). Daarnaast werden de onderscheiden grootheden per cyclus doodtij-springtij-doodtij uitgetekend (zie fig. 7).

Uit een visuele beoordeling van de bekomen grafieken volgt een duidelijke variatie van de maximale snelheid met de amplitude van het getij, gekoppeld aan een toename van de zandconcentratie rond springtij. De slibconcentratie is minder sterk gekoppeld aan de doodtij-springtij cyclus, wat ook kan gezegd worden van de saliniteit.

Ook werden getijgemiddelde waarden berekend voor respectievelijk vloed en eb, resulterend in 204 getijgemiddelde observaties. Deze zijn uitgetekend in fig. 8 en samengebracht in onderstaande tabel waarbij het gemiddelde (μ) en de spreiding (σ) voor de volledige meetreeks zijn aangegeven.

Karakteristiek		Vloed		Eb	
		μ	σ	μ	σ
Snelheid	[cm/s]	51.8	6.0	17.2	4.4
Slibconcentratie	[mg/l]	242	140	174	111
Zandconcentratie	[mg/l]	8.1	11.5	6.6	9.3
Temperatuur	[°C]	11.2	3.4	11.1	3.4
Saliniteit	[g/l]	4.92	1.46	5.18	1.59
Amplitude	[m]	4.99	0.79	4.99	0.76

De gemiddelde amplitude die aldus berekend werd (4.99m) komt goed overeen met de amplitude van het gemiddeld getij van de periode 1971-1980 (4.93m) in Liefkenshoek. Deze geringe toename van de amplitude volgt de tendens van stijgende getijvariatiën welke de afgelopen decennia is vastgesteld. Gezien de gemiddelde waarden zo goed overeenstemmen kunnen de gemeten grootheden als representatief beschouwd worden voor het hydraulisch, morfologisch regime ter hoogte van Liefkenshoek.

4 ANALYSE VAN DE MEETRESULTATEN

Het doel van deze analyse is na te gaan hoe de gemeten grootheden variëren gedurende het getij, gedurende de cyclus van springtij naar doodtij, over de breedte, de waterdiepte en ogenblikkelijk.

4.1 OGENBLIKKELIJKE SPREIDING

Tijdens de 13-uursmeting werden de slib- en zandconcentraties om de 20 minuten en op elke meetdiepte in de vertikaal bemonsterd gedurende 120 seconden met een tusseninterval van 0.5 seconden in de meetpunten 1, 2 en 3. Vervolgens werden uit de 240 meetwaarden van de bemonsteringsperiode het gemiddelde (μ) en de spreiding (σ) bepaald. Voor de slibconcentratie worden de bekomen variaties (σ/μ), uitgedrukt in % van het gemiddelde in het meetpunt 0.5m boven de bodem hieronder samengevat : enerzijds wordt de gemiddelde variatie over de ± 30 metingen van de volledige meetreeks weergegeven, anderzijds de maximale variatie welke in de reeks werd opgemeten.

Meetpunt Tunnelsectie	Variatie σ/μ [%]	1 34	2 55	3 66
Slibconcentratie (bodem + 0.5m)	gemid.	4.6	6.3	6.0
	max	24.9	41.1	27.0
	spreiding	7.0	7.0	7.6

Uit deze tabel kan worden afgeleid dat een ogenblikkelijke aflezing van de slibconcentratie op basis van de turbiditeitsmeter een afwijking kan geven van gemiddeld 6% en gaande tot 25 à 40 %.

4.2 VARIATIE GEDURENDE HET GETIJ

De stroom- en sedimentkarakteristieken variëren onmiskenbaar gedurende het getij. Het kwantificeren van deze variaties en het vastleggen van de onderlinge verbanden blijft evenwel een moeilijke opgave, en de resulterende verbanden en wetmatigheden zullen steeds vatbaar blijven voor verbetering. Deze verbeteringen zijn nochtans slechts mogelijk naarmate meer homogene meetgegevens verzameld worden. Voor de 13-uursmeting van 25/01/89 wordt de variatie van de dieptegemiddelde snelheid, slib- en zandconcentratie weergegeven in fig. 4.1 en 4.2, terwijl in onderstaande tabel het gemiddelde en het maximum van de gemeten grootheden respectievelijk tijdens eb en vloed worden samengevat.

Meetpunt Tunnelsectie		1 34	2 55	3 66	4 AFW	5 OPW
Gem. snelheid [m/s]	EB-gem	.70	.81	.86	.60	.87
	max	.89	1.04	1.21	.92	1.32
	VL-gem	.81	.77	.73	.77	.74
	max	1.31	1.49	1.32	1.22	1.27
Gem. slibconc. [mg/l]	EB-gem	231	223	182	259	88
	max	281	332	271	365	347
	VL-gem	415	236	323	269	644
	max	580	414	689	361	>1250
Gem. zandconc. [mg/l]	EB-gem	55	78	43	-	-
	max	109	152	90	-	-
	VL-gem	43	77	74	-	-
	max	110	218	217	-	-

Ook gedurende de langdurige meting werd getracht om de variatie gedurende het getij te kunnen kwantificeren. Daartoe werden alle waarnemingen ingedeeld in klassen van 10 minuten t.o.v. hoogwater. Voor elke klasse werd vervolgens het gemiddelde, de spreiding, het minimum en het maximum van de snelheid, de slibconcentratie en de zandconcentratie bepaald. Dergelijke berekeningen werden niet uitgevoerd voor de saliniteit en de temperatuur omwille van de langdurige variaties waarop de getijvariaties gesuperponeerd zijn. De bekomen resultaten zijn weergegeven in fig. 9.1, 9.2 en 9.3.

De snelheid vertoont een piek ongeveer 45 minuten voor hoogwater (tijdens de vloed), terwijl gedurende de eb de snelheid ongeveer een factor 3 kleiner is, vrij blokvormig is en slechts een geringe piek vertoont ongeveer 2u30 na hoogwater. De slibconcentratie vertoont een dubbel maximum tijdens de vloed (3u respectievelijk 0u30 voor hoogwater), en een even sterk maximum 2u30 na hoogwater. Tijdens de kenteringen is de slibconcentratie niet maximaal. De zandconcentratie vertoont drie pieken die samenvallen met het versnellend gedeelte van het getij (3u en 0u30 voor HW en 2u30 na HW).

4.3 VARIATIE OVER DE DWARSSECTIE

De gemeten grootheden variëren over de dwarssectie : tijdens de vloed is het effect van de bocht ter hoogte van Liefkenshoek duidelijk merkbaar. Ter illustratie worden in figuur 10.1 en 10.2 de snelheid en de zandconcentratie uitgezet voor de 3 meetpunten. Hieruit blijkt dat de eb meer uitgesproken onder de rechteroever stroomt en de vloed meer onder de linkeroever. Het slib is vrij homogeen verspreid tijdens de eb (weliswaar met een lichte verhoging van de slibconcentratie van rechter-naar linkeroever toe. De gemeten zandconcentratie is gedurende het volledige getij het grootst in het midden van de Schelde met een opvallende kleine concentratie onder de linkeroever tijdens de vloed en langs rechteroever gedurende de eb. Rekening houdend met de bijhorende snelheden vertaalt dit zich in een beperkt zandtransport onder de linkeroever en een uitgesproken transport in het midden van de Schelde.

4.4 VARIATIE VAN DE SNELHEID OVER DE VERTIKAAL

Bij een nadere evaluatie van de snelheids- en concentratievertikalen (zie fig. 11) valt op dat tijdens eb en vloed de snelheidsvertikalen vervormd zijn. Aan het oppervlak is een zeewaartse component en aan de bodem een landwaartse component waarneembaar. Dit veroorzaakt bij de bodem tijdens vloed een verhoogde en tijdens eb een verlaagde snelheidsgradiënt t.o.v. de theoretische logarithmische snelheidsvertikaal. Dit is in overeenstemming met de ook tijdens de meting van 28 april 1987 geconstateerde dichtheidsinvloed. Uitgaande van een theoretische (logarithmische) snelheidsvertikaal kan de verhouding berekend worden tussen de oppervlaktesnelheid en de vertikaalgemiddelde snelheid :

$$v_{\text{opp}} / v_{\text{gem}} \approx 1.11$$

In onderstaande tabel wordt deze verhouding uitgerekend voor de verschillende meetpunten, waaruit het gemiddelde gedurende eb en vloed berekend is, gekoppeld aan de procentuele afwijking t.o.v. het theoretisch logarithmisch profiel.

Meetpunt		1	afw. [%]	2	afw. [%]	3	afw. [%]
$v_{\text{opp}} / v_{\text{gem}}$	EB	1.24	+12	1.20	+8	1.22	+10
	VL	0.90	-18	0.92	-17	1.17	+5

De invloed van dit gewijzigd snelheidsprofiel op de bodemschuifspanning resulteert in een gewijzigde verdeling van de zandconcentratie. Tijdens de eb is de concentratievertikaal driehoekiger d.w.z. bovenin voller in vergelijking met de vloed waarbij vooral bij de bodem sterk gepiekt is.

4.5 VARIATIE MET DE GETIJAMPLITUDE

In de grafieken in fig. 6, 7 en 8 werd reeds geïllustreerd dat de verschillende karakteristieken variëren gedurende de cyclus doottij-springtij-doottij. Deze koppeling aan de getijamplitude werd verder onderzocht door de getijgemiddelde gegevens uit §3.2.2 te groeperen volgens doot-, gemiddeld en springtij, en voor elk van deze groepen opnieuw het gemiddelde (μ) en de spreiding (σ) te bepalen.

Karakteristiek		Vloed μ σ		Eb μ σ	
DOODTIJ					
Snelheid	[cm/s]	46.4	5.6	15.8	5.5
Slibconcentratie	[mg/l]	126	66	100	57
Zandconcentratie	[mg/l]	1.5	2.2	0.9	2.2
Saliniteit	[g/l]	4.75	1.59	4.96	1.79
GEMIDDELD GETIJ					
Snelheid	[cm/s]	52.4	4.8	17.6	3.8
Slibconcentratie	[mg/l]	272	115	180	94
Zandconcentratie	[mg/l]	8.6	12.2	6.2	6.7
Saliniteit	[g/l]	5.06	1.38	5.33	1.57
SPRINGTIJ					
Snelheid	[cm/s]	55.7	4.4	17.7	4.0
Slibconcentratie	[mg/l]	311	165	242	136
Zandconcentratie	[mg/l]	13.4	12.6	12.4	12.8
Saliniteit	[g/l]	4.87	1.49	5.12	1.40

Opvallend hierin is dat de snelheid nagenoeg op dezelfde wijze varieert als de getijamplitude, terwijl slib- en zandconcentratie sterker verminderen tijdens doodtij en in grotere mate toenemen tijdens springtij.

5

BESLUITEN EN AANBEVELINGEN

Vooraleer "werken" te kunnen ontwerpen of uitvoeren, is het nodig de huidige toestand nauwkeurig te kennen en de wetten te kennen die toelaten de invloed van een menselijke ingreep (indijking, baggerwerken, normalisatie, kanalisatie...) te voorspellen.

Gezien de enorme investeringen die zulke werken vergen, is een zorgvuldige studie aangewezen.

*Waterloop- en Waterbouwkunde
Prof. dr. ir. J. Berlamont*

Het morfologisch onderzoek dat werd uitgevoerd in het kader van de studie en de opvolging van belangrijke werken in de Schelde zijn een noodzaak om dergelijke projecten met gunstig resultaat te kunnen verwezenlijken. Meer specifiek kan worden gesteld dat **mathematische modellen een belangrijk instrument** zijn in het bestuderen van verschillende opties voor de bouw van de constructie en voor het inschatten van een aantal risico's. Een uitermate belangrijke voorwaarde hiertoe is dat deze modellen moeten **afgeijkt** worden en gevalideerd worden op basis van **voldoende en kwalitatief hoogstaande gegevens**. Ter illustratie wordt aangehaald dat de schaarste aan gegevens met betrekking tot het sedimentregime in de Schelde ter hoogte van Liefkenshoek werd omgezet in een stevig gevuld dossier, bestaande uit niet minder dan 11 stroom- en sedimentmetingen en een langdurige meting van snelheid, zand- en slibconcentratie en saliniteit.

In een ruimer kader wordt benadrukt dat de gemeten stroom- en sedimentgegevens uitnodigen tot een verdere analyse. Van even groot belang is de zorg om de kwaliteit van ons leefmilieu, een zuivere kennis van de slibproblematiek i.v.m. de Waterverdragen met Nederland en i.v.m. de internationale bepalingen inzake de bescherming van de Noordzee tegen toenemende verontreinigingsdruk. Een nauwkeurige inventarisatie van de slibtransporten in de Schelde is hierbij van primordiaal belang. Voorwaarde daartoe blijft evenwel dat de nodige middelen worden vrijgemaakt om de gestarte meetreeks aan te vullen met een serie continue metingen van slib- en milieutechnische parameters op diverse plaatsen langs de Schelde.

6 DANKWOORD

De aangehaalde gegevens werden verzameld en geanalyseerd in opdracht van de T.V. De Meyer - Van Laere - Betonac, welke ook instemde met de publicatie ervan. IMDC dankt de verantwoordelijke ingenieurs van de Tijdelijke Vereniging, van de Projectleiding en het Bestuur der Waterwegen en alle medewerkers van de Natte Werkgroep ad hoc voor de stimulerende discussies tijdens de talrijke vergaderingen.

Literatuurlijst

- 1.1 Stabiliteitsberekening van het talud voor een sleuf in de Schelde.
IMDC.
Rapport 118-88.02.01.
- 1.2 Tunnel Liefkenshoek, Onderzoek betreffende de morfologische factoren.
IMDC.
Rapport 130-88.09.03.
- 1.3 Tunnel Liefkenshoek, Onderzoek betreffende de morfologische factoren (2D).
Deelrapport 1 en samenvatting.
IMDC.
Rapport 132-89.04.04, 132-89.04.05.
- 1.4 Tunnel Liefkenshoek, Onderzoek betreffende de morfologische factoren (2D).
Stroom- en sedimentmeting van 25/01/89.
IMDC.
Rapport 138-89.10.01, 138-89.10.02.
- 1.5 Tunnel Liefkenshoek, Onderzoek betreffende de morfologische factoren (2D).
Langdurige stroom- en sedimentmeting.
IMDC.
Rapport 138-89.11.06.
- 1.6 Tunnel Liefkenshoek, Onderzoek betreffende de morfologische factoren (2D).
Analyse stroom- en sedimentmetingen.
IMDC.
Rapport 138-90.11.05.
- 1.7 Tunnel Liefkenshoek, Opvolging der bagger- en aanvulwerkzaamheden,
Wetenschappelijk Onderzoek. Eindrapport.
IMDC.
Rapport 142-91.05.01.
- 1.8 Optimalisatie van de onderhoudsbaggerwerken in de toegangsgeul tot de
Kallosluis. Eindrapport.
IMDC.
Rapport 906-88.01.02.
- 1.9 Gecontroleerde capping onder het Doeldok. Eindrapport.
IMDC.
Rapport 119-90.02.01.
- 1.10 Toegangsgeul Zandvliet - Berendrecht. Meetcampagne t.b.v. de Baggerwer-

- ken.
IMDC.
Rapport 922-90.03.02.
- 1.11 Containerkaai Noord. Hydraulisch onderzoek. Eindrapport.
IMDC.
Rapport 1146-91.12.06.
- 2.1 Twedimensionaal numeriek stromingsmodel van het Continentaal Plat van de Noordzee.
D. Moelans, R. De Bruyn.
28-hy-10, 1986.
- 2.2 Zeeschelde, stroomsnelheids- en debietmetingen Liefkenshoek, 28 april 1987.
Ministerie van Openbare Werken, Bestuur der Waterwegen, Antwerpse Zeediensten.
Verslag nr. AZ.87.3, november 1987.
- 2.3 Stroomdrijvingen - Drempel van Lillo,
10 juni 1987 - vloed, 17-18 juni 1987 - eb.
Ministerie van Openbare Werken, Bestuur der Waterwegen, Antwerpse Zeediensten.
Verslag nr. C3.9460.
- 2.4 River Scheldt Surge Barrier, Study of estuary sediments.
Hydraulics Research.
Report EX 928, 1980.
- 2.5 Containerkaai Noord. Hydraulisch en sedimentologisch onderzoek. Deelrapporten 1a, 1b, 2a, 2b. Stroom- en sedimentmetingen van 27/09/90 en 04/10/90.
Studieconsortium IMDC-WLB.
Rapporten 1166.92.01.02-05.
- 2.6 Sternberg R.W., Instrumentation for estuarine research, Journ. of Geophysical Res., Vol. 94., No. C10, pp 14289-14301, 1989.
- 2.7 Van Rijn L.C., Schaafsma A.S., Evaluation of measuring instruments for suspended sediment, Int. Conf. on measuring Techniques of Hydraulics Phenomena in Offshore, Coastal & Inland Waters, London, 1986.
- 2.8 Schaafsma A.S., der Kinderen W.J.G.J., Ultrasonic instruments for the continuous measurement of suspended sand transport, Measuring Techniques in Hydraulic Research, Delft, 1985.
- 2.9 Salkield A.P., Legood G.P. and Soulsby R.L., Impact sensor for measuring suspended sand concentration, Conf. on Electronics for Ocean Technology, Birmingham, 1981.
- 2.10 Akoestische Zandtransportmeter, type AZTM-1, Handboek, Waterloopkundig Laboratorium, Delft, 1983.
- 3.1 Burt T.N., Stevenson J.R., Monitoring cohesive sediment transport in estuaries, Int. Conf. on measuring Techniques of Hydraulics Phenomena in Offshore, Coastal & Inland Waters, London, 1986.

MESH VAN HET VOLLEDIG MODELGEBIED
MET INBEGRIIP VAN DE INSTEKEN ONDER DE OEVERS

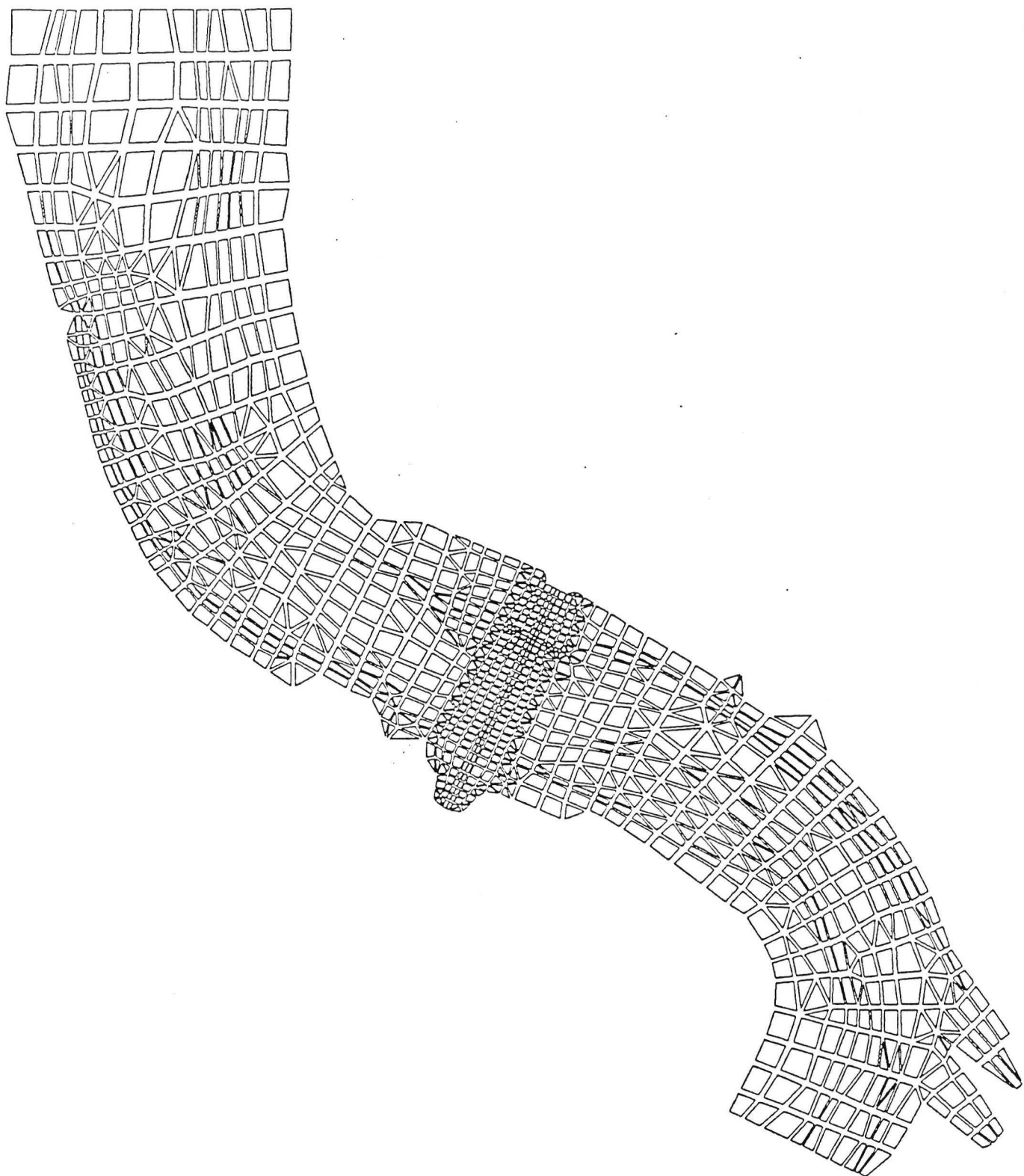


FIG. 1

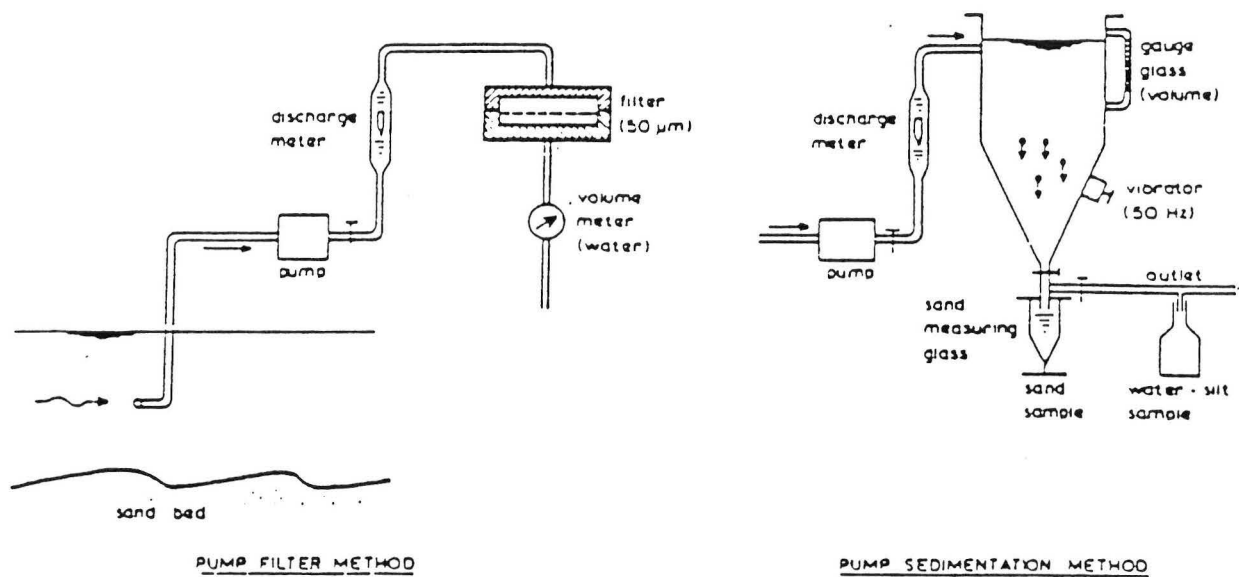


FIG. 2 POMPSYSTEMEN VOOR GESUSPENDEERD SEDIMENT

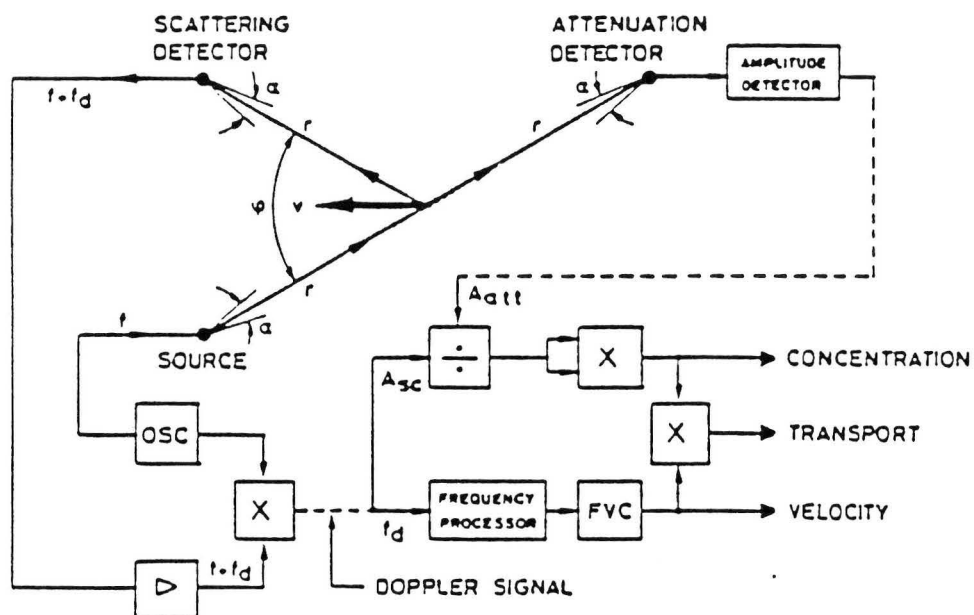


FIG. 3 MEETPRINCIPE VAN DE AZTM

LIEFKENSHOEKTUNNEL : WETENSCHAPPELIJK ONDERZOEK

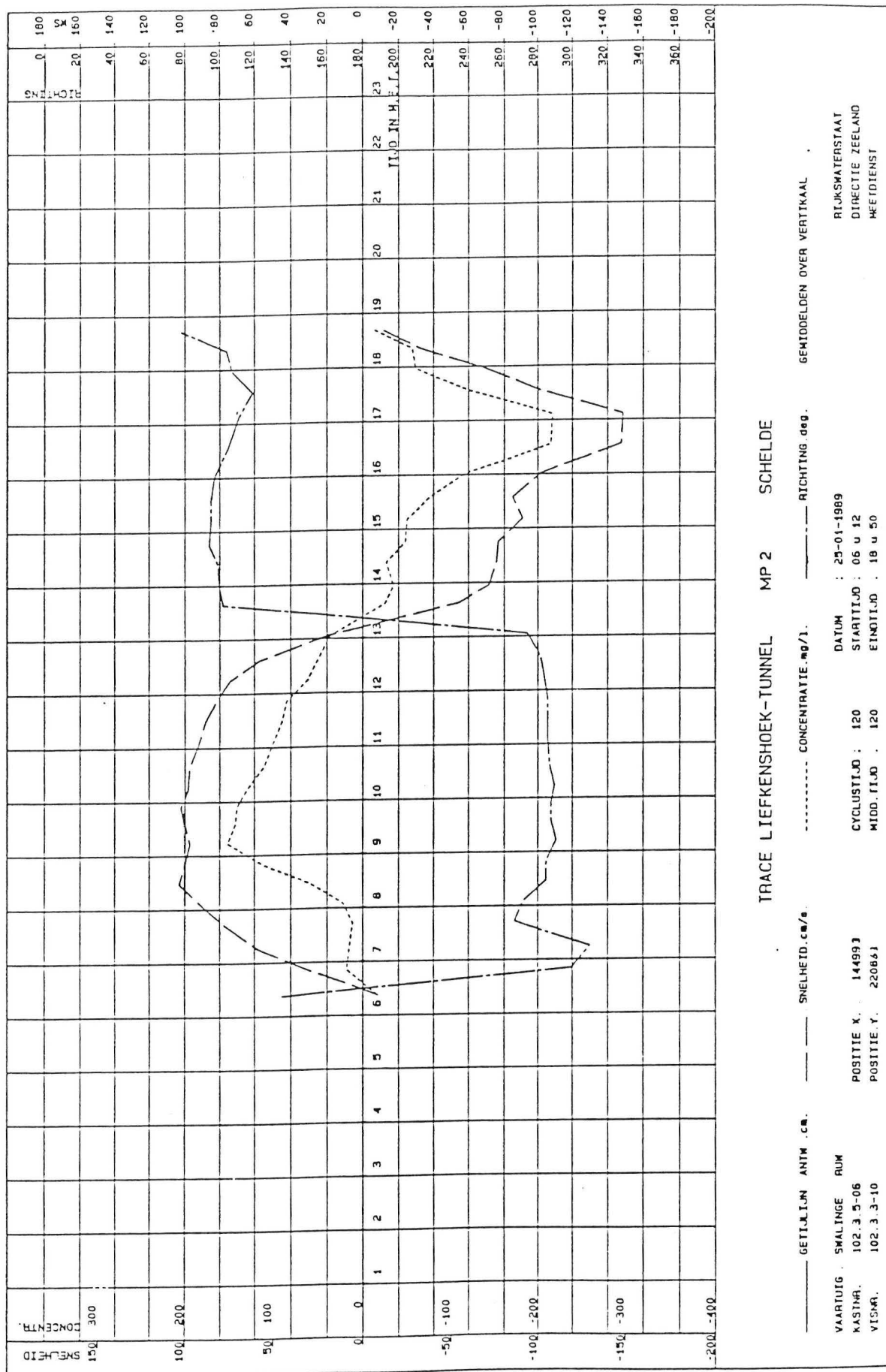


FIG. 4.1

LIEFKENSHOEKTUNNEL : WETENSCHAPPELIJK ONDERZOEK

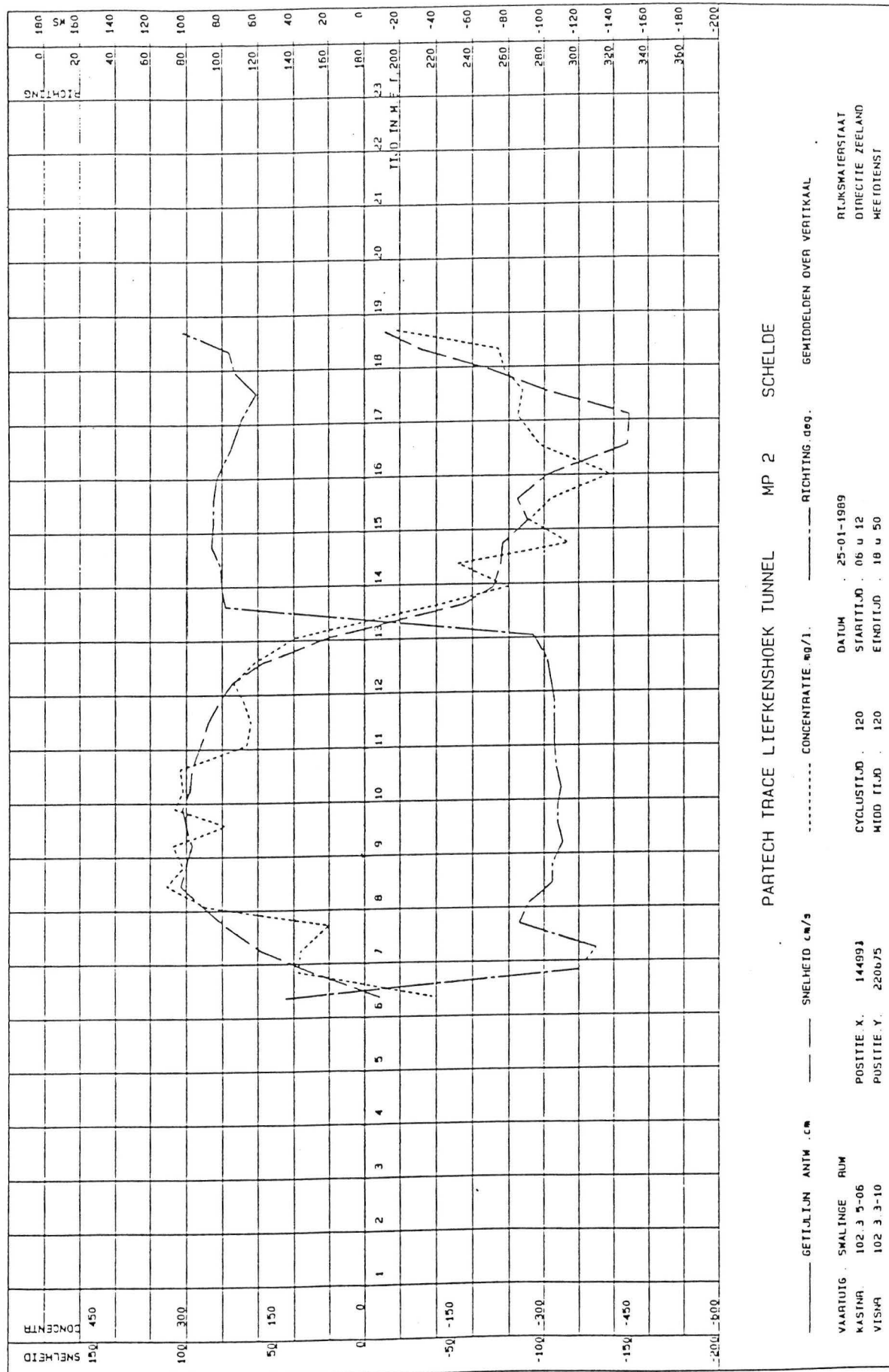


FIG. 4.2

AKOESTISCHE ZANDTRANSPORTMETER

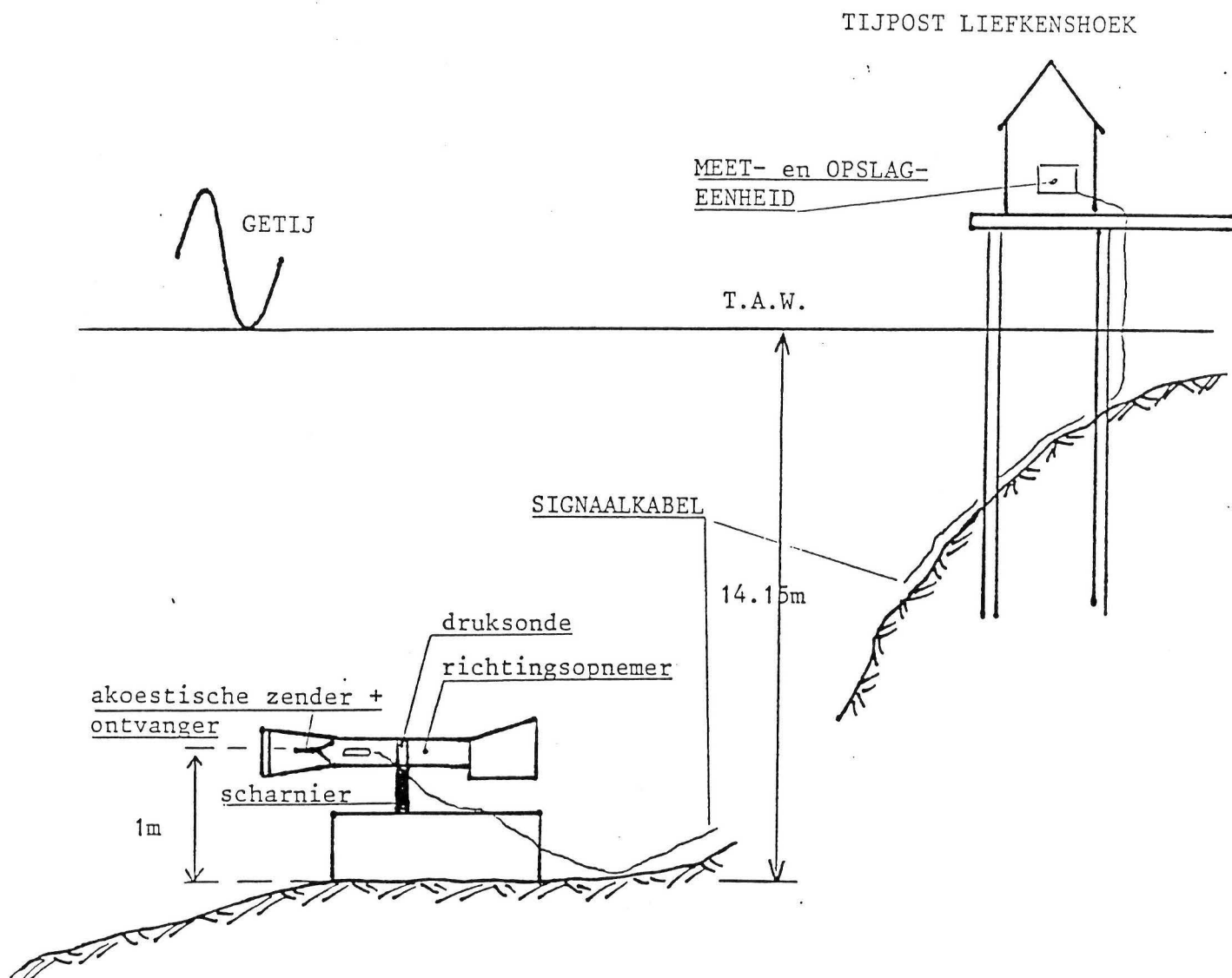


FIG. 5.1

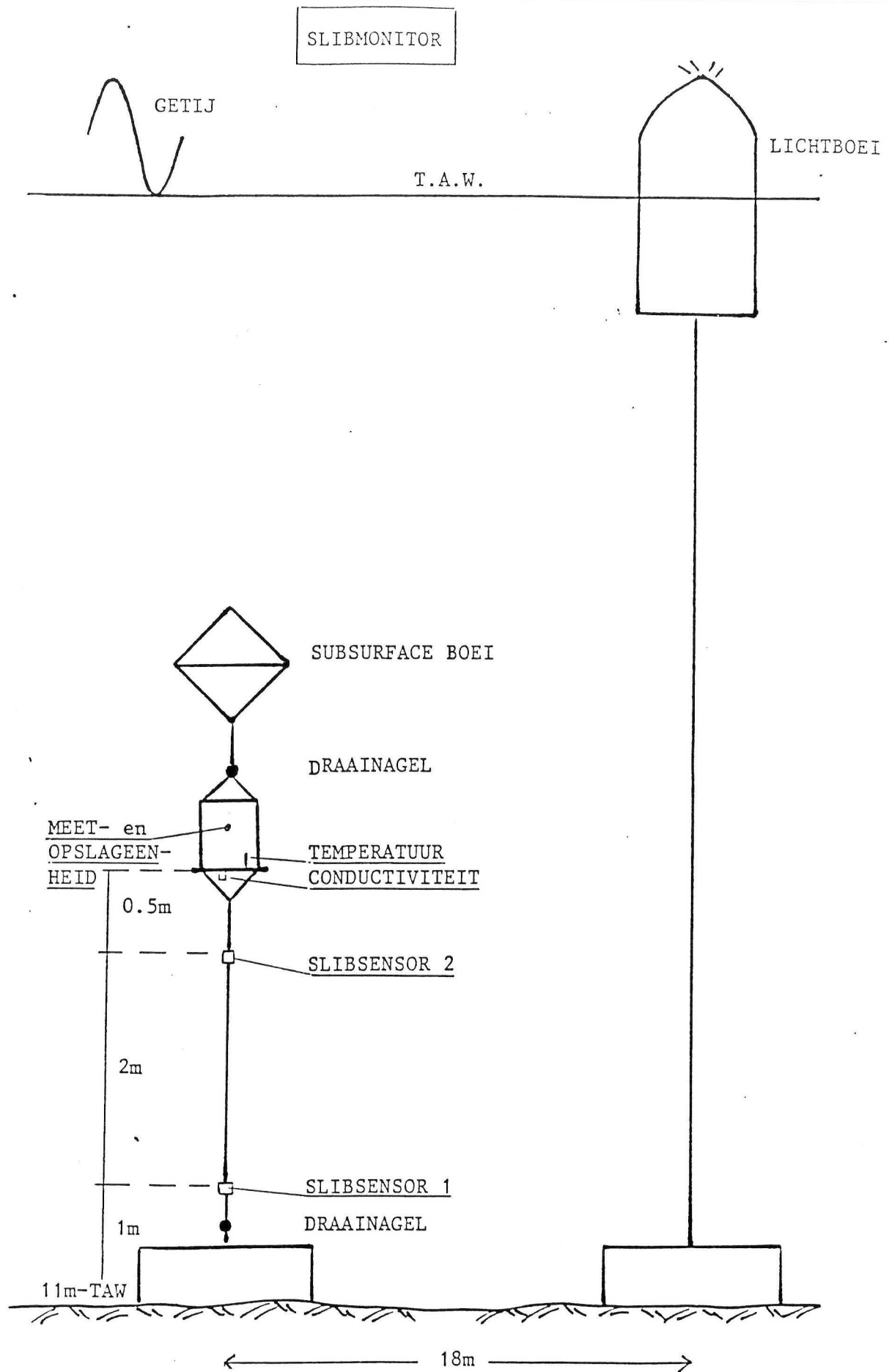


FIG. 5.2

STROOM- EN SEDIMENTMETING 08/03/89

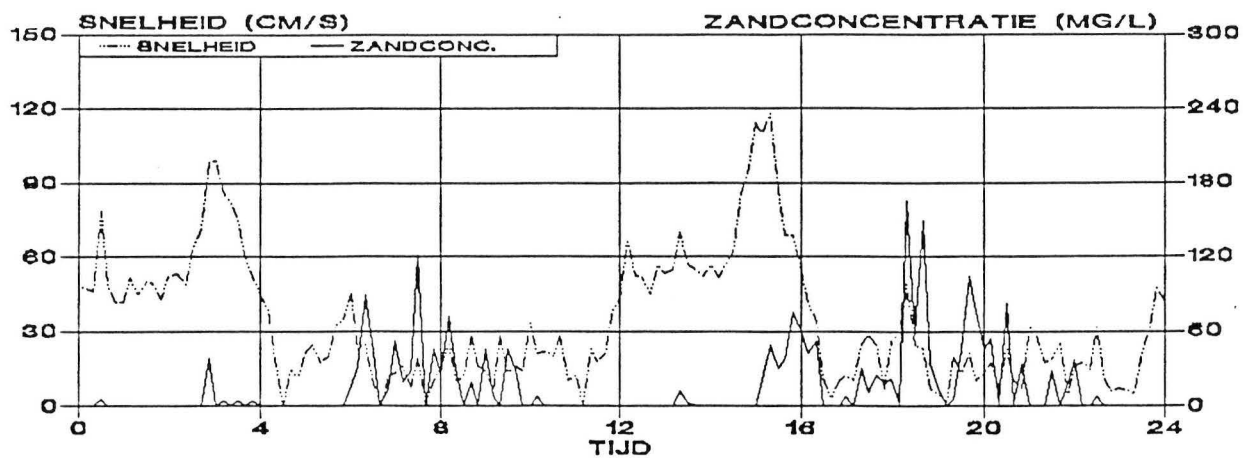
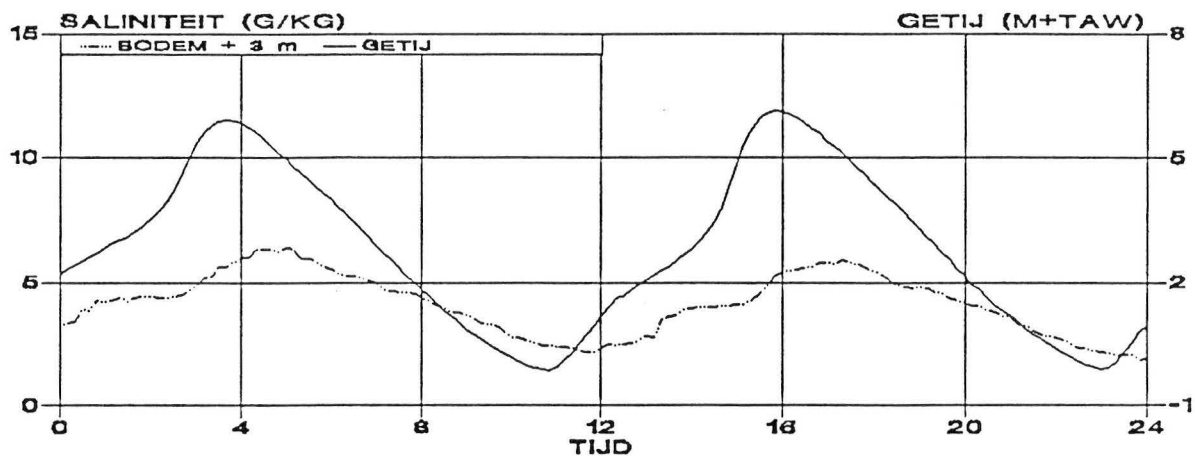
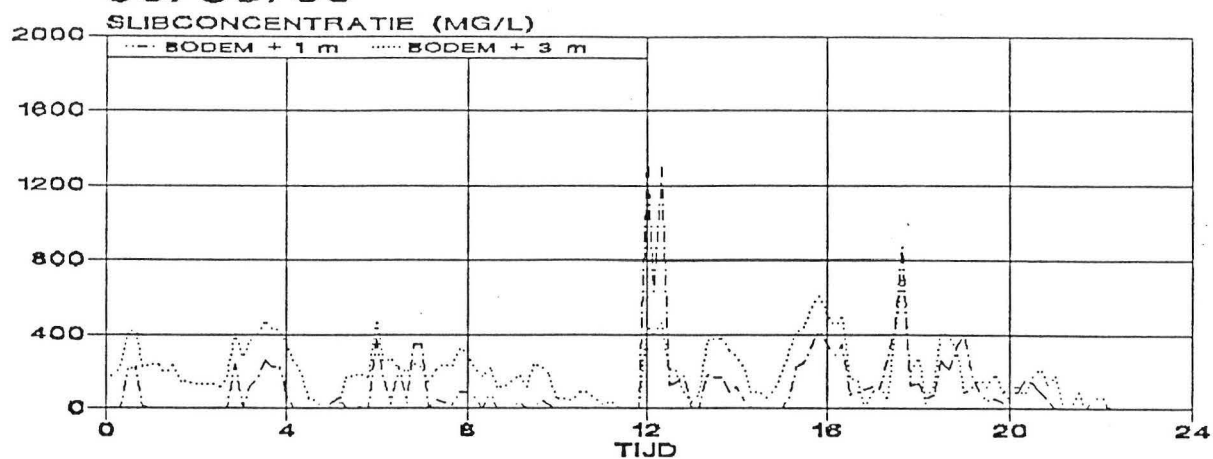
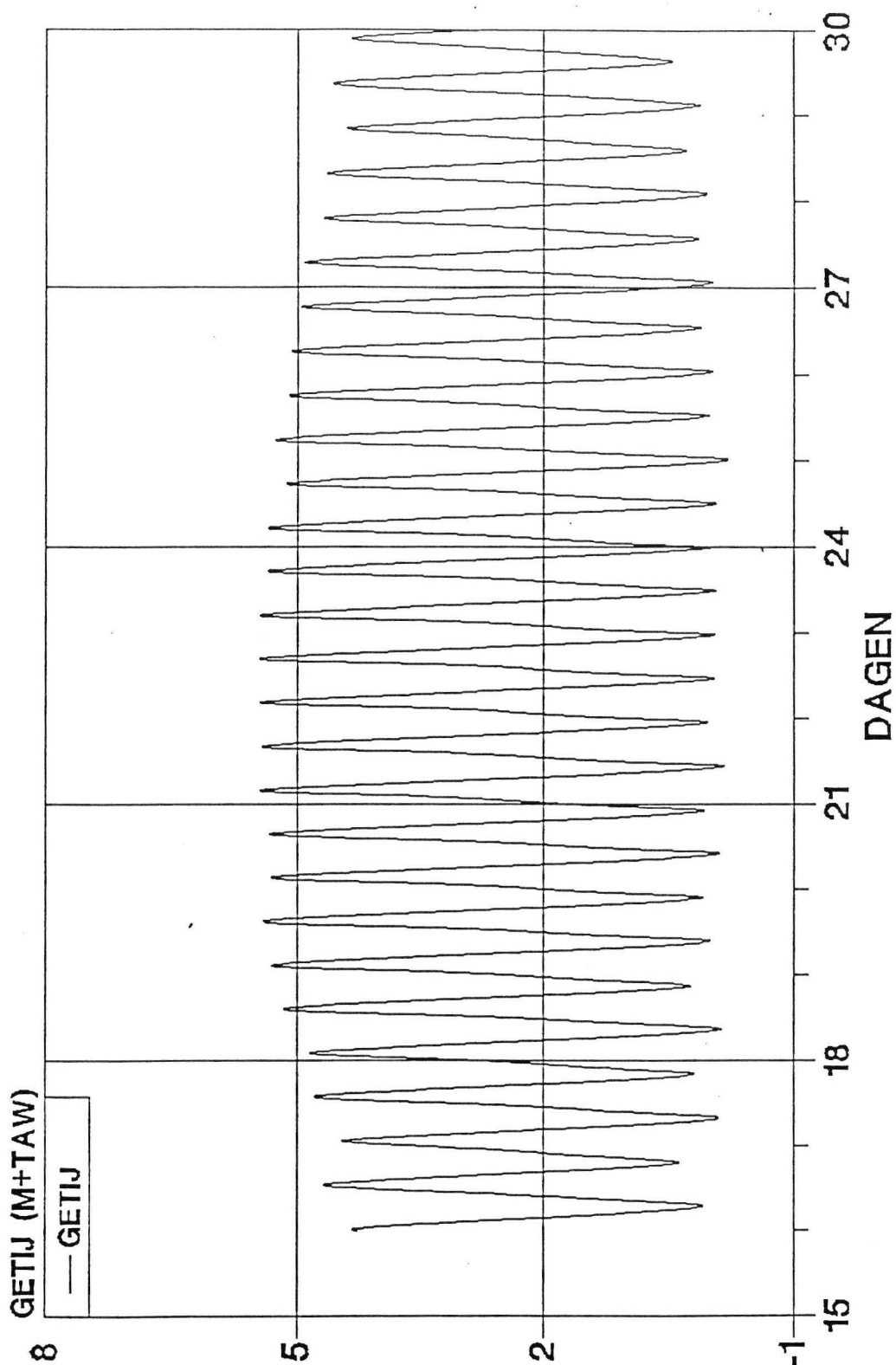


FIG. 6

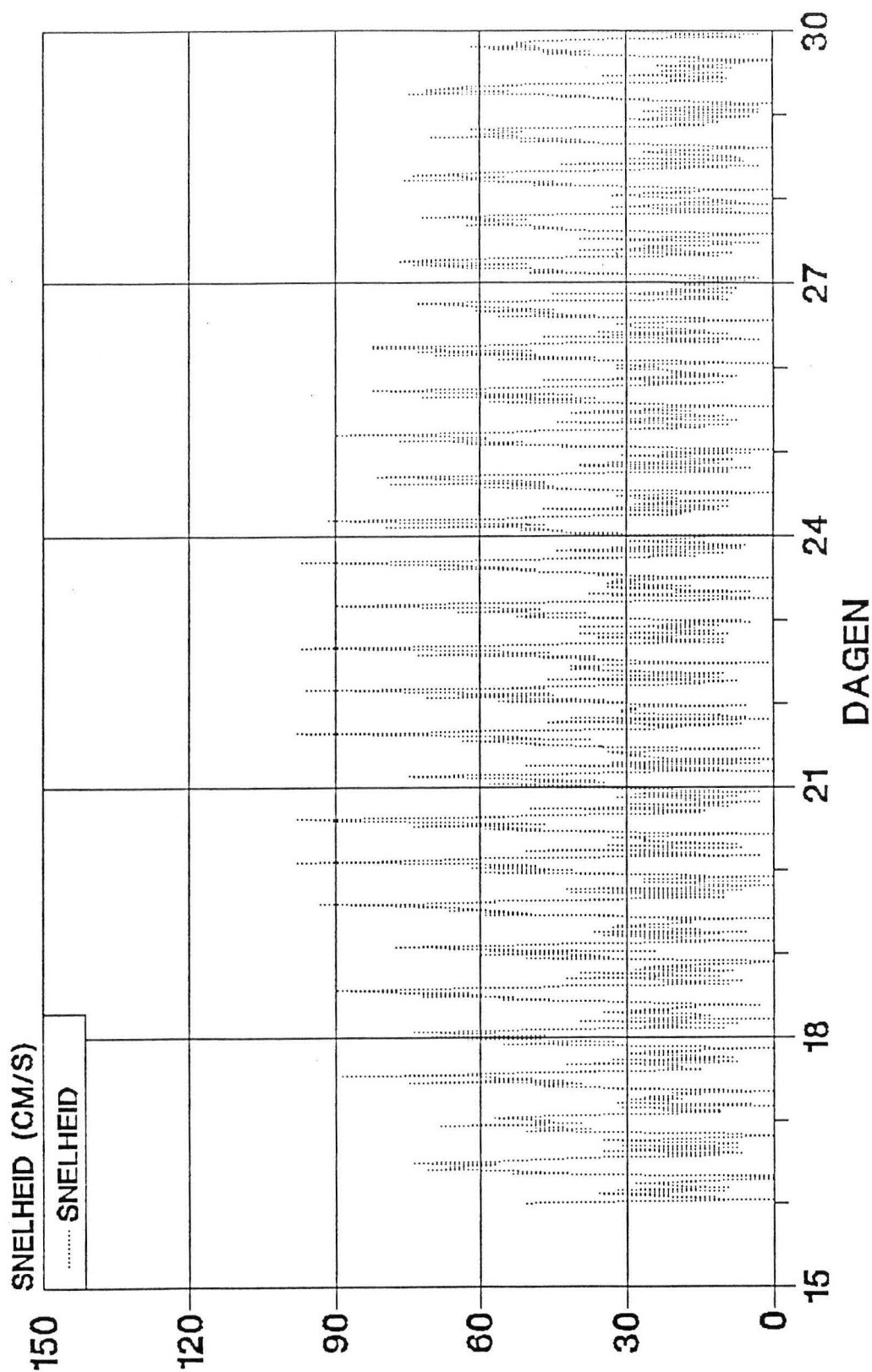
STROOM- EN SEDIMENTMETING 16/04/89 TOT 29/04/89



23/04/89 17h11 : SPRINGTIJ

FIG. 7.1

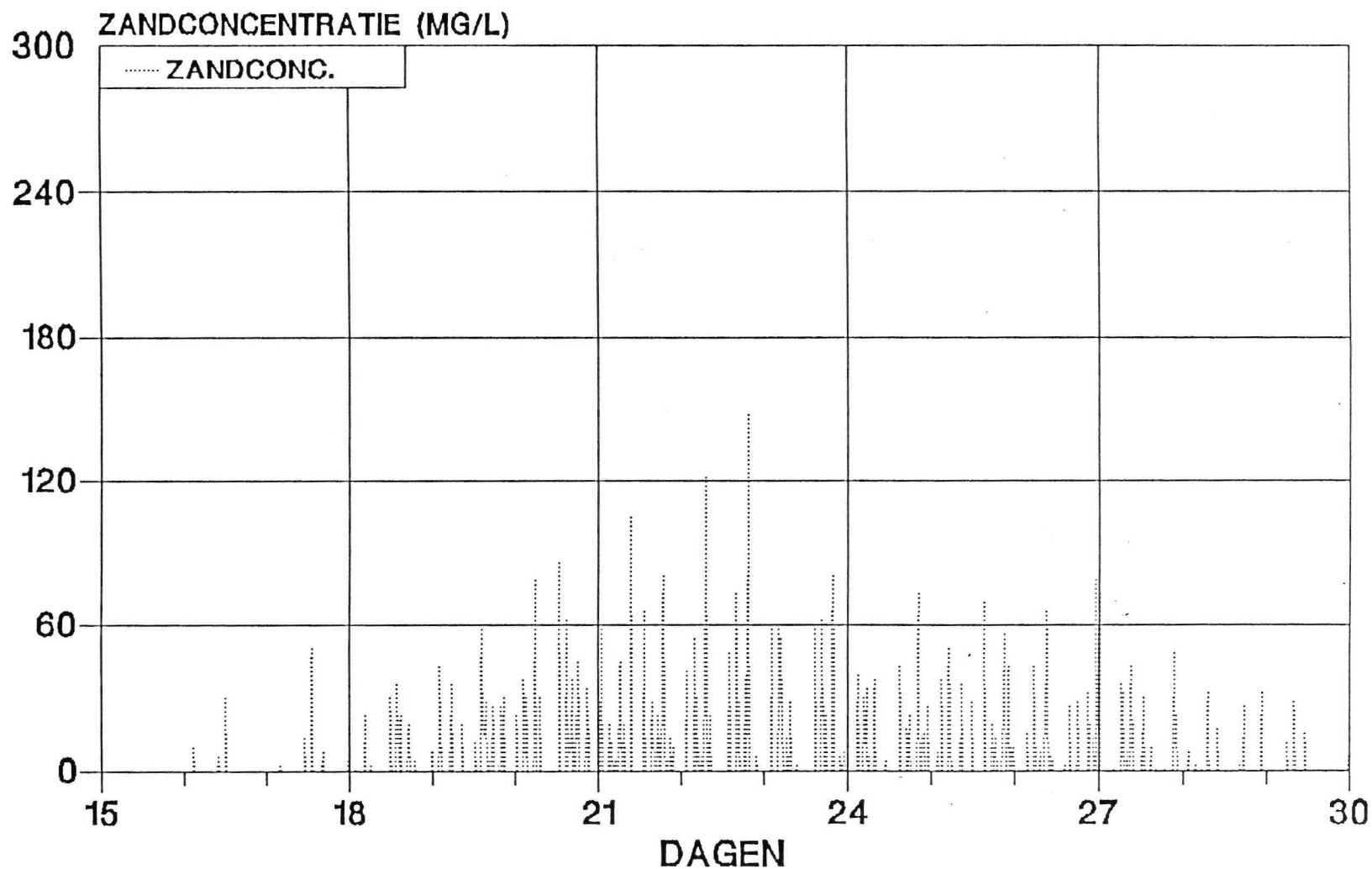
STROOM- EN SEDIMENTMETING 16/04/89 TOT 29/04/89



23/04/89 17h11 : SPRINGTIJ

FIG. 7.2

STROOM- EN SEDIMENTMETING 16/04/89 TOT 29/04/89



23/04/89 17h11 : SPRINGTIJ

FIG. 7.3

STROOM- EN SEDIMENTMETING

JANUARI '89 - MEI '89

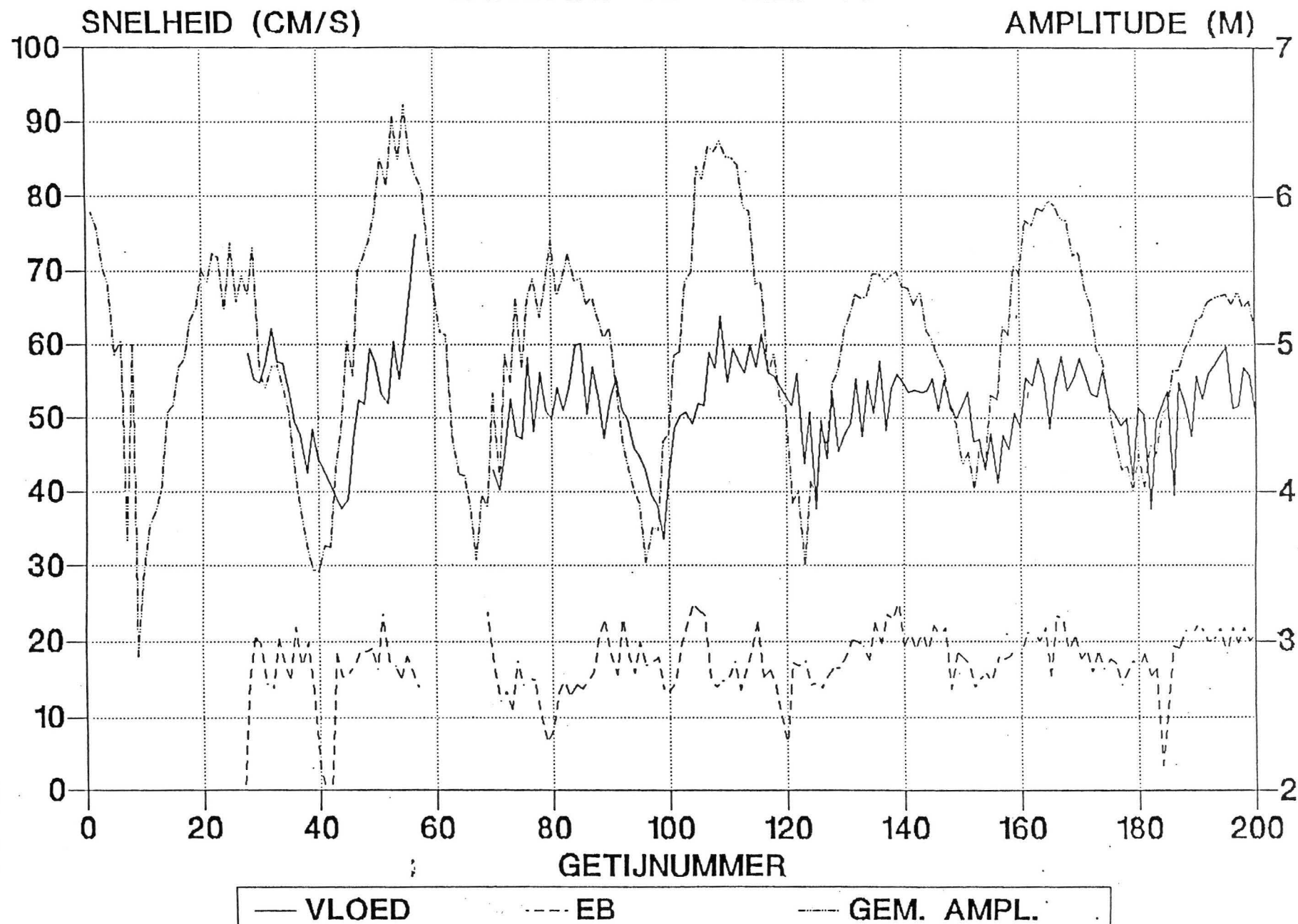


FIG. 8.1

STROOM- EN SEDIMENTMETING

JANUARI '89 - MEI '89

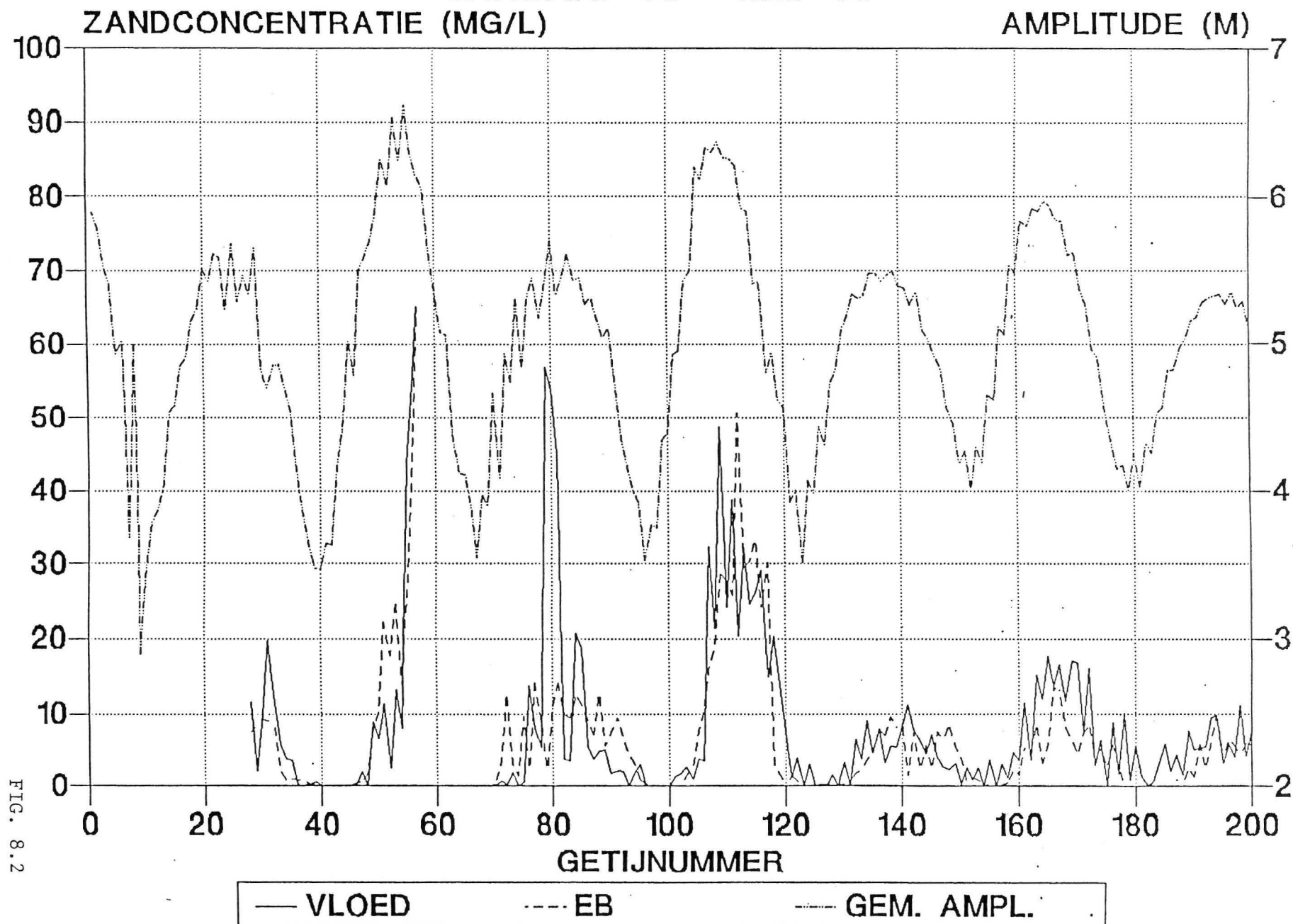


FIG. 8.2

STROOM- EN SEDIMENTMETING

JANUARI '89 - MEI '89

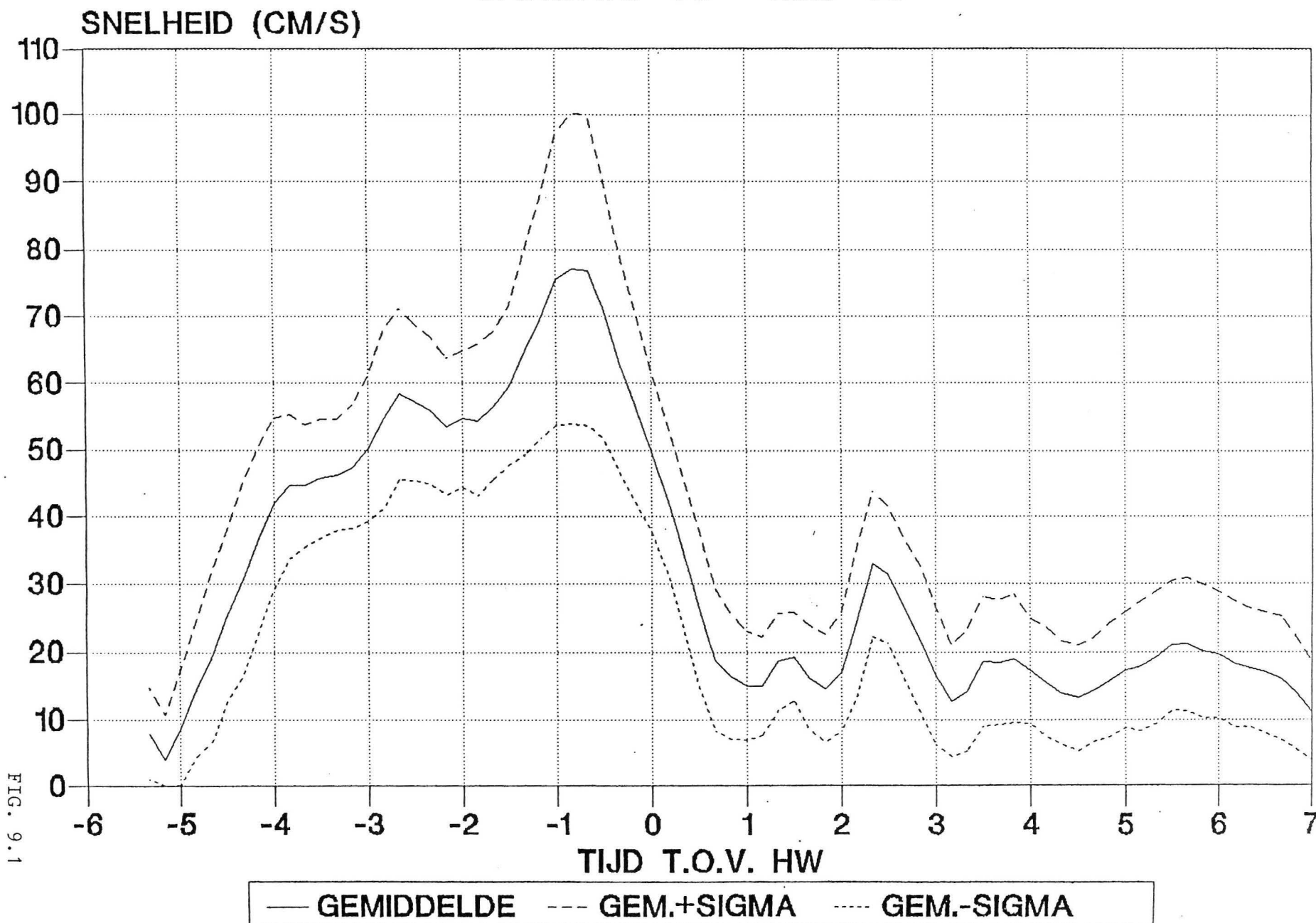
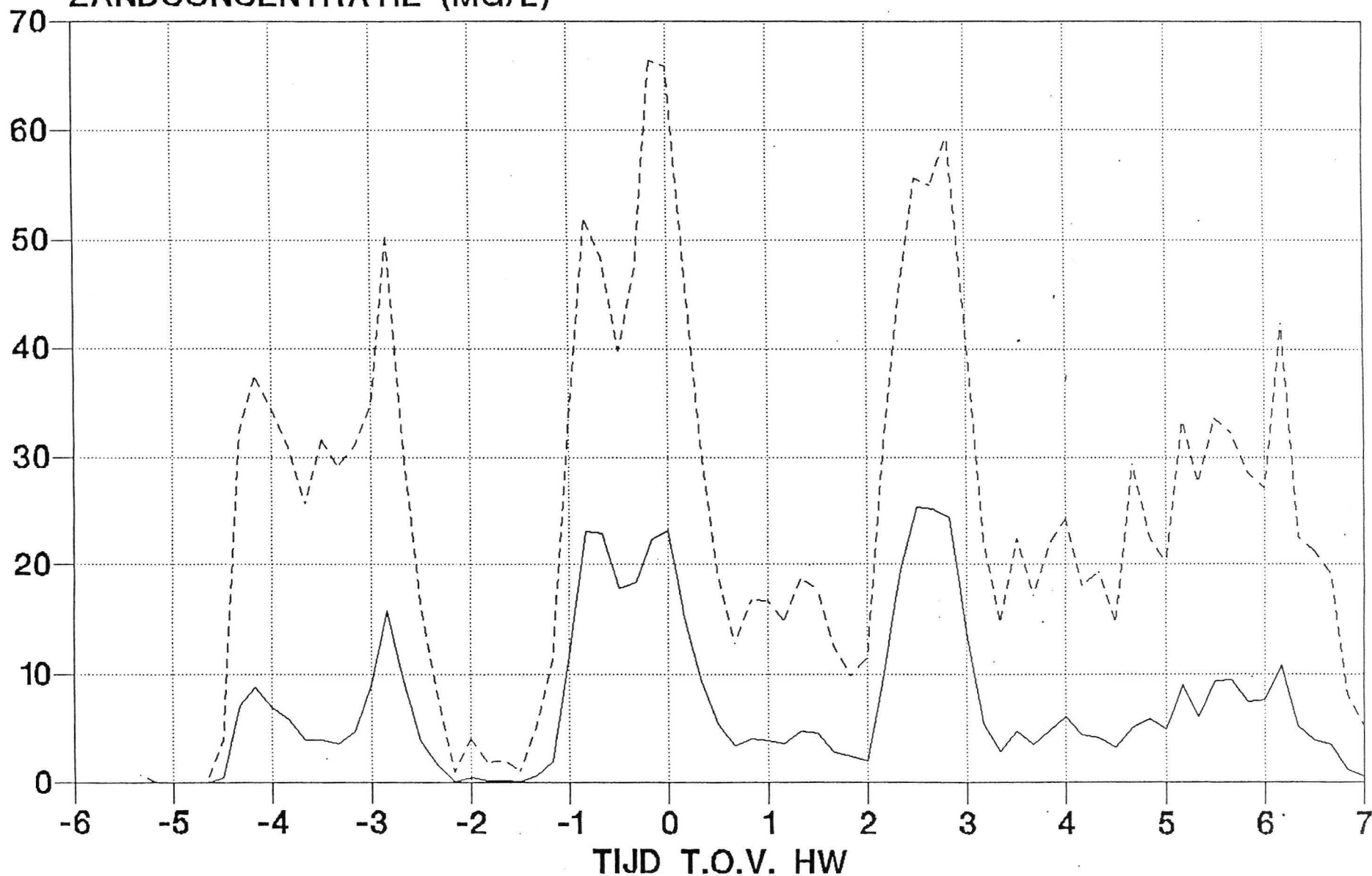


FIG. 9.1

STROOM- EN SEDIMENTMETING

JANUARI '89 - MEI '89

ZANDCONCENTRATIE (MG/L)



— GEMIDDELDE --- GEM.+SIGMA GEM.-SIGMA

FIG. 9.2

LIEFKENSHOEKTUNNEL

Morfologisch onderzoek

DE MEYER
VAN LAERE

STROOM- EN SEDIMENTMETING

JANUARI '89 - MEI '89

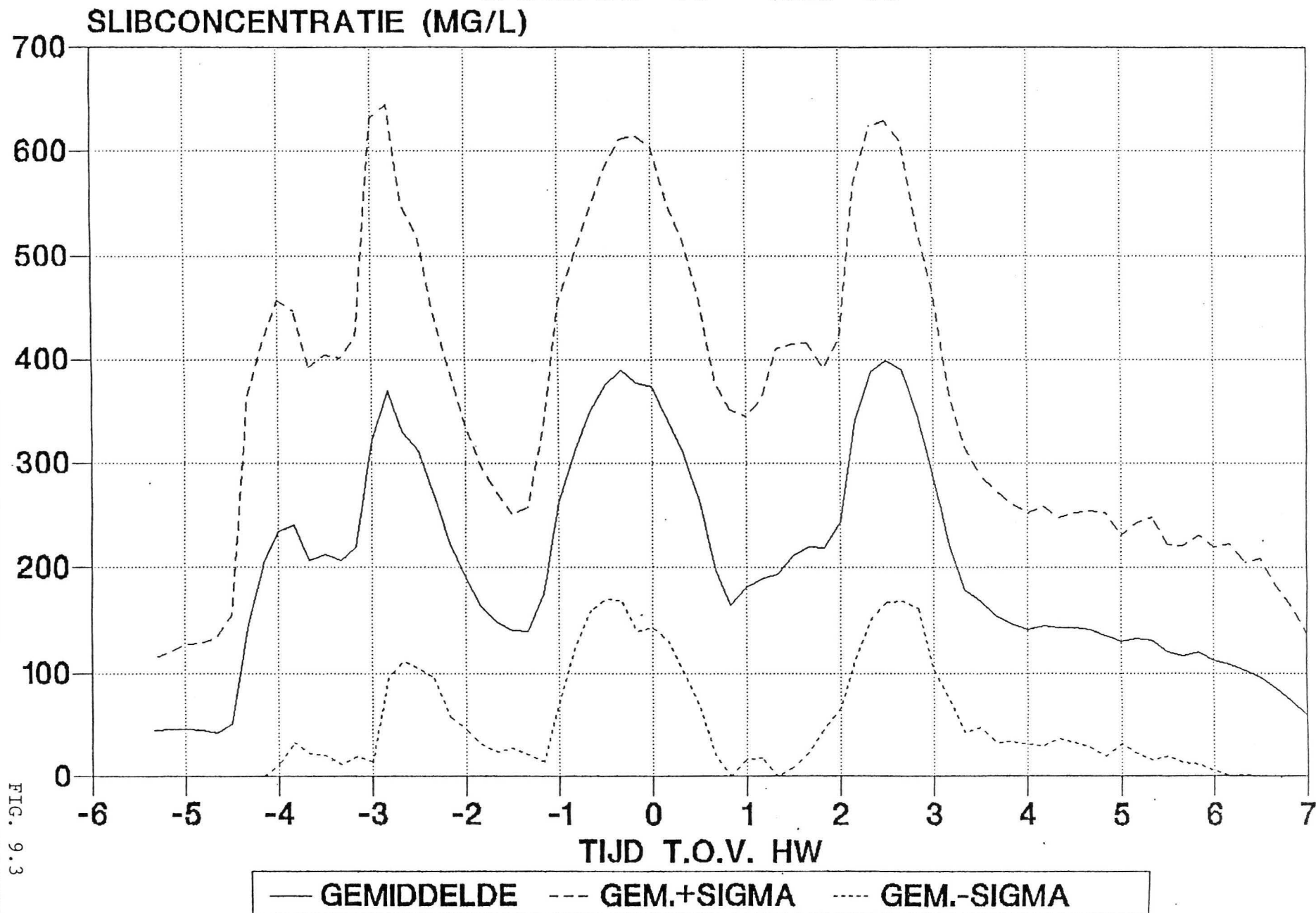


FIG. 9.3

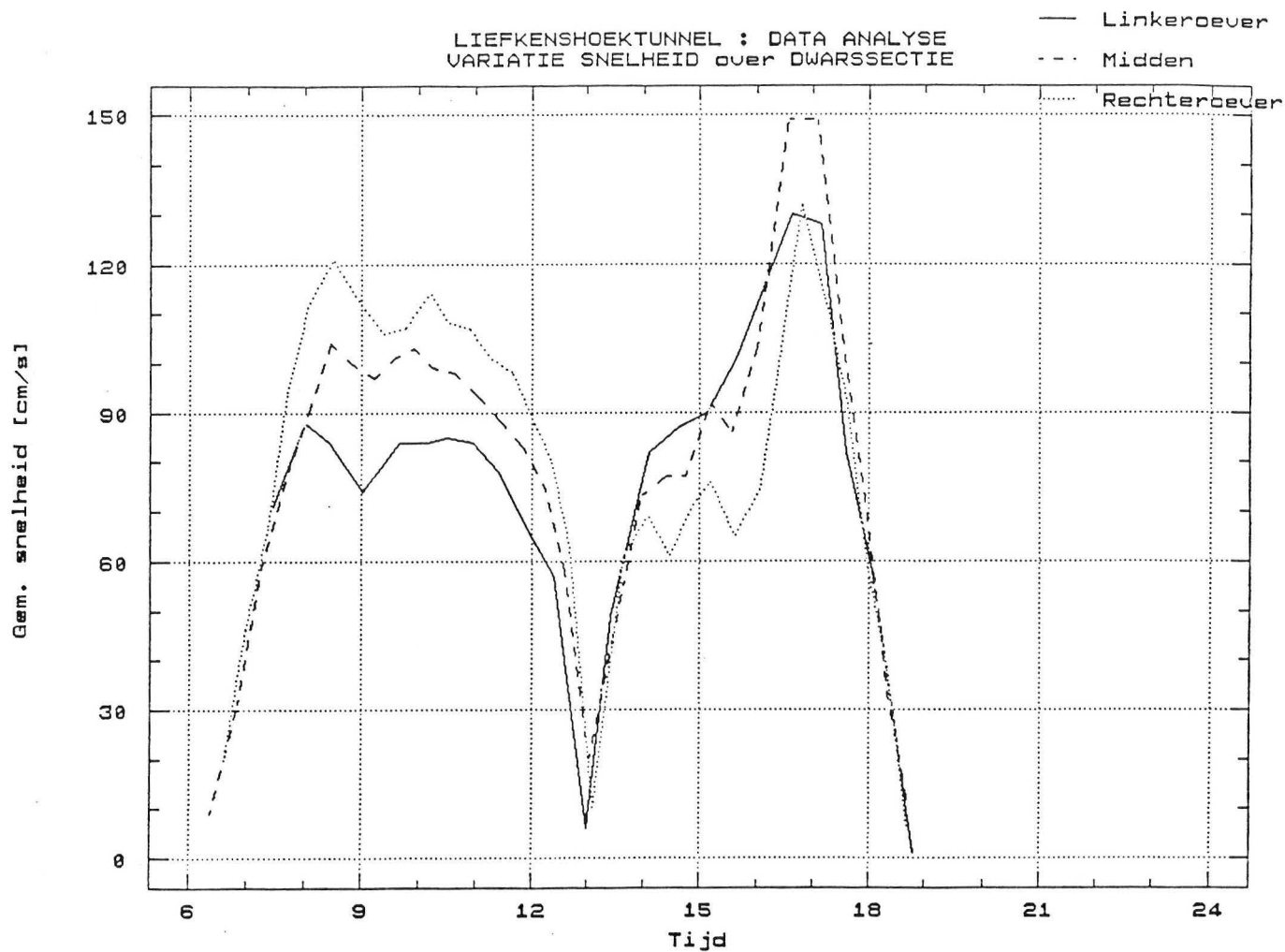


FIG. 10.1

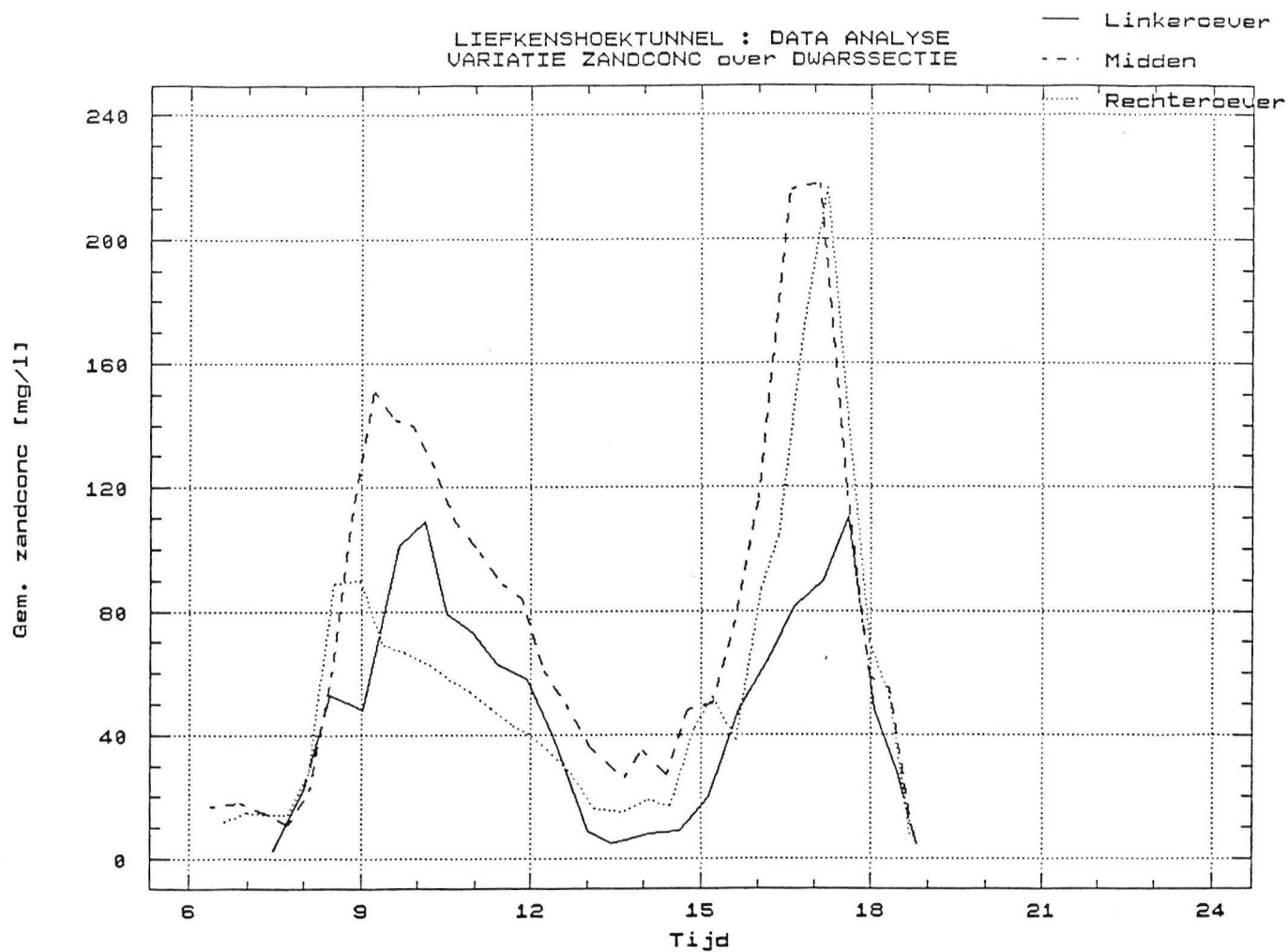
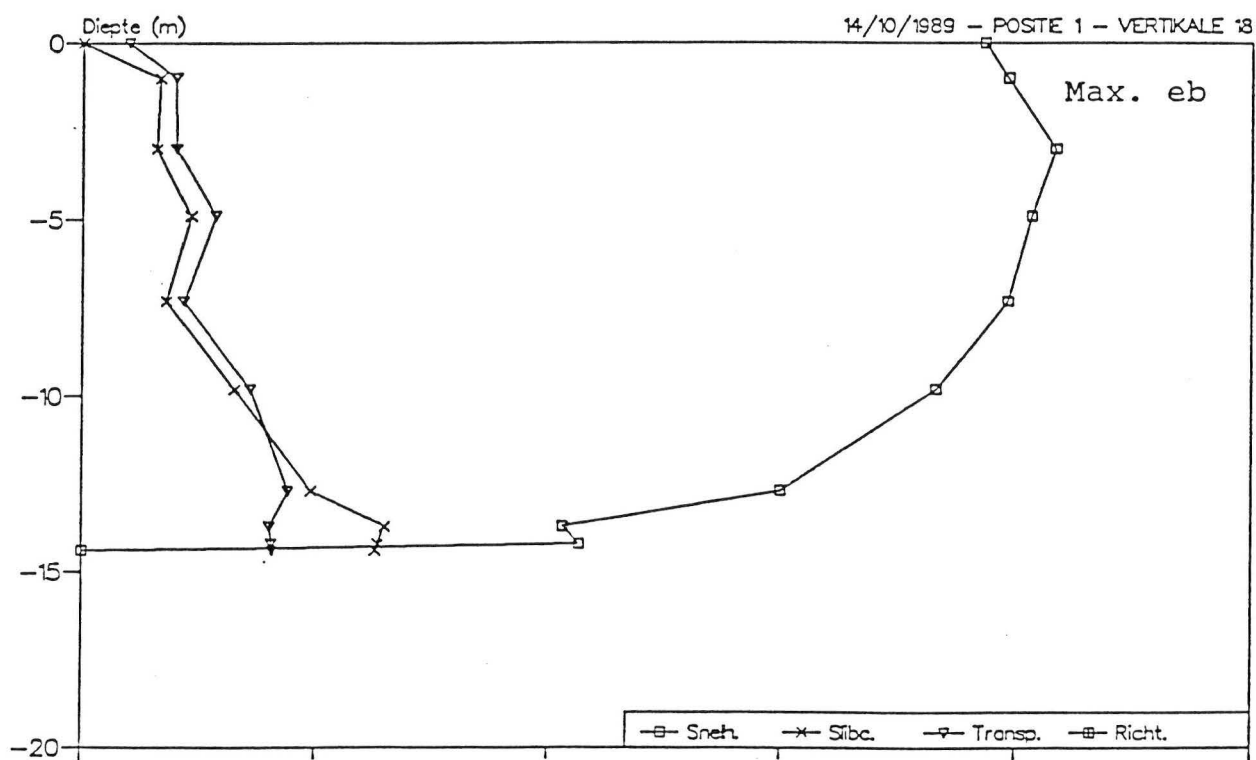
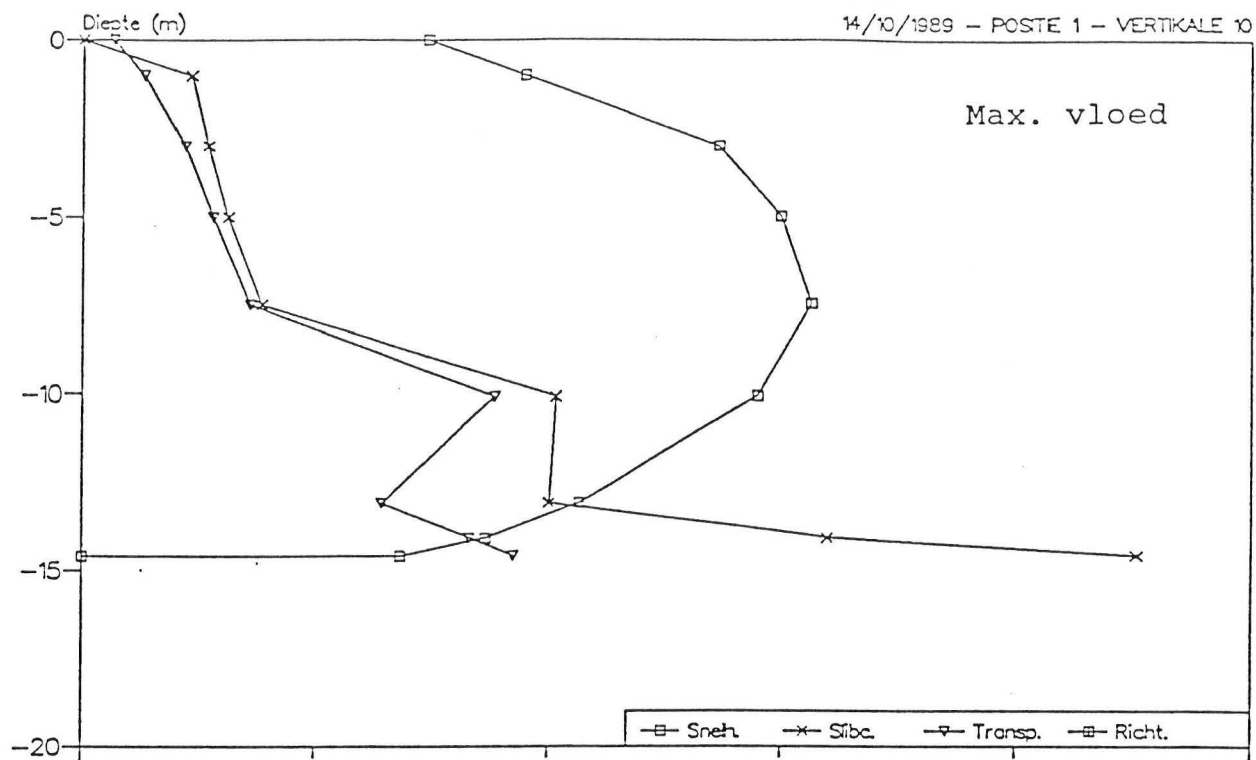


FIG. 10.2

Stroom- en sedimentmeting



Snelheid (0.00 - 150 m/s) Richting (0 - 360 gr.)
 Sibaconcentratie (0 - 1500 mg/l)
 Transport (0 - 1500 g/ms)

Plaats : LIEFKENSHOEK - POSITIE 1
 Datum : 14/10/89
 Vaartuig : SCHELDEWACHT

FIG. 11