
Westerschelde-oeververbinding

krachten op en verplaatsingen van de tunnel-
elementen tengevolge van stroomdruk

verslag modelonderzoek

M 1739

maart 1981

INHOUD

	blz.
1. <u>Inleiding en samenvatting</u>	1
1.1 Probleemstelling en doel van het onderzoek.....	1
1.2 Opdracht.....	2
1.3 Samenvatting van het onderzoek.....	3
1.4 Resultaten en konklusies.....	4
2. <u>Modelonderzoek</u>	10
2.1 Model.....	10
2.2 IJking van het model.....	12
2.3 Randvoorwaarden en proevenprogramma.....	12
2.4 Gemeten grootheden, meetmethode en nauwkeurigheid.....	13
3. <u>Resultaten</u>	15
3.1 Horizontale stroomkrachten.....	15
3.2 Kritieke condities voor uitvaren uit het bouwdok.....	17
3.3 Vertikale stroomkrachten en verplaatsingen tijdens het afzinken....	19
3.4 Resonantiegevaar tijdens het afzinken.....	22
4. <u>Bijzondere aspecten</u>	27
4.1 Stootgevaar bij het plaatsen van de tunnelelementen.....	27
4.2 Stootgevaar door passerende schepen.....	28
4.3 Stabiliteitsaspecten van afgezonken tunnelelementen.....	34

LITERATUUR

TABELLEN

FIGUREN

FOTBLAD

APPENDIX

TABELLEN

- 1.1 - 1.8 Proevenprogramma en resultaten horizontale stroomkrachten
- 2 Globale schatting van de maximale trekkracht van het konvooi
- 3.1 - 3.2 Meetresultaten verticale stroomkrachten en verplaatsingen
- 4 Invloed van passerend zeeschip op element 4 vlak voor de plaatsing
- 5 Invloed van passerend zeeschip op element 4 vlak na plaatsing op de nok
- 6 Maximum belasting van oplegpunten en kopschot van element 4 door passerend zeeschip
- 7 Gemiddelde seizoensfluctuatie in zoutgehalte bij het tunneltracé (Middelgat, boei 49) in de Westerschelde

FIGUREN

- | | |
|-------------|--|
| 1 | Situatie vaste oeververbinding Westerschelde |
| 2 | Langsdoorsnede Westerscheldetunnel |
| 3 | Overzicht model |
| 4 | Onderzocht tunnelelement en gebruikte pontons |
| 5.1 - 5.2 | IJking van de stroomsnelheidsverdelingen in het model (tunneltracé) |
| 6.1 - 6.2 | Situatie zinksleuf en onderzochte manoeuvres tunnelelement 4 |
| 7 | Vertikale posities van element 4 in het model |
| 8.1 | Definitieschets voor de horizontale krachten in de transportfase |
| 8.2 | Definitieschets voor de krachten en verplaatsingen in de afzink-
fase |
| 9.1 - 9.2 | Stroomkracht op tunnelelement; grootte, richting en aangrijpings-
punt |
| 10 | Konvooi voor het verslepen van de tunnelementen (aangenomen) |
| 11 | Getij ter plaatse van de tunnelsleuf (getijfactor 1,05) |
| 12.1 - 12.2 | Vertikale krachten afzinkfase tunnelelement 4 |
| 13.1 - 13.2 | Vertikale verplaatsingen afzinkfase tunnelelement 4 |
| 14.1 - 14.4 | Verband tussen verticale krachten en verplaatsingen |
| 15.1 - 15.2 | Grootte van fluktuaties in verticale krachten en verplaatsingen
in afzinkfase |
| 16 | Waterspiegeldaling bij en bewegingen van element 4 nabij zijn
eindpositie door een passerend zeeschip |
| 17 | Definitieschets stootbelastingen |
| 18 | Verloop maximum (extra) drukkracht op kopschotten bij zinkvoeg
als functie van initiële spleetwijdte |
| 19 | Relatie tussen zoutgehalte Middelgat/Zuidergat (boei 49) en afvoer
te Schelle |

FOTO'S

- | | |
|---|---|
| 1 | Tunnelelement 4 hangend aan de pontons (positie 9A) |
| 2 | Meet- en registratieapparatuur voor de afzinkfase |

WESTERSCHELDE-OEVERVERBINDING

Krachten op en verplaatsingen van de tunnelementen tengevolge van stroomdruk

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 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 hoog en 174,67 m lang, behalve de elementen 1 en 2, die 131,00 m lang zijn.

De elementen 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 afgezonden.

Tijdens het transport en het afzinken van de elementen treden enkele kritieke fasen op waarvoor een goed inzicht vereist is in de optredende stroomkrachten, de mogelijke risico's en de mogelijke maatregelen in geval van nood.

Het uitvaren van de elementen uit het bouwdok moet via een betrekkelijk smalle geul plaats vinden, waarbij de stroom dwars over de geul staat. Bij te sterke dwarsstroom of onvoldoende sleepvermogen zou het element in het benedenstroomse talud van de geul kunnen worden gedrukt. Voor een verantwoorde opstelling van

een afzinkschema dient de kritieke stroomsnelheid waarboven niet meer kan worden uitgevaren bekend te zijn.

Indien het element eenmaal is ingespannen in het verhaalsysteem moet dit systeem de optredende stroomkrachten ook kunnen opnemen. Voor een juiste dimensionering van dit systeem moeten deze krachten voor kritiek geachte omstandigheden bekend zijn.

Hetzelfde geldt voor de verticale stroomkrachten; het gekozen afzinksysteem moet deze krachten kunnen opnemen.

Om deze redenen, in het bijzonder voor het bepalen van de verticale stroomkrachten, is besloten tot het uitvoeren van het onderhavige modelonderzoek in het reeds voor een ander onderzoek gebouwde model van het betreffende gebied.

In het kader van deze studie is tevens gekeken naar enkele bijzondere aspecten, met name het gevaar van stoten van het af te zinken element tegen het voorgaande, reeds afgezonken element en de stabiliteit van afgezonken en nog niet afgedekte elementen.

1.2 Opdracht

De N.V. Westerschelde-Oeververbinding heeft in haar schrijven d.d. 4 augustus 1980, ref. 8672, het Waterloopkundig Laboratorium opdracht gegeven tot het uitvoeren van waterloopkundig onderzoek conform haar aanbiedingen in de brieven van 27 juni 1980 en 22 juli 1980, kenmerk V5722/LV1128, 1131, 1136/EYS/gv respectievelijk V6465/LV1128, 1131, 1136/Verh./ja. Deze opdracht omvat:

- 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 sedimentgehalte-profielen van natuurmetingen, die door de Studiedienst Vlissingen zijn uitgevoerd.

- 4 Aanzandingsberekeningen voor de tunnelsleuf.
- 5 Bepalen van de (gemiddelde) 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 afgezonken en nog niet afgedekte tunnenelementen door kruisende schepen.
- 7 Bepalen van de krachten op in het open bouwdok afgemeerde tunnelelementen door passerende schepen.

Het in dit verslag gerapporteerde onderzoek betreft het onder punt 5 genoemde aspect van dit onderzoekpakket. Dit deel van het onderzoek is in de maanden oktober, november en december 1980 en in januari 1981 uitgevoerd onder leiding van ir. W.D. Eysink, die tevens dit verslag samenstelde.

1.3 Samenvatting van het onderzoek

Het belangrijkste doel van het onderzoek was het bepalen van de gemiddelde stroomkrachten op de elementen tijdens het uitvaren, afmeren en afzinken. Deze krachten zijn in een fysisch schaalmodel (schaal 1:100) onder verschillende stroomkondities bepaald voor het afzinken van element 4. De stroomkondities waren hierbij zodanig bepaald dat de stroomkrachten, die onder willekeurige omstandigheden zullen optreden, op eenvoudige wijze uit de modelresultaten kunnen worden bepaald via een referentie-stroomsnelheid. Ook kunnen de resultaten via korrektiefactoren op betrekkelijk eenvoudige en voldoende betrouwbare wijze worden omgerekend naar de gemiddelde stroomkrachten op één van de andere elementen. Eén en ander is nader behandeld in de paragrafen 2.3 (korrektiefactoren voor andere elementen), 3.1 (horizontale stroomkrachten op element 4) en 3.3 (vertikale stroomkrachten op element 4).

Gebaseerd op de waargenomen stroomkrachten op element 4 in de uitvaarfasen is in paragraaf 3.2 een beschouwing gegeven omtrent de mogelijkheden van het uitvaren rond de kenteringen.

Tijdens het onderzoek werd onder extreme stroomkondities vertikale opslingering waargenomen van het ingespannen tunnelelement. Daar de waargenomen situatie te gevaarlijk werd geacht voor een veilige uitvoering van het afzinken van de tunnelelementen is dit dynamisch aspect nader geanalyseerd (paragraaf 3.4).

Tenslotte zijn nog enkele bijzondere aspecten in beschouwing genomen. Met name is het gevaar behandeld van stoten, die tijdens het plaatsen van de elementen kunnen optreden (paragrafen 4.1 en 4.2), en zijn factoren, die de stabiliteit van de geplaatste elementen in gevaar kunnen brengen, besproken (paragraaf 4.3).

1.4 Resultaten en konklusies

De belangrijkste resultaten van het onderzoek zijn samengevat in onderstaande konklusies en aanbevelingen:

Manoeuvres met drijvend element (fasen 1-9, zie fig. 6.1 en 6.2)

- 1 Uit de in de figuren 9.1 en 9.2 weergegeven modelresultaten volgt dat bij het uitvaren uit het bouwdok (fasen 1-6) tijdens grote stroomsnelheden het element aan grote stroomkrachten wordt onderworpen. Hierdoor bestaat onder die omstandigheden het gevaar dat het element tijdens het uitvaren aan de grond loopt. Aanbevolen wordt het tijdstip van uitvaren vlak voor kentering te kiezen, zodat de fasen 1-6 in een periode met geringe stroomsnelheden worden gepasseerd.
- 2 In paragraaf 3.2 zijn de kritieke kondities voor het uitvaren beschouwd voor een aangenomen konvooi-indeling (Fig. 10). Hieruit werd gekonkludeerd:
 - De beschikbare periode rond LW-kentering moet ruim voldoende worden geacht voor het veilig uitvaren van het tunnelelement.
 - Bij een goede voorbereiding, waarbij belangrijke vertraging in het tijdstip van vertrek van positie 1 wordt vermeden, is in het algemeen ook rond HW-kentering wel voldoende tijd beschikbaar voor het veilig uitvaren van een element. Bij een hoog springtij kunnen in dat geval de marges echter zeer gering worden.

Aanbevolen wordt om in elk geval het eerste element rond een LW-kentering uit te varen om enige routine op te doen alvorens rond een HW-kentering uit te varen.

- 3 Tijdens speelproeven in het model is gebleken dat ook bij hogere stroomsnelheden kan worden uitgevaren, mits het element tijdig (tussen de fasen 4 en 6) met de kop of de achterkant in de stroom wordt gebracht waardoor grote stroomkrachten op het element worden voorkomen (zie Appendix, par. 3.1 en fig. A.1 en A.2). Voor de draaimanoeuvre dient voldoende ruimte te worden geschapen. Het element kan vervolgens met de kop of de achterzijde in de stroom dwars in de tunnelsleuf worden versleept waardoor de stroomkracht op het element tot een minimum wordt beperkt (klein aangestroomd oppervlak, zie fig. 9.1 en 9.2 - positie 7).
- 4 Na het verslepen naar de afzinklokatie dient het element eerst met de kop in het verhaalsysteem te worden ingespannen (fase 7, fixeren draaipunt) alvorens het met de sleepboten dwars op de stroom wordt gebracht (zie Appendix, par. 3.2). Op deze wijze kan het element het best onder controle worden gehouden.
- 5 Uit het krachtsverloop op het tunnelelement 4 tijdens het inspannen in het verhaalsysteem (fasen 7-9) blijkt dat de onderzochte manoeuvre, waarbij het element naar de wal toe wordt gedraaid, tot een ongunstig krachtsverloop kan leiden met onnodig grote stroomkrachten (vergelijk fig. 9.1 met fig. 9.2). Dit kan worden voorkomen door positie 7 naar de landzijde te verleggen en het element van het land af draaiend in positie 9 te brengen.
- 6 Alleen bij eb heeft de waterstand tijdens het boven de sleuf draaien en het afzinken (fasen 8-9D) een duidelijk waarneembare invloed op de stroomkracht (fig. 9.2). In het algemeen is deze invloed echter van ondergeschikt belang of zelfs verwaarloosbaar (fig. 9.1 en 9.2).
- 7 De krachten op het tunnelelement tijdens de manoeuvres kunnen op eenvoudige wijze worden bewaakt via snelheidsmetingen (op een diepte van 4,5 m) in het betreffende referentiepunt, nadat van te voren de kritieke stroomsnelheid is bepaald. Dit laatste kan met behulp van de figuren 9.1 en 9.2, eventueel gekorrigeerd voor afwijkende afmetingen van het element en een afwijkende afzinkpositie (zie par. 2.3).

Afzinkfase

- 8 Tijdens het afzinken kunnen in de fasen 9-9B grote horizontale en verticale stroomkrachten optreden, die rond fase 9A maximaal zijn (zie figuren 9.1,

9.2, 12.1 en 12.2). Als gevolg van de hogere stroomsnelheden in die getijfase kunnen deze krachten vooral tijdens vloed tot grote waarden oplopen. Deze situatie wordt dan ook maatgevend geacht voor de dimensionering van het afzink-systeem.

- 9 De maatgevende verticale kabelkrachten blijken, als gevolg van de rotatie om de lengteas van het element door de stroom, niet evenredig te zijn met de stroomsnelheid in het kwadraat, maar met de stroomsnelheid tot de macht 2,5. Een duidelijke invloed van de waterstand op deze krachten is niet aanwezig.
- 10 Indien het element tijdens het afzinken onder water gaat, gaat een belangrijk deel van de stabiliteit verloren. Vanaf dat moment moeten de verticale krachten volledig door de relatief kleine pontons worden opgenomen, hetgeen in de eerste fasen van het afzinken (fasen A - C) tot grote verticale verplaatsingen kan leiden (figuren 13.1 en 13.2).
- 11 In fase 9D, de situatie waarin het element tegen zijn voorganger wordt geplaatst, zijn de krachten op het element betrekkelijk laag, zelfs bij hoge stroomsnelheden. De verticale verplaatsingen kunnen in het laatste geval nog aanzienlijk zijn, waarbij het element in het algemeen omhooggezogen wordt. Bij lage stroomsnelheden zullen echter zowel de krachten als verplaatsingen klein zijn en zijn er geen problemen bij de uiteindelijke plaatsing te verwachten.

Stabiliteit pontongroepen, ophangkabels

- 12 Bij vloed van het extreme springtij (getijfactor = getijverschil/gemiddeld getijverschil = 1,45) bleek het in het model onderzochte ophangstelsel niet voldoende stabiel om de optredende stroomkrachten op te nemen. Aanbevolen wordt een stabielere stelsel toe te passen, hetgeen is te bereiken door:
 - het toepassen van een zo laag mogelijk aangrijpingspunt van de verticale krachten op de pontongroep (laag liggende koppelbalk),
 - het aanbrengen van een starre koppeling van de beide pontons van een pontongroep, waardoor de stabiliteit van de pontons in dwarsrichting van het element wordt vergroot,
 - het toepassen van pontons met een grotere afmeting in de lengterichting van het element dan dwars op het element, waardoor de pontongroep stabielere wordt in de lengterichting van het element, en

- het toepassen van pontons met een groter oppervlak op de waterlijn, waardoor zowel de stabiliteit van de pontongroep toeneemt als het opdrijvend vermogen per ponton.

- 13 Vergroten van de pontons heeft tot gevolg dat de verticale verplaatsingen (globaal) evenredig met de vergroting van de pontons zullen afnemen. Hierdoor zal tevens de kanteling van het element reduceren en daardoor ook de verticale kracht (niet het moment). Dit laatste effect kan ook worden bereikt door het element met een initiële vertrimming af te zinken (b.v. benedenstroomse zijde 0,5 m lager dan bovenstroomse zijde). Om andere redenen bleek een dergelijke vertrimming in dit geval echter gevaarlijk te zijn (zie konklusie 17).
- 14 Aanbevolen wordt de ophangkabels in dwarsrichting zo ver mogelijk uit elkaar te plaatsen. Op deze wijze kan de bijdrage van het moment om de langsas van het element in de kabelkrachten met circa 20% worden gereduceerd. Deze maatregel beïnvloedt de uitwendige krachten op en het gedrag van het element niet of nauwelijks.

Resonantiegevaar tijdens het afzinken

- 15 Uit het modelonderzoek is gebleken dat het onderzochte systeem gevoelig is voor opslinging in verticale richting. De amplitude van de opslinging in de verticale krachten en verplaatsingen blijkt afhankelijk te zijn van de afzinkpositie en de stroomsnelheid (figuren 15.1 en 15.2). Bij grote stroomsnelheden treden in fase B grote fluktuaties op. Bij vloed van een extreem springtij bleek het element in die positie zelfs circa 3 m (!) op en neer te bewegen met krachtsfluktuaties in de verticale kabels met een amplitude van circa 1200 à 1500 kN (120 à 150 tf).
- 16 Bovengenoemde extreme opslingerings bleken te worden veroorzaakt door resonantie. Instabiliteiten in het stroombeeld veroorzaken een aanstoten van het ingespannen element loodrecht op de stroomrichting met een frekwentie die afhankelijk is van de geometrie en de stroomsnelheid (Strouhal). Bij de hoge stroomsnelheden bleek deze aanstootfrekwentie samen te vallen met de eigen frekwenties voor stampen en dompen van het ingespannen element, waardoor vooral resonantie in de stampbeweging optrad (par. 3.4). Bij element 7 bleek onder dezelfde stroomkondities vooral resonantie in de slingerbeweging op te treden (zie Appendix, par. 3.3).

17 Reduktie van de vertikale stroomkracht door initiële vertrimming van het element is vooral interessant onder extreme stroomkondities. Onder dergelijke omstandigheden blijkt echter resonantiegevaar voor stampen en/of slingeren te bestaan. Dit gevaar blijkt belangrijk te worden vergroot indien door vertrimming van het element de spanning uit de benedenstroomse vertikale kabels wordt gehaald. In dat geval bestaat er geen (belangrijk) moment meer om slingeren van het element tegen te gaan.

Resonantie is in deze situatie gevaarlijker dan een grote statische vertikale kracht en blijkt zelfs te kunnen worden onderdrukt door de vertikale stroomkracht (gekontroleerd) via vertrimming te vergroten (Appendix, par. 3.3).

18 Vergroting van de pontons zal de eigenfrekwenties van het ingespannen element verhogen, waardoor de mate van resonantie in vergelijkbare situaties enigermate zal worden gereduceerd. Resonantieproblemen kunnen echter eenvoudig worden voorkomen door niet onder extreme stroomsnelheden af te zinken.

19 De kans op resonantie door golven wordt gering geacht, omdat, zelfs met vergrootte pontons, de golffrekwenties die bij de tunnelsleuf kunnen voorkomen meer dan een faktor 2 zullen afwijken van de eigen frekwenties van het element (kleinste eigen slingertijd is 12 à 19 s voor slingeren). Doordat het element stabiel blijft treden wel krachtsfluctuaties op in de vertikale kabels, die evenredig zijn met de golfhoogte en de grootte van de pontons.

Stootgevaar tijdens plaatsen van het element

20 Tijdens het plaatsen van een element kunnen vertikale stoten optreden op de oplegnok en de oplegpunten en een horizontale stoot op het ginaprofiel en/of een extra drukbelasting van de kopschotten bij de zinkvoeg. Deze stootbelastingen kunnen worden veroorzaakt door:

- a onjuiste manipulaties met het verhaalsysteem,
- b slingering van het element veroorzaakt door stroom,
- c slingering van het element door golven, of
- d beweging van het element door passerende schepen.

21 De indruk bestaat dat de eerste drie verschijnselen geen belangrijke stoten zullen veroorzaken, zeker niet indien het element bij rustig weer en lage stroomsnelheid wordt geplaatst.

22 Grote passerende schepen zouden aanleiding kunnen geven tot aanzienlijke stootbelastingen indien ze tijdens het plaatsen met hoge snelheid op korte afstand van het element passeren. De indruk bestaat dat dit soort belasting binnen aanvaardbare grenzen kan worden gehouden door toepassing van een minimum passeer afstand tijdens het plaatsen en een (beperkte) beperking van de vaarsnelheid, vooral die van grote zeeschepen (zie fig. 16 en tabel 6).

Stabiliteit van afgezonken, niet afgedekte elementen

- 23 De stabiliteit van een afgezonken element moet worden geleverd door het overwicht onder water. De hiervoor benodigde ballast wordt in wezen bepaald door drie criteria:
- de oplegkracht moet altijd groter dan nul zijn om opdrijven te voorkomen,
 - de oplegkrachten mogen een bepaalde toelaatbare waarde niet overschrijden om bezwijken te voorkomen, en
 - de totale oplegkracht moet voldoende groot zijn om horizontale krachten via wrijving te kunnen opnemen.
- 24 Uitwendige factoren die van invloed zijn op de grootte van de oplegkrachten zijn stroomkrachten, krachten door passerende schepen en wijzigingen in de opdrijvende kracht op het element door fluktuaties in de dichtheid van het water. De grootte van de stroomkrachten volgt uit de kritieke stroomcondities en de resultaten van dit rapport (fase D), eventueel met correcties (zie par. 2.3). Gegevens over de krachten op het element veroorzaakt door passerende schepen kunnen worden ontleend aan [6].
- 25 De dichtheid van het water bij de tunnelsleuf fluktueert met het getij en met de afvoer van de Schelde. Incidenteel heeft ook op- en afwaaiing van de waterpiegel in de Westerschelde enige invloed. In het algemeen zal de dichtheidsfluktuatie bij de tunnelsleuf over een korte periode niet meer dan ca. 5 kg/m^3 bedragen. Over een langere periode genomen speelt de seizoeninvloed in de afvoer van de Schelde een belangrijke rol en kan de gemiddelde dichtheid variëren van ca. 1008 kg/m^3 tot ca. 1019 kg/m^3 (volgt uit fig. 19). Deze verandering verloopt echter langzaam.
- 26 De dichtheidsfluktuaties hebben een belangrijke invloed op de opdrijvende kracht. Omdat niet tijdig ingespeeld kan worden op de snelle dichtheidsfluktuaties wordt aanbevolen in elk geval zodanig te ballasten dat momentaan een fluktuatie van 5 kg/m^3 ($\Delta G = 1150 \text{ kN}$ (117 tf) voor klein element en 1525 kN (155 tf) voor groot element) geen gevaar oplevert voor de stabiliteit van het element. Het langzame verloop in de gemiddelde dichtheid van het water kan eventueel worden opgevangen door bewakingsmetingen en aanpassing van de ballast van het element. Op deze wijze kan de maximum belasting van de oplegpunten worden beperkt zonder de stabiliteit van het element in gevaar te brengen.

2. Modelonderzoek

2.1 Model

Het belangrijkste doel van het modelonderzoek was het bepalen van de gemiddelde stroomkrachten op de tunnelelementen tijdens het uitvaren uit het bouwdok en tijdens de afzinkmanoeuvres. Met name het bepalen van de verticale krachten tijdens het afzinken is slechts met voldoende betrouwbaarheid mogelijk in een geometrisch gelijkvormig model van voldoende grootte.

Voor onderzoek naar de vormgeving van de nieuwe voorhaven van Hansweert was reeds een model op schaal 1:100 van het betreffende gebied gebouwd dat eveneens voor het onderhavige onderzoek gebruikt kon worden. Het model omvatte het geulen- en plantengebied tussen de Platen van Ossensisse en Zuidbeveland met modelranden in het Zuidergat en de Schaar van Waard aan de oostzijde en in de Overloop van Hansweert en het Middelgat aan de westzijde (fig. 3). Tevens waren de veerhaven van Krui-ningen 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 het model), C6.79.175 en B3.79.319 van Rijkswaterstaat.

De schaal 1:100 van het model werd, gezien de grote afmetingen van het te onderzoeken tunnelement en de hoge stroomsnelheden in de Westerschelde, aanvaardbaar geacht voor betrouwbare krachtmetingen in het model. Volgens de schaalregels van Froude gelden de volgende schaalfactoren (prototypemaat/modelmaat) voor het onderzoek:

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

De verandering in de debieten tengevolge van het getij kunnen rond kentering aanleiding geven tot traagheidseffekten in de waterbeweging. In de maatgevende situaties met hoge stroomsnelheden zijn de debietsveranderingen echter in het algemeen voldoende klein om traagheidseffekten in de waterbeweging te mogen verwaarlozen. Om deze reden mag het onderhavige probleem met permanente stroming worden onderzocht.

Dit geldt in wat mindere mate voor het uitvaren uit het bouwdok, wat men juist rond kentering wil doen. Hier gaat het echter minder om het bepalen van de juiste krachten bij lage stroomsnelheden dan wel om het bepalen van de kritieke stroomsnelheden waarboven het niet meer verantwoord is om uit te varen. Ook dan gaat het dus om hogere stroomsnelheden waarbij traagheidseffekten verwaarloosbaar kunnen worden geacht.

Het manoeuvreren met een element met het verhaalsysteem gaat zo langzaam, dat de snelheid van het element ten opzichte van de stroomsnelheid verwaarloosbaar is. Dit betekent, dat de stroomkrachten op het element in elke fase van de manoeuvre in het model met een stilliggend element kunnen worden bepaald.

Ook dit geldt in mindere mate voor het uitvaren uit het bouwdok, omdat daar de relevante stroomsnelheid relatief laag is en de verplaatsing van het element juist met een niet verwaarloosbare snelheid zal gaan. Om praktische redenen zijn hier echter de krachten ook met een stilliggend element bepaald en dient de kritieke stroomkonditie, die aldus is bepaald, met enige voorzichtigheid te worden gehanteerd.

Voor het onderzoek is gebruik gemaakt van een enigszins geschematiseerd geometrisch gelijkvormig stalen model van het grote type tunnelement (fig. 4). De schematisatie van het model is zodanig gekozen dat de massaverdeling van het element als ook de plaats, grootte en vorm van de ballasttanks de werkelijkheid zo goed mogelijk (op schaal) benaderden. Dit is een essentiële voorwaarde om ook de verplaatsingen van het drijvende element door de uitwendige stroomkrachten en het terugkoppelend effect hiervan op de krachten juist in het model weer te geven. De overige elementen, die als dummy-elementen zijn gebruikt, waren van hout. De elementen zijn gebouwd op basis van de tekeningen WT-67 en WT-68 verstrekt door de Direktie Sluizen en Stuwen van de Rijkswaterstaat met dien verstande dat het middenkanaal in de tunnel zou vervallen en het dwarsprofiel 1,70 m smaller zou worden dan aangegeven op tekening WT-67. De voor het afzinken gebruikte pontons (fig. 4) werden vervaardigd volgens gegevens eveneens verstrekt door de Direktie Sluizen en Stuwen van de Rijkswaterstaat als vertegenwoordiger van de opdrachtgever.

2.2 Ijking van het model

Voor de uitvoering van de onderdelen 2, 5, 6 en 7 van het totale onderzoek (zie paragraaf 1.2) diende het model opnieuw te worden geijkt. Deze ijking is tot stand gebracht door de instroming en de ruwheid in de diepere delen van de geulen in het model, zonder slinksleuf en met de huidige voorhaven van Hansweert, zodanig te maken dat de stroomsnelheidsverdelingen in meerdere raaien, doch vooral in de nabijheid van de toekomstige sleuf, in het model overeenkwamen met overeenkomstige in de natuur gemeten snelheidsverdelingen. Deze laatste zijn zo goed mogelijk bepaald aan de hand van speciaal uitgevoerde drijfvermetingen en stroomsnelheidsmetingen in meerdere posities per raai.

De ijking van het model is uitgevoerd voor het maximale ebdebiet en het maximale vloeddebiet bij een gemiddeld springtij (getijfaktor 1,18). Het eindresultaat van de ijking wordt gegeven in de figuren 5.1 en 5.2. Hieruit blijkt een goede overeenkomst tussen de stroming in de natuur en in het model. Een meer gedetailleerde beschrijving van de ijking wordt gegeven in [1].

2.3 Randvoorwaarden en proevenprogramma

De randvoorwaarden en het proevenprogramma zijn in onderling overleg tussen de Directie Sluizen en Stuwen van Rijkswaterstaat, vertegenwoordiger van de N.V. Westerschelde-Oeververbinding, en het Waterloopkundig Laboratorium vastgesteld tijdens de bespreking te Utrecht op 29 augustus 1980. De randvoorwaarden zijn zodanig gekozen dat voor elke situatie, die in werkelijkheid zou kunnen optreden, de te verwachten krachten via interpolatie uit de modelresultaten kunnen worden bepaald (tabellen 1.1 - 1.8). De hoge stroomsnelheden, die in het model zijn toegepast, zijn ondermeer gebaseerd op de overweging dat bij grote stroomkrachten de absolute meetfout een geringe rol speelt. Hierdoor wordt de nauwkeurigheid van de afgeleide krachten voor geringere stroomsnelheden zo groot mogelijk.

Alleen het transport en het afzinken van element 4 is in het onderhavige onderzoek onderzocht. In de transportfase van het drijvende element zijn voor de verschillende randvoorwaarden 6 posities onderzocht tijdens de uitvaarfase uit het bouw-dok en 3 posities gedurende de manoeuvre bij het inspannen in het verhaalsysteem boven de eindpositie in de sleuf (fig. 6.1 en 6.2). Vervolgens is element 4 onderzocht in vier fasen tijdens het afzinken, te weten (figuur 7):

- A het tunnelelement 2,0 m onder water hangend vlak onder de pontons, zodanig geballast dat de pontons 1,50 m diep staken (zonder ballast is dit 1,00 m),
- B het tunnelelement halverwege het afzinken,
- C het tunnelelement ongeveer half onder de oorspronkelijke bodem gezakt, en
- D het tunnelelement vlak boven of in zijn eindpositie.

Bovenstaande leidde, in combinatie met de vastgestelde randvoorwaarden, tot een programma met 16 proeven, die elk een groot aantal fasen van de manoeuvres van het element 4 omvatten (tabellen 1.1 - 1.8).

De krachten op andere elementen tijdens het afzinken (fasen 7 tot 9D) kunnen op basis van de modelresultaten voor element 4 via korrektiefactoren worden geschat. De invloed van de grootte van het element kan eenvoudig via de lengteverhouding van de elementen n en 4 (L_n/L_4) worden gecorrigeerd. De invloed van de afzinklokatie wordt bepaald door de afwijking van de lokale stroomsnelheid bovenstrooms van de sleuf (v_n) ten opzichte van die snelheid ter plaatse van element 4 (v_4). Gezien de relaties tussen de stroomkracht en de stroomsnelheid kan deze invloed worden geschat via de faktor $(v_n/v_4)^2$ voor de horizontale krachten (par. 3.1 - vgl. 1) en een faktor $(v_n/v_4)^{2,5}$ voor de verticale krachten (par. 3.3).

2.4 Gemeten grootheden, meetmethode en nauwkeurigheid

Het eerste onderdeel van het onderzoek betrof het bepalen van het verloop van de gemiddelde horizontale stroomkracht op de tunnelelementen gedurende de drijvende fase van de afzinkmanoeuvres. Hiertoe zijn deze manoeuvres verdeeld in een aantal momentopnamen waarin de gemiddelde horizontale stroomkrachten werden gemeten. In deze fase was het mogelijk de gemiddelde stroomkracht op eenvoudige en snelle wijze met een veerunster te meten. De gebruikte veerunsters, met gewichten geijkt, bleken binnen enkele grammen nauwkeurig te zijn (circa 20 kN (2 tf) in werkelijkheid). In elke positie lag het element ingespannen in 3 starre staalkabeltjes aan de bovenstroomse zijde, waarmee de positie was bepaald, en 1 kabel met een slappe veer aan de benedenstroomse zijde (veerstijfheid circa 10% van die van de veerunster). Alle kabels waren aan de hoekbolders van het element bevestigd onder een hoek van 45° met de lengteas van het element. Het element werd in positie gehouden door via de slappe veer een voorspanning in de kabels aan te brengen (fig. 8.1). De stroomkracht werd bepaald door de krachten in alle kabels, één voor één, te meten en samen te stellen. De samengestelde kracht heeft een geringere betrouwbaarheid dan de individueel gemeten kabelkrachten. Naast de meetonnauwkeurigheid

van de veerunsters worden geringe afwijkingen in de stroomkracht geïntroduceerd door het uitmiddelen van de niet simultaan gemeten krachtsfluctuaties in de kabels. Hierdoor bleek uiteindelijk een maximale fout in de stroomkracht op te treden, die (incidenteel) 150 kN (15 tf) bedroeg. Door de "weerstandskoëfficiënt" K/v^2 voor hoge stroomsnelheden te bepalen blijft de procentuele fout echter beperkt.

In het tweede onderdeel van het onderzoek, de afzinkfase, moesten naast de horizontale krachten ook de (gemiddelde) verticale krachten en verplaatsingen tengevolge van de waterbeweging worden bepaald. Daar deze drie grootheden simultaan moesten worden gemeten, stelde dit hogere eisen aan de meetmethode. Het principe van de meetmethode voor de horizontale krachten bleef gehandhaafd, zij het, dat de veerunster werd vervangen door een krachtringetje met rekstrookjes. De verticale krachten werden eveneens met behulp van krachtringetjes, geplaatst in de verticale ophangkabels tussen element en pontons, gemeten. De verticale verplaatsingen werden vastgelegd door de verplaatsingen van de hoekpunten van het element ten opzichte van vaste punten met potentiometers te meten (fig. 8.2). De elektrische signalen van de krachtopnemers en de verplaatsingsmeters werden via de bijbehorende meetkasten op recorders geregistreerd. De nulstanden en standaarduitslagen werden voor elke proef geijkt en op de gewenste stand geregeld. De nauwkeurigheid van de krachtmetingen kan, afhankelijk van het benodigde meetbereik, gesteld worden op circa 2 tf (kleine krachten) à 5 tf (grote krachten) per hoofdkabel. De stroomkrachten hebben een maximale fout van respectievelijk 5 tf à 10 tf. De nauwkeurigheid van de afgeleide grootheden, richting van de stroomkracht en de arm van het moment op het tunnelelement door de stroomkracht, is geringer dan bij de direkt gemeten grootheden, vooral bij geringe stroomkrachten gemeten met de veerunsters. In deze gevallen wordt voor de kritieke fasen toch een redelijke nauwkeurigheid behaald doordat voor een bepaalde positie van een element informatie uit meerdere proeven wordt verkregen. Slechts in de posities 1, 2 en 3 bij de mond van het bouwdok bleken de afgeleide grootheden onbetrouwbaar, doordat de stroomkrachten op het element klein waren ten opzichte van de meetfouten in de verschillende kabeltjes.

3. Resultaten

3.1 Horizontale stroomkrachten

In dit onderzoek zijn uitsluitend de gemiddelde, door stroomdruk veroorzaakte krachten in de kabels gemeten. De horizontale weerstandskracht op een lichaam in een stroom kan in principe worden geschreven als:

$$K = \frac{1}{2} \rho C_w A v_r^2 \quad (1)$$

waarin K = weerstandskracht op een voorwerp in een stroom (N)
 ρ = dichtheid van de vloeistof (kg/m^3)
 C_w = weerstandskoefficiënt (-)
 A = aangestroomd oppervlak loodrecht op de stroomrichting (m^2)
 v_r = maatgevende stroomsnelheid (m/s)

De maatgevende stroomsnelheid is steeds gedefiniëerd als de stroomsnelheid in het referentiepunt bovenstrooms van de zinksleuf (figuur 6.1 en 6.2).

Vergelijking (1) laat zien, dat er een kwadratisch verband bestaat tussen de weerstandskracht en de stroomsnelheid. Teneinde te komen tot een duidelijke en zo eenvoudig mogelijke presentatie van het verloop van de stroomkrachten op de tunnel-elementen gedurende de manoeuvres, zijn de gemeten stroomkrachten (zie fig. 8.1 en 8.2 en tabellen 1.1-1.8) herleid tot die geldend voor een maatgevende stroomsnelheid van 1 m/s. De aldus verkregen "krachten", die in wezen het karakter hebben van een weerstandskoefficiënt, waarin beide variabele grootheden C_w en A zijn opgenomen, zijn uitgezet als functie van de positie in de manoeuvres in de figuren 9.1-9.2. In deze figuren wordt tevens het verloop van de hoek tussen de stroomkrachtrichting en de lengte-as naar de kopzijde van het element gegeven als ook het verloop van de arm (M_z/K) van het moment M_z ten opzichte van het zwaartepunt van het element veroorzaakt door de stroomkracht.

In het algemeen vertonen de gevonden resultaten voor het verloop van de horizontale krachten (voor $v_r = 1$ m/s) overeenkomstige karakteristieken. Tijdens de eerste fase van het uitvaren uit het bouwdok (posities 1, 2 en 3) zijn de stroomkrachten op het element gering. Daarna neemt de stroomkracht snel toe naarmate het element verder naar buiten gaat en bereikt een maximum in positie 6.

bij het uitvaren van het element uit het bouwdok. Een enigszins uitzonderlijke situatie komt voor in positie 8 bij eb. In die situatie is er een sterke convergentie tussen het element en de noordelijke geuloever, waardoor een belangrijk deel van de ebstroom in een soort trechter wordt gevangen. Hierdoor ontstaat kennelijk een aanzienlijke opstuwing tegen het element, die leidt tot de waargenomen grote stroomkracht. Deze ongunstige situatie kan worden voorkomen door positie 7 te verleggen naar de landzijde van positie 9 en het element linksom, van het land af draaiend, in positie 9 te brengen.

De verschillen in waterstand, die kunnen optreden, zullen geen belangrijke invloed hebben op de stroomweerstand. De in het onderzoek gevonden krachtsverschillen bij verschillende waterstanden blijken alleen in de posities 7, 8 en 9 boven de sleuf een zeker systematisch verband te vertonen met de waterstand waarbij de verschillen niet aan de meetonnauwkeurigheid kunnen worden toegeschreven.

Bij een element dwars op de stroom is de weerstand van het element tegen kantelen aanzienlijk geringer dan bij aanstroming op de kop. Hierdoor kantelde het dwars op de stroom liggende element bij hoge stroomsnelheden (en -krachten) aanzienlijk meer dan bij de lage snelheden en vertoonde het element zelfs de neiging tot dui-

In deze positie is het element volledig uit de beschutting van de sleuf gekomen en staat dan bloot aan de volle stroom. Bij verder transport naar positie 7 neemt de kracht met toenemende waterdiepte onder het element weer af tot een niveau dat ongeveer overeenkomt met de stroomkracht in positie 9. Vervolgens neemt de stroomkracht sterk af als het element boven zijn eindbestemming evenwijdig aan de stroom wordt gedraaid (positie 7) teneinde de eerste ankerdraden vast te maken. Wanneer het element vervolgens weer dwars op de stroom wordt gedraaid in de uiteindelijke afzinkpositie (positie 9) neemt de stroomkracht weer sterk toe. In het eerste deel van de afzinkfase (positie 9-9A) neemt het aangestroomde oppervlak toe en daarmee de stroomweerstand. Vervolgens zakt het element in de zinksleuf en wordt aldus buiten de hoofdstroom gebracht, waardoor de stroomweerstand aanzienlijk afneemt (figuren 9.1-9.2).

In de situatie met vloed is het krachtsverloop wat regelmatigier dan bij eb. Dit verschil, alsmede de overige verschillen in details, worden in het algemeen veroorzaakt door de verschillen in de stroomsnelheidsverdelingen in beide situaties en de lokaties van de referentiepunten. Bij eb werd een scherpe toename in de stroomkracht gevonden tussen positie 3 en 4, hetgeen wijst op een sterke gradient in de stroomsnelheid in dat gebied. Dergelijke situaties kunnen gevaar opleveren bij het uitvaren van het element uit het bouwdok. Een enigszins uitzonderlijke situatie komt voor in positie 8 bij eb. In die situatie is er een sterke convergentie tussen het element en de noordelijke geuloever, waardoor een belangrijk deel van de ebstroom in een soort trechter wordt gevangen. Hierdoor ontstaat kennelijk een aanzienlijke opstuwing tegen het element, die leidt tot de waargenomen grote stroomkracht. Deze ongunstige situatie kan worden voorkomen door positie 7 te verleggen naar de landzijde van positie 9 en het element linksom, van het land af draaiend, in positie 9 te brengen.

De verschillen in waterstand, die kunnen optreden, zullen geen belangrijke invloed hebben op de stroomweerstand. De in het onderzoek gevonden krachtsverschillen bij verschillende waterstanden blijken alleen in de posities 7, 8 en 9 boven de sleuf een zeker systematisch verband te vertonen met de waterstand waarbij de verschillen niet aan de meetonnauwkeurigheid kunnen worden toegeschreven.

Bij een element dwars op de stroom is de weerstand van het element tegen kantelen aanzienlijk geringer dan bij aanstroming op de kop. Hierdoor kantelde het dwars op de stroom liggende element bij hoge stroomsnelheden (en -krachten) aanzienlijk meer dan bij de lage snelheden en vertoonde het element zelfs de neiging tot dui-

ken, waarbij het bovenstroomse deel van het dek onder water liep en de pontons verder duiken voorkwamen. In enkele gevallen (positie 6 bij hoge vloodsnelheden) dook het element zover onder dat het water er overheen stroomde en de bovenstroomse pontons bijna geheel onder water werden getrokken. Dientengevolge nam het aangestroomde oppervlak en dus de stroomweerstand merkbaar toe (fig. 9.1). Voor de praktijk is deze situatie niet relevant.

3.2 Kritieke kondities voor uitvaren uit het bouwdok

Welke kondities kritiek zijn voor het uitvaren van het tunnelelement uit het bouwdok wordt enerzijds bepaald door de stroomkracht op het element veroorzaakt door getijstroom, en anderzijds door het beschikbare sleepvermogen en de indeling van het konvooi. In dit verslag is uitgegaan van een vergelijkbaar konvooi als toegepast bij de Drecht-, Kil- en Botlektunnel (fig. 10). Dit konvooi heeft een totaal vermogen van 15.700 pk en een maximale trekkracht van 1930 kN (196,5 tf) (som paalkrachten).

De effectieve trekkracht die door een sleepboot wordt geleverd is altijd kleiner dan de paalkracht. Deze laatste geeft de kracht die de sleepboot kan uitoefenen op een paal in stilstaand water, waarbij de sleepboot dus niet vooruit beweegt. In werkelijkheid zal de sleepboot wel ten opzichte van het water bewegen, waardoor het rendement van de schroef in het algemeen wat afneemt en bovendien een (klein) deel van de stuwkracht van de schroef wordt gebruikt voor het overwinnen van de stroomweerstand van de sleepboot. Naast deze betrekkelijk kleine verliezen wordt het rendement van de sleepboten echter in belangrijke mate gereduceerd door de aanwezigheid van het tunnelelement en door onderlinge beïnvloeding. Het rendement van de sleepboten, die voor het element liggen, wordt sterk verlaagd doordat de schroefstraal gedeeltelijk tegen het element "botst". De invloed hiervan is groter naarmate de sleepboot dichterbij het element ligt; in het extreme geval is de stuwkracht van de schroef even groot als de kracht van de schroefstraal op het element. Indien sleepboten achter elkaar werken zal het rendement van de achterste lager zijn dan dat van de voorste als gevolg van de schroefstraal van de voorste. Tenslotte zal het rendement van de sleepboten naast het element eveneens worden gereduceerd door de aanwezigheid van het element. De voor- en achterwaartse stuwung zal betrekkelijk weinig worden beïnvloed door het element, doch wel de stuwung dwars op het element. Bij het dwars tegen de stroom opduwen is het rendement van de beide bovenstrooms gelegen boten dwars op het

element nihil. De stuwende kracht dwars op het element wordt grotendeels door de benedenstroomse boten geleverd met enige bijdrage van de boten aan voor- en achterzijde van het element. Door de slechte aanstroming van het schroefwater als gevolg van de aanwezigheid van het element, moet echter ook voor de benedenstroomse boten met een aanzienlijk rendementsverlies rekening worden gehouden. In tabel 2 is een globale schatting gegeven van de effectieve krachten bij maximaal vermogen van de sleepboten bij het uitvaren met vloed. Hieruit blijkt dat ca. 600 kN (61 tf) aan dwarskracht kan worden geleverd. Tegelijkertijd kan dan nog eenzelfde kracht voor de voortstuwing worden opgewekt, hetgeen ruim voldoende is om het element met een snelheid van 1 à 1,5 m/s te verslepen (weerstandskracht 120 à 275 kN (12 à 28 tf)).

De vaarafstand vanuit de mond van het bouwdok (positie 1) tot vrij water (positie 6) bedraagt ongeveer 800 m. Met een vaarsnelheid van 0,5 à 1 m/s kan deze afstand binnen respectievelijk 30 à 15 minuten worden afgelegd. Uit figuur 11 blijkt dat binnen een dergelijke korte periode rond kentering de stroomsnelheden laag zijn; ter illustratie:

max. snelheid (m/s)	beschikbare periode (min.) rond:	
	LW-kentering	HW-kentering
0,20	25	20
0,33	45	35
0,50	75	50
0,67	125	70

Zelfs in het geval waarin een stroomsnelheid van 0,67 m/s optreedt bij aankomst in positie 6, zal de dwarskracht niet groter zijn dan ca. 315 kN (32 tf) bij vloed of 395 kN (40 tf) bij eb. Dit is ongeveer de helft à tweederde van het beschikbare vermogen om deze kracht op te vangen. Dit houdt in dat, bij vertrek vanuit positie 1 op het moment dat de stroomsnelheid van 0,67 m/s wordt onderschreden, een periode van ca. 1 uur beschikbaar is voor het uitvaren van het element rond HW-kentering en rond LW-kentering zelfs een periode van ca. 2 uur. Met springtij (getijfactor > 1,05) worden deze perioden wat korter en met doodtij langer. De beschikbare periode rond LW-kentering moet ruim voldoende geacht worden voor het veilig uitvaren van het tunnelement. Bij een goede voorbereiding, waarbij belangrijke vertraging in het tijdstip van het vertrek van positie 1 wordt ver-

meden, is er in het algemeen ook rond HW-kentering wel voldoende tijd beschikbaar voor een veilig uitvaren van het element. Bij hoge springvloeden kunnen in dat geval de marges echter zeer gering worden.

3.3 Vertikale stroomkrachten en verplaatsingen tijdens het afzinken

Tijdens het afzinken hangen de tunnelementen met vier kabels aan twee stel pontons (fig. 4). In dit deel van de manoeuvre (fasen A-D) moeten de vertikale stroomkrachten door de pontons (voldoende drijfvermogen) en de vertikale kabels (voldoende sterkte) kunnen worden opgenomen. De krachten in de vier vertikale kabels, gedefiniëerd in figuur 8.2, zijn in het model gemeten en de resultaten zijn gegeven in de tabellen 3.1-3.2 en de figuren 12.1-12.2.

De vertikale stroomkrachten zijn in principe niet evenredig met v_r^2 , omdat ze naast de direkte beïnvloeding door de stroom ook indirect worden beïnvloed door de rotatie van het element. Hierdoor worden de stroomdrukken op boven- en onderzijde van het element extra gewijzigd, terwijl bovendien het zwaartepunt van het water in de ballasttanks zich verplaatst. Derhalve zijn de gemeten krachten niet gereduceerd naar $v_r = 1$ m/s. Een beschouwing van de krachten in de bovenstroomse vertikale kabels tijdens de afzinkfasen A en B toonden een verband tussen de vertikale stroomkracht in deze kabels en ongeveer de stroomsnelheid tot de macht 2,5. Een duidelijke invloed van de waterstand op de krachten en verplaatsingen is niet aanwezig.

Naast de krachten zijn ook de vertikale verplaatsingen van de hoekbolders van het tunnelement door de stroming van het water gemeten (tabellen 3.1-3.2 en figuren 13.1 en 13.2).

Er bestaat een verband tussen de vertikale verplaatsingen van de ophangpunten van het element (te berekenen uit de gemeten verplaatsingen) en de krachten in de bijbehorende vertikale kabels:

$$K_{v1} = -\frac{1}{2}\rho g A_p \left\{ (\Delta_{o1} + \Delta_{o2}) + \left(\frac{b}{a}\right)^2 (\Delta_{o1} - \Delta_{o2}) \right\} \quad (2a)$$

$$K_{v2} = -\frac{1}{2}\rho g A_p \left\{ (\Delta_{o2} + \Delta_{o1}) + \left(\frac{b}{a}\right)^2 (\Delta_{o2} - \Delta_{o1}) \right\} \quad (2b)$$

$$K_{v3} = -\frac{1}{2}\rho g A_p \left\{ (\Delta_{o3} + \Delta_{o4}) + \left(\frac{b}{a}\right)^2 (\Delta_{o3} - \Delta_{o4}) \right\} \quad (2c)$$

$$K_{v4} = -\frac{1}{2}\rho g A_p \left\{ (\Delta_{o4} + \Delta_{o3}) + \left(\frac{b}{a}\right)^2 (\Delta_{o4} - \Delta_{o3}) \right\} \quad (2d)$$

of anders:

$$\Delta_{o1} = - \frac{b_p^2 + a^2}{2b_p^2} \frac{K_{v1}}{\rho g A_p} - \frac{b_p^2 - a^2}{2b_p^2} \frac{K_{v2}}{\rho g A_p} \quad (3a)$$

$$\Delta_{o2} = - \frac{b_p^2 - a^2}{2b_p^2} \frac{K_{v1}}{\rho g A_p} - \frac{b_p^2 + a^2}{2b_p^2} \frac{K_{v2}}{\rho g A_p} \quad (3b)$$

$$\Delta_{o3} = - \frac{b_p^2 + a^2}{2b_p^2} \frac{K_{v3}}{\rho g A_p} - \frac{b_p^2 - a^2}{2b_p^2} \frac{K_{v4}}{\rho g A_p} \quad (3c)$$

$$\Delta_{o4} = - \frac{b_p^2 - a^2}{2b_p^2} \frac{K_{v3}}{\rho g A_p} - \frac{b_p^2 + a^2}{2b_p^2} \frac{K_{v4}}{\rho g A_p} \quad (3d)$$

waarin:

A_p : oppervlak van het ponton op de waterlijn

a : afstand tussen de ophangpunten (in dwarsrichting)

b_p : afstand (h.o.h.) tussen de pontons (in dwarsrichting)

K_v : vertikale kabelkrachten (fig. 8.2)

Δ_o : vertikale verplaatsing ophangpunten (fig. 8.2)

g : zwaartekrachtsversnelling

Door het gekozen ophangstelsel is een vertikale kabelkracht steeds afhankelijk van de vertikale verplaatsingen van twee ophangpunten (zie vgl. 2a-d) of omgekeerd (zie vgl. 3a-d).

In eerste instantie is getracht de betrouwbaarheid van de uitgevoerde metingen te controleren door de gemeten krachten in de ophangdraden te vergelijken met de uit de verplaatsingen berekende waarden (vgl. 2a-d). Deze controle bleek echter niet zinvol omdat geringe afwijkingen in de dwarshelling ($\Delta_{o1} - \Delta_{o2} = \Delta_{o3} - \Delta_{o4}$) een significante afwijking in de krachten gaven als gevolg van de term $(b_p/a)^2$. Daarom is de controle uitgevoerd door de verplaatsingen van de ophangpunten, bepaald uit de gemeten verplaatsingen van de hoekbolders en die uit de gemeten krachten in de vertikale kabels (vgl. 3a-d), met elkaar te vergelijken (zie fig. 14.1-14.4). Uit deze vergelijking blijkt in het algemeen dat er een duidelijk verband bestaat tussen de krachten en de verplaatsingen, ondanks de spreiding in de resultaten door onnauwkeurigheden in alle gemeten grootheden die in deze indirecte vergelijkingswijze een rol spelen. Tevens blijkt duidelijk dat, zowel

bij eb als bij vloed, de bovenstroomse ophangpunten (Δ_{02} en Δ_{04}) vrij goed op de "theoretische" lijn liggen, terwijl de benedenstroomse punten (Δ_{01} en Δ_{03}) een verband vertonen dat enigszins verschoven ligt ten opzichte van de "theoretische" lijn. Deze verschuiving is groter naarmate de stroomsnelheden hoger zijn en vertoont globaal een evenredigheid met het kwadraat van de stroomsnelheid. Dit geeft een aanwijzing dat de waterspiegel bij het element niet vlak is maar lokale afwijkingen met het referentieniveau vertoont (door vertragingen en versnellingen in de stroomsnelheid) die gerelateerd zullen zijn aan de energiehogte $v_r^2/2g$. Dit verschijnsel verklaart waarom de controle via de verticale krachten niet mogelijk bleek.

Uit de figuren 14.1-14.4 en uit de meetresultaten zelf (in het algemeen goed sluitende resultaten van de verplaatsingsmetingen, reproducerende tendenzen in de gemeten krachten en verplaatsingen) blijkt dat de modelresultaten een betrouwbaar beeld geven van de krachten op en het gedrag van het tunnelelement.

Uit het onderzoek blijkt duidelijk, dat de afzinkfase A maatgevend is voor de verticale krachten en verplaatsingen. Naarmate het element verder wordt neergelaten nemen de verticale krachten en verplaatsingen af (zie figuren 12.1, 12.2, 13.1 en 13.2). In fase D, de situatie waarin het element tegen zijn voorganger wordt geplaatst, zijn de krachten relatief klein, zelfs bij hoge stroomsnelheden. Als gevolg van de geringere stroomsnelheden bij eb zijn de krachten en verplaatsingen in die getijfase aanzienlijk minder dan bij vloed.

Bij vloed van het gekozen springtij bleek het in het model onderzochte ophangstelsel (pontons scharnierend aan de balk bevestigd, aangrijpingspunt ophangkabels 2 m boven het dek van de pontons) niet voldoende stabiel om de optredende stroomkrachten op te nemen. Door de krachten op de pontons en het element kantelde ponton 4 en werd daarbij zover naar beneden getrokken dat het water ging scheppen. Hierdoor ging de stabiliteit van de pontongroep 3+4, mede door het hooggelegen aangrijpingspunt van de verticale kabels, verloren en kapseisde deze. Onder genoemde stroomcondities kon dit slechts worden voorkomen door alle pontons te koppelen en rotatie ten opzichte van het tunnelelement onmogelijk te maken; slechts dan konden de stroomkrachten volledig worden opgenomen en bleef ponton 4 (meest kritiek) met slechts een gering vrijboord boven water. Gezien deze resultaten wordt aanbevolen een stabielere afzinkstelsel toe te passen dan is onderzocht. Dit kan worden verkregen door:

- a Het toepassen van een zo laag mogelijk aangrijpingspunt van de verticale krachten op de pontongroep (laag liggende koppelbalk).

- b Het aanbrengen van een starre koppeling van de beide pontons van een pontongroep (geen scharnierende verbinding tussen ponton en balk), waardoor de stabiliteit van de pontons in dwarsrichting van het element wordt vergroot.
- c Het kiezen van pontons met een grotere afmeting in de lengterichting van het element dan dwars op het element, waardoor de pontongroep stabielere wordt in de lengterichting van het element.
- d Het kiezen van pontons met een groter oppervlak op de waterlijn (A_p), waardoor zowel de stabiliteit van de pontongroep toeneemt als het opdrijvend vermogen per ponton.

Het laatste punt (punt d) heeft bovendien tot gevolg dat de "veerstijfheid" van het ophangstelsel groter wordt waardoor het dynamisch gedrag naar verwachting gunstiger wordt. Tevens zal dit leiden tot geringere verticale verplaatsingen en dus tot een geringere mate van kantelen van het element dan met het onderzochte pontonsysteem. Hierdoor zal het element onder dezelfde stroomcondities minder stroom scheppen, hetgeen naar verwachting vooral zal leiden tot een vermindering van de verticale stroomkracht. Deze verwachting is gebaseerd op resultaten van voorgaand modelonderzoek [2].

Naast bovenstaande wijzigingen in het afzinkstelsel wordt aanbevolen om de ophangkabels in dwarsrichting zo ver mogelijk uit elkaar te plaatsen. Hierdoor worden de krachten door het grote moment om de langsas van het element in deze kabels zoveel mogelijk gereduceerd (20% reductie wordt haalbaar geacht). Deze maatregel beïnvloedt de uitwendige krachten op en het gedrag van het element niet of nauwelijks.

3.4 Resonantiegevaar tijdens het afzinken

Uit het modelonderzoek is duidelijk gebleken dat het onderzochte afzinkstelsel gevoelig is voor opslingeren in verticale richting. Hoewel het model in horizontale richting niet dynamisch gelijkvormig is (geen juiste veerstijfheden in de horizontale kabels) is dit wel het geval in verticale richting. Daarom dient met dit in het model waargenomen verschijnsel, tenminste kwalitatief, rekening te worden gehouden. In de figuren 15.1 en 15.2 is de grootte van de fluktuaties in de verticale krachten en verplaatsingen als functie van de afzinkpositie, stroomsnelheid en waterstand weergegeven. De fluktuaties blijken duidelijk afhankelijk te zijn van de stroomsnelheid en de afzinkpositie; bij hoge stroomsnelhe-

de treden in fase B grote fluktuaties op. Bij springtij bleek het element tijdens vloed zelfs circa 3 m(!) op en neer te gaan in fase B met krachtsfluktuaties in de vertikale kabels met een amplitude van circa 1200 à 1500 kN (120 à 150 tf). In de eindfase (fase D) blijken de fluktuaties in het algemeen gering te zijn en af te nemen met afnemende stroomsnelheid.

In positie B bevindt het element zich ongeveer in het midden van de stroomvoerende diepte. In deze situatie wordt het stroombeeld kennelijk instabiel en kan het massa-veersysteem, wat het tunnelelement hangend aan de pontons in wezen is, door deze instabiliteiten worden aangestoten, waardoor de waargenomen verticale op-slingering kan ontstaan. De instabiliteit in het stroombeeld wordt veroorzaakt door het loslaten van wervels achter het element (Von Karman-wervelstraten). De frequentie waarmee dit loslaten gebeurt is afhankelijk van de geometrie en de turbulentie (Reynoldsgetal). Uit de voor deze trillingen kenmerkende konstante, het Strouhal getal

$$Sh = \frac{ND}{u} = \frac{D}{uT} \quad (4)$$

waarin:

Sh : Strouhalgetal = konstante die afhankelijk is van o.a. de geometrie en het Reynoldsgetal (= circa 0,12 in de hier geldende situatie [3,4], zowel in model als in werkelijkheid)

N : frekwentie waarmee het element door de stroming wordt aangestoten (= 1/T)

D : kenmerkende afmeting van het voorwerp in de stroom (hoogte van het element)

u : stroomsnelheid (ongestoord) van het water

T : periode van aanstoten

blijkt dat de aanstootfrequentie toeneemt met toenemende stroomsnelheid, terwijl verwacht mag worden dat daarbij tevens de aanstootkracht toeneemt.

De situatie wordt gevaarlijk als de aanstootfrequentie de eigen frekwentie van het systeem voor dompen, slingeren of stampen te dicht gaat naderen en gevaar voor resonantie ontstaat. Hierbij kunnen de krachtsfluktuaties zo groot worden dat kabelbreuk kan gaan optreden. In dit geval, waarbij het in de stroom hangende voorwerp in verticale zin kan bewegen, bestaat bovendien de mogelijkheid dat de waterbeweging door de eigenbeweging van het ingespannen tunnelelement wordt gestuurd. De excitatiefrequentie kan zo dicht tot de betreffende eigen frekwentie naderen dat het element aanzienlijke bewegingen gaat maken ten opzichte van de waterdiepte. Dit heeft tot gevolg dat het loslaten van de wervels gestuurd gaat

worden door de bewegingen van het element ende excitatiefrekwentie als het ware naar de eigen frekwentie wordt toegezogen. In het volgende zal wat dieper worden ingegaan op het resonantiegevaar.

Het al dan niet optreden van resonantie wordt bepaald door de verhouding tussen de excitatiefrekwentie N en de eigen of natuurlijke frekwentie(s) van een massaveersysteem N_n . Indien deze verhouding 1 bedraagt treedt volledige resonantie op met mogelijk aanzienlijk gevaar voor het systeem. Naarmate de verhouding meer van 1 afwijkt neemt de mate van resonantie af en treedt bij voldoende grote afwijking van 1 zelfs in het geheel niet meer op. Naast de excitatiefrekwentie, die met vergelijking (4) kan worden geschat, zijn in dit geval ook de natuurlijke frekwenties van het dompen, stampen en slingeren van belang. Deze zijn naast de veerstijfheid ook afhankelijk van de toegevoegde massa en de demping van het systeem. In het bijzonder van de laatste faktor is nauwelijks iets bekend. In het algemeen kan echter worden gesteld dat demping een vertraging geeft in de optredende slingeringen, dus een vergroting van de slingertijden [5]. Ook kan worden gesteld dat in het beschouwde systeem demping een belangrijke rol zal spelen. Voor niet gedempte slingeringen gelden de volgende slingertijden:

$$T_{n, \text{ dompen}} = 2\pi \sqrt{\frac{m+m_w}{C_d}} \quad (5)$$

$$T_{n, \text{ stampen}} = 2\pi \sqrt{\frac{I_y}{C_y}} = \frac{4}{3,4} \pi \frac{L}{l_p} \sqrt{\frac{m+m_w}{C_d}} \quad (6)$$

$$T_{n, \text{ slingeren}} = 2\pi \sqrt{\frac{I_x}{C_x}} = \frac{4}{2,2} \pi \frac{B}{b_p} \sqrt{\frac{m+m_w}{C_d}} \quad (7)$$

waarin:

T_n : natuurlijke slingertijd ($= 1/N_n$)

m : massa van het element

m_w : toegevoegde massa, die voor dompen op 2 m, voor stampen op 1,6 m en voor slingeren op 0,4 m is gesteld

I : traagheidsmoment tegen rotatie om een as door het zwaartepunt van het element $= r^2(m+m_w)$

r : traagheidsstraal, die voor stampen op circa $L/3,4$ kan worden gesteld en voor slingeren op circa $B/2,2$ (inklusief ballast tanks)

L : lengte van het tunnelelement

- B : breedte van het tunnelelement
 l_p : afstand (h.o.h.) van de pontons in lengterichting van het element
 b_p : afstand (h.o.h.) van de pontons in breedterichting van het element
 C_d : veerstijfheid tegen dompen = $4\rho g A_p$
 C_x : veerstijfheid tegen slingeren = $\frac{b_p^2}{4} C_d$
 C_y : veerstijfheid tegen stampen = $\frac{l_p^2}{4} C_d$

Voor het onderzochte systeem worden met bovenstaande vergelijkingen slingertijden gevonden van respectievelijk 30 s (dompen), 31 s (stampen) en 12 s (slingerende). In werkelijkheid zullen deze slingertijden dus wat langer zijn door de aanwezige demping in het systeem.

Met vergelijking (4) kunnen de excitatie perioden T voor de verschillende omstandigheden worden bepaald. Dit levert de volgende resultaten:

<u>Stroomrichting</u>	<u>proeven</u>	<u>stroomsnelheid</u>	<u>periode T (natuur)</u>
eb	9 + 11	1,11 - 1,18 m/s	64 - 69 s
	10 + 12	1,36 - 1,44 m/s	53 - 56 s
vloed	13 + 15	1,89 - 2,14 m/s	35 - 40 s
	14 + 16	2,39 - 2,65 m/s	29 - 32 s

Hieruit blijkt duidelijk dat de excitatieperiode T met toenemende stroomsnelheid naar de eigen slingertijden voor dompen en stampen van het element verschuift. In de meest kritieke situaties (proeven 14 en 16) bedraagt de verhouding T/T_n vrijwel 1, zodat de ernstige mate van resonantie in die situatie verklaarbaar is. Uit bovenstaande tabel voor T blijkt verder, dat de afnemende mate van resonantie, zoals die volgt uit de figuren 15.1 en 15.2, verklaard kan worden met een bijbehorende toenemende verhouding van T/T_n . In de ebsituatie met lage snelheden is de resonantie verwaarloosbaar bij een verhouding van $T/T_n \approx 2$, hetgeen goed aansluit bij bestaande kennis.

Het in de kritieke fase B in het model optredende verschijnsel tijdens de proeven 14 en 16 was voornamelijk een opgeslingerde stampbeweging van het element. De waargenomen slingertijden bedroegen 3,1 s respectievelijk 3,25 s (31 en 32,5 s in de natuur), hetgeen in elk geval goed aansluit bij de berekende waarden gebaseerd op het Strouhalgetal. De in het model, bij stilstaand water, bepaalde natuurlijke

slingertijden voor dompen, stampen en slingeren bedroegen respektievelijk ca. 32 s, 35 s en 19 s. Hiermee wordt het voorgaande nog eens bevestigd met die restrictie dat de gemeten slingertijd voor slingeren aanmerkelijk hoger is dan de berekende. Deze afwijking wordt vermoedelijk veroorzaakt door de ballasttanks (anti slingertank-werking?) en de toegevoegde massa (te laag geschat). Een en ander toont duidelijk aan dat bij het afzinken bij hoge stroomsnelheden resonantiegevaar bestaat met alle konsekwenties van dien. Dit gevaar kan worden gereduceerd of zelfs geheel worden vermeden door:

- a het verkorten van de natuurlijke slingertijden voor dompen en stampen van het element door het vergroten van de veerstijfheden C_d en C_y , en/of
- b het stellen van restricties voor de omstandigheden waaronder zal worden afgezonken.

De in paragraaf 3.3 aanbevolen verbetering van het afzinkstelsel, met name het vergroten van de pontons, leidt ook tot een vergroting van de veerstijfheden C_d en C_y . Een verdere vergroting van de veerstijfheid tegen stampen C_y kan worden verkregen door ook de afstand l_p tussen de pontongroepen te vergroten. Op deze wijze kunnen de natuurlijke slingertijden van het element redelijkerwijs een faktor 1,5 worden verkort (door vergroting van A_p met een faktor 2 à 2,5). Een nadeel is dat hierdoor de natuurlijke slingertijd voor slingeren van het element (ca. 19 s) afneemt (tot ca. 12 s) en dichterbij de buurt komt te liggen van perioden van golven, waardoor resonantiegevaar voor slingeren kan ontstaan. De indruk bestaat echter dat de kans hierop klein is, omdat naar verwachting in het gebied slechts windgolven zullen voorkomen met perioden in de orde van 3 à 5 seconden.

In praktische zin zijn de mogelijkheden om belangrijke verschuivingen in de natuurlijke frekwenties van het stelsel te bereiken (ad a) betrekkelijk beperkt. Meer kan worden bereikt met het selekteren van toelaatbare omstandigheden voor het afzinken (ad b). Een juiste keuze van de maximum stroomsnelheid (geen resonantie in het stampen of dompen) en/of van de toelaatbare golfomstandigheden (geen resonantie in het slingeren) kan resonantiegevaar voorkomen of resonantieverschijnselen sterk verminderen.

4. Bijzondere aspecten

4.1 Stootgevaar bij het plaatsen van de tunnelementen

Bij het plaatsen van een tunnelement bestaat de mogelijkheid dat er stootbelasting optreedt op de oplegpunten van het te plaatsen element en die van het voorlaatst afgezonken element. Indien de stootbelasting te groot is kan één van de oplegnokken aan de tunnelementen bezwijken, of kan de pen van één van de tijdelijke oplegpunten door de funderingsplaat ponsen. Ook zou het hydraulische systeem van de vijzels van de tijdelijke oplegpunten lek kunnen slaan door de plotseling optredende drukstoot in dit systeem. Elk van deze schademogelijkheden is onaanvaardbaar voor een goede uitvoering van de bouw van de tunnel.

Naast bovengenoemde stoten, die worden veroorzaakt doordat het element met verticale snelheid op het voorgaande element of op de bodem botst, kan ook een grote kracht op de kopschotten bij de zinkvoeg ontstaan door een horizontale beweging van het af te zinken element in de richting van het reeds afgezonken element waarop het moet worden aangesloten. Door de dempende werking van de spleet tussen beide elementen gaat het hier niet direkt om een zuivere stootbelasting. Desondanks kunnen onder bepaalde omstandigheden hoge drukken optreden in de zinkvoeg, die aanleiding zouden kunnen zijn tot het bezwijken van een van beide kopschotten met alle konsekwenties van dien.

In beginsel kunnen bovengenoemde stootbelastingen slechts optreden indien het element beweegt. Deze beweging kan worden gegenereerd door:

- a manipulaties met het verhaalsysteem,
- b stroming van het water,
- c golven, en
- d passerende schepen.

De bewegingen van het element door manipulaties met de lieren van het verhaalsysteem zijn tijdens het uiteindelijke plaatsen van het element zeer gering en zullen geen (belangrijke) stootbelastingen veroorzaken.

De stroming van het water in de Westerschelde veroorzaakt in de tunnelsleuf turbulenties en wervelstraten die krachtsfluctuaties op het tunnelement veroorzaken. Hierdoor zullen ook bewegingen ontstaan, met name in verticale richting. De ampli-

tude en de maximum snelheid van deze bewegingen zijn groter naarmate de stroomsnelheid in de Westerschelde groter is. Onder extreme omstandigheden (maximum vloed tijdens springtij) kan het element ter plaatse van een oplegpunt circa 0,5 m op en neer bewegen (amplitude circa 0,25 m, zie fig. 15.1) met een bijbehorende maximum snelheid van ongeveer 2 à 4 cm/s. Dit soort bewegingen kunnen aanzienlijk worden beperkt door het element bij lage stroomsnelheden te plaatsen. Gezien de ervaringen met voorgaande tunnels zullen dan geen (belangrijke) stoten optreden.

Ter plaatse van de tunnelsleuf treden in de Westerschelde slechts betrekkelijke lage en korte golven op door wind en eventueel door scheepvaart. Uit modelproeven met varende schepen is gebleken dat dergelijke golven het zware, aan de pontons hangende element niet in beweging zetten. Kennelijk liggen de natuurlijke slinger-tijden van het ingespannen element (zie paragraaf 3.4) te ver verwijderd van de periode van deze golven (orde 3 à 5 s) om door de relatief kleine en kortwerkende golfkrachten in beweging te worden gezet. Het stootgevaar door golven kan derhalve nihil worden geacht. Als gevolg van het stationair blijven van het element leidt dit echter wel tot aanzienlijke krachtsfluctuaties in de ophangkabels (evenredig met de golfhoogte en de grootte van het ponton).

Passerende schepen kunnen een belangrijk gevaar inhouden voor aanzienlijke stootbelastingen op de oplegpunten van het element tijdens het plaatsen. De stoten kunnen optreden doordat het element kan zakken als gevolg van de waterspiegeldaling gegenereerd door een passerend schip. Deze waterspiegeldaling houdt voldoende lang aan om het ingespannen tunnelement in beweging te zetten en kan, afhankelijk van een aantal factoren zoals scheepsgrootte, vaarsnelheid en passeerafstand, aanzienlijke waarden aannemen. Omdat het scheepvaartverkeer naar en van de haven van Antwerpen niet zo maar stil gelegd kan worden, was nader onderzoek naar de invloed van passerende schepen op stootbelastingen bij het plaatsen van een tunnel-element gewenst.

4.2 Stootgevaar door passerende schepen

Een belangrijke parameter bij stoten is de beweging van het element. Omdat voor het onderhavige onderzoek en voor het onderzoek naar de krachten door passerende schepen op afgezonken tunnelementen [6] alle benodigde faciliteiten beschikbaar waren, zijn de door een passerend groot schip (238 x 35,5 x 12,75 m) gegenereerde bewegingen van het element 4 in meerdere situaties in het model gemeten.

De belangrijke horizontale beweging in lengterichting van het element is indirect gemeten door de krachtsveranderingen in die richting (dK_3 en dK_3/dt) te bepalen, die via de veerconstanten van de verhaaldraden omgezet kunnen worden in verplaatsing en verplaatsingssnelheid in die richting. De verticale verplaatsingssnelheden zijn direct uit de gemeten verplaatsingen (uitgeschreven in de tijd) van de hoekbolders van het element bepaald (tabel 4). Als referentiegrrootheid is tevens in de meeste gevallen de waterspiegel nabij de kop van het element (in de lijn door de zuidelijke bolders 3 en 4) gemeten. De resultaten zijn als functie van de relatieve scheepssnelheid (t.o.v. het water) uitgezet in fig. 16, waaruit duidelijk de invloed van de vaarsnelheid en de passeerafstand blijkt. Op ruim water, zoals hier het geval is, kunnen daarnaast de retourstroomsnelheid en de waterspiegeldaling globaal evenredig gesteld worden met het grootspantoppervlak van het passerende schip. Extrapolatie van deze evenredigheid naar de bewegingen van het element lijkt een redelijke eerste ordebenadering om de invloed van de scheepsgrootte in dit verband in rekening te brengen. Uit de in tabel 4 gegeven grootheden kunnen de benodigde bewegingsparameters voor de stootberekeningen worden afgeleid.

In beginsel kunnen verschillende situaties met verticale stootbelasting optreden, waarvan de volgende het meest relevant worden geacht (fig. 17):

- a Element 4 botst met de nok op de nok van element 3 met een niet-elastische botsing (de nokken blijven na de botsing op elkaar liggen).
- b Als situatie a, maar met een elastische botsing (de nok van element 3 stuit na de botsing met dezelfde snelheid omhoog als waarmee hij voor de botsing omhoog bewoog).
- c Nadat element 4 is afgezet op de nok van element 3 passeert een schip en botst element 4 met één van de nabij het uiteinde gesitueerde oplegpunten op de bodem. Er treedt een niet-elastische botsing op op het oplegpunt en een reactiestoot op de oplegnok.
- d Als situatie c, maar met een elastische botsing bij het oplegpunt.
- e Reaktiestoten op de tijdelijke oplegpunten van element 3 en op de nokken van de elementen 2 en 3 als gevolg van een stoot op de nokken van de elementen 3 en 4.

Daarnaast kan nog de in paragraaf 4.1 beschreven horizontale belasting van het kopschot optreden, die bij hoge aanvangssnelheid van het te plaatsen element naar het voorgaande element het karakter van een stoot kan aannemen. Slechts indien de twee elementen zich niet recht voor elkaar bevinden en het in de zinkvoeg opge-

sloten water makkelijk kan afvloeien, kan echte stootbelasting voorkomen, waarbij het ginaprofiel de (grootste) klap zal opvangen.

Met behulp van de algemene stootvergelijkingen en de kinematische randvoorwaarden voor de stootpunten kunnen de volgende uitdrukkingen voor de vertikaal optredende stootbelastingen worden afgeleid (voor definities van de symbolen zie fig. 17):

Geval a

$$S_B = \frac{1}{4}(m+m_w) V_{B1} \quad (8)$$

Geval b

$$S_B = \frac{1}{2}(m+m_w) V_{B1} \quad (9)$$

Geval c

$$S_C = 4(m+m_w) V_{C1} / 3 \left\{ \left(\frac{a+1}{l} \right)^2 + 4 \frac{c^2}{b^2} \right\} \quad (10)$$

$$S_B = \frac{1}{4} S_C \left(3 \frac{a}{l} - 1 \right) \quad (11)$$

S_B bestaat alleen indien $a \geq \frac{1}{3} l$. Anders is $S_B = 0$ en gelden de vergelijkingen (10) en (11) niet.

Geval d

$$S_C = 8(m+m_w) V_{C1} / 3 \left\{ \left(\frac{a+1}{l} \right)^2 + 4 \frac{c^2}{b^2} \right\} \quad (12)$$

$$S_B = \frac{1}{4} S_C \left(3 \frac{a}{l} - 1 \right) \quad (13)$$

Ook deze vergelijkingen gelden slechts indien $a \geq \frac{1}{3} l$ en S_B bestaat.

Geval e is in het kader van deze studie niet nader beschouwd. Indien de tijdelijke oplegging van het voorgaande element zou bezwijken door de stoot op de nok dan hoeft dit nog niet tot het (volledig) bezwijken van de zinkvoeg te leiden en zijn desastreus gevolgen niet waarschijnlijk. Indien voorzorgsmaatregelen worden getroffen dat het zwakste punt van de tijdelijke oplegging in het hydraulische vij-

zelsysteem zit, dan is herstel betrekkelijk eenvoudig uitvoerbaar. Indien één van de funderingsplaten zou bezwijken, dan lijkt herstel moeilijker uitvoerbaar door de slechte bereikbaarheid van dit onderdeel.

De in tabel 4 gegeven grootheden kunnen niet zonder meer voor de stootgevallen c en d worden gebruikt. Aangenomen wordt dat de gemeten bewegingen van element 4 werden bepaald door de lokale waterspiegeldalingen bij de pontons en dat de zakkingen bij de pontongroepen onafhankelijk van elkaar zijn. Deze aanname en het op zijn plaats houden van de oplegnok bieden de mogelijkheid om de beweging van het element 4 voor de situaties c en d uit de in tabel 4 gegeven bewegingen te herleiden. De resultaten hiervan zijn gegeven in tabel 5.

Uit de gegevens van de tabellen 4 en 5 kunnen de botsingssnelheden van de betreffende stootpunten worden bepaald en in de vergelijkingen (8), (9), (10) en (12) worden gesubstitueerd. Uit de in het model gemeten slingertijden en de betreffende formules (5), (6) en (7) kunnen de waarden van $(m+m_w)$ worden bepaald voor dompen, stampen en slingeren. Deze blijken respektievelijk 3,4 m, 3,3 m en 3,5 m te bedragen, zodat met één waarde van 3,4 m kan worden volstaan (zoals ook toegepast bij de afleiding van de formules). Substitutie van alle randvoorwaarden leidt tot de in tabel 6 berekende waarden van de verticale stootbelastingen.

De horizontale stootbelasting kan niet met behulp van eenvoudige stootvergelijkingen worden beschreven en is daarom geschematiseerd tot een systeem van een massa die met een initiële snelheid V_0 het voorgaande element nadert. De stoot wordt opgevangen door de dempende werking van het water dat via een nauwe spleet uit de zinkvoeg wordt geperst. Dit leidt tot het volgende stelsel vergelijkingen: (voor symbolen zie fig. 17):

Op tijdstip $t=0$ geldt:

$$V = V_0 = (dK_3/dt)_{\max}/C_v \text{ en } \delta = \delta_0 \quad (14)$$

waarin C_v : veerstijfheid verhaalsysteem in richting van de kracht K_3 .

De ruimte in de zinkvoeg is groot ten opzichte van de spleetwijdte δ , zodat de overdruk p in de spleet overal gelijk is en volgens Bernouilli geldt:

$$p = V_s^2/2g \quad (15)$$

Uit continuïteitsoverweging geldt:

$$V_s = V HB/\delta(2B+2H) \quad (16)$$

De kracht op het tunnelelement is dus:

$$K = \rho g p B H \quad (17)$$

Substitutie hiervan in de algemene wet $K = ma$ geeft:

$$\rho g p B H = (m+m_w) a \quad (18)$$

waarin:

$$a = - \frac{dV}{dt} \quad (\text{vertraging}) \quad (19)$$

De spleetwijdte bedraagt:

$$\delta = \delta_o - \int_0^t V \, dt \quad (20)$$

Hieruit kan worden afgeleid:

$$\frac{d\delta}{dt} = -V \quad (21)$$

Substitutie van de vergelijkingen (15), (16), (19) en (20) in (18) leidt tot de volgende differentiaalvergelijking:

$$\frac{dV}{d\delta} = \frac{\rho B^3 H^3}{8(m+m_w)(B+H)^2} \frac{V}{\delta^2} = \alpha \frac{V}{\delta^2} \quad (22)$$

Integreren van deze vergelijking en de beginvoorwaarden (vergelijking 14) leiden tot de volgende oplossing:

$$V/V_o = \exp.\{\alpha(\delta-\delta_o)/\delta_o\delta\} \quad (23)$$

Uit deze vergelijking blijkt dat de snelheid van het element naar nul nadert als de spleetwijdte δ naar nul gaat; een echte botsing zal dus niet optreden. Wel kunnen bij het afremmen van het te plaatsen element, afhankelijk van V_o en δ_o ,

hoge drukken in de zinkvoeg optreden, die tot grote extra belasting van de kopschotten kunnen leiden. Er kan afgeleid worden dat de extra kracht op de kopschotten maximaal is als $\delta = \alpha$. De kracht bedraagt dan:

$$K_{\max} = \frac{V_o^2}{\alpha} (m+m_w) \exp.\{2(\frac{\alpha}{\delta_o} - 1)\} \quad (24)$$

Dit geldt indien α kleiner is dan δ_o , anders wordt het maximum bereikt voor $\delta = \delta_o$ en bedraagt:

$$K_{\max} = \frac{V_o^2}{\delta_o^2} (m+m_w) \alpha \quad (25)$$

In figuur 18 is het verloop van $K_{\max}$ als functie van δ_o uitgezet. Duidelijk blijkt dat de kracht groter wordt naarmate de initiële energie van het element $\frac{1}{2}(m+m_w)V_o^2$ over een kortere afstand δ_o moet worden opgenomen. Bij $\delta_o = 0$ wordt in het geschematiseerde geval de kracht oneindig groot en zou een normale stootbelasting optreden. In werkelijkheid is dit echter niet mogelijk, omdat in dat geval een schip het element niet in beweging kan zetten. Hiervoor moet het eerst in de "kuil" naar het schip toe worden gezogen om vervolgens, na passage van het schip, door de in de kabels opgewekte spanning en het terugstromende water weer teruggetrokken te worden. De hierbij ontwikkelde maximum snelheid V_o is maatgevend gesteld voor de "stootbelasting". Indien de spleet δ_o echter erg klein is dan kan er moeilijk water tot de sluitvoeg toetreden en zal daar onderdruk ontstaan, waardoor het element niet vrijelijk naar het schip toegezogen kan worden, hetgeen in het model ($\delta_o = 0,5 \text{ à } 1 \text{ m}$) wel kon. Dit effect kan, bij toepassing van de via het model bepaalde initiële snelheid V_o , worden verdisconteerd door begrenzing van het geldigheidsgebied van vergelijking (25).

Het lijkt redelijk om aan te nemen dat de maximale belasting door drukverhoging in de zinkvoeg niet meer zal bedragen dan circa ($m+m_w = 1,1 \text{ m}$):

$$K_{\max} = 2 \frac{V_o^2}{\alpha} (m+m_w) = 2,70 \cdot 10^6 \cdot V_o^2 \text{ kN} \quad (26)$$

Substitutie van de via het model bepaalde waarden voor V_o leiden tot de in tabel 6 gegeven maximale extra belasting van de kopschotten door passerende schepen.

De waarde voor α blijkt 0,025 m te zijn. Hieruit volgt dat hoge belastingen van de kopschotten door passerende schepen pas kunnen ontstaan wanneer het te plaat-

sen element vrijwel op zijn plaats is. Tevens dient de amplitude van de door het passerende schip opgewekte beweging (bepaald door $dK_{3,max}/C_v$) groter te zijn dan de spleetwijdte δ_o , omdat anders de kabels het element opvangen. Hoe kleiner deze amplitude is, hoe kleiner de spleet waarbij stootgevaar bestaat en hoe korter de tijd waarin stootbelasting kan optreden.

Daar α slechts 2,5 cm bedraagt is het waarschijnlijk dat de spleet niet als demper zal werken indien de kopschotten niet voldoende parallel staan en de spleetwijdte, waardoor het water naar buiten geperst wordt, niet overal even groot is. Het water zal met relatief lage snelheden via die plaats, waar de spleet het wijdst is, uit de zinkvoeg naar buiten worden geperst. Hierdoor zal slechts een geringe overdruk in de zinkvoeg zijn opgebouwd als het element aan de andere zijde met het ginaprofiel tegen het voorlaatste element stoot. Deze stoot zal, afhankelijk van de elasticiteit van de botsing, groot zijn ($m+m_w = 1,1 m$):

$$S_h = (1 \text{ à } 2)(m+m_w) V_o = (33,8 \text{ à } 67,6) V_o \text{ kNs} \quad (27)$$

Substitutie van V_o geeft de in tabel 6 gegeven mogelijke horizontale stootbelasting als gevolg van een passerend zeeschip.

Uitgaande van de toelaatbare stoten op de nok en de oplegpunten en de toelaatbare extra drukkracht op het kopschot van de elementen, kan de bijbehorende toelaatbare referentiesnelheid worden bepaald. Vervolgens kan dan met behulp van figuur 16 (eventueel rekening houdend met de grootte van het grootspant van het passerende schip) worden bepaald of scheepvaart tijdens het afzinken toelaatbaar is en, zo ja, onder welke voorwaarden (maximum snelheid, passeerafstand, grootte van het schip).

4.3 Stabiliteitsaspecten van afgezonken tunnelementen

De stabiliteit van een afgezonken element in de open zinksleuf moet voornamelijk worden geleverd door het overwicht van het ondergedompelde element. Dit wordt in deze fase geleverd door het water in de ballasttanks.

De benodigde ballast wordt in wezen door drie criteria bepaald, namelijk:

- de oplegkrachten moeten altijd groter zijn dan nul om opdrijven tegen te gaan.

- de oplegkrachten mogen een bepaalde toelaatbare waarde niet overschrijden, en
- de totale oplegkracht moet voldoende groot zijn om de horizontale krachten via wrijving te kunnen laten opnemen.

Bij het beschouwen van bovenstaande criteria dient, naast de stroomkrachten en de krachten door schepen (zie [6]), rekening te worden gehouden met wijzigingen in de opdrijvende kracht op het afgezonken element als gevolg van fluktuaties in de dichtheid van het water. Het belang van deze fluktuaties moge blijken uit de verandering van de opdrijvende kracht op een element bij een verandering van de dichtheid van het water van 1 kg/m^3 . Deze verandering bedraagt:

- klein element (Vol. = 23.375 m^3): $\Delta G = 230 \text{ kN}$ (23,4 t)
- groot element (Vol. = 31.165 m^3): $\Delta G = 305 \text{ kN}$ (31,2 t)

Het zoutgehalte, en daarmee de dichtheid, van het water in de Westerschelde wordt beïnvloed door:

- de afvoer van de Schelde,
- het getij, en
- de op- of afwaaiing in de Westerschelde.

Uit de in [7] gegeven relatie tussen het zoutgehalte (chloriniteit) bij boei 49 (bij tunneltracé) en de afvoer van de Schelde bij Schelle blijkt duidelijk dat de Scheldeafvoer invloed heeft op het zoutgehalte, doch blijkt tevens dat deze invloed het karakter heeft van een seizoensinvloed (afvoer gemiddeld over een periode van 3 maanden!) (fig. 19). De in fig. 19 gegeven punten kunnen goed worden beschreven door de empirische relatie (maximum afwijking ca. $1000 \text{ mg Cl}^-/\text{l}$):

$$\bar{C}_{b49} = \frac{V}{V + f \cdot V_r \cdot Q / \bar{Q}} C_{\text{zee}} \quad (28)$$

waarin $\bar{C}_{b49}$: zoutconcentratie (maandgemiddelde) bij tunnelsleuf (boei 49) gemiddeld over het getij (seizoensafhankelijk)

V : gemiddeld vloedvolume bij Hansweert ($400 \cdot 10^6 \text{ m}^3$)

f : empirische konstante (335)

V_r : gemiddelde zoetwaterafvoer per getij ($4,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$)

Q : gemiddelde afvoer te Schelle over betreffende maand en voorgaande 2 maanden (m^3/s)

$\bar{Q}$: gemiddelde afvoer te Schelle over periode 1949-1973 ($105 \text{ m}^3/\text{s}$)

C_{zee} : zoutconcentratie van het zeewater (chloriniteit = $18 \text{ g Cl}^-/\text{l}$)

Gebaseerd op deze relatie (geldig voor de huidige situatie) en de maandgemiddelde afvoeren van de Schelde is het verloop in het maandgemiddelde bij de tunnelsleuf bepaald (tabel 7). Door afwijkingen van het gemiddelde regime van de Schelde kunnen afwijkingen van deze zoutgehalten voorkomen.

Het getij geeft aanzienlijk geringere fluktuaties in het zoutgehalte van de Westerschelde bij de tunnelsleuf dan de seizoensfluktuatie. Daar deze fluktuaties echter dagelijks optreden zijn ze wel van belang voor de stabiliteitsbeschouwing van de pas afgezonken tunnelementen. Gemiddeld kan deze fluktuatie gesteld worden op ca. $2,0 \text{ g Cl}^-/\text{l}$. Bij lage Scheldeafvoeren in de zomer ligt het gebied met de grote zoutgradient meer landinwaarts, waardoor de fluktuatie per getij geringer is en ca. $1,5 \text{ g Cl}^-/\text{l}$ bedraagt. Bij hoge Scheldeafvoeren neemt de fluktuatie daarentegen toe tot ca. $3,0 \text{ g Cl}^-/\text{l}$ (gegevens Rijkswaterstaat en [8]).

De invloed van op- en afwaaiing van de waterspiegel in de Westerschelde op het zoutgehalte bij Hansweert is in het algemeen betrekkelijk gering. Onder extreme omstandigheden wordt de waterstand in de Westerschelde ca. 2,5 m (1953) verhoogd of ca. 1,5 m (1956) verlaagd. In het algemeen zullen deze waarden veel lager zijn (orde 0,5 à 1 m) en klein zijn ten opzichte van het getijverschil in de Westerschelde (gemiddeld 4 à 5 m). De op- of afwaaiing zal derhalve slechts een tijdelijke en betrekkelijk geringe vergroting van de getijweg tengevolge hebben. Dit leidt tot zoutfluktuaties over het getij, die incidenteel door op- of afwaaiingseffekten een faktor 1,1 à 1,25 groter kunnen zijn dan normaal.

Tussen de chloriniteit en het dichtheidsverschil ten opzichte van zoet water bestaat binnen een temperatuurrange van circa 0 tot 20°C globaal een verhouding van 3:4. Uit deze verhouding en het bovenstaande kan worden afgeleid dat in het algemeen de dichtheidsfluktuaties over een korte periode bij de tunnelsleuf niet meer dan ca. 5 kg/m^3 zullen bedragen. Desondanks leidt dit tot grote fluktuaties in de opdrijvende kracht op de afgezonken tunnelementen, waarmee rekening dient te worden gehouden bij de stabiliteitsbeschouwingen van deze elementen.

LITERATUUR

- 1 Westerschelde-oeververbinding
Stroombeelden ter plaatse van de tunnelsleuf
Waterloopkundig Laboratorium, Verslag modelonderzoek, M 1734, 1981 (in voorbereiding)
- 2 Thames Barrier, Hydrodynamic forces on and behaviour of the sill elements during positioning and sinking
Delft Hydraulics Laboratory, report on model investigations, M 1332, October 1975
- 3 VICKERY, B.J.
Fluctuating lift and drag on a long cylinder of square cross-sections in a smooth and in a turbulent stream
J. Fluid Mech., vol. 25, part 3, 1966, pp. 481-494
- 4 BEARMAN, P.W. and TRUEMAN, D.M.
An investigation of the flow around rectangular cylinders
Aeronautical Quarterly, 23, August 1972, no. 3, pp. 229-237
- 5 COOL, J.C., SCHLIJFF, F.J. en VIERSMA, T.J.
Regeltechniek
Agon Elsevier, Amsterdam, 1969, 486 p.
- 6 Westerschelde-oeververbinding
Invloed scheepvaart op afgezonken tunnelelementen en afgemeerde elementen in het bouwdok
Waterloopkundig Laboratorium, Verslag modelonderzoek, M 1738, 1981 (in voorbereiding)
- 7 EBBENS, E.H.
De gevolgen van het lozen van het doorspoeldebiet van het Zoommeer op de zoutgehalten van de Westerschelde
Rijkswaterstaat, Dir. Wa. en Wa, Studiedienst Vlissingen, Memo Vl. 77.10, oktober 1977

LITERATUUR (vervolg)

8 PETERS, J.J. en STERLING, A.

Hydrodynamique et transports de sédiments de l'estuaire de l'Escaut

Hoofdst. I in: Project Zee, Eindverslag, boekdeel 10

Het Schelde Estuarium uitgevoerd door J.C.J. Nihoul en R. Wollast

Diensten van eerste minister van Programmatie Wetenschapsbeleid, Brussel,
december 1976

proef	positie element (fig. 6.1 en 7)	waterstand t.o.v. N.A.P. m	stroom- snelheid ref. punt m/s	horizontale krachten (fig. 8.1 en 8.2)				gem. stroomkracht 1)			afgeleide grootheden 1)		
				K ₁	K ₂	K ₃	K ₄	K _{//}	K _⊥	M _z	K/v ²	α	M _z /K
				tf	tf	tf	tf	tf	tf	tf.m	tf.s ² .m ⁻²	gr.	m
1	1	+2,12	2,04	7,5	6	7	6	- 0,4	0,4	139	0,1	135	278
	2			7,5	6	4	6	- 2,5	2,5	28	0,8	135	- 8
	3			5	1	3	2	- 0,7	2,1	278	0,5	108	124
	4			66	4	16	36	-12,3	58,0	2331	14,0	94	40
	5			100	0	0- 4	60- 68	-24,0	114,6	2109	28,2	102	18
	6			220-250	0	0- 30	200-220	- 7,1	304,1	2220	73,3	91	7
	7			60- 68	64- 69	32	28- 32	-49,1	- 3,9	- 83	11,9	185	- 2
	8			33- 35	96-100	72- 90	0	-36,1	-102,5	944	26,2	251	9
	9			8- 12	150-153	116-122	0	-30,1	-184,2	-1249	45,0	261	- 7
13	A	+2,12	1,89	105	125	22,5	-	-22,5	-230	-1720	64,7	264	- 7
	B		1,99	75	95	28	-	-28	-170	-1720	43,5	261	- 10
	C		1,99	62	70	25	-	-25	-132	- 688	33,9	259	- 5
	D		1,96	28	25	18	-	-18	- 53	258	14,6	251	5

Stroomrichting: vloed (getijfaktor 1,18)

1) voor tekenafspraken zie fig. 9.1

Tabel 1.1 Proevenprogramma en resultaten horizontale stroomkrachten

proef	positie element (fig. 6.1 en 7)	waterstand t.o.v. N.A.P. m	stroom- snelheid ref. punt m/s	horizontale krachten (fig. 8.1 en 8.2)				gem. stroomkracht ¹⁾			afgeleide grootheden ¹⁾		
				K ₁	K ₂	K ₃	K ₄	K _{//}	K _⊥	M _z	K/v ²	α	M _z /K
				tf	tf	tf	tf	tf	tf	tf.m	tf.s ² .m ⁻²	gr.	m
2	1	+2,12	2,47	5- 6	2- 11	4	4- 5	- 2,8	- 0,4	- 83	0,5	188	-29
	2			5- 10	3- 7	5	3- 6	- 2,1	1,4	167	0,4	146	65
	3			3- 7	0	0	0- 5	- 1,8	5,3	139	0,9	109	25
	4			80- 96	0	10- 12	38- 42	-26,2	82,7	3275	14,2	108	38
	5			160-180	0	0- 2	92-122	-43,8	195,2	3552	32,8	103	18
	6			340-380	0	0- 30	320-370	0	487,9	1665	79,9	90	3
	7			76- 86	68- 73	28	22- 28	-69,7	5,3	749	11,4	176	11
	8			46- 48	158-162	108-112	0	-68,6	-157,7	- 167	28,2	247	- 1
	9			0- 10	220-250	170-200	0	-38,9	-222,7	-2498	37,0	260	-11
14	A	+2,12	2,39	160	220	40	-	-40	-380	-5160	66,9	264	-14
	B		2,47	120	160	45	-	-45	-280	-3440	46,5	261	-12
	C		2,51	82	110	35	-	-35	-192	-2408	31,0	260	-12
	D		2,47	45	50	28	-	-28	- 95	- 430	16,2	254	- 4

Stroomrichting: vloed (getijfaktor 1,45)

¹⁾ voor tekenafspraken zie fig. 9.1

Tabel 1.2 Proevenprogramma en resultaten horizontale stroomkrachten

proef	positie element (fig. 6.1 en 7)	waterstand t.o.v. N.A.P. m	stroom- snelheid ref. punt m/s	horizontale krachten (fig. 8.1 en 8.2)				gem. stroomkracht 1)			afgeleide grootheden 1)		
				K ₁	K ₂	K ₃	K ₄	K _{//}	K _⊥	M _z	K/v ²	α	M _z /K
				tf	tf	tf	tf	tf	tf	tf.m	tf.s ² .m ⁻²	gr.	m
3	1	+1,00	2,12	3- 4	3- 6	2,5	2- 5	- 1,4	0	- 111	0,3	180	-79
	2			4- 7	2- 4	4,5	4- 5	0,7	1,4	111	0,4	63	70
	3			1- 4	0- 4	0	0	- 3,2	0,4	28	0,7	174	9
	4			66- 72	9,5	20- 26	38- 44	-10,2	54,8	2303	12,5	101	41
	5			102-108	0	0	64- 68	-27,6	120,9	2165	27,7	103	18
	6			260-270	0	0- 40	210-220	-21,2	325,3	3885	72,8	94	12
	7			56- 60	58- 60	10	10- 12	-67,9	0	- 111	15,2	180	- 2
	8			26- 32	118-128	90- 93	0	-42,8	-131,2	- 139	30,8	252	- 1
	9			0	140-160	128-132	0	-14,1	-198,0	-1110	44,3	266	- 6
15	A	+1,00	2,14	120	150	25	-	-25	-270	-2580	59,2	265	-10
	B		2,04	85	110	30	-	-30	-195	-2150	47,4	261	-11
	C		2,12	60	75	25	-	-25	-135	-1290	30,6	260	- 9
	D		2,10	31	30	18	-	-18	- 61	86	14,4	254	1,5

Stroomrichting: vloed (getijfaktor 1,18)

1) voor tekenafspraken zie fig. 9.1

Tabel 1.3 Proevenprogramma en resultaten horizontale stroomkrachten

proef	positie element (fig. 6.1 en 7)	waterstand t.o.v. N.A.P. m	stroom- snelheid ref. punt m/s	horizontale krachten (fig. 8.1 en 8.2)				gem. stroomkracht 1)			afgeleide grootheden 1)		
				K ₁	K ₂	K ₃	K ₄	K _{//}	K _⊥	M _z	K/v ²	α	M _z /K
				tf	tf	tf	tf	tf	tf	tf.m	tf.s ² .m ⁻²	gr.	m
4	1	+1,00	2,59	1- 3	3- 5	5	4- 5	2,5	- 1,8	- 83	0,5	- 36	-27
	2			3- 5	4- 7	4,5	3- 7	0	- 0,7	- 56	0,1	- 90	-79
	3			0- 4	0	3	2	2,1	- 0,7	167	0,3	- 18	75
	4			100-106	0	2- 5	28- 32	-49,1	91,6	4246	15,5	118	41
	5			178-180	0	0- 10	110-126	-39,6	206,5	3663	31,4	101	17
	6			455-460	0	0	400-410	-37,1	609,9	2914	91,3	94	5
	7			62- 72	60- 72	10	0	-87,0	- 6,4	611	13,0	184	7
	8			40- 44	177-181	140-148	0	-54,5	-198,7	389	30,8	255	2
	9			0	255-260	200-230	0	-30,1	-334,1	-2359	50,9	259	- 7
16	A	+1,00	2,65	200	250	45	-	-45	-450	-4300	64,4	264	-10
	B		2,54	140	170	47	-	-47	-310	-2580	48,6	261	- 8
	C		2,62	100	110	40	-	-40	-210	- 860	31,1	259	- 4
	D		2,61	40	45	28	-	-28	- 85	- 430	13,1	252	- 5

Stroomrichting: vloed (getijfaktor 1,45)

1) voor tekenafspraken zie fig. 9.1

Tabel 1.4 Proevenprogramma en resultaten horizontale stroomkrachten

proef	positie element (fig. 6.2 en 7)	waterstand t.o.v. N.A.P. m	stroom- snelheid ref. punt m/s	horizontale krachten (fig. 8.1 en 8.2)				gem. stroomkracht 1)			afgeleide grootheden 1)		
				K ₁	K ₂	K ₃	K ₄	K _{//}	K _⊥	M _z	K/v ²	α	M _z /K
				tf	tf	tf	tf	tf	tf	tf.m	tf.s ² .m ⁻²	gr.	m
5	1	+0,20	1,12	4	0- 15	0- 18	1- 11	2,5	- 4,6	- 28	4,2	- 62	- 5
	2			4	0- 15	0- 13	0- 18	2,8	- 0,7	- 333	2,4	- 14	-114
	3			5,5	0- 20	4- 17	0- 18	2,8	- 4,2	- 167	4,0	- 56	- 33
	4			4	56- 68	70- 90	0- 8	12,7	- 94,8	999	76,4	- 82	11
	5			6	62- 68	76- 92	0- 4	10,6	- 99,7	1277	80,2	- 84	13
	6			0	108-118	80- 85	0	-21,6	-138,2	-1693	112,0	- 99	- 12
	7			25-30	25- 30	8- 12	4	-29,0	- 4,2	333	23,4	-172	11
	8			92-95	3- 5	0	80- 83	-11,3	120,9	444	97,2	-265	4
	9			60-68	0- 5	0	72- 80	6,7	97,2	- 805	78,0	-274	8
9	A	+0,20	1,12	55	50	- 5	-	5	105	- 430	83,8	-273	- 4
	B		1,17	40	38	- 7	-	7	78	- 172	57,2	-275	- 2
	C		1,11	32	30	-10	-	10	62	- 172	51,0	-279	- 3
	D		1,18	10	10	- 7	-	7	20	0	15,2	-289	0

Stroomrichting: eb (getijfaktor 1,18)

1) voor tekenafspraken zie fig. 9.2

Tabel 1.5 Proevenprogramma en resultaten horizontale stroomkrachten

proef	positie element (fig. 6.2 en 7)	waterstand t.o.v. N.A.P.	stroom- snelheid ref. punt	horizontale krachten (fig. 8.1 en 8.2)				gem. stroomkracht 1)			afgeleide grootheden 1)		
				K ₁	K ₂	K ₃	K ₄	K _{//}	K _⊥	M _z	K/v ²	α	M _z /K
		m	m/s	tf	tf	tf	tf	tf	tf	tf.m	tf.s ² .m ⁻²	gr.	m
6	1	+0,20	1,49	56	58- 72	52- 60	46- 52	-11,3	- 11,3	- 111	7,3	-135	- 7
	2			19	40- 46	41- 46	32- 40	12,4	- 22,3	- 916	11,5	- 61	-36
	3			77	94-104	84- 90	78- 81	- 6,7	- 20,9	- 805	9,9	-108	-37
	4			0	58- 78	70-100	0	12,0	-108,2	944	49,4	- 84	9
	5			0	58- 64	82- 94	0	19,1	-105,4	1499	48,6	- 80	14
	6			0	158-164	130-140	0	-18,4	-209,3	-1443	95,4	- 95	- 7
	7			38- 44	38- 44	8- 14	7	-45,3	- 2,8	222	20,5	-176	5
	8			138-144	10- 16	0	112-118	-27,6	171,8	777	78,9	-261	5
	9			114-122	0- 8	0	120-130	2,1	169,0	- 611	76,7	-271	- 4
10	A	+0,20	1,42	85	82	- 9	-	9	167	- 258	82,9	-273	- 1,5
	B		1,44	75	65	-15	-	15	140	- 860	67,9	-276	- 6
	C		1,36	52	50	-12	-	12	102	- 172	55,5	-277	- 1,5
	D		1,43	20	20	-10	-	10	40	0	20,2	-284	0

Stroomrichting: eb (getijfaktor 1,45)

1) voor tekenafspraken zie fig. 9.2

Tabel 1.6 Proevenprogramma en resultaten horizontale stroomkrachten

proef	positie element (fig. 6.2 en 7)	waterstand t.o.v. N.A.P. m	stroom- snelheid ref. punt m/s	horizontale krachten (fig. 8.1 en 8.2)				gem. stroomkracht 1)			afgeleide grootheden 1)		
				K ₁	K ₂	K ₃	K ₄	K _{//}	K _⊥	M _z	K/v ²	α	M _z /K
				tf	tf	tf	tf	tf	tf	tf.m	tf.s ² .m ⁻²	gr.	m
7	1	-0,80	1,23	54	32- 46	48- 72	42- 52	9,9	1,4	1554	6,7	8	155
	2			72	56- 74	50- 64	50- 60	-10,6	10,6	- 56	9,9	135	- 4
	3			60	48- 80	60- 82	65- 72	11,0	- 4,6	- 83	7,8	- 23	- 7
	4			39	70- 90	80- 98	11- 18	-11,0	- 81,7	1859	54,7	- 98	23
	5			20	64- 72	86- 98	6- 14	9,9	- 91,9	1887	61,4	- 84	20
	6			0	106-112	90- 94	17	0	-130,1	-1887	86,5	- 90	- 15
	7			66- 68	68- 70	58- 64	48	-19,1	- 10,6	611	14,5	-151	28
	8			172-176	64- 68	52	152-154	-24,8	147,8	389	99,6	-261	3
	9			130-132	54- 56	50	138-142	2,8	117,4	- 777	78,0	-271	- 7
11	A	-0,80	1,15	68	68	- 5	-	5	136	0	102,9	-272	0
	B		1,15	50	47	-12	-	12	97	- 258	73,9	-277	- 3
	C		1,15	37	36	- 5	-	5	73	- 86	55,3	-274	- 1
	D		1,18	15	15	- 7,5	-	7,5	30	0	22,2	-284	0

Stroomrichting: eb (getijfactor 1,18)

1) voor tekenafspraken zie fig. 9.2

Tabel 1.7 Proevenprogramma en resultaten horizontale stroomkrachten

proef	positie element (fig. 6.2 en 7)	waterstand t.o.v. N.A.P. m	stroom- snelheid ref. punt m/s	horizontale krachten (fig. 8.1 en 8.2)				gem. stroomkracht 1)			afgeleide grootheden 1)		
				K ₁	K ₂	K ₃	K ₄	K _{//}	K _⊥	M _z	K/v ²	α	M _z /K
				tf	tf	tf	tf	tf	tf	tf.m	tf.s ² .m ⁻²	gr.	m
8	1	-0,80	1,52	80	70- 90	78- 88	72- 79	- 1,1	- 5,3	416	2,4	-101	77
	2			88	58- 90	78- 92	80- 90	5,7	9,9	777	5,0	- 60	68
	3			84	70- 90	82- 94	84- 92	8,5	2,8	222	3,8	- 18	25
	4			81	144-150	168-172	70- 76	10,6	-115,3	1721	49,8	- 85	15
	5			115	190-198	192-194	118-120	2,1	-108,2	- 278	46,5	- 89	- 3
	6			30- 32	195-204	150-160	39	-25,8	-201,2	-2914	87,1	- 97	-14
	7			78- 84	82- 90	60- 64	44	-43,1	- 16,3	722	19,9	-159	16
	8			250-260	50- 65	50	200-215	-38,9	251,0	2220	109,2	-261	9
	9			162-166	52- 58	44	198-202	17,7	187,4	-2609	80,9	-275	-14
12	A	-0,80	1,45	105	100	- 7	-	7	205	- 430	97,6	-272	- 2
	B		1,42	80	75	-13	-	13	155	- 430	77,1	-275	- 3
	C		1,40	65	62	-10	-	10	127	- 258	65,0	-275	- 2
	D		1,43	20	20	- 7,5	-	7,5	40	0	19,9	-281	0

Stroomrichting: eb (getijfaktor 1,45)

1) voor tekenafspraken zie fig. 9.2

Tabel 1.8 Proevenprogramma en resultaten horizontale stroomkrachten

Sleepboot (fig. 10)	Vermogen (pk)	Paalkracht (kN/tf)	Maximum trekkracht (kN/tf)	
			vooruit	dwars
1	900	123/12,5	24,5/2,5	73,5/ 7,5
2	900	123/12,5	54 /5,5	54 / 5,5
3	900	123/12,5	73,5/7,5	-
4	900	123/12,5	-	73,5/ 7,5
5	900	123/12,5	-54/-5,5	54 / 5,5
6	2800	329/33,5	270/27,5	-
7	2800	329/33,5	221/22,5	-
8	2800	329/33,5	-	172 /17,5
9	2800	329/33,5	-	172 /17,5
Konvooi	15.700	1931/196,5	589/60	599/60

N.B. Trekkracht geschat voor vloed; voor eb geldt (gespiegeld) hetzelfde

Tabel 2 Globale schatting van de maximale trekkracht van het konvooi

proef	positie element	v_r stroom- snelheid	h waterstand t.o.v. N.A.P.	vertikale krachten (fig. 8.2)				vert. verplaatsingen (fig. 8.2)				verval	
				K_{v1}	K_{v2}	K_{v3}	K_{v4}	Δ_1	Δ_2	Δ_3	Δ_4	$\bar{\Delta}_L$	$\bar{\Delta}_D$
	(fig. 7)	m/s	m	tf	tf	tf	tf	cm	cm	cm	cm	cm	cm
9	A	1,12	+0,20	10	36	-17	45	-14,5	-30	11	- 5,5	25	16
10		1,42	+0,20	15	62,5	-25	72	-22	-47,5	20	- 6	42	25,5
11		1,15	-0,80	9	45	-20	60	-15	-30	20	- 5	30	20
12		1,44	-0,80	15	75	-25	88	-30	-55	30	- 5	55	30
9	B	1,17	+0,20	3	30	3	20	- 2,5	-15	5	- 5	9	11,5
10		1,44	+0,20	5	60	10	37	-22	-40	0	-22	20	20
11		1,15	-0,80	0	35	- 5	16	-10	-17	10	- 5	16	11
12		1,42	-0,80	5	60	- 5	30	-15	-35	15	-10	27,5	22,5
9	C	1,11	+0,20	5	16	- 6	10	-10	-20	2	- 8	12	10
10		1,36	+0,20	10	32	- 7	16	-10	-26	12	- 4	22	16
11		1,15	-0,80	4	17	- 6	4	- 5	-10	15	2,5	16,5	9
12		1,40	-0,80	10	34	- 8	18	- 5	-25	22	5	28,5	18,5
9	D	1,18	+0,20	0,5	1	0,5	1	10	7	7	5	- 2,5	2,5
10		1,43	+0,20	2	- 2	- 2,5	0	12	5	6	5	- 3	4
11		1,18	-0,80	1,5	-12	- 6	- 6	22	20	16	8	- 9	5
12		1,43	-0,80	3,5	- 9	- 6	- 6	30	25	27	20	- 4	6

+ = krachttoename respektievelijk verplaatsing omhoog

- = krachtvermindering respektievelijk verplaatsing omlaag

$$\Delta_L = \Delta_3 - \Delta_1 = \Delta_4 - \Delta_2 \quad \text{Element 4}$$

$$\Delta_D = \Delta_1 - \Delta_2 = \Delta_3 - \Delta_4 \quad \text{Eb}$$

Tabel 3.1 Meetresultaten verticale stroomkrachten en verplaatsingen

proef	positie element	v_r stroom- snelheid	h waterstand t.o.v. N.A.P.	vertikale krachten (fig. 8.2)				vert. verplaatsingen (fig. 8.2)				verval	
				K_{v1}	K_{v2}	K_{v3}	K_{v4}	Δ_1	Δ_2	Δ_3	Δ_4	$\bar{\Delta}_L$	$\bar{\Delta}_D$
	(fig. 7)	m/s	m	tf	tf	tf	tf	cm	cm	cm	cm	cm	cm
13	A	1,89	+2,12	-15	70	13	125	15	-30	- 35	- 82	51	46
14		2,39	+2,12	-25	115	40	220	30	-45	- 70	-140	97,5	72,5
15		2,14	+1,00	-32	85	25	145	10	-55	- 55	-110	60	60
16		2,65	+1,00	-20	165	60	240	30	-65	-130	-225	160	95
13	B	1,99	+2,12	-11	44	10	75	12	-18	- 22	- 55	35,5	31,5
14		2,47	+2,12	-10	80	10	130	10	-30	- 40	- 80	50	40
15		2,04	+1,00	-15	45	10	80	20	-20	- 30	- 50	40	30
16		2,54	+1,00	-10	95	15	150	20	-50	- 45	- 80	47,5	52,5
13	C	1,99	+2,12	- 2,5	20	-10	48	8	-13	- 25	- 48	34	22
14		2,51	+2,12	- 2,5	25	- 5	80	30	0	- 45	- 75	75	30
15		2,12	+1,00	2,5	13	-15	50	17,5	- 5	- 30	- 50	46,5	21,5
16		2,62	+1,00	2	30	- 5	80	35	- 5	- 40	- 80	75	40
13	D	1,96	+2,12	- 6	- 7,5	- 5	5	25	12	4	- 8	20,5	12,5
14		2,47	+2,12	- 9	- 8	- 8	12	30	7	3	- 18	26	22
15		2,10	+1,00	-15	- 15	-10	- 8	35	25	8	8	22	5
16		2,61	+1,00	-15	- 19	-12	- 3	55	30	15	2,5	34	19

+ = krachttoename respektievelijk verplaatsing omhoog

- = krachtvermindering respektievelijk verplaatsing omlaag

$$\Delta_L = \Delta_1 - \Delta_3 = \Delta_2 - \Delta_4$$

$$\Delta_D = \Delta_1 - \Delta_2 = \Delta_3 - \Delta_4$$

Element 4

Vloed

Tabel 3.2 Meetresultaten verticale stroomkrachten en verplaatsingen

proef	stroom- ¹⁾ snelheid ref. punt	vaar- ²⁾ snelheid schip	passeer- ³⁾ afstand schip (ca)	$dK_{3,max}$	$(dK_3/dt)_{max}$	$(d\Delta_1/dt)_{max}$	$(d\Delta_2/dt)_{max}$	$(d\Delta_3/dt)_{max}$	$(d\Delta_4/dt)_{max}$	$z_{max}^{5)}$
	m/s	m/s	m	tf	tf/s	cm/s	cm/s	cm/s	cm/s	cm
1	0	6,94	90	12,5	4,4	-0,65	-1,85	-1,3	-2,2	-
2	0	7,03		13	4,0	-0,35	-1,7	-1,35	-2,25	10(?)
3	0	6,97		15	3,7	-0,6	-2,2	-1,8	-2,7	17,5-20
4	0	5,19		4	0,15	-0,3	-0,3	-0,5	-0,4	9
5	0	3,29		3	nihil	nihil	nihil	nihil	nihil	2,5- 5
6	0	8,99		75	27	+0,75	-6,7	-0,75	-7,3	40
7	1,40	8,09		20	2,1	-1,1	-1,75	-1,4	-1,65	14 -16
8	1,40	10,28		90	27,5	+0,9	-9,5	0	-10,0	37
9	1,40	10,12		100	35	0	-7,5	0	-8,25	36
10	1,48	9,90	260	25-30	4-5	-0,6	-1,1	-0,9	-1,6	8 -10
11	1,48	8,05		12	3	-0,45	-1,1	-1,0	-0,6	11,5
12	0	6,89		8	1	-0,6	-0,85	-0,65	-1,1	-
13	0	9,36		20	7	-1,3	-1,5	-1,45	-1,5	14,5
14	0	9,40		17,5	3,5-5	-1,6	-2,3	-2,4	-3,0	14 -15
15	0	9,42		25	1,75	-1,15	-1,5	-1,75	-1,9	16 -18
16	0	9,64	525	22,5	1,9	-1,1	-1,2	-1,35	-1,6	14
17	0	7,01		10-12	2,9	-0,45	-0,65	-0,45	-0,65	8
18 ⁴⁾	1,80	8,65		20(?)	gering	gering	gering	gering	gering	-
19 ⁴⁾	1,80	8,31		20(?)	gering	gering	gering	gering	gering	-
20	1,80	10,02		15	1,8	-1,25	-1,6	-1,2	-1,3	-
21	1,80	10,59		20	2,0-2,4	-1,3	-1,5	-1,6	-1,8	-

1) stroomsnelheid in de sleuf ter plaatse van de vaarbaan (gemiddelde over bovenste 13 m (diepgang schip))

2) absolute vaarsnelheid (t.o.v. de oever); schip vaart met stroom mee

3) afstand tussen vaarbaan en kop van het element

4) waarden van de naar de tijd afgeleide grootheden niet herkenbaar binnen "ruis" door stromend water

5) waterspiegeldaling gemeten naast het element op enige afstand van bolder no. 3

Tabel 4 Invloed van passerend zeeschip (ca. 70.000 DWT) op element 4 vlak voor de plaatsing

proef	stroom- ¹⁾ snelheid ref. punt	vaar- ²⁾ snelheid schip	passeer- ³⁾ afstand schip (ca)	$(d\Delta'_1/dt)_{\max}$	$(d\Delta'_2/dt)_{\max}$	$(d\Delta'_3/dt)_{\max}$	$(d\Delta'_4/dt)_{\max}$
	m/s	m/s	m	cm/s	cm/s	cm/s	cm/s
1	0	6,94	90	0,55	-0,55	-1,6	-2,7
2	0	7,03		0,55	-0,55	-1,55	-2,65
3	0	6,97		0,6	-0,6	-2,1	-3,3
4	0	5,19		0	0	-0,55	-0,55
5	0	3,29		nihil	nihil	nihil	nihil
6	0	8,99		3,9	-3,9	-0,9	-8,7
7	1,40	8,09		0,25	-0,25	-1,3	-1,8
8	1,40	10,28		5,1	-5,1	-1,25	-11,45
9	1,40	10,12		3,9	-3,9	-1,4	-9,2
10	1,48	9,90	260	0,3	-0,3	-1,2	-1,8
11	1,48	8,05		-0,4	0,4	-1,45	-0,65
12	0	6,89		0,2	-0,2	-0,9	-1,3
13	0	9,36		0,05	-0,05	-1,85	-1,95
14	0	9,40		0,35	-0,35	-2,95	-3,65
15	0	9,42		0,15	-0,15	-2,1	-2,4
16	0	9,64	525	0,1	-0,1	-1,75	-1,95
17 ⁴⁾	0	7,01		0,1	-0,1	-0,6	-0,8
18 ⁴⁾	1,80	8,65		-	-	-	-
19 ⁴⁾	1,80	8,31		-	-	-	-
20	1,80	10,02		0,1	-0,1	-1,6	-1,8
21	1,80	10,59		0,1	-0,1	-2,05	-2,25

1) stroomsnelheid in de sleuf ter plaatse van de vaarbaan (gemiddelde over bovenste 13 m (diepgang schip))

2) absolute vaarsnelheid (t.o.v. de oever); schip vaart met stroom mee

3) afstand tussen vaarbaan en kop van het element

4) waarden van de naar de tijd afgeleide grootheden niet herkenbaar binnen "ruis" door stromend water

Tabel 5 Invloed van passerend zeeschip (ca. 70.000 DTW) op element 4 vlak na plaatsing op de nok van het voorgaande element (berekende waarden)

proef	stroom- ¹⁾	vaar- ²⁾	passeer- ³⁾	vertikale stoten op oplegpunten (vgl. 8-13)			extra belasting	horizontale stoot
	snelheid	snelheid	afstand	situatie a-b		situatie c-d	kopschot (vgl. 26)	op gina (vgl. 27)
	ref. punt	schip	schip (ca)	S _B	S _C	S _B		
	m/s	m/s	m	kNs	kNs	kNs	K _{max} ⁵⁾	S _h ⁵⁾
							tf (g kN)	kNs
1	0	6,94	90	325- 650	535-1065	195- 395	130	75- 150
2	0	7,03		265- 535	525-1045	195- 400	105	65- 135
3	0	6,97		365- 730	650-1305	240- 480	95	60- 120
4	0	5,19		80- 155	110- 220	40- 80	nihil	nihil
5	0	3,29		nihil	nihil	nihil	nihil	nihil
6	0	8,99		775-1545	1720-3435	653-1270	4920	460- 910
7	1,40	8,09		370- 740	355- 710	130- 260	30	35- 75
8	1,40	10,28		1120-2235	2260-4520	835-1675	5105	465- 925
9	1,40	10,12		975-1950	1815-3635	670-1345	8270	600-1185
10	1,48	9,90	260	220- 440	355- 710	130- 260	105-170	75- 160
11	1,48	8,05		200- 405	285- 570	105- 210	65	50- 100
12	0	6,89		190- 375	255- 515	95- 190	6	15- 35
13	0	9,36		365- 730	385- 770	140- 285	330	115- 235
14	0	9,40		505-1015	720-1440	265- 535	80-170	65- 160
15	0	9,42		345- 690	475- 950	175- 350	20	25- 60
16	0	9,64	525	300- 600	385- 770	140- 285	25	35- 65
17	0	7,01		145- 285	160- 315	60- 115	55	50- 100
18 ⁴⁾	1,80	8,65		-	-	-	-	-
19 ⁴⁾	1,80	8,31		-	-	-	-	-
20	1,80	10,02		395- 795	355- 710	130- 260	20	25- 60
21	1,80	10,59		365- 730	445- 890	165- 330	25- 35	35- 75

1) stroomsnelheid in de sleuf ter plaatse van de vaarbaan (gemiddelde over bovenste 13 m (diepgang schip))

2) absolute vaarsnelheid (t.o.v. de oever); schip vaart met stroom mee

3) afstand tussen vaarbaan en kop van het element

4) waarden van de naar de tijd afgeleide grootheden niet herkenbaar binnen "ruis" door stromend water

5) veerstijfheid in richting van K₃ (bepalend voor V₀) geschat op C_V = 2 tf/cm (circa 2000 kN/m) op basis van gegevens van RWS

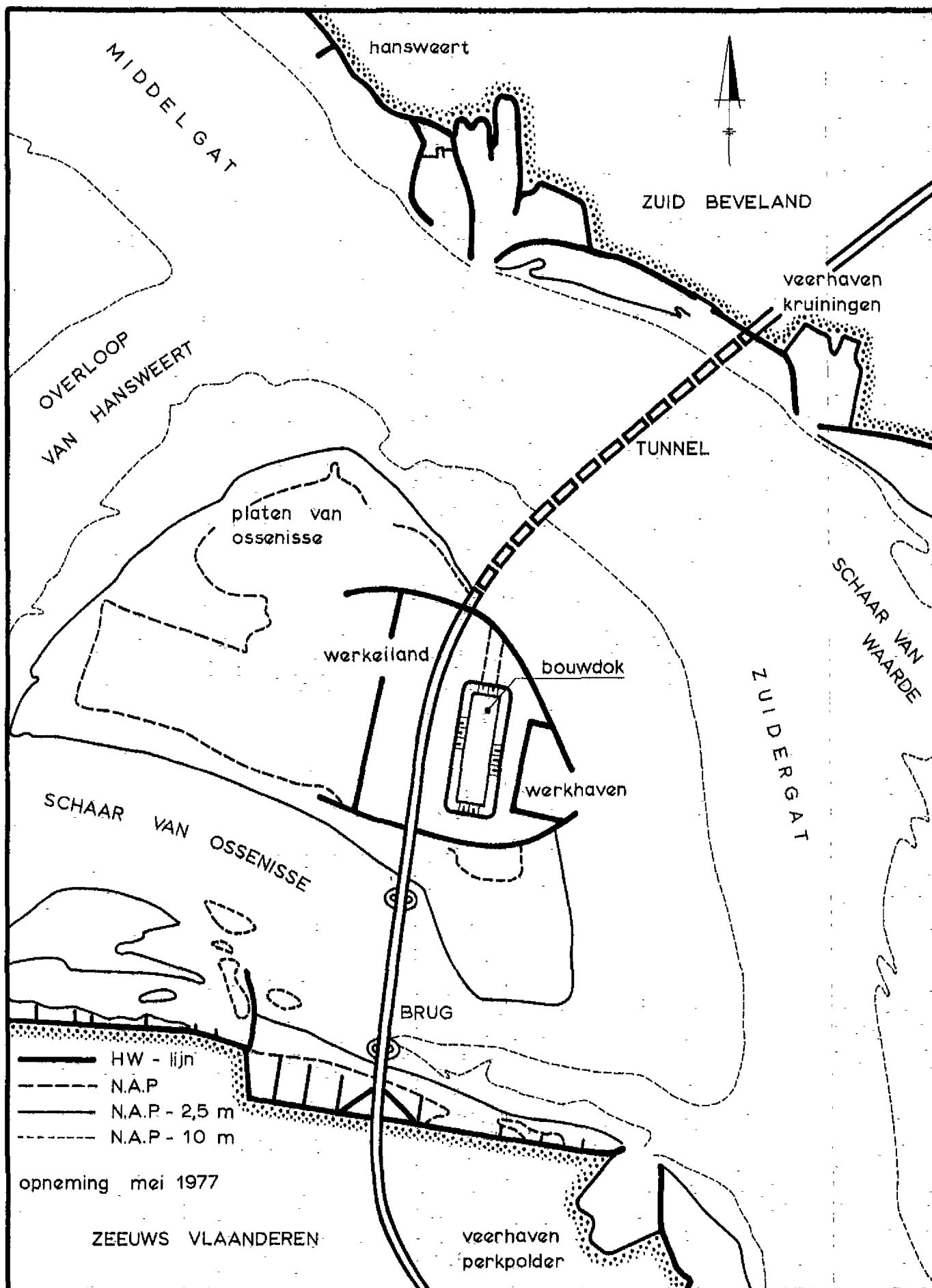
Tabel 6 Maximum belasting van oplegpunten en kopschot van element 4 door passerend zeeschip (ca. 70.000 DWT)

Maand	Scheldeafvoer te Schelle over periode 1949-1973 (m ³ /s)		Chloriniteit boei 49 maandgemiddelde $\pm 1,0$ (g Cl ⁻ /l)
	I	II	
jan.	180	151	8,2
febr.	182	176	7,5
maart	137	166	7,75
april	105	141	8,45
mei	67	103	9,9
juni	55	76	11,2
juli	47	56	12,45
aug.	52	51	12,8
sept.	52,5	51	12,8
okt.	67	57	12,4
nov.	107	76	11,2
dec.	165	113	9,45

I maandgemiddelde

II gemiddelde over betreffende maand + 2 voorafgaande maanden

Tabel 7 Gemiddelde seizoensfluctuatie in zoutgehalte bij het tunneltracé
(Middelgat, boei 49) in de Westerschelde



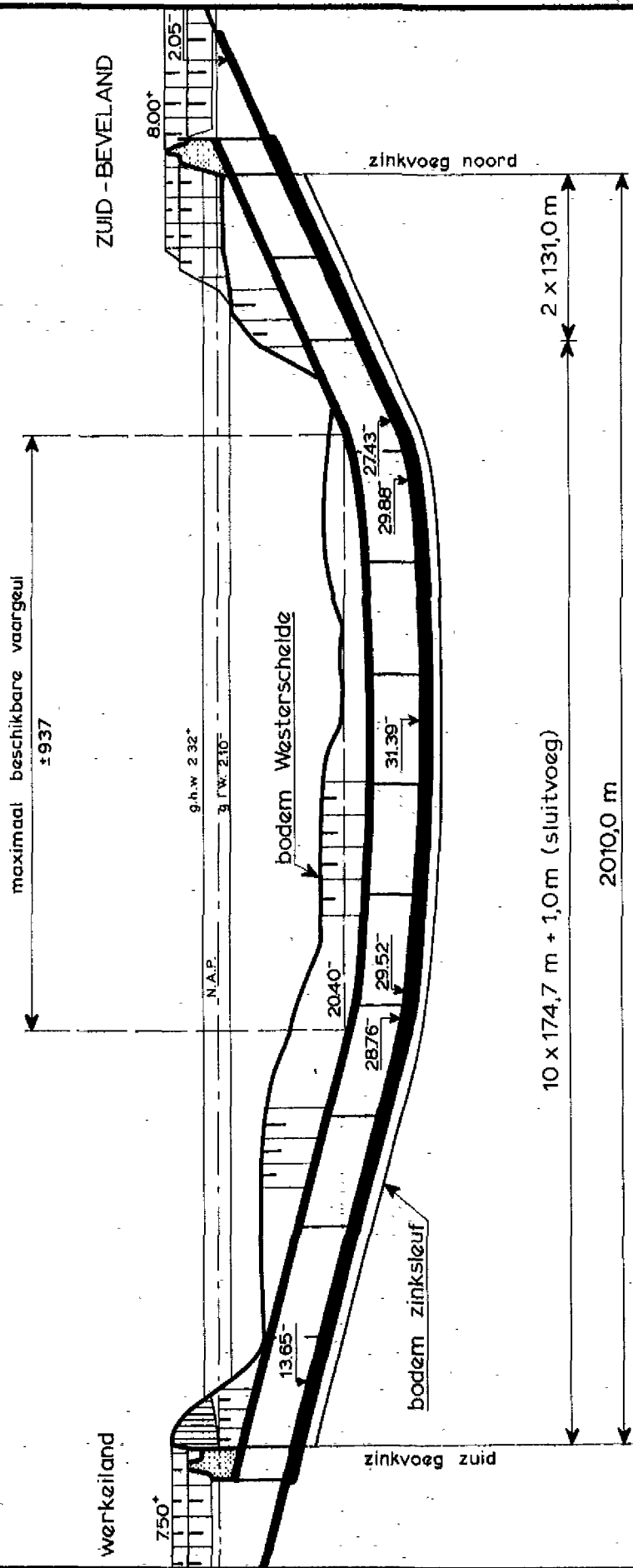
SITUATIE VASTE OEERVERBINDING WESTERSCHELDE

SCHAAL 1:25.000

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M. 1739

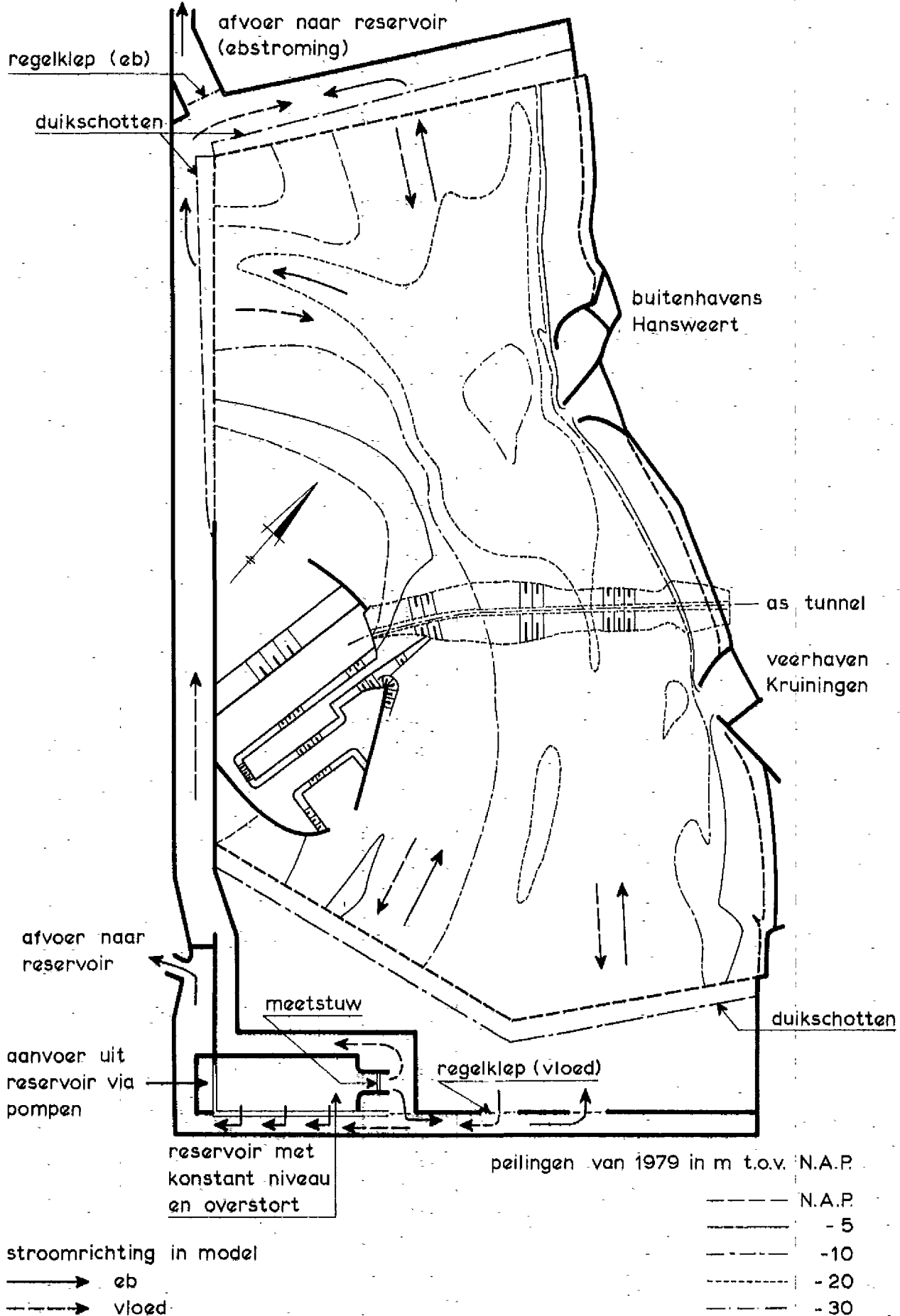
FIG. 1



het zinkgedeelte van de tunnel bestaat uit 12 elementen die van noord naar zuid zijn genummerd. element 11 zal als laatste worden afgezonden, waarbij de sluitvoeg tussen de elementen 11 en 12 komt te liggen:

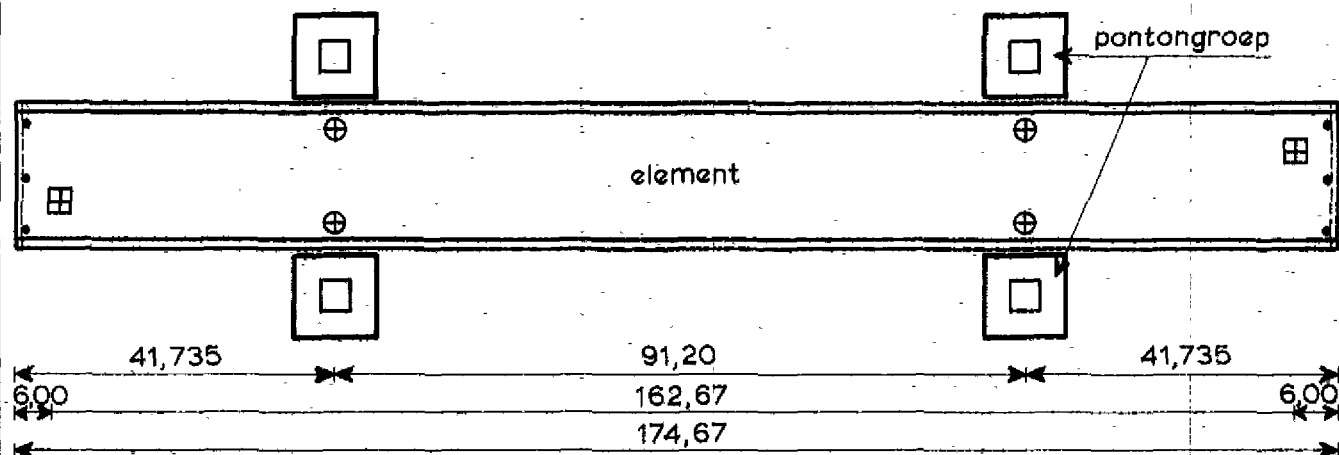
maten en peilen in meters

LANGSDOORSNEDE WESTERSCHELDETUNNEL		
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1739	FIG. 2

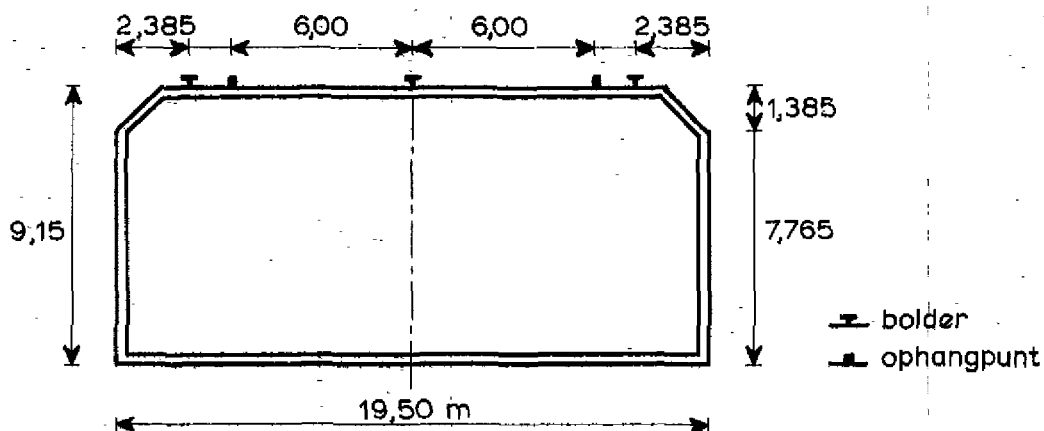


- bolders
- ⊕ ophangpunten pontons
- ⊞ richttoerens

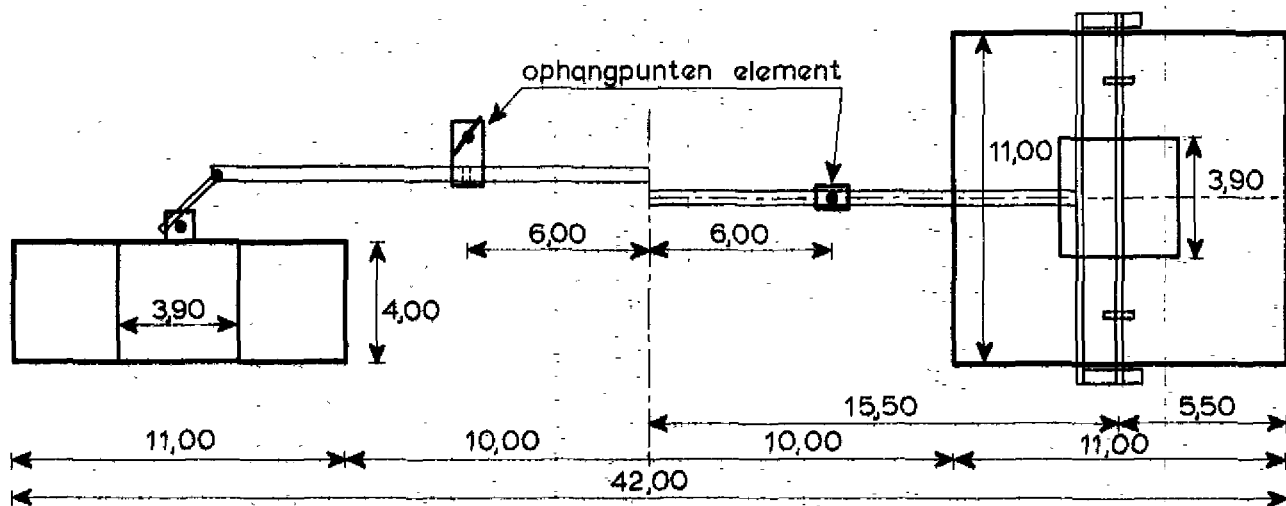
maten (prototype) in meters



BOVENAANZICHT ELEMENT 4 (1:1000)



VOORAANZICHT ELEMENTEN (1:250)



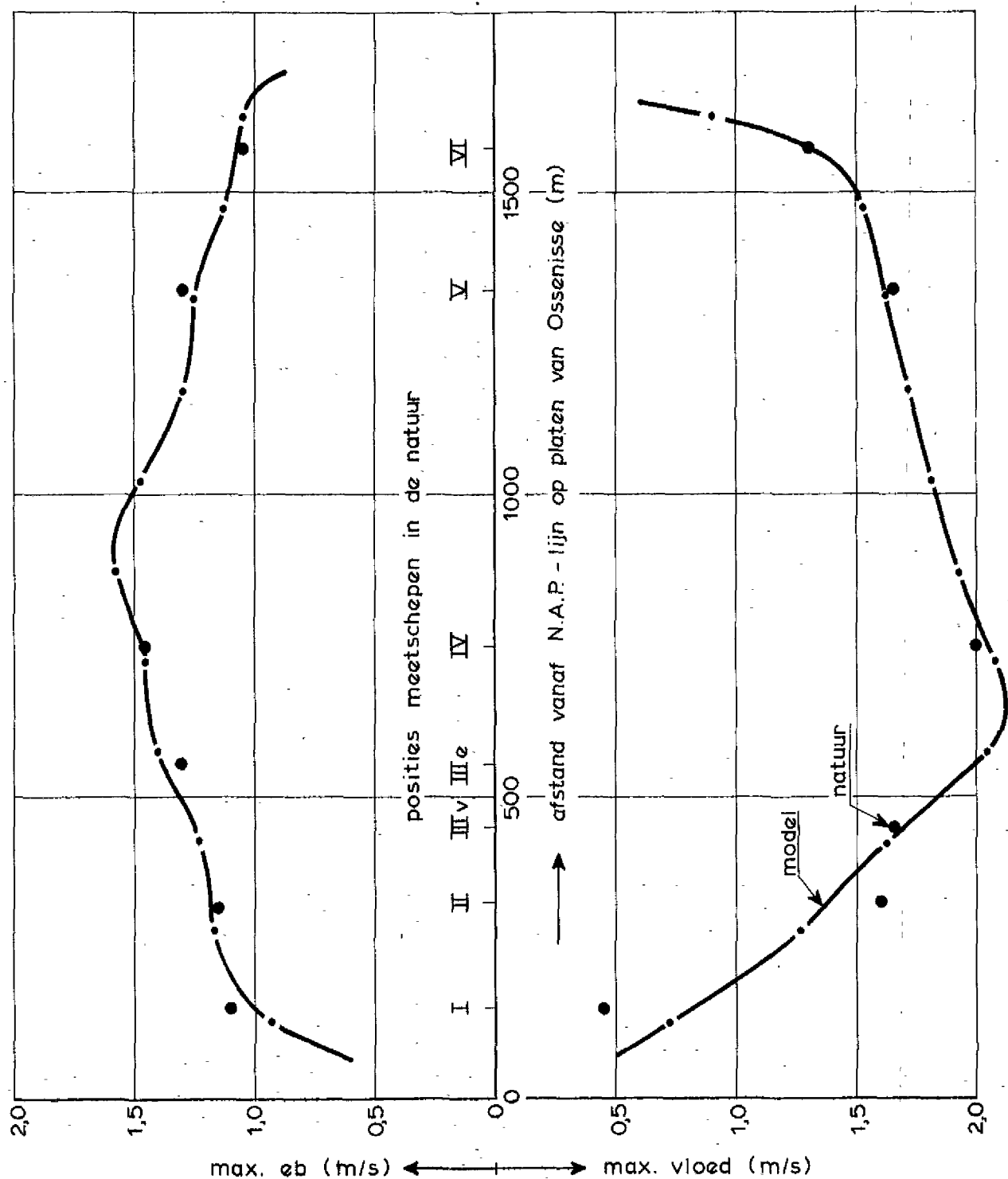
DWARSDOORSNEDE / BOVENAANZICHT PONTONGROEP (1:250)

ONDERZOCHT TUNNELELEMENT EN
GEBRUIKTE PONTONS

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1739

FIG. 4



stroomsnelheid gemiddeld over de waterdiepte (vektorsnelheid)

normaal springtij (getijfaktor 1,18; waterstand - eb : N.A.P. + 0,20 m

- vloed : N.A.P. + 2,12 m

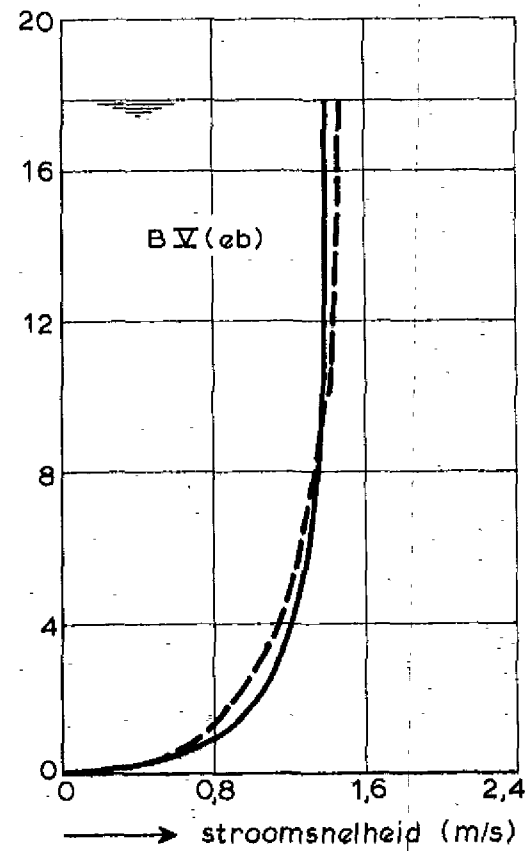
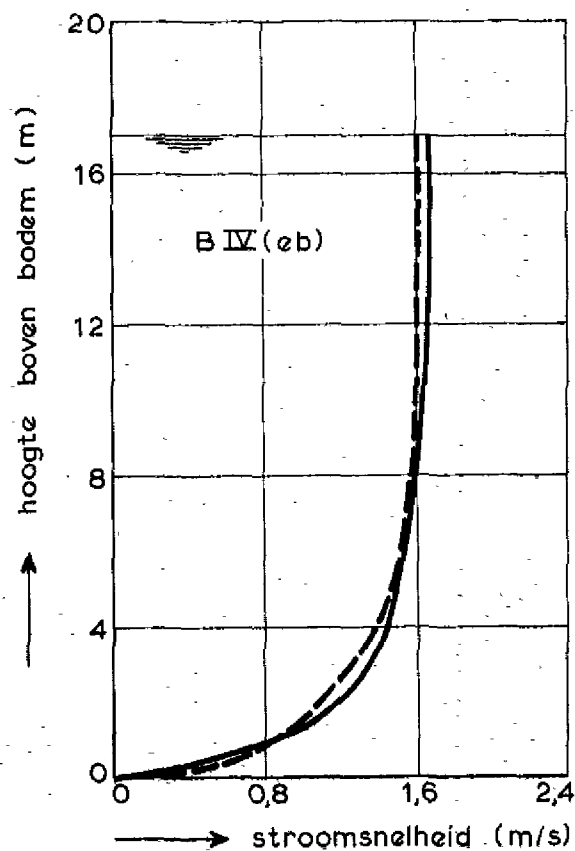
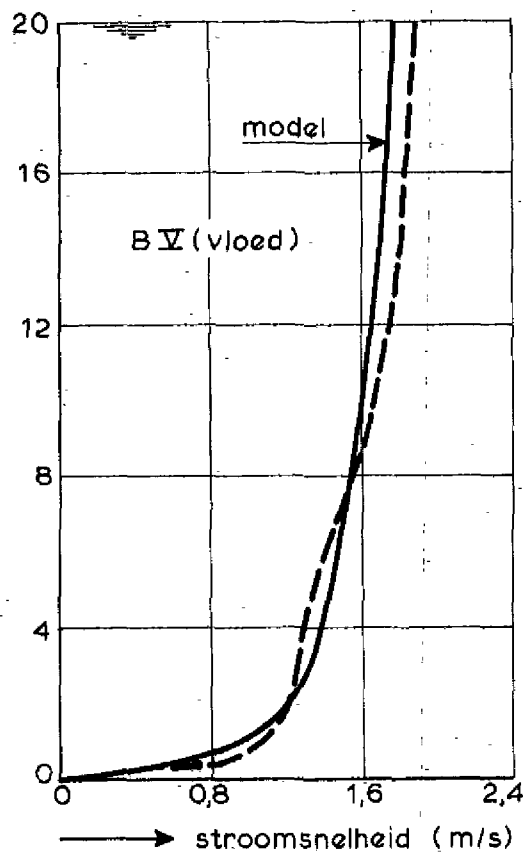
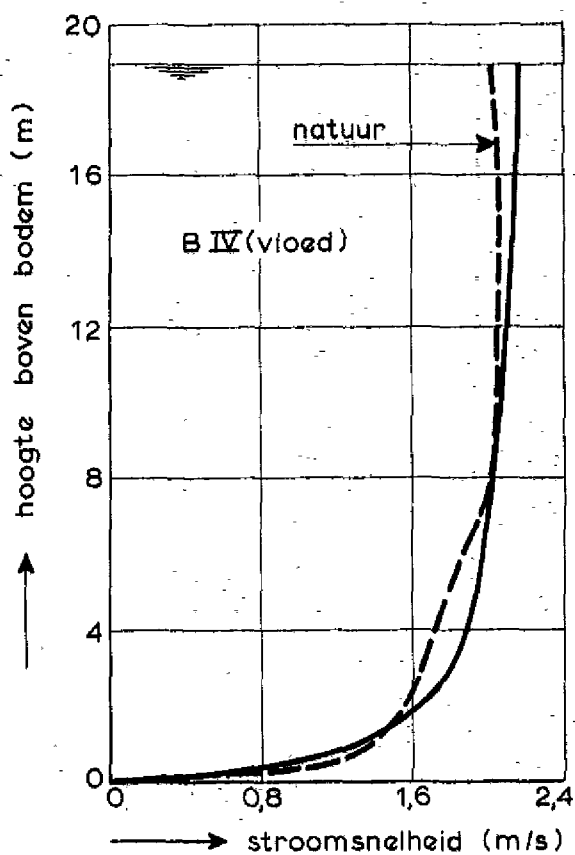
IJ KING VAN DE STROOMSNELHEIDSVERDELINGEN
IN HET MODEL (TUNNELTRACÉ)

RAAI B UIT [1]

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1739

FIG. 5.1



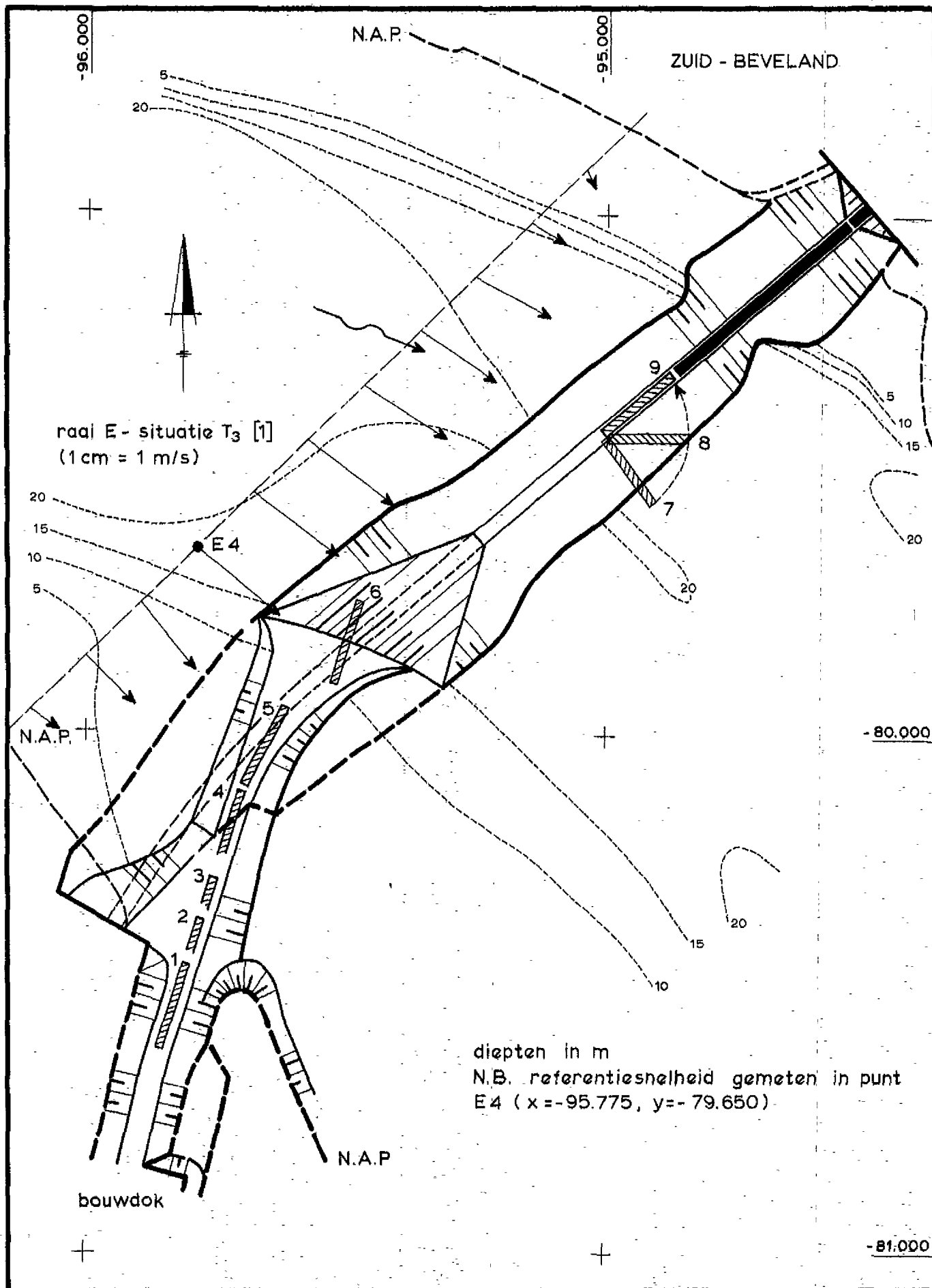
IJ KING VAN DE STROOMSNELHEIDSVERDELINGEN
IN HET MODEL (TUNNELTRACÉ)

RAAI B UIT [1]

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1739

FIG. 5.2



SITUATIE ZINKSLEUF EN ONDERZOCHE
MANOEUVRE TUNNELELEMENT 4 BIJ VLOED

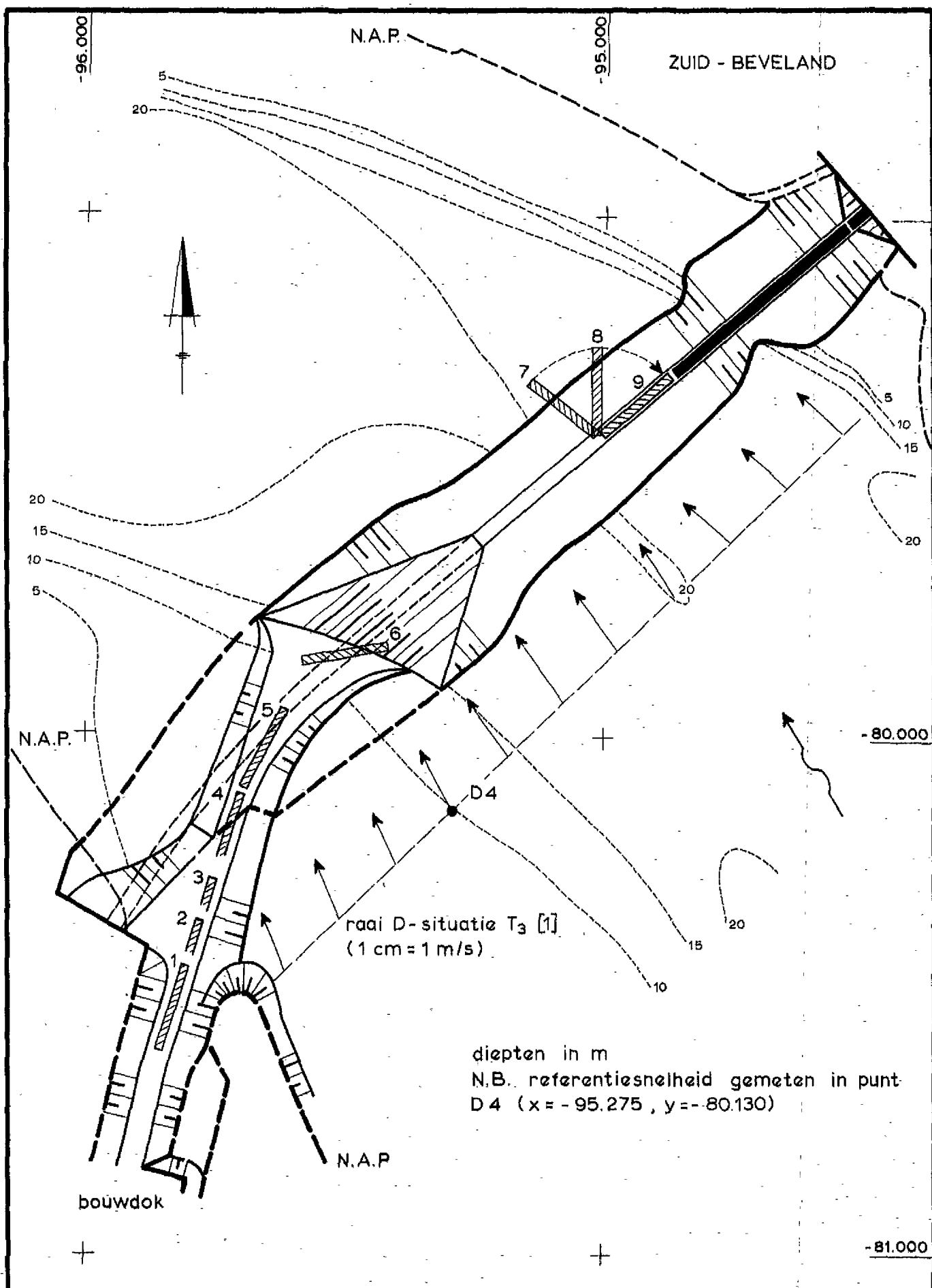
9 POSITIES

SCHAAL 1:10.000

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1739

FIG. 6.1



SITUATIE ZINKSLEUF EN ONDERZOCHE
MANOEUVRE TUNNELEMENT 4 BIJ EB

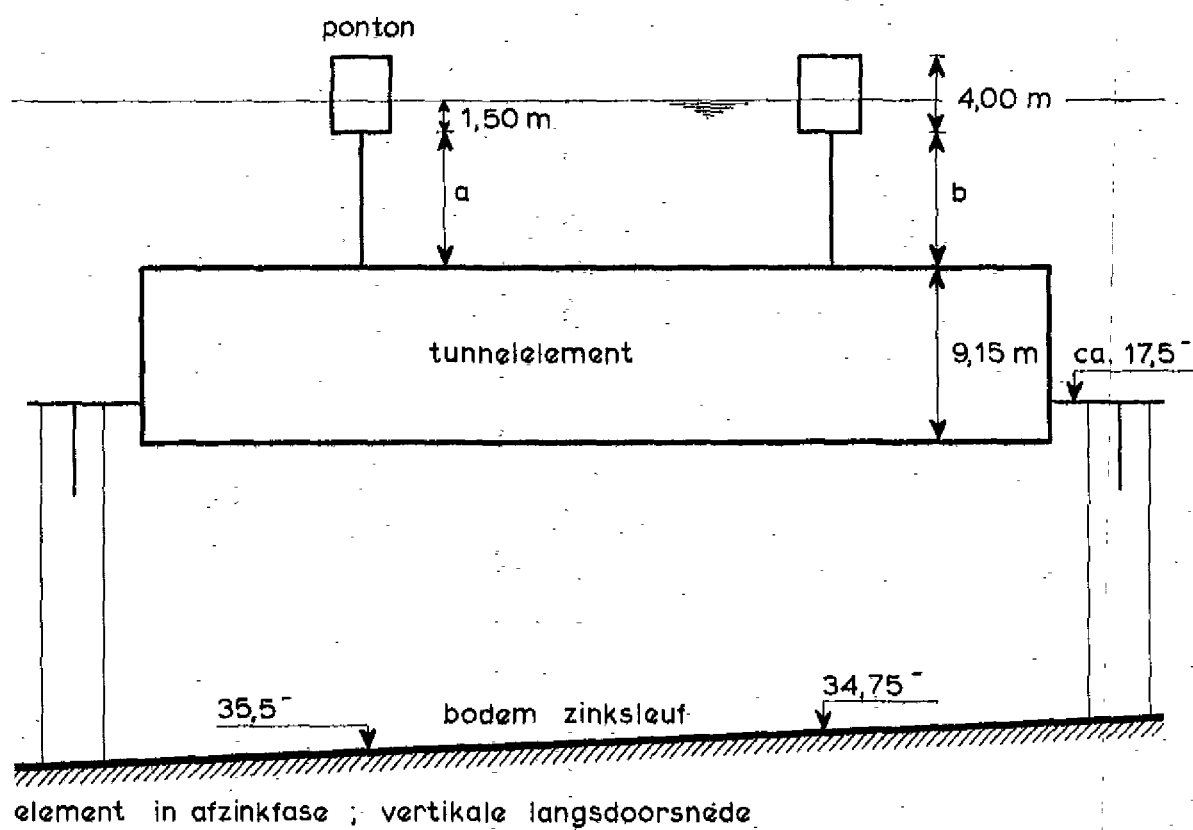
9 POSITIES

SCHAAL 1:10.000

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1739

FIG. 6.2



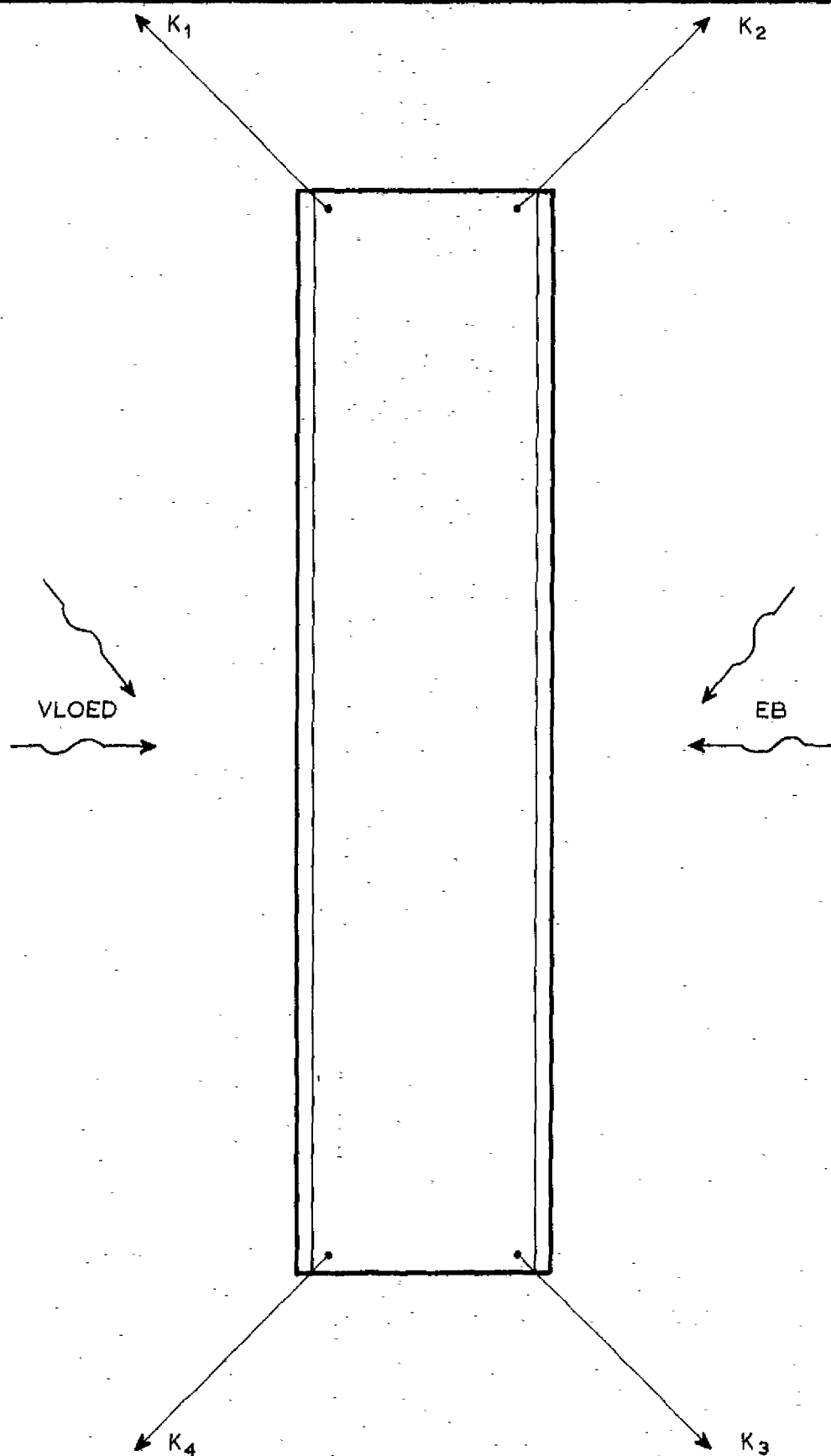
getijfase	eb		vloed	
kabellengte (m)	a	b	a	b
positie 9 A	0,50	0,50	0,50	0,50
9 B	5,80	5,80	6,70	6,70
9 C	11,10	11,10	12,90	12,90
9 D	23,05	22,30	24,85	24,10

VERTIKALE POSITIES VAN ELEMENT 4
IN HET MODEL

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1739

FIG. 7



de benedenstroomse draad die door de stroomkracht niet wordt belast is voorzien van een slappe veer waarmee voorspanning op alle kabels wordt gezet. (K_3 bij vloed c.q. K_4 bij eb)

DEFINITIESCHETS VOOR DE HORIZONTALE
KRACHTEN IN DE TRANSPORTFASE

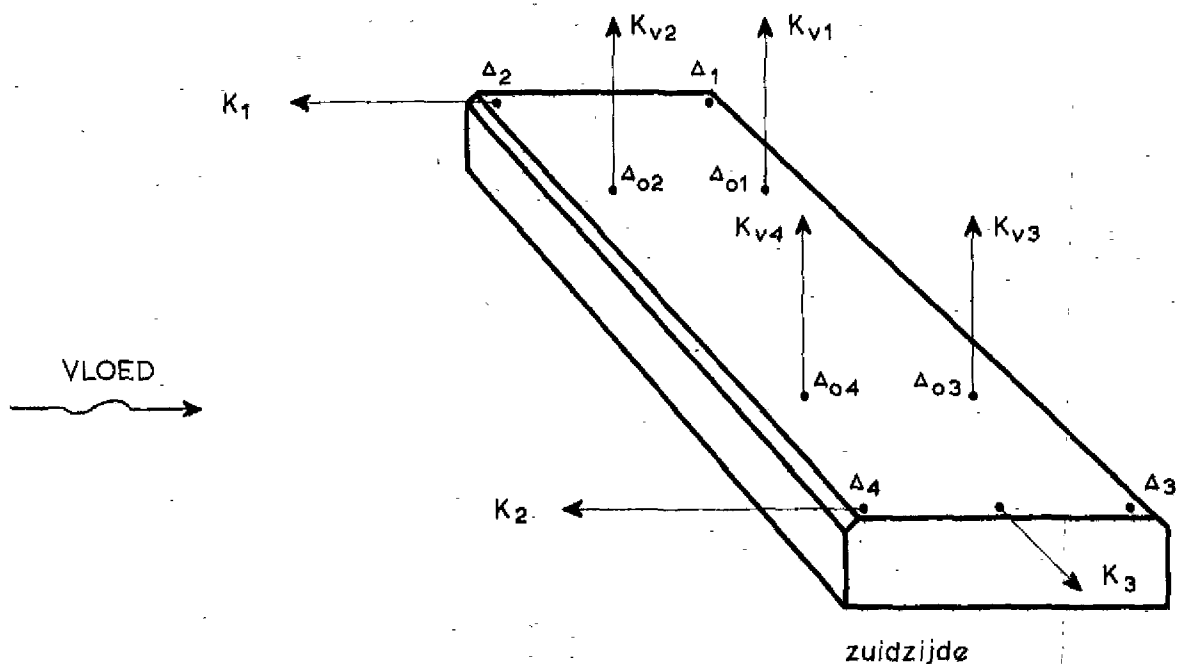
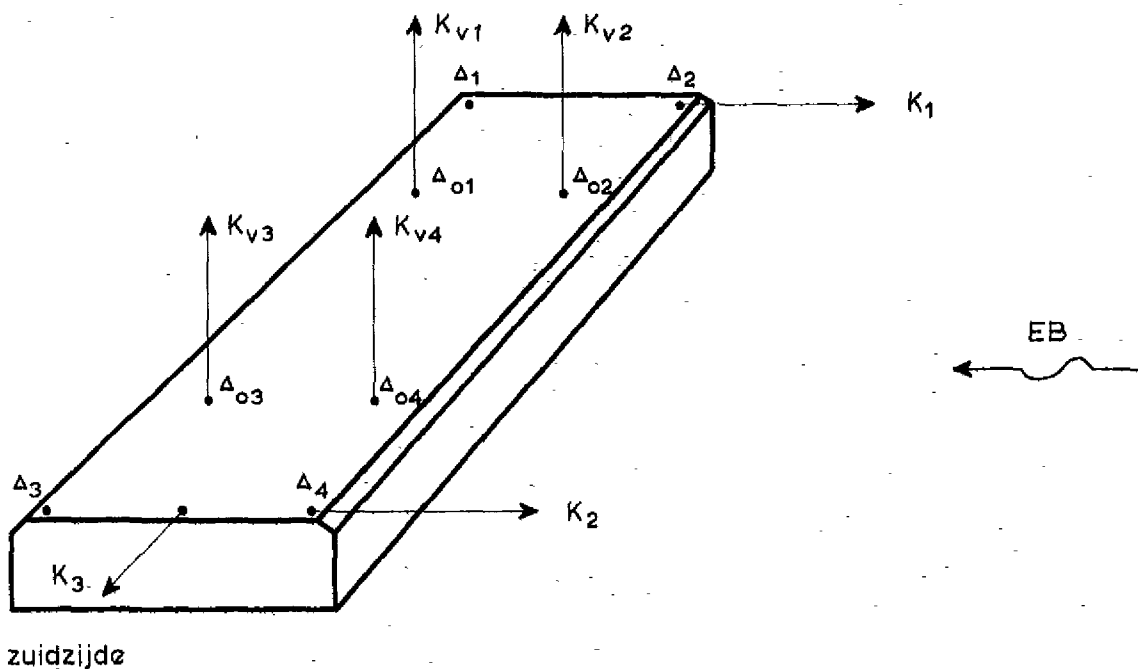
BOVENAANZICHT

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1739

FIG. 8.1

K, K_y : horizontale resp. verticale stroomkrachten
 Δ : verticale verplaatsingen door de stroming van het water

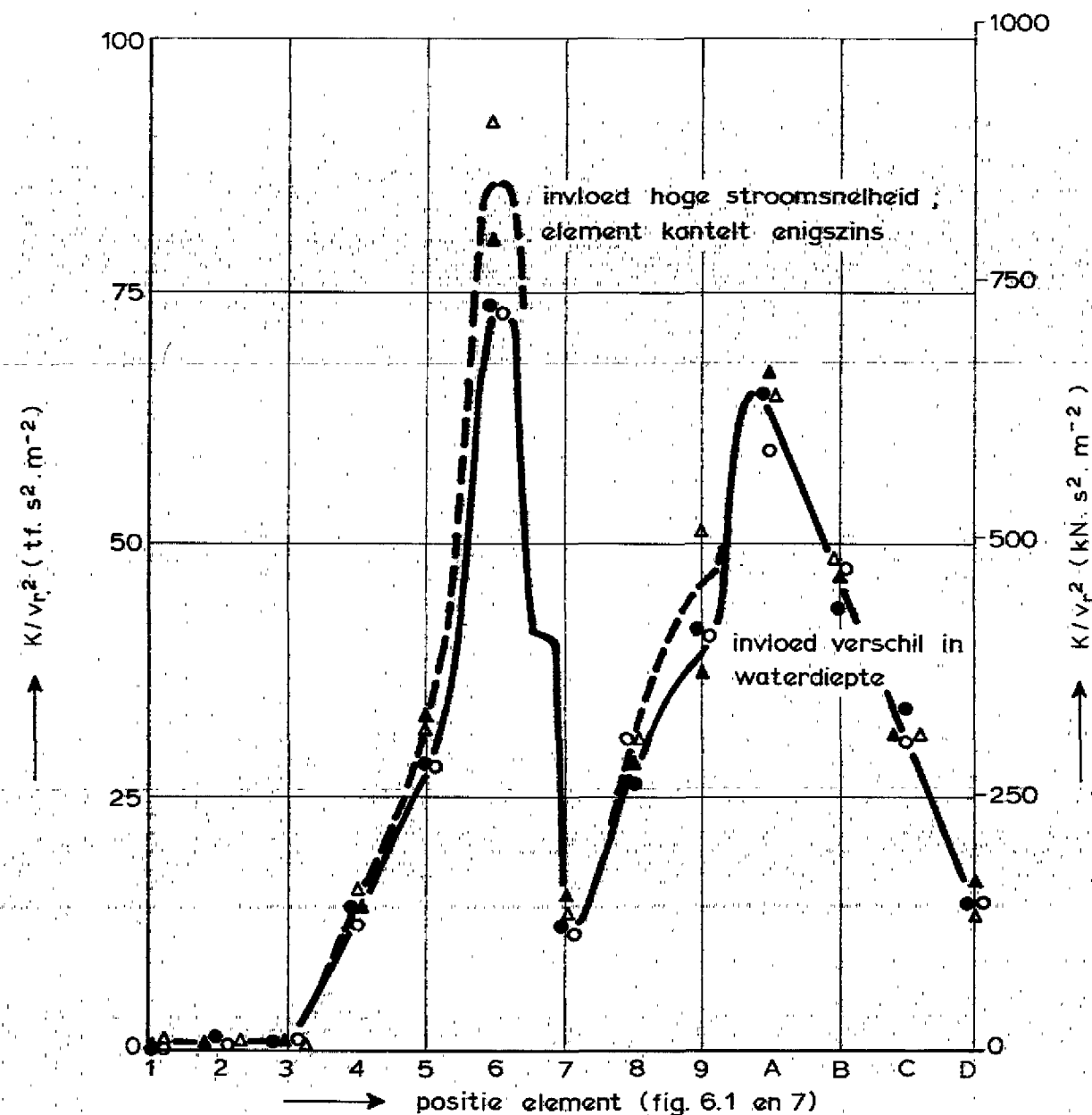


DEFINITIESCHETS VOOR DE KABELKRACHTEN EN
 VERPLAATSINGEN IN DE AFZINKFASE

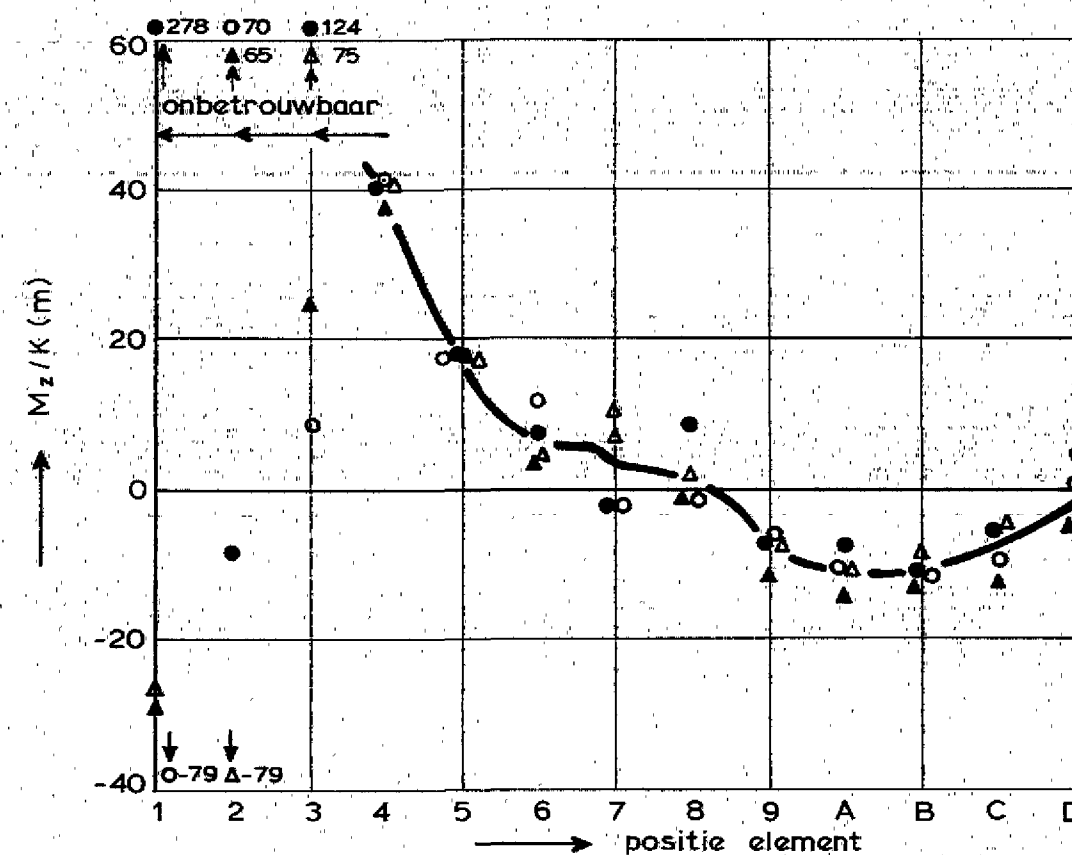
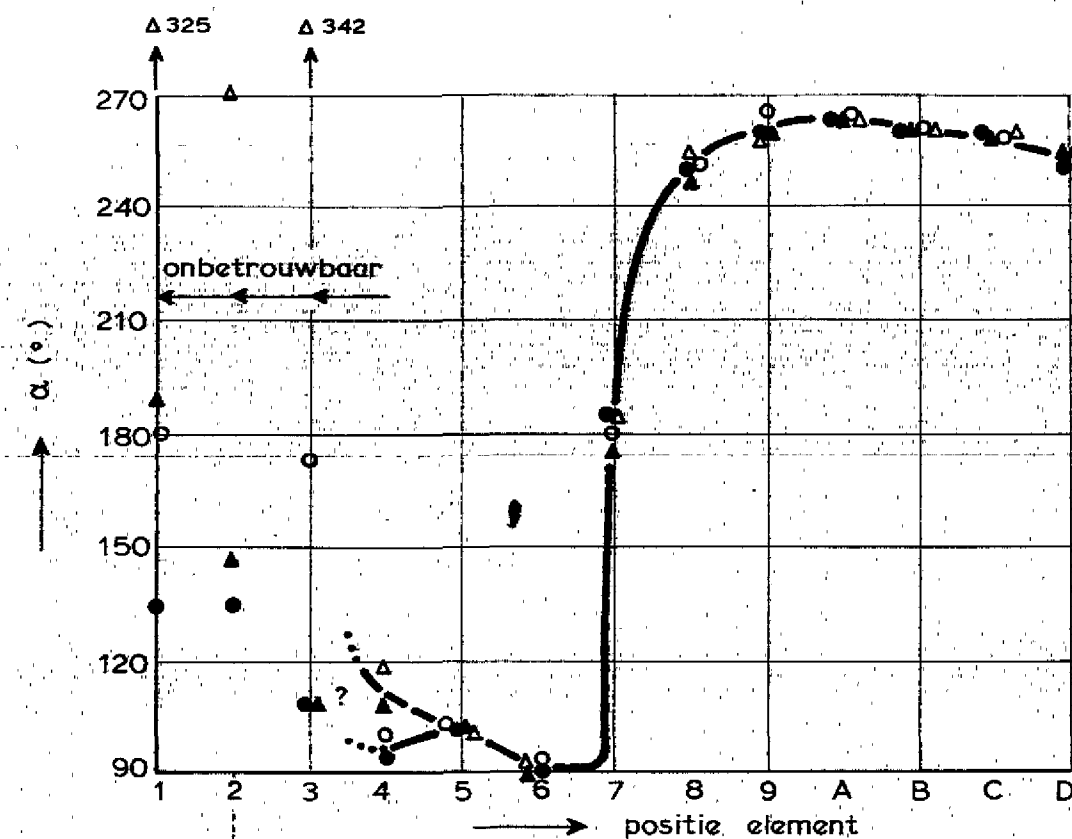
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1739

FIG. 8.2



symbool	proef	stroomsnelheid (v_r)	waterstand (h)
●	1+13	2,04/1,96 m/s	N.A.P. + 2,12 m
▲	2+14	2,47/2,46 m/s	+ 2,12 m
○	3+15	2,12/2,10 m/s	N.A.P. + 1,0 m
△	4+16	2,59/2,61 m/s	+ 1,0 m



α : hoek tussen stroomkrachtrichting en de lengteas naar de kopzijde van het element : rechtson is positief
 M_z : moment door stroomkracht K om de verticale as door het zwaartepunt van het element : rechtsondraaiend moment is positief
 v_r : maatgevende stroomsnelheid gemeten in referentiepunt E4 (fig. 6.1)

STROOMKRACHT OP TUNNELELEMENT ; GROOTTE, RICHTING EN AANGRIJPINGSPOINT

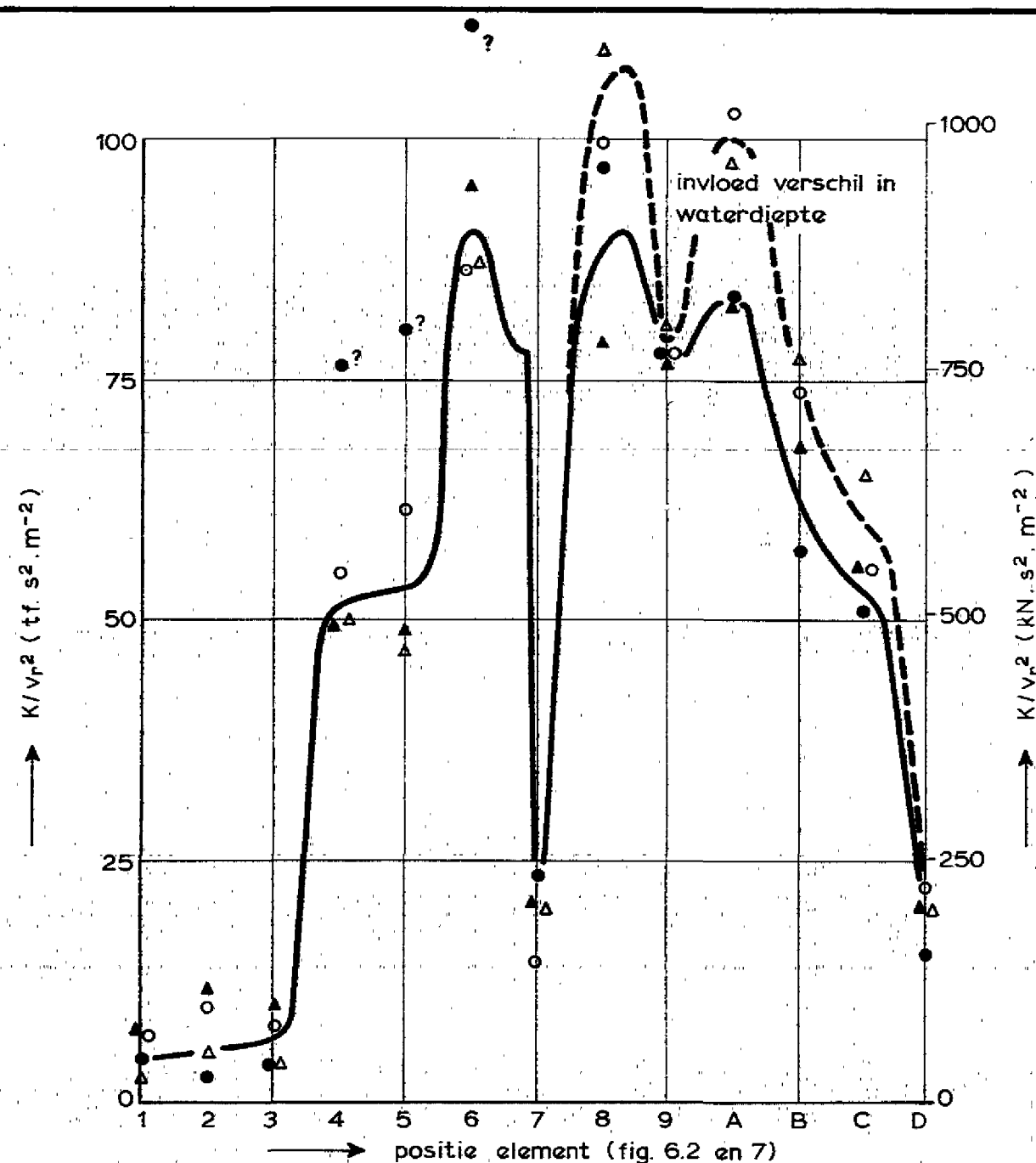
ELEMENT 4

VLOED

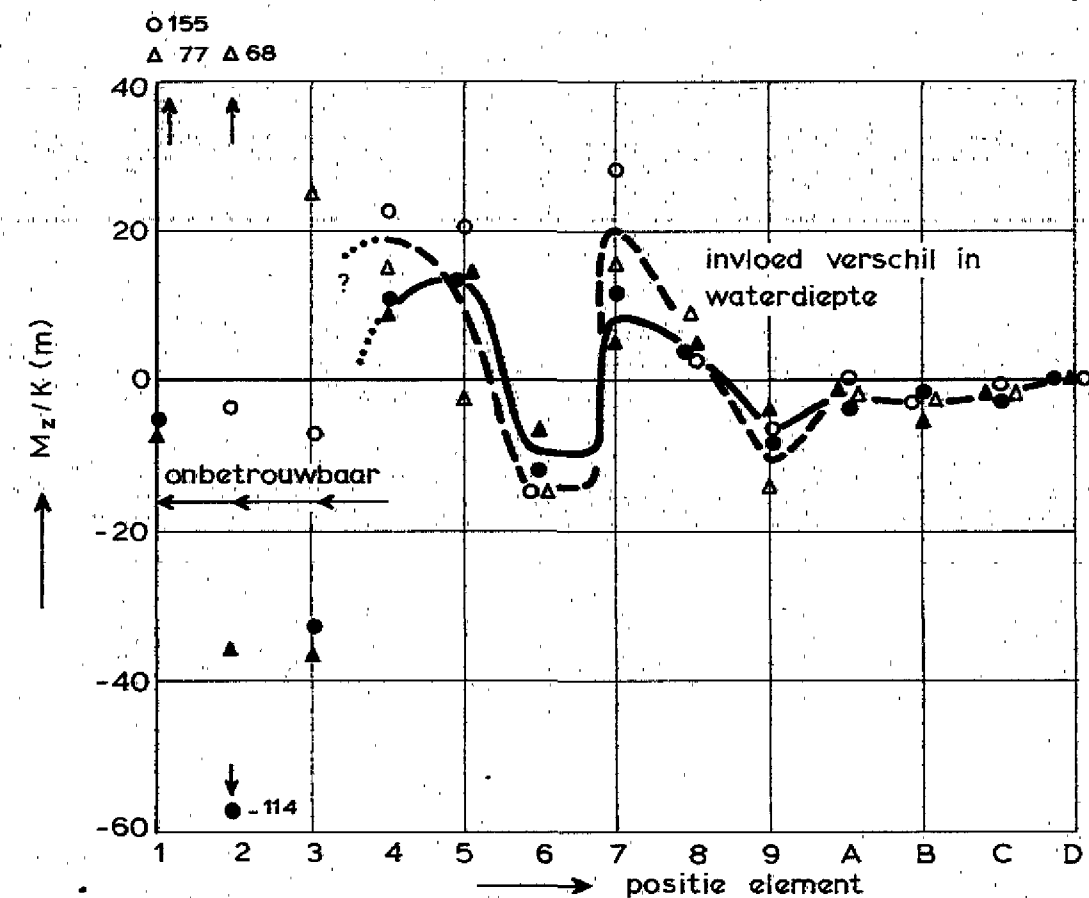
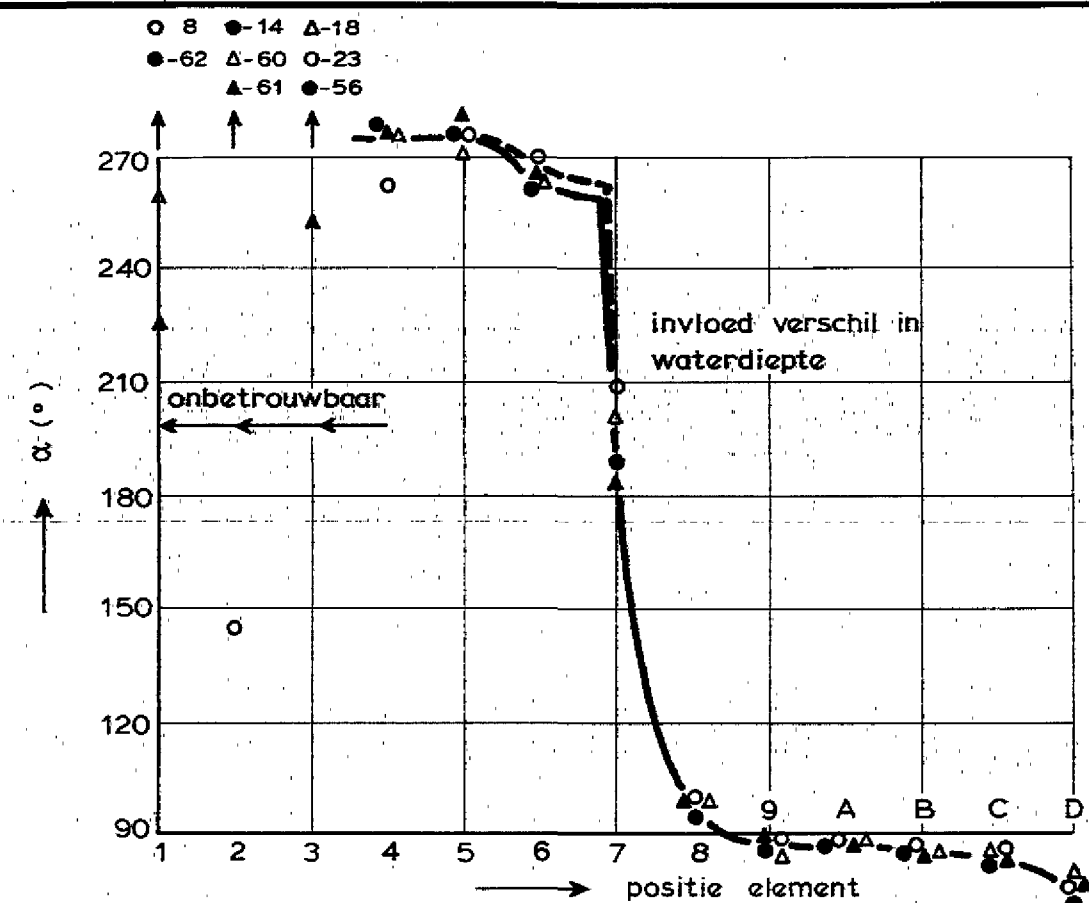
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1739

FIG. 9.1



symbool	proef	stroomsnelheid (v_r)	waterstand (h)
●	5+9	1,12/1,14 m/s	N.A.P. +0,2 m
▲	6+10	1,49/1,41 m/s	+0,2 m
○	7+11	1,23/1,16 m/s	N.A.P. -0,8 m
△	8+12	1,52/1,42 m/s	-0,8 m



α : hoek tussen stroomkrachtrichting en de lengteas naar de kopzijde van het element : rechtson is positief

M_z : moment door stroomkracht K om de verticale as door het zwaartepunt van het element : rechtsondraaiend moment is positief

v_r : maatgevende stroomsnelheid gemeten in referentiepunt D4 (fig 6.2)

STROOMKRACHT OP TUNNELEMENT ; GROOTTE, RICHTING EN AANGRIJPINGSPUNT

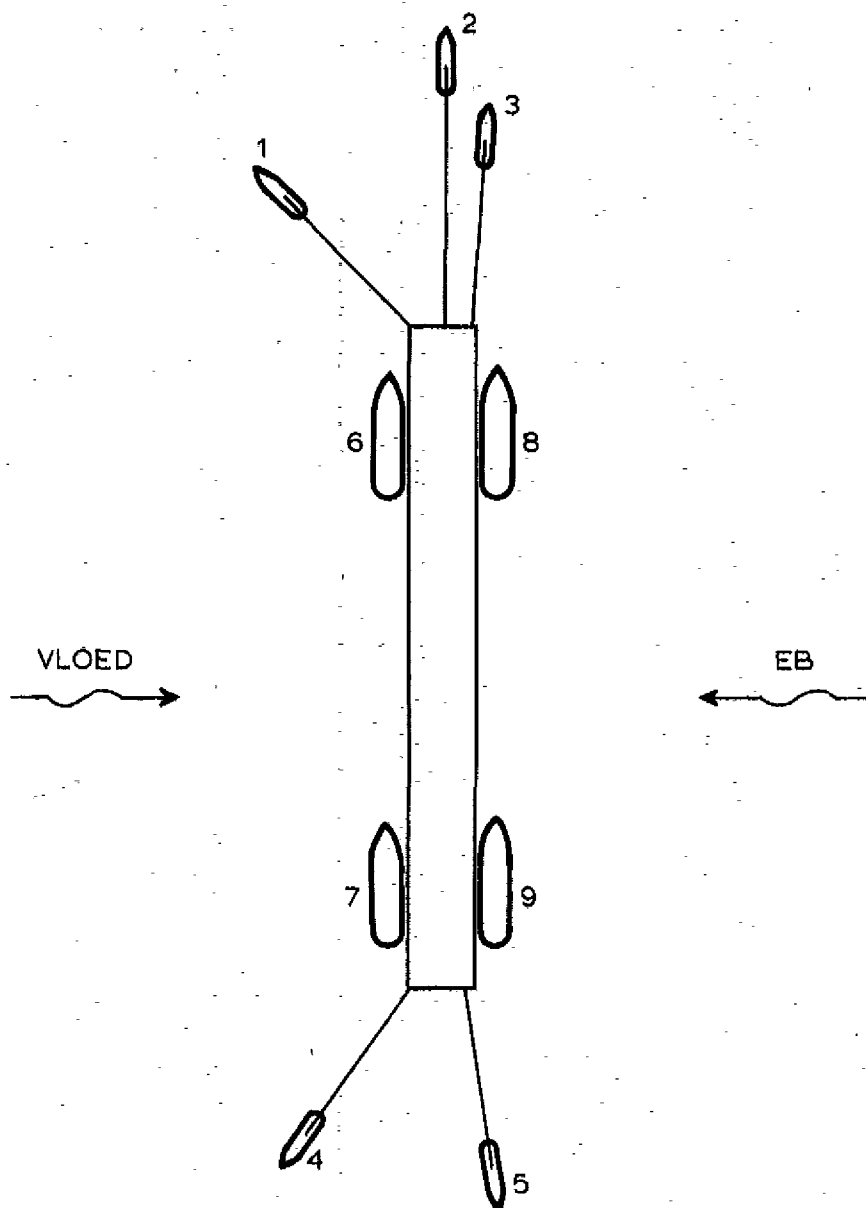
ELEMENT 4

EB

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1739

FIG. 9.2



- 1 t/m 5 sleepboten met vermogen van 900 pk (paalkracht 12,5 tf)
- 6 t/m 9 sleepboten met voith-schneiderschroef en een vermogen van 2800 pk (paalkracht 33,5 tf)

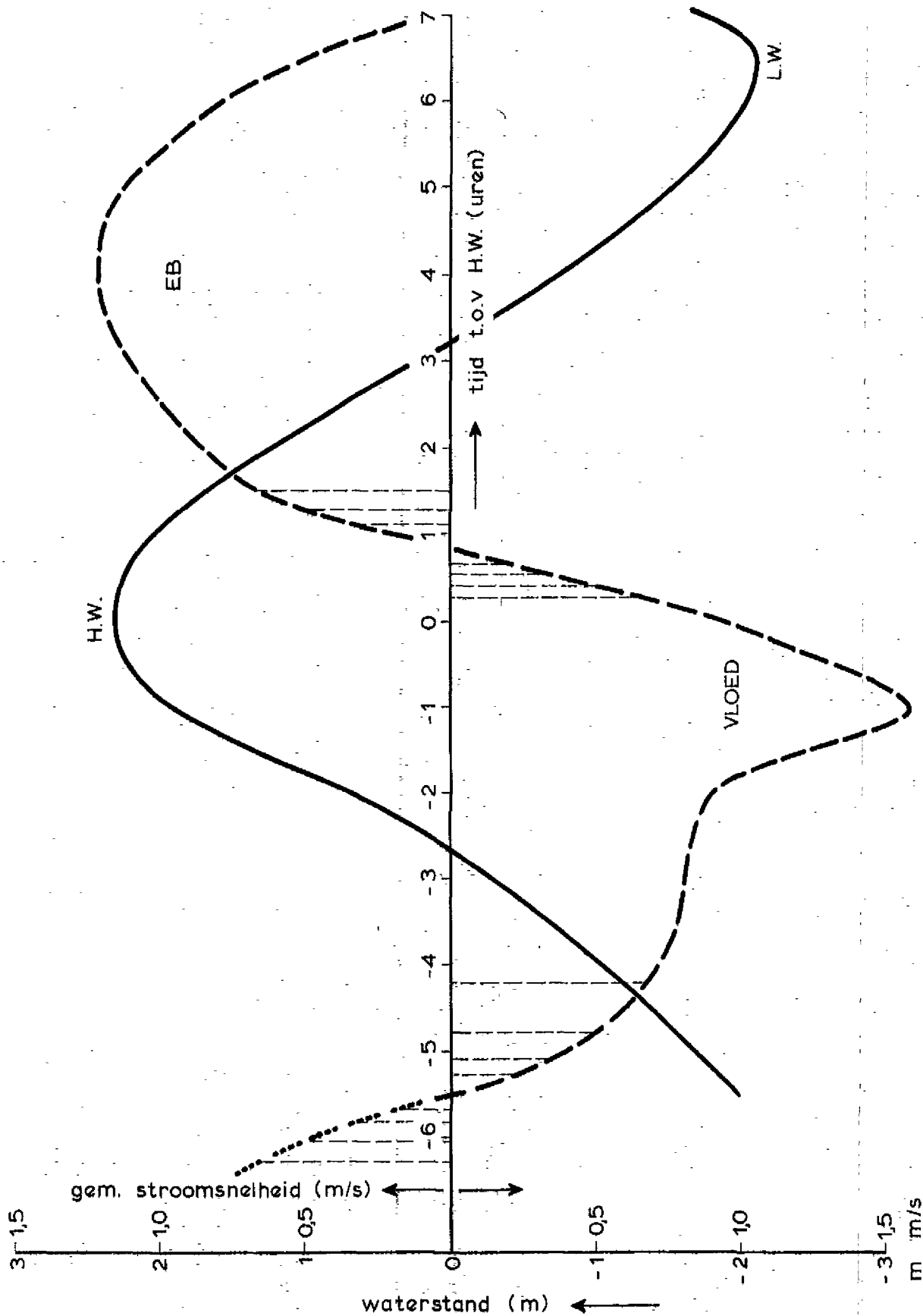
KONVOOI VOOR HET VERSLEPEN VAN DE
TUNNELEMENTEN (AANGENOMEN)

SCHAAL 1 : 2000

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1739

FIG. 10



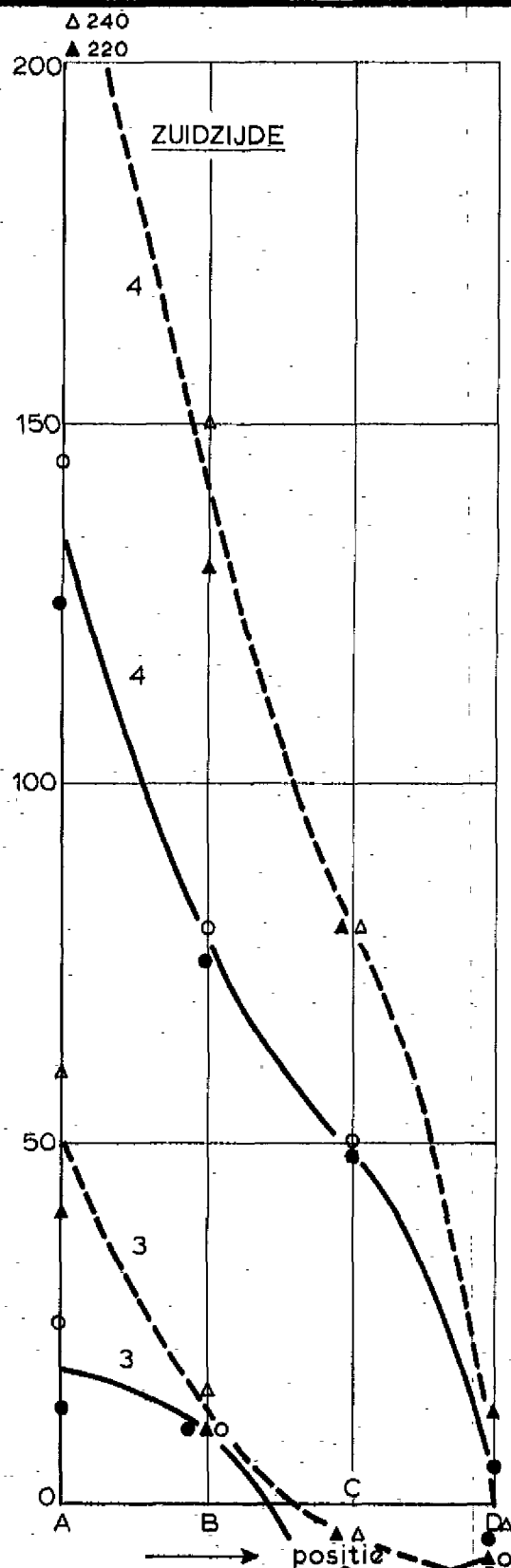
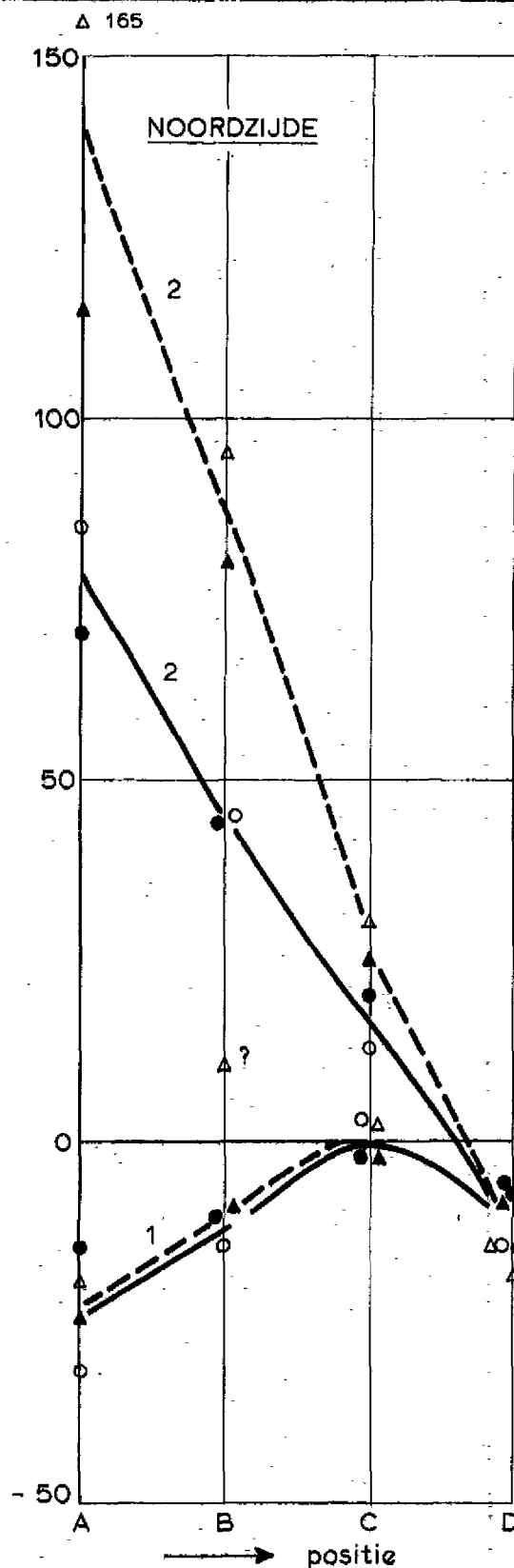
N.B. getijfactor = getijverschil / gemiddeld getijverschil

GETIJ TER PLAATSE VAN DE TUNNELSLEUF
(GETIJFAKTOR 1,05)

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1739

FIG. 11



1. even nummers aan bovenstroomse zijde van het element
2. de ogenschijnlijke invloed van de waterdiepte is het gevolg van verschillen in stroomsnelheden (tabel 3.2)
3. + is toename en - is afname van de kabelkracht

$v_r \backslash h$	+2,12	+1,00
2,03	●	○
2,54	▲	△

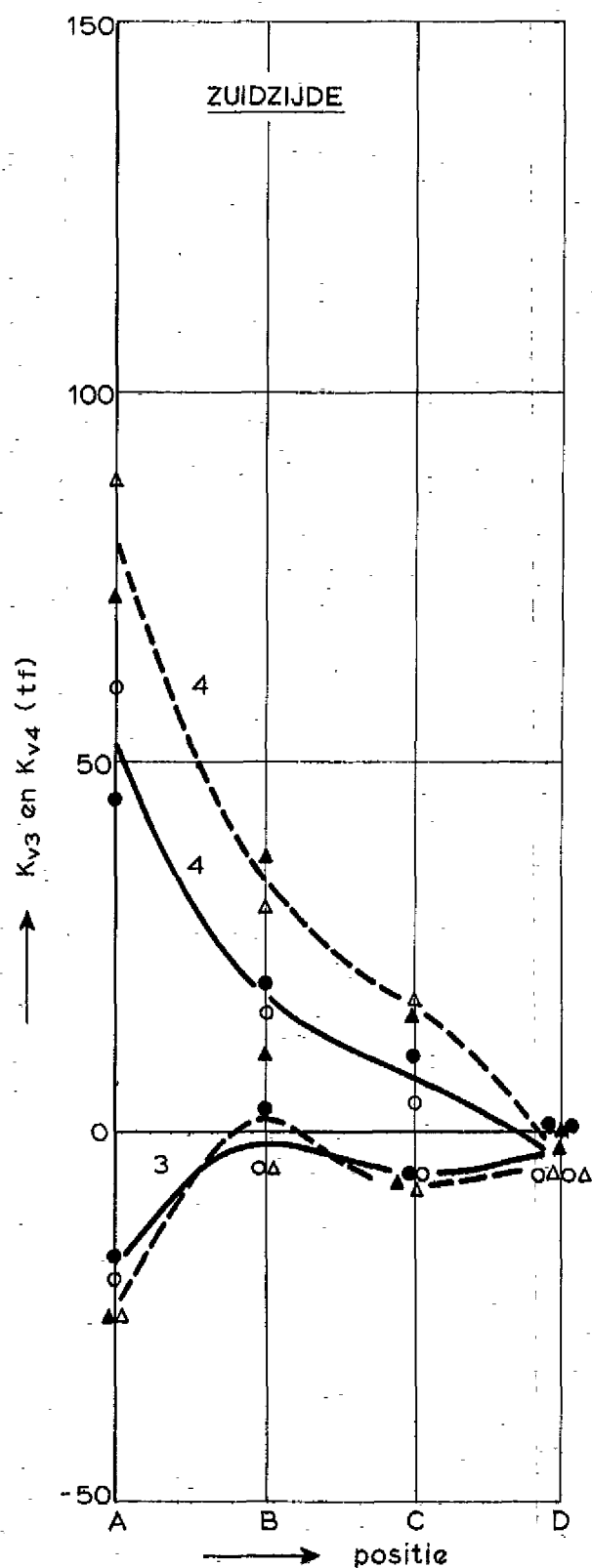
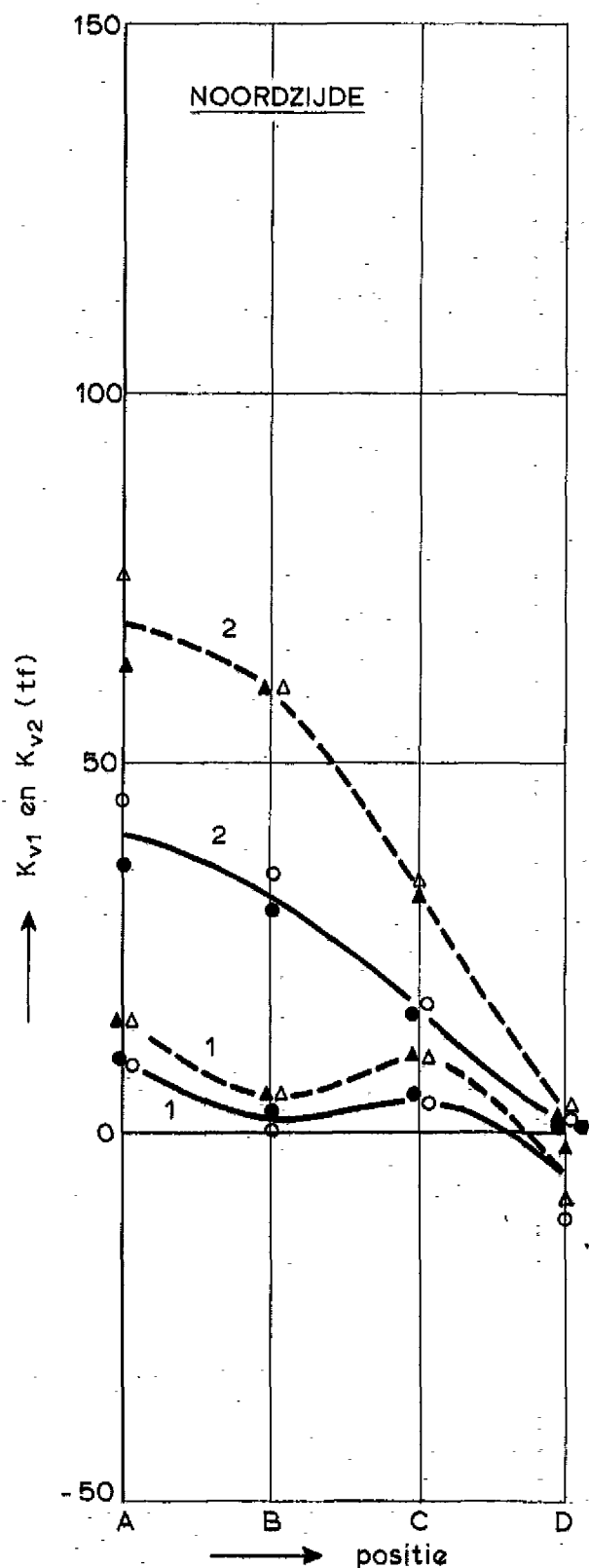
VERTIKALE KRACHTEN AFZINKFASE
TUNNELELEMENT 4

VLOED

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1739

FIG. 12.1



1. even nummers aan bovenstroomse zijde van het element
 2. + is toename en - is afname van de kabelkracht

v_r	h	+0,20	-0,80
1,15		●	○
1,42		▲	△

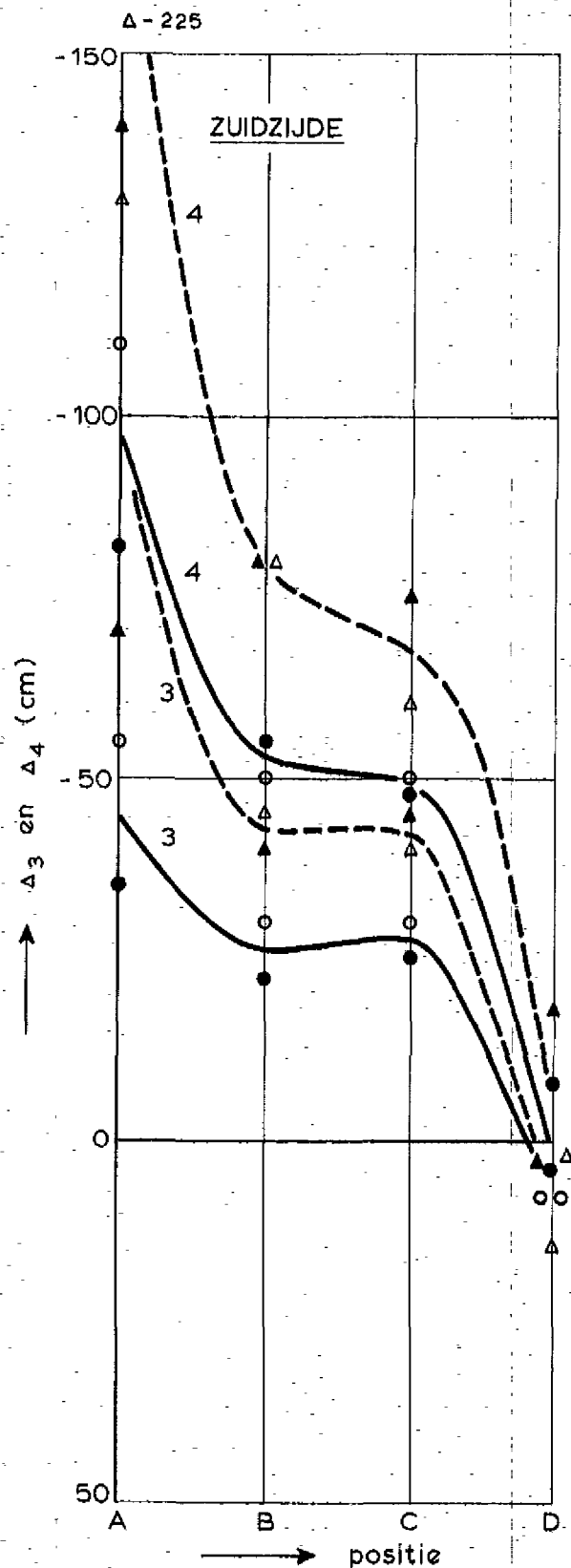
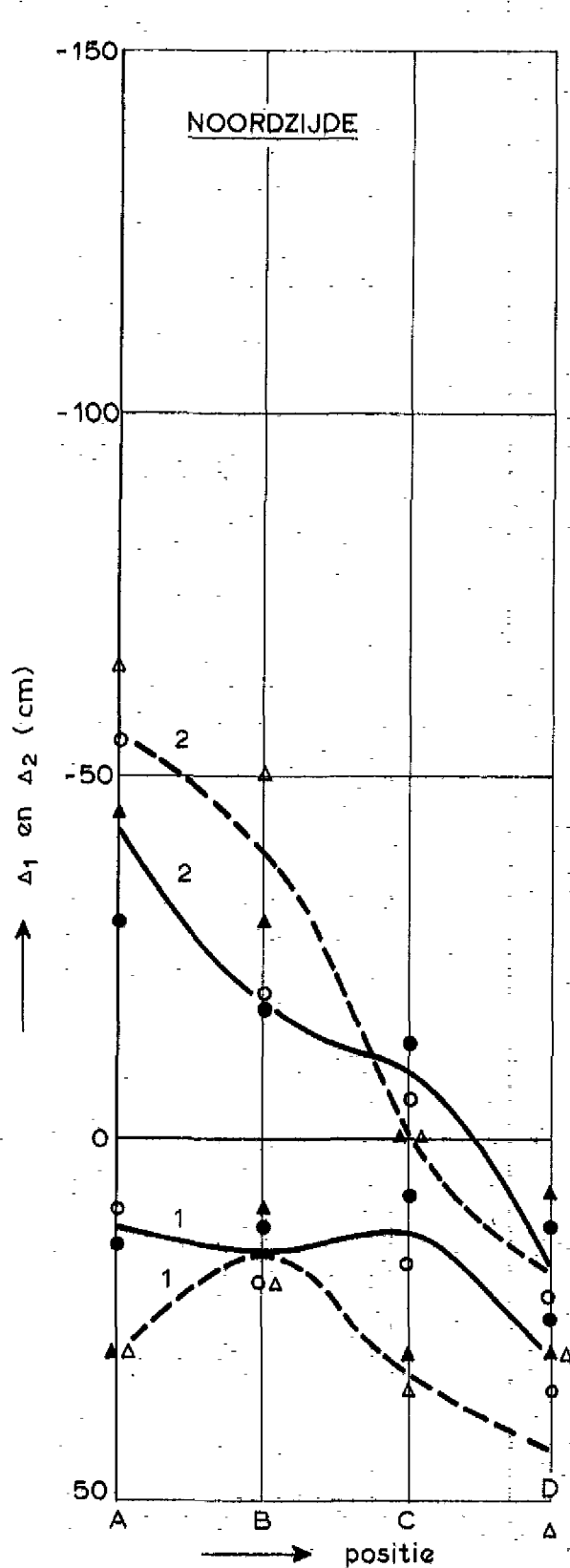
VERTIKALE KRACHTEN AFZINKFASE
 TUNNELELEMENT 4

EB

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1739

FIG. 12.2



1. even nummers aan bovenstroomse zijde van het element
2. de ogenschijnlijke invloed van de waterdiepte is het gevolg van verschillen in stroomsnelheden (tabel 3.2)
3. + is stijgen en - is zakken

$v_r \backslash h$	+2,12	+1,00
2,03	●	○
2,54	▲	△

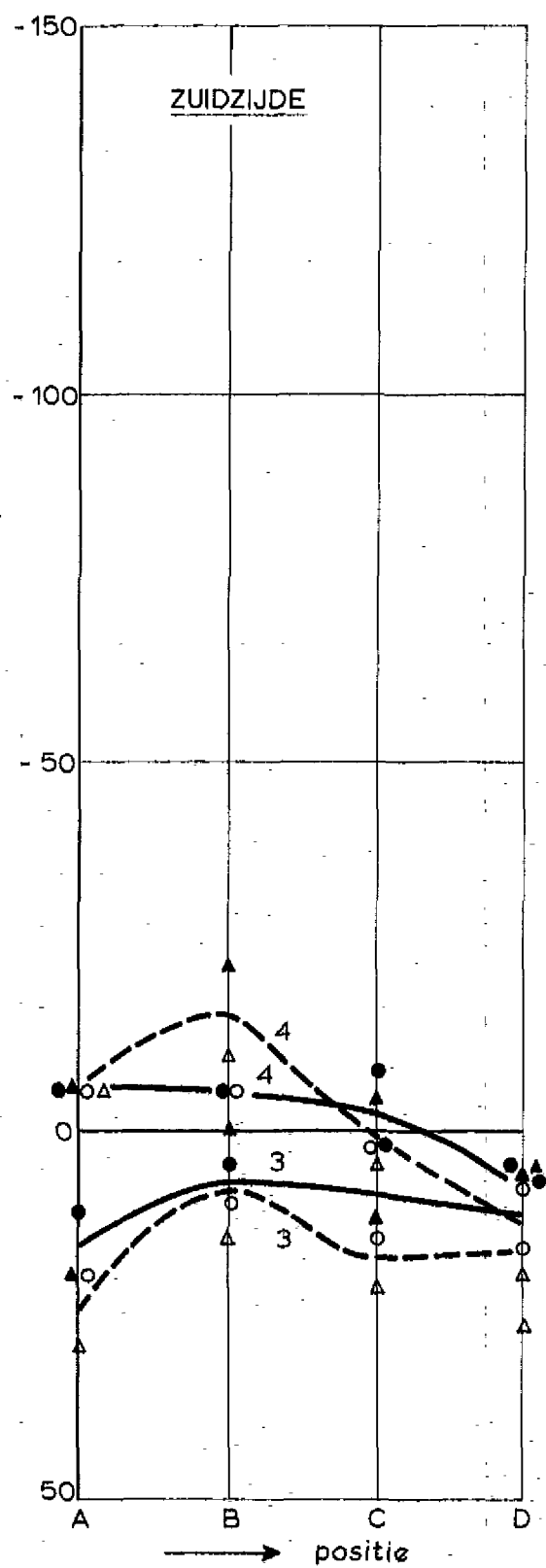
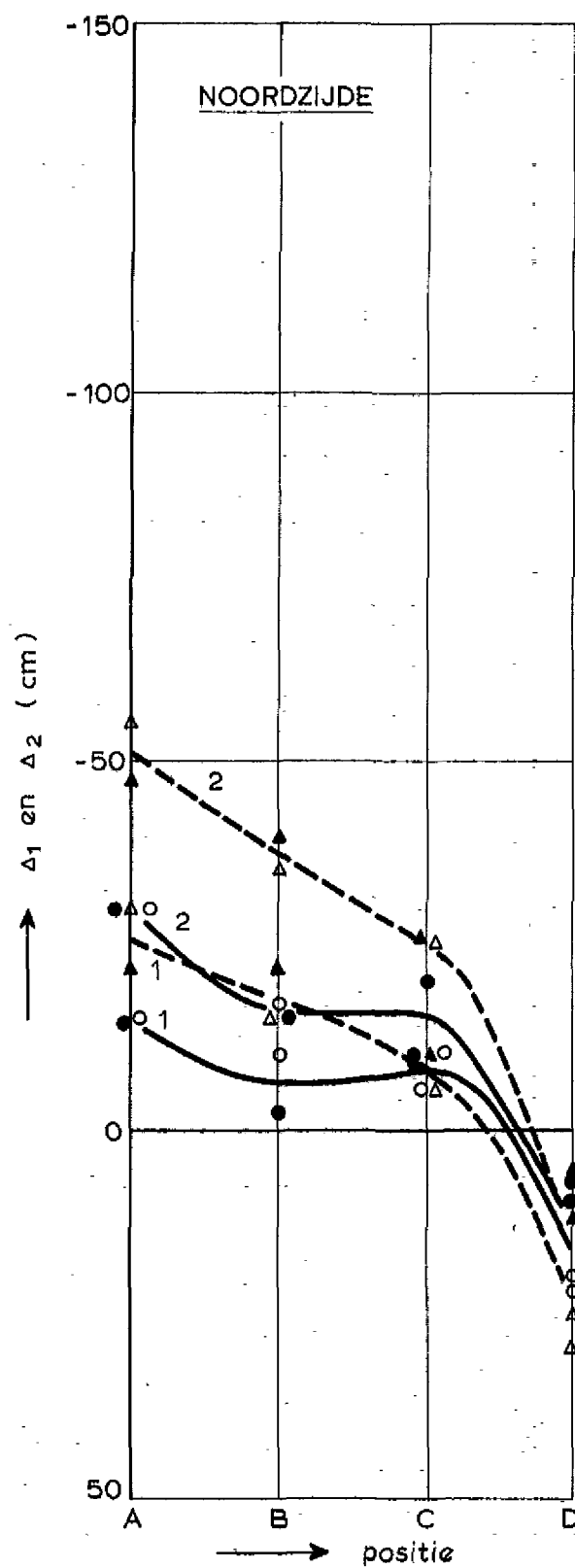
VERTIKALE VERPLAATSINGEN AFZINKFASE
TUNNELEMENT 4

VLOED

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1739

FIG. 13.1



1. even nummers aan bovenstroomse zijde van het element
 2. + is stijgen en - is zakken

$v_r \backslash h$	+0,20	-0,80
1,15	●	○
1,42	▲	△

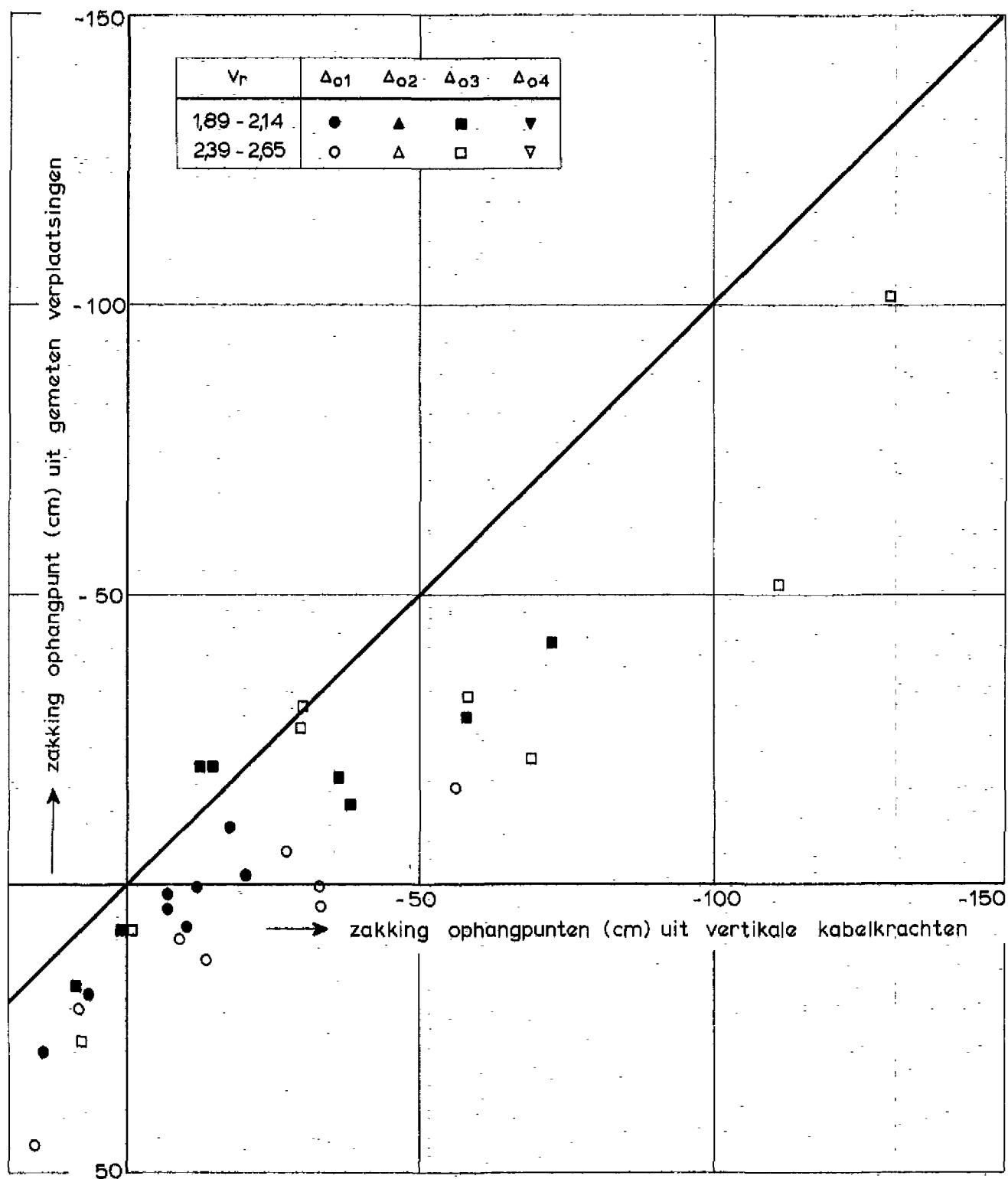
VERTIKALE VERPLAATSINGEN AFZINKFASE
 TUNNELELEMENT 4

EB

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1739

FIG. 13.2



VERBAND TUSSEN VERTIKALE KRACHTEN
EN VERPLAATSINGEN

VLOED

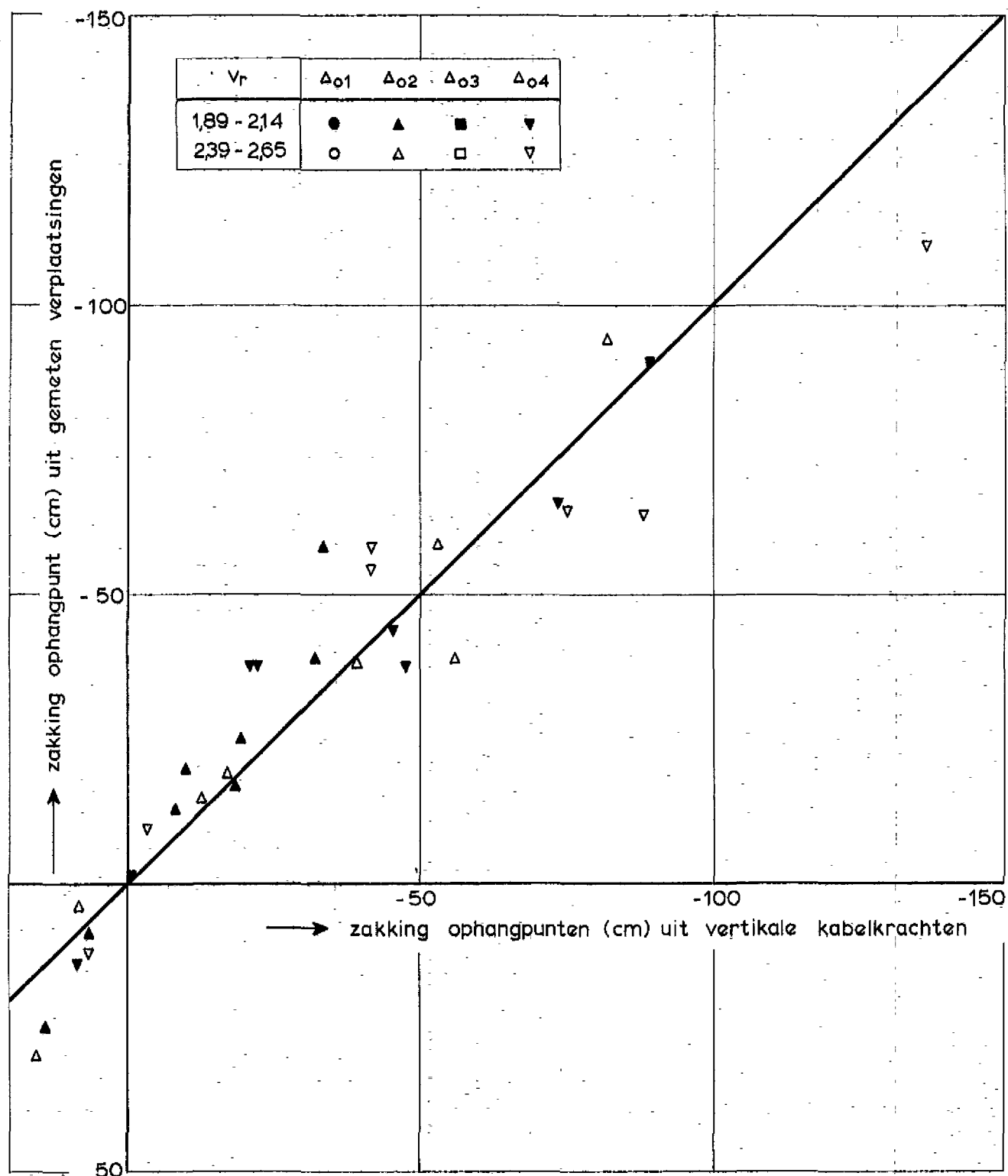
Δ_{01} en Δ_{03}

ELEMENT 4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1739

FIG. 14.1



VERBAND TUSSEN VERTIKALE KRACHTEN
EN VERPLAATSINGEN

VLOED

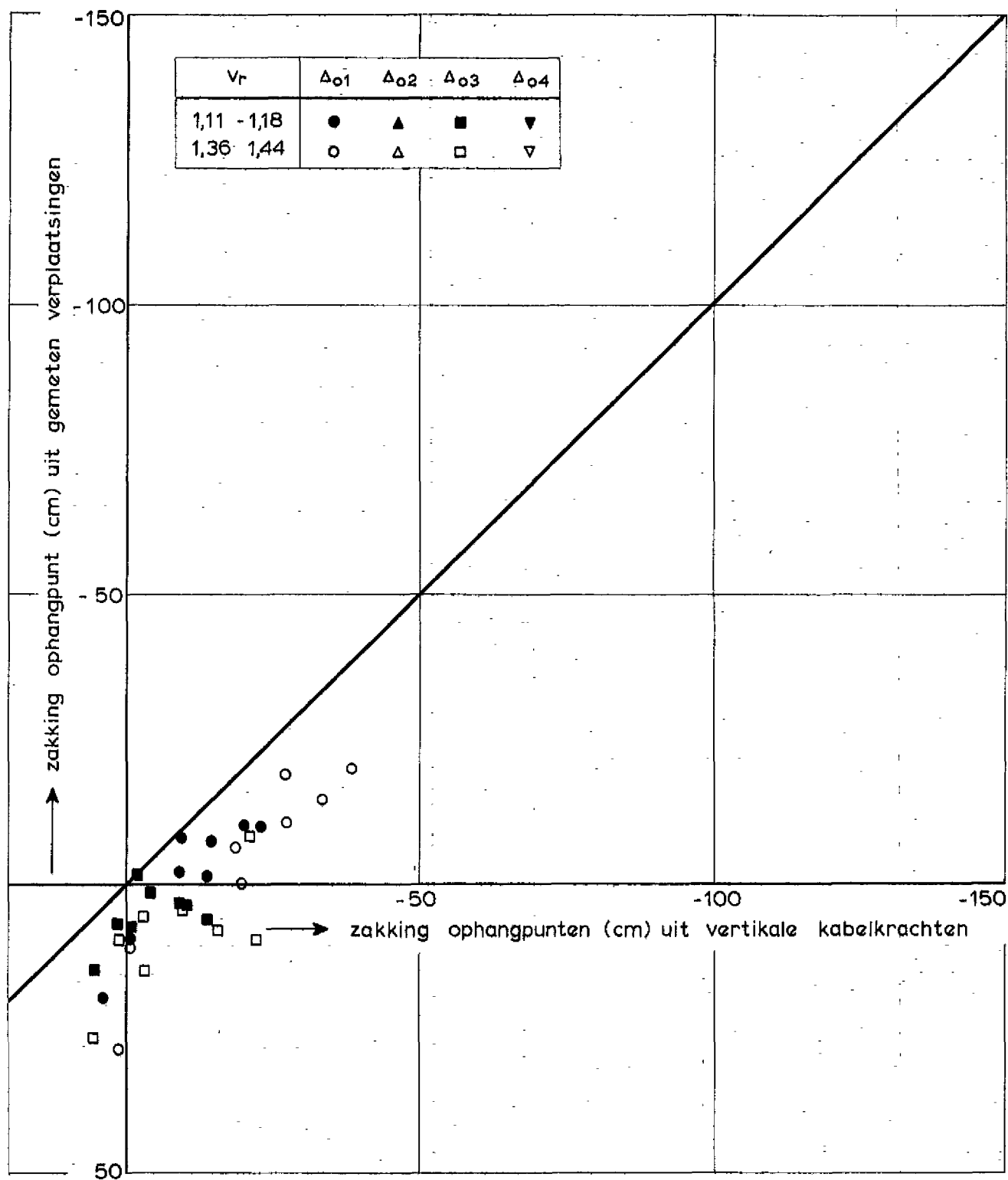
Δ_{o2} en Δ_{o4}

ELEMENT 4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1739

FIG. 14.2



VERBAND TUSSEN VERTIKALE KRACHTEN
EN VERPLAATSINGEN

EB

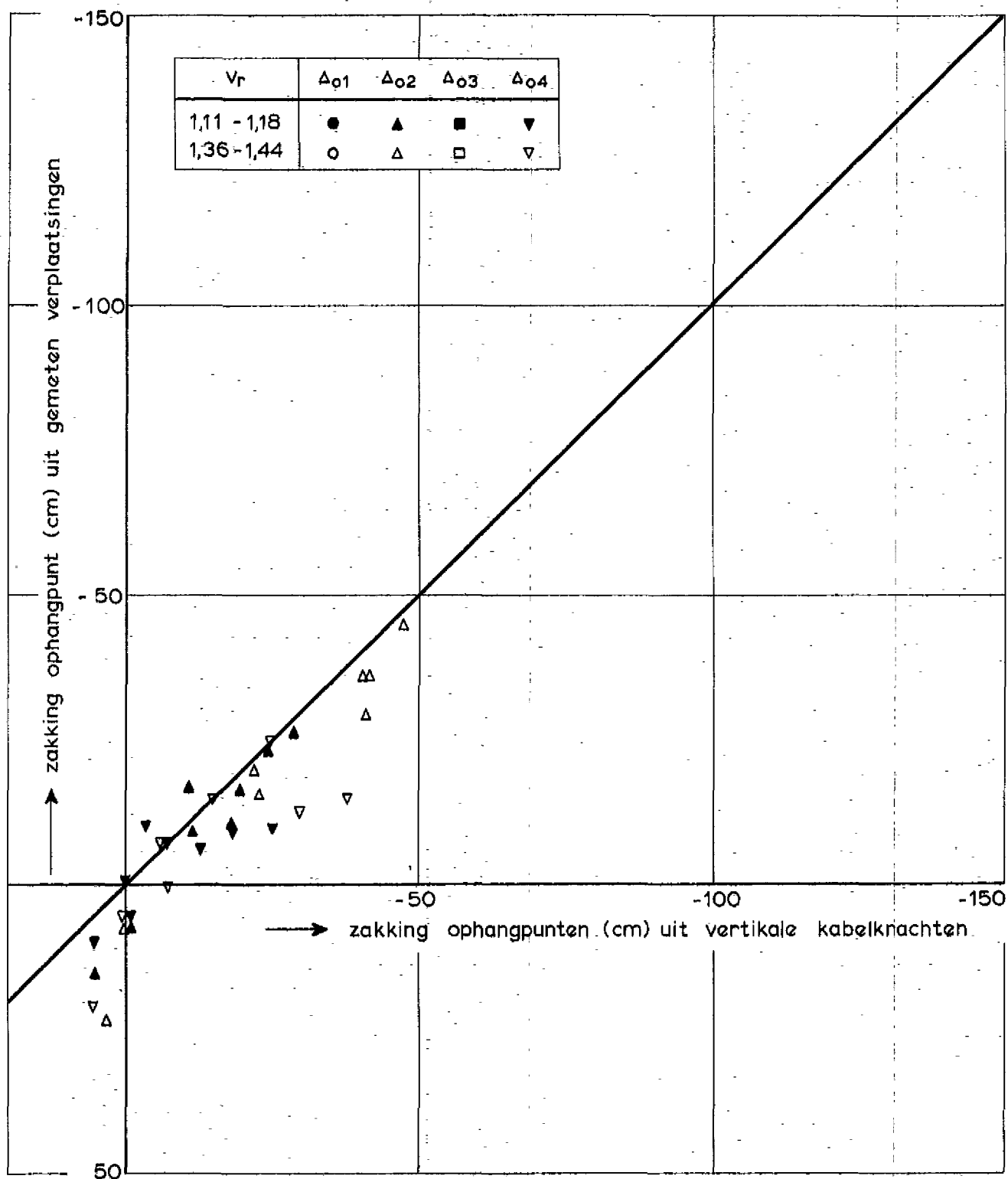
Δ_{o1} en Δ_{o3}

ELEMENT 4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1739

FIG. 14.3



VERBAND TUSSEN VERTIKALE KRACHTEN
EN VERPLAATSINGEN

EB

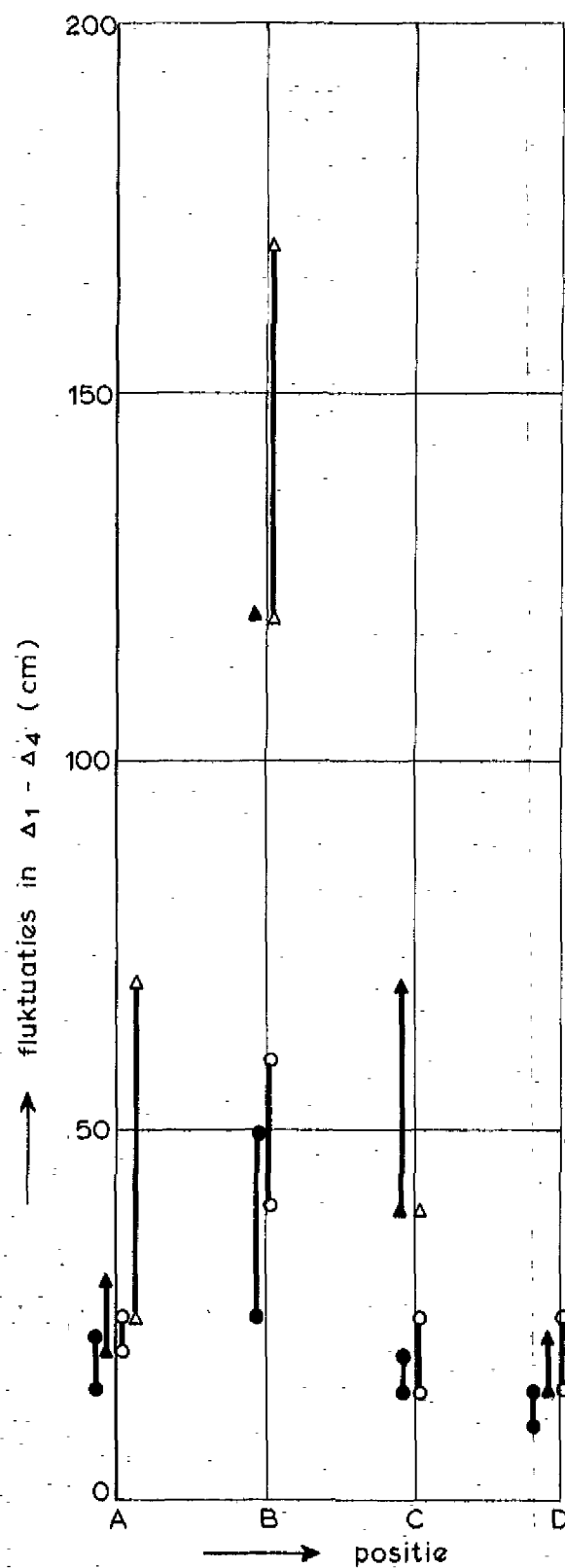
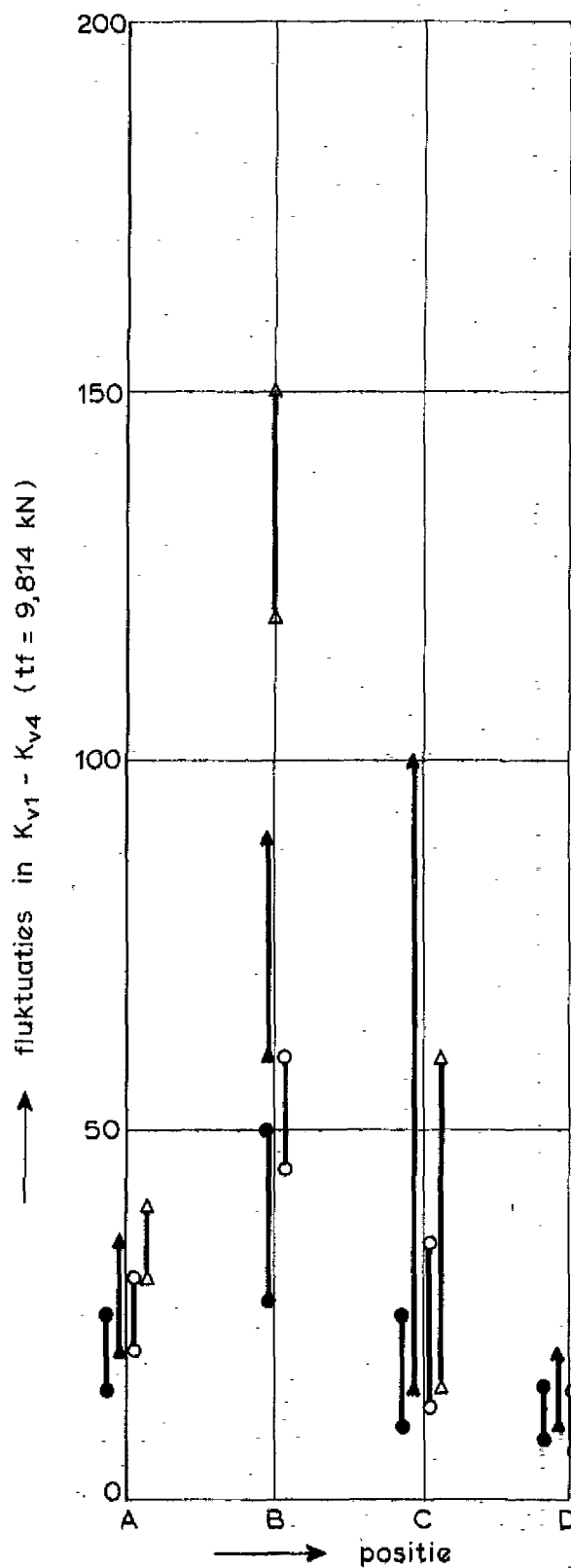
Δ_{o2} en Δ_{o4}

ELEMENT 4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1739

FIG. 14.4



v_r	h	+2,12	+1,00
2,03	●	○	
2,54	▲	△	

GROOTTE VAN FLUKTUATIES IN VERTIKALE
KRACHTEN EN VERPLAATSINGEN IN AFZINKFASE

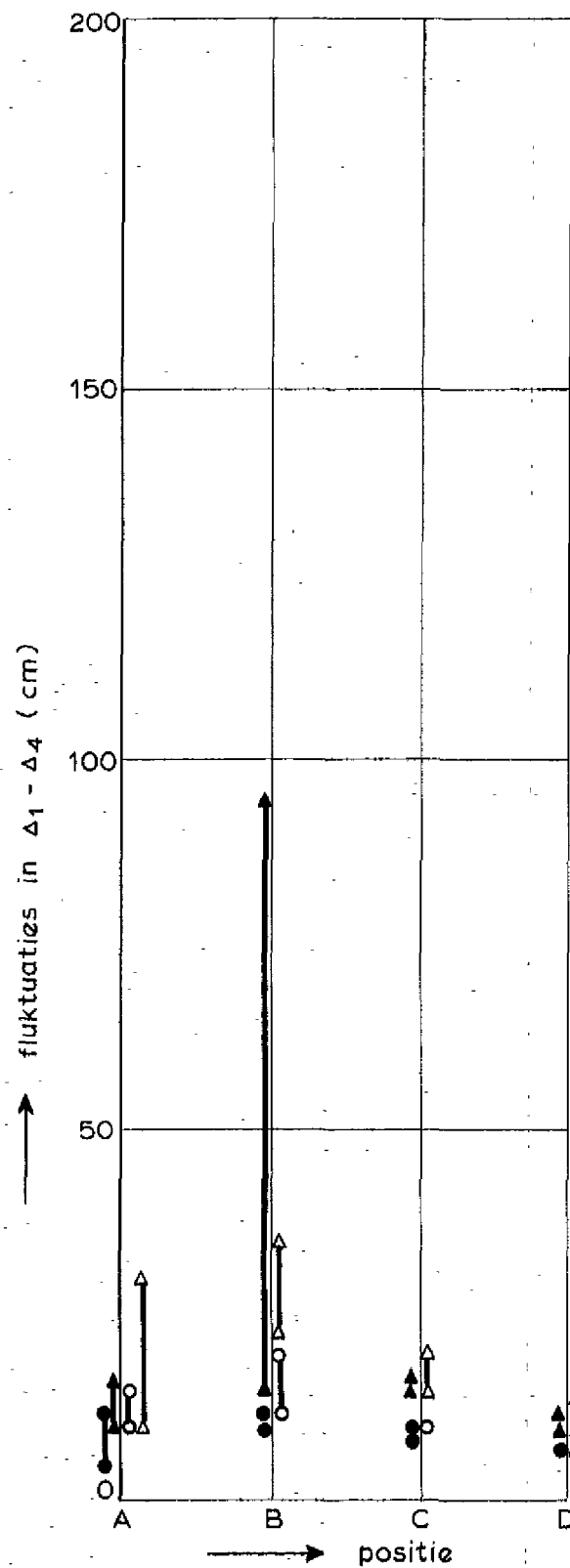
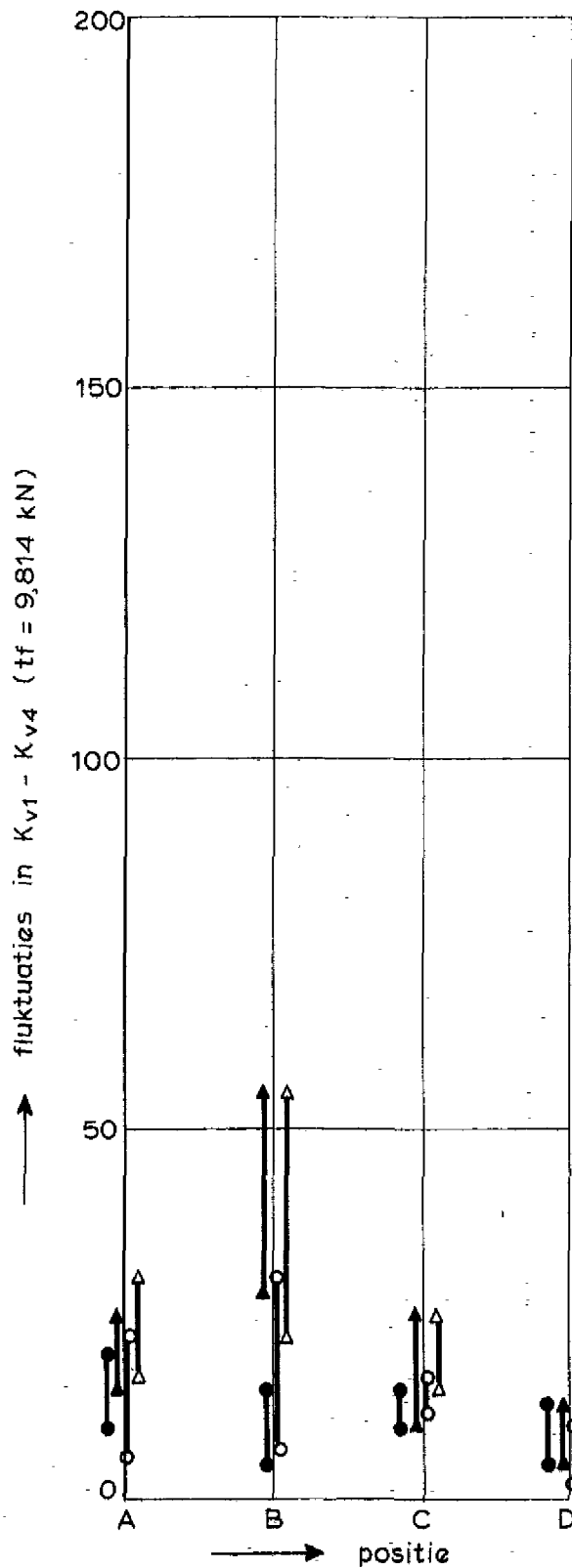
VLOED

ELEMENT 4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1739

FIG. 15.1



v_r	h	+0,20	-0,80
1,15		●	○
1,42		▲	△

GROOTTE VAN FLUKTUATIES IN VERTIKALE
KRACHTEN EN VERPLAATSINGEN IN AFZINKFASE

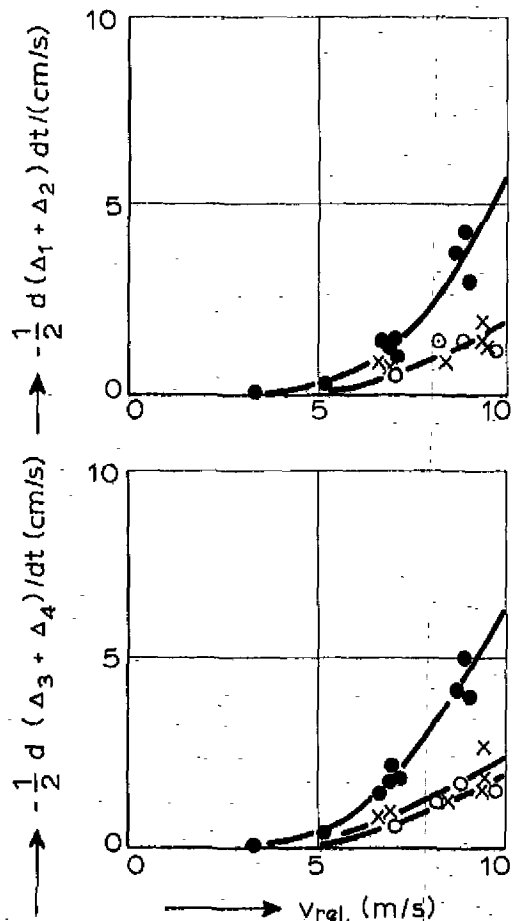
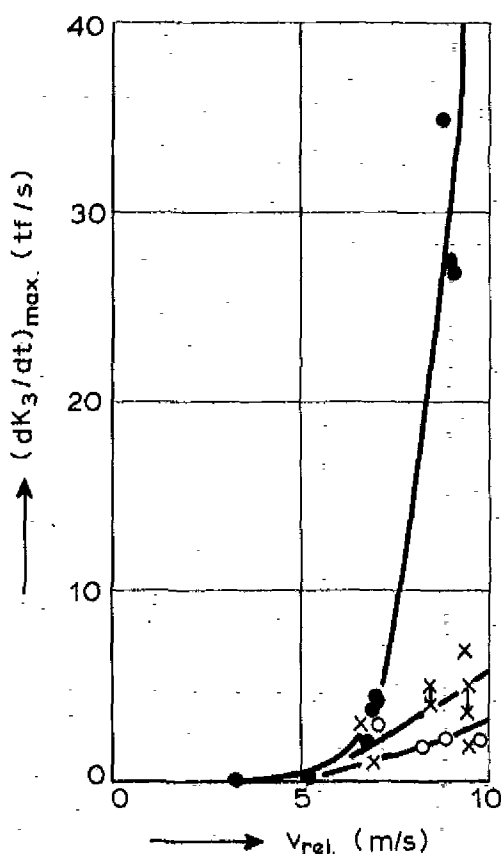
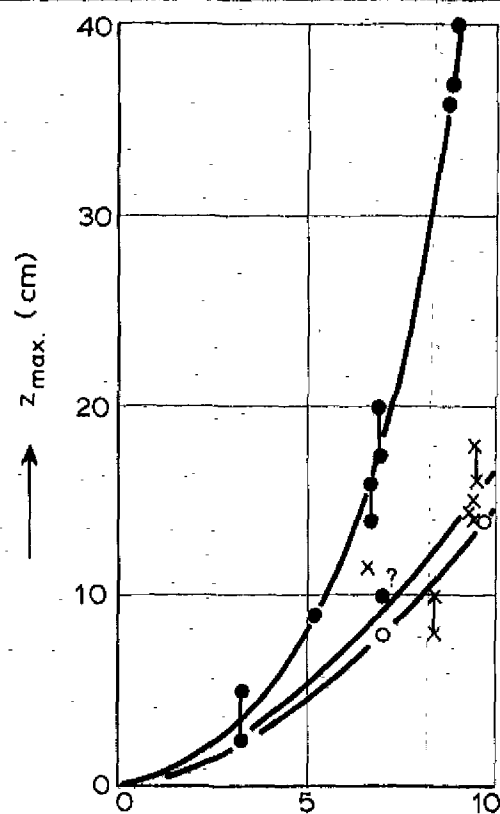
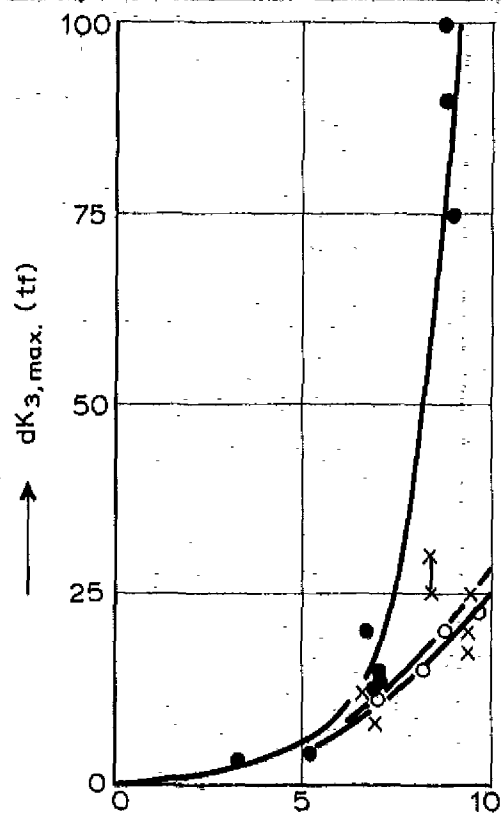
EB

ELEMENT 4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1739

FIG. 15.2



● x o passeerafstand schip - kop tunelelement respectievelijk 90, 260 en 525 m

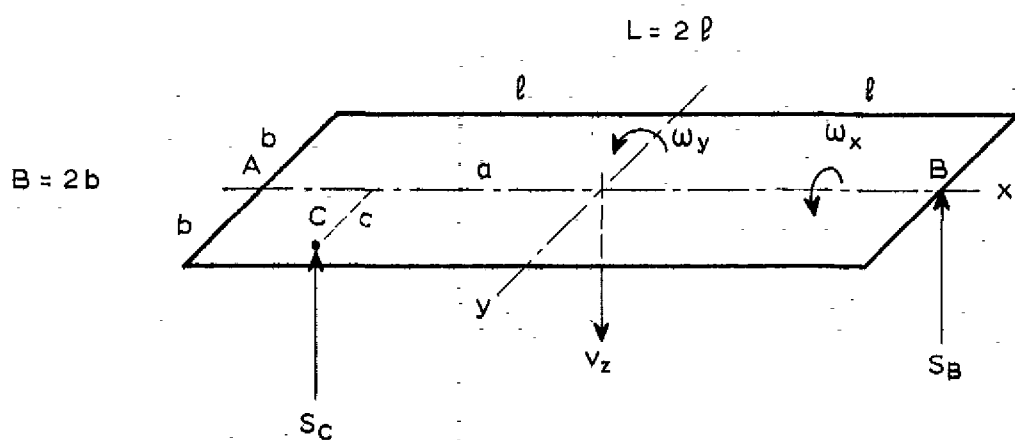
WATERSPIEGELDALING BIJ EN BEWEGINGEN VAN
ELEMENT 4 NABIJ ZIJN EINDPOSITIE DOOR EEN
PASSEREND ZEE SCHIP

SCHIP : ca.
70.000 D.W.T.

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1739

FIG. 16



$$\text{massa} = m + m_w \approx 3,4 \text{ m}$$

$$v_B = v_z - l\omega_y$$

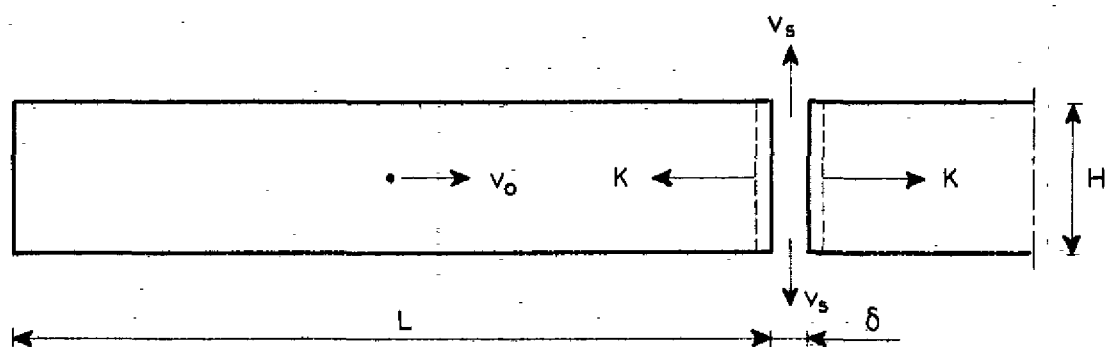
$$m = \rho LBH$$

$$v_C = v_z + a\omega_y + c\omega_x$$

situaties a en b : alleen stoot in B ; S_C bestaat niet

situaties c en d : stoot in punt C en reactiestoot in punt B

A - VERTIKALE STOOTBELASTINGEN



$$\text{massa} = m + m_w \approx 1,1 \text{ m}$$

$$p = v_s^2 / 2g$$

$$K = pg \rho BH$$

$$m = \rho LBH$$

$$v_o = (dK_3 / dt)_{\text{max.}} / c$$

$$c = \text{veerconstante}$$

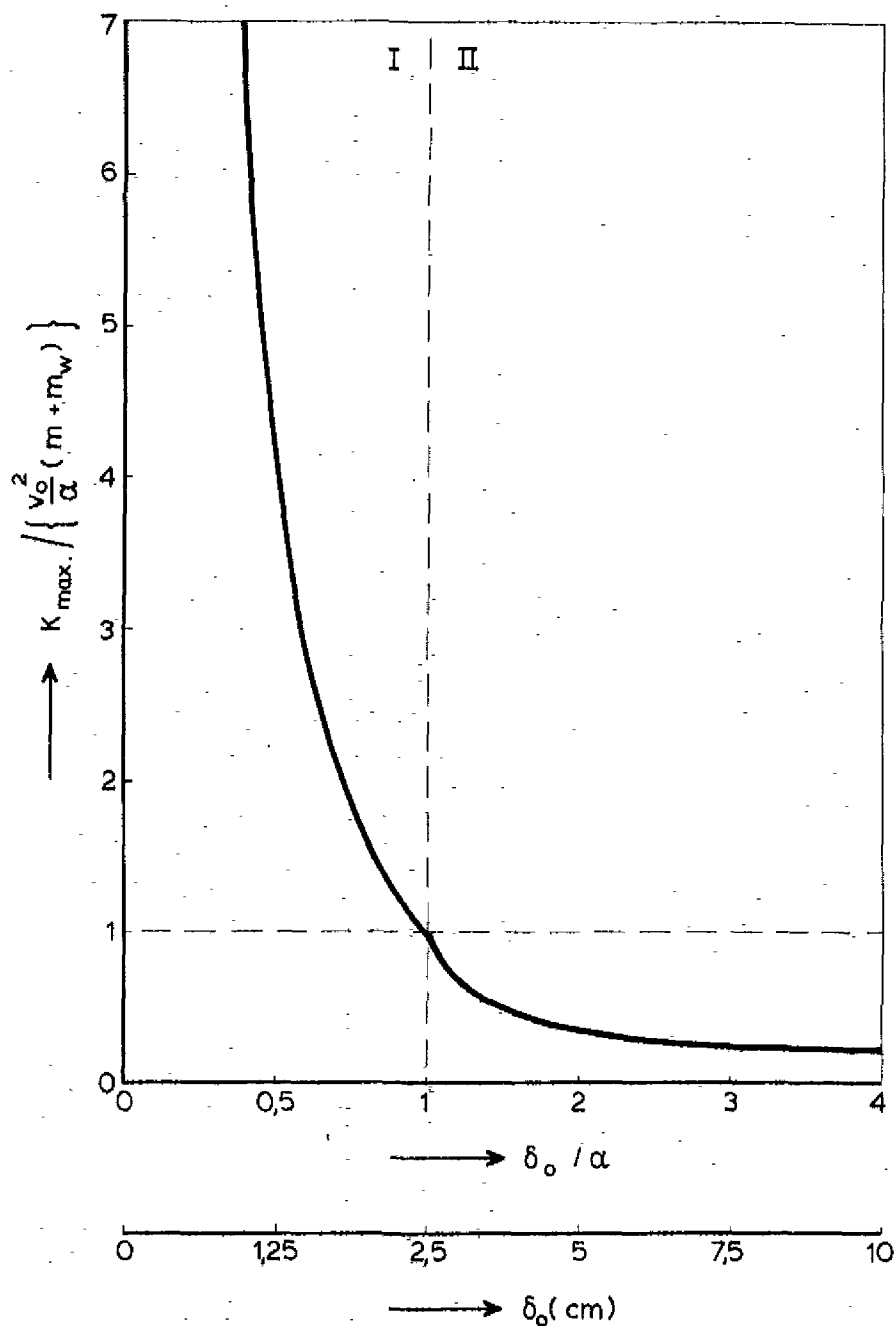
B - BELASTING KOPSCHOTTEN DOOR DRUKSTOOT IN ZINKVOEG

DEFINITIESCHETS STOOTBELASTINGEN

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1739

FIG. 17



$$\text{konstante } \alpha = \rho B^3 H^3 / \left\{ 8(m + m_w)(B + H)^2 \right\} = 0,025 \text{ m}$$

$$\text{gebied I : } K_{\max} = \frac{v_o^2}{\alpha} (m + m_w) \left(\frac{\alpha}{\delta_o} \right)^2$$

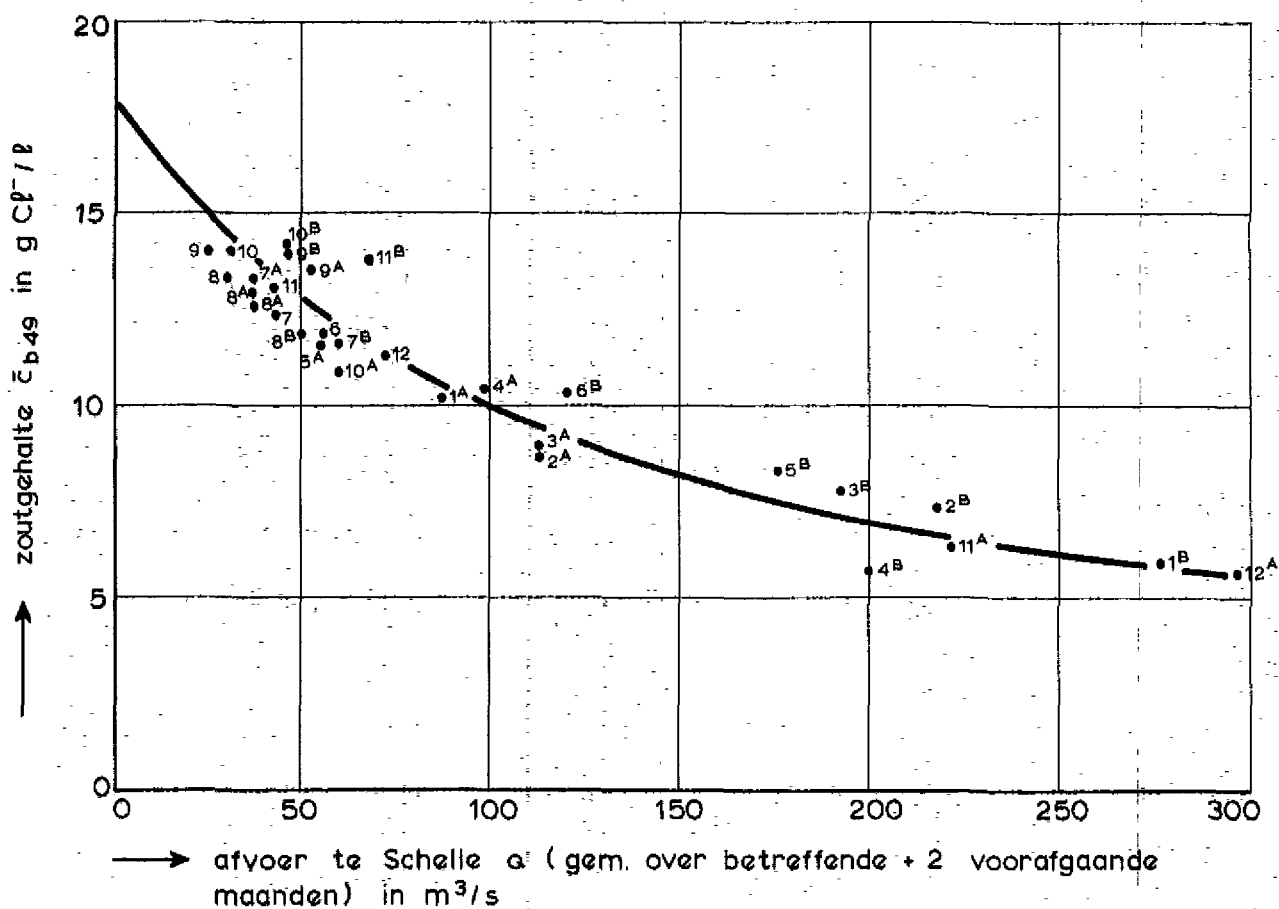
$$\text{gebied II : } K_{\max} = \frac{v_o^2}{\alpha} (m + m_w) \exp. \left\{ 2 \left(\frac{\alpha}{\delta_o} - 1 \right) \right\}$$

VERLOOP MAXIMUM (EXTRA) DRUKKRACHT OP
KOPSCHOTTEN BIJ ZINKVOEG ALS FUNKTIE
VAN INITIELE SPLEETWIJDTE

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1739

FIG. 18



toelichting			
mnd.	jaar		
	'73	'74	'75
jan.	1	1 ^A	1 ^B
febr.	2	2 ^A	2 ^B
mrt.	3	3 ^A	3 ^B
apr.	4	4 ^A	4 ^B
mei	5	5 ^A	5 ^B
jun.	6	6 ^A	6 ^B
jul.	7	7 ^A	7 ^B
aug.	8	8 ^A	8 ^B
sep.	9	9 ^A	9 ^B
okt.	10	10 ^A	10 ^B
nov.	11	11 ^A	11 ^B
dec.	12	12 ^A	12 ^B

de weergegeven relatie is :

$$\bar{c}_{b49} = \frac{v}{v + f \cdot v_r \cdot a / \bar{a}} \quad c_{zaa} = \frac{4}{4 + 0,144 a} \quad 18 \text{ g Cl}^-/\text{l}$$

waarin c : zoutconcentratie

v : gemiddeld vloedvolume

v_r : gemiddelde zoetwaterafvoer per getij

f : empirische konstante

a : gemiddelde afvoer te Schelle

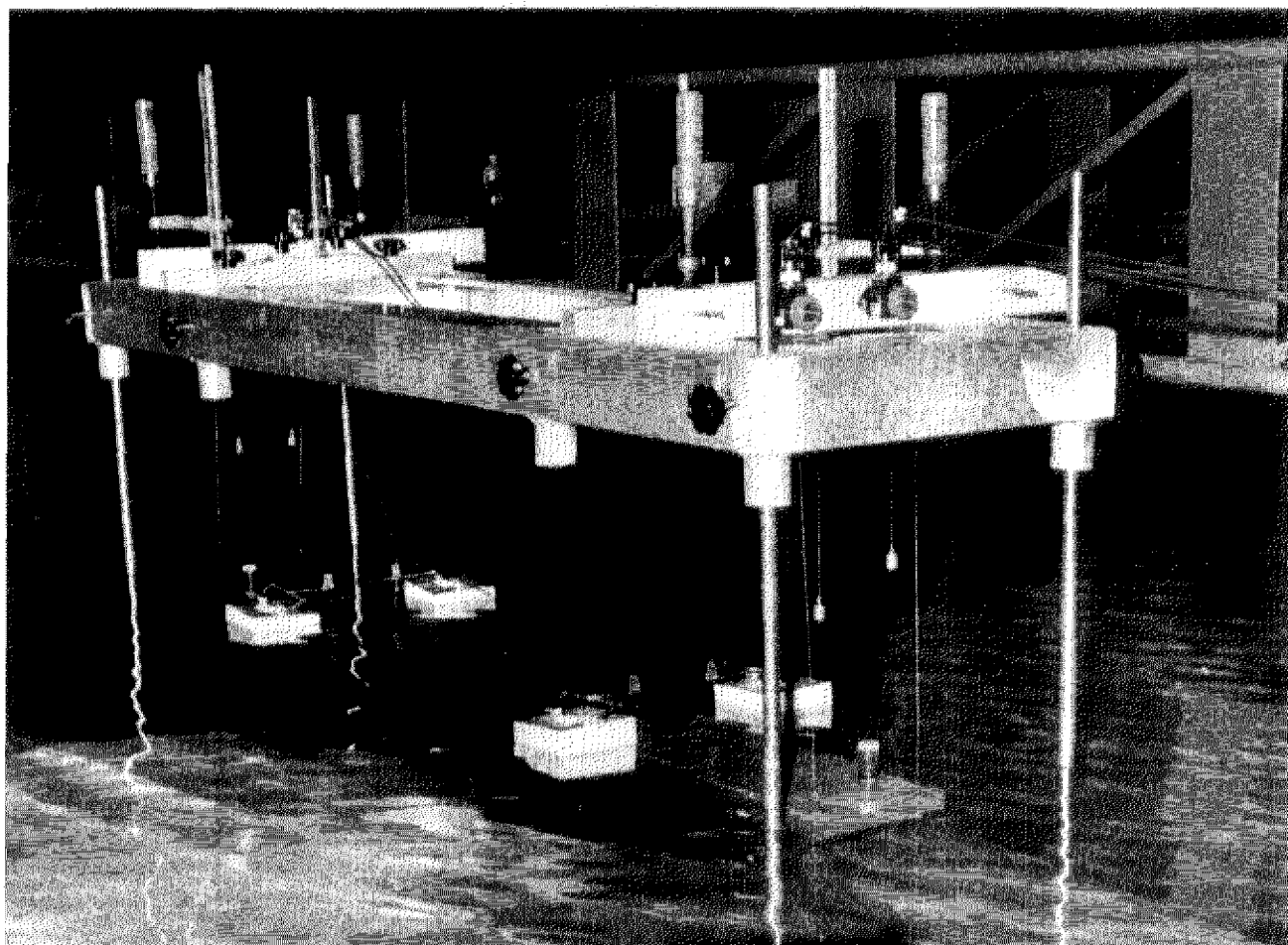
RELATIE TUSSEN ZOUTGEHALTE MIDDELGAT /
ZUIDERGAT (BOEI 49) EN AFVOER TE SCHELLE

UIT [7]

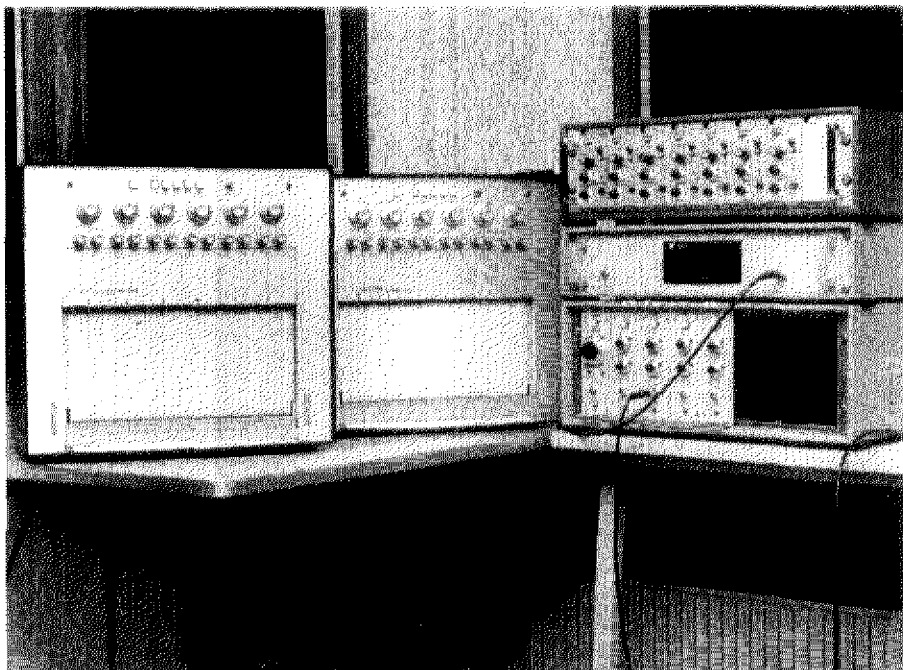
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1739

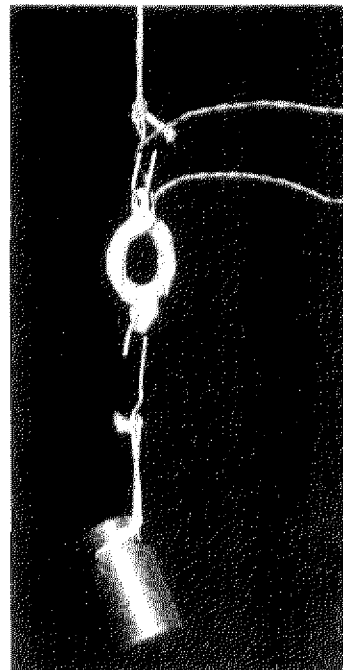
FIG. 19



1 Tunnelelement 4 hangend aan de pontons (positie 9A)



Zes-kanaals schrijvers en meetbruggen krachtopnemers
spanningsmeter
versterkers verplaatsingsopnemers



LJking krachtopnemer
(ringetje met rek-
strookjes)

2 Meet- en registratieapparatuur voor de afzinkfase

APPENDIX

Enkele aanvullende onderzoekresultaten

verslag "speelproeven" in het model

INHOUD

	blz.
1. <u>Inleiding</u>	A.1
2. <u>Proevenprogramma</u>	A.1
3. <u>Resultaten en konklusies</u>	A.2
3.1 Uitvaren.....	A.2
3.2 Verhaalsysteem.....	A.3
3.3 Afzinken.....	A.4

FIGUREN

- A.1 Aanbevolen situatie zinksleuf en uitvaarmanoeuvr bij vloed
- A.2 Aanbevolen situatie zinksleuf en uitvaarmanoeuvr bij eb
- A.3 Vertrimming beschouwd tijdens speelproeven

APPENDIX

ENKELE AANVULLENDE ONDERZOEKRESULTATEN

1. Inleiding

Ter afsluiting van het modelonderzoek voor het afzinken van de Westerscheldetunnel en vooral als demonstratie van enkele aspecten van het afzinken van de tunnel-elementen heeft het Waterloopkundig Laboratorium een "speeldag" aan de opdrachtgever aangeboden. Op deze dag, gehouden op 26 februari 1981, werd de opdrachtgever en de door deze uitgenodigde aannemers in de gelegenheid gesteld om zelf de transportfase van een element in het model te simuleren. Op deze wijze kon een goede indruk worden verkregen van het gedrag van het uitvarende element bij verschillende uitvaarmanoeuvres, hetgeen een nuttige ondersteuning is bij de interpretatie en toepassing van de resultaten van het voorgaande modelonderzoek. Daarnaast zijn nog enkele andere aspecten globaal onderzocht of gedemonstreerd. Op 27 februari 1981 zijn bovengenoemde speelproeven door het Waterloopkundig Laboratorium herhaald en op film vastgelegd.

2. Proevenprogramma

Tijdens de speeldag zijn de volgende proeven uitgevoerd:

1. simulatie uitvaren uit het bouwdok,
2. meten horizontale krachten in afzinkposities 9 en 9A,
3. aftasten invloed vertrimming van het element op de verticale krachten (positie 9A),
4. demonstratie resonantieverschijnselen in positie 9B.

Alle proeven zijn uitgevoerd voor tunnelelement 7 met de in het model aanwezige situatie in de tunnelsleuf die hoort bij het afzinken van element 12 (sleuf aan de noordzijde volledig gebaggerd en aan de zuidzijde tot ca. element 5 geheel aangestort met een talud dat afloopt tot iets voorbij de kop van element 6). Uit praktische overwegingen is alleen gewerkt bij vloed. Hierbij treden de grootste stroomsnelheden op die aanleiding kunnen geven tot kritieke situaties.

3. Resultaten en konklusies

3.1 Uitvaren

Het uitvaren uit het bouwdok is zowel bij lage (0,7 m/s in het referentiepunt) als bij hoge stroomsnelheden (gemiddeld springtij; 2,1 m/s in het referentiepunt) gesimuleerd. Hierbij werd uitgegaan van het in Fig. 10 gegeven konvooi met een effectief vermogen zoals geschat in tabel 2. De sleepboten of een groep sleepboten werden elk vervangen door een persoon die via een kabeltje de bijbehorende sleepkracht leverde. Met behulp van een veerunster werd deze sleepkracht zodanig bewaakt dat niet met een grotere kracht werd getrokken (op schaal) dan de betreffende sleepboot of groep sleepboten zou kunnen leveren (waarden gebaseerd op tabel 2 van het verslag). De simulatie van het uitvaren demonstreerde duidelijk de volgende resultaten:

- a. In de gegeven situatie bleek het uitvaren bij de lage stroomsnelheid (0,7 m/s in het referentiepunt) zonder problemen uitvoerbaar. Hierbij dient echter te worden vermeld dat de uitgebaggerde tunnelsleuf in deze situatie een duidelijk reducerende werking heeft op de stroomkrachten op de stroomkrachten op het element juist in de kritieke fasen 5 en 6. Hierdoor ontstaat een aanmerkelijk gunstiger krachtsverloop dan gevonden voor element 4 (zie fig. 9.1 van het verslag).
- b. In de gegeven situatie bleek het zelfs mogelijk bij hoge stroomsnelheden (2,1 m/s in het referentiepunt) veilig uit te varen, mits hierbij de juiste manoeuvres worden uitgevoerd. Indien gewoon rechtuit vanuit het bouwdok naar de tunnelsleuf wordt gevaren, dan krijgt de stroom op een bepaald moment tussen fase 4 en fase 6 vat op het element. Het vermogen van het konvooi blijkt dan onvoldoende om de grote stroomkracht dwars op het element op te vangen, waardoor het met de stroom afdrijft met het gevaar vast te lopen. Dit gevaar blijkt afdoende te kunnen worden afgewend door het element zo hoog mogelijk langs het bovenstroomse talud te varen. Tussen de fasen 4 en 6 moet de kop van het element zo hoog mogelijk worden gehouden, terwijl de achterzijde zoveel mogelijk benedenstrooms van de kop wordt getrokken hierbij eventueel geholpen door de stroomdruk. Als het element in de volle stroom komt moet het dus al min of meer in de stroomrichting zijn gebracht, waarna het vervolgens met een te regelen gierhoek (afhankelijk van de stroomsnelheid)

dwars door de tunnelsleuf naar zijn eindpositie kan worden versleept. De stroomkracht, in de lengterichting van het element, kan nu bovendien worden gekompenseerd met alle vier grote sleepboten met een Voith-Schneider schroef.

- c. In het bovenstaande zijn uitvaarmanoeuvres beschreven waarbij de kop van het element in de stroom wordt gehouden (zie fig. A.1 en A.2). Een variant hierop kan zijn dat men bij het uitvaren de kop met de stroom laat afdrijven en de achterkant van het element hoog houdt en in de stroom brengt (manoeuvre van fig. A.2 met stroombeeld van fig. A.1 en omgekeerd). Afhankelijk van de omstandigheden bij het uitvaren en de positie van het element in het bouwdok kan men kiezen uit de meest geschikte variant om goed in positie 7 uit te komen.
- d. Het verdient aanbeveling de toegangsgeul naar het bouwdok voor alle situaties zodanig ruim te dimensioneren dat bij het uitvaren bovengenoemde draaimanoeuvres tussen de fasen 4 en 6 kunnen worden uitgevoerd (zie fig. A.1 en A.2).

3.2 Verhaalsysteem

Nadat het element is aangevoerd naar de afzinklokatie, wordt aanbevolen eerst op stroom de kop van het element in te spannen in de bovenstroomse dwarskabel en de bijbehorende kopdraad van het verhaalsysteem (fixeren draaipunt). Vervolgens kunnen de meeste sleepboten die de kop hebben gecontroleerd worden los gemaakt en worden gehergroepeerd om het element bij voldoende lage stroomsnelheden dwars op de stroom te draaien (van positie 7 naar positie 9). Uit de speelproeven is nog eens duidelijk gebleken dat de krachten op het element in positie 9 hoog kunnen oplopen. Indien dit uitsluitend met sleepboten moet worden opgevangen kan dit alleen bij geringe stroomsnelheden. Het gevaar dat het konvooi daarbij zou afdrijven is niet denkbeeldig met als gevolg dat de stroomkrachten snel toenemen zodra het element uit de sleuf drijft en boven ondieper water komt. Als dit gebeurt verliezen de boten vooreerst volledig de controle over het element totdat ze het weer in de stroomrichting hebben kunnen draaien.

Positie 9A is duidelijk bepalend voor het dimensioneren van de dwarsdraden die de grote stroomkracht op het element moeten opvangen. De dwarsdoorsnede van de kopdraden wordt waarschijnlijk niet bepaald door de op te nemen stroomkracht maar door andere factoren, zoals voorspanning en krachtsfluctuaties door allerlei oorzaken.

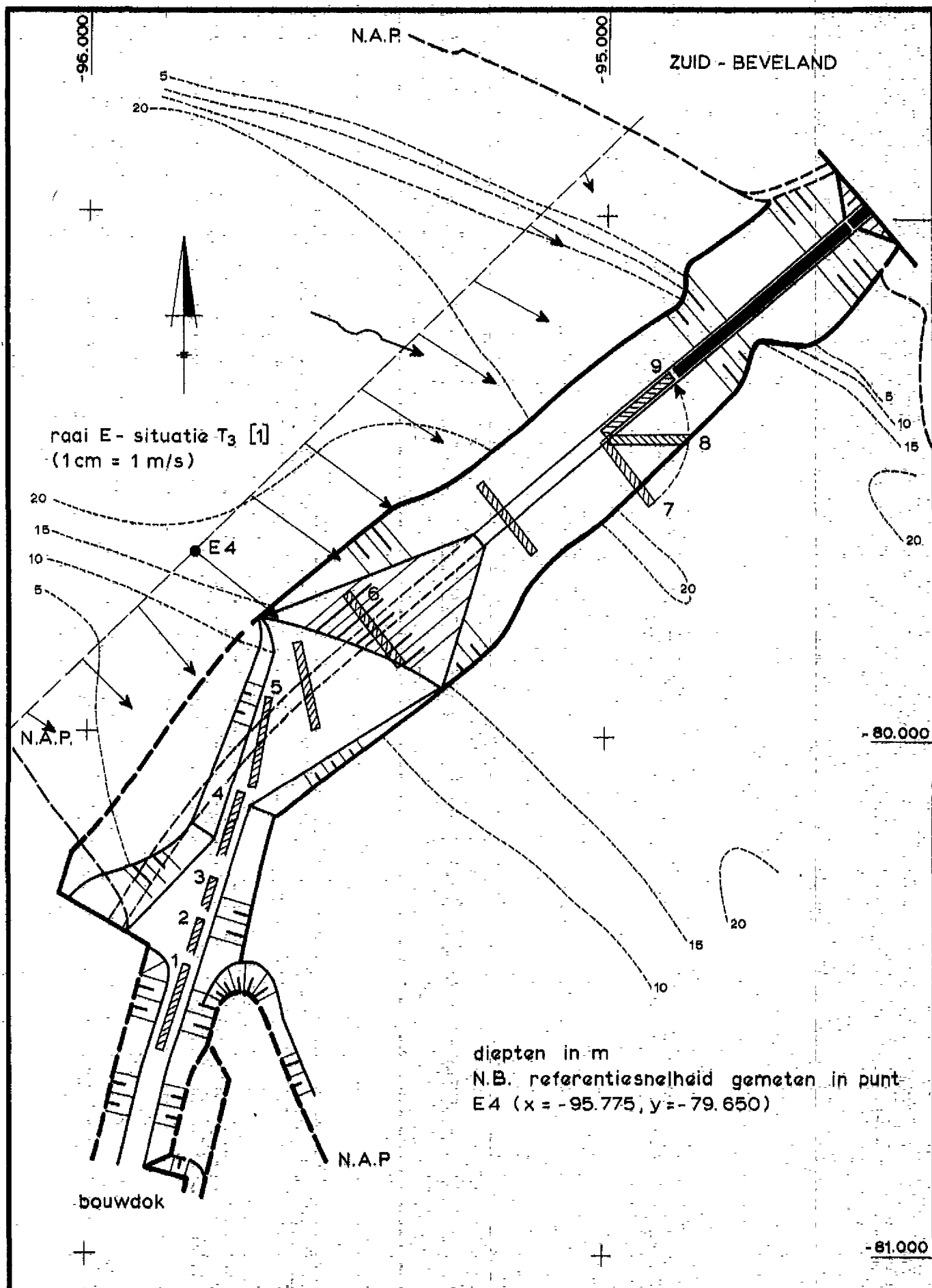
3.3 Afzinken

Tijdens de speelproeven in de fasen 9A en 9B werd nog eens de gebrekkige stabiliteit van de in het onderzoek gebruikte pontons gedemonstreerd alsook de resonantie bij hoge stroomsnelheden in fase 9B. In dit geval bleek element 7 voornamelijk te gaan rollen (slingeren) in plaats van te stampen zoals element 4. Vermoedelijk werd dit veroorzaakt door de bij element 7 optredende hogere stroomsnelheden en de iets andere geometrie van de sleuf; bij iets geringere stroomsnelheden bleek het element te gaan stampen en slingeren. Bij de omstandigheden met een hoge springvloed (getijfactor 1,45) ontstond echter een sterk opgeslingerde slingerbeweging waarbij het element (en dus ook de toren) een slag maakte van zeker 30° tot 45° met een slingertijd van ca. 2 s (eigen slingertijd van 19 s in werkelijkheid). Bovendien bleken de benedenstroomse draden steeds spanningsloos en slap te worden als het element voorover helde om vervolgens met een klap weer te worden gespannen als het element terugkantelde.

Uit het aftasten van de invloed van de vertrimming van het element 7 in positie 9A op de verticale krachten in de ophangkabels zijn twee effecten waargenomen:

- a. Via de indompelingsdiepte van de pontons is duidelijk waargenomen dat vertrimming invloed heeft op de verticale stroomkracht. Dit is gebleken uit de beschouwing van drie situaties onder dezelfde stroomomstandigheden (zie fig. A.3). Op het gezicht werd een bevestiging gevonden van de resultaten van het onderzoek voor de Thames Barrier (M 1332, oktober 1975), waar het bleek dat vertrimming vrijwel uitsluitend de grootte van de verticale stroomkracht beïnvloedt, doch niet het moment om de lengte-as van het element. Het voorover hangen van het element (situatie B) leidde ten opzichte van situatie A tot een voor alle pontons min of meer even grote extra indompeling die voor de gegeven vertrimming aanzienlijk was. Het achterover hangen van het element leidde daarentegen tot een ontlasting van de verticale kabels, waardoor de benedenstroomse kabels in de beschouwde (overdreven) situatie zelfs (gemiddeld) spanningsloos en slap werden; de 50 tf voorspanning werd bij de hoge stroomsnelheid geheel opgeheven.
- b. Deze laatste situatie bleek zelfs gevaarlijk te zijn. Het element kon daardoor vrijwel ongeremd gaan slingeren om de as door de twee bovenstroomse ophangpunten in een situatie met stroomcondities waarbij toch al gevaar voor resonantie bestond. Deze resonantie-slingering bleek dan ook duidelijk

op te treden. Hieruit volgt dat vertrimmen in deze situatie een gevaarlijk middel is om grote vertikale krachten in de ophangdraden te vermijden (situatie C). Het blijkt zelfs beter om onder extreme omstandigheden de gemiddelde vertikale stroomkracht door vertrimmen te vergroten, waardoor een veel stabielere situatie ontstaat waarin resonantie wordt onderdrukt (situatie A versus situatie B met 1,5 m vertrimming in fase 9B bij vloed van het extreme springtij). Ten koste van een aanvaardbare vergroting van de gemiddelde krachten in de vertikale kabels kunnen aldus onaanvaardbare krachtsfluctuaties en bewegingen (o.a. van de kommandotoren) worden vermeden.



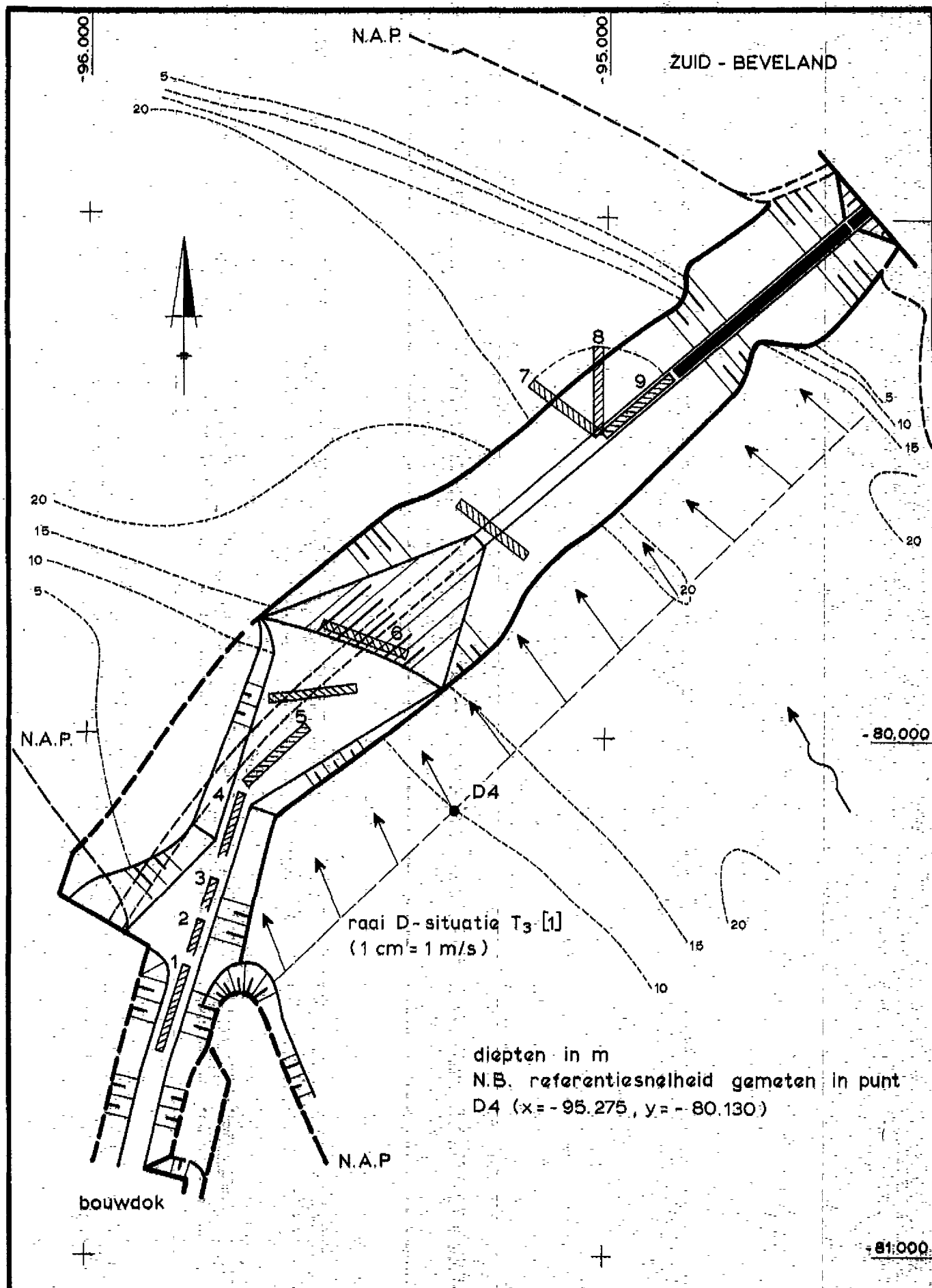
AANBEVOLEN SITUATIE ZINKSLEUF EN
UITVAARMANOEUVRE BIJ VLOED

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

SCHAAL 1:10.000

M 1739

FIG. A.1



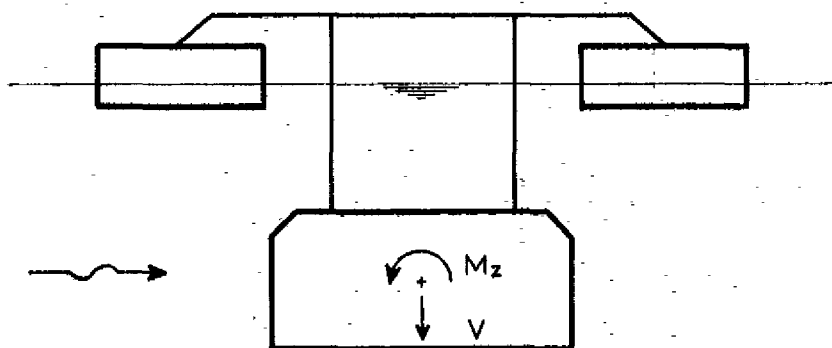
AANBEVOLEN SITUATIE ZINKSLEUF EN
UITVAARMANOEUVRE BIJ EB

SCHAAL 1:10,000

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

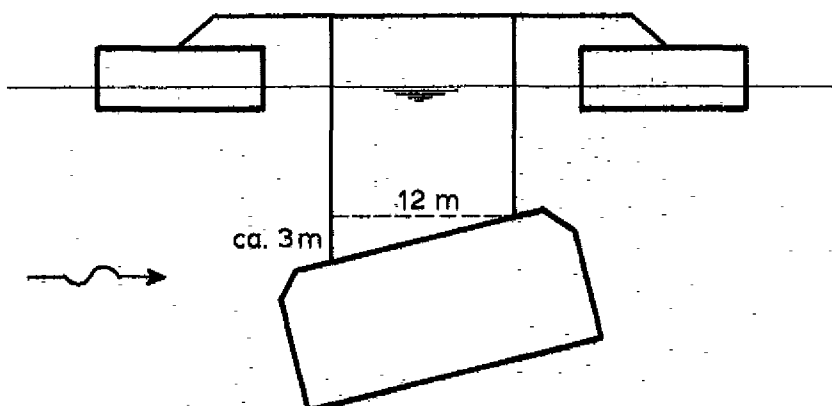
M 1739

FIG. A.2



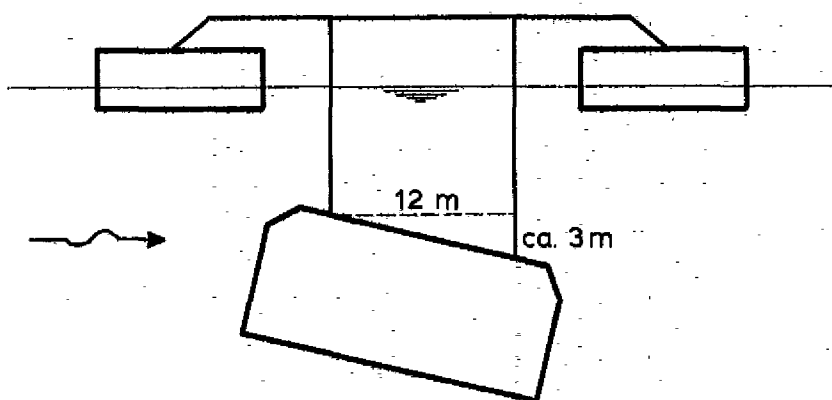
SITUATIE A

toegepast tijdens
modelonderzoek



SITUATIE B

toename verticale
kracht V



SITUATIE C

afname verticale
kracht V; bij hoge
stroomsnelheid komen
benedenstroomse draden
zelfs slap te hangen
en treedt resonantie op
in slingerbeweging

in de situaties B en C lijkt het moment M niet (belangrijk) te veranderen