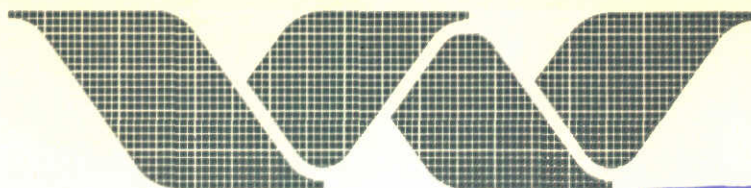


1 1360

Bibl Lb



2e exemplaar

waterloopkundig laboratorium
delft hydraulics laboratory

reduktie ontgrondingskuilen door sedimenttransport

AFGEHANDELD

verslag onderzoek

M 1360

augustus 1978

M1360

30 OKT. 1978

BIBLIOTHEEK
Waterloopkundig Laboratorium
Postbus 177 - DELFT
NEDERLAND

reduktie ontgrondingskuilen door sedimenttransport

verslag onderzoek

M 1360

augustus 1978

INHOUD

	blz.
1 <u>Inleiding.....</u>	1
1.1 Probleemstelling.....	1
1.2 Opdracht.....	1
1.3 Opzet van het onderzoek.....	2
2 <u>Samenvatting, konklusies en aanbevelingen voor nader onderzoek.....</u>	4
2.1 Samenvatting.....	4
2.2 Konklusies.....	5
2.3 Aanbevelingen voor nader onderzoek.....	5
3 <u>Modelonderzoek; toetsing aanzanding ontgrondingskuilen.....</u>	6
3.1 Proefopstelling en meetmethoden.....	6
3.2 Sedimenttransport.....	7
3.2.1 Proef T1.....	7
3.2.2 Proef T2.....	8
3.3 Toetsingsberekening.....	9
3.3.1 Overzicht van stroomgegevens en numerieke parameters.....	9
3.3.2 Resultaten.....	10
4 <u>Prototype-onderzoek; toetsing aanzanding proefput Oosterschelde.....</u>	12
4.1 Algemeen.....	12
4.2 Getij-omstandigheden.....	12
4.3 Sedimenttransport.....	13
4.3.1 Relatie sedimenttransport-stroomsnelheid.....	13
4.3.2 Bodemruwheid.....	15
4.3.3 Sedimentkarakteristieken.....	16
4.4 Morfologische aspecten.....	16
4.5 Toetsingsberekening.....	16
4.5.1 Invoergegevens raai II.....	17
4.5.2 Resultaten.....	18

LITERATUUR

TABELLEN

- 1 Resultaten proeven ter bepaling van transport-stroomsnelheidsrelatie van het zandgootje voor proef T1

FIGUREN

- 1 Transport - stroomsnelheidsrelatie voor proef T1
- 2 Bodemligging van de ontgrondingskuil (proef T1)
- 3 Bodemligging van de ontgrondingskuil (proef T2)
- 4 Situatie proefput Oosterschelde
- 5 Vertikaal getij werkeiland Roggenplaat op 28 en 29 augustus 1975
- 6 Stroomsnelheden en debieten in raai I op 28 augustus 1975
- 7 Stroomsnelheden en debieten in raai II op 29 augustus 1975
- 8 Stroombeelden ter plaatse van de proefput Oosterschelde (foto's M 1000)
- 9 Transport-stroomsnelheidsrelatie Oosterschelde
- 10 Dwarsdoorsnede 200 m westelijk van de as van de proefput
- 11 Dwarsdoorsnede 200 m oostelijk van de as van de proefput
- 12 Gemeten bodemligging in raai I en II van de proefput
- 13 Schematisatie van het maatgevend getij voor het sedimenttransport
- 14 Gemeten en berekende bodemligging in raai II

SYMBOLLEN

b	= breedte (loodrecht op stroomrichting)	[L]
c	= gemiddelde lokale concentratie in ppm	-
C	= ruwheidscoëfficiënt van Chézy	[L ^{1/2} T ⁻¹]
D _r	= representatieve korreldiameter	[L]
D ₅₀	= korreldiameter waarbij 50 gewichtsprocenten fijner is	[L]
g	= zwaartekrachtsversnelling	[LT ⁻²]
h	= waterdiepte	[L]
i	= energieverhang	-
k	= equivalente ruwheid van Nikuradse	[L]
l	= ribbellengte	[L]
q	= afvoer per eenheid van breedte	[L ² T ⁻¹]
Q	= afvoer	[L ³ T ⁻¹]
r	= ribbelhoogte	[L]
S _g	= sedimenttransport in massa per eenheid van breedte en tijd	[ML ⁻¹ T ⁻¹]
s	= ribbelsteilheid: $\frac{r}{l}$	-
T	= watertemperatuur	[°C]
t	= tijd	[T]
Δt	= tijdstap	[T]
$\bar{u}$	= gemiddelde stroomsnelheid	[LT ⁻¹]
u*	= schuifspanningssnelheid	[LT ⁻¹]
w _s	= bezinksnelheid	[LT ⁻¹]
x	= horizontale plaatscoördinaat	[L]
Δx	= horizontale plaatsstap	[L]
z	= verticale plaatscoördinaat	[L]
Δz	= verticale plaatsstap	[L]
z _a	= hoogte, waarop de bodemconcentratie gedefiniëerd is	[L]
Δ	= $\frac{\rho_s - \rho}{\rho}$	-
ρ _s	= dichtheid van het sediment	[ML ⁻³]
ρ	= dichtheid van water	[ML ⁻³]
K	= konstante van Von Karman	-
σ	= standaardafwijking	-
σ _s	= $\frac{1}{2} \left(\frac{D_{50}}{D_{16}} + \frac{D_{84}}{D_{50}} \right)$ = gradatiecoëfficiënt	-

1 Inleiding

1.1 Probleemstelling

Het huidig ontgrondingsonderzoek in fysische modellen vindt plaats bij stromen in één richting en zonder initiëel sedimenttransport. De gevonden ontgrondingen zijn daarom te groot en moeten worden gereduceerd. De tot nu toe gebruikte reductiemethode is empirisch van opzet. Er bestaat behoefte aan een meer fundamentele methode. In een getijgebied verkeert de ontgrondingskuil aan weerszijden van een konstruktie met bodembescherming afwisselend onder verschillende omstandigheden. Enerzijds gedraagt de kuil zich als een ontgrondingskuil, die de neiging heeft zich te verdiepen. Anderzijds gedraagt de kuil zich als een sleuf, die de tendens heeft tot aanzanding.

In het kader van het onderzoek naar de aanzanding van tunnelsleuven (R 975) is een berekeningsmethode ontwikkeld om aanzanding van sleuven te berekenen. Deze methode is in eerste instantie slechts geschikt voor sleuven met flauwe taluds en uniform of matig gegradeerd materiaal, terwijl de resultaten in belangrijke mate worden beïnvloed door de nauwkeurigheid, waarmee het sedimenttransport aan de bovenstroomse zijde van de sleuf kan worden bepaald. In principe kan genoemde methode voor de berekening van de aanzanding van ontgrondingskuilen worden gebruikt, maar moet voor dit doel nog worden getoetst. Ontgrondingskuilen hebben immers zowel een flauw als een steil talud (bijvoorbeeld respectievelijk 1:40 en 1:4).

De reducerende werking van het initiëel sedimenttransport op de ontgronding laat zich moeilijker beschrijven, omdat de ontgrondingsproblematiek tot dusver langs experimentele weg is benaderd.

1.2 Opdracht

Als aanzet tot een meer fundamentele aanpak heeft de Hoofdafdeling Waterloopkunde van de Deltadienst van Rijkswaterstaat het Waterloopkundig Laboratorium opdracht gegeven de berekeningsmethode voor de berekening van de aanzanding van sleuven te toetsen voor ontgrondingskuilen. Bovendien is er in het kader van de zandwinning voor de aanleg van de damaanzet Schouwen een proefput gezogen aan de noordzijde van de Roggenplaat (zie figuur 4), waarna de aanzanding is gemeten en stroom- en transportmetingen zijn uitgevoerd. De proefput had een tweeledig doel: enerzijds kon de snelheid en mate van aanzanding van inbaggeringen worden

bepaald, anderzijds kon de genoemde berekeningsmethode voor prototype-omstandigheden worden getoetst.

1.3 Opzet van het onderzoek

Bij het toetsen van de berekeningsmethode voor het berekenen van de aanzanding van sleuven voor het geval van ontgrondingskuilen en de proefput Oosterschelde is gebruik gemaakt van het numeriek model voor niet-permanent suspensietransport, zoals dat wordt beschreven in het verslag R 975, deel II [1].

Het mathematisch model, dat aan dit numeriek model ten grondslag ligt, omvat de vergelijkingen, vereenvoudigingen en randvoorwaarden, die op de niet-permanente en niet-éénparige water- en sedimentbeweging van toepassing zijn. Vooral de bewegingsvergelijkingen voor het water en het sediment zijn sterk geschematiseerd. Een gevolg hiervan is, dat toepassing van het model alleen zinvol is voor sleuven met relatief flauwe taluds (1:6 à 1:8).

De valsnelheid van het zwevend sediment is konstant verondersteld. Dit beperkt het gebruik van het model tot matig gegradeerd, niet-kohesief bedmateriaal. Van de randvoorwaarden is vooral het bepalen van het aanwezige sedimenttransport op de bovenstroomse rand ($x = 0$) erg belangrijk. Dit geldt eveneens voor de bodemconcentratie langs het gehele systeem. Aangezien het (nog) niet mogelijk is de bodemconcentratie direkt uit lokale stroomparameters (zoals bijvoorbeeld de schuifspanningssnelheid) te bepalen, wordt dit via de evenwichtstransportkapaciteit gedaan, waarbij wordt aangenomen, dat de bodemconcentratie zich aanpast aan de veranderde gemiddelde stroomsnelheid. Het is daarom absoluut noodzakelijk de transportkapaciteit in evenwichtsomstandigheden te kennen.

In het geval van getijbeweging moet er een voor de totale toetsingsperiode karakteristiek getij worden bepaald. Dit getij wordt dan tot een aantal representatieve quasi-permanente stromingstoestanden geschematiseerd. Hierbij moet het totale sedimenttransport gedurende één getijcyclus goed worden weergegeven. Het oplossen van de continuïteits- en bewegingsvergelijkingen van het water en het sediment geschiedt op numerieke wijze. De numerieke onnauwkeurigheden kunnen binnen aanvaardbare grenzen blijven (orde 5% van het totale aanzandingsniveau).

De aanzanding van ontgrondingskuilen is onderzocht in het zogenaamde zandgootje van het Laboratorium De Voorst. Er zijn 2 proeven uitgevoerd met als enige variabele de samenstelling van het sediment. De resultaten van deze proeven zijn vergeleken met de resultaten van de berekening met het hiervoor beschreven numeriek model. De aanzanding van de proefput Oosterschelde is vastgelegd door de

meetdienst Zierikzee van de Deltadienst van Rijkswaterstaat. Deze dienst heeft tevens stroomsnelheids- en concentratiemetingen uitgevoerd. Met behulp van deze metingen zijn de aanzandingen berekend en vergeleken met de gemeten aanzandingen. In dit verband moet nog worden opgemerkt, dat is aangenomen, dat het uit de verkregen meetresultaten berekende sedimenttransport het evenwichtstransport is. Deze aanname mag, gezien de samenstelling van het sediment, redelijk worden genoemd.

Het onderzoek is uitgevoerd door ir. L.C. van Rijn en ir. N.J. van Wijngaarden, die tevens dit verslag hebben samengesteld.

2 Samenvatting, konklusies en aanbevelingen voor nader onderzoek

2.1 Samenvatting

In een getijgebied met sedimenttransport gedraagt een ontgrondingskuil zich enerzijds als een ontgrondingskuil, die de neiging heeft zich te verdiepen en anderzijds als een sleuf, die de tendens heeft tot aanzanding. Dit is er de oorzaak van, dat de uit:ontgrondingsonderzoek in fysische modellen gevonden ontgrondingen moeten worden gereduceerd.

Met het numeriek model voor niet-permanent suspensietransport [1] kan de aanzanding van de ontgrondingskuil worden berekend. Het model is voor dit doel getoetst aan de aanzanding van ontgrondingskuilen onder laboratoriumomstandigheden en de aanzanding van de proefput Oosterschelde in het prototype.

In het laboratorium is de aanzanding van een ontgrondingskuil voor 2 situaties met verschillende sedimentsamenstelling gemeten en met het numeriek model berekend. De sedimentatie in het diepste deel van de kuil werd goed voorspeld. Op het bovenstrooms talud werd minder aanzanding berekend dan gemeten en op het benedenstrooms talud minder erosie. Hiervoor kunnen de volgende verklaringen worden gegeven:

- 1 Het numeriek model gaat uit van uniform sediment. In het laboratorium is gegradeerd materiaal gebruikt, waarbij de zwaardere deeltjes eerder uitzakken.
- 2 Tijdens het instromen traden bij de proeven in het laboratorium uitzevingsverschijnselen op, waardoor de toplaag van het bed grover werd met als gevolg dat na het aanbrengen van de ontgrondingskuil daar ter plaatse de transportkapaciteit groter was (oorspronkelijk bodemmateriaal).
- 3 In het vertragingsgebied van de kuil treedt vergroting van de turbulente uitwisseling van het sediment op, waardoor het sediment beter in suspensie kan worden gehouden. Het numeriek model houdt met dit effect geen rekening.
- 4 In het versnellingsgebied van de kuil treedt een vergroting van de erosie op als gevolg van een andere inwerking van de stroom op het bed dan in de evenwichtssituatie (geen juiste weergave van de "pick-up" van het bedmateriaal door het numeriek model).
- 5 In het numeriek model wordt de snelheidsverdeling in de ontgrondingskuil benaderd door een logaritmische snelheidsverdeling geldend voor een éénparige stroming. Met name ter plaatse van het steile talud is dit een te grove benadering.
- 6 Numerieke onnauwkeurigheden. De orde van grootte bedraagt 5% van de totale aanzanding of erosie.

De tendenzen van de aanzanding van de proefput Oosterschelde werden door het numeriek model goed weergegeven. Vanwege de geringe aanzanding en de daardoor grote invloed van numerieke onnauwkeurigheden en het belangrijke aandeel van het bodemtransport (vrij grof materiaal) zijn de resultaten van deze toetsing slechts van kwalitatief belang.

2.2 Konklusies

Het gebruik van het numeriek model voor niet-permanent suspensietransport ter bepaling van de reductie van ontgrondingen voor het geval de ontgrondingskuil in een getijgebied vanuit tegengestelde richting wordt aangestroomd, geeft redelijke resultaten. Een verfijning van de berekeningsmethode, waaraan in het kader van het project "aanzanding cunetten Oosterschelde" (R 1267) wordt gewerkt, kan de resultaten nog verbeteren. De methode is in belangrijke mate afhankelijk van de nauwkeurigheid, waarmee het sedimenttransport bekend is.

2.3 Aanbevelingen voor nader onderzoek

Een volgende stap in de bepaling van de reductie van ontgrondingen is het beschrijven van de reducerende werking van het initiëel sedimenttransport op de ontgrondingen. Hiervoor dient het opnameproces van sediment bij de bodem te worden beschreven, alsmede het stroombeeld in de kuil. Onderzocht moet worden of het model van Breusers hierbij als uitgangspunt kan dienen [2].

3 Modelonderzoek; toetsing aanzanding ontgrondingskuilen

3.1 Proefopstelling en meetmethoden

Het modelonderzoek is uitgevoerd in het Laboratorium De Voorst in een goot van 0,5 meter breed, 0,7 meter diep en ca. 30 meter lang en voorzien van een zandbed van ongeveer 0,2 meter dikte. In deze goot kan alleen met buitenwater worden gestroomd. Het debiet wordt geregeld door een cirkelstuw (max. $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$).

De proeven bestonden uit:

- het instromen; dat wil zeggen het bepalen van het sedimenttransport (= voeding) en de evenwichtsligging van het zandbed bij de heersende stromingsomstandigheden
- het meten van stroomparameters (stroomsnelheid, waterdiepte, verhang) in de evenwichtssituatie
- het aanbrengen van een ontgrondingskuil
- het peilen van de bodemligging van de kuil bij het ingestelde sedimenttransport (= voeding)

Afmetingen ontgrondingskuil

De ontgrondingskuil, driehoekig van vorm en bestaande uit een flauw en een steil talud, was zodanig in de goot aangebracht, dat het flauwe talud aan de bovenstroomse zijde lag. De helling van het bovenstroomse talud was 1:40 à 1:50 en die van het benedenstroomse talud 1:4 à 1:7, terwijl in het diepste punt van de kuil de diepte ca 0,18 m bedroeg (zie ook de figuren 2 en 3).

Verhang

Het verhang, gemeten met behulp van 2 pitot-buizen, is gedefiniëerd als het verval (van de waterspiegel) over de meetsektie. De lengte van de meetsektie bedroeg ca 20 meter.

Waterdiepte

De gemiddelde waterdiepte is gedefiniëerd als het verschil tussen de gemiddelde waterspiegel en de gemiddelde bodemligging over de meetsektie. Voor het peilen van de bodemligging werd een automatisch profielvolgsysteem toegepast.

Stroomsnelheid

De stroomsnelheid is gedefiniëerd als:

$$\bar{u} = \frac{Q}{b \cdot h},$$

waarin:

$\bar{u}$ = gemiddelde stroomsnelheid in m/s

b = breedte van de goot in m

h = gemiddelde waterdiepte

Q = debiet in m³/s

Het debiet werd geregeld door een cirkelstuw (nauwkeurigheid ca 3%).

Sedimentbemonstering

De bemonstering geschiedde volgens het principe van afzuigen van water en sediment. In ieder meetpunt van de vertikaal werd steeds een vaste hoeveelheid water afgezogen. Hieruit zijn de concentraties bepaald als het quotiënt van het (gevangen) sedimentgewicht en het gewicht van het afgetapte watervolume. Per vertikaal werd in 10 à 15 punten gemeten met dichtbij de bodem een relatief kleine tussenafstand.

Door het stromen met buitenwater en het ontbreken van een zandvang was het niet mogelijk om tijdens de proeven konstante omstandigheden te handhaven wat betreft watertemperatuur en sedimentafmetingen.

De invloed van de gootwanden is in rekening gebracht met behulp van de methode Vanoni-Brooks [5].

3.2 Sedimenttransport

3.2.1 Proef T1

Het gebruikte voedingmateriaal bestond uit wadzand met een D_{50} van 150 μm en een gradatiecoëfficiënt (σ_g) van 1,43.

Voor het berekenen van bodemprofielen met het numeriek model voor suspensie-transport (zie [1]) moet er een relatie tussen het sedimenttransport in de evenwichtssituatie en de stromingsomstandigheden bekend zijn. Een dergelijke relatie is op experimentele wijze bepaald door in de goot bij verschillende stromingsomstandigheden het evenwichtstransport vast te stellen (T_o -A tot en met F; zie tabel 1). Eenvoudigheidshalve is verondersteld, dat het sedimenttransport (S_g)

evenredig is met een konstante macht van de stroomsnelheid ($\bar{u}$).

Voor bodemmateriaal met een korreldiameter van 160-200 μm en een watertemperatuur van 17-20°C leverde dit de volgende relatie op (zie ook figuur 1):

$$S_g = 0,55 (\bar{u})^{5,5} \quad \text{kg/s} \quad (2)$$

Tijdens de eigenlijke aanzandingsproef bedroeg het (evenwichts)transport bovenstrooms van de sleuf 10 gram per seconde bij een watertemperatuur van ca 16°C. De stroomsnelheid was 0,507 m/s, de waterdiepte 0,39 m.

De representatieve korreldiameter van het materiaal in suspensie, verkregen uit de gemeten verdeling van de korrelgrootte over de vertikaal, was 120 μm . De hiermee overeenstemmende bezinksnelheid bedroeg 0,0115 m/s bij een watertemperatuur van 16°C.

Door uitzeving van de toplaag van het zandbed tijdens het instromen, was de D_{50} van het bedmateriaal ca 200 μm geworden. Onder de toplaag had het bed dezelfde samenstelling als het voedingmateriaal ($\approx 150 \mu\text{m}$). Voor het referentieniveau, waarop de bodemconcentraties zijn gedefiniëerd, is de halve ribbelhoogte ($\approx 0,01 \text{ m}$) genomen. De equivalente zandruwheid (k) - berekend uit het verhang, de stroomsnelheid en de hydraulische straal tijdens de evenwichtstoestand met een transport van 10 gr/s (T4) - bedroeg ca 0,028 m.

3.2.2 Proef T2

Bij deze proef bestond het voedingmateriaal uit wadzand met een D_{50} van 127 μm en een gradatiecoëfficiënt van 1,3.

Het bedmateriaal had in de evenwichtssituatie een D_{50} van 170 μm en een gradatiecoëfficiënt van 1,4.

Het evenwichtstransport bedroeg 20,5 gram per seconde bij een temperatuur van 16°C. De stroomsnelheid was 0,503 m/s, de waterdiepte 0,40 m.

Aangezien er bij deze proef geen concentratiemetingen zijn uitgevoerd, kon de representatieve korreldiameter van het materiaal in suspensie niet uit de vertikale korrelverdeling van het zwevend sediment worden bepaald. Analyse van de meetresultaten van proef T1 wees evenwel uit, dat de D_{15} van het bedmateriaal een goede benadering is van de representatieve korreldiameter van het materiaal in suspensie. Dit gaf voor proef T2 een waarde van ca 110 μm (en een bezinksnelheid van 0,01 m/s).

Daar vanwege het andere voedingsmateriaal de voor proef T1 gevonden transportstroomsnelheidsrelatie niet kon worden gebruikt en het opnieuw experimenteel

bepalen van deze relatie te veel tijd zou vergen, is voor de berekening van de transportkapaciteit in de evenwichtssituatie de transportformule van Engelund-Hansen gebruikt, waarbij de door Engelund-Hansen gegeven koëfficiënt van 0,05 aangepast is om het ingestelde evenwichtstransport bovenstrooms van de kuil juist te kunnen voorspellen. De gebruikte transportformule luidt:

$$S_g = \frac{0,035 \rho_s (\bar{u})^5}{D_{50}(\text{bed}) \cdot \Delta^2 g^{\frac{1}{2}} C^3} \quad \text{kg/ms} \quad (3)$$

Ook bij deze proef is het referentieniveau bij de bodem (z_a) gelijkgesteld aan de halve ribbelhoogte ($\approx 0,015$ m). De equivalente ruwheid (k) bedroeg 0,026 m.

3.3 Toetsingsberekening

3.3.1 Overzicht van stroomgegevens en numerieke parameters

		proef 1	proef 2	dim.
voeding: S_g ($x=0$)	=	10	20,5	gr/s
D_{50} (voeding)	=	150	127	μm
D_r (suspensiemateriaal)	=	120	110	μm
D_{50} (bed)	=	200	170	μm
$\bar{u}$ ($x=0$)	=	0,507	0,503	m/s
h ($x=0$)	=	0,39	0,40	m
b	=	0,50	0,50	m
k (bed)	=	0,028	0,026	m
z_a	=	0,01	0,015	m
w_s	=	0,0115	0,01	m/s
temperatuur	=	16	16	$^{\circ}\text{C}$
Δx	=	0,25	0,25	m
Δz	=	variabel	variabel	m
Δt	=	900	900	s

3.3.2 Resultaten

Proef T1

De gemeten en berekende bodemliggingen, weergegeven in figuur 2, zijn vergeleken op $t = 9$ uur en $t = 18$ uur. De sedimentatie in het diepste gedeelte van de kuil wordt op beide tijdstippen opmerkelijke goed voorspeld. Op het bovenstroomse talud van de kuil blijft de voorspelde sedimentatie enigszins achter bij de gemeten waarden. Dit is in nog sterkere mate het geval voor de erosie ter plaatse van het benedenstroomse talud van de kuil. Daar treden aanzienlijke afwijkingen op.

Proef T2

Uit figuur 3 komt een vergelijkbaar beeld naar voren. De sedimentatie in het diepste gedeelte van de kuil wordt goed benaderd door het numerieke model. De voorspelde sedimentatie op het bovenstroomse talud en de erosie op het benedenstroomse talud blijven duidelijk achter bij de gemeten waarden.

Mogelijke verklaringen voor de gekonstateerde afwijkingen zijn:

- De niet-uniformiteit van het sediment

Het numerieke model is in principe opgezet voor uniform materiaal. Dit betekent, dat het in suspensie getransporteerde materiaal moet worden weergegeven door een representatieve korreldiameter. Het niet-uniform zijn van het sediment heeft vooral bij proef T1 bijgedragen tot de afwijkingen tussen de gemeten en voorspelde bodemliggingen. Dit kan worden afgeleid uit het steiler worden van het bovenstroomse talud van de ontgrondingskuil, hetgeen duidt op het relatief snel uitzakken van het zwaardere materiaal onderin de vertikaal. Ook het aandeel van het bodemtransport in het totale transport zal bij proef T1 relatief groot zijn geweest.

- Uitzevingsverschijnselen

Tijdens het instromen traden in het model uitzevingsverschijnselen op, waardoor de top laag van het bed grover werd. Na het instromen werd de ontgrondingskuil aangebracht, zodat daar ter plaatse het oorspronkelijke bodemmateriaal aan de oppervlakte kwam. De transportcapaciteit was daarom groter, hetgeen heeft bijgedragen tot meer erosie op het benedenstroomse talud dan was berekend.

- Vergroting van de turbulente uitwisseling in het verdragingsgebied van de kuil

Door vergroting van de turbulente uitwisseling in het verdragingsgebied van

de kuil kan het sediment beter in suspensie worden gehouden. Het numerieke model houdt met dit effect geen rekening, hetgeen heeft bijgedragen tot minder aanzanding van het bovenstroomse talud dan was berekend.

- Vergroting van de "pick-up" in het versnellingsgebied van de kuil

Als gevolg van een andere werking van de stroom op het bed dan in de evenwichtssituatie treedt in het versnellingsgebied van de kuil ter plaatse van het benedenstroomse talud meer erosie op dan wordt berekend. De "pick-up" van het bedmateriaal wordt hier niet goed door het numerieke model weergegeven.

- Het benaderen van het snelheidsveld door een logaritmische verdeling geldend voor een éénparige stroming

Door het benaderen van het snelheidsveld door een logaritmische verdeling worden de stroomsnelheden ter plaatse van het benedenstroomse steile talud van de kuil door het numerieke model niet goed weergegeven, waardoor de gemeten erosie groter is dan de berekende.

- Numerieke onnauwkeurigheden

Met name het berekenen van de sedimentatie of erosie uit de continuïteitsvergelijking van het sedimenttransport introduceert aanzienlijke onnauwkeurigheden ter plaatse van scherpe overgangen (diepste gedeelte van de kuil en het eind van het benedenstroomse steile talud).

Voor een uitgebreide behandeling van genoemde aspecten wordt verwezen naar [1].

4 Prototype-onderzoek; toetsing aanzanding proefput Oosterschelde

4.1 Algemeen

De bouw van de stormvloedkering in de mond van de Oosterschelde brengt met zich mee, dat er in de as van het tracé een aantal inbaggeringen moeten worden gemaakt. Om een eerste indruk te krijgen van de snelheid waarmee deze inbaggeringen zullen gaan aanzanden, werd besloten tot het baggeren van een proefput aan de noordzijde van de Roggenplaat (zie figuur 4). Hierbij werd gebruik gemaakt van de noodzaak tot zandwinning voor de aanleg van de damaanzet Schouwen. De juiste plaats van de put is bepaald aan de hand van stroombeeldfoto's, gemaakt in het getijmodel van de Oosterschelde (M 1000) in het Laboratorium De Voorst. Uitgangspunt hierbij was een zo recht mogelijke aanstroming van de put tijdens de eb- en vloedstromen.

De diepte van de put was ca 5 à 8 meter bij een gemiddelde waterdiepte van ca 15 à 10 meter. De totale lengte in de stroomrichting was ca 350 meter, terwijl de breedte ca 250 meter bedroeg.

De baggerwerkzaamheden vonden plaats in de maanden juni en juli van het jaar 1975. Na oplevering van de put werden regelmatig bodempeilingen van het betreffende gebied uitgevoerd. Eénmalig (28 en 29 augustus 1975) vond op de randen van raai I en II (zie figuur 4) een stroommeting en een waterstandsmeting plaats. Tevens werden er op 0,4 m en 1,0 m boven het bed transportmetingen met de Delftse fles verricht.

4.2 Getij-omstandigheden

Getijmetingen op 28 en 29 augustus 1975 ter plaatse van de west- en oostrand in raai I en II hebben bij de voorspellingsberekeningen als randvoorwaarden gediend. Het vertikaal getij is weergegeven in figuur 5. Uitgaande van het gemiddelde getijverschil te Burghsluis van 2,76 m bedroeg de getijcoëfficiënt op 28 augustus ca 0,95 en op 29 augustus ca 0,90.

De gemeten stroomsnelheden op beide randen in raai I zijn vermeld op figuur 6. Hierop zijn ook de debieten per eenheid van breedte, berekend uit stroomsnelheden en waterdiepten, ter plaatse van de randen aangegeven. Uit het verschil in debiet blijkt, dat de stroming in raai I een enigszins drie-dimensionaal karakter moet hebben gehad. Stroombeeldonderzoek in het getijmodel M 1000 bij een ongestoorde toestand (proefput niet aanwezig) bevestigt dit enigszins (zie figuur 8). Als

oorzaak voor de drie-dimensionale stroming kan de ligging van raai I, dichtbij de Roggenplaat, worden aangemerkt.

De stroming in raai II kan als twee-dimensionaal worden opgevat, gezien de geringe verschillen in debiet op de west- en oostrand van deze raai (zie figuur 7). Opgemerkt wordt, dat vooral bij vloed de proefput in beide raaien enigszins scheef wordt aangestroomd (zie figuur 8).

4.3 Sedimenttransport

4.3.1 Relatie sedimenttransport-stroomsnelheid

Het schematiseren van het getij tot een aantal representatieve quasi-permanente stromingstoestanden, waarbij tevens het sedimenttransport goed wordt weergegeven, vereist gedetailleerde kennis van de relatie tussen het sedimenttransport en de stroomsnelheid.

Dit inzicht is verkregen uit stroomsnelheids- en concentratiemetingen op 28 en 29 augustus 1975 in de raaien I en II westelijk en oostelijk van de proefput met de vaartuigen Orisant en Prof. Lorentz.

De concentraties zijn gedurende een eb- en vloedperiode gemeten met de Delftse fles, opgesteld in een statief op 0,4 m en 1,0 m boven de bodem. Naast de Delftse fles is tevens de stroomsnelheid gemeten met een Ott-molen. Bovendien is de stroomsnelheidsvertikaal daar ter plaatse gemeten, waaruit de gemiddelde stroomsnelheid kan worden bepaald.

Het gevangen sediment wordt uit de Delftse fles verwijderd en in een maatglas gedeponeerd, waarna - als het sediment is bezonken - de hoeveelheid (in cm^3) kan worden afgelezen. Omdat de stroomsnelheid ter plaatse van de Delftse fles en de duur van meten bekend zijn, kan het totale volume aan water, dat tijdens de meting door de Delftse fles is gestroomd, worden bepaald (in m^3). Op deze wijze wordt de concentratie verkregen, uitgedrukt in cm^3/m^3 . Dit is dus een volumekonzentratie, inklusief het poriënvolume tussen de sedimentdeeltjes.

In een getijstroom is het mogelijk, dat er een faseverschuiving optreedt tussen de maximum concentratie en de maximum stroomsnelheid. Voor materiaal met een diameter groter dan $100 \mu\text{m}$ in combinatie met een waterdiepte kleiner dan 10 m kan dit effect worden verwaarloosd [4]. Uit de gemeten concentraties is gebleken, dat bij eb nog wel van een faseverschuiving kan worden gesproken. Bij vloed is dit niet het geval. Voor het bepalen van de relatie sedimenttransport-stroomsnelheid is derhalve alleen gebruik gemaakt van de vloed-waarnemingen.

De concentraties, die benedenstrooms van de proefput zijn gemeten, kunnen beïnvloed zijn door de proefput. Van de meetresultaten kunnen daarom alleen de metingen van het vaartuig Orisant (bij vloed) worden gebruikt.

Het sedimenttransport is berekend als het produkt van de stroomsnelheid en de konzentratie, geïntegreerd over de waterdiepte. De konzentratie is verdeeld volgens de verdeling van Rouse:

$$c_z = c_a \left[\left(\frac{h-z}{z} \right) \cdot \left(\frac{z_a}{h-z_a} \right) \right]^Z \quad (4)$$

met:

$$Z = \frac{w_s}{\kappa u_*} \quad (5)$$

waarin:

- z_a = hoogte boven de bodem in m
- c_a = konzentratie op de hoogte z_a boven de bodem in ppm
- c_z = konzentratie op de hoogte z boven de bodem in ppm
- h = waterdiepte in m
- u_* = schuifspanningssnelheid in m/s
- w_s = bezinksnelheid van het sediment in m/s
- z = vertikale plaatskoördinaat
- κ = konstante van Von Karman = 0,385

De konzentratieverdeling volgens Rouse kan hier worden toegepast, omdat de konzentraties bij de bodem niet te groot zijn (maximaal $100 \text{ cm}^3/\text{m}^3$). In zo'n geval mag de term $(1-c)$ in de diffusievergelijking worden verwaarloosd en zijn κ en w geen funkties meer van de konzentratie.

Voor de verdeling van de stroomsnelheid is de logaritmische verdeling aangehouden:

$$u_z = \frac{u_*}{\kappa} \ln \frac{33z}{k}, \quad (6)$$

waarin:

- u_z = stroomsnelheid op de hoogte z boven de bodem in m/s
- k = equivalente ruwheid volgens Nikuradse in m

Om de 20 minuten is het sedimenttransport aldus berekend en per tijdstip tweemaal: éénmaal met c_a op $a = 0,4 \text{ m}$ en éénmaal met c_a op $a = 1,0 \text{ m}$ boven de

bodem. Per tijdstip worden dus 2 waarden voor het sedimenttransport gevonden, waarvan het gemiddelde is bepaald. Het is gebleken, dat het op deze wijze berekende sedimenttransport gevoelig is voor de bij de berekening aangehouden verdeling van de stroomsnelheid. Het berekende sedimenttransport en de bijbehorende stroomsnelheid zijn op dubbel-log papier uitgezet (figuur 9). Dit levert de volgende relatie sedimenttransport-stroomsnelheid op:

$$S_g = 0,12 (\bar{u})^{6,2} \quad \text{kg/ms} \quad (7)$$

waarin:

S_g = sedimenttransport in kg/ms

$\bar{u}$ = gemiddelde stroomsnelheid in m/s

In dit verband moet nog worden opgemerkt, dat er van uitgegaan is, dat het suspensietransport overheerst. Gezien het feit, dat het sediment vrij grof is (zie paragraaf 4.3.3), moet met de mogelijkheid rekening worden gehouden, dat het bodemtransport een belangrijk aandeel heeft in het totale transport.

4.3.2 Bodemruwheid

Voor de berekening van de aanzanding moet de bodemruwheid, uitgedrukt in de k-waarden volgens Nikuradse, bekend zijn. De k-waarde kan volgens de methode van Swart [3] afgeleid worden uit de ribbelhoogte en ribbelsteilheid volgens de formule:

$$k = 25 \cdot r \cdot s \quad (8)$$

met:

r = ribbelhoogte in m

s = ribbelsteilheid: $\frac{r}{l}$

l = ribbellengte in m

De ribbelhoogte en ribbellengte kunnen worden afgeleid uit peilingen met de Wijker Rib, waarvan de resultaten zijn gegeven op de tekeningen van R.W.S. 75.9.0056, 75.9.0057 en 75.9.0058. Het blijkt, dat in de Hammen (de geul, waarvan de proefput grenst) een gemiddelde ribbelhoogte optreedt van $r = 0,3$ m. De gemiddelde ribbellengte bedraagt $l = 10$ m.

De bodemruwheid wordt dan:

$$k = 25 \cdot 0,3 \cdot \frac{0,3}{10} = 0,225 \text{ m}$$

Voor de toetsingsberekening is deze waarde aangehouden.

4.3.3 Sedimentkarakteristieken

Als representatieve korreldiameter van het bedmateriaal is de D_{50} van een genomen bodemonster aangehouden. Deze bedroeg ca 275 μm in de omgeving van de proefput. De representatieve korreldiameter van het materiaal in suspensie is bepaald aan de hand van de transportmetingen op 0,4 meter boven het bed, uitgevoerd met een Delftse fles. Bij een stroomsnelheid kleiner dan 0,5 m/s was de D_{50} van het gevangen sediment ca 150 μm , terwijl bij stroomsnelheden groter dan 0,5 m/s de D_{50} ca 175 μm bedroeg. Deze laatste waarde is maatgevend verondersteld. Bij een temperatuur van 10°C (jaargemiddelde) resulteert dit in een representatieve bezinksnelheid van ca 0,018 m/s.

4.4 Morfologische aspecten

In het mondingsgebied van de Oosterschelde is een natuurlijk proces van geulverleggingen aan de gang, waarbij met name de Hammen en de Schaar van Roggenplaat de tendens vertonen zich in zuidelijke richting te willen verplaatsen. Dit kan worden aangetoond met behulp van twee dwarsdoorsneden, 200 meter westelijk en oostelijk van de as van de proefput (zie figuur 4). Deze dwarsdoorsneden zijn weergegeven in figuur 10 en 11. Vooral ter plaatse van raai I is een duidelijke wijziging in de bodemligging waar te nemen. Hierbij moet worden opgemerkt, dat de erosie ter plaatse van de randen van de put voor een deel wordt veroorzaakt door de aanwezigheid van de put en met name door het versnellen van de stroom boven de taluds van de put. Dit laatstgenoemde effect is evenwel van ondergeschikt belang gezien de geringe erosie in raai II (zie figuur 12), waar nauwelijks natuurlijke morfologische veranderingen zijn waar te nemen.

4.5 Toetsingsberekening

Gezien het drie-dimensionale karakter van de stroming langs de Roggenplaat in combinatie met de morfologische veranderingen die zich daar voltrekken, is een toetsingsberekening van de sedimentatie in raai I, met zijn ligging dichtbij de

Roggenplaat, niet zinvol. Daar drie-dimensionale effecten in raai II minder duidelijk aanwezig zijn, is een toetsingsberekening van deze raai wel mogelijk, hoewel de diepte van de sleuf in deze raai gering is.

4.5.1 Invoergegevens raai II

Water

Uit het horizontale getij, gemeten op 29 augustus ter plaatse van de randen van raai II, is een gemiddeld getij samengesteld door de gemeten stroomsnelheden met de faktor 1,11 (reciproke-waarde van de getijkoëfficiënten) te vermenigvuldigen. Om de relatief grotere bijdrage van de stroomsnelheden tijdens springtij, alsmede ongunstige weersinvloeden te verdiskontereren, zijn de stroomsnelheden van het gemiddeld getij nog eens verhoogd met 5% (zie [4]). Het aldus verkregen getij kan als maatgevend voor het sedimenttransport worden beschouwd en is geschematiseerd tot 4 quasi-permanente stromingstoestanden (zie figuur 13). Bij het bepalen van de representatieve stroomsnelheden is het volledige sedimenttransport over een cyclus in rekening gebracht. De waterdiepten volgen uit het verticale getij op 29 augustus 1975.

eb		vloed	
$\bar{u}(o) = 0,88 \text{ m/s}$	$\bar{u}(o) = 0,65 \text{ m/s}$	$\bar{u}(o) = 0,9 \text{ m/s}$	$\bar{u}(o) = 0,95 \text{ m/s}$
$h(o) = 16,55 \text{ m}$	$h(o) = 15,25 \text{ m}$	$h(o) = 16,0 \text{ m}$	$h(o) = 17,2 \text{ m}$

Sediment

Transportformule:

$$S_g = 0,12 (\bar{u})^{6,2} \quad \text{kg/ms}$$

(zie paragraaf 4.3.1)

D_r (zwevend sediment)	w_s	ρ_s	k
175 μm	0,018 m/s (bij $T=10^\circ\text{C}$)	2650 kg/m ³	0,225 m

Numerieke parameter

Het referentieniveau (z_a), waarop de bodemconcentraties zijn gedefiniëerd, is gelijk gesteld aan de halve duinhoogte.

Δx	Δz	Δt	z_a
5 m	variabel (11 rekenpunten in de vertikaal)	7200 s	0,11 m

4.5.2 Resultaten

De gemeten en berekende bodemligging in raai II zijn weergegeven in figuur 14. Vergelijking van bodemprofielen op overeenkomstige tijdstippen toont aan, dat de tendenzen in het prototype ook door het numerieke model worden voorspeld. Met name het overheersende karakter van de vloedbeweging komt tot uiting. Opgemerkt wordt, dat het belang van deze toetsing meer in het kwalitatieve dan in het kwantitatieve vlak ligt. Oorzaak hiervan is de geringe omvang van de bodemveranderingen, waardoor de numerieke onnauwkeurigheden in de bodemliggingsberekening zich relatief sterk doen gelden.

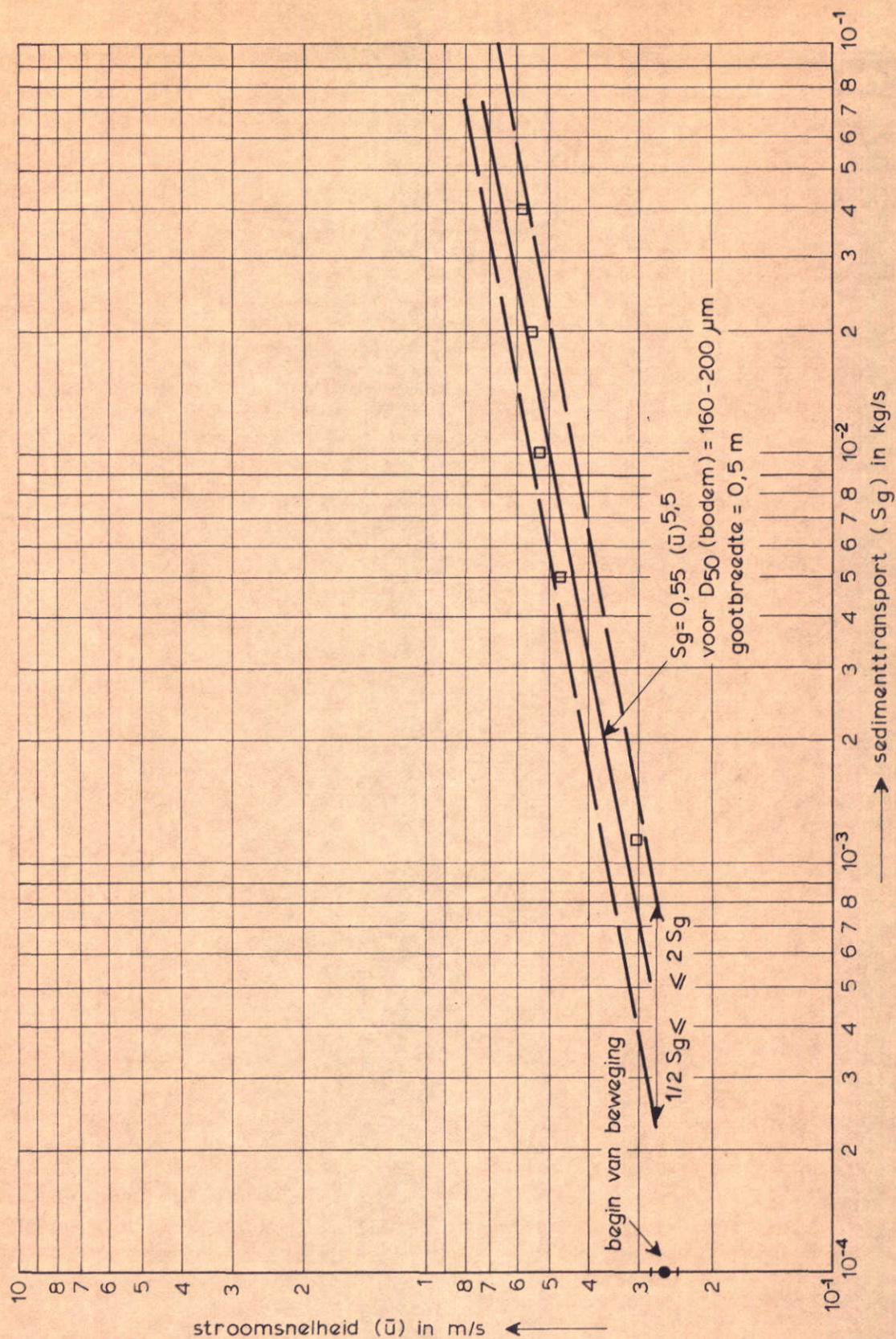
Ook de verwaarlozing van het bodemtransport brengt het belang van de toetsing meer in het kwalitatieve vlak. Gezien de grootte van het bodemmateriaal (275 μm) in de omgeving van de proefput zou het bodemtransport wel eens een belangrijke bijdrage kunnen geven in de omvang van de sedimentatie. Gegevens hieromtrent ontbreken echter.

LITERATUUR

- 1 Aanzanding van tunnelsleuven,
Numeriek model voor niet-permanent suspensietransport,
Waterloopkundig Laboratorium, verslag R 975-II, augustus 1977
- 2 BREUSERS, H.N.C.,
Computation of velocity in scour holes,
Delft Hydraulics Laboratory, Publication no. 152, November 1975
- 3 Coastal sediment transport,
Computation of longshore transport,
Delft Hydraulics Laboratory, verslag R 968-I, September 1976
- 4 Sedimenttransport in estuaria,
Waterloopkundig Laboratorium, Nota R 1267-I, oktober 1977
- 5 VANONI, V.A. en BROOKS, N.H.,
Laboratory study of the roughness and suspended load of alluvial streams,
Sedimentation laboratory no. E-68, California, Institute of Technology,
Pasadena, California, December 1957
- 6 Zandtransport in suspensie,
Berekening zandtransport in suspensie bij een permanente en eenparige stroming,
Waterloopkundig Laboratorium, verslag R 783-II

Proef	Verhang	Waterdiepte (m)	Afvoer (l/s)	Stroom- snelheid (m/s)	Bedding- ruwheid ($\text{m}^{1/2}/\text{s}$)	Voeding (gr/s)	D ₅₀ (μm)		Tempe- ratuur (°C)	Beddingvormen			
							Voeding	Bed		Lengte (m)	σ (m)	Hoogte (m)	σ (m)
T _O -A	1,3 10 ⁻⁴	0,30	39,2	0,261	55,5	-	-	150	17	VLAK			
T _O -B	3,7 10 ⁻⁴	0,30	45,5	0,302	32,9	1,11	160	163	17	RIBBELS 0,188 0,086 0,0204 0,0102			
T _O -C	6,6 10 ⁻⁴	0,415	95,9	0,463	33,5	5	160	190	18	RIBBELS 0,141 0,055 0,0168 0,0083			
T _O -D	7,0 10 ⁻⁴	0,39	99,9	0,507	36,9	10	150	207	17,5	RIBBELS 0,136 0,046 0,0145 0,0087			
T _O -E	7,8 10 ⁻⁴	0,415	111,8	0,539	36,4	20	150	180	17,5	RIBBELS 0,16 0,067 0,018 0,0092			
T _O -F	7,8 10 ⁻⁴	0,414	119,4	0,577	39,6	40	150	214	20	DUINEN 1,98 0,66 0,10 0,029			

Tabel 1 Resultaten proeven ter bepaling van transport-stroomsnelheidsrelatie van het zandgootje voor proef T1

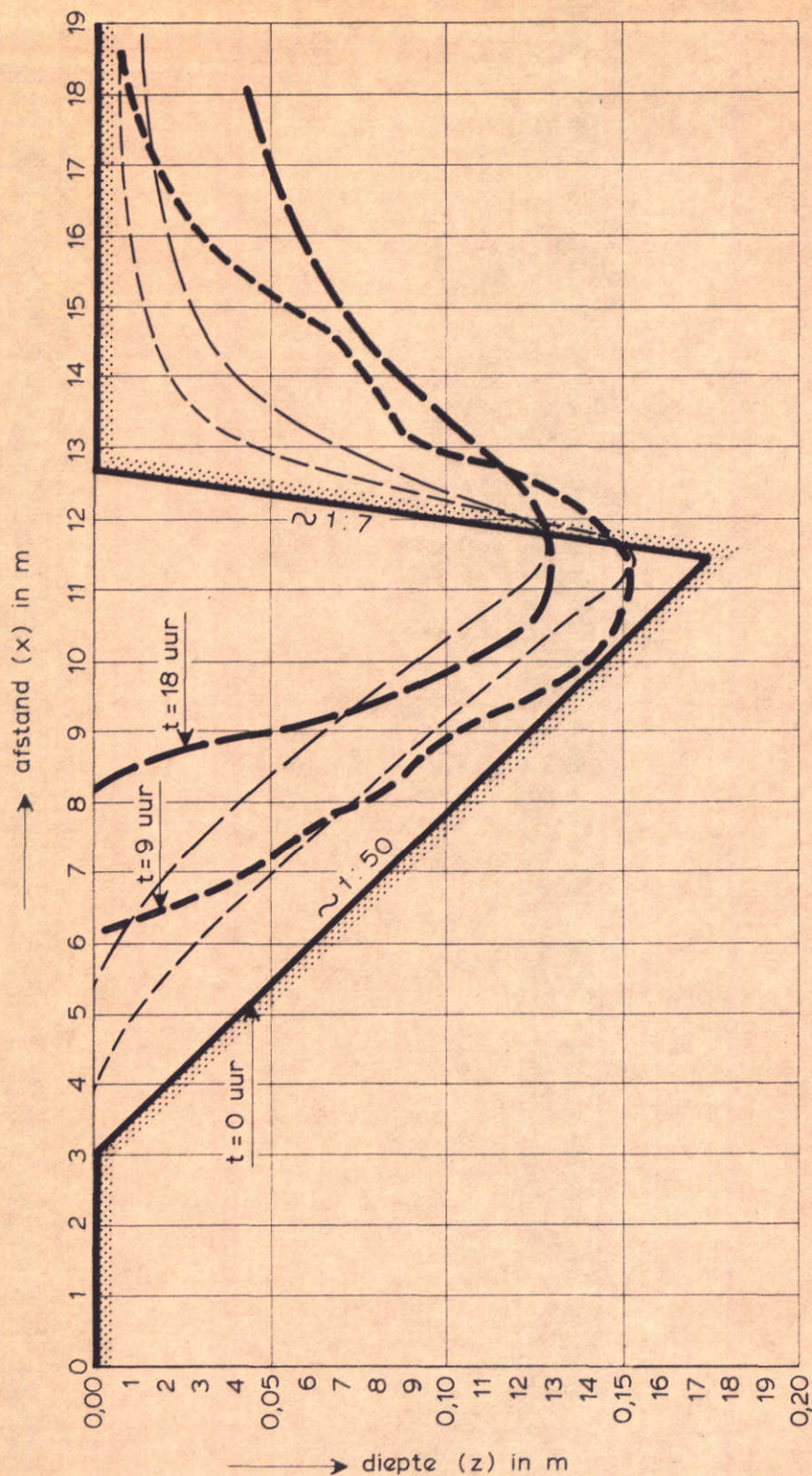


TRANSPORT - STROOMSNELHEIDSRELATIE
VOOR PROEF T1

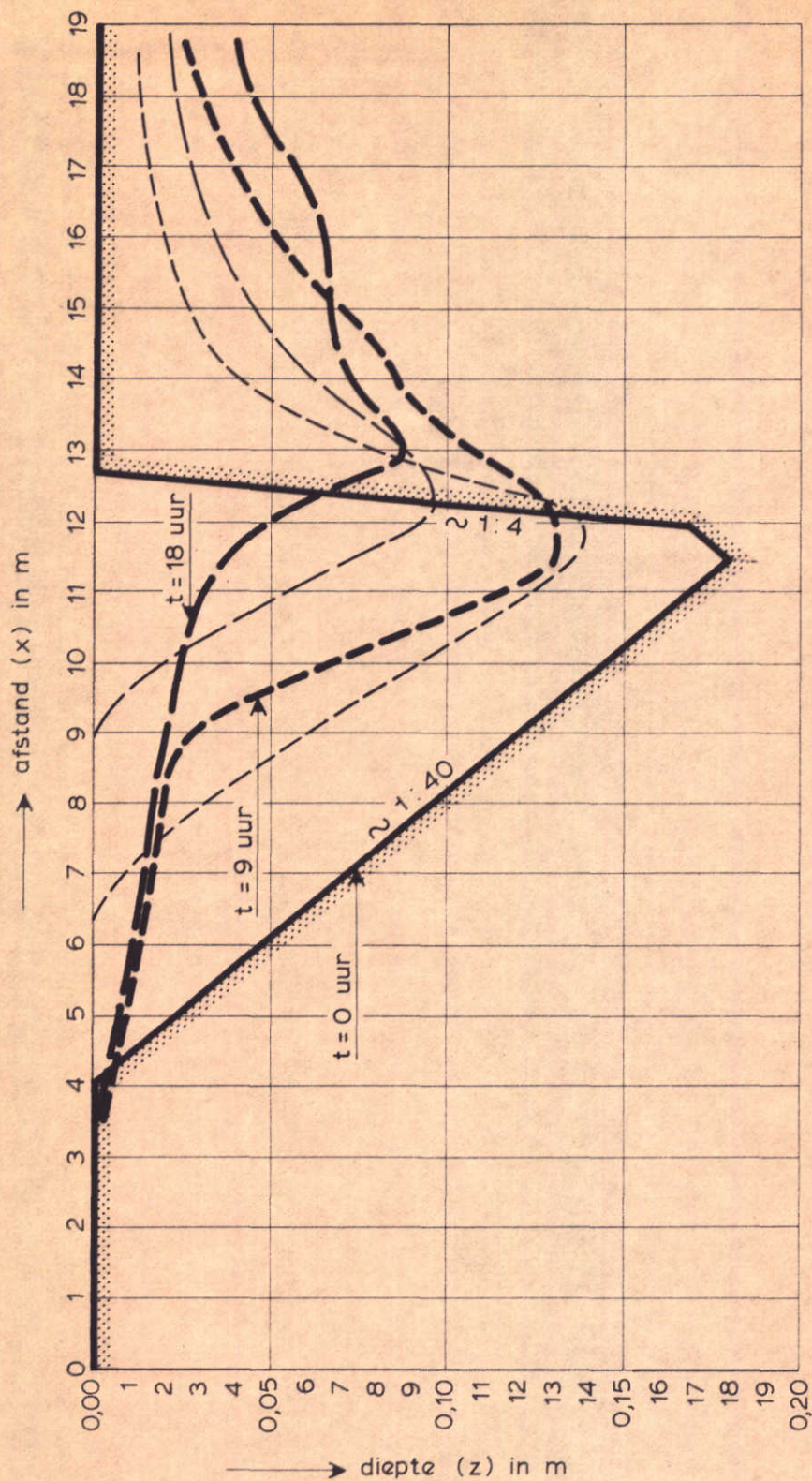
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1360

FIG. 1



voeding: $S_g(x=0) = 10 \text{ gr/s}$
 $\bar{u}(x=0) = 0,507 \text{ m/s}$
 $h(x=0) = 0,39 \text{ m}$
 $T = 16^\circ \text{C}$
 $b = 0,5 \text{ m}$
 $D_{50}(\text{bed}) = 200 \mu\text{m}$
 $D_r(\text{suspensie}) = 120 \mu\text{m}$



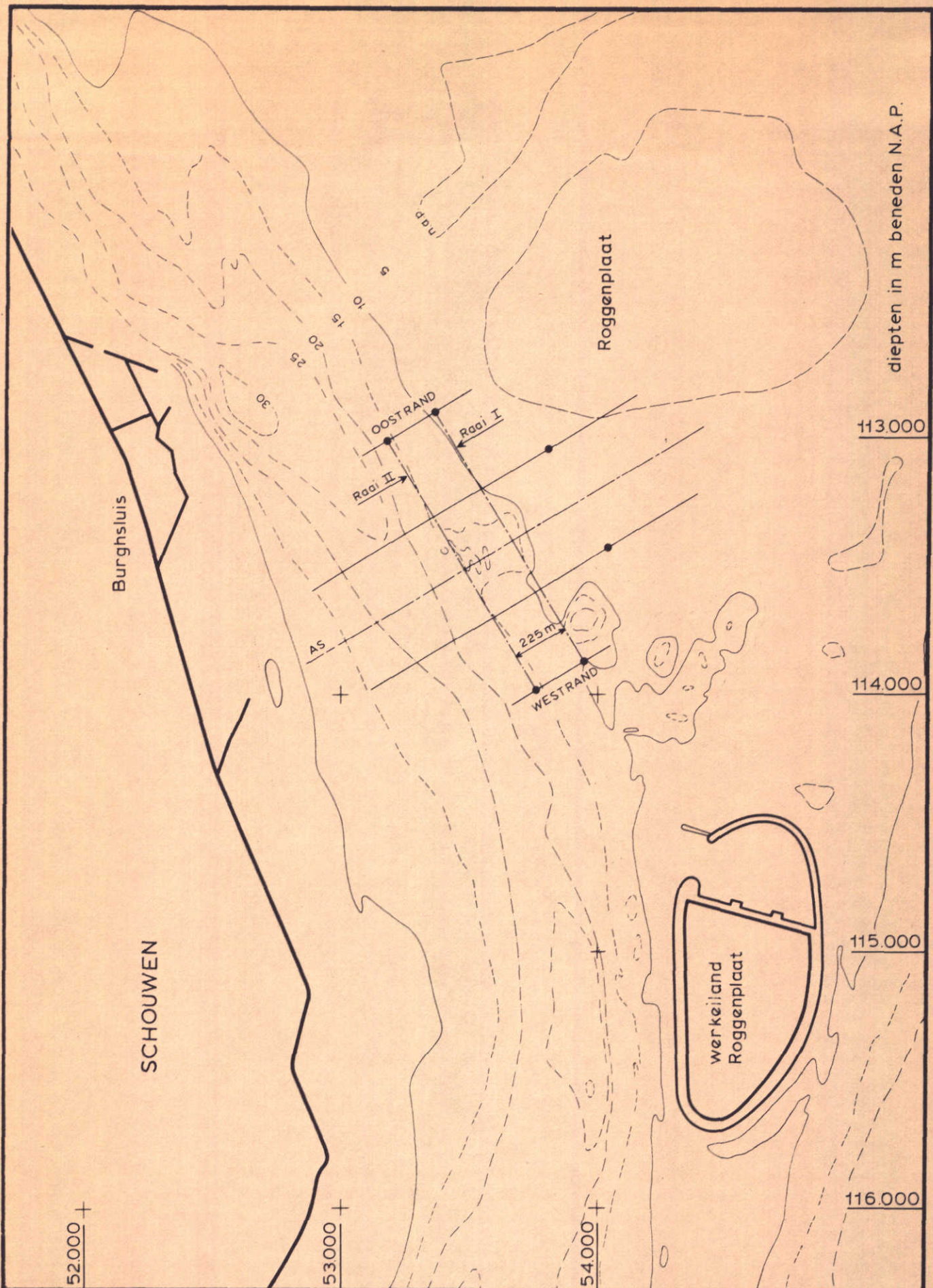
BODEMLIGGING VAN DE ONTGRONDINGSKUIL

PROEF T 2

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1360

FIG. 3



diepten in m beneden N.A.P.

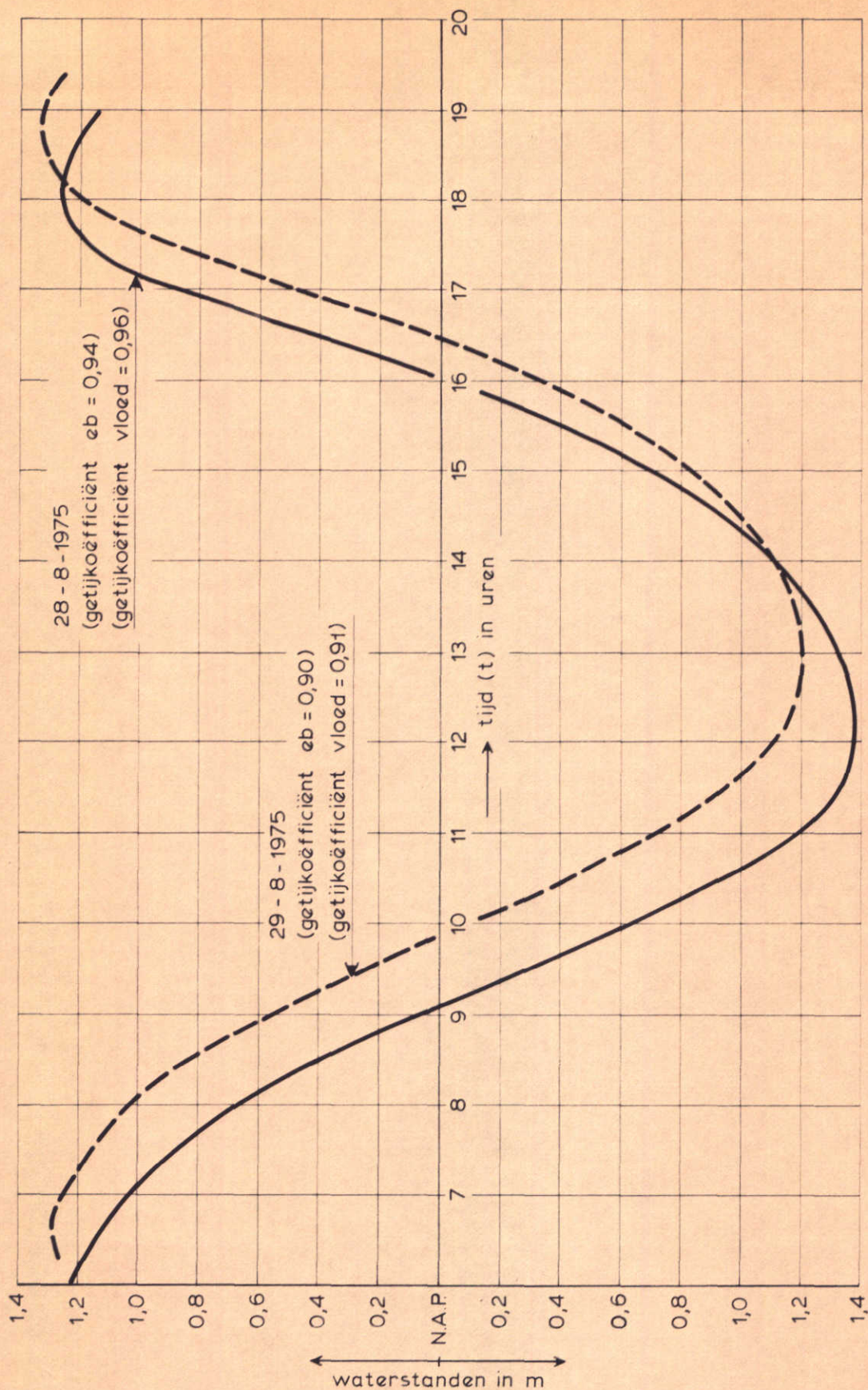
SITUATIE PROEFPUT OOSTERSCHELDE

schaal 1 : 20.000

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1360

FIG. 4

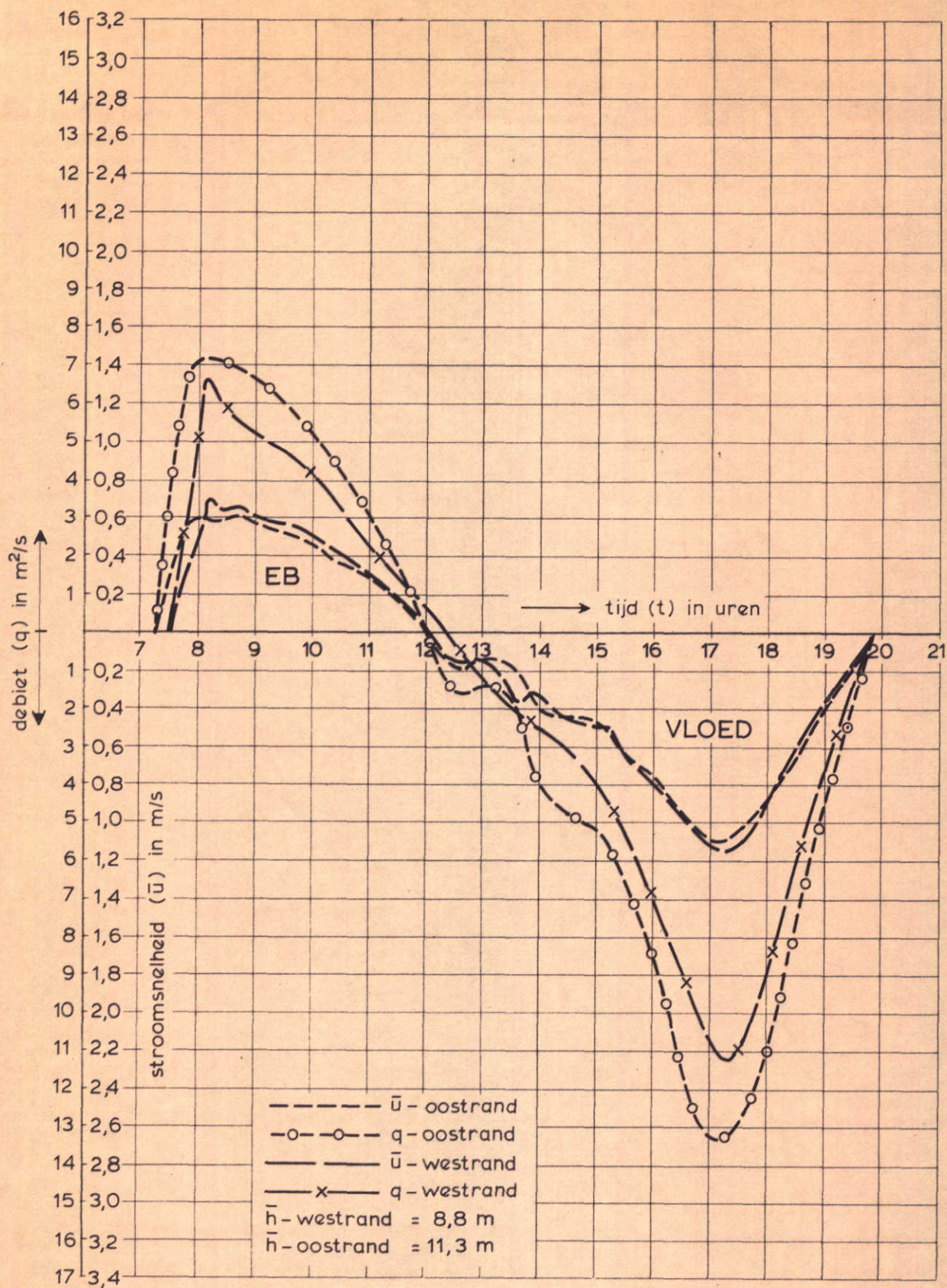


VERTIKAAL GETIJ WERKEILAND ROGGENPLAAT
OP 28 EN 29 AUGUSTUS 1975

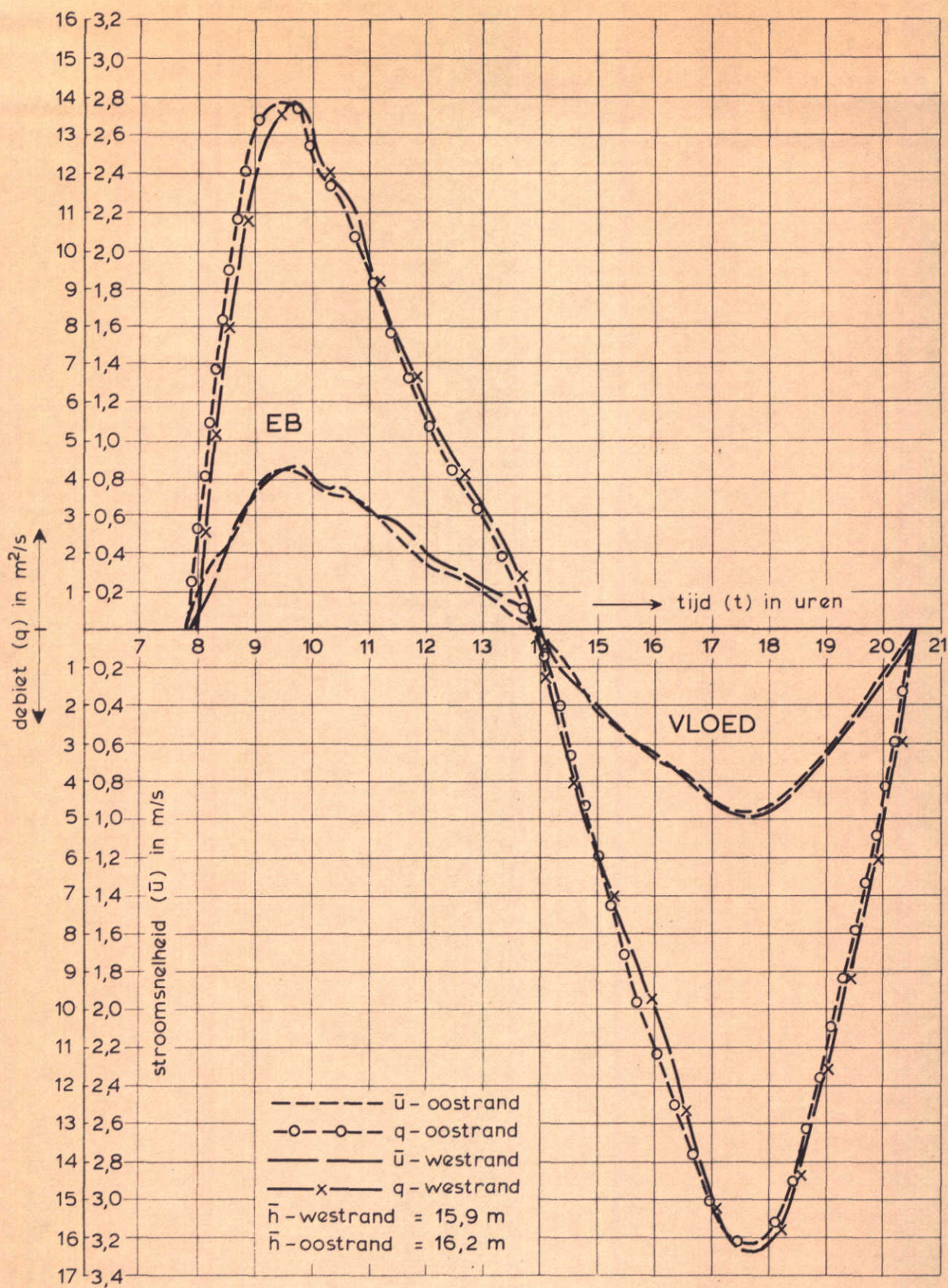
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1360

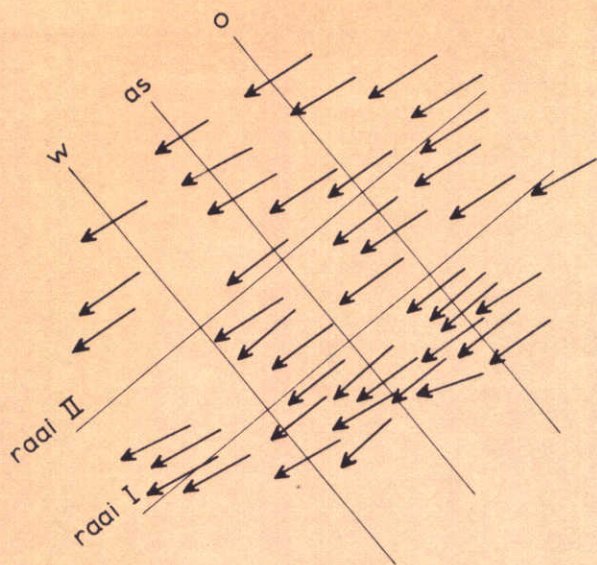
FIG. 5



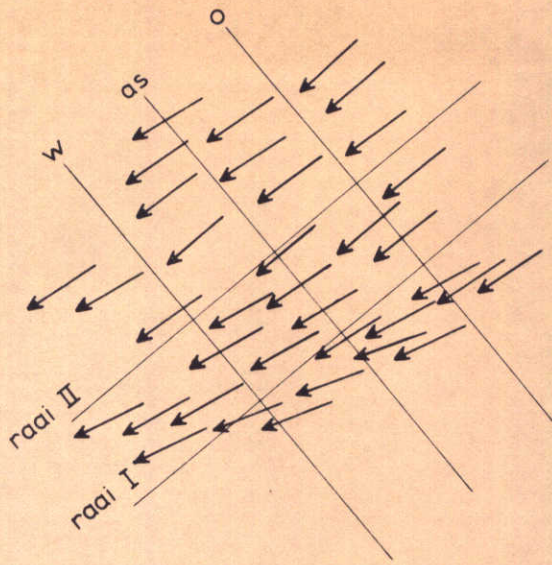
STROOMSNELHEDEN EN DEBIETEN IN RAAI I
OP 28 AUGUSTUS 1975



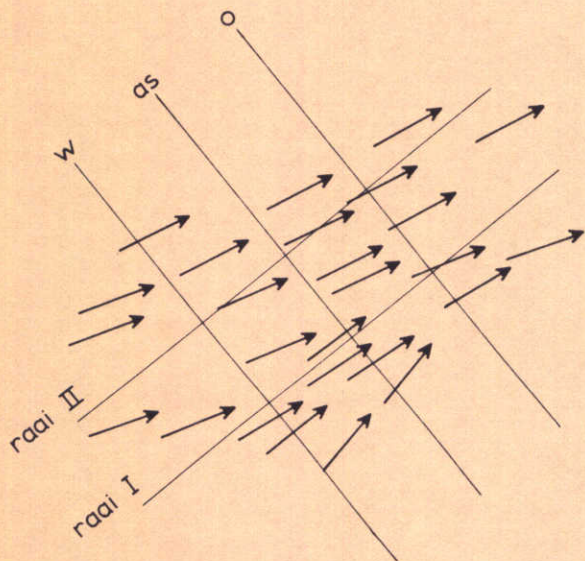
STROOMSNELHEDEN EN DEBIETEN IN RAAI II
OP 29 AUGUSTUS 1975



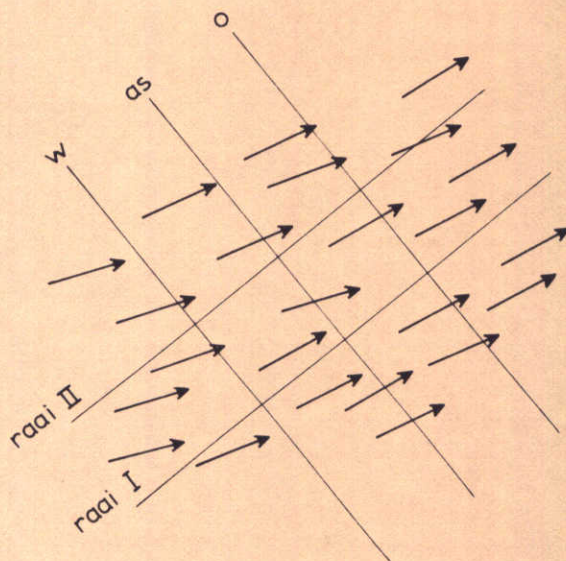
eb : t = 8.30 uur



eb : t = 10.00 uur



vloed : t = 15.00 uur



vloed : t = 17.00 uur

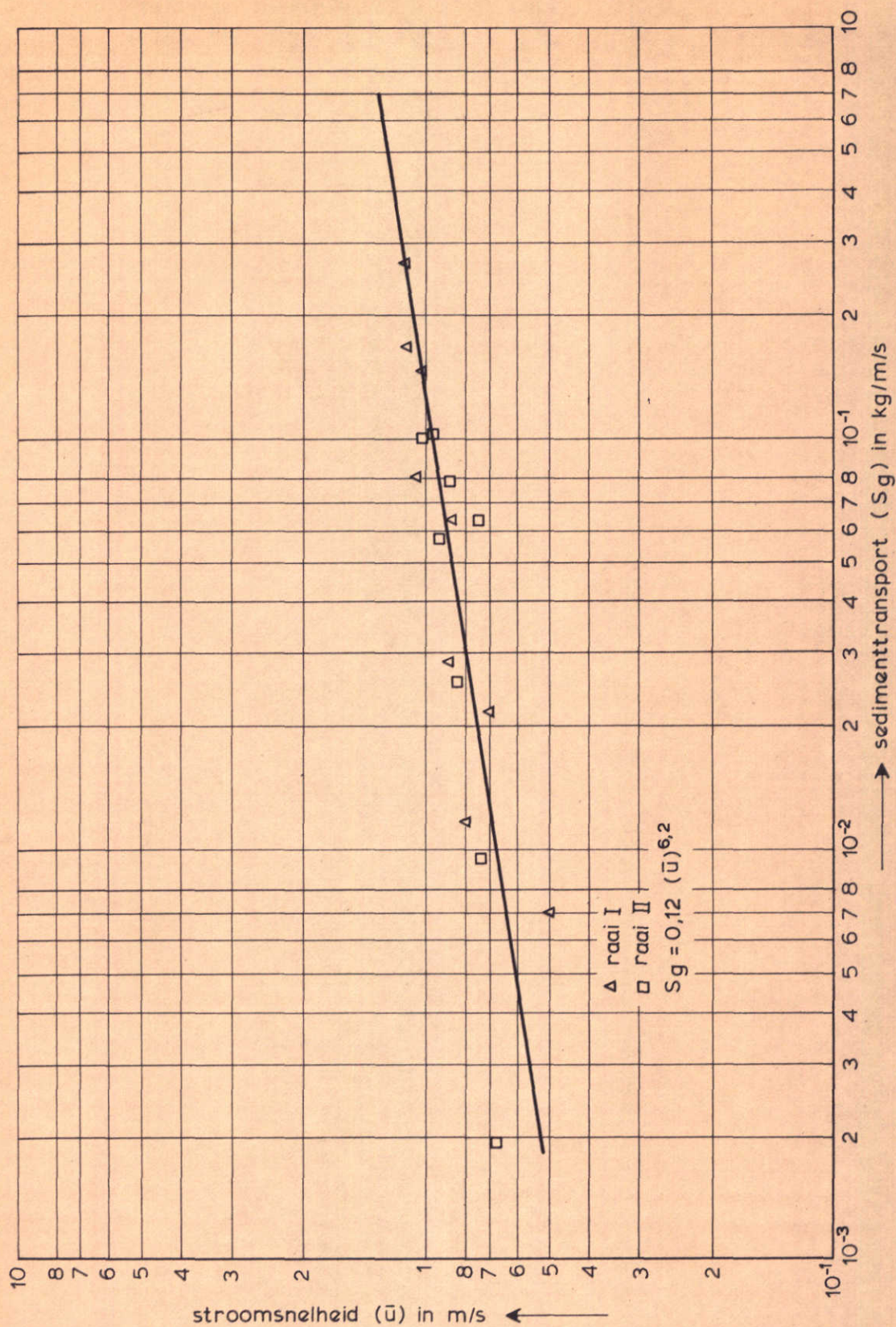
STROOMBEELDEN TER PLAATSE VAN DE
PROEFPUT OOSTERSCHELDE (FOTO's M 1000)

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

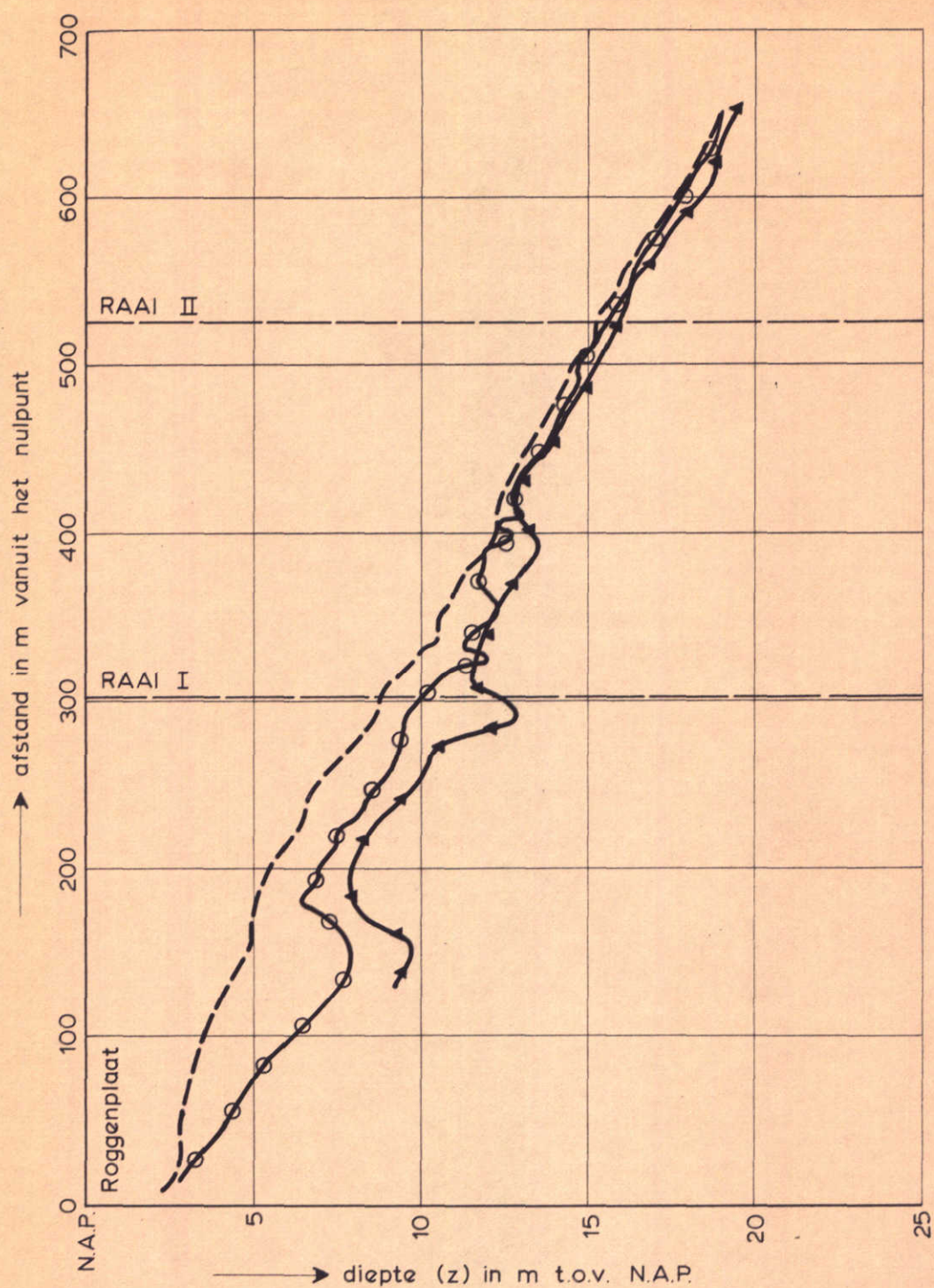
GETIJ 11.09.68

M 1360

FIG. 8

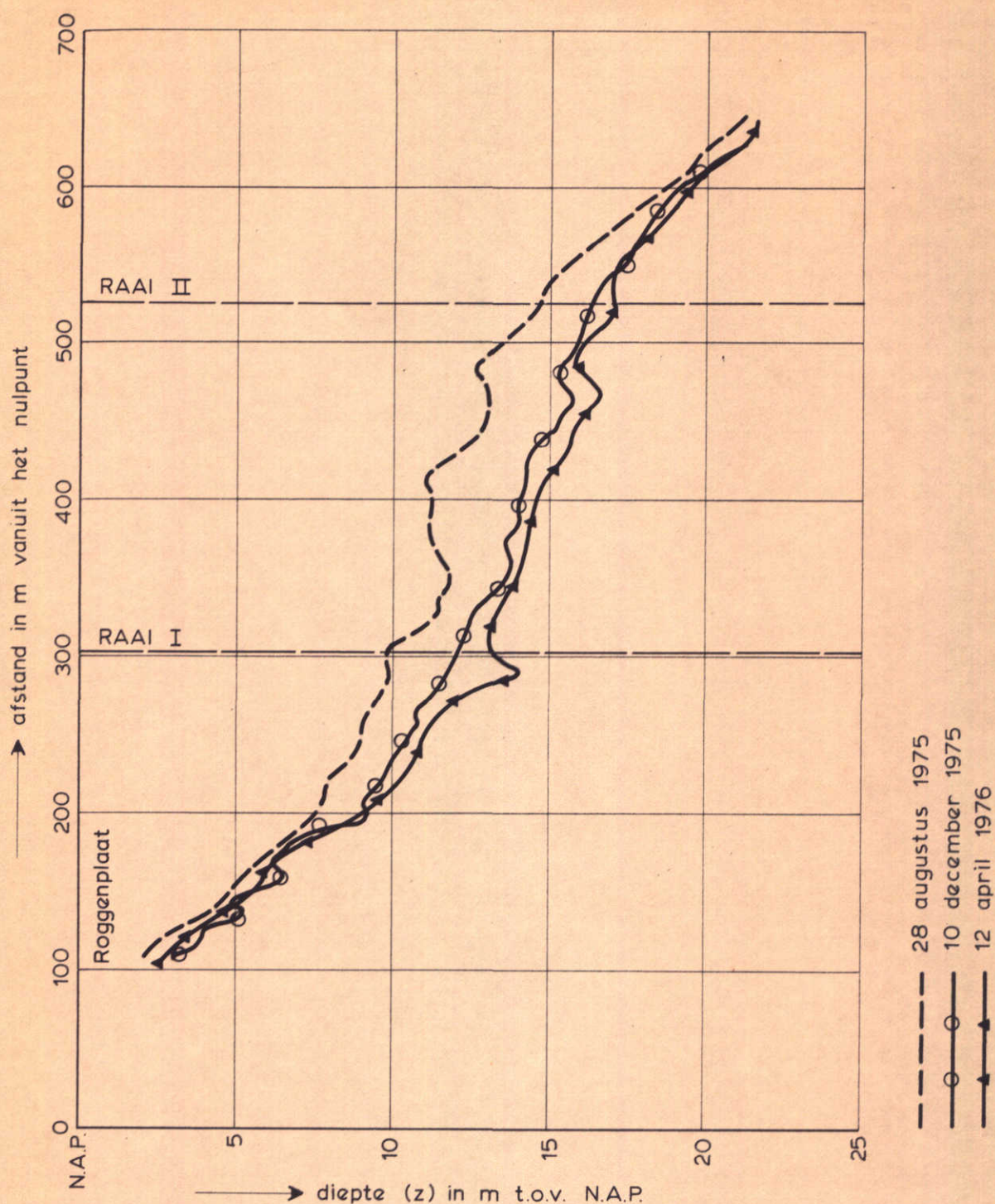


TRANSPORT - STROOMSNELHEIDSRELATIE
OOSTERSCHELDE

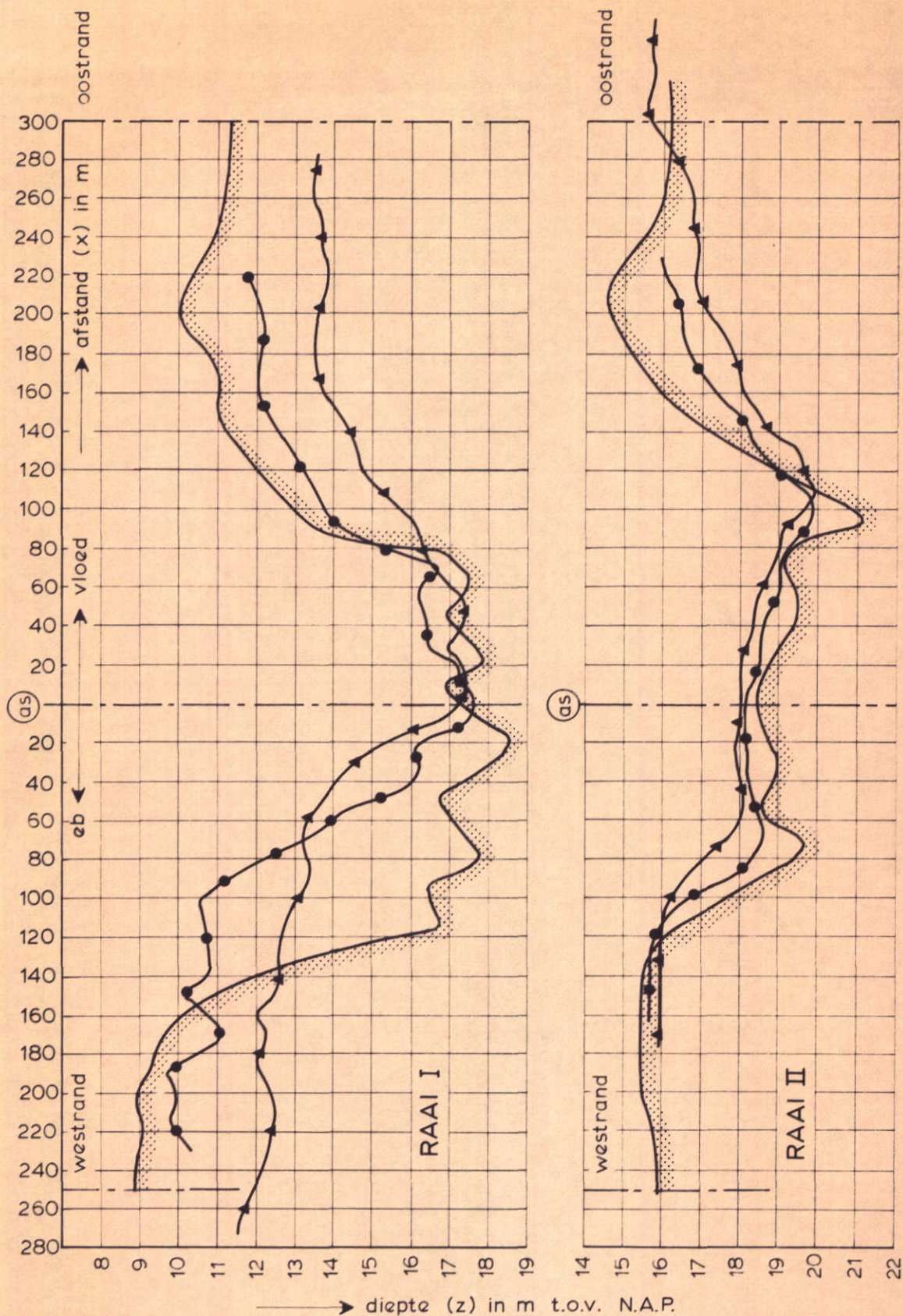


--- 28 augustus 1975
 ○ 10 december 1975
 △ 12 april 1976

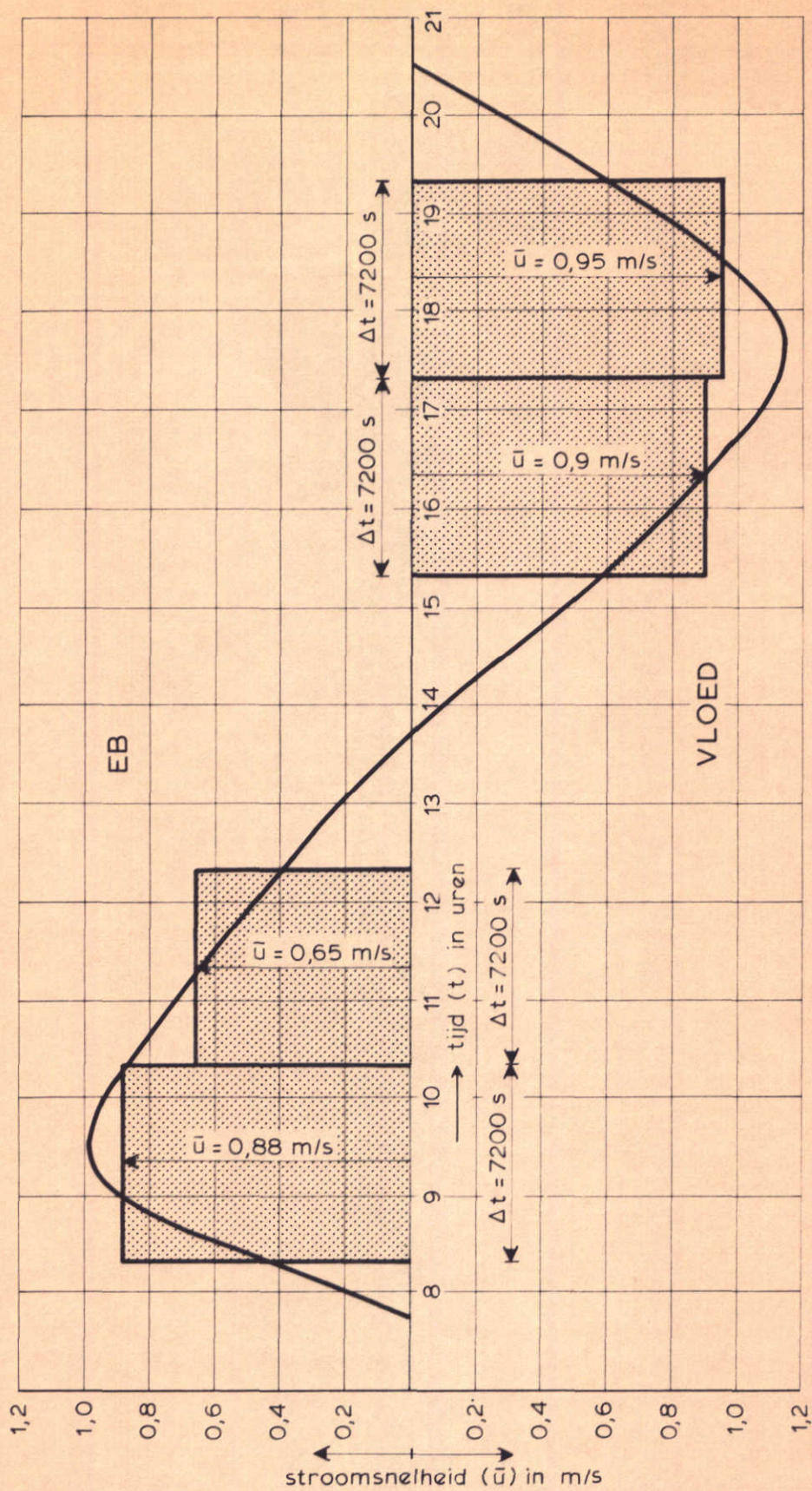
DWARSDOORSNEDE 200 m WESTELIJK
VAN DE AS VAN DE PROEFPUT



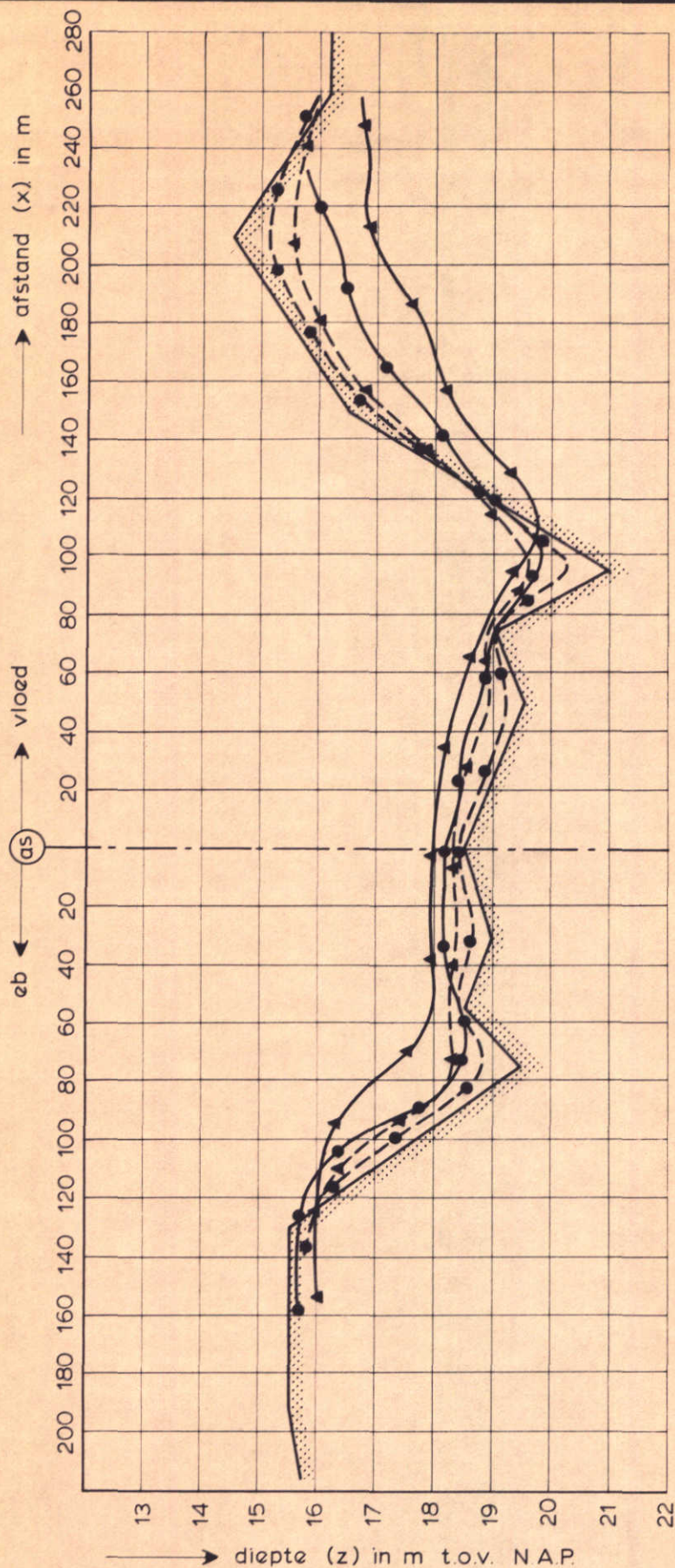
DWARSDOORSNEDE 200 m OOSTELIJK
VAN DE AS VAN DE PROEFPUT



GEMETEN BODEMLIGGING IN RAAI I EN II
VAN DE PROEFPUT



SCHEMATISATIE VAN HET MAATGEVEND GETIJ
VOOR HET SEDIMENTTRANSPORT



- beginbodemligging (28-8-1975)
- gemeten bodemligging na t = 107 etm. (10-12-1975)
- -●- - berekende bodemligging na t = 107 etm.
- ▲— gemeten bodemligging na t = 229 etm. (12-4-1976)
- -▲- - berekende bodemligging na t = 229 etm.

GEMETEN EN BEREKENDE BODEMLIGGING IN
RAAI II

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1360

FIG. 14

delft hydraulics laboratory p.o. box 177 delft