

waterloopkundig laboratorium
delft hydraulics laboratory

systematisch onderzoek naar twee- en drie-
dimensionale ontgrondingen

invloed bovenaanvoer en wisselende stroomrichting

verslag modelonderzoek

M 863 deel II

mei 1981

g.6-192

systematisch onderzoek naar twee- en drie-
dimensionale ontgrondingen

invloed bovenaanvoer en wisselende stroomrichting

verslag modelonderzoek

M 863 deel II

mei 1981

BIBLIOTHEEK
Dienst Weg- en Waterbouwkunde
Postbus 5044, 2600 GA DELFT
Tel. 015 - 699111

05 SEP. 1981

INHOUD

	blz.
1. <u>Inleiding</u>	1
2. <u>Samenvatting, konklusies en aanbevelingen voor nader onderzoek</u>	3
3. <u>Onderzoek naar invloed bovenaanvoer</u>	6
3.1 Opzet.....	6
3.2 Resultaten.....	8
3.3 Interpretatie resultaten.....	10
3.4 Konklusies.....	11
4. <u>Onderzoek naar invloed van wisselende stroomrichting</u>	12
4.1 Opzet.....	12
4.2 Resultaten.....	14
4.3 Interpretatie resultaten.....	15
4.4 Konklusies.....	15

Literatuur

TABELLEN

- 1 Proeven ter bepaling van invloed bovenaanvoer op ontgronding
- 2 Proeven ter bepaling van invloed wisselende stroomrichting op ontgronding
- 3 Gebruikte randvoorwaarden berekening wisseltijd model

FIGUREN

- 1 Overzicht gebruikte faciliteit; onderzoek invloed bovenaanvoer
- 2 Toegepaste drempelkonstrukties
- 3 T4...T7 Korrelverdelingsdiagram
- 4 T10...T18 Korrelverdelingsdiagram
- 5 T25...T31 Korrelverdelingsdiagram
- 6 ...10 Vorm ontgrondingskuil voor situatie met en zonder bovenaanvoer
- 11...15 h_{\max} als functie van tijd voor situatie met en zonder bovenaanvoer
- 16...20 Inhoud ontgrondingskuil en snelheid ontgroning als functie van tijd
- 21...25 Snelheid ontgroning als functie van inhoud ontgrondingskuil
- 26 Overzicht gebruikte faciliteit; onderzoek invloed wisselende stroom-
 richting
- 27 T22...T24 Korrelverdelingsdiagram
- 28...30 Vorm ontgrondingskuil voor situatie met wisselende stroomrichting
- 31 h_{\max} als functie van tijd voor situatie met wisselende stroomrichting

Symbolen

b	= gootbreedte	(m)
D_{50}	= gemiddelde korreldiameter sediment	(μm)
h	= goothoogte	(m)
h_o	= waterdiepte juist bovenstrooms van de ontgrondingskuil	(m)
$h_o(o)$	= gemiddelde waterdiepte over een getij juist bovenstrooms van de ontgrondingskuil	(m)
$h_o(t)$	= momentane waterdiepte juist bovenstrooms van de ontgrondingskuil	(m)
h_{max}	= maximale ontgroning	(m)
I	= inhoud ontgrondingskuil	(dm^3)
dI/dt	= snelheid van ontgronden	(dm^3/uur)
k	= konstante	(-)
l	= gootlengte	(m)
n_1	= lengteschaal	(-)
Q_{max}	= maximum gootdebiet	(m^3/s)
S	= bovenaanvoer sediment	(kg droge stof/uur)
t	= ontgrondingsduur	(uur)
$t_{0,5}$	= het tijdstip, waarop $h_{\text{max}} = 0,5 h_o$	(uur)
dt	= tijdstap	(uur)
T	= getijperiode; watertemperatuur	(uur); ($^{\circ}\text{C}$)
\bar{u}	= gemiddelde stroomsnelheid	(m/s)
$\bar{u}(t)$	= momentane over de vertikaal gemiddelde stroomsnelheid	(m/s)
\bar{u}_{kr}	= gemiddelde kritieke stroomsnelheid (begin van bewegen van het sediment)	(m/s)
u_*	= schuifspanningssnelheid	(m/s)
w	= valsnelheid van het sediment	(m/s)
α	= geometrieparameter	(-)
β	= hellingshoek aanzethelling ontgrondingskuil	(-)
γ	= hellingshoek benedenstroomse helling ontgrondingskuil	(-)
Δ	= relatieve dichtheid van het sediment	(-)

SYSTEMATISCH ONDERZOEK NAAR TWEE- EN DRIEDIMENSIONALE ONTGRONDINGEN

INVLOED BOVENAANVOER EN WISSELENDE STROOMRICHTING

1. Inleiding

In het kader van het systematisch onderzoek naar twee- en driedimensionale ontgrondingen (M 648/M 863) is een methode ontwikkeld, waarmee de ontgrondingen benedenstrooms van een konstruktie kunnen worden voorspeld. De methode is gebaseerd op het uitvoeren van modelonderzoek, waarbij het verloop van de ontgronding in de tijd wordt gemeten. Bij toepassing van deze methode voor de voorspelling van de ontgronding tijdens de uitvoering van een aantal afsluitingswerken in het zuidwesten van Nederland is gebleken, dat de voorspelde ontgrondingen in de wintersluitgatifase over het algemeen te groot waren, terwijl de ontgrondingen in de verschillende sluitingsfasen (meestal van korte duur) redelijk goed werden voorspeld.

In het prototype treden twee verschijnselen op, die in het modelonderzoek niet werden nagebootst, te weten:

- het initiële sedimenttransport (bovenaanvoer),
- de werking van eb en vloed (wisselende stroomrichting).

In nota W 69.107 [1] komt Spaargaren tot de konklusie, dat het initiële sedimenttransport van invloed is op de ontgronding benedenstrooms van een bodembescherming. Echter niet al het aangeboden sediment zal meewerken aan de reductie van de ontgronding. Hierbij dient te worden opgemerkt, dat bij de berekening is uitgegaan van de transportcapaciteit. Deze is groter dan het optredend transport, omdat de versnelling van de stroom in een sluitgat niet door het materiaal in suspensie kan worden gevolgd. Bovendien is gerekend met de transportformule van Morra-Kalinske, waarvan later is gebleken, dat deze veel te grote transporten oplevert (faktor zeven).

In het verslag M 648/M 863 van het Waterloopkundig Laboratorium [2] wordt naar aanleiding van de hiervoor beschreven problematiek aanbevolen het systematisch ontgrondingsonderzoek voort te zetten en te richten op de invloed van de getijbeweging en het initiële materiaal transport. Bij dit voortgezette onderzoek zou dan op de verkregen grondslag kunnen worden verder gebouwd.

Een en ander heeft er toe geleid, dat in juli 1969 de Waterloopkundige Afdeling van de Deltadienst van Rijkswaterstaat het Waterloopkundig Laboratorium opdracht heeft gegeven het systematisch onderzoek naar ontgrondingen voort te

zetten. In eerste instantie was het onderzoek gericht op de reductie van de ontgronding als gevolg van bovenaanvoer van sediment. Later werd ook onderzoek verricht naar de invloed van een wisselende stroomrichting op de ontgronding.

Het onderzoek werd uitgevoerd in het Zandgootje in het Laboratorium De Voorst in de periode tussen juli 1969 en december 1971.

Het onderzoek stond aanvankelijk onder leiding van ir. A. Zwols en werd voortgezet door ir. N.J. v. Wijngaarden, die ook dit verslag heeft samengesteld.

2. Samenvatting, konklusies en aanbevelingen voor nader onderzoek

Het onderzoek was er in eerste instantie op gericht na te gaan welk deel van het aangeboden sediment zal meewerken aan de reductie van de ontgronding benedenstrooms van een konstruktie. Daarbij werd tevens onderzocht in hoeverre de ontgrondingskuil voor een situatie met bovenaanvoer afwijkt van die zonder bovenaanvoer.

Er zijn in totaal vijf series proeven uitgevoerd (zie tabel 1). Elke serie bestond uit drie proeven: een proef ter bepaling van de evenwichtsligging van de bodem, een ontgrondingsproef zonder bovenaanvoer (gebruikelijke methode) en een ontgrondingsproef met bovenaanvoer.

Het onderzoek werd uitgevoerd in het Zandgootje van het Laboratorium De Voorst (zie figuur 1). De variatie in stroomsnelheid (0,42 - 0,63 m/s) en waterdiepte (0,26 - 0,40 m) was niet groot.

Uit de figuren 6...10 blijkt, dat de vorm van de ontgrondingskuil behorend bij de situatie met bovenaanvoer sterk afwijkt van de vorm behorend bij de situatie zonder bovenaanvoer en ook moeilijk is te schematiseren. De aanzethelling is flauwer, evenals de helling van de benedenstroomse zijde van de kuil (zie ook tabel 1).

Uit de figuren 11...15 blijkt, dat evenals bij de situatie zonder bovenaanvoer $\frac{h_{\max}}{t^x}$ bij de situatie met bovenaanvoer in de ontwikkelingsfase evenredig is met t^x , waarbij de exponent x kleiner is.

In de figuren 21...25 wordt de snelheid van ontgronden gegeven als funktie van de inhoud van de ontgrondingskuil. De transportcapaciteit benedenstrooms van de drempel wordt bepaald door $(\bar{\alpha}u - \bar{u}_{kr})$ en bestaat uit de normale transportcapaciteit en een extra capaciteit als gevolg van de geometrie van de drempel en de ontgrondingskuil. Als de bovenaanvoer volledig benut wordt als reductie van de ontgronding zal de snelheid van ontgronden bij een bepaalde kuilinhoud zonder bovenaanvoer, verminderd met de bovenaanvoer, gelijk zijn aan die bij dezelfde kuilinhoud met bovenaanvoer. Om deze reden zijn in elke figuur drie relaties gegeven: de relatie voor de situatie zonder bovenaanvoer, die voor de situatie met bovenaanvoer en de op hiervoor genoemde wijze gekonstrueerde relatie (met *). Als beide laatste relaties samenvallen zal dus de bovenaanvoer volledig worden benut. Dit lijkt voor T6 redelijk goed op te gaan. Voor de toestanden T13 en T18 gaat het in het geheel niet op. Voor toestand T27 gaat het alleen op bij de evenwichtskuil. Voor toestand T31 gaat het weer redelijk goed op.

Samenvattend lijkt de konklusie gerechtvaardigd, dat bij de situatie met bovenaanvoer alle bovenstrooms van een ontgrondingskuil aangeboden sediment als reductie van de ontgronding wordt aangewend. In dat geval is het mogelijk uit het verloop van de inhoud van de ontgrondingskuil als functie van de tijd bij de situatie zonder bovenaanvoer het verloop te konstrueren van de inhoud als functie van de tijd bij de situatie met bovenaanvoer. Als gevolg van het feit, dat de vorm van de ontgrondingskuil voor deze situatie sterk afwijkt van die bij de situatie zonder bovenaanvoer en ook moeilijk is te schematiseren, kan het verloop van h_{\max} in de tijd niet worden bepaald!

In tweede instantie was het onderzoek met name gericht op het bepalen van de invloed van een wisselende stroomrichting op de vorm van de ontgrondingskuil. Bovendien zou er misschien ook iets gezegd kunnen worden over de relatie tussen de reductie van de ontgronding en het sedimenttransport.

Het onderzoek bestond uit twee delen. Het eerste deel was bedoeld om de gevoeligheid van de resultaten van het onderzoek voor de wisseltijd na te gaan. Het tweede deel omvatte het eigenlijke onderzoek, dat zodanig was opgezet, dat een goede vergelijking met een situatie, waarbij in één richting werd gestroomd, mogelijk was.

In tabel 2 wordt een overzicht van de uitgevoerde proeven gegeven. Elke serie proeven bestond uit een proef ter bepaling van de evenwichtsligging van de bodem en een proef met de drempelkonstruktie volgens figuur 2.

Het onderzoek werd uitgevoerd in de eerder genoemde faciliteit, die daarvoor was aangepast (zie figuur 26). De nauwkeurigheid werd nadelig beïnvloed door de te kleine instroomlengte (korte goot) en het opstuwend effect van de drempelkonstruktie, waardoor bovenstrooms een deel van de voeding (bovenaanvoer van sediment) werd afgezet.

Uit figuur 28 en 29 blijkt, dat de aanzethelling van de ontgrondingskuil afhankelijk is van de toegepaste wisseltijd.

Uit figuur 30 in vergelijking met figuur 9 blijkt, dat de aanzethelling van T29 (wisselende stroomrichting met bovenaanvoer) gelijk is aan die van T26 (één stroomrichting zonder bovenaanvoer). In tegenstelling tot T27 (één stroomrichting met bovenaanvoer) heeft de ontgrondingskuil van T29 een driehoekige vorm. Het uitzetten van de snelheid van ontgronden tegen de inhoud van de ontgrondingskuil leverde geen bruikbare resultaten op.

Samenvattend kan worden gekonkludeerd, dat als gevolg van het wisselen van stroomrichting de aanzethelling van de ontgrondingskuil in vergelijking met die

bij de situatie van stromen in één richting met bovenaanvoer weer steiler wordt en gelijk wordt aan die bij de situatie van stromen in één richting zonder bovenaanvoer. Ook de driehoekige vorm van de ontgrondingskuil, zoals die bij de situatie van stromen in één richting zonder bovenaanvoer optreedt, komt weer terug.

Met name het onderzoek naar de invloed van een wisselende stroomrichting was te kort om hieruit harde konklusies te kunnen trekken. Bovendien was als gevolg van de beschikbare - te korte - faciliteit de nauwkeurigheid gering. Nader onderzoek zou in een lange goot met goede mogelijkheid voor stromen in twee richtingen moeten plaatsvinden.

Ter verbetering van de nauwkeurigheid van het onderzoek in het algemeen moet worden gestreefd naar een situatie met veel turbulentie benedenstrooms van de drempelkonstruktie en een niet te grote stroomsnelheid en daardoor weinig transport. De waterdiepte zou zodanig moeten zijn, dat de opstuwende werking van de drempelkonstruktie kan worden verwaarloosd.

3. Onderzoek naar invloed bovenaanvoer

3.1 Opzet

Met betrekking tot de invloed van bovenaanvoer op de ontgronding benedenstrooms van een konstruktie zijn de volgende aspecten van belang:

- de vorm van de ontgrondingskuil bij bovenaanvoer,
- het deel van het transport, dat gebruikt wordt voor reductie van de ontgronding.

Er zijn in totaal vijf series proeven uitgevoerd (zie tabel 1). Elke serie bestond uit drie proeven: een proef ter bepaling van de evenwichtsligging van de bodem, een ontgrondingsproef zonder bovenaanvoer (gebruikelijke methode) en een ontgrondingsproef met bovenaanvoer.

De proef ter bepaling van de evenwichtsligging van de bodem was noodzakelijk, teneinde bij de gegeven stromingsomstandigheden het aan de bovenstroomse zijde van de goot toegevoerde sediment in overeenstemming te doen zijn met het in de goot optredende sedimenttransport.

Bij de beide ontgrondingsproeven was ongeveer halverwege de goot een drempelkonstruktie aangebracht, waarachter de ontgronding kon plaatsvinden. Bij de ontgrondingsproeven zonder bovenaanvoer werd de bodem bovenstrooms van de drempelkonstruktie vastgelegd, omdat anders het bed zou gaan eroderen, waardoor toch bovenaanvoer zou optreden. Bij de ontgrondingsproeven met bovenaanvoer was de bodem bovenstrooms van de drempelkonstruktie beweeglijk en werd aan de bovenstroomse zijde van de goot dezelfde hoeveelheid sediment toegevoerd als bij de proef ter bepaling van de evenwichtsligging van de bodem.

Het onderzoek werd uitgevoerd in het Zandgootje. In figuur 1 wordt een overzicht van deze faciliteit gegeven. De effectieve lengte van de goot bedraagt: $l = 31$ m; de breedte: $b = 0,51$ m en de hoogte $h = 0,70$ m. Het maximum debiet: $Q_{\max} = 0,14$ m³/s. De debietregeling aan de bovenstroomse zijde van de goot vindt plaats door middel van een cirkelstuw. De waterstandsregeling aan de benedenstroomse zijde vindt plaats met een klep met overstort.

Ten behoeve van de bovenaanvoer werd aanvankelijk gebruik gemaakt van de in de goot aanwezige zandlift. Het bleek echter niet mogelijk hiermee een konstante bovenaanvoer te realiseren. Met ingang van proef T10 werd daarom een ander voedingssysteem toegepast. Dit bestond uit een trechtervormige bak, die aan de omtrek voorzien was van een geperforeerde leiding, waardoor continu een geringe

hoeveelheid water stroomde. Periodiek werd een afgepaste hoeveelheid sediment in de bak gedeponeerd, die geleidelijk met het water uit de ringleiding werd meegevoerd door de aan de onderzijde van de bak aangebrachte buis. Deze buis was op enige afstand boven het zandbed onder een hoek van 90° gebogen in de stroomrichting, waardoor het mengsel van sediment en water gemakkelijk in de richting van de stroom kon uitstromen (zie ook figuur 1).

Bij alle proeven was in de goot een zandbodem aangebracht ter dikte van ongeveer 0,20 m. De korrelverdelingsdiagrammen van het gebruikte sediment worden gegeven in de figuren 3...5.

De drie bij het onderzoek toegepaste drempelkonstrukties worden gegeven in figuur 2. Uit tabel 1 blijkt duidelijk, dat elk type drempelkonstruktie een andere stroomver- tikaal en turbulentie-intensiteit veroorzaakt (verschillende waarden van α).

Tijdens het onderzoek moest een oplossing worden gevonden voor een tweetal problemen: het ontstaan van een ontgrondingskuil aan de bovenstroomse zijde van de goot en het optreden van aanzanding bovenstrooms van de drempelkonstruktie bij de ontgrondingsproeven met bovenaanvoer.

Als gevolg van de overgang van een vaste gootbodem naar een beweeglijke zandbodem aan de bovenstroomse zijde van de goot ontstond er een ontgrondingskuil van zodanige afmetingen, dat de instroomlengte aanzienlijk werd vergroot. Na proef T20 is de aanstroming zodanig aangepast, dat er een minimale ontgrondingskuil ontstond. Desondanks bleef de ook toen nog benodigde instroomlengte van de goot relatief groot, waardoor de lengte van de goot voor een goede uitvoering van het onderzoek te klein was.

Door het aanbrengen van de drempelkonstruktie na de proef ter bepaling van de evenwichtsligging van de bodem ontstond bovenstrooms van de drempel een kleine opstuwung, gepaard gaande met een geringe afname van de stroomsnelheid en daarmee van de transportcapaciteit. Dit had tot gevolg dat een deel van de voeding bovenstrooms van de drempel werd afgezet. Een mogelijke oplossing zou zijn de bodem bovenstrooms vast te leggen en de voeding boven de drempel te laten plaatsvinden. Deze mogelijkheid is onderzocht. Het bleek echter niet mogelijk de voeding zodanig over de breedte van de goot te verdelen, dat het reducerend effect op de ontgronding benedenstrooms van de drempel over de hele breedte hetzelfde was. Tenslotte is besloten de voeding aan het begin van de goot te handhaven en het gevolg van de aanzanding bovenstrooms op de ontgronding benedenstrooms van de drempel te verrekenen via een reductie op de gemeten ontgronding (T27 en T31).

Tijdens elke proef werd de modelbodem regelmatig gepeild, in het begin van de proef frequenter dan later. De afstand tussen de peilraaien bedroeg in het algemeen 1 m, maar was ter plaatse van de ontgrondingskuil kleiner. In elke raai werd op drie plaatsen gepeild, te weten op een kwart, de helft en driekwart van de breedte van de goot. Van de drie aldus gevonden waarden werd naderhand het gemiddelde bepaald.

Op een viertal plaatsen in het model werd de waterstand bepaald met behulp van pitotbuizen (zie figuur 1).

Zowel van de voeding als de modelbodem werden zo nu en dan monsters genomen en geanalyseerd. De monsters werden gedroogd en gewogen. Van een aantal monsters werd het korrelverdelingsdiagram bepaald.

Tijdens elke proef werd minstens eenmaal de watertemperatuur gemeten.

Bij het onderzoek naar de beste plaats voor de voeding zijn transporten gemeten. Dit vond plaats door het meten van de stroomsnelheid en de concentratie in de vertikaal. De stroomsnelheid werd gemeten met een Ott-molen. De concentratie werd volgens de iso-kinetische afzuigmethode bepaald.

Integratie van het produkt van stroomsnelheid en concentratie over de hoogte leverde het transport.

3.2 Resultaten

In de figuren 6...10 wordt de vorm van de ontgrondingskuil gegeven voor de situatie met en zonder bovenaanvoer. De hellingen van de ontgrondingskuilen worden gegeven in tabel 1 als $\cotg \beta$ en $\cotg \gamma$.

In de figuren 11...15 wordt h_{\max} (= maximale ontgronding) als funktie van de tijd gegeven voor de situatie met en zonder bovenaanvoer. Hierbij is h_{\max} bepaald ten opzichte van de gemiddelde bodemligging benedenstrooms van de drempelkonstruktie. Uit de figuren blijkt, dat vooral voor de situatie met bovenaanvoer h_{\max} klein is. Dit heeft tot gevolg, dat aan de waarden van h_{\max} in de eerste uren na het aanvangen van de proef een geringe waarde moet worden toegekend. Bij het bepalen van het (grafisch) verband tussen h_{\max} en de tijd is hiermee rekening gehouden. Het verband tussen h_{\max} en de tijd voor de proeven zonder bovenaanvoer maakt het mogelijk op basis van het onderzoek M 648/M 863 de geometriecoëfficiënt α te bepalen. De coëfficiënt α komt voor in de formule:

$$t_{0,5} = \frac{57 \Delta^{1,7} h_o^2}{(\alpha \bar{u} - \bar{u}_{kr})^{4,3}} \quad (1)$$

waarin:

$t_{0,5}$	= het tijdstip, waarop $h_{\max} = 0,5 h_o$	(uur)
h_o	= waterdiepte juist bovenstrooms van de ontgrondingskuil	(m)
Δ	= relatieve dichtheid van het sediment	(-)
α	= geometriecoëfficiënt	(-)
\bar{u}	= gemiddelde stroomsnelheid	(m/s)
\bar{u}_{kr}	= gemiddelde kritieke stroomsnelheid (begin van bewegen van het sediment)	(m/s)

De aldus bepaalde coëfficiënt α wordt gegeven in tabel 1 en blijkt voor eenzelfde drempelkonstructie dezelfde waarde te hebben, hetgeen ook mag worden verwacht.

Uit de overige in tabel 1 verzamelde gegevens blijkt, dat de variatie in de stroomsnelheid en waterdiepte gering is geweest. De stroomsnelheid is gevarieerd van 0,42 tot 0,63 m/s, de waterdiepte van 0,26 tot 0,40 m.

De transport-omstandigheden waren bij elke proef gelijk. In alle gevallen was er sprake van een overgangssituatie tussen bodemtransport en suspensietransport ($1 \leq \frac{u_*}{w} \leq 4$). Dat het suspensietransport overheerste, blijkt uit het feit, dat onder nagenoeg gelijke omstandigheden bij een hoge watertemperatuur het transport kleiner was dan bij een lage watertemperatuur (vergelijk het transport bij T25/27 met dat bij T15/18). Bij suspensietransport speelt immers de valsnelheid een belangrijke rol. Bij een hoge watertemperatuur is de valsnelheid groter en zal er minder sediment in suspensie blijven.

Uit tabel 1 blijkt ook, dat de tijd, die nodig was om een evenwichtsligging van de bodem te bereiken, groot was. Deze tijd varieerde van 21 uur bij T4 tot 51 uur bij T30. Dit wordt veroorzaakt door het feit, dat bodemverandering een langzaam proces is.

In de figuren 16...20 wordt de inhoud van de ontgrondingskuil en de snelheid van ontgronden gegeven als functie van de tijd. De inhoud van de ontgrondingskuil is bepaald door de oppervlakte tussen de bodemligging op $t = 0$ en $t = t_n$ te vermenigvuldigen met de breedte van de goot. De snelheid van ontgronden is de afgeleide van $I = f(t)$. Bovendien wordt in elke figuur de bovenaanvoer gegeven. In de figuren 19 en 20 wordt voor de toestanden T27 en T31 ook de relatie gegeven, die ontstaat na reductie van de ontgronding. In par. 3.1 is reeds gezegd, dat na het aanbrengen van de drempelkonstructie bovenstrooms hiervan een kleine opstuwing ontstond, waardoor een deel van de voeding aldaar werd afgezet. Dit zou anders ten goede zijn gekomen aan de reductie van de ontgronding benedenstrooms van de drempel en moet

daarom van de gemeten kuilinhoud worden afgetrokken.

In de figuren 21...25 wordt de snelheid van ontgronden gegeven als functie van de inhoud van de ontgrondingskuil. De transportcapaciteit benedenstrooms van de drempel wordt bepaald door $(\alpha \bar{u} - \bar{u}_{kr})$ en bestaat uit de normale transportcapaciteit en een extra capaciteit als gevolg van de geometrie van de drempel en de ontgrondingskuil. Als deze stelling juist is en de bovenaanvoer volledig benut wordt als reductie van de ontgroning zal de snelheid van ontgronden bij een bepaalde kuilinhoud zonder bovenaanvoer, verminderd met de bovenaanvoer, gelijk zijn aan die bij dezelfde kuilinhoud met bovenaanvoer. Om deze reden zijn in elke figuur drie relaties gegeven: de relatie voor de situatie zonder bovenaanvoer, die voor de situatie met bovenaanvoer en de op hiervoor genoemde wijze gekonstrueerde relatie (met *).

3.3 Interpretatie resultaten

Uit de figuren 6...10 blijkt, dat de aanzethelling van de ontgrondingskuilen behorend bij de situatie met bovenaanvoer over het algemeen flauwer is dan die behorend bij de situatie zonder bovenaanvoer (zie ook tabel 1). De helling aan de benedenstroomse zijde van de ontgrondingskuil is bij de situaties met bovenaanvoer veel flauwer of soms moeilijk te definiëren. De kuilvorm bij de situaties zonder bovenaanvoer kan worden geschematiseerd tot een driehoek, waardoor de inhoud kan worden uitgedrukt als een functie van h_{max} . Bij de situaties met bovenaanvoer is schematisatie van de kuilvorm tot een driehoek niet mogelijk.

Uit de figuren 11...15 blijkt, dat bij de situaties zonder bovenaanvoer de ontgroning zich volledig in de ontwikkelingsfase bevindt. Bij de situaties met bovenaanvoer treedt doorgaans zowel de ontwikkelingsfase als de stabiliseringsfase op. Over het algemeen is de helling van de relatie $h_{max} = f(t)$ uitgezet op dubbel-log papier flauwer bij de situatie met bovenaanvoer. Dit wordt door onderstaande tabel nog eens onderstreept (kleinere exponent).

zonder bovenaanvoer	met bovenaanvoer
T7 : $h_{max} = k \cdot t^{0,43}$	T6 : $h_{max} = k \cdot t^{0,49}$
T11: $h_{max} = k \cdot t^{0,48}$	T13: $h_{max} = k \cdot t^{0,42}$
T16: $h_{max} = k \cdot t^{0,42}$	T18: $h_{max} = k \cdot t^{0,31}$
T26: $h_{max} = k \cdot t^{0,50}$	T27: $h_{max} = k \cdot t^{0,40}$
T32: $h_{max} = k \cdot t^{0,40}$	T31: $h_{max} = k \cdot t^{0,29}$

Bij de proeven T27 en T31 is duidelijk te zien, dat aanvankelijk een deel van de voeding bovenstrooms van de drempel wordt afgezet, waardoor de ontgronding sneller verloopt dan het geval zou zijn als de bovenaanvoer van begin af aan korrekt was geweest. Een eenvoudige korrektie is hier niet mogelijk.

Zoals reeds in par. 3.2 is beschreven zal voor het geval dat de bovenaanvoer volledig benut wordt als reductie van de ontgronding de gekonstrueerde relatie (aangeduid met *) uit de figuren 21...25 samenvallen met de relatie voor de situatie met bovenaanvoer. Dit blijkt voor T6 redelijk goed op te gaan. Voor de toestanden T13 en T18 gaat het in het geheel niet op. Bij eenzelfde kuilinhoud is de gekonstrueerde waarde voor de snelheid van ontgronden veel groter. Voor toestand T27 gaat het alleen op bij de evenwichtskuil; in alle andere gevallen is de gekonstrueerde waarde voor de snelheid van ontgronden bij eenzelfde kuilinhoud kleiner. Voor toestand T31 gaat het redelijk goed op.

3.4 Konklusies

- De vorm van de ontgrondingskuil behorend bij de situatie met bovenaanvoer wijkt sterk af van de vorm behorend bij de situatie zonder bovenaanvoer en is ook moeilijk te schematiseren. De aanzethelling is flauwer, evenals de helling aan de benedenstroomse zijde van de kuil.
- Evenals bij de situatie zonder bovenaanvoer is h_{\max} bij de situatie met bovenaanvoer in de ontwikkelingsfase evenredig met t^x , waarbij de exponent x kleiner is.
- Hoewel de resultaten van het onderzoek niet eenduidig zijn, lijkt de konklusie gerechtvaardigd, dat bij de situatie met bovenaanvoer alle bovenstrooms van een ontgrondingskuil aangeboden sediment als reductie van de ontgronding wordt aangewend. In dat geval is het mogelijk uit het verloop van de inhoud van de ontgrondingskuil als funktie van de tijd bij de situatie zonder bovenaanvoer het verloop te konstrueren van de inhoud als funktie van de tijd bij de situatie met bovenaanvoer.

4. Onderzoek naar invloed van wisselende stroomrichting

4.1 Opzet

Het doel van het onderzoek naar de invloed van een wisselende stroomrichting was tweeledig. Enerzijds diende te worden onderzocht in hoeverre de vorm van de ontgrondingskuil afwijkt van die bij stromen in één richting. Anderzijds zou er iets gezegd kunnen worden over de relatie tussen de reductie van de ontgroning en het transport.

Teneinde onderzoek met wisselende stroomrichting te kunnen uitvoeren moest het Zandgootje worden aangepast. Belangrijk daarbij was de snelheid, waarmee de stroomrichting kon worden veranderd. Aangezien er altijd enige tijd voor nodig is de stroom aan de andere richting aan te laten passen mag de tijd, dat in een bepaalde richting wordt gestroomd, niet te klein zijn. In dat geval zouden de aanloopverschijnselen immers een te grote rol spelen.

Voordat met de aanpassing van de faciliteit werd begonnen is getracht meer inzicht te krijgen in de tijdsduur, dat in een bepaalde richting moet worden gestroomd. Hierbij is uitgegaan van de proeven T16 en T26 (zie tabel 1). Deze proeven zijn beschouwd als een op schaal 1:50 weergegeven drempel voor een caissonsluiting van de Schaar van Roggenplaat voor het geval, dat de Oosterschelde zou worden afgesloten met caissons. Met behulp van prototypegegevens voor deze situatie is voor het prototype het tijdstip berekend, waarop $h_{\max} = 0,5 h_o$:

$$(t_{0,5})_{\text{getij}} = \frac{57 \Delta^{1,7} h_o(o)}{\frac{1}{T} \int_0^{0,5T} \frac{(\alpha \bar{u}(t) - \bar{u}_{kr})^{4,3}}{h_o(t)} dt} \quad (2)$$

waarin:

- $t_{0,5}$ = het tijdstip, waarop $h_{\max} = 0,5 h_o(o)$ (uur)
- $h_o(o)$ = gemiddelde waterdiepte over een getij juist bovenstrooms van de ontgrondingskuil (m)
- $h_o(t)$ = momentane waterdiepte juist bovenstrooms van de ontgrondingskuil (m)
- Δ = relatieve dichtheid van het sediment (-)
- α = geometriecoëfficiënt (bepaald uit modelonderzoek) (-)
- $\bar{u}(t)$ = momentane over de vertikaal gemiddelde stroomsnelheid (m/s)

\bar{u}_{kr}	= gemiddelde kritieke stroomsnelheid (begin van bewegen van het sediment)	(m/s)
T	= duur van de getijperiode	(uur)
dt	= tijdstap	(uur)

De gebruikte randvoorwaarden worden gegeven in tabel 3. Uit de berekeningen blijkt, dat voor de situatie van:

$$T16: (t_{0,5})_{\text{getij}} = 1399 \text{ uur} = 117 \text{ getijden} \quad (3)$$

$$T26: (t_{0,5})_{\text{getij}} = 1562 \text{ uur} = 130 \text{ getijden}$$

Uit de figuren 13 en 14 blijkt, dat voor het model geldt:

$$T16: t_{0,5} = 39 \text{ uur} \quad (4)$$

$$T26: t_{0,5} = 54 \text{ uur}$$

Bij de berekening van $(t_{0,5})_{\text{getij}}$ is er vanuit gegaan, dat alleen de eb-stroom in het prototype ontgronding veroorzaakt. Uit de combinatie van (3) en (4) volgt de tijdsduur in het model, die evenveel ontgronding oplevert als 1 getijperiode in het prototype, dat wil zeggen voor:

$$T16: 1 \text{ getij} \cong 0,33 \text{ uur} = 20 \text{ minuten}$$

$$T26: 1 \text{ getij} \cong 0,42 \text{ uur} = 25 \text{ minuten}$$

Aldus beschouwd zal de wisseltijd in het model 20 à 25 minuten moeten bedragen.

Het onderzoek bestond uit twee delen. Het eerste deel was bedoeld om de gevoeligheid van de resultaten van het onderzoek voor de wisseltijd na te gaan. Het tweede deel omvatte het eigenlijke onderzoek, dat zodanig was opgezet, dat een goede vergelijking met een situatie, waarbij in één richting werd gestroomd, mogelijk was.

In tabel 2 wordt een overzicht van de uitgevoerde proeven gegeven. Elke serie proeven bestond uit een proef ter bepaling van de evenwichtsligging van de bodem

en een proef met de drempelkonstruktie volgens figuur 2. De proeven T23 en T24 hebben een wisseltijd van 0,5 en 2 uur; proef T 29 heeft een wisseltijd van 0,5 uur, die zoveel mogelijk aansluit bij de hiervoor berekende.

Het onderzoek werd uitgevoerd in het Zandgootje, dat voor dit doel werd aangepast. Een beschrijving van deze faciliteit is gegeven in paragraaf 3.1. Figuur 26 geeft een overzicht van de aangepaste faciliteit. Het omkeren van de stroomrichting werd geregeld door het manipuleren met afsluiters en kleppen. Wegens de beschikbare ruimte kon de goot niet worden verlengd. Dit gaf wel een beperking aan de nauwkeurigheid van het onderzoek. Een vuistregel voor de benodigde instroomlengte van een zandgoot is: circa 40 maal de waterdiepte. Voor het Zandgootje betekent dit $40 \times 0,4 = 16$ m, dat wil zeggen ongeveer de helft van de gootlengte, zodat van een goede instroming (dat wil zeggen, dat de sedimentbeweging en waterbeweging op elkaar zijn ingesteld) geen sprake kan zijn.

Een andere beperking aan de nauwkeurigheid van het onderzoek werd gegeven door de reeds in paragraaf 3.1 genoemde opstuwende werking van de drempelkonstruktie, waardoor de transportcapaciteit bovenstrooms afneemt en een deel van de voeding aldaar wordt afgezet. Bij stromen in één richting was het mogelijk hiervoor een reductie op de gemeten ontgronding toe te passen. In dit geval kan dat niet. Op de bodem van de goot was een zandbed aangebracht met een dikte van 0,20 m. Het korrelverdelingsdiagram van het gebruikte sediment wordt gegeven in figuur 27. De bij het onderzoek toegepaste drempelkonstruktie wordt gegeven in figuur 2.

Het vastleggen van het modelgebeuren vond op dezelfde wijze plaats als bij de proeven ter bepaling van de invloed van de bovenaanvoer. Voor een beschrijving hiervan wordt verwezen naar paragraaf 3.1.

4.2 Resultaten

In de figuren 28 en 29 wordt de vorm van de ontgrondingskuil gegeven voor een situatie met een wisseltijd van 0,5 uur (T23) en een situatie met een wisseltijd van 2 uur (T24). Figuur 28 geeft de vorm van de ontgrondingskuil links van de drempelkonstruktie. Figuur 29 geeft de vorm van de ontgrondingskuil rechts van de drempelkonstruktie. De hellingen van de ontgrondingskuilen worden gegeven in tabel 2 als $\cotg\beta$ en $\cotg\gamma$.

In figuur 30 wordt de vorm van de ontgrondingskuil gegeven voor T29 (wisseltijd 0,5 uur) voor zowel links als rechts van de drempelkonstruktie. De hellingen

van de ontgrondingskuilen worden gegeven in tabel 2 als $\cotg \beta$ en $\cotg \gamma$.

Figuur 31 geeft h_{\max} als functie van de tijd voor de situatie met een wisselende stroomrichting (T29, wisseltijd 0,5 uur).

Hierbij is h_{\max} bepaald ten opzichte van de gemiddelde bodemligging aan de desbetreffende zijde van de drempelconstructie.

Het uitzetten van de snelheid van ontgronden tegen de inhoud van de ontgrondingskuil leverde geen bruikbare resultaten op. De snelheid van ontgronden als functie van de inhoud van de ontgrondingskuil wordt daarom hier niet gegeven.

4.3 Interpretatie resultaten

Uit de figuren 28 en 29 en uit tabel 2 blijkt, dat de aanzethelling van de ontgrondingskuil bij een grotere wisseltijd (T24) steiler is dan bij een kleinere (T23). Op de benedenstroomse helling van de ontgrondingskuil is de wisseltijd nauwelijks van invloed.

Hoewel het onderzoek symmetrisch ten opzichte van het midden van de drempelconstructie was opgezet (in beide stroomrichtingen waren alle variabelen gelijk gehouden) zijn de vormen van de ontgrondingskuilen links en rechts van de drempelconstructie niet gelijk. Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt door de relatief geringe instroomlengte van de goot.

Vergelijking van de vorm van de ontgrondingskuil van T29 (figuur 30) met die van T26 (figuur 9) leert, dat de aanzethelling van T29 gelijk is aan die van T26 (één stroomrichting, geen bovenaanvoer). De benedenstroomse helling van de ontgrondingskuil van T29 is evenwel flauwer dan die van T26.

Uit figuur 31 blijkt, dat bij T29 - evenals bij T26 - h_{\max} evenredig is met t^x , waarbij de exponent x kleiner is. Het verschil tussen links en rechts van de drempel wordt evenals bij de vorm van de ontgrondingskuil waarschijnlijk veroorzaakt door de relatief kleine instroomlengte van de goot.

4.4 Konklusies

Het onderzoek was te kort om hieruit harde konklusies te kunnen trekken. Bovendien was als gevolg van de beschikbare te korte- faciliteit de nauwkeurigheid gering. De volgende tendenzen kunnen worden aangegeven:

- De aanzethelling van de ontgrondingskuil is voor de situatie met bovenaanvoer en wisselende stroomrichting afhankelijk van de toegepaste wisseltijd.

- Als gevolg van het wisselen van stroomrichting wordt de aanzethelling van de ontgrondingskuil in vergelijking met die bij de situatie van stromen in één richting met bovenaanvoer weer steiler en gelijk aan die bij de situatie van stromen in één richting zonder bovenaanvoer. Ook de driehoekige vorm van de ontgrondingskuil, zoals die bij de situatie van stromen in één richting zonder bovenaanvoer optreedt, keert weer terug.

LITERATUUR

- 1 SPAARGAREN, F.

Beschouwing over de invloed van het rollend en zwevend transport op de ontgronding benedenstrooms van een bodembescherming

Rijkswaterstaat, Deltadienst, Waterloopkundige afdeling, nota W69.107, 1969

- 2 Waterloopkundig Laboratorium

Systematisch onderzoek naar twee- en driedimensionale ontgrondingen

Verslag M 648/M 863, 1971

proef- nummer	situatie			randvoorwaarden						ontgrondingskuil			
	omschrijving	bodemligging bovenstrooms	α	\bar{u} m/s	h_o m	T °C	D ₅₀ µm	S kg/uur	t uur	h_{max} m	$t_{0,5}$ uur	cotg β	cotg γ
T4	bepaling evenwichtsligging bodem	-	-	0,42	0,26	5	140	51	21	-	-	-	-
T7	zie figuur 2, geen bovenaanvoer	vast	2,39	0,42	0,26	5	140	-	26	0,15	17	3	60
T6	zie figuur 2, bovenaanvoer	beweeglijk	2,39	0,42	0,26	5	140	30	26	0,08	-	4	100
T10	bepaling evenwichtsligging bodem	-	-	0,63	0,36	9	150	109	30	-	-	-	-
T11	zie figuur 2, geen bovenaanvoer	vast	2,03	0,63	0,36	9	150	-	10	0,17	11	4	90
T13	zie figuur 2, bovenaanvoer	beweeglijk	2,03	0,63	0,36	9	150	109	20	0,04	-	?	?
T15	bepaling evenwichtsligging bodem	-	-	0,54	0,37	11	150	42	44	-	-	-	-
T16	zie figuur 2, geen bovenaanvoer	vast	1,87	0,54	0,37	11	150	-	21	0,14	39	4	110
T18	zie figuur 2, bovenaanvoer	beweeglijk	1,87	0,54	0,37	10	150	42	28	0,04	-	31	700*)
T25	bepaling evenwichtsligging bodem	-	-	0,51	0,39	19	170	22,5	46	-	-	-	-
T26	zie figuur 2, geen bovenaanvoer	vast	1,86	0,51	0,39	16	170	-	30	0,14	54	4	30
T27	zie figuur 2, bovenaanvoer	beweeglijk	1,86	0,53	0,38	18	170	22,5	29	0,05	-	16	160**)
T30	bepaling evenwichtsligging bodem	-	-	0,59	0,40	6	170	68	51	-	-	-	-
T32	zie figuur 2, geen bovenaanvoer	vast	1,87	0,60	0,39	5	170	-	10	0,13	25	3	34
T31	zie figuur 2, bovenaanvoer	beweeglijk	1,87	0,60	0,39	3	170	68	23	0,05	-	9	var

α = geometrieparameter (-)

\bar{u} = gemiddelde stroomsnelheid op rand vaste bodem (m/s)

h_o = waterdiepte op rand vaste bodem (m)

T = watertemperatuur (°C)

D₅₀ = gemiddelde korreldiameter sediment (µm)

S = bovenaanvoer sediment (kg droge stof/uur)

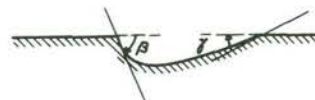
t = ontgrondingsduur (uur)

h_{max} = max. ontgroning (m)

$t_{0,5}$ = tijd, waarop $h_{max} = 0,5 h_o$ (uur)

*) tussentalud cotg $\beta' = 240$

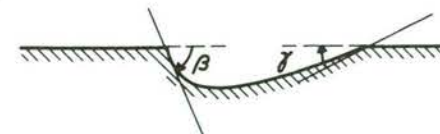
**) tussentalud cotg $\beta' = 190$



Tabel 1 Proeven ter bepaling van invloed bovenaanvoer op ontgroning

proef- nummer	situatie		randvoorwaarden						ontgrondingskuil					
	omschrijving	wissel- tijd uur	\bar{u} m/s	h_o m	T °C	D_{50} μm	S kg/uur	t uur	h_{max} m		$\cot\beta$		$\cot\gamma$	
									l	r	l	r	l	r
T22G	bepaling evenwichtsligging bodem	0,5	0,44	0,40	15	160	22,5	19	-	-	-	-	-	-
T22E	bepaling evenwichtsligging bodem	2	0,44	0,40	15	160	22,5	18	-	-	-	-	-	-
T23	zie figuur 2	0,5	0,44	0,40	16	160	22,5	25,5	0,05	0,06	13	7	79	69
T24	zie figuur 2	2	0,44	0,40	19	160	22,5	26	0,04	0,05	11	3	71	79
T28B	bepaling evenwichtsligging bodem	0,5	0,49	0,41	15	170	22,5	43,5	-	-	-	-	-	-
T29	zie figuur 2	0,5	0,49	0,41	14	170	22,5	33	0,09	0,09	4	4	63	63

\bar{u} = gemiddelde stroomsnelheid op rand vaste bodem (m/s)
 h_o = waterdiepte op rand vaste bodem (m)
T = watertemperatuur (°C)
 D_{50} = gemiddelde korreldiameter sediment (μm)
S = bovenaanvoer sediment (kg droge stof/uur)
t = ontgrondingsduur (uur)
 h_{max} = max. ontgroning (m)



Tabel 2 Proeven ter bepaling van invloed wisselende stroomrichting op ontgroning

Prototype gegevens:

eb			vloed		
tijd	$\bar{u}(t)$	$h_a(t)$	tijd	$\bar{u}(t)$	$h_a(t)$
uur	m/s	m	uur	m/s	m
6.30	0,82	+1,16	12.00	0,30	-1,08
7.00	1,40	+0,92	12.30	0,72	-1,00
7.30	1,77	+0,58	13.00	0,98	-0,84
8.00	1,94	+0,22	13.30	1,10	-0,64
8.30	2,02	-0,20	14.00	1,18	-0,40
9.00	1,96	-0,56	14.30	1,32	-0,06
9.30	1,84	-0,84	15.00	1,43	+0,31
10.00	1,60	-1,06	15.30	1,74	+0,82
10.30	1,20	-1,20	16.00	1,99	+1,44
11.00	0,68	-1,14	16.30	1,78	+1,62
11.30	0,20	-1,11	17.00	1,28	+1,66
			17.30	0,80	+1,54
			18.00	0,18	+1,38

$$h_o(t) = h_o(o) + h_a(t) \text{ met}$$

T16: $h_o(o) = 50 \times 0,37 = 18,5 \text{ m}$
T26: $h_o(o) = 50 \times 0,39 = 19,5 \text{ m}$

$$\bar{u}_{kr} = 0,45 \text{ m/s}$$

$$D_{50} = 200 \text{ } \mu\text{m}$$

$$\Delta = 1,65$$

$$\alpha = 1,87 \text{ (T16)}$$

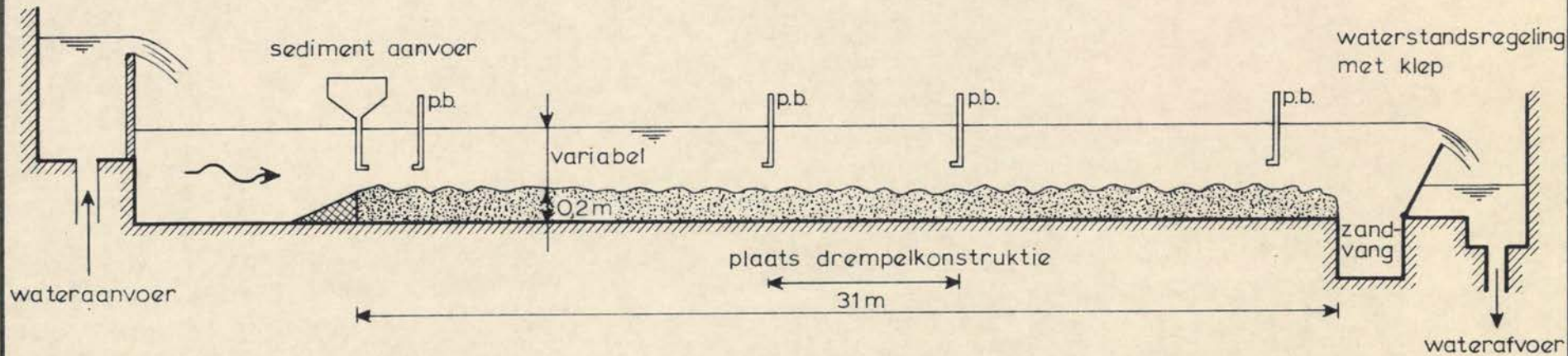
$$\alpha = 1,86 \text{ (T26)}$$

Tabel 3 Gebruikte randvoorwaarden berekening wisseltijd model

OVERZICHT GEBRUIKTE FACILITEIT; ONDERZOEK
INVLOED BOVENAANVOER

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

debiet-regeling door middel
van cirkelstuw

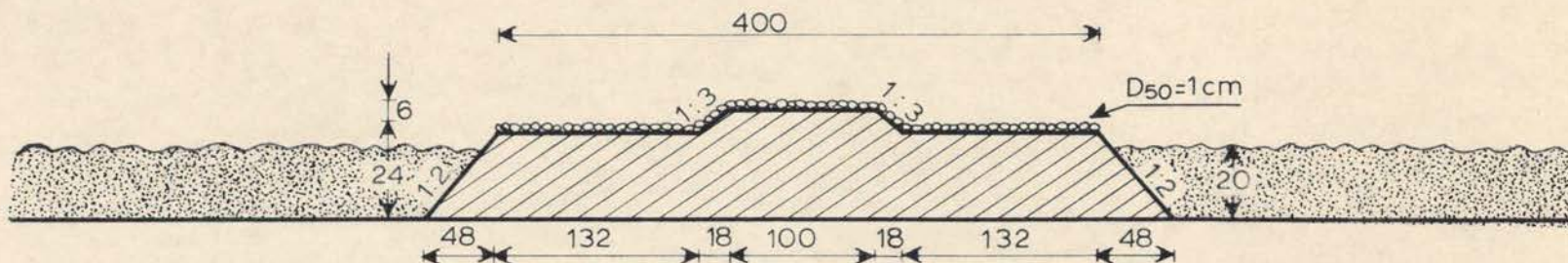


p.b. = pitotbuis

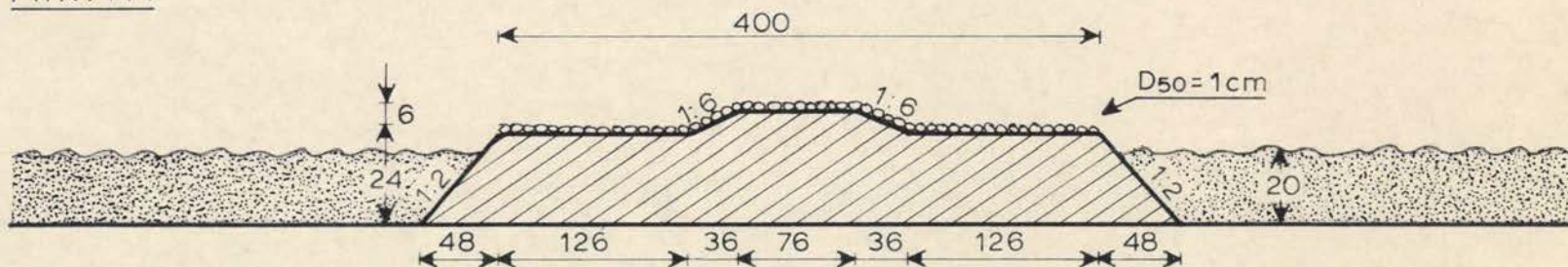
M 863-II

FIG. 1

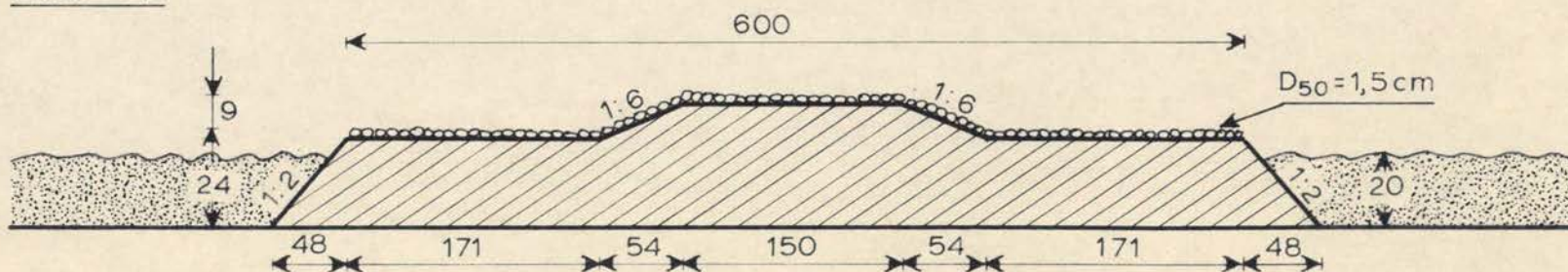
T6 en T7



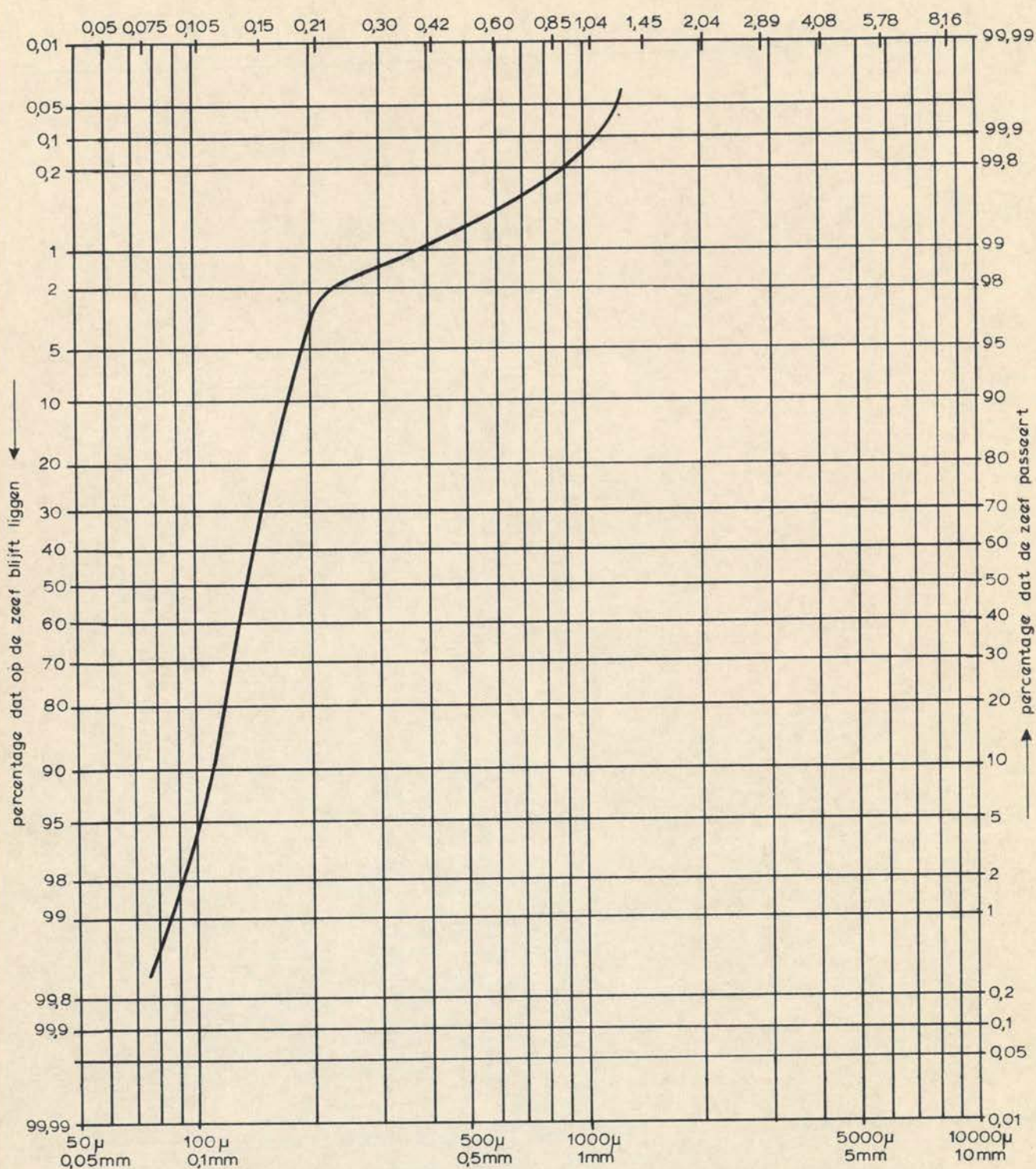
T11... T14



vanaf T16



maten in cm



KORRELVERDELINGSDIAGRAM

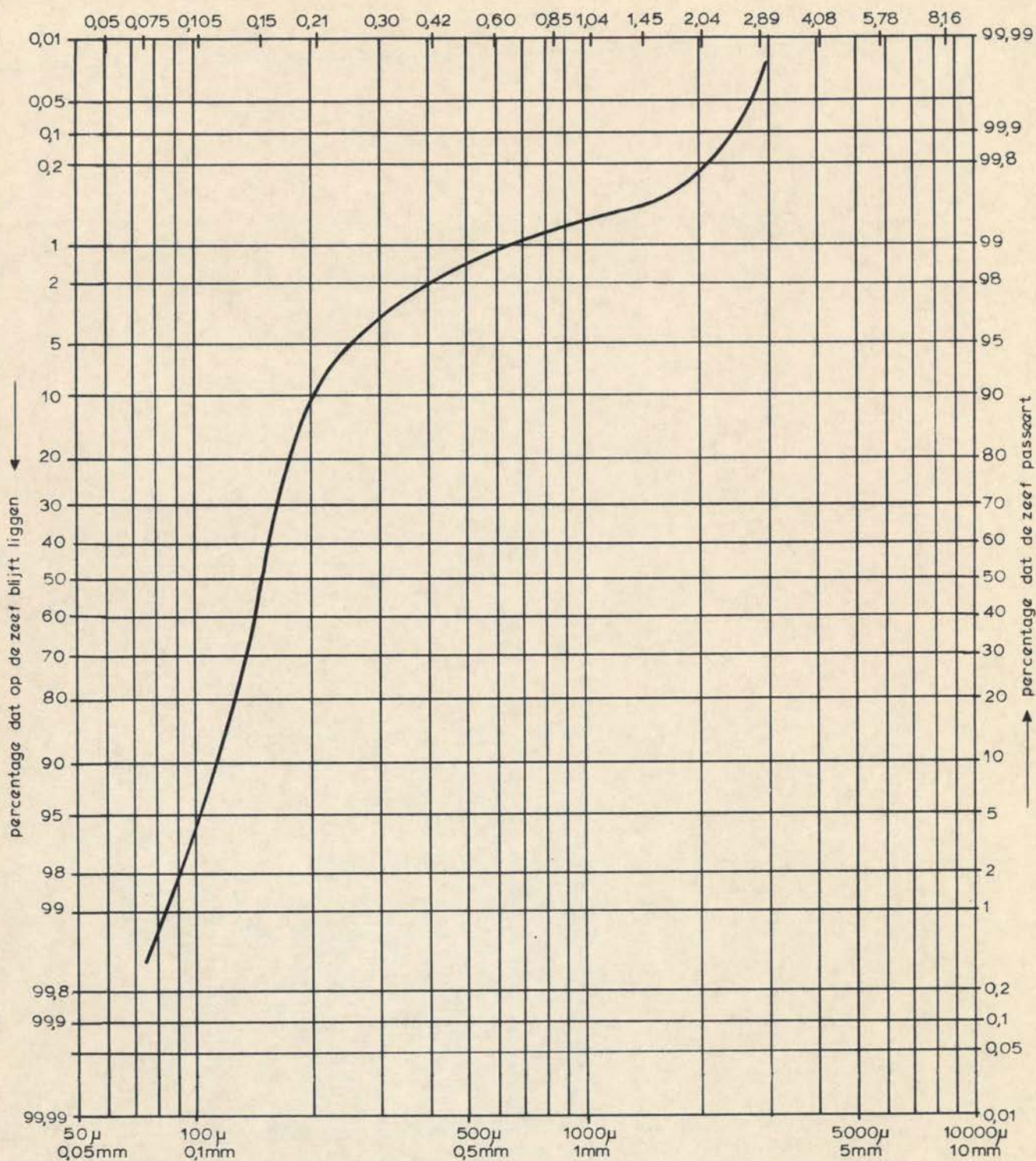
T4...T7

$D_{50} = 140 \mu m$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 863-II

FIG. 3



KORRELVERDELINGSDIAGRAM

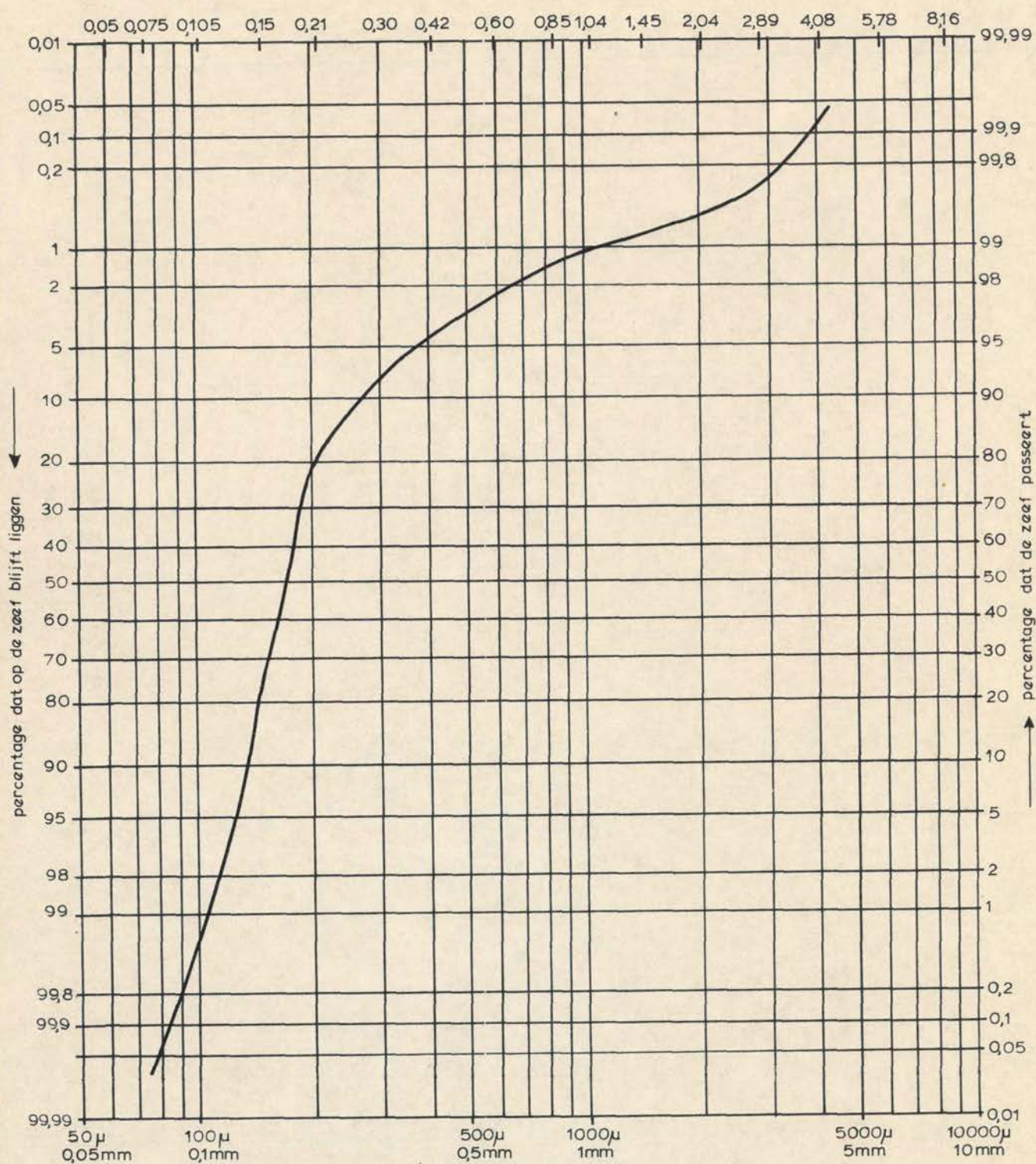
T10...T18

$D_{50} = 150 \mu m$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 863-II

FIG. 4



KORRELVERDELINGSDIAGRAM

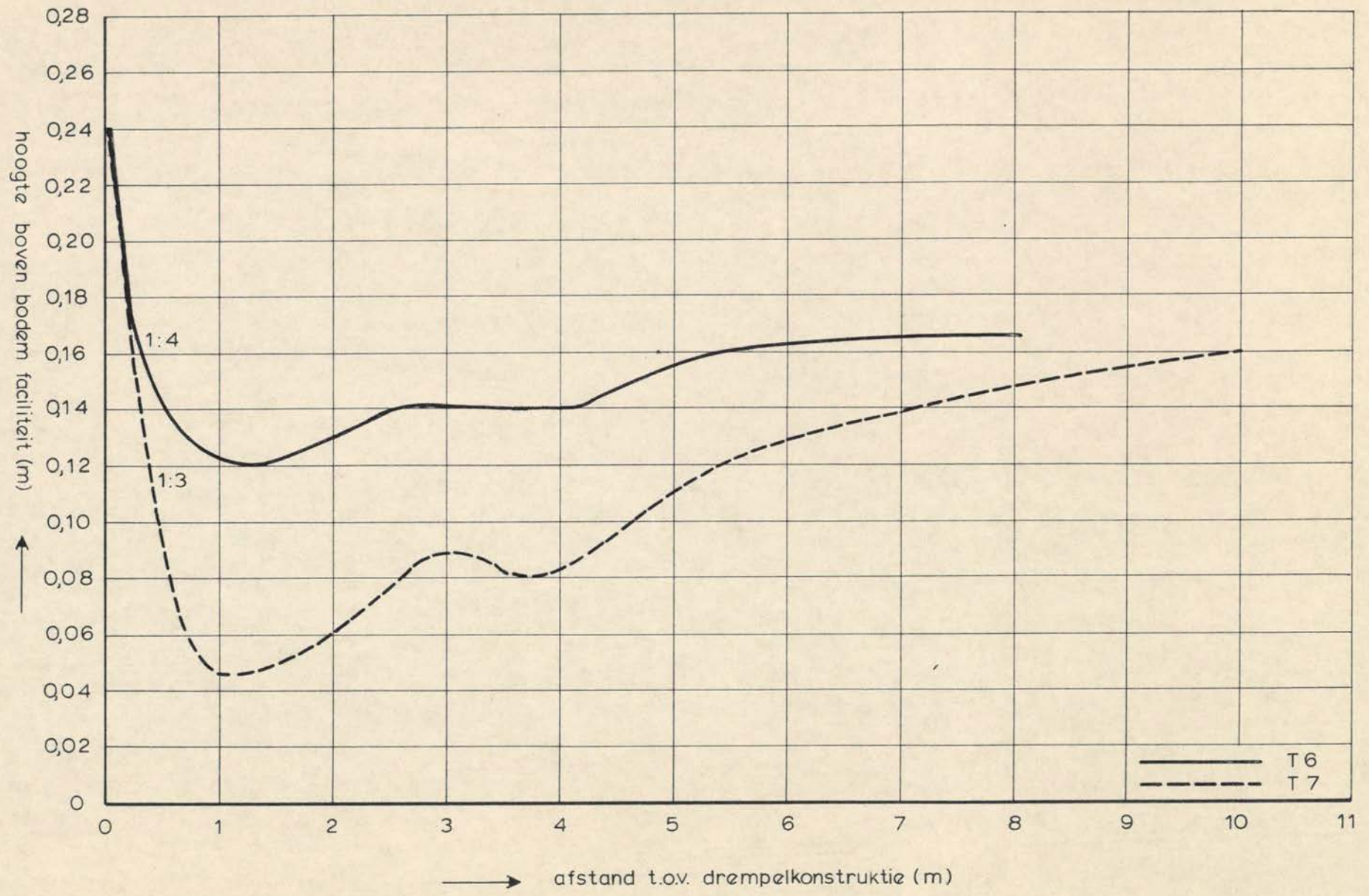
T25...T31

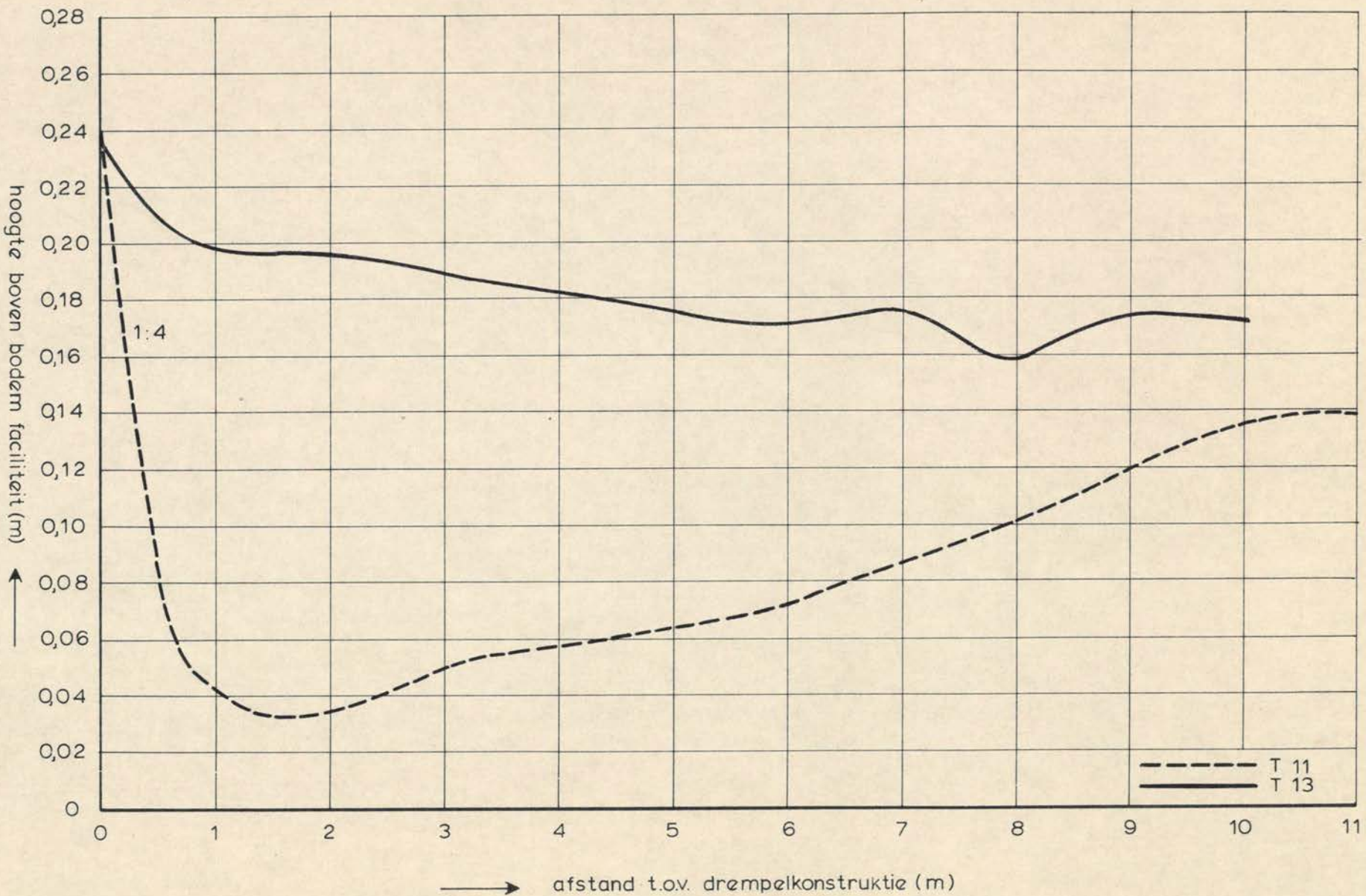
$D_{50} = 170 \mu\text{m}$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 863-II

FIG. 5





VORM ONTGRONDINGSKUIL VOOR SITUATIE MET
EN ZONDER BOVENAANVOER

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

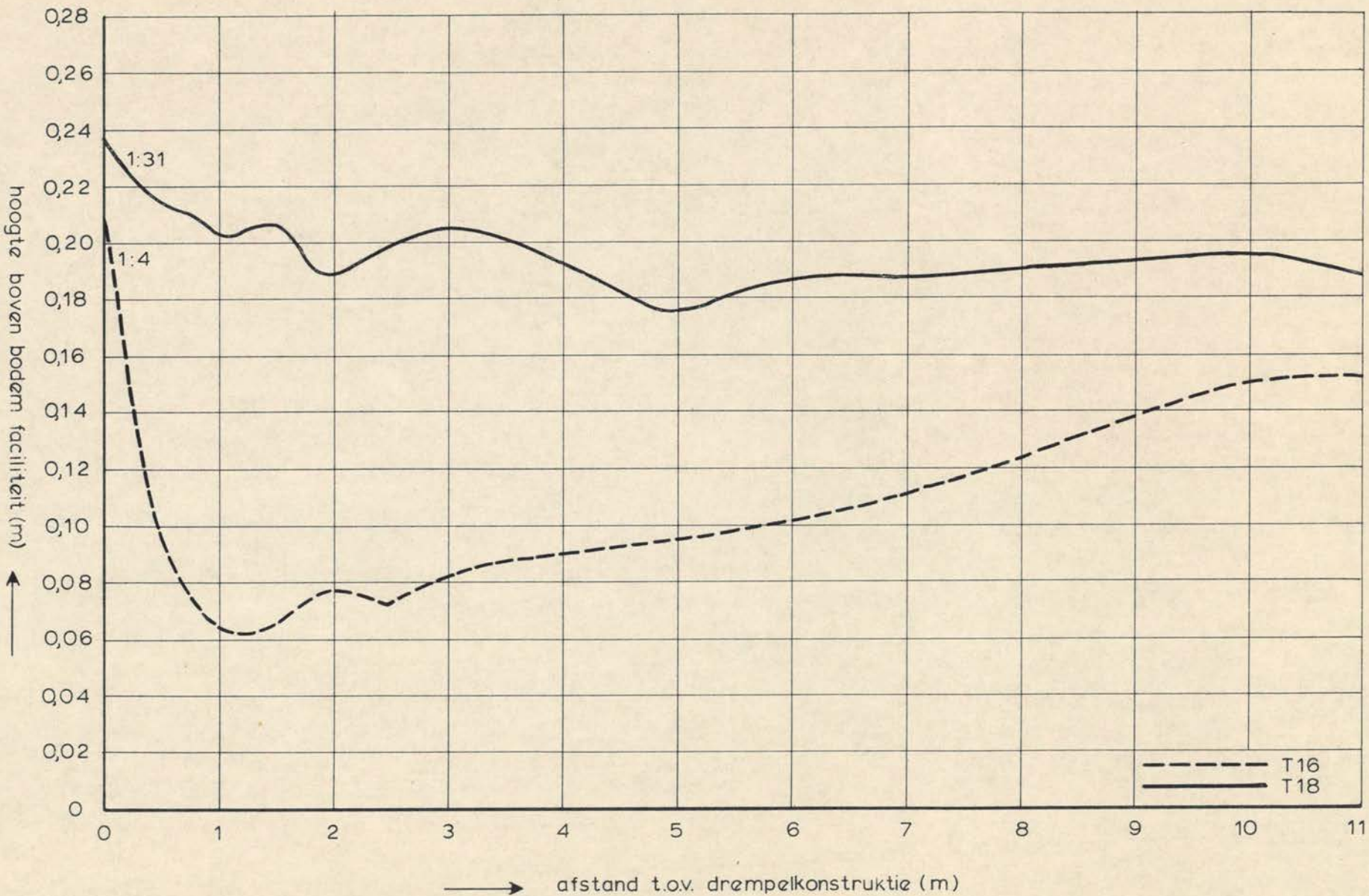
T 11 EN T 13

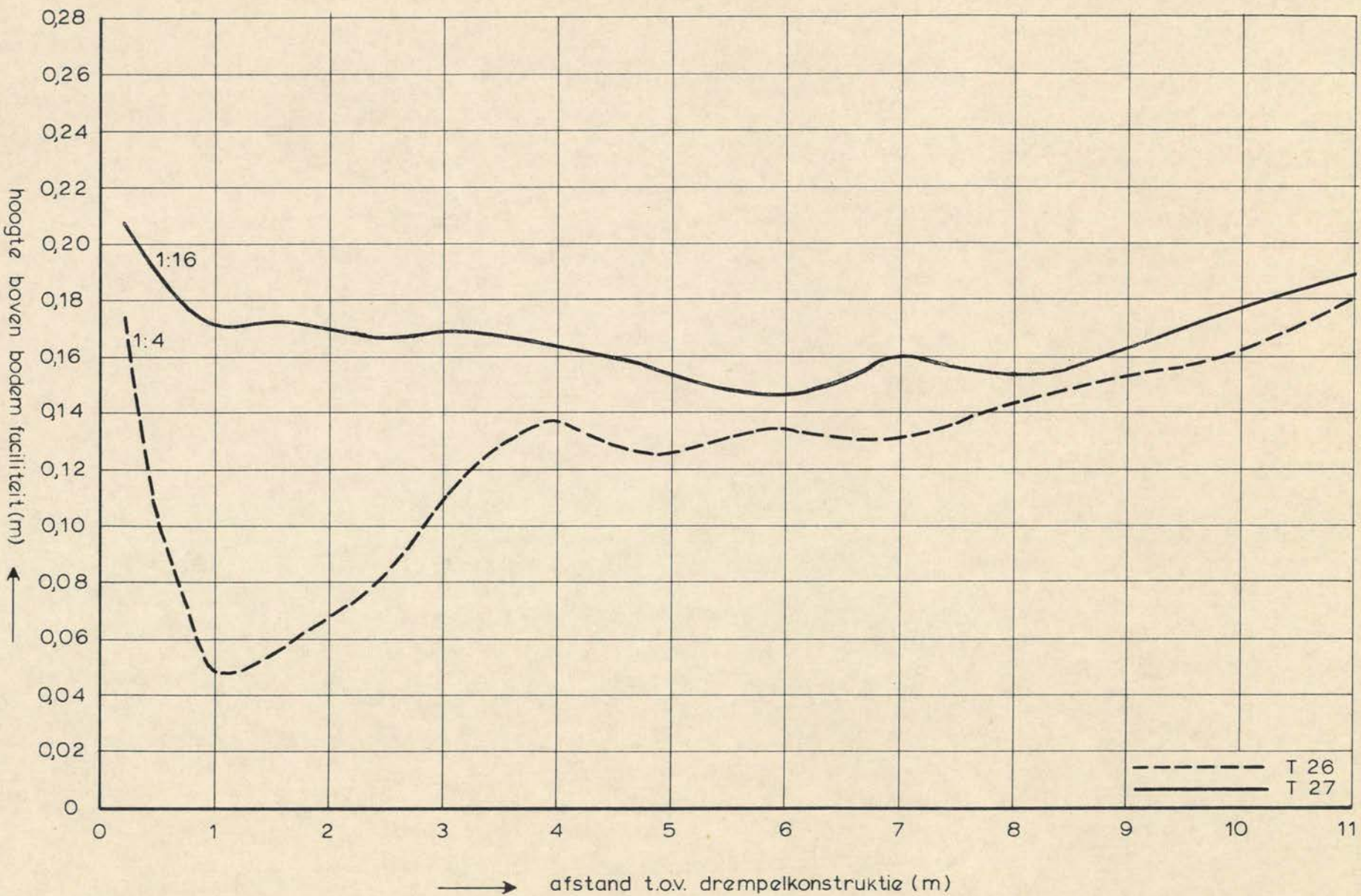
M 863-II

FIG. 7

VORM ONTGRONDINGSKUIL VOOR SITUATIE MET
EN ZONDER BOVENAANVOER

T16 EN T18





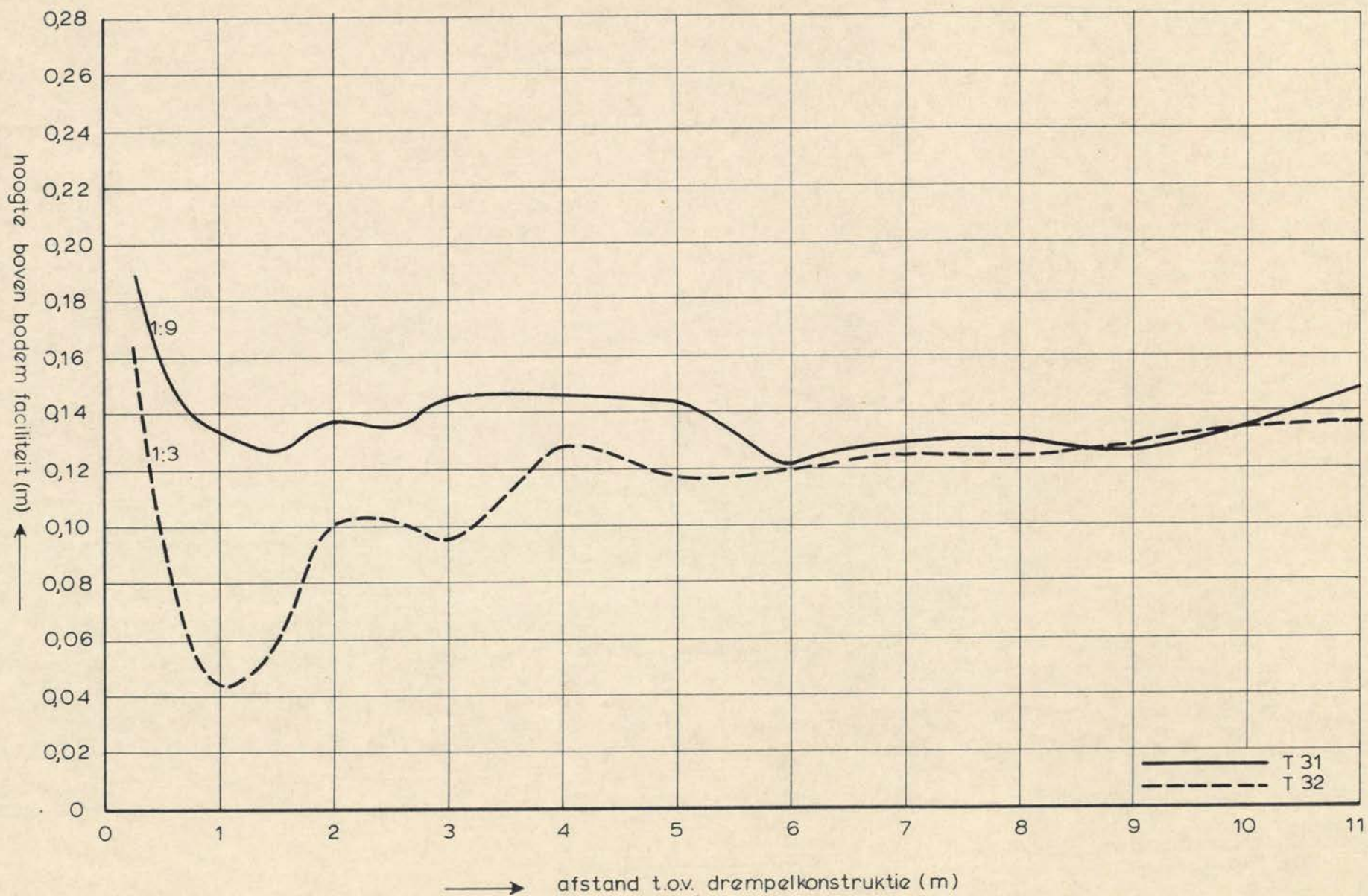
VORM ONTGRONDINGSKUIL VOOR SITUATIE MET
EN ZONDER BOVENAANVOER

T26 EN T27

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 863-II

FIG. 9



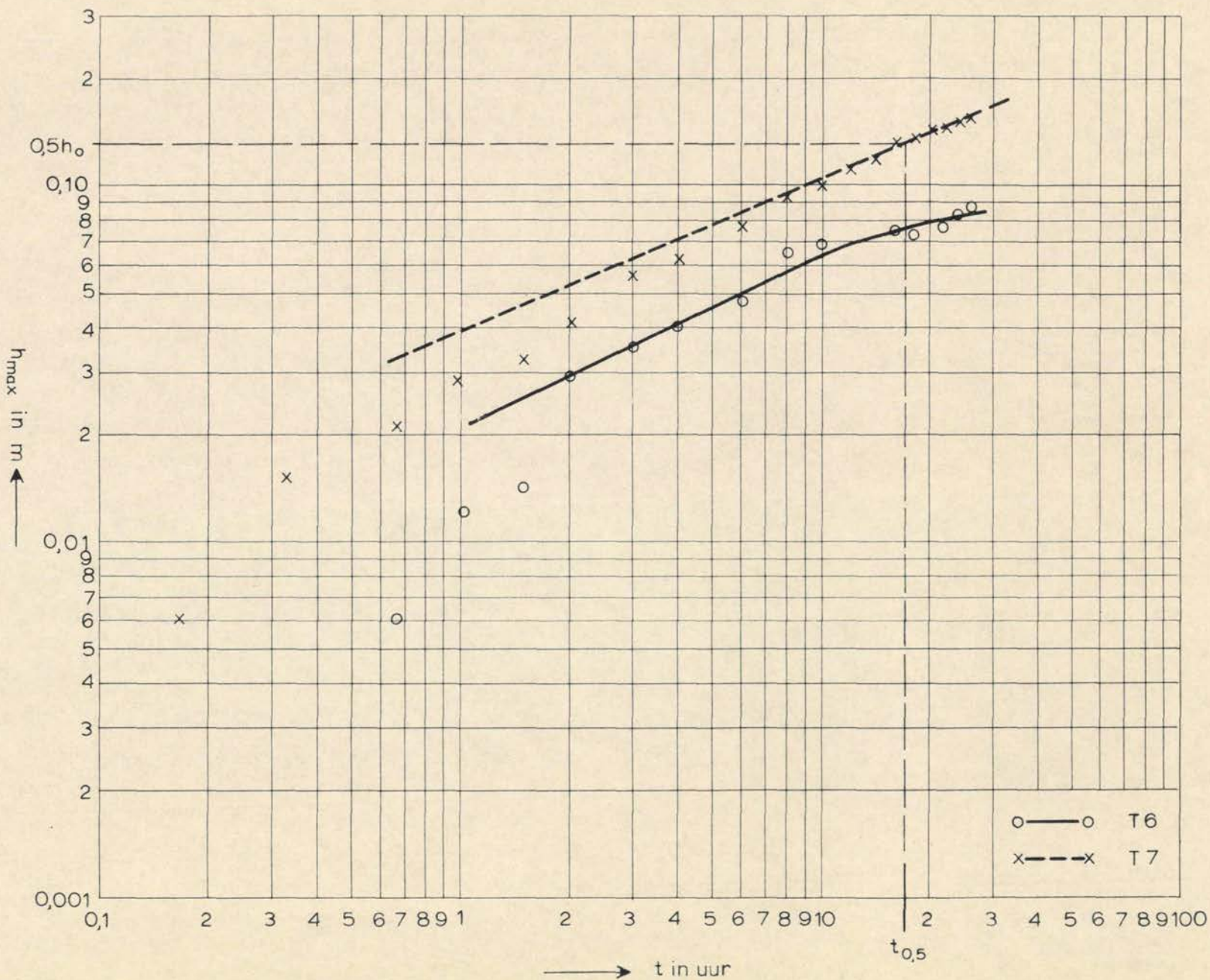
VORM ONTGRONDINGSKUIL VOOR SITUATIE MET
EN ZONDER BOVENAANVOER

T 31 EN T 32

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 863-II

FIG. 10



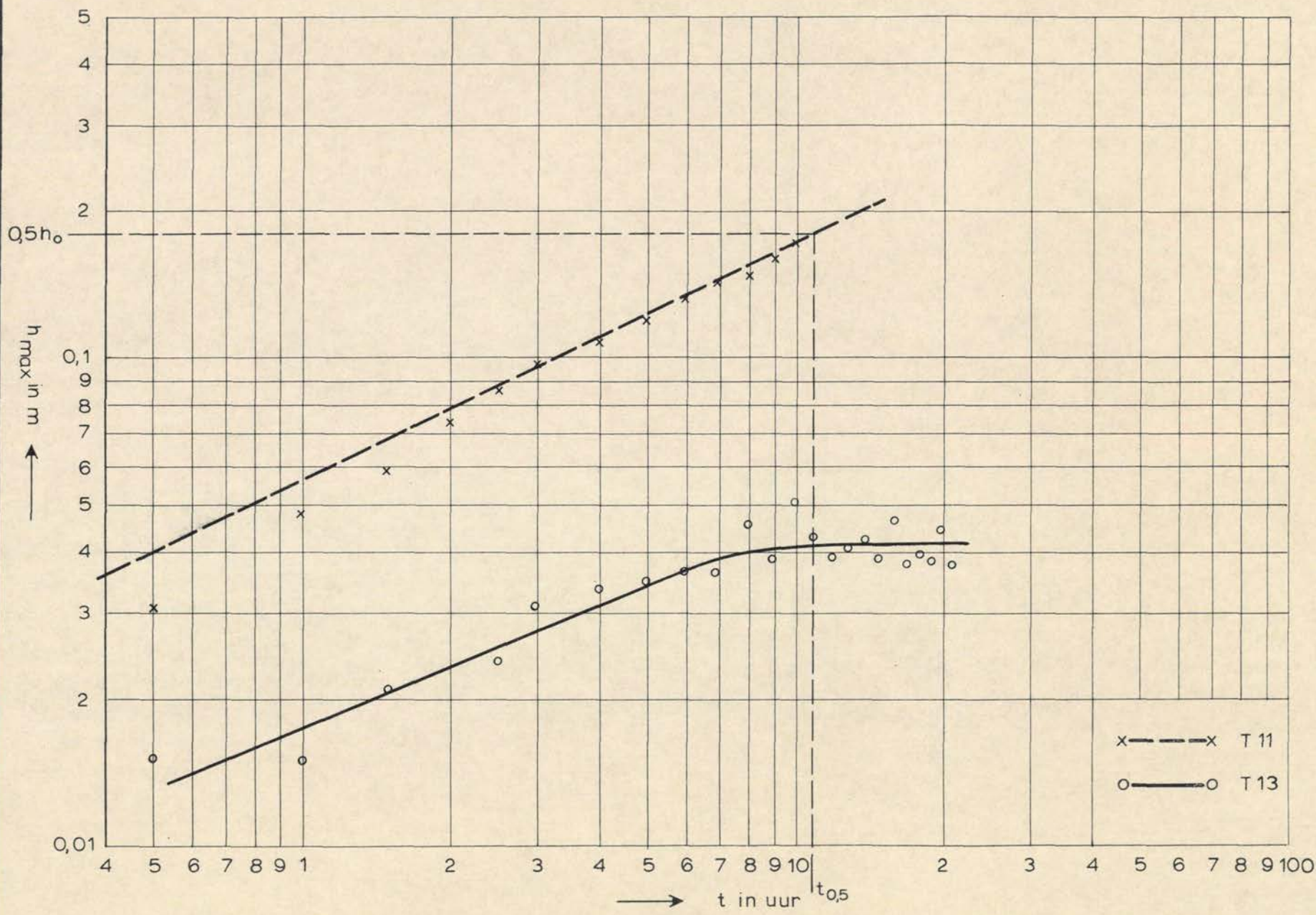
h_{max} ALS FUNKTIE VAN TJD VOOR SITUATIE MET
EN ZONDER BOVENAANVOER

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

T6 EN T7

M 863-II

FIG. 11



h_{\max} ALS FUNKTIE VAN TIJD VOOR SITUATIE MET
EN ZONDER BOVENAANVOER

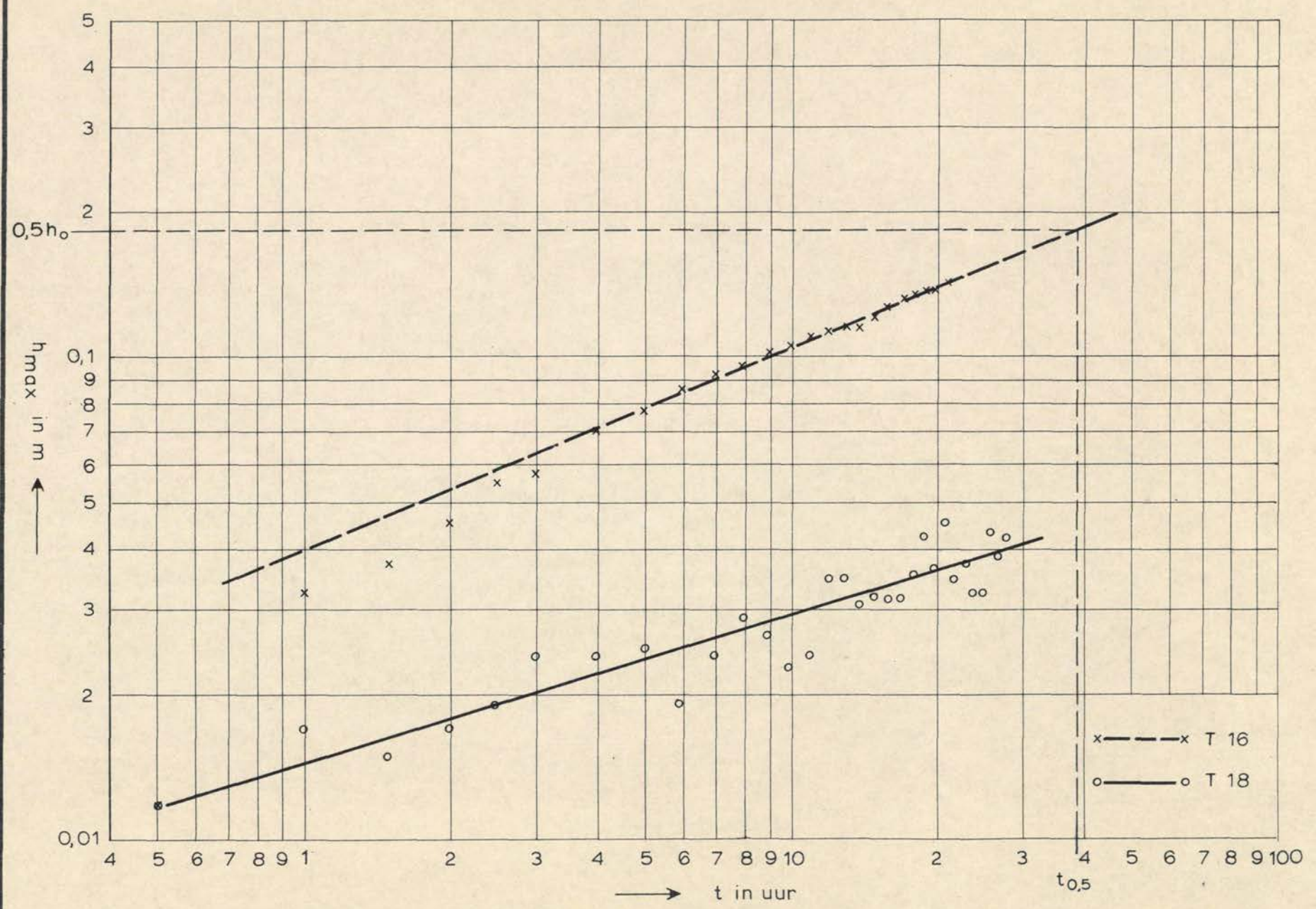
T11 EN T13

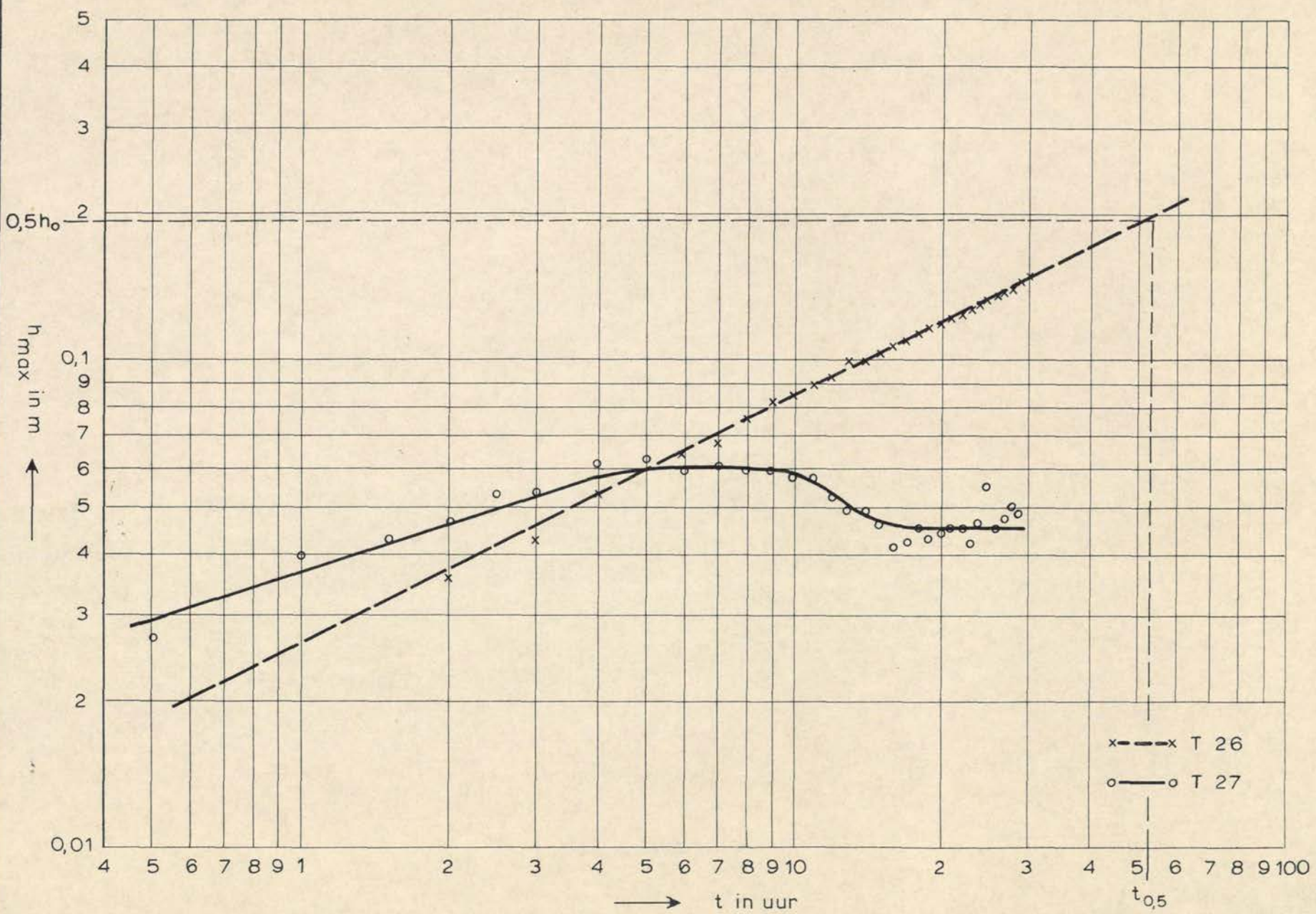
h_{\max} ALS FUNKTIE VAN TIJD VOOR SITUATIE MET
EN ZONDER BOVENAANVOER.

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

T16EN T18

M 863-II FIG. 13





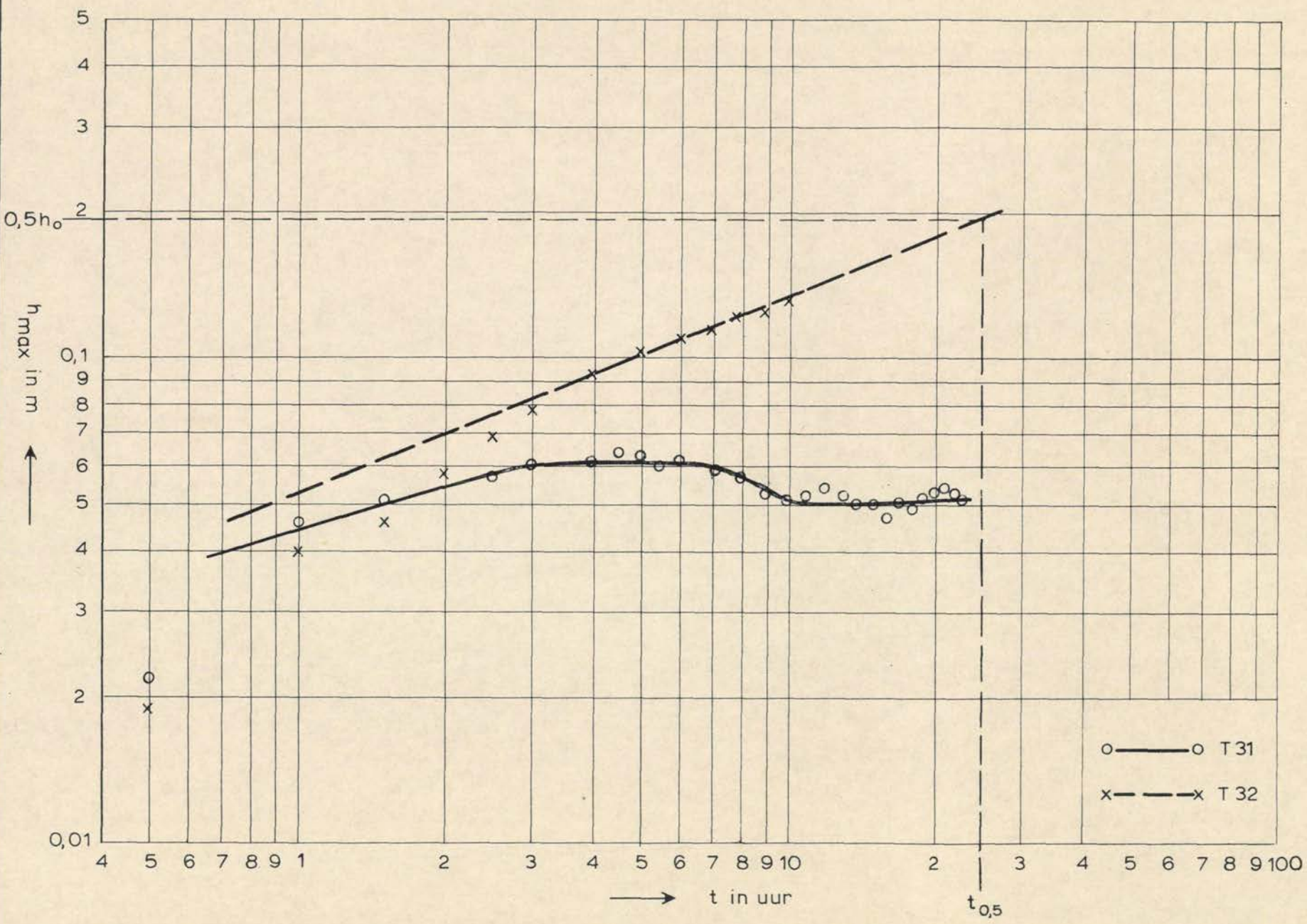
h_{\max} ALS FUNKTIE VAN TIJD VOOR SITUATIE MET
EN ZONDER BOVENAANVOER

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

T26EN T27

M 863-II

FIG. 14



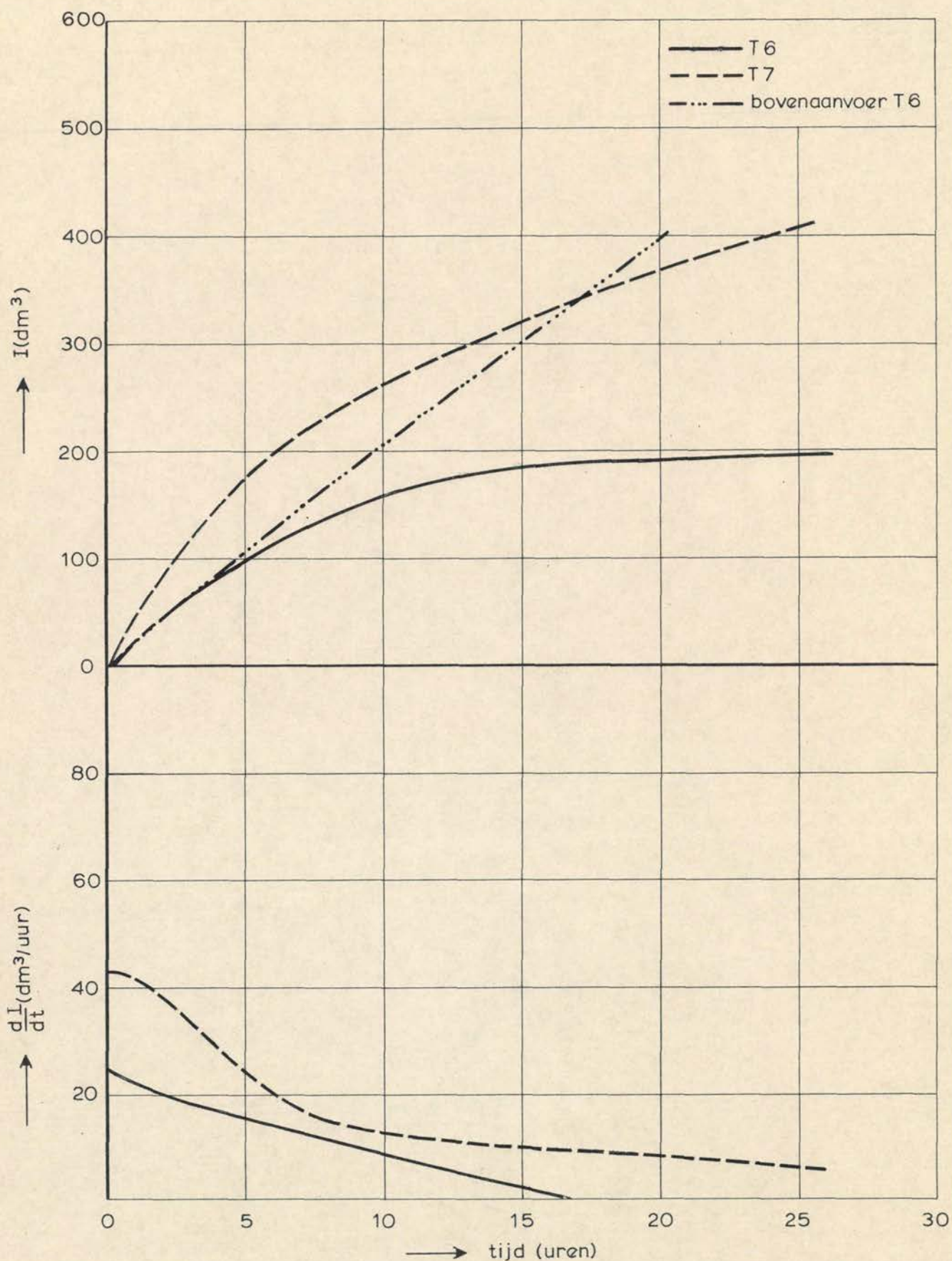
h_{\max} ALS FUNKTIE VAN TIJD VOOR SITUATIE MET
EN ZONDER BOVENAANVOER

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

T31 EN T32

M 863-II

FIG. 15



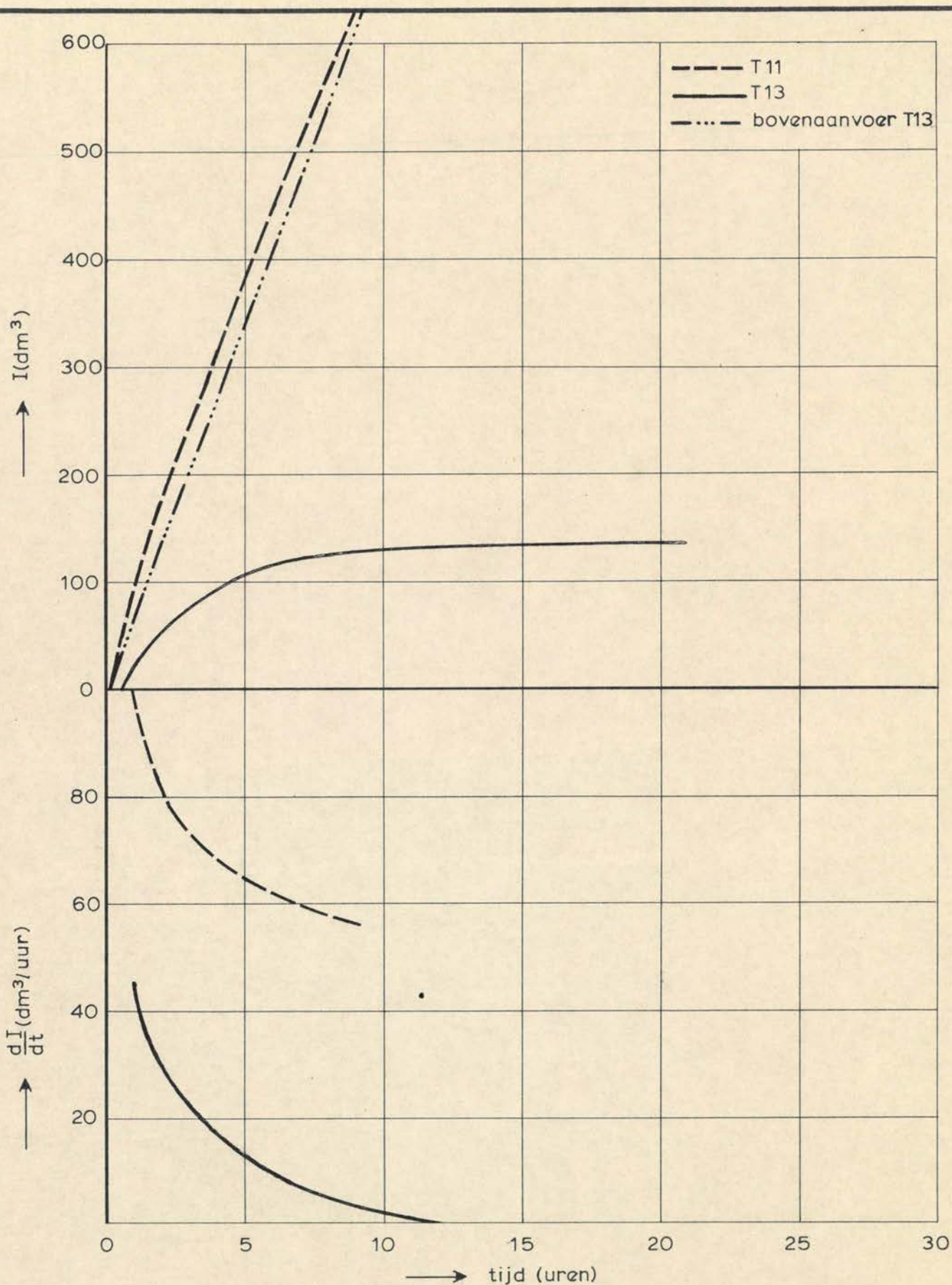
INHOUD ONTGRONDINGSKUIL EN SNELHEID
ONTGRONDING ALS FUNKTIE VAN TIJD

T 6 EN T 7

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 863-II

FIG. 16



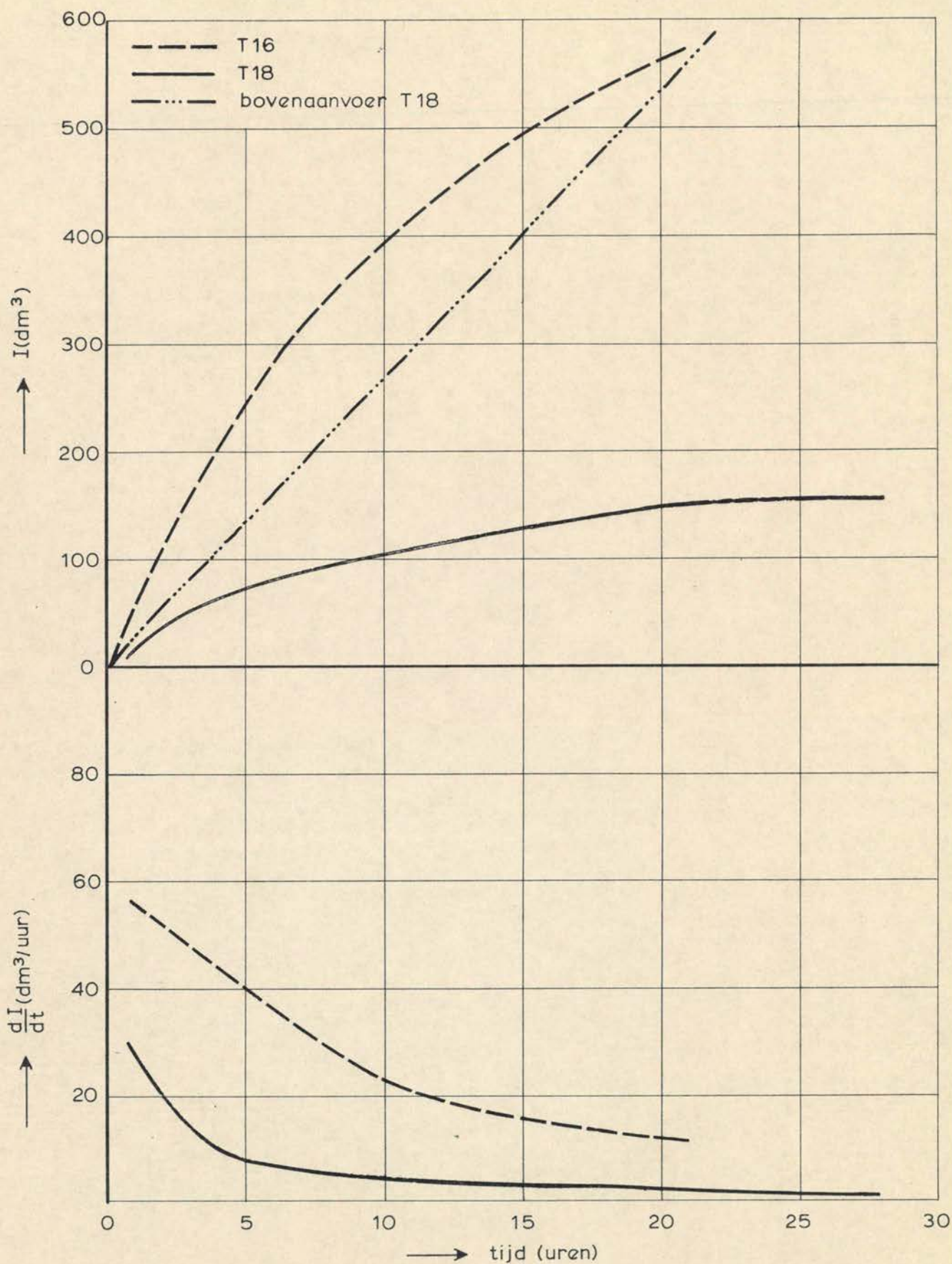
INHOUD ONTGRONDINGSKUIL EN SNELHEID
ONTGRONDING ALS FUNKTIE VAN TIJD

T11 EN T13

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 863-II

FIG. 17



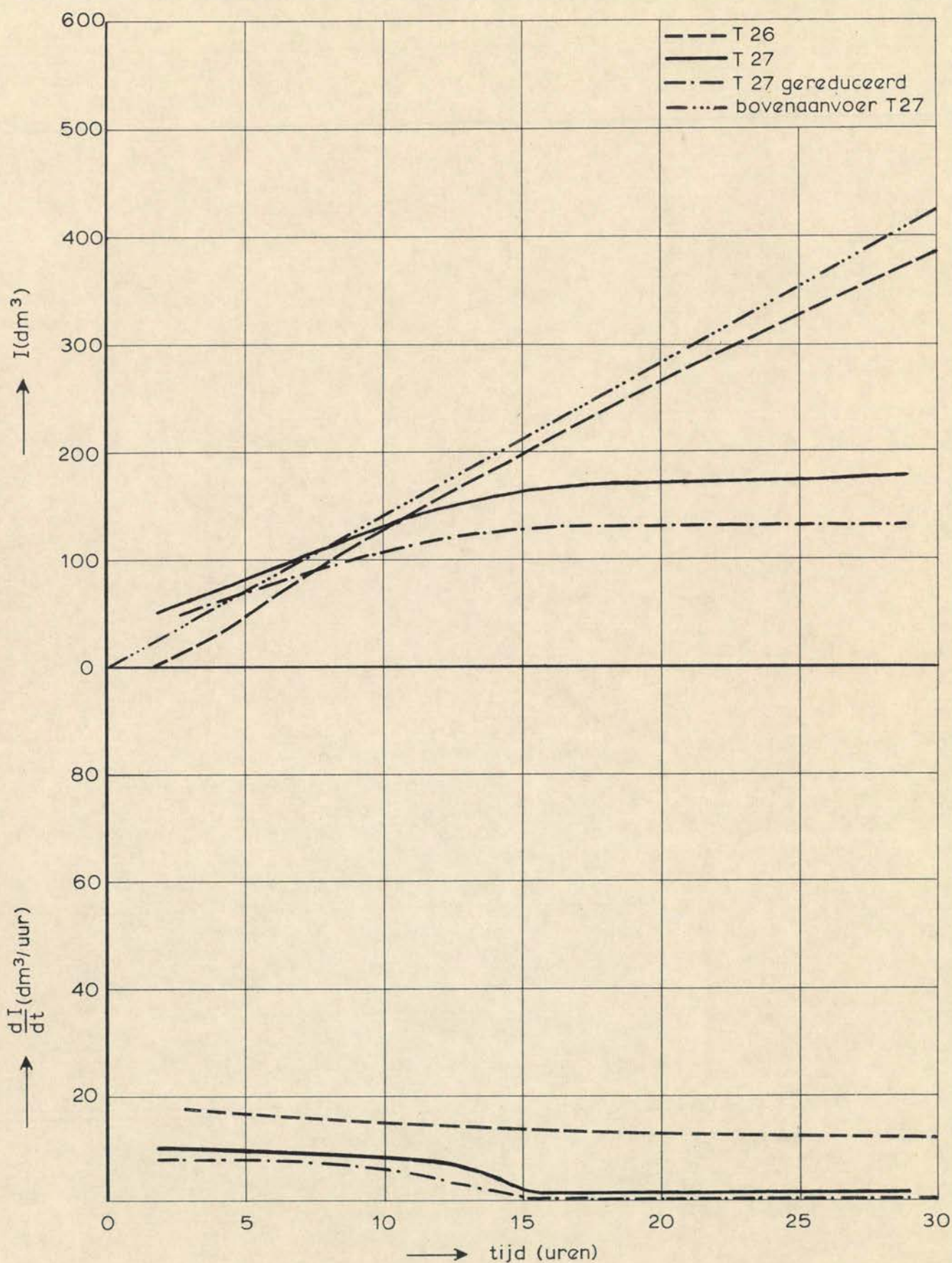
INHOUD ONTGRONDINGSKUIL EN SNELHEID
ONTGRONDING ALS FUNKTIE VAN TIJD

T16 EN T18

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 863-II

FIG. 18



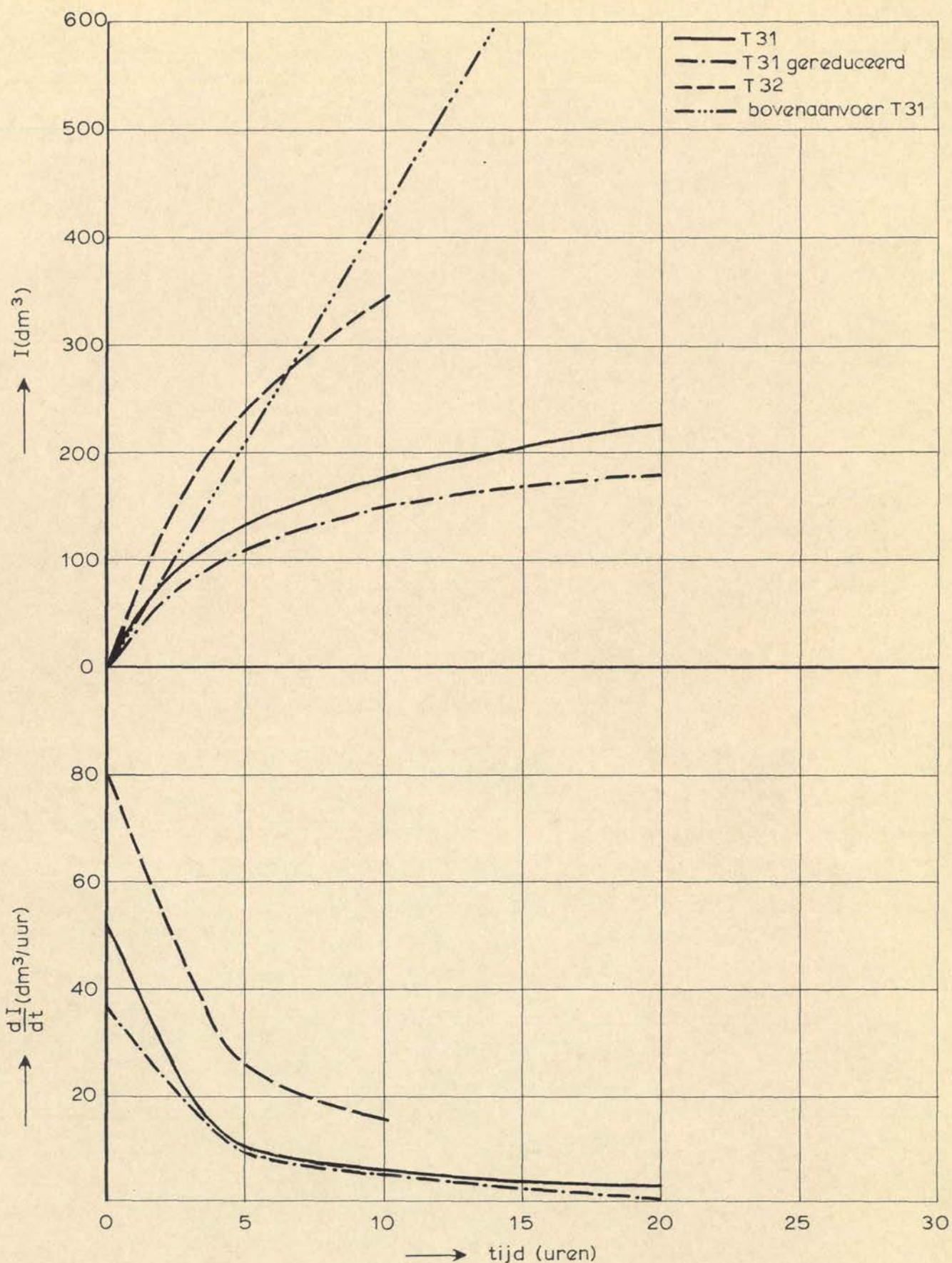
INHOUD ONTGRONDINGSKUIL EN SNELHEID
ONTGRONDING ALS FUNKTIE VAN TIJD

T 26 EN T 27

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 863-II

FIG. 19



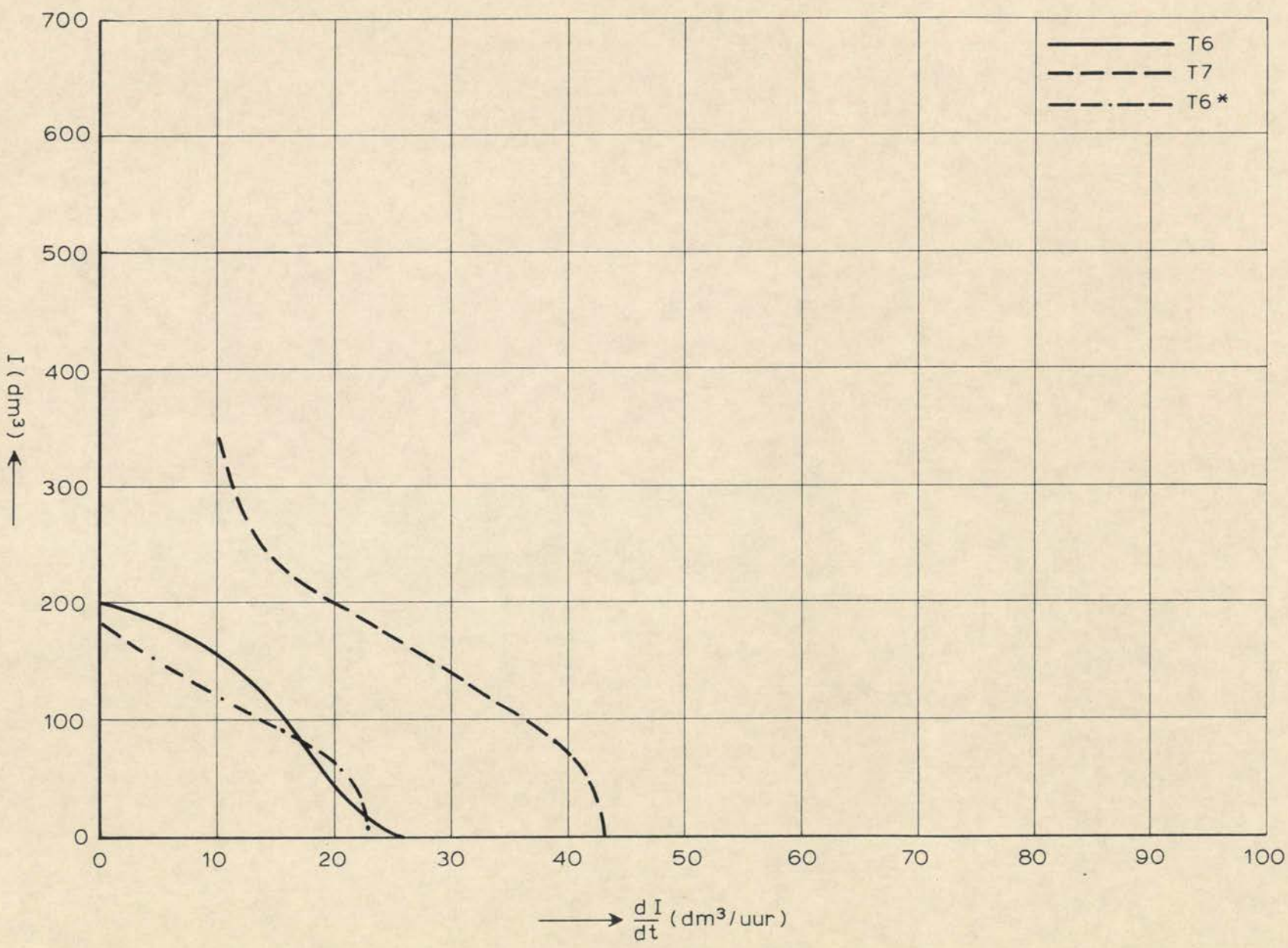
INHOUD ONTGRONDINGSKUIL EN SNELHEID
ONTGRONDING ALS FUNKTIE VAN TIJD

T31 EN T32

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

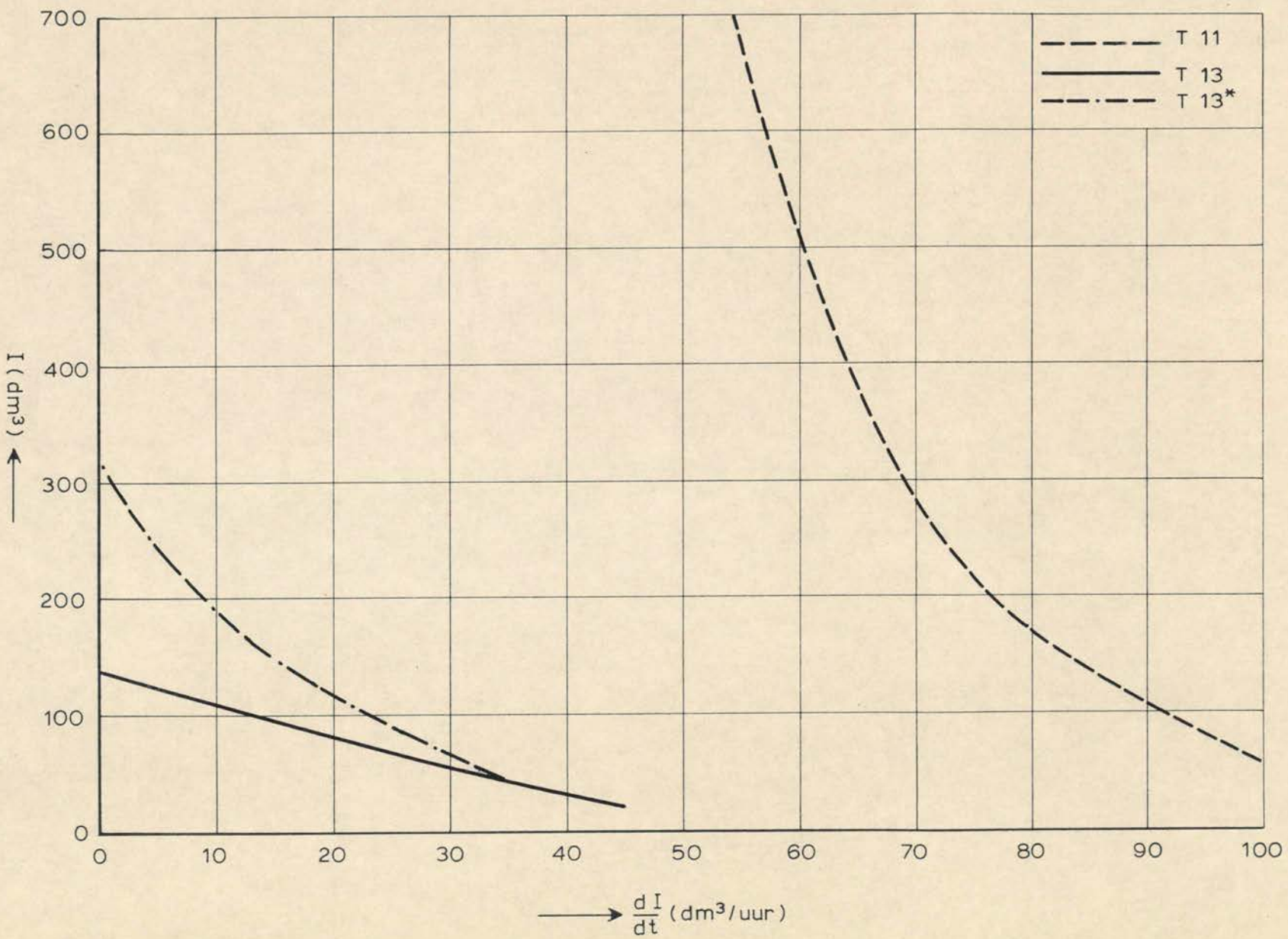
M 863-II

FIG. 20



SNELHEID ONTGRONDING ALS FUNKTIE VAN
INHOUD ONTGRONDINGSKUIL

T6 EN T7



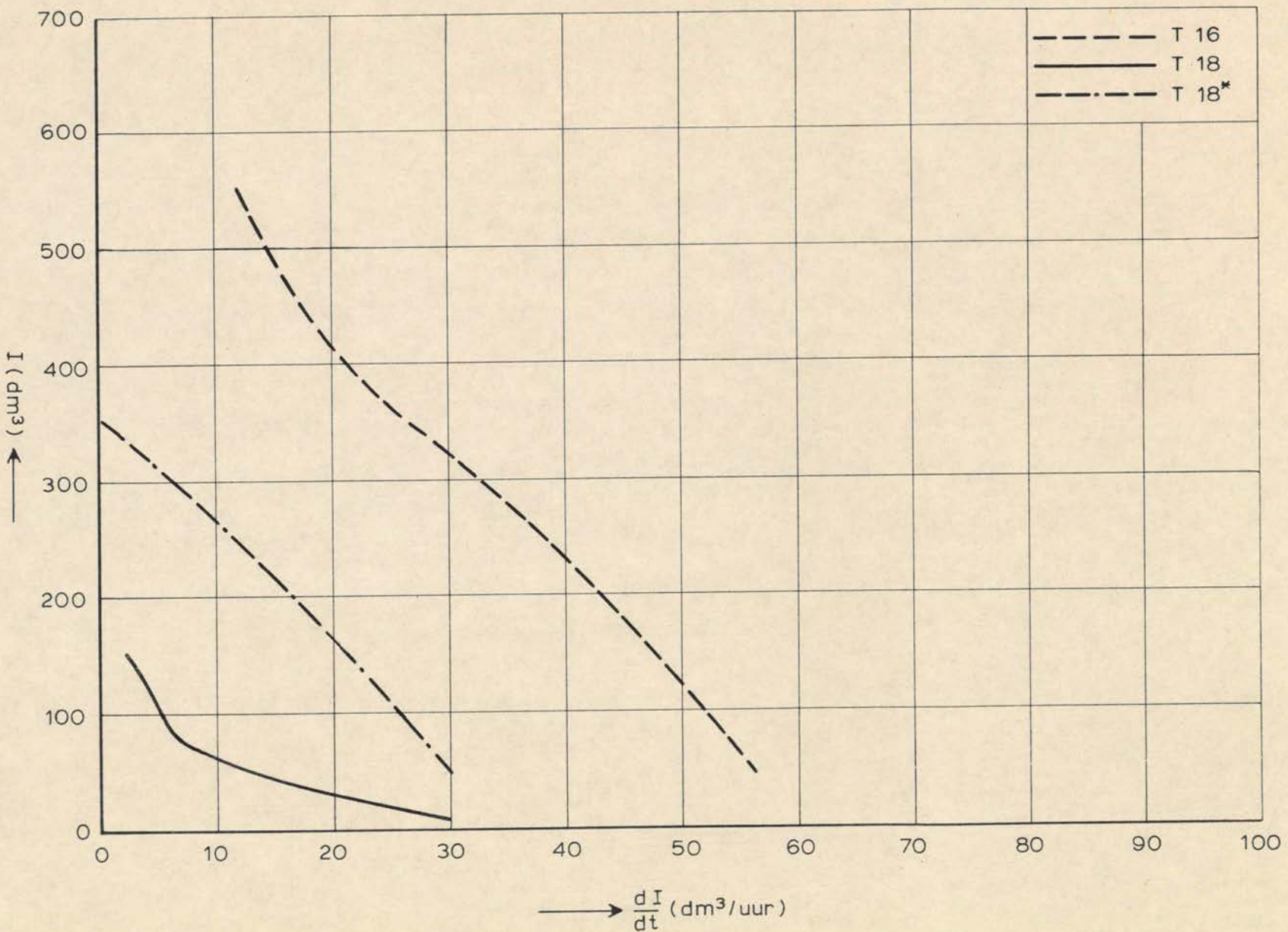
SNELHEID ONTGRONDING ALS FUNKTIE VAN
INHOUD ONTGRONDINGSKUL

T11 ENT13

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 863-II

FIG. 22



SNELHEID ONTGRONDING ALS FUNKTIE VAN
INHOUD ONTGRONDINGSKUL

T16 EN T18

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 863-II

FIG. 23

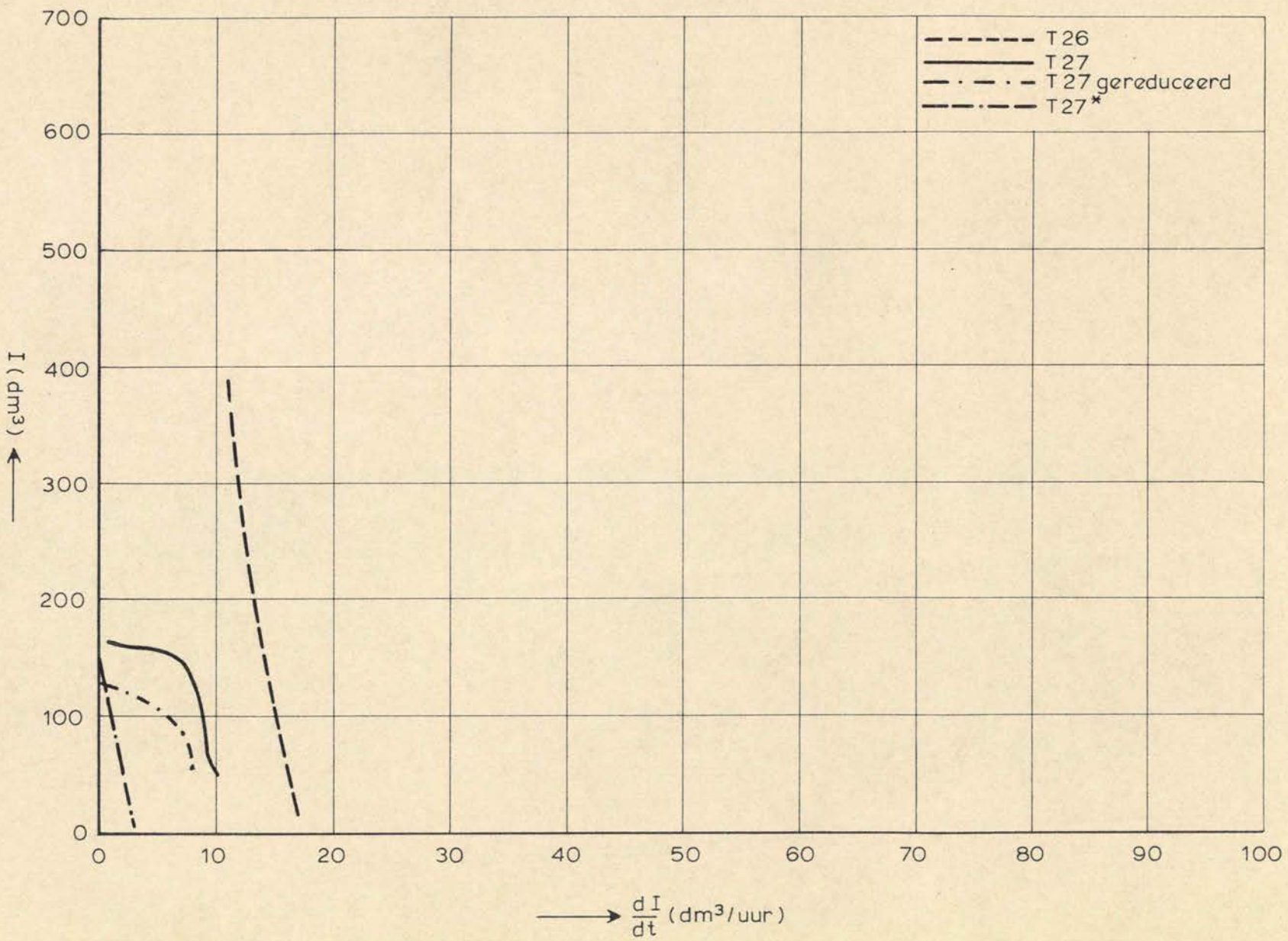
SNELHEID ONTGRONDING ALS FUNKTIE VAN
INHOUD ONTGRONDINGSKUL

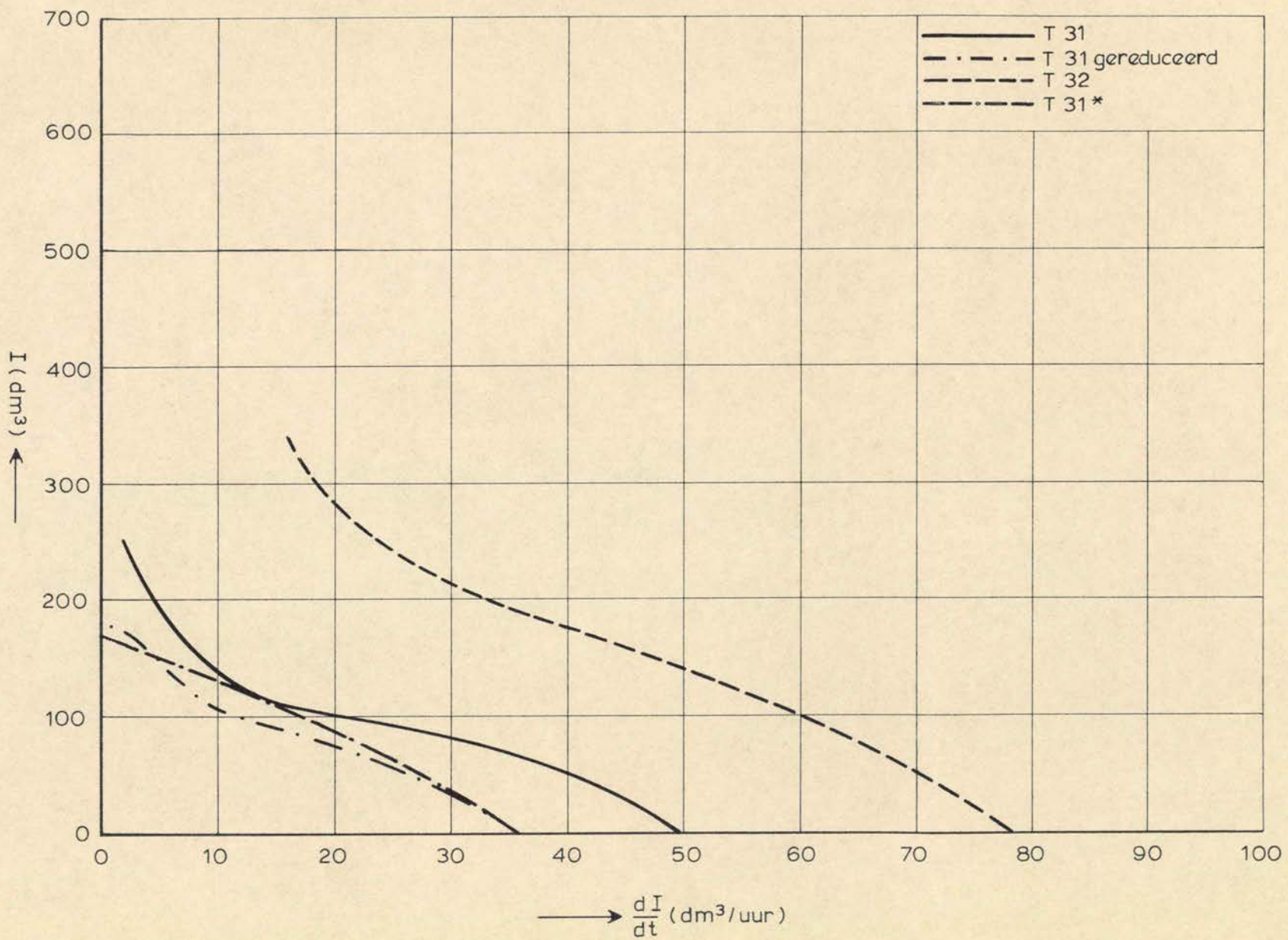
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

T26 EN T27

M 863-II

FIG. 24





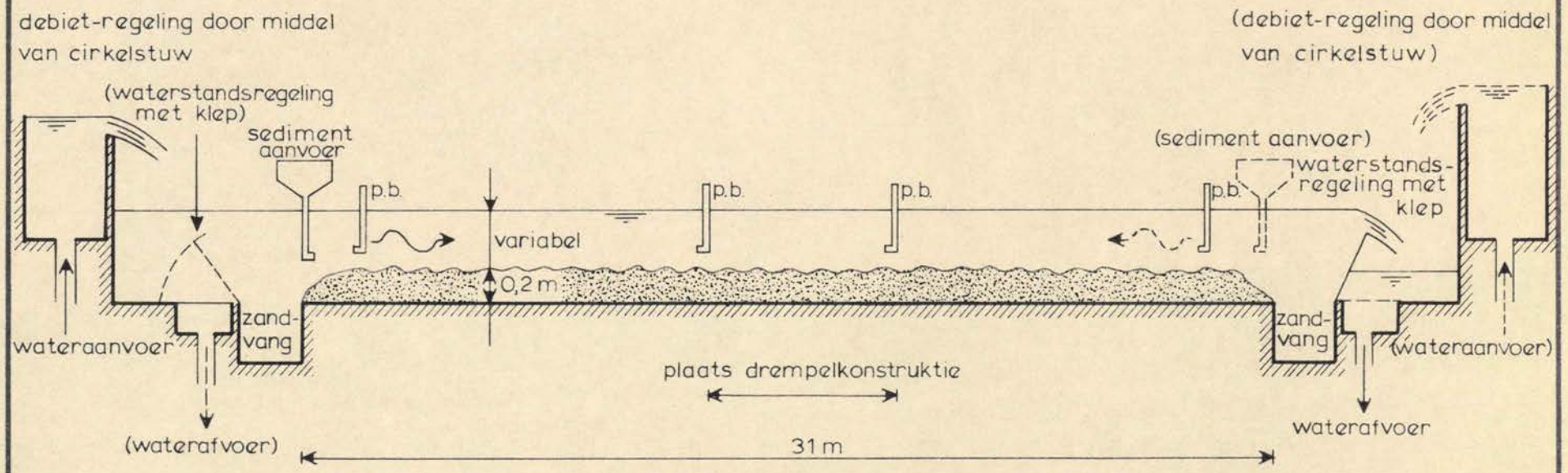
SNELHEID ONTGRONDING ALS FUNKTIE VAN
INHOUD ONTGRONDINGSKUIL

T31 ENT32

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 863-II

FIG. 25



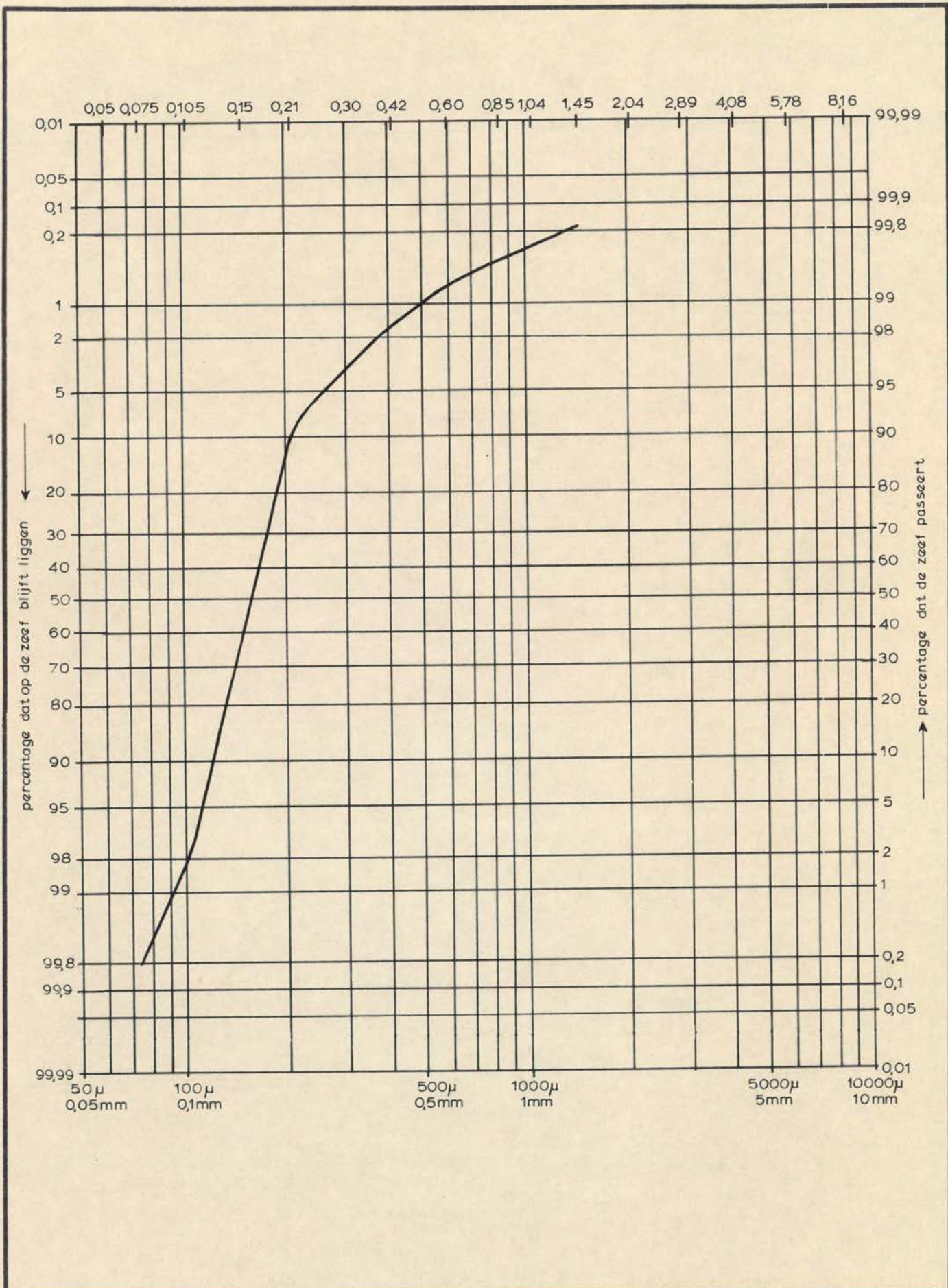
p.b. = pitotbuis

OVERZICHT GEBRUIKTE FACILITEIT, ONDERZOEK
INVLOED WISSELENDE STROOMRICHTING

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 863-II

FIG. 26



KORRELVERDELINGSDIAGRAM

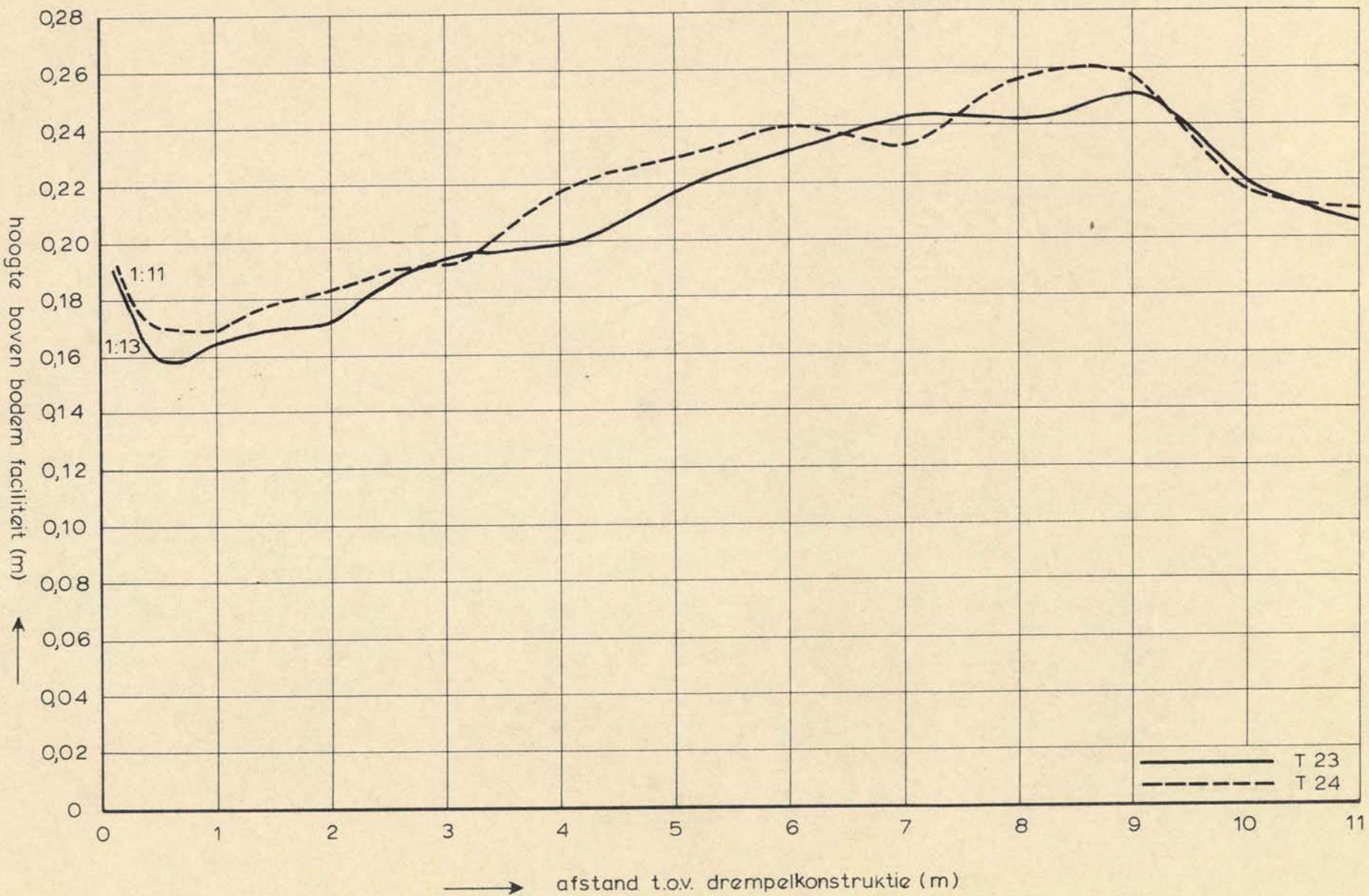
T22...T24

$D_{50} = 160 \mu\text{m}$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 863-II

FIG. 27



VORM ONTGRONDINGSKUL VOOR SITUATIE MET
WISSELENDE STROOMRICHTING

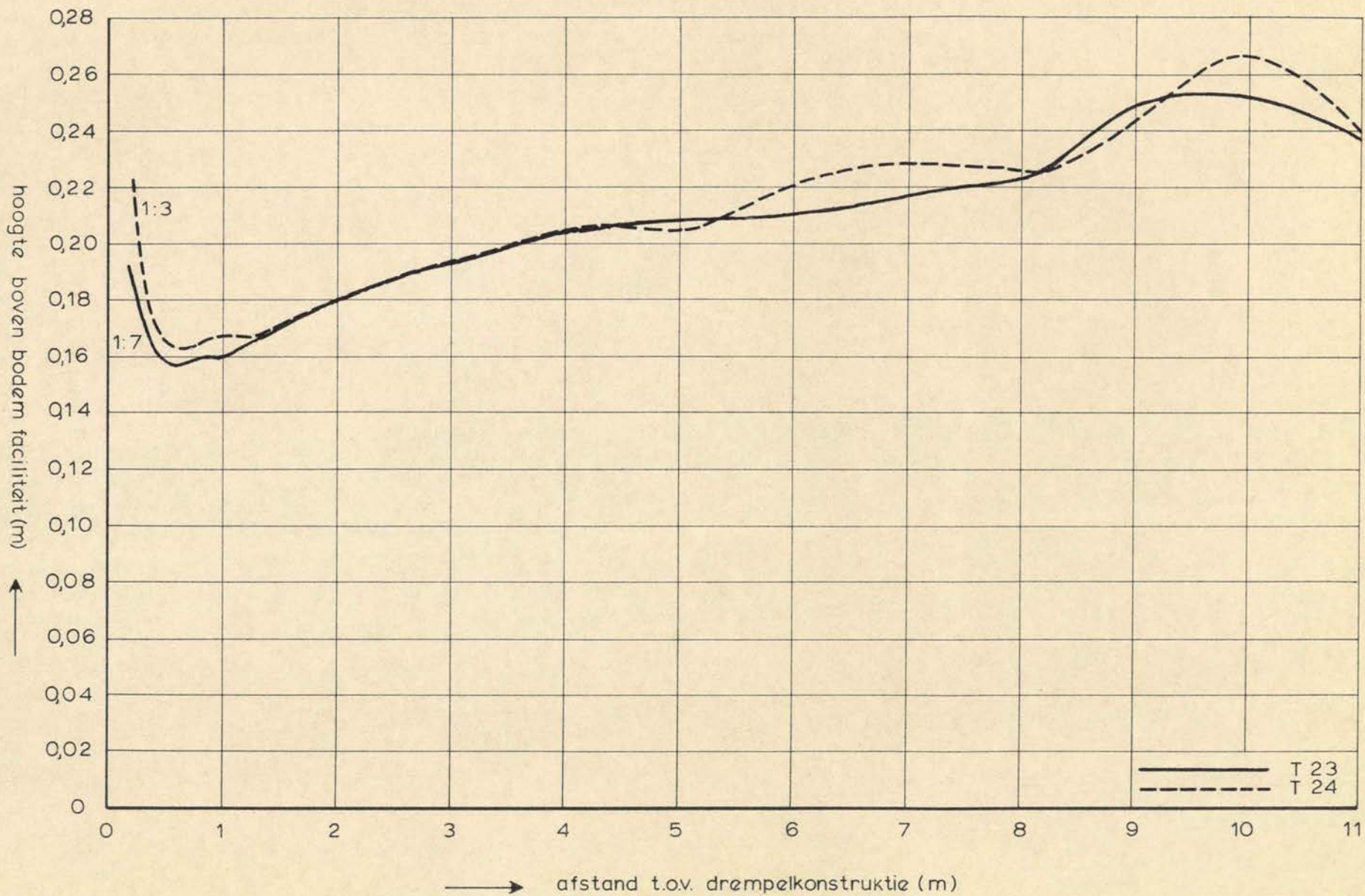
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

T23 EN T24

LINKS VAN DREMPEL

M 863-II

FIG. 28



VORM ONTGRONDINGSKUL VOOR SITUATIE MET
WISSELENDE STROOMRICHTING

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

T 23 EN T 24

RECHTS VAN DREMPEL

M 863-II

FIG. 29

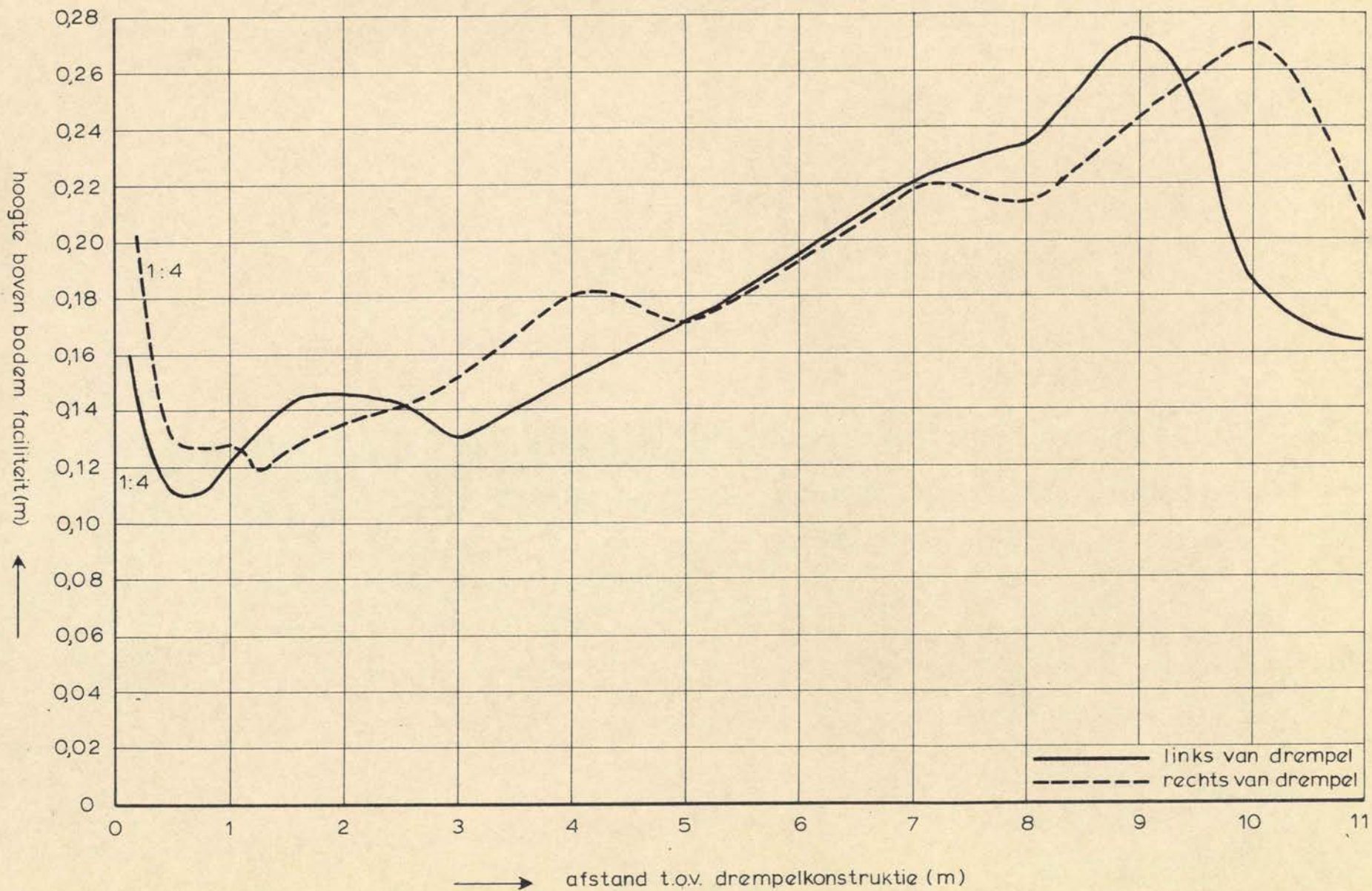
VORM ONTGRONDINGSKUIL VOOR SITUATIE MET
WISSELENDE STROOMRICHTING

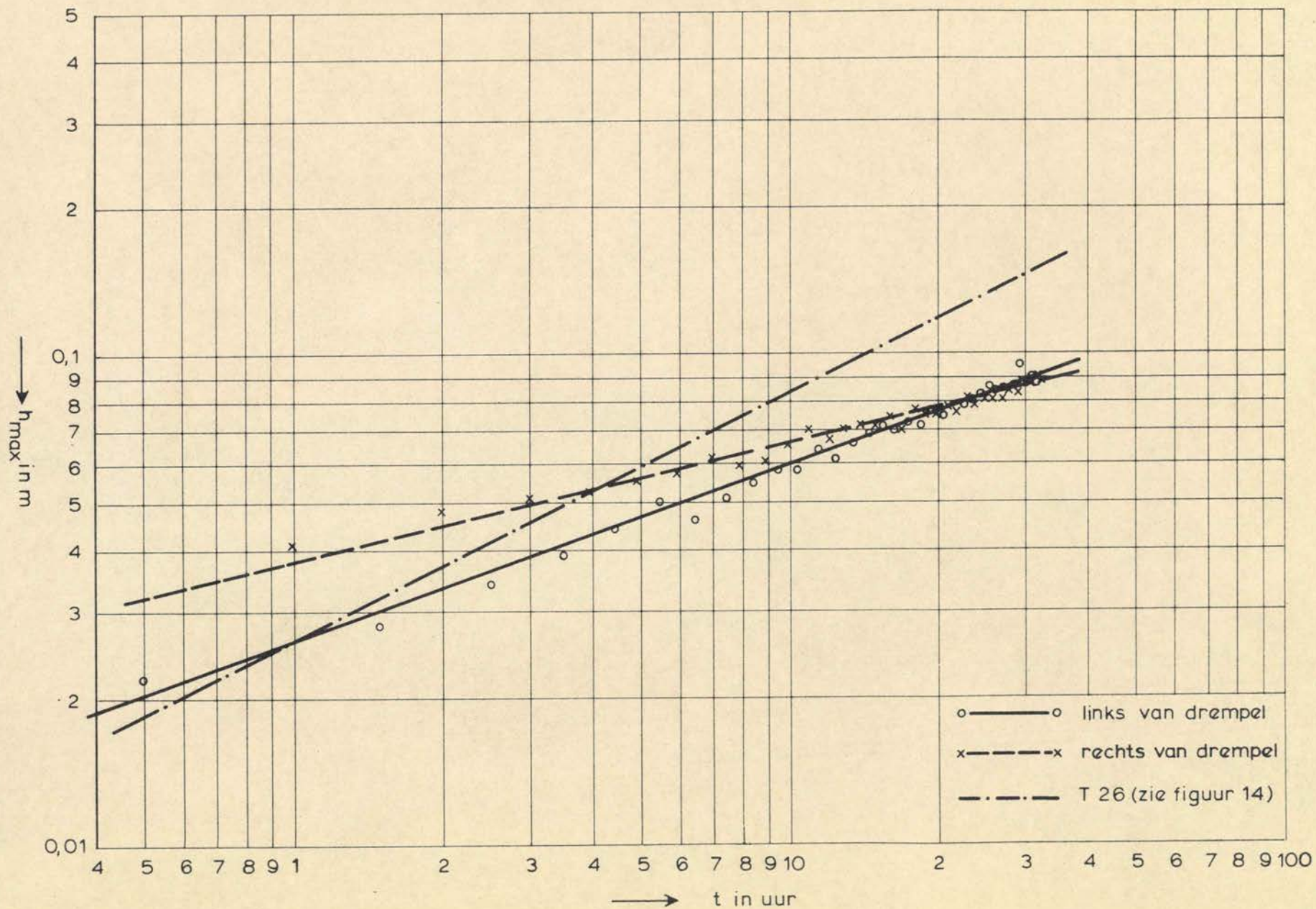
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

T 29

M 863-II

FIG. 30





h_{\max} ALS FUNKTIE VAN TJD VOOR SITUATIE MET
WISSELEND E STROOMRICHTING

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

T 29

M 863-I

FIG. 31

p.o. box 177

2600 mh delft

the netherlands