

b1 109531

waterloopkundig laboratorium
delft hydraulics laboratory

Westerschelde -oeververbinding

invloed van scheepvaart op tunnelelementen
in de sleuf en in het bouwdoek

verslag modelonderzoek

M 1738

oktober 1981

C1332

(2)

BIBLIOTHEEK
Bouwdienst Rijkswaterstaat
Postbus 20.000
3502 LA Utrecht

BIBLIOTHEEK BOUWDIENST RIJKSWATERSTAAT
NR. C 1332 BDU

Westerschelde -oeververbinding

invloed van scheepvaart op tunnelementen
in de sleuf en in het bouwdok

verslag modelonderzoek

M 1738

oktober 1981

INHOUD

	blz.
1. <u>Inleiding</u>	1
1.1 Probleemstelling en doel van het onderzoek.....	1
1.2 Opdracht.....	2
1.3 Samenvatting en konklusies.....	3
2. <u>Modelonderzoek</u>	5
2.1 Modelschaal en schaalearkten.....	5
2.2 Model.....	6
2.3 Gekozen kondities voor het onderzoek naar afgezonken elementen ...	6
2.4 Gekozen kondities voor onderzoek naar de in het bouwdok af- gemeerde elementen.....	8
2.5 Meetmethode.....	8
3. <u>Resultaten</u>	10
3.1 Krachten op afgezonken tunnelelementen.....	10
3.2 Waterspiegelveranderingen in het bouwdok.....	11
4. <u>Nadere beschouwing van krachten op afgezonken elementen</u>	12
4.1 Theorie.....	12
4.2 Berekening van de oplegkrachten.....	16
4.2.1 Voorbeeld berekening.....	16
4.2.2 Afleiden van vereenvoudigde relaties.....	16
4.2.3 Resultaten.....	19
5. <u>Bepaling van belastingen op de elementen in het bouwdok</u>	20
5.1 Statische belasting.....	20
5.2 Statische verplaatsingen.....	21
5.3 Dynamische effecten.....	24
6. <u>Konsekwenties voor de scheepvaart</u>	27
6.1 Samenstelling scheepvaart.....	27
6.2 Omschaling naar andere schepen.....	27

LITERATUUR

TABELLEN

- 1 Scheepsafmetingen
- 2 Gemiddelde stroomkrachten
- 3 Berekening maximale krachten op opleggingen
- 4 Waterspiegeldalingen in bouwdok
- 5 Gegevens draden
- 6 Beschouwde schepen

FIGUREN

1	Situatie vaste oeververbinding Westerschelde
2	Langsdoorsnede tunnel / afzinkfase 4
3	Langsdoorsnede tunnel / afzinkfase 7
4	Overzicht model met vaarbanen
5	Meetsysteem tunnelelement
6	Model van tunnelelement
7 ...12	Voorbeelden registraties
13...24	Gemeten maxima van krachten en momenten door scheepvaart
25...28	Krachten bij verschillende toestanden
29	Vertikale drukken en resulterende krachten
30	Theoretisch krachtsverloop
31	Waterspiegelveranderingen afhankelijk van afstand tot schip
32	Berekeningsschematisatie krachten op opleggingen
33	Krachten op opleggingen (horizontaal)
34	Krachten op opleggingen (vertikaal)
35	Maximale belasting op pennen
36	Maximale belasting op nok
37	Kritieke kondities
38	Afmeersysteem
39	Verdeling schepen in tonnage-klassen
40...44	Gemeten scheepssnelheden
45...48	Waterspiegelhellingen
49...50	Kritieke kondities

SYMBOLEN

A	aanstroomoppervlak	m^2
a	lengtemaat	m
B	scheepsbreedte	m
b_{eq}	equivalente vaarwegbreedte	m
b	breedte, breedtemaat	m
C	veerstijfheid	N/m'
C	coëfficiënt van Chézy	$m^{\frac{1}{2}}s^{-1}$
C_F	wrijvingscoëfficiënt	-
C_M	massacoëfficiënt	-
C_P	drukkrachtcoëfficiënt	-
c	hoogtemaat	m
c	voortplantingssnelheid	m/s
F_D	sleepkracht	N
F_M	traagheidskracht	N
F_s	kracht door scheepvaart	N
F_v	voorspankracht	N
F_w	windkracht	N
g	versnelling zwaartekracht	m/s^2
h	hoogte	m
h	waterdiepte	m
I	massatraagheidsmoment	kgm^2
I'	toegevoegd massatraagheidsmoment	kgm^2
k	kracht	N
L	scheepslengte	m
L	draadlengte	m
l	lengte	m
M	moment	Nm
M_v	voorspanmoment	Nm
M_x	moment om x-as	Nm
M_y	moment om y-as	Nm
M_z	moment om z-as	Nm
m	massa	kg
m'	toegevoegde massa	kg
n	schaalfactor	-

Q	debiet	m^3/s
R	hydraulische straal	m
S	langsstroomoppervlak	m^2
T	eigen periode	s
T	diepgang	m
t	tijd	s
u	stroomsnelheid	m/s
u_{retour}	retourstroomsnelheid	m/s
V	volume	m^3
V_s	scheepssnelheid	m/s
$V_{s,r}$	scheepssnelheid relatief t.o.v. het water	m/s
v	stroomsnelheid	m/s
X	kracht in x-richting	N
x	coördinaat	m
Y	kracht in y-richting	N
y	coördinaat	m
Z	kracht in z-richting	N
z	coördinaat	m
z	waterspiegeldaling	m
μ	contractiecoëfficiënt	-
ψ	hoekverdraaiing	rad
ρ	dichtheid	kg/m^3
ξ	verlies coëfficiënt	-
ω	frequentie	rad/s

onderschrift

1,2,3	nummering oplegpunten
x,y,z	betreffende richting
sp	spleet

Invloed van scheepvaart op tunnelelementen in de sleuf en in het bouwdok

1. Inleiding

1.1 Probleemstelling en doel van het onderzoek

Ter verbetering van de verbinding tussen Zeeuws-Vlaanderen en de rest van Nederland zal iets ten westen van de route van de veerdienst Kruiningen-Perkpolder een vaste oeververbinding over de Westerschelde worden gebouwd. Het zuidelijk deel van deze verbinding zal bestaan uit een brug over de Schaar van Ossenissee. Het noordelijk deel, dat de scheepvaartroute naar de haven van Antwerpen kruist, zal echter als tunnel worden uitgevoerd (fig. 1). De tunnel zal bestaan uit twee landhoofden met de bijbehorende op- en afritten en een onderwatergedeelte. Dit gedeelte onder de geul Overloop van Hansweert-Zuidergat zal in 12 delen volgens de zinkmethode worden aangebracht (fig. 2). De elementen zijn 19,50 m breed, 9,15 m hoog en 174,67 m lang, behalve de elementen 1 en 2, die 131,00 m lang zijn.

De elementen zullen worden gebouwd in een bouwdok, gelegen in een werkeiland dat voor de bouw van de vaste oeververbinding op de platen van Ossenissee zal worden opgeworpen. Na de bouw van de elementen zal het bouwdok worden geopend en zullen de elementen, na afbouw aan de afbouwsteiger, drijvend en hangend tussen pontons met een vrijboord van 0,2 m via een gebaggerde geul naar de afzinkpositie in de tunnelsleuf worden gesleept. Na het aanvoeren van de elementen door sleepboten zullen ze boven de zinksleuf worden vastgemaakt aan vaste ankerpunten. Met behulp van een kabelsysteem met lieren zullen de elementen vervolgens naar de juiste positie voor het afzinken worden verhaald, waarna ze worden afgezonken.

In de afgezonken toestand zijn de elementen aan één kant met een nok op het voorgaande element opgelegd en aan de andere kant op pennen met vijzels. Onder het element is een open ruimte van 1 m hoogte. Deze toestand duurt enige tijd, totdat het element met zand onderspoeld wordt. Daarna wordt aan de zijanten de sleuf aangevuld (aangeklapt). In de figuren 2 en 3 worden de situaties weergegeven

op het moment dat de tunnelementen 4, respektievelijk 7 juist afgezonken zijn.

Zolang het element afgezonken maar nog niet onderspoeld is, kan het slechts weinig kracht opnemen zonder gevaar voor verplaatsingen. Bij vergroting van het eigen gewicht door ballasten zou zowel de toelaatbare horizontale kracht als ook de toelaatbare omhooggerichte kracht toenemen. Dit levert echter problemen op voor de opleggingen. Uit metingen tijdens de bouw van andere tunnels is gebleken, dat door passerende scheepvaart aanzienlijke krachten op een afgezonken element kunnen worden opgewekt [1].

Het doel van het hier beschreven onderzoek is om de grootte van krachten en momenten te bepalen op de afgezonken en nog niet onderspoelde tunnelementen, die door passerende scheepvaart veroorzaakt worden en verder om de invloed van die scheepvaart op de aan de afbouwsteiger in het bouwdok afgemeerde elementen aan te geven. De laatstgenoemde invloed wordt verwacht in verband met translatiegolven die in het bouwdok op kunnen treden.

1.2 Opdracht

De N.V. Westerschelde-Oeververbinding heeft per brief van 4 augustus 1980, nr. 8672, het Waterloopkundig Laboratorium opdracht gegeven tot het uitvoeren van een onderzoekpakket naar het tunnelgedeelte volgens de opgestelde aanbiedingen in de brieven van 27 juni 1980 en 22 juli 1980 met kenmerk V5722 en V6465.

De opdracht omvat het volgende onderzoekpakket.

- 1 IJking van het model.
- 2 Stroombeeldonderzoek voor het leveren van de randvoorwaarden voor de aanzandingsberekeningen voor de tunnelsleuf en het signaleren van drie-dimensionale effecten hierin. Tevens kunnen de gevonden stroombeelden worden gebruikt om de stroomkrachten te schatten, die tijdens het afzinken op de niet-onderzochte elementen zullen werken.

- 3 Bepalen van zandtransporten ter plaatse van het tunneltracé uit stroomsnelheids- en sedimentgehalteprofielen van natuurmetingen, die door de Adviesdienst Vlissingen zijn uitgevoerd.
- 4 Aanzandingsberekeningen voor de tunnelsleuf.
- 5 Bepalen van de stroomkrachten op een tunnelelement tijdens het transport naar en het afzinken in de tunnelsleuf, alsmede het gevaar voor het optreden van stoten tijdens het plaatsen van het element.
- 6 Bepalen van de krachten op de afgezonken en nog niet afgedekte tunnelementen door passerende schepen.
- 7 Bepalen van de krachten op in het open bouwdok afgemeerde tunnelementen door passerende schepen.

Het in dit verslag beschreven onderzoek betreft de onder de punten 6 en 7 genoemde aspecten van het onderzoekpakket. Het onderzoek heeft plaatsgevonden in het Laboratorium De Voorst. Dit deel van het onderzoek stond onder leiding van ir. W.A. de Vries, die tevens dit verslag samenstelde.

1.3 Samenvatting en konklusies

In een permanentiemodel (schaal 1:100) van het tracé van het tunnelgedeelte van de oeververbinding en de riviergedeelten direct westelijk en oostelijk hiervan zijn vaarten uitgevoerd met een model van een schip met een laadvermogen van 73.000 dwt.

Gemeten zijn:

- a Krachten en momenten op een afgezonken tunnelelement tijdens passage van het schip en de bijbehorende waterspiegeldalingen en stroomsnelheden.
- b Waterspiegeldalingen in het afbouwdok.

Gevariëerd zijn:

- voor a: - scheepssnelheid
- passeerafstand
- getijfase

- al of niet afdichten van de spleet aan de zijkant
- het tunnelelement in kwestie

voor b: - vaarsnelheid schip
- aantal elementen in het bouwdok
- getijfase

De konklusies met betrekking tot de afgezonken elementen kunnen als volgt worden samengevat:

- De optredende krachten en momenten kunnen zeer groot zijn.
- De horizontale krachten zijn groter dan de verticale krachten.
- De maxima van krachten en momenten nemen bij verhoging van de relatieve scheepssnelheid meer dan evenredig met het kwadraat van de snelheid toe.
- De krachten en momenten zijn sterk afhankelijk van de passeerafstand.
- Wanneer een horizontale kracht van $1 \cdot 10^6$ N op een element toegelaten wordt, zijn restrikties voor de passeerafstand en scheepssnelheid nodig (zie de figuren 49 en 50). Deze zijn afhankelijk van de scheepsafmetingen.

De konklusies met betrekking tot in het bouwdok afgemeerde elementen zijn:

- De optredende krachten zijn door de grote afstand van het bouwdok tot de vaargeul relatief klein.
- Dynamische effecten zijn niet zodanig dat ontoelaatbare situaties optreden.

2. Modelonderzoek

2.1 Modelschaal en schaalearseffekten

Zowel bij de elementen in het bouwdok als bij de afgezonken elementen veroorzaakt de primaire door schepen geïnduceerde waterbeweging (retourstroom en waterspiegeldaling) de verschijnselen. Om de waterspiegeldaling goed weer te kunnen geven is een geometrisch gelijkvormig model vereist en moeten de schaalregels volgens Froude toegepast worden. De waterspiegeldaling is gerelateerd aan de retourstroom. De retourstroom wordt bepaald door de continuïteit. In dit geval wil dit zeggen, dat het schip bij de boeg het water verdringt en bij het hek moet het water de overgebleven ruimte weer aanvullen. Het totale retour-debiet in een doorsnede over het schip is derhalve gelijk aan scheepssnelheid x oppervlakte dwarsdoorsnede (in stroomsituaties is de relatieve scheepssnelheid bepalend). Dit is dus nauwelijks aan schaalearseffekten onderhevig. De verdeling van de retourstroom en eventuele volgroom en daarmee de vorm van de kuil kan door verschillen in grenslaagdikte tussen prototype en model wel aan schaalearseffekten onderhevig zijn. De indruk bestaat echter, dat deze bij de gekozen modelschaal niet groot zijn.

De krachten op de tunnelelementen worden voor het belangrijkste deel bepaald door de waterspiegelhellingen. De relatie hiertussen is niet aan schaalearseffekten onderhevig.

Voor onderzoek naar de vormgeving van de nieuwe voorhaven te Hansweert was al een model gebouwd van het betreffende gedeelte van de Westerschelde. De schaal van dit model was 1:100. Deze schaal is nog voldoende om geen belangrijke schaalearseffekten in de beschouwde krachten te introduceren. Volgens de schaalregels van Froude gelden de volgende schaalearfactoren (prototypemaat/modelmaat)

lengte	: n_l	= 100
snelheid	: $n_v = n_l^{\frac{1}{2}}$	= 10
tijd	: $n_t = n_l n_v^{-1}$	= 10
versnelling	: n_g	= 1
dichtheid	: n_ρ	= 1
massa	: $n_m = n_\rho n_l^3$	= 1.000.000
kracht	: $n_k = n_m n_g$	= 1.000.000

2.2 Model

Het model omvatte het geulen- en platengebied tussen de Platen van Ossenisse en Zuid-Beveland met modelranden in het Zuidergat en de Schaar van Waarde aan de oostzijde en in de Overloop van Hansweert en het Middelgat aan de westzijde (figuur 4). Tevens waren de veerhaven van Kruiningen en de voorhavens van Hansweert in het model weergegeven, althans voorzover van belang voor het stroombeeld rond het tunneltracé. In het model kon geen getij worden gesimuleerd, doch werd een bepaalde getijfase als permanent stroombeeld ingesteld. Dit kon zowel voor eb- als vloedfasen.

De bodemligging in het model was gebaseerd op de recente peilkaarten C6.77.1345, (klein deel van model), C6.79.175 en B3.79.319 van Rijkswaterstaat.

Voor de ijking van het model wordt verwezen naar het stroombeeldonderzoek, dat in dit kader uitgevoerd is (M 1734).

2.3 Gekozen kondities voor het onderzoek naar afgezonken elementen

Schip

De grootte van de zeeschepen, die op de Westerschelde passeren is beperkt door de waterdiepte op de Westerschelde en de faciliteiten in Antwerpen.

Uit diepgangsregistraties van 1975 - 1977 blijkt dat de grootste toen gemeten diepgang 13,75 m bedroeg.

Voor het modelonderzoek is een schip met diepgang 12,75 m gekozen. Een diepgang van 12,70 m werd in 1977 in 46 gevallen overschreden (gegevens van Studiedienst Vlissingen, tekening nr. 78.590). De overige afmetingen van het schip zijn in tabel 1 gegeven.

Vaarrichting

Uit bovengenoemde gegevens blijkt, dat afvarende schepen uit de richting Antwerpen niet dieper staken dan 12.00 m. De afvarende schepen zijn over het algemeen niet volledig geladen. De opvaart is dus qua diepgang maatgevend. In het modelonderzoek is alleen de opvaart onderzocht.

Getijfase

Het onderzoek is uitgevoerd voor maximum vloedstroom en maximum ebstroom. Daarnaast zijn enkele vaarten uitgevoerd op stil water, teneinde het verschijnsel beter te kunnen bestuderen. Voor het getij is een gemiddeld springtij genomen, in aansluiting op het merendeel van het overige onderzoek in dit kader. Voor het onderhavige deel van het onderzoek is de getijfactor van secundair belang, omdat verwacht kan worden, dat de verschijnselen evenredig zijn met de relatieve snelheid van het schip ten opzichte van het water. Van de onderzochte getijfasen is de vloedfase het belangrijkste, omdat de grotere schepen vrijwel uitsluitend tijdens vloed passeren (max. vloed is 1 u voor H.W.).

Scheepssnelheid

Om de merites van eventuele snelheidsbeperkingen tijdens de bouw van de tunnel te kunnen onderzoeken is een grote variatie van scheepssnelheden onderzocht. De ingestelde vaarsnelheden door het water ($V_{s,r}$) bedroegen bij benadering 3,5, 7 en 9 m/s.

Vaarbaan

Omdat de waterspiegeldaling en de retourstroom slechts over een beperkte afstand van het schip merkbaar zijn, mag verwacht worden, dat de passeerafstand van het schip tot het betreffende tunnelelement grote invloed heeft op de grootte van de optredende krachten. Bij een eventuele verkeersregeling kan ook deze passeerafstand voorgeschreven worden. Om de invloed hiervan te onderzoeken zijn in het model 5 vaarbanen uitgezet met passeerafstanden (= afstand tot hart tunnelelement) van 0, $\frac{1}{2}$, 1, 2 en $3\frac{1}{2}$ elementlengten (van 175 m).

Element

Onderzocht zijn twee elementen, waar de scheepvaart in principe midden overheen kan varen, nr. 4 en nr. 7. Omdat tijdens het onderzoek nog niet zeker was of de zijkant van de spleet onder het element direkt afgedicht zou worden, is zowel de variant met open als met afgedichte spleet onderzocht.

De afgedichte spleet is als basisgeval - meest waarschijnlijk geval - beschouwd. Alleen bij element nr. 4 is ook een open spleet onderzocht.

2.4 Gekozen kondities voor het onderzoek naar de in het bouwdok afgemeerde elementen

Voor de in het bouwdok afgemeerde elementen werd niet verwacht, dat beperkingen voor de scheepvaart nodig zouden zijn. Daarom zijn hier alleen maatgevende omstandigheden beschouwd. De scheepssnelheid door het water is op 9 m/s ingesteld. De vaarbaan is zo dicht mogelijk bij het bouwdok gekozen. De getijfase - en daarmee de waterstand - is gevarieerd, evenals het aantal elementen in het bouwdok. Beide hebben invloed op de looptijd van een translatiegolf in het bouwdok.

2.5 Meetmethode

Het schip werd gestuurd met een kabelvolgsysteem. Op de bodem van het model lag een kabel met hoogfrequente wisselspanning. Uitwijkingen en koersafwijkingen van het schip ten opzichte van de kabel kunnen met inductiespoelen op het scheepsmodel worden gedetecteerd. Op basis hiervan wordt met een regelsysteem (stuurautomaat) de roerhoek ingesteld.

De ligging van de kabel en de afstelling van de stuurautomaat was steeds zodanig, dat het midden van het schip bij benadering over de van tevoren uitgestippelde baan voer. Hierbij kwamen afwijkingen van $\frac{1}{2}$ scheepsbreedte echter wel voor, vanwege de grote drifthoeken, die veroorzaakt werden door het varen in een bocht met stroom mee (bij vloed).

De snelheid van het schip (V_s) is bepaald door de passagetijd tussen twee fotocellen te meten. Deze fotocellen stonden respectievelijk in de as van de tunnel en 500 m oostelijk daarvan.

De krachten op het element zijn bepaald door het element statisch bepaald op te hangen (zie figuur 5) en in alle draden met krachtringen de krachten te meten. De krachtringen werden iedere dag geijkt. De voorspanning op de ringen is bij stil water elektrisch "weggenuld". De totale krachten en momenten op het element zijn tijdens de meting bepaald door een analoge omrekening. Deze totale krachten en momenten zijn uitgeschreven op een 6-kanaals schrijver.

Om een nadere bestudering van de verschijnselen mogelijk te maken zijn de stroomsnelheden (+ retourstroom) en de waterspiegelveranderingen aan beide kopen van het element gemeten. De stroomsnelheden zijn met micromolens gemeten.

De waterstandsvariatiën zijn met wavo's gemeten. Deze laatste stonden om praktische redenen 50 m westelijk van het element.

In het bouwdok zijn alleen waterspiegelveranderingen en stroomsnelheden gemeten. De wavo's zijn daarbij op de vier hoekpunten gezet van de plaats van het element afgemeerd zal worden. Een micromolen stond in het -denkbeeldige- noordelijke kopvlak.

3. Resultaten

3.1 Krachten op afgezonken tunnelelementen

In de figuren 7 ... 12 zijn enkele voorbeelden gegeven van geregistreeerde krachten en momenten met bijbehorende waterspiegeldalingen en stroomsnelheid. Bij de beschouwde scheepssnelheid van $V_{s,r} = \text{ca. } 7 \text{ m/s}$ bereikt de waterspiegeldaling bij de kop van het tunnelelement (ca. 80 m van midden schip) een waarde van 0,45 m. De dwarskracht op het element is maximaal in de orde van grootte $5 \cdot 10^6 \text{ N}$. De maximaal toelaatbare dwarskracht werd in eerste instantie geschat op $1 \cdot 10^6 \text{ N}$. Het verschijnsel verdient dus duidelijk de aandacht.

Om de verschillende toestanden vergelijkbaar te maken zijn de krachten gesplitst in een stationair deel - de stroomkrachten - en een fluctuerend deel. Van dit fluctuerend deel zijn de maxima en de minima bepaald en uitgezet tegen de relatieve scheepssnelheid ($V_{s,r}$). Deze grafieken zijn in de figuren 13 ... 24 per situatie gegeven voor verschillende passeerafstanden.

Daarnaast zijn de belangrijkste van de genoemde grafieken voor de verschillende situaties vergeleken in de figuren 25 ... 28.

Uit de figuren blijkt dat

- de krachten sterk afhankelijk zijn van de passeerafstand,
- de krachten eveneens sterk afhankelijk zijn van de scheepssnelheid,
- de dwarskracht op het element met open spleet enigszins groter is dan de dwarskracht op het element met dichte spleet. Daarintegen is in laatstgenoemd geval het moment van de dwarskracht groter (M_z). Hetzelfde geldt voor de verticale kracht (Z en M_y).
- dat de krachten bij eb vrijwel altijd iets groter zijn dan bij vloed of stil water.

Dit laatste kan verklaard worden uit het feit, dat bij eb de waterstand lager is. Hierdoor wordt bij gelijke scheepssnelheid de door het schip veroorzaakte waterspiegeldaling groter.

De afhankelijkheid van de scheepssnelheid is evident. De afhankelijkheid van de passeerafstand kan verklaard worden uit het feit, dat de waterspiegeldaling verder van het schip af minder wordt.

Voor de verschillen tussen open en dichte spleet wordt verwezen naar hoofdstuk 4.

3.2 Waterspiegelveranderingen in het bouwdok

De waterspiegelveranderingen waren over het algemeen klein en daardoor niet nauwkeurig meetbaar. De schommelingen van het peil in het model speelden hierbij een rol. Per toestand zijn 2 à 4 vaarten uitgevoerd. In tabel 4 wordt een overzicht gegeven van de resultaten. De vermelde waarden zijn gemiddelden per toestand.

De maximaal gemeten waterspiegelverandering is 0,25 m. Het maximale verval tussen de punten 1 en 4 (voor- en achterkant element) bedraagt 0,2 m. Beide waarden treden op bij eb en de situatie zonder elementen in het bouwdok. Het verval tussen de punten 1 en 2, respectievelijk 4 en 3, is niet in de tabel vermeld. Dit verval is minder dan de meetnauwkeurigheid (0,01 m). De vervallen waren nauwkeuriger meetbaar dan de absolute waterspiegelveranderingen, omdat de schommelingen in het model hierop nagenoeg niet van invloed zijn.

De waterspiegelveranderingen zijn enigszins periodiek, omdat de translatiegolven terugkaatsen tegen de verbreding en tegen de achterwand van het bouwdok. De terugkaatsing tegen de verbreding is nauwelijks zichtbaar.

De terugkaatsing tegen de achterwand zorgt ervoor dat de negatieve translatiegolf na ca. 150 s terugkomt. Deze tijd komt overeen met de verwachtingen, daar de voortplantingssnelheid van de translatiegolf is:

$$c = \sqrt{gh} \approx \sqrt{9.81 \times 10} \approx 9.9 \text{ m/s}$$

en de benodigde tijd voor het heen en weer lopen door het bouwdok

$$t = 2L/c \approx 2 \times 700/9.9 = 141 \text{ s.}$$

Daarnaast is er een periodiciteit van 600 à 700 s in de waterspiegelveranderingen.

Voor het verval over het tunnelelement is deze lange periodiciteit echter nauwelijks van belang.

De maximaal (tussen de punten 3 en 4) gemeten stroomsnelheid bedraagt ca. 0,15 m/s.

4. Nadere beschouwing van krachten op afgezonken elementen

4.1 Theorie

In [1] is een verklaring gegeven voor het optreden van krachten op afgezonken tunnelelementen met een spleet eronder bij passage van schepen. In het onderhavige verslag wordt uitgegaan van dezelfde basisprincipes als in [1] gehanteerd zijn. Deze komen neer op het volgende:

- Het verschijnsel wordt veroorzaakt door de waterspiegelveranderingen.
- De verticale krachten en de bijbehorende momenten worden bepaald door het drukverloop onder en boven het tunnelelement; de horizontale krachten worden bepaald door het drukverloop aan beide zijanten).
- De druk buiten de spleet is hydrostatisch.
- De druk in de spleet wordt bepaald door de stroomsnelheid in de spleet. De druk wordt verondersteld zich onder de spleet zo snel voort te planten, dat hier altijd een evenwichtsstroming heerst.
- De beschouwing is twee-dimensionaal in het vlak van de dwarsdoorsnede van het tunnelelement.

De afleiding die in [1] gegeven is was er echter op gebaseerd, dat de boeg-golf kort is ten opzichte van de breedte van het tunnelelement. In het onderhavige onderzoek is dat niet het geval, zodat opnieuw relaties afgeleid dienen te worden.

De horizontale kracht wordt, zoals gebruikelijk is bij de berekening van krachten op (grote) lichamen geformuleerd als:

$$Y = C_M \cdot \rho g \frac{\partial h}{\partial y} \cdot V ,$$

of

$$Y = C_M \cdot \rho g (h_1 - h_0) / b_E \cdot V ,$$

waarin:

Y = dwarskracht op tunnelelement (N)

C_M = massacoëfficiënt (-)

ρ = dichtheid water (kg/m³)

g = versnelling zwaartekracht (m/s²)

h	= waterspiegelhoogte	(m)
h_1	= idem, aan linkerzijde element (zie fig. 29)	(m)
h_o	= idem, aan rechterzijde element	(m)
y	= coördinaat	(m)
V	= volume element = $l_E b_E h_E$	(m ³)
l_E	= lengte element	(m)
b_E	= breedte element	(m)
h_E	= hoogte element	(m)

Voor C_M wordt de waarde 2.0 aangehouden. Het moment van de horizontale kracht ten opzichte van het ondervlak van het element is:

$$M_{x1} = \frac{1}{2} h_E Y ,$$

waarin: M_{x1} = moment om de x-as; aandeel dwarskracht (Nm)

De vertikale drukken en de daaruit resulterende krachten en momenten zijn in figuur 29 geschetst. Daarbij is onderscheid gemaakt tussen een open en een dichte spleet. Er is een waterspiegelverval van h_1-h_o over de breedte van het tunnelelement aanwezig.

Open spleet

Het water in de spleet stroomt (op de tekening van links naar rechts). Aan de linkerkant is een instroomverlies, onder het element is een wrijvingsverlies en aan de rechterzijde een uitstroomverlies. De stroomsnelheid voldoet aan:

$$h_1 - h_o = \frac{v^2}{2g} (\xi_i + \xi_w + \xi_u)$$

waarin:

v_{sp}	= stroomsnelheid in de spleet	(m/s)
ξ_i, ξ_w, ξ_u	= verliescoëfficiënten	(-)

Voor de verliescoëfficiënten geldt:

ξ_i	= 0,2 à 0,3	(instroomverlies voor $\mu = 0,7$ à 0,65)
ξ_w	= $\frac{2gb_E}{RC^2}$	(wrijvingsverlies)
ξ_u	= 1,0	(uitstroomverlies)

waarin:

R = hydraulische straal (m)
 C = coëfficiënt van Chézy ($\text{m}^{\frac{1}{2}}/\text{s}$)

De hydraulische straal van de spleet is gelijk aan de halve spleethoogte. De spleethoogte is 1 m.

Uitgaande van oneffenheden van de bodem onder het tunnelelement van 0,05 m wordt voor de weerstandscœfficiënt van Chézy een waarde van 35 à 40 $\text{m}^{\frac{1}{2}}/\text{s}$ gevonden. Substitutie van deze gegevens levert een verliescoëfficiënt voor de wrijving:

$$\xi_w = 0,5 \text{ à } 0,65$$

Afgerond is aangehouden:

instroomverlies	0,14 ($h_1 - h_0$)
wrijvingsverlies	0,31 ($h_1 - h_0$)
uitstroomverlies	0,55 ($h_1 - h_0$)

De resulterende drukken, krachten en momenten zijn in figuur 29 vermeld.

Deze grootheden zijn apart voor de onderzijde en de bovenzijde van het element bepaald. De laagste waarde van de drukhoogten aan beide zijden (in dit geval h_0) is als referentiehoogte genomen. De daarbij behorende druk (in dit geval $\rho g h_0$) is zowel bij de onderzijde als de bovenzijde van de werkelijke druk afgetrokken. Wanneer h_0 hoger wordt dan h_1 , dan houden de verticale krachten hetzelfde teken. De momenten keren echter van teken om.

Dichte spleet

Daar de afdichting aan de zijkant van de spleet met grind zal worden gemaakt, mag verwacht worden, dat hierdoor nog wel stroming plaatsvindt. Door de wrijvingsverliezen in het grind zal het drukverval over de afdichting echter groot zijn ten opzichte van het wrijvingsverlies in de spleet. Aangenomen is, dat het drukverval bij beide afdichtingen gelijk is aan de helft van het totale verval.

Resulterende krachten en momentenverloop

Het resulterende verloop van de dwarskracht, de verticale kracht en het moment om de langsas is in figuur 30 geschetst. De gebruikte gegevens komen overeen met de in de figuren 10, 11 en 12 gepresenteerde gevallen. Het verloop van M_{x2} (het moment door de verticale drukken) is enigszins vereenvoudigd, omdat het moment M_{x1} toch overheersend is.

Bij vergelijking van de berekende en de gemeten krachten, blijkt, dat het algemene beeld van het krachtenverloop wel overeenstemt. Het meest opvallende verschil is, dat tussen de verschijnselen die bij boeg en hek optreden in de meting fluctuerende krachten voorkomen. Deze krachten vinden hun oorsprong waarschijnlijk in de secundaire golven van het schip, welke in de bovenstaande afleiding buiten beschouwing zijn gelaten. De maatgevende krachten worden echter niet door deze secundaire golven veroorzaakt.

De orde van grootte van de krachten klopt redelijk, zij het dat de vertikale kracht een faktor 2 te klein wordt voorspeld. De verschillen tussen de open en de dichte spleet worden niet verklaard door de gepresenteerde theorie.

Schematisaties

In bovenstaande theoretische verklaring is uitgegaan van

- hydrostatische drukverdeling
- tweedimensionaal karakter.

Gezien de lengte van de beschouwde golf (in de orde van grootte van de scheeps-lengte) is een hydrostatische verdeling van de druk wel aannemelijk.

De breedte van het vaarwater is echter zo groot, dat niet over de gehele breedte de waterspiegeldaling even groot is. Over het algemeen wordt gesteld, dat op breed vaarwater de breedte van de spiegeldalingskuil ongeveer 10 maal de scheepsbreedte is. In figuur 31 wordt een voorbeeld gegeven van de gemeten waterspiegeldalingen op verschillende afstanden van het schip. Hieruit kan afgelezen worden, dat over een elementlengte aanzienlijke verschillen in waterspiegeldaling kunnen voorkomen.

Dit houdt in, dat de tweedimensionale beschouwing niet geoorloofd is. Wanneer een stripgewijze tweedimensionale beschouwing gegeven zou worden, zouden hieruit in de langsrichting van het element drukverhangen resulteren.

Deze verhangen worden vereffend door stroming in de langsrichting van het element. Vooral bij de dichte spleet kan deze stroming overheersen over de stroming door de afdichting. Deze driedimensionale effecten zijn nauwelijks voor berekening toegankelijk. De verschillen tussen de berekende en de gemeten krachten kunnen deels aan deze effecten geweten worden.

Met name bij de dichte spleet, waarbij de stroming in dwarsrichting onder de spleet zeer gering is, kunnen drukgolven in de lengterichting lopen. Dit kan

het relatief grote moment M_y en een afwijkende verticale kracht Z verklaren.

Konklusie:

In principe kunnen de gemeten krachten worden verklaard met de in [1] gepresenteerde theorie en een aangepaste schematisatie van het waterspiegelverloop. Voornamelijk door driedimensionale effecten kunnen er echter nog kwantitatieve verschillen optreden tussen gemeten en berekende krachten.

4.2 Berekening van de oplegkrachten

Om criteria te kunnen stellen ten aanzien van de scheepvaart is het nodig de maxima van de oplegreacties te kennen. Hiertoe zouden alle gemeten signalen van krachten en momenten omgerekend moeten worden naar signalen van de oplegreacties. Om deze intensieve procedure te vermijden is hier de volgende vereenvoudigde procedure toegepast:

- berekening van de oplegreacties voor 2 gevallen,
- afleiden van relaties tussen maxima van oplegkrachten en maxima van belastingen op het element,
- schatten van maxima van oplegreacties.

4.2.1 Voorbeeld berekening

In figuur 32 is de schematisatie voor de berekening van de oplegreacties aangegeven. Door de schematisatie is het systeem statisch bepaald en dus toegankelijk voor berekening.

In de figuren 33 en 34 zijn de berekende oplegreacties gegeven voor het geval maximum vloed, relatieve scheepssnelheid 6,7 m/s, schip passeert over element 4, spleet open en dicht (zie ook de figuren 10, 11 en 12). Uit de figuren valt af te lezen, dat het signaal van de dwarskracht op de pennen dezelfde vorm heeft als het signaal van de totale dwarskracht. Het verloop van de verticale krachten op de pennen wordt samengesteld uit het verloop van de verticale kracht en het moment om de langsas.

4.2.2 Afleiden van vereenvoudigde relaties

Bij beschouwing van de krachtsignalen op het element valt het volgende op te merken:

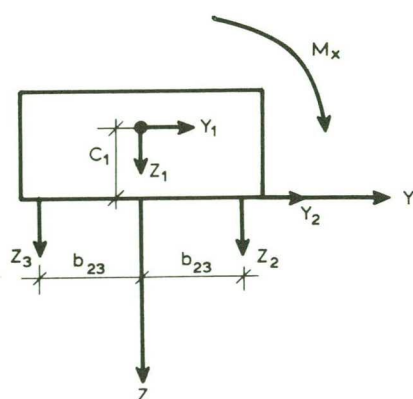
M_x is bij benadering recht evenredig met Y
 M_z is bij benadering recht evenredig met Y
 M_y is bij benadering recht evenredig met Z
 Z heeft een faseverschuiving van 90° ten opzichte van Y

Bij de krachtsignalen van de figuren 10, 11 en 12 (element 4) liggen de verhoudingen als volgt

spleet	open	dicht
M_x/Y (m)	6	7
M_z/Y (m)	20 à 30	80
M_y/Z (m)	-20 à -50	-60

Bij element 7 blijken de momenten M_z en M_y juist het omgekeerde teken te hebben.

De evenwichtsvergelijkingen worden hieronder gegeven:



M_x, Y, Z belastingen op element
 Y_1, Z_1 belasting op nok
 Z_2, Z_3 belasting per 2 vjzels
 Y_2 belasting per 4 vjzels

aanzicht op de kop

Moment om de nok (punt 1):

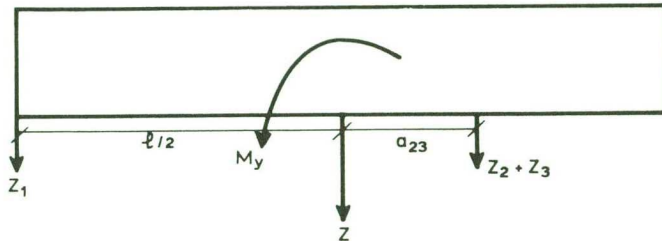
$$b_{23}Z_2 - b_{23}Z_3 - c_1Y_2 = M_x - c_1Y$$

evenwicht horizontaal:

$$Y_1 + Y_2 = Y$$

evenwicht vertikaal:

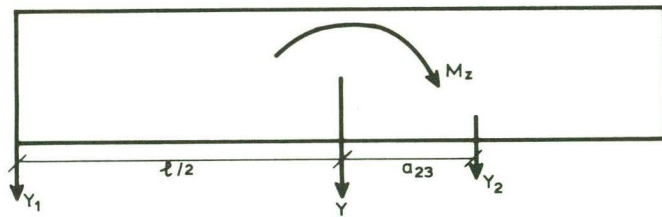
$$Z_1 + Z_2 + Z_3 = Z$$



zijaanzicht

moment om nok:

$$-(Z_2 + Z_3) (l/2 + a_{23}) = -Z l/2 + M_y$$



bovenaanzicht

moment om nok:

$$Y_2 (l/2 + a_{23}) = Y l/2 + M_x$$

dit levert de volgende belastingen op de opleggingen:

$$Y_2 = \frac{l/2}{l/2 + a_{23}} Y + \frac{1}{l/2 + a_{23}} M_x$$

$$Y_1 = \frac{a_{23}}{l/2 + a_{23}} Y - \frac{1}{l/2 + a_{23}} M_x$$

$$Z_2 + Z_3 = \frac{l/2}{l/2 + a_{23}} Z - \frac{1}{l/2 + a_{23}} M_y$$

$$Z_1 = \frac{a_{23}}{l/2 + a_{23}} Z + \frac{1}{l/2 + a_{23}} M_y$$

$$Z_2 - Z_3 = \frac{c_1}{b_{23}} Y_2 + \frac{1}{b_{23}} M_x - \frac{c_1}{b_{23}} Y$$

$$= \frac{-c_1 a_{23}}{b_{23} (l/2 + a_{23})} + \frac{c_1}{b_{23} (l/2 + a_{23})} M_x + \frac{1}{b_{23}} M_x$$

Hierin is:

$$\begin{aligned} l/2 &= 87 \text{ m} & l &= l_E = \text{lengte tunnelelement} \\ a_{2,3} &= 22,5 \text{ m} & &= \text{x-afstand penne tot oorsprong} \\ b_{2,3} &= 8,6 \text{ m} & &= \text{y-afstand penne tot oorsprong} \\ c_1 &= 5,6 \text{ m} & &= \text{hoogte nok boven ondervlak} \end{aligned}$$

zodat:

$$\begin{aligned} Y_1 &= 0,20 Y - 0,0091 M_Z \\ Y_2 &= 0,80 Y + 0,0091 M_Z \\ Z_1 &= 0,20 Z + 0,0091 M_Y \\ Z_2+Z_3 &= 0,80 Z - 0,0091 M_Y \\ Z_2-Z_3 &= -0,13 Y + 0,12 M_X + 0,006 M_Z \end{aligned}$$

Uit de vergelijkingen volgt, dat Z_2-Z_3 in fase is met Y . Z_2+Z_3 is in fase met Z (90° uit fase met Y). Het maximum kan geschat worden door bij in- en uit fase zijnde krachten van ongeveer gelijke grootte $0,8$ maal in-fase-zijnde-kracht + $0,8 \times$ uit-fase-zijnde-kracht te nemen. Bij grote verschillen van in- en uit fase zijnde kracht moet de oplegkracht uiteraard minstens gelijk aan de grootste van de twee worden genomen. De momenten M_Y en M_Z zijn steeds zo ongunstig mogelijk genomen.

4.2.3 Resultaten

De volgens bovenstaande vereenvoudigingen berekende maxima van de belastingen op de opleggingen zijn in de figuren 35 en 36 gegeven.

De verkregen resultaten zijn globaal. Wanneer een nauwkeuriger bepaling van de oplegkrachten gewenst is, moeten alle gemeten signalen omgerekend worden. Dit valt echter buiten het kader van de verstrekte opdracht.

Wanneer als criterium voor de toelaatbare krachten gehanteerd wordt, dat de totale horizontale kracht op de penne door scheepvaart een waarde van $1 \times 10^6 \text{ N}$ niet mag overschrijden, dan kan in figuur 35 afgelezen worden welke combinatie van passeerafstand en vaarsnelheid nog toelaatbaar is. Deze grens wordt in figuur 37 gepresenteerd. Overigens kan de toelaatbare horizontale kracht ook afhankelijk gesteld worden van de optredende verticale kracht, omdat het bij de horizontale kracht om een wrijvingskracht gaat.

5. Bepaling van belastingen op de elementen in het bouwdok

5.1 Statische belasting

De belasting door de waterbeweging die door de passerende scheepvaart veroorzaakt wordt op de elementen in het bouwdok kan worden gesplitst in een verhangkracht en een sleepkracht.

De verhangkracht op een lichaam luidt in het algemeen:

$$F_{Mx} = C_{Mx} \rho \frac{\partial u}{\partial t} \cdot V$$

Onder aanname van hydrostatische drukverdeling kan dit ook geschreven worden als:

$$F_{Mx} = C_{Mx} \rho g \frac{\partial h}{\partial x} \cdot V,$$

$$\text{aangezien dan } \rho \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial p}{\partial x} = \rho g \frac{\partial h}{\partial x}$$

Hierin is:

$$F_{Mx} = \text{traagheidskracht op lichaam in x-richting} \quad (\text{N})$$

$$C_{Mx} = \text{massacoëfficiënt in x-richting} \quad (-)$$

$$\rho = \text{dichtheid water} \quad (\text{kg/m}^3)$$

$$u = \text{stroomsnelheid in x-richting} \quad (\text{m/s})$$

$$V = \text{volume van het lichaam} \quad (\text{m}^3)$$

$$g = \text{versnelling zwaartekracht} \quad (\text{m/s}^2)$$

$$h = \text{hoogte wateroppervlak} \quad (\text{m})$$

Eenvoudigheidshalve wordt het verhang konstant verondersteld over de lengte van het element en bedraagt dan:

$$\frac{\partial h}{\partial x} = \frac{\Delta h}{l_E}$$

De coëfficiënt C_M bedraagt voor een dwars aangestroomde cylinder 2,0; voor een in de lengterichting aangestroomd schip ca. 1,05 à 1,2 en voor een dwarsaangestroomd schip 2 à 3.

Wanneer voor het tunnelelement in langsrichting aangenomen wordt: $C_{Mx} = 1,5$ en het maximaal gemeten verhang $\frac{\partial h}{\partial x} = \frac{0,20}{175} = 1,14 \cdot 10^{-3}$ aangehouden wordt, dan is de kracht in de lengterichting:

$$F_{Mx} = 1,5 \times 1000 \times 9,81 \times 1,14 \cdot 10^{-3} \times 31500 \text{ N}$$

$$F_{Mx} = 500 \text{ kN}$$

Een schatting van de dwarskracht levert

$$C_{My} = 2$$

$$\frac{\partial h}{\partial y} = \frac{0,01}{20} = 0,5 \cdot 10^{-3}$$

$$F_{My} = 2 \cdot 1000 \cdot 9,81 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} \times 31500 \text{ N}$$

$$F_{My} = 300 \text{ kN}$$

De sleepkracht in langsrichting kan geschreven worden als:

$$F_{Dx} = \frac{1}{2} \rho C_p \cdot u^2 \cdot A + \frac{1}{2} \rho C_F \cdot u^2 \cdot S$$

waarin:

$$F_{Dx} = \text{sleepkracht in x-richting} \quad (\text{N})$$

$$C_p = \text{coëfficiënt drukweerstand} \quad (-)$$

$$C_F = \text{coëfficiënt wrijving} \quad (-)$$

$$A = \text{aanstroomoppervlak} \quad (\text{m}^2)$$

$$S = \text{langsstroomoppervlak} \quad (\text{m}^2)$$

$$\text{Met } C_F \approx 3 \cdot 10^{-3}$$

$$\text{en } C_p \approx 1,5 \text{ volgt:}$$

$$F_{Dx} = \frac{1}{2} \cdot 1000 \cdot 1,5 \cdot 0,15^2 \cdot 9 \cdot 20 + \frac{1}{2} \cdot 1000 \cdot 3 \cdot 10^{-3} \cdot 0,15^2 \cdot (9+20) \cdot 2 \cdot 175 \text{ N} = 3 + 0,3 \text{ kN}$$

Het aandeel van de sleepkracht is dus verwaarloosbaar.

5.2 Statische verplaatsingen

In een notitie van Rijkswaterstaat, Directie Sluizen en Stuwen d.d. september 1980 wordt het afmeersysteem geschetst (zie figuur 38). In het onderstaande wordt een schatting gegeven van de krachten en verplaatsingen die in dit systeem optreden. De afmetingen en overige gegevens van het afmeersysteem zijn van genoemde notitie overgenomen, evenals de windbelasting.

De belasting bedraagt:

$$\text{windbelasting } \perp \text{ element } F_{wy} \quad 368 \text{ kN}$$

$$\text{windbelasting } // \text{ element } F_{wx} \quad 364 \text{ kN}$$

belasting door

scheepvaart: $\perp$ element F_{sy} 300 kN
 // element F_{sx} 500 kN

Bij de door schepen geïnduceerde belasting kunnen langs- en dwarskrachten gelijktijdig optreden. Bij de windbelasting is het wellicht realistischer één van beide te beschouwen.

De palen waartegen het element ligt worden als oneindig stijf beschouwd. De draden zijn voorgespannen en hebben een bepaalde stijfheid. In tabel 5 zijn de gegevens per draad uitgewerkt.

In eerste instantie schuift het element langs de palen. Wanneer de belasting ongunstig is kan het element om een van de buitenste palen gaan roteren (paal 6 wordt beschouwd).

Twee gevallen worden beschouwd:

- a Het element wordt door de dwarskracht tegen de palen geduwd. Nagegaan wordt, of bij de maximale langskracht één of meer van de draden "slack" (= slap) vallen.
- b Het element wordt door de dwarskracht van de palen afgetrokken. Nagegaan wordt, wat de maximale rotatie van het element wordt.

ad a Het evenwicht in langsrichting luidt:

$$F_{wx} + F_{sx} + \frac{\partial F}{\partial x} \cdot \Delta x = 0 ,$$

waarin: F_x = x-component reaktiekracht in de draden (N)

Δx = verplaatsing in x-richting (m)

De verplaatsing wordt:

$$x = \frac{F_{wx} + F_{sx}}{-\frac{\partial F}{\partial x}} = \frac{364 + 500}{2668} = 0,33 \text{ m}$$

De spanning in de draden wordt dan:

draad 1: $350 \text{ kN} + 0,33 \cdot 746 \text{ kN} = 596 \text{ kN}$

draad 2: $300 \text{ kN} + 0,33 \cdot 972 \text{ kN} = 620 \text{ kN}$

$$\text{draad 3: } 300 \text{ kN} - 0,33 \cdot 972 \text{ kN} = -20 \text{ kN}$$

$$\text{draad 4: } 350 \text{ kN} - 0,33 \cdot 746 \text{ kN} = 103 \text{ kN}$$

Er valt dus inderdaad één van de draden slap (draad 3). De overige berekende draadkrachten zijn daarmee niet meer geldig.

ad b Het evenwicht in langsrichting luidt nu:

$$F_{wx} = F_{sx} + \frac{\partial F}{\partial x} x + \frac{\partial F}{\partial \psi} \Delta\psi = 0$$

Het momenten evenwicht om paal 6:

$$(F_{wy} + F_{sy})a - (F_{wx} + F_{sx})b/2 + \frac{\partial M}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial M}{\partial \psi} \Delta\psi + M_v = 0 ,$$

waarin: M = moment van reactiekracht in draden (Nm)
 $\Delta\psi$ = rotatie van het element op paal 6 (rad)
 M_v = moment van voorspanning in draden (Nm)

Uit tabel 5 blijkt:

$$M_v = -45600 \text{ kN/m}$$

$$A = \frac{\partial F}{\partial x} = -2668 \text{ kN/m}$$

$$B = \frac{\partial F}{\partial \psi} = +209500 \text{ kN}$$

$$C = \frac{\partial M}{\partial x} = +209500 \text{ kN}$$

$$D = \frac{\partial M}{\partial \psi} = -22950000 \text{ kNm}$$

Kombinatie van de evenwichtsvergelijkingen levert:

$$\Delta\psi = \frac{-C(F_{wx} + F_{sx}) + Aa(F_{wy} + F_{sy}) - Ab/2(F_{wx} + F_{sx}) + AM_v}{BC - AD}$$

Dan volgt:

$$\Delta\psi = 0,8 \cdot 10^{-2} \text{ en } \Delta x = 1 \text{ m}$$

Dit betekent, dat het element bij paal 5 0,9 m van de paal los kan komen.

Wanneer de langskracht van de windbelasting niet meegenomen wordt, volgt:

$$\Delta\psi = 0,4 \cdot 10^{-2} \quad \text{en} \quad \Delta x = 0,5 \text{ m.}$$

In dat geval komt het element 0,5 m vrij van de paal.

5.3 Dynamische effecten

De gevallen a en b van 5.2 worden hier nogmaals beschouwd

ad a De totale massa bedraagt:

$$m + m'_x \approx 1,5 m = 1,5 \times \rho \cdot b_E \cdot h_E \cdot l_E = 0,45 \cdot 10^8 \text{ kg}$$

waarin: m = massa element (kg)

m'_x = toegevoegde massa voor x-richting (kg)

De veerstijfheid bedraagt, wanneer nog geen draad is slap gevallen:

$$\frac{\partial F_x}{\partial x} = A = -2668 \text{ kN/m}$$

De eigenfrequentie wordt daarmee:

$$\omega = \sqrt{\frac{A}{m+m'_x}} = 0,24 \text{ s}^{-1}$$

De eigen periode is $T = \frac{2\pi}{\omega} = 25 \text{ s.}$

Wat de scheepsgeïnduceerde belasting betreft, kan een spiegeldalingskuil gezien worden als een belasting met een periode van ca. 80 s. Deze belasting komt na ca. 140 s terug.

Gezien de verhouding van belasting frequentie en eigen frequentie hoeft geen rekening gehouden te worden met opslingering. Het slap vallen van draad 3 heeft hierop nauwelijks invloed, omdat dit slechts gedurende een klein deel van de periode optreedt, en aan dezelfde zijde nog een draad gespannen blijft staan. De periodiciteit van de windbelasting is hierbij buiten beschouwing gelaten.

ad b Het massatraagheidsmoment bedraagt:

$$I_6 = I_z + I'_z + a^2 (m + m'_y)$$

waarin I_6 = totale massatraagheidsmoment voor rotatie om paal 6 (kg m²)

I_z = massatraagheidsmoment om zwaartepunt (kg m²)

$$\begin{aligned} I'_z &= \text{idem toegevoegd} & (\text{kgm}^2) \\ a &= \text{afstand paal 6 - zwaartepunt} & (\text{m}) \\ m'_y &= \text{toegevoegde massa voor beweging in y-richting} & (\text{kg}) \end{aligned}$$

Bij benadering geldt: $I'_z = I_z$ en $m'_y = m$
 zodat $I_6 = 36,4 \cdot 10^{10} \text{ kg m}^2$

De rotatiestijfheid bedraagt:

$$\frac{\partial M}{\partial \psi} = D = -2,3 \cdot 10^{10} \text{ Nm}$$

De eigenfrequentie voor rotatie wordt daarmee:

$$\omega = \sqrt{\frac{-D}{I_6}} = 0,25$$

$$\text{zodat } T = \frac{2\pi}{\omega} = 25 \text{ s}$$

Ook voor deze beweging hoeft dus geen opslinging verwacht te worden. Wel kan het terugdraaiende element tegen de palen 5 en 7 stoten.

Aangenomen wordt, dat de stoot voornamelijk door paal 5 opgevangen wordt. Omdat de beweging quasi-statisch is, heeft deze dezelfde periode als de belasting.

De maximale giersnelheid wordt dan:

(langskracht wind niet meegerekend)

$$\dot{\psi}_{\max} = \omega \psi_{\max} = \frac{2\pi}{T} \psi_{\max} = \frac{2\pi}{80} \cdot 0,4 \cdot 10^{-2}$$

$$\dot{\psi}_{\max} = 3 \cdot 10^{-4}$$

De energie van de draaibeweging moet opgevangen worden door paal 5:

$$-\frac{1}{2} I_6 \dot{\psi}^2 = \frac{1}{2} \frac{F_5^2}{C}$$

waarin F_5 = maximale reactiekracht paal 5

C = veerstijfheid paal 5

(N)

(N/m)

Er volgt:

$$\frac{F_5^2}{C} = 33 \cdot 10^3 \text{ Nm}$$

De optredende maximale kracht hangt af van de stijfheid van de paal. Van de dimensies van de palen is nog niets bekend. Wanneer bijvoorbeeld aangenomen wordt, dat een paal 5 x zo stijf is als een draad, dan is

$$C = 5 \cdot 10^6 \text{ N/m}$$

Dan zou de maximale paalkracht door de stoot bedragen: $F_6 \approx 400 \text{ kN}$.

Aangezien dit ongeveer 1,5 maal de belasting door de voorspanning is, wordt dit wel toelaatbaar verondersteld.

De verplaatsingen en belastingen, die uit bovenstaande berekeningen volgen, zijn op het eerste gezicht niet ontoelaatbaar. Wanneer de rotatie van het element wegens nader te stellen eisen toch ontoelaatbaar geacht wordt, dan wordt een afmeersysteem aanbevolen, zoals onderin figuur 38 geschetst is, omdat hierbij minder snel rotaties optreden.

6. Konsekwenties voor de scheepvaart

6.1 Samenstelling scheepvaart

De in hoofdstuk 4 bepaalde maximale oplegkrachten zijn niet toelaatbaar voor de opleggingen. Dit houdt in, dat restrikties aan de scheepvaart opgelegd moeten worden. Uit het voorgaande blijkt, dat zowel het vergroten van de passeer-afstand als het beperken van de scheepssnelheid zeer effectief zullen zijn. Daarnaast zullen de passerende schepen over het algemeen kleiner zijn dan het voor dit onderzoek gekozen schip. Afhankelijk van de verdeling van scheepsgrootten zou het doelmatiger kunnen zijn alleen schepen boven een bepaalde klasse beperkingen op te leggen. Om in deze materie enig zich te krijgen, zijn metingen geanalyseerd van de verkeerspost Hansweert in de periode januari - maart 1977.

In figuur 39 is van totaal 200 aselekt gekozen schepen de verdeling in tonnagelassen gegeven. In de figuren 40... 44 zijn per tonnageklasse de gemeten snelheden door het water ($v_{s,r}$) gegeven.

Uit de figuren valt af te lezen, dat het vrij laten van de scheepssnelheden niet toelaatbaar zal zijn, daar de grootste schepen met relatieve snelheden tot 9 m/s varen.

Verder is af te lezen, dat een differentiatie van maatregelen voor schepen beneden en boven 25.000 DWT wel doelmatig zou kunnen zijn. Het aantal schepen boven 25.000 DWT is laag (circa 5 per dag gemiddeld, waarvan 2 à 3 opvarend), zodat extra begeleiding van deze schepen wel mogelijk geacht kan worden. Om een dergelijke differentiatie te kunnen maken, dienen de resultaten van dit onderzoek echter omgerekend te worden naar kleinere schepen.

6.2 Omschaling naar andere schepen

In hoofdstuk 4 is gebleken, dat de krachten evenredig zijn met het waterspiegelverschil aan twee zijanten van het tunnelelement. Bij extrapolatie naar andere schepen dient dus dit waterspiegelverschil de basis te zijn. Daar de breedte van het element konstant is, kan dit worden vervangen door de waterspiegelhelling.

Een algemeen gangbare methode om de waterspiegel daling (dus het maximum) te berekenen is de methode Schijf (zie [2]). Dit is een één dimensionale methode. Hiertoe dienen de breedte en diepte van het vaarwater bekend te zijn, evenals het grootspant (breedte en diepgang) van het schip en de scheepssnelheid. Aangezien het een één dimensionale methode is, worden de waterspiegeldaling en de retour stroom verondersteld konstant te zijn over de breedte. Bij breed vaarwater is dit over het algemeen niet zo. De methode kan echter toch tot goede resultaten leiden, wanneer een equivalente waterbreedte ingevoerd wordt. Op basis van de metingen van retourstroom in het schaalmodel van het onderhavige onderzoek is deze breedte op $2,2 \times$ de scheepslengte gesteld. Deze breedte is iteratief bepaald, zodanig dat het debiet Q_1

$$Q_1 = b_{eq} \times h \times u_{retour}$$

berekend met

$$\begin{aligned} b_{eq} &= \text{equivalente vaarwegbreedte} \\ h &= \text{vaarwegdiepte} \\ u_{retour} &= \text{retourstroom volgens Schijf} \end{aligned}$$

gelijk was aan het gemeten retourdebiet.

De waterspiegelhelling is bepaald door de berekende daling te delen door een lengte L_1 , die evenredig was met de scheepslengte. Uit de metingen bleek, dat L_1 bovendien van de scheepssnelheid afhangt. Als goede benadering werd gevonden:

$$\begin{aligned} L_1 &= 0,3 L && \text{voor } V_{schip} \leq 0,7 V_{grens} \\ L_1 &= 0,1 (V_{grens} - V_{schip}) && \text{voor } V_{schip} \geq 0,7 V_{grens} \end{aligned}$$

$$\text{waarin } L_1 = \frac{z_{max}}{\partial z / \partial y_{max}}$$

$$z = \text{waterspiegeldaling}$$

$$V_{grens} = \text{grenssnelheid volgens Schijf}$$

De afmetingen van de schepen, waarvoor deze exercitie uitgevoerd is, zijn in tabel 4 gegeven. De berekende waterspiegelhellingen zijn in de figuren 45 ... 48 weergegeven.

Daarnaast speelt de invloed van de passeerafstand een rol. Aangenomen is, dat de afstand, waarbij de waterspiegeldaling (en helling) afgenomen is tot een bepaald percentage van de daling bij het schip, recht evenredig is met de scheepslengte. Dit is in overeenstemming met de equivalente vaarwegbreedte.

Het doel is nu figuur 37 te vertalen naar andere schepen. Daartoe zijn drie kritische waterspiegelhellingen vastgesteld, die overeenkomen met de drie kritische scheepssnelheden in figuur 37. De met deze hellingen overeenkomende scheepssnelheden zijn per schip afgelezen. De bijbehorende passeerafstand is evenredig met de scheepslengte omgeschaald. Het resultaat is in de figuren 49 en 50 gegeven. De waterstand heeft een invloed op de kritieke snelheden. De berekende invloed hiervan komt voor het onderzochte schip (de 73.000 DWT tanker) goed overeen met de metingen. Opvallend is dat bij passeerafstand 0 de kritieke snelheid nauwelijks afhankelijk is van de scheepsafmetingen. Dit komt omdat de waterspiegeldaling bij een kleiner schip welliswaar kleiner wordt, maar de helling blijft nagenoeg gelijk. De omschaling is in dit geval enigszins conservatief, omdat de waterspiegeldalingen (en hellingen) bij een kleiner schip niet over de gehele lengte van het tunnelelement optreden. Bij grotere passeerafstanden kunnen de kleinere schepen wel harder varen dan de grotere.

LITERATUUR

- 1 Afzinken van de Botlektunnel,
Krachten op en verplaatsingen van de tunnelementen tengevolge van
stroomdruk
Waterloopkundig Laboratorium, verslag modelonderzoek M 1458, juni 1978
- 2 SCHIJF, J.B. en JANSEN, P.Ph.
Rome, XVIIIth Int. Navigation Congress
Section 1, Communication 1, 1953

Symbool	omschrijving	waarde	eenheid
L_{oa}	lengte over alles	238,03	m
L_{pp}	lengte tussen loodlijnen	226,20	m
B	breedte	35,47	m
T	diepgang	12,75	m
∇	waterverplaatsing	81692	m ³
C_b	block coëfficiënt	0,795	-
P	vermogen	19070	kW
RPS	schroeftoerental	2,0	s ⁻¹
V_s	dienstsnelheid	9,07	m/s
DWT	laadvermogen	73.000	DWT

Tabel 1 Scheepsafmetingen

getij- fase	spleet	element nr.	X 10 ⁶ N	Y 10 ⁶ N	Z 10 ⁶ N	M_x 10 ⁷ Nm	M_y 10 ⁷ Nm	M_z 10 ⁷ Nm
eb	dicht	4	0,07	0,15	-0,2	0,1	-1	-0,5
		7	0,10	0,4	-0,4	0,4	0	-0,4
vloed	dicht	4	-0,1	-0,4	-0,35	-0,35	1	-0,5
		7	-0,15	-0,6	-0,65	-0,65	-0,4	-0,5
vloed	open	4	-0,15	-0,4	-0,25	-0,4	0	0

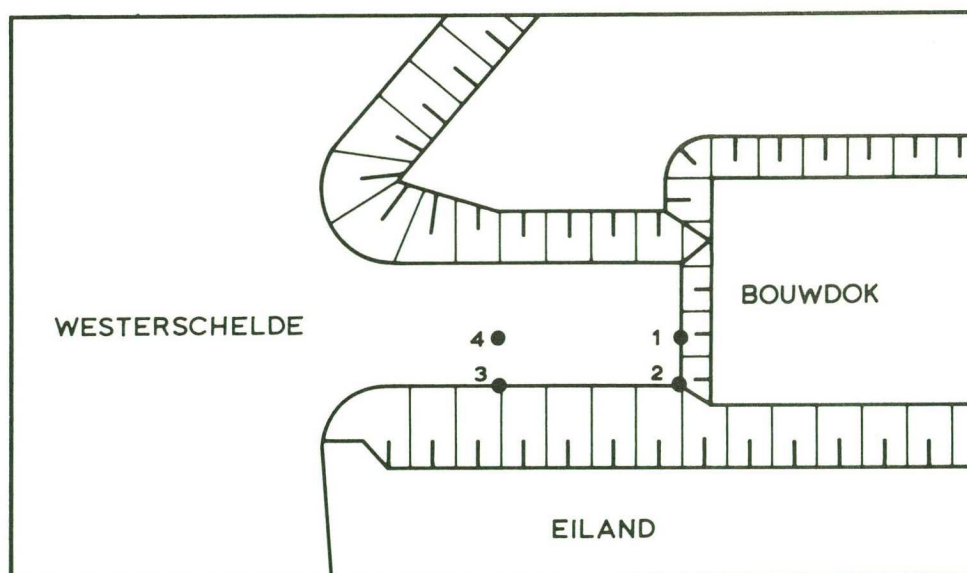
Tabel 2 Gemiddelde stroomkrachten

getij- fase	afstand tot TE m	V _{schip} rel. m/s	Y _{max} 10 ⁶ N	Z _{max} 10 ⁶ N	M _x max 10 ⁷ Nm	M _y max 10 ⁷ Nm	M _z max 10 ⁷ Nm	Y ₁ max 10 ⁶ N	Y ₂ max 10 ⁶ N	Z ₁ max 10 ⁶ N	Z ₂ +Z ₃ 10 ⁶ N	Z ₂ -Z ₃ 10 ⁶ N	Z _{2/3} 10 ⁶ N
vloed	0	3	1,0	0,6	0,5	1,6	4,4	0,6	1,2	0,2	0,6	0,8	0,55
		5	2,6	1,5	1,4	5,6	12,0	1,6	3,2	0,8	1,7	2,1	1,5
		7	7,0	4,4	4,0	12,4	30,0	4,1	8,3	2,0	4,6	5,7	4,1
	175	5	0,3	0,25	0,25	0,7	1,0	0,2	0,3	0,1	0,3	0,4	0,3
		7	0,9	0,6	0,6	2,2	3,6	0,5	1,0	0,3	0,7	0,8	0,6
		9	3,0	1,4	2,4	9,0	11,6	1,6	3,4	1,1	1,9	3,2	2,0
	350	7	0,4	0,3	0,2	1,2	0,8	0,2	0,4	0,1	0,35	0,2	0,2
		9	0,8	0,7	0,4	1,4	2,0	0,4	0,8	0,2	0,7	0,5	0,5
eb	0	3	1,0	1,2	0,5	2,2	1,8	0,4	1,0	0,4	1,2	0,6	0,7
		5	2,7	2,5	1,6	8,6	10	1,5	3,1	1,3	2,8	2,2	2,0
		7	8,0	7,0	6,0	18	60	7,1	11,5	3,0	7,2	9,8	6,8
	175	5	0,5	0,5	0,3	1,2	1,0	0,2	0,5	0,2	0,5	0,45	0,4
		7	0,9	0,9	0,6	2,0	2,6	0,4	0,9	0,4	0,9	0,75	0,7
		9	5,0	3,0	2,0	8,0	10	1,9	4,9	1,3	3,1	2,4	2,2
	350	7	0,5	0,4	0,3	1,2	1,2	0,2	0,5	0,2	0,4	0,5	0,4
		9	1,0	0,8	0,5	1,8	2,0	0,4	1,0	0,4	0,8	0,6	0,6

Tabel 3 Berekening maximale krachten op opleggingen

vaart	eb/vl.	aantal elementen	V_{schip} m/s	$h_{1,2}$ m	$h_{3,4}$ m	$h_1 - h_{4\text{max}}$ m
A	vl	0	8,75	0,12	0,09	0,09
B	vl	0	10,75	0,13	0,13	0,11
C	eb	0	7,35	0,20	0,25	0,20
E	eb	5	5,70	0,08	0,13	0,12
F	eb	5	7,42	0,15	0,20	0,17
G	eb	12	5,80	0,07	0,10	0,10
H	eb	12	7,45	0,15	0,19	0,18

Tabel 4 Waterspiegeldalingen in bouwdok



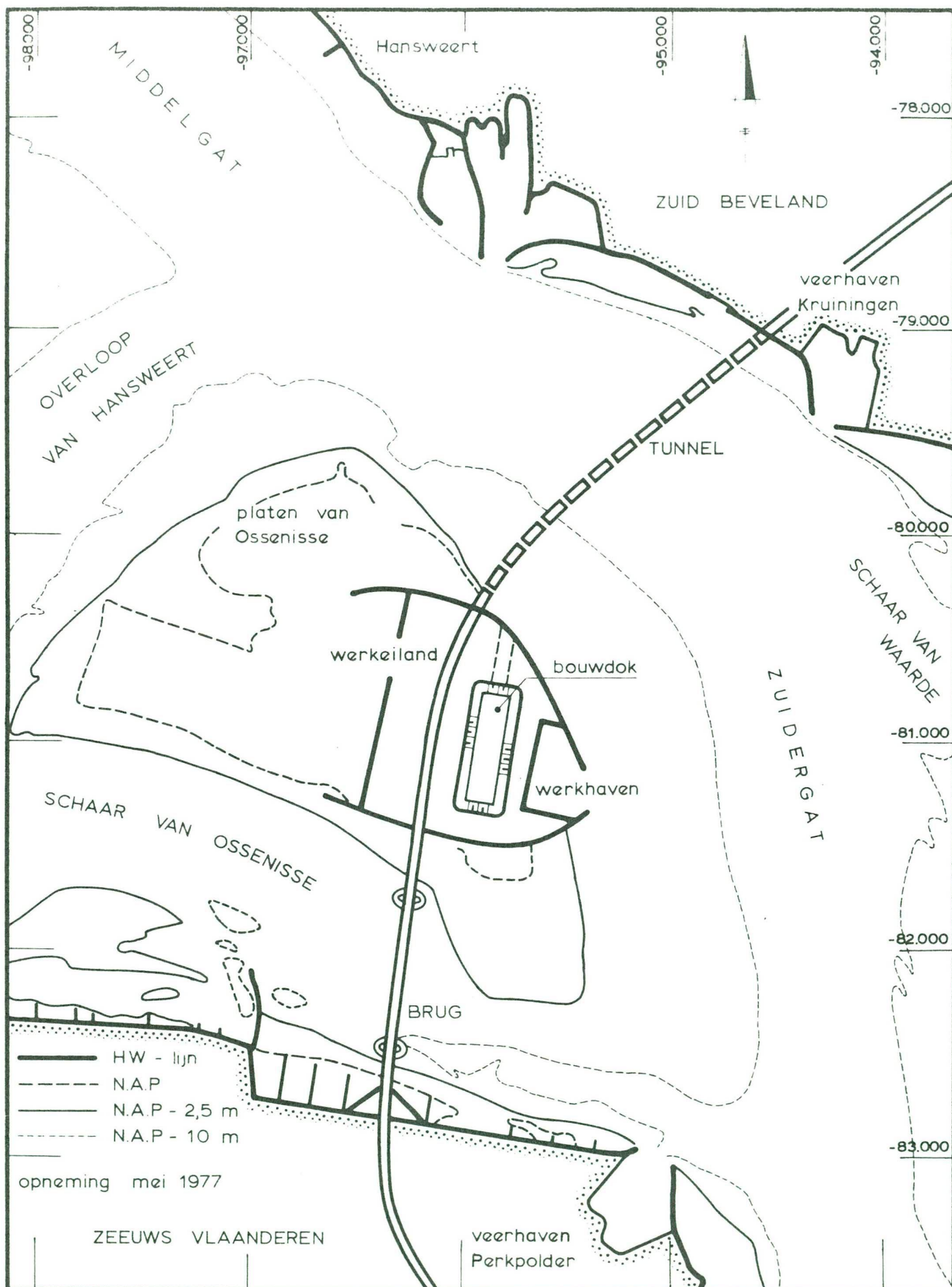
● positie wavo

draadnummer		1	2	3	4	totaal
lengte	m	100	87,6	87,6	100	
diameter	mm	48	48	48	48	
veerstijfheid C	kN/m'	1037	1184	1184	1037	
x t.o.v. paal 6	m	- 32,5	- 32,5	142,5	142,5	
y t.o.v. paal 6	m	19,5	0	0	19,5	
hoek α	o	44,03	34,81	145,19	135,97	
hoek β	o	149,04	180	0	7,8	
straal R	m	37,9	32,5	142,5	143,8	
$\alpha - \beta$	o	- 105,01	- 145,2	145,2	128,2	
$\sin(\alpha - \beta)$	-	- 0,966	- 0,571	0,571	0,786	
$\frac{\partial L}{\partial \psi} = \sin(\alpha - \beta) R$	m	- 37,7	- 18,6	81,4	113	
$\frac{\partial F}{\partial \psi} = C \frac{\partial L}{\partial \psi}$	10^3 kN	- 39,0	- 22,0	96,4	117	
$\frac{\partial M}{\partial \psi} = \frac{\partial F}{\partial \psi} \sin(\alpha - \beta)$	10^6 kNm	- 1,47	- 0,41	- 7,85	- 13,22	- 22,95
$\frac{\partial L}{\partial x} = \cos \alpha$	-	0,719	0,821	- 0,821	- 0,719	
$\frac{\partial F}{\partial x} = \cos \alpha C$	kN/m'	746	972	- 972	- 746	
$\frac{\partial F_x}{\partial x} = \cos^2 \alpha C$	kN/m'	-536	- 798	- 798	- 536	-2668
$\frac{\partial M}{\partial x}$	10^3 kN	28,1	18,1	79,1	84,2	+ 209,4
$\frac{\partial F_x}{\partial \psi}$	10^3 kN	28,1	18,1	79,1	84,2	+ 209,4
voorspanning F_v	kN	350	300	300	350	
M_v	10^3 kNm	13,2	5,6	- 24,4	- 39,6	- 45,2

Tabel 5 Gegevens draden

type	DWT	L m	B m	T m
tanker	100.000	252	38	14,5
tanker	73.000	226	35,5	12,75
tanker	50.000	208	29	11,1
tanker	25.000	165	22	9,0
vrachtschip	12.000	138	19,9	8,9
vrachtschip	6.000	107	16,3	7,0
vrachtschip	3.000	81	12,8	5,5

Tabel 6 Beschouwde schepen



SITUATIE VASTE OEERVERBINDING WESTERSCHELDE

SCHAAL 1: 25.000

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

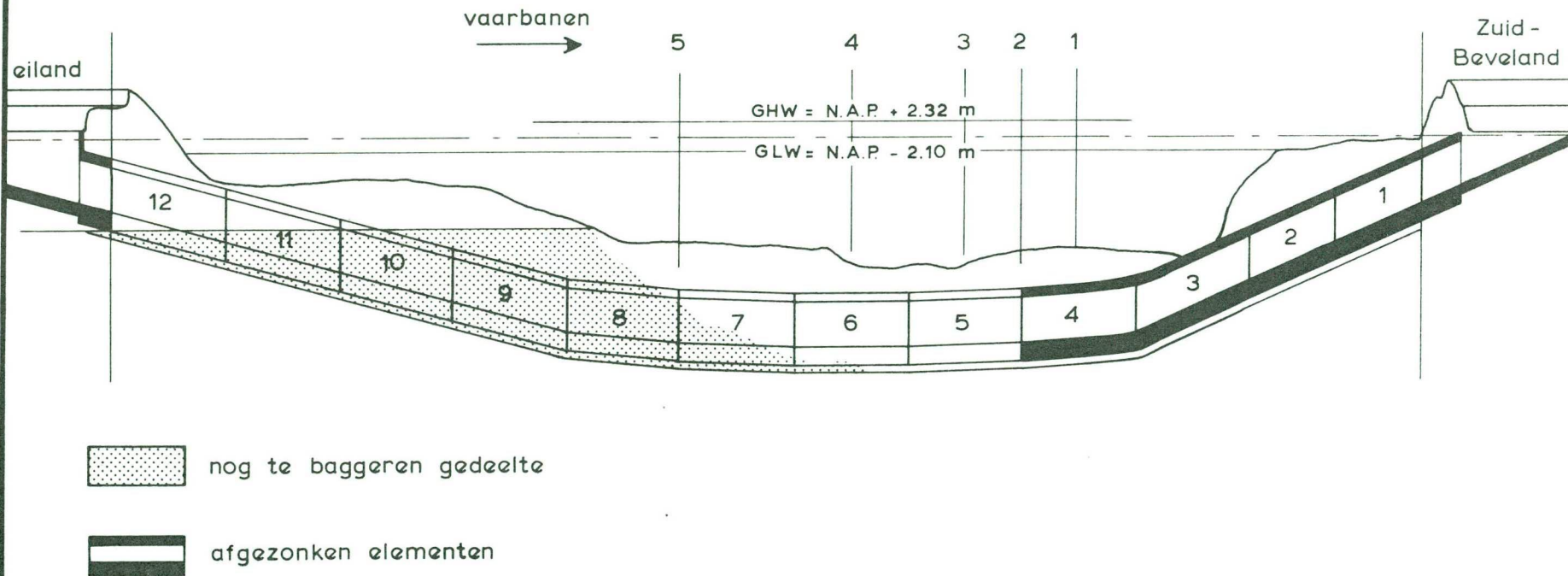
M 1738

FIG. 1

LANGSDOORSNEDE TUNNEL

AFZINKFASE 4

SCHAAL hor. 1 : 10.000
vert. 1 : 1.000



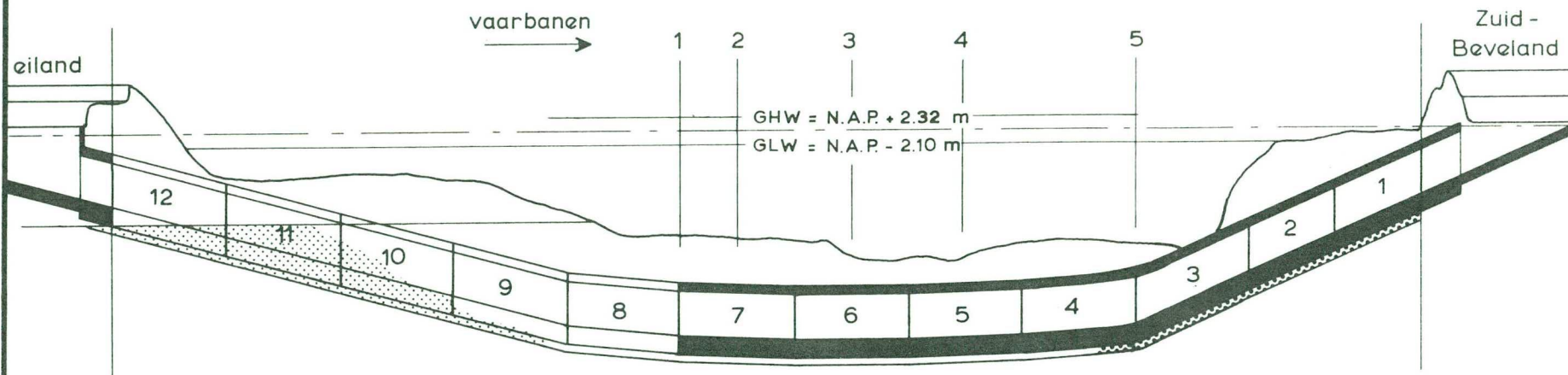
LANGSDOORSNEDE TUNNEL

AFZINKFASE 7

SCHAAL hor. 1:10.000
vert. 1:1.000

M 1738

FIG. 3



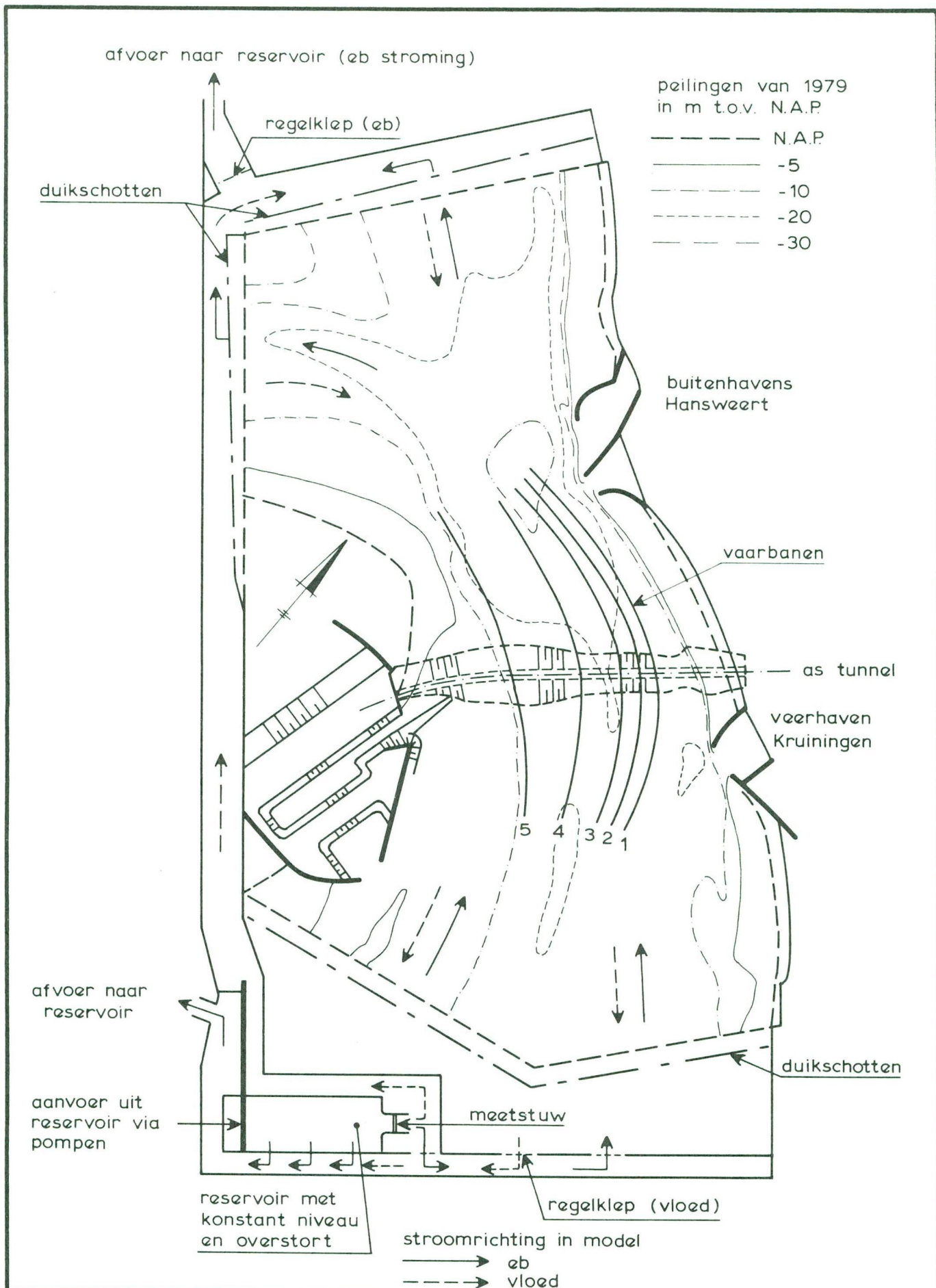
nog te baggeren gedeelte



onderspoeld gedeelte



afgezonken elementen



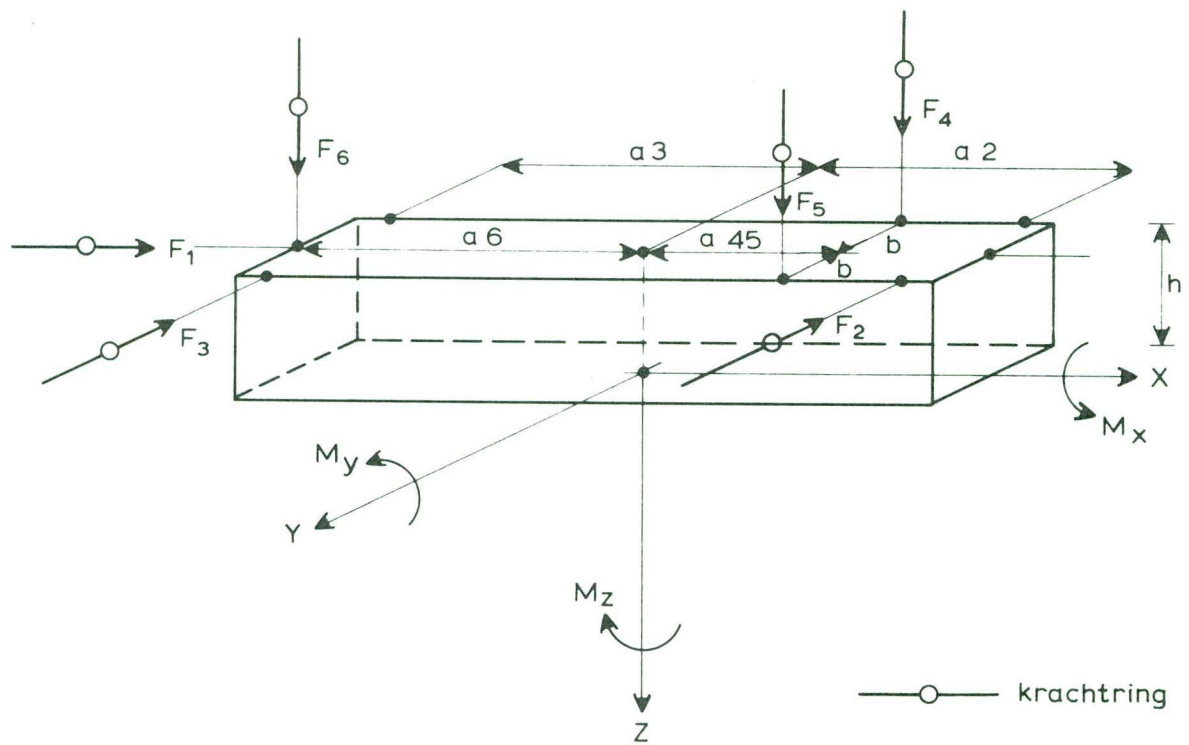
OVERZICHT MODEL MET VAARBANEN

SCHAAL 1:300

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1738

FIG. 4



Analoge omrekening krachten

$$X = F_1$$

$$Y = -F_2 - F_3$$

$$Z = F_4 + F_5 + F_6$$

$$M_x = -hF_2 - hF_3 - bF_4 + bF_5$$

$$M_y = -hF_1 + a_6 F_6 - a_{45} F_4 - a_{45} F_5$$

$$M_z = -a_2 F_2 + a_3 F_3$$

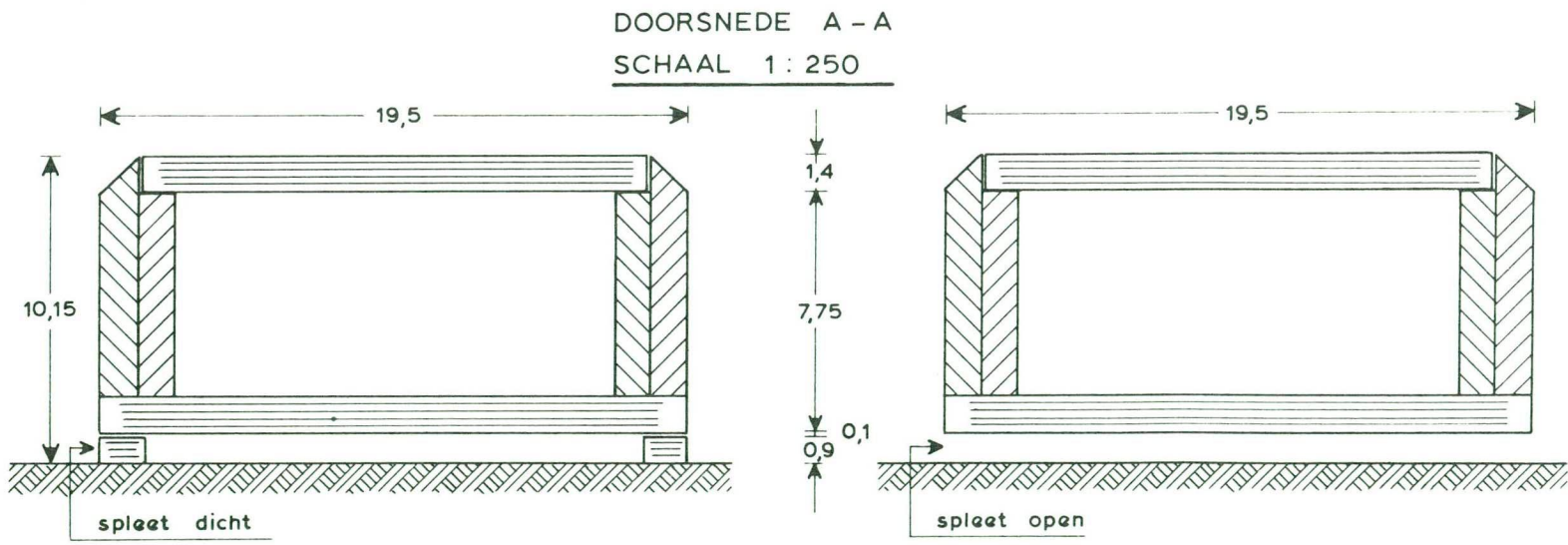
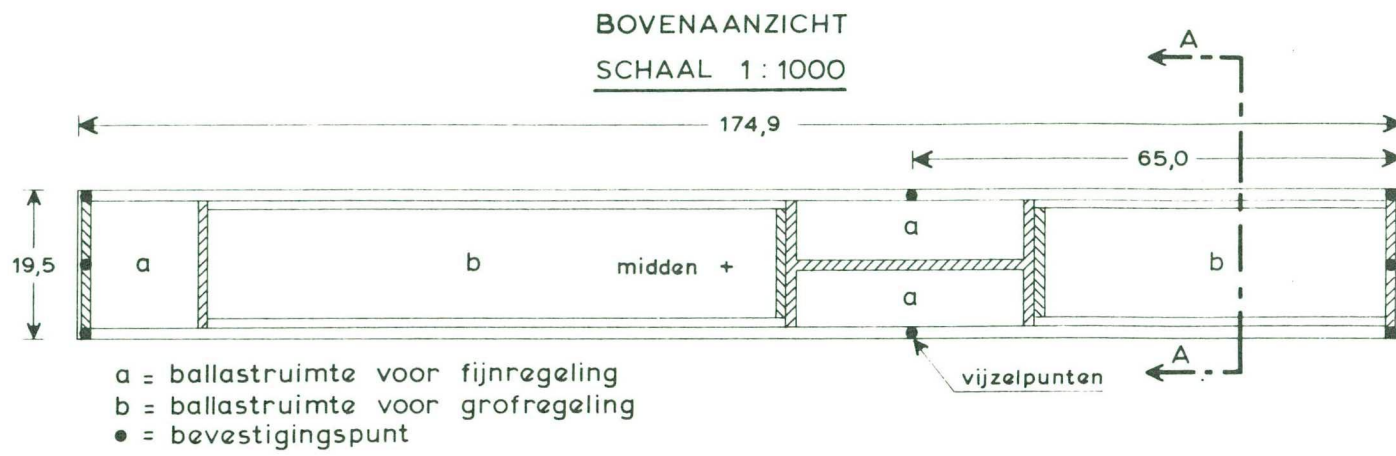
coëfficiënten $a_2, a_3, a_{45}, a_6, b, h$ instelbaar. > 0

MEETSYSTEEM TUNNELELEMENT

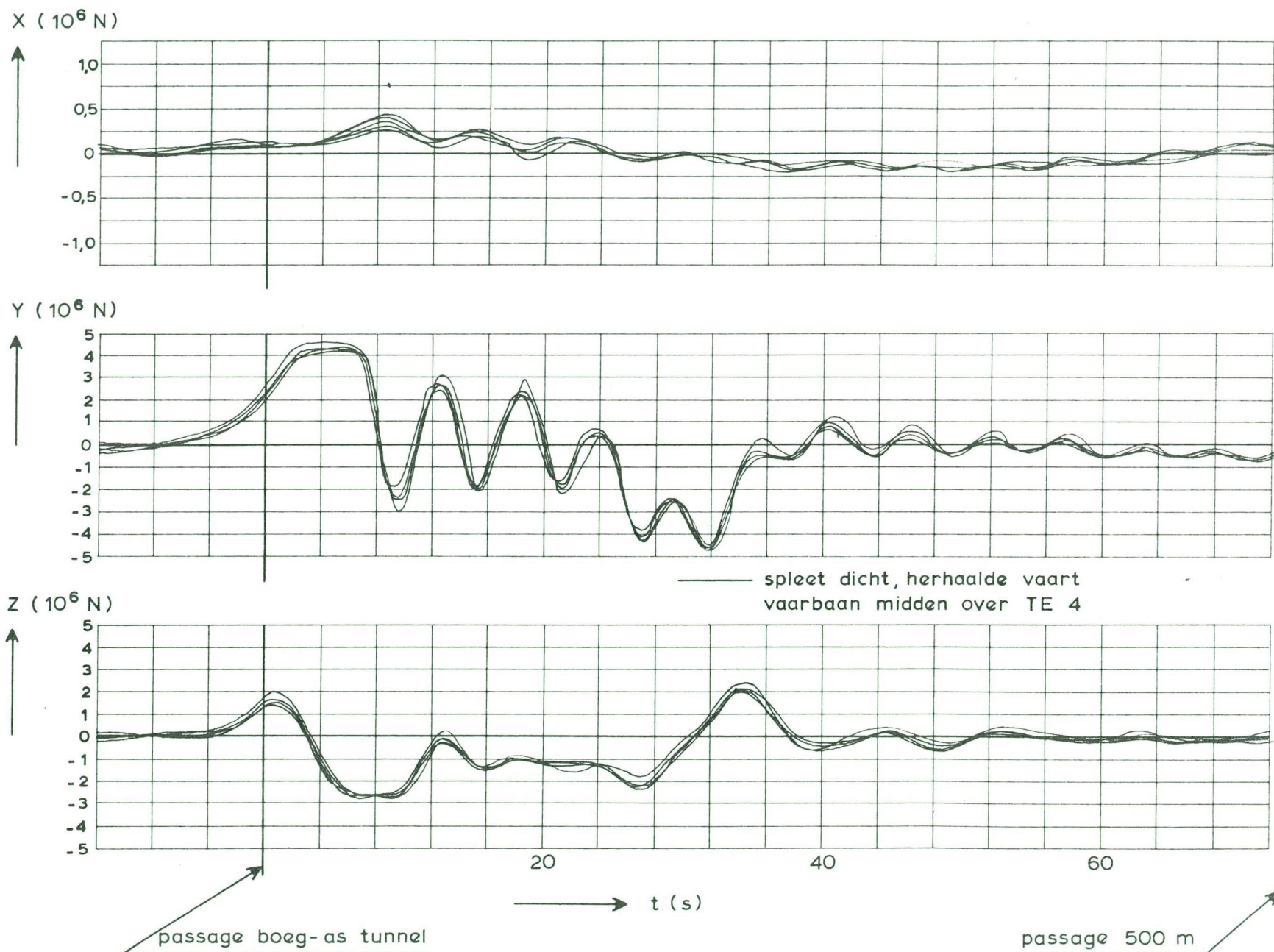
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

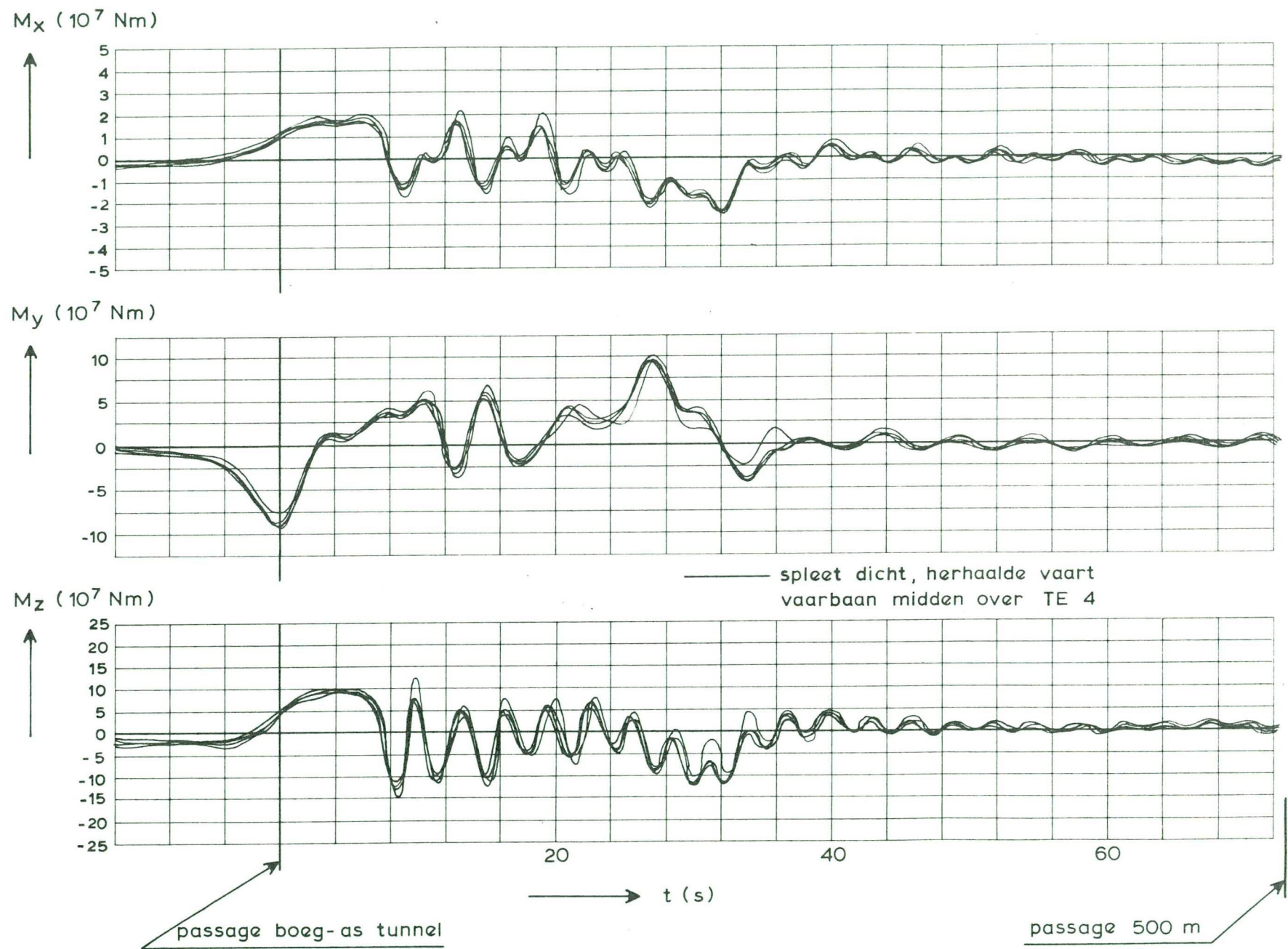
M 1738

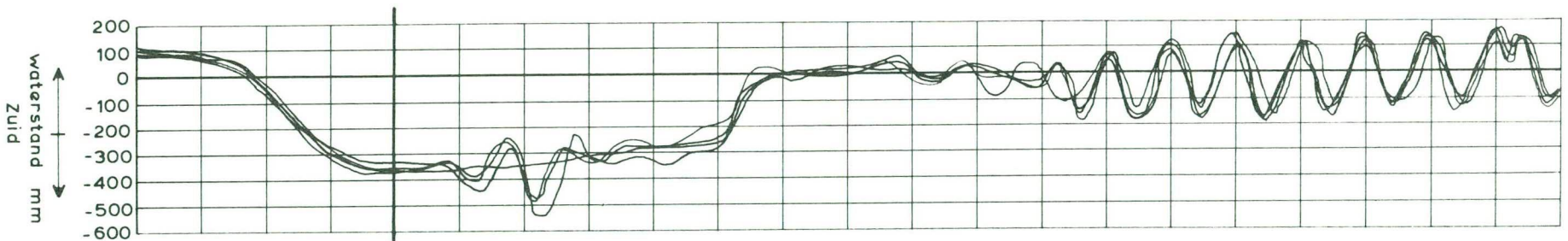
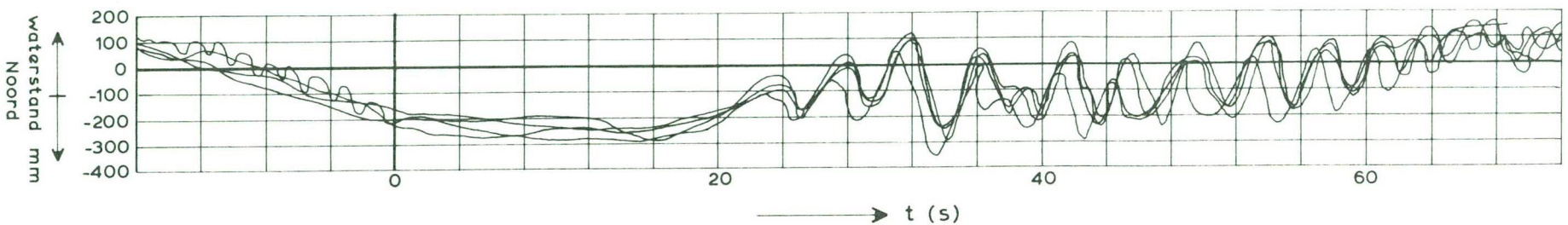
FIG. 5



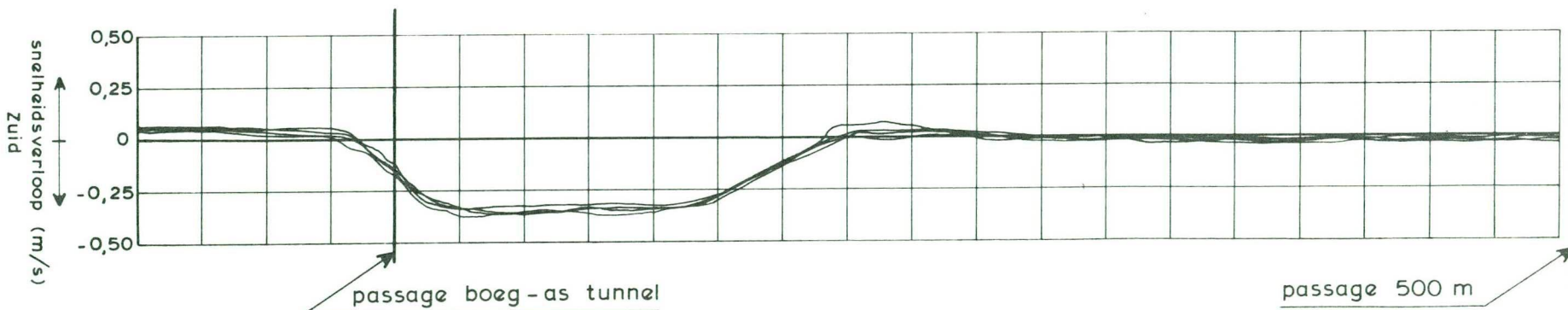
maten in m







— spleet dicht, herhaalde vaart
vaarbaan midden over TE 4



VOORBEELD REGISTRATIES

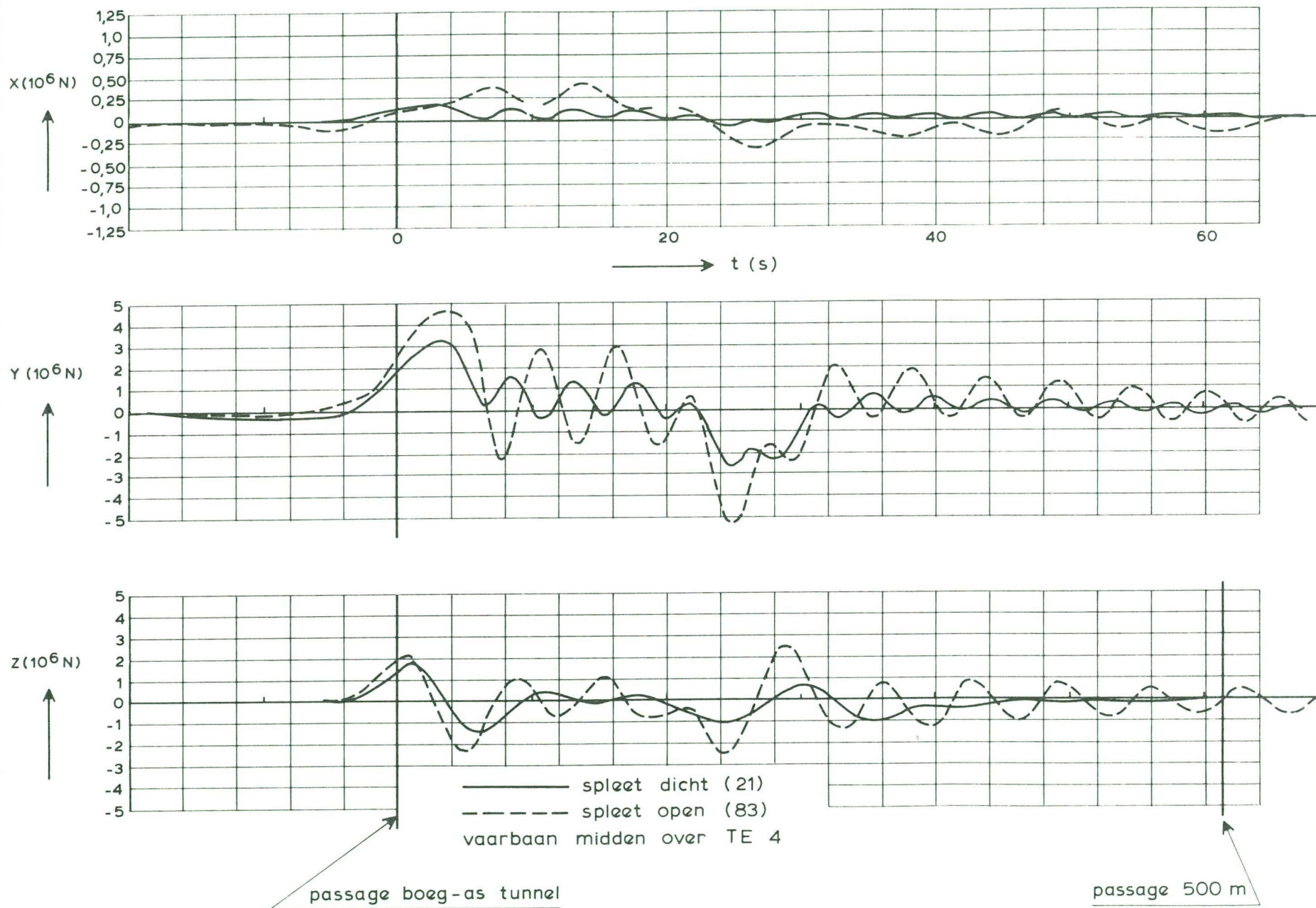
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

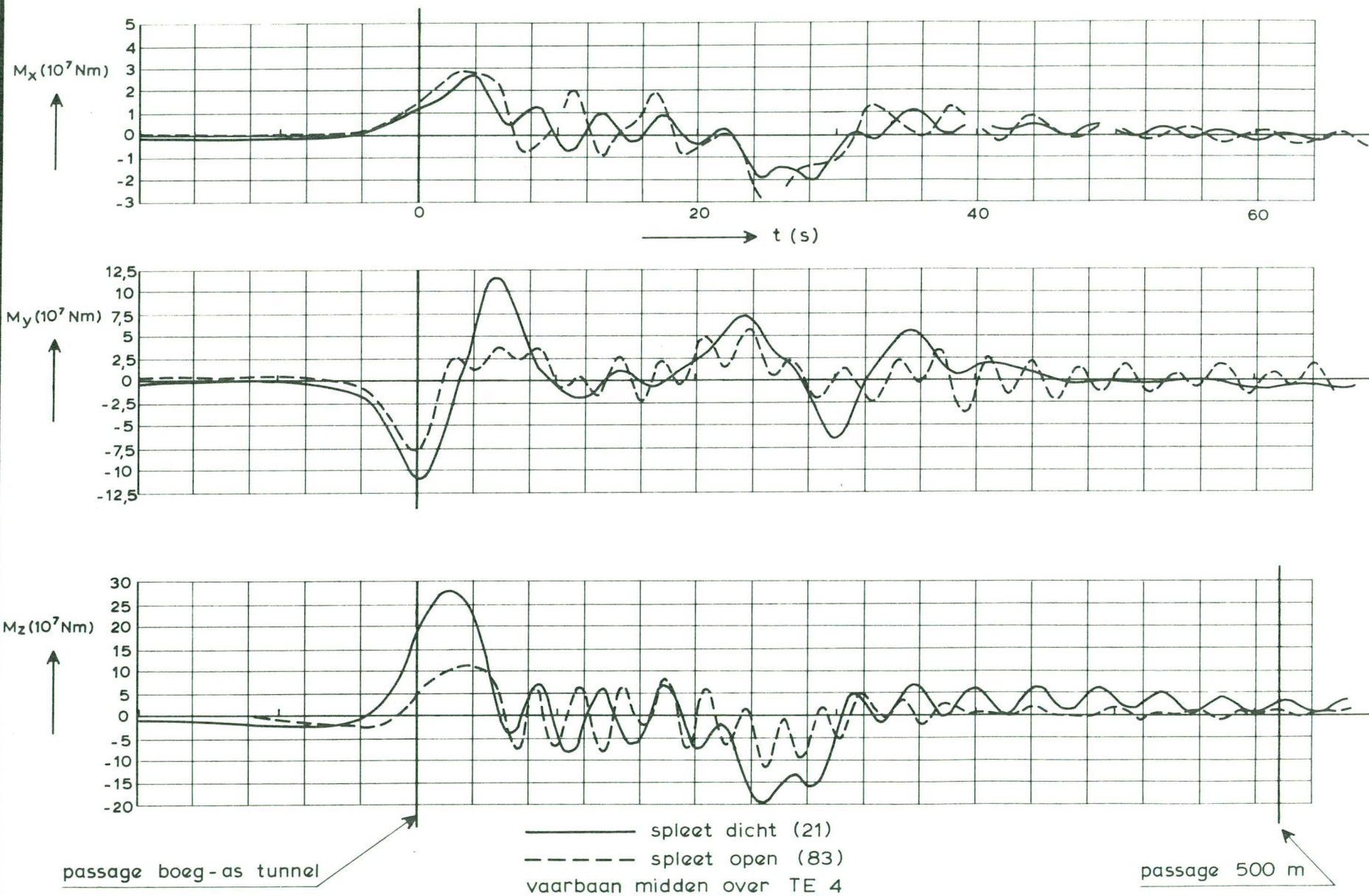
TE 4 STIL W.

$V_{s,r} = 6,5 \text{ m/s}$

M 1738

FIG. 9





VOORBEELD REGISTRATIES

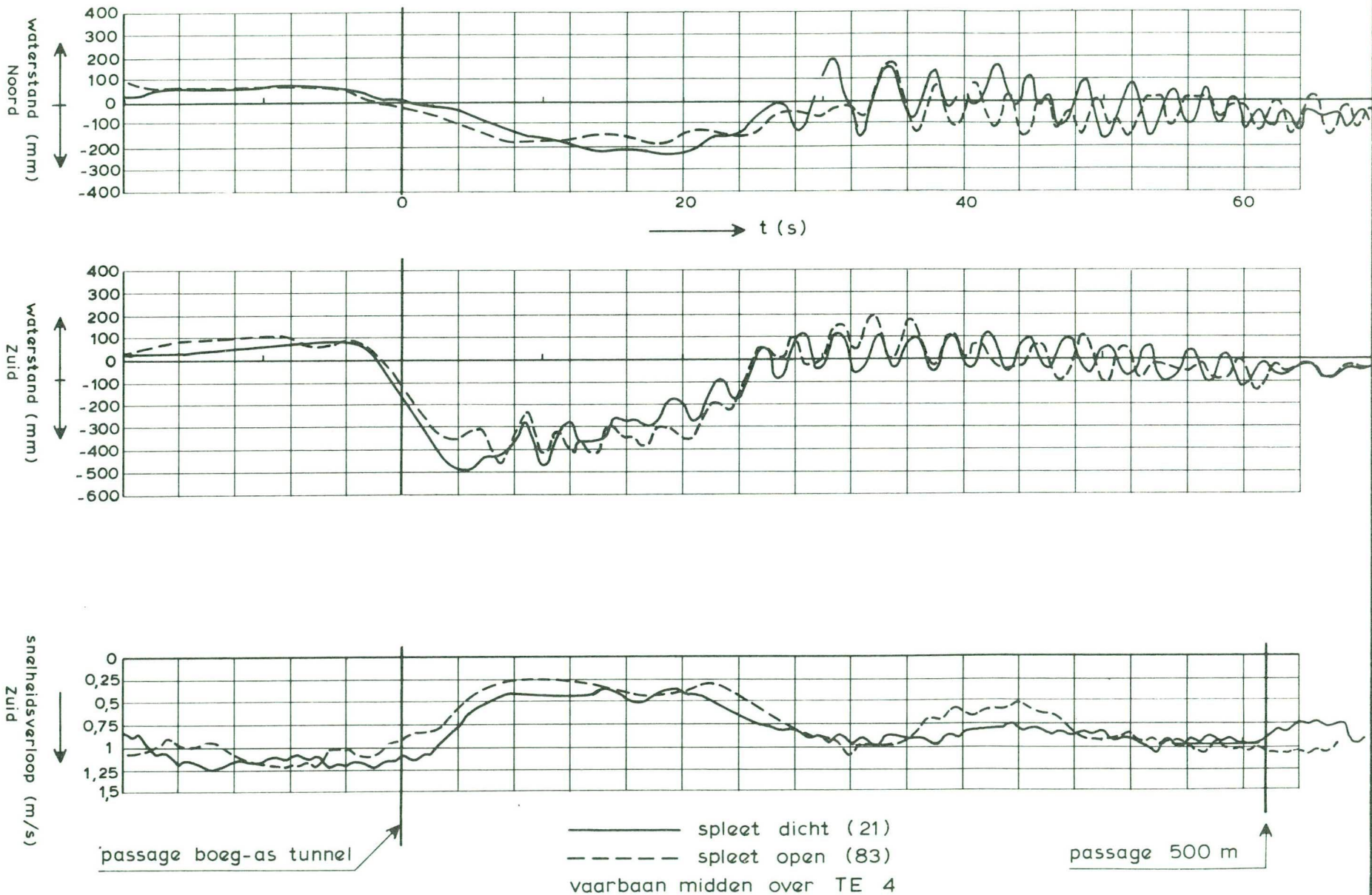
TE 4

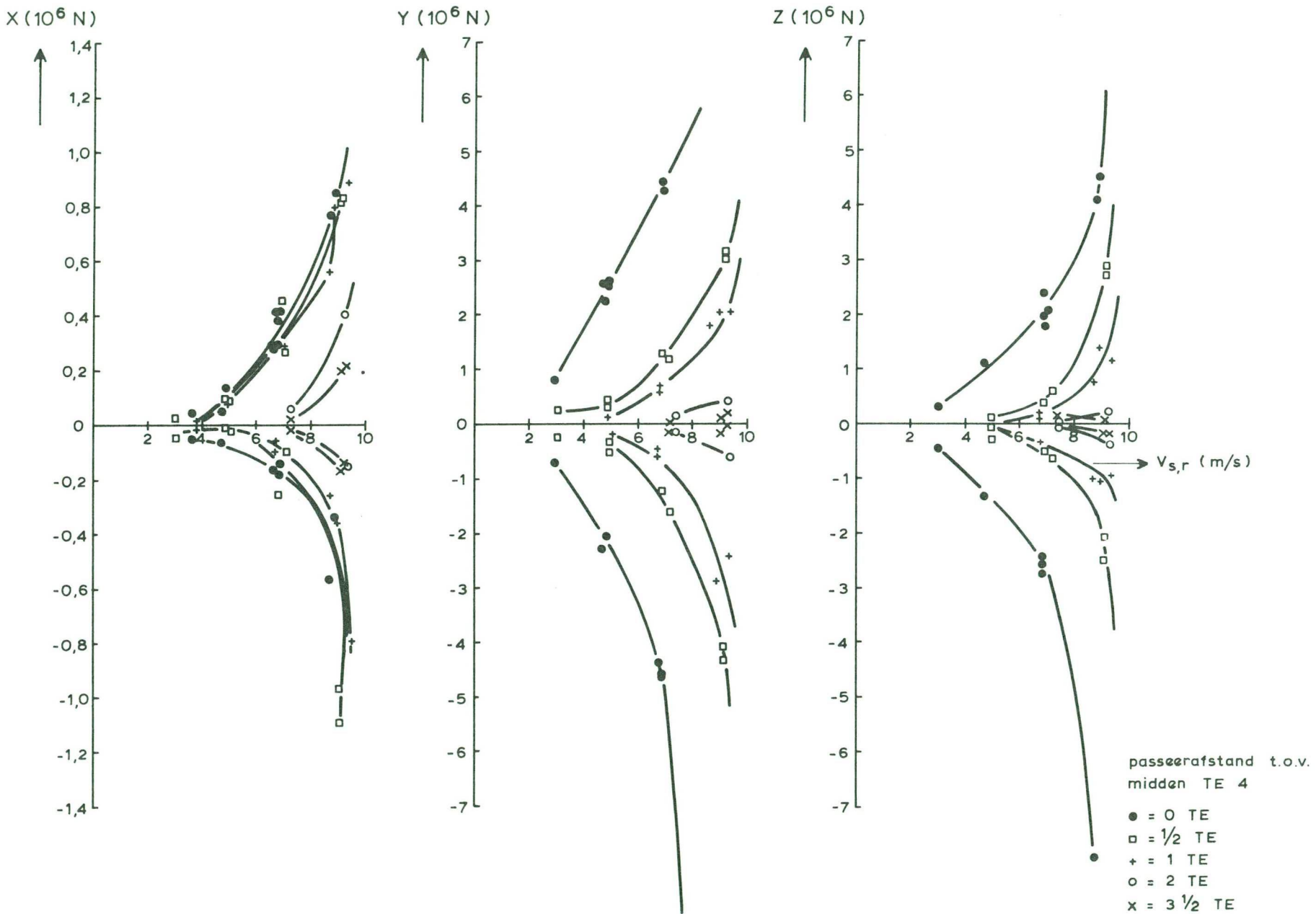
VLOED

$V_{s,r} = 6,7 \text{ m/s}$

M 1738

FIG. 12





GEMETEN MAXIMA VAN KRACHTEN
EN MOMENTEN DOOR SCHEEPVAART

SPLEET DICHT

TE 4
STIL WATER

$M_x (10^7 \text{ Nm})$



7
6
5
4
3
2
1
0
-1
-2
-3
-4
-5
-6
-7

2 4 6 8 10

$M_y (10^7 \text{ Nm})$



14
12
10
8
6
4
2
0
-2
-4
-6
-8
-10
-12
-14

2 4 6 8 10

$M_z (10^7 \text{ Nm})$



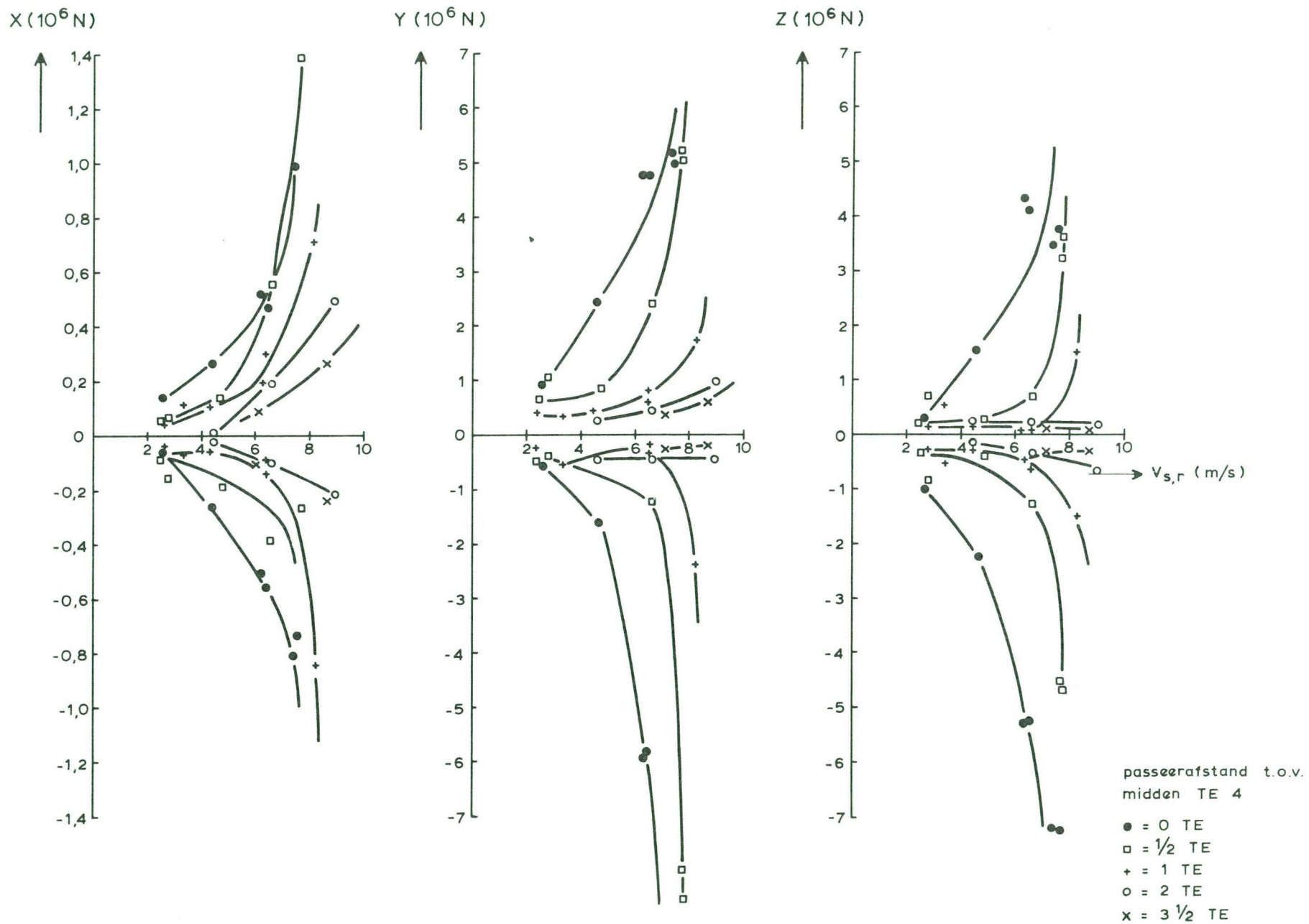
14
12
10
8
6
4
2
0
-2
-4
-6
-8
-10
-12
-14

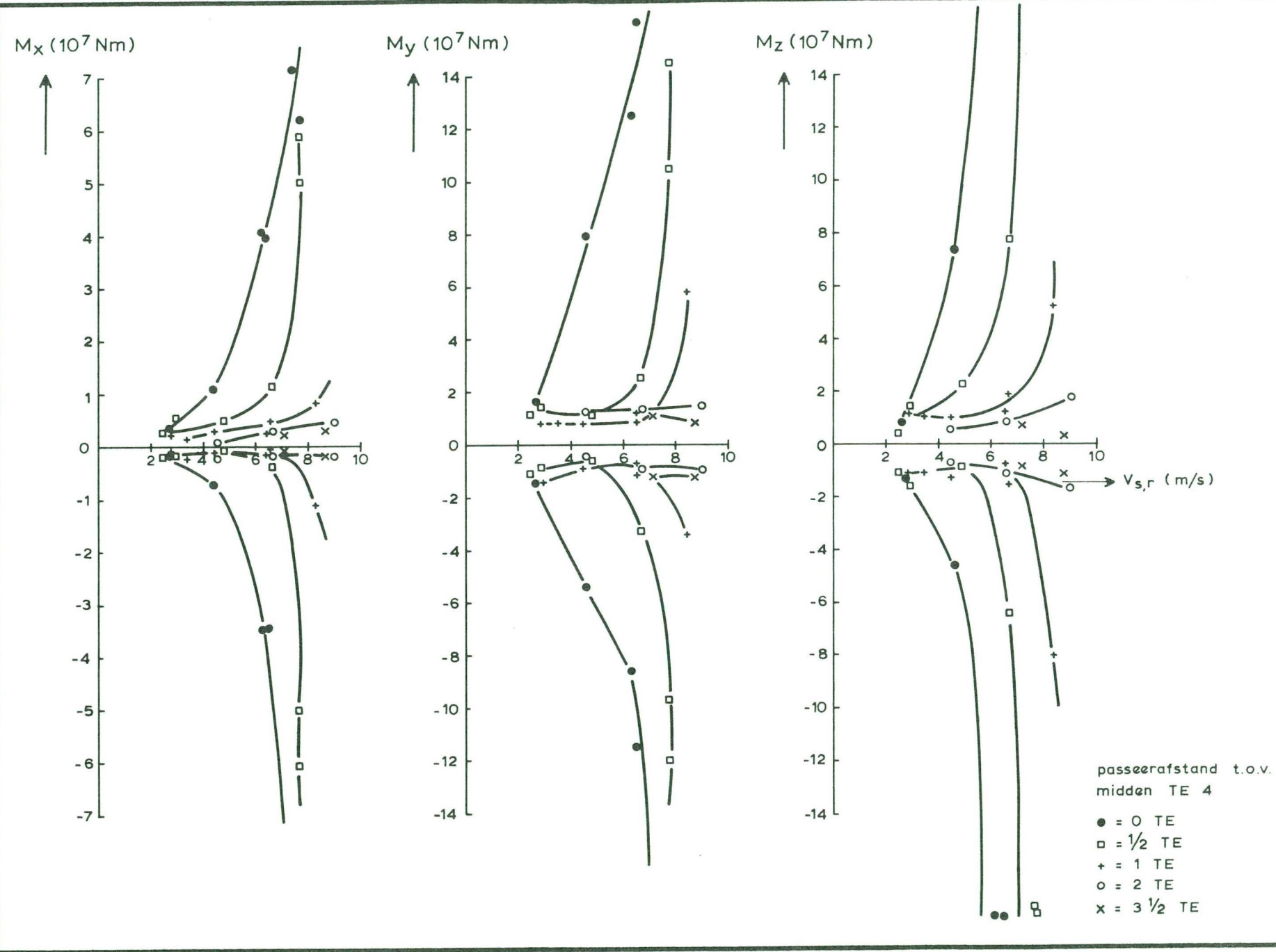
2 4 6 8 10

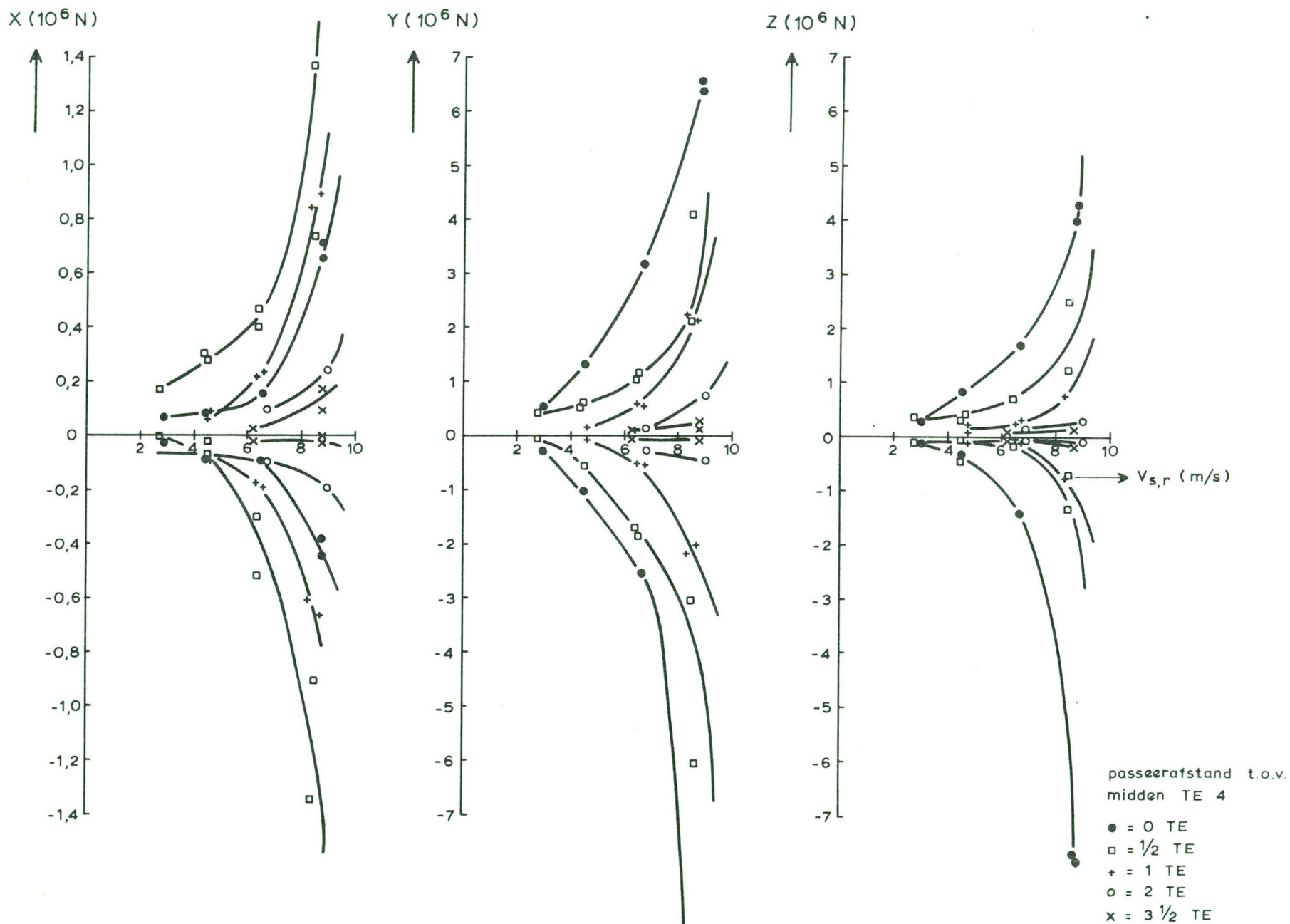
$V_{s,r} \text{ (m/s)}$

passeeerafstand t.o.v.
midden TE 4

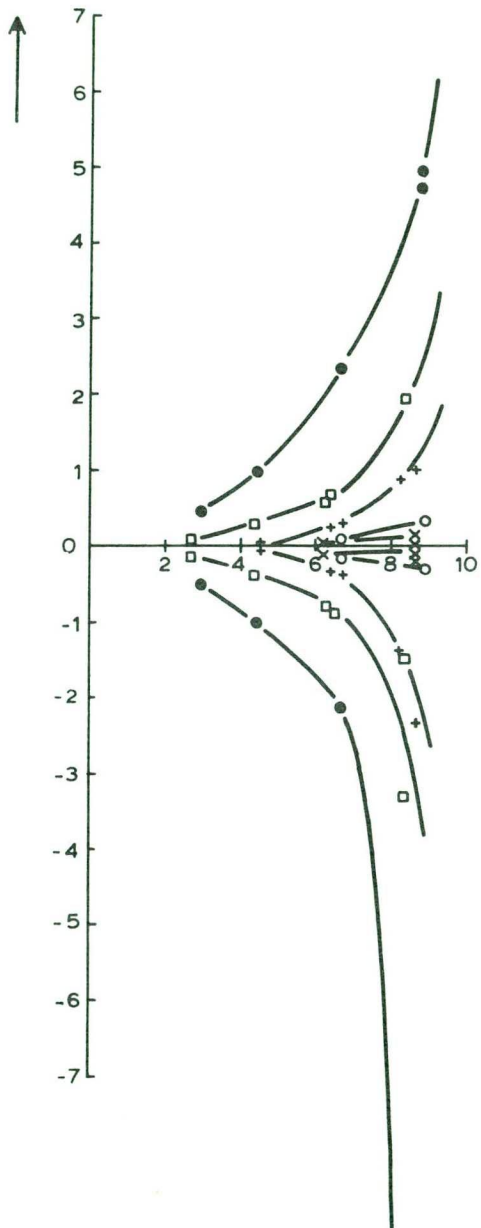
- = 0 TE
- = 1/2 TE
- + = 1 TE
- = 2 TE
- x = 3 1/2 TE



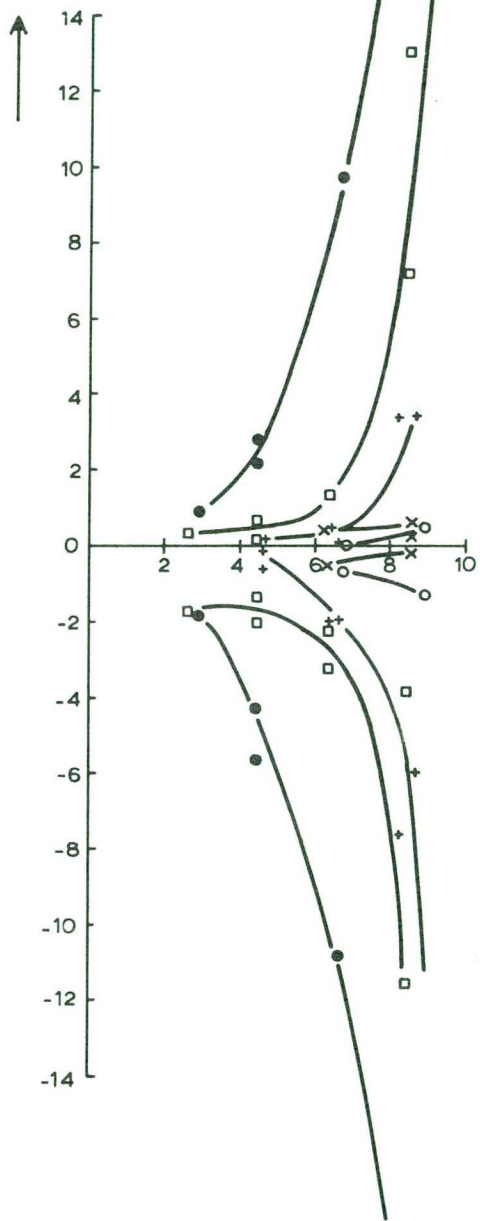




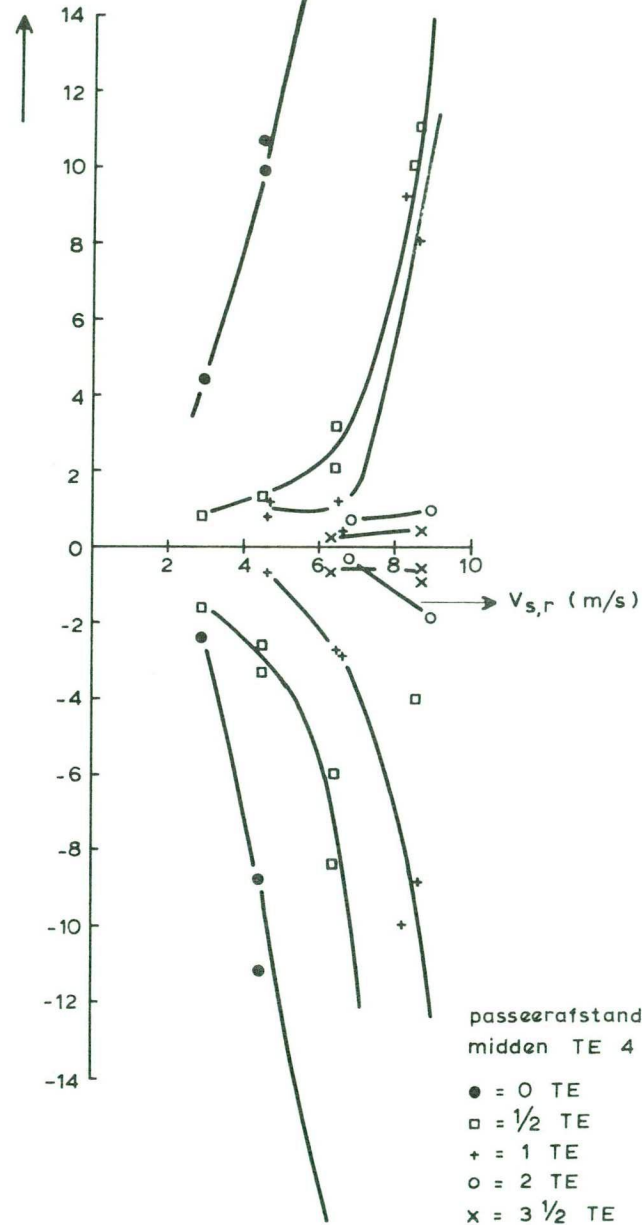
$M_x (10^7 \text{ Nm})$



$M_y (10^7 \text{ Nm})$

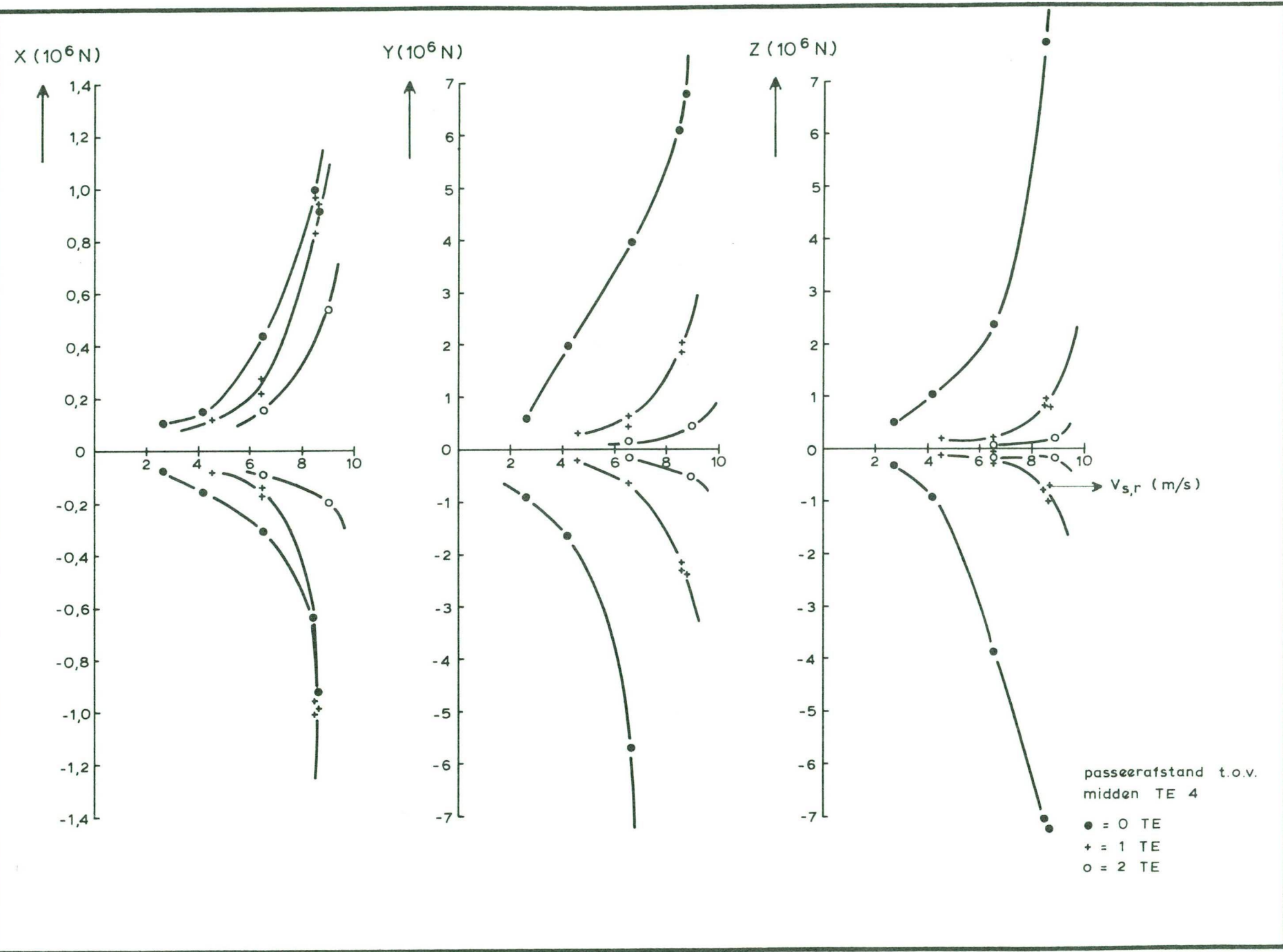


$M_z (10^7 \text{ Nm})$



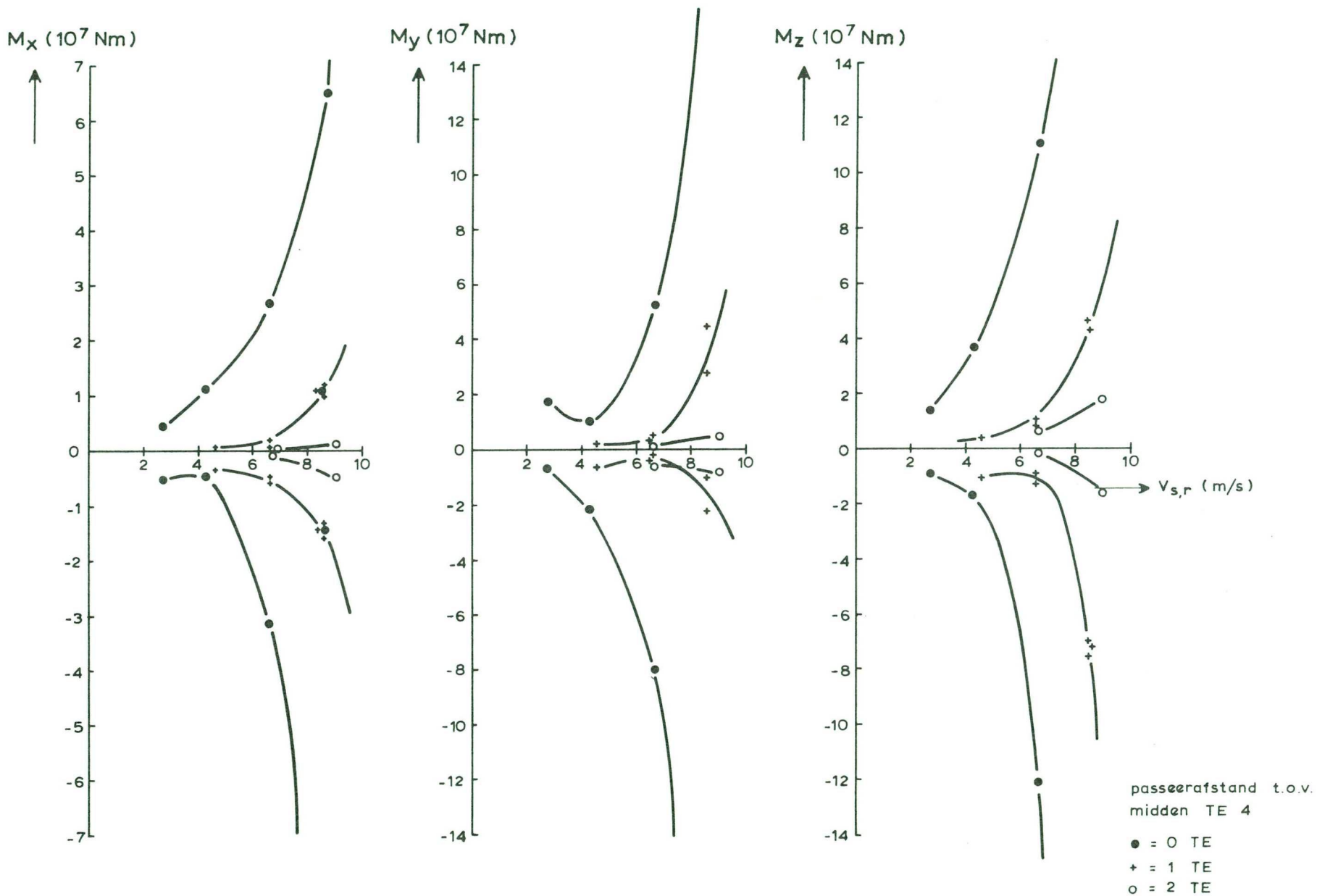
passerafstand t.o.v.
midden TE 4

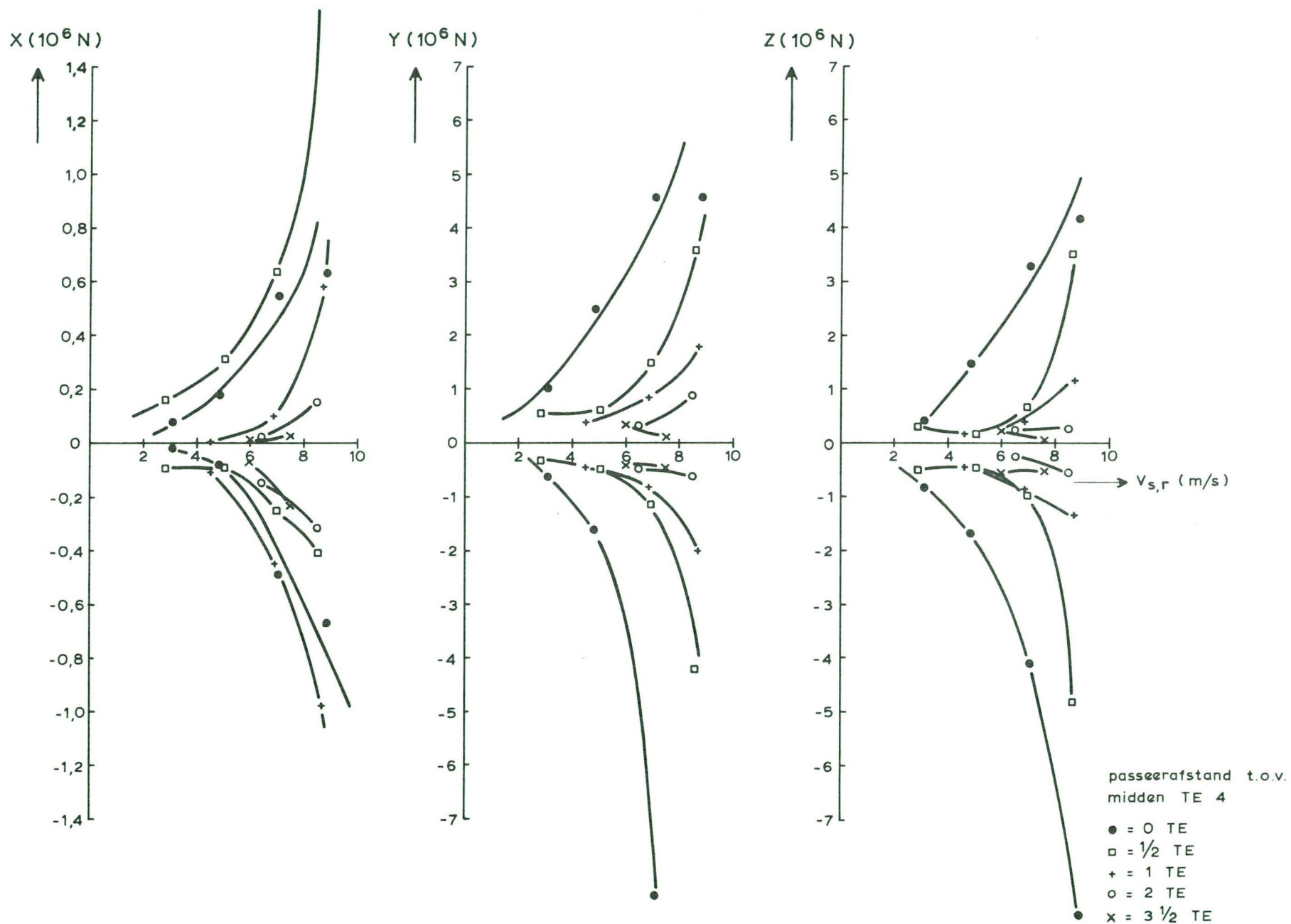
- = 0 TE
- = $\frac{1}{2}$ TE
- + = 1 TE
- = 2 TE
- x = $3\frac{1}{2}$ TE

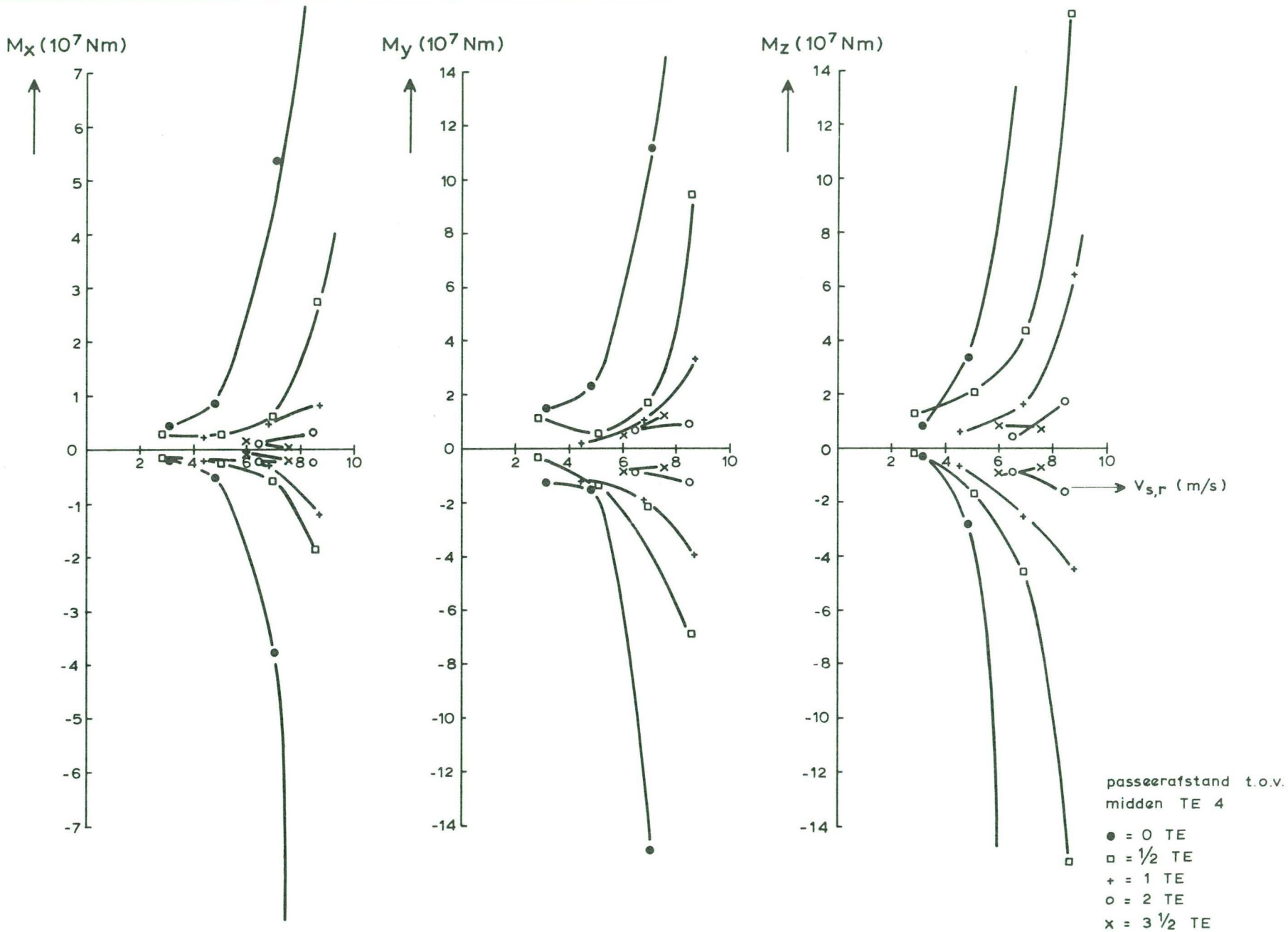


GEMETEN MAXIMA VAN KRACHTEN
EN MOMENTEN DOOR SCHEEPVAART

TE 4
SPLEET OPEN
VLOED







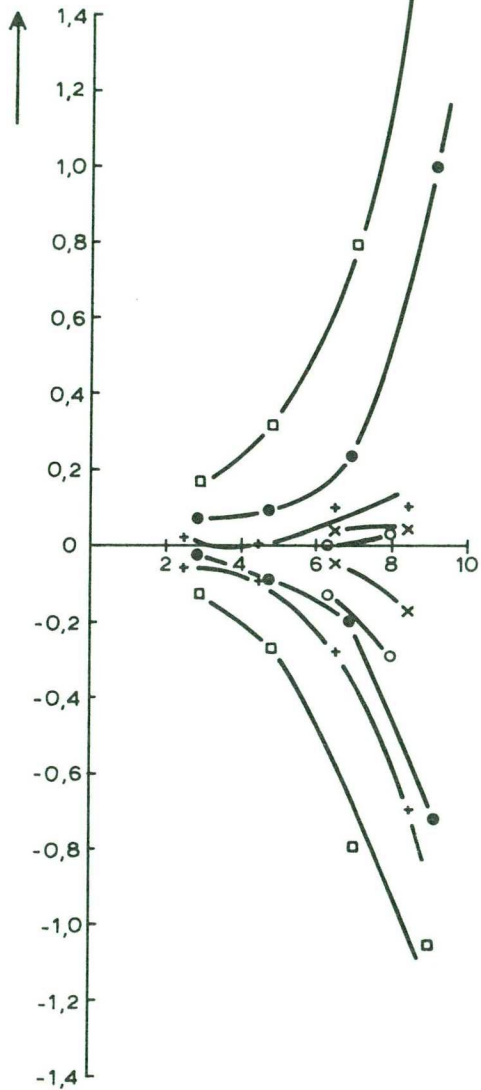
GEMETEN MAXIMA VAN KRACHTEN
EN MOMENTEN DOOR SCHEEPVAART

SPLEET DICHT

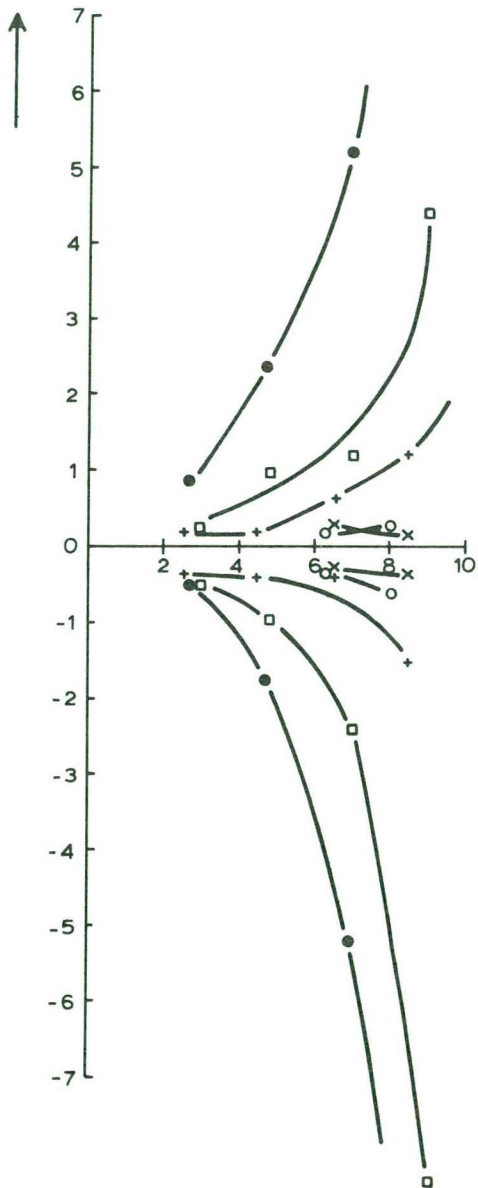
TE 7

VLOED

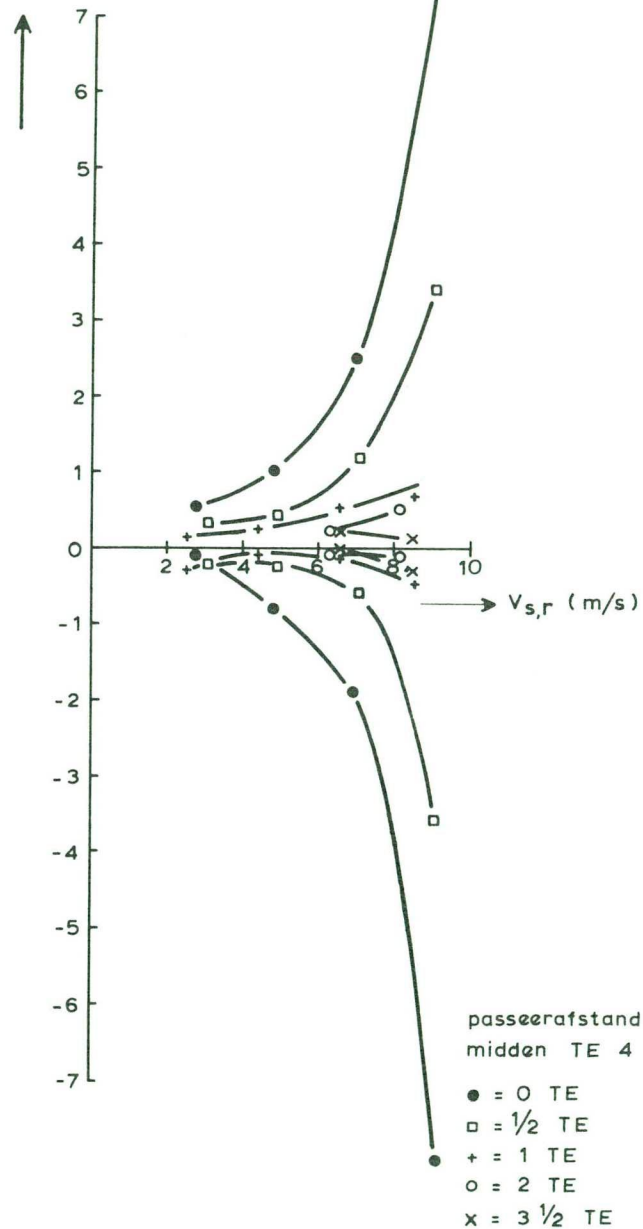
$X (10^6 \text{ N})$



$Y (10^6 \text{ N})$



$Z (10^6 \text{ N})$



passerafstand t.o.v.
midden TE 4

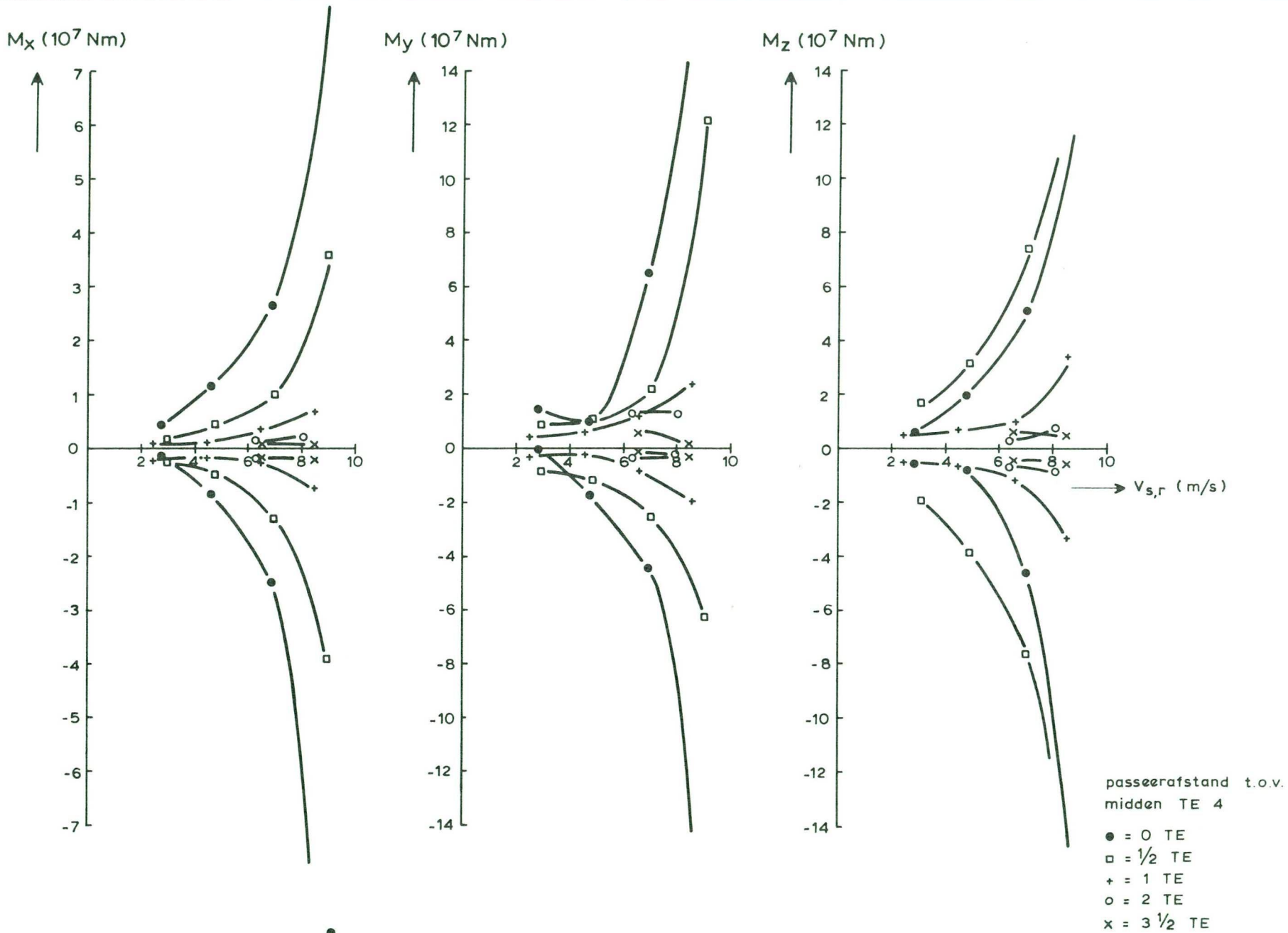
- = 0 TE
- = $1/2$ TE
- + = 1 TE
- = 2 TE
- x = $3 \frac{1}{2}$ TE

GEMETEN MAXIMA VAN KRACHTEN
EN MOMENTEN DOOR SCHEEPVAART

SPLEET DICHT

TE 7

VLOED

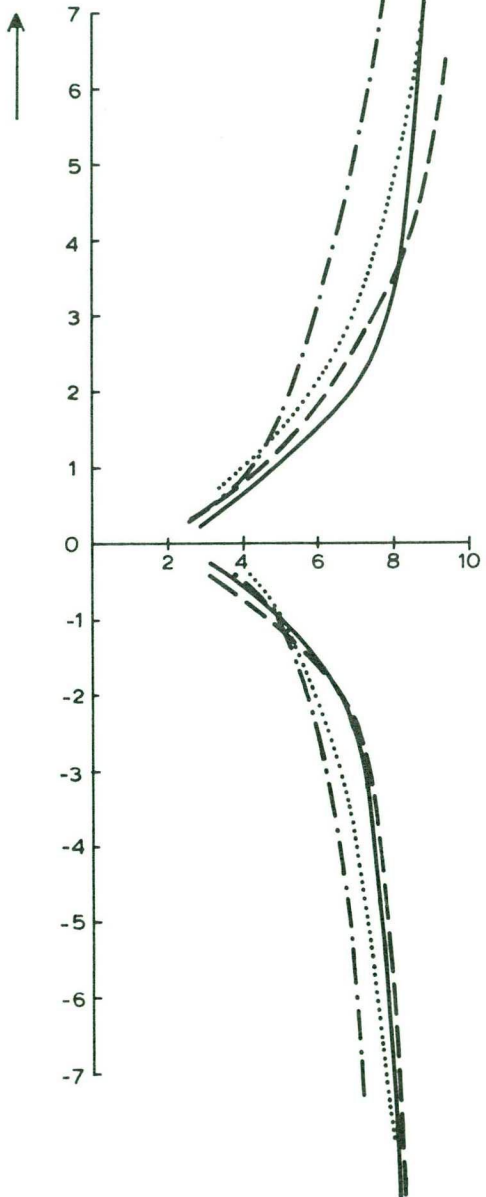


KRACHTEN BIJ VERSCHILLENDE TOESTANDEN

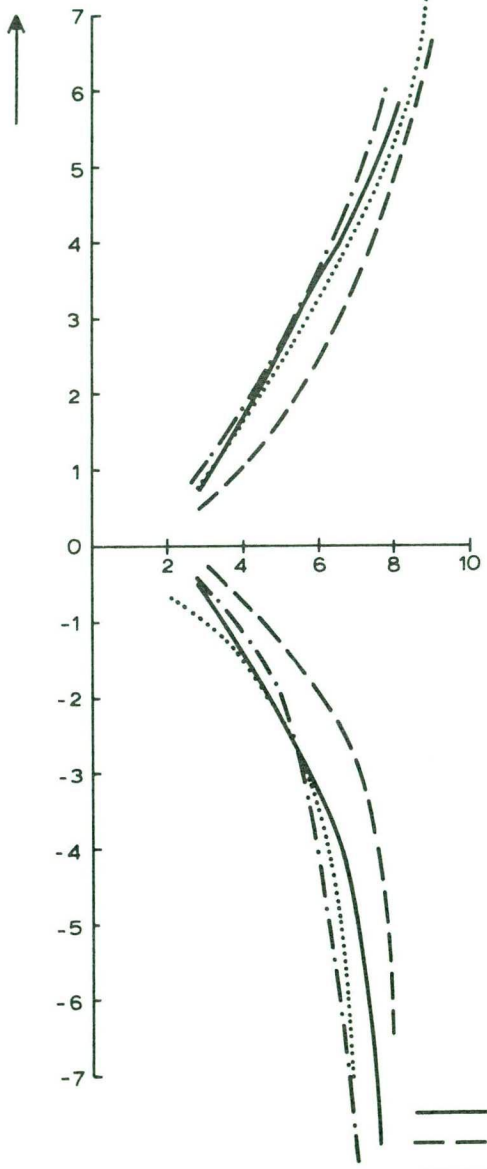
TE 4

passerafstand
x = 0

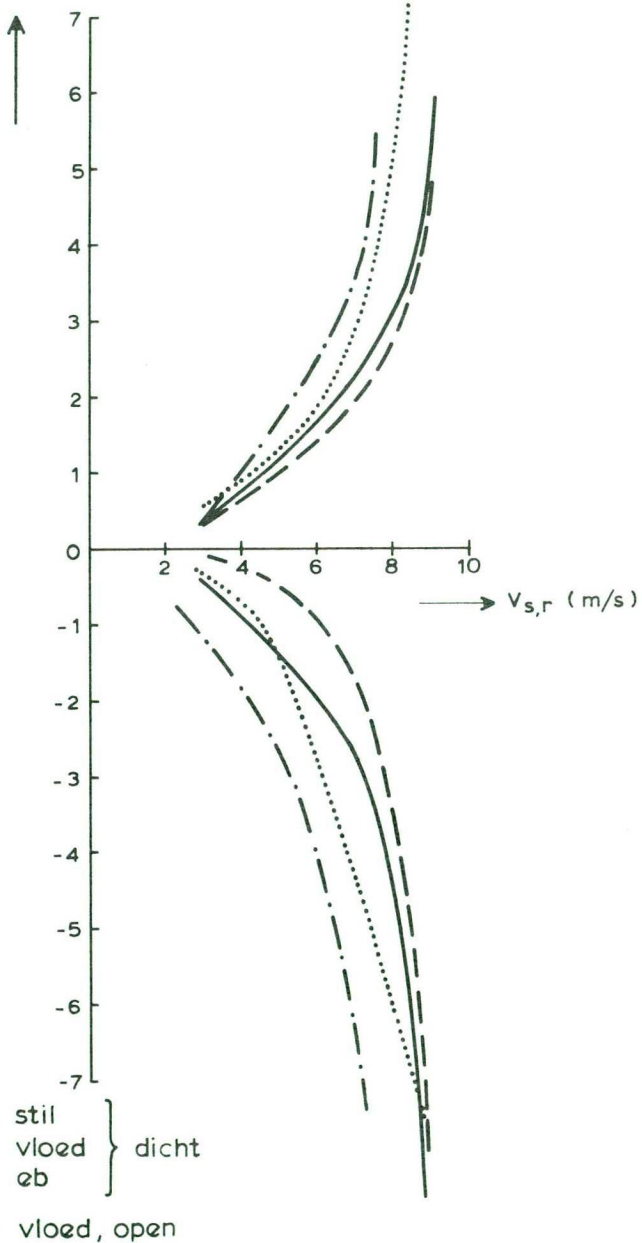
$M_x (10^7 \text{ Nm})$



$Y (10^6 \text{ N})$



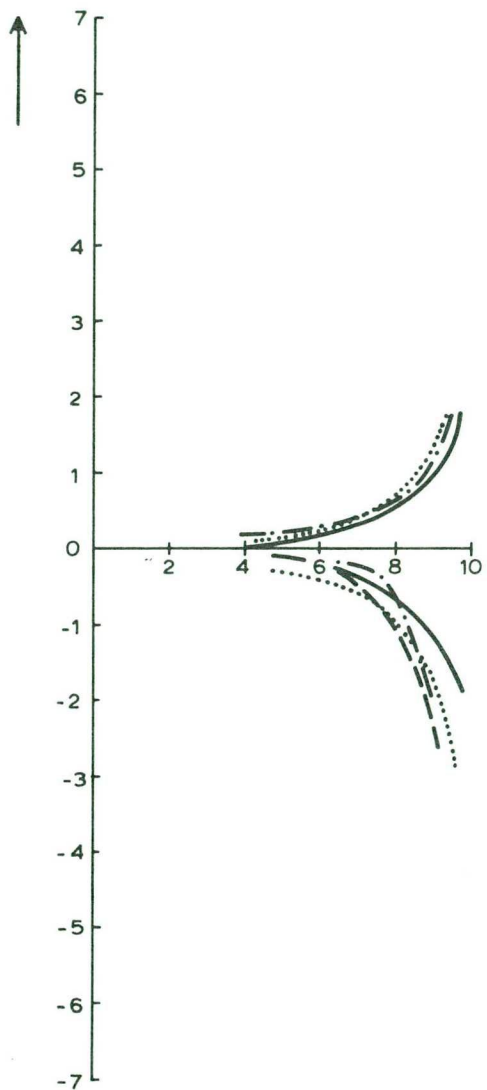
$Z (10^6 \text{ N})$



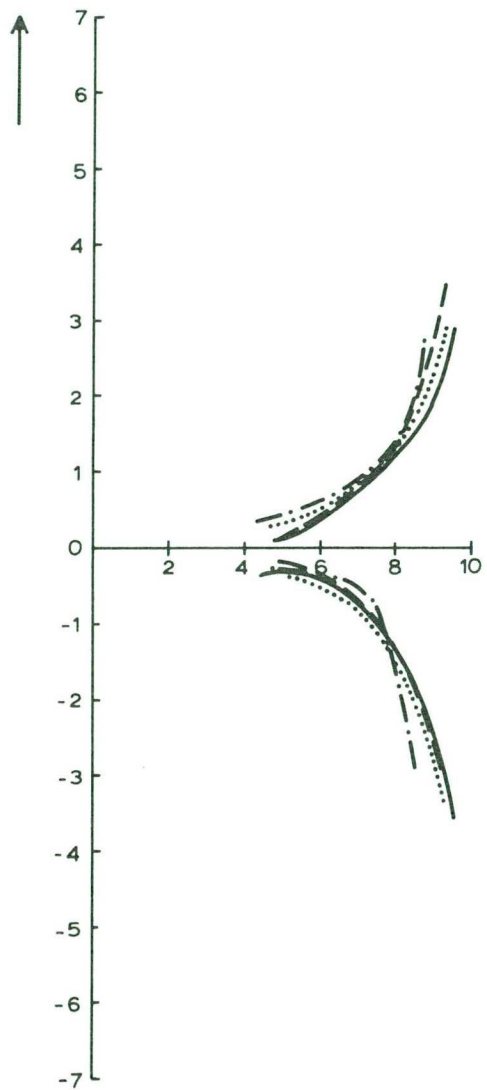
— stil
 - - - vloed
 - . - eb
 vloed, open

} dicht

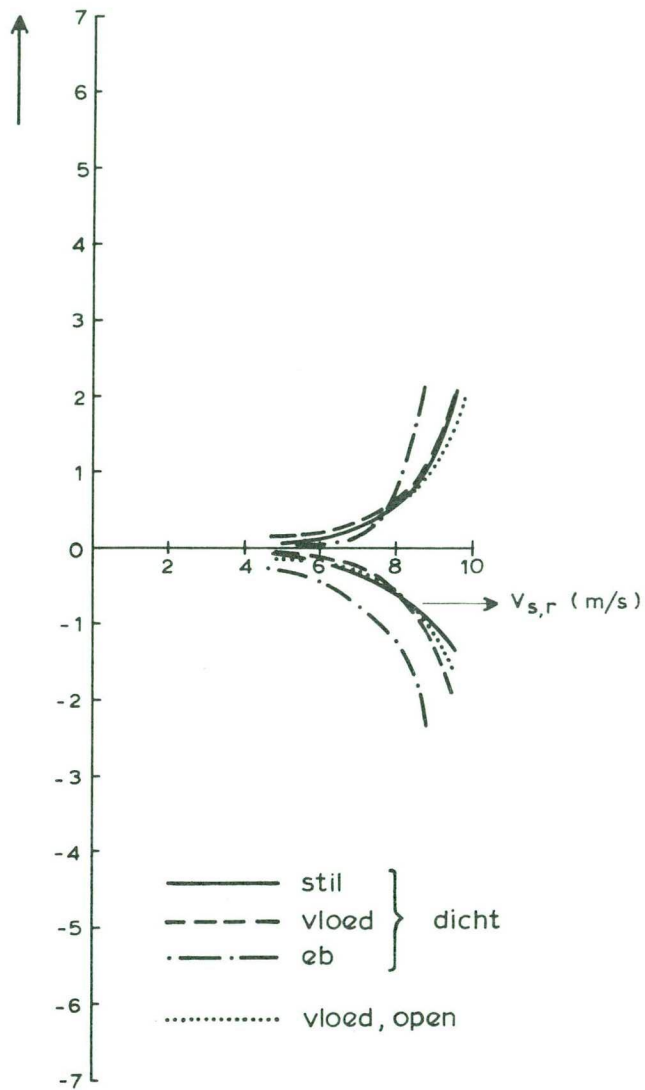
$M_x (10^7 \text{ Nm})$



$Y (10^6 \text{ N})$



$Z (10^6 \text{ N})$



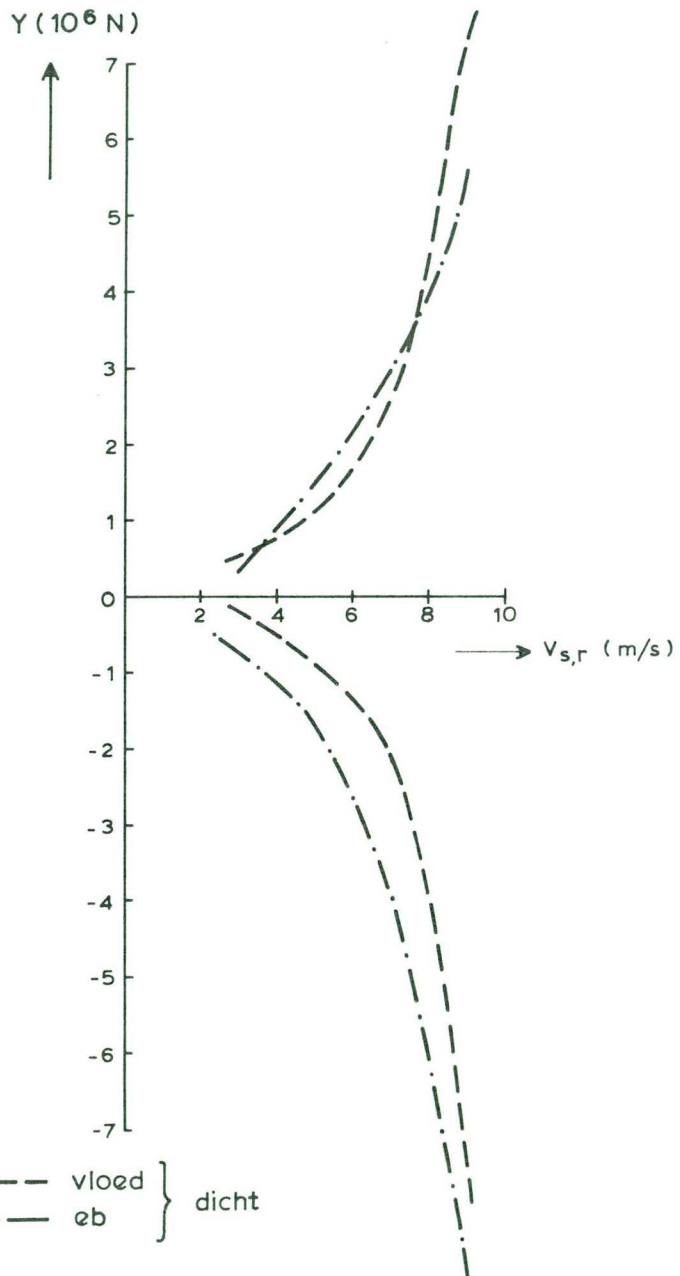
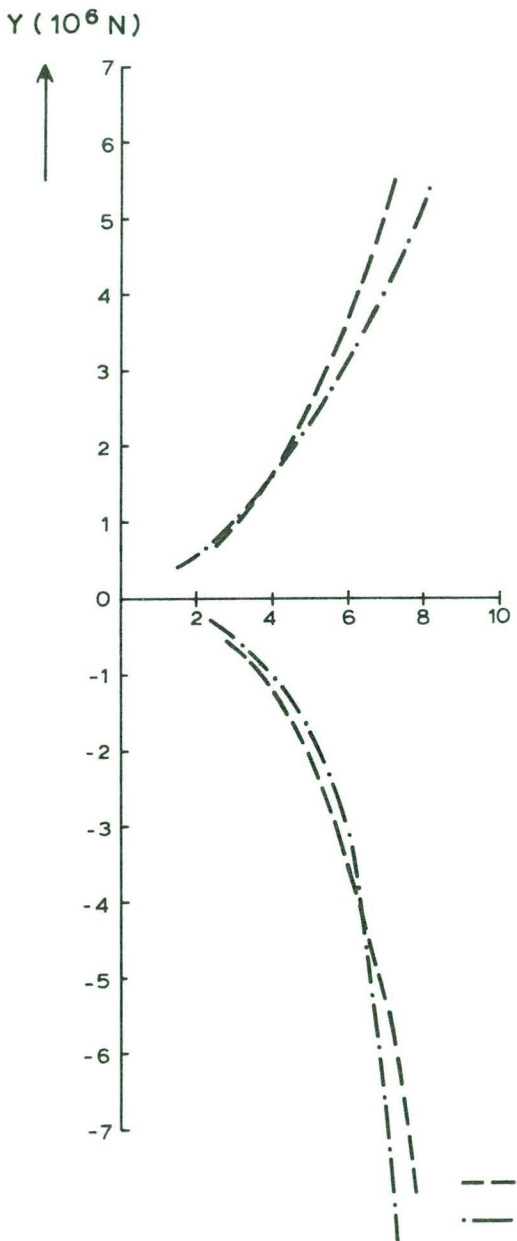
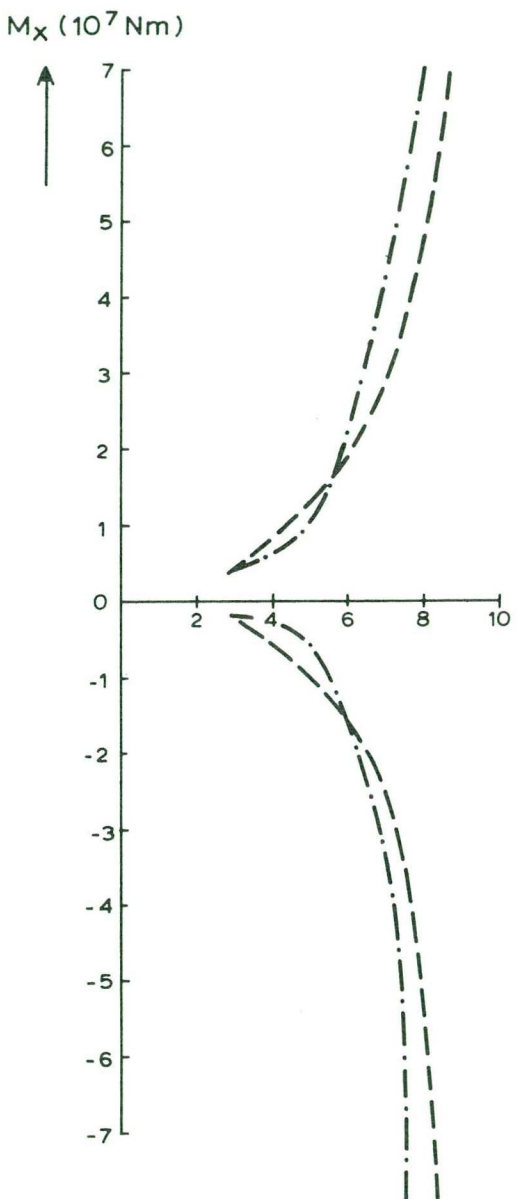
— stil
 - - - vloed
 . . . eb
 vloed, open

} dicht

KRACHTEN BIJ VERSCHILLENDE TOESTANDEN

TE 7

pasgeeststand
x = 0

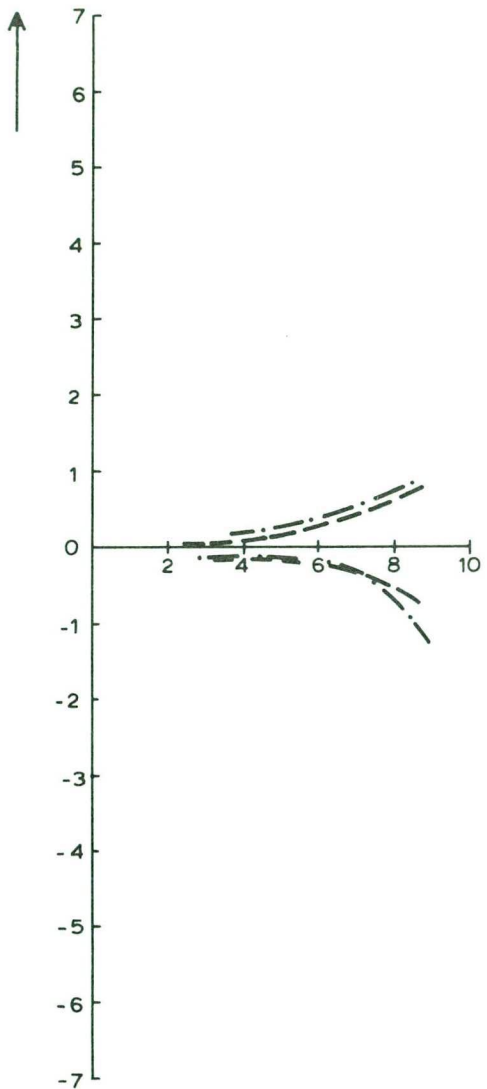


KRACHTEN BIJ VERSCHILLENDE TOESTANDEN

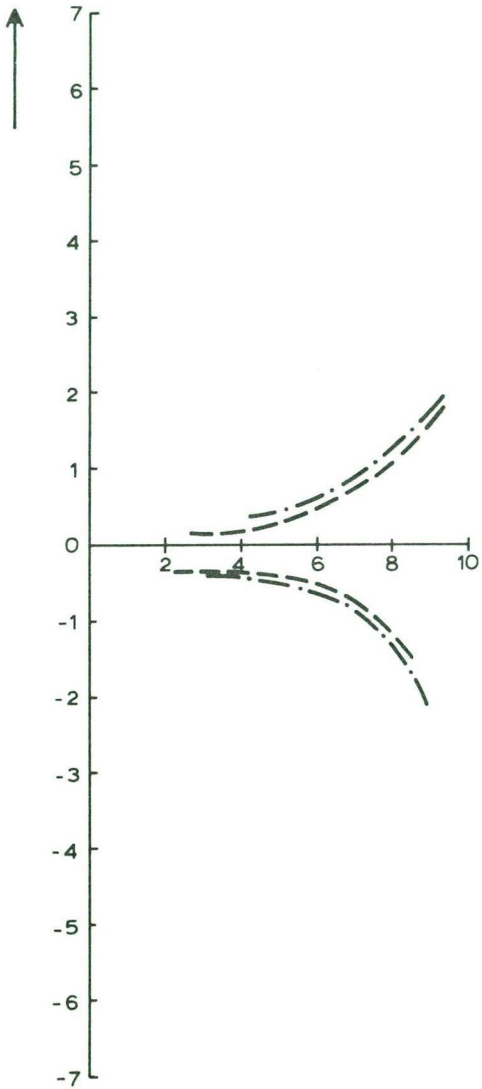
TE 7

passerafstand
x = 176 m

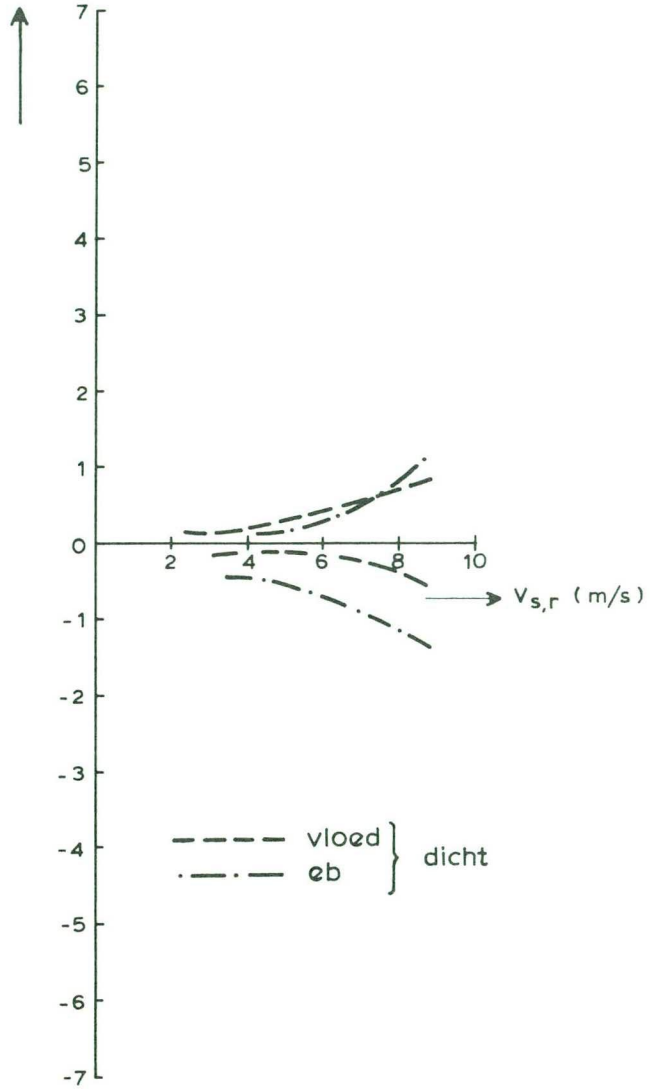
$M_x (10^7 \text{ Nm})$



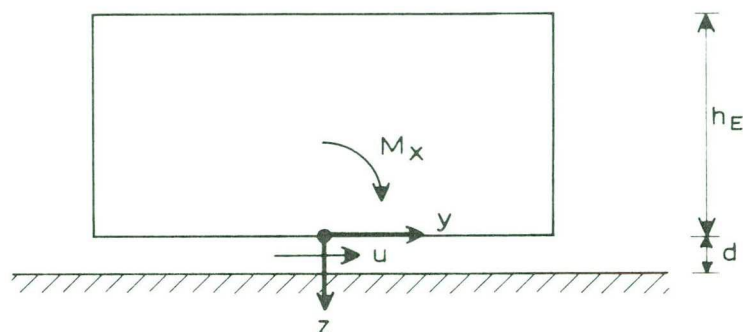
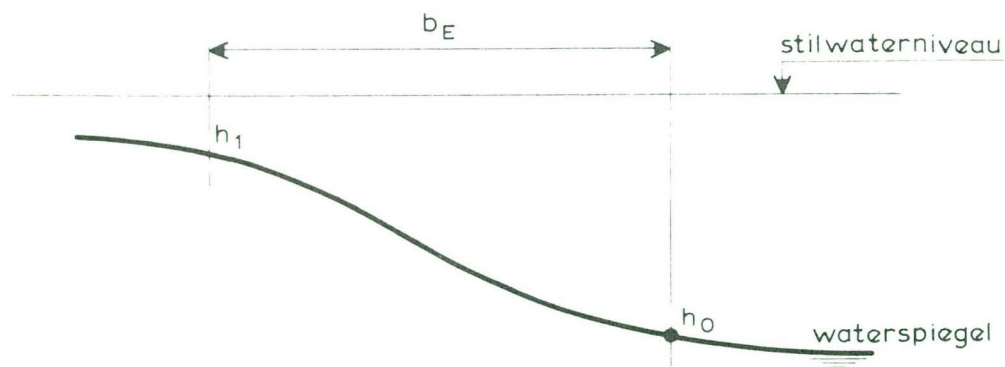
$Y (10^6 \text{ N})$



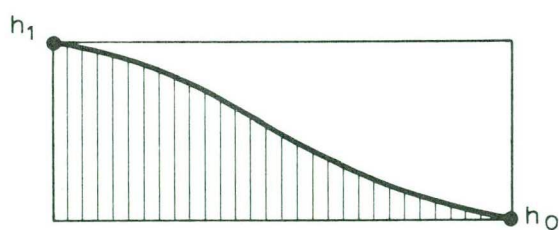
$Z (10^6 \text{ N})$



--- vloed }
-.- eb } dicht



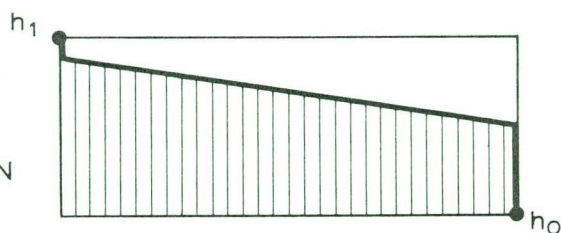
DRUK BOVEN
ELEMENT



$$Z = \rho g \int_{-1/2 b}^{1/2} (h - h_{ref}) \cdot dx \cdot l_E$$

$$M_x = \rho g \int_{-1/2 b}^{1/2} (h - h_0) x \cdot dx \cdot l_E$$

DRUK ONDER
ELEMENT
SPLEET OPEN



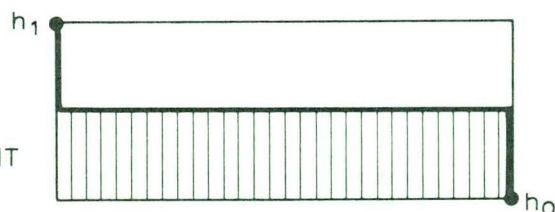
instroomverlies 0,14 (h₁ - h₀)
wrijvingsverlies 0,31 (h₁ - h₀)

uitstroomverlies 0,55 (h₁ - h₀)

$$Z = 0,705 \rho g |h_1 - h_0| b_E l_E$$

$$M_x = 0,026 \rho g (h_1 - h_0) b_E^2 l_E$$

DRUK ONDER
ELEMENT
SPLEET DICHT



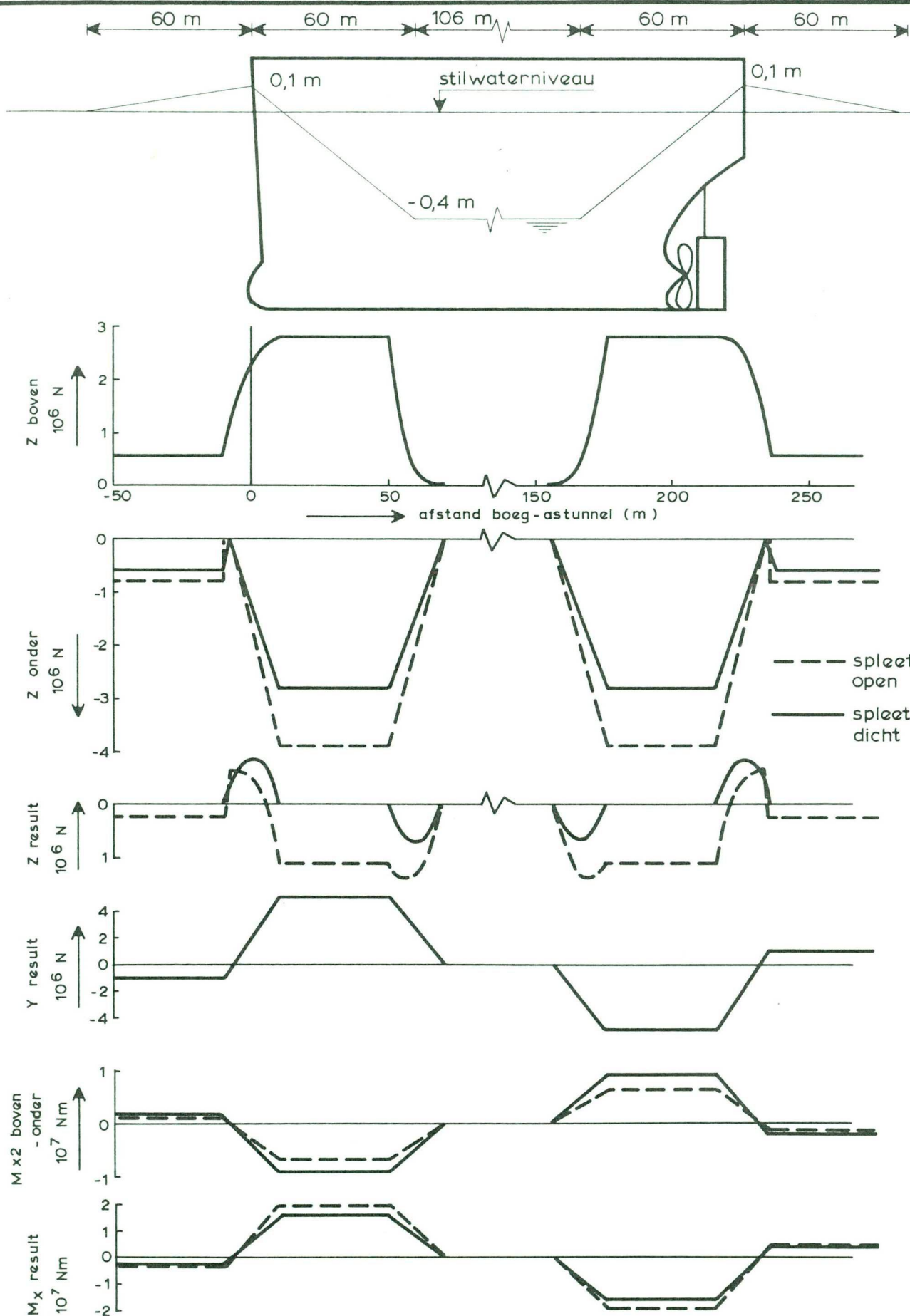
verval
afdichting 0,5 ρg (h₁ - h₀)

verval
afdichting 0,5 ρg (h₁ - h₀)

$$Z = 0,5 \rho g |h_1 - h_0| b_E l_E$$

$$M_x = 0$$

VERTIKALE DRUKKEN EN RESULTERENDE KRACHTEN

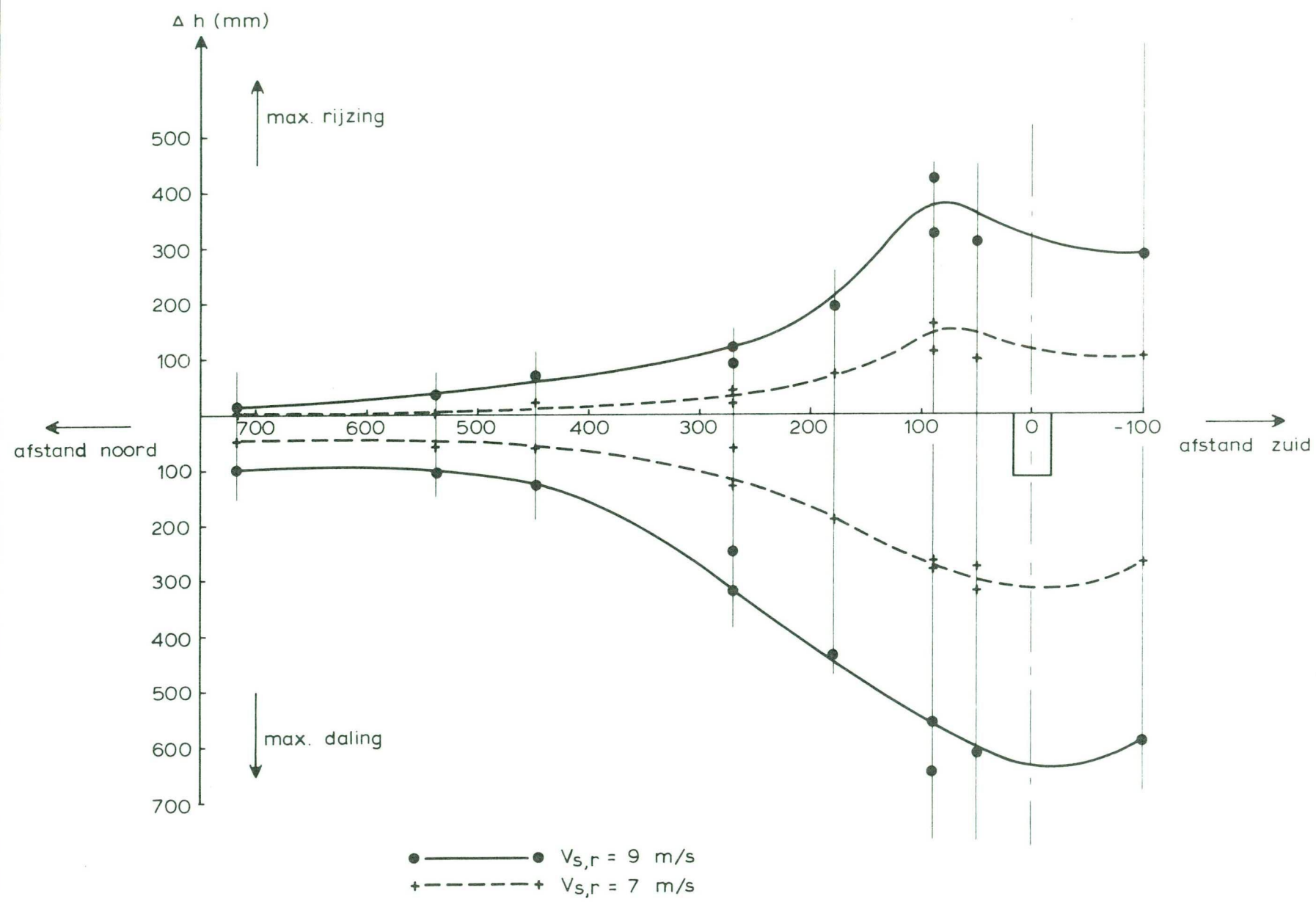


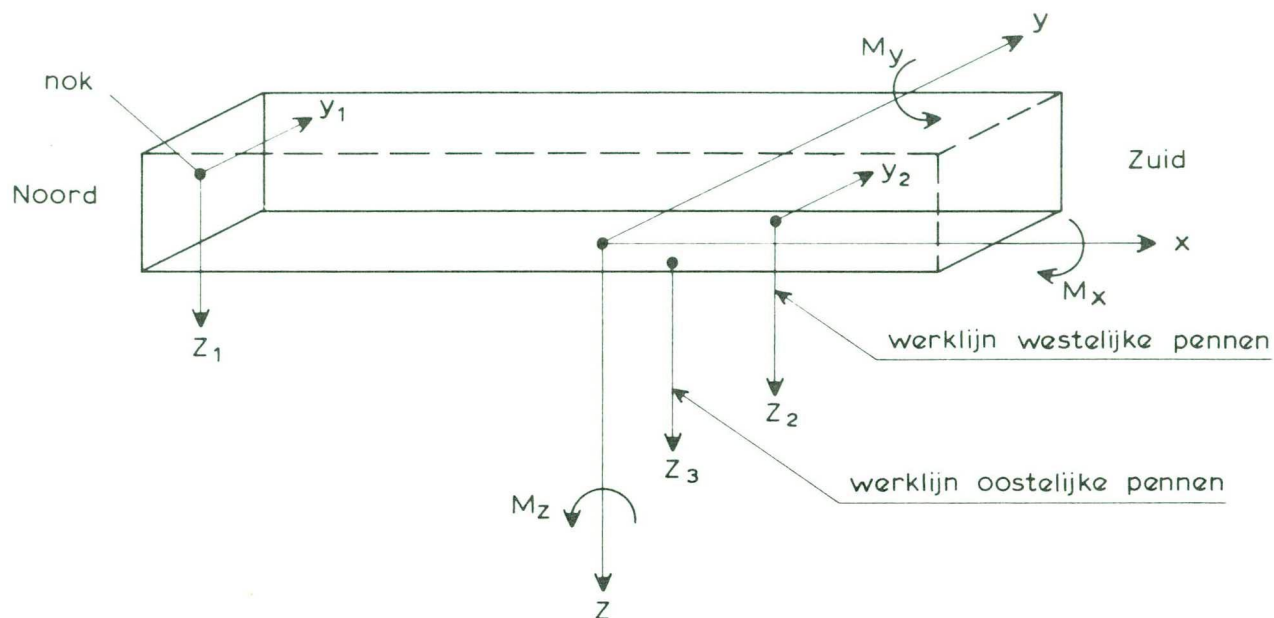
THEORETISCH KRACHTSVERLOOP

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1738

FIG. 30





Berekenings schematisatie :

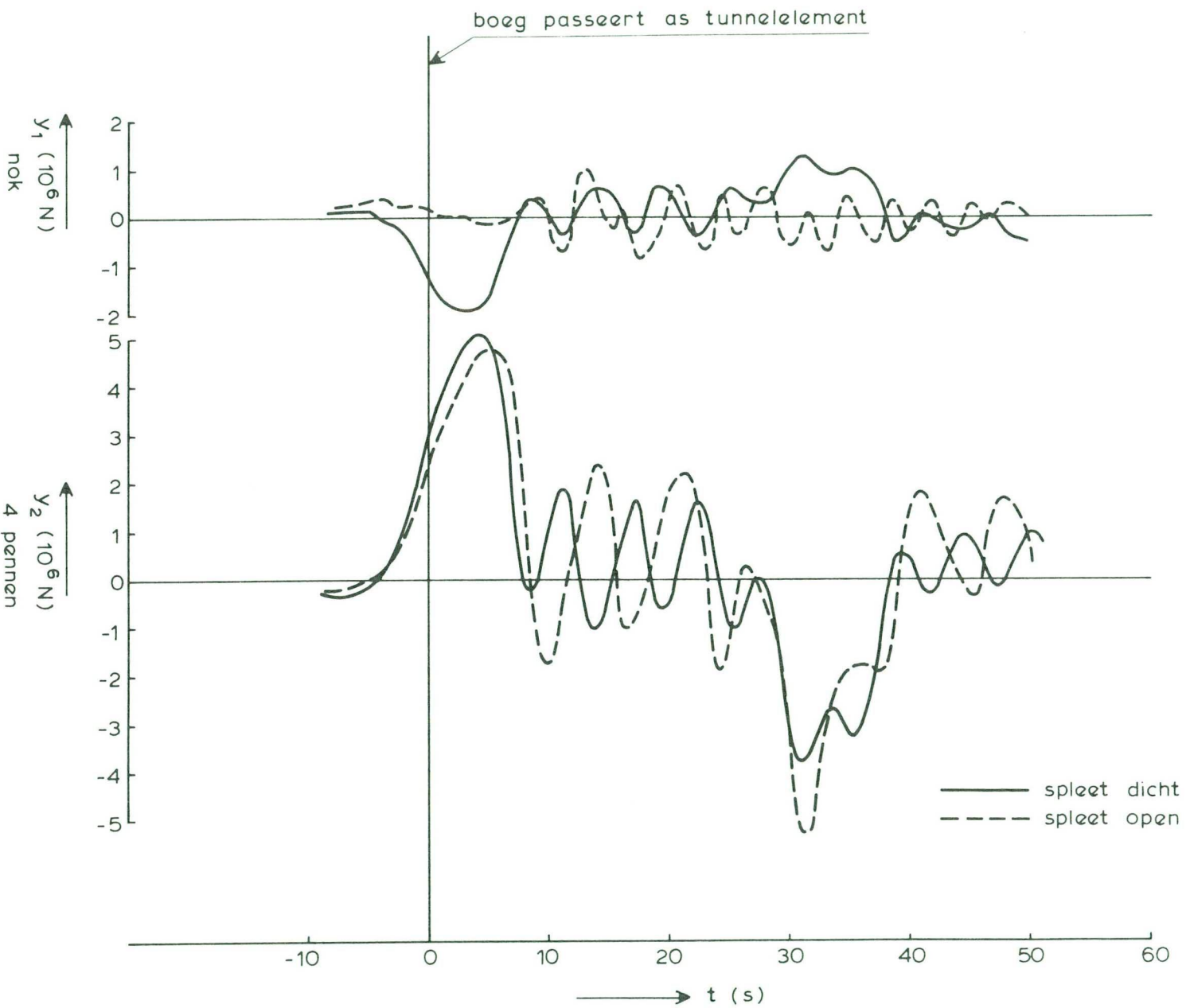
- langskracht niet meegenomen
- krachten noord alleen t.p.v. nok
- moment om z-as wordt opgenomen door dwarskrachten t.p.v. nok en werklijn pennen

BEREKENINGSSCHEMATISATIE
KRACHTEN OP OPLEGGINGEN

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1738

FIG. 32



KRACHTEN OP OPLEGGINGEN (HORIZONTAL)

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

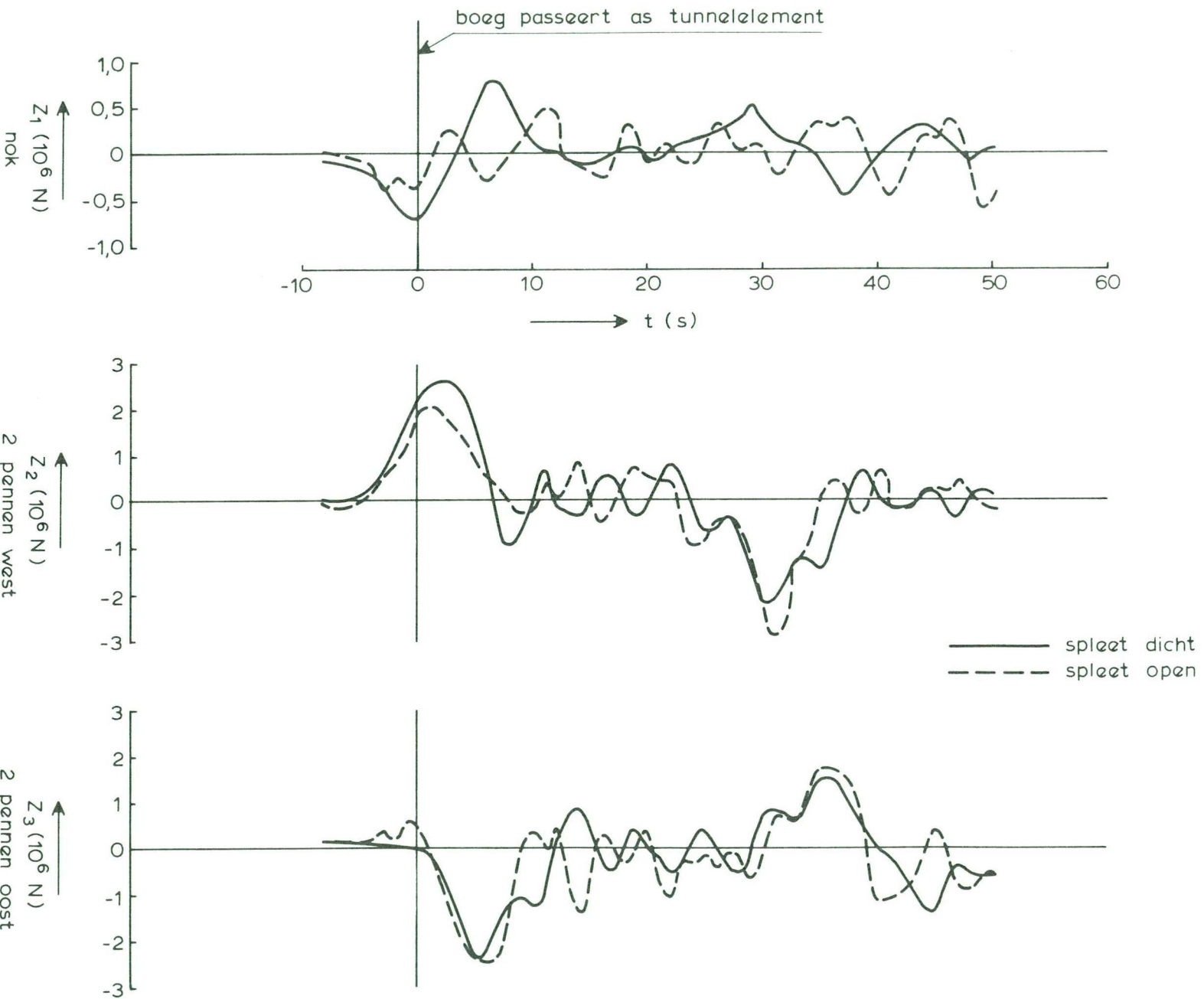
TE 4

VLOED

$V_{s,r} = 6,7$ m/s

M 1738

FIG. 33



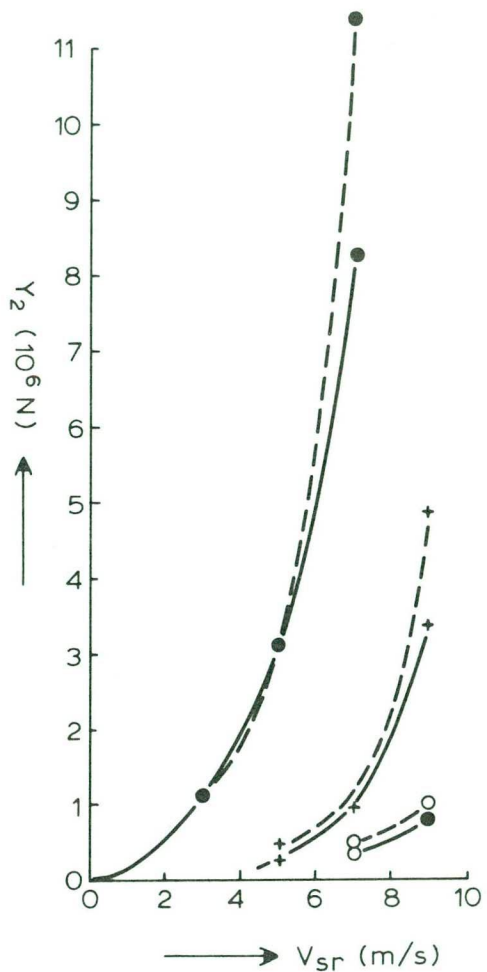
KRACHTEN OP OPLEGGINGEN (VERTIKAAL)

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

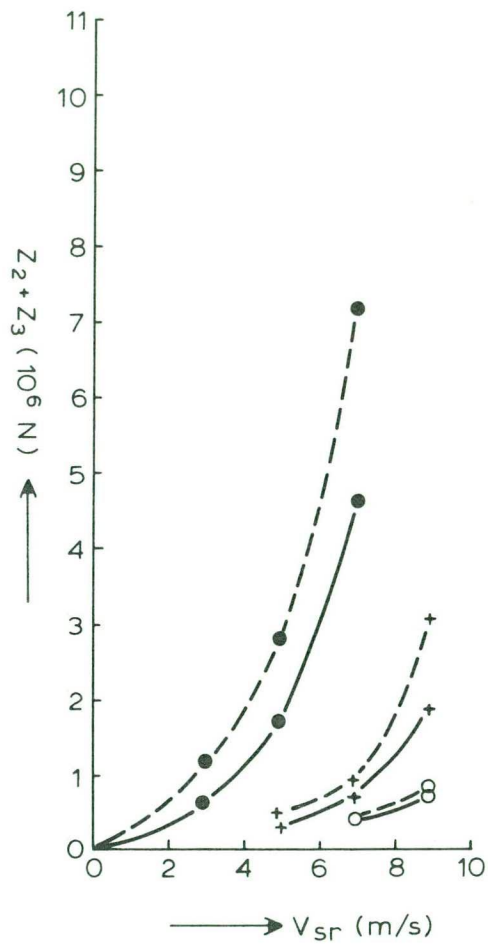
TE 4 VLOED

$V_{sr} = 6,7 \text{ m/s}$

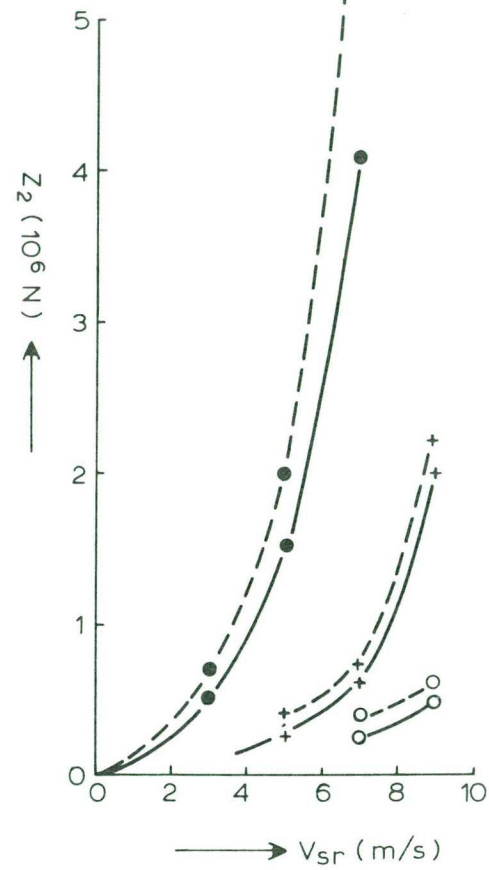
M 1738 FIG. 34



TOTALE DWARSKRACHT
OP 4 PENNEN

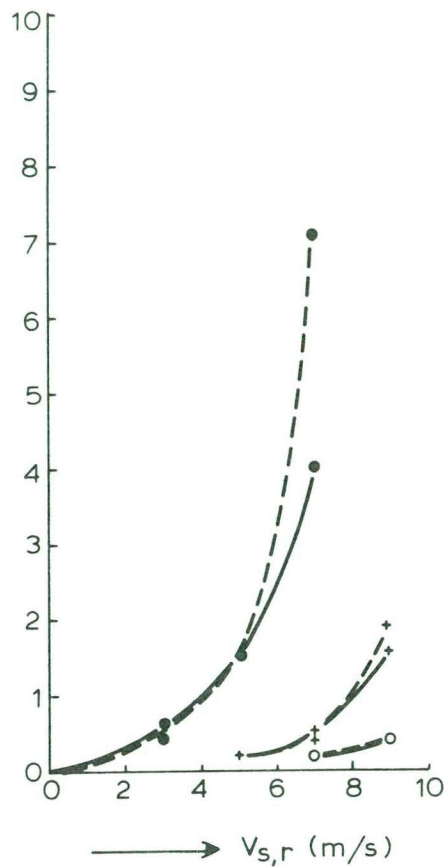


TOTALE VERT. KRACHT
OP 4 PENNEN

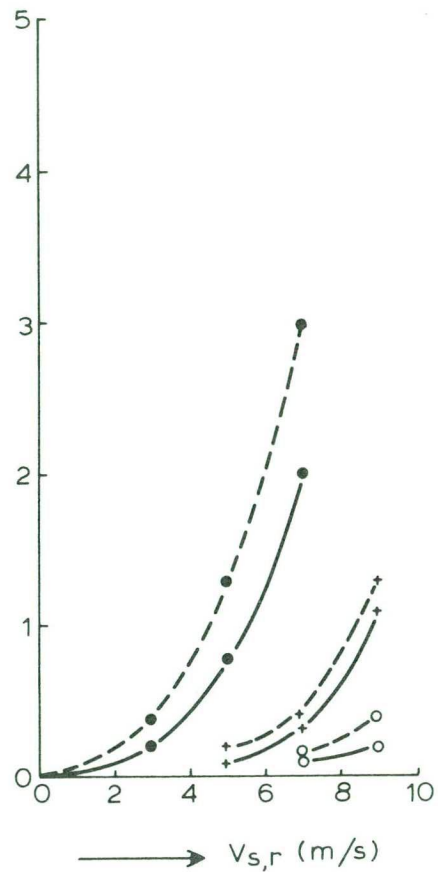


MAX. VERT. KRACHT
OP 2 PENNEN

getijfase :	passèraafstand :
— vloed	● = 0 m
- - - eb	+ = 175 m
	o = 350 m

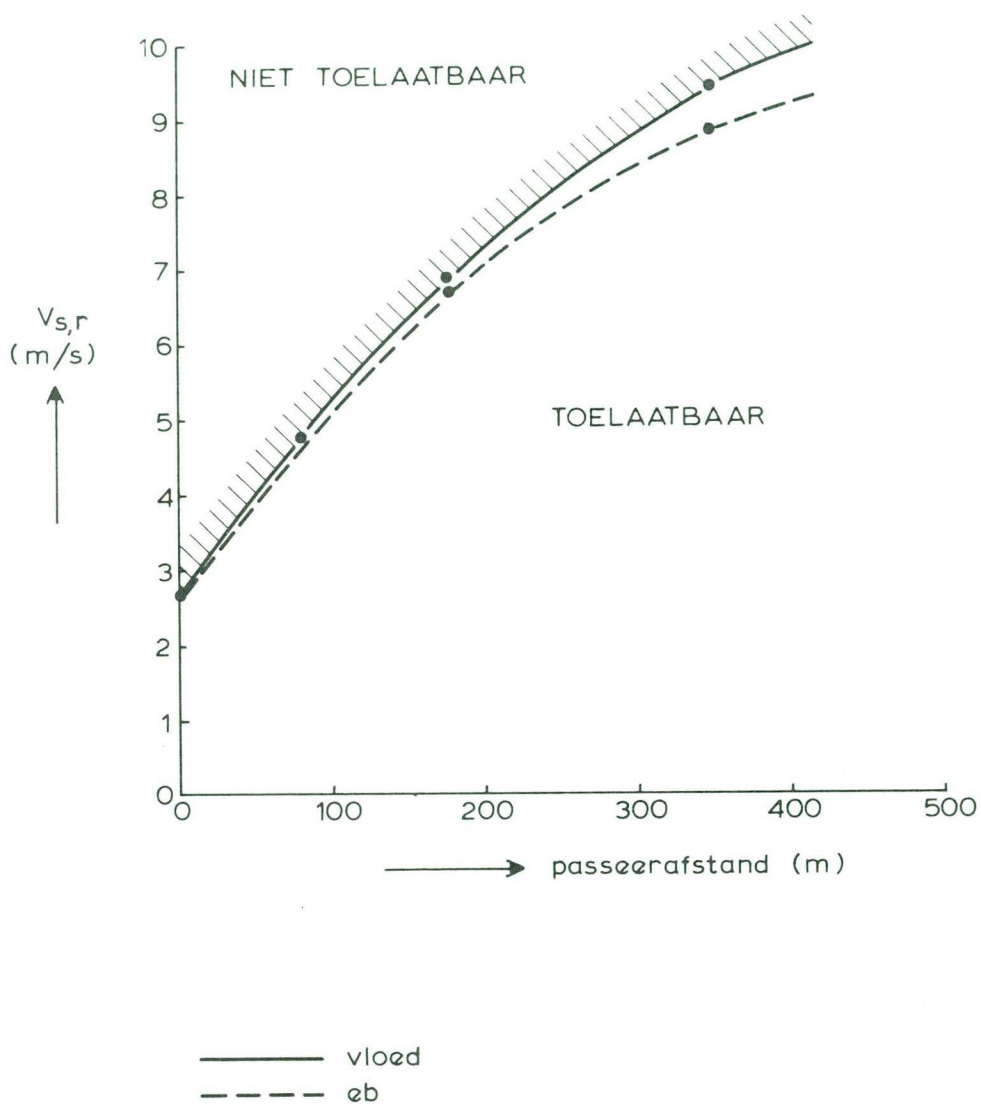


DWARSKRACHT OP NOK



VERTIKALE KRACHT OP NOK

getijfase	passèerafstand
— vloed	● 0 m
- - - eb	+ 175 m
	○ 350 m



KRITIEKE KONDITIES

TE 4/7

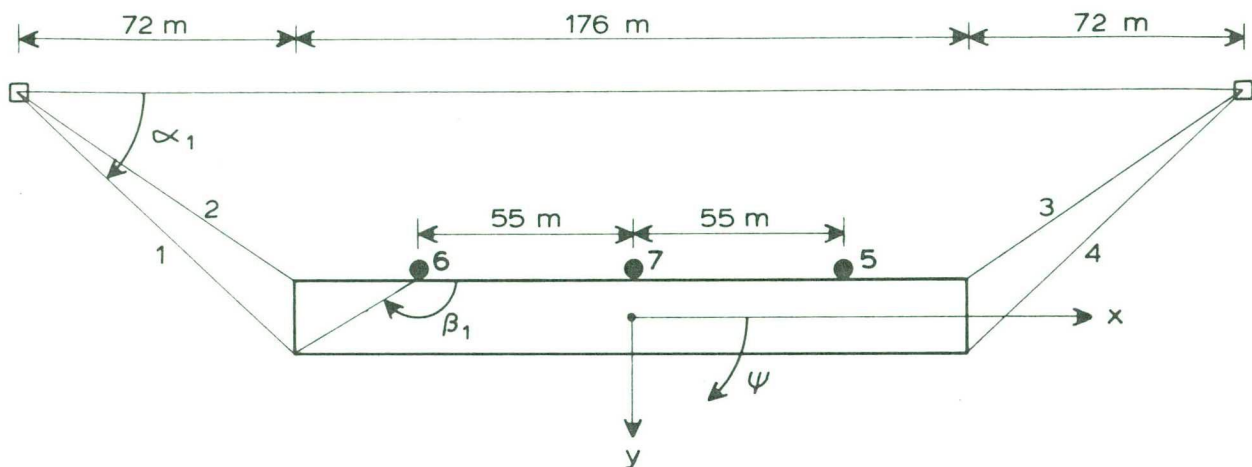
EB/VLOED

OPEN/DICHT

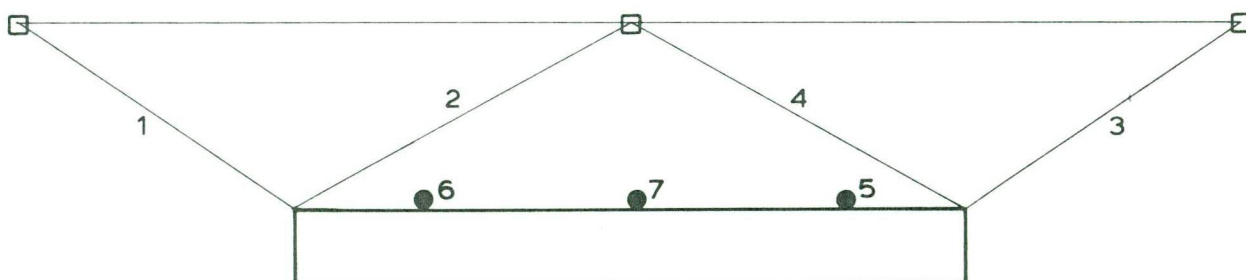
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1738

FIG. 37



BESCHOUWD SYSTEEM



ALTERNATIEF SYSTEEM

- paal
- lier

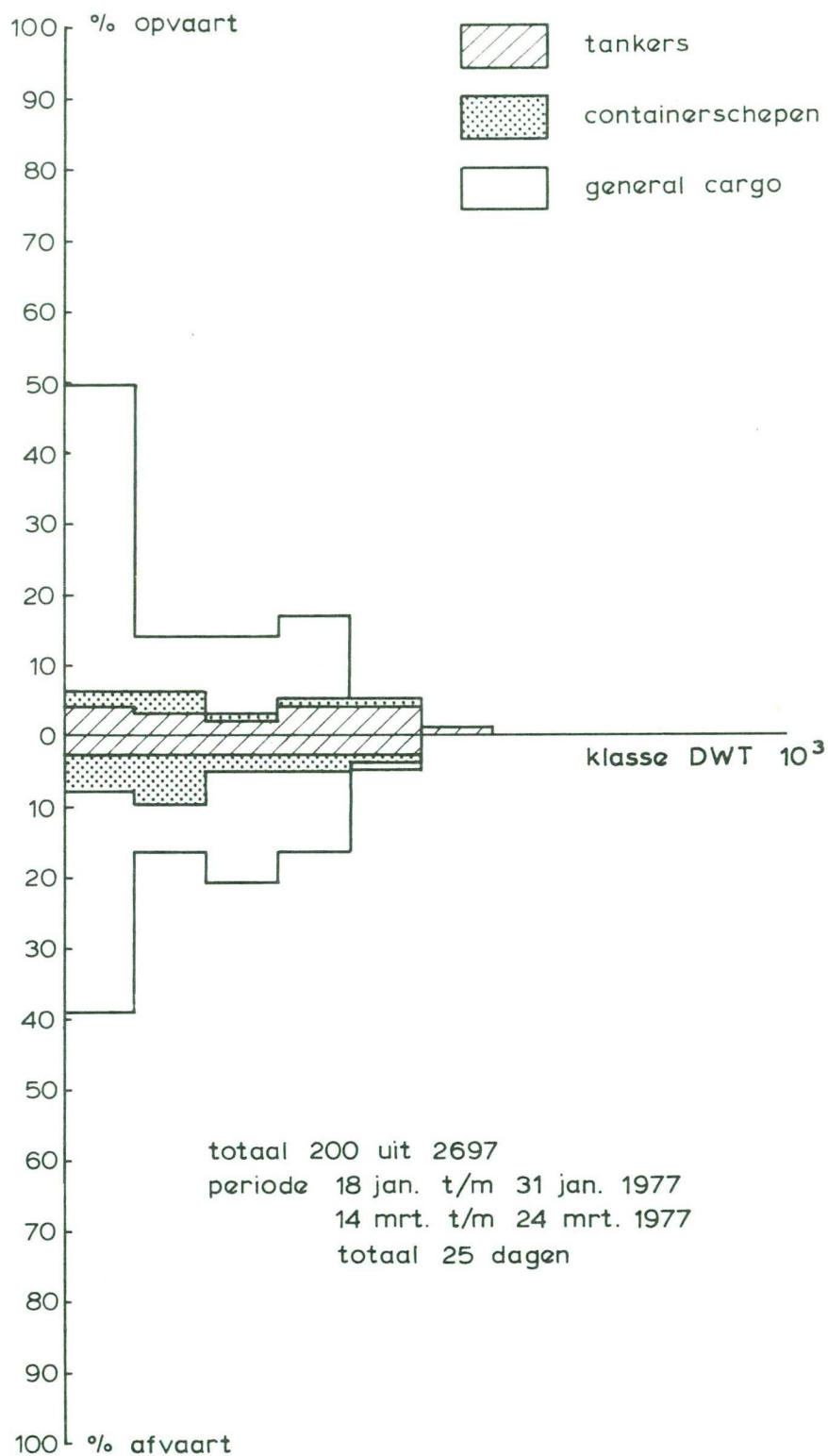
AFMEERSYSTEEM

SCHAAL 1 : 2000

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1738

FIG. 38

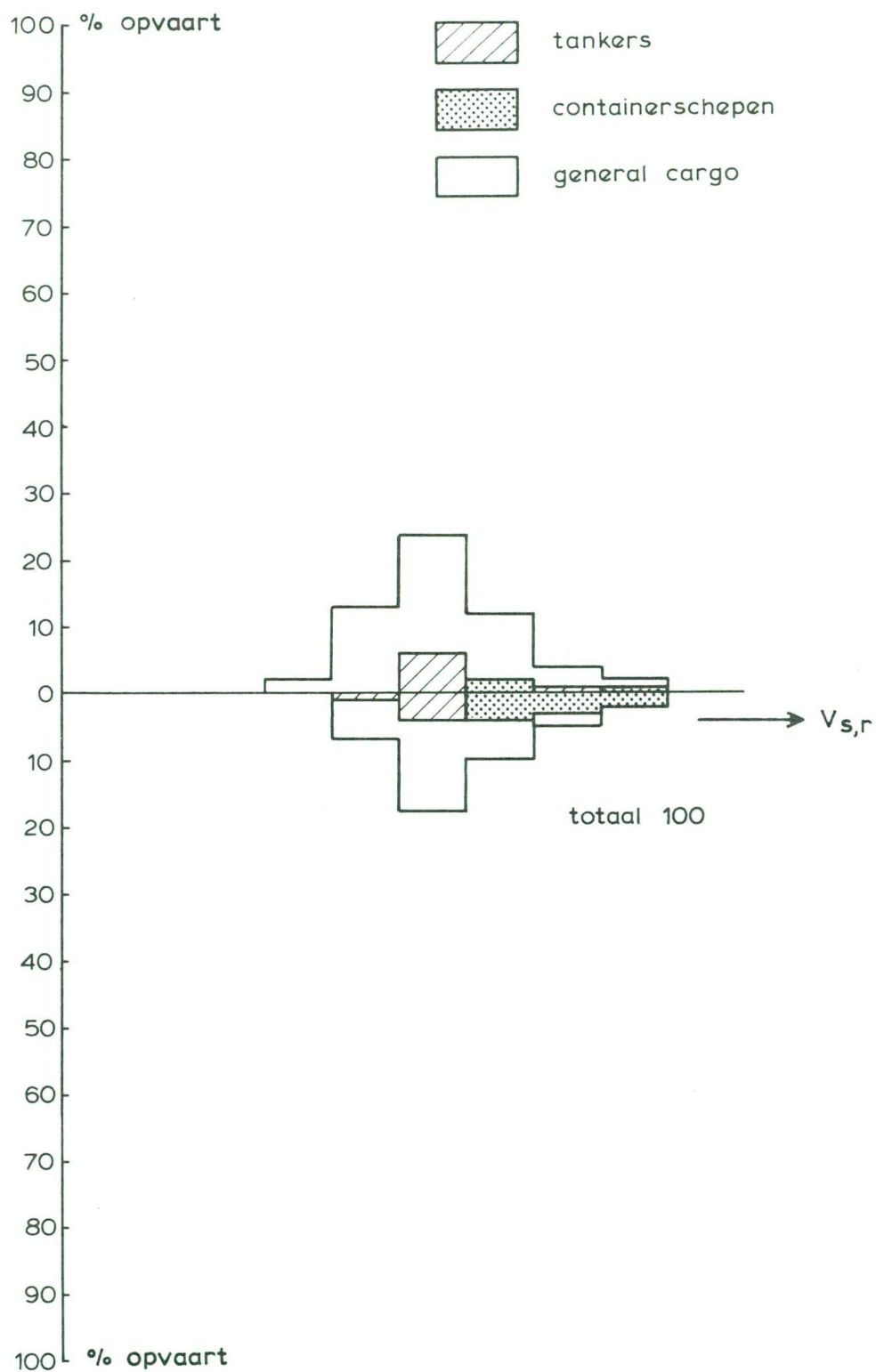


VERDELING SCHEPEN IN TONNAGE-KLASSEN

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1738

FIG. 39



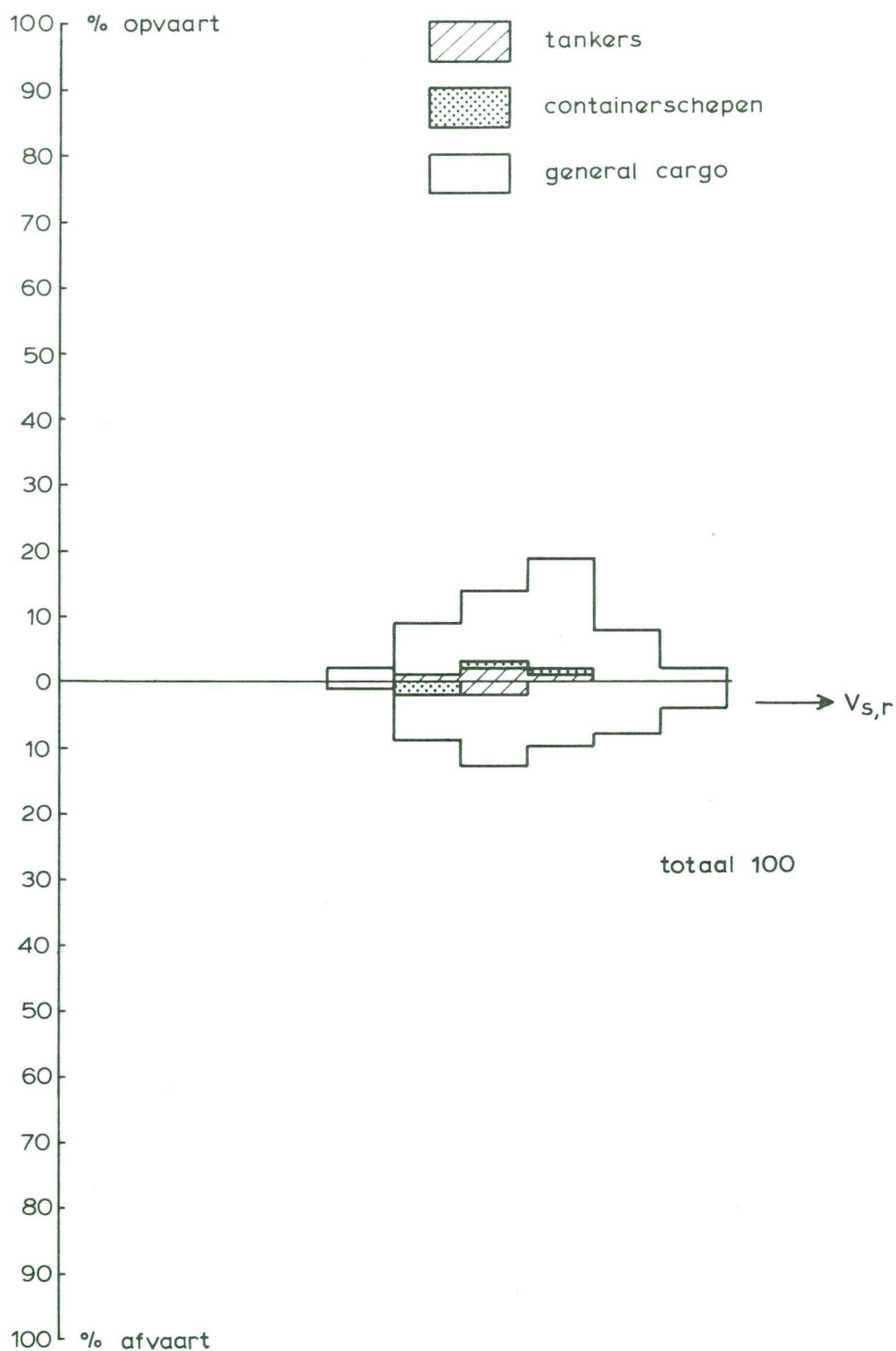
GEMETEN SCHEEPSSNELHEDEN

0-6.000 DWT

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1738

FIG. 40



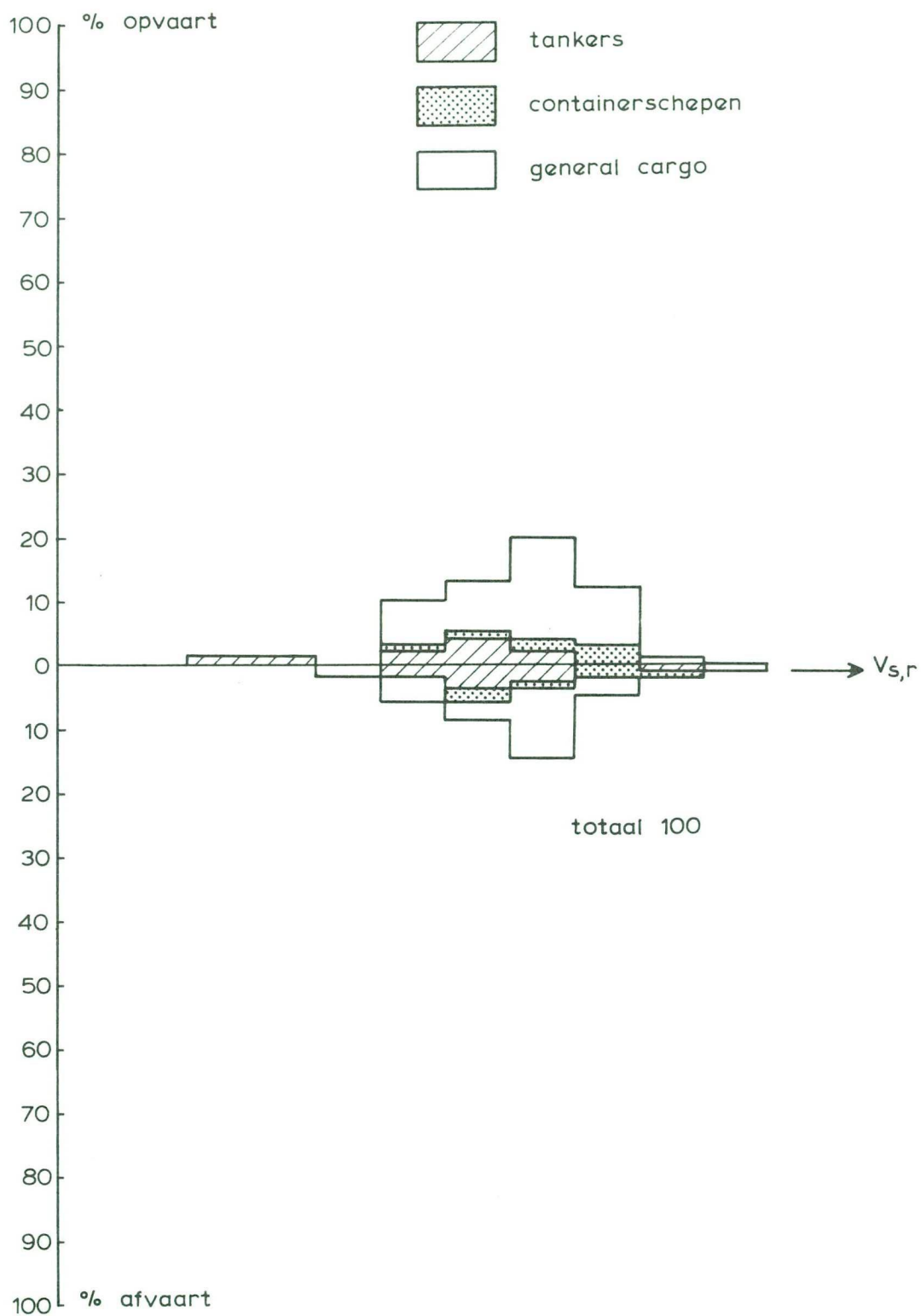
GEMETEN SCHEEPSSNELHEDEN

6.000 - 12.000 DWT

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1738

FIG. 41



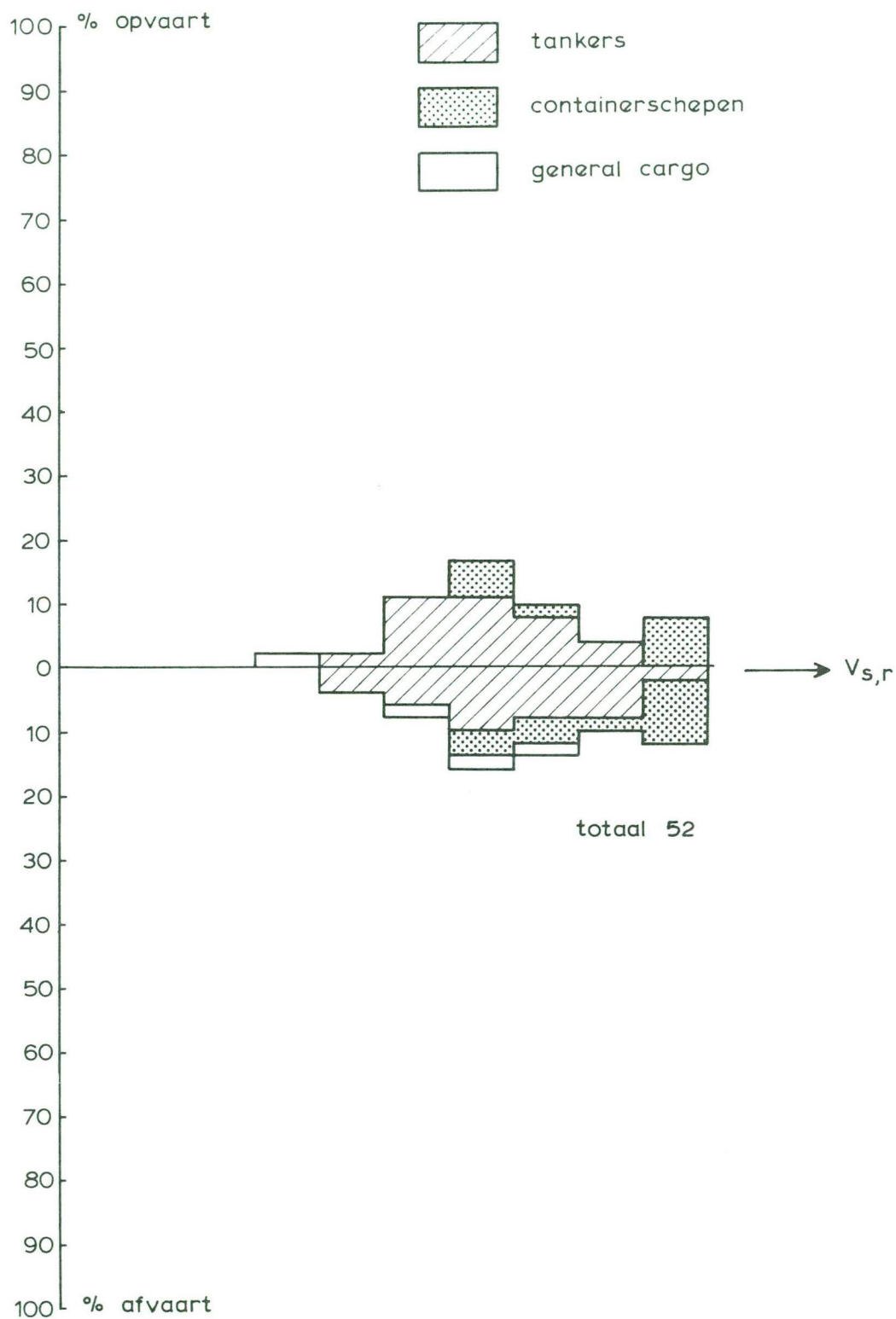
GEMETEN SCHEEPSSNELHEDEN

12.000 - 25.000 DWT

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1738

FIG. 42



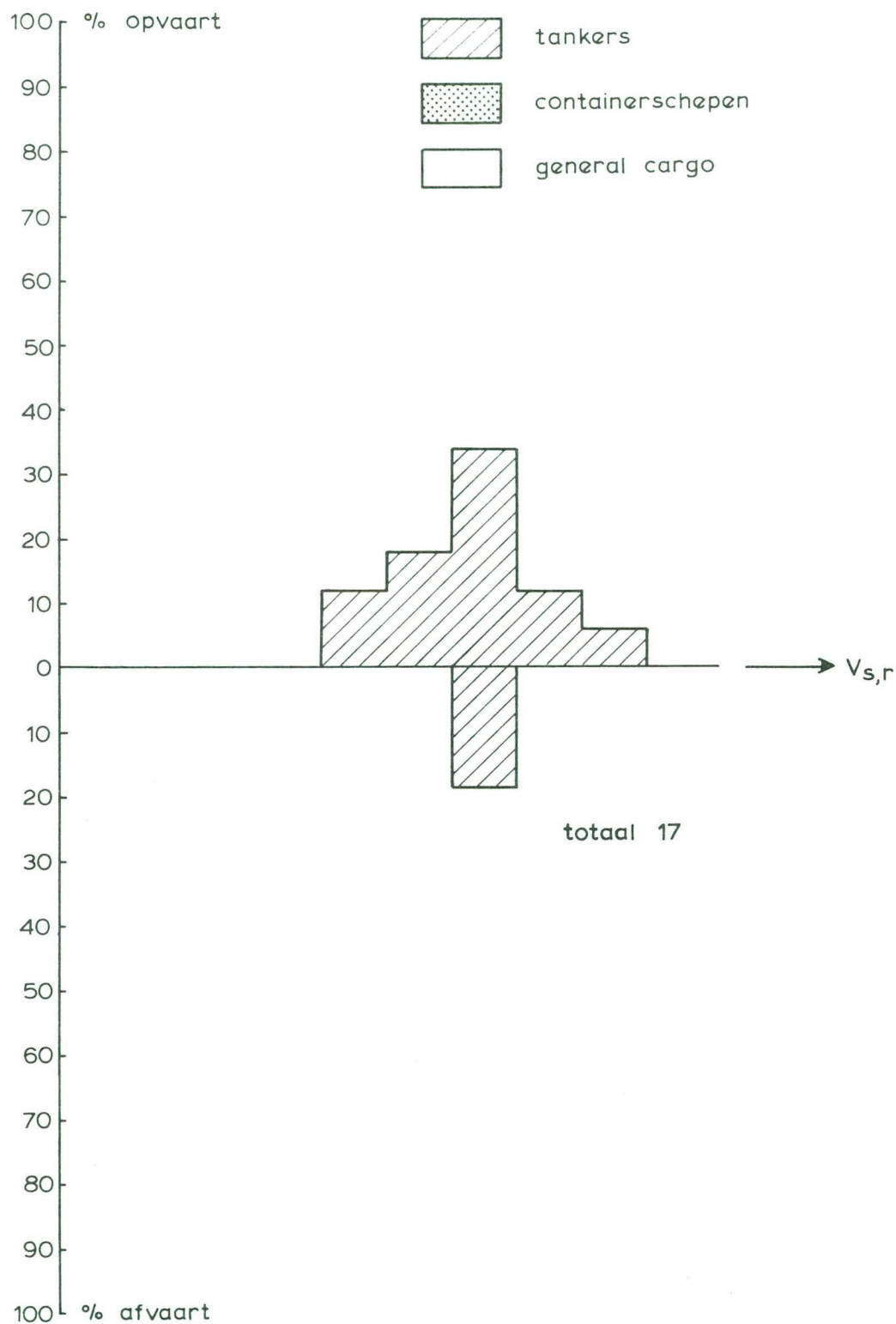
GEMETEN SCHEEPSSNELHEDEN

25.000-50.000 DWT

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1738

FIG. 43



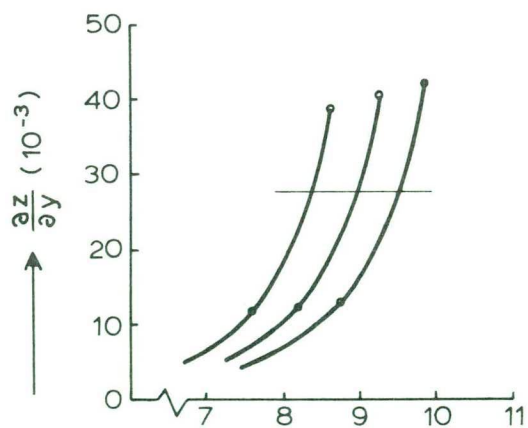
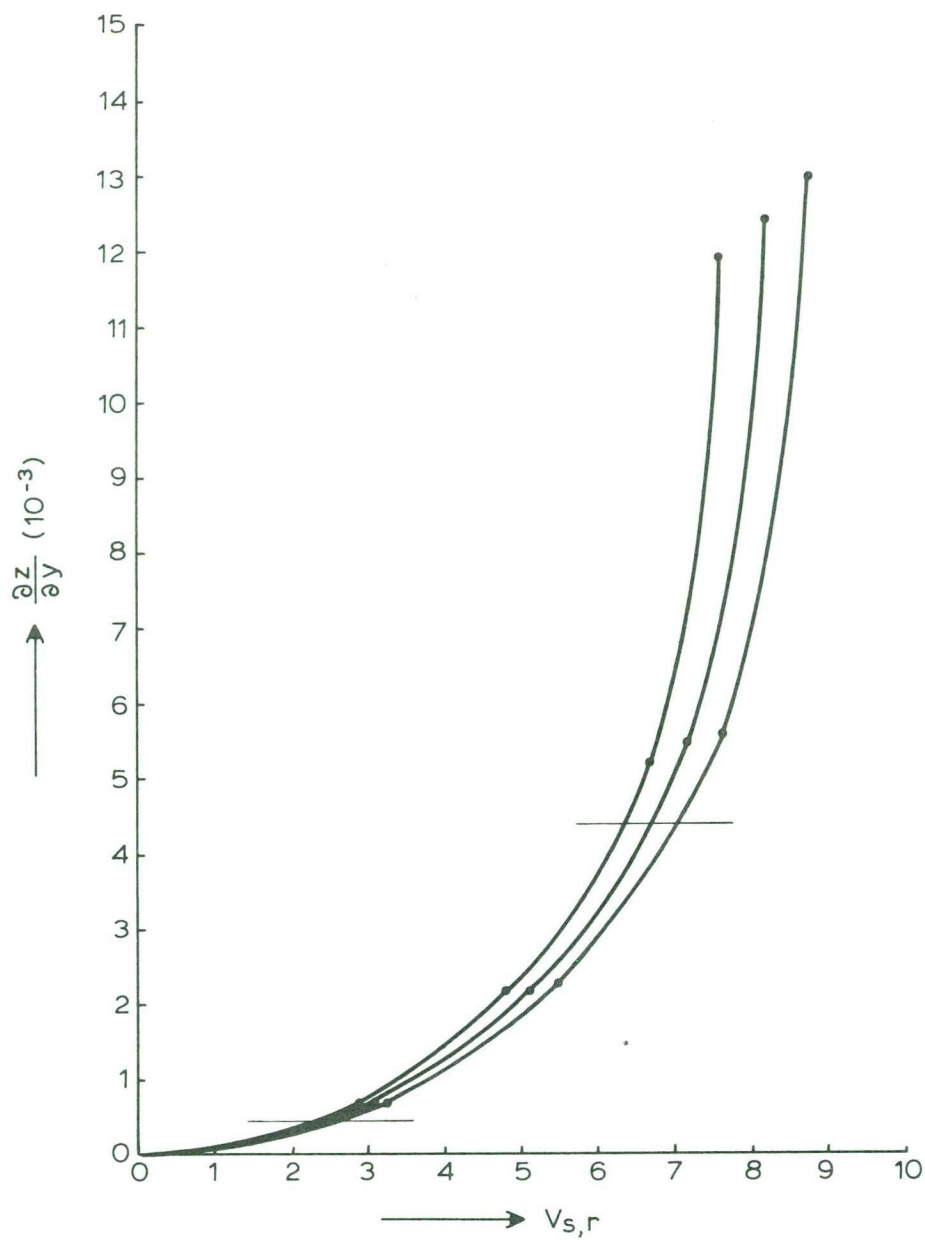
GEMETEN SCHEEPSSNELHEDEN

50.000 - 100.000 DWT

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1738

FIG. 44



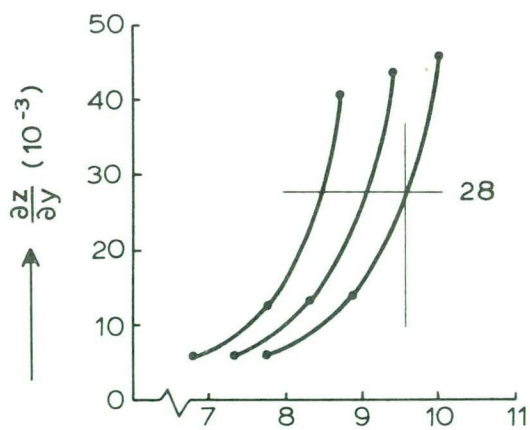
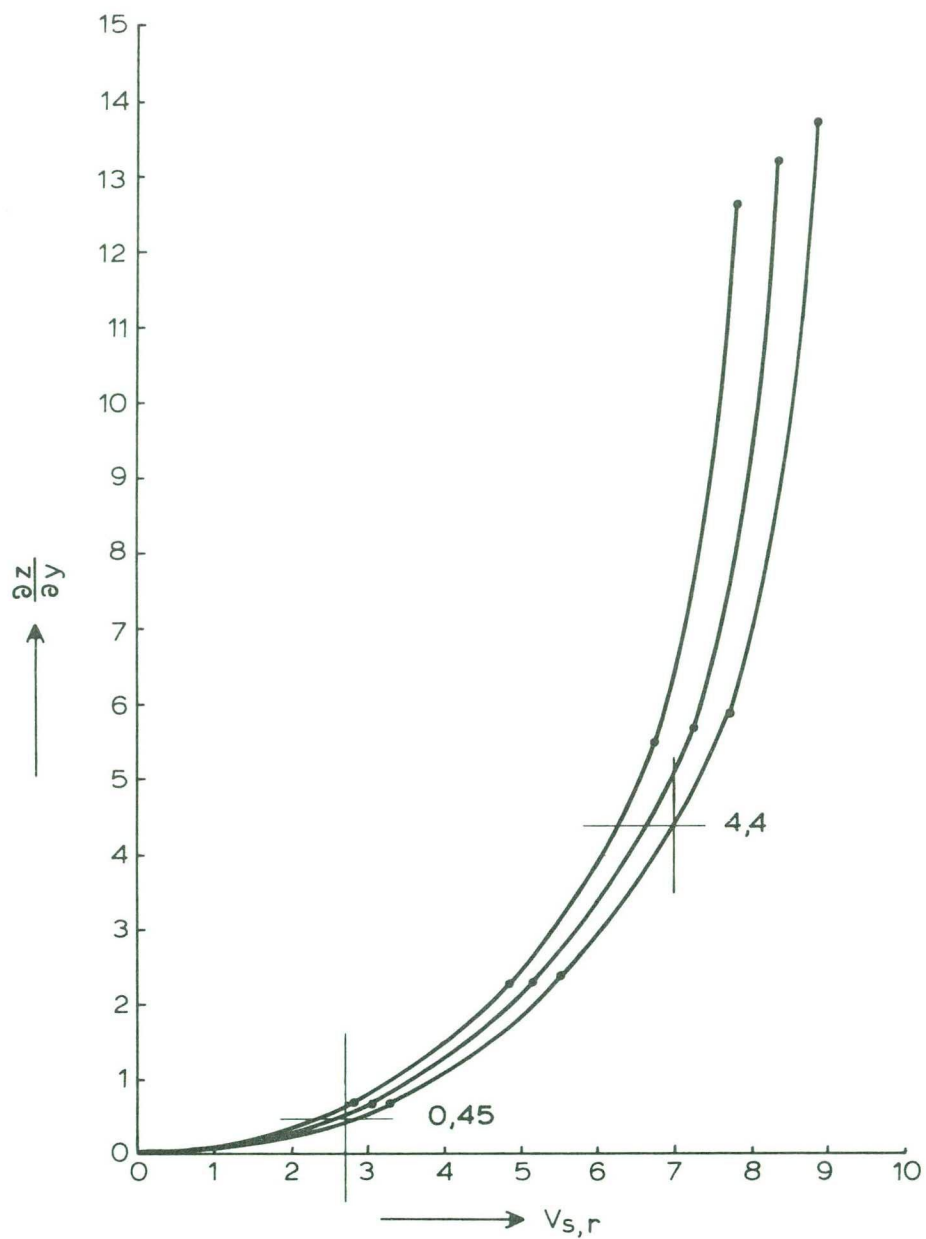
WATERSPIEGELHELLINGEN

TANKER 100.000 DWT

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1738

FIG. 45



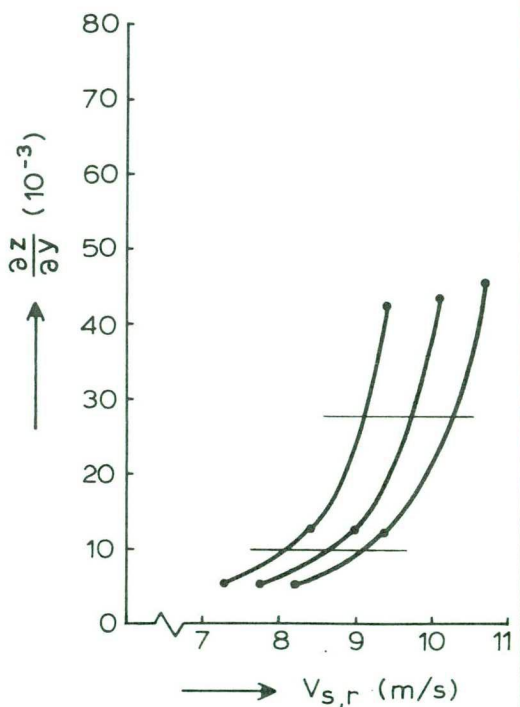
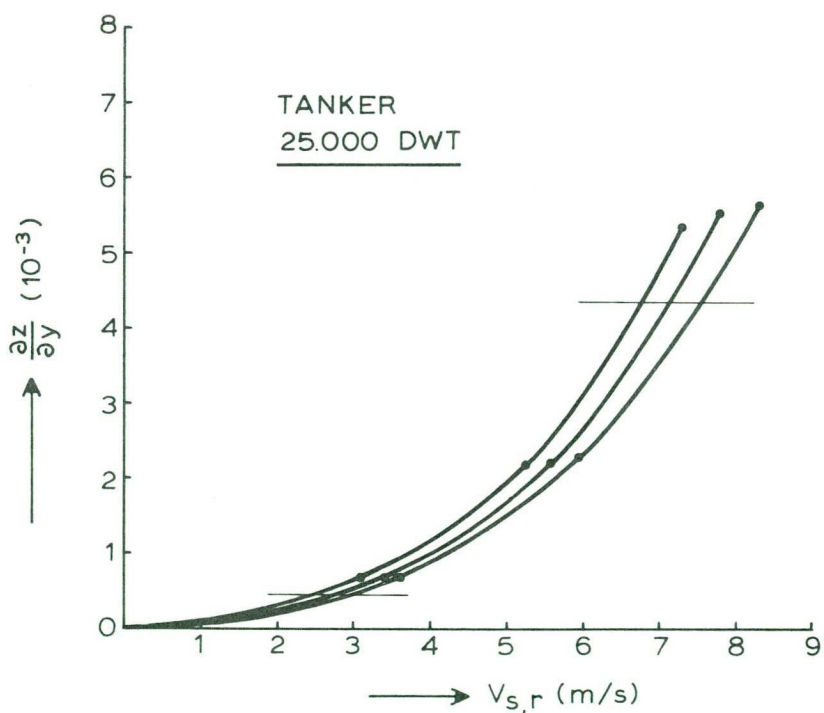
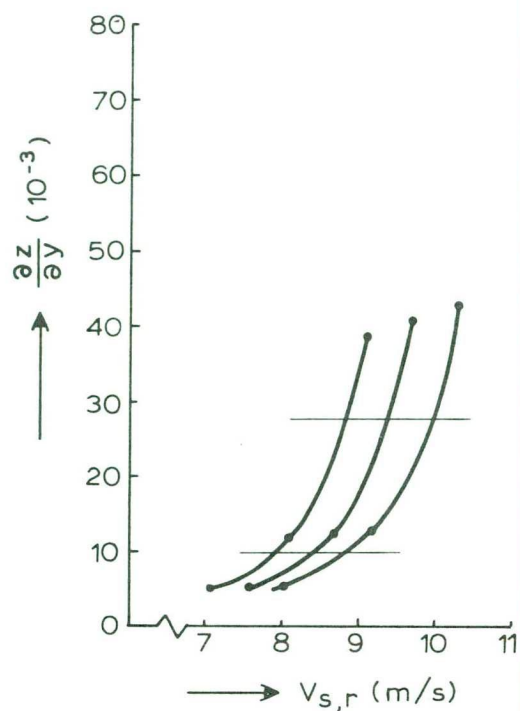
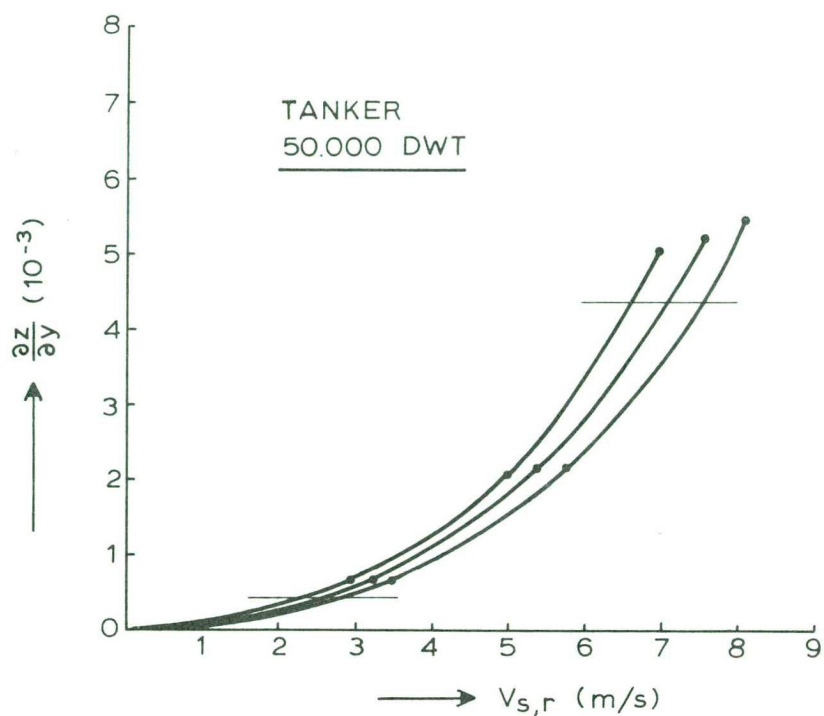
WATERSPIEGELHELLINGEN

TANKER 73.000 DWT

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1738

FIG. 45 a



WATERSPIEGELHELLINGEN

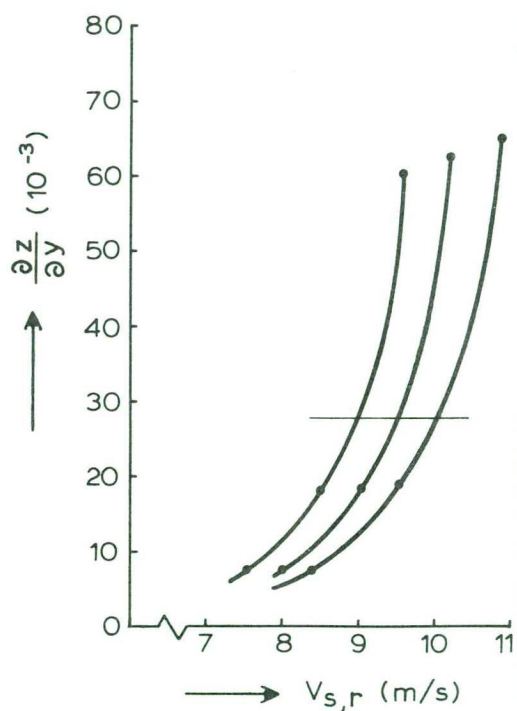
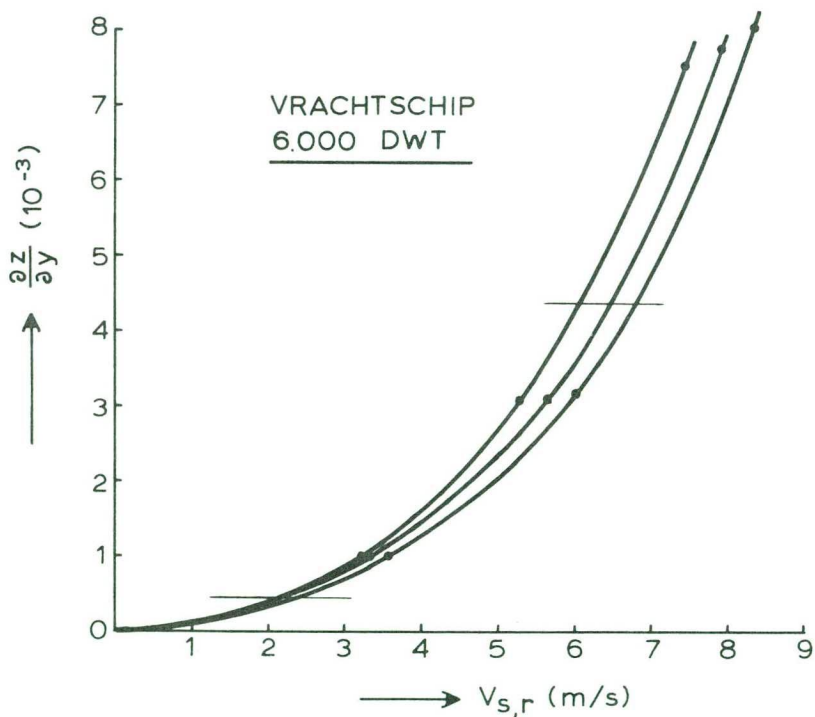
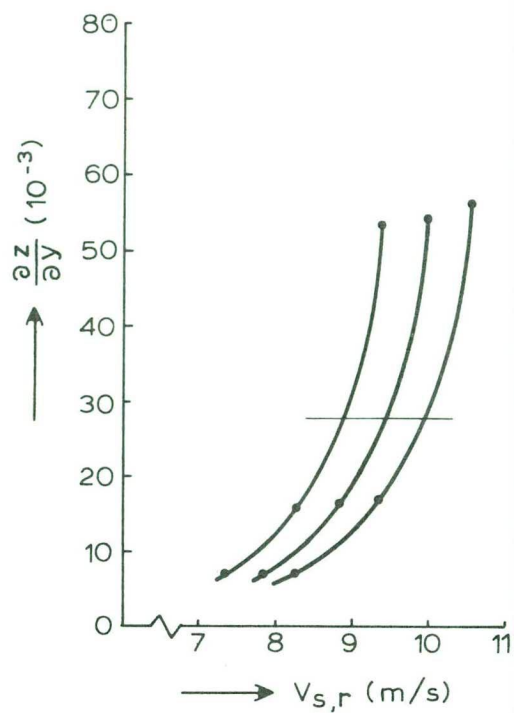
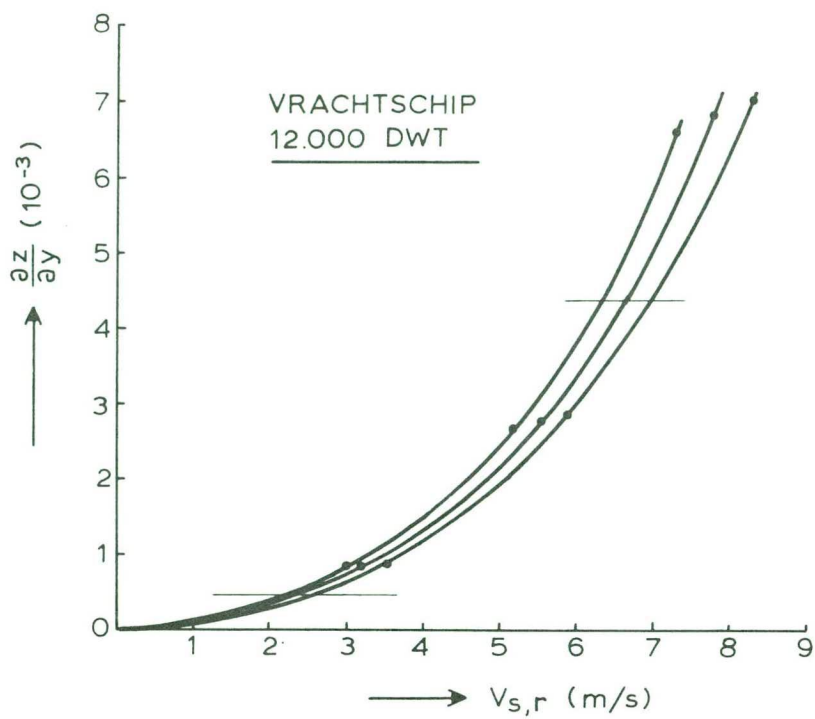
TANKER

25.000 en
50.000 DWT

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1738

FIG. 46



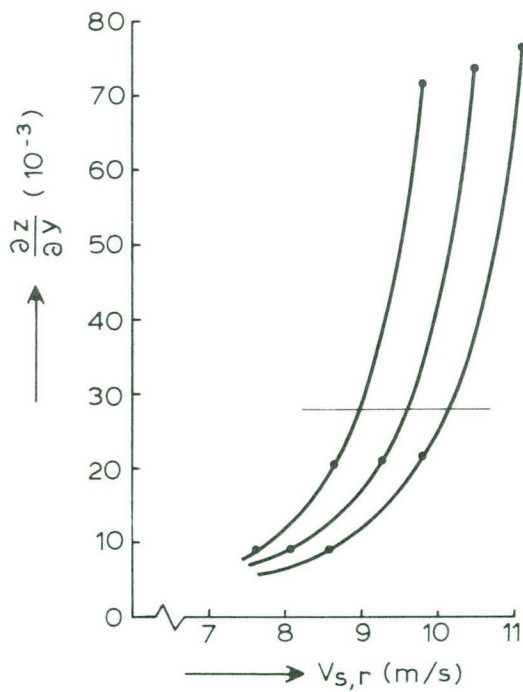
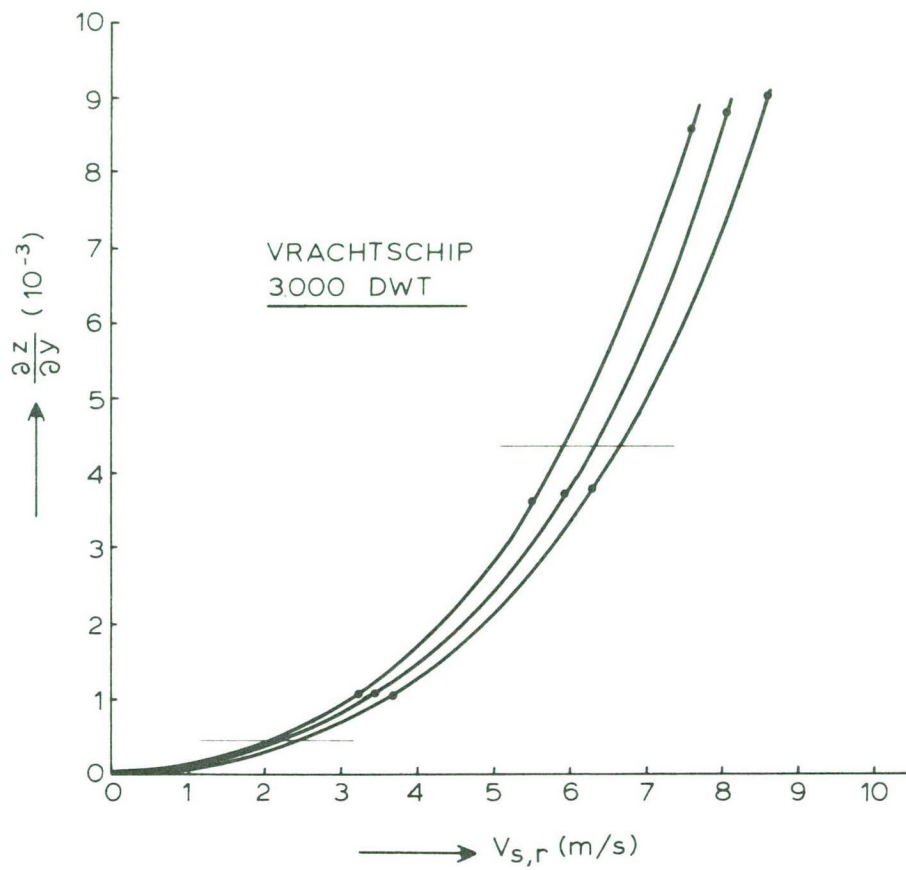
WATERSPIEGELHELLINGEN

VRACHTSCHIP 6.000 en 12.000 DWT

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1738

FIG. 47



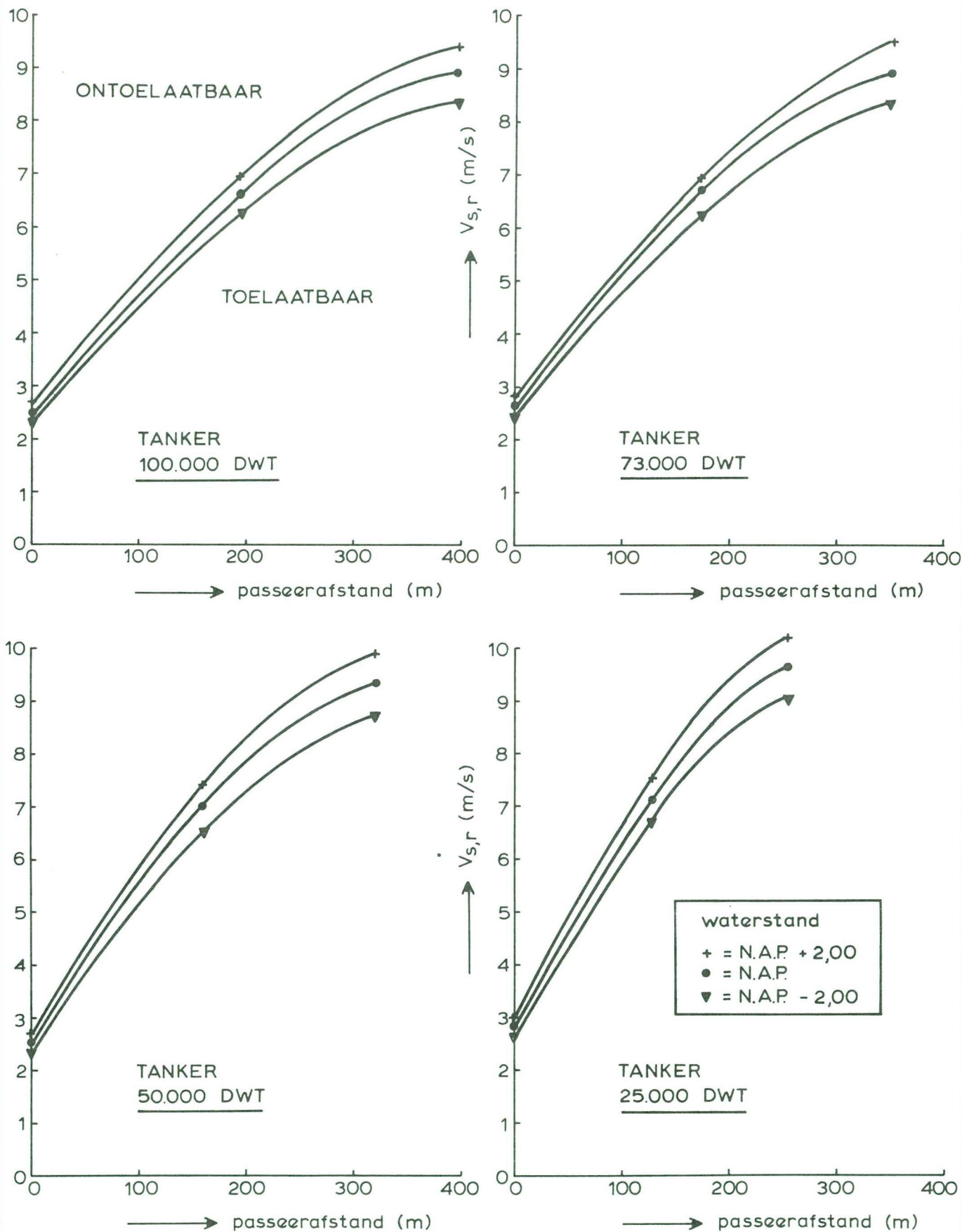
WATERSPIEGELHELLINGEN

VRACHTSCHIP 3.000 DWT

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1738

FIG. 48



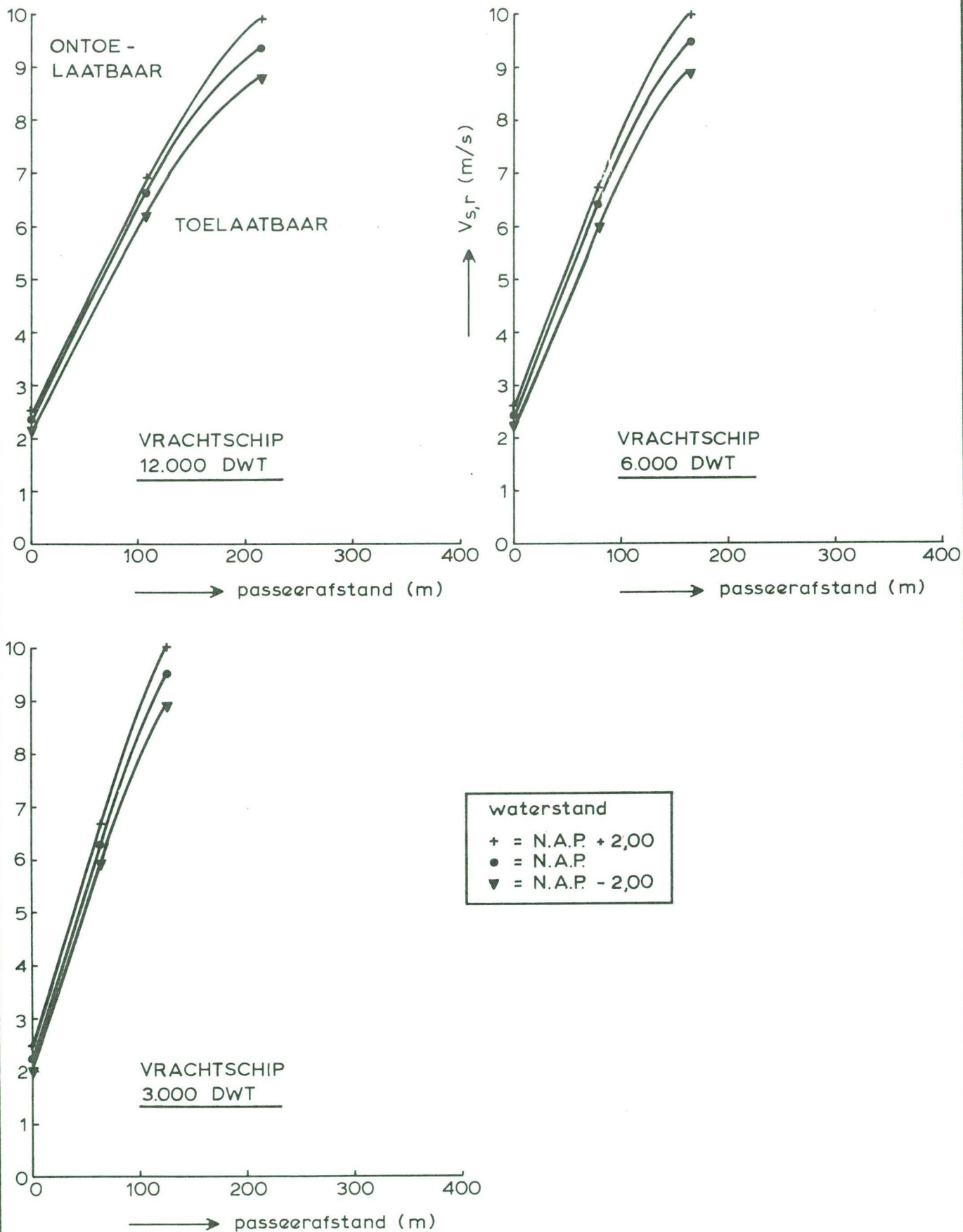
KRITIEKE KONDITIES

TANKERS

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1738

FIG. 49



KRITIEKE KONDITIES

VRACHTSCHEPEN

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1738

FIG. 50

p.o. box 177

2600 mh delft

the netherlands