UNIVERSITEIT GENT
Vakgroep TW04V
Afdeling Maritieme Technologie

UNIVERSITEIT
GENT

CONTAINERTERMINAL TE VLISSINGEN
ONDERZOEK LICHTERDOK WESTERSCHELDE

door

prof. Marc VANTORRE
Hoogleraar RUG

Studie uitgevoerd in opdracht van HESSENATIE N.V.

in samenwerking met

AWZ-LIN
Afdeling Waterbouwkundig Laboratorium en Hydrologisch Onderzoek
Antwerpen (Borgerhout)

Antwerpen, oktober 2000

UNIVERSITEIT GENT

FACULTEIT TOEGEPASTE WETENSCHAPPEN

VAKGROEP MECHANISCHE CONSTRUCTIE EN PRODUCTIE
AFDELING MARITIEME TECHNOLOGIE
PROF. DR. IR. MARC VANTORRE

NOTA

Het verslag "Containerterminal te Vlissingen – Onderzoek Lichterdok Westerschelde" mag geraadpleegd en/of uitgeleend worden op voorwaarde dat bij verwijzing de huidige naam van de opdrachtgever (**Hesse-Noord Natie N.V., Antwerpen**) vermeld wordt, naast uiteraard de uitvoerders van de studie (Afdeling Maritieme Technologie RUG & Waterbouwkundig Laboratorium en Hydrologisch Onderzoek).

Prof. M. Vantorre

UNIVERSITEIT GENT

Technologiepark Zwijnaarde 9, B-9052 Gent, Belgium • tel. +32 (0)9 2645555 • +32 (0)478 349971 • fax +32 (0)9 2645843
c/o Flanders Hydraulics, Berchemlei 115, B-2140 Antwerpen, Belgium • tel. +32 (0) 3 2361850 • fax +32 (0) 3 2359523
e-mail: : marc.vantorre@rug.ac.be, marc.vantorre@lin.vlaanderen.be

VLIZ (vzw)
VLAAMS INSTITUUT VOOR DE ZEE
FLANDERS MARINE INSTITUTE
Oostende - Belgium
24936

1 Probleemstelling

Door Hessenatie N.V. werd aan de Afdeling Maritieme Technologie van de Universiteit Gent (vakgroep TW04V) de opdracht gegeven tot het uitvoeren van een onderzoek naar de invloed van voorbijvarende zeeschepen op binnenschepen die afgemeerd liggen in het ontworpen lichterdok bij de geplande containerterminal op de Westerschelde nabij Vlissingen. Een schets van de inplanting van de terminal wordt gegeven in figuur 1.

Teneinde een nauwkeurig beeld te bekomen van de waterbeweging in het betreffende dok veroorzaakt door een zeeschip, meer bepaald een tanker, dat de terminal op de Westerschelde voorbijvaart, werd een fysisch model van de omgeving op schaal 1:130 gebouwd in de *Sleeptank voor manoeuvres in ondiep water (Samenwerking Waterbouwkundig Laboratorium – Universiteit Gent)* in het Waterbouwkundig Laboratorium te Borgerhout. Een beschrijving van de proefopstelling en een overzicht van het experimentele programma wordt gegeven in Hoofdstuk 2. Aan de hand van de resultaten van dit modelonderzoek, gerapporteerd in Hoofdstuk 3, werd vervolgens een schatting gemaakt van de invloed van deze waterbeweging op de bewegingen van afgemeerde binnenschepen en op de krachten die optreden in hun meertrossen. Dit laatste is terug te vinden in Hoofdstuk 4. Tenslotte worden de belangrijkste conclusies geformuleerd in Hoofdstuk 5.

van het scheepsmodel, de eenvoudige montage en het geplande proevenprogramma.

2.4 Model van de omgeving

Bij de modellering van de omgeving werd uitgegaan van volgende gegevens:
- actuele peilingsplannen van de Westerschelde (figuur 2);
- gegevens verstrekt door de opdrachtgever aangaande de geplande containerterminal (figuur 3) en de koelwateruitlaat van de elektrische centrale van Borssele (figuur 4).

In drie aspecten verschilt het uiteindelijke schaalmodel van de werkelijkheid:
- de dieptelijnen werden vereenvoudigd om een snelle inbouw mogelijk te maken, waarbij de diepte van de vaargeul werd beperkt tot maximaal 40 m beneden NAP;
- daar net stroomopwaarts de terminal de vaargeul een bocht maakt, terwijl het hulpwagentje het scheepsmodel enkel volgens een rechtlijnige koers kan voortbewegen, werd het betreffende gedeelte van de omgeving uitgezet ten opzichte van de as van de vaargeul en bijgevolg overeenkomstig 'rechtgetrokken';
- het model laat niet toe de stroming op de Westerschelde na te bootsen.

De invloed van deze vereenvoudigingen op de resultaten mag echter als irrelevant beschouwd worden. De eerste vereenvoudiging zal eerder een versterking van de fenomenen veroorzaken, waardoor de resultaten aan de veilige kant liggen. Het rechttrekken zal omwille van de vrij grote kromtestraal weinig invloed hebben op het zich met het schip meebewegende drukveld. Tenslotte kan het genoemde drukveld beschouwd worden als een perturbatie van een stationaire stromingssituatie, zodat het effect van een voorbijvarend schip onafhankelijk van deze stromingstoestand beschouwd mag worden.

De mogelijkheid werd voorzien om de stroming tengevolge van de lozing van koelwater via de uitlaat van de elektrische centrale op schaal te simuleren.

De uiteindelijke inbouw wordt weergegeven in figuur 5 en foto's 1.

2.5 Meet- en stuurinstrumentatie

De waterbeweging in het lichterdok werd geregistreerd door de meting van de verticale positie van het wateroppervlak op een representatief aantal punten, weergegeven in figuur 6 en Tabel 2. Daar er slechts 4 golvenmeters (1, 2, 3, 4) ter beschikking waren op het tijdstip van de proeven, werd elke proef 4 maal uitgevoerd bij verschillende posities van de golvenmeters (A, B, C, D). Golvenmeter 4 werd op dezelfde positie gehouden om te fungeren als referentie. In totaal werd de beweging van het wateroppervlak bijgevolg geregistreerd in 13 punten.

Na afbraak van het ingebouwde schaalmodel van het lichterdok werden in de ongestoorde tank bijkomende proeven uitgevoerd waarbij de golvenmeters op verschillende dwarsafstanden ten opzichte van het scheepsmodel werden opgesteld. De posities van de golvenmeters (E, F) tijdens deze proeven worden getoond op figuur 7 en foto's 2.

2 Fysisch model

2.1 Experimentele infrastructuur

Het modelonderzoek vond plaats in de *Sleeptank voor manoeuvres in ondiep water (Samenwerking Waterbouwkundig Laboratorium – Universiteit Gent)* in het Waterbouwkundig Laboratorium te Borgerhout, waarvan de hoofdkenmerken gegeven worden in Bijlage 3.

2.2 Keuze van de schaal

Bij de keuze van de schaal werd rekening gehouden met:
- de beperkingen gesteld door de afmetingen – en meer bepaald de breedte – van de sleeptank;
- de beschikbaarheid van scheepsmodellen;
- de nauwkeurigheid van de metingen.

Uiteindelijk werd geopteerd voor een schaal 1:130, waardoor een in het Waterbouwkundig Laboratorium voorhanden model van een tanker in aanmerking kwam als voorbijvarend schip. Rekening houdend met het feit dat de breedte van de tank 7 m bedraagt, kon de omgeving van de terminal over een breedte van 910 m ingebouwd worden. Hoewel dit in vergelijking met de breedte van de vaarweg op die plaats (1100 m) vrij beperkt is, laat een dergelijke opstelling toch toe het grootste gedeelte van de vaargeul in afwaartse richting te modelleren. Daar de dwarssectie van het scheepsmodel zelfs na inbouw van een schaalmodel van de omgeving beperkt is vergeleken met de dwarsdoorsnede van de sleeptank, mag verwacht worden dat de fout die veroorzaakt wordt door de beperkte tankbreedte verwaarloosd mag worden, en in elk geval aan de veilige kant ligt.

2.3 Scheepsmodel

De afmetingen van het scheepsmodel en van het corresponderende schip op ware grootte, rekening houdend met een schaal 1:130, worden gegeven in Tabel 1.

TABEL 1. KARAKTERISTIEKEN VAN HET SCHEEPSMODEL (SCHAAL 1:130).

	Model	Ware grootte
Lengte over alles (m)	2.32	301.6
Lengte tussen de loodlijnen (m)	2.21	287.3
Breedte (m)	0.296	38.5
Diepgang (m)	0.112	14.5
Deplacement (m^3)	0.062	136500.

Voor de voortbeweging van het scheepsmodel werd geen gebruik gemaakt van de sleepwagen; het model werd daarentegen bevestigd aan een hulpwagentje, dat in staat is het scheepsmodel een rechtlijnige beweging volgens een gewenst snelheidspatroon op te leggen. Deze keuze werd bepaald door de beperkte afmetingen

De snelheid van het hulpwagentje werd gestuurd volgens een vooropgesteld snelheidsverloop in functie van de tijd, zodat het scheepsmodel met een constante, instelbare snelheid voorbij het schaalmodel van de terminal werd bewogen. Op twee plaatsen werd via een schakelaar de aanwezigheid van het hulpwagentje gedetecteerd, waardoor snelheid en positie van het scheepsmodel bepaald konden worden.

De sturing van het hulpwagentje en de registratie van de metingen geschiedden met behulp van de stuur- en meet-PC's op de sleepwagen. De metingen werden uitgevoerd met een frequentie van 40 Hz.

TABEL 2. POSITIE VAN DE GOLVENMETERS (ZIE FIGUUR 6)

GOLVENMETER	x (m natuur)	y (m natuur)
A1	130	280
A2	-10	280
A3	-150	280
B1	-290	280
B2	-290	200
B3	-290	110
C1	-200	110
C2	-110	110
C3	-20	110
D1	-20	-10
D2	-290	-10
D3	-490	-10
4	0	160

3 Experimenteel programma

3.1 Overzicht

Tijdens het proevenprogramma konden volgende parameters gevarieerd worden:

- de vaarzin:
  - stroomafwaarts: wordt beschouwd als standaard, daar de schepen die richting zee varen op de kortste afstand voorbij het lichterdok zullen passeren;
  - stroomopwaarts;
- de vaarsnelheid:
  - 15 knoop (0.677 m/s model): wordt beschouwd als standaard vaarsnelheid, wat overeenkomt met een voor de beschouwde locatie hoge snelheid;
  - 18 knoop (0.812 m/s model): wordt beschouwd als een zeer extreme (zelfs onrealistische) situatie;
  - 12 knoop (0.541 m/s model): wordt beschouwd als meer realistische snelheid;
- de waterdiepte:
  - gemiddeld hoogwater (springtij): +2.48 m t.o.v. NAP;
  - gemiddeld laagwater (springtij): -1.92 m t.o.v. NAP;
- de dwarspositie van het schip:
  - y_1: as van het schip 320 m van de kaaimuur: wordt gekozen als standaard (naar analogie met studie afgemeerde schepen aan zeekade);
  - y_2: as van het schip 230 m van de kaaimuur: komt overeen met extreme positie van een schip in de (huidige) vaargeul, rakelings langs de boeien;
- de positie van de golvenmeters (zie paragraaf 2.5).

Het proevenprogramma werd tijdens de uitvoering ervan aangepast in functie van de resultaten. Het uiteindelijke programma is samengevat in Tabel 3.

TABEL 3. EXPERIMENTEEL PROGRAMMA

Waterdiepte	laag	laag	laag	laag	laag	laag
Dwarspositie	y_1	y_1	y_1	y_1	y_1	y_1
Snelheid (kn)	15	15	18	18	12	12
Vaarzin	Af	Op	Af	Op	Af	Op
Posities golvenmeters	A – D E – F	A – D	A – D E – F	A – D	A – D E – F	A – D
Reeksnr.	HNI01	HNI02	HNI07	HNI08	HNI09	HNI10

Waterdiepte	hoog	hoog	hoog	hoog	laag	laag
Dwarspositie	y_1	y_1	y_1	y_1	y_2	y_2
Snelheid (kn)	15	15	18	12	18	15
Vaarzin	Af	Op	Af	Af	Af	Af
Posities golvenmeters	A – D E – F	A – D	A – D E – F	A – D E – F	A – D	A – D
Reeksnr.	HNI04	HNI03	HNI05	HNI11	HNI12	HNI06

wat neerkomt op een totaal van 60 proeven.

De invloed van de stroming veroorzaakt door de lozing van het koelwater via de uitlaat van de centrale van Borssele werd bepaald door één van de proeven (HNI01C) met en zonder debiet uit te voeren. De invloed bleek onbelangrijk (zie paragraaf 3.3.6), zodat de overige proeven zonder debiet werden uitgevoerd.

Teneinde na te gaan in welke mate de door het voorbijvarende schip veroorzaakte storing vermindert in functie van de dwarsafstand, werden in de ongestoorde tank 12 bijkomende proeven (HNIxxE en HNIxxF, met xx = 01, 07, 09; 04, 05, 11, zie Tabel 3) uitgevoerd.

3.2 Voorstelling van de proefresultaten

Alle resultaten in dit verslag worden voorgesteld in natuurwaarden; de schaalfactoren werden bijgevolg reeds in aanmerking genomen.

Als oorsprong voor de tijd wordt het punt beschouwd waarbij de boeg van het schip zich bevindt ter hoogte van het stroomopwaarts gelegen uiteinde van de containerkaai (x=0: zie figuur 8).

Uit een typische registratie van een golvenmeter, zoals getoond in figuur 9a, blijkt dat het verschijnsel veroorzaakt door de passage van een zeeschip beschouwd kan worden als de superpositie van:

- een langzaam variërende denivellering van het wateroppervlak, overeenkomstig het primaire (Bernoulli) golfpatroon rond het schip;
- een golftrein, overeenkomstig het secundaire (Kelvin) golfpatroon dat zich met het schip meebeweegt.

Daar de responsie van een (afgemeerd binnen)schip op deze patronen fundamenteel verschillend is, wordt bij de voorstelling van de resultaten een onderscheid gemaakt tussen:

- het 'laagfrequente' gedeelte, dat bekomen wordt door een zwevend gemiddelde te beschouwen van het signaal over een tijdspanne van 22 seconden (figuur 9b);
- het 'hoogfrequente' gedeelte, dat resulteert na aftrekking van het zwevende gemiddelde van het meetsignaal. Om de figuur overzichtelijk te houden, wordt bij de voorstelling van de resultaten verder enkel de omhullende getoond (figuur 9c). Deze omhullende geeft bijgevolg het verloop van de amplitude van de hoogfrequente component; om de overeenkomstige golfhoogte te kennen, moet deze waarde met 2 vermenigvuldigd worden.

De resultaten worden per proevenreeks voorgesteld in vijf figuren:

(a) registraties A1, A2, A3, B1 (ondiep gedeelte van het lichterdok);
(b) registraties B1, B2, B3 (uiteinde lichterdok) en D2 (op zeekade);
(c) registraties C1, C2, C3, B3 (diep gedeelte van het lichterdok);
(d) registraties D1, D2, D3 (zeekade);
(e) registraties A2, C4, C3, D1 (doorsnede ter hoogte van de kop van de zeekade).

De resultaten zijn gebundeld in bijlagen 1 (laagfrequente component) en 2 (hoogfrequente component).

3.3 *Laagfrequente oscillaties: waarnemingen*

3.3.1 Algemeen verloop

Over het algemeen wordt het tijdsverloop van het niveau van de waterspiegel op een welbepaalde positie gekenmerkt door een relatief beperkte rijzing, gevolgd door een belangrijke daling (zie figuur 10 en Bijlage 1). Golvenmeters opgesteld in het lichterdok (A, B, C) registreren vervolgens een oscillerende beweging met een periode van ca. 6 minuten, die slechts langzaam uitdempt. Voor posities gelegen op de zeekade (D) is een dergelijke oscillatie niet of minder duidelijk waarneembaar.

In vele gevallen wordt de oscillatie na enkele periodes licht versterkt; dit fenomeen kan echter toegeschreven worden aan langse oscillaties in de sleeptank, en dient bijgevolg niet in aanmerking genomen te worden.

De grootte van de optredende denivelleringen hangt sterk af van de positie van de waarneming:

- Op de zeekade nemen de schommelingen in grootte af naargelang men dichter bij de ingang van het lichterdok komt; vooral de inzinking wordt hierdoor beïnvloed. Dit kan verklaard worden door het feit dat de sectie van de stroom op die plaats zowel in breedte als in diepte toeneemt.
- Naarmate men zich dieper in het lichterdok beweegt, worden de rijzingen en dalingen versterkt; de verticale beweging van de waterspiegel is het meest uitgesproken bij kaai B.
- De verschillen tussen de registraties van golvenmeters die zich in een zelfde dwarsdoorsnede van het lichterdok bevinden (respectievelijk B1, B2, B3 en A2, 4, C3) zijn minder belangrijk, en in sommige gevallen (hoog water) niet waarneembaar. De verticale beweging van de waterspiegel is over het algemeen iets meer uitgesproken in het ondiepe gedeelte van het lichterdok.
- In het tijdsverloop van meetpunten A1 en – in mindere mate – A2 wordt de neerwaartse beweging onderbroken door een rijzing; dit is te verklaren door de dynamica van de watermassa in het ondiepere gedeelte in de omgeving van de koelwateruitlaat.

3.3.2 Invloed van de snelheid van het passerende schip

De grootte van de verticale beweging van het wateroppervlak is zeer sterk afhankelijk van de snelheid. Zoals blijkt uit figuur 10, geldt dit in het bijzonder voor de daling van de waterspiegel; de hierop volgende oscillaties worden in mindere mate beïnvloed. Ook het tijdstip van de opeenvolgende oscillaties wordt niet sterk beïnvloed door de snelheid.

3.3.3 Invloed van de vaarzin van het passerende schip

Bij gelijke waarden van laterale positie, snelheid en waterdiepte is de invloed van een schip dat de Westerschelde opvaart groter dat deze van een afvarend schip (zie figuur 11). Bij een opvarend schip wordt het verschijnsel ook later ingezet.

Dit is te verklaren door het feit dat de denivellering van de waterspiegel die zich meebeweegt met het schip (primair 'Bernoulli' patroon) bij afvaart de ingang van het

dok vroeger en geleidelijker bereikt. De (onder)drukgolf die wordt aangelegd aan de ingang van het dok is meer gespreid bij afvaart, en heeft meer het karakter van een puls bij opvaart.

Bovendien komt het schip bij opvaart uit een smallere sectie, wat ook merkbaar is aan het tijdsverloop van de verticale positie van de waterspiegel zoals geregistreerd op de zeekade D. Bij afvaart neemt de inzinking langzaam toe naarmate het schip zich van de ingang van het lichterdok verwijdert, bij opvaart is de invloed van het lichterdok enkel duidelijk merkbaar ter plaatse van golvenmeter D1.

Daar opvarende schepen in regel echter op veel grotere dwarsafstand de terminal zullen voorbijvaren, is de nadruk in deze studie gelegd op afvarende schepen.

3.3.4 Invloed van de waterdiepte

De verschijnselen zijn iets minder uitgesproken bij de hoogste waterstand, zoals blijkt uit figuur 12. Daar storingen zich in dieper water sneller voortplanten, worden de verschijnselen enigszins vroeger ingezet, en is de periode van de oscillaties wat korter.

Bij een hogere waterstand is het diepteverschil tussen het diepere en ondiepere gedeelte van het lichterdok relatief kleiner. Hierdoor is het tijdsverloop van de verticale beweging van de waterspiegel bij hoog water vrijwel constant over een dwarsdoorsnede van het lichterdok. Het verschil in voortplantingssnelheid van de storingen in het diepere en het ondiepere gedeelte van het lichterdok doet bij laag water duidelijk zichtbare hogere harmonischen ontstaan, die bij hoog water nauwelijks waarneembaar zijn.

3.3.5 Invloed van de laterale afstand

Het is duidelijk dat de waterbeweging sterker is naarmate de laterale afstand van het passerende schip kleiner wordt. Dit wordt geïllustreerd in figuur 13.

Overigens werd deze invloed eveneens onderzocht in open water (proevenreeksen HNI13E/F, HNI14E/F, HNI15E/F). Het verband tussen de laterale afstand en de grootte van de maximale inzinking van het wateroppervlak wordt weergegeven in figuur 14.

3.3.6 Invloed van het koelwaterdebiet

Proef HNI01C werd tweemaal uitgevoerd, met als debiet uit het model van de koelwateruitlaat van de centrale van Borssele:

- debiet nul;
- debiet van 100000 m^3/h natuur (<10 l/min model)

Figuur 15 toont dat er geen beduidende invloed waar te nemen is.

3.4 Hoogfrequente oscillaties: waarnemingen

3.4.1 Algemeen verloop

Het secundaire (Kelvin) golfpatroon is bij de hoogste twee snelheden duidelijk te registreren op de zeekade D, en is in vele gevallen meetbaar in de ingang van het lichterdok. Hierbij dient vermeld dat golven met een golfhoogte van minder dan 0.10 m natuur (amplitude < 0.05 m) hooguit als waarneembaar, maar gezien de beperkingen van de meetopstelling en de schaal niet meer als meetbaar bestempeld kunnen worden. Voor de gestelde toepassing lijkt dit niet meteen een beperking.

De hogerfrequente golftreinen worden waargenomen na de passage van het zeeschip. Vaak volgen er, met een zekere tussentijd, meerdere golftreinen; wellicht is dit te wijten aan reflectie van de tankwand, zodat enkel de eerste golftrein in aanmerking genomen dient te worden.

3.4.2 Invloed van de snelheid van het passerende schip

De hoogte van de golftrein langs de zeekade (D) heeft (bij de referentie dwarsafstand) als grootte-orde 0.4 tot 0.8 m bij een snelheid van 18 knoop, tegen 0.1 m bij 15 knoop; bij 12 knoop is er geen meetbaar signaal. Dit maakt meteen duidelijk dat enkel schepen die met hoge snelheid passeren een beduidende golftrein kunnen veroorzaken.

3.4.3 Invloed van de vaarzin van het passerende schip

Schepen die de Westerschelde opvaren, veroorzaken een patroon met grotere golfhoogte; anderzijds dringt het golfpatroon gegenereerd door een afwaarts varend schip dieper in het lichterdok door. Bij een opwaarts varend schip blijft de golfwerking beperkt tot positie A1, terwijl een afwaarts varend schip ook een zeer beperkte golfwerking veroorzaakt in posities A2, A3 en C3.

3.4.4 Invloed van de waterdiepte

De invloed van de waterdiepte op de golfwerking is waarneembaar: vergelijking van proeven HNI07 (laag water) en HNI05 (hoog water) toont aan dat bij hoge waterstand de golfhoogte afneemt naarmate men zich dieper in het lichterdok begeeft.

3.4.5 Invloed van de laterale afstand

Bij een snelheid van 18 knoop blijkt logischerwijs de golfwerking toe te nemen bij verminderde laterale afstand van het passerende schip. Bij 15 knoop blijft de golfwerking zeer beperkt.

Daar het golfpatroon zich in een wig achter het schip bevindt, zullen de golven langer uitblijven naarmate de laterale afstand tot het passerende schip groter is.

3.4.6 Besluit

Uit alle waarnemingen blijkt dat slechts in enkele situaties in het lichterdok golfhoogten gemeten worden die groter zijn dan of gelijk aan 0.1 m:

- op positie A1, veroorzaakt door een opvarend schip met een snelheid van 18 knoop;
- op posities A1, A2 (enkel bij laag water), A3 (idem), veroorzaakt door een afvarend schip met een snelheid van 18 knoop.

Er mag dan ook besloten worden dat de hogerfrequente golven gegenereerd door het passerende schip niet hinderend zullen zijn voor binnenschepen afgemeerd in het lichterdok.

4 Responsie van afgemeerde binnenschepen

4.1 Inleiding

Het uiteindelijke doel van het onderzoek bestaat erin een schatting te maken van de krachten en bewegingen waaraan binnenschepen die in het lichterdok afgemeerd worden, onderhevig zullen zijn tijdens de passage van een zeeschip op de Westerschelde.

De schaal die tijdens de modelproeven gehanteerd werd, liet niet toe schaalmodellen van afgemeerde binnenschepen te gebruiken. Een schatting van de responsies zal dan ook moeten gebeuren aan de hand van de opgemeten waterstanden.

De responsies de hinder kunnen veroorzaken bij de laad- en losoperaties van een binnenschip zijn:

- horizontale bewegingen (schrikken, verzetten, gieren);
- verticale bewegingen (dompen, stampen, slingeren);
- krachten in de meertrossen.

en zijn afhankelijk van:

- de karakteristieken van het schip: afmetingen, massa, traagheidsmomenten, ...;
- de afmeerconfiguratie: aantal trossen, lengte, bevestigingspunten, materiaal, ...;
- de positie van het binnenschip in het lichterdok.

Wat de scheepskarakteristieken betreft, worden drie scheepstypes beschouwd, volgens Tabel 4.

TABEL 4. AFGEMEERDE BINNENSCHEPEN: KARAKTERISTIEKEN

Aanduiding	(1)	(2a) - (2b)	(3)
Type	Rijn-Hernekanaal (klasse IV)	duwkonvooi met (1-2) x 2 duwbakken (klasse Vb – VIb)	duwkonvooi met 2 x 3 duwbakken (klasse VIc)
Lengte (m)	80	160 (*)	240 (*)
Breedte (m)	9.5	11.4 – 22.8	22.8
Diepgang	2.5	4.5	4.5
Blokcoëfficiënt (-)	0.875	0.875	0.875
Volumedeplacement (m^3)	1704	7362 – 14723 (*)	22085 (*)

(*) zonder duwboot

Bij de beoordeling van de responsie kan een onderscheid gemaakt worden tussen de laag- en de hoogfrequente verschijnselen. Zoals vermeld in paragraaf 3.4.6, dringen de secundaire golfpatronen veroorzaakt door de passage van het zeeschip nauwelijks door in het lichterdok, en nemen zij slechts in uitzonderlijke omstandigheden golfhoogten aan hoger dan 0.1 m. De invloed van deze golfpatronen kan dan ook verwaarloosbaar geacht worden.

Hinderlijke responsies kunnen bijgevolg enkel veroorzaakt worden door de laagfrequente denivelleringen van de waterspiegel, veroorzaakt door het zich met het schip meebewegende primaire golfpatroon. Door het langzaam variërende karakter van deze verschijnselen kan in een eerste benadering het probleem als statisch beschouwd worden. Dit heeft als voordeel dat een aantal sterk variabele parameters, zoals de afmeerconfiguratie, geen invloed hebben op de responsie. In een tweede fase kan de invloed van dynamische effecten, die het gevolg zijn van het feit dat het afgemeerde schip zich als een massa-veer-systeem gedraagt, geëvalueerd worden in het geval van een specifieke, typische afmeerconfiguratie.

4.2 Statische benadering

4.2.1 Algemeen

Voor elk van de in Tabel 4 beschouwde binnenschepen wordt een schatting gemaakt van volgende grootheden:

- de maximale verticale verplaatsing (inzinking);
- de maximale langshelling;
- de maximale langsscheepse (horizontale) krachtcomponent, op te nemen door de meertrossen.

Een dergelijke schatting wordt uitgevoerd voor elk van de tijdens het experimentele programma beproefde condities. De afmeerplaats langsheen kaaien A, B en C fungeert hierbij als parameter.

4.2.2 Maximale verticale verplaatsing

Figuren 16a-h geven een overzicht van de maximale inzinking die elk van de beschouwde types van binnenschepen ondergaat in elk van de experimenteel onderzochte gevallen.

Volgende conclusies kunnen getrokken worden:

- De verticale beweging neemt over het algemeen toe naarmate het schip dieper in het lichterdok is afgemeerd, en is maximaal voor schepen afgemeerd aan kaai B.
- In de referentiesituatie (afvarend schip bij 15 knoop, dwarsafstand tot hoofdkaai 320 m) bedraagt de inzinking maximaal 0.30 m.
- Bij grotere snelheden (18 knoop) kan de maximale inzinking sterk oplopen (tot ca. 0.75 m).
- Afvarende schepen veroorzaken bij eenzelfde snelheid, waterdiepte en dwarsafstand een minder grote inzinking dan opvarende schepen.
- De stand van het getij speelt een ondergeschikte rol bij afvarende schepen, maar is een significante parameters bij opvarende schepen.

4.2.3 Maximale langshelling

Figuren 17a-h vatten de resultaten samen van de maximale langshelling die de binnenschepen ondergaan tijdens de passage van een zeeschip.

Conclusies:

- In de referentiesituatie blijft de langshelling in alle gevallen onder de waarde 0.0008 m/m.
- Schepen afgemeerd aan kaai B ondergaan kleinere langshellingen dan aan kaden A of C.

4.2.4 Maximale langsscheepse kracht

Het niveauverschil Δz van de waterspiegel ter hoogte van voor- en achterschip geeft aanleiding tot een langsscheepse kracht X, die benaderd kan worden als:

$$\frac{X}{\rho g \nabla} = \frac{\Delta z}{L}\frac{1}{C_B}$$

zodat de waarden in figuren 17a-h na deling door de blokcoëfficiënt ook geïnterpreteerd kunnen worden als de langsscheepse kracht als fractie van het gewichtsdeplacement. Rekening houdend met het feit dat de blokcoëfficiënt van binnenschepen minimaal 0.8 bedraagt, dient de ordinaatas van figuren 17a-h geconverteerd te worden met behulp van Tabel 5.

TABEL 5. STATISCHE BENADERING: CONVERSIE VAN LANGSHELLING NAAR DE VERHOUDING VAN LANGSSCHEEPSE KRACHT TOT GEWICHTSDEPLACEMENT.

$\frac{\Delta z}{L}$	$\frac{X}{\rho g \nabla}$
0	0
0.0005	0.000625
0.001	0.00125
0.0015	0.001875
0.002	0.0025
0.0025	0.003125
0.003	0.00375

Hieruit blijkt dat in referentie-omstandigheden de statische langsscheepse kracht die door de trossen moet opgenomen worden nooit meer dan 0.001 maal het gewichtsdeplacement bedraagt. Ter vergelijking: volgens [1] geldt als toelaatbare waarde voor de kracht op te nemen door de trossen tijdens het vullen of ledigen van een sluis 1/600 (0.00167) van het totale scheepsgewicht, wat overeenkomt met een langshelling van 0.0013. Uit figuren 17 blijkt dat deze waarde nooit overschreden wordt bij een passerend schip met snelheid 15 knoop, ook niet bij de kleinste dwarsafstand tot de zeekade. Alleen bij een scheepssnelheid van 18 knoop zou de grenswaarde overschreden worden, en dan nog niet in alle gevallen.

4.2.5 Andere bewegingsmodi

Uit de registraties is gebleken dat de denivellering van de waterspiegel quasi onafhankelijk is van de dwarspositie in het lichterdok. De hellingen van de waterspiegel die volgens een dwarssectie van het lichterdok optreden, kunnen afgeschat worden

met behulp van figuren 17b en 17e; zij nemen waarden aan van hooguit 0.001 (0.06°) in referentie-omstandigheden tot 0.0025 (0.14°) in extreme situaties. Dit betekent dat de denivellering tussen stuur- en bakboordzijde gering is, zodat er geen beduidende dwarsscheepse belastingen van hydrodynamische oorsprong zullen optreden op schepen afgemeerd aan kaden A en C; de verzet- en gierbewegingen van schepen die aldaar afgemeerd zijn, dienen verder dan ook niet in beschouwing genomen te worden.

De hellingen die volgens de lengterichting van het dok ontstaan, zijn zeer beperkt; dit is het gevolg van het feit dat het oscillerende verschijnsel dat zich voordoet in het lichterdok een zeer lange periode heeft, en dus een zeer grote golflengte. Dit blijkt ook uit figuren 17a en 17c, waar de hellingen van een lichter afgemeerd aan kaden A en C wordt weergegeven. Hierdoor blijven ook voor schepen afgemeerd aan kaai B de hellingen in dwarsrichting zeer beperkt; gezien de geringe helling en de relatief kleine breedte van de schepen in vergelijking met de golflengte van het oscillerende verschijnsel, zullen de krachten die dwarsscheeps optreden die in de praktijk verwaarloosbaar zijn. De verzet- en gierbewegingen van schepen afgemeerd aan kaai B zullen bijgevolg evenmin in aanmerking worden genomen.

Om dezelfde redenen zullen slingerbewegingen van hydrodynamische oorsprong in statische benadering zeer beperkt blijven. De troskrachten kunnen echter wel een verticale component bezitten, die excentrisch aangrijpt en daardoor een dwarsscheeps moment kan induceren. De grootte hiervan en de gevolgen voor de slingerhoek hangen echter sterk af van de afmeerconfiguratie, en wordt in paragraaf 4.3 behandeld.

4.3 Dynamisch gedrag

4.3.1 Inleiding

Het werkelijke gedrag van een afgemeerd binnenschip onder invloed van de fenomenen veroorzaakt door een passende schip kan gesimuleerd worden aan de hand van het oplossen van de bewegingsvergelijkingen voor stampen, dompen en schrikken.

De vergelijking voor het slingeren wordt bij de simulaties niet in aanmerking genomen, wat impliceert dat bij de berekening ondersteld wordt dat het schip in dwarsrichting steeds horizontaal blijft liggen. In werkelijkheid zal bij het opspannen van de meertrossen de verticale component van de trekkracht in de trossen aanleiding geven tot een kenterend koppel om de langsas van het schip, waardoor een dwarshelling optreedt; hierdoor zullen de meertrossen iets ontlast worden. Het verwaarlozen van de slingerbeweging resulteert bijgevolg in een zwaardere belasting van de meertrossen dan in werkelijkheid het geval zal zijn. De slingerhoek die zal optreden is afhankelijk van de aanvangsstabiliteit van het binnenschip, en zal later geschat worden.

De responsie hangt sterk af van de wijze van afmeren, gekenmerkt door een bijzonder groot aantal parameters:

- aantal meertrossen
- lengte van de meertrossen
- positie van de bevestigingspunten op het schip
- positie van de bevestigingspunten aan de wal
- diagram belasting – rek
- voorspanning of initiële speling
- wrijvingscoëfficiënt
- ...

Daar men onmogelijk alle parameters kan onderzoeken, dient men zich hier te beperken tot een aantal typische voorbeelden. Hierbij worden enkel binnenschepen beschouwd die afgemeerd liggen aan kaai A; de excitaties voor schepen afgemeerd aan kaai C zijn nooit groter dan deze voor kaai A, terwijl aan kaai B de excitaties kleiner zullen zijn dan deze waaraan een schip onderhevig is dat teneinde kaai A is afgemeerd.

4.3.2 Simulaties

4.3.2.1 Binnenschip (1)

Voor het Rijn-Hernekanaalschip (1) wordt volgende situatie (a) beschouwd als uitgangspositie. Het wordt afgemeerd aan kaai A, ter hoogte van x = -100 m, met behulp van twee meertrossen van ca. 10 m lengte met breuksterkte 180 kN (gebaseerd op [1], zie figuur 18) en rek bij breuk 5% (wat een benadering vormt voor stalen kabels, zie figuur 19). Er is een hoogteverschil van 2.5 m tussen de bevestigingspunten op kaai en schip. Als wrijvingscoëfficiënt van het schip tegen de kaai wordt een waarde van 0.02 vooropgesteld. De tanker passeert in standaardcondities (V = 15 knoop, afwaarts, dwarsafstand tot de kaai 320 m) bij laag water.

Als varianten worden beschouwd:

(b) situatie zonder wrijving;
(c) situatie met meer elastische tros (rek bij breuk 45%; komt benaderend overeen met polyethyleen trossen, zie Tabel 6);
(d) situatie met een speling van 0.1 m in de trossen;
(e) situatie waarbij de bevestigingspunten op kaai en schip op dezelfde hoogte liggen;
(f) situatie met kortere tros (ca. 6 m);
(g) situatie met langere tros (ca. 15 m);
(h) situatie met langere en meer elastische tros;
(i) situatie (a), waarbij het schip afgemeerd is aan positie x = -250 m;
(j) situatie (g) (langere tros), waarbij het schip afgemeerd is aan positie x = -250 m;
(q) situatie (c) met verhoogde wrijving;
(s) situatie (c) met kortere tros (ca. 6 m).

Figuren 20a, b,..., j, q, s geven het tijdsverloop van domp-, stamp- en schrikbeweging, en van de troskrachten. Enkele conclusies:

TABEL 6. ELASTISCHE EIGENSCHAPPEN VAN TROSSEN.

STAALKABEL-, NIJS- EN HEFTECHNIEK

VERGELIJKINGSTABEL VAN VERSCHILLENDE TOUWSOORTEN

	Composite Rope	Polyamide 6.	Polyamide 6.6	Polyester	Poly-ethyleen	Poly-propeen	Manilla	Supamix
Werkelijk soort. gew.	1,1	1,1	1,1	1,3	0,9	0,9	1,4	0,9
Smeltpunt	250/185	215	250	250	135	165	n.v.t.	165
Verwekingspunt	230/140	170	220	230	115	140	n.v.t.	140
TCLL-waarde	72	60	60	70	55	55	n.v.t.	58
Wrijvingsweerstand bij cycli tot breuk	11.000 reststerkte 30%	5.000	5.000	1.500	n.v.t.	900	n.v.t.	1.200
Slijtweerstand cycli tot breuk in natte toestand	600	350	350	900	200	200	n.v.t.	300
UV-bestendigheid	uitstekend	goed	goed	uitstekend	goed	goed	slecht	goed
Weerstand tegen rot en schimmels	100%	100%	100%	100%	100%	100%	slecht	100%
Koudwaterkrimp	1%	5-6%	4-5%	2%	0%	0%	6-8%	0%
Opdrogend vermogen in vergelijking met polypropyleen	1,2	2,5	2,5	2,0	1,0	1,0	n.v.t.	1,0
Wateropname	40%	40%	40%	40%	15%	15%	80%	15%
Flexibiliteit: droog nat	uitstekend geen verand.	uitstekend flexibiliteit vermindert	uitstekend flexibiliteit vermindert	uitstekend geen verand.	goed geen verand.	goed geen verand.	goed flexibiliteit vermindert	goed geen verand.
Brkr. (in daN/kTex): droog	27,5	27,5	27,5	18,0	19,1	25,7	n.v.t.	26,5
nat	27,5	23,3	23,3	18,0	19,1	25,7	n.v.t.	26,5
Rek bij breuk (bij eerste belasting): droog	34%	48%	45%	35%	45%	30%	16%	28%
nat	34%	55%	50%	35%	45%	30%	22%	28%
bij 20% van de brkr.	19%	28%	28%	20%	25%	17%	n.v.t.	17%
bij 50% van de brkr.	27%	39%	38%	28%	34%	23%	n.v.t.	23%

- Domp- en stampbeweging worden bijzonder goed benaderd wordt door de statische aanpak; de resultaten bekomen in paragraaf 4.2 kunnen bijgevolg zonder meer overgenomen worden.

- Het is logisch dat de langsscheepse beweging (schrikken) belangrijker wordt naarmate de trossen minder stijf worden, dus naarmate de lengte toeneemt en de breukrek groter wordt; naargelang van de elasticiteit en de lengte van de tros bedraagt de maximale uitwijking tussen 0.05 en 1 m.

- De krachten waarmee de trossen belast worden, zijn minstens gelijk aan de statisch berekende langsscheepse krachten. In de meeste gevallen worden deze laatste versterkt, enerzijds door dynamische effecten, maar ook door de trek-

kracht die in de trossen ontstaat wanneer het schip inzinkt. De uiteindelijke versterking van de statische krachten is dan ook afhankelijk van diverse parameters:

- Lengte van de tros: bij stijve trossen (staalkabels) neemt de kracht opgenomen door de trossen aanzienlijk toe wanneer de kortere trossen worden gebruikt. In de simulaties varieert de verhouding tussen maximale troskracht en statische langskracht van 1.1 voor een tros van 15 m lengte, over 2 voor een tros van 10 m, naar zelfs 5 voor een korte tros van ca. 6 m lengte.
- Bij meer elastische trossen is de invloed van de troslengte op de maximale troskracht veel kleiner (vergelijk figuren 20c en 20s); een kortere tros leidt tot aanzienlijk kleinere schrikbewegingen.
- Elasticiteit van de tros: het gebruik van een meer elastische tros geeft aanleiding tot kleinere troskrachten bij kortere trossen, terwijl bij grotere troslengten het tegendeel geldt.
- De troskrachten vertonen oscillaties wanneer de wrijving wegvalt of bij trossen die speling vertonen, waardoor de versterking ten opzichte van de statische benadering een factor 3 bedraagt.
- Een verhoging van de wrijving heeft geen invloed op de maximale bewegingen of troskrachten, wel op het verloop van deze grootheden in functie van de tijd.
- Een zeer belangrijke factor blijkt de onderlinge ligging in hoogte tussen de bevestigingspunten op kaai en schip te zijn: wanneer deze op dezelfde hoogte liggen, vallen de verticale krachten tengevolge van het inzinken van het schip vrijwel weg, en beperken de troskrachten zich tot de statisch berekende langsscheepse krachten.
- Wanneer het binnenschip achteraan in het lichterdok aangemeerd is (figuur 20i), dan is de inzinking groter, waardoor de voorste tros ca. 5% meer opgespannen wordt. Ook hier is het aan te raden een langere of meer flexibele meertros te gebruiken (zie figuur 20j).

Figuren 20k, l, m, ...,o, r geven situaties weer met een hoogteverschil van 10 m tussen kaai en schip. Enkele conclusies:

- Bij het gebruik van stijve trossen (staalkabels) dient de troslengte voldoende groot gekozen te worden, zoals blijkt uit een vergelijking tussen figuur 20k (lengte ca. 20 m) en figuur 20l (ca. 30 m). In het laatste geval overtreft de troskracht nauwelijks de statische langskracht.
- Bij het gebruik van meer flexibele materialen kunnen de trossen korter gekozen worden (zie figuur 20m).
- De situatie is minder kritisch op het uiteinde van kaai A (nabij kaai B), zoals blijkt uit figuur 20n.
- Extreem elastische materialen geven aanleiding tot onaanvaardbare dynamische verschijnselen (zie figuur 20o), die enkel door een belangrijke voorspanning (grootte-orde 1 ton) onderdrukt kunnen worden (zie figuur 20p).
- Het effect van een verhoging van de wrijving tussen kaai en schip op de maximale verplaatsingen en troskrachten is verwaarloosbaar (vergelijk figuren 20m en 20r).

Door een oordeelkundige wijze van aanmeren kunnen de troskrachten kunnen dus beperkt blijven tot ca. 20 kN of ca. 11% van de breuksterkte. De meest kritische situatie doet zich voor bij lage waterstand, wanneer er een aanzienlijk hoogteverschil ontstaat tussen de bevestigingspunten van de trossen op kaai en schip; in dat geval

dienen de trossen voldoende flexibiliteit te vertonen, wat verwezenlijkt kan worden door een grotere lengte of het gebruik van een elastische materiaal. Bij hogere waterstand is het probleem minder kritisch.

4.3.2.2 Duwkonvooi (2a)

Voor de simulatie van de bewegingen en krachten van duwkonvooien werd de breuksterkte van de meertrossen gekozen overeenkomstig de klassevoorschriften van Bureau Veritas voor binnenschepen. Per duwbak worden twee trossen voorzien met een breuksterkte van 243 kN. De voorschriften van Unitas, gebaseerd op het reglement betreffende het onderzoek van vaartuigen en vlotten die de Rijn bevaren, geven aanleiding tot eenzelfde orde van grootte.

Figuren 21a-h geven simulaties weer voor duwkonvooi (1a), afgemeerd in gelijkaardige omstandigheden als binnenschip (1), met dien verstande dat er nu in totaal 4 meertrossen voorzien zijn.

De conclusies zijn in grote lijnen identiek:

- Domp- en stampbeweging mogen zonder meer benaderd wordt door de statische waarden.

- Naargelang van de stijfheid van de trossen bedraagt de maximale uitwijking tussen 0.05 en 2 m.

- De voorste (1 en 4), respectievelijk achterste (2 en 3) trossen van elke duwbak worden nagenoeg gelijk belast. De verhouding tussen de (som van de) troskrachten en de statisch berekende langskracht is afhankelijk van:
  - Lengte van de tros: de verhouding tussen maximale troskracht en statische langskracht van 1.1 voor trossen van 15 m lengte, over 1.5 voor trossen van 10 m, naar 3 voor een korte tros van ca. 6 m lengte. De toename is bijgevolg iets minder uitgesproken dan in het geval van binnenschip (1).
  - Elasticiteit van de tros (zie hoger).
  - De troskrachten vertonen oscillaties wanneer de wrijving wegvalt of bij trossen die speling vertonen; de versterking ten opzichte van de statische benadering bedraagt een factor 2, dus minder dan in het geval van binnenschip (1).
  - Ook hier is de onderlinge ligging in hoogte tussen de bevestigingspunten op kaai en schip een zeer belangrijke factor.
  - Wanneer het binnenschip achteraan in het lichterdok aangemeerd is (figuur 20i), dan is de inzinking groter, waardoor de voorste tros ca. 5% meer opgespannen wordt. Ook hier is het aan te raden een langere of meer flexibele meertros te gebruiken (zie figuur 20j).

4.3.2.3 Duwkonvooi (2b)

Het gedrag van een duwkonvooi bestaande uit 2x2 duwbakken werd gesimuleerd terwijl het afgemeerd is op dezelfde plaats aan kaai A. Er werd ondersteld dat de meertrossen ontdubbeld werden. Zoals blijkt uit figuur 22 bekomt men gelijkaardige resultaten als onder 4.3.2.2; de bewegingen zijn identiek, terwijl de krachten verdubbelen, maar opgevangen worden door dubbel zoveel trossen.

4.3.2.4 Duwkonvooi (3)

Voor het afmeren van het konvooi bestaande uit 3x2 duwbakken werd elke aan de kaai afgemeerde duwbak voorzien van een ontdubbeld stel trossen, zoals in 4.3.2.3.

Figuur 23(a) geeft een simulatie weer voor de uitgangsconfiguratie, terwijl figuur 23(b) de variante met langere trossen weergeeft. Ook hier blijft de maximale troskracht beperkt tot ca. 10% van de breeksterkte.

4.3.3 Slingerbeweging

De slingerbeweging hangt af van de aanvangsmetacenterhoogte GM, en dus van de ligging van het zwaartepunt. Indien de kracht in een tros F_{tros} genoemd wordt, treedt er een kenterend koppel K op dat benaderd kan worden als:

$$K = \frac{1}{2} B F_{tros} \frac{z_{kaai} - z_{schip}}{L_{tros}}$$

waarbij z_{kaai} en z_{schip} de verticale coördinaat van de bevestigingspunten van de tros op respectievelijk kaai en schip voorstellen, B de scheepsbreedte, en L_{tros} de lengte van de tros.

Dit koppel geeft aanleiding tot een dwarshelling ϕ:

$$\phi = \frac{K}{\rho g \nabla GM} = \frac{F_{tros}}{\rho g \nabla} \frac{\frac{1}{2} B}{GM} \frac{z_{kaai} - z_{schip}}{L_{tros}}$$

waarbij GM de aanvangsmetacenterhoogte voorstelt, en ∇ het volumedeplacement van het binnenschip.

Indien de troskracht beneden de hogervermelde waarde van 1/600 van het gewichtsdeplacement blijft, zal de hellingshoek beperkt blijven tot:

$$\phi < \frac{1}{1200} \frac{B}{GM} \frac{z_{kaai} - z_{schip}}{L_{tros}}$$

Daar in alle aanvaardbare configuraties L_{tros} 10 tot 15 m bedraagt, terwijl de hoogteverschil tussen de bevestigingspunten 2.5 m bedraagt, kan als grootte-orde voor de verhouding $(z_{kaai} - z_{schip})/L_{tros}$ 0.25 genomen worden. Dit leidt tot:

$$\phi < \frac{1}{4800} \frac{B}{GM}$$

Om een slingerhoek van 1° te bekomen, dient de aanvangsmetacenterhoogte kleiner te zijn dan 0.012 B. Voor de beschouwde binnenschepen en konvooien bedraagt deze bovengrens voor GM:

(1) GM < 0.012 * 9.5 m = 0.11 m
(2a) GM < 0.012 * 11.4 m = 0.14 m

(2b) GM < 0.012 * 22.8 m = 0.28 m
(3) GM < 0.012 * 22.8 m = 0.28 m

Deze waarden van GM worden bereikt indien het zwaartepunt (benaderend) op volgende hoogte boven de waterlijn ligt:
(1) z_G < 2.08 m
(2a) z_G < 0.36 m
(2b) z_G < 8.47 m
(3) z_G < 8.47 m
Enkel bij duwkonvooi (2a) kan de bekomen waarde voor de maximale hoogte van het zwaartepunt van schip en lading boven de waterlijn eventueel bereikt worden. Bij een GM van 0.14 m is het echter niet uit te sluiten dat het schip hoe dan ook stabiliteitsproblemen zal vertonen.

Er kan dus besloten worden dat de dwarshellingen zeer beperkt zullen blijven.

5 Conclusies

5.1 Waterbeweging in het lichterdok

Tengevolge van de passage van een zeeschip op de Westerschelde ontstaat er een waterbeweging langsheen de zeekade en in het lichterdok dat beschouwd kan worden als de superpositie van een langzame oscillatie en een golfpatroon met hogere frequentie. In het lichterdok is het hogerfrequente golfpatroon echter onbeduidend, zodat het gedrag van een afgemeerd binnenschip in het lichterdok uitsluitend bepaald wordt door het laagfrequente verschijnsel.

Het tijdsverloop van de laagfrequente signaal wordt gekenmerkt door een relatief beperkte rijzing, gevolgd door een belangrijke daling, waarna een oscillerende beweging optreedt met een periode van ca. 6 minuten.

Naarmate men zich dieper in het lichterdok bevindt, worden de verticale bewegingen van de waterspiegel meer uitgesproken. In eenzelfde dwarsdoorsnede van het lichterdok is het tijdsverloop nagenoeg identiek.

Het verloop van de rijzingen en dalingen is afhankelijk van:
- de snelheid van het passerende schip;
- de dwarse afstand;
- de vaarzin van het passerende schip: de waterbeweging is meer uitgesproken bij een opvarend schip, maar in de praktijk zal een opvarend schip op een grotere dwarsafstand de terminal passeren;
- de waterdiepte: bij lage waterstand is de waterbeweging meer uitgesproken.

De invloed van de stroming veroorzaakt door het koelwater komende uit de uitlaat van de centrale van Borssele op de beweging van de waterspiegel in het lichterdok is nauwelijks waarneembaar.

5.2 Gedrag van afgemeerde binnenschepen

Het tijdsverloop van de domp- en stampbeweging van een afgemeerd binnenschip kan op een statische wijze bepaald worden.
Voor de dompbeweging kan men het volgende concluderen:
- de beweging wordt sterker naarmate het schip dieper in het lichterdok is afgemeerd;
- bij de passage van een afvarend zeeschip bij een snelheid van 15 knoop bedraagt de inzinking maximaal 0.30 m.

Voor de langshelling kan men volgend besluit trekken:
- bij de passage van een afvarend zeeschip bij een snelheid van 15 knoop bedraagt de langshelling maximaal 0.8 mm/m.

In een statische benadering bedraagt de maximale langskracht die door de trossen moet opgenomen worden bij de passage van een zeeschip met snelheid 15 knoop nooit meer dan 0.001 maal het gewichtsdeplacement, wat beduidend lager is dan de

toelaatbare waarde voor de kracht op te nemen door de trossen tijdens het vullen of ledigen van een sluis (0.00167 x totaal scheepsgewicht).

De werkelijke troskrachten liggen echter hoger dan deze statische benadering, omwille van:

- dynamische effecten, veroorzaakt door het systeem binnenschip – meertrossen, dat als massa-veer-systeem fungeert;
- de verticale krachtcomponenten die ontstaan wanneer het schip onder invloed van de daling van het wateroppervlak aan de trossen gaat hangen.

Uit simulaties in gebleken dat het steeds mogelijk is een afmeerconfiguratie te vinden waarbij de trossen maximaal tot een grootte-orde van ca. 10 % van de breuksterkte belast worden bij passage van een afvarend schip met snelheid 15 knoop. Hiertoe dienen de trossen echter voldoende flexibel (i.e voldoende lang, of voldoende rekbaar) gekozen te worden, vooral in situaties waarbij het vasthechtingspunt op het schip beduidend lager ligt dan de kaai.

De schrikbeweging langs de kaai hangt sterk af van de elastische eigenschappen en de lengte van de trossen. Bij staalkabels is deze van de grootte-orde van 0.1 tot 0.2 m, maar bij meer elastische trossen kan deze 1 tot 2 m bedragen. In het laatste geval is de lengte van de tros een zeer belangrijke parameter.

Bij gebruikelijke waarden van de aanvangsmetacenterhoogte blijft de slingerbeweging zeer beperkt: de hellingshoeken blijven beduidend kleiner dan 1°. Verzet- en gierbewegingen kunnen zonder meer verwaarloosd worden.

Antwerpen, 4 oktober 2000

Prof. Marc VANTORRE

6 Geraadpleegde werken

[1] PARTENSCKY, H.-W. Binnenverkehrswasserbau. Schleusenanlagen. Springer-Verlag, Berlin, 1986.

Prof. dr. ir. Marc VANTORRE

Universiteit Gent
VakgroepTW04V (Mechanische constructie en productie)
Afdeling Maritieme Technologie
Technologiepark Zwijnaarde 9
B 9052 GENT (België)
Telefoon +32 (0)478 349971
+32 (0)9 2645555
Fax +32 (0)9 2645843
marc.vantorre@rug.ac.be

p/a Flanders Hydraulics
Berchemlei 115
B 2140 ANTWERPEN (België)
Telefoon + 32 (0)3 2361850
Fax + 32 (0)3 2359523
marc.vantorre@lin.vlaanderen.be

privé:
Drakenhoflaan 61
B 2100 ANTWERPEN (België)
Telefoon +32 (0)3 3226434

UNIVERSITEIT GENT
Vakgroep TW04V
Afdeling Maritieme Technologie

CONTAINERTERMINAL TE VLISSINGEN
ONDERZOEK LICHTERDOK WESTERSCHELDE

Figuren

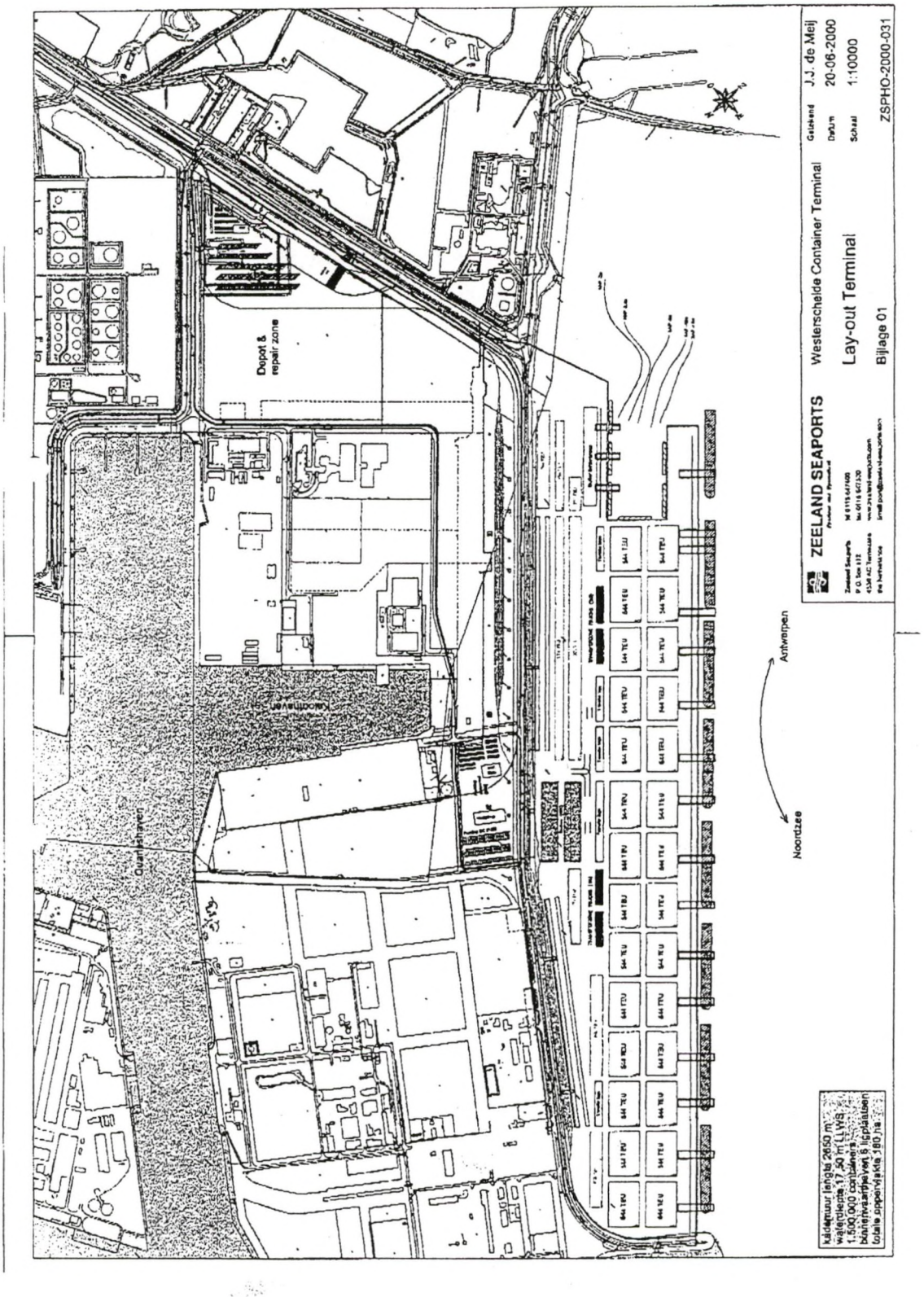
door

prof. Marc VANTORRE
Hoogleraar RUG

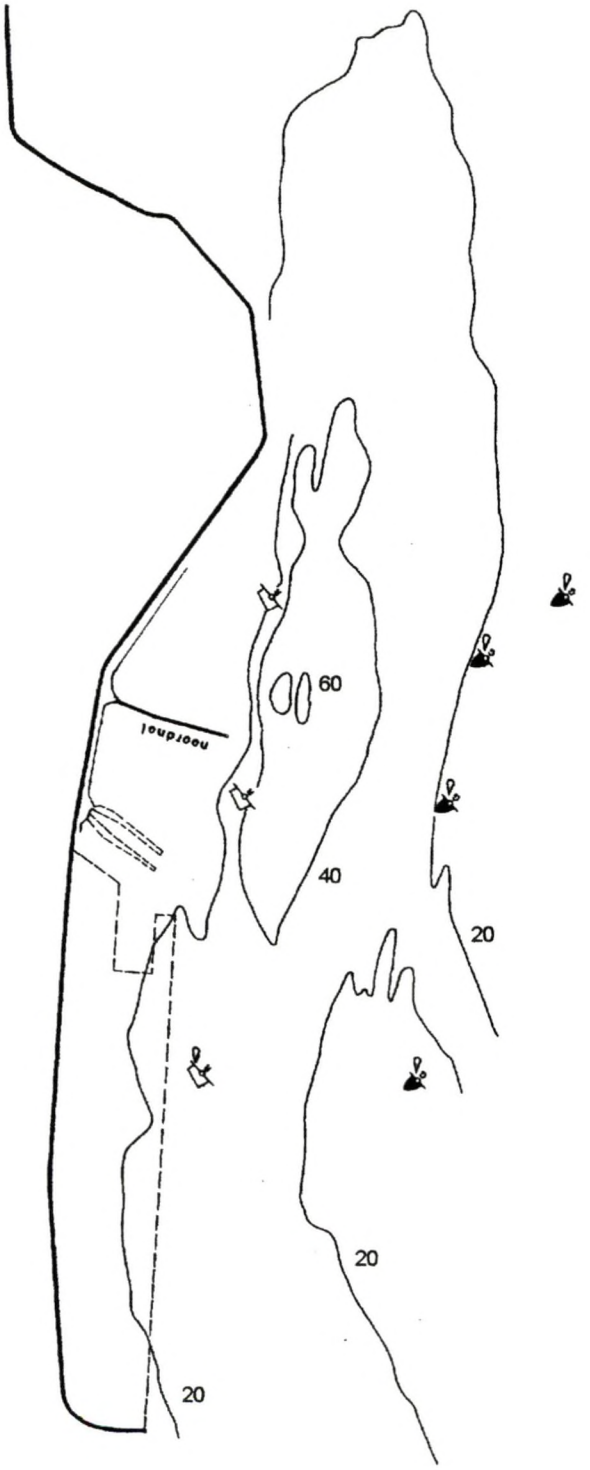
Studie uitgevoerd in opdracht van
HESSENATIE N.V.

in samenwerking met
Afdeling Waterbouwkundig Laboratorium en Hydrologisch Onderzoek
AWZ – LIN – MVG

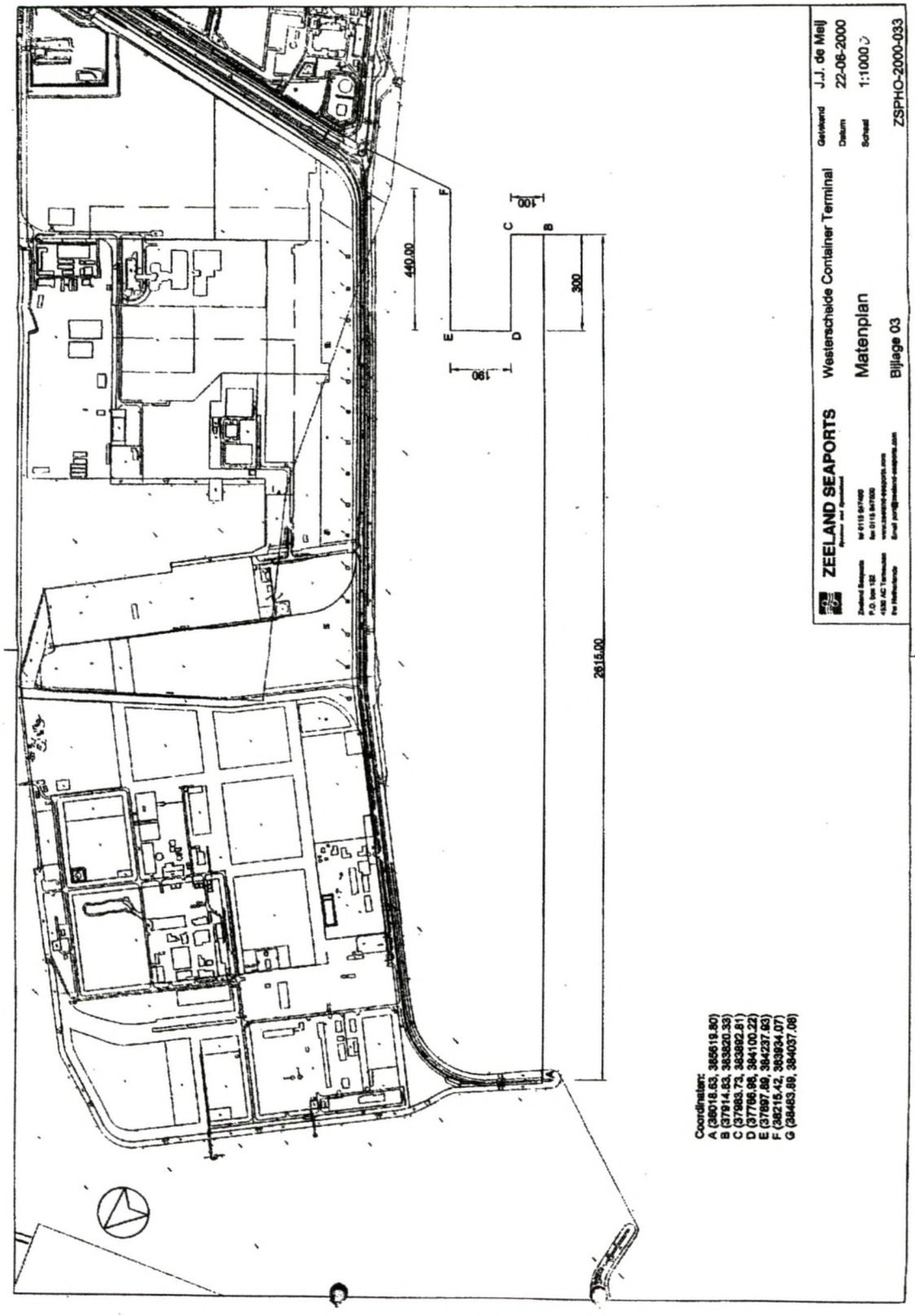
Antwerpen, oktober 2000



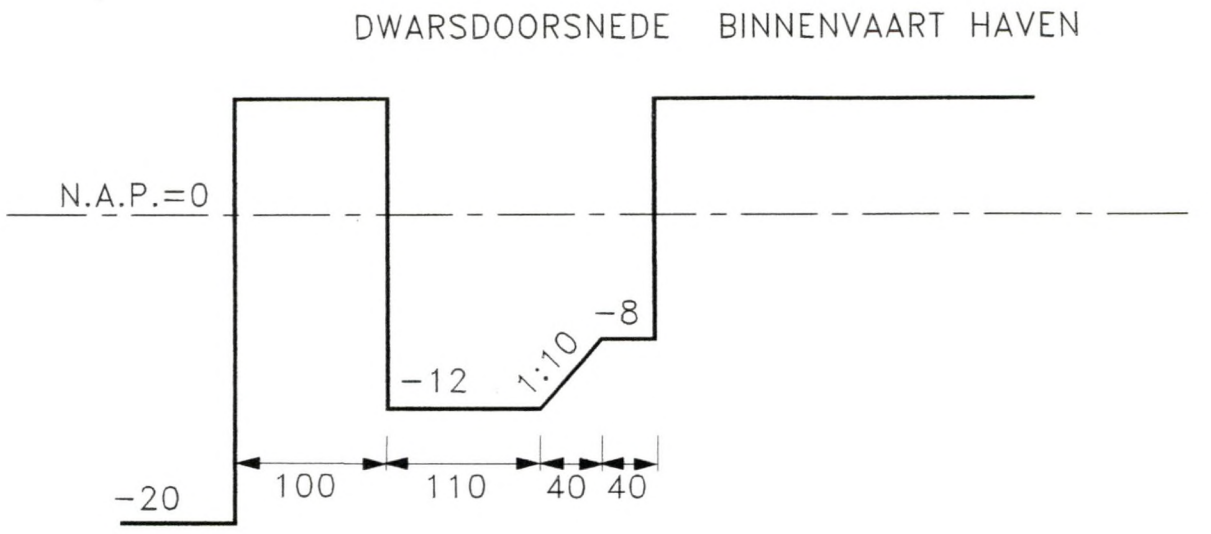
Figuur 1. Westerschelde Container Terminal: Lay-out.



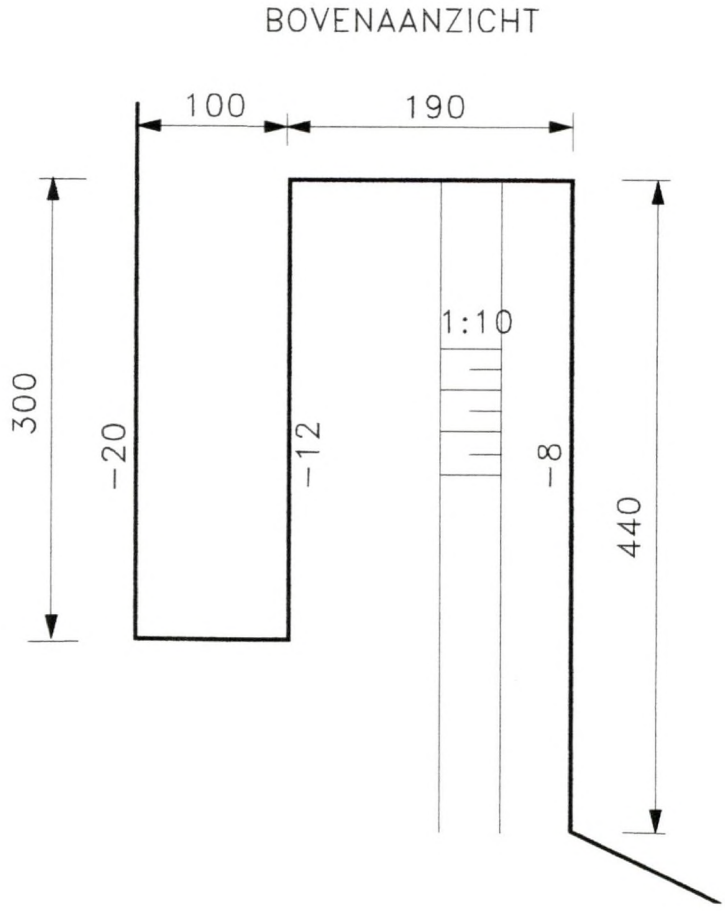
Figuur 2.
Omgeving Westerschelde Container Terminal: actuele situatie (diepte t.o.v. NAP, gebaseerd op peilingsplannen Rijkswaterstaat Directie Zeeland nr. 99.174)



Figuur 3a. Westerschelde Container Terminal: horizontale afmetingen.

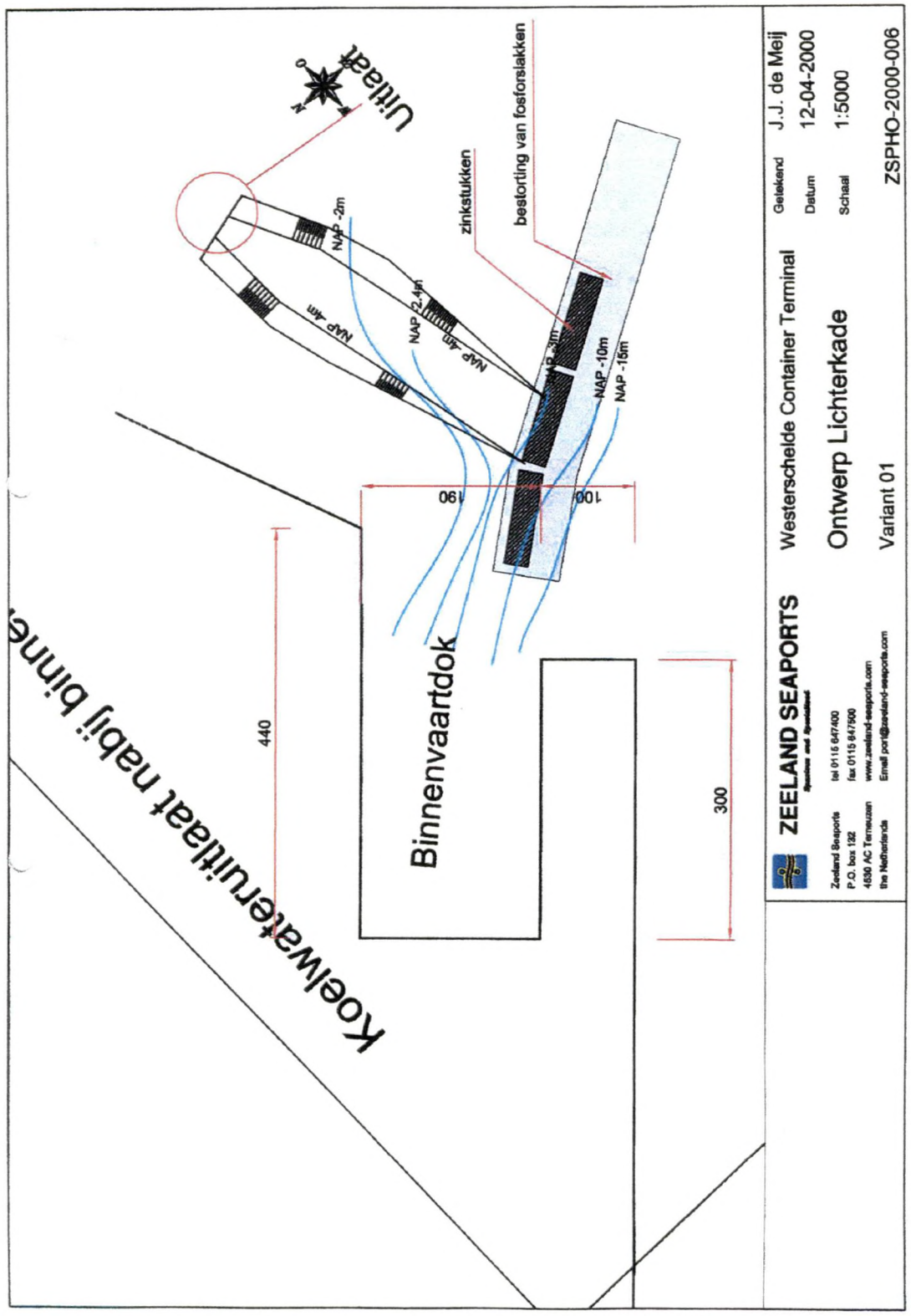


Schaal: horizontaal 1/5000 (i.e. afmetingen)
verticaal 1/500 (i.e. diepte)

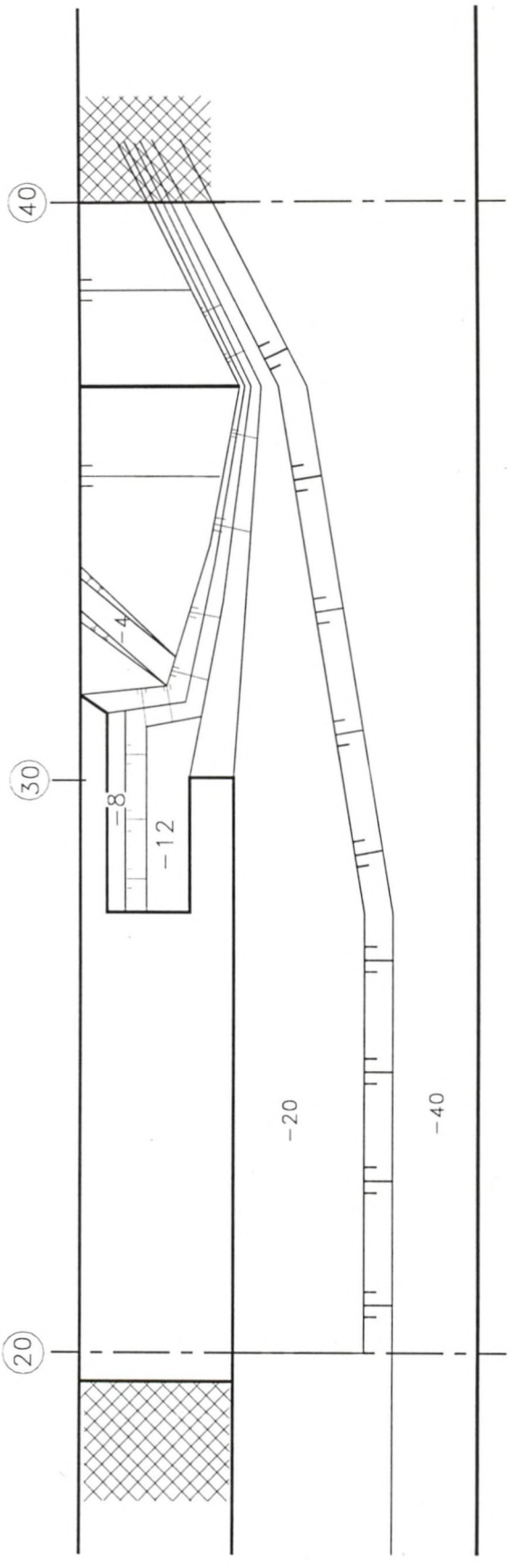


Schaal: 1/5000
Maten in meter

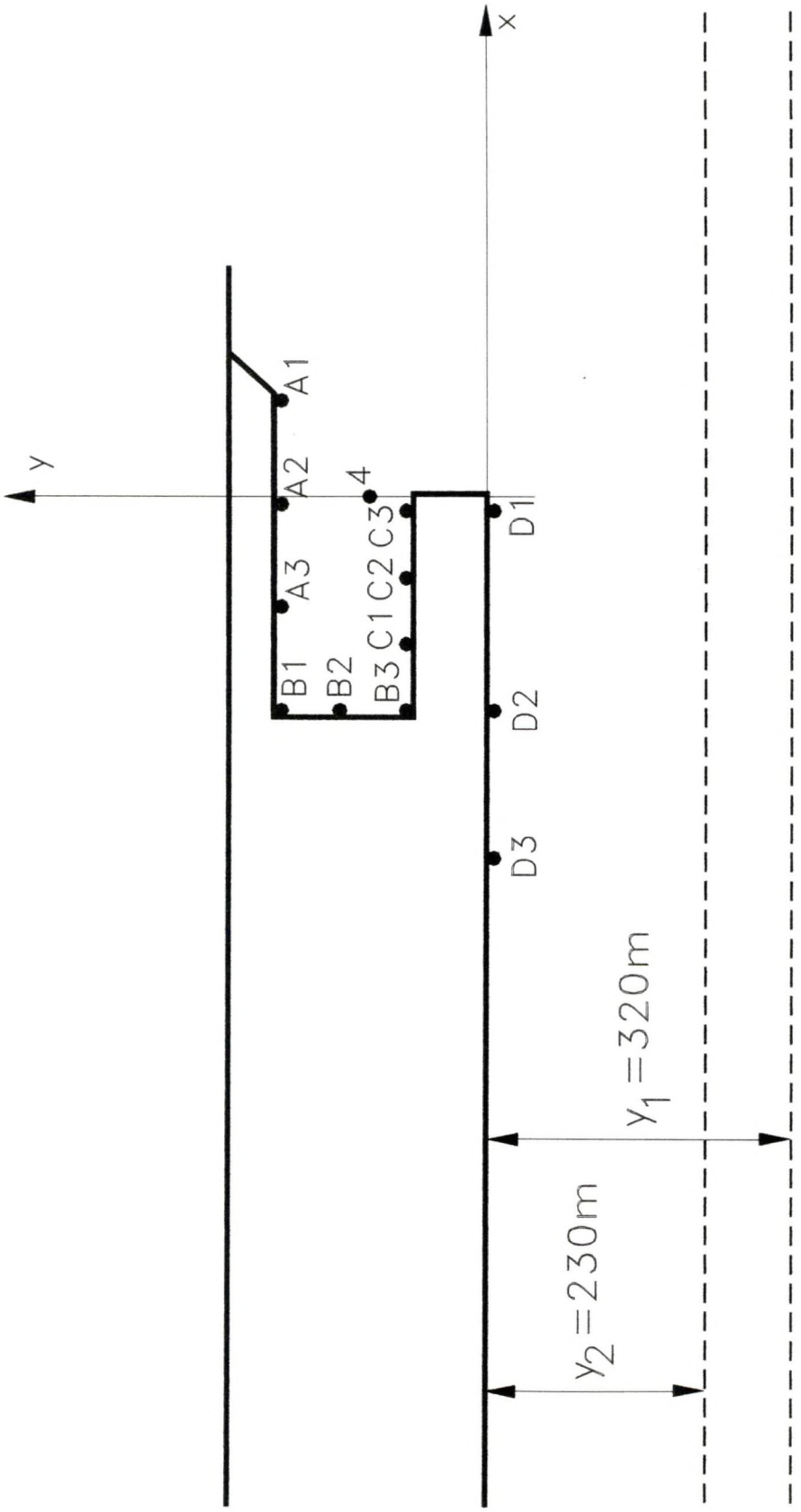
Figuur 3b. Westerschelde Container Terminal: verticale afmetingen in het binnenvaartdok.



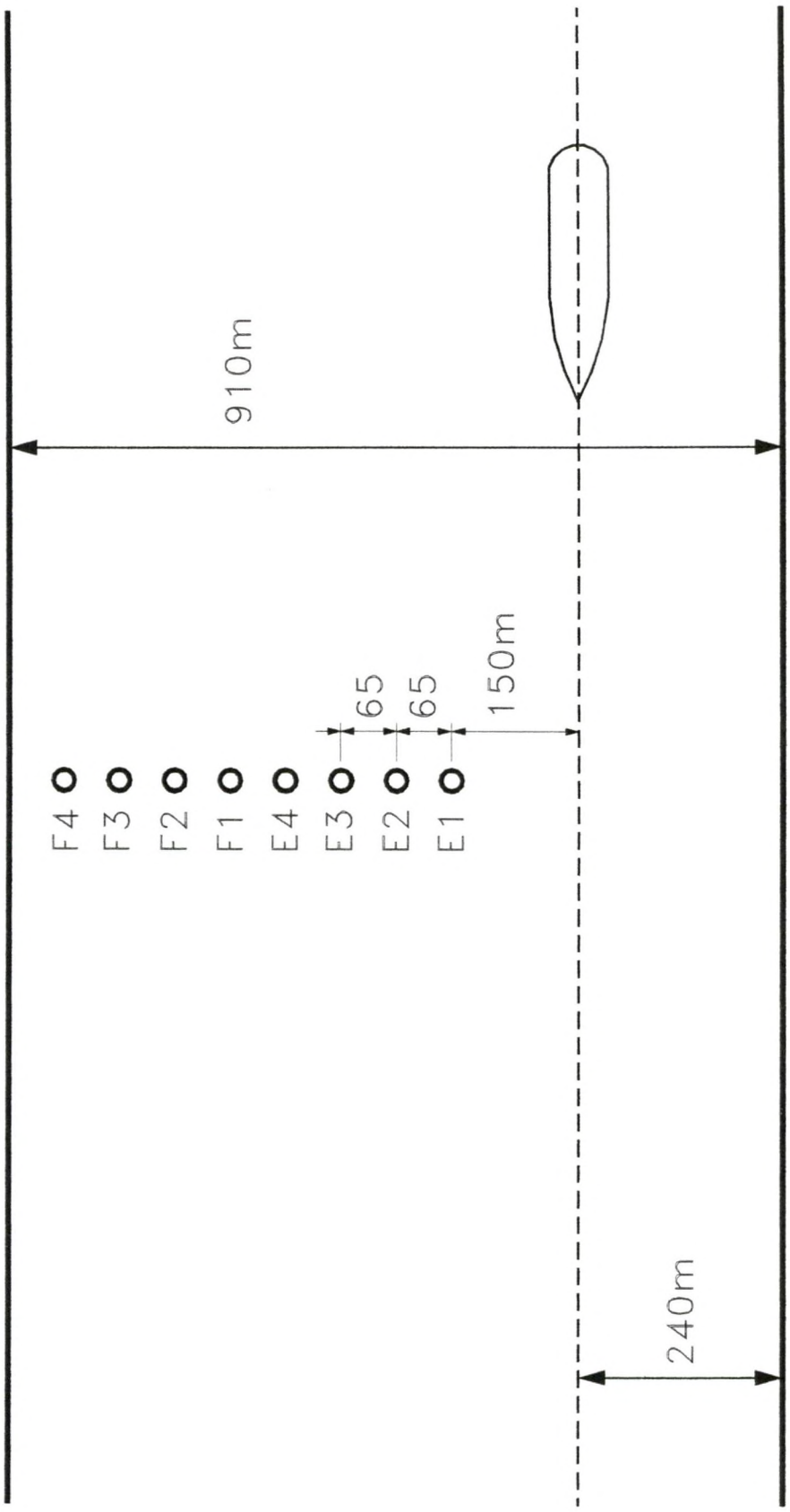
Figuur 4. Westerschelde Container Terminal: koelwateruitlaat nabij binnenvaartdok.



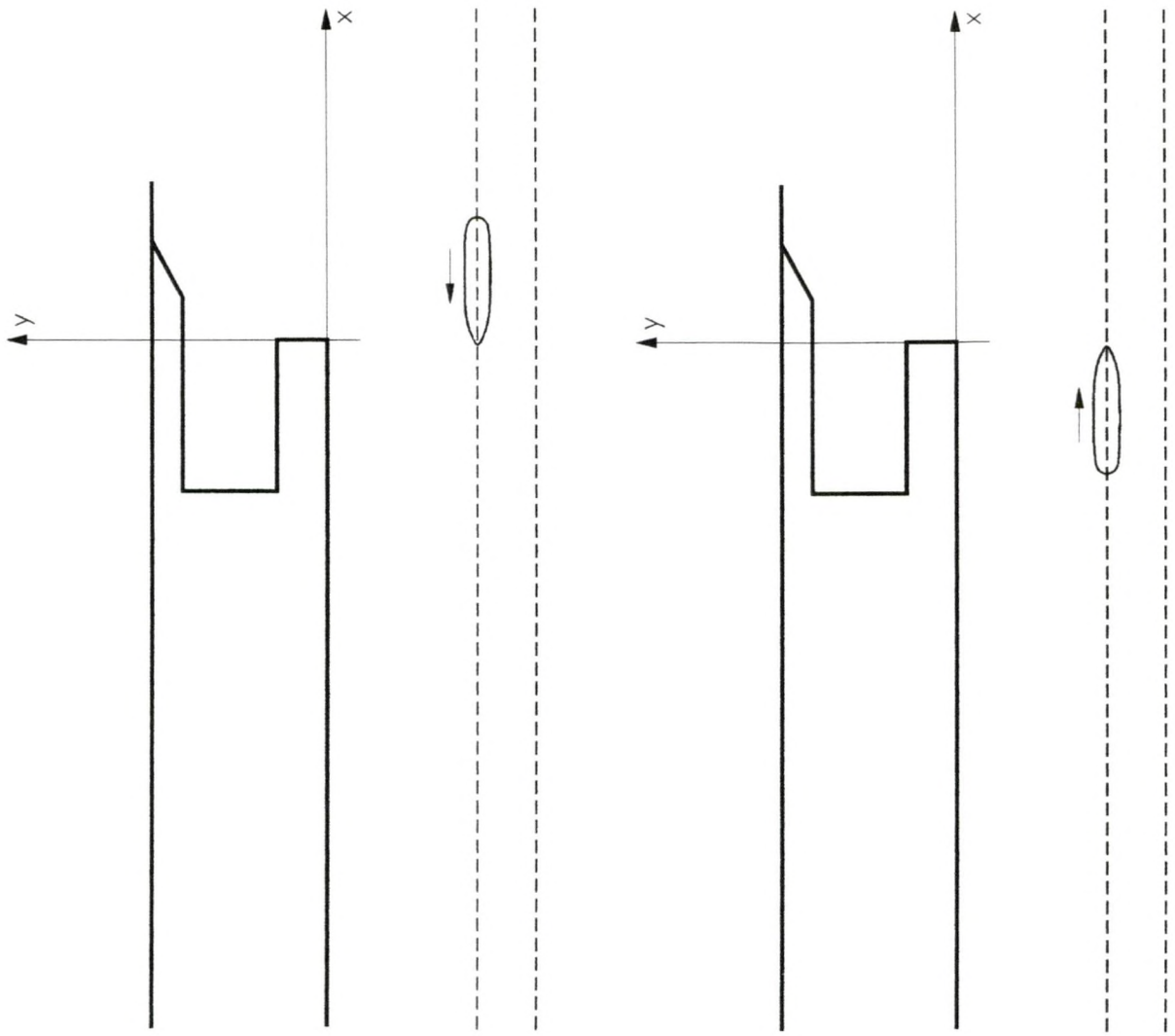
Figuur 5.
Westerschelde Container Terminal: inbouw van het schaalmodel in de scheepsmanoeuvreertank



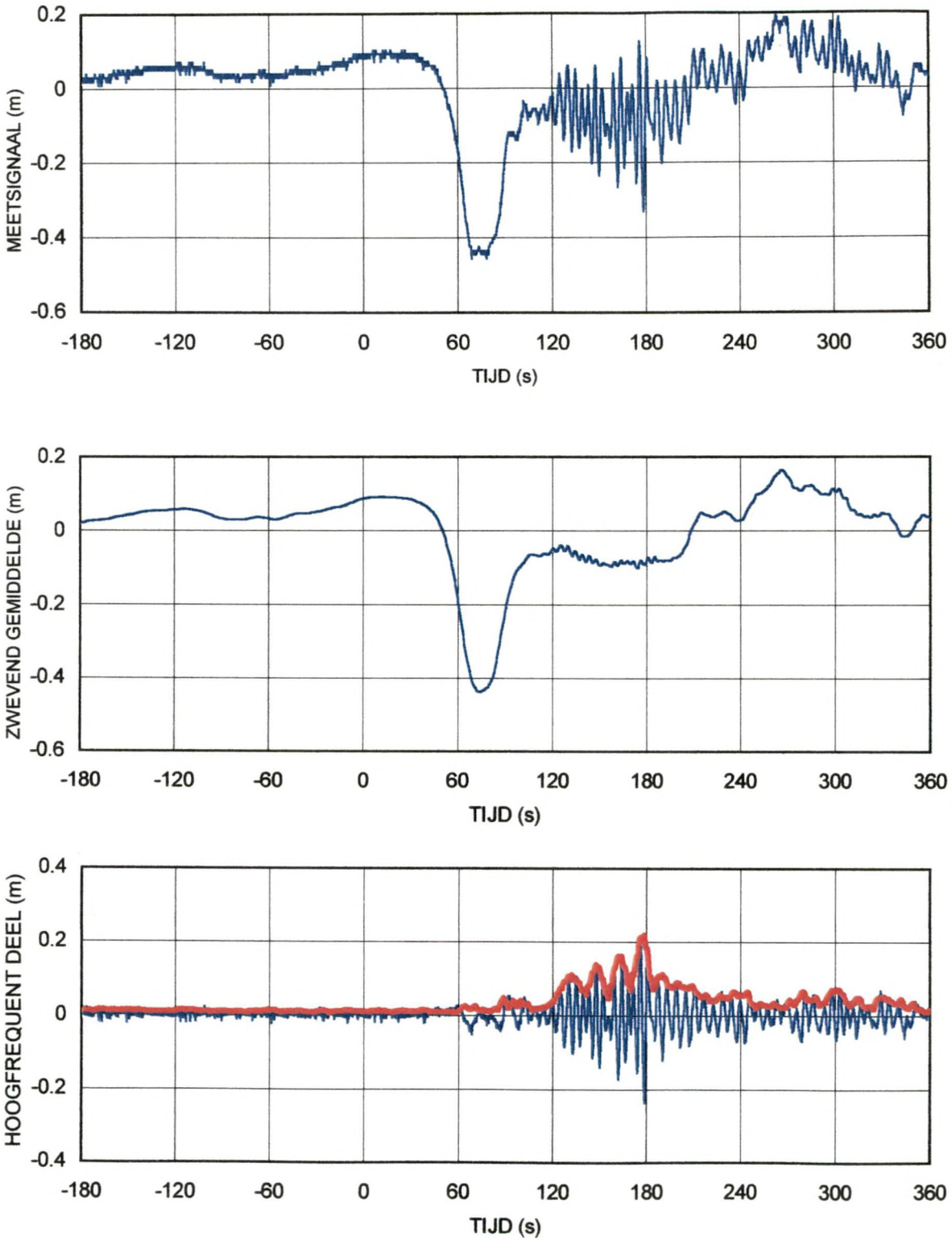
Figuur 6.
Positie van de golvenmeters in het schaalmodel van het binnenvaartdok (proeven HNIxxA, HNIxxB, HNIxxC, HNIxxD).



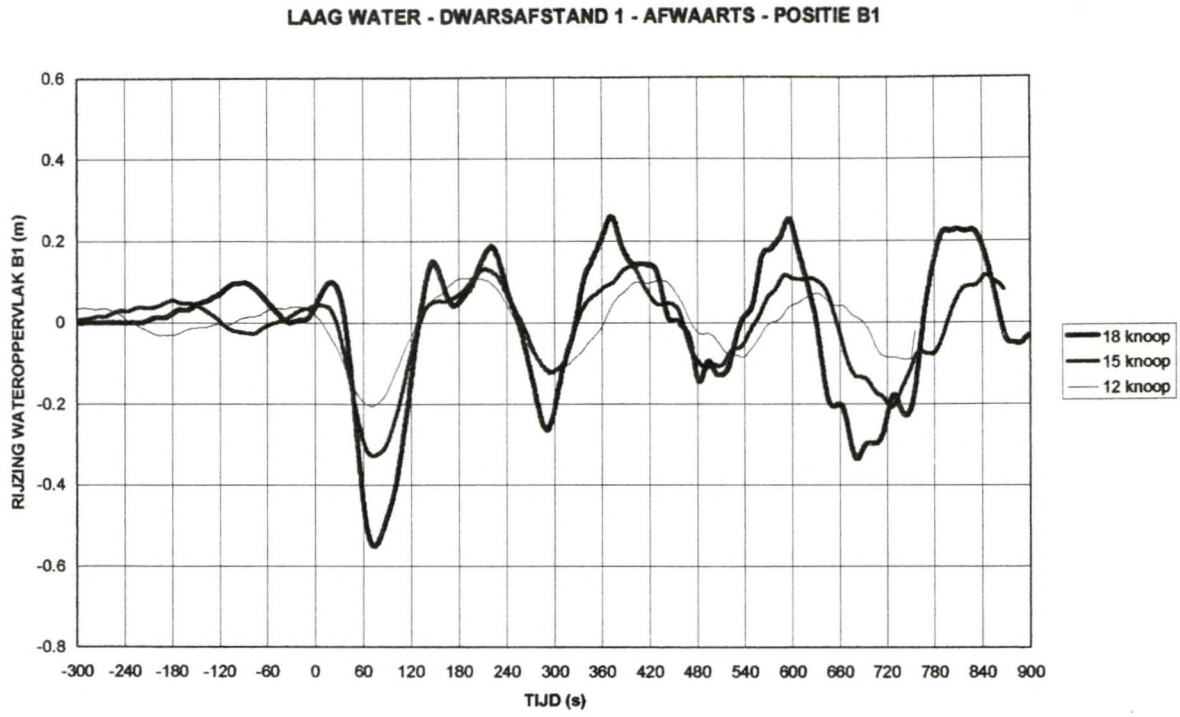
Figuur 7.
Positie van de golvenmeters in lege scheepsmanoeuvreertank
(proeven HNIxxE, HNIxxF).



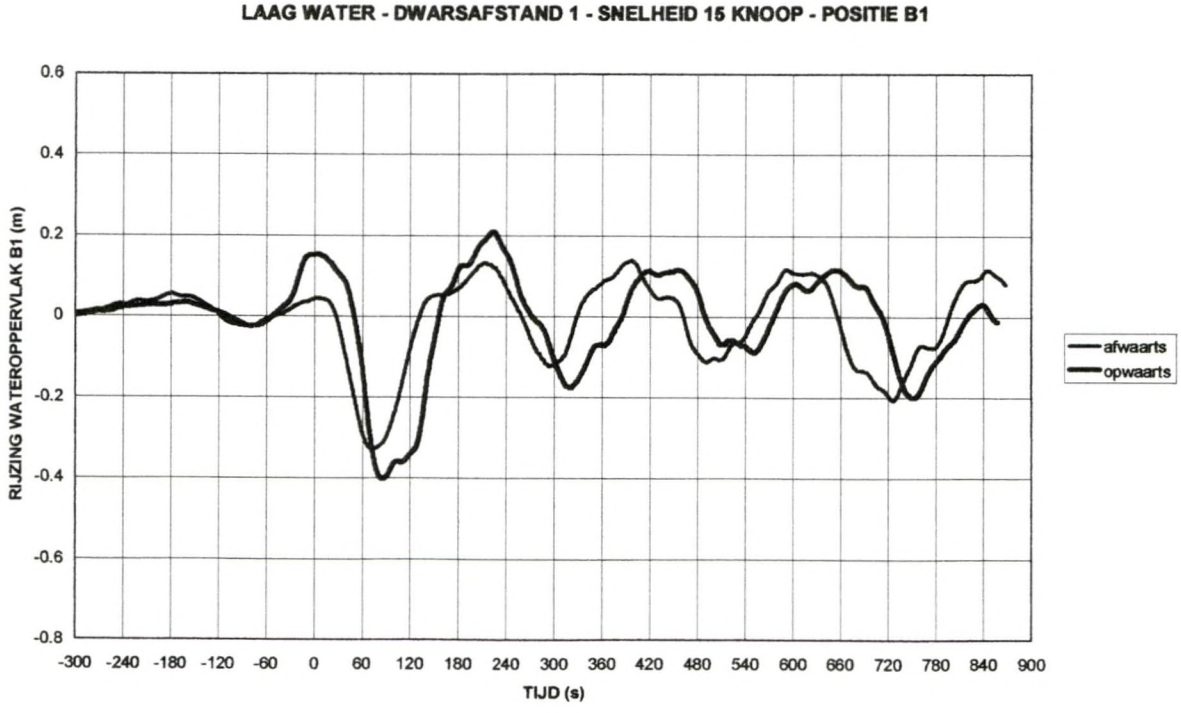
Figuur 8. Positie van het scheepsmodel bij tijdstip t=0.



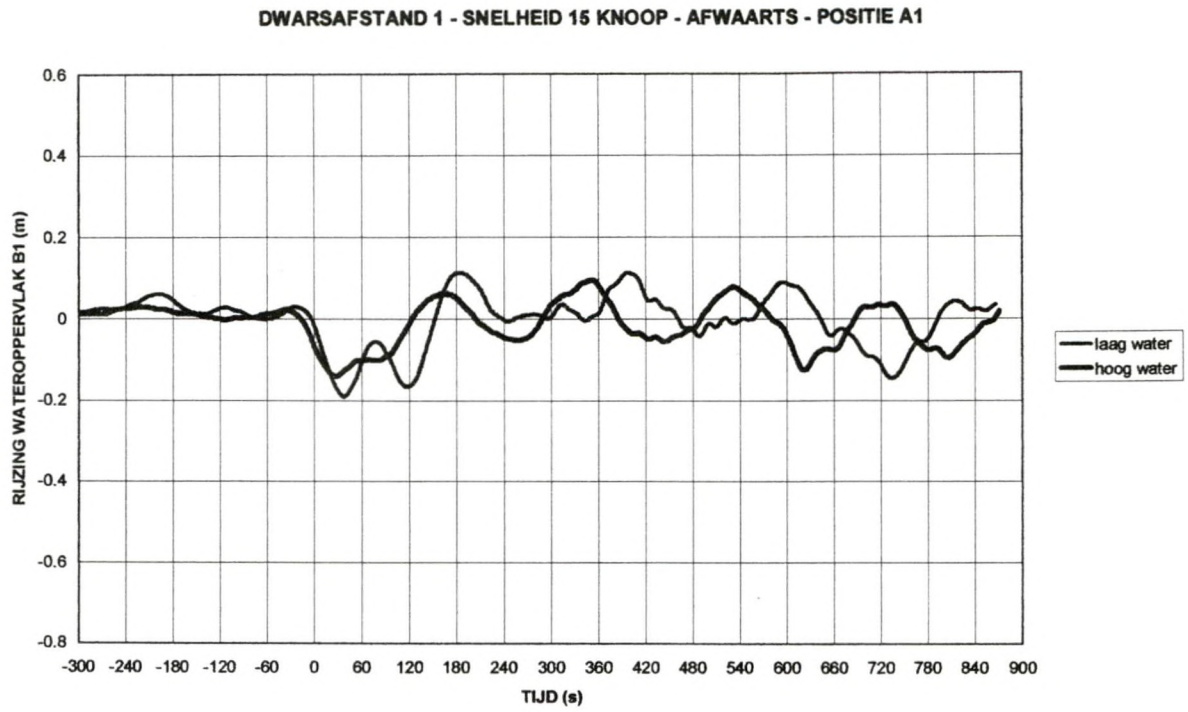
Figuur 9. Opsplitsing van het meetsignaal in laag- en hoogfrequente componenten.



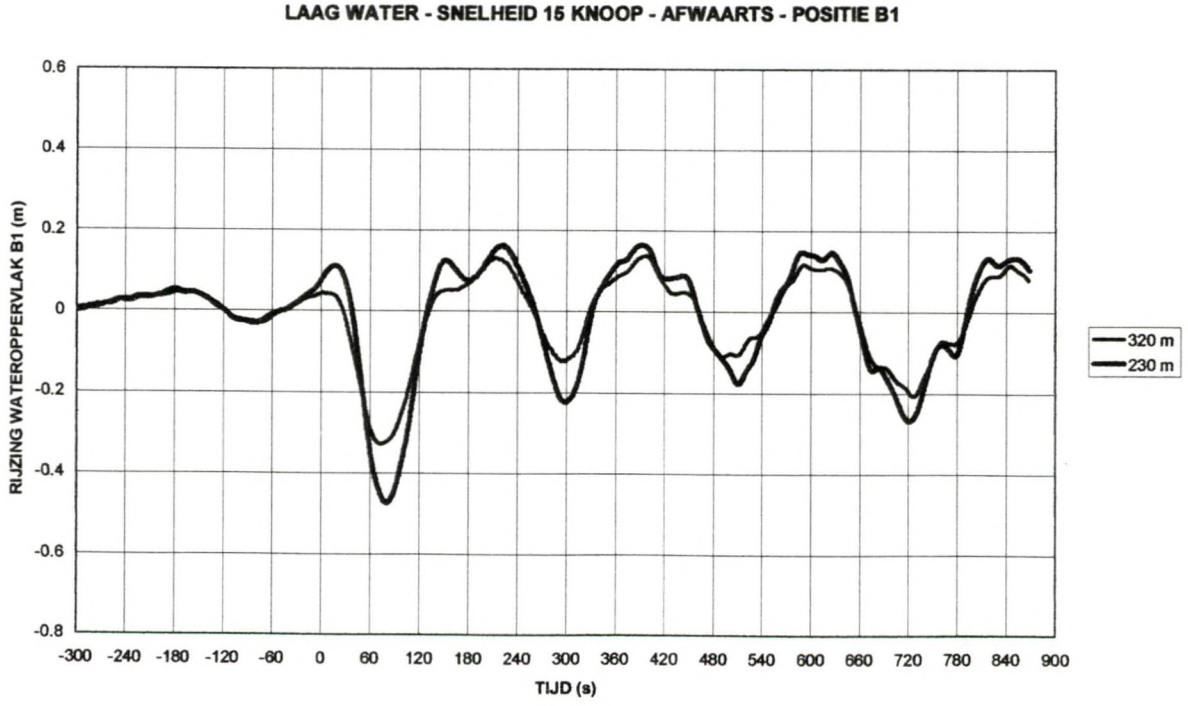
Figuur 10.
Invloed van de snelheid op de verticale beweging van het wateroppervlak in het binnenvaartdok.



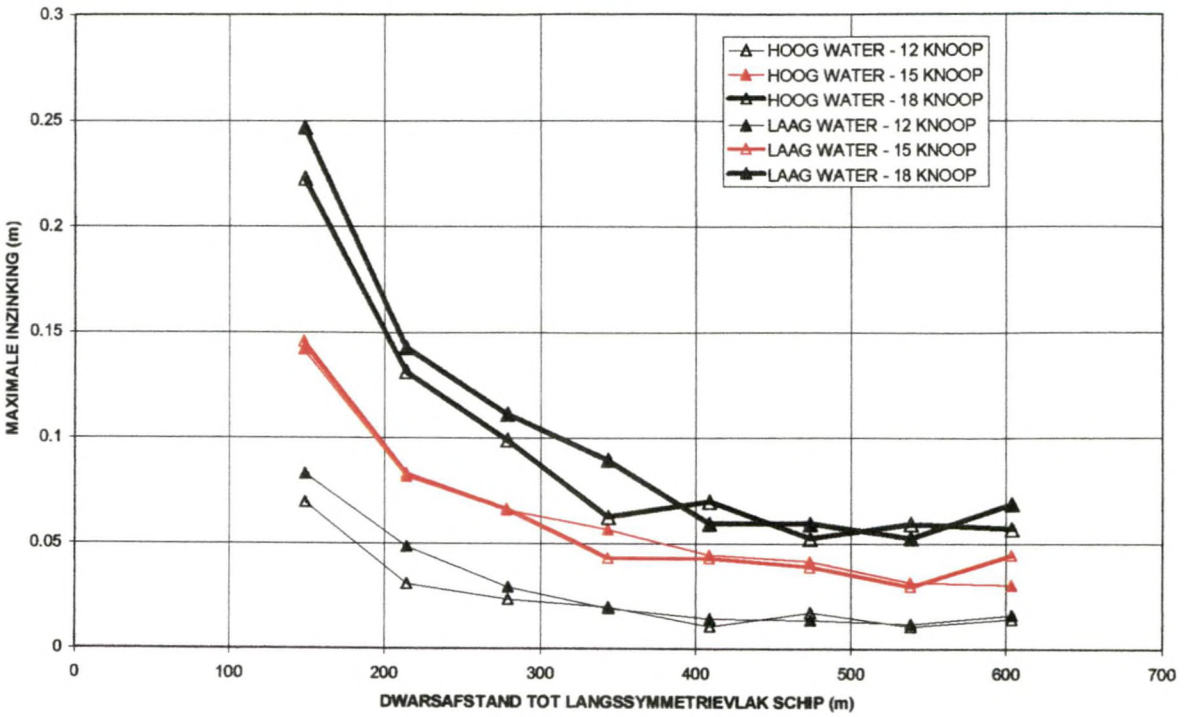
Figuur 11.
Invloed van de vaarzin op de verticale beweging van het wateroppervlak in het binnenvaartdok.



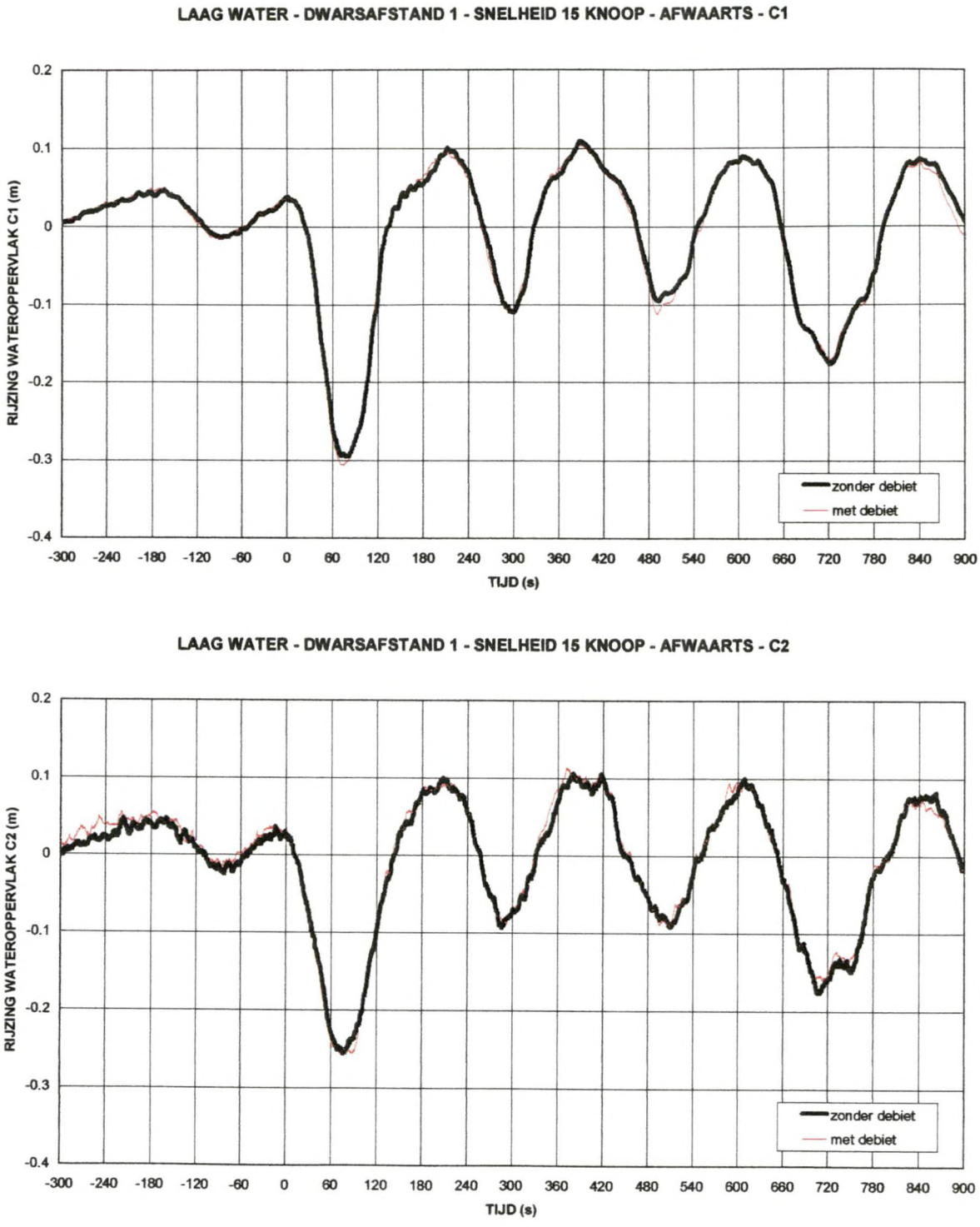
Figuur 12.
Invloed van de waterdiepte op de verticale beweging van het wateroppervlak in het binnenvaartdok.



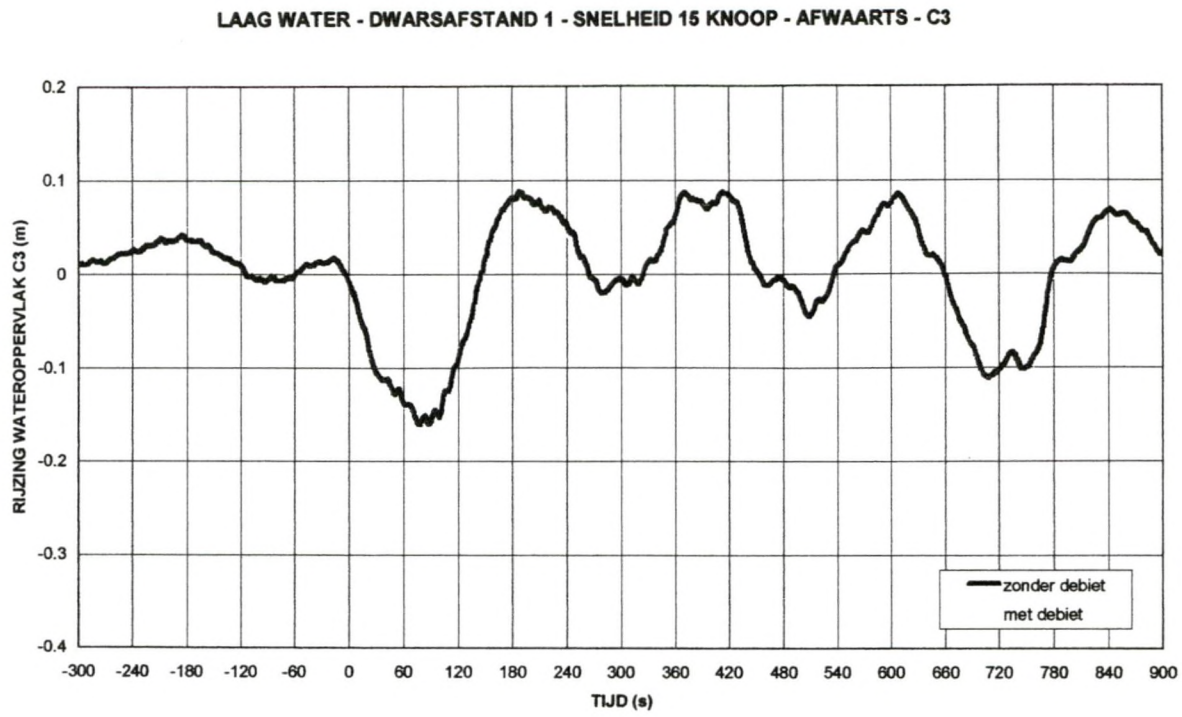
Figuur 13.
Invloed van de laterale afstand van het passerende schip tot de kaaimuur op de verticale beweging van het wateroppervlak in het binnenvaartdok

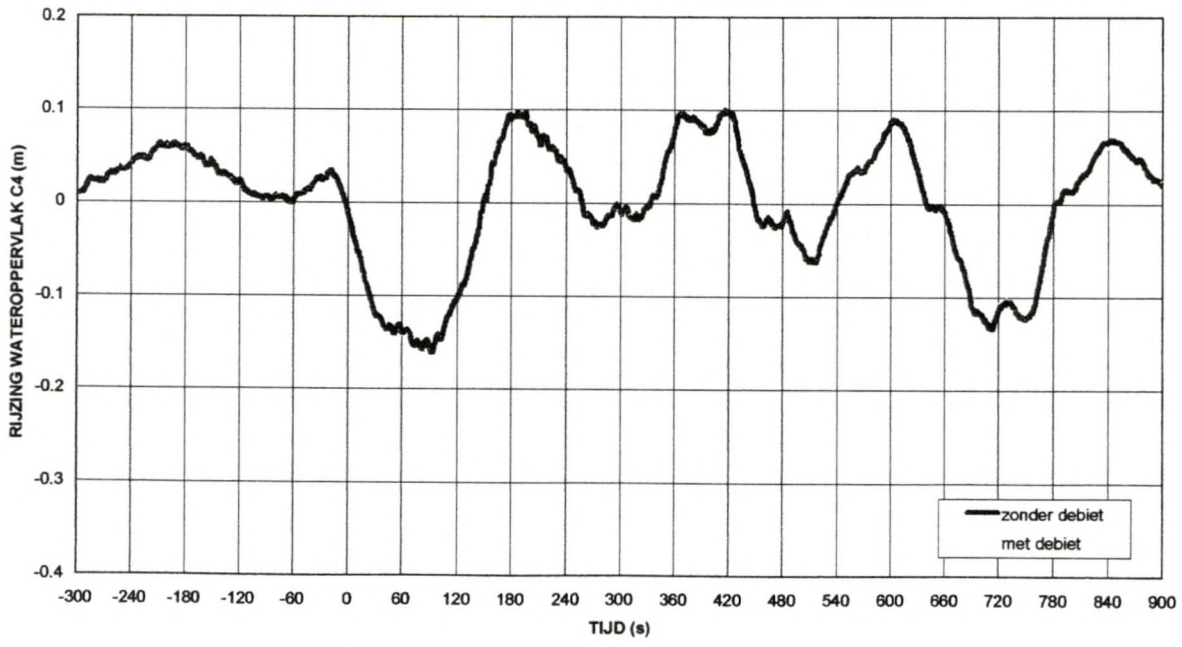


Figuur 14.
Maximale inzinking van het wateroppervlak in functie van de dwarsafstand tot het langssymmetrievlak van het passerende schip (proeven HNIxxE en HNIxxF: uitgevoerd in lege sleeptank)

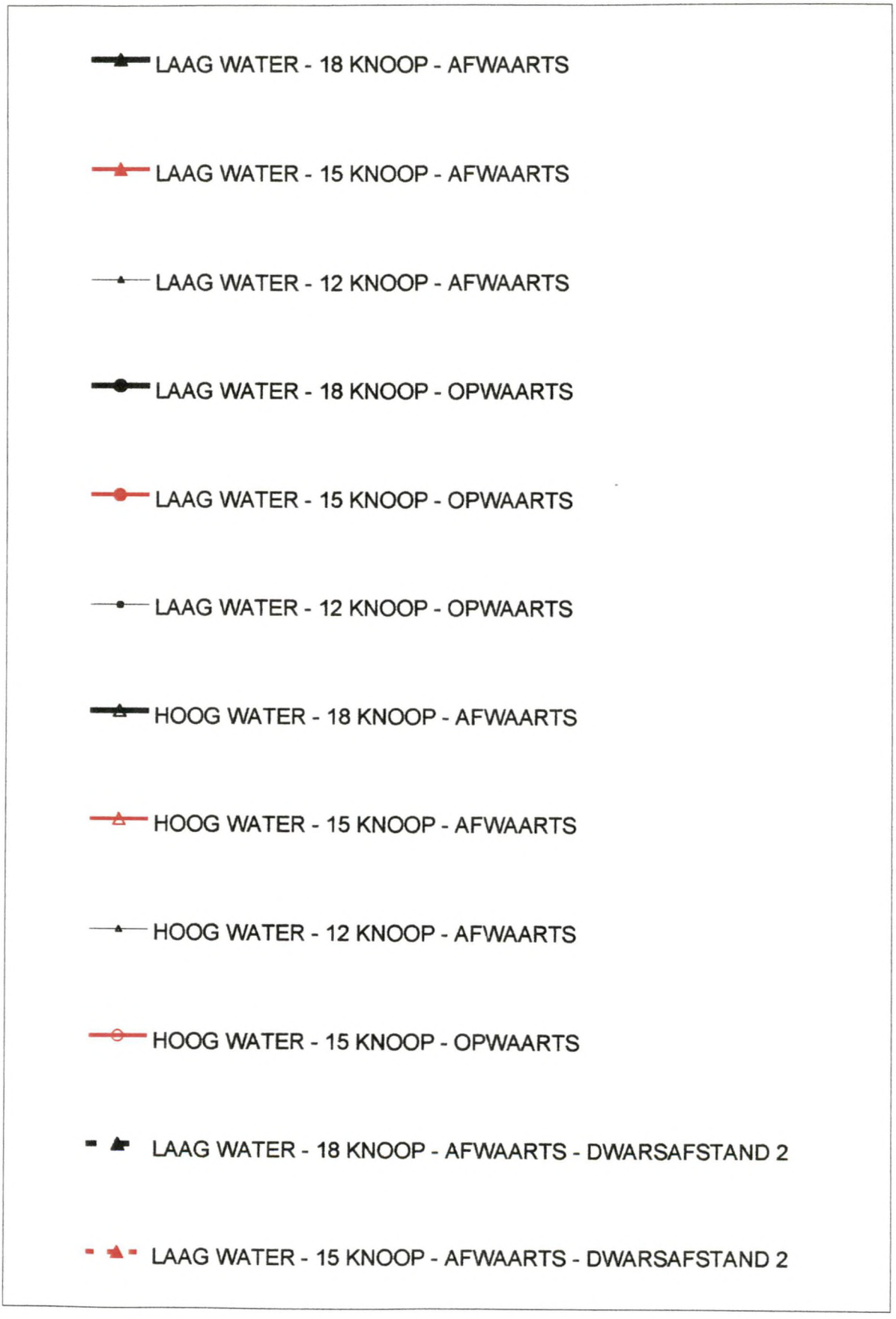


Figuur 15.
Invloed van het koelwaterdebiet op de verticale beweging van het wateroppervlak in het binnenvaartdok

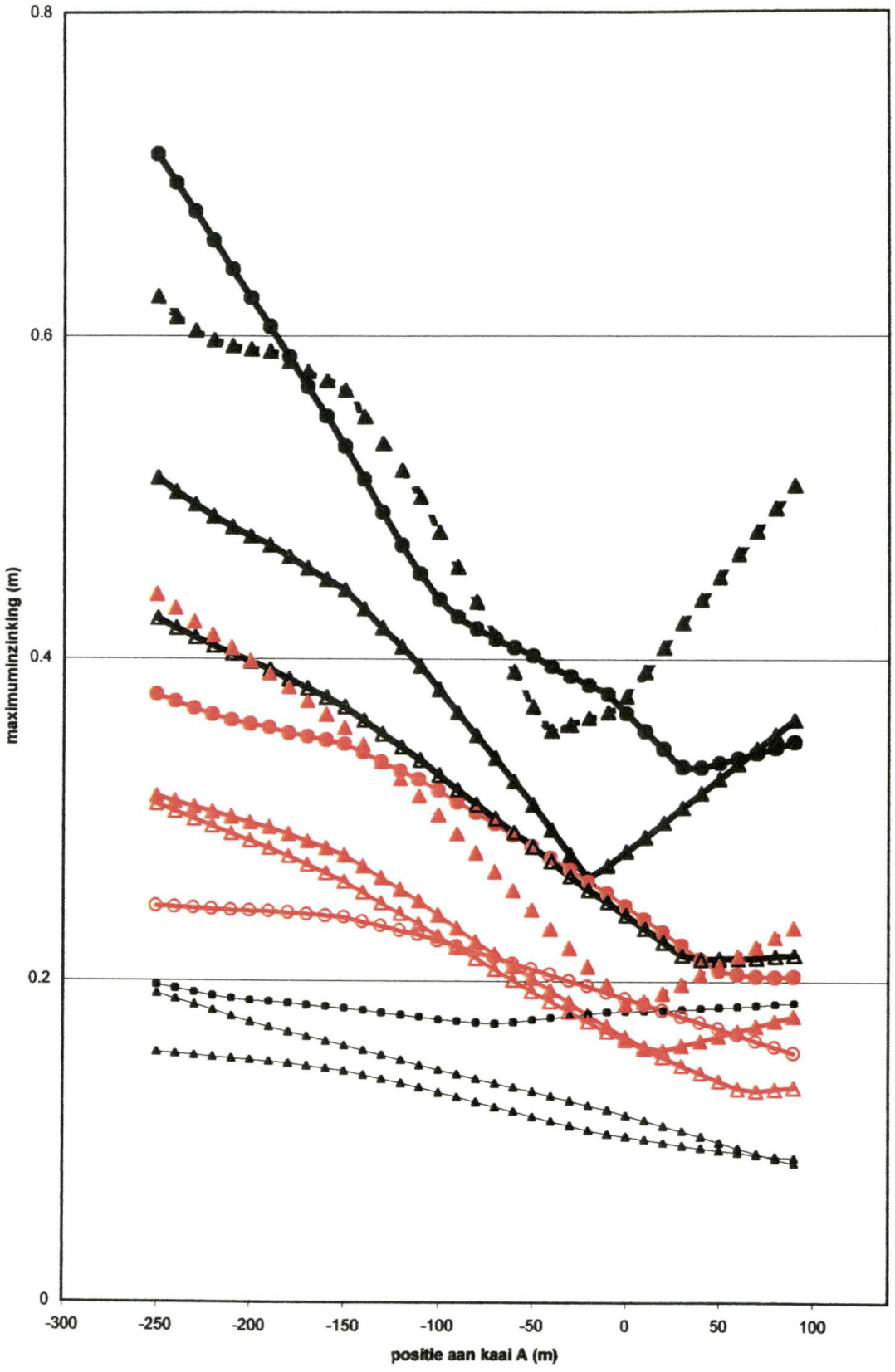




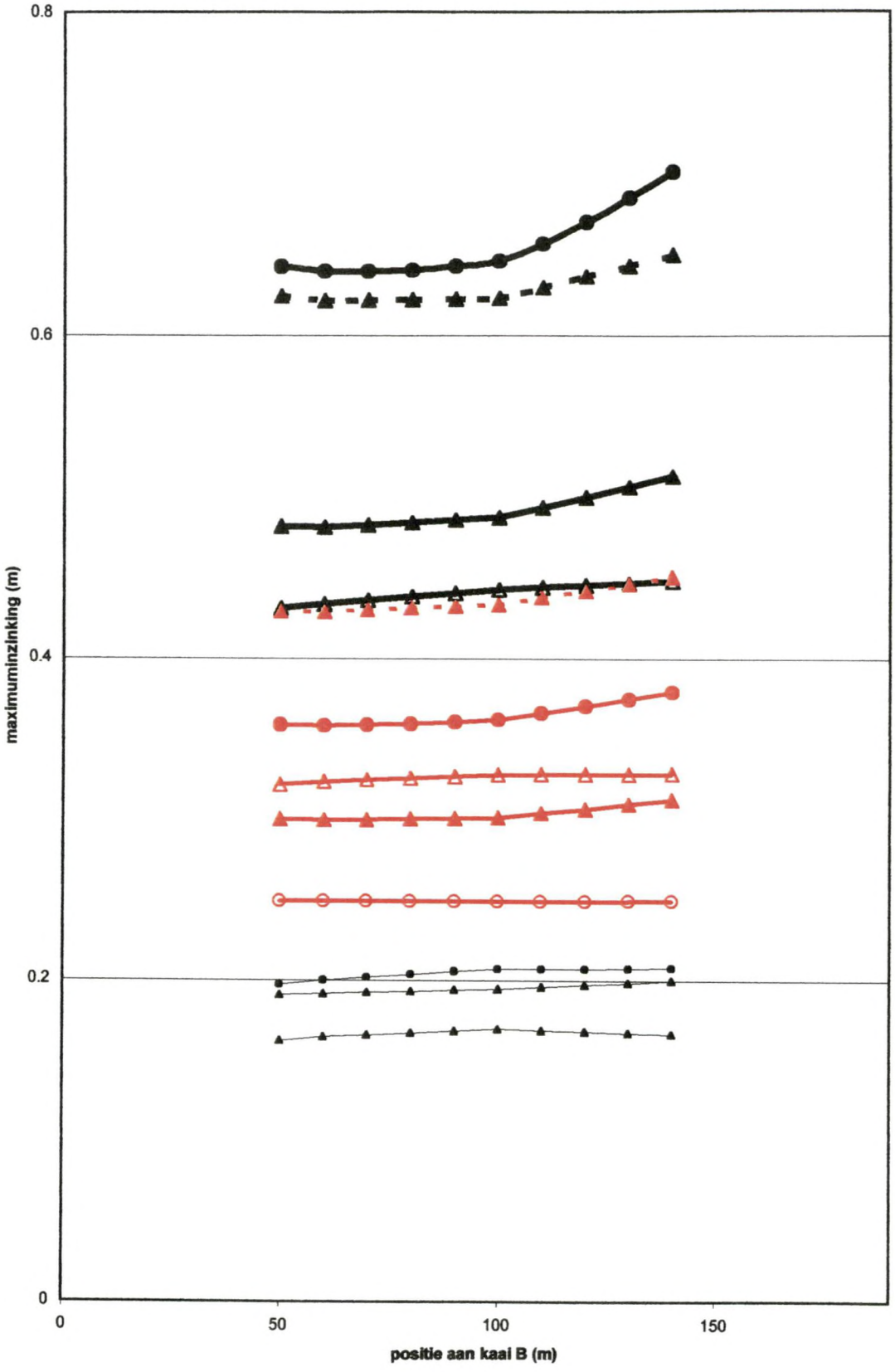
Figuur 15 (vervolg).
Invloed van het koelwaterdebiet op de verticale beweging van het wateroppervlak in het binnenvaartdok



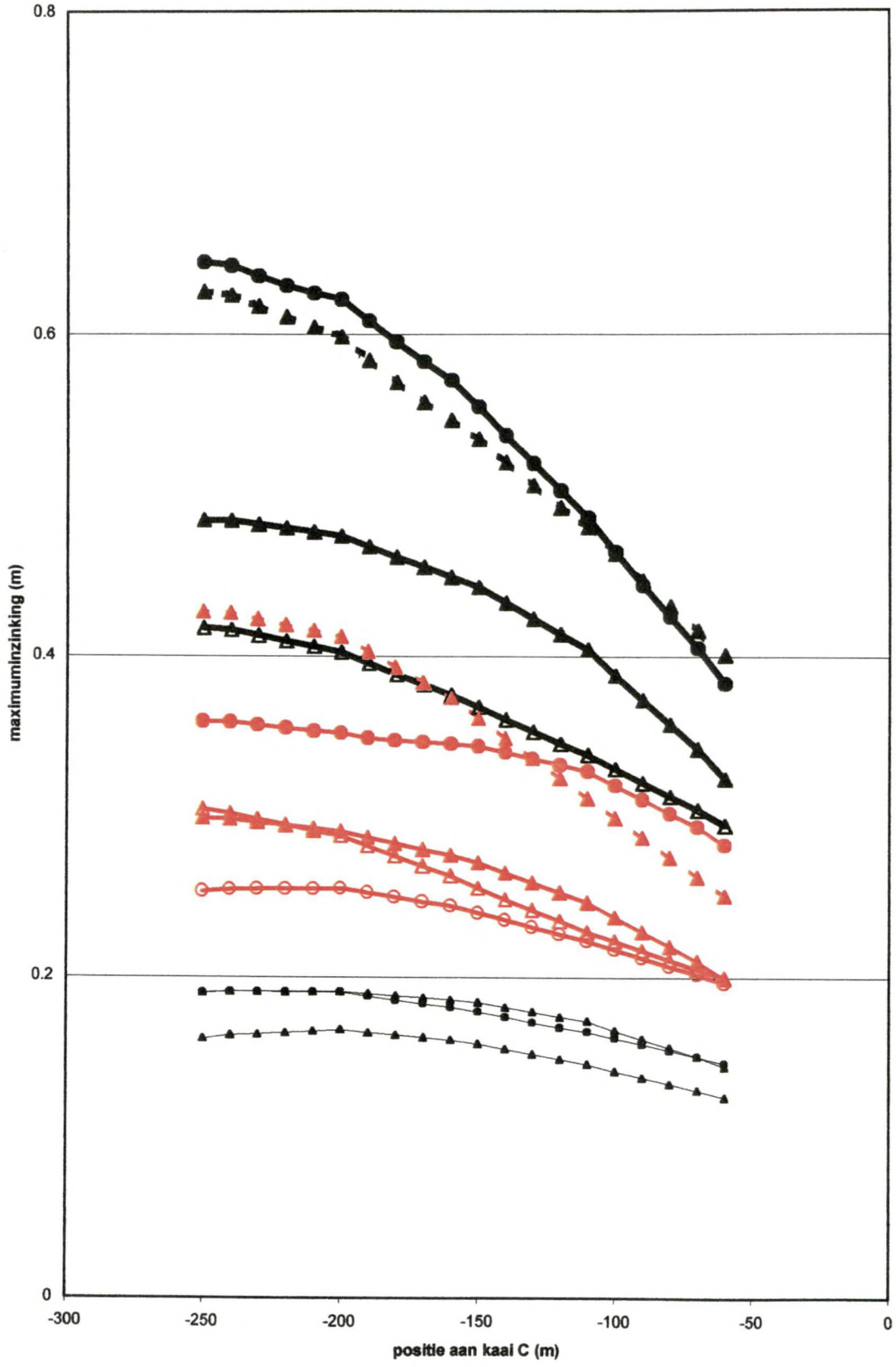
Figuren 16 – 17: legende



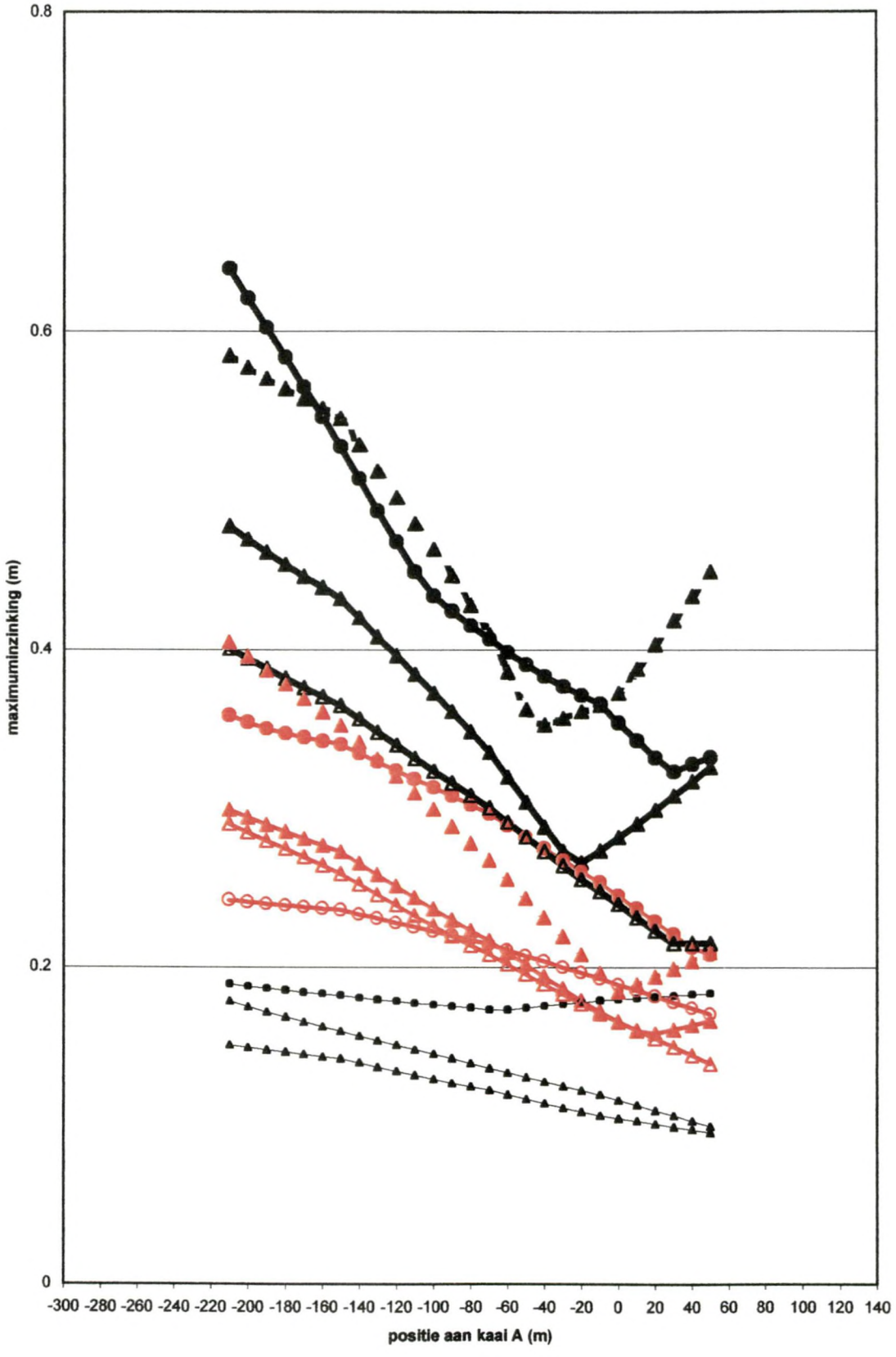
Figuur 16a.
Maximale inzinking (statische benadering) van een binnenschip klasse IV afgemeerd aan kaai A.



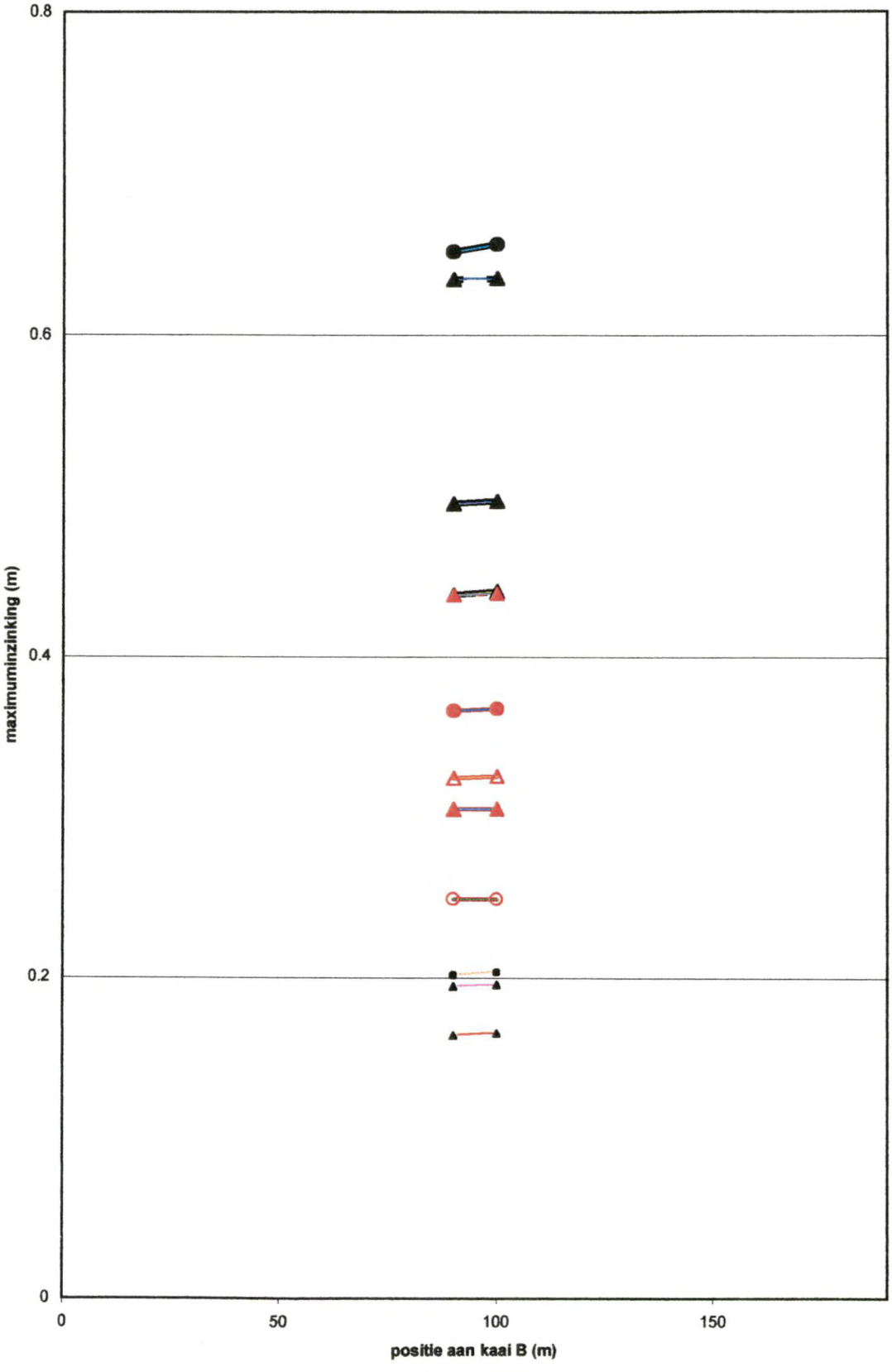
Figuur 16b.
Maximale inzinking (statische benadering) van een binnenschip klasse IV afgemeerd aan kaai B.



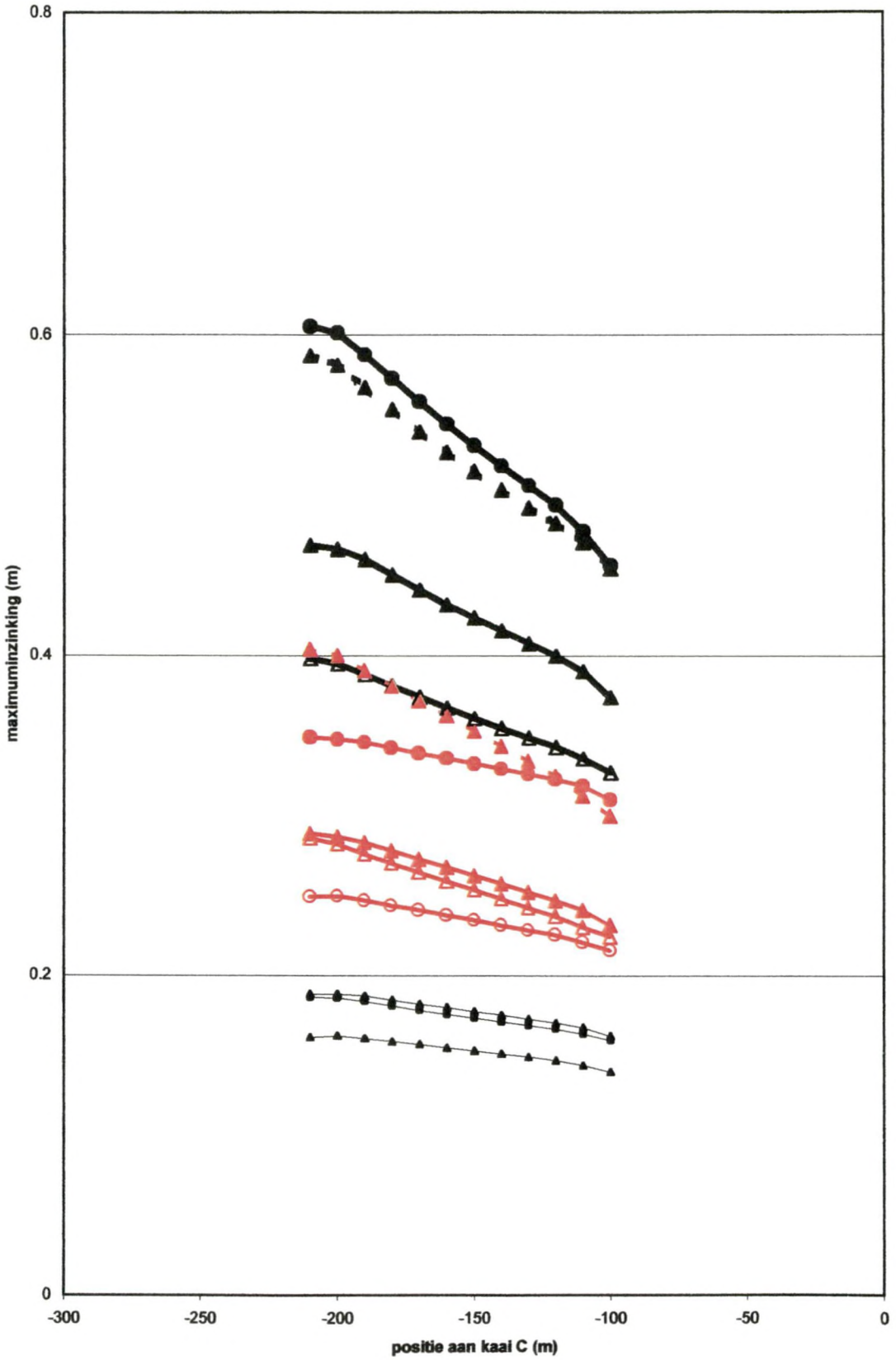
Figuur 16c.
Maximale inzinking (statische benadering) van een binnenschip klasse IV afgemeerd aan kaai C.



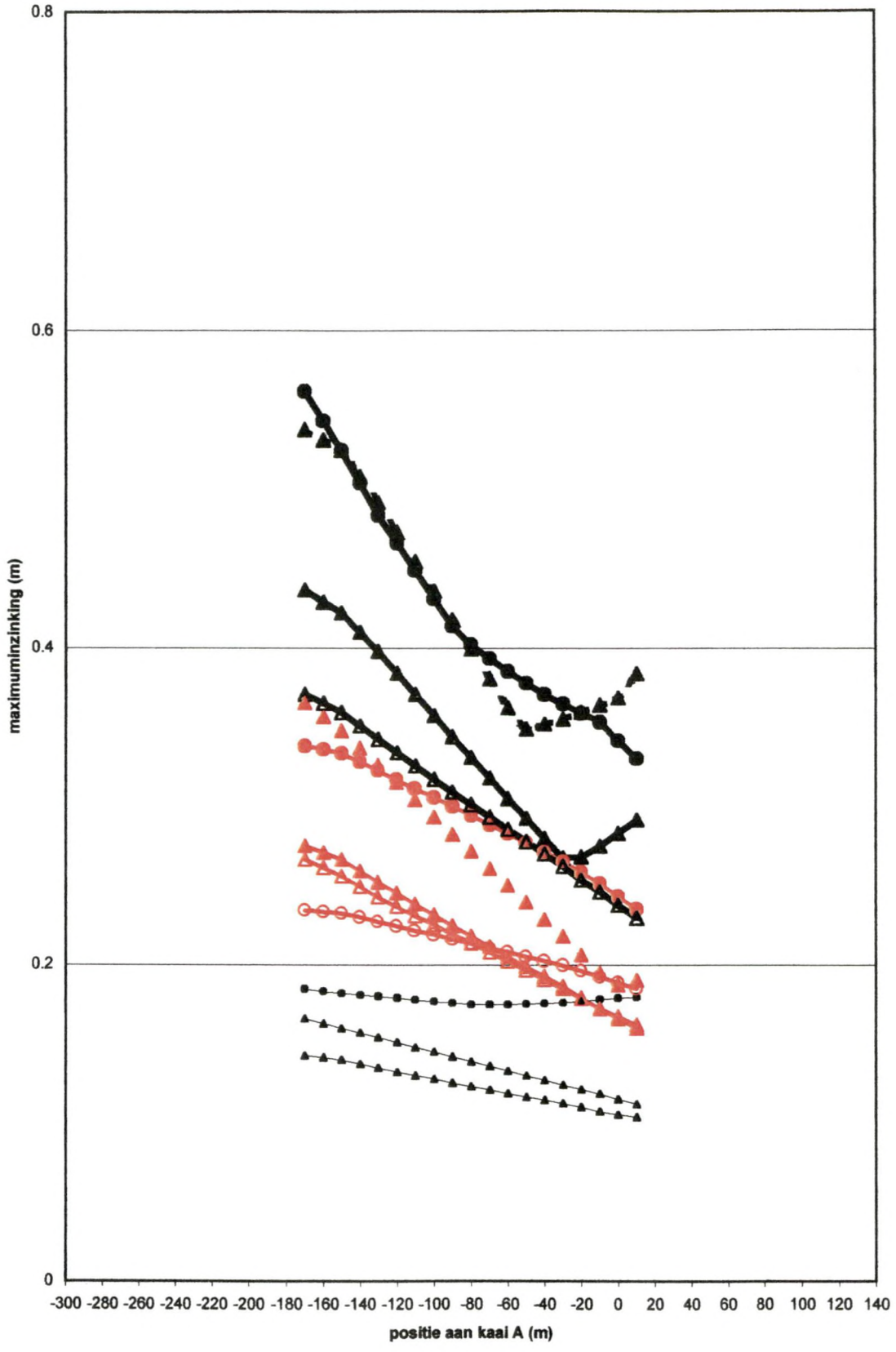
Figuur 16d.
Maximale inzinking (statische benadering) van een binnenschip klassen Vb/VIb (2x1 of 2x2 duwbakken) afgemeerd aan kaai A.



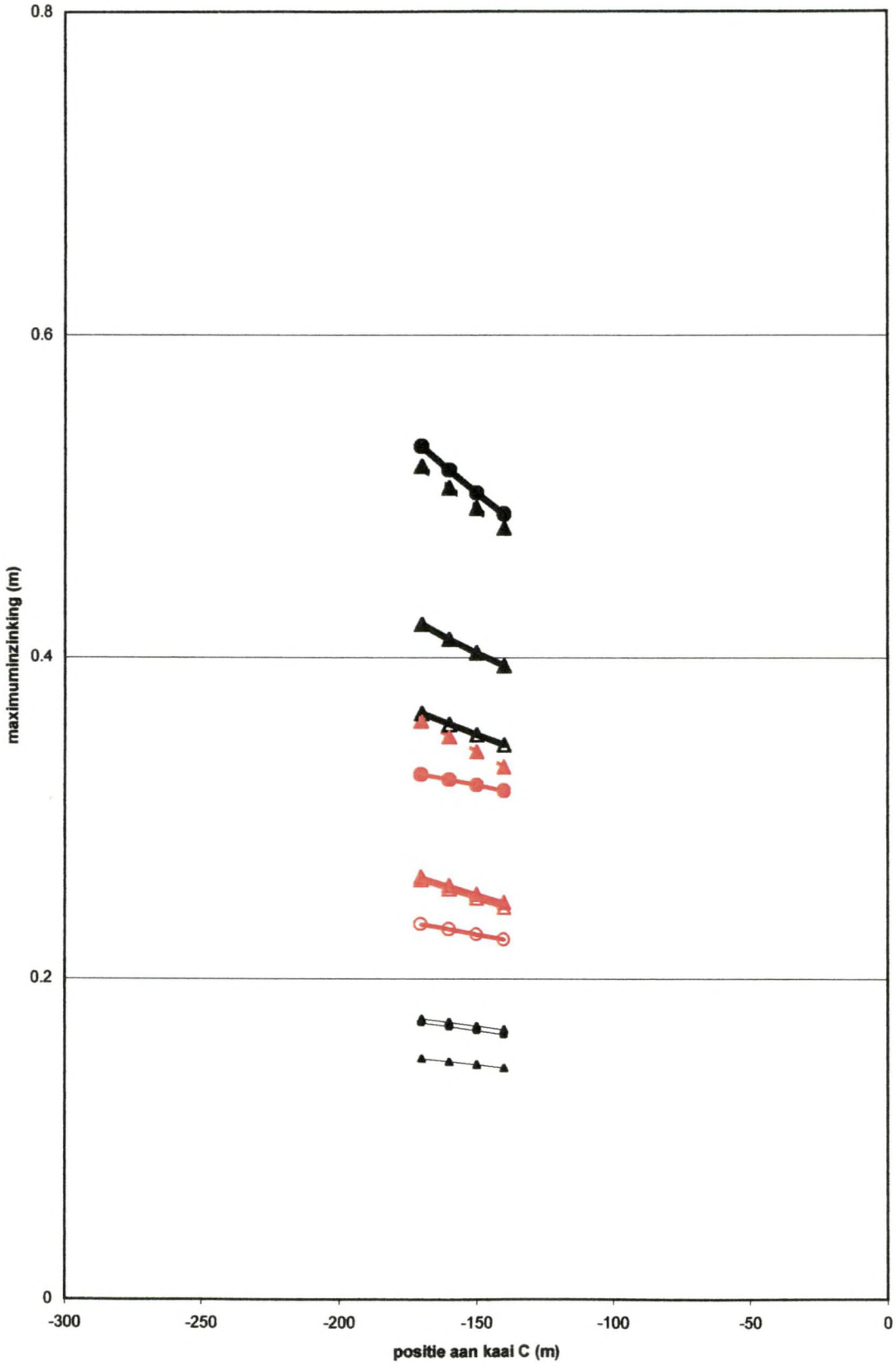
Figuur 16e.
Maximale inzinking (statische benadering) van een binnenschip klassen Vb/VIb (2x1 of 2x2 duwbakken) afgemeerd aan kaai B.



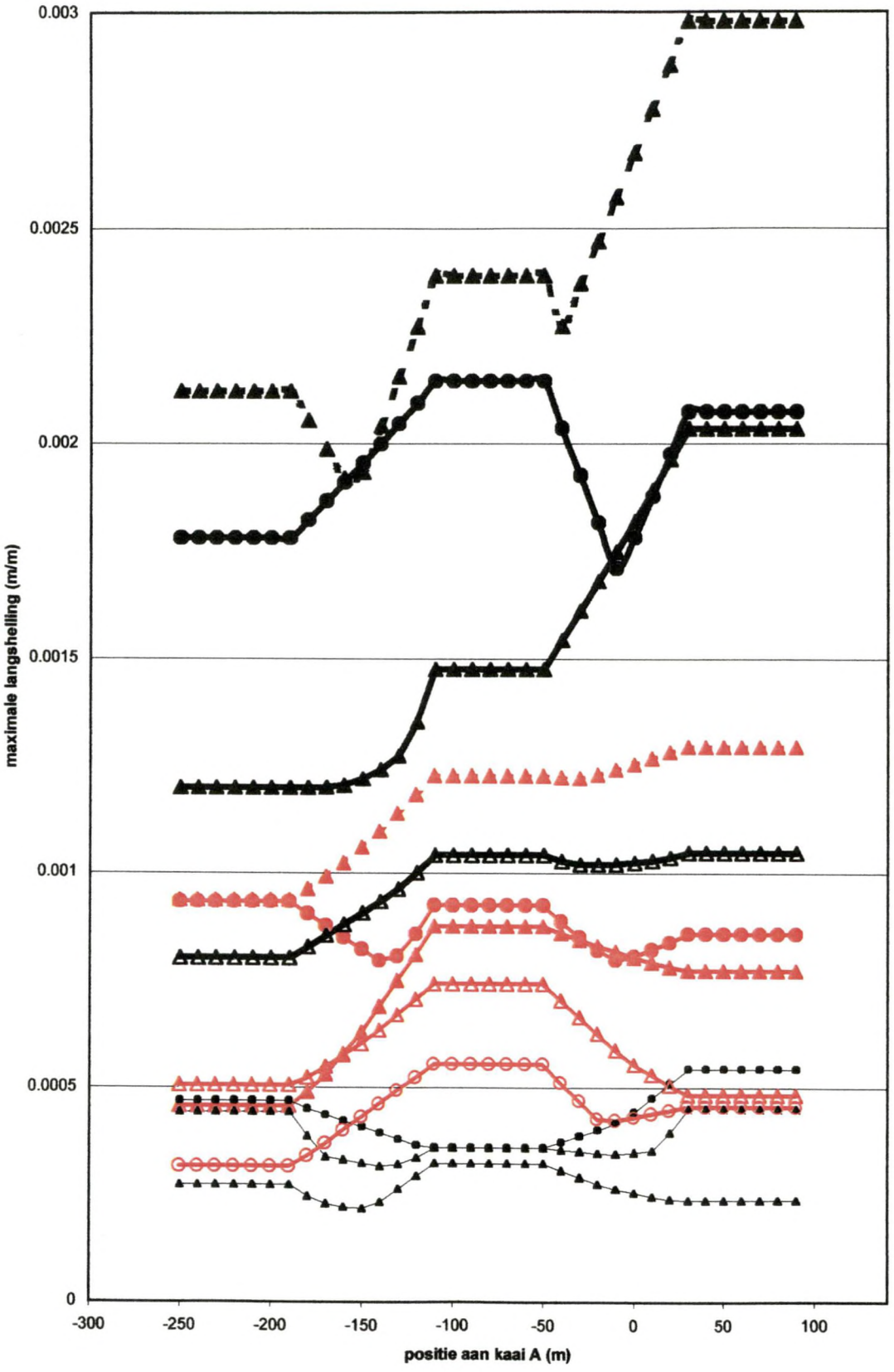
Figuur 16f.
Maximale inzinking (statische benadering) van een binnenschip klassen Vb/VIb (2x1 of 2x2 duwbakken) afgemeerd aan kaai C.



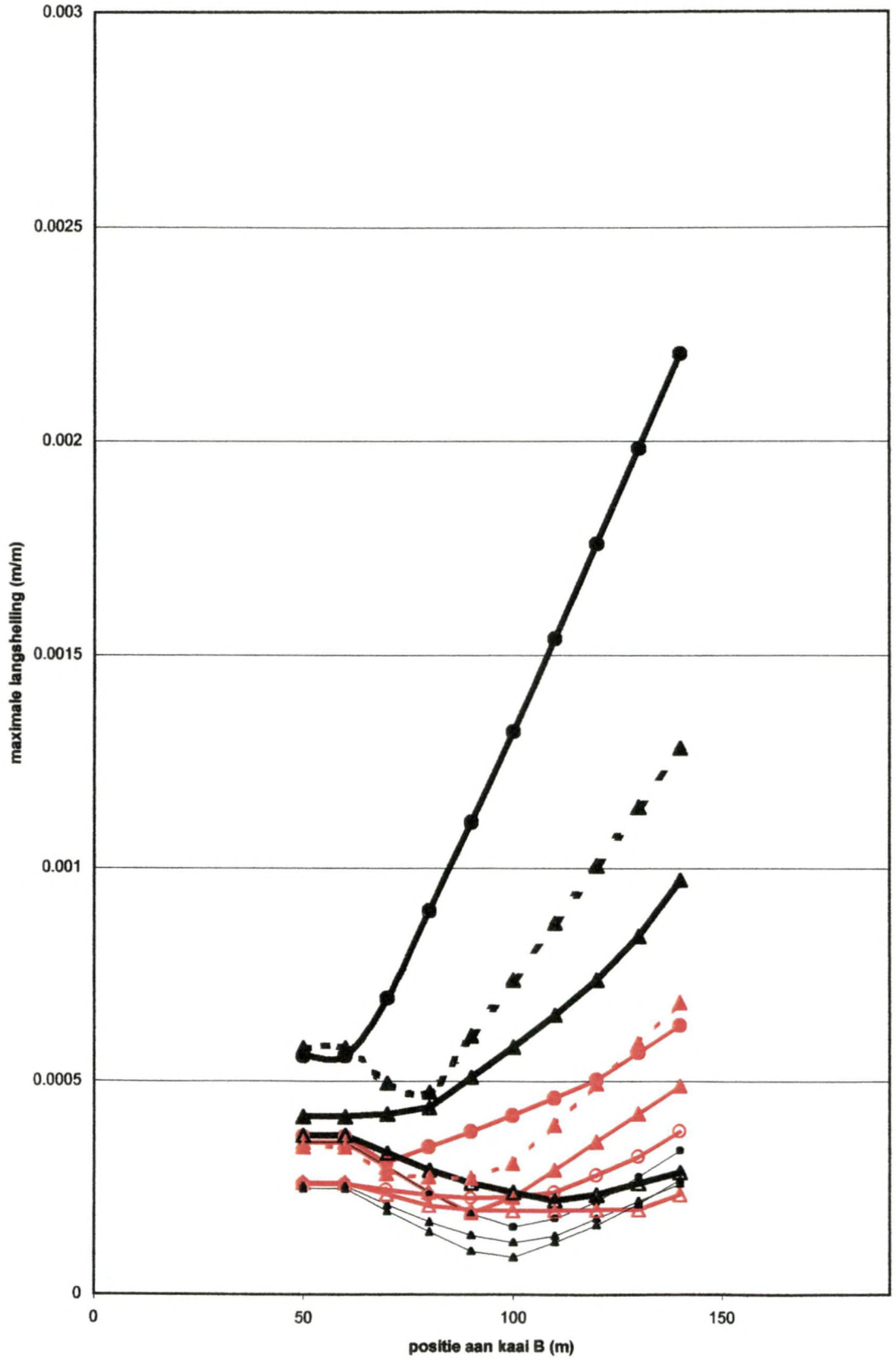
Figuur 16g.
Maximale inzinking (statische benadering) van een binnenschip klasse VIc (3 x1 of 3x2 duwbakken) afgemeerd aan kaai A.



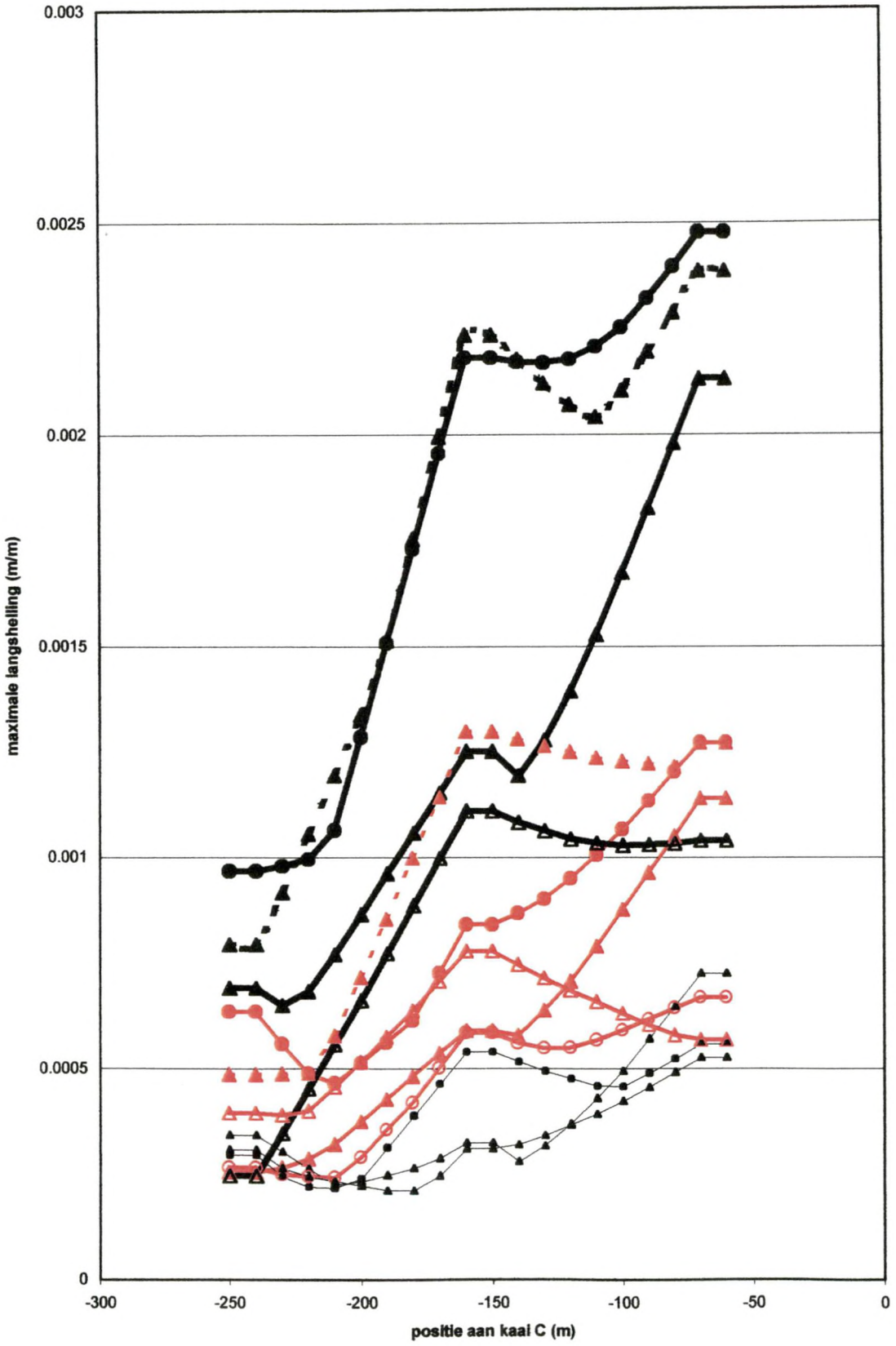
Figuur 16h.
Maximale inzinking (statische benadering) van een binnenschip klasse Vlc (3 x1 of 3x2 duwbakken) afgemeerd aan kaai C.



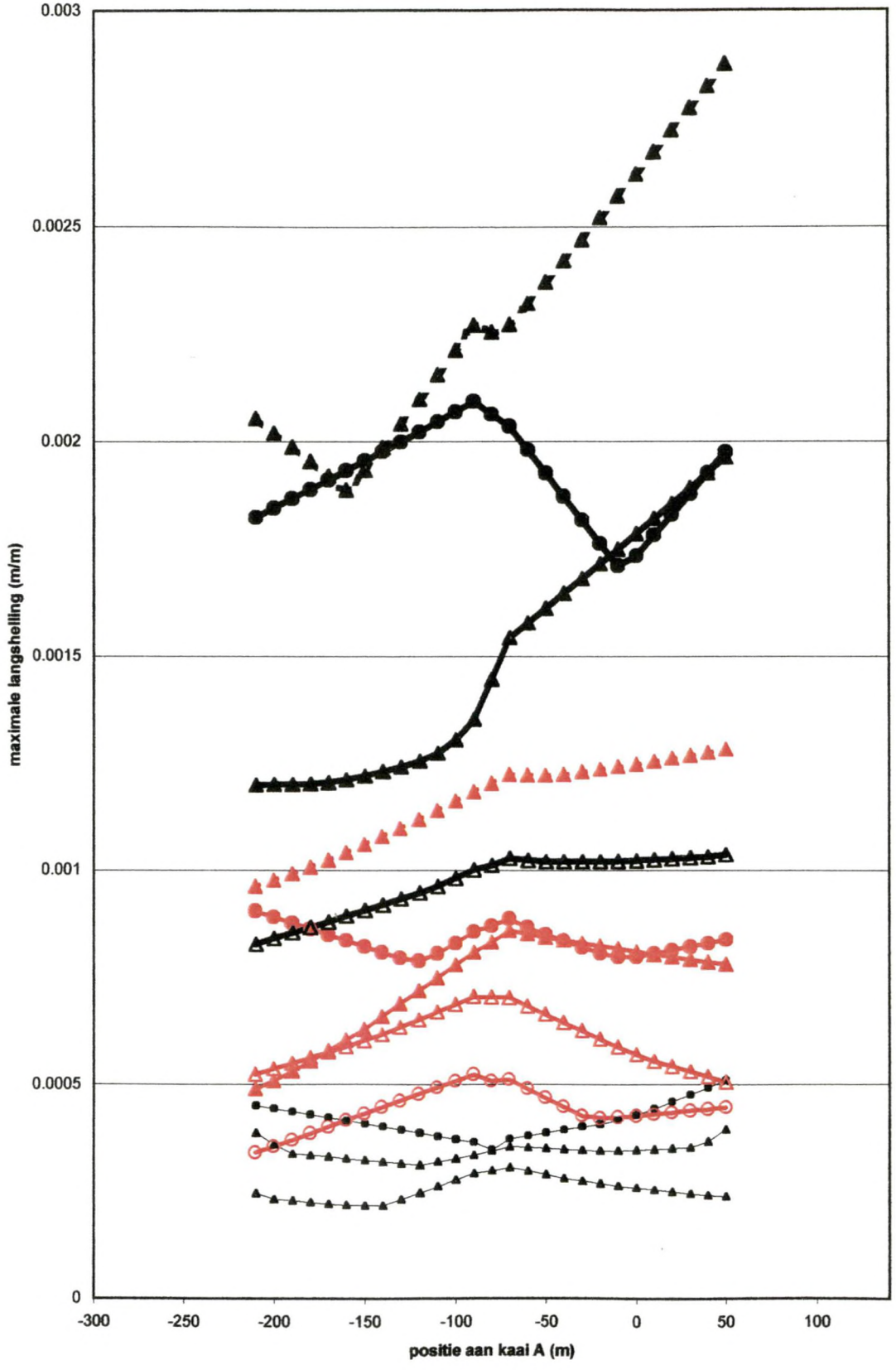
Figuur 17a.
Maximale langshelling (statische benadering) van een binnenschip klasse IV afgemeerd aan kaai A.



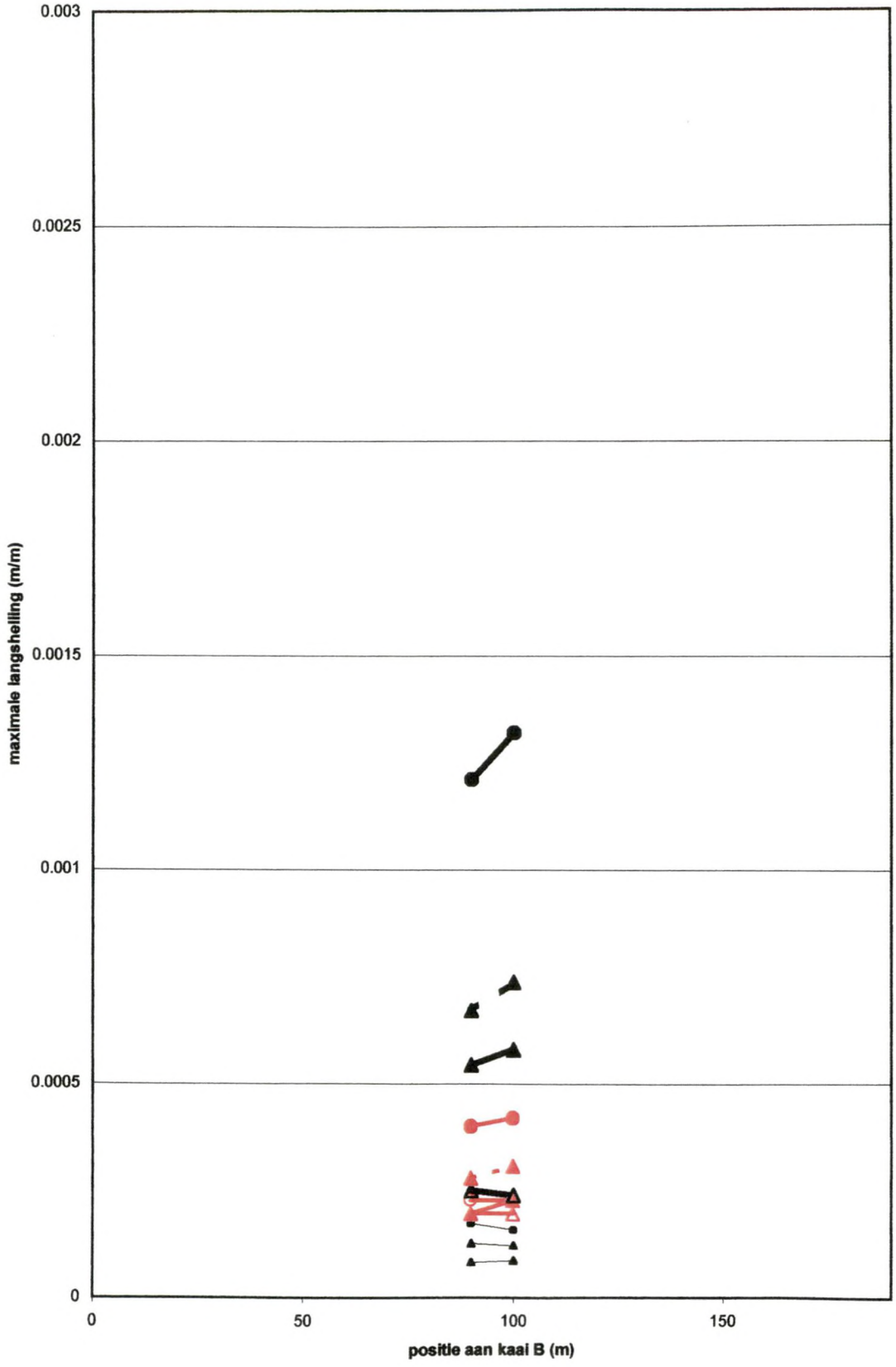
Figuur 17b.
Maximale langshelling (statische benadering) van een binnenschip klasse IV afgemeerd aan kaai B.



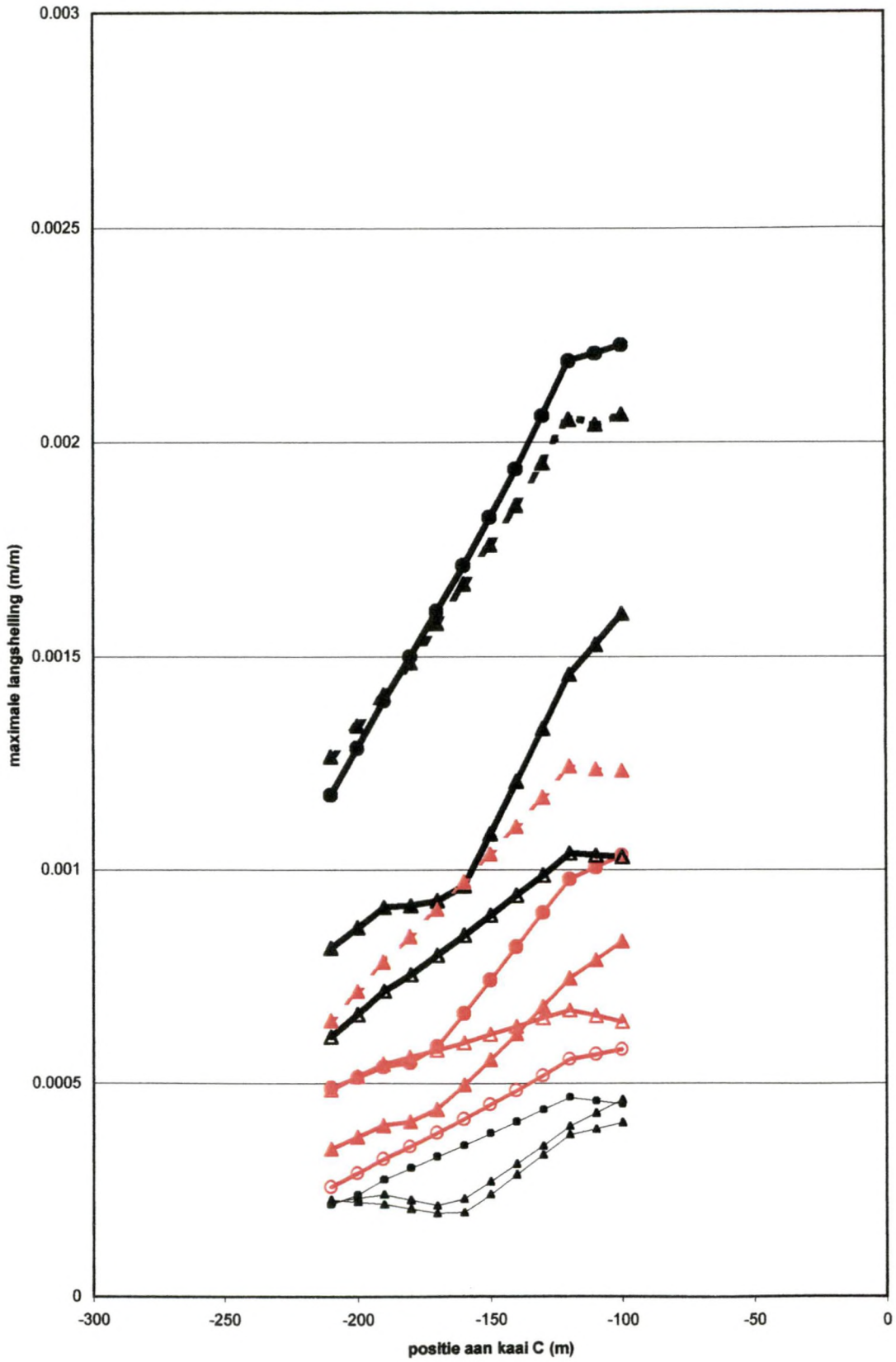
Figuur 17c.
Maximale langshelling (statische benadering) van een binnenschip klasse IV afgemeerd aan kaai C.



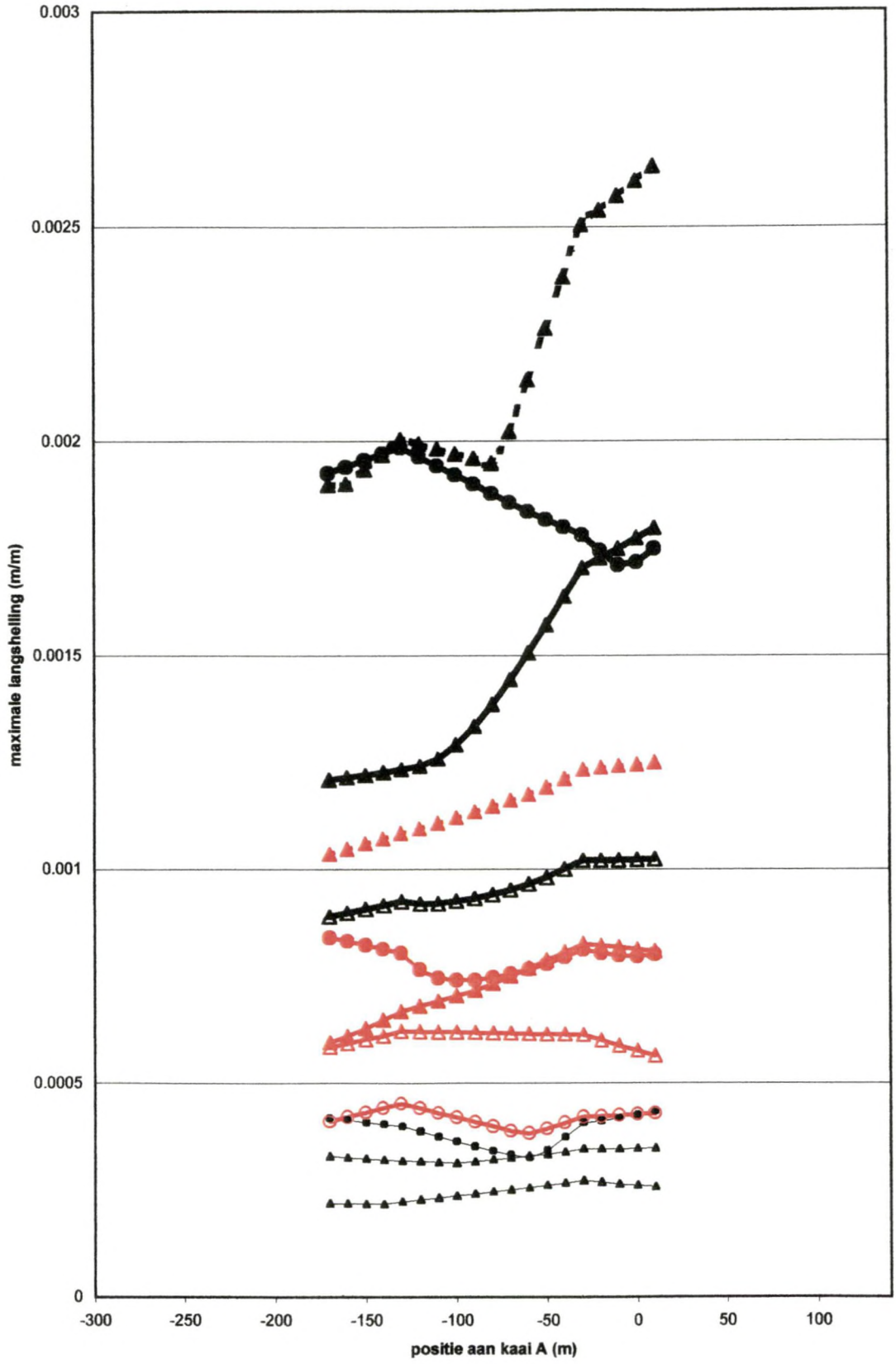
Figuur 17d.
Maximale langshelling (statische benadering) van een binnenschip klassen Vb/VIb (2x1 of 2x2 duwbakken) afgemeerd aan kaai A.



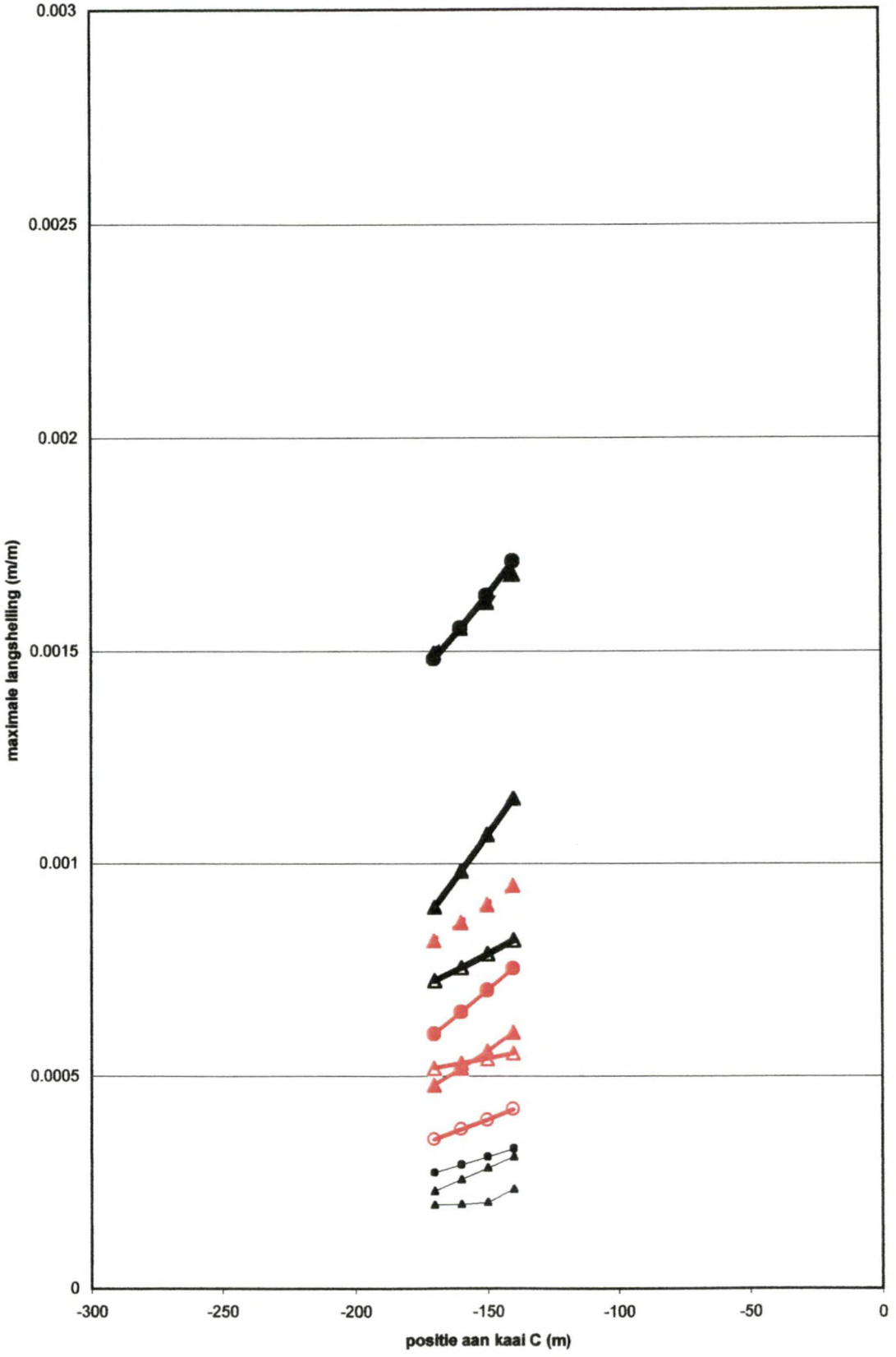
Figuur 17e.
Maximale langshelling (statische benadering) van een binnenschip klassen Vb/VIb (2x1 of 2x2 duwbakken) afgemeerd aan kaai B.



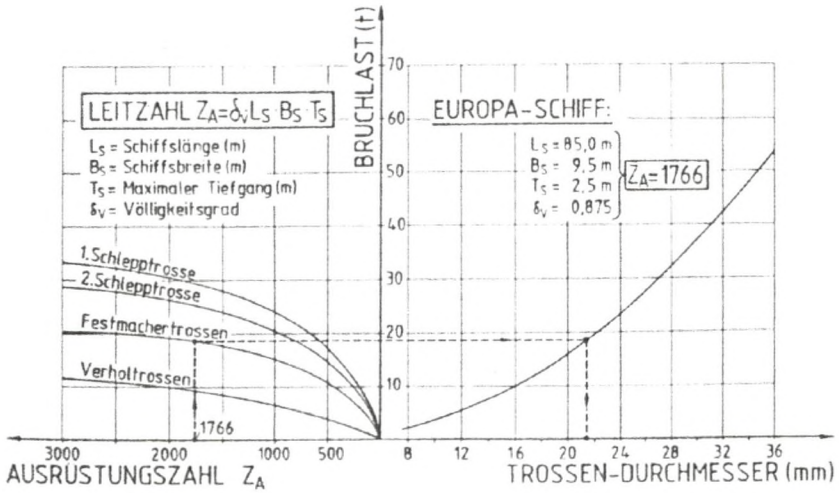
Figuur 17f.
Maximale langshelling (statische benadering) van een binnenschip klassen Vb/VIb (2x1 of 2x2 duwbakken) afgemeerd aan kaai C.



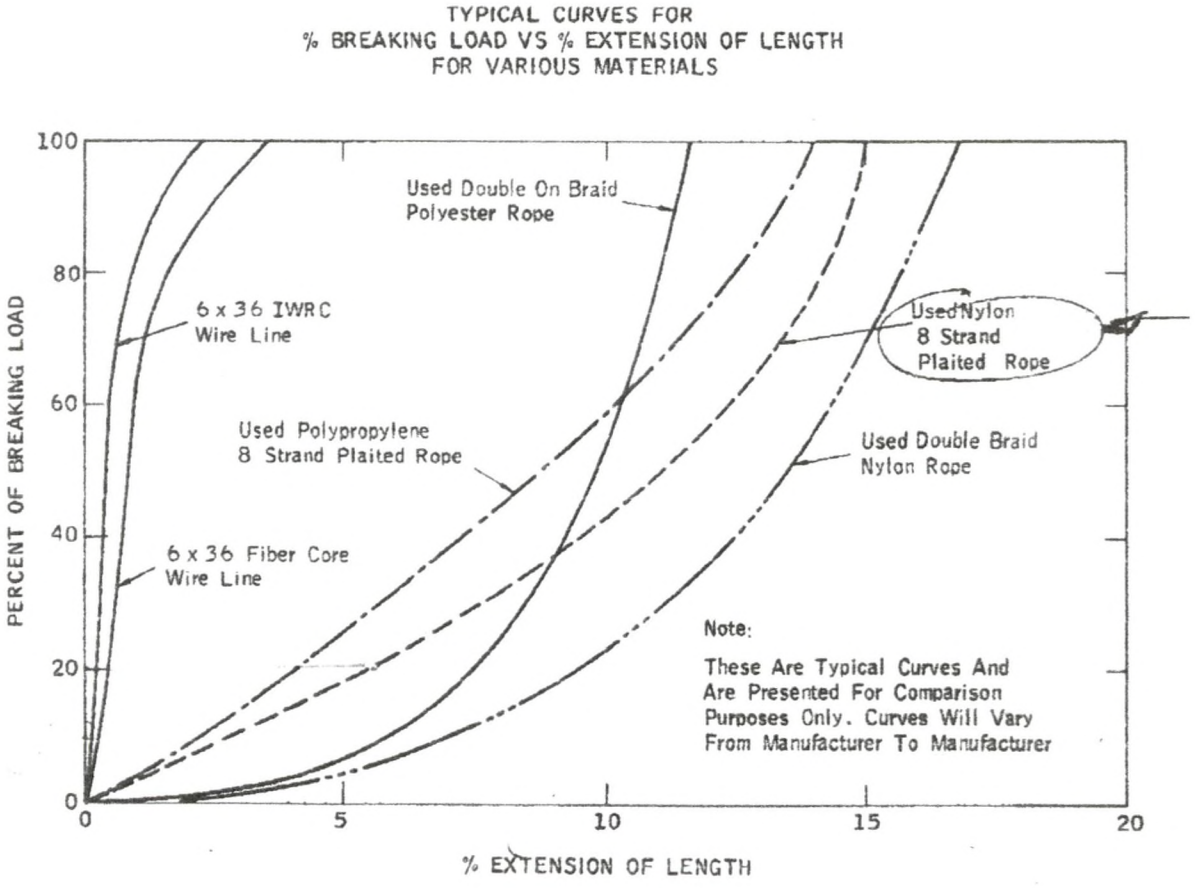
Figuur 17g.
Maximale langshelling (statische benadering) van een binnenschip klasse Vlc (3 x1 of 3x2 duwbakken) afgemeerd aan kaai A.



Figuur 17h.
Maximale langshelling (statische benadering) van een binnenschip klasse Vlc (3 x1 of 3x2 duwbakken) afgemeerd aan kaai C.

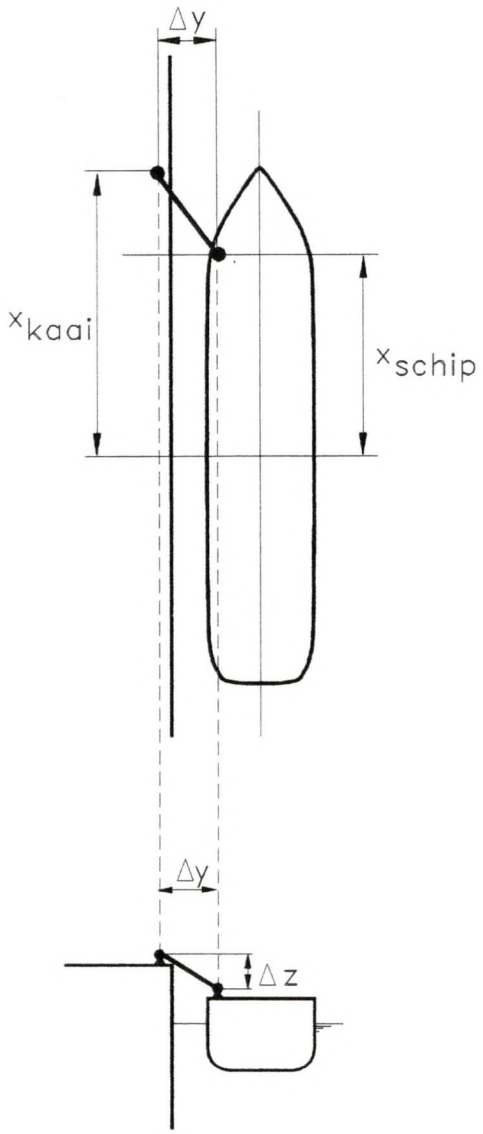


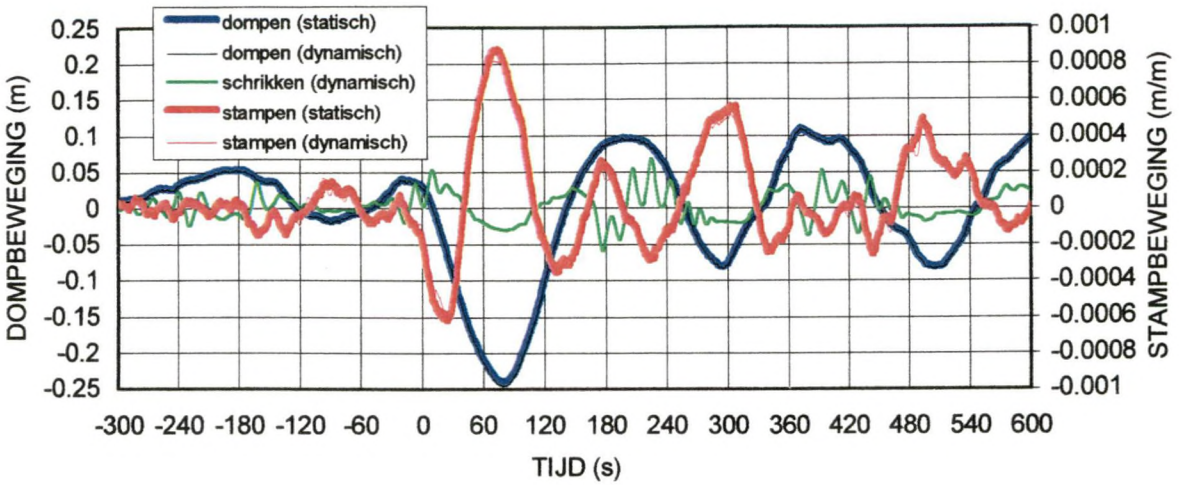
Figuur 18. Afmetingen van meertrossen (ontleend aan [1])

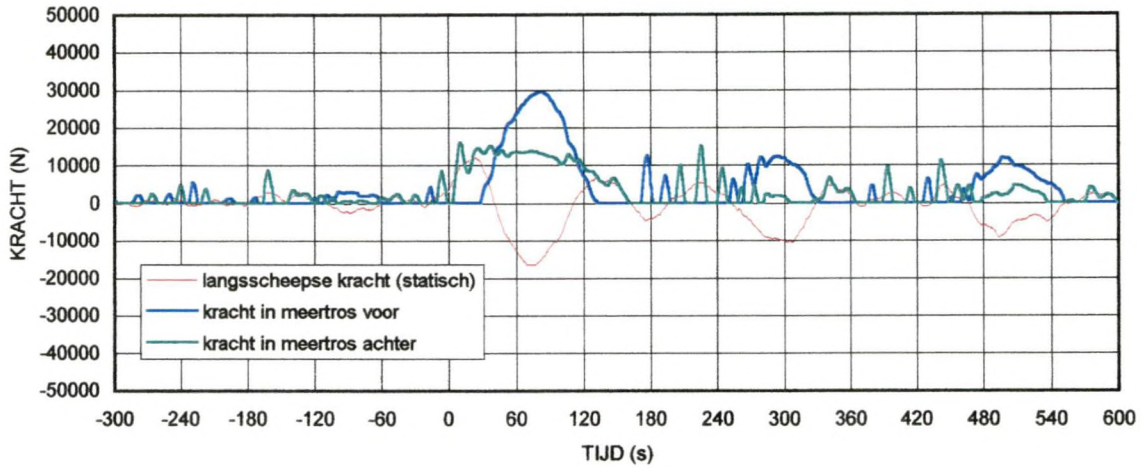


Figuur 19.
Elastische eigenschappen van trossen.

Verklaring bij figuren 20 t/m 23

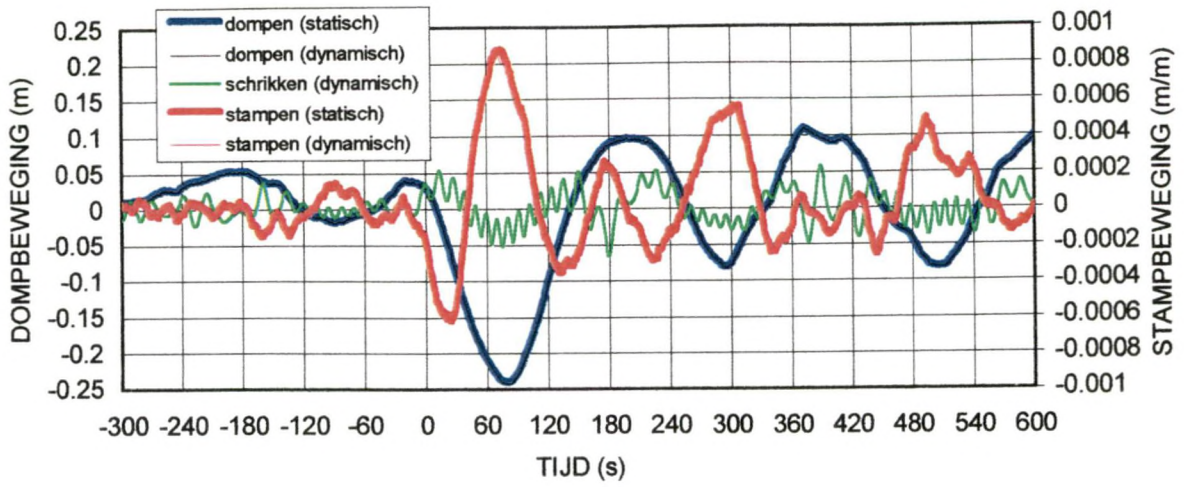


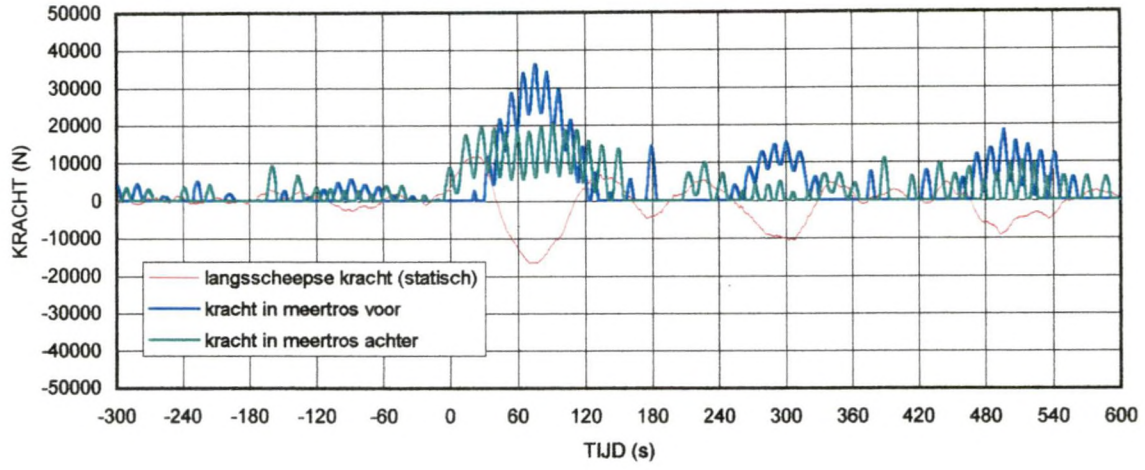




	TROS 1	TROS 2
x_{schip} (m)	35	-35
x_{kaai} (m)	45	-45
Δy (m)	1	1
Δz (m)	2.5	2.5
F_{breuk} (kN)	180	180
breukrek (%)	5	5
speling (m)	0	0
troslengte	10.4	10.4
wrijvingscoëfficiënt langs-scheeps (-)	0.02	

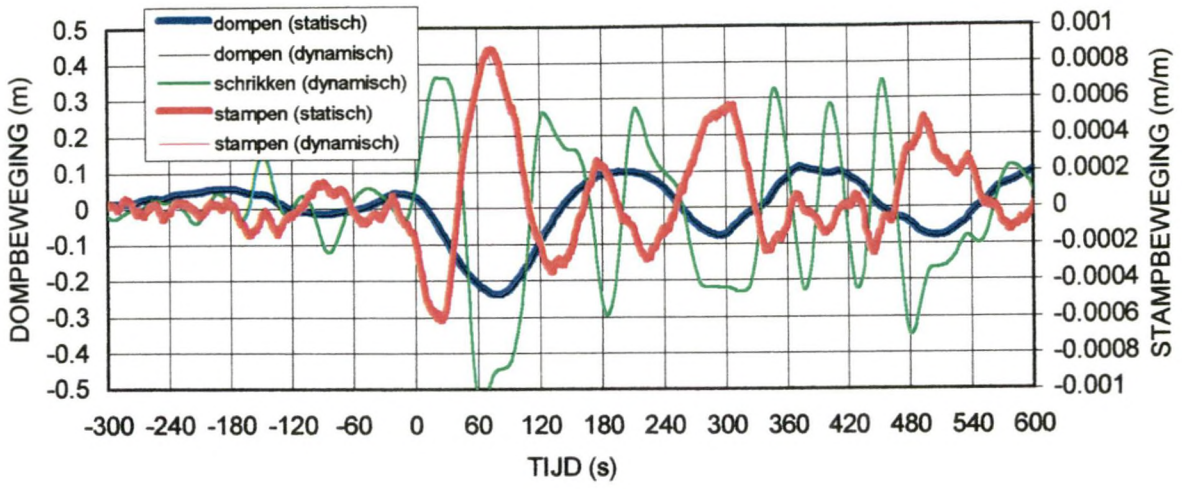
Figuur 20a.
Simulatie van bewegingen en krachten uitgeoefend op afgemeerd binnenschip (1) afgemeerd aan kaai A (x = -100 m).

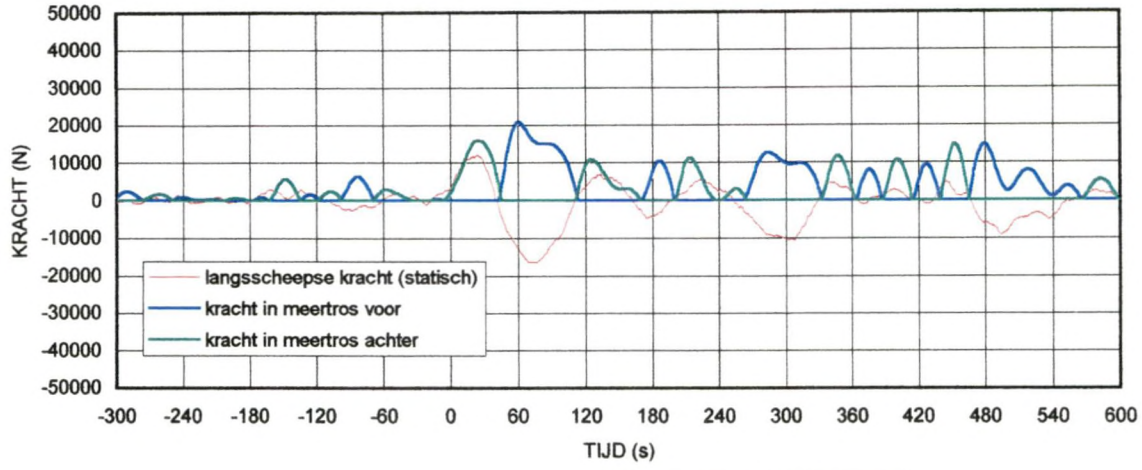




	TROS 1	TROS 2
x_{schip} (m)	35	-35
x_{kaai} (m)	45	-45
Δy (m)	1.0	1.0
Δz (m)	2.5	2.5
F_{breuk} (kN)	180	180
breukrek (%)	5	5
speling (m)	0	0
troslengte	10.4	10.4
wrijvingscoëfficiënt langs-scheeps (-)	0	

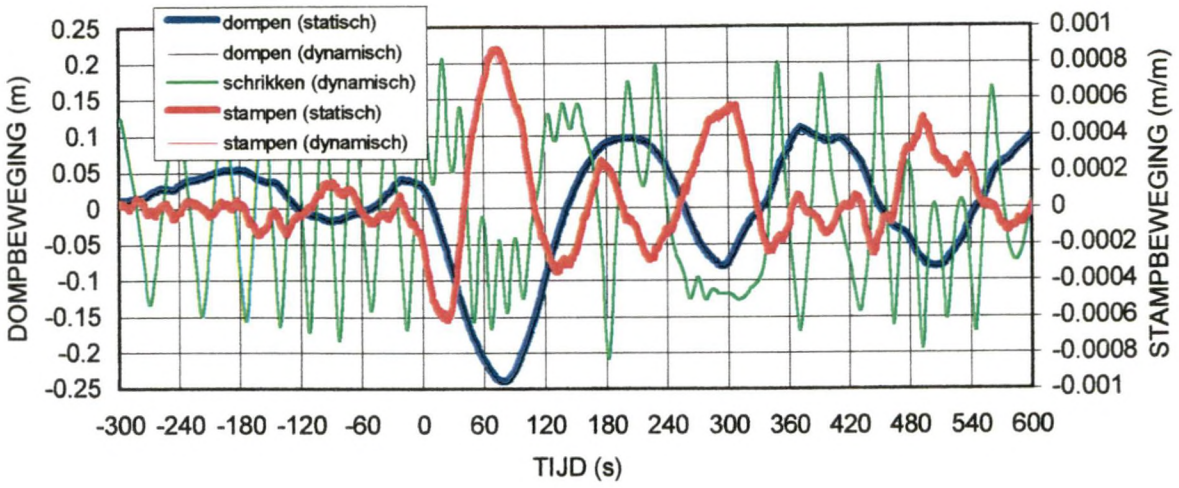
Figuur 20b.
Simulatie van bewegingen en krachten uitgeoefend op afgemeerd binnenschip (1) afgemeerd aan kaai A (x = -100 m): invloed van de langsscheepse wrijving.

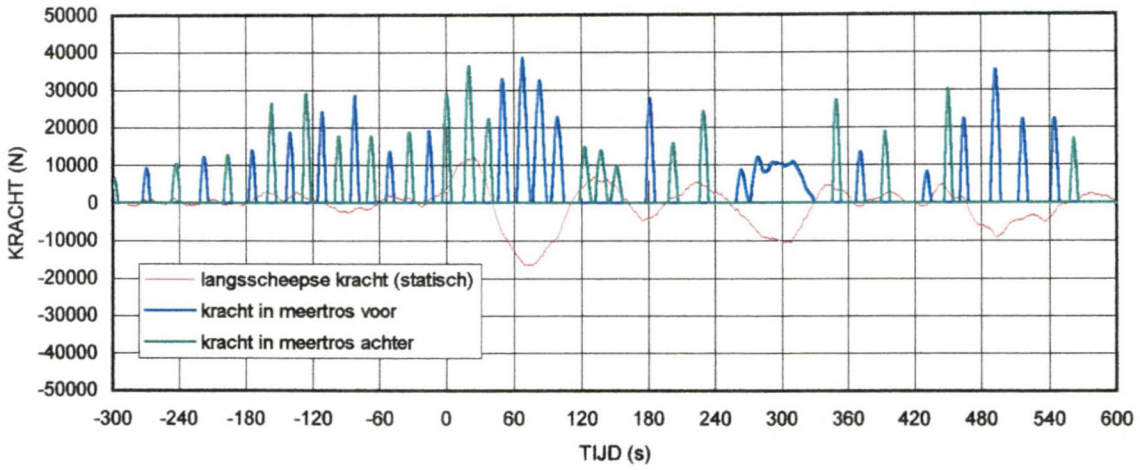




	TROS 1	TROS 2
x_{schip} (m)	35	-35
x_{kaai} (m)	45	-45
Δy (m)	1.0	1.0
Δz (m)	2.5	2.5
F_{breuk} (kN)	180	180
breukrek (%)	45	45
speling (m)	0	0
troslengte	10.4	10.4
wrijvingscoëfficiënt langs-scheeps (-)	0.02	

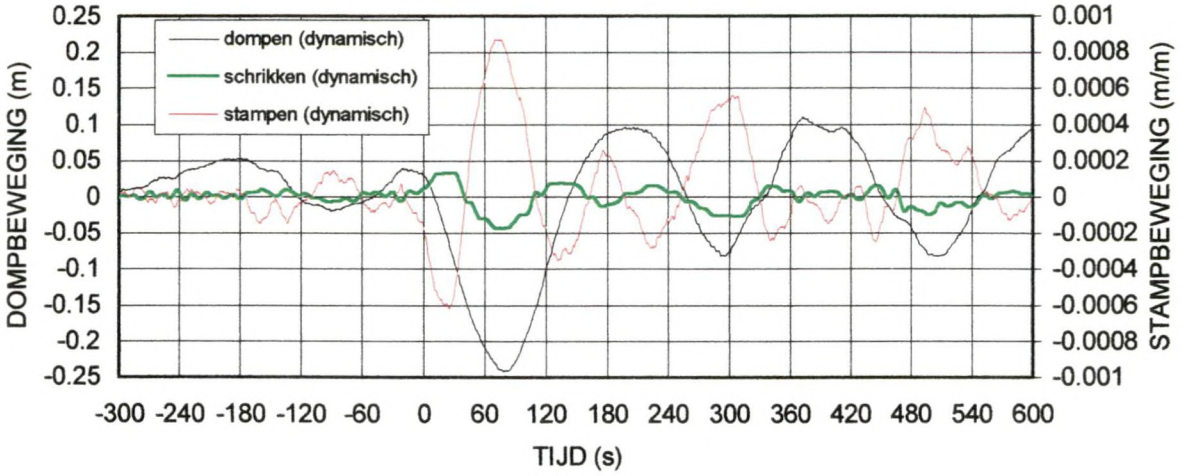
Figuur 20c.
Simulatie van bewegingen en krachten uitgeoefend op afgemeerd binnenschip (1) afgemeerd aan kaai A (x = -100 m): invloed van de elasticiteit van de trossen.

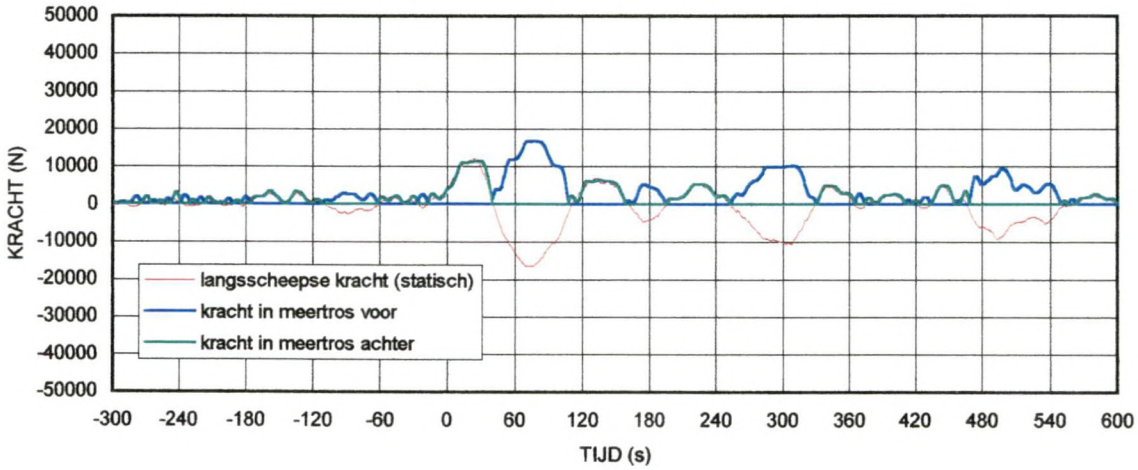




	TROS 1	TROS 2
x_{schip} (m)	35	-35
x_{kaai} (m)	45	-45
Δy (m)	1.0	1.0
Δz (m)	2.5	2.5
F_{breuk} (kN)	180	180
breukrek (%)	5	5
speling (m)	0.1	0.1
troslengte	10.5	10.5
wrijvingscoëfficiënt langs-scheeps (-)	0.02	

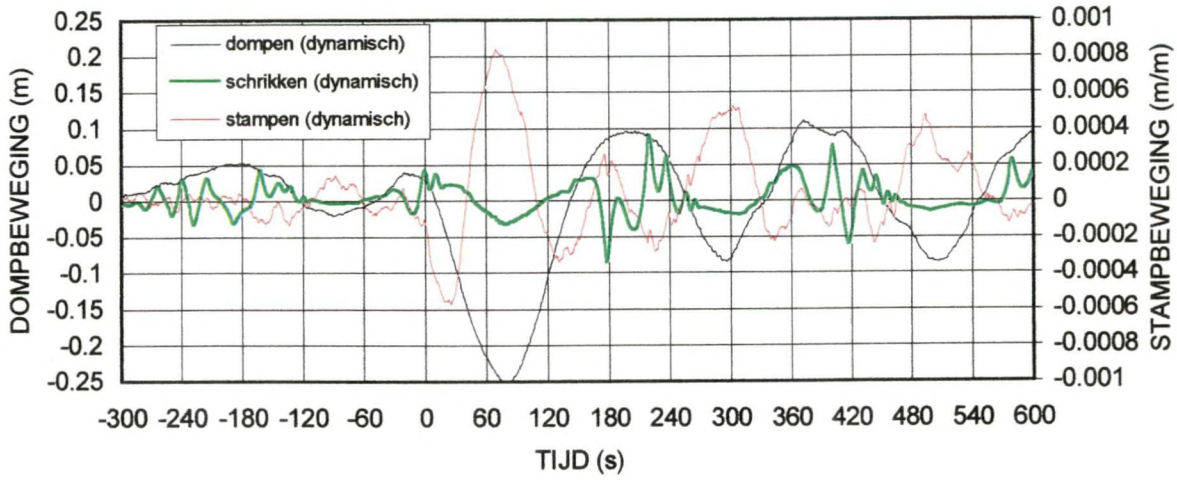
Figuur 20d.
Simulatie van bewegingen en krachten uitgeoefend op afgemeerd binnenschip (1) afgemeerd aan kaai A (x = -100 m): invloed van de speling van de trossen.

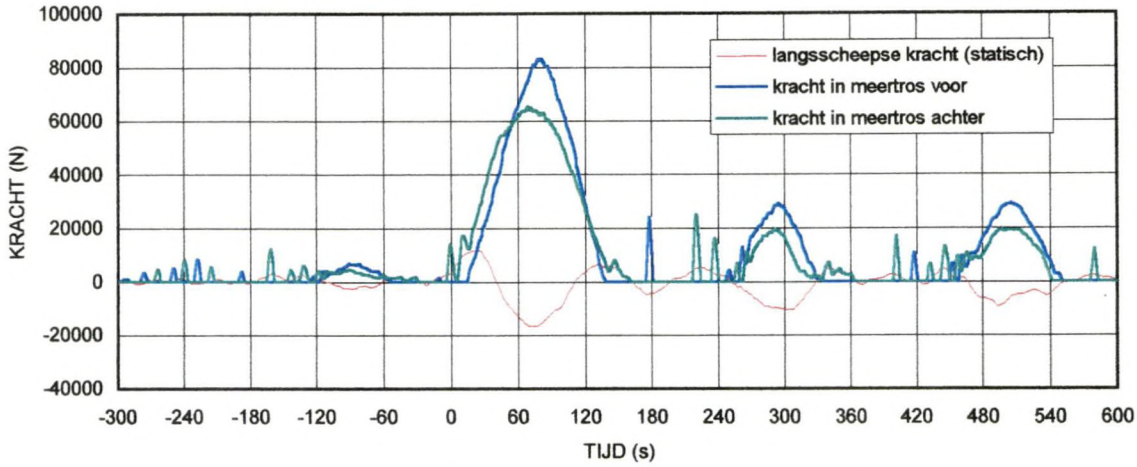




	TROS 1	TROS 2
x_{schip} (m)	35	-35
x_{kaai} (m)	45	-45
Δy (m)	1.0	1.0
Δz (m)	0	0
F_{breuk} (kN)	180	180
breukrek (%)	5	5
speling (m)	0	0
troslengte	10.0	10.0
wrijvingscoëfficiënt langs-scheeps (-)	0.02	

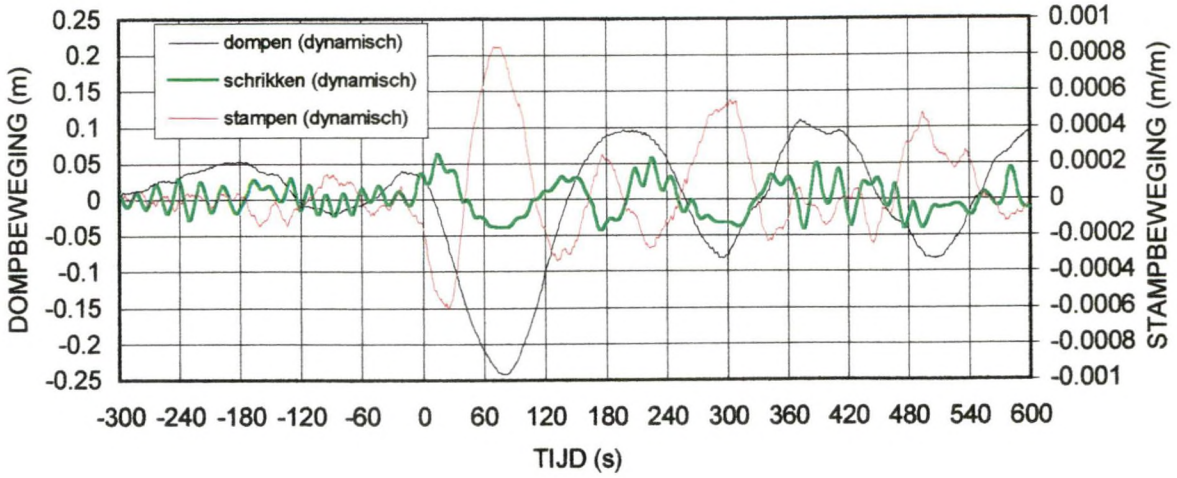
Figuur 20e.
Simulatie van bewegingen en krachten uitgeoefend op afgemeerd binnenschip (1) afgemeerd aan kaai A (x = -100 m): invloed van het verschil in hoogte tussen de bevestigingspunten op schip en kaai.

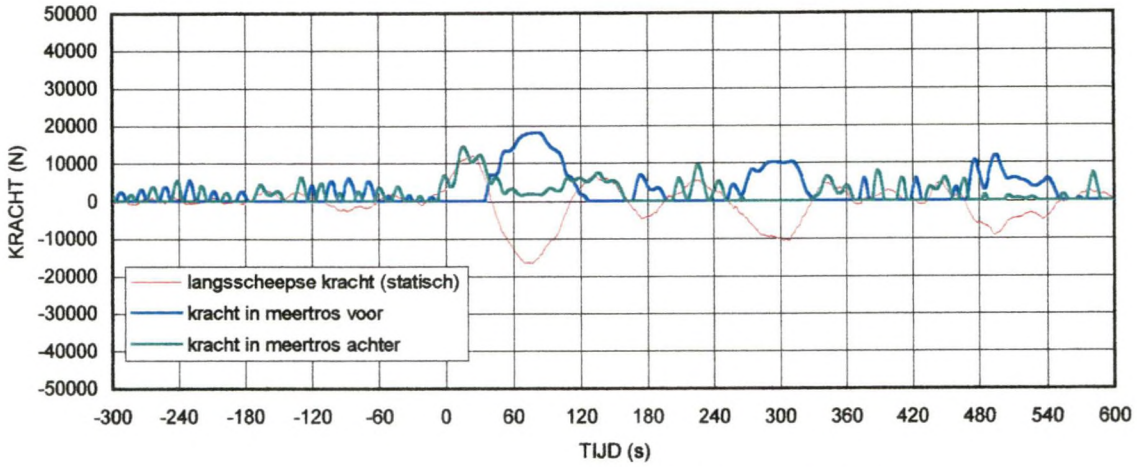




	TROS 1	TROS 2
x_{schip} (m)	35	-35
x_{kaai} (m)	40	-40
Δy (m)	1.0	1.0
Δz (m)	2.5	2.5
F_{breuk} (kN)	180	180
breukrek (%)	5	5
speling (m)	0	0
troslengte	5.7	5.7
wrijvingscoëfficiënt langs-scheeps (-)	0.02	

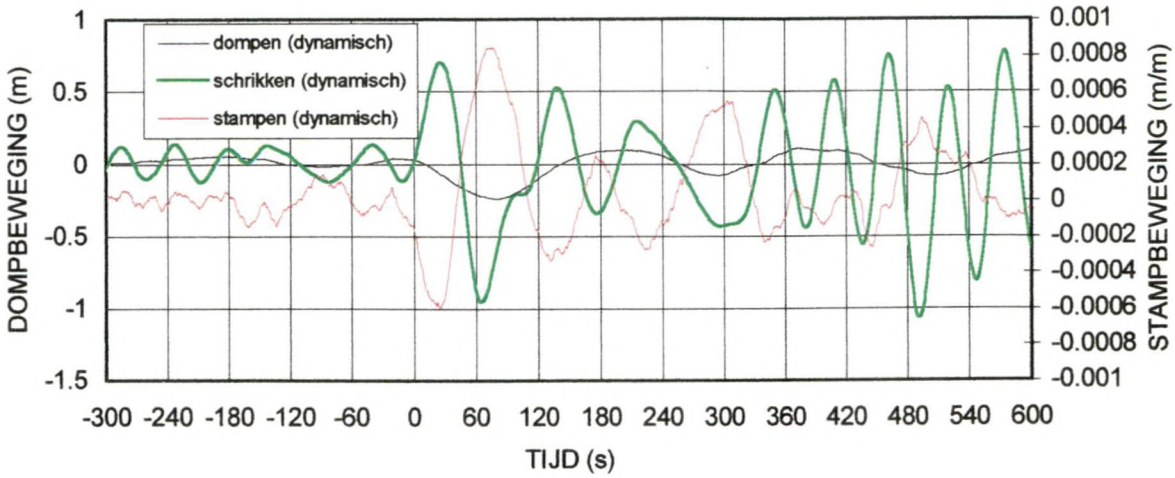
Figuur 20f.
Simulatie van bewegingen en krachten uitgeoefend op afgemeerd binnenschip (1) afgemeerd aan kaai A (x = -100 m): invloed van de troslengte (korte tros).

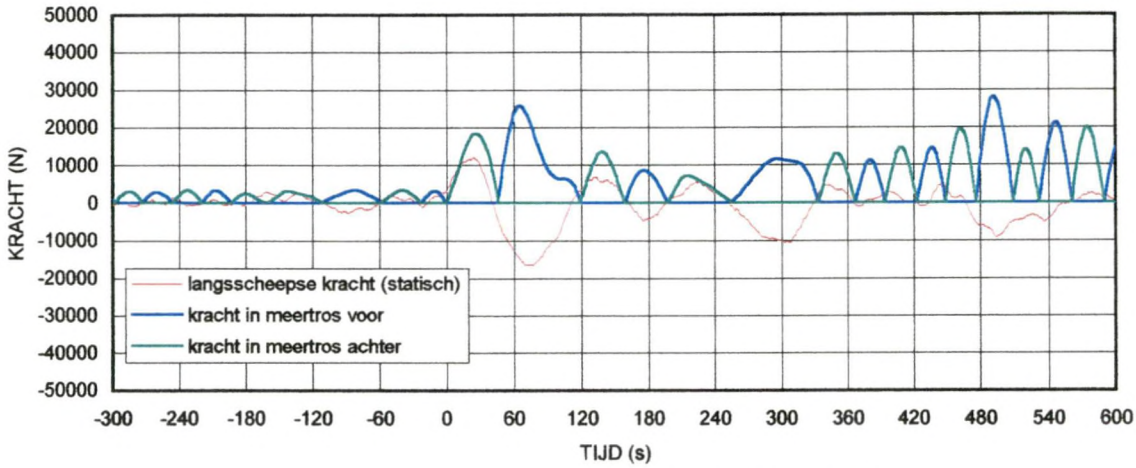




	TROS 1	TROS 2
x_{schip} (m)	35	-35
x_{kaai} (m)	50	-50
Δy (m)	1.0	1.0
Δz (m)	2.5	2.5
F_{breuk} (kN)	180	180
breukrek (%)	5	5
speling (m)	0	0
troslengte	15.2	15.2
wrijvingscoëfficiënt langs-scheeps (-)	0.02	

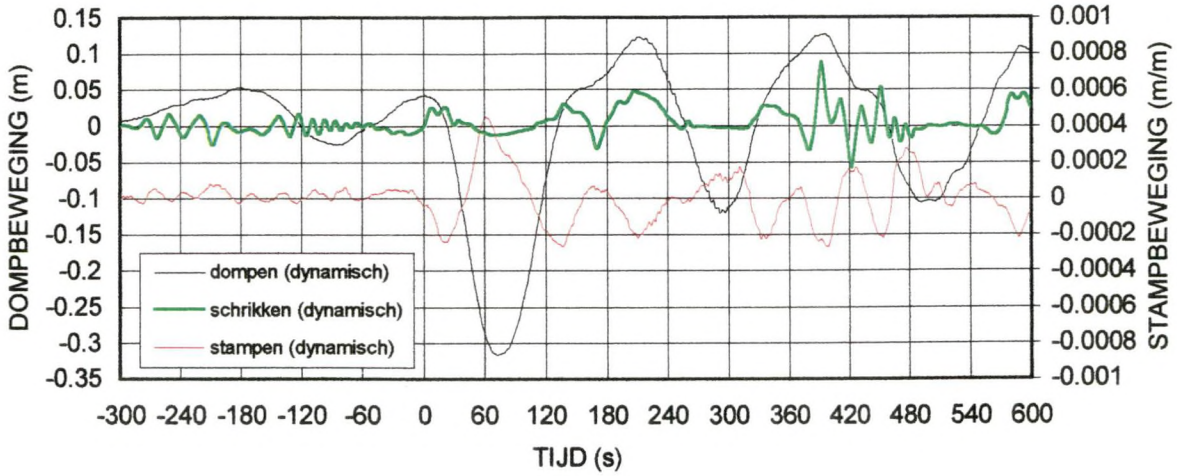
Figuur 20g.
Simulatie van bewegingen en krachten uitgeoefend op afgemeerd binnenschip (1) afgemeerd aan kaai A (x = -100 m): invloed van de troslengte (lange tros).

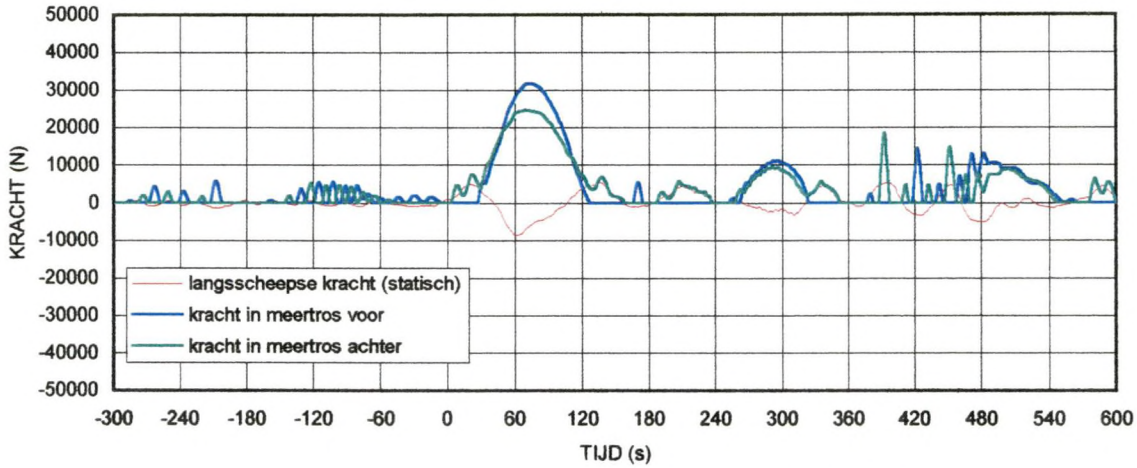




	TROS 1	TROS 2
x_{schip} (m)	35	-35
x_{kaai} (m)	50	-50
Δy (m)	1.0	1.0
Δz (m)	0	0
F_{breuk} (kN)	180	180
breukrek (%)	45	45
speling (m)	0	0
troslengte	15.2	15.2
wrijvingscoëfficiënt langs-scheeps (-)	0.02	

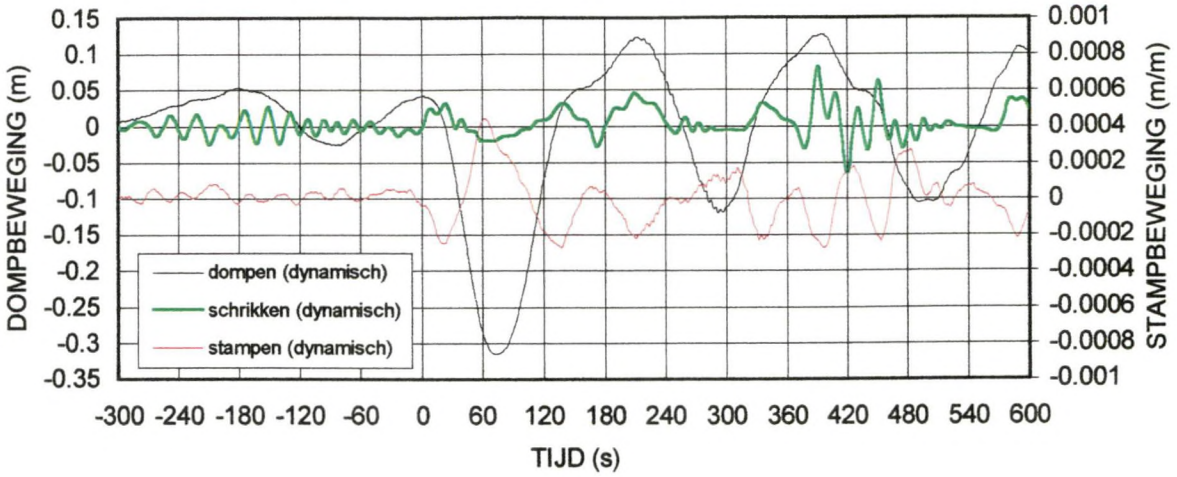
Figuur 20h.
Simulatie van bewegingen en krachten uitgeoefend op afgemeerd binnenschip (1) afgemeerd aan kaai A (x = -100 m): invloed van de troslengte (lange tros) en elasticiteit van de trossen.

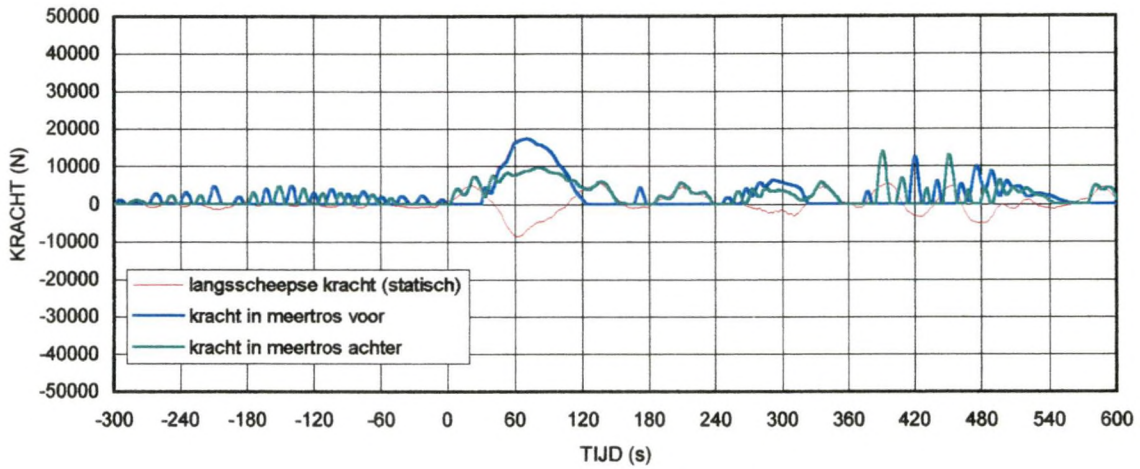




	TROS 1	TROS 2
x_{schip} (m)	35	-35
x_{kaai} (m)	45	-45
Δy (m)	1.0	1.0
Δz (m)	2.5	2.5
F_{breuk} (kN)	180	180
breukrek (%)	5	5
speling (m)	0	0
troslengte	10.4	10.4
wrijvingscoëfficiënt langs-scheeps (-)	0.02	

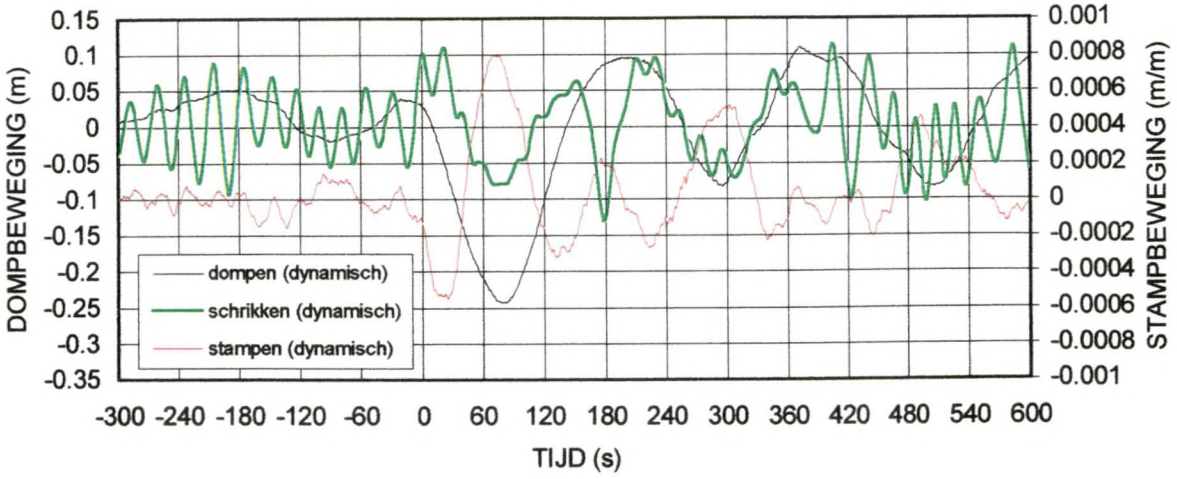
Figuur 20i.
Simulatie van bewegingen en krachten uitgeoefend op afgemeerd binnenschip (1) afgemeerd aan kaai A (x = -250 m): invloed van de positie langs de kaai.

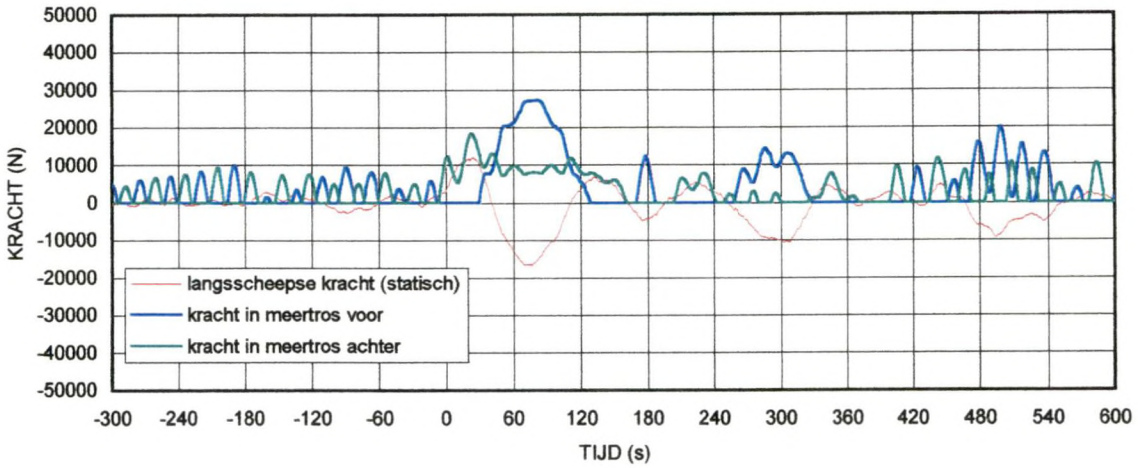




	TROS 1	TROS 2
x_{schip} (m)	35	-35
x_{kaai} (m)	50	-50
Δy (m)	1.0	1.0
Δz (m)	2.5	2.5
F_{breuk} (kN)	180	180
breukrek (%)	5	5
speling (m)	0	0
troslengte	15.2	15.2
wrijvingscoëfficiënt langs-scheeps (-)	0.02	

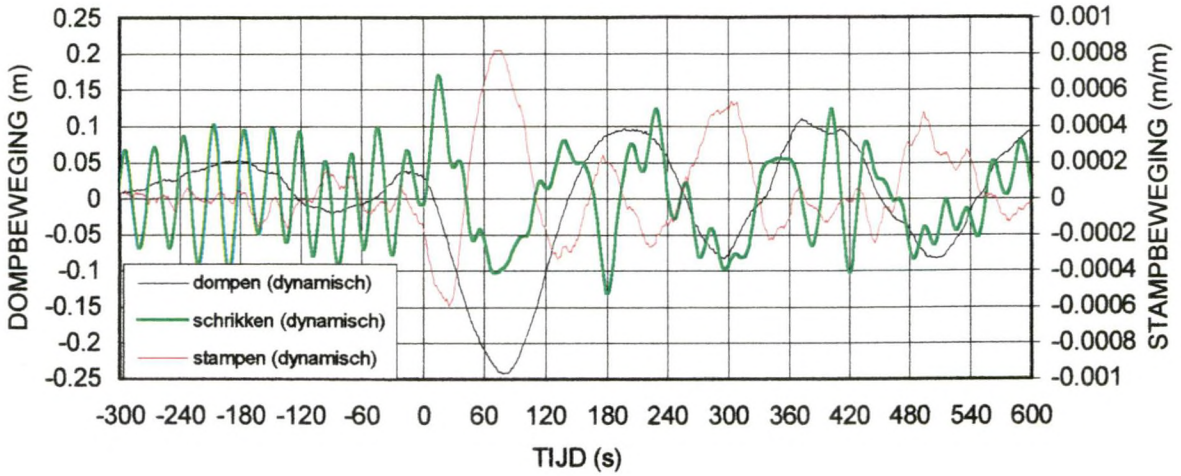
Figuur 20j.
Simulatie van bewegingen en krachten uitgeoefend op afgemeerd binnenschip (1) afgemeerd aan kaai A (x = -250 m): invloed van de troslengte (lange tros).

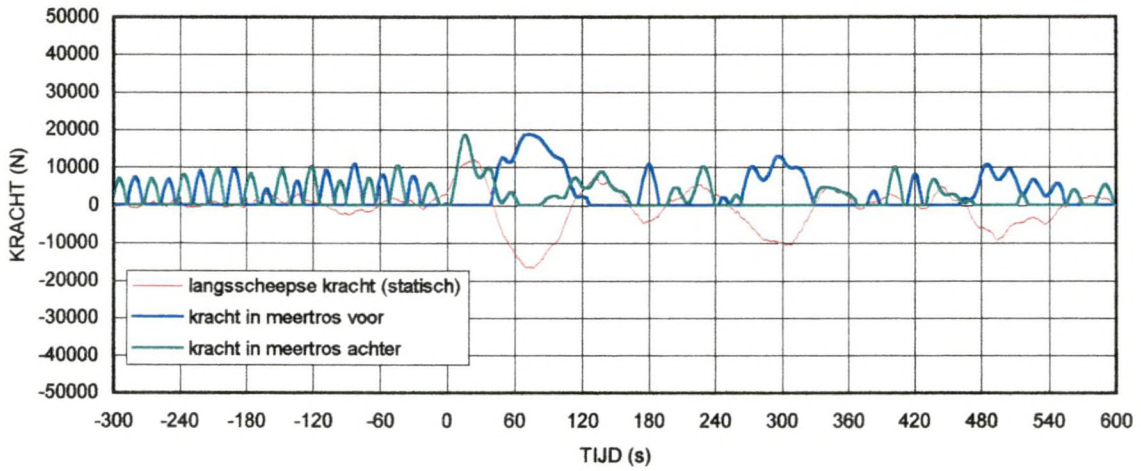




	TROS 1	TROS 2
x_{schip} (m)	35	-35
x_{kaai} (m)	55	-55
Δy (m)	1.0	1.0
Δz (m)	10	10
F_{breuk} (kN)	180	180
breukrek (%)	5	5
speling (m)	0	0
troslengte	22.4	22.4
wrijvingscoëfficiënt langs-scheeps (-)	0.02	

Figuur 20k.
Simulatie van bewegingen en krachten uitgeoefend op afgemeerd binnenschip (1) afgemeerd aan kaai A (x = -100 m): hoogteverschil tussen kaai en schip van 10 m, stalen tros, troslengte 22.4 m.

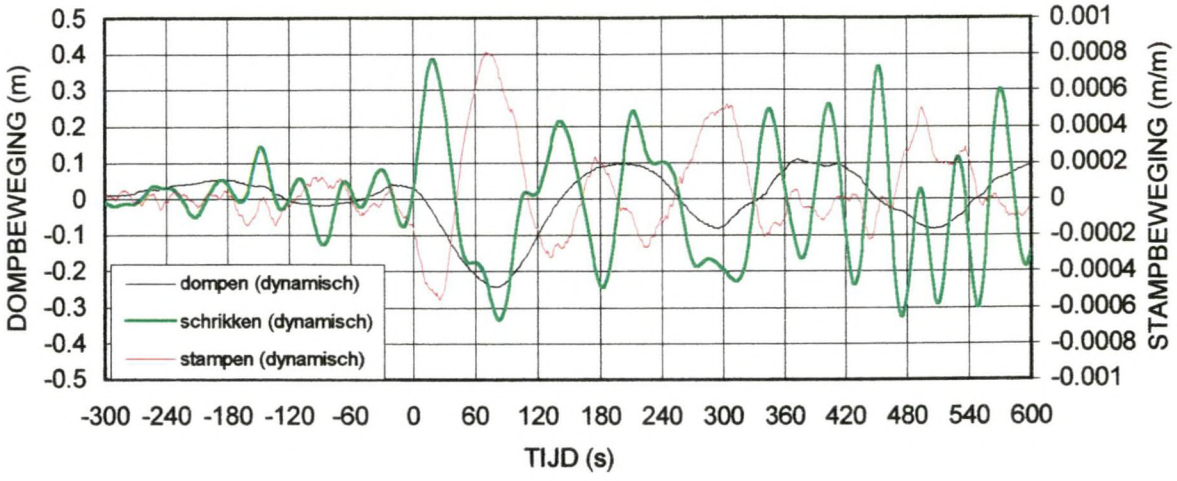


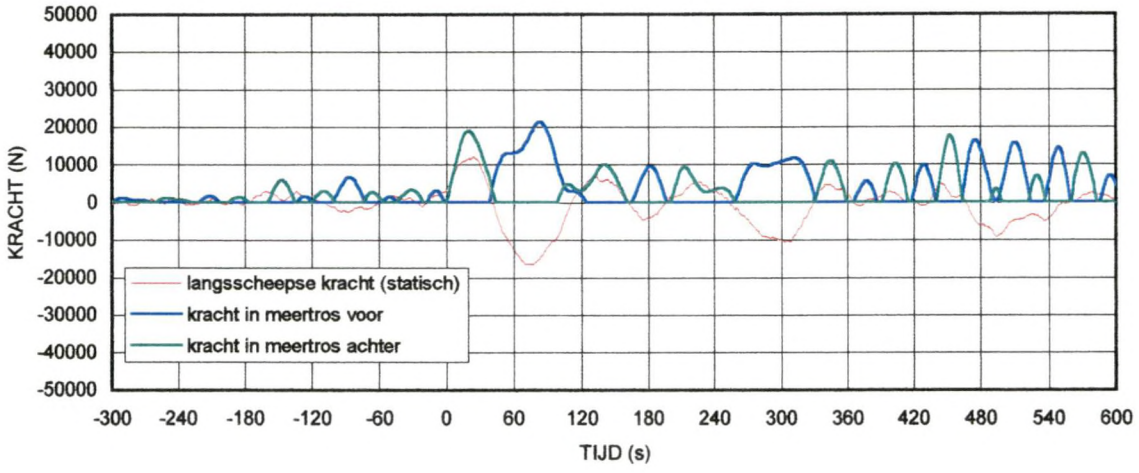


	TROS 1	TROS 2
x_{schip} (m)	35	-35
x_{kaai} (m)	65	-65
Δy (m)	1.0	1.0
Δz (m)	10	10
F_{breuk} (kN)	180	180
breukrek (%)	5	5
speling (m)	0	0
troslengte	31.6	31.6
wrijvingscoëfficiënt langs-scheeps (-)	0.02	

Figuur 20l.

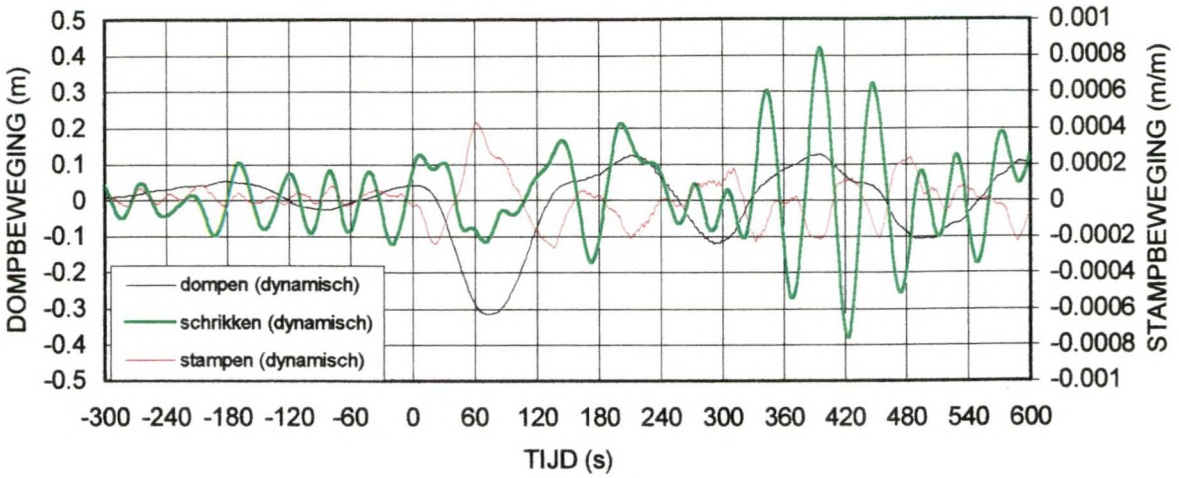
Simulatie van bewegingen en krachten uitgeoefend op afgemeerd binnenschip (1) afgemeerd aan kaai A (x = -100 m): hoogteverschil tussen kaai en schip van 10 m, stalen tros, troslengte 31.6 m.

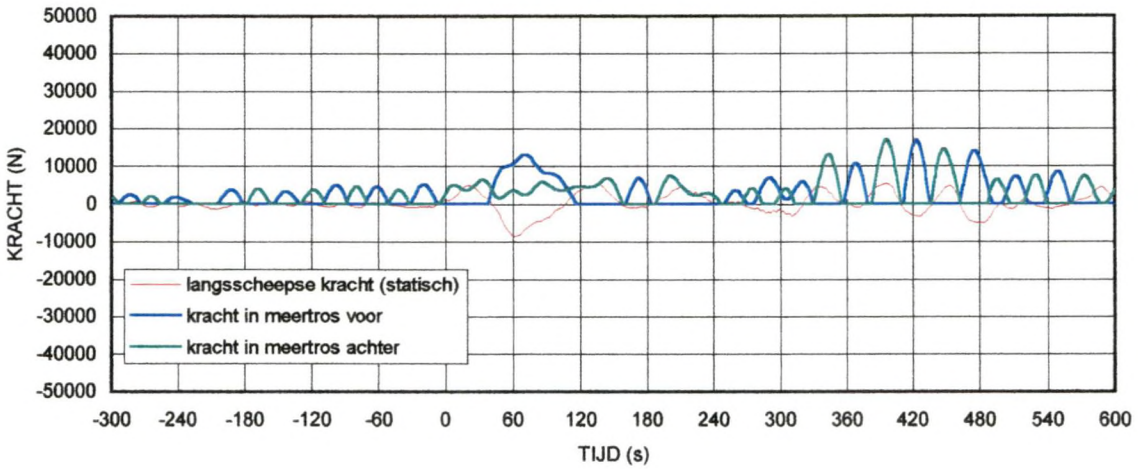




	TROS 1	TROS 2
x_{schip} (m)	35	-35
x_{kaai} (m)	55	-55
Δy (m)	1.0	1.0
Δz (m)	10	10
F_{breuk} (kN)	180	180
breukrek (%)	15	15
speling (m)	0	0
troslengte	22.4	22.4
wrijvingscoëfficiënt langs-scheeps (-)	0.02	

Figuur 20m.
Simulatie van bewegingen en krachten uitgeoefend op afgemeerd binnenschip (1) afgemeerd aan kaai A (x = -100 m): hoogteverschil tussen kaai en schip van 10 m, tros met 15% rek bij breuk, troslengte 22.4 m.

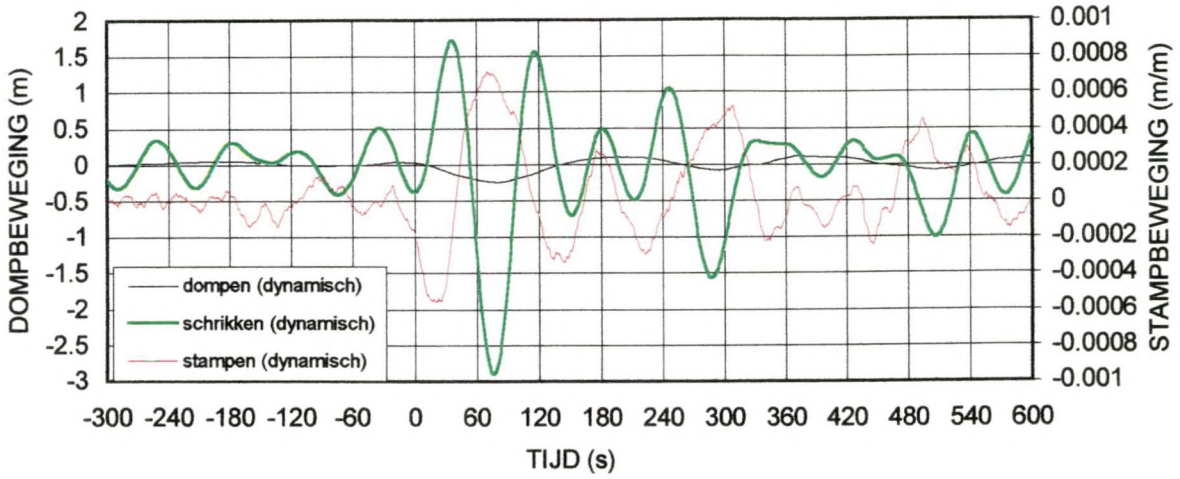


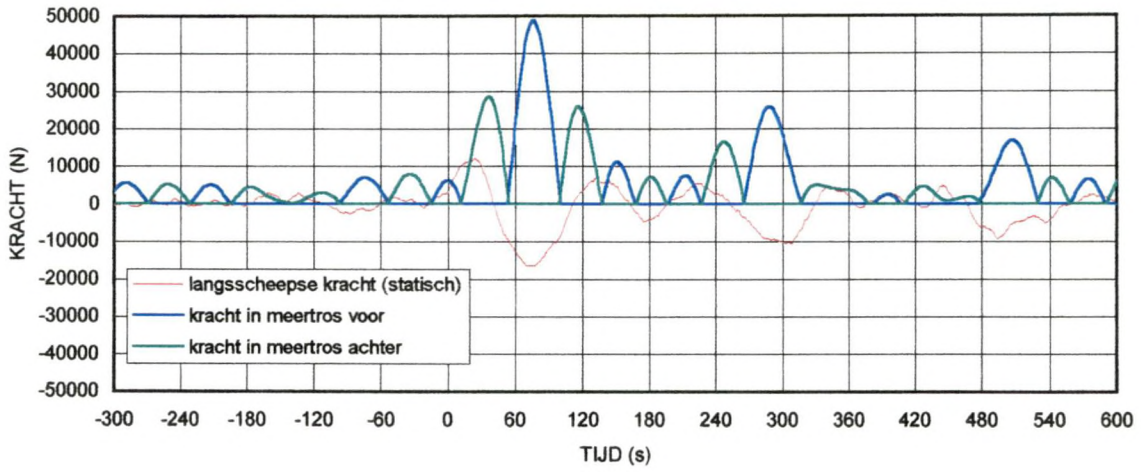


	TROS 1	TROS 2
x_{schip} (m)	35	-35
x_{kaai} (m)	55	-55
Δy (m)	1.0	1.0
Δz (m)	10	10
F_{breuk} (kN)	180	180
breukrek (%)	15	15
speling (m)	0	0
troslengte	22.4	22.4
wrijvingscoëfficiënt langs-scheeps (-)	0.02	

Figuur 20n.

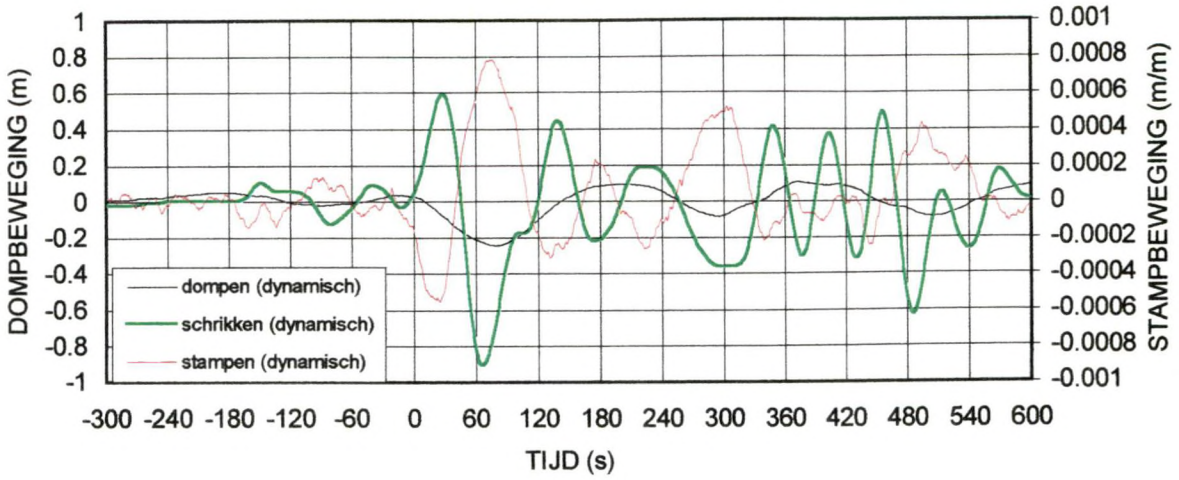
Simulatie van bewegingen en krachten uitgeoefend op afgemeerd binnenschip (1) afgemeerd aan kaai A (x = -250 m): hoogteverschil tussen kaai en schip van 10 m, tros met 15% rek bij breuk, troslengte 22.4 m.

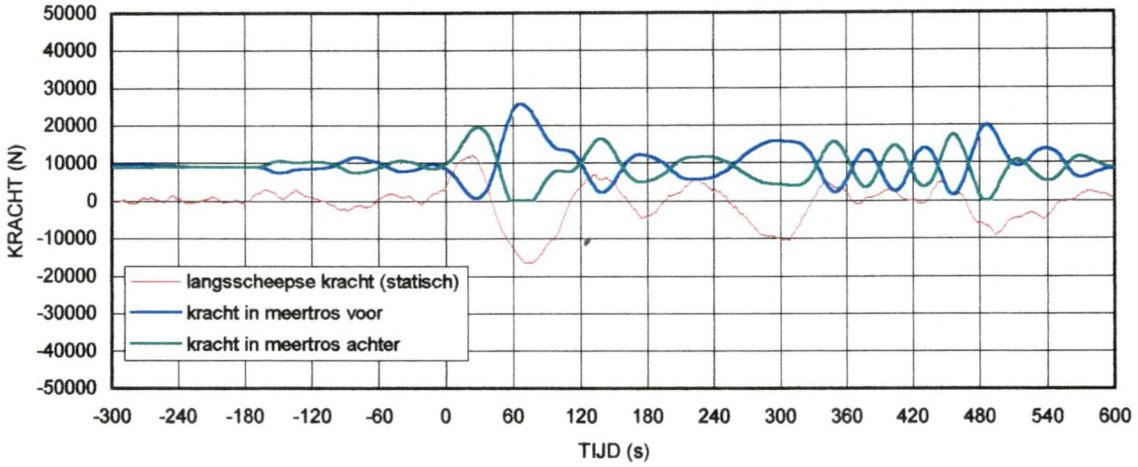




	TROS 1	TROS 2
x_{schip} (m)	35	-35
x_{kaai} (m)	55	-55
Δy (m)	1.0	1.0
Δz (m)	10	10
F_{breuk} (kN)	180	180
breukrek (%)	45	45
speling (m)	0	0
troslengte	22.4	22.4
wrijvingscoëfficiënt langs-scheeps (-)	0.02	

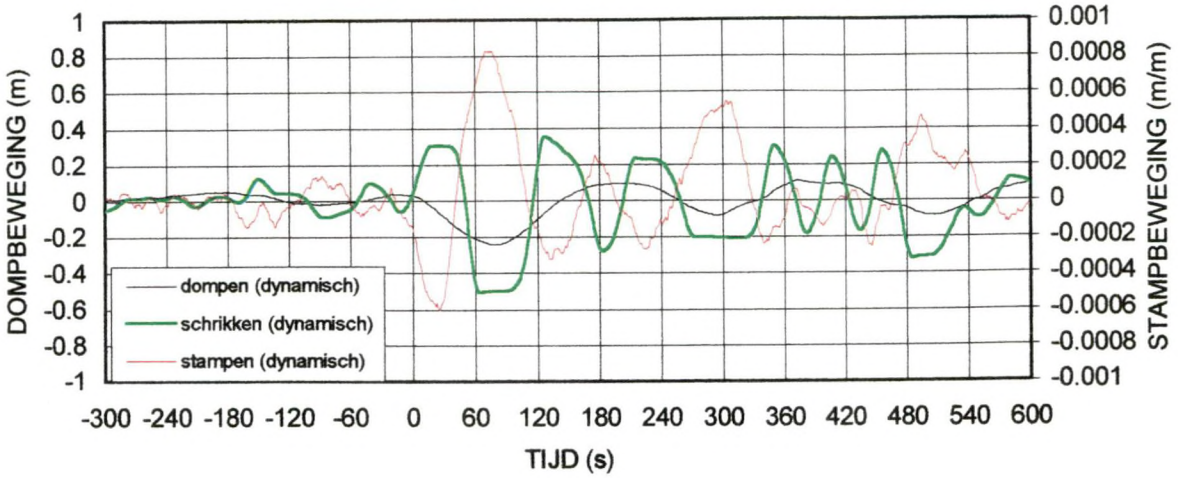
Figuur 20o.
Simulatie van bewegingen en krachten uitgeoefend op afgemeerd binnenschip (1) afgemeerd aan kaai A (x = -100 m): hoogteverschil tussen kaai en schip van 10 m, tros met 45% rek bij breuk, troslengte 22.4 m.

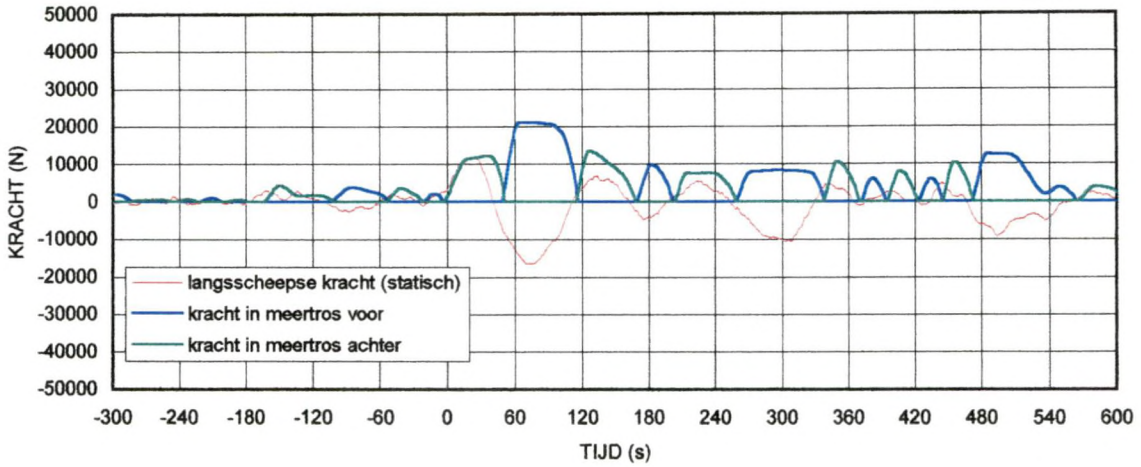




	TROS 1	TROS 2
x_{schip} (m)	35	-35
x_{kaai} (m)	55	-55
Δy (m)	1.0	1.0
Δz (m)	10	10
F_{breuk} (kN)	180	180
breukrek (%)	45	45
speling (m)	-0.5	-0.5
troslengte	22.4	22.4
wrijvingscoëfficiënt langs-scheeps (-)	0.02	

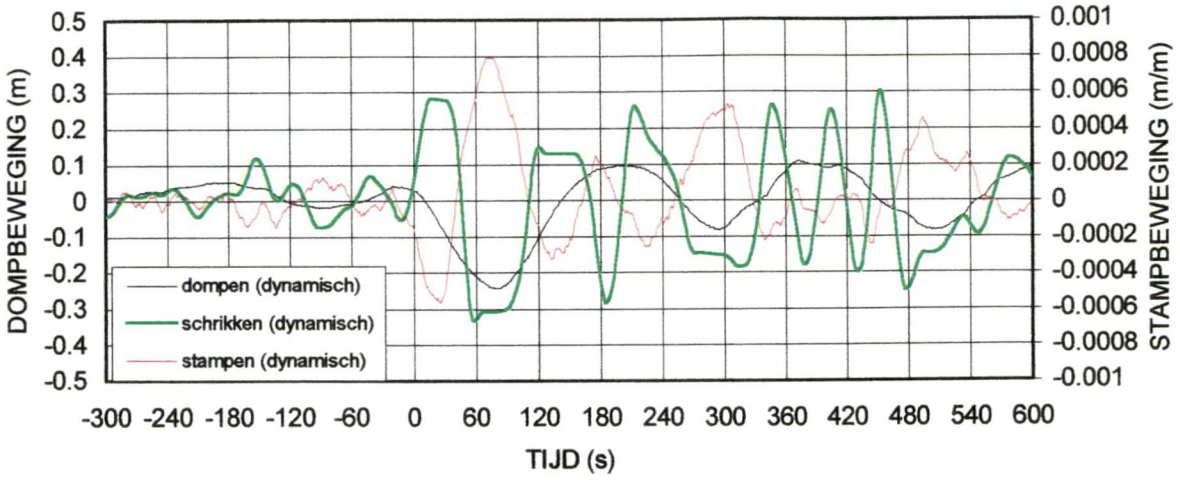
Figuur 20p.
Simulatie van bewegingen en krachten uitgeoefend op afgemeerd binnenschip (1) afgemeerd aan kaai A (x = -100 m): hoogteverschil tussen kaai en schip van 10 m, tros met 45% rek bij breuk, troslengte 22.4 m, met voorspanning

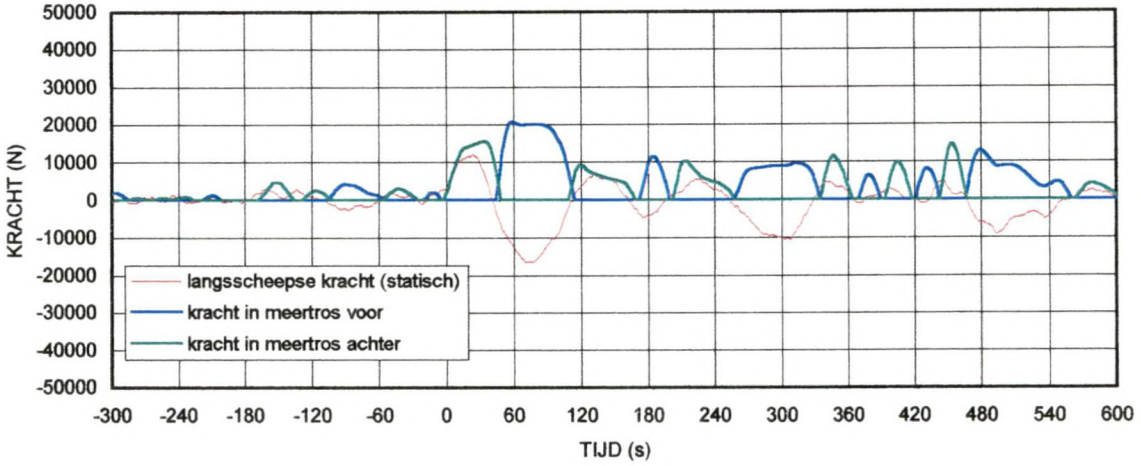




	TROS 1	TROS 2
x_{schip} (m)	35	-35
x_{kaai} (m)	45	-45
Δy (m)	1.0	1.0
Δz (m)	2.5	2.5
F_{breuk} (kN)	180	180
breukrek (%)	45	45
speling (m)	0	0
troslengte	10.4	10.4
wrijvingscoëfficiënt langs-scheeps (-)	0.10	

Figuur 20q.
Simulatie van bewegingen en krachten uitgeoefend op afgemeerd binnenschip (1) afgemeerd aan kaai A (x = -100 m): invloed van een verhoging van de wrijvingscoëfficiënt

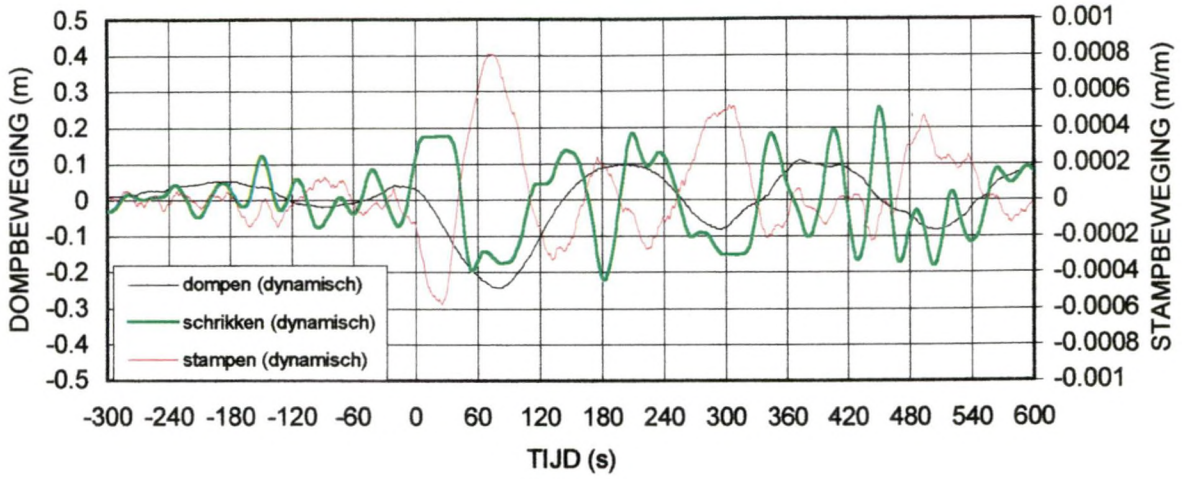


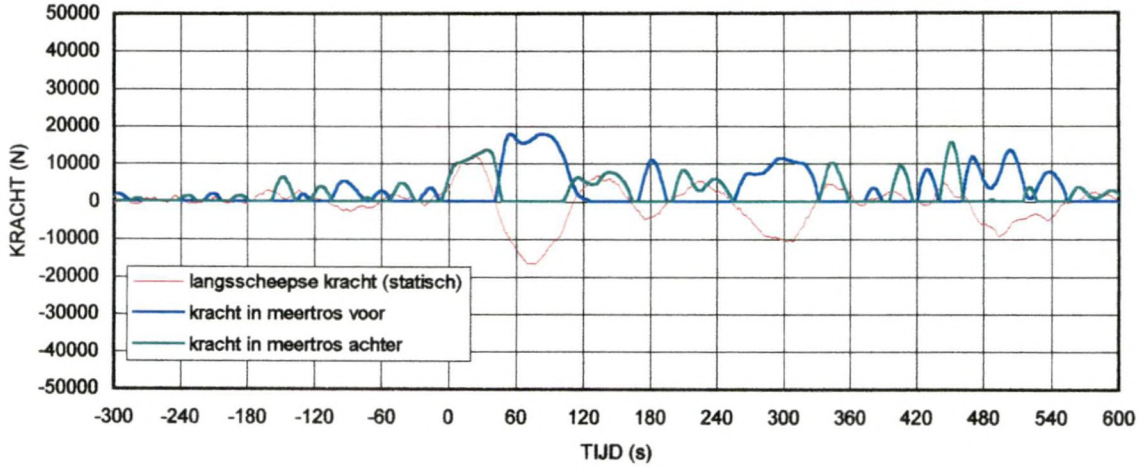


	TROS 1	TROS 2
x_{schip} (m)	35	-35
x_{kaai} (m)	55	-55
Δy (m)	1.0	1.0
Δz (m)	10	10
F_{breuk} (kN)	180	180
breukrek (%)	15	15
speling (m)	0	0
troslengte	22.4	22.4
wrijvingscoëfficiënt langs-scheeps (-)	0.10	

Figuur 20r.

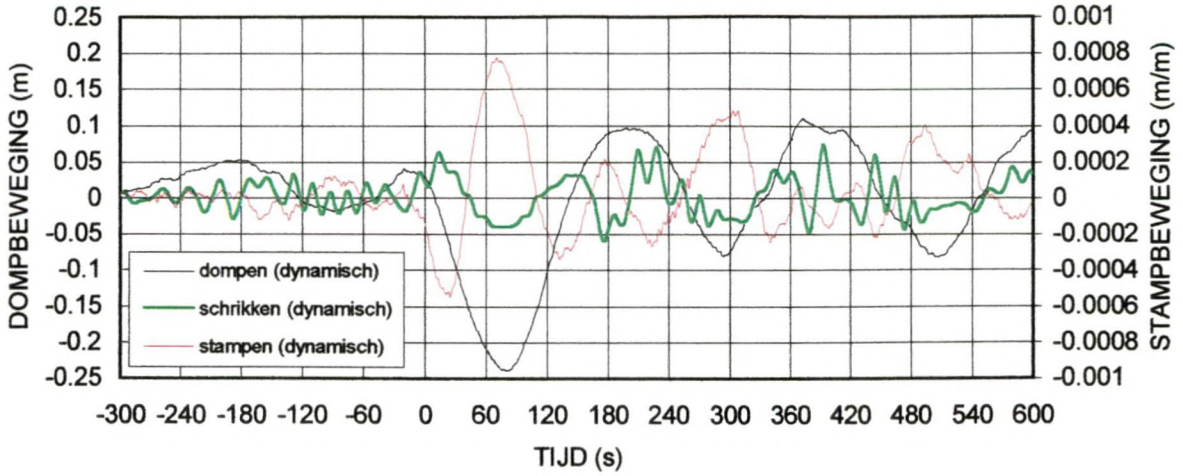
Simulatie van bewegingen en krachten uitgeoefend op afgemeerd binnenschip (1) afgemeerd aan kaai A (x = -100 m): hoogteverschil tussen kaai en schip van 10 m, tros met 15% rek bij breuk, troslengte 22.4 m; invloed van grotere wrijvingscoëfficiënt

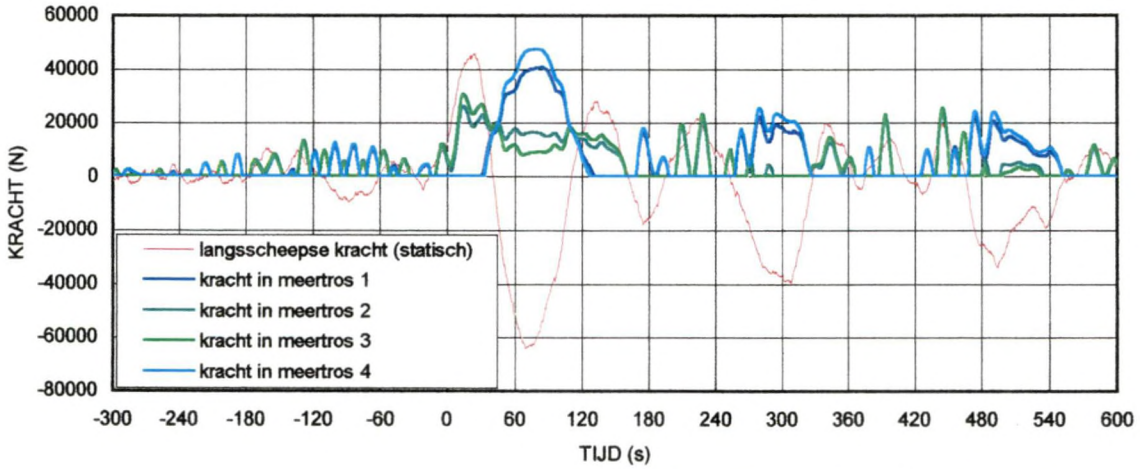




	TROS 1	TROS 2
x_{schip} (m)	35	-35
x_{kaai} (m)	40	-40
Δy (m)	1.0	1.0
Δz (m)	2.5	2.5
F_{breuk} (kN)	180	180
breukrek (%)	45	45
speling (m)	0	0
troslengte	5.7	5.7
wrijvingscoëfficiënt langs-scheeps (-)	0.02	

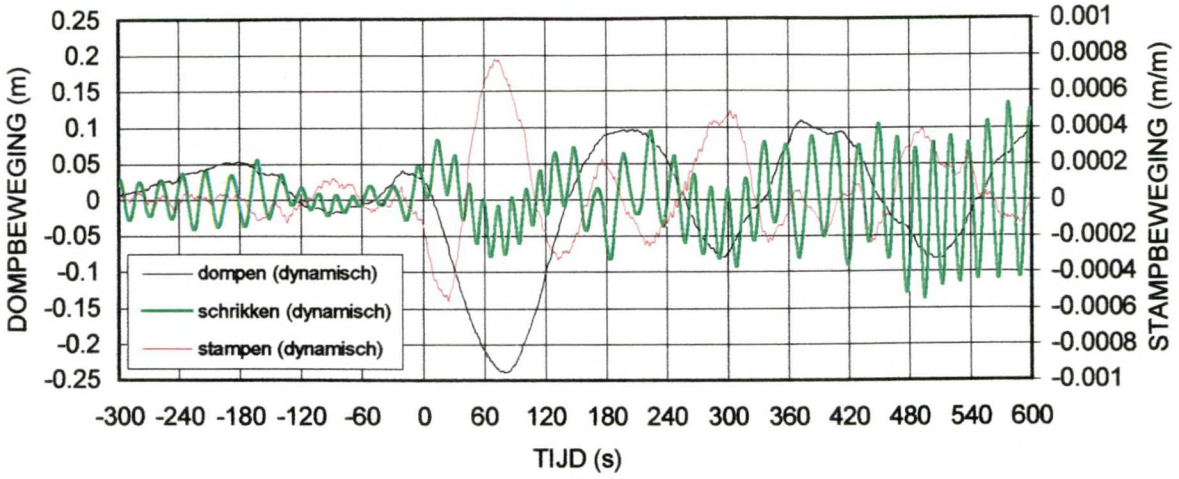
Figuur 20s.
Simulatie van bewegingen en krachten uitgeoefend op afgemeerd binnenschip (1) afgemeerd aan kaai A (x = -100 m): hoogteverschil tussen kaai en schip van 2.5 m, tros met 45% rek bij breuk, zeer korte tros (5.7 m) wrijvingscoëfficiënt

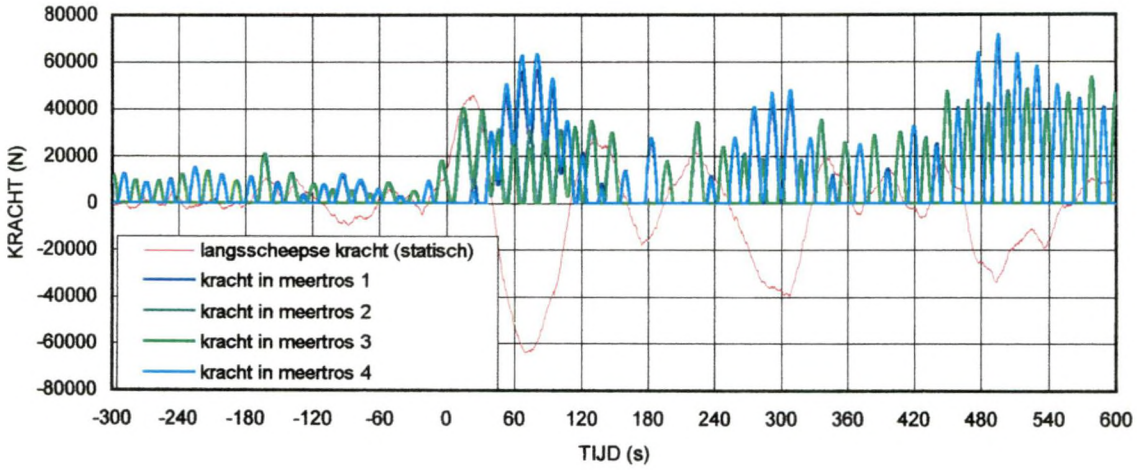




	TROS 1	TROS 2	TROS 3	TROS 4
x_{schip} (m)	75	-75	5	-5
x_{kaai} (m)	85	-85	-5	5
Δy (m)	1.0	1.0	1.0	1.0
Δz (m)	2.5	2.5	2.5	2.5
F_{breuk} (kN)	243	243	243	243
breukrek (%)	5	5	5	5
speling (m)	0	0	0	0
troslengte	10.4	10.4	10.4	10.4
wrijvingscoëfficiënt langs-scheeps (-)	0.02			

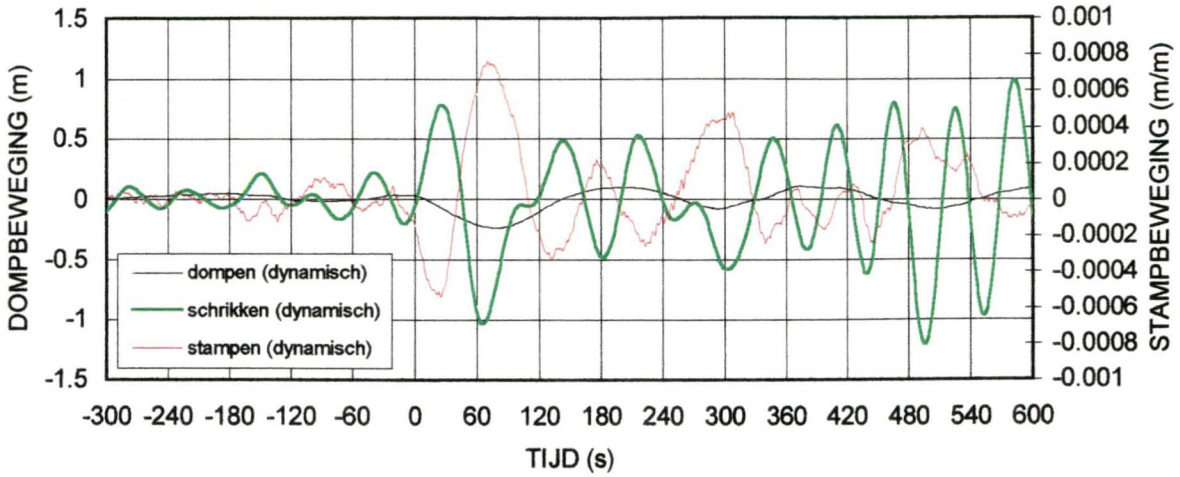
Figuur 21a.
Simulatie van bewegingen en krachten uitgeoefend op afgemeerd duwkonvooi (2a) afgemeerd aan kaai A.

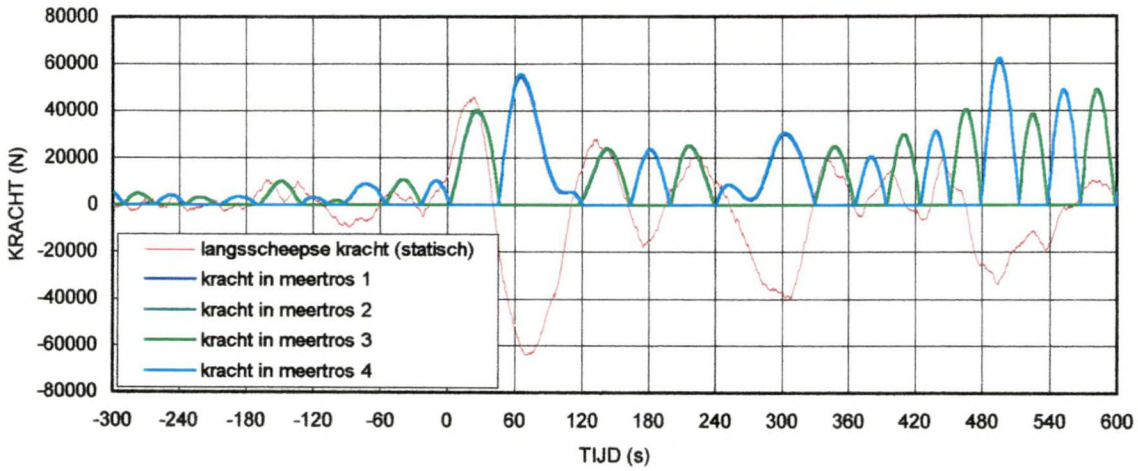




	TROS 1	TROS 2	TROS 3	TROS 4
x_{schip} (m)	75	-75	5	-5
x_{kaai} (m)	85	-85	-5	5
Δy (m)	1.0	1.0	1.0	1.0
Δz (m)	2.5	2.5	2.5	2.5
F_{breuk} (kN)	243	243	243	243
breukrek (%)	5	5	5	5
speling (m)	0	0	0	0
troslengte	10.4	10.4	10.4	10.4
wrijvingscoëfficiënt langs-scheeps (-)	0			

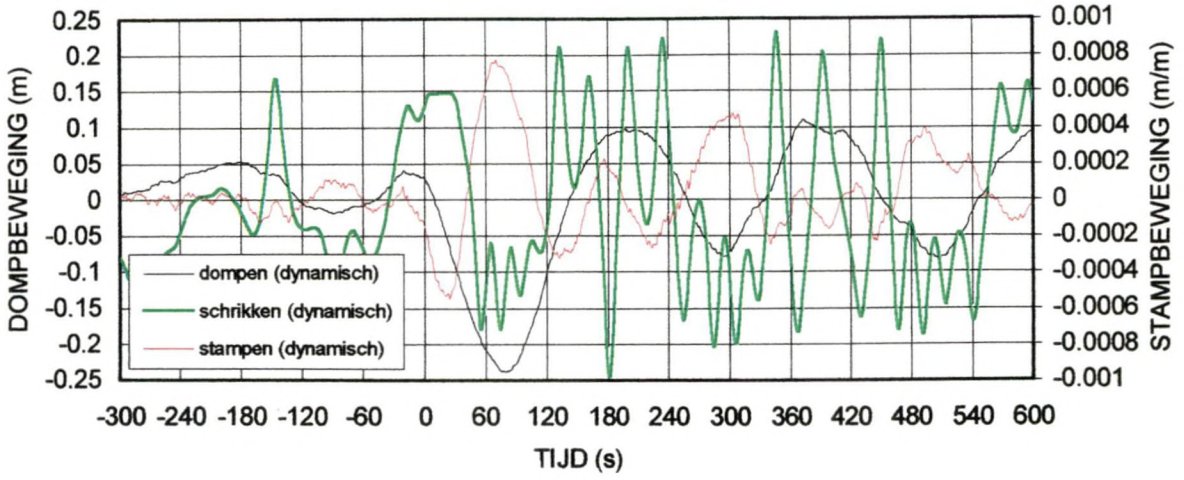
Figuur 21b.
Simulatie van bewegingen en krachten uitgeoefend op afgemeerd duwkonvooi (2a) afgemeerd aan kaai A: invloed van de langsscheepse wrijving.

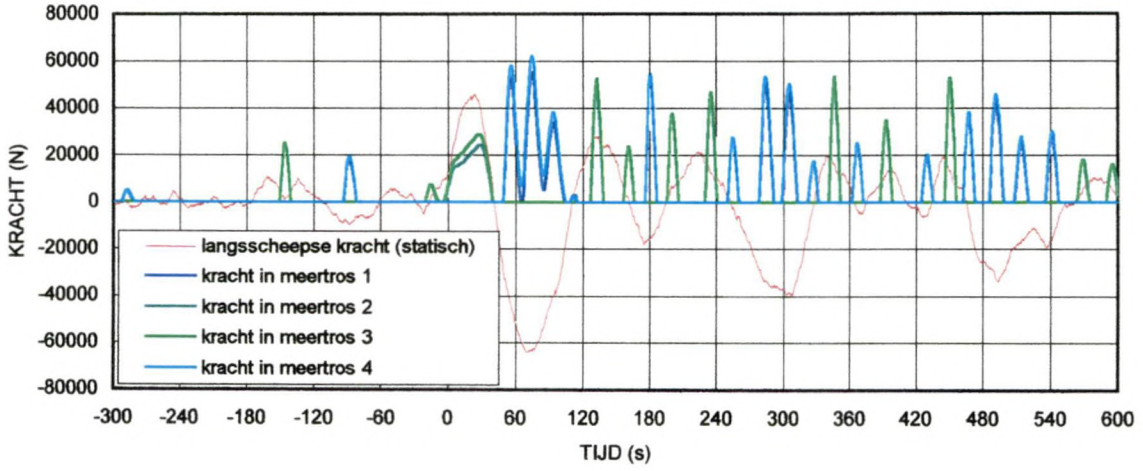




	TROS 1	TROS 2	TROS 3	TROS 4
x_{schip} (m)	75	-75	5	-5
x_{kaai} (m)	85	-85	-5	5
Δy (m)	1.0	1.0	1.0	1.0
Δz (m)	2.5	2.5	2.5	2.5
F_{breuk} (kN)	243	243	243	243
breukrek (%)	45	45	45	45
speling (m)	0	0	0	0
troslengte	10.4	10.4	10.4	10.4
wrijvingscoëfficiënt langs-scheeps (-)	0.02			

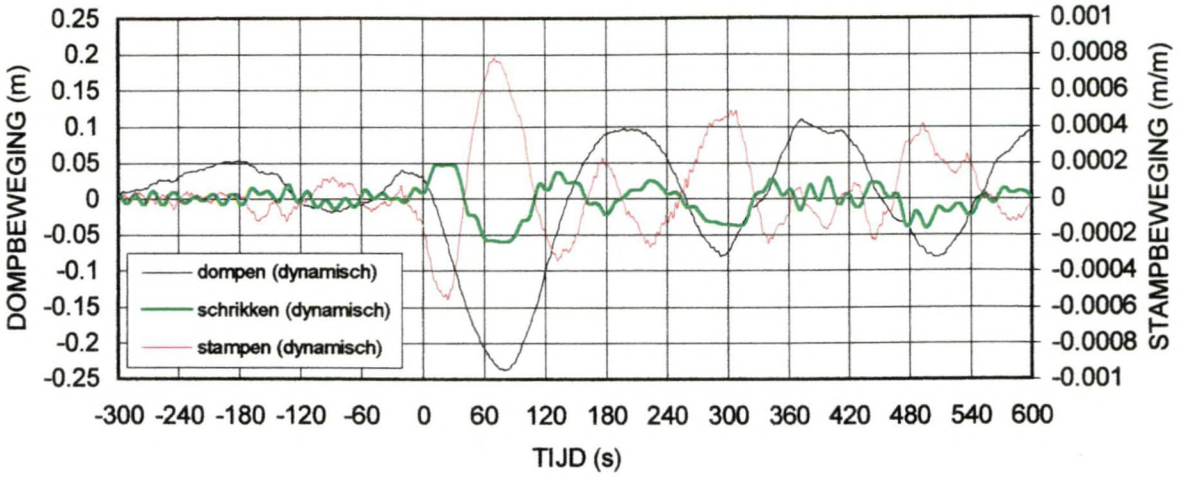
Figuur 21c.
Simulatie van bewegingen en krachten uitgeoefend op afgemeerd duwkonvooi (2a) afgemeerd aan kaai A: invloed van de elasticiteit van de trossen.

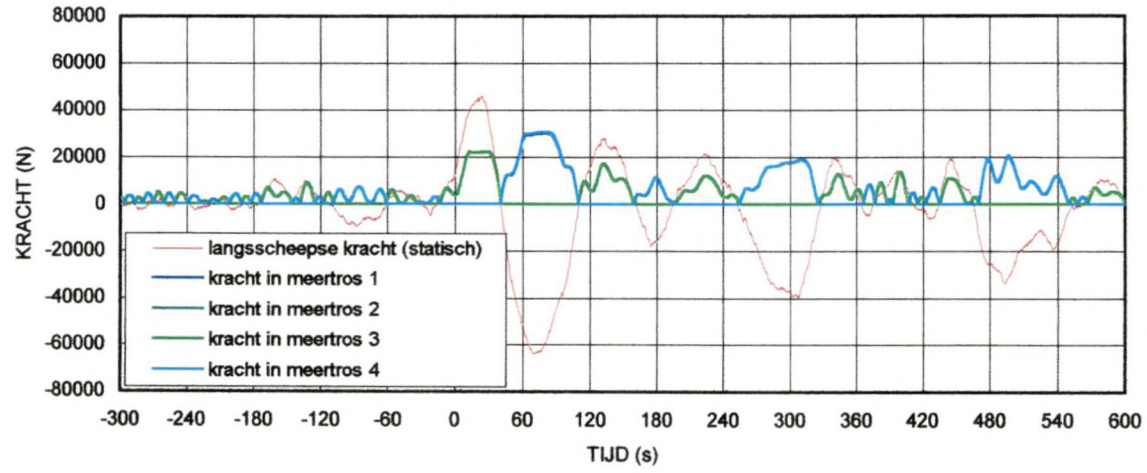




	TROS 1	TROS 2	TROS 3	TROS 4
x_{schip} (m)	75	-75	5	-5
x_{kaai} (m)	85	-85	-5	5
Δy (m)	1.0	1.0	1.0	1.0
Δz (m)	2.5	2.5	2.5	2.5
F_{breuk} (kN)	243	243	243	243
breukrek (%)	5	5	5	5
speling (m)	0.1	0.1	0.1	0.1
troslengte	10.5	10.5	10.5	10.5
wrijvingscoëfficiënt langs-scheeps (-)	0.02			

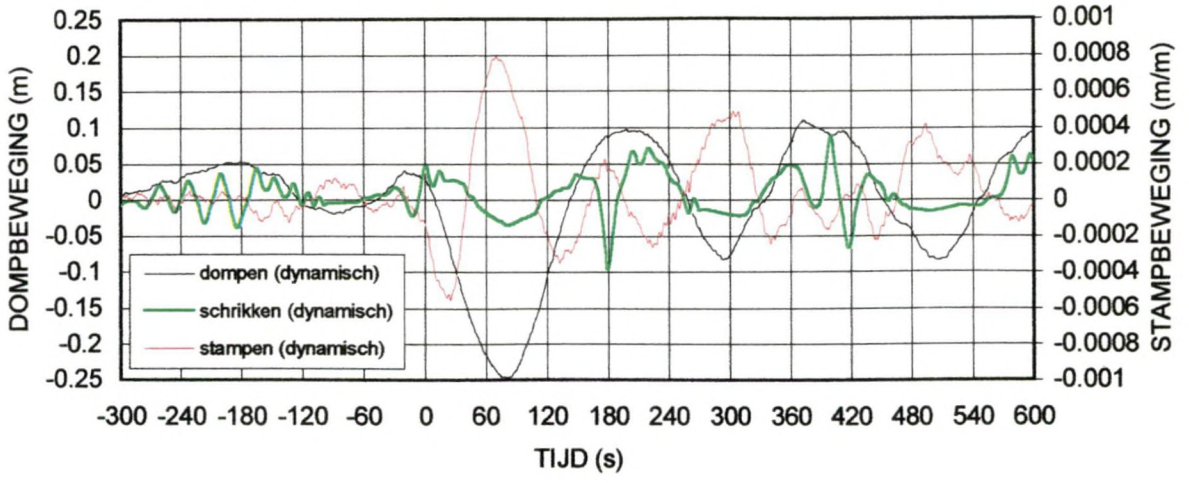
Figuur 21d.
Simulatie van bewegingen en krachten uitgeoefend op afgemeerd duwkonvooi (2a) afgemeerd aan kaai A: invloed van de speling van de trossen.

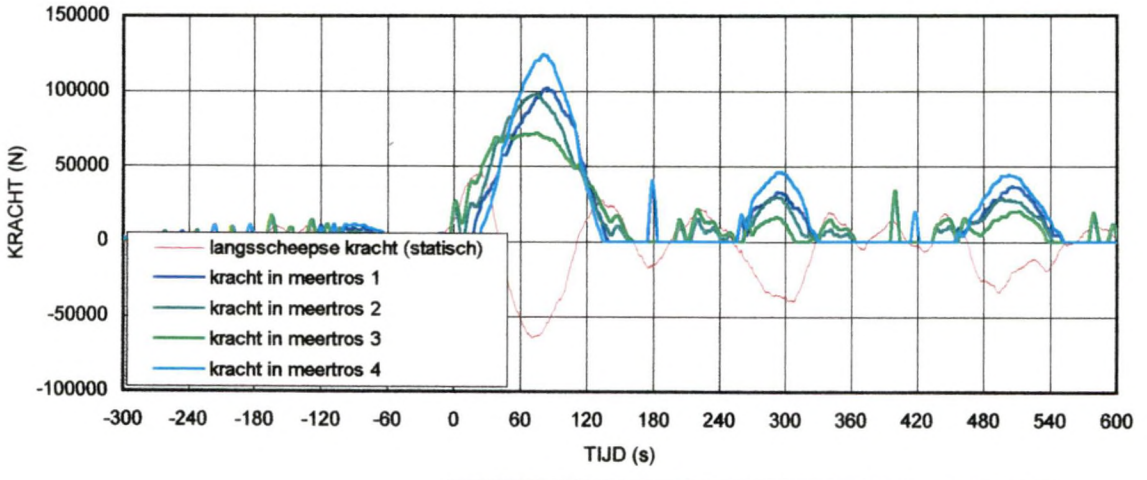




	TROS 1	TROS 2	TROS 3	TROS 4
x_{schip} (m)	75	-75	5	-5
x_{kaai} (m)	85	-85	-5	5
Δy (m)	1.0	1.0	1.0	1.0
Δz (m)	0	0	0	0
F_{breuk} (kN)	243	243	243	243
breukrek (%)	5	5	5	5
speling (m)	0	0	0	0
troslengte	10.4	10.4	10.4	10.4
wrijvingscoëfficiënt langs-scheeps (-)	0.02			

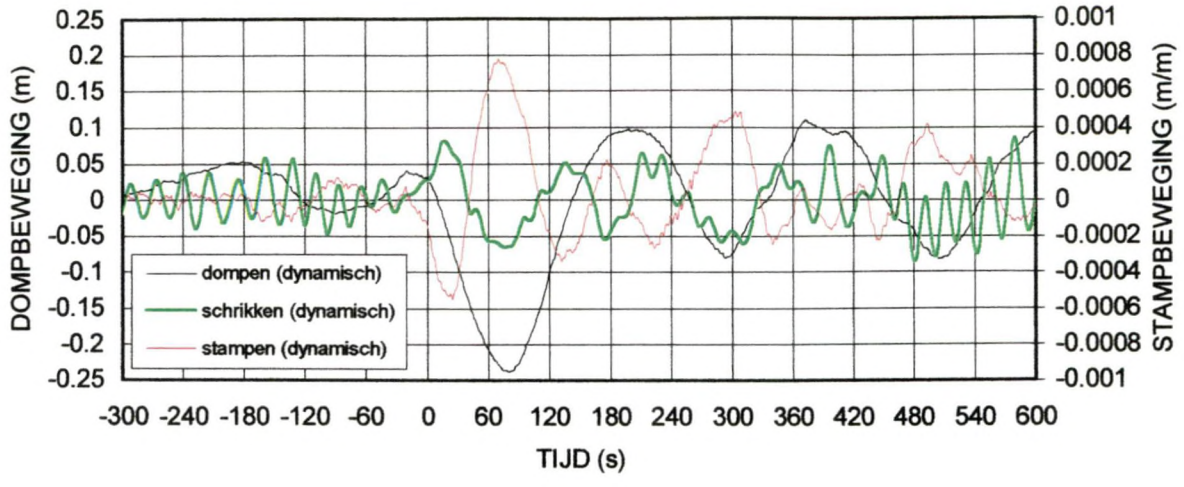
Figuur 21e.
Simulatie van bewegingen en krachten uitgeoefend op afgemeerd duwkonvooi (2a) afgemeerd aan kaai A: invloed van het verschil in hoogte tussen de bevestigings-punten op schip en kaai.

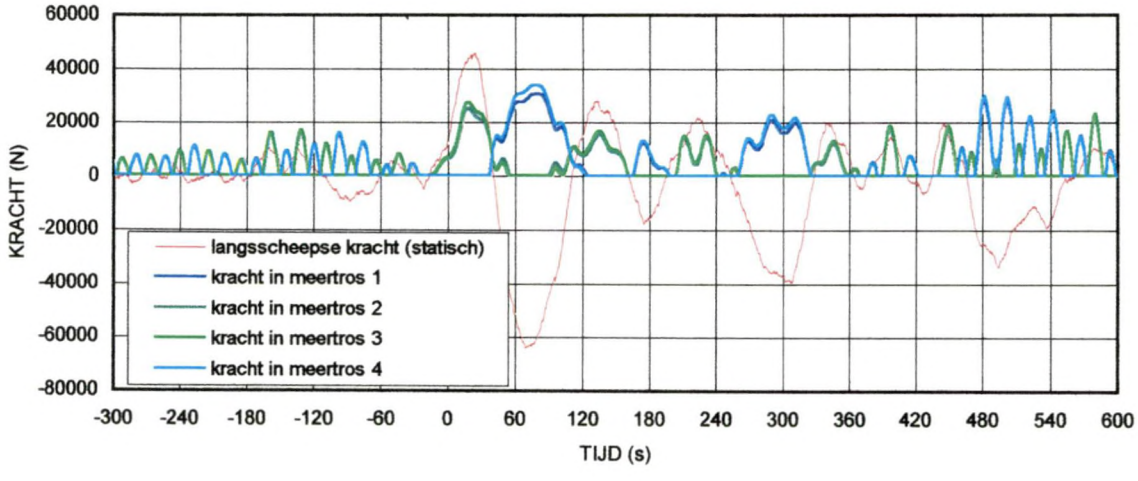




	TROS 1	TROS 2	TROS 3	TROS 4
x_{schip} (m)	75	-75	5	-5
x_{kaai} (m)	80	-80	0	0
Δy (m)	1.0	1.0	1.0	1.0
Δz (m)	2.5	2.5	2.5	2.5
F_{breuk} (kN)	243	243	243	243
breukrek (%)	5	5	5	5
speling (m)	0	0	0	0
troslengte	5.7	5.7	5.7	5.7
wrijvingscoëfficiënt langs-scheeps (-)	0.02			

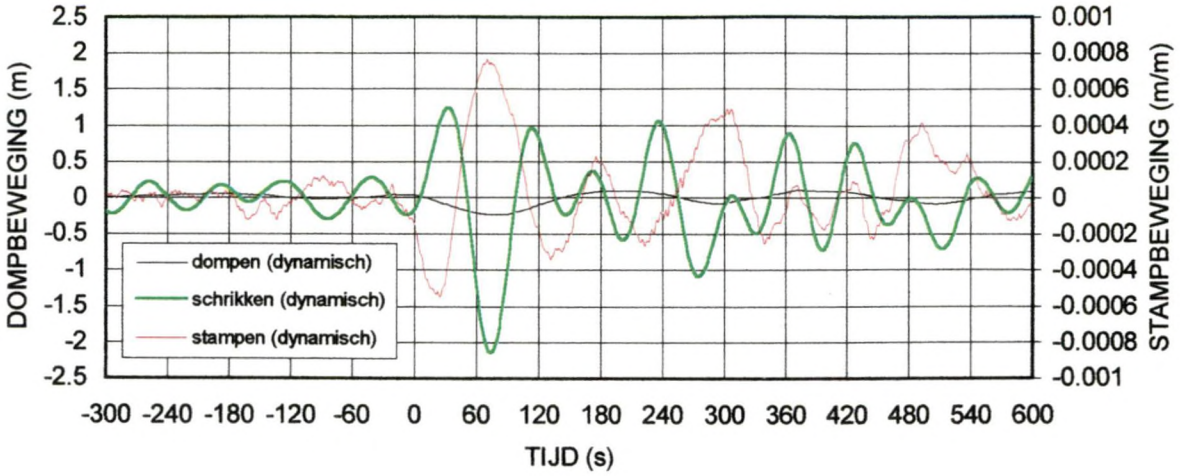
Figuur 21f.
Simulatie van bewegingen en krachten uitgeoefend op afgemeerd duwkonvooi (2a) afgemeerd aan kaai A: invloed van de troslengte (korte tros)

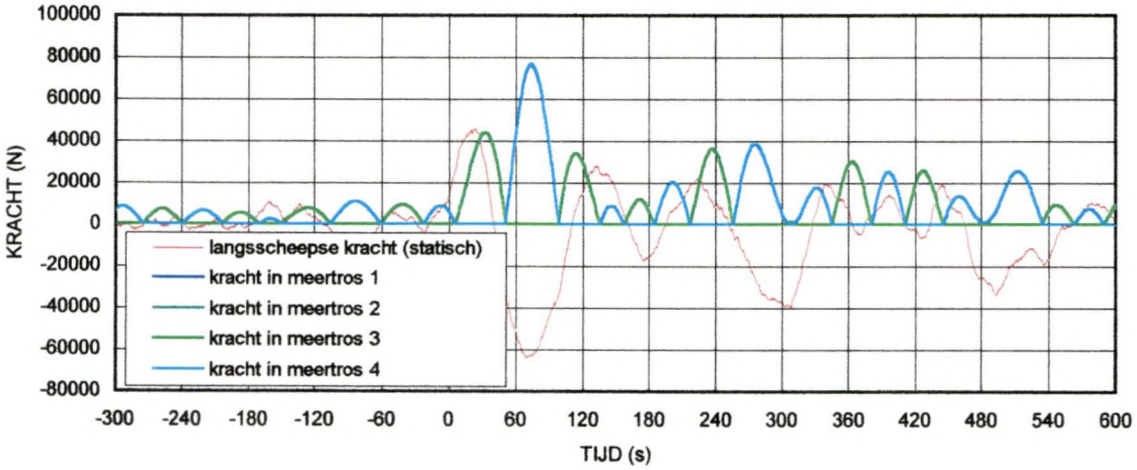




	TROS 1	TROS 2	TROS 3	TROS 4
x_{schip} (m)	75	-75	5	-5
x_{kaai} (m)	90	-90	10	-10
Δy (m)	1.0	1.0	1.0	1.0
Δz (m)	2.5	2.5	2.5	2.5
F_{breuk} (kN)	243	243	243	243
breukrek (%)	5	5	5	5
speling (m)	0	0	0	0
troslengte	15.2	15.2	15.2	15.2
wrijvingscoëfficiënt langs-scheeps (-)	0.02			

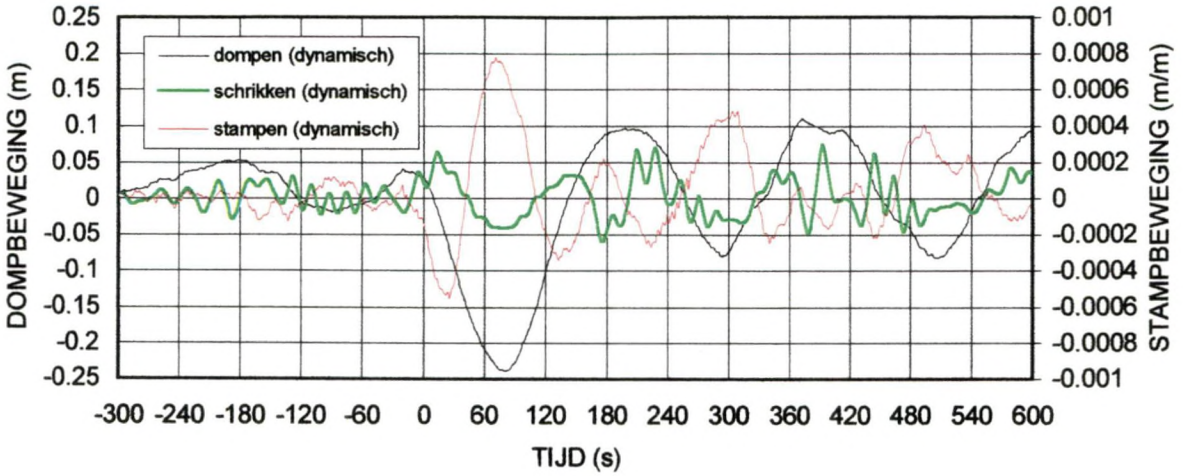
Figuur 21g.
Simulatie van bewegingen en krachten uitgeoefend op afgemeerd duwkonvooi (2a) afgemeerd aan kaai A: invloed van de troslengte (lange tros)

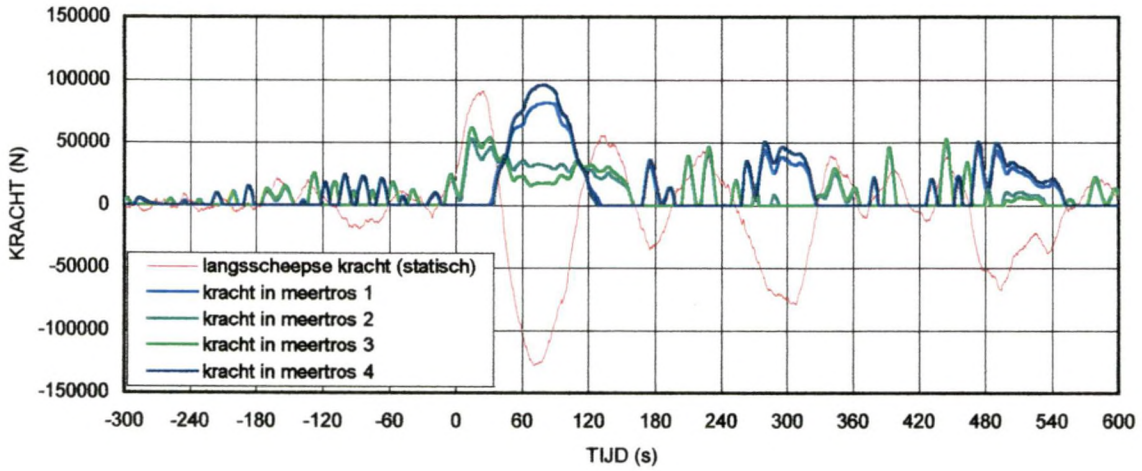




	TROS 1	TROS 2	TROS 3	TROS 4
x_{schip} (m)	75	-75	5	-5
x_{kaai} (m)	90	-90	10	-10
Δy (m)	1.0	1.0	1.0	1.0
Δz (m)	2.5	2.5	2.5	2.5
F_{breuk} (kN)	243	243	243	243
breukrek (%)	45	45	45	45
speling (m)	0	0	0	0
troslengte	15.2	15.2	15.2	15.2
wrijvingscoëfficiënt langs-scheeps (-)	0.02			

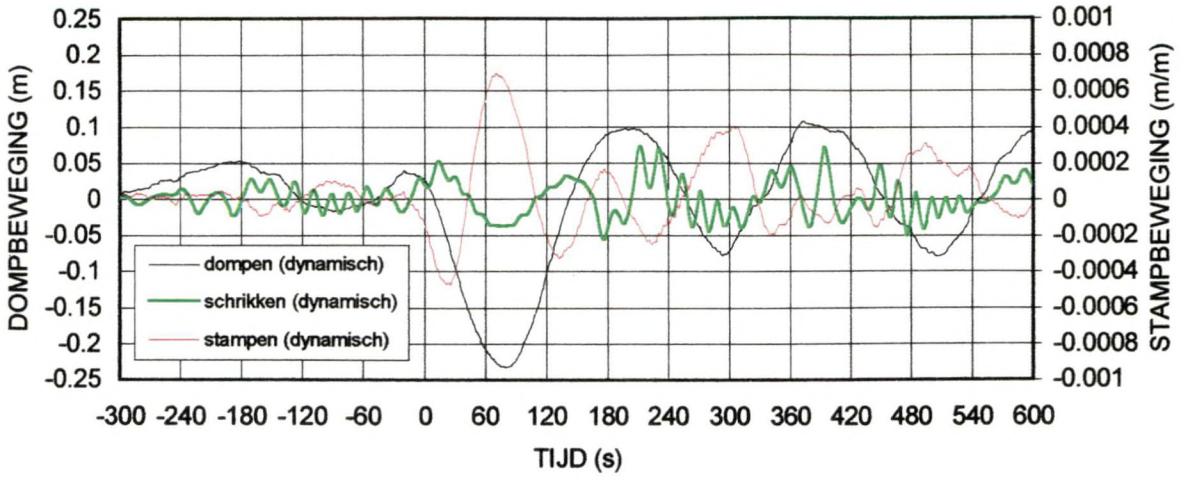
Figuur 21h.
Simulatie van bewegingen en krachten uitgeoefend op afgemeerd duwkonvooi (2a) afgemeerd aan kaai A: invloed van de troslengte (lange tros) en van de elasticiteit van de trossen.

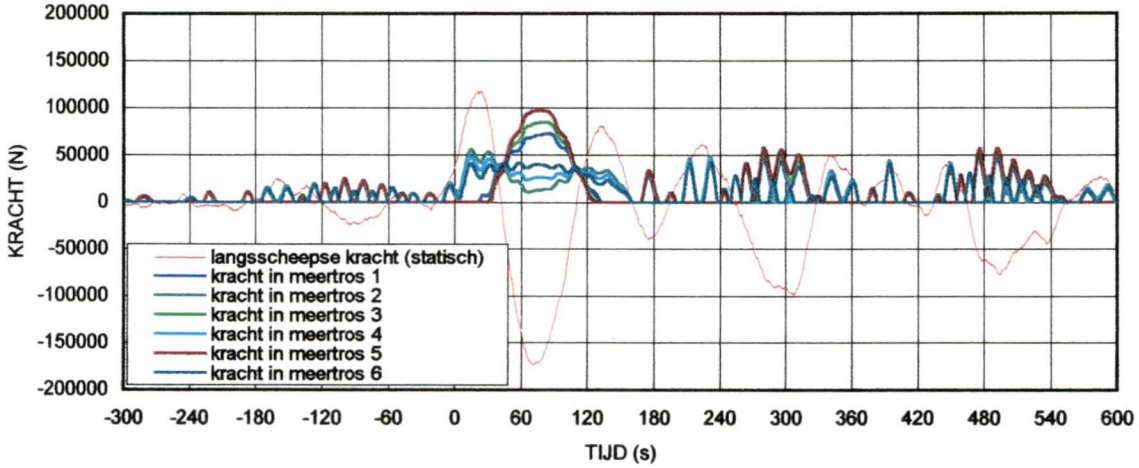




	TROS 1	TROS 2	TROS 3	TROS 4
x_{schip} (m)	75	-75	5	-5
x_{kaai} (m)	85	-85	-5	5
Δy (m)	1.0	1.0	1.0	1.0
Δz (m)	2.5	2.5	2.5	2.5
F_{breuk} (kN)	2 * 243	2 * 243	2 * 243	2 * 243
breukrek (%)	5	5	5	5
speling (m)	0	0	0	0
troslengte	10.4	10.4	10.4	10.4
wrijvingscoëfficiënt langs-scheeps (-)	0.02			

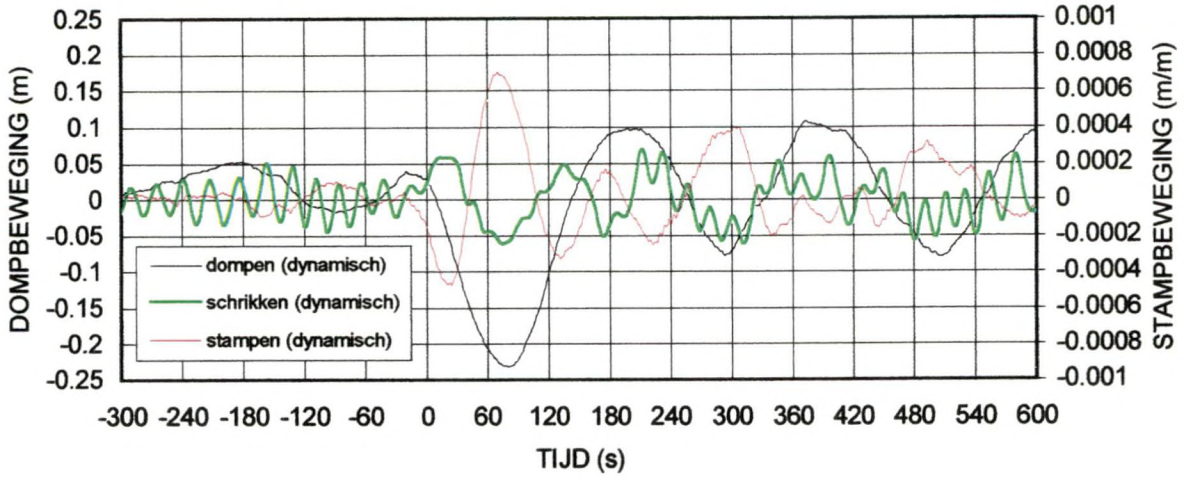
Figuur 22.
Simulatie van bewegingen en krachten uitgeoefend op afgemeerd duwkonvooi (2b) afgemeerd aan kaai A.

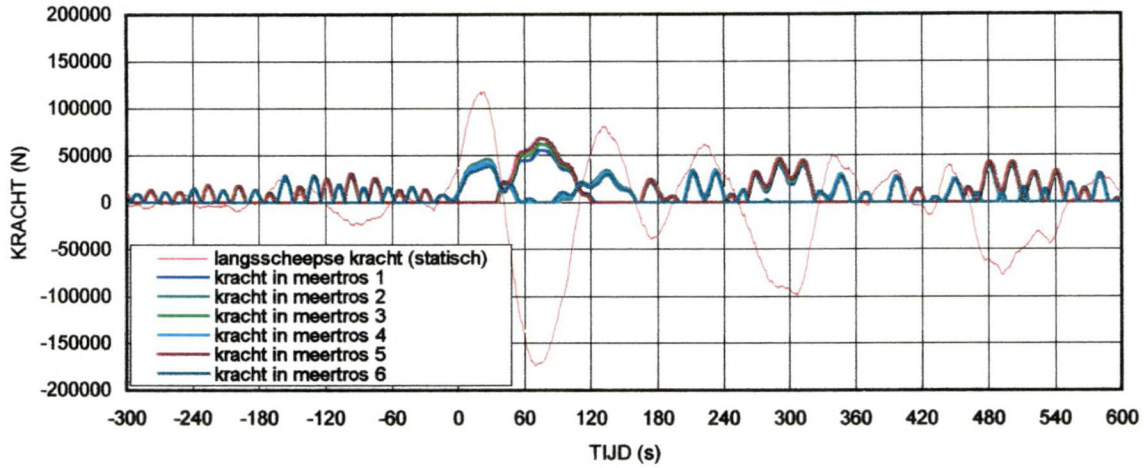




	TROS 1	TROS 2	TROS 3	TROS 4	TROS 5	TROS 6
x_{schip} (m)	115	45	35	-35	-45	-115
x_{kaai} (m)	125	35	45	-45	-35	-125
Δy (m)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Δz (m)	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
F_{breuk} (kN)	2 * 243	2 * 243	2 * 243	2 * 243	2 * 243	2 * 243
breukrek (%)	5	5	5	5	5	5
speling (m)	0	0	0	0	0	0
troslengte	10.4	10.4	10.4	10.4	10.4	10.4
wrijvingscoëfficiënt langs-scheeps (-)	0.02					

Figuur 23a.
Simulatie van bewegingen en krachten uitgeoefend op afgemeerd duwkonvooi (3) afgemeerd aan kaai A.





	TROS 1	TROS 2	TROS 3	TROS 4	TROS 5	TROS 6
x_{schip} (m)	115	45	35	-35	-45	-115
x_{kaai} (m)	130	30	50	-50	-30	-130
Δy (m)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Δz (m)	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
F_{breuk} (kN)	2 * 243	2 * 243	2 * 243	2 * 243	2 * 243	2 * 243
breukrek (%)	5	5	5	5	5	5
speling (m)	0	0	0	0	0	0
troslengte	15.2	15.2	15.2	15.2	15.2	15.2
wrijvingscoëfficiënt langs-scheeps (-)	0.02					

Figuur 23b.
Simulatie van bewegingen en krachten uitgeoefend op afgemeerd duwkonvooi (3) afgemeerd aan kaai A: invloed van de lengte van de tros (langere tros).

UNIVERSITEIT GENT
Vakgroep TW04V
Afdeling Maritieme Technologie

UNIVERSITEIT
GENT

CONTAINERTERMINAL TE VLISSINGEN
ONDERZOEK LICHTERDOK WESTERSCHELDE

Foto's

door

prof. Marc VANTORRE
Hoogleraar RUG

Studie uitgevoerd in opdracht van HESSENATIE N.V.

in samenwerking met
Afdeling Waterbouwkundig Laboratorium en Hydrologisch Onderzoek
AWZ-LIN-MVG

Antwerpen, oktober 2000

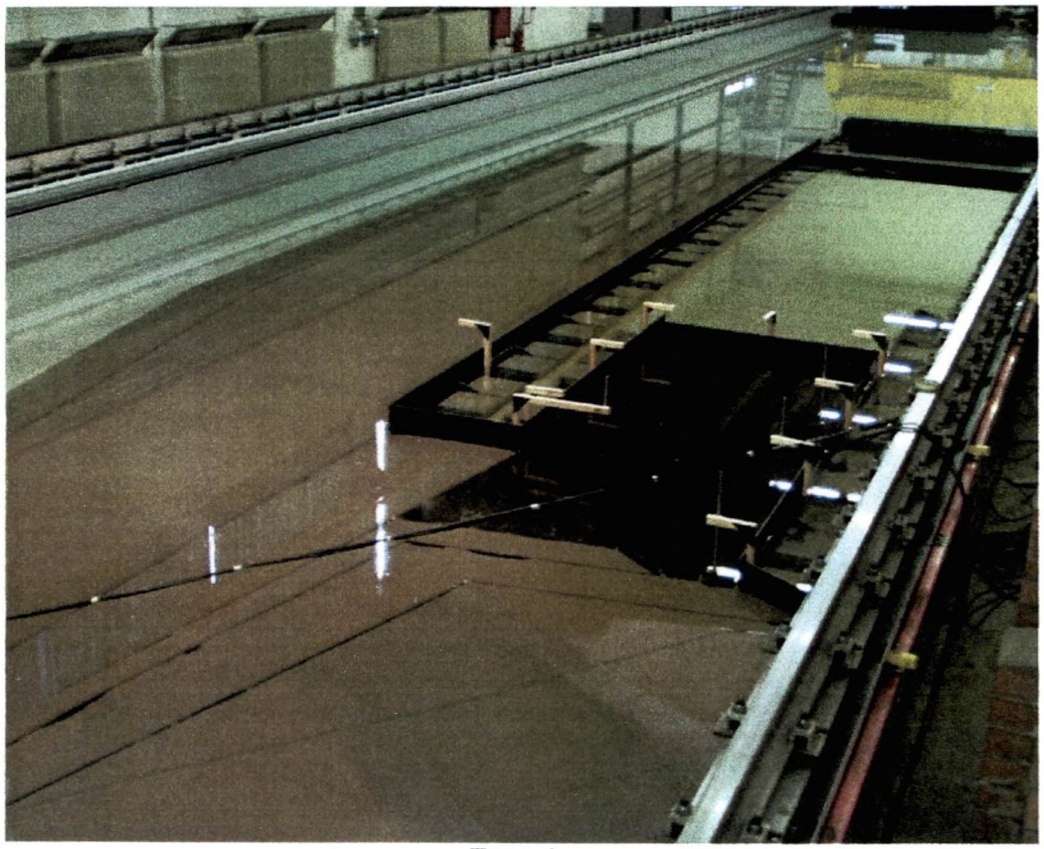


Foto 1a

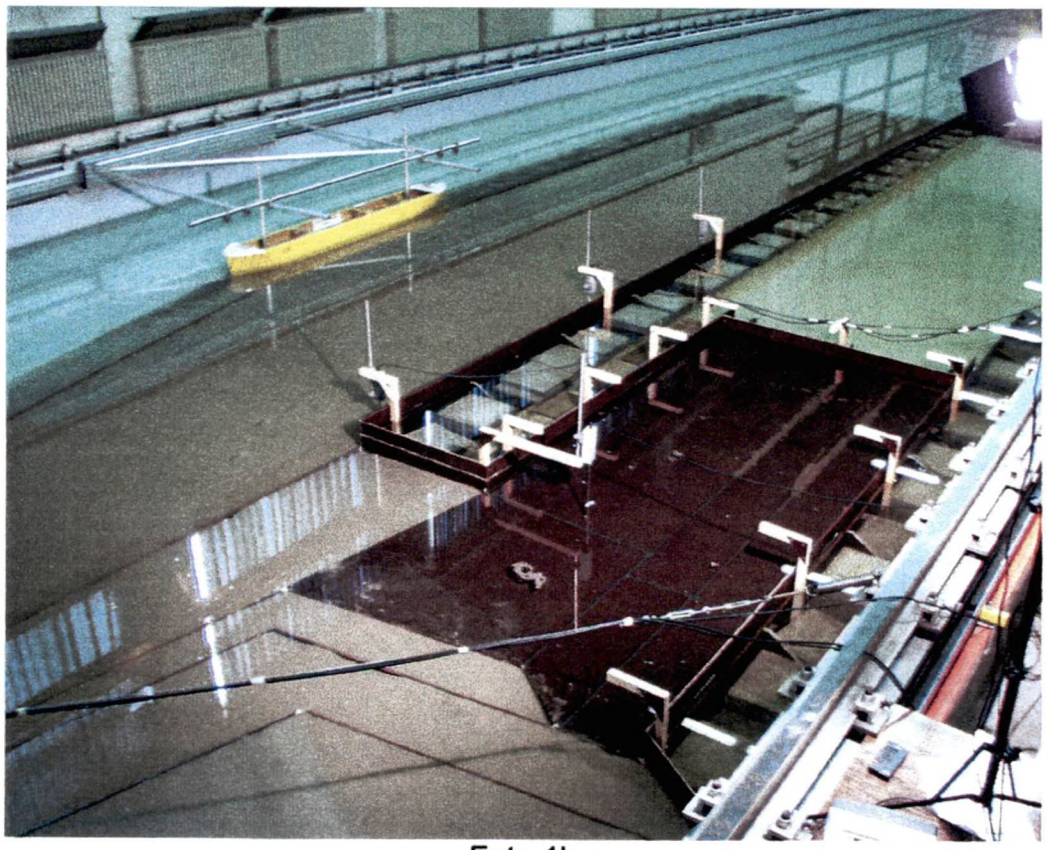


Foto 1b

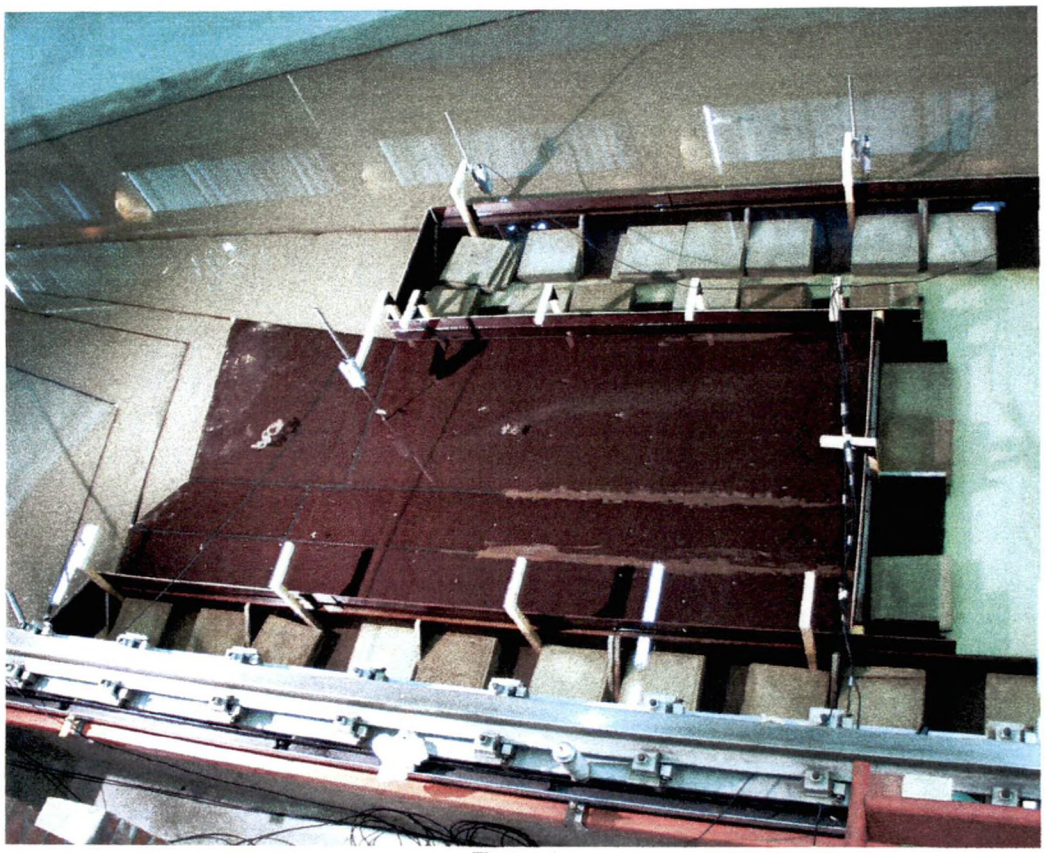


Foto 1c

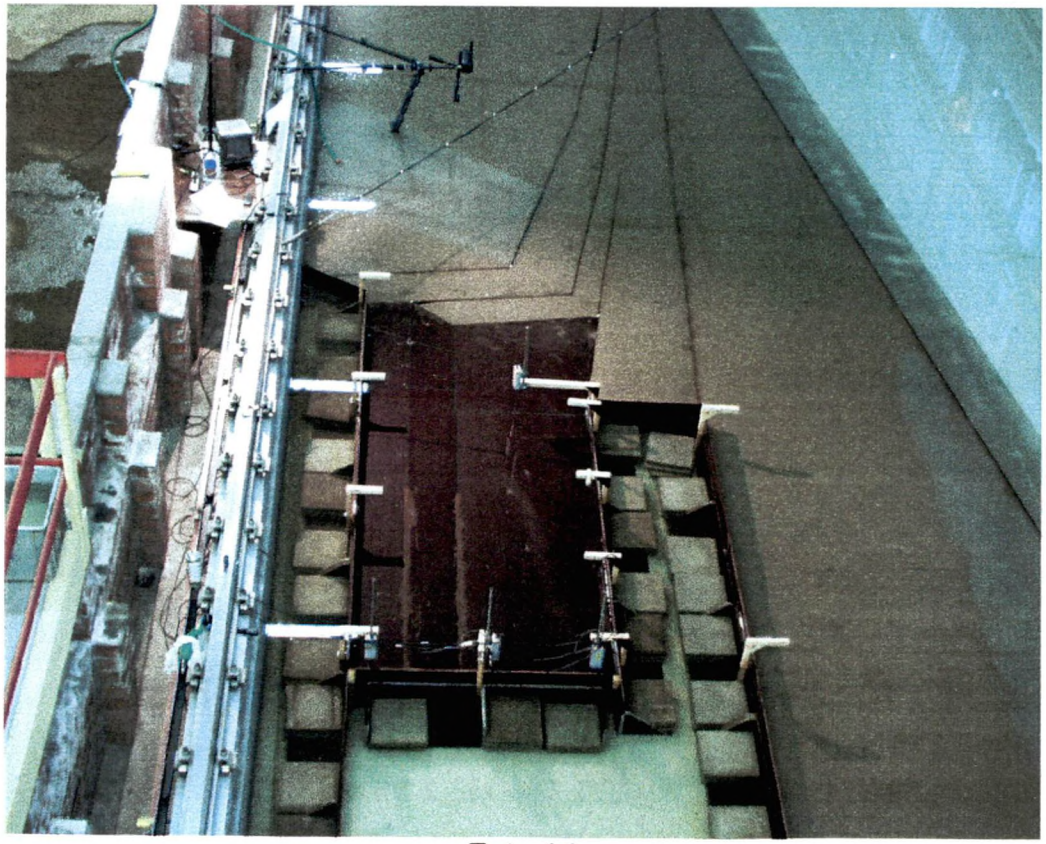


Foto 1d

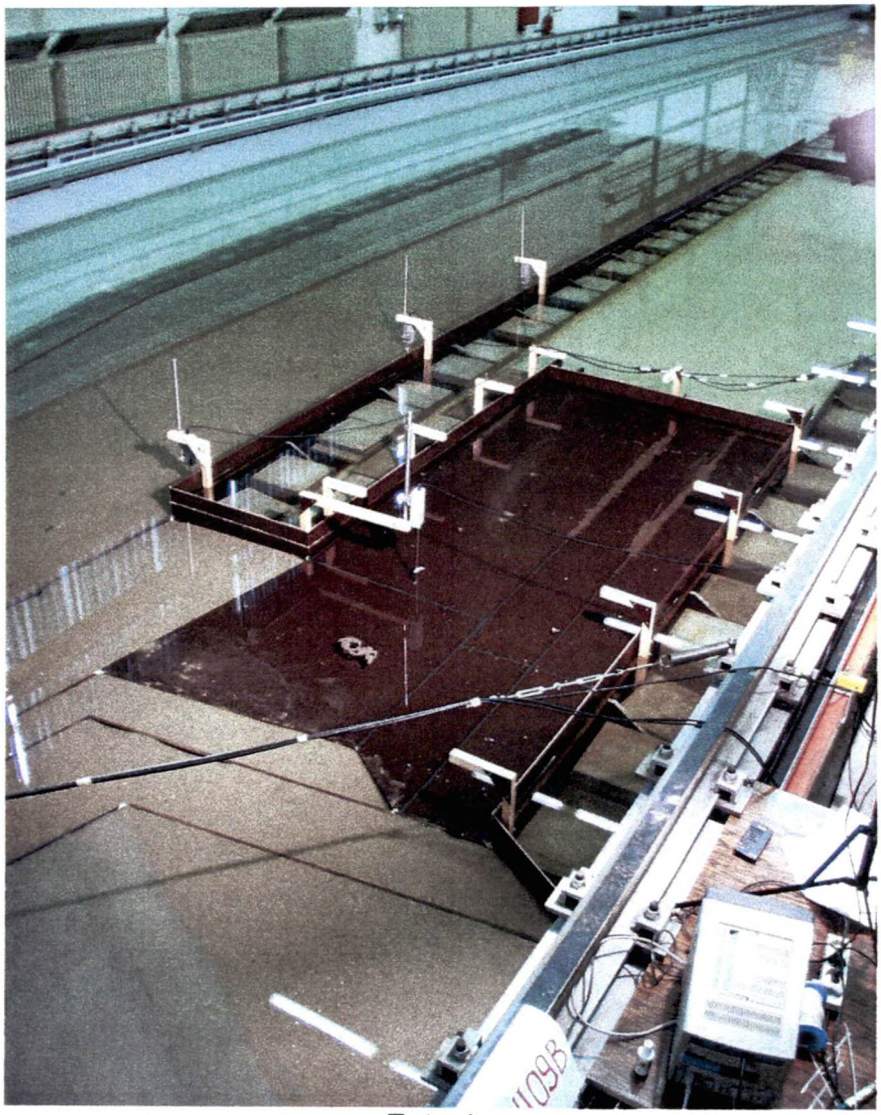


Foto 1e

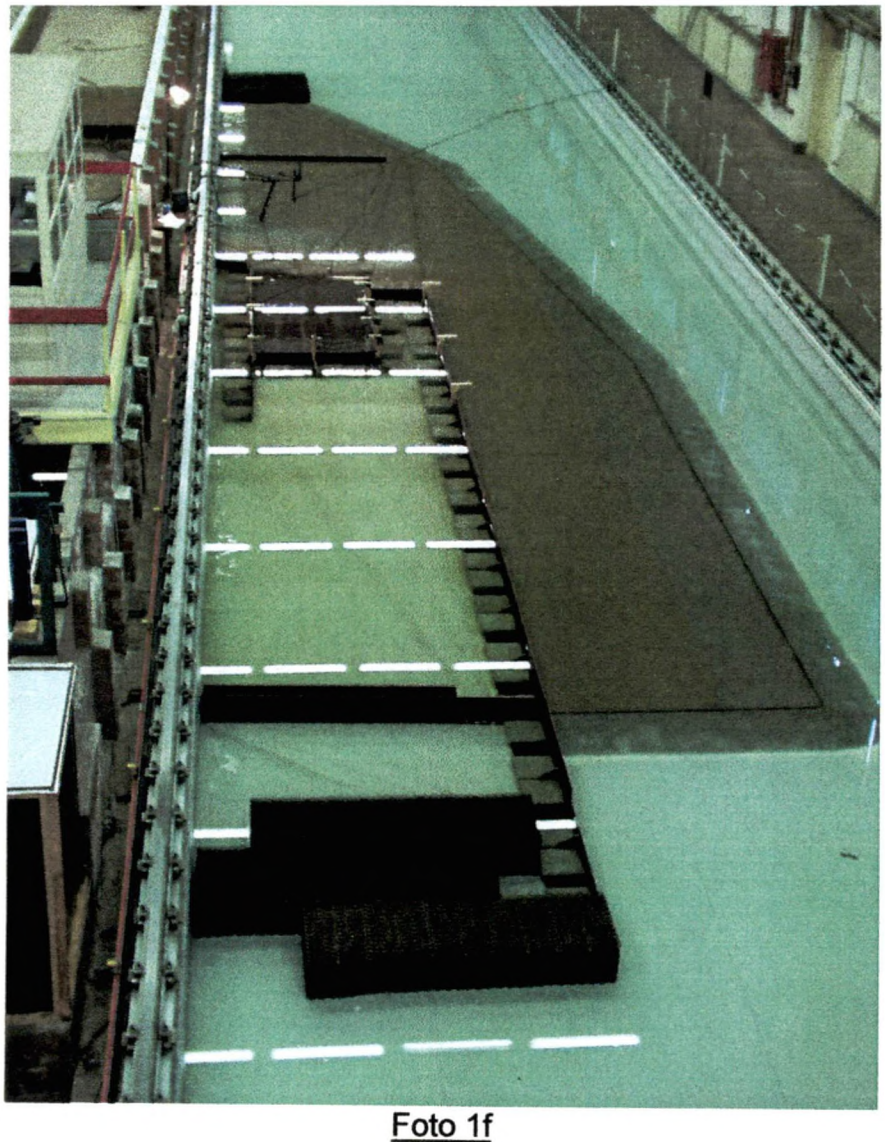
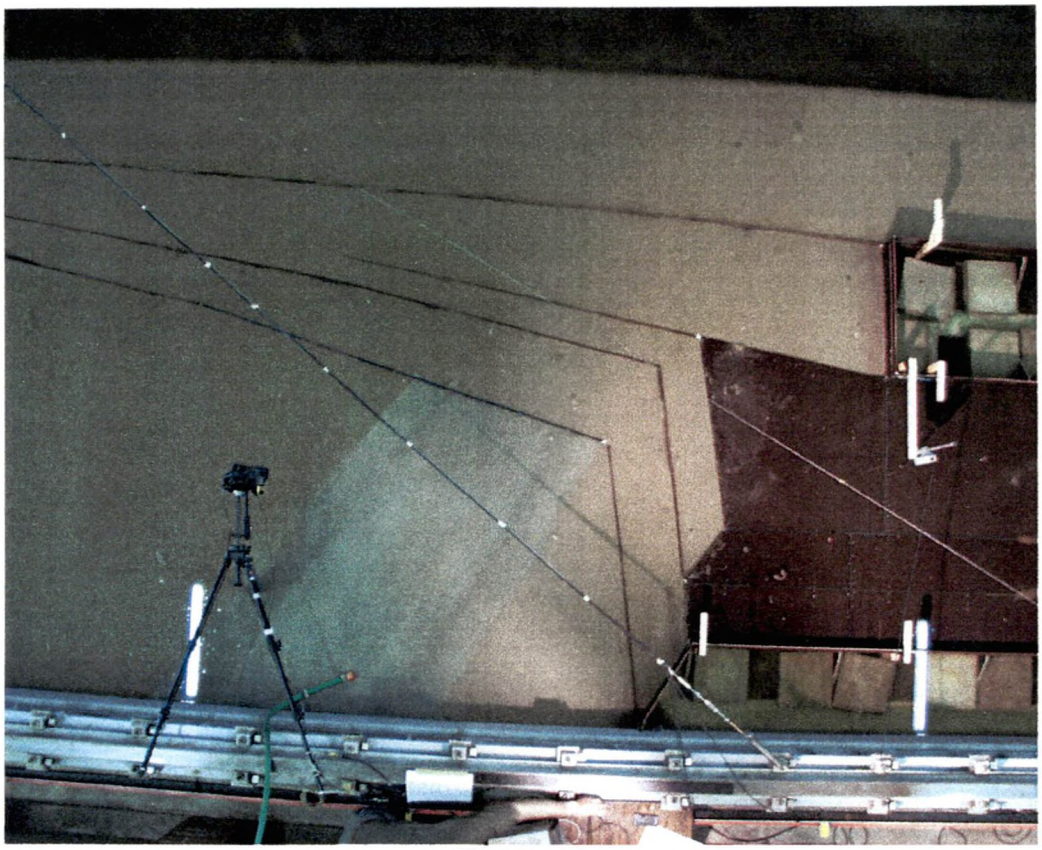
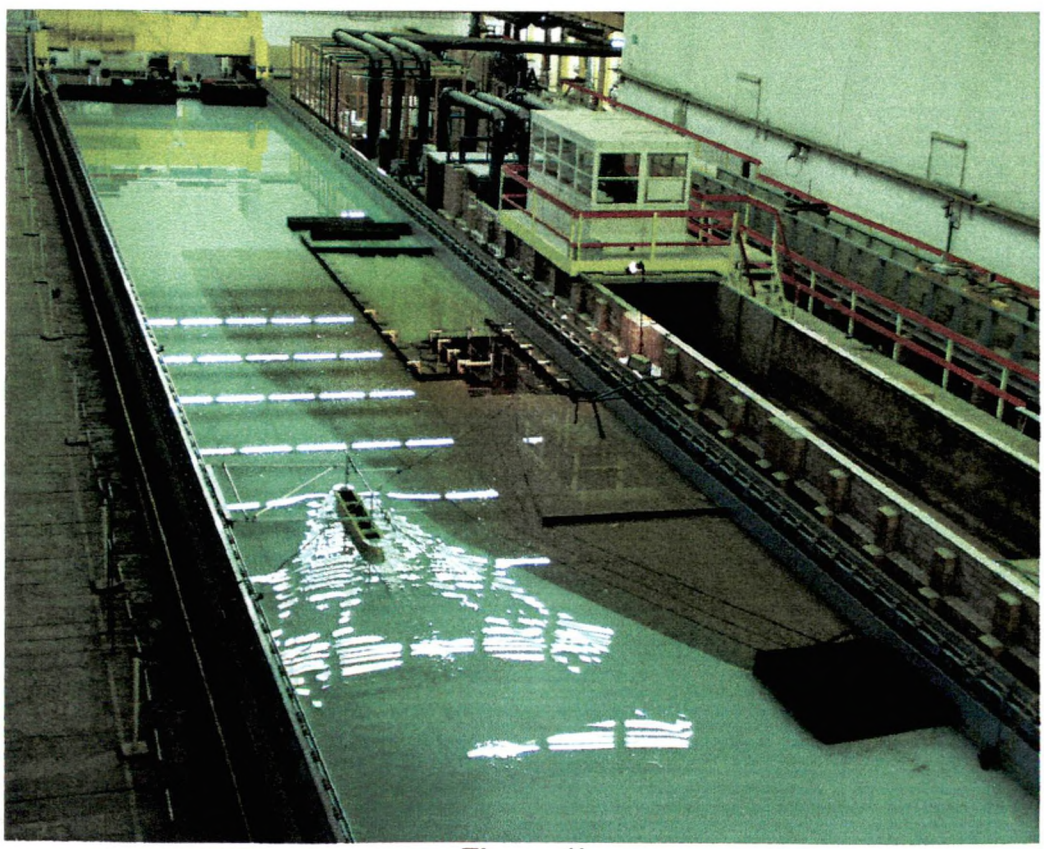


Foto 1f

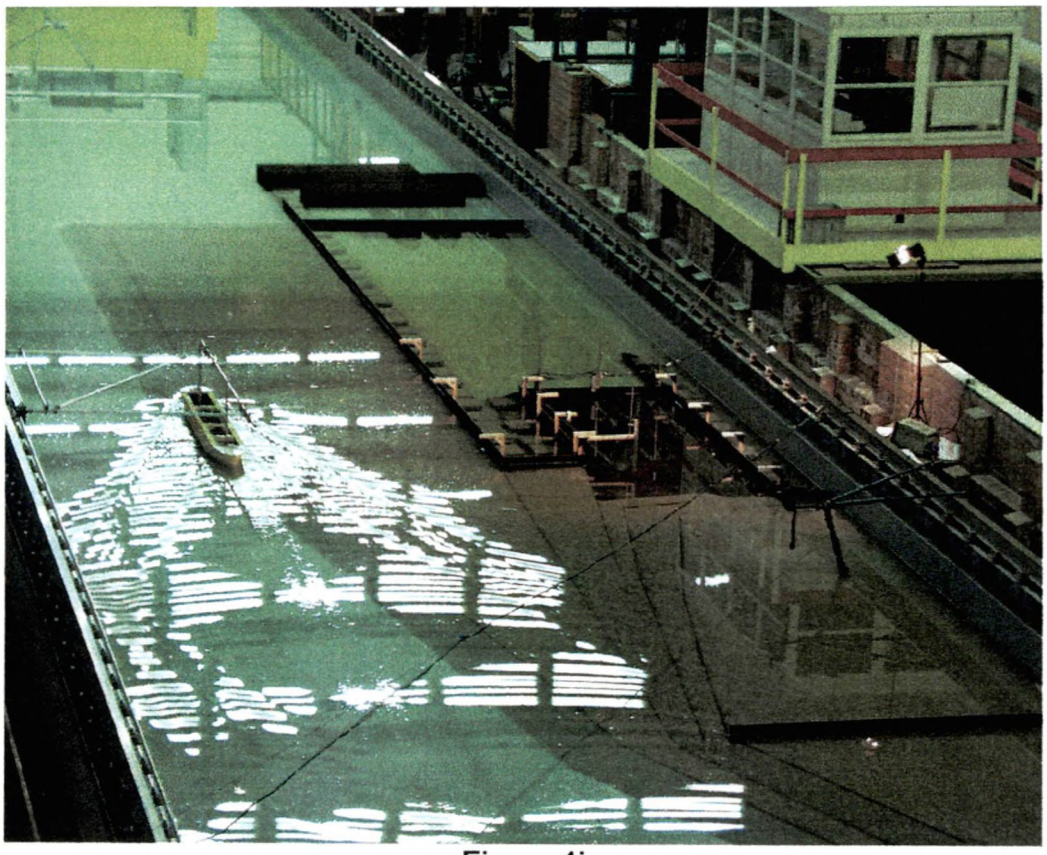
Foto 1g



Figuur 1h



Figuur 1i



Figuur 1j

Figuur 1k

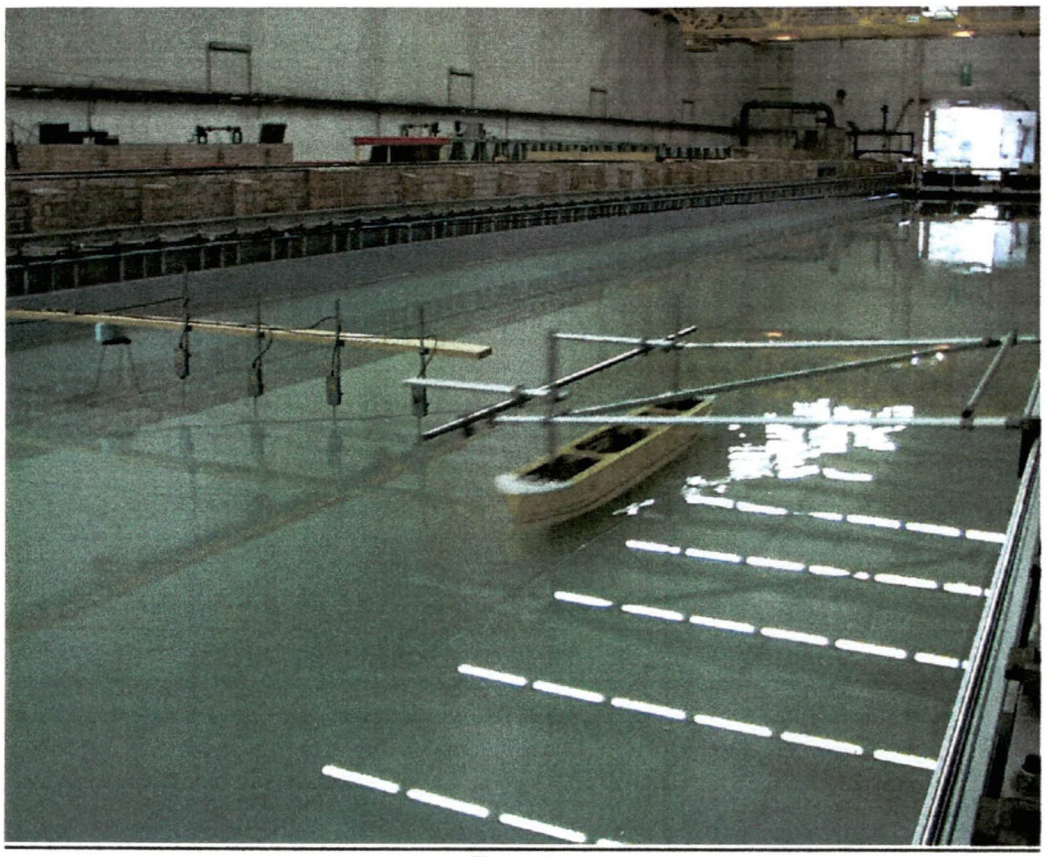


Foto 2a

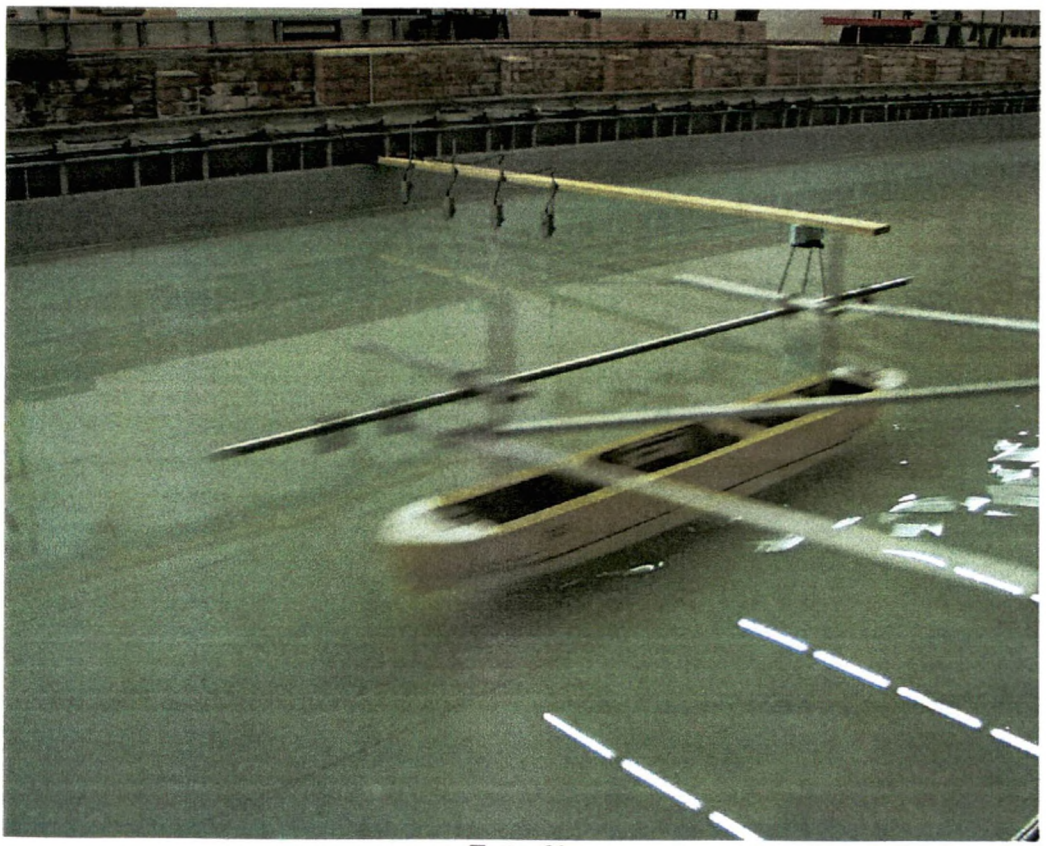


Foto 2b

UNIVERSITEIT GENT
Vakgroep TW04V
Afdeling Maritieme Technologie

UNIVERSITEIT GENT

CONTAINERTERMINAL TE VLISSINGEN ONDERZOEK LICHTERDOK WESTERSCHELDE

Bijlage 1 – Laagfrequente bewegingen van het wateroppervlak

door

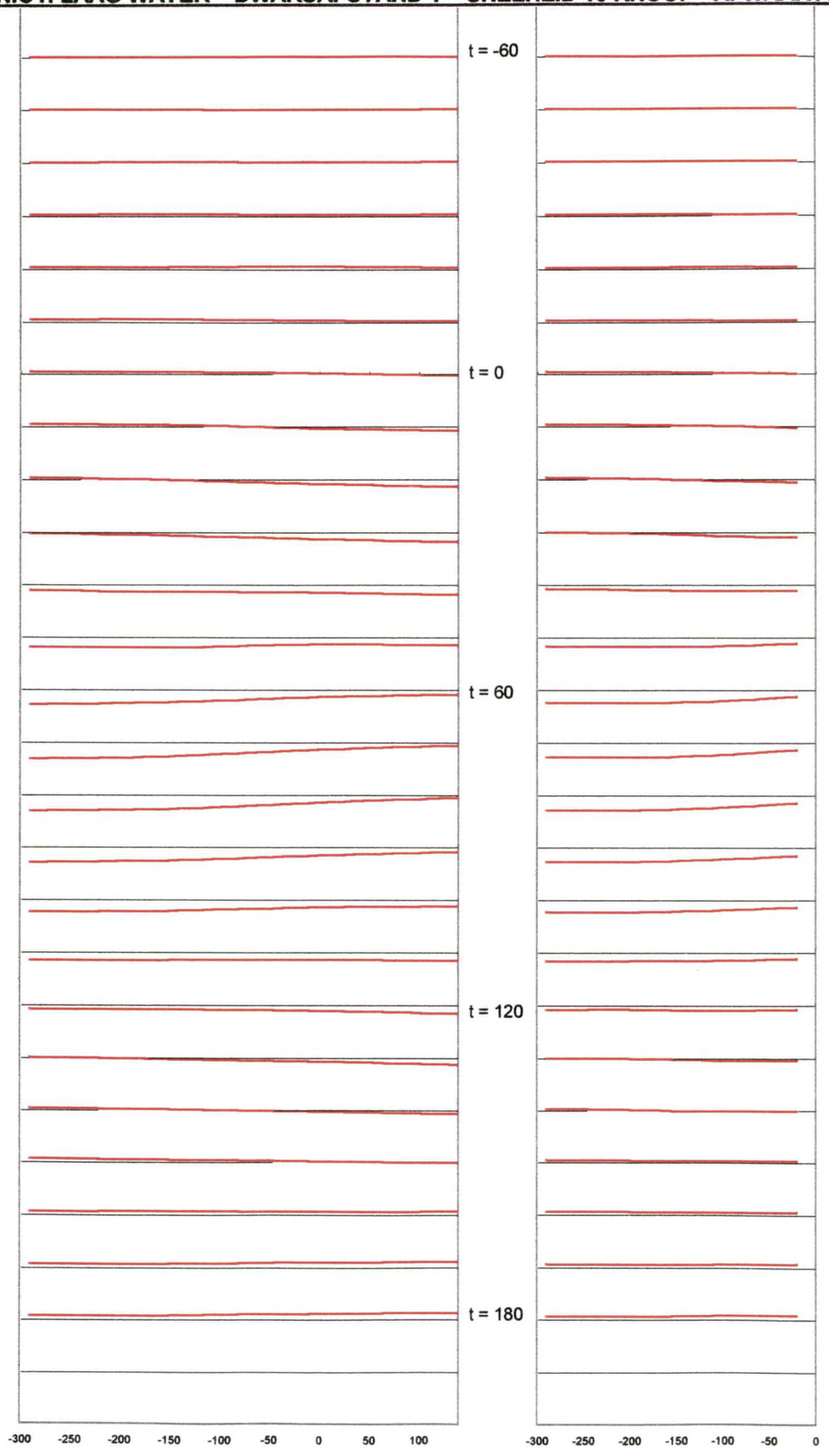
prof. Marc VANTORRE
Hoogleraar RUG

Studie uitgevoerd in opdracht van HESSENATIE N.V.

in samenwerking met
Afdeling Waterbouwkundig Laboratorium en Hydrologisch Onderzoek
AWZ-LIN

Antwerpen, oktober 2000

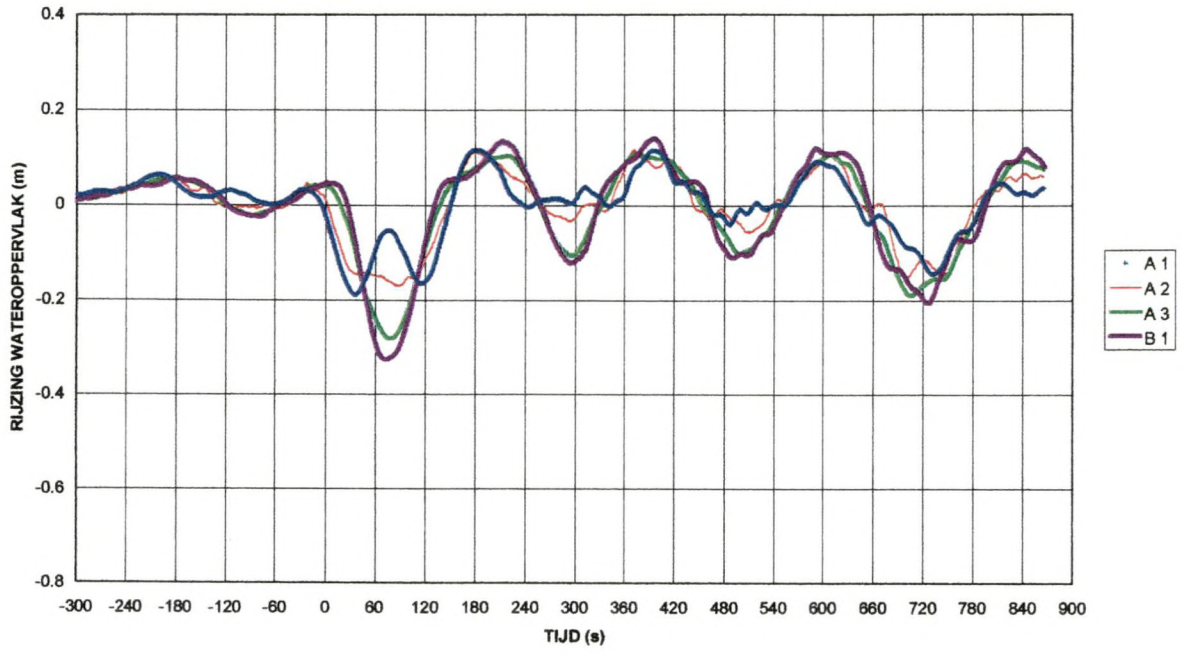
HNIO1: LAAG WATER – DWARSAFSTAND 1 – SNELHEID 15 KNOOP - AFWAARTS



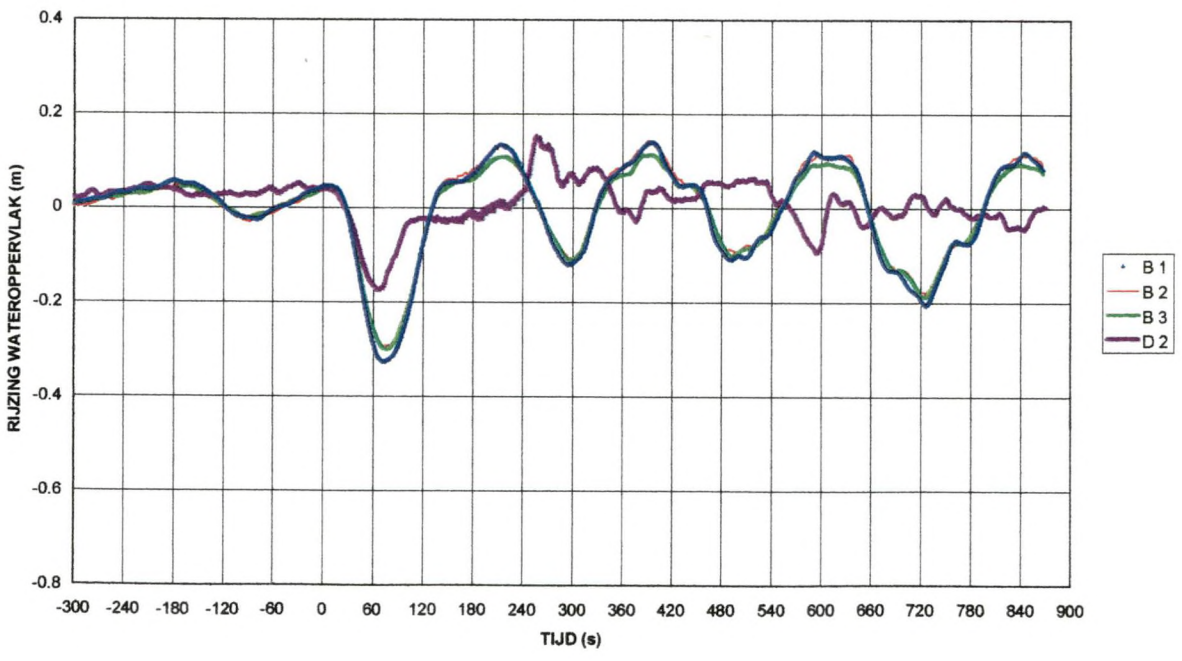
Verloop van de golfrijzing over de lengte van kaaien A en C. Verticale schaal: 1 m / schaalverdeling.

HNI01

LAAG WATER - DWARSAFSTAND 1 - SNELHEID 15 KNOOP - AFWAARTS

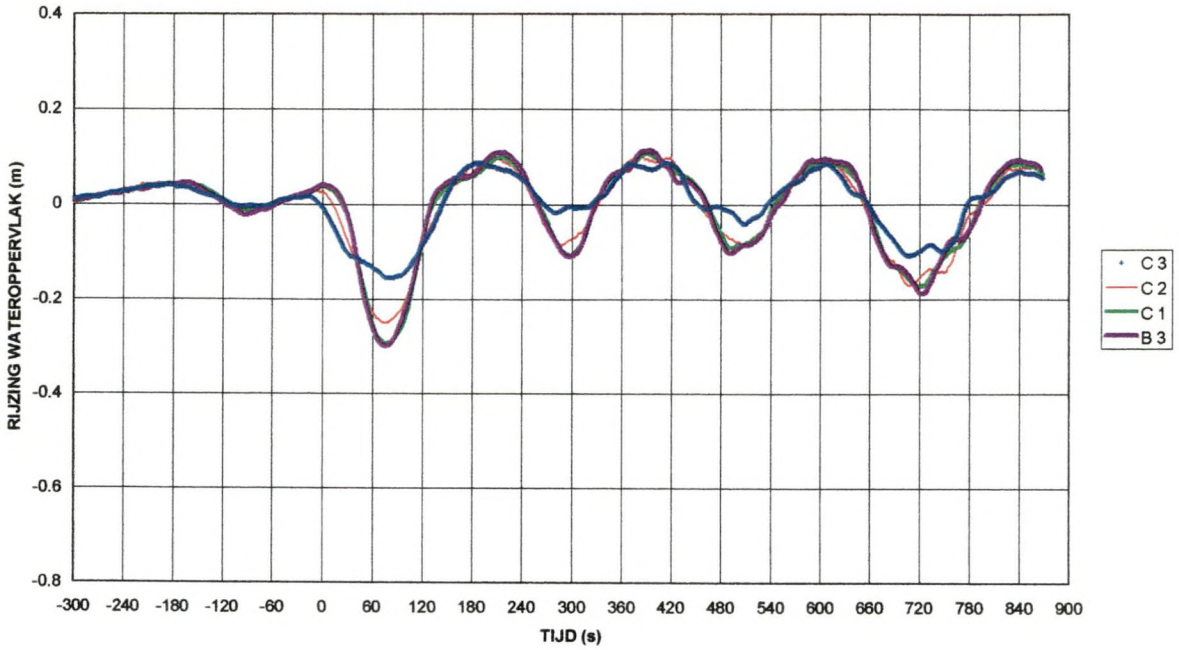


LAAG WATER - DWARSAFSTAND 1 - SNELHEID 15 KNOOP - AFWAARTS

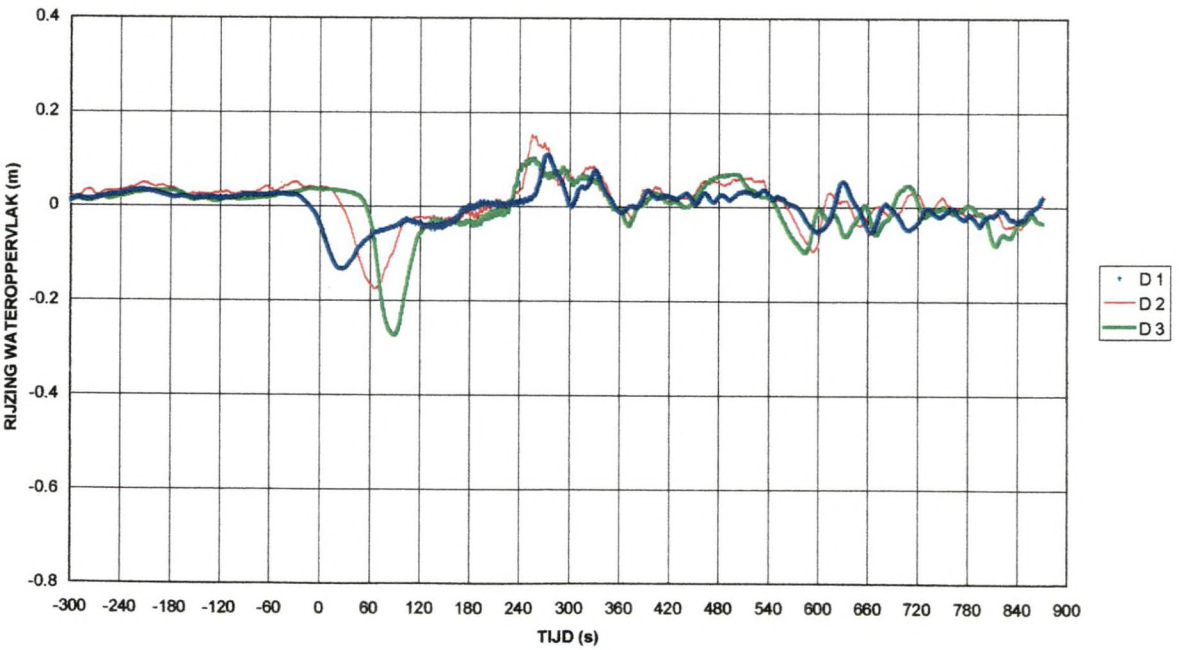


HNI01 (vervolg)

LAAG WATER - DWARSAFSTAND 1 - SNELHEID 15 KNOOP - AFWAARTS

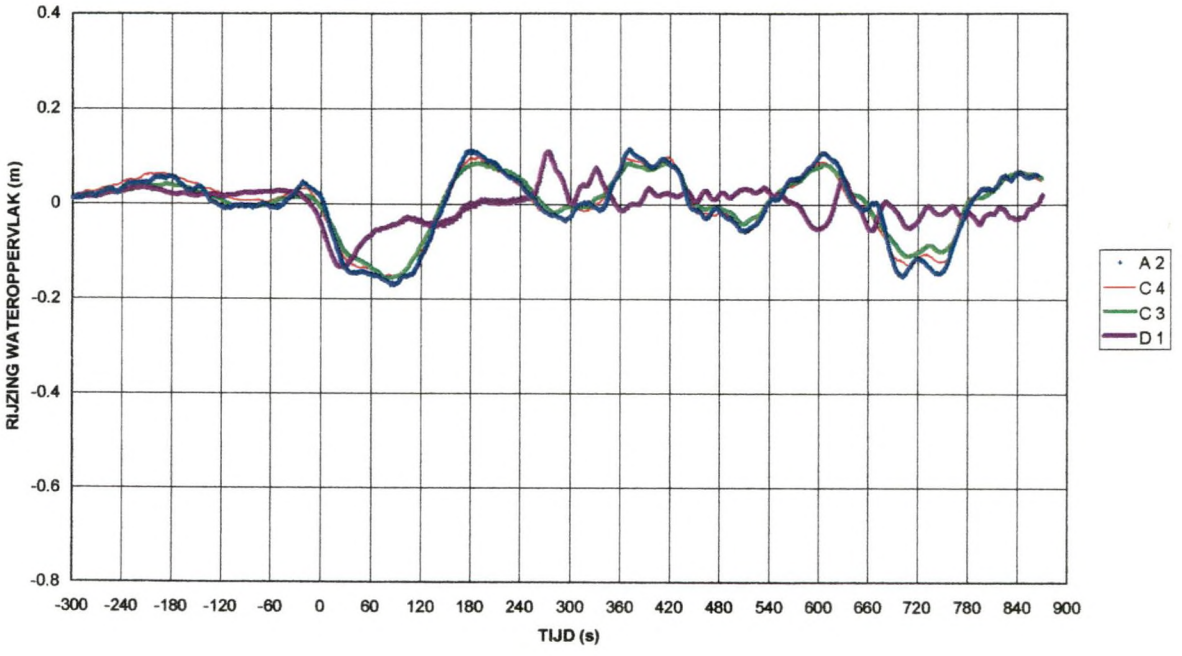


LAAG WATER - DWARSAFSTAND 1 - SNELHEID 15 KNOOP - AFWAARTS



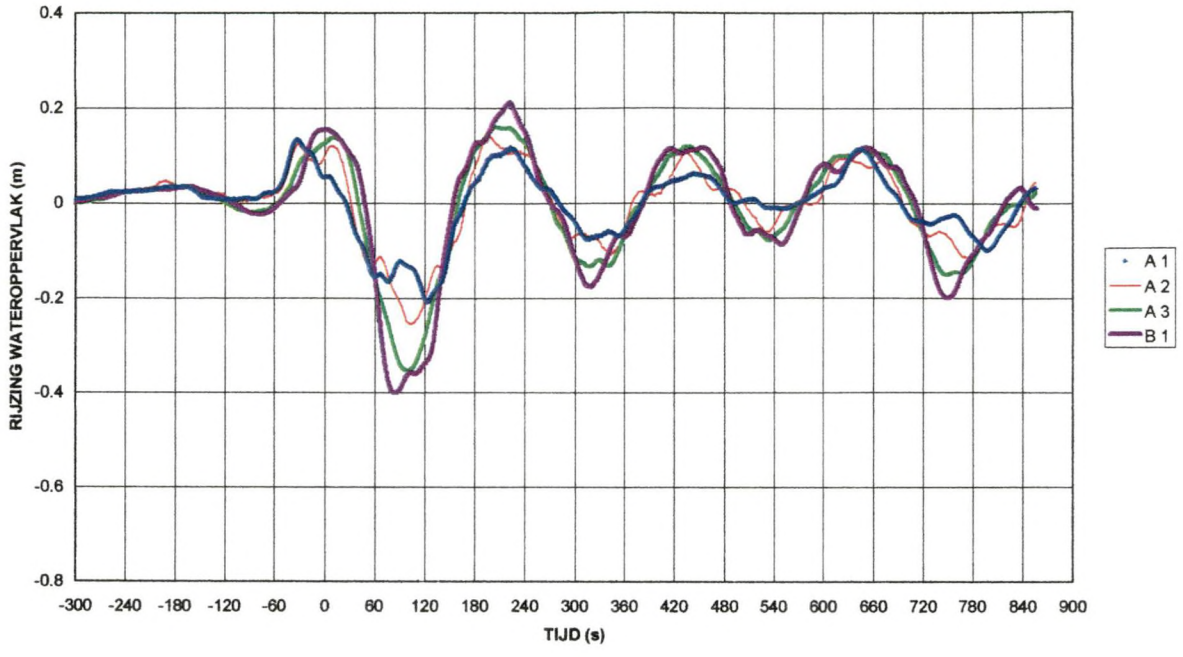
HNI01 (vervolg)

LAAG WATER - DWARSAFSTAND 1 - SNELHEID 15 KNOOP - AFWAARTS

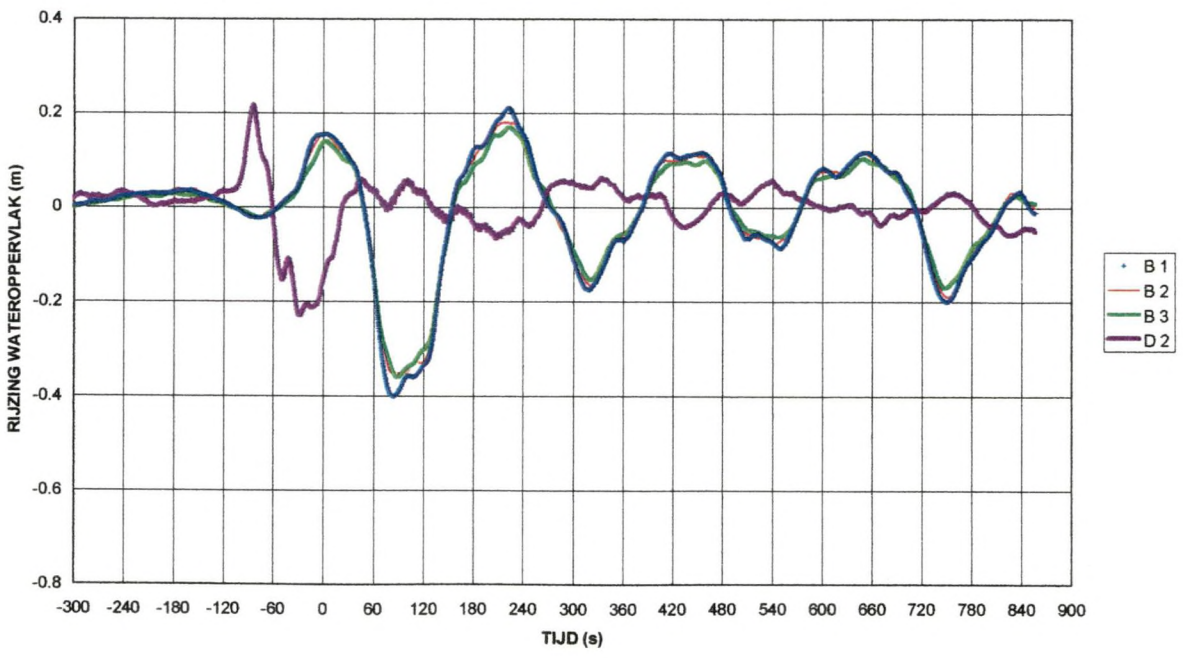


HNI02

LAAG WATER - DWARSAFSTAND 1 - SNELHEID 15 KNOOP - OPWAARTS

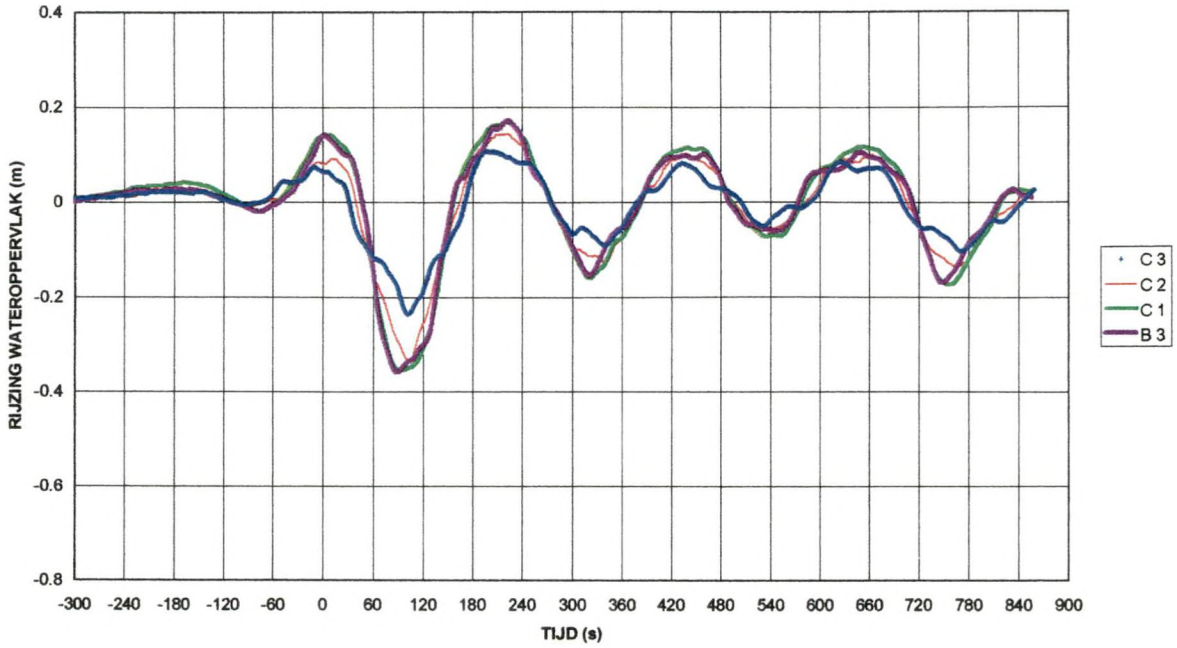


LAAG WATER - DWARSAFSTAND 1 - SNELHEID 15 KNOOP - OPWAARTS

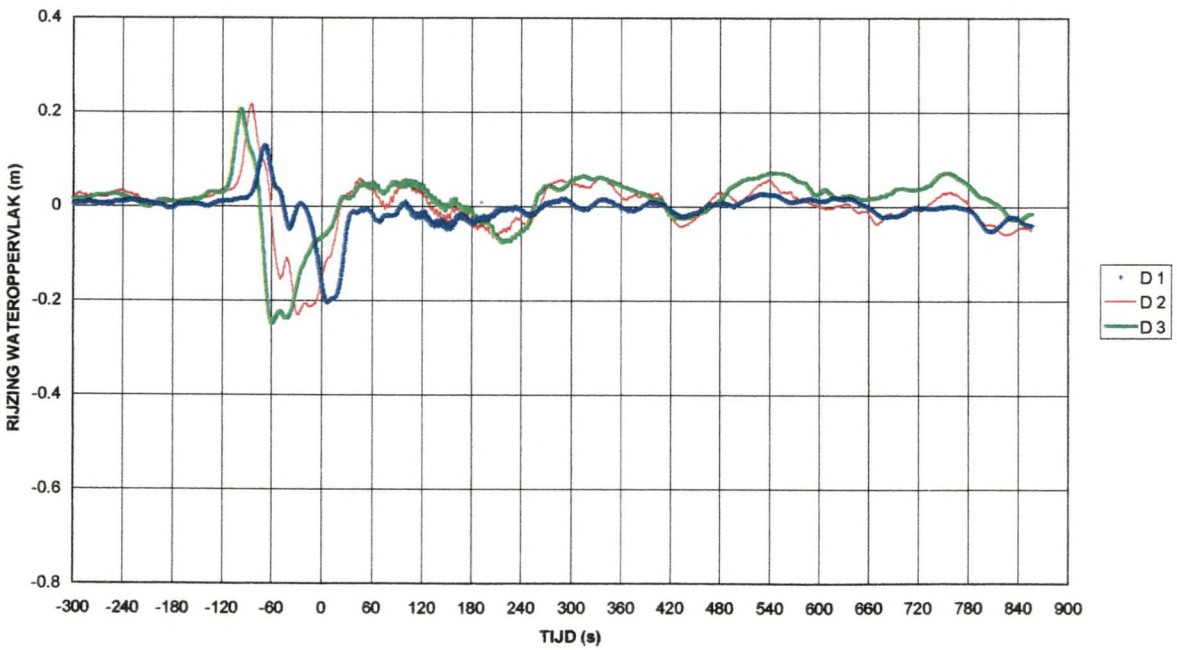


HNI02 (vervolg)

LAAG WATER - DWARSAFSTAND 1 - SNELHEID 15 KNOOP - OPWAARTS

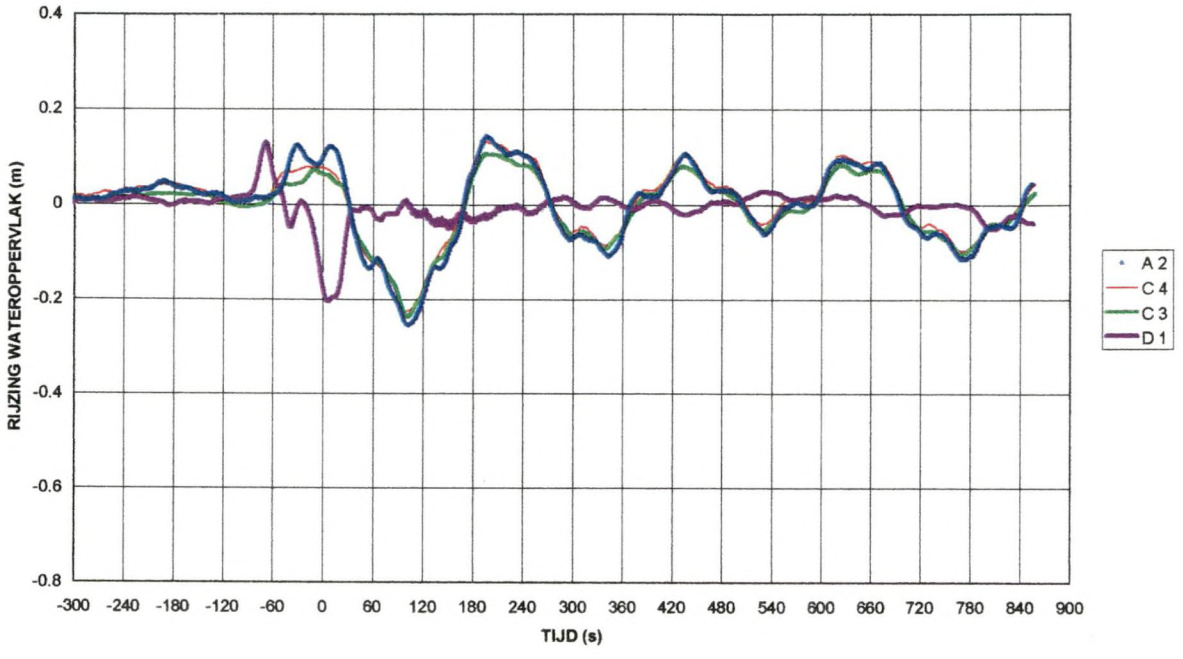


LAAG WATER - DWARSAFSTAND 1 - SNELHEID 15 KNOOP - OPWAARTS



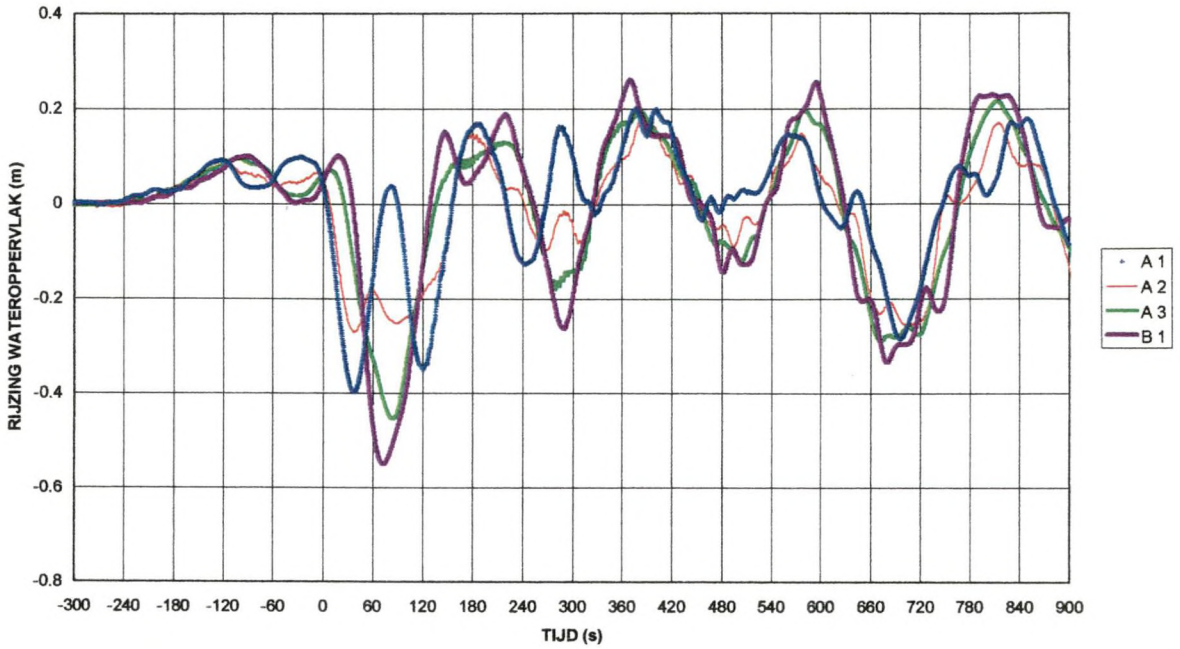
HNI02 (vervolg)

LAAG WATER - DWARSAFSTAND 1 - SNELHEID 15 KNOOP - OPWAARTS

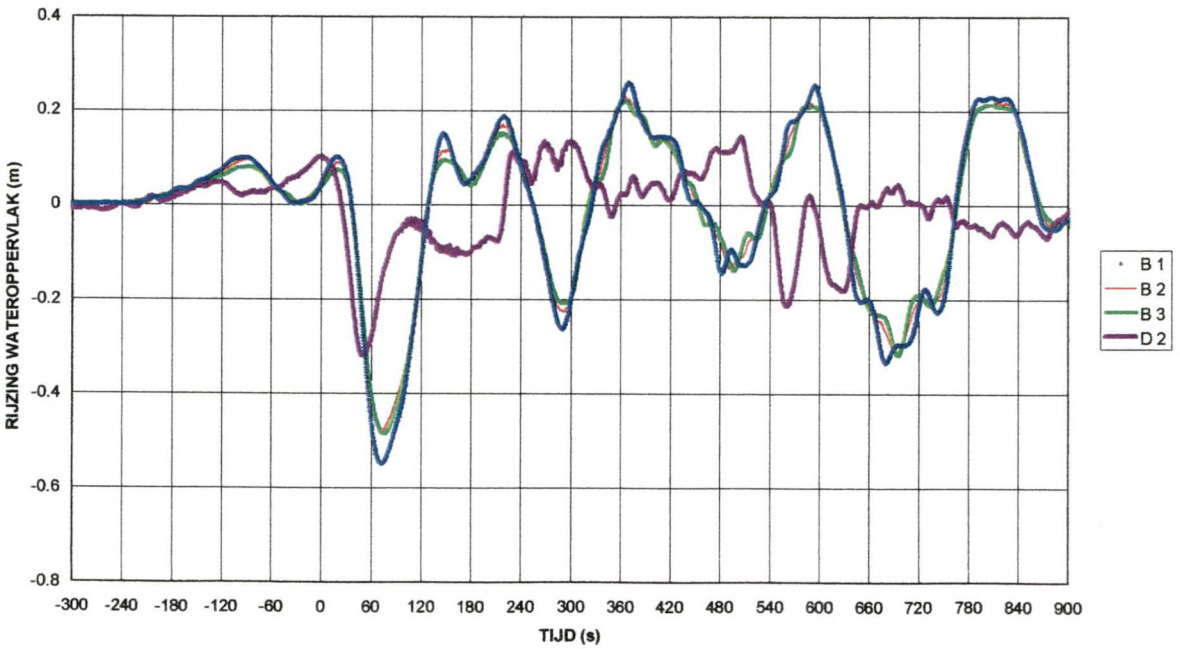


HNI07

LAAG WATER - DWARSAFSTAND 1 - SNELHEID 18 KNOOP - AFWAARTS

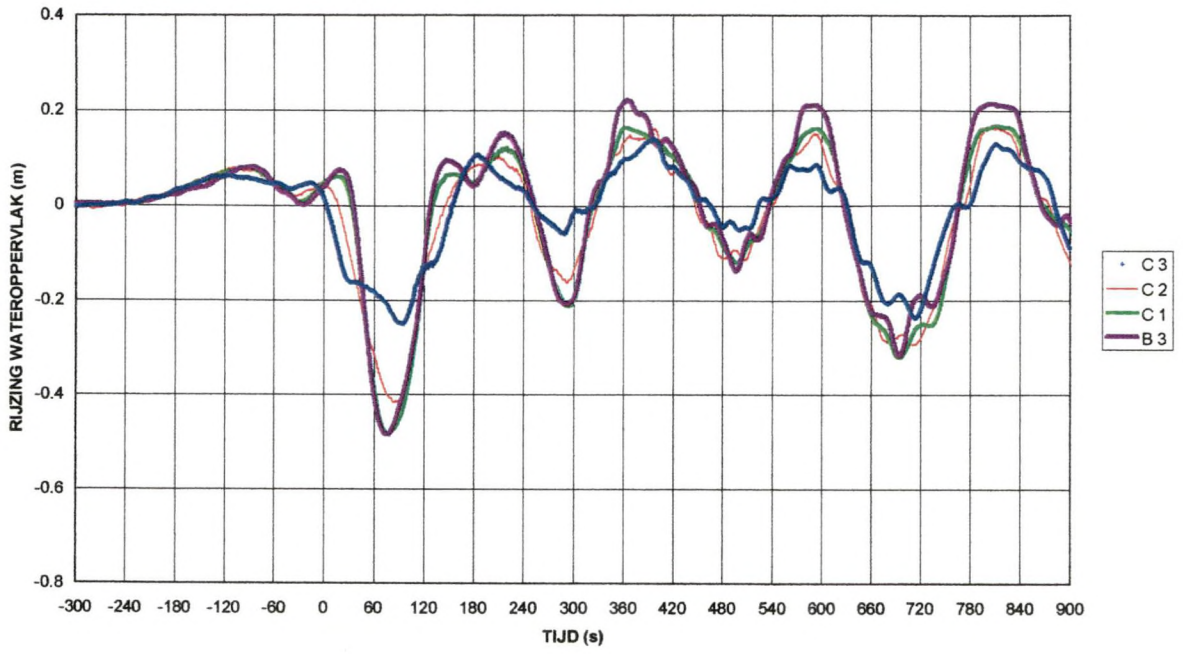


LAAG WATER - DWARSAFSTAND 1 - SNELHEID 18 KNOOP - AFWAARTS

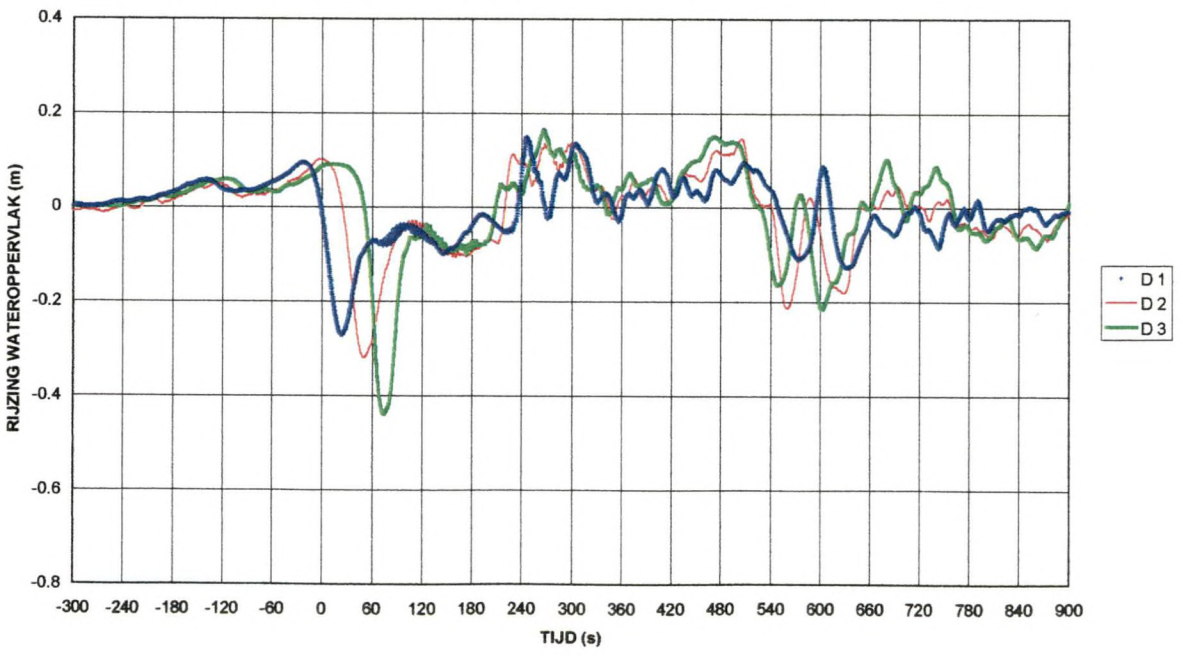


HNI07 (vervolg)

LAAG WATER - DWARSAFSTAND 1 - SNELHEID 18 KNOOP - AFWAARTS

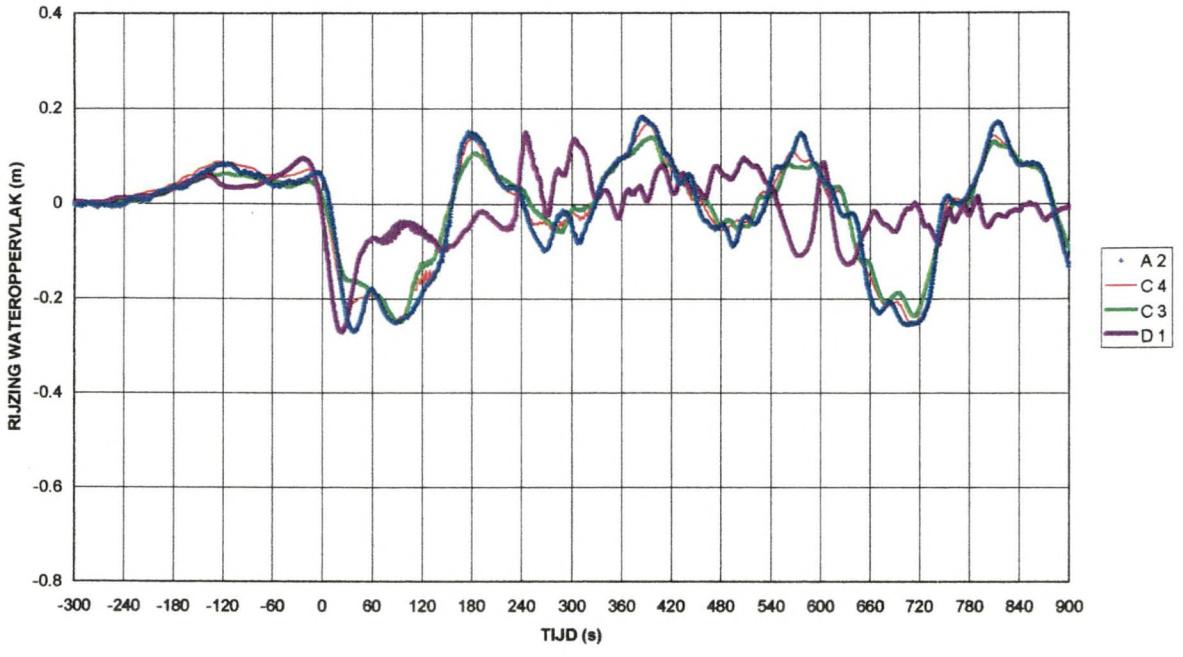


LAAG WATER - DWARSAFSTAND 1 - SNELHEID 18 KNOOP - AFWAARTS



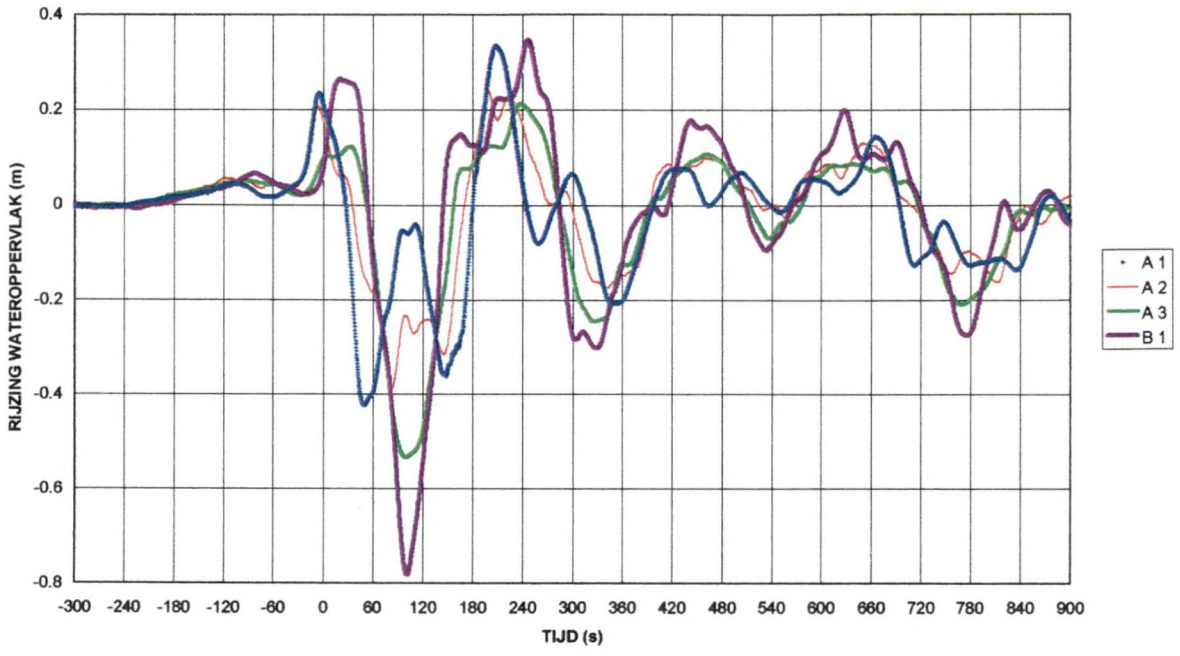
HNI07 (vervolg)

LAAG WATER - DWARSAFSTAND 1 - SNELHEID 18 KNOOP - AFWAARTS

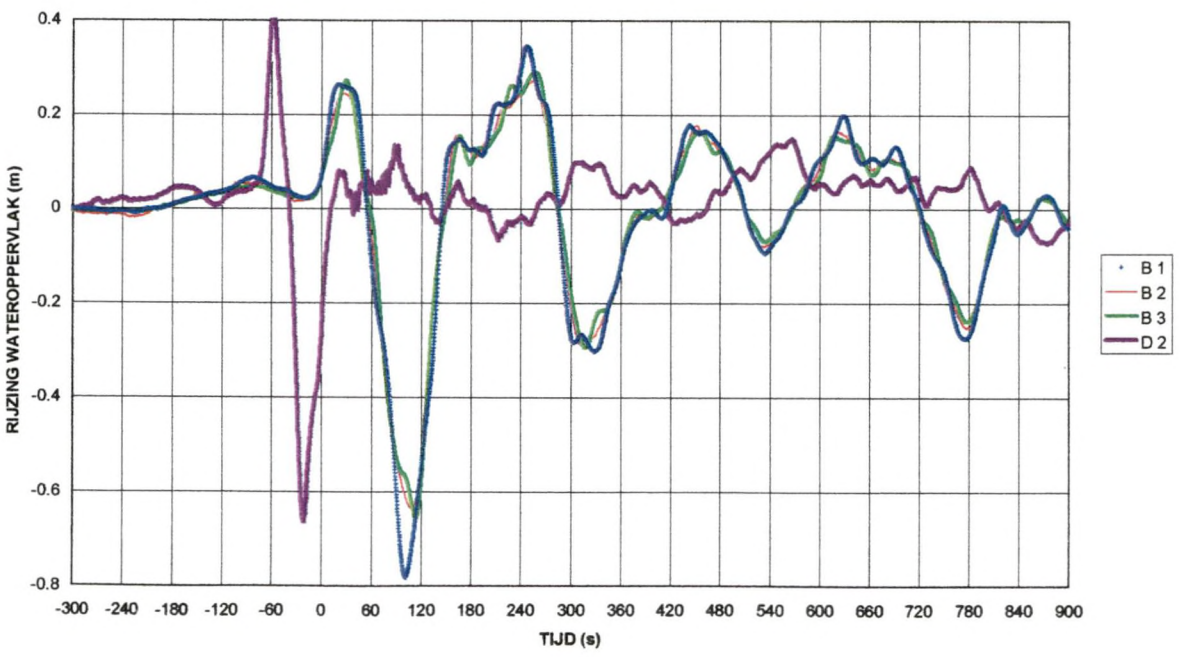


HNI08

LAAG WATER - DWARSAFSTAND 1 - SNELHEID 18 KNOOP - OPWAARTS

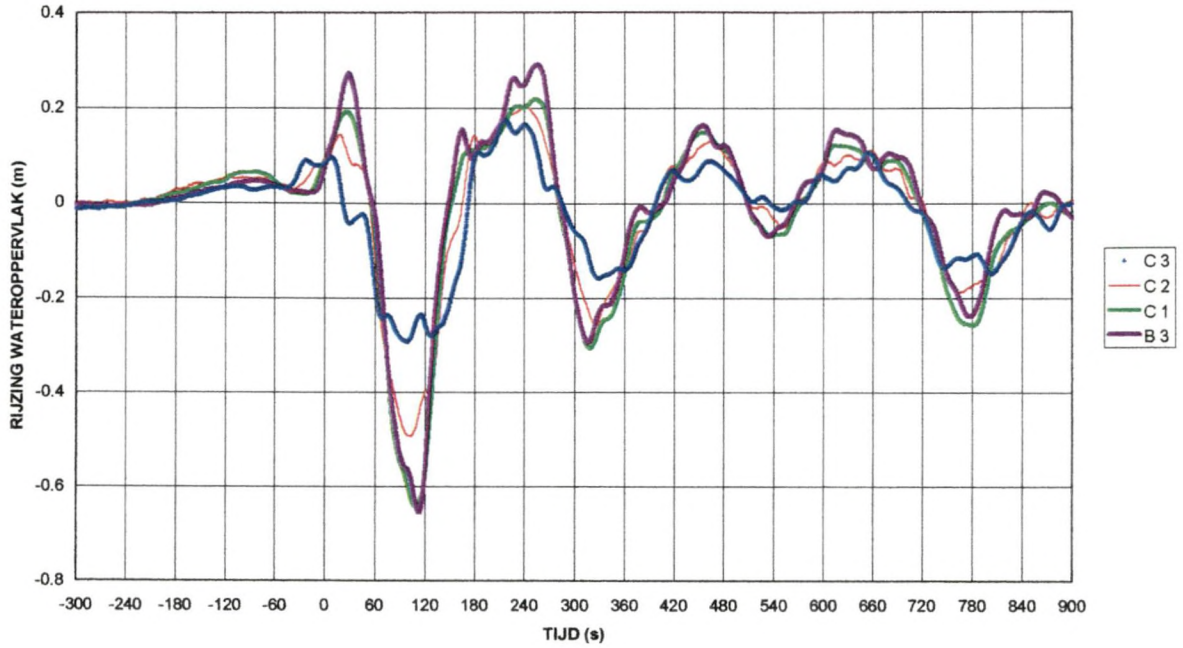


LAAG WATER - DWARSAFSTAND 1 - SNELHEID 18 KNOOP - OPWAARTS

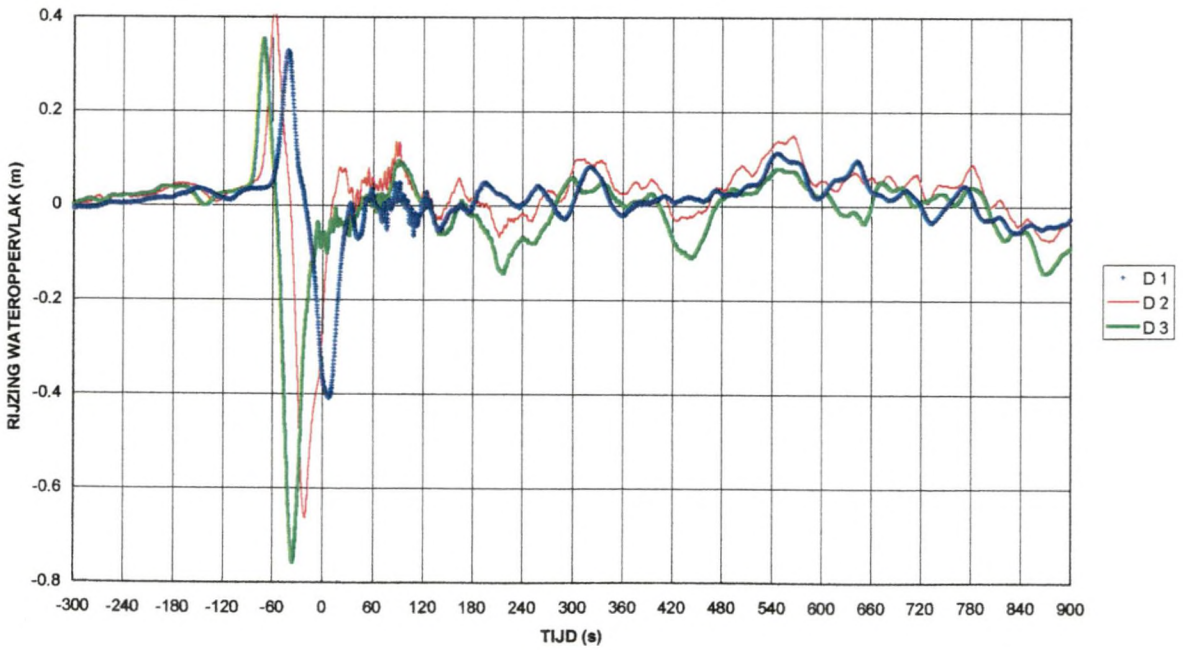


HNI08 (vervolg)

LAAG WATER - DWARSAFSTAND 1 - SNELHEID 18 KNOOP - OPWAARTS

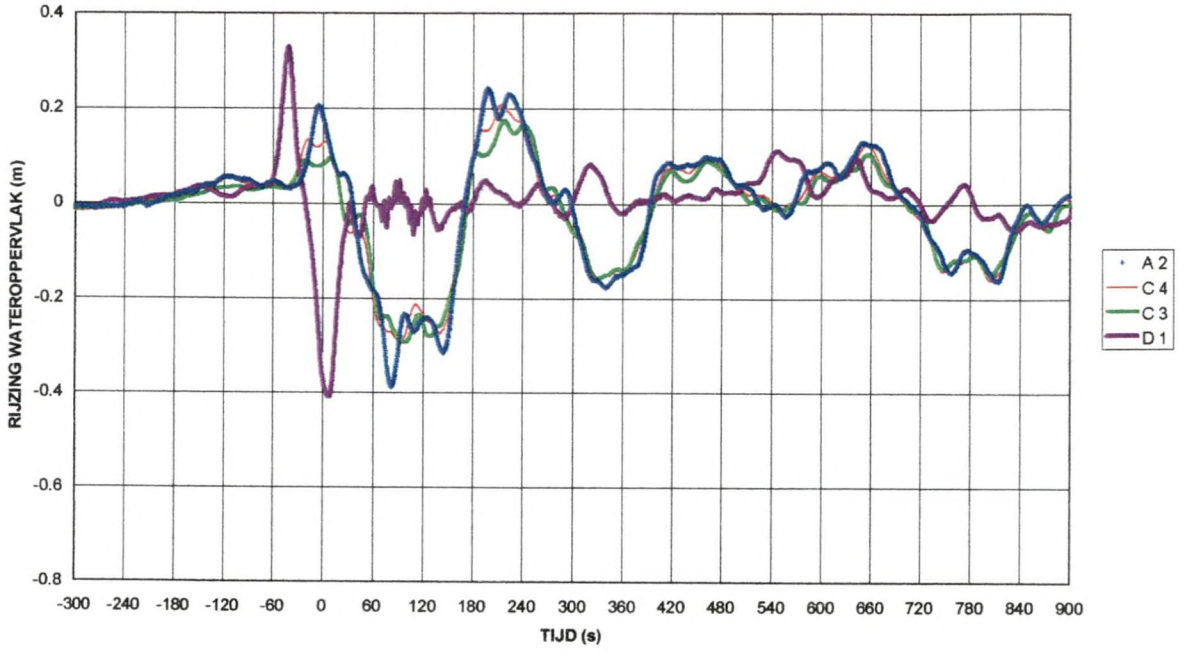


LAAG WATER - DWARSAFSTAND 1 - SNELHEID 18 KNOOP - OPWAARTS



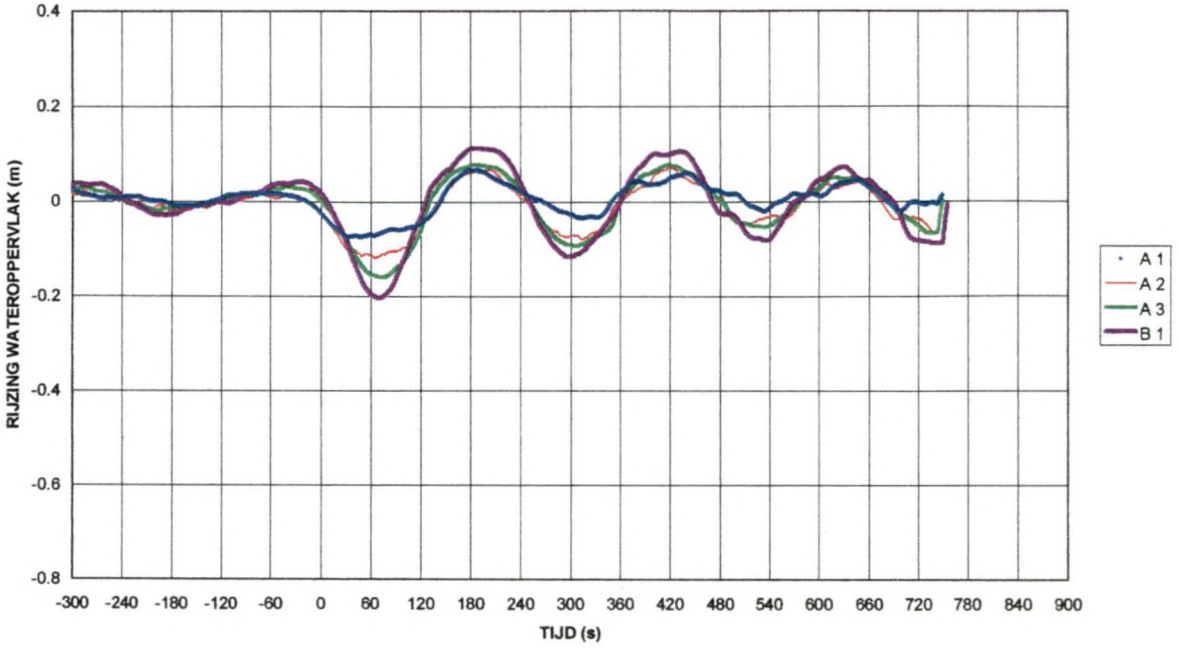
HNI08 (vervolg)

LAAG WATER - DWARSAFSTAND 1 - SNELHEID 18 KNOOP - OPWAARTS

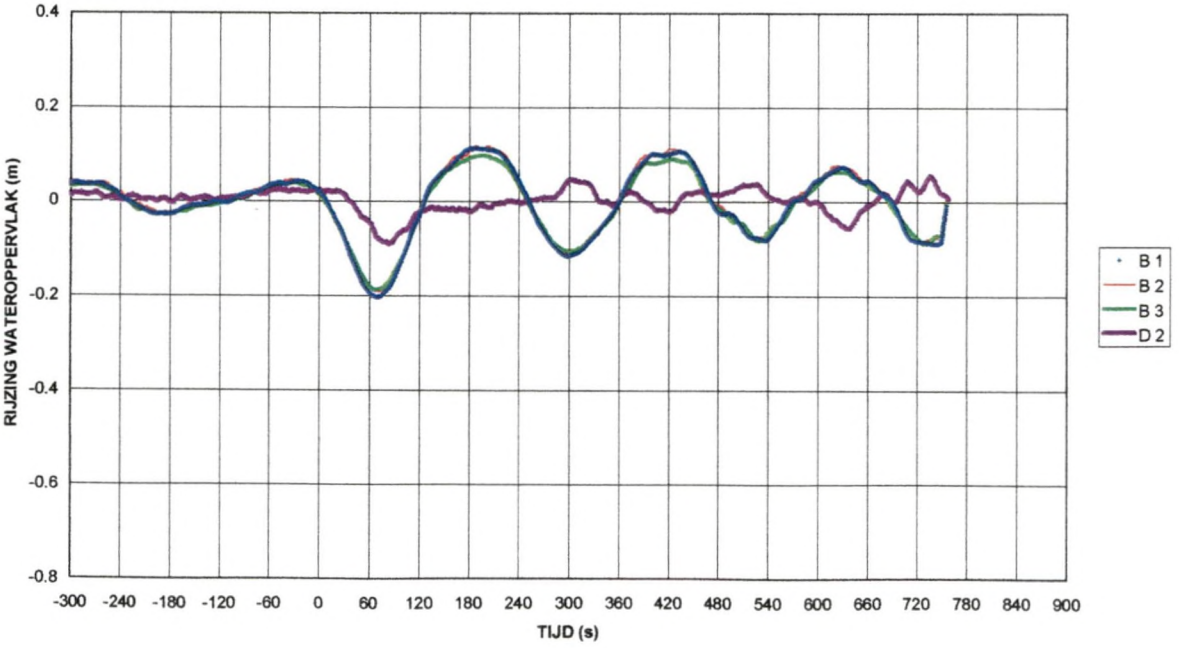


HNI09

LAAG WATER - DWARSAFSTAND 1 - SNELHEID 12 KNOOP - AFWAARTS

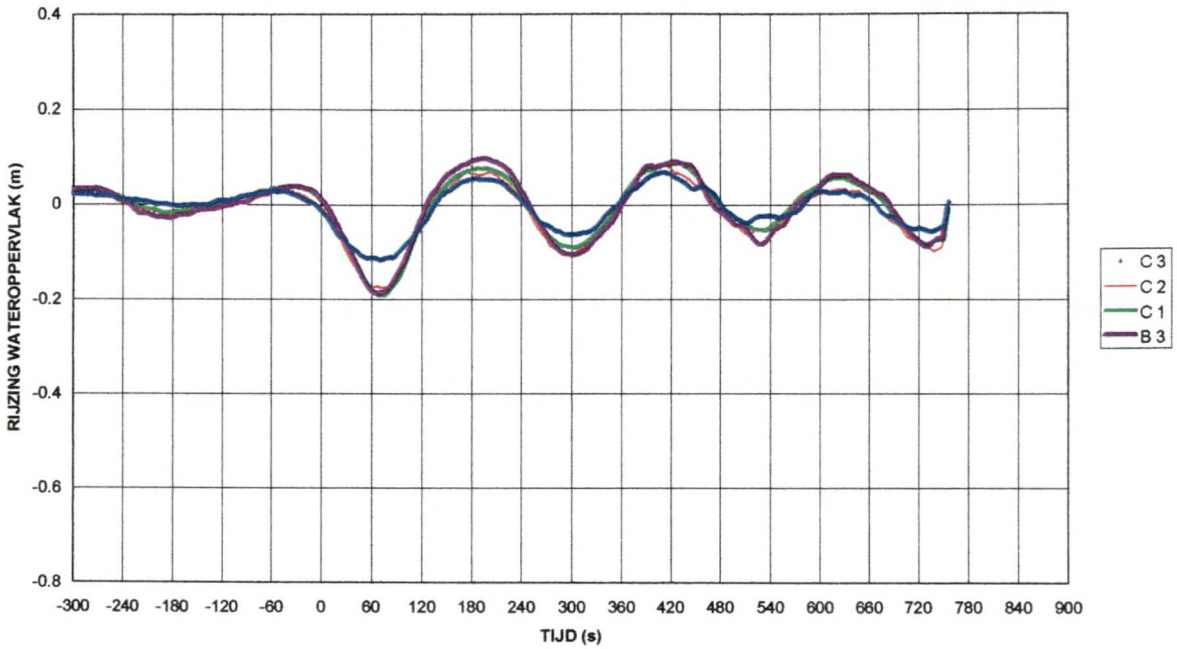


LAAG WATER - DWARSAFSTAND 1 - SNELHEID 12 KNOOP - AFWAARTS

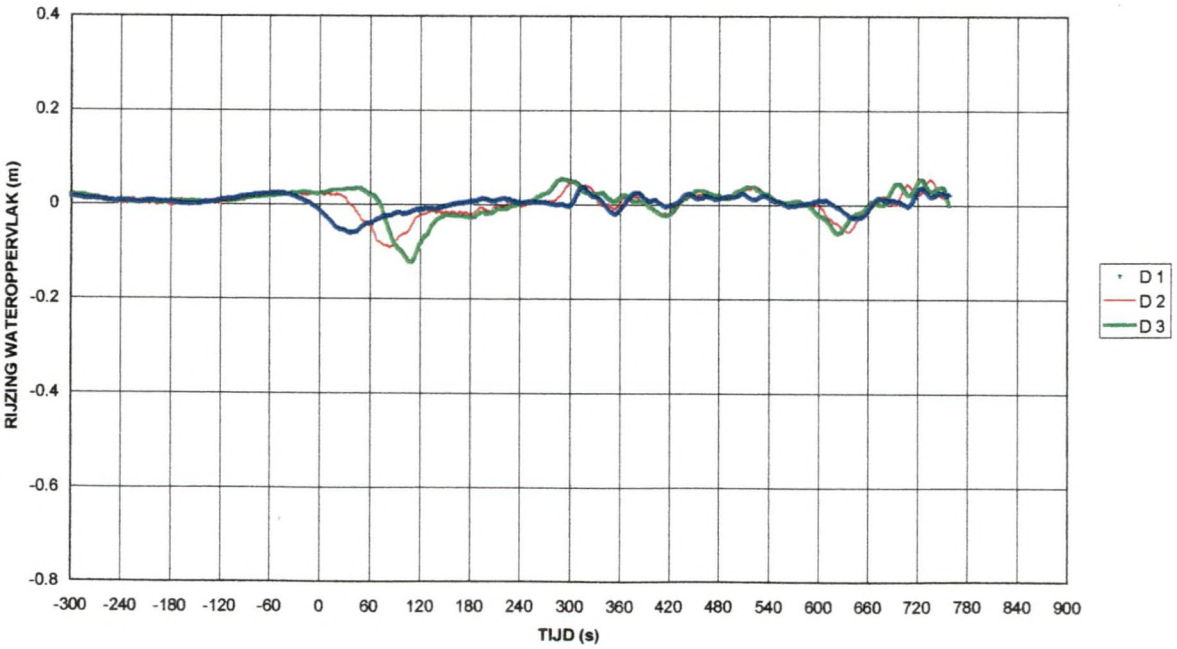


HNI09 (vervolg)

LAAG WATER - DWARSAFSTAND 1 - SNELHEID 12 KNOOP - AFWAARTS

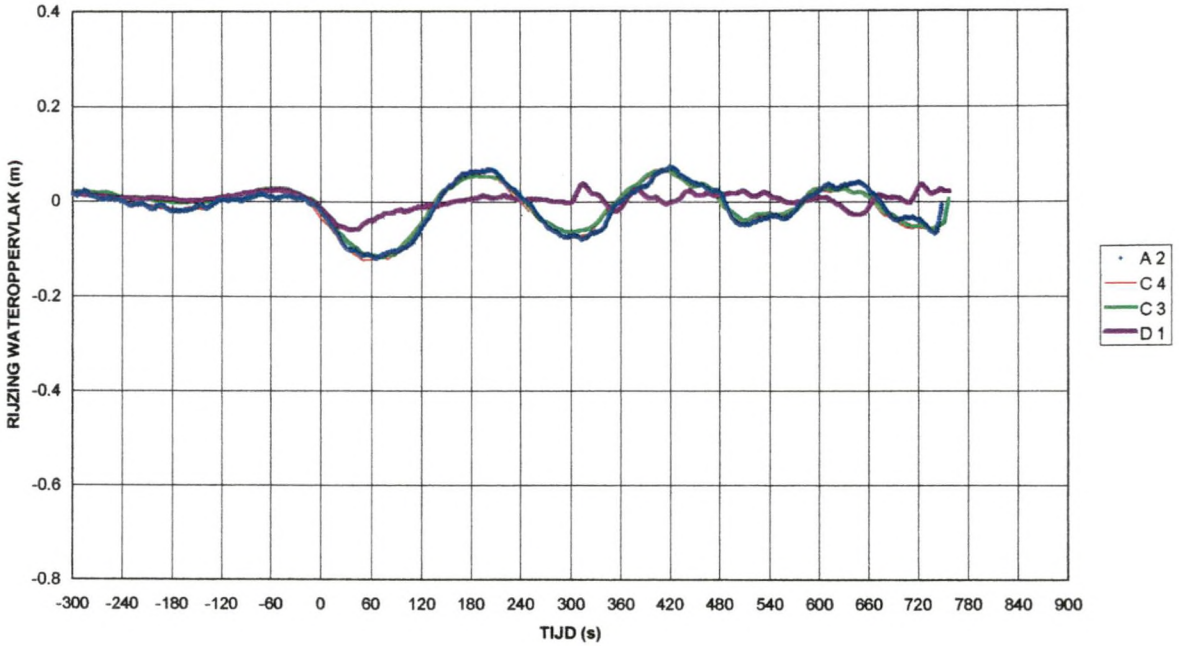


LAAG WATER - DWARSAFSTAND 1 - SNELHEID 12 KNOOP - AFWAARTS



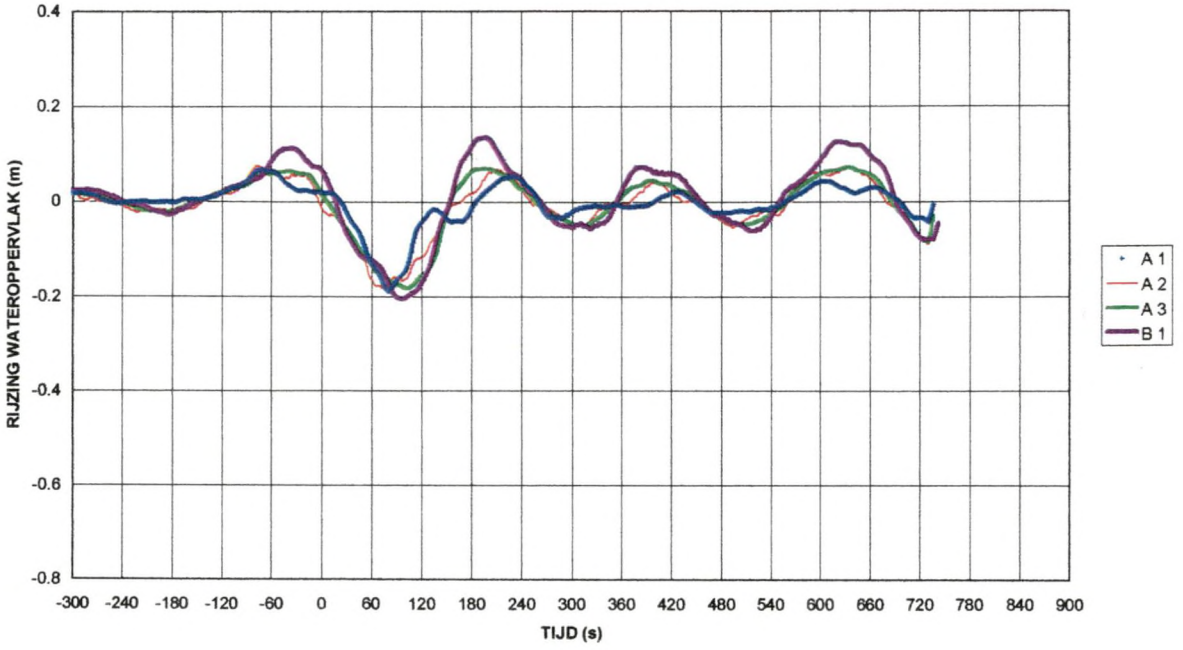
HNI09 (vervolg)

LAAG WATER - DWARSAFSTAND 1 - SNELHEID 12 KNOOP - AFWAARTS

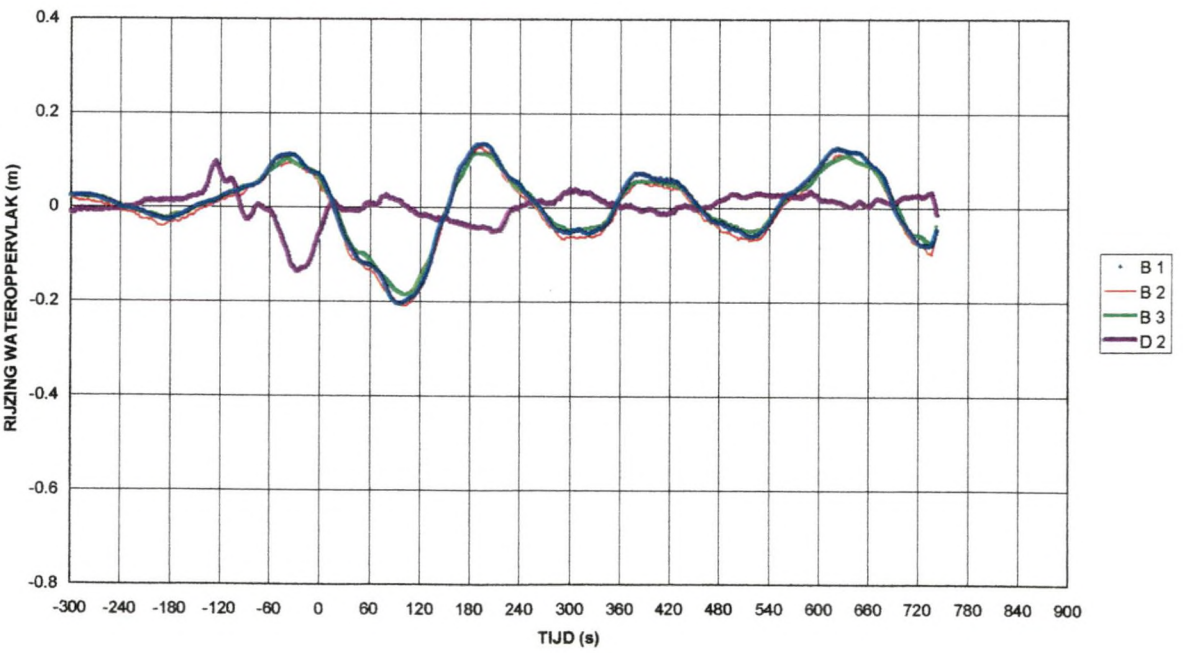


HNI10

LAAG WATER - DWARSAFSTAND 1 - SNELHEID 12 KNOOP - OPWAARTS

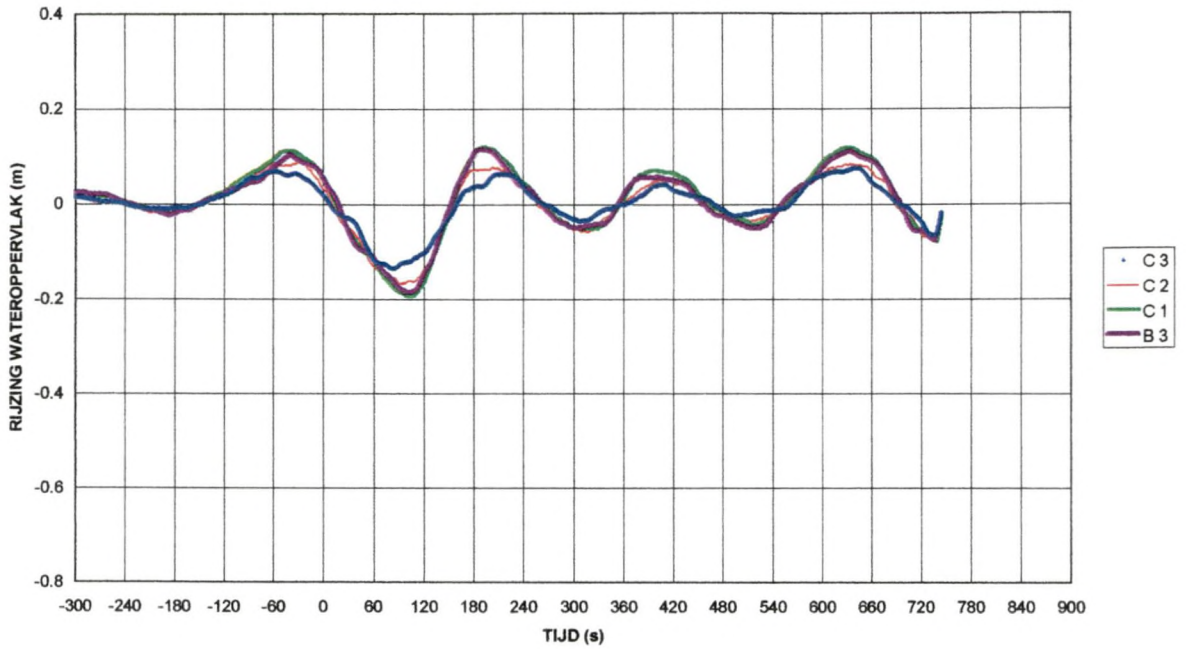


LAAG WATER - DWARSAFSTAND 1 - SNELHEID 12 KNOOP - OPWAARTS

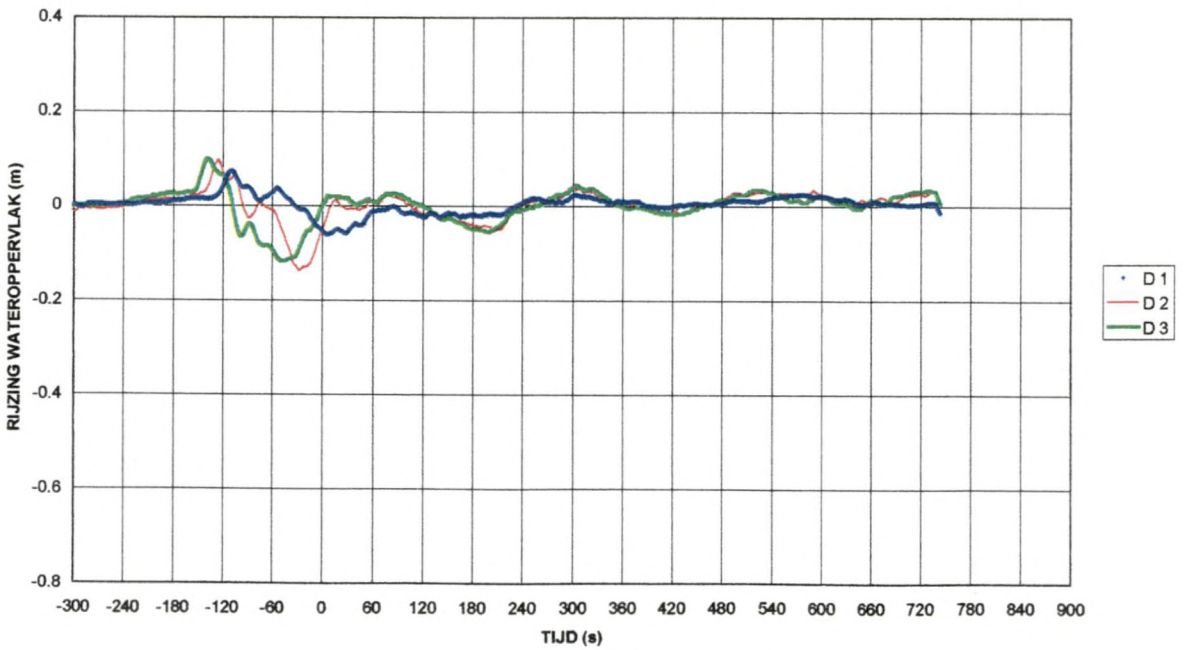


HNI10 (vervolg)

LAAG WATER - DWARSAFSTAND 1 - SNELHEID 12 KNOOP - OPWAARTS

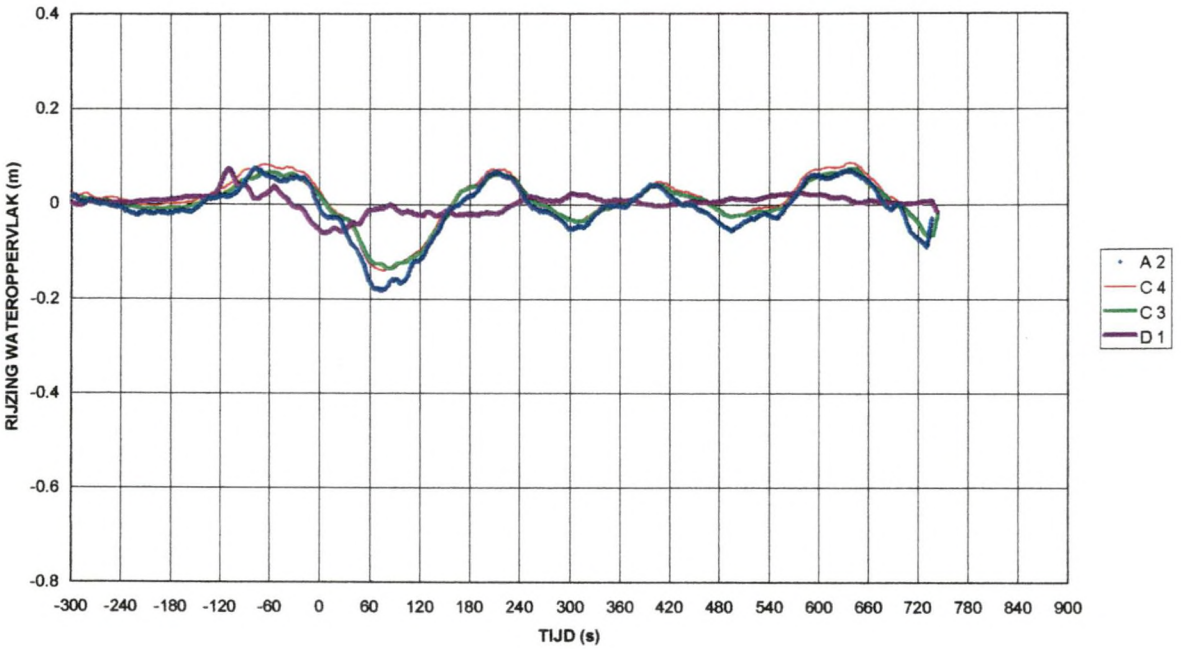


LAAG WATER - DWARSAFSTAND 1 - SNELHEID 12 KNOOP - OPWAARTS



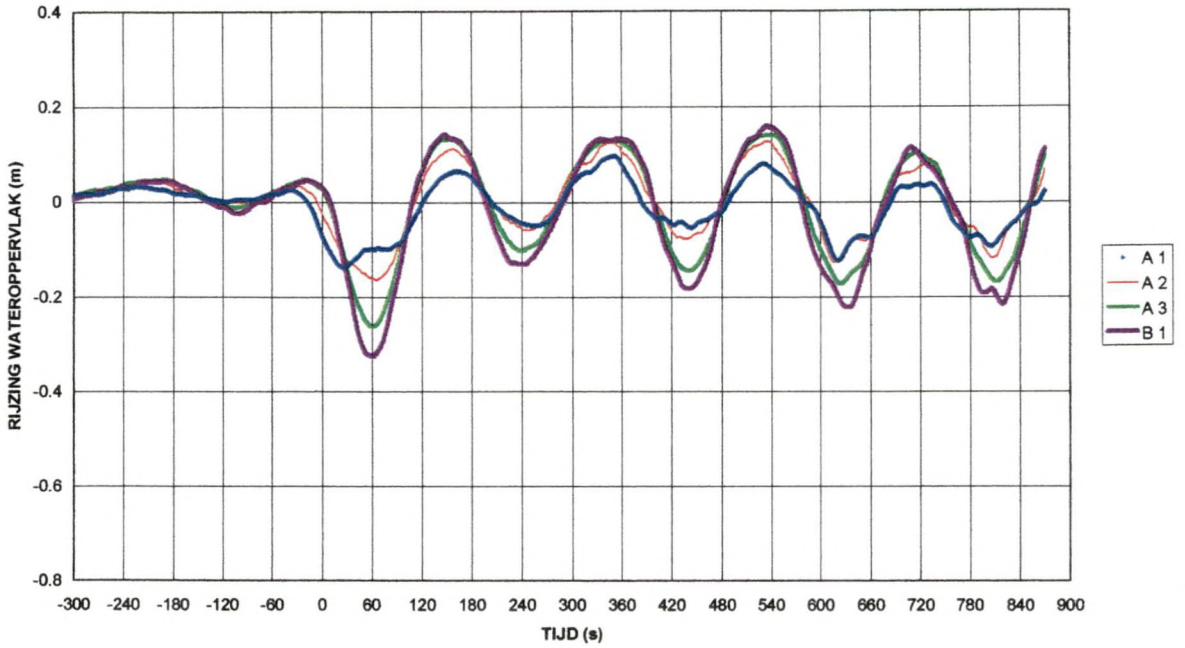
HNI10 (vervolg)

LAAG WATER - DWARSAFSTAND 1 - SNELHEID 12 KNOOP - OPWAARTS

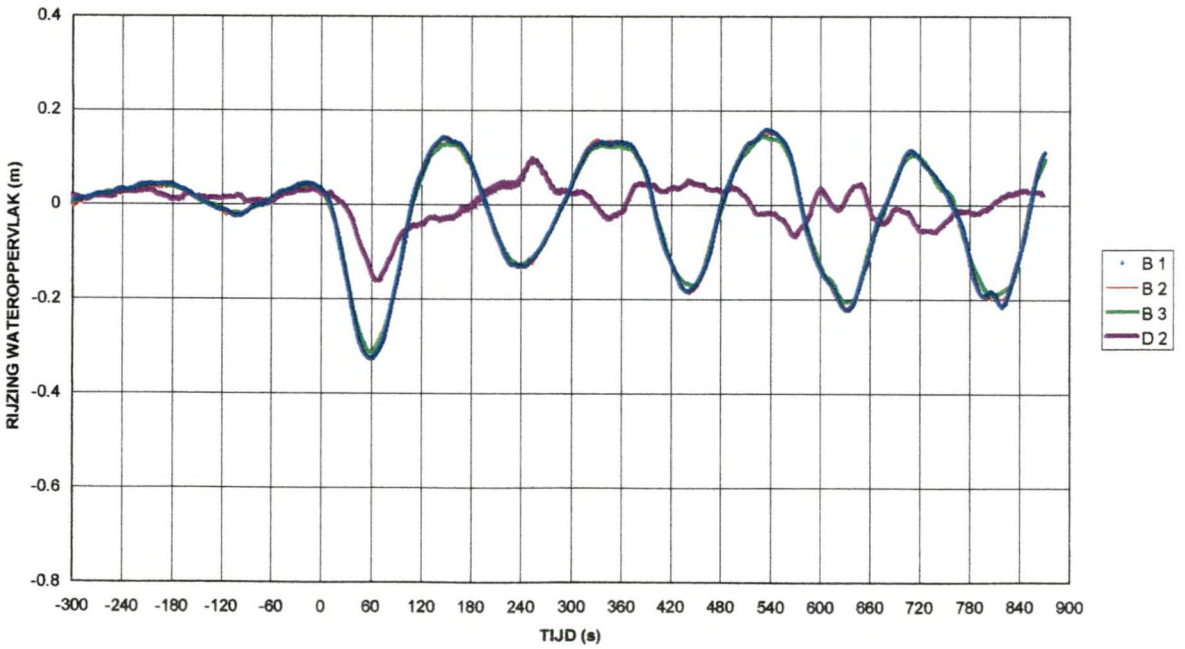


HNI04

HOOG WATER - DWARSAFSTAND 1 - SNELHEID 15 KNOOP - AFWAARTS

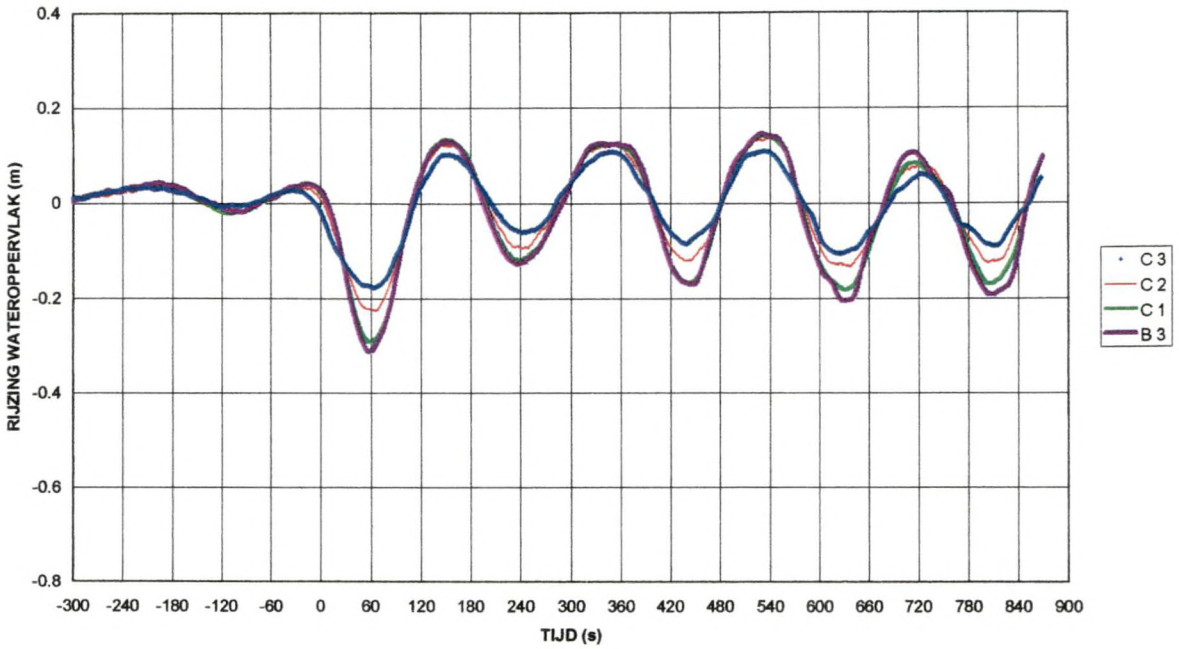


HOOG WATER - DWARSAFSTAND 1 - SNELHEID 15 KNOOP - AFWAARTS

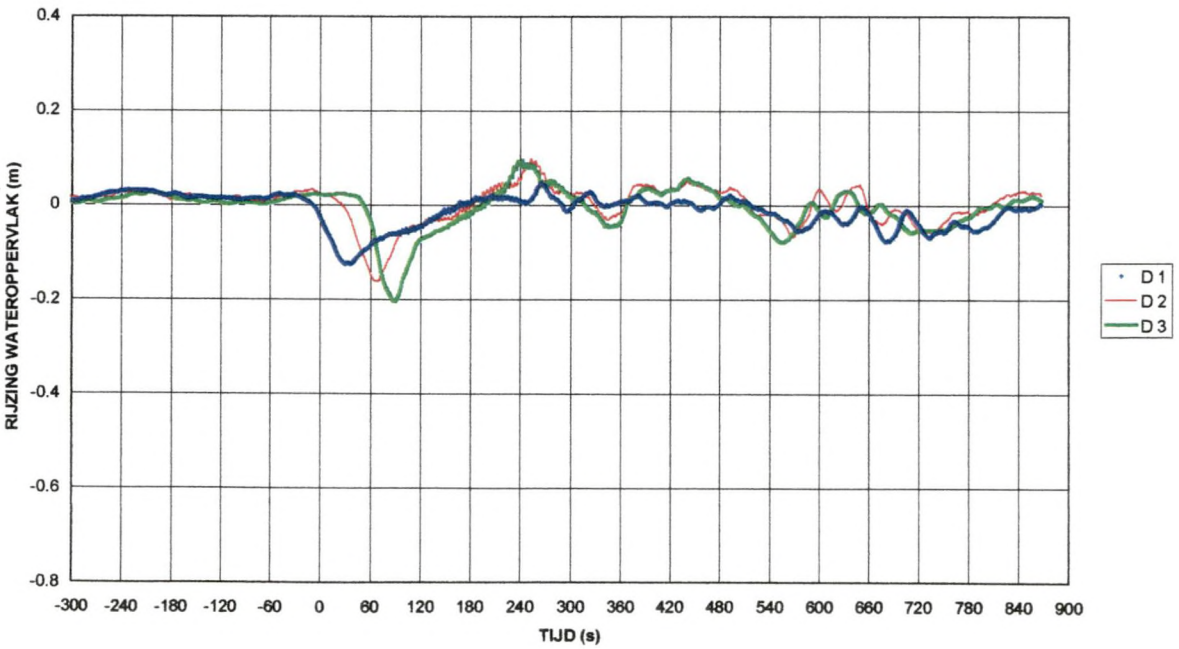


HNI04 (vervolg)

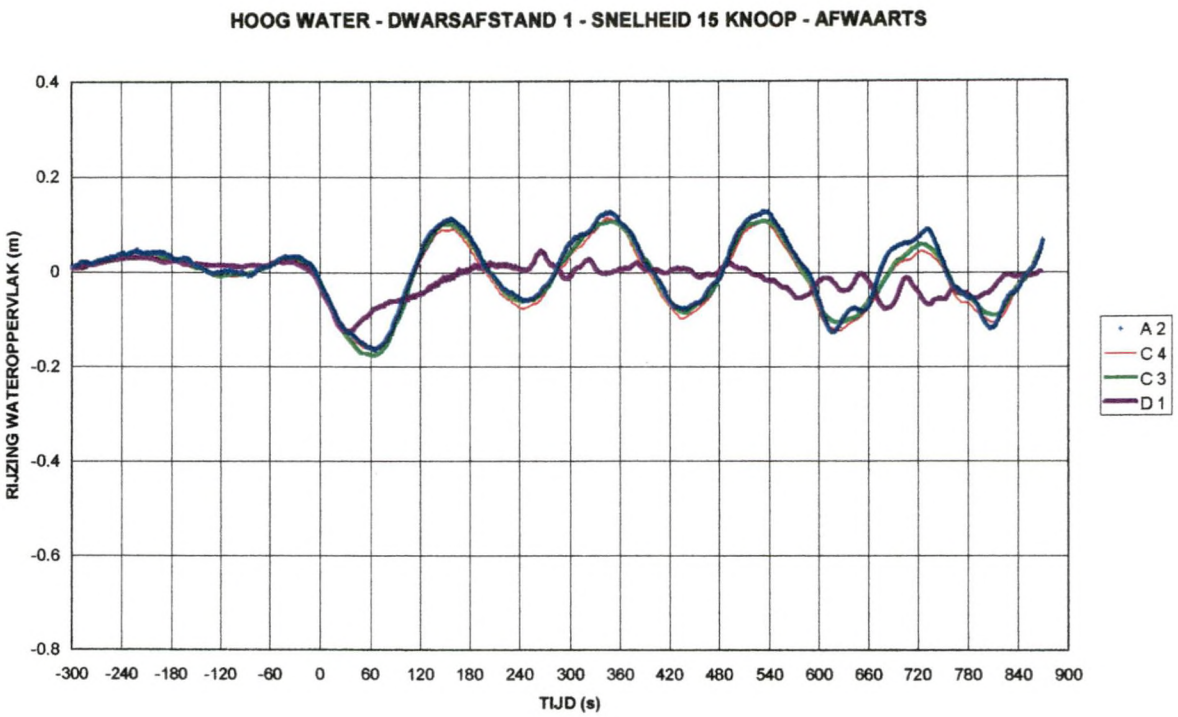
HOOG WATER - DWARSAFSTAND 1 - SNELHEID 15 KNOOP - AFWAARTS



HOOG WATER - DWARSAFSTAND 1 - SNELHEID 15 KNOOP - AFWAARTS

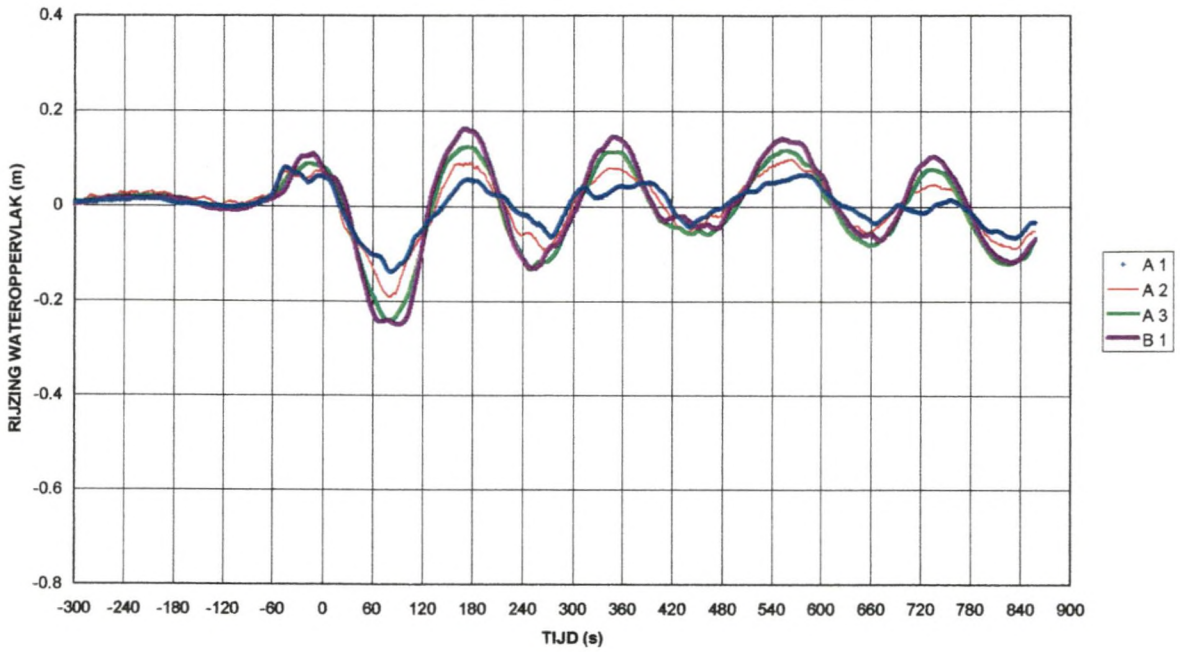


HNI04 (vervolg)

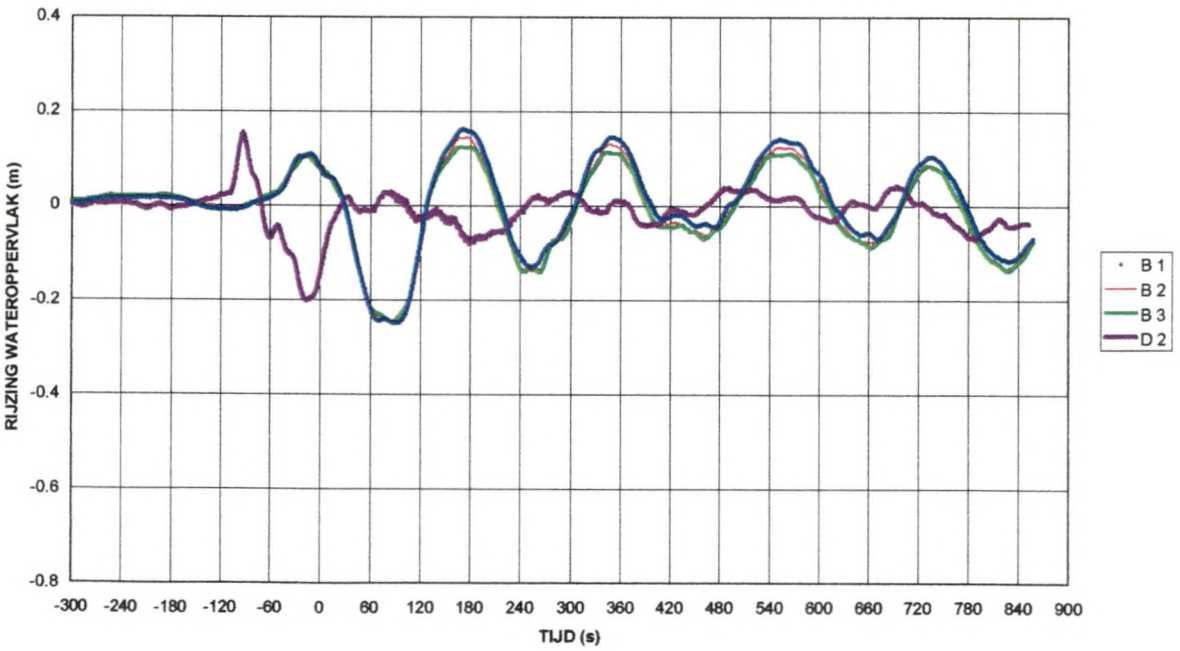


HNI03

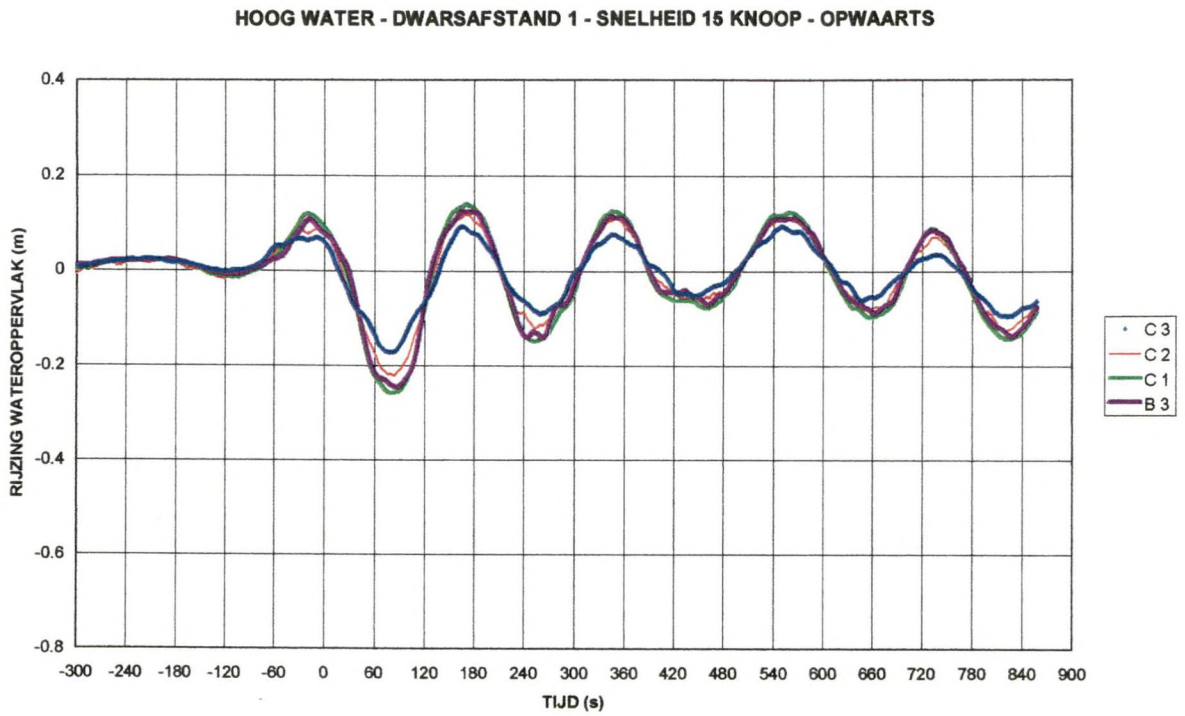
HOOG WATER - DWARSAFSTAND 1 - SNELHEID 15 KNOOP - OPWAARTS

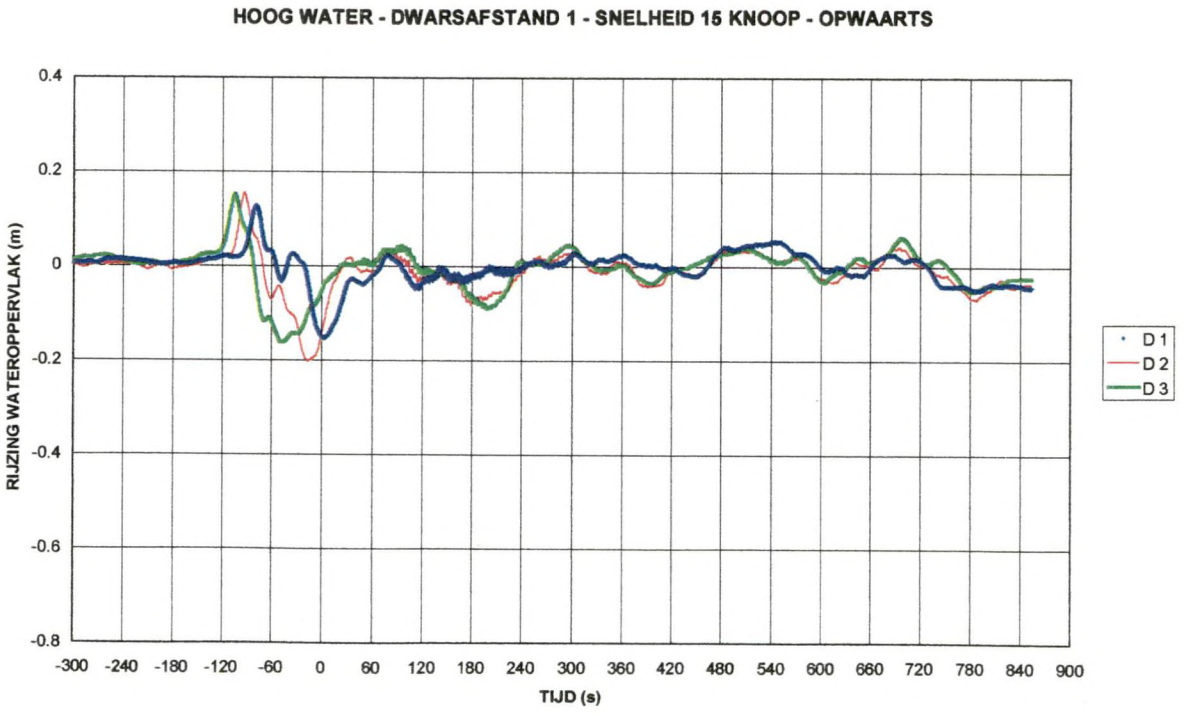


HOOG WATER - DWARSAFSTAND 1 - SNELHEID 15 KNOOP - OPWAARTS

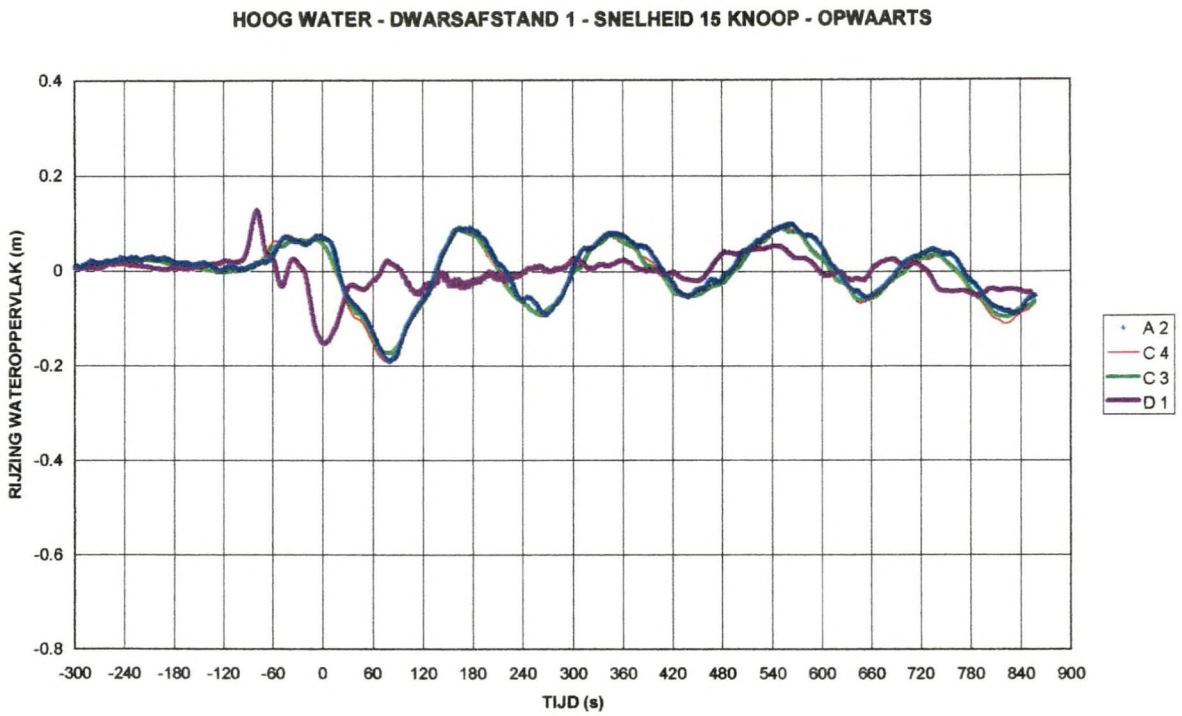


HNI03 (vervolg)



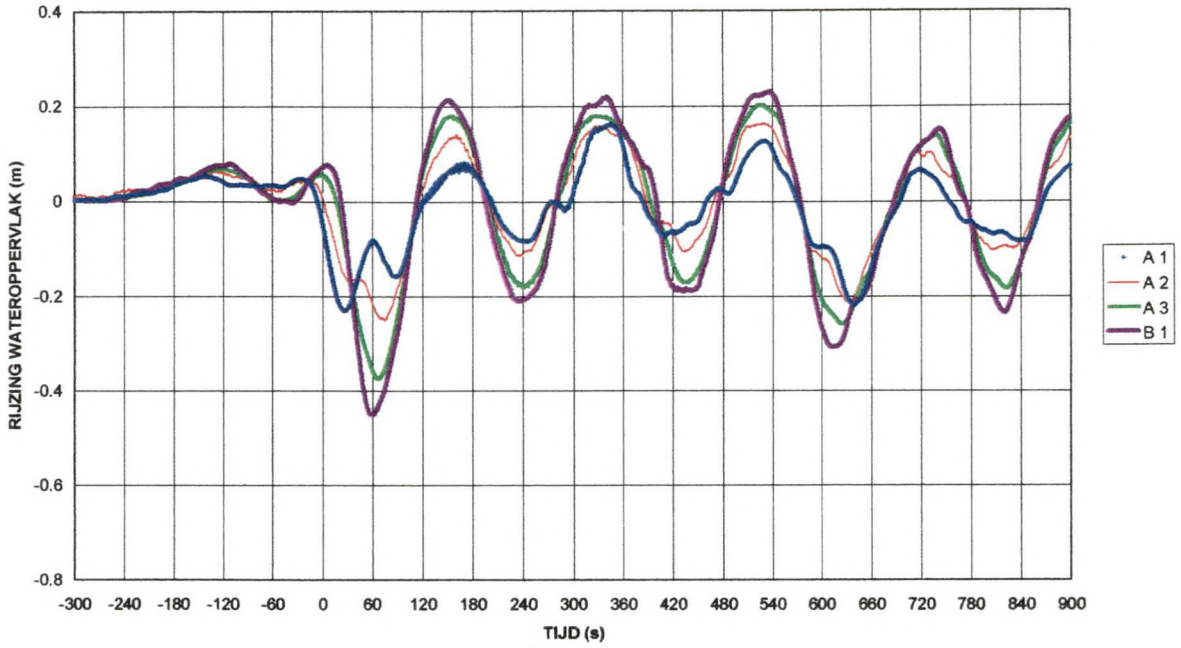


HNI03 (vervolg)

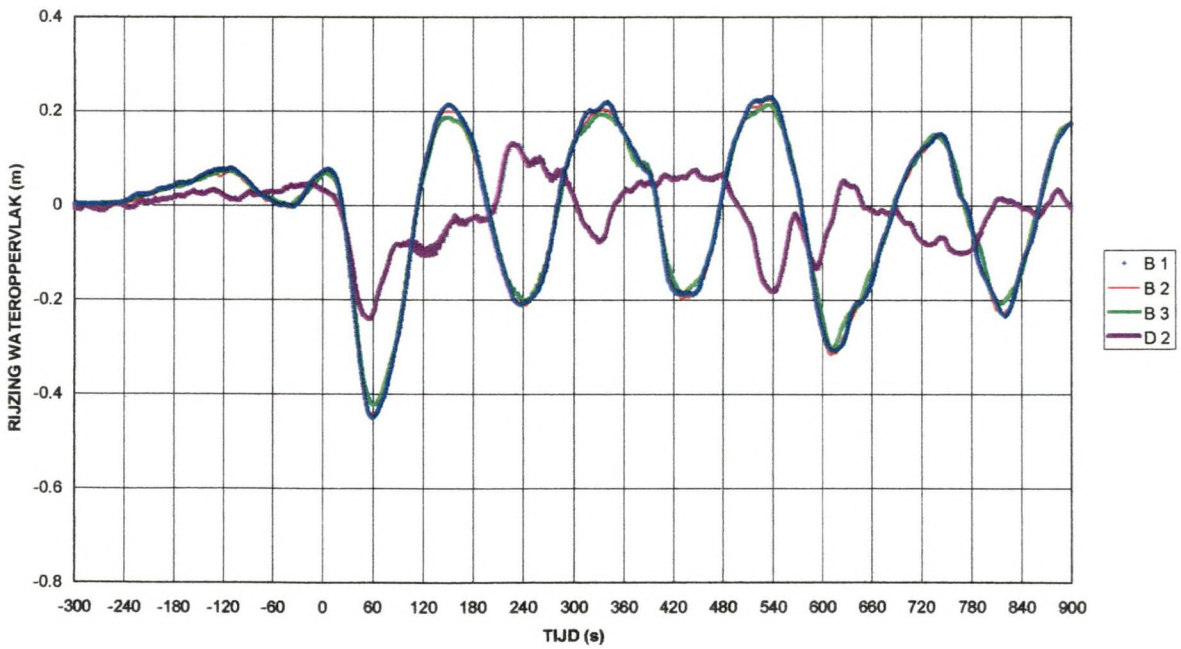


HNI05

HOOG WATER - DWARSAFSTAND 1 - SNELHEID 18 KNOOP - AFWAARTS

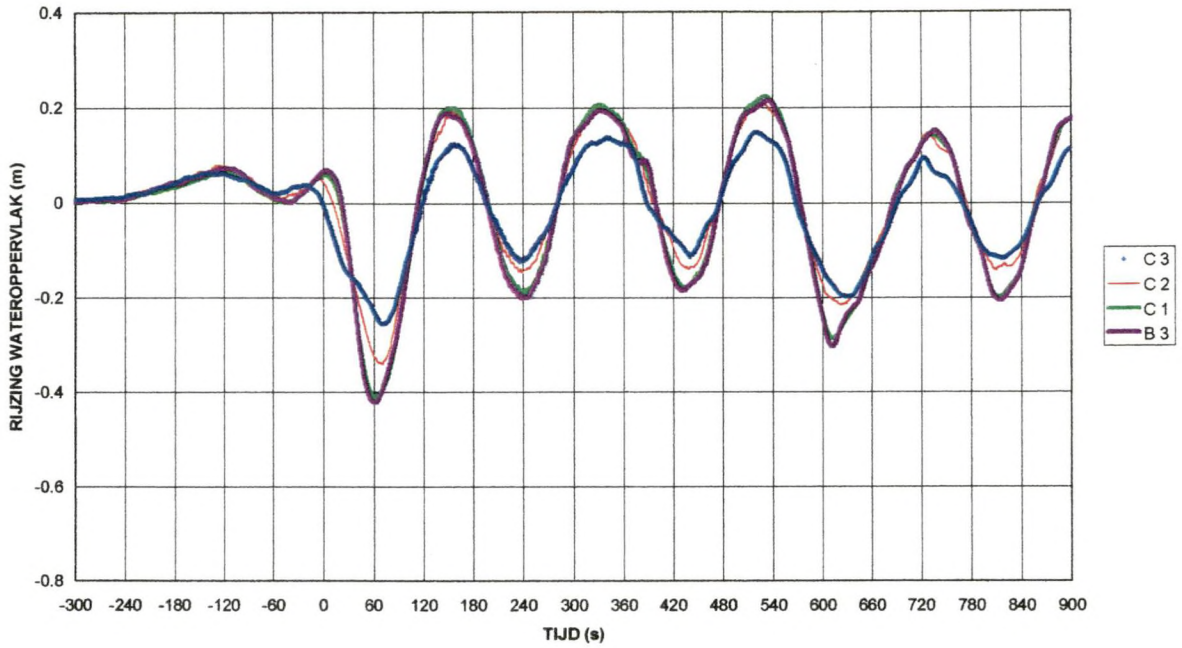


HOOG WATER - DWARSAFSTAND 1 - SNELHEID 18 KNOOP - AFWAARTS

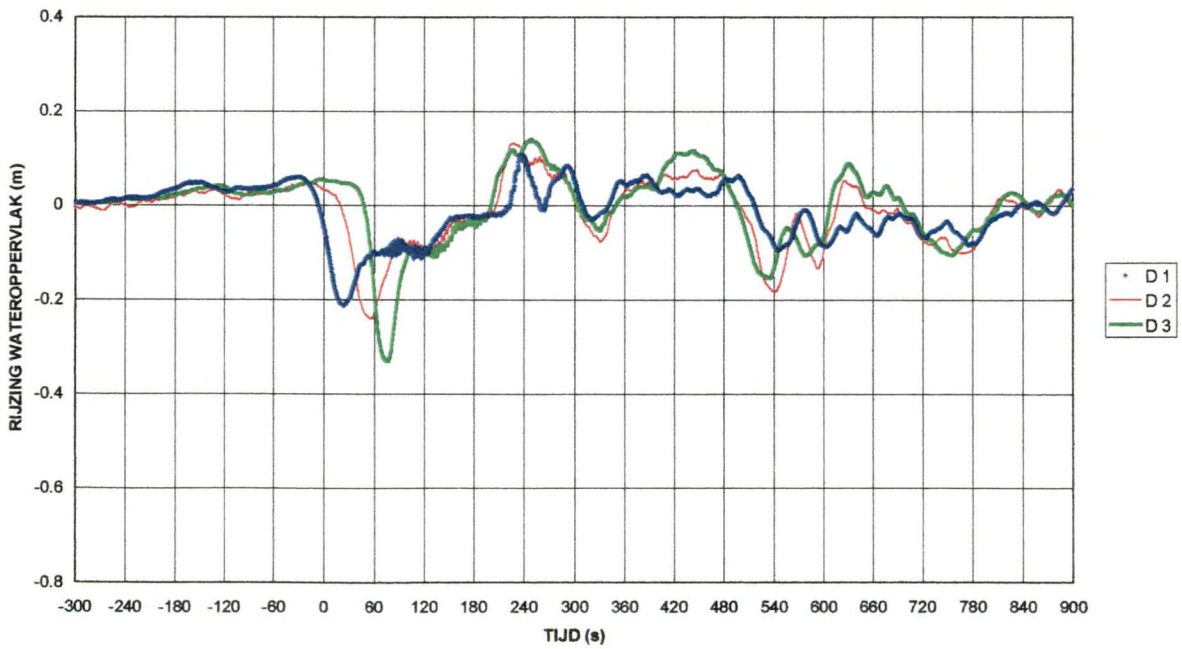


HNI05 (vervolg)

HOOG WATER - DWARSAFSTAND 1 - SNELHEID 18 KNOOP - AFWAARTS

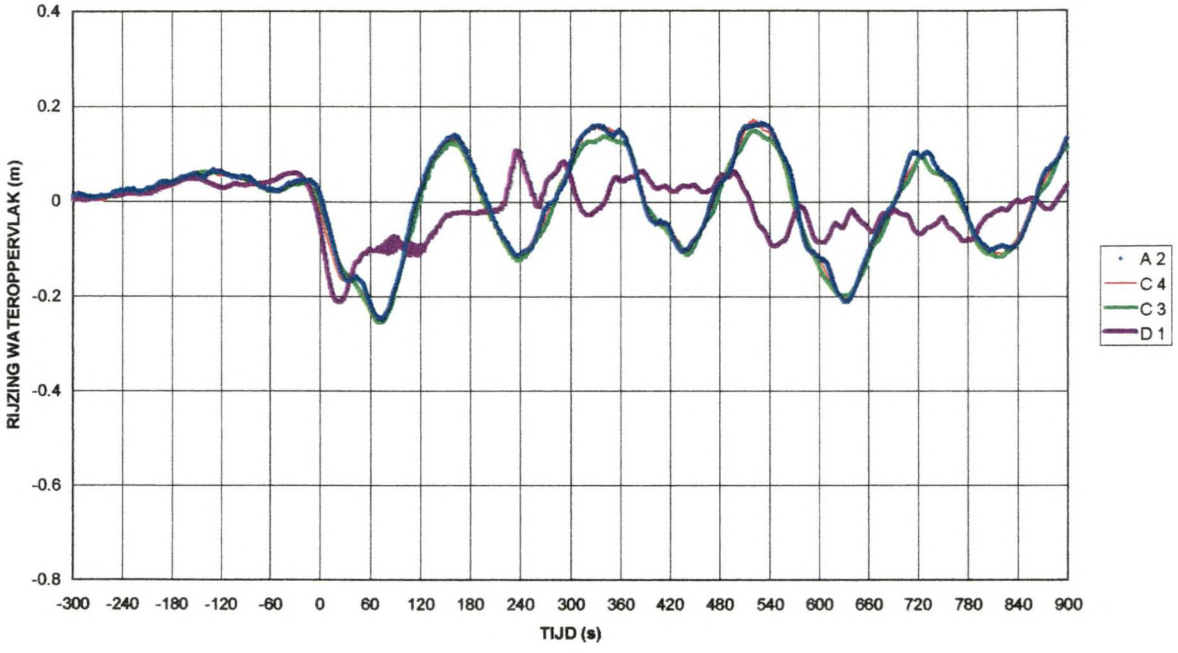


HOOG WATER - DWARSAFSTAND 1 - SNELHEID 18 KNOOP - AFWAARTS



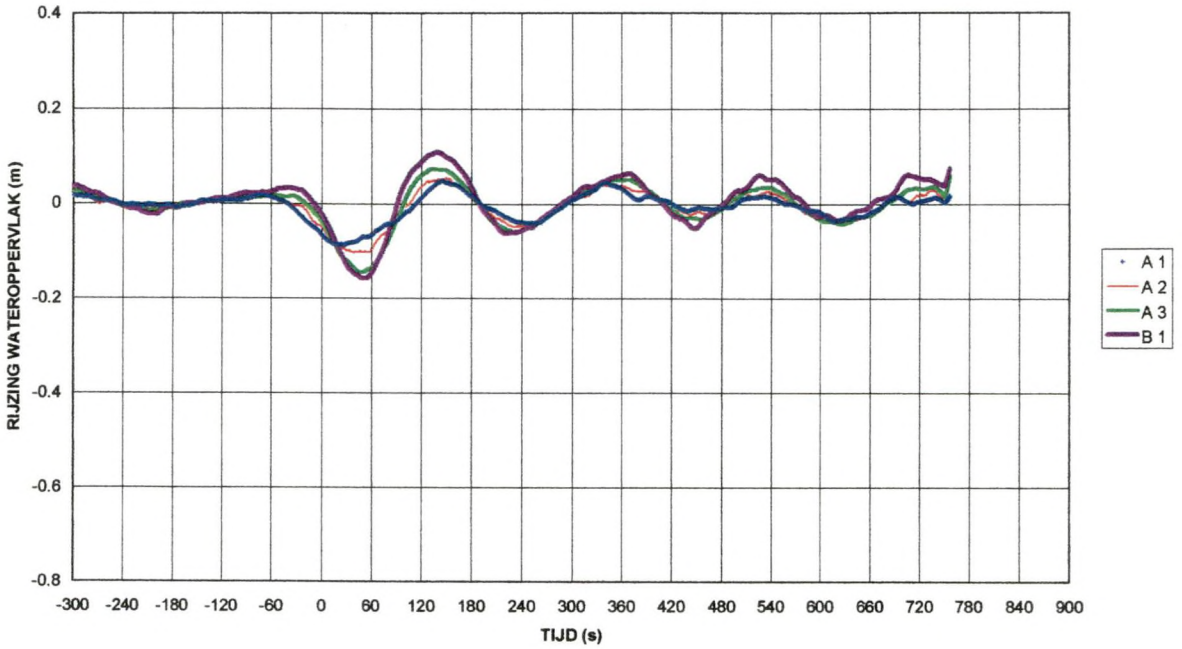
HNI05 (vervolg)

HOOG WATER - DWARSAFSTAND 1 - SNELHEID 18 KNOOP - AFWAARTS

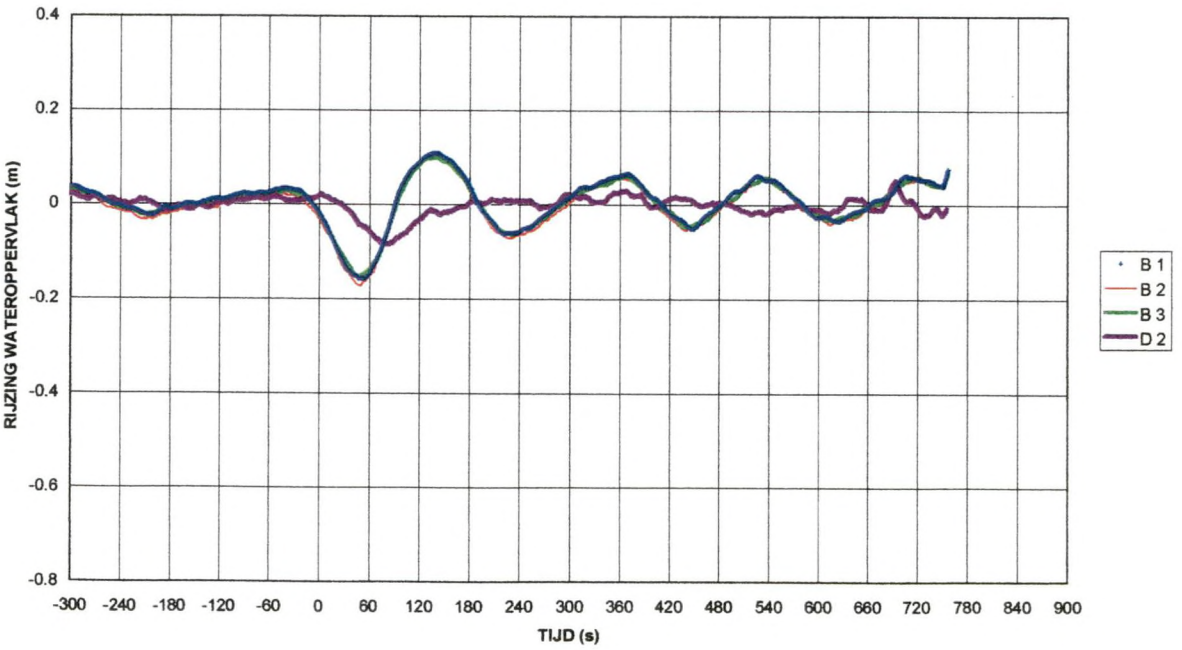


HNI11

HOOG WATER - DWARSAFSTAND 1 - SNELHEID 12 KNOOP - AFWAARTS

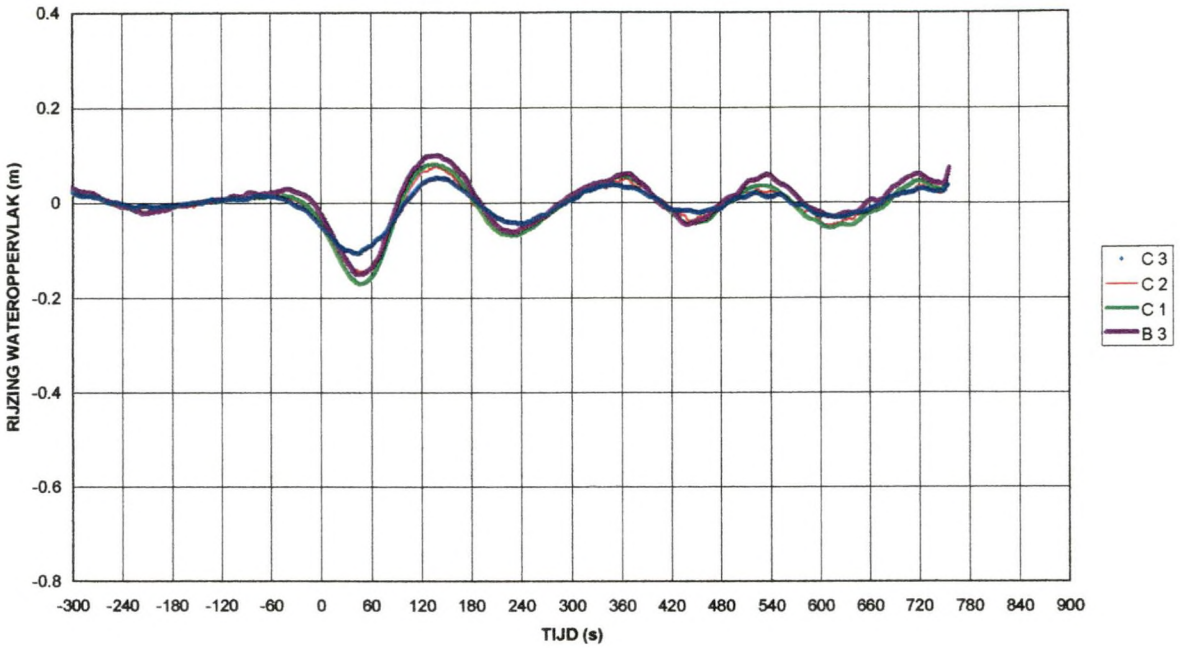


HOOG WATER - DWARSAFSTAND 1 - SNELHEID 12 KNOOP - AFWAARTS

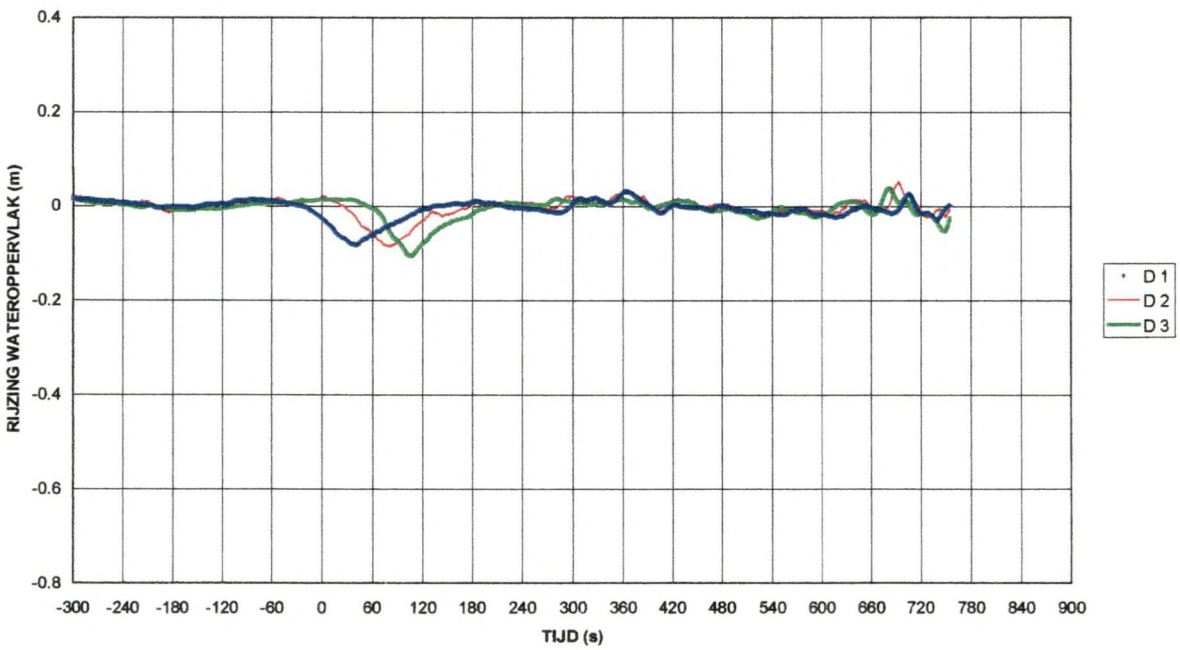


HNI11 (vervolg)

HOOG WATER - DWARSAFSTAND 1 - SNELHEID 12 KNOOP - AFWAARTS

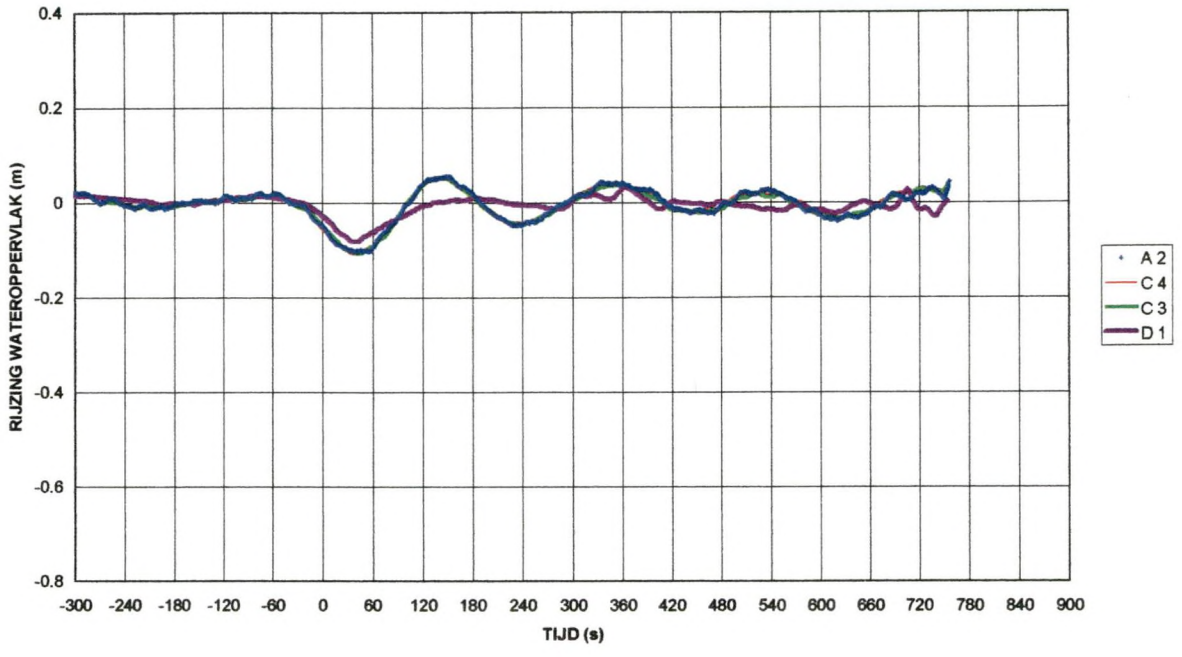


HOOG WATER - DWARSAFSTAND 1 - SNELHEID 12 KNOOP - AFWAARTS



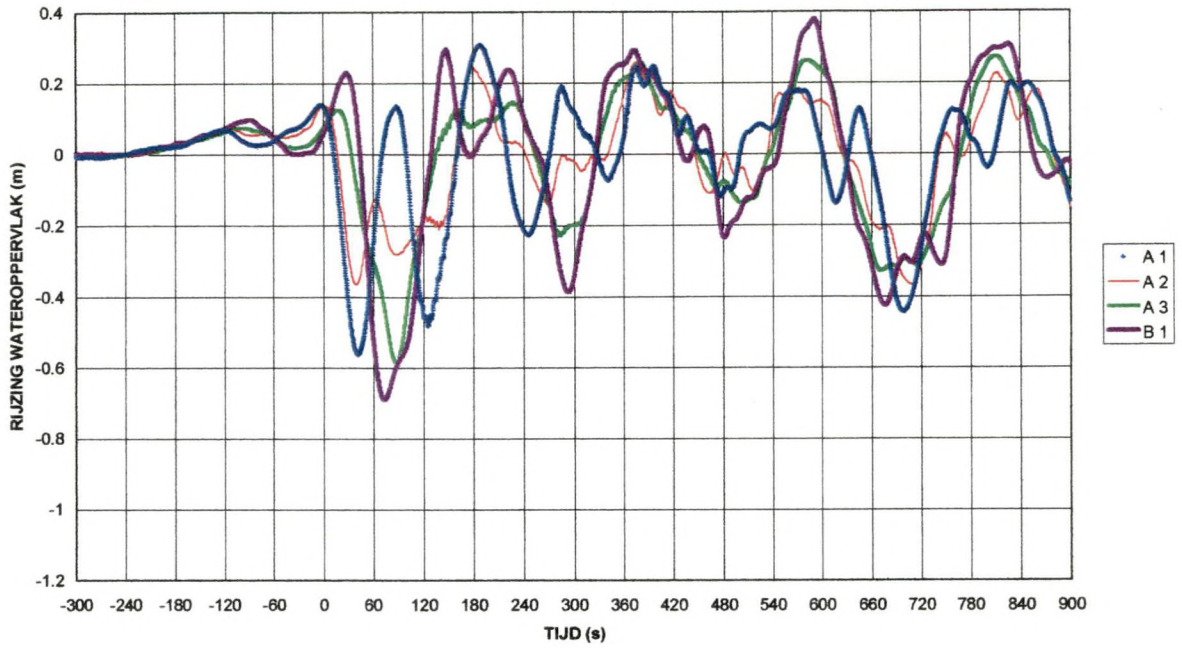
HNI11 (vervolg)

HOOG WATER - DWARSAFSTAND 1 - SNELHEID 12 KNOOP - AFWAARTS

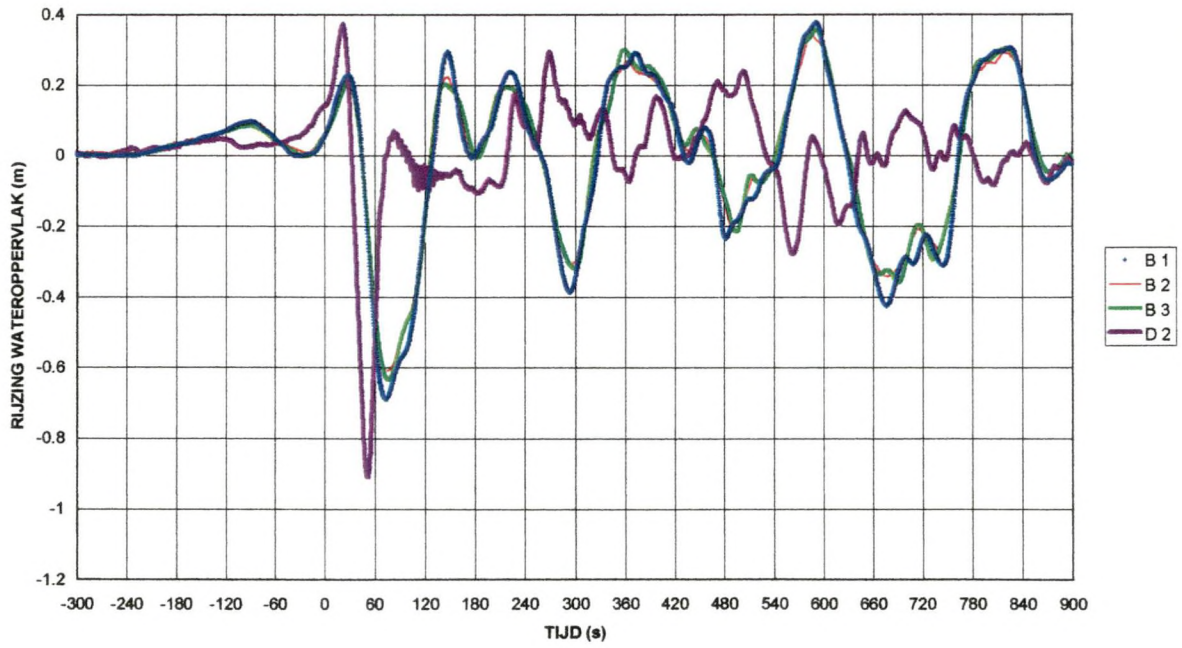


HNI12

LAAG WATER - DWARSAFSTAND 2 - SNELHEID 18 KNOOP - AFWAARTS

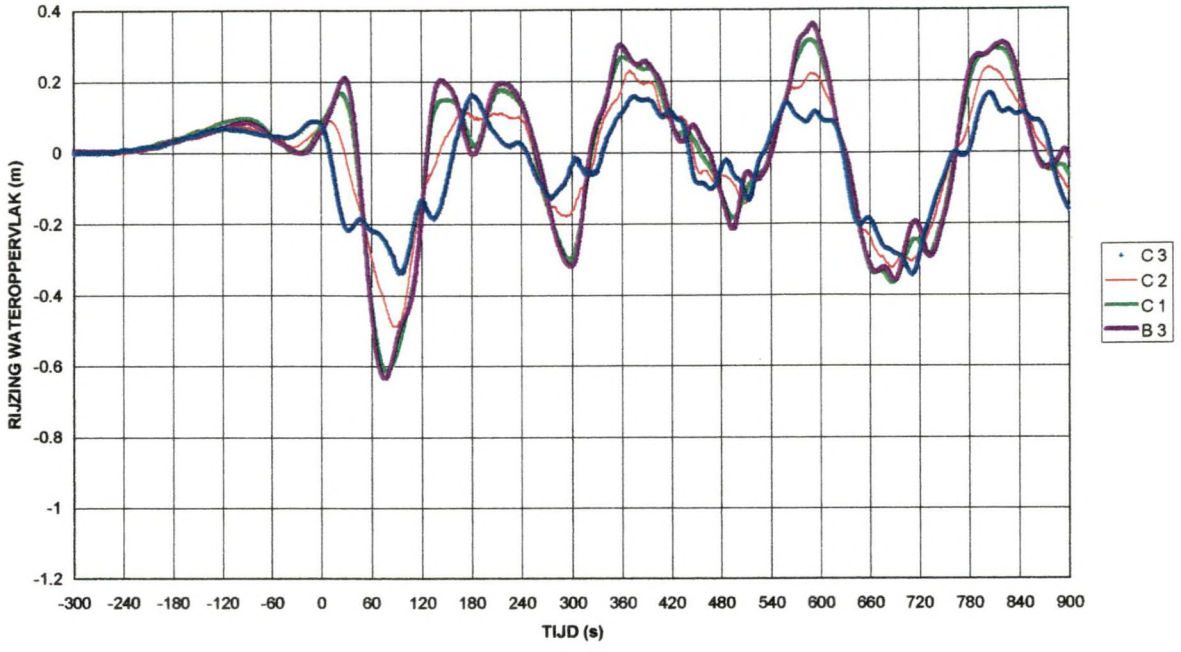


LAAG WATER - DWARSAFSTAND 2 - SNELHEID 18 KNOOP - AFWAARTS

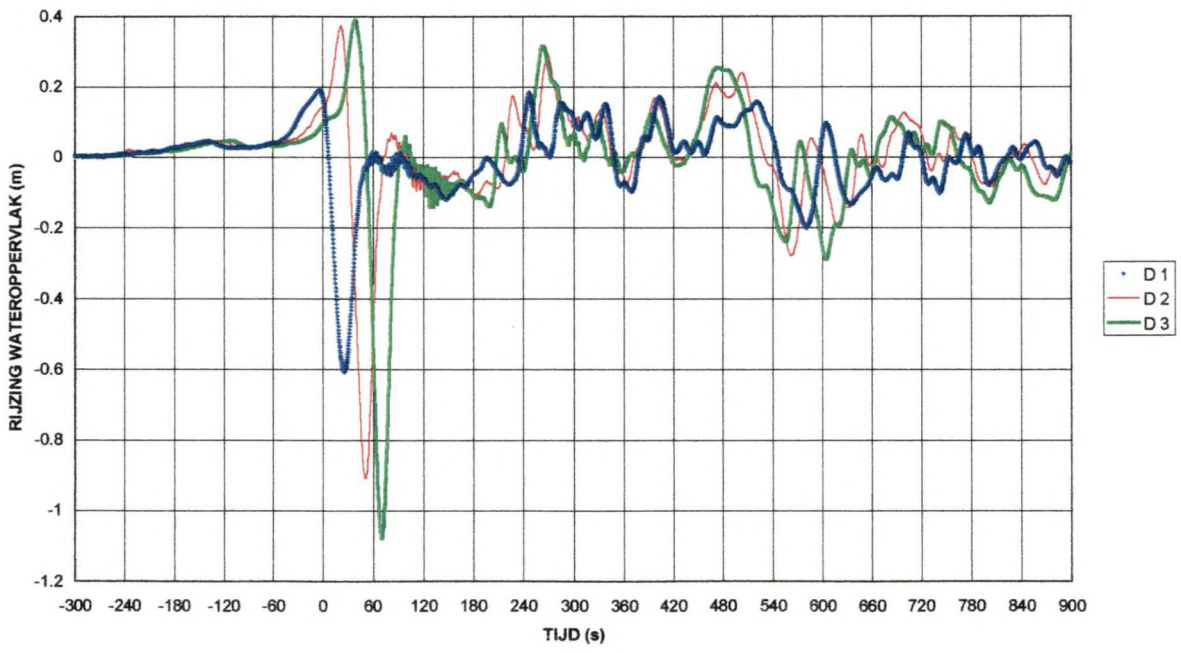


HNI12 (vervolg)

LAAG WATER - DWARSAFSTAND 2 - SNELHEID 18 KNOOP - AFWAARTS

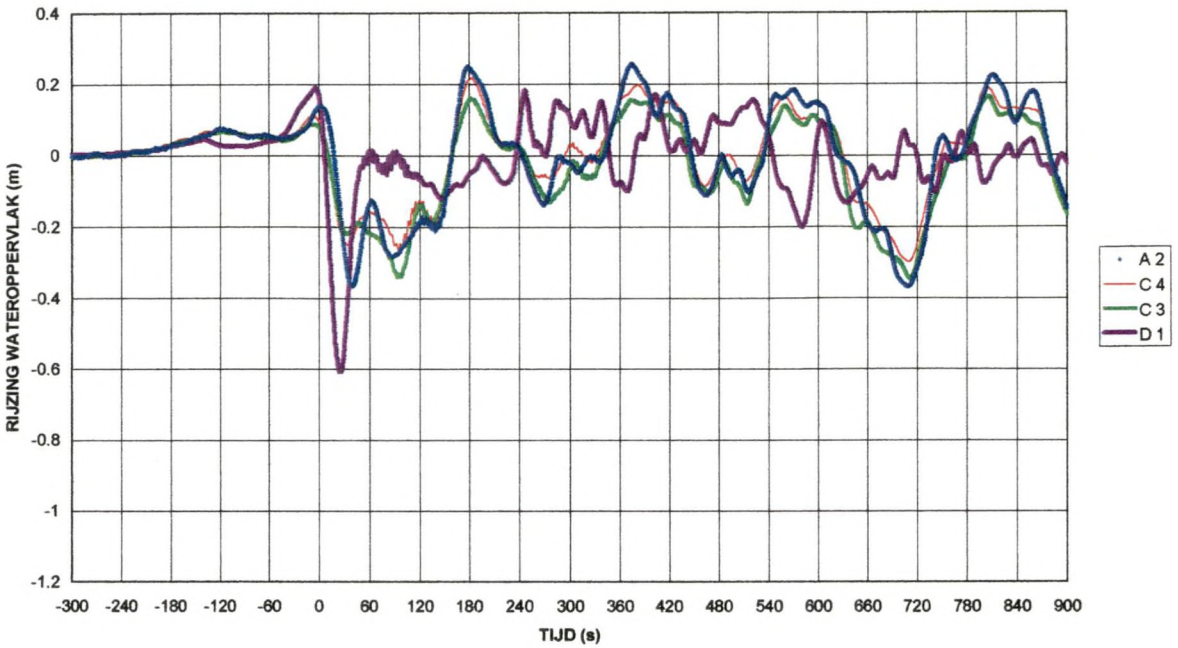


LAAG WATER - DWARSAFSTAND 2 - SNELHEID 18 KNOOP - AFWAARTS



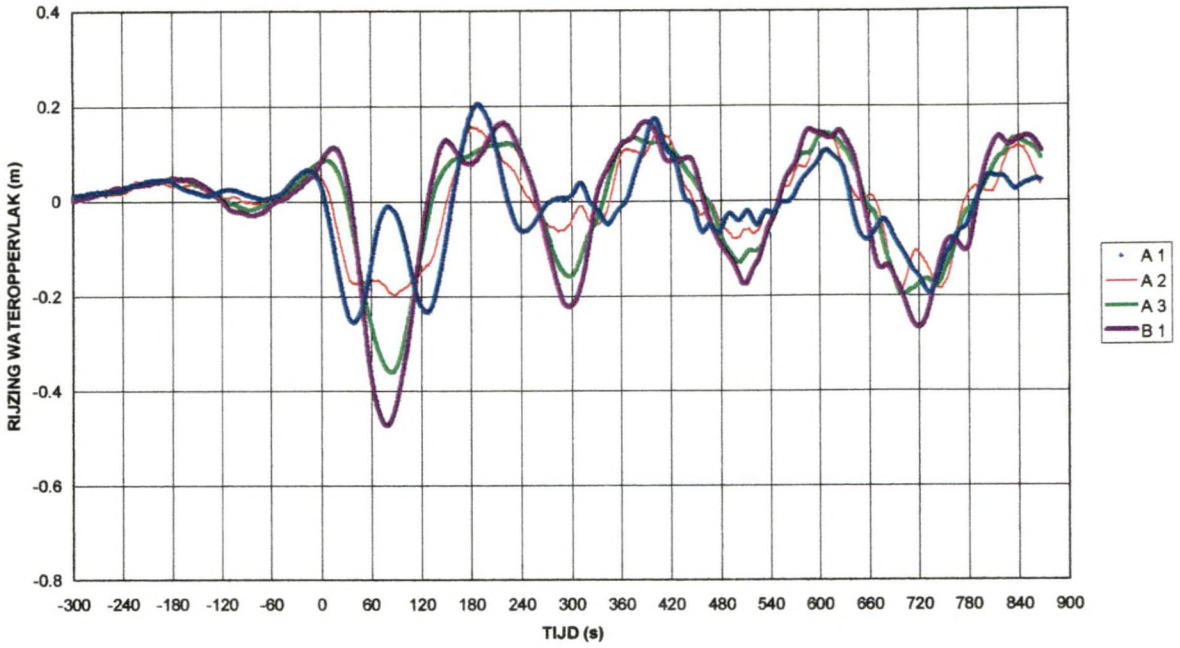
HNI12 (vervolg)

LAAG WATER - DWARSAFSTAND 2 - SNELHEID 18 KNOOP - AFWAARTS

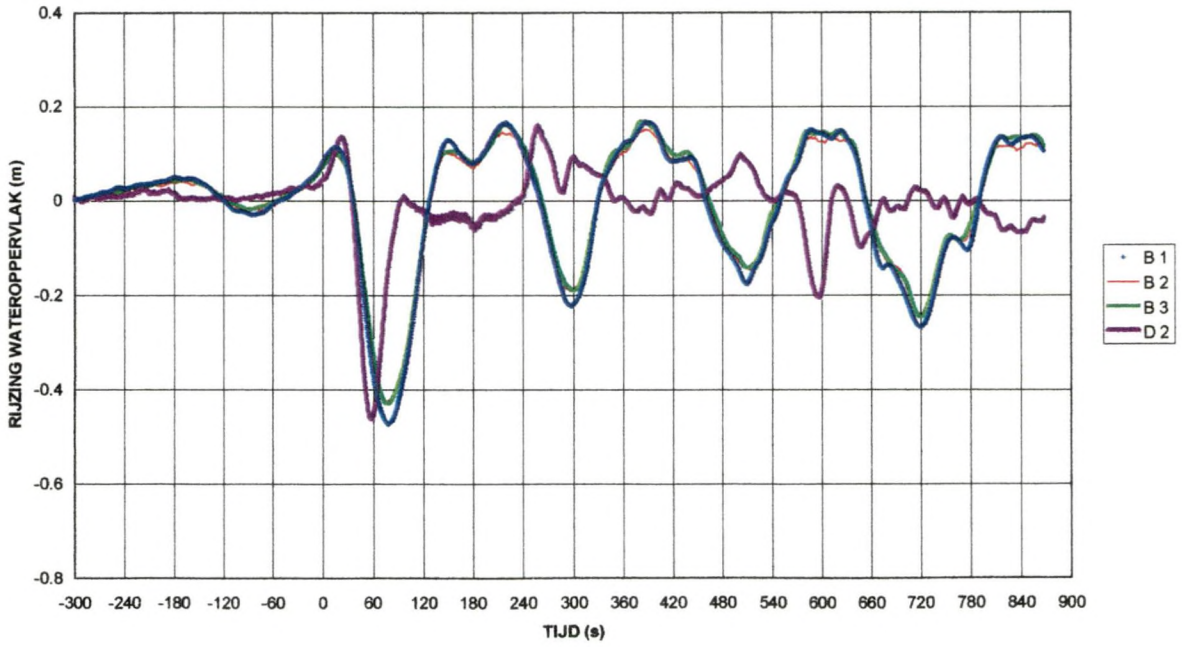


HNI06

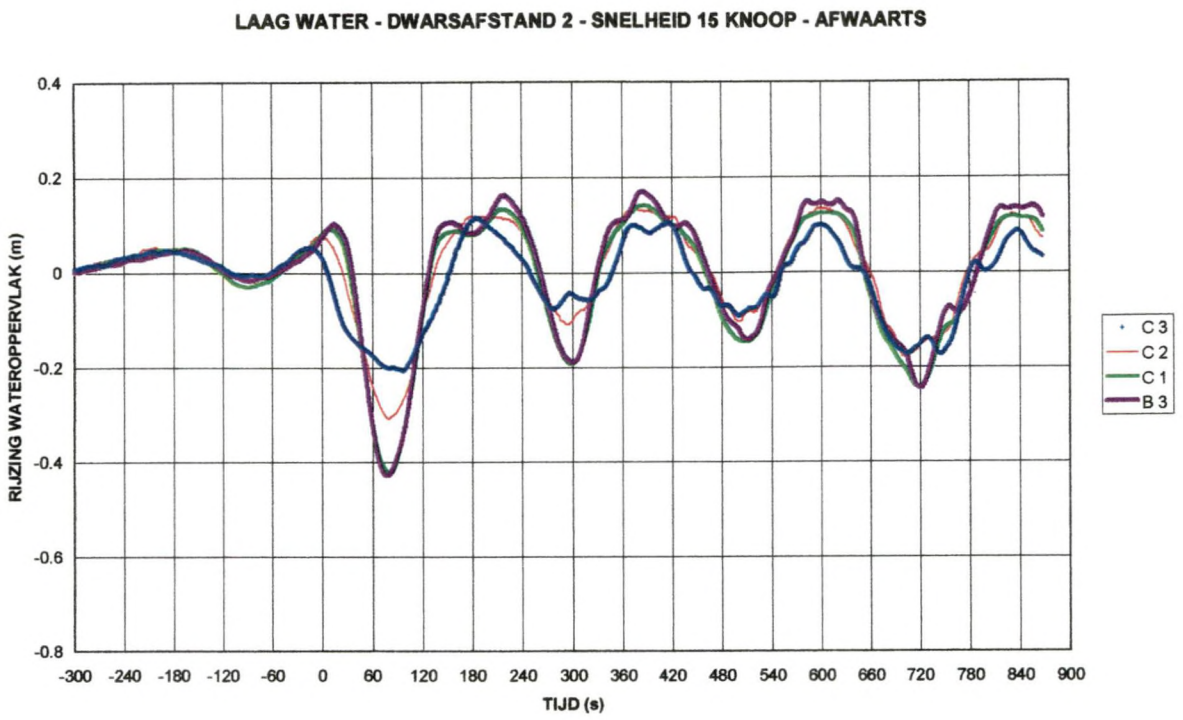
LAAG WATER - DWARSAFSTAND 2 - SNELHEID 15 KNOOP - AFWAARTS

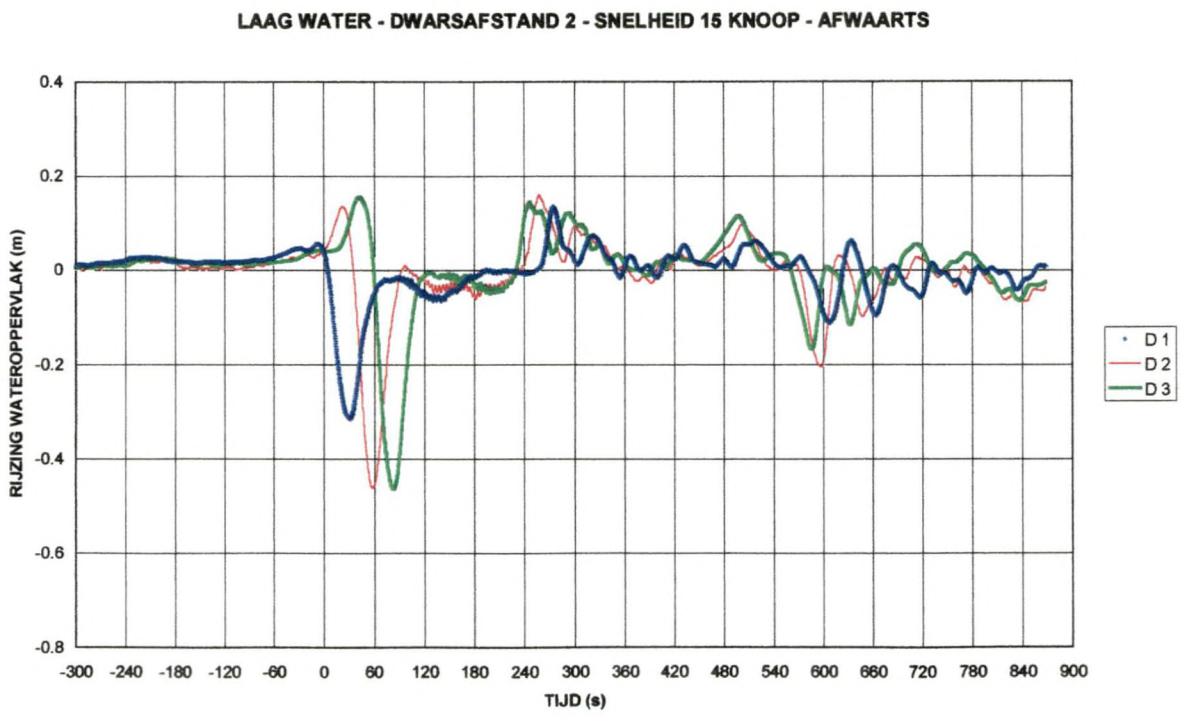


LAAG WATER - DWARSAFSTAND 2 - SNELHEID 15 KNOOP - AFWAARTS

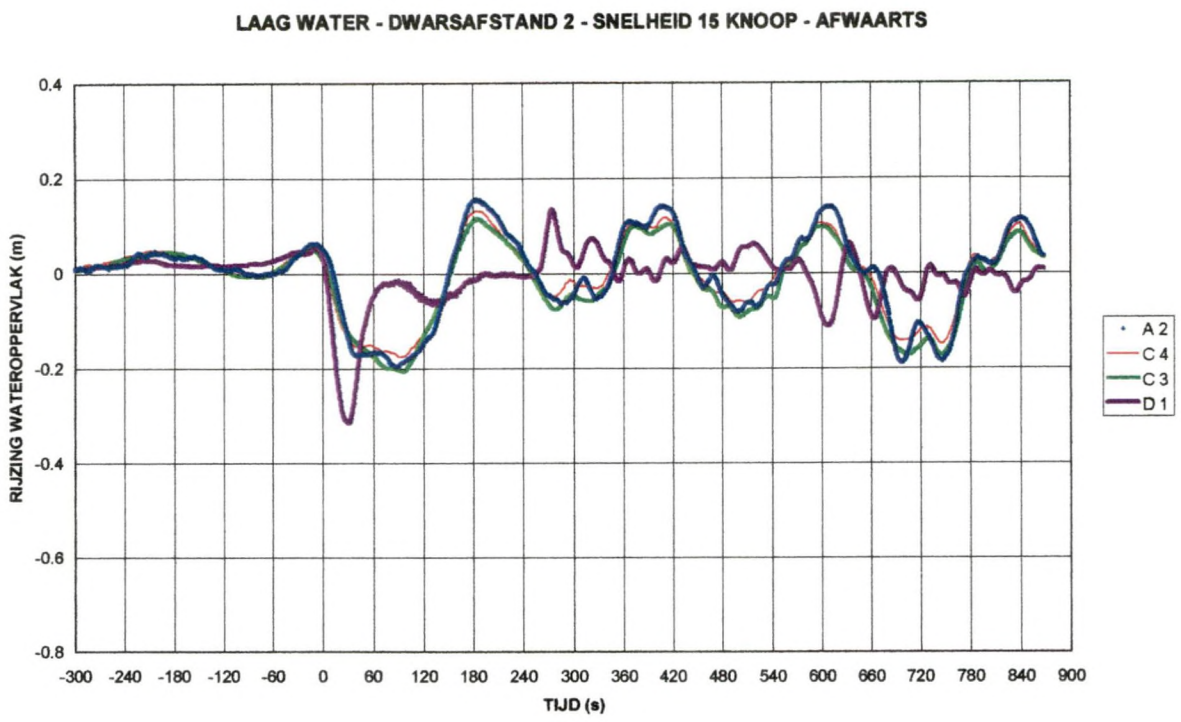


HNI06 (vervolg)





HNI06 (vervolg)



UNIVERSITEIT GENT
Vakgroep TW04V
Afdeling Maritieme Technologie

UNIVERSITEIT GENT

CONTAINERTERMINAL TE VLISSINGEN
ONDERZOEK LICHTERDOK WESTERSCHELDE

Bijlage 2 – Hoogfrequente bewegingen van het wateroppervlak

door

prof. Marc VANTORRE
Hoogleraar RUG

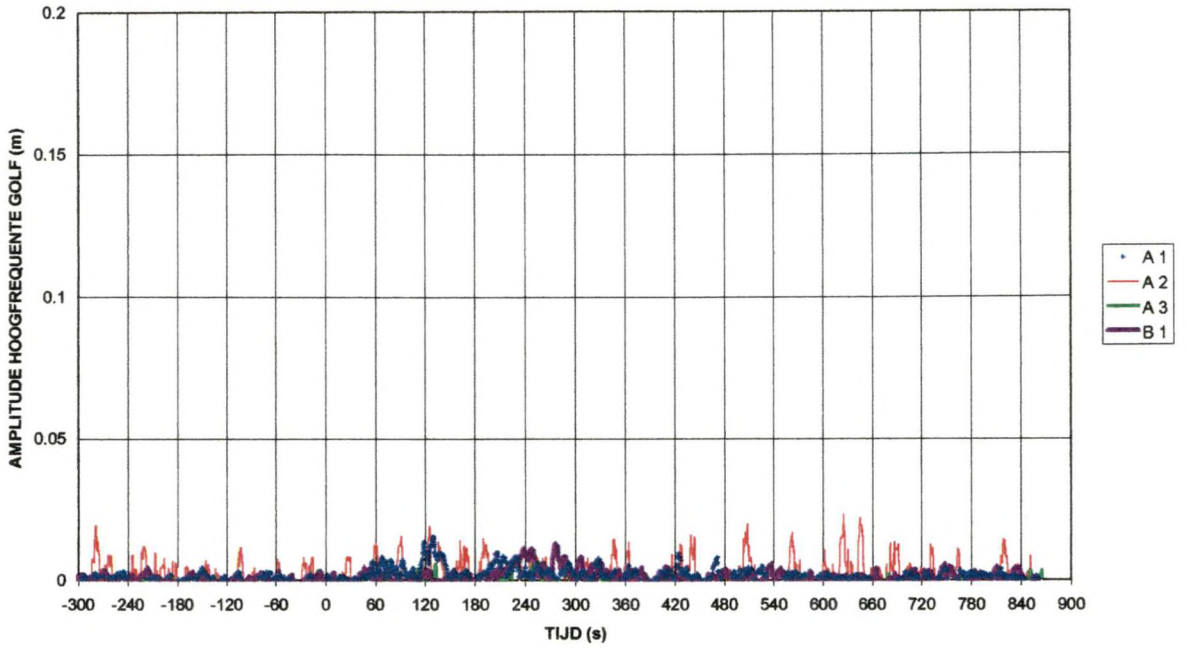
Studie uitgevoerd in opdracht van HESSENATIE N.V.

in samenwerking met
Afdeling Waterbouwkundig Laboratorium en Hydrologisch Onderzoek
AWZ-LIN

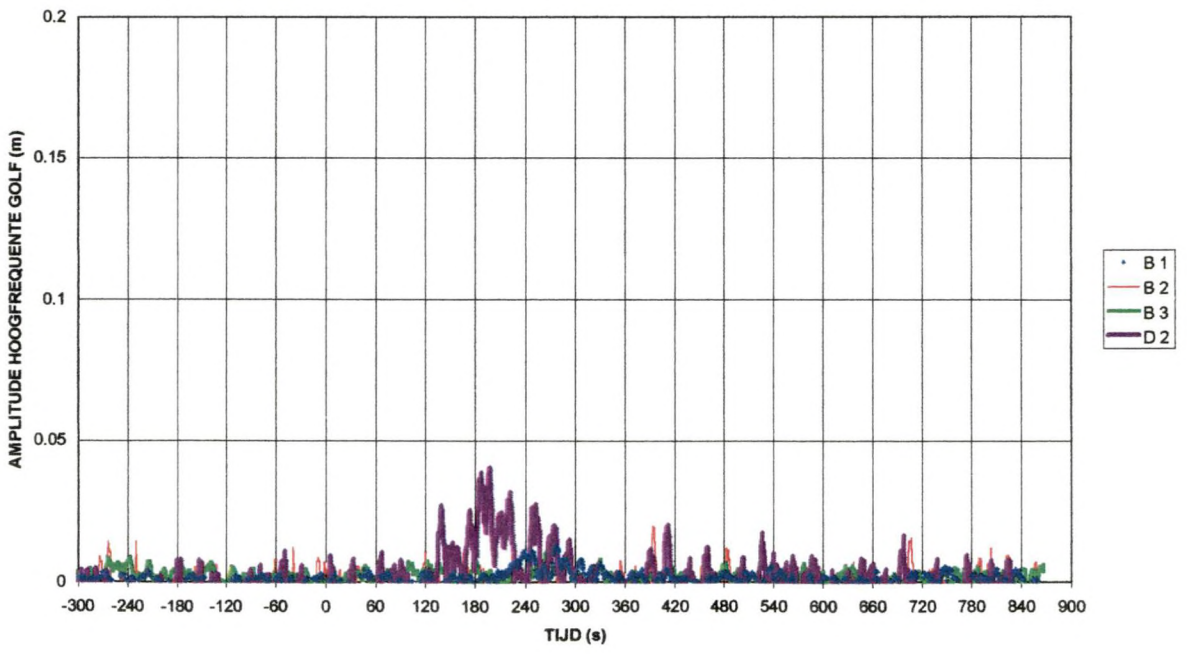
Antwerpen, oktober 2000

HNI01

LAAG WATER - DWARSAFSTAND 1 - SNELHEID 15 KNOOP - AFWAARTS

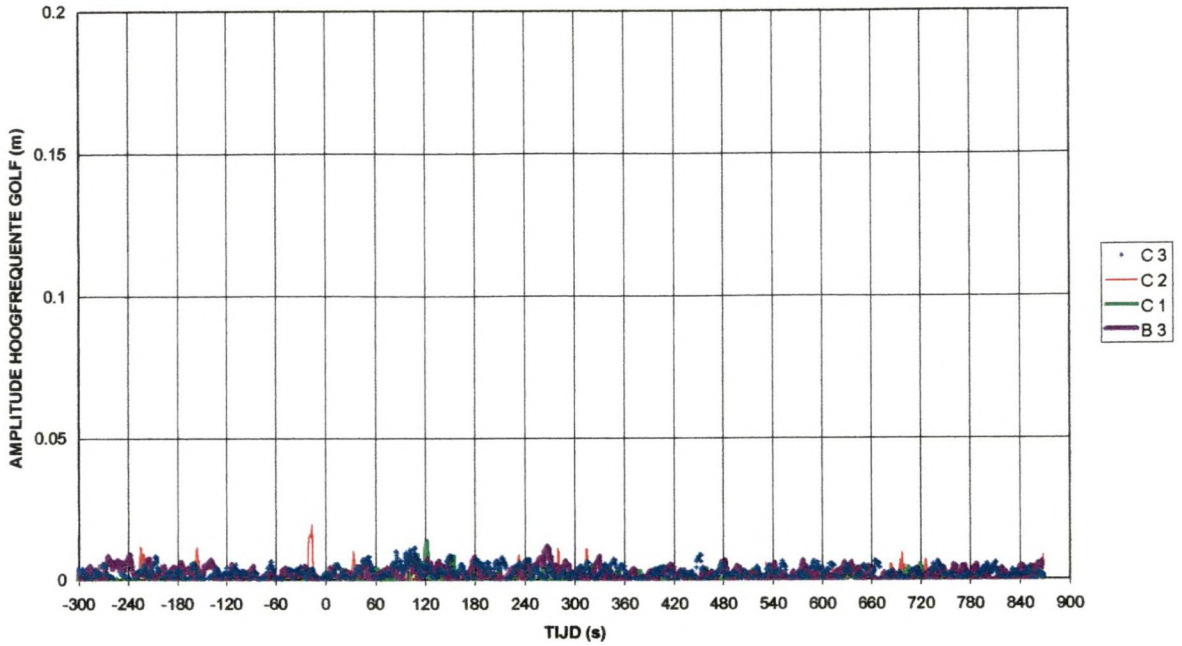


LAAG WATER - DWARSAFSTAND 1 - SNELHEID 15 KNOOP - AFWAARTS

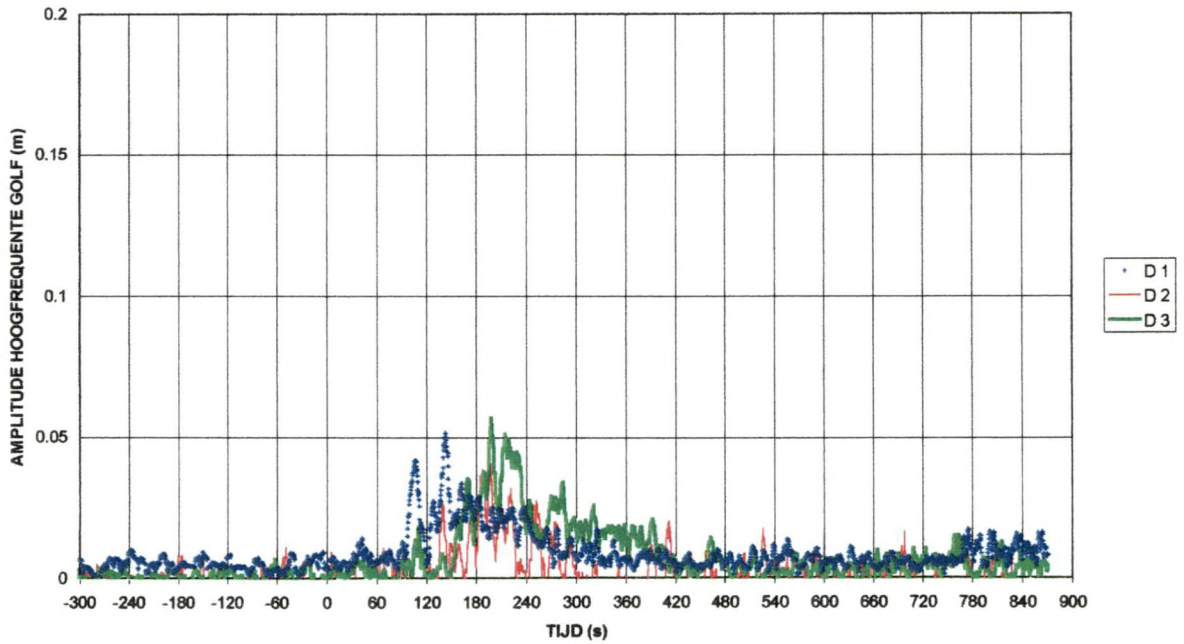


HNI01 (vervolg)

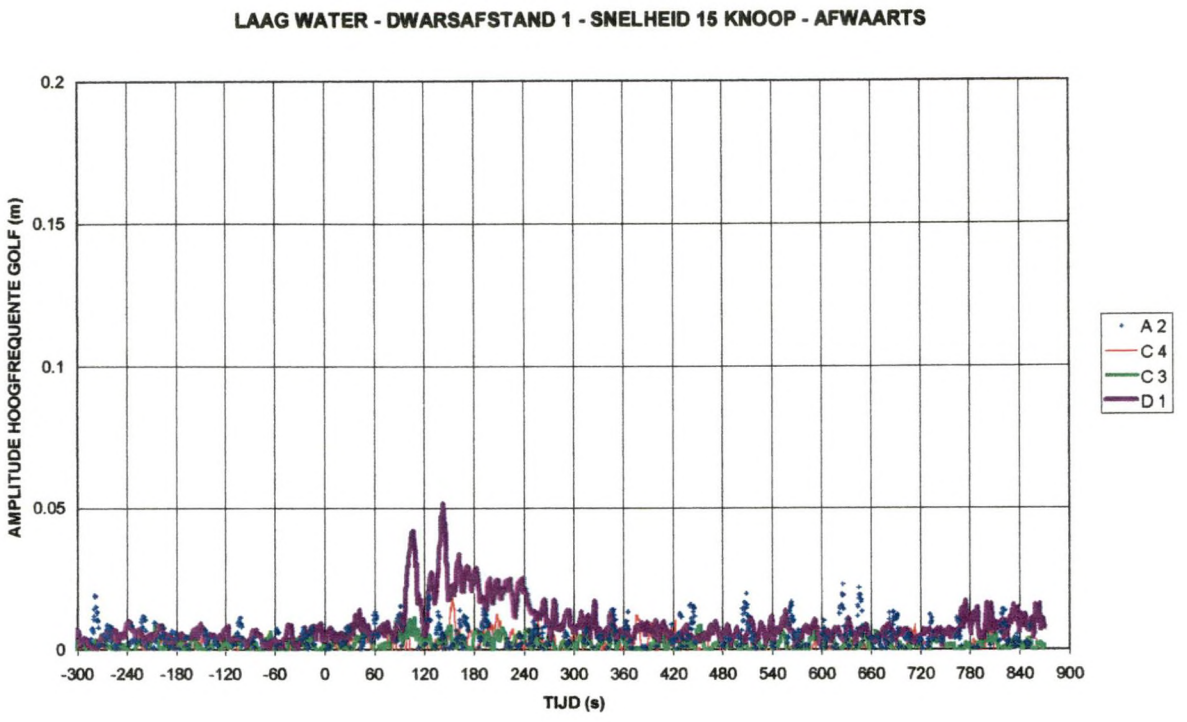
LAAG WATER - DWARSAFSTAND 1 - SNELHEID 15 KNOOP - AFWAARTS



LAAG WATER - DWARSAFSTAND 1 - SNELHEID 15 KNOOP - AFWAARTS

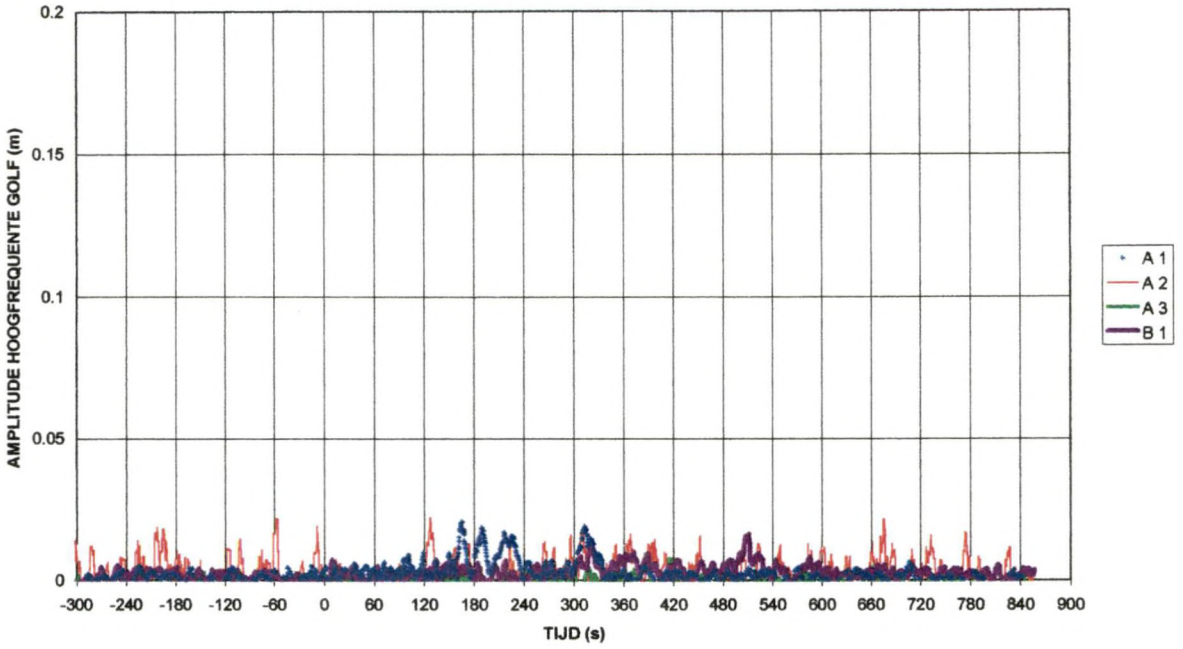


HNI01 (vervolg)



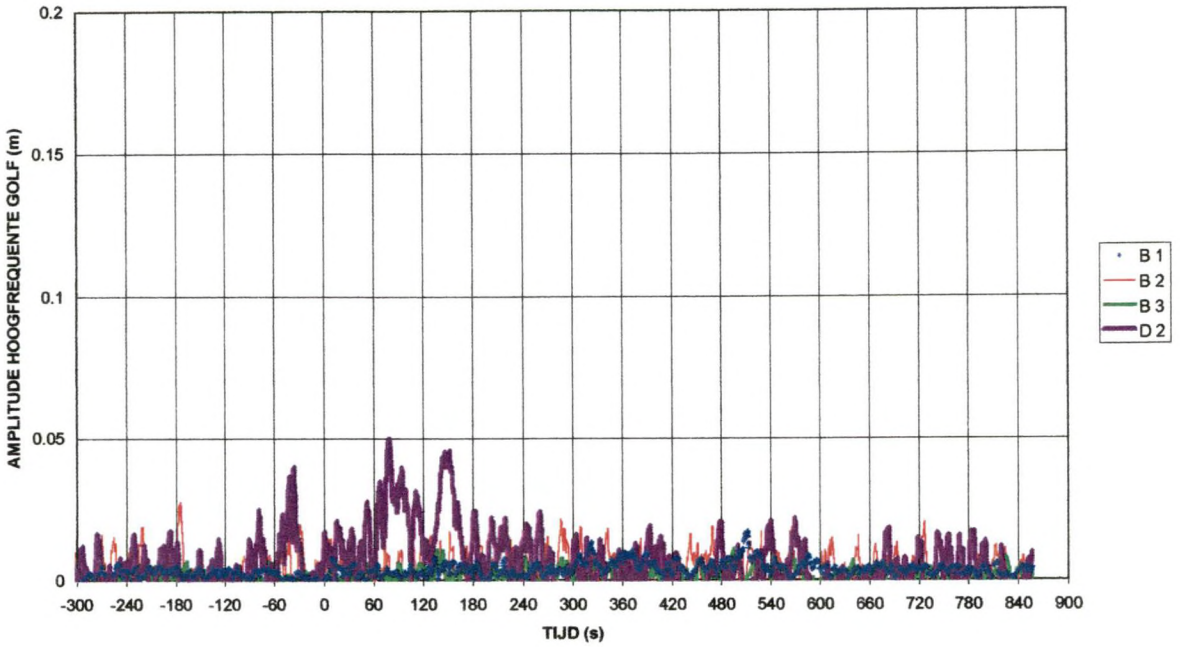
HNI02

LAAG WATER - DWARSAFSTAND 1 - SNELHEID 15 KNOOP - OPWAARTS

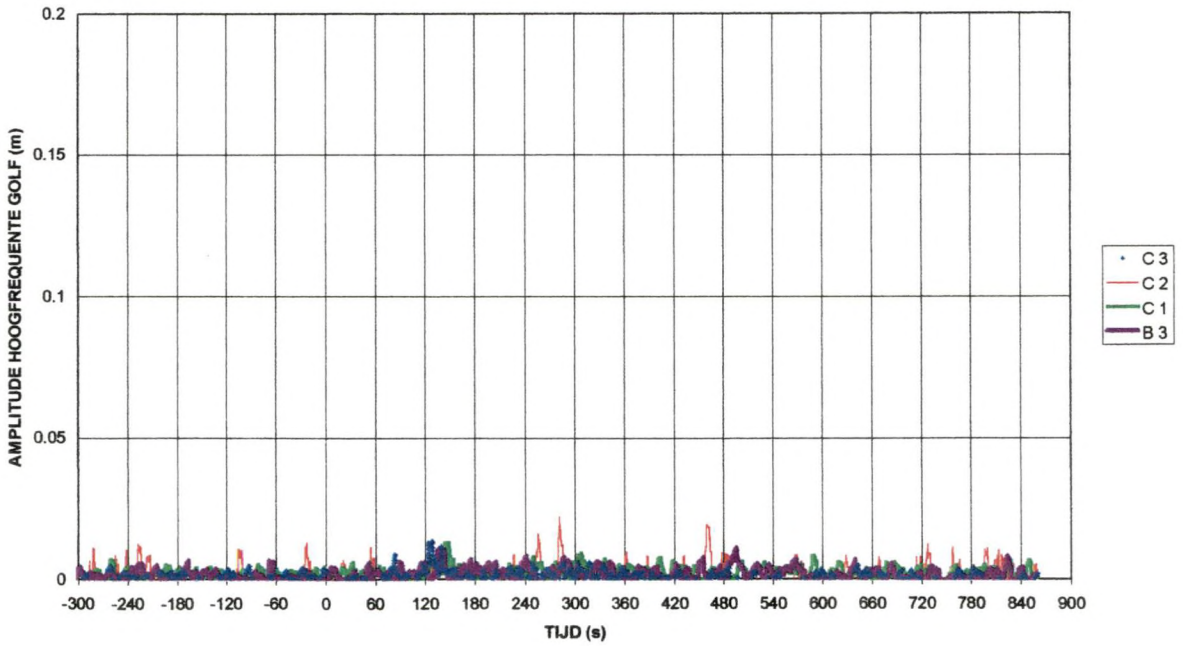


HNI02 (vervolg)

LAAG WATER - DWARSAFSTAND 1 - SNELHEID 15 KNOOP - OPWAARTS

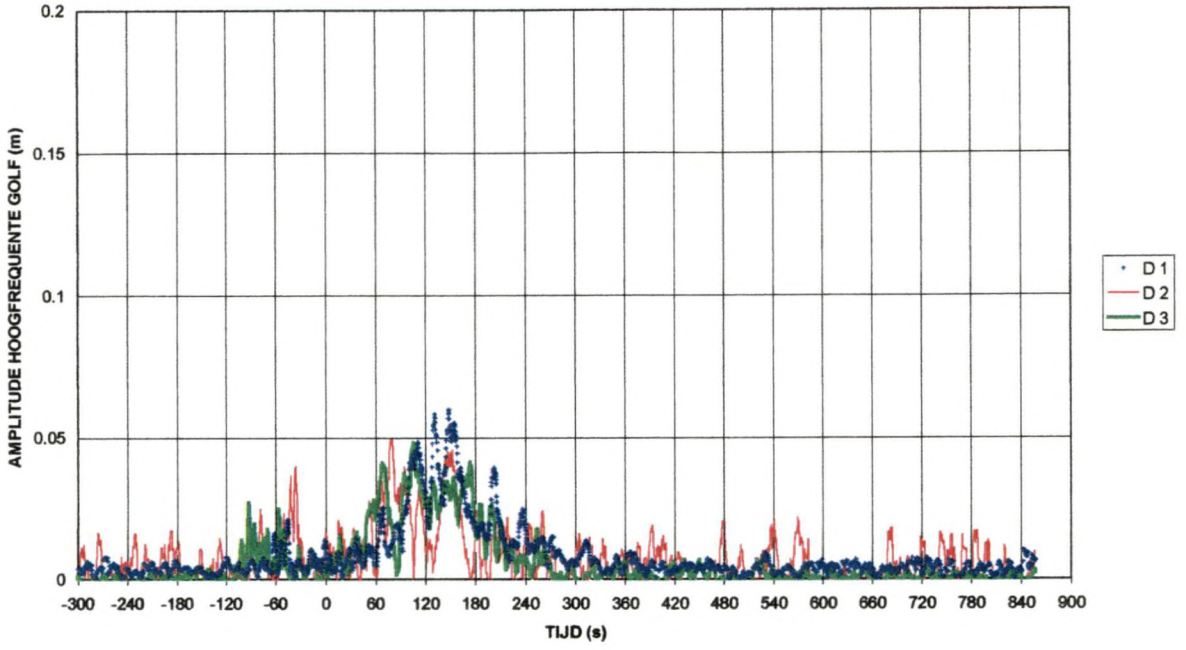


LAAG WATER - DWARSAFSTAND 1 - SNELHEID 15 KNOOP - OPWAARTS

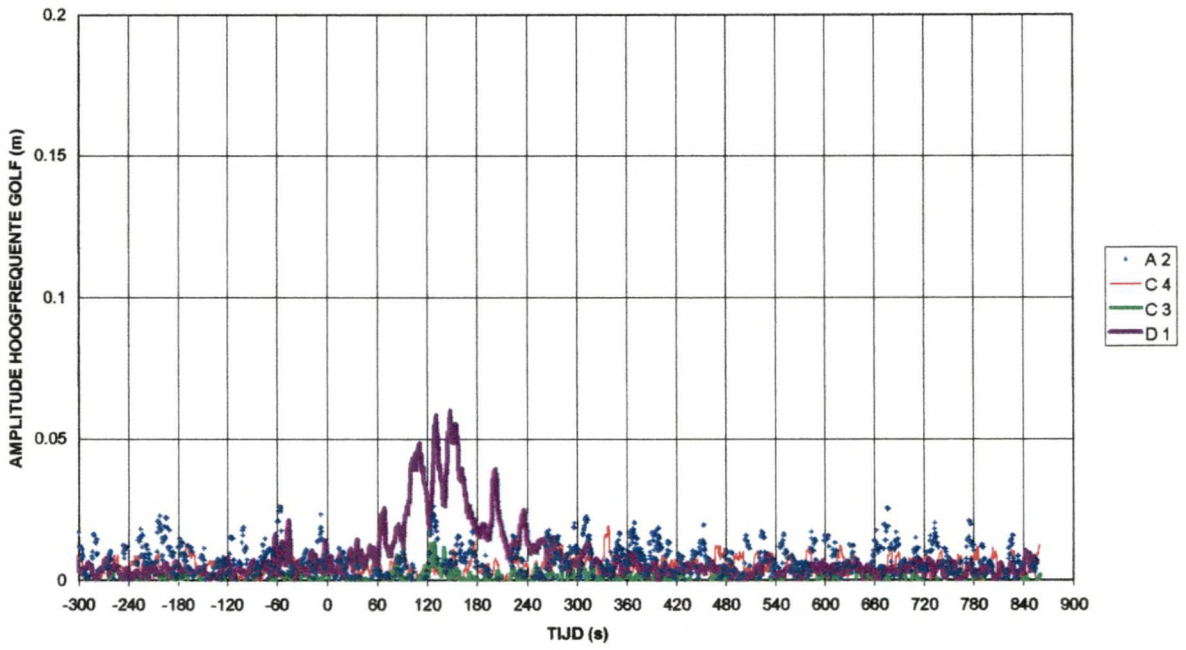


HNI02 (vervolg)

LAAG WATER - DWARSAFSTAND 1 - SNELHEID 15 KNOOP - OPWAARTS

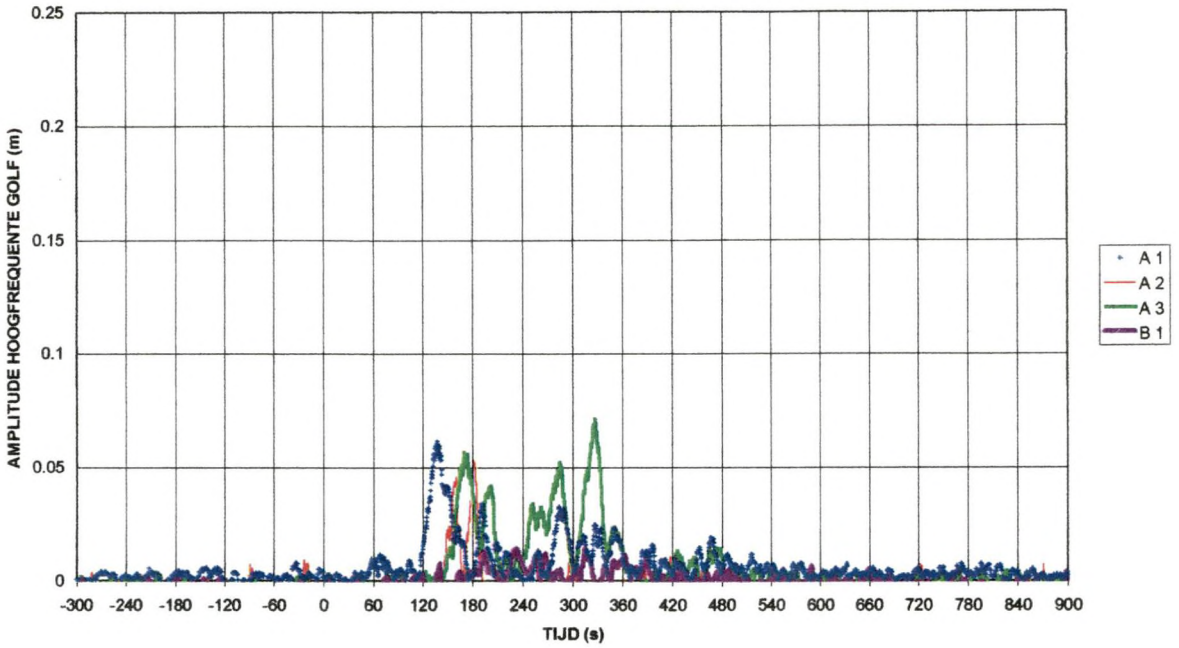


LAAG WATER - DWARSAFSTAND 1 - SNELHEID 15 KNOOP - OPWAARTS

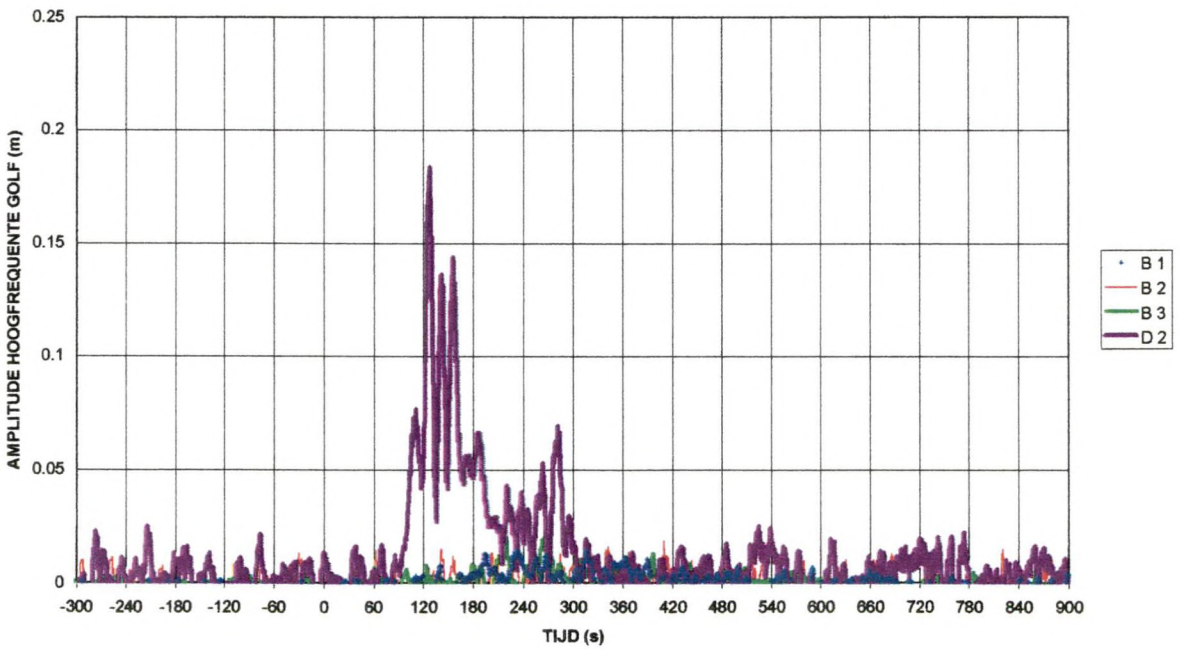


HNI07

LAAG WATER - DWARSAFSTAND 1 - SNELHEID 18 KNOOP - AFWAARTS

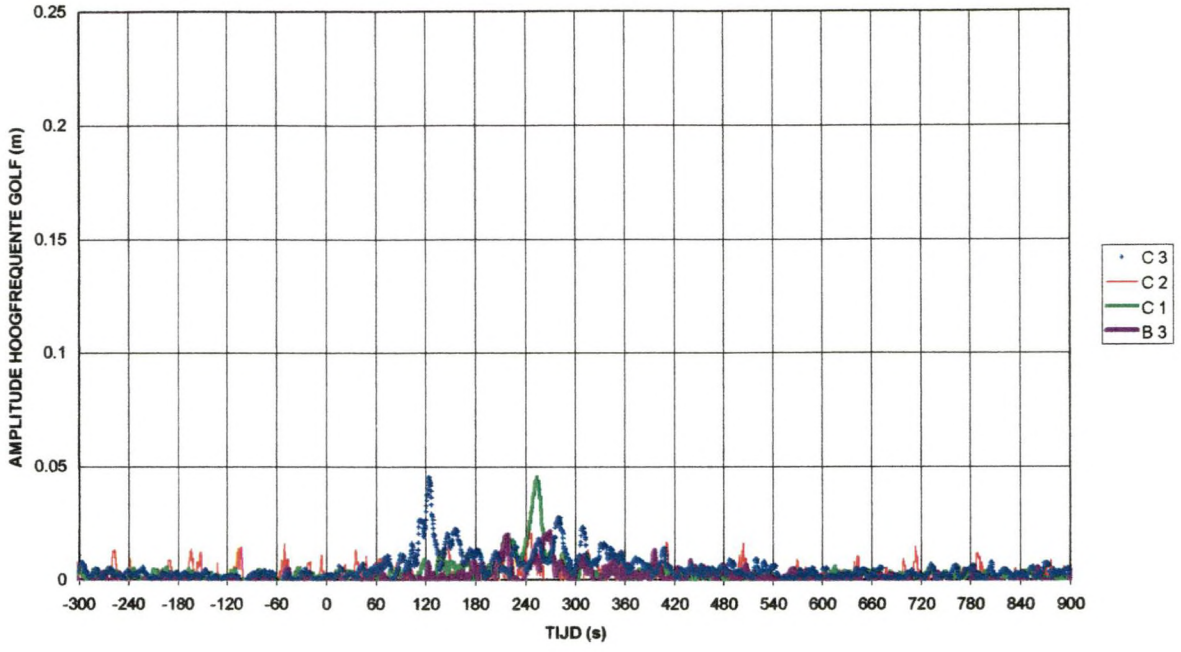


LAAG WATER - DWARSAFSTAND 1 - SNELHEID 18 KNOOP - AFWAARTS

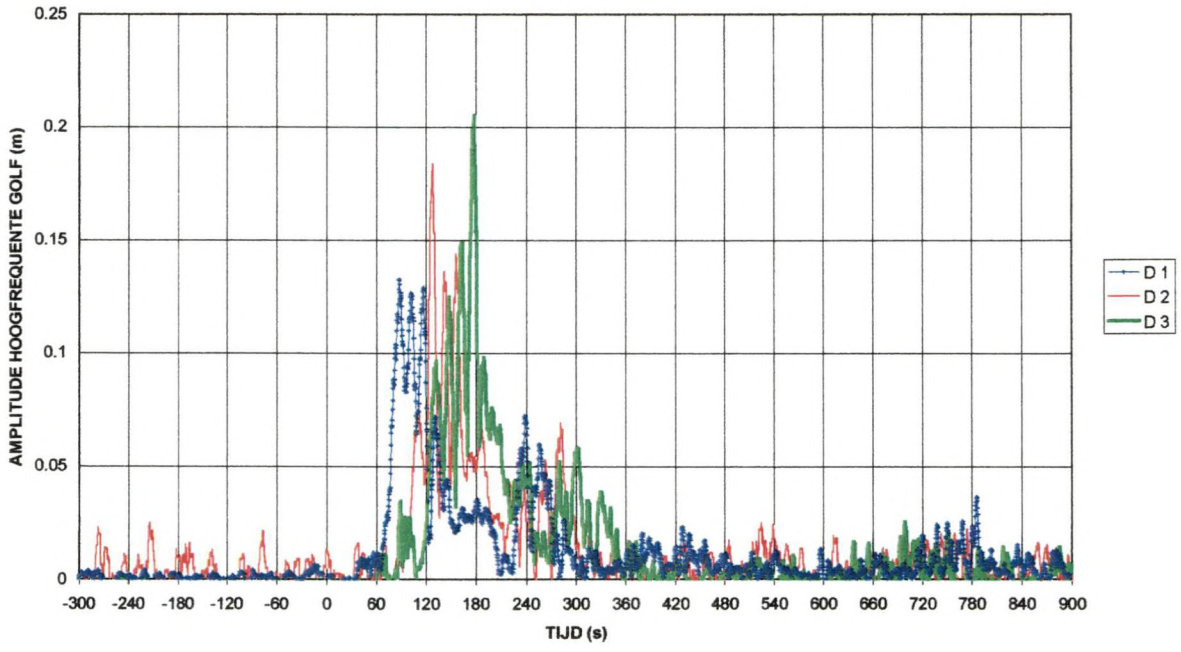


HNI07 (vervolg)

LAAG WATER - DWARSAFSTAND 1 - SNELHEID 18 KNOOP - AFWAARTS

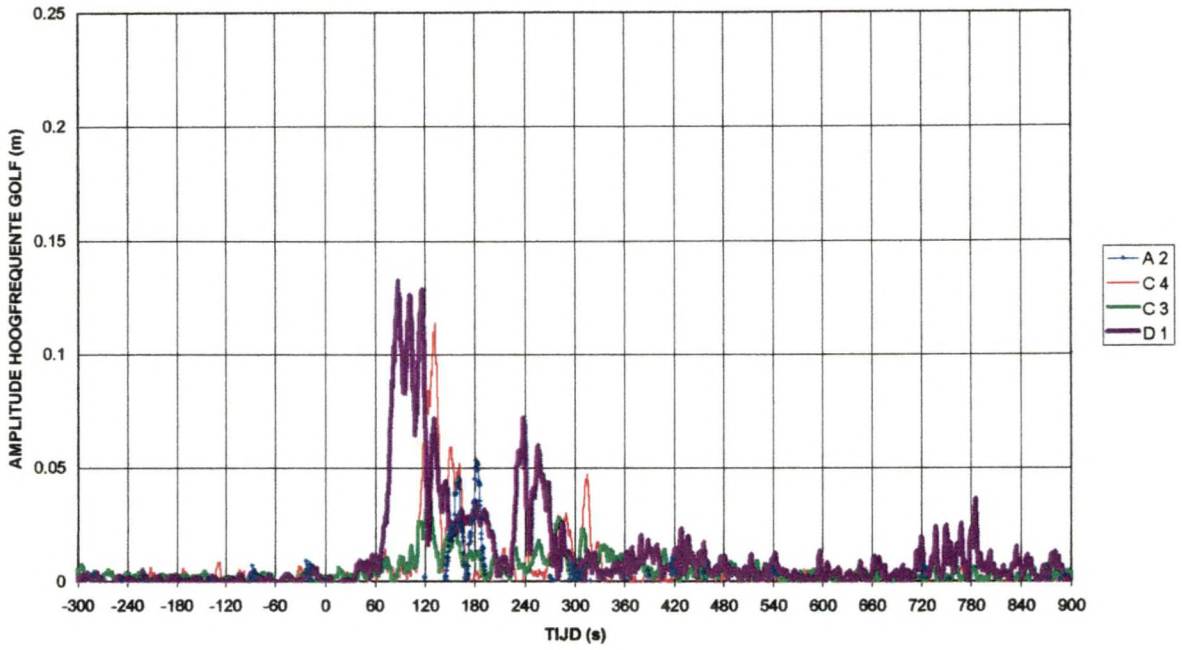


LAAG WATER - DWARSAFSTAND 1 - SNELHEID 15 KNOOP - AFWAARTS



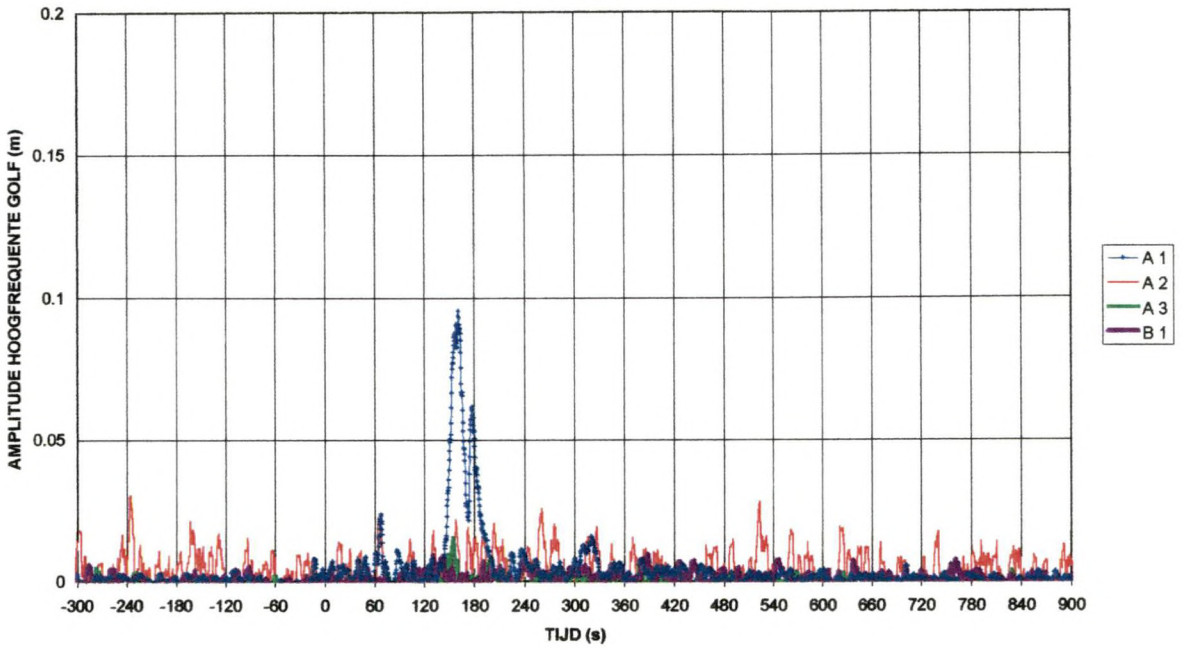
HNI07 (vervolg)

LAAG WATER - DWARSAFSTAND 1 - SNELHEID 18 KNOOP - AFWAARTS

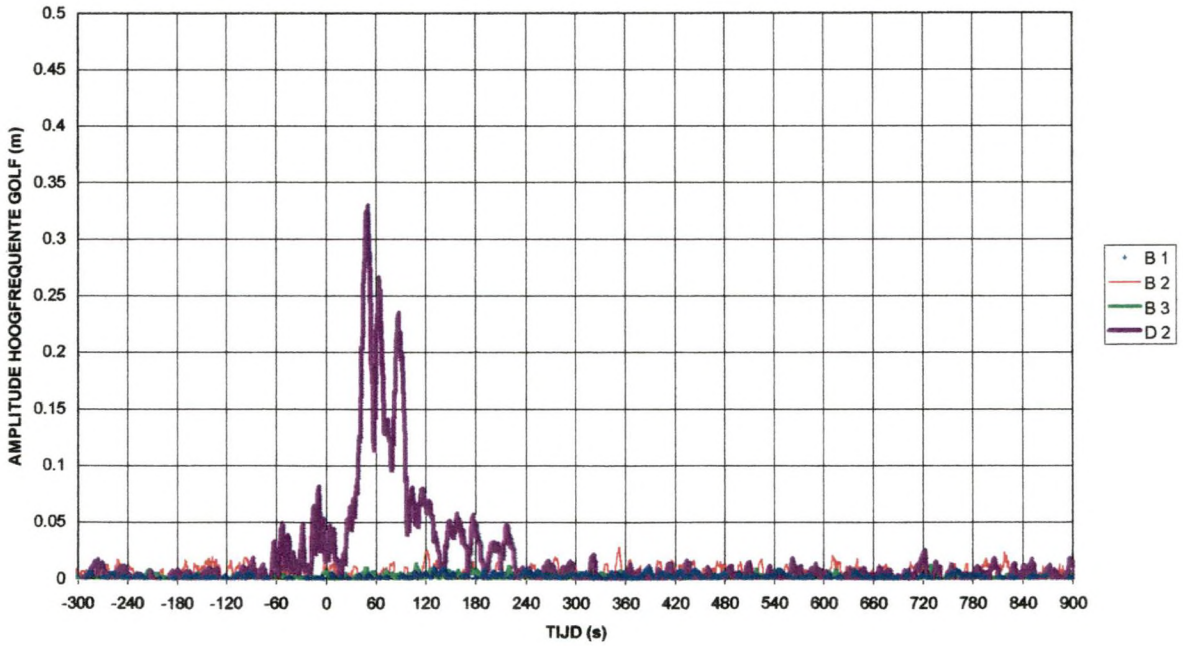


HNI08

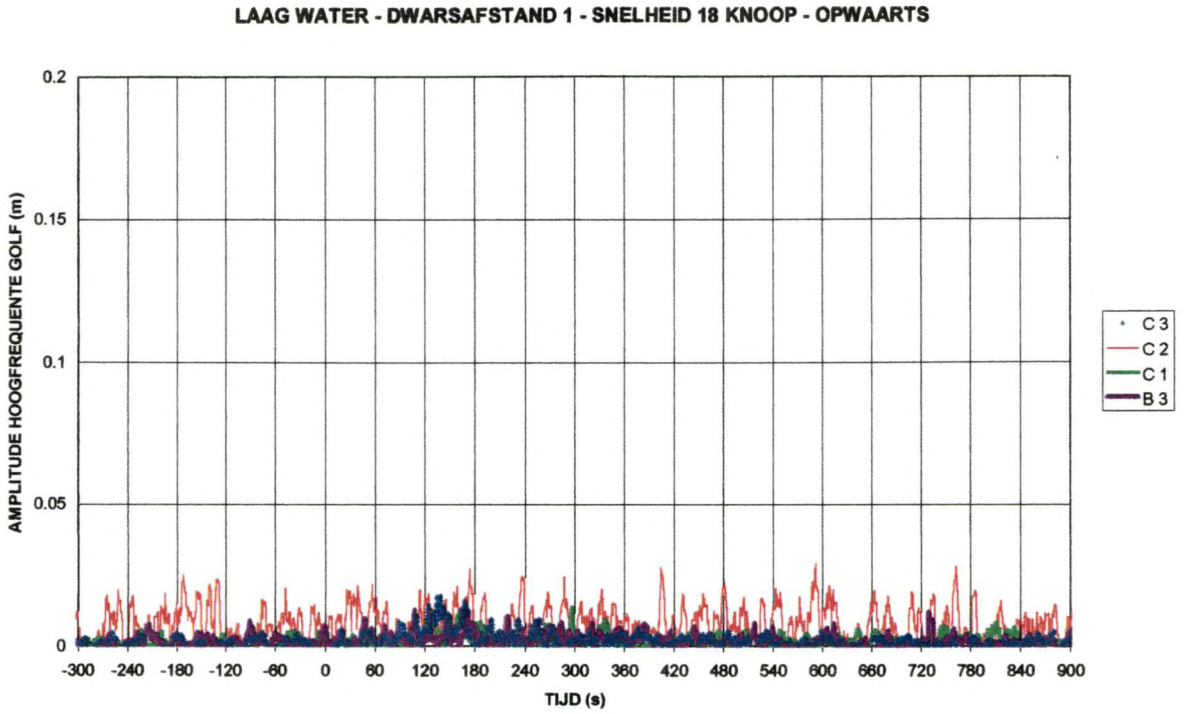
LAAG WATER - DWARSAFSTAND 1 - SNELHEID 18 KNOOP - OPWAARTS

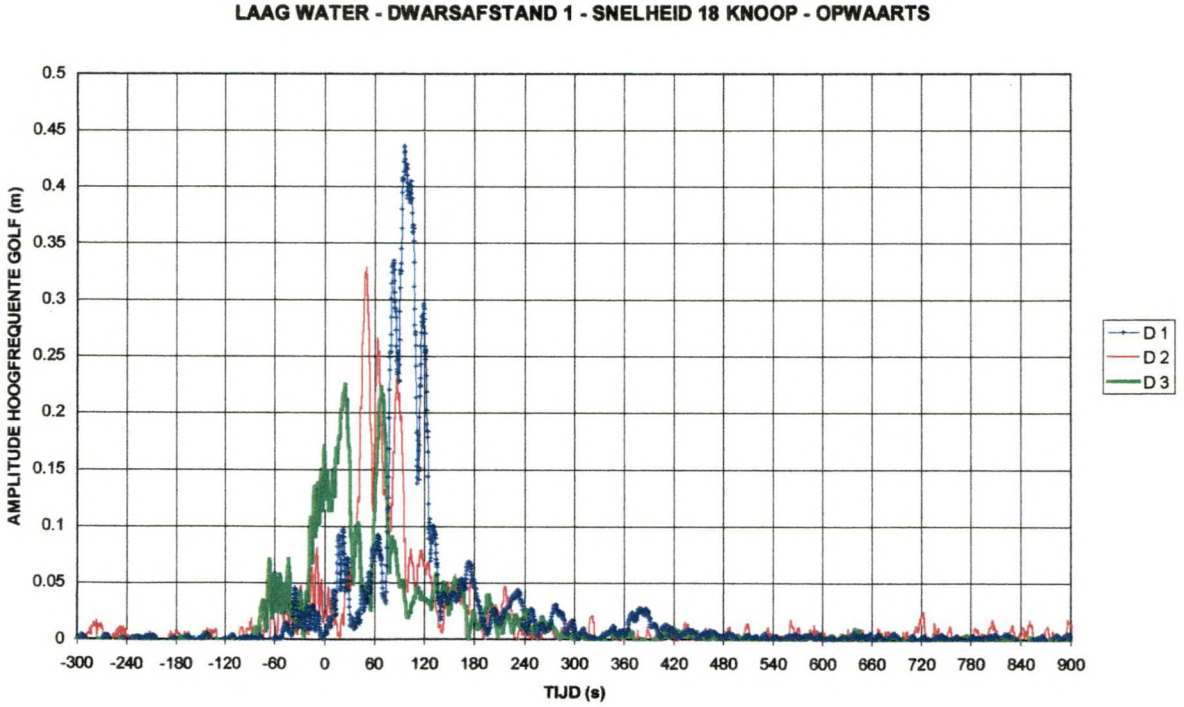


LAAG WATER - DWARSAFSTAND 1 - SNELHEID 18 KNOOP - OPWAARTS



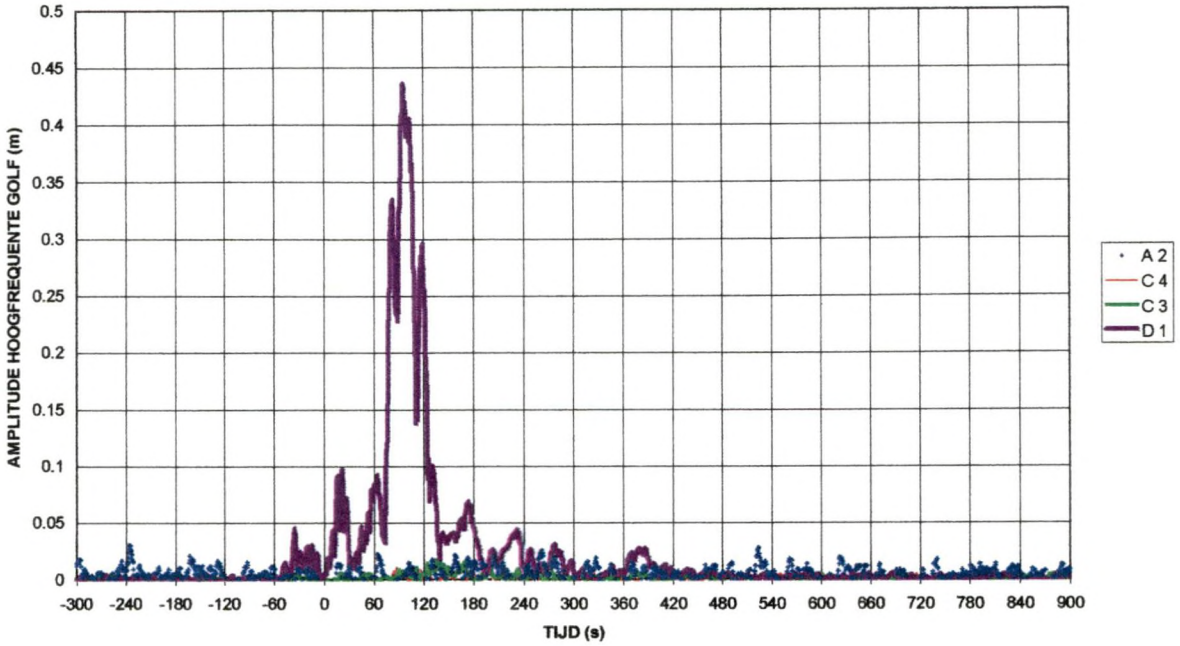
HNI08 (vervolg)





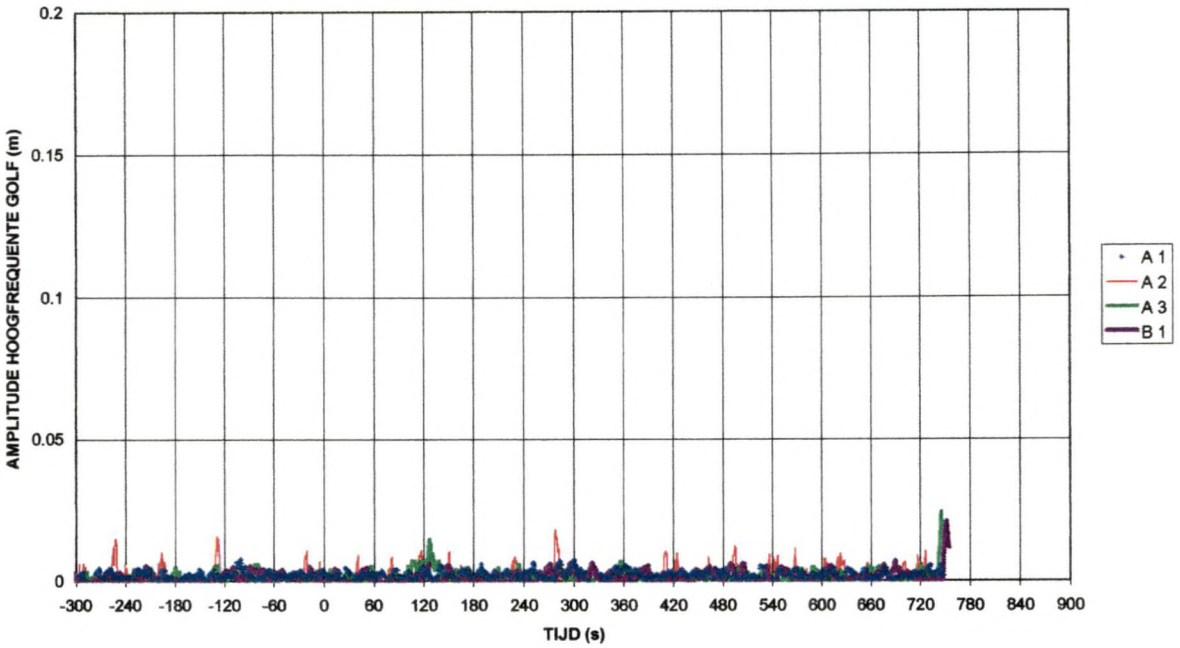
HNI08 (vervolg)

LAAG WATER - DWARSAFSTAND 1 - SNELHEID 18 KNOOP - OPWAARTS

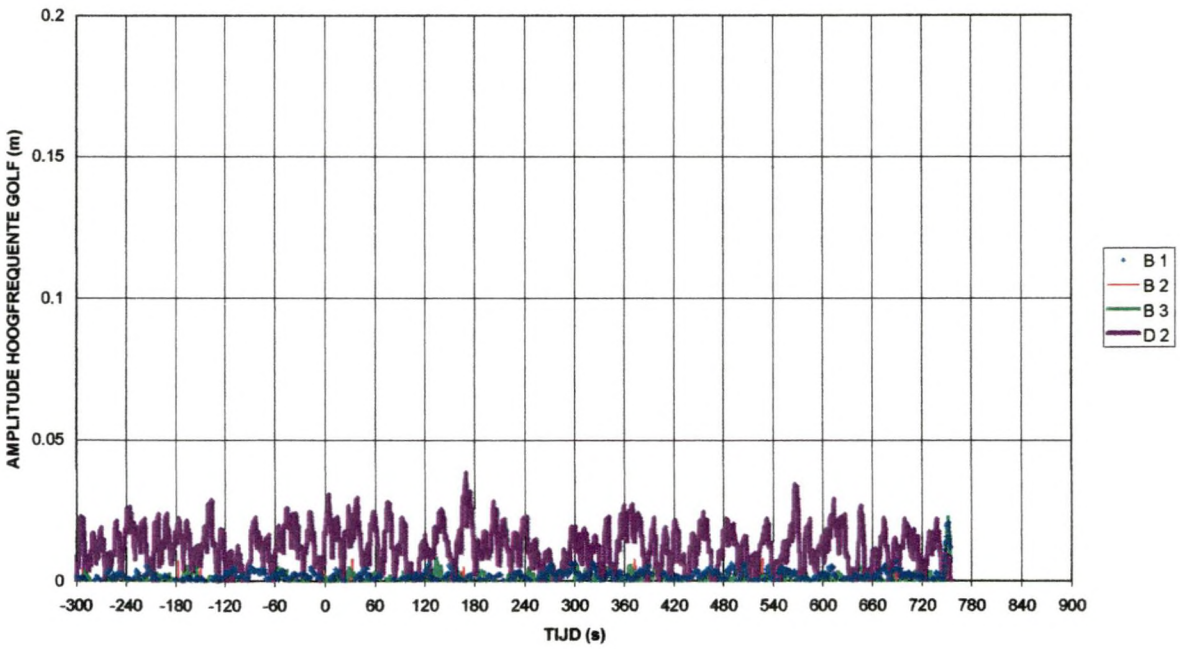


HNI09

LAAG WATER - DWARSAFSTAND 1 - SNELHEID 12 KNOOP - AFWAARTS

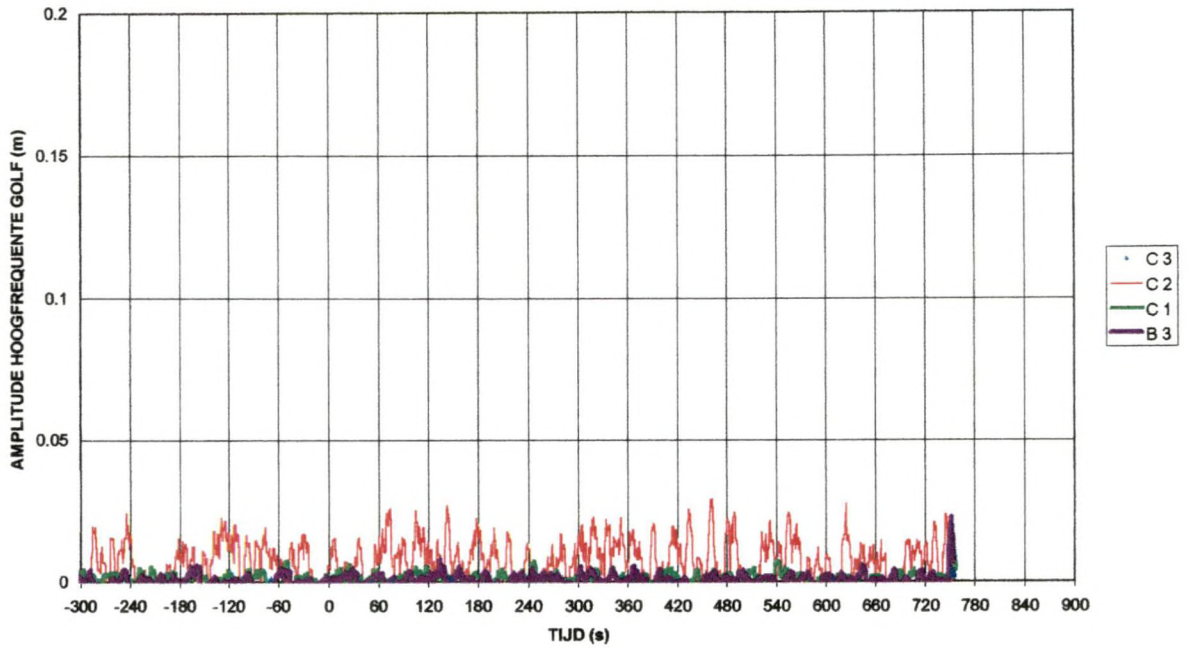


LAAG WATER - DWARSAFSTAND 1 - SNELHEID 12 KNOOP - AFWAARTS

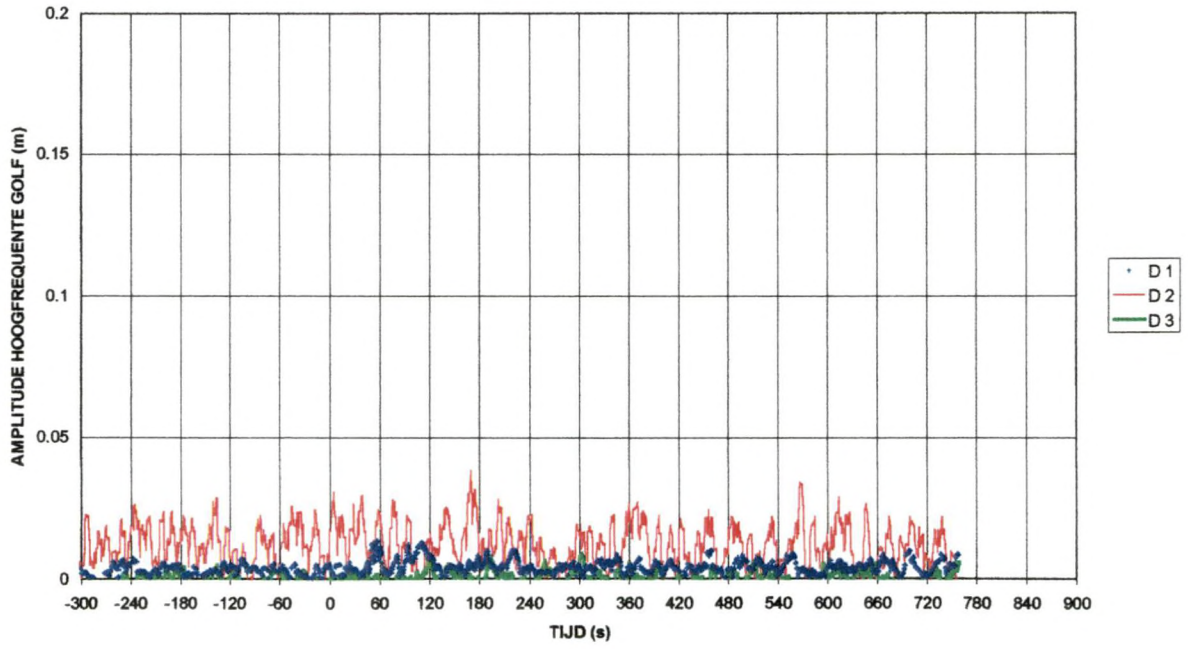


HNI09 (vervolg)

LAAG WATER - DWARSAFSTAND 1 - SNELHEID 12 KNOOP - AFWAARTS

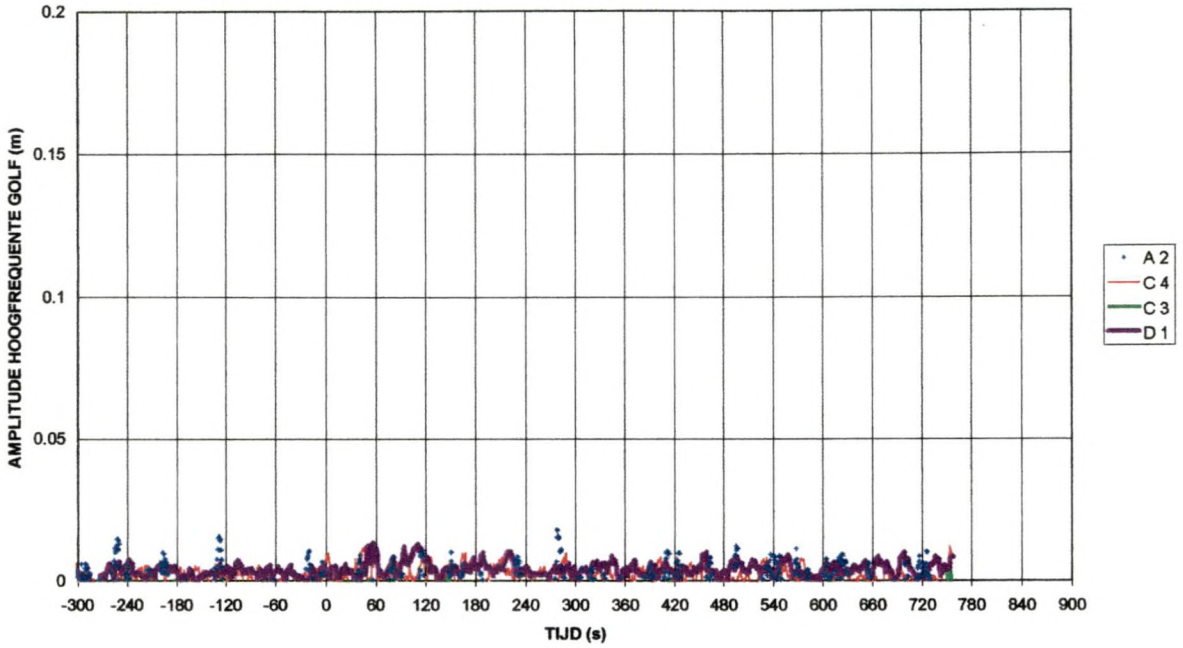


LAAG WATER - DWARSAFSTAND 1 - SNELHEID 12 KNOOP - AFWAARTS

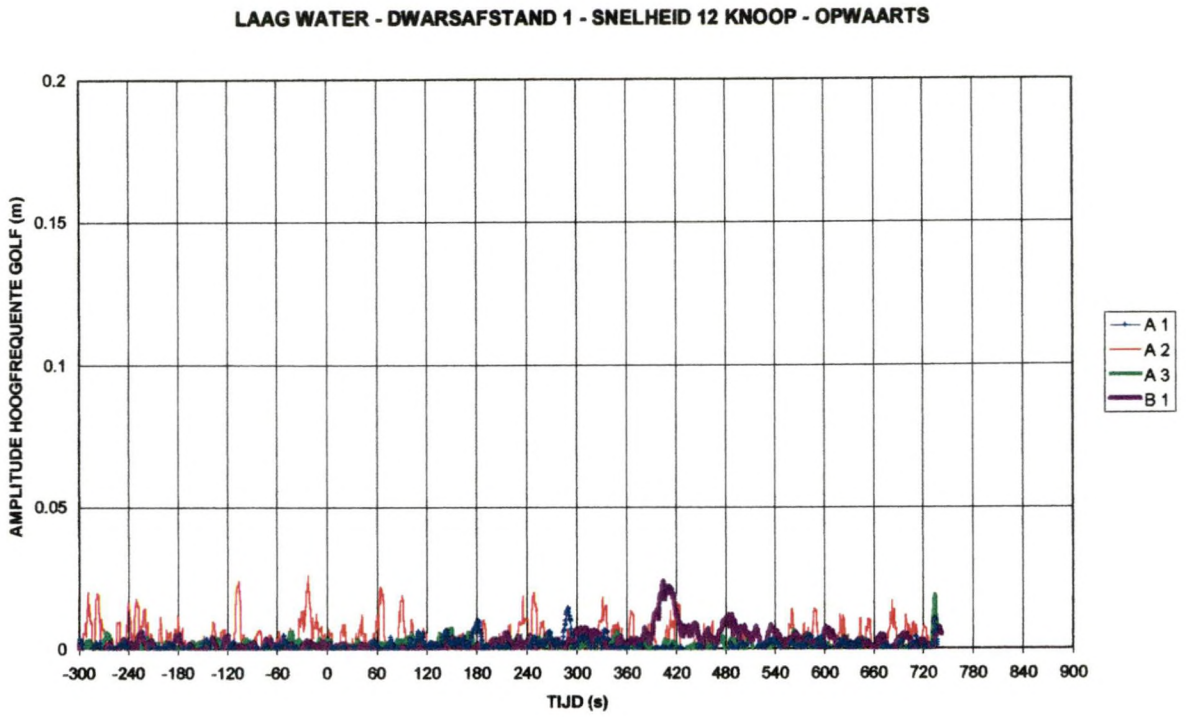


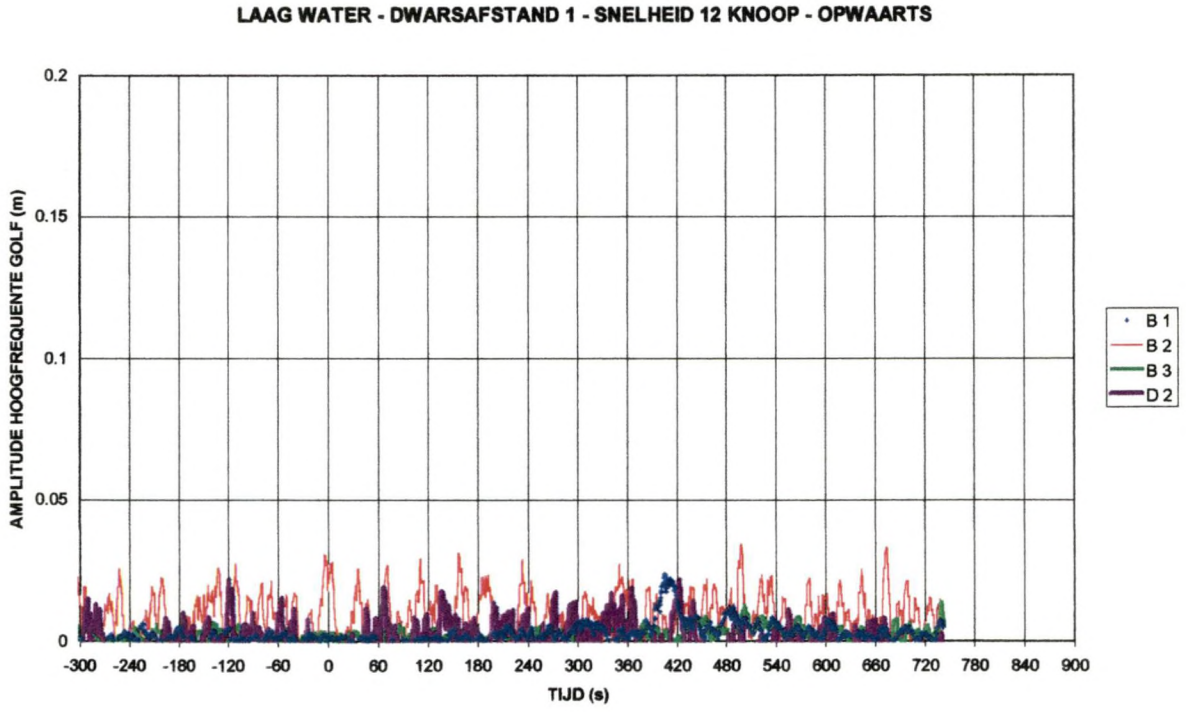
HNI09 (vervolg)

LAAG WATER - DWARSAFSTAND 1 - SNELHEID 12 KNOOP - AFWAARTS



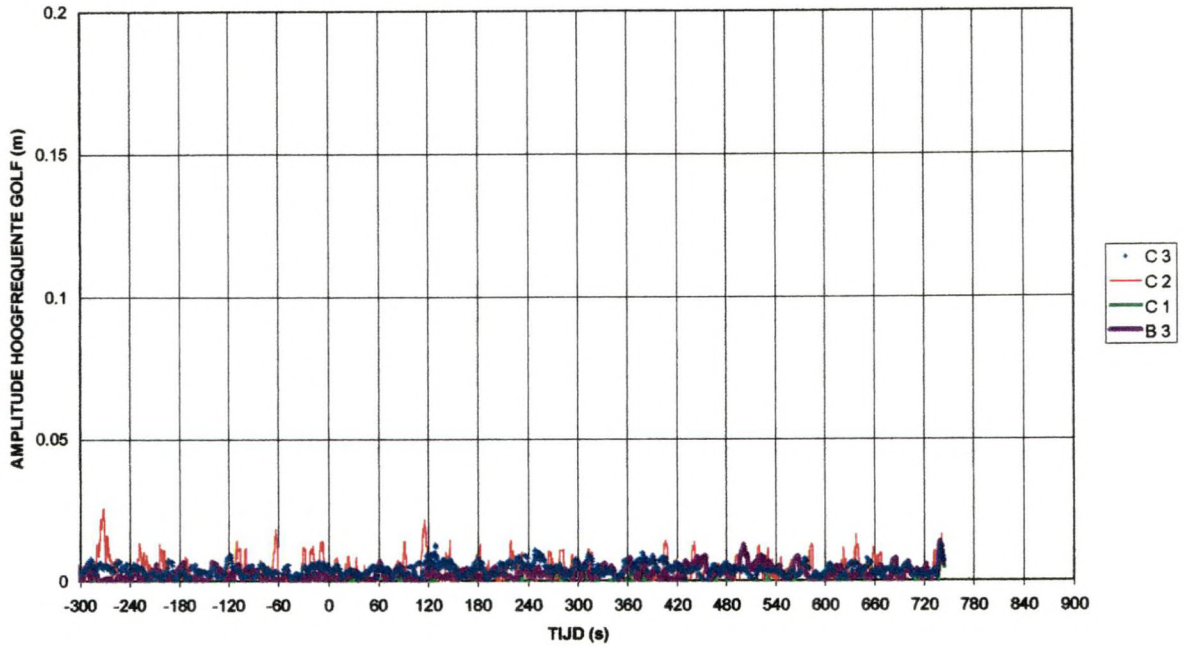
HNI10


LAAG WATER - DWARSAFSTAND 1 - SNELHEID 12 KNOOP - OPWAARTS
AMPLITUDE HOOGFREQUENTE GOLF (m)
0.2
0.15
0.1
0.05
0
-300 -240 -180 -120 -60 0 60 120 180 240 300 360 420 480 540 600 660 720 780 840 900
TIJD (s)
A 1
A 2
A 3
B 1

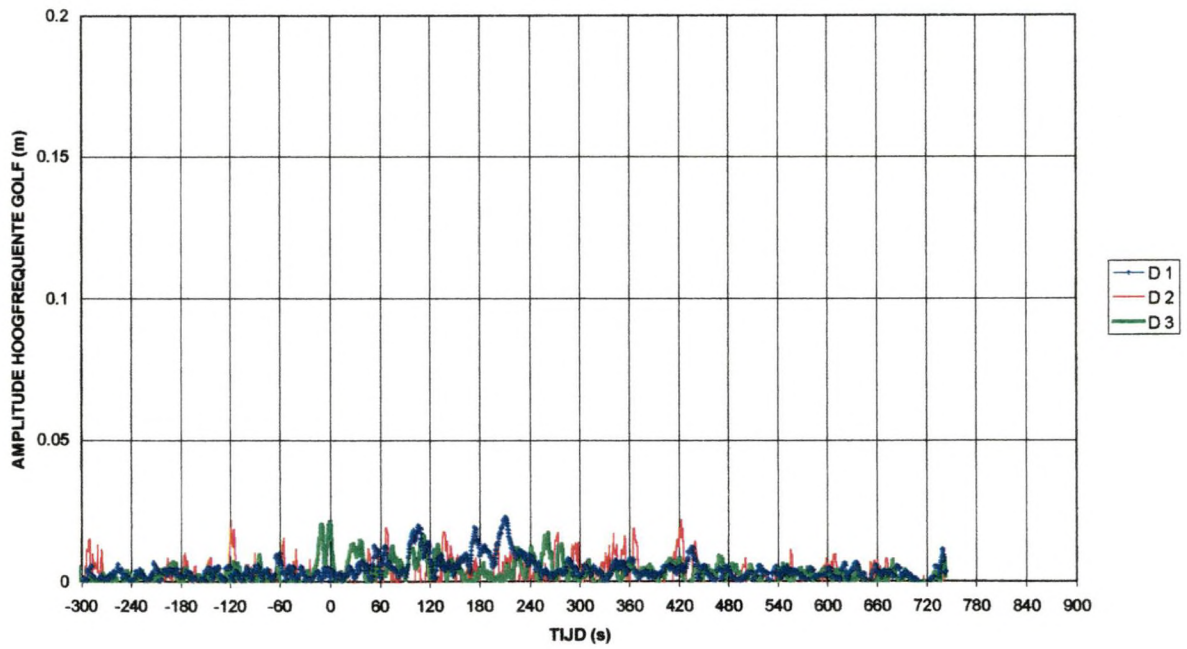

LAAG WATER - DWARSAFSTAND 1 - SNELHEID 12 KNOOP - OPWAARTS
AMPLITUDE HOOGFREQUENTE GOLF (m)
0.2
0.15
0.1
0.05
0
-300 -240 -180 -120 -60 0 60 120 180 240 300 360 420 480 540 600 660 720 780 840 900
TIJD (s)
B 1
B 2
B 3
D 2

HNI10 (vervolg)

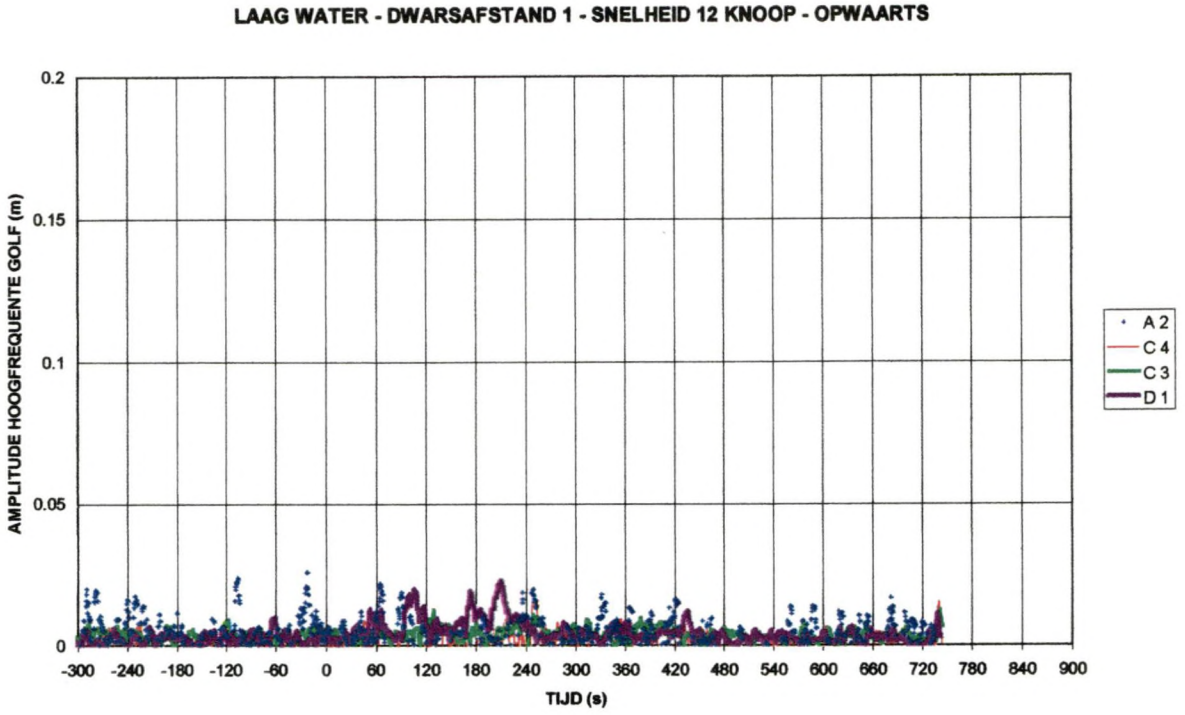
LAAG WATER - DWARSAFSTAND 1 - SNELHEID 12 KNOOP - OPWAARTS



LAAG WATER - DWARSAFSTAND 1 - SNELHEID 12 KNOOP - OPWAARTS

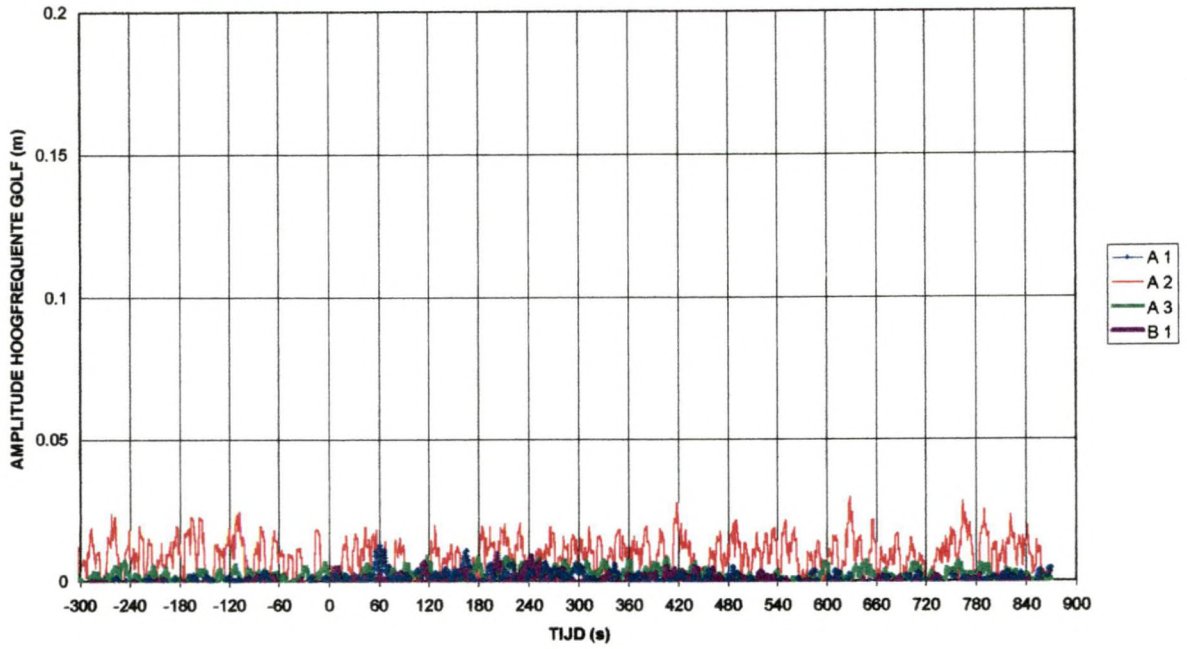


HNI10 (vervolg)

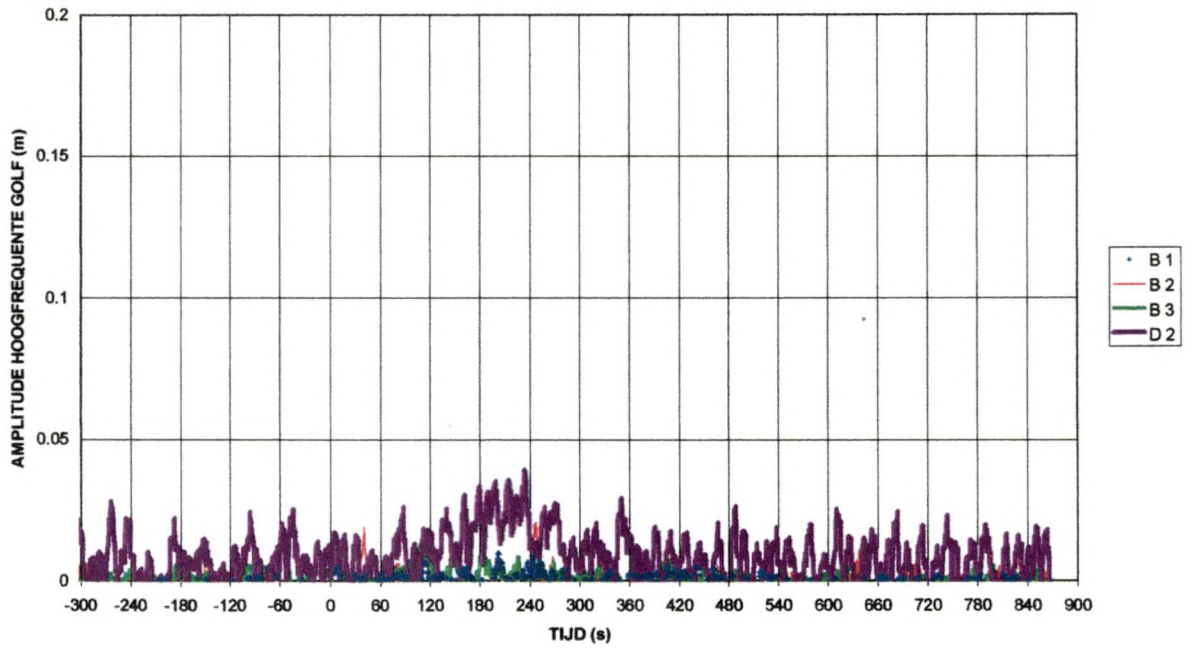


HNI04

HOOG WATER - DWARSAFSTAND 1 - SNELHEID 15 KNOOP - AFWAARTS

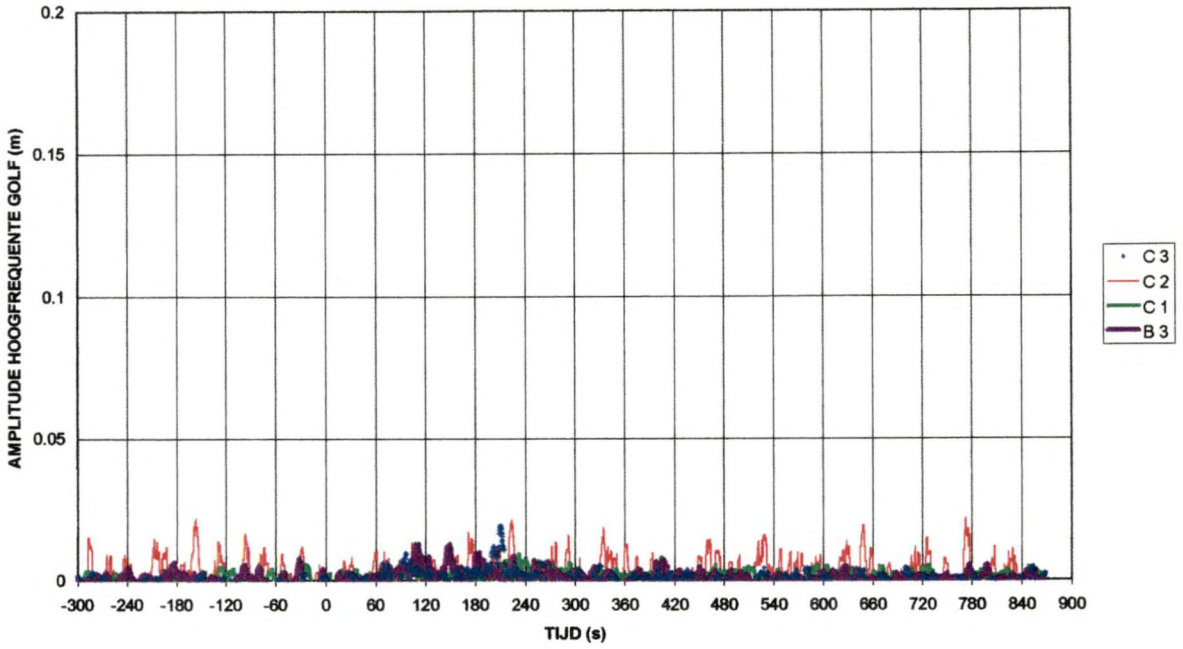


HOOG WATER - DWARSAFSTAND 1 - SNELHEID 15 KNOOP - AFWAARTS

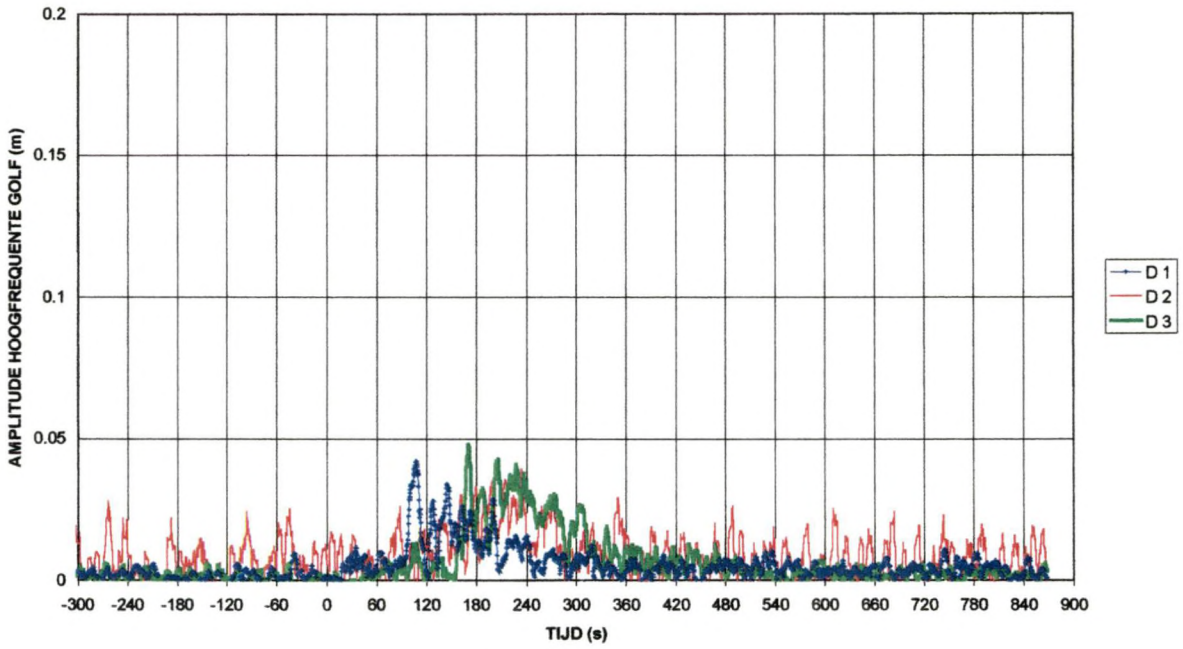


HNI04 (vervolg)

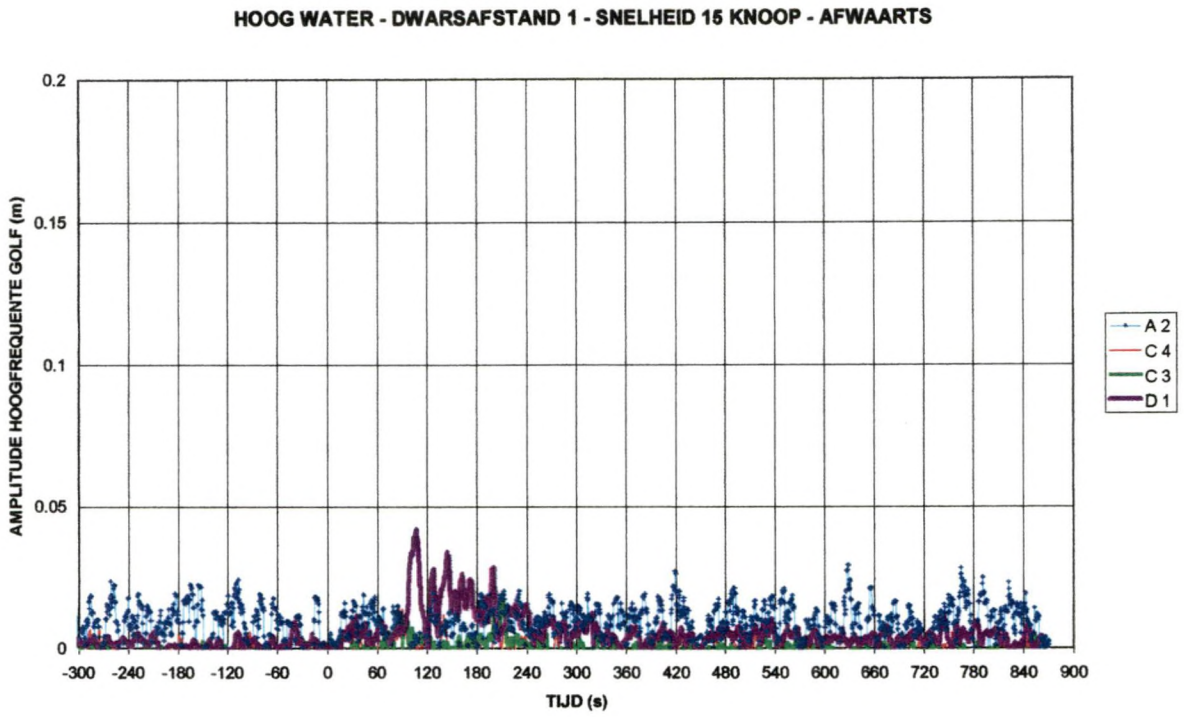
HOOG WATER - DWARSAFSTAND 1 - SNELHEID 15 KNOOP - AFWAARTS



HOOG WATER - DWARSAFSTAND 1 - SNELHEID 15 KNOOP - AFWAARTS

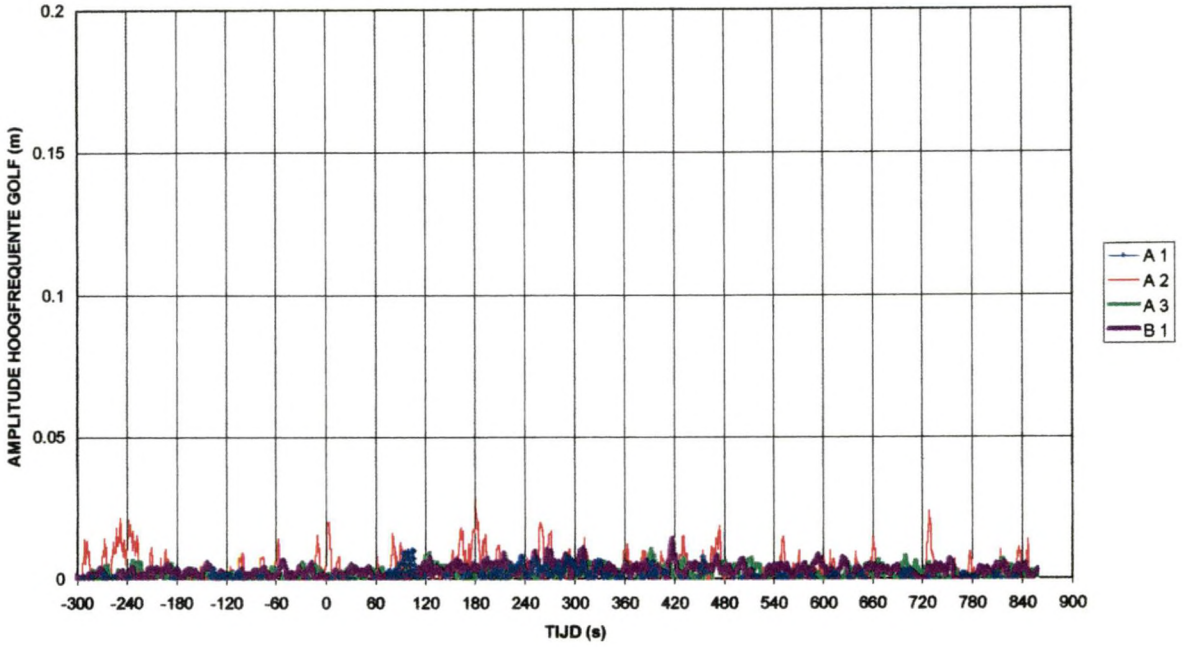


HNI04 (vervolg)

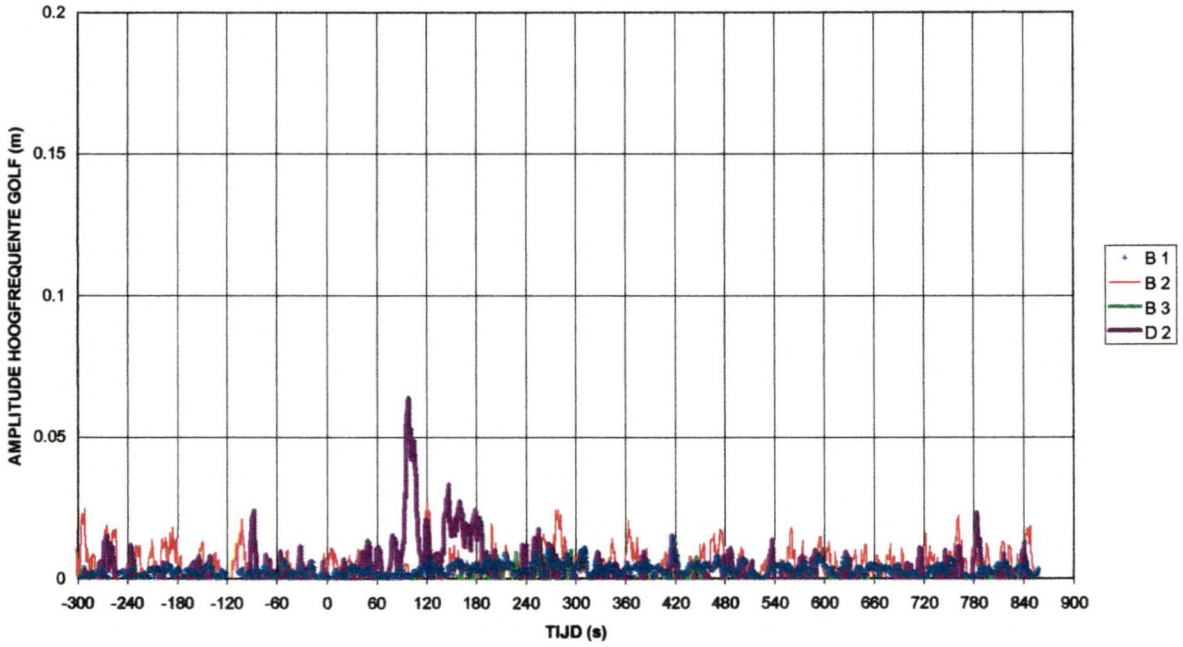


HNI03

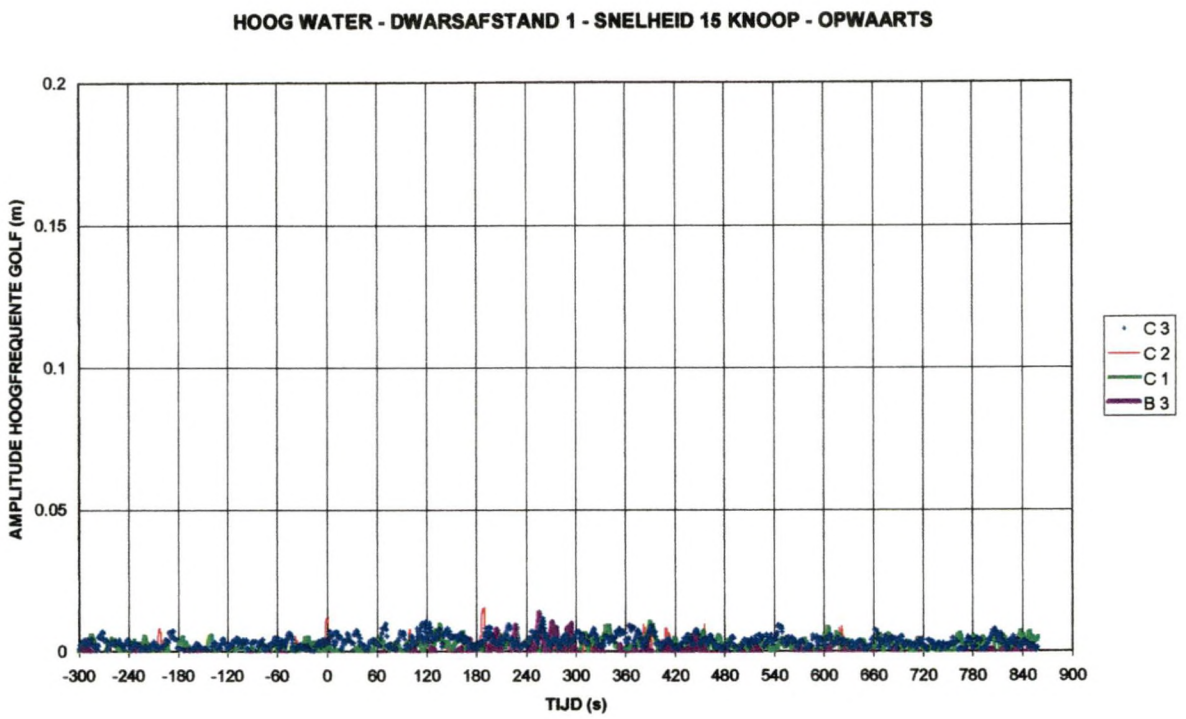
HOOG WATER - DWARSAFSTAND 1 - SNELHEID 15 KNOOP - OPWAARTS

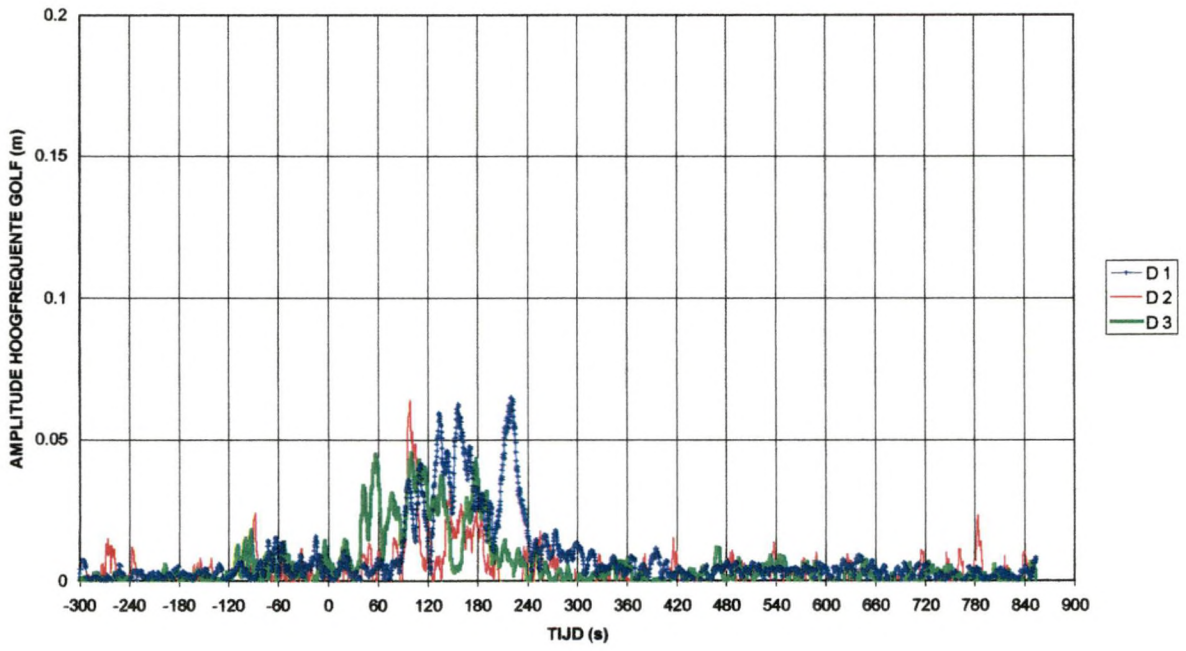


HOOG WATER - DWARSAFSTAND 1 - SNELHEID 15 KNOOP - OPWAARTS



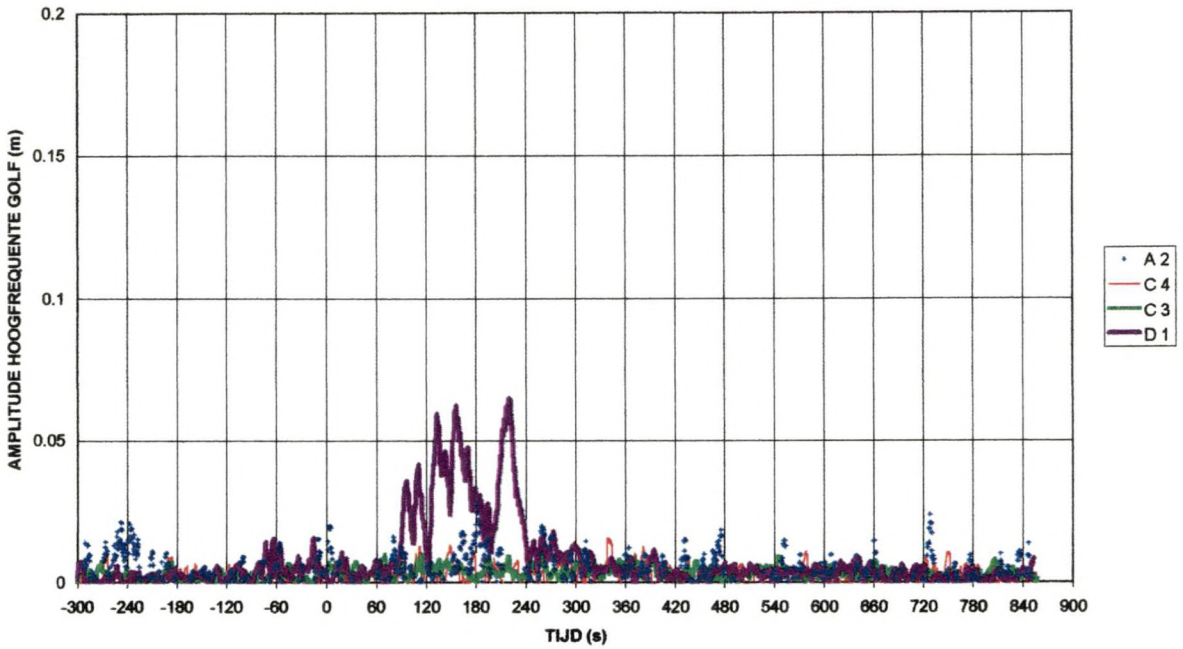
HNI03 (vervolg)





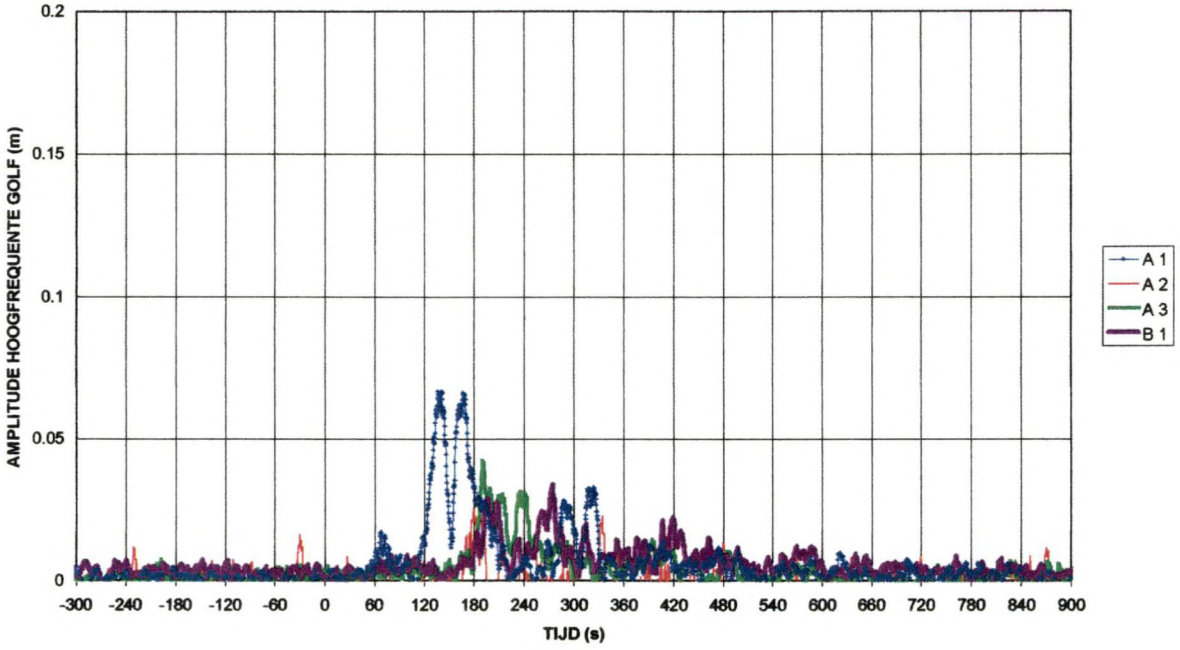
HNI03 (vervolg)

HOOG WATER - DWARSAFSTAND 1 - SNELHEID 15 KNOOP - OPWAARTS

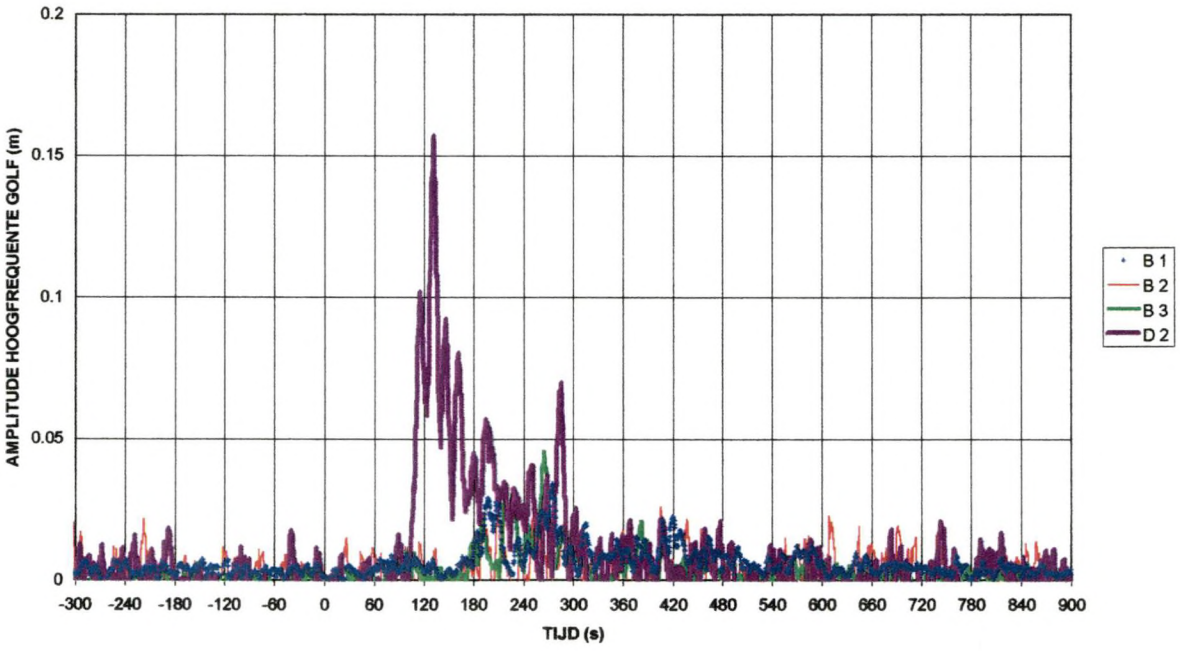


HNI05

HOOG WATER - DWARSAFSTAND 1 - SNELHEID 18 KNOOP - AFWAARTS

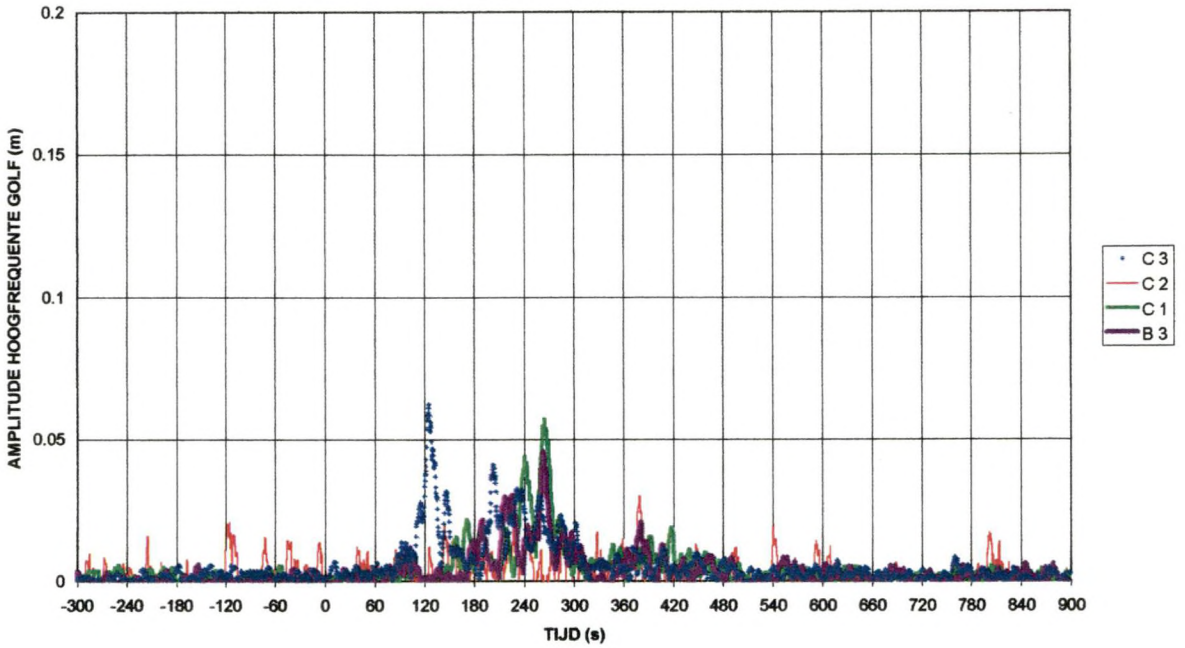


HOOG WATER - DWARSAFSTAND 1 - SNELHEID 18 KNOOP - AFWAARTS

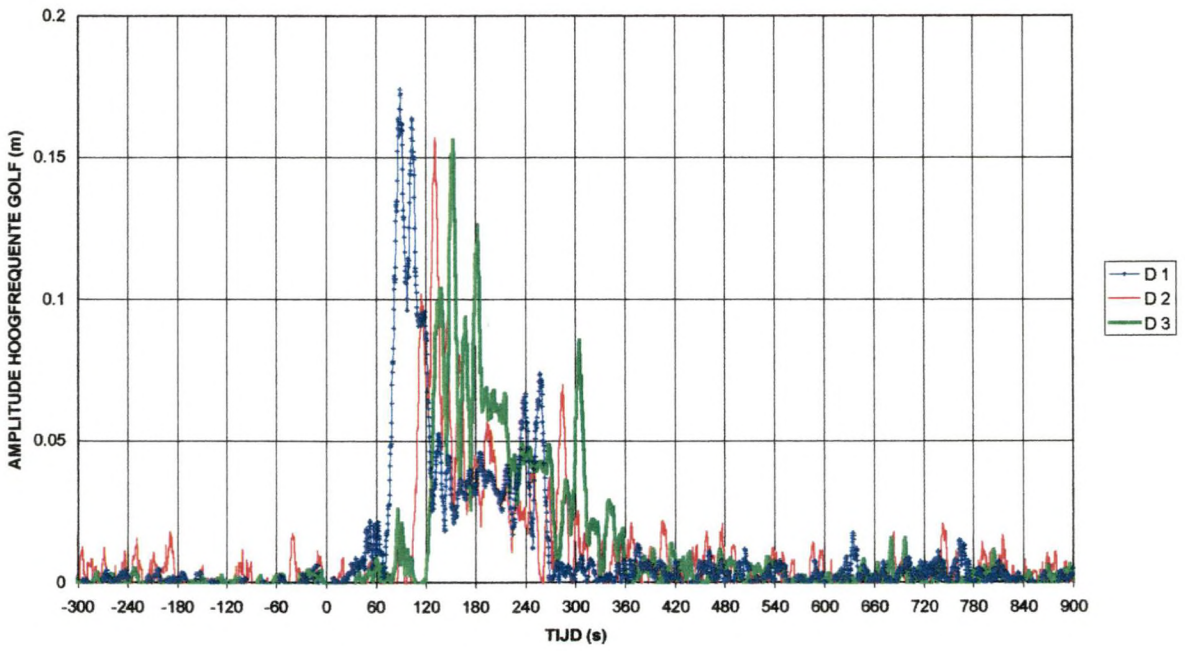


HNI05 (vervolg)

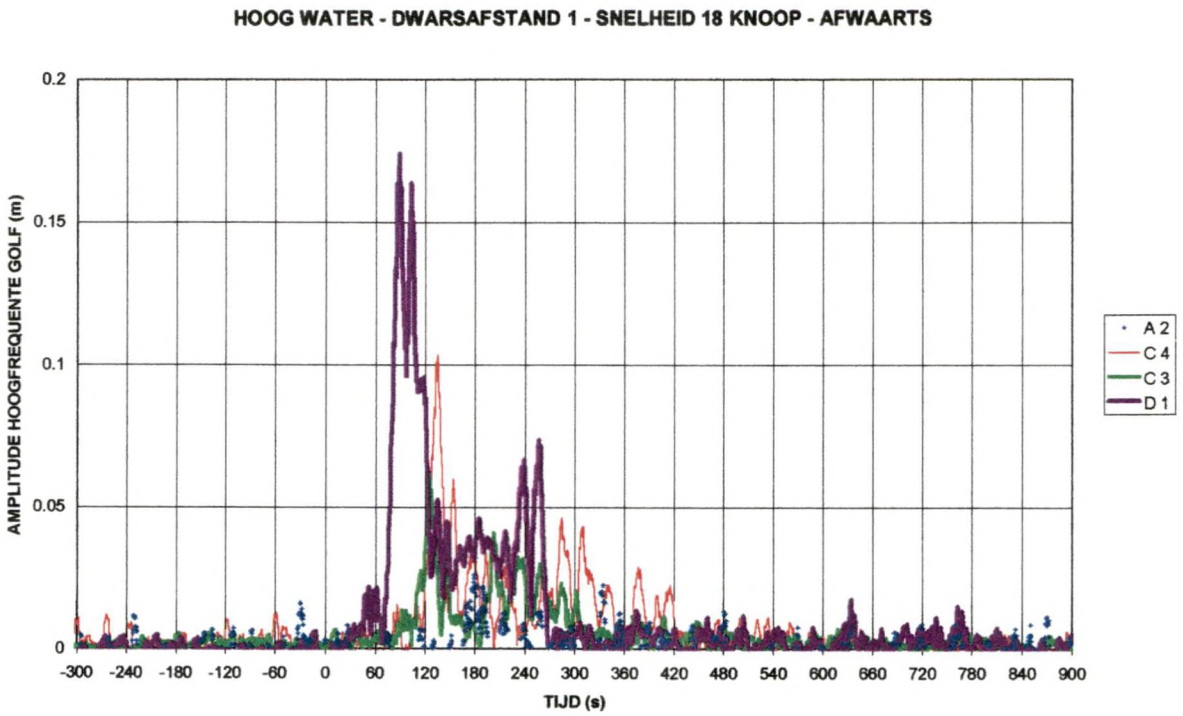
HOOG WATER - DWARSAFSTAND 1 - SNELHEID 18 KNOOP - AFWAARTS



HOOG WATER - DWARSAFSTAND 1 - SNELHEID 18 KNOOP - AFWAARTS

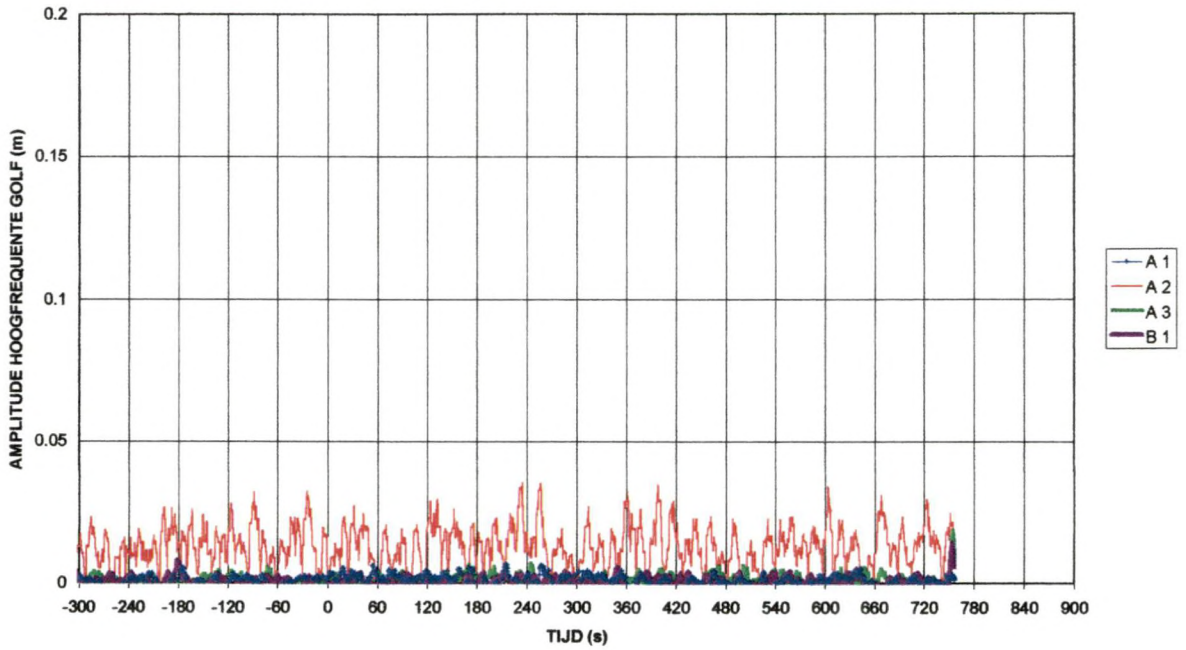


HNI05 (vervolg)

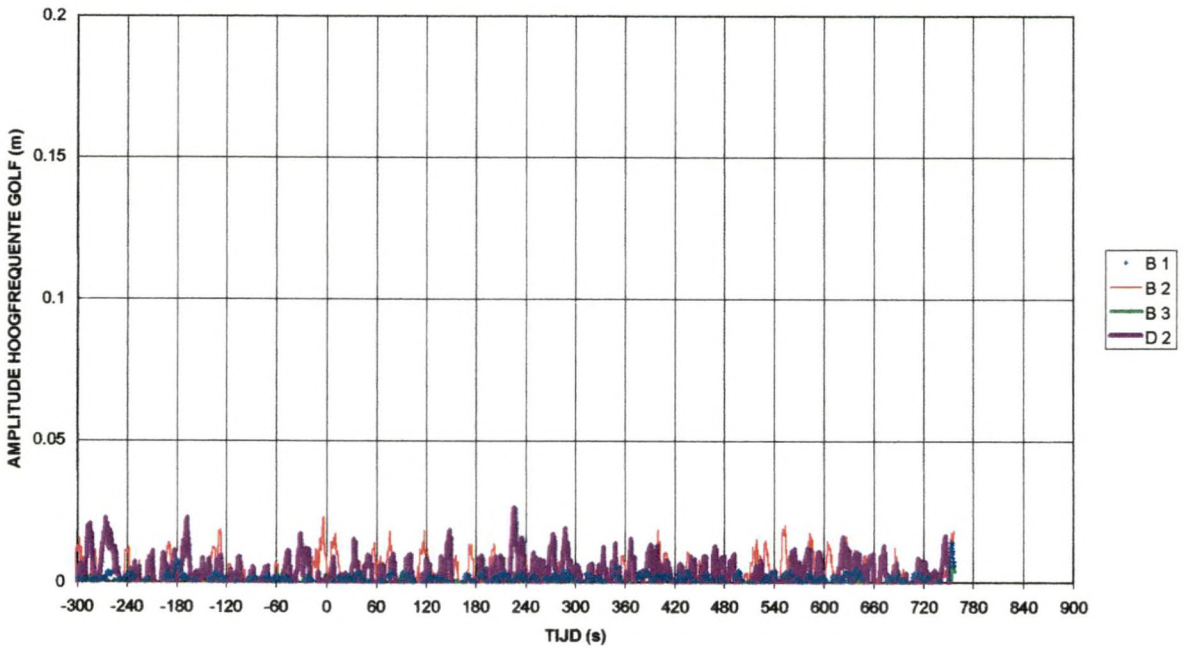


HNI11

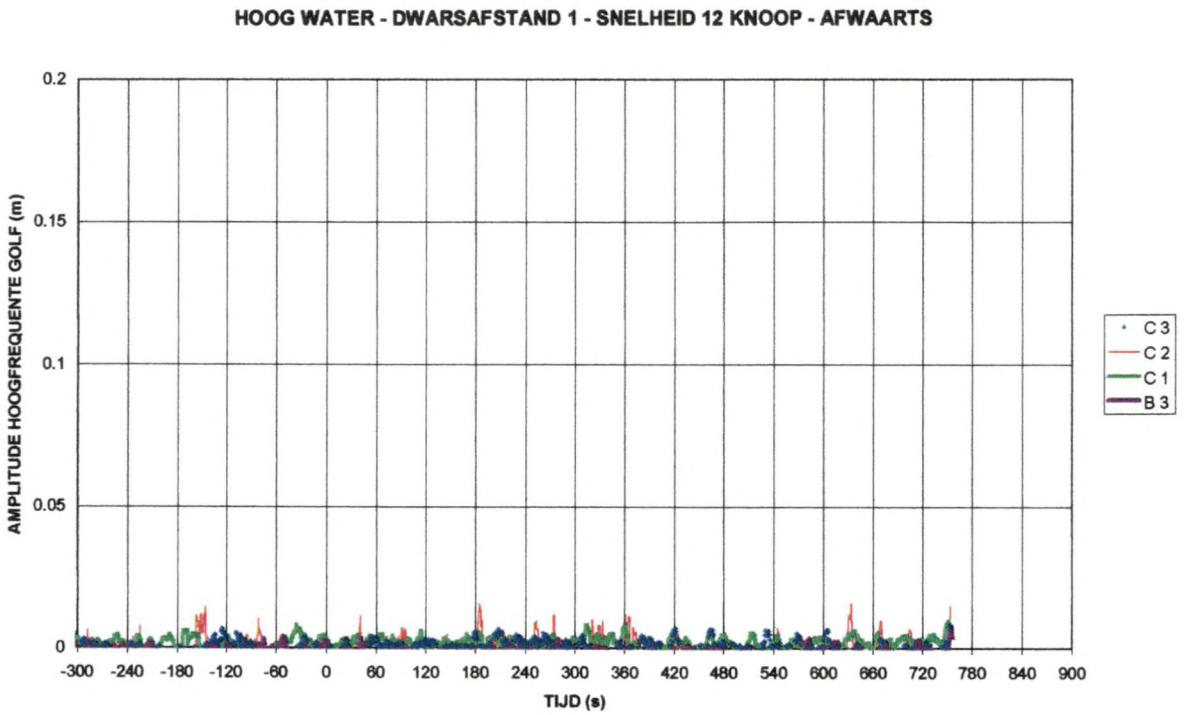
HOOG WATER - DWARSAFSTAND 1 - SNELHEID 12 KNOOP - AFWAARTS

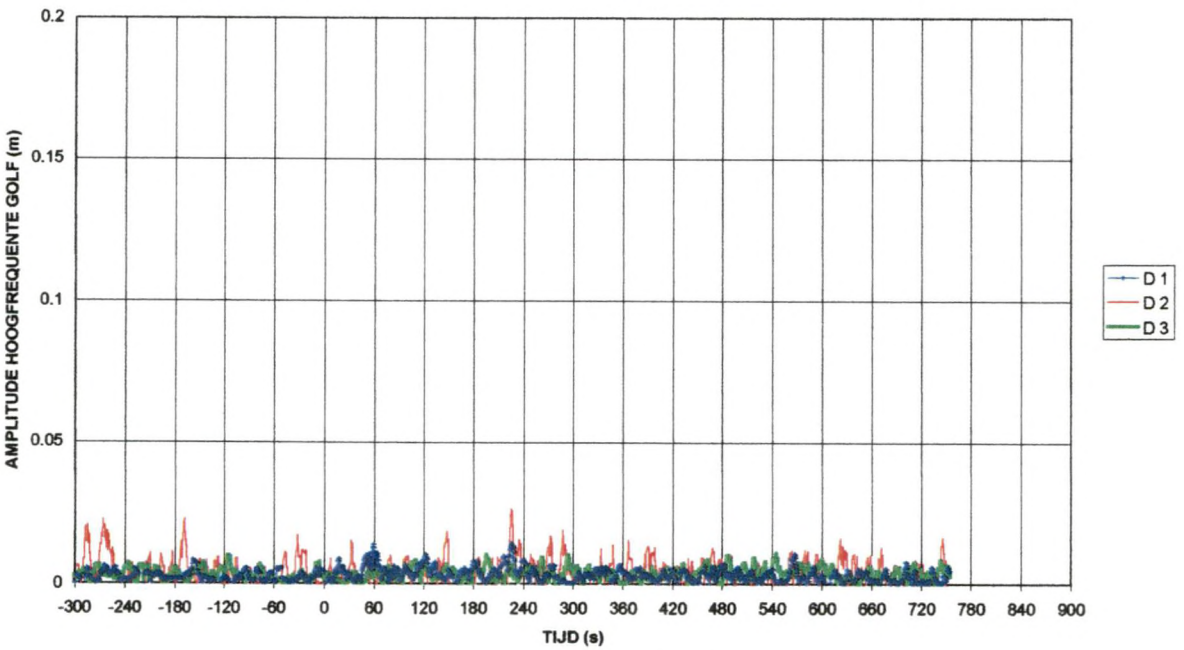


HOOG WATER - DWARSAFSTAND 1 - SNELHEID 12 KNOOP - AFWAARTS

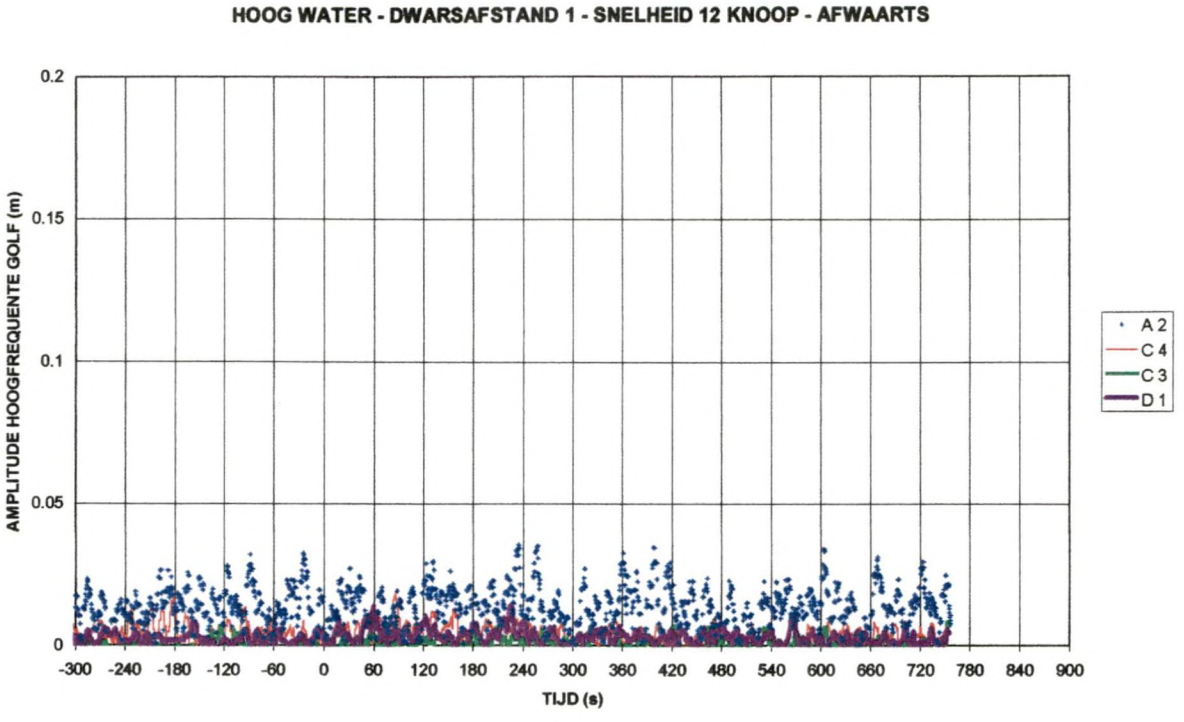


HNI11 (vervolg)



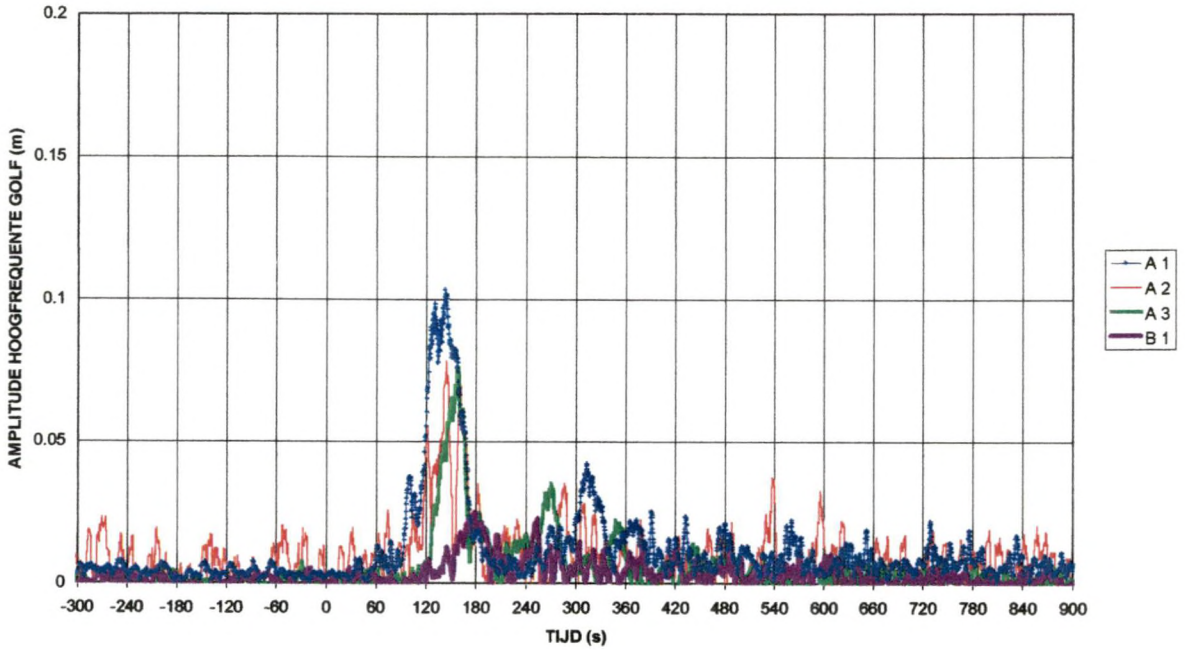


HNI11 (vervolg)

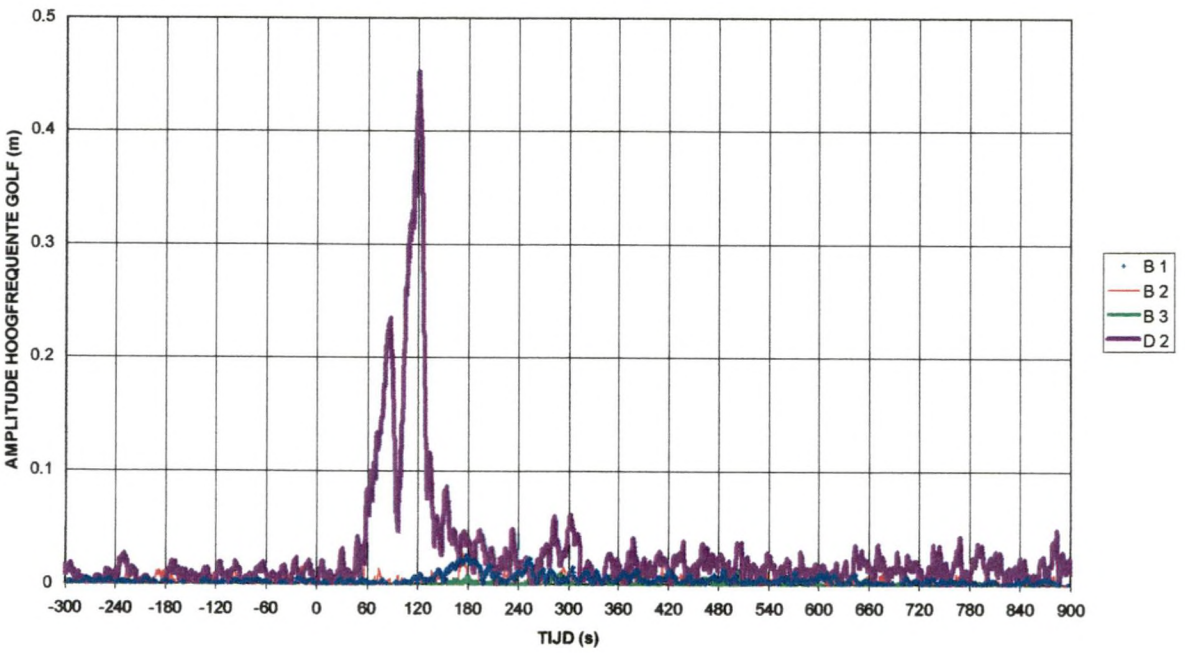


HNI12

LAAG WATER - DWARSAFSTAND 2 - SNELHEID 18 KNOOP - AFWAARTS

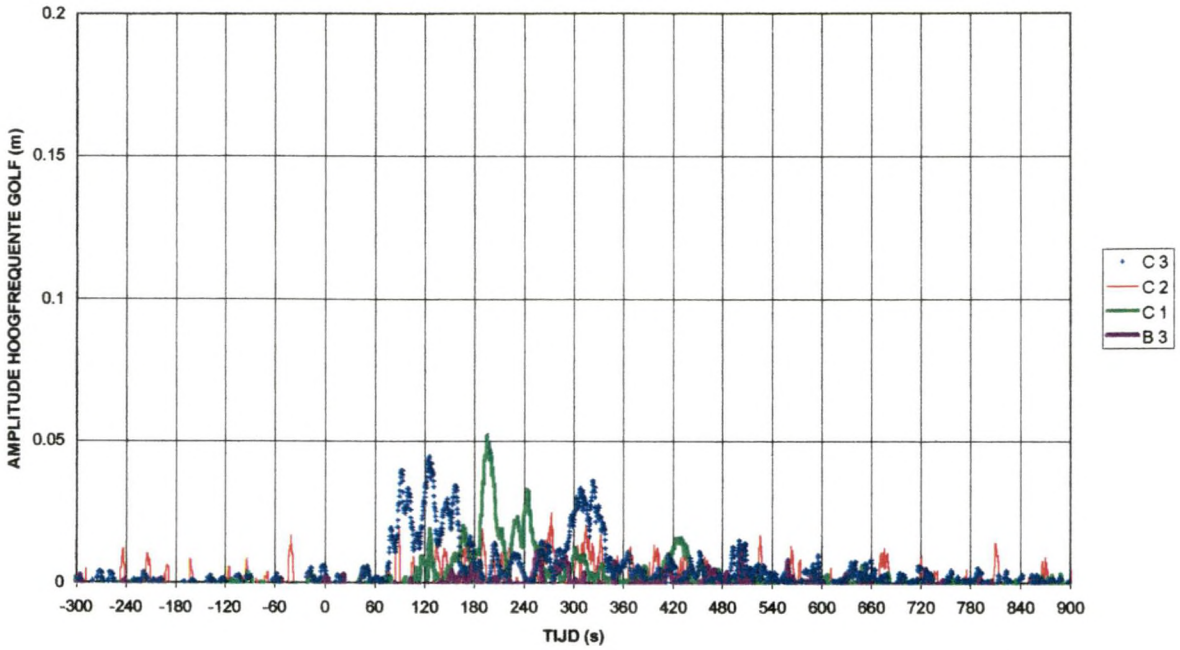


LAAG WATER - DWARSAFSTAND 2 - SNELHEID 18 KNOOP - AFWAARTS

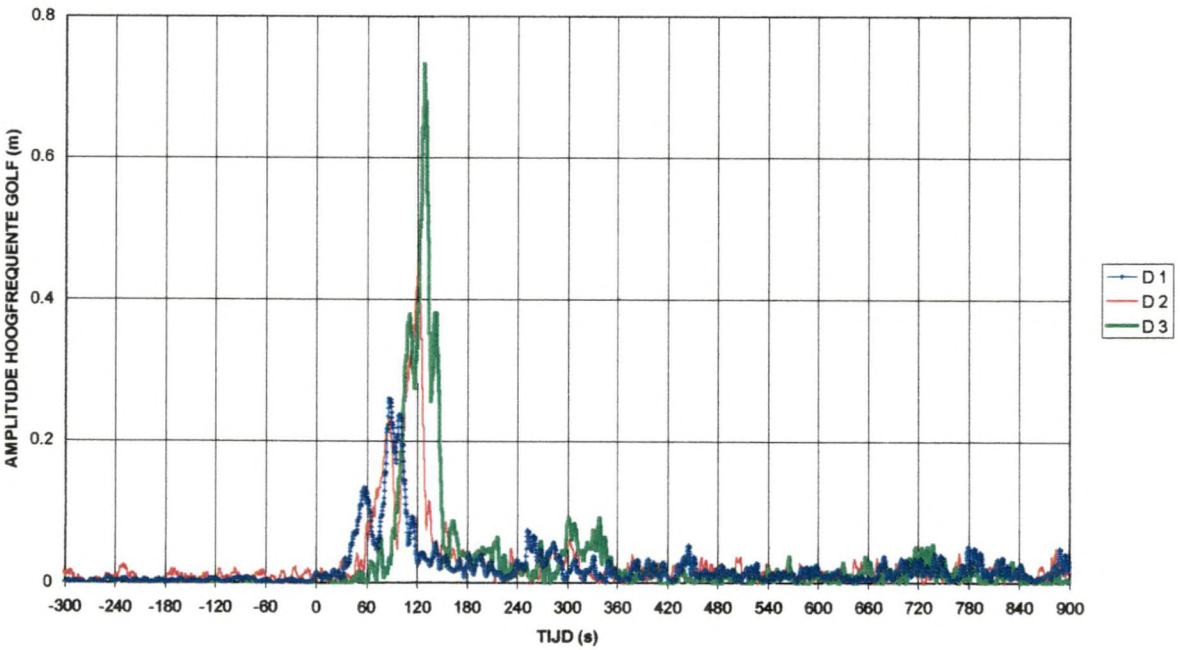


HNI12 (vervolg)

LAAG WATER - DWARSAFSTAND 2 - SNELHEID 18 KNOOP - AFWAARTS

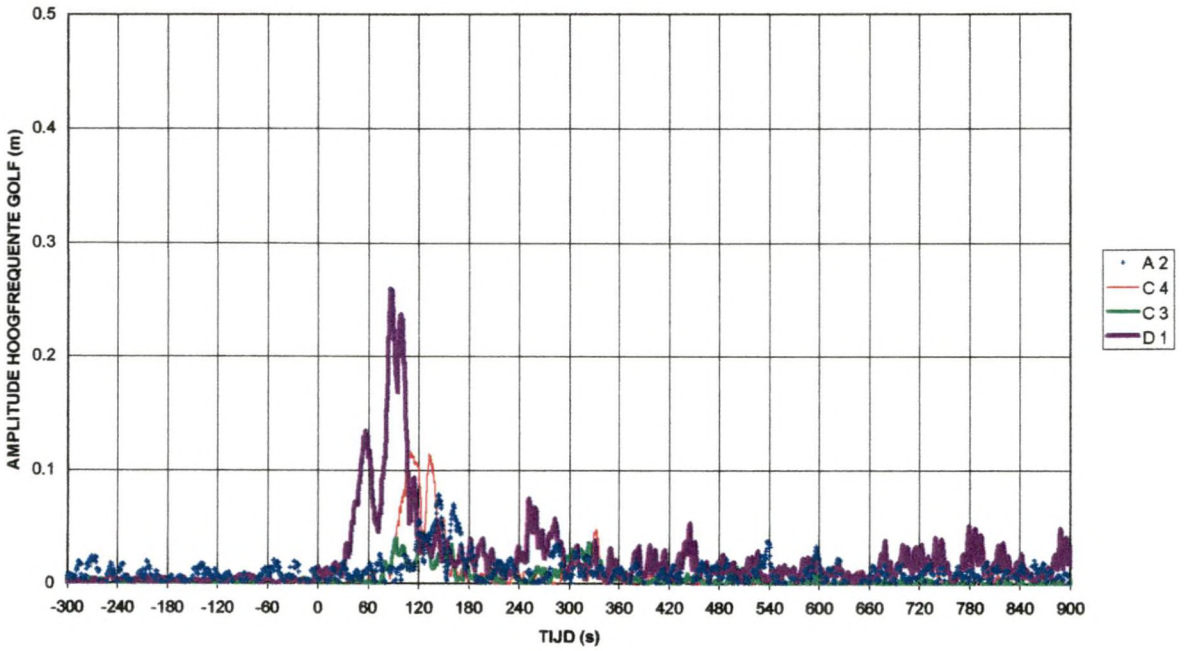


LAAG WATER - DWARSAFSTAND 2 - SNELHEID 18 KNOOP - AFWAARTS



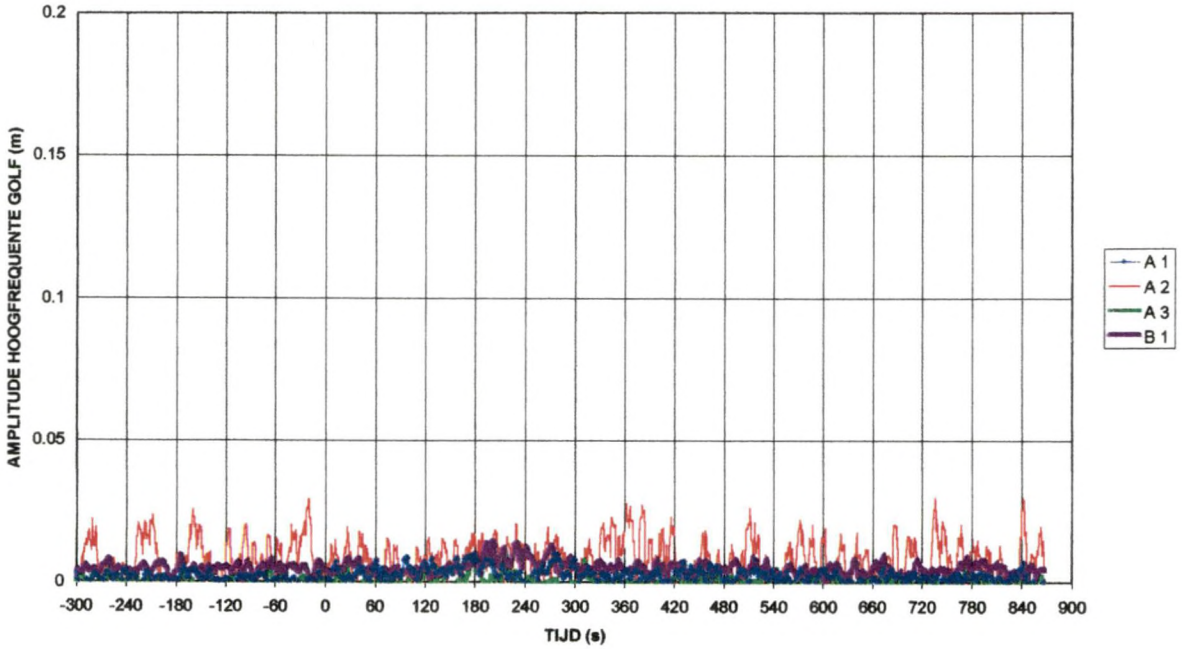
HNI12 (vervolg)

LAAG WATER - DWARSAFSTAND 2 - SNELHEID 18 KNOOP - AFWAARTS

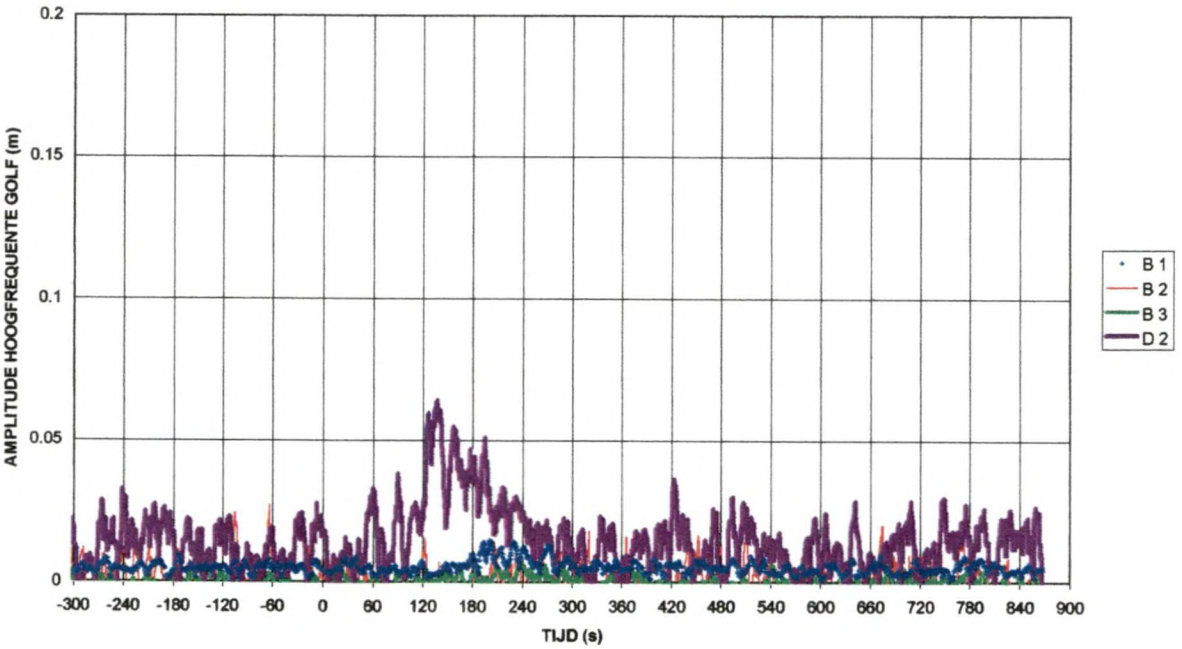


HNI06

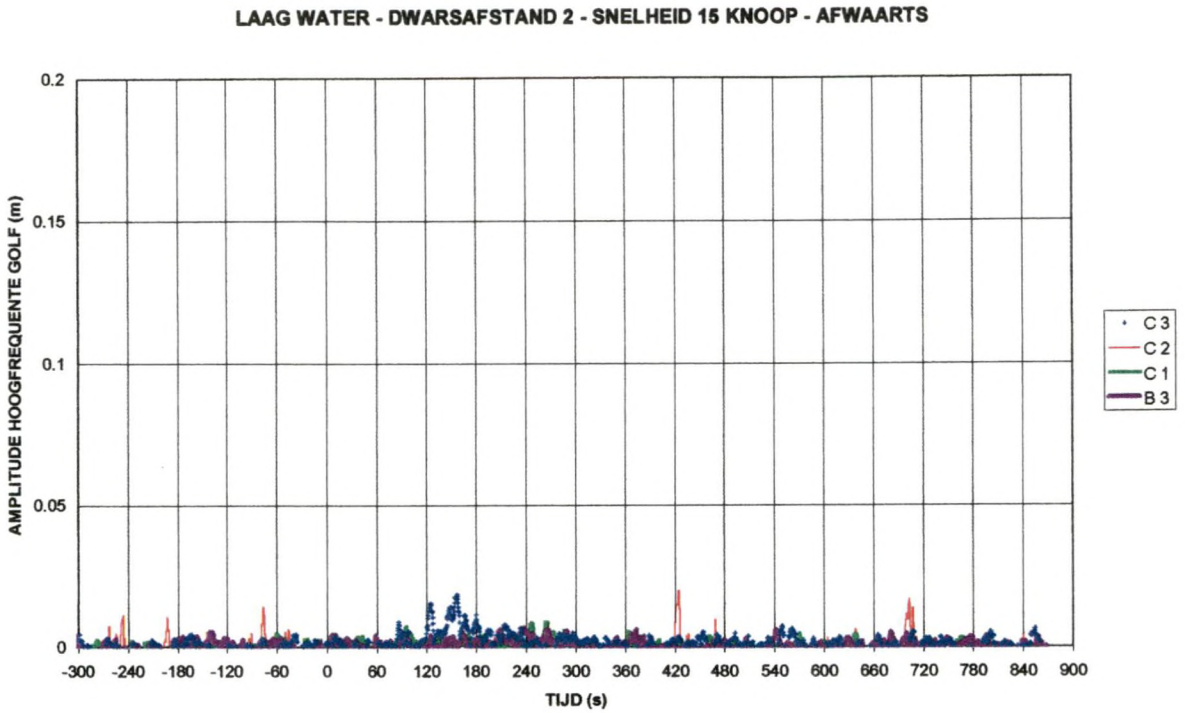
LAAG WATER - DWARSAFSTAND 2 - SNELHEID 15 KNOOP - AFWAARTS

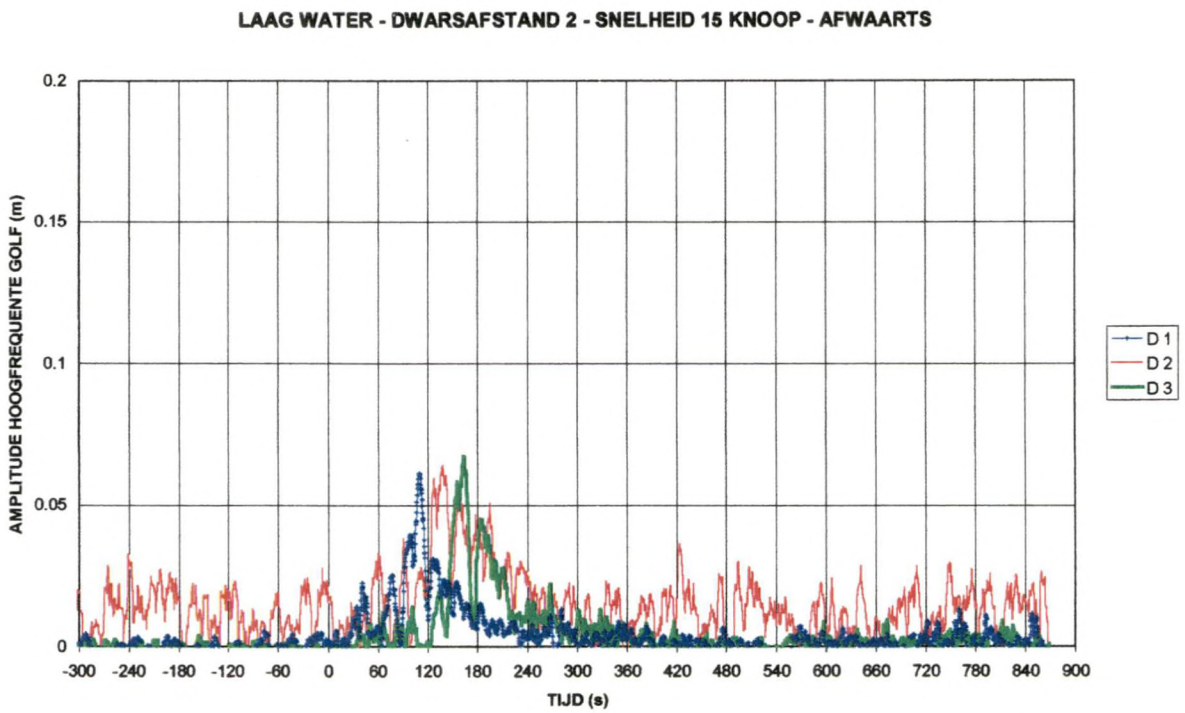


LAAG WATER - DWARSAFSTAND 2 - SNELHEID 15 KNOOP - AFWAARTS

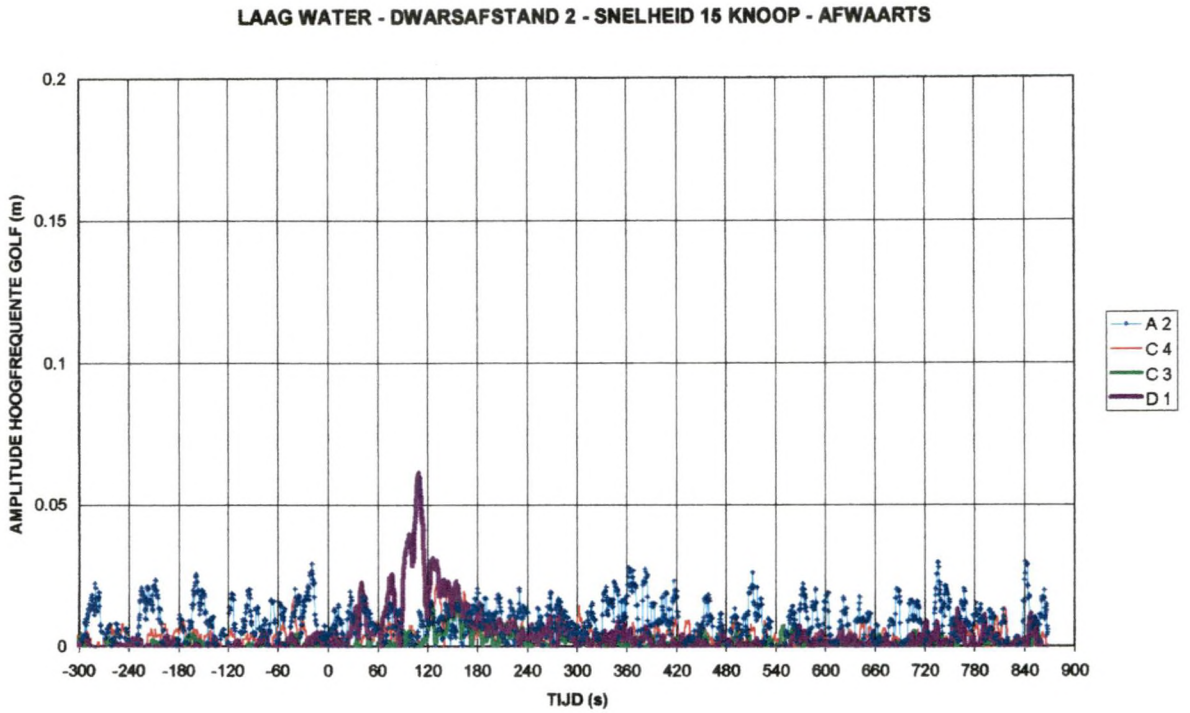


HNI06 (vervolg)





HNI06 (vervolg)



UNIVERSITEIT GENT
Vakgroep TW04V
Afdeling Maritieme Technologie

UNIVERSITEIT GENT

CONTAINERTERMINAL TE VLISSINGEN ONDERZOEK LICHTERDOK WESTERSCHELDE

Bijlage 3 – Korte beschrijving van de scheepsmanoeuvreertank voor ondiep water

door

prof. Marc VANTORRE
Hoogleraar RUG

Studie uitgevoerd in opdracht van HESSENATIE N.V.

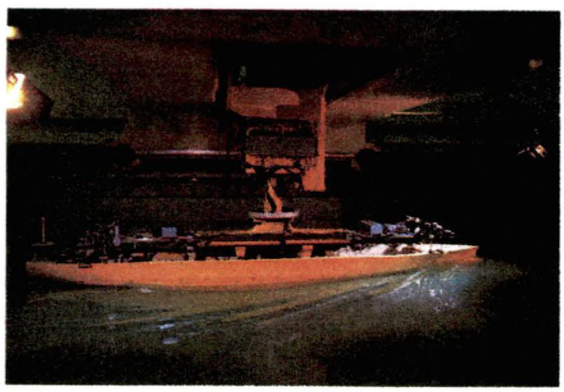
in samenwerking met
Afdeling Waterbouwkundig Laboratorium en Hydrologisch Onderzoek
AWZ-LIN

Antwerpen, oktober 2000

		main carriage	Lateral carriage	yawing table
Position	min	0.0 m	-2.55 m	-130.0°
	max	67.0 m	+2.55 m	+220.0°
Velocity	min	0.05 m/s	0.00 m/s	0.0 °/s
	max	2.00 m/s	1.30 m/s	16.0 °/s
Acceleration	max	0.40 m/s²	0.70 m/s²	8.0 °/s
Power		4 x 7.2 kW	4.3 kW	1.0 kW

The main carriage is a rectangular frame, composed of two wheel girders, connected by two box girders. A lateral carriage is guided between the transversal girders and carries a slide in which a yawing table is incorporated. This slide can be positioned in vertical sense over 0.4 m to take account of the water level.

The ship model is connected to the carriage by means of a mechanism which allows free heave and pitch; roll can be restrained or free. In the horizontal plane, a rigid connection is provided.



Wave generator

The piston type wave maker, allowing generation of both regular and irregular waves, is driven by an electro-hydraulic unit with following kinematic characteristics:

Stroke	0.3 m
Velocity	0.6 m/s
acceleration	4.4 m/s²

Auxiliary carriage

In order to carry out ship-ship interaction tests, the tank is equipped with an auxiliary carriage allowing a second ship model to perform a prescribed speed history along a straight trajectory, with a maximum speed of 1.2 m/s.

Control and data acquisition

The three motion modes, the wave generator, rudder, propulsion and auxiliary devices are controlled by a personal computer.

A second PC is connected to the first one for sampling analog input signals:

Number of channels	24
Resolution	12 bit
Max. sampling frequency	40 Hz

The control system allows unmanned operation, so that experiments can be executed in a fully automatic way 24 hours a day, 7 days a week.

Instrumentation

- 4 x 2 dynamometers for longitudinal and lateral forces (20, 50, 100, 200 N)
- dynamometers for roll moment;
- measurement of propeller rpm;
- 2 propeller thrust and torque dynamometers (30 N, 0.5 Nm);
- measurement of vertical motion (due to squat or wave action) at 4 measuring posts;
- measurement of rudder angle;
- 2 rudder force and moment dynamometers (50 N, 2 Nm);
- wave height measurement devices.

Applications

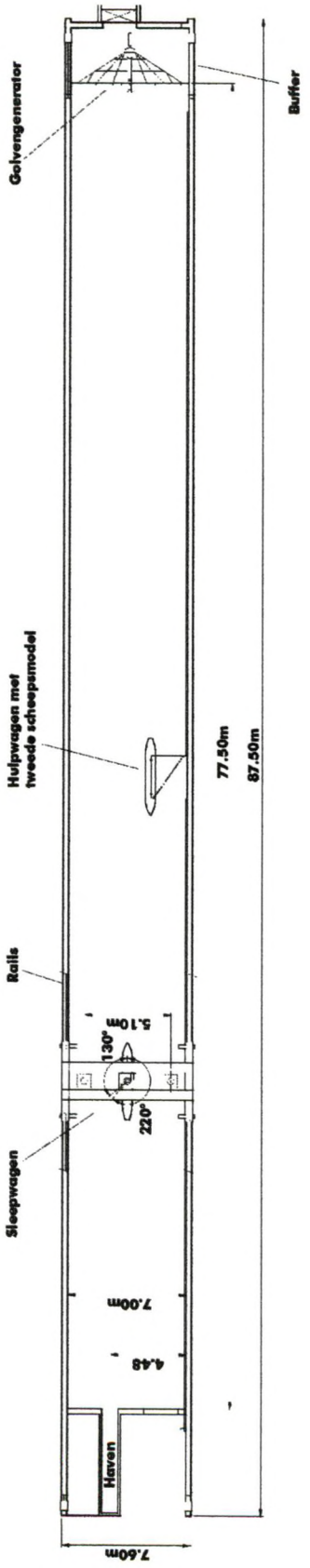
- Determination of manoeuvring simulation models by means of captive model tests, with special emphasis on harbour manoeuvres:
  - large range of ship speeds (ahead and astern);
  - large drift angles;
  - rudder action;
  - large range of propeller rates (ahead and astern);
  - very shallow water (typical under keel clearance: 10 to 20% of draught)
- Manoeuvring behaviour in restricted waters:
  - bank effects
  - navigation in canals
  - berthing
- Ship-ship interaction tests
- Seakeeping in shallow water.

Contact

Prof. dr. ir. Marc VANTORRE

Flanders Hydraulics
Berchemlei 115
B 2140 ANTWERPEN (België)
Phone + 32 (0)3 2361850
+ 32 (0)478 349971
Fax + 32 (0)3 2359523
marc.vantorre@lin.vlaanderen.be

Ghent University
Department TW04V
Division Maritime Technology
Technologiepark Zwijnaarde 9
B 9052 GENT (Belgium)
Phone +32 (0)9 2645555
Fax +32 (0)9 2645843
marc.vantorre@rug.ac.be


Golvengenerator
Buffer
Hulpwagen met tweede scheepsmodel
77.50m
87.50m
Rails
5.10m
130°
220°
Sleepwagen
7.00m
4.48
Haven
7.60m