

waterloopkundig laboratorium delft hydraulics laboratory

voorhaven Hansweert

stroombeeld- en sedimentatieonderzoek

concept-verslag modelonderzoek

M 1642 deel I

januari 1981

INHOUD

	blz.
1. <u>Inleiding</u>	1
1.1 Probleemstelling en opdracht.....	1
1.2 Samenvatting.....	2
1.3 Conclusies.....	3
2. <u>Het prototype</u>	5
2.1 Algemene beschrijving.....	5
2.2 Bodemligging.....	5
2.3 Getijkromme.....	6
2.4 Stroommetingen.....	6
2.5 Baggergegevens Hansweert.....	7
2.6 Slibgehalte van de Westerschelde.....	8
2.7 Zoutgehalte van de Westerschelde.....	8
3. <u>Het model</u>	9
3.1 Algemeen.....	9
3.2 Inrichting van het model.....	9
3.3 Schalen.....	10
3.4 Bodemligging.....	11
3.5 Ruwheid van de bodem.....	11
3.6 Kombergingsdebieten.....	12
4. <u>Meetmethoden</u>	13
4.1 Stroommetingen.....	13
4.2 Meting horizontale uitwisseling.....	14
4.2.1 Algemeen.....	14
4.2.2 Meting.....	15
5. <u>IJking</u>	17
5.1 Keuze getijfasen.....	17
5.2 Opzet van de ijking.....	18
5.3 IJkingsresultaten.....	18
5.3.1 Hoogwater (getijfase A).....	18
5.3.2 Maximale ebstroom (getijfase B).....	19
5.3.3 Laagwater (getijfase C).....	19
5.3.4 Maximale vloedstroom (getijfase D).....	19

INHOUD (vervolg)

blz.

6.	<u>Onderzoek havenontwerpen</u>	21
6.1	Inleiding.....	21
6.2	T0 - modelonderzoek.....	21
6.3	T1 - modelonderzoek.....	22
6.4	T2 - modelonderzoek.....	23
6.5	T3 - modelonderzoek.....	24
6.6	T4 - modelonderzoek.....	24
6.7	T5 - modelonderzoek.....	26
6.8	T6 - modelonderzoek.....	26
6.9	T7 - modelonderzoek.....	27
7.	<u>Berekening van de sedimentatie</u>	29
7.1	Opzet van de berekeningen.....	29
7.2	Berekeningsresultaten.....	30
7.3	Sedimentatie van de nieuwe haven.....	31
8.	<u>Aanbeveling</u>	34
8.1	Stroombeeld.....	34
8.2	Sedimentatie.....	34

LITERATUUR

TABELLEN

FIGUREN

BIJLAGEN

TABELLEN

- 1 Variatie van het slibgehalte over een getijperiode
- 2 Instel- en ijkgegevens voor het model (T0)
- 3 Horizontale uitwisseling T0
- 4 Horizontale uitwisseling T1
- 5 Horizontale uitwisseling T4
- 6 Horizontale uitwisseling T6
- 7 Horizontale uitwisseling T7
- 8 Sedimentatie van de haven van Hansweert

FIGUREN

- 1 Situatie Hansweert
- 2 Getijkromme Hansweert, 12 juni 1979
- 3 Posities van de meetpunten
- 4 Sedimentatie in de voorhaven Hansweert
- 5 Overzicht van het model, voor eb en vloed
- 6 Principe van de kleurstofinjectie voor de horizontale uitwisselingsmetingen
- 7 Principe van de meting van de horizontale uitwisseling
- 8 Absolute snelheden in de ijkingsraaien I en II voor de getijfasen A en B
- 9 Absolute snelheden in de ijkingsraaien I en II voor de getijfasen C en D
- 10 Overzicht ijking, fase A
- 11 Overzicht ijking, fase B
- 12 Overzicht ijking, fase C
- 13 Overzicht ijking, fase D
- 14 T1, fase A, stroombeeld tijdens hoogwater
- 15 T1, fase B, stroombeeld tijdens maximale ebstroom
- 16 T1, fase C, stroombeeld tijdens laagwater
- 17 T1, fase D, stroombeeld tijdens maximale vloedstroom
- 18 T1, fase D, snelheden langs de koppen van de havendammen tijdens maximale vloedstroom
- 19 T2, fase B, stroombeeld tijdens maximale ebstroom
- 20 T2, fase D, stroombeeld tijdens maximale vloedstroom
- 21 T2, fase D, snelheden langs de koppen van de havendammen tijdens maximale vloedstroom
- 22 T4, fase A, stroombeeld tijdens hoogwater
- 23 T4, fase B, stroombeeld tijdens maximale ebstroom
- 24 T4, fase C, stroombeeld tijdens laagwater
- 25 T4, fase D, stroombeeld tijdens maximale vloedstroom
- 26 T4, fase B, snelheden langs de koppen van de havendammen tijdens maximale ebstroom
- 27 T4, fase D, snelheden langs de koppen van de havendammen tijdens maximale vloedstroom
- 28 T6, fase A, stroombeeld tijdens hoogwater
- 29 T6, fase B, stroombeeld tijdens maximale ebstroom
- 30 T6, fase C, stroombeeld tijdens laagwater
- 31 T6, fase D, stroombeeld tijdens maximale vloedstroom

FIGUREN (vervolg)

- 32 T6, fase D, snelheden langs de koppen van de havendammen tijdens maximale vloedstroom
- 33 T7, fase A, stroombeeld tijdens hoogwater
- 34 T7, fase B, stroombeeld tijdens maximale ebstroom
- 35 T7, fase C, stroombeeld tijdens laagwater
- 36 T7, fase D, stroombeeld tijdens maximale vloedstroom
- 37 Horizontale uitwisseling over één getijcyclus (12.25 u).

BIJLAGEN

- 1 Verwerking van de resultaten van de horizontale uitwisselingsmeting
- 2 Bepaling van de invloed van dichtheidsstromingen op de sedimentatie van de voorhaven van Hansweert

Stroombeeld- en sedimentatieonderzoek

1. Inleiding

1.1 Probleemstelling en opdracht

In de brief no. NXT 16376 van 6 december 1979 wordt door de hoofdingenieur-direkteur van Rijkswaterstaat, Directie Zeeland aan het Waterloopkundig Laboratorium opdracht gegeven tot het uitvoeren van een onderzoek naar de te bouwen nieuwe aansluitingen van het kanaal door Zuid-Beveland aan de Westerschelde te Hansweert en aan de Oosterschelde te Wemeldinge. Dit onderzoek heeft betrekking op de nautische kwaliteiten van deze aansluitingen, die te Hansweert zal bestaan uit een sluizencomplex met voorhaven, alsmede op de sedimentatieaspecten van de voorhaven van Hansweert.

Het onderzoek wordt als volgt gerapporteerd:

- M 1642, deel I. Voorhaven Hansweert. Stroombeeld- en sedimentatieonderzoek.
- M 1642, deel II. Voorhaven Hansweert. Scheepvaartonderzoek.
- M 1642, deel III. Wemeldinge. Scheepvaartonderzoek.

In Hansweert zullen de bestaande voorhaven en het bestaande sluizencomplex vervangen worden om het kanaal toegankelijk te maken voor grotere schepen. Door de aanwezige bebouwing is het aantal vrijheidsgraden van het ontwerp van de nieuwe voorhaven beperkt. Binnen deze grenzen is door Rijkswaterstaat een basisontwerp gemaakt. In de loop van het onderzoek is dit ontwerp in nauw overleg met de betrokken diensten op verschillende punten aangepast.

Naar aanleiding van de resultaten van een voorstudie [1] is besloten tot de bouw van een hydraulisch model. In dit model worden de volgende aspecten onderzocht:

- Stroombeelden en stroomsnelheden in en nabij de havenmond van Hansweert. De gemeten stroombeelden dienen als invoergegevens voor een mathematisch model waarmee de baan, de koershoeken, de roerhoeken e.d. kunnen worden berekend van een schip dat de haven in- of uitvaart. De resultaten van deze berekeningen worden gepresenteerd in rapport M 1642, deel II.
- De horizontale uitwisseling van water tussen de voorhaven en de Westerschelde door de havenmond. Doordat het Westerscheldewater een hoger sedimentgehalte heeft dan het havenwater levert deze uitwisseling een bijdrage aan de totale sedimentatie van de haven.

- De invloed van de nieuwe voorhaven op stromingen in de Westerschelde in verband met mogelijke ontgrondingen in de nabijheid van de havenmond en ter plaatse van het tracé van de ontworpen vaste oeververbinding.

Het onderzoek heeft plaatsgevonden in de periode van december 1979 tot juni 1980 in het laboratorium "De Voorst". Het onderzoek is uitgevoerd door ir. A.M. Burger die ook dit verslag heeft opgesteld.

1.2 Samenvatting

In dit rapport wordt verslag gedaan van het hydraulisch modelonderzoek voor de nieuwe voorhaven van Hansweert. Nadat het model is geijkt aan de hand van prototypemetingen in de bestaande toestand te Hansweert is, uitgaande van een door Rijkswaterstaat verstrekt basisontwerp, een aantal havenvarianten in detail onderzocht.

Het basisontwerp (T1) is zowel ten aanzien van het stroombeeld vóór en in de havenmond als ten aanzien van de te verwachten hoeveelheid onderhoudsbaggerwerk niet optimaal. Dit wordt veroorzaakt door de vorm en oriëntatie van de westelijke havendam met betrekking tot de geleiding van de vloedstroming op de Westerschelde. Daarom is in eerste instantie het onderzoek gericht geweest op een verbetering van de stroomgeleiding van deze havendam (T2 en T3).

Nadat de eerste resultaten van het wiskundig scheepvaartonderzoek beschikbaar kwamen bleek dat ook de vorm van de haven zelf, binnen de gegeven begrenzingsen, diende te worden aangepast. Hierdoor was het noodzakelijk de ligging van de havenmond ingrijpend te wijzigen (T4). Dit havenontwerp voldeed goed, zowel met betrekking tot het stroombeeld als met betrekking tot de te verwachten sedimentatie.

Het vervolg van het onderzoek is er op gericht geweest om het T4 havenontwerp in detail te verbeteren. Havenvariant T5 verschilt slechts weinig van T4 en dient als een tussenfase beschouwd te worden. In havenvariant T6 is geprobeerd om door het verder uitbouwen van de oostelijke havendam het stroombeeld binnen de haven te verbeteren. Deze opzet is niet geslaagd, terwijl het stroombeeld direct voor de haven, vooral tijdens de ebstroming kwalitatief achteruit ging.

In een poging om de bouwkosten te reduceren, met behoud van de hydraulische kwaliteiten van havenvariant T4, is de laatste havenvariant T7 ontworpen. Deze verschilt slechts van T4 doordat de gekromde oostelijke havendam is vervangen

door een gestrekte dam. De plaats van de kop van deze havendam is hierbij niet gewijzigd. Deze verandering veroorzaakt echter instabiliteiten in het stroombeeld binnen de haven, zodat aan de eis van behoud van de hydraulische kwaliteiten niet werd voldaan.

1.3 Conclusies

Met betrekking tot de uitkomsten van het modelonderzoek van de stroombeelden en de sedimentatie van de nieuwe voorhaven te Hansweert kunnen de volgende conclusies worden geformuleerd:

- Van de zeven onderzochte havenvarianten is T4 (Figuur 22), zowel ten aanzien van de te verwachten sedimentatie als ten aanzien van de kwaliteit van het stroombeeld, het meest gunstig.
- De invloed van de nieuwe haven op het stroombeeld in de Westerschelde blijft beperkt tot de directe omgeving (400 à 500 m) van de nieuwe havenmond.
- De geleiding van de stroming in de Westerschelde door de havendammen heeft een zeer belangrijke invloed op de vorm en de stabiliteit van het stroombeeld in en direct buiten de havenmond. Daardoor is de horizontale uitwisseling door de havenmond zeer gevoelig voor relatief geringe wijzigingen in de vormgeving van de havenmond.
- De sedimentatie van de haven van Hansweert ten gevolge van de horizontale uitwisseling is betrekkelijk klein ten opzichte van de sedimentatie ten gevolge van komberging. Over de invloed van dichtheidsstromingen op de sedimentatie van de haven is niet veel bekend. Uit een oriënterende berekening blijkt dat die invloed significant maar vermoedelijk niet dominant is.
- Van de vier in model onderzochte getijfasen (hoogwater (fase A), maximale ebstroming (fase B), laagwater (fase C) en maximale vloedstroom (fase D)) wordt de sedimentatie van de haven, voor zover die door de horizontale uitwisseling wordt veroorzaakt, in belangrijke mate bepaald door de uitwisseling en het stroombeeld voor getijfase D. De oorzaak hiervan is dat de combinatie van vloedstroming op de Westerschelde en een intrekkend kombergingsdebiet, zoals gedurende getijfase D, aanwezig is tijdens het overgrote deel van de tijd dat uitwisseling optreedt. Een verkleining van de door

horizontale uitwisseling veroorzaakte sedimentatie kan dan ook het meest doeltreffend gebeuren door een verbetering van het stroombeeld voor getijfase D.

- De te verwachten sedimentatie voor havenvariant T4 bedraagt 200.000 à 300.000 m³/jaar (gemeten in het profiel van ontgraving). Door de relatief kleine invloed van de horizontale uitwisseling op de totale sedimentatie van de haven is de sedimentatie voor de varianten T6 en T7 van dezelfde orde van grootte.

2. Het prototype

2.1 Algemene beschrijving

Hansweert is gelegen aan de noordelijke oever van de Westerschelde (zie Figuur 1). De haven vormt een belangrijke schakel in de binnenvaartroute Terneuzen-Rotterdam. In mindere mate wordt de haven ook gebruikt door binnenvaart uit de richting Antwerpen. De huidige haven van Hansweert bestaat uit een buitenhaven, waarvan de havenmond op de N.A.P.-lijn ongeveer 80 meter breed is, en een vluchthaven direct ten oosten van deze buitenhaven. Achter in de haven bevindt zich een complex van drie sluizen dat toegang geeft tot het kanaal door Zuid-Beveland.

Direct westelijk van de haven bevindt zich een sterk aangeslibde havenkom die niet of nauwelijks meer wordt gebruikt. Tijdens laagwater valt deze kom volledig droog. De hoofdscheepvaartroute voor de zeevaart van en naar Antwerpen wordt ter hoogte van Hansweert gevormd door het Gat van Ossenis, de Overloop van Hansweert en het Zuidergat. Deze scheepvaartroute kruist de route van de schepen die de haven van Hansweert in en uitvaren op enige honderden meters voor de havenmond. De Westerschelde wordt ter hoogte van Hansweert gedeeld in een ebgeul en een vloedgeul, respectievelijk het Uitloopgat van Ossenis en de Overloop van Hansweert. Hiertussen ligt een platengebied dat tijdens laagwater gedeeltelijk droog valt.

2.2 Bodemligging

Voor de debiet -en stromingsgegevens nabij de haven van Hansweert is gebruik gemaakt van meetresultaten uit de periode tussen 1973 en 1979. Hierdoor is het zinvol om te onderzoeken of de bodemligging van de Westerschelde in de nabijheid van Hansweert in die periode belangrijke veranderingen heeft ondergaan. Dergelijke veranderingen kunnen namelijk de debietverdeling over de verschillende geulen en het stroombeeld beïnvloeden. Hierdoor verliezen de gegevens van vroegere datum aan waarde.

Nabij de havenmond heeft de bodemligging sinds 1973 relatief geringe wijzigingen ondergaan. Op wat grotere afstand van de haven is de Overloop van Hansweert sinds 1973 wat in noordwestelijke richting verschoven. Enerzijds door baggerwerkzaamheden in het Zuidergat, anderzijds door het storten van baggerspecie in de Schaar van Waarde is het doorstroomdebiet van het Zuidergat toegenomen ten koste van

het debiet door de Schaar van Waarde. Het is niet uitgesloten dat de verschuiving van de Overloop van Hansweert in samenhang hiermee is opgetreden. Door Rijkswaterstaat, Studiedienst Vlissingen, is de invloed van bovengenoemde bodemveranderingen op het stroombeeld nabij de haven van Hansweert onderzocht [2]. De belangrijkste conclusie uit deze studie is dat het stroombeeld direct vóór de haven van Hansweert geen grote wijzigingen heeft ondergaan ten gevolge van de veranderingen in de bodemligging van de Westerschelde.

2.3 Getijkromme

Volgens de slotgemiddelden 1961.0 is te Hansweert de getijamplitude voor springtij 4,89 m met hoogwater op N.A.P. + 2,57 m en laagwater op N.A.P. - 2,32 m. Voor gemiddeld getij is de getijamplitude 4,36 m en voor doortij 3,56 m.

Op 12 juni 1979 zijn uitgebreide stroommetingen uitgevoerd op de ^{we} Oosterschelde nabij Hansweert. De waterstanden werden daarbij gemeten met een zelfregistre-
rende peilschaal in de haven van Hansweert (PR 3.2). De twee hoogwaters waren achtereenvolgens N.A.P. + 2,72 m en N.A.P. + 2,64 m en het daartussen opgetreden laagwater was N.A.P. - 2,51 m (zie Figuur 2). Geconcludeerd kan worden dat dit getij een goed ontwikkeld springtij was met een getijfactor van ongeveer 1,17. Dit getij zal als randvoorwaarde dienen voor het modelonderzoek.

Ook het verloop van $\frac{dh}{dt}$ is weergegeven in Figuur 2. Dit is van belang om de grootte van de komvullings- en komledigingsdebieten van de haven van Hansweert te kunnen bepalen.

2.4 Stroommetingen

In de meetpunten 1 t/m 7 (Figuur 3) zijn op 12 juni 1979 stroommetingen uitgevoerd in de vertikaal. Overeenkomstige metingen zijn eerder uitgevoerd op 15 mei 1979 in de meetpunten 5049, 5051, 5052 en 5053 en op 28 maart 1979 in de meetpunten 5048 en 5050.

Door aanpassing van de getijfactoren zijn alle metingen herleid naar het getij op 12 juni 1979. Uit de gemeten stroomsnelheden op 12 juni 1979 en de metingen die naar die datum zijn herleid is het verloop van het debiet berekend voor het betrokken gedeelte van de Westerschelde.

In dit gebied zijn ook herhaaldelijk stroomdrijvermetingen uitgevoerd. De banen die de drijvers afleggen blijken vrijwel onafhankelijk te zijn van de getijfactor tijdens de metingen. De grootte van de gemeten snelheden is vanzelfsprekend wel afhankelijk van deze getijfactor. Uit een beoordeling van de drijvermetingen gedurende meerdere jaren blijkt dat er slechts kleine veranderingen in het stroombeeld zijn opgetreden.

De resultaten van drijvermetingen, uitgevoerd op 2 mei 1973, 31 juli 1973 en 12 april 1979 zijn gebruikt voor de ijking van het hydraulisch model.

2.5 Baggergegevens Hansweert

Een gedeelte van het door het Waterloopkundig Laboratorium uit te brengen advies betreft de te verwachten hoeveelheid onderhoudsbaggerwerk in de nieuwe te bouwen voorhaven. Deze hoeveelheid wordt bepaald door een relatie op te stellen tussen de hoeveelheid havenwater die in de bestaande voorhaven gedurende een bepaalde periode door water uit de Westerschelde wordt vervangen en de hoeveelheid onderhoudsbaggerwerk van de bestaande voorhaven Hansweert.

Rijkswaterstaat heeft gegevens verstrekt met betrekking tot het onderhoudsbaggerwerk van de bestaande haven gedurende de periode van 1962 tot 1978. Het blijkt dat per jaar gemiddeld ongeveer 100.000 m³ (gemeten in het profiel van ontgraving) wordt gebaggerd. Nadere analyse van de baggerbestekken over de periode van 1971 tot 1978 leert dat ongeveer 75% van de sedimentatie optreedt in de vluchthaven en ongeveer 25% in de buitenhaven van Hansweert. Uit de verdeling van de sedimentatie over het oppervlak van de haven (zie Figuur 4) blijkt dat de sedimentatie in de buitenhaven zich concentreert op plaatsen met een minder intensief scheepvaartverkeer en in de havenmond.

In het overige deel van de buitenhaven blijft de sedimentatie beperkt tot maximaal 0,20 m/jr. Blijkbaar wordt het sediment door de scheepvaart gedeeltelijk in suspensie gehouden of gebracht en komt het slechts in relatief rustig water tot bezinken. De invloed van het bezinkingsgedrag van het slib op de sedimentatie van de nieuwe haven is moeilijk te bepalen omdat zowel de afmetingen (horizontaal en vertikaal) als scheepsintensiteit sterk kunnen afwijken van de bestaande toestand. Hierop wordt in hoofdstuk 7 teruggekomen.

2.6 Slibgehalte van de Westerschelde

Door Rijkswaterstaat zijn gegevens verstrekt met betrekking tot het slibgehalte op de Westerschelde ter hoogte van Hansweert. De gegevens hebben betrekking op de periode van mei 1973 tot mei 1979. De slibconcentratie gemiddeld over de vertikaal en gemiddeld over deze periode bedraagt ter plaatse van boei 49 (Figuur 3) 50 gr/m^3 . De variatie van het slibgehalte gedurende een getijperiode ter plaatse van boei 49 is weergegeven in Tabel 1.

2.7 Zoutgehalte van de Westerschelde

In overleg met Rijkswaterstaat is besloten dat de variaties in het zoutgehalte van de Westerschelde en de daarmee samenhangende dichtheidsverschillen en dichtheidsstromingen in de haven van Hansweert niet in het model zullen worden weergegeven. Behalve in een zeer globale berekening van de invloed van dichtheidsstromingen op de sedimentatie van de haven blijft dit onderdeel volledig buiten beschouwing.

3. Het model

3.1 Algemeen

De eisen waaraan een goed havenontwerp moet voldoen, zijn voor een belangrijk deel te vertalen in eisen die aan de waterbeweging in en in de nabijheid van de haven kunnen worden gesteld. In een hydraulisch model kan deze waterbeweging, juist voor zover die samenhangt met de vormgeving van de haven in detail worden bestudeerd. Om deze reden is stromingsonderzoek een belangrijk hulpmiddel om tot een goed havenontwerp te komen.

Voor het onderzoek met betrekking tot de nieuwe voorhaven Hansweert is in een van de bestaande hallen van het laboratorium "De Voorst" een hydraulisch schaalmodel gebouwd van het betreffende deel van de Westerschelde (Figuur 5). Het model is een zogenaamd permanentiemodel; dat wil zeggen dat niet de volledige getijbeweging wordt gereproduceerd maar dat slechts voor enkele discrete tijdstippen uit een getijcyclus de stromingstoestand permanent in het model wordt weergegeven. Hierbij worden de traagheidseffecten die optreden in het prototype en die ook op zouden treden in een getijmodel, geacht van ondergeschikt belang te zijn voor het stroombeeld in model.

Tegenover het verwaarlozen van de traagheidseffecten staat het voordeel dat in een permanentiemodel aan alle gekozen getijfasen in principe onbeperkt lang metingen kunnen worden uitgevoerd. Hierdoor kan het stroombeeld in detail worden vastgelegd. De keuze van de getijfasen die in model worden gebracht wordt bepaald door het doel van het onderzoek en de ontwerpcriteria voor de haven.

3.2 Inrichting van het model

De begrenzingen van het model zijn bepaald naar aanleiding van de resultaten van de voorstudie [1]. De westelijke grens van het model loopt vanaf de oever van Zuid-Beveland, op een afstand van ca. 2 km uit de mond van de toekomstige voorhaven dwars over het Middelgat; vanaf het platengebied loopt de grens in zuidoostelijke richting dwars over de Overloop van Hansweert tot op de Platen van Ossensisse. De oostelijke modelgrens loopt vanaf de oever van Zuid-Beveland op ca. 1,6 km oostelijk van de veerhaven te Kruiningen dwars over de Schaar van Waarde en vervolgens over het Zuidergat tot aan de Platen van Ossensisse.

De overige begrenzingen worden gevormd door de Platen van Ossenis en de oever van Zuid-Beveland, waarbij de bestaande voorhaven van Hansweert volledig in het model is opgenomen (zie Figuur 5). Het model heeft een vaste bodem die is uitgevoerd in cementmortel.

Voor de instelling van de juiste debieten en waterstanden, behorende bij de verschillende getijfasen, wordt gebruik gemaakt van verschillende meet- en regelwerken zoals aangegeven in Figuur 5. Achter in de voorhaven is een aan- en afvoersysteem gebouwd voor het introduceren van de komledigings- en komvullingsstromen. Door middel van een roosterwerk op de open randen van het model kan de debietverdeling over de rand correct worden gereproduceerd.

3.3 Schalen

Op grond van de resultaten van het vooronderzoek is gekozen voor een lengteschaal van 100 en een onvertrokken model. De horizontale schaal (n_1) en de vertikale schaal (n_d) van het model zijn dus:

$$n_1 = n_d = 100,$$

waarbij $n = \frac{\text{waarde van een bepaalde grootheid in prototype}}{\text{waarde van die grootheid in model.}}$

Om tot een juiste weergave van het stroombeeld te komen moet worden voldaan aan de schaalregel van Froude. Dientengevolge is de schaal voor de stroomsnelheden:

$$n_v = n_d^{\frac{1}{2}} = 10$$

De schaal waarop de debieten worden weergegeven wordt dan:

$$n_Q = n_1 \cdot n_d \cdot n_v = 1 \cdot 10^5$$

Voor de wrijvingscoëfficiënt van Chézy geldt:

$$n_C^2 = \frac{n_v^2}{n_d \cdot n_i} = \frac{n_v^2 \cdot n_1}{n_d^2} = \frac{10^2 \cdot 100}{100^2} = 1$$

Dit wil zeggen dat de ruwheid van de bodem op de vertikale schaal moet worden weergegeven.

3.4 Bodemligging

Voor de bodemligging en de vorm van de oevers die in het model moeten worden weergegeven is gebruik gemaakt van door Rijkswaterstaat verstrekte gegevens. Voor de ligging van de bodem van de Westerschelde is gebruik gemaakt van recente peilkaarten C6.77.1345, C6.79.175 en B3.79.319 die gezamenlijk het gehele te modelleren gebied bestrijken.

Voor de bodemligging van de haven van Hansweert is gebruik gemaakt van baggerbestek Z 1904, zoals aangegeven op de tekeningen H69-31-B4 en H68-23-135. Hierbij is de gemiddelde bodemligging bepaald door te interpoleren tussen de bodemligging vóór en ná baggeren. Voor de vorm en de uitvoering van de havendammen van de bestaande haven van Hansweert is gebruik gemaakt van de tekeningen A7.55.147, A5.56.82, B6.60.39 en B7.72.164.

De bodemligging van de veerhaven Kruiningen is ingebouwd volgens tekening B4.78.797. Deze peiling valt precies tussen het uitbaggeren van de haven in februari 1979 en in augustus 1979 en wordt daarom geacht representatief te zijn voor de gemiddelde bodemligging.

Na het ijken van het model en het doormeten van de bestaande stromingstoestand wordt het model verbouwd. De door Rijkswaterstaat ontworpen nieuwe voorhaven is ingebouwd volgens bestektekening NXT80.2041. Verder is de bodemligging nabij de voorhaven plaatselijk iets gewijzigd, vooruitlopend op de te verwachten bodemveranderingen in het prototype.

In het model is geen rekening gehouden met de aanleg van de Westerschelde Oeververbinding (W.O.V.) omdat verwacht wordt dat de invloed van zowel het aan te leggen eiland op de Platen van Ossenisse als van de aansluiting van de W.O.V. met de oever van Zuid-Beveland (bestektekening C6-WXT.79.1002) op de stromingen nabij de voorhaven Hansweert verwaarloosbaar klein is.

3.5 Ruwheid van de bodem

Uit inleidende metingen is gebleken dat de kromming van de stroombanen in model niet goed overeenkwam met de kromming in prototype. De oorzaak hiervan was dat de bodem van het model, bestaande uit cementmortel te glad was.

Zoals onder 3.3 is aangetoond dient de ruwheid van de bodem op de verticale-schaal te worden weergegeven. In feite moet dus elke onregelmatigheid van de bodem op schaal 100 worden gemodelleerd. Dit is praktisch niet uitvoerbaar.

Wat wel mogelijk is is het aanbrengen van kunstmatige bodemruwheid in het model. Uit prototypemetingen kan een schatting gemaakt worden van de lengte en de hoogte van de in het prototype aanwezige bodemribbels. Met behulp van een empirische relatie is hieruit de hoeveelheid gebroken grind bepaald, per eenheid van oppervlakte in het model moet worden aangebracht, om tot een juiste reproductie van de bodemruwheid te komen. De afmetingen van het grind liggen dan ook vast.

3.6 Kombergingsdebieten

Zoals vermeld wordt in het model gewerkt met permanente stromingen; dat wil zeggen dat tijdsafhankelijke grootheden als stromingen en waterstanden permanent worden weergegeven. Voor de beschouwing van het stroombeeld op de Westerschelde wordt deze vereenvoudiging acceptabel geacht. Voor het stroombeeld ter plaatse van de aansluiting van de haven van Hansweert op de Westerschelde is een dergelijke vereenvoudiging niet onvoorwaardelijk toegestaan. Het stroombeeld wordt daar namelijk in belangrijke mate bepaald door het in- en uittrekend kombergingsdebiet. Dit debiet wordt bepaald door

$$Q_k = A \cdot \frac{dh}{dt}$$

waarin:

Q_k	= kombergingsdebiet	(m^3/s)
A	= oppervlakte van de haven <i>het gebied achter de havenmond</i>	(m^2)
$\frac{dh}{dt}$	= snelheid van de waterstandsveranderingen	(m/s)

Door middel van een meet-en regelwerk achter in de haven kan het bij de in model weergegeven getijfase behorende komvullings- of komledigingsdebiet worden ingesteld. In het prototype neemt de grootte van het kombergingsdebiet af met de afstand tot de havenmond. In model is dit niet het geval doordat een constant debiet achter in de haven wordt ingelaten of onttrokken. Hierdoor zal het stroombeeld in de haven, voor de getijfase waarvoor een kombergingsdebiet moet worden ingesteld, afwijken van het stroombeeld in prototype, en wel sterker naarmate men verder de haven ingaat. De instelling is er echter op gericht om het stroombeeld in de havenmond zo goed mogelijk te reproduceren, in verband met de consequenties aangaande nautische en sedimentologische aspecten.

4. Meetmethoden

4.1 Stroommetingen

Ter bepaling van de stromingen in het model zijn drie verschillende registratie-of meetmethoden toegepast die tezamen een totaalbeeld van de stroomsnelheden en richtingen geven.

- 1 Micromolen. In de ijkingsraaien I en II (Figuur 3) van het model en in een net van meetpunten dat over het model gelegd is zijn met behulp van een micromolen stroomsnelheden gemeten. De snelheden werden tijdens de ijkingsfase van het model gemeten op een afstand van 0,4.h vanaf de bodem nadat uit enige vertikaal-metingen was gebleken dat op die hoogte ongeveer de gemiddelde snelheid over de vertikaal werd gemeten. Bij het onderzoek van de nieuwe havenontwerpen zijn ook snelheden gemeten in de bovenste, 4 cm dikke, waterlaag ten behoeve van het wiskundig scheepvaartmodel.
Op plaatsen met een zeer geringe diepte ($< 2,5 \cdot 10^{-2}$ m) kan de micromolen niet worden gebruikt, terwijl ook snelheden kleiner dan $\approx 3 \cdot 10^{-2}$ m/s niet meer nauwkeurig kunnen worden gemeten. De stroomrichtingen zijn gemeten met behulp van een richtingsvaantje.
- 2 Drijvers. Ter bepaling van stroombanen, dus niet zozeer stroomsnelheden, is gebruik gemaakt van drijvers. De afgelegde baan is van elke drijver vastgelegd ten opzichte van een coördinatenstelsel dat over het model werd gelegd.
- 3 Foto's. Met behulp van dezelfde drijvers als hierboven is door middel van fotografische tijdopnamen vanaf een hoogte van $\pm 8,25$ m, met behulp van twee camera's, de gemiddelde snelheid bepaald in de bovenste 4 cm water. Deze diepte is gekozen omdat het maatgevend schip voor de nieuwe haven van Hansweert in geladen toestand 4 meter diepgang heeft. Voor het vastleggen van neren, scherpe snelheidsgradienten en stroomcontracties, alsmede voor het vastleggen van stroombeelden op relatief ondiep water zijn de gebruikte drijvers minder geschikt. Daarom is ook gebruik gemaakt van fotografische tijdopnamen van de bewegingen van papiersnippers.
Het gebied dat is gefotografeerd is weergegeven in Figuur 3.

4.2 Meting horizontale uitwisseling

4.2.1 Algemeen

De aanslibbing van de haven van Hansweert wordt voor een groot deel veroorzaakt door het binnendringen van slibhoudend Westerscheldewater in de haven ten gevolge van komvulling en de horizontale uitwisseling. Binnen de haven zijn de stroomsnelheden zo gering dat een gedeelte van het meegevoerde gesuspendeerde slib zal bezinken. De komberging is een bekende grootheid (zie 3.6); de horizontale uitwisseling moet uit modelmetingen worden bepaald.

Alsvorens op de methode van meting van de horizontale uitwisseling in te gaan is het noodzakelijk het uitwisselingsmechanisme, juist in samenhang met de aanslibbing van de haven nader te bezien. De grens tussen het water in de haven en op de Westerschelde wordt gevormd door het vertikale vlak door de koppen van de havendammen. De totale horizontale uitwisseling bestaat in strikte zin uit drie componenten:

- a) het havenwater dat komende uit de haven de mond passeert en even later weer de haven binnentrekt,
- b) het rivierwater dat de havenmond passeert en direct daarna de haven weer verlaat,
- c) het rivierwater dat de havenmond passeert en pas na langere tijd de haven weer verlaat.

Component (a) draagt niet bij tot de aanslibbing van de haven omdat het hier reeds slibarm water betreft dat wederom de haven binnentrekt. In principe zal de aanslibbing ten gevolge van component (b) gering zijn omdat dit water te kort binnen de haven verblijft om een belangrijk gedeelte van het meegevoerde slib te laten bezinken, terwijl deze component van de uitwisseling slechts aanwezig is op plaatsen waar de snelheden in de haven relatief hoog zijn, namelijk direct in de nabijheid van de havenmond. Component (c) zal voor een belangrijk deel voor de aanslibbing, voor zover deze door de horizontale uitwisseling wordt veroorzaakt, verantwoordelijk zijn. Het onderzoek en de metingen zijn er daarom op gericht de grootte van deze laatste component te bepalen.

4.2.2 Meting

Bij de meting van de horizontale uitwisseling wordt niet de hoeveelheid rivierwater die de haven intrekt gemeten, maar de hoeveelheid havenwater die de haven verlaat. Hiervoor wordt door middel van een regelwerk een konstant debiet van een sterk geconcentreerde kleurstof, natrium-fluoresceïne, in de haven ingelaten (zie Figuur 6). De grootte van het kleurstofdebiet wordt zodanig gekozen dat de snelheden die dientengevolge optreden verwaarloosbaar klein zijn ten opzichte van het heersende stroombeeld. De plaats van de injectie wordt zodanig gekozen dat de kleurstof vanuit de haven in de richting van de havenmond wordt getransporteerd. Een gedeelte van de geïnjecteerde hoeveelheid kleurstof zal de havenmond nooit bereiken, doordat het met een eventueel aanwezig komvullingsdebiet achter uit de haven verdwijnt. De kleurstofinjectie geschiedt door meerdere pijpjes die zich op $\pm 0,15$ m uit elkaar bevinden. In elk pijpje bevinden zich 2, 4, 6, 8 of 10 gaatjes, afhankelijk van de waterdiepte waarop het pijpje zich bevindt. Door deze gaatjes stroomt de kleurstof goed verdeeld de haven in. Door deze wijze van kleurstofinjectie mag er van worden uitgegaan dat de kleurstofconcentratie van het uittrekkende water homogeen is.

In een raai op ongeveer 0,50 m binnen de havenmond wordt de kleurstofconcentratie bepaald van het water dat ter plaatse nog een snelheid heeft in de richting van de havenmond (Figuur 7, raai A). De kleurstofconcentratie in raai A wordt nu representatief verondersteld te zijn voor de gemiddelde kleurstofconcentratie van havenwater dat voor uitwisseling in aanmerking komt. Het is dus niet zeker dat al dit water uitgewisseld wordt, maar wel dat het water dat uitgewisseld wordt de in raai A gemeten kleurstofconcentratie heeft.

De bepaling van de kleurstofconcentratie in raai A gebeurt door met behulp van een pompje een watermonster te nemen, dat geanalyseerd wordt door vergelijking van de kleuring van dit monster met een reeks van standaardmonsters. Om het vergelijken te vergemakkelijken wordt gewerkt in ultraviolet licht.

Simultaan met de concentratiemetingen in raai A worden in een raai vanaf de kop van de havendam, die ten opzichte van de hoofdstroom op de Westerschelde benedenstrooms is gelegen, metingen verricht (zie Figuur 7, raai B).

In raai B worden op onderlinge afstanden van 0,10 m achtereenvolgens bepaald:

- de plaatselijke waterdiepte,
- de vertikaal gemiddelde stroomsnelheid loodrecht op die raai, en

- de kleurstofconcentratie gemiddeld over de vertikaal.

Met behulp van deze gegevens is het mogelijk het totale kleurstofdebiet door raai B te bepalen volgens de formule:

$$q_k = \sum_{i=1}^n (b \cdot d_i \cdot \bar{v}_i \cdot \bar{c}_i)$$

waarin:

q_k = totale kleurstofdebiet door raai B

n = aantal beschouwde meetpunten

i = volgnummer van het beschouwde punt

b = horizontale afstand tussen de meetpunten

d_i = waterdiepte in punt i

$\bar{v}_i$ = vertikaal gemiddelde snelheid in punt i loodrecht op raai B

$\bar{c}_i$ = vertikaal gemiddelde kleurstofconcentratie in punt i

Uit de metingen in raai A is de gemiddelde kleurstofconcentratie bekend van havenwater dat voor uitwisseling in aanmerking komt. Uit de metingen in raai B is de hoeveelheid kleurstof bekend die per tijdseenheid door de monding de haven verlaat. Door nu dit kleurstofdebiet te delen door de kleurstofconcentratie in raai A wordt het uitwisselingsdebiet bepaald. Dus,

$$\frac{\text{raai B: kleurstofdebiet door de havenmond } (q_k)}{\text{raai A: gemiddelde kleurstofconcentratie } (c_A)} = \frac{[\text{gr/s}]}{[\text{gr/m}^3]} = \text{uitwisselingsdebiet } [\text{m}^3/\text{s}]$$

Ter illustratie wordt in Bijlage 1 de verwerking van de meetresultaten voor havenvariant T4, volgens de beschreven methode, gepresenteerd. Op de wijze waarop uit de gemeten uitwisseling voor verschillende getijfasen de uitwisseling gedurende een volledige getijcyclus wordt berekend, wordt ingegaan in hoofdstuk 7.

5. IJking

5.1 Keuze getijfasen

Alvorens een model voor onderzoek te kunnen gebruiken dient het zodanig ingesteld te worden dat de bestaande stromingstoestand, T0 genoemd, correct gereproduceerd wordt. Zoals vermeld zullen in het model permanente stromingen worden ingesteld, die overeenkomen met de getijstromen tijdens een aantal fasen van het getij. De keuze van die getijfasen wordt bepaald door het doel van het te verrichten modelonderzoek.

Een belangrijk deel van de studie vormt het scheepvaartkundige onderzoek. Afgezien van wind en andere meteorologische omstandigheden zal de grootste hinder tijdens in en uitvaart van de haven optreden bij een sterke dwarsstroming voor de havenmond. Daarom is ervoor gekozen het onderzoek uit te voeren voor springtijomstandigheden, waarbij de getijfasen met maximale ebstroom en maximale vloedstroom op de Westerschelde worden weergegeven in het model. Tijdens maximale ebstroom zal ten gevolge van een daling van de waterspiegel een stroom uit de voorhaven trekken, terwijl tijdens maximale vloedstroom een intrekkende stroming optreedt.

Verder worden in het model de getijstromingen corresponderend met hoog water en laag water weergegeven. Deze keuze hangt samen met de interpretatie van de resultaten van de horizontale uitwisselingsmetingen. Tijdens deze getijfasen treedt namelijk geen komvullings- of komledigingsstroom op omdat de verticale snelheid van de waterspiegel gelijk aan nul is. Tijdens deze getijfasen kan dus de uitwisseling gemeten worden zonder dat die wordt beïnvloed door kombergingsdebieten. Hierop wordt in Hoofdstuk 7 uitvoerig ingegaan. Voor de eenduidigheid en in verband met de beschikbaarheid van prototypemetingen is besloten om ook hier springtijomstandigheden aan te houden. De debieten voor deze vier getijfasen door de Westerschelde en de daarbij behorende waterstanden en kombergingsdebieten in de haven van Hansweert zijn weergegeven in Tabel 2. Met inachtneming van de afgeleide schalen worden deze getijfasen weergegeven in het hydraulisch model.

5.2 Opzet van de ijking

De ijking van het model voor de vier getijfasen, genoemd in 5.1, wordt uitgevoerd voor de stromingstoestand op 12 juni 1979. De gegevens die als basis voor de ijking ter beschikking staan kunnen worden verdeeld in drie groepen:

- De resultaten van snelheidsmetingen in de vertikaal in een aantal meetpunten in de ijkingsraaien I en II (Figuur 3). De metingen zijn uitgevoerd op 12 juni 1979 of zijn naar die datum herleid. De resultaten zijn door de opdrachtgever bewerkt en in de vorm van gemiddelde snelheden over de vertikaal, snelheidsrichtingen, debieten en debietverdelingen aan het Waterloopkundig Laboratorium ter beschikking gesteld.
- De resultaten van stokdrijvermetingen uitgevoerd op 2 mei 1973. Deze metingen hebben betrekking op het Middelgat, de Overloop van Hansweert en het Zuidergat.
- De resultaten van stokdrijvermetingen uitgevoerd op 31 juli 1973 en 12 april 1979. Deze metingen hebben betrekking op de havenmond van Hansweert en de direkte omgeving daarvan.

Omdat het getij op 2 mei 1973, 31 juli 1973 en 12 april 1979 vergelijkbaar is met het getij op 12 juni 1979 is op de drijvermetingen geen herleiding toegepast.

5.3 Ijkingsresultaten

5.3.1 Hoogwater (getijfase A)

Tijdens HW te Hansweert treedt kennelijk in het meest zuidoostelijk in het model weergegeven deel van de Westerschelde reeds een stroomkentering op (meetpunten 5048 en 5049 in raai II), terwijl in het overige deel nog een duidelijke vloedstroom aanwezig is (zie Figuren 8 en 10). Dit verschijnsel kan in een permanentiemodel niet worden weergegeven, wat tot gevolg heeft dat de snelheidsverdeling in raai II in het model afwijkt van die in het prototype.

Een ander opvallend verschil tussen het model en het prototype is het stroombeeld in de havenmond. In het prototype is de stroom over de gehele breedte van de mond naar buiten gericht. Aangezien tijdens de beschouwde getijfase geen kombergingsdebiet optreedt, moet de geconstateerde stroom waarschijnlijk aangemerkt worden als een dichtheidsstroom, waarbij op een lager niveau zouter

en dus zwaarder water de haven intrekt. Aangezien het water in het model een homogene samenstelling heeft kan het gemeten stroombeeld in het prototype niet worden gereproduceerd in het model.

Overigens blijken de stroomsnelheden en stroomrichtingen in het model en in het prototype goed met elkaar overeen te stemmen.

5.3.2 Maximale ebstroom (getijfase B)

De prototypemetingen en ijkingsresultaten zijn weergegeven op de Figuren 8 en 11. De stroomsnelheden en richtingen in model komen goed overeen met het prototype. Alleen op plaatsen waar de snelheden erg laag zijn (meetpunten 1 en 7) treden afwijkingen op in de richting.

5.3.3 Laagwater (getijfase C)

De prototypemetingen en ijkingsresultaten zijn weergegeven op de Figuren 9 en 12. Het stroombeeld op de Westerschelde wordt redelijk in model weergegeven hoewel de snelheden in model over het algemeen wat lager zijn dan in prototype. Het stroombeeld in de havenmond wordt goed weergegeven. Ten westen van de haven van Hansweert treedt in het model een neer op die in prototype in veel mindere mate aanwezig is. Met betrekking tot dergelijke afwijkingen in het stroombeeld wordt opgemerkt dat ook de resultaten van de verschillende prototypemeetcampagnes niet altijd eenduidig zijn. Verschillen kunnen worden veroorzaakt door bijvoorbeeld windinvloeden.

De zeer lage snelheden in het prototype in de meetpunten 1, 2 en 3 die in het model niet goed worden weergegeven, zijn wellicht een gevolg van de laagwater stroomkentering in dit gedeelte van de Westerschelde.

5.3.4 Maximale vloedstroom (getijfase D)

De prototypemetingen en de ijkingsresultaten zijn weergegeven in de Figuren 9 en 13. De stroomsnelheden en richtingen in model komen goed overeen met het prototype. In ijkingsraai II zijn de snelheden in het model wat lager dan in het prototype. Evenals voor de verschillen die optreden in de meetpunten 5048 en 5050 moet de oorzaak hiervoor gezocht worden in het feit dat de prototype-snelheden in raai II niet op dezelfde datum zijn gemeten als de snelheden in raai I; de snelheden in raai II zijn herleid naar 12 juni 1979 (zie 2.4).

De afwijking in de stroomsnelheid in punt 5053 wordt veroorzaakt doordat dit meetpunt gelegen is op de scherpe overgang tussen de ondiepe vooroever en de diepe Schaar van Waarde. Kleine afwijkingen in de plaatsbepaling, in model zowel als in prototype, kunnen maken dat aanzienlijke snelheidsverschillen worden gemeten.

Het stroombeeld in en direct vóór de havenmond wordt goed weergegeven.

6. Onderzoek havenontwerpen

6.1 Inleiding

Alvorens het ontwerp van Rijkswaterstaat van de nieuwe voorhaven en eventuele alternatieven te onderzoeken, wordt de stromingstoestand in de huidige situatie (T0) in detail vastgelegd. Dit betreft dan het meten van stroomsnelheden en stroomrichtingen in de haven en in een ruim gebied in de Westerschelde, alsmede de horizontale uitwisseling door de havenmond. Door dezelfde grootheden te meten in de mogelijk toekomstige situaties kan een goede indruk worden verkregen van de wijzigingen in de stromingstoestand.

Na het inbouwen van een nieuwe situatie wordt eerst een kwalitatief oordeel gegeven over de stroombeelden tijdens de maximale getijstromen, dit zijn de getijfasen B en D. Wanneer dit oordeel positief is worden de bovenbeschreven metingen uitgevoerd. Dit zijn in concreto stroommetingen voor de vier getijfasen A, B, C en D en horizontale uitwisselingsmetingen voor de getijfasen A, C en D. Dergelijke metingen zijn gedaan voor de situaties T1, T4, T6, T7. In T2 zijn alleen stroommetingen uitgevoerd voor de getijfasen B en D, terwijl T3 en T5 uitsluitend kwalitatief zijn beoordeeld.

6.2 T0 - Modelonderzoek

6.2.1 Stroombeeld (T0)

Het stroombeeld voor de bestaande toestand (T0) is reeds besproken bij de ijkingsresultaten in 5.3 en wordt in detail weergegeven op de Figuren 10 tot en met 13.

6.2.2 Horizontale uitwisseling (T0)

De horizontale uitwisseling door de havenmond is gemeten volgens de methode zoals beschreven in 4.2. De metingen zijn uitgevoerd voor de getijfasen A(H.W.), C (L.W.) en D(maximale vloedstroom). Voor fase D wordt een kombergingsdebiet ingesteld overeenkomend met de getijfase en het havenoppervlak. Voor fase B (maximale ebstroom) wordt geen horizontale uitwisseling gemeten omdat de kombergingsstroom, die door de havenmond naar buiten trekt, de indringing van Westerscheldewater volledig voorkomt. De resultaten van de metingen voor T0 zijn samengevat in Tabel 3.

6.3 T1 - Modelonderzoek

De haven van Hansweert wordt in model verbouwd volgens bestektekening NXT 80.2041. De breedte van de havenmond bedraagt aan de teen van het talud van de havendammen 120 m en deze maat wordt niet gewijzigd tijdens het onderzoek. De teen van het talud ligt op N.A.P.- 9,00 m. De taludhelling is 1 : 6, met een plasberm tussen N.A.P.- 0,70 m en N.A.P.- 0,50 m. Hierdoor wordt de breedte van de havenmond op N.A.P.-niveau ongeveer 240 m. De vorm van de nieuwe haven wordt in belangrijke mate bepaald door de bestaande haven en de overige aanwezige bebouwing. Verder wordt de plaats van de haven bepaald door de eis dat de bestaande haven in gebruik moet blijven voor de scheepvaart tijdens de bouw van de nieuwe haven en het nieuwe sluizencomplex. Hierdoor worden de benodigde sloopwerkzaamheden van de bestaande haven tot een minimum beperkt. De oostelijke begrenzing van het havenontwerp mag, in verband met de grondaankopen die reeds zijn gedaan, slechts bij zeer grote noodzaak overschreden worden. Een en ander in overleg met Rijkswaterstaat. De oppervlakte van het havenontwerp bedraagt op N.A.P.-niveau ongeveer 56.10^4 m^2 ; de grootste lengte van de haven is ongeveer 1.650 m.

6.3.1 Stroombeeld (T1)

In het model worden voor havenontwerp T1 voor de vier getijfasen de stroombeelden vastgelegd (Figuren 14 t/m 17). Het blijkt dat het stroombeeld op de Westerschelde slechts tot op vier tot vijfhonderd meter uit de havenmond verandert onder invloed van de inbouw van de nieuwe haven.

Voor getijfase A en D Figuur 14 en 17 treedt een warrig stroombeeld op in de havenmond. Vooral voor getijfase D ligt de overgang van hoge naar lage stroomsnelheden ver (100 à 150 m) buiten de havenmond. Dit wordt veroorzaakt door een ongunstige oriëntatie van de kop van de westelijke havendam waardoor de hoofdstroom ver wordt uitgeworpen. Het optredende stroombeeld is ongunstig voor invarende scheepvaart.

Voor getijfase B (Figuur 15) en C (Figuur 16) levert het stroombeeld geen problemen op voor de scheepvaart. De optredende stroomsnelheden zijn laag en de overgang naar de hoofdstroom op de Westerschelde verloopt geleidelijk.

Voor de getijfase B wordt de stroming ten westen van de westelijke havendam ver uitgeworpen door de ongunstige oriëntering van de kop van die dam.

De stroombeelden voor de getijfasen B en D zijn numeriek verwerkt ten behoeve van het wiskundig scheepvaartonderzoek (zie M 1642, deel II).

Ter beoordeling en vergelijking van de verschillende havenvarianten is voor getijfase D steeds het stroombeeld langs de koppen van de havendammen in detail vastgelegd. Fase D is gekozen omdat voor deze getijfase de grootste stroomsnelheden optreden. De gemiddelde stroomsnelheden over de vertikaal zijn weergegeven in Figuur 18. Duidelijk zichtbaar is de neer die optreedt tussen de hoofdstroom en de westelijke havendam.

6.3.2 Horizontale uitwisseling (T1)

De resultaten van de horizontale uitwisseling zijn weergegeven in Tabel 4. Opvallend is de sterke toename van de uitwisseling voor getijfase D. Deze toename kan verklaard worden uit het stroombeeld in en vóór de havenmond. Tijdens de beide vloedfasen A en D (Figuren 14 en 17) wordt de stroom uitgeworpen door de westelijke havendam, met als gevolg dat het verticale oppervlak waardoor de eigenlijke uitwisseling plaats vindt, ver buiten de havendam ligt en daardoor zeer groot is, zowel in horizontale als verticale zin (door de grotere waterdiepte). In de getijfase D is er bovendien nog een geconcentreerde komvullingsstroom waardoor een langgerekte neer in de haven ontstaat die water uit de haven naar buiten transporteert. Doordat de horizontale uitwisseling tijdens getijfase D in zeer belangrijke mate verantwoordelijk is voor de uitwisseling gedurende een volledige getijcyclus (zie 7.2) kan gesproken worden van een ongunstige situatie ten aanzien van de aanslibbing van de haven voor T1.

6.4 T2 - Modelonderzoek

6.4.1 Stroombeeld (T2)

Om de stroomgeleiding langs de westelijke havendam te verbeteren is de oriëntatie van de kop van deze dam gewijzigd. De kop van de westelijke havendam sluit nu beter aan bij de denkbeeldige verbindingslijn van de Oostdam en het meest westelijk gelegen stroomgeleidingsdammetje.

Beoordeling van het stroombeeld voor de getijfasen B en D leert dat de aangebrachte wijzigingen in de havenconfiguratie slechts het stroombeeld in en direct buiten de haven beïnvloeden. Het stroombeeld op de Westerschelde is praktisch ongewijzigd ten opzichte van T1 (Figuren 19 en 20).

Voor getijfase B wordt een acceptabel glad stroombeeld verkregen met een geleidelijke overgang van de lage snelheden in de haven naar de hoge snelheden

op de Westerschelde. Voor getijfase D is de opzet van een verbetering van de stroomgeleiding langs de werkdam ten dele geslaagd. De vloedstroom volgt de westdam niet volledig. Er treden kleine instabiele neertjes op tussen de hoofdstroom en de kop van deze dam. Een en ander leidt er toe dat eerst nog enige aanpassingen aan de westelijke havendam moeten worden aangebracht en dat het in detail doormeten van de getijfasen A en C achterwege kan blijven. De gemiddelde snelheden in de vertikaal nabij de westelijke havendam zijn voor getijfase D weergegeven in Figuur 21.

6.4.2 Horizontale uitwisseling (T2)

Op grond van een beoordeling van de stroombeelden voor de getijfasen B en D is besloten de uitwisselingsmetingen voor T2 achterwege te laten.

6.5 T3 - Modelonderzoek

Om de stroomgeleiding langs de kop van de westelijke havendam te verbeteren is de meest westelijke punt van deze dam nog wat afgerond. Hoewel de vloedstroom hierdoor strak langs de havendam wordt geleid moet T3 toch gezien worden als een tussenfase. De inmiddels beschikbaar gekomen voorlopige resultaten van het wiskundig scheepvaartmodel toonden aan dat in de haven meer ruimte gecreëerd moest worden wat een aanzienlijke wijziging van het havenontwerp vereist. Daarom is besloten variant T3 niet in detail door te meten, zodat van verdere rapportage wordt afgezien.

6.6 T4 - Modelonderzoek

Naar aanleiding van de resultaten van het wiskundig scheepvaartonderzoek voor variant T1 blijkt het noodzakelijk de havenmond ingrijpend te veranderen. Om voor schepen, komende uit de richting Terneuzen tijdens de maximale ebstroom een veilige invaart te garanderen dient aan de oostzijde van de haven direct binnen de havenmond extra manoeuvreerruimte geschapen te worden. Doordat de oostelijke begrenzing van het T1-havenontwerp samenvalt met de aankoopgrens van gronden voor de havenuitbreiding wordt het niet wenselijk geacht om die begrenzing te overschrijden voor het ontwerp van variant T4. Daarom is de gehele havenmond 70 meter in westelijke richting opgeschoven. Hierdoor ontstaat de benodigde manoeuvreerruimte zonder dat de oostelijke begrenzing wordt

overschreden. De breedte van de havenmond is hierbij niet veranderd (120 m op N.A.P. - 9 m).

6.6.1 Stroombeeld (T4)

Voor fase A (zie Figuur 22) wordt een glad stroombeeld verkregen met een goede stroomgeleiding langs de westelijke havendam. De snelheidsgradiënten in de havenmond zijn klein, evenals de stroomsnelheden in de haven. Ook voor de getijfasen B (Figuur 23) en C (Figuur 24) geldt dat zowel de stroomsnelheden in de haven als de gradiënten in en direct buiten de havenmond acceptabel lijken. Voor getijfase B is de komledigingsstroom goed gespreid over de volle havenbreedte. Voor getijfase D (Figuur 25) wordt de vloedstroom goed geleid door de westelijke havendam. Aan de oostzijde van de haven treedt een geconcentreerde komvullingsstroom op. Tussen deze vulstroom en de oostelijke havendam ontstaat een kleine maar vrij krachtige neer, die echter grotendeels op het talud van de havendam ligt. De stroomsnelheden in de haven variëren tussen 0,20 en 0,30 m/s. De richting van deze stroomsnelheden is vrijwel evenwijdig met de havenas zodat hiervan niet veel hinder voor de scheepvaart wordt verwacht. Resumerend kan gesteld worden dat een acceptabel stroombeeld wordt verkregen voor alle onderzochte getijfasen.

Het neertje langs de oostelijke havendam kan als een schoonheidsfoutje worden aangemerkt. Dit neertje ligt vrijwel volledig op het talud van de havendam.

Naar verwachting zal het geen hinder opleveren voor de scheepvaart.

Omdat voor variant T4 het stroombeeld er zeer bemoedigend uitziet is het stroombeeld langs de koppen van de havendammen zowel voor fase B als voor fase D in detail vastgelegd. De resultaten zijn weergegeven in de Figuren 26 en 27.

6.6.2 Horizontale uitwisseling (T4)

De resultaten van de horizontale uitwisselingsmetingen voor de getijfasen A, C en D zijn weergegeven in Tabel 5. Het blijkt dat voor alle drie de onderzochte getijfasen de uitwisseling aanmerkelijk lager is dan tijdens T1. De oorzaak hiervan moet gezocht worden in de gelijkmatige snelheidsovergang en de gladde stroombeelden.

Door de lage stroomsnelheden binnen de haven tijdens fase C (L.W) is de uitwisseling erg laag. Door de verbeterde stroomgeleiding langs de westelijke havendam tijdens getijfase D is de uitwisseling hier, vergeleken met T1, met een factor 6 gereduceerd.

6.7 T5 - Modelonderzoek

Voor variant T5 zijn enkele kleine veranderingen aangebracht in de bodemligging direct westelijk van de westelijke havendam. Dit om de bodemconfiguratie aan te passen aan de te verwachten bodemligging in het prototype enige tijd na gereedkomen van de nieuwe voorhaven. Het stroombeeld verandert ten gevolge van deze aanpassingen echter niet waarneembaar. Daarom wordt deze variant verder niet gepresenteerd.

6.8 T6 - modelonderzoek

In een poging om het neertje dat optreedt in variant T4 tijdens getijfase D te onderdrukken is de kromtestraal van de oostelijke havendam gewijzigd. De kromtestraal van de teen van het binnentalud van de oostdam (op N.A.P.-9.00 m) is vergroot van 102 m tot 160 m. Hierdoor steekt de kop van de oostdam ± 28 m verder in de Westerschelde. De westelijke havendam en de breedte van de havenmond zijn ongewijzigd.

6.8.1 Stroombeeld (T6)

Voor getijfase A is het stroombeeld vrijwel gelijkvormig aan dat voor T4 (zie Figuur 28). De neer in de havenmond is wat groter geworden, maar de optredende stroomsnelheden zijn niet waarneembaar veranderd.

Tijdens getijfase B (Figuur 29) treedt een klein neertje op in de havenmond. Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt doordat de ebstroom op de Westerschelde meer wordt uitgeworpen door de verlengde oostelijke havendam. Doordat binnen de haven een klein neertje optreedt tegen de westelijke havendam is de komledigingsstroom meer geconcentreerd. Overigens is het stroombeeld nauwelijks veranderd.

Tijdens getijfase C is vooral het stroombeeld binnen de haven veranderd onder invloed van de verder uitgeworpen ebstroom (Figuur 30). Tijdens getijfase D treedt een vrijwel gelijkvormig stroombeeld op als voor variant T4. Ook het neertje tegen de oostelijke havendam is nog aanwezig. De opzet van variant T6 is dus niet geslaagd (zie Figuur 31).

Voor getijfase D zijn de stroomsnelheden langs de koppen van de havendammen in detail gemeten. Slechts kleine verschillen treden op ten opzichte van variant T4. De resultaten zijn weergegeven in Figuur 32.

6.8.3 Horizontale uitwisseling (T6)

De resultaten van de uitwisselingsmetingen zijn weergegeven in Tabel 6. Voor fase A en D zijn de resultaten vergelijkbaar met die voor variant T4. De horizontale uitwisseling voor getijfase C is met een factor 4 à 5 toegenomen ten opzichte van T4. De verandering van het stroombeeld in de havenmond, doordat de ebstroming verder wordt uitgeworpen, is hier de oorzaak van.

6.9 T7 - modelonderzoek

Voornamelijk met het oog op een reductie van de bouwkosten is een alternatief onderzocht voor variant T4. De verschillen hebben slechts betrekking op de oostelijke havendam. De kop van de havendam ligt op dezelfde plaats als bij T4 maar de verbinding met de oever van Zuid-Beveland wordt niet gevormd door een cirkelboog maar door een rechte lijn.

6.9.1 Stroombeeld (T7)

Tijdens getijfase A wijkt het stroombeeld in de haven iets af van het stroombeeld in variant T4 (zie Figuur 33). De snelheden in de haven hebben echter wel dezelfde grootte.

Voor fase B is het stroombeeld volkomen gelijkvormig aan dat van variant T4 (zie Figuur 34).

Het stroombeeld binnen de haven voor getijfase C (Figuur 34) is strakker dan bij variant T4. In de havenmond ligt de overgang van langzaam naar snel stromend water meer binnen de verbindingslijn van de havenhoofden dan bij T4.

Het stroombeeld tijdens fase D (zie Figuur 35) is vergelijkbaar met dat voor variant T4. Binnen de haven nabij de oostelijke havendam is het stroombeeld echter over grotere lengte instabiel. De neertjes tussen de oostelijke havendam en de komvullingsstroom zijn niet plaatsvast.

Omdat de vormgeving van de haven slechts zeer weinig verschilt van variant T4 is het stroombeeld langs de koppen van de havendammen niet in detail doorgemeten.

6.9.2 Horizontale uitwisseling (T7)

De resultaten van de horizontale uitwisselingsmetingen zijn weergegeven in Tabel 7.

In vergelijking met de uitwisseling voor variant T4 is de uitwisseling voor alle drie de getijfasen A, C en D aanmerkelijk toegenomen. De relatieve toename is het kleinst voor getijfase D. Voor deze getijfase was ook de overeenkomst tussen de stroombeelden voor T4 en T6 het grootst (6.9.1). Wat opvalt is de grote spreiding in de berekeningsresultaten voor de verschillende uitwisselingsproeven voor getijfase D, zoals weergegeven in Tabel 7. Dit wijst op een instabiel stromingsbeeld, vermoedelijk veroorzaakt door de gekonstaterde veranderingen in de neertjes langs de oostelijke havendam. Uit het voorgaande blijkt dat de horizontale uitwisseling voor variant T7 ten opzichte van variant T4 onder invloed van de geringe wijzigingen in de vormgeving van de haven relatief sterk is toegenomen.

7. Berekening van de sedimentatie

7.1 Opzet van de berekening

In Hoofdstuk 6 zijn onder andere de resultaten gepresenteerd van de horizontale uitwisselingsmetingen die in een aantal havenvarianten voor de getijfasen A, C en D zijn uitgevoerd. Uit voorgaande onderzoeken [3 en 4] is gebleken dat de meetresultaten voor de horizontale uitwisseling in een bepaalde havenvariant voor verschillende getijfasen, bij benadering op de volgende wijze aan elkaar zijn gerelateerd:

- De horizontale uitwisseling neemt lineair toe met een toename van een maatgevende stroomsnelheid of een maatgevend debiet voor de haven.
- De horizontale uitwisseling neemt lineair af met een toename van het komvullingsdebiet.

Een verklaring voor deze in eerste benadering lineaire verbanden op fysische grondslag is vooralsnog niet gevonden.

Verder blijkt uit modelonderzoeken dat er niet of nauwelijks een horizontale uitwisseling optreedt als er een komledigingsdebiet door de havenmond naar buiten trekt. Het optreden van horizontale uitwisseling is dus beperkt tot het gedeelte van de getijcyclus tussen laagwater en hoogwater waarover een komvullingsstroom optreedt (zie Figuur 2). Het blijkt dat binnen deze periode zowel een ebstroming als een vloedstroming kan optreden. Voor de vloedstroming leiden bovenstaande relaties tot de volgende vergelijking:

$$U = a \cdot v - b \cdot A \cdot \frac{dh}{dt} \quad (1)$$

waarin:

U	= momentane horizontale uitwisseling	[m ³ /s]
a	= positieve constante	[m ²]
v	= maatgevende stroomsnelheid	[m/s]
b	= positieve constante	[-]
A	= havenoppervlak	[m ²]
$\frac{dh}{dt}$	= vertikale snelheid van de waterspiegel	[m/s]

* De constante a wordt bepaald uit de gemeten uitwisseling voor fase A (hoogwater). In deze fase is $\frac{dh}{dt} = 0$ en vergelijking (1) gaat over in

$$U = a \cdot v \quad (2)$$

- * Als a bekend is kan b bepaald worden met behulp van de gemeten uitwisseling voor fase D (maximale vloedstroom).

Voor de ebstroming leiden de beschreven relaties tot de volgende vergelijking:

$$U = c|v| - d.A.\frac{dh}{dt} \quad (3)$$

waarin:

$$\begin{aligned} c &= \text{positieve constante} & [m^2] \\ d &= \text{positieve constante} & [-] \end{aligned}$$

- * De constante c wordt bepaald uit de gemeten uitwisseling voor fase C (laagwater) op dezelfde manier als waarop a bepaald wordt.
- * De constante d kan uit de metingen niet worden bepaald. Daarom wordt voor d dezelfde waarde aangehouden als voor b. De hierdoor geïntroduceerde fout is slechts gering omdat de horizontale uitwisseling tijdens ebstroming klein is ten opzichte van de totale horizontale uitwisseling tijdens een getijcyclus.

Om nu het verloop van de horizontale uitwisseling over een getijcyclus te kunnen berekenen moet het verloop van de maatgevende snelheid v en van $\frac{dh}{dt}$ worden bepaald.

Voor v wordt gekozen het gemiddelde van de snelheidsregistraties op 12 juni 1979 voor de meetpunten 5, 6, 5051 en 5052 (Figuur 3). Deze meetpunten liggen ten oosten en ten westen van de havenmond op een zodanige afstand, dat de snelheden niet of nauwelijks worden beïnvloed door wijzigingen van de haven.

Het verloop van $\frac{dh}{dt}$ wordt bepaald uit de resultaten van de zelfregistrerende peilschaal in de haven van Hansweert (PR 3.2) op 12 juni 1979 (zie Figuur 2).

7.2 Berekeningsresultaten

Voor de havenvarianten T0, T1, T4, T6 en T7 zijn met behulp van de relaties in 7.2.1 de constanten a, b en c bepaald. De periode waarover de uitwisseling plaats vindt is verdeeld in intervallen van 20 minuten elk. Over elk interval wordende snelheid v en $\frac{dh}{dt}$ verondersteld constant te zijn. Met behulp van de vergelijkingen (1) en (3) wordt per interval de horizontale uitwisseling berekend. De resultaten worden gesommeerd over de volledige periode waarover de

Uitwisseling plaatsvindt. De resultaten van de berekeningen zijn weergegeven in Tabel 8. Het verloop van de horizontale uitwisseling over een getijcyclus is weergegeven in Figuur 37.

Opmerking

Voor havenvariant T1 blijkt de constante b negatief te zijn. Dat wil zeggen dat de horizontale uitwisseling toeneemt met een toename van het komvullingsdebiet. Dit is te verklaren uit het optredende stroombeeld (zie paragraaf 6.3.2 en Figuur 17). Er is echter geen enkele reden om te veronderstellen dat deze toename lineair is. De vergelijkingen uit paragraaf 7.1 zijn hier dus niet geldig en het verloop van de uitwisseling in een getijcyclus is onbekend. Hierdoor is het niet mogelijk de uitwisseling over een hele getijperiode te berekenen. Uit de uitwisselingsmetingen voor de getijfasen A, C en D blijkt wel dat de uitwisseling voor variant T1 veel groter (en dus ongunstiger) is dan voor de overige onderzochte varianten (zie Tabel 8).

7.3 Sedimentatie van de nieuwe haven

De oorzaak van de sedimentatie van de haven van Hansweert wordt gevormd door de volgende drie componenten:

- komvulling;
- horizontale uitwisseling;
- verticale uitwisseling door dichtheidsverschillen.

Om de sedimentatie goed te kunnen berekenen moeten alle drie de componenten bekend zijn. Van de komvulling en de horizontale uitwisseling zijn redelijk betrouwbare schattingen te maken. Van de dichtheidsstromingen en de wederzijdse beïnvloeding van de drie componenten is echter vrijwel niets bekend.

Een ander belangrijk gegeven voor de bepaling van de sedimentatie is het deel van het aangevoerde sediment dat blijvend tot bezinken komt. Uit de sedimentatiegegevens van de bestaande haven te Hansweert blijkt dat van de totale sedimentatie van $100.000 \text{ m}^3/\text{jr}$ ongeveer 75% optreedt in de vluchthaven en maar 25% in de buitenhaven (paragraaf 2.5). De aanslibbing per eenheid van oppervlakte bedraagt in de vluchthaven ca. $0,80 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{jr}$ (Figuur 4). Dit opvallende verschil wordt vermoedelijk veroorzaakt door verschillen in de verkeersintensiteit voor de beide havens. Indien er van wordt uitgegaan dat in de vluchthaven door de zeer geringe scheepvaartintensiteit ongeveer 95% van het in suspensie

aangevoerde slib bezinkt en in de buitenhaven ongeveer 20% wordt de sedimentatiequote voor de hele haven 50%. Dit wil zeggen dat van het slib dat door de havenmond wordt aangevoerd ongeveer 50% zal bezinken. De overige 50% verlaat de haven weer.

Het is niet eenvoudig om de sedimentatiequote voor de nieuwe haven te bepalen. Enerzijds zal de scheepvaartintensiteit in de nieuwe haven groot zijn en zal de sedimentatiequote in de richting gaan van die in de bestaande buitenhaven, anderzijds is de nieuwe haven aanmerkelijk wijder en dieper dan de bestaande haven waardoor de sedimentatiequote wordt verhoogd.

Een en ander afwegend wordt verwacht dat de sedimentatiequote van de nieuwe haven vergelijkbaar is met die van de bestaande haven, dus ongeveer 50%.

Indien ook de relatieve bijdrage van de dichtheidsstromingen aan de sedimentatie van de nieuwe en de bestaande haven gelijk wordt verondersteld kan uit de verhouding van de som van de komberging en de horizontale uitwisseling in de nieuwe en de bestaande haven de sedimentatie van de nieuwe haven worden berekend.

In Tabel 8 zijn voor de verschillende havenvarianten de komberging en de horizontale uitwisseling voor een gemiddeld getij weergegeven. De bijdrage van de komberging aan de sedimentatie blijkt voor de nieuwe haven toe te nemen ten opzichte van de bestaande toestand (T0). De horizontale uitwisseling blijkt van een ondergeschikte betekenis te zijn. In Tabel 8 zijn ook de resultaten van de sedimentatieberekening voor de verschillende havenvarianten weergegeven.

In de metingen en de berekeningen van de horizontale uitwisseling zitten een aantal onzekerheden. Ook de sedimentatiequote en de invloed van de dichtheidsstromingen op de sedimentatie van de haven zijn slechts globaal afgeschat. Hierdoor kan de sedimentatie van de nieuwe haven slechts binnen ruime marges worden bepaald. De verwachte sedimentatie voor de havenvarianten T4, T6 en T7 bedraagt 200.000 à 300.000 m³/jr. Door de ruime marge is het onderscheid tussen T4, T6 en T7 (Tabel 8) niet langer gerechtvaardigd, hoewel er significante verschillen optreden in de horizontale uitwisseling. Er is verondersteld dat de dichtheid van het gebaggerde havenslib in de bestaande en de toekomstige situatie gelijk blijft.

Om te controleren of de invloed van de dichtheidsstroming op de sedimentatie van de haven niet zodanig is dat uit een vergelijking van komberging en horizontale uitwisseling voor verschillende havenvarianten alléén geen goede schatting van de sedimentatie gemaakt kan worden is een tweede sedimentatie berekening gemaakt. Hierbij zijn schattingen gemaakt voor onbekende grootheden die de sedimentatie beïnvloeden.

De berekeningen en de resultaten zijn weergegeven in Bijlage 2. Het blijkt dat de dichtheidsstromingen op de sedimentatie van de bestaande haven een significante invloed kunnen uitoefenen. De mate waarin dichtheidsstromingen het sedimentatieproces beïnvloeden is echter sterk afhankelijk van de aannamen die voor de berekening zijn gedaan. Er wordt op gewezen dat de berekeningen een zeer globaal karakter hebben en dat de resultaten met de nodige voorzichtigheid dienen te worden geïnterpreteerd.

8. Aanbeveling

In dit hoofdstuk wordt een aanbeveling gedaan van één van de onderzochte havenvarianten op grond van twee beoordelingscriteria namelijk:

- de kwaliteit van het stroombeeld (8.1),
- de sedimentatie van de nieuwe haven (8.2).

De nautische kwaliteiten van de haven blijven uitdrukkelijk buiten beschouwing. De resultaten van het wiskundig modelonderzoek dat hierop gericht is worden gepresenteerd in een apart verslag.

8.1 Stroombeeld

De stroombeelden, die in hoofdstuk 6 zijn gepresenteerd, tonen aan dat het stroombeeld op de Westerschelde slechts in de directe omgeving van de haven van Hansweert zal veranderen onder invloed van de vervanging van deze haven door één van de varianten. Dit wordt verklaard uit de omstandigheid, dat de veranderingen in de havenconfiguratie zich afspelen buiten de diepe stroomgeulen, die het stroombeeld bepalen.

Verder blijkt dat de vorm en de stabiliteit van het stroombeeld in de havenmond in belangrijke mate bepaald worden door de mate van geleiding van de hoofdstroom op de Westerschelde. Het blijkt dat alleen voor havenvariant T4 (Figuur 22 t/m 27) voor alle 4 de onderzochte getijfasen een acceptabel vloeiend stroombeeld optreedt. Hierbij moet worden opgemerkt dat de vorm van de haven niet alleen bepaald is door het stroombeeld maar ook door de eisen die de scheepvaart aan de haven stelt.

8.2 Sedimentatie

De resultaten van de horizontale uitwisselingsmetingen (Tabel 8) laten zien dat voor havenvariant T4 de uitwisseling slechts ongeveer 70% bedraagt van die voor de varianten T6 en T7. Voor variant T4 is de berekende sedimentatie dan ook het kleinst. Overigens blijkt dat de horizontale uitwisseling slechts een relatief onbelangrijke bijdrage levert tot de totale sedimentatie van de haven; de komberging is verantwoordelijk voor het grootste deel. Daardoor vertonen de sedimentatiecijfers voor de varianten T4, T6 en T7 onderling slechts relatief kleine verschillen.

LITERATUUR

- 1 Waterloopkundig Laboratorium.
Onderzoek voorhavens Hansweert en Wemeldinge.
Voorstudie modelonderzoek Hansweert, M 1642, juni 1979.
- 2 Rijkswaterstaat, Studiedienst Vlissingen.
Vergelijking drijfvermetingen van 1973 en 1979 nabij de haven van Hansweert.
Maart 1980.
- 3 Waterloopkundig Laboratorium.
Haven van Borssele.
Verslag modelonderzoek, M 1070, maart 1973.
- 4 Waterloopkundig Laboratorium.
Haven van Ossensisse.
Stroombeeldonderzoek M 986 deel II, maart 1974.

getijfase [uren t.o.v. L.W.]	$c/\bar{c}$
-5	1,155
-4	1,213
-3	1,085
-2	0,863
-1	1,176
0	1,202
1	0,863
2	0,844
3	0,634
4	0,675
5	1,016
6	1,200
6.42	1,178

c = gemiddelde slibconcentratie in de vertikaal (gr/m^3)

$\bar{c}$ = slibgehalte, gemiddeld over een getijperiode (gr/m^3)

Tabel 1 Variatie van het slibgehalte over een getijperiode

omschrijving	fase	tijdstip t.o.v. H.W. (uur)	waterstand t.o.v. NAP (m)	debiet tussen Hansweert en de Platen van Ossensisse (m ³ /s)	$\frac{dh}{dt}$ ($\cdot 10^{-4}$ m/s)	kombergingsdebiet bestaande haven (m ³ /s)
hoogwater	A	H.W	+ 2,64	19.700	0	0
maximale ebstroom	B	H.W + 3 uur	+ 0,20	28.600	- 3,38	78(uit)
laagwater	C	H.W	- 2,51	12.200	0	0
maximale vloedstroom	D	H.W - 1 uur	+ 2,12	42.100	+ 3,52	81(in)

Tabel 2 Instel- en ijkgegevens voor het model (T0)

proef	T0: horizontale uitwisseling model ($\cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$)		
	fase A (H.W)	fase C (L.W)	fase D (maximum vloed)
1	0,125	0,117	0,124
2	0,108	0,183	0,192
3	0,135	0,132	0,171
4	0,160	0,133	0,162
5	0,090	0,129	0,230
6	0,071	0,116	0,093
7	-	0,155	0,115
gemiddelde	0,115	0,138	0,155
stand.afw.	0,032	0,024	0,048

Tabel 3 Horizontale uitwisseling T0

proef	T1: horizontale uitwisseling model ($\cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$)		
	fase A (H.W.)	fase C (L.W.)	fase D (maximum vloed)
1	0,373	0,157	1,169
2	0,329	0,119	0,809
3	0,277	0,140	0,894
4	0,314	0,156	1,031
5	0,352	0,140	-
6	-	0,113	-
gemiddelde	0,329	0,138	0,976
stand.afw.	0,037	0,018	0,158

Tabel 4 Horizontale uitwisseling T1

proef	T4: horizontale uitwisseling model ($\cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$)		
	fase A (H.W)	fase C (L.W)	fase D (maximum vloed)
1	0,148	0,088	0,182
2	0,219	0,062	0,106
3	0,268	0,039	0,173
4	0,230	0,070	0,181
5	0,317	0,041	0,138
6	0,236	0,039	-
gemiddelde	0,236	0,056	0,156
stand.afw.	0,056	0,020	0,033

Tabel 5 Horizontale uitwisseling T4

proef	T6: horizontale uitwisseling model ($\cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$)		
	fase A (H.W)	fase C (L.W)	fase D (maximum vloed)
1	0,338	0,095	0,229
2	0,227	0,144	0,170
3	0,180	0,312	0,209
4	0,279	0,336	0,240
5	0,316	0,313	0,214
6	0,334	0,330	0,213
7	-	-	0,310
8	-	-	0,254
gemiddelde	0,279	0,255	0,230
stand.afw.	0,064	0,106	0,041

Tabel 6 Horizontale uitwisseling T6

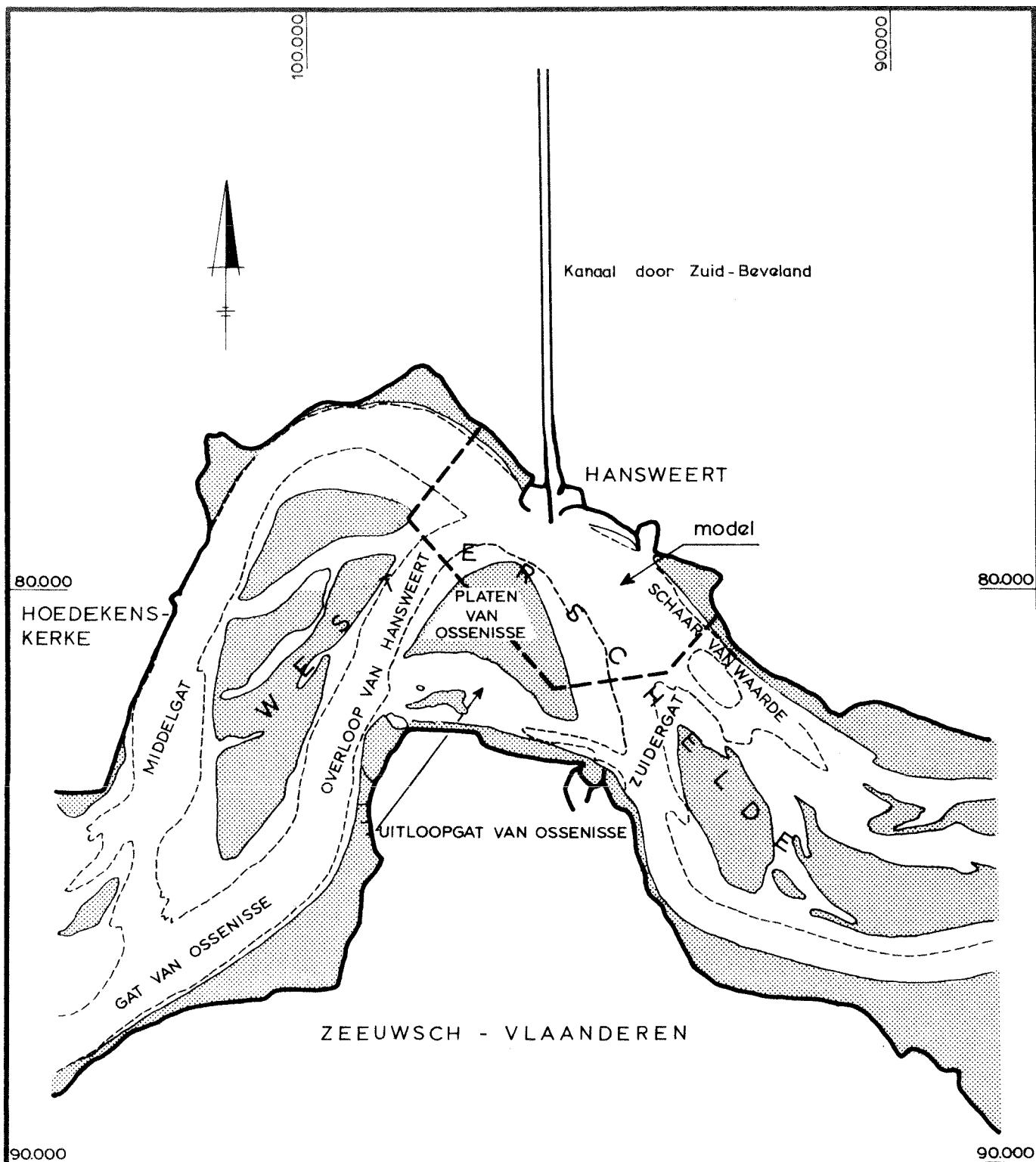
proef	T7: horizontale uitwisseling model ($\cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$)		
	fase A (H.W)	fase C (L.W)	fase D (maximum vloed)
1	0,538	0,203	0,298
2	0,413	0,221	0,569
3	0,423	0,277	0,245
4	0,552	0,258	0,092
5	0,522	0,211	0,153
6	-	-	0,172
7	-	-	0,180
gemiddelde	0,490	0,234	0,244
stand. afw.	0,066	0,032	0,158

Tabel 7 Horizontale uitwisseling T7

	T0	T1	T4	T6	T7
uitwisseling H.W. (m ³ /s)	11,5	33,0	23,5	28,0	49,0
uitwisseling L.W. (m ³ /s)	14,0	14,0	5,5	25,5	23,5
uitwisseling maximum vloed (m ³ /s)	15,5	97,5	15,5	23,0	24,5
a	15,8	-	32,9	38,4	67,1
b.A. *)	14.552	-	71.755	72.828	166.881
c	26,4	-	11,3	48,1	43,4
berekende uitwisseling (m ³ /getij)	199.000	-	192.000	309.000	321.000
uitwisseling voor gem. getij (m ³ /getij)	170.000	-	164.000	264.000	274.000
komberging voor gem. getij (m ³ /getij)	1.012.000	-	2.464.000	2.464.000	2.464.000
sedimentatie (m ³ /jrr)	100.000	-	220.000	230.000	230.000

*) A is 23.10^4 m^2 voor de bestaande haven (T0) en 56.10^4 m^2 voor de nieuwe haven (T1 t/m T7).

Tabel 8 Sedimentatie van de haven van Hansweert



rechthoekige coördinaten in m. t.o.v. Amersfoort

- lijn van N.A.P. -25 dm
 - - - lijn van N.A.P. -100 dm

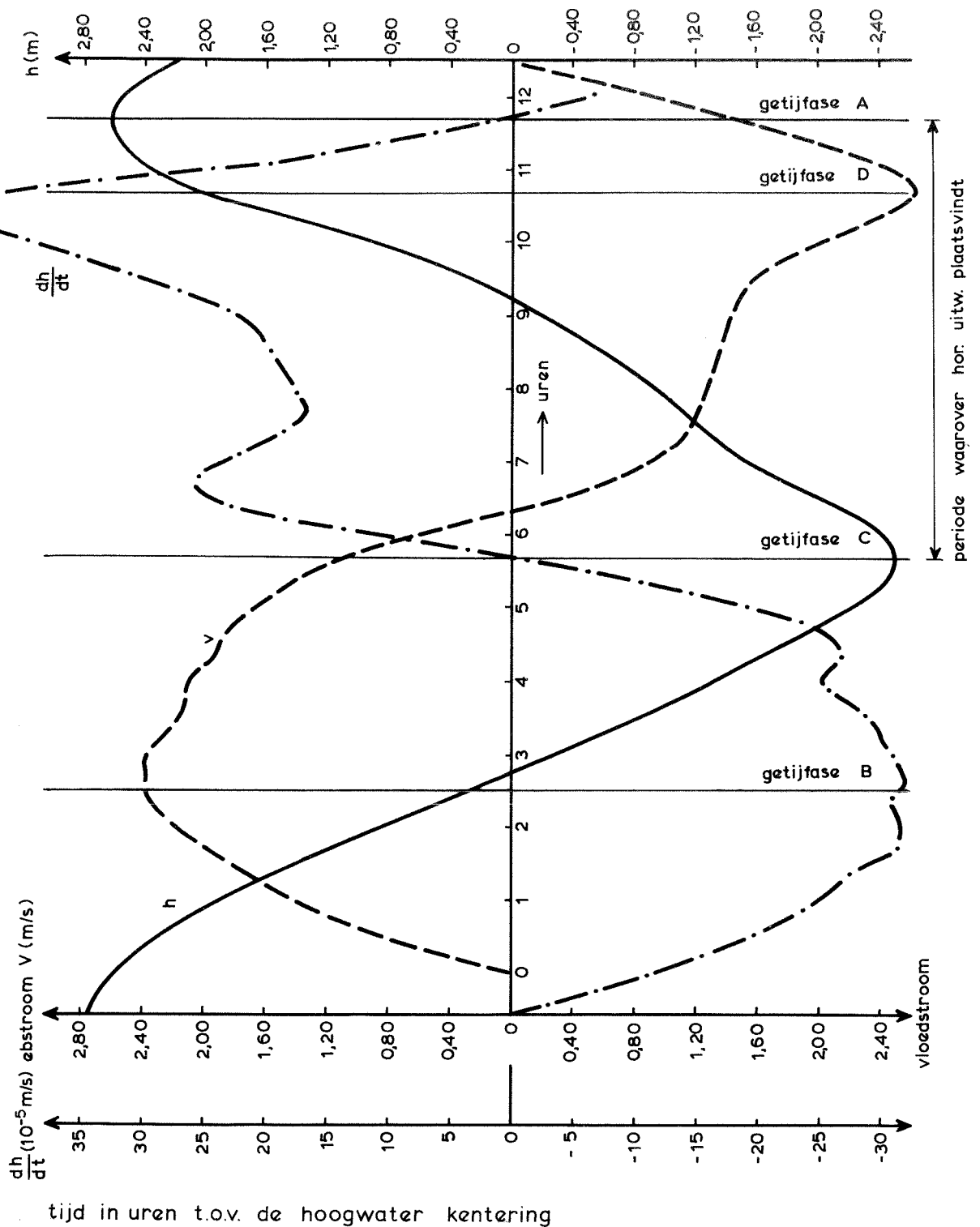
SITUATIE HANSWEERT

SCHAAL 1:100.000

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1642

FIG. 1

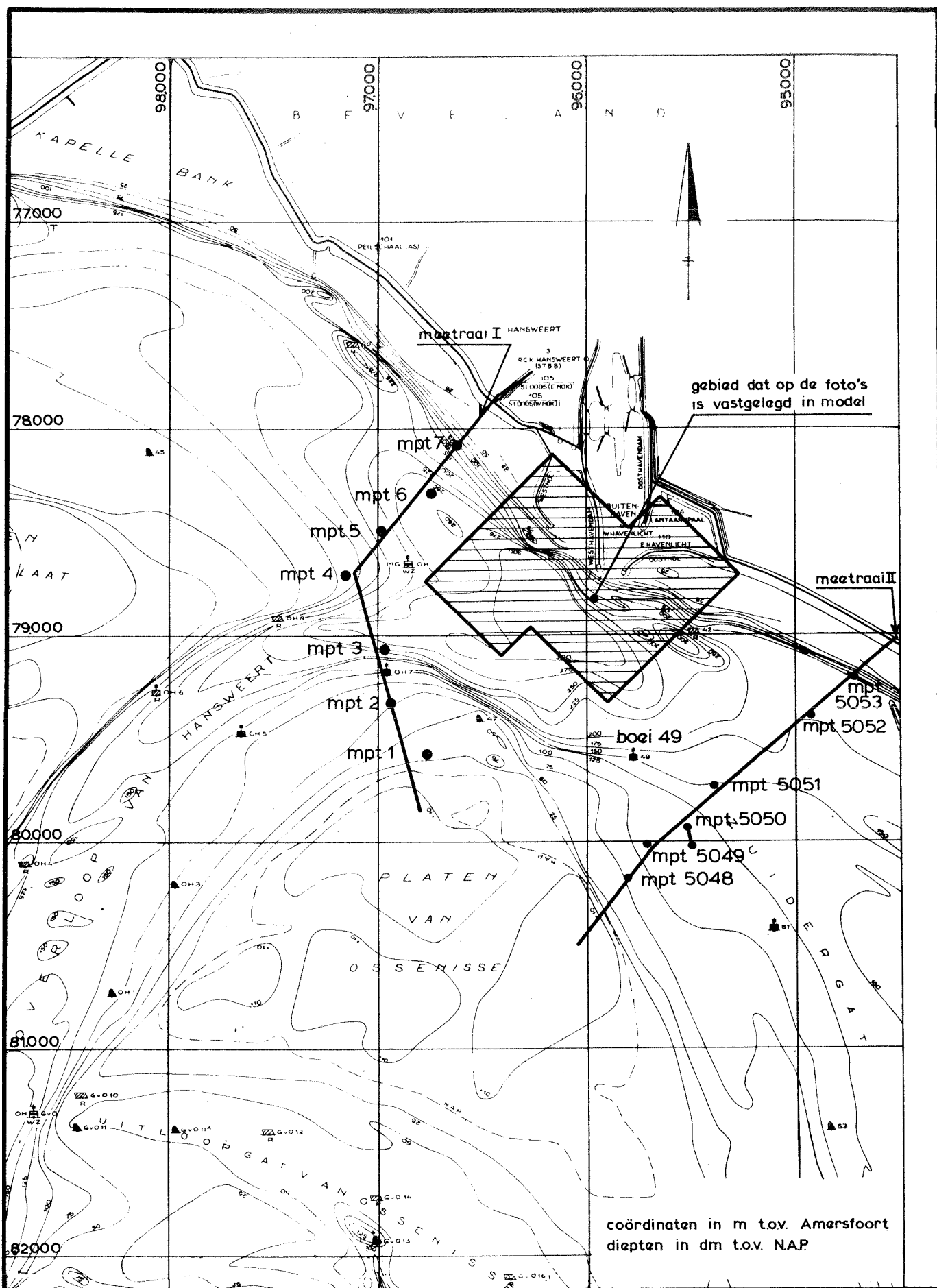


GETIJKROMME HANSWEERT, 12 JUNI 1979

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1642

FIG. 2



coördinaten in m tov. Amersfoort
diepten in dm tov. NAP

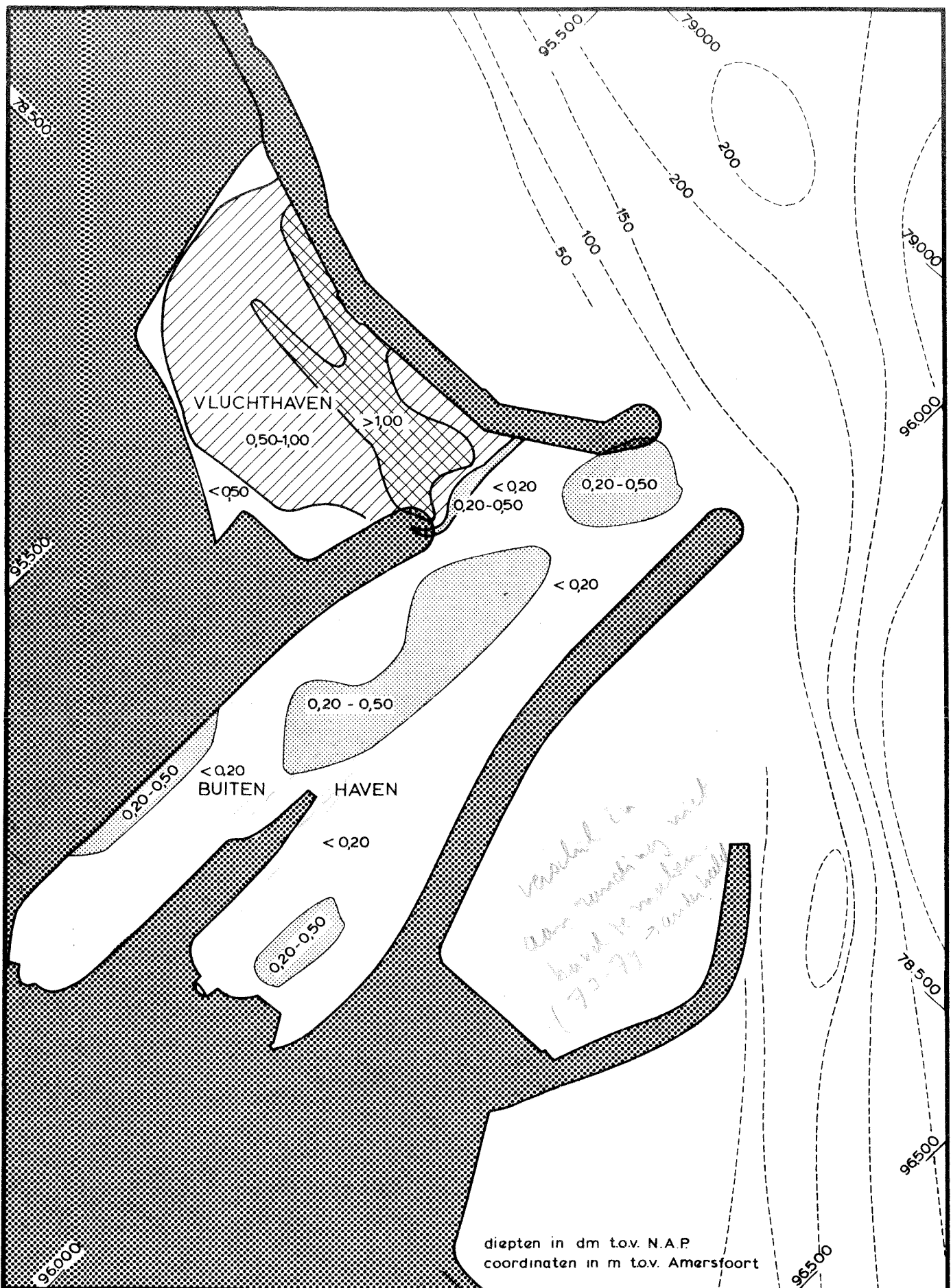
POSITIES VAN DE MEETPUNTEN

SCHAAL 1:25000

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1642

FIG. 3



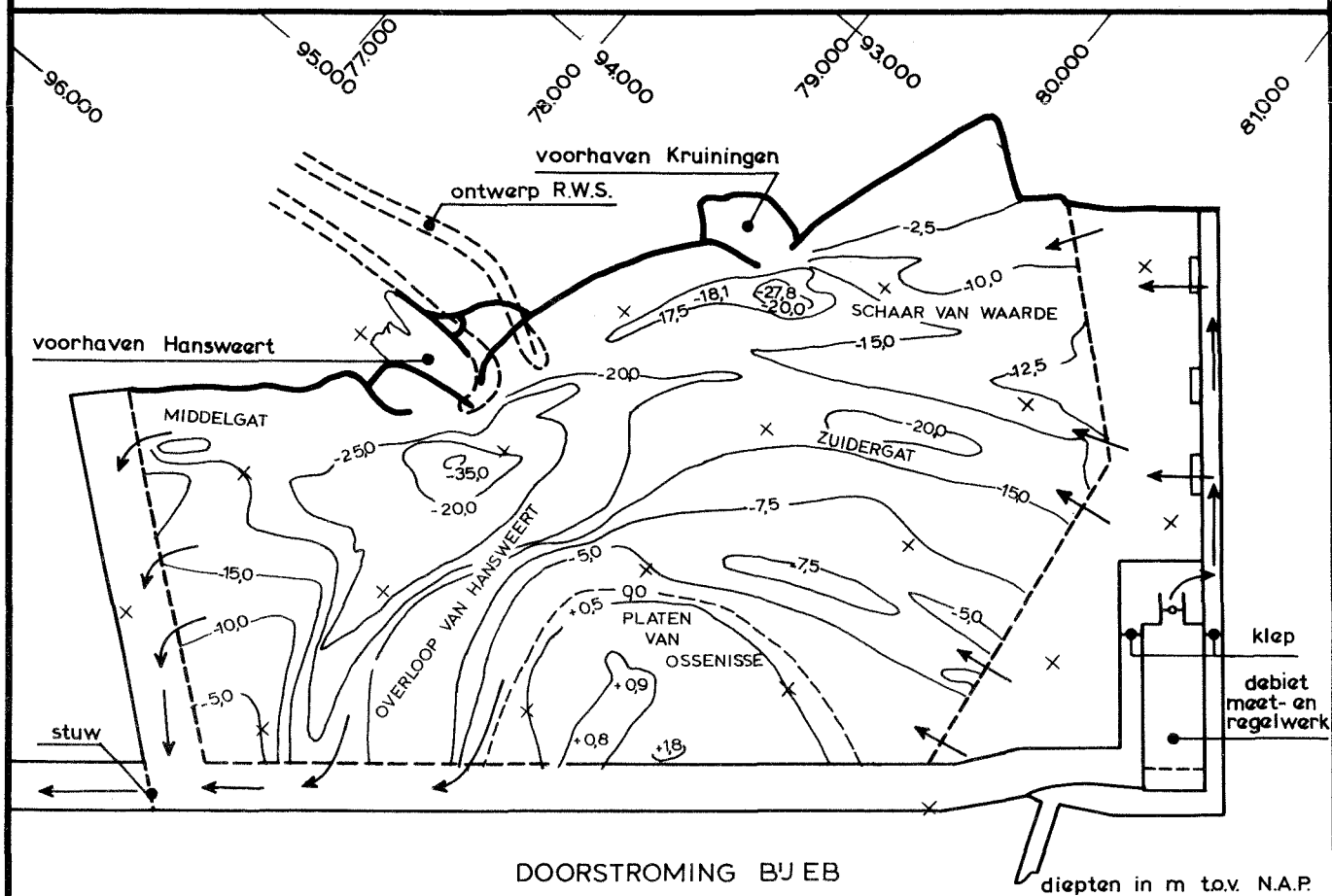
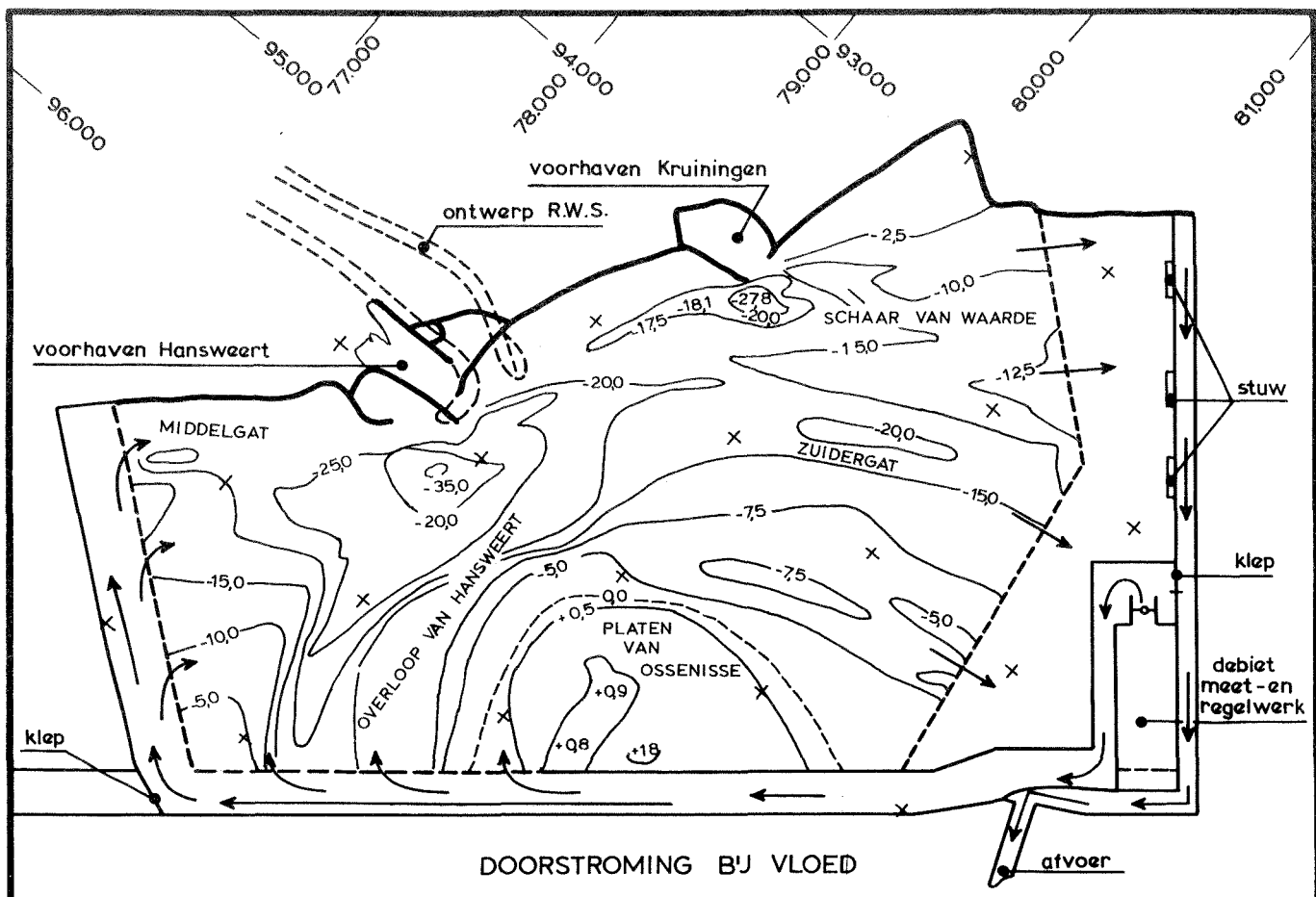
SEDIMENTATIE IN DE VOORHAVEN HANSWEERT(m/jr)

SCHAAL 1:5000

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1642

FIG. 4



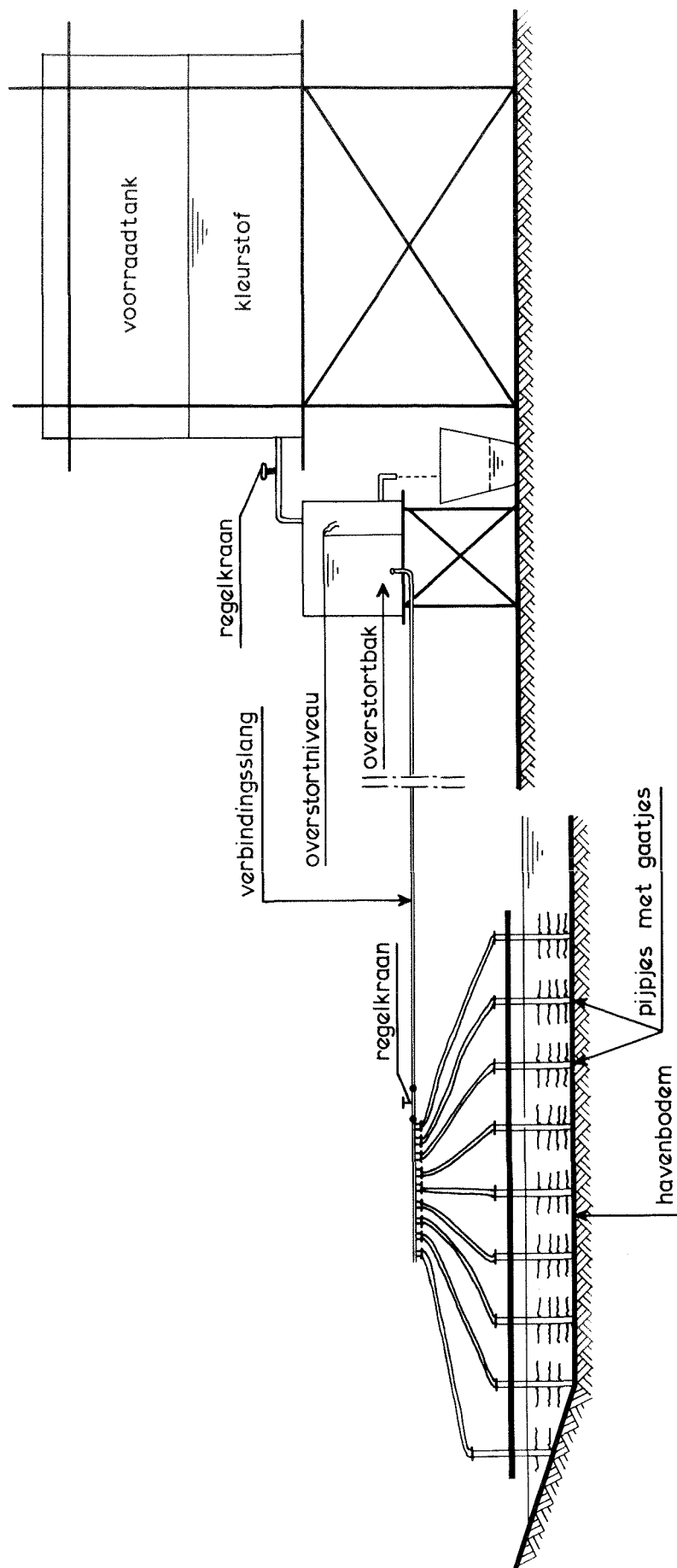
OVERZICHT VAN HET MODEL, VOOR EB EN VLOED

SCHAAL 1:400 tov. model
1:40000 tov. prototype

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1642

FIG. 5



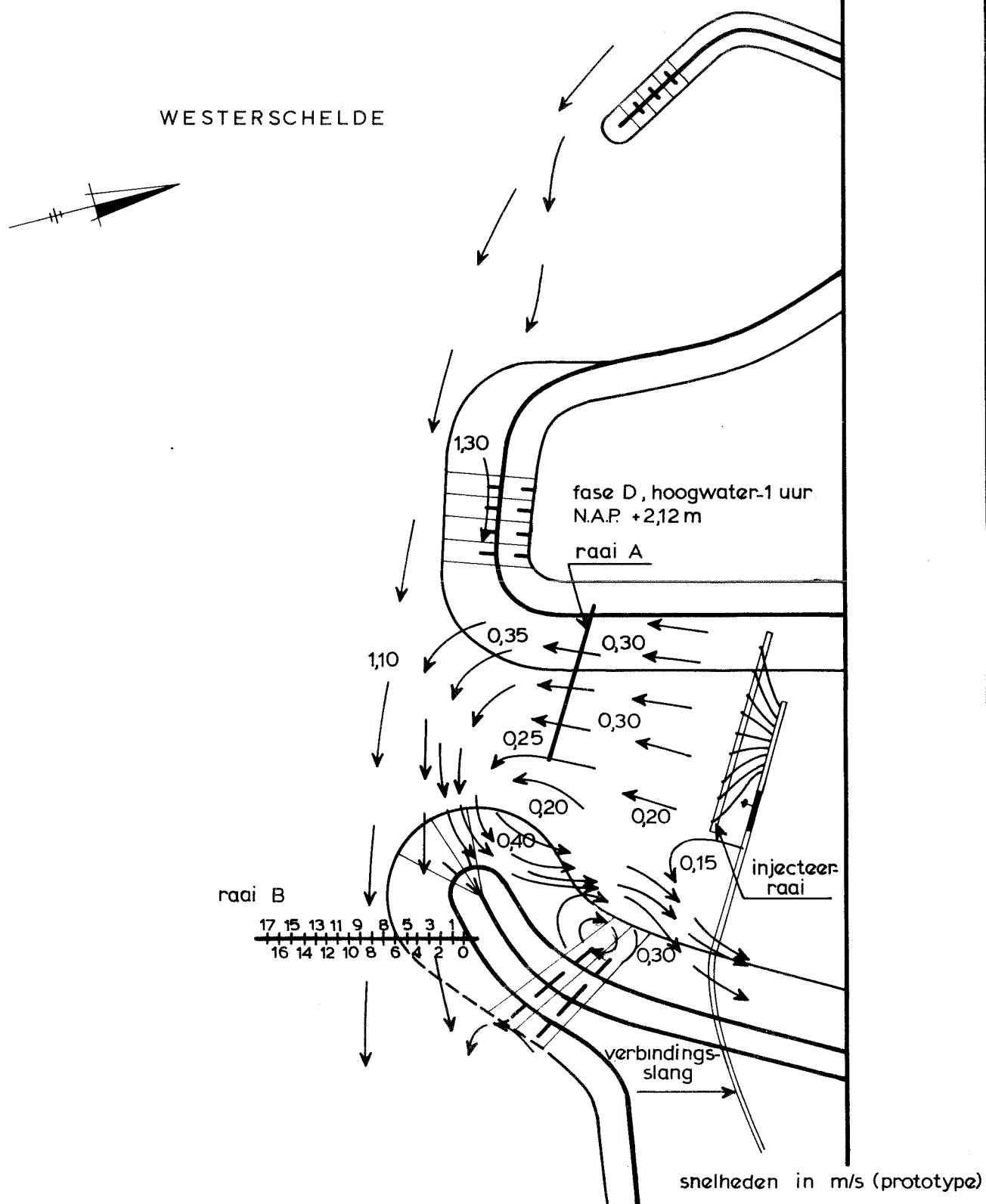
PRINCIPE VAN DE KLEURSTOFINJECTIE VOOR DE
HORIZONTALE UITWISSELINGSMETINGEN

NIET OP SCHAAAL

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1642

FIG. 6



PRINCIPE VAN DE METING VAN
DE HORIZONTALE UITWISSELING

T 4

FASE D

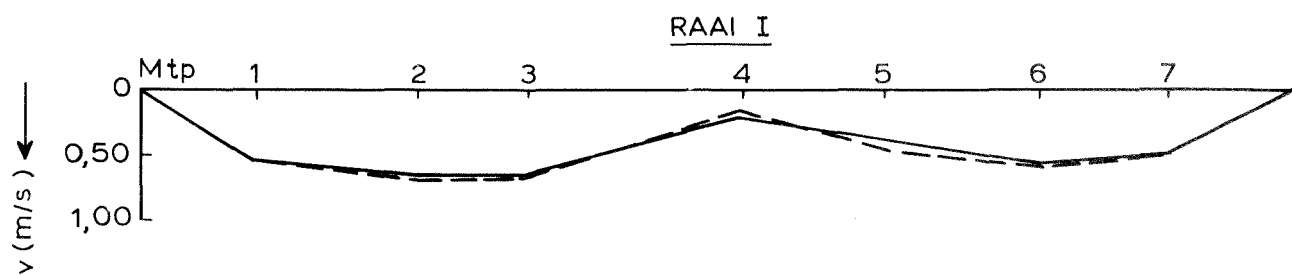
SCHAAL 1:5000

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

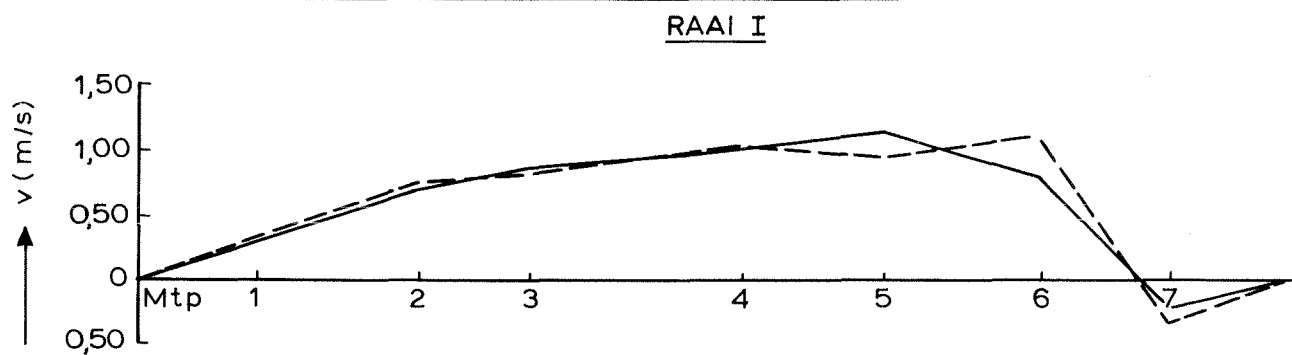
M 1642

FIG. 7

HOOGWATER FASE A N.A.P. + 2,64 m



MAXIMALE EBSTROOM FASE B N.A.P. + 0,20 m



--- prototype
— model

snelheden gemiddeld over de vertikaal

schaal : 0 125 250 375 500 m

ABSOLUTE SNELHEDEN IN DE 'KINGSRAAIEN I
EN II VOOR DE GETJFASEN A EN B

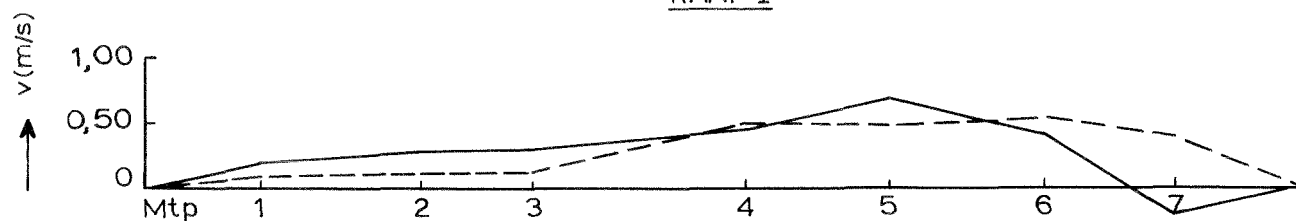
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1642

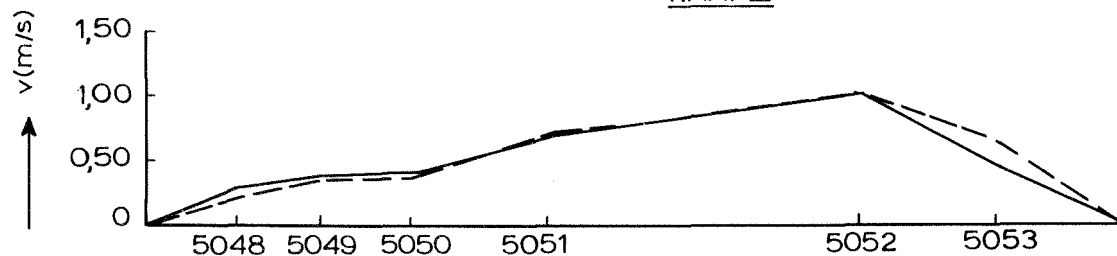
FIG. 8

LAAGWATER FASE C N.A.P. - 2,51 m

RAAI I

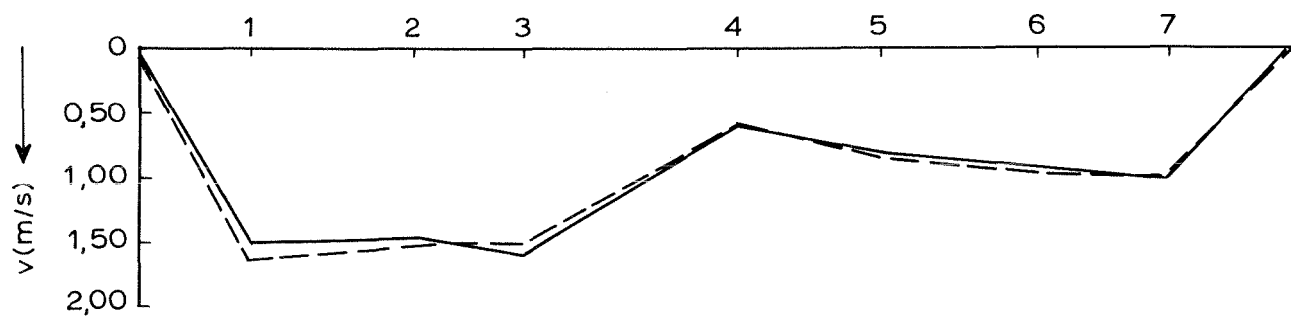


RAAI II

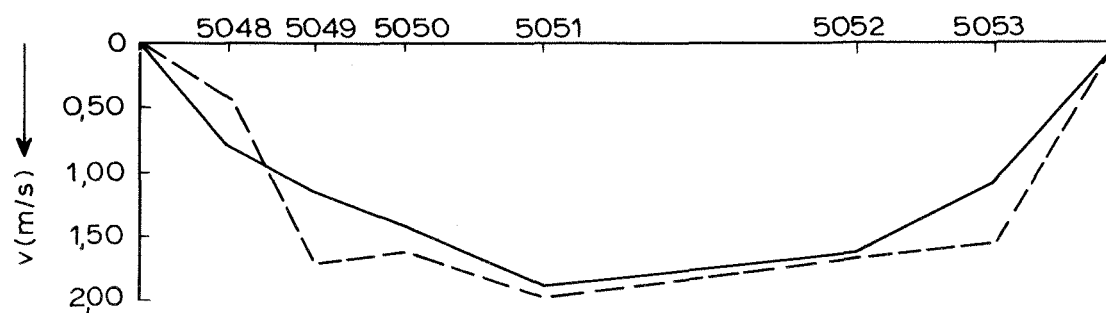


MAXIMALE VLOEDSTROOM FASE D N.A.P. + 2,12 m

RAAI I



RAAI II



----- prototype
 _____ model

snelheden gemiddeld over de vertikaal

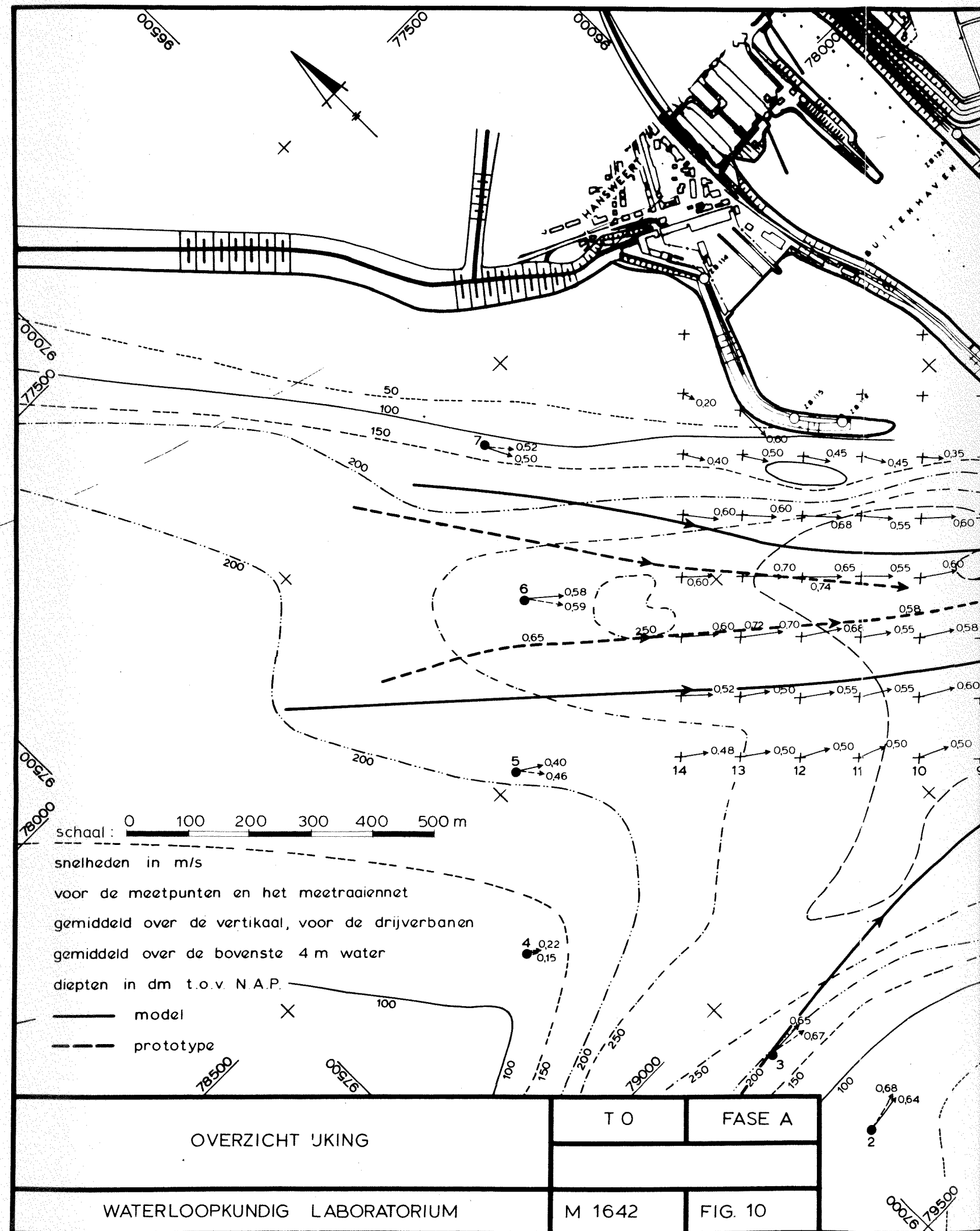
schaal : 0 125 250 375 500 m

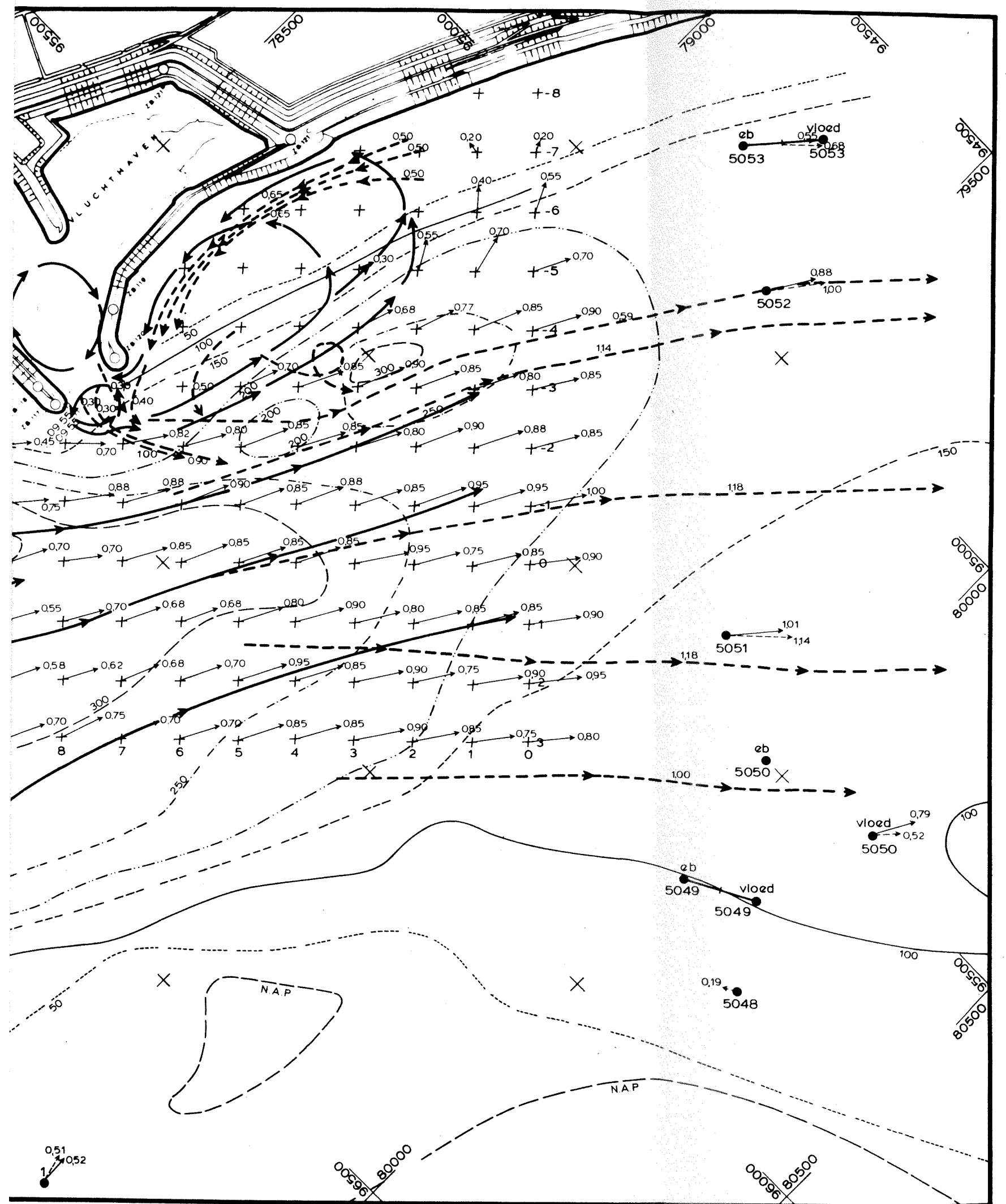
ABSOLUTE SNELHEDEN IN DE 'KINGSRAAIEN I
 EN II VOOR DE GETIJFASSEN C EN D

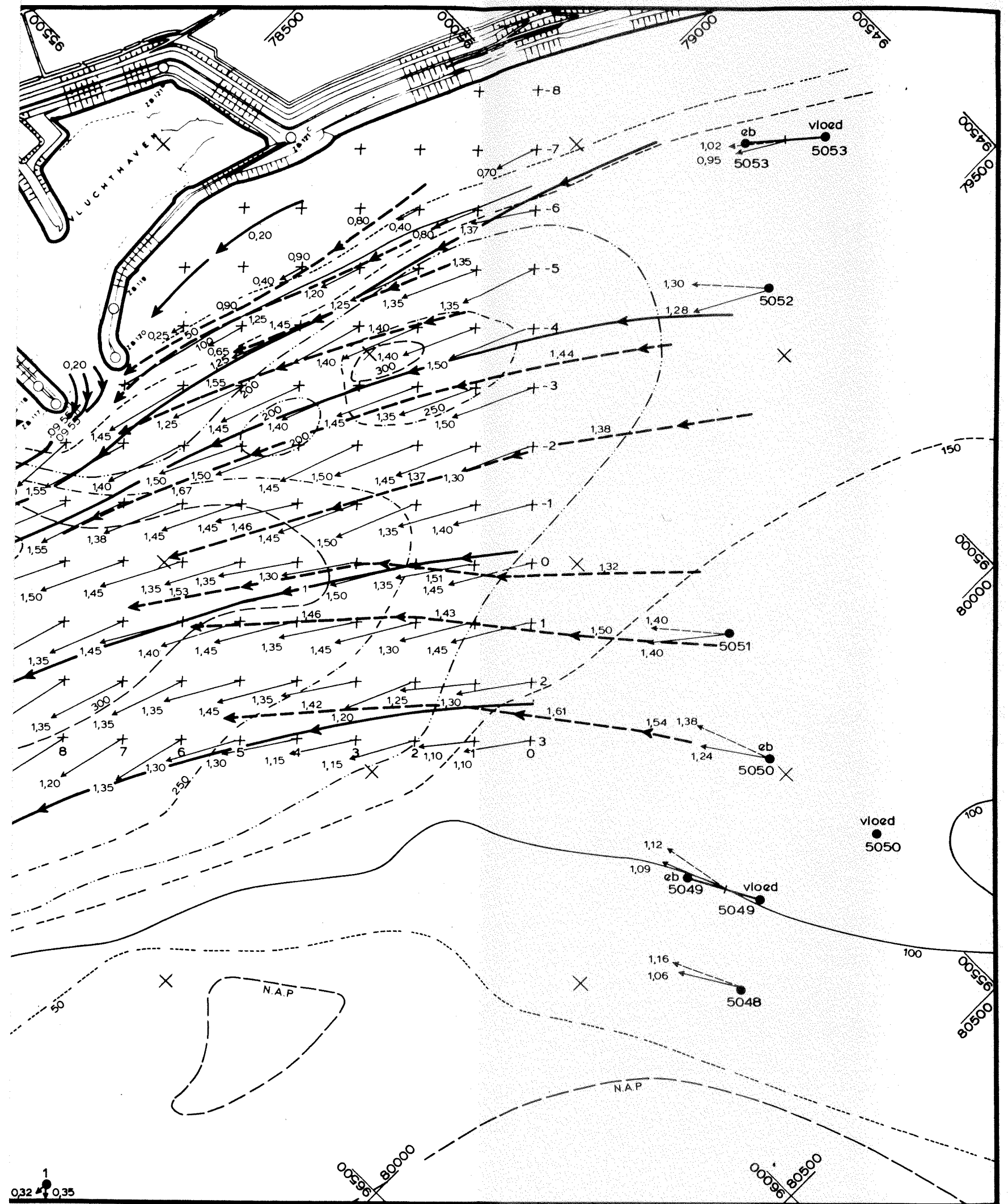
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

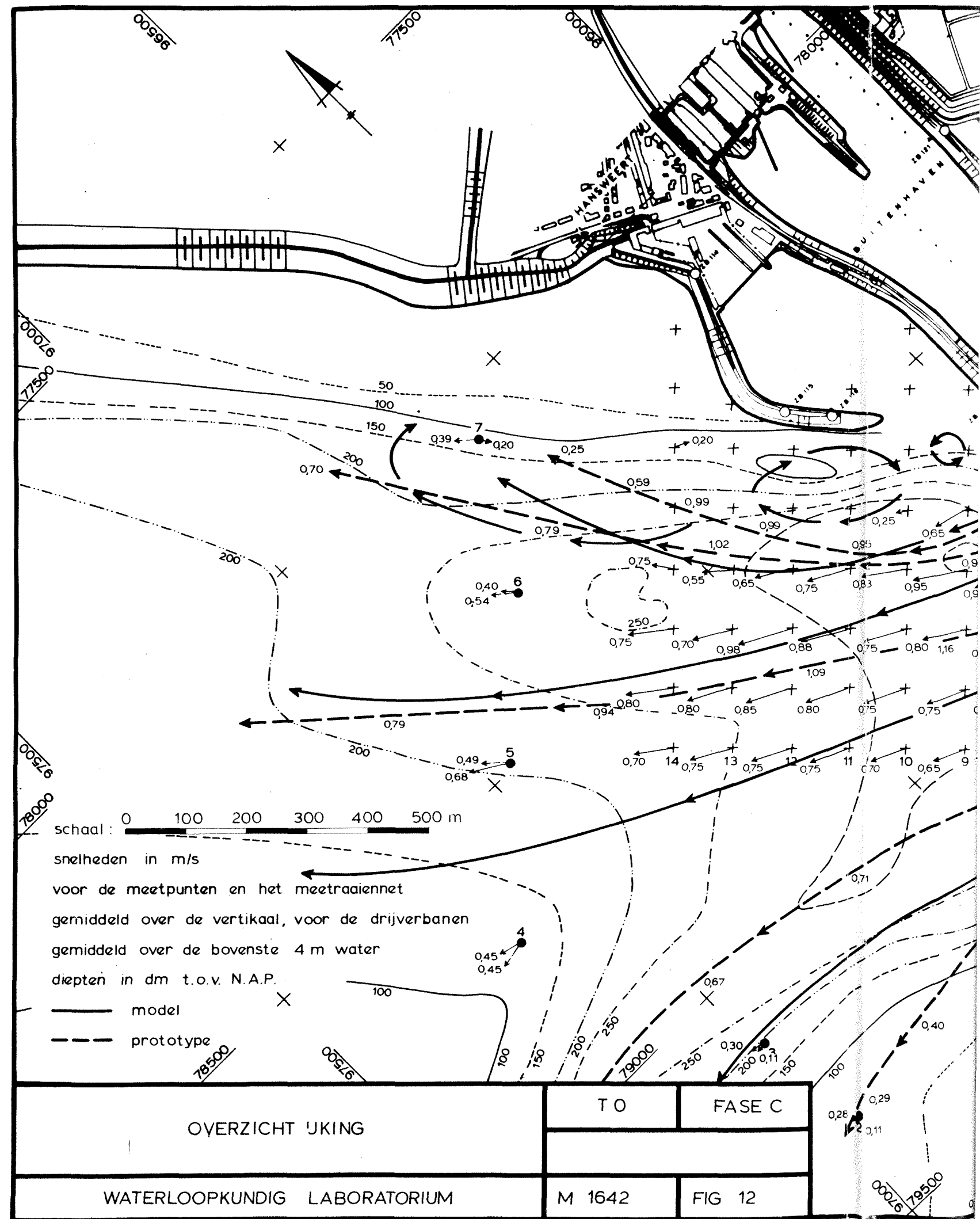
M 1642

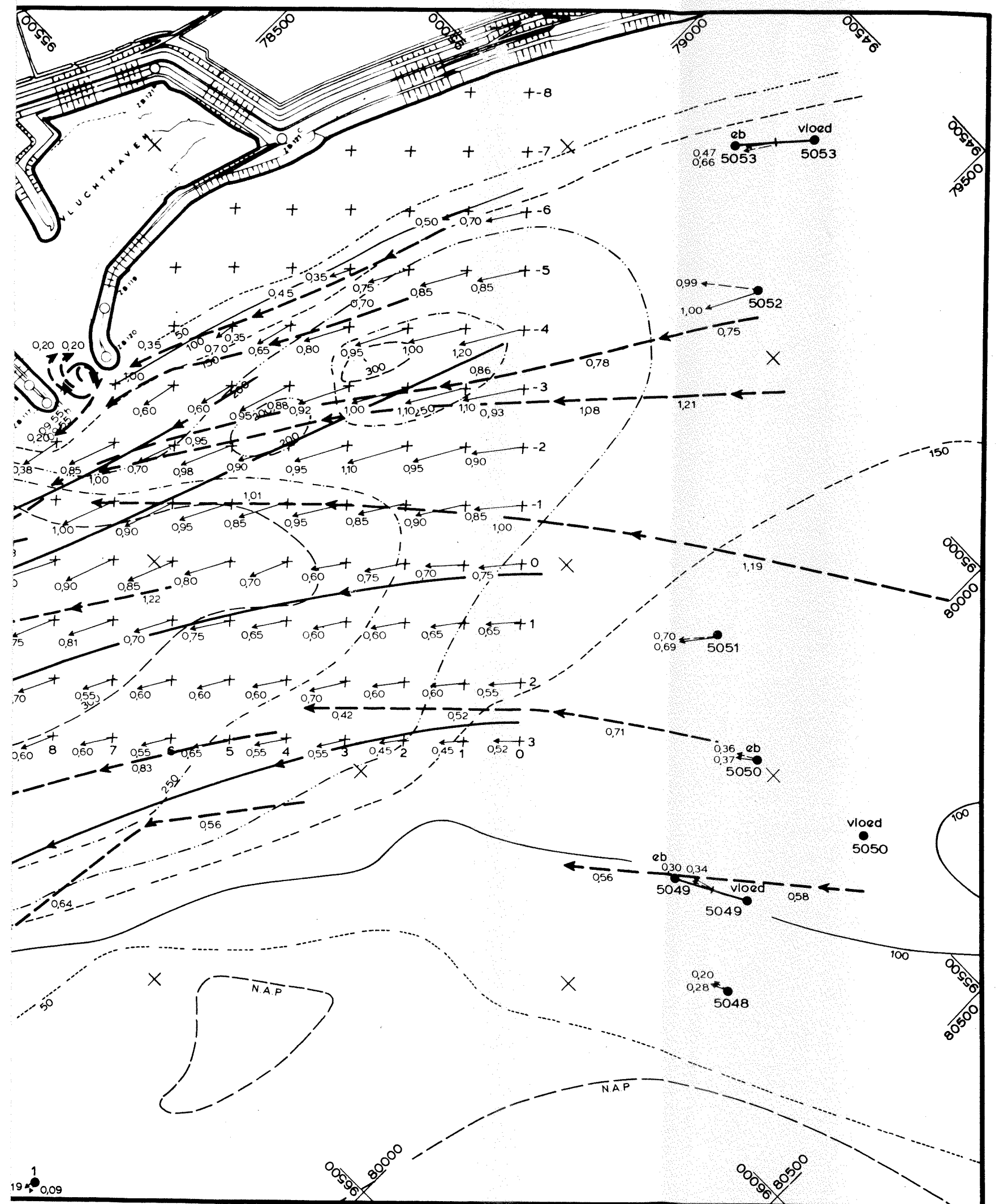
FIG. 9

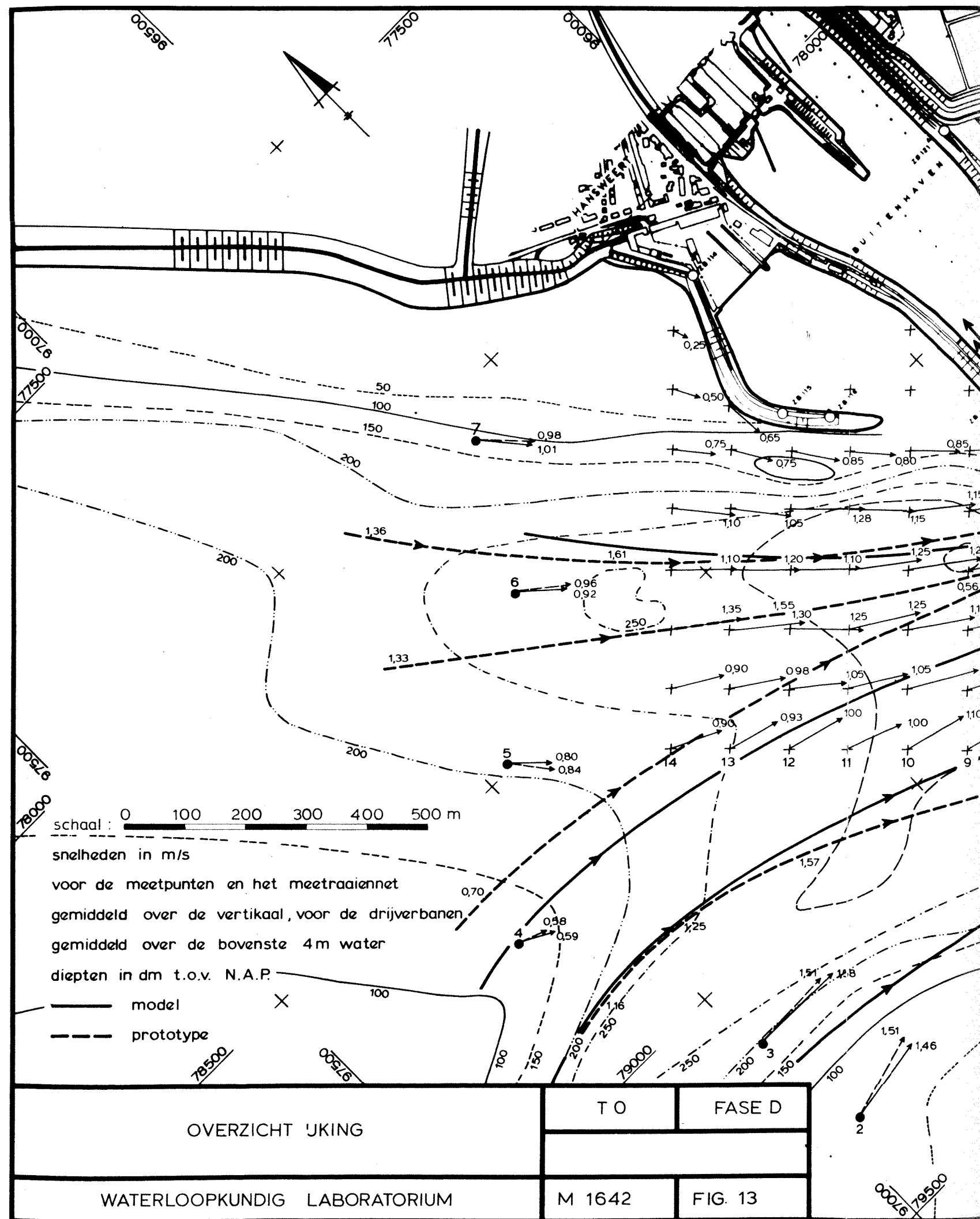


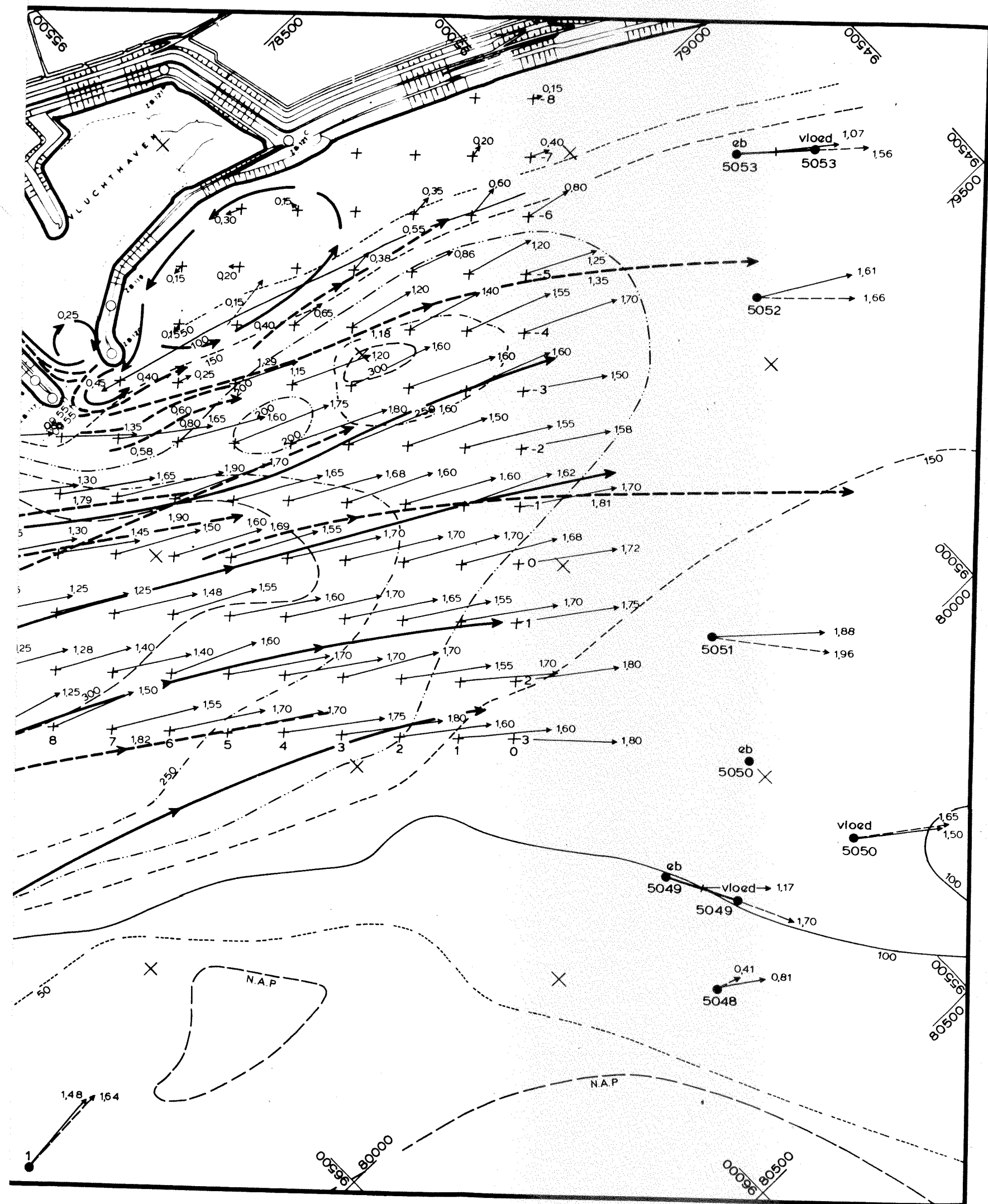


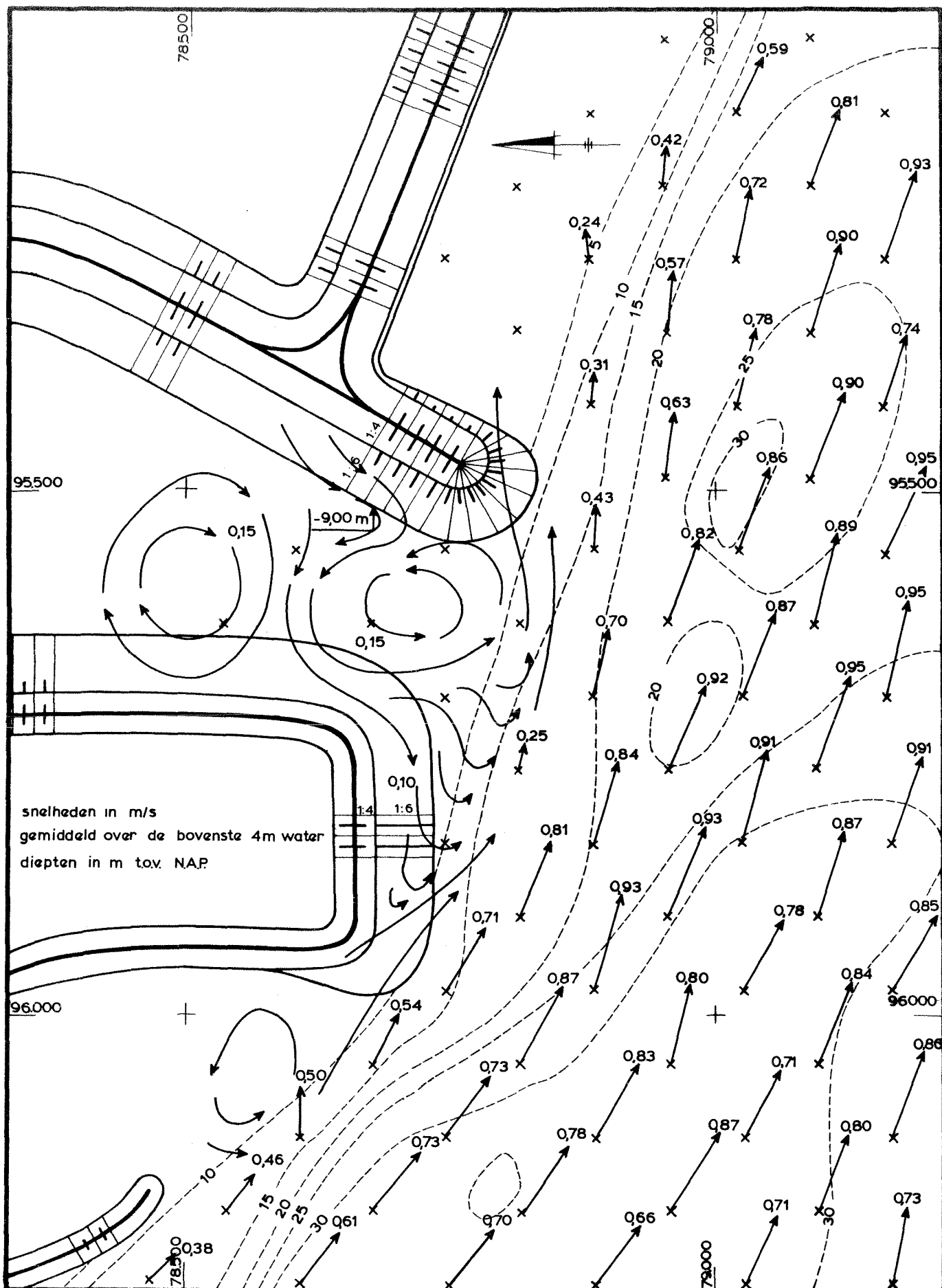












STROOMBEELD TIJDENS HOOGWATER

T 1

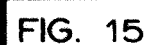
FASE A

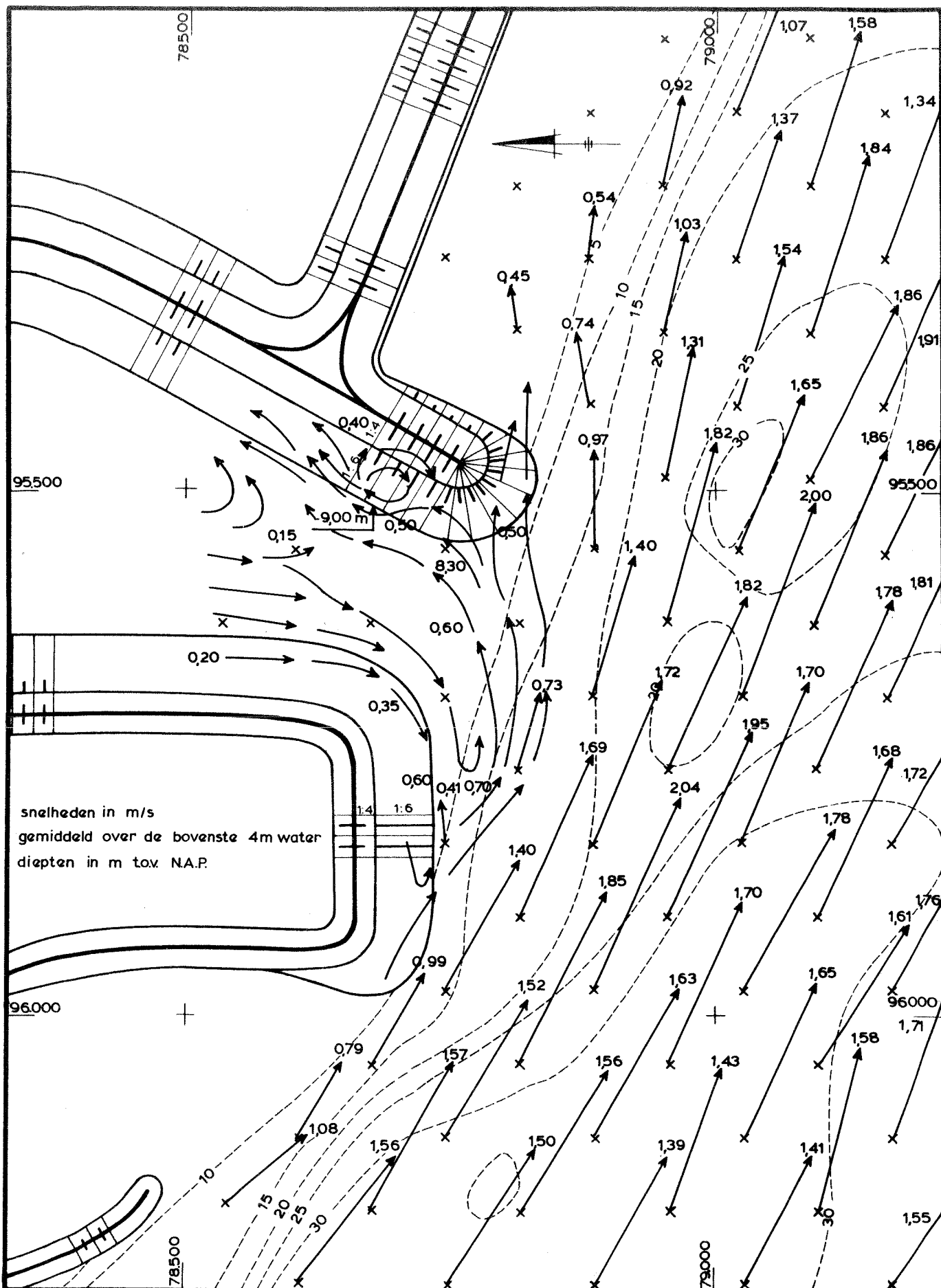
SCHAAL 1:5000

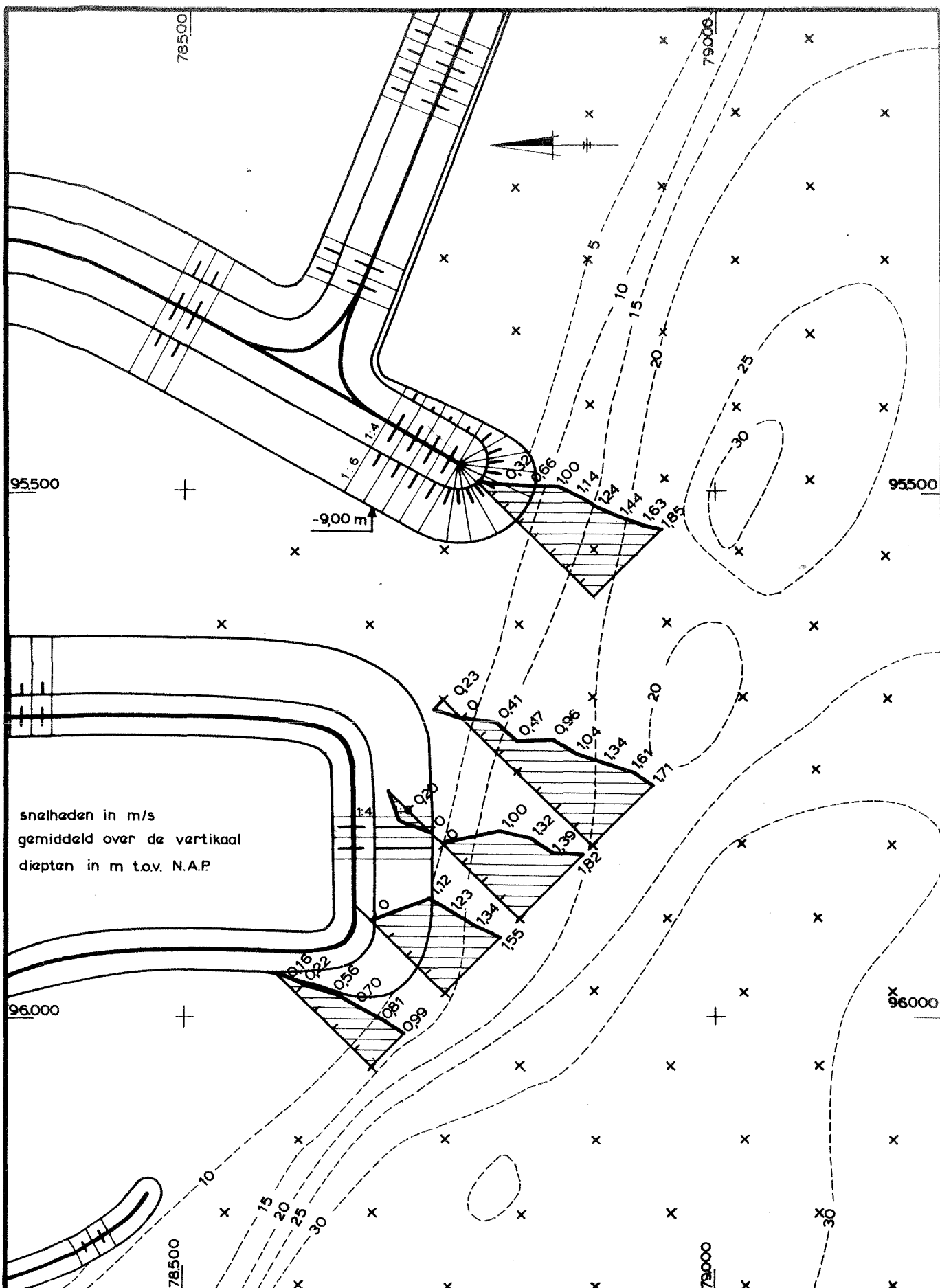
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1642

FIG.14







SNELHEDEN LANGS DE KOPPEN VAN DE HAVEN-
DAMMEN TIJDENS MAXIMALE VLOEDSTROOM

T1

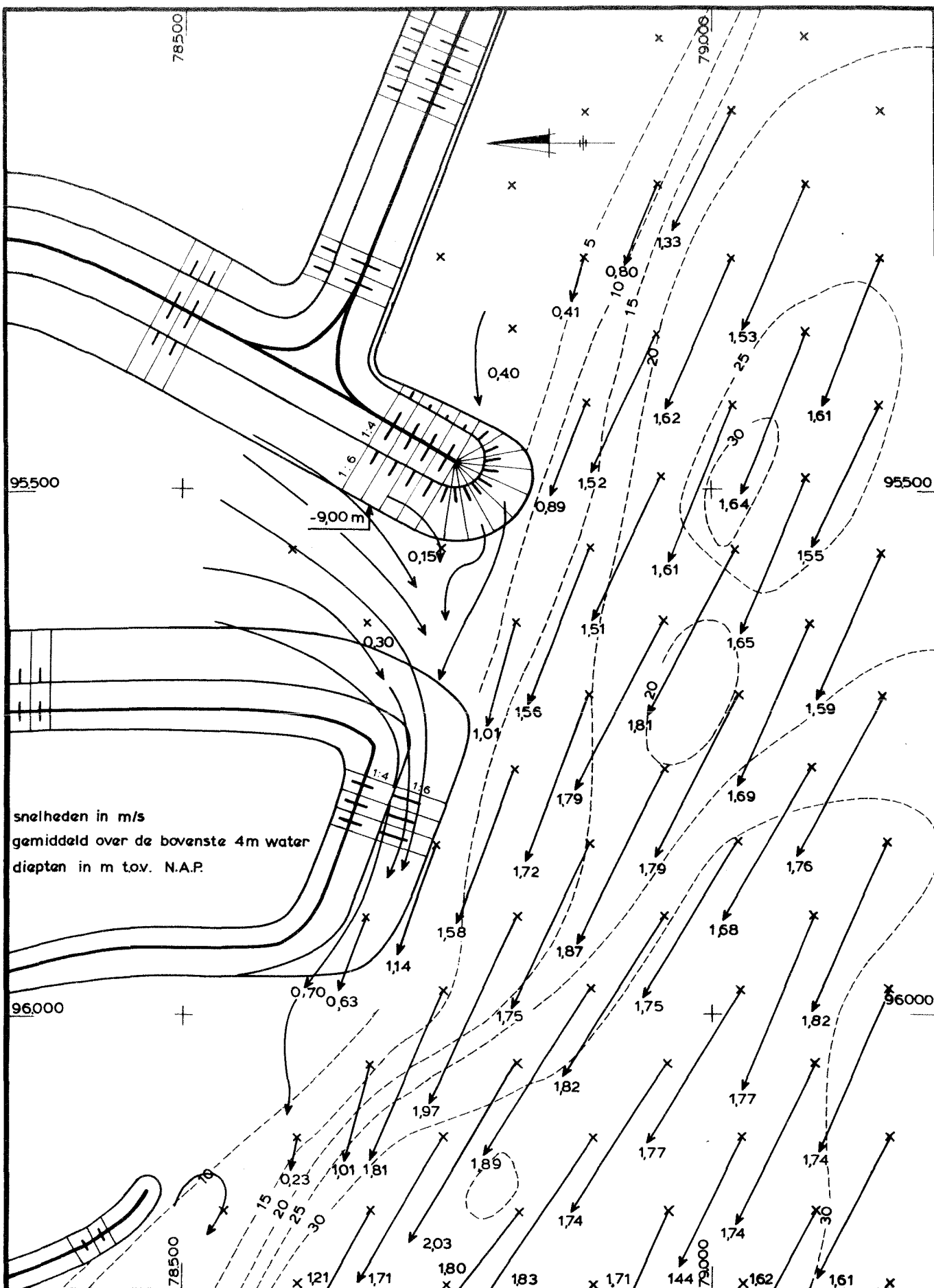
FASE D

SCHAAL 1:5000

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1642

FIG. 18



STROOMBEELD TIJDENS MAXIMALE EBSTROOM

T2

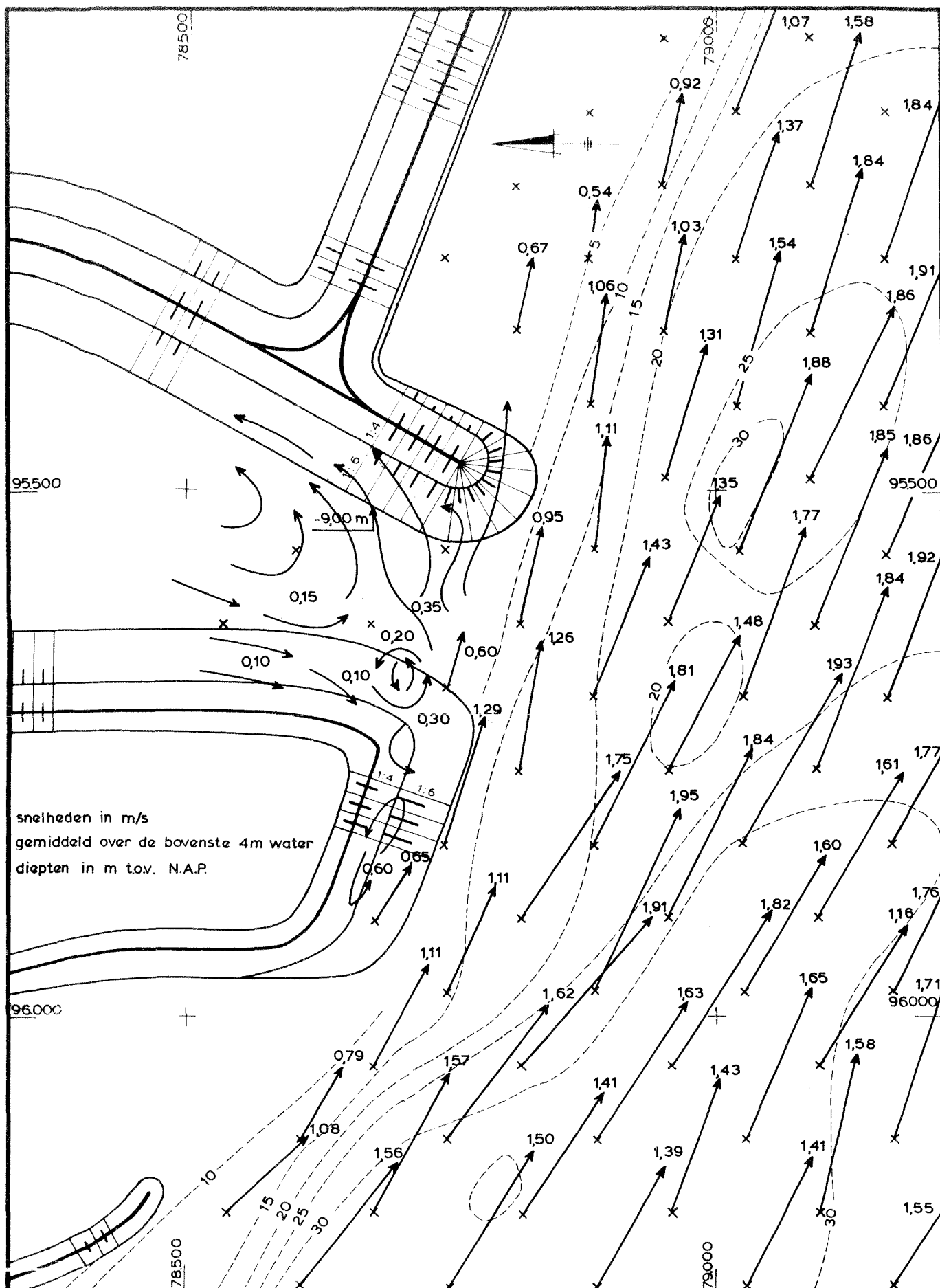
FASE B

SCHAAL 1:5000

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1642

FIG. 19



STROOMBEELD TIJDENS MAXIMALE VLOEDSTROOM

T 2

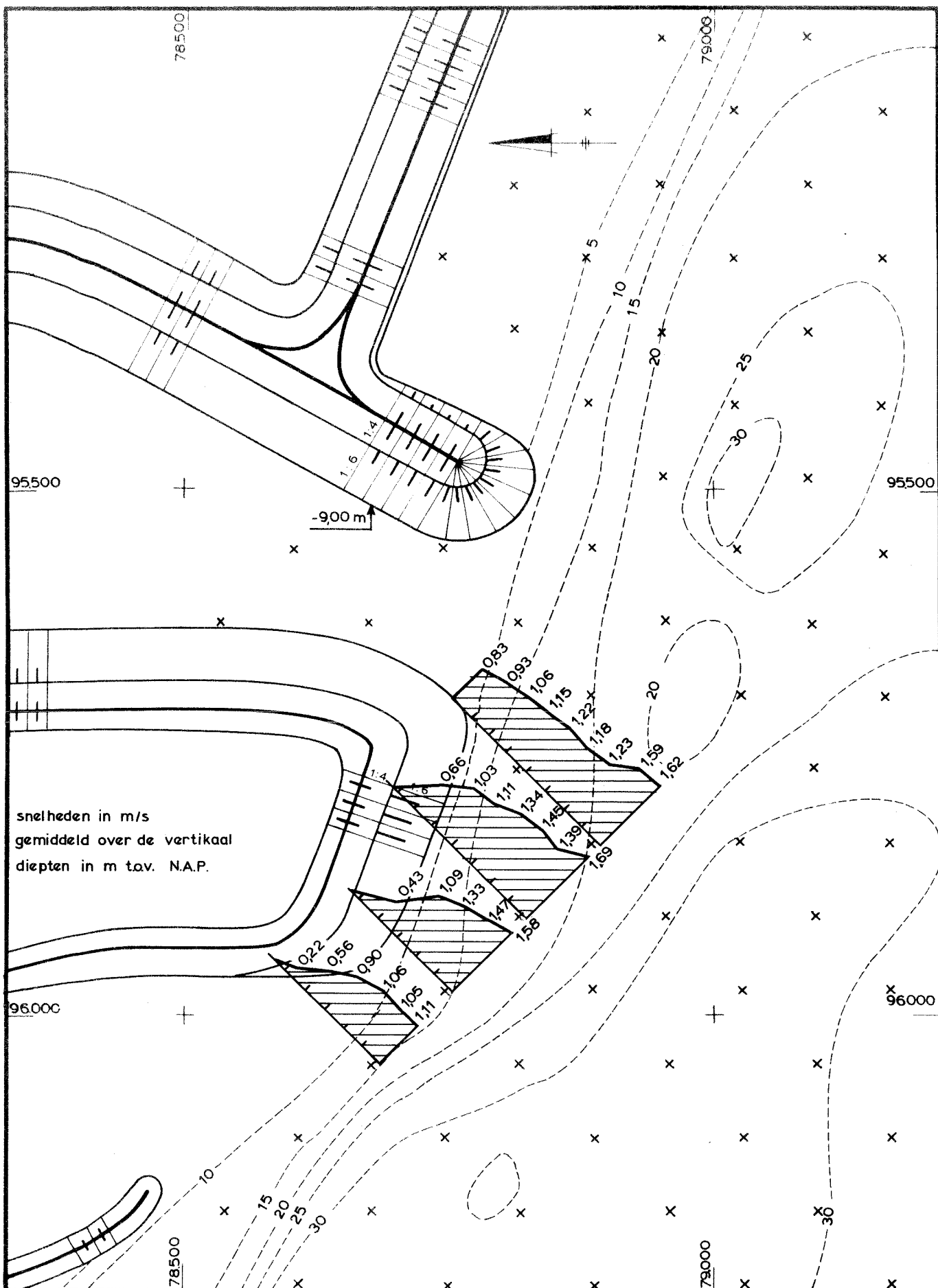
FASE D

SCHAAL 1:5000

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1642

FIG. 20



SNELHEDEN LANGS DE KOPPEN VAN DE HAVEN -
DAMMEN TUDENS MAXIMALE VLOEDSTROOM

T 2

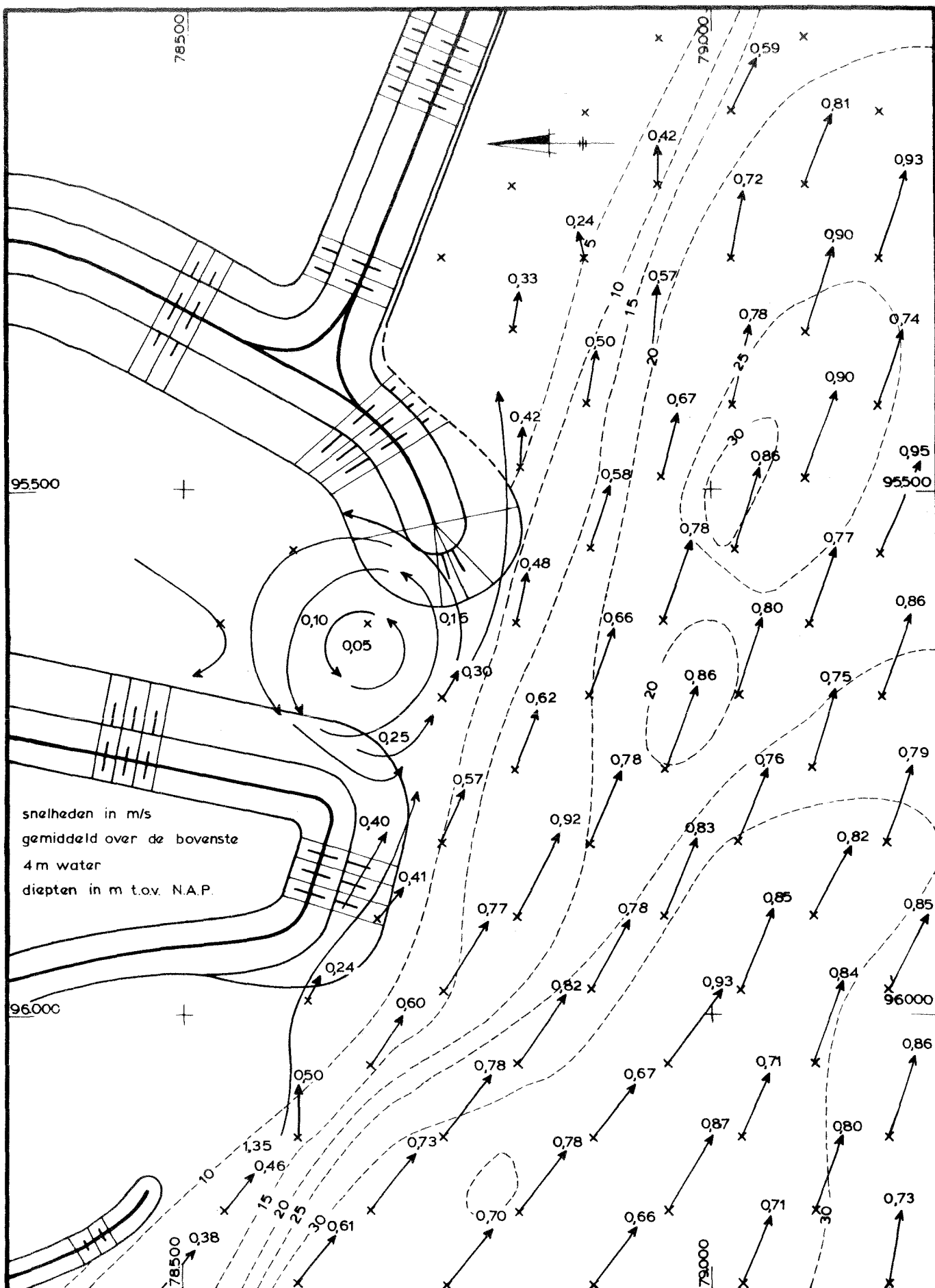
FASE D

SCHAAL 1:5000

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1642

FIG. 21



STROOMBEELD TIJDENS HOOGWATER

T 4

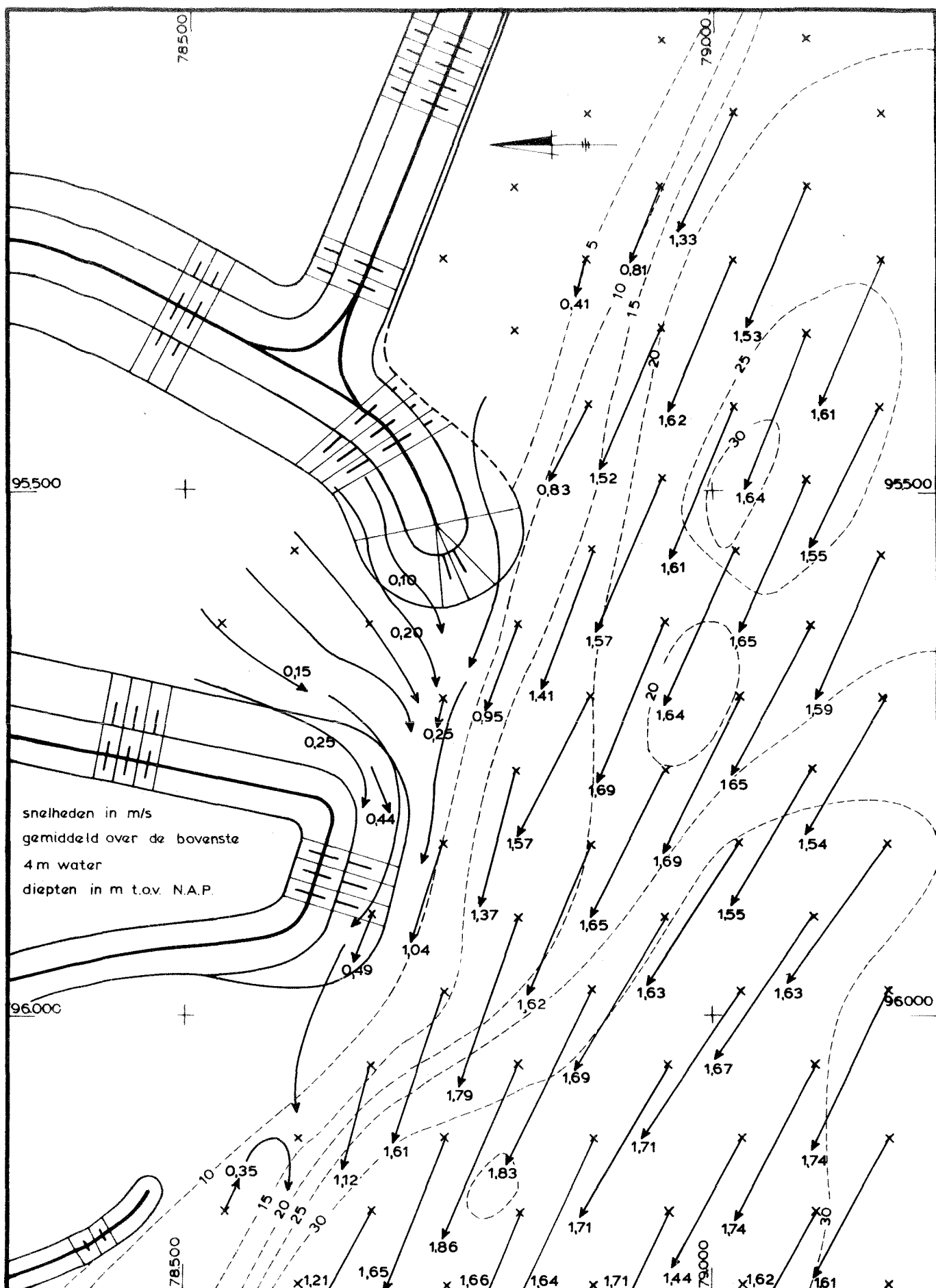
FASE A

SCHAAL 1:5000

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1642

FIG. 22



STROOMBEELD TUDENS MAXIMALE EBSTROOM

T 4

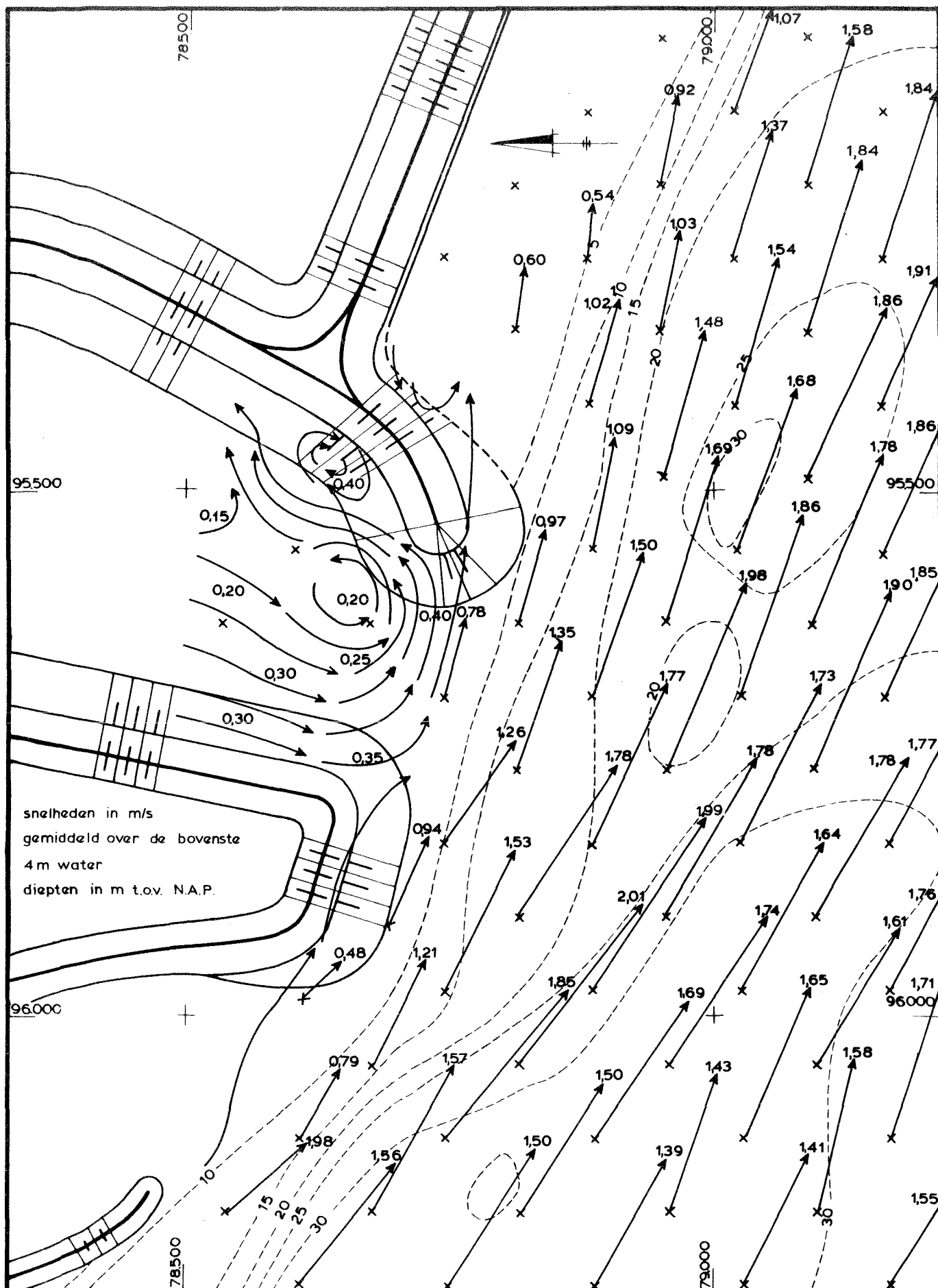
FASE B

SCHAAL 1:5000

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1642

FIG. 23



STROOMBEELD TJDENS MAXIMALE VLOEDSTROOM

T 4

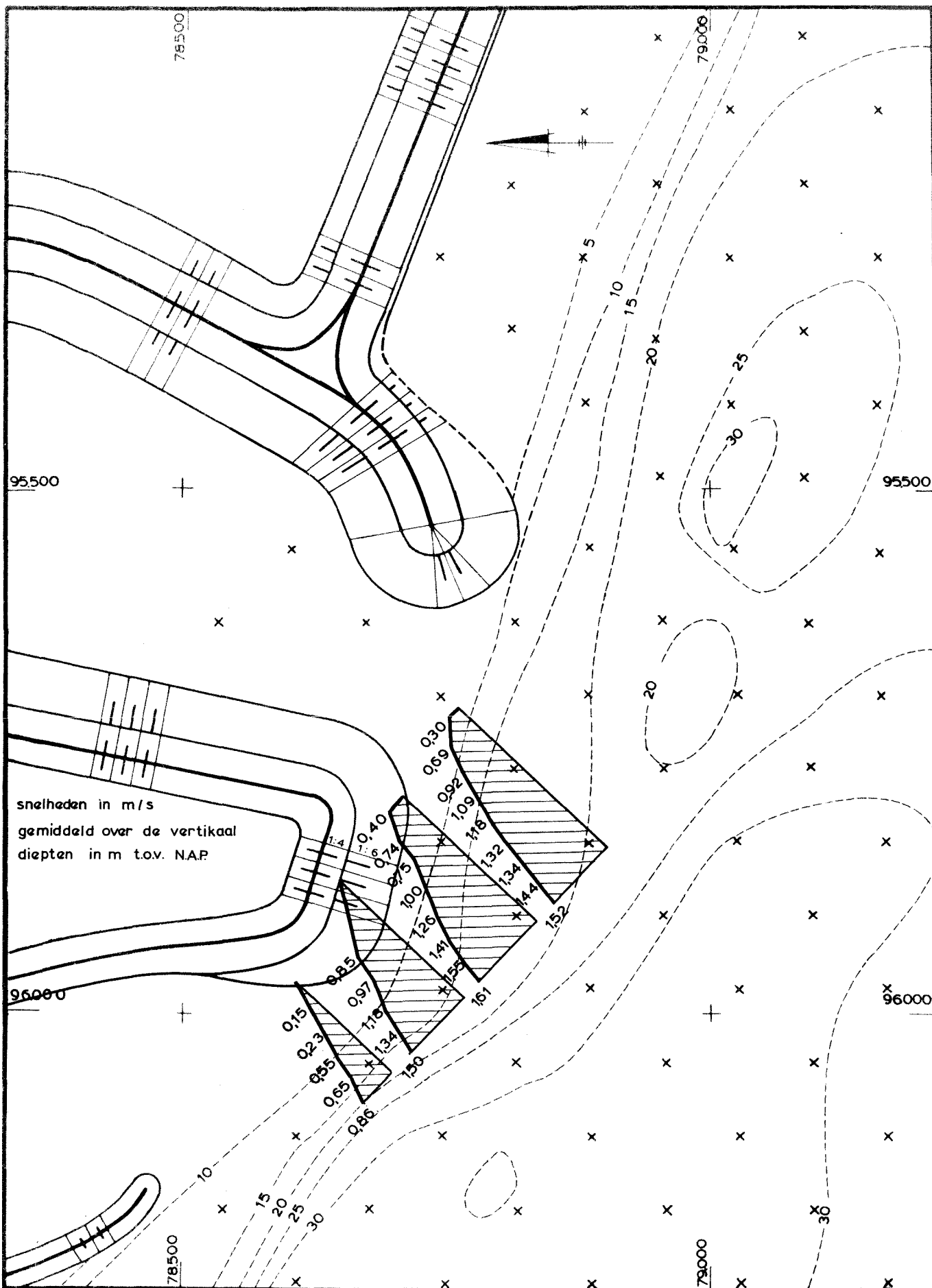
FASE D

SCHAAL 1:5000

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1642

FIG. 25



SNELHEDEN LANGS DE KOPPEN VAN DE HAVEN -
DAMMEN TIJDENS MAXIMALE EBSTROOM

T4

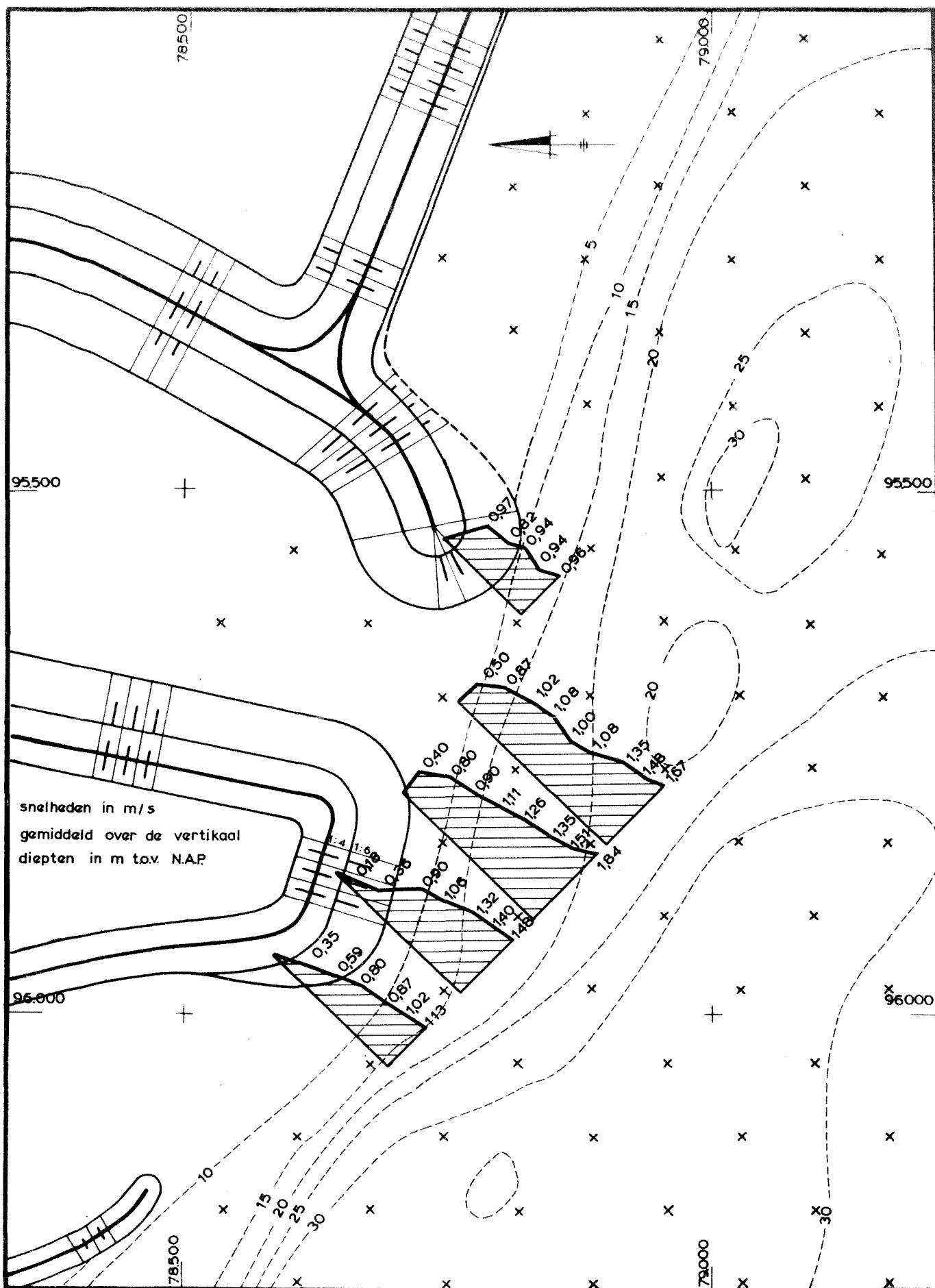
FASE B

SCHAAL 1:5000

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1642

FIG. 26



SNELHEDEN LANGS DE KOPPEN VAN DE HAVEN-
DAMMEN TIJDENS MAXIMALE VLOEDSTROOM

T 4

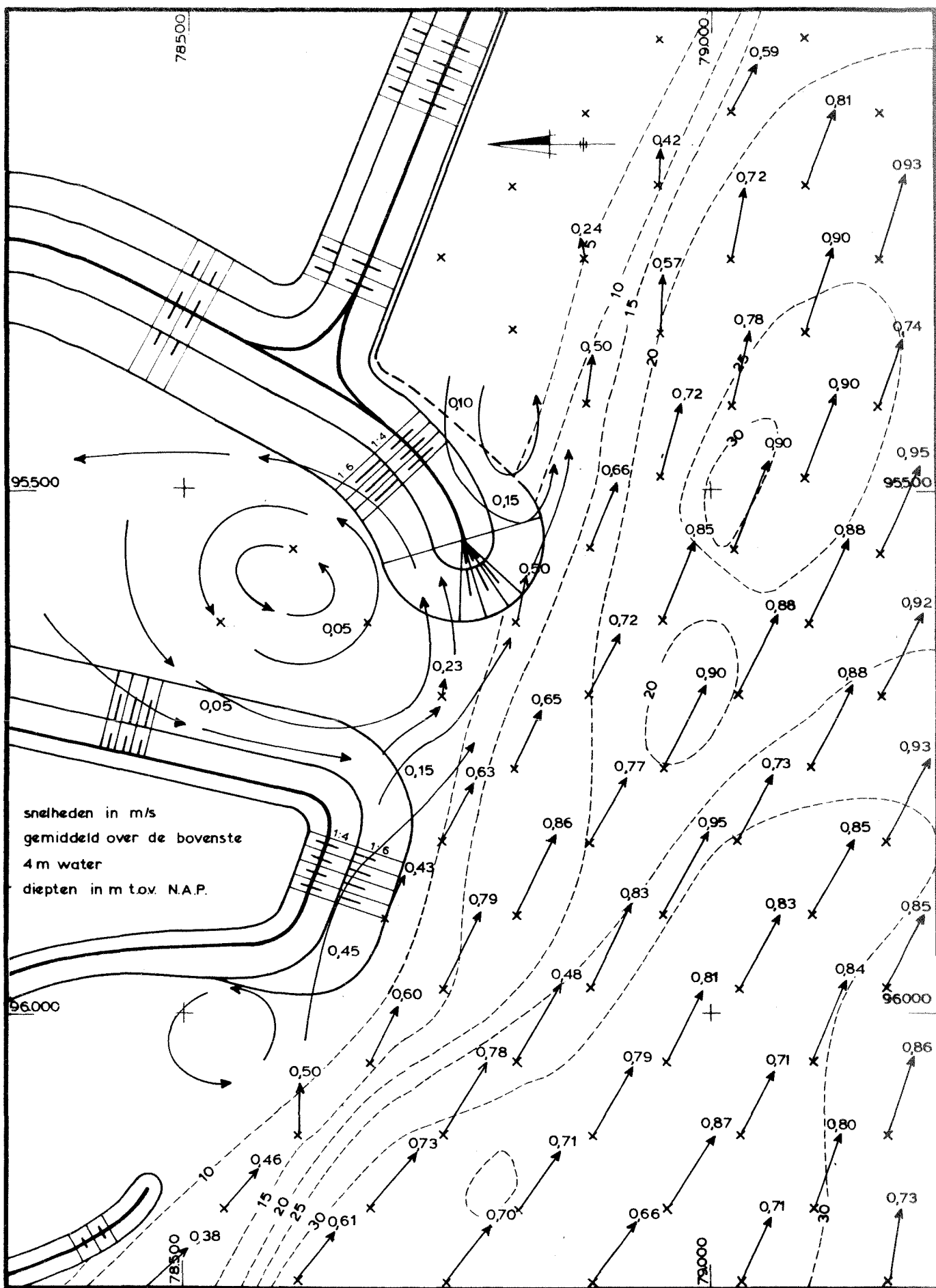
FASE D

SCHAAL 1:5000

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1642

FIG. 27



STROOMBEELD TIJDENS HOOGWATER

T 6

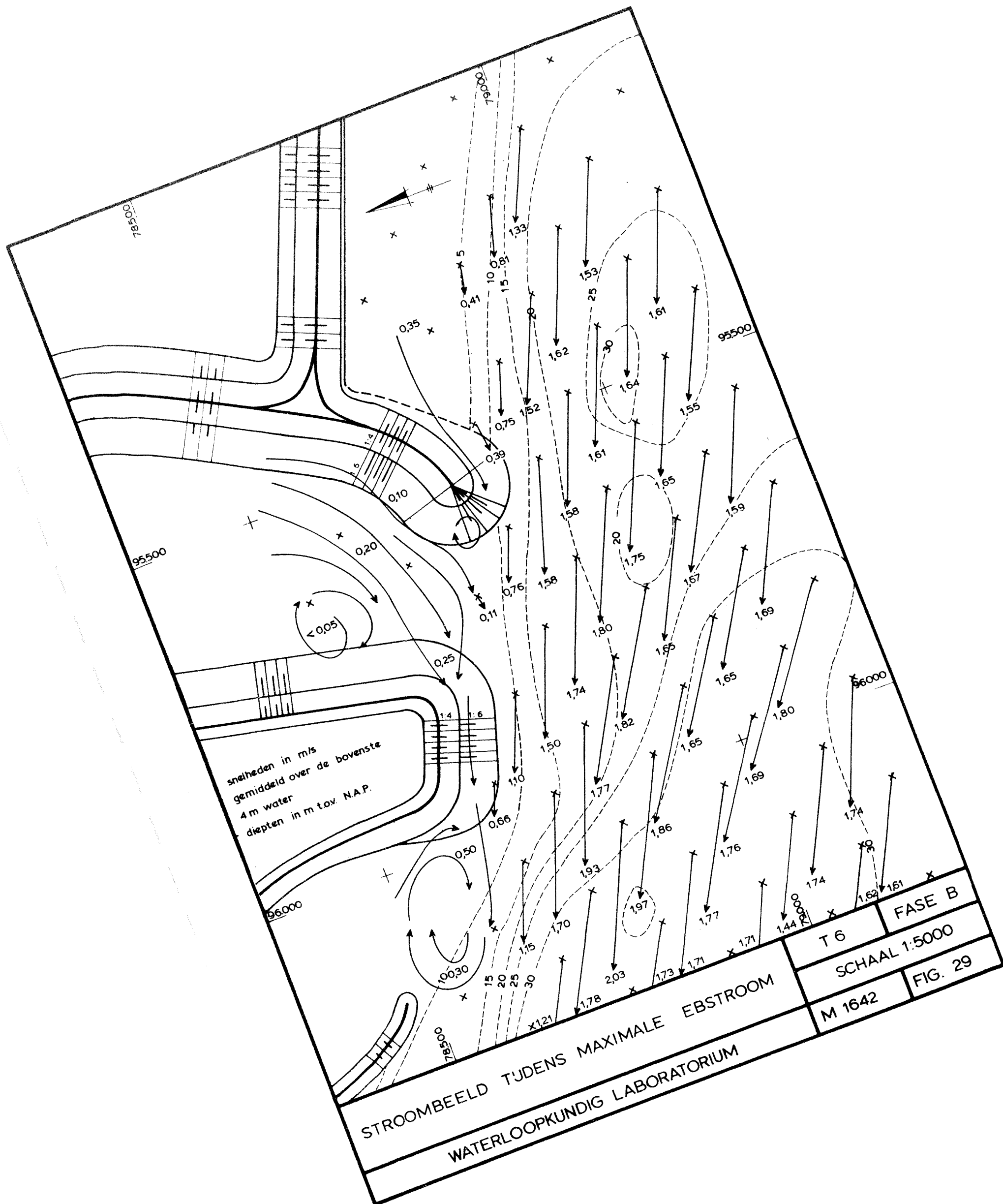
FASE A

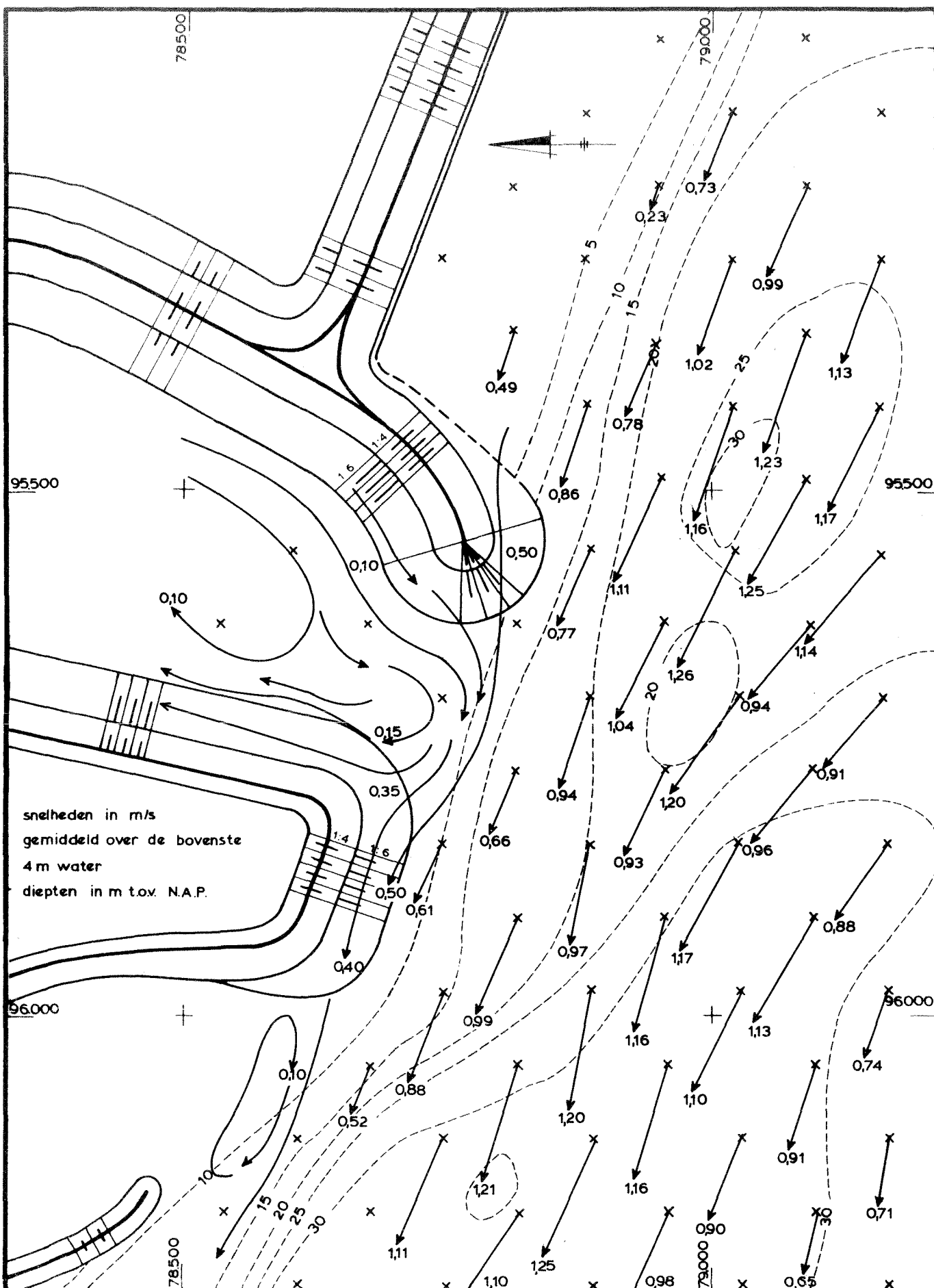
SCHAAL 1:5000

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1642

FIG. 28





STROOMBEELD TIJDENS LAAGWATER

T 6

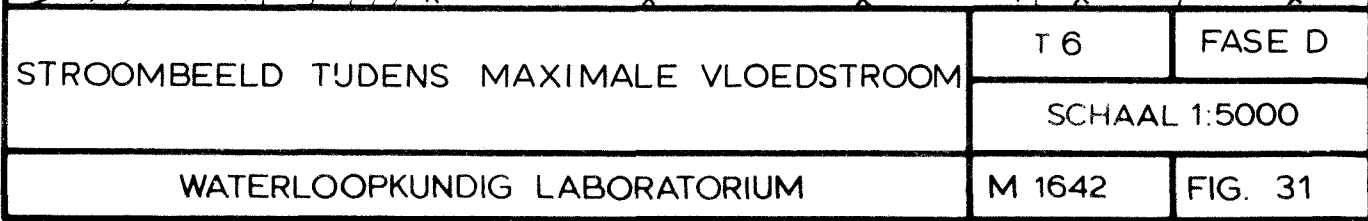
FASE C

SCHAAL 1:5000

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1642

FIG. 30



STROOMBEELD TIJDENS MAXIMALE VLOEDSTROOM

T 6

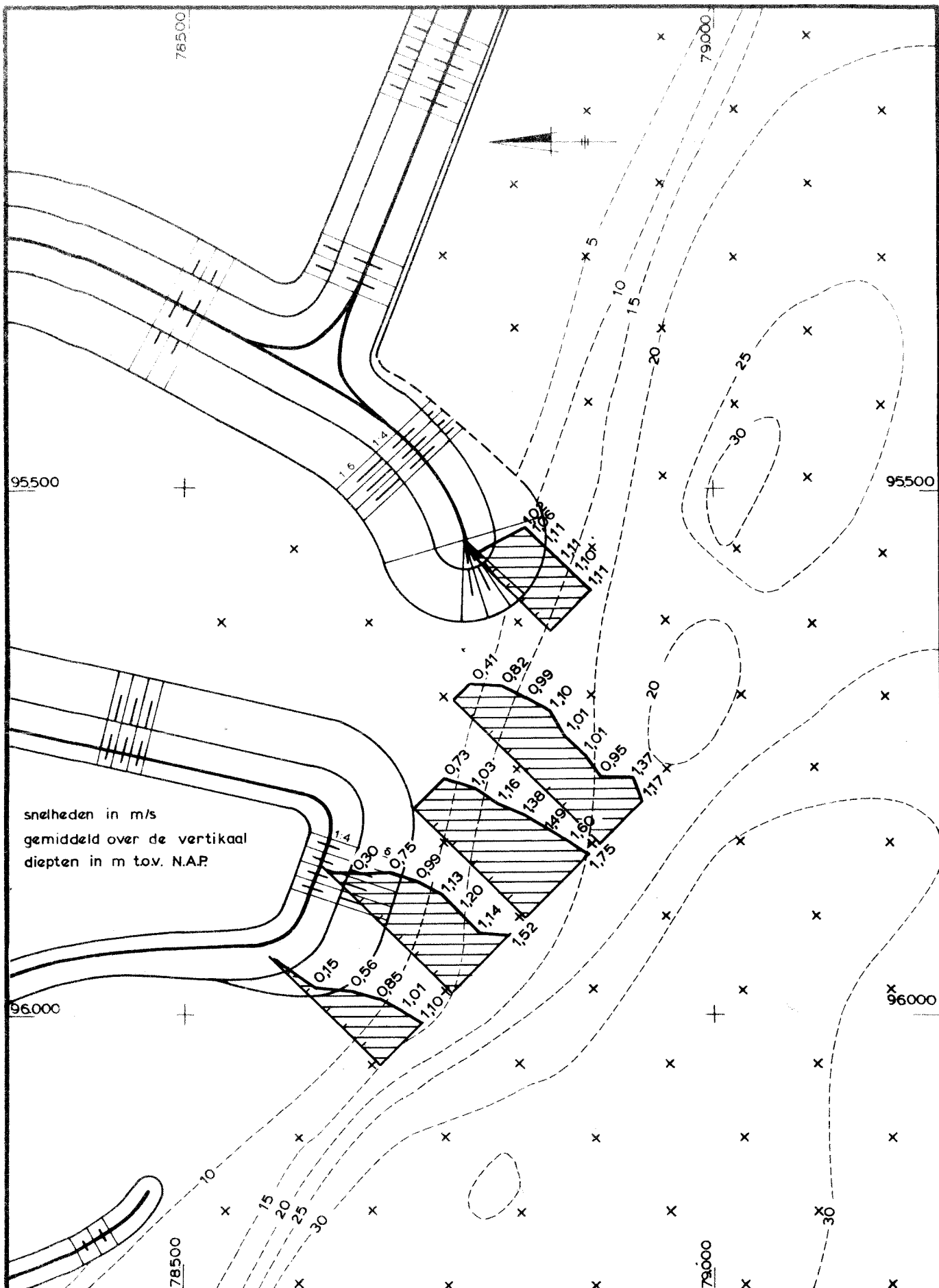
FASE D

SCHAAL 1:5000

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1642

FIG. 31



SNELHEDEN LANGS DE KOPPEN VAN DE HAVEN-
DAMMEN TIJDENS MAXIMALE VLOEDSTROOM

T 6

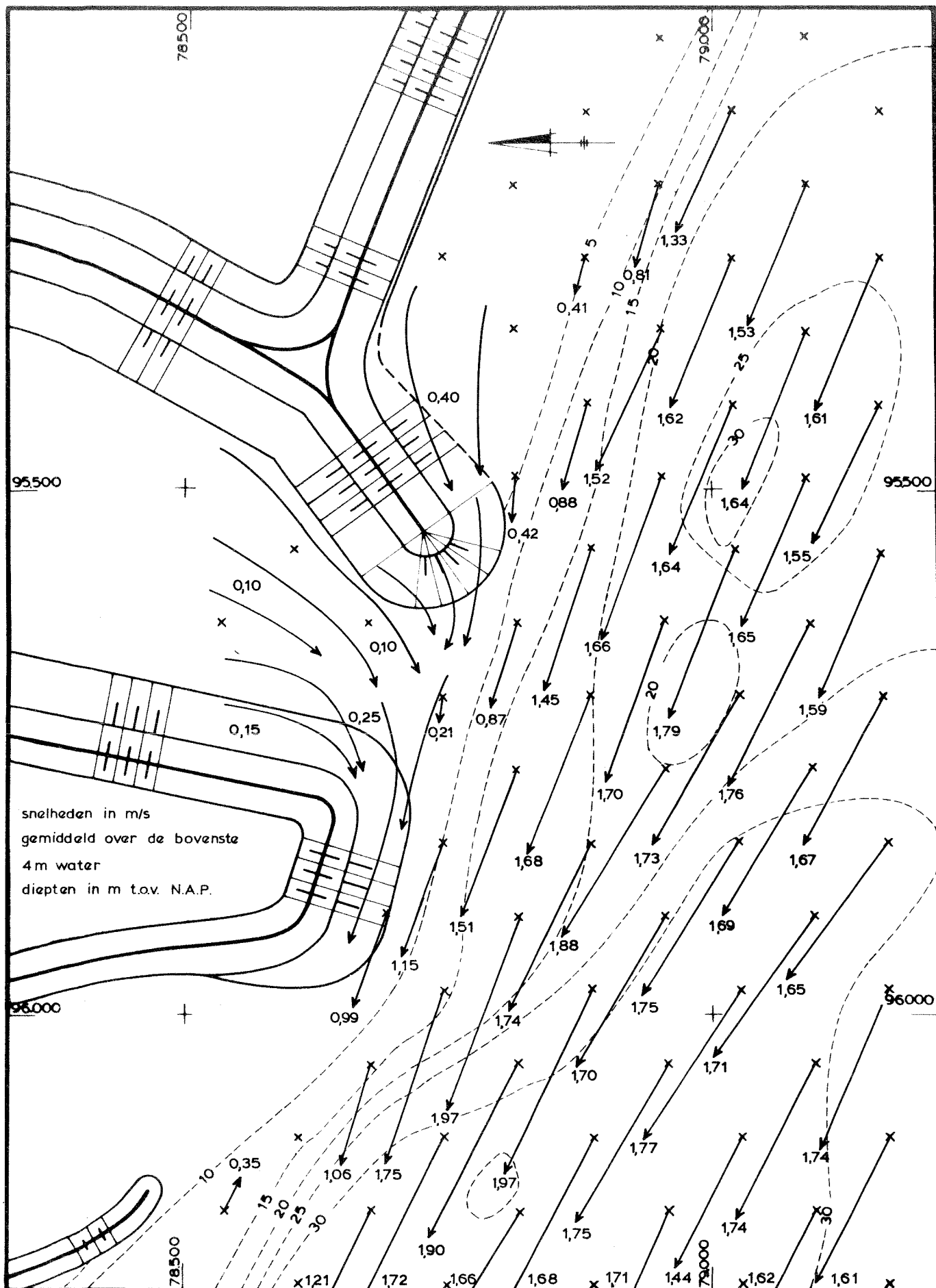
FASE D

SCHAAL 1:5000

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1642

FIG. 32



STROOMBEELD TIJDENS MAXIMALE EBSTROOM

T 7

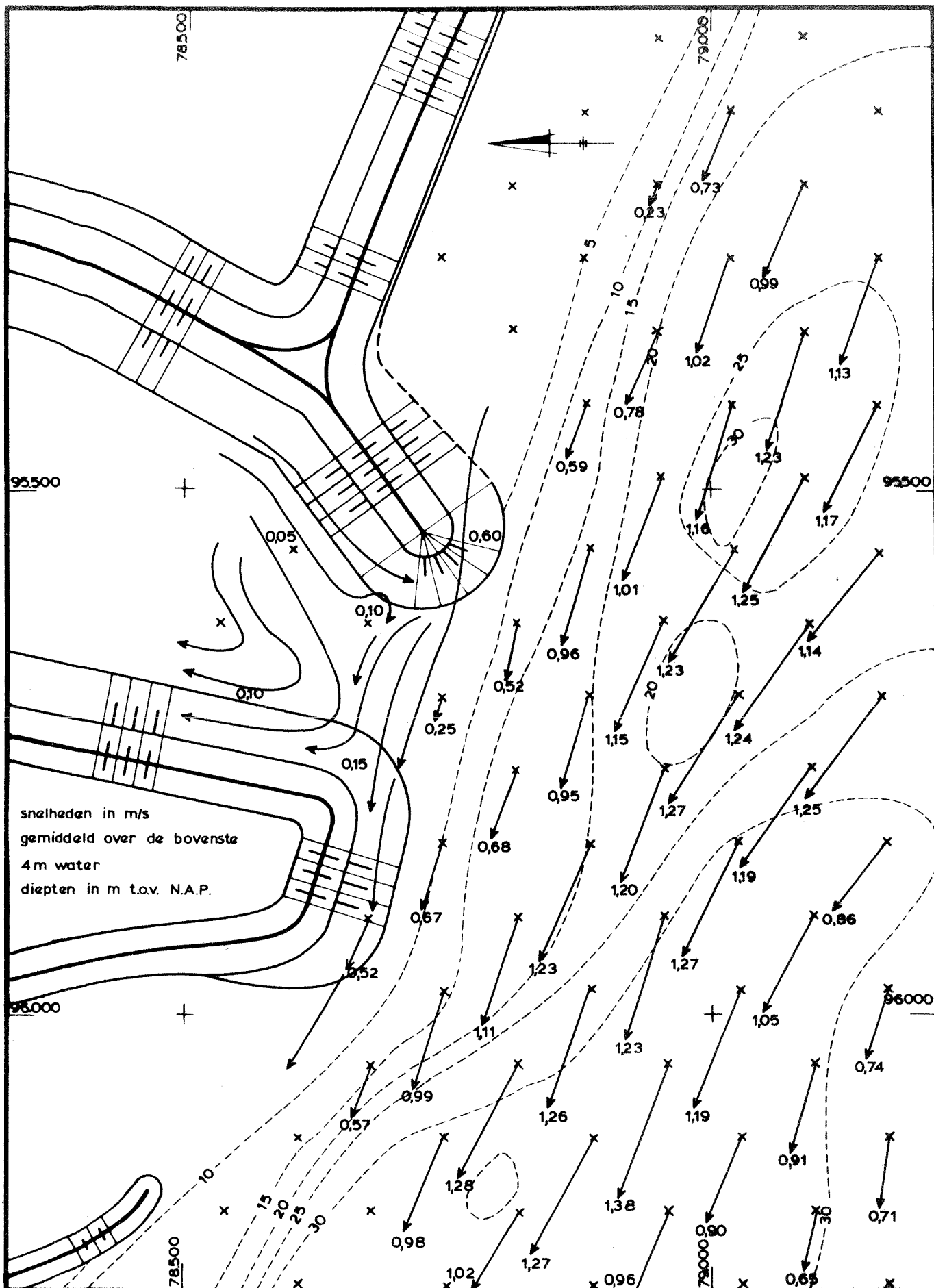
FASE B

SCHAAL 1:5000

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1642

FIG. 34



STROOMBEELD TIJDENS LAAGWATER

T 7

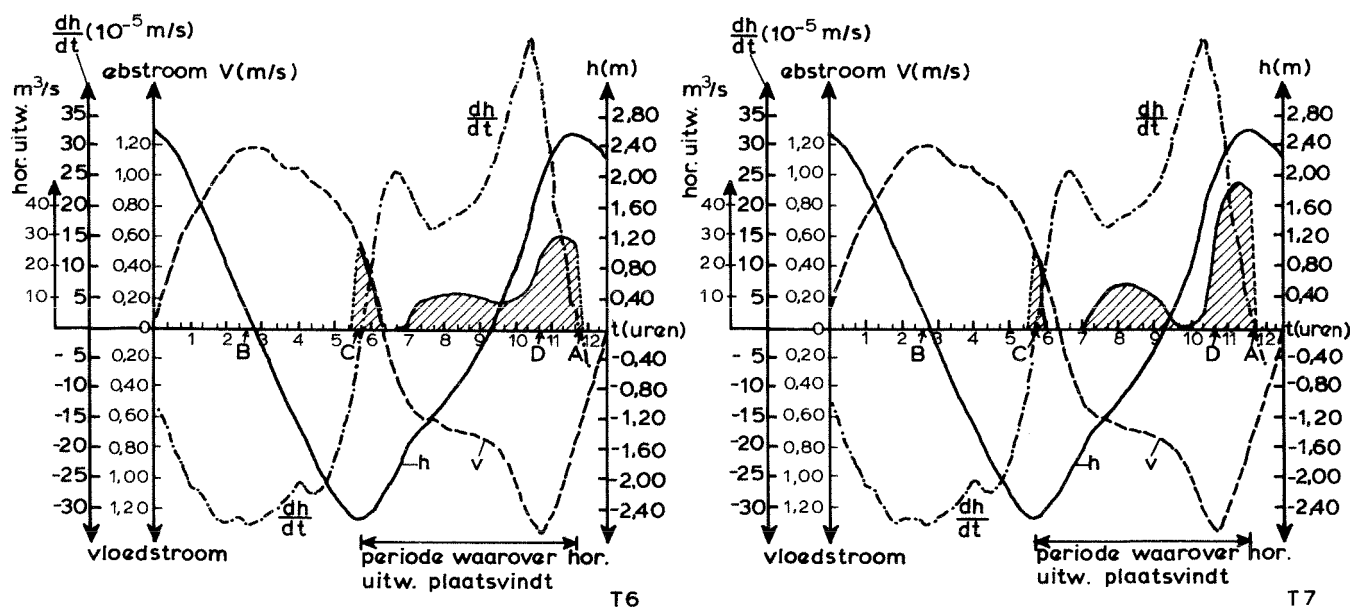
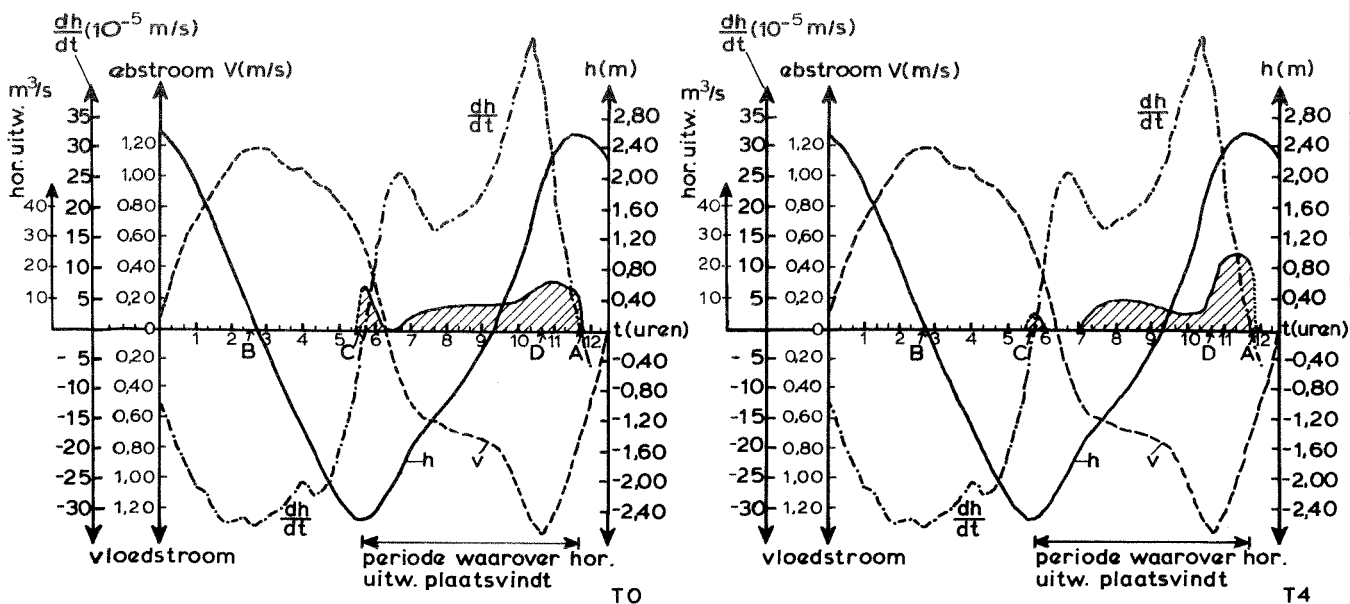
FASE C

SCHAAL 1:5000

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1642

FIG. 35



- t in uren t.o.v. de hoogwater kentering.
- v is de gemiddelde snelheid in de meetpunten 5, 6, 5051 en 5052 zoals geregistreerd op 12 juni 1979.
- h is getijregistratie pr 3.2 Hansweert op 12 juni 1979.
- $\frac{dh}{dt}$ is afgeleid uit de h -curve.

HORIZONTALE UITWISSELING OVER EEN
GETIJCYCLUS (12.25 u)

GETIJFACTOR 1,17

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1642

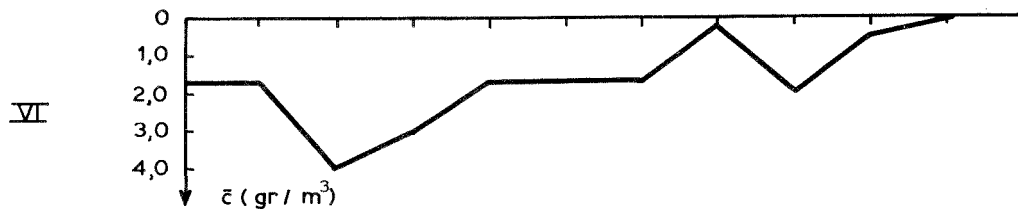
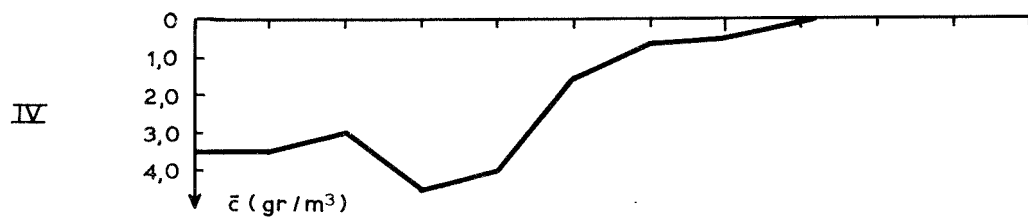
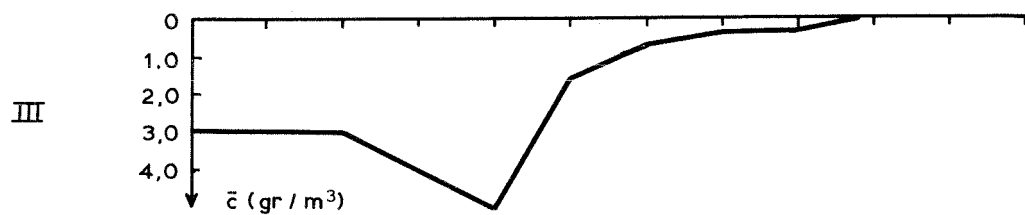
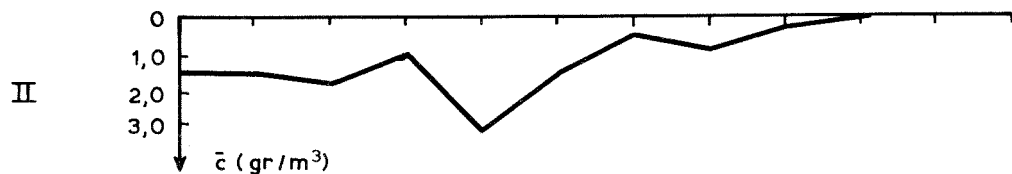
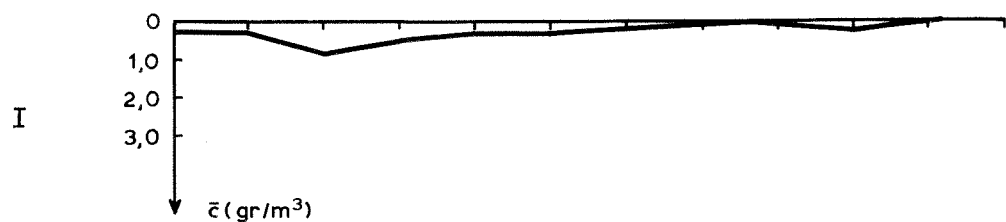
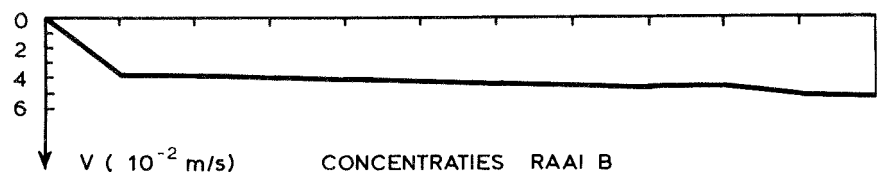
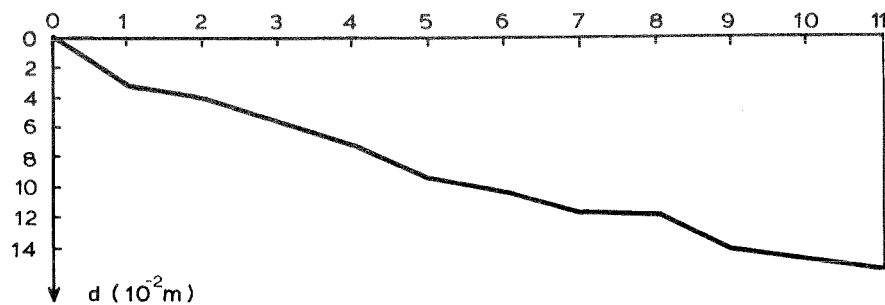
FIG. 37

Verwerking van de resultaten van de horizontale uitwisselingsmeting

Het principe van de berekening van de horizontale uitwisseling is beschreven in 4.2. De manier waarop de metingen worden uitgevoerd is geïllustreerd in de Figuren 6 en 7. In deze Bijlage wordt de manier geïllustreerd waarop de meetresultaten worden verwerkt in de berekening van de horizontale uitwisseling voor een bepaalde getijfase. De getoonde resultaten hebben betrekking op de metingen in havenvariant T4 voor de getijfasen A, C en D.

In Bijlage 1.1 zijn voor getijfase A achtereenvolgens de bodemligging, de snelheidsverdeling en de kleurstofconcentraties in raai B weergegeven. Daarnaast is een gemiddelde kleurstofconcentratie in raai A, gelegen binnen de havenmond, vermeld. Er zijn 6 proeven uitgevoerd. In Bijlage 1.2 zijn de meetresultaten uit 1.1 verwerkt en is de horizontale uitwisseling voor getijfase A berekend.

In de Bijlagen 1.3 t/m 1.6 zijn op dezelfde manier de resultaten gepresenteerd en verwerkt voor de uitwisselingsmetingen voor de getijfasen C en D.



UITWISSELINGSMETINGEN

T 4

FASE A

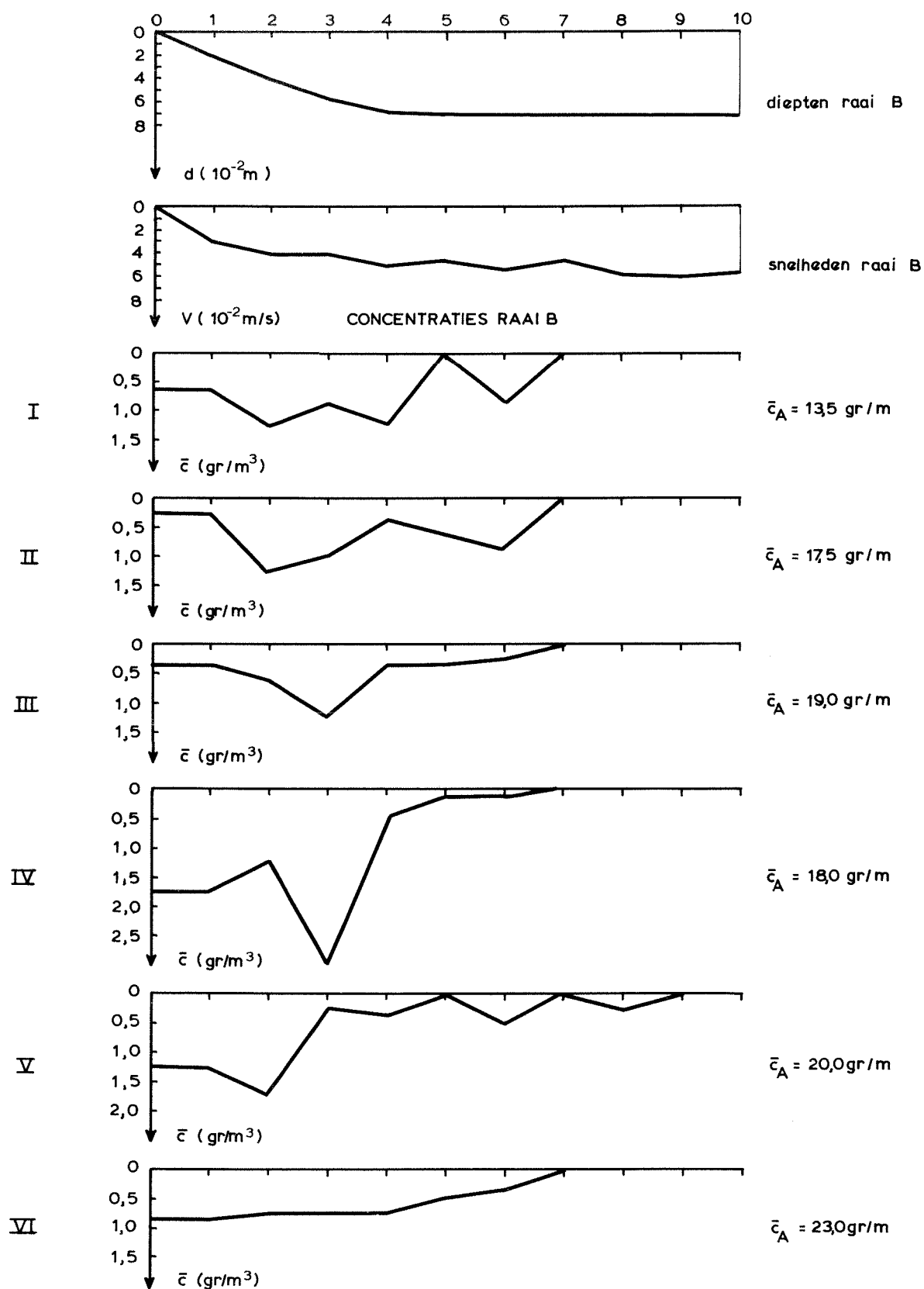
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1642

BUL. 1.1

	proef					
$b \cdot d_i \cdot \bar{v}_i \cdot \bar{c}_i \cdot [10^{-6} \text{ gr/s}]$	I	II	III	IV	V	VI
$i = 1$	30	182	365	426	426	213
$i = 2$	136	273	468	468	624	624
$i = 3$	113	224	896	1008	896	672
$i = 4$	113	907	1512	1210	907	529
$i = 5$	152	606	606	606	2021	707
$i = 6$	117	234	292	292	468	819
$i = 7$	70	489	210	280	350	140
$i = 8$	0	144	216	72	360	1152
$i = 9$	85	0	0	0	596	341
$i = 10$	0	0	0	0	0	0
$\sum_{i=1}^{10} b \cdot d_i \cdot \bar{v}_i \cdot \bar{c}_i \cdot [10^{-6} \text{ gr/s}]$	816	3060	4565	4362	6648	5197
$c_A \cdot [\text{gr/m}^3]$	5,5	14	17	19	21	22
$\frac{\sum_{i=1}^{10} b \cdot d_i \cdot \bar{v}_i \cdot \bar{c}_i}{c_A} \cdot [10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}]$	148	219	268	230	317	236
gemiddelde horizontale uitwisseling				model: $236 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ prototype: $23,6 \text{ m}^3/\text{s}$		

Bewerking meetresultaten T4, fase A



UITWISSELINGSMETINGEN

T4

FASE C

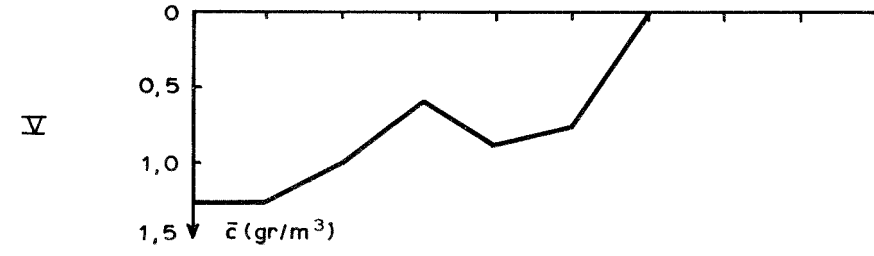
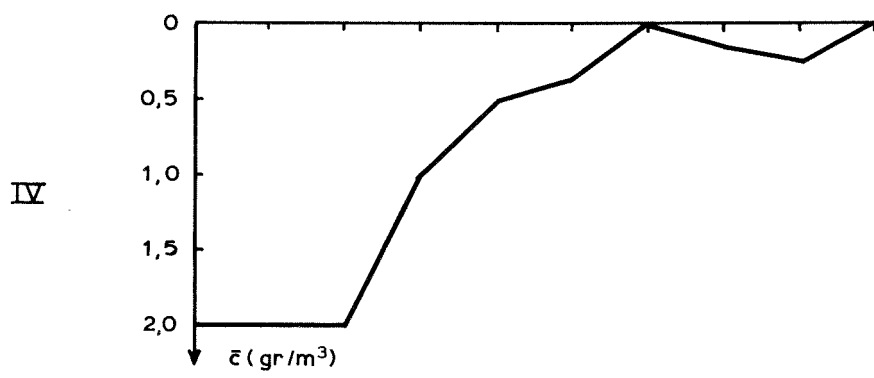
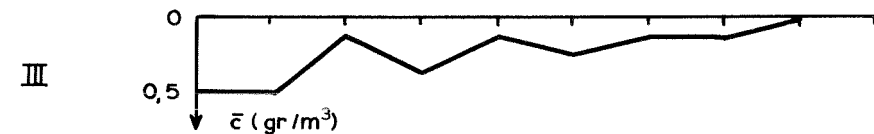
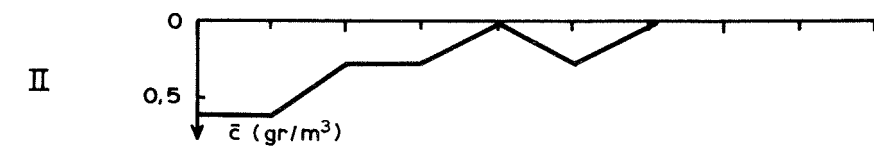
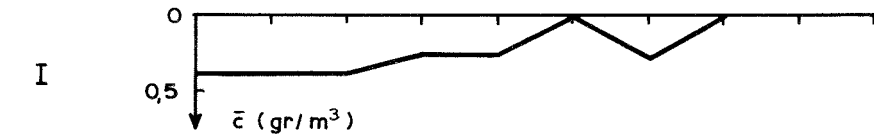
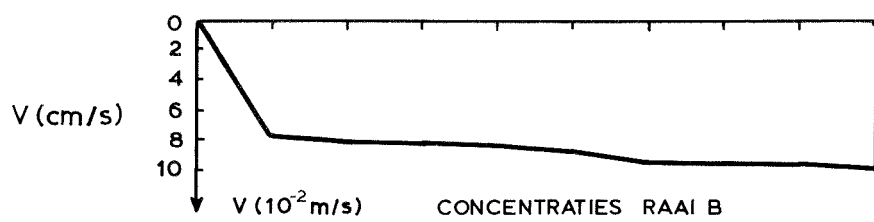
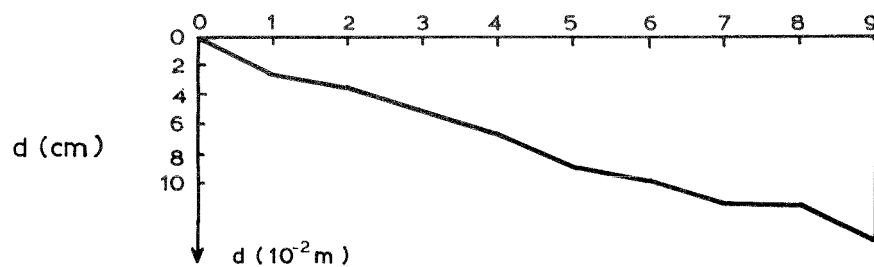
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1642

BIJL. 1.3

	proef					
$b \cdot d_i \cdot \bar{v}_i \cdot \bar{c}_i \text{ [} 10^{-6} \text{ gr/s]}$	I	II	III	IV	V	VI
$i = 1$	38	15	22	105	75	52
$i = 2$	200	200	100	200	280	120
$i = 3$	203	232	290	696	58	174
$i = 4$	425	128	128	170	128	255
$i = 5$	0	197	118	39	0	158
$i = 6$	318	318	91	46	182	136
$i = 7$	0	0	0	0	0	0
$i = 8$	0	0	0	0	101	0
$\sum_{i=1}^8 b \cdot d_i \cdot \bar{v}_i \cdot \bar{c}_i \text{ [} 10^{-6} \text{ gr/s]}$	1184	1090	749	1256	824	895
$c_A \text{ [gr/m}^3\text{]}$	13,5	17,5	19	18	20	23
$\frac{\sum_{i=1}^8 b \cdot d_i \cdot \bar{v}_i \cdot \bar{c}_i}{c_A} \text{ [} 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s]}$	88	62	39	70	41	39
gemiddelde horizontale uitwisseling				model: $56 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ prototype: $5,6 \text{ m}^3/\text{s}$		

Berekening meetresultaten T4, fase C



UITWISSELINGSMETINGEN	T4	FASE D
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1642	BUL. 1.5

	proef				
$b \cdot d_i \cdot \bar{v}_i \cdot \bar{c}_i \quad [10^{-6} \text{ gr/s}]$	I	II	III	IV	V
$i = 1$	73	122	98	390	244
$i = 2$	101	67	34	537	269
$i = 3$	98	98	146	390	244
$i = 4$	135	0	67	271	473
$i = 5$	0	189	189	283	568
$i = 6$	230	0	115	0	0
$i = 7$	0	0	128	128	0
$i = 8$	0	0	0	263	0
$i = 9$	0	0	0	0	0
$\sum_{i=1}^9 b \cdot d_i \cdot \bar{v}_i \cdot \bar{c}_i \quad [10^{-6} \text{ gr/s}]$	637	476	777	2262	1798
$c_A \quad [\text{gr/m}^3]$	3,5	4,5	4,5	12,5	13,0
$\frac{\sum_{i=1}^9 b \cdot d_i \cdot \bar{v}_i \cdot \bar{c}_i}{c_A} \quad [10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}]$	182	106	173	181	138
gemiddelde horizontale uitwisseling				model: $156 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ prototype: $15,6 \text{ m}^3/\text{s}$	

Bewerking meetresultaten T4, fase D

Bepaling van de invloed van dichtheidsstromingen op de sedimentatie van de voorhaven van Hansweert

In deze Bijlage wordt het deel van de sedimentatie van de haven bepaald dat niet veroorzaakt wordt door komvulling of horizontale uitwisseling en waarvan dus kan worden aangenomen dat dit veroorzaakt wordt door dichtheidsstromingen (S_d).

Hiervoor zijn de volgende gegevens gebruikt:

- horizontale uitwisseling voor één gemiddeld getij (T0) $U = 170.000 \text{ m}^3$
- komberging voor één gemiddeld getij (T0) $K = 1.012.000 \text{ m}^3$
- gemiddeld slibgehalte van de Westerschelde t.p.v. Hansweert $\bar{c} = 50 \text{ gr/m}^3$
- variatie van het slibgehalte gedurende één getijcyclus tabel 1
- aantal getijperioden per jaar $n = 706$
- sedimentatie van de bestaande voorhaven (gemeten in het profiel van ontgraving). $S_t = 100.000 \text{ m}^3/\text{jr}$

Naast deze gegevens zijn een aantal aannamen gedaan met betrekking tot de samenstelling van het havenslib en het sedimentatiegedrag:

- soortelijke massa sediment $\rho_o = 2650 \text{ kg/m}^3$
- soortelijke massa water $\rho_w \approx 1000 \text{ kg/m}^3$
- dichtheid gebaggerd havenslib $\rho_s = 1200 \text{ à } 1300 \text{ kg/m}^3$
- percentage van het aangevoerde slib dat bezinkt in de haven. $p = 50\% \text{ à } 60\%$

De sedimentatie die veroorzaakt wordt door dichtheidsstromingen (S_d) wordt nu als volgt berekend:

$$S_d = S_t - p \cdot r \cdot \bar{c} \cdot n (U + K) \frac{\rho_o - \rho_w}{\rho_o (\rho_s - \rho_w)}$$

waarin:

r = gewogen gemiddelde van de reductie-coëfficiënten volgens Tabel 1 voor de periode waarover uitwisseling en komberging optreden, volgens:

$$r = \frac{\sum_{t=1}^5 \left(\frac{c}{\bar{c}} \cdot \frac{dh}{dt} \right)_t}{\sum_{t=1}^5 \left(\frac{c}{\bar{c}} \right)_t} = 0,83$$

Conform onze berekening
(zie bijlage 1)
met 'afdring' = niet

$$S_d = 100.000 - p \cdot 0,83 \cdot 50 \cdot 706 \cdot 1.182.000 \cdot \frac{2650 - 1000}{2650(\rho_s - 1000)} \cdot 10^{-3}$$

$$S_d = 35.000 \text{ à } 65.000 \text{ m}^3/\text{jr}$$

Conclusies

Uit deze oriënterende berekening kan gekonkludeerd worden dat:

- de aanslibbing van de bestaande haven van Hansweert voor een belangrijk deel (orde 50%) veroorzaakt wordt door optredende dichtheidsverschillen over de havenmond.
- bovenstaande berekening een aantal onzekere factoren in zich bergt zoals de dichtheid van het gebaggerde havenslib, het percentage van het aangevoerde slib dat blijvend bezinkt en de slibconcentratie voor de haven van Hansweert.