

opdrachtgever:
Rijkswaterstaat

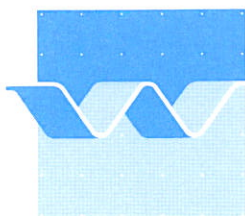
ontgroning bij een
horizontale vernauwing

verslag modelonderzoek

mei 1991

ontgroning bij een
horizontale vernauwing

M. van der Wal



INHOUD

1. Inleiding.....	1
2. Samenvatting en conclusies.....	3
3. Opzet van het onderzoek.....	5
4. Meetresultaten.....	8
5. Analyse.....	11
5.1 Inleiding.....	11
5.2 Ontgrondingsformule van Breusers.....	11
5.3 Bepaling kritieke stroomsnelheid.....	15
5.4 Bepaling van de coëfficiënten.....	18
5.5 Vergelijking met andere onderzoeken.....	21
5.6 Evenwichtsontgrondingsdiepte.....	22
5.7 Aanzethelling.....	28
6. Aanbevelingen.....	31

LITERATUUR

TABELLEN

FIGUREN

FOTO'S

BIJLAGE

TABELLEN

- 1 Proevenprogramma
- 2 Posities van de profielvolgers
- 3 Correctie op de maximum ontgrondingsdiepte die met de profielvolgers is gemeten
- 4 Gemiddelde en maximale stroomsnelheden
- 5 De uit de tijd-ontgrondingslijn berekende parameters
- 6 De waarde van α bij u_k en u_{max}
- 7 Vergelijking berekende en gemeten evenwichtsdiepten
- 8 Vergelijking van de berekende evenwichtsdiepten
- 9 Berekening van ω
- 10 Berekening evenwichtsontgrondingsdiepte
- 11 Gemeten aanzethellingen

FIGUREN

- 1 Overzicht proefopstelling in de Zandgoot
- 2 Zeefkromme van het zand
- 3 Dwarsdoorsnede kribkop bij proef T11
- 4 Langsprofielen van de ontgrondingskuil en de waterspiegel, proef T1
- 5 Langsprofielen van de ontgrondingskuil en de waterspiegel, proef T2
- 6 Langsprofielen van de ontgrondingskuil en de waterspiegel, proef T3
- 7 Langsprofielen van de ontgrondingskuil en de waterspiegel, proef T4
- 8 Langsprofielen van de ontgrondingskuil en de waterspiegel, proef T5
- 9 Langsprofielen van de ontgrondingskuil en de waterspiegel, proef T6
- 10 Langsprofielen van de ontgrondingskuil en de waterspiegel, proef T7
- 11 Langsprofielen van de ontgrondingskuil en de waterspiegel, proef T8
- 12 Langsprofielen van de ontgrondingskuil en de waterspiegel, proef T10
- 13 Langsprofielen van de ontgrondingskuil en de waterspiegel, proef T11
- 14 Langsprofielen van de ontgrondingskuil en de waterspiegel, proef T12
- 15 Maximum ontgrondingsdiepte als functie van de tijd, T1
- 16 Maximum ontgrondingsdiepte als functie van de tijd, T2
- 17 Maximum ontgrondingsdiepte als functie van de tijd, T3
- 18 Maximum ontgrondingsdiepte als functie van de tijd, T4
- 19 Maximum ontgrondingsdiepte als functie van de tijd, T5
- 20 Maximum ontgrondingsdiepte als functie van de tijd, T6
- 21 Maximum ontgrondingsdiepte als functie van de tijd, T7
- 22 Maximum ontgrondingsdiepte als functie van de tijd, T8
- 23 Maximum ontgrondingsdiepte als functie van de tijd, T10
- 24 Maximum ontgrondingsdiepte als functie van de tijd, T11
- 25 Maximum ontgrondingsdiepte als functie van de tijd, T12
- 26 Voorbeeld maximum ontgrondingsdiepte in een tweedimensionale situatie
- 27 Voorbeeld maximum ontgrondingsdiepte in een driedimensionale situatie
- 28 Toelichting op verschillende definities van α
- 29 Bepaling van de schuifspanningssnelheid uit het logaritmisch snelheidsprofiel
- 30 Toegepaste optimalisatie-parameter
- 31 Maximum ontgrondingsdiepte - tijd op dubbel logaritmische schaal, T1
- 32 Maximum ontgrondingsdiepte - tijd op dubbel logaritmische schaal, T2
- 33 Maximum ontgrondingsdiepte - tijd op dubbel logaritmische schaal, T3
- 34 Maximum ontgrondingsdiepte - tijd op dubbel logaritmische schaal, T4
- 35 Maximum ontgrondingsdiepte - tijd op dubbel logaritmische schaal, T5
- 36 Maximum ontgrondingsdiepte - tijd op dubbel logaritmische schaal, T6
- 37 Maximum ontgrondingsdiepte - tijd op dubbel logaritmische schaal, T7

FIGUREN (vervolg)

- 38 Maximum ontgrondingsdiepte - tijd op dubbel-logaritmische schaal, T8
- 39 Maximum ontgrondingsdiepte - tijd op dubbel-logaritmische schaal, T10
- 40 Maximum ontgrondingsdiepte - tijd op dubbel-logaritmische schaal, T11
- 41 Maximum ontgrondingsdiepte - tijd op dubbel-logaritmische schaal, T12
- 42 α als functie van de horizontale vernauwing, met bodemverdediging
- 43 α als functie van de horizontale vernauwing, zonder bodemverdediging
- 44 y als functie van h_{\max}/h_o
- 45 ω als functie van α_k
- 46 Evenwichtsontgrondingsdiepte, gemeten en berekend

FOTO'S

- 1 Ontgrondingskuil tijdens proef T4
- 2 Stroombeeld tijdens proef T8
- 3 Ontgrondingskuil na afloop van proef T6
- 4 Ontgrondingskuil na afloop van proef T12

SYMBOLEN

A	doorstroomoppervlak	m ²
A ₁	oppervlak van het doorstroomprofiel bovenstrooms van de constructie	m ²
A _k	oppervlak van het doorstroomprofiel in de vernauwde doorsnede	m ²
b	breedte van de vernauwing	m
B	totale breedte van een waterloop	m
B _s	lengte van de horizontale vernauwing B _s = B-b	m
C	Chézy-coëfficiënt	m ^{0,5} /s
c ₁	coëfficiënt	dim.
c(m _s)	coëfficiënt	-
D	diameter van het zand of van de stenen	m
D ₅₀	diameter waarbij 50 % van de stenen of van het zand een grotere diameter heeft	m
D _x	diameter waarbij x % van het materiaal wordt onderschreden	m
Fr	Froudegetal betrokken op u, h en g	-
g	versnelling zwaartekracht	m/s ²
h ₀	oorspronkelijke waterdiepte	m
h _{max}	maximale ontgrondingsdiepte (deze is een functie van de tijd)	m
h _{max,rel}	relatieve evenwichtsontgrondingsdiepte	-
h _e	evenwichts-ontgrondingsdiepte	m
k	coëfficiënt	-
k _e	coëfficiënt	dim.
k _s	hydraulische ruwheid volgens Nikuradse	m
L _p	lengte bodembescherming benedenstrooms van de horizontale vernauwing	m
m	(B-b)/B	-
m _g	cot φ met φ de helling van de kop van de krib	graden
m _s	cot ψ met ψ de helling van de zijkant van de krib	graden
n	b/B = 1-m	-
p	coëfficiënt	-
Q	debiet	m ³ /s
q	afvoerdebiet per eenheid van breedte	m ² /s
Re _*	Reynoldsgetal betrokken op u _* , D en ν	-
t	tijd	hr
t ₁	tijd vanaf start ontgrondingsproces tot het tijdstip waarop h _{max} = h ₀	hr
u	stroomsnelheid, gemiddelde stroomsnelheid Q/A	m/s

SYMBOLEN (vervolg)

u_k	gemiddelde stroomsnelheid in de vernauwing	m/s
u_{kr}	stroomsnelheid, gemiddeld over het dwarsprofiel, waarbij het bodemmateriaal juist in beweging komt	m/s
u_{max}	maximale stroomsnelheid	m/s
u_*	schuifspanningssnelheid	m/s
v	coëfficiënt	-
z	verticale afstand met de oorsprong op de bodem	m
α	coëfficiënt	-
α_1	coëfficiënt, $\alpha_m = \alpha \cdot u / u_1$	-
α_k	coëfficiënt, $\alpha_k = \alpha \cdot u / u_k$	-
α_m	coëfficiënt, $\alpha_m = \alpha \cdot u / u_{max}$	-
β	hoek tussen de as van de krib en de oever	graden
γ	coëfficiënt	-
Δ	relatieve dichtheid $(\rho_s - \rho) / \rho$	-
δ	aanzethelling	graden
λ	weerstandcoëfficiënt volgens diagram van Moody	-
ν	kinematische viscositeit	m ² /s
ρ	dichtheid water	kg/m ³
ρ_s	dichtheid sediment	kg/m ³
τ	schuifspanning	N/m ²
τ_{kr}	kritieke schuifspanning	N/m ²
ψ	Shieldsparameter	-
ψ_{kr}	kritieke waarde Shieldsparameter	-
ω	coëfficiënt	-

1. Inleiding

In de afgelopen decennia is veel onderzoek verricht naar de ontgroning van een niet-cohesieve bodem onder invloed van een permanente stroming. Deze ontgroning treedt op achter een constructie, die in het algemeen een lokale vernauwing van de stroming veroorzaakt. De kennis en ervaring, die met dat onderzoek is verkregen, wordt thans in een Handboek Ontgroningen vastgelegd. De projectgroep die dit handboek samenstelt, heeft aan de hand van een inventarisatie geconstateerd dat de kennis op het gebied van ontgroningen aanvulling behoeft op de volgende punten:

- ontgroningen bij horizontale vernauwingen van de stroming, en
- ontgroningen bij sterk driedimensionale geometrieën en stromings-situaties.

In de praktijk treden horizontale vernauwingen van de stroming op bij kofferdammen, stroomgeleidingswerken, zoals kribben in rivieren, en horizontaal uitgebouwde sluitingen.

Tevens bestaat behoefte om de duur van de proeven zodanig te kiezen, dat een vrijwel volledige beschrijving van de tijd-ontgrondingslijn kan worden gegeven. Op basis van deze lijn kan een schatting gegeven worden van de evenwichtsontgrondingsdiepte. Deze diepte is van belang voor een langetermijn voorspelling van het verloop van de ontgroningen bij bijvoorbeeld de stormvloedkering in de Oosterschelde.

Met het doel de kennis op het gebied van ontgroningen op de genoemde punten aan te vullen, hebben Waterbouwspeurwerk en het Afwikkelingsbureau Oosterscheldewerken van Rijkswaterstaat in de brieven met kenmerk BSW/WB 88-7740, d.d. 21 november 1988 en met kenmerk 4394/AZ d.d. 24 juli 1989 het Waterloopkundig Laboratorium opdracht verleend een fysisch modelonderzoek uit te voeren. Tijdens de uitvoering van het fysisch onderzoek heeft de Dienst Weg- en Waterbouwkunde van Rijkswaterstaat in de brief met kenmerk WB/BX 891633, d.d. 5 april 1989, opdracht verleend een extra proef naar de ontgroning bij een krib uit te voeren.

Namens het samenwerkingsverband Bouwspeurwerk is het onderzoek door ir. K.J. Bakker van genoemde dienst en ir. R.E. Jorissen van de Technische Universiteit Delft begeleid. Van de zijde van het Afwikkelingsbureau Oosterscheldewerken is het onderzoek door ir. H.E. Klatter begeleid. De extra proef naar de ontgroning bij een krib is van de zijde van de Dienst Weg- en Waterbouwkunde door ir. K.W. Pilarczyk begeleid. Bij het

Waterloopkundig Laboratorium was ir. R.A.H. Thabet de projectleider van het onderzoek. Het onderzoek is in de periode februari-mei 1989 uitgevoerd en ir. M. van der Wal heeft in nauwe samenwerking met ir. R.E. Jorissen het verslag samengesteld.

2. Samenvatting en conclusies

Ten behoeve van een aanvulling van de kennis op het gebied van ontgroningen zijn in een fysisch modelonderzoek proeven uitgevoerd naar de ontgroning bij horizontale vernauwingen en naar de ontgroning bij sterk drie-dimensionale geometrieën en stromingssituaties. Het fysisch modelonderzoek is uitgevoerd in de Zandgoot van het WL.

Het proevenprogramma beslaat horizontale vernauwingen van 10, 30 en 50 % met en zonder bodemverdediging. De vernauwing bestaat uit een schotje, dat een schematisering van in de praktijk voorkomende constructies is. Daarom zijn in het proevenprogramma ook een proef met een realistische kribkop en een proef met een caisson of een kofferdam opgenomen. De lengte van de bodemverdediging benedenstrooms van de constructie is ongeveer 5 keer de waterdiepte.

De ontgrondingskuilen zijn in een zandbodem met $D_{50} = 210 \mu\text{m}$ gevormd. Met profielvolgers zijn langsprofielen van de ontgrondingskuil gemeten. De proeven zijn voortgezet totdat de maximale ontgrondingsdiepte groter was dan 1 à 2 keer de waterdiepte, zodat ook van de evenwichtsdiepte een redelijke schatting kon worden gemaakt. Uit de meetresultaten zijn de parameters t_1 en de variabele γ (en daarvan de coëfficiënten α , p en v bepaald).

De belangrijkste resultaten van het fysisch modelonderzoek zijn:

- Bij een toenemend vernauwingspercentage neemt α , betrokken op de gemiddelde bovenstroomse aanstroomsnelheid, sterk toe.
- Een bodemverdediging met een lengte van $5h_0$ benedenstrooms van de constructie, leidt tot een reductie van α met 1,7 à 6,4 ten opzichte van de situatie zonder een bodemverdediging.
- Een kribkop zoals in proef T11, leidt tot een verlaging van α in vergelijking met een schotje, namelijk van de geïnterpoleerde waarde 5,0 à 5,3 naar 3,1; dat komt overeen met een verlaging van ongeveer 40 %. De kribkop veroorzaakt namelijk een tijdens de proef veranderend vernauwingspercentage van 12 naar 16%.

- Een caisson of een kofferdam zoals in proef T12 leidt in vergelijking met een schotje tot een geringe verhoging van α , namelijk van 8,2 naar 8,9. Dat betekent een toename met 10 %.
- Voor de coëfficiënt p worden de volgende waarden aanbevolen:

tweedimensionale ontgronding	0
horizontale vernauwing met een bodemverdediging	-0,10
horizontale vernauwing zonder bodemverdediging	-0,30
- Voor de coëfficiënt v worden de volgende waarden aanbevolen:

tweedimensionale ontgronding	-0,40
horizontale vernauwing	-0,30
- In de proeven met een horizontale vernauwing en geen bodemverdediging is de aanzethelling 5 à 9 graden flauwer dan de hoek van natuurlijk talud. De aanzethelling is ongeveer de helft van de hoek van natuurlijk talud in de proeven met een bodemverdediging. Door de verticale kop van de horizontale vernauwing te vervangen door een realistische kribkop kan eveneens een aanzienlijke reductie van de aanzethelling worden verkregen.

De resultaten van het modelonderzoek zijn aanleiding om enkele aanbevelingen te formuleren. De belangrijkste aanbevelingen zijn:

- Een voortzetting van het modelonderzoek met proeven naar de ontgronding bij tweezijdige vernauwingen en naar de ontgronding bij een schotje met een variabele helling van de kop van het schotje. Deze laatste serie proeven wordt aanbevolen, omdat uit een vergelijking van een echte kribkop (proef T11) met een schotje (proef T7) blijkt, dat de helling en de ronding van de kop waarschijnlijk veel invloed op α hebben.
- In een voortgezet onderzoek zou de definitie van de hydraulische ruwheid nader kunnen worden onderzocht om vervolgens een methode ter bepaling van de kritieke stroomsnelheid in een ontgrondingsformule te kunnen aanbevelen.
- De voorgestelde formule voor de evenwichtsontgrondingsdiepte dient te worden getoetst aan de resultaten van andere onderzoeken.

3. Opzet van het onderzoek

Bij de opzet van het onderzoek zijn de volgende aspecten behandeld: de keuze van de modelfaciliteit, de proefopstelling in de modelfaciliteit, het proevenprogramma en de gemeten grootheden.

Voor het ontgrondingsonderzoek bij een horizontale vernauwing is als faciliteit voor het fysisch onderzoek de Zandgoot van het WL gekozen. Bij deze keuze heeft het voordeel, dat deze goot beschikt over een geautomatiseerd meetsysteem met profielvolgers, zwaar meegewogen. Hierdoor is het mogelijk per proef extra metingen te verrichten en kan de duur van een proef flexibel gekozen worden. Een nadeel van de Zandgoot is de beperkte breedte van de goot, namelijk 1,5 m. Dit nadeel is gedeeltelijk gecompenseerd door de waterdiepte zo klein mogelijk te kiezen. De breedte van de goot was gelijk aan $(6 \text{ à } 15) h_0$, waarin h_0 de waterdiepte voorstelt.

In de Zandgoot is een proefopstelling gemaakt, waarbij de bodem over een lengte van 7 m is verhoogd tot 0,5 m boven de vaste gootbodem. Over deze lengte is een bodemverdediging van grind aangebracht met een laagdikte van ongeveer 2 D. Benedenstrooms van deze verhoogde bodem is over een lengte van 10 m de goot met zand gevuld tot het niveau van de verhoogde bodem, zie Figuur 1.

In het zand kan een ontgrondingskuil ontstaan met een maximale kuildiepte van 0,5 m, dat is $(2 \text{ à } 3) h_0$. Van een monster van het zand is de korrelverdeling bepaald, zie Figuur 2. Uit het gezeefde monster zijn de volgende karakteristieke diameters berekend: $D_{50} = 212 \mu\text{m}$, $D_{10} = 154 \mu\text{m}$ en $D_{90} = 286 \mu\text{m}$. Na het vullen van de goot met water zijn de luchtinsluitingen in het zand zo goed mogelijk verwijderd door het zand met een schep te verdichten. Op deze wijze was het echter niet mogelijk alle luchtinsluitingen te verwijderen. Uit de zeefkromme van het zand blijkt, dat het zand een klein percentage grind met een diameter van 0,001 tot 0,004 m bevat. Aan het einde van enkele proeven verzamelde zich dit grovere grind in het diepste punt van de ontgrondingskuil, waardoor het ontgrondingsproces enigszins is vertraagd. Het zand is uit de Waddenzee afkomstig en bevatte kleine hoeveelheden schelpgruis en veenresten.

In verscheidene proeven bestond de horizontale vernauwing uit een schotje, dat op verschillende afstanden van de benedenstroomse rand van de bodemverdediging is geplaatst.

Het proevenprogramma is als volgt samengesteld, zie tabel 1. De twee eerste proeven zijn opgezet als referentieproeven met het systematisch ontgrondingsonderzoek dat vroeger bij het WL is uitgevoerd, zie lit. [15]. De volgende proeven dienden aan onderstaande eisen te voldoen:

- het horizontaal vernauwingspercentage is 10, 30 of 50,
- $u_1 / u_{kr} > 1$, dat wil zeggen dat bovenstrooms van de constructie de kritieke waarde voor de stroomsnelheid voor het begin van bewegen van het zand moet zijn overschreden,
- de lengte van de bodemverdediging benedenstrooms van de constructie varieert tussen 0 en $5 h_0$.

Tijdens de uitvoering van het onderzoek is het proevenprogramma in overleg met de begeleider van de zijde van de opdrachtgever, ir. R.E. Jorissen, verscheidene keren aangepast. Dit heeft er toe geleid, dat een voorgenomen proef om de ruwheid van de bodemverdediging te variëren, is komen te vervallen. Omdat het ontgrondingsproces in proef T4 te snel verliep om een voldoende aantal metingen te kunnen verrichten, is besloten deze proef met een kleiner debiet (proef T10) te herhalen. In proef T5 is bovenstrooms van de constructie het begin van bewegen van het zand niet overschreden, zodat het ontgrondingsproces te langzaam verliep en besloten is deze proef met een groter debiet in proef T6 te herhalen. Tijdens de uitvoering van de proeven bleek behoefte te bestaan aan extra metingen van de stroomsnelheid en de stroomrichting. Deze metingen zijn in proef T9 uitgevoerd.

Een horizontale vernauwing met een schotje is een schematisering van een werkelijke constructie. In de praktijk komen veel kribben voor, daarom is proef T11 met een realistische kribkop uitgevoerd. De uit grof grind opgebouwde kribkop heeft een taludhelling van 1 : 1,5, zie de dwarsdoorsnede van de kribkop in Figuur 3.

Tenslotte is het proevenprogramma uitgebreid met een proef waarin de dikte van het schotje sterk is vergroot zodat de constructie overeenkomst vertoont met een caisson of een kofferdam. Het caisson heeft een lengte van 0,45 m en een breedte van een 0,30 m. Dat betekent dat het caisson het doorstroomprofiel met 30 % vernauwt.

In het onderzoek zijn verschillende grootheden standaard gemeten, zoals het debiet, de waterstand en de temperatuur van het water. Drie langsprofielen van de ontgrondingskuil zijn na op te geven tijdsintervallen gemeten met drie profielvolgers, die op een meetwagen zijn geplaatst. De positie van de profielvolgers op de meetwagen kan in beperkte mate worden gevarieerd. De waterstand is met een waterstandvolger op de meetwagen geregistreerd.

In een enkele situatie zijn de stroomsnelheden in de vernauwing met een micromolen gemeten. Tevens zijn met dat instrument bovenstrooms van de constructie enkele verticale stroomsnelheidsprofielen boven het zand en boven de bodemverdediging gemeten. In proef T9 is de stroomrichting rond de kop van het schot globaal vastgelegd.

Tenslotte zijn van de proefopstelling en van de ontgrondingskuil na afloop van de proef enkele foto's gemaakt.

4. Meetresultaten

Bij de behandeling van de meetresultaten van het fysisch modelonderzoek ligt de nadruk op de gemeten langsprofielen van de ontgrondingskuil en de de tijd-ontgrondingslijnen. Allereerst worden enkele opmerkingen gemaakt over de gemeten hydraulische grootheden.

Het onderzoek in de Zandgoot is niet afgestemd op een prototype situatie en daarom is de modelopstelling als prototype beschouwd en zijn in dit verslag modelmaten vermeld.

Hydraulische grootheden

De debieten, die tijdens de proeven zijn ingesteld, zijn in tabel 1 vermeld. Het debiet is met een nauwkeurigheid van 2 à 5 % gemeten. De in te stellen waterstand was ten opzichte van de bodemverdediging van grind gedefinieerd. De gemiddelde bodemligging van deze toplaag heeft een marge van enkele millimeters. Deze marge is ook maatgevend voor de nauwkeurigheid waarmee de waterstand is ingesteld. Met de waterstandsvolger is de waterstand met een nauwkeurigheid van 0,0001 à 0,0005 m ten opzichte van de vaste gootbodem gemeten, zie enkele voorbeelden in de Figuren 4 tot en met 14.

Tijdens de proeven varieerde de temperatuur van het water van 10,5 tot 12,5°C.

Langsprofielen van de ontgrondingskuil

Met de drie profielvolgers op de meetwagen zijn langsprofielen van de ontgrondingskuil gemeten, zie enkele voorbeelden in de Figuren 4 tot en met 14, waarin ook het verloop van de waterspiegel is weergegeven. De posities van de profielvolgers zijn in tabel 2 vermeld (zie ook figuur 3). Hierbij wordt opgemerkt, dat in proef T10 de profielvolgers tijdens de proef verschoven zijn om zo goed mogelijk het diepste punt van de ontgrondingskuil te registreren, en in proef T11 moesten de profielvolgers verschoven worden, omdat een profielvolger niet het grove grind van de kribkop kon volgen. Tijdens de proef groeide de ontgrondingskuil namelijk zodanig, dat de kribkop in de baan van een profielvolger bloot kwam te liggen. De ontgrondingskuil is door de profielvolgers met een nauwkeurigheid van ongeveer 0,0005 m geregistreerd. Het signaal bestaat uit een waarneming om de centimeter, daardoor zijn echter ook de beddingvormen gemeten, zie bijvoorbeeld Figuur 13. De invloed van de beddingvormen op het signaal is verminderd door een voortschrijdend gemiddelde over 10 of 20 waarnemingen te bepalen. De nauwkeurigheid van de bepaling van de maximale

ontgrondingsdiepte van de kuil is in sommige proeven beperkt door de invloed van de beddingsvormen.

Opgemerkt moet worden, dat profielvolger 2 niet in alle proeven goed heeft gefunctioneerd. In de proeven T6 en T10 heeft deze profielvolger het deel van de ontgrondingskuil beneden het niveau van 0,35 m boven de gootbodem niet geregistreerd. In proef T6 is deze profielvolger voor de maximale ontgrondingsdiepte niet van belang, maar in proef T10 moest de maximale ontgrondingsdiepte in een aantal metingen uit extrapolatie van het betrouwbare deel van het langsprofiel worden bepaald.

De maximale ontgrondingsdiepte is bepaald ten opzichte van de bodemligging, die tijdens een nulmeting voor de aanvang van de proef is gemeten. Deze met een profielvolger gemeten bodemligging is benedenstrooms van de constructie over een afstand van 2 à 3 m gemiddeld. Deze gemiddelde bodemligging is de bodemligging ten opzichte waarvan de maximale ontgrondingsdiepte is bepaald.

Na afloop van de proef is met de hand de maximale kuildiepte gemeten en deze waarde is vergeleken met de maximale kuildiepte die uit de laatste meting met de profielvolgers is bepaald. In ontgrondingskuilen met steile dwarshellingen is het mogelijk dat de maximum kuildiepte niet in één van de drie langsraaien ligt waarlangs de profielvolgers de kuil registreren. In tabel 3 is vermeld bij welke proeven de met de hand gemeten diepte groter is dan de met de profielvolgers gemeten diepte. Vervolgens zijn alle gemeten kuildiepten van een proef procentueel verhoogd zodanig, dat de laatst gemeten kuildiepte overeenkomt met de handgemeten kuildiepte. Op deze wijze is het verloop van de maximale kuildiepte zo nauwkeurig mogelijk bepaald.

Tijd-ontgrondingslijn

Van elke proef is het verloop van de maximale ontgroning als functie van de tijd in de Figuren 15 tot en met 25 uitgezet. Hierbij worden de volgende opmerkingen gemaakt. Bij proef T1 sluit de berekende kromme ogenschijnlijk niet optimaal aan op de laatste drie meetpunten. Dit komt doordat in de fitprocedure elk meetpunt evenveel gewicht heeft. Het laatste meetpunt zou eigenlijk een groter gewicht ten opzichte van de overige meetpunten moeten hebben. In de overige proeven is de fit van de berekende en de meetpunten echter heel goed. In enkele proeven was het mogelijk ook 's nachts metingen te verrichten, zodat een goede opeenvolging van de meetpunten is verkregen.

De nauwkeurigheid van de maximale ontgrondingsdiepte is negatief beïnvloed, doordat de opstelling van de profielvolgers in dwarsrichting soms zodanig was dat het diepste punt van de kuil juist naast de gemeten langsraai lag. Tijdens de proef kan het diepste punt van de ontgrondingskuil ook in dwarsrichting verschuiven. Uit de tijd-ontgrondingslijn van proef T3 is de plotselinge toename van de maximale kuildiepte aan het einde van de proef uit een dergelijke verschuiving te verklaren, dat betekent een overgang naar een andere profielvolger waarmee de maximale kuildiepte is geregistreerd.

Opgemerkt wordt, dat de gefitte curve in figuur 20 onregelmatigheden vertoont, die zijn veroorzaakt door een onvolmaaktheid van het software programma, waarmee deze figuur is gemaakt.

In sommige proeven, zoals bijvoorbeeld in proef T4, verloopt de tijd-ontgrondingslijn onregelmatig. Deze onregelmatigheden zijn waarschijnlijk veroorzaakt door het zo af en toe plotseling en gedeeltelijk instorten van een ontgrondingskuil met steile hellingen. Het verband tussen het optreden van een afschuiving en de steilste helling is door Silvis in [6] nader uitgewerkt.

5. Analyse

5.1 Inleiding

De analyse van de meetresultaten begint met een samenvatting van de relevante theorie betreffende de ontgrondingsformule van Breusers. In deze formule komt een kritieke stroomsnelheid voor die in paragraaf 5.3 is bepaald. Vervolgens is deze formule gefit aan de meetresultaten, waarmee optimale waarden van de coëfficiënten α en γ zijn verkregen (paragraaf 5.4). Deze analyse resulteert in een aanbevolen verloop van α en γ als functie van onder andere het vernauwingspercentage. In het proevenprogramma is een referentieproef opgenomen, om een vergelijking met de resultaten van andere onderzoeken mogelijk te maken. De analyse van deze referentieproef is in paragraaf 5.5 beschreven. Tenslotte is op basis van de meetresultaten de evenwichtsdiepte bepaald en deze evenwichtsdiepten zijn vergeleken met enkele uit de literatuur bekende formules.

5.2 Ontgrondingsformule van Breusers

In het evaluatie rapport met betrekking tot het ontgrondingsonderzoek bij de stormvloedkering Oosterschelde, lit. [16] is de ontwikkeling en de toepassing van de ontgrondingsformule van Breusers in detail beschreven. Met het doel het voorliggende verslag zonder al te veel verwijzingen naar andere rapporten te kunnen lezen, zijn in het onderstaande de relevante aspecten van deze formule behandeld.

Op basis van de resultaten van het systematische onderzoek naar twee en driedimensionale ontgrondingen, zie de verslagen van het onderzoek M648/M863, lit. [15], zijn de volgende empirische relaties voor het verloop van de maximale ontgrondingsdiepte afgeleid:

$$\frac{h_{\max}(t)}{h_0} = f \left\{ \frac{t}{t_1} \right\} \quad (5.1)$$

$$t_1 = \frac{k \cdot \Delta^{1,7} \cdot h_0^2}{(\alpha u - u_{kr})^{4,3}} \quad (5.2)$$

waarin:

$h_{\max}(t)$	= maximale ontgrondingsdiepte op het tijdstip t	(m)
h_0	= oorspronkelijke waterdiepte	(m)
t	= tijd	(hr)
t_1	= tijd waarin $h_{\max} = h_0$ wordt	(hr)
Δ	= relatieve dichtheid van het bodemmateriaal onder water	(-)
α	= coëfficiënt afhankelijk van de geometrie bovenstrooms van de ontgrondingskuil	(-)
k	= coëfficiënt	(-)
u	= gemiddelde stroomsnelheid, $u = Q/A$	(m/s)
Q	= debiet door de gehele waterloop	(m ³ /s)
A	= doorstroomoppervlak	(m ²)
u_{kr}	= stroomsnelheid waarbij het bodemmateriaal juist in beweging komt (bij een waterdiepte h_0)	(m/s)
$f\{ \}$	= functie van $\{ \}$	(-)

In het systematische onderzoek is het doorstroomoppervlak A gedefinieerd als het produkt van de breedte in de nauwste doorsnede tussen de landhoofden, ook wel de keel genoemd, en de waterdiepte aan de benedenstroomse rand van de bodemverdediging. Indien geen bodemverdediging aanwezig is, wordt de waterdiepte in de keel gebruikt om het doorstroomoppervlak te berekenen.

De coëfficiënt k is op basis van de resultaten van het systematisch onderzoek [14] bepaald op een waarde van 250. Door een selectie van deze resultaten gericht op de Oosterschelde omstandigheden, dat wil zeggen de proeven met een gladde bodemverdediging zijn niet meegenomen, is een nieuw bestand van meetgegevens gecreëerd, op basis waarvan een optimale waarde van 330 van deze coëfficiënt k is bepaald.

Voor situaties met een overwegend tweedimensionale stroming is op basis van de meetresultaten een functie $f\{..\}$ uit (5.1) gedefiniëerd als een exponentiële relatie:

$$\frac{h_{\max}(t)}{h_0} = \left\{ \frac{t}{t_1} \right\}^{\gamma} \quad (5.3)$$

waarin:

$$\gamma = \text{coëfficiënt} \quad (-)$$

De waarde van γ blijkt voor tweedimensionale ontgrondingen ongeveer gelijk te zijn aan 0,4, zie het voorbeeld van een tijd-ontgrondingslijn in Figuur 26. In deze figuur is de helling van de lijn een maat voor γ . Voor een driedimensionale geometrie is vergelijking (5.3) ook te gebruiken echter met dien verstande, dat de waarde van γ niet meer constant is, zie als voorbeeld Figuur 27. Door Driegen [16] en Jorissen [12] is een methode voorgesteld, waarin een verband tussen deze coëfficiënt en de maximale kuildiepte is verondersteld:

$$\gamma = 10 \left(\frac{p \cdot h_{\max}}{h_0} + v \right) \quad (5.4)$$

waarin:

$$\begin{aligned} p &= \text{coëfficiënt} & (-) \\ v &= \text{coëfficiënt} & (-) \end{aligned}$$

De toepassing van uitdrukking (5.4) heeft de volgende voordelen:

- Het ontgrondingsverloop in driedimensionale situaties kan beter gevolgd worden.
- Het verloop van de maximale ontgrondingsdiepte kan in een vergevorderd stadium van de ontgroning, $h_{\max} > 2h_0$, zowel voor twee- als voor driedimensionale situaties met (5.4) nauwkeuriger worden beschreven.
- De coëfficiënt α heeft in ieder stadium van het ontgrondingsproces eenzelfde waarde.

In de analyse zijn α en γ op de volgende wijze bepaald. Uit de meetpunten is het tijdstip t_1 bepaald waarop $h_{\max}(t) = h_0$. Na substitutie van t_1 in (5.2) kan α worden berekend. Vervolgens zijn p en v uit curvefitting met de overige meetpunten bepaald. In deze procedure is essentieel dat de maximum gemeten ontgrondingskuildiepte groter is dan h_0 . In het onderhavige onderzoek is dat steeds het geval geweest, met uitzondering van T_1 .

Uitdrukking (5.2) is in sterke mate afhankelijk van de waarde van het produkt ($\alpha \cdot u$). In de loop van de tijd is gebleken dat α zeer sterk afhankelijk is van de geometrie. Deze afhankelijkheid kan met Figuur 28 worden toegelicht. Tevens is α gevoelig voor de definitie van de stroomsnelheid u in het genoemde produkt. Voor het onderhavige onderzoek zijn de volgende definities van de stroomsnelheid gehanteerd:

- 1 de gemiddelde stroomsnelheid bovenstrooms van de constructie, $u = Q/A_1$, waarin A_1 = het oppervlak van het doorstroomprofiel bovenstrooms van de constructie,
- 2 de gemiddelde stroomsnelheid in de doorstroomprofiel ter plaatse van de vernauwing, dit doorstroomprofiel wordt ook wel de keel genoemd, $u_k = Q/A_k$, waarin A_k = het oppervlak van het doorstroomprofiel in de vernauwde doorsnede,
- 3 de maximale stroomsnelheid, u_{max} rond de kop van het schot (voor de situatie zonder bodembescherming), respectievelijk op de rand van de bodemverdediging (voor de situatie met een bodemverdediging).

Deze definities van de stroomsnelheid zijn in Figuur 28 toegelicht. Overeenkomstig deze definities van de stroomsnelheid kunnen ook verschillende coëfficiënten α worden gedefinieerd:

$$\alpha_k = \alpha \cdot u / u_k \quad (5.5a)$$

of

$$\alpha_m = \alpha \cdot u / u_{max} \quad (5.5b)$$

Na verloop van tijd neemt de toename van de maximale kuildiepte steeds meer af, totdat uiteindelijk een evenwichtsdiepte is bereikt. De meeste proeven duren niet zolang dat de evenwichtsdiepte gemeten kan worden. Daarom wordt de evenwichtsdiepte uit een extrapolatie van de tijd-ontgrondingslijn bepaald. Door deze extrapolatie is de nauwkeurigheid van de evenwichtsdiepte minder dan de bepaling van de coëfficiënten α en γ .

Met betrekking tot de vorm van de ontgrondingskuil is in het systematisch onderzoek behalve de maximale kuildiepte ook de aanzethelling van de kuil als karakteristieke parameter gedefiniëerd: de aanzethelling is de hoek tussen de verbindingslijn tussen de rand van de bodemverdediging en het in de kuil gelegen punt op een horizontale afstand van 15 m uit de rand van de bodemverdediging, en een horizontale lijn. Hierbij is verondersteld, dat de bodemverdediging horizontaal ligt. In het systematisch onderzoek is de aanzethelling steeds in de laatste fase van een ontgrondingsproef gemeten, dat wil zeggen $t > 0,2 t_1$.

5.3 Bepaling van de kritieke stroomsnelheid

De kritieke stroomsnelheid van het zand is bepaald met de grafiek van Shields, waarin de Shieldsparameter ψ is uitgezet tegen het Reynoldsgetal Re_* betrokken op u_* , D en ν .

$$u_* = \{\tau/\rho\}^{0.5} \quad (5.6)$$

waarin:

τ	= schuifspanning	(N/m ²)
ρ	= dichtheid water	(kg/m ³)
D	= diameter zand, in het algemeen D_{50}	(m)
ν	= kinematische viscositeit	(m ² /s)
u_*	= schuifspanningssnelheid	(m/s)

De Shieldsparameter is gedefiniëerd als:

$$\psi = \tau / (\rho g \Delta D) \quad (5.7)$$

waarin:

ψ	= Shieldsparameter	(-)
Δ	= relatieve dichtheid, $\Delta = (\rho_s - \rho)/\rho$	(-)
g	= versnelling zwaartekracht	(m/s ²)
ρ_s	= dichtheid steen	(kg/m ³)

In het verslag van het systematisch onderzoek [15] is het begin van bewegen van het bodemmateriaal uitvoering onderzocht. Het begin van bewegen is in dat onderzoek door zeven kwalitatief omschreven criteria gekarakteriseerd. Min of meer arbitrair is criterium 6: korrels aan de wandel, overal en permanent, gekozen als criterium waarmee u_{kr} is bepaald.

Uit de grafiek van Shields blijkt dat bij zand met $D_{50} = 220 \mu\text{m}$ het begin van bewegen volgens criterium 6 optreedt bij $\psi_{kr} = 0,055$.

De combinatie van (5.7) met de formule van Chézy leidt tot:

$$\psi_{kr} = u_{kr}^2 / \{ C^2 \Delta D \} \quad (5.8)$$

waarin:

C	= Chézy-coëfficiënt	(m ^{0.5} /s)
-----	---------------------	-----------------------

De Chézy-coëfficiënt kan worden berekend met de formule van White-Colebrook, indien de hydraulische ruwheid k_s bekend is. De hydraulische ruwheid is uit het logaritmische snelheidsprofiel te bepalen:

$$u(z) / u_* = 5,75 \log \{ 30 z / k_s \} \quad (5.9)$$

waarin:

$$\begin{aligned} k_s &= \text{hydraulische ruwheid of Nikuradse ruwheid} && \text{(m)} \\ z &= \text{verticale afstand van de bodem} && \text{(m)} \end{aligned}$$

Uit de helling van het snelheidsprofiel op enkel-logaritmisch papier is u_* bepaald en vervolgens met (5.9) k_s .

$$u_* = 0,1739 \{ u(0,1) - u(0,01) \} \quad (5.10)$$

Bij drie verschillende waterdiepten zijn bovenstrooms van de vernauwing ongestoorde stroomsnelheidsprofielen gemeten. Deze snelheidsprofielen zijn op enkel-logaritmisch papier uitgezet, zie Figuur 29. Uit deze figuur blijkt dat de grenslaag voor wat betreft de gemiddelde stroomsnelheden vrijwel volledig ontwikkeld is. Waarschijnlijk is de turbulentieverdeling in de verticaal nog wel beïnvloedt door de bodemverdediging bovenstrooms. De gemiddelde waarde van de hydraulische ruwheid is als volgt als gemiddelde uit drie stroomsnelheidsprofielen (zie figuur 29) berekend:

$$k_s = \{ 0,0163 + 0,0267 + 0,04 \} / 3 = 0,025 \text{ m} \quad (5.11)$$

Deze berekening van k_s uit drie stroomsnelheidsprofielen geeft een goede indruk van de beperkte nauwkeurigheid waarmee de hydraulische ruwheid kan worden bepaald.

De gemiddelde waarde van k_s komt overeen met ongeveer 100 D_{50} van het zand. Deze waarde van k_s wijkt sterk af van de vuistregel $k_s = 3 D_{90}$ met D_{90} van het zand, [13] waarschijnlijk door de invloed van de bodemverdediging op het gemeten stroomsnelheidsprofiel. De hoogte van de ribbels op de zandbodem is te klein om deze hydraulische ruwheid te verklaren. Deze gemiddelde waarde van k_s is gelijk aan ongeveer 3 D_{90} van het grind op de bodemverdediging en dat komt meer overeen met de genoemde vuistregel. De conclusie is dat voor de berekening van de ontgrondingskuil benedenstrooms van een bodemverdediging $k_s = 3 D_{90}$ met D_{90} van de bodemverdediging kan worden aanbevolen.

In de systematische meetserie naar de ontgrondingen in het onderzoek M 648 is de hydraulische ruwheid met de volgende vuistregel bepaald: $k_s = D_{50}$. Deze vuistregel geldt voor omstandigheden waar het allereerste begin van bewegen van een glad afgestreken bed optreedt, dat wil zeggen $\psi = 0,02$ à $0,03$. Dit is niet in overeenstemming met het criterium 6, waarmee in de systematische meetserie het begin van bewegen is gekarakteriseerd: korrels aan de wandel, overall en permanent. Deze bewegingsgraad komt overeen met de bewegingsgraad van de vlak-bed-proeven, die door van Rijn [13] zijn geanalyseerd. Het resultaat van deze proeven is $k_s = (1 \text{ à } 10) D_{90}$ met een gemiddelde waarde van $k_s = 3 D_{90}$.

De gevolgen van het toepassen van een andere vuistregel voor k_s kunnen worden geïllustreerd met de resultaten van proef DOV2M36 van de systematische meetserie:

k_s (m)	C ($m^{1/2}s^{-1}$)	u_{kr} (m/s)	α (-)
D_{50} zand	74,8	0,326	2,95
$3D_{90}$ zand	63,1	0,275	2,87
$3D_{90}$ bodem- verdediging	38,2	0,167	2,55

Tabel I Voorbeeld van de invloed van de keuze van k_s op u_{kr} en α .

Uit het voorbeeld in tabel I blijkt, dat de invloed van de verschillende vuistregels voor k_s op α en u_{kr} niet kan worden verwaarloosd.

Uit het voorgaande volgt, dat het aanbeveling verdient om bij de toepassing van de ontgrondingsformule steeds de gebruikte vuistregel voor k_s te vermelden, en indien van toepassing te overwegen de resultaten van de systematische meetserie te corrigeren voor een meer realistische vuistregel van $k_s = 3 D_{90}$ van het ontgrondingsmateriaal of van de bodemverdediging.

In de verdere analyse van de meetresultaten van het onderhavige onderzoek is de vuistregel $k_s = 2 D_{50}$ toegepast om een goede aansluiting op de resultaten van de systematische meetserie te behouden (met $k_s = D_{50}$ zou de aansluiting nog beter zijn).

Vervolgens is met de formule van White-Colebrook de Chézy-coëfficiënt en met (5.8) de kritieke stroomsnelheid berekend; het resultaat is in onderstaande tabel samengevat.

h_o (m)	C ($m^{0.5}/s$)	$k_s = D_{50}$	$k_s = 2 D_{50}$
		u_{kr} (m/s)	u_{kr} (m/s)
0,25	74,8	0,326	0,31
0,15	70,8	0,309	0,29
0,14	70,2	0,306	0,283
0,125	69,4	0,303	0,280
0,115	68,7	0,300	0,28
0,10	67,6	0,295	0,276

Tabel II Kritieke stroomsnelheid van zand bij verschillende waterdiepten met $k_s = D_{50}$ en $k_s = 2 D_{50}$

5.4 Bepaling van de coëfficiënten

De coëfficiënten α en γ van de ontgrondingsformule zijn bepaald door de berekende kromme met een kleinste kwadraten methode aan de meetpunten te fitten. Hierbij is van de relaties (5.2), (5.3) en (5.4) gebruik gemaakt en zijn de volgende situaties onderscheiden:

- De proef heeft lang genoeg geduurd om de waarde van t_1 door interpolatie te bepalen. Het tijdstip t_1 is gedefiniëerd als het tijdstip waarop de maximale ontgrondingsdiepte gelijk is aan de waterdiepte. Het verloop van γ wordt door de waarden van de coëfficiënten p en v bepaald. De waarden van deze coëfficiënten volgen uit het met een kleinste kwadraten criterium minimaliseren van het verschil tussen de gemeten en de berekende punten. In verband met de structuur van de relaties (5.3) en (5.4) is er voor gekozen de afwijking tussen een berekend en een gemeten tijdstip bij een gegeven ontgrondingsdiepte te minimaliseren, zie Figuur 30 voor een toelichting.
- De proef heeft zo kort geduurd dat de waarde van t_1 door extrapolatie bepaald dient te worden. In dit geval dient het optimaliseren van t_1 bij het optimalisatieproces van p en v te worden betrokken. Het spreekt voor zich, dat het toevoegen van een extra variabele de uitkomst van

het optimalisatieproces negatief kan beïnvloeden. Deze situatie heeft zich in het onderhavige onderzoek alleen bij proef T1 voorgedaan.

De genoemde optimalisatieprocedure is met het programma Alfabit uitgevoerd. Dit programma verkeert nog in een ontwikkelingsstadium.

Vervolgens is de maximale ontgronding als functie van de tijd op dubbel-logarithmische schaal uitgezet, zie de Figuren 31 tot en met 41. De helling van de berekende kromme is in het geval van een tweedimensionale ontgronding een maat voor de waarde van y . Uit deze figuren blijkt dat de ontgronding in de proeven T1 en T2 goed overeenkomt met de ontgronding in een tweedimensionale situatie, waarbij y een min of meer constante waarde heeft. Bij de overige proeven is de afbuiging van de kromme aan het einde van de proef goed waarneembaar.

De waarden van de parameters α , p en v die met dit programma Alfabit zijn bepaald, zijn in tabel 5 verzameld. De complete uitvoer van het programma Alfabit met extra informatie over het optimalisatieproces zijn als bijlage 1 in dit verslag opgenomen. De coëfficiënt α is als functie van het vernauwingspercentage uitgezet in de Figuren 42 en 43 voor de proeven met en zonder bodemverdediging. In deze figuren zijn alleen de resultaten van proeven gepresenteerd, waarbij de vernauwing uit een schotje bestaat. Uit deze resultaten kunnen de volgende tendenzen worden afgeleid:

- Bij een toenemend vernauwingspercentage neemt α betrokken op de gemiddelde bovenstroomse aanstroomsnelheid sterk toe.
- Een bodemverdediging met een lengte van $5 h_0$ benedenstrooms van de constructie leidt tot een reductie van α met 1,7 à 6,4 ten opzicht van de situatie zonder een bodemverdediging.
- Een kribkop zoals in proef T11, leidt tot een verlaging van α in vergelijking met een schotje, namelijk van de geïnterpoleerde waarde 5,0 à 5,3 naar 3,4, dat komt overeen met een verlaging van ongeveer 40%. De kribkop veroorzaakt namelijk een tijdens de proef veranderend vernauwingspercentage van 12 naar 16.
- Een caisson of een kofferdam zoals in proef T12, leidt in vergelijking met een schotje tot een geringe verhoging van α , namelijk van 8,2 naar 8,9. Dat betekent een toename met 10%.

Vervolgens is voor andere stroomsnelheden dan de gemiddelde bovenstroomse aanstroomsnelheid α berekend met (5.5). Deze andere stroomsnelheden zijn u_k en u_{\max} , zie tabel 6 en de Figuren 42 en 43. Uit deze resultaten volgen onderstaande tendenzen:

- bij een toenemend vernauwingspercentage neemt α_k veel langzamer toe dan α_1 . Bij een toenemend vernauwingspercentage is α_m betrokken op u_{\max} vrijwel constant bij de proeven met een bodemverdediging en neemt deze α langzaam toe bij de proeven zonder bodemverdediging. Deze langzame toename wordt nog minder als de invloed van ontgrondingskuil op de gemeten stroomsnelheden wordt vermeden, bijvoorbeeld door de stroomsnelheden in het begin van de proef te meten.
- Een kribkop zoals in proef T11, leidt tot een verlaging van α_k van 4,3 à 4,6 naar 2,6 ten opzichte van een vernauwing door een schotje, dat wil zeggen een verlaging met 45%.
- Een caisson of een kofferdam zoals in proef T12, leidt in vergelijking met een schotje tot een geringe verhoging van α_k met ongeveer 10 %.

Deze tendenzen komen grotendeels overeen met de tendenzen gebaseerd op de gemiddelde aanstroomsnelheid u bovenstrooms van de constructie.

De variatie in de coëfficiënt y komt tot uitdrukking in de coëfficiënten p en v , die in tabel 5 zijn vermeld. Op basis van deze gegevens zijn de onderstaande gemiddelde waarden bepaald, waarbij een variatie met 0,1 is geaccepteerd:

Voor de coëfficiënt p worden de volgende waarden aanbevolen:

tweedimensionale ontgroning	0
horizontale vernauwing met een bodemverdediging	-0,10
horizontale vernauwing zonder bodemverdediging	-0,30

Voor de coëfficiënt v worden de volgende waarden aanbevolen:

tweedimensionale ontgroning	-0,40
horizontale vernauwing	-0,30

Het verdient aanbeveling te onderzoeken of de fit tussen de berekende kromme en de meetpunten verslechtert als van de aanbevolen waarden voor p en v wordt uitgegaan.

De waarden van p en v die bij de proef met kribkop zijn bepaald, komen goed overeen met de aanbevolen waarden. Bij de proef met het caisson of de kofferdam is een aanzienlijk lagere waarde van p bepaald, en de waarde van v komt redelijk overeen met de aanbevolen waarde.

Het verloop van y bij een toenemende ontgrondingsdiepte is voor de aanbevolen waarden van p en v in Figuur 44 weergegeven. Uit deze figuur volgt bij de proeven met een bodemverdediging dat de variatie van y geen grote invloed heeft en redelijk aansluit bij een tweedimensionale ontgroning, maar dat bij de proeven zonder bodemverdediging de variatie in y niet mag worden verwaarloosd. Bij de proeven zonder bodemverdediging is de ontgrondingskuil meer driedimensionaal van karakter.

5.5 Vergelijking met andere onderzoeken

Teneinde de resultaten van het ontgrondingsonderzoek Q935 in een breder kader te plaatsen, is naar de resultaten van vergelijkbare proeven uit andere onderzoeken gezocht.

Voor het verloop van de maximale ontgrondingsdiepte in de tijd van proef T2 met een bodemverdediging en een horizontale vernauwing van 10% zijn in het systematisch ontgrondingsonderzoek, zie lit. [15], enkele vergelijkbare proeven gevonden. In de proeven DOV2M36 tot en met DOV2M54 komen zowel de geometrie, de waterdiepte als de afmetingen van het sediment overeen met deze grootheden in proef T2 van het onderzoek Q935. In het systematisch ontgrondingsonderzoek zijn geen proeven uitgevoerd met een horizontale vernauwing van meer dan 10%.

In onderstaande tabel zijn de belangrijkste parameters van de te vergelijken proeven vergeleken:

parameter	onderzoek	M648/M863		Q935
	proef	DOV2M36	DOV2M54	T2
vernauwings percentage (%)		10	10	10
lengte bodemverdediging (m)		12 h _o	12 h _o	5 h _o
breedte goot (m)		5	5	1,5 _o
waterdiepte (m)		0,25	0,25	0,25
stroomsnelheid (m/s)		0,36	0,54	0,60
D ₅₀ (µm)		258	204	220
u _{kr} (m/s)		0,319	0,311	0,31
t ₁ (uur)		130	12	12,6
α ¹ (-)		2,95	2,98	2,79
y (-)		0,38 à 0,54	0,47 à 0,51	0,49

Tabel III Vergelijking van proef T2 met de resultaten van vergelijkbare proeven uit het Systematisch ontgrondingsonderzoek

De waarde van α in T2 is 2,79 en deze waarde is iets lager dan de waarde van α in de vergelijkbare proeven in de systematische serie, met $\alpha = 2,95$ à 2,98.

Opgemerkt wordt dat in de vergelijkbare proeven van het systematisch ontgrondingsonderzoek de bodemverdediging benedenstrooms van de constructie twee keer zo lang is als in proef T2 van het onderzoek Q935. Naar verwachting heeft dit verschil een verwaarloosbare invloed op de waarde van α , als α klein is of als de bodemverdediging lang is.

Hieruit kan worden geconcludeerd dat proef T2 goed aansluit op de resultaten van het systematisch ontgrondingsonderzoek.

5.6 Evenwichtsontgrondingsdiepte

In de praktijk zijn veel kribben zonder uitgebreide bodemverdediging aangelegd. Van het onderhavige onderzoek kunnen in principe de proeven zonder bodemverdediging rond de constructie worden vergeleken met proeven, die in andere onderzoeken naar de ontgroning bij kribkoppen zijn uitgevoerd. Deze andere onderzoeken zijn voornamelijk op het bepalen van de evenwichtsontgrondingsdiepte ten behoeve van het ontwerp van een kribkop gericht. Uit de proefresultaten van het onderhavige onderzoek is de evenwichtsontgrondingsdiepte zo goed mogelijk bepaald en vergeleken met de bestaande berekeningsmethoden van deze evenwichtsdiepte.

De evenwichtsdiepte is gedefiniëerd als de maximale ontgrondingsdiepte, die in de tijd niet verder toeneemt. In de figuren, waarin de ontgrondingsdiepte als functie van de tijd is uitgezet, betekent dat het bepalen van een horizontale raaklijn. Uit de figuren 15 tot en met 25 blijkt, dat in de meeste proeven de maximale ontgrondingsdiepte aan het einde van de proef nog steeds toeneemt en de evenwichtsdiepte nog niet is bereikt. Daarom is de evenwichtsdiepte bepaald als h_{\max} na 20 uren stromen, dat is meestal aan het einde van de proef, en uit een extrapolatie van de gefitte curve. De evenwichtsdiepte na 20 uur is wel nauwkeurig te bepalen, maar is een te lage waarde voor de evenwichtsdiepte. De evenwichtsdiepte uit de genoemde extrapolatie is onnauwkeurig, maar is een realistische waarde voor de evenwichtsdiepte.

In het verleden zijn verschillende formules gepubliceerd waarmee de evenwichtsdiepte kan worden berekend. De meest bekende formules zijn in het onderstaande samengevat.

Een eenvoudige formule voor de berekening van de evenwichtsontgrondingsdiepte is reeds in 1936 door Khosla, lit. [8], gepubliceerd:

$$h_o + h_e = 75 \cdot D_{50}^{-0,167} \cdot q^{0,67} \quad (5.12)$$

Volgens deze formule is de invloed van D_{50} op de evenwichtsdiepte voor fijn zand niet zo groot. Ahmad, lit. [1], verwaarloosde deze invloed op de evenwichtsdiepte en stelde dat D_{50} alleen invloed heeft op de snelheid waarmee de evenwichtsontgrondingsdiepte wordt bereikt. Hij breidde deze formule (5.12) uit met de invloed van de relatieve vernauwing $m = (B - b)/B$:

$$h_o + h_e = k_e \cdot q^{0,67} \cdot m^{-0,67} \quad (5.13)$$

$$\text{waarin } k_e = 1,5 B^{0,67}$$

Deze formule komt vrijwel overeen met de formule, die door Izzard en Bradley, lit. [7], enkele jaren later, in 1957, is gepubliceerd:

$$h_o + h_e = 2,1 \cdot q^{0,67} \cdot m^{-0,67} \quad (5.14)$$

Vervolgens heeft Laursen, lit. [9], gevonden, dat de evenwichtsdiepte niet afhankelijk is van D_{50} en het specifieke debiet q , maar uitsluitend van de breedte in de vernauwing en de waterdiepte:

$$\frac{h_e}{h_o} = 1,5 \left(\frac{b}{h_o}\right)^{0,5} \quad (5.15)$$

Liu, Chang en Skinner, lit. [10], breidden de formule van Laursen uit met de invloed van het Froude-getal Fr en de helling van de wand van een contractie. Tot op zekere hoogte is een contractie vergelijkbaar met een krib. Opgemerkt wordt, dat de afhankelijkheid van het Froude-getal vergelijkbaar is met de afhankelijkheid van het specifieke debiet:

$$q = u \cdot h_o$$

$$Fr = u/(g \cdot h_o)^{0,5}$$

Het specifieke debiet en het Froude-getal geven beide de afhankelijkheid van de stroomsnelheid weer.

$$\frac{h_e}{h_o} = c(m_s) \cdot \left(\frac{b}{h_o}\right)^{0,4} \cdot Fr^{0,33} \quad (5.16)$$

waarin:

$$c(m_s) = 2,15 \text{ voor } m_g = m_s = 0$$

$$c(m_s) = 1,1 \text{ voor } m_g = m_s = 1,5$$

Deze waarden kunnen benaderd worden met $c(m_s) = 2,1 (1 - 0,285 m_s)$ waarin $(1 - 0,285 m_s)$ een factor is die door Maglakelidze, Muromov en Papashvili is voorgesteld [11].

De formule van Ahmad vertoont sterke overeenkomst met de formule van Garde, Subramanya en Nanbudripad, lit. [4], indien het specifieke debiet q vervangen wordt door het Froude-getal:

$$h_o + h_e = c_1 \cdot Fr^{+0,67} \cdot m^{-1} \quad (5.17)$$

waarin:

$$c_1 = \text{functie van } \sqrt{\frac{4 \Delta g D}{3 \omega^2}}$$

$$c_1 \approx 4$$

Deze formule is gebaseerd op proeven naar de ontgroning bij kribben die geschematiseerd zijn tot een schotje met een verticale helling van de kribkop. Het proevenprogramma omvatte vier soorten zand met $D_{50} = 300 \mu\text{m}$ tot $D_{50} = 2,3 \text{ mm}$ en vier vernauwingspercentages van 10 tot 47%.

Door Gill, lit. [5], is eveneens onderzoek gedaan naar de ontgroning bij tot een schotje geschematiseerde kribben. In de analyse voor een ontgroningsformule is hij uitgegaan van een formule voor een lange contractie en de situatie dat $\tau = \tau_{cr}$ bovenstrooms van de vernauwing:

$$h_o + h_e = 8,375 \cdot h_o \left(\frac{D_{50}}{h_o}\right)^{0,25} \cdot m^{-0,857} \quad (5.18)$$

Deze formule heeft een beperkte geldigheid en is minder geschikt om te worden gebruikt als vuistregel.

Door Das, lit. [2], is een analyse van de ontgroning bij horizontaal uitgebouwde dammen van breuksteen uitgevoerd. In het proevenprogramma zijn drie soorten zand ($D_{50} = 250 \mu\text{m}$, $600 \mu\text{m}$ en $1,2 \text{ mm}$), drie stroomsnelheden en vernauwingspercentages tussen 20 en 90%. Deze vernauwingspercentages zijn voor kribben aan de hoge kant, omdat bij een krib het vernauwingspercentage vrijwel altijd kleiner is dan 50%.

$$h_o + h_e = 0,69 \cdot Fr^{0,85} \cdot \Delta^{-0,43} \cdot \left(\frac{h_o}{D_{50}}\right)^{0,29} \cdot 10^{1,011 \cdot n - 0,0538} \quad (5.19)$$

Deze formule geldt voor breuksteen dat onder de hoek van natuurlijk talud ligt, stel ongeveer 1:1,5. In een eerste benadering van de invloed van de taludhelling kan de factor $1/1,44 = 0,694$ worden vervangen door 1,21 ($1 - 0,285 m_s$) voor de invloed van de taludhelling volgens Maglakelidze, Muromov en Papasvili [11]. Das vergelijkt in figuur 7 van lit. [2] zijn resultaten met de resultaten van Garde en constateert een verschil in de evenwichtsontgrondingsdiepten in beide onderzoeken. Dit verschil kan verklaard worden door het verschil in taludhelling: Garde onderzocht verticale kribben en Das kribben met een taludhelling van 1:1,5.

De invloed van de relatieve dichtheid in de formule is slechts gebaseerd op twee materialen: zand en steenkool. De exponent $-0,43$ is waarschijnlijk niet nauwkeurig.

In de afleiding van de formule wordt het begin van bewegen gelijk gesteld aan de Shields-parameter volgens $\psi = 0,04$, onafhankelijk van D_{50} . Een nauwkeuriger resultaat zou zijn verkregen als ψ_{cr} volgens de Shields-kromme varieert met D_{50} van het ontgrondingsmateriaal. In Tabel IV is de relatieve evenwichtsdiepte vergeleken voor verschillende proeven. De relatieve evenwichtsdiepte $h_{\text{max,rel}} = (h_o + h_e)/h_o$.

Proef nummer	$h_{\text{max,rel}}$ Das (-)	$h_{\text{max,rel}}$ 20 uur (-)	$h_{\text{max,rel}}$ extrapolatie (-)
T7	2,5	2,4	2,7
T11	1,8	2,1	2,3
T5	2,7	2,1	2,4
T6	3,5	3,4	3,7
T12	3,5	3,4	3,7
T8	3,7	2,9	3,0

Tabel IV Vergelijking van de evenwichtsdiepte volgens Das met de meetresultaten

Uit bovenstaande tabel volgt dat de evenwichtsdiepte berekend met de aangepaste formule van Das redelijk overeenstemt met de evenwichtsdiepte, die volgt uit de extrapolatie van de meetresultaten van het onderhavige onderzoek.

Ook de evenwichtsdiepte, die met de formule van Liu et al is berekend, stemt redelijk overeen met de meetresultaten. De overige formules berekenen sterk afwijkende waarden. Opgemerkt wordt dat met de formule van Garde et al te lage evenwichtsdiepten berekend worden en dat deze veel toegepaste formule aan de onveilige kant is.

In de tabellen 7 en 8 zijn de berekende evenwichtsdiepten en de uit de meetresultaten bepaalde evenwichtsdiepten voor enkele proeven verzameld. Hieruit blijkt, dat bij een horizontale vernauwing van 10 à 14 % en een echte kribkop de evenwichtsdiepte na 20 uur met een nauwkeurigheid van 30 % kan worden berekend, met uitzondering van de formule van Das, die in dit geval veel te lage evenwichtsdiepten berekend. Bij een hoger vernauwingspercentage leidt de formule van Liu tot de beste overeenkomst met de modelresultaten, dat wil zeggen de evenwichtsdiepte na 20 uur wordt met Liu met een nauwkeurigheid van 15 à 30 % berekend. De overige formules leiden tot evenwichtsdiepten, die ten opzichte van de gemeten evenwichtsdiepten 100% kunnen afwijken.

Door Dietz, lit. [3], is een eenvoudige formule voor de maximum kuildiepte in een evenwichtsontgrondingskuil afgeleid. Stel de gemiddelde stroomsnelheid in een raai door het diepste punt van de ontgrondingskuil is u_{\max} . Volgens de continuïteitswet geldt:

$$u_0 \cdot h_0 = u_{\max} \cdot (h_0 + h_{\max}) \quad (5.20)$$

De evenwichtsdiepte is bereikt indien u_{\max} gelijk is aan de kritieke stroomsnelheid u_{kr} , en dan is $h_{\max} = h_e$. Dietz heeft u_{kr} berekend op de waterdiepte h_0 , om zoveel mogelijk aan te sluiten op de beschouwingen over de kuilgroei in de ontwikkelingsfase. Het is wellicht logischer de kritieke stroomsnelheid op de waterdiepte $h_0 + h_{\max}$ te berekenen. Voor de invloed van de turbulentie en de ongelijkmatige stroomsnelheidsverdeling wordt een faktor ω ingevoerd:

$$h_0 + h_e = \omega \cdot u_0 \cdot h_0 / u_{kr} \quad (5.21)$$

ofwel:

$$\frac{h_e}{h_0} = \frac{\omega \cdot u_0}{u_{kr}} - 1 \quad (5.22)$$

Uit de tweedimensionale ontgrondingen in de proeven van Dietz en de experimenteel bepaalde u_{kr} volgt dat ω een functie van α is:

$$\omega = (0,6 \text{ à } 1,0) \cdot \alpha$$

Uit de meetresultaten van het onderhavige onderzoek naar driedimensionale ontgrondingen volgt, zie Figuur 45:

$$\omega = (0,6 \text{ à } 0,7) \cdot \alpha_k \quad (5.23)$$

Deze relatie stemt goed overeen met de resultaten van Dietz. Opgemerkt wordt, dat hierbij is uitgegaan van de werkelijke kritieke stroomsnelheid, waarbij k_s door de ruwheid van het zand is bepaald, $k_s = 2 D_{50}$, en van de evenwichtsdiepte, die globaal volgt uit een extrapolatie van de metingen.

Een aanvullende studie voor het handboek ontgrondingen heeft geresulteerd in de volgende formule voor α_k :

$$\alpha_k = 1,5 + \left\{ 2,7 + 18 \left(\frac{B_s}{B} \right)^2 \right\} e^{-0,1 L_p/h_0} \quad (5.24)$$

waarin:

α_k = alfa-faktor

L_p = lengte bodembescherming benedenstrooms van de horizontale vernauwing (m)

Deze formule geldt indien:

- $B_s/B < 0,7$
- $L_p/h_0 < 25$
- de krib een verticale kop heeft, en
- indien een bodembescherming aanwezig is, deze bescherming hydraulisch ruw is.

Door curve-fitting en een combinatie van de formules (5.8), (5.22), (5.23) en (5.24) is een formule afgeleid, waarmee direct de evenwichtsontgrondingsdiepte kan worden voorspeld:

$$u_{kr} = 18 \sqrt{\psi_{kr} \Delta D_{50}} \log\left(\frac{12 h_o}{2 D_{50}}\right) \quad (5.25)$$

$$h_e = \{1 - 0,285 m_s\} \left\{ \left[0,70 + (1,27 + 2,8 \left(\frac{B_s}{B}\right)^{1,5})^{-0,1} \frac{L_p}{h_o} \right] e^{\frac{u_k \cdot h_o}{u_{kr}} - h_o} \right\} \quad (5.26)$$

Formule (5.25) geldt indien:

$B_s/B < 0,7$, $L_p/h_o < 25$, $u_k > u_{kr}$, een hydraulische ruwe bodembescherming, en een krib loodrecht op de oever.

Formule (5.26) is slechts getoetst aan het onderhavige onderzoek, zodat de algemene geldigheid nog onzeker is.

De met vgl. (5.25) en (5.26) berekende evenwichtsdiepten sluiten beter aan bij de meetpunten dan de evenwichtsdiepten, die met de literatuurformules zijn berekend. Dit wordt vooral veroorzaakt door het fitten. Daarom wordt de toetsing aan een ander onderzoek aanbevolen om een beter inzicht in de algemene geldigheid van (5.26) te verkrijgen.

5.7 Aanzethelling

De aanzethelling van een ontgrondingskuil is de steilste helling juist benedenstrooms van de bodemverdediging. In situatie zonder bodemverdediging is de aanzethelling gemeten als de steilste helling in het bovenstroomse deel van de ontgrondingskuil. Deze aanzethelling is in de hoofdstroomrichting gemeten, dus evenwijdig aan de as van de goot. De grootte van de aanzethelling is een maat voor de goetechnische stabiliteit, dat wil zeggen voor de kans op een afschuiving of een zettingsvloeiing.

Uit de meetsignalen van de profielvolgers zijn de aanzethellingen bepaald, zie tabel 11. Van de aanzethelling is de hoek met de horizontale as, de tangens en de cotangens berekend. Bij sterke driedimensionale ontgrondingskuilen is het mogelijk dat de steilste aanzethelling juist

tussen de banen van de profielvolgers is gelegen, dan moet de gemeten waarde als een ondergrens van de steilste aanzethelling worden beschouwd.

In de proeven zonder bodemverdediging en een vernauwing door een schotje met een verticale kop zijn steile aanzethellingen gemeten (proeven T5, T6, T7 en T8). Onder water is de hoek van natuurlijk talud van het wadzand ongeveer 32 tot 36 graden. De hoek van natuurlijk talud van dat fijne zand wordt door het afschuiven van kleine laagjes bepaald. Bij grover materiaal echter, zoals bij grind en stortsteen, is de stabiliteit van een enkele steen die op een helling ligt maatgevend voor de hoek van natuurlijk talud. Het blijkt dat de aanzethelling in die proeven ongeveer 5 à 9 graden flauwer is dan de hoek van natuurlijk talud. Voorts blijkt dat deze hoek nauwelijks afhankelijk is van het vernauwingspercentage.

In de proeven met een bodemverdediging en een vernauwing door een schotje met een verticale kop zijn de aanzethellingen ongeveer de helft van de hoek van natuurlijk talud. Uit een vergelijking met de proeven zonder bodemverdediging volgt dat door een bodemverdediging de aanzethelling sterk wordt gereduceerd. Uit de proeven T2, T3 en T4/T10 volgt dat bij een toenemende vernauwing de aanzethelling slechts enkele graden zal toenemen (gemeten is 1,2 tot 2,5 graad), maar dat bij een toename van de stroomsnelheid in de keel van $0,85 u_{cr}$ tot $1,6 u_{cr}$ de aanzethelling met ongeveer 4 graden kan toenemen. Uit een vergelijking van de proeven T5/T6 met T12 volgt dat een toename van de "dikte" van de vernauwing slechts tot een geringe toename van de aanzethelling leidt (0,9 tot 2,5 graad).

In proef T11 met een realistische kribkop is de aanzethelling veel kleiner dan bij een vernauwing door een schotje met een verticale kop: 4 tot 6 graden te vergelijken met 15 to 19 graden. Hieruit volgt dat door de helling van de kribkop flauwer te maken de aanzethelling van de ontrgrondingskuil kan worden gereduceerd en daarmee de grondmechnische stabiliteit kan worden vergroot.

De resultaten van de proeven T1 en T2 kunnen worden vergeleken met de resultaten van het systematische onderzoek naar driedimensionale ontgrondingen M847, lit. [14]. De proeven zonder drempel en met een ruwe en een matig ruwe bodemverdediging tonen een aanzienlijk spreiding in de gemeten aanzethelling:

proef	gemeten (-)	systematische meetserie (-)
T1	5,4 à 5,5	3,5 à 4,2
T2	3,2 à 3,4	2,6 à 4,4

Tabel V Vergelijking van de cotangens van de aanzehelling

Uit de vergelijking in tabel V volgt dat in T1 een relatief te flauwe aanzehelling is gemeten, maar dat de aanzehelling in T2 goed overeenstemt met de meetresultaten van de systematische meetserie indien rekening wordt gehouden met de spreiding in de meetpunten van de systematische meetserie. In deze systematische meetserie is de aanzehelling bepaald in proeven waarbij een horizontale vernauwing van 10 % gecombineerd is met een verticale vernauwing. In deze proeven is de maximale aanzehelling iets flauwer dan de hoek van natuurlijk talud.

6. Aanbevelingen

De resultaten van het modelonderzoek zijn aanleiding om enkele aanbevelingen te formuleren:

- Een voortzetting van het modelonderzoek met proeven naar de ontgronding bij tweezijdige vernauwingen en naar de ontgronding bij een schotje met een variabele helling van de kop van het schotje. Deze laatste serie proeven wordt aanbevolen omdat uit een vergelijking van een echte kribkop (proef T11) met een schotje (proef T7) blijkt, dat de helling waarschijnlijk veel invloed op α heeft. Het verdient aanbeveling hierbij de ronding van de kribkop en de helling als twee onafhankelijke geometrie parameters te beschouwen.
- In een voortgezet onderzoek zou de definitie van de hydraulische ruwheid nader kunnen worden onderzocht en vervolgens kan een methode ter bepaling van de kritieke stroomsnelheid in een ontgrondingsformule worden aanbevolen.
- Het optimalisatiecriterium in het programma Alafit kan worden verfijnd, door een combinatie van ontgrondingsdiepte en tijd te optimaliseren in plaats van alleen de tijd.
- Ter vergroting van het inzicht in het Sutrench-3D model zouden de mogelijkheden om de meetresultaten met dat model geheel of gedeeltelijk na te rekenen, onderzocht kunnen worden. In het onderzoek "Three-dimensional modelling of suspended sediment transport for currents and waves" [17] is de erosiesnelheid van de bodem rond een kribkop berekend. Eén van de onderzochte situaties in dat onderzoek vertoont veel overeenkomst met de situatie in proef T7, een horizontale vernauwing van 10 % en zonder bodemverdediging.
- De uitdrukking voor een variabele y is tamelijk gecompliceerd, en daarom verdient het aanbeveling een eenvoudige uitdrukking of een uitdrukking met een duidelijke fysische betekenis te onderzoeken.
- De voorgestelde formule voor de evenwichtsontgrondingsdiepte dient aan de resultaten van andere onderzoeken te worden getoetst om het inzicht in de geldigheid van deze formule te vergroten.

LITERATUUR

- 1 Ahmad, M.
Experiments on design and behaviour of spur dikes
Proceedings IAHR Conference Minnesota, 1953, pp. 145-159
- 2 Das, B.P.
Bed scour at end-dump channel constrictions
Journal of the hydraulics division of the ASCE,
No HY12, 1973, pp. 2273-2285
- 3 Dietz, J.W.
Kolkbildung in feinen oder leichten Sohlmaterialen bei strömenden
Abfluss
Mitteilungen van Versuchsanstalt für Wasserbau und Kulturtechnik, Heft
155, pp. 1..120, Karlsruhe, Duitsland, 1969
- 4 Garde, R.J., K. Subramanya and K.D. Nanbudripad
Study of scour around spurdikes
Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 87, No HY6, 1961,
pp. 23-38
- 5 Gill, M.A.
Erosion of sand beds around spurdikes
Journal of the Hydraulics Division of the ASCE, No HY9, September 1972,
pp. 1587-1601
- 6 Grondmechanica Delft,
Oriënterende studie naar grondmechanische aspecten bij ontgrondings-
kuilen, CO - 291720/12, F. Silvis,
Delft, maart 1988
- 7 Izzard, C.F. and J.N. Bradley
Field verification of model tests in flow through highway bridges and
culverts
Proceedings of the 7th Hydraulics Conference, IOWA, USA, 1957

- 8 Khosla, A.N.
Design of weirs on permeable foundations
Publication No. 12, Central Board of Irrigation and Power, India, 1936

- 9 Laursen, E.M.
Scour at bridge crossings
Transactions ASCE, Vol. 127, Part I, Paper No. 3294, 1962 pp. 166-180

- 10 Liu, H.K., F.M. Chang en M.M. Skinner
Effect of bridge constrictions on scour and backwater
Colorado State University, Civil Engineering Section Fort Collins, USA,
Civil Engineering Section Report CER-60-HKL-22, Feb. 1961

- 11 Przedwojski, B. and Blazejewski, R..
Manual on river training and flood control, Part II, Fundamentals of
river engineering and flood protection
draft report, Poznan, Poland, 1989

- 12 Rijkswaterstaat, Bouwspuurwerk
notitie van R.E. Jorissen
Verwerkingsprocedure tijd-ontgrondingsproeven
Delft, 4 juli 1988

- 13 Rijn, L.C. van
Equivalent roughness of alluvial bed
Journal of the Hydraulics Division of the ASCE, No HY10, 1982.

- 14 Waterloopkundig Laboratorium
Systematisch onderzoek bodembescherming
M847 deel I, II en III, R. Adihardjo
Delft, 1970 en 1972

- 15 Waterloopkundig Laboratorium
Systematisch onderzoek naar twee- en driedimensionale ontgrondingen
M648 / M863, W.H.P. Schukking,
Delft, april 1972

- 16 Waterloopkundig Laboratorium
Stormvloedkering Oosterschelde,
Evaluatie ontgroningen, voorstel aanpassing verwerkingsprocedure
Q 496, J. Driegen
Delft, april 1987
- 17 Waterloopkundig Laboratorium
Three-dimensional modelling of suspended sediment transport for
currents and waves, SUTRENCH-3D model.
WL, H461/Q250/Q422, Delft, november 1986

proef- nummer	horizontale vernuwing (%)	lengte bodemver. (m)	water- diepte (m)	debiet	
				Q (m ³ /s)	q (m ² /s)
T1	10	20	0,25	0,225	0,150
T2	10	5	0,25	0,225	0,150
T3	30	5	0,15	0,061	0,041
T4	50	4,3	0,115	0,040	0,027
T5	30	0	0,14	0,047	0,031
T6	30	0	0,15	0,070	0,047
T7	10	0	0,15	0,080	0,053
T8	50	0	0,125	0,035	0,023
T9	-	-	-	-	-
T10	50	5	0,10	0,018	0,012
T11	10	0	0,15	0,090	0,060
T12	30	0	0,15	0,070	0,047

Tabel 1 Proevenprogramma

proef- nummer	positie van de profielvolgers *		
	provo 1 (m)	provo 2 (m)	provo 3 (m)
T1	0,25	0,75	1,25
T2	0,25	0,75	1,25
T3	0,30	0,60	0,90
T4	0,20	0,45	0,70
T5	0,30	0,60	0,90
T6	0,40	0,70	0,75
T7	0,84	1,06	1,29
T8	0,24	0,47	0,70
T10	0,20	0,45	0,70
	0,10	0,31	0,54
T11	0,60	0,83	1,05
	0,50	0,73	0,95
T12	0,50	0,73	0,95

* gemeten ten opzicht van de linker gootwand

Tabel 2 Posities van de profielvolgers

proef- nummer	correctie op maximum ontgrondingsdiepte (m)
T4	0,04
T5	0,055
T6	0,05
T7	0,02
T8	0,05
T10	0,0
T11	0,0
T12	0,05

Tabel 3 Correctie op de maximum ontgrondingsdiepte die met de profiel-
volgers is gemeten

proef- nummer	stroomsnelheden			
	u_1 (m/s)	u_k (m/s)	u_{max} (m/s)	u_{max} rand bodemver. (m/s)
T1	0,60	0,67		0,77
T2	0,60	0,67		0,80
T3	0,27	0,39		0,60
T4	0,23	0,46		0,82
T5	0,21	0,30	0,48	
T6	0,31	0,44	0,70	
T7	0,35	0,39	0,52	
T8	0,16	0,31	0,39	
T10	0,12	0,24		0,52
T11	0,40	0,48	0,43*	
T12	0,31	0,44	0,36*	

* Deze waarden zijn na afloop van de proef gemeten en beïnvloed door de
ontgrondingskuil

Tabel 4 Gemiddelde en maximale stroomsnelheden.

proef- nummer	t_1 (uren)	α_1 (-)	u (m/s)	p (-)	v (-)
T1	139,6	1,8	0,60	-0,44	-0,35
T2	12,6	2,8	0,60	0,0	-0,31
T3	3,3	6,5	0,27	-0,18	-0,18
T4	0,14	13,0	0,23	-0,10	-0,35
T5	6,9	7,1	0,21	-0,37	-0,25
T6	0,54	8,2	0,31	-0,09	-0,41
T7	4,5	4,7	0,35	-0,36	-0,26
T8	0,3	16,9	0,16	-0,30	-0,24
T10	8,4	10,5	0,12	-0,0	-0,31
T11	20,8	3,1	0,40	-0,32	-0,35
T12	0,4	9	0,31	-0,17	-0,27

Tabel 5 De uit de tijd-ontgrondingslijn berekende parameters

proef- nummer	u_k (m/s)	α_k (-)	u_{\max} vernaauwing (m/s)	α_m bodemver. (-)	u_{\max} (m/s)	α_m (-)
T1	0,67	1,41			0,77	1,23
T2	0,67	2,50			0,80	2,09
T3	0,39	4,52			0,60	2,94
T4	0,46	6,47			0,82	3,63
T5	0,30	5,00	0,48	3,11		
T6	0,44	5,76	0,70	3,62		
T7	0,39	4,25	0,52	3,19		
T8	0,31	8,72	0,39	6,93		
T10	0,24	5,24			0,52	2,42
T11	0,48	2,60	0,43*			
T12	0,44	6,26	0,36*			

* Deze waarden zijn na afloop van de proef gemeten, en beïnvloed door de ontgrondingskuil

Tabel 6 De waarde van α bij u_k en u_{\max}

proef- nummer	ver- nauwing (%)	evenwichtsdiepten		Das (m)	Garde (m)
		Q935 20 uur (m)	Q935 geextra- poleerd (m)		
T7	10	0,205	0,20 à 0,25	0,070	0,143
T11	14	0,170	0,20	0,117	0,182
T5	30	0,149	0,15 à 0,20	0,083	0,124
T6	30	0,368	0,40	0,163	0,195
T12	30	0,366	0,40	0,163	0,195
T8	50	0,234	0,25	0,151	0,179

Tabel 7 Vergelijking berekende en gemeten evenwichtsdiepten

proef nummer	ver- nauwing (%)	Liu (m)	Laursen (m)	Izzard (m)	Ahmad (m)	Koshla (m)	Gill (m)	Dietz gemodificeerd (m)
T7	10	0,214	0,225	0,163	0,078	0,347	0,116	0,265
T11	14	0,130	0,266	0,205	0,104	0,388	0,127	0,215
T5	30	0,272	0,376	0,125	0,053	0,209	0,174	0,22
T6	30	0,319	0,390	0,195	0,097	0,305	0,181	0,40
T12	30	0,319	0,390	0,195	0,097	0,305	0,181	0,40
T8	50	0,303	0,459	0,147	0,069	0,162	0,260	0,28

Tabel 8 Vergelijking van de berekende evenwichtsdiepten

Proef nummer	\bar{u}_o (m/s)	\bar{u}_{kr} (m/s)	α_k (-)	h_{max} 20 uur (m)	ω (-)	h_{max} geextrap. (m)	ω (-)
T1	0,60	0,31	1,41	0,142	0,81	0,15 à 0,20	0,83 à 0,93
T2	0,60	0,31	2,50	0,33	1,20	0,40 à 0,50	1,34 à 1,55
T3	0,27	0,29	4,52	0,28	3,10	0,30 à 0,35	3,22 à 3,58
T4	0,23	0,28	6,47	0,335	4,76	0,35 à 0,40	4,92 à 5,45
T5	0,21	0,283	5,00	0,149	2,85	0,15 à 0,20	2,79 à 3,27
T6	0,31	0,29	5,76	0,368	3,23	0,40	3,43
T7	0,35	0,29	4,25	0,205	1,96	0,20 à 0,25	1,93 à 2,21
T8	0,16	0,28	8,72	0,234	5,02	0,25	5,25
T10	0,12	0,276	5,24	0,166	6,12	0,30	9,2
T11	0,40	0,29	2,60	0,170	1,55	0,20	1,69
T12	0,31	0,29	6,26	0,366	3,21	0,40	3,43

Tabel 9 Berekening van ω

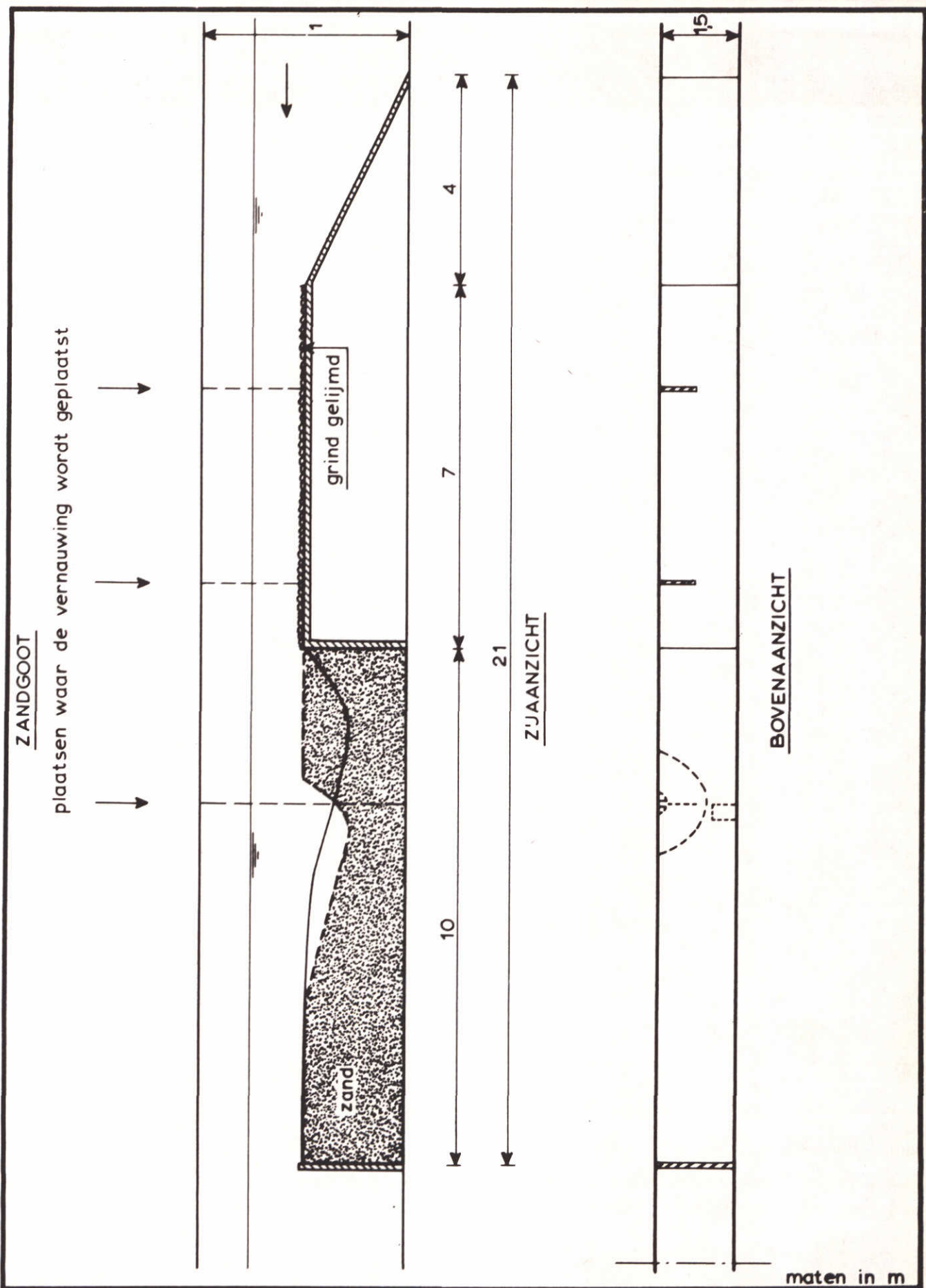
Proef nummer	B_s/B (-)	L_p/h_o (-)	h_o (m)	u_k (m/s)	u_{kr} (m/s)	m_s (-)	h_{max} berekend (m)	h_{max} gemeten (m)
T1	0,1	20	0,25	0,67	0,31	0	0,23	0,15 à 0,20
T2	0,1	5	0,25	0,67	0,31	0	0,57	0,40 à 0,50
T3	0,3	5	0,15	0,39	0,29	0	0,203	0,30 à 0,35
T4	0,5	4,3	0,115	0,46	0,28	0	0,295	0,35 à 0,40
T5	0,3	0	0,14	0,30	0,283	0	0,221	0,15 à 0,20
T6	0,3	0	0,15	0,44	0,29	0	0,403	0,40
T7	0,1	0	0,15	0,39	0,29	0	0,265	0,20 à 0,25
T8	0,5	0	0,125	0,31	0,28	0	0,28	0,25
T10	0,5	5	0,10	0,24	0,276	0	0,08	0,30
T11	0,14	0	0,15	0,48	0,29	1,5	0,215	0,20
T12	0,3	0	0,15	0,44	0,29	0	0,403	0,40

Opm. Voor h_{max} berekend is gebruik gemaakt van vgl. (5.25) en (5.26) met $\psi_{cr} = 0,055$, $\Delta = 1,65$ en $D_{50} = 220 \mu m$.

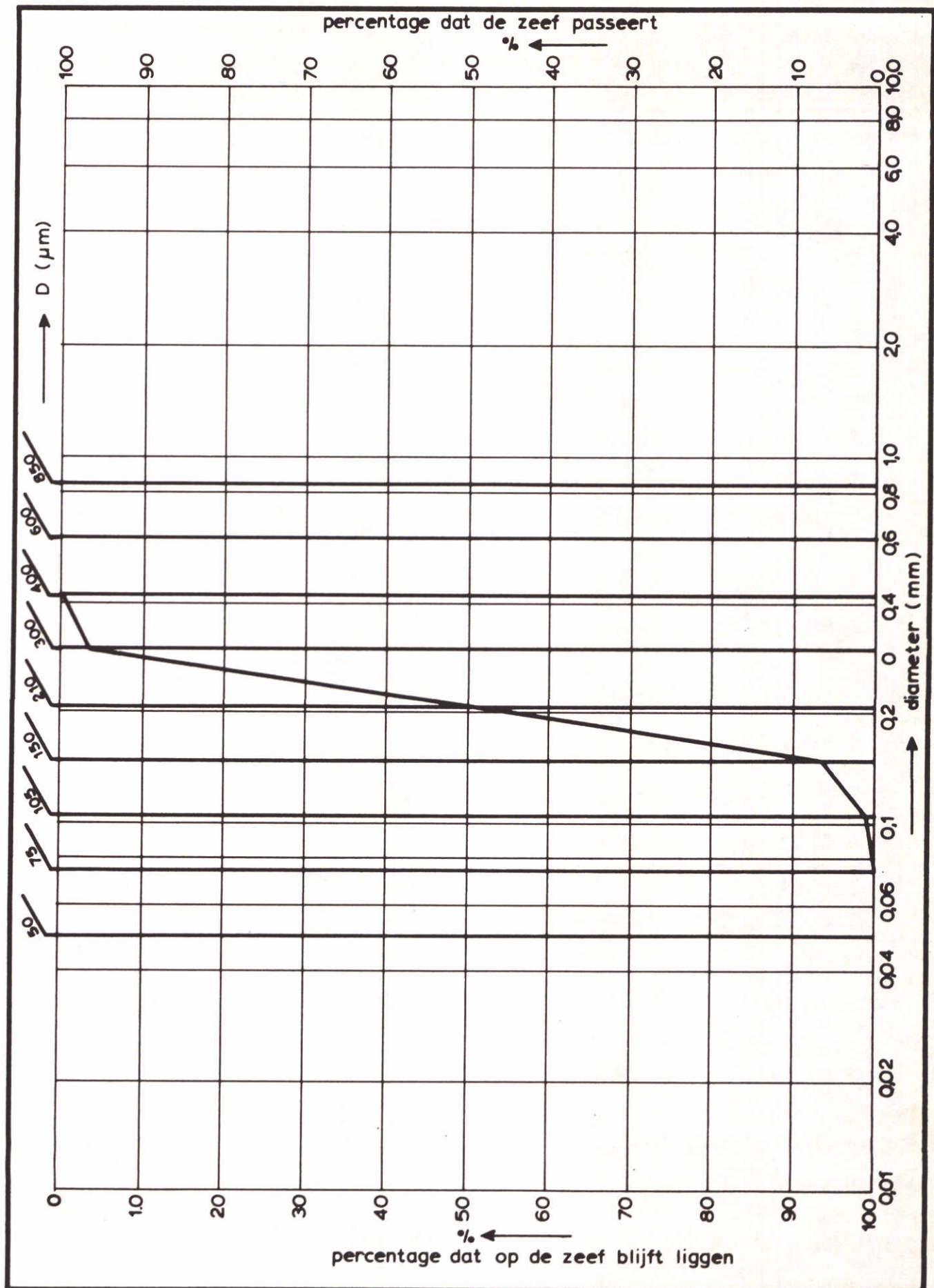
Tabel 10 Berekening evenwichtsontgrondingsdiepte

Proef nummer	L/h_o (P) ⁰	b/B (-)	δ (graden)	$\tan \delta$ (-)	$\cot \delta$ (-)
T1	20	0,10	10,2	0,18	5,55
			10,5	0,185	5,40
T2	5	0,10	16,2	0,29	3,2
			17,5	0,315	3,4
T3	5	0,30	17,6	0,32	3,1
T4	4,3	0,50	18,7	0,338	3,0
T5	0	0,30	28,8	0,55	1,8
T6	0	0,30	27,2	0,515	1,94
T7	0	0,10	28,0	0,532	1,9
T8	0	0,50	32,4	0,634	1,6
T10	5	0,50	14,6	0,26	3,8
T11	0	0,14	3,8	0,07	15,0
			6,0	0,10	9,5
T12	0	0,30	29,7	0,57	1,75

Tabel 11 Gemeten aanzethellingen



OVERZICHT PROEFOPSTELLING IN DE ZANDGOOT

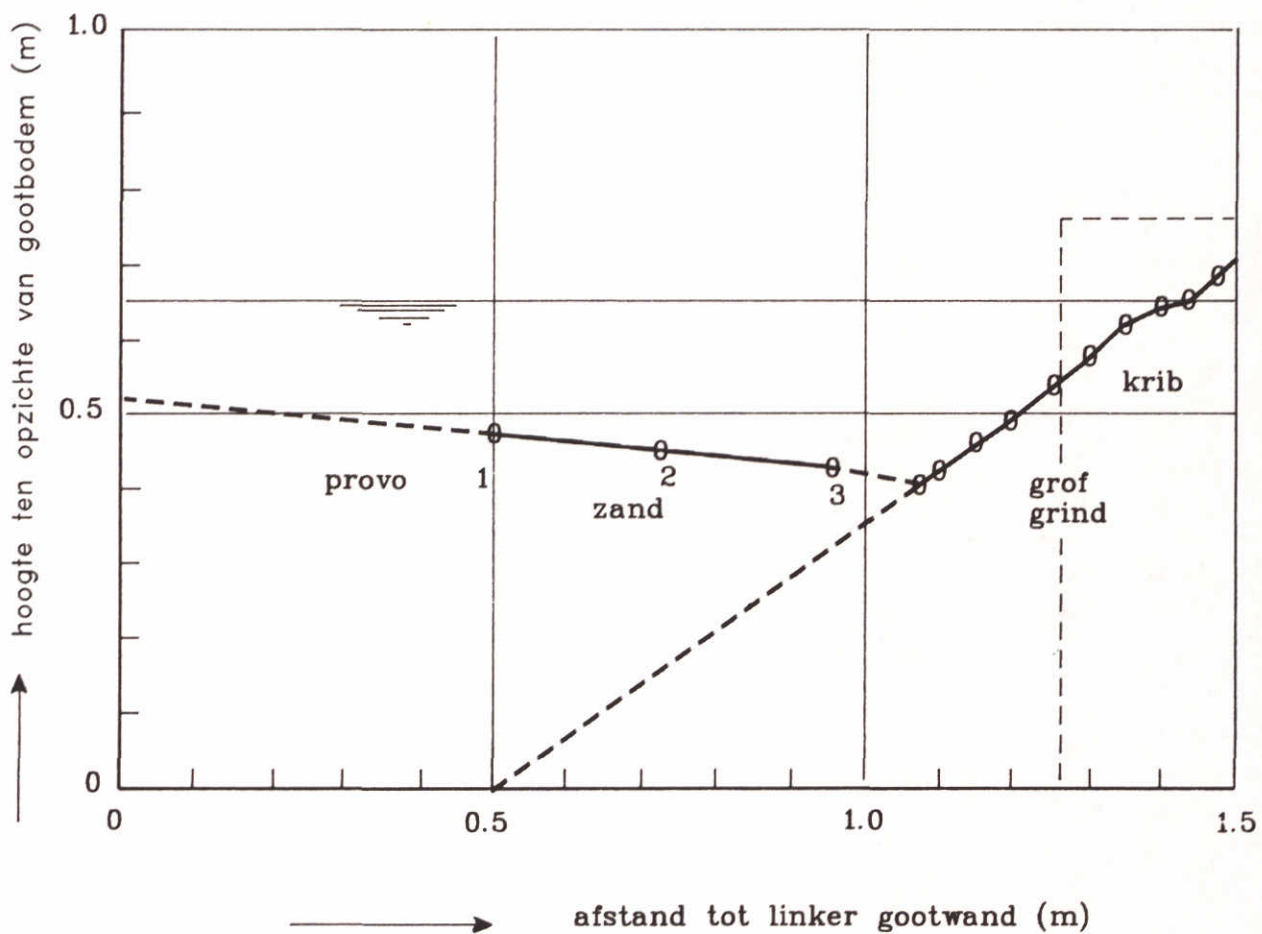


ZEEFKROMME VAN HET ZAND

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Q 935

FIG. 2

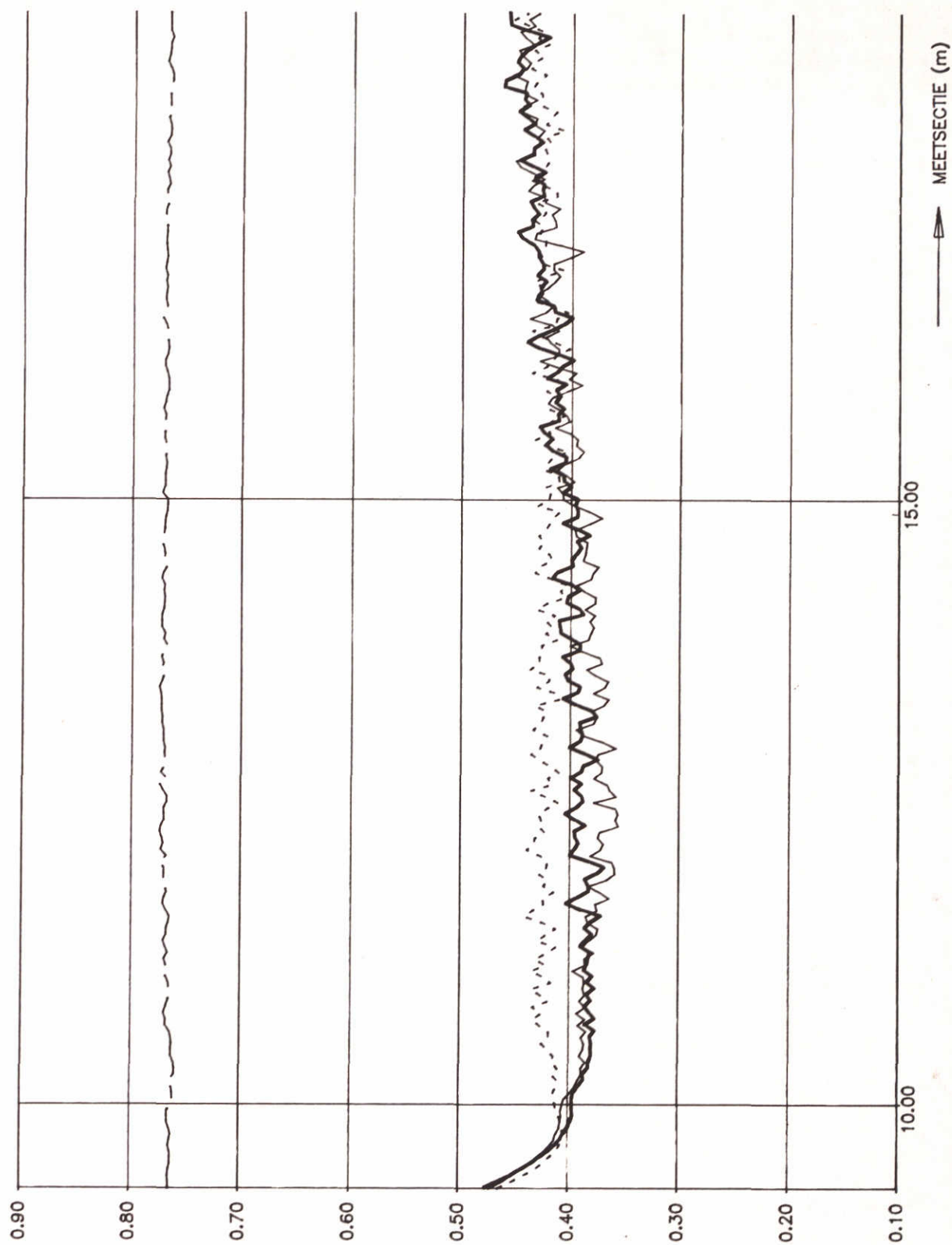


DWARSDOORSNEDE KRIBKOP BIJ PROEF T11

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Q 935

FIG 3



HOOGTE BOVEN GOOTBODEM (m) ←

- - - WAPRO
 — PROVO 1
 — PROVO 2

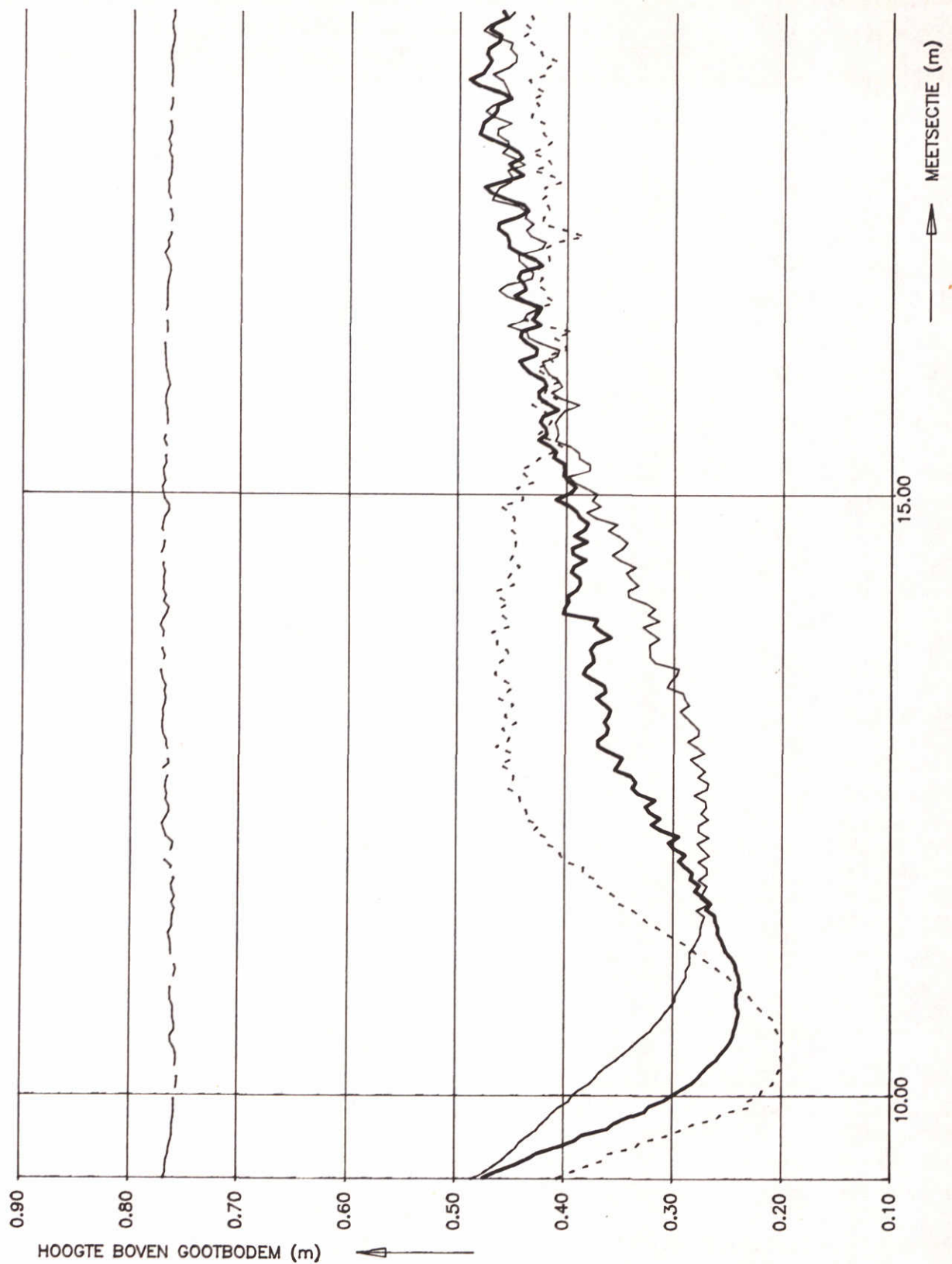
- - - - - PROVO 3

DATUM : 15-02-89
 METING : 1
 DUUR : 20.33 uur

LANGSPROFIELN VAN DE ONTGRONDINGSKUIL
 EN DE WATERSPIEGEL, PROEF T1

T1	
Q = 0.225 M ³ /S	
Q 935	FIG. 4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM



- - - WAPRO
 — PROVO 1
 — PROVO 2
 - - - - - PROVO 3

DATUM : 16-02-89
 METING : 1
 DUUR : 19.35 uur

LANGSPROFIELN VAN DE ONTGRONDINGSKUIL
 EN DE WATERSPIEGEL, PROEF T2

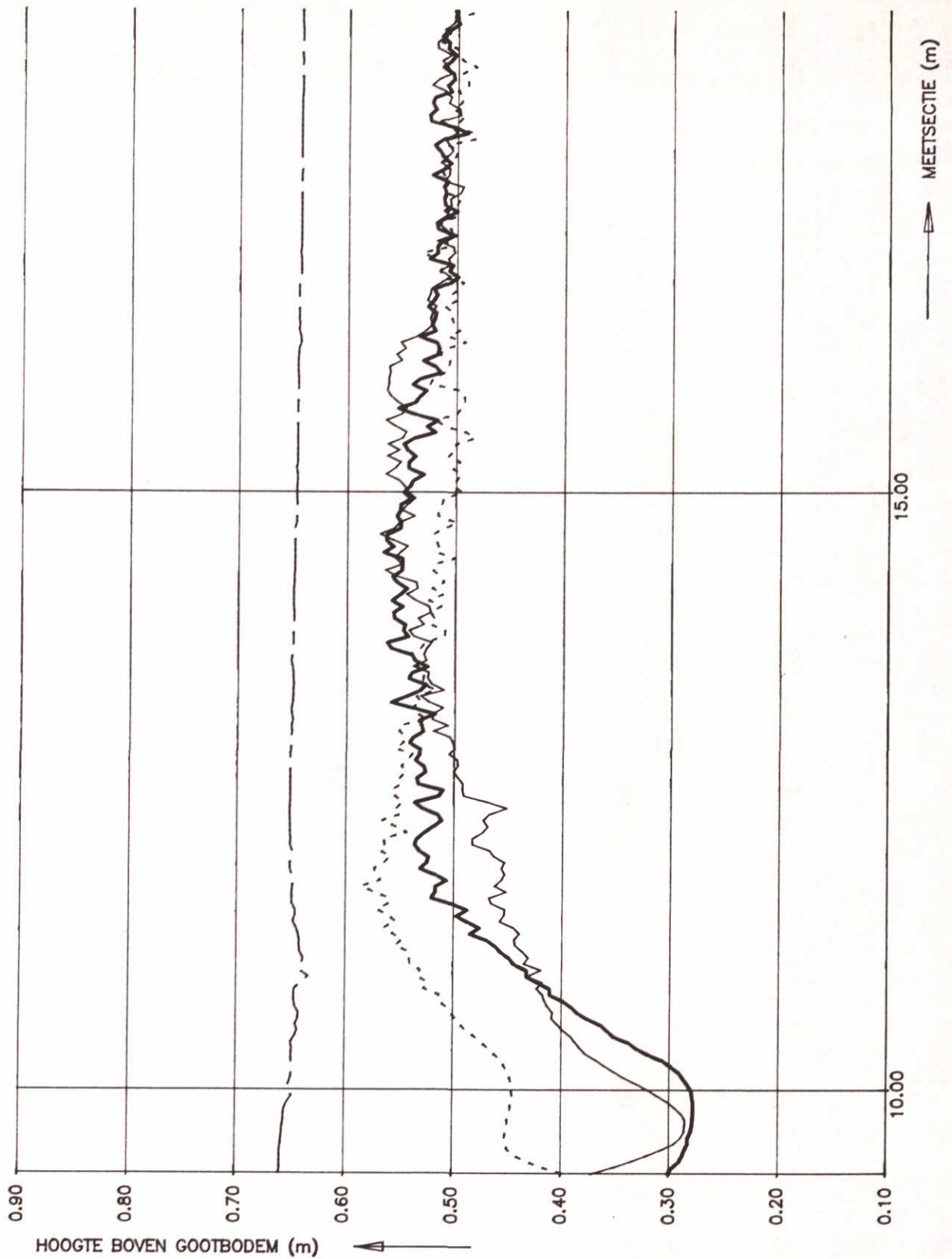
T2

$Q = 0.225 \text{ M}^3/\text{S}$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Q 935

FIG. 5



HOOGTE BOVEN GOOTBODEM (m) \uparrow

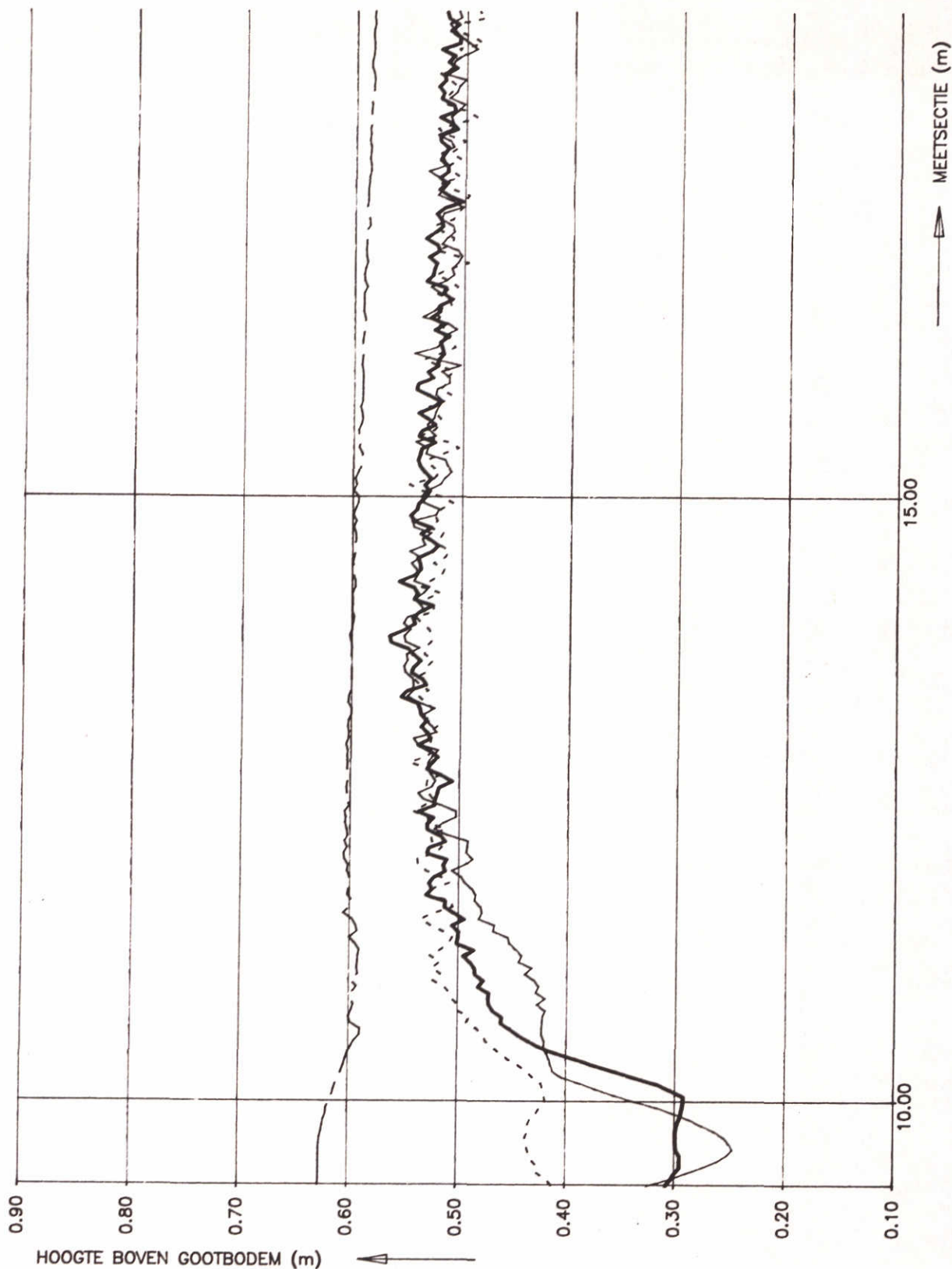
- - - - - WAPRO
 ——— PROVO 1
 ——— PROVO 2
 PROVO 3

DATUM : 17-02-89
 METING : 27
 DUUR : 13.40 uur

LANGSPROFIELEN VAN DE ONTGRONDINGSKUIL
 EN DE WATERSPIEGEL, PROEF T3

T3	
Q = 0.061 M ³ /S	
Q 935	FIG. 6

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM



- - - WAPRO
 — PROVO 1
 — PROVO 2
 - · - · - PROVO 3

DATUM : 20-02-89
 METING : 14
 DUUR : 2.06 uur

LANGSPROFIELN VAN DE ONTGRONDINGSKUIL
 EN DE WATERSPIEGEL, PROEF T4

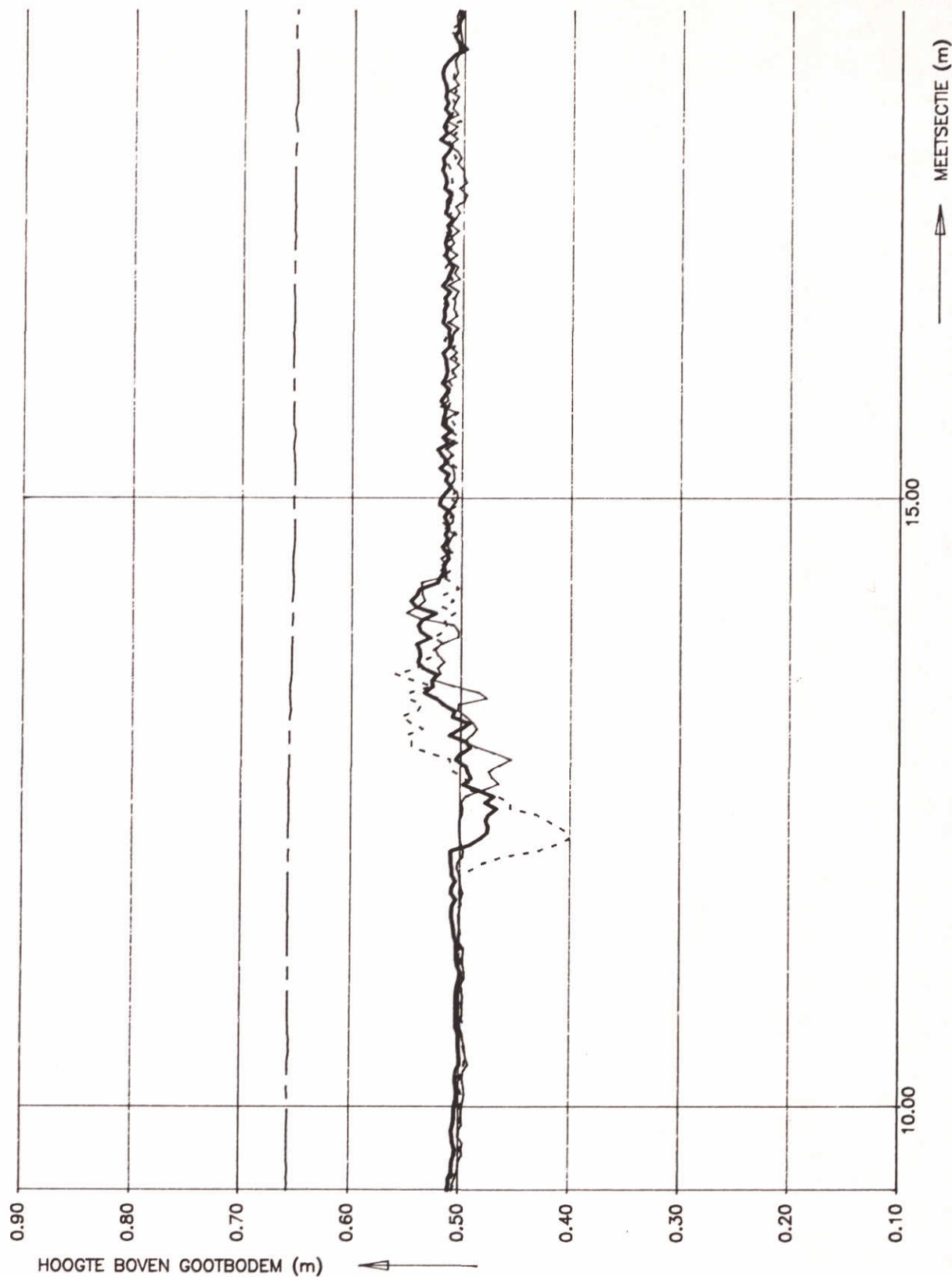
T4

$Q = 0.040 \text{ M}^3/\text{S}$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Q 935

FIG. 7



- - - - - WAPRO
 ——— PROVO 1
 ——— PROVO 2

- - - - - PROVO 3

DATUM : 21-02-89
 METING : 22
 DUUR : 8.57 uur

LANGSPROFIELN VAN DE ONTGRONDINGSKUIL
 EN DE WATERSPIEGEL, PROEF T5

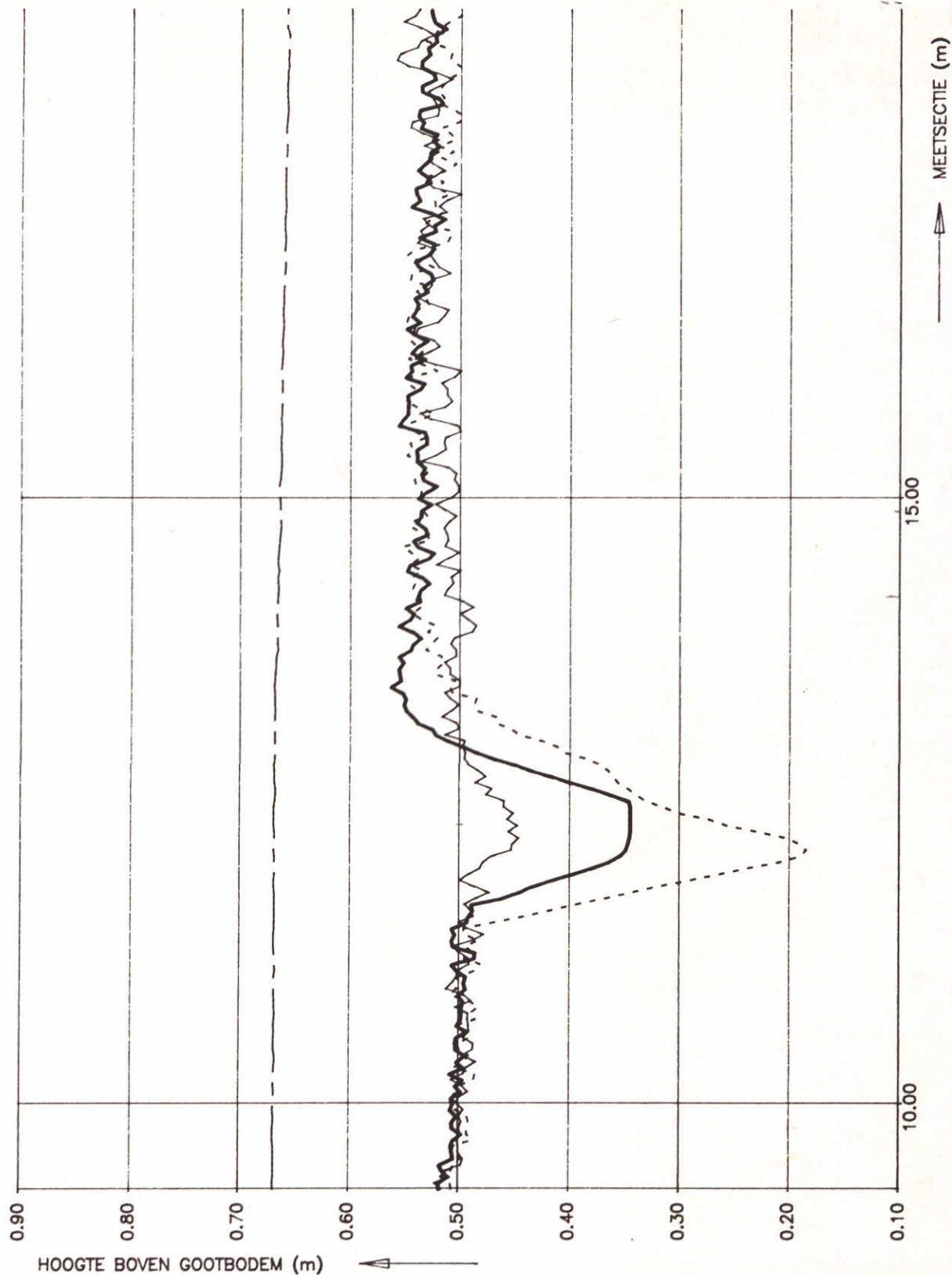
T5

$Q = 0.047 \text{ M}^3/\text{S}$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Q 935

FIG. 8



LANGSPROFIELN VAN DE ONTGRONDINGSKUIL
EN DE WATERSPIEGEL, PROEF T6

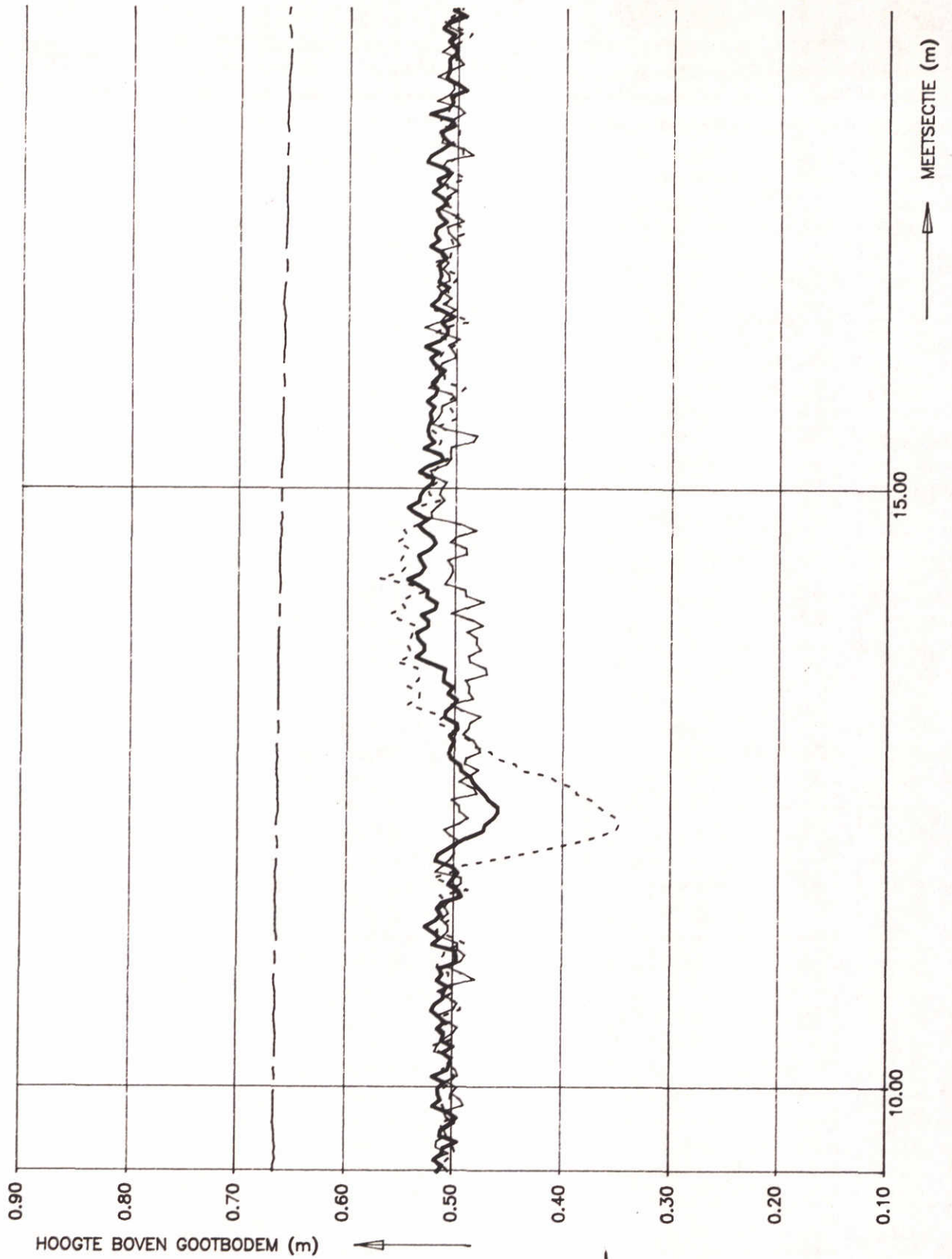
T6

$Q = 0.071 \text{ M}^3/\text{S}$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Q 935

FIG. 9



- - - - WAPRO
 ——— PROVO 1
 ——— PROVO 2
 - - - - - PROVO 3

DATUM : 23-02-89
 METING : 26
 DUUR : 8.16 uur

LANGSPROFIELEN VAN DE ONTGRONDINGSKUIL
 EN DE WATERSPIEGEL, PROEF T7

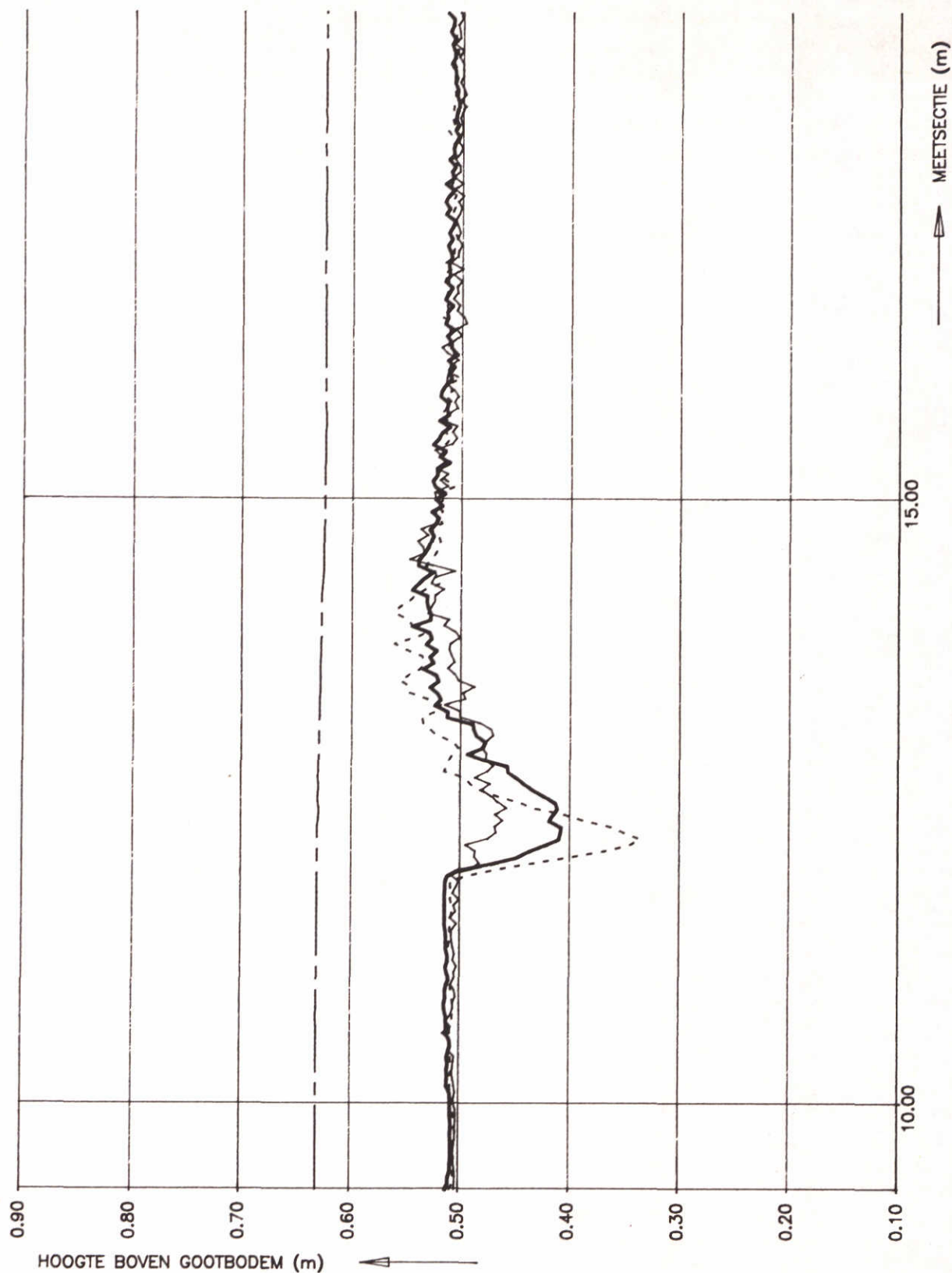
T7

$Q = 0.080 \text{ M}^3/\text{S}$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Q 935

FIG. 10



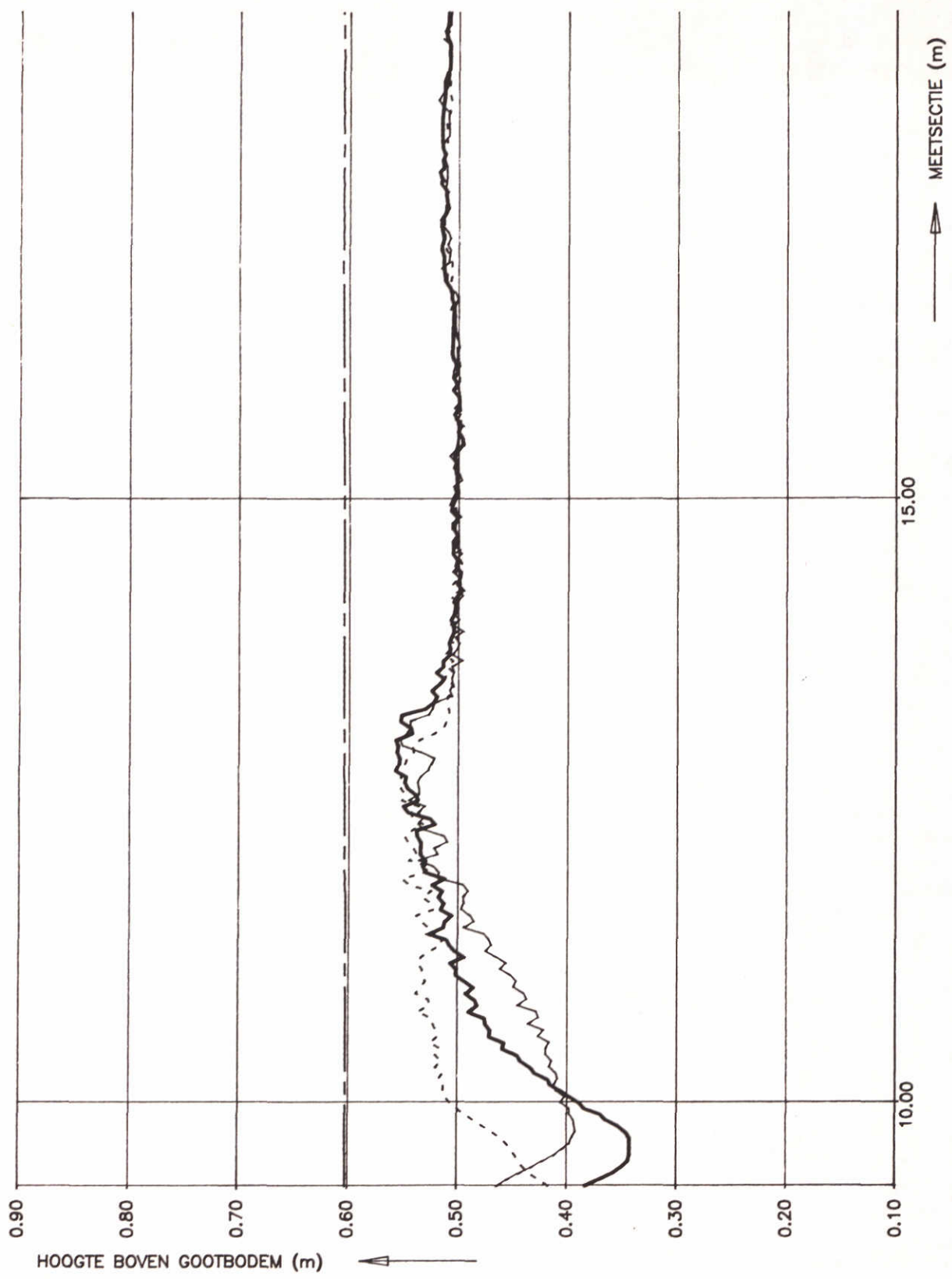
- - - WAPRO
 — PROVO 1
 — PROVO 2
 - - - - - PROVO 3

DATUM : 24-02-89
 METING : 14
 DUUR : 3.56 uur

LANGSPROFIELEN VAN DE ONTGRONDINGSKUIL
 EN DE WATERSPIEGEL, PROEF T8

T8	
Q = 0.035 M ³ /S	
Q 935	FIG. 11

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

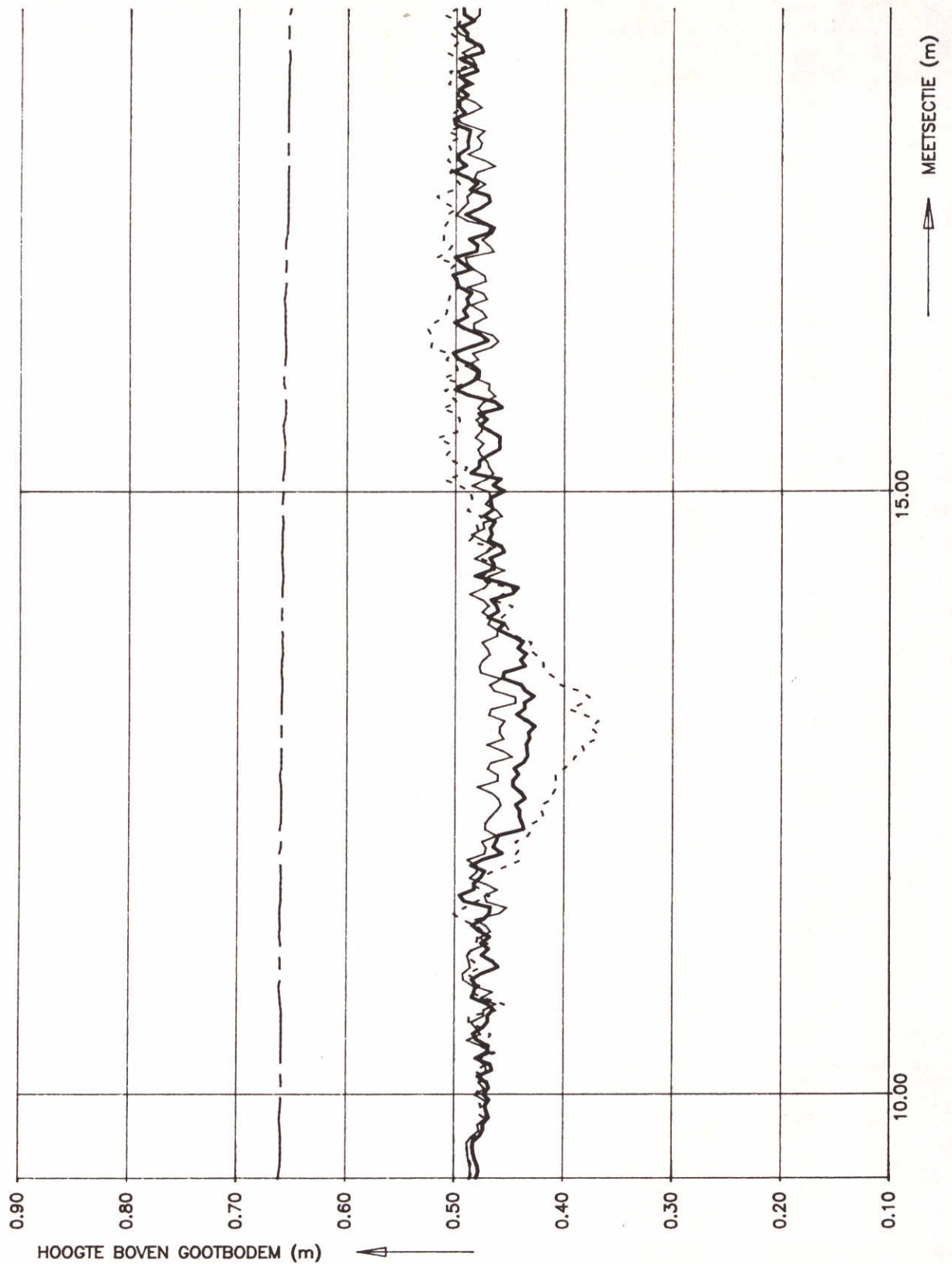


- - - - - WAPRO - - - - - PROVO 3 DATUM : 01-03-89
 ———— PROVO 1 METING : 7
 ———— PROVO 2 DUUR : 21.25 uur

LANGSPROFIELEN VAN DE ONTGRONDINGSKUIL
 EN DE WATERSPIEGEL, PROEF T10

T10	
Q = 0.018 M ³ /S	
Q 935	FIG. 12

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM



- - - - - WAPRO
 ——— PROVO 1
 ——— PROVO 2
 · · · · · PROVO 3

DATUM : 03-03-89
 METING : 2
 DUUR : 27.03 uur

LANGSPROFIELEN VAN DE ONTGRONDINGSKUIL
 EN DE WATERSPIEGEL, PROEF T11

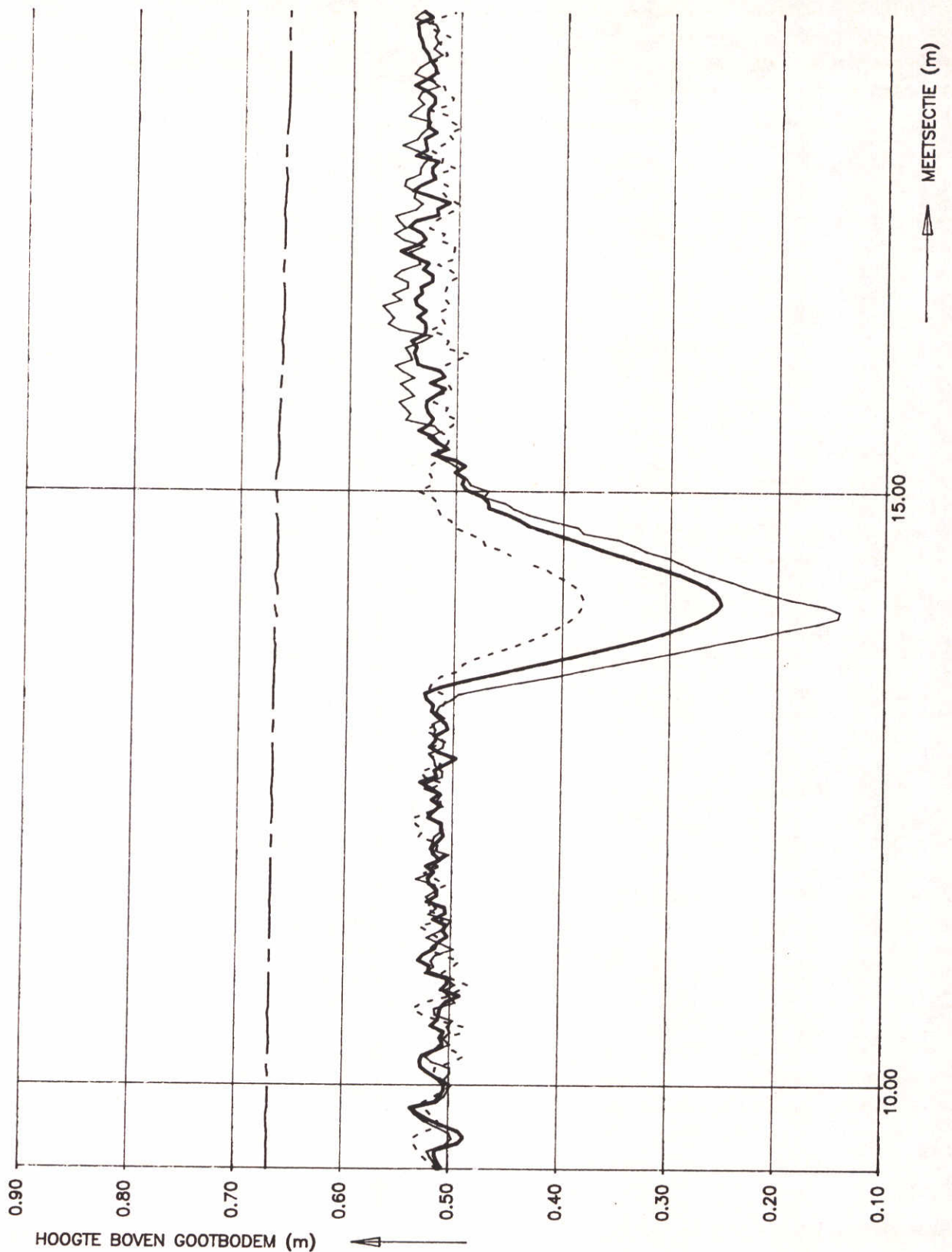
T11

$Q = 0.090 \text{ M}^3/\text{S}$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Q 935

FIG. 13



- - - WAPRO
 — PROVO 1
 — PROVO 2
 - · - · - PROVO 3

DATUM : 07-03-89
 METING : 5
 DUUR : 22.07 uur

LANGSPROFIELEN VAN DE ONTGRONDINGSKUIL
 EN DE WATERSPIEGEL, PROEF T12

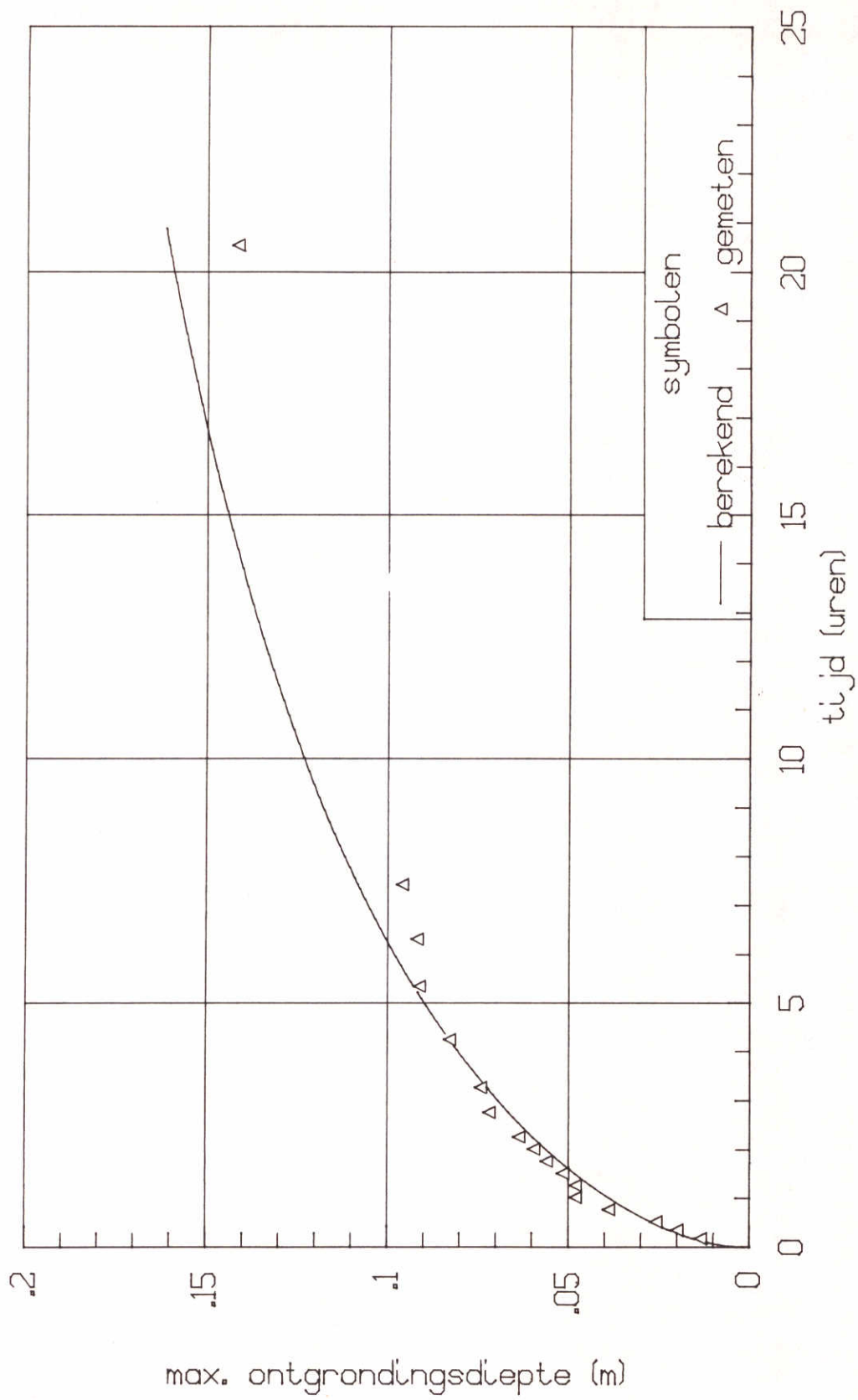
T12

$Q = 0.070 \text{ M}^3/\text{S}$

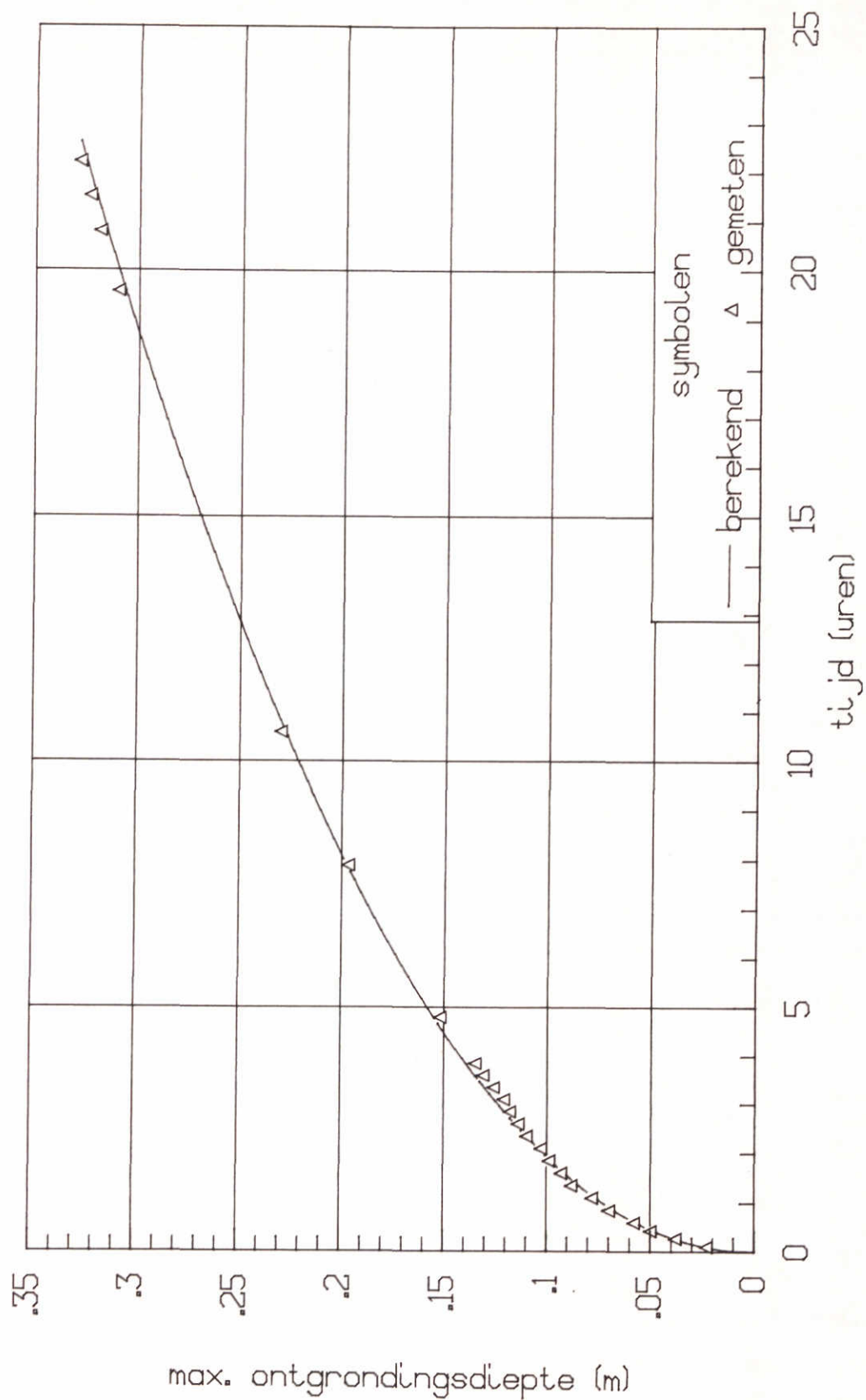
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Q 935

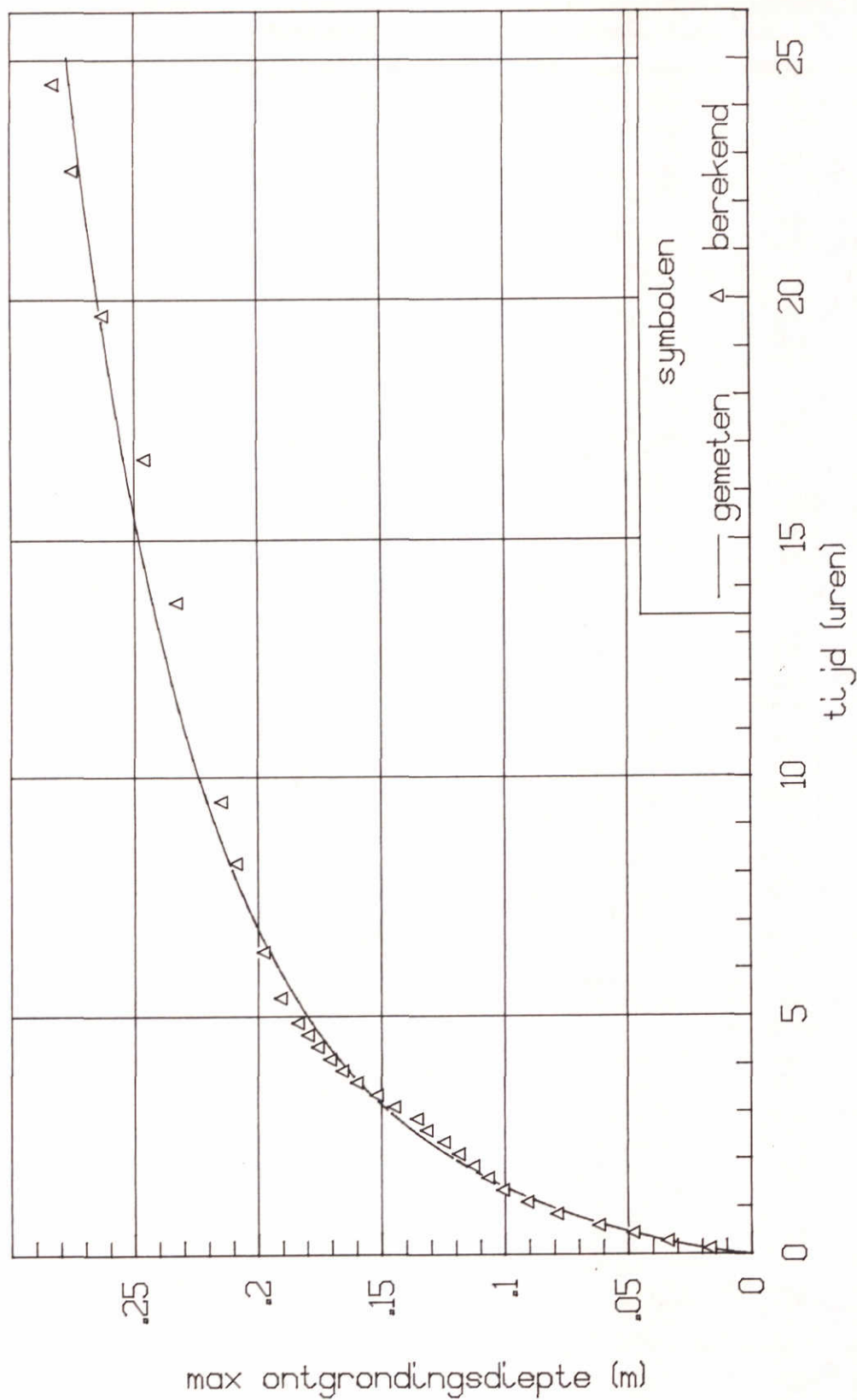
FIG. 14



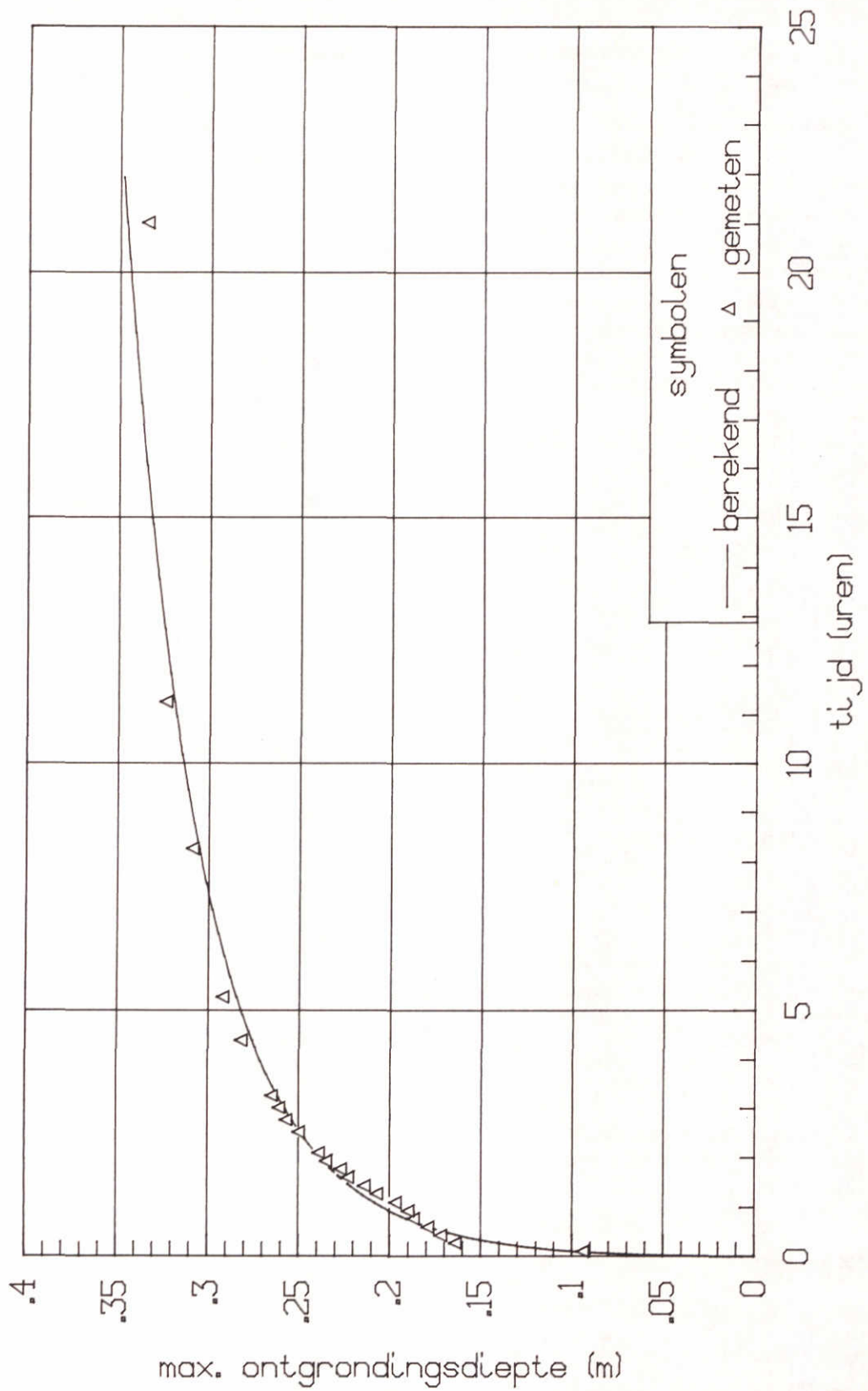
MAXIMUM ONTGRONDINGSDIEPTE ALS FUNKTIE
VAN DE TIJD, T1



MAXIMUM ONTGRONDINGSDIEPTE ALS FUNKTIE
VAN DE TIJD, T₂



MAXIMUM ONTGRONDINGSDIEPTE ALS FUNKTIE
VAN DE TIJD, T3

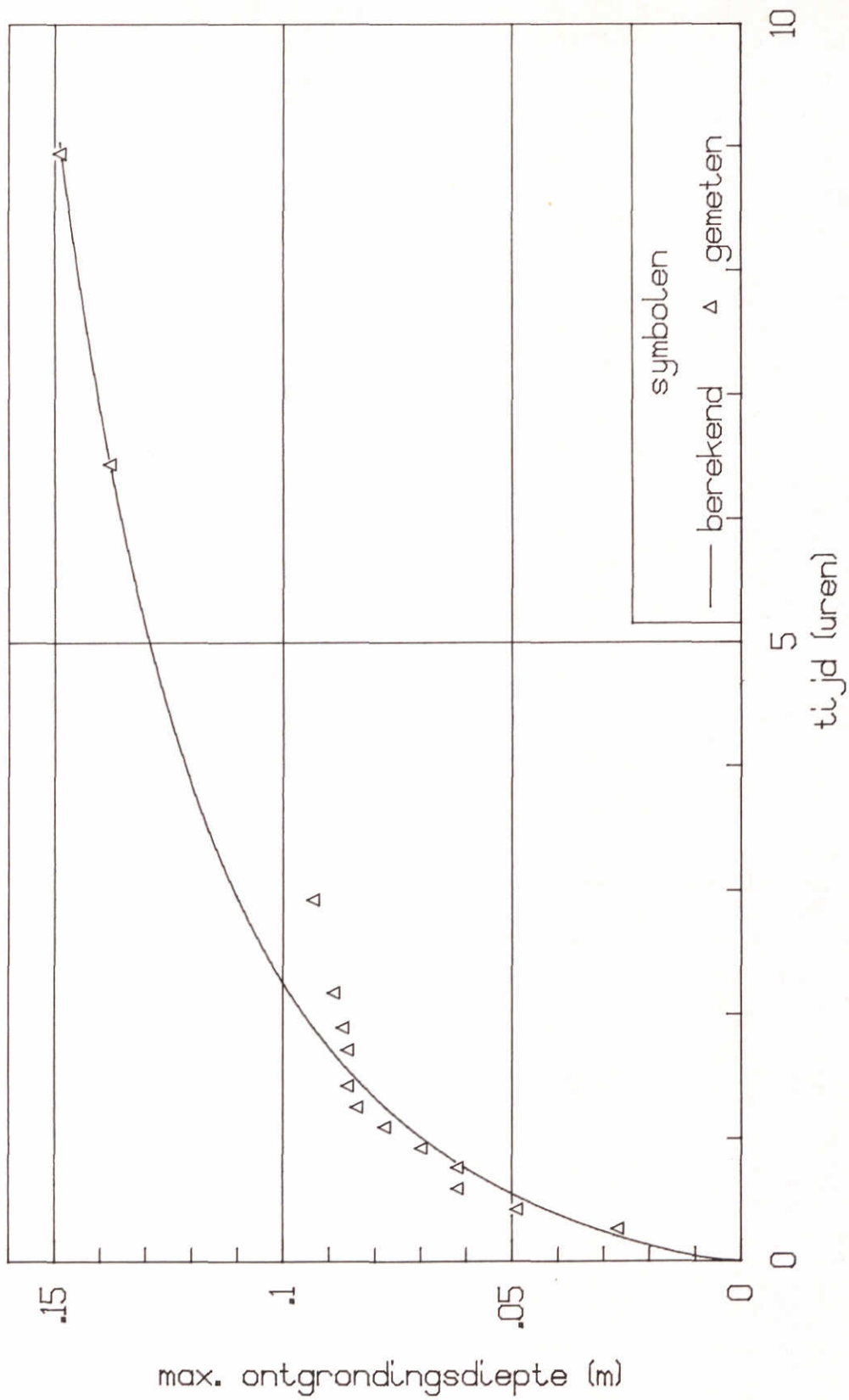


MAXIMUM ONTGRONDINGSDIEPTE ALS FUNKTIE
VAN DE TIJD, T4

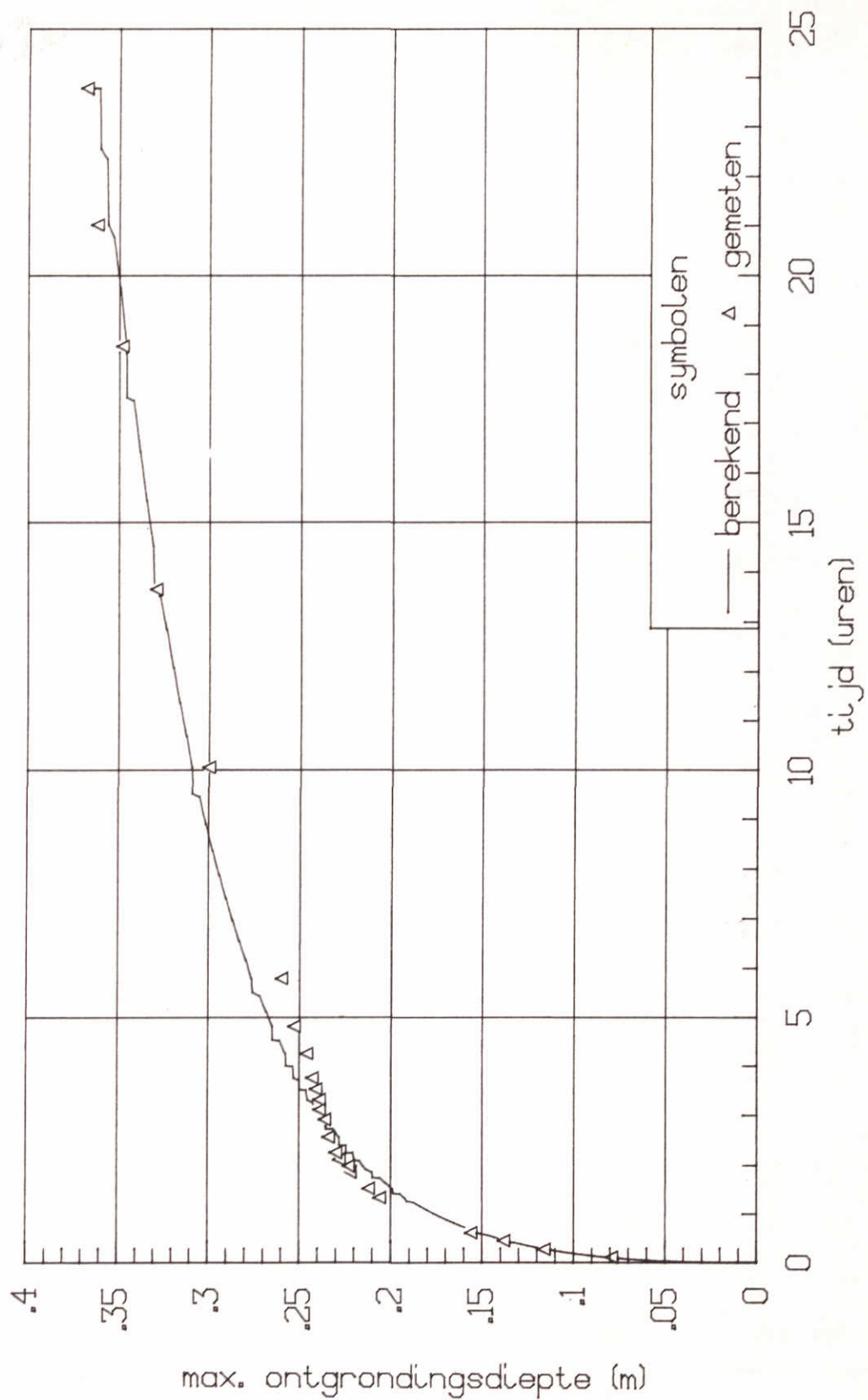
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Q 935

FIG 18



MAXIMUM ONTGRONDINGSDIEPTE ALS FUNKTIE
VAN DE TIJD, T5

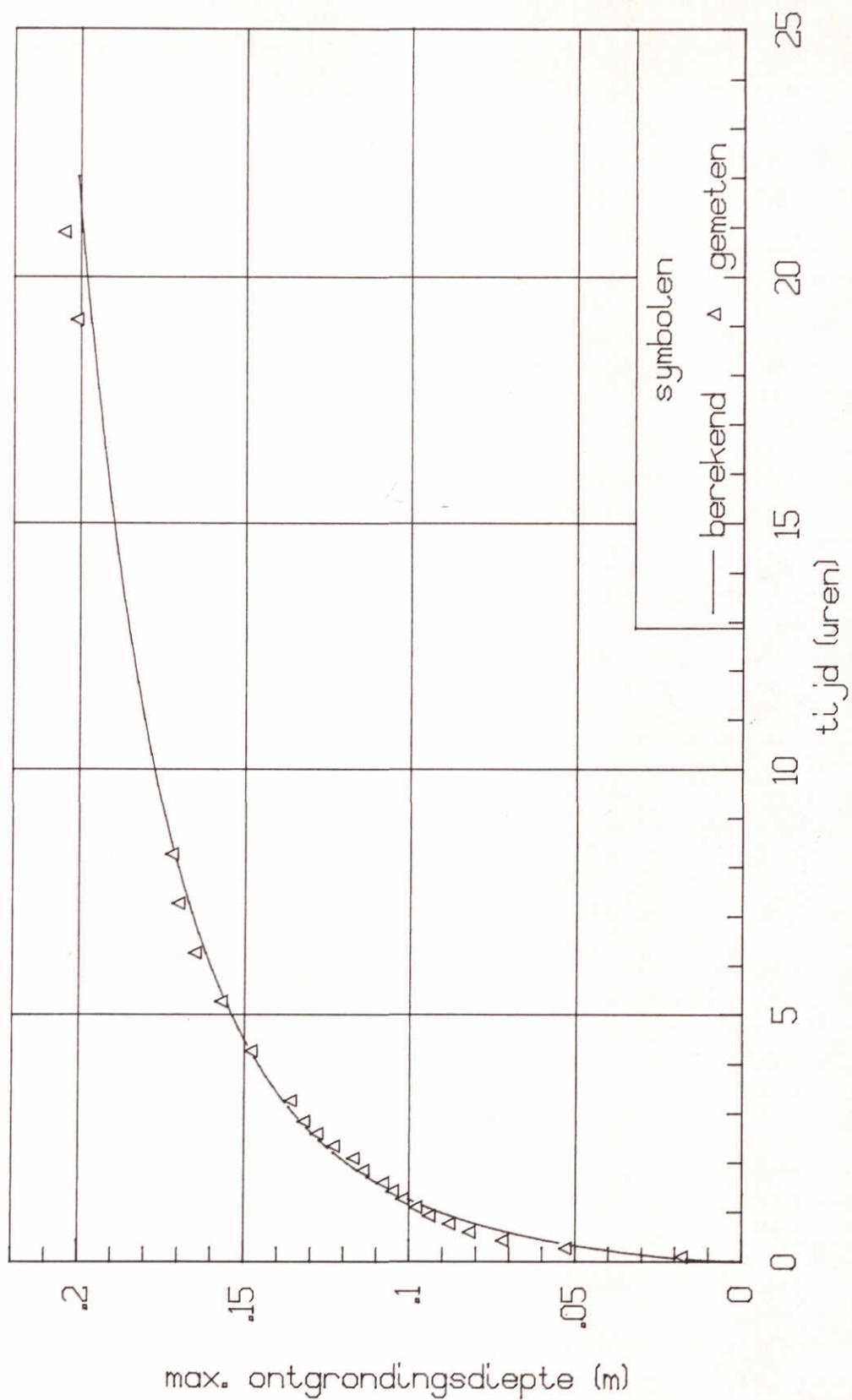


MAXIMUM ONTGRONDINGSDIEPTE ALS FUNKTIE
 VAN DE TIJD, T6

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Q 935

FIG 20

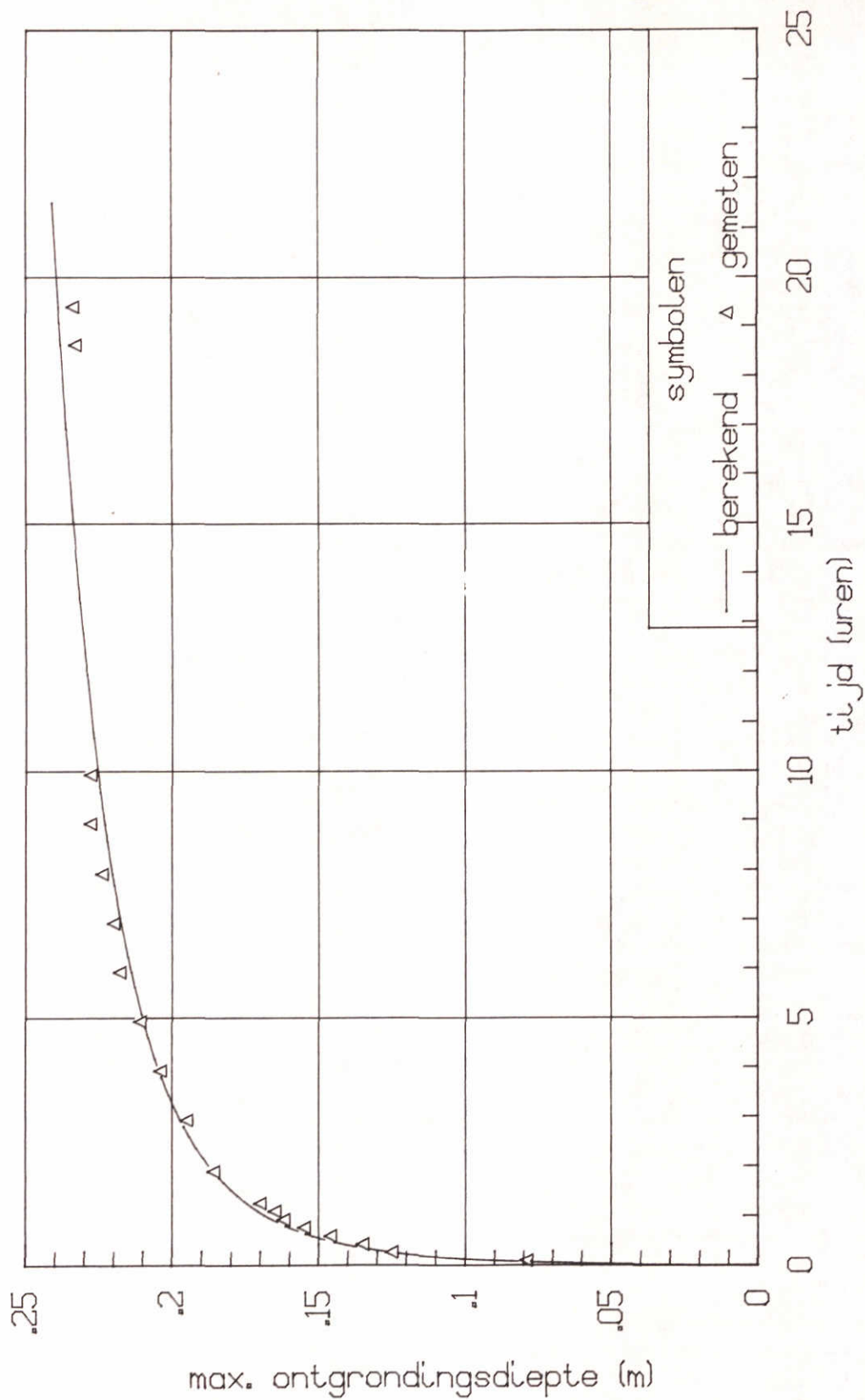


MAXIMUM ONTGRONDINGSDIEPTE ALS FUNKTIE
VAN DE TIJD, T7

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Q 935

FIG 21

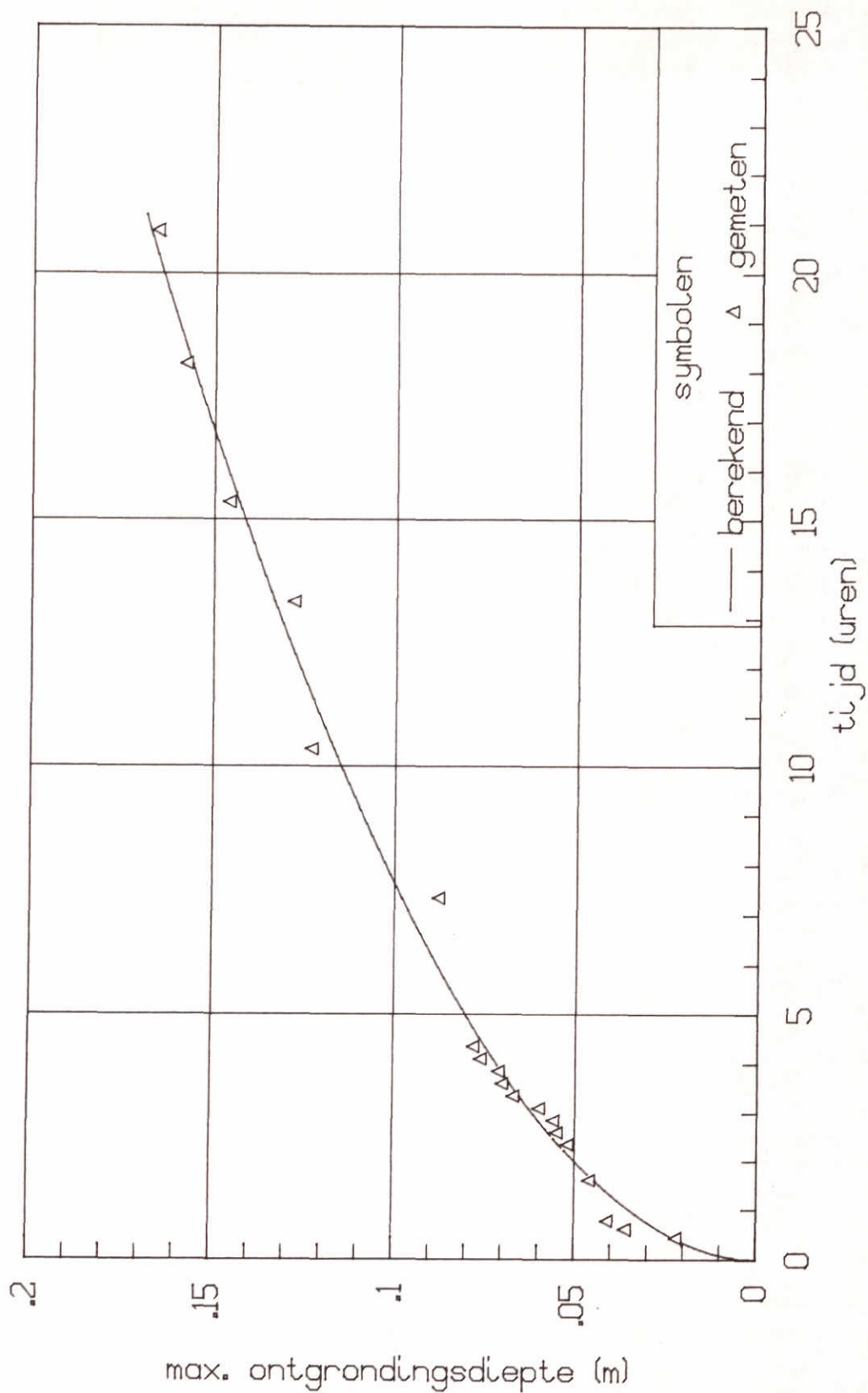


MAXIMUM ONTGRONDINGSDIEPTE ALS FUNKTIE
VAN DE TIJD, T8

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Q 935

FIG 22

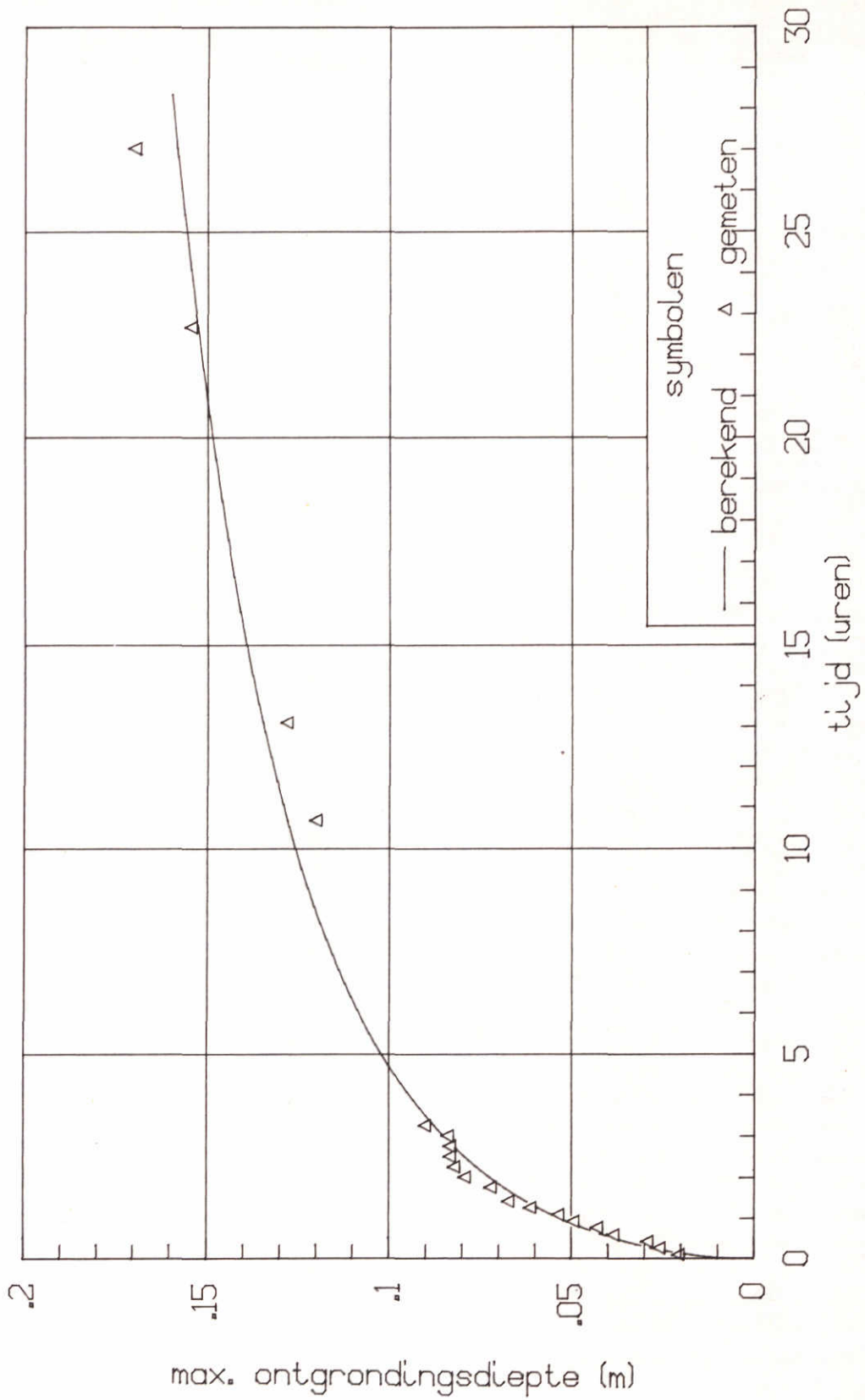


MAXIMUM ONTGRONDINGSDIEPTE ALS FUNKTIE
VAN DE TIJD, T10

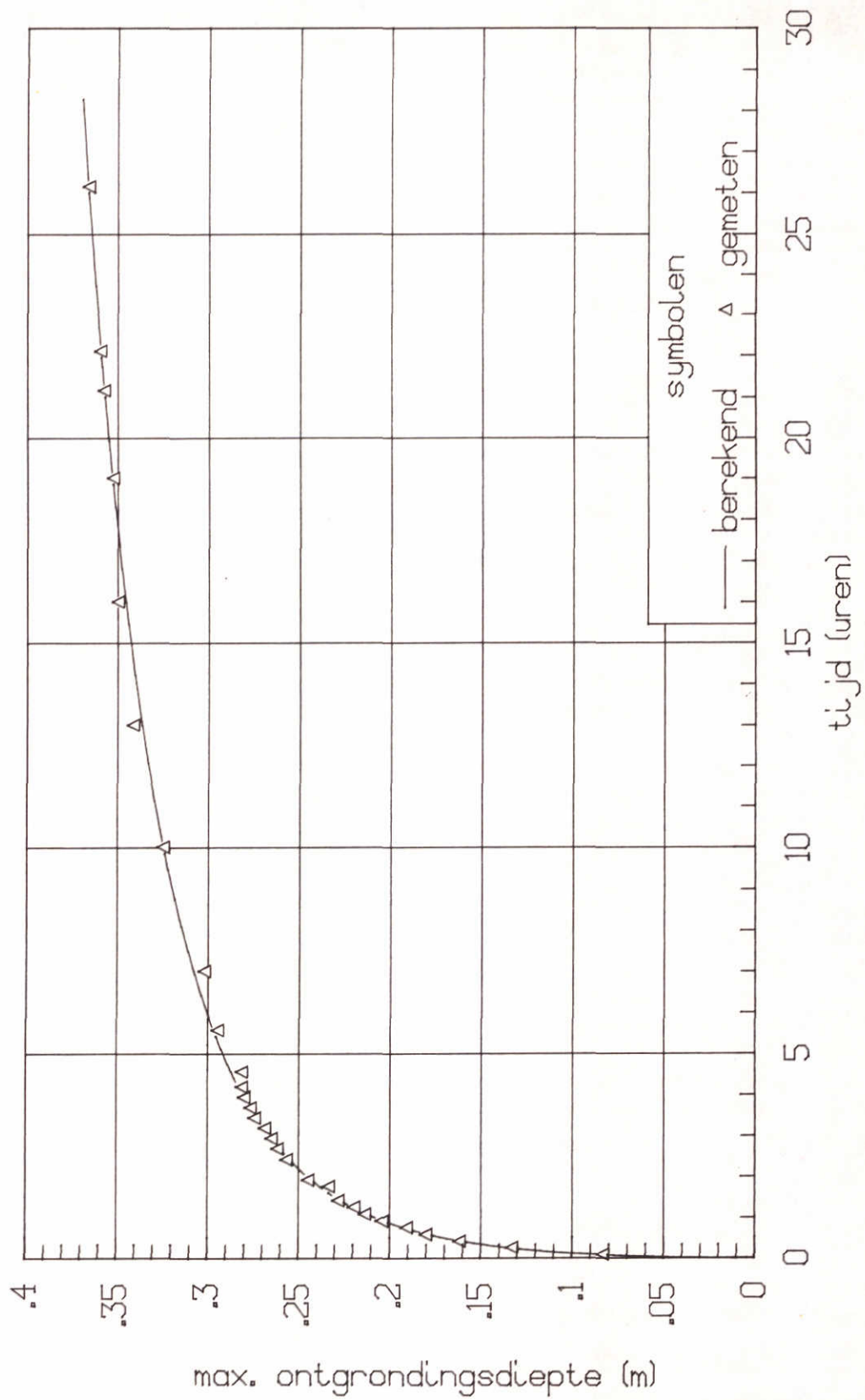
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Q 935

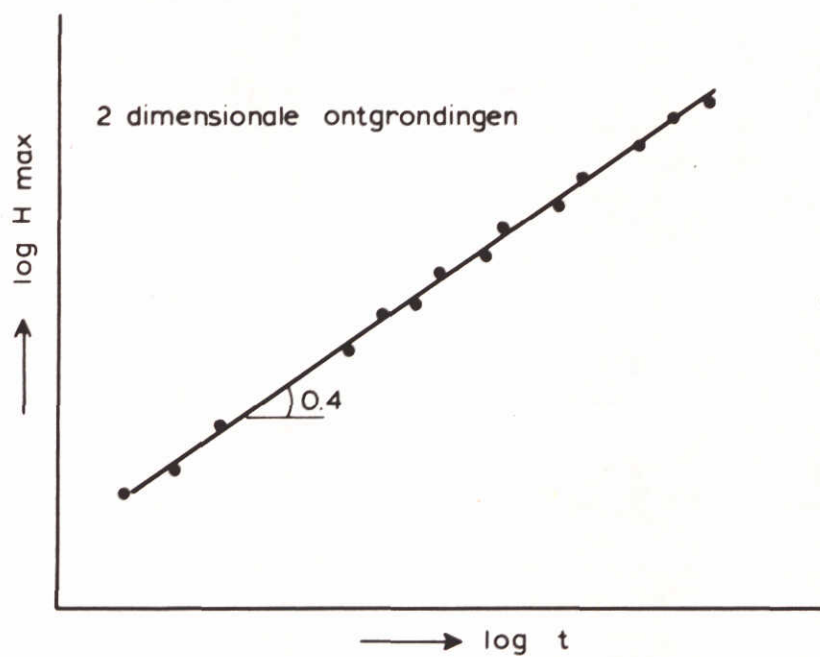
FIG 23



MAXIMUM ONTGRONDINGSDIEPTE ALS FUNKTIE
VAN DE TIJD, T11



MAXIMUM ONTGRONDINGSDIEPTE ALS FUNKTIE VAN DE TIJD, T12

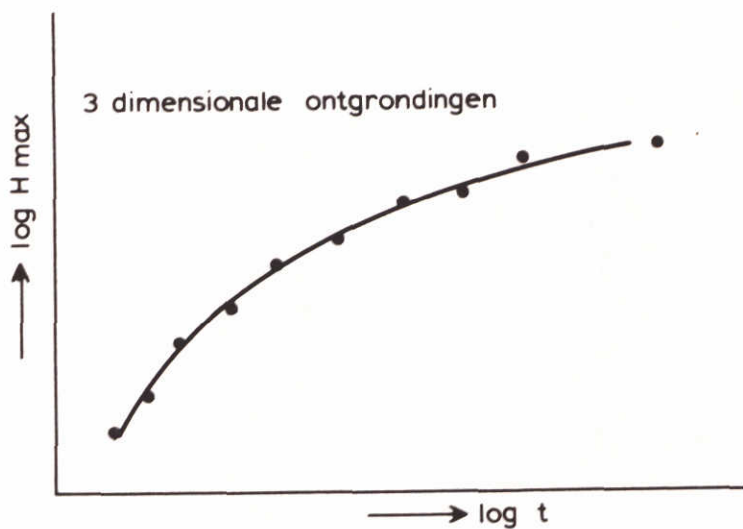


VOORBEELD MAXIMUM ONTGRONDINGSDIEPTE IN
EEN TWEEDIMENSIONALE SITUATIE

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Q 935

FIG. 26

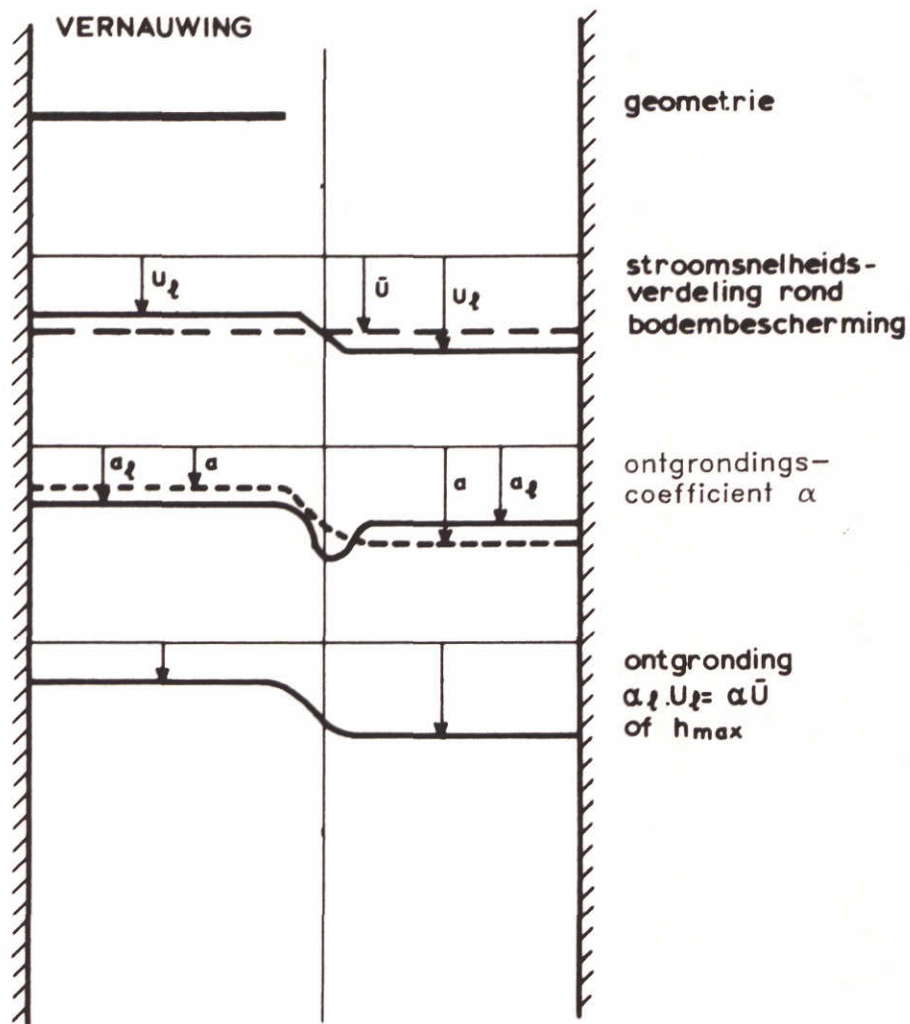


VOORBEELD MAXIMUM ONTGRONDINGSDIEPTE IN
EEN DRIEDIMENSIONALE SITUATIE

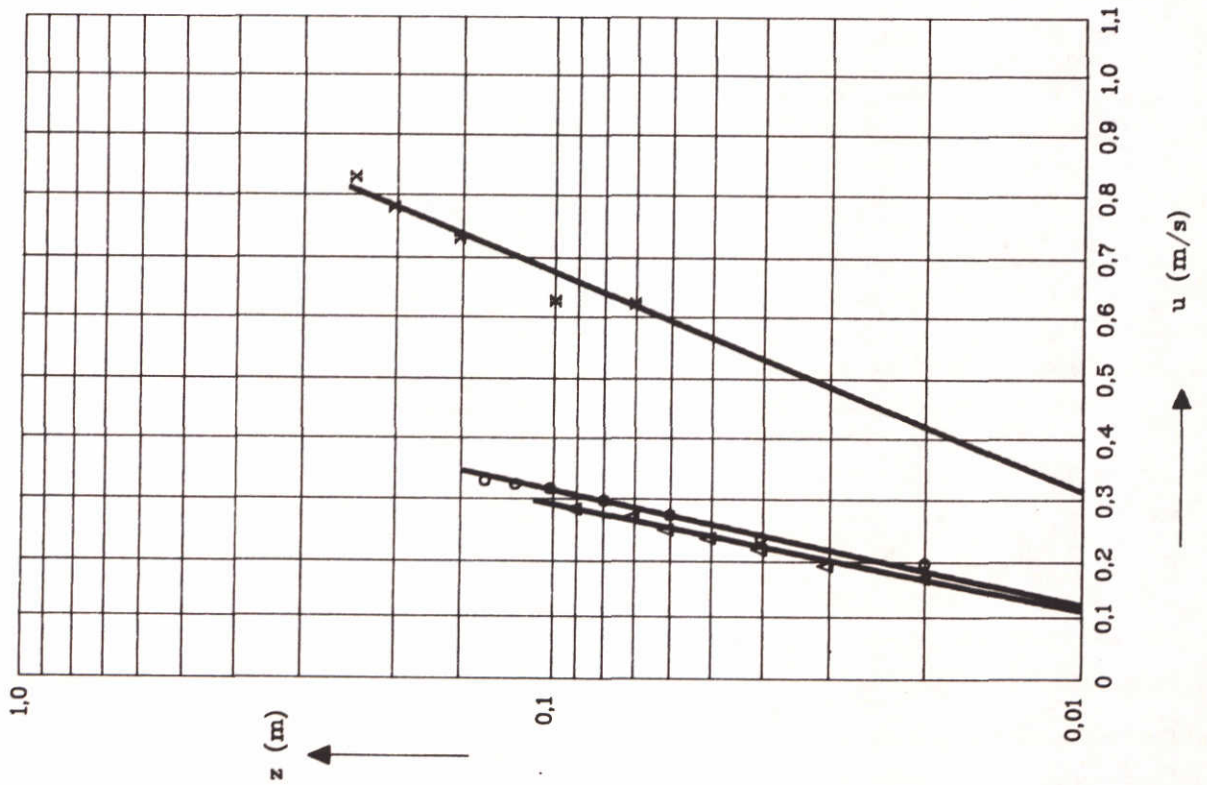
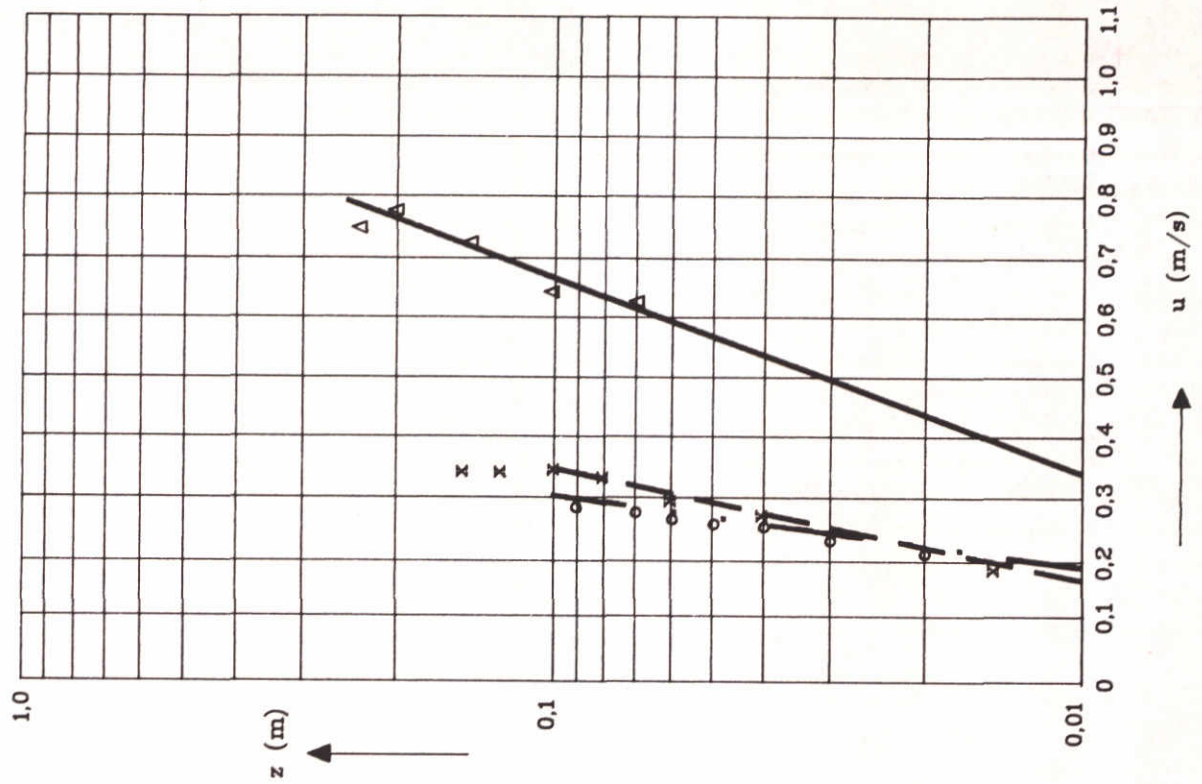
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Q 935

FIG. 27



TOELICHTING OP VERSCHILLENDE
DEFINITIES VAN α

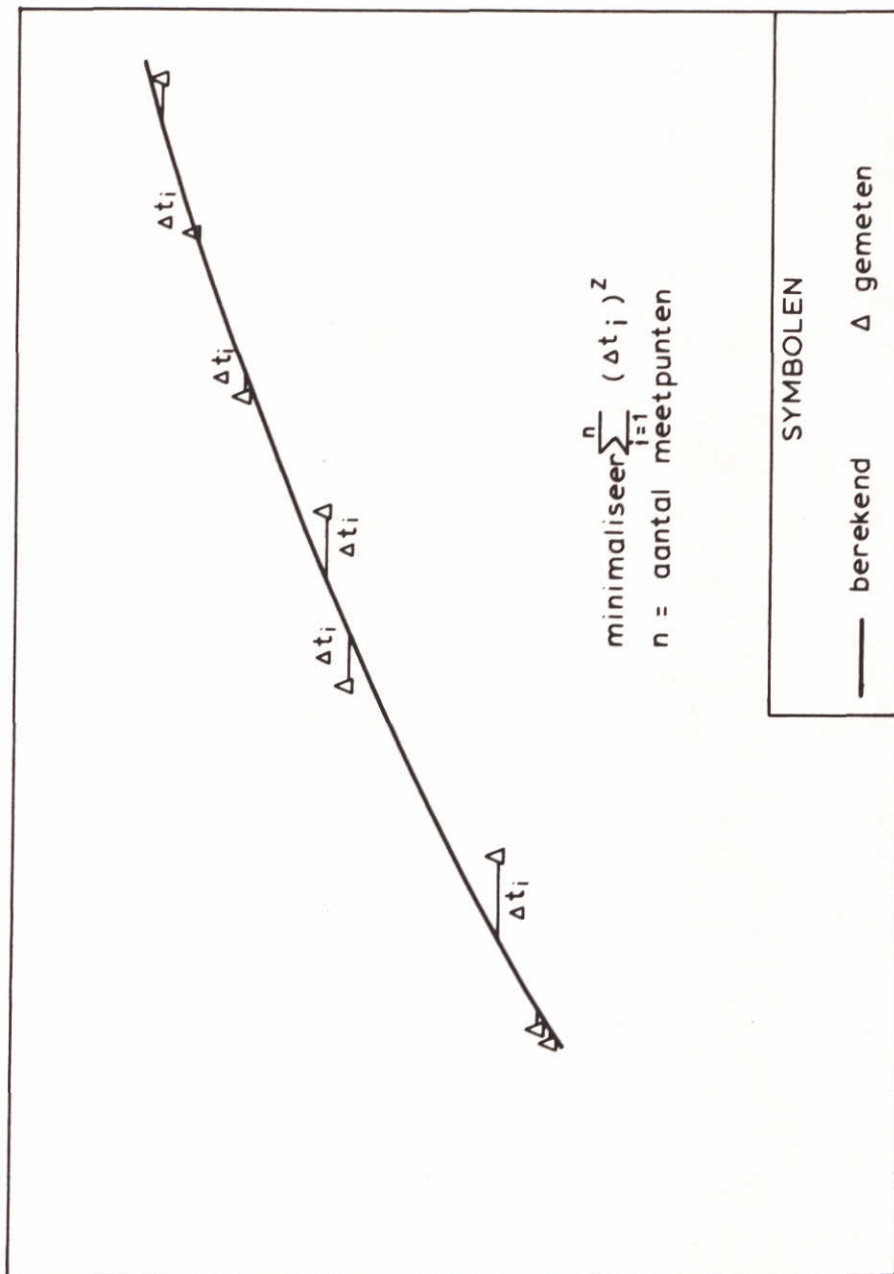


BEPALING VAN DE SCHUIFSPANNINGSSNELHEID
UIT HET LOGARITHMISCH SNELHEIDSPROFIEL

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Q 935

FIG. 29

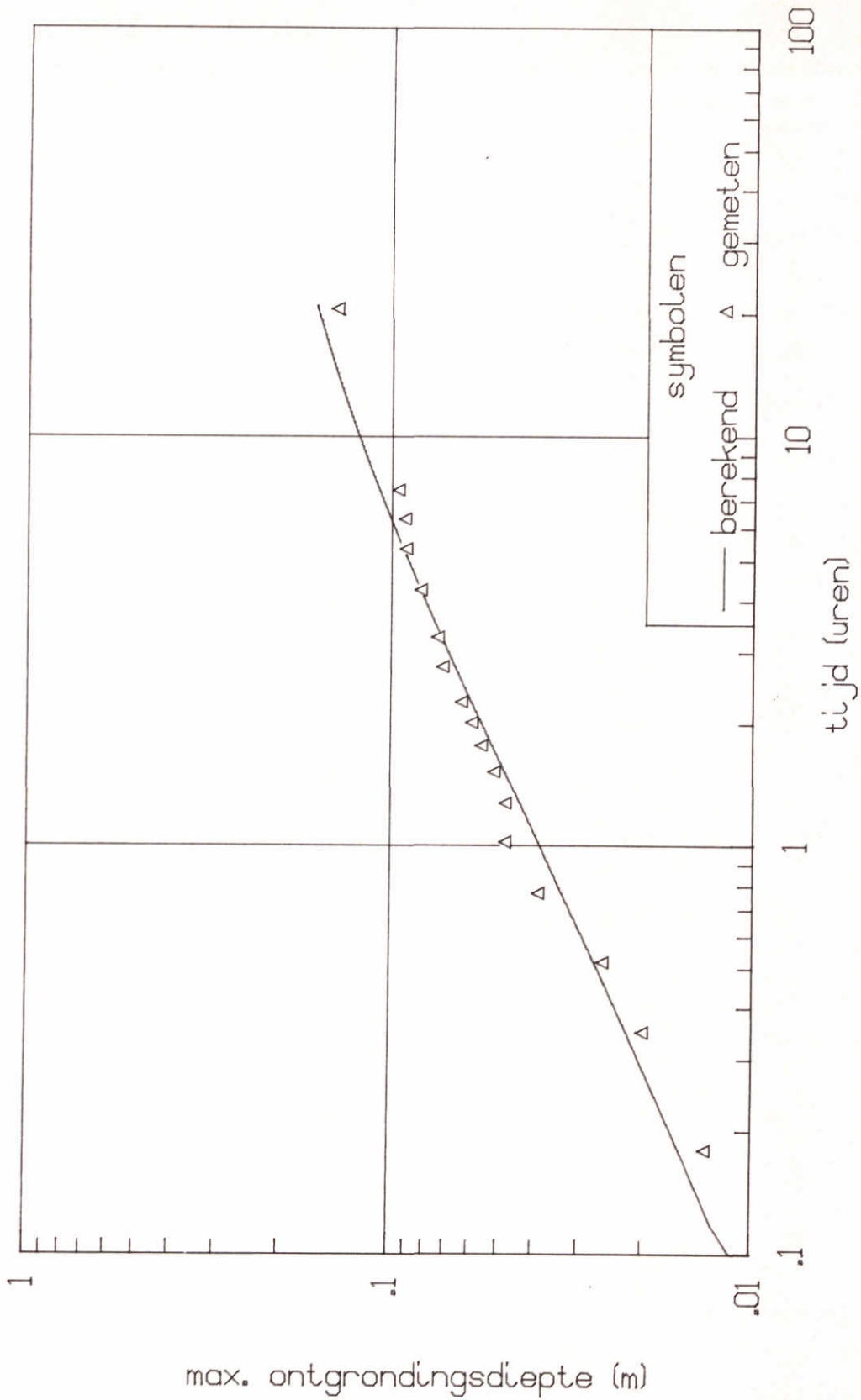


TOEGEPASTE OPTIMALISATIE PARAMETER

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Q 935

FIG. 30

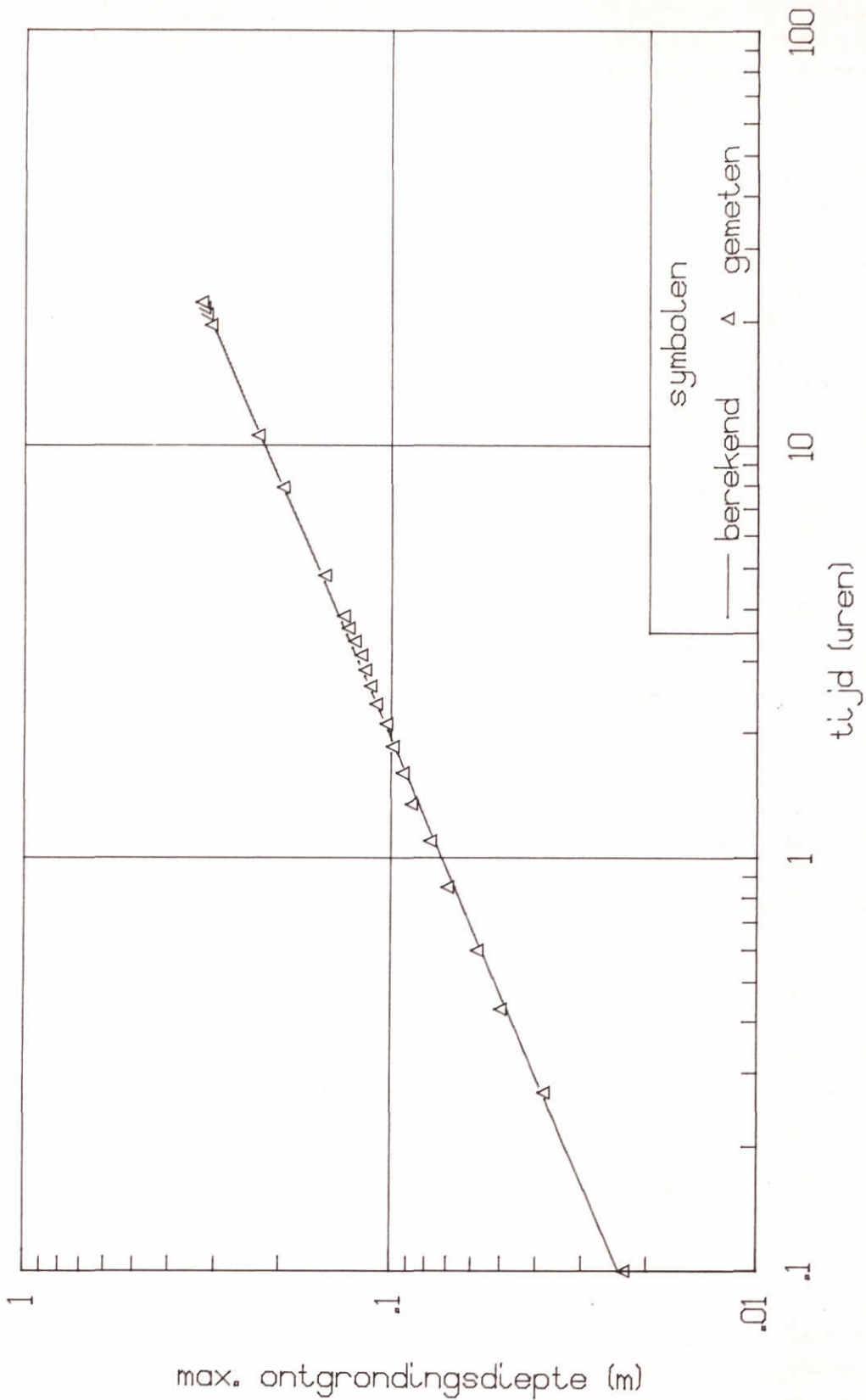


MAXIMUM ONTGRONDINGSDIEPTE-TIJD OP
DUBBEL LOGARITHMISCHE SCHAAL, T1

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Q 935

FIG 31

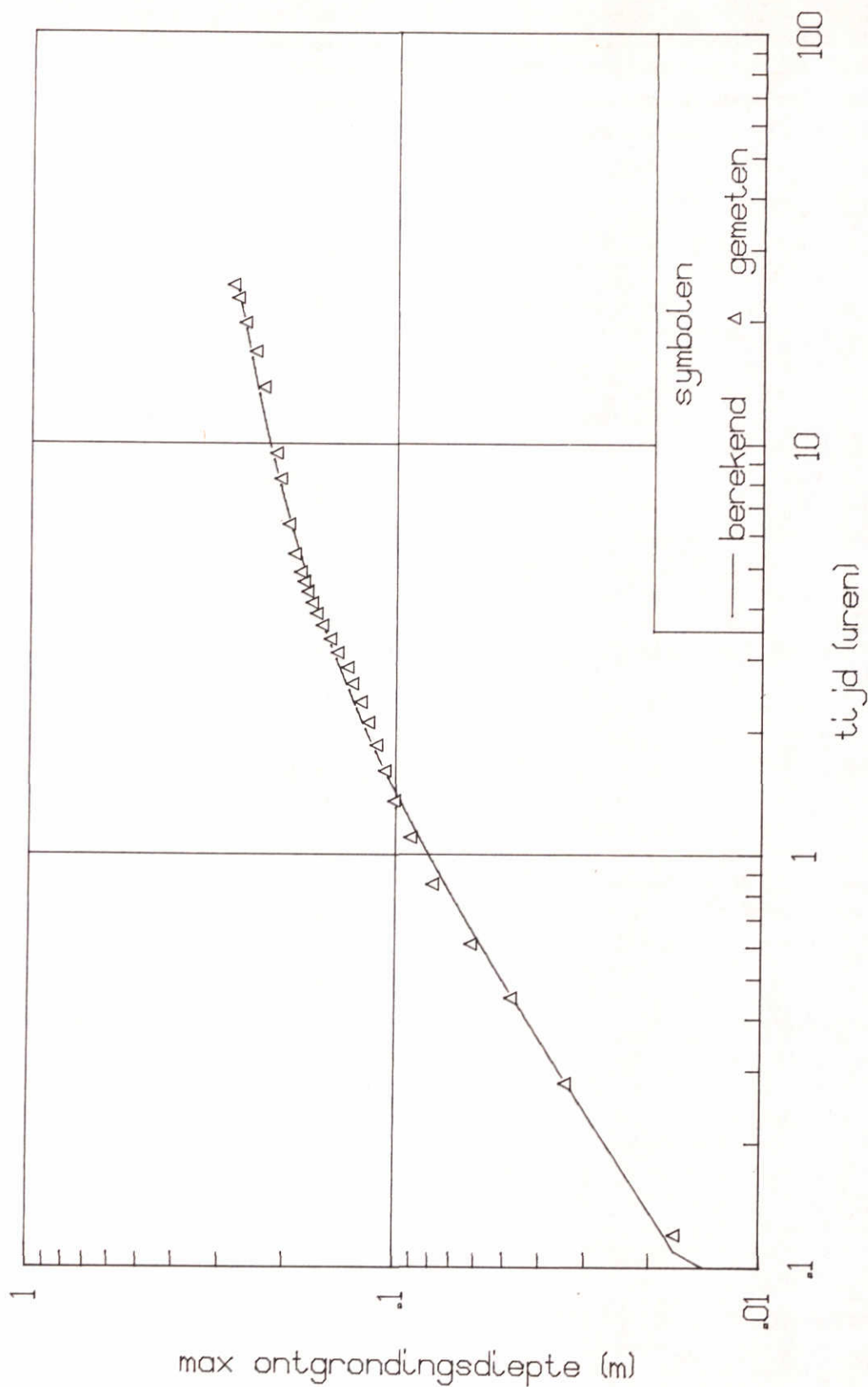


MAXIMUM ONTGRONDINGSDIEPTE-TIJD OP
 DUBBEL LOGARITHMISCHE SCHAAAL, T2

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Q 935

FIG 32

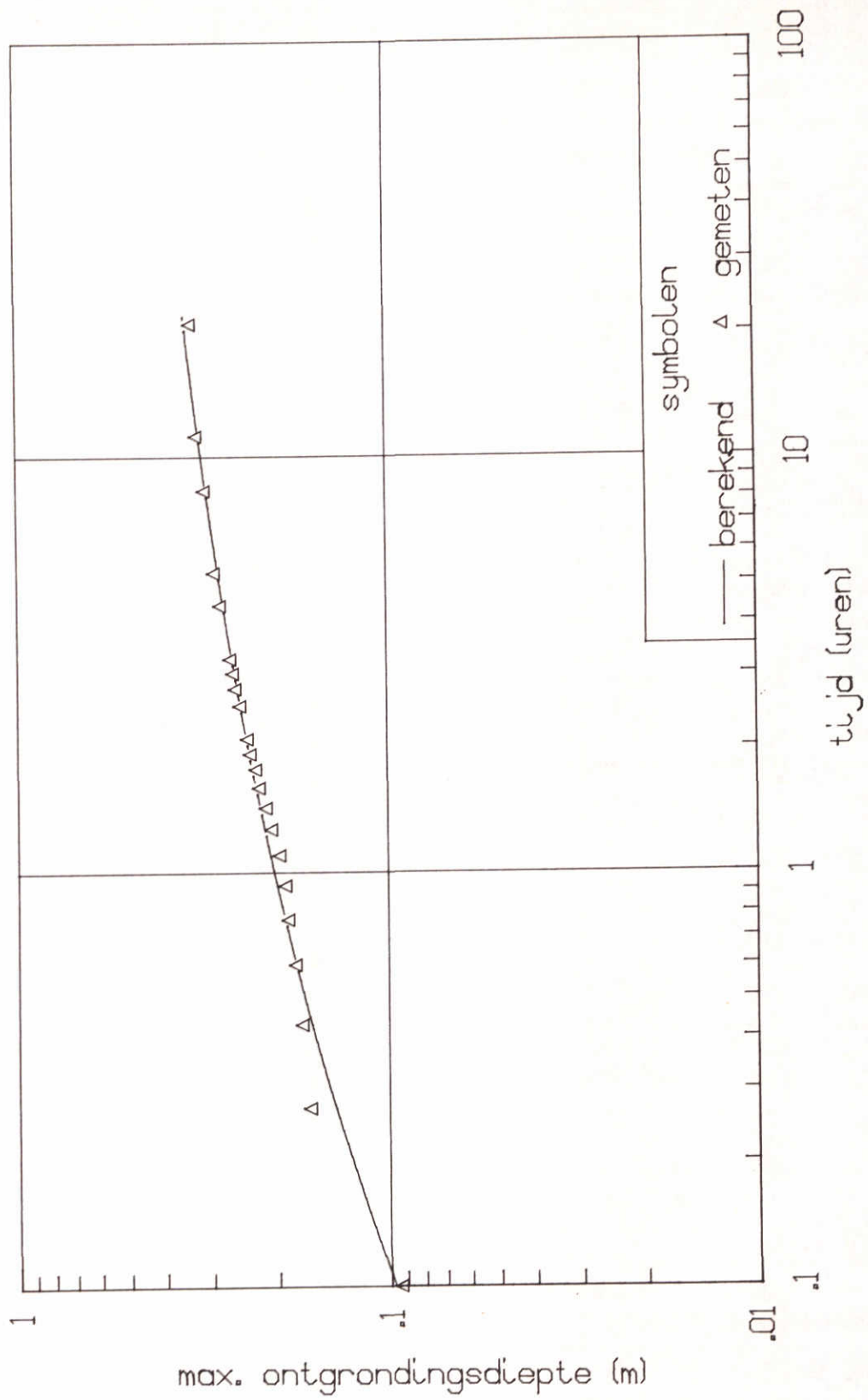


MAXIMUM ONTGRONDINGSDIEPTE-TIJD OP
DUBBEL LOGARITHMISCHE SCHAAL, T3

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Q 935

FIG 33

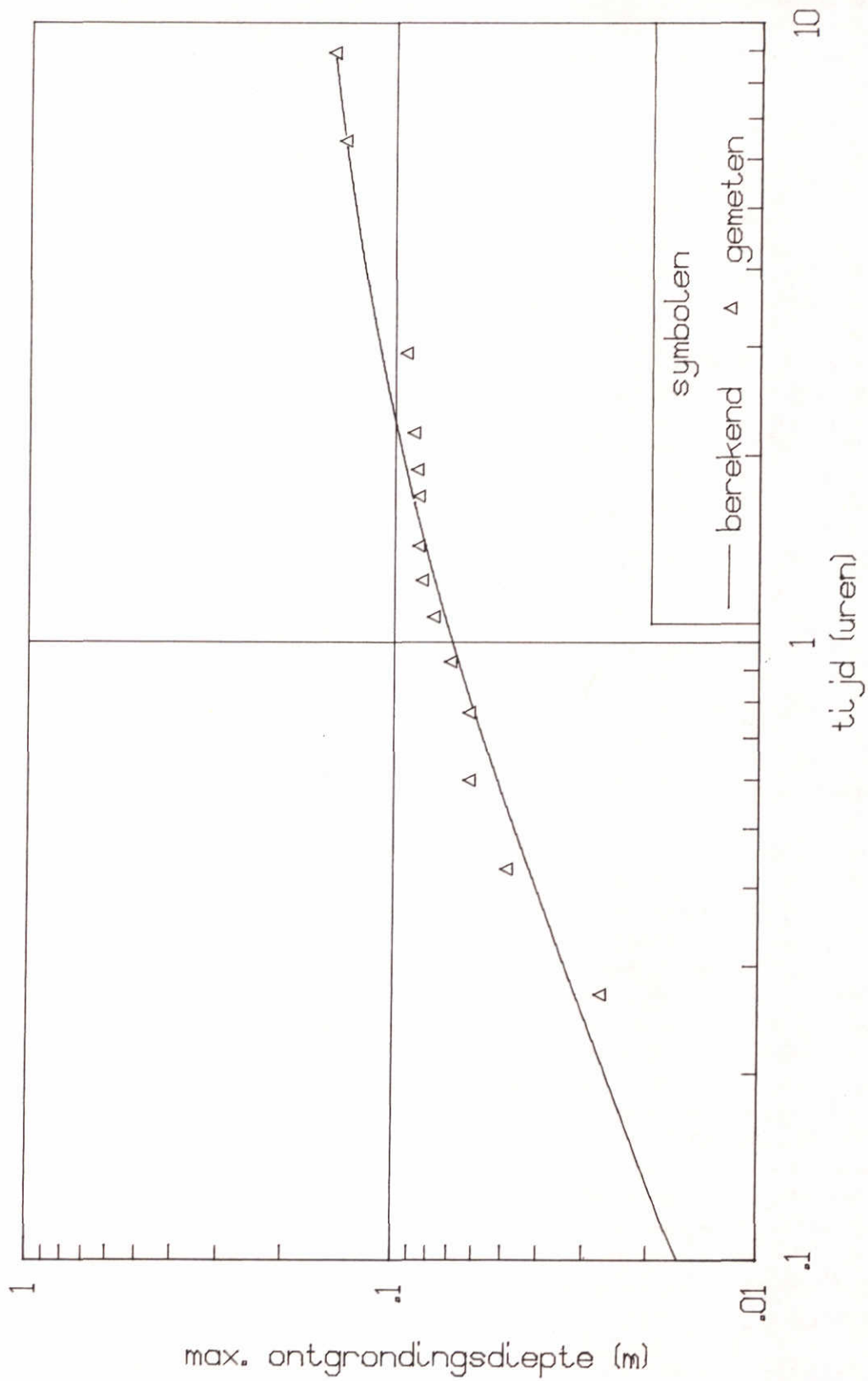


MAXIMUM ONTGRONDINGSDIEPTE-TIJD OP
DUBBEL LOGARITHMISCHE SCHAAL, T4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Q 935

FIG 34

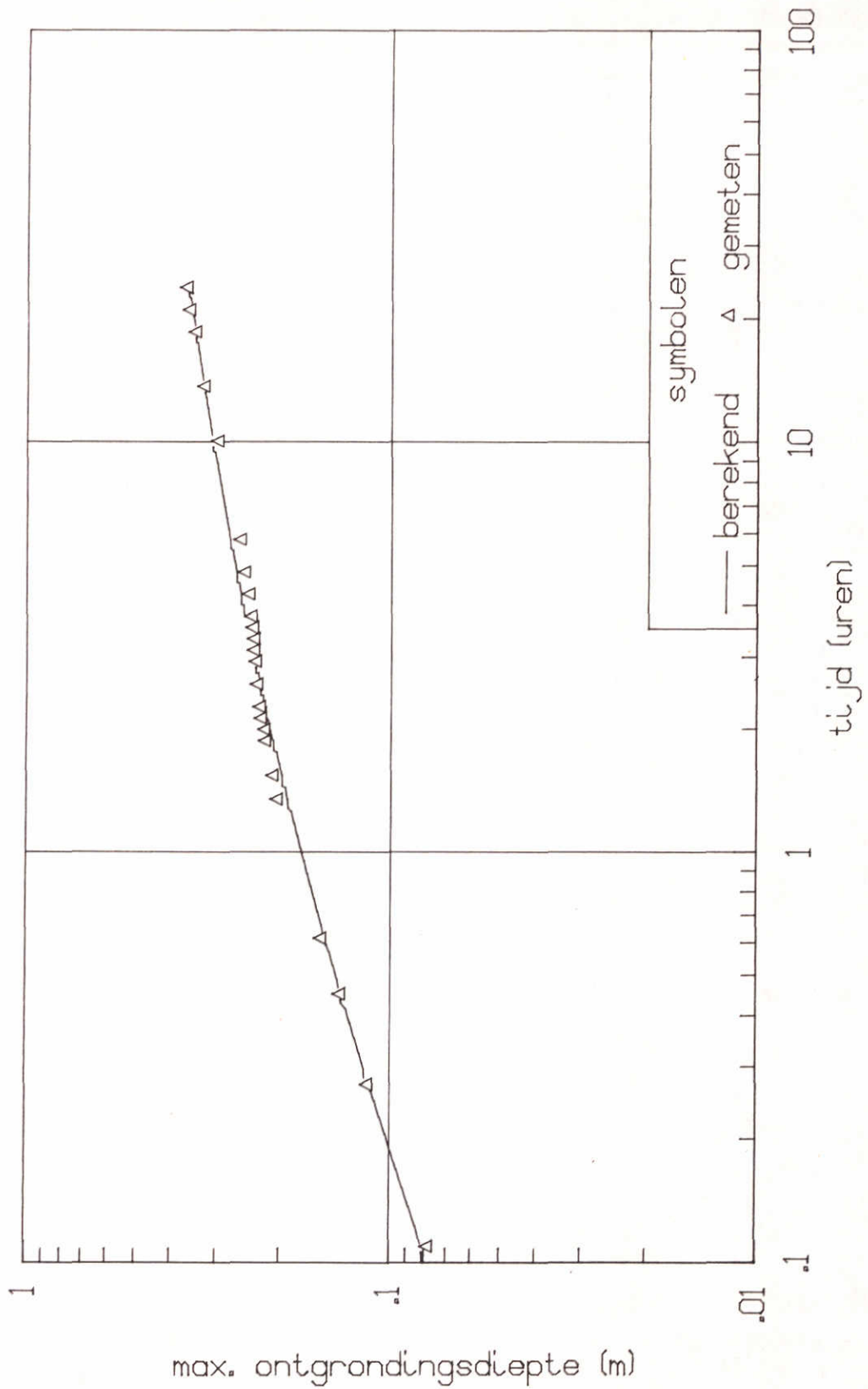


MAXIMUM ONTGRONDINGSDIEPTE-TIJD OP
DUBBEL LOGARITHMISCHE SCHAAL, T5

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Q 935

FIG 35

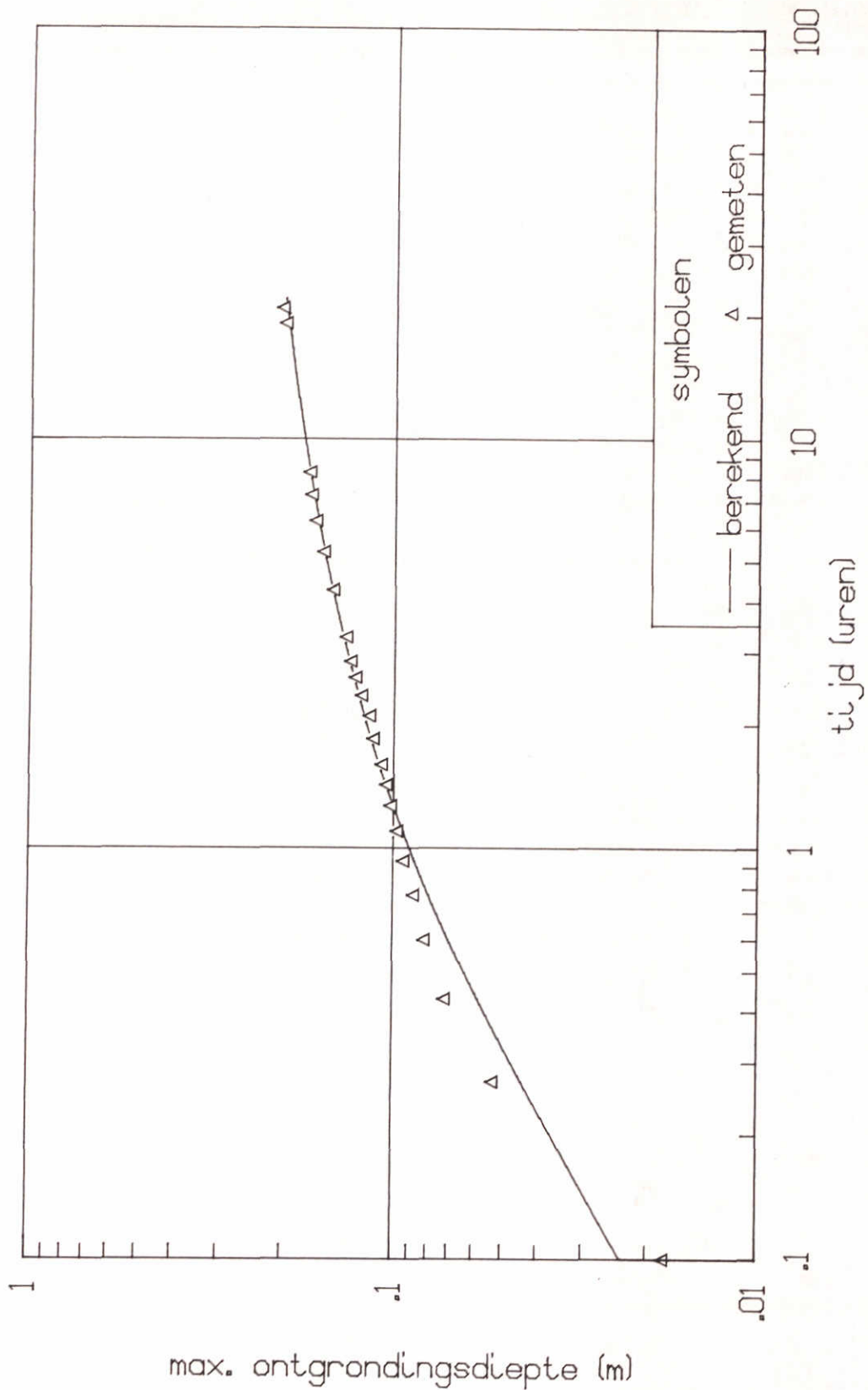


MAXIMUM ONTGRONDINGSDIEPTE-TIJD OP
DUBBEL LOGARITHMISCHE SCHAAL, T6

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Q 935

FIG 36

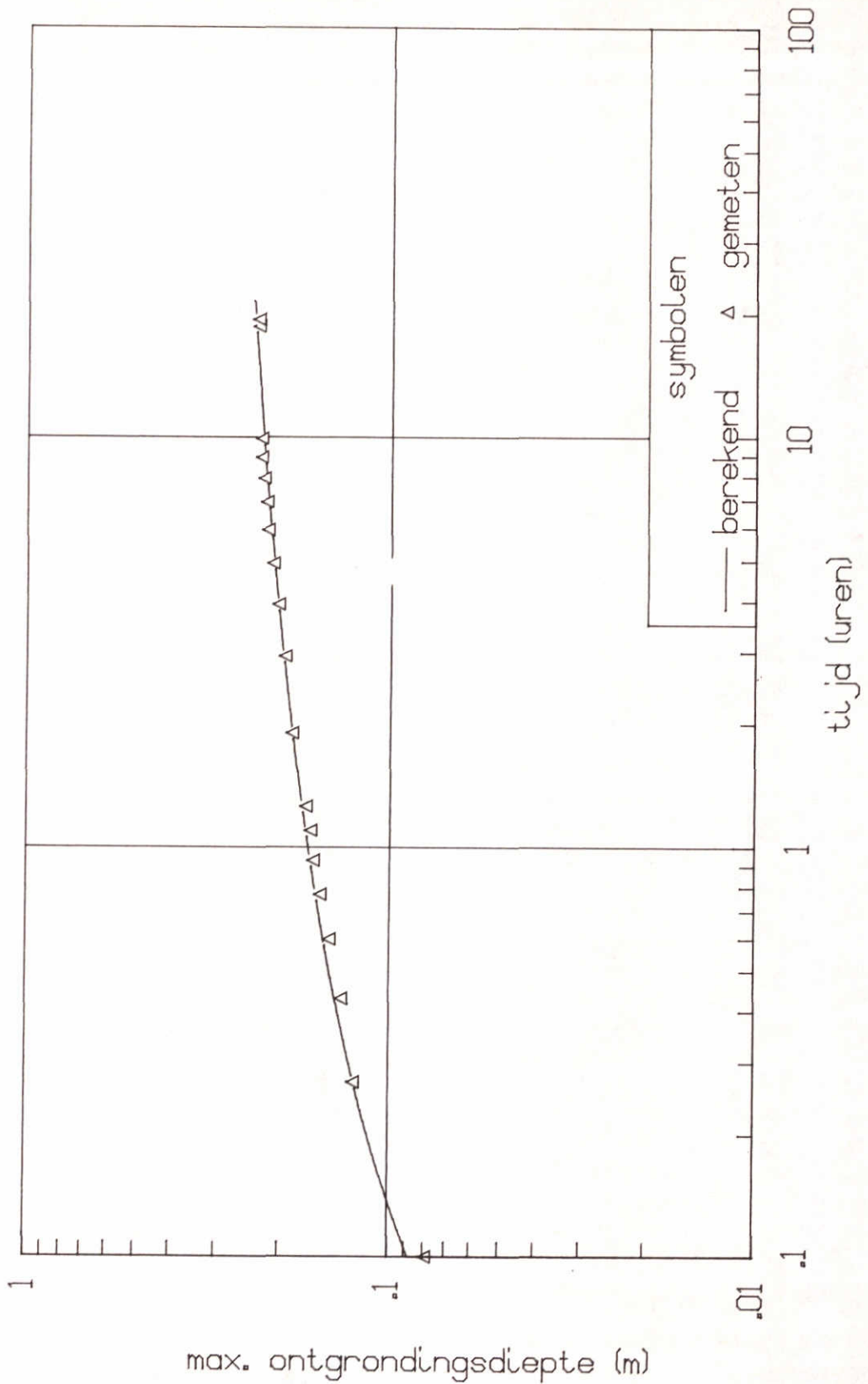


MAXIMUM ONTGRONDINGSDIEPTE-TIJD OP
DUBBEL LOGARITHMISCHE SCHAALE, T7

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Q 935

FIG 37

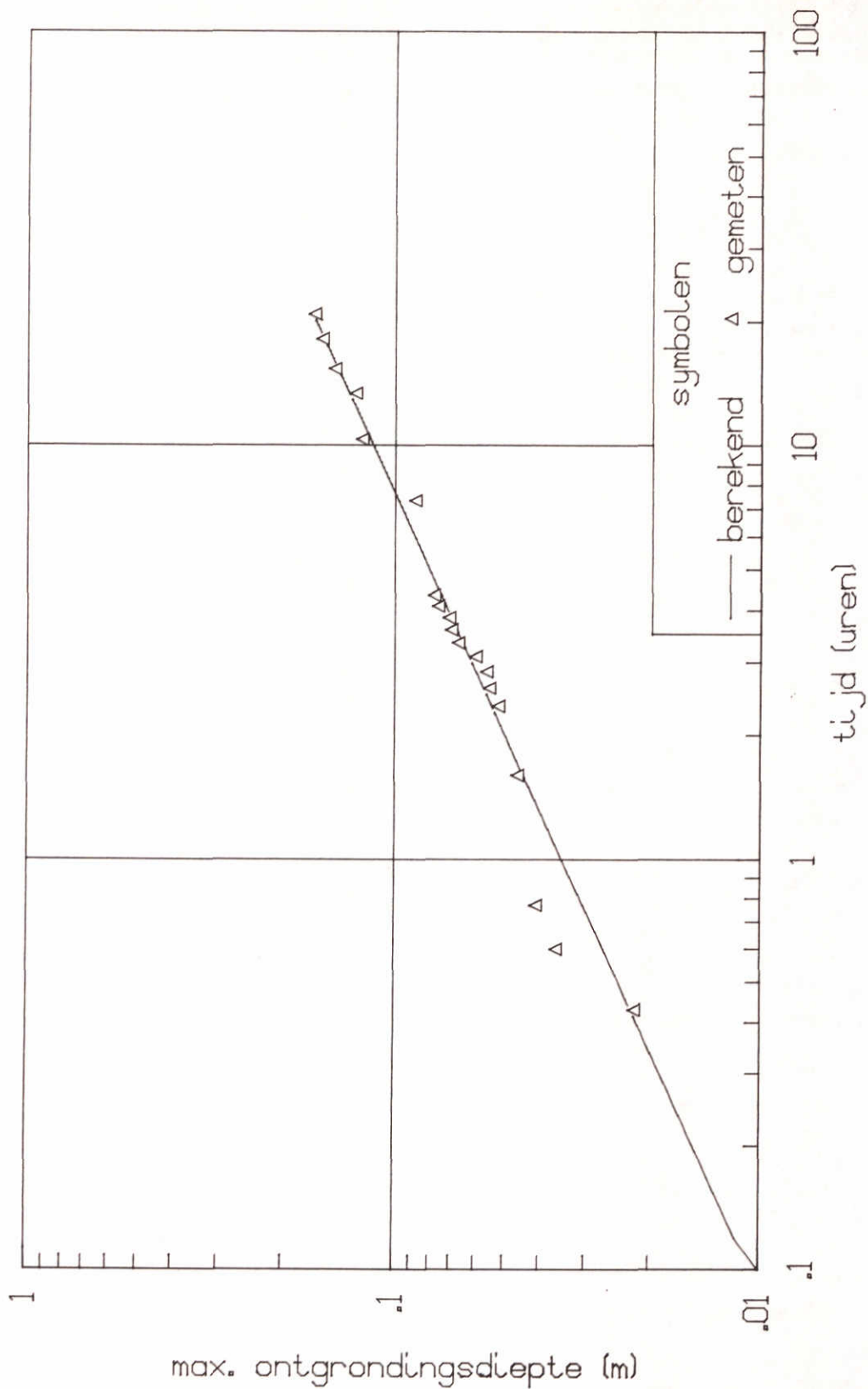


MAXIMUM ONTGRONDSDIEPTE-TIJD OP
DUBBEL LOGARITHMISCHE SCHAAL, T8

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Q 935

FIG 38

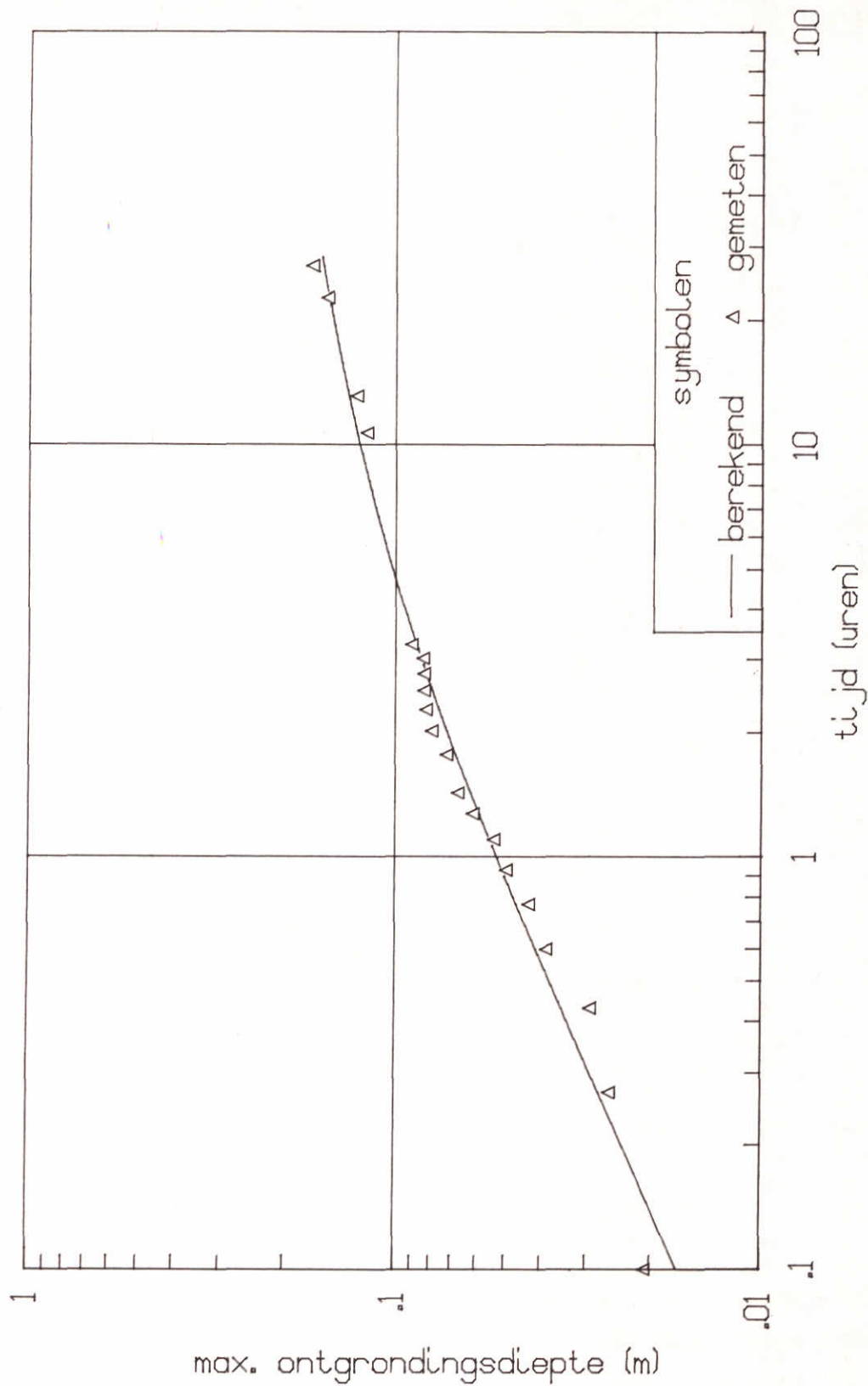


MAXIMUM ONTGRONDINGSDIEPTE-TIJD OP
 DUBBEL LOGARITHMISCHE SCHAAL, T10

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Q 935

FIG 39

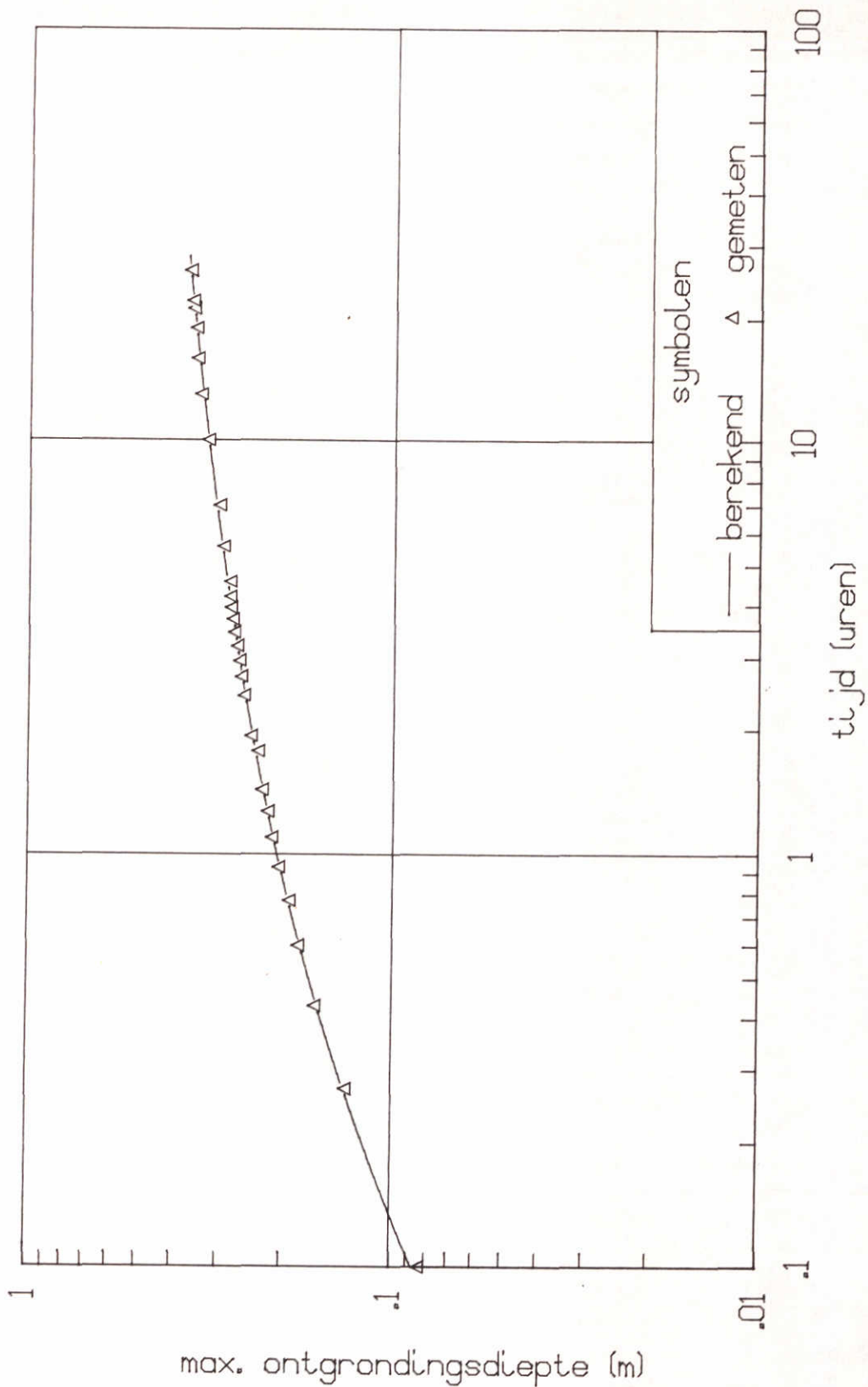


MAXIMUM ONTGRONDINGSDIEPTE-TIJD OP
 DUBBEL LOGARITHMISCHE SCHAAAL, T11

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Q 935

FIG 40

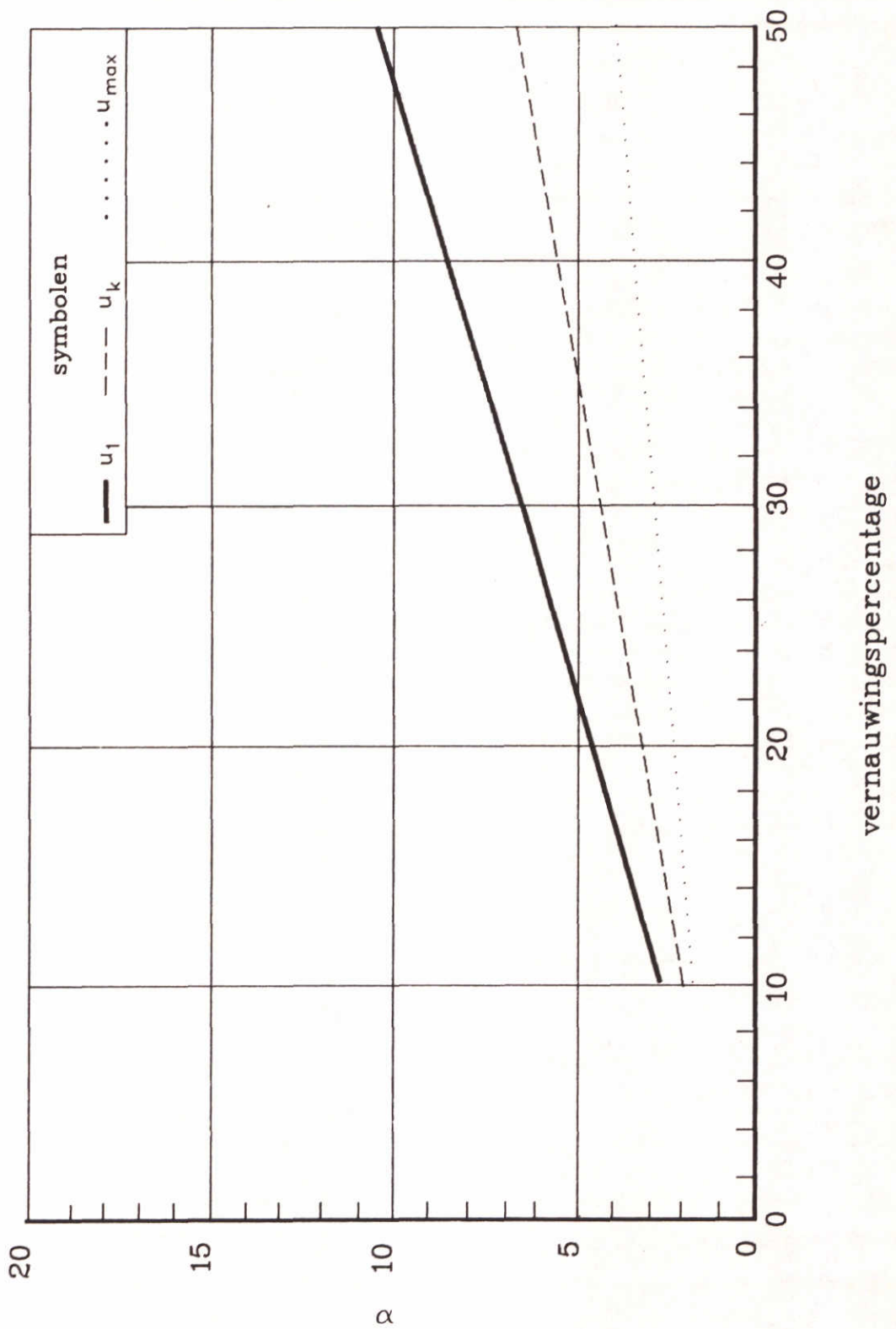


MAXIMUM ONTGRONDINGSDIEPTE-TIJD OP
DUBBEL LOGARITHMISCHE SCHAAAL, T12

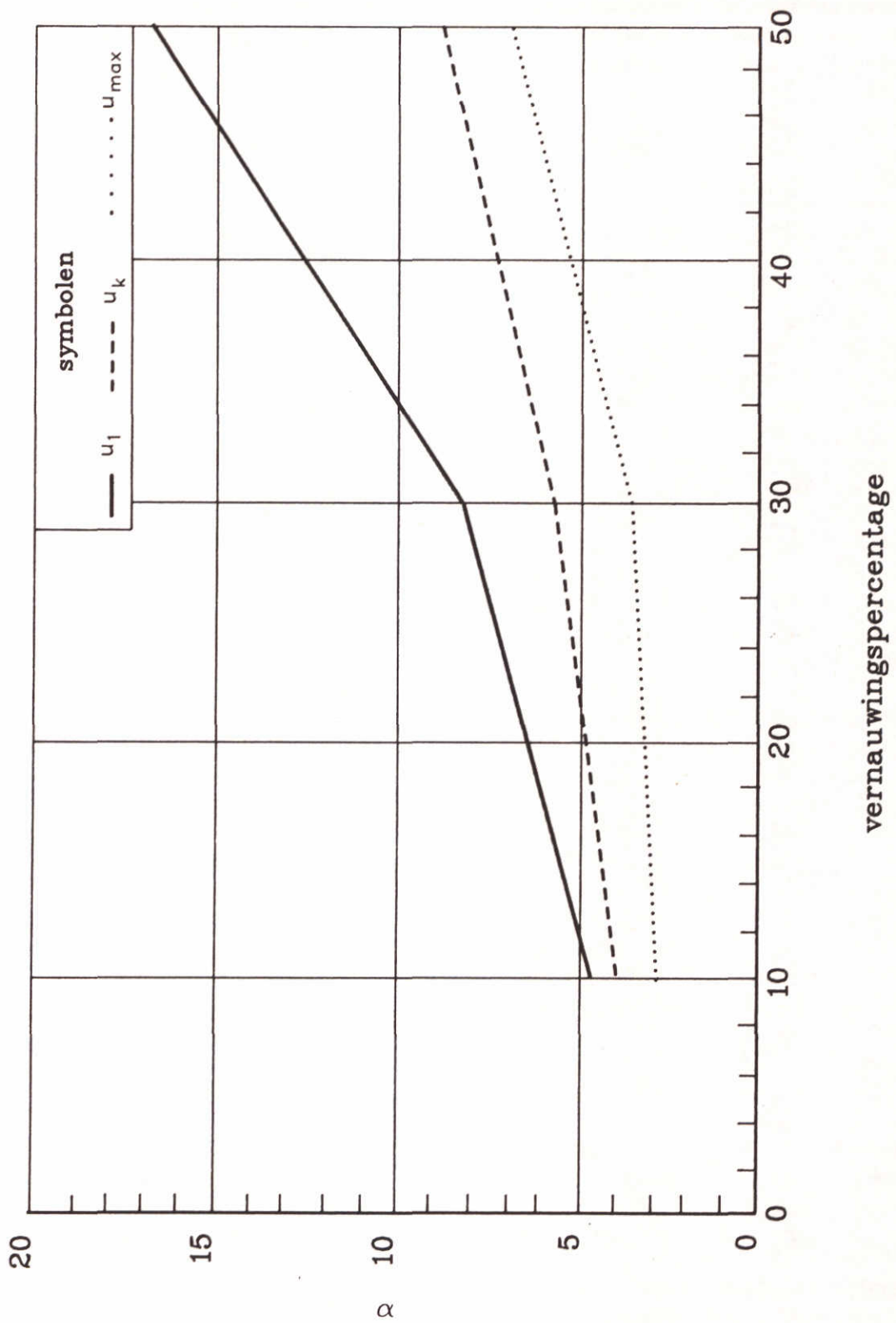
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Q 935

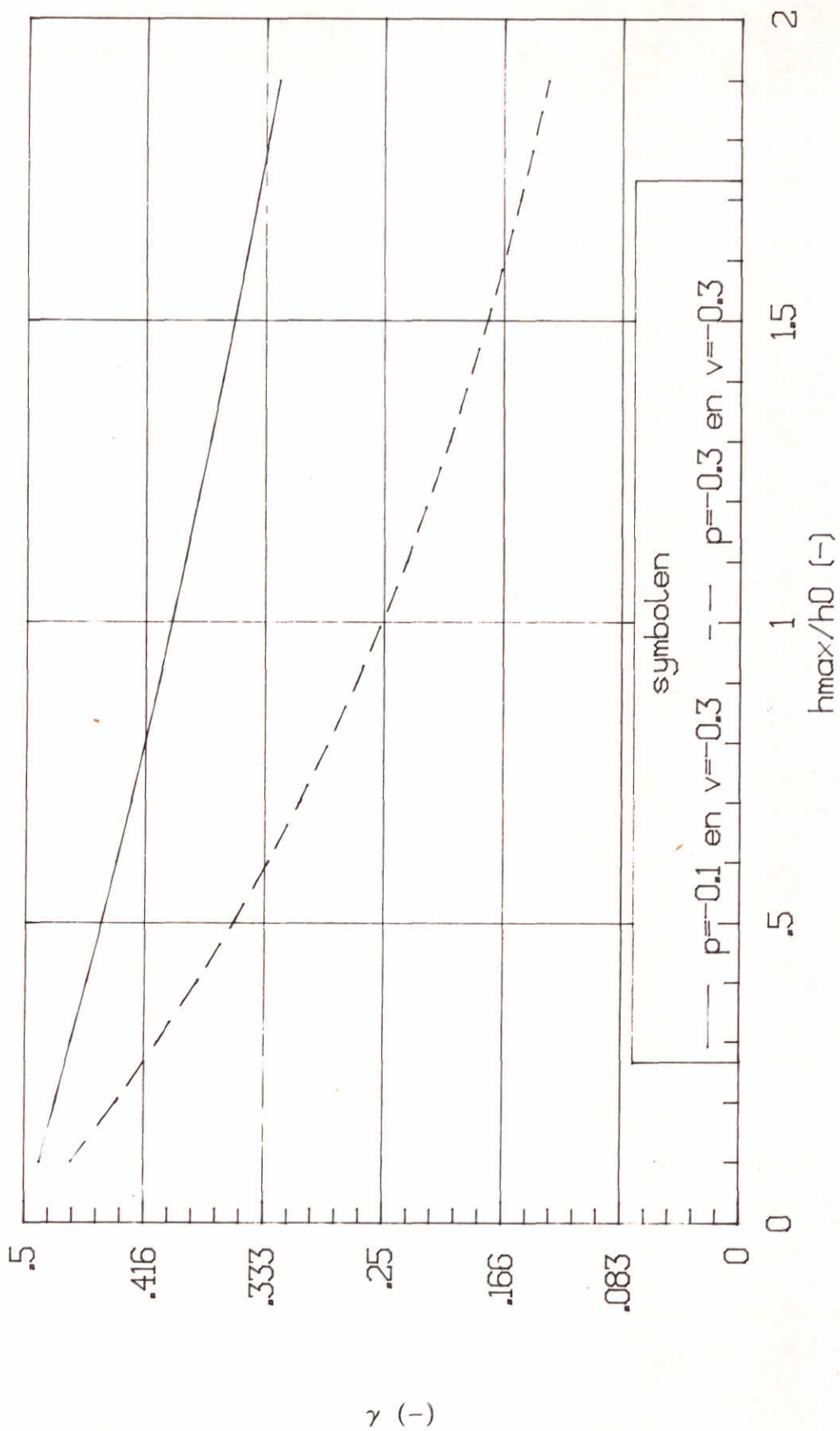
FIG 41



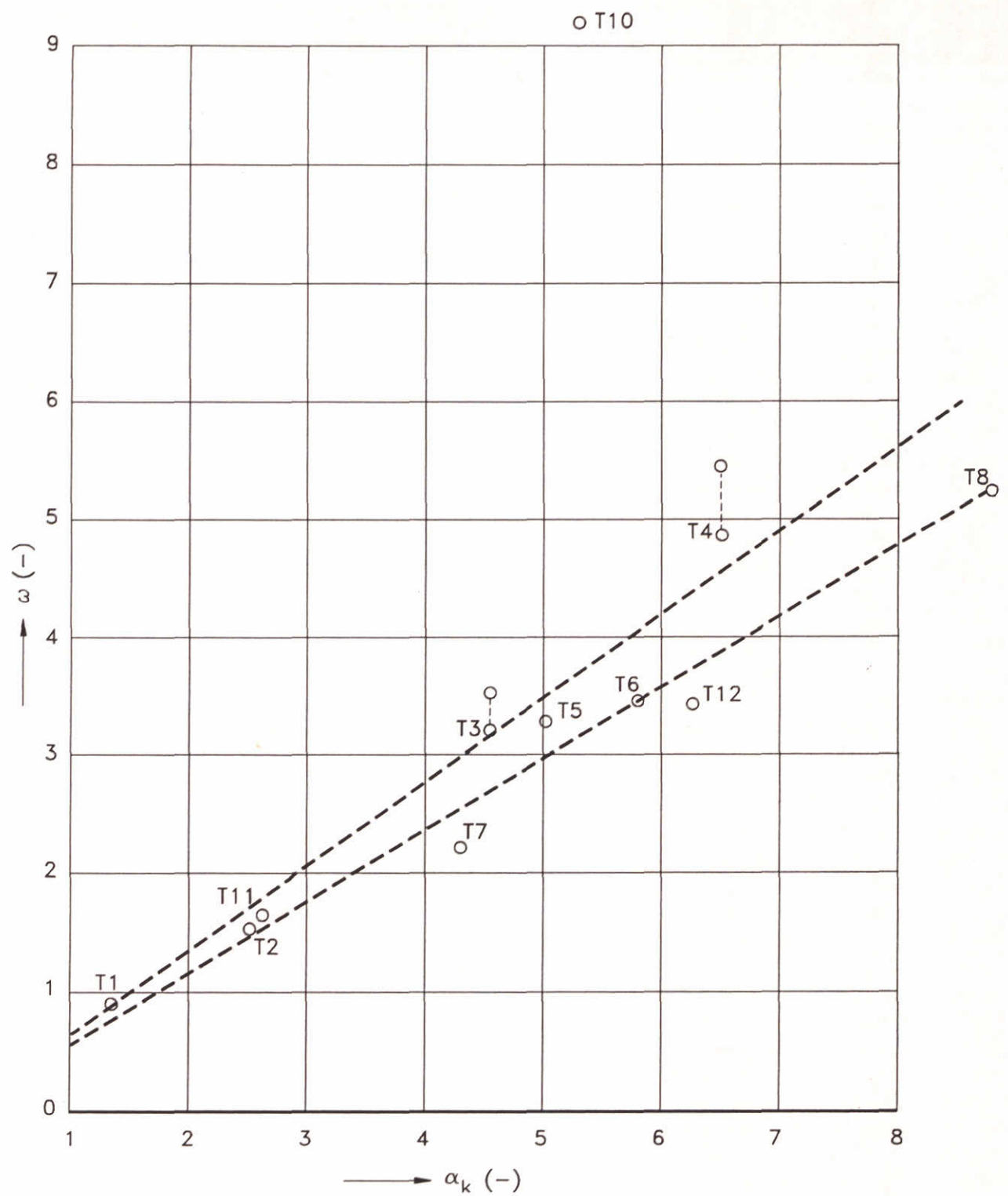
α ALS FUNKTIE VAN DE HORIZONTALE
VERNAUWING, ZONDER BODEMVERDEDIGING



α ALS FUNKTIE VAN DE HORIZONTALE
VERNAUWING, ZONDER BODEMVERDEDIGING



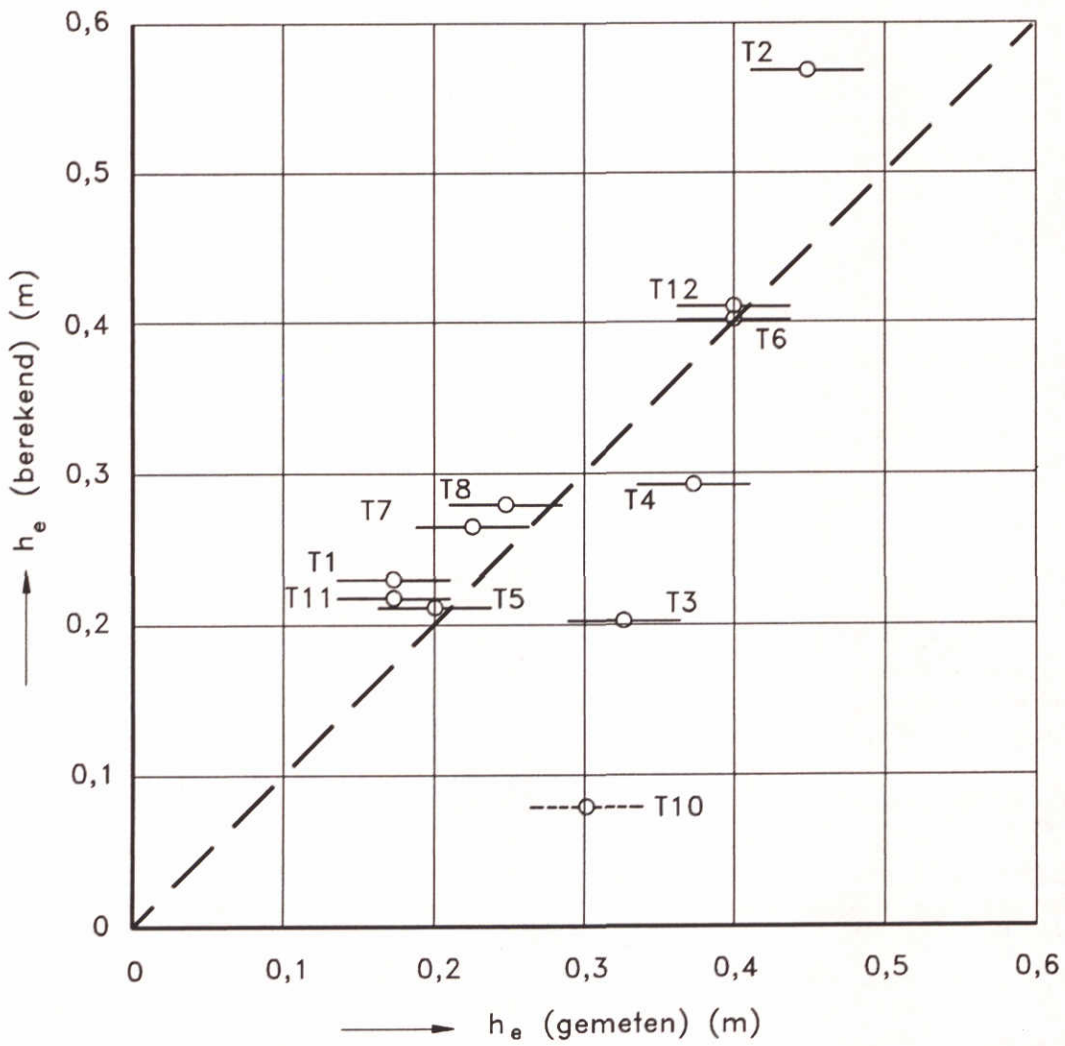
γ ALS FUNKTIE VAN h_{max}/h_0



Opm: Voor de meetpunten is gebruik gemaakt van de werkelijke u_{kr} en de geëxtrapoleerde h_{max}

--- $\omega = (0,6 \text{ à } 0,7) \alpha_k$

ω ALS FUNKTIE VAN α_k



T10 : formule niet geldig

EVENWICHTSONTGRONDINGSDIEPTE,
GEMETEN EN BEREKEND

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Q 935

FIG. 46



Foto 1 Ontgrondingskuil tijdens proef T4

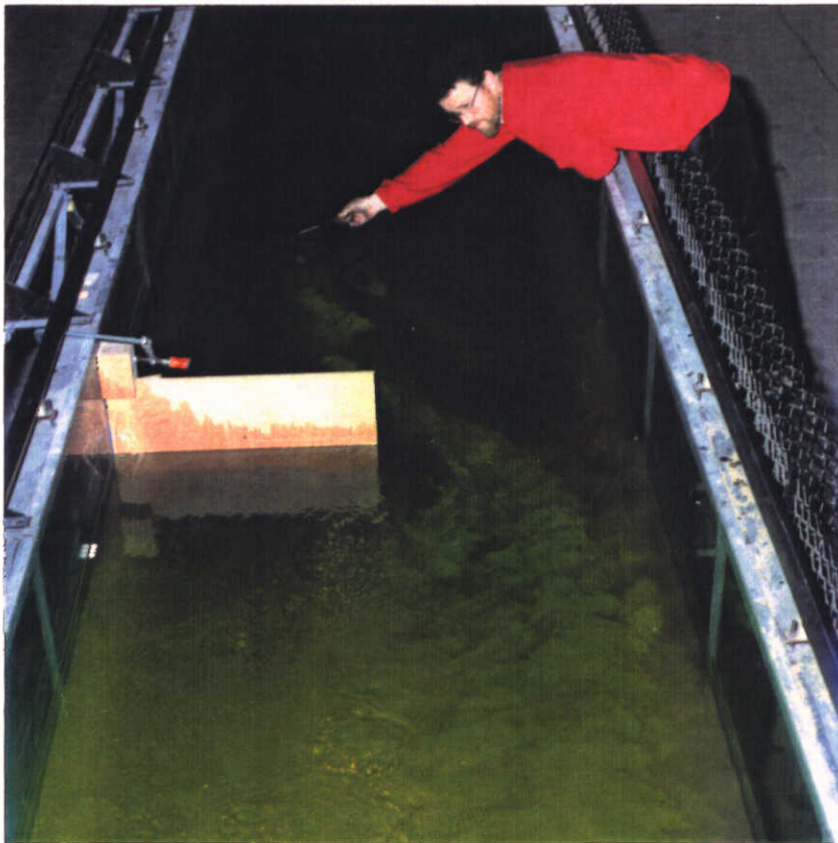


Foto 2 Stroombeeld tijdens proef T8

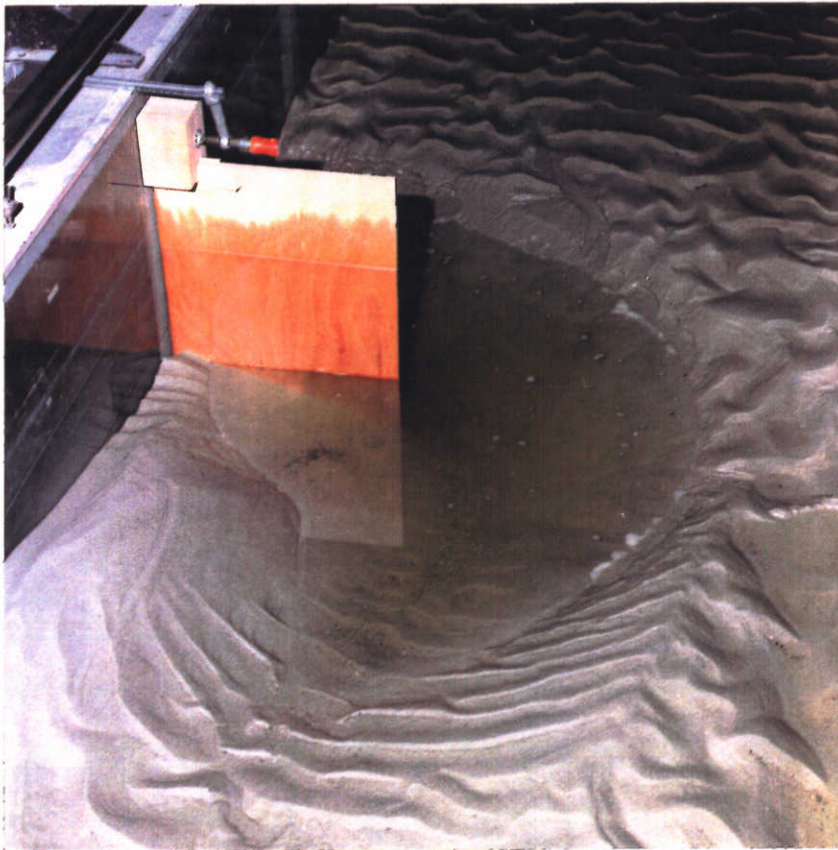


Foto 3 Ontgrondingskuil na afloop van proef T6

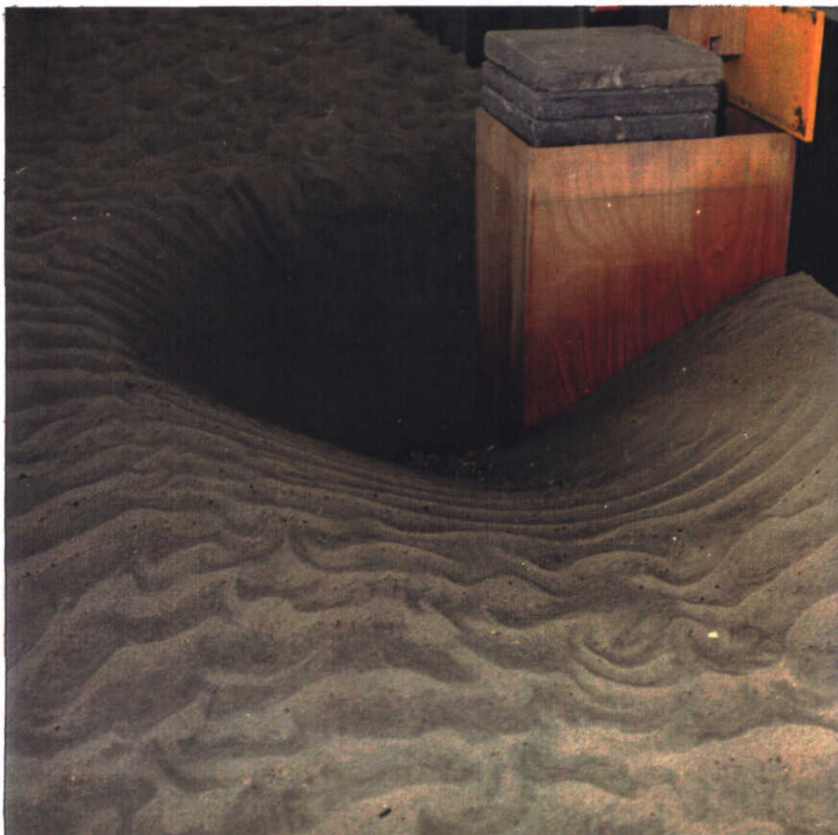
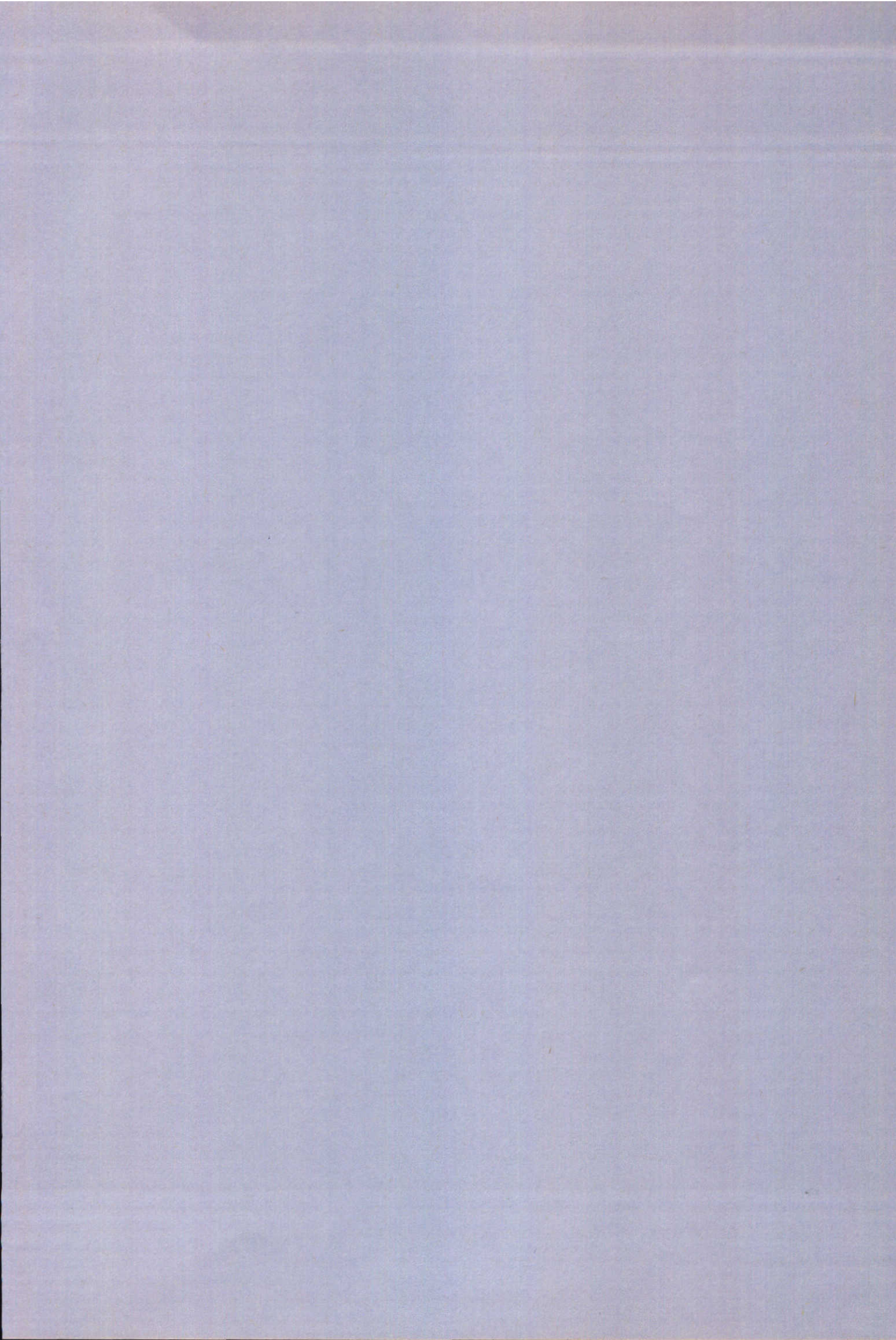


Foto 4 Ontgrondingskuil na afloop van proef T12



Bijlage

1 Uitvoer resultaten programma Alfafit

In een tweedimensionale geometrie geldt bij benadering: $y = 0,4$, en in een driedimensionale situatie is y een functie van de tijd en van de geometrie. Na een eerste analyse van enkele proeven is onderzocht of y gelijk gesteld zou kunnen worden aan de richtingscoëfficiënt van de tijd-ontgrondingslijn op dubbel-logaritmisch papier, zie het verslag evaluatie ontgrondingen bij de Oosterschelde, Q 496 lit.[16]. Deze definitie is voor een praktische toepassing aantrekkelijk. Vervolgens is deze definitie getoetst aan enkele proeven met diepe ontgrondingskuilen ($h_{\max} > 2 h_0$). Uit deze toetsing bleek dat deze definitie niet in alle gevallen leidde tot een constante waarde van α . Naar aanleiding van dit resultaat is de definitie van y aangepast, zie een notitie van Rijkswaterstaat, Bouwspeurwerk lit.[12].

ALGEMENE GEGEVENS

PROJEKT	Q935-T1	Ho	0.250 m
SERIE		U (gemiddeld)	0.600 m/s
TOESTAND	T1	U (lokaal)	N.V.T.
RAAI	DP	Ukritiek	0.123 m/s
		D50	220 μm
GEOMETRIE	SCHOT 10 %	Delta	1.65 (-)
MATERIAAL	ZAND		
LENGTE BB	5.00 m		

0.31 m/s

Hmax (m.)	Hmax/Ho (-)	t gemeten (uren)	t berekend (uren)	τ (-)	d(Hmax)/dt (m/uur)
0.013	0.054	0.180	0.130	0.419	0.499
0.020	0.080	0.350	0.286	0.408	0.513
0.026	0.103	0.520	0.468	0.399	0.523
0.039	0.155	0.770	1.011	0.378	0.535
0.048	0.192	1.020	1.504	0.364	0.537
0.046	0.184	1.270	1.504	0.364	0.537
0.051	0.206	1.520	1.714	0.359	0.536
0.056	0.224	1.770	2.004	0.353	0.534
0.060	0.238	2.020	2.246	0.348	0.532
0.064	0.254	2.270	2.546	0.342	0.529
0.072	0.287	2.770	3.208	0.331	0.520
0.074	0.297	3.270	3.418	0.327	0.517
0.083	0.331	4.250	4.238	0.316	0.503
0.091	0.365	5.350	5.150	0.306	0.488
0.092	0.368	6.320	5.232	0.305	0.486
0.096	0.384	7.430	5.727	0.300	0.478
0.142	0.567	20.550	14.294	0.249	0.370

PARAMETERS

T1 (hr)	139.59
α (-)	1.51
Ao (-)	0.47
P (-)	- 0.44
V (-)	- 0.35

FITGEGEVENS

μ (%)	- 2.18
σ (%)	5.53
Iteratie	7
Iteraties	7

$$\alpha = 1.82$$

$$\alpha u - u_{kr} = C$$

$$\alpha = \frac{C + u_{kr}}{u} = \frac{(\alpha u - u_{kr})_{oud} + (u_{kr})_{nieuw}}{u}$$

ALGEMENE GEGEVENS

PROJEKT	Q935-T2	Ho	0.250 m
SERIE		U (gemiddeld)	0.600 m/s
TOESTAND	T2	U (lokaal)	N.V.T.
RAAI	DP	Ukritiek	0.123 m/s
		D50	220 μ m
GEOMETRIE	SCHOT 10 %	Delta	1.65 (-)
MATERIAAL	ZAND		
LENGTE BB	1.25 m		

0.31 m/s

Hmax (m.)	Hmax/Ho (-)	t gemeten (uren)	t berekend (uren)	τ (-)	d(Hmax)/dt (m/uur)
0.023	0.092	0.100	0.091	0.484	0.484
0.038	0.152	0.270	0.257	0.484	0.484
0.050	0.200	0.430	0.454	0.484	0.484
0.058	0.232	0.600	0.616	0.484	0.484
0.070	0.280	0.850	0.909	0.484	0.484
0.078	0.312	1.100	1.136	0.484	0.484
0.088	0.352	1.350	1.457	0.484	0.484
0.093	0.372	1.600	1.634	0.484	0.484
0.099	0.396	1.850	1.859	0.484	0.484
0.103	0.412	2.100	2.017	0.484	0.484
0.110	0.440	2.350	2.310	0.484	0.484
0.114	0.456	2.600	2.487	0.484	0.484
0.118	0.472	2.850	2.671	0.484	0.484
0.121	0.484	3.100	2.813	0.484	0.484
0.126	0.504	3.350	3.058	0.484	0.484
0.131	0.524	3.600	3.314	0.484	0.484
0.135	0.540	3.850	3.526	0.484	0.484
0.152	0.608	4.800	4.504	0.484	0.484
0.197	0.788	7.900	7.694	0.484	0.484
0.230	0.920	10.600	10.592	0.484	0.484
0.310	1.240	19.580	19.616	0.484	0.484
0.319	1.276	20.800	20.810	0.484	0.484
0.324	1.296	21.520	21.489	0.484	0.484
0.329	1.316	22.220	22.180	0.484	0.484

PARAMETERS	
T1 (hr)	12.58
α (-)	2.48
Ao (-)	5.18
P (-)	0.00
V (-)	- 0.31

FITGEGEVENS	
μ (%)	- 2.13
σ (%)	1.10
Iteratie	0
Iteraties	2

$\alpha = 2.79$

ALGEMENE GEGEVENS

PROJEKT	Q935-T3	Ho	0.150 m
SERIE		U (gemiddeld)	0.270 m/s
TOESTAND	T3	U (lokaal)	N.V.T.
RAAI	DP	Ukritiek	0.110 m/s
GEOMETRIE	SCHOT 30 %	D50	220 μm
MATERIAAL	ZAND	Delta	1.65 (-)
LENGTE BB	0.75 m		

0.29 m/s

Hmax (m.)	Hmax/Ho (-)	t gemeten (uren)	t berekend (uren)	τ (-)	d(Hmax)/dt (m/uur)
0.017	0.113	0.120	0.107	0.636	0.710
0.034	0.227	0.280	0.283	0.606	0.707
0.048	0.320	0.450	0.463	0.582	0.689
0.062	0.413	0.610	0.676	0.560	0.662
0.079	0.527	0.850	0.985	0.533	0.623
0.091	0.607	1.100	1.243	0.515	0.592
0.101	0.673	1.350	1.488	0.501	0.565
0.107	0.713	1.600	1.651	0.493	0.549
0.113	0.753	1.850	1.826	0.484	0.533
0.119	0.793	2.100	2.016	0.476	0.516
0.125	0.833	2.350	2.220	0.468	0.500
0.132	0.880	2.600	2.481	0.459	0.482
0.136	0.907	2.850	2.641	0.454	0.472
0.145	0.967	3.100	3.036	0.442	0.449
0.152	1.013	3.350	3.379	0.434	0.431
0.160	1.067	3.620	3.817	0.424	0.412
0.166	1.107	3.870	4.180	0.417	0.398
0.171	1.140	4.110	4.509	0.411	0.386
0.176	1.173	4.370	4.864	0.405	0.375
0.180	1.200	4.620	5.167	0.401	0.366
0.184	1.227	4.870	5.491	0.396	0.358
0.191	1.273	5.380	6.108	0.388	0.343
0.198	1.320	6.350	6.798	0.381	0.329
0.209	1.393	8.200	8.054	0.369	0.308
0.215	1.433	9.480	8.843	0.363	0.298
0.233	1.553	13.680	11.761	0.345	0.267
0.246	1.640	16.680	14.529	0.332	0.247
0.263	1.753	19.680	19.311	0.317	0.223
0.275	1.833	22.680	23.755	0.306	0.208
0.283	1.887	24.500	27.359	0.299	0.198

PARAMETERS	
T1 (hr)	3.28
α (-)	5.87
Ao (-)	2996.97
P (-)	- 0.18
V (-)	- 0.18

FITGEGEVENS	
μ (%)	1.94
σ (%)	1.57
Iteratie	6
Iteraties	6

$\alpha = 6.54$

ALGEMENE GEGEVENS

PROJEKT	Q935-T4	Ho	0.115 m
SERIE		U (gemiddeld)	0.230 m/s
TOESTAND	T4	U (lokaal)	N.V.T.
RAAI	DP	Ukritiek	0.100 m/s
GEOMETRIE	SCHOT 50 %	D50	220 μm
MATERIAAL	ZAND	Delta	1.65 (-)
LENGTE BB	0.50 m		

0.28 m/s

Hmax (m.)	Hmax/Ho (-)	t gemeten (uren)	t berekend (uren)	τ (-)	d(Hmax)/dt (m/uur)
0.094	0.817	0.100	0.083	0.367	0.381
0.164	1.426	0.270	0.436	0.319	0.286
0.172	1.496	0.430	0.516	0.314	0.276
0.179	1.557	0.600	0.598	0.310	0.268
0.187	1.626	0.770	0.706	0.305	0.258
0.190	1.652	0.930	0.751	0.303	0.255
0.197	1.713	1.100	0.868	0.299	0.247
0.207	1.800	1.270	1.066	0.293	0.236
0.214	1.861	1.430	1.230	0.289	0.228
0.223	1.939	1.600	1.479	0.284	0.219
0.227	1.974	1.770	1.605	0.281	0.215
0.235	2.043	1.930	1.891	0.277	0.208
0.239	2.078	2.100	2.052	0.275	0.204
0.250	2.174	2.520	2.574	0.269	0.194
0.257	2.235	2.770	2.974	0.265	0.188
0.261	2.270	3.020	3.232	0.263	0.184
0.265	2.304	3.270	3.512	0.261	0.181
0.282	2.452	4.400	5.018	0.252	0.168
0.292	2.539	5.270	6.205	0.247	0.160
0.309	2.687	8.270	8.953	0.239	0.149
0.324	2.817	11.270	12.449	0.232	0.139
0.335	2.913	21.030	15.922	0.227	0.132

PARAMETERS

T1 (hr)	0.14
α (-)	12.16
Ao (-)	131313
P (-)	- 0.10
V (-)	- 0.35

FITGEGEVENS

μ (%)	- 2.25
σ (%)	3.66
Iteratie	3
Iteraties	3

$\alpha = 12.94$

ALGEMENE GEGEVENS

PROJEKT	Q935-T5	Ho	0.140 m
SERIE		U (gemiddeld)	0.210 m/s
TOESTAND	T5	U (lokaal)	N.V.T.
RAAI	DP	Ukritiek	0.110 m/s
GEOMETRIE	SCHOT 30 %	D50	220 μ m
MATERIAAL	ZAND	Delta	1.65 (-)
LENGTE BB	0.00 m		

0.29 m/s

Hmax (m.)	Hmax/Ho (-)	t gemeten (uren)	t berekend (uren)	τ (-)	d(Hmax)/dt (m/uur)
0.027	0.193	0.270	0.211	0.473	0.648
0.049	0.350	0.430	0.541	0.414	0.602
0.062	0.443	0.600	0.813	0.382	0.552
0.055	0.393	0.770	0.813	0.382	0.552
0.070	0.500	0.930	1.020	0.364	0.517
0.078	0.557	1.100	1.267	0.347	0.480
0.084	0.600	1.260	1.486	0.334	0.452
0.086	0.614	1.430	1.566	0.330	0.443
0.060	0.429	1.720	1.566	0.330	0.443
0.087	0.621	1.900	1.607	0.328	0.439
0.089	0.636	2.180	1.694	0.324	0.430
0.093	0.668	2.930	1.905	0.315	0.410
0.138	0.986	6.440	6.452	0.241	0.244
0.149	1.064	8.950	9.036	0.225	0.213

PARAMETERS	
T1 (hr)	6.85
α (-)	6.25
Ao (-)	8531.80
P (-)	- 0.37
V (-)	- 0.25

FITGEGEVENS	
μ (%)	- 2.83
σ (%)	6.21
Iteratie	4
Iteraties	4

$\alpha = 7.1$

ALGEMENE GEGEVENS

PROJEKT	Q935-T6	Ho	0.150 m
SERIE		U (gemiddeld)	0.310 m/s
TOESTAND	T6	U (lokaal)	N.V.T.
RAAI	DP	Ukritiek	0.110 m/s
GEOMETRIE	SCHOT 30 %	D50	220 μm
MATERIAAL	ZAND	Delta	1.65 (-)
LENGTE BB	0.00 m		

0.29 m/s

Hmax (m.)	Hmax/Ho (-)	t gemeten (uren)	t berekend (uren)	τ (-)	d(Hmax)/dt (m/uur)
0.079	0.527	0.100	0.086	0.348	0.375
0.116	0.773	0.270	0.248	0.331	0.345
0.138	0.920	0.430	0.416	0.321	0.326
0.156	1.040	0.600	0.611	0.313	0.310
0.206	1.373	1.280	1.602	0.291	0.267
0.212	1.413	1.450	1.785	0.289	0.262
0.222	1.480	1.770	2.135	0.285	0.254
0.223	1.487	1.930	2.173	0.285	0.253
0.228	1.520	2.100	2.373	0.283	0.249
0.230	1.533	2.270	2.458	0.282	0.248
0.234	1.560	2.430	2.637	0.280	0.244
0.236	1.573	2.750	2.730	0.279	0.243
0.239	1.593	3.020	2.877	0.278	0.241
0.238	1.587	3.270	2.877	0.278	0.241
0.241	1.607	3.520	2.978	0.277	0.239
0.243	1.620	3.720	3.084	0.277	0.238
0.246	1.640	4.020	3.248	0.276	0.235
0.253	1.687	4.550	3.664	0.273	0.230
0.260	1.733	5.520	4.131	0.270	0.225
0.300	2.000	9.530	8.138	0.255	0.198
0.329	2.193	13.530	13.274	0.245	0.180
0.348	2.320	17.530	18.314	0.239	0.169
0.362	2.413	20.780	23.248	0.234	0.162
0.368	2.453	22.570	25.762	0.232	0.159

PARAMETERS

T1 (hr)	0.54
α (-)	7.59
Ao (-)	6286.95
P (-)	- 0.09
V (-)	- 0.41

FITGEGEVENS

μ (%)	- 2.69
σ (%)	3.21
Iteratie	3
Iteraties	3

$\alpha = 8.17$

ALGEMENE GEGEVENS

PROJEKT	Q935-T7	Ho	0.150 m
SERIE		U (gemiddeld)	0.350 m/s
TOESTAND	T7	U (lokaal)	N.V.T.
RAAI	DP	Ukritiek	0.110 m/s
		D50	220 μ m
GEOMETRIE	SCHOT 10 %	Delta	1.65 (-)
MATERIAAL	ZAND		
LENGTE BB	0.00 m		

0.29 m/s

Hmax (m.)	Hmax/Ho (-)	t gemeten (uren)	t berekend (uren)	τ (-)	d(Hmax)/dt (m/uur)
0.018	0.120	0.100	0.066	0.503	0.637
0.053	0.353	0.270	0.364	0.415	0.596
0.072	0.480	0.430	0.627	0.373	0.527
0.082	0.547	0.600	0.811	0.353	0.486
0.088	0.587	0.770	0.941	0.342	0.461
0.094	0.627	0.930	1.090	0.331	0.436
0.098	0.653	1.100	1.201	0.323	0.420
0.102	0.680	1.270	1.324	0.316	0.404
0.105	0.700	1.430	1.424	0.311	0.392
0.108	0.720	1.600	1.532	0.306	0.381
0.114	0.760	1.850	1.773	0.296	0.358
0.117	0.780	2.100	1.909	0.291	0.347
0.123	0.820	2.350	2.215	0.282	0.326
0.128	0.853	2.600	2.512	0.274	0.309
0.132	0.880	2.850	2.781	0.268	0.296
0.136	0.907	3.270	3.083	0.262	0.283
0.148	0.987	4.270	4.241	0.246	0.248
0.157	1.047	5.270	5.445	0.234	0.225
0.165	1.100	6.270	6.861	0.224	0.206
0.170	1.133	7.270	7.965	0.217	0.195
0.172	1.147	8.270	8.464	0.215	0.190
0.201	1.340	19.130	22.112	0.183	0.138
0.205	1.367	20.910	25.576	0.179	0.133

PARAMETERS	
T1 (hr)	4.48
α (-)	4.23
Ao (-)	297.39
P (-)	- 0.36
V (-)	- 0.26

FITGEGEVENS	
μ (%)	4.07
σ (%)	3.56
Iteratie	9
Iteraties	9

$\alpha = 4.74$

ALGEMENE GEGEVENS

PROJEKT	Q935-T8	Ho	0.125 m
SERIE		U (gemiddeld)	0.160 m/s
TOESTAND	T8	U (lokaal)	N.V.T.
RAAI	DP	Ukritiek	0.105 m/s
GEOMETRIE	SCHOT 50 %	D50	220 μ m
MATERIAAL	ZAND	Delta	1.65 (-)
LENGTE BB	0.00 m		

0.28 m/s

Hmax (m.)	Hmax/Ho (-)	t gemeten (uren)	t berekend (uren)	τ (-)	d(Hmax)/dt (m/uur)
0.079	0.632	0.100	0.078	0.370	0.464
0.125	1.000	0.270	0.270	0.287	0.287
0.135	1.080	0.430	0.359	0.271	0.256
0.146	1.168	0.600	0.497	0.255	0.226
0.155	1.240	0.770	0.656	0.242	0.204
0.162	1.296	0.930	0.821	0.233	0.189
0.165	1.320	1.100	0.907	0.229	0.183
0.170	1.360	1.260	1.073	0.223	0.173
0.186	1.488	1.900	1.897	0.204	0.144
0.195	1.560	2.930	2.676	0.194	0.131
0.204	1.632	3.930	3.847	0.184	0.118
0.211	1.688	4.930	5.173	0.177	0.110
0.218	1.744	5.930	7.047	0.171	0.102
0.220	1.760	6.930	7.717	0.169	0.100
0.224	1.792	7.930	9.285	0.165	0.095
0.228	1.824	8.930	11.224	0.161	0.091
0.228	1.824	9.930	11.224	0.161	0.091
0.233	1.864	18.630	14.323	0.157	0.087
0.234	1.872	19.400	15.053	0.156	0.086

PARAMETERS

T1 (hr)	0.27
α (-)	15.78
Ao (-)	1369186
P (-)	- 0.30
V (-)	- 0.24

FITGEGEVENS

μ (%)	- 6.92
σ (%)	3.89
Iteratie	4
Iteraties	4

$\alpha = 16.87$

ALGEMENE GEGEVENS

PROJEKT	Q935-T10	Ho	0.100 m
SERIE		U (gemiddeld)	0.120 m/s
TOESTAND	T10	U (lokaal)	N.V.T.
RAAI	DP	Ukritiek	0.100 m/s
GEOMETRIE	SCHOT 50 %	D50	220 μ m
MATERIAAL	ZAND	Delta	1.65 (-)
LENGTE BB	0.50 m		

0.276 m/s

Hmax (m.)	Hmax/Ho (-)	t gemeten (uren)	t berekend (uren)	τ (-)	d(Hmax)/dt (m/uur)
0.022	0.220	0.430	0.378	0.489	0.489
0.036	0.360	0.600	1.035	0.489	0.489
0.041	0.410	0.770	1.350	0.489	0.489
0.046	0.460	1.600	1.709	0.489	0.489
0.052	0.520	2.350	2.196	0.489	0.489
0.055	0.550	2.600	2.464	0.489	0.489
0.056	0.560	2.850	2.556	0.489	0.489
0.060	0.600	3.100	2.944	0.489	0.489
0.067	0.670	3.350	3.690	0.489	0.489
0.070	0.700	3.600	4.036	0.489	0.489
0.071	0.710	3.850	4.155	0.489	0.489
0.076	0.760	4.100	4.776	0.489	0.489
0.078	0.780	4.350	5.037	0.489	0.489
0.088	0.880	7.350	6.448	0.489	0.489
0.123	1.230	10.350	12.796	0.489	0.489
0.128	1.280	13.350	13.883	0.489	0.489
0.146	1.460	15.350	18.175	0.489	0.489
0.158	1.580	18.170	21.364	0.489	0.489
0.166	1.660	20.860	23.637	0.489	0.489

PARAMETERS	
T1 (hr)	8.38
α (-)	9.01
Ao (-)	247522
P (-)	0.00
V (-)	- 0.31

FITGEGEVENS	
μ (%)	8.13
σ (%)	3.79
Iteratie	0
Iteraties	3

$\alpha = 10.47$

ALGEMENE GEGEVENS

PROJEKT	Q935-T11	Ho	0.150 m
SERIE		U (gemiddeld)	0.400 m/s
TOESTAND	T11	U (lokaal)	N.V.T.
RAAI	DP	Ukritiek	0.110 m/s
GEOMETRIE	KRIB 10 %	D50	220 μm
MATERIAAL	ZAND	Delta	1.65 (-)
LENGTE BB	0.00 m		

0.29 m/s

Hmax (m.)	Hmax/Ho (-)	t gemeten (uren)	t berekend (uren)	τ (-)	d(Hmax)/dt (m/uur)
0.021	0.138	0.100	0.150	0.402	0.502
0.026	0.173	0.270	0.236	0.391	0.503
0.029	0.195	0.430	0.299	0.385	0.502
0.039	0.257	0.600	0.520	0.368	0.494
0.043	0.287	0.770	0.651	0.360	0.488
0.050	0.331	0.930	0.872	0.349	0.476
0.054	0.358	1.100	1.031	0.342	0.467
0.061	0.409	1.270	1.381	0.329	0.449
0.067	0.449	1.430	1.706	0.320	0.434
0.072	0.482	1.770	2.010	0.312	0.420
0.079	0.529	2.020	2.526	0.302	0.400
0.082	0.549	2.270	2.765	0.298	0.392
0.084	0.557	2.520	2.870	0.296	0.388
0.082	0.549	2.770	2.870	0.296	0.388
0.084	0.561	3.020	2.923	0.295	0.386
0.090	0.603	3.270	3.540	0.286	0.368
0.120	0.801	10.680	8.470	0.248	0.285
0.128	0.855	13.110	10.748	0.238	0.264
0.155	1.030	22.680	23.947	0.209	0.205
0.170	1.133	27.050	39.619	0.194	0.176

PARAMETERS	
T1 (hr)	20.79
α (-)	2.67
Ao (-)	22.92
P (-)	- 0.32
V (-)	- 0.35

FITGEGEVENS	
μ (%)	0.57
σ (%)	4.56
Iteratie	5
Iteraties	5

$\alpha = 3.12$

ALGEMENE GEGEVENS

PROJEKT	Q935-T12	Ho	0.150 m
SERIE		U (gemiddeld)	0.310 m/s
TOESTAND	T12	U (lokaal)	N.V.T.
RAAI	DP	Ukritiek	0.110 m/s
GEOMETRIE	KOFFERDAM 30 %	D50	220 μ m
MATERIAAL	ZAND	Delta	1.65 (-)
LENGTE BB	0.00 m		

0.29 m/s

Hmax (m.)	Hmax/Ho (-)	t gemeten (uren)	t berekend (uren)	τ (-)	d(Hmax)/dt (m/uur)
0.083	0.555	0.100	0.092	0.431	0.493
0.133	0.887	0.270	0.261	0.379	0.396
0.162	1.079	0.430	0.446	0.352	0.341
0.180	1.202	0.600	0.621	0.336	0.310
0.191	1.272	0.770	0.749	0.327	0.293
0.204	1.361	0.930	0.953	0.316	0.272
0.213	1.423	1.100	1.127	0.309	0.259
0.219	1.463	1.270	1.254	0.304	0.250
0.228	1.520	1.430	1.468	0.297	0.239
0.233	1.556	1.770	1.621	0.293	0.232
0.245	1.631	1.930	2.000	0.285	0.218
0.257	1.711	2.430	2.510	0.276	0.204
0.262	1.745	2.700	2.763	0.273	0.199
0.265	1.766	2.950	2.939	0.270	0.195
0.269	1.791	3.200	3.164	0.268	0.191
0.274	1.829	3.450	3.530	0.264	0.185
0.277	1.844	3.700	3.694	0.262	0.183
0.280	1.867	3.950	3.951	0.260	0.180
0.281	1.875	4.200	4.055	0.259	0.178
0.281	1.874	4.570	4.055	0.259	0.178
0.294	1.963	5.580	5.292	0.251	0.166
0.302	2.013	7.020	6.176	0.246	0.160
0.325	2.164	10.020	9.989	0.232	0.141
0.341	2.275	13.020	14.478	0.222	0.129
0.350	2.332	16.020	17.587	0.218	0.124
0.353	2.351	19.020	18.767	0.216	0.122
0.357	2.383	21.180	21.048	0.213	0.119
0.360	2.397	22.120	22.118	0.212	0.117
0.366	2.441	26.170	25.892	0.209	0.113

PARAMETERS

T1 (hr)	0.36
α (-)	8.31
Ao (-)	9447.31
P (-)	- 0.17
V (-)	- 0.27

FITGEGEVENS

μ (%)	- 0.75
σ (%)	1.02
Iteratie	4
Iteraties	4

$\alpha = 8.89$



hoofdkantoor
Rotterdamseweg 185
postbus 177
2600 MH Delft
telefoon (015) 56 93 53
telefax (015) 61 96 74
telex 38176 hydel-nl

locatie 'De Voorst'
Voorsterweg 28, Marknesse
postbus 152
8300 AD Emmeloord
telefoon (05274) 29 22
telefax (05274) 35 73
telex 42290 hylvo-nl

