waterloopkundig laboratorium
delft hydraulics laboratory

stormvloedkering Oosterschelde

bestorting van ontgrondingskuilen

AFGEHANDELD

verslag modelonderzoek

M 1774

maart 1982

stormvloedkering Oosterschelde

bestorting van ontgrondingskuilen

verslag modelonderzoek

M 1774

maart 1982

Inhoud

		blz.
1	Inleiding	1
1.1	Opdracht	1
1.2	Probleemstelling	1
1.3	Aanpak van het onderzoek	2
2	Samenvatting en conclusies	3
3	Inventarisatie reeds uitgevoerd onderzoek	4
3.1	Overzicht	4
3.2	Conclusie	5
4	Het modelonderzoek	6
4.1	Opzet van het onderzoek	6
4.2	Schaalkeuze	6
4.3	Modelopstelling	7
4.4	Meetmethoden en verwerking van de metingen	8
4.5	Proevenprogramma	8
5	Resultaten	9
5.1	Resultaten van de proeven	9
5.1.1	Tijd- ontgrondingsverloop	9
5.1.2	Kuilprofielen en aanzethellingen	9
5.2	Analyse van de resultaten	10
5.2.1	Invloed van de bestorting op de tijd- ontgrondingslijnen	10
5.2.2	Invloed van de bestorting op de aanzethelling	10
5.3	Interpretatie van de resultaten	11
5.4	Invloed van de bestortingen op de aanzethelling	12

REFERENTIES

TABELLEN

1 Overzicht uitgevoerde proeven

FIGUREN

Figuren ontleend aan M715

1 Mogelijke verdedigingsvormen
2 Helling verbindingslijn constructie-diepste punt
3 Ontgrondingsdiepte en aanzethelling bij aanlegdiepte randbodemverdediging N.A.P. -35, N.A.P. -25 en N.A.P. -11,5 m

Figuren ontleend aan M1321

4 Proefopstelling T61, T63 en T64. Verlengd stortebed tot in de kuil

Overzicht meetresultaten ontgrondingsproef

5 T61
6 T63
7 T64

Figuren ontleend aan R460

Ontgrondingskuilen

8 proef 75-15
9 proef 75-17
10 proef 75-20
11 proef 75-18
12 proef 75-19

Figuren ontleend aan M1435

13 Relatie aanzethelling $\beta 1$ met ontgrondingsdiepte

Figuren M1774

14 Overzicht tussenpadgoot
15 Overzicht proefopstellingen

FIGUREN (vervolg)

Tijd- ontgrondingsverloop

16 TO.1, TO.2, TO.3
17 T2, T3, T6
18 T1, T4, T5

Ontgrondingskuil en aanzethelling

19 TO
20 T1
21 T2
22 T3
23 T4
24 T5
25 T6

26 Definitie aanzethelling
27 Voorspelling bestorting, voorbeeld
28 Bestortings-filosofie

FOTO'S

Ligging ontgrondingskuil bij einde proef

1 T1
2 T2
3 T3
4 T5
5 T6

Ontgrondingsbeeld T4

6 na 0 uur stromen
7 na 0,04 uur stromen
8 na 0,098 uur stromen
9 na 0,127 uur stromen
10 na 0,167 uur stromen
11 na 0,25 uur stromen
12 na 0,485 uur stromen
13 na 1,0 uur stromen

SYMBOLEN

A	= doorstroomprofiel = h_o x B	(m^2)
B	= gootbreedte	(m)
D_{50}	= gemiddelde diameter van het bodemmateriaal	(m)
$h_{max(t)}$	= maximale ontgrondingsdiepte op het tijdstip t	(m)
h_o	= oorspronkelijke waterdiepte	(m)
L	= lengte bodembescherming	(m)
L_1	= lengte eerste bestorting	(m)
L_2	= lengte tweede bestorting	(m)
L_3	= lengte derde bestorting	(m)
n_L	= lengte schaal	(-)
n_h	= hoogte schaal	(-)
n_v	= snelheidsschaal	(-)
Q	= debiet	(m^3/s)
t_1	= tijd waarin $h_{max} = h_o$ wordt	(uren)
$\bar{u}$	= gemiddelde aanstroomsnelheid = Q/A	(m/s)
u_{kr}	= stroomsnelheid, waarbij het ontgrondingsmateriaal juist in beweging komt	(m/s)
α	= ontgrondingsfaktor	(-)
β	= aanzethelling ontgrondingskuil	(^{o})
β^1	= referentie aanzethelling ontgrondingskuil	(^{o})
β_1	= aanzethelling ontgrondingskuil M1435	(^{o})
Δ	= relatieve dichtheid bodemmateriaal onder water	(-)
ϕ	= hoek van het natuurlijk talud	(^{o})

STORMVLOEDKERING OOSTERSCHELDE

Bestorting van ontgrondingskuilen

1. Inleiding

1.1 Opdracht

In het kader van het onderzoek naar de stormvloedkering in de Oosterschelde is door de Hoofdafdeling Waterloopkunde van de Deltadienst van Rijkswaterstaat opdracht gegeven tot het onderzoeken van de invloed van bestortingen op de aanzethelling van ontgrondingskuilen. De opdracht is verleend per brief met kenmerk WT10.096 d.d. 29 januari 1981. Het onderzoek is uitgevoerd in de Tussenpadgoot van het Laboratorium De Voorst en stond onder leiding van ir. A.F.F. de Graauw en ing. J.J. Taat, waarvan de laatstgenoemde het verslag heeft opgesteld. De begeleiding van het onderzoek voor Rijkswaterstaat was in handen van ir. T. Smole.

1.2 Probleemstelling

De stabiliteit van de rand van de bodemverdediging kan in gevaar komen indien de ondergrond,waarop de rand van de bodemverdediging rust, wordt gedeformeerd door afschuivingen en/of zettingsvloeiingen. Deze afschuivingen en vloeiingen kunnen ontstaan als de aanzethelling van de ontgrondingskuil over een zekere hoogte een kritieke waarde overschrijdt en de samenstelling van de ondergrond aan zekere voorwaarden voldoet. Een nadere analyse van deze problemen is te vinden in de nota 22RABO-M-81004 van Rijkswaterstaat.

Het doel van het bestorten van aanzethellingen van ontgrondingskuilen is het vastleggen van deze hellingen voordat kritieke waarden van de hellingen worden overschreden.

De belangrijkste vraagpunten hierbij zijn:

1. Wordt het verloop van de ontgronding beïnvloed door de aanwezigheid van bestortingen?
   Hierbij kan gedacht worden aan een verstoring van het transportmechanisme in ontgrondingskuilen ten gevolge van het bestorten, waardoor het gehele ontgrondingsproces zich sneller of langzamer zou kunnen voltrekken dan zonder bestortingen.

2. Wat is de invloed van bestortingen op de ontwikkeling van de aanzethelling van het nog niet bestorte gedeelte van het bovenstroomse talud van de ontgrondingskuil?

Dit vraagpunt heeft betrekking op het probleem, dat een te steile aanzethelling weliswaar voorkomen kan worden door vroegtijdig een gedeelte van de ontgrondingskuil, aansluitend op de bodemverdediging, te bestorten, maar dat benedenstrooms van deze bestorting dan weer een nieuwe aanzethelling ontstaat. Als de steilheid van deze helling weer net zo groot is als van de helling die zonder bestorten zou zijn ontstaan (of wellicht nog steiler) moet na enige tijd weer een nieuwe bestorting worden uitgevoerd, waarbij dan weer dezelfde vraag gesteld kan worden. In het meest ongunstig denkbare geval zou dan de gehele bovenstroomse taludhelling van de ontgrondingskuil moeten worden bestort, tot het moment waarop het ontgrondingsproces tot stilstand komt bij het bereiken van grote kuildiepten.

3. Is stortsteen stabiel op een aanzethelling?
   De stroomsnelheden in de ontgrondingskuil zijn aanmerkelijk kleiner dan de aanstroomsnelheid;de turbulentie-intensieteit is echter veel groter. Met het dimensioneren van de bestorting moet hiermee rekening gehouden worden, zodat een aangebrachte bestorting voldoende stabiliteit bezit.

1.3 Aanpak van het onderzoek

Het idee voor het bestorten van aanzethellingen is op zich niet nieuw. In het verleden is in een aantal gevallen getracht door middel van bestortingen de maximaal optredende ontgrondingen te reduceren, de aanzethelling te verflauwen en ondermijning tegen te gaan.
In het kader van het onderhavige onderzoek werden de genoemde onderzoeken geanalyseerd op bruikbaarheid van de resultaten.
Uit deze analyse bleek dat zelfs gedeeltelijke beantwoording van de gestelde vragen niet mogelijk was, zodat werd besloten tot het uitvoeren van modelonderzoek.Een twee-dimensionaal onderzoek werd als voldoende beschouwd, omdat verwacht werd dat drie-dimensionaal onderzoek weinig meer informatie zou verschaffen, terwijl de kosten aanzienlijk hoger zouden zijn. Verder werd het onderzoek uitgevoerd zonder variatie van de geometrie, constructie van de bestortingen en ontgrondingsmateriaal en werd dus alle aandacht geconcentreerd op de invloed van de bestorting op de aanzethelling en het ontgrondingsverloop.

2. Samenvatting en conclusies

In het onderzoek is de invloed bepaald van de aanwezigheid van bestortingen van aanzethellingen van ontgrondingskuilen op het ontgrondingsverloop en de steilheid van de aanzethellingen.
De genoemde bestortingen kunnen van belang zijn voor het verzekeren van de (grondmechanische) stabiliteit van de rand van de bodemverdediging van de stormvloedkering in de Oosterschelde.

De belangrijkste conclusies van het onderzoek zijn:

- het ontgrondingsverloop wordt door de bestortingen niet beïnvloed.
- de aanzethellingen die ontstaan na het bestorten zijn gelijk aan de hellingen van de ontgrondingskuil zonder bestorting op dezelfde plaats als waar de bestorting eindigt.
- het bestorten kan, afhankelijk van het plaatselijke ontgrondingsverloop, gefaseerd worden uitgevoerd.
- in gebieden met een sterk drie-dimensionaal ontgrondingspatroon kunnen problemen ontstaan bij de zijhellingen van ontgrondingskuilen.
- verwacht wordt dat bestortingen bestaande uit fosforslakken (met D_{50} = 20 mm) op de aanzethelling stabiel zullen zijn; bij de overgang bestorting-bodemverdediging kan een zwaardere bestorting nodig zijn.
- een methode is ontwikkeld voor het bepalen van het tijdstip van bestorten.

3. Inventarisatie reeds uitgevoerd onderzoek

3.1 Overzicht

- M 715 (Haringvlietsluizen). In figuur 1 is een overzicht van de te vergelijken situaties gegeven. In figuur 2 is het verloop (van de plaats) van het dieptste punt van de kuil voor een aantal tijdstippen gegeven. De getrokken lijnen door de punten geven dus niet de aanzethelling weer, maar de helling tot het dieptste punt (globaal factor 1,5 flauwer). In figuur 3 is wél de aanzethelling weergegeven (gemiddeld over 0,50 m model ≙ 18 m proto). Het blijkt dat er weinig verschil is tussen de situaties met de rand van de bodemverdediging op N.A.P. -25 m en -35 m. Beide zijn veel ongunstiger dan de situatie met horizontale bodem op N.A.P. -13,5 m. Een oorzaak hiervoor kan zijn een groot verschil in de verhouding $\frac{L}{h_o}$ tussen de situaties "-25 m" en "-35 m" enerzijds en "-13,5 m" anderzijds (respectievelijk 4 en 3 tegen 13,5). De turbulentie-intensiteit bij de rand van de bodemverdediging kan hierdoor bij de grotere aanlegdiepten aanmerkelijk groter zijn, met als gevolg een steilere aanzethelling.
- M 1321 (caissons Oosterschelde, WL 8-31). In figuur 4 zijn 3 onderzochte situaties weergegeven. De eerste is over zeer grote afstand bestort, beide laatste slechts in het gebied van de aanzethelling. De oorspronkelijke aanzethelling is cotg β = 2,9 (proef T6). Uit de figuren 6 en 7 blijkt dat een korte bestorting in een vroeg stadium vrij ongunstig kan zijn, terwijl een latere en langere bestorting gunstig is voor de aanzethelling. Het aantal proeven is echter te beperkt om daaruit harde conclusies te kunnen trekken.
- R 460 (proeven stroomgoot Lith, WL8-45). In de stroomgoot werd onderzoek verricht naar de invloed op de aanzethelling van de ontgrondingskuil van een niet zanddichte verlenging van de bodemverdediging, aangebracht voordat de ontgrondingen tot ontwikkeling komen. Figuur 8 geeft de uitgangssituatie (referentie) met een ontgronding van ca. 1 m na 5½ uur en een aanzethelling van 1:4½ (de randbalk werd iets ondermijnd). De figuren 9 en 10 geven een situatie met 4 m bestorting met stortsteen 10/60 kg. Na de proef is de bestorting gezakt en de aanzethelling is wederom circa 1:4. De bestorting zelf ligt echter horizontaal en is kennelijk niet zanddicht, zodat niet gesproken kan worden van het bestorten van een aanzethelling. De figuren 11 en 12 geven de situatie met afnemende bestorting (respektievelijk stortsteen 10/60 kg

en fosforslakken). Nu is wel degelijk een gunstige invloed op de aanzethelling te herkennen door de geleidelijke overgang van verdedigde naar onverdedigde bodem.

- M 1435 (niet-zanddichte blokkenmat). Het resultaat van de proeven in Lith leidde tot het concept van een blokkenmat met geleidelijk afnemende zanddichtheid. In figuur 13 zijn de resultaten samengevat. Het beste voldeden blokkenmatten met toenemend openingspercentage p over een lengte van 6 maal de waterdiepte (h_o). Tevens werd geconstateerd dat de aanzethelling redelijk stabiel werd als $h_{max} > 0,4\ h_o$.

3.2 Conclusie

Uit deze onderzoeken kan worden geconcludeerd dat:

- een geleidelijk afnemende zanddichtheid (van een horizontaal liggende bestorting of mat) een duidelijk gunstige invloed heeft op de aanzethelling, althans in het begin van het ontgrondingsproces. Vraagpunt blijft of op (zeer) lange termijn deze invloed nog merkbaar zal zijn.
- over het bestorten van een aanzethelling geen duidelijke uitkomst wordt verkregen.

4. Het modelonderzoek

4.1 Opzet van het onderzoek

Het doel van het onderzoek is, zoals beschreven in hoofdstuk 1.2, het bepalen van de invloed van bestortingen op de ontwikkeling van ontgrondingskuilen.
De keuzemogelijkheden die hierbij ontstaan zijn:

1. een éénmalige bestorting van een ondiepe kuil
2. het meerdere malen bestorten van een ondiepe kuil
3. het meerdere malen bestorten tijdens het ontgrondingsproces van diepe kuilen.

Deze mogelijkheden leveren een vrij groot aantal mogelijk te onderzoeken combinaties van taludhellingen op. Bij de opzet van het onderzoek is gekozen voor het onderzoeken van een aantal in de praktijk waarschijnlijk voorkomende combinaties, terwijl door onderlinge vergelijking van de proefresultaten getracht zou worden meer algemeen geldende regels af te leiden.
Aangezien het onderzoek twee-dimensionaal uitgevoerd zou worden, kon gebruik gemaakt worden van een stroomgoot met rondpompcircuit. De meest geschikte goot hiervoor was de Tussenpadgoot, met afmetingen 30x0,8x1,0 m^3 (lxbxh).
De hoogte van deze goot was groot genoeg om een modelopstelling te kunnen maken met voldoende hoogte, terwijl door het rondpompcircuit gebruik gemaakt kon worden van leidingwater. Doordat een zijwand van de goot uit glas bestaat was het ontgrondingsproces visueel goed te volgen.
Figuur 14 toont een overzicht van de Tussenpadgoot.

4.2 Schaalkeuze

Als uitgangspunt werd gekozen het zo hoog mogelijk opvoeren van de waarnemingsnauwkeurigheid, hetgeen resulteerde in het gebruikmaken van de maximaal beschikbare hoogte in de Tussenpadgoot. De weer te geven waterdiepte bedraagt ca. 30 m, terwijl een ontgrondingsdiepte van $2xh_o$ = 60 m werd vereist. Gecombineerd met de beschikbare waterdiepte van 1 m levert dit een lengte-(en hoogte-)schaal op van 1:100.
De snelheidsschaal kan min of meer onafhankelijk gekozen worden van de lengteschaal . Als enige beperkende voorwaarde geldt dat het stroombeeld zich niet mag wijzigen ten opzichte van de snelheidsschaal volgens Froude n_v = 10.

Voor het goed weergeven van het ontgrondingsproces is het noodzakelijk te stromen met een stroomsnelheid $u > u_{kr}$, waarbij het uit praktisch oogpunt wenselijk is de maximale ontgronding te bereiken binnen 1 dag. Als ontgrondingsmateriaal is gekozen polystyreen (D_{50} = 1280 µm, Δ = 0,058) met een kritieke snelheid van ongeveer 0,1 m/s.

4.3 Modelopstelling

De bodem van de goot is over een afstand van enige meters met 0,6 m verhoogd, waardoor een ontgrondingsbak met een diepte van 0,6 m (2 h_o) ontstaat. Benedenstrooms is deze ontgrondingsbak begrensd door een schot. De lengte van de ontgrondingsbak van 6 m (20 h_o) is zodanig gekozen, dat deze lengte iets groter is dan de lengte van de verwachtte ontgrondingskuil. Dit minimaliseren van de lengte van de ontgrondingsbak is gewenst in verband met het onderstaand beschreven transportsysteem voor polystyreen. Om een grote ontgrondingssnelheid en een steile aanzethelling te verkrijgen is op de verhoogde bodem van de goot op een afstand van 10 h_o een vertikale vernauwing aangebracht van 50%, waardoor de faktor α vrij groot zal worden (zie ook [1]). Tussen deze drempel en het ontgrondingsbed is bodemruwheid aangebracht in de vorm van een laag split ($D_n = 4{,}5 \times 10^{-3}$m). Het uit de ontgrondingsbak getransporteerde polystyreen werd achter de waterstandsregelende klep opgevangen in een met gaas bespannen bak, en voor zover nodig tijdens de proeven in een buiten de Tussenpadgoot liggende bak opgeslagen. Het bestorten van polystyreen bleek niet mogelijk. Gekozen is daarom voor een systeem, waarbij het bestorten van de aanzethelling werd gesimuleerd door een stijve plaat met daarop vast aangebrachte ruwheid (split $D_n = 4{,}5 \times 10^{-3}$m). Deze bestorting werd aangebracht voor elke proef, waarna het profiel van het polystyreenbed steeds over de hele lengte van de ontgrondingskuil werd gevlakt op dezelfde hoogte als de oorspronkelijke bodemverdediging. De lengte van de bestorting bedroeg steeds 1 x h_o of een veelvoud hiervan.
Figuur 15 geeft een overzicht van de proefopstelling en de onderzochte bestortingen.

Een aantal beperkingen zijn noodzakelijkerwijs in het onderzoek ingebouwd. Achtereenvolgens kunnen worden genoemd:

1. Het onderzoek is twee-dimensionaal; in gebieden waar in het prototype wervelstraten voorkomen, kunnen processen een rol spelen die in dit onderzoek buiten beschouwing blijven.

2. De bestortingen zijn stijf, zodat systematisch een geringe ondergraving van de rand optreedt, terwijl in werkelijkheid de bestorting uit losse stenen bestaat waarbij ondergraving niet kan optreden.
3. De bestorting is dicht en laat dus geen zand (model: polystyreen) door. In het prototype is de dikte en samenstelling van de bestorting maatgevend voor de zanddichtheid.
4. De gekozen geometrie is zodanig, dat de turbulentie-intensiteit ter plaatse van de rand van de bodembescherming geen grote veranderingen meer ondergaat ($\frac{L}{h_o} = 10$).

De stabiliteit van de bestorting op de aanzethelling is door de opzet van het onderzoek niet door middel van de uitgevoerde proeven te bepalen.
In hoofdstuk 5.4 wordt rekenenderwijs nader op deze stabiliteit ingegaan.

4.4 Meetmethoden en verwerking van de metingen

De stroomsnelheid werd bepaald uit het debiet en het doorstroomoppervlak direct bovenstrooms van de ontgrondingskuil. Het debiet werd gemeten met behulp van een cirkelstuw, terwijl de waterdiepte werd bepaald uit een meting van de waterstandshoogte met behulp van een pitotbuis. De ontgrondingskuil werd bemeten met een profielvolger, waarbij steeds volgens een bepaald schema diskrete punten werden gepeild.
De verkregen gegevens werden verwerkt tot gemiddelde stroomsnelheden en ontgrondingsprofielen. Met deze gegevens konden daarna tijd-ontgrondingslijnen worden vastgesteld, waarden van α worden bepaald en aanzethellingen worden berekend. Als definitie van de aanzethelling is aangehouden de taludhelling tussen de punten $x_1 = 0{,}033\ h_o$ en $x_2 = 0{,}5\ h_o$. De afstand van x_1 tot de rand van de bodemverdediging was de in het model minimaal mogelijke (1 cm).

4.5 Proevenprogramma

Tabel 1 geeft een overzicht van de uitgevoerde proeven.
Proef T0 is de referentieproef zonder bestorting.
T1 en T2 simuleren een éénmalige bestorting, T3 en T6 een meervoudige bestorting van een ondiepe ontgrondingskuil.
T4 en T5 simuleren een meervoudige bestorting van een diepe kuil.

5. Resultaten

5.1 Resultaten van de proeven

5.1.1 Tijd-ontgrondingsverloop

De gemeten tijd-ontgrondingslijnen zijn gegeven in de figuren 16...18. De referentieproef T0 is driemaal uitgevoerd om een betrouwbare vergelijking mogelijk te maken. Vooral in het begin van de proef verloopt het ontgrondingsproces dermate snel, dat een goede meting van het kuilprofiel nauwelijks mogelijk is. Om deze reden is T0.3 uitgevoerd met een aanmerkelijk lagere stroomsnelheid. Het ontgrondingsverloop van deze proef wijkt af van de proeven T0.1 en T0.2, omdat door de lagere stroomsnelheid de tijd-ontgrondingslijn eerder afbuigt naar een evenwichtsdiepte. De gemeten tijd-ontgrondingslijnen van de proeven T0.1 ... T0.3 zijn met behulp van de bekende ontgrondingsformules omgerekend naar een stroomsnelheid van 0,318 m/s (figuur 16) (zie ook [1]).
De stroomsnelheid van 0,32 m/s is de bij alle proeven (met uitzondering van T0.3) gewenste stroomsnelheid. De grootte ervan is gekozen in verband met de tijdsduur van de proeven.
In figuur 17 is het ontgrondingsverloop uitgezet van de proeven T2, T3 en T6, waarbij het in T0 gevonden verloop als referentie is weergegeven.
In figuur 18 is hetzelfde gedaan voor de proeven T1, T4 en T5.

5.1.2 Kuilprofielen en aanzethellingen

De gevonden kuilprofielen en aanzethellingen zijn gegeven in de figuren 19...25. De kuilprofielen van proef T0 zijn samengesteld uit de proeven T0.1...T0.3.
De aanzethellingen zijn bepaald uit de relatie $\operatorname{cotg}\,\beta = \frac{x_2 - x_1}{h_{x_2} - h_{x_1}}$ waarbij $x_2 = 0{,}5\ h_o$ en $x_1 = 0{,}033\ h_o$. De in de figuren 20...25 gegeven aanzethellingen van proef T0 worden in hoofdstuk 5.2 nader verklaard.

5.2 Analyse van de resultaten

5.2.1 Invloed van de bestorting op de tijd-ontgrondingslijnen (h_{max}-t)

Uit de figuren 17 en 18 blijkt dat de invloed van de bestortingen op de ontgrondingssnelheid niet aantoonbaar aanwezig is. Wellicht wordt bij grotere ontgrondingsdiepte ($h_{max} > h_o$) het ontgrondingsproces iets geremd, maar de gevonden verschillen zijn niet zo groot dat dit met zekerheid gesteld kan worden (vergelijk ook T0.3, figuur 16).De gevonden waarden van α(tabel 1) geven dan ook slechts een geringe spreiding te zien.

5.2.2 Invloed van de bestorting op de aanzethelling

Om de invloed van de bestortingen op de aanzethelling te kunnen bepalen, is het noodzakelijk eerst te bepalen welke hellingen met elkaar vergeleken worden.
Er zijn twee principieel verschillende methoden:

1. Van alle proeven worden de hellingen die ontstaan direkt achter de bestorting vergeleken met de aanzethelling van proef T0.
2. Van alle proeven worden de hellingen die ontstaan direkt achter de bestorting vergeleken met de helling die gevonden is bij proef T0 op dezelfde diepte.

Figuur 26 verduidelijkt een en ander. Gekozen is voor de tweede methode. De overwegingen die tot deze keuze geleid hebben zijn principieel: de processen die de helling van het bovenstroomse kuilprofiel bepalen zijn niet bekend, in hoeverre het aanbrengen van een bestorting deze processen beïnvloedt is daarom niet te bepalen. Op grond van deze overwegingen is het beter geometrisch zo veel mogelijk dezelfde plaatsen met elkaar te vergelijken, dan verschillende plaatsen waar verschillende processen een rol kunnen spelen.
In de figuren 19 ... 25 zijn de gevonden aanzethellingen van de betreffende proef vergeleken met hellingen van proef T0 op dezelfde diepte, volgens de bovengenoemde tweede methode (β^1).
Uit de gevonden resultaten blijkt, dat de aanzethelling bij de bestortingen ongeveer gelijk zijn aan de hellingen op dezelfde diepte bij proef T0.
Hierdoor is het mogelijk om, uitgaande van een gegeven ontgrondingsverloop zonder bestortingen, het ontgrondingsverloop met één of meerdere bestortingen te voorspellen. Een beperking van de geldigheid van deze methode is dat de afstand van de aangebrachte profielvernauwing tot de rand van de bodembescherming tenminste 10 h_o moet bedragen, hetgeen bij de stormvloedkering van de Oosterschelde het geval is.

5.3 Interpretatie van de resultaten

In het voorgaande hoofdstuk is aangegeven met welke methoden aanzethellingen na het uitvoeren van bestortingen te bepalen zijn, indien het kuilprofiel, voordat de bestortingen zijn uitgevoerd, bekend is.
Kort samengevat moet hierbij rekening gehouden worden met de volgende voorwaarden:

1. Het tijd-ontgrondingsverloop wordt door de bestortingen niet beïnvloed.
2. De aanzethellingen die ontstaan direct achter de bestorting zijn gelijk aan de hellingen zonder bestorting op dezelfde diepte (figuur 26).
3. De beperkingen vermeld in hoofdstuk 4.3.

De vraag die rest is hoe deze kennis praktisch kan worden gebruikt, ofwel, op welke plaats moet op welk tijdstip worden bestort.
Aan de hand van de bestortingscriteria (notitie 22RABO-M-81004,paragraaf 1.2) wordt hiervan een voorbeeld uitgewerkt.
In figuur 27 is het tijd-ontgrondingsverloop uitgezet voor een drietal plaatsen, zoals gemeten en berekend tijdens het onderzoek in het detailmodel van de stroomgeulen van de Oosterschelde, (M1737) bouwfase S2. De plaatsen zijn min of meer willekeurig gekozen, maar tonen wel aan dat de uitkomsten per plaats aanzienlijk kunnen verschillen. De aanzethellingen van de ontgrondingskuilen van de drie beschouwde raaien zijn steiler dan 1:4.
Vervolgens zijn de volgende aannamen gedaan:

- de bodem is niet gevoelig voor zettingsvloeiingen, zodat alleen het gevaar voor afschuivingen bedwongen moet worden
- de bestortingslengte bedraagt 30 m
- de ontgrondingskuilen van de betrokken raaien zijn gelijk van vorm en gelijk aan de ontgrondingskuil van TO.

Volgens de eerder vermelde bestortingscriteria moet in deze situatie een bestorting worden uitgevoerd,indien een helling van 1:4 over een diepte van 5 m optreedt. Uit de ontwikkeling van de kuilvorm is af te leiden dat dit het geval is bij het bereiken van ongrondingsdiepten van ongeveer 6, 17,5 en 25 m. In figuur 27 zijn deze ontgrondingsdiepten aangegeven. Het blijkt dan dat de eerste bestorting moet worden uitgevoerd na 130 dagen (raai P801 en raai P797), terwijl in de Schaar (Raai P665) na 300 dagen bestort moet worden. De tweede bestorting in de Hammen moet plaats vinden na 900 dagen, terwijl op de andere twee plaatsen het tijd-ontgrondingsverloop niet meer bekend is.

De derde bestorting in de Hammen moet plaatsvinden (uitgaande van een enigszins geëxtrapoleerd tijd-ontgrondingsverloop) na 1800 dagen.
Figuur 28 geeft schematisch aan hoe voor het prototype bepaald kan worden waar en wanneer bestort moet worden.

5.4 Stabiliteit van de bestortingen op de aanzethelling

De stabiliteit van de stortsteen wordt enerzijds ongunstig beïnvloed door de component van de zwaartekracht in stroomrichting, anderzijds gunstig beïnvloed door relatief lage bodemsnelheden.

a. voor de invloed van de langshelling β geldt de volgende reductie voor u_{cr}: (zie [2])

$$\left\{\frac{\sin(\phi-\beta)}{\sin\phi}\right\}^{\frac{1}{2}} = 0{,}63$$

met

ϕ = hoek natuurlijk talud (zeg 30^{o})

β = langshelling (zeg cotg β = 3 op moment van bestorten).

b. metingen en berekeningen tonen aan dat de bodemsnelheden langs de aanzethelling, praktisch tot aan het diepste punt van de kuil, klein zijn. Over het algemeen is zelfs een bodemneer aanwezig,waardoor een kleine retourstroom bij de bodem aanwezig is.

Fosforslakken (met D_{50} = 20 mm) zullen stabiel zijn als over de onderste 2 m van de snelheidsvertikaal de gemiddelde snelheid kleiner is dan 1,3 m/s (op helling 1:3). Voor stortsteen 10/60 kg (met D_{50} = 200 mm) geldt 2,4 m/s. Gezien de hierboven geschetste snelheidsvertikaal, is de verwachting dat de bestorting bij de stormvloedkering stabiel zal zijn op de aanzethelling. Het meest kritieke punt zal zijn de aansluiting met de bestaande bodembescherming; daar is de bodem horizontaal en de snelheidsvertikaal onvervormd. Op een waterdiepte van 20 m zullen fosforslakken en stortsteen 10/60 kg stabiel zijn bij een gemiddelde snelheid kleiner dan respectievelijk 2,7 m/s en 5,5 m/s bij een lage turbulente intensiteit, en 1,9 m/s en 3,8 m/s bij een hoge turbulentie-intensiteit.

REFERENTIES

1 Waterloopkundig Laboratorium
Ontgrondingen
M1001 Nota II juni 1981

2 Waterloopkundig Laboratorium
Begin van beweging van bodemmateriaal
verslag S 159-I , december 1971

3 Waterloopkundig Laboratorium
Systematisch onderzoek ontgrondingen Haringvlietsluizen
verslag M 715 , februari 1966

4 Waterloopkundig Laboratorium
Stormvloedkering Oosterschelde
Tweedimensionaal ontgrondingsonderzoek WL8-31
verslag M1321, oktober 1975

5 Waterloopkundig Laboratorium
Stormvloedkering Oosterschelde.
Vormgeving en constructie van de sluitgaten . Invloed van de geleidelijk in hoeveelheid afnemende bestorting benedenstrooms van een bodemverdediging op de vorming van een ontgrondingskuil. WL 8-45
verslag R 460, april 1976

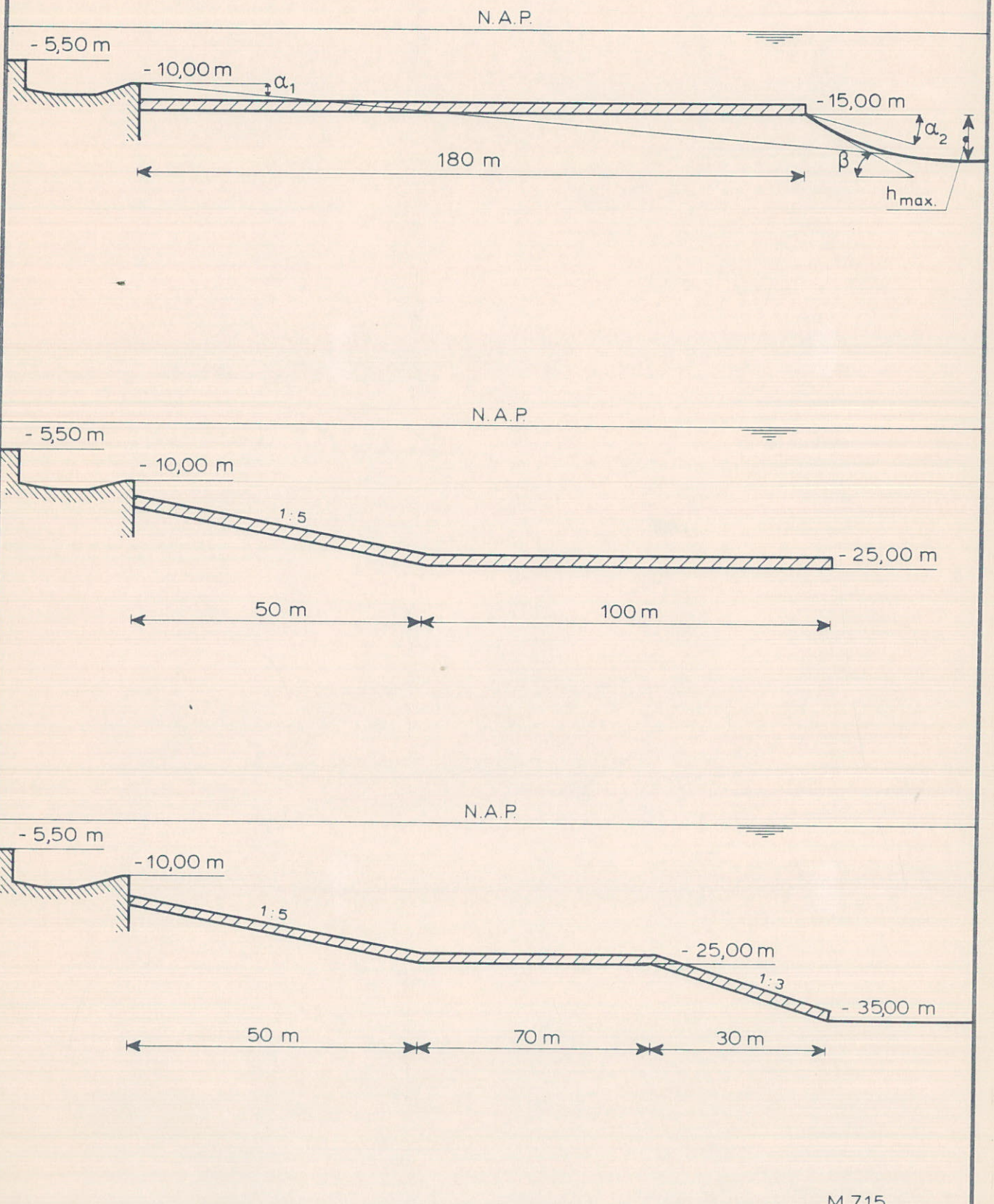
6 Waterloopkundig Laboratorium
Stormvloedkering Oosterschelde
Invloed van een niet-zanddichte blokkenmat op de aanzethelling van een ontgrondingskuil
verslag M1435, juni 1978

7 Waterloopkundig Laboratorium
Stormvloedkering Oosterschelde
Detailmodel stroomgeulen; bouwfase S2 in de Schaar en Hammen
verslag M 1737-II, december 1981

Proef nummer	bestorting helling			$\bar{u} = \frac{Q}{A}$ m/s	t_1 uren	α	evenwichts aanzethelling cotg β	t_1 bij $\bar{u}$ = 0,32 m/s
	L_1	L_2	L_3					
TO.1	-	-	-	0,318	0,4	3,06		0,391
TO.2	-	-	-	0,317	0,4	3,07	2,4	0,385
TO.3	-	-	-	0,238	1,7	3,03		0,410
T1	1:4	-	-	0,308	0,4	3,16	2,6	0,336
T2	1:7	-	-	0,327	0,4	2,98	2,6	0,443
T3	1:4	1:7	-	0,323	0,4	3,02	2,7	0,416
T4	1:4	1:4	-	0,304	0,4	3,21	2,6	0,312
T5	1:4	1:4	1:4	0,317	0,4	3,07	3,3	0,385
T6	1:4	1:7	-1:7	0,311	0,4	3,13	2,6	0,351

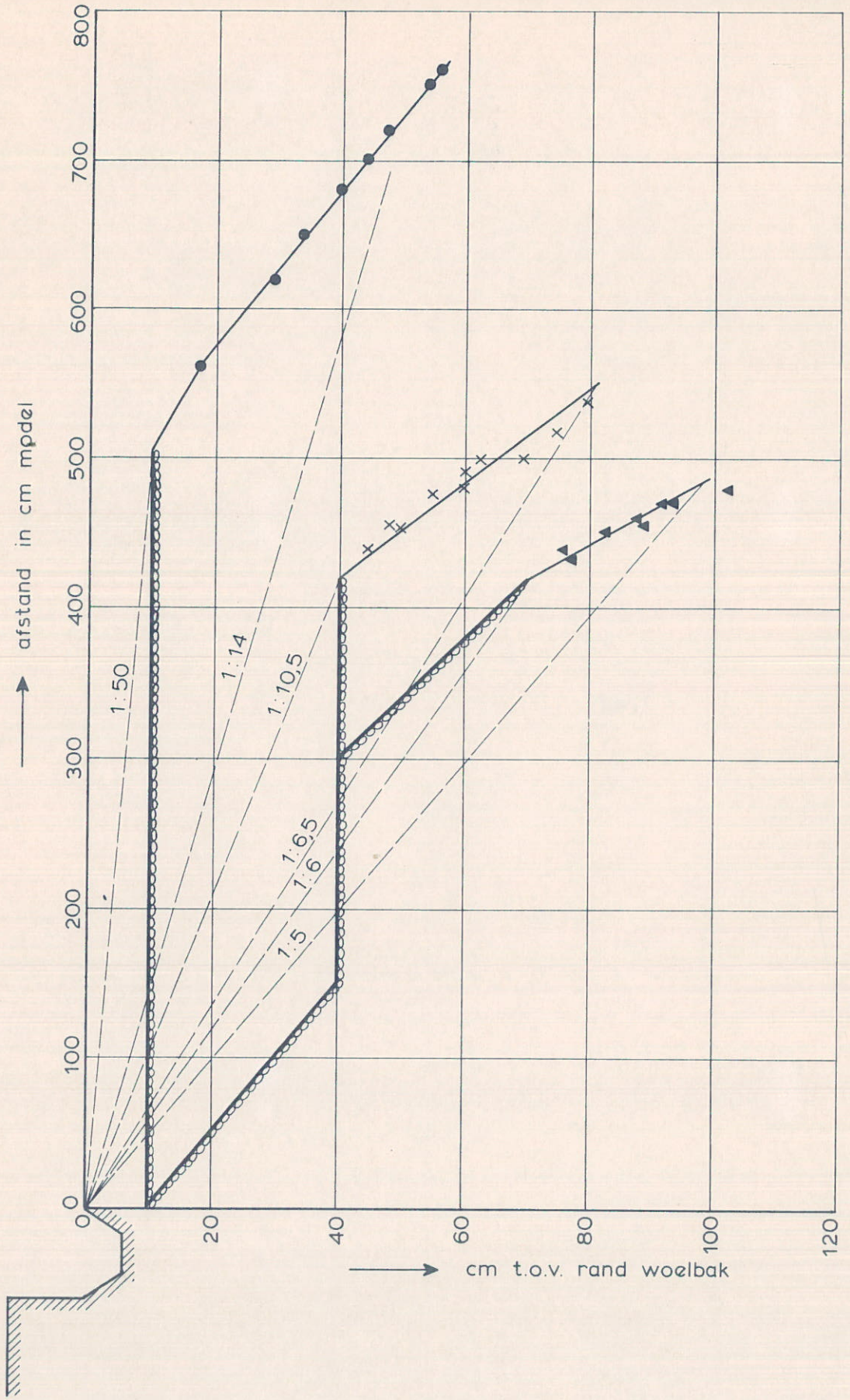
$L_1 = L_2 = L_3 = 30$ m

Tabel 1 Overzicht uitgevoerde proeven



M 715

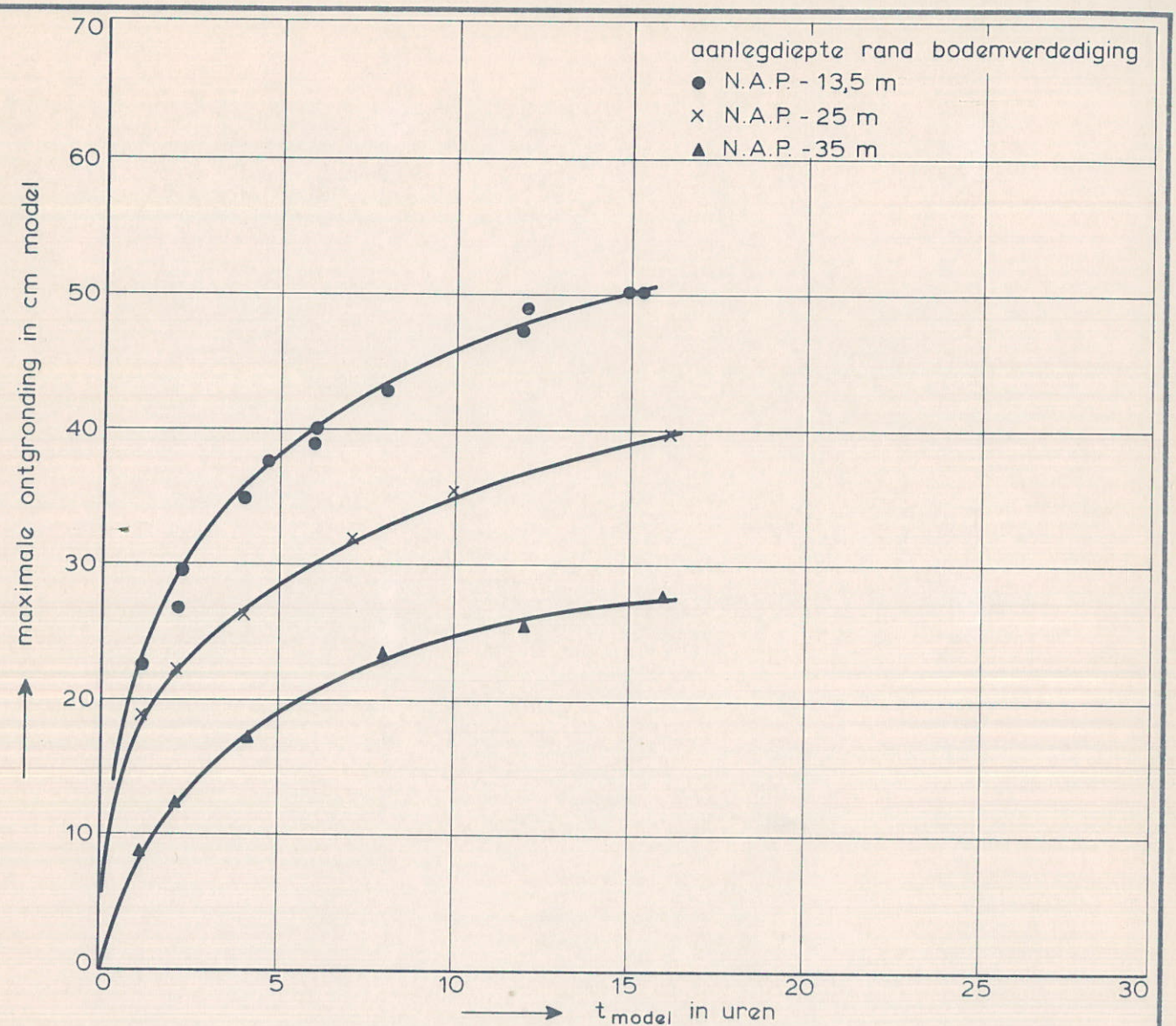
MOGELIJKE VERDEDIGINGSVORMEN		
	SCHAAL 1 : 1000	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1774	FIG. 1

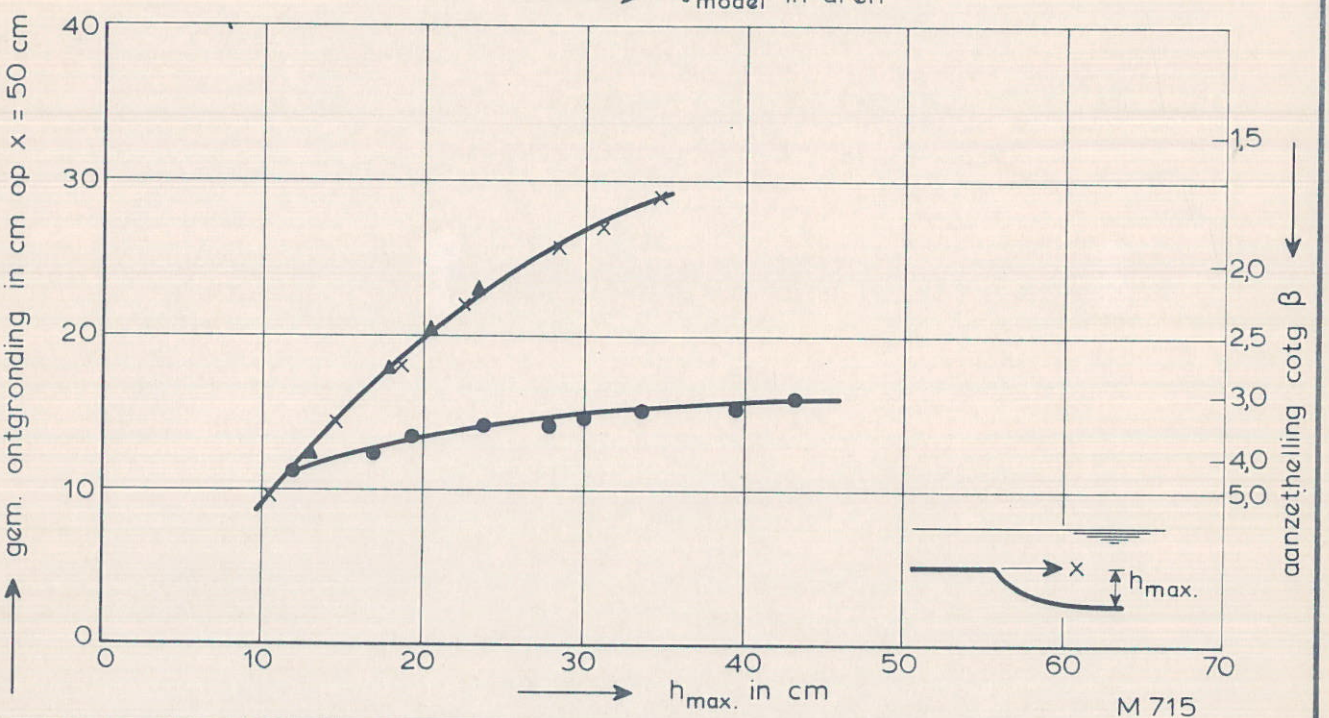


M 715

HELLING VERBINDINGSLIJN CONSTRUCTIE - DIEPSTE PUNT

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM | M 1774 | FIG. 2

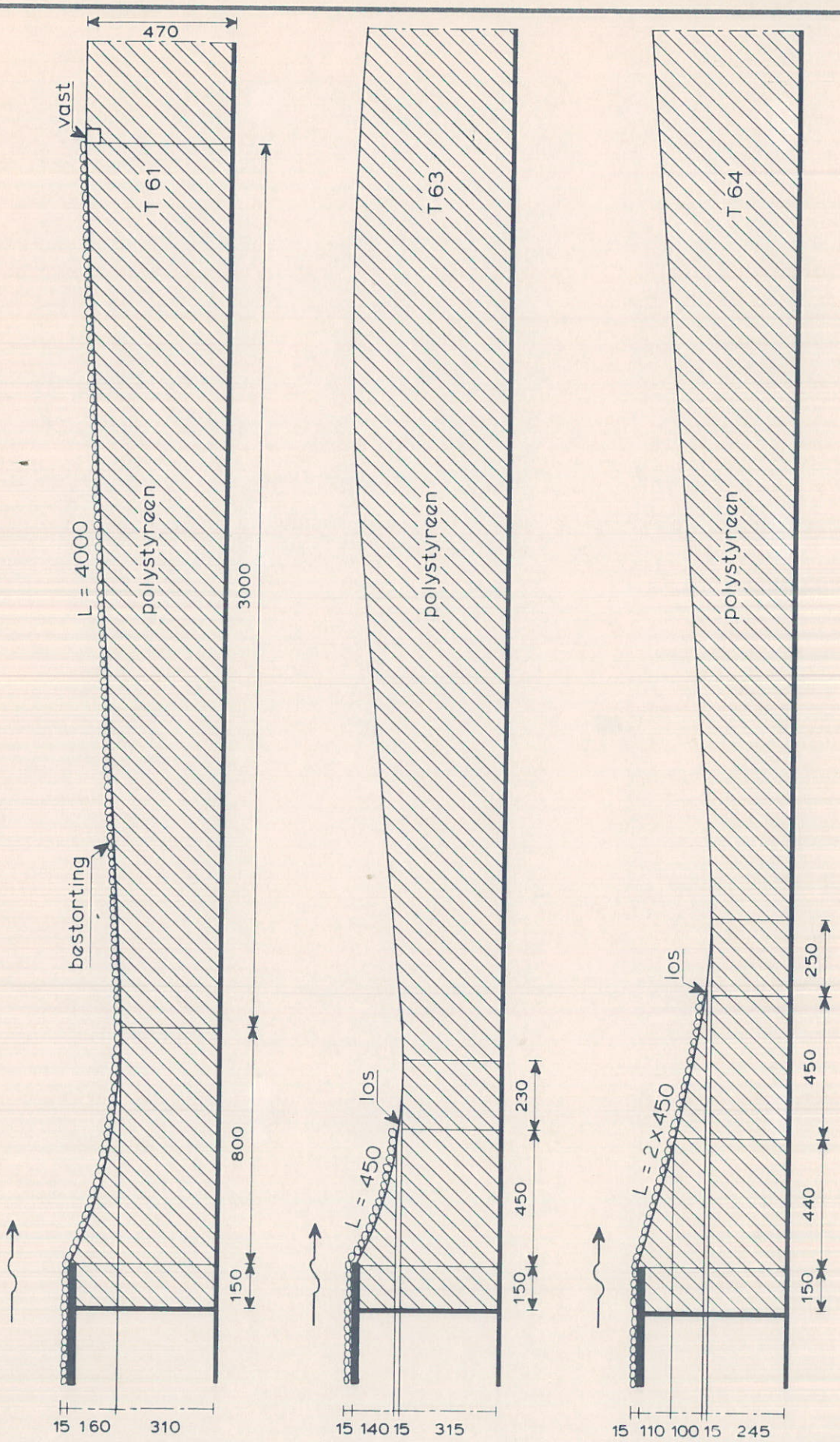




M 715

ONTGRONDINGSDIEPTE EN AANZETHELLING BIJ AANLEGDIEPTE RAND BODEMVERDEDIGING N.A.P. - 35 m N.A.P. - 25 m EN N.A.P. - 13,5 m

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM | M 1774 | FIG. 3

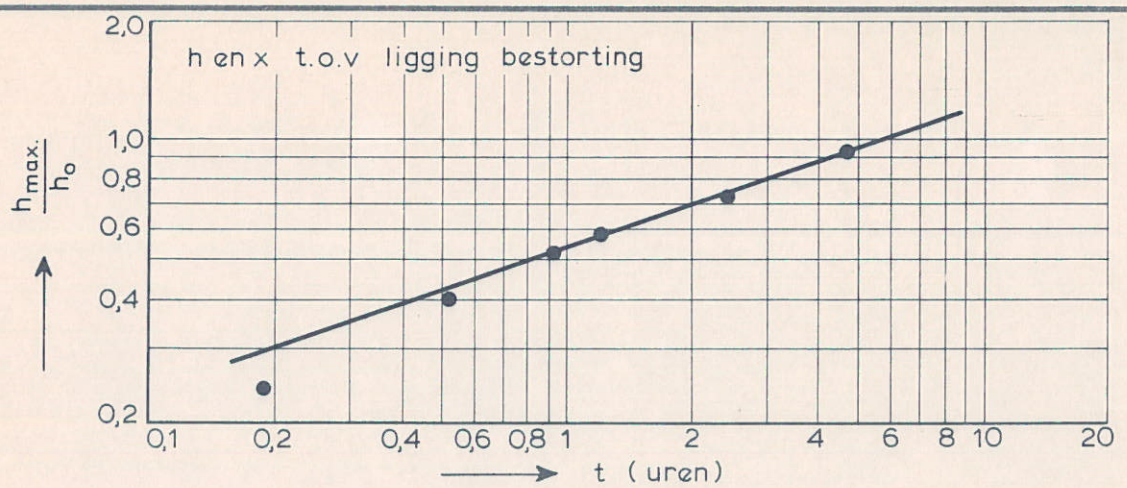


modelmaten in mm

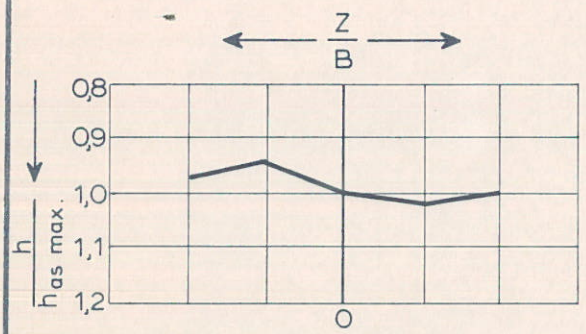
M 1321 - 1012

PROEFOPSTELLING T61, T63 EN T64
VERLENGD STORTEBED TOT IN DE KUIL

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM | M 1774 | FIG. 4

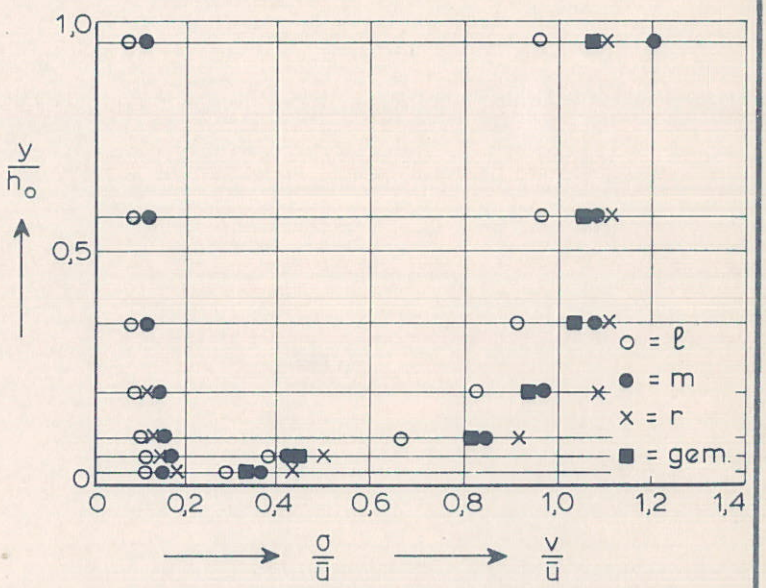


TIJD - ONTGRONDINGSLIJN

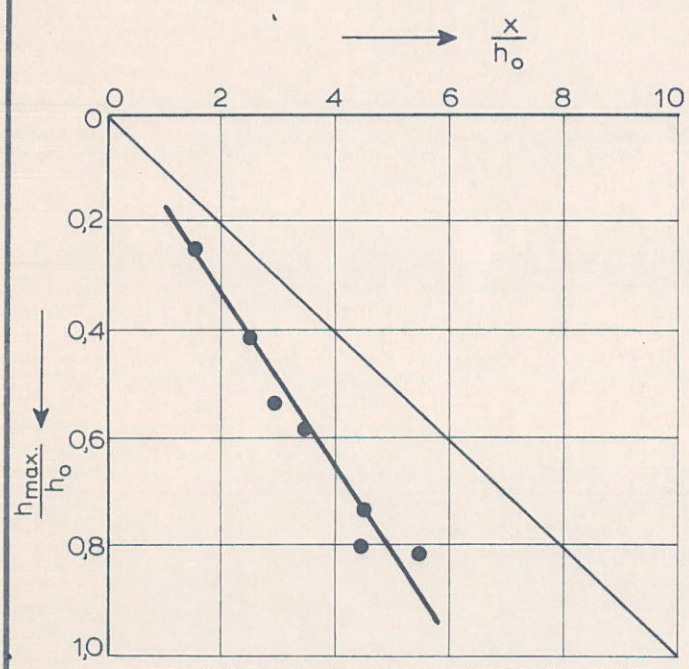


DWARSPROFIEL DIEPSTE PUNT
BIJ EINDE PROEF

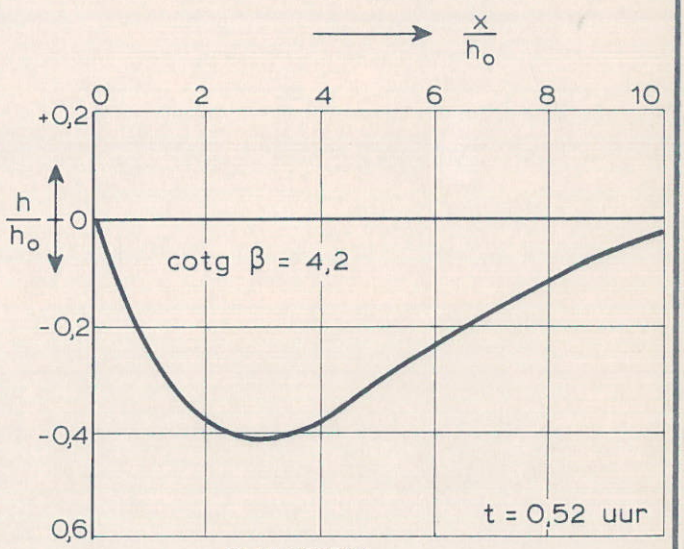
$h_{as\ max.} = 38$ cm



VERTIKALE SNELHEIDSVERDELING EINDE
VERDEDIGING



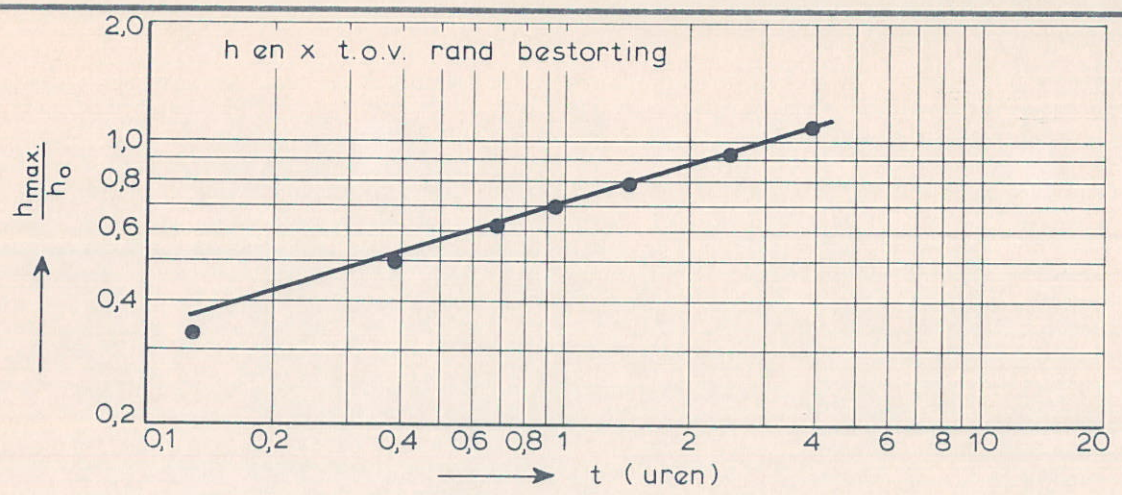
VERLOOP VAN HET DIEPSTE PUNT



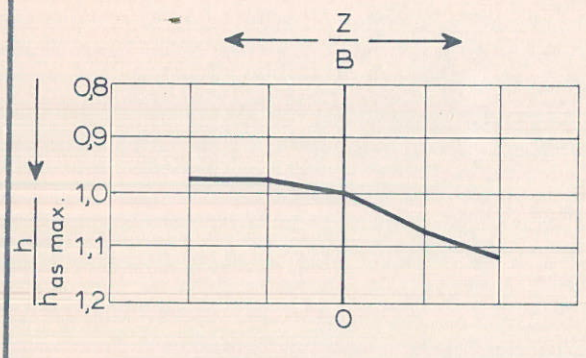
KUILVORM

M 1321 - 1073

OVERZICHT VAN MEETRESULTATEN ONTGRONDINGSPROEF	T 61	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1774	FIG. 5

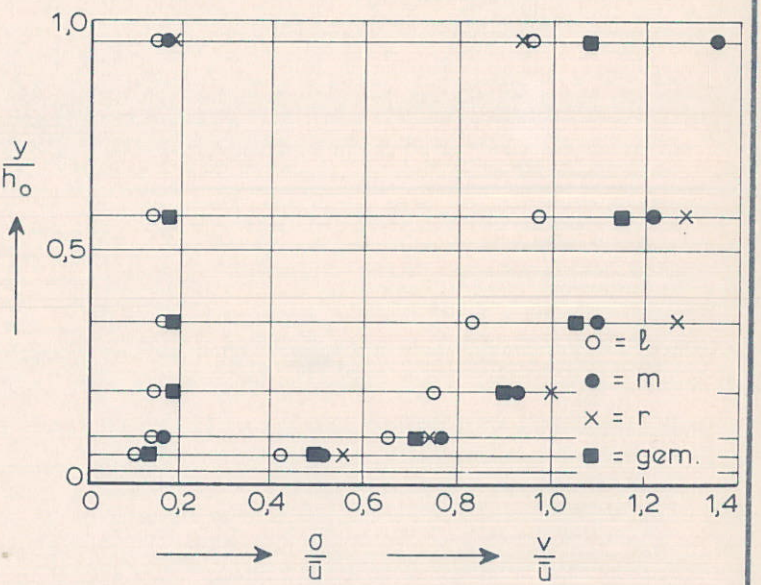


TIJD - ONTGRONDINGSLIJN

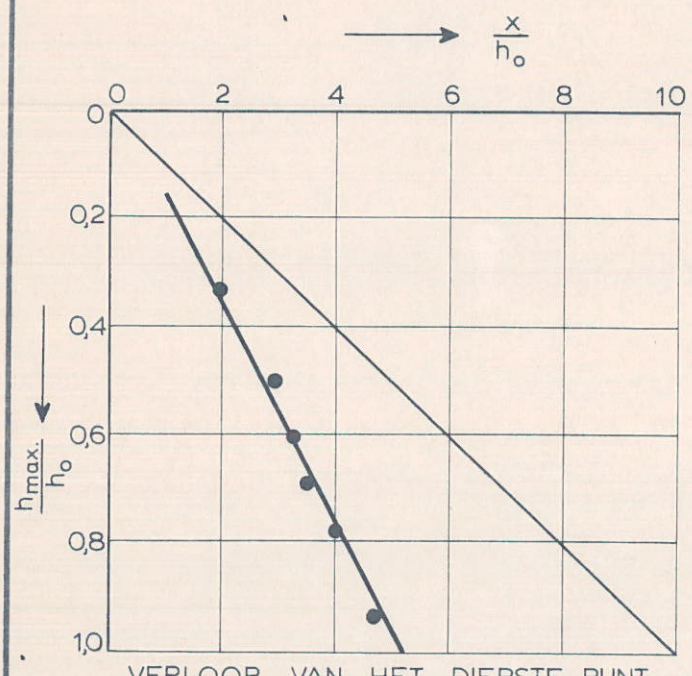


DWARSPROFIEL DIEPSTE PUNT BIJ EINDE PROEF

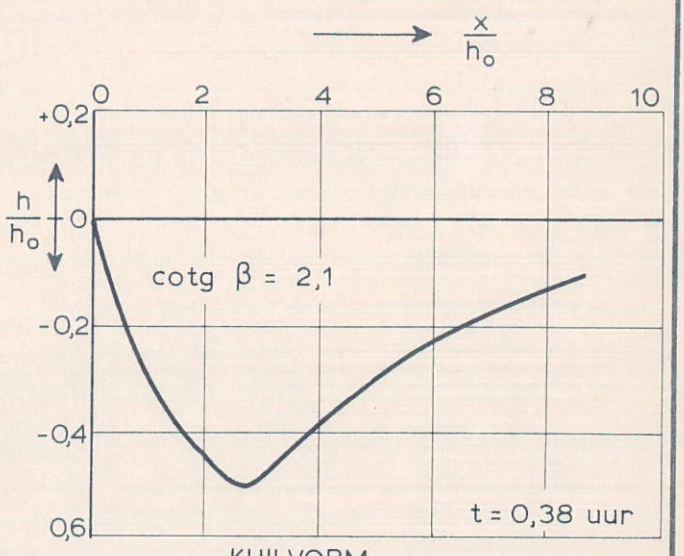
$h_{as\ max.} = 42$ cm



VERTIKALE SNELHEIDSVERDELING EINDE VERDEDIGING



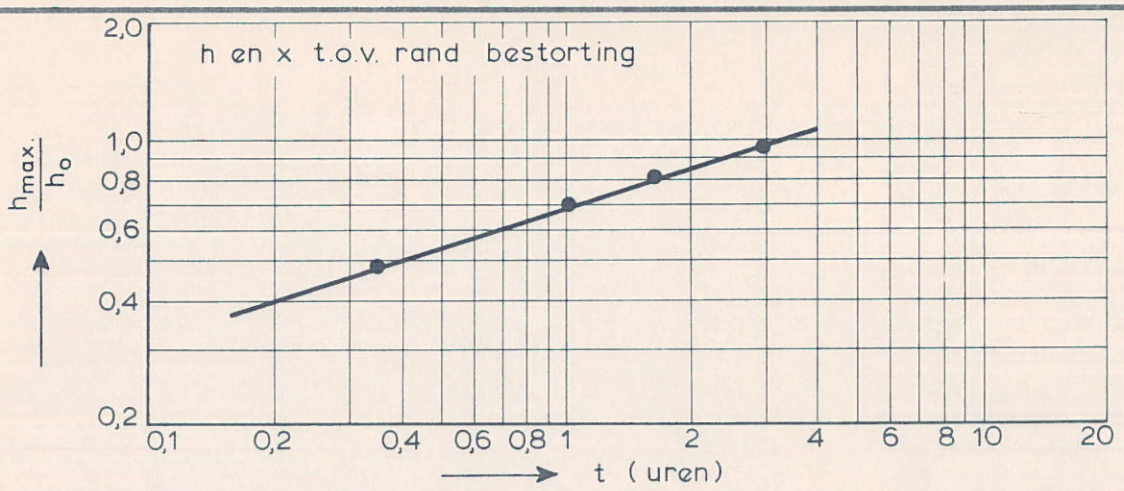
VERLOOP VAN HET DIEPSTE PUNT



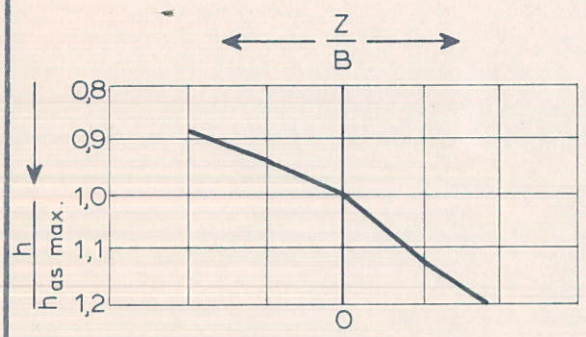
KUILVORM

M 1321 - 1075

OVERZICHT VAN MEETRESULTATEN ONTGRONDINGSPROEF	T 63	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1774	FIG. 6

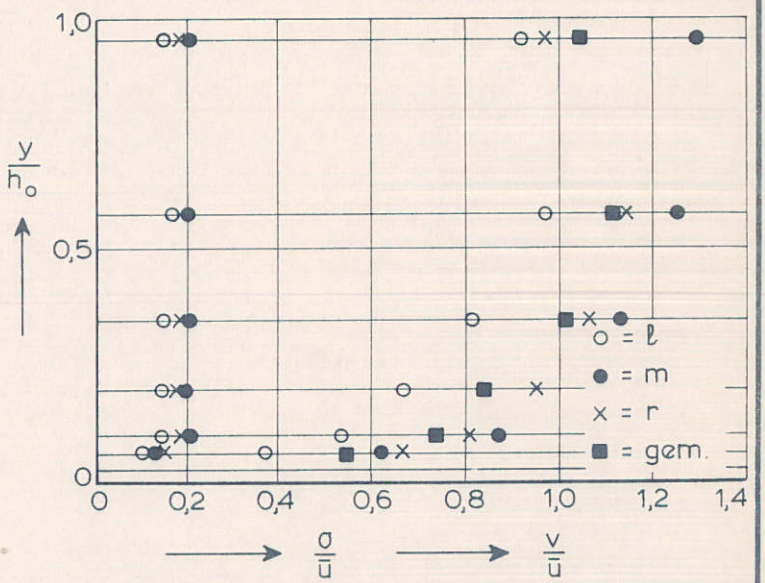


TIJD - ONTGRONDINGSLIJN

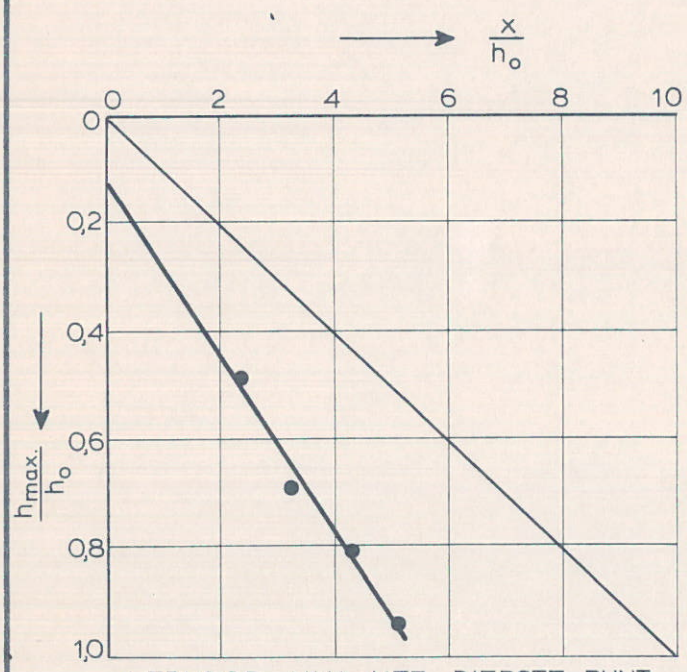


DWARSPROFIEL DIEPSTE PUNT BIJ EINDE PROEF

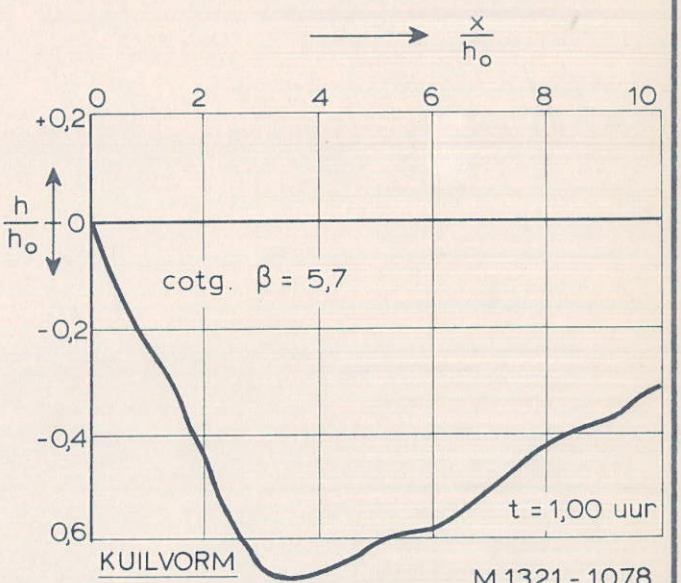
$h_{as\ max.} = 36$ cm



VERTIKALE SNELHEIDSVERDELING EINDE VERDEDIGING



VERLOOP VAN HET DIEPSTE PUNT



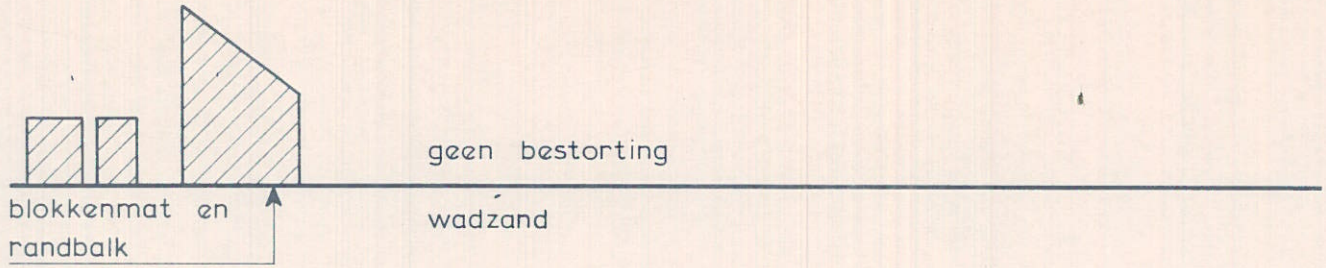
KUILVORM

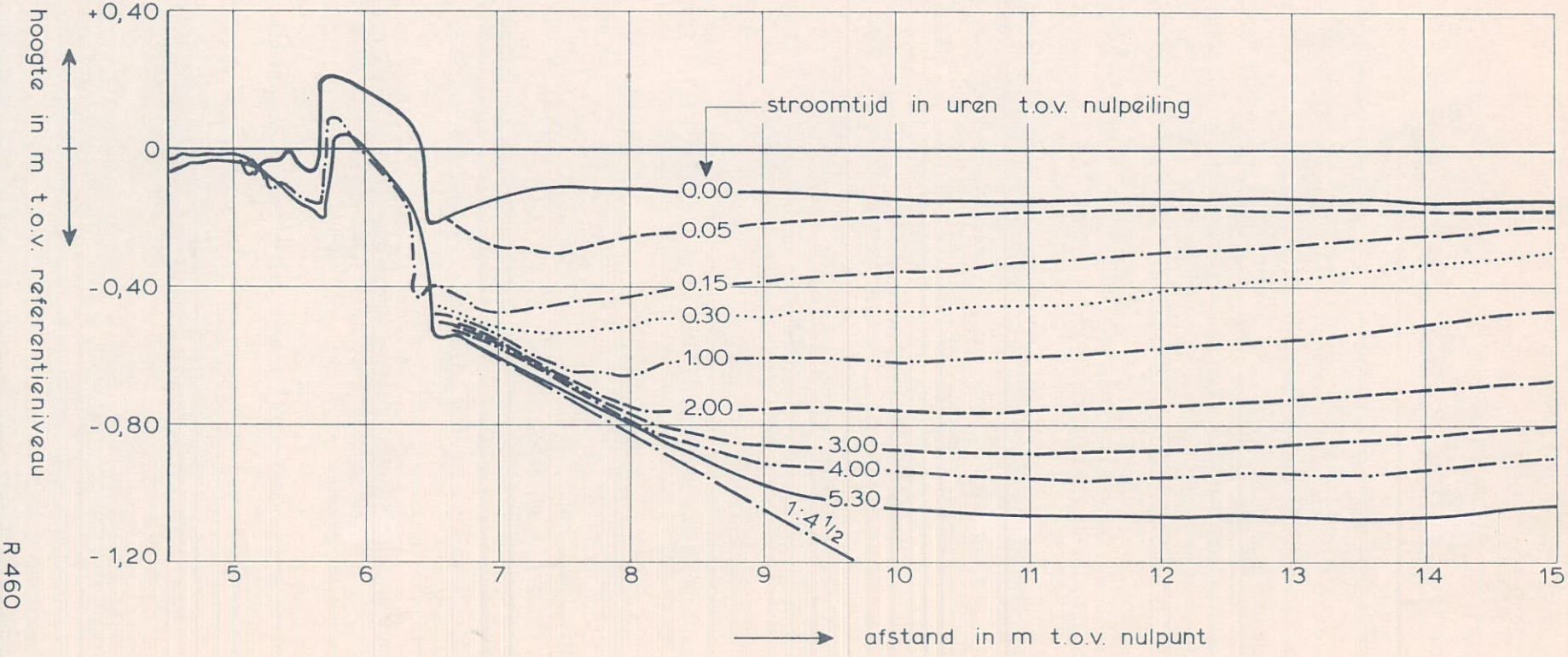
M 1321 - 1078

OVERZICHT VAN MEETRESULTATEN ONTGRONDINGSPROEF	T 64	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1774	FIG. 7

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

ONTGRONDINGSKUILEN





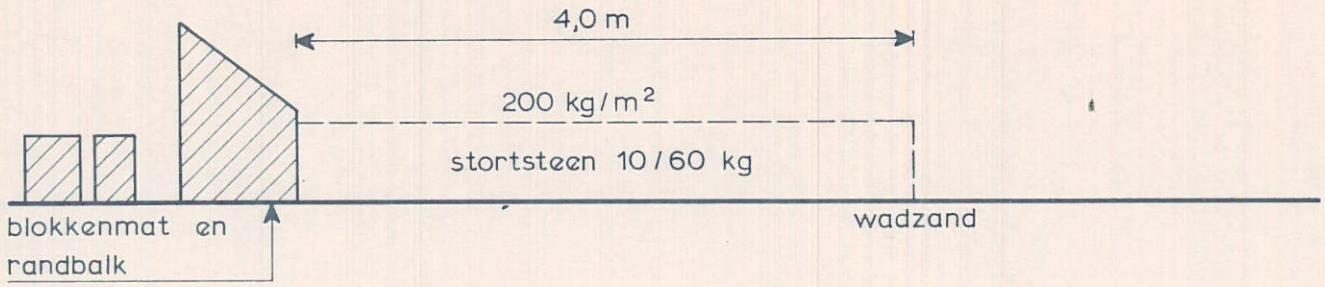
M 1774

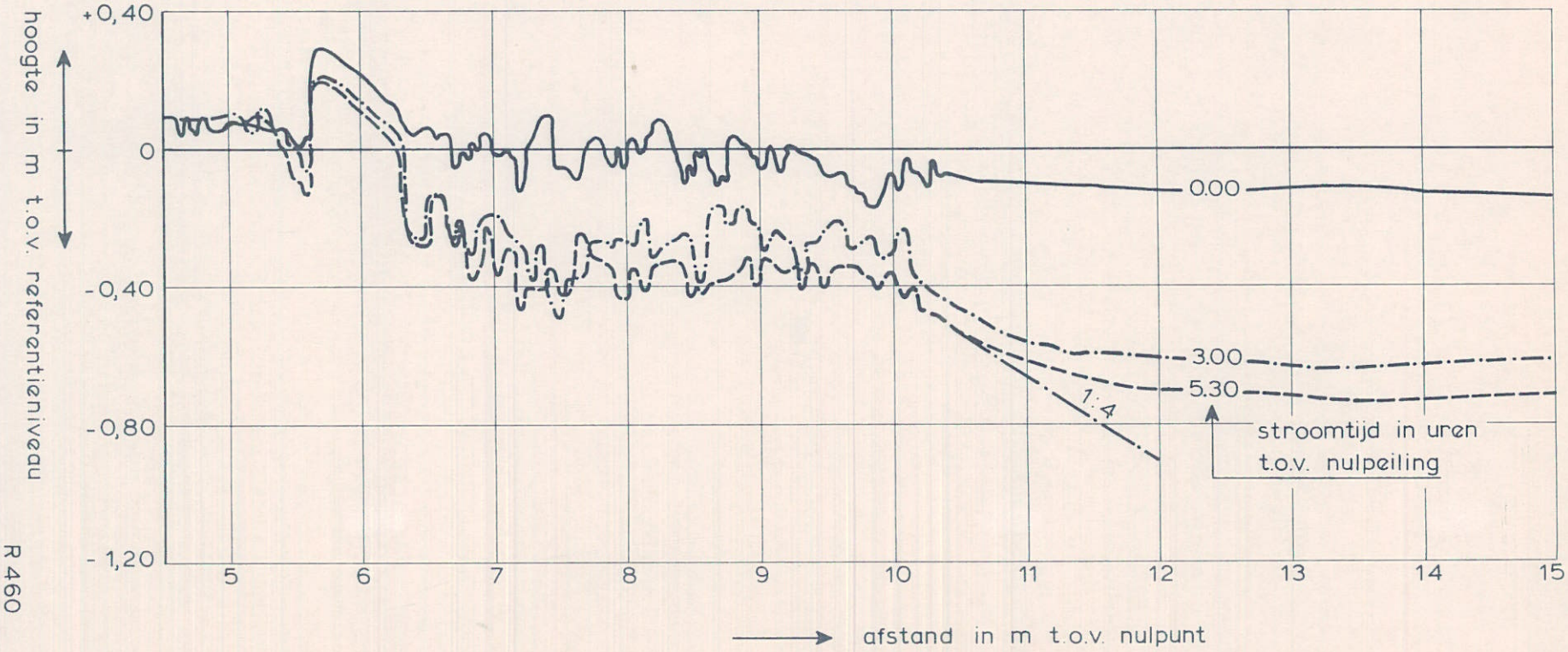
FIG. 8

PROEF: 75-15

RAAI: 2

R 460





R 460

ONTGRONDINGSKUILEN

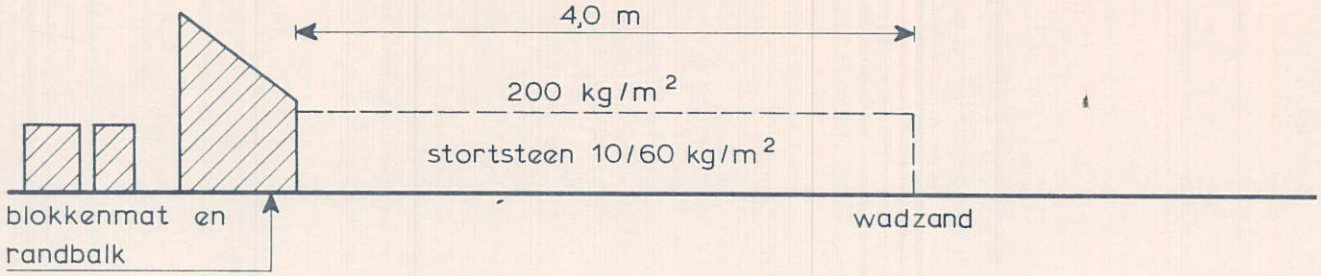
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

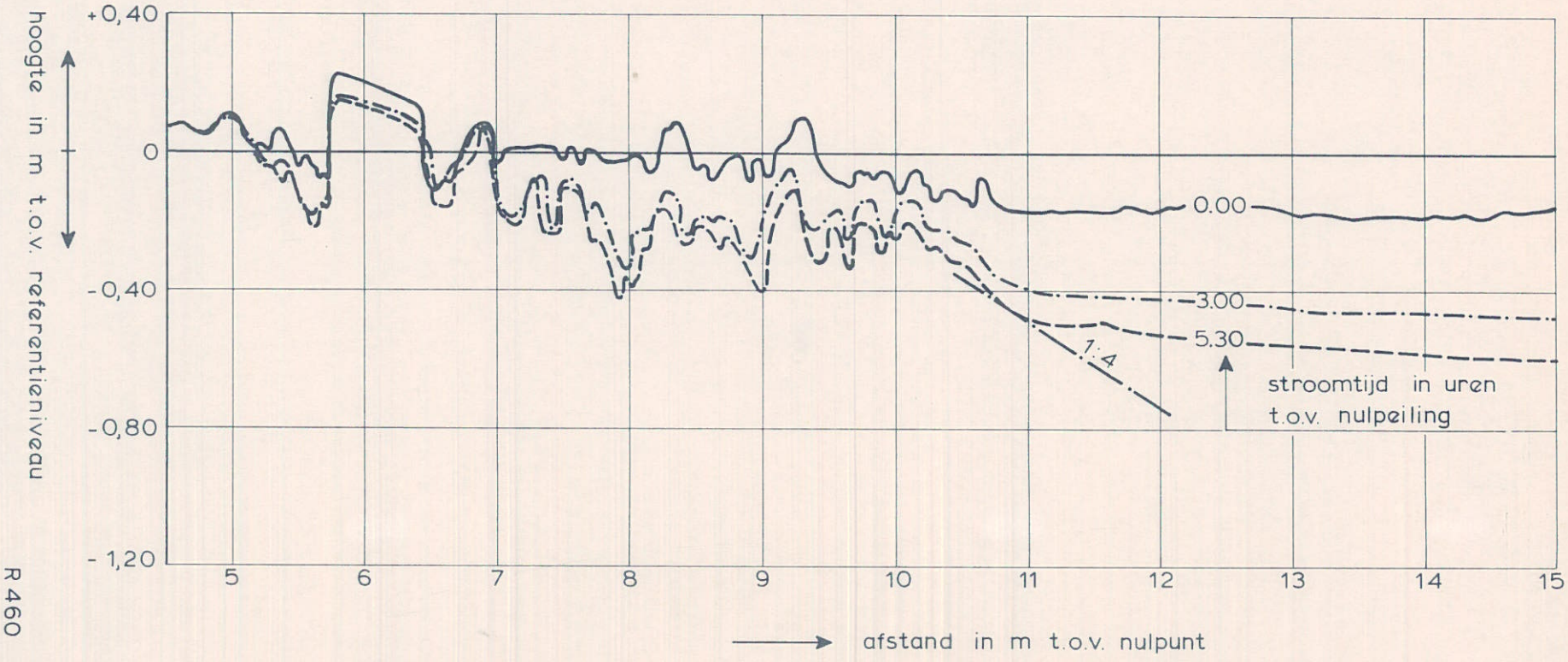
M 1774

FIG. 9

PROEF: 75-17

RAAI: 2





WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

ONTGRONDINGSKUILEN

M 1774

PROEF: 75-20

RAAI: 2

FIG. 10

R 460

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

ONTGRONDINGSKUILEN

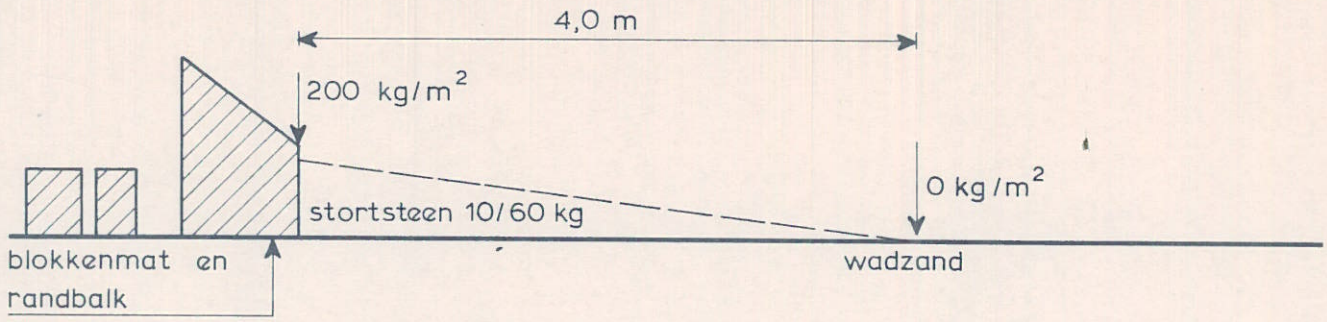
M 1774

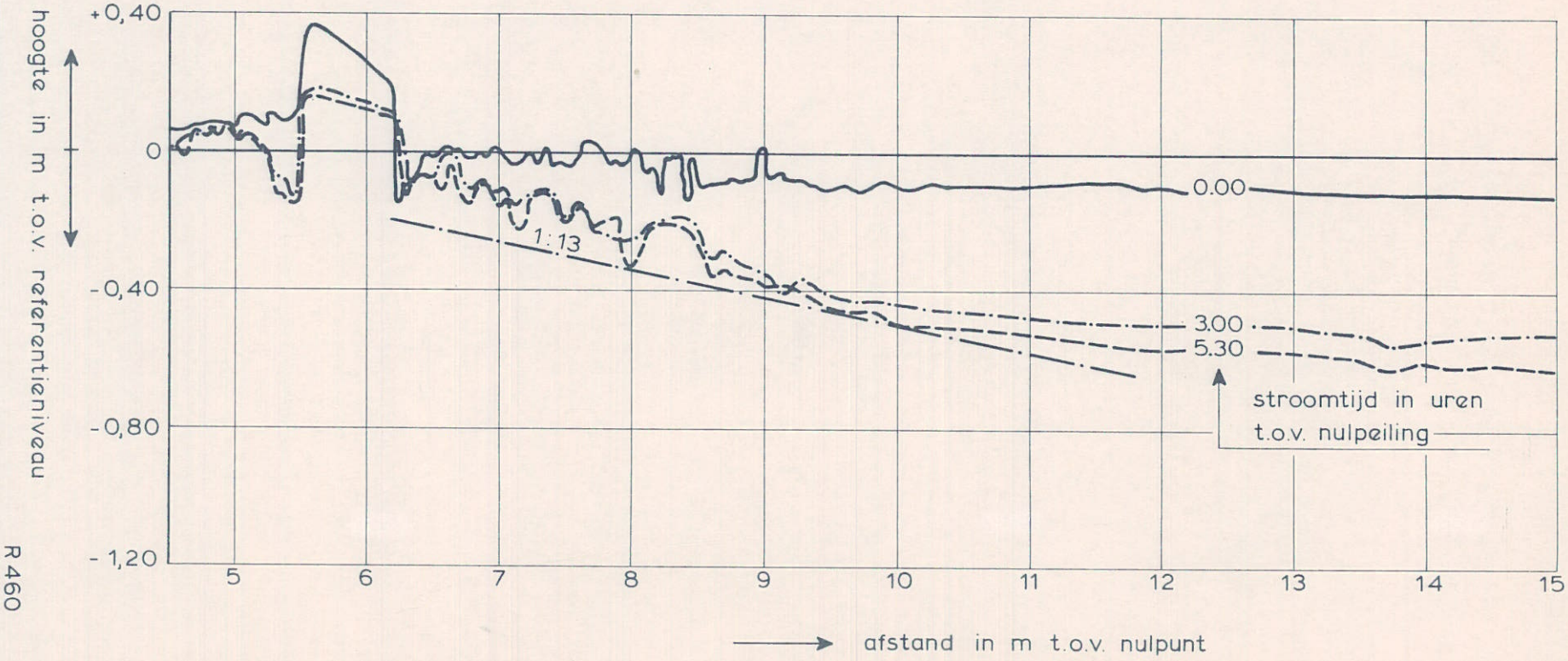
FIG. 11

PROEF: 75-18

RAAI : 2

R 460





WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

ONTGRONDINGSKUILEN

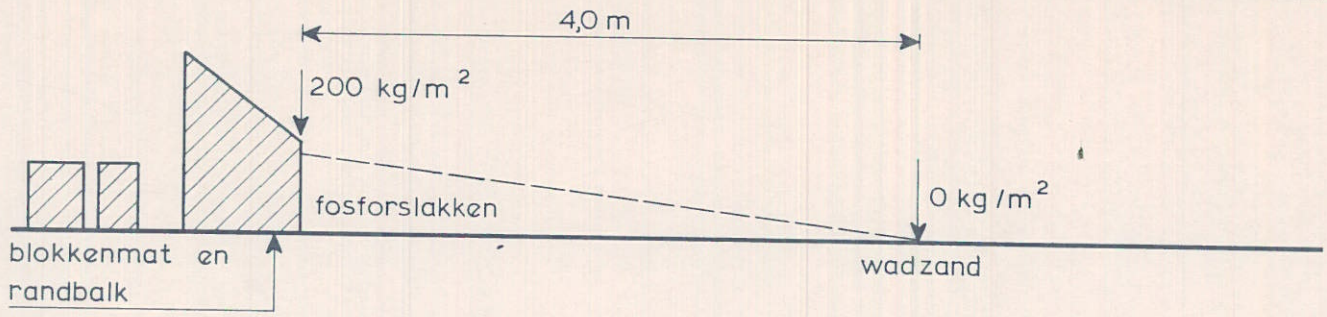
M 1774

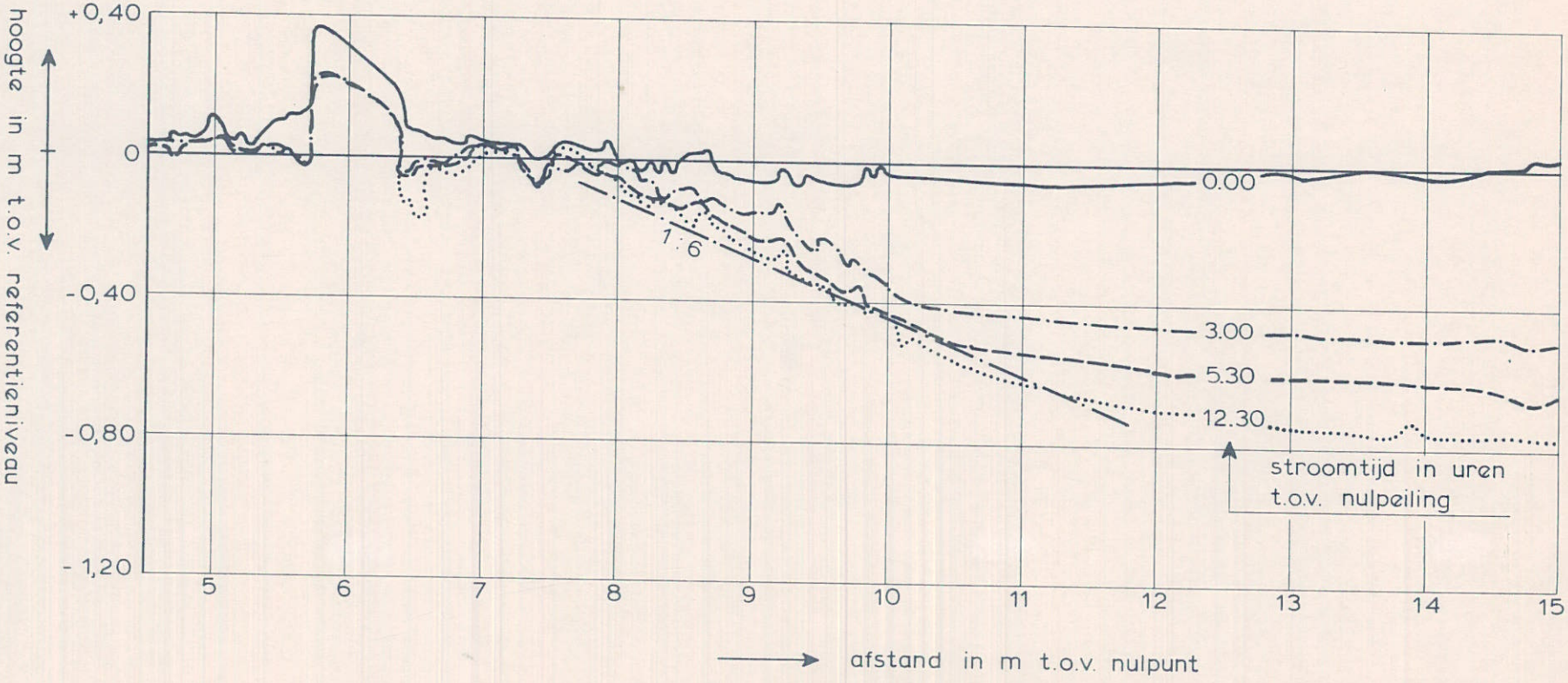
FIG. 12

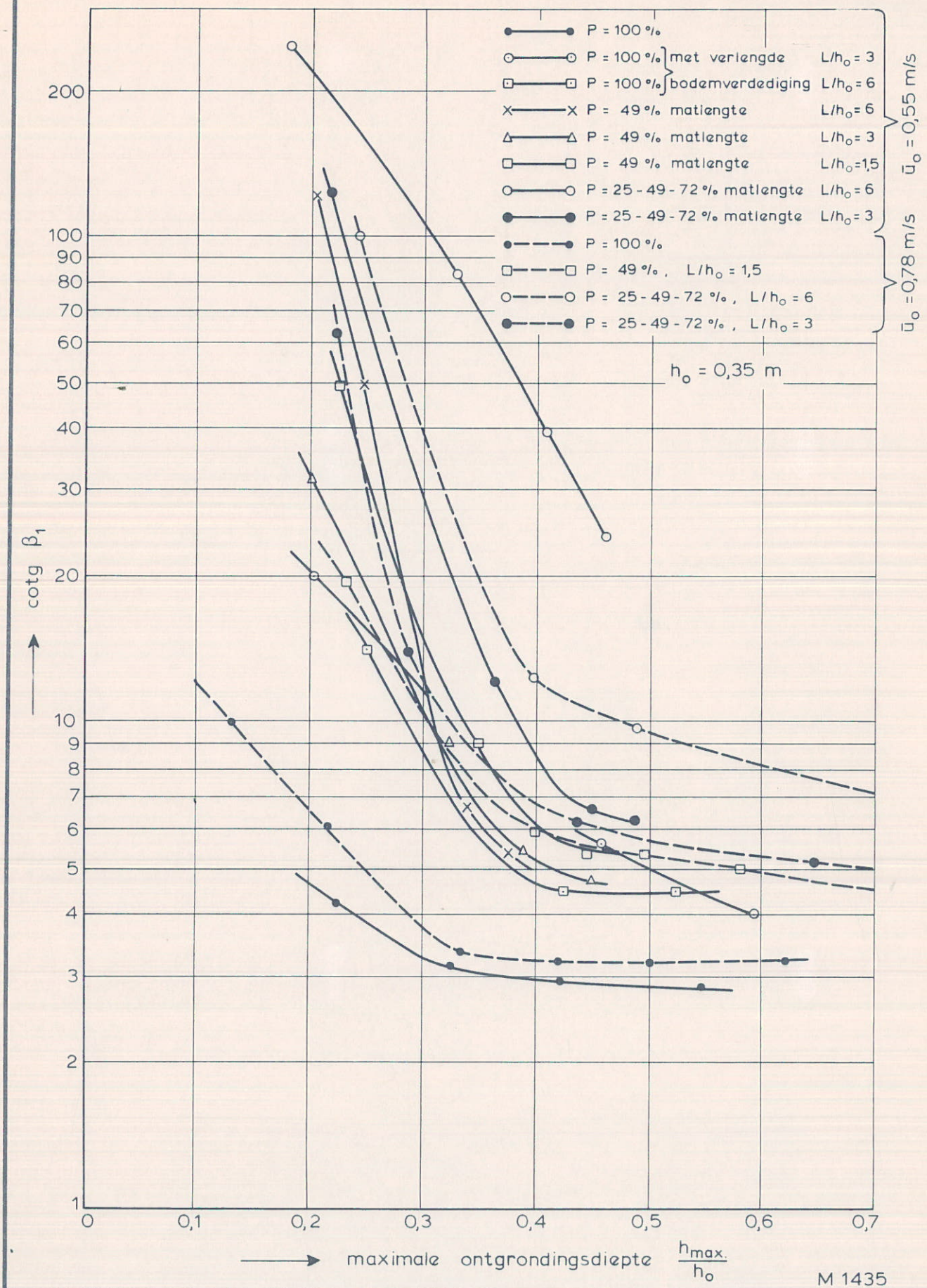
PROEF: 75-19

RAAI: 2

R460







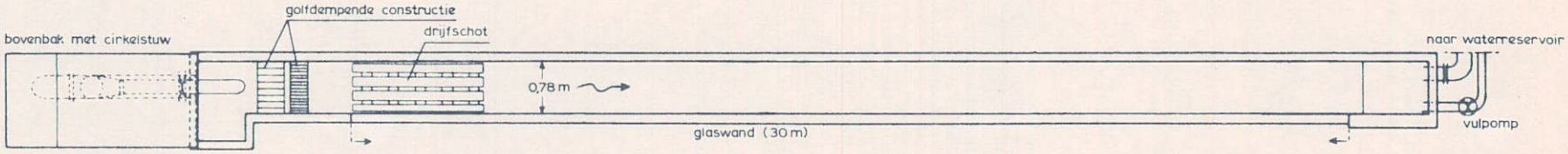
M 1435

RELATIE AANZETHELLING β_1
MET ONTGRONDINGSDIEPTE

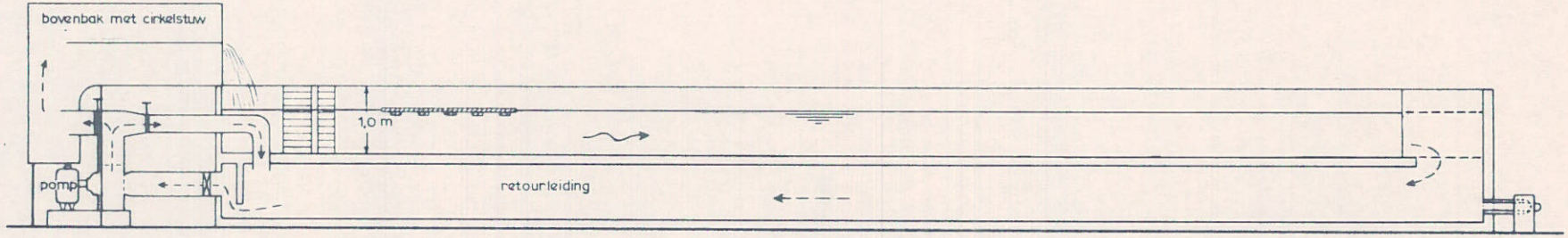
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM | M 1774 | FIG. 13

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

OVERZICHT TUSSENPADGOOT



BOVENAANZICHT TUSSENPADGOOT



DWARSDOORSNEDE TUSSENPADGOOT

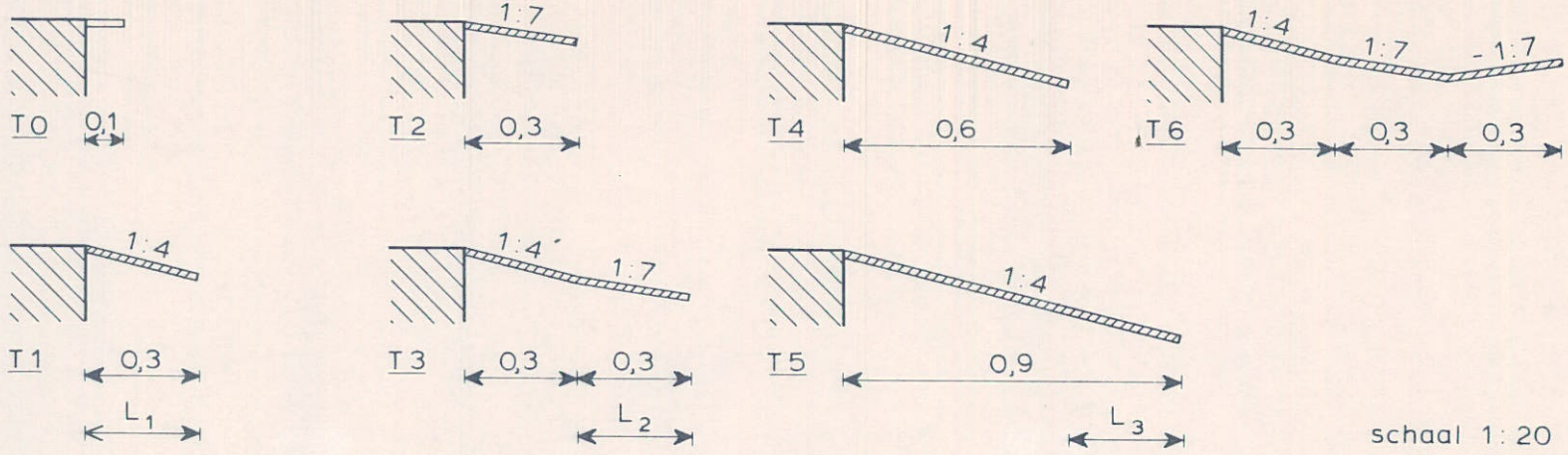
schalen : verticaal en in breedterichting 1 : 100
in langsrichting 1 : 200

M 1774

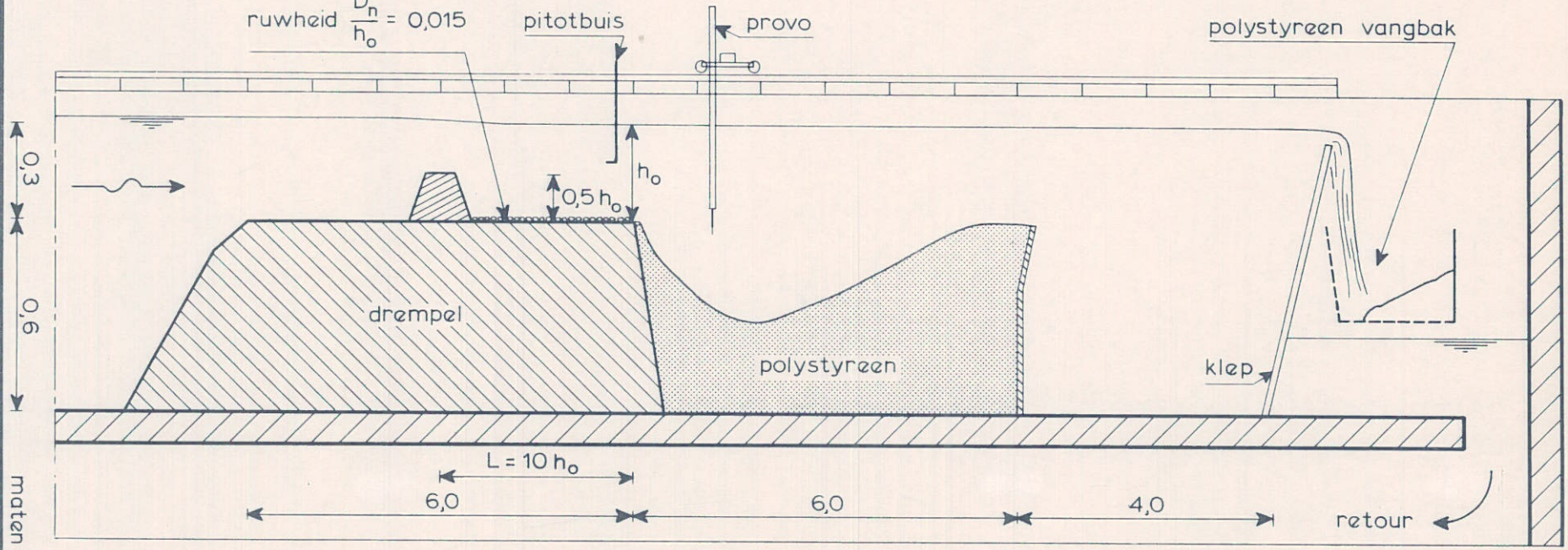
FIG. 14

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

OVERZICHT PROEFOPSTELLINGEN



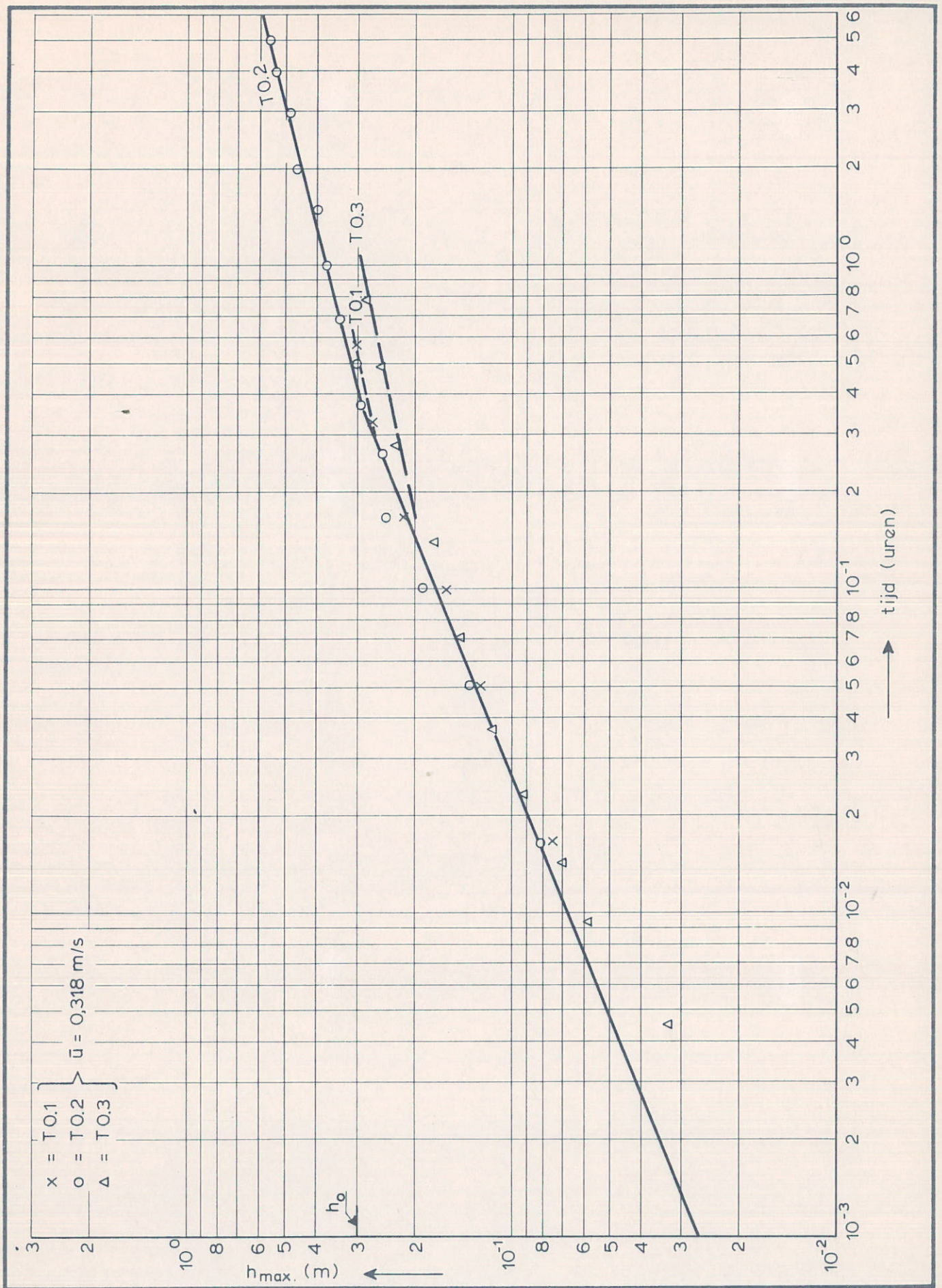
schaal 1:20



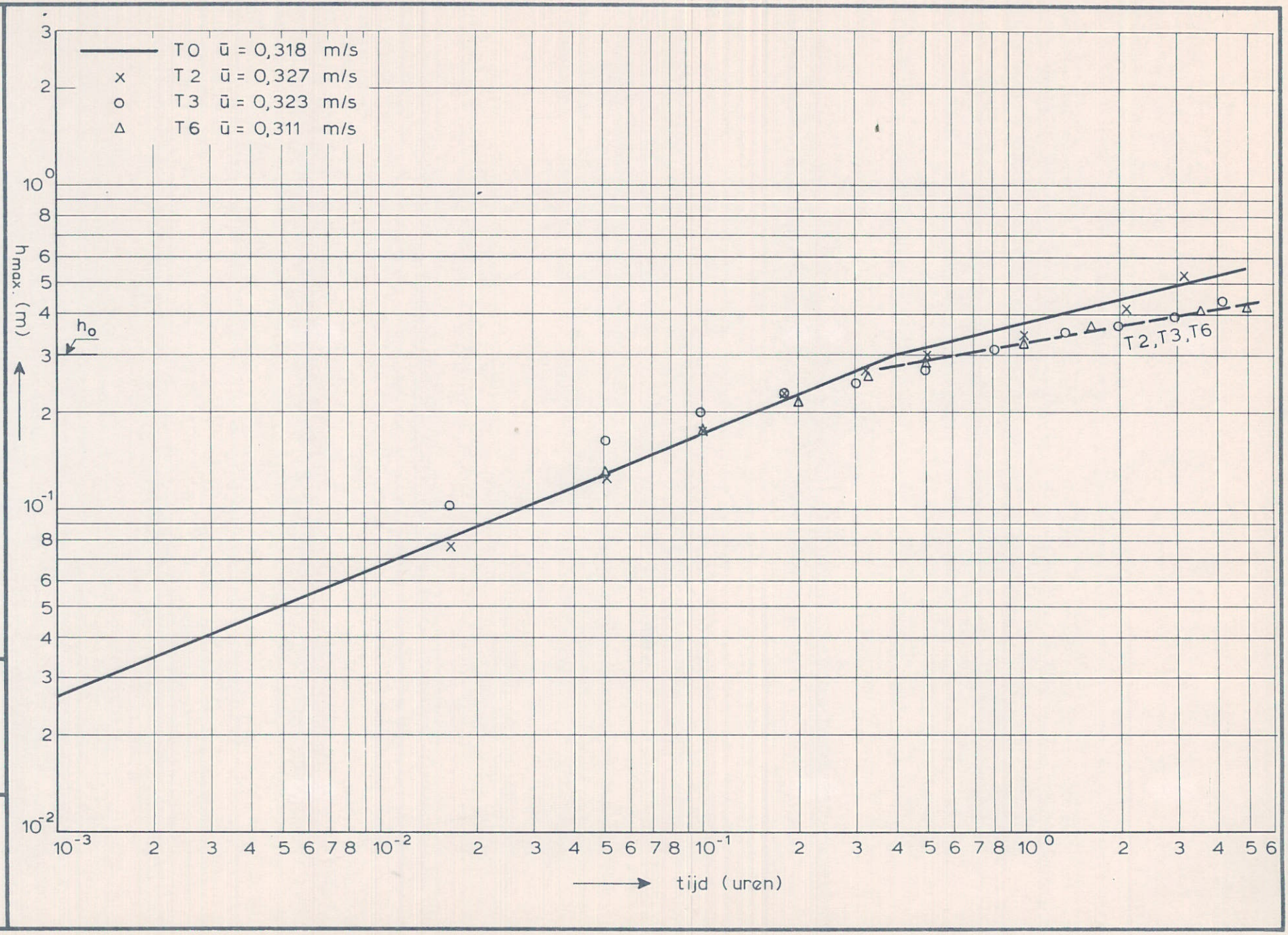
schaal hor. 1:100
vert. 1: 20

M 1774

FIG. 15



TIJD - ONTGRONDINGSVERLOOP	T0	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1774	FIG. 16



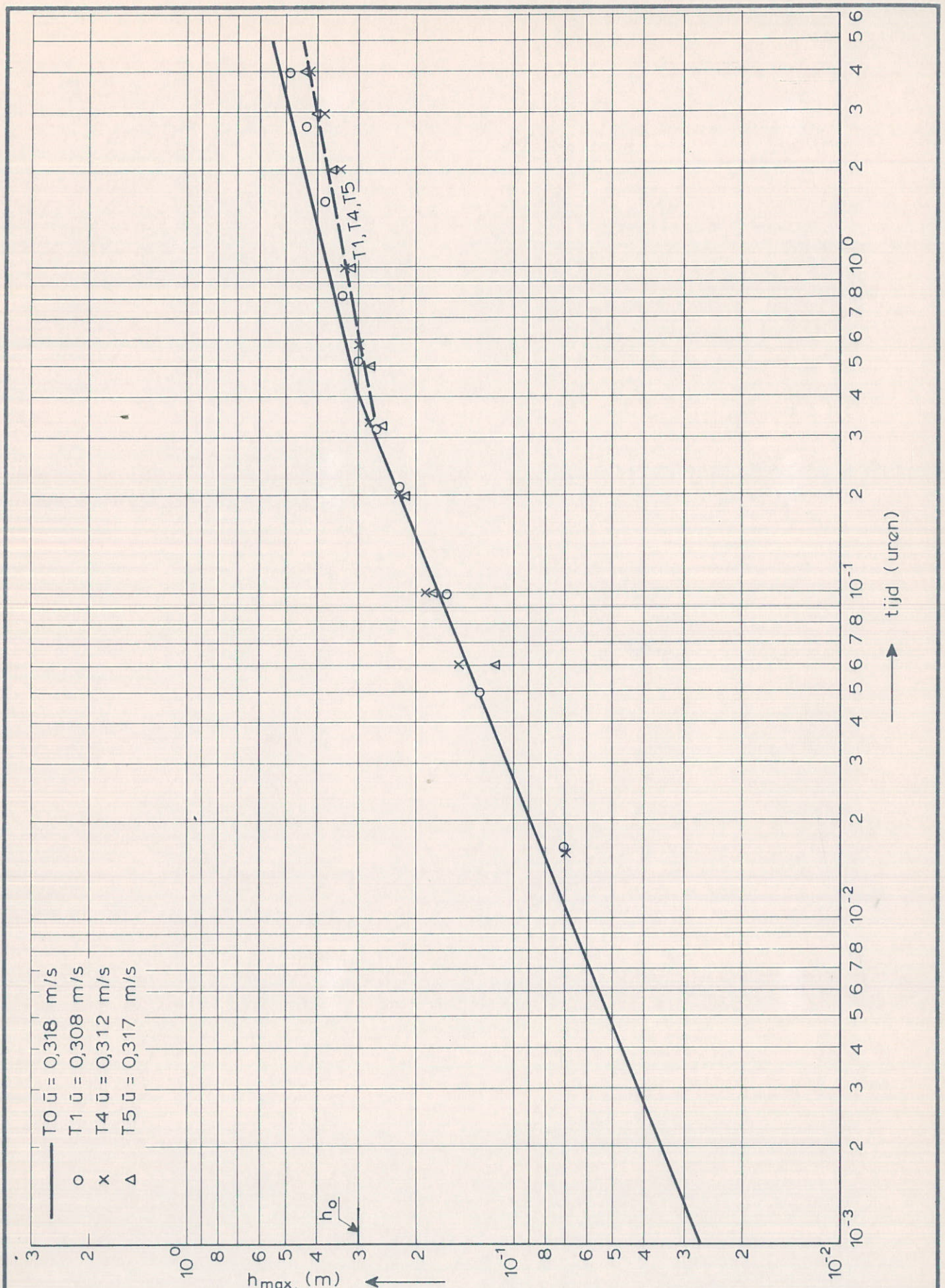
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

TIJD - ONTGRONDINGSVERLOOP

T2, T3, T6

M 1774

FIG. 17



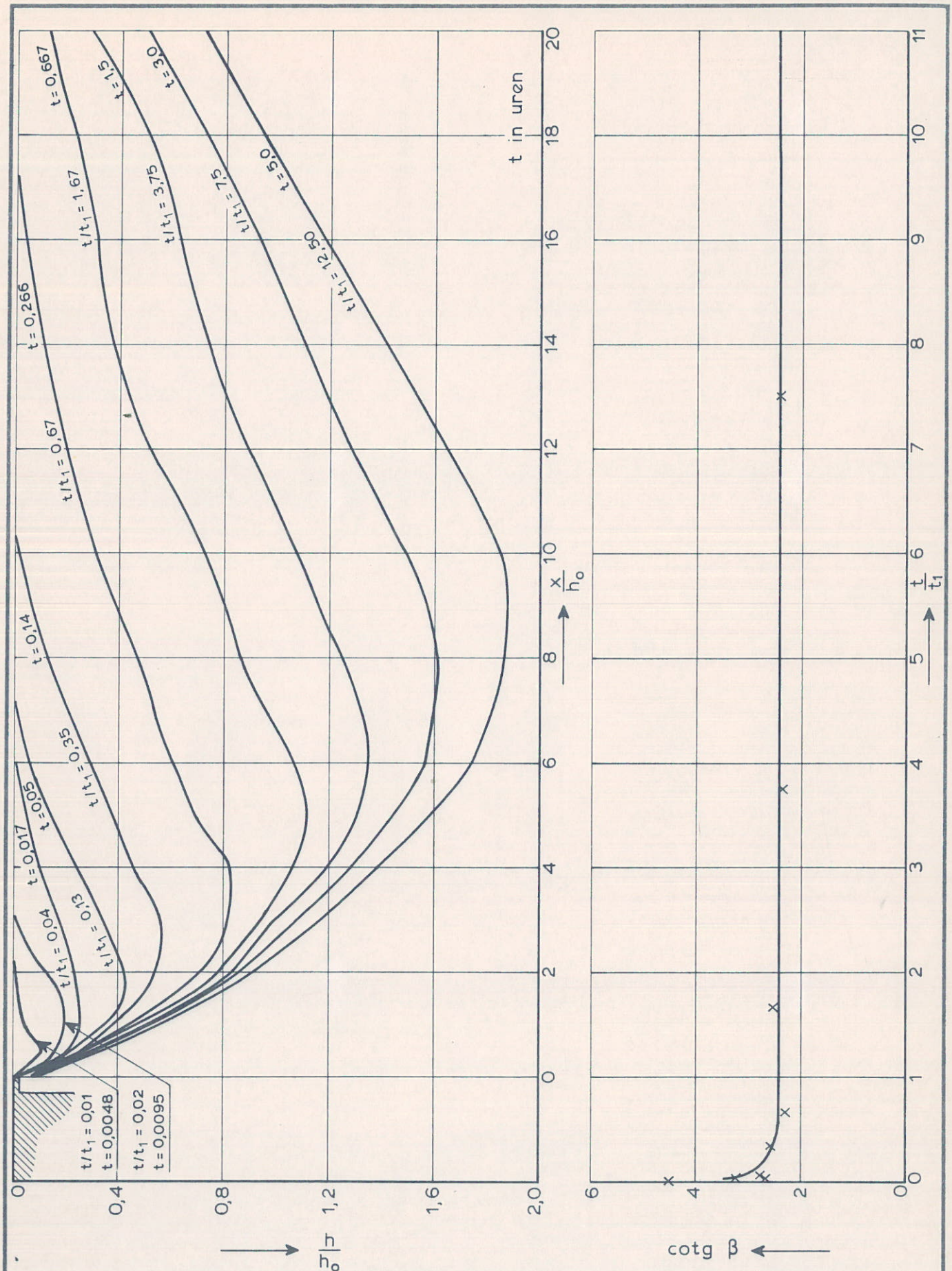
TIJD - ONTGRONDINGSVERLOOP

T1, T4, T5

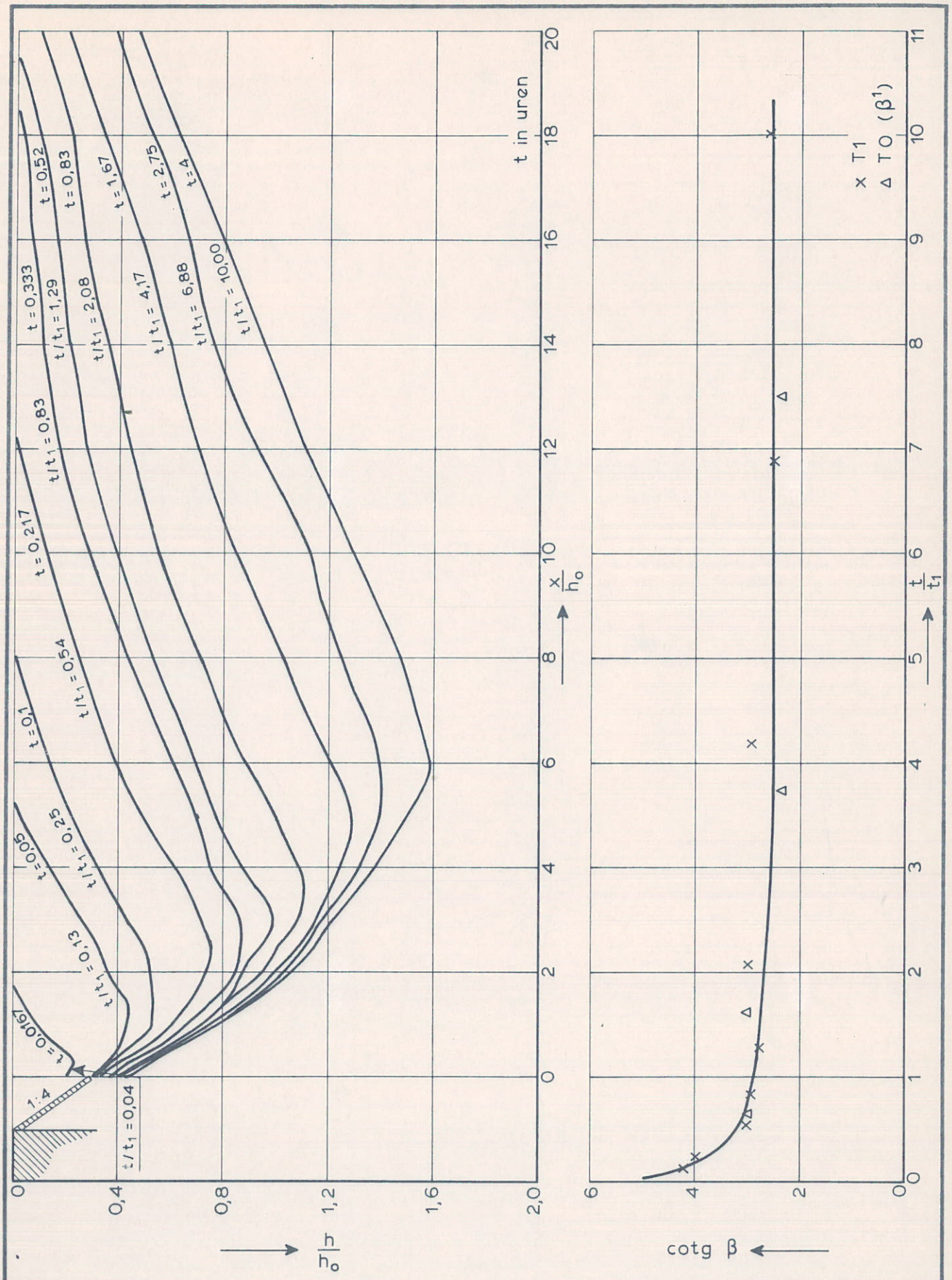
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1774

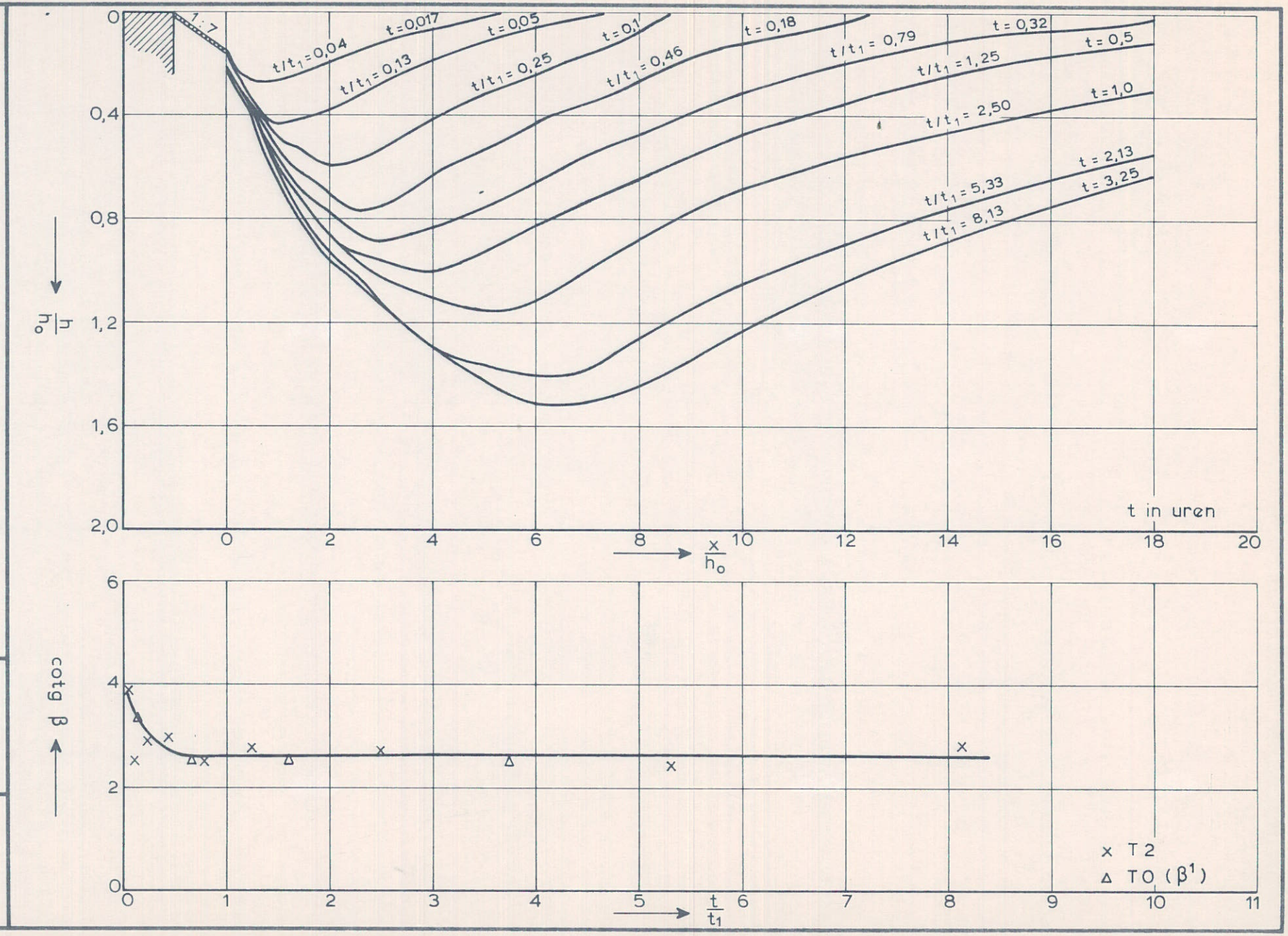
FIG. 18



ONTGRONDINGSKUIL EN AANZETHELLING	TO	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1774	FIG. 19



ONTGRONDINGSKUIL EN AANZETHELLING	T1	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1774	FIG. 20



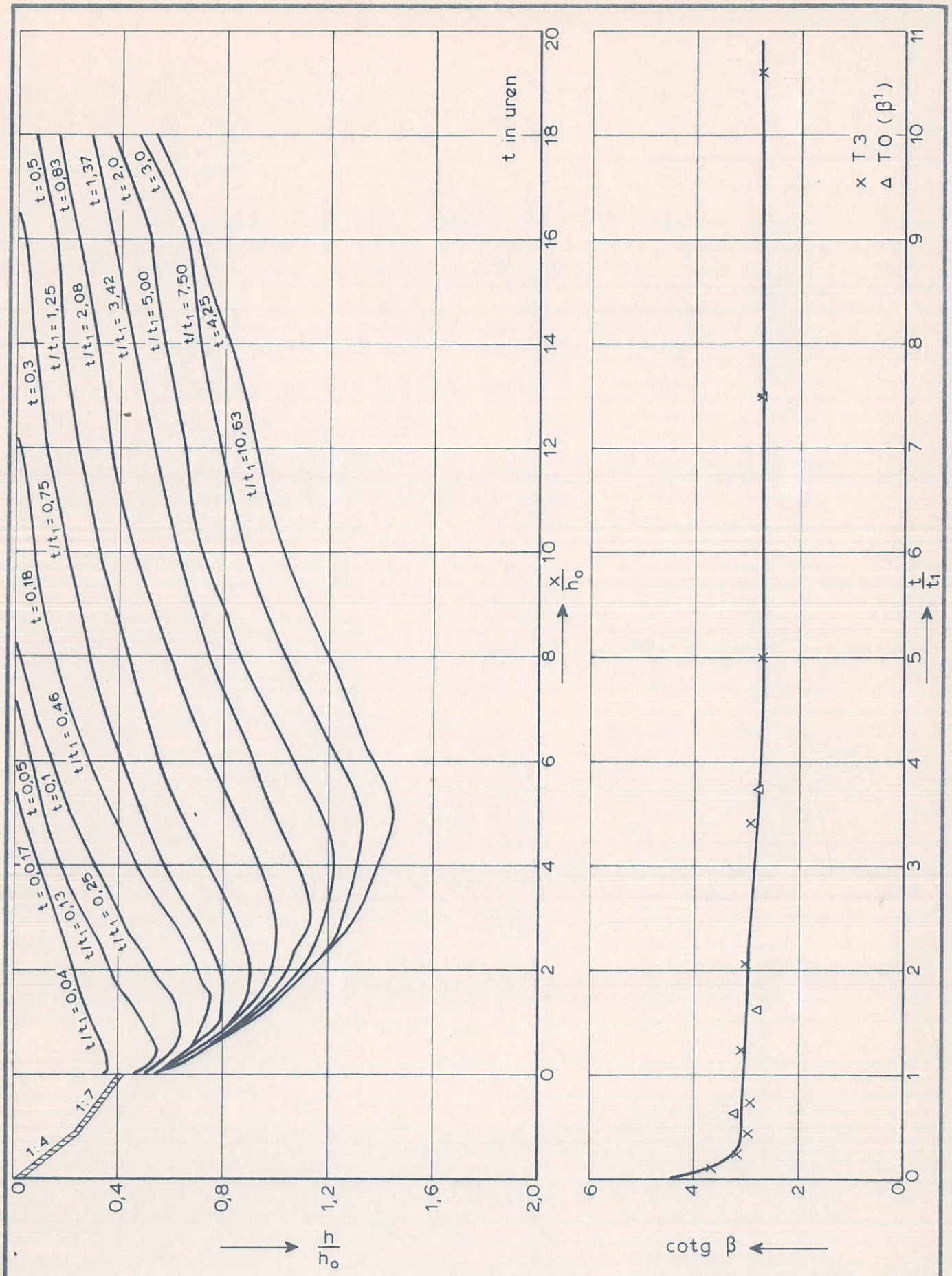
ONTGRONDINGSKUIL EN AANZETHELLING

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

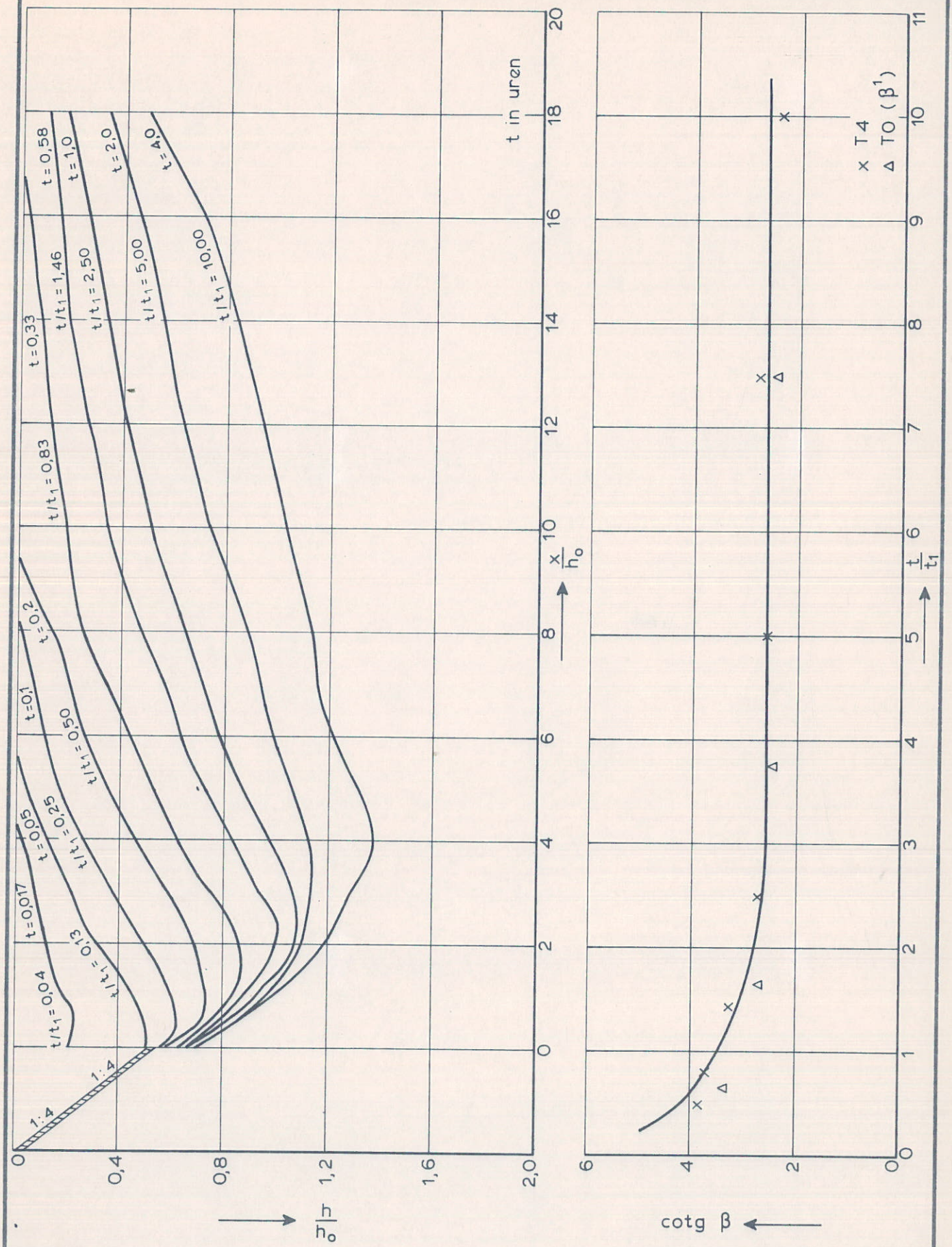
M 1774

T 2

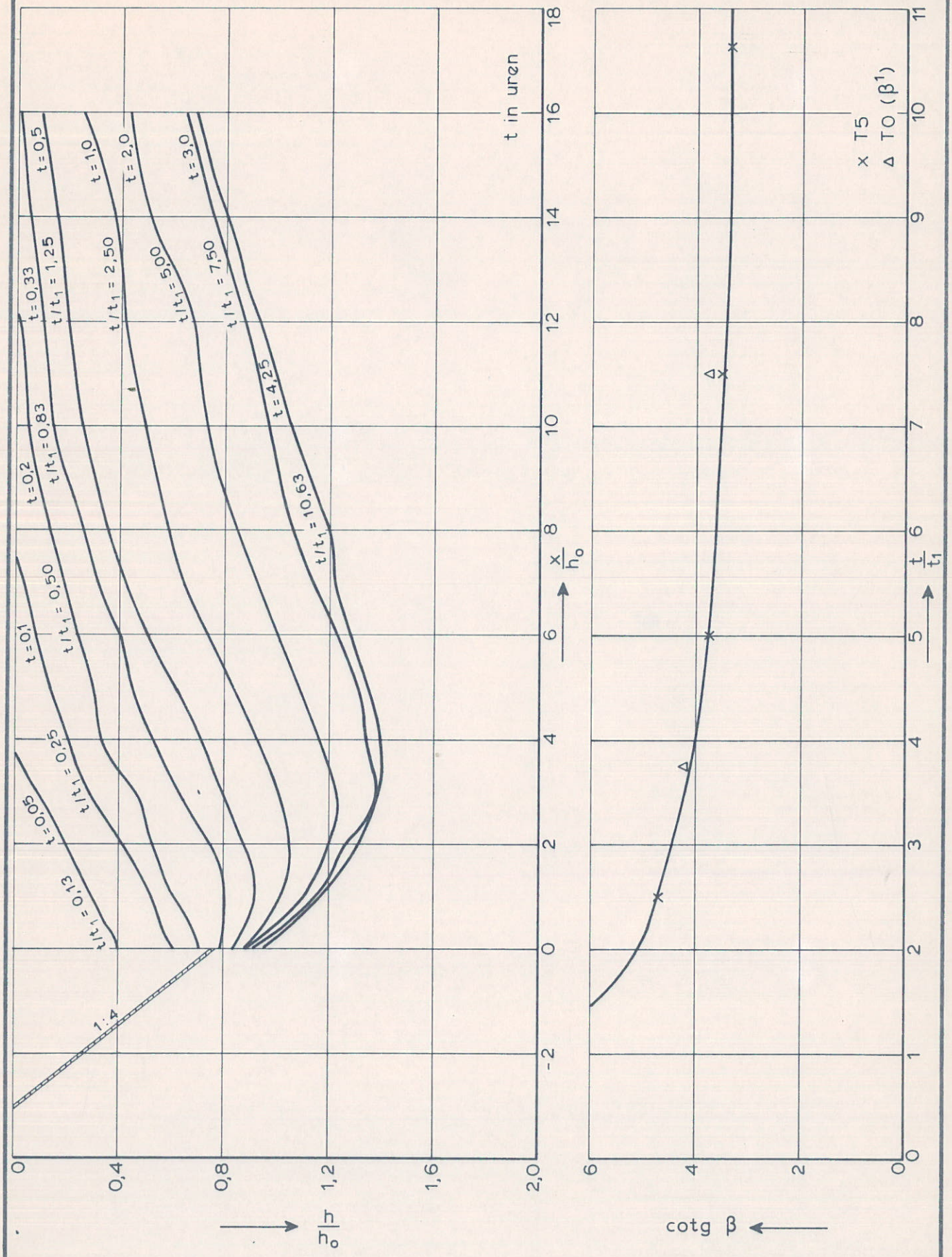
FIG. 21



ONTGRONDINGSKUIL EN AANZETHELLING	T3	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1774	FIG. 22



ONTGRONDINGSKUIL EN AANZETHELLING	T4	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1774	FIG. 23



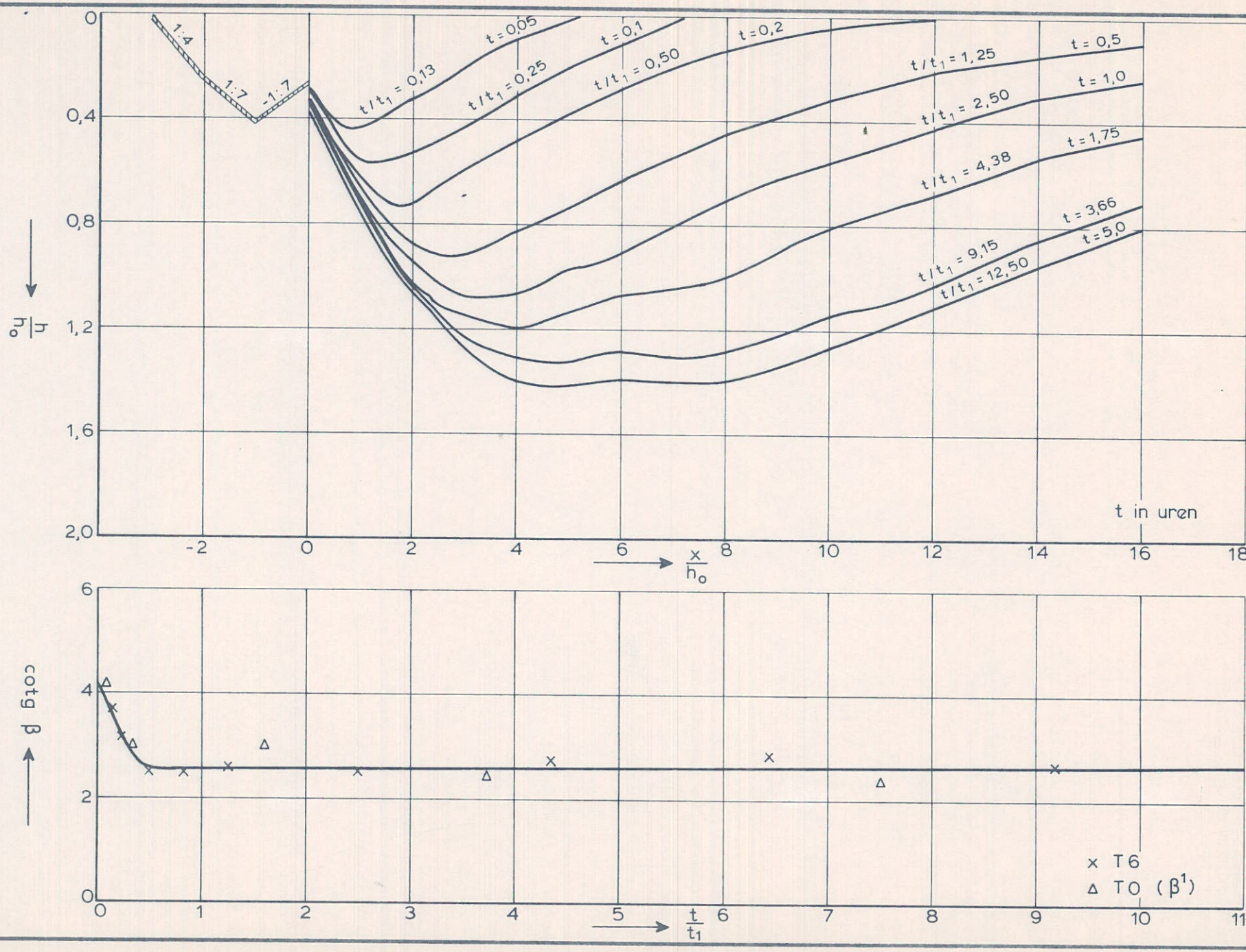
ONTGRONDINGSKUIL EN AANZETHELLING

T5

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1774

FIG. 24



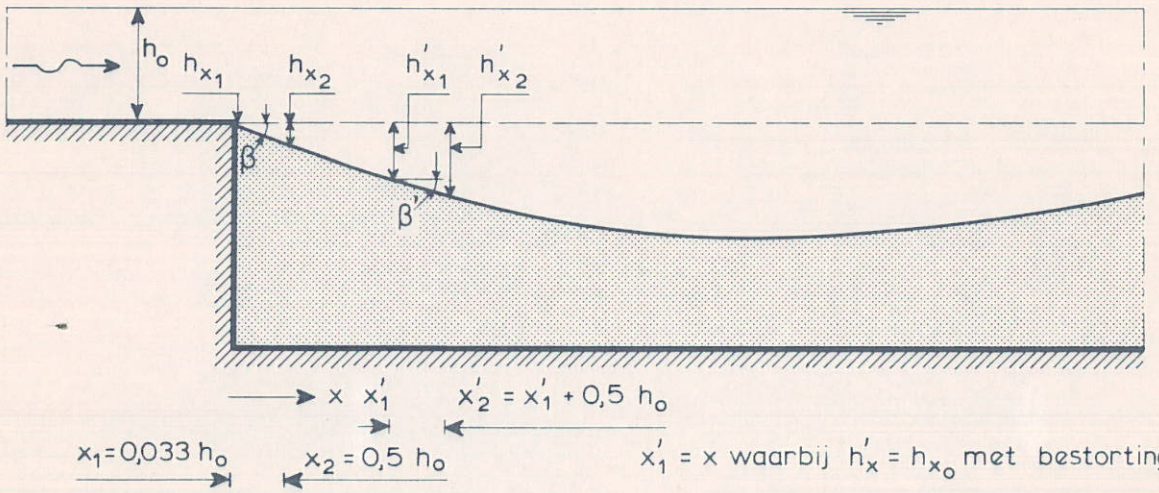
ONTGRONDINGSKUIL EN AANZETHELLING

T6

M 1774

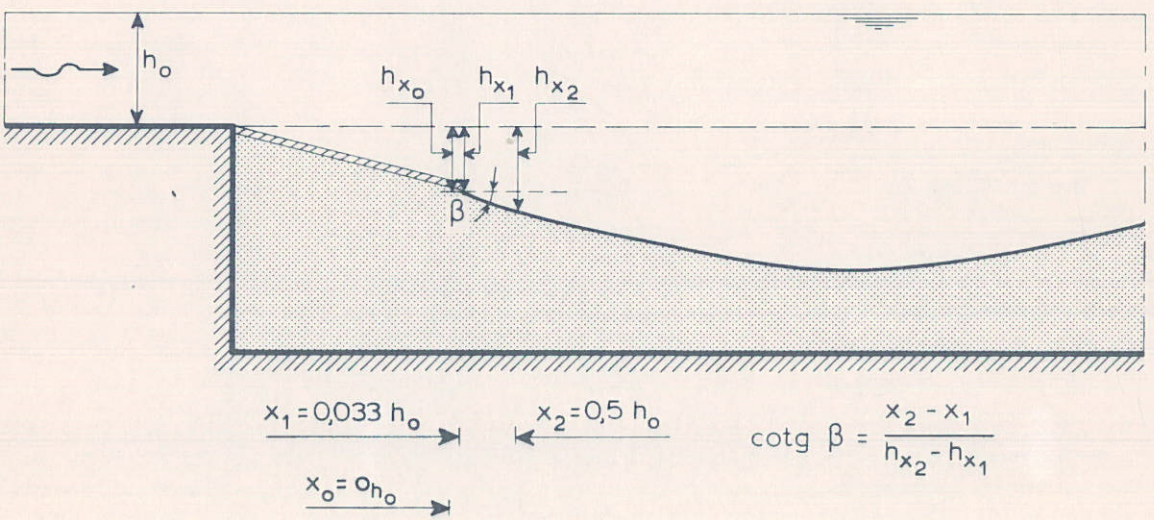
FIG. 25

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM



$$\text{cotg}\ \beta = \frac{x_2 - x_1}{h_{x_2} - h_{x_1}} \qquad \text{cotg}'\ \beta' = \frac{x'_2 - x'_1}{h'_{x_2} - h'_{x_1}}$$

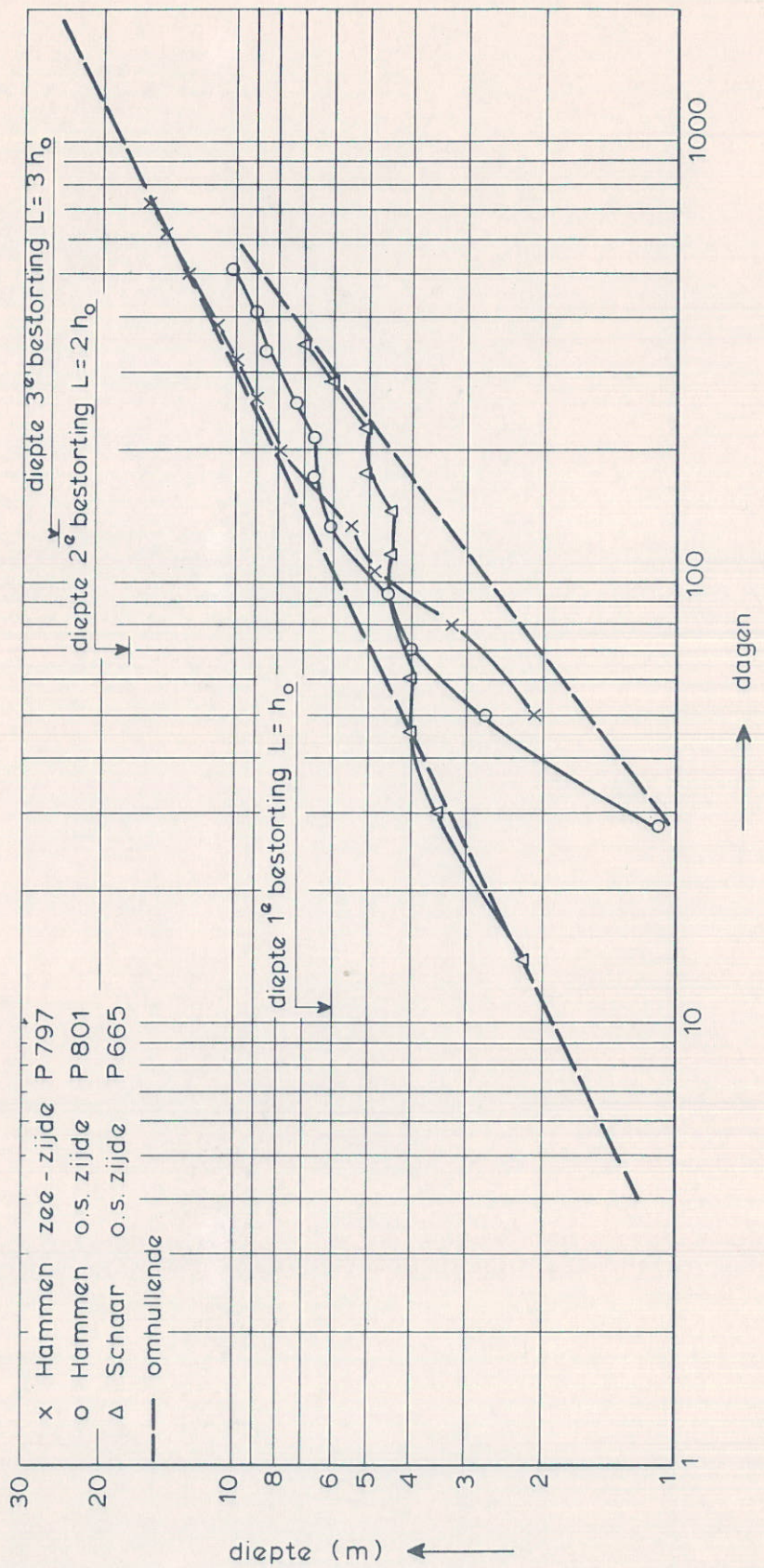
zonder bestorting



$$\text{cotg}\ \beta = \frac{x_2 - x_1}{h_{x_2} - h_{x_1}}$$

met bestorting

DEFINITIE AANZETHELLING		
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1774	FIG. 26

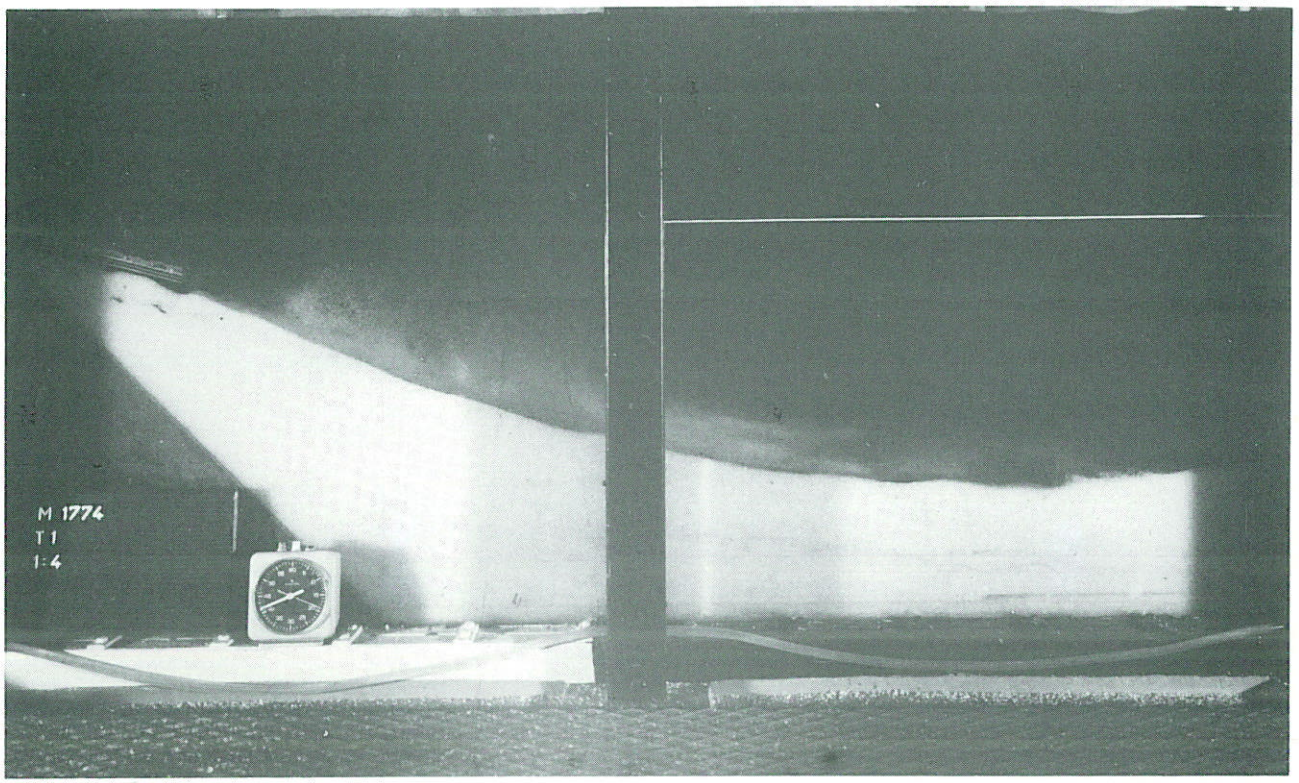


VOORSPELLING BESTORTING, VOORBEELD

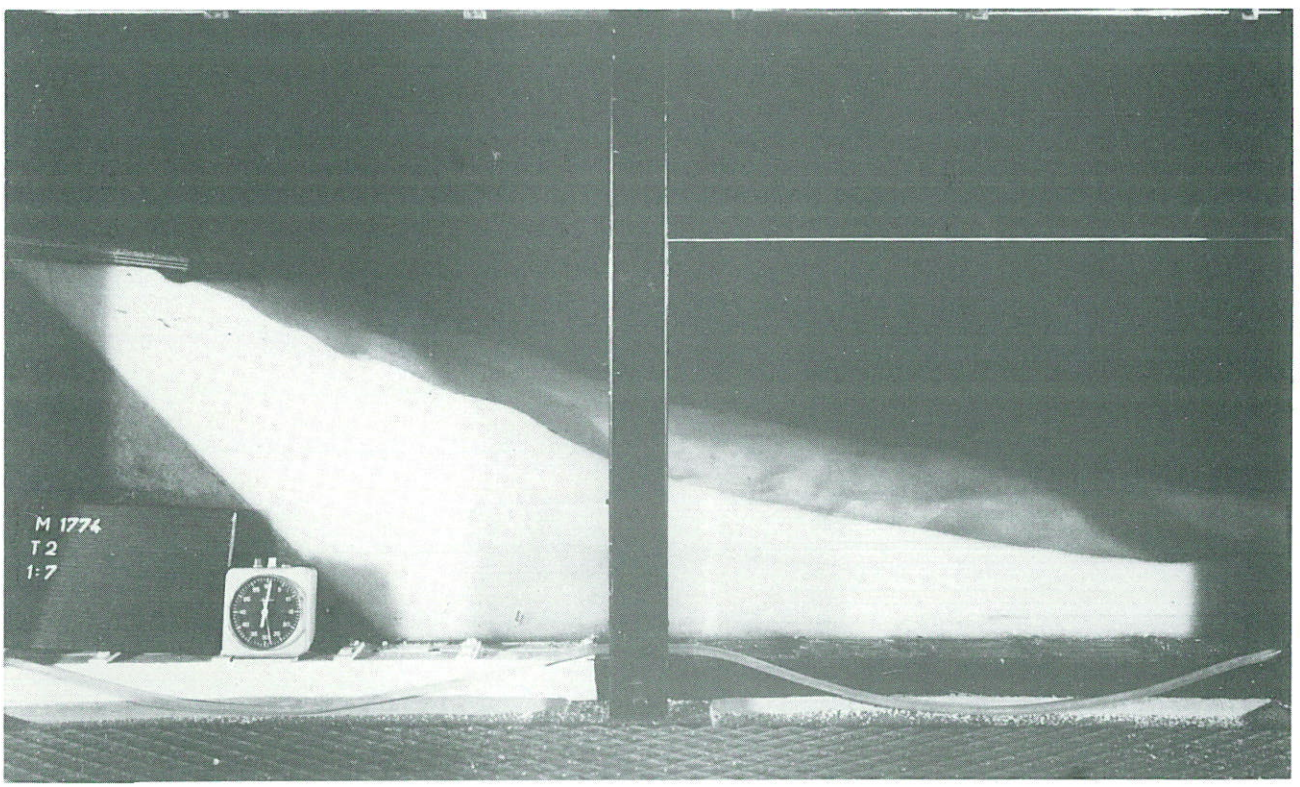
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM | M 1774 | FIG. 27

BESTORTINGS - FILOSOFIE

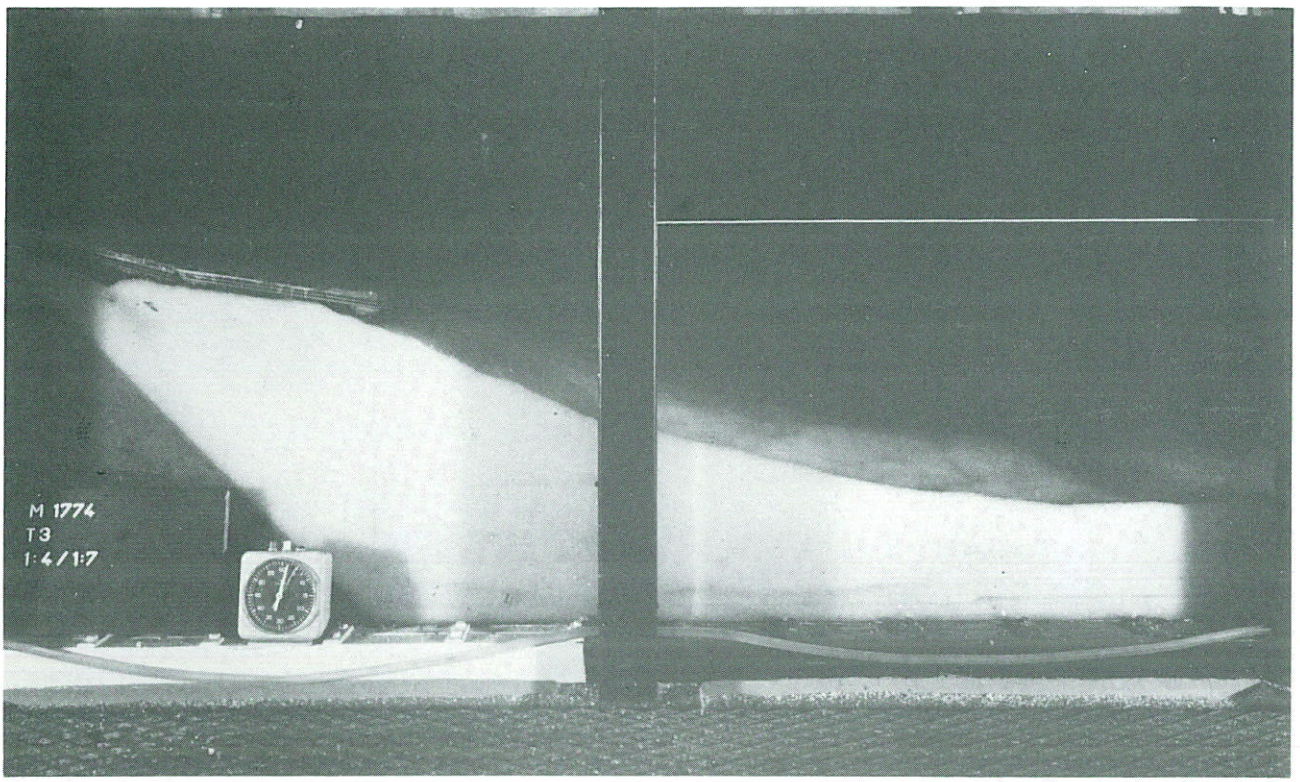
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM | M 1774 | FIG. 28



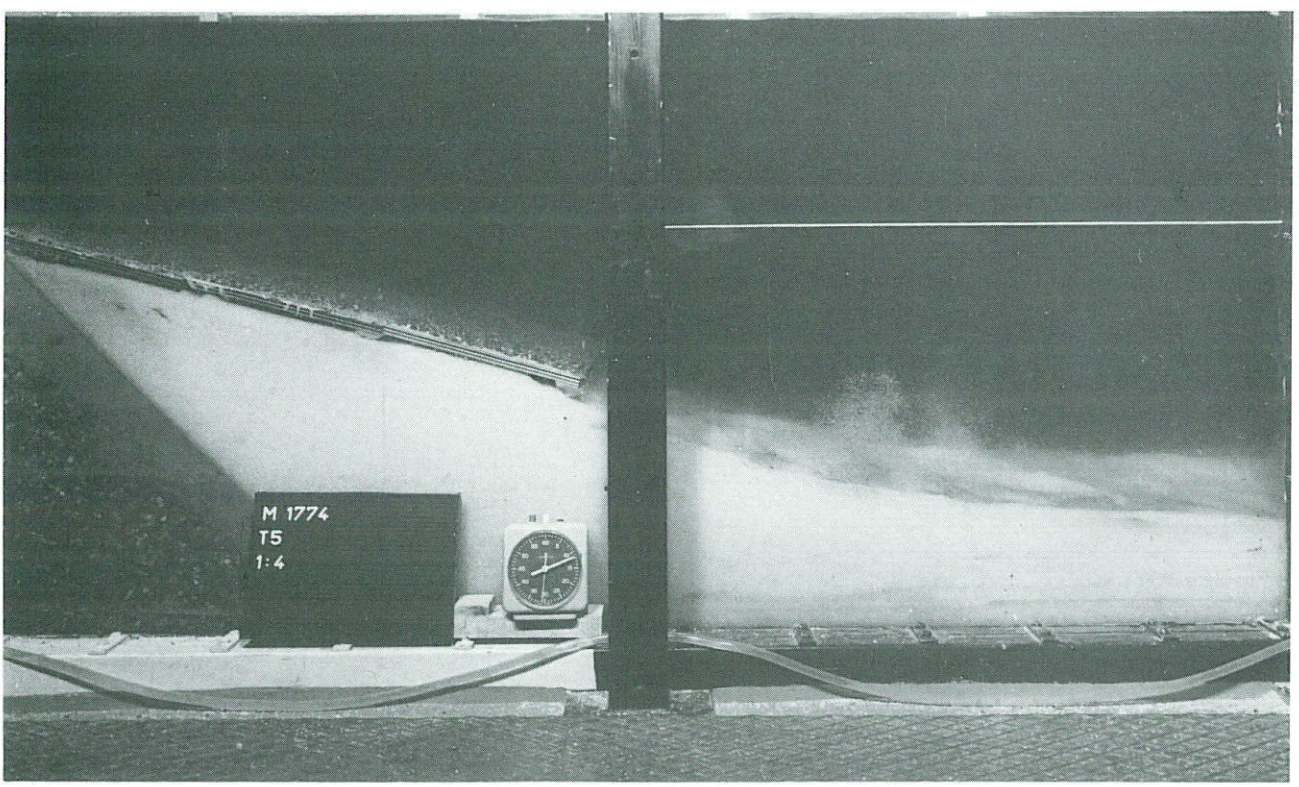
1 Ligging ontgrondingskuil bij einde proef T1



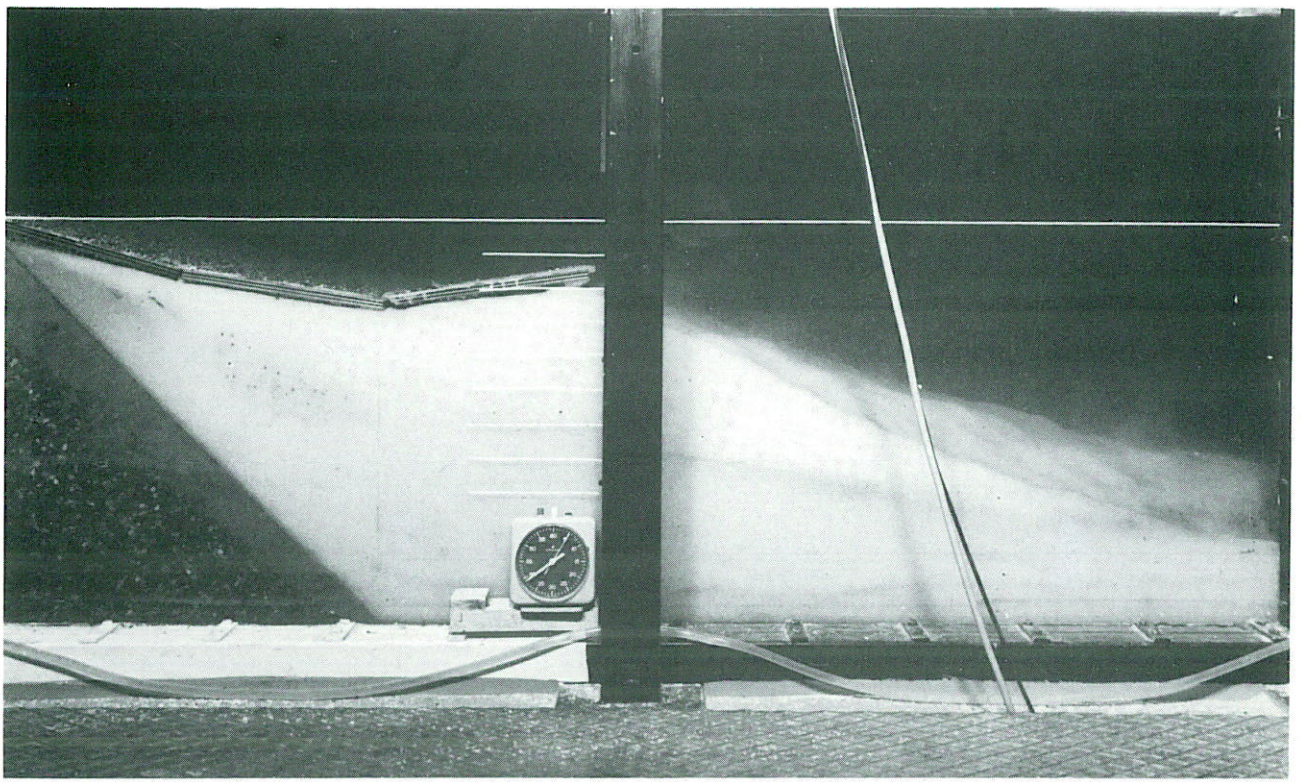
2 Ligging ontgrondingskuil bij einde proef T2



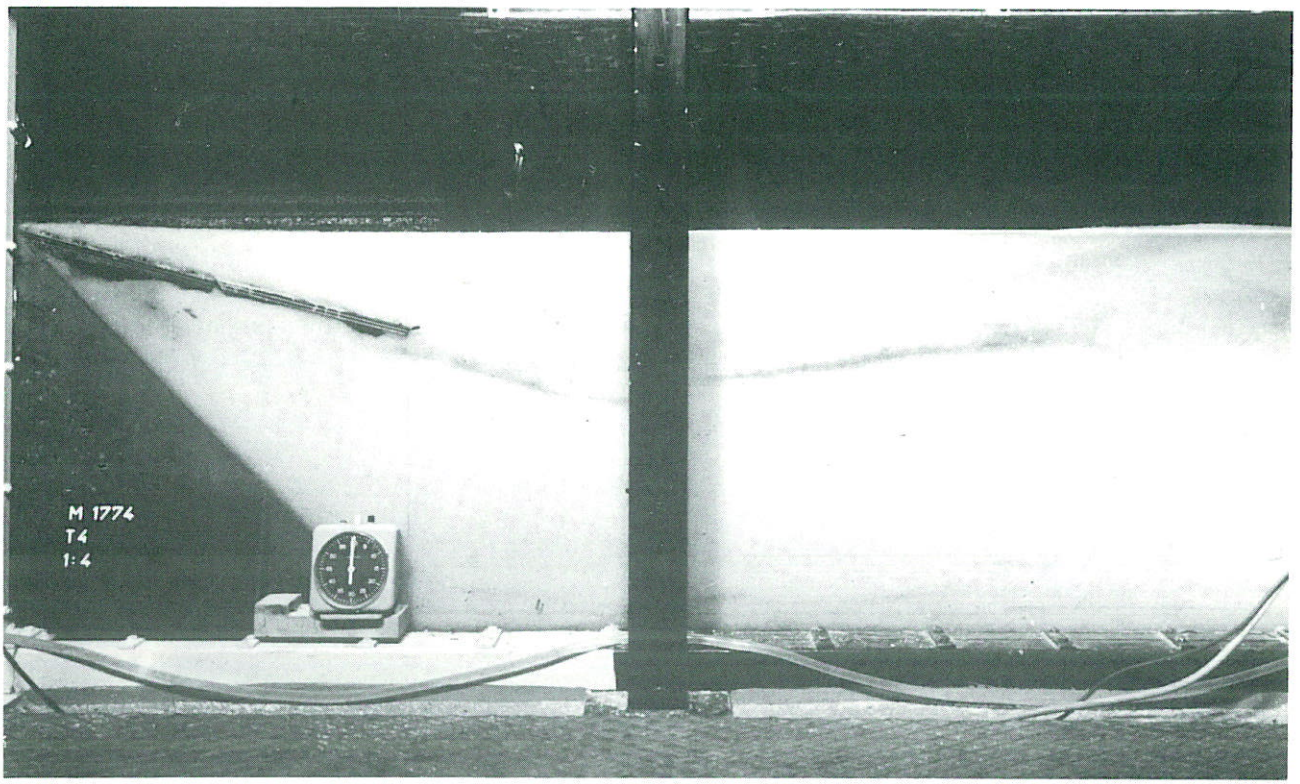
3 Ligging ontgrondingskuil bij einde proef T3



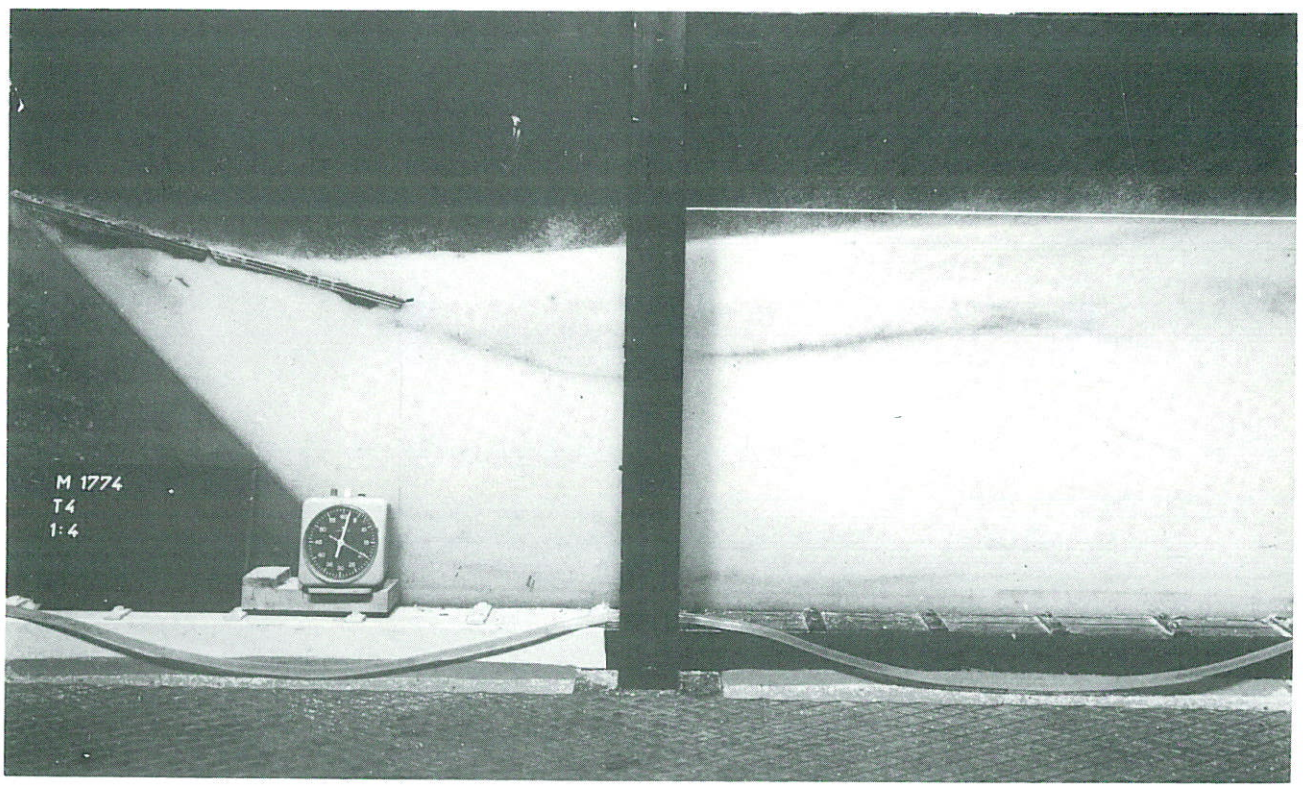
4 Ligging ontgrondingskuil bij einde proef T5



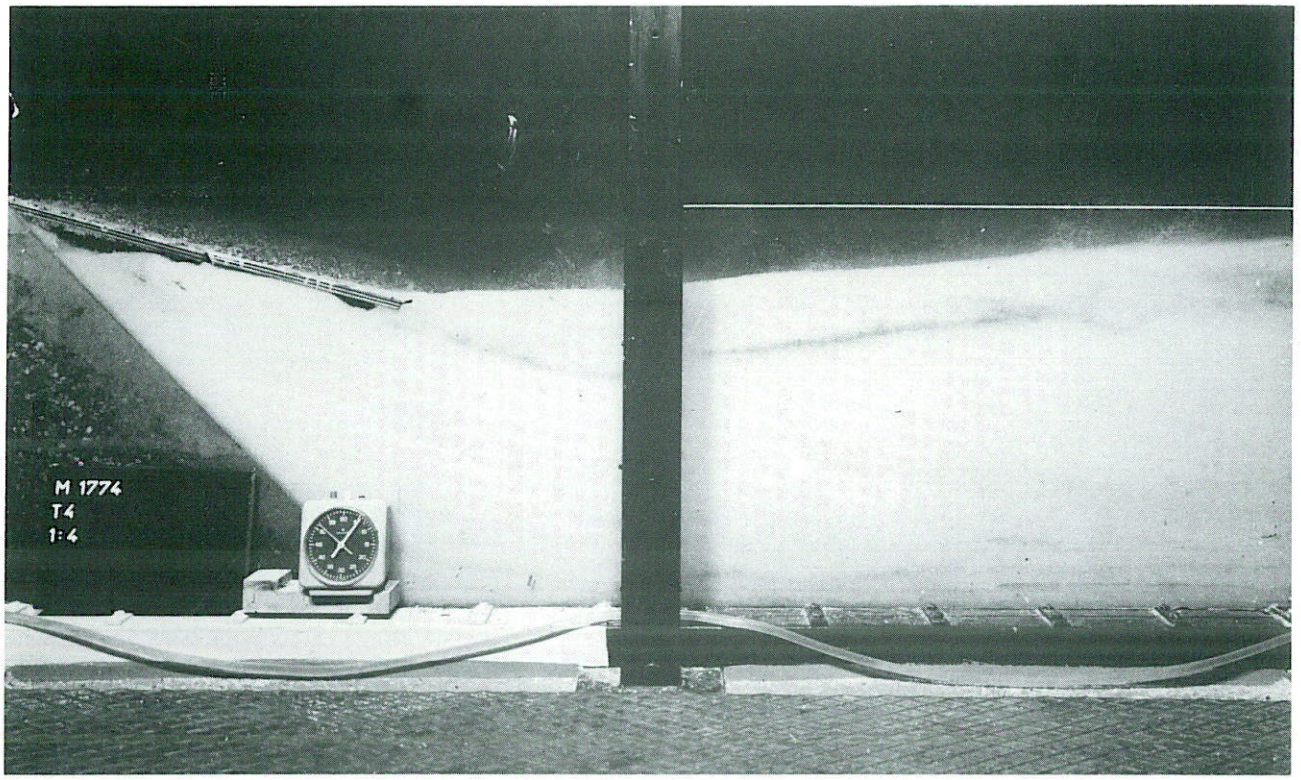
5 Ligging ontgrondingskuil bij einde proef T6



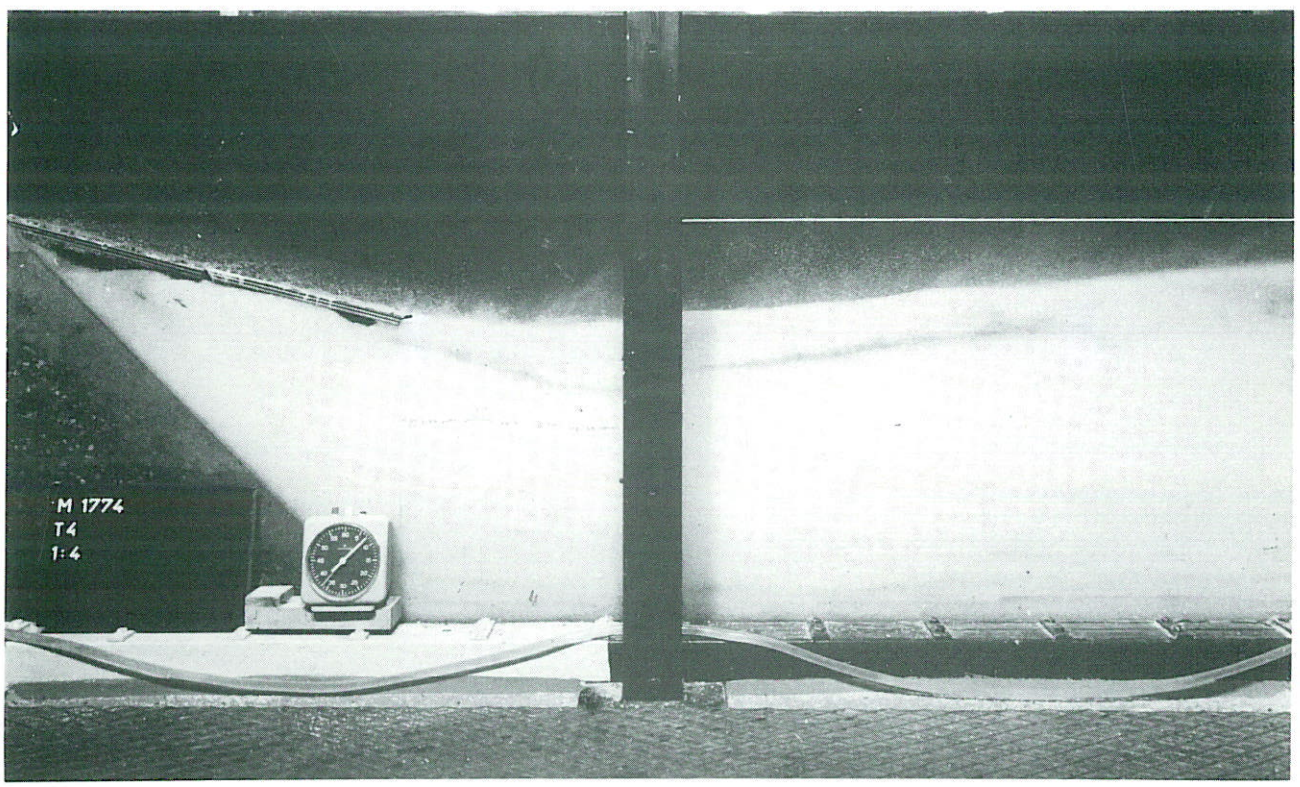
6 Ontgrondingsbeeld na 0 uur stromen



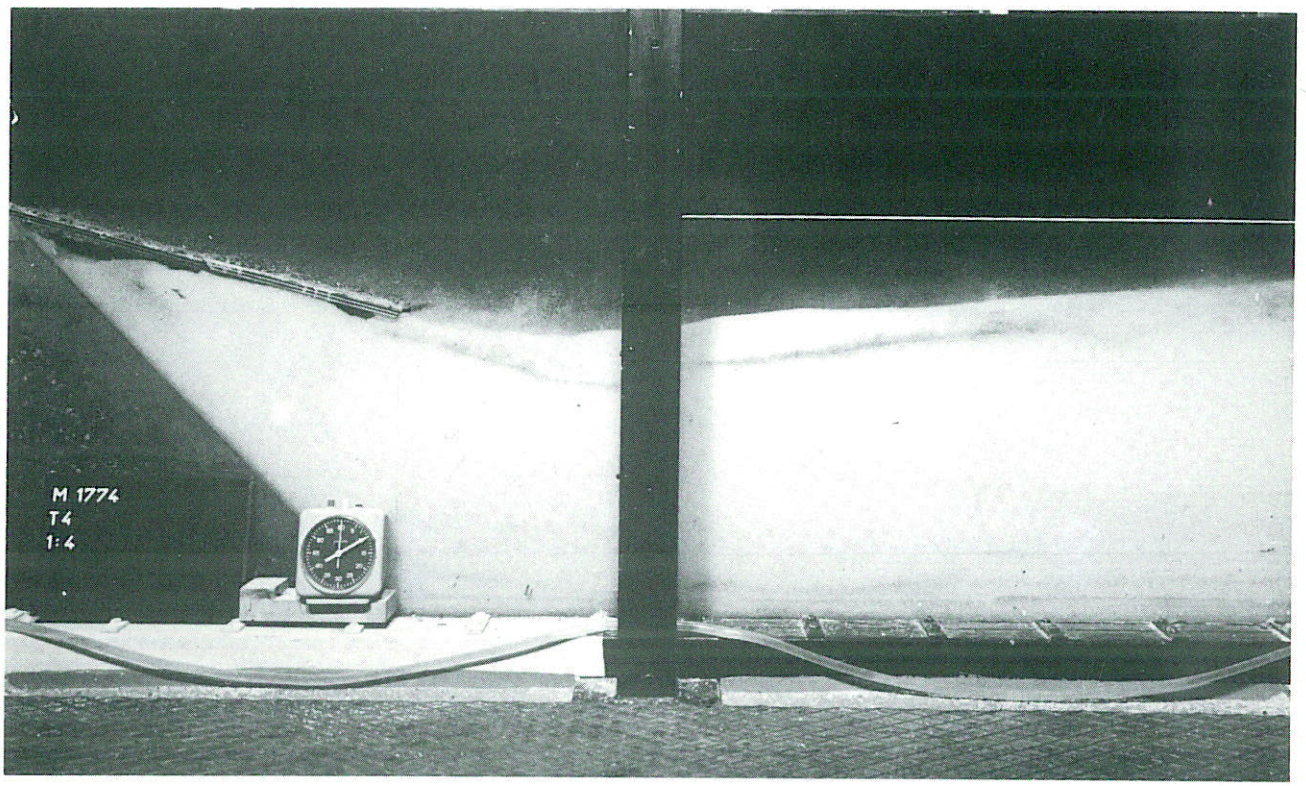
7 Ontgrondingsbeeld na 0,04 uur stromen



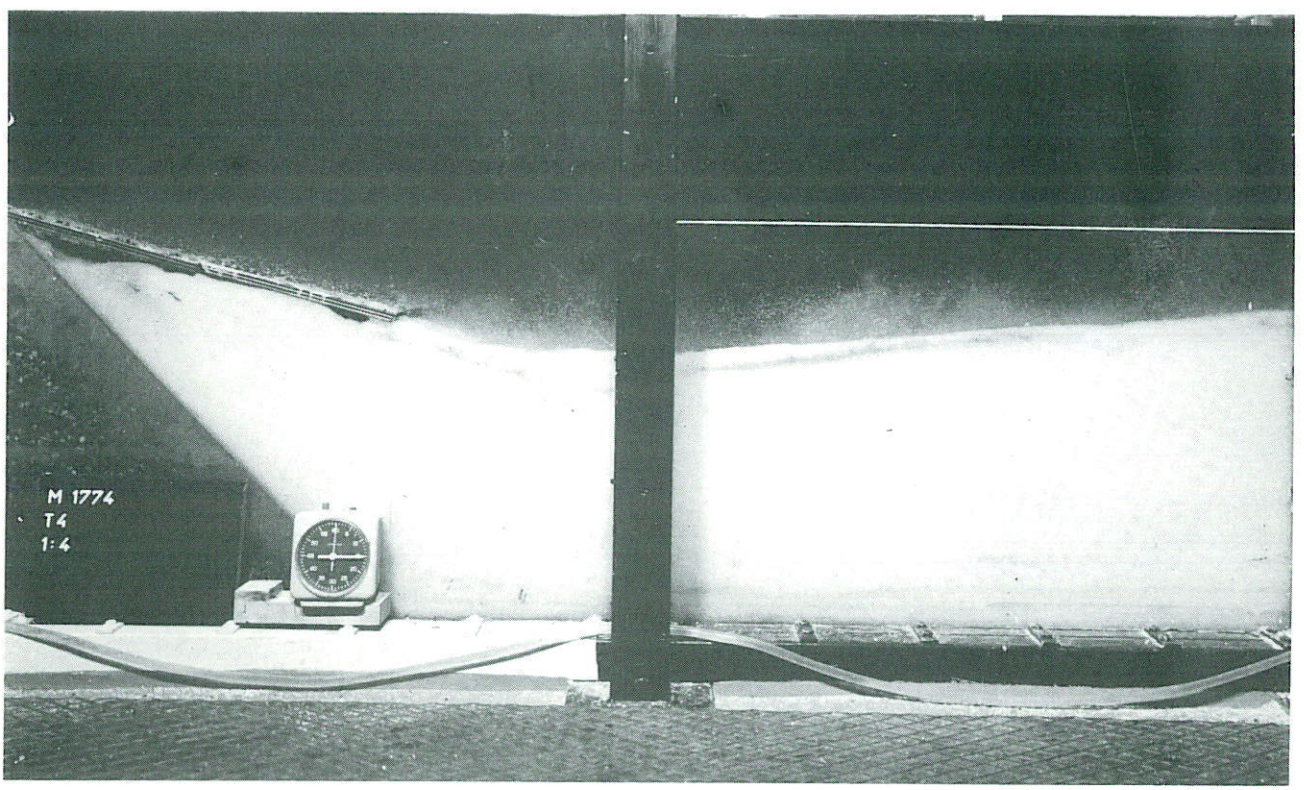
8 Ontgrondingsbeeld na 0,098 uur stromen



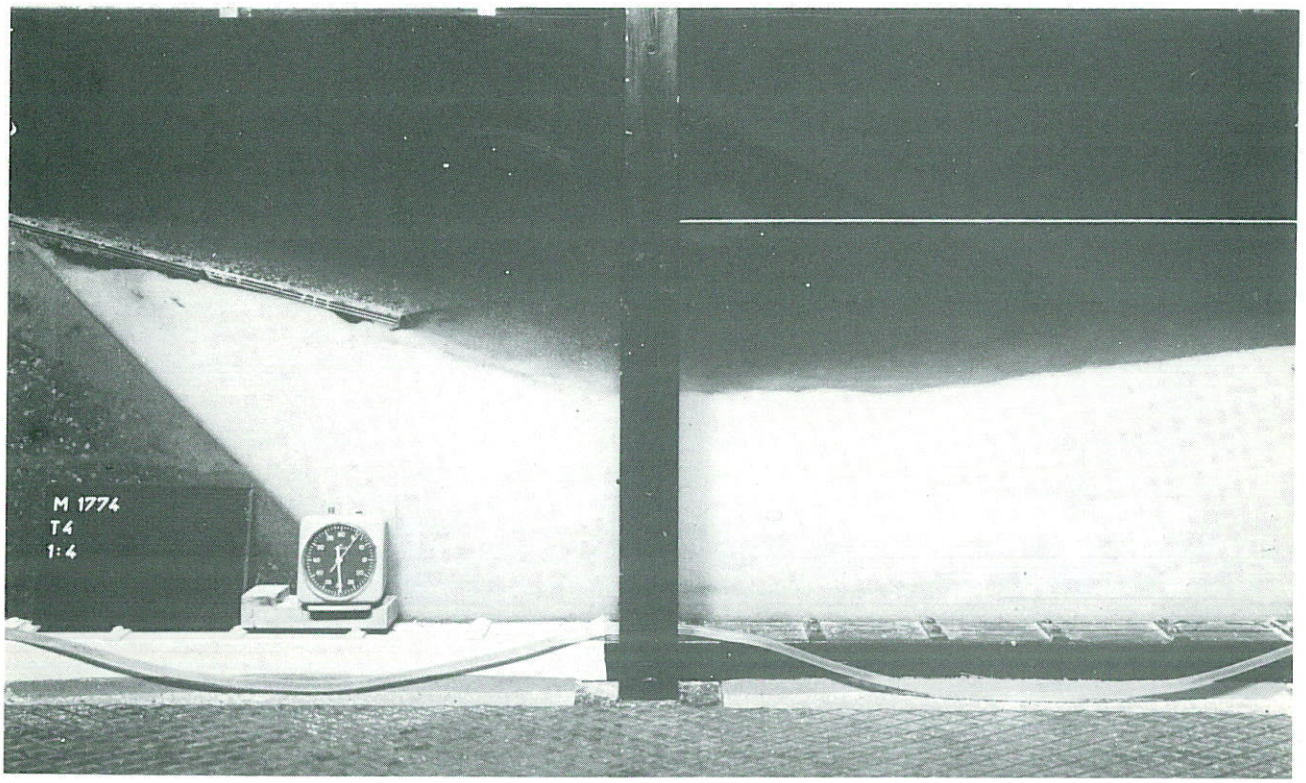
9 Ontgrondingsbeeld na 0,127 uur stromen



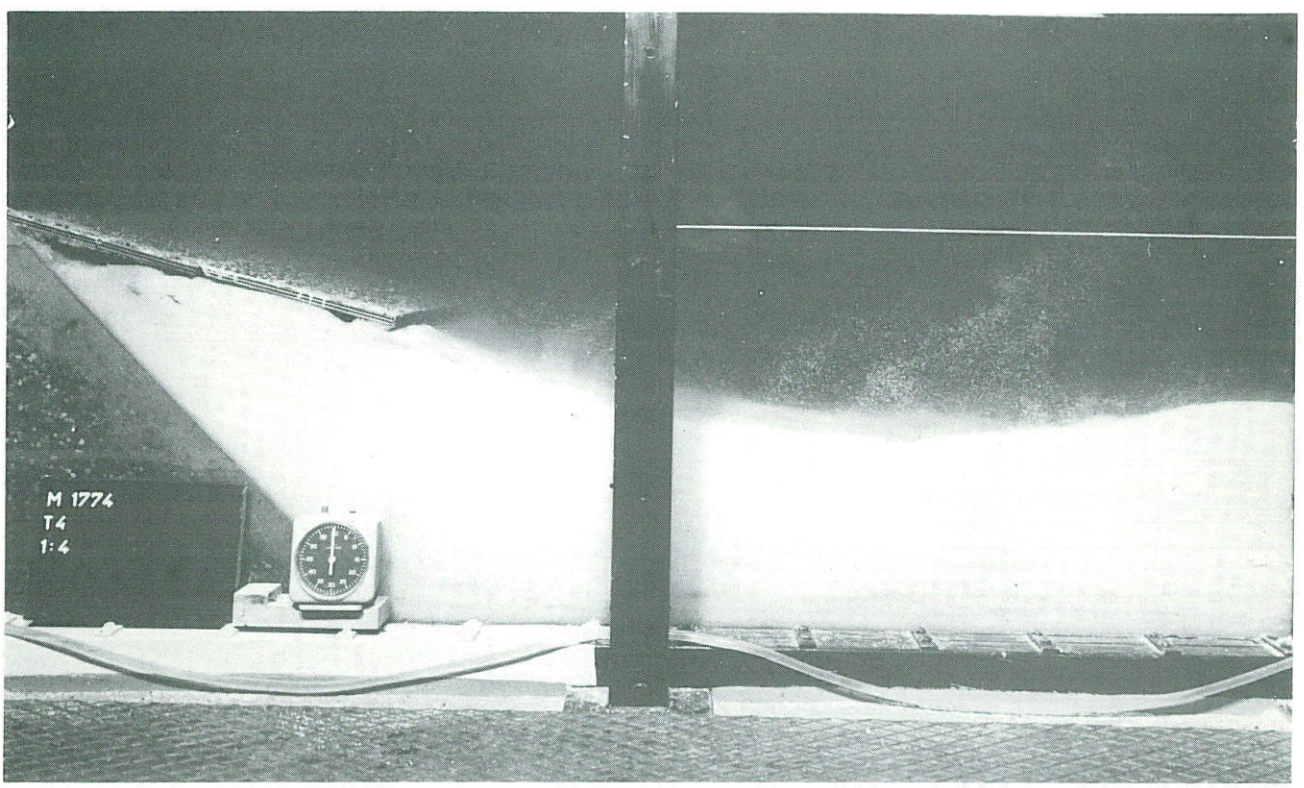
10 Ontgrondingsbeeld na 0,167 uur stromen



11 Ontgrondingsbeeld na 0,250 uur stromen



12 Ontgrondingsbeeld na 0,485 uur stromen



13 Ontgrondingbeeld na 1,0 uur stromen

p.o. box 177 2600 mh delft the netherlands