

MINIMALISERING KOSTEN ONDERHOUDSBAGGERWERK

GEMEENTEWERKEN ROTTERDAM
Ingenieursbureau Havenwerken

Neerstroming en slibconcentraties
in de Maashaven

Analyse van meetresultaten
co: 58.50 - R8701

maart 1987

T.B.

INHOUD

Blz.

Samenvatting	i-iv
1. Inleiding	3
2. De uitvoering van de metingen	5
3. De stroming in de havenmond	8
3.1 De te verwachten stromingen	8
3.1.1 Komberging	8
3.1.2 Dichtheidsstroming	8
3.1.3 Neerstroming	9
3.2 De gemeten stromingspatronen in de havenmond	14
3.3 Resumé van gemeten neerstromingen	19
4. De gemeten sedimentconcentraties	20
4.1 De sedimentconcentraties op de rivier	20
4.2 De sedimentconcentraties in de haven	23
4.3 De sedimentuitwisseling tussen rivier en haven	24
5. Conclusies	28
5.1 De neerstroming in de havenmond	28
5.2 De sedimentuitwisseling tussen rivier en haven	28
Literatuur	30
Lijst van figuren	31
Figuren	32

SAMENVATTING

Binnen het project M.K.O. (= Minimalisering Kosten Onderhoudsbaggerwerk) opereert de werkgroep "Sedimentatiepatronen". Deze werkgroep onderzoekt en modelleert het aanslibbingsproces van havens. In het kader hiervan zijn op 26 april 1986 metingen uitgevoerd in en voor de Maashaven te Rotterdam.

De metingen hadden tot doel inzicht te verschaffen in:

- a. de neerstromingen (met verticale as) die optreden in een havenmond;
- b. de sedimentuitwisseling tussen rivier en haven, in relatie tot de stromingspatronen in de havenmond (ad a);
- c. de verspreiding en bezinking van sediment (c.q. slib) binnen de haven.

In het navolgende gedeelte wordt achtereenvolgens ingegaan op:

- A. de uitgevoerde metingen;
- B. de stromingspatronen in de havenmond;
- C. de sedimentuitwisseling in de havenmond, en de verspreiding binnen de haven.

A. De uitgevoerde metingen

Gedurende één getijcyclus zijn de volgende metingen uitgevoerd:

- a. stromingsmetingen in de havenmond met behulp van drijvers;
- b. sedimentconcentratie metingen over 4 verticalen op de rivier voor de havenmond, en over 9 verticalen in de haven. De meetverticalen in de haven waren verdeeld over 3 meetraaien, op resp. 200 m, 600 m en 1.350 m vanaf de rivier;
- c. stroomsnelheidsmetingen over de 4 genoemde verticalen op de rivier.

De gebruikte drijvers (ad a) bestonden uit een stroomvangend lichaam en een drijflichaam, die met een staaldraad aan elkaar waren verbonden. Er zijn steeds twee soorten drijvers gelijktijdig uitgezet, waarbij het stroomvangende lichaam resp. op 4 m en 8 m beneden het wateroppervlak hing.

De drijvers zijn met tussenperioden van 1 uur uitgezet; na het uitzetten zijn de drijvers gedurende 40 minuten gevolgd.

De concentratiemetingen (ad b) zijn uitgevoerd met troebelheids-sensoren. Hierbij worden percentages lichtdoorlating gemeten, die via ijkcurven worden gerelateerd aan sedimentconcentraties. De ijkcurven zijn tijdens de meetcampagne bepaald. De lichtdoorlatingmetingen en de ijkcurven hebben beide een zekere onnauwkeurigheid, die niet veel kleiner is dan de fysisch optredende concentratievariaties. (De optredende concentraties bleken helaas kleiner te zijn, dan was verwacht.) Dit betekent dat geen fysische betekenis kan worden gegeven aan:

- incidentele en lokale concentratiefluctuaties, en
- systematische concentratieverschillen tussen meetverticalen die met verschillende sensoren zijn doorgemeten.

Ondanks deze beperkingen, kunnen wel op betrouwbare wijze veranderingstendensen in de concentraties worden vastgesteld. Deze tendensen kunnen meestal op zinvolle wijze worden gerelateerd aan stromingsveranderingen.

B. De stromingspatronen in de havenmond

De stromingspatronen die resp. op 4 m en 8 m diepte zijn gemeten, vertonen geen systematische verschillen, omdat er geen dichtheidsstromingen optreden.

De stroming in de havenmond is (afhankelijk van de getijfase) een kombergingsstroming of een neerstroming, of een combinatie van komberging en neer.

Neerstromingen blijken op te treden tijdens de 4 uur durende laagwaterperiode, en gedurende een periode van 1 à 2 uur rond hoogwater.

De sterkte van de gemeten neerstromingen is:

$$\begin{aligned} V_{\text{neer}}/V_{\text{rivier}} &= 0,21 \text{ tijdens laagwater,} \\ &= 0,33 \text{ tijdens hoogwater,} \end{aligned}$$

waarbij V_{neer} = de maximale stroomsnelheid in de neer,
 V_{rivier} = de stroomsnelheid op de rivier.

Deze neersterkten komen qua orde van grootte overeen met het laboratoriumonderzoek (lit. 3), waarbij sterkten van 0,16 à 0,32 zijn gemeten.

De hoogwaterneer blijkt 1½ maal sterker te zijn dan de laagwaterneer.

De hoog- en laagwaterneer vertonen ook aanzienlijke verschillen ten aanzien van vorm en samenhang. De hoogwaterneer is uitgesproken cirkelvormig, met een zeer coherente structuur: de stroombanen zijn bij benadering concentrische cirkels. De laagwaterneer is niet cirkelvormig: de neerlengte is ten minste $1\frac{1}{2}$ -maal groter dan de neerbreedte. De structuur van de laagwaterneer is tamelijk incoherent, en varieert in de tijd. Soms treedt de langgerekte circulatie op in combinatie met een cirkelvormige stroming voorin de havenmond.

Tijdens de periode van stijgende waterstand (na laagwater) treedt een combinatie van neerstroming en kombergingsstroming op. De draaiingsrichting van de neerstroming past zich binnen 1 uur aan, aan de laagwaterkentering van de rivierstroming.

Gedurende de periode van dalende waterstand (na hoogwater) treedt over de gehele breedte van de havenmond alleen een (havenuitwaartse) kombergingsstroming op. De neerstroming wordt kennelijk geheel onderdrukt door de komberging; dit ondanks het feit dat de komberging na hoogwater zwakker is dan na laagwater.

Bij het genoemde laboratoriumonderzoek is onder andere het volgende geconstateerd:

- een netto haveninwaarts debiet leidt tot versterking van de neer, en een uitwaarts debiet leidt tot verzwakking;
- een scherpe hoek tussen de as van de haveningang en de stroomrichting op de rivier veroorzaakt een grotere neersterkte, en een stompe hoek veroorzaakt een kleinere sterkte.

Deze verschijnselen kunnen beide oorzaak zijn van (1) het verschil in sterkte tussen de hoog- en laagwaterneer, en (2) de onderdrukking van de neer in de komledigingsperiode na hoogwater. Het verschil tussen hoog- en laagwaterneer kan (in de derde plaats) mede zijn veroorzaakt door een relatief groot aandrijvend waterstandsverval over de breedte van de havenmond tijdens hoogwater.

C. De sedimentuitwisseling tussen rivier en haven

De gemeten sedimentconcentratie op de rivier varieert meestal tussen 40 en 55 mg/l. Rond de stroomkenteringen treden concentratieverlagingen op tot 25 à 30 mg/l. De rivierconcentratie is dus zeer laag, dit is waarschijnlijk mede een gevolg van de voorgaande, langdurige periode van hoge Rijnafvoer.

De sedimentconcentratie in de haven blijkt in verticale richting bijna niet te variëren: het verschil tussen bodem- en oppervlakconcentratie bedraagt zelden meer dan 5 mg/l.

De concentraties die achterin de haven (c.q. op 1.350 m vanaf de monding) zijn gemeten, vertonen een vrijwel constante waarde van 36 à 40 mg/l. Effecten van de sedimentuitwisseling met de rivier zijn hier vrijwel niet merkbaar (c.q. meetbaar). Op resp. 200 m en 600 m vanaf de rivier zijn wel concentratievariëaties gemeten, die kunnen worden gerelateerd aan uitwisseling door stromingen in de havenmond.

Tijdens laagwater is sedimentuitwisseling geconstateerd door de neerstroming: op 200 m vanaf de rivier zijn in het instromende deel van de neer concentraties van 38 mg/l gemeten (tegenover 32 mg/l in het uitstromende deel van de neer). Op 600 m vanaf de rivier blijkt de laagwaterneer niet meer tot concentratieverhoging te leiden.

De haveninwaartse komberging voorafgaande aan hoogwater veroorzaakt de sterkste concentratieverhoging in de haven. Deze verhoging treedt op vanaf 1½ uur voor hoogwater, met maxima van ongeveer 44 en 38 mg/l, op resp. 200 en 600 m vanaf de rivier. Tijdens de periode van inwaartse kombergingsstroming, is op de rivier gedurende een zekere tijd (globaal 1 uur) sprake van een verlaagde concentratie, als gevolg van de laagwaterkentering. Dit heeft een beperkende invloed op de slibaanvoer door de komberging; bij de onderhavige onnauwkeurigheden is het effect hiervan echter niet significant en eenduidig waarneembaar.

Rond hoogwater is op 200 m vanaf de rivier al weer een afname van de concentraties gemeten. Hieruit kan men concluderen dat de uitwisseling door de (sterke) hoogwaterneer geringer is dan die door de voorafgaande kombergingsstroming. Deze geringere uitwisseling is mogelijk mede een gevolg van de relatief cirkelvormige en coherende structuur van de hoogwaterneer.

Om 1 uur na hoogwater is op 200 m vanaf de rivier de lokale achtergrondconcentratie van 32 mg/l weer bereikt. In de periode tussen hoogwater en laagwater wordt de havenconcentratie niet beïnvloed vanaf de rivier; dan treedt namelijk over de gehele havenbreedte havenuitwaartse kombergingsstroming op.

Resumerend kan worden gesteld dat de neerstroming zeker een significante sedimentuitwisseling tussen rivier en haven veroorzaakt. Hierbij speelt tevens een rol dat de tijdsduur van de haveninwaartse komberging korter is dan de tijdsduur van de neerstromingen. Een enigszins betrouwbare vergelijking van de aangevoerde sedimenthoeveelheden door resp. de komberging en de neerstroming, kan helaas niet worden gemaakt; hiervoor zijn de metingen te onnauwkeurig (bij de optredende relatief lage concentraties).

1. INLEIDING

De M.K.O.¹⁾-werkgroep "Sedimentatiepatronen" onderzoekt en modelleert het aanslibbingsproces van havens. In het kader hiervan zijn op 26 april 1986 metingen uitgevoerd in de Maashaven te Rotterdam (zie figuur 1.1). De resultaten van deze metingen worden in het onderhavige rapport gepresenteerd en geanalyseerd. Deze metingen hadden drie - nauw met elkaar verweven - doelstellingen:

1. vergroten van de kennis van de neerstroming in een havenmond; dit in aansluiting op een laboratoriumonderzoek naar neerstromingen in verschillende havengeometrieën;
2. het leggen van relaties tussen enerzijds de stromingspatronen in de havenmond en anderzijds de slibuitwisseling tussen rivier en haven;
3. het verschaffen van prototypegegevens over de verspreiding en sedimentatie van slib in een haven; dit ter toetsing van het één-dimensionale, slibverspreidingsmodel, dat door de werkgroep is ontwikkeld.

De Maasvlakte is gekozen als meetlocatie op grond van de volgende overwegingen:

- er treden geen dichtheidsstromingen op in de Maashaven. Dichtheidsstromingen zouden in de havenmond een gecompliceerd, samengesteld stromingspatroon veroorzaken; hierdoor zou het ad 1 beoogde inzicht in de optredende neerstromingen te veel worden vertroebeld. Bovendien is het te toetsen slibverspreidingsmodel (ad 3) ongelaagd;
- binnen de categorie van "havens zonder dichtheidsstroming" werd in de Maashaven een relatief groot slibgehalte verwacht. In het algemeen komen hoge slibgehalten echter alleen voor in havens met dichtheidsstroming.

Gedurende één (bijna) volledige getijcyclus zijn de volgende metingen uitgevoerd:

- metingen van stroomsnelheden, slibconcentraties en zoutconcentraties over vier vaste meetverticalen op de rivier, voor de havenmond;
- meting van de stroming in de havenmond met behulp van drijvers;
- metingen van slibconcentraties en zoutconcentraties over 9 meetverticalen in de haven.

¹⁾ M.K.O. = Minimalisering Kosten Onderhoudsbaggerwerk

Het onderhavige rapport geeft een analyse en interpretatie van de meetresultaten.

In hoofdstuk 2 wordt eerst een beschrijving gegeven van de uitvoering van de metingen.

In hoofdstuk 3 worden de stromingspatronen in de havenmond besproken; de te verwachten en de gemeten stromingen komen resp. aan de orde in § 3.1 en § 3.2.

In hoofdstuk 4 worden de gemeten sedimentconcentraties besproken. In § 4.1 en § 4.2 komen resp. de concentraties op de rivier en in de haven aan de orde.

In § 4.3 wordt ingegaan op de sedimentuitwisseling tussen rivier en haven, uitgaande van het stromingspatroon dat in § 3.2 is beschreven.

Samenvattende conclusies worden gegeven in hoofdstuk 5.

2.

DE UITVOERING VAN DE METINGEN

De navolgende metingen zijn uitgevoerd (zie ook lit. 1):

- A. continue registratie van het waterstandsniveau;
- B. meting op de rivier van:
 - stroomsnelheden (en -richtingen),
 - sedimentconcentraties,
 - zoutconcentraties;
- C. meting in de haven van:
 - sedimentconcentraties,
 - zoutgehalten;
- D. drijfvermetingen van het stromingspatroon in de havenmond.

Ad A

De waterstandsregistratie is uitgevoerd op een bestaand meetpunt in de Dokhaven.

De Dokhaven ligt \pm 300 m stroomafwaarts naast de Maashavenmond. De waterstand in de Maashavenmond kan gelijk worden gesteld aan die in de Dokhaven.

Het geregistreeerde waterstandsverloop is uitgezet in figuur 2.1.

Ad B/C

De metingen op de rivier zijn uitgevoerd in vier meetverticalen, met vier verankerde meetvaartuigen. De metingen in de haven zijn uitgevoerd in negen meetverticalen, met twee mobiele meetvaartuigen.

De posities van de meetverticalen zijn uitgezet in figuur 2.2.

In iedere meetverticaal is op zes verschillende diepten gemeten: 0,50; 1,50; 3,00; 6,00 en 9,00 m boven de bodem en 0,50 m onder de waterspiegel.

De verticaalmetingen zijn uitgevoerd met een gemiddelde tussenperiode van resp. 20 minuten op de rivier en 30 minuten in de haven.

De ad B en C genoemde grootheden zijn per verticaalmeting simultaan gemeten.

De meting van de sedimentconcentraties vormt een belangrijk onderdeel van de meetcampagne. Daarom wordt in het navolgende iets meer gezegd over de uitvoering en de nauwkeurigheid van deze metingen.

De slibconcentraties zijn gemeten met troebelheidssensoren. Op de rivier is gemeten met vier MONITEK-sensoren: iedere meetverticaal op de rivier is met een afzonderlijke sensor bemeten. In de haven is gemeten met twee EUR-CONTROL-sensoren: de meetverticalen 1 t/m 5 zijn met de ene sensor gemeten, en 6 t/m 9 met de andere sensor. Met de genoemde sensoren zijn lichtdoorlatendheidspercentages gemeten, waaruit achteraf sedimentconcentraties zijn berekend met behulp van ijkcurven.

Er is voor iedere sensor een afzonderlijke ijkcurve bepaald, door tijdens de meetcampagne elke 1 1/2 uur twee watermonsters te nemen (resp. op kleine en op grote waterdiepte, c.q. met kleine en met grote sedimentconcentratie). Gelijktijdig met de monstername is het lichtdoorlatendheidspercentage gemeten; het sedimentgehalte in de monsters is achteraf op gravimetrische wijze bepaald.

Bij de MONITEK-ijkingen zijn 90% betrouwbaarheidsintervallen bepaald. Voor de breedte (B_{90}) van deze intervallen geldt (op het concentratieniveau van 45 mg/l):

- voor de berekende ijkcurve:
 $B_{90} = 5 \text{ à } 12 \text{ mg/l}$ (resp. in R4 en R1);
- voor de gemeten concentraties in de afzonderlijke ijkmonsters:
 $B_{90} = 22 \text{ à } 36 \text{ mg/l}$ (resp. in R4 en R1).

Bij de algemene concentratiemetingen met de troebelheidssensoren kunnen twee onnauwkeurigheden worden onderscheiden:

- a. de systematische onnauwkeurigheid van de ijkcurven;
- b. de statistische onnauwkeurigheid van de lichtdoorlatendheidsmetingen.

Uitgaande van de bovenvermelde 90% betrouwbaarheidsintervallen, kunnen de genoemde onnauwkeurigheden enkelzijdig worden geschat op:

- ad a. $2\frac{1}{2} \text{ à } 6 \text{ mg/l}$, voor de ijkcurven;
- ad b. maximaal $11 \text{ à } 18 \text{ mg/l}$, voor de lichtdoorlatendheidsmetingen.

Er zij opgemerkt dat de ijkmonsters alleen een bovengrens geven van de onnauwkeurigheid in de lichtdoorlatendheidsmetingen. Het 90% betrouwbaarheidsinterval van de afzonderlijke ijkmonsters wordt namelijk niet alleen bepaald door de ad b genoemde onnauwkeurigheid; ze wordt tevens bepaald door de onnauwkeurigheid in de gravimetrische bepaling van de sedimentgehalten.

De ijklijnen en de lichtdoorlatendheidsmetingen in de haven hebben waarschijnlijk een grotere nauwkeurigheid dan die op de rivier. In de haven treden namelijk veel kleinere fluctuaties op in de stroomsnelheden, in de sedimentconcentraties en in de korrelgrootteverdelingen van het zwevende sediment.

Ad D

De drijfvermeting in de havenmond

De gebruikte drijvers bestonden uit een stroomvangend lichaam en een drijflichaam, die met een staaldraad aan elkaar waren verbonden.

Het stroomvangende lichaam was kruisvormig; het was samengesteld uit twee verticale, metalen platen, met een hoogte van ca. 40 cm en een breedte van ca. 60 cm.

Bij de ene helft van het aantal gebruikte drijvers hing het stroomvangende lichaam 4 m onder het wateroppervlak; bij de andere helft hing het 8 m onder het wateroppervlak.

Tijdens de uitvoering van de drijfvermetingen lagen er minimaal 12 drijvers in het water.

De drijvers werden met tussenperioden van 1 uur uitgezet en na het uitzetten gedurende een periode van 40 minuten gevolgd. Het centrale tijdstip van deze drijfperioden verschilde steeds een geheel aantal uren van het tijdstip van het dichtstbijzijnde hoogwater (zie de tabel bij figuur 3.4).²⁾

Gedurende de drijfperioden werden de drijfposities (zo frequent mogelijk) geregistreerd, door met een meetvaartuig langs de drijvers te varen. Hierbij werd de positie van het meetvaartuig radiografisch ingemeten, op het moment dat een drijver op zo kort mogelijke afstand werd gepasseerd. De momentane positie van de gepasseerde drijver, is gelijkgesteld aan de ingemeten positie van het meetvaartuig. De hiermee geïntroduceerde fout in de plaatsbepaling van de drijver is grotendeels systematisch, omdat de drijvers zo veel mogelijk aan dezelfde zijde zijn gepasseerd door het meetvaartuig. (Men merke op dat een systematische fout in de plaatsbepaling niet van invloed is op de berekende drijversnelheden.)

Het volgen van de drijvers is uitgevoerd met twee meetvaartuigen. Er kan worden aangenomen dat de positie van de drijvers vrijwel niet is beïnvloed door de retourstroming of de schroefstraal van de passerende meetvaartuigen, omdat de stroomvangende lichamen op voldoende diepte hingen. (Dit geldt zeker voor de 8 m- drijvers.)

Uit de veranderingen van de drijverposities zijn drijversnelheden berekend. Deze zijn karakteristiek voor de stroomsnelheden die optreden op resp. 4 m en 8 m beneden het wateroppervlak.

De aldus gemeten en berekende stroomsnelheden zijn uitgezet in figuur 3.4.

Per figuuronderdeel zijn de snelheden uitgezet, die gedurende één meetperiode zijn gemeten. Uit deze snelheden kan meestal een bepaald stroomlijnenpatroon worden afgeleid; deze stroomlijnen zijn met de hand ingetekend.

²⁾ Bij de drijfperiode van 6 uur na hoogwater treedt een onregelmatigheid op; deze drijfperiode duurt ook slechts 20 minuten.

3. DE STROMING IN DE HAVENMOND

3.1 De te verwachten stromingen

In de havenmondingen kunnen de volgende stromingen optreden:

- kombergingsstroming, als gevolg van variaties in het waterspiegelniveau;
- dichtheidsstroming, als gevolg van variaties in het zoutgehalte;
- neerstroming met verticale as, als gevolg van het langsstromende rivierwater.

3.1.1 Komberging

De stroming als gevolg van waterspiegelvariatie, zal in het vervolg worden geschat met een kombergingsbenadering:

$$V_{\text{kom}} = \frac{A_{\text{haven}}}{A_{\text{mondng}}} \cdot \frac{dh}{dt}$$

met V_{kom} = stroomsnelheid, gemiddeld over de mondingsdoorsnede,

h = waterspiegelniveau,

t = tijd,

A_{haven} = oppervlakte van het havenbekken
($\approx 605.000 \text{ m}^2$)

A_{mondng} = oppervlakte van de mondingsdoorsnede; voor de nauwste doorsnede (doorsnede C-C in figuur 2.2 en 3.1) geldt : $A_{\text{mondng}} \approx 1.430 \text{ m}^2$.

In figuur 3.2 is uitgezet, hoe de te verwachten kombergingsstroomsnelheid verloopt in de tijd. Dit verloop is berekend met bovenstaande vergelijking voor V_{kom} , uitgaande van het gemeten waterstandsverloop (figuur 2.1) en uitgaande van bovenstaande waarden voor A_{haven} en A_{mondng} .

3.1.2 Dichtheidsstroming

Bij de onderhavige metingen blijkt vrijwel geen variatie op te treden in het zoutgehalte.

De gemeten zoutconcentraties (c.q. Cl^- -concentraties) bedragen 125 à 131 mg/l, zodat er sprake is van 'zoet water' (ter vergelijking: Noordzeewater bevat globaal 18 gr. Cl^- /l). Het lage zoutgehalte is mede een gevolg van de hoge Rijnwaterafvoer (bij Lobith $3.600 \text{ m}^3/\text{s}$, tegen gemiddeld $2.200 \text{ m}^3/\text{s}$).

Omdat het zoutgehalte laag is en niet varieert, treedt er geen dichtheidsstroming op. Dit blijkt ook uit het feit dat de gemeten stromingspatronen op resp. 4 m en 8 m diepte niet significant van elkaar verschillen (zie fig. 3.4).

3.1.3

Neerstroming

Het langsstromende rivierwater veroorzaakt in de havenmonding een neerstroming met een verticale as. Bij de beschrijving van deze neer kunnen twee hoofdaspecten worden onderscheiden.

i. de (relatieve) sterkte van de neer, gedefinieerd als:

$$S_{neer} = V_{neer}/V_{rivier}, \quad \text{met:}$$

S_{neer} = de neersterkte,

V_{neer} = de maximale stroomsnelheid in de neer
(gewoonlijk optredend aan de rand van de neer);

V_{rivier} = de stroomsnelheid op de rivier.

ii. de vorm en de samenhang van de neer;

hiermee samenhangende vragen zijn:

- is de (hoofd)neer cirkelvormig of langgerekt? Over welke haveninwaartse afstand strekt de neerstroming zich uit (in verhouding tot de havenbreedte)?;

- is er sprake van één coherent stromingspatroon, c.q. is er sprake van één neer met een duidelijk centrum en concentrische stroomlijnen?

Of zijn de stroomlijnen niet duidelijk rond één centrum georiënteerd? Is er sprake van een samenstel van meerdere neren?

Er zijn tot op heden nog vrijwel geen voorspellende relaties bekend voor de neersterkte en de neervorm.

In het vervolg wordt achtereenvolgens ingegaan op:

- a. een eenvoudige relatie voor de neersterkte, die in lit. 2 wordt gegeven;
- b. de resultaten (t.a.v. neersterkte en neervorm) van een laboratoriumonderzoek naar neren in havenmondingen, zoals vermeld in lit. 3;
- c. de aandrijvende mechanismen van de neer, en hun variatie gedurende een getij.

Ad a:

In lit. 2 wordt een relatie gegeven voor de neersterkte, als functie van de karakteristieke breedte van de havenmond.

De keuze van deze karakteristieke breedte (B_k) is afhankelijk van de geometrie van de mond. Bij de Maashaven is $B_k \approx 175$ m.

De genoemde relatie geeft hierbij een neersterkte van 0,15. Het modelonderzoek en de WAQUA-berekeningen, waarop de genoemde relatie is gebaseerd, vertonen voor $B_k \approx 175$ m echter een wat hogere neersterkte van 0,15 à 0,20.

Zoals in § 3.2 zal blijken, worden bij de onderhavige Maashavenmetingen neersterkten gevonden van 0,21 à 0,33. De relatie uit lit. 2 blijkt dus een onderschatting te geven van de neersterkte.

Dit kan een gevolg zijn van het feit, dat in lit. 2 ten onrechte is aangenomen:

- dat de neersterkte naar nul nadert als de havenbreedte naar nul nadert;
- dat de neersterkte (alleen) wordt bepaald door de breedte en de geometrie van de havenmond.

Ad b:

In tegenstelling tot de laatstgenoemde aanname van lit. 2, blijkt uit laboratoriumonderzoek (lit. 3) dat de neersterkte tevens wordt bepaald door:

- het netto debiet door de havenmond (c.q. de kombergingsstroming);
een netto haveninwaarts debiet leidt tot versterking van de neer, terwijl een netto havenuitwaarts debiet leidt tot verzwakking van de neer;
- de oriëntatie van de as van de haveningang, ten opzichte van de stroomrichting op de rivier;
bij een scherpe hoek tussen de havenas en de rivierstroomrichting is de neersterkte groter dan bij een stompe hoek.

Dit betekent dat tijdens vloed en hoogwater een sterkere neerstroming verwacht kan worden dan tijdens eb en laagwater.

Want:

- tijdens vloed treedt er een haveninwaarts kombergings-debiet op, terwijl tijdens eb een uitwaarts debiet optreedt;
- de hoek tussen havenas en rivierstroomrichting is bij de Maashaven scherp tijdens vloed en stomp tijdens eb en laagwater.

Bij het genoemde laboratoriumonderzoek, zijn voor de neersterkte $S_{neer} = V_{neer}/V_{rivier}$, de volgende globale waarden gemeten:

- * 0,25, indien havenas loodrecht op rivieras staat, en indien geen netto debiet aanwezig is in de haven;
- * 0,32, als de havenas scherpe hoek van 45° maakt met de rivieras (in dit geval kan de neersnelheid mede zijn beïnvloed door instabiliteitshalingen in de haven);
- * 0,16, bij een stompe hoek van 45° ;
- * 0,30, bij een netto haveninwaarts debiet,
0,22, bij een netto havenuitwaarts debiet.

Ten aanzien van de vorm van de neerstroming, blijkt uit het laboratoriumonderzoek dat een stationaire neer in het algemeen niet cirkelvormig is: de lengte is globaal 1,5 maal groter dan de breedte. Uitgaande van een havenbreedte van 150 m, zou dit voor de Maashaven een neerlengte geven van 225 m.

Er zijn echter ook factoren die kunnen leiden tot een afwijkende neerlengte tussen laboratorium en Maashaven:

- het niet-stationaire karakter van de neerstroming, door de aanpassing aan de niet-stationaire rivierstroming;

- de hoek tussen de havenas en de stroomrichting op de rivier; bij het laboratoriumonderzoek (lit. 3) is in het geval van een scherpe hoek een lengte/breedte-verhouding gemeten van 2,3 (deze hoge waarde kan echter mede een gevolg zijn van instabiliteits-halingen in de haven);
- het netto debiet door de havenmond; bij het laboratoriumonderzoek is in het geval van een haven-inwaarts debiet een grotere lengte/breedte-verhouding gemeten dan in het geval van een uitwaarts debiet (resp. 1,65 en 1,4);
- de geometrie van de haven; de Maashaven heeft een divergerende breedte.

Ad c:

De neer in de havenmond wordt aangedreven door twee mechanismen:

- I. impulsoverdracht (ofwel schuifspanningen) in de menglaag tussen rivier en haven;
- II. drukopbouw voor het aangestroomde hoekpunt van de haveningang, als gevolg van het feit dat het aanstromende water daar snelheid verliest.

Het is enigszins onduidelijk in hoeverre deze twee mechanismen onafhankelijk zijn van elkaar.

In lit. 3 wordt alle nadruk gelegd op impulsoverdracht in de menglaag (ad I):

veranderingen in neersterkte en neervorm zijn een gevolg van veranderingen in de impulsuitwisseling. In lit. 3 wordt geen afzonderlijke aandacht besteed aan veranderingen in de drukopbouw (ad II); er wordt impliciet aangenomen dat de mechanismen I en II onderling sterk zijn gekoppeld.

In het navolgende gedeelte zal afzonderlijk aandacht worden besteed aan de ad II genoemde drukopbouw. Redenen hiervoor zijn:

- de drukopbouw is relatief eenvoudig te berekenen (afgezien van een constante factor α^2 , zoals hierna wordt beschreven);
- de grootte van de drukopbouw is mede bepalend voor de neersterkte en de neervorm; dit geldt onafhankelijk van de vraag of de mechanismen I en II sterk zijn gekoppeld.

De ad II genoemde drukopbouw leidt bij het aangestroomde havenhoekpunt tot een waterstandsverhoging ter grootte van $(\alpha \cdot U_{\text{rivier}})^2 / 2g$. Het waterstandsverval over de breedte van de havenmond wordt gegeven door:

$$\Delta h_{\text{mondning}} = \frac{\alpha^2}{2g} U_{\text{rivier}} |U_{\text{rivier}}| - B_{\text{mondning}} \cdot i_{\text{rivier}} \quad (3.2)$$

met:

- U_{rivier} = de gemiddelde stroomsnelheid op de rivier (positief indien zeewaarts gericht);
 i_{rivier} = het verhang van de rivier (positief indien de waterstand in zeewaartse richting daalt);
 $\Delta h_{\text{mondning}}$ = waterstandsverschil over de breedte van de monding (positief als waterstand aan zeewaartse zijde hoger is dan aan landinwaartse zijde);
 B_{mondning} = breedte van de havenmondning;
 g = zwaartekrachtsversnelling;
 α = factor tussen 0 en 1, waarmee U_{rivier} dient te worden vermenigvuldigd, om een karakteristieke aanstroomsnelheid van het havenhoekpunt te verkrijgen.

$$\text{Als } \left| \frac{\alpha^2}{2g} U_{\text{rivier}}^2 \right| > |B_{\text{mondning}} \cdot i_{\text{rivier}}| \quad (3.3)$$

dan is de drukopbouw voor het aangestroomde havenhoekpunt groot genoeg, om een neerstroming te doen ontstaan, waarvan de draaiingsrichting correspondeert met de stroomrichting op de rivier.

Voor de bemeten getijperiode is een berekening gemaakt van het verloop van U_{rivier} en i_{rivier} op de Nieuwe Maas voor de Maashaven. Deze berekening is uitgevoerd met het mathematische model ZWENDL voor het benedenrivierengebied. Als randvoorwaarden zijn ingevoerd de opgetreden rivierafvoeren, en de waterstandsverlopen bij Hoek van Holland en bij Zeegat Goeree. De resultaten van deze berekeningen zijn uitgetekend in fig. 3.2.a. In fig. 3.2.b is het corresponderende verloop van $\Delta h_{\text{mondning}}$ uitgetekend, uitgaande van de enigszins arbitraire aanname dat $\alpha = \frac{1}{2}$. Uit deze figuur blijkt:

- zowel bij hoogwater als bij laagwater is voldaan aan de voorwaarde van vgl. (3.3), zodat een neer kan ontstaan;
- tekenwisseling van $\Delta h_{\text{mondning}}$ treedt op $\frac{1}{4}$ uur na de laagwaterkentering, en $1\frac{1}{2}$ uur na de hoogwaterkentering; dit kan impliceren dat de draaiingsrichting van de neer na de laagwaterkentering eerder omkeert, dan na de hoogwaterkentering;
- tijdens de laagwaterkentering is $|\Delta h_{\text{mondning}}|$ globaal $1\frac{1}{2}$ maal groter dan tijdens de hoogwaterkentering; dit kan impliceren dat de laagwaterneer sneller wordt 'afgebroken' dan de hoogwaterneer;

- tijdens hoogwater is de maximale waarde van $|\Delta h_{\text{mond ing}}|$ globaal 2-maal groter dan tijdens laagwater; dat kan impliceren dat de hoogwaterneer sterker is dan de laagwaterneer. Men merke op dat de grotere waarde van $|\Delta h_{\text{mond ing}}|$ tijdens hoogwater geen gevolg is van een grotere stuwhoogte (de maximale waarde hiervan is tijdens hoogwater zelfs kleiner dan tijdens laagwater). Ze is alleen een gevolg van de kleine waarde van het rivierverhang tijdens hoogwater, als gevolg van de faseverschuiving tussen riviersnelheid en rivierverhang;
- tijdens het eerste deel van de laagwaterperiode (c.q. tussen 4 en 6 uur na h.w.) is $|\Delta h_{\text{mond ing}}|$ globaal 2-maal groter dan tijdens het tweede deel (c.q. tussen 6 en 4 uur voor h.w.); dit kan een sterkere neer impliceren tijdens de beginperiode.

Er dient opgemerkt te worden, dat de bovengenoemde verhoudingen qua grootte afhankelijk zijn van de keuze van α ; het verschil tussen $|\Delta h_{\text{mond ing}}|$ bij hoogwater en bij laagwater wordt bijvoorbeeld kleiner, naarmate α groter wordt gekozen. Het gaat in het bovenstaande dus meer om tendensen, dan om exacte verhoudingen.

3.2

De gemeten stromingspatronen in de havenmond

De stroomsnelheden in de havenmond en op de rivier zijn gemeten zoals in hoofdstuk 2 is beschreven.

Het stromingspatroon in de havenmond wordt bepaald door (zie § 3.1):

- a. de variatie van de waterstand (figuur 2.1), die leidt tot een zekere kombergingsstroming (figuur 3.2);
- b. de grootte van de stroomsnelheid op de rivier, die zorgt voor de aandrijving van een neerstroming; in figuur 3.3 is uitgezet hoe de gemeten, dieptegemiddelde stroomsnelheden op de rivier verlopen in de tijd.

De stromingspatronen die in de havenmond zijn gemeten, zijn weergegeven in figuur 3.4.

In deze figuur is een onderverdeling gemaakt op basis van de volgende getijperioden:

- | | |
|-------------------------|----------------------|
| A. laagwater | (10.30 - 15.15 uur); |
| B. stijgende waterstand | (15.15 - 17.45 uur); |
| C. hoogwater | (17.45 - 19.15 uur); |
| D. dalende waterstand | (6.45 - 10.30 uur). |

Bij deze periodenindeling is uitgegaan van de waterstandsvariatie; de genoemde perioden onderscheiden zich dus primair door verschillende kombergingsstromingen (ad a).

Uitgaande van het rivierregime (c.q. de stroming op de rivier), zou men tot de volgende, alternatieve perioden komen:

- | | |
|----------------------|----------------------------|
| - bovenafvoerregime | (11.30 - 16.15 uur); |
| - vloedregime | (16.15 - 18.45 uur); |
| - hoogwaterkentering | (± 18.45 uur); |
| - ebregime | (7.15 - 11.30 uur). |

Deze perioden onderscheiden zich door verschillende aandrijvingen van de neerstroming.

De rivierperioden vallen grotendeels samen met de waterstandsperioden, behoudens een faseverschuiving van 1 uur: de rivierperioden treden 1 uur later op.

Alvorens tot de bespreking van figuur 3.4 over te gaan, dienen eerst de volgende opmerkingen te worden gemaakt:

- * de drijfvermetingen zijn niet beïnvloed door passages van grote schepen of door de wind. Er zijn namelijk geen grote schepen gepasseerd door de havenmond en de windsterkte was zeer laag;
- * de snelheden die per onderdeel van fig. 3.4 zijn uitgezet, zijn meestal op verschillende tijdstippen gemeten, verspreid over de meetperiode van 40 minuten. Als de stroomrichtingen tijdens de meetperiode veranderen, dan resulteert dat in een warrig stromingspatroon in fig. 3.4 (zie bijv. 4 uur na h.w.);

- * het dwarsprofiel van de haveningang is niet symmetrisch (zie figuur 3.1):
- . de noordoostoever bestaat uit een verticale kademuur, zodat de drijvers hier tot de oeverlijn kunnen komen;
 - . de zuidwestoever bestaat uit een talud, waardoor de 4 m- en 8 m- drijvers resp. 20 m en 30 m uit de oeverlijn blijven (bij N.A.P.-waterstand).

In het vervolg van deze paragraaf worden de stromingspatronen uit figuur 3.4 besproken, uitgaande van de bovengenoemde waterstandsgetijfasen.

- A. Laagwater: 10.30 - 15.15 uur, 5 uur na h.w. tot 3 uur voor h.w.

De laagwaterperiode duurt relatief lang. Tijdens deze periode zijn de waterstandsvariaties slechts klein: de te verwachten kombergingsstroming is dus ook verwaarloosbaar klein: maximaal 1,5 cm/s \approx 0,03 mijl/h haveninwaarts, op 6 en 3 uur voor h.w. (Om 3 uur voor h.w. begint de komvullingsstroming van de vloedfase.)

In de periode van 6 uur na h.w. tot 3 1/2 uur voor h.w. wordt de stroomsnelheid op de rivier bepaald door de rivierafvoer. In deze periode bedraagt de stroomsnelheid voor de havenmond globaal:

$$V_{\text{rivier}} = 0,47 \text{ m/s } (\pm 0,03 \text{ m/s})$$

Rond 5 uur na h.w. is V_{rivier} groter, c.q. ongeveer 0,73 m/s, omdat de ebstroming dan nog een dominerende rol speelt.

De stromingspatronen die in de havenmond zijn gemeten vertonen géén overheersend in- of uitstromend karakter, waaruit blijkt dat komberging inderdaad vrijwel geen rol speelt.

De stroombanen in de mond zijn overwegend linksom gekromd, met een circulerend karakter. Er is echter geen sprake van één constant coherent neerpatroon.

In alle gevallen blijkt er langs de zuidwestoever, over relatief lange afstand, een haveninwaartse stroming op te treden (met snelheden van 0,05 m/s à 0,15 m/s).

Bij de noordoostoever bestaat een gelijke stroming in tegenovergestelde richting. (Deze stroming is op grotere afstand in de haven niet gemeten, omdat de drijvers door deze stroming havenuitwaarts worden verplaatst.)

Er is dus sprake van een langgerekte circulerende stroming in de haveningang.

De lengte van de circulatie is enigszins onzeker. De metingen van 6, 5 en 4 uur voor h.w., op 8 m diepte, vertonen op \pm 225 m vanaf de haveningang tekenen van een afbuiging in de richting van de havenas. Deze afstand komt globaal overeen met 1,5-maal de havenbreedte. Er zijn dus zwakke aanwijzingen dat de neerlengte ongeveer 1,5-maal groter is dan de neerbreedte, hetgeen overeen zou komen met laboratoriumonderzoek (§ 3.1, ad c).

Op 8 m diepte is om 6 uur voor h.w. (en in mindere mate om 5 uur voor h.w.) voorin de mond een relatief zeer coherente en cirkelvormige neer gemeten. Rond deze tijdstippen treedt dus een combinatie op van bovengenoemde langgerekte neer met een cirkelvormige neer voorin de havenmond.

De neer op 8 m diepte, om 6 uur voor h.w., geeft de meest eenduidige schatting van de neersterkte:

$$V_{\text{neer}}/V_{\text{rivier}} \approx (0,1 \text{ m/s})/(0,47 \text{ m/s}) = 0,21.$$

B. Stijgende waterstand: 15.15 - 17.45 uur, 2 en 1 uur voor h.w.

Door de snelle waterspiegelstijging, treedt een sterke haveninwaartse kombergingsstroming op.

Deze stroming is naar verwachting maximaal rond 1 1/2 uur voor h.w., met een snelheid van 0,11 m/s (gemiddeld over de havendoorsnede).

De metingen vertonen sterkere inwaartse stroomsnelheden, namelijk 0,1 à 0,2 m/s. Deze treden echter slechts op over een gedeelte (globaal 2/3) van de breedte van de haveningang, want:

- a. in de meetperiode van 2 uur voor h.w. treedt bij de noordoost-oever nog uitstroming op (met 0,05 m/s), als restant van de linksdraaiende laagwaterneer;
- b. in de meetperiode van 1 uur voor h.w. treedt bij de zuidwest-oever al een sterke uitstroming op (met 0,25 m/s op 4 m diepte), als onderdeel van de rechtsdraaiende hoogwaterneer.

Ad a

Om 2 uur voor h.w. (c.q. 16.15 uur) is de stroomsnelheid op de rivier ongeveer gelijk aan nul, omdat dan de laagwaterkentering optreedt. Er vindt om 2 uur voor h.w. dus geen aandrijving plaats van een neerstroming in de havenmond.

Ad b

Om 1 uur voor h.w. bedraagt de vloedstroming op de rivier ongeveer 0,59 m/s. Deze vloedstroming zorgt in de havenmond voor de aandrijving van een rechtsdraaiende circulatie. Men kan verwachten dat de circulerende stroming in de havenmond een zekere vertragingstijd vertoont ten opzichte van de aandrijvende stroming op de rivier; dit vanwege de massatraagheid van het water. Deze vertragingstijd blijkt minder te zijn dan 1 uur, want de meetperiode van 1 uur voor h.w. valt 1 uur na de stroomkentering op de rivier, terwijl in de meetperiode van 1 uur voor h.w. reeds een rechtsdraaiende circulatie blijkt op te treden. Deze circulatie treedt dan nog niet over de gehele havenbreedte op, omdat de komvullingsstroming dan nog een belangrijke rol speelt.

C. Hoogwater: 17.45 - 19.15 uur, 1/2 uur voor h.w. tot 1 uur na h.w.

Het hoogwatertijdstip is 18.15 uur.

In de periode van 1/2 uur voor h.w. tot 1 uur na h.w. is de waterstandsvariatie erg klein, zodat de kombergingsstroming ook erg klein is. De sterkste kombergingsstroming kan worden verwacht om 1 uur na h.w.: 2,5 cm/s ($\approx 0,05$ mijl/h) havenuitwaarts (over de gehele havendoorsnede).

Tijdens de h.w.-meetperiode blijkt in de havenmond een sterke, coherente, cirkelvormige, rechtsdraaiende neerstroming op te treden. De maximale snelheid in deze neer bedraagt ongeveer 0,2 m/s. De corresponderende neersterkte kan worden geschat als:

$$V_{\text{neer}}/V_{\text{rivier}} = 0,2/0,6 = 0,33.$$

Bij deze schatting is de riviersnelheid gekarakteriseerd door 0,6 m/s, op grond van de volgende overwegingen:

- het water in de havenmond bezit een zekere massa-traagheid, waardoor de neersterkte niet alleen wordt bepaald door de momentane riviersnelheid;
- de vertragingstijd van de rivierstroming is in ieder geval kleiner dan 1 uur (zie ad B);
- de momentane rivierstroming op het h.w.-tijdstip bedraagt 0,51 m/s;
- de vloedstroming op de rivier heeft een maximale waarde van 0,66 m/s om 3/4 uur voor h.w.; dit maximum treedt slechts kort op, en het is daarom niet zonder meer bepalend voor de neersterkte.

De uitgesproken cirkelvorm van de h.w.-neer komt niet overeen met de algemene vorm van stationaire neren (§ 3.1.3, ad b). Niet-stationaire neren zijn in het algemeen meer cirkelvormig. Het niet-stationaire karakter van de vloedstroming op de rivier kan dus een oorzaak zijn van de cirkelvorm van de h.w.-neer.

Om 1 uur na h.w. treedt op de rivier nog steeds een vloedstroming op, met ongeveer 0,18 m/s.

Tijdens de meetperiode van 1 uur na h.w. is in de havenmond daarom nog een rechtsdraaiende circulatie gemeten. Hierin blijken nog relatief hoge snelheden op te treden van 0,2 m/s, die overeenkomen met de neersnelheden rond h.w.

Om 1 uur na h.w. is de circulatie echter veel minder coherent dan op het h.w.-tijdstip, met name op het 4 m-niveau. (Deze mindere coherentie kan mede een gevolg zijn van veranderingen van de stroomrichtingen in de neer tijdens de meetperiode.)

D. Dalende waterstand: 6.45 - 10.30 uur, 2 uur t/m 4 uur na h.w.

Door de daling van de waterspiegel kan een havenuitwaartse kombergingsstroming worden verwacht, die toeneemt van 2,5 cm/s (\approx 0,05 mijl/h) om 1 uur na h.w., tot 6 cm/s (\approx 0,12 mijl/h) om 3 en 4 uur na h.w.

Om 2, 3 en 4 uur na h.w. is inderdaad over (vrijwel) de gehele havenbreedte een uitstroming gemeten met snelheden van 5 à 10 cm/s.

De hoogwaterkentering op de rivier treedt op om ongeveer 1 1/2 uur na h.w. Daarna treedt de ebstroming op, die toeneemt tot een maximale waarde van 0,75 à 0,80 m/s om 4 à 4 1/2 uur na h.w.

Om 4 uur na h.w. zijn de condities ongeveer gelijk - maar tegengesteld - aan de condities van 1 uur voor h.w.:

- de stroomsnelheid op de rivier bedraagt 0,75 m/s om 4 uur na h.w. en 0,60 m/s om 1 uur voor h.w.;
- de verwachte kombergingsstroming bedraagt 0,06 m/s om 4 uur na h.w. en 0,08 m/s om 1 uur voor h.w.

Op grond hiervan zou men om 4 uur na h.w. in de havenmond een stromingspatroon verwachten, dat analoog - maar tegengesteld - is aan het patroon van 1 uur voor h.w.: men zou bij de zuidwestoever een linksdraaiende circulatie verwachten, met een havenuitwaartse kombergingsstroming over het noordoostelijke deel van de haveningang.

Het stromingspatroon dat om 4 uur na h.w. is gemeten, blijkt bij de zuidwestoever echter geen duidelijke circulerende stroming te vertonen. Dit ondanks het feit dat de riviersnelheid om 4 uur na h.w. aanzienlijk groter is dan om 1 uur voor h.w.

Alleen om 2 uur na h.w. lijken bij de zuidwestoever de beginselen van een linksdraaiende circulatie op te treden. Deze beginselen zijn om 3 uur na h.w. echter geheel onderdrukt door de kombergingsstroming.

3.3

Resume van gemeten neerstromingen

Zoals werd verwacht (§ 3.1.3, ad c) blijkt zowel tijdens hoogwater als tijdens laagwater een neerstroming op te treden.

De sterkte (V_{neer}/V_{rivier}) van de hoogwaterneer blijkt 1½ maal groter te zijn dan de sterkte van de laagwaterneer. De mogelijke oorzaken hiervan zijn reeds genoemd in § 3.1.3, ad b en c:

- i. in de vloedperiode voorafgaande aan hoogwater, treedt een sterke haveninwaartse kombergingsstroming op;
- ii. tijdens vloed bestaat een scherpe hoek tussen de oriëntatie van de havenas en de rivierstroming;
- iii. tijdens hoogwater is het aandrijvende waterstandsverschil (Δh_{mondig}) over de breedte van de havenmonding groter dan tijdens laagwater.

Na de laagwaterkentering blijkt de draaiingsrichting van de neer binnen één uur om te draaien.

Tijdens de (vloed)periode van stijgende waterstand blijkt er steeds een zekere neerstroming te bestaan; daarentegen wordt de neerstroming tijdens de (eb)periode van dalende waterstand geheel onderdrukt door de kombergingsstroming (hoewel de komberging tijdens eb zwakker is dan tijdens vloed).

Bij deze verschillen tussen vloed- en ebperiode spelen eveneens de bovengenoemde factoren i t/m iii een rol, en daarnaast als vierde factor:

- iv. na de laagwaterkentering verandert Δh_{mondig} binnen kortere tijd van teken, dan na de hoogwaterkentering.

4. DE GEMETEN SEDIMENTCONCENTRATIES

4.1 De sedimentconcentraties op de rivier

In figuur 4.1 zijn de dieptegemiddelde sedimentconcentraties uitgezet, die in de loop van de tijd zijn gemeten in de vier meetpunten op de rivier.

Deze concentratieverlopen vertonen fluctuaties, die enerzijds een gevolg zijn van feitelijke concentratiefluctuaties en anderzijds van statistische onnauwkeurigheden (zie hoofdstuk 2) in de metingen. Om de invloed van de statistische meetonnauwkeurigheden te verminderen, is ook een middeling uitgevoerd over de vier meetpunten. Het resultaat hiervan is de 'riviergemiddelde concentratie', die ook is uitgezet in figuur 4.1.

In de riviergemiddelde concentratie weegt de concentratie voor de havenmond relatief het zwaarst, omdat daar twee meetpunten liggen.

De riviergemiddelde sedimentconcentratie vertoont de volgende kenmerken:

- a. gedurende het grootste gedeelte van de tijd bedraagt de rivierconcentratie 40 à 55 mg/l;
- b. tijdens en na de stroomkenteringen treden tijdelijke concentratieverlagingen op tot 25 à 30 mg/l.

Ad a

De gemeten rivierconcentratie van 40 à 55 mg/l is relatief laag. Dit ondanks het feit dat de Rijnafvoer relatief hoog is: 3.600 m³/s bij Lobith (de gemiddelde afvoer is 2.200 m³/s).

Toch is de gemeten rivierconcentratie niet onwaarschijnlijk laag: voorafgaande aan de meetcampagne is er namelijk al langere tijd (c.q. gedurende één maand) een Rijnafvoer boven de 3.000 m³/s opgetreden, met een maximale afvoer van 5.800 m³/s op 4 april. Met name de hoogwatergolf rond 4 april zal grote hoeveelheden rivierslib hebben afgevoerd naar zee, waardoor de slibconcentratie op 26 april relatief laag is.

De grootste riviergemiddelde concentratie (50 mg/l) is gemeten tijdens de laagwaterperiode.

Dit is waarschijnlijk een gevolg van de aanvoer van nieuw sediment met de rivier.

Tijdens eb treedt ook een tijdelijk verhoogde concentratie op (tot 46 mg/l), door de dan optredende hogere stroomsnelheid.

Ad b

De meest voor de hand liggende verklaring voor de concentratieverlaging rond de kentering is: het bezinken van de grovere sedimentfractie, omdat deze bij de optredende lagere stroomsnelheid niet in suspensie gehouden kan worden.

Er zal nu worden nagegaan of deze verklaring ook kan worden gerechtvaardigd vanuit:

- i. het te verwachten zandpercentage in het riviersediment;
- ii. de gemeten concentratieverticalen op de rivier.

Ad i

De afname van de rivierconcentratie tijdens kentering treedt binnen 1 uur op. Als een sedimentdeeltje in deze periode over de gehele diepte (= 12 m) uitzakt, dan impliceert dit een valsnelheid van 3,3 mm/s. Deze valsnelheid treedt op bij een korrel-diameter van 70 μm , uitgaande van bolvormige kwartsdeeltjes in stilstaand water.

Bij deze diameterschatting moeten twee kanttekeningen worden gemaakt:

- in werkelijkheid is geen sprake van bolvormige deeltjes en van stilstaand water; dit betekent dat een valsnelheid van 3,3 mm/s samengaat met een grotere diameter dan 70 μm ;
- de genoemde afname van de rivierconcentratie impliceert nog geen bezinking over de gehele waterdiepte; dit betekent dat de valsnelheid kleiner mag zijn dan 3,3 mm/s.

Eenvoudigheidshalve kan worden aangenomen, dat deze twee effecten elkaar opheffen.

Dit impliceert dan dat het sediment, dat tijdens de kentering bezinkt, een diameter heeft van minimaal 70 μm . Uit de concentratieafname van ± 45 mg/l naar ± 28 mg/l, volgt dan dat $\pm 37\%$ (= 17 mg/l) van het riviersediment uit zand bestaat. Dit is geen ongewoon hoog percentage, want tijdens de voorafgaande periode van hoge rivierafvoer is waarschijnlijk veel slib afgevoerd. Bovendien is in het verleden voor de Maasmond wel een 90% zand gemeten in het riviersediment.

Ad ii

De vraag is nu of het veronderstelde bezinkingsproces ook wordt gerechtvaardigd door de gemeten verticale concentratieprofielen. Stel dat 37% van het riviersediment een valsnelheid heeft van 3,3 mm/s, terwijl de valsnelheid van het overige sediment 0 mm/s bedraagt. Dan zou de verhouding tussen de 'bodemconcentratie' en de 'oppervlakteconcentratie' ongeveer 1,9 moeten bedragen, als de stroomsnelheid 0,5 m/s is.³⁾ Deze stroomsnelheid treedt gedurende langere tijd op tijdens laagwater. Echter bij de concentratieprofielen die tijdens laagwater zijn gemeten, is de verhouding tussen 'bodem' en 'oppervlakte' meestal 1,0 à 1,4 (in plaats van 1,9). Hieruit kan worden geconcludeerd dat minder dan 37% van het sediment een valsnelheid heeft van 3,3 m/s. Hieruit kunnen echter moeilijk conclusies worden getrokken ten aanzien van diametergrootte.

³⁾ Hierbij is uitgegaan van theoretische evenwichtsprofielen. De 'bodemconcentratie' is de concentratie op 0,5 m boven de bodem en de 'oppervlakteconcentratie' is de concentratie op ongeveer 1 1/2 m onder het wateroppervlak.

Tijdens de kenteringsperioden kan men verwachten dat er tijdelijk een grotere verhouding tussen bodem- en oppervlakteconcentratie optreedt (als gevolg van de bezinking). Bij een aantal verticaalmetingen blijkt binnen 2 m boven de bodem, inderdaad een relatief verhoogde concentratie op te treden. Bij andere verticaalmetingen (bijv. bij alle metingen in meetpunt R2) blijft tijdens de kentering echter sprake van een zeer uniforme concentratieverdeling over de diepte.

Resumerend kan ten aanzien van het veronderstelde bezinkingsproces tijdens de kentering, het volgende worden gesteld:

- het bezinkingsproces is niet onwaarschijnlijk, gezien de zandpercentages die het riviersediment bevat;
- de gemeten verticale concentratieprofielen corresponderen voor een groot deel niet met de veronderstelde bezinking.

4.2

De sedimentconcentraties in de haven

De dieptegemiddelde sedimentconcentraties die in de haven zijn gemeten, zijn uitgezet in figuur 4.2.

Hierbij zij opgemerkt dat de sedimentconcentraties zeer uniform verdeeld blijken te zijn over de waterdiepte: de concentratievariëatie over de hoogte bedraagt zelden meer dan 5 mg/l.

De achtergrondconcentratie blijkt achterin de haven (bij meetpunten 7 t/m 9) ongeveer 28 mg/l te bedragen, de achtergrondconcentratie is iets groter: ongeveer 30 mg/l.

Bij meetpunten 7 t/m 9 (op \pm 1.350 m vanaf de rivier) treden géén variaties op in de concentratie.

Kennelijk is de invloed van de sedimentwisseling met de rivier hier vrijwel niet meer merkbaar.

Bij meetpunt 4 t/m 6 (op \pm 600 m vanaf de rivier) is de invloed van de rivier wèl merkbaar, gezien de daar optredende concentratieverhoging (tot 35 à 38 mg/l) rond het hoogwater van 18.00 uur.

De meetpunten 1 t/m 3 liggen het dichtst bij de rivier, c.q. op \pm 200 m vanaf de rivieroeverlijn. In deze meetpunten zijn de sterkste concentratievariëaties gemeten. Deze variëaties kunnen grotendeels vanuit interacties met de rivier worden verklaard. De gemeten significante concentratievariëaties zijn:

- vanaf 11.00 uur tot 15.30 uur is bij de zuidwestoever een verhoogde concentratie van 38 mg/l gemeten, als gevolg van de interactie van de laagwaterneer;
- rond 15.45 uur (c.q. kort voor hoogwater) treedt een concentratieverhoging op tot 40 à 45 mg/l, als gevolg van de haveninwaartse kombergingsstroming.

In de volgende paragraaf wordt gedetailleerder ingegaan op de interactie tussen rivier en haven en op de resulterende concentratievariëaties in de haven.

4.3

De sedimentuitwisseling tussen rivier en haven

De sedimentuitwisseling tussen rivier en haven wordt hoofdzakelijk bepaald door:

- de kombergingsstroming en de neerstroming in de havenmond (zie § 3.2);
- de slibconcentratie op de rivier (zie § 4.1);

Er is een schatting gemaakt van de totale hoeveelheid slib die in de bemeten getijperiode is uitgewisseld door de kombergingsstroming. Deze schatting is gebaseerd op:

- a. de (verwachte) kombergingssnelheden uit fig. 3.1;
- b. de sedimentconcentraties die zijn gemeten in de meetpunten R3 en R4 op de rivier, of in de punten 1 t/m 3 in de haven (afhankelijk van de richting van de komberging).

De schatting resulteerde in een uitwisseling van globaal 3.500 kg slib tijdens de bemeten getijperiode. Dit komt op jaarbasis overeen met 5.500 m³ verrekenbare baggerspecie, aannemend dat één verrekenbare m³ ongeveer 450 kg droge stof bevat.

De geschatte uitwisseling door de komberging is globaal 7 maal kleiner dan de jaarlijks gebaggerde hoeveelheid, die over de jaren 1977 t/m 1985 gemiddeld 40.000 m³ bedroeg. De verschilfactor 7 niet onverklaarbaar groot gezien het volgende:

- de sedimentuitwisseling is waarschijnlijk relatief laag tijdens de bemeten periode;
- de uitwisseling door neerstromingen is buiten beschouwing gelaten;
- de schatting van de uitwisseling door de komberging is zeer onnauwkeurig; een onnauwkeurighedsfactor 3 is zeer goed mogelijk, alleen al vanwege de onnauwkeurigheid van de rivierconcentraties.

In het vervolg worden de uitwisselingsprocessen in de opeenvolgende getijfasen afzonderlijk besproken:

A. laagwater: 5 uur na h.w. tot 3 uur voor h.w.

Tijdens laagwater treedt in de havenmond een linksdraaiende neerstroming op. Hierdoor wordt riviersediment aangevoerd door de zuidwestelijke helft van de haveningang.

Tussen 6 uur na h.w. en 3 uur voor h.w. blijkt in het zuidwestelijke meetpunt 3 inderdaad een verhoogd concentratieniveau op te treden (+ 38 mg/l), terwijl in de meer noordoostelijk gelegen meetpunten de concentratie lager is (+ 32 mg/l). Ondanks stochastische variaties in de meetwaarden, kan het genoemde concentratieverschil significant worden genoemd; de relatief hogere concentratie bij meetpunt 3 is namelijk meerdere malen gemeten.

Bij de meetpunten 4 t/m 6 blijkt tijdens laagwater geen enkele concentratieverhoging op te treden. Dit is vanzelfsprekend gezien de lage neersnelheden en de betrekkelijk grote afstand tot de haveningang (650 m voor meetpunt 6).

Bij de gemeten neersnelheid van 0,1 m/s duurt het $\pm 1 \frac{3}{4}$ uur voor het riviersediment bij meetpunt 6 kan zijn aangekomen. In deze periode is het sediment al grotendeels bezonken (gezien het feit dat de rivierconcentratie tijdens kentering binnen ± 1 uur sterk afneemt).

Bovendien is het zeer waarschijnlijk dat de primaire neer niet tot meetpunt 6 reikt.

Het sediment dat door de neer wordt uitgewisseld, bezinkt kennelijk grotendeels in het voorste deel van de haven (in ieder geval binnen 600 m vanaf de ingang).

B. Stijgende waterstand: 1 en 2 uur voor h.w.

Er treedt tussen 2 $\frac{1}{2}$ en 1 $\frac{1}{2}$ uur voor h.w. een sterke haveninwaartse kombergingsstroming op, die tussen 1 $\frac{3}{4}$ en 1 $\frac{1}{4}$ uur voor h.w. maximaal is ($\approx 0,11$ m/s).

Deze stroming zorgt voor haveninwaarts transport van riviersediment. De concentratie van het aangevoerde sediment is afhankelijk van de rivierconcentratie.

Tussen 2 $\frac{1}{2}$ en 1 $\frac{1}{2}$ uur voor h.w. treedt op de rivier een verlaagde concentratie op met een minimum van 25 à 30 mg/l tussen 1 $\frac{3}{4}$ en 1 $\frac{1}{4}$ uur voor h.w. Dit betekent dat tot 1 uur voor h.w. in de haveningang geen (sterke) verhoging van de concentratie verwacht kan worden.

De gemeten concentraties in de haveningang (bij meetpunten 1 t/m 3) blijken tussen 2 $\frac{1}{4}$ en 1 $\frac{1}{4}$ uur voor h.w. wel enige toename te vertonen, namelijk van 33 mg/l naar 37 mg/l.

De rivierconcentratie neemt vanaf ± 1 uur voor h.w. toe tot 40 à 45 mg/l om 1 $\frac{1}{4}$ uur voor h.w.

Alle meetpunten (1 t/m 3) in de haveningang vertonen om 1 $\frac{1}{2}$ uur voor h.w. eveneens een verhoogde concentratie tot 40 à 45 mg/l.

Bij het verder haveninwaarts gelegen meetpunt 6 is van 1 $\frac{1}{2}$ uur voor h.w. tot 1 uur na h.w. een significante concentratieverhoging gemeten tot 35 à 38 mg/l. Deze verhoging is een gevolg van sedimentaanvoer vanuit de havenmond.

Men merke op dat om 1 à 2 uur voor h.w. het concentratieniveau in de havenmond (bij meetpunt 3) reeds hoger is dan bij meetpunt 6. De komvullingsstroming begint om 2 $\frac{1}{2}$ uur voor h.w. Dit betekent dat de concentratie bij meetpunt 6 vanaf 1 $\frac{1}{2}$ uur voor h.w. al een toename kan vertonen, door aanvoer van sediment uit de havenmond (hoewel er dan waarschijnlijk nog geen sprake is van aanvoer van sediment vanaf de rivier).

De kombergingsstroming treedt aanvankelijk vooral op langs de zuidwestoever. Hierdoor is de concentratieverhoging bij meetpunt 6 het grootst, terwijl bij meetpunt 4 vrijwel geen verhoging optreedt.

Bij een komvullingssnelheid van 0,15 à 0,2 m/s bedraagt de transporttijd vanaf de rivier tot meetpunt 6 0,9 à 1,2 uur.

Deze tijdsperiode komt globaal overeen met de kenteringstijd op de rivier: bij kentering is de riviersnelheid gedurende 1 1/2 uur lager dan 0,2 m/s. Men zou dus kunnen veronderstellen dat de sedimentconcentratie tijdens het transport naar meetpunt 6 tot hetzelfde niveau afneemt als tijdens de kentering op de rivier. Echter, tijdens kentering blijkt de concentratie af te nemen tot 27 à 35 mg/l, terwijl bij meetpunt 6 concentraties boven 35 mg/l zijn gemeten. Dit verschil kan worden verklaard uit het feit dat tijdens de rivierkentering de stroomsnelheid afneemt tot nul, terwijl de komberging een permanente stroomsnelheid van 0,15 à 0,2 m/s veroorzaakt. Hierdoor is de sedimentatie tijdens kentering op de rivier sterker dan tijdens het transport naar meetpunt 6.

C. Hoogwater: h.w. en 1 uur na h.w.

Tijdens de hoogwaterperiode is er geen kombergingsstroming meer die zou zorgen voor een sterke sedimentaanvoer. Tijdens hoogwater is er wel een sterke neerstroming in de havenmond. Deze neer is echter alleen in een beperkt gebied in de mond gemeten: de meetpunten 1 t/m 3 liggen haveninwaarts buiten de gemeten

Bovendien suggereren de drijvermetingen ook dat er slechts een geringe uitwisseling plaatsvindt tussen de rivier en de neer, en eveneens tussen de neer en de haven (want er verdwijnen geen drijvers vanuit de neer naar de rivier of de haven).

De gemeten concentraties in meetpunten 1 t/m 3 blijken van 1/2 uur voor h.w. tot 1 uur na h.w. een significante afname te vertonen.

Dit kan ondanks de sterke neerstroming verklaarbaar worden geacht, vanwege de beperkte omvang van de neer en de relatief geringe uitwisseling.

(Ter vergelijking: bij de laagwaterneer liggen de meetpunten 1 t/m 3 wèl binnen het neergebied; bij deze neer vindt ook een 'uitwisseling' van drijvers plaats tussen neer en rivier.)

Bij meetpunten 5 en 6 lijkt de afname van de concentratie minder snel te verlopen dan bij 1 t/m 3.

De oorzaak hiervan kan worden gezocht in een fijnere gradering van het gesuspendeerde sediment bij meetpunten 5 en 6.

D. Dalende waterstand: 2 t/m 4 uur na h.w.

In de periode van dalende waterstand is er over de gehele breedte van de havenmond sprake van een havenuitwaartse kombergingsstroming. Hierdoor wordt in deze periode de sedimentconcentratie in de haven niet beïnvloed door de concentratie op de rivier.

De periode van dalende waterstand treedt op aan het begin van de meetcampagne: van 8.00 uur tot 10.00 uur. Tijdens deze periode is in de meetpunten 1 t/m 5 een vrijwel identiek concentratieverloop gemeten: een afname van + 46 mg/l naar + 33 mg/l. De relatief hoge aanvangsconcentratie van 46 mg/l kan alleen een gevolg zijn van een sterke aanvoer van rivierslib voor en tijdens het h.w. van 5.55 uur.

Als de gemeten concentratie van 46 mg/l fysische betekenis heeft, dan zou dit betekenen dat er een groot verschil bestaat tussen het h.w. van 5.55 uur en 18.15 uur. Na het h.w. van 18.15 uur is de slibconcentratie namelijk al binnen 1 uur afgenomen tot 33 à 35 mg/l. Dit verschil is alleen mogelijk als rond 5.55 uur op de rivier een lokale en tijdelijke slibwolk zou zijn opgetreden. Deze wolk moet lokaal en tijdelijk zijn geweest, want om 7.30 uur bedraagt de gemeten rivierconcentratie nog slechts + 25 mg/l. Echter het is zeer waarschijnlijk dat de concentratieverlopen, die tussen 8.00 en 10.00 uur in de meetpunten 1 t/m 5 zijn gemeten, geen fysische betekenis hebben; waarschijnlijk zijn ze een gevolg van een instelproces van de apparatuur. De redenen hiervoor zijn:

- de meetpunten 4 en 5 liggen met punt 6 in één meetraai, terwijl de punten 1 t/m 3 in een andere meetraai liggen dan 4 t/m 6. De afstand tussen deze twee meetraaien is ongeveer 600 m. Hierdoor is het fysisch onverklaarbaar dat de gemeten concentratieverlopen in de meetpunten 4 en 5 vrijwel identiek zijn aan die in 1 t/m 3, terwijl ze sterk verschillen van het gemeten verloop in meetpunt 6: de gemeten concentratie in 6 bedraagt constant + 30 mg/l.
- er zijn in de haven twee troebelheidssensoren gebruikt, waarbij de meetpunten 1 t/m 5 met de ene sensor zijn bemeaten, en de punten 6 t/m 9 met de andere sensor. Het is dus zeer waarschijnlijk dat de vrijwel identieke concentratieverlopen in meetpunt 1 t/m 5, een gevolg zijn van een 'verlopende' meetsensor.

5. CONCLUSIES

5.1 De neerstroming in de havenmond

Er zijn in de havenmond neerstromingen gemeten, met de navolgende sterkten (zoals gedefinieerd in § 3.1.3):

$$\begin{aligned} V_{\text{neer}}/V_{\text{rivier}} &= 0,21 \text{ tijdens laagwater;} \\ &= 0,33 \text{ tijdens hoogwater.} \end{aligned}$$

Deze sterkten komen qua orde van grootte overeen met sterkten die bij laboratoriumonderzoek (lit. 3) zijn gemeten.

De hoogwaterneer is $1\frac{1}{2}$ maal sterker dan de laagwaterneer.

Mogelijke oorzaken hiervan zijn:

- de sterke haveninwaartse kombergingsstroming voorafgaand aan hoogwater;
- de scherpe hoek tussen de as van de haveningang en de vloedstroming op de rivier;
- het relatief grote (aandrijvende) waterstandsverval over de breedte van de havenmonding tijdens hoogwater.

De hoogwaterneer blijkt zeer coherent te zijn, en uitgesproken cirkelvormig. De laagwaterneer daarentegen is incoherent, en heeft een lengte/breedte-verhouding van minimaal 1,5.

Na de laagwaterkentering op de rivier, past de draaiingsrichting van de neer zich binnen één uur aan.

Tijdens de (eb)periode van dalende waterstand wordt de neerstroming geheel door de kombergingsstroming onderdrukt.

5.2 De sedimentuitwisseling tussen rivier en haven

De gemeten concentratievariatiën in de haven waren slechts klein, omdat de rivierconcentratie laag was. Laatstgenoemde varieerde meestal tussen 40 en 50 mg/l, met tijdelijke verlagingen tot 25 à 30 mg/l rond de kenteringen.

De achtergrondconcentratie in de Maashaven bedroeg 28 mg/l.

De neerstromingen veroorzaken een significante concentratieverhoging in het voorste deel van de haven: op 200 m vanaf de rivier is in het uitstromende deel van de laagwaterneer een concentratie van 38 mg/l gemeten, tegenover 32 mg/l in het uitstromende deel. In de meetpunten op 600 m vanaf de rivier blijkt de laagwaterneer geen concentratieverhoging meer te veroorzaken.

De sterkste concentratieverhoging in de haven wordt veroorzaakt door sedimentaanvoer met de haveninwaartse kombergingsstroming voorafgaand aan hoogwater. Hierbij treden concentratiemaxima op van ongeveer 44 en 38 mg/l, op resp. 200 m en 600 m vanaf de rivier.

De tijdsduur van de haveninwaartse kombergingsstroming is korter dan de tijdsduur van de neerstromingen. Mede op grond hiervan is het aannemelijk dat de aangevoerde sedimenthoeveelheden door resp. de komberging en de neerstroming, qua orde van grootte niet sterk van elkaar verschillen.

LITERATUUR

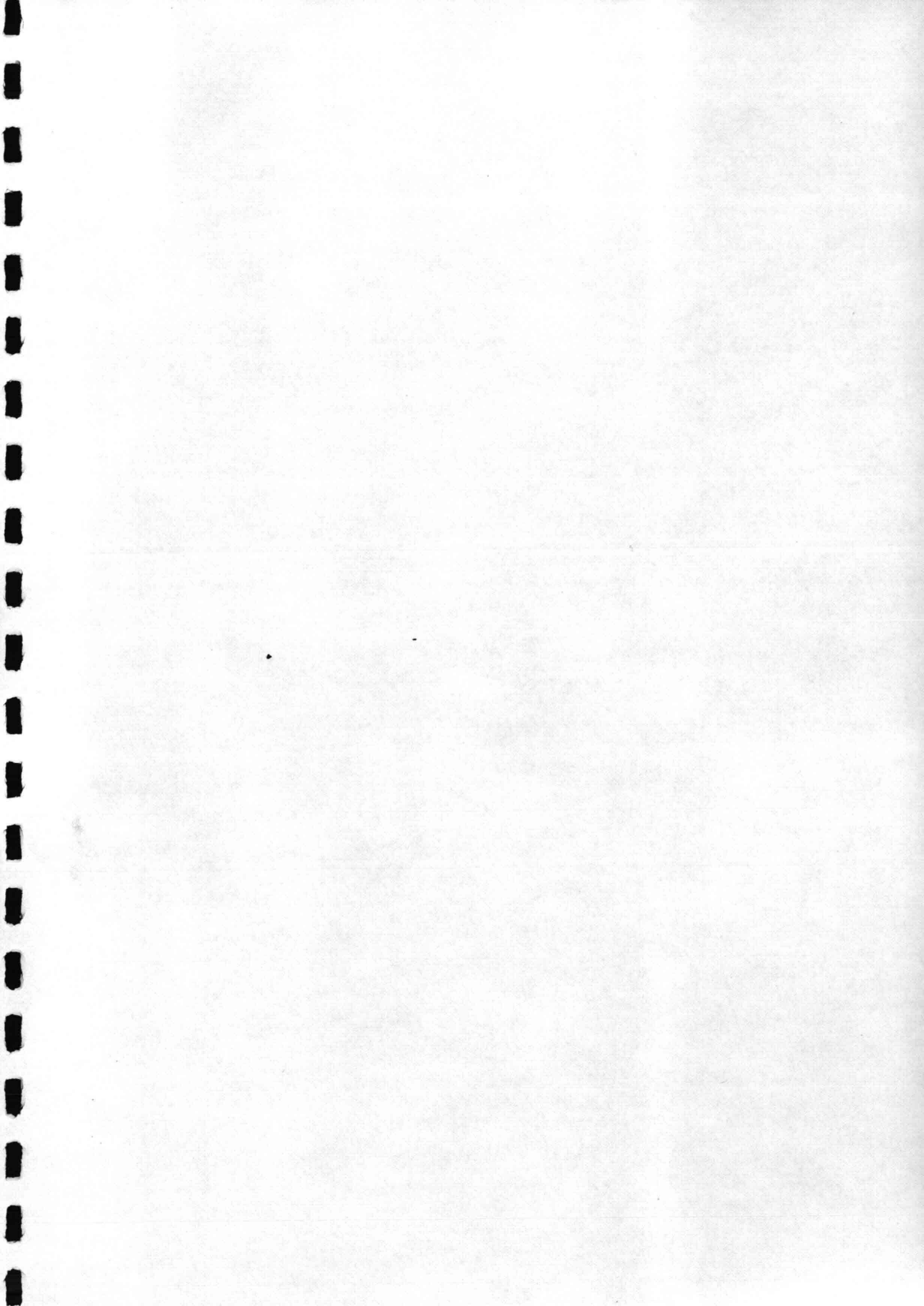
1. Meetprogramma's en meetverslagen:
 - a. "Meetprogramma riviermeting", 26 april 1986, projectnummer 710.003, Rijkswaterstaat, Dienst Binnenwateren/R.I.Z.A., Dordrecht,
 - b. "Drijvermeting in de mond van de Maashaven", 26 april 1986, code 101-86-41, Gemeentewerken Rotterdam.

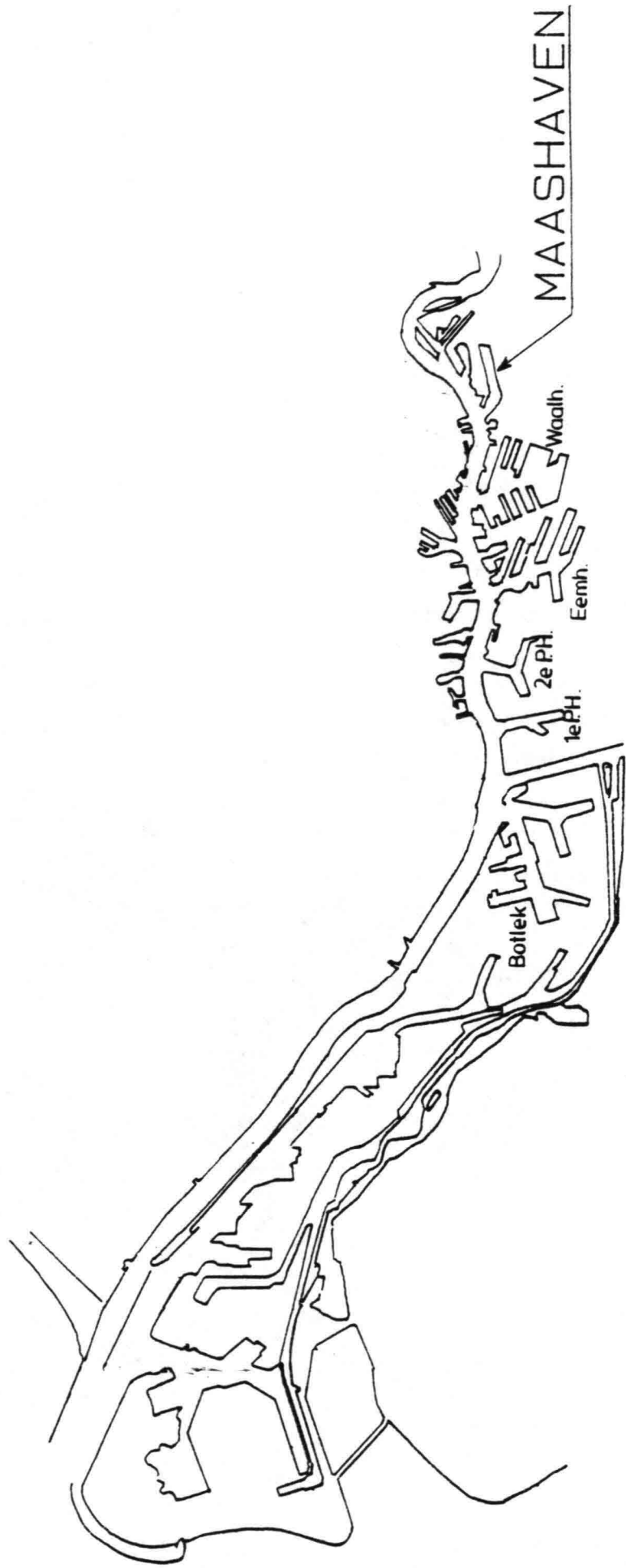
2. Dollee, A.W. en De Reus, J.H., 1986, Waterbeweging in en bij de havenmond. Transportmechanismen van slib", PT/Civiele Techniek, jrg. 41, nr. 3.

3. Booij, R., 1986, "Metingen van uitwisselingen tussen rivier en haven", T.U. Delft, rapport nr. 9-86.

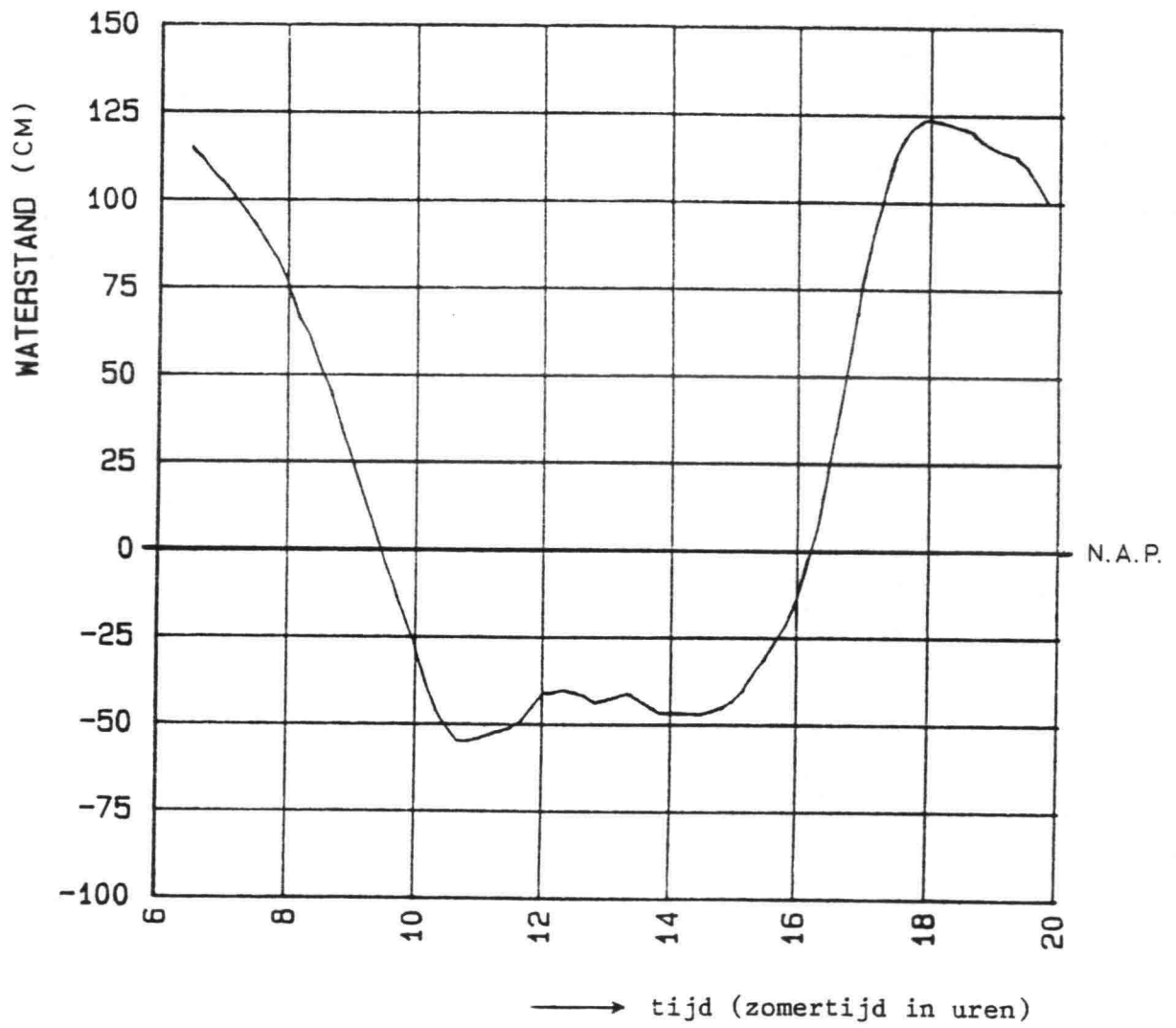
LIJST VAN FIGUREN

- 1.1 Locatie van de Maashaven
- 2.1 Het waterstandsverloop bij de Maashaven op 26-4-1986
- 2.2 Locaties van de meetverticalen in de haven en op de rivier
- 3.1 Dwarsdoorsnede van de haveningang
- 3.2 De te verwachten kombergingsstroming, op basis van het gemeten waterstandsverloop
- 3.2.a Stroomsnelheid en verhang op de rivier voor de Maashavenmonding (berekend met ZWENDL)
- 3.2.b Waterstandsverval over de breedte van de havenmond, op basis van ZWENDL-berekening
- 3.3 De gemeten dieptegemiddelde stroomsnelheden op de rivier
- 3.4 De gemeten stromingspatronen in de havenmond
- 4.1 De gemeten dieptegemiddelde sedimentconcentraties op de rivier
- 4.2 De gemeten dieptegemiddelde sedimentconcentraties in de haven

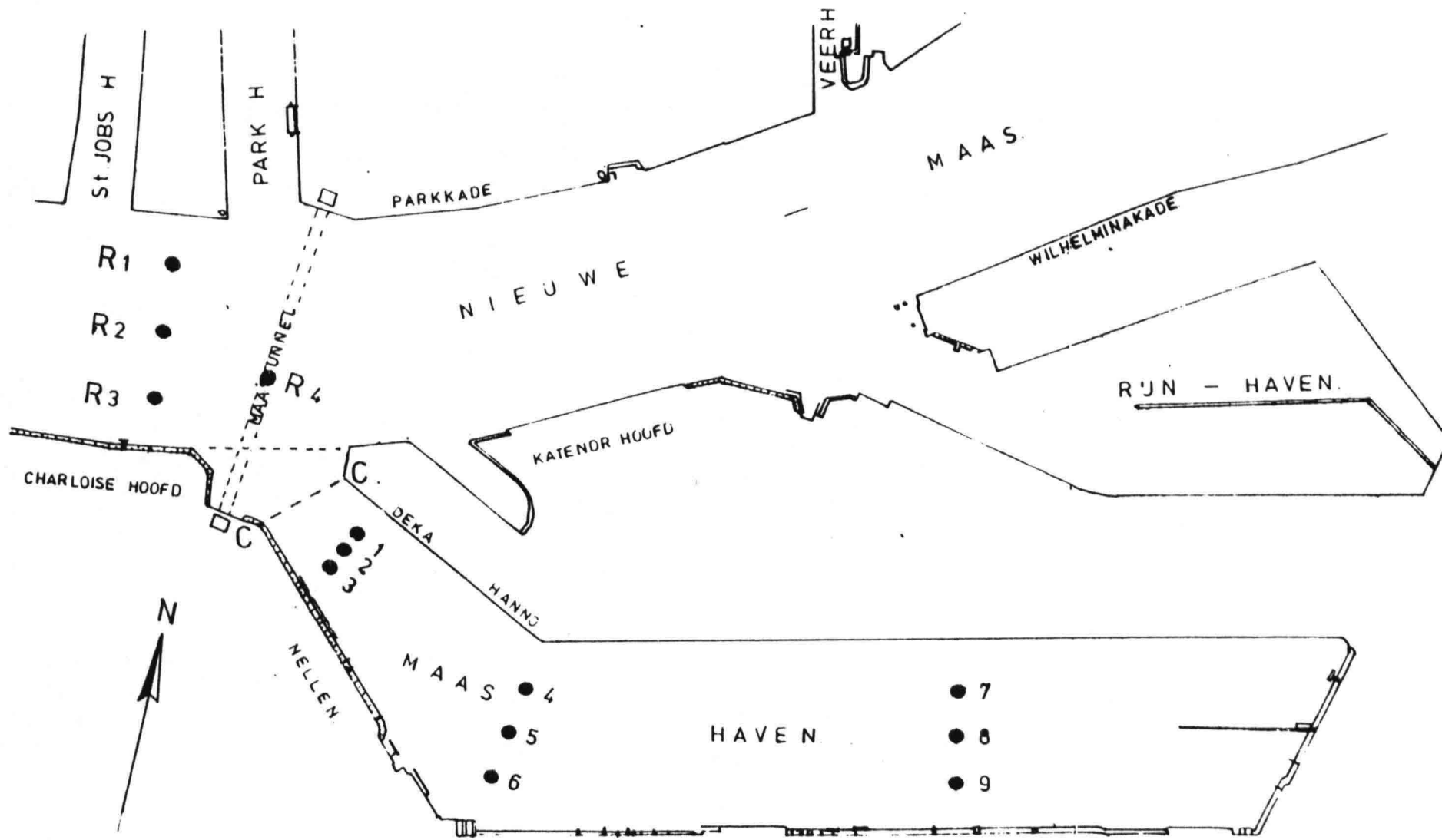




Figuur 1.1 Locatie van de Maashaven

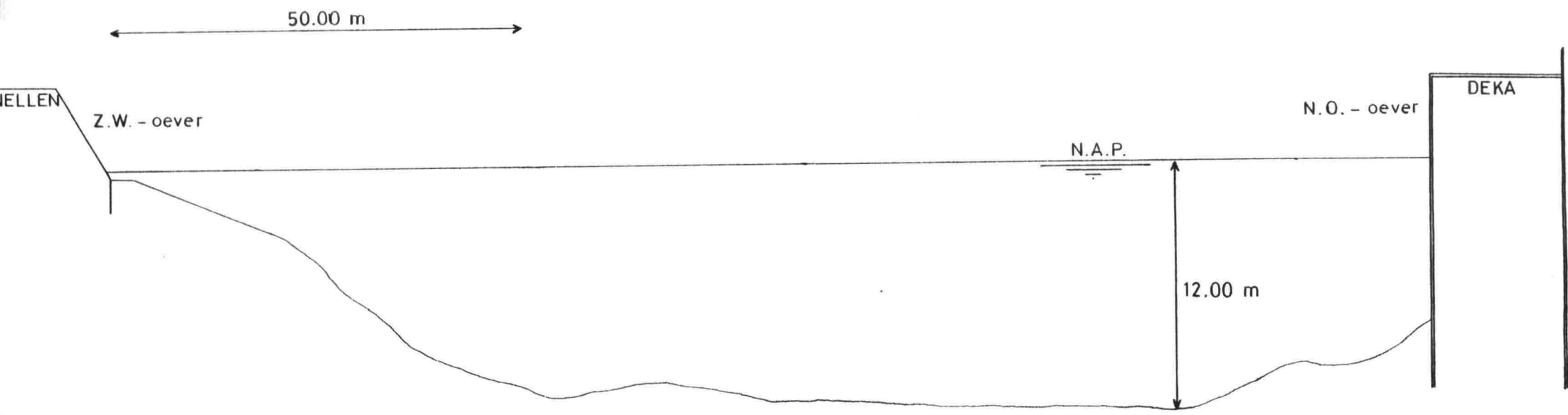


Figuur 2.1 Het waterstandsverloop bij de Maashaven op 26-4-1986



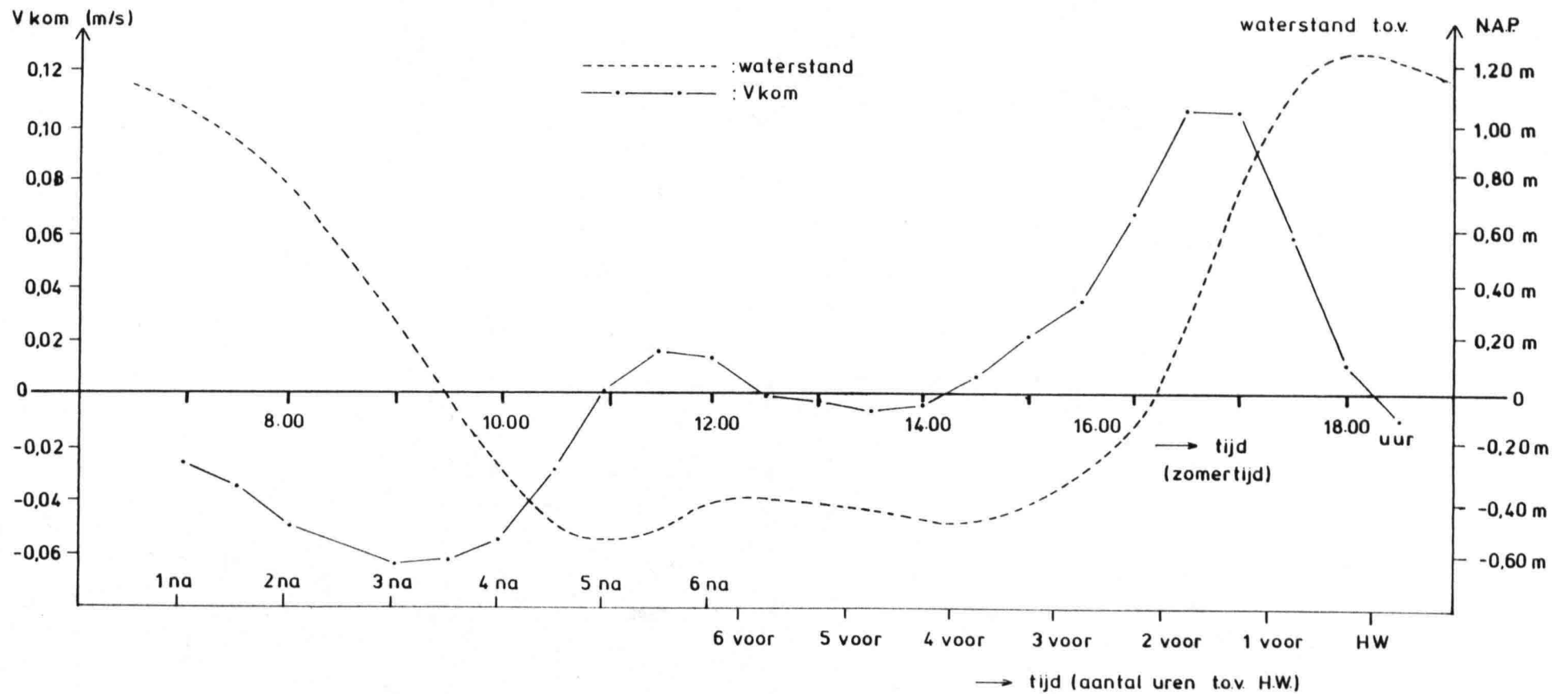
Figuur 2.2

Locaties van de meetverticalen in de haven en op de rivier



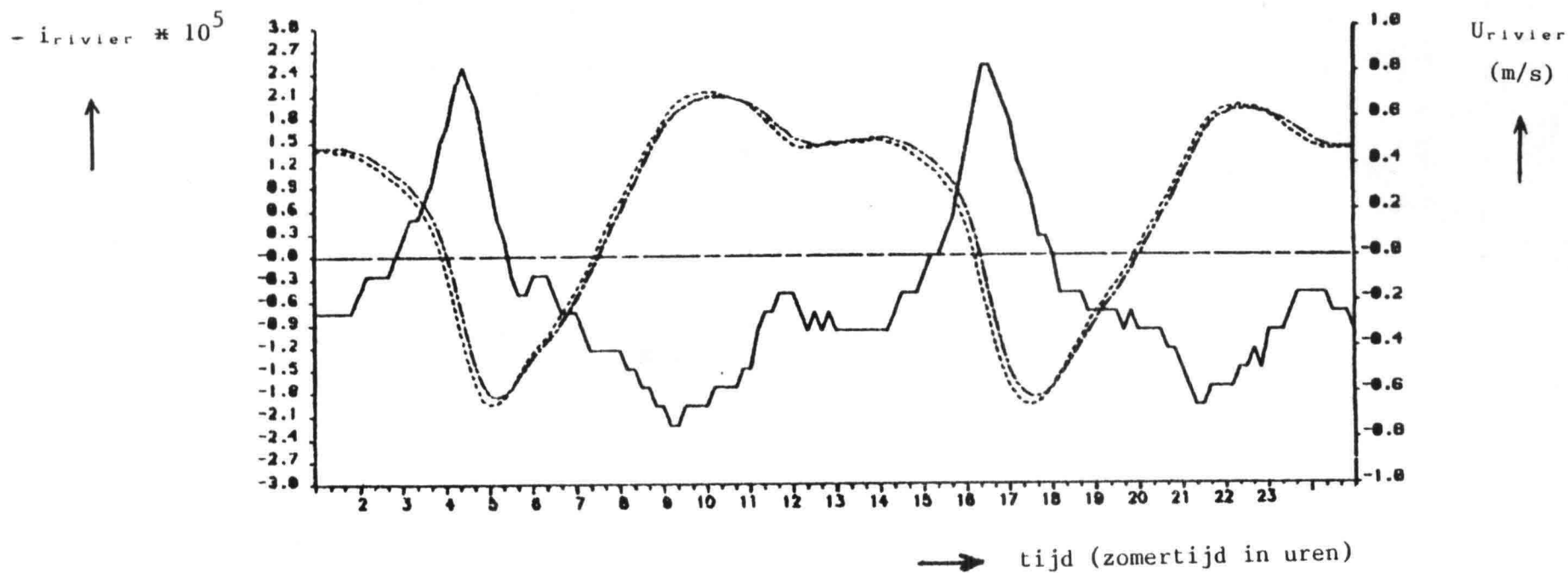
DWARSDOORSNEDE C - C (zie figuur 2.2)

Figuur 3.1 Dwarsdoorsnede van de haveningang



V_{kom} = kombergingsstroomsnelheid, gemiddeld over de havendoorsnede (zie § 3.1)

Figuur 3.2 De te verwachten kombergingsstroming, op basis van het gemeten waterstandsverloop



— : $-i_{rivier} \cdot 10^5$

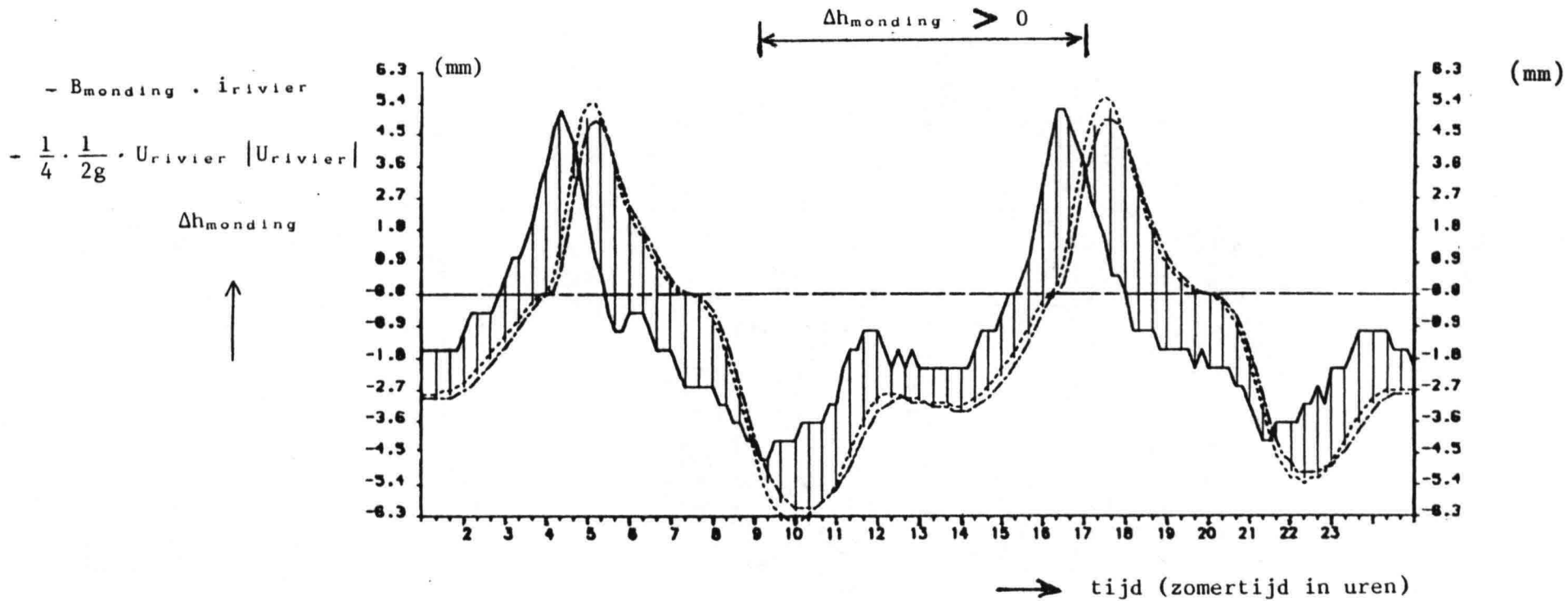
..... : U_{rivier} op ± 700 m stroomafwaarts van de Maashaven

- - - - : U_{rivier} " ± 300 m stroomopwaarts van de Maashaven

Symboolbetekenis : zie §3.1.3, bij vgl.(3.2)

Figuur 3.2.a

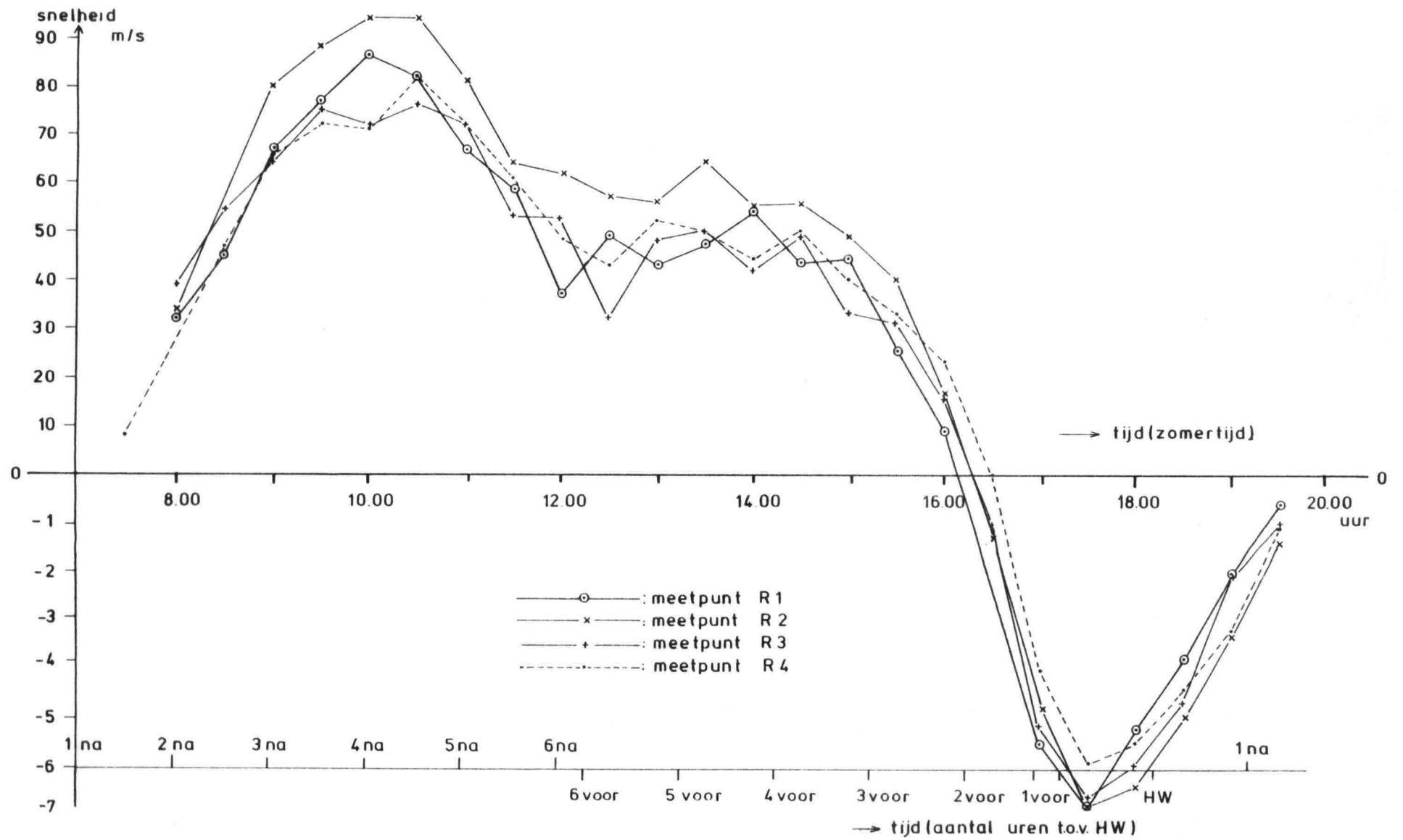
Stroomsnelheid en verhang op de rivier voor de Maashavenmonding
(berekend met ZWENDL)



- : $- B_{\text{mondning}} \cdot i_{\text{rivier}}$, met $B_{\text{mondning}} = 210 \text{ m}$
- : $-\frac{1}{4} \cdot \frac{1}{2g} \cdot U_{\text{rivier}} \cdot |U_{\text{rivier}}|$ op $\pm 700 \text{ m}$ stroomafwaarts van de Maashaven
- - - : " " " $\pm 300 \text{ m}$ stroomopwaarts van de Maashaven
- ||||| : $\Delta h_{\text{mondning}}$

Symbolbetekenis: zie §3.3.3, bij vgl.(3.2)

Figuur 3.2.b Waterstandsverval over de breedte van de havenmond, op basis van ZWENDL-berekening



Figuur 3.3 De gemeten dieptegemiddelde stroomsnelheden op de rivier

Figuur 3.4 De gemeten stromingspatronen in de havenmond

Toelichting

I Per figuuronderdeel zijn de stromingspatronen weergegeven die zijn gemeten op 4 m diepte en op 8 m diepte, gedurende de volgende drijfperiodes (c.q. meetperiodes):

figuur- onder- deel:	drijfperiode:	centraal tijdstip t.o.v. h.w.:	waterstands- getijfase:	rivier- regime:
A1	10.35 - 11.55	5 uur na	laagwater	eb
A2	11.35 - 11.55	6 uur na	laagwater	bovenafvoer
A3	11.55 - 12.35	6 uur voor	laagwater	bovenafvoer
A4	12.55 - 13.35	5 uur voor	laagwater	bovenafvoer
A5	13.55 - 14.35	4 uur voor	laagwater	bovenafvoer
A6	14.55 - 15.35	3 uur voor	laagwater	bovenafvoer
B1	15.55 - 16.35	2 uur voor	stijgend	bovenafvoer
B2	16.55 - 17.35	1 uur voor	stijgend	vloed
C1	17.55 - 18.35	h.w.	hoogwater	vloed
C2	18.55 - 19.35	1 uur na	hoogwater	h.w.-kentering
D1	7.35 - 8.15	2 uur na	dalend	eb
D2	8.35 - 9.15	3 uur na	dalend	eb
D3	9.35 - 10.15	4 uur na	dalend	eb

II De weergegeven stromingspatronen bestaan uit:

- de gemeten drijversnelheden en -richtingen, weergegeven door een getal met een pijltje;
de drijversnelheden worden vermeld in zeemijlen per uur
(1 zeemijl/uur = 0,515 m/s);
- gestippelde stroomlijnen die 'op het oog' zijn ingetekend; langs de stroomlijnen zijn pijlen getekend, waarvan de lengte globaal overeenkomt met de lokaal gemeten drijversnelheden
(schaal: 1½ cm ≈ 0,2 zeemijl/uur).

00029-

00029-

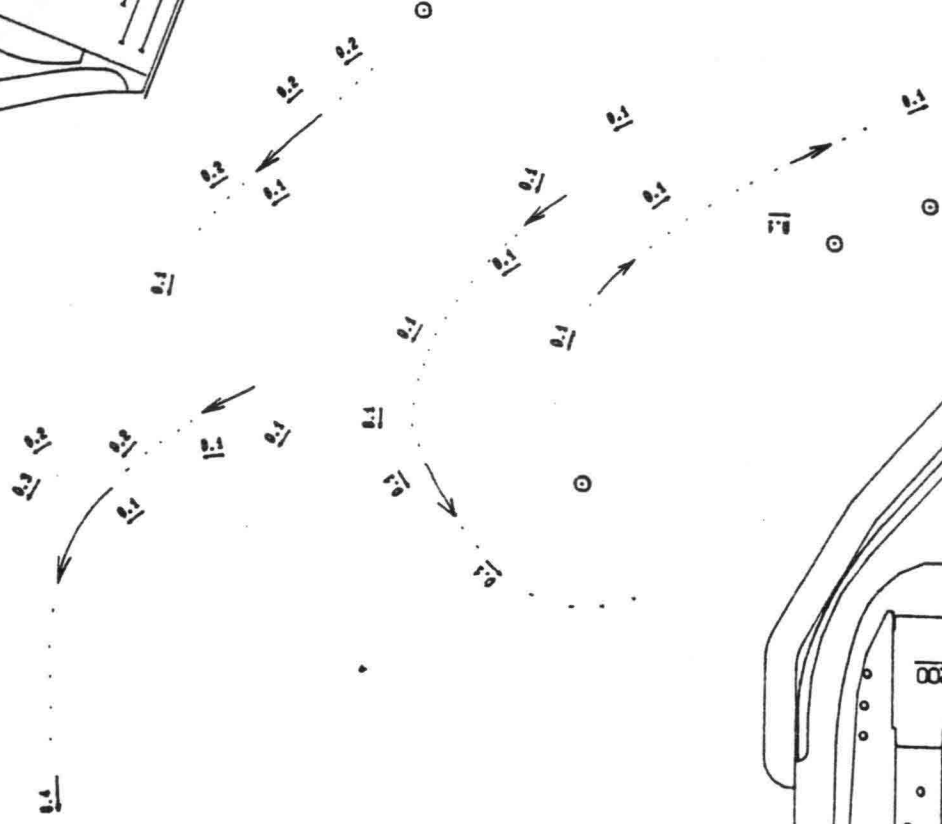
200 m

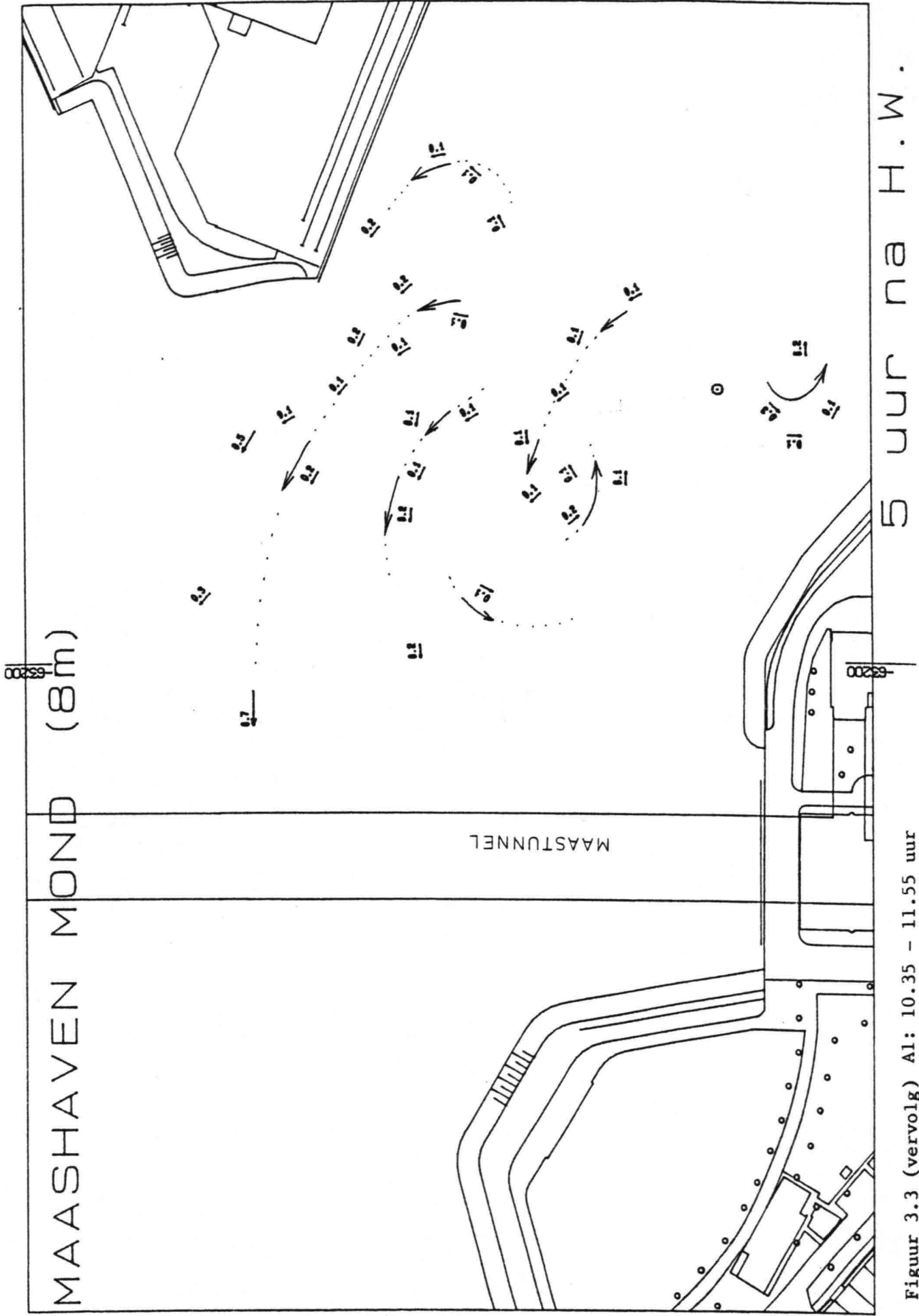
MAASHAVEN MOND (4m)

MAASTUNNEL

5 uur na H.W.

(snelheid in zeemijlen per uur)



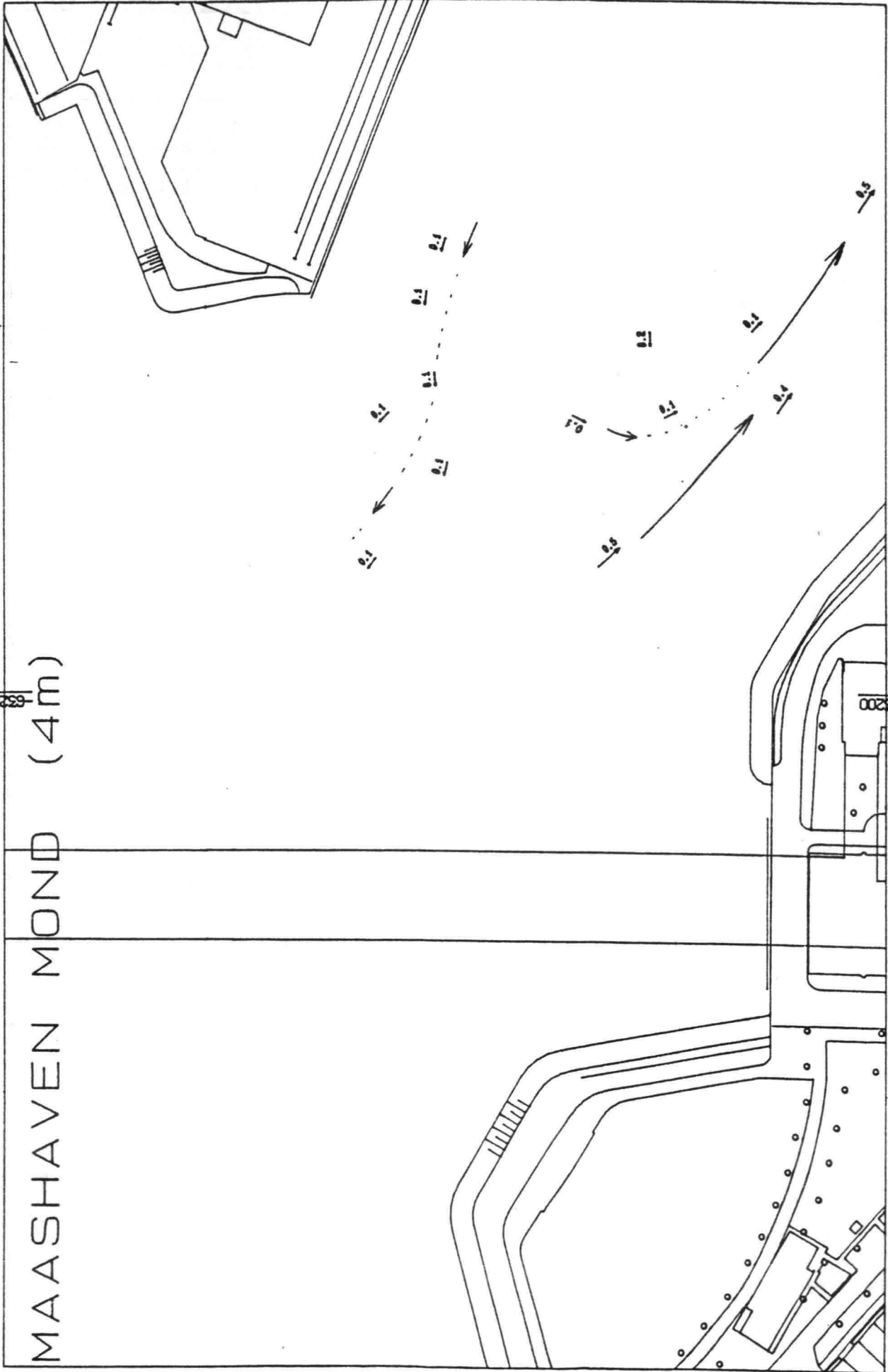


5 uur na H.W.

Figuur 3.3 (vervolg) A1: 10.35 - 11.55 uur

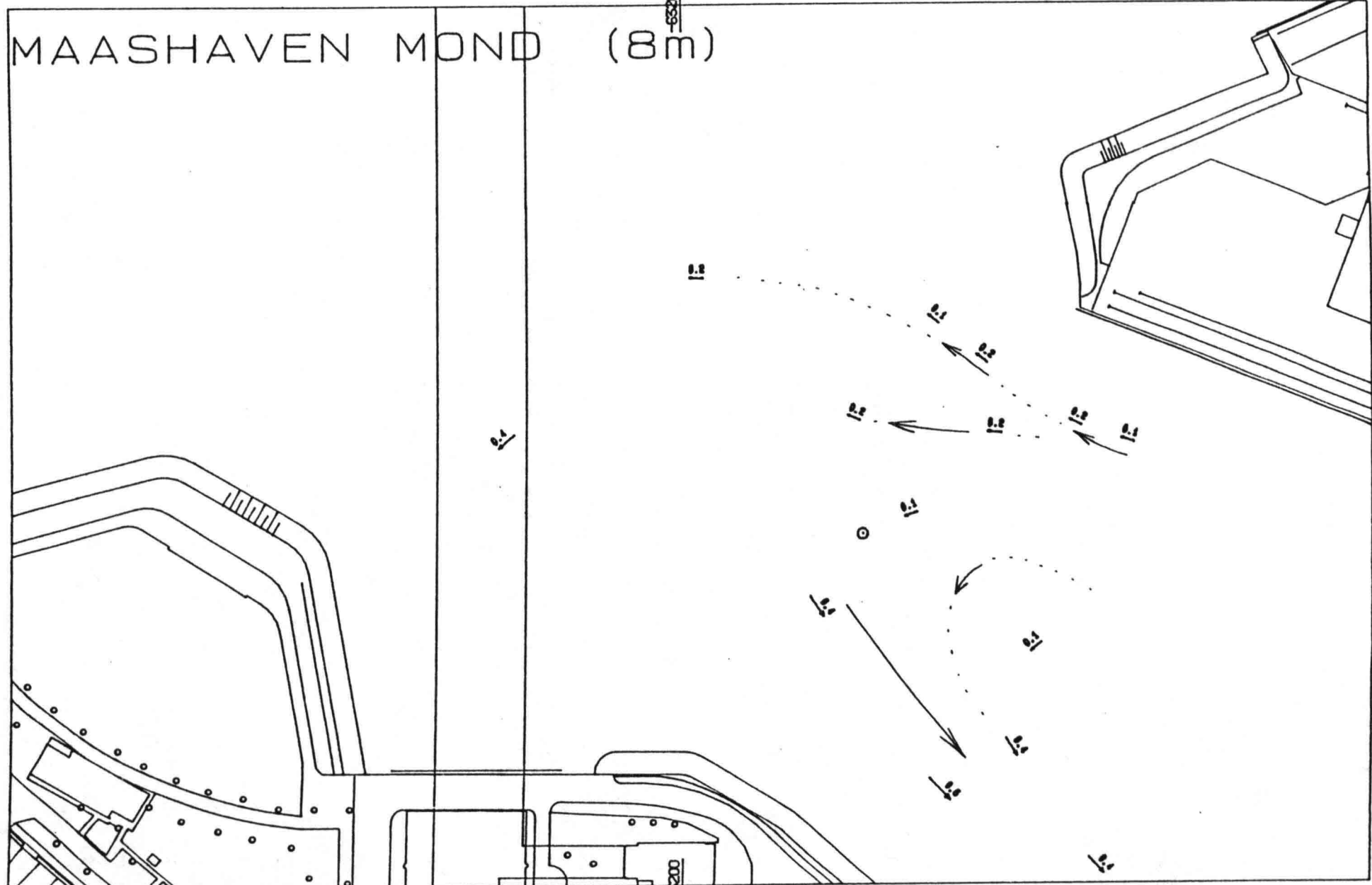
MAASHAVEN MOND (4m)

200 m



(snelheid in zeemijlen per uur)

6 uur na H.W.



Figuur 3.3 (vervolg) A2: 11.35 - 11.55 uur

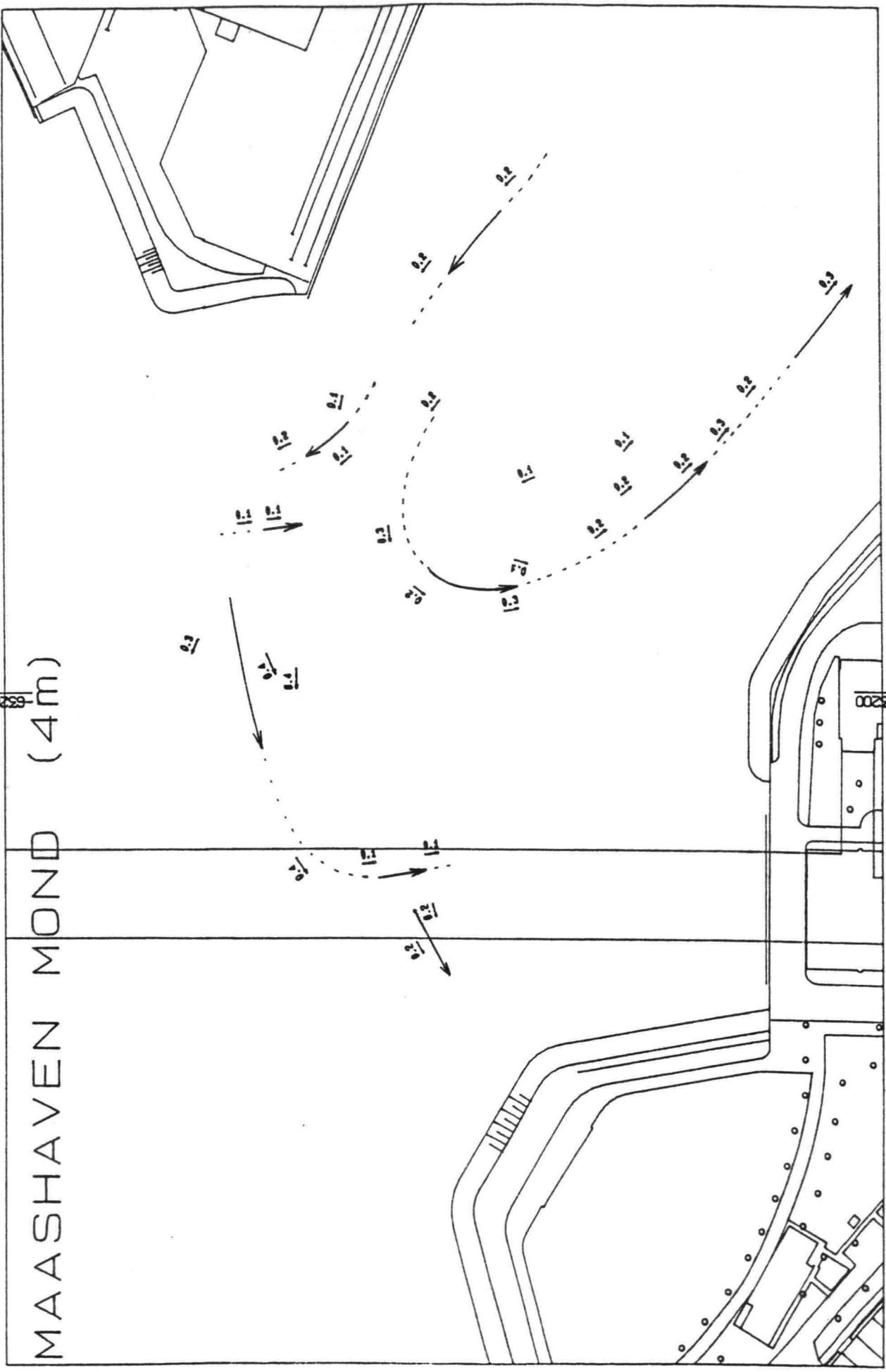
6 uur na H.W.

00029-

00029-

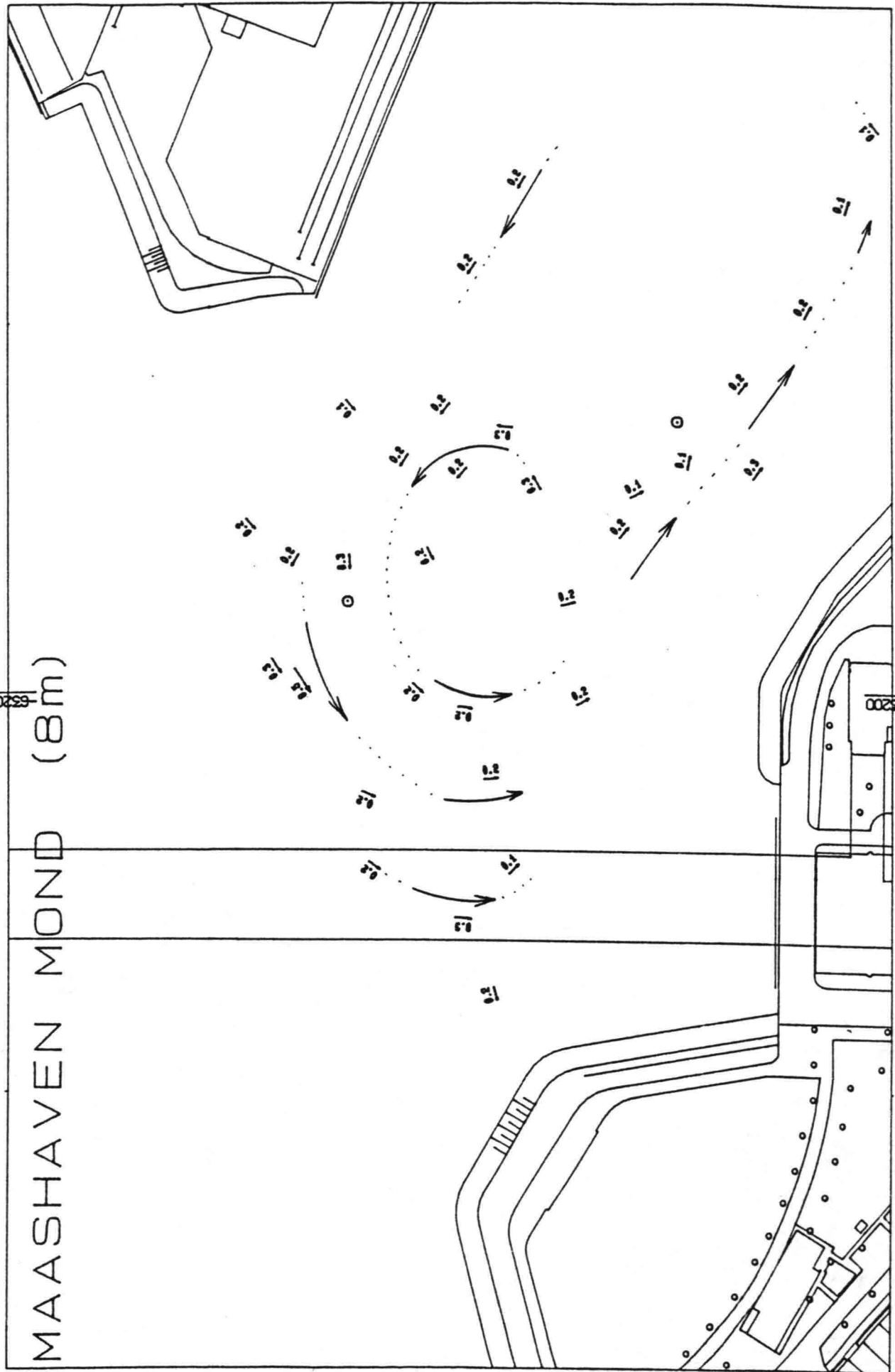
200 m

MAASHAVEN MOND (4m)



6 uur voor H.W.

(snelheid in zeemijlen per uur)



6 uur voor H.W.

Figuur 3.3 (vervolg) A3: 11.55 - 12.35 uur

MAASHAVEN MOND (4m)

200 m

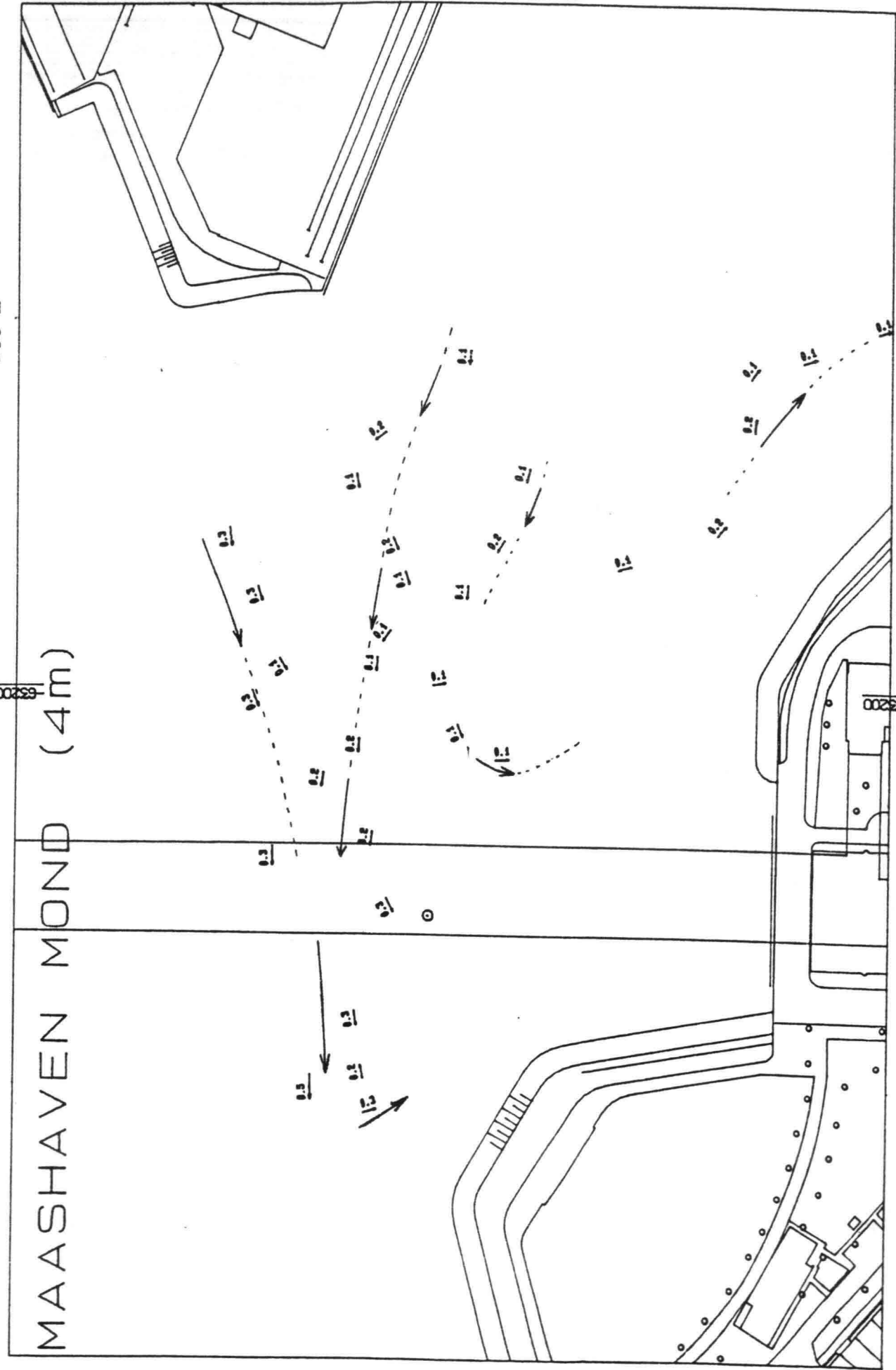
00029

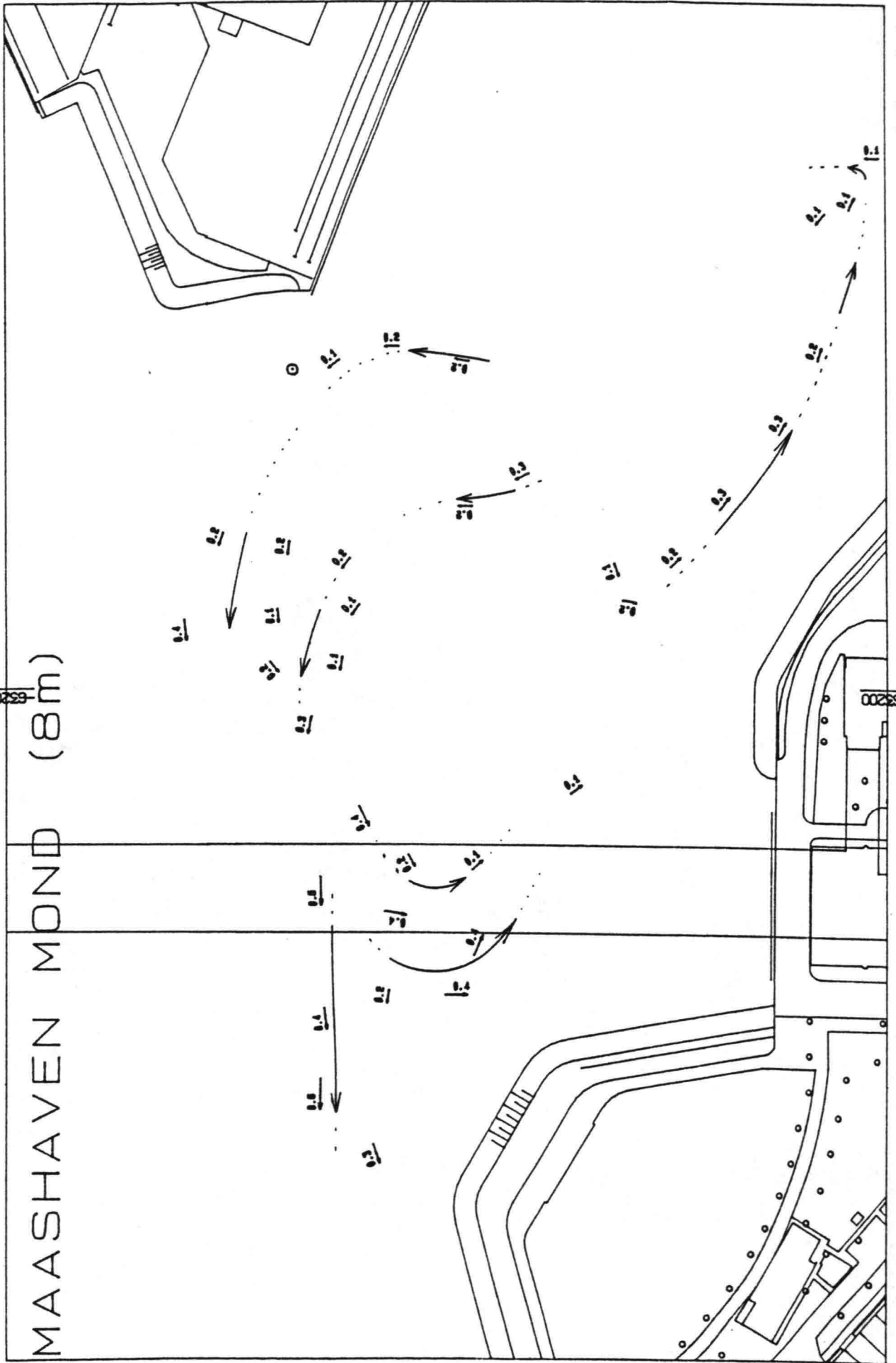
00259

00029

(snelheid in zeemijlen per uur)

5 uur voor H.W.





5 uur voor H.W.

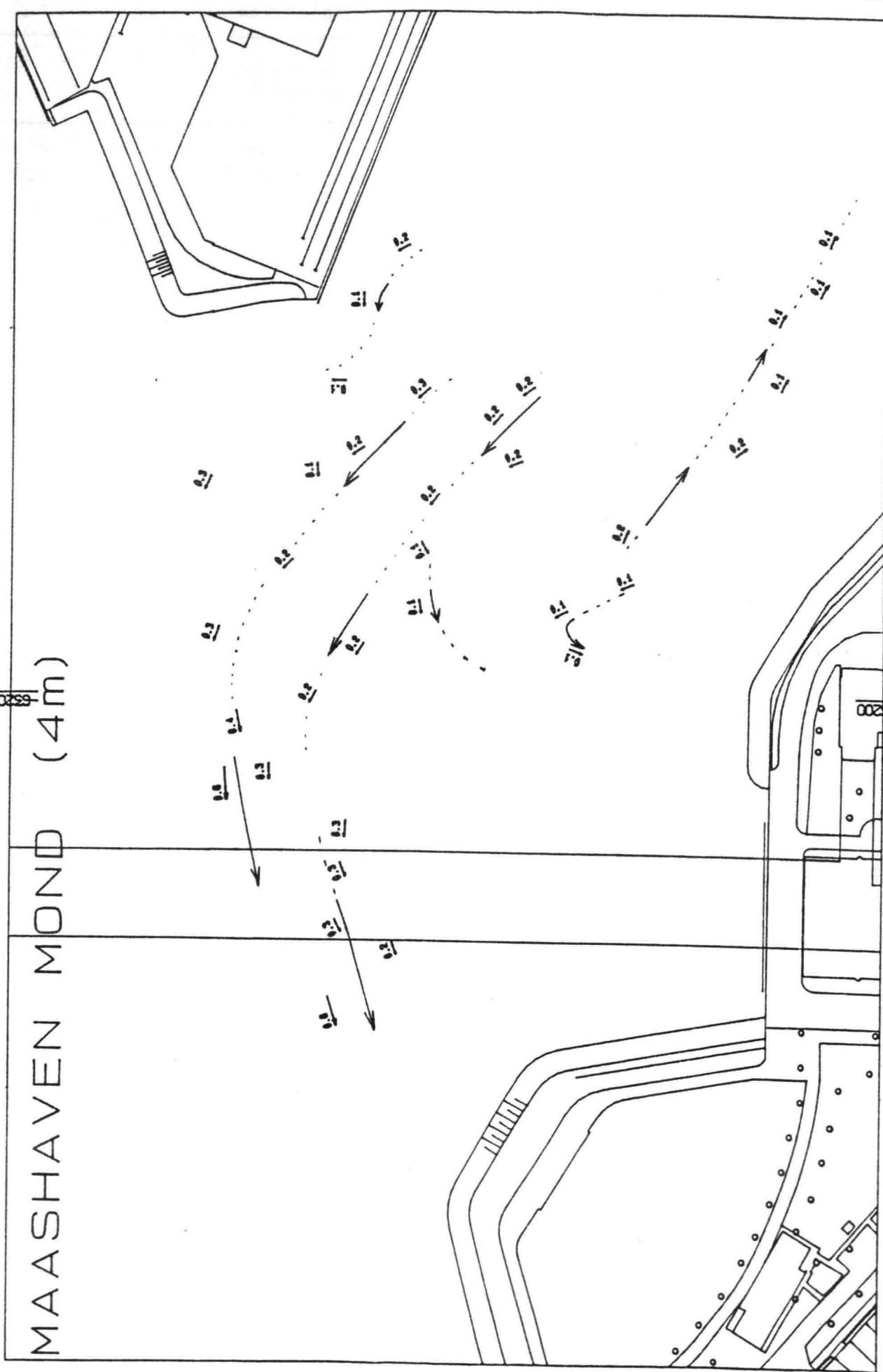
MAASHAVEN MOND (8m)

Figuur 3.3 (vervolg) A4: 12.55 - 13.35 uur

200 m

00029

00029



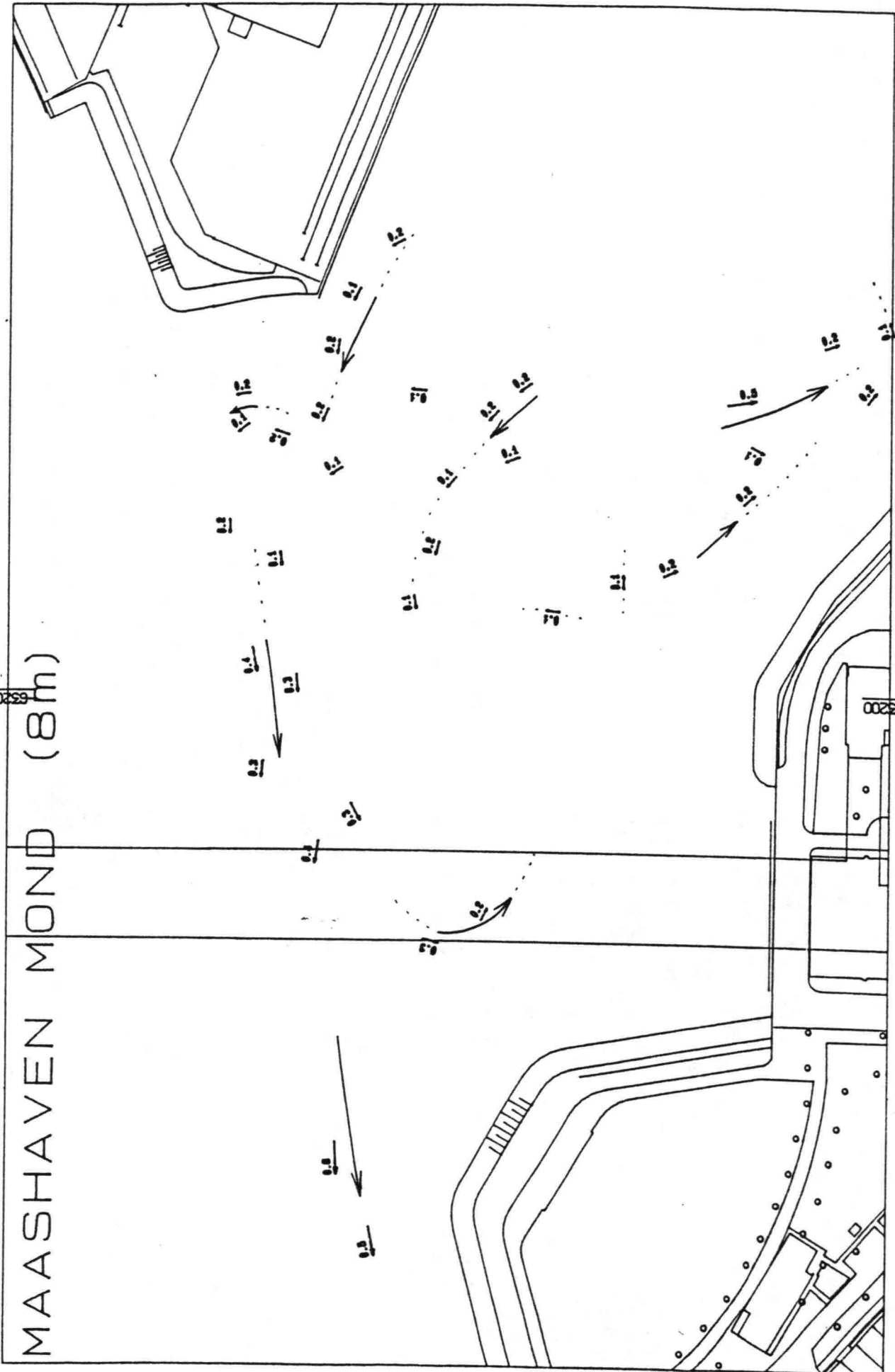
MAASHAVEN MOND (4m)

4 uur voor H.W.

(snelheid in zeemijlen per uur)

00029

00029

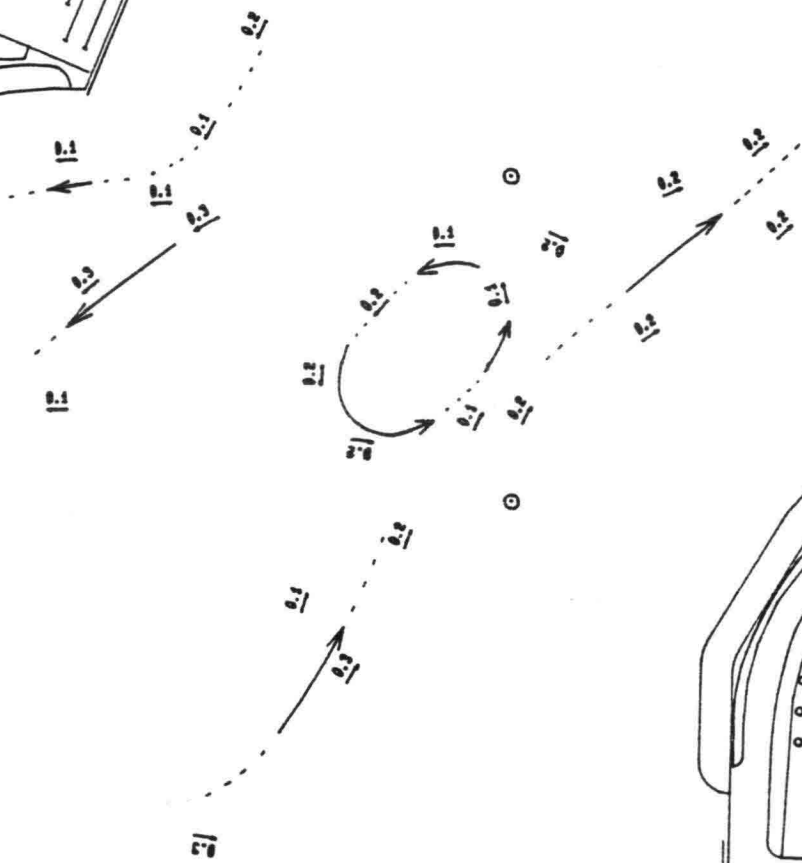


4 uur voor H.W.

Figuur 3.3 (vervolg) A5: 13.55 - 14.35 uur

MAASHAVEN MOND (4m)

200 m



(snelheid in zeemijlen per uur)

3 uur voor H.W.

00039

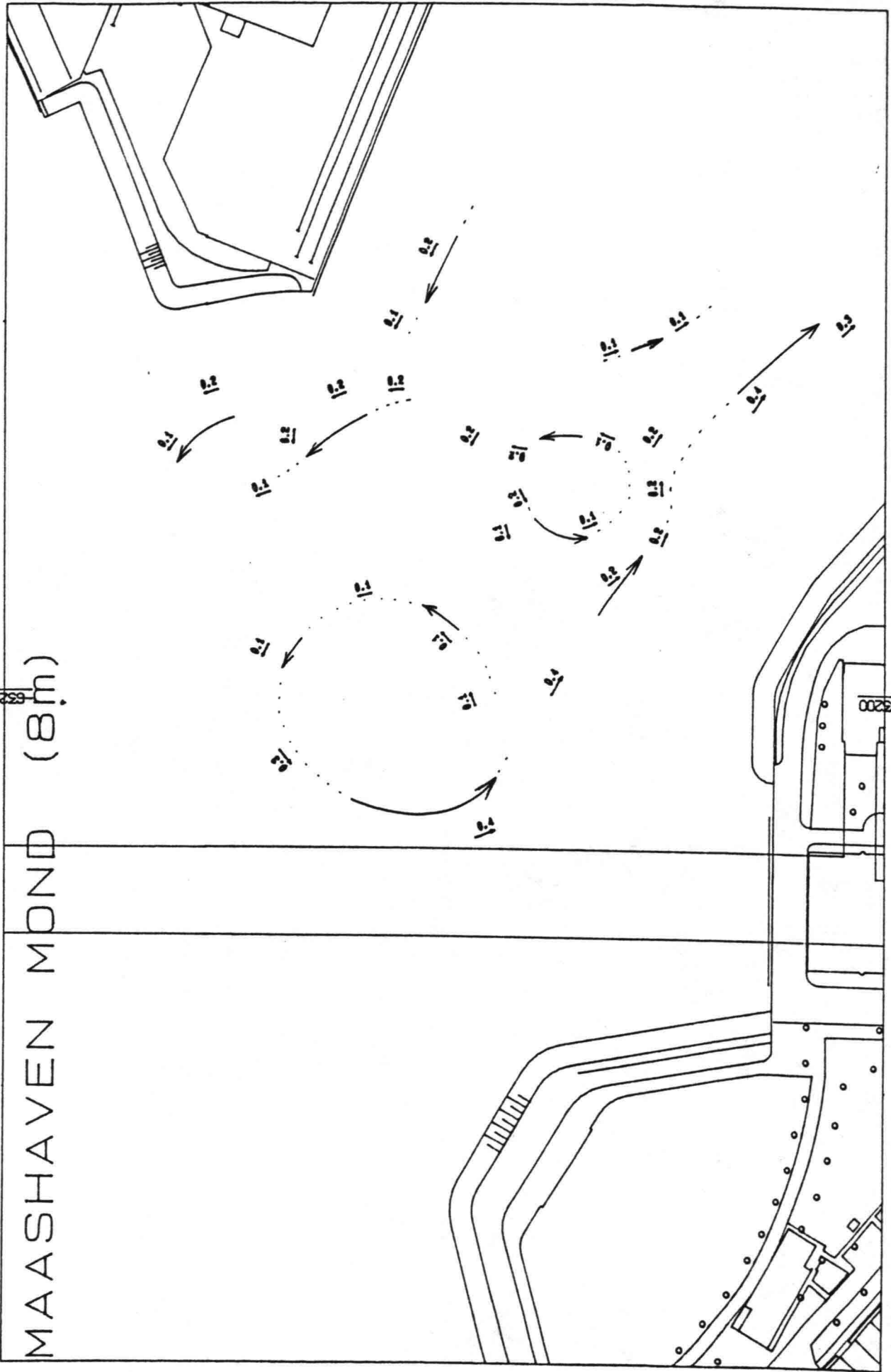
00039

00039

00039

00029

00029



MAASHAVEN MOND (8m)

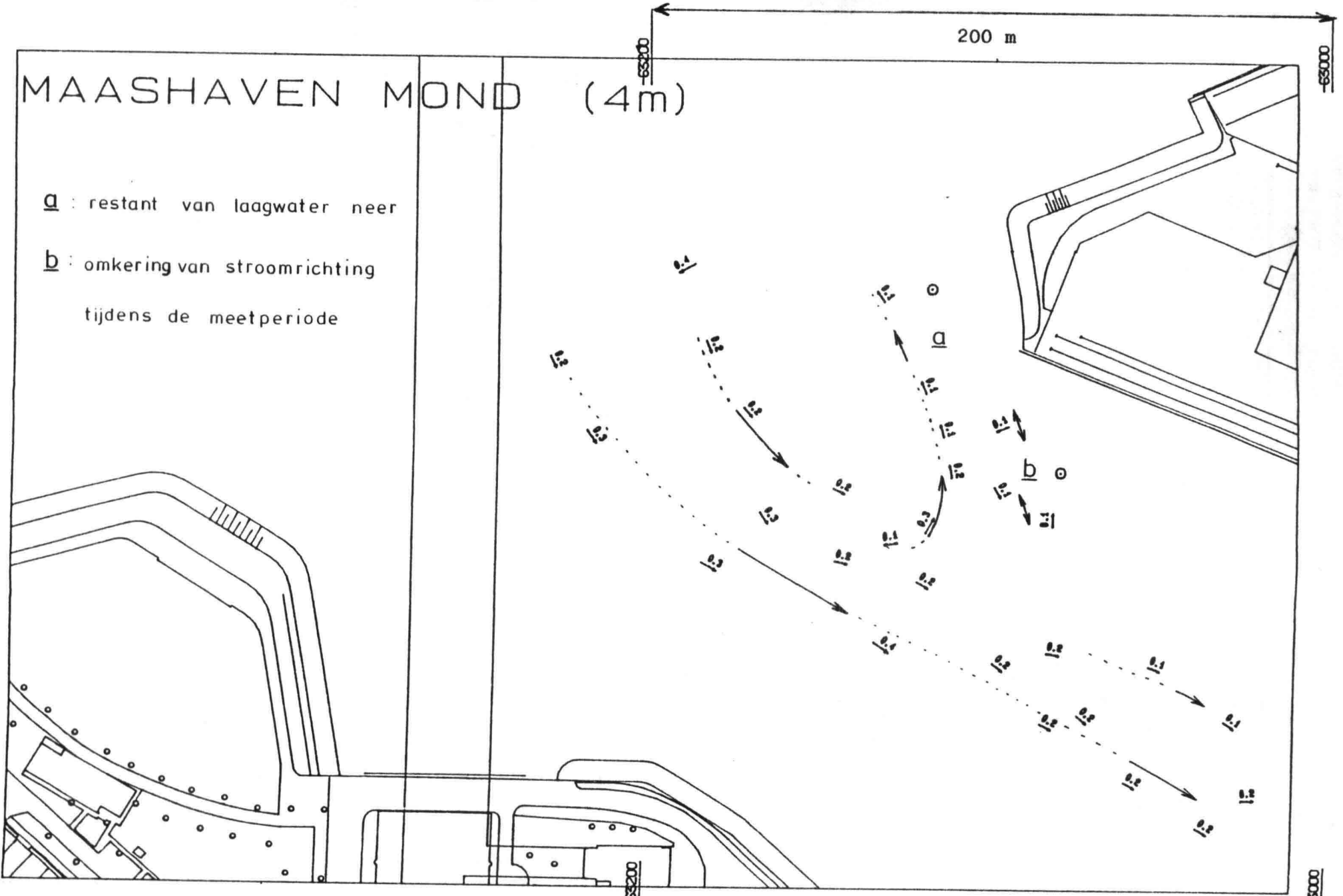
3 uur voor H.W.

Figuur 3.3 (vervolg) A6: 14.55 - 15.35 uur

MAASHAVEN MOND (4m)

a : restant van laagwater neer

b : omkering van stroomrichting
tijdens de meetperiode



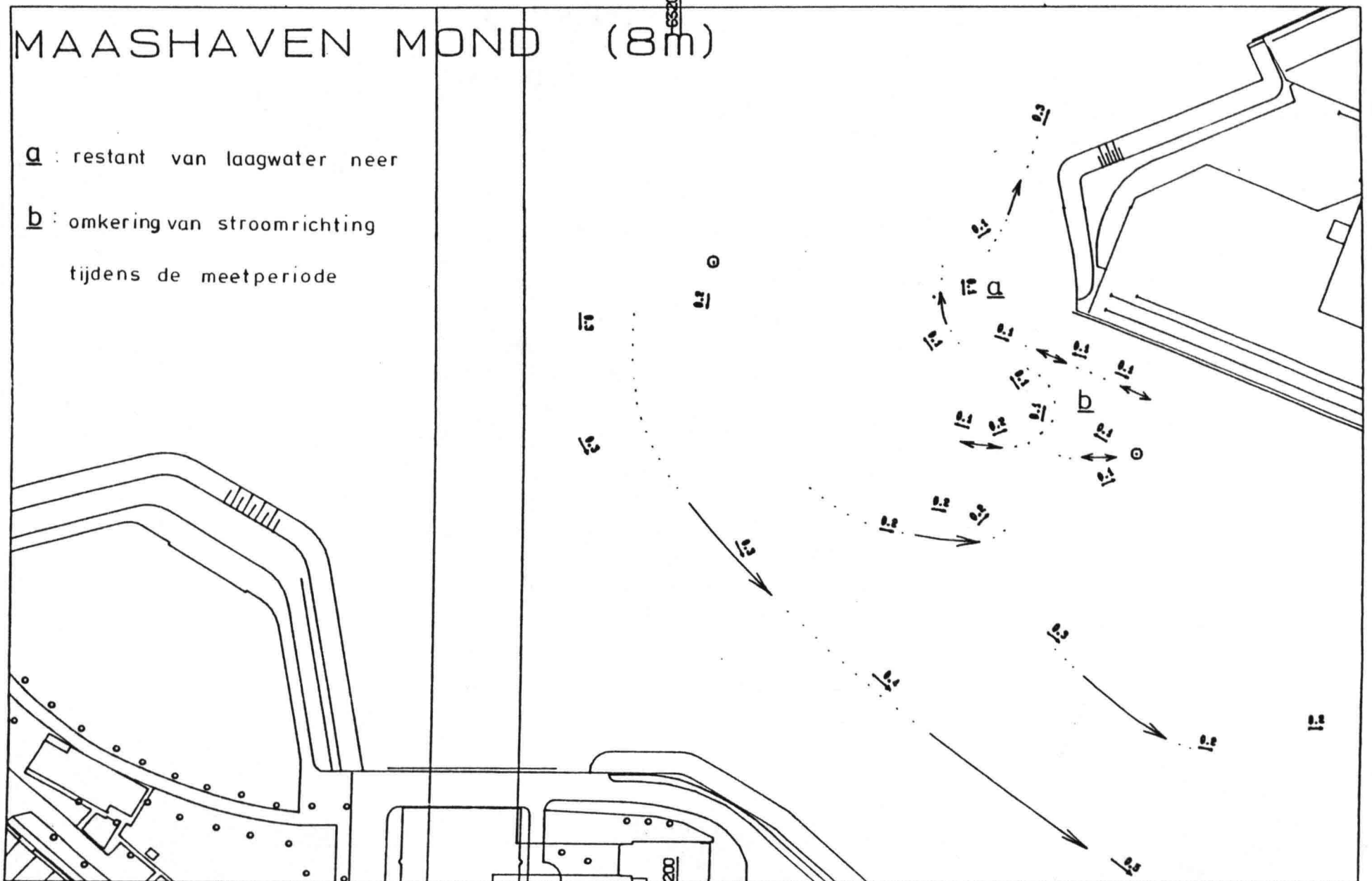
(snelheid in zeemijlen per uur)

2 uur voor H.W.

MAASHAVEN MOND (8m)

a : restant van laagwater neer

b : omkering van stroomrichting
tijdens de meetperiode

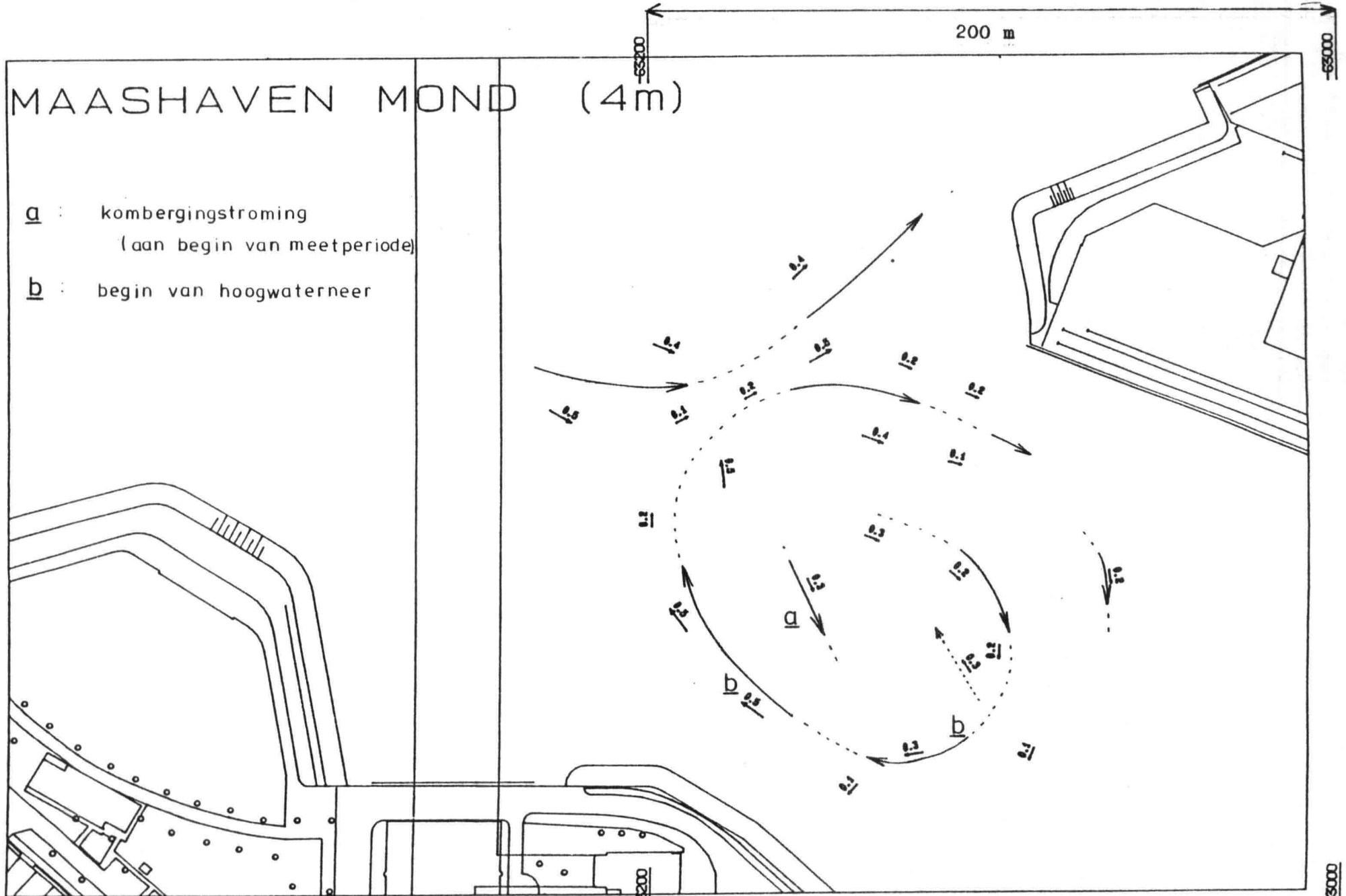


Figuur 3.3 (vervolg) B1: 15.55 - 16.35 uur

2 uur voor H.W.

MAASHAVEN MOND (4m)

- a : kombergingstroming
(aan begin van meetperiode)
- b : begin van hoogwaterneer

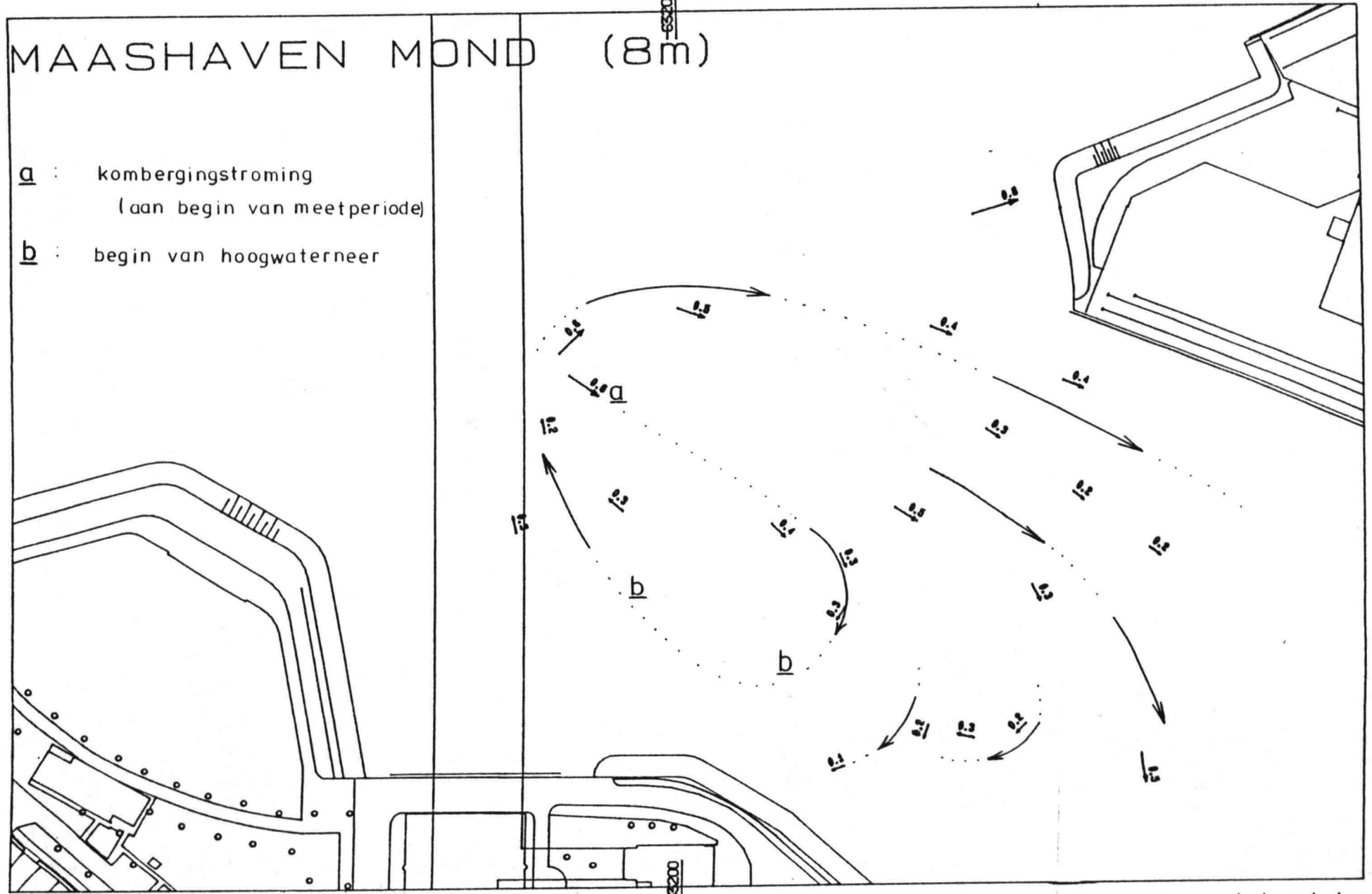


(snelheid in zeemijlen per uur)

1 uur voor H.W.

MAASHAVEN MOND (8m)

- a** : kombergingstroming
(aan begin van meetperiode)
- b** : begin van hoogwaterneer



Figuur 3.3 (vervolg) B2: 16.55 - 17.35 uur

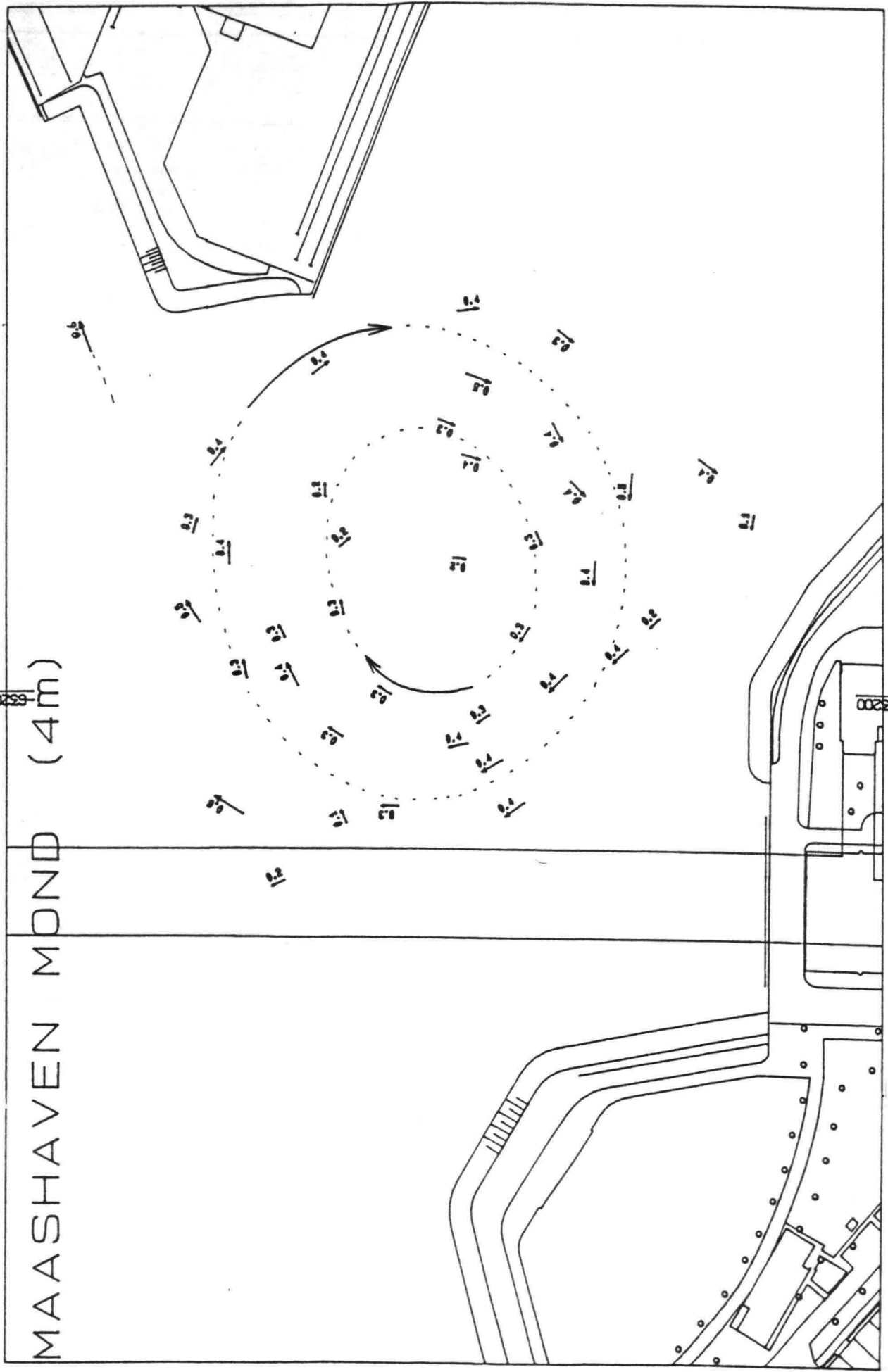
1 uur voor H.W.

00029

00029

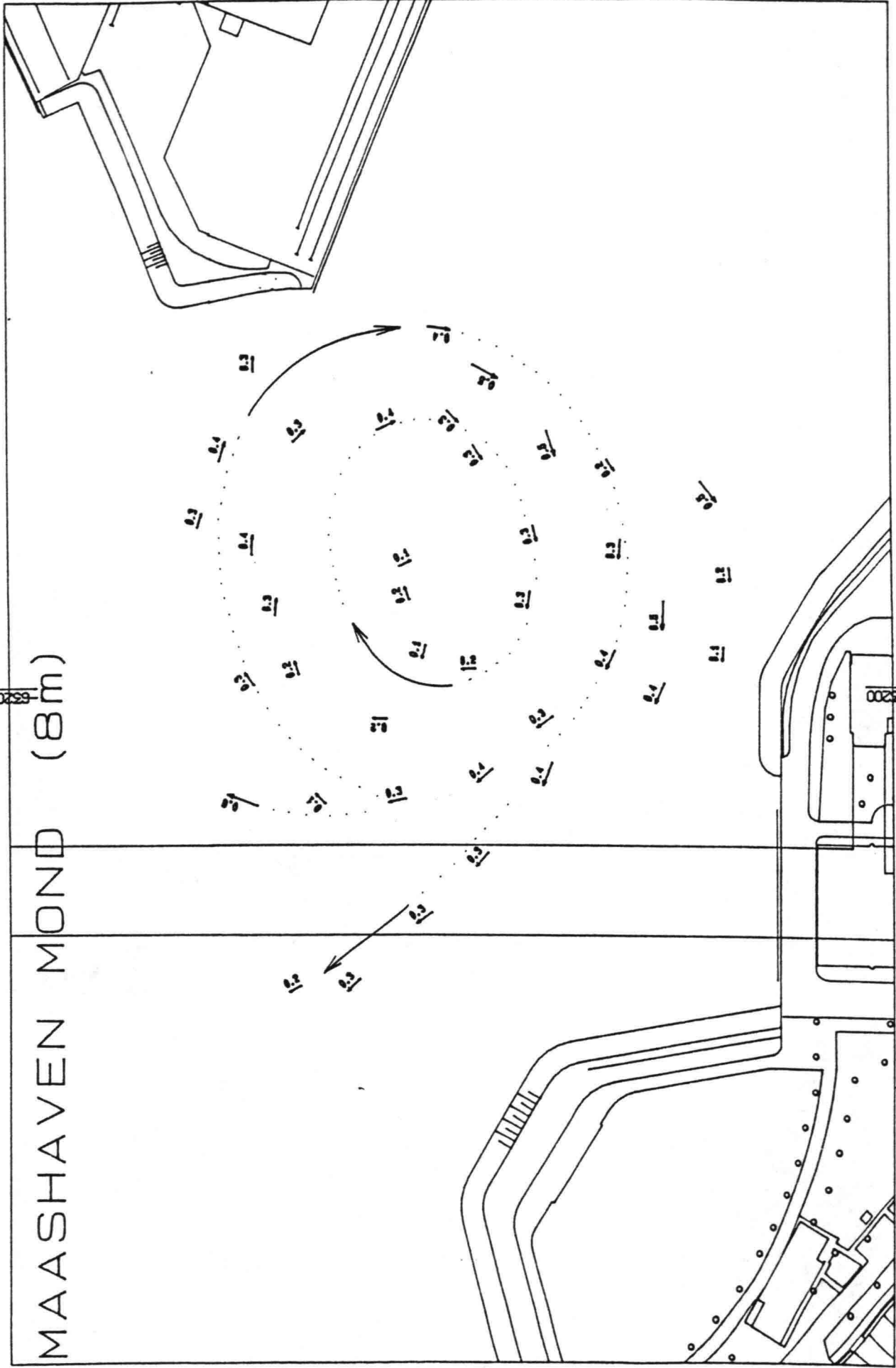
200 m

MAASHAVEN MOND (4m)



H.W.

(snelheid in zeemijlen per uur)

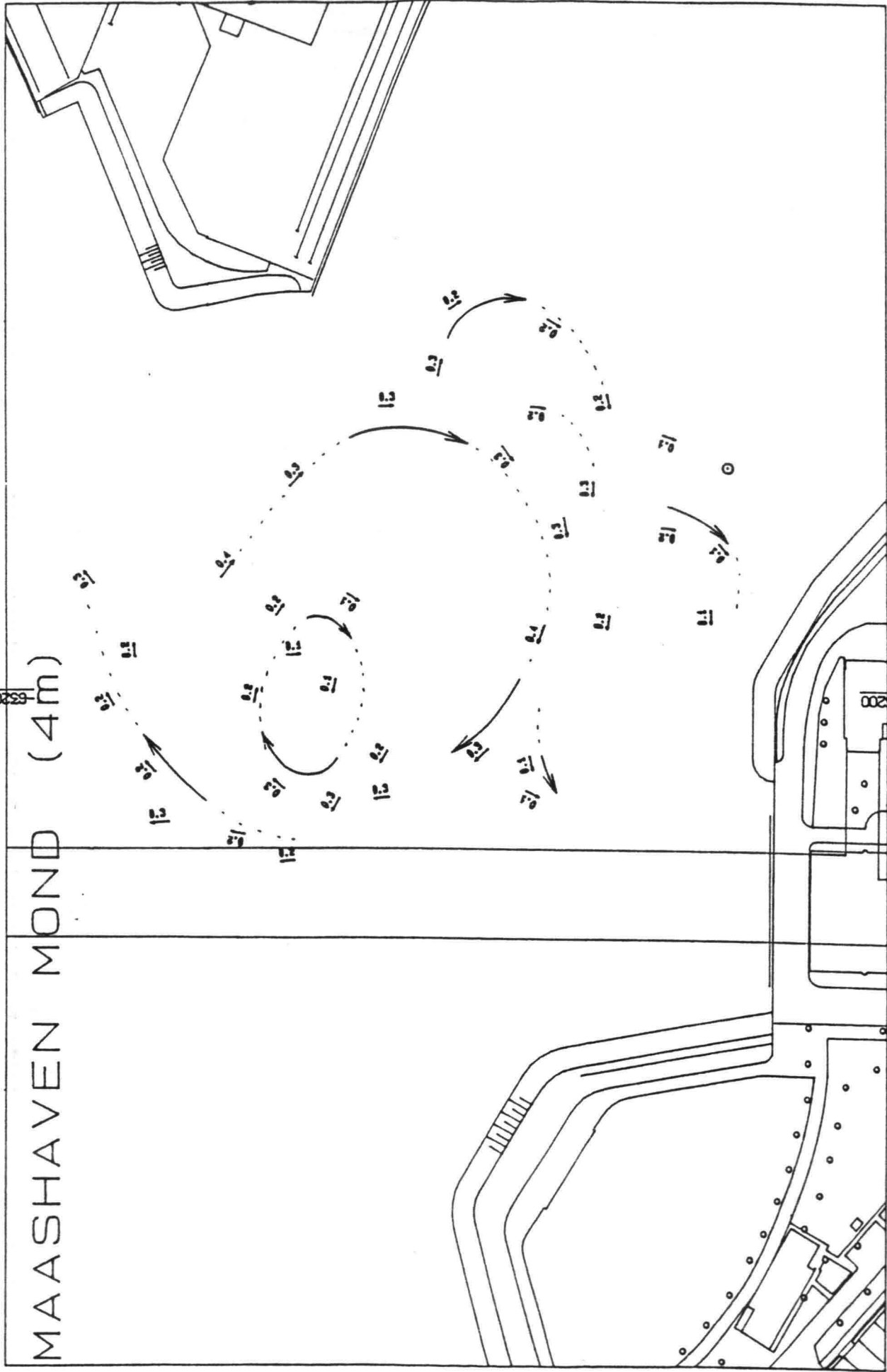


H.W.

Figuur 3.3 (vervolg) Cl: 17.55 - 18.35 uur

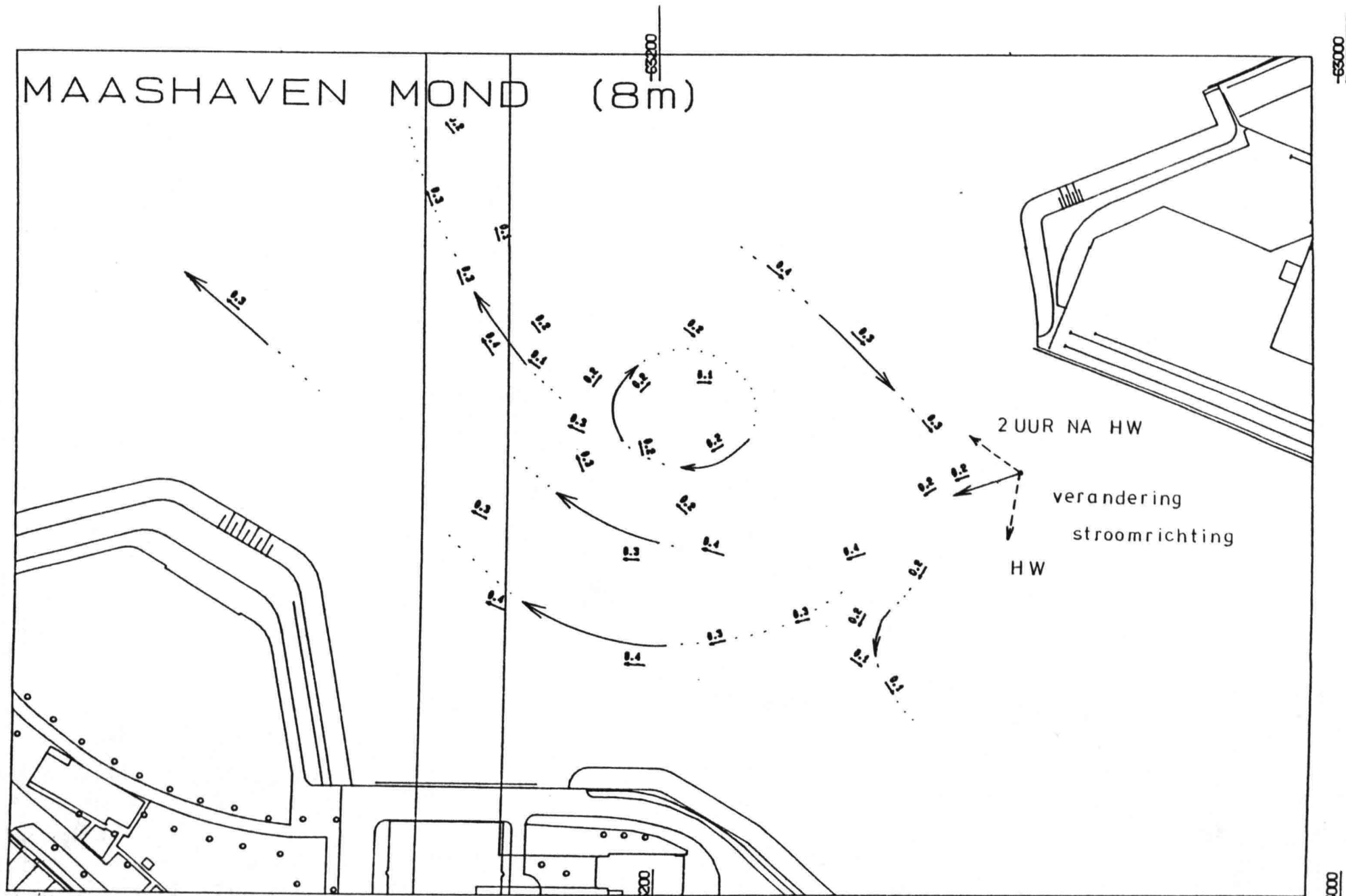
MAASHAVEN MOND (4m)

200 m



(snelheid in zeemijlen per uur)

1 uur na H.W.



Figuur 3.3 (vervolg) C2: 18.55 - 19.35 uur

1 uur na H.W.

200 m

-63200

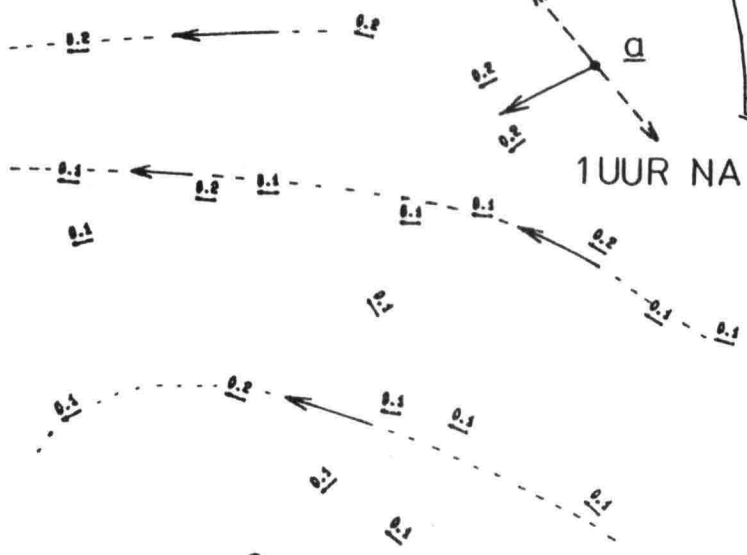
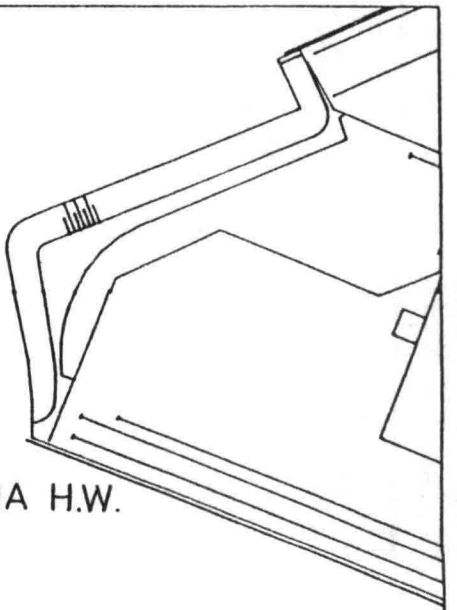
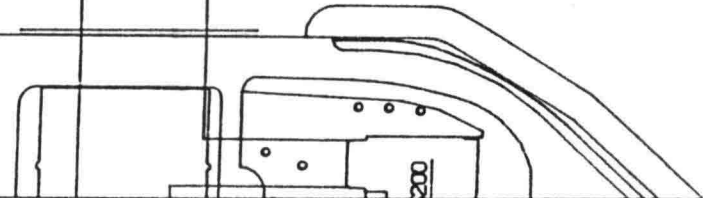
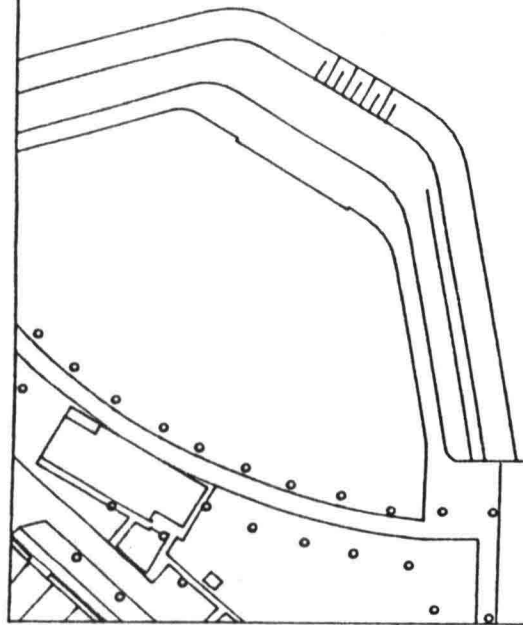
-63000

MAASHAVEN MOND (4m)

a : omkering van stroomrichting

3UUR NA H.W.

1UUR NA H.W.



(snelheid in zeemijlen per uur)

2 uur na H.W.

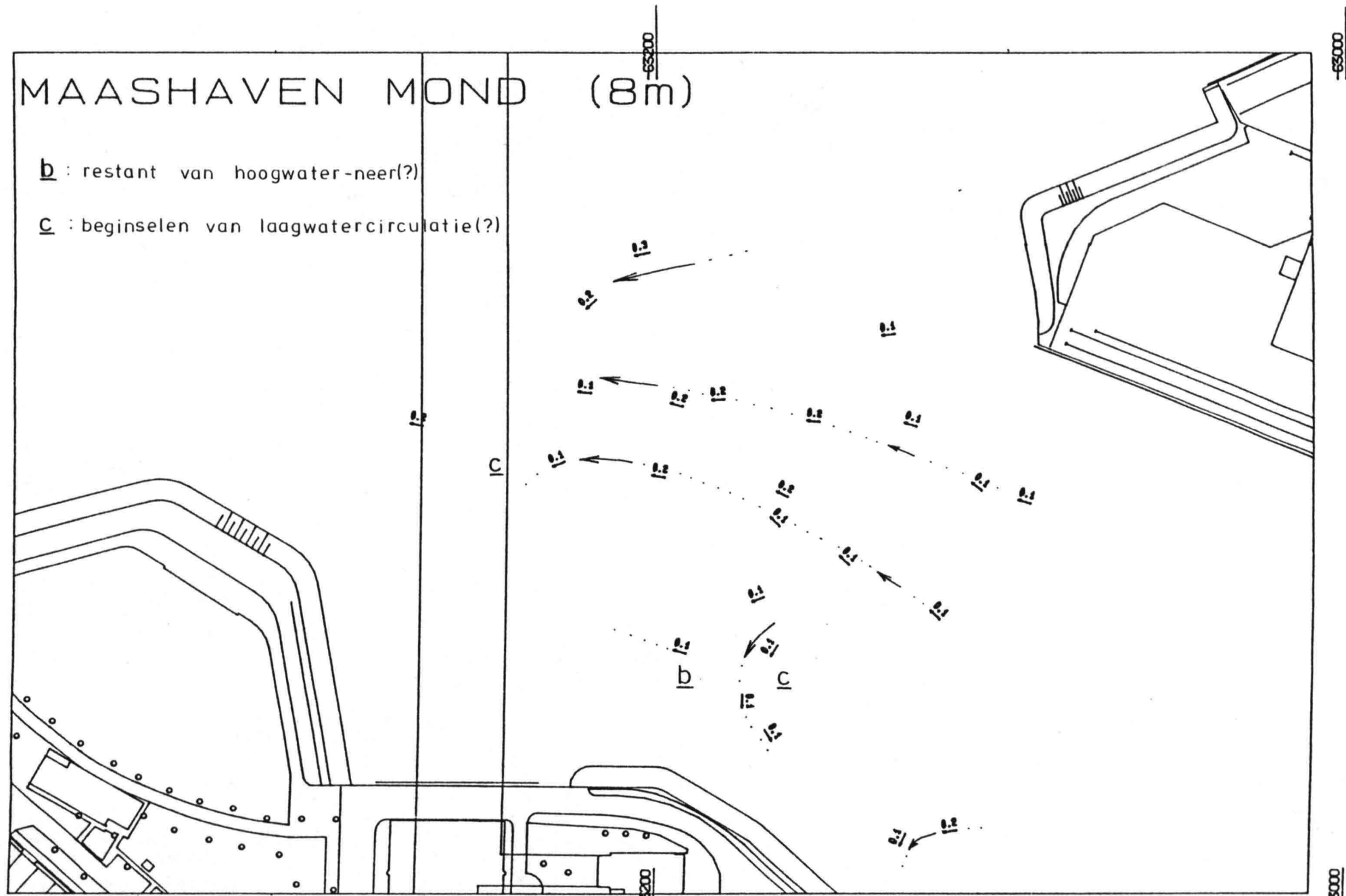
-63200

-63000

MAASHAVEN MOND (8m)

b : restant van hoogwater-neer(?)

c : beginselen van laagwatercirculatie(?)

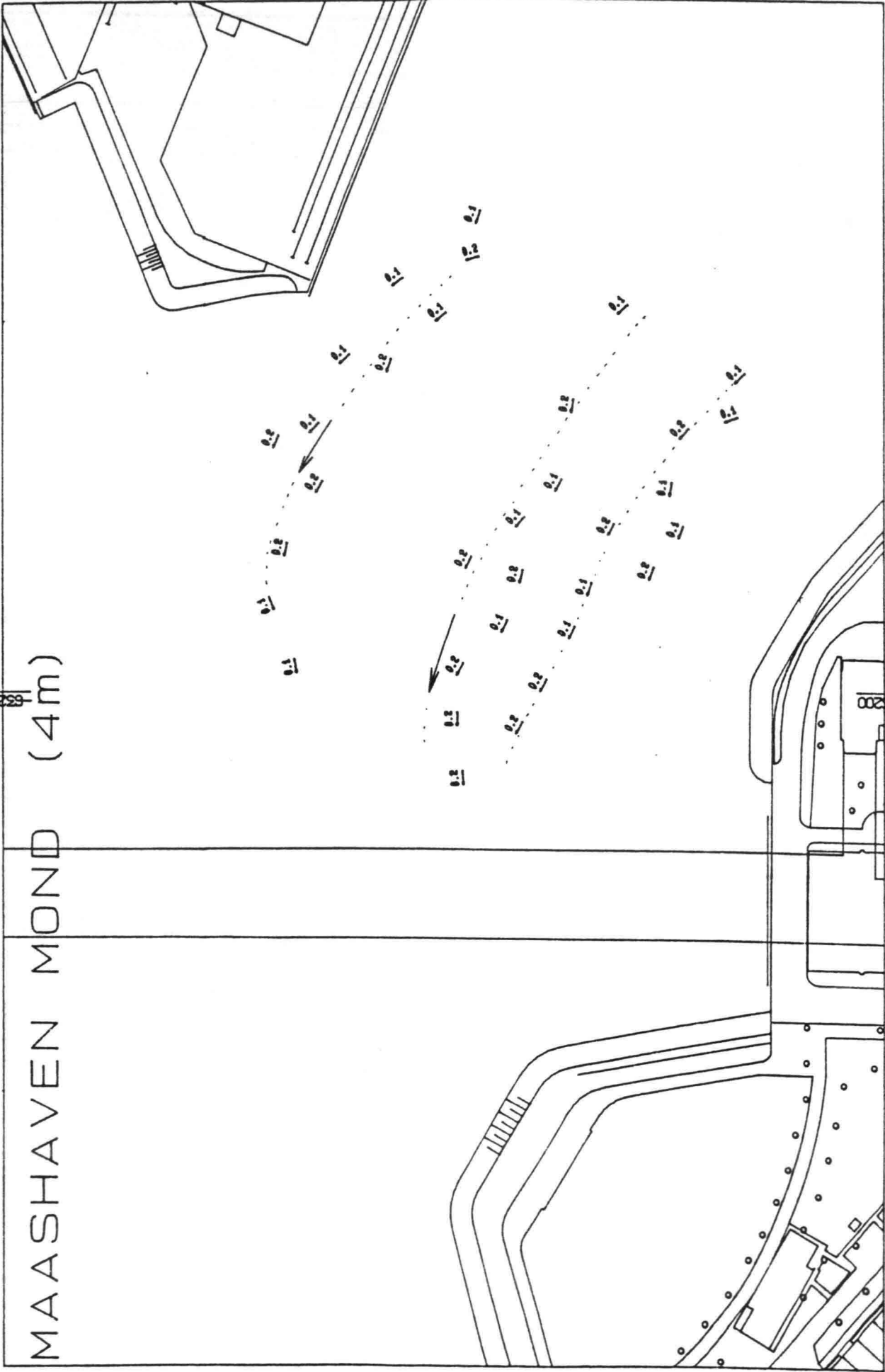


Figuur 3.3 (vervolg) D1: 7.35 - 8.15 uur

2 uur na H.W.

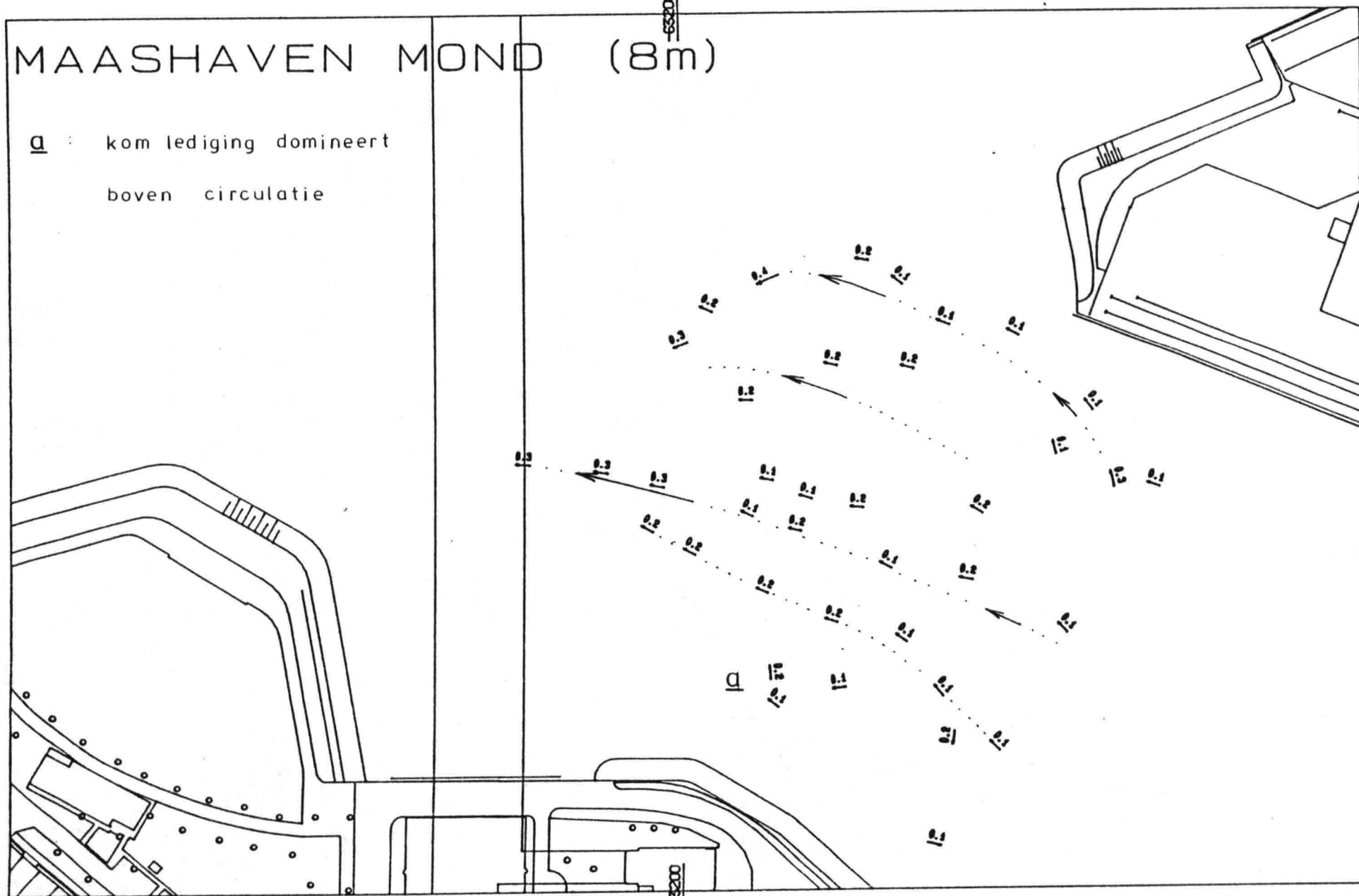
MAASHAVEN MOND (4m)

200 m



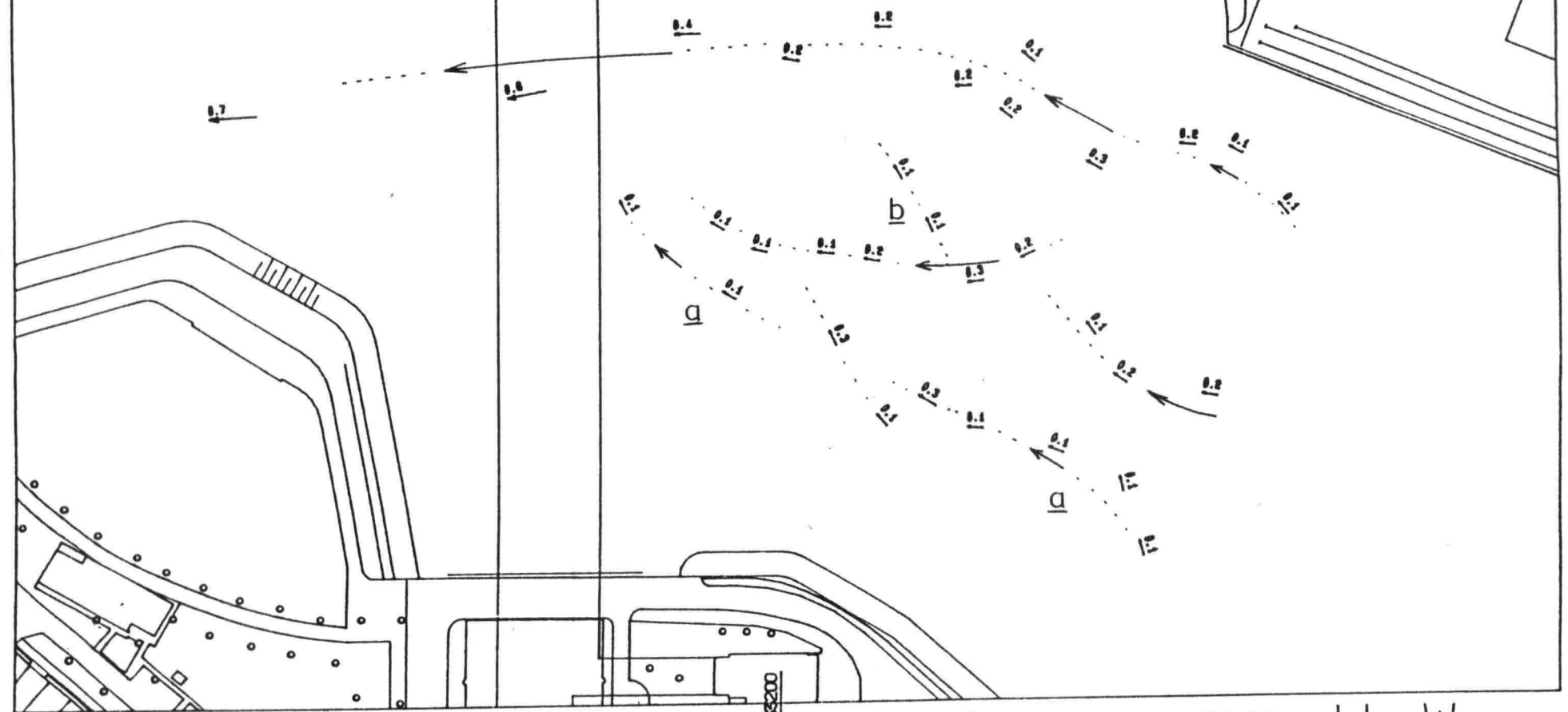
MAASHAVEN MOND (8m)

q : kom lediging domineert
boven circulatie



MAASHAVEN MOND (4m)

a : komt overeen met stroomlijnen 3uur na H.W.
b : " " " " 5 " " "



(snelheid in zeemijlen per uur)

4 uur na H.W.

200 m

-63200

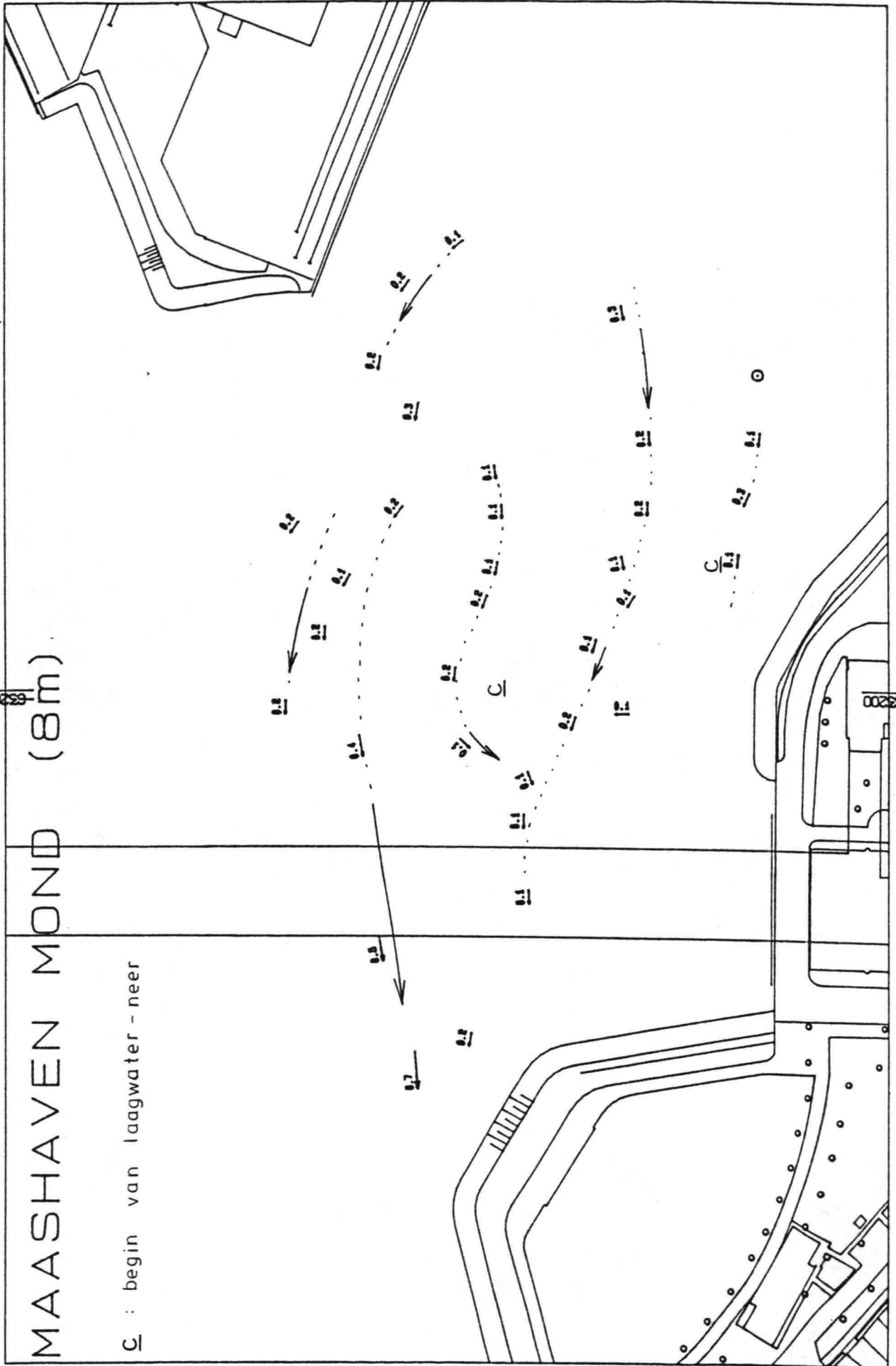
-63000

-63200

-63000

00029

00029

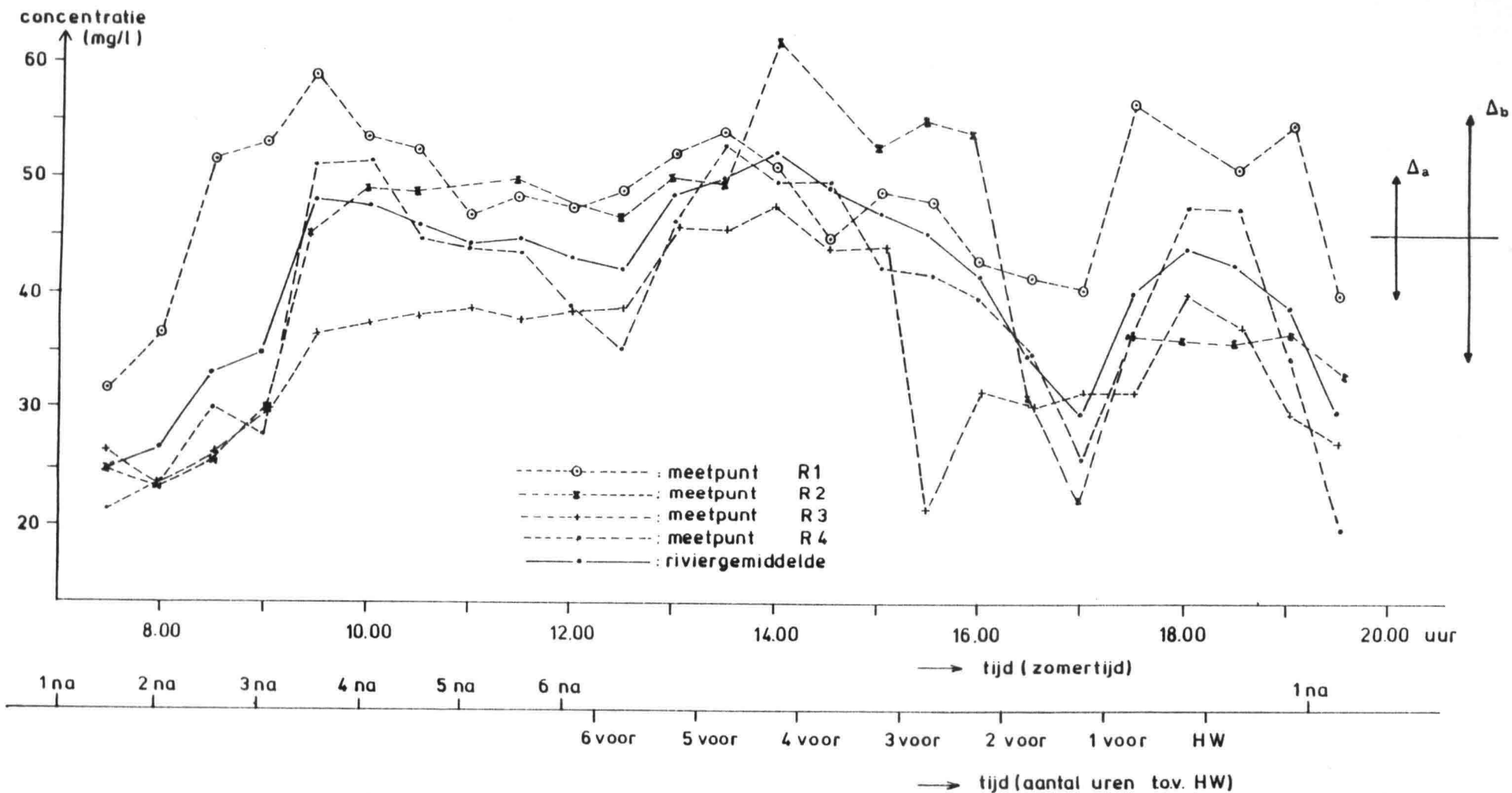


MAASHAVEN MOND (8m)

C : begin van laagwater - neer

4 uur na H.W.

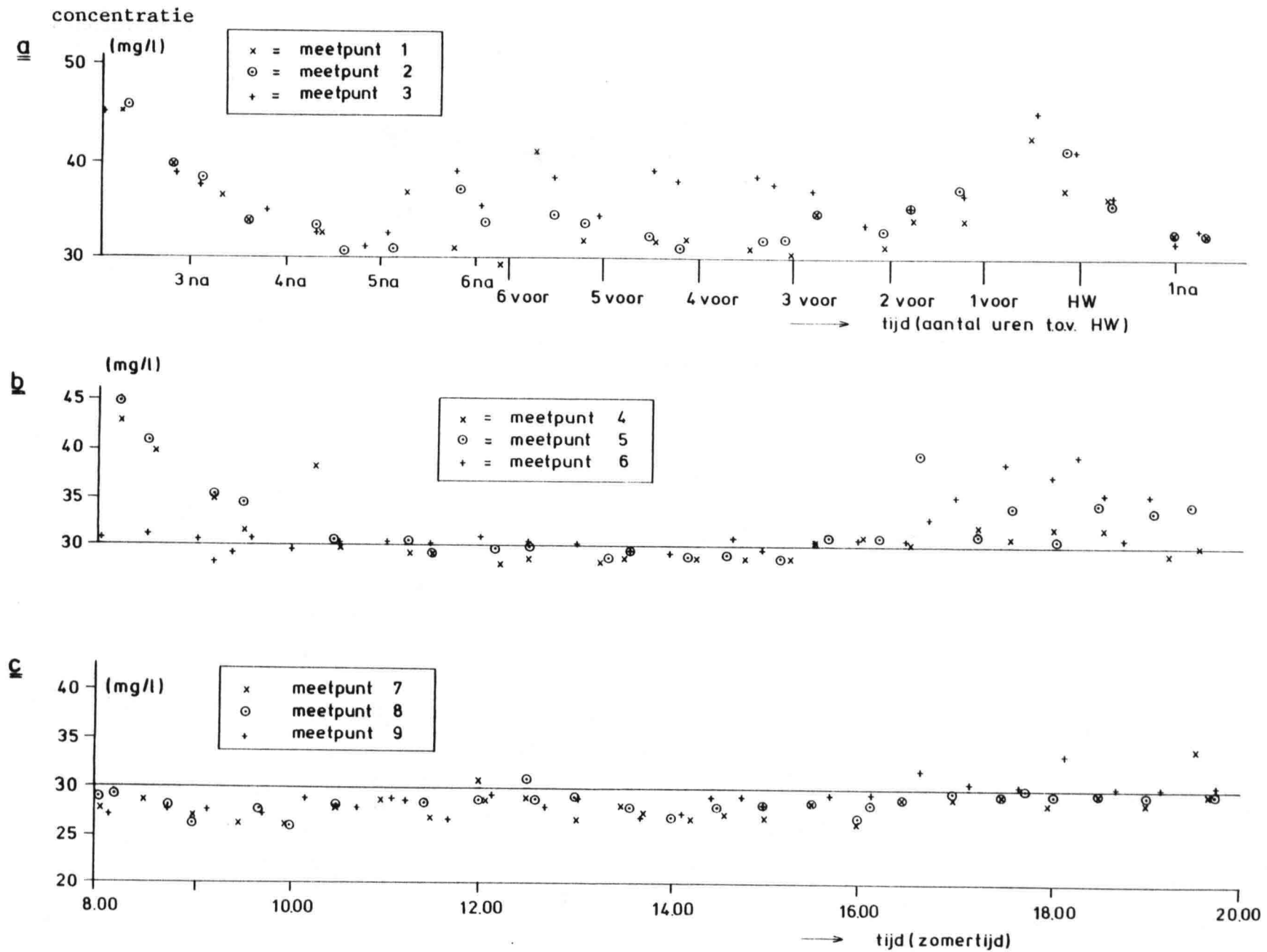
Figuur 3.3 (vervolg) D3: 9.35 - 10.15 uur



Δ_a = geschatte maximale systematische onnauwkeurigheid (in de ijkingen)

Δ_b = geschatte maximale statistische onnauwkeurigheid (in de lichtdoorlatendheidsmetingen)

Figuur 4.1 De gemeten dieptegemiddelde sedimentconcentraties op de rivier



Figuur 4.2 De gemeten dieptegemiddelde sedimentconcentraties in de haven

