S-79.052

ARCHIEFEXEMPLAAR

waterloopkundig laboratorium
delft hydraulics laboratory

ARCHIEFEXEMPLAAR

onderzoek naar duinafslag tijdens superstormvloed

toetsing van de resultaten van het twee-dimensionale modelonderzoek door middel van onderzoek in een drie-dimensionaal model

tekst en tabellen

verslag modelonderzoek

M 1653 deel A

december 1981

Auteur : Waterloopkundig Laboratorium.

Titel : Onderzoek naar duinafslag tijdens superstormvloed.
Toetsing van de resultaten van het twee - dimensionale modelonderzoek in een drie - dimensionaal model.
Verslag modelonderzoek M 1653, deel A en B, december 1981.

Inhoud : Het rapport beschrijft een drie - dimensionaal model-onderzoek naar duinafslag tijdens superstormvloed aan een rechte kust.
Het voorgaande modelonderzoek werd uitgevoerd in smalle goten in de vorm van een schaalserie (M 1263 I en II).
Doel van het onderzoek is na te gaan in hoeverre de twee - dimensionale benadering voldoet in situaties met schuine golfinval, welke een betere weergave van de werkelijk optredende stormvloedomstandigheden geven (langsstromen, muistromen).
Het beschreven onderzoek is uitgevoerd als onderdeel van het onderzoekprogramma van werkgroep 5 "Duinen als waterkering" van de Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW).
De proeven, uitgevoerd met golfinvalshoeken van 0°, 10° en 20°, laten een goede overeenkomst zien met het twee - dimensionale model wat betreft de afslaghoeveelheid en het afslagprofiel.
In het drie - dimensionale model wordt het afgeslagen zand echter in een enkel geval verder verspreid dan gevonden in het twee - dimensionale model.

ARCHIEFEXEMPLAAR

onderzoek naar duinafslag tijdens superstormvloed

toetsing van de resultaten van het twee-dimensionale modelonderzoek door middel van onderzoek in een drie-dimensionaal model

tekst en tabellen

verslag modelonderzoek

M 1653 deel A

december 1981

Dit verslag bestaat uit twee onderdelen.

KORTE INHOUDSOPGAVE

DEEL A: TEKST EN TABELLEN

1 Inleiding
2 Schaalrelaties
3 Model en randvoorwaarden
4 Meetresultaten
5 Vergelijking van de resultaten uit het drie-dimensionaal model met het twee-dimensionaal model
6 Invloed van de kustlengte en de hoek van golfinval op het prototyperesultaat
7 Toetsing schaalrelaties twee-dimensionaal onderzoek
8 Samenvatting en conclusies

LITERATUUR

ANNEX

DEEL B: FIGUREN EN FOTO'S

SUMMARY

The primary sea defence system of The Netherlands consists for a large part of sandy beaches and dunes. The row of dunes, however, is rather narrow in some places, due to long-term erosion, and reinforcement has become necessary. In this respect a special governmental committee (Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen) requested the co-operation of the Delft Hydraulics Laboratory to develop a design criterion for a dune sea defence system that could withstand a storm surge with a frequency of occurrence of once in 10,000 years. For that purpose all relevant field observations on dune erosion were analysed and a provisional, empirical, guide-line was developed in 1972 [1]. However, because of the limited amount of field data and the complexity of a theoretical approach it was decided to check the validity of this guide-line by means of a model investigation.

As no adequate scaling relationships are available for sand transport under waves, especially as far as the offshore sand transport during a storm surge is concerned, the tests were set up in the form of a scale series. A large number of two-dimensional tests with various geometric scales using four types of sand (D_{50} = 225 μm, 150 μm, 130 μm and 95 μm) was carried out from 1974 to 1977. Simple relations were assumed for the model distortion n_l/n_d (length scale over depth scale) and for the morphological time scale n_t, viz.:

$$n_l/n_d = n_d^{\alpha} \; ; \; n_t = n_d^{\beta} \; ,$$

in which α and β are constants, while n represents prototype value over model value. The values of α and β were determined by a correlation analysis and the following relations were found for $n_D = 1$:

$$n_l/n_d = n_d^{0.28} \; ; \; n_t = n_d^{0.5} .$$

Consequently the scale of the dune erosion quantity per unit length of coast is

$$n_A = n_l * n_d = (n_d)^{2.28} .$$

On the assumption that these relations are also valid beyond the scale range used, a prototype value for the dune erosion was found [2,3]. One of the basic schematizations, however, is the reproduction of dune erosion in a flume, this means in a two-dimensional model. In a situation with wave incidence perpendicular to the coast, this seems a reasonable approximation. The present model

investigation was set up in order to verify whether the two-dimensional model satisfies situations with oblique wave attack, which fit better the conditions during a storm surge.

The model investigation was performed in a model basin in the De Voorst Laboratory of the Delft Hydraulics Laboratory during the second half of 1980. The basin has horizontal dimensions 30 m x 40 m and the maximum water depth is 0.6 m. The investigation was performed with irregular waves and with the smallest sand size of the two-dimensional investigation, viz. with D_{50} = 95 μm. Related to the assumed conditions during the design storm surge, with a significant wave height H_{os} = 7.6 m and a maximum water level of 5 m above mean sea level, the vertical scale was n_d = 60. The tests were done for a representative coastal profile in the prototype, which was reproduced according to the depth scale and a horizontal scale, derived from the scale relationship for the model distortion.

Three tests were performed with a fixed water level, corresponding with the maximum design storm surge level:

(1) test with perpendicular wave attack to the coast in "flumes" of 1 m, 4 m and 25 m width;
(2) test with deep water wave incidence of 20° to the coast;
(3) test with deep water wave incidence of 10° to the coast.

Furthermore, a fourth test was performed with a wave incidence of 10° and a varying water level during the test, corresponding with the assumed water level variation during the design storm surge.

The results of the present model investigation indicate that the dune erosion in the three-dimensional tests is in good agreement with that in the two-dimensional model. Moreover, the coastal profile which developed during the tests is not significantly different from the parabolic profile resulting from the two-dimensional tests. However, the eroded sand from the dunes may be spread somewhat farther seaward than is concluded from the results of the two-dimensional model investigation.

INHOUD

		blz.
1.	Inleiding	1
1.1	Voorgeschiedenis	1
1.2	Opdracht	2
2.	Schaalrelaties	3
2.1	Inleiding	3
2.2	Toepassing schaalrelaties	3
3.	Model en randvoorwaarden	5
3.1	Proeven	5
3.2	Bodemmateriaal	7
3.3	Beginprofielen	8
3.4	Golfbeweging en waterstand	9
3.4.1	Proeven met vaste waterstand	9
3.4.2	Proef met variërende waterstand	9
3.5	Proefduur	10
4.	Meetresultaten	12
4.1	Inleiding	12
4.2	Profielen	12
4.3	Dieptelijnen	12
4.4	Golfhoogte	13
4.5	Brandingstroom	14
4.6	Langstransport	19
4.7	Korrelgrootte	24
4.8	Watertemperatuur	24
4.9	Visuele waarnemingen	24
5.	Vergelijking van de resultaten uit het drie-dimensionaal model met het twee-dimensionaal model	27
5.1	Inleiding	27
5.2	Afslaghoeveelheid boven de waterlijn	28
5.2.1	Afslaghoeveelheid in het model	28
5.2.2	Herleiding tot prototype afslagresultaat	28

INHOUD (vervolg)

blz.

5.2.3 Vergelijking met twee-dimensionaal model 30
5.3 Afslagprofiel beneden de waterlijn 33
5.3.1 Afslagprofiel in het model 33
5.3.2 Herleiding tot prototype afslagprofiel 33
5.3.3 Vergelijking met twee-dimensionaal model 34
5.4 Duinvoethoogte boven de waterlijn 35
5.4.1 Duinvoethoogte in het model 35
5.4.2 Herleiding tot prototype duinvoethoogte 35
5.4.3 Vergelijking met twee-dimensionaal model 36
5.5 Afstand duinvoet tot de waterlijn 38
5.5.1 Duinvoetafstand in het model 38
5.5.2 Herleiding tot prototype duinvoetafstand 39
5.5.3 Vergelijking met twee-dimensionaal model 40
5.6 Verspreidingsafstand van het afgeslagen zand 42
5.6.1 Inleiding 42
5.6.2 Herleiding tot prototype verspreidingsafstand 42
5.6.3 Vergelijking met twee-dimensionaal model 43

6. Invloed van de kustlengte en de hoek van golfinval op het prototype-resultaat 46
6.1 Inleiding 46
6.2 Invloed van de kustlengte 46
6.3 Invloed van de hoek van golfinval 48

7. Toetsing schaalrelaties twee-dimensionaal model 51
7.1 Inleiding 51
7.2 Toetsing schaalrelaties 52

8. Samenvatting en conclusies 56

LITERATUUR

ANNEX

TABELLEN

1 Golfhoogtemetingen proef P001

2 Golfhoogtemetingen proef P002

3 Golfhoogtemetingen proef P003

4 Golfhoogtemetingen proef P004

5 Toetsing golfhoogte t.p.v. d = 2 H_{os} voor proef P001

6 Toetsing golfhoogte t.p.v. d = 2 H_{os} voor proef P002

7 Toetsing golfhoogte t.p.v. d = 2 H_{os} voor proef P003

8 Zeefanalyse proef P001

9 Zeefanalyse proef P002

10 Zeefanalyse proef P003

11 Zeefanalyse proef P004

12 Watertemperatuur tijdens de proeven

13 Afslagresultaten in model, proef P001

14 Afslagresultaten in model, proef P002

15 Afslagresultaten in model, proef P003

16 Afslagresultaten in model, proef P004

17 Prototype afslagresultaten proef P001

18 Prototype afslagresultaten proef P002

19 Prototype afslagresultaten proef P003

20 Prototype afslagresultaten proef P004

21 Invloed van de correctie van de samentrekking van het beginprofiel (proef P001)

22 Invloed van de correctie van de samentrekking van het beginprofiel (proef P002)

23 Invloed van de correctie van de samentrekking van het beginprofiel (proef P003)

ONDERZOEK NAAR DUINAFSLAG TIJDENS SUPERSTORMVLOED

Toetsing van de resultaten van het twee-dimensionale modelonderzoek door middel van onderzoek in een drie-dimensionaal model

1. Inleiding

1.1 Voorgeschiedenis

In opdracht van de Werkgroep 5, Duinen als Waterkering, van de Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen is in 1971 door het Centrum voor Onderzoek Waterkeringen en het Waterloopkundig Laboratorium een voorlopige richtlijn ontwikkeld voor de beoordeling van de veiligheid van een duinwaterkering [1]. Het voorlopige karakter van deze richtlijn is ingegeven door het feit dat bij de opstelling slechts weinig gegevens beschikbaar waren en veel veronderstellingen moesten worden gedaan.

Het is duidelijk dat een definitieve richtlijn in voldoende mate onderbouwd dient te worden door prototype- en/of modelonderzoek. Vanwege het gebrek aan prototype-gegevens werd in 1974 gestart met modelonderzoek. De fysische achtergrond van het duinafslagverschijnsel is echter onvoldoende bekend om eenduidige schaalregels op te stellen voor de reproduktie op kleine schaal. Teneinde toch inzicht te verkrijgen in het proces en de mate van duinafslag tijdens een superstormvloed, werden de proeven op verschillende schalen uitgevoerd. Voor uitgebreide achtergrondinformatie wordt verwezen naar het verslag M 1263, deel IA en IB van april 1976 [2] en het verslag M 1263 deel IIA en IIB van april 1981 [3].

Dit modelonderzoek heeft steeds plaatsgevonden met sterk geschematiseerde begin- en randvoorwaarden. Schematisatie is nodig om het proces goed te kunnen volgen en de benodigde schaalrelaties te kunnen afleiden. Een van de belangrijkste schematisaties is de reproductie van duinafslag in een goot, dus twee-dimensionaal. Voor een situatie met golfaanval loodrecht op de kust is dit een redelijke benadering.

Het onderzoek naar het proces van duinafslag heeft inmiddels het stadium bereikt dat onderzocht dient te worden in hoeverre de twee-dimensionale benadering voldoet in situaties met schuine golfinval, welke beter aansluiten bij de werkelijk optredende stormvloedomstandigheden. Hiertoe is het nodig proeven te doen in een drie-dimensionaal model.

1.2 Opdracht

Het onderzoek naar duinafslag met behulp van een drie-dimensionaal model past in het algehele duinafslagonderzoek, zoals opgezet door de Werkgroep 5 van de Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen.
Het Waterloopkundig Laboratorium heeft bij brief V8859/M1263/Vel/JB, dd. 28 november 1978, aan de Werkgroep een voorstel gedaan voor uit te voeren onderzoek in het Laboratorium De Voorst. Het aangeboden proevenpakket omvatte vijf proeven: drie proeven met vaste waterstand en golfinvalsrichtingen op "diep" water van 0°, 10° en 20° en twee proeven met variërende waterstand ter reproduktie van de stormvloed van 1953 en een superstormvloed. Tijdens de vergadering van de Werkgroep op 8 december 1978 is het voorstel voor drie-dimensionaal modelonderzoek naar duinafslag geaccepteerd. Op 10 oktober 1979 werd bij brief nr. 1188 door het Centrum voor Onderzoek Waterkeringen ten behoeve van de Werkgroep opdracht gegeven tot het doen uitvoeren van het voorgestelde onderzoek.

Op grond van de resultaten van de eerste drie-dimensionale proeven werd besloten de toetsingsproef stormvloed-1953 alsnog te laten vervallen. Er mocht namelijk worden verwacht dat de resultaten van deze toetsingsproef met scheef invallende golven niet wezenlijk zouden verschillen van de resultaten van de eerder uitgevoerde twee-dimensionale toetsingsproef. Daarenboven was in het proevenpakket voor de Deltagoot deze toetsingsproef reeds opgenomen om de gevonden schaalrelaties te verifiëren.

Het modelonderzoek is uitgevoerd in de periode van november 1979 tot juni 1980 in de "Havenbak" van het Laboratorium De Voorst en stond onder leiding van ir. W.M.K. Tilmans, die tevens het onderhavige verslag heeft samengesteld.

2. Schaalrelaties

2.1 Inleiding

Het fysische proces van duinafslag is onvoldoende bekend om langs theoretische weg direct toepasbare schaalbetrekkingen af te leiden. Daarom werd het voorafgaande modelonderzoek opgezet in de vorm van een schaalserie. Dat wil zeggen dat het duinafslagproces op verschillende schalen is nagebootst. Uit de onderlinge vergelijking van de proeven werden schaalrelaties afgeleid waarmee de modelresultaten herleid zijn naar prototyperesultaten.

De schaalrelaties, welke in het onderhavige onderzoek zijn toegepast, werden deels door literatuurstudie en deels langs empirische weg in het voorgaande onderzoek vastgesteld. Voor uitgebreide achtergrondinformatie wordt verwezen naar het verslag M 1263-II [3]. Het blijkt niet zonder meer mogelijk een schaalmodel te maken van het duinafslagproces. Het reproduceren van de waterbeweging is nog wel mogelijk, maar het vinden van een bodemmateriaal dat aan alle voorwaarden voldoet is onmogelijk. Om deze reden is destijds gekozen voor de opzet van een schaalserie. Voor het nabootsen van de waterbeweging is uitgegaan van de Froude-schaal voor de golfbeweging. Als bodemmateriaal zijn verschillende zandsoorten toegepast. Omdat het niet mogelijk is het bodemmateriaal goed op schaal weer te geven zullen in het model schaaleffecten optreden. Door het verrichten van een groot aantal proeven met verschillende schaalfactoren kon, door vergelijking van de resultaten, dit schaaleffect als functie van de schaalfactor worden bepaald.

2.2 Toepassing schaalrelaties

Bij de voorafgaande proeven bleek, dat de belangrijkste schaaleffecten werden gevonden in de helling van het afslagprofiel en de snelheid waarmee het duinafslagproces verliep in het model.

Uitgaande van de relatie $n_l/n_d = (n_d)^{\alpha}$ werd gevonden dat $\alpha = 0{,}28$ de beste keuze was voor de α-waarde. Op basis van de relatie $n_l/n_d = (n_d)^{0{,}28}$ voor proeven met dezelfde zandsoort, kon voor proeven met verschillende zandsoorten, maar met gelijke waarde van de valsnelheidsparameter H/Tw, de relatie worden afgeleid tussen de diepteschaal, de valsnelheid en de samentrekking. Deze geïntegreerde samentrekkingsrelatie kan als volgt worden geschreven:

$$n_l/n_d = (n_d/n_w^2)^{0,28} \quad (1)$$

Een andere onmisbare schaalrelatie voor de opzet en de interpretatie van de proeven is de relatie voor de morfologische tijdschaal. Uitgaande van de relatie $n_t = (n_d)^{\beta}$ werd in het voorafgaande onderzoek gevonden dat $\beta = 0,5$ of:

$$n_t = (n_d)^{0,5} \quad (2)$$

Deze tijdschaalrelatie komt overeen met de hydrodynamische schaalbetrekking. Voor de opzet van de huidige proeven is uitgegaan van bovenstaande empirisch-theoretische schaalrelaties.

3. Model en randvoorwaarden

3.1 Proeven

De meest geschikte modelfaciliteit in het Laboratorium De Voorst voor het driedimensionale onderzoek naar duinafslag was de "Havenbak". Deze modelfaciliteit is uitgerust met golfmachines waarmee onregelmatige golven kunnen worden opgewekt. De afmetingen zijn:

- breedte langs de golfmachines : 30 m
- lengte : 40 m
- maximale waterdiepte : 0,6 m

Om een schatting te kunnen maken van de in het modelonderzoek toe te passen golfinvalsrichtingen zijn in onderstaande tabel de golfvoortplantingsrichtingen tijdens "zware storm" (windkracht 10 of meer op de schaal van Beaufort; windsnelheid groter dan 25 m/s) weergegeven, zoals die voor de Nederlandse kust vanaf de lichtschepen Texel en Goeree zijn waargenomen in de periode 1949 tot 1963 [4]. Tevens is in deze tabel aangegeven of daarbij het grenspeil (overschrijdingskans 0,5 x per jaar) in Den Helder (N.A.P. + 2,15 m) en Hoek van Holland (N.A.P. + 2,42 m) is overschreden.

Het blijkt dat tijdens "zware storm" waarbij het grenspeil aan de kust overschreden wordt, de gemiddelde golfinval is waargenomen uit een richting die voor lichtschip Texel ligt tussen 280° N en 330° N en voor lichtschip Goeree tussen 300° N en 340° N. De gemiddelde kustoriëntatie is in Zuid-Holland in de richting 35° N tot 40° N en in Noord-Holland in de richting 5° N tot 15° N. Dientengevolge resulteert voor de Zuid-Hollandse kust uit de waarnemingen van lichtschip Goeree een golfinvalshoek ten opzichte van de kustlijn van 5° tot 35° (op een diepte van N.A.P. -20 m). Uit de waarnemingen van lichtschip Texel volgt voor de Noord-Hollandse kust een golfinvalshoek ten opzichte van de kustlijn van 5° tot 55° (op een diepte van N.A.P. -26 m).

De februari-storm van 1953 heeft over de beschouwde periode van 1949 tot 1963 de hoogste wateropzet aan de Nederlandse kust teweeg gebracht. De uit de waarnemingen afgeleide golfinvalshoek ten opzichte van de kustlijn bedraagt voor de Noord-Hollandse kust 10° tot 20° en voor de Zuid-Hollandse kust 10° tot 15°.

		lichtschip Texel		lichtschip Goeree	
jaar	maand	golfrichting t.o.v. N (^{o})	grenspeil in Den Helder	golfrichting t.o.v. N (^{o})	grenspeil in Hoek van Holland
1949	maart	280-300	x	300	x
	december	280-290			
	december	290			
	december	300		290	
1952	november			300-320	
1953	februari	290-300	x	300-340	x
1954	januari	260-270		280-290	
	december	onbekend	x	300-320	x
	december	320	x	310-330	x
1956	januari	240-270			
1959	oktober			210-220	
1960	januari	310-330	x	300-310	
	december			230-240	
1961	december	270-280			
1962	januari	270			
	februari	280-310	x	300-320	x
	december	290		290-310	

Lichtschepen Texel en Goeree - golfinvalsrichtingen bij storm met windkracht $\geq$ 10 op schaal van Beaufort.

Indien wordt aangenomen dat de golfinvalshoek tijdens een superstormvloed niet wezenlijk zal verschillen van de waarnemingen tijdens de beschouwde stormvloeden, mag uit het bovenstaande worden gekonkludeerd dat voor het huidige onderzoek golfinvalshoeken op "diep" water tussen 0° en 20° een reële afspiegeling zijn van de in de natuur waargenomen waarden. Op grond van deze conclusie zijn de golfinvalshoeken voor het drie-dimensionale onderzoek vastgesteld.

De volgende serie proeven is uitgevoerd met een vaste waterstand op het maximale stormvloedpeil van N.A.P. +5,0 m:

P001 : proef met loodrecht invallende golven op verschillende kustlengten. Hiertoe is de faciliteit onderverdeeld in drie bakken met respektievelijk 1 m, 4 m en 25 m lengte langs de golfmachines. De 1 m-bak is nodig om het verband tussen de eerder uitgevoerde twee-dimensionale proeven en de uit te voeren drie-dimensionale proeven te verifiëren. In de 4 m-bak en 25 m-bak kan het eventuele effect van de aangevallen kustlengte op de duinafslag worden nagegaan. Figuur 1 geeft het modeloverzicht

P002 : proef met schuin invallende golven met $\phi_o = 20^o$ (figuur 2)

P003 : proef met schuin invallende golven met $\phi_o = 10^o$ (figuur 3)

Daarnaast is een aanvullende proef met variërende waterstand uitgevoerd ter simulatie van de superstormvloed:

P004 : proef met schuin invallende golven met $\phi_o = 10^o$ (figuur 3). Het veronderstelde waterstandsverloop in het prototype is gegeven in figuur 7.

3.2 Bodemmateriaal

Bij de proeven is uitgegaan van de veronderstelling, dat het bodemmateriaal in het prototype een korreldiameter heeft van D_{50} = 225 µm. In water met een temperatuur van 10° C is de valsnelheid w = 0,0267 m/s. Deze valsnelheid is bepaald aan de hand van valsnelheidsproeven, die in het Laboratorium voor Vloeistofmechanica van de Technische Hogeschool te Delft zijn uitgevoerd (zie de figuren 65 en 66).

In het onderhavige onderzoek is als bodemmateriaal de fijnste zandsoort van het twee-dimensionale onderzoek toegepast. Dit zand is pleistoceen zand, dat is afgezet als glaciaal bekkenzand in het Elsterien. Door erosie van de bovenliggende lagen ligt het bij Assen nagenoeg aan de oppervlakte. Het wordt daar gewonnen door de firma Trip Popken. De D_{50} van deze zandsoort bedraagt ongeveer 100 µm. Het zand bevat circa 3,5% slib, gedefinieerd als deeltjes kleiner dan 16 µm.

Gezien de benodigde hoeveelheden zand in het model werd het financieel niet haalbaar geacht de proevenserie met gespoeld zand uit te voeren. Daarnaast is uit een door het Waterloopkundig Laboratorium uitgevoerd vooronderzoek [5] niet gebleken, dat het ongespoelde zand zich wezenlijk anders gedraagt dan het gespoelde zand. Het benodigde zand is derhalve vanaf de winplaats te Zeyen

zonder verdere behandeling rechtstreeks in het model gebracht. Tijdens de proeven werd uit visuele waarnemingen niet de indruk verkregen dat het aanwezige slib van invloed was op het transportproces.

Uit een nadere zeefanalyse van het zand bleek dat de korreldiameter D_{50} = 105 µm was (figuur 58). In water met een temperatuur van 10° C is de hierbij behorende valsnelheid w = 0,0089 m/s.

3.3 Beginprofielen

Bij de proeven is uitgegaan van een geschemetiseerd kustprofiel, referentieprofiel genoemd (zie figuur 4). Dit profiel komt ongeveer overeen met het gemiddelde profiel van de Nederlandse kust (zie figuur 5). De duinhoogte is N.A.P. +15,0 m, de helling van het duinfront is 1:3. De duinvoet, dat is de min of meer fictieve plaats waar het relatief flauwe strandbeloop overgaat in het veel steilere zeewaartse beloop van de duinregel, ligt op N.A.P. +3,0 m. Vanaf de duinvoet tot N.A.P. wordt een helling 1:20 aangenomen. Vanaf N.A.P. tot N.A.P. -3,0 m is de helling 1:70. Verder zeewaarts is de helling 1:180.

Uit het voorgaande onderzoek kwam de samentre-kingsrelatie $n_l/n_d = (n_d/n_w^2)^{0,28}$ naar voren. Onder de samentrekking wordt verstaan de verhouding tussen de lengteschaal (n_l) en de diepteschaal (n_d). De huidige proeven zijn alle uitgevoerd met eenzelfde diepteschaalfactor n_d = 60. Voor deze proeven met asserzand moet het beginprofiel in het model worden gebouwd met een samentrekking:

$$n_l/n_d = \left[\frac{60}{(\frac{0,0267}{0,0089})^2}\right]^{0,28} = 1,7 \qquad (3)$$

om de duinafslag voor het referentieprofiel na te bootsen. De gevonden hoeveelheid afslag moet worden vermenigvuldigd met de oppervlakteschaalfactor om de prototype afslaghoeveelheid te verkrijgen (m^3/m'):

$$n_A = n_l \times n_d = 60^2 \times 1,7 = 6120 \qquad (4)$$

Vanwege de beperkte afmetingen van de "Havenbak" zijn de beginprofielen voor de diverse proeven met een samentrekking 2 in het model gebouwd. Dit is iets steiler dan uit voornoemde samentrekkingsrelatie volgt. De proeven hebben dan ook betrekking op een prototypeprofiel dat een factor S = 2/1,7 = 1,18 steiler is dan het referentieprofiel. Dit is voor de toetsing echter geen enkel bezwaar, daar het afslagresultaat als functie van de prototype samentrekking bekend wordt verondersteld.

Voorts kan worden afgeleid, dat de uitgevoerde proeven met asserzand en diepteschaalfactor $n_d = 60$ overeenkomen met een duinzandproef met diepteschaalfactor:

$$n_d^* = \frac{n_d}{n_w^2} \frac{60}{(\frac{0,0267}{0,0089})^2} = 6,67 \qquad (5)$$

In par. 5.2.2 wordt voor de herleiding van de modelresultaten naar waarden voor het prototype nog een differentiatie aangebracht in de schaalfactoren van de verschillende proeven, op grond van de gemeten waarden voor de D_{50} van het bodemmateriaal en de watertemperatuur tijdens de proeven.

3.4 Golfbeweging en waterstand

3.4.1 Proeven met vaste waterstand

In het model zijn onregelmatige golven toegepast met een spectrumvorm volgens Pierson en Moskowitz (zie figuur 6). Bij de modelvoering is uitgegaan van de prototype omstandigheden tijdens een superstormvloed. De randvoorwaarden zijn identiek aan die welke gebruikt zijn in het twee-dimensionale onderzoek:

golfperiode (top van het spectrum) : $\hat{T} = 12$ sec

significante golfhoogte op 25 m waterdiepte (N.A.P. -20 m) : $H_s = 7,0$ m

diepwater significante golfhoogte (teruggerekend met de lineaire golftheorie) : $H_{os} = 7,6$ m

Om praktische redenen is uitgegaan van een diepteschaalfactor $n_d = 60$. De waterdiepte bij het golfschot is 0,38 m, zodat in het model het prototype kustprofiel tot 22,80 m waterdiepte is weergegeven. De golfperiode is op schaal gebracht volgens $n_T = \sqrt{n_d} = 7,75$. De periode die behoort bij de top van het opgelegde spectrum wordt daarom in het model $\hat{T} = 12/7,75 = 1,55$ s. De bijbehorende significante golfhoogte ter plaatse van het golfschot wordt dan volgens de lineaire golftheorie: $H_s = 0,117$ m.

3.4.2 Proef met variërende waterstand

Naast de 3 proeven met vaste waterstand is één proef met variërende waterstand uitgevoerd. Als beginprofiel is weer gekozen voor het zgn. referentieprofiel en de toegepaste diepteschaalfactor is $n_d = 60$. Voor het verloop van de waterstand en de golfhoogte worden de veronderstelde prototype-omstandigheden tijdens een superstormvloed nagebootst op deze diepteschaal. Gezien de onbekendheid met het werkelijke waterstandsverloop tijdens een superstormvloed is door het Centrum voor Onderzoek Waterkeringen een verloop voorgesteld op basis van de volgende overwegingen [6]:

1 De hoogste waterstand is N.A.P. +5,0 m. Deze waterstand komt nagenoeg overeen met het ontwerppeil voor de "schone" kust. Voor Zeeland moet een hoger peil maatgevend worden geacht. Het niveau van N.A.P. +5,0 m komt overeen met de vaste waterstand tijdens de overige duinafslagproeven zodat vergelijking mogelijk is.
2 Het maximum stormeffect en het astronomisch hoogwater vallen samen. Een één-toppige storm wordt maatgevend geacht voor de mate van duinafslag.
3 Het astronomisch getij is een hoog springtij. De getijkromme wordt geacht te kunnen worden beschreven door een cosinusvormige functie welke fluctueert tussen N.A.P. +1,45 m en N.A.P. -0,55 m met een periode van 12,42 uur. Dit is een redelijke weergave van een fors springtij te Hoek van Holland.
4 Het stormeffect kan worden beschreven door een $\cos^2$-vormige functie met een basis van 45 uur en een maximum opzet van 5,0 m - 1,45 m = 3,55 m.

Het bovenstaande resulteert in de volgende formulering voor het mogelijke waterstandsverloop tijdens een superstormvloed:

$$h = 0{,}45 + 1{,}00 \cos \frac{2\pi(t-t_1)}{12{,}42} + 3{,}55 \cos^2 \frac{\pi(t-t_1)}{45{,}0} \qquad (6)$$

voor : $t_1 - D/2 \leq t \leq t_1 + D/2$

waarin: h = waterstand in meter t.o.v. N.A.P.
t_1 = tijdstip van de maximale waterstand in uren
t = tijd in uren
D = duur van het stormeffect (45 uren)

Het waterstandsverloop is weergegeven in figuur 7. Tijdens de proef is dit verloop nagebootst met de tijdschaal $n_t = \sqrt{n_d} = 7{,}75$.

Er is verondersteld dat tijdens de stormduur ook het inkomende golfveld zal variëren. Voor de onderhavige proef is aangenomen dat bij een stormeffect lager dan N.A.P. + 3,25 m een diepwater significante golfhoogte van H_{os} = 5,5 m een reëel uitgangspunt is. Bij een hoger stormeffect is een golfhoogte H_{os} = 7,6 m aangenomen (overeenkomstig de proeven met vaste waterstand).

3.5 Proefduur

De tijdsduur die relevant wordt geacht voor het proces van duinafslag in de natuur bedraagt 5 à 10 uur. Bij de voorgaande proeven werd gevonden dat de morfologische tijdschaal het beste kan worden beschreven als:

$$n_t = \sqrt{n_d} \tag{7}$$

Op basis van deze tijdschaal kan voor de huidige proeven worden gesteld dat de tijdsduur in het model minimaal moet bedragen:

$$t = \frac{5 \text{ uur à } 10 \text{ uur}}{\sqrt{60}} = 0{,}6 \text{ uur à } 1{,}3 \text{ uur} \tag{8}$$

Uiteindelijk werd gekozen voor een tijdsduur van 10 uur om ook de morfologische ontwikkeling in het model op iets langere termijn te kunnen volgen.

4. Meetresultaten

4.1 Inleiding

Het doel van de drie-dimensionale proeven is een toetsing van de resultaten uit het twee-dimensionale onderzoek, gekwantificeerd in afslaghoeveelheid, profielvorm, verspreidingsafstand en duinvoetontwikkeling. Hiertoe zijn in het model een aantal profielen en dieptelijnen op gezette tijden opgemeten.
Daarnaast zijn metingen verricht om de randvoorwaarden tijdens de proeven vast te leggen. Hieronder vallen metingen betreffende rondpompdebiet, zanddosering en zandvangst, korrelgrootte bodemmateriaal, golfhoogten en watertemperatuur.

4.2 Profielen

In een aantal raaien is de hoogteligging van het duin, het strand en de vooroever in mm nauwkeurig opgemeten met waterpasinstrument en baak. De profielmetingen zijn beperkt gehouden tot 15,00 m zeewaarts van de basislijn welke 1,50 m landwaarts van de initiële kruinlijn ligt. Verder zeewaarts dan 15,00 m mag worden verwacht dat de profielveranderingen gering zijn. Bij proef P001 is in een aantal raaien de meting niet verder dan tot 3,00 m uit de basislijn doorgezet.

De peilingen zijn tot 6,00 m uit de basislijn uitgevoerd op onderlinge afstanden van 0,10 m. Aangezien de kruin en de teen van het duinfront meestal buiten dit meetstramien zullen vallen, zijn zowel de plaats als de hoogteligging van deze profielpunten steeds apart opgemeten. Van 6,00 m tot 15,00 m uit de basislijn is de peilafstand vergroot tot 0,30 m.

De meeste peilingen zijn verricht in de beginfase van de proeven waarin de grootste afslag verwacht mag worden. Naarmate de proef vordert liggen de peiltijdstippen verder uit elkaar. De gemeten profielen zijn weergegeven in de figuren 8 t/m 33.

4.3 Dieptelijnen

Op een aantal relevante tijdstippen is de waterstand in stappen naar beneden gebracht om het dieptelijnen-patroon van het model door middel van het opmeten van de verschillende waterlijnen in kaart te brengen. Hiermee kan het "recht" blijven van de kust en de vooroever tijdens de proef worden gecontroleerd.

Voorts kan het dieptelijnenpatroon inzicht verschaffen in de plaats van optredende muistromen. Tevens wordt de mogelijkheid geschapen om achteraf een zandbalans op te stellen.

In de figuren 34 t/m 44 is voor de diverse proeven de bodemligging van de beginsituatie, de bodemligging na 1 uur modeltijd (uitgezonderd P004), en de bodemligging na beëindiging van de proef, weergegeven.

4.4 Golfhoogte

Evenals bij de vorige proevenserie is een golfveld toegepast, waarbij het Pierson-Moskowitz spectrum zo goed mogelijk is benaderd. De golven zijn opgewekt door een synchrone golfschotbeweging van 6 golfmachines over een lengte van 30 m. Bij de proef met loodrechte golfinval werden in de bakken van 4 m en 1 m lengte de golven opgewekt door één golfmachine. Bij alle proeven zijn in verschillende tijdsperioden golfwaarnemingen verricht. De plaatsen van de opnemers zijn voor de diverse proeven aangegeven in de figuren 1 t/m 3. Alle golfwaarnemingen zijn in de tabellen 1 t/m 4 samengevat.

Voor een goede vergelijking met de resultaten uit het twee-dimensionale onderzoek dient de opgetreden golfhoogte tijdens de proeven op de juiste schaal in het model te zijn weergegeven. In de tabellen 5 t/m 7 zijn voor de proeven met vaste waterstand de gemeten golfhoogten vlak voor het golfschot en op een diepte van $d = 2\ H_{os}$ (juist buiten de brekerzone) getoetst aan de waarden die volgen uit de lineaire golftheorie. Om ter plaatse van $d = 2\ H_{os}$ de "juiste" golfhoogte te bereiken is ter compensatie van de energiedissipatie door wand- en bodemwrijving de golfhoogte vlak voor het golfschot 10% tot 20% verhoogd ten opzichte van de waarde uit de lineaire golftheorie.

Voor de proeven P001 en P003 is het resultaat op diepte $d = 2\ H_{os}$ bevredigend te noemen. Proef P002 vertoont op diepte $d = 2\ H_{os}$ een sterk verloop in golfhoogte langs de kust. Indien als criterium wordt gesteld dat de golfhoogte ter plaatse van een diepte van $2\ H_{os}$ niet meer dan 15% mag afwijken van de golfhoogte die voor die diepte wordt berekend met de lineaire golftheorie (criterium volgens [3]), dan is de gemeten variatie in golfhoogte bij proef P002 acceptabel te noemen. Aangezien bij proef P002 de golven in raai R 0000 een langere weg afleggen dan in raai R 1500 is het gemeten verloop niet verwonderlijk. De metingen bevestigen de in het voorgaande onderzoek gesignaleerde invloed van de bodemwrijving als energiedissipator.

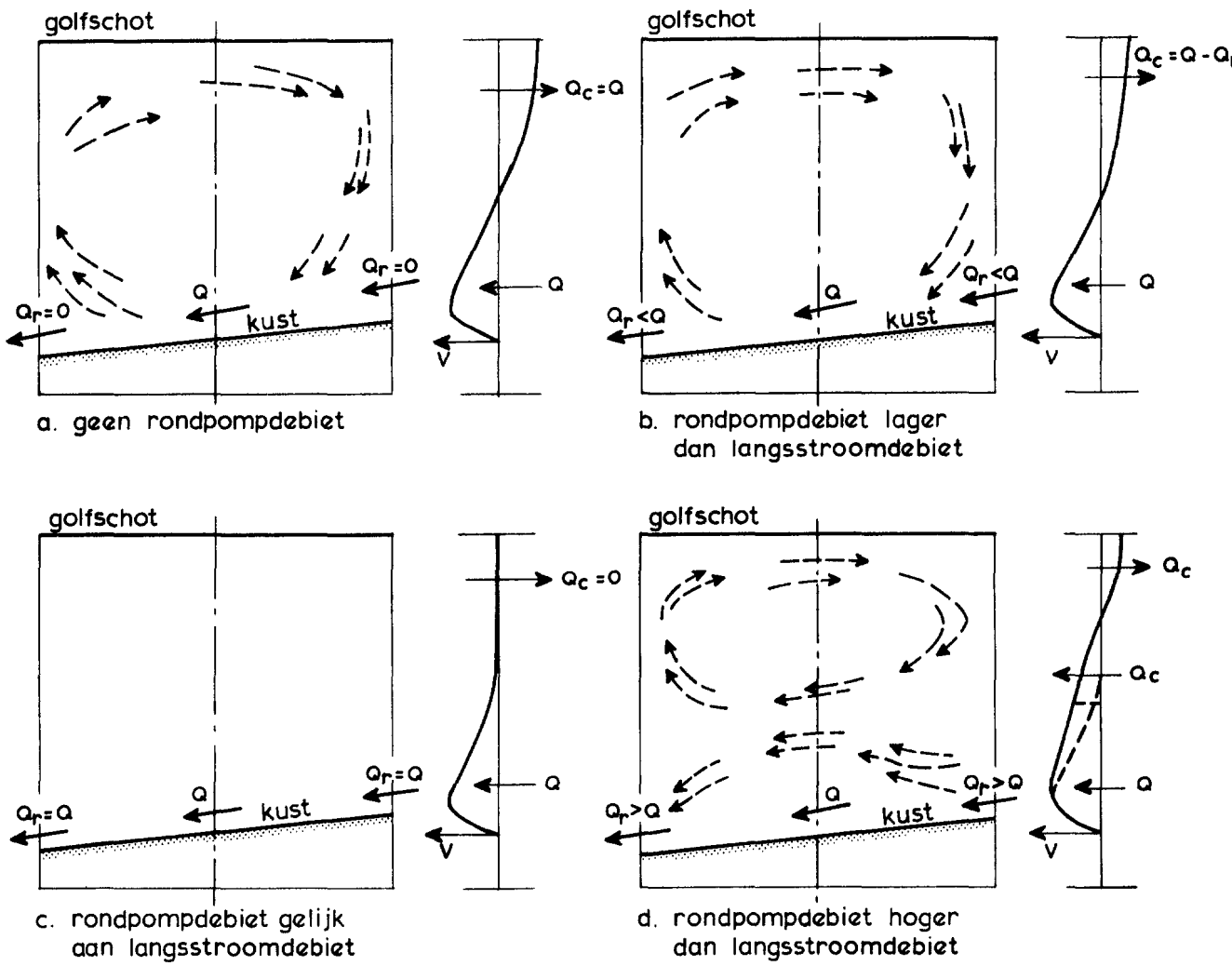
4.5 Brandingstroom

Het modelonderzoek heeft betrekking op een kustvak uit een oneindig lange rechte kust. Bij de proef met loodrechte golfinval heeft dit geen verdere consequenties voor de randvoorwaarden. Bij de proeven met schuine golfinval zullen de brekende golven zowel een langsstroom als een langszandtransport in het model opwekken. In de natuur wordt de continuïteit van deze grootheden in aangrenzende kustvakken gewaarborgd. In het model zullen de opgewekte langsstroom en langstransport als randvoorwaarden aan de bovenstroomse modelbegrenzing moeten worden opgelegd. Hierbij dienen op basis van modelwaarnemingen zowel de grootte als de verdeling over de brekerzone van beide grootheden zo goed mogelijk te worden ingesteld. Evenzo zullen aan de benedenstroomse modelbegrenzing voorzieningen moeten worden getroffen om de langsstroom en het langstransport ongestoord uit het model te voeren.

Ten behoeve van de watertoevoer is aan de bovenstroomse modelbegrenzing een inlaatconstructie aangebracht waarmee een gecontroleerd debiet het model wordt ingelaten. De instroomrichting is evenwijdig aan de kust en de mogelijkheid bestaat het toegevoerde debiet te verdelen over een 10-tal vakken van 0,90 m breedte. De verdeling kan geregeld worden door afsluiters bij elk van de vakken (zie de figuren 2 en 3). Aan de benedenstroomse rand van het model zijn een 5-tal klokpompen geïnstalleerd die het bovenstrooms toegevoerde debiet uit het model afvoeren. Dit debiet wordt via een Rehbock-stuw geleid, waar meting kan plaatsvinden, waarna het via de bovenstroomse rand weer in het model wordt gevoerd. Tijdens de proef wordt het gecontroleerde debiet voortdurend gecirculeerd.

Het kriterium voor een juist ingesteld langsstroomdebiet is dat het gemiddelde waterniveau in langsstroomrichting géén verhang vertoont. Er zou kunnen worden overwogen door directe vervalmeting de instelling van het langsstroomdebiet te optimaliseren.
Visser [7] heeft getracht deze optimalisatie voor regelmatige golven te bewerkstelligen. Hij komt tot de conclusie dat de beperkte breedte van het gebruikte modelbassin en de onvermijdelijke variaties in golf set-up en set-down langs de kust, een gerichte vervalmeting onmogelijk maken.

In de onderhavige proevenserie zijn onregelmatige golven toegepast. Daardoor zal de door de brekende golven geïnitieerde langsstroom een variërend karakter hebben. Tijdens de proeven is het ingestelde debiet constant gehouden. Dit debiet sluit zo goed mogelijk aan bij de in het model optredende tijdgemiddelde situatie. De momentane langsstroom zal veelal fluctueren rondom de waarde van de aan de randen opgelegde stroom. Plaatselijk kan dan ook een stroombeeld verwacht worden dat in de tijd gezien instabiel is.



Schematische weergave van mogelijke situaties in het golfbassin

De instelling van de tijdgemiddelde situatie kan worden nagegaan aan de hand van metingen aan de optredende circulatiestroming in het bassin. In bovenstaande figuur zijn een aantal mogelijke situaties geschetst. Indien géén debiet wordt rondgepompt, dan zal het geïnitieerde langsstroomdebiet volledig opgaan in een

circulatiecel in het bassin (schets a). Aan de (gesloten) bovenstroomse rand zal er vanuit het model water naar de kust worden aangevoerd om het "gevraagde" debiet te voeden. Aangezien aan de benedenstroomse rand geen water uit het model wordt gepompt, zal de langsstroom hier naar dieper water verdwijnen, zodat een circulatiestroming zal ontstaan. Het circulatiedebiet Q_c is in de gesloten situatie maximaal en gelijk aan het langsstroomdebiet Q.

Naarmate het rondpompdebiet Q_r wordt opgevoerd, zal het circulatiedebiet afnemen volgens (schets b):

$$Q_c = Q - Q_r \qquad (9)$$

In het ideale geval, dat het rondpompdebiet Q_r qua grootte en verdeling overeenkomt met het door de brekende golven opgewekte langsstroomdebiet Q, zal géén circulatiestroming optreden (schets c). Indien het rondpompdebiet verder wordt opgevoerd zal het surplus aan water (Q_r - Q) grotendeels buiten de brekerzone om (langs de weg van de minste weerstand) door het model stromen. Afhankelijk van de geometrie van het bassin kan daarbij opnieuw een circulatiestroming opgewekt worden (schets d).

Onafhankelijk van de grootte van het ingestelde langsstroomdebiet zal er steeds een circulatiestroom in het bassin aanwezig zijn doordat de omvang van in- en uitstroomopeningen niet geheel en al overeenkomt met de breedte van de brandingszone. Deze circulatiestroom is echter van secundair belang.

De meting aan de optredende circulatiecel betreft dus een minimalisatieprocedure. Voorafgaand aan proef P002 is een gidsproef uitgevoerd waarbij is getracht aan de hand van een dergelijke meting tot een afschatting te komen van de in het model optredende langsstroom bij de golfinvalsrichting van 20°. Het rondpompdebiet is langzaam opgevoerd en met behulp van drijvers en kleurstofinjectie is ter plaatse van de modelranden en langs de golfmachines gekeken naar de gedragingen van de optredende circulatiecel. Op basis van deze meting kon de ordegrootte van het in te stellen debiet worden vastgesteld op 90 ± 40 1/s. Een nauwkeuriger resultaat bleek niet mogelijk.

Er is daarom getracht het in te stellen debiet nader te definiëren met behulp van een langsstroomberekening op basis van de berekeningsmethode volgens Battjes

voor onregelmatige golven (zie de Annex). Als invoergegevens zijn de "root-mean-square" golfhoogte, de golfinvalsrichting en de waterdiepte ter plaatse van het golfschot, en de piek periode van het golfspectrum gebruikt bij een tweetal geschematiseerde hellingen van het strandprofiel, te weten hellingen 1:35 en 1:90.

Genoemde hellingwaarden kunnen worden beschouwd als de grenzen waarbinnen het strandprofiel zich in het model ontwikkelt. Overigens blijkt het eindresultaat van de berekening vrij ongevoelig te zijn voor de ingevoerde strandhelling.

Bij de proeven met vaste waterstand (P002 en P003) is de waterstand ter plaatse van het golfschot als invoergegeven gebruikt. Tevens is bij deze proeven de golfhoogte constant gehouden. In de laatste proef (P004) zijn beide grootheden echter gevarieerd (zie figuur 79). In de berekening is daarom bij deze proef onderscheid gemaakt tussen "blokken" van constante golfhoogte, waarbij als waterstand de begrenzingen van het werkelijke waterstandsverloop in de betreffende "blokken" zijn ingevoerd. De waterstand blijkt evenmin een gevoelige parameter in de berekening te zijn. In onderstaande tabel zijn de resultaten van de diverse berekeningen samengevat:

proef	golfkarakteristieken t.p.v. golfschot			waterdiepte t.p.v. golfschot d(m)	langsstroom Q(l/s)	
	invalshoek $\phi(^{o})$	periode $\hat{T}$(s)	golfhoogte H_{rms} (m)		helling 1:35	helling 1:90
P002	20	1,55	0,083	0,38	86	84
P003	10	1,55	0,083	0,38	47	43
P004	10	1,55	0,061	0,31 0,35	21 20	19 18
	10	1,55	0,083	0,345 0,38	50 47	48 43

Resultaten langsstroomberekening

Ten aanzien van de randvoorwaarden voor proef P002 liggen de berekende langsstroomdebieten binnen het interval dat door de experimentele verificatie kon worden aangegeven.
De gemiddelde waarden in bovenstaande tabel zijn dan ook als randvoorwaarden in het modelonderzoek toegepast. In proef P002 is een constant langsstroomdebiet van 83 l/s toegevoerd; in proef P003 een constant debiet van 48 l/s. In proef P004 is het ingestelde debiet gevarieerd conform de golfhoogtevariatie. De totale duur van deze proef bedroeg 246 minuten. De eerste 88 minuten is het debiet constant gehouden op 20 l/s. De volgende 70 minuten is een verhoogd debiet van 48 l/s opgelegd waarna de laatste 88 minuten weer met 20 l/s is gestroomd.

Tijdens de proeven P002 en P003 met vaste waterstand is getracht de optredende snelheidsverdeling in de door golven gegenereerde langsstroom te meten met behulp van kleurstofinjectie. De (oppervlakte-)snelheden zijn met een stopwatch geklokt binnen twee raaien op een onderlinge afstand van 1 m nabij raai R 0375. Door middeling over een groot aantal metingen is een indruk verkregen van de optredende snelheidsverdeling in de brandingstroom langs de kust. Het resultaat is teruggekoppeld naar de bovenstroomse modelbegrenzing waar getracht is de in het model gevonden verdeling zo goed mogelijk op te leggen. De ingestelde langsstroomverdeling is wederom door meting geverifiëerd. Een en ander is weergegeven in de figuren 45 en 46. De overeenkomst tussen beide snelheidsverdelingen is goed te noemen.

Bij proef P002 is de langsstroom tot 7 m en bij proef P003 tot 4 m uit de waterlijn opgemeten. De brandingszone strekt zich echter verder uit. De zeewaartse begrenzing hiervan ligt ongeveer op 0,25 m waterdiepte. Er zal dan ook nog een en ander aan debiet buiten de gemeten zone aanwezig zijn. Dit blijkt ook uit het verloop van de gemeten langsstroomsnelheden evenwijdig aan de kust. Proef P002 vertoont een geringe snelheidsgradiënt, wat zou kunnen duiden op een situatie zoals weergegeven in schets d op blz. 15.

De betrouwbaarheid van de gemeten snelheden kan worden nagegaan aan de hand van een vergelijking van het door snelheidsintegratie over het strandprofiel verkregen debiet ter plaatse van de bovenstroomse modelrand en het daar opgelegde debiet. Bij proef P002 is het uit de meting afgeleide debiet 23% hoger dan het werkelijke debiet (= 83 l/s). Bij proef P003 bedraagt dit verschil met het werkelijke debiet (= 48 l/s) zelfs 38%. Gezien de nauwkeurigheid van de bodempeiling mag dan ook worden geconcludeerd dat de gemeten gemiddelde snelheden aan

de hoge kant zullen zijn. Tijdens de proeven is het ingestelde debiet niet gewijzigd omdat uit bovenstaande blijkt dat uit de resultaten van de snelheidsmeting nabij raai R 0375 geen conclusie mag worden getrokken omtrent de juistheid van het ingestelde debiet aan de bovenstroomse modelbegrenzing.

4.6 Langstransport

Evenals bij het langsstroomdebiet zal bij de proeven ook continuïteit in langszandtransport gewaarborgd dienen te worden. Hiertoe is aan de bovenstroomse modelbegrenzing over de instroomrand (voor het langsstroomdebiet) een loopbrug geconstrueerd waarvandaan periodiek zand in het model is gebracht. Hierbij is de dosering verdeeld over de diverse vakken van de instroomrand.
Benedenstrooms is het langszandtransport uit het model gevangen in een zandvang waarvan het overzicht voor de diverse proeven is weergegeven in de figuren 47 en 48. Om een indruk te verkrijgen van de verdeling van het langstransport zijn op een tweetal plaatsen in de zandvang scheidingsmuren geconstrueerd.

De voeding- en vangstresultaten zijn steeds onderling vergelijkbaar gemaakt via gewichtsbepaling. Hiertoe zijn tevens monsters geanalyseerd op poriënvolume en vochtgehalte.

Als initiële randvoorwaarde voor de zanddosering is uitgegaan van transportberekeningen, waarbij de transportformule van Bijker is gekoppeld aan de Battjes-snelheidsverdeling over de brandingszone. Tevens is de CERC-formule gebruikt. In de transportberekening volgens Bijker zijn de snelheidsprofielen toegepast die uit de eerdere berekening van het langsstroomdebiet zijn geresulteerd. De hieraan ten grondslag liggende randvoorwaarden zijn eveneens in de berekening van de CERC-transporten toegepast. In onderstaande tabel zijn de resultaten samengevat (zie ook de Annex):

proef	golfkarakteristieken t.p.v. golfschot			waterdiepte t.p.v. golfschot d(m)	langstransport S_{Bijker} (dm^3/uur)		langstransport S_{CERC} (dm^3/uur)	
	invalshoek $\phi(^o)$	periode $\hat{T}$(s)	golfhoogte H_{rms} (m)		helling 1:35	helling 1:90	coëfficiënt 0,036	coëfficiënt 0,047
P002	20	1,55	0,083	0,38	470	437	421	550
P003	10	1,55	0,083	0,38	245	223	227	296
P004	10	1,55	0,061	0,31 0,35	94 90	84 81	116 109	152 142
	10	1,55	0,083	0,345 0,38	252 245	229 223	237 227	310 296

Resultaten langstransportberekening

Het uiteindelijke langstransport blijkt slechts in geringe mate afhankelijk te zijn van de waterstand. Daarenboven blijkt het zandtransport volgens de Bijker-formule weinig gevoelig voor de ingevoerde strandhelling.

Proef met schuine golfinval 20°, vaste waterstand (P002)

In eerste instantie is in proef P002 het voor deze proef berekende gemiddelde langstransport als voeding aangehouden (≃ 470 dm^3/uur). Indien er teveel zand gevoed wordt, zal het surplus aan voeding direct benedenstrooms afgezet worden, terwijl bij te geringe voeding het heersende langstransport door plaatselijke erosie van de vooroever aangevuld zal worden. Deze morfologische respons van de vooroever op de voeding is nagegaan door tijdens het eerste uur van de proef bij de verschillende peiltijdstippen de ligging van een aantal waterlijnen te observeren. Op basis van deze waarnemingen is zowel de grootte als de verdeling van de voeding aangepast. Na 6 minuten golven is de voeding verhoogd tot 530 dm^3/uur. Na 18 minuten golven is de voeding verder verhoogd tot 625 dm^3/uur. Na 40 minuten golven is deze voeding teruggebracht tot 575 dm^3/uur.

Na 1 uur golven is de zandvang leeggehaald. De totale vangst bedroeg 547 dm^3. Dit komt goed overeen met de gemiddelde voeding in het eerste uur (575 dm^3). De verdeling van voeding en vangst is weergegeven in figuur 49a. Op de horizontale as is de afstand tot de waterlijn uitgezet. Op de verticale as is de voeding- en vangsthoeveelheid in dm^3/m' weergegeven. De vangstverdeling is enigszins suggestief daar de geschetste verdeling niet daadwerkelijk is geconstateerd doch is afgeleid uit de vangstresultaten van de drie vangbakken. Toch kan worden geconcludeerd dat de verdeling van zanddosering en zandvangst langs het kustprofiel redelijk overeenkomen. De vooroeverligging na 1 uur golven is weergegeven in figuur 38.

Op basis van de gegevens van het eerste uur is de grootte en verdeling van de voeding voor de verdere proefduur vastgesteld. De voeding is constant gehouden op 545 dm^3/uur. De verdeling van deze voeding, tesamen met het vangstresultaat na 10 uur golven, is weergegeven in figuur 49b. Opgemerkt dient te worden dat ongeveer 4,50 m van de meest zeewaarts gelegen vangbak bleek te zijn geblokkeerd, doordat ter plaatse het golfgeleidingschot tot op de bodem was neergelaten. In het model heeft zich daar dan ook een zandrug gevormd (figuur 39) waaruit een gecorrigeerde zandvangst voor de derde zandvang kan worden afgeleid. In feite moet dan ook in figuur 49b de aangegeven vangsthoeveelheid (dm^3/m') worden doorgezet tot 15,50 m uit de waterlijn. Geconcludeerd kan worden dat de

totale voeding- en (gecorrigeerde) vangsthoeveelheden redelijk overeenkomen. De verdeling van de voeding is echter meer landwaarts georiënteerd geweest dan die van de vangst.

Uit bovenstaande kan de conclusie worden getrokken dat tijdens proef P002 de zandtransporten langs de bovenstroomse en benedenstroomse modelbegrenzing redelijk op elkaar aansluiten (maximale afwijking 15%). Dit wil echter nog niet zeggen dat de gewenste continuïteit in langstransport in het model is bereikt. Er dient evenzeer te worden nagegaan of het model geen "verdraaiing" heeft vertoond. Uit de figuren 38 en 39 en de foto's 3 en 4 blijkt dat dit laatste niet aantoonbaar het geval is geweest. De voeding- en vangstresultaten mogen dan ook representatief worden geacht voor het heersende langstransport in het model. In figuur 50 zijn de berekende langstransporten met de formule van Bijker en van de CERC vergeleken met de modelresultaten. Aangezien de zandvang slechts op 2 tijdstippen, na 1 uur en na 10 uur golven, is leeggehaald, is het geschetste vangstverloop een zeer geschematiseerde weergave van het werkelijke verloop in de tijd. Toch kan uit de resultaten van de zandvangst worden geconstateerd dat gedurende de eerste fase van de proef een hoger langstransport in het model moet hebben plaatsgevonden dan in de latere fase van de proef. Deze langstransportgradiënt in de tijd kan het gevolg zijn van een aantal tijdsafhankelijke processen in het model: (1) de hoeveelheid duinafslag, welke de concentratie in de brekerzone beïnvloedt; (2) de profielvorm, welke de plaats en de wijze van energiedissipatie van de brekende golven bepaalt; en (3) eventuele randeffecten bij de zandvang. Nochtans kan worden geconcludeerd dat berekende en "gemeten" langstransporten goed bij elkaar aansluiten.

Proef met schuine golfinval 10°, vaste waterstand (P003)

Het gemiddelde berekende langstransport voor proef P003 is 248 dm^3/uur. Uit een vergelijking van berekende en "gemeten" langstransporten bij proef P002 blijkt dat tenminste gedurende het eerste uur van de proef ca. 15% meer zand gevoed zal dienen te worden. Derhalve is bij proef P003 in eerste instantie 290 dm^3/uur als zanddosering aan de bovenstroomse modelrand ingebracht. Uit de vooroeverligging na 6 minuten golven bleek dat deze voeding echter te gering was en is derhalve de gedoseerde hoeveelheid zand verhoogd tot 340 dm^3/uur.

Na 1 uur golven is de zandvang leeggehaald. Er blijkt in deze periode 433 dm^3 te zijn gevangen. Dit is aanzienlijk hoger dan de gedoseerde zandhoeveelheid

(337 dm^3) en de verwachte vangsthoeveelheid (290 dm^3). De verdeling van voeding en vangst is weergegeven in figuur 51a. De overeenkomst is, met uitzondering van vangbak 1 (figuur 48), goed te noemen. De vooroeverligging na 1 uur golven is weergegeven in figuur 41.

In proef P002 is gebleken dat in de verdere proefduur (1 tot 10 uur golven) de gemiddelde berekende en "gemeten" langstransporten goed bij elkaar aansluiten. Daarom is bij proef P003 in deze periode de voeding constant gehouden op 248 dm^3/uur. Na 10 uur golven is wederom de zandvang leeggehaald. De totale vangst bedraagt nu 2321 dm^3. Deze hoeveelheid sluit goed aan bij het verwachte langstransport van 248 dm^3/uur (totale voeding 2233 dm^3). De verdeling van voeding en vangst is weergegeven in figuur 51b. Beide grootheden blijken goed overeen te komen. De vooroeverligging na 10 uur is weergegeven in figuur 42.

Bij proef P003 kan het voeding- en vangstresultaat worden getoetst aan de hand van een totale balans voor het model. Na beëindiging van de proef is het model namelijk in de oorspronkelijke staat gevlakt ten behoeve van proef P004. Uiteindelijk bleek de toevoeging van vier kruiwagens losgepakt zand (ca. 170 dm^3 voeding) afdoende om de initiële situatie te verkrijgen. Dit resultaat sluit goed aan bij het voeding- en vangstresultaat van figuur 51.

Uit de figuren 41 en 42 en de foto's 5 en 6 blijkt dat het model ook tijdens proef P003 geen "verdraaiing" heeft vertoond. Er mag dan ook worden geconcludeerd dat tijdens de proef de gewenste continuïteit in langstransport is bereikt. In figuur 52 zijn de berekende langstransporten volgens Bijker en de CERC nogmaals vergeleken met de modelresultaten. Aangezien de duinafslag- en de profielontwikkeling bij de proeven P002 en P003 niet wezenlijk verschillen (zie hoofdstuk 5), moet het aanzienlijke verschil tussen verwachte en gevangen zandhoeveelheid tijdens het eerste uur van proef P003 worden toegeschreven aan modeleffecten.

Proef met schuine golfinval 10°, variërende waterstand (P004)

In proef P004, met variërende waterstand, zijn twee verschillende "golfhoogten" toegepast. Bij een stormeffect tot N.A.P. +3,25 m is in het model een golfhoogte H_{os} = 5,5 m op schaal weergegeven; bij hogere waterstanden is een prototype golfhoogte H_{os} = 7,6 m toegepast.

Uit de transportberekeningen met de formule van Bijker en van de CERC blijkt dat de waterstandsvariatie slechts een geringe invloed heeft op het totale langszandtransport. De golfhoogtevariatie tijdens de proef is echter van groot belang (zie de tabel op blz. 19). De voeding is dan ook tijdens de proefduur overeenkomstig de ingestelde golfhoogte aangepast.

Uit de vangstresultaten van de proeven met vaste waterstand is gebleken dat het langstransport in het model gedurende de initiële fase van het duinafslagproces ongeveer 15% hoger is dan het gemiddelde berekende langstransport volgens Bijker en de CERC. Voor proef P004 is dit gemiddelde berekende transport 109 dm^3/uur voor een golfhoogte ter plaatse van het golfschot H_s = 0,061 m en 253 dm^3/uur voor een golfhoogte H_s = 0,083 m.

De "lage" golfhoogte is gedurende de eerste 88 minuten van de proef als randvoorwaarde toegepast. In deze periode is 1,15 * 109 ≃ 127 dm^3/uur als zanddosering in het model gebracht. In de daaropvolgende periode van 70 minuten is de "hoge" golfhoogte ingesteld en dientengevolge de voeding aangepast tot 1,15 * 253 ≃ 294 dm^3/uur. De laatste 88 minuten van de proef is de golfhoogte weer verlaagd en de zanddosering teruggebracht tot 127 dm^3/uur. Opgemerkt dient te worden dat achteraf is gebleken, dat gedurende de perioden met de "lage" golfhoogte iets meer zand is gevoed (138 dm^3/uur) dan was voorzien. De totale voeding bedraagt dan ook 748 dm^3 in plaats van de voorziene 716 dm^3.

Na beëindiging van de proef is de zandvang leeggehaald. Er blijkt tijdens de proef 643 dm^3 te zijn gevangen. Dit is minder dan werd verwacht op basis van de proeven met vaste waterstand. De verdeling van voeding en vangst is weergegeven in figuur 53. De overeenkomst is redelijk te noemen. De vooroeverligging na beëindiging van de proef is weergegeven in figuur 44.

Ook tijdens proef P004 is de gewenste continuïteit in langstransport bereikt. Het model heeft geen "verdraaiing" vertoont, zoals moge blijken uit figuur 44 en de foto's 7 en 8. In figuur 54 zijn de berekende langstransporten volgens Bijker en de CERC vergeleken met de voeding- en vangstresultaten. De gevangen hoeveelheid zand blijkt goed aan te sluiten bij de over de proefduur gemiddelde CERC- en Bijkertransporten. De voeding is iets aan de hoge kant geweest.

4.7 Korrelgrootte

Na afloop van iedere proef is in de diverse meetraaien een aantal bodemmonsters genomen. De plaatsen, waar de monstername is verricht, zijn aangegeven in figuur 55. Deze plaatsen zijn, tesamen met de resultaten van de zeefanalyse, aangegeven in de tabellen 8 t/m 11. In de figuren 56 en 57 zijn de over de meetraaien gemiddelde waarden van D_{10}, D_{50} en D_{90} voor alle proeven uitgezet als functie van de afstand tot de basislijn. Het blijkt dat, indien er al gesproken mag worden van een bepaalde uitzeving, deze nabij de waterlijn is opgetreden. De verschillen zijn echter zo gering dat hieraan geen waarde moet worden gehecht. In figuur 58 is de gemiddelde zeefkromme uit het onderzoek weergegeven. Tevens is de zeefkromme voor het asserzand uit de voorgaande proevenserie gegeven. Het blijkt dat het asserzand uit het drie-dimensionale onderzoek gemiddeld iets grover is dan het asserzand uit het twee-dimensionale onderzoek.

4.8 Watertemperatuur

De hoeveelheid duinafslag en de ontwikkelde profielvorm tijdens de proeven worden mede bepaald door de valsnelheid van het bodemmateriaal. De valsnelheid in water is afhankelijk van de viscositeit en dus afhankelijk van de watertemperatuur. Deze laatste is dan ook gedurende de proevenserie regelmatig gemeten. De waarnemingen zijn in tabel 12 samengevat. De variatie over de gehele proevenserie is aanzienlijk. De temperatuur varieert in mindere mate binnen de afzonderlijke proeven. De berekende valsnelheid van het bodemmateriaal zal voor genoemde temperatuursvariatie gecompenseerd dienen te worden (zie hoofdstuk 5).

4.9 Visuele waarnemingen

Tijdens de proeven zijn visuele waarnemingen verricht aan optredende verschijnselen in het modelbassin. Bij de proef met loodrecht invallende golven kon een plaatsvast en stationair patroon van muien in het bassin worden waargenomen. In figuur 59 is een en ander schematisch weergegeven. De muien werden in stand gehouden door watertoevoer over ca. 5 m kustlengte (25 m-bak) alhoewel een kustlengte van 4 m reeds voldoende bleek een geconcentreerde retourstroom op te wekken (4 m-bak). De uittredende muistroom manifesteerde zich tot een afstand van 6 tot 8 m uit de kust en was goed zichtbaar door de hogere concentraties gesuspendeerd materiaal in de mui. De vooroeverligging na 1 uur is weergegeven in

figuur 35. Uit het dieptelijnenpatroon kan eveneens het geobserveerde patroon van muien worden afgeleid.

Bij de proeven met schuine golfinval zijn muien veel minder herkenbaar opgetreden. Er werd geen bepaald patroon geobserveerd en de optredende muien bleken weinig plaatsvast en konden steeds slechts gedurende korte tijd in stand worden gehouden. Opmerkelijk was wel dat de richting van uittreden ongeveer 45° à 75° ten opzichte van de kustoriëntatie en tegengesteld aan de langsstroomrichting was (zie figuur 60).

Uit een literatuurstudie betreffende muistromen door de T.O.W.-werkgroep Kuststromingen [8] zijn voorshands de volgende conclusies naar voren gekomen:

- muistromen kunnen zowel plaatsvast als bewegend zijn,
- bij lage waterstanden overheersen plaatsvaste muistromen, terwijl bij hoge waterstanden vaker bewegende muistromen voorkomen (beide bij scheve golfinval),
- plaatsvaste muistromen schijnen vaker voor te komen bij deining dan bij windgolven.

In 1975 zijn in het kader van het T.O.W.-Kustonderzoek enige verkennings- en fotovluchten uitgevoerd boven de Nederlandse kust bij Noordwijkerhout [9]. Dit kustgedeelte is een onderdeel van de zogenaamde "schone kust ". De aanwezigheid van muistromen is tijdens deze vluchten alleen waargenomen in de periode van HW naar LW, wat doet vermoeden dat de waargenomen muistromen een direct gevolg zijn geweest van het "leeglopen" van het zwin. De geconstateerde afstanden tussen de waargenomen muien (300 m - 1850 m) zijn bovendien dermate groot dat verticale uitwisseling mogelijkerwijs een grote rol heeft gespeeld bij het waargenomen fenomeen. De richting van de muistromen (W tot WZW) was onder een hoek van 45° tot 60° met de kustlijn. De langsstroom was tijdens de waarnemingen zuidwaarts gericht onder invloed van golven uit een richting tussen NW en WNW.

De in het onderhavige modelonderzoek optredende muistromen zijn vooralsnog niet in het prototype waargenomen. In de literatuur [8] worden wel een aantal mogelijke oorzaken genoemd voor het optreden van dergelijke verschijnselen in het model. Het waargenomen muienpatroon kan mogelijkerwijs verband houden met optredende circulatiestromen in het bassin (zie par. 4.5) dan wel het gevolg zijn van het ontstaan van een knopen- en buikenpatroon in langsrichting door de interactie van inkomend en gereflekteerd golfveld.

Bij de proeven met schuine golfinval en vaste waterstand is ook een relatief sterke kustachteruitgang aan de bovenstroomse rand geconstateerd. Mogelijkerwijs is de zandvoeding hier tijdelijk onvoldoende geweest, of is de golfaanval dan wel de stroomconcentratie in een of meerdere inlaatvakken te hoog geweest. Resulterend is locaal over zekere afstand een verdieping van de bodem ontstaan, waardoor de golfaanval op de betreffende kuststrook aanzienlijk kon toenemen. Verhoogde duinafslag en duinvoetverlaging was het gevolg. Dit laatste veroorzaakte in sterke mate golfreflectie, waardoor de locale bodemverdieping door verhoogde turbulentie en transport toenam. Hiermee is de cirkel van de voortschrijdende erosie gesloten. Op foto 3 kan een dergelijke locale erosie worden waargenomen. Door aanpassing van de voeding en stroomverdeling aan de hand van zandvangresultaten en stroommetingen in het model is dit ongewenste fenomeen beperkt gehouden.

5. Vergelijking van de resultaten uit het drie-dimensionaal model met het twee-dimensionaal model

5.1 Inleiding

De reproductie van duinafslag in een twee-dimensionaal model, een goot, elimineert de mogelijke invloed van drie-dimensionale verschijnselen zoals langsstromen en muistromen. Het onderhavige modelonderzoek in een drie-dimensionale faciliteit, een golfbassin, heeft tot doel na te gaan in hoeverre deze effecten invloed hebben op het proces van duinafslag, gekwantificeerd in afslaghoeveelheid, profielvorm, duinvoetligging en verspreidingsafstand van het afgeslagen zand.

In het voorgaande onderzoek (M 1263-II) is de geldigheid van het H/Tw-concept aangetoond. Uitgaande van dit gegeven kunnen proeven met fijn zand worden herleid tot (fictieve) duinzandproeven, zodat het schaalgebied langs theoretische weg kan worden vergroot in de richting van n_d=1. Uit het proevenbestand kan op een tweetal manieren het prototyperesultaat worden afgeleid. Ten eerste door directe extrapolatie van de resultaten naar n_d=1, de zogenaamde "extrapolatie methode". Ten tweede door de resultaten onderling te vergelijken, daaruit schaalrelaties af te leiden en met deze schaalrelaties het proevenbestand te herleiden naar het prototype. Deze laatste methode wordt de "methode schaalrelaties" genoemd. Uitgaande van de eenvoudige betrekkingen $n_l/n_d = n_d^{\alpha}$ (samentrekkingsrelatie) en $n_t = n_d^{\beta}$ (tijdschaal relatie) werd in het voorgaande onderzoek gevonden dat voor de toetsing van zowel afslaghoeveelheid als afslagprofiel de combinatie $\alpha = 0{,}28$ en $\beta = 0{,}5$ de beste overeenkomst opleverde tussen beide herleidingsmethoden. Op grond hiervan werd gekozen voor de schaalrelaties:

$$n_l/n_d = (n_d)^{0{,}28} \tag{10}$$

en

$$n_t = (n_d)^{0{,}5} \tag{11}$$

als zijnde de beste schaalrelaties voor de beschrijving van het verband tussen de resultaten van de proeven met de verschillende schaalfactoren.
Uitgaande van de relatie $n_l/n_d = (n_d)^{0{,}28}$, voor proeven met dezelfde zandsoort, en de valsnelheidsparameter H/Tw, voor proeven met verschillende zandsoorten,

kan bovendien de relatie worden afgeleid tussen de diepteschaal, de valsnelheid en de samentrekking [3]:

$$n_l/n_d = (n_d/n_w^2)^{0,28} \qquad (12)$$

In het navolgende zullen de naar het prototype herleide resultaten van het huidige onderzoek vergeleken worden met de uitkomsten van het twee-dimensionaal model.

5.2 Afslaghoeveelheid boven de waterlijn

5.2.1 Afslaghoeveelheid in het model

Proeven met vaste waterstand

In het modelonderzoek zijn 3 proeven uitgevoerd met vaste waterstand op het niveau van het superstormvloedpeil. Er zijn daarbij verschillende golfinvalsrichtingen toegepast, te weten: loodrechte golfinval, en schuine golfinval met hoeken van 10° en 20° ten opzichte van de kustlijn ter plaatse van het golfschot. In de proef met loodrechte golfinval zijn tevens 3 verschillende kustlengten van 1 m, 4 m en 25 m toegepast.

In de tabellen 13 t/m 15 zijn voor de verschillende proeven en peiltijdstippen de cumulatieve afslaghoeveelheden gegeven. In de figuren 61 t/m 63 is deze afslag als functie van de tijd uitgezet.

Proef met variërende waterstand

Naast de proeven met vaste waterstand is tevens een proef met variërende waterstand uitgevoerd ter simulatie van de superstormvloed. In figuur 64 is het verloop van de waterstand en de resulterende duinafslag in de tijd weergegeven. De cumulatieve afslaghoeveelheid is voor de diverse peiltijdstippen weergegeven in tabel 16.

5.2.2 Herleiding tot prototype afslagresultaat

Op basis van de korreldiameter van het bodemmateriaal in het model en de gemeten watertemperatuur tijdens de proeven, kan de valsnelheid worden afgeleid uit de valsnelheidsgrafieken die zijn bepaald in het voorgaande onderzoek (hier

weergegeven als figuren 65 en 66). Met dit gegeven kan via vgl. (12) de gewenste samentrekking van het beginprofiel worden bepaald waarbij de duinafslag van het referentieprofiel wordt nagebootst. Tevens kan de hierbij behorende oppervlakte schaalfactor worden bepaald, waarmee de gevonden hoeveelheid afslag moet worden vermenigvuldigd om de prototype afslaghoeveelheid te verkrijgen (m^3/m'):

$$n_A = n_l \times n_d = n_d^2 * \left(\frac{n_d}{n_w^2}\right)^{0,28} \qquad (13)$$

In onderstaande tabel zijn de resultaten samengevat (zie blz. 7 voor gegevens prototype bodemmateriaal):

proef	periode (uren)	D_{50} (μm)	water-temp. (^oC)	val-snelheid (m/s)	afslag schaalfactor	samentrekking proto-typeprofiel t.o.v. referentieprofiel
P001	0- 1	105	5,75	0,0081	5821	1,237
	1-10	105	6,75	0,0083	5886	1,223
P002	0- 1	108	7,0	0,0087	6062	1,188
	1-10	108	8,5	0,0090	6170	1,167
P003	0-10	106	9,75	0,0090	6149	1,171
P004	0- 4,1	105	12,5	0,0093	6282	1,146

Herleidingsfactoren modelresultaten

Gezien de beperkte afmetingen van de "Havenbak" zijn de beginprofielen steeds met een samentrekking 2 in het model gebouwd. Dit resulteert in steilere profielen dan volgt uit de gewenste samentrekking. De naar het prototype herleide afslaghoeveelheden hebben dan ook betrekking op profielen die iets steiler zijn dan het referentieprofiel, d.w.z. profielen met een samentrekking groter dan 1. Deze waarde is voor de verschillende proeven eveneens in bovenstaande tabel opgenomen.

In de tabellen 17 t/m 19 zijn de naar het prototype herleide afslaghoeveelheden voor de proeven met vaste waterstand en prototype tijdstippen 2 uur, 5 uur en 10 uur weergegeven. In tabel 20 is het cumulatieve prototype afslagresultaat van de simulatieproef superstormvloed weergegeven.

5.2.3 Vergelijking met twee-dimensionaal model

Proeven met vaste waterstand

Om een vergelijking mogelijk te maken tussen de gevonden afslaghoeveelheden in het onderhavige onderzoek en het twee-dimensionale onderzoek, zijn de gegevens gebruikt zoals deze staan vermeld op blz.56 van het verslag M 1263-II [3]. Uitgaande van de werkelijke samentrekking van het prototype beginprofiel ten opzichte van het referentieprofiel (zie de tabel op blz. 29) is door lineaire interpolatie in de twee-dimensionale afslagresultaten de toetsingsbasis voor de resultaten uit het drie-dimensionale onderzoek verkregen. Tevens is hierbij het 95%-betrouwbaarheidsinterval voor zowel de gemiddelde waarde als voor de individuele waarnemingen uit het twee-dimensionaal model bepaald. Deze resultaten zijn eveneens in de tabellen 17 t/m 20 opgenomen.

Het is van belang te onderzoeken in hoeverre de spreiding in de prototype afslagresultaten van de huidige proeven wordt verkleind door een correctie van de samentrekking van die beginprofielen, die iets afwijken van de gewenste beginprofielen. Er zijn twee methoden van correctie toegepast, welke in de figuren 67 en 68 worden toegelicht. Figuur 67 geeft de oorspronkelijke methode uit het voorgaande onderzoek. Hierbij wordt de correctie van de samentrekking bepaald op basis van het werkelijke onderwater beginprofiel tot een diepte van $d = 2\ H_{os}$. De gevonden verspreidingsdiepte uit het voorgaande onderzoek komt echter ongeveer overeen met een diepte van $d = H_{os}$. Het is dan ook de vraag in hoeverre het deel van het profiel dat dieper ligt dan $d = H_{os}$ van invloed is op de hoeveelheid duinafslag. Daarenboven lijkt het plausibel dat ook het profiel boven de waterlijn van invloed zal zijn. Daarom is de alternatieve methode van correctie van de samentrekking volgens figuur 68 ontwikkeld.

De resultaten van beide correcties op de samentrekking van de beginprofielen zijn weergegeven in de tabellen 21 t/m 23. In de figuren 69 t/m 71 is de gecorrigeerde samentrekking uitgezet als functie van de gemeten afslaghoeveelheid boven de waterlijn na 5 uur prototypetijd. Hierbij zijn beide grootheden relatief gemaakt door respectievelijk te delen door de gewenste, theoretische samentrekking en de afslaghoeveelheid na 5 uur prototypetijd behorende bij deze samentrekking; deze afslaghoeveelheid is gevonden uit de uitgevoerde curve-fitting van het geselecteerde proevenbestand uit het twee-dimensionale onderzoek.

Indien de correctie zinvol is, dan moeten de "meetpunten" een tendens vertonen die door de gestippelde lijn in de figuren is aangegeven. In het twee-dimensionale onderzoek is namelijk gebleken dat de hoeveelheid duinafslag ongeveer recht evenredig is met de samentrekking van het beginprofiel. In het geval dat de correctie niet zou zijn uitgevoerd, zouden de te steile profielen herkenbaar moeten zijn aan een te grote afslaghoeveelheid. Evenzo geldt voor profielen waar de werkelijke samentrekking kleiner is dan de gewenste, dat de profielen herkenbaar zouden moeten zijn aan een te geringe afslaghoeveelheid. Uit de figuren 69 t/m 71 blijkt dat dit niet het geval is. De geconstateerde spreiding in de afslagresultaten is dan ook niet terug te voeren tot kleine afwijkingen in de ligging van het beginprofiel. Een mogelijke correctie van de afslagresultaten langs deze weg wordt daarom niet zinvol geacht. Wel mag worden geconstateerd dat in het algemeen de beginprofielen iets steiler zijn geweest dan de gewenste, theoretische beginprofielen. De verschillen zijn echter dusdanig klein, dat het voor de verdere analyse van de modelresultaten niet nodig wordt geacht deze in rekening te brengen.

In de figuren 72 t/m 74 is de naar het prototype herleide duinafslag van de proeven in het drie-dimensionale onderzoek als functie van de tijd uitgezet. Tevens is het gemiddelde afslagresultaat uit het twee-dimensionale onderzoek gegeven, tesamen met de 95%-betrouwbaarheidsintervallen voor zowel gemiddelde als individuele waarnemingen uit dat onderzoek. Gezien de grootte van de betrouwbaarheidsintervallen rondom het gemiddelde afslagresultaat uit het twee-dimensionale onderzoek kan vooraleerst niet worden geconcludeerd dat de afslagresultaten uit het drie-dimensionaal model significant verschillen van de afslagresultaten uit het twee-dimensionaal model.

Om een en ander duidelijker tot uiting te laten komen, is voor de diverse proeven in de figuren 75 t/m 78 de ontwikkeling van het prototype afslagresultaat in de verschillende raaien en in de tijd nogmaals weergegeven. Om de invloed van de samentrekking van het beginprofiel te elimineren zijn de gemeten afslaghoeveelheden uit het huidige onderzoek dimensieloos gemaakt door te delen door het overeenkomstige gemiddelde afslagresultaat uit het voorgaande onderzoek.

In de figuren 75 en 76 is de ontwikkeling van het prototype afslagresultaat voor de proef met loodrechte golfinval weergegeven. De ontwikkeling van de duinafslag in de 4 m-bak en de 25 m-bak sluit bijzonder goed aan bij de resultaten

van het twee-dimensionaal model. Het verloop van de duinafslag in de tijd van de 1 m-bak is echter geleidelijker dan wordt aangegeven door de vastgestelde schaalrelaties in het twee-dimensionale onderzoek. Hierop zal worden teruggekomen in hoofdstuk 7. Aangezien het drie-dimensionale onderzoek betrekking heeft op een kustvak uit een oneindig lange en recht veronderstelde kust, dient de spreiding over de verschillende raaien opgevat te worden als zijnde een maat voor de nauwkeurigheid van de drie-dimensionale modelresultaten. Deze spreiding ligt voor de verschillende tijdstippen binnen 10% van de gemiddelde afslaghoeveelheid.

Figuur 77 geeft de ontwikkeling van het prototype afslagresultaat voor de proef met schuine golfinval van 20°. Ook hier is het verloop van de duinafslag in de tijd geleidelijker dan in het twee-dimensionale model. De relatief grote spreiding over de verschillende raaien, 10% tot 20% van het gemiddelde afslagresultaat, is vooral te wijten aan het kustgedrag in raai R 1500. Tijdens het eerste uur van de proef ontstond er aan de bovenstroomse zijde van het model sterke kusterosie door locaal relatief grote golfaanval (zie par. 4.9), waardoor vermoedelijk het resultaat van raai R 1500 is beïnvloed.

De ontwikkeling van het prototype afslagresultaat van de proef met schuine golfinval van 10° is weergegeven in figuur 78. Het verloop van de duinafslag sluit goed aan bij het verloop uit het twee-dimensionale onderzoek. De spreiding in de afslagresultaten van de verschillende raaien bedraagt voor de diverse tijdstippen 10% tot 15% van de gemiddelde duinafslag.

Proef met variërende waterstand

In figuur 79 is het verloop van de waterstand en de golfhoogte en de resulterende duinafslag in de tijd weergegeven. Het gerealiseerde verloop van de waterstand tijdens de proef sluit bijzonder goed aan bij het aangenomen waterstandsverloop. De grootste hoeveelheid duinafslag wordt gevonden vlak nadat de maximum waterstand is opgetreden en bedraagt 320 m^3/m'. Deze afslag heeft betrekking op een prototype beginprofiel dat een factor 1,146 steiler is dan het referentieprofiel.

In het voorgaande onderzoek zijn een tweetal simulatieproeven van een superstormvloed uitgevoerd met duinzand en wadzand op diepteschaal $n_d = 26$ (zie onderstaande tabel). Uitgaande van de in dat onderzoek gevonden relatie tussen afslaghoeveelheid en samentrekking van het beginprofiel (figuur 192 van het verslag M 1263-II)

kan dan worden berekend, dat voor de onderhavige samentrekking een maximale duinafslag van 235-285 m^3/m' zou zijn opgetreden.

proef M1263 II	D_{50} (μm)	water-temp. (^oC)	val-snelheid (m/s)	afslag schaal-factor	max. afslag (m^3/m')	samentrekking prototypeprofiel t.o.v. referentieprofiel
131	221	8,5	0,0258	1651	155	0,819
132	156	8,0	0,0157	1250	199	0,811

Resultaten proeven M 1263-II met variërende waterstand ter simulatie superstormvloed

In deze simulatieproeven werd echter de superstormvloed gesimuleerd met tijdschaal $n_t = 1$, terwijl in het huidige onderzoek de variatie van de waterstand met een factor $(60)^{0,5} = 7,75$ sneller is uitgevoerd. Daarenboven is in het voorgaande onderzoek bij de simulatieproef superstormvloed een waterstandsverloop toegepast, dat was gebaseerd op het verloop van de waterstand tijdens de stormvloed van 1953.

Daarnaast kan worden aangetoond dat de uiteindelijke hoeveelheid duinafslag boven de maximale waterstand bij de drie-dimensionale simulatieproef superstormvloed (320 m^3/m') overeenkomt met de gemiddelde hoeveelheid duinafslag boven de waterlijn na 7,5 uur prototypetijd bij de proeven met vaste waterstand in het twee-dimensionaal model (zie tabel 20).

5.3 Afslagprofiel beneden de waterlijn

5.3.1 Afslagprofiel in het model

Tijdens de proeven is in een aantal raaien en op verschillende tijdstippen de ligging van het afslagprofiel opgemeten. De resultaten zijn grafisch weergegeven in de figuren 8 t/m 33.

5.3.2 Herleiding tot prototype afslagprofiel

Proeven met vaste waterstand

Uit de tijdschaalrelatie $n_t = n_d^{0,5}$ volgt, dat de voor het duinafslagproces relevant geachte prototypetijd van 5 à 10 uur bij een diepteschaalfactor $n_d = 60$ overeenkomt met 0,6 à 1,3 uur modeltijd. De figuren 8 t/m 28 maken duidelijk dat de vorm van het afslagprofiel beneden de waterlijn tussen 0,3 uur en 3 uur modeltijd geen wezenlijke veranderingen ondergaat. Er mag dan ook worden aange-

nomen dat voldoende inzicht in het prototype afslagprofiel kan worden verkregen uit de modelprofielen behorende bij 1 uur modeltijd. In de figuren 80 t/m 82 zijn de naar het prototype herleide profielvormen voor dit tijdstip weergegeven.

Proef met variërende waterstand

Tijdens de simulatieproef superstormvloed blijkt de maximale duinafslag op te treden na 2,75 à 4,1 uur modeltijd. De bij deze tijdstippen opgemeten modelprofielen beneden de maximale waterstand zijn herleid naar het prototype en weergegeven in de figuren 83 en 84. Het prototypeprofiel na 2,75 uur modeltijd is gevormd onder invloed van een waterstandsverhoging van N.A.P. +1,0 m naar N.A.P. +5,0 m en een successievelijke waterstandsdaling van N.A.P. +5,0 m naar N.A.P. +2,5 m. Het prototypeprofiel na 4,1 uur heeft zich hieruit ontwikkeld onder invloed van een waterstandsverhoging van N.A.P. +2,5 m naar N.A.P. +3,1 m en een successievelijke verlaging van N.A.P. +3,1 m naar N.A.P. +1,0 m. Het uiteindelijk gevormde afslagprofiel beneden de maximale waterstand blijkt steiler te zijn dan het profiel na 2,75 uur modeltijd.

5.3.3 Vergelijking met twee-dimensionaal model

Proeven met vaste waterstand

Om een vergelijking te kunnen maken tussen de gevonden afslagprofielen beneden de waterlijn in het onderhavige onderzoek en het twee-dimensionale onderzoek, is in de figuren 80 t/m 82 het gemiddelde afslagprofiel uit het twee-dimensionaal model ingetekend. Dit profiel kan worden beschreven met de volgende parabolische vergelijking (figuur 85):

$$x = 3{,}62\ y^2 + 12{,}22\ y \qquad (14)$$

waarin:
y = diepte beneden de waterstand
x = afstand vanaf de waterlijn, positief in zeewaartse richting

De afslagprofielen beneden de waterlijn uit het drie-dimensionaal model blijken alle steiler te zijn dan de parabolische beschrijving van het onderwaterprofiel uit het twee-dimensionale modelonderzoek en in het algemeen buiten de daar gevonden spreiding te liggen. Een en ander duidt er vooralsnog op dat in het drie-dimensionale onderzoek het afgeslagen zand verder zeewaarts is afgezet dan uit het twee-dimensionaal model volgt, en dat derhalve grotere verspreidingsafstanden verwacht mogen worden. Hierop wordt teruggekomen in par. 5.6.

Proef met variërende waterstand

In de figuren 83 en 84 is eveneens het parabolische afslagprofiel uit het twee-dimensionale onderzoek uitgezet. Uit de figuren blijkt dat de gevormde onderwaterprofielen bij de simulatieproef superstormvloed aanzienlijk steiler zijn dan het profiel dat door de parabool uit het twee-dimensionaal model bij vaste waterstand wordt weergegeven.

5.4 Duinvoethoogte boven de waterlijn

5.4.1 Duinvoethoogte in het model

Aangezien in het model de duinvoetligging in de meeste gevallen niet samenvalt met het meetstramien, is deze in de profielmeting steeds apart opgemeten. In de figuren 8 t/m 33 is voor de verschillende proeven de ligging van de duinvoet duidelijk waarneembaar.

5.4.2 Herleiding tot prototype duinvoethoogte

Bij de proeven in het voorgaande onderzoek is gebruik gemaakt van de "extrapolatie methode" ter bepaling van de prototype duinvoethoogte. Hierbij zijn de duinvoethoogten uit het naar duinzand herleide proevenbestand uitgezet als functie van de fictieve diepteschaal voor verschillende prototype tijdstippen op zowel "dubbellogaritmisch" als op "logaritmisch-lineair" papier. De correlatie coëfficiënten voor beide benaderingen van de prototype duinvoethoogte wezen uit dat het verband op "logaritmisch-lineair" papier het beste was. Dit laatste verband is daarom gekozen als toetsingsbasis voor de resultaten van het drie-dimensionale onderzoek, welke daartoe zijn herleid naar waarden voor fictieve duinzandproeven op diepteschaal $n_d^* = n_d/n_w^2$.

Proeven met vaste waterstand

In de figuren 86 t/m 97 zijn deze waarden van de duinvoethoogte voor de proeven met vaste waterstand uitgezet, tesamen met de waarden van het twee-dimensionale onderzoek, voor de prototypetijdstippen 1 uur, 2 uur, 5 uur en 10 uur. Het verband tussen de duinvoethoogte h_o en de diepteschaal n_d^* kan volgens de voorgaande proevenserie worden beschreven met de relatie:

$$h_o = a_o + a_1 \log n_d^* \qquad (15)$$

Proef met variërende waterstand

De herleide waarden voor de duinvoethoogte van de simulatieproef superstormvloed hebben betrekking op een duinzandproef met diepteschaal $n_d^* = 7{,}31$. In onderstaande tabel zijn de over de modeltijdstippen 2,75 uur en 4,1 uur gemiddelde resultaten gegeven.

raai	duinvoethoogte h_o(m)
R 0000	4,05
R 0375	3,70
R 0750	3,65
R 1125	3,85
R 1500	3,55
gemiddeld	3,75

5.4.3 Vergelijking met twee-dimensionaal model

Proeven met vaste waterstand

Uit de figuren 86 t/m 97 wordt een indruk verkregen van de spreiding in de resultaten van het drie-dimensionale onderzoek ten opzichte van de spreiding in de oorspronkelijke waarnemingen van het twee-dimensionaal model. Tevens zijn op basis van vgl. (15) de "best-fit"-lijnen weergegeven voor de resultaten van het twee-dimensionaal model. Uit deze lijnen kunnen de duinvoethoogten worden afgeleid, die corresponderen met de fictieve diepteschaalfactoren van de onderhavige proevenserie. Met deze waarden zijn de herleide modelwaarnemingen vergeleken. Het resultaat van deze toetsing is voor de verschillende raaien en tijdstippen weergegeven in de figuren 98 t/m 101.

In de figuren 98 en 99 is de ontwikkeling van de duinvoethoogte voor de proef met loodrechte golfinval weergegeven. De duinvoethoogte-ontwikkeling in de 25 m-bak sluit redelijk aan bij de resultaten van het twee-dimensionaal model, alhoewel de spreiding over de verschillende raaien in de eerste uren nogal groot is: 25% ten opzichte van de gemiddelde waarde, afnemend naar 10% bij 10 uur prototypetijd. De gemiddelde waarde van de duinvoethoogte ligt ongeveer 5% à 10% beneden de waarde uit het twee-dimensionaal model.

De 4 m-bak en de 1 m-bak vertonen een geleidelijker ontwikkeling in de duinvoethoogte dan wordt aangegeven door de resultaten uit het twee-dimensionaal model. Ook hier is de spreiding ten opzichte van het gemiddelde modelresultaat aanzienlijk. Voor de 4 m-bak is de spreiding na 2 uur prototypetijd 25% ten opzichte van de gemiddelde waarde van de duinvoethoogte, afnemend naar 20% na 10 uur prototypetijd. De gemiddelde waarde neemt in deze tijdsperiode toe van 60% tot 75% van de waarde uit het twee-dimensionaal model. Voor de 1 m-bak varieert de spreiding over de raaien van 25% tot 10% ten opzichte van de gemiddelde duinvoethoogte, die zelf in de periode van 2 uur naar 10 uur prototypetijd toeneemt van 50% tot 85% van de waarde uit het twee-dimensionaal model.

In de figuren 100 en 101 zijn de toetsingsresultaten van de proeven met schuine golfinval weergegeven. Voor proef P002 ($\phi = 20^{o}$) geldt wederom dat de resultaten van R 1500 ten gevolge van modeleffecten minder betrouwbaar zijn. Beide proeven vertonen een duinvoethoogte-ontwikkeling die in de tijd geleidelijker verloopt dan door het twee-dimensionaal model wordt aangegeven. Bij proef P002 is de spreiding in duinvoethoogte over de raaien steeds ongeveer 25% ten opzichte van de gemiddelde waarde. Deze laatste blijft van 2 uur tot 10 uur prototypetijd redelijk constant op 75% van de waarde uit het twee-dimensionaal model. Proef P003 vertoont steeds ongeveer 20% spreiding in de raaien. De gemiddelde waarde van de duinvoethoogte neemt daarbij in de tijdsperiode van 2 uur tot 10 uur prototypetijd toe van 60% naar 90% van de toetsingsgrootheid uit het twee-dimensionale onderzoek.

In onderstaande tabel is een en ander samengevat:

proef	gem. waarde duinvoethoogte t.o.v. twee-dimensionaal model	
	t = 2 uur	t = 10 uur
P001, 25 m-bak	0,90	0,95
P001, 4 m-bak	0,60	0,75
P001, 1 m-bak	0,50	0,85
P002	0,75	0,75
P003	0,60	0,95

Hieruit kan geconcludeerd worden dat in het algemeen de duinvoethoogten bij de proeven van het drie-dimensionale onderzoek onder de waarden blijven, die door het twee-dimensionaal model worden aangegeven.

Proef met variërende waterstand

Bij de analyse van de prototype afslaghoeveelheid is aangetoond dat het eindresultaat van de simulatieproef superstormvloed, wat bereikt wordt na 2,75 uur à 4,1 uur modeltijd, overeenkomt met het afslagresultaat na 5 à 10 uur prototypetijd in het twee-dimensionaal model.

Voor een vergelijking van de ontwikkelde duinvoethoogte van het twee- en drie-dimensionaal model zijn uit de "best-fit"-lijnen van de duinvoethoogten uit het twee-dimensionale onderzoek, voor de diepteschaal $n_d^* = 7{,}31$ van de onderhavige proef, de corresponderende duinvoethoogten afgeleid. Het resultaat is als volgt:

duinvoethoogte	t = 1 uur	t = 2 uur	t = 5 uur	t = 10 uur
h_o (m)	2,95	3,75	4,85	5,25

Indien deze waarden worden vergeleken met het over de raaien gemiddelde eindresultaat van de proef met variërende waterstand (h_o = 3,75 m, zie de tabel op blz. 36) dan blijkt, dat eenzelfde waarde bij het twee-dimensionaal model reeds na 2 uur prototypetijd wordt bereikt. Voor de tijdsperiode van 5 uur à 10 uur prototypetijd, welke bepalend is gebleken voor het afslagresultaat, blijft de ontwikkelde duinvoethoogte van de proef met variërende waterstand gemiddeld 25% beneden de waarden uit het twee-dimensionaal model.

5.5 Afstand duinvoet tot de waterlijn

5.5.1 Duinvoetafstand in het model

Zoals reeds werd opgemerkt is de duinvoetligging bij de diverse proeven steeds apart opgemeten. In de figuren 8 t/m 33 in deze voor de verschillende raaien en tijdstippen in de opgemeten dwarsprofielen opgenomen.

5.5.2 Herleiding tot prototype duinvoetafstand

Voor de bepaling van de duinvoet positie moet naast de hoogte ook de afstand tot de waterlijn worden bepaald. Deze afstand is in het voorgaande onderzoek voor de verschillende prototype tijdstippen op dezelfde wijze bepaald als de duinvoethoogte. Wederom is het verband tussen duinvoetafstand en fictieve diepteschaal uitgezet op zowel "dubbellogaritmisch" als op "logaritmisch-lineair" papier. Het resultaat van de twee extrapolatie methoden blijkt nagenoeg hetzelfde te zijn. Omdat bij de extrapolatie van de horizontale afstand, ten behoeve van de bepaling van het afslagprofiel, is uitgegaan van de benadering op "dubbellogaritmisch" papier is aan deze extrapolatie methode ook in de bepaling van de prototype duinvoetafstand de voorkeur gegeven. Dit laatste verband is daarom gekozen als toetsingsbasis voor de resultaten van het drie-dimensionale onderzoek, welke daartoe met $n_l = n_d$ zijn herleid naar waarden voor fictieve duinzandproeven op diepteschaal $n_d^* = n_d/n_w^2$.

Proeven met vaste waterstand

In de figuren 102 t/m 113 zijn deze waarden van de duinvoetafstand voor de proeven met vaste waterstand uitgezet, tesamen met de waarden van het twee-dimensionale onderzoek, voor de prototype tijdstippen 1 uur, 2 uur, 5 uur en 10 uur. Het verband tussen de duinvoetafstand L_o en de diepteschaal n_d^* kan volgens de voorgaande proevenserie worden beschreven met de relatie:

$$L_o = a_o \, (n_d^*)^{a_1} \qquad (16)$$

Proef met variërende waterstand

De herleide waarden voor de duinvoetafstand van de simulatieproef superstormvloed zijn, gemiddeld over de modeltijdstippen 2,75 uur en 4,1 uur, in onderstaande tabel weergegeven.

raai	duinvoetafstand L_o (m)
R 0000	25,50
R 0375	23,80
R 0750	24,50
R 1125	24,40
R 1500	20,50
gemiddeld	23,75

5.5.3 Vergelijking met twee-dimensionaal model

Proeven met vaste waterstand

De figuren 102 t/m 113 geven een indruk van de spreiding in de resultaten van het drie-dimensionale onderzoek ten opzichte van de spreiding in de oorspronkelijke waarnemingen van het twee-dimensionaal model. In de diverse figuren zijn tevens op basis van vgl. (16) de "best-fit"-lijnen weergegeven voor de resultaten van het twee-dimensionaal model. Uit deze lijnen kunnen voor het twee-dimensionaal model de duinvoetafstanden worden afgeleid, die corresponderen met de fictieve diepteschaalfactoren van de onderhavige proevenserie. Met deze waarden zijn de herleide modelwaarnemingen wederom vergeleken. Het resultaat van deze toetsing is voor de verschillende raaien en tijdstippen weergegeven in de figuren 114 t/m 117.

In de figuren 114 en 115 is de ontwikkeling van de duinvoetafstand voor de proef met loodrechte golfinval weergegeven. De ontwikkeling in de 25 m-bak sluit goed aan bij het twee-dimensionaal model. De spreiding over de verschillende raaien is vanaf 2 uur prototypetijd redelijk constant en bedraagt 15% van de gemiddelde waarde voor de duinvoetafstand. Deze laatste ligt binnen 5% van de waarde van het twee-dimensionaal model.

De 4 m-bak en de 1 m-bak vertonen een geleidelijker ontwikkeling in de afstand tussen duinvoet en waterlijn dan wordt aangegeven door de resultaten van het twee-dimensionale modelonderzoek. De over de raaien gemiddelde waarde neemt voor de 4 m-bak in de periode van 2 uur tot 10 uur prototypetijd toe van 65% naar 90% van de duinvoetafstand uit het twee-dimensionaal model. Over deze tijdsperiode varieert de spreiding in de resultaten van de verschillende raaien tussen 5% en 15% van de gemiddelde duinvoetafstand. Voor de 1 m-bak wordt eenzelfde spreidingsvariatie gevonden, waarbij de gemiddelde gemeten duinvoetafstand in de periode van 2 uur naar 10 uur prototypetijd toeneemt van 60% naar 85% van de waarde van de duinvoetafstand, die door het twee-dimensionaal model wordt aangegeven.

In de figuren 116 en 117 zijn de toetsingsresultaten van de proeven met schuine golfinval weergegeven. Proef P002 ($\phi = 20^{o}$) vertoont eveneens een ontwikkeling van de duinvoetafstand, die geleidelijker verloopt dan door het twee-dimensionaal model wordt aangegeven. Na 2 uur prototypetijd bedraagt de over de raaien

gemiddelde duinvoetafstand 80% en na 10 uur prototypetijd 90% van de waarde uit het twee-dimensionaal model. De spreiding over de raaien reduceert in deze periode van 25% naar 15% van de gemiddelde gemeten waarde van de duinvoetafstand tijdens de proef. Bij proef P003 ($\phi = 10^o$) wordt eenzelfde spreidingsresultaat gevonden. De gemiddelde waarde van de duinvoetafstand sluit nu redelijk aan bij het twee-dimensionaal model: na 2 uur prototypetijd is deze nog 20% lager dan de toetsingswaarde; na 10 uur prototypetijd is de gemiddelde gemeten duinvoetafstand 5% hoger dan de waarde uit het twee-dimensionaal model.

In onderstaande tabel is een en ander wederom samengevat:

proef	gem. waarde duinvoetafstand t.o.v. twee-dimensionaal model	
	t = 2 uur	t = 10 uur
P001, 25 m-bak	1,00	1,05
P001, 4 m-bak	0,65	0,90
P001, 1 m-bak	0,60	0,85
P002	0,80	0,90
P003	0,80	1,05

Hieruit kan worden geconcludeerd dat in het drie-dimensionaal model de gevonden afstand tussen de duinvoet en de waterlijn redelijk tot goed aansluit bij de uitkomst van het twee-dimensionaal model.

Proef met variërende waterstand

Overeenkomstig de toetsing van de duinvoethoogte zijn uit de "best-fit"-lijnen van de duinvoetafstanden uit het twee-dimensionale onderzoek, voor de dieptesschaal $n_d^* = 7,31$ van de simulatieproef superstormvloed, de corresponderende duinvoetafstanden afgeleid. Het resultaat is als volgt:

duinvoetafstand	t = 1 uur	t = 2 uur	t = 5 uur	t = 10 uur
L_o (m)	16,8	21,0	27,0	29,5

Indien deze waarden weer worden vergeleken met het over de raaien gemiddelde eindresultaat van proef P004 ($L_o = 23,75$ m; zie de tabel op blz. 39) dan blijkt, dat eenzelfde waarde bij het twee-dimensionaal model nu na 3½ uur prototypetijd

wordt bereikt. Voor de tijdsperiode van 5 uur à 10 uur prototypetijd, welke bepalend is gebleken voor het afslagresultaat, blijft de ontwikkelde afstand tussen de duinvoet en de waterlijn van de proef met variërende waterstand gemiddeld 15% beneden de waarden uit het twee-dimensionaal model.

5.6 Verspreidingsafstand van het afgeslagen zand

5.6.1 Inleiding

Evenals in het voorgaande onderzoek is in de analyse van de verspreiding van het afgeslagen zand de afstand gekozen als maat voor de verspreiding. Niet alleen is de afstand waarover het profiel zich ontwikkelt vrij onafhankelijk van de vorm van het beginprofiel; ook is de afstand in een veranderend dwarsprofiel duidelijker gedefinieerd dan de diepte.

Bij de beantwoording van de vraag hoe ver het afgeslagen zand verspreid wordt, is uitgegaan van het relatieve dwarstransport. Dat wil zeggen dat het zeewaartse dwarstransport wordt gerelateerd aan de hoeveelheid duinafslag boven de waterlijn.

5.6.2 Herleiding tot prototype verspreidingsafstand

Proeven met vaste waterstand

Voor de herleiding van de verspreidingsafstand naar prototype is in het twee-dimensionale onderzoek de "extrapolatie methode" toegepast. Evenals bij de extrapolatie van de horizontale afstand, ten behoeve van de bepaling van het afslagprofiel, en de extrapolatie van de afstand duinvoet-waterlijn, is de verspreidingsafstand als functie van de fictieve diepte schaalfactor op "dubbellogaritmisch" papier uitgezet. Dit is in het twee-dimensionale onderzoek gebeurd voor de prototype tijdstippen 1,53 uur, 5,10 uur en 15,30 uur en voor de dwarstransportpercentages van 10%, 20%, 30% en 50% van de momentane afslaghoeveelheid. In de figuren 118 t/m 153 zijn de, met $n_l=n_d$ naar duinzandproeven herleide resultaten van de proeven met vaste waterstand uit het huidige onderzoek, uitgezet, tesamen met de resultaten van het twee-dimensionale onderzoek. De figuren geven voor de verschillende tijdstippen en relatieve dwarstransportpercentages het verband tussen de verspreidingsafstand L en de diepteschaal n_d^* volgens:

$$L = a_o \, (n_d^*)^{a_1} \qquad (17)$$

Proef met variërende waterstand

Bij de simulatieproef superstormvloed is een variërende waterstand toegepast. Hierdoor worden steilere afslagprofielen gevormd dan vergelijkbare profielen in het twee-dimensionaal model (zie de figuren 83 en 84). Het lijkt dan ook aannemelijk dat relatief grotere verspreidingsafstanden resulteren. In de analyse van deze proef blijkt het echter niet mogelijk de verschillende relatieve dwarstransportpercentages in de profielmeting terug te vinden.

5.6.3 Vergelijking met twee-dimensionaal model

Proeven met vaste waterstand

In de figuren 118 t/m 129 zijn de resultaten van de proef met loodrechte golfinval weergegeven. Deze resultaten hebben betrekking op de zogenaamde "lange" profielraaien, te weten: R 0500, R 1250 en R 2000 in de 25 m-bak; R 2600 en R 2800 in de 4 m-bak; en R 2950 in de 1 m-bak. Ten gevolge van het drie-dimensionale karakter van de proef, blijkt het niet altijd mogelijk de verschillende relatieve dwarstransportpercentages in de profielmeting terug te vinden. In de diverse figuren zijn voor de twee-dimensionale meetresultaten tevens de op basis van vgl. (17) verkregen "best-fit"-lijnen weergegeven.

De gevonden verspreidingsafstanden in de 1 m-bak blijken voor de verschillende tijdstippen en relatieve dwarstransportpercentages goed aan te sluiten bij de waarden van het twee-dimensionaal model. De resultaten van de 4 m-bak en de 25 m-bak leveren in het algemeen grotere verspreidingsafstanden op. Op basis van het geobserveerde muienpatroon in het model, zoals beschreven in par. 4.9 en geschetst in figuur 59, kunnen de gevonden verschillen ten opzichte van het twee-dimensionaal model in kwalitatieve zin worden verklaard.

Zoals blijkt uit figuur 59, heeft er in de 4 m-bak ter plaatse van R 2700 een min of meer stationaire mui bestaan. Tengevolge van de optredende horizontale circulatiestroom in de bak, is er in de verspreidingszone van het afgeslagen zand van het duinprofiel suspensief materiaal vanuit de raaien R 2600 en R 2800 naar raai R 2700 gevoerd. Aangezien de berekende verspreidingsafstanden in een raai gerelateerd worden aan de gemeten hoeveelheid duinafslag in deze raai, mag verwacht worden dat door de negatieve zandbalans in de raaien R 2600 en R 2800

ter plaatse grotere verspreidingsafstanden resulteren dan volgen uit het twee-dimensionaal model. Dit wordt in de figuren 118 t/m 129 bevestigd. Uit de correlatiecoëfficiënten van de verschillende extrapolatielijnen volgt dat in dit opzicht vooral de figuren 124 t/m 129 met $L_{30\%}$ en $L_{50\%}$ van belang zijn. Alhoewel de resultaten van R 2600 en R 2800 verschillen van de waarden uit het twee-dimensionaal model, bestaat er tussen beide raaien onderling een goede overeenkomst. Dit is conform het geschetste proces in figuur 59.

In figuur 59 is eveneens het muienpatroon geschetst, zoals dit in de 25 m-bak is geobserveerd. Uit deze figuur blijkt, dat ook ter plaatse van raai R 1250 een mui heeft bestaan. In deze raai wordt via de geschetste horizontale circulatiestroming in het verspreidingsgebied een positieve zandbalans gecreëerd. Dit in tegenstelling tot de raaien R 0500 en R 2000, waar in dat gebied juist een min of meer sluitende zandbalans mag worden verondersteld. Deze gedachtengang leidt tot de conclusie dat in raai R 1250 ten opzichte van het twee-dimensionaal model kleinere verspreidingsafstanden zullen resulteren, terwijl de raaien R 0500 en R 2000 juist overeenkomstige waarden van het toetsingsmodel zullen opleveren.

Uit de figuren 118 t/m 129 blijkt, dat de resultaten van raai R 1250 in het algemeen goed aansluiten bij het twee-dimensionale model. De berekende verspreidingsafstanden in de raaien R 0500 en R 2000 liggen daarentegen veelal boven de waarden uit het toetsingsmodel; daarbij bestaat er wel een goede onderlinge overeenstemming tussen beide raaien. Alhoewel het relatieve verschil tussen de resultaten van raai R 1250 enerzijds en de raaien R 0500 en R 2000 anderzijds inderdaad wordt gevonden, doet een en ander vermoeden dat naast het geschetste muienpatroon ook andere modeleffecten een rol hebben gespeeld in de verspreiding van het afgeslagen zand. Daarenboven dient te worden opgemerkt dat de geconstateerde verschillen in verspreidingsafstanden tussen de verschillende raaien maar zeer ten dele zijn terug te vinden in de gevormde afslagprofielen (zie figuur 80).

Voor de proeven met schuine golfinval zijn in de figuren 130 t/m 153 de berekende verspreidingsafstanden, behorende bij de verschillende tijdstippen en relatieve dwarstransportpercentages, weergegeven tesamen met de resultaten van het twee-dimensionale onderzoek. Zoals reeds werd opgemerkt, zijn hierbij vooral de resultaten van $L_{30\%}$ en $L_{50\%}$ van belang. Voor proef P002 met schuine golfinval 20°, betreffen dit de figuren 136 t/m 141. Gezien de opgetreden randverschijnselen tijdens de proef, zijn de resultaten van raai R 1500 minder betrouwbaar.

In het algemeen blijken de berekende verspreidingsafstanden goed aan te sluiten bij het twee-dimensionaal model. Drie-dimensionale verschijnselen, zoals langstransport en muistromen (zie figuur 60), hebben hier kennelijk geen resulterende invloed gehad op de verspreiding van het afgeslagen zand. De uiteindelijke afslagprofielen zijn weergegeven in figuur 81.

Voor de analyse van de resultaten van proef P003, met schuine golfinval 10°, zijn vooral de figuren 148 t/m 153 met $L_{30\%}$ en $L_{50\%}$ relevant. De berekende verspreidingsafstanden van deze proef liggen in het algemeen boven de waarden die door het twee-dimensionaal model worden aangegeven. Tijdens de proef werden eventueel optredende muistromen niet zichtbaar waargenomen. De resulterende afslagprofielen zijn weergegeven in figuur 82.

Indien de resultaten van de analyse van de verspreiding van het afgeslagen zand bij de onderhavige proeven, met vaste waterstand, worden bekeken, dan blijkt, dat de verspreidingsafstanden in het algemeen groter dan wel overeenkomstig de waarden uit het twee-dimensionaal model zijn. Hierbij kunnen drie-dimensionale verschijnselen, zoals langstransport en muistromen, een belangrijke rol spelen.

6. Invloed van de kustlengte en de hoek van golfinval op het prototype-resultaat

6.1 Inleiding

Het modelonderzoek naar duinafslag heeft tot nu toe steeds plaatsgevonden met sterk geschematiseerde begin- en randvoorwaarden. Een dergelijke schematisatie was toegespitst op het kunnen afleiden van de benodigde schaalrelaties. Nu deze echter afdoende zijn vastgesteld, dient te worden nagegaan in hoeverre de belangrijkste schematisatie, namelijk reproductie van duinafslag in een twee-dimensionale proefopstelling (een goot), voldoet in reële prototype-omstandigheden. In het huidige onderzoek zijn daarom een aantal proeven uitgevoerd in een golfbassin om de invloed na te gaan van een tweetal schematisaties op het proces van duinafslag:

- invloed van de door golven aangevallen kustlengte,
- invloed van de golfinvalsrichting op de kust.

Hierbij dient te worden opgemerkt dat in beide gevallen drie-dimensionale verschijnselen (langsstroom, muistromen) een rol kunnen spelen. Daarnaast wordt uitsluitend een kust beschouwd, welke als kustvak uit een oneindig lange, rechte kust kan worden aangemerkt. De duinafslag langs gebogen kusten, zoals bij de koppen van eilanden (gradiënt in langstransport), wordt uitdrukkelijk niet in beschouwing genomen.

6.2 Invloed van de kustlengte

In het onderhavige onderzoek met een drie-dimensionaal model is één proef (P001) uitgevoerd met loodrecht invallende golven op verschillende kustlengten. Hiertoe is de faciliteit onderverdeeld in drie bakken met respectievelijk 1 m, 4 m en 25 m lengte langs de golfmachines. De resultaten van de 1 m-bak zijn eveneens gebruikt om het verband tussen het twee-dimensionale modelonderzoek en het drie-dimensionale onderzoek te verifiëren. Zie hiertoe hoofdstuk 7.

Afslaghoeveelheid boven de waterlijn

De ontwikkeling van het prototype afslagresultaat is voor de verschillende kustlengten weergegeven in figuur 154. De gevonden hoeveelheid duinafslag in de 1 m-bak ligt systematisch 15% à 20% beneden de waarden uit de 4 m-bak en de

25 m-bak, welke laatste onderling goed bij elkaar aansluiten. De geobserveerde horizontale circulatiestroming (figuur 59) heeft in de 4 m-bak en de 25 m-bak een duidelijk grotere afslag teweeg gebracht, welke echter ruimschoots binnen het 95%-betrouwbaarheidsinterval van het twee-dimensionaal model blijft.

Afslagprofiel beneden de waterlijn

In figuur 155 zijn de gevonden prototype-profielen na 1 uur modeltijd voor de verschillende kustlengten vergeleken, door voor een aantal waterdiepten de bijbehorende afstand uit de waterlijn uit te zetten. Het blijkt dat de profielvormen onderling goed bij elkaar aansluiten. Zoals reeds eerder werd geconstateerd, zijn deze profielen wel alle steiler dan het parabolische profiel uit het twee-dimensionaal model.

Duinvoethoogte boven de waterlijn

De ontwikkeling van de duinvoethoogte is voor de verschillende kustlengten weergegeven in figuur 156. Het resultaat van de 25 m-bak ligt initieel boven de waarden van de 4 m-bak en de 1 m-bak, welke laatste onderling bij elkaar aansluiten. Tussen 5 uur en 10 uur prototypetijd wordt de overeenkomst tussen de duinvoethoogten voor de verschillende kustlengten beter en sluiten deze waarden ook redelijk aan bij het twee-dimensionaal model. Dit is voor de 25 m-bak ook reeds het geval op eerdere tijdstippen.

Afstand duinvoet tot de waterlijn

Eenzelfde conclusie, als gegeven bij de duinvoethoogte, kan voor de duinvoetafstand worden gemaakt. Uit figuur 157 blijkt dat ook de duinvoetafstand in de 25 m-bak initieel boven de waarden in de 4 m-bak en de 1 m-bak ligt. Deze laatste vertonen wederom een overeenkomstige ontwikkeling, die tevens tussen 5 uur en 10 uur prototypetijd redelijk samenvalt met het twee-dimensionaal model. Het resultaat van de 25 m-bak sluit op alle tijdstippen goed aan bij de door het twee-dimensionaal model aangegeven ontwikkeling van de duinvoetafstand.

Verspreidingsafstand van het afgeslagen zand

Zoals reeds in par. 5.6 is geconstateerd heeft de opgetreden horizontale circulatiestroming in de verspreiding van het afgeslagen zand een belangrijke rol gespeeld. De verspreidingsafstanden voor de verschillende kustlengten, en zelfs de variatie hierin over één bepaalde kustlengte, hangen derhalve ten nauwste

samen met de ligging van de beschouwde raaien in het patroon van circulatiecellen. Een vergelijking van de gevonden verspreidingsafstanden bij de verschillende kustlengten is daarom niet goed mogelijk.

6.3 Invloed van de hoek van golfinval

In het drie-dimensionale onderzoek is de invloed van de golfinvalsrichting op de kust onderzocht door naast de proef met loodrechte golfinval tevens een tweetal proeven met schuine golfinval van respectievelijk 10° en 20° uit te voeren. Door de optredende gradiënt van de stralingsdruk langs de kust zal een langsstroom opgewekt worden, welke een transport van zand langs de kust zal veroorzaken. Deze en andere verschijnselen (o.a. muistromen) kunnen hun weerslag hebben op het proces van duinafslag, welke invloed niet is betrokken in het twee-dimensionaal model.

Afslaghoeveelheid boven de waterlijn

De ontwikkeling van het prototype afslagresultaat is voor de verschillende golfinvalsrichtingen weergegeven in figuur 158. Hierbij is voor de hoek van golfinval $\phi = 0^{o}$ het afslagresultaat van de 25 m-bak genomen. De gevonden hoeveelheden duinafslag in de proeven met loodrechte golfinval en schuine golfinval 10° vertonen een goede onderlinge overeenkomst; de ontwikkeling in de tijd sluit bijzonder goed aan bij het twee-dimensionaal model. Het verloop van de duinafslag in de proef met schuine golfinval 20° blijft hierbij enigszins achter. Een en ander is echter niet dermate significant, dat een mogelijke tendens in de hoeveelheid duinafslag als functie van de golfinvalsrichting kan worden waargenomen.

Afslagprofiel beneden de waterlijn

Voor een aantal waterdiepten is de bijbehorende afstand tot de waterlijn voor de verschillende proeven na 1 uur modeltijd vergeleken, om een indruk te krijgen van de invloed van de golfinvalsrichting op de vorming van het prototype afslagprofiel. Het resultaat is weergegeven in figuur 159. Wederom is voor de hoek van golfinval $\phi = 0^{o}$ het resultaat van de 25 m-bak genomen. Uit de figuur blijkt dat de profielvormen onderling goed bij elkaar aansluiten. De gevormde afslagprofielen beneden de waterlijn zijn wel alle steiler dan het parabolische afslagprofiel uit het twee-dimensionaal model (zie par. 5.3).

Duinvoethoogte boven de waterlijn

De ontwikkeling van de duinvoethoogte is voor de verschillende golfinvalsrichtingen weergegeven in figuur 160. De resultaten van de 25 m-bak uit de proef met loodrechte golfinval zijn hierbij representatief verondersteld voor $\phi = 0^{o}$. Voor een onderlinge vergelijking van de resultaten van de verschillende proeven is vooral het tijdvak van 5 uur à 10 uur prototype van belang. In deze periode is in de gemiddelde resultaten een tendens aanwezig, waarbij de proeven met schuine golfinval van 10° en 20° respectievelijk 10% en 20% lagere duinvoethoogten opleveren dan het resultaat bij de proef met loodrechte golfinval. De spreiding in de individuele waarnemingen is echter dusdanig, dat aan deze tendens geen absolute waarde kan worden toegekend. De gevonden duinvoethoogten in het drie-dimensionale onderzoek liggen wel alle beneden de waarden, die door het twee-dimensionaal model worden aangegeven (zie par. 5.4).

Afstand duinvoet tot de waterlijn

De ontwikkeling van de afstand tussen de duinvoet en de waterlijn is voor de verschillende golfinvalsrichtingen weergegeven in figuur 161. Voor $\phi = 0^{o}$ zijn wederom de waarden van de 25 m-bak uit de proef met loodrechte golfinval genomen. De resultaten van de verschillende proeven sluiten onderling goed bij elkaar aan en vertonen tevens een overeenkomstige ontwikkeling als in het twee-dimensionaal model.

Verspreidingsafstand van het afgeslagen zand

In par. 5.6 is onderzocht in hoeverre de mate van verspreiding van het afgeslagen zand kan worden toegeschreven aan de horizontale circulatiestromen, die zowel bij de proef met loodrechte golfinval (in deze beschouwing beperkt tot de 25 m-bak) als bij de proeven met schuine golfinval zijn waargenomen. Het vermoeden bestaat dat naast dit drie-dimensionale verschijnsel ook andere fenomenen (o.a. langsstroom) een rol hebben gespeeld in de afstand waarover het afgeslagen zand wordt verspreid.

De over de raaien gemiddelde resultaten van de proeven met schuine golfinval zijn vergeleken met de resultaten van de proef met loodrechte golfinval. Een en ander is samengevat in onderstaande tabel.

relatieve dwarstransport-percentages	verspreidingsafstand t.o.v. $\phi = 0^o$					
	t = 1,53 uur		t = 5,10 uur		t = 15,30 uur	
	$\phi=20^o$	$\phi=10^o$	$\phi=20^o$	$\phi=10^o$	$\phi=20^o$	$\phi=10^o$
10%	0,66	2,46	0,35	1,49	0,90	1,55
20%	0,74	2,43	0,42	1,78	0,99	1,80
30%	0,73	1,60	0,50	1,52	0,92	1,80
50%	0,84	1,11	0,73	1,40	0,94	2,43

Gemiddelde verspreidingsafstand van het afgeslagen zand

Uit de tabel blijkt dat in de proef met een golfinval van 10° het afgeslagen zand verder wordt verspreid dan in de proef met loodrechte golfinval. Daarentegen is er een redelijke tot goede overeenkomst tussen de proeven met $\phi = 0^o$ en $\phi = 20^o$, die beide tevens redelijk aansluiten bij de resultaten van het twee-dimensionaal model. De wijze waarop de golfinvalsrichting de verspreiding van het afgeslagen zand beïnvloedt, vertoont geen duidelijk waarneembare tendens.

7. Toetsing schaalrelaties twee-dimensionaal model

7.1 Inleiding

De schaalrelaties, welke in het onderhavige onderzoek zijn toegepast, werden deels door literatuurstudie en deels langs empirische weg (door middel van een schaalserie) in het twee-dimensionale onderzoek vastgesteld. Uit dit laatstgenoemde onderzoek bleek, dat de belangrijkste schaaleffecten optraden in de helling van het afslagprofiel en de snelheid waarmee het duinafslagproces verliep in het model. Deze schaaleffecten zijn op basis van de eenvoudige betrekkingen $n_l/n_d=n_d^{\alpha}$ (samentrekkingsrelatie) en $n_t=n_d^{\beta}$ (tijdschaalrelatie) nader geanalyseerd.

Samentrekkingsrelatie

De α-waarde is gevonden door onderlinge vergelijking van de proeven met de verschillende schalen op een tweetal manieren. De eerste methode gaat uit van verschillende waarden voor α, waarmee alle proefresultaten zijn herleid naar prototype. Met behulp van correlatieanalyse wordt daarna vastgesteld welke waarde van α de meeste overeenstemming geeft tussen de proeven onderling. Deze methode wordt de "methode schaalrelaties" genoemd, en kan zowel voor de afslaghoeveelheid als voor het afslagprofiel worden toegepast. Bij de tweede methode worden de proefresultaten eerst herleid naar prototype met $n_l = n_d$, alsof er geen schaaleffect in de profielhelling bestaat. Vervolgens wordt de relatie onderzocht tussen de profielhelling en de diepteschaalfactor. Deze methode wordt de "extrapolatie methode" genoemd, en is alleen toepasbaar voor het afslagprofiel. Een dergelijke analyse is voor de afslaghoeveelheid niet zinvol omdat daarbij, in tegenstelling tot het afslagprofiel, ook het beginprofiel van invloed is.

Uit de "methode schaalrelaties" voor de afslaghoeveelheid werd in het twee-dimensionale onderzoek een α-waarde tussen 0,22 en 0,26 gevonden, terwijl deze analyse voor het afslagprofiel geen significante verschillen liet zien tussen omrekening met een α-waarde van 0,24 dan wel 0,26 of 0,28. De analyse van het afslagprofiel volgens de "extrapolatiemethode" resulteerde in α-waarden tussen 0,25 en 0,34.

In het twee-dimensionale onderzoek manifesteerde zich dus een discrepantie tussen de toe te passen α-waarden in de samentrekkingsrelatie, die volgen uit de afslag boven de waterlijn en de profielvorm beneden de waterlijn. In de bepaling van een

éénduidige samentrekkingsrelatie ligt het voor de hand dat uiteindelijk is gekozen voor een "gemiddelde" α-waarde van 0,28 zodat $n_l/n_d = (n_d)^{0,28}$

Tijdschaalrelatie

In de analyse van de tijdschaal in het twee-dimensionale onderzoek is de waarde van β op een tweetal manieren bepaald. Allereerst door correlatieanalyse van de naar prototype herleide afslaghoeveelheden, de zgn. "extrapolatie methode". Een tweede methode is die, waarbij de modeltijd die nodig is om een bepaalde afslaghoeveelheid te bereiken wordt uitgezet als functie van de diepteschaal. Deze methode wordt de "directe methode" genoemd.

De "extrapolatiemethode" geeft tussen 5 uur en 10 uur prototypetijd de beste correlatie voor een β-waarde van 0,25 à 0,5. Uit de analyse volgens de "directe methode" voor alle zandsoorten (met α = 0,28) volgt dat de β-waarde varieert tussen 0,5 en 0,9. Worden alleen de duinzandproeven beschouwd, dan blijkt dat een β-waarde van 0,2 à 0,6 gevonden wordt. De fijnere zandsoorten lijken dus een verhogende werking te hebben op de waarde van β. Uit de resultaten van de "directe methode" wordt de conclusie getrokken dat de waarde van β ligt tussen 0,4 en 0,7. Op basis van het afslagresultaat tussen 5 uur en 10 uur prototype wordt gevonden dat voor een waarde van β = 0,5 de "extrapolatie methode" en de "directe methode" vrij goed bij elkaar aansluiten. Op grond hiervan wordt de morfologische tijdschaal vastgesteld op $n_t = (n_d)^{0,5}$.

7.2 Toetsing schaalrelaties

De naar het prototype herleide resultaten van de 1 m-bak bij de proef met loodrechte golfinval (P001) zijn gebruikt voor de toetsing van de schaalrelaties van het twee-dimensionaal model, aan de hand van de karakteristieken van het duinafslagproces, waaruit deze schaalrelaties zijn afgeleid.

Afslaghoeveelheid boven de waterlijn

Het lijkt interessant om allereerst een directe vergelijking te maken met de asserzandproeven uit het voorgaande onderzoek. In het twee-dimensionale onderzoek zijn in totaal 6 proeven met dit fijne zand uitgevoerd, waarvan alleen in de 2 proeven op diepteschaal n_d=26 (proeven 124 en 128) de golfhoogte binnen de gestelde normen werd weergegeven. De afslagresultaten van deze proeven zijn met behulp van de schaalrelaties van het twee-dimensionaal model herleid tot prototype-

waarden. Teneinde een directe vergelijking met de resultaten van de 1 m-bak uit proef P001 van het onderhavige onderzoek mogelijk te maken, dient de invloed van de samentrekking van het beginprofiel nog geëlimineerd te worden. Dit is gebeurd door voor iedere samentrekking de overeenkomstige prototype afslaghoeveelheid uit het twee-dimensionaal model te herleiden en hiermee de proefresultaten dimensieloos te maken. Een en ander is voor de prototype tijdstippen 2 uur, 5 uur en 10 uur weergegeven in figuur 162.

De resultaten van de 1 m-bak in de proef met loodrechte golfinval van het huidige onderzoek blijken goed aan te sluiten bij de resultaten van de asserzandproeven uit het voorgaande onderzoek. De asserzandproeven uit beide onderzoeken vertonen een duidelijke discrepantie met het twee-dimensionaal model, gedefinieerd door de beschreven schaalrelaties met $\alpha = 0{,}28$ en $\beta = 0{,}5$. In de analyse van de afslaghoeveelheid zijn in het twee-dimensionale onderzoek 33 proeven met "voldoende" golfhoogte betrokken geweest volgens onderstaande tabel:

zandsoort / diepteschaal	duinzand	wadzand	drentzand	asserzand	
$n_d=26$	6	6	2	2	16
$n_d=47$	4	4	-	-	8
$n_d=84$	5	4	-	-	9
	15	14	2	2	33

Hieruit blijkt dat de fijnere zandsoorten in combinatie met grotere diepteschaalfactoren niet zijn meegenomen in de vaststelling van de uiteindelijke schaalbetrekkingen.

Voor wat betreft de afslaghoeveelheid kan de geconstateerde discrepantie aan zowel de waarde van α als de waarde van β worden toegeschreven, waarbij de zandsoort (asserzand) en de toegepaste diepteschaal bepalende factoren zijn. Uit figuur 162 blijkt, dat vooral de toegepaste zandsoort oorzaak is van de matige aansluiting bij het twee-dimensionaal model.

Afslagprofiel beneden de waterlijn

In de vaststelling van het prototype afslagprofiel speelt de waarde van β geen rol. Het parabolische afslagprofiel uit het twee-dimensionaal model is gevonden

op basis van de samentrekkingsrelatie $n_1/n_d = n_d^{\alpha}$ met $\alpha = 0{,}28$ (zie figuur 85). In figuur 163 is dit profiel weergegeven, tesamen met de naar het prototype herleide afslagprofielen uit de 1 m-bak bij proef P001 van het onderhavige onderzoek. Tevens zijn de afslagprofielen van de asserzandproeven met diepteschalen n_d=26, n_d=47 en n_d=84 uit het voorgaande onderzoek ingetekend. Uit deze laatste profielen blijkt dat, ondanks de herleiding naar het prototype via de samentrekkingsrelatie, de helling van het afslagprofiel alsnog afhankelijk blijft van de schaal waarop de asserzandproeven zijn uitgevoerd.

Het gemiddelde prototype afslagprofiel uit het twee-dimensionaal model, aangegeven door de parabool in figuur 85, is vastgesteld aan de hand van een 10-tal proefresultaten, waarvan slechts 2 proeven op schaal n_d=47 zijn uitgevoerd; de overige zijn alle proeven op schaal n_d=26. Daarnaast zijn maar 2 proeven met asserzand (proeven 124 en 128, met n_d=26) in de analyse van het afslagprofiel meegenomen. De uitgevoerde asserzandproeven op schaal n_d=47 en n_d=84 bleken namelijk te geringe golfhoogte te bezitten (respectievelijk 80% en 70% van de golfhoogte bij de asserzandproeven op schaal n_d=26). Derhalve komt in de vaststelling van het gemiddelde prototype afslagprofiel de invloed van het asserzand en grotere diepteschaalfactoren maar zeer ten dele tot uiting.

Dit is zichtbaar gemaakt in figuur 163. Het afslagprofiel van de asserzandproef op schaal n_d=26 sluit goed aan bij het parabolische profiel van het twee-dimensionaal model, terwijl met toenemende diepteschaalfactor de asserzandproeven steilere afslagprofielen ontwikkelen. Dit is deels ook voor andere zandsoorten waarneembaar (zie figuur 85). Bij deze constatering moet echter opgemerkt worden dat in de asserzandproeven op schaal $n_d = 47$ en $n_d = 84$ de golfhoogte onvoldoende was om een zuivere vergelijking met het gemiddelde prototype afslagprofiel mogelijk te maken. Nochtans is het gemeten golfhoogteverschil tussen deze laatste proeven onderling niet zodanig dat de waargenomen diepteschaal-afhankelijkheid hiermee zonder meer te verklaren zou zijn.

De profielen uit de 1 m-bak van de proef met loodrechte golfinval op diepteschaal n_d=60 uit het huidige onderzoek geven een goede aansluiting bij de waargenomen tendens. Een en ander geeft aanleiding tot de veronderstelling dat ten aanzien van de profielontwikkeling vooral de toegepaste diepteschaal verantwoordelijk is voor de matige aansluiting bij het twee-dimensionaal model.

Er moet dus geconstateerd worden dat, mede door de samenstelling van het geselekteerde proevenbestand van het twee-dimensionale onderzoek, de onderhavige proefresultaten met toepassing van asserzand en diepteschaalfactor $n_d = 60$ minder goed beschreven worden door het twee-dimensionaal model.

8. Samenvatting en conclusies

Het drie-dimensionale onderzoek dat in dit verslag wordt beschreven, moet worden gezien als een toetsing van de resultaten van het tot dusver zuiver twee-dimensionale onderzoek naar duinafslag. Het doel van het onderhavige onderzoek was na te gaan in hoeverre de twee-dimensionale benadering voldoet in situaties met schuine golfinval, welke een betere weergave van de werkelijk optredende stormvloedomstandigheden geven. In dergelijke situaties kan de mogelijke invloed van drie-dimensionale verschijnselen, zoals langsstromen en muistromen, op de ontwikkeling van afslaghoeveelheid, profielvorm, duinvoetligging en verspreidingsafstand van het afgeslagen zand worden nagegaan.

Het onderzoek is uitgevoerd in de "Havenbak" van het Laboratorium De Voorst. De proeven zijn alle uitgevoerd met diepteschaalfactor $n_d = 60$. Als bodemmateriaal is asserzand ($D_{50} \simeq 105$ µm) toegepast.

Het uiteindelijke proevenprogramma omvatte 4 proeven. Hiervan zijn 3 proeven uitgevoerd met vaste waterstand, te weten:
- proef met loodrecht invallende golven op kustlengten van 1 m, 4 m en 25 m;
- proef met schuin invallende golven met $\phi_o \simeq 20^o$;
- proef met schuin invallende golven met $\phi_o \simeq 10^o$.

De vierde proef, met variërende waterstand, was een simulatie van de superstormvloed. De proef werd uitgevoerd met schuin invallende golven met $\phi_o \simeq 10^o$.

De randvoorwaarden voor de modelproeven komen grotendeels overeen met die van het twee-dimensionale onderzoek. Zij kunnen als volgt worden samengevat:

a proeven met vaste waterstand:
   - geschematiseerd kustprofiel, duinhoogte N.A.P. +15 m en duinvoethoogte N.A.P. +3 m;
   - onregelmatige golven, $H_{os} = 7{,}6$ m en $\hat{T} = 12$ sec.;
   - waterstand, overeenkomend met de maximale stormvloedstand, N.A.P. +5 m;

b proef met variërende waterstand:
   - geschematiseerd kustprofiel, duinhoogte N.A.P. +15 m en duinvoethoogte N.A.P. +3 m;

- onregelmatige golven, H_{os} = 5,5 m en 7,6 m en $\hat{T}$ = 12 sec.;
- waterstand, volgens een door het Centrum voor Onderzoek Waterkeringen voorgesteld verloop, met een maximaal peil van N.A.P. +5 m.

De conclusies van het onderzoek kunnen als volgt worden samengevat:

1 De afslaghoeveelheden uit het drie-dimensionale onderzoek sluiten goed aan bij de afslagresultaten van het twee-dimensionale onderzoek. Op grond hiervan mag worden geconcludeerd dat het twee-dimensionaal model op het punt van de hoeveelheid duinafslag, een goede benadering is.

2 De toegepaste golfinvalsrichtingen ten opzichte van de kust van 0°, 10° en 20° ter plaatse van een waterdiepte van N.A.P. -20 m, hebben geen significante invloed op het afslagresultaat.

3 Bij de proef met loodrechte golfinval wordt in de bredere bassins (4 m en 25 m) een overwegend grotere afslaghoeveelheid gemeten, tot maximaal 20% boven het gemiddelde afslagresultaat uit de 1 m-bak. Een en ander blijft echter binnen het 95%-betrouwbaarheidsinterval van het twee-dimensionaal model.

4 De vorm van het afslagprofiel beneden de waterlijn blijkt onafhankelijk te zijn van de toegepaste modelbreedte dan wel golfinvalsrichting.

5 De afslagprofielen uit het drie-dimensionale onderzoek zijn alle steiler dan het gemiddelde afslagprofiel uit het twee-dimensionaal model. Dit was echter ook het geval met de afslagprofielen in het twee-dimensionaal model voor de fijnere zandsoorten en grotere diepteschaalfactoren. De discrepantie moet dan ook worden toegeschreven aan de marges binnen de afgeleide schaalrelaties van het twee-dimensionaal model en is vermoedelijk niet het gevolg van drie-dimensionale verschijnselen.

6 De ontwikkeling van de duinvoethoogte verloopt in het drie-dimensionaal model geleidelijker, naarmate de golven de kust onder een grotere hoek naderen. Dezelfde tendens is aanwezig bij afnemende breedte van het model.

7 De ontwikkeling van de duinvoethoogte blijft in het drie-dimensionaal model in het algemeen achter bij het verloop, zoals dat door het twee-dimensionaal

model wordt aangegeven. Eenzelfde tendens is voor de fijnere zandsoorten en grotere diepteschaalfactoren ook in het twee-dimensionale onderzoek waargenomen. Een en ander is dan ook vermoedelijk toe te schrijven aan de wens om eenduidige schaalrelaties af te leiden binnen het twee-dimensionale modelonderzoek.

8 De ontwikkeling van de afstand tussen de duinvoet en de waterlijn verloopt sneller naarmate de breedte van het model toeneemt. De toegepaste golfinvalsrichtingen hebben daarentegen geen significante invloed op deze ontwikkeling.

9 Bij het drie-dimensionale onderzoek sluit de gemeten duinvoetafstand tot de waterlijn redelijk tot goed aan bij de gemiddelde resultaten van het tweedimensionaal model.

10 In het drie-dimensionaal model wordt het afgeslagen zand in een enkel geval ($\phi=10^{o}$) verder verspreid dan wordt aangegeven door de gevonden verspreidingsafstanden in het twee-dimensionaal model. Dit kan het gevolg zijn van modeleffecten, of veroorzaakt zijn door verschijnselen die eveneens in de natuur optreden. Op grond van de huidige resultaten kan echter geen duidelijke uitspraak worden gedaan. Bij het opstellen van een definitieve richtlijn zal er met betrekking tot dit punt de nodige voorzichtigheid betracht moeten worden.

Aanbevelingen voor verder onderzoek:

Bij het verdere onderzoek naar de beoordeling van de veiligheid van de duinen als waterkering zullen de volgende zaken nader aan de orde moeten komen:

1 Modelonderzoek naar de invloed van afwijkingen ten opzichte van de geschematiseerde situatie; dat wil zeggen onderzoek naar de invloed van:
- stormvloedstand,
- de golfcondities,
- de vorm van het beginprofiel (banken in de vooroever, hoogte van het duin).

Dit onderzoek is van belang voor het opstellen van een definitieve richtlijn voor duinafslag, welke een zo breed mogelijk toepassingsgebied heeft. Daarnaast kan dit aanvullende onderzoek van belang zijn voor de probabilistische benadering van de berekening van de ontwerpsterkte van duinen.

2 Modelonderzoek naar duinafslag aan een sterk gebogen kust. Hierbij is het van belang te onderzoeken in hoeverre een gradiënt in het langstransport invloed heeft op de hoeveelheid duinafslag tijdens een stormvloed.

LITERATUUR

1 Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen
Richtlijn voor de berekening van duinafslag ten gevolge van een stormvloed
juli 1972

2 Waterloopkundig Laboratorium
Schaalserie duinafslag
Verslag modelonderzoek M 1263, deel IA en IB, april 1976

3 Waterloopkundig Laboratorium
Schaalserie duinafslag
Verslag modelonderzoek M 1263, deel IIA en IIB, april 1981

4 DORRESTEIN, R.
Wind and wave data of Netherlands lightvessels since 1949
Staatsdrukkerij, 's-Gravenhage, 1967

5 Waterloopkundig Laboratorium
Oriënterende duinafslagproef met fijn zand als bodemmateriaal
Nota modelonderzoek M 1263, mei 1976

6 Centrum voor Onderzoek Waterkeringen
Notitie betreffende het mogelijk waterstandsverloop gedurende een super-
stormvloed, mei 1980

7 VISSER, P.J.
Longshore current flows in a wave basin
Proceedings 17th Coastal Engineering Conference, Sydney, Australia, 1980

8 Waterloopkundig Laboratorium
Muistromen, literatuurstudie
Toegepast Onderzoek Waterstaat, nota R 1174, juli 1977

9 HOOPEN, H.G.H. ten, DRIEL, G.B. van
Rapportage fotovluchten muistroomonderzoek
Rijkswaterstaat, Directie Waterhuishouding en Waterbeweging,
District Kust en Zee, Nota WWKZ-79 G.013, november 1979

P001		golfmetingen uitgedrukt in H_s (m)											
plaats opnemers		tijd in uren na begin proef											
x (m)	y (m)	0,05	0,20	0,51	0,90	1,21	1,64	2,03	2,56	3,21	3,57	3,99	4,46
5,65	5,00			0,141	0,143	0,143	0,141	0,145	0,143	0,142	0,136	0,144	0,143
12,30	5,00									0,123			
15,80	5,00									0,128			
19,30	5,00									0,114			
22,80	5,00									0,101			
12,30	8,75										0,125		
15,80	8,75										0,115		
19,30	8,75										0,117		
22,80	8,75										0,097		
5,65	12,50	0,137	0,130	0,133	0,135	0,131	0,130	0,134	0,132	0,131	0,125	0,132	0,131
12,30	12,50			0,132				0,134					
15,80	12,50			0,113				0,114					
19,30	12,50			0,126				0,128					
22,80	12,50			0,087				0,095					
12,30	16,25												
15,80	16,25												
19,30	16,25												
22,80	16,25												
5,65	20,00			0,137	0,138	0,138	0,135	0,140	0,139	0,138	0,129	0,142	0,138
12,30	20,00						0,133						
15,80	20,00						0,121						
19,30	20,00						0,115						
22,80	20,00						0,102						
5,65	27,00			0,134	0,134	0,135	0,132	0,136	0,135	0,135	0,127	0,136	0,136
12,30	27,00				0,145	0,138							0,134
15,80	27,00				0,111	0,112							0,110
19,30	27,00					0,128							0,132
22,80	27,00					0,100							0,091
5,65	29,50			0,133	0,134	0,135	0,133	0,137	0,135	0,134	0,128	0,137	0,135
12,30	29,50								0,126			0,124	
15,80	29,50								0,119			0,120	
19,30	29,50								0,111			0,112	
22,80	29,50								0,103			0,098	

N.B. zie figuur 1 voor oorsprong coördinaten

Tabel 1 Golfmetingen proef P001

P001		golfmetingen uitgedrukt in H_s(m)											
plaats opnemers		tijd in uren na begin proef											
x (m)	y (m)	4,96	5,41	5,79	6,21	6,74	7,15	7,63	8,13	8,66	9,03	9,33	9,83
5,65	5,00	0,144	0,140	0,144	0,141	0,141	0,135	0,144	0,141	0,142	0,135	0,144	0,144
12,30	5,00									0,120			
15,80	5,00									0,127			
19,30	5,00									0,108			
22,80	5,00									0,094			
12,30	8,75										0,124		
15,80	8,75										0,116		
19,30	8,75										0,118		
22,80	8,75										0,084		
5,65	12,50	0,132	0,130	0,134	0,132	0,132	0,127	0,134	0,130	0,132	0,125	0,133	0,131
12,30	12,50			0,134				0,128				0,131	
15,80	12,50			0,113				0,118				0,114	
19,30	12,50			0,128				0,124				0,129	
22,80	12,50			0,089				0,087				0,082	
12,30	16,25		0,132				0,127						
15,80	16,25		0,117				0,112						
19,30	16,25		0,114				0,113						
22,80	16,25		0,088				0,086						
5,65	20,00	0,138	0,135	0,141	0,138	0,137	0,129	0,140	0,136	0,136	0,130	0,139	0,138
12,30	20,00	0,134							0,131				
15,80	20,00	0,121							0,122				
19,30	20,00	0,115							0,113				
22,80	20,00	0,099							0,098				
5,65	27,00	0,138	0,135	0,138	0,136	0,138	0,131	0,140	0,138	0,137	0,131	0,141	0,140
12,30	27,00					0,135							0,134
15,80	27,00					0,112							0,107
19,30	27,00					0,129							0,133
22,80	27,00					0,089							0,085
5,65	29,50	0,135	0,132	0,137	0,133	0,132	0,127	0,135	0,132	0,133	0,126	0,135	0,134
12,30	29,50				0,125								
15,80	29,50				0,119								
19,30	29,50				0,110								
22,80	29,50				0,096								

N.B. zie figuur 1 voor oorsprong coördinaten

Tabel 1 Golfmetingen proef P001 (vervolg)

P002		golfmetingen uitgedrukt in H_s (m)					
plaats opnemers		tijd in uren na begin proef					
x (m)	y (m)	1,25	1,83	2,42	6,21	6,71	7,21
5,65	7,50	0,137	0,139	0,135	0,138	0,139	0,135
10,77	7,50			0,153	0,145		
13,50	7,50			0,141	0,161		
16,23	7,50			0,119	0,163		
18,96	7,50			0,119	0,112		
21,69	7,50			0,113	0,092		
5,65	15,00	0,143	0,144	0,140	0,141	0,144	0,141
10,77	15,00	0,147				0,147	
13,50	15,00	0,162				0,156	
16,23	15,00	0,154				0,161	
18,96	15,00	0,119				0,115	
21,69	15,00	0,105				0,099	
5,65	22,50	0,137	0,134	0,131	0,132	0,136	0,131
10,77	22,50		0,138				0,153
13,50	22,50		0,121				0,173
16,23	22,50		0,123				0,166
18,96	22,50		0,112				0,129
21,69	22,50		0,090				0,113

N.B. zie figuur 2 voor oorsprong coördinaten

Tabel 2 Golfmetingen proef P002

P003		golfmetingen uitgedrukt in H_s (m)					
plaats opnemers		tijd in uren na begin proef					
x (m)	y (m)	1,25	1,88	2,46	6,25	6,92	7,58
5,65	7,50	0,135	0,137	0,133	0,133	0,132	0,135
12,22	7,50		0,131				0,130
14,22	7,50		0,128				0,123
16,22	7,50		0,131				0,123
18,22	7,50		0,119				0,120
20,22	7,50		0,118				0,125
5,65	15,00	0,137	0,138	0,135	0,135	0,133	0,137
10,90	15,00	0,127				0,126	
12,90	15,00	0,119				0,126	
14,90	15,00	0,130				0,123	
16,90	15,00	0,132				0,119	
18,90	15,00	0,114				0,117	
5,65	22,50	0,128	0,130	0,129	0,128	0,126	0,130
9,58	22,50			0,133	0,128		
11,58	22,50			0,123	0,110		
13,58	22,50			0,131	0,126		
15,58	22,50			0,129	0,126		
17,58	22,50			0,113	0,117		

N.B. zie figuur 3 voor oorsprong coördinaten

Tabel 3 Golfmetingen proef P003

P004		golfmetingen uitgedrukt in H_s (m)					
plaats opnemers		tijd in uren na begin proef					
x (m)	y (m)	0,50	1,04	2,04			
5,65	7,50	0,105		0,135			
5,65	15,00	0,107	0,092	0,135			
10,90	15,00	0,105					
12,90	15,00	0,094					
14,90	15,00	0,100					
16,90	15,00	0,100					
18,90	15,00	0,094					
5,65	22,50	0,108		0,129			

N.B. zie figuur 3 voor oorsprong coördinaten

Tabel 4 Golfmetingen proef P004

proef P001	gemeten golfhoogte		volgens de lineaire golftheorie		$H_{s_1}/H^*_{s_1}$	$H_{s_2}/H^*_{s_2}$
	vlak voor het golfschot gemiddeld in de tijd H_{s_1} (m)	op een diepte $d = 2\,H_{os}$ gemiddeld in de tijd H_{s_2} (m)	vlak voor het golfschot $H^*_{s_1}$ (m)	op een diepte $d = 2\,H_{os}$ $H^*_{s_2}$ (m)		
R0500	0,142	0,125	0,117	0,123	1,20	1,02
R0875	-	0,120	0,117	0,123	-	0,98
R1250	0,131	0,123	0,117	0,123	1,11	1,00
R1625	-	0,121	0,117	0,123	-	0,98
R2000	0,137	0,127	0,117	0,123	1,16	1,03
R2700	0,136	0,123	0,117	0,123	1,15	1,00
R2950	0,133	0,122	0,117	0,123	1,13	0,99

Tabel 5 Toetsing golfhoogte t.p.v. $d = 2\,H_{os}$ voor proef P001

proef P002	gemeten golfhoogte		volgens de lineaire golftheorie		$H_{s_1}/H^*_{s_1}$	$H_{s_2}/H^*_{s_2}$
	vlak voor het golfschot gemiddeld in de tijd H_{s_1} (m)	op een diepte $d = 2\,H_{os}$ gemiddeld in de tijd H_{s_2} (m)	vlak voor het golfschot $H^*_{s_1}$ (m)	op een diepte $d = 2\,H_{os}$ $H^*_{s_2}$ (m)		
R0000	0,137	0,106	0,117	0,122	1,17	0,87
R0750	0,142	0,126	0,117	0,122	1,21	1,03
R1500	0,134	0,145	0,117	0,122	1,15	1,19

Tabel 6 Toetsing golfhoogte t.p.v. $d = 2\,H_{os}$ voor proef P002

proef P003	gemeten golfhoogte		volgens de lineaire golftheorie		$H_{s_1}/H^*_{s_1}$	$H_{s_2}/H^*_{s_2}$
	vlak voor het golfschot gemiddeld in de tijd H_{s_1} (m)	op een diepte $d = 2\,H_{os}$ gemiddeld in de tijd H_{s_2} (m)	vlak voor het golfschot $H^*_{s_1}$ (m)	op een diepte $d = 2\,H_{os}$ $H^*_{s_2}$ (m)		
R0000	0,134	0,120	0,117	0,123	1,15	0,98
R0750	0,136	0,126	0,117	0,123	1,16	1,02
R1500	0,129	0,128	0,117	0,123	1,10	1,04

Tabel 7 Toetsing golfhoogte t.p.v. $d = 2\,H_{os}$ voor proef P003

meetplaats	1				2				3				4				5				6			
raainummer	afst.	D_{10}	D_{50}	D_{90}	afst.	D_{10}	D_{50}	D_{90}	afst.	D_{10}	D_{50}	D_{90}	afst.	D_{10}	D_{50}	D_{90}	afst.	D_{10}	D_{50}	D_{90}	afst.	D_{10}	D_{50}	D_{90}
R0500	0,15	70	102	128	0,85	72	104	125	1,20	70	107	136	1,80	73	102	138	3,40	70	108	124	5,40	76	110	133
R1250	0,25	73	104	129	0,85	76	110	135	1,30	70	110	135	1,90	73	104	134	3,50	75	103	125	5,50	74	101	124
R2000	0,05	73	105	129	0,65	69	103	133	1,10	71	103	133	1,70	72	107	141	3,30	71	103	124	5,30	75	101	124
R2700	0,05	74	108	127	0,65	73	103	131	1,10	75	108	141	1,70	74	110	137	3,30	72	104	128	5,30	69	98	124
R2950	0,10	71	103	127	0,75	74	103	130	1,15	76	109	138	1,75	70	107	134	3,35	71	102	124	5,35	71	99	123
gemiddeld		72	105	128		73	105	131		73	108	137		72	106	137		72	104	125		73	102	125
gemiddeld over de meetpunten 1 tot en met 6: D_{10} = 73 D_{50} = 105 D_{90} = 131																								

Tabel 8 Zeefanalyses proef P001. D_{10}, D_{50} en D_{90} in µm, afstand tot de basislijn in m

meetplaats	1				2				3				4				5				6			
raainummer	afst.	D_{10}	D_{50}	D_{90}	afst.	D_{10}	D_{50}	D_{90}	afst.	D_{10}	D_{50}	D_{90}	afst.	D_{10}	D_{50}	D_{90}	afst.	D_{10}	D_{50}	D_{90}	afst.	D_{10}	D_{50}	D_{90}
R0000	0,05	77	108	133	0,70	72	106	132	1,10	76	109	136	1,70	76	110	135	3,30	77	108	126	5,30	77	108	124
R0750	0,10	70	106	125	0,65	75	109	134	1,15	77	109	135	1,75	78	112	140	3,35	77	109	136	5,35	76	104	124
R1500	0,05	79	110	134	0,70	75	107	130	1,10	77	110	135	1,70	76	109	134	3,30	76	109	129	5,30	77	109	125
gemiddeld		75	108	131		74	107	132		77	109	136		77	110	136		77	108	130		76	107	124
gemiddeld over de meetpunten 1 tot en met 6: D_{10} = 76 D_{50} = 108 D_{90} = 132																								

Tabel 9 Zeefanalyses proef P002. D_{10}, D_{50} en D_{90} in µm, afstand tot de basislijn in m

meetplaats	1				2				3				4				5				6			
raainummer	afst.	D_{10}	D_{50}	D_{90}	afst.	D_{10}	D_{50}	D_{90}	afst.	D_{10}	D_{50}	D_{90}	afst.	D_{10}	D_{50}	D_{90}	afst.	D_{10}	D_{50}	D_{90}	afst.	D_{10}	D_{50}	D_{90}
R0000	0,20	77	109	137	0,80	74	109	140	1,25	75	106	141	1,85	74	107	135	3,45	75	106	124	5,45	71	101	123
R0750	0,20	75	106	134	0,80	77	111	142	1,25	76	107	140	1,85	75	108	139	3,45	76	104	125	5,45	76	104	123
R1500	0,00	72	106	126	0,60	75	106	130	1,00	71	103	137	1,60	73	105	137	3,20	76	107	135	5,20	78	108	136
gemiddeld		75	107	132		75	109	137		74	105	139		74	107	137		75	106	128		75	104	128
gemiddeld over de meetpunten 1 tot en met 6: D_{10} = 75 D_{50} = 106 D_{90} = 134																								

Tabel 10 Zeefanalyses proef P003. D_{10}, D_{50} en D_{90} in µm, afstand tot de basislijn in m

meetplaats	1				2				3				4				5				6			
raainummer	afst.	D_{10}	D_{50}	D_{90}	afst.	D_{10}	D_{50}	D_{90}	afst.	D_{10}	D_{50}	D_{90}	afst.	D_{10}	D_{50}	D_{90}	afst.	D_{10}	D_{50}	D_{90}	afst.	D_{10}	D_{50}	D_{90}
R0000	0,70	74	109	134	1,30	77	108	135	1,75	75	109	133	2,35	75	102	134	3,95	74	104	126	5,95	75	99	124
R0750	0,65	73	101	123	1,30	77	111	144	1,70	77	111	142	2,30	74	107	131	3,90	70	106	123	5,90	74	104	124
R1500	0,55	74	102	123	1,25	75	109	143	1 60	71	106	135	2,20	74	109	137	3,80	71	99	122	5,80	74	99	122
gemiddeld		74	104	127		76	109	141		75	109	137		74	106	134		72	103	124		74	101	124
gemiddeld over de meetpunten 1 tot en met 6: D_{10} = 74 D_{50} = 105 D_{90} = 131																								

Tabel 11 Zeefanalyses proef P004. D_{10}, D_{50} en D_{90} in µm, afstand tot de basislijn in m

proef-nummer	tijdstip in uren na begin v/d proef	temperatuur in ^{o}C	datum
P001	0,1	5,5	29-1-1980
	1,0	6,0	1-2-1980
	6,0	6,5	8-2-1980
	10,0	7,5	12-2-1980
P002	0,1	6,5	21-3-1980
	1,0	7,5	24-3-1980
	10,0	9,5	3-4-1980
P003	0,3	9,5	1-5-1980
	1,0	10,0	2-5-1980
	6,0	10,0	8-5-1980
	10,0	9,5	9-5-1980
P004	2,75	12,7	28-5-1980

Tabel 12 Watertemperatuur tijdens de proeven

	afslaghoeveelheid boven de waterlijn in 10^{-4} m^3/m'	peiltijdstip in uren na het begin van de proef					
		0,1	0,3	1,0	3,0	6,0	10,0
25 m-bak	R0500	253	412	589	890	1016	1331
	R0875	258	467	676	872	1036	1249
	R1250	381	463	548	713	945	1228
	R1625	260	378	687	885	1003	1281
	R2000	317	457	610	886	1167	1474
4 m-bak	R2600	212	441	602	905	1165	1422
	R2700	264	433	708	1011	1328	1683
	R2800	215	411	601	954	1261	1523
1 m-bak	R2925	186	287	512	796	1043	1353
	R2950	258	340	582	856	1117	1421
	R2975	224	380	546	796	1038	1390

Tabel 13 Afslagresultaten in model, proef P001

afslaghoeveelheid boven de waterlijn in 10^{-4} m^3/m'	peiltijdstip in uren na het begin van de proef					
	0,1	0,3	1,0	3,0	6,0	10,0
R0000	248	326	545	864	1106	1401
R0375	237	310	446	731	975	1215
R0750	200	300	482	791	1031	1484
R1125	227	308	412	660	996	1505
R1500	291	392	610	950	1061	1470

Tabel 14 Afslagresultaten in model, proef P002

afslaghoeveelheid boven de waterlijn in 10^{-4} m^3/m'	peiltijdstip in uren na het begin van de proef					
	0,1	0,3	1,0	3,0	6,0	10,0
R0000	295	413	687	791	1038	1294
R0375	241	405	619	870	1014	1385
R0750	285	386	637	880	1115	1354
R1125	295	368	514	803	1124	1410
R1500	247	349	604	922	1305	1687

Tabel 15 Afslagresultaten in model, proef P003

afslaghoeveelheid boven de max. waterlijn in 10^{-4} m^3/m'	peiltijdstip in uren na begin van de proef				
	0,75	1,67	2,33	2,75	4,1
R0000	119	196	499	480	470
R0375	66	216	490	526	494
R0750	125	189	413	439	439
R1125	140	192	497	542	562
R1500	134	262	541	567	588

Tabel 16 Afslagresultaten in model, proef P004

P001		hoeveelheid duinafslag boven de waterlijn in m^3/m'		
		t = 2 uur	t = 5 uur	t = 10 uur
25 m-bak	R0500	220	291	369
	R0875	246	332	411
	R1250	260	294	334
	R1625	206	309	418
	R2000	249	310	379
	gemiddeld	236	307	382
4 m-bak	R2600	229	303	377
	R2700	232	331	439
	R2800	215	294	381
	gemiddeld	225	309	399
1 m-bak	R2925	155	232	323
	R2950	188	268	363
	R2975	202	269	340
	gemiddeld	182	256	342

afgeleide resultaten twee-dimensionale duinafslagonderzoek M 1263 II			
gemiddelde afslaghoev.	267	328	364
95% betrouw-baarheids-interval gem. waarde	297 237	356 299	396 332
95% betrouw-baarheids-interval individuele waarnemingen	394 139	446 209	498 229

Tabel 17 Prototype afslagresultaten proef P001

P002	hoeveelheid duinafslag boven de waterlijn in m^3/m'		
	t = 2 uur	t = 5 uur	t = 10 uur
R0000	188	263	359
R0375	179	228	296
R0750	169	236	320
R1125	177	218	273
R1500	225	303	401
gemiddeld	188	250	330

afgeleide resultaten twee-dimensionaal duinafslagonderzoek M 1263 II			
gemiddelde afslaghoev.	255	313	346
95% betrouwbaarheids-interval gem. waarde	285 225	342 285	377 314
95% betrouwbaarheids-interval individuele waarnemingen	383 128	432 195	480 211

Tabel 18 Prototype afslagresultaten proef P002

P003	hoeveelheid duinafslag boven de waterlijn in m^3/m'		
	t = 2 uur	t = 5 uur	t = 10 uur
R0000	239	337	367
R0375	228	314	403
R0750	224	314	414
R1125	217	270	342
R1500	202	292	400
gemiddeld	222	305	385
afgeleide resultaten twee-dimensionaal duinafslagonderzoek M 1263 II			
gemiddelde afslaghoev.	251	308	347
95% betrouwbaarheids-interval gem. waarde	281 222	336 280	379 316
95% betrouwbaarheids-interval individuele waarnemingen	379 124	427 190	482 213

Tabel 19 Prototype afslagresultaten proef P003

P004	hoeveelheid duinafslag boven de waterlijn in m^3/m'				
	t=5,8 uur	t=12,9 uur	t=18,1 uur	t=21,3 uur	t=31,8 uur
R0000	75	123	313	302	295
R0375	41	136	308	330	310
R0750	79	119	259	276	276
R1125	88	121	312	340	353
R1500	84	165	340	356	369
gemiddeld	73	133	306	320	320

afgeleide resultaten twee-dimensionaal duinafslagonderzoek M 1263 II proeven met vaste waterstand op niveau van max. waterstand proef P004			
	t = 2 uur	t = 5 uur	t = 10 uur
gemiddelde afslaghoev.	245	301	339
95% betrouw-baarheids-interval gem. waarde	275 216	329 273	370 308
95% betrouw-baarheids-interval individuele waarnemingen	373 118	419 182	473 205

Tabel 20 Prototype afslagresultaten proef P004

proef P001	prototype samentrekking beginprofiel			$\frac{S_{werkelijk}}{S_{gewenst}}$	$\frac{S^*_{werkelijk}}{S_{gewenst}}$	afslaghoeveelheid prototype na 5 uur in m^3/m^1		$\frac{A_{gemeten}}{A_{gewenst}}$
	$S_{gewenst}$	volgens oorspr. methode $S_{werkelijk}$	volgens alternatieve methode $S^*_{werkelijk}$			volgens $S_{gewenst}$	gemeten	
R0500	1,237	1,307	1,331	1,06	1,08	328	291	0,89
R1250	1,237	1,328	1,232	1,07	1,00	328	294	0,90
R2000	1,237	1,437	1,312	1,16	1,06	328	310	0,95
R2600	1,237	1,588	1,171	1,28	0,95	328	303	0,93
R2800	1,237	1,474	1,266	1,19	1,02	328	294	0,90
R2950	1,237	1,543	1,252	1,25	1,01	328	268	0,82

Tabel 21 Invloed van de correctie van de samentrekking van het beginprofiel (proef P001)

proef P002	prototype samentrekking beginprofiel			$\frac{S_{werkelijk}}{S_{gewenst}}$	$\frac{S^*_{werkelijk}}{S_{gewenst}}$	afslaghoeveelheid prototype na 5 uur in m^3/m'		$\frac{A_{gemeten}}{A_{gewenst}}$
	$S_{gewenst}$	volgens oorspr. methode $S_{werkelijk}$	volgens alternatieve methode $S^*_{werkelijk}$			volgens $S_{gewenst}$	gemeten	
R0000	1,188	1,294	1,435	1,09	1,21	313	263	0,84
R0375	1,188	1,247	1,283	1,05	1,08	313	228	0,73
R0750	1,188	1,212	1,387	1,02	1,17	313	236	0,75
R1125	1,188	1,307	1,265	1,10	1,06	313	218	0,70
R1500	1,188	1,282	1,441	1,08	1,21	313	303	0,97

Tabel 22 Invloed van de correctie van de samentrekking van het beginprofiel (proef P002)

proef P003	prototype samentrekking beginprofiel			$\frac{S_{werkelijk}}{S_{gewenst}}$	$\frac{S^*_{werkelijk}}{S_{gewenst}}$	afslaghoeveelheid prototype na 5 uur in m^3/m'		$\frac{A_{gemeten}}{A_{gewenst}}$
	volgens oorspr. methode		volgens alternatieve methode $S^*_{werkelijk}$			volgens $S_{gewenst}$	gemeten	
	$S_{gewenst}$	$S_{werkelijk}$						
R0000	1,171	1,251	1,454	1,07	1,24	308	337	1,09
R0375	1,171	1,253	1,331	1,07	1,14	308	314	1,02
R0750	1,171	1,271	1,324	1,09	1,13	308	314	1,02
R1125	1,171	1,225	1,172	1,05	1,00	308	-	-
R1500	1,171	1,244	1,196	1,06	1,02	308	300	0,97

Tabel 23 Invloed van de correctie van de samentrekking van het beginprofiel (proef P003)

ANNEX

A.1 Snelheidsverdeling langsstroom bij onregelmatige golven

Battjes geeft in zijn proefschrift [1] een verdeling van de golfhoogte in de brekerzone, uitgaande van een golfveld met een smal spectrum. Battjes definiëert de fictieve energie E_f als:

$$E_f = \frac{1}{8} \rho g \overline{H_f^2} \tag{A.1}$$

Hierin stelt H_f de fictieve golfhoogte voor die bepaald wordt uit een shoaling- en refractieberekening zonder rekening te houden met breken. Bij kleinere diepten wordt de golfhoogte H_f steeds groter; op de waterlijn is H_f oneindig groot geworden. De formule van H_f is:

$$\overline{H_f^2} = (K_{sh}.K_r)^2 \, \overline{H_o^2} \tag{A.2}$$

waarin:

K_{sh} = shoaling coëfficiënt

$$= \left(\frac{1}{2n} \cdot \frac{c_o}{c}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{A.3}$$

K_r = refractiecoëfficiënt

$$= \left(\frac{\cos \phi_o}{\cos \phi}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{A.4}$$

H_o = golfhoogte op diep water
c_o = golfvoortplantingssnelheid op diep water
ϕ_o = hoek van golfinval op diep water
n = verhouding tussen de groepsnelheid en de voortplantingssnelheid

Als aangenomen wordt dat H_f Rayleigh-verdeeld is, dan is de kansverdelingsfunctie van H_f:

$$F_f(H) = \Pr\{\underline{H}_f \leq H\} = \begin{cases} 0 & \text{voor } H < 0 \\ 1 - \exp(-H^2/\overline{H_f^2}) & \text{voor } H \geq 0 \end{cases} \tag{A.5}$$

waarin:

$Pr\{\underline{H}_f \leq H\}$ = de kans dat de fictieve golfhoogte kleiner is dan of gelijk is aan een zekere golfhoogte H.

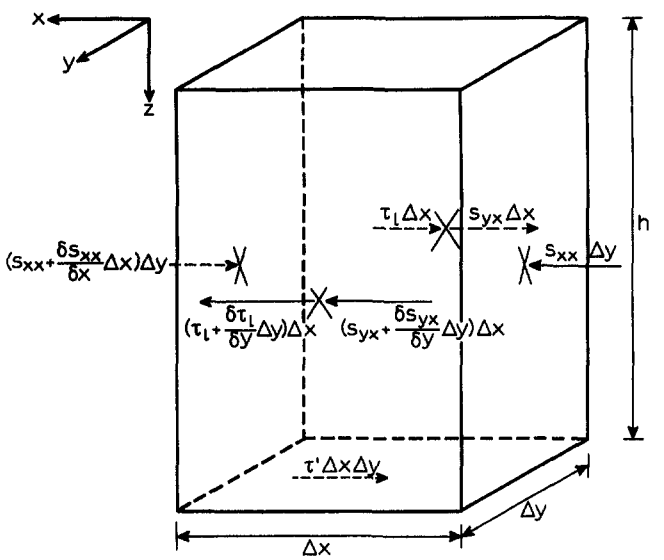
Als verder wordt aangenomen dat de locale golfhoogte niet groter kan zijn dan de plaatselijke brekerhoogte $H_{br} = \gamma h_{br}$ (γ = brekerindex), dan wordt de kansverdelingsfunctie voor de golfhoogte H:

$$F(H) = Pr\{\underline{H} \leq H\} = \begin{cases} 0 & \text{voor } H < 0 \\ 1 - \exp(-H^2/\overline{H_f^2}) & \text{voor } 0 \leq H < H_{br} \\ 1 & \text{voor } H \geq H_{br} \end{cases} \qquad (A.6)$$

Snelheidsverdeling evenwijdig aan de kust

Voor de berekening van de snelheden evenwijdig aan de kust kan de krachtenbalans worden opgesteld van de krachten die evenwijdig aan de kust werken. Deze zijn (zie onderstaande schets):

- de golfspanningstermen S_{yx} en S_{xx}
- de laterale wrijving, τ_l
- de bodemschuifspanning, τ'



Krachtenbalans evenwijdig aan de kust

Er wordt verondersteld dat de golfomstandigheden op een lijn evenwijdig aan de kust gelijk zijn zodat geldt:

$$\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} = 0 \qquad (A.7)$$

De golfspanningsterm S_{xx} levert dus geen bijdrage aan de krachtenbalans evenwijdig aan de kust. Er resulteert de volgende balansvergelijking:

$$\left[(S_{yx} + \frac{\partial S_{yx}}{\partial y} \Delta y) - (S_{yx}) \right] \Delta x + \left[(\tau_1 + \frac{\partial \tau_1}{\partial y} \Delta y) - (\tau_1) \right] \Delta x - \tau^1 \Delta x \Delta y = 0 \qquad (A.8)$$

waarin:
x = plaatscoördinaat evenwijdig aan de kust
y = plaatscoördinaat loodrecht op de kust

Delen door $\Delta x \Delta y$ levert:

$$\frac{\partial S_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_1}{\partial y} - \tau^1 = 0 \qquad (A.9)$$

In de snelheidsverdeling volgens Battjes wordt de laterale wrijving buiten beschouwing gelaten, dus:

$$\frac{\partial \tau_1}{\partial y} = 0 \text{ en } \tau_1 = 0 \qquad (A.10)$$

De krachtenbalans volgens (A.9) reduceert dan tot:

$$\frac{\partial S_{yx}}{\partial y} - \tau^1 = 0 \qquad (A.11)$$

Voor de berekening van de bodemschuifspanning door golven en stroom wordt de formulering volgens Bijker [2] toegepast. Deze toonde in zijn proefschrift aan dat voor kleine golfinvalshoeken ($0^o < \phi < 20^o$) τ^1 benaderd kan worden door:

$$\tau^1 = \tau_c \left[0{,}75 + 0{,}45 \left(\xi \frac{\hat{u}_o}{v} \right)^{1{,}13} \right] \qquad (A.12)$$

waarin:

τ_c = bodemschuifspanning door de werking van de stroom alleen

$$= \rho g \frac{v^2}{C^2} \qquad (A.13)$$

v = stroomsnelheid

C = Chézy-coëfficiënt

$$= 18 \log \frac{12\ h}{r} \qquad (A.14)$$

h = waterdiepte

r = bodemruwheid

$$\xi = C(f_w/2g)^{1/2} \qquad (A.15)$$

f_w = wrijvingscoëfficiënt volgens Jonsson

$$= \exp\left[-5{,}977 + 5{,}213 \left(\frac{a_o}{r}\right)^{-0{,}194}\right] \qquad (A.16)$$

a_o = maximale uitwijking van de orbitaalbeweging bij de bodem

$\hat{u}_o$ = amplitude van de orbitaalsnelheid bij de bodem

Vergelijking (A.11) wordt nu:

$$\frac{\partial S_{yx}}{\partial y} - \tau_c \left[0{,}75 + 0{,}45 \left(\xi \frac{\hat{u}_o}{v}\right)^{1{,}13}\right] = 0 \qquad (A.17)$$

Voor de berekening van het differentie-quotiënt van de golfspanning wordt gebruik gemaakt van de formulering volgens Longuet-Higgins [3]:

$$S_{yx} = \frac{1}{8} \rho g H^2 n \cos\phi\sin\phi \qquad (A.18)$$

In deze formule dient de gemiddelde energie, en dus $\overline{H^2}$ in rekening gebracht te worden. De term $\overline{H^2}$ wordt als volgt berekend:

$$\overline{H^2} = \int_{-\infty}^{+\infty} H^2\, dF(H) \qquad (A.19)$$

Hierin is F(H) de golfhoogte - kansverdelingsfunctie volgens vergelijking (A.6). Vergelijking (A.19) levert na uitwerken:

$$\overline{H^2} = \left[1 - \exp\left(-H_{br}^2/\overline{H_f^2}\right)\right] \overline{H_f^2} \qquad (A.20)$$

Hierin is H_f de fictieve golfhoogte.

In de bodemschuifspanningsterm van vergelijking (A.17) wordt $\hat{u}_o$ geschreven als:

$$\hat{u}_o = \frac{\pi H}{T} \frac{1}{\sinh (kh)} \tag{A.21}$$

waarin:

T = golfperiode (piekperiode van het spectrum)

h = waterdiepte

k = golfgetal

$= 2\pi/L$ (A.22)

L = golflengte

In vergelijking (A.21) is de orbitaalsnelheid $\hat{u}_o$ evenredig met de golfhoogte H. In een onregelmatig golfveld lijkt het verantwoord bij de berekening van de gemiddelde bodemschuifspanning de gemiddelde golfhoogte $\bar{H}$ in te voeren, aangezien blijkt dat de bodemschuifspanning τ' vrijwel lineair met H verloopt (bij verschillende waarden van de stroomsnelheid v). De gemiddelde golfhoogte $\bar{H}$ wordt berekend uit:

$$\bar{H} = \int_{-\infty}^{+\infty} H \, dF(H) \tag{A.23}$$

Uitgewerkt levert dit:

$$\bar{H} = \frac{(\pi)^{\frac{1}{2}}}{2} H_{f\ rms}\ \mathrm{erf}(H_{br}/H_{f\ rms}) \tag{A.24}$$

waarin:

$$H_{f\ rms} = \overline{(H_f^2)}^{\frac{1}{2}} \tag{A.25}$$

$$\mathrm{erf}(p) = \frac{2}{(\pi)^{\frac{1}{2}}} \int_o^p e^{-u^2}\, du \tag{A.26}$$

Met substitutie van $\overline{H^2}$ in de golfspanningsterm en $\bar{H}$ in de bodemschuifspanningsterm kan nu uit vergelijking (A.17) langs iteratieve weg v worden opgelost.

A.2 Langstransport

Voor de berekening van het zandtransport evenwijdig aan de kust kan gebruik worden gemaakt van de transportformulering volgens Bijker [4], gekoppeld aan de snelheidsverdeling van Battjes. Daarenboven kan de CERC-formule worden toegepast.

Bijker-formule

Uitgaande van de formule van Kalinske-Frijlink heeft Bijker de volgende bodemtransportformule opgesteld voor golven en stroom:

$$S_b = b\, D_{50}\, \frac{v}{C}\, g^{1/2} \exp\left[\frac{-0{,}27\, \Delta\, D_{50}\, C^2}{\mu\, v^2 \left[1 + \tfrac{1}{2} (\xi \frac{\hat{u}_o}{v})^2\right]} \right] \qquad (A.27)$$

waarin:

S_b = bodemtransport
b = empirische coëfficiënt
D_{50} = 50% korreldiameter bodemmateriaal
v = stroomsnelheid volgens (A.17)
C = Chézy coëfficiënt volgens (A.14)
Δ = relatieve dichtheid bodemmateriaal
μ = ribbelfactor
$= \left[C/C_{D90}\right]^{3/2}$ (A.28)

$$C_{D90} = 18 \log \frac{12\, h}{D_{90}} \qquad (A.29)$$

h = waterdiepte
D_{90} = 90% korreldiameter bodemmateriaal
ξ = coëfficiënt volgens (A.15)
$\hat{u}_o$ = amplitude orbitaalsnelheid bij de bodem

Bijker neemt aan dat het bodemtransport plaats vindt in een laag ter dikte van de ruwheidswaarde r. In de zone van de vertikaal tussen z = 0 en z = r wordt een constante bodemconcentratie c_r verondersteld:

$$c_r = \frac{S_b\, C}{6{,}35\, v\, r\, \sqrt{g}} \qquad (A.30)$$

Deze concentratie dient als basis voor de berekening van de concentratievertikaal. De berekening is analoog aan die volgens Einstein [5]. De concentratie op een willekeurige hoogte z wordt in de bodemconcentratie c_r uitgedrukt volgens:

$$c(z) = c_r \left[\frac{h-z}{z} \frac{r}{h-r} \right]^{e_1} \qquad (A.31)$$

De exponent e_1 kan als volgt worden geschreven:

$$e_1 = \frac{w.C}{\kappa\sqrt{g}\ v\ \sqrt{1+\frac{1}{2}\ (\xi\ \frac{\hat{u}_o}{v})^2}} \tag{A.32}$$

waarin:

w = valsnelheid bodemmateriaal

κ = constante van Von Kármàn

= 0,40 (A.33)

Het totale suspensietransport wordt nu berekend door op elke hoogte z de concentratie c(z) te vermenigvuldigen met de stroomsnelheid v(z) en te integreren tussen z=r en z=h. In formulevorm:

$$S_s = \int_{z=r}^{z=h} c(z)\ v(z)\ dz \tag{A.34}$$

De snelheid v(z) is gekoppeld aan de gemiddelde snelheid v uit vergelijking (A.17) via de logaritmische snelheidsverdeling:

$$v(z) = \frac{\sqrt{g}}{\kappa\ C}\ v\ \ln\frac{z}{z_o} \tag{A.35}$$

waarin:

z_o = hoogte waarop v(z) = 0

$\simeq$ r/33 (A.36)

Na uitwerking levert vergelijking (A.34) het volgende resultaat:

$$S_s = 1{,}83\ S_b\ \left[I_1\ \ln\frac{33h}{r} + I_2\right] \tag{A.37}$$

waarin:

$$I_1 = R\ \int_A^1 \left(\frac{1-y}{y}\right)^{e_1} dy \tag{A.38}$$

$$I_2 = R\ \int_A^1 \left(\frac{1-y}{y}\right)^{e_1} \ln y\ dy \tag{A.39}$$

$$y = z/h \tag{A.40}$$

$$A = r/h \tag{A.41}$$

$$R = \frac{0{,}216\ A^{(e_1-1)}}{(1-A)^{e_1}} \tag{A.42}$$

Het totale zandtransport is nu gelijk aan de som van bodem- en suspensietransport.

$$S_{totaal} = S_b + S_s = S_b \left[1{,}83 \left(I_1 \ln \frac{33h}{r} + I_2\right)\right] \qquad (A.43)$$

CERC-formule

In de Amerikaanse kustwaterbouwkunde-praktijk is in de jaren na de Tweede Wereldoorlog de welbekende CERC-formule tot ontwikkeling gekomen. Deze formule beschrijft het totale zandtransport evenwijdig aan de kust als gevolg van golven die de kust onder een hoek naderen. Gebaseerd op natuur- en modelgegevens is een eenvoudig verband afgeleid tussen het zandtransport en enkele golfkarakteristieken [6]:

$$S = A\, H_o^2\, c_o\, K_{r\,br}^2 \sin \phi_{br} \cos \phi_{br} \qquad (A.44)$$

waarin:

S = totale langstransport
A = coëfficiënt
H_o = golfhoogte in diep water
c_o = golfvoortplantingssnelheid in diep water
$K_{r\,br}$ = refractiecoëfficiënt op de brekerlijn
ϕ_{br} = hoek van golfinval op de brekerlijn

De waarde van de evenredigheidsconstante A is in de loop der jaren veelvuldig aangepast. In onderstaande tabel zijn enkele coëfficiënten samengevat. De waarde wordt mede bepaald door de gebruikte golfhoogte in vergelijking (A.44) en de gebruikte tijdeenheid.

oorsprong	coëfficiënt volgens (A.44) op sekonde-basis	toegepaste golfhoogte
originele CERC {	0,014	H_{sig}
	0,028	H_{rms}
Shore Protection Manual (1973)	0,025	H_{sig}
Komar (1976)	0,049	H_{rms}
Svasek (1969)	0,039	H_{rms}
van de Graaff/van Overeem (1979)	0,042 (0,036-0,047)	H_{rms}

De formule houdt geen rekening met de korreldiameter van het bodemmateriaal, de bodemhelling en de ruwheidswaarde.

A.3 Berekeningen

Ten behoeve van het huidige drie-dimensionale modelonderzoek zijn langsstroomberekeningen uitgevoerd volgens het theoretische concept van Battjes voor onregelmatige golven. Door koppeling van de gevonden snelheden aan de Bijker-formule is het langstransport bepaald. De transportberekening is tevens met de CERC-formule uitgevoerd.

Een punt dat voor de berekeningen met de Bijker-formule nader uitgewerkt dient te worden is de bepaling van de ruwheidswaarde r. Bijker [2] nam aan dat bij onbekende ruwheid een waarde van r = ½ * ribbelhoogte Δ_r diende te worden genomen. Swart [7] vindt de volgende relatie voor de relatieve ruwheid r/Δ_r:

$$\frac{r}{\Delta_r} = 25 \left(\frac{\Delta_r}{\lambda_r}\right) \text{ voor } 0{,}05 \leq \frac{\Delta_r}{\lambda_r} \leq 0{,}20 \qquad \text{(A.45)}$$

waarin:

Δ_r = ribbelhoogte

λ_r = ribbellengte

In het drie-dimensionale onderzoek zijn geen afzonderlijke ribbelmetingen uitgevoerd. De ribbelgeometrie is echter voldoende bekend uit het twee-dimensionale onderzoek (zie figuur A.1). Voor het asserzand op diepteschaal n_d = 60 blijkt een ribbelhoogte $\Delta_r \simeq 0{,}008$ m en een ribbellengte $\lambda_r \simeq 0{,}05$ m. De ribbelsteilheid is derhalve:

$$\frac{\Delta_r}{\lambda_r} = 0{,}16 \qquad \text{(A.46)}$$

en ligt dus binnen het interval waarvoor vergelijking (A.45) geldig is. Met de bekende ribbelgeometrie volgt uit deze vergelijking voor de ruwheid een waarde r = 0,032 m. De ruwheid blijkt dus 4 * de ribbelhoogte Δ_r te zijn, wat aanzienlijk meer is dan door Bijker wordt verondersteld.

Swart [7] geeft ook een rekenprocedure waarmee, uitgaande van de waterbeweging vlak boven de bodem, de ribbelgeometrie kan worden bepaald. Indien deze rekenprocedure wordt gevolg voor de golfrandvoorwaarden in het huidige onderzoek worden

ruwheidswaarden gevonden van r = 0,006 à 0,008 m. Deze waarden sluiten redelijk aan bij de ruwheid volgens Bijker ($r = \frac{1}{2} * \Delta_r = 0{,}004$ m).

Indien een ruwheidswaarde van 4 * de ribbelhoogte wordt aangenomen, lijkt het niet meer verantwoord in de berekening van het langstransport een constante concentratie in de zone $0 \leq z \leq r$ te veronderstellen. Een verloop in de concentratie voor $z < r$ lijkt dan aannemelijker. Dit zal dan ook in de berekening van de concentratieverticaal verdisconteerd dienen te worden.

Vooralsnog is het oorspronkelijke concept van Bijker voor de berekening van bodemschuifspanning, bodemtransport en suspensietransport toegepast, waarbij de ruwheidswaarde is berekend volgens de rekenprocedure van Swart, resulterend in waarden van r = 0,006 à 0,008 m. De in het voorgaande beschreven theoretische opzet voor de berekening van langsstroom en langstransport is als numeriek model (LATRAN) op de WL-computer geïmplementeerd. Als golfrandvoorwaarden zijn de karakteristieken ter plaatse van het golfschot ingevoerd. Als brekercriterium is een waarde van $\gamma = H_{br}/d_{br} = 0{,}8$ aangehouden. Voor de bodemschematisatie zijn een tweetal hellingen, te weten 1:35 en 1:90, aangenomen welke als begrenzende waarden voor de profielontwikkeling tijdens de proeven kunnen worden aangemerkt. In de Bijker-formule is voor de coëfficiënt b = 5 gekozen. In de CERC-formule is de evenredigheidsconstante A = 0,036 à 0,047 volgens van de Graaff en van Overeem [8] toegepast.

In onderstaande tabel zijn de randvoorwaarden en de resultaten van de transportberekeningen samengevat:

proef	golfkarakteristieken t.p.v. golfschot			waterdiepte t.p.v. golfschot	langstransport S_{Bijker} (dm³/uur)		langstransport S_{CERC} (dm³/uur)	
	invalshoek ϕ (°)	periode $\hat{T}$(s)	golfhoogte H_{rms} (m)	d(m)	helling 1:35	helling 1:90	coëfficiënt 0,036	coëfficiënt 0,047
P002	20	1,55	0,083	0,38	470	437	421	550
P003	10	1,55	0,083	0,38	245	223	227	296
P004	10	1,55	0,061	0,31	94	84	116	152
				0,35	90	81	109	142
	10	1,55	0,083	0,345	252	229	237	310
				0,38	245	223	227	296

LITERATUUR ANNEX

1 BATTJES, J.A.
Computations of set-up, longshore currents, run-up and overtopping due to wind-generated waves
Communications on Hydraulics, Delft University of Technology, Department of Civil Engineering
Report no. 74-2, 1974

2 BIJKER, E.W.
Some considerations about scales for coastal models with movable bed
Delft Hydraulics Laboratory, publication no. 50, 1967

3 LONGUET-HIGGINS, M.S.; STEWART, R.W.
Radiation stresses in water waves, a physical discussion with applications
Deep Sea Research, vol. 11, pp. 529-563, 1964

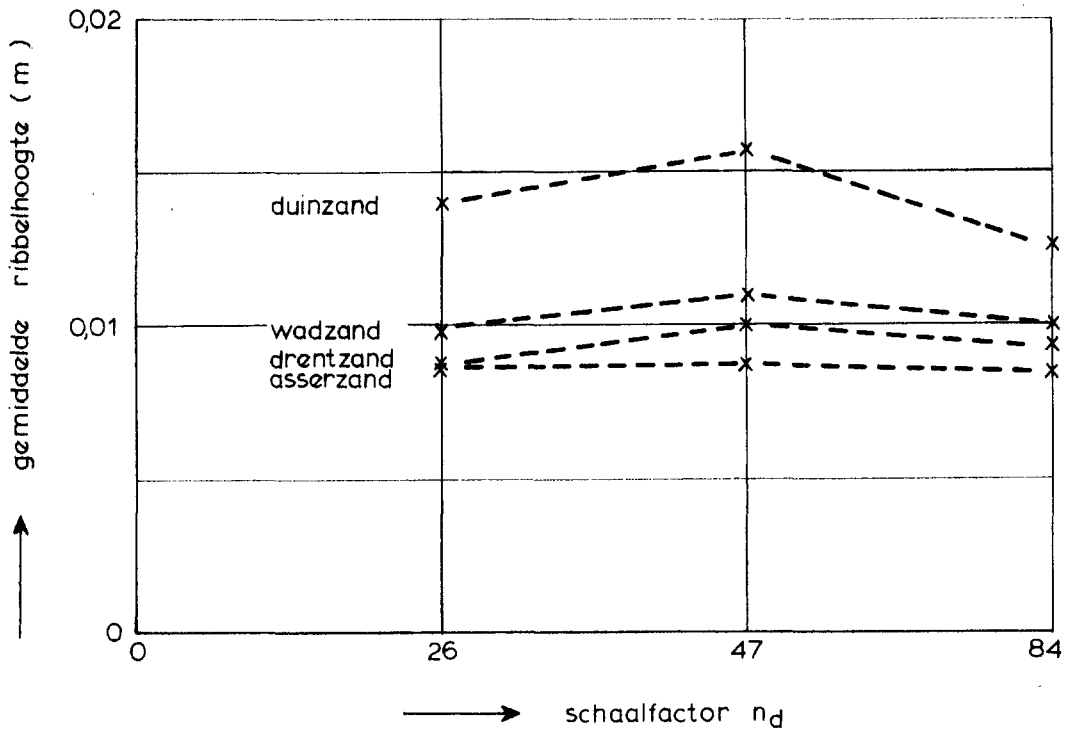
4 BIJKER, E.W.
Littoral drift as function of waves and currents
Delft Hydraulics Laboratory, publication no. 58, 1968

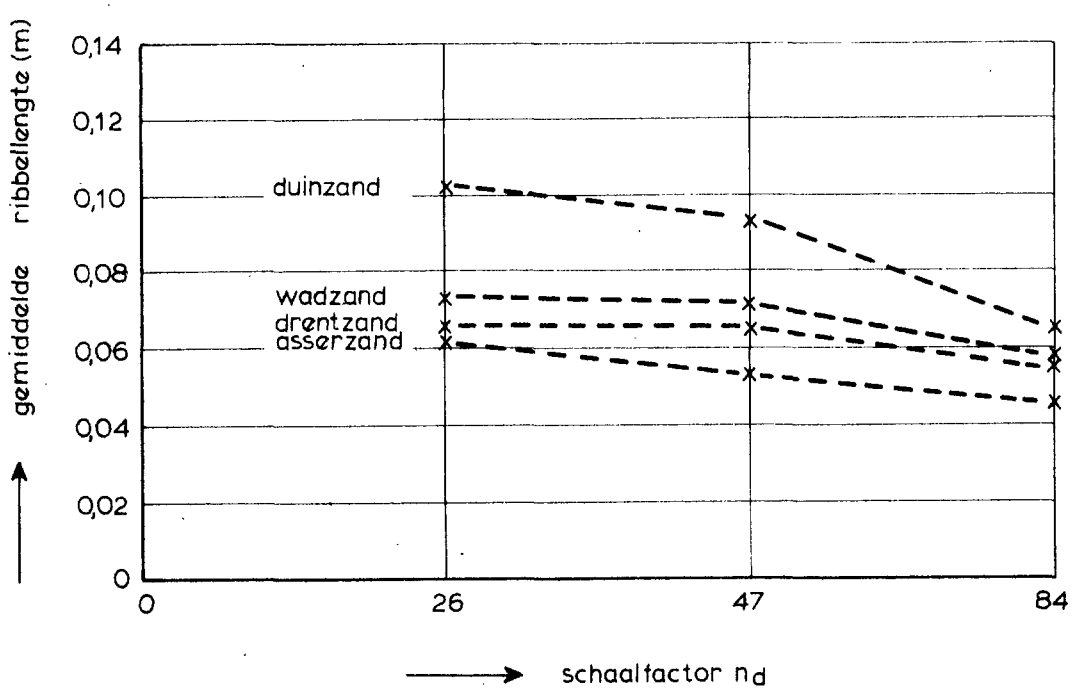
5 EINSTEIN, H.A.
The bed load function for sediment transportation in open channel flows
U.S. Dep. Agric. Soil Conserv. Serv., T.B. no. 1026, 1950

6 U.S. Army, Coastal Engineering Research Center
Shore Protection Manual
Department of the Army, Corps of Engineers, 1975

7 SWART, D.H.
Computation of longshore transport
Delft Hydraulics Laboratory, report R 968-I, 1976

8 GRAAFF, J. van de; OVEREEM, J. van
Evaluation of sediment transport formulae in coastal engineering practice
Coastal Engineering, volume 3, pp. 1-32, 1979





RIBBELAFMETINGEN ALS FUNCTIE VAN DE SCHAALFACTOR — TWEEDIMENSIONAAL MODELONDERZOEK

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM | M 1653 | FIG. A.1

p.o. box 177 2600 mh delft the netherlands

S-79.052

waterloopkundig laboratorium
delft hydraulics laboratory

ARCHIEFEXEMPLAAR

onderzoek naar duinafslag tijdens superstormvloed

toetsing van de resultaten van het twee-dimensionale modelonderzoek door middel van onderzoek in een drie-dimensionaal model

figuren en foto's

verslag modelonderzoek

M 1653 deel B

december 1981

ARCHIEFEXEMPLAAR

onderzoek naar duinafslag tijdens superstormvloed

toetsing van de resultaten van het twee-dimensionale modelonderzoek door middel van onderzoek in een drie-dimensionaal model

figuren en foto's

verslag modelonderzoek

M 1653 deel B

december 1981

Dit verslag bestaat uit twee onderdelen.

KORTE INHOUDSOPGAVE

DEEL A: TEKST EN TABELLEN

1 Inleiding
2 Schaalrelaties
3 Model en randvoorwaarden
4 Meetresultaten
5 Vergelijking van de resultaten uit het drie-dimensionaal model met het twee-dimensionaal model
6 Invloed van de kustlengte en de hoek van golfinval op het prototyperesultaat
7 Toetsing schaalrelaties twee-dimensionaal onderzoek
8 Samenvatting en conclusies

LITERATUUR

ANNEX

DEEL B: FIGUREN EN FOTO'S

FIGUREN

1 Modeloverzicht proef met loodrechte golfinval, P001
2 Modeloverzicht proef met schuine golfinval 20°, P002
3 Modeloverzicht proeven met schuine golfinval 10°, P003/P004
4 Geschematiseerd kustprofiel, referentie profiel
5 Kustprofielen Noord- en Zuidhollandse kust
6 Energiedichtheidsspectrum volgens Pierson en Moskowitz
7 Voorgesteld waterstandsverloop tijdens superstormvloed
8 Dwarsprofielen, P001, R0500, 25 m-bak
9 Dwarsprofielen, P001, R0875, 25 m-bak
10 Dwarsprofielen, P001, R1250, 25 m-bak
11 Dwarsprofielen, P001, R1625, 25 m-bak
12 Dwarsprofielen, P001, R2000, 25 m-bak
13 Dwarsprofielen, P001, R2600, 4 m-bak
14 Dwarsprofielen, P001, R2700, 4 m-bak
15 Dwarsprofielen, P001, R2800, 4 m-bak
16 Dwarsprofielen, P001, R2925, 1 m-bak
17 Dwarsprofielen, P001, R2950, 1 m-bak
18 Dwarsprofielen, P001, R2975, 1 m-bak
19 Dwarsprofielen, P002, R0000
20 Dwarsprofielen, P002, R0375
21 Dwarsprofielen, P002, R0750
22 Dwarsprofielen, P002, R1125
23 Dwarsprofielen, P002, R1500
24 Dwarsprofielen, P003, R0000
25 Dwarsprofielen, P003, R0375
26 Dwarsprofielen, P003, R0750
27 Dwarsprofielen, P003, R1125
28 Dwarsprofielen, P003, R1500
29 Dwarsprofielen, P004, R0000
30 Dwarsprofielen, P004, R0375
31 Dwarsprofielen, P004, R0750
32 Dwarsprofielen, P004, R1125
33 Dwarsprofielen, P004, R1500

FIGUREN (vervolg)

34 Bodemligging vooroever na t = 0 uur, P001
35 Bodemligging vooroever na t = 1 uur, P001
36 Bodemligging vooroever na t = 10 uur, P001
37 Bodemligging vooroever na t = 0 uur, P002
38 Bodemligging vooroever na t = 1 uur, P002
39 Bodemligging vooroever na t = 10 uur, P002
40 Bodemligging vooroever na t = 0 uur, P003
41 Bodemligging vooroever na t = 1 uur, P003
42 Bodemligging vooroever na t = 10 uur, P003
43 Bodemligging vooroever na t = 0 uur, P004
44 Bodemligging vooroever na t = 4,1 uur, P004
45 Snelheidsverdeling langsstroom, P002
46 Snelheidsverdeling langsstroom, P003
47 Indeling zandvang bij schuine golfinval 20°
48 Indeling zandvang bij schuine golfinval 10°
49 Verdeling zandvoeding en zandvangst, P002
50 Langstransport, P002
51 Verdeling zandvoeding en zandvangst, P003
52 Langstransport, P003
53 Verdeling zandvoeding en zandvangst, P004
54 Langstransport, P004
55 Plaatsen waar de zandmonsters zijn genomen
56 Verloop van D_{10}, D_{50} en D_{90}, P001/P002
57 Verloop van D_{10}, D_{50} en D_{90}, P003/P004
58 Gemiddelde zeefkromme
59 Optredende muistromen bij loodrechte golfinval
60 Optredende muistromen bij schuine golfinval 20°
61 Duinafslag boven de waterlijn als functie van de tijd, P001
62 Duinafslag boven de waterlijn als functie van de tijd, P002
63 Duinafslag boven de waterlijn als functie van de tijd, P003
64 Duinafslag boven de maximale waterstand als functie van de tijd, P004
65 Resultaat valsnelheidsproeven bij watertemperatuur van 10° C
66 Resultaat valsnelheidsproeven bij watertemperatuur van 18° C
67 Bepaling samentrekking van beginprofiel volgens oorspronkelijke methode
68 Bepaling samentrekking van beginprofiel volgens alternatieve methode

FIGUREN (vervolg)

69 Invloed van de correctie van de samentrekking van het beginprofiel, P001
70 Invloed van de correctie van de samentrekking van het beginprofiel, P002
71 Invloed van de correctie van de samentrekking van het beginprofiel, P003
72 Prototype duinafslag boven de waterlijn, P001
73 Prototype duinafslag boven de waterlijn, P002
74 Prototype duinafslag boven de waterlijn, P003
75 Ontwikkeling prototype afslagresultaat, P001, 4 m-bak/1 m-bak
76 Ontwikkeling prototype afslagresultaat, P001, 25 m-bak
77 Ontwikkeling prototype afslagresultaat, P002
78 Ontwikkeling prototype afslagresultaat, P003
79 Prototype duinafslag boven de maximale waterstand, P004
80 Prototype afslagprofielen na 1 uur modeltijd, P001
81 Prototype afslagprofielen na 1 uur modeltijd, P002
82 Prototype afslagprofielen na 1 uur modeltijd, P003
83 Prototype afslagprofielen na 2,75 uur modeltijd, P004
84 Prototype afslagprofielen na 4,1 uur modeltijd, P004
85 Prototype afslagprofielen na 1 uur modeltijd, uit twee-dimensionale onderzoek
86 Extrapolatie duinvoethoogte boven de waterlijn, t = 1 uur prototype, P001
87 Extrapolatie duinvoethoogte boven de waterlijn, t = 2 uur prototype, P001
88 Extrapolatie duinvoethoogte boven de waterlijn, t = 5 uur prototype, P001
89 Extrapolatie duinvoethoogte boven de waterlijn, t = 10 uur prototype, P001
90 Extrapolatie duinvoethoogte boven de waterlijn, t = 1 uur prototype, P002
91 Extrapolatie duinvoethoogte boven de waterlijn, t = 2 uur prototype, P002
92 Extrapolatie duinvoethoogte boven de waterlijn, t = 5 uur prototype, P002
93 Extrapolatie duinvoethoogte boven de waterlijn, t = 10 uur prototype, P002
94 Extrapolatie duinvoethoogte boven de waterlijn, t = 1 uur prototype, P003
95 Extrapolatie duinvoethoogte boven de waterlijn, t = 2 uur prototype, P003
96 Extrapolatie duinvoethoogte boven de waterlijn, t = 5 uur prototype, P003
97 Extrapolatie duinvoethoogte boven de waterlijn, t = 10 uur prototype, P003
98 Ontwikkeling duinvoethoogte, P001, 4 m-bak/1 m-bak
99 Ontwikkeling duinvoethoogte, P001, 25 m-bak
100 Ontwikkeling duinvoethoogte, P002
101 Ontwikkeling duinvoethoogte, P003

FIGUREN (vervolg)

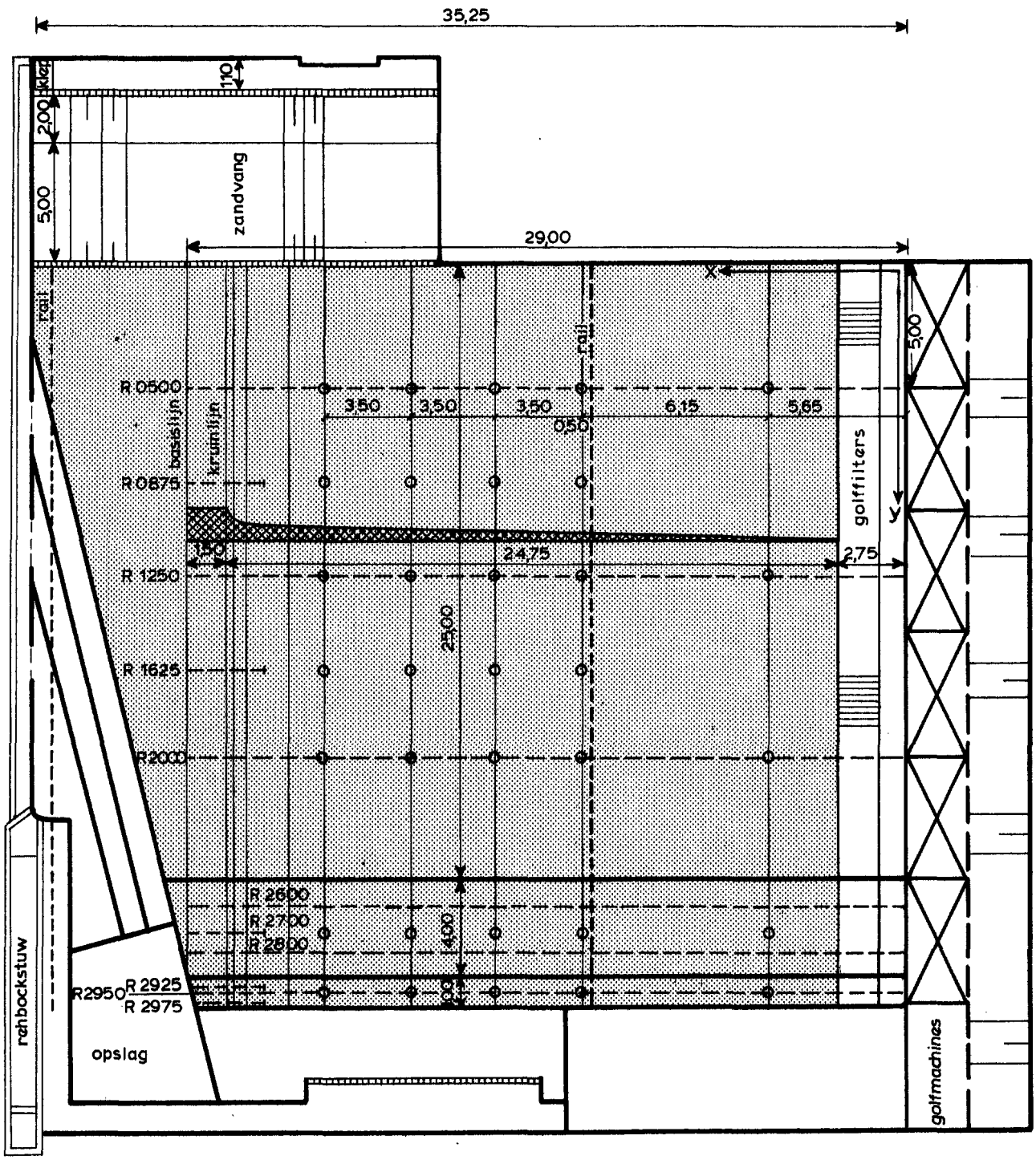
102 Extrapolatie afstand duinvoet-waterlijn, t = 1 uur prototype, P001
103 Extrapolatie afstand duinvoet-waterlijn, t = 2 uur prototype, P001
104 Extrapolatie afstand duinvoet-waterlijn, t = 5 uur prototype, P001
105 Extrapolatie afstand duinvoet-waterlijn, t = 10 uur prototype, P001
106 Extrapolatie afstand duinvoet-waterlijn, t = 1 uur prototype, P002
107 Extrapolatie afstand duinvoet-waterlijn, t = 2 uur prototype, P002
108 Extrapolatie afstand duinvoet-waterlijn, t = 5 uur prototype, P002
109 Extrapolatie afstand duinvoet-waterlijn, t = 10 uur prototype, P002
110 Extrapolatie afstand duinvoet-waterlijn, t = 1 uur prototype, P003
111 Extrapolatie afstand duinvoet-waterlijn, t = 2 uur prototype, P003
112 Extrapolatie afstand duinvoet-waterlijn, t = 5 uur prototype, P003
113 Extrapolatie afstand duinvoet-waterlijn, t = 10 uur prototype, P003
114 Ontwikkeling afstand duinvoet-waterlijn, P001, 4 m-bak/1 m-bak
115 Ontwikkeling afstand duinvoet-waterlijn, P001, 25 m-bak
116 Ontwikkeling afstand duinvoet-waterlijn, P002
117 Ontwikkeling afstand duinvoet-waterlijn, P003
118 Extrapolatie verspreidingsafstand, t = 1,53 uur prototype, $L_{10\%}$, P001
119 Extrapolatie verspreidingsafstand, t = 5,10 uur prototype, $L_{10\%}$, P001
120 Extrapolatie verspreidingsafstand, t =15,30 uur prototype, $L_{10\%}$, P001
121 Extrapolatie verspreidingsafstand, t = 1,53 uur prototype, $L_{20\%}$, P001
122 Extrapolatie verspreidingsafstand, t = 5,10 uur prototype, $L_{20\%}$, P001
123 Extrapolatie verspreidingsafstand, t =15,30 uur prototype, $L_{20\%}$, P001
124 Extrapolatie verspreidingsafstand, t = 1,53 uur prototype, $L_{30\%}$, P001
125 Extrapolatie verspreidingsafstand, t = 5,10 uur prototype, $L_{30\%}$, P001
126 Extrapolatie verspreidingsafstand, t =15,30 uur prototype, $L_{30\%}$, P001
127 Extrapolatie verspreidingsafstand, t = 1,53 uur prototype, $L_{50\%}$, P001
128 Extrapolatie verspreidingsafstand, t = 5,10 uur prototype, $L_{50\%}$, P001
129 Extrapolatie verspreidingsafstand, t =15,30 uur prototype, $L_{50\%}$, P001
130 Extrapolatie verspreidingsafstand, t = 1,53 uur prototype, $L_{10\%}$, P002
131 Extrapolatie verspreidingsafstand, t = 5,10 uur prototype, $L_{10\%}$, P002
132 Extrapolatie verspreidingsafstand, t =15,30 uur prototype, $L_{10\%}$, P002
133 Extrapolatie verspreidingsafstand, t = 1,53 uur prototype, $L_{20\%}$, P002
134 Extrapolatie verspreidingsafstand, t = 5,10 uur prototype, $L_{20\%}$, P002
135 Extrapolatie verspreidingsafstand, t =15,30 uur prototype, $L_{20\%}$, P002
136 Extrapolatie verspreidingsafstand, t = 1,53 uur prototype, $L_{30\%}$, P002
137 Extrapolatie verspreidingsafstand, t = 5,10 uur prototype, $L_{30\%}$, P002

FIGUREN (vervolg)

138 Extrapolatie verspreidingsafstand, t =15,30 uur prototype, $L_{30\%}$, P002
139 Extrapolatie verspreidingsafstand, t = 1,53 uur prototype, $L_{50\%}$, P002
140 Extrapolatie verspreidingsafstand, t = 5,10 uur ptototype, $L_{50\%}$, P002
141 Extrapolatie verspreidingsafstand, t =15,30 uur prototype, $L_{50\%}$, P002
142 Extrapolatie verspreidingsafstand, t = 1,53 uur prototype, $L_{10\%}$, P003
143 Extrapolatie verspreidingsafstand, t = 5,10 uur prototype, $L_{10\%}$, P003
144 Extrapolatie verspreidingsafstand, t =15,30 uur prototype, $L_{10\%}$, P003
145 Extrapolatie verspreidingsafstand, t = 1,53 uur prototype, $L_{20\%}$, P003
146 Extrapolatie verspreidingsafstand, t = 5,10 uur prototype, $L_{20\%}$, P003
147 Extrapolatie verspreidingsafstand, t =15,30 uur prototype, $L_{20\%}$, P003
148 Extrapolatie verspreidingsafstand, t = 1,53 uur prototype, $L_{30\%}$, P003
149 Extrapolatie verspreidingsafstand, t = 5,10 uur prototype, $L_{30\%}$, P003
150 Extrapolatie verspreidingsafstand, t =15,30 uur prototype, $L_{30\%}$, P003
151 Extrapolatie verspreidingsafstand, t = 1,53 uur prototype, $L_{50\%}$, P003
152 Extrapolatie verspreidingsafstand, t = 5,10 uur prototype, $L_{50\%}$, P003
153 Extrapolatie verspreidingsafstand, t =15,30 uur prototype, $L_{50\%}$, P003
154 Vergelijking prototype afslagresultaat voor de verschillende kustlengten
155 Vergelijking profielvormen voor de verschillende kustlengten
156 Vergelijking duinvoethoogten voor de verschillende kustlengten
157 Vergelijking duinvoetafstanden voor de verschillende kustlengten
158 Vergelijking prototype afslagresultaat voor de verschillende golfinvalsrichtingen
159 Vergelijking profielvormen voor de verschillende golfinvalsrichtingen
160 Vergelijking duinvoethoogten voor de verschillende golfinvalsrichtingen
161 Vergelijking duinvoetafstanden voor de verschillende golfinvalsrichtingen
162 Toetsing prototype afslagresultaat asserzandproeven twee- en drie-dimensionaal model
163 Toetsing prototype afslagprofielen asserzandproeven twee- en drie-dimensionaal model

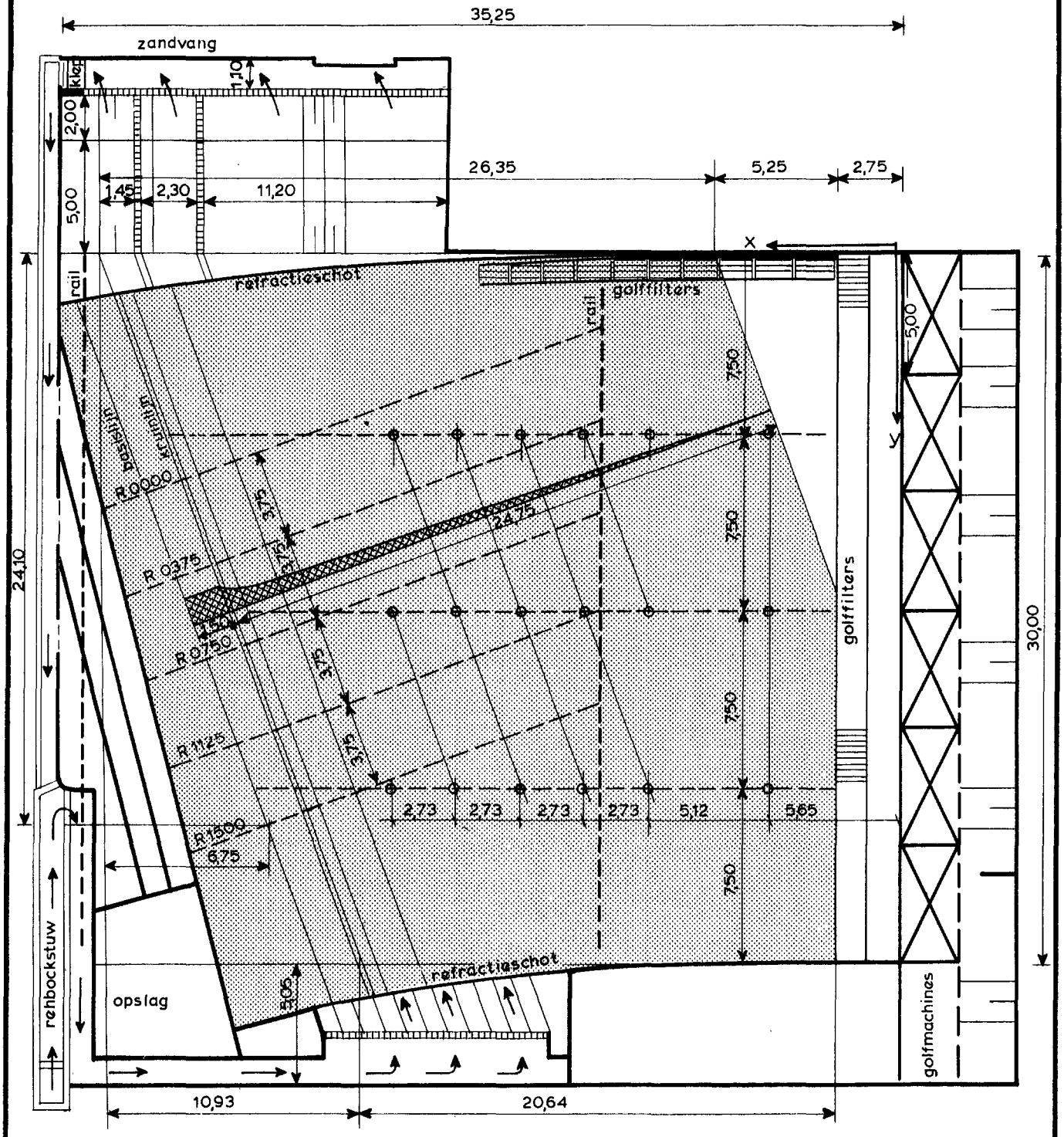
FOTO'S

1 Modeloverzicht bij loodrechte golfinval na 1 uur, P001
2 Modeloverzicht bij loodrechte golfinval na 10 uur, P001
3 Modeloverzicht bij schuine golfinval 20° na 1 uur, P002
4 Modeloverzicht bij schuine golfinval 20° na 10 uur, P002
5 Modeloverzicht bij schuine golfinval 10° na 1 uur, P003
6 Modeloverzicht bij schuine golfinval 10° na 10 uur, P003
7 Modeloverzicht bij schuine golfinval 10° na 2,75 uur, P004
8 Modeloverzicht bij schuine golfinval 10° na 4,1 uur, P004



maten in meters

MODELOVERZICHT PROEF MET LOODRECHTE GOLFINVAL		P 001
	SCHAAL 1 : 250	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1653	FIG. 1

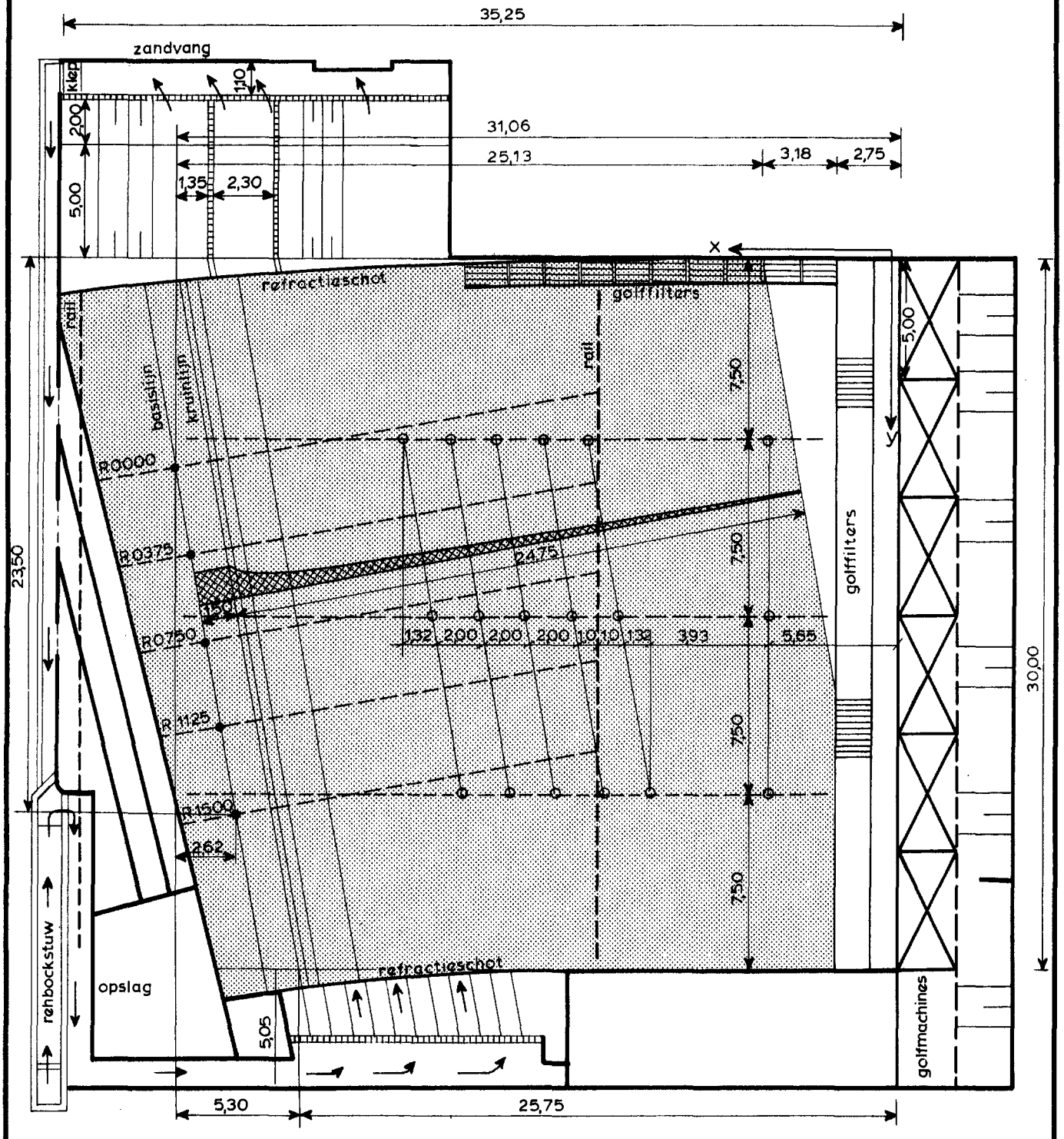


o plaats opnemers golfhoogtemeting

zandbodem

maten in meters

MODELOVERZICHT PROEF MET SCHUINE GOLFINVAL 20°		P 002
	SCHAAL 1:250	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1653	FIG. 2



o plaats opnemers golfhoogtemeting

zandbodem

maten in meters

MODELOVERZICHT PROEVEN MET SCHUINE GOLFINVAL 10°		P003 P004
	SCHAAL 1:250	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1653	FIG. 3

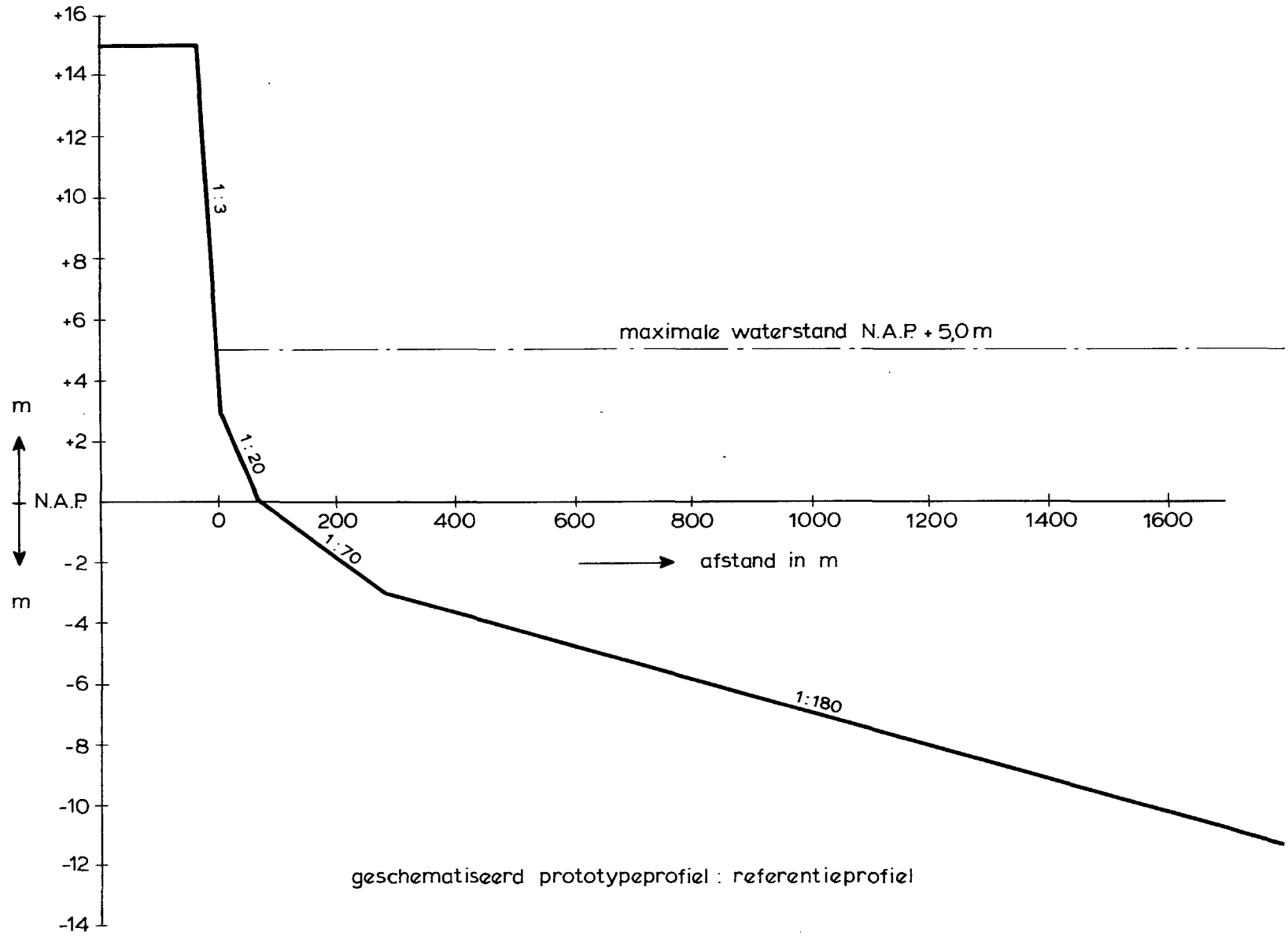
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

GESCHEMATISEERD KUSTPROFIEL, REFERENTIEPROFIEL

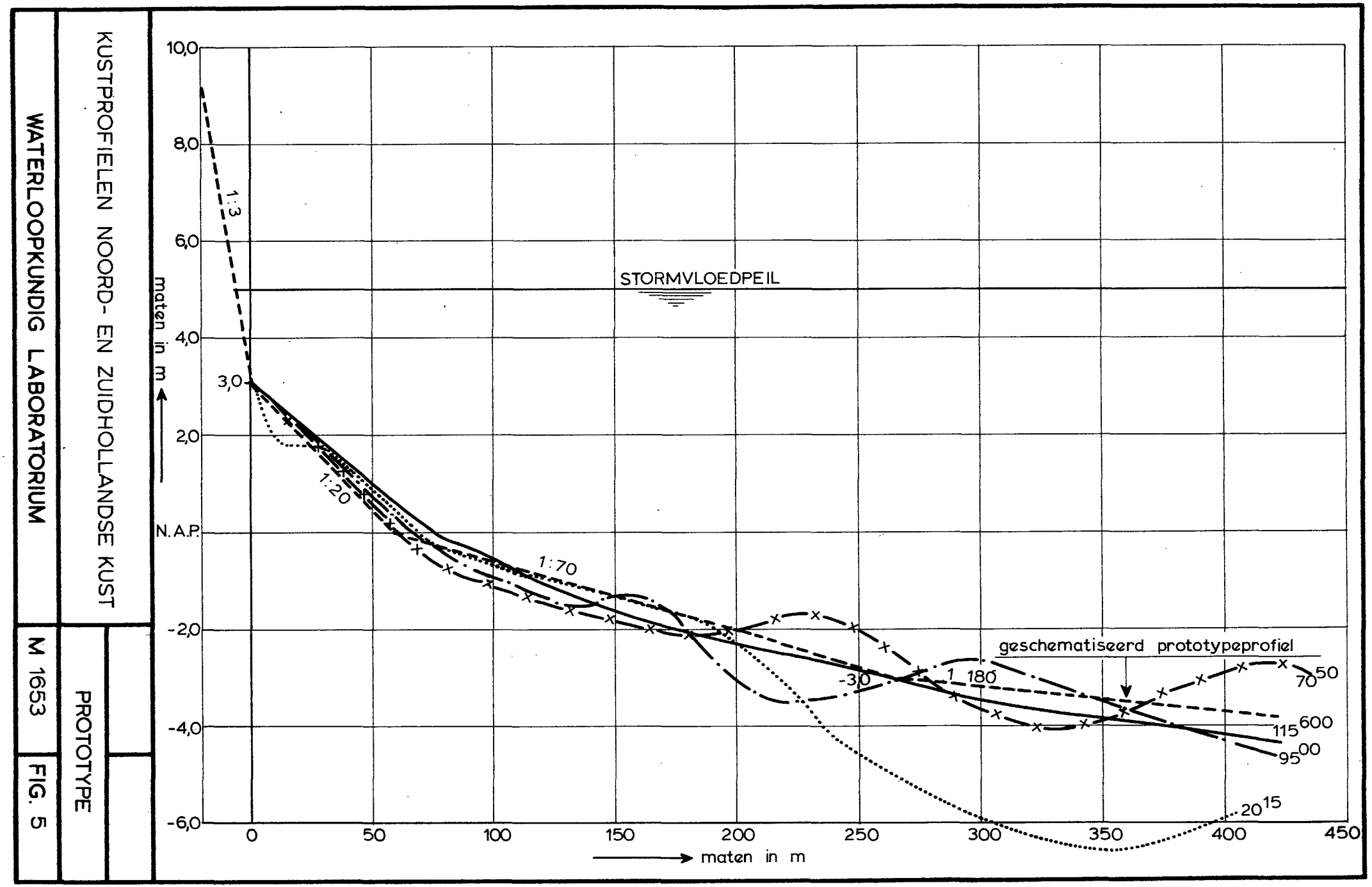
M 1653

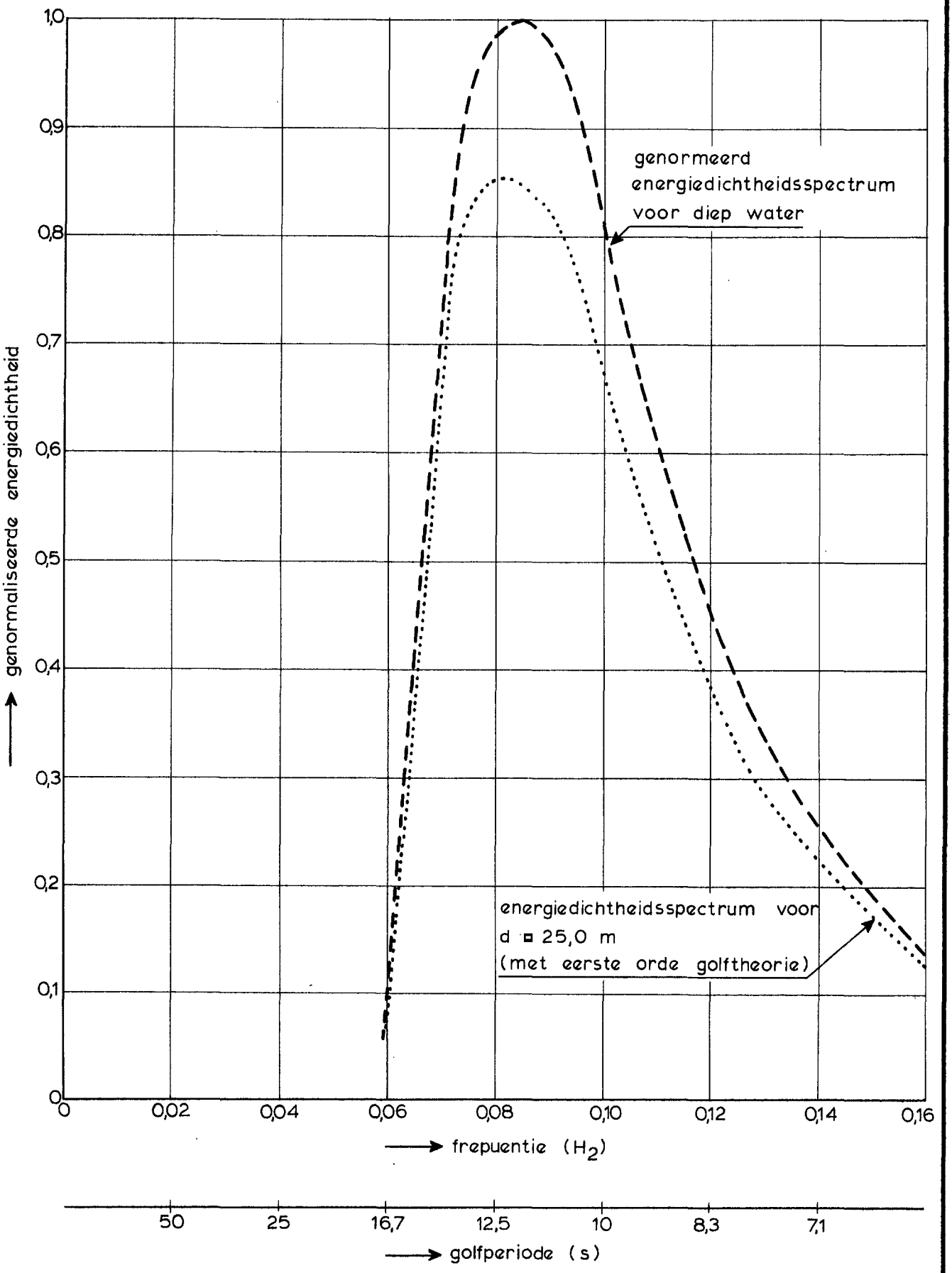
FIG. 4

PROTOTYPE



geschematiseerd prototypeprofiel : referentieprofiel


KUSTPROFIELEN NOORD- EN ZUIDHOLLANDSE KUST
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM
M 1653
FIG. 5
PROTOTYPE
10,0
8,0
6,0
4,0
3,0
2,0
N.A.P.
-2,0
-4,0
-6,0
maten in m
STORMVLOEDPEIL
1:3
1:20
1:70
-3,0
1 180
115 600
95 00
70 50
20 15
geschematiseerd prototypeprofiel
0
50
100
150
200
250
300
350
400
450
maten in m



ENERGIEDICHTHEIDSSPECTRUM VOLGENS PIERSON EN MOSKOWITZ		
	PROTOTYPE	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1653	FIG. 6

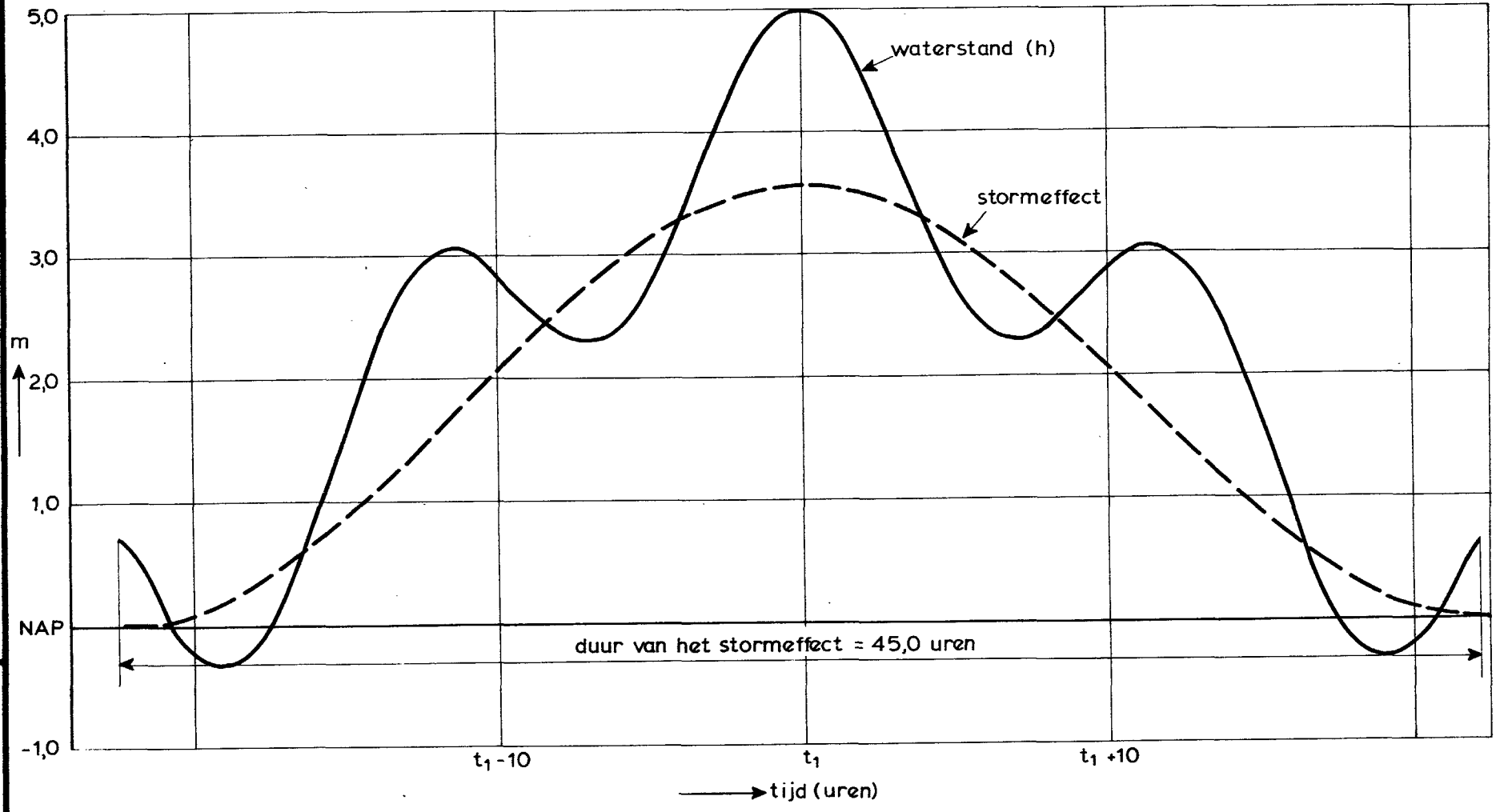
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1653

FIG. 7

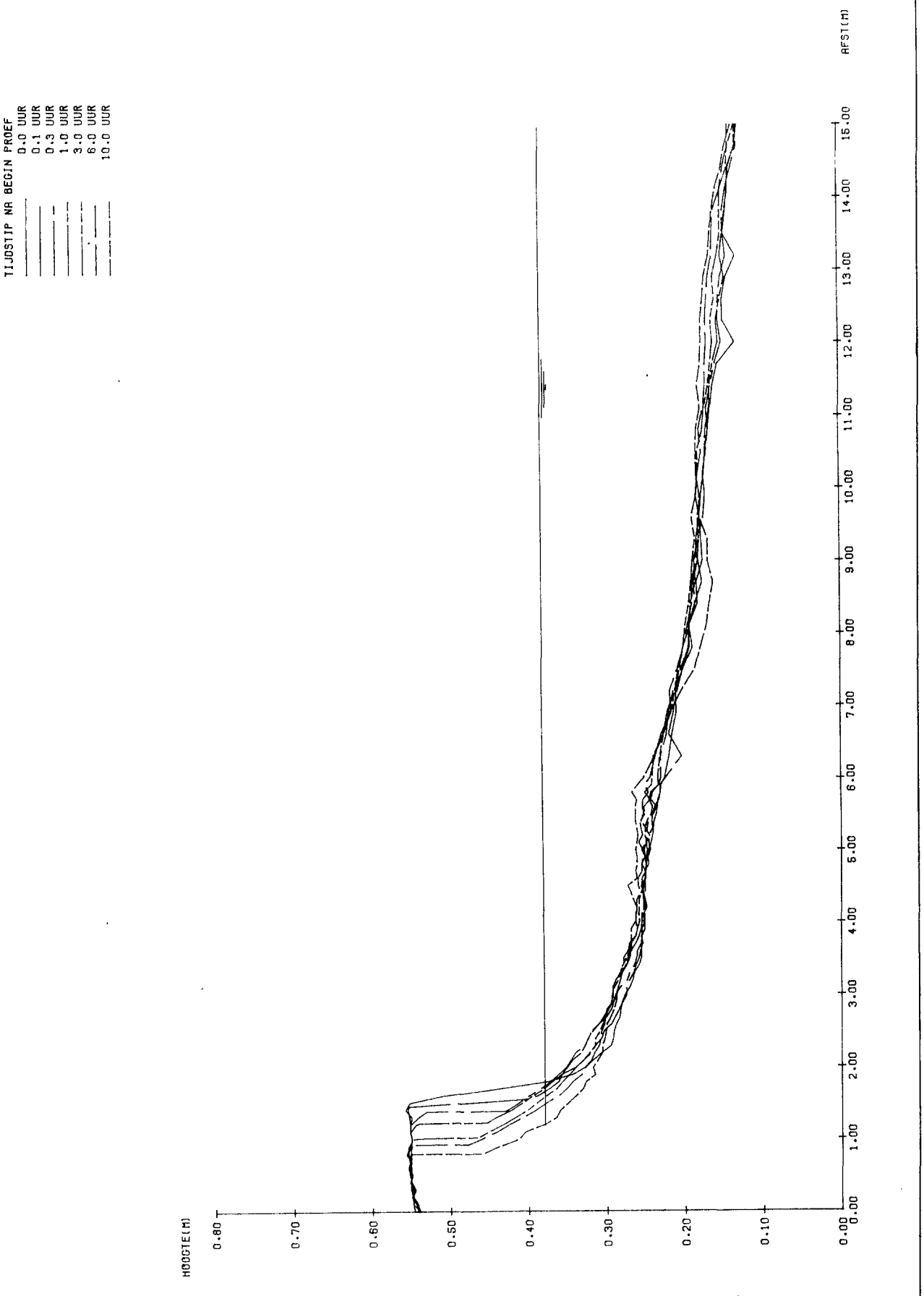
VOORGESTELD WATERSTANDSVERLOOP

TIJDENS SUPERSTORMVLOED



tijdens stormeffect:

waterstand $h = 0{,}45 + 1{,}00 \cos \frac{2\pi(t-t_1)}{12{,}42} + 3{,}55 \cos^2 \frac{\pi(t-t_1)}{45{,}0}$

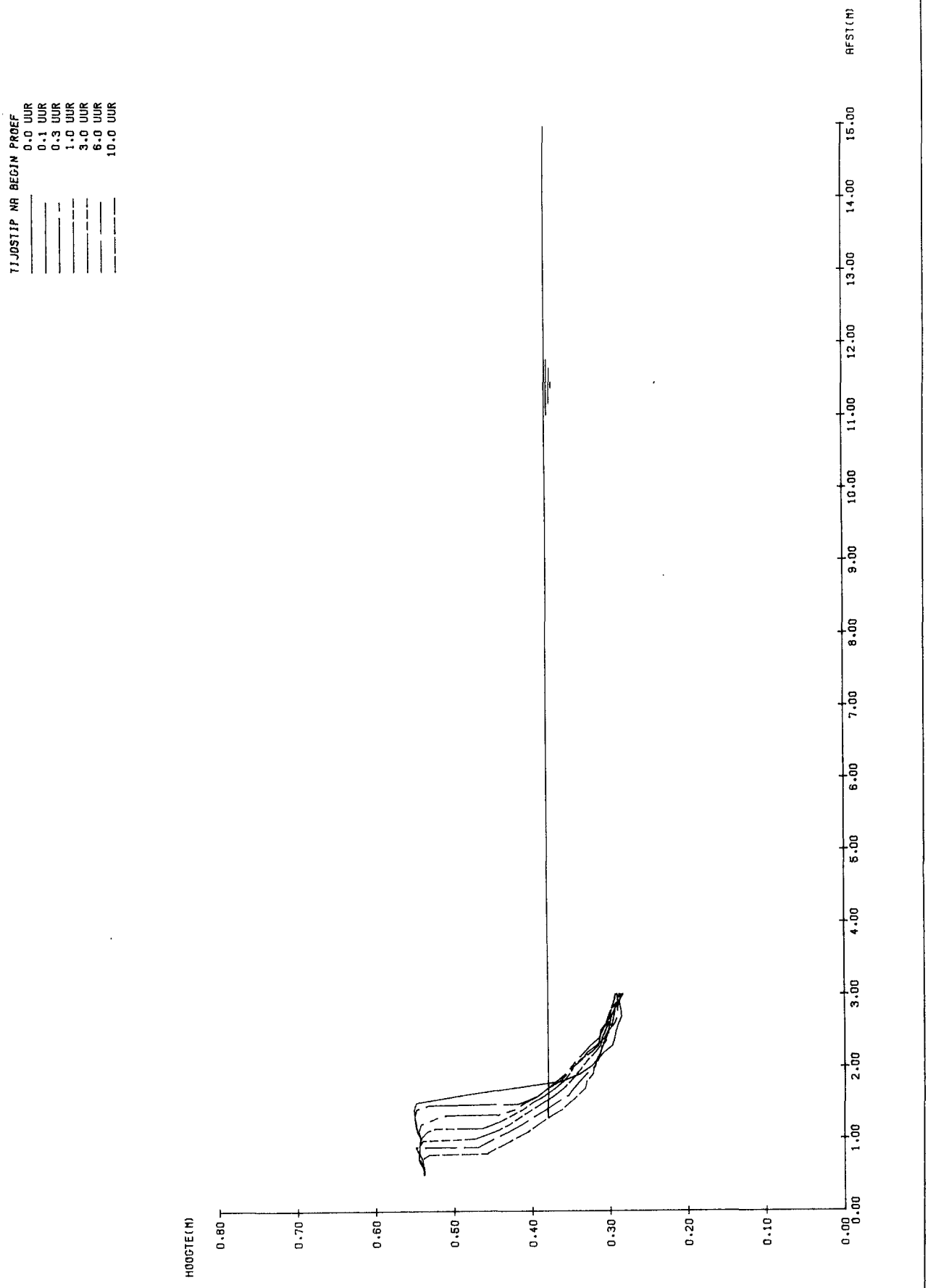


DWARSPROFIELEN

P 001 | R 0500

H-SCHAAL 1:50 V-SCHAAL 1:5

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM | M1653 | FIG. 8

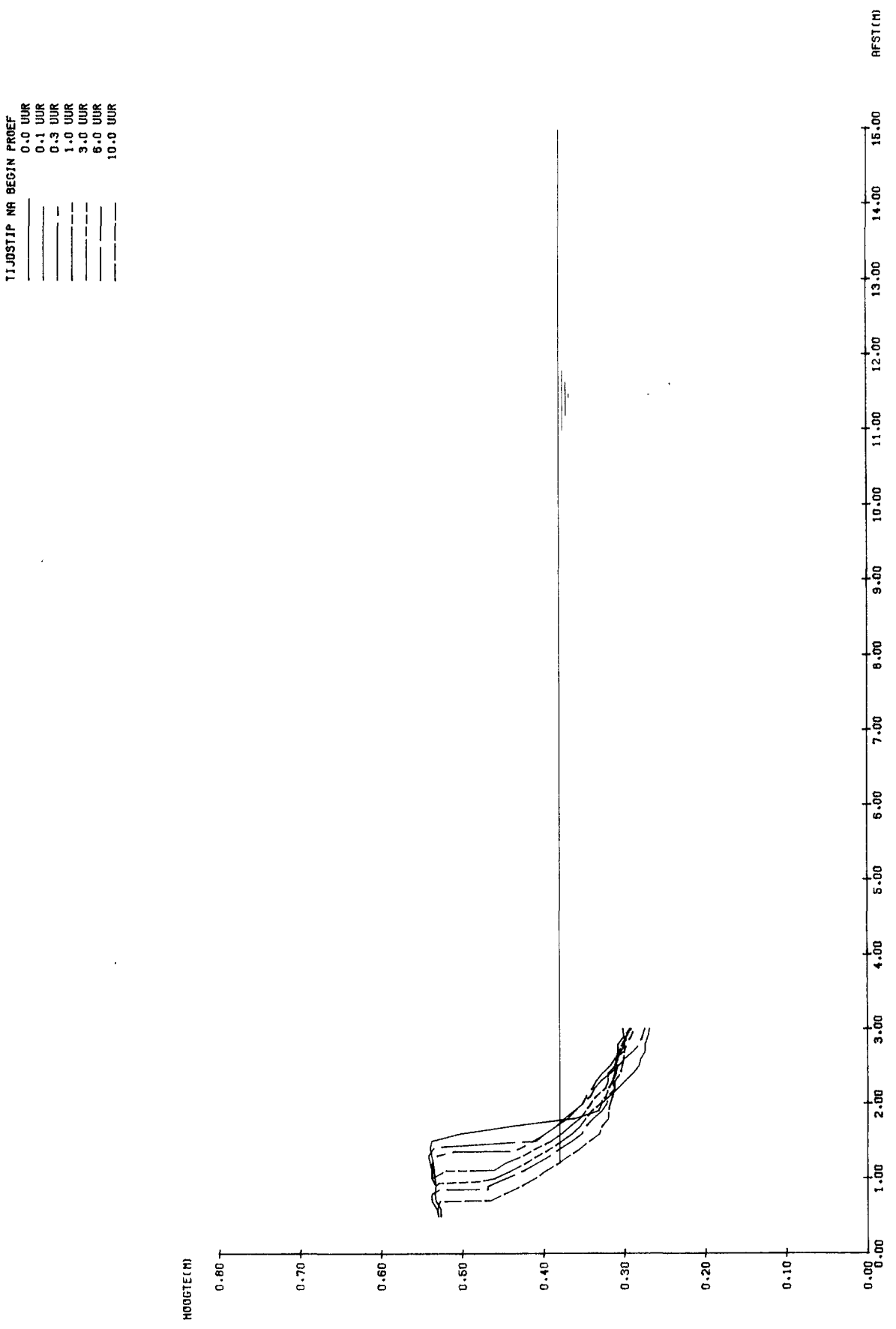


DWARSPROFIELEN	P 001	R 0875
	H-SCHAAL 1:50	V-SCHAAL 1:5
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M1653	FIG. 9

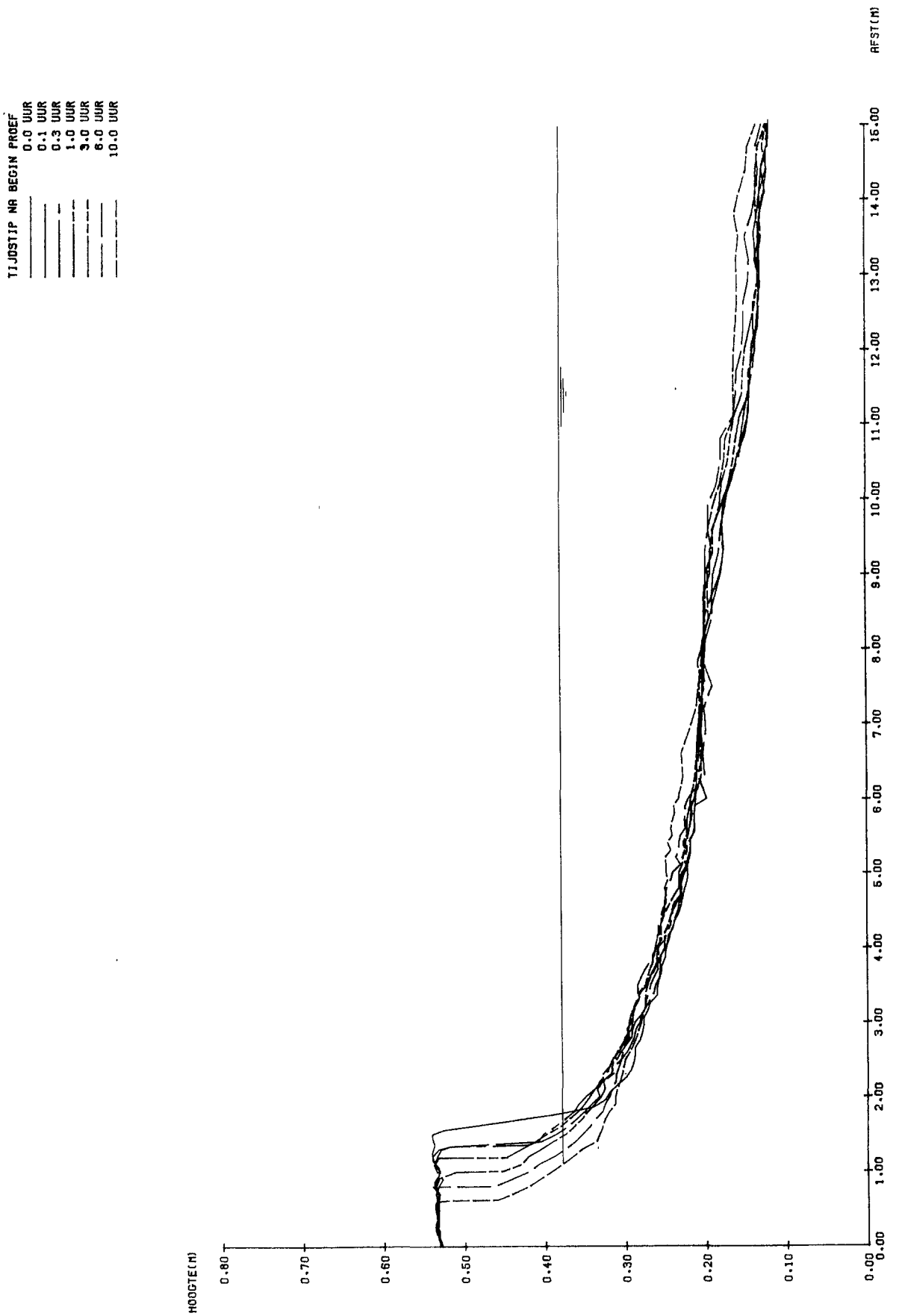
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

DWARSPROFIELEN

M1653	H-SCHAAL 1:50 V-SCHAAL 1:5	P 001
FIG. 10		R 1250



DWARSPROFIELEN	P 001	R 1625
	H-SCHAAL 1:50	V-SCHAAL 1:5
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M1653	FIG. 11



DWARSPROFIELEN	P 001	R 2000
	H-SCHAAL 1:50	V-SCHAAL 1:5
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M1653	FIG. 12

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

DWARSPROFIELEN

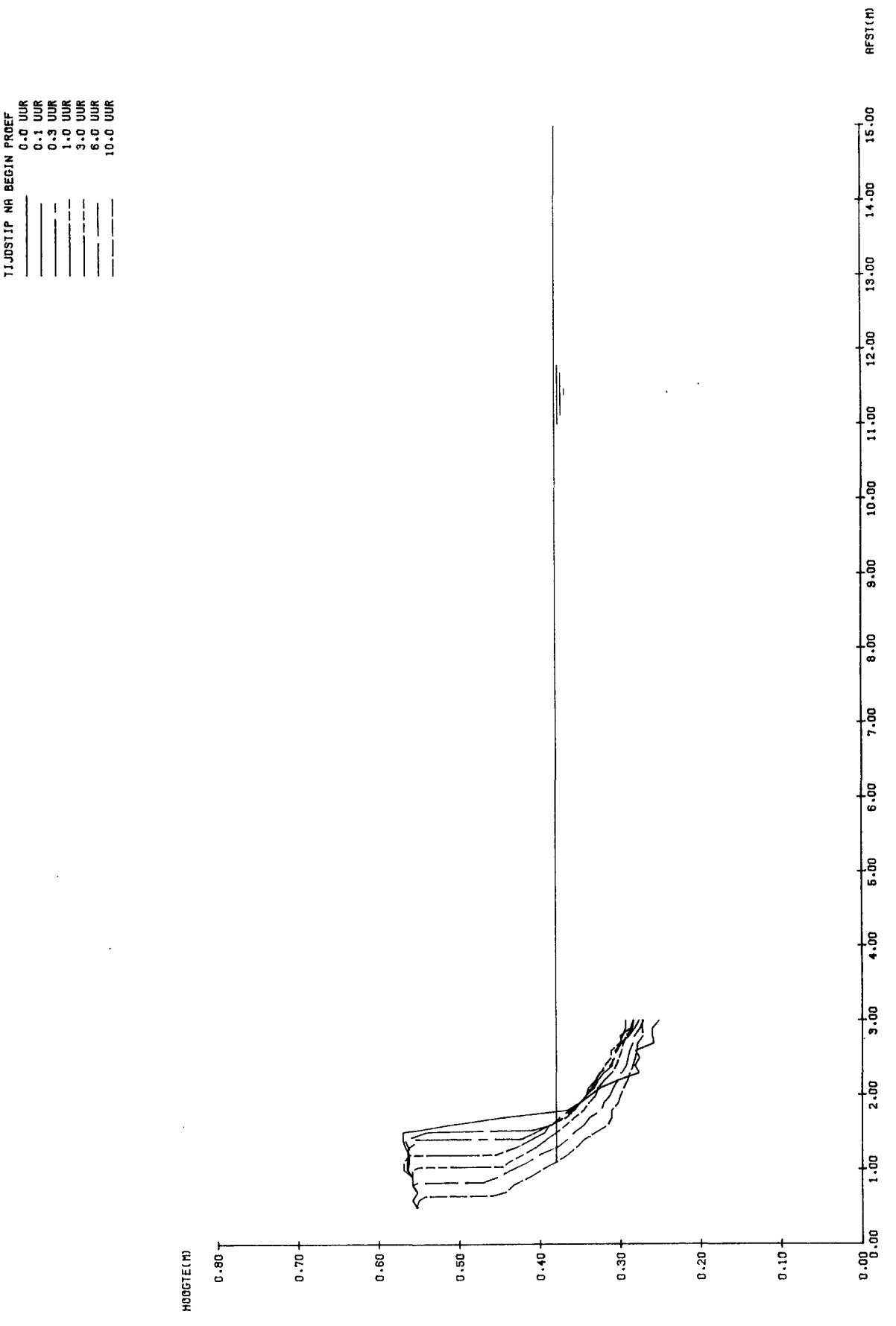
M1653

H-SCHAAL 1:50 V-SCHAAL 1:5

P 001

R 2600

FIG.13



DWARSPROFIELEN	P 001	R 2700
	H-SCHAAL 1:50	V-SCHAAL 1:5
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M1653	FIG. 14

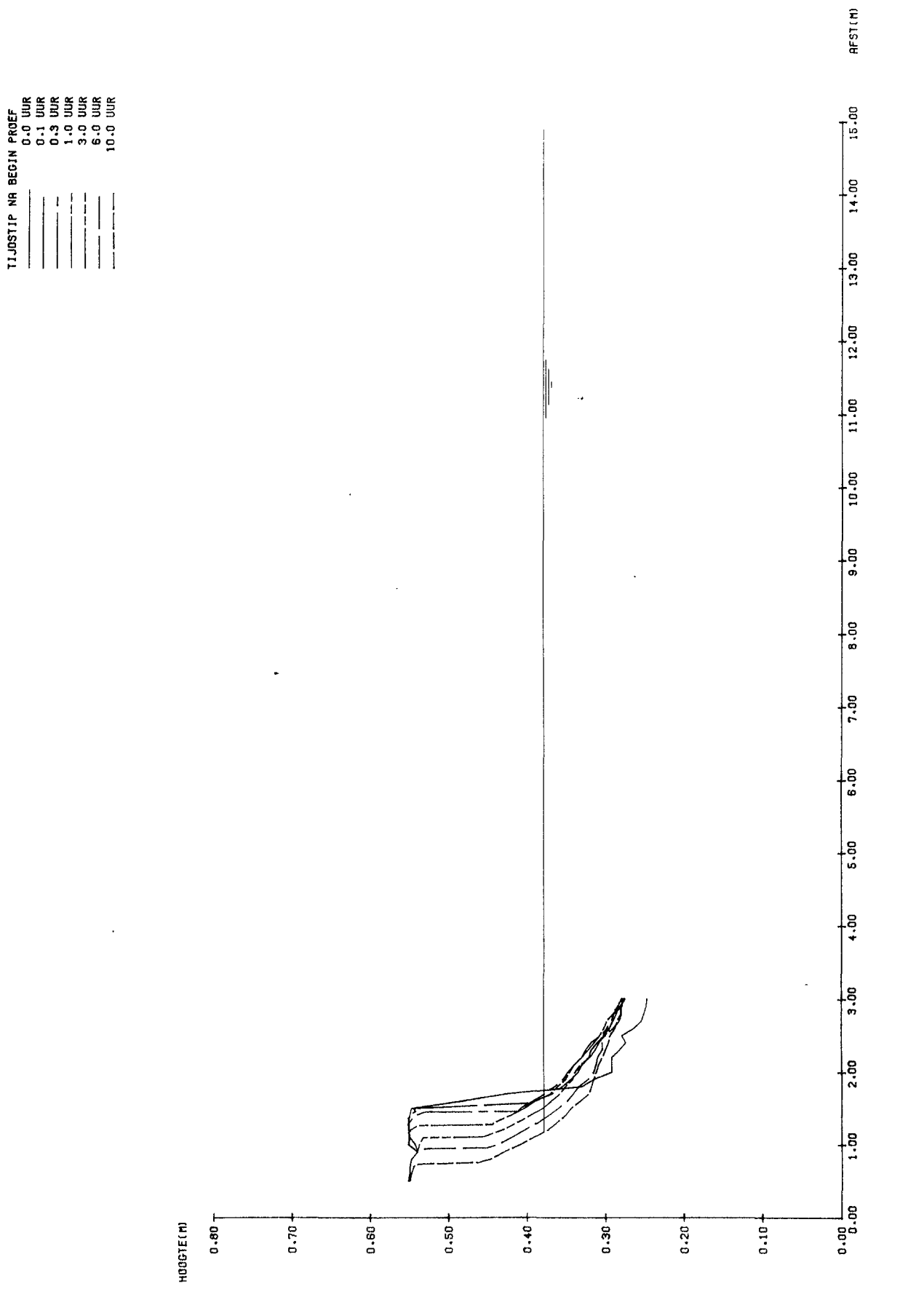
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

DWARSPROFIELEN

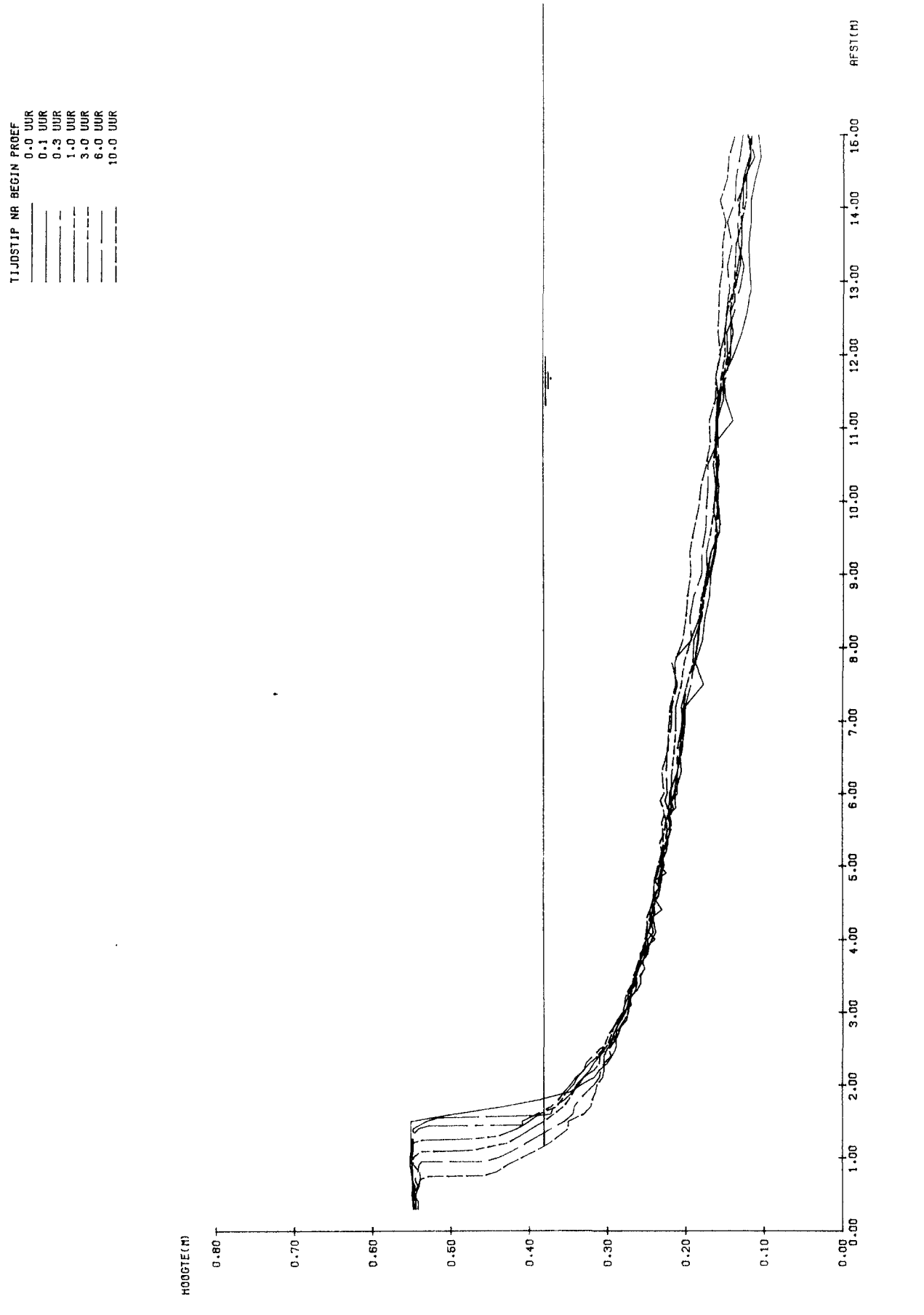
M1653 | P 001

H-SCHAAL 1:50 V-SCHAAL 1:5

FIG.15 | R 2800



DWARSPROFIELEN	P 001	R 2925
	H-SCHAAL 1:50	V-SCHAAL 1:5
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M1653	FIG. 16



DWARSPROFIELEN	P 001	R 2950
	H-SCHAAL 1:50	V-SCHAAL 1:5
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M1653	FIG. 17

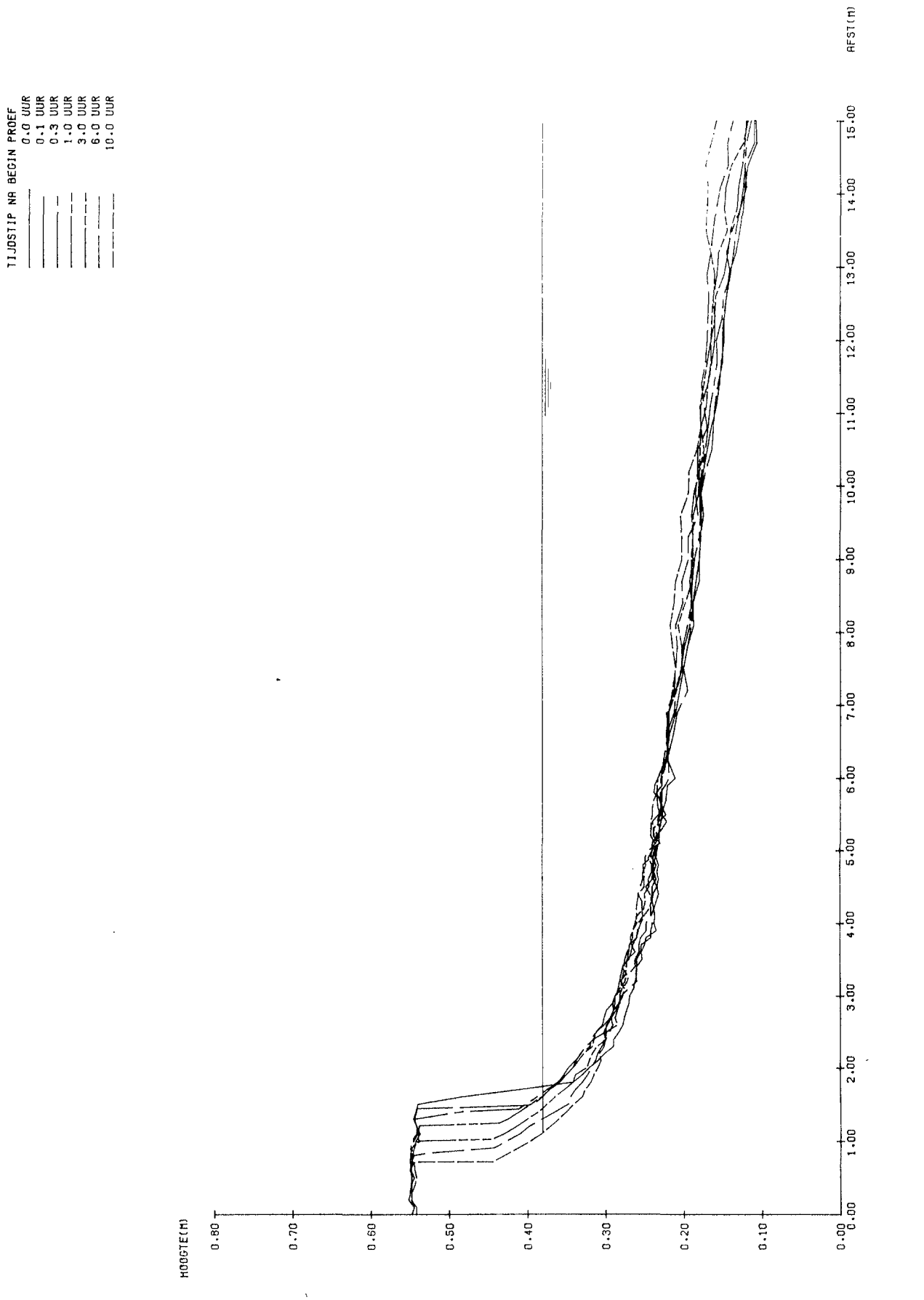
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

DWARSPROFIELEN

M1653 | P 001 | R 2975

H-SCHAAL 1:50 V-SCHAAL 1:5

FIG: 18



DWARSPROFIELEN

P 002 | R 0000

H-SCHAAL 1:50 V-SCHAAL 1:5

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM | M1653 | FIG. 19

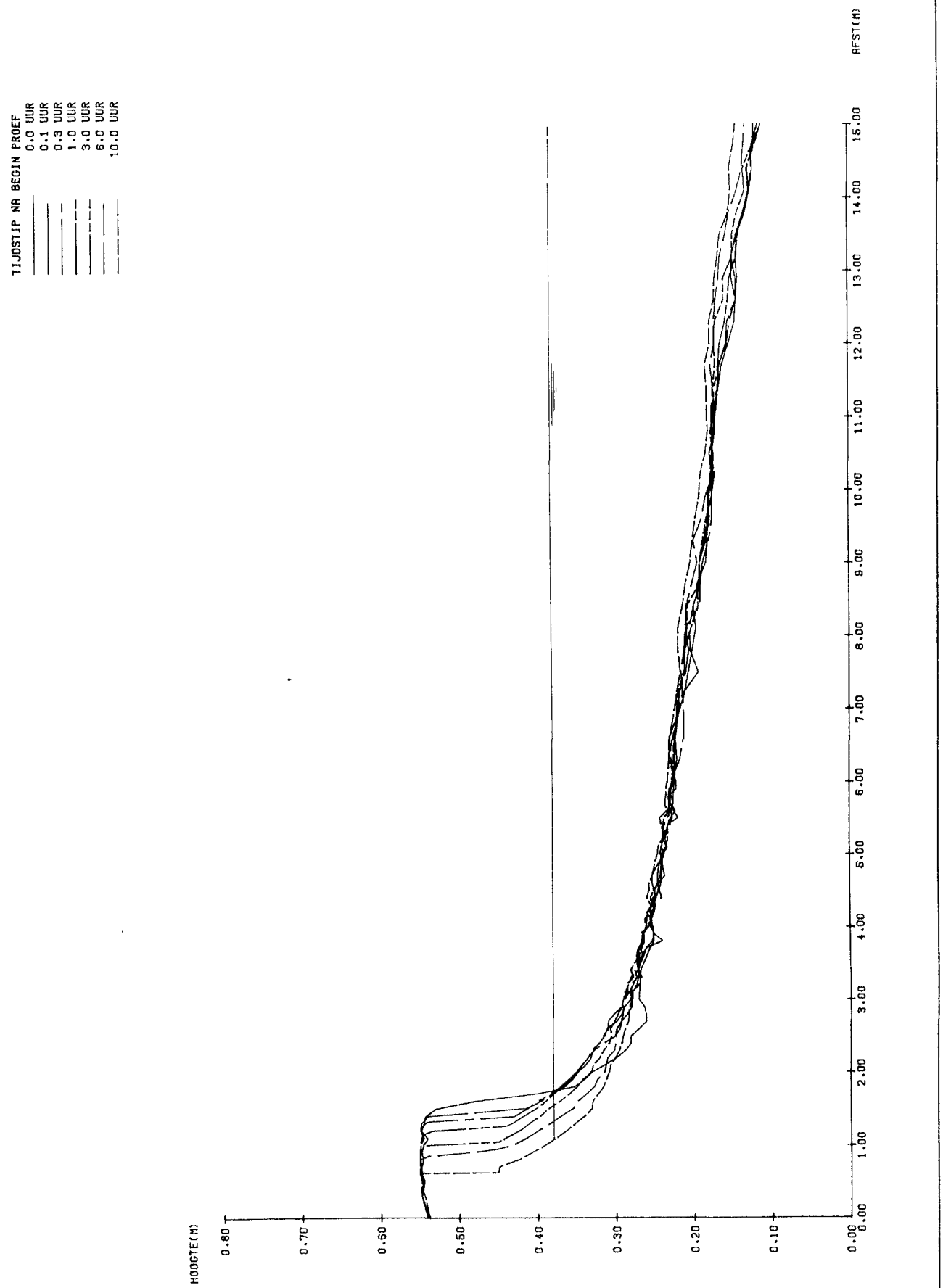
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

DWARSPROFIELEN

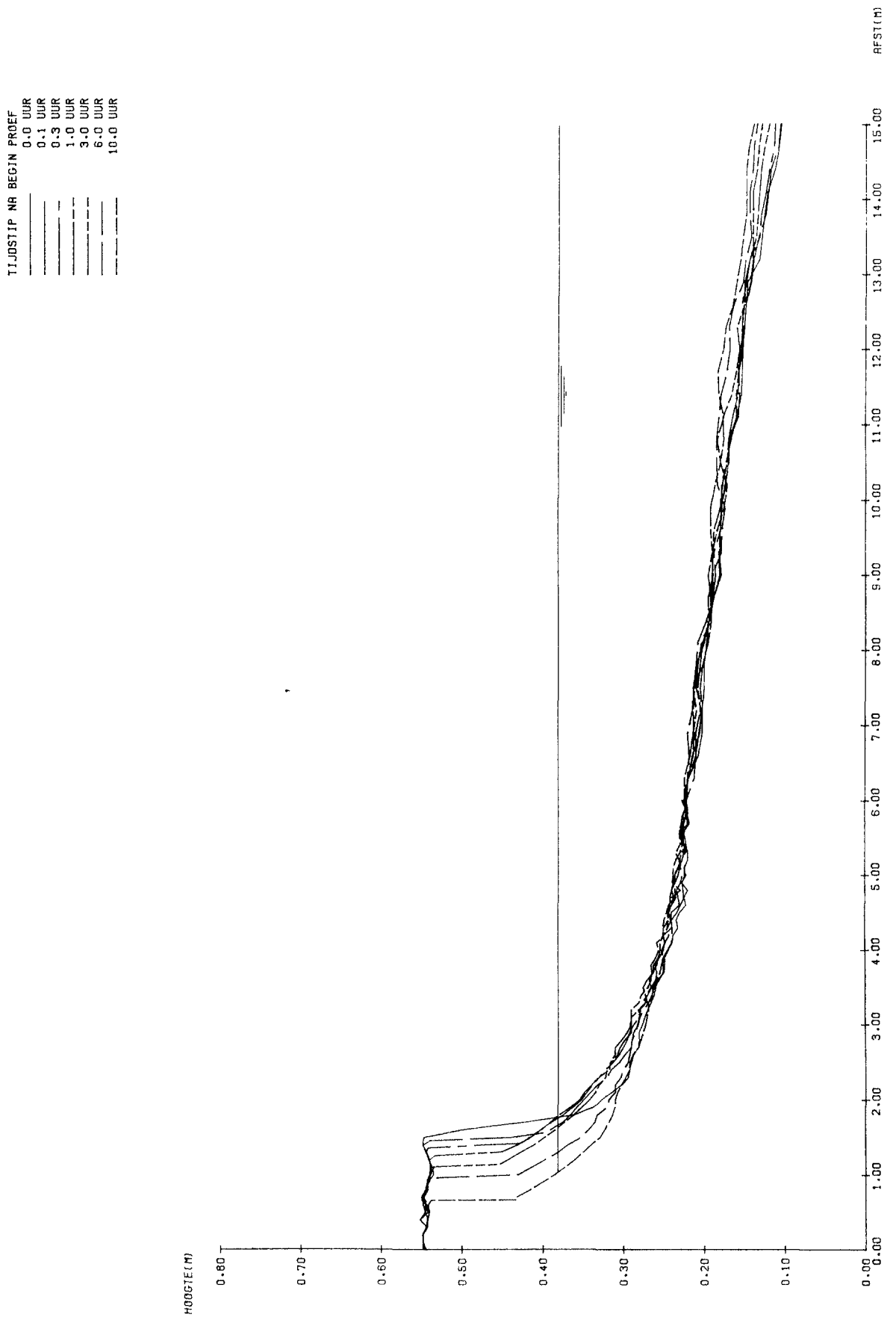
M1653 | P 002 | R 0375

H-SCHAAL 1:50 V-SCHAAL 1:5

FIG. 20



DWARSPROFIELEN	P 002	R 0750
	H-SCHAAL 1:50	V-SCHAAL 1:5
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M1653	FIG. 21



DWARSPROFIELEN	P 002	R 1125
	H-SCHAAL 1:50	V-SCHAAL 1:5
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M1653	FIG. 22

DWARSPROFIELEN	P 002	R 1500
	H-SCHAAL 1:50	V-SCHAAL 1:5
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M1653	FIG. 23

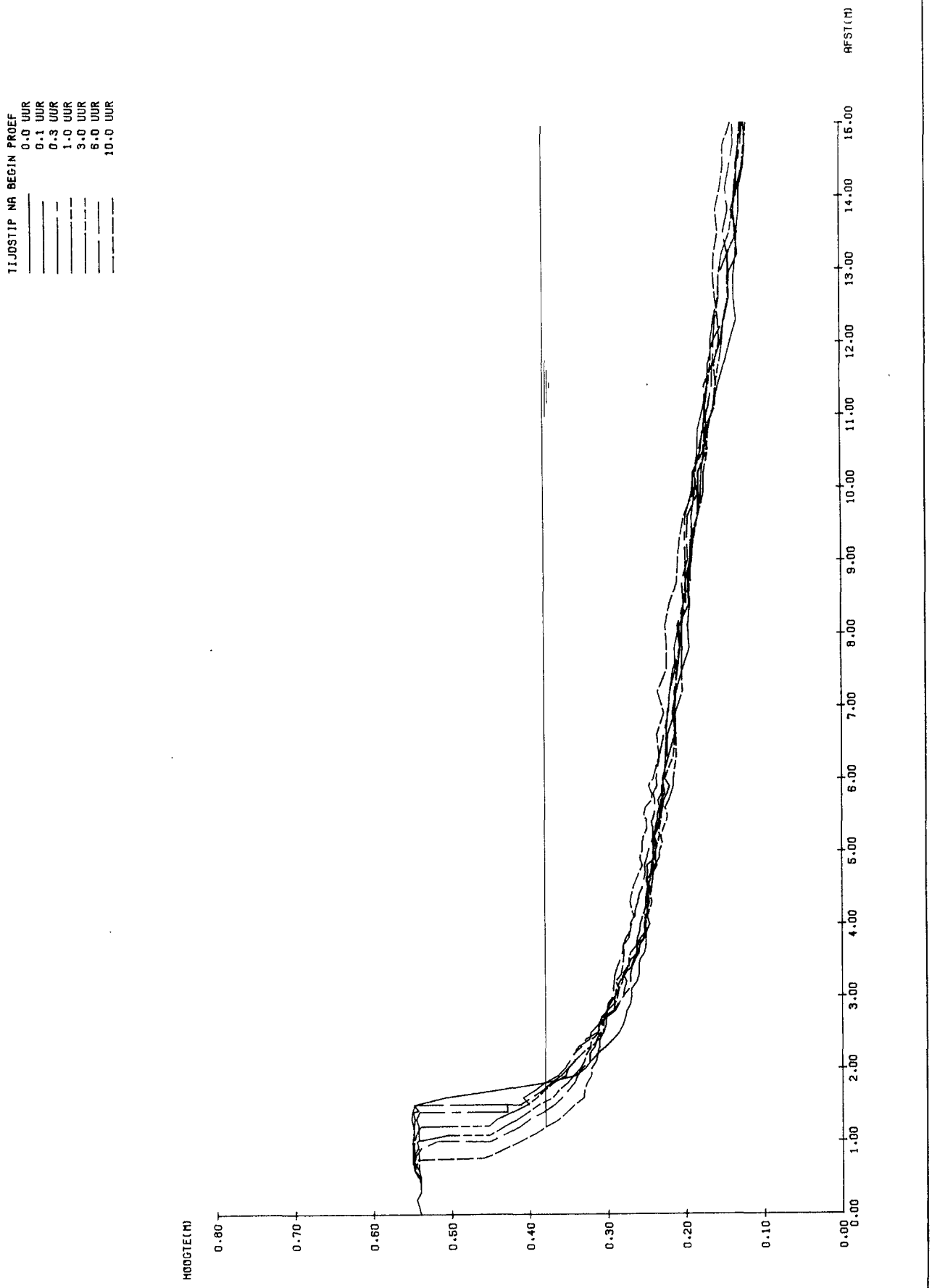
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

DWARSPROFIELEN

M1653 | P 003 | R 0000

H-SCHAAL 1:50 V-SCHAAL 1:5

FIG. 24



DWARSPROFIELEN

P 003 | R 0375

H-SCHAAL 1:50 V-SCHAAL 1:5

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM | M1653 | FIG. 25

DWARSPROFIELEN	P 003	R 0750
	H-SCHAAL 1:50	V-SCHAAL 1:5
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M1653	FIG. 26

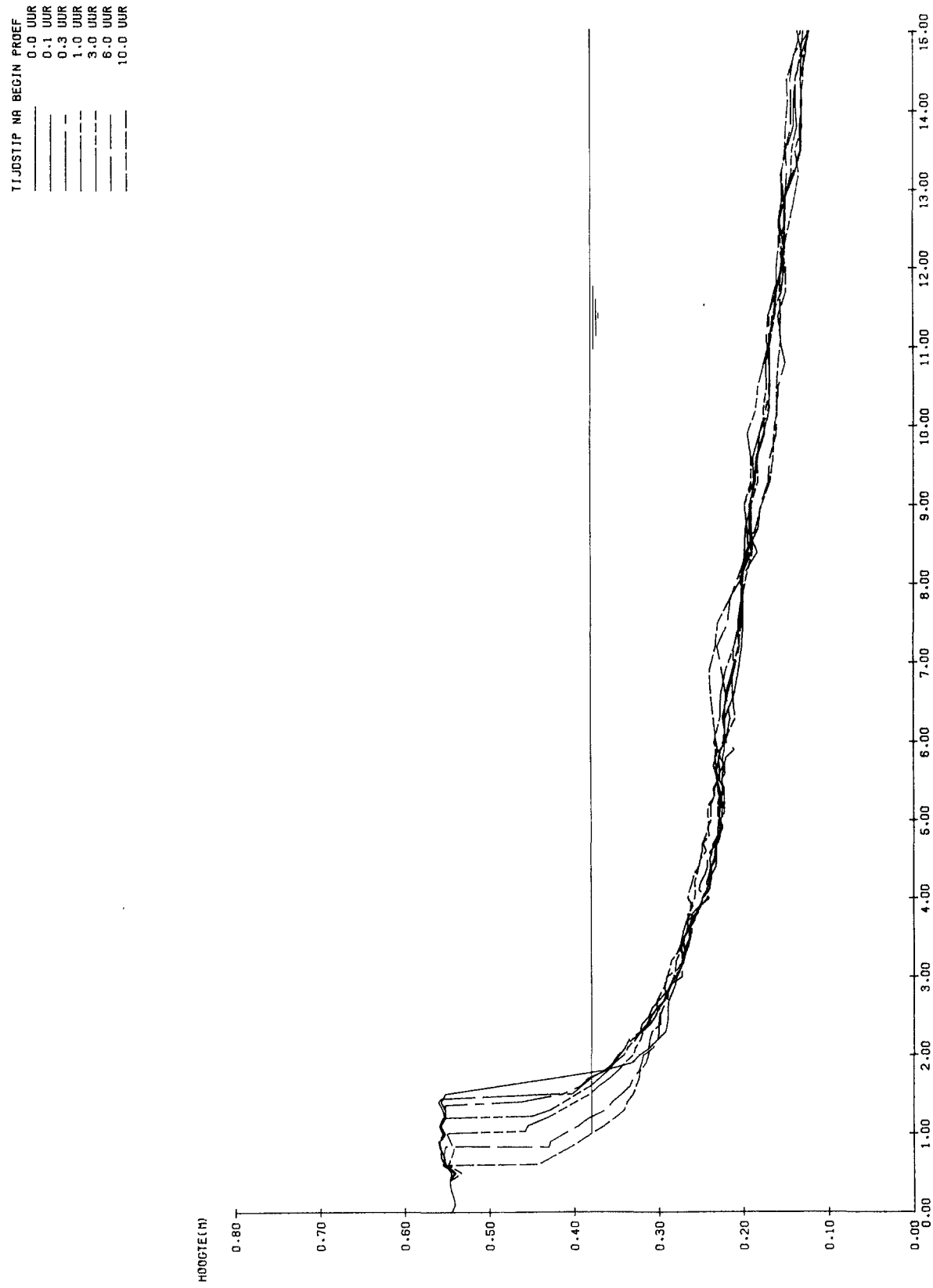
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

DWARSPROFIELEN

M1653 | P 003 | R 1125

H-SCHAAL 1:50 V-SCHAAL 1:5

FIG.27

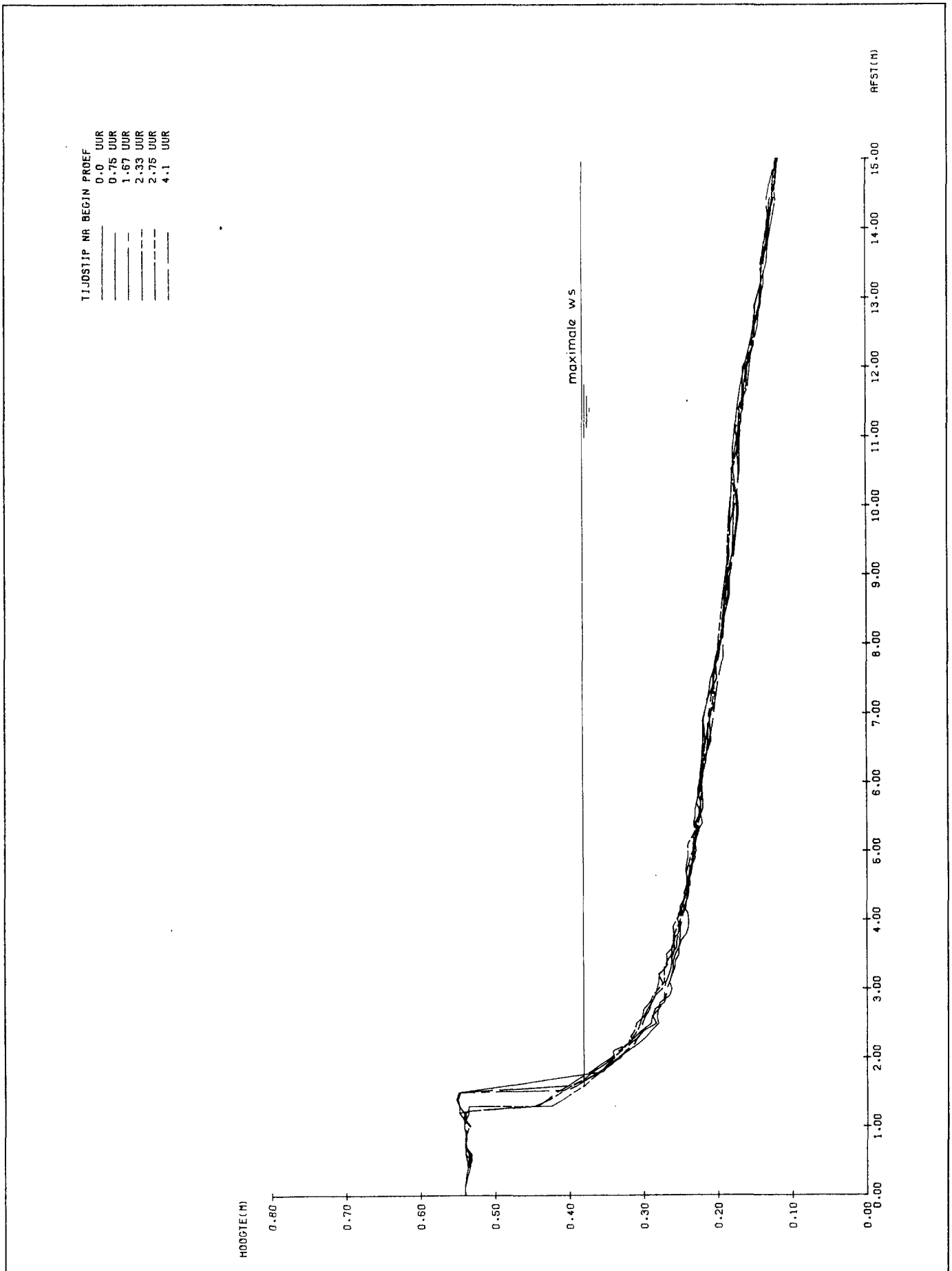


DWARSPROFIELEN

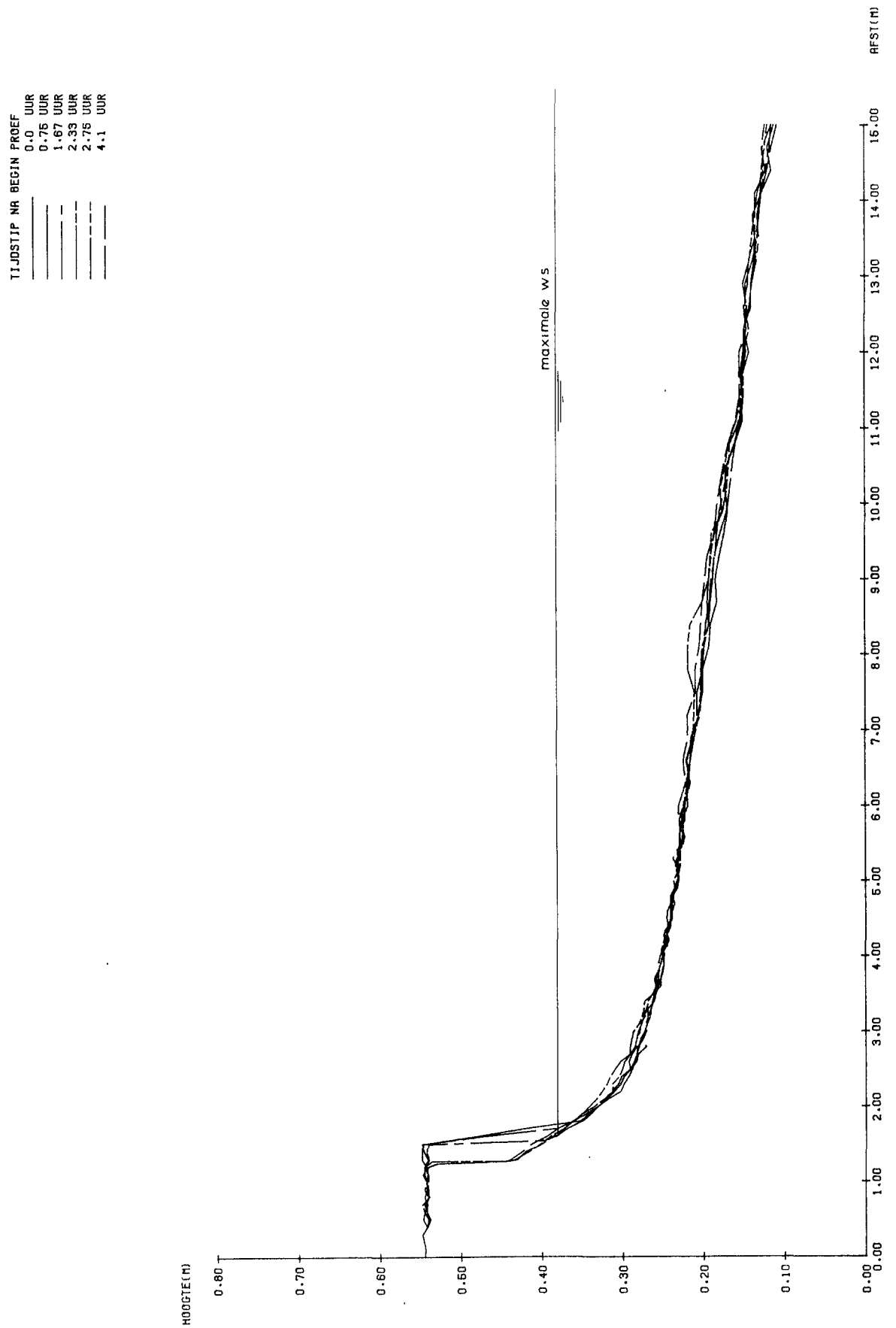
P 003 | R 1500

H-SCHAAL 1:50 V-SCHAAL 1:5

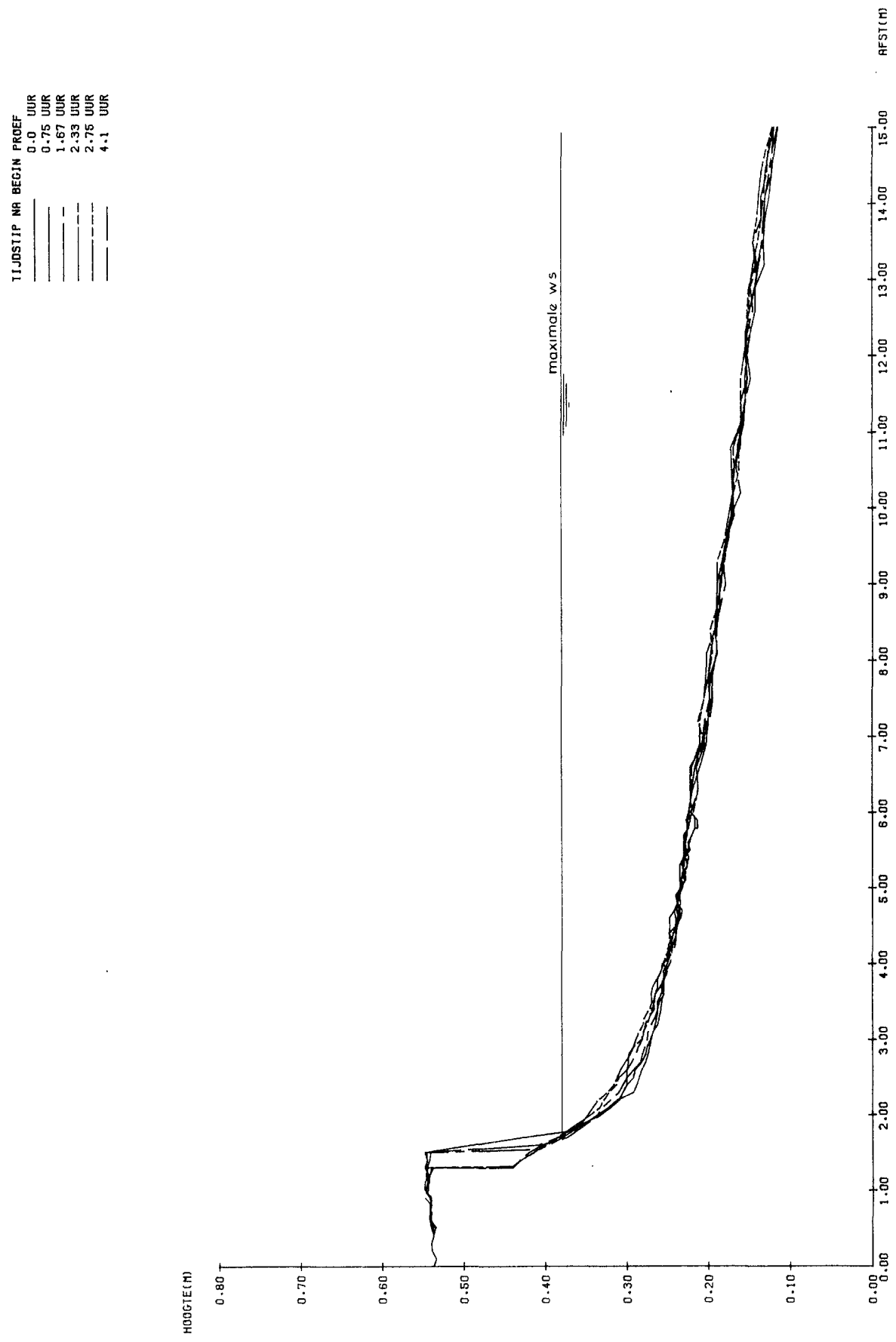
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM | M1653 | FIG. 28



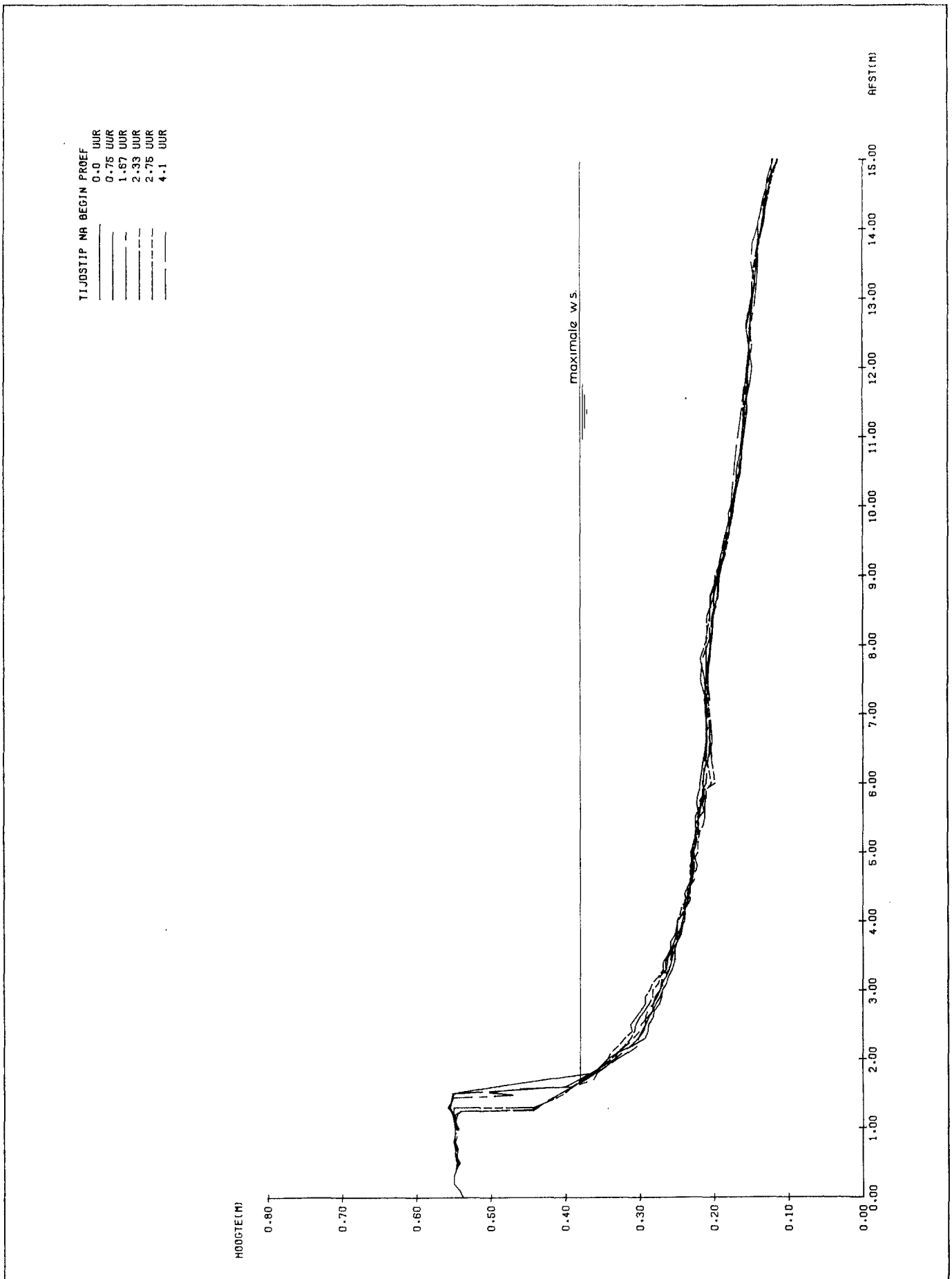
DWARSPROFIELEN	P 004	R 0000
	H-SCHAAL 1:50	V-SCHAAL 1:5
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M1653	FIG. 29



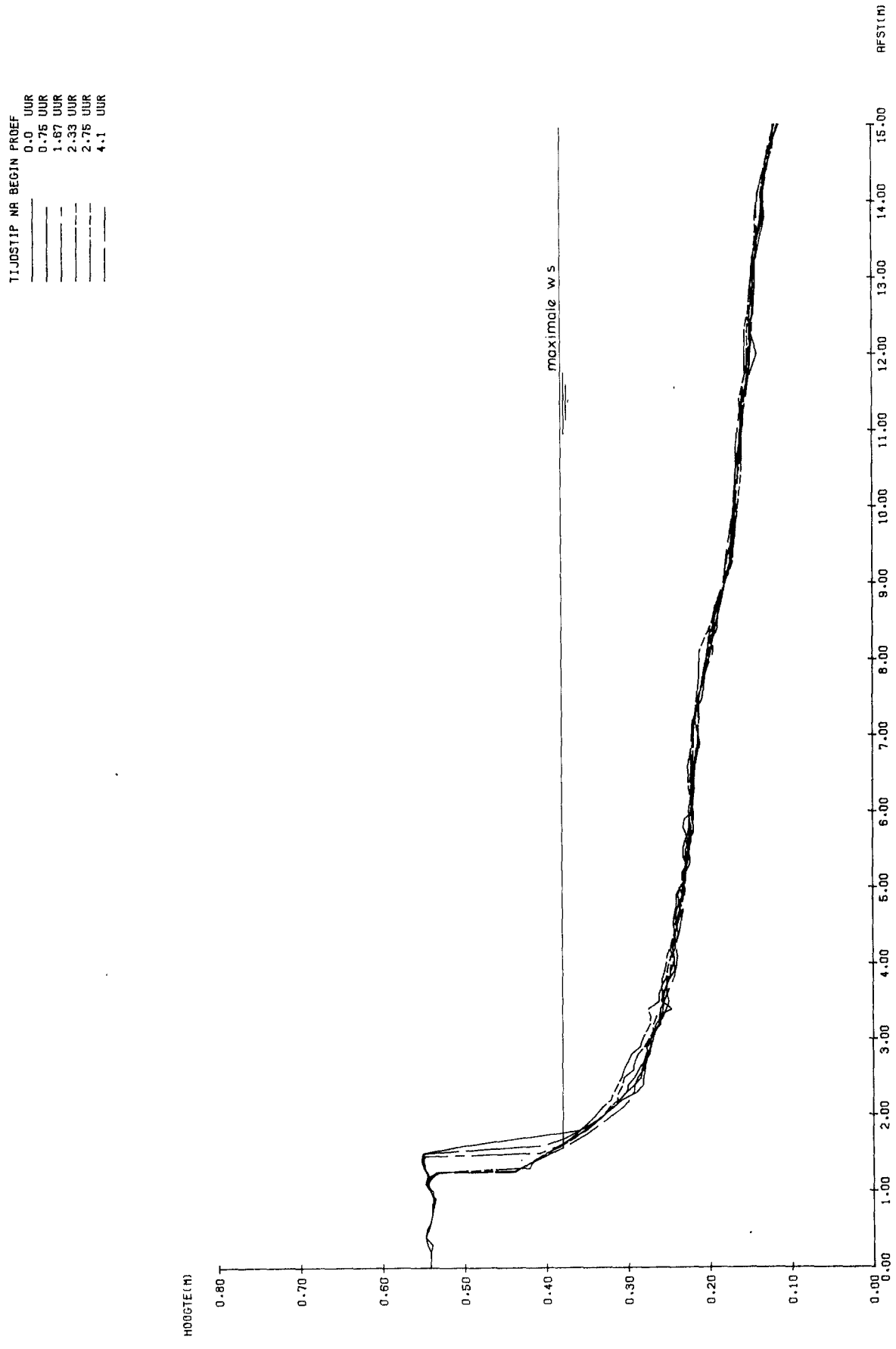
DWARSPROFIELEN	P 004	R 0375
	H-SCHAAL 1:50	V-SCHAAL 1:5
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M1653	FIG. 30



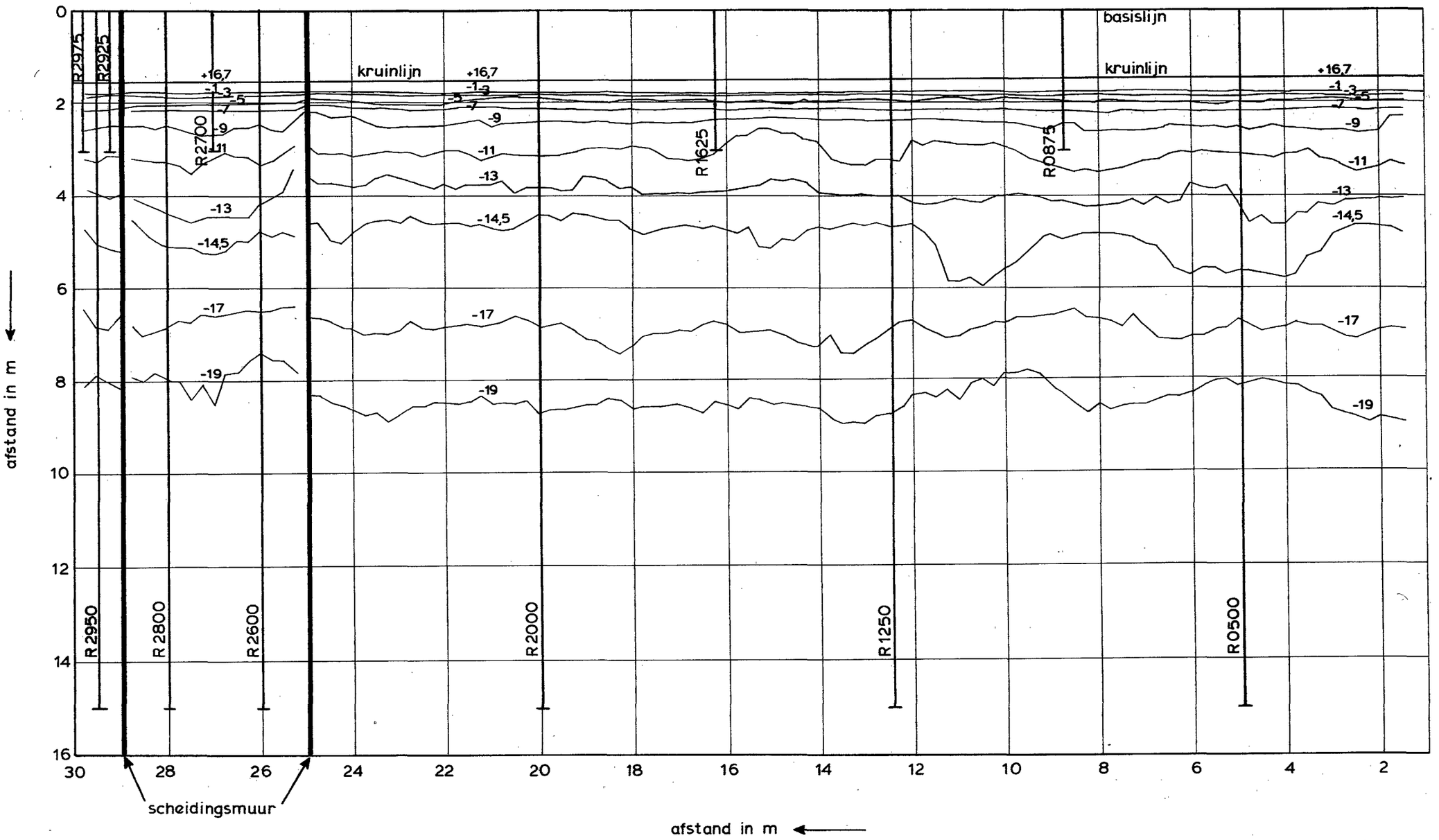
DWARSPROFIELEN	P 004	R 0750
	H-SCHAAL 1:50	V-SCHAAL 1:5
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M1653	FIG. 31



DWARSPROFIELEN	P 004	R 1125
	H-SCHAAL 1:50	V-SCHAAL 1:5
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M1653	FIG. 32

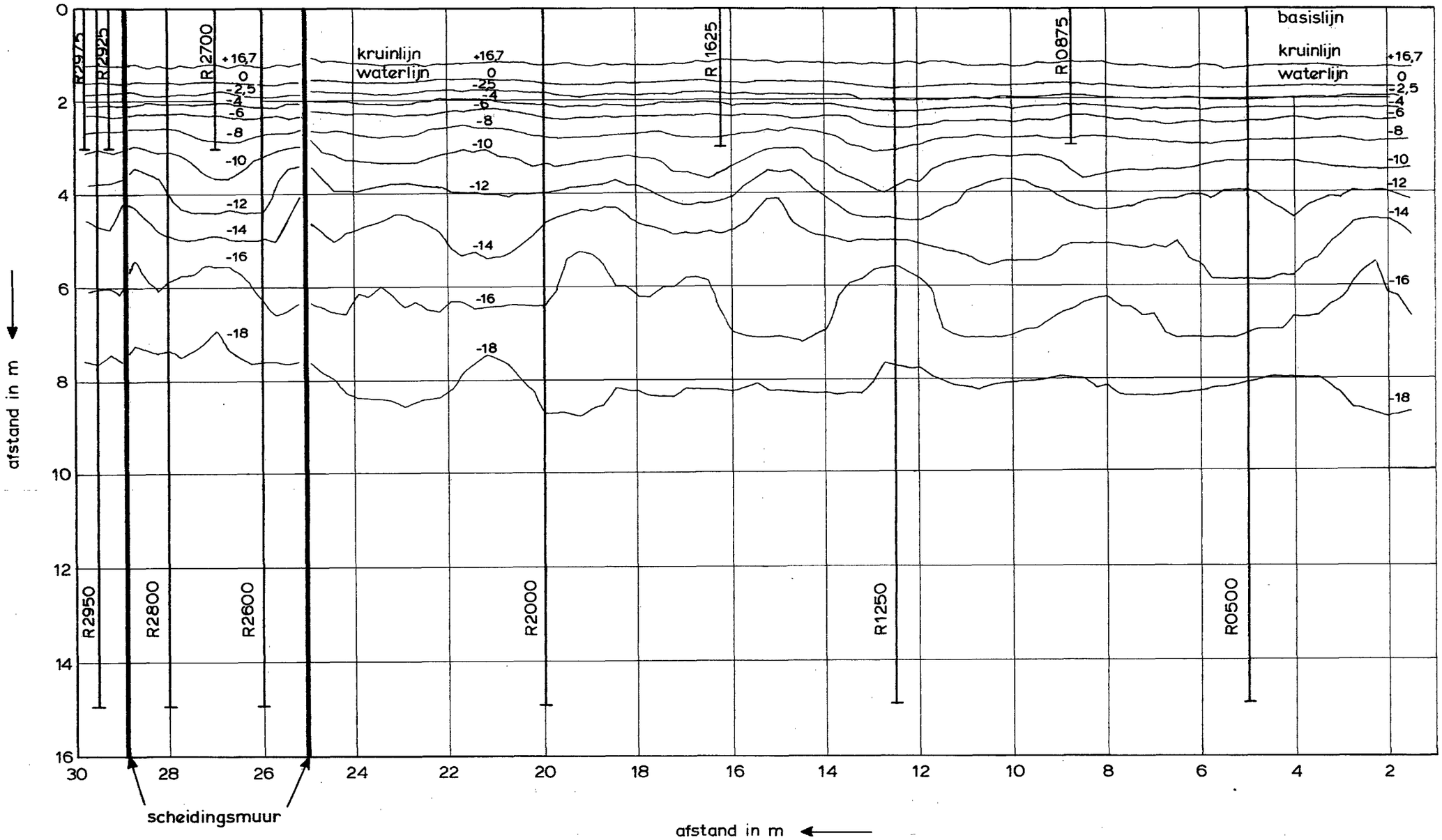


DWARSPROFIELEN	P 004	R 1500
	H-SCHAAL 1:50	V-SCHAAL 1:5
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M1653	FIG.33



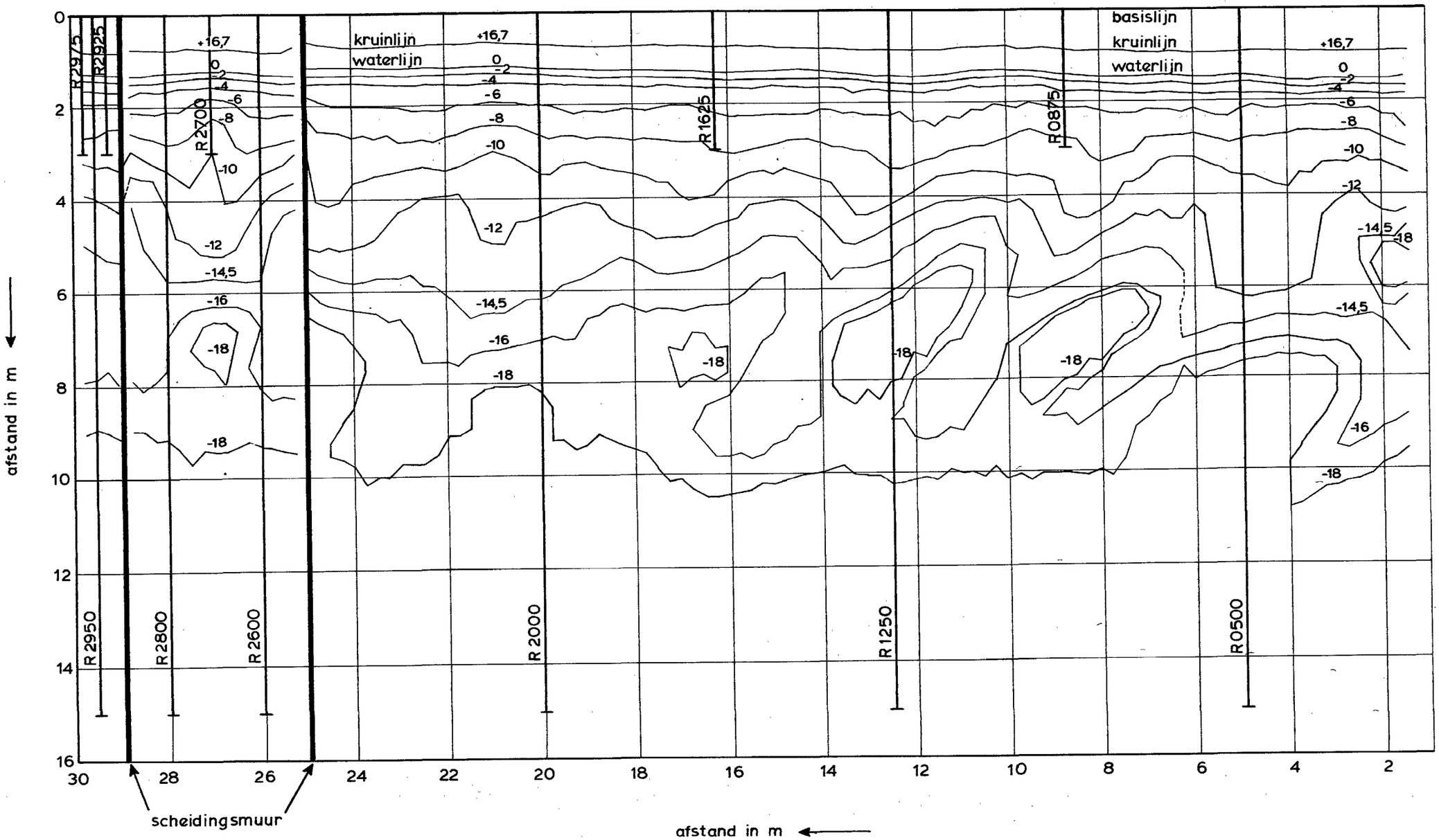
diepten in cm t.o.v. stilwaterniveau

BODEMLIGGING VOOROEVER NA t = 0 uur		P001
	SCHAAL 1:100	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1653	FIG. 34



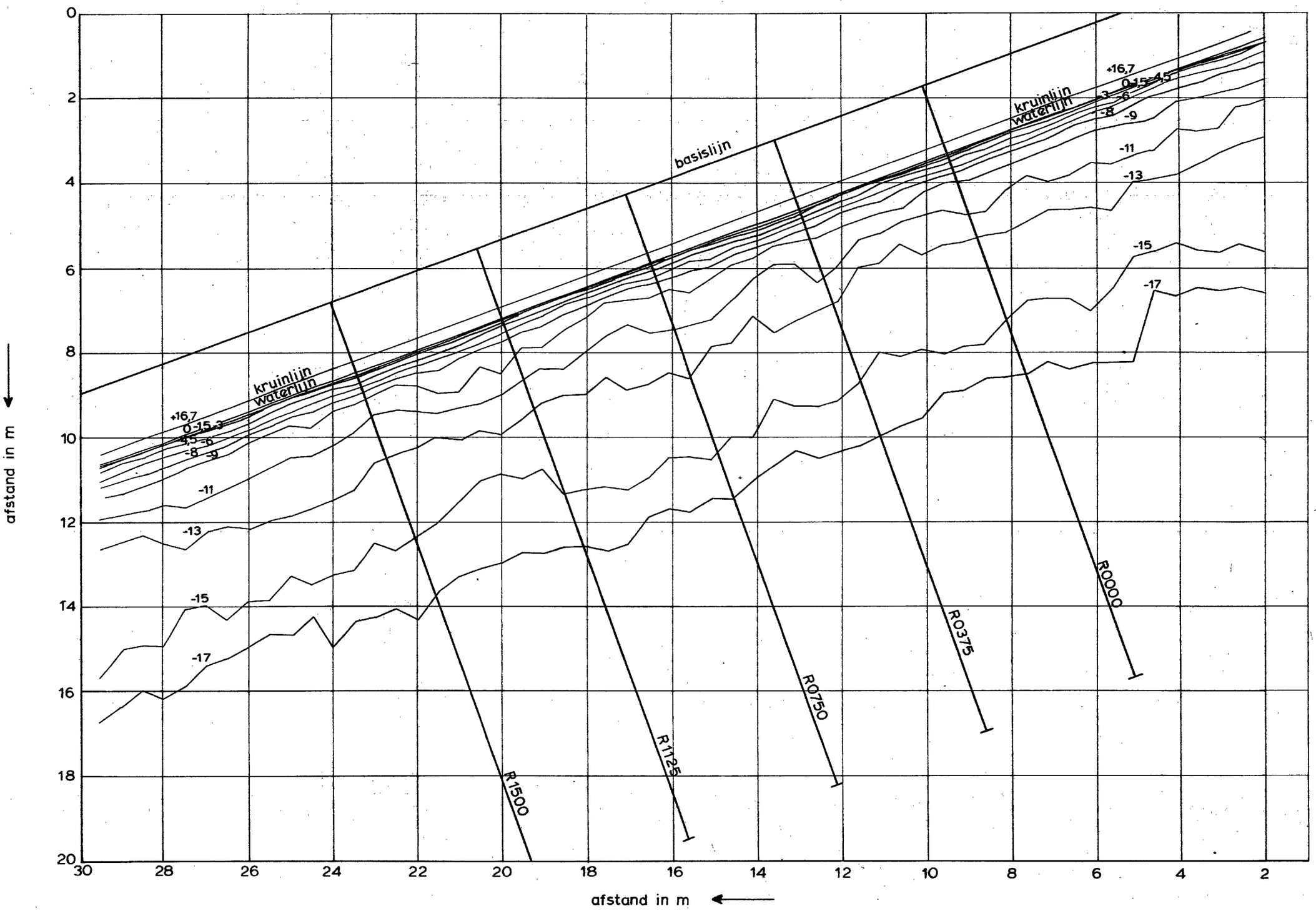
diepten in cm t.o.v. stilwaterniveau

BODEMLIGGING VOOROEVER NA t = 1 uur		P001
	SCHAAL 1:100	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1653	FIG. 35



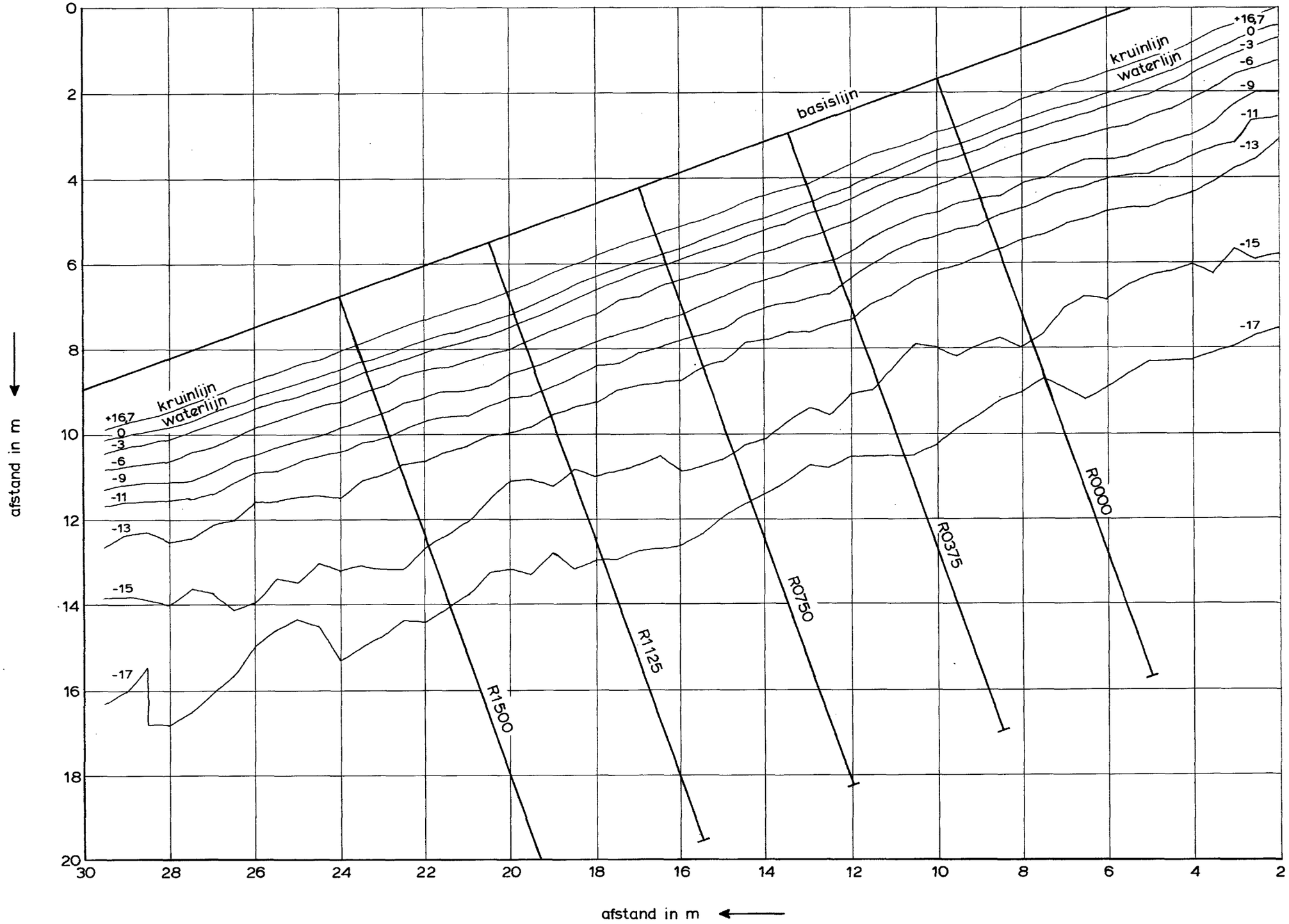
diepten in cm t.o.v. stilwaterniveau

BODEMLIGGING VOOROEVER NA t = 10 uur		P001
	SCHAAL 1:100	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1653	FIG. 36



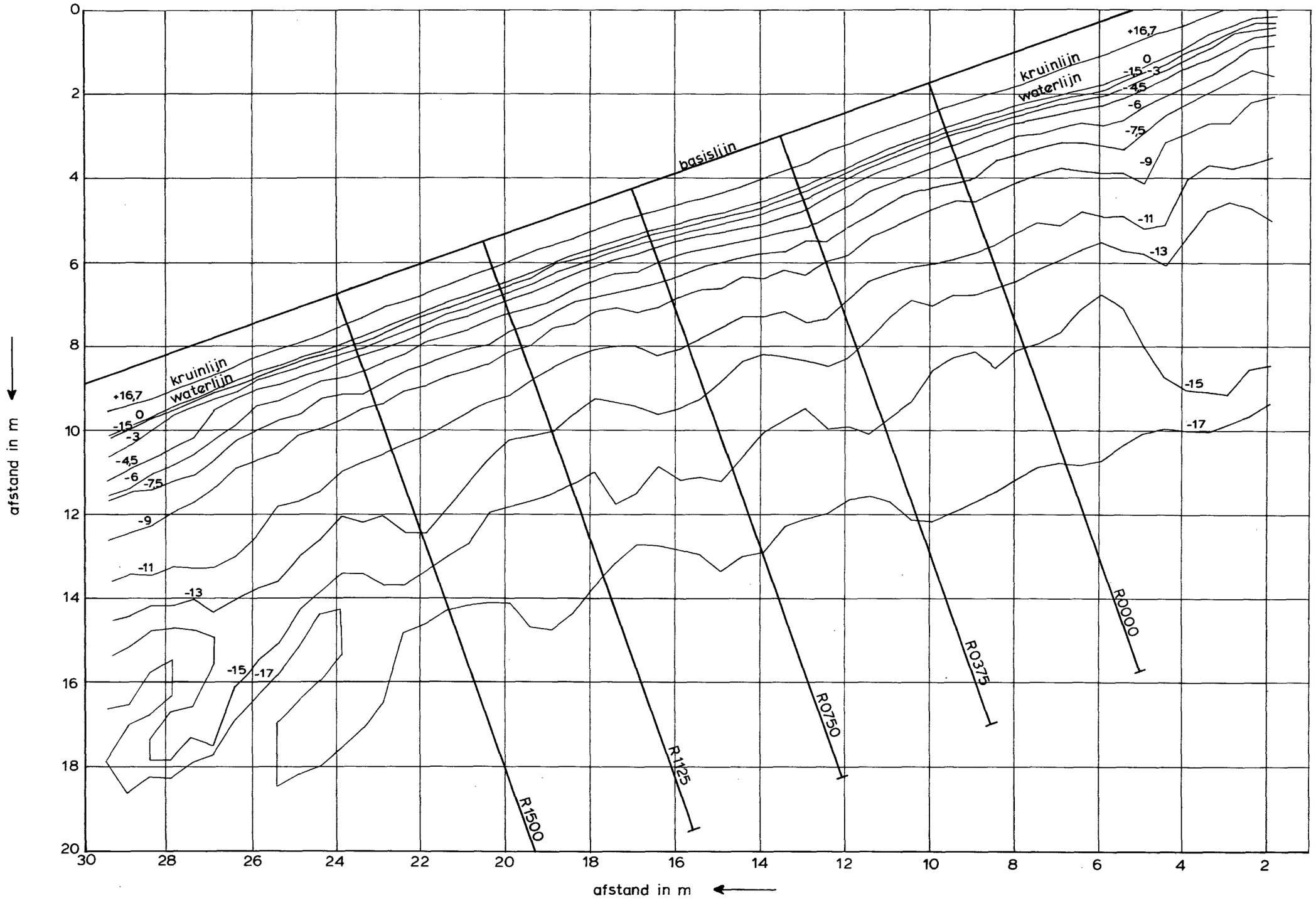
diepten in cm t.o.v. stilwaterniveau

BODEMLIGGING VOOROEVER NA t = 0 uur		P 002
	SCHAAL 1:100	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1653	FIG. 37



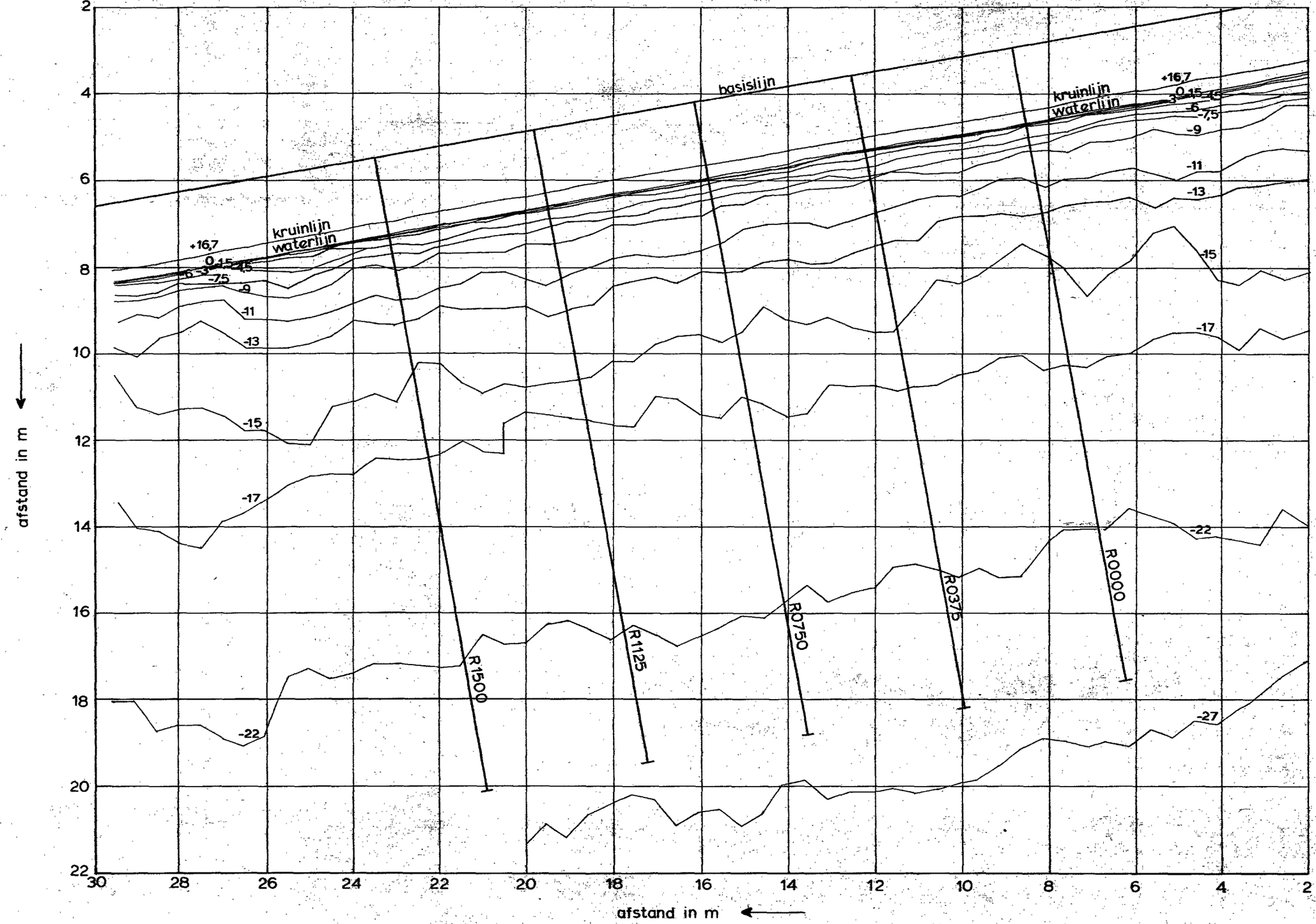
BODEMLIGGING VOOROEVER NA t = 1 uur		P002
	SCHAAL 1:100	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1653	FIG. 38

diepten in cm t.o.v. stilwaterniveau



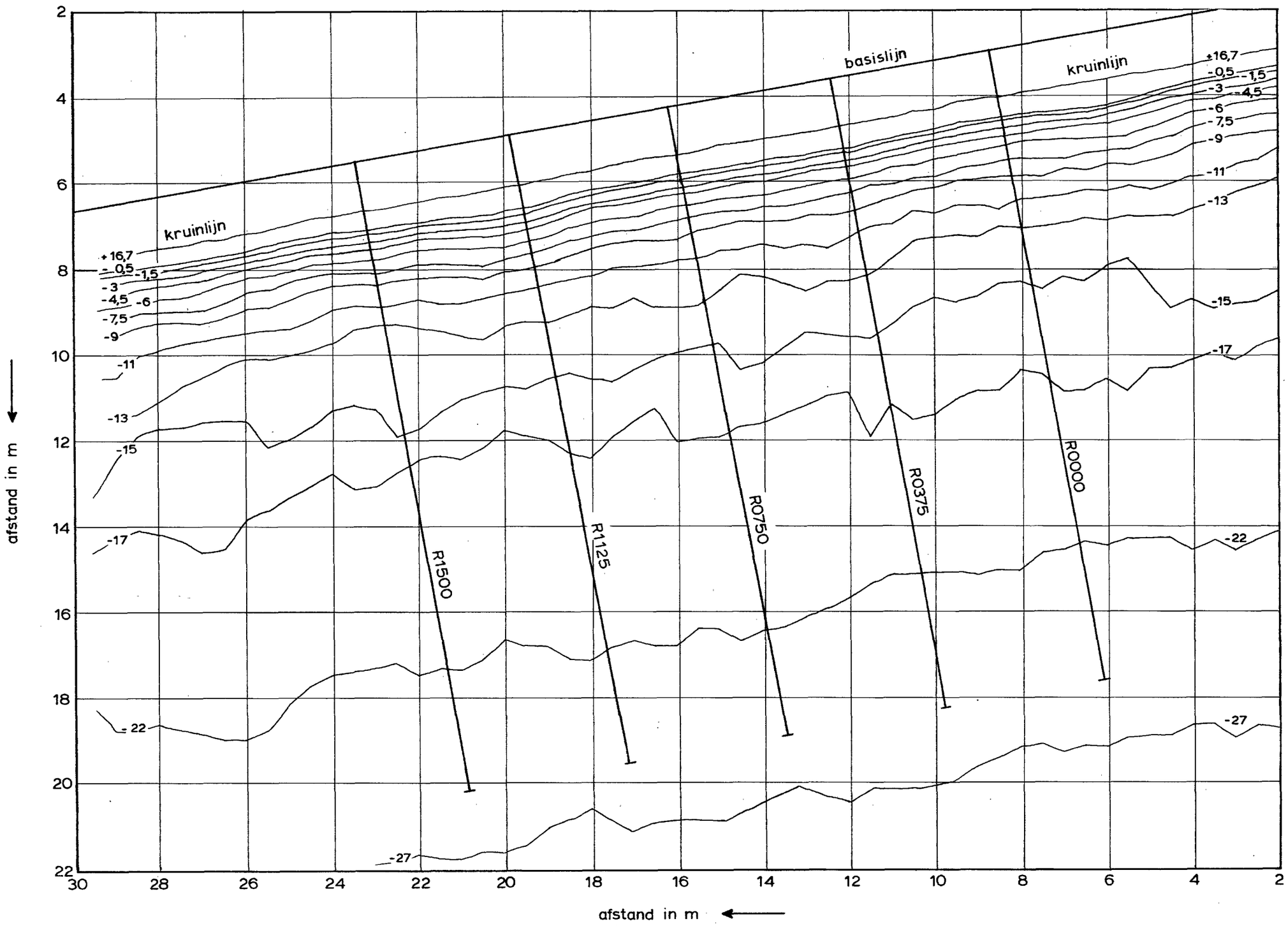
diepten in cm t.o.v. stilwaterniveau

BODEMLIGGING VOOROEVER NA t = 10 uur		P 002
	SCHAAL 1:100	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1653	FIG. 39



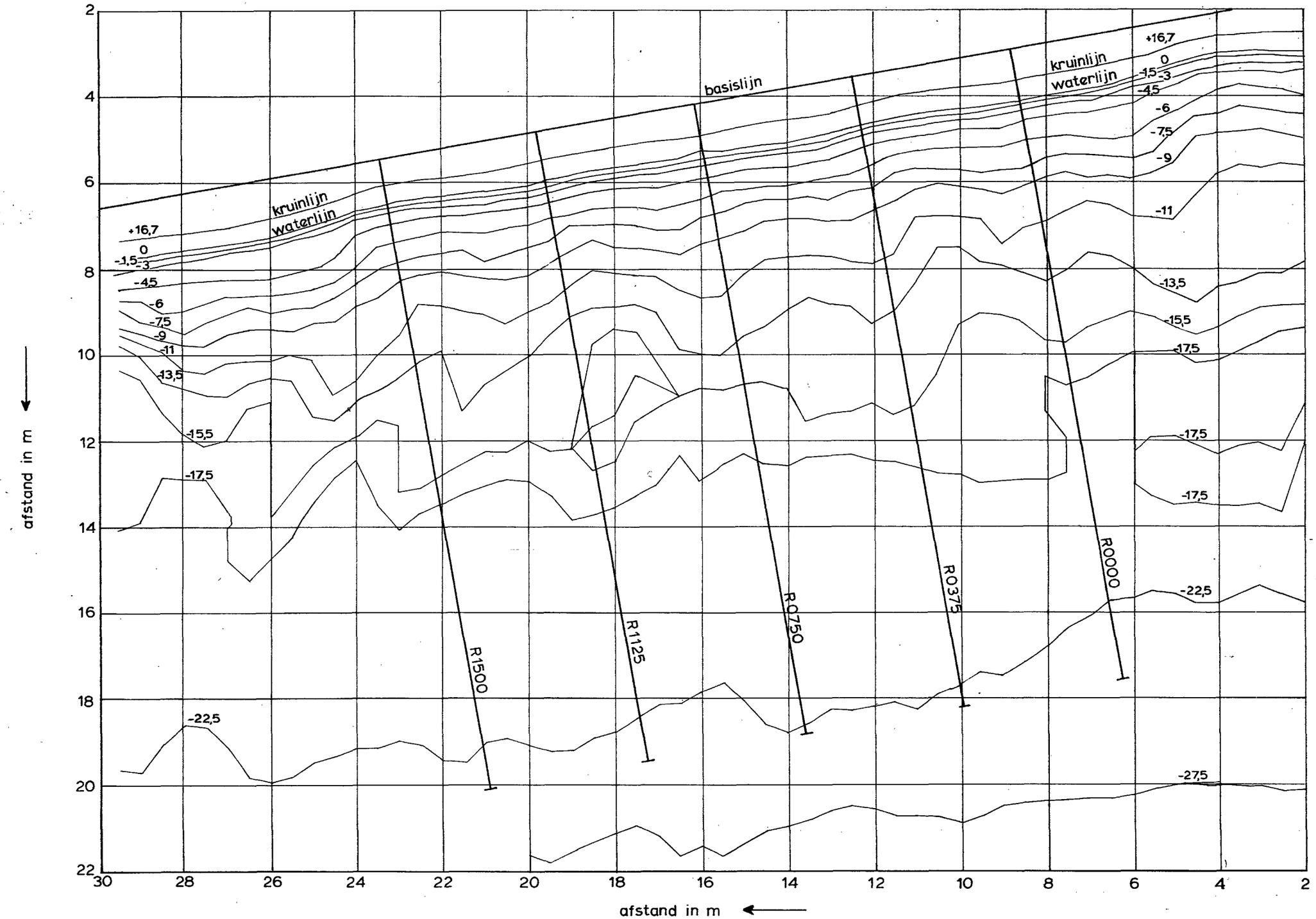
diepten in cm t.o.v. stilwaterniveau

BODEMLIGGING VOOROEVER NA t = 0 uur		P 003
	SCHAAL 1:100	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1653	FIG. 40



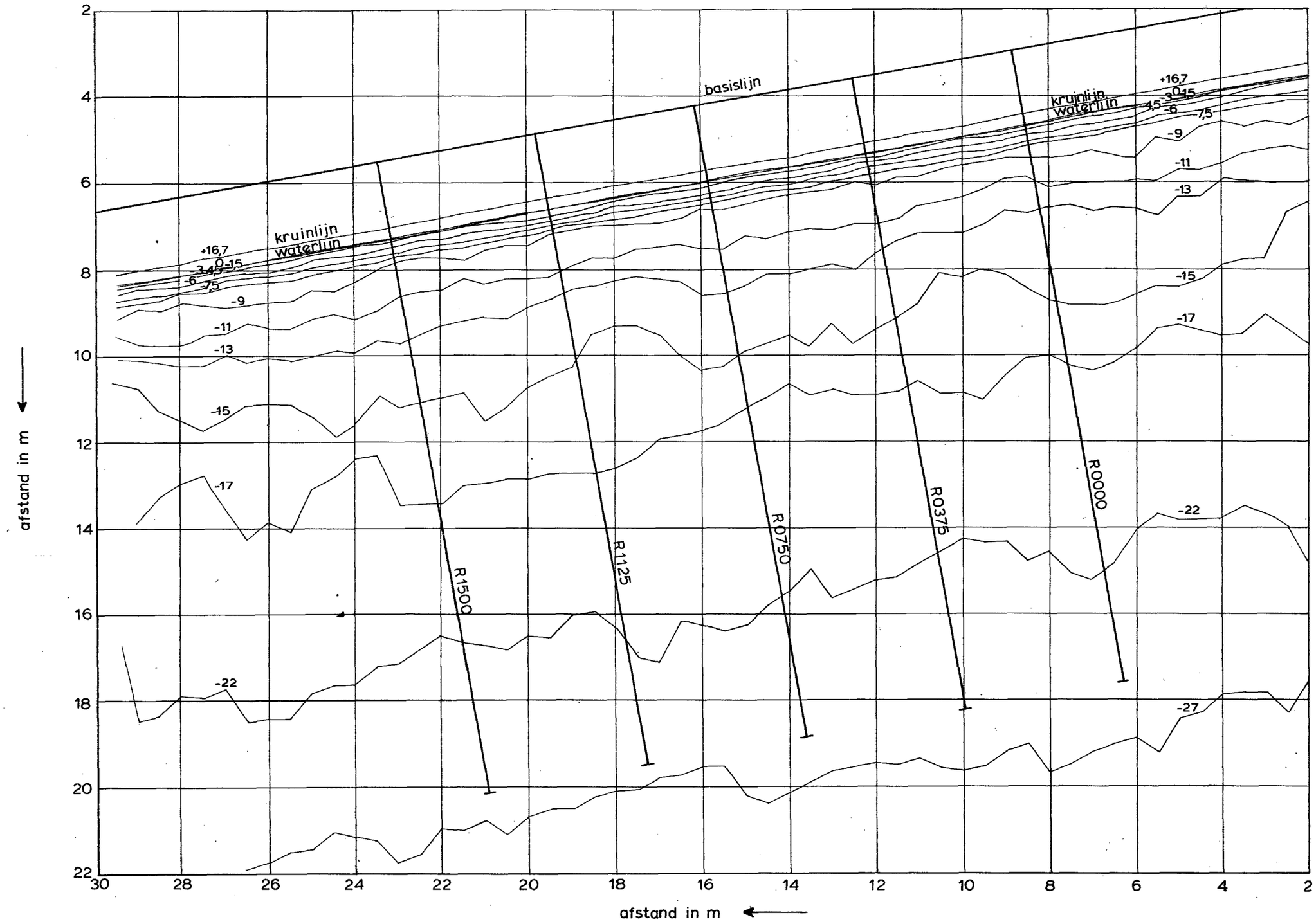
BODEMLIGGING VOOROEVER NA t = 1 uur		P003
	SCHAAL 1:100	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1653	FIG. 41

diepten in cm t.o.v. stilwaterniveau



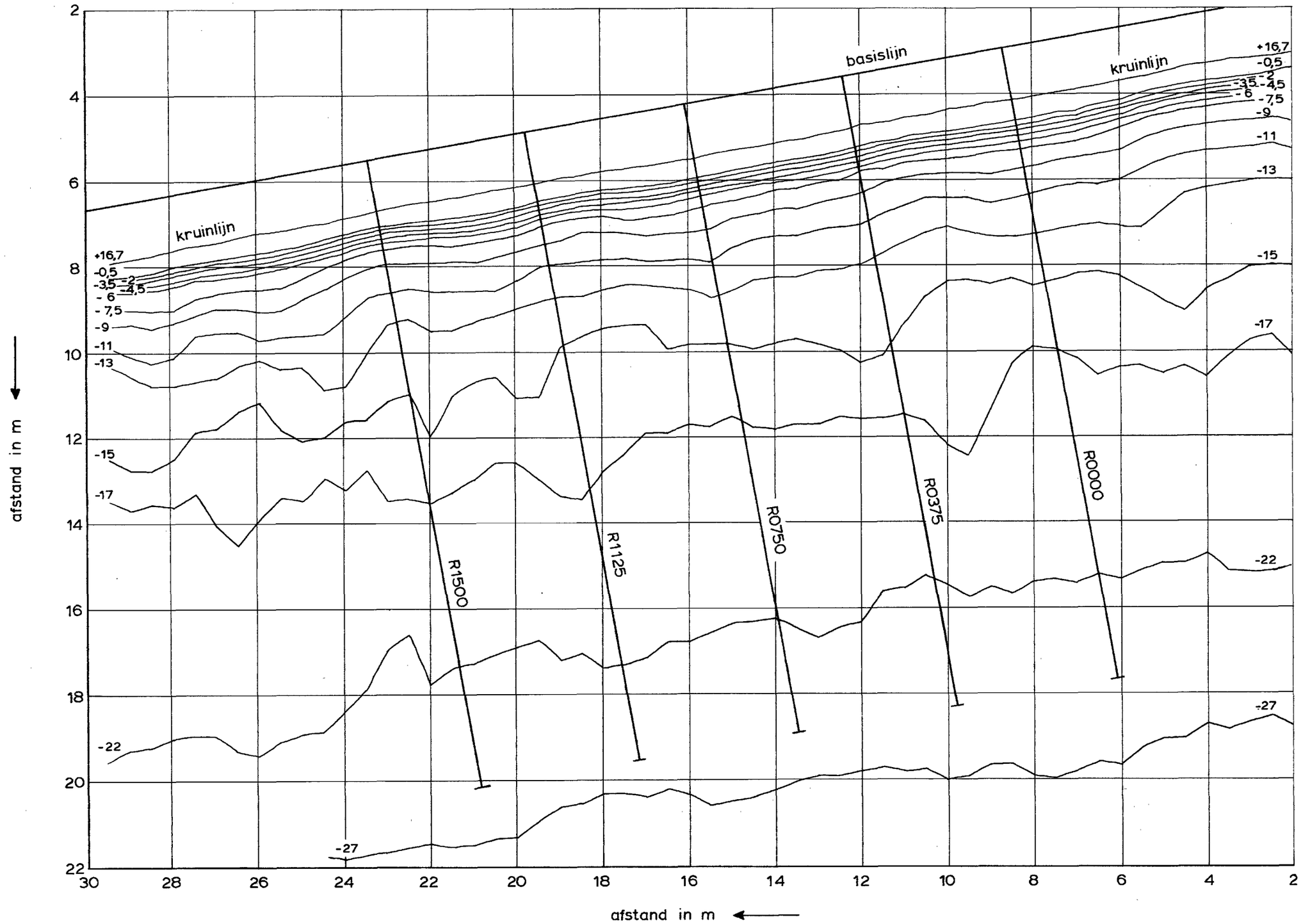
diepten in cm t.o.v. stilwaterniveau

BODEMLIGGING VOOROEVER NA t = 10 uur		P 003
	SCHAAL 1:100	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1653	FIG. 42



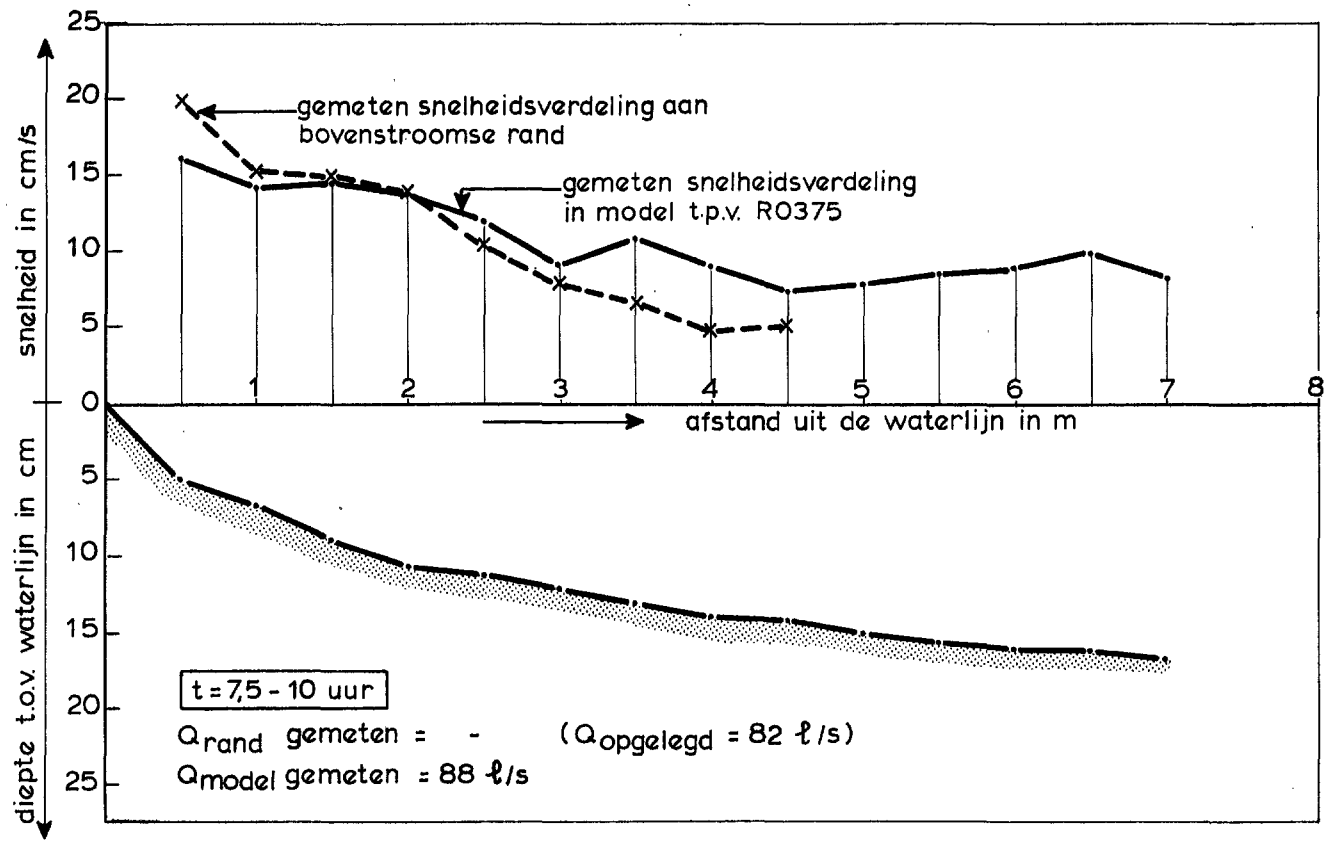
diepten in cm t.o.v. max. stilwaterniveau

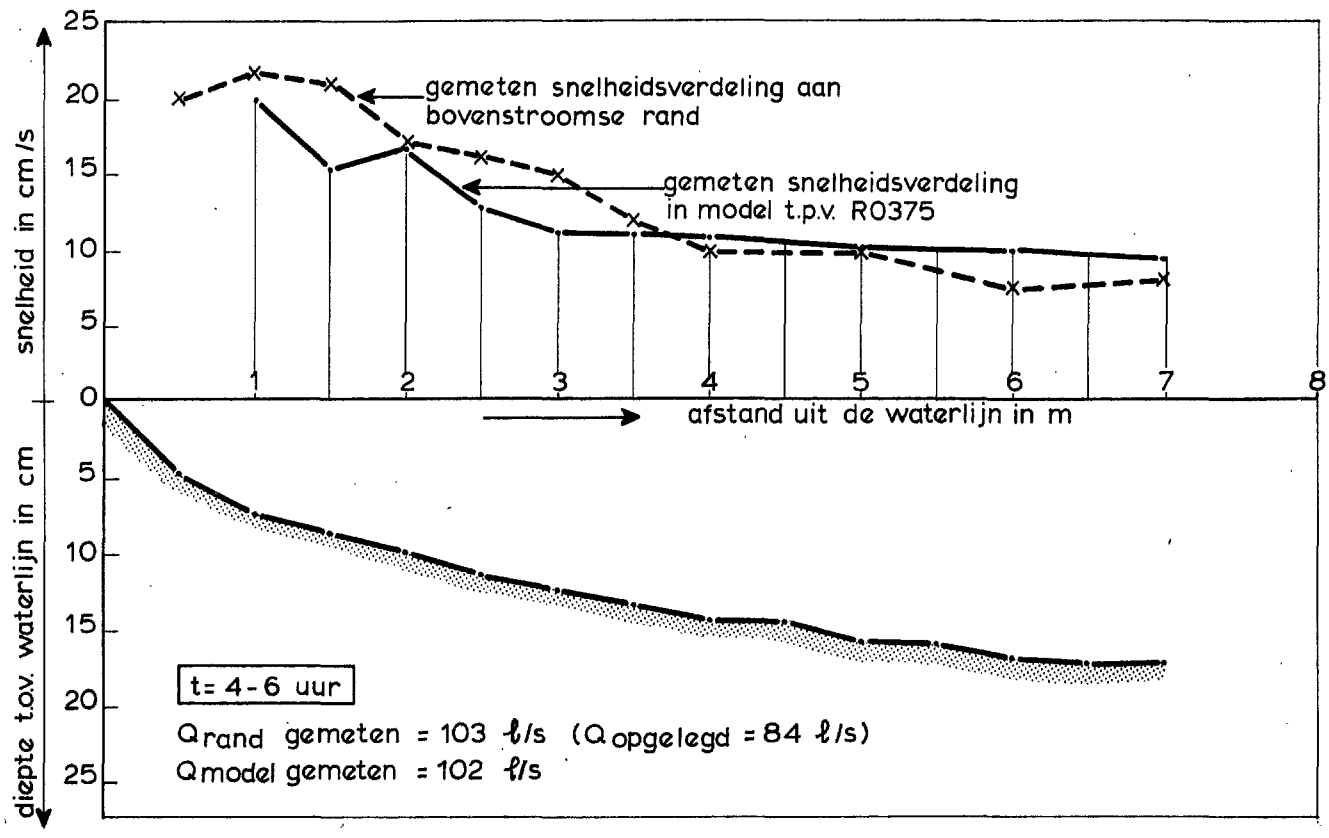
BODEMLIGGING VOOROEVER NA t = 0 uur		P 004
	SCHAAL 1:100	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1653	FIG. 43



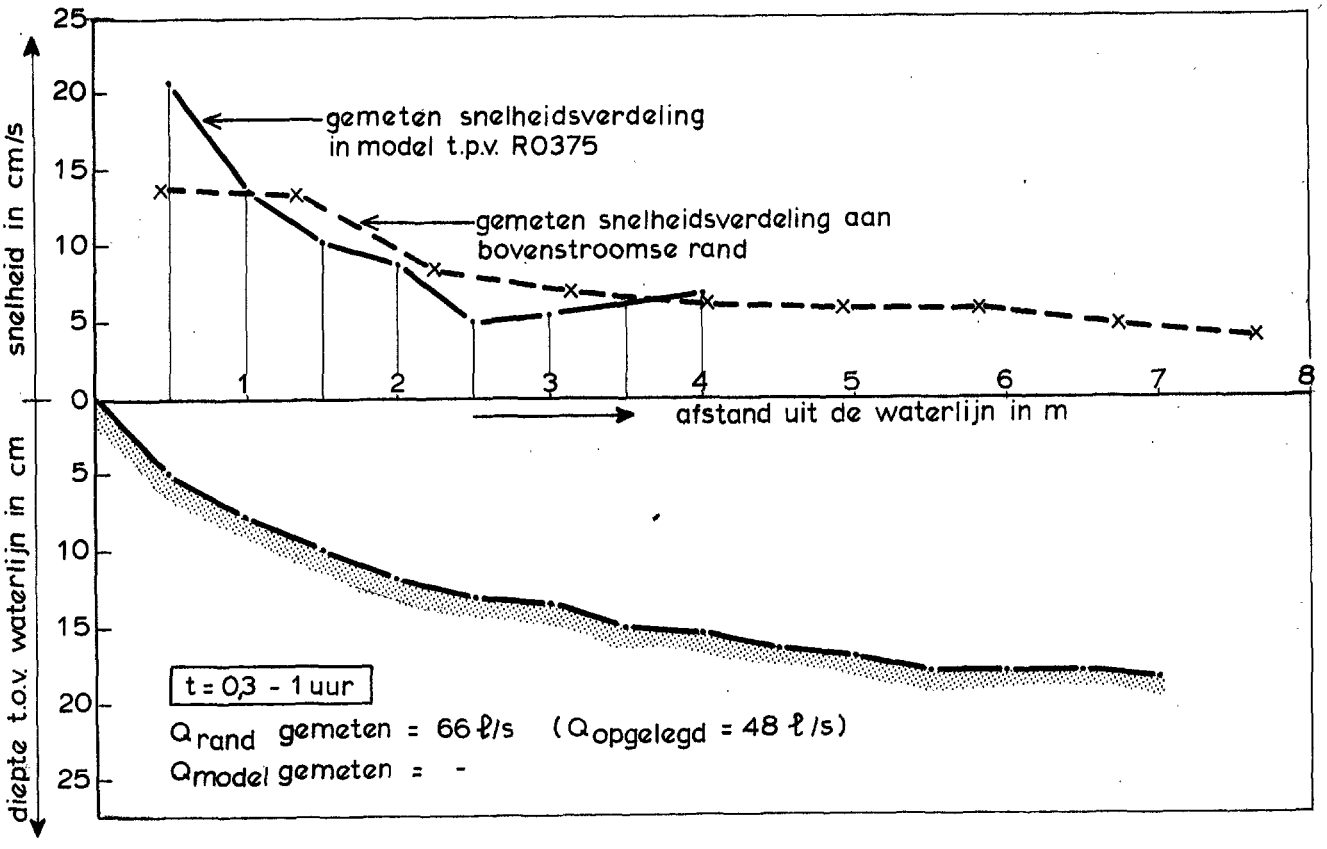
BODEMLIGGING VOOROEVER NA t = 4,1 uur		P004
	SCHAAL 1:100	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1653	FIG. 44

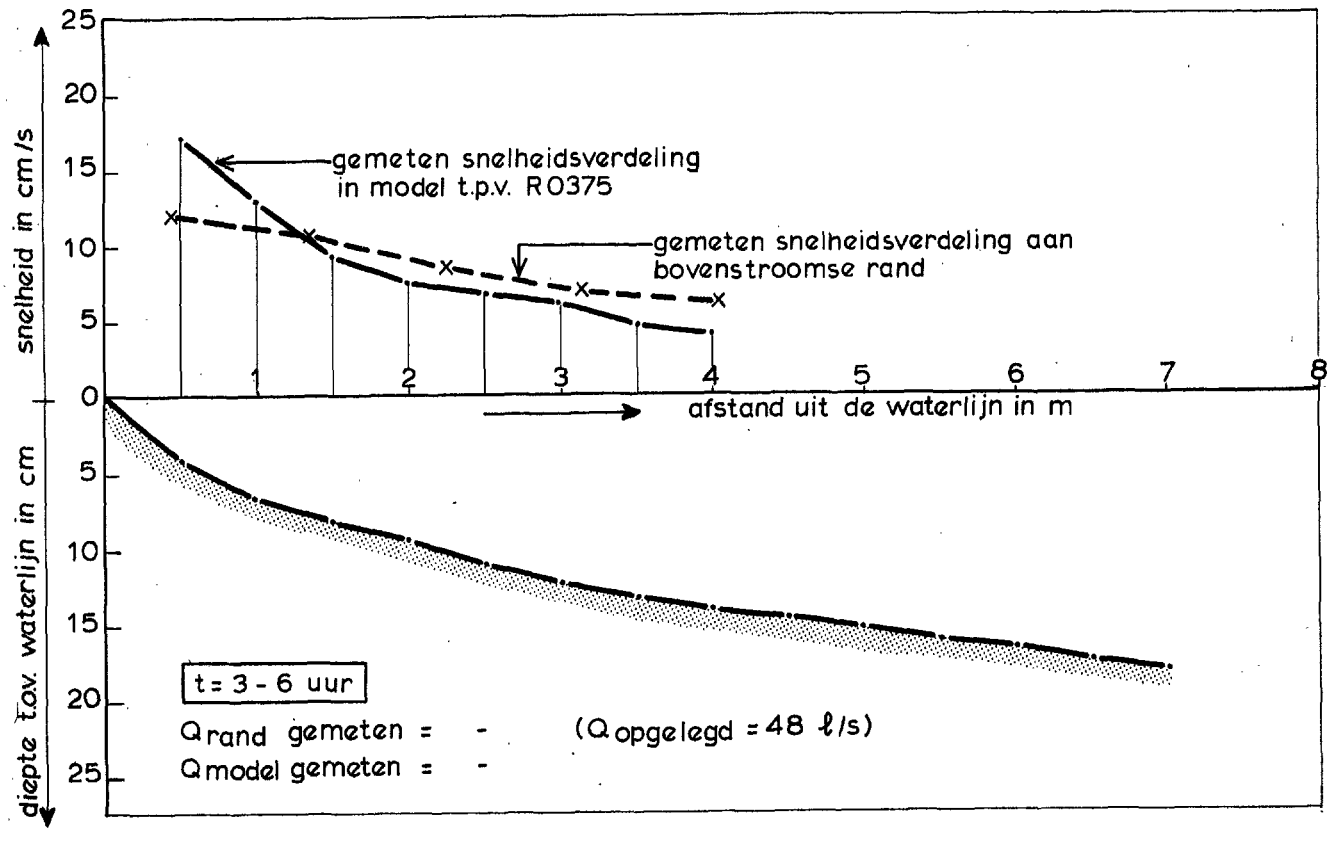
diepten in cm t.o.v. max. stilwaterniveau



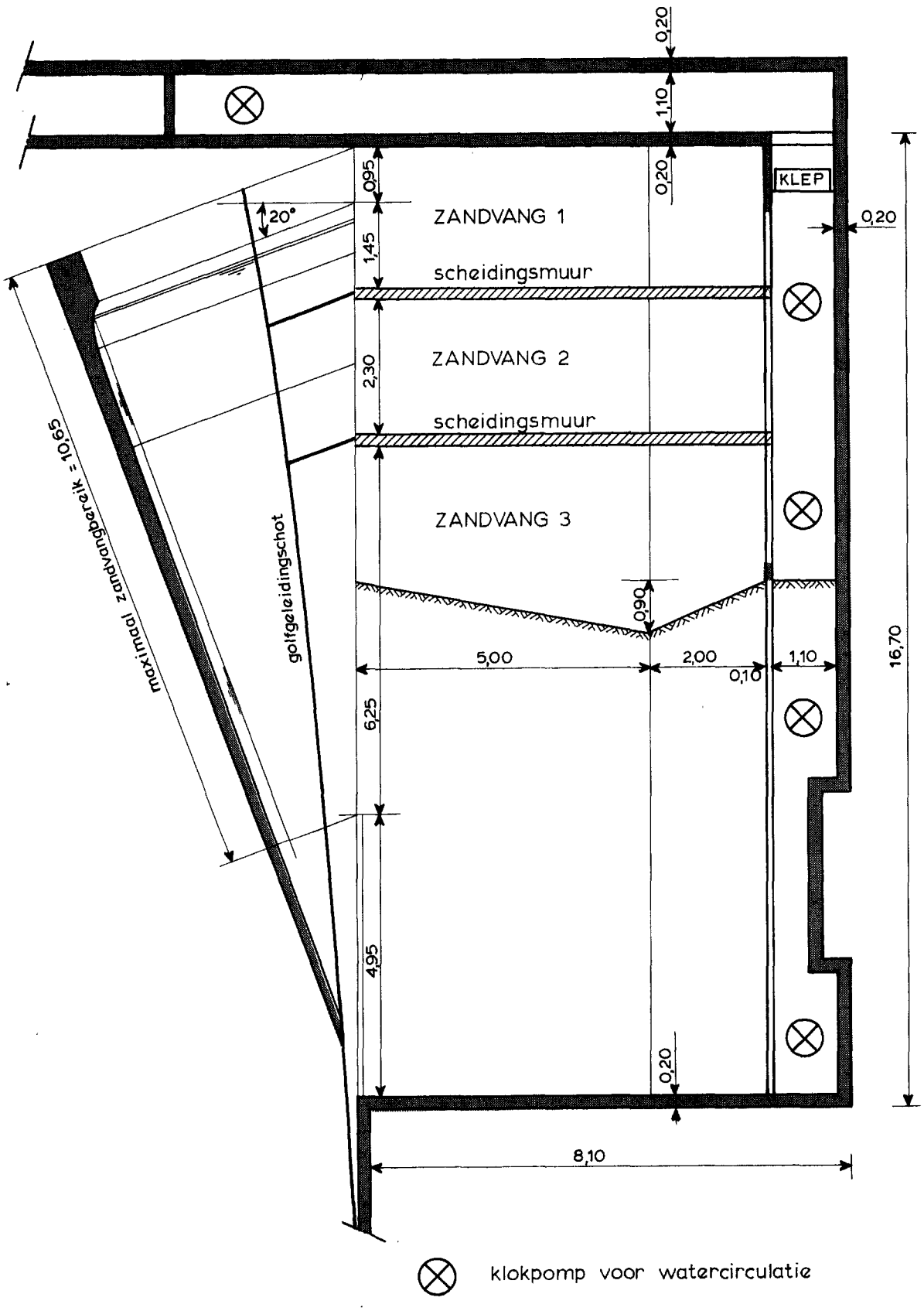


SNELHEIDSVERDELING LANGSSTROOM		P002
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1653	FIG. 45



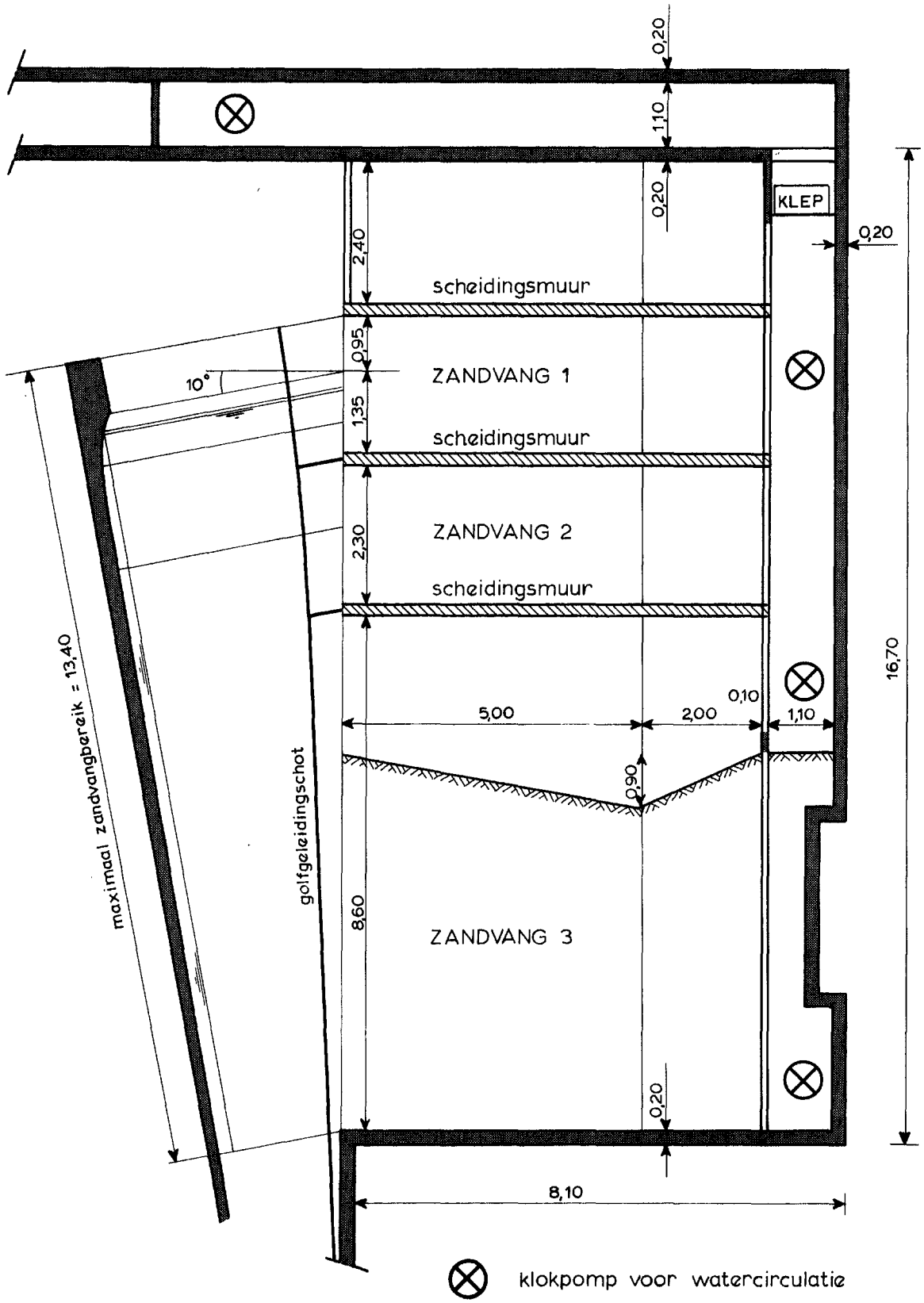


SNELHEIDSVERDELING LANGSSTROOM		P003
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1653	FIG. 46



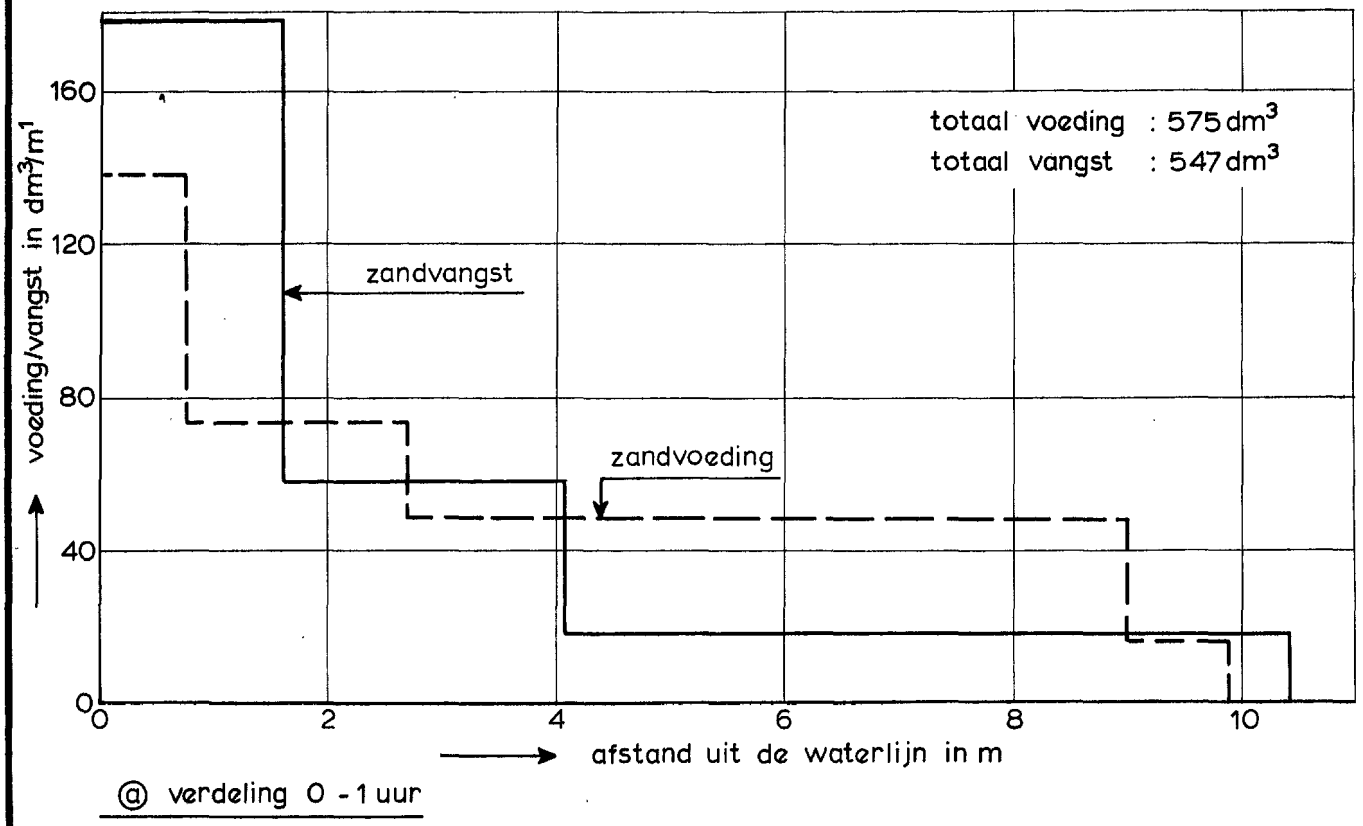
maten in m

INDELING ZANDVANG BIJ SCHUINE GOLFINVAL 20°		P 002
		SCHAAL 1:100
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1653	FIG. 47

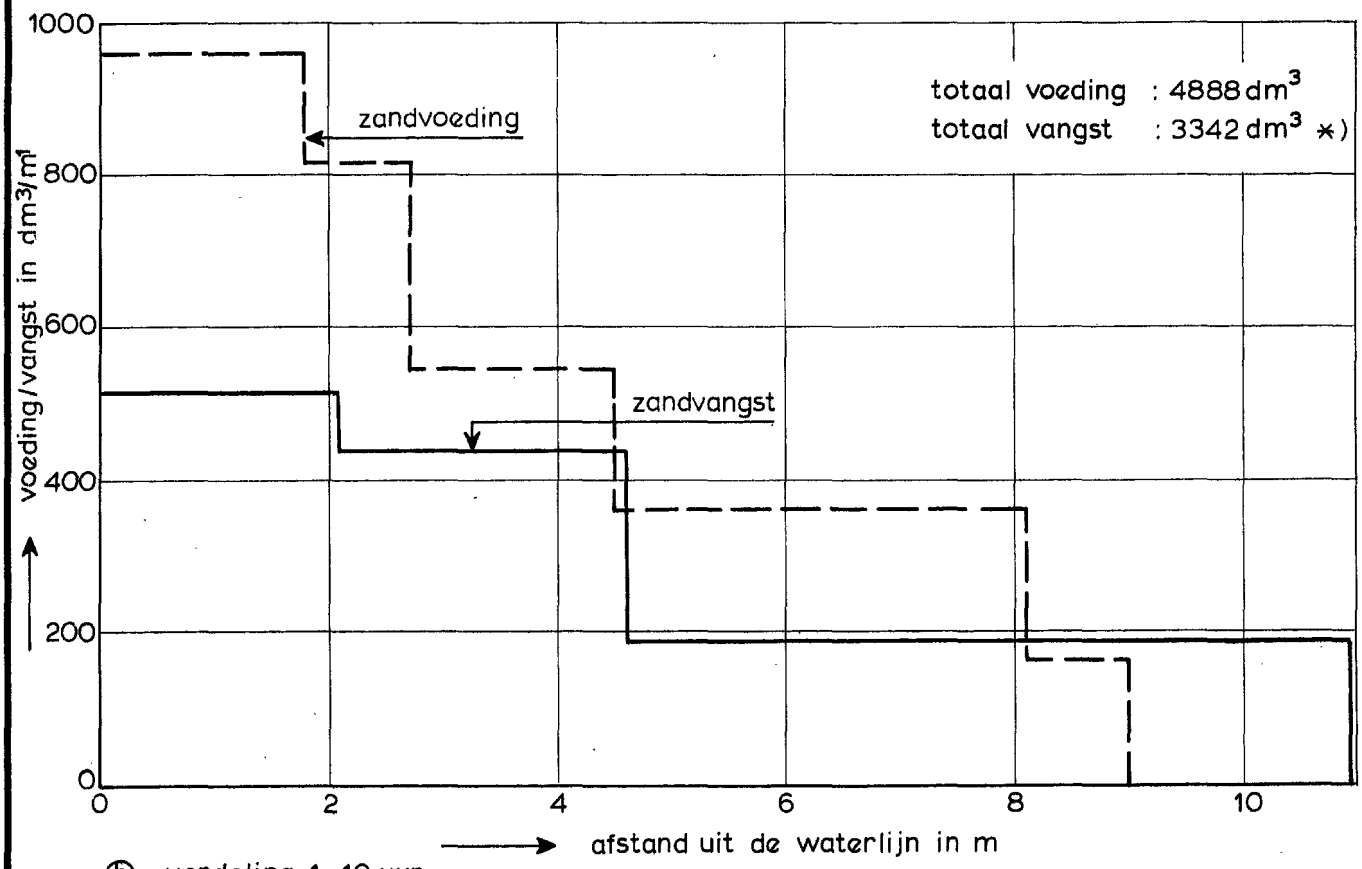


maten in m

INDELING ZANDVANG BIJ SCHUINE GOLFINVAL 10°		P003 P004
	SCHAAL 1 : 100	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1653	FIG. 48



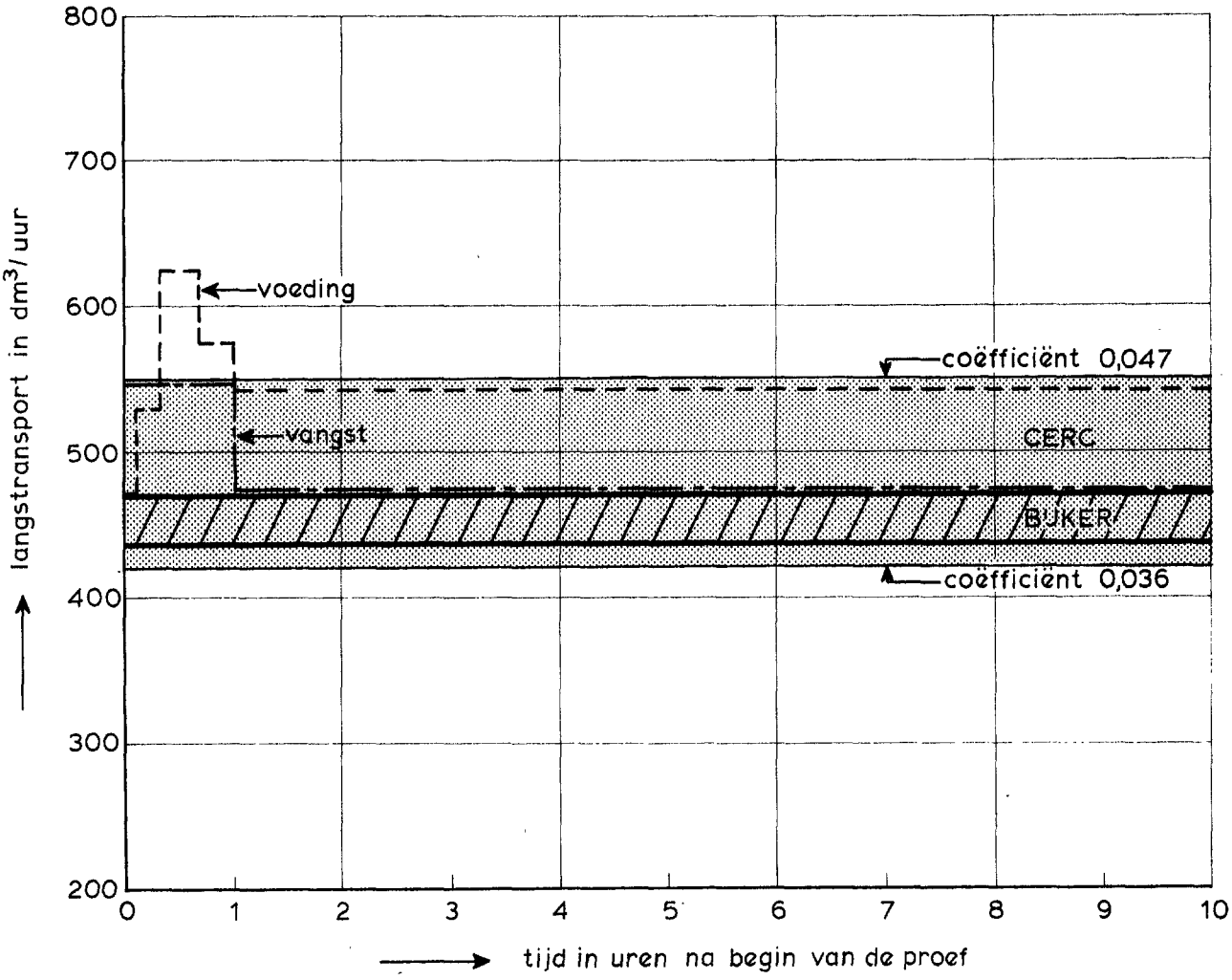
ⓐ verdeling 0 - 1 uur



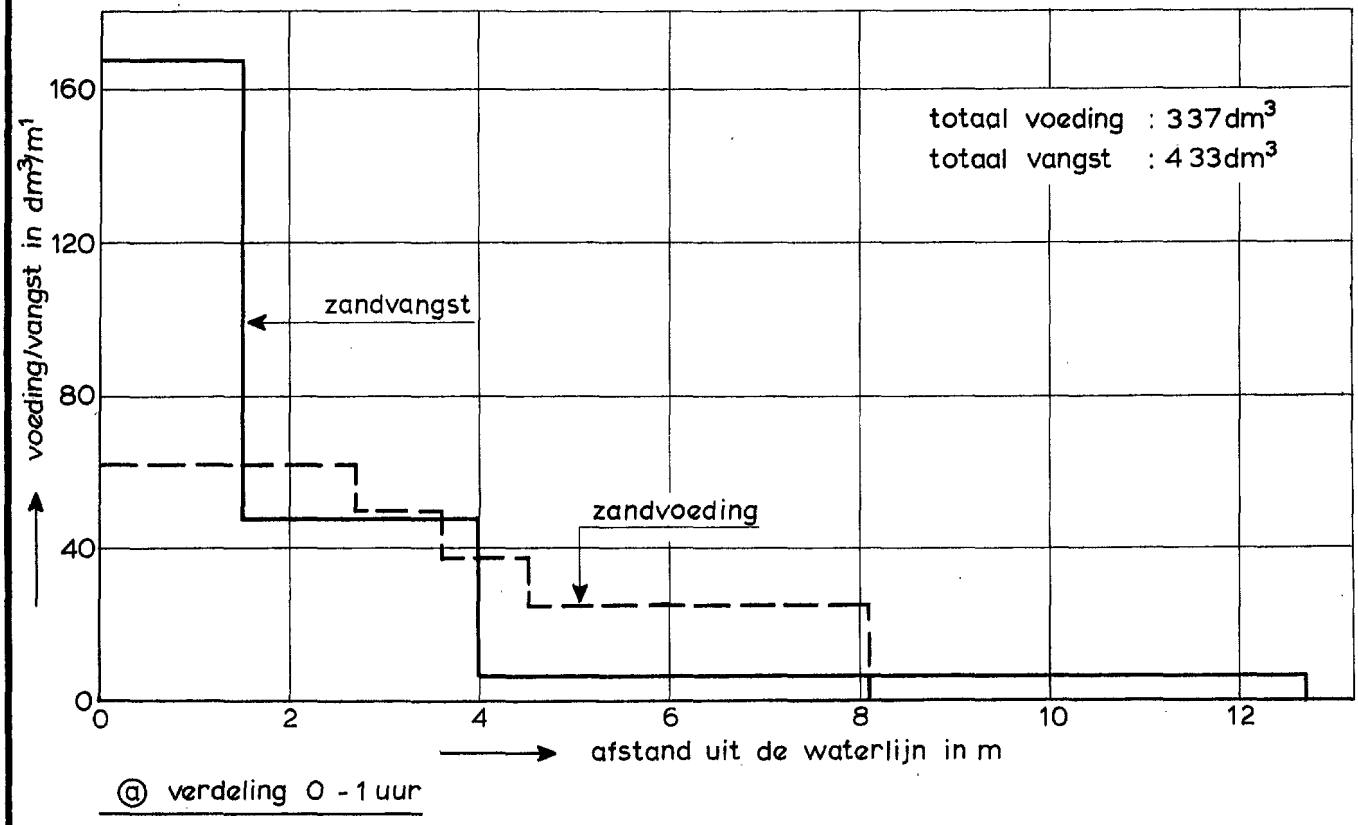
ⓑ verdeling 1 - 10 uur

*) N.B. zandvang over ca. 4,50 m geblokkeerd ; gecorrigeerde vangst ca. 4250 dm³

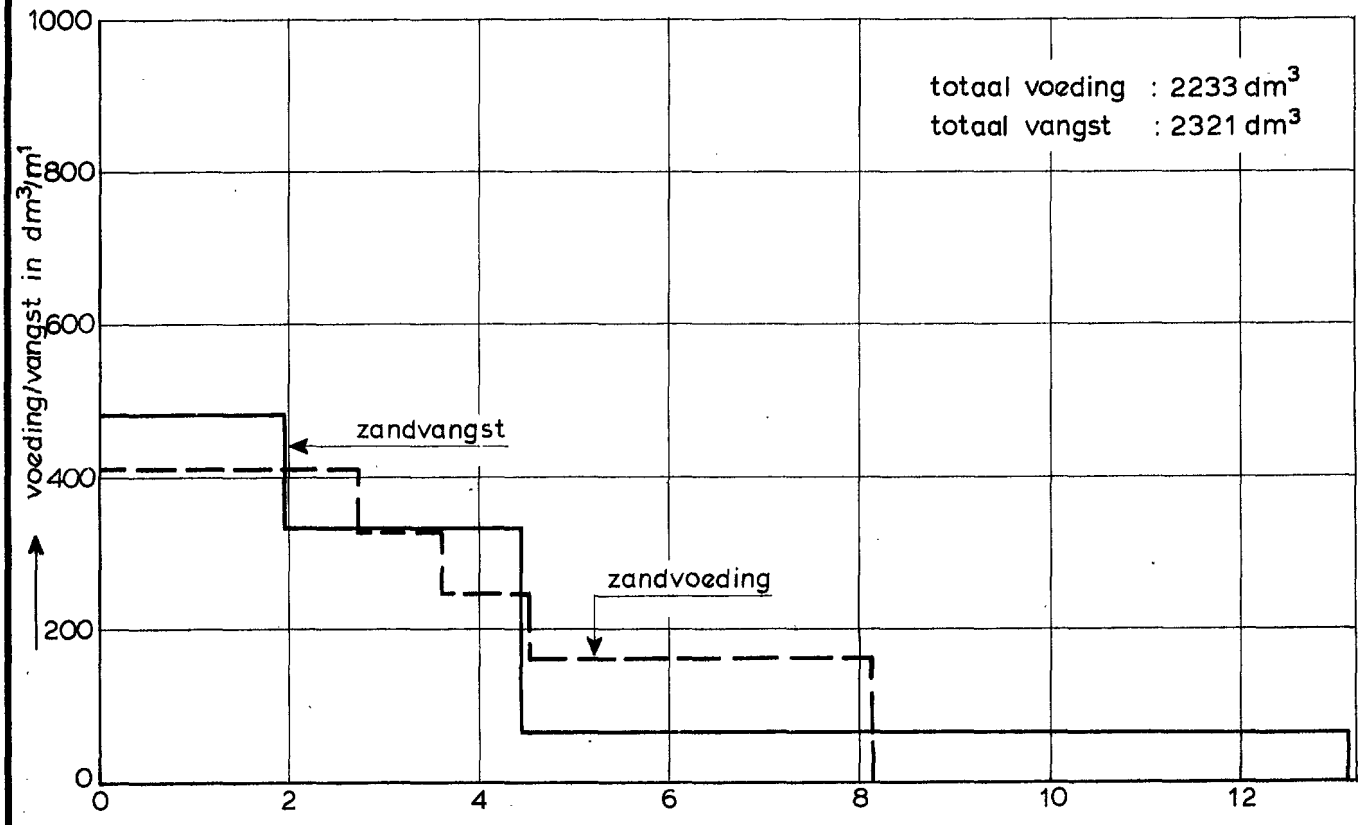
VERDELING ZANDVOEDING EN ZANDVANGST		P 002
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1653	FIG. 49



LANGSTRANSPORT		P002
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1653	FIG. 50

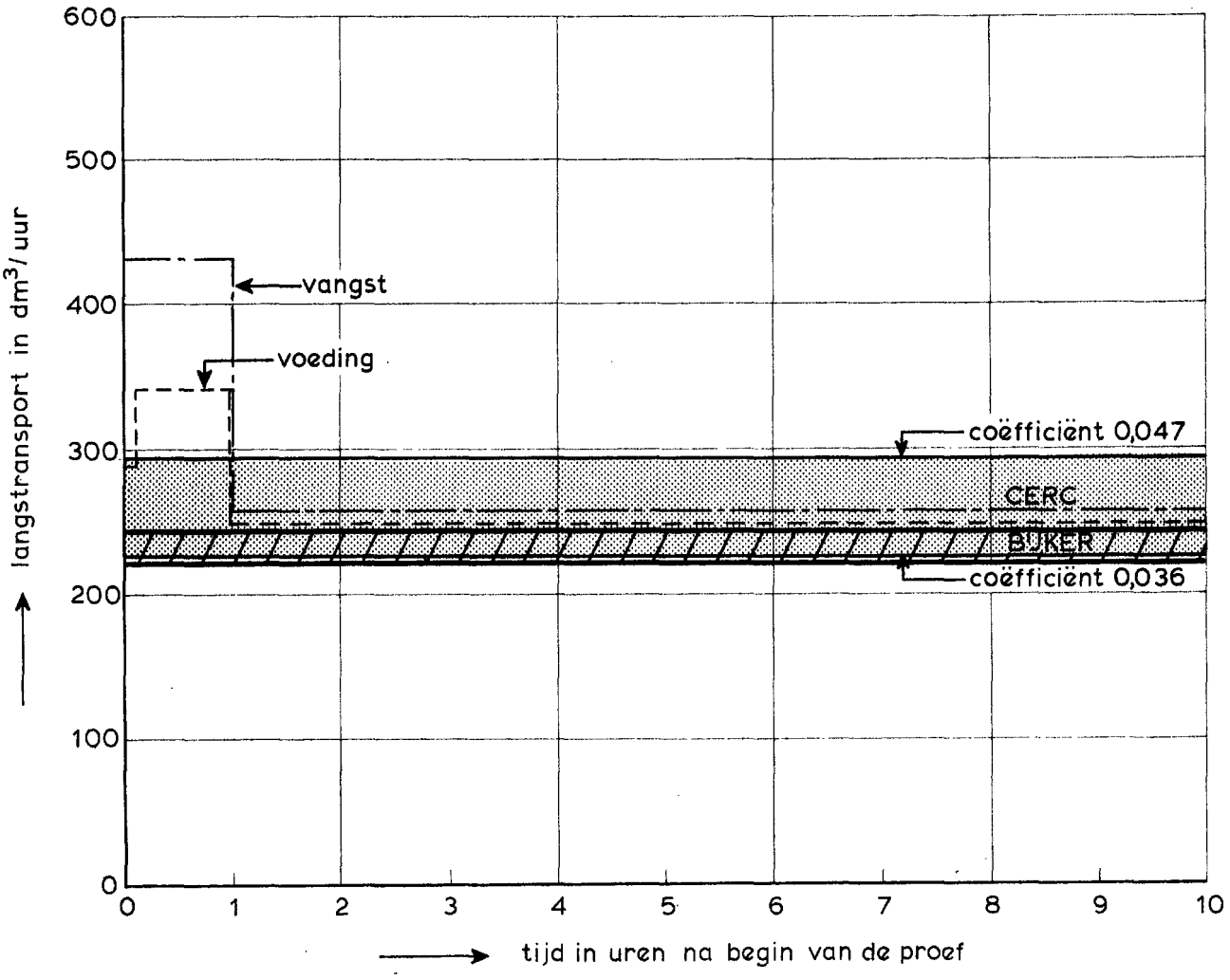


ⓐ verdeling 0 - 1 uur



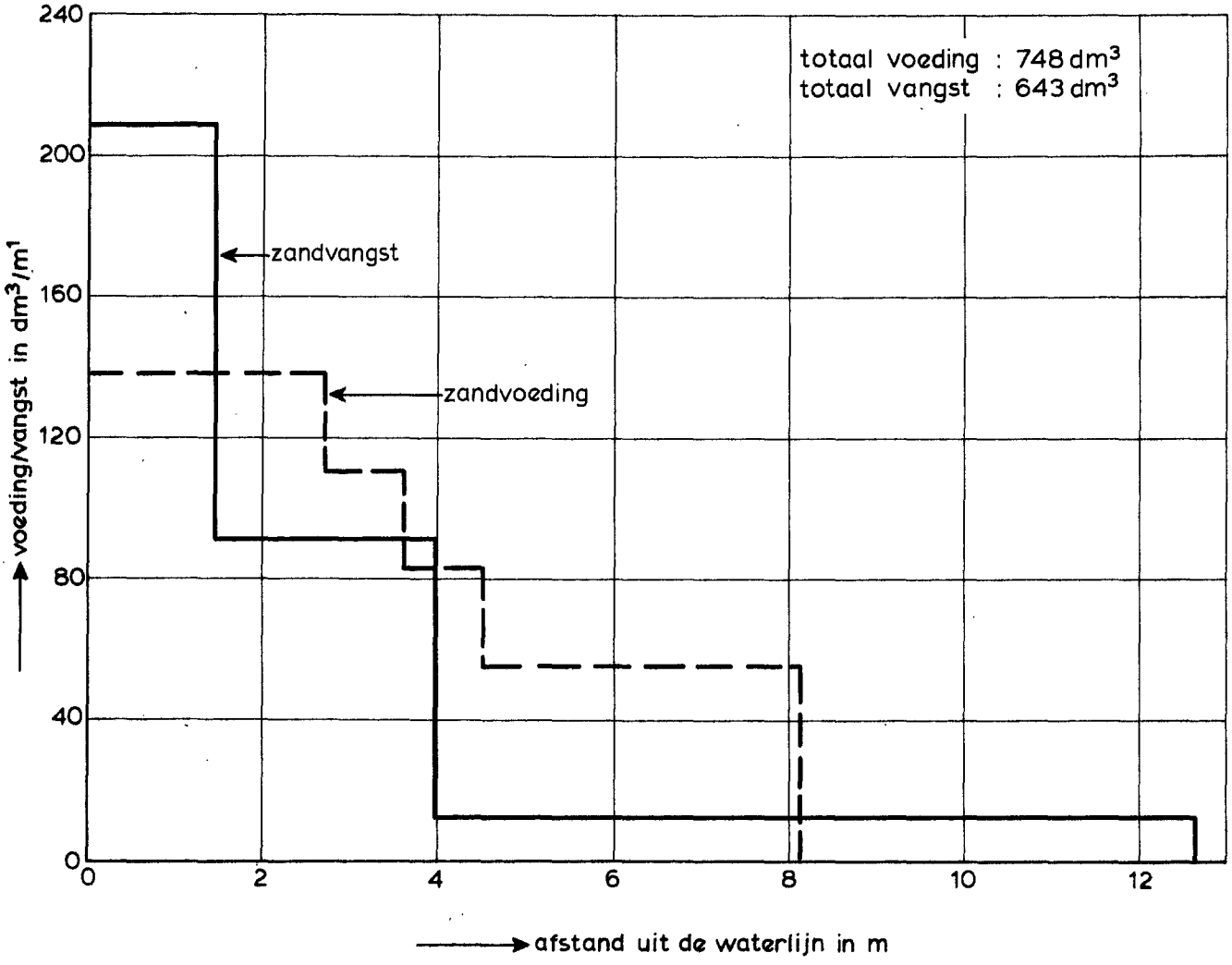
ⓑ verdeling 1 - 10 uur

VERDELING ZANDVOEDING EN ZANDVANGST		P003
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1653	FIG. 51



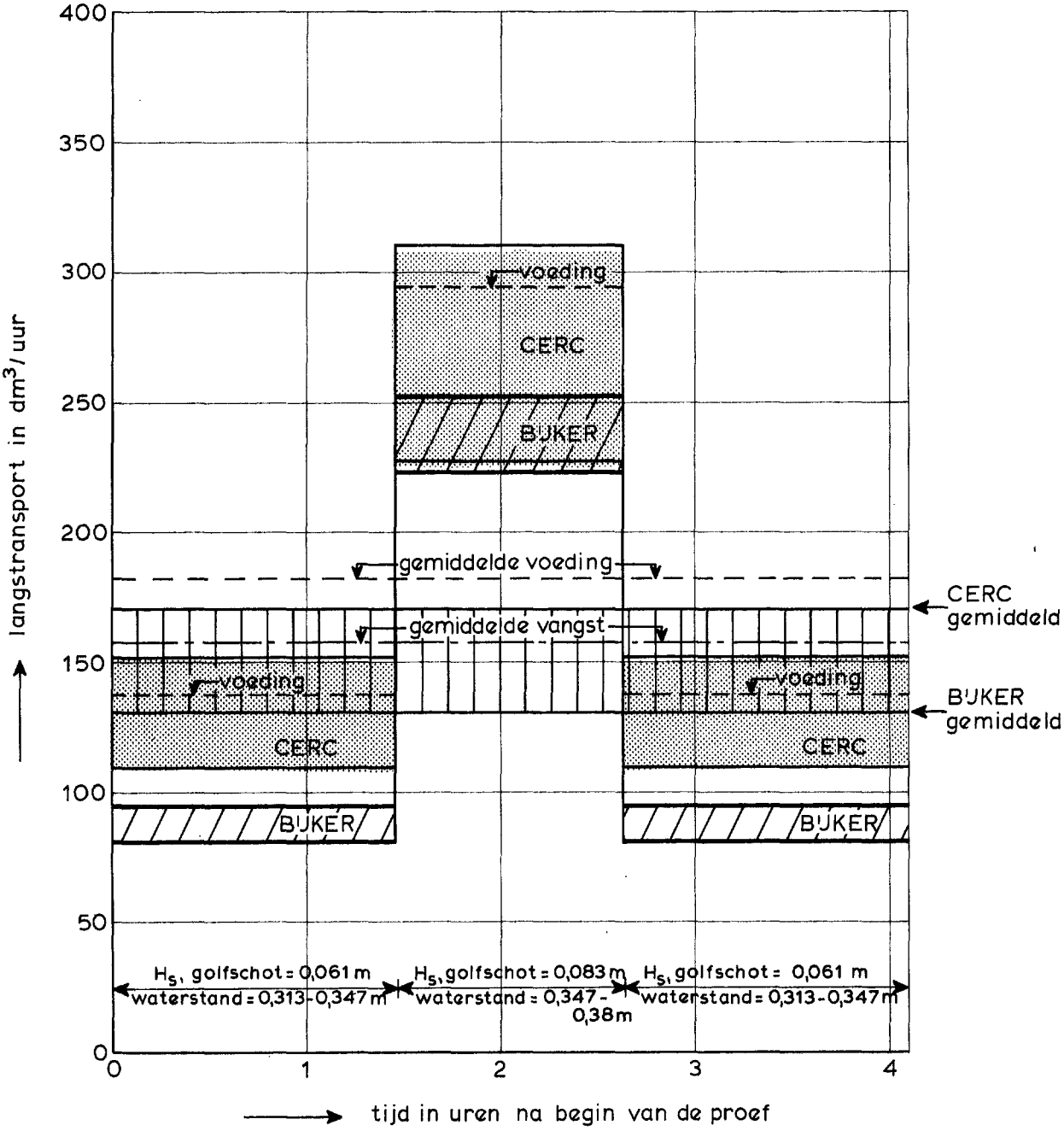
LANGSTRANSPORT		P003
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1653	FIG. 52

totaal voeding : 748 dm³
totaal vangst : 643 dm³



verdeling 0 - 4,1 uur

VERDELING ZANDVOEDING EN ZANDVANGST		P004
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1653	FIG. 53



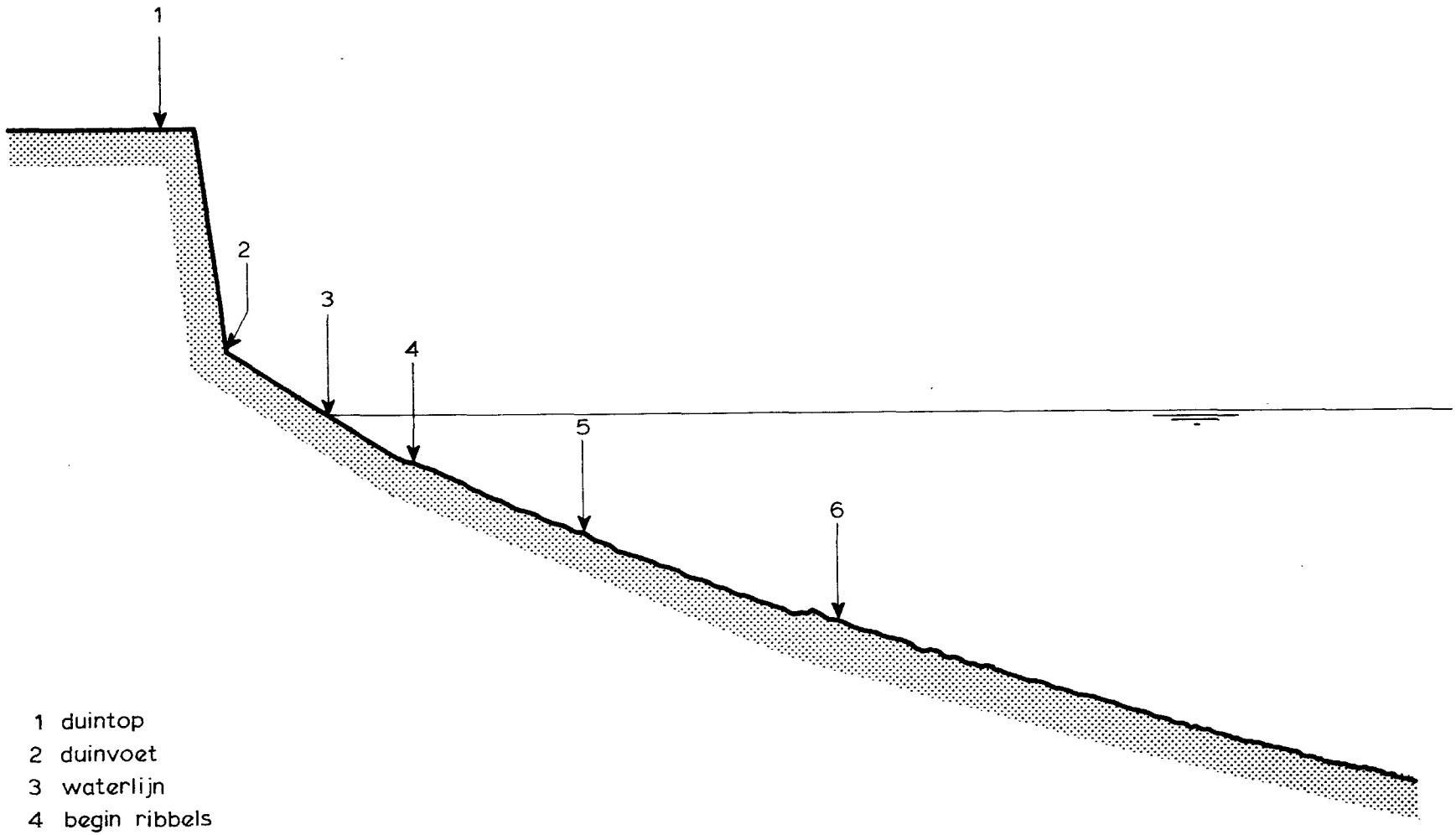
LANGSTRANSPORT		P004
	VARIERENDE WATERSTAND	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1653	FIG. 54

PLAATSEN WAAR DE ZANDMONSTERS ZIJN GENOMEN

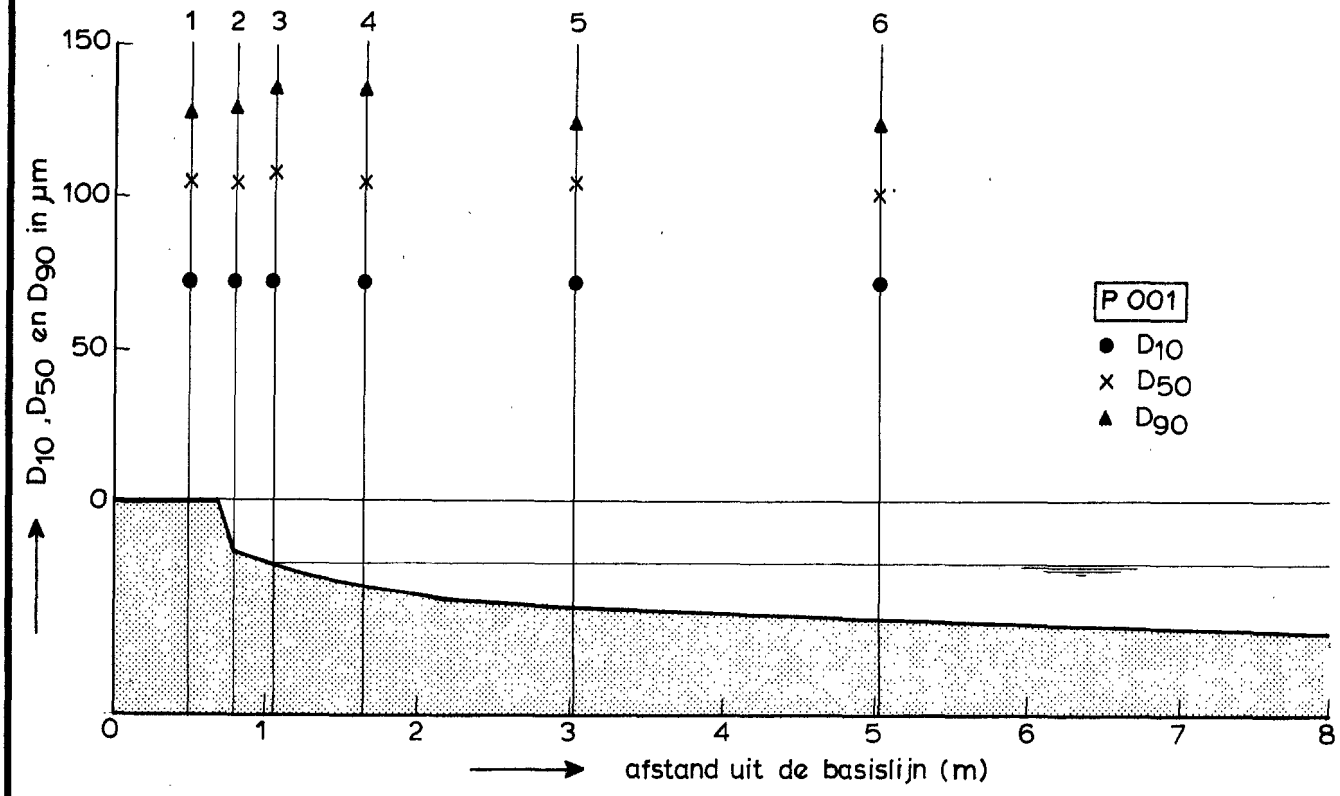
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

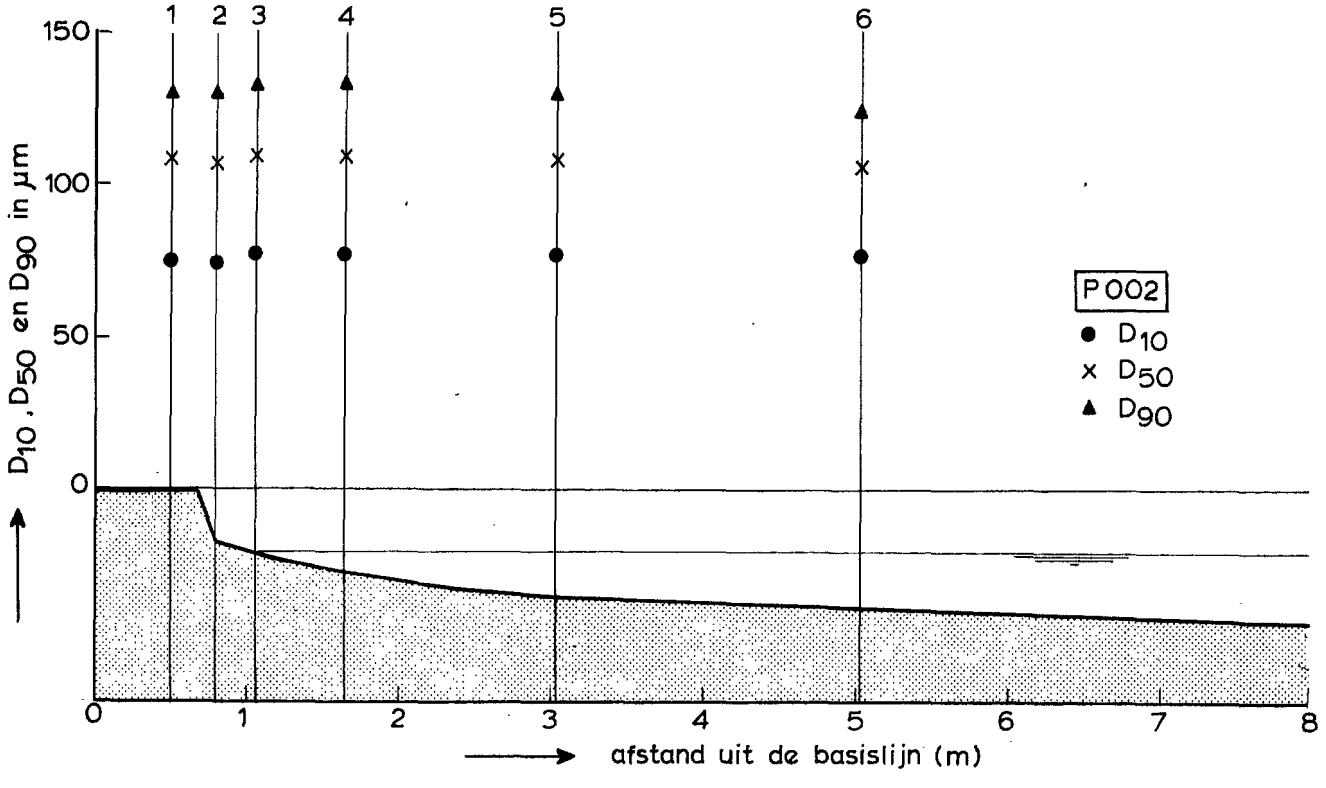
M 1653

FIG. 55

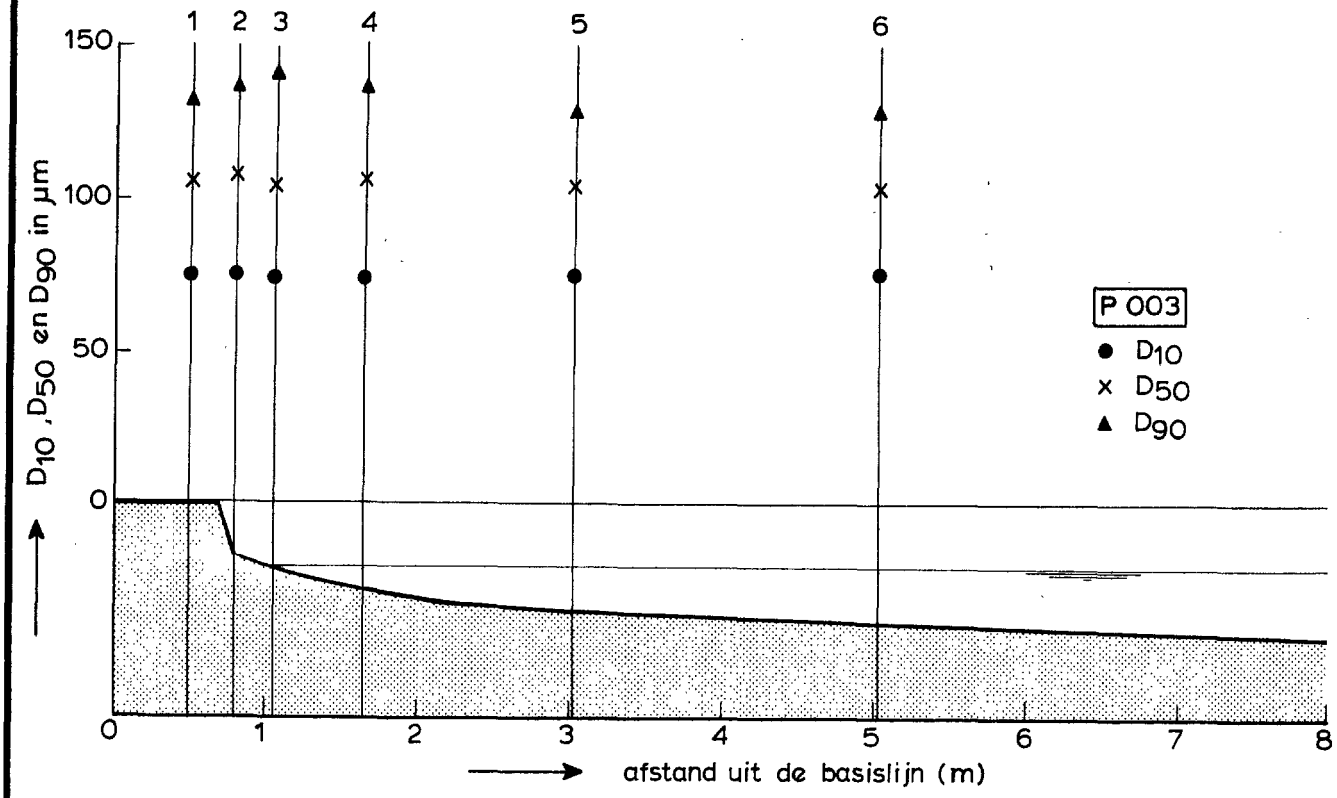


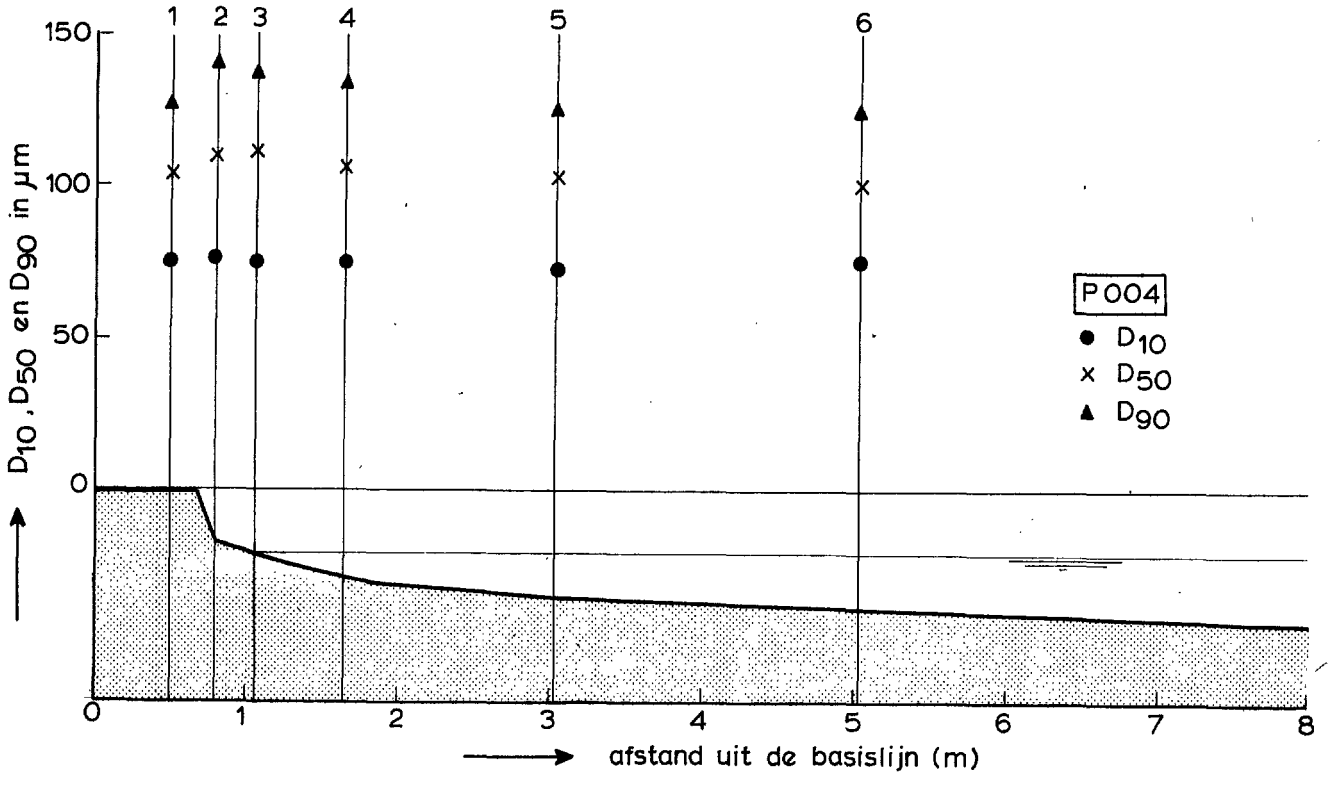
1 duintop
2 duinvoet
3 waterlijn
4 begin ribbels
5 twee meter zeewaarts waterlijn
6 vier meter zeewaarts waterlijn



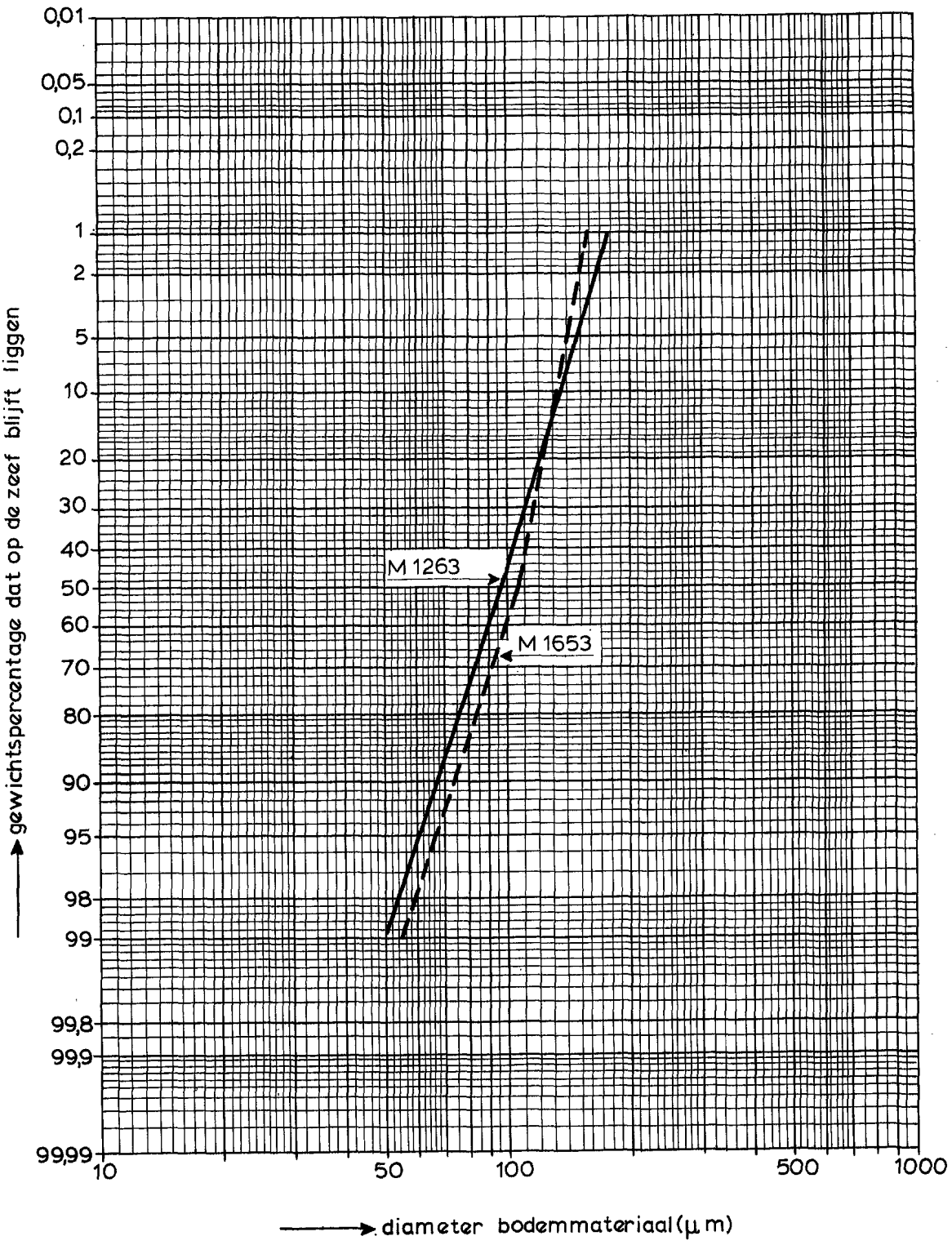


VERLOOP VAN D_{10} , D_{50} EN D_{90}		P 001 P 002
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1653	FIG. 56

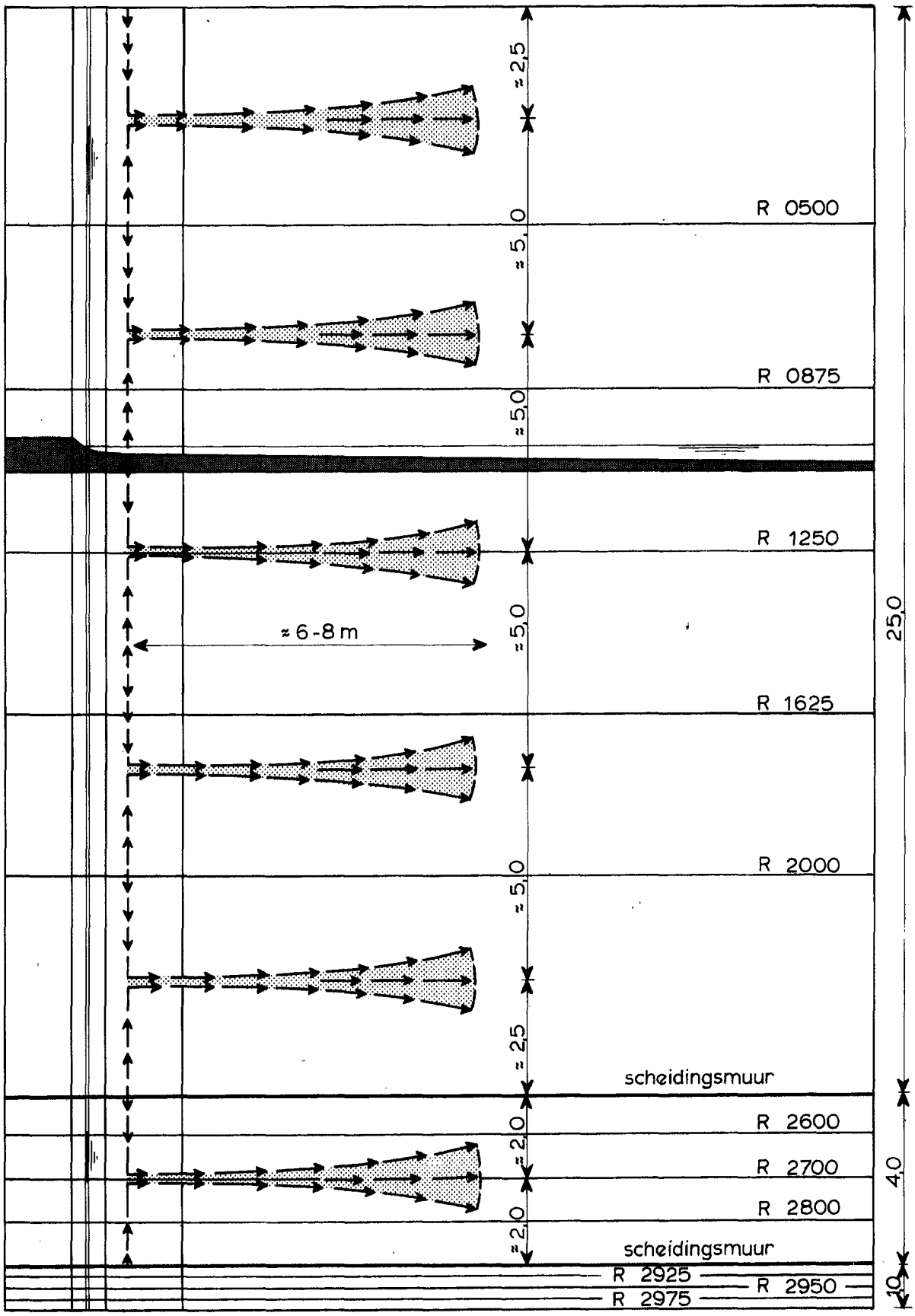




VERLOOP VAN D_{10} , D_{50} EN D_{90}		P003 P004
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1653	FIG. 57

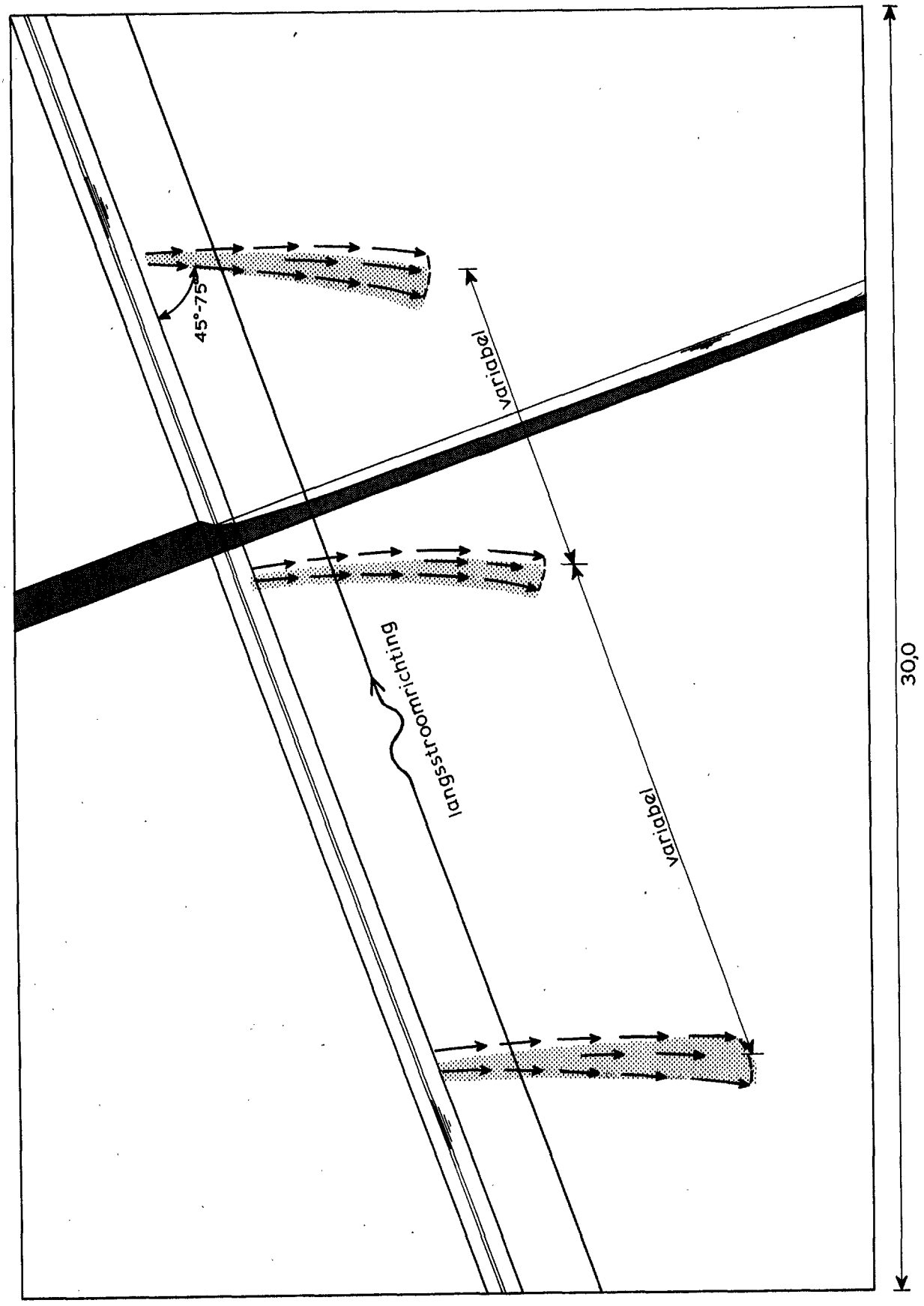


GEMIDDELDE ZEEFKROMME		
	ASSERZAND	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1653	FIG. 58



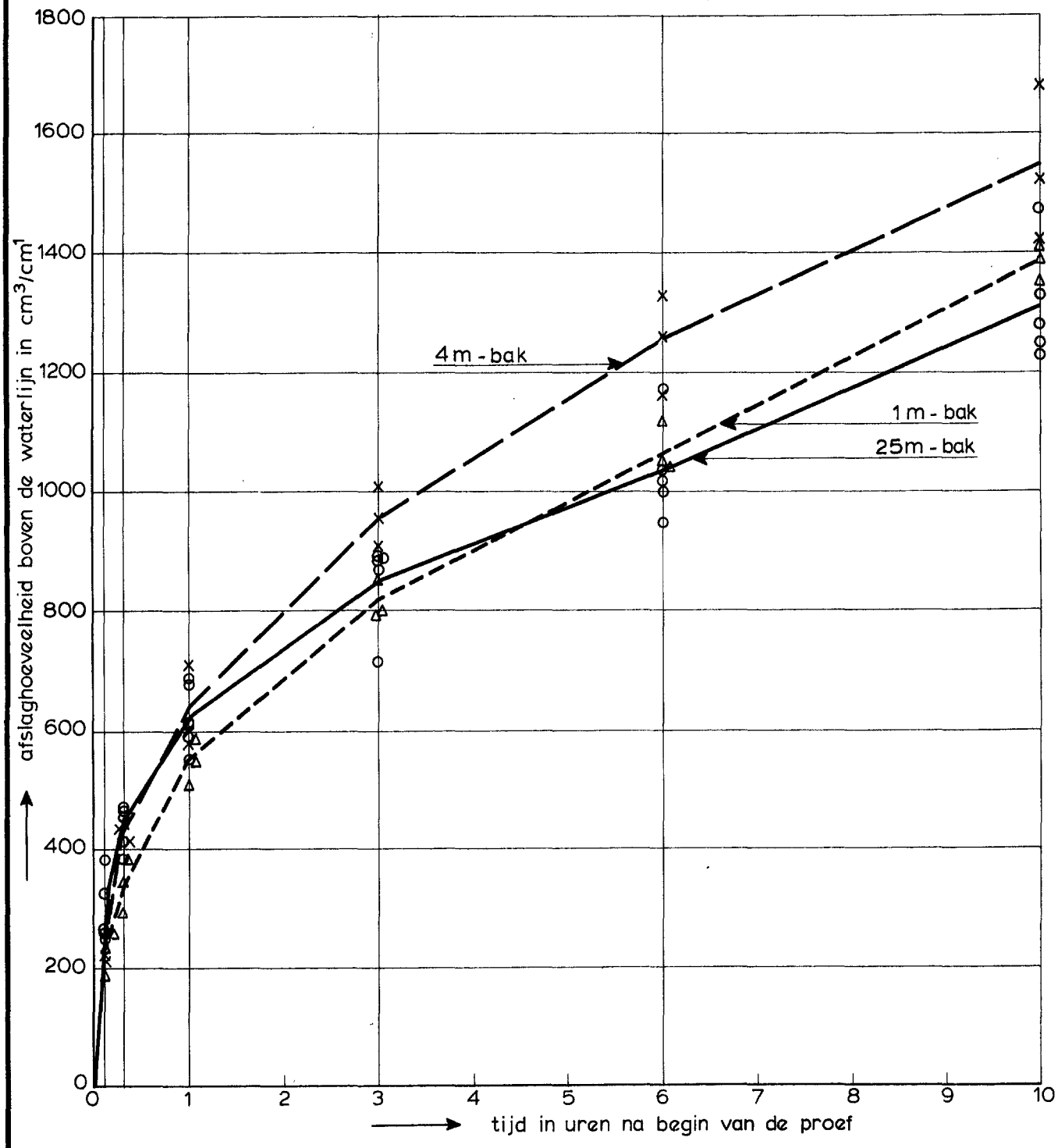
maten in m

OPTREDENDE MUISTROMEN B'J LOODRECHTE GOLFINVAL		P 001
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1653	FIG. 59



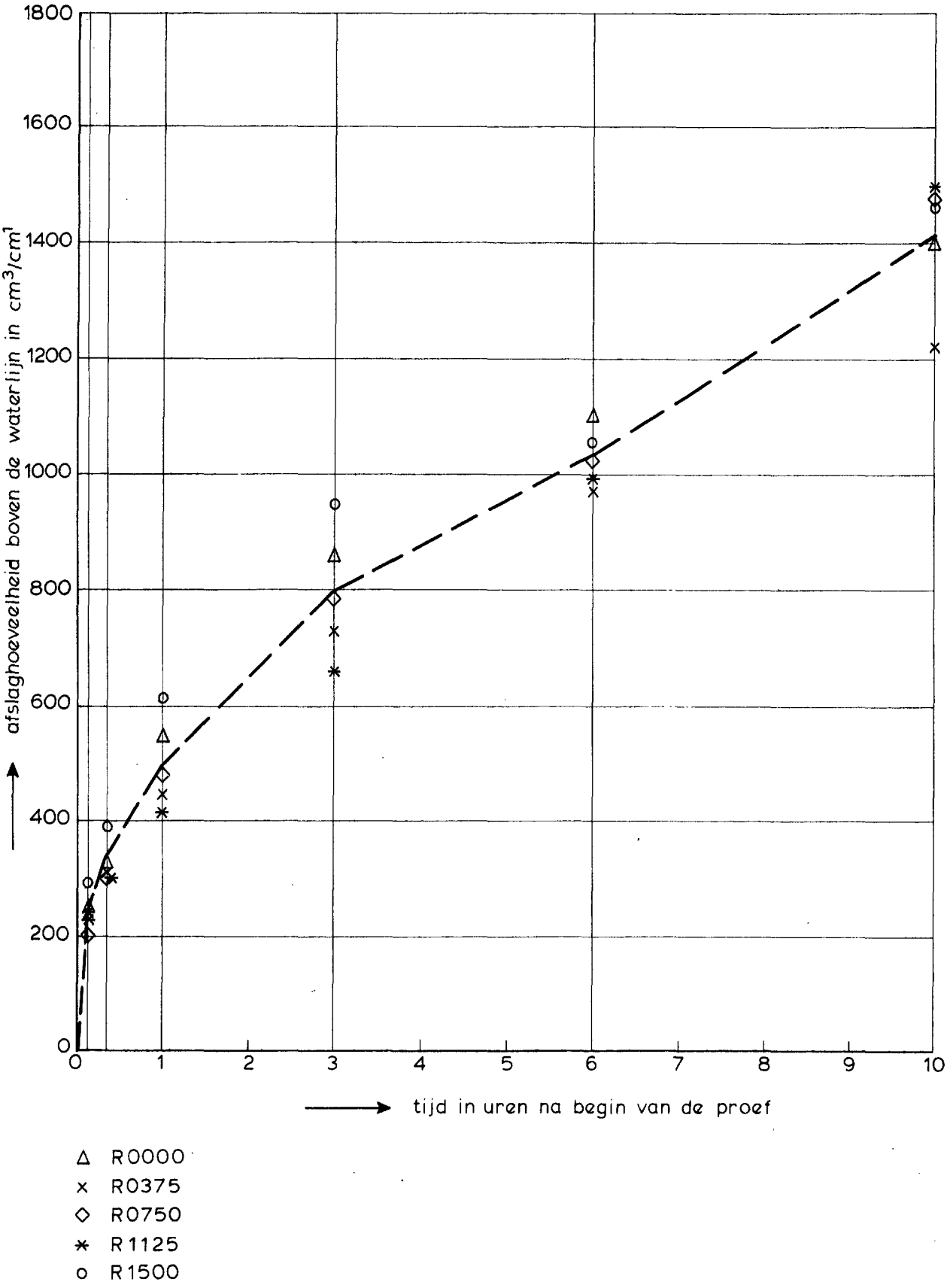
maten in m

OPTREDENDE MUISTROMEN BIJ SCHUINE GOLFINVAL 20°		P002
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1653	FIG. 60

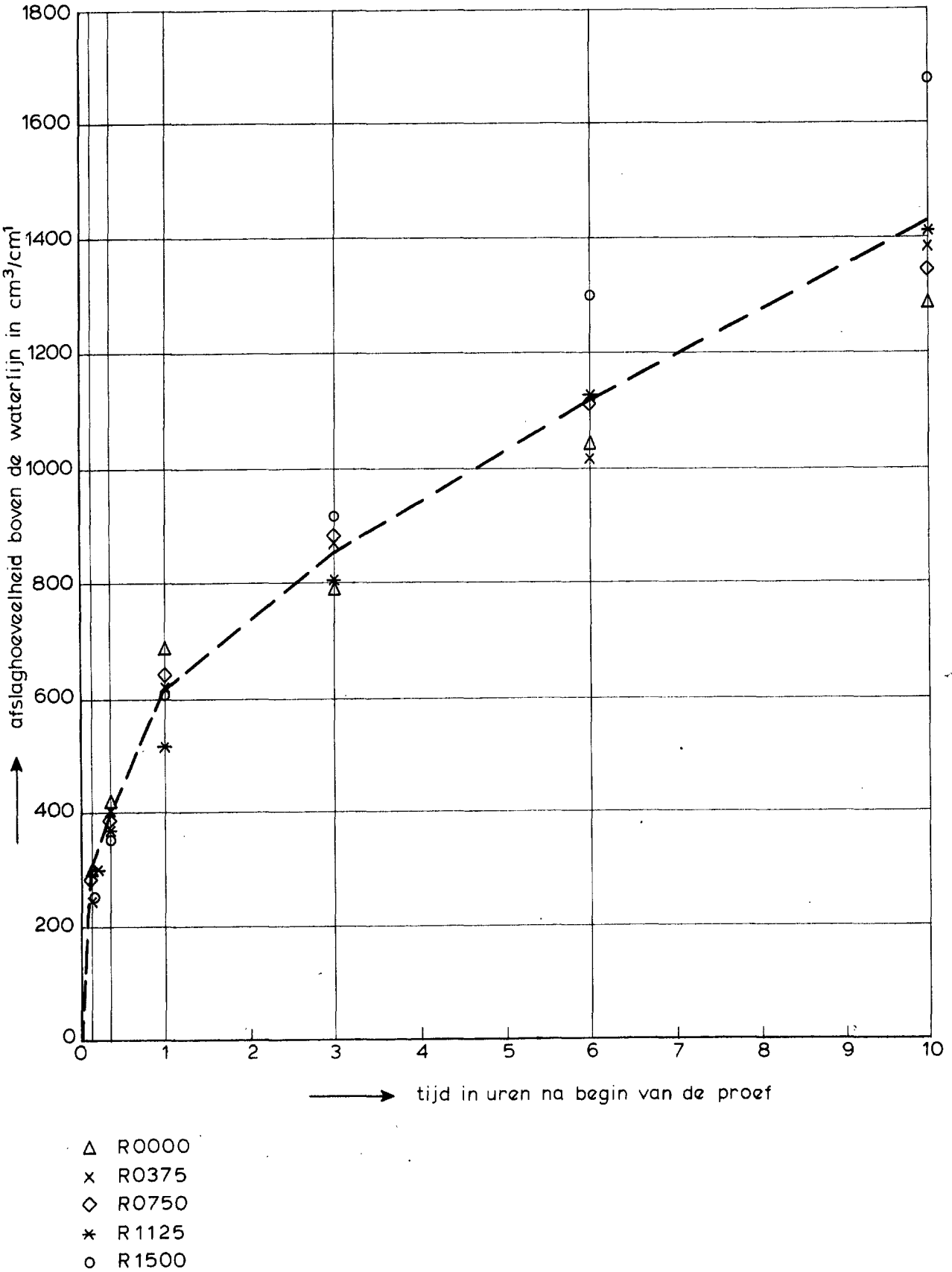


o 25 m - bak
x 4 m - bak
Δ 1 m - bak

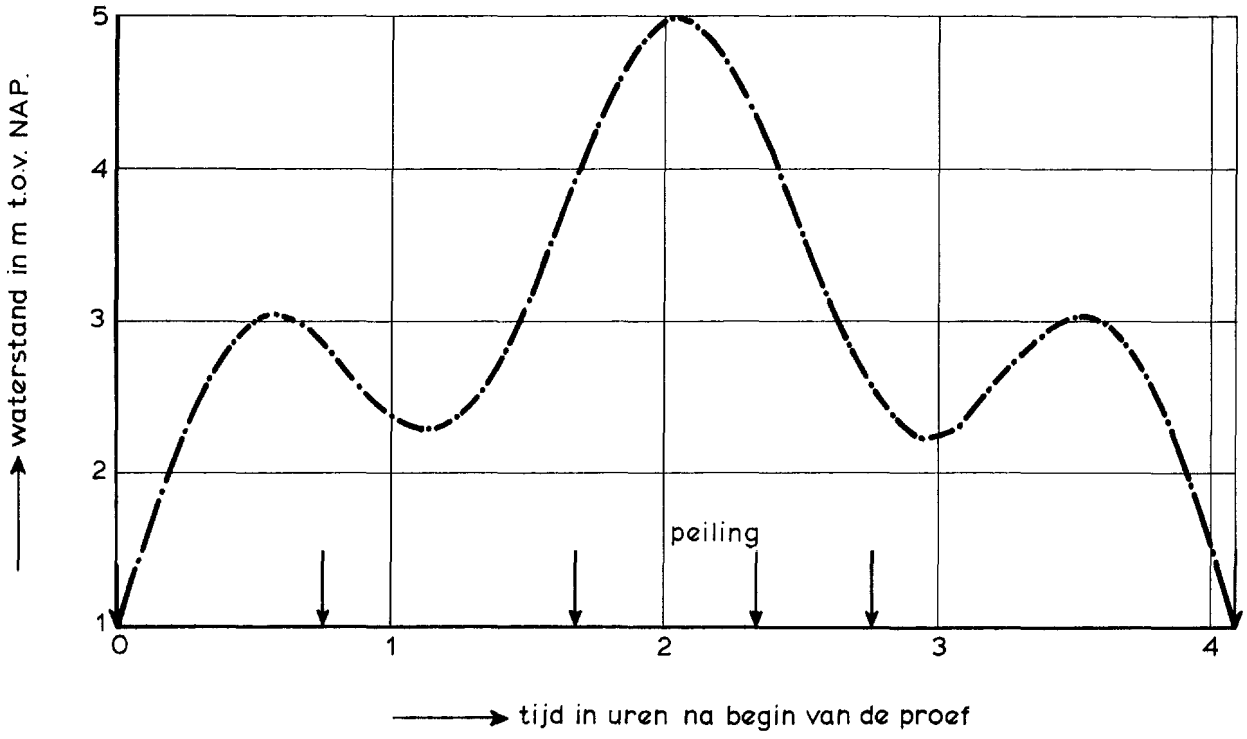
DUINAFSLAG BOVEN DE WATERLIJN ALS FUNCTIE VAN DE TIJD		P 001
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1653	FIG. 61

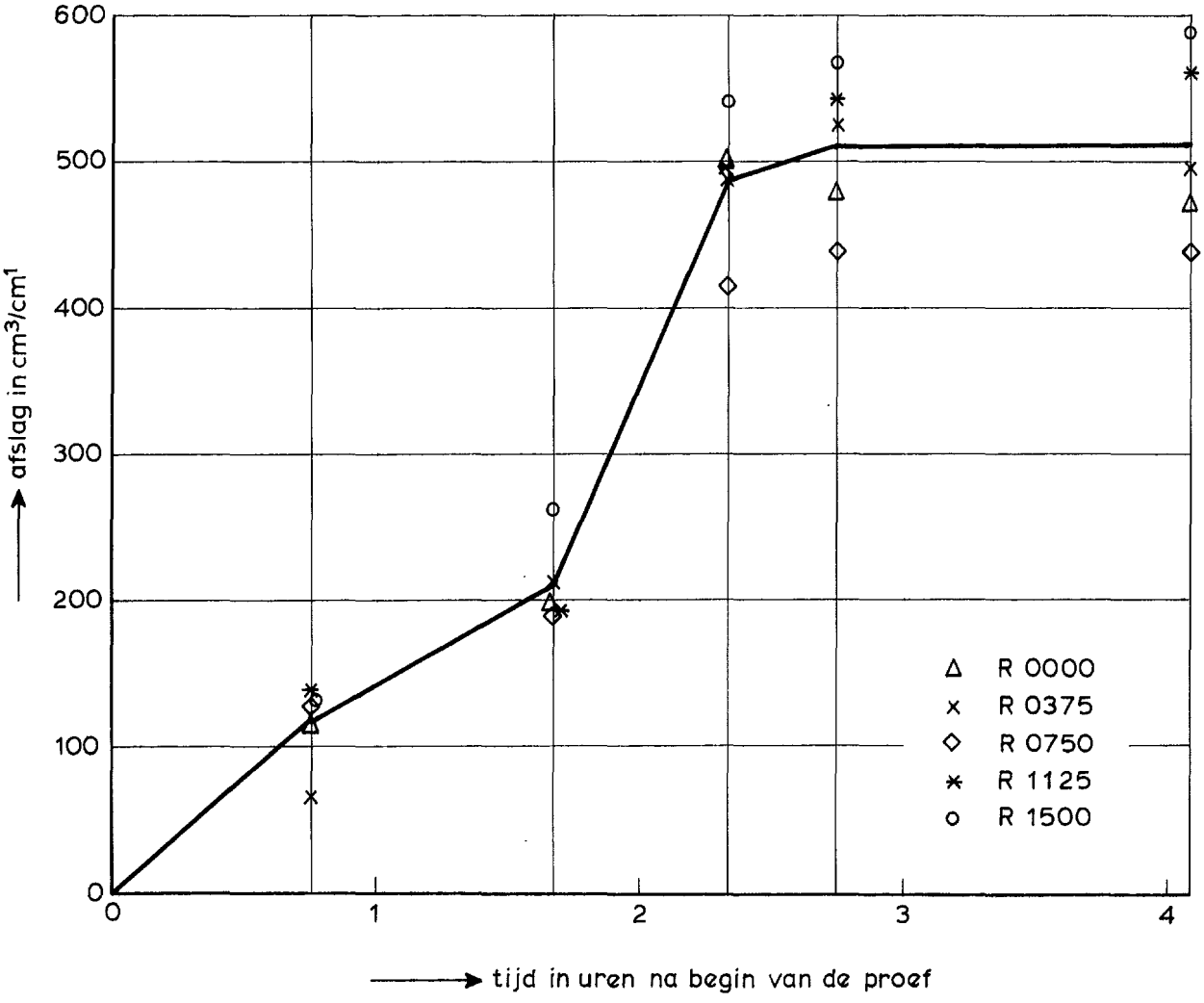


DUINAFSLAG BOVEN DE WATERLIJN ALS FUNCTIE VAN DE TIJD		P002
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1653	FIG. 62



DUINAFSLAG BOVEN DE WATERLIJN ALS FUNCTIE VAN DE TIJD		P003
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1653	FIG. 63





DUINAFSLAG BOVEN DE MAXIMALE WATERSTAND ALS FUNCTIE VAN DE TIJD

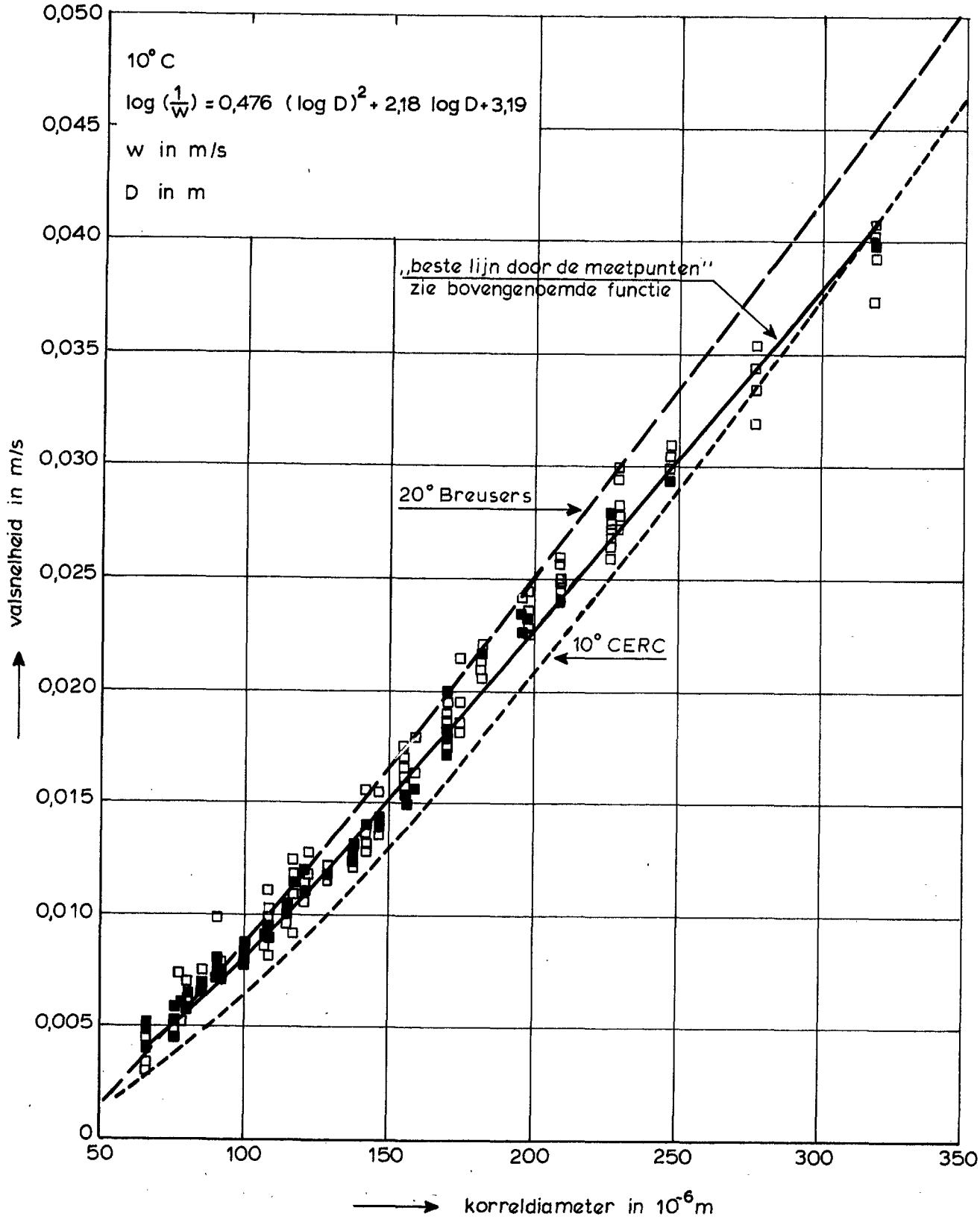
P004

VARIERENDE WATERSTAND

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

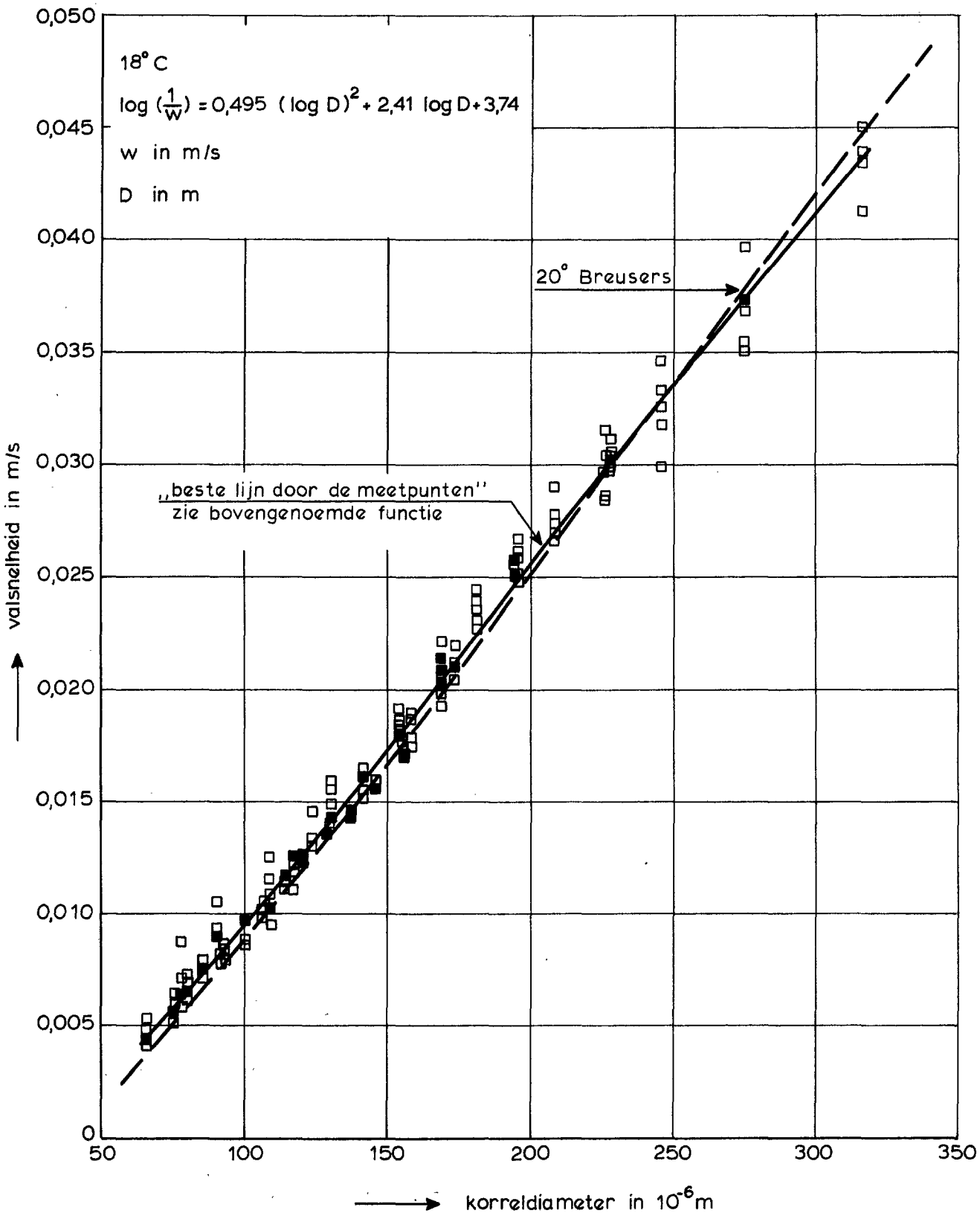
M 1653

FIG. 64



RESULTAAT VALSNELHEIDPROEVEN BIJ WATERTEMPERATUUR VAN 10°C

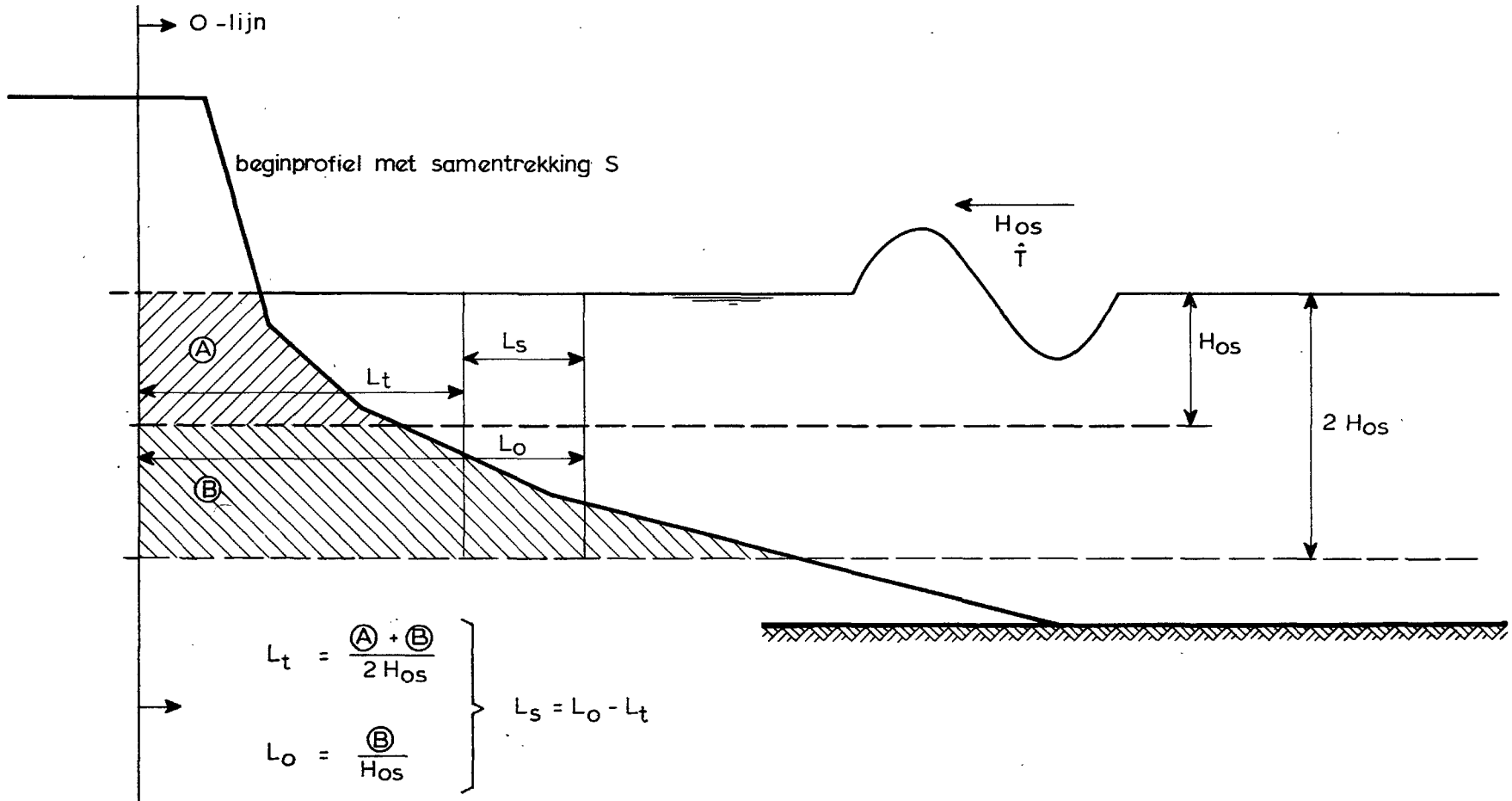
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM | M 1653 | FIG. 65



RESULTAAT VALSNELHEIDPROEVEN BIJ WATERTEMPERATUUR VAN 18°C

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM | M 1653 | FIG. 66

BEPALING SAMENTREKKING VAN BEGINPROFIEL VOLGENS OORSPRONKELIJKE METHODE

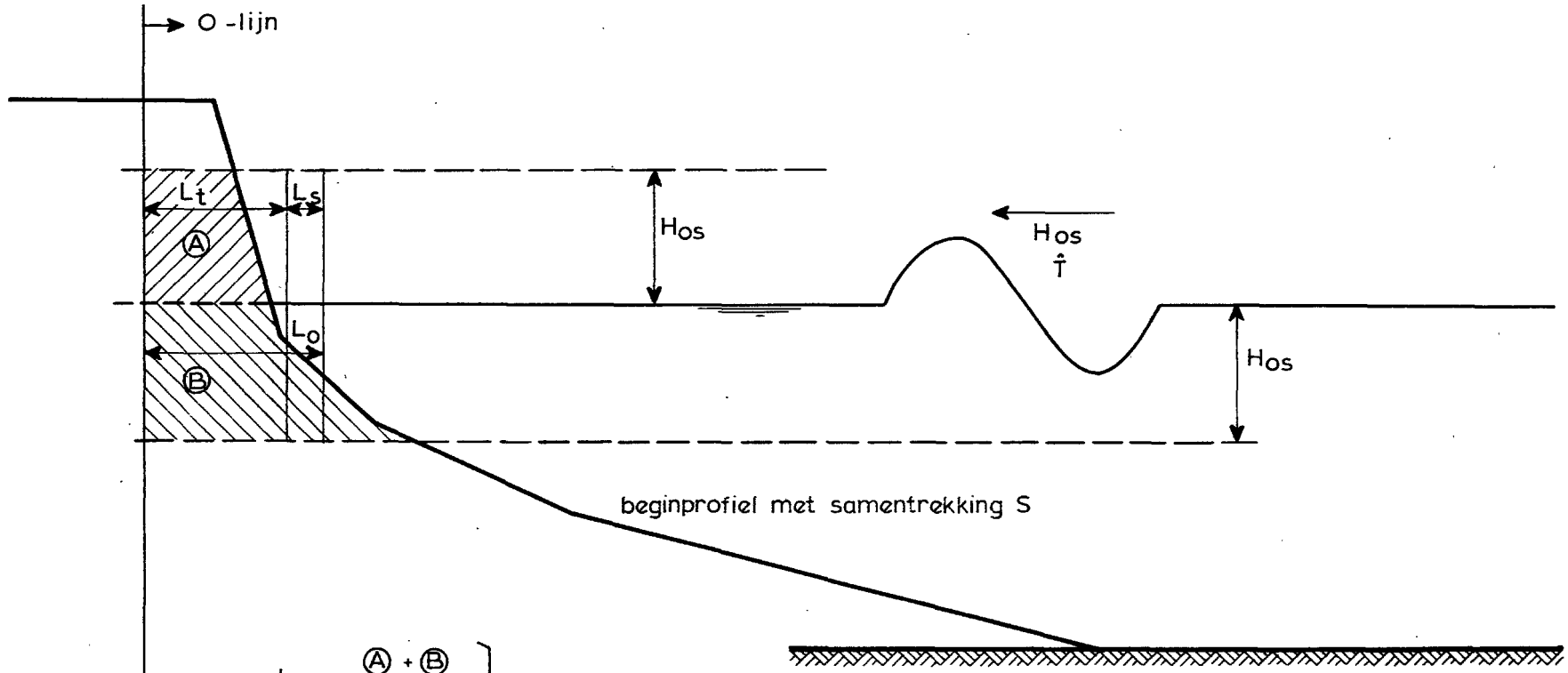


toelichting : Van het beginprofiel wordt met de aangegeven laagindeling L_s bepaald. Aan het profiel wordt de samentrekking S toegekend van het theoretische profiel dat de zelfde L_s- waarde heeft als het opgemeten profiel

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1653

FIG. 67



$$L_t = \frac{Ⓐ + Ⓑ}{2\,H_{os}}$$

$$L_o = \frac{Ⓑ}{H_{os}}$$

$$L_s = L_o - L_t$$

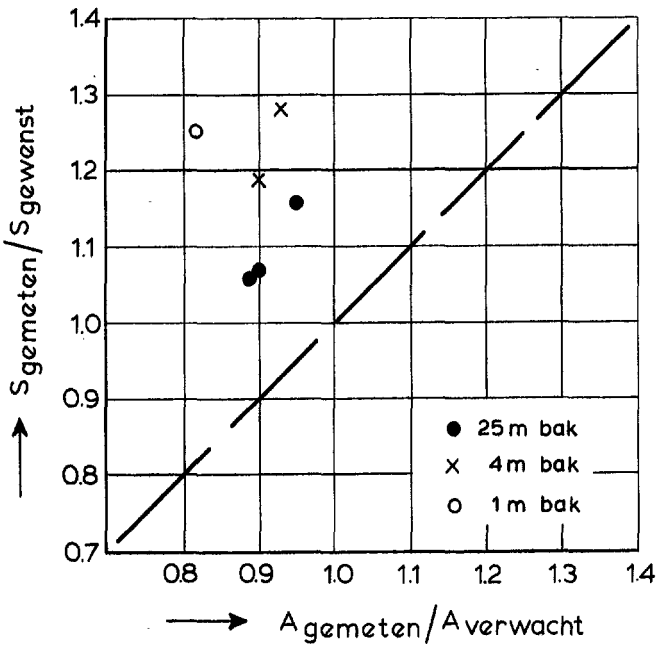
toelichting : Van het beginprofiel wordt met de aangegeven laagindeling L_s bepaald. Aan het profiel wordt de samentrekking S toegekend van het theoretische profiel dat de zelfde L_s- waarde heeft als het opgemeten profiel

BEPALING SAMENTREKKING VAN BEGINPROFIEL VOLGENS ALTERNATIEVE METHODE

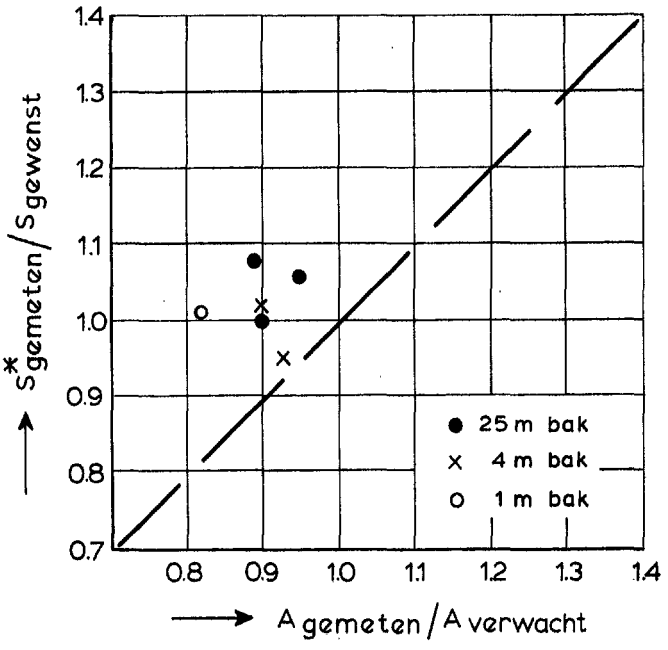
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1653

FIG. 68



ⓐ oorspronkelijke correctie



ⓑ alternatieve correctie

S gemeten is de gecorrigeerde samentrekking van het beginprofiel volgens de oorspronkelijke methode

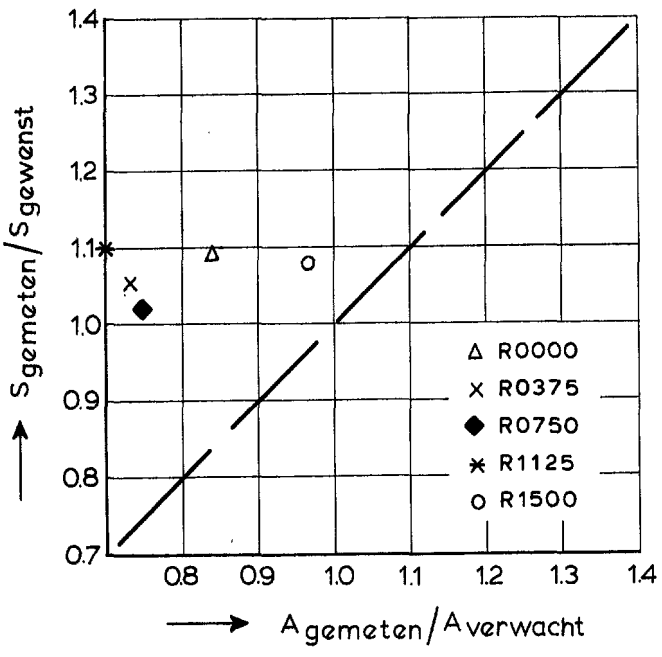
S^* gemeten is de gecorrigeerde samentrekking van het beginprofiel volgens de alternatieve methode

S gewenst is de gewenste samentrekking van het beginprofiel

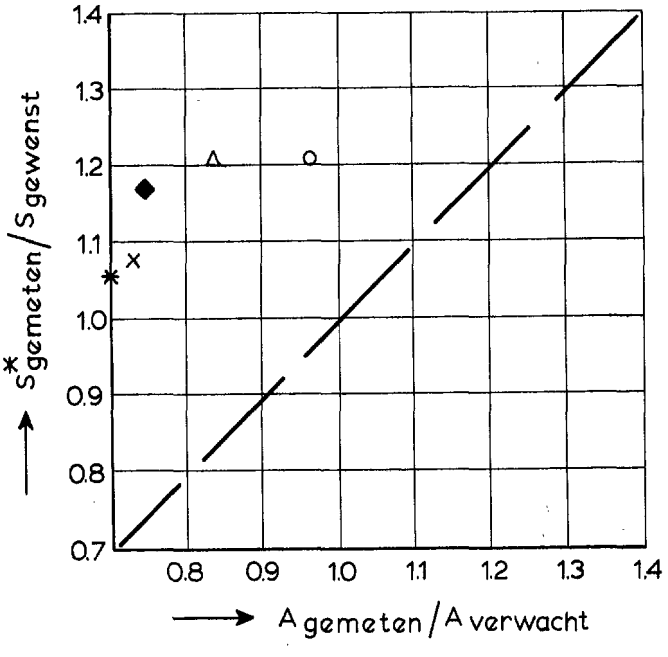
A gemeten is de afslaghoeveelheid in het model herleid naar prototype met $n_l / n_d = (n_d / n_w^2)^{0,28}$ en $n_t = (n_d)^{0,5}$ op basis van S gewenst

A verwacht is de afslaghoeveelheid gevonden uit de curve-fitting van de metingen M 1263 uitgaande van de proeven met "voldoende" golfhoogte (33 proeven) op basis van S gewenst

INVLOED VAN DE CORRECTIE VAN DE SAMENTREKKING VAN HET BEGINPROFIEL		P001
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1653	FIG. 69



ⓐ oorspronkelijke correctie



ⓑ alternatieve correctie

S gemeten is de gecorrigeerde samentrekking van het beginprofiel volgens de oorspronkelijke methode

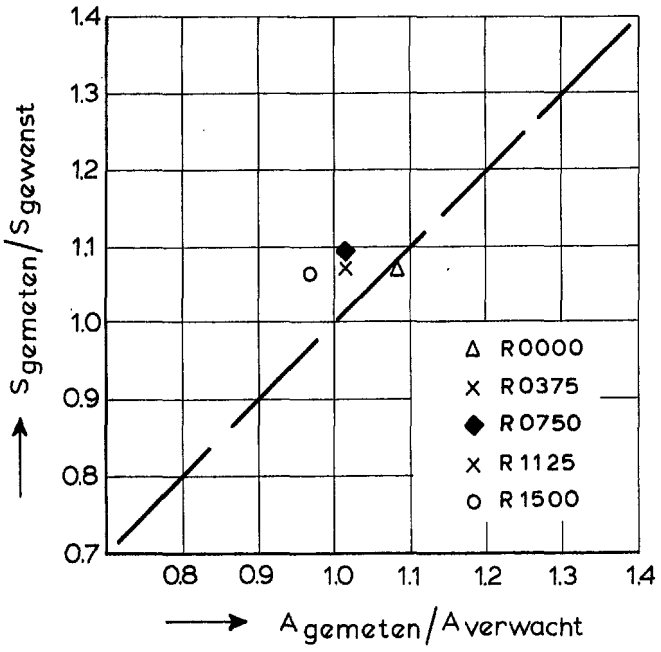
S^* gemeten is de gecorrigeerde samentrekking van het beginprofiel volgens de alternatieve methode

S gewenst is de gewenste samentrekking van het beginprofiel

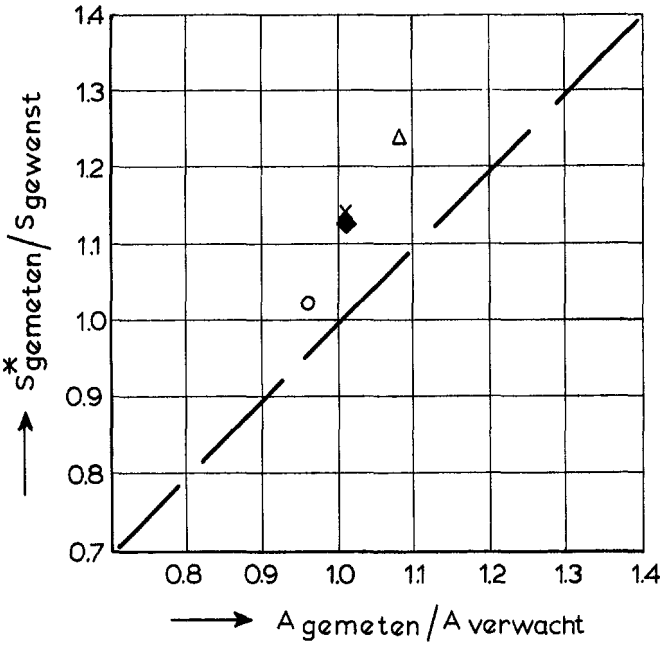
A gemeten is de afslaghoeveelheid in het model herleid naar prototype met $n_l / n_d = (n_d / n_w^{2})^{0,28}$ en $n_t = (n_d)^{0,5}$ op basis van S gewenst

A verwacht is de afslaghoeveelheid gevonden uit de curve-fitting van de metingen M 1263 uitgaande van de proeven met "voldoende" golfhoogte (33 proeven) op basis van S gewenst

INVLOED VAN DE CORRECTIE VAN DE SAMENTREKKING VAN HET BEGINPROFIEL		P002
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1653	FIG. 70



ⓐ oorspronkelijke correctie



ⓑ alternatieve correctie

S gemeten is de gecorrigeerde samentrekking van het beginprofiel volgens de oorspronkelijke methode

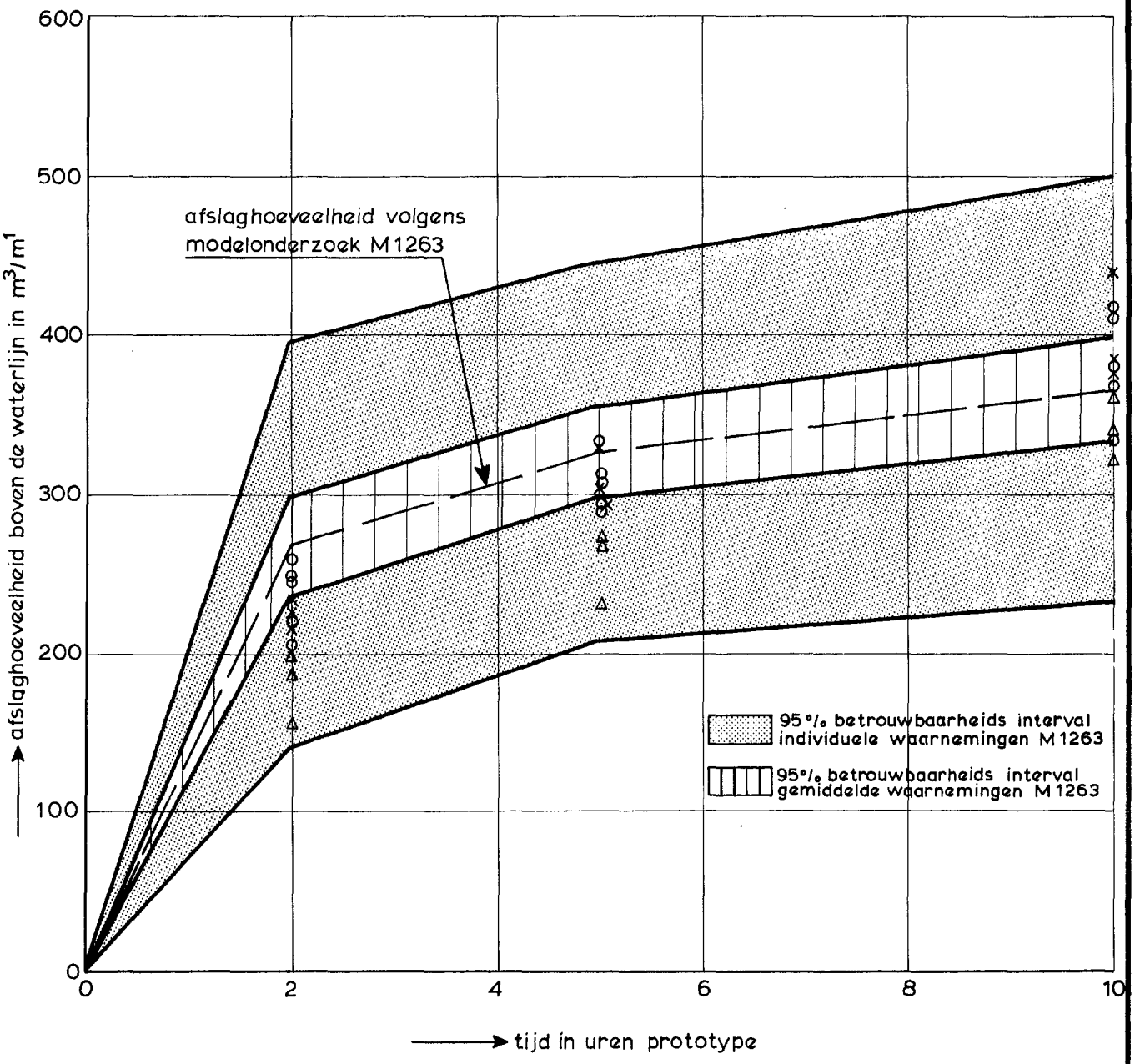
S^* gemeten is de gecorrigeerde samentrekking van het beginprofiel volgens de alternatieve methode

S gewenst is de gewenste samentrekking van het beginprofiel

A gemeten is de afslaghoeveelheid in het model herleid naar prototype met $n_l / n_d = (n_d / n_w^2)^{0,28}$ en $n_t = (n_d)^{0,5}$ op basis van S gewenst

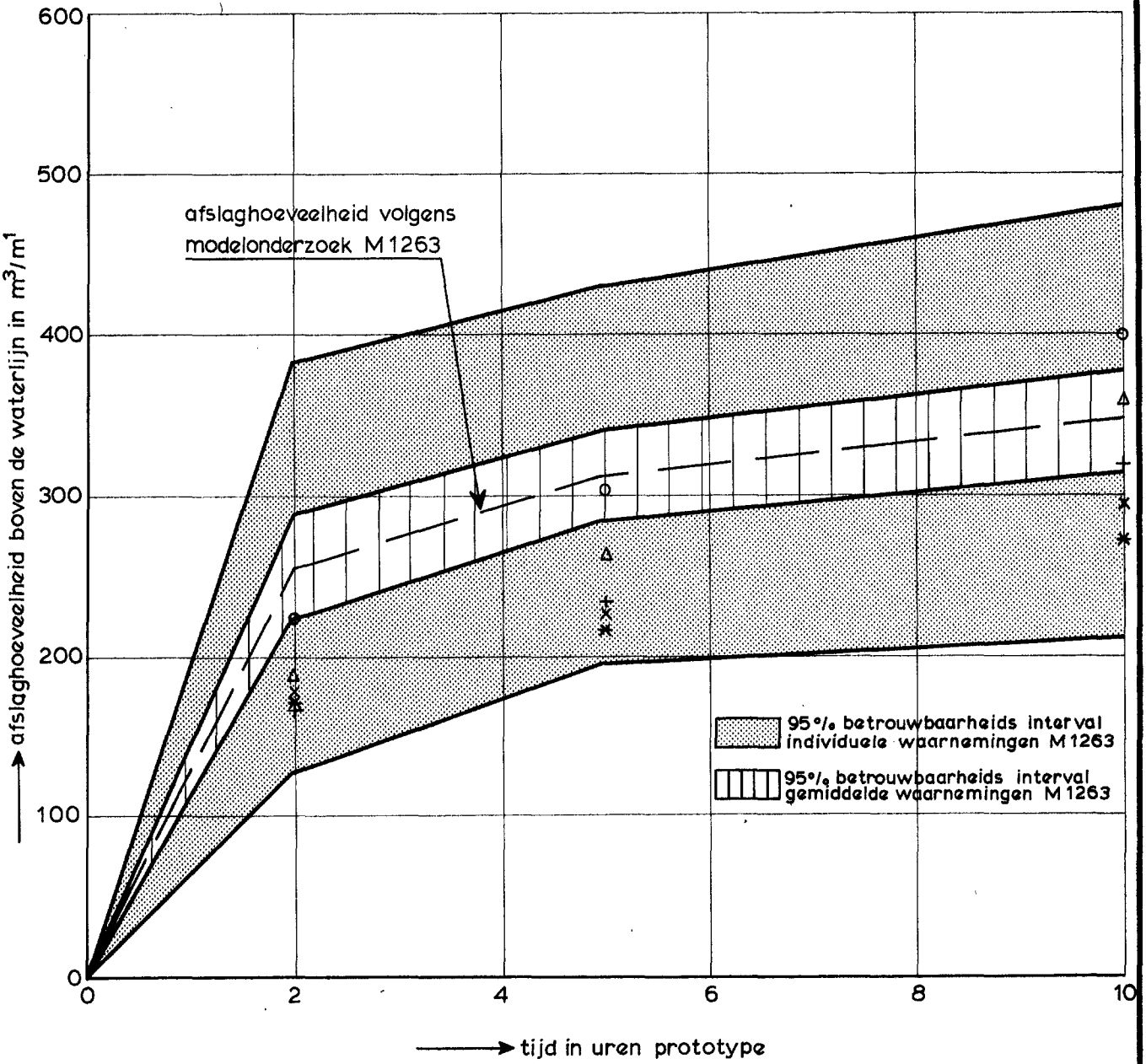
A verwacht is de afslaghoeveelheid gevonden uit de curve-fitting van de metingen M 1263 uitgaande van de proeven met "voldoende" golfhoogte (33 proeven) op basis van S gewenst

INVLOED VAN DE CORRECTIE VAN DE SAMENTREKKING VAN HET BEGINPROFIEL		P003
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1653	FIG. 71



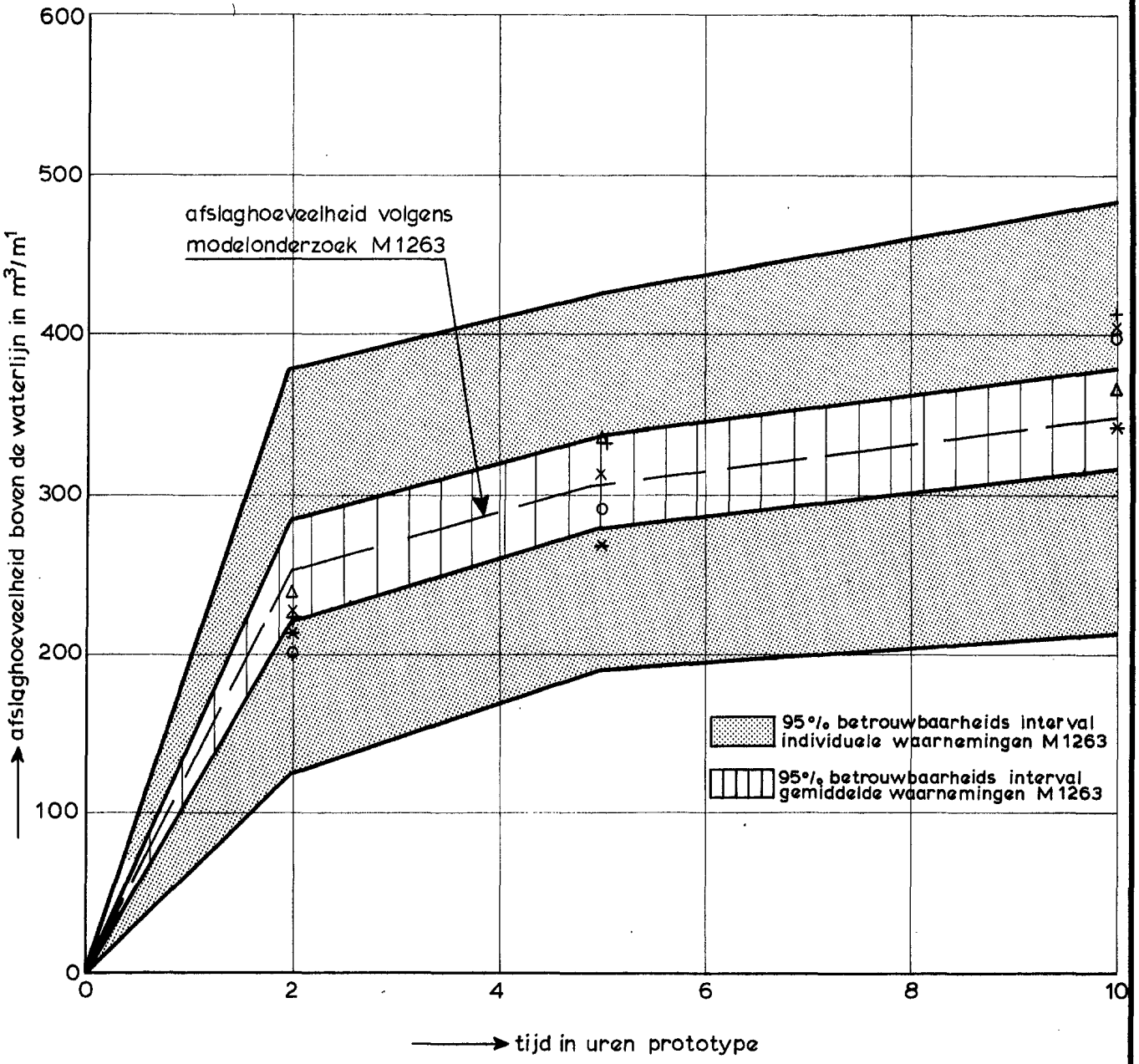
o 25m - bak
x 4m - bak
Δ 1m - bak

PROTOTYPE DUINAFSLAG BOVEN DE WATERLIJN	S=1,237	P001
	VASTE WATERSTAND	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1653	FIG. 72



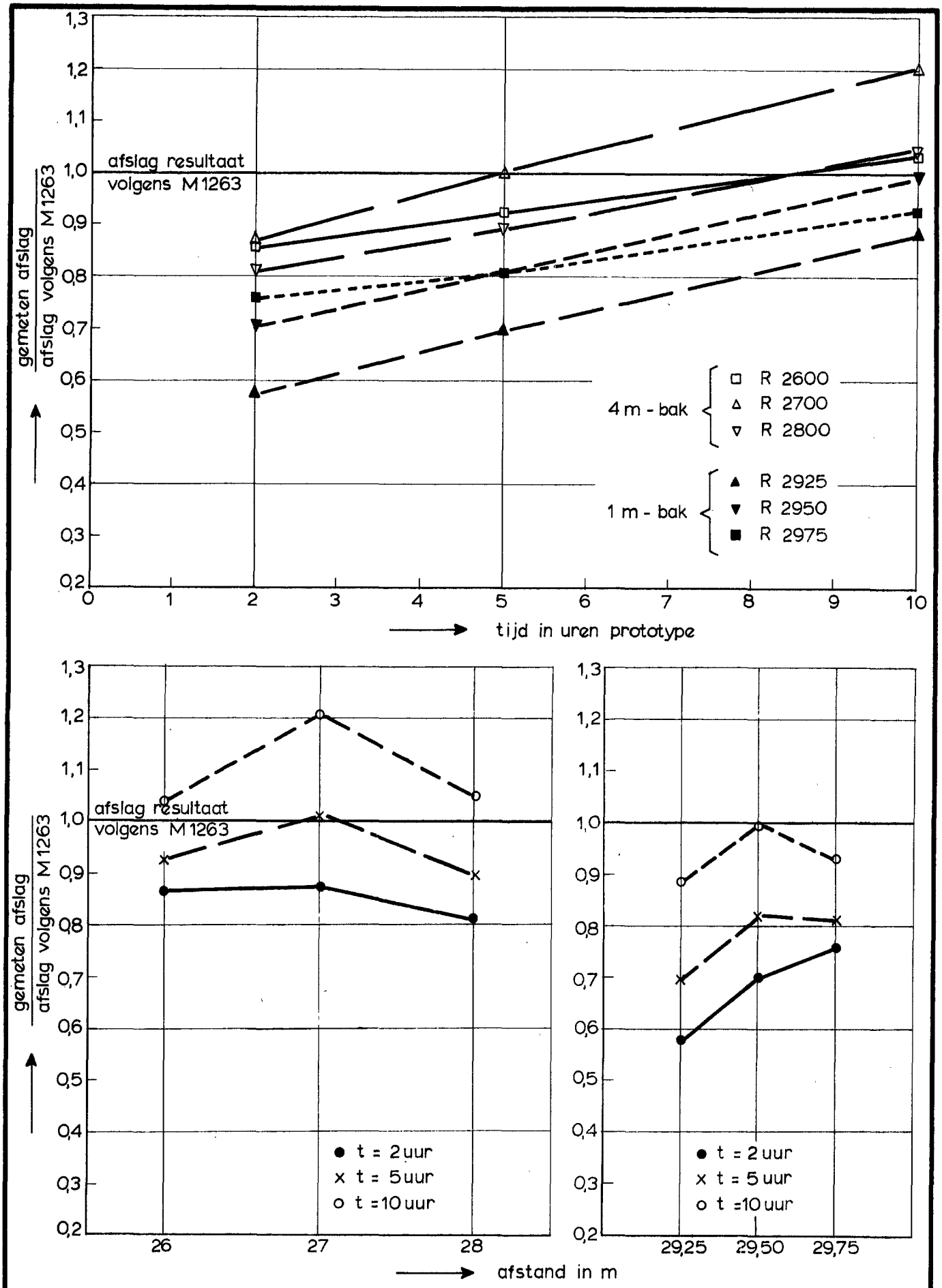
- △ R 0000
- × R 0375
- \+ R 0750
- ✱ R 1125
- o R 1500

PROTOTYPE DUINAFSLAG BOVEN DE WATERLIJN	S=1,188	P002
	VASTE WATERSTAND	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1653	FIG. 73

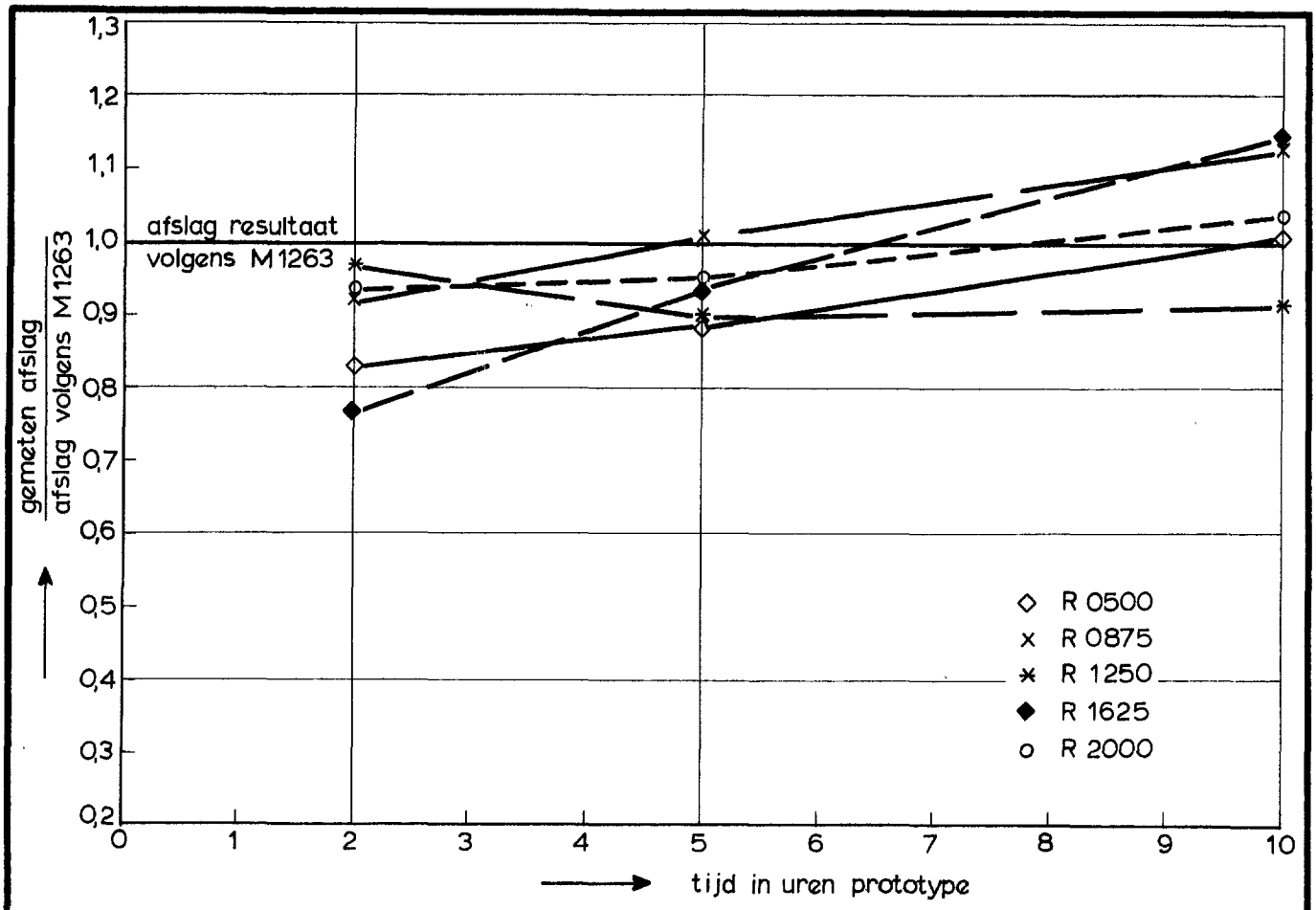


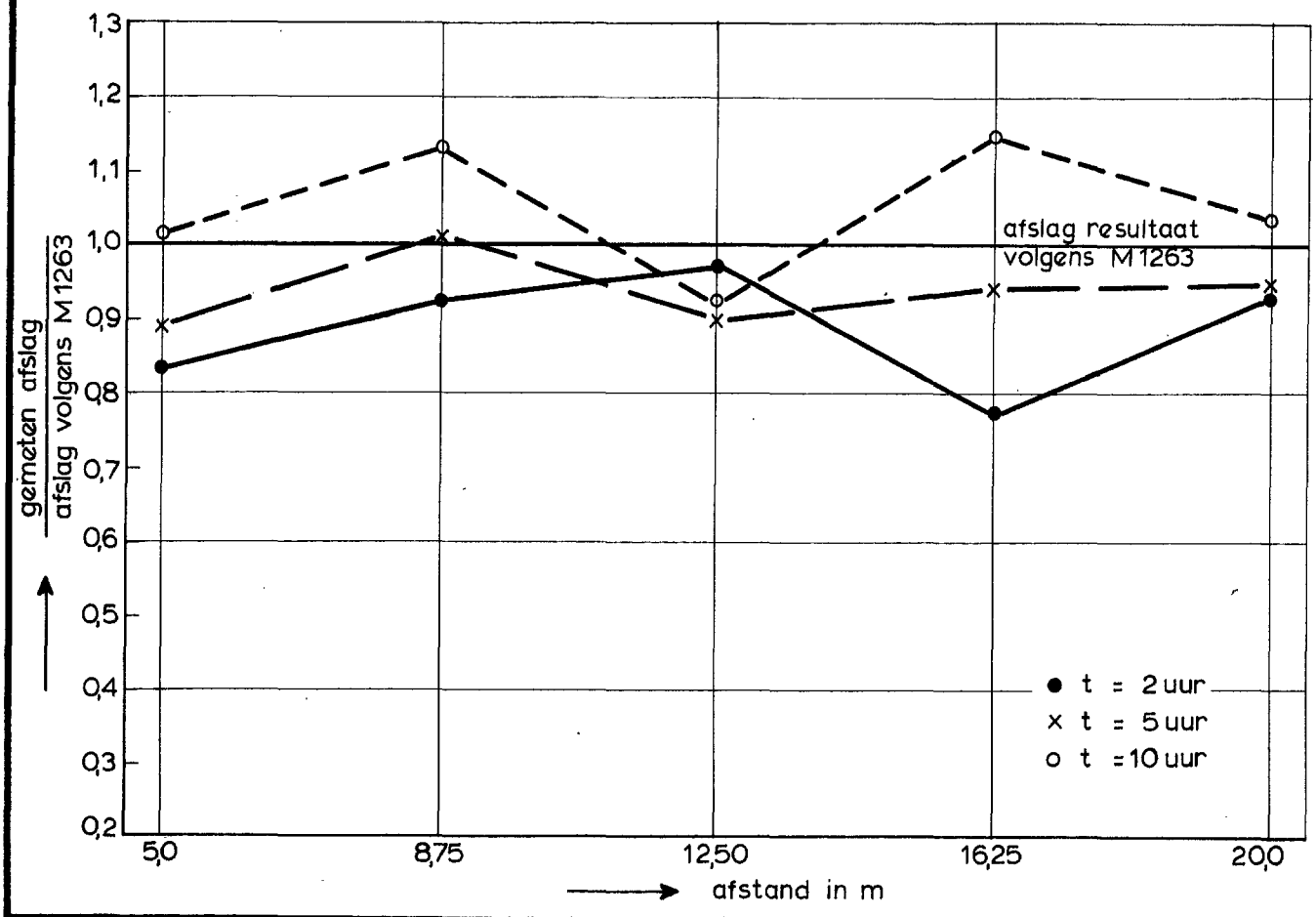
△ R 0000
× R 0375
\+ R 0750
✱ R 1125
o R 1500

PROTOTYPE DUINAFSLAG BOVEN DE WATERLIJN	S=1, 171	P003
	VASTE WATERSTAND	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1653	FIG. 74

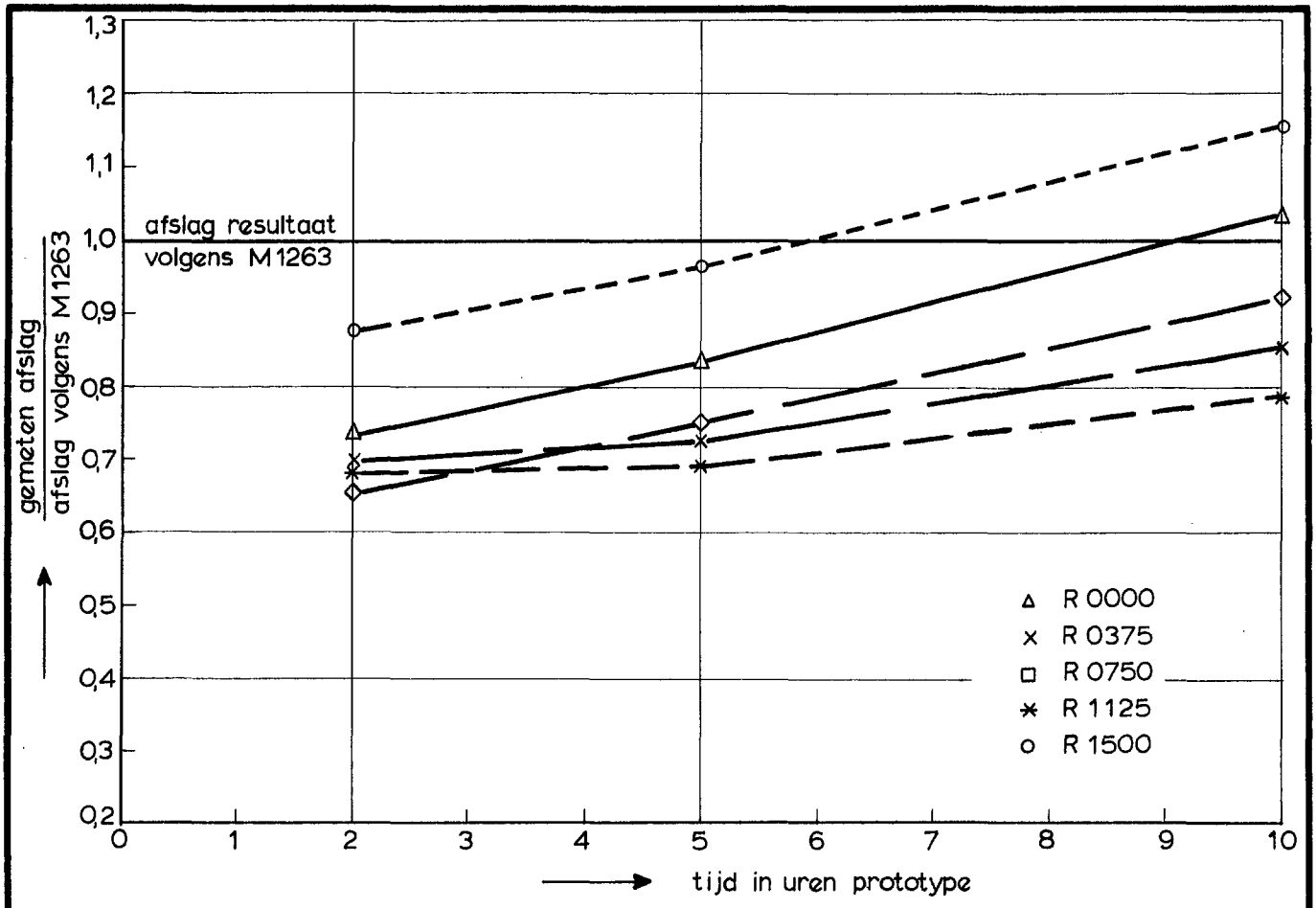


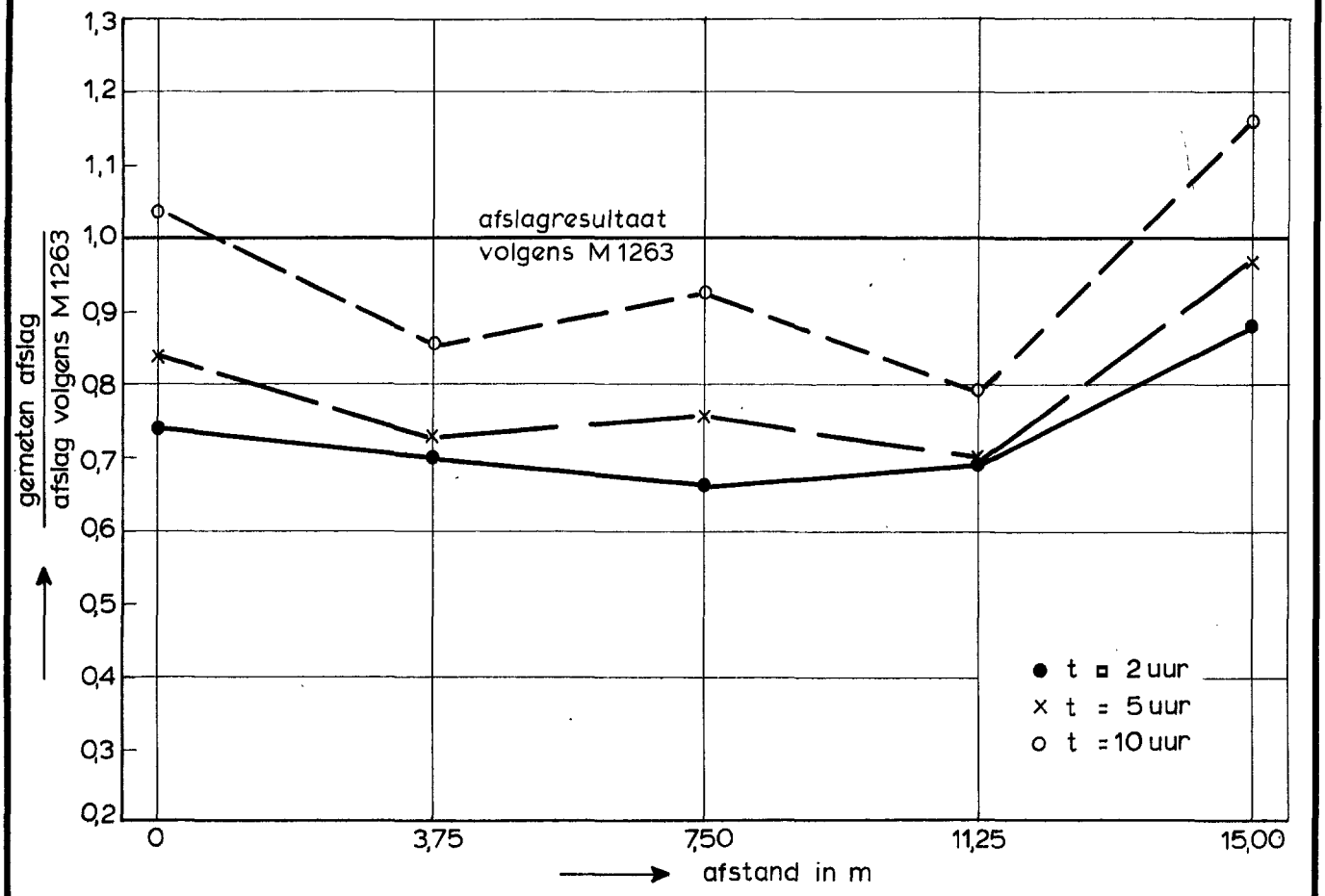
ONTWIKKELING PROTOTYPE AFSLAGRESULTAAT		P 001
	4 m - bak ; 1 m - bak	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1653	FIG. 75



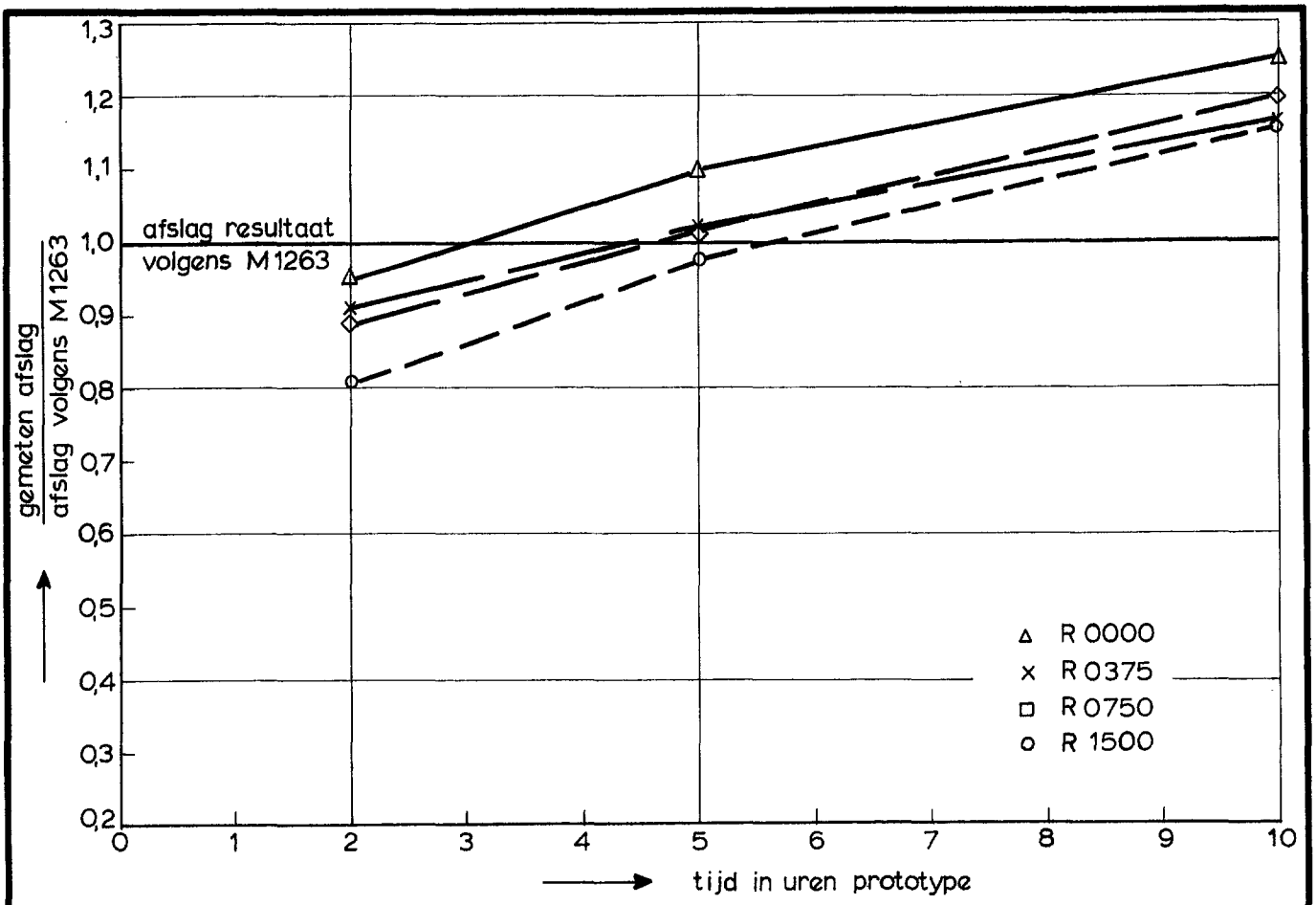


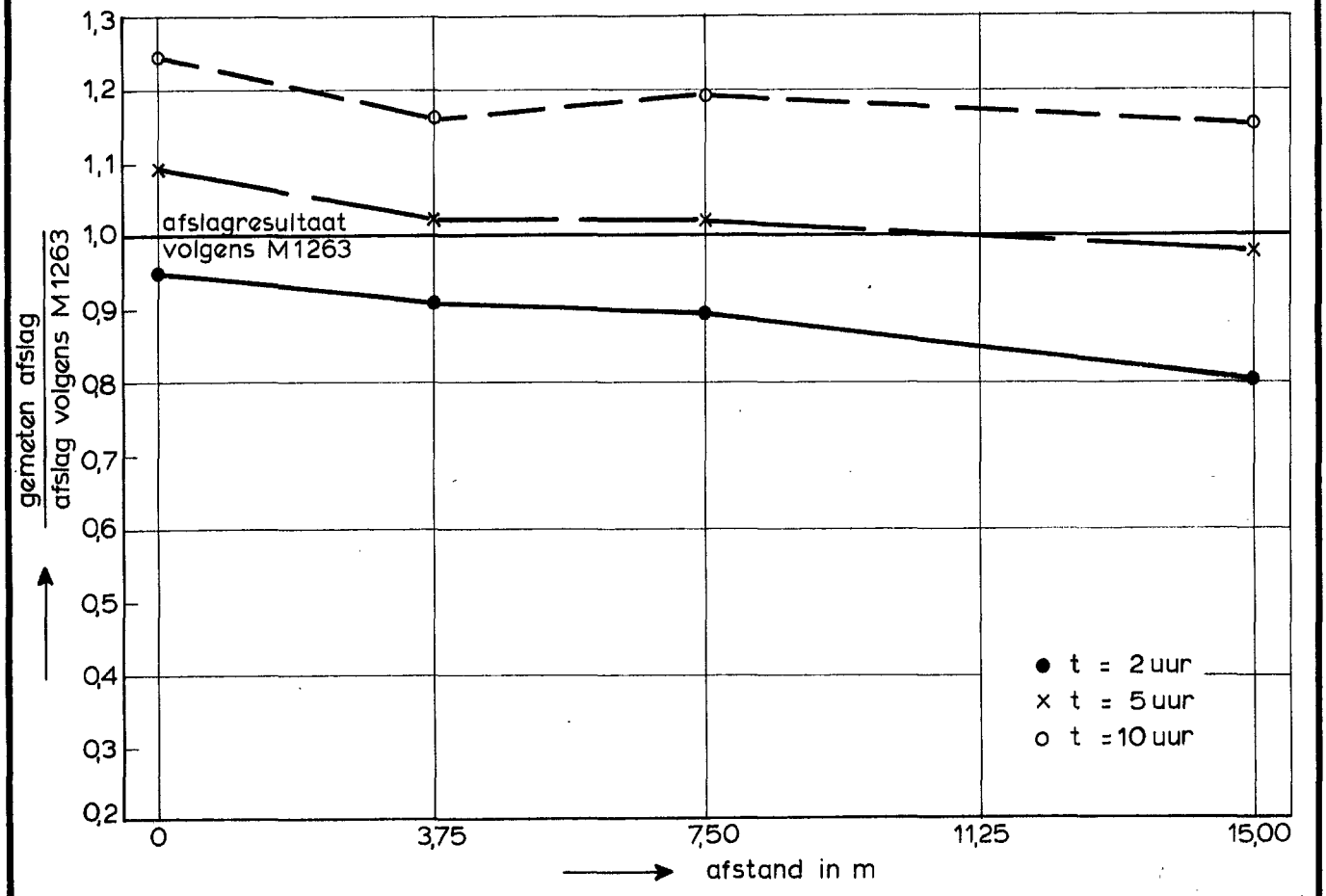
ONTWIKKELING PROTOTYPE AFSLAGRESULTAAT		P 001
	25 m - bak	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1653	FIG. 76



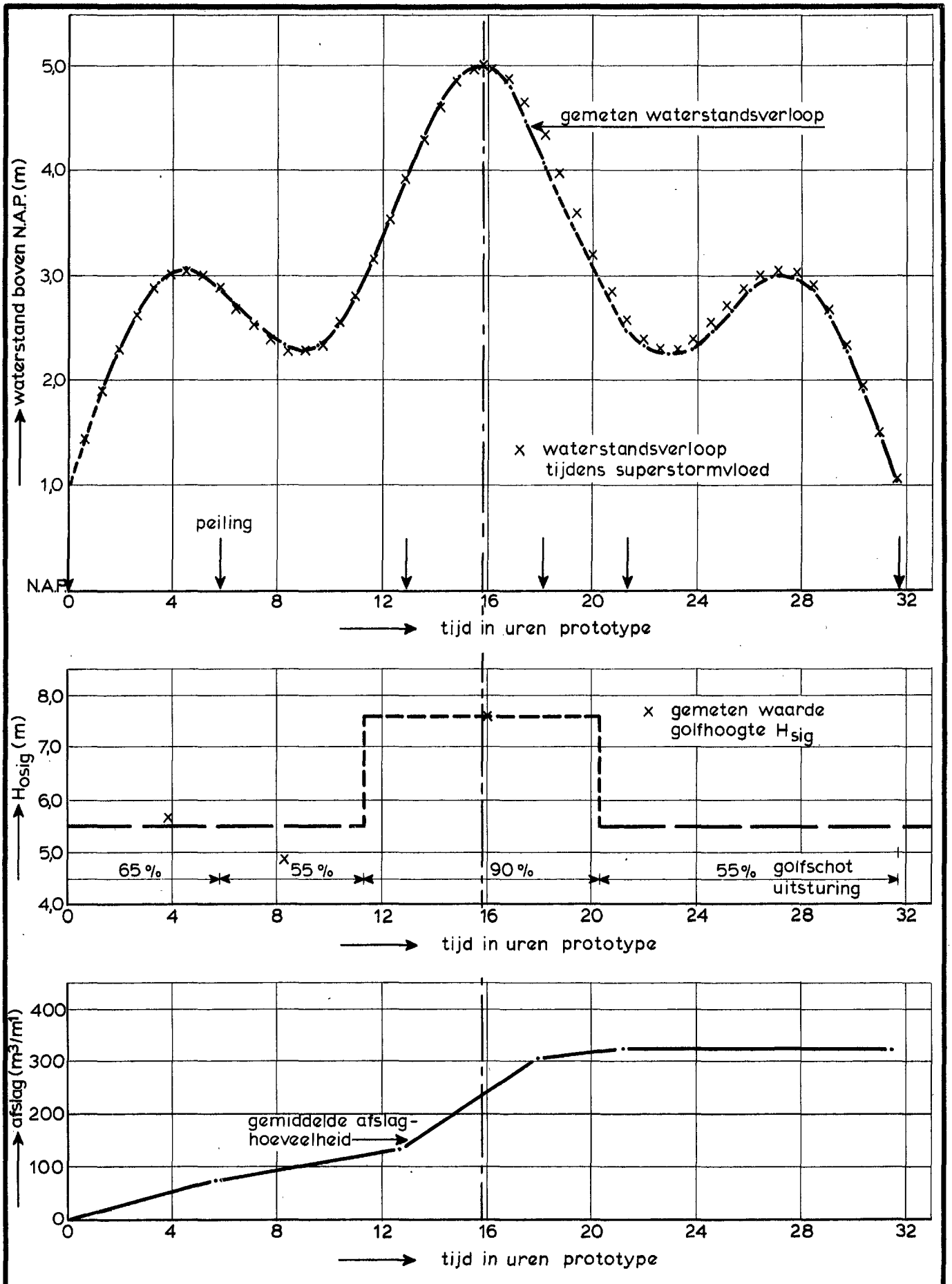


ONTWIKKELING PROTOTYPE AFSLAGRESULTAAT		P 002
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1653	FIG. 77

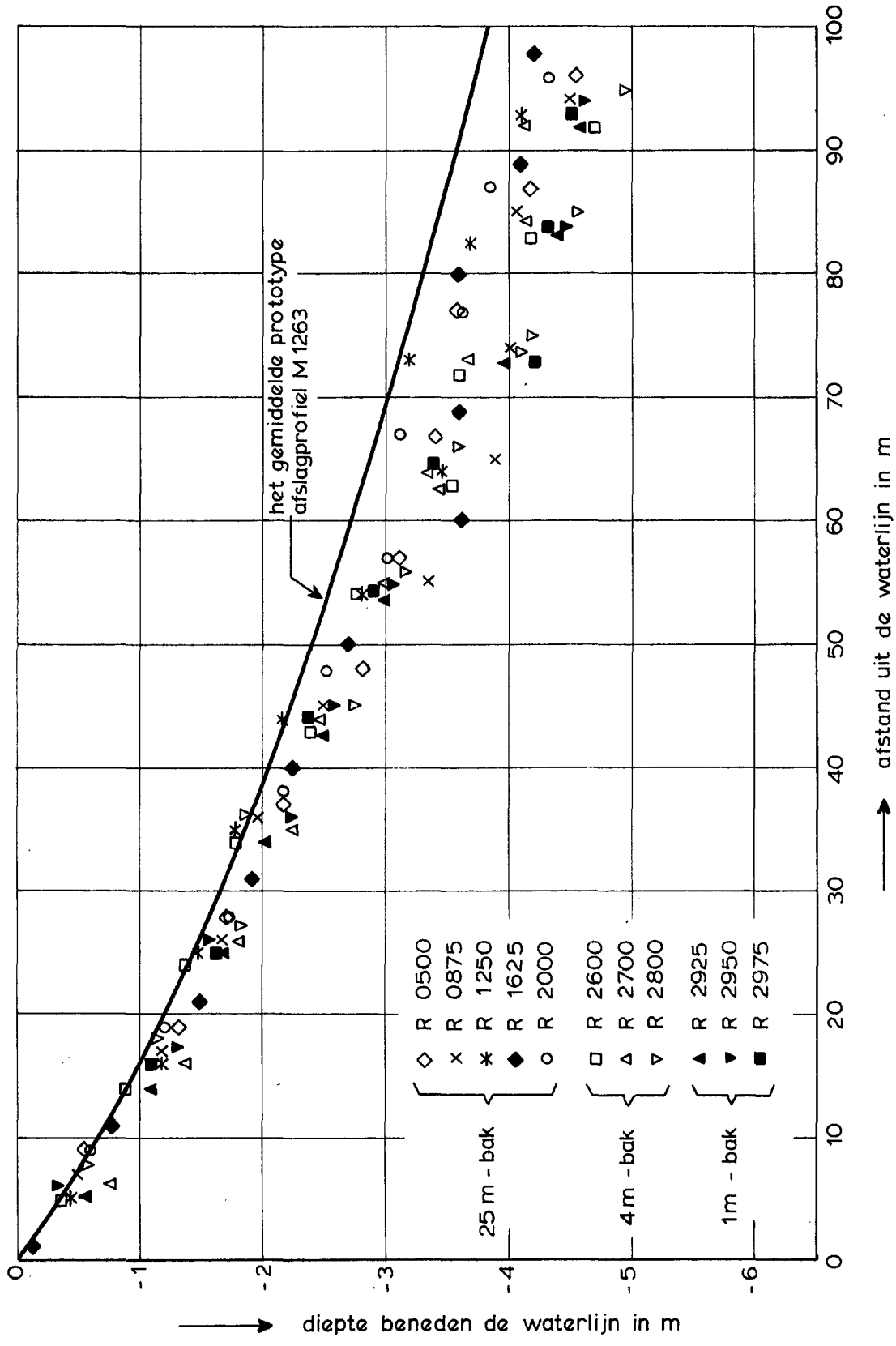




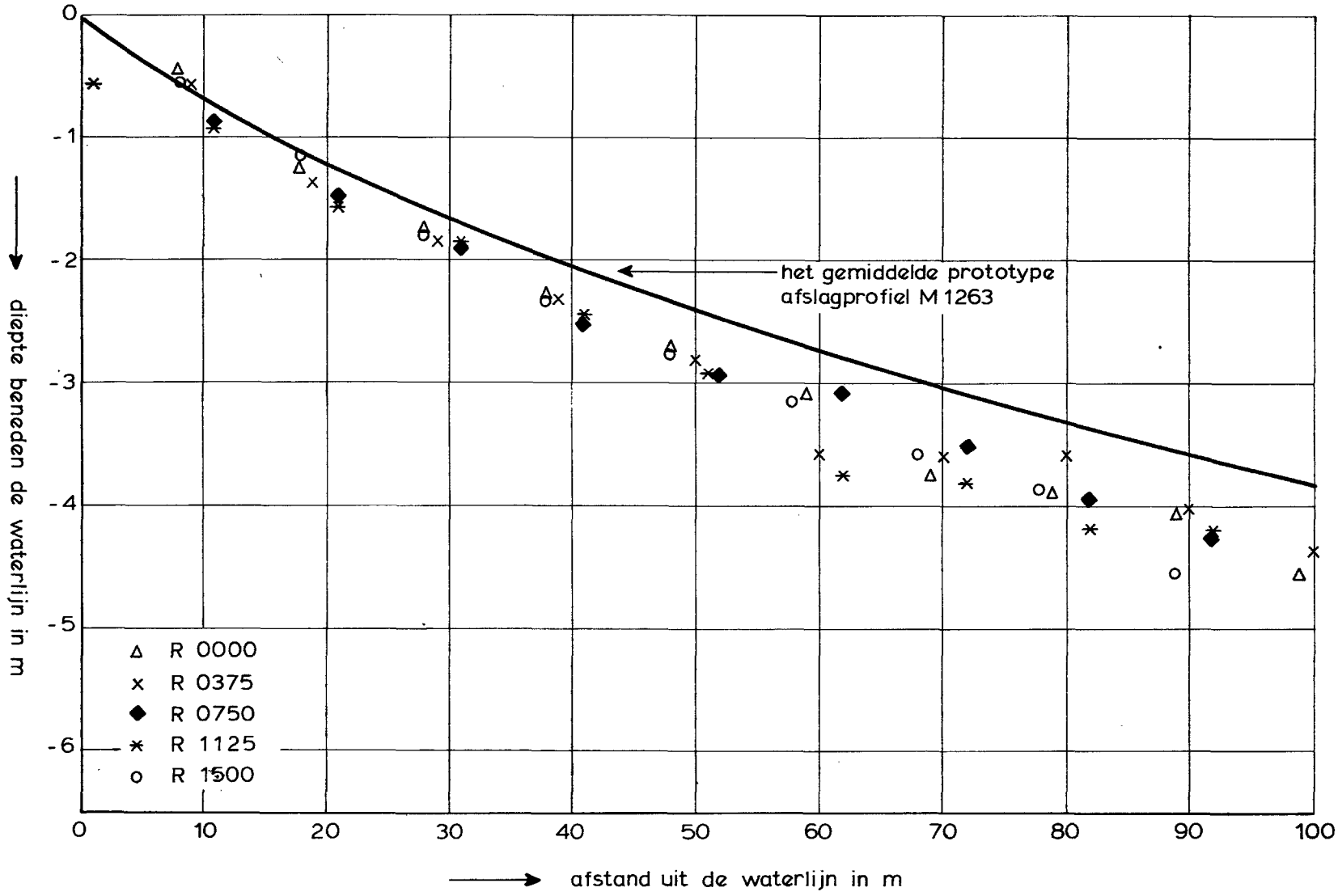
ONTWIKKELING PROTOTYPE AFSLAGRESULTAAT		P 003
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1653	FIG. 78



PROTOTYPE DUINAFSLAG BOVEN DE MAXIMALE WATERSTAND	S=1,146	P004
	VARIERENDE WATERSTAND	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1653	FIG. 79



PROTOTYPE AFSLAGPROFIELEN NA 1 uur MODELTIJD		P001
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1653	FIG. 80



PROTOTYPE AFSLAGPROFIELEN NA 1UUR MODELTIJD

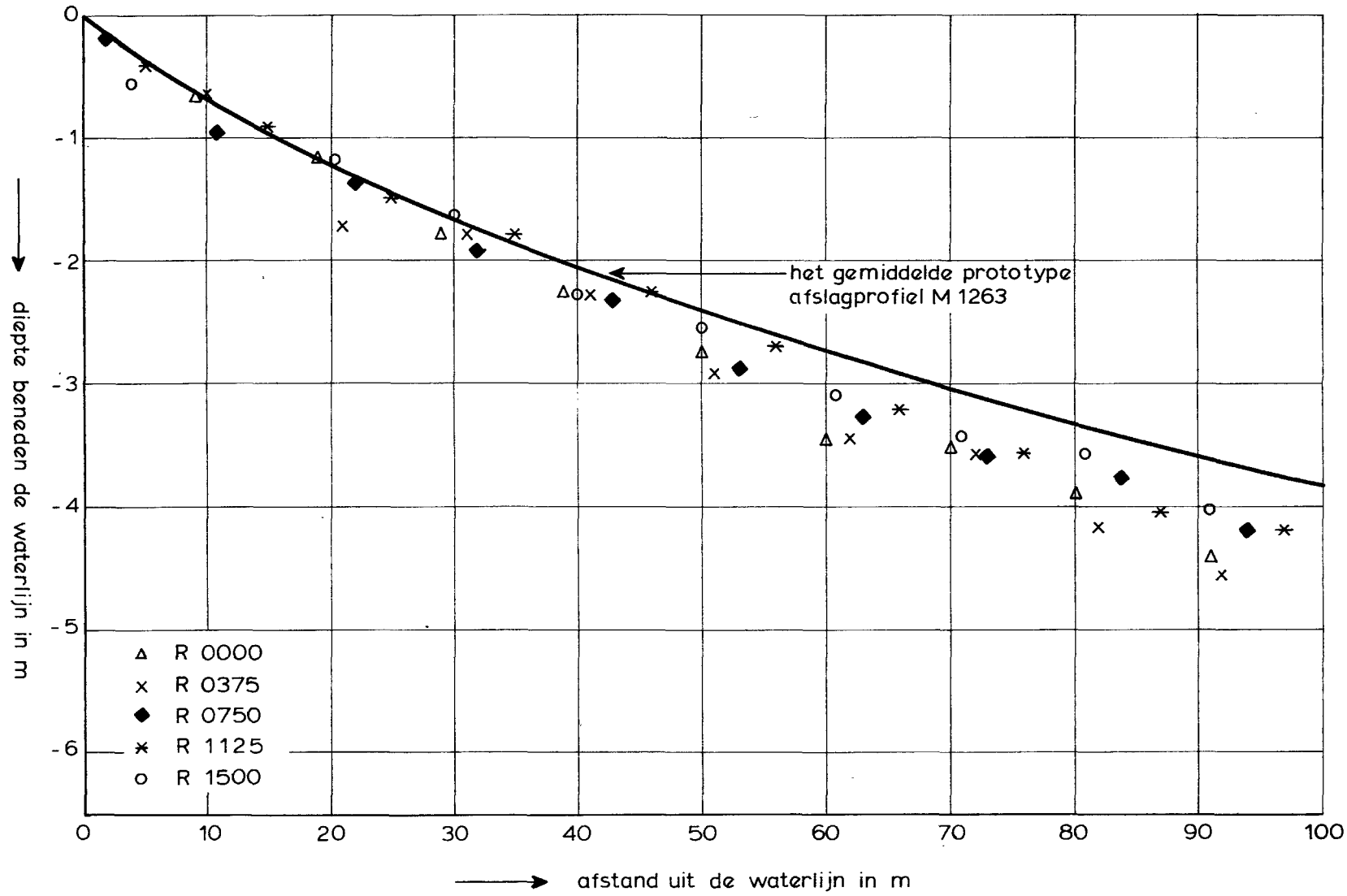
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1653

FIG. 81

P002

PROTOTYPE AFSLAGPROFIELEN NA 1UUR MODELTIJD



WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1653

FIG. 82

P003

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

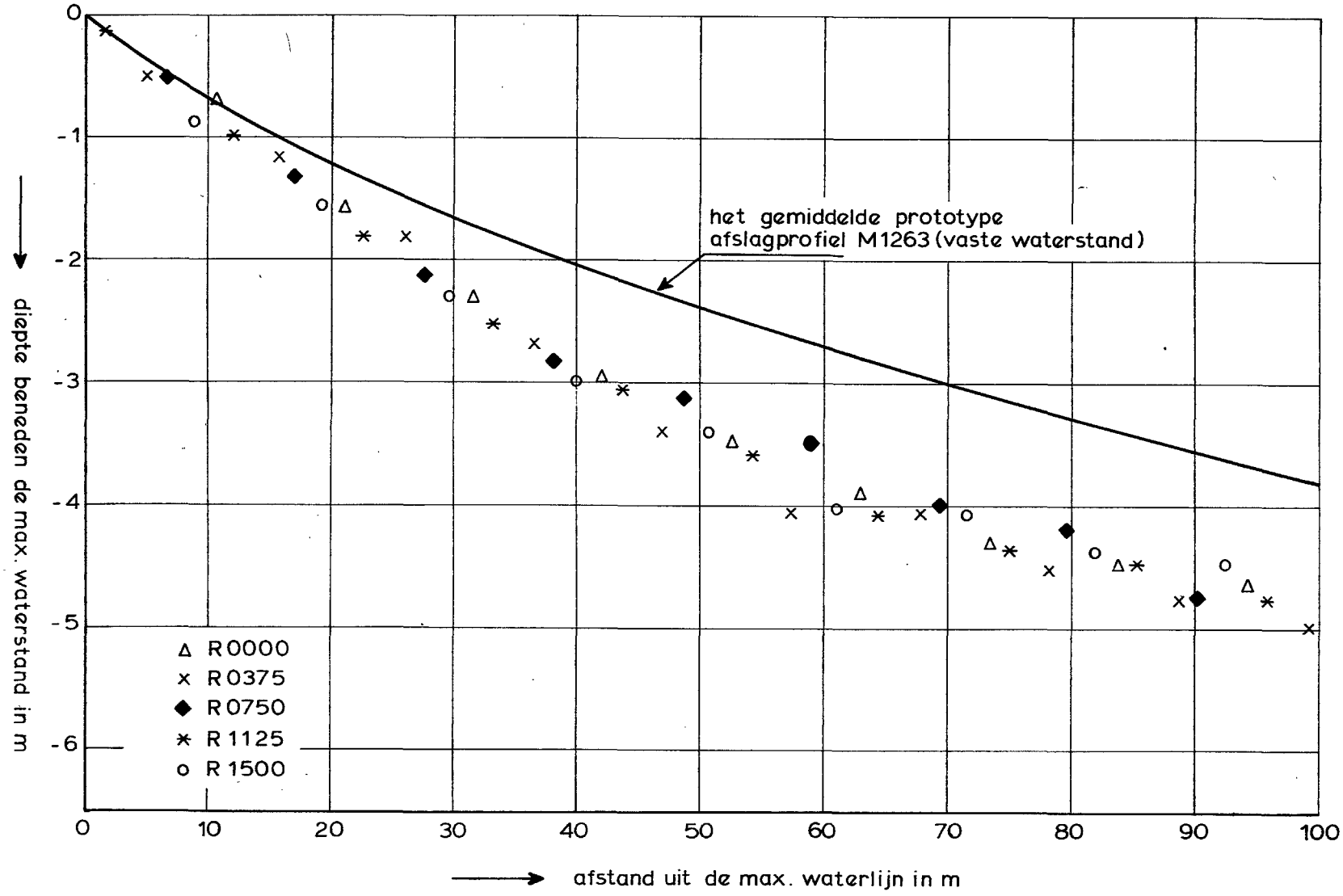
PROTOTYPE AFSLAGPROFIELEN NA 2,75 uur MODELTIJD

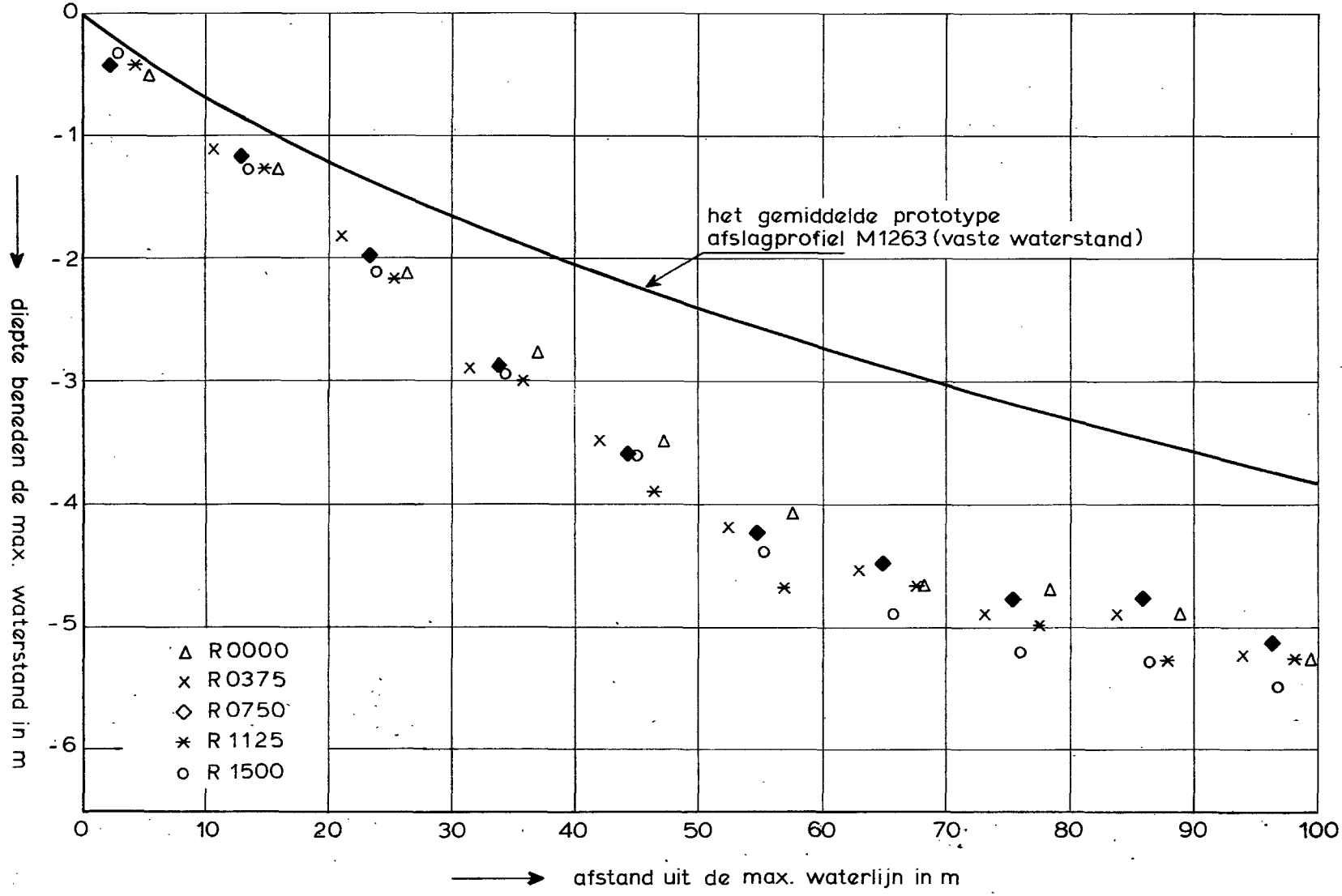
VARIERENDE WATERSTAND

M 1653

FIG. 83

P004





PROTOTYPE AFSLAGPROFIELEN NA 4,1 uur MODELTIJD

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

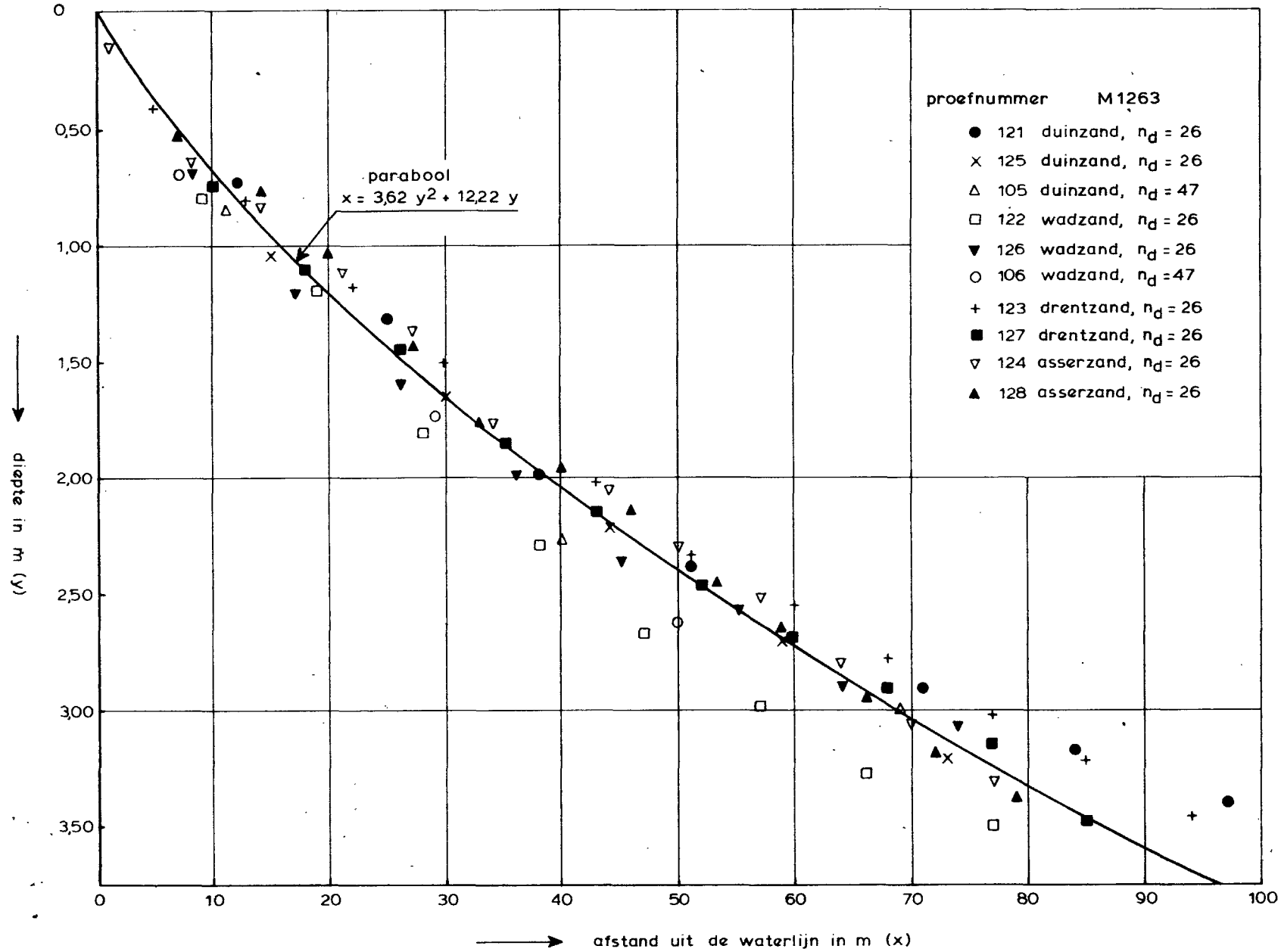
M 1653

VARIERENDE WATERSTAND

P004

FIG. 84

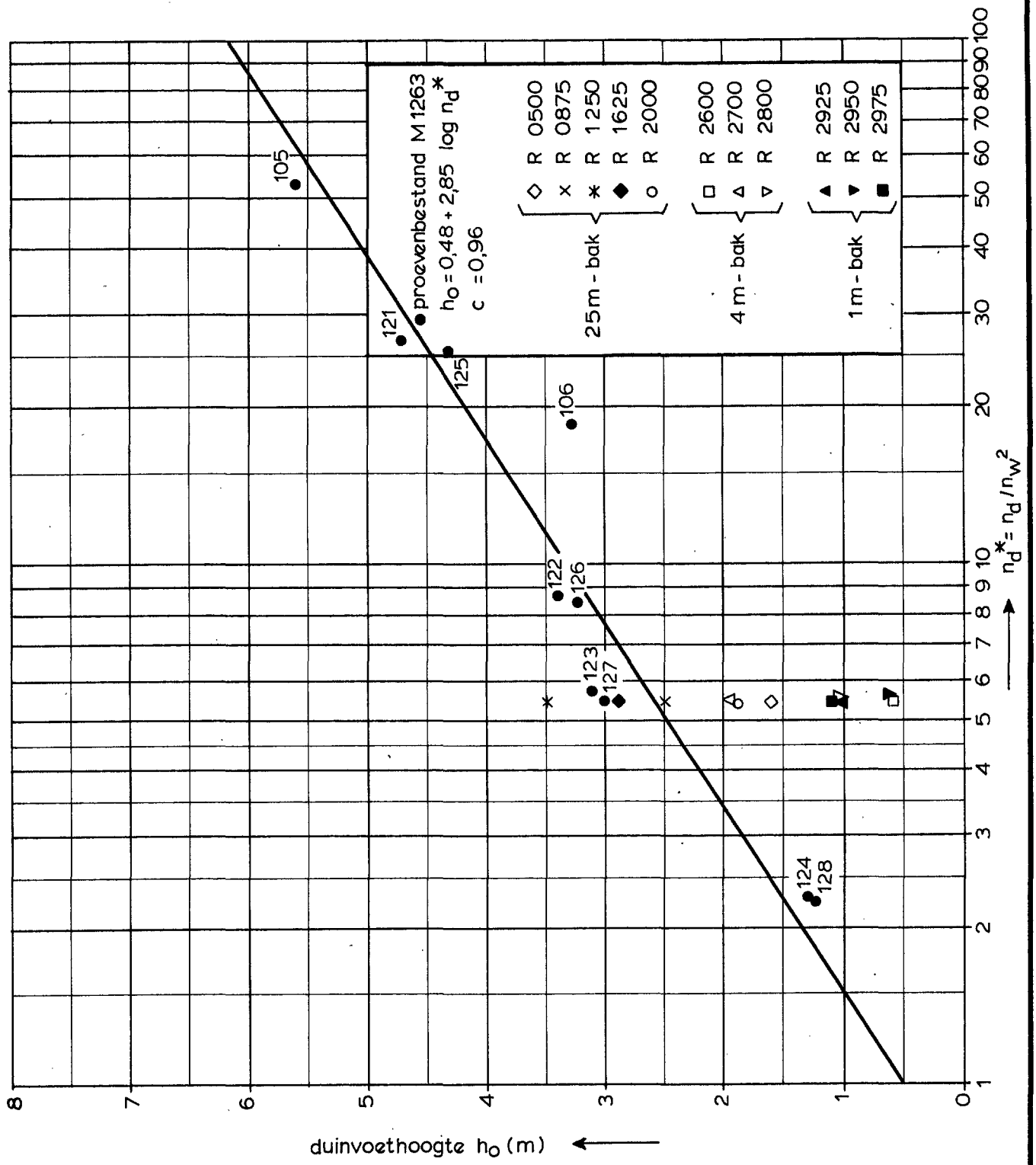
PROTOTYPE AFSLAGPROFIELEN NA 1 uur
MODELTIJD TWEE-DIMENSIONAAL
ONDERZOEK



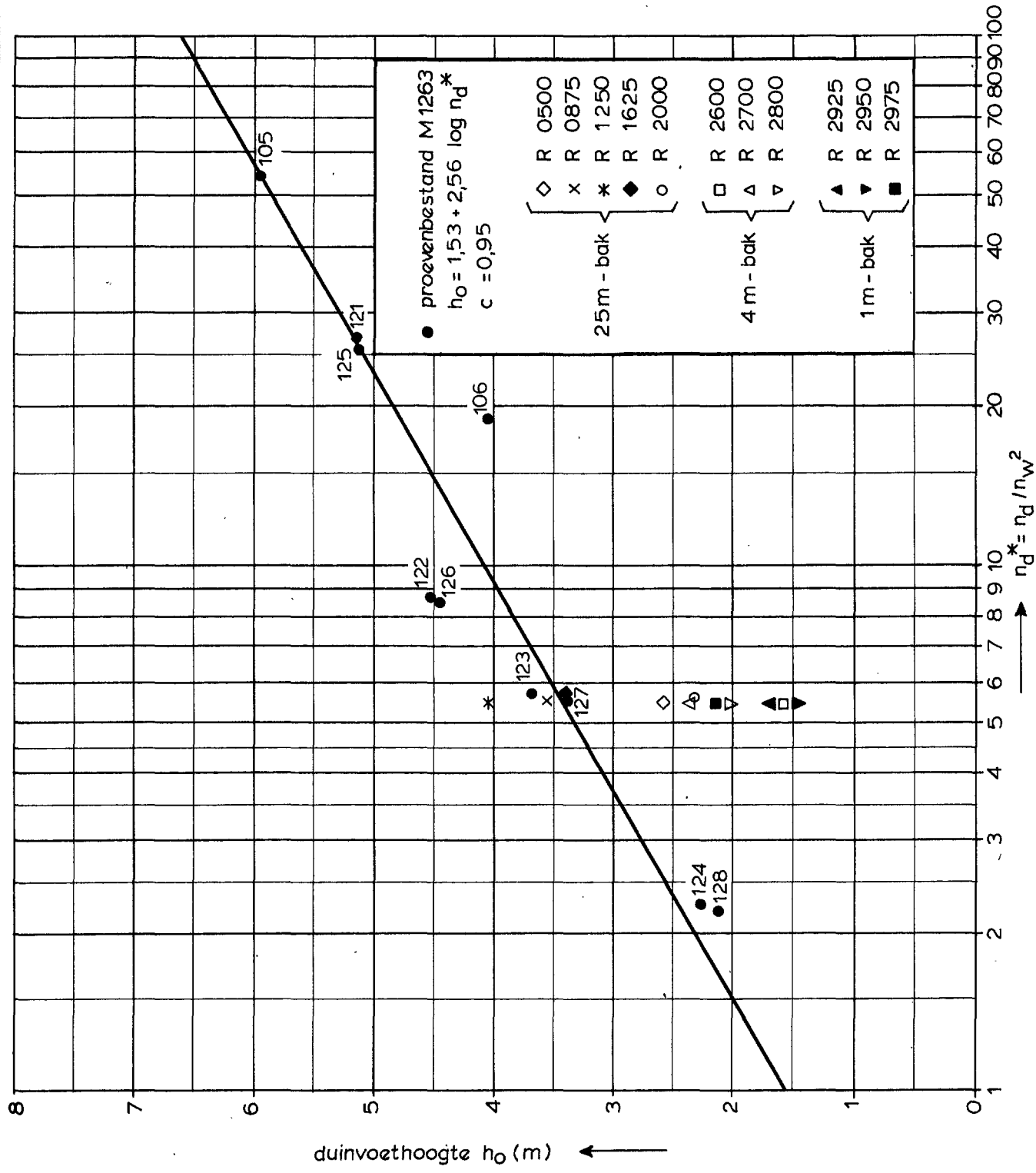
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1653

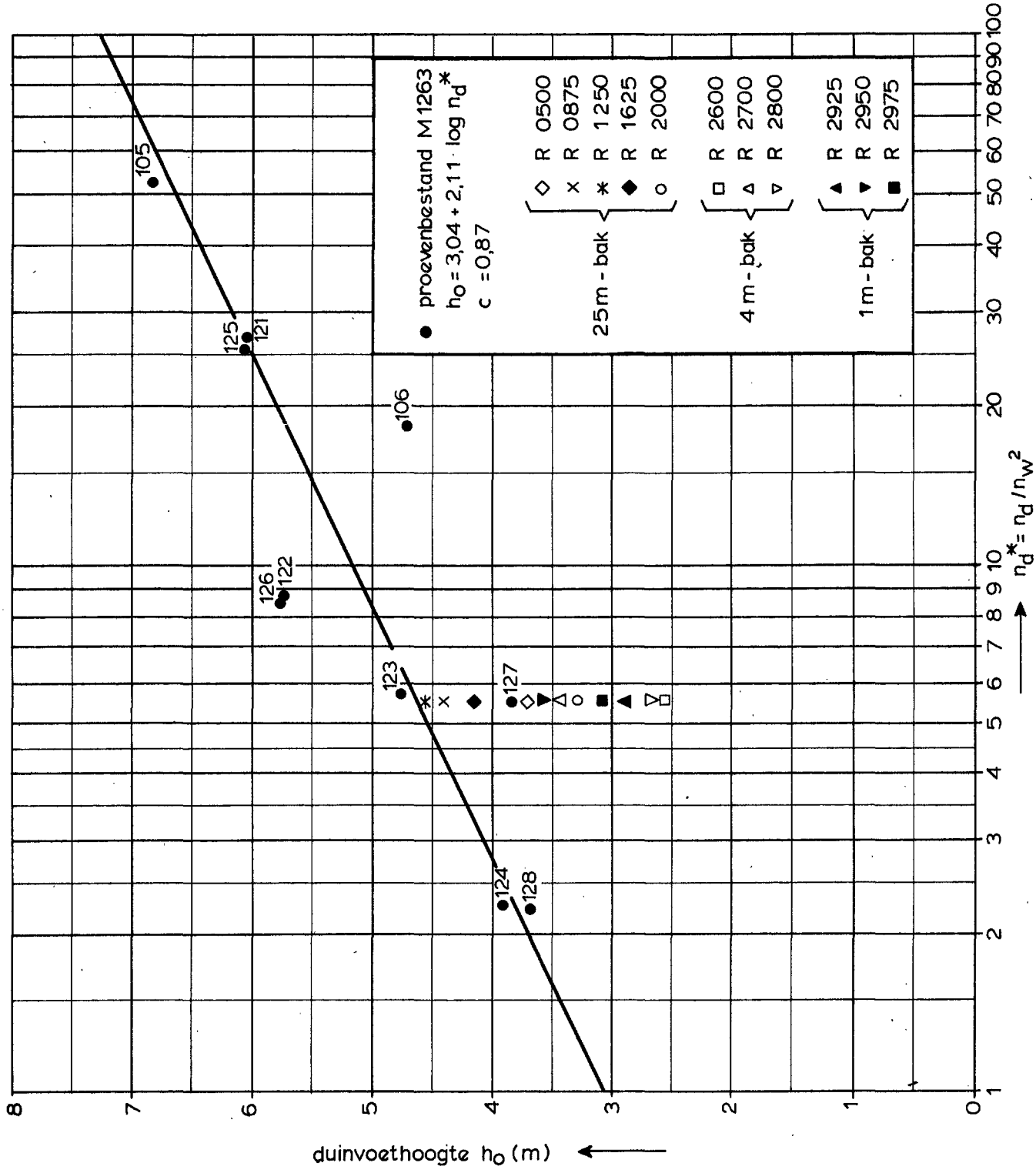
FIG. 85



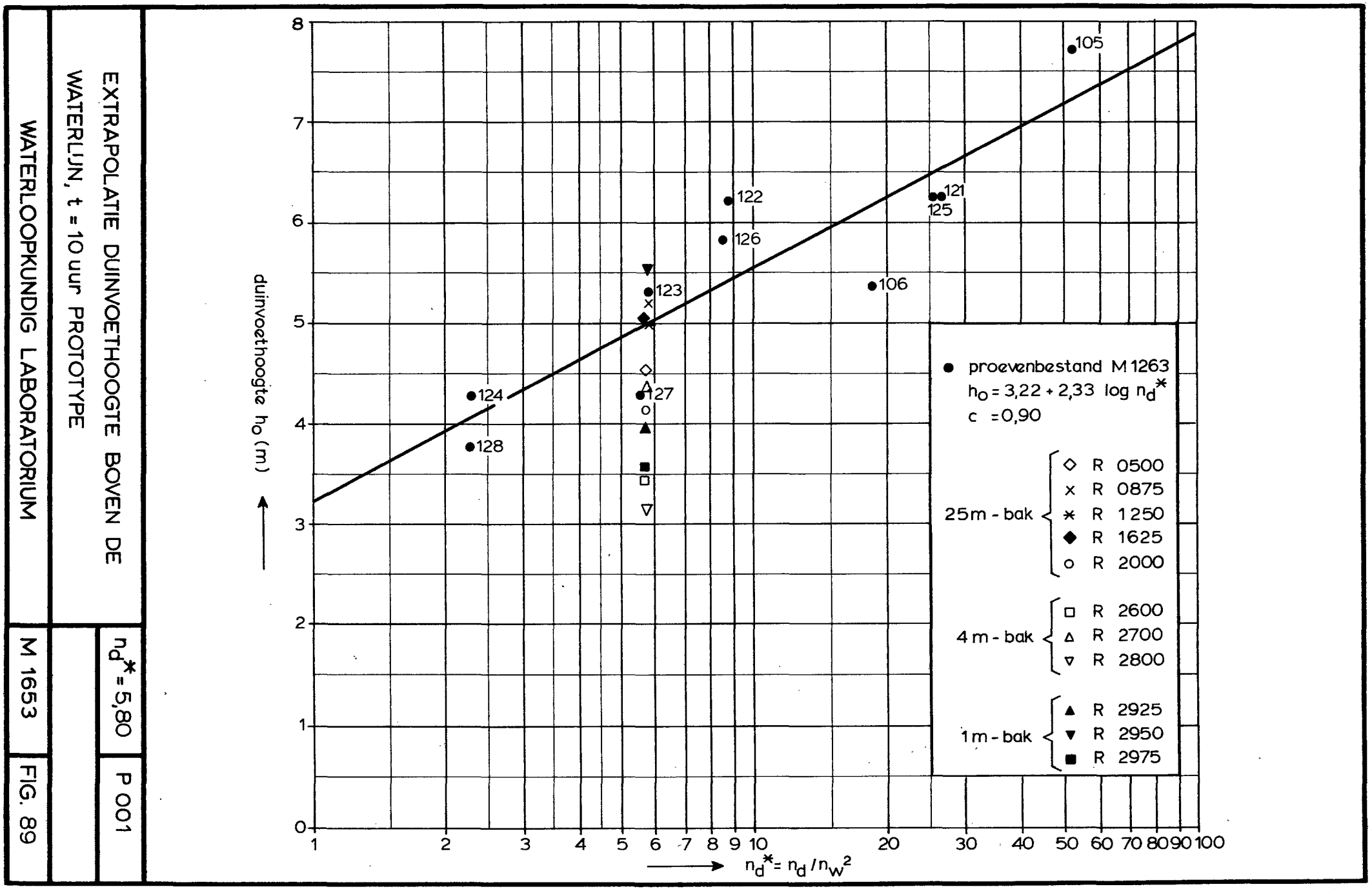
EXTRAPOLATIE DUINVOETHOOGTE BOVEN DE WATERLIJN, t = 1 uur PROTOTYPE	$n_d^* = 5{,}56$	P 001
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1653	FIG. 86

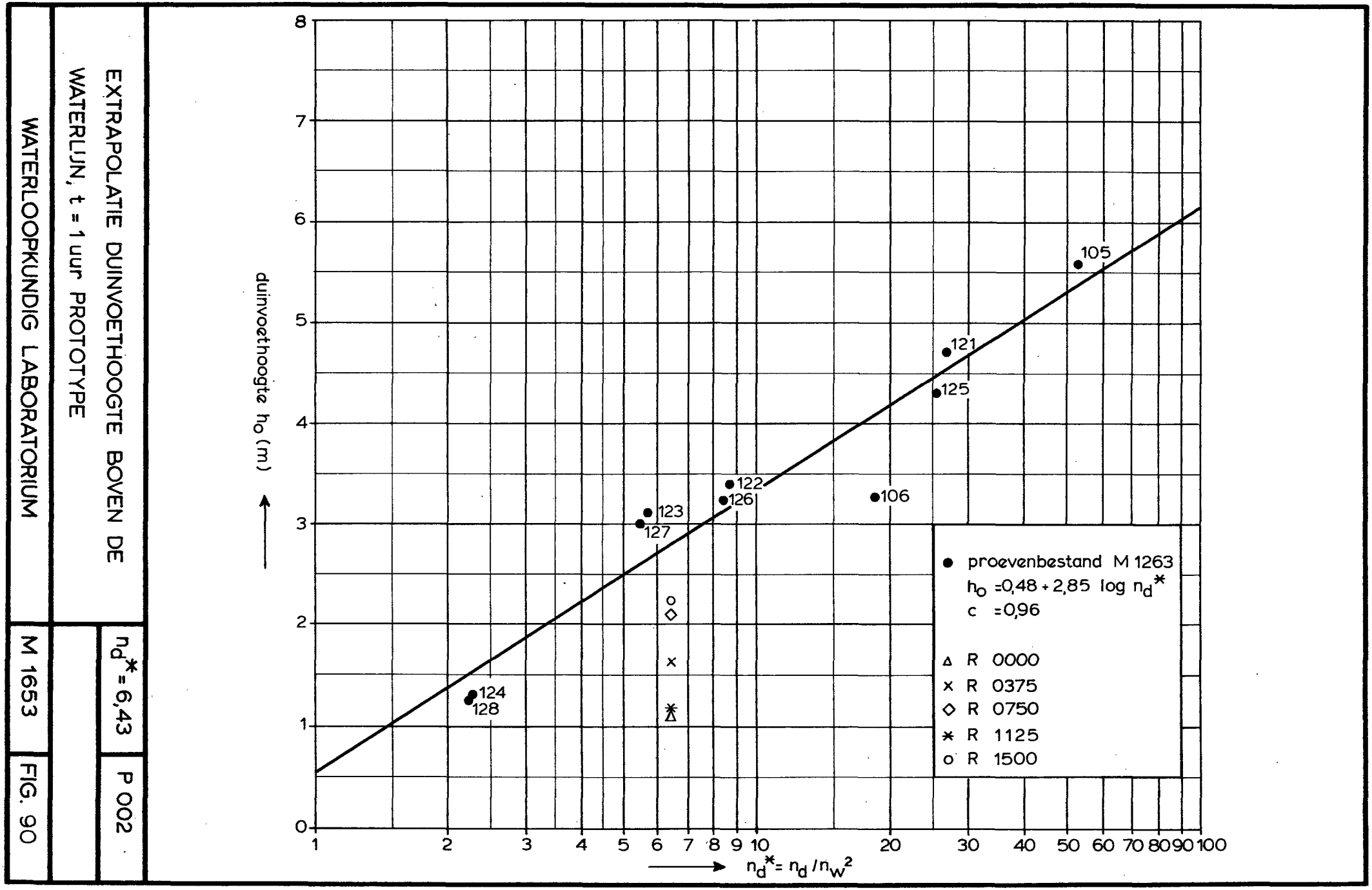


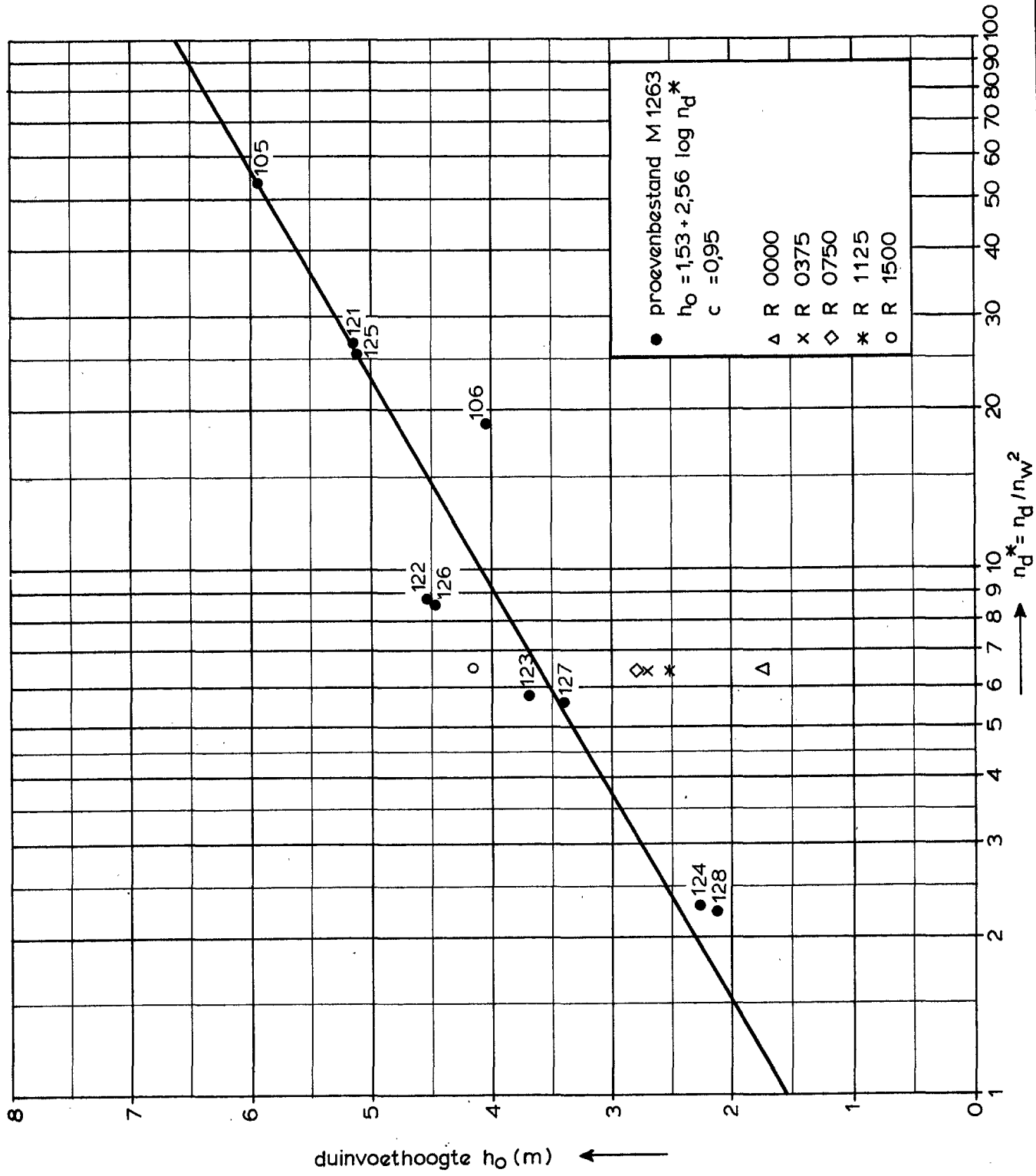
EXTRAPOLATIE DUINVOETHOOGTE BOVEN DE WATERLIJN, t = 2uur PROTOTYPE	$n_d^* = 5{,}56$	P 001
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1653	FIG. 87



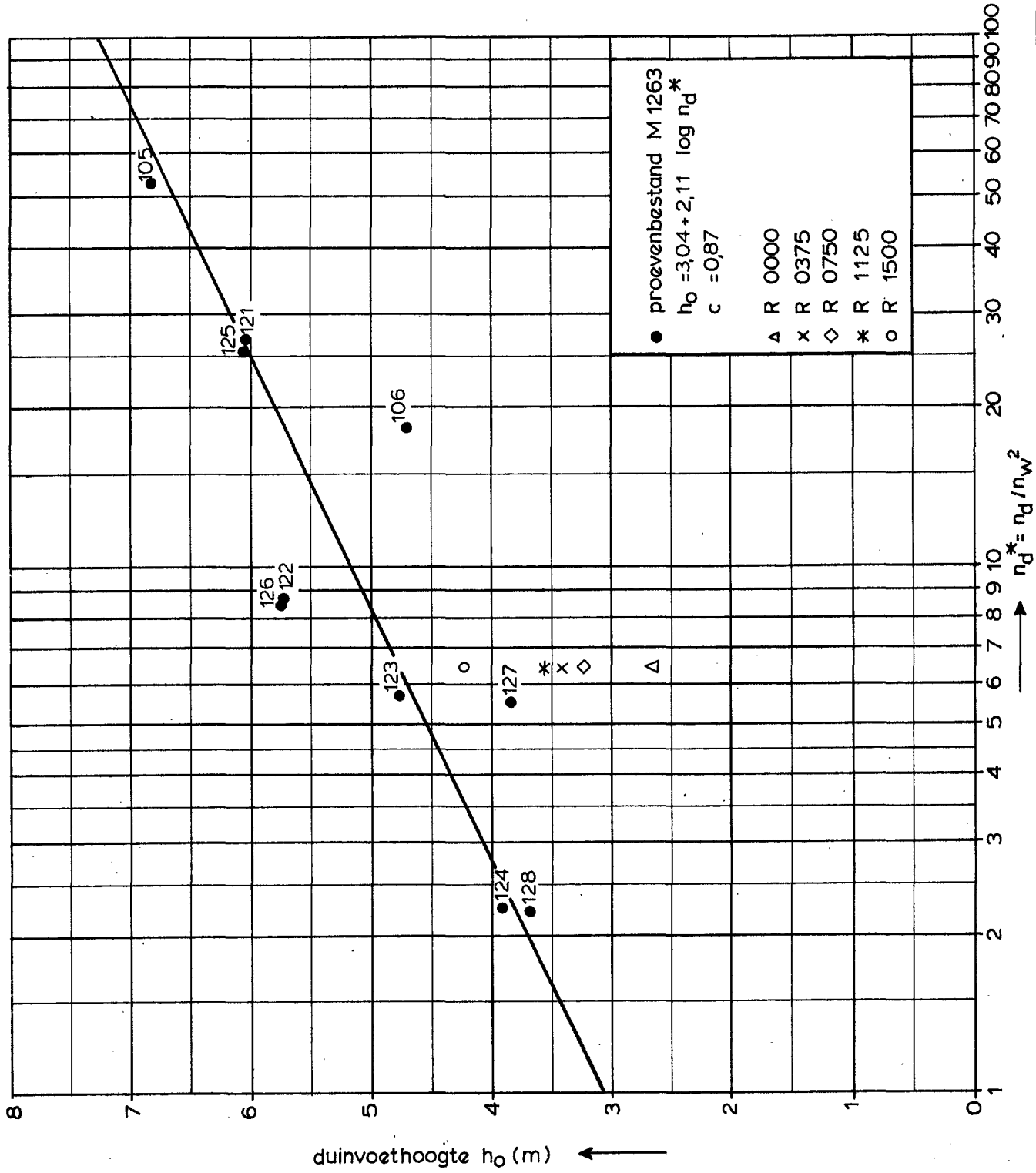
EXTRAPOLATIE DUINVOETHOOGTE BOVEN DE WATERLIJN, t = 5 uur PROTOTYPE	$n_d^* = 5{,}56$	P 001
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1653	FIG. 88


EXTRAPOLATIE DUINVOETHOOGTE BOVEN DE WATERLIJN, t = 10 uur PROTOTYPE
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM
M 1653
FIG. 89
P 001
$n_d^* = 5{,}80$
duinvoethoogte h_o (m)
$n_d^* = n_d / n_w^2$
105
122
121
125
126
106
123
124
127
128
proevenbestand M 1263
$h_o = 3{,}22 + 2{,}33 \log n_d^*$
c = 0,90
25m - bak
R 0500
R 0875
R 1250
R 1625
R 2000
4 m - bak
R 2600
R 2700
R 2800
1 m - bak
R 2925
R 2950
R 2975

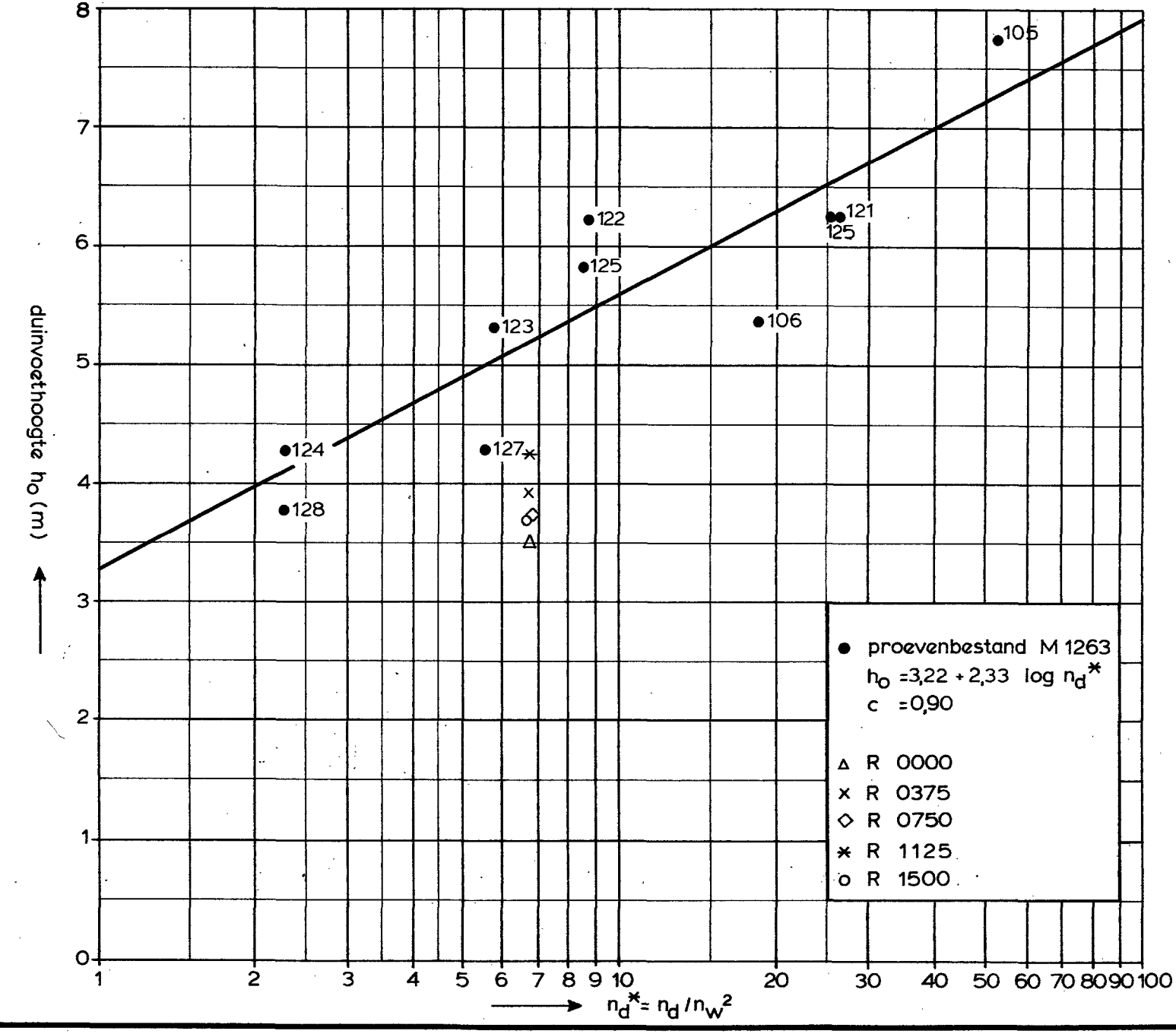

EXTRAPOLATIE DUINVOETHOOGTE BOVEN DE WATERLIJN, t = 1 uur PROTOTYPE
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM
M 1653
FIG. 90
$n_d^* = 6{,}43$
P 002
duinvoethoogte h_o (m)
$n_d^* = n_d / n_w^2$
0 1 2 3 4 5 6 7 8
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100
105
121
125
122
126
106
123
127
124
128
proevenbestand M 1263
$h_o = 0{,}48 + 2{,}85 \log n_d^*$
c = 0,96
R 0000
R 0375
R 0750
R 1125
R 1500



EXTRAPOLATIE DUINVOETHOOGTE BOVEN DE WATERLIJN, t = 2 uur PROTOTYPE	n_d^* = 6,43	P 002
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1653	FIG. 91



EXTRAPOLATIE DUINVOETHOOGTE BOVEN DE WATERLIJN, t = 5 uur PROTOTYPE	n_d^* = 6,43	P 002
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1653	FIG. 92



EXTRAPOLATIE DUINVOETHOOGTE BOVEN DE WATERLIJN, t = 10 uur PROTOTYPE

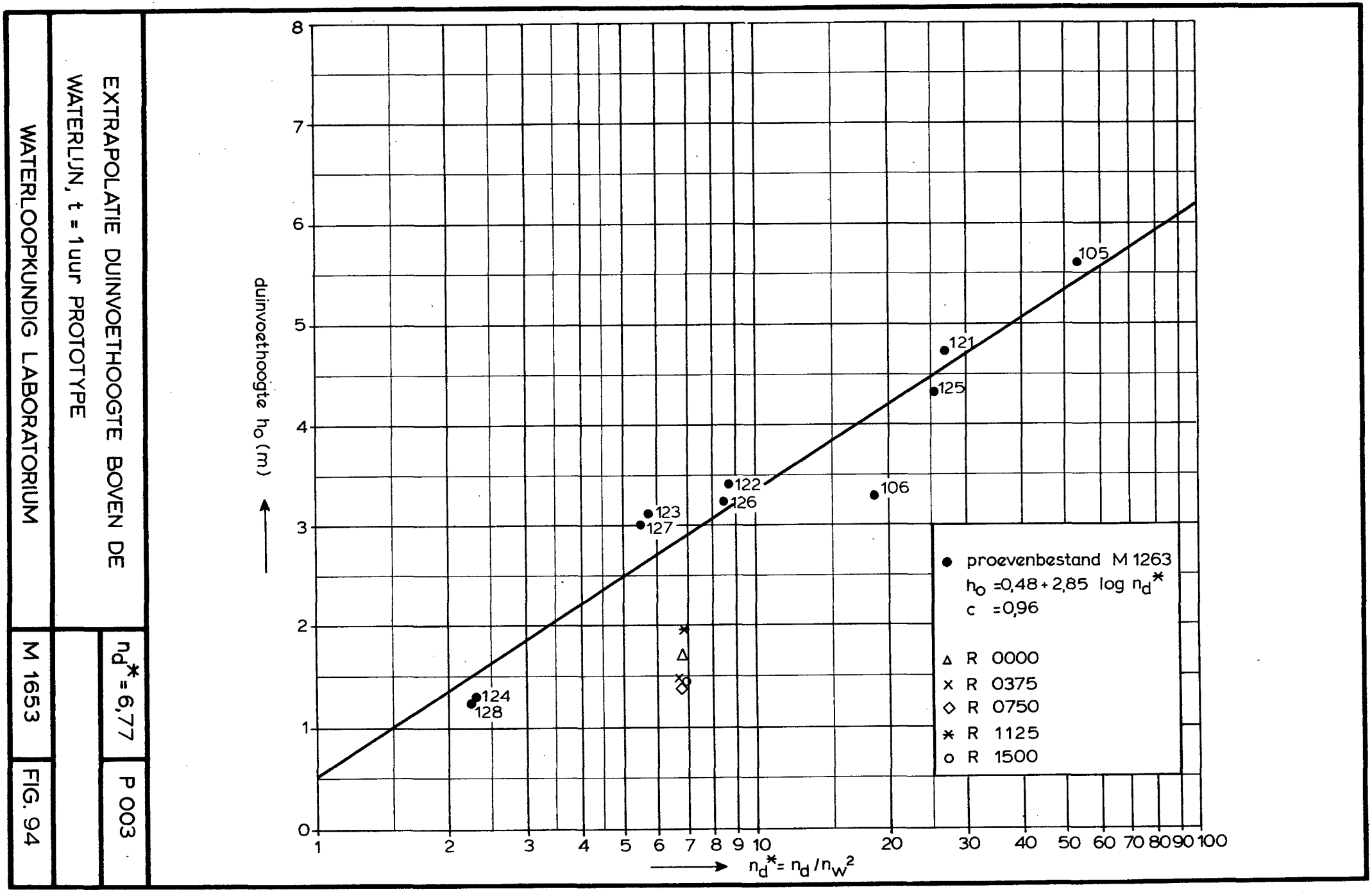
n_d^* = 6,85

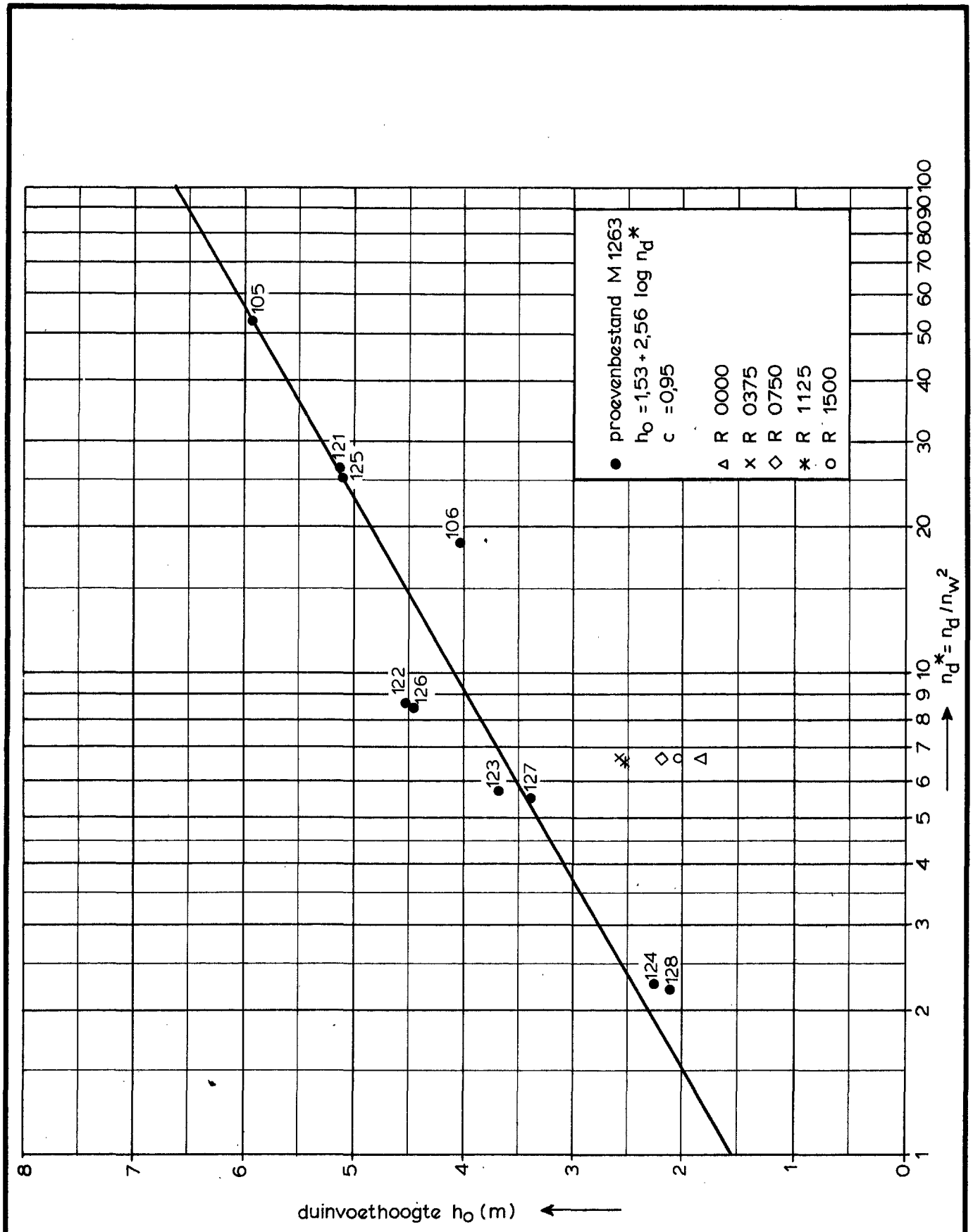
P 002

M 1653

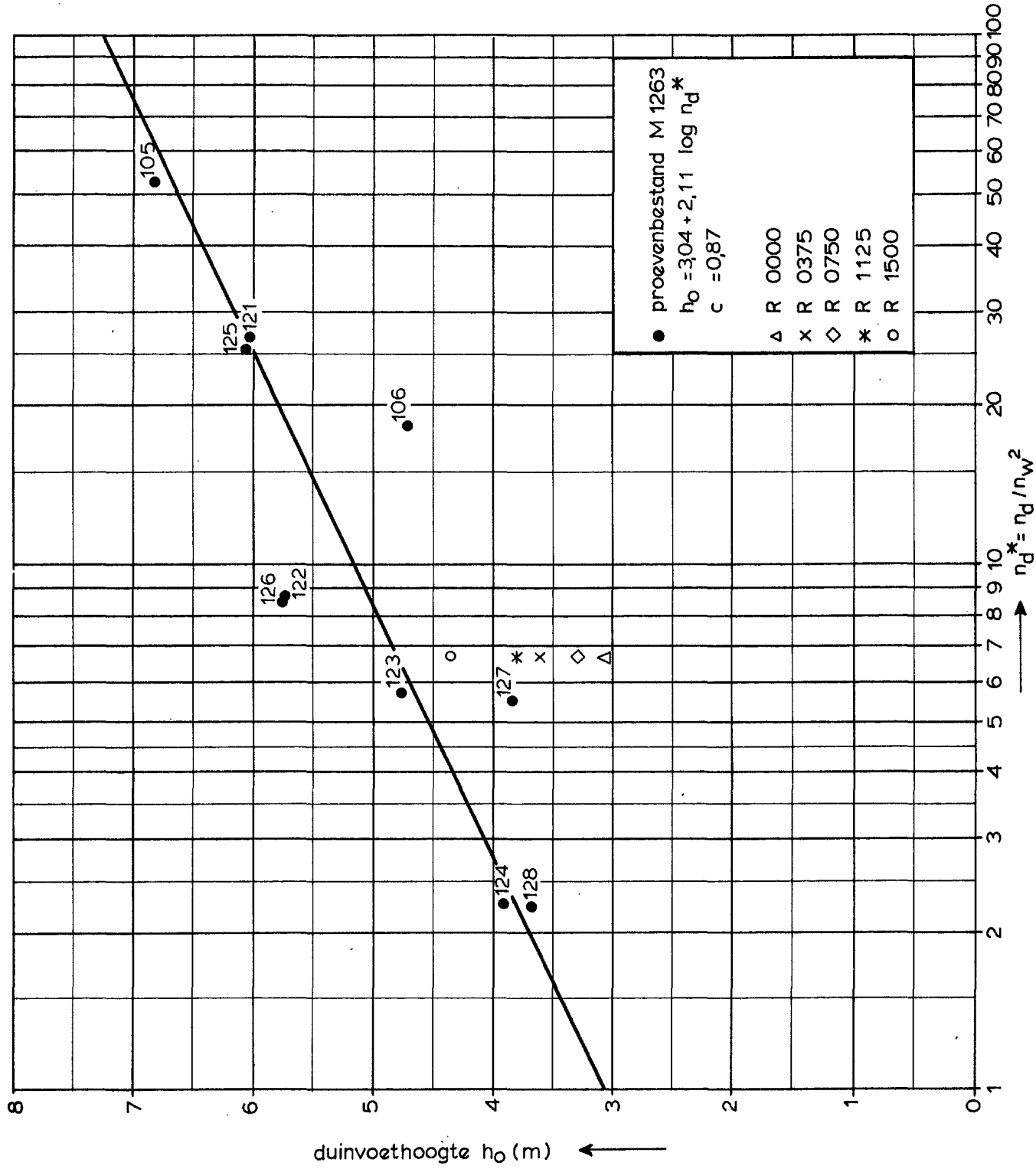
FIG. 93

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

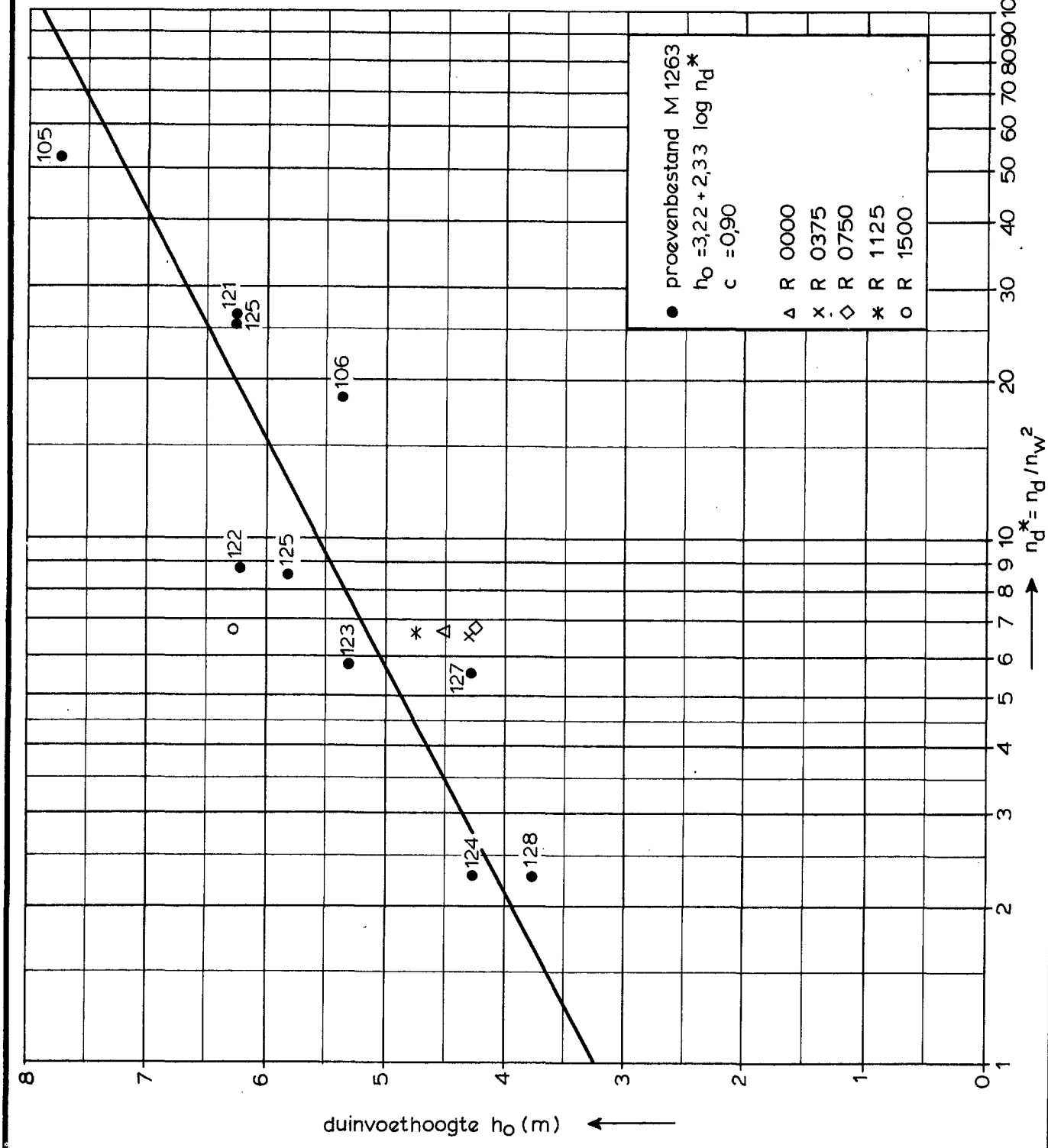

EXTRAPOLATIE DUINVOETHOOGTE BOVEN DE WATERLIJN, t = 1 uur PROTOTYPE
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM
M 1653
FIG. 94
P 003
$n_d^* = 6{,}77$
duinvoethoogte h_o (m)
$n_d^* = n_d / n_w^2$
0 1 2 3 4 5 6 7 8
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100
105
121
125
122
126
106
123
127
124
128
proevenbestand M 1263
$h_o = 0{,}48 + 2{,}85 \log n_d^*$
c = 0,96
R 0000
R 0375
R 0750
R 1125
R 1500



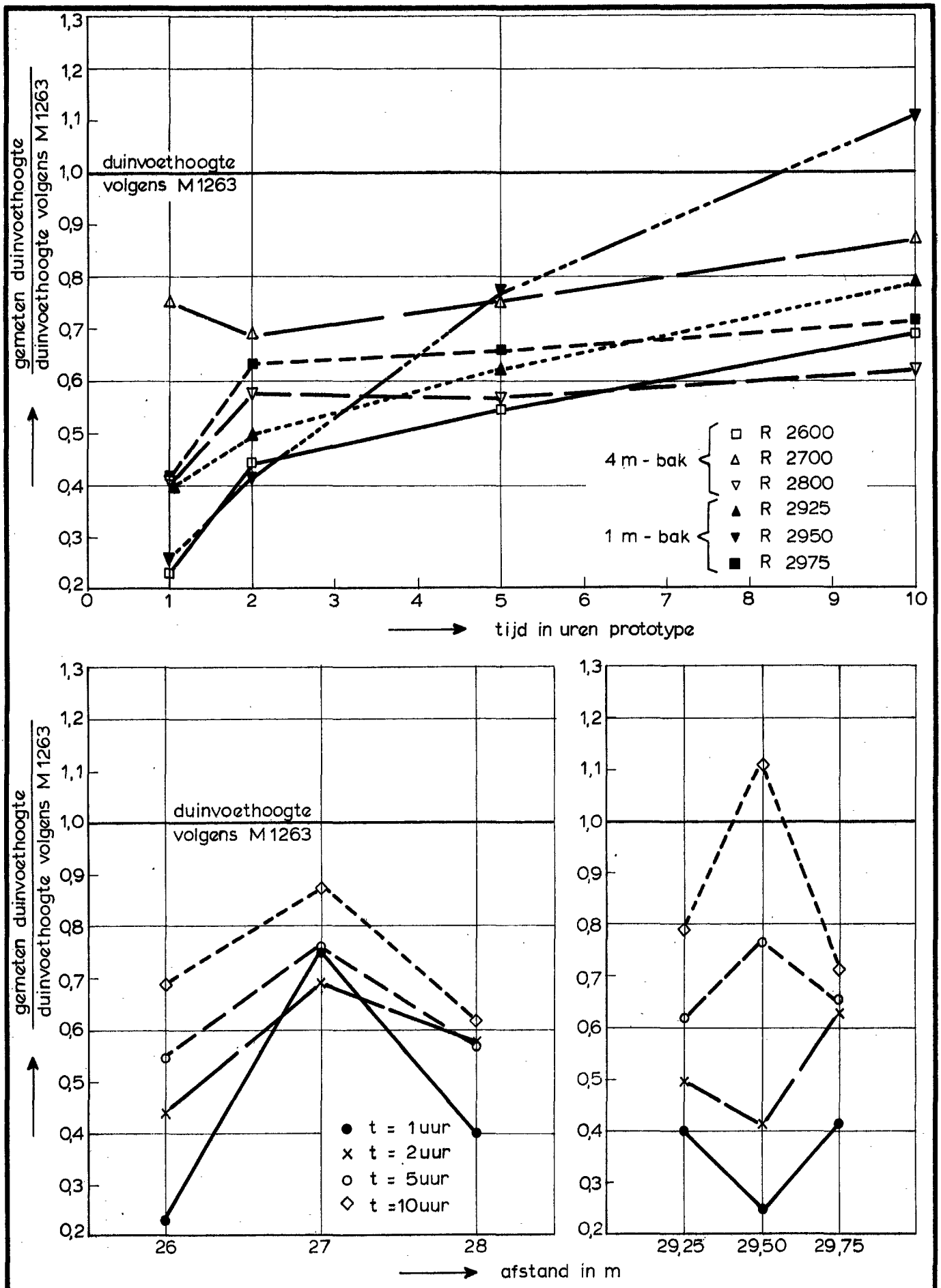
EXTRAPOLATIE DUINVOETHOOGTE BOVEN DE WATERLIJN, t = 2 uur PROTOTYPE	$n_d^* = 6{,}77$	P 003
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1653	FIG. 95



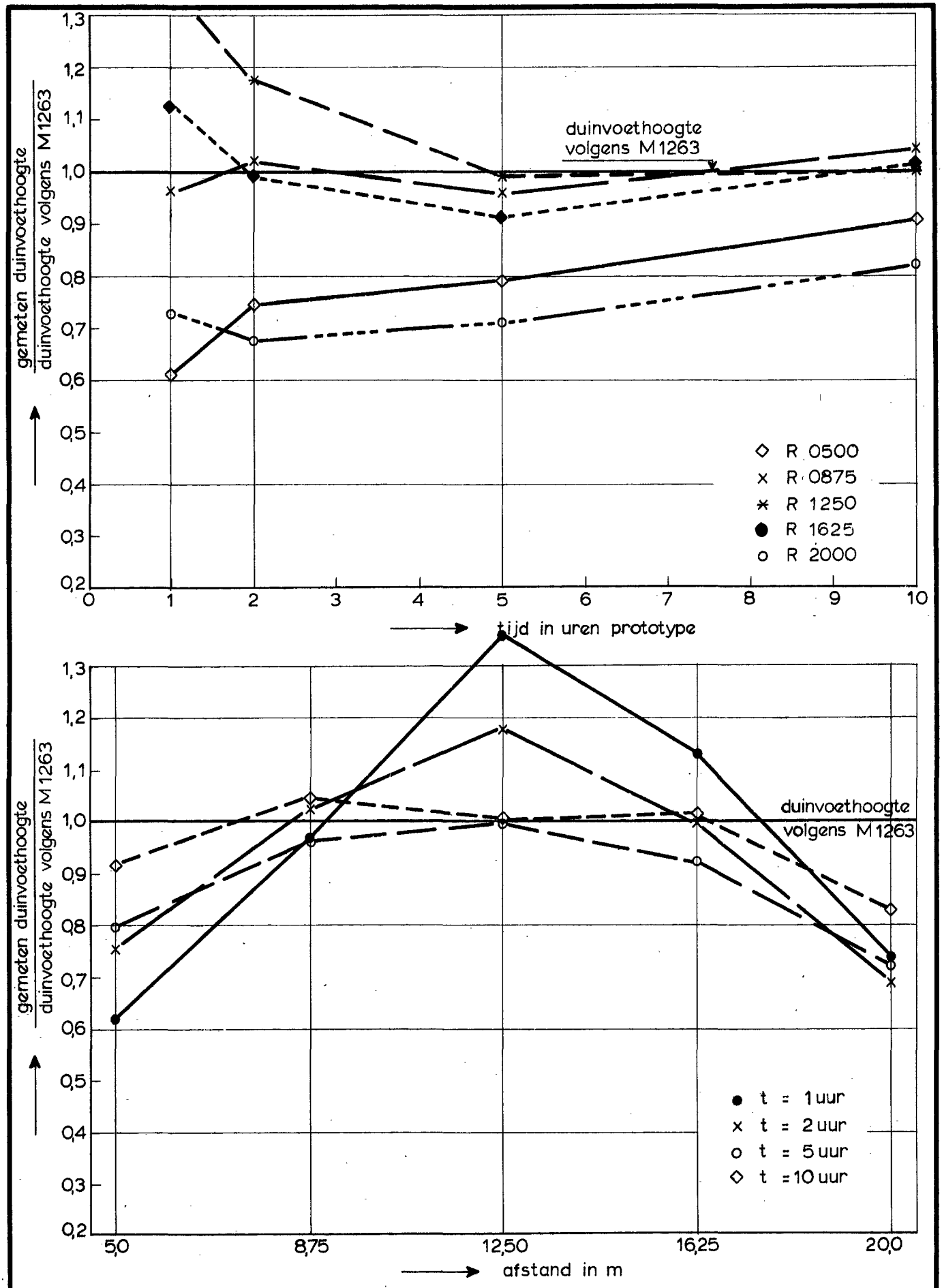
EXTRAPOLATIE DUINVOETHOOGTE BOVEN DE WATERLIJN, t = 5 uur PROTOTYPE	n_d^* = 6,77	P 003
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1653	FIG. 96



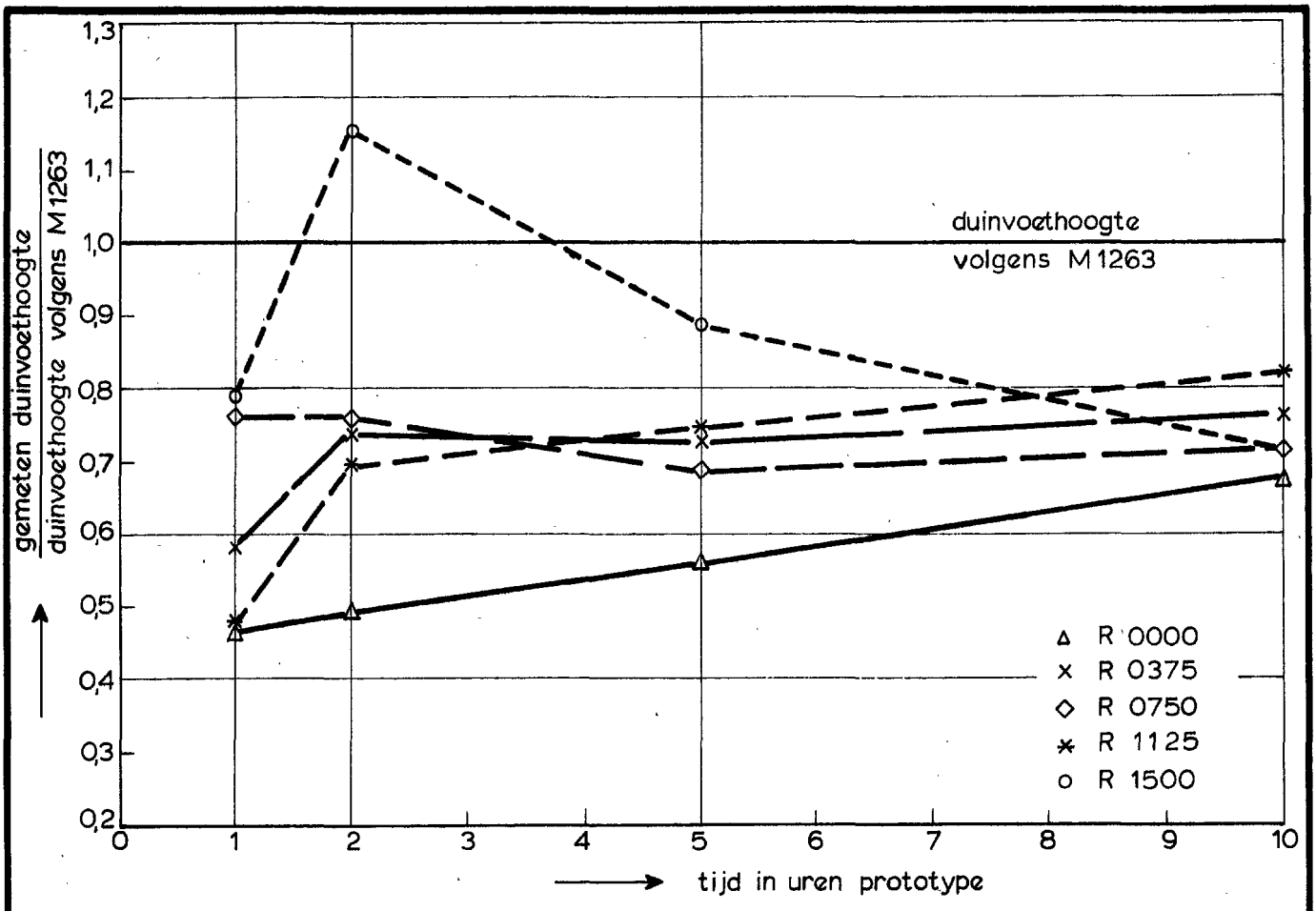
EXTRAPOLATIE DUINVOETHOOGTE BOVEN DE WATERLIJN, t = 10 uur PROTOTYPE	n_d* = 6,77	P 003
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1653	FIG. 97

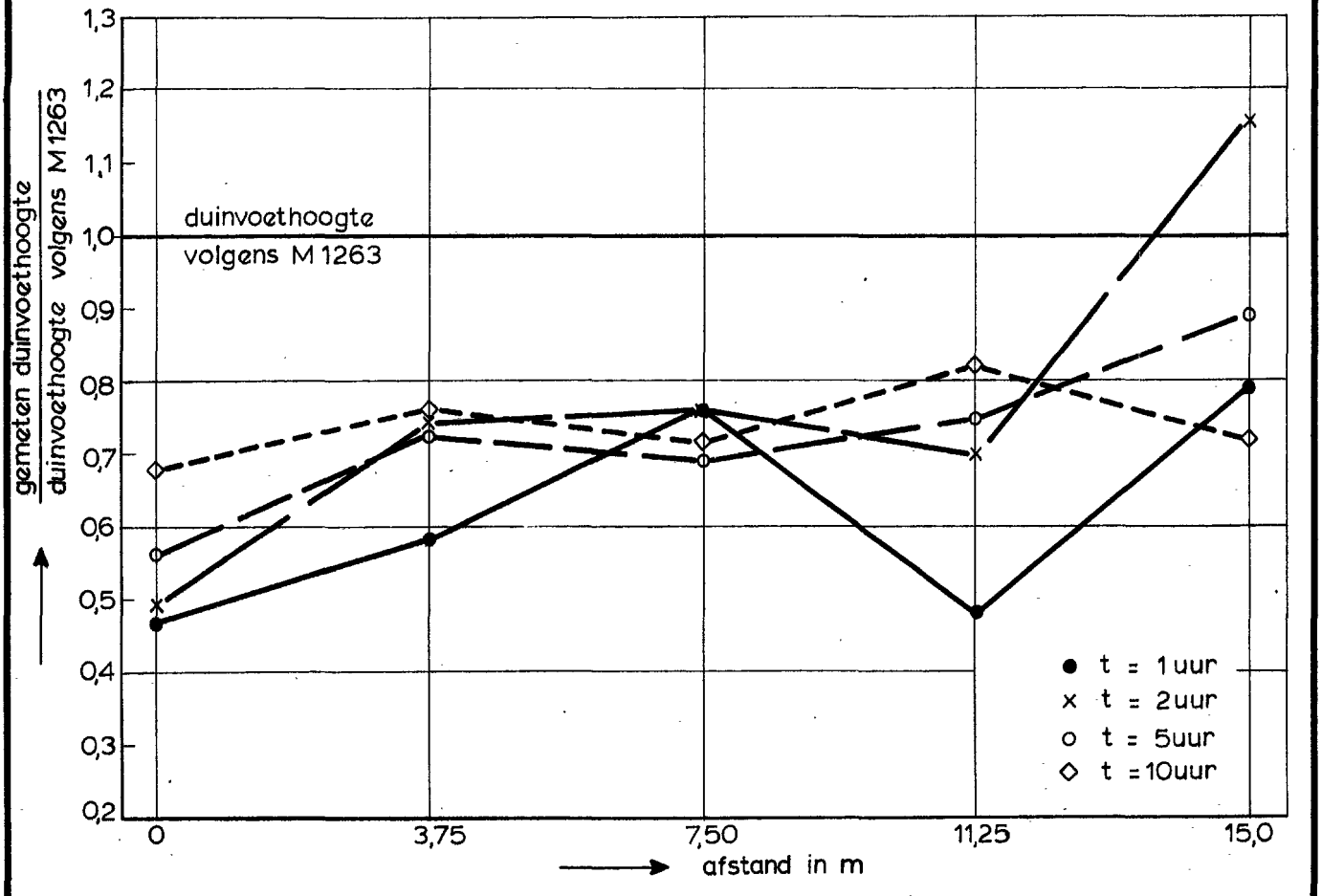


ONTWIKKELING DUINVOETHOOGTE		P 001
	4 m - bak ; 1 m - bak	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1653	FIG. 98

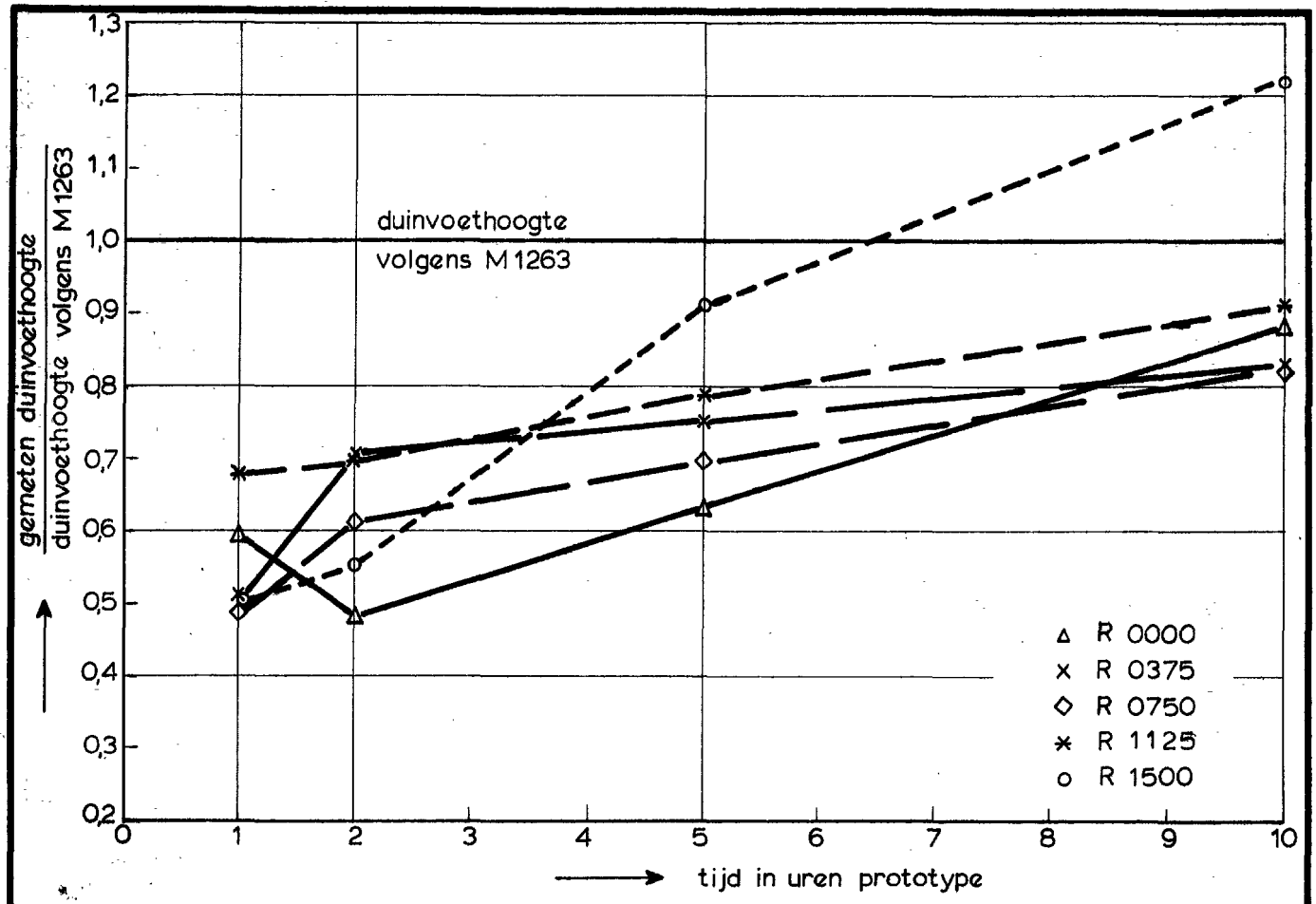


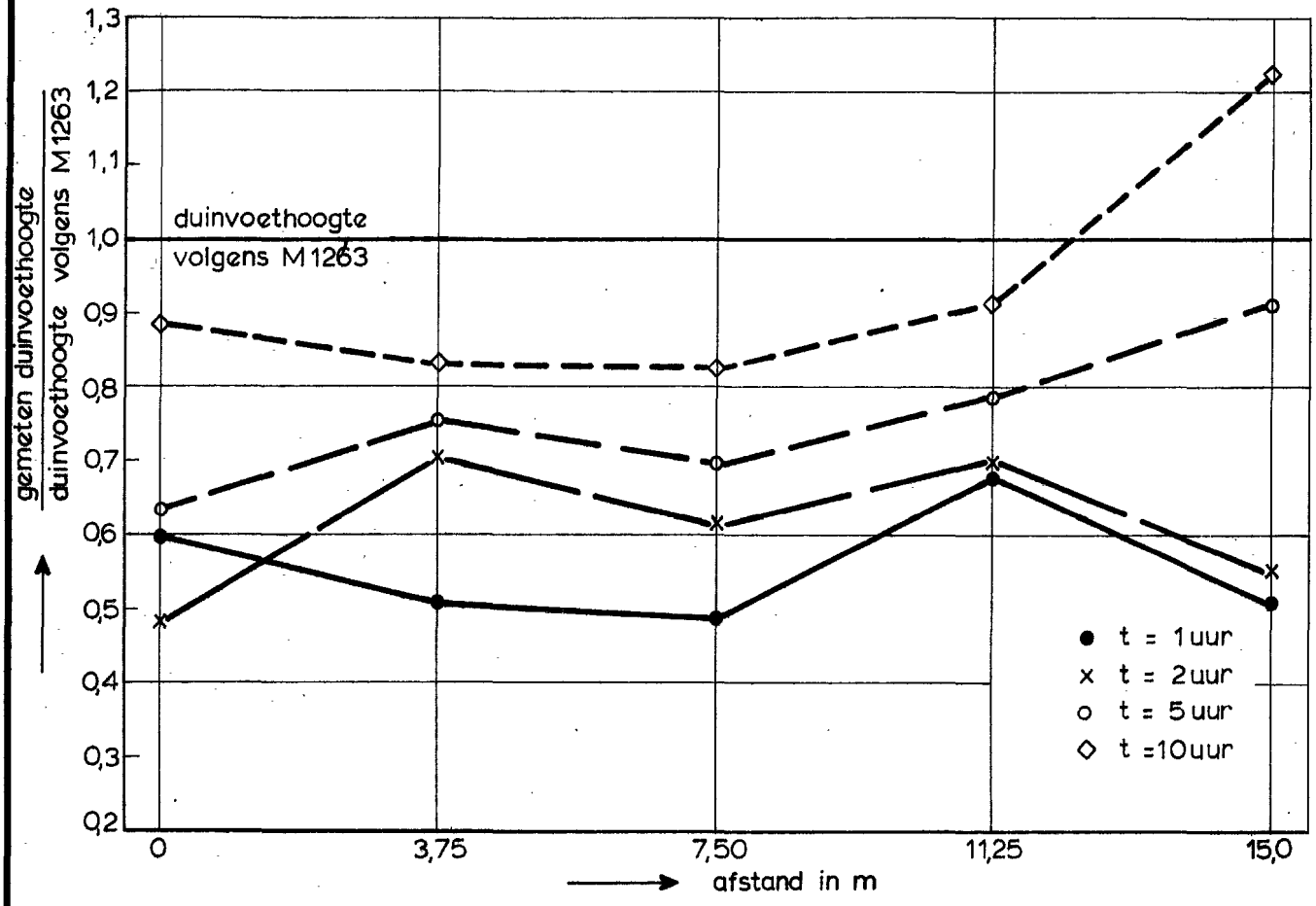
ONTWIKKELING DUINVOETHOOGTE		P 001
	25 m - bak	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1653	FIG. 99



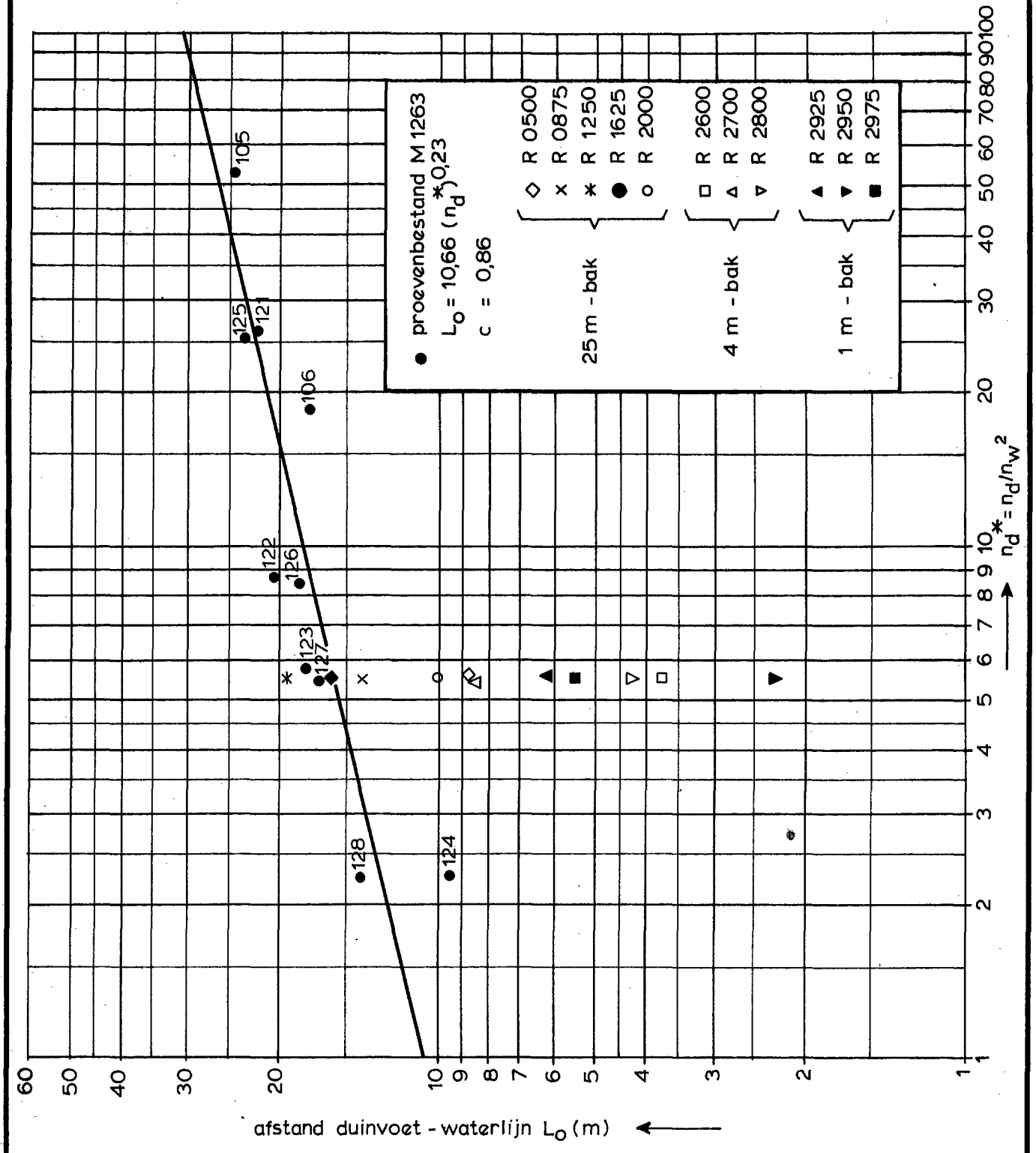


ONTWIKKELING DUINVOETHOOGTE		P002
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1653	FIG. 100

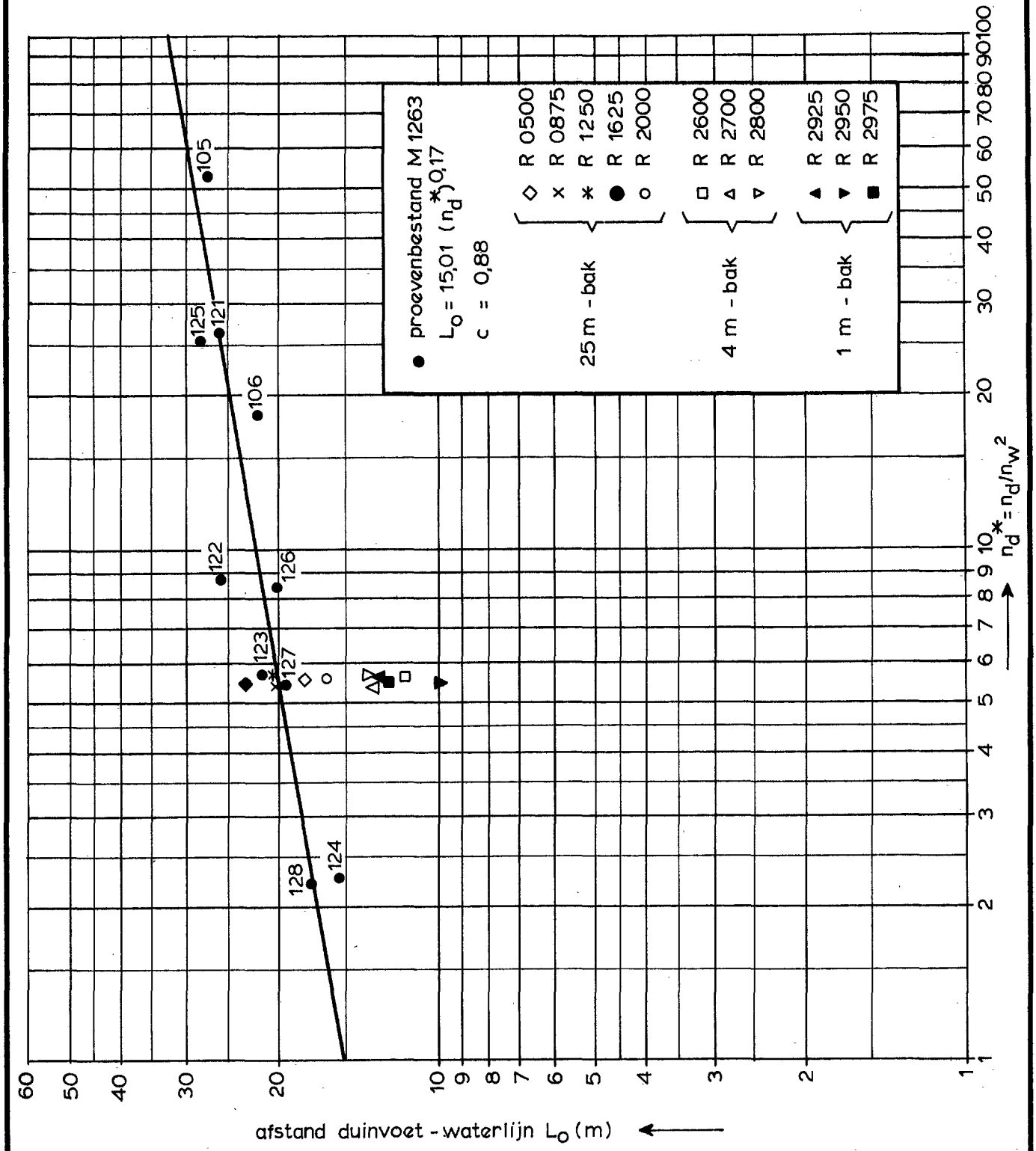




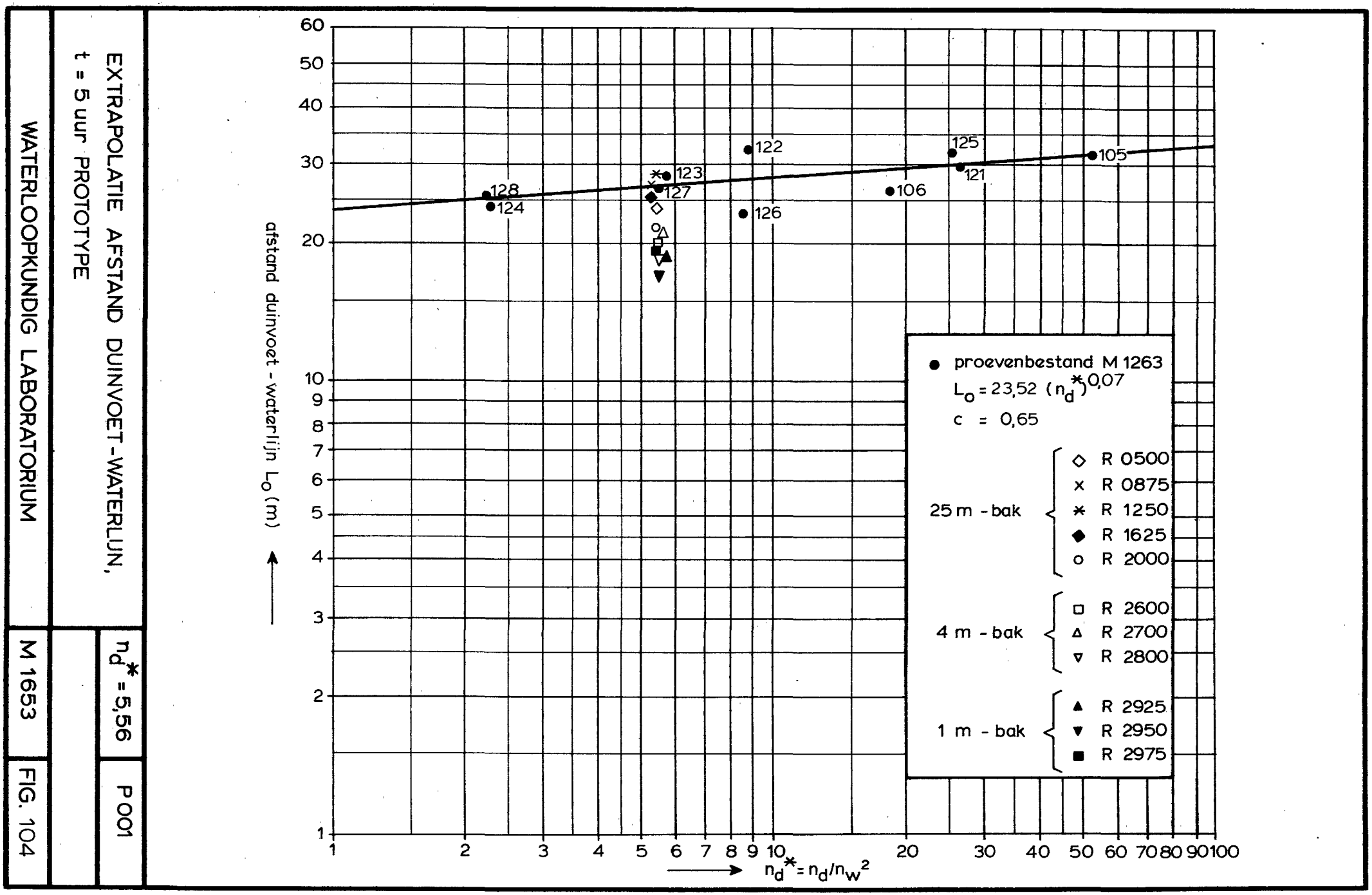
ONTWIKKELING DUINVOETHOOGTE		P003
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1653	FIG. 101

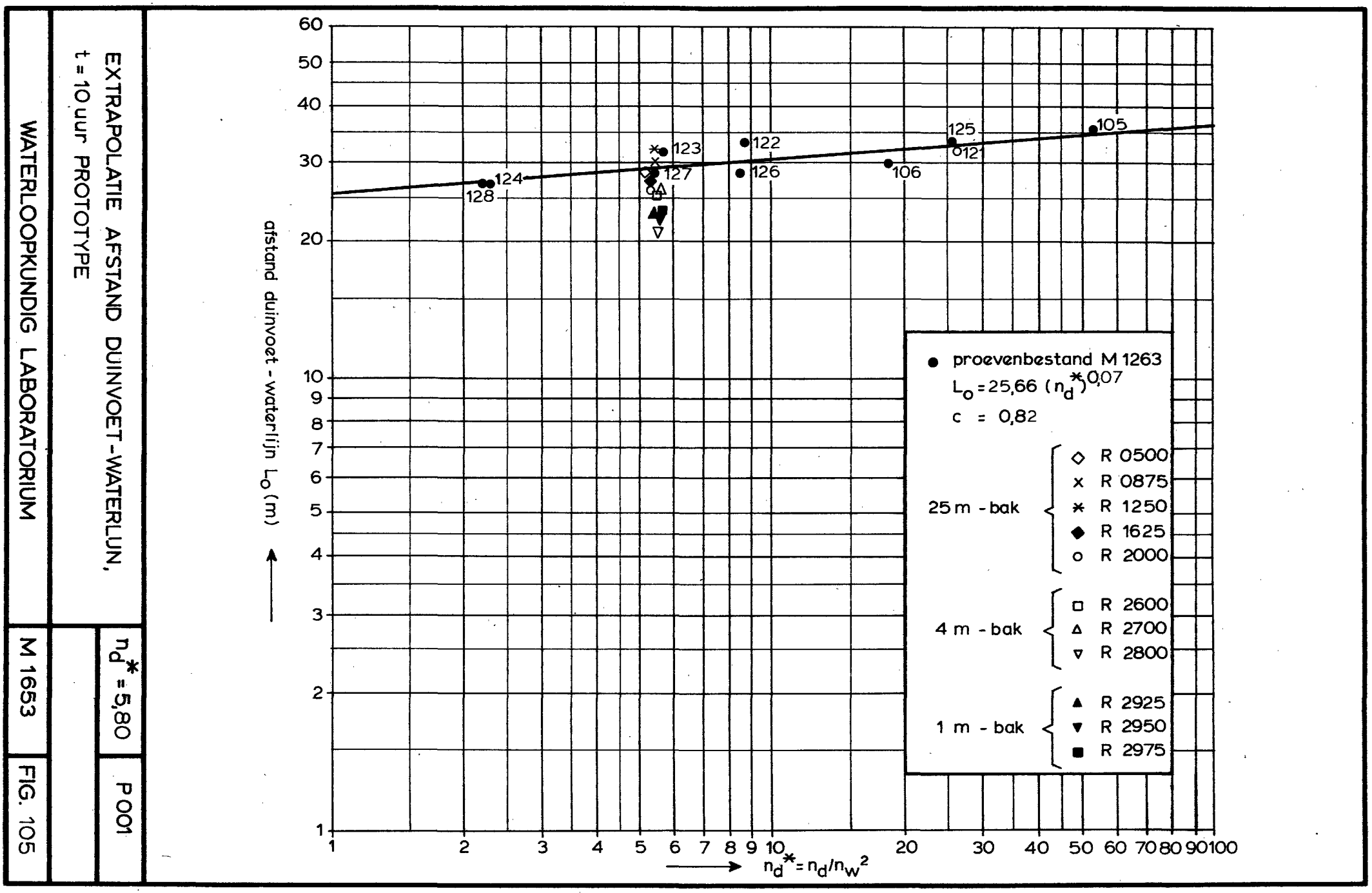


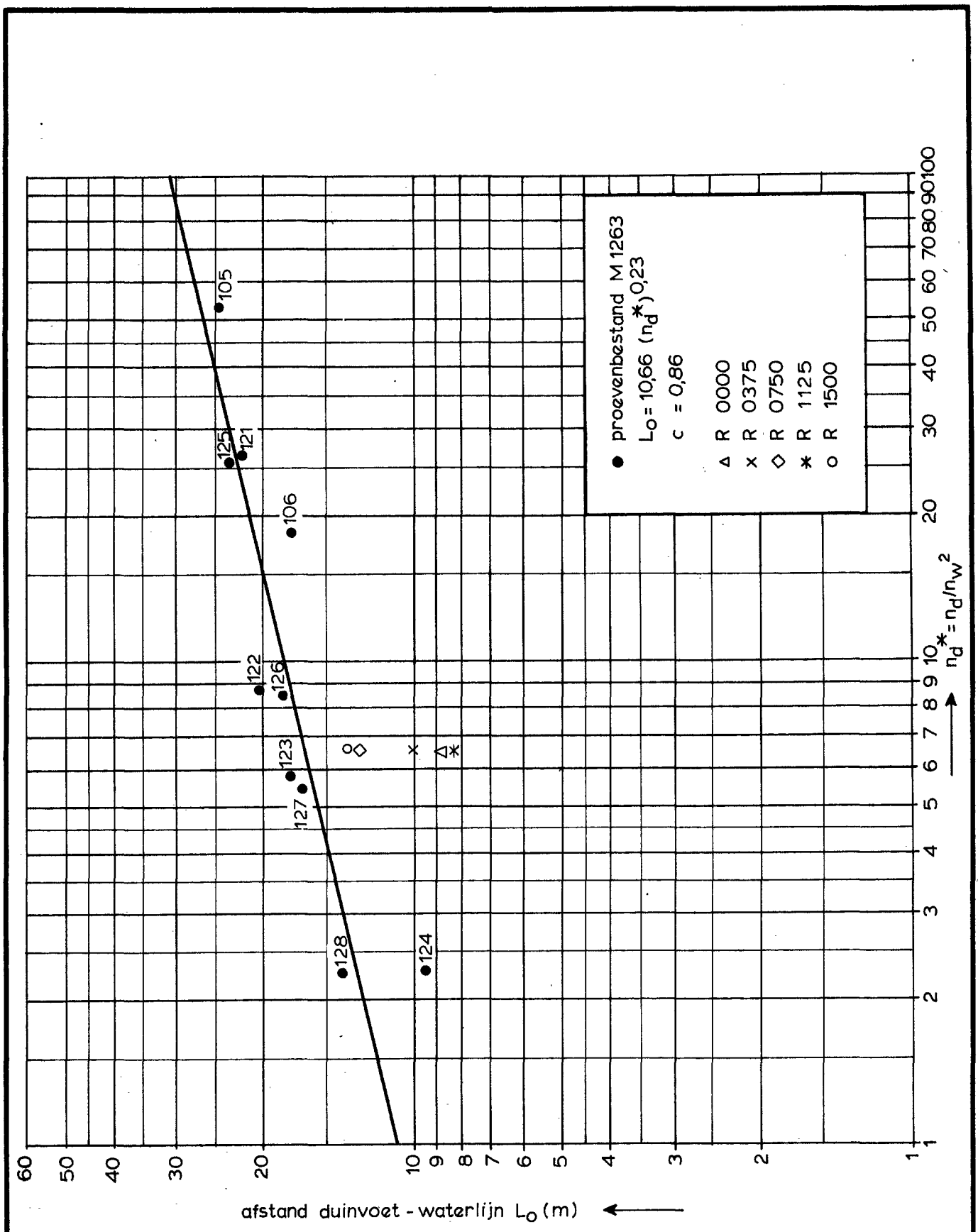
EXTRAPOLATIE AFSTAND DUINVOET-WATERLIJN, t = 1 uur PROTOTYPE	$n_d^* = 5{,}56$	P 001
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1653	FIG. 102



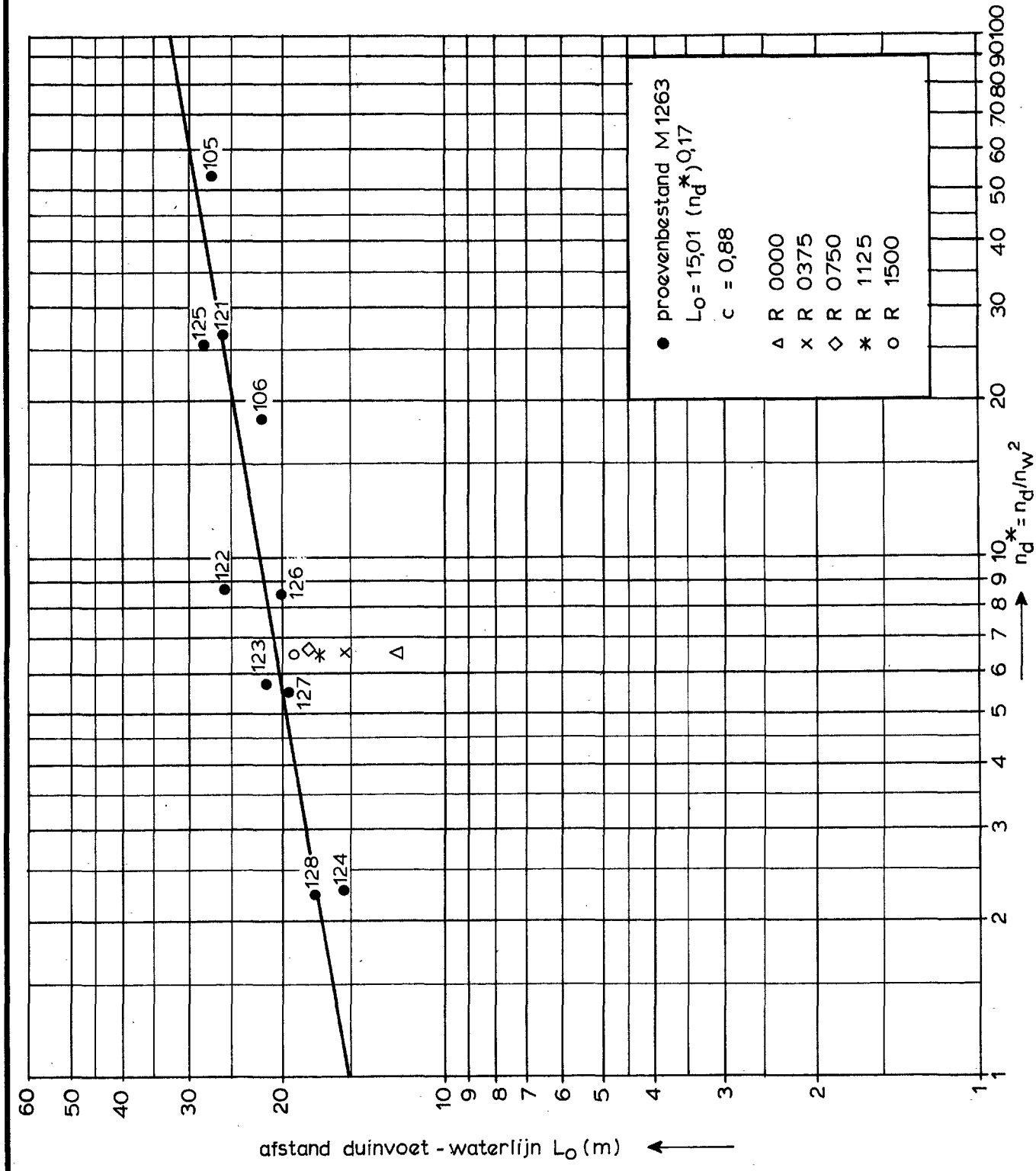
EXTRAPOLATIE AFSTAND DUINVOET-WATERLIJN, t = 2 uur PROTOTYPE	$n_d^* = 5{,}56$	P 001
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1653	FIG. 103


EXTRAPOLATIE AFSTAND DUINVOET-WATERLIJN,
t = 5 uur PROTOTYPE
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM
M 1653
FIG. 104
P 001
$n_d^* = 5{,}56$
afstand duinvoet - waterlijn L_o (m)
$n_d^* = n_d/n_w^2$
proevenbestand M 1263
$L_o = 23{,}52\ (n_d^*)^{0{,}07}$
c = 0,65
25 m - bak
R 0500
R 0875
R 1250
R 1625
R 2000
4 m - bak
R 2600
R 2700
R 2800
1 m - bak
R 2925
R 2950
R 2975
128
124
123
127
122
126
125
121
106
105

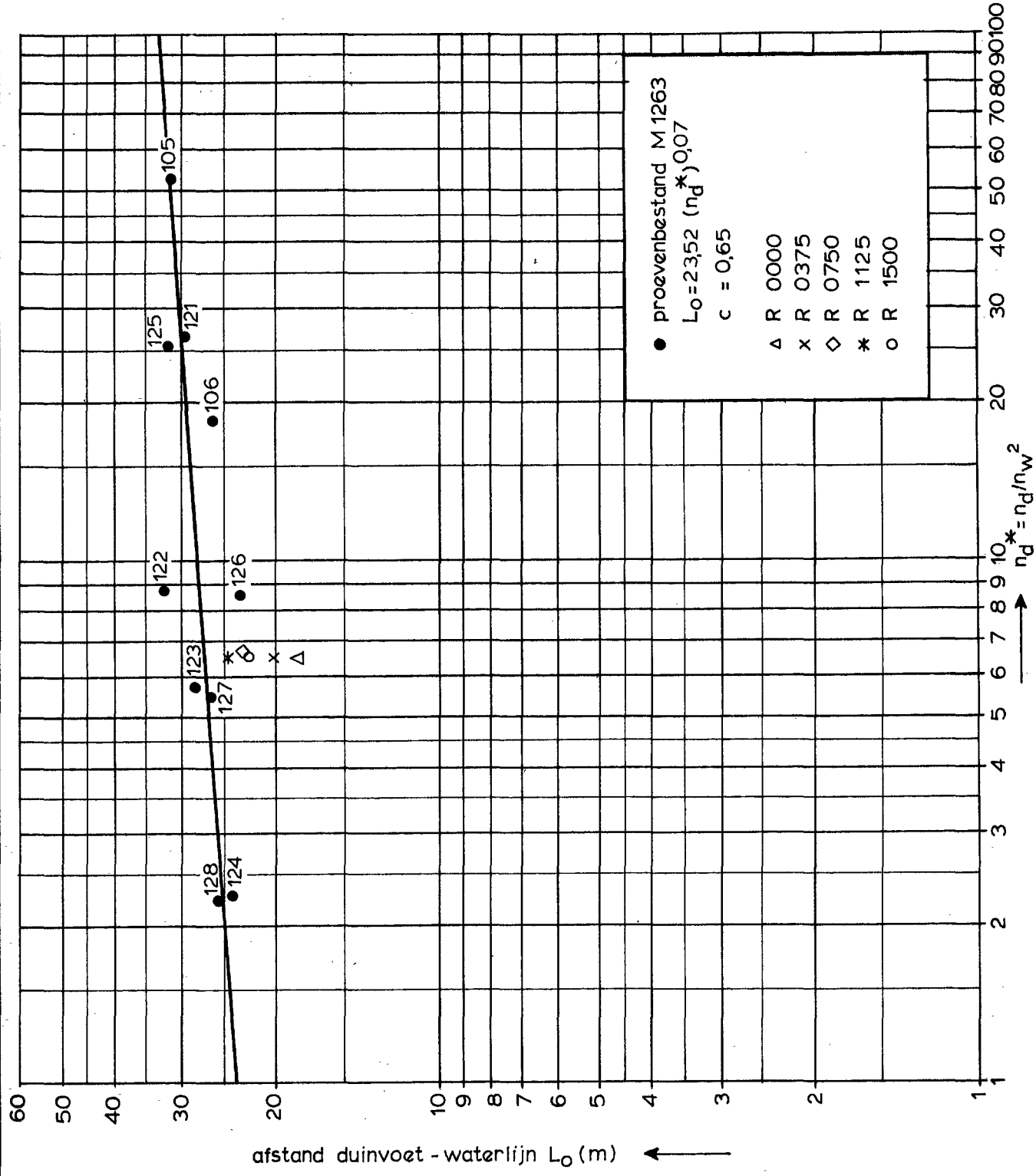

EXTRAPOLATIE AFSTAND DUINVOET-WATERLIJN,
t = 10 uur PROTOTYPE
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM
M 1653
FIG. 105
P 001
$n_d^* = 5{,}80$
afstand duinvoet - waterlijn L_o (m)
$n_d^* = n_d / n_w^2$
proevenbestand M 1263
$L_o = 25{,}66\ (n_d^*)^{0{,}07}$
c = 0,82
25 m - bak
R 0500
R 0875
R 1250
R 1625
R 2000
4 m - bak
R 2600
R 2700
R 2800
1 m - bak
R 2925
R 2950
R 2975
105
106
121
122
123
124
125
126
127
128



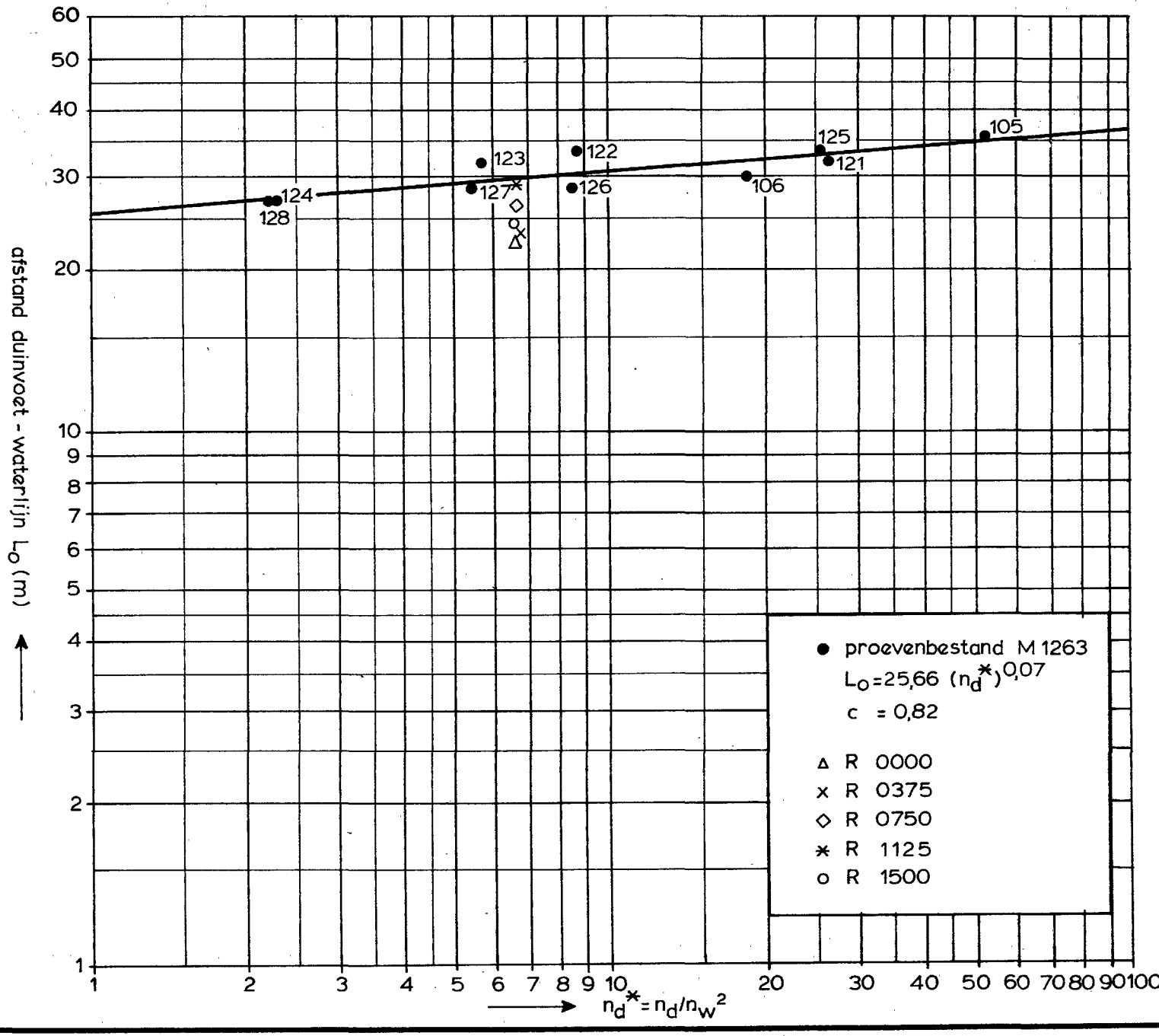
EXTRAPOLATIE AFSTAND DUINVOET-WATERLIJN, t = 1 uur PROTOTYPE	$n_d^* = 6{,}43$	P 002
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1653	FIG. 106



EXTRAPOLATIE AFSTAND DUINVOET-WATERLIJN, t = 2 uur PROTOTYPE	$n_d^* = 6{,}43$	P 002
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1653	FIG. 107



EXTRAPOLATIE AFSTAND DUINVOET-WATERLUN, t = 5 uur PROTOTYPE	$n_d^* = 6{,}43$	P 002
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1653	FIG. 108



EXTRAPOLATIE AFSTAND DUINVOET-WATERLIJN,

t = 10 uur PROTOTYPE

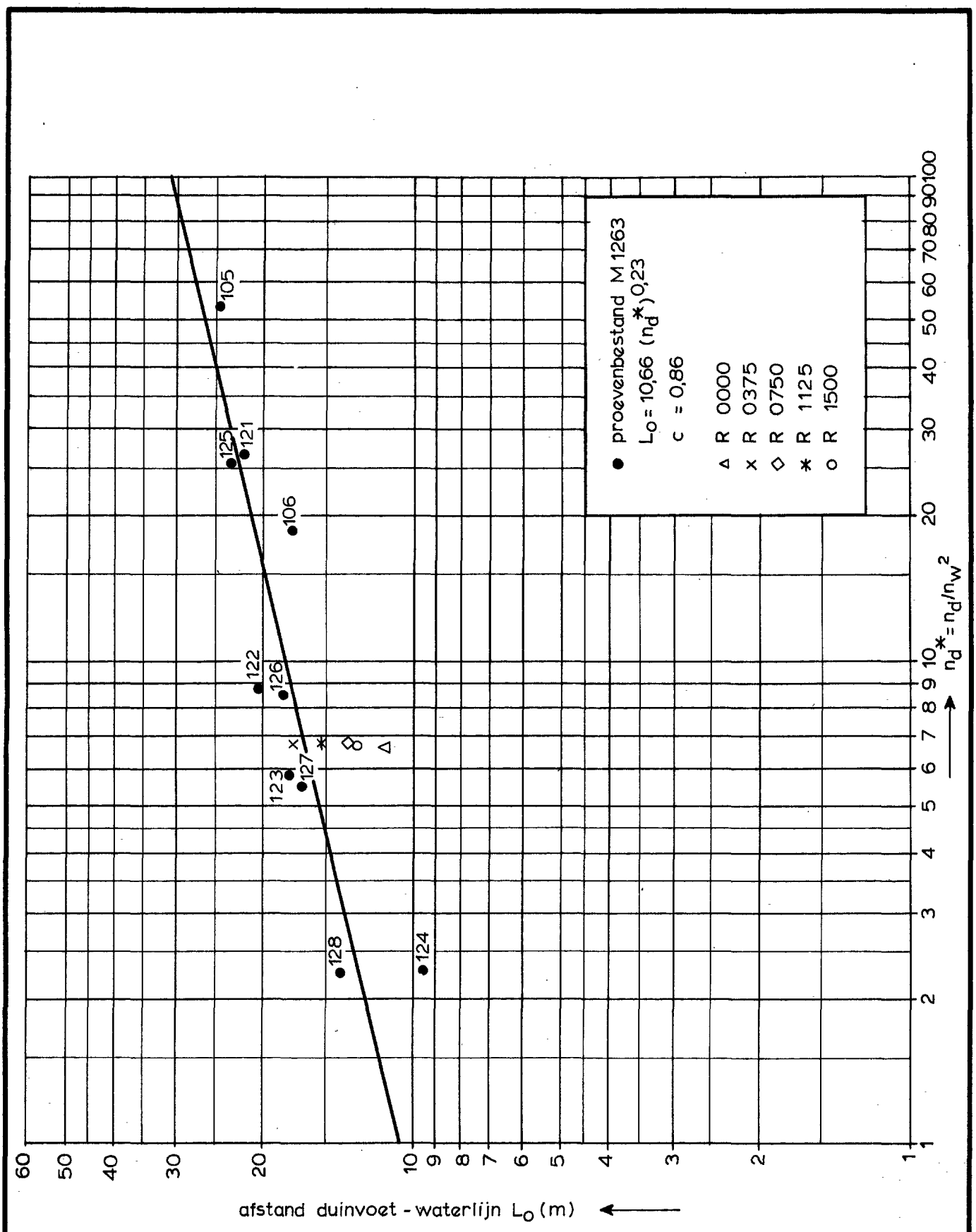
$n_d^* = 6{,}85$

P 002

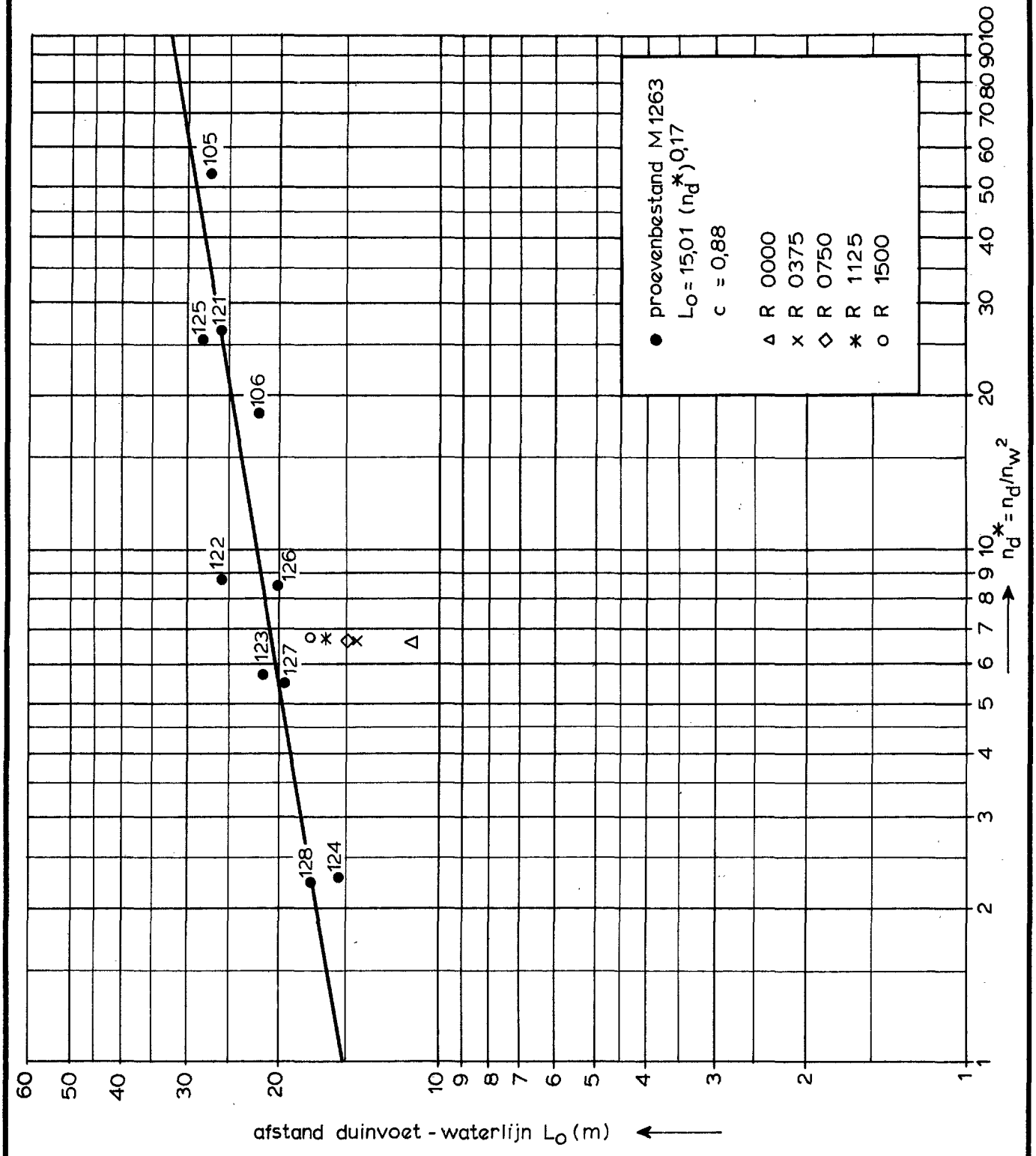
M 1653

FIG. 109

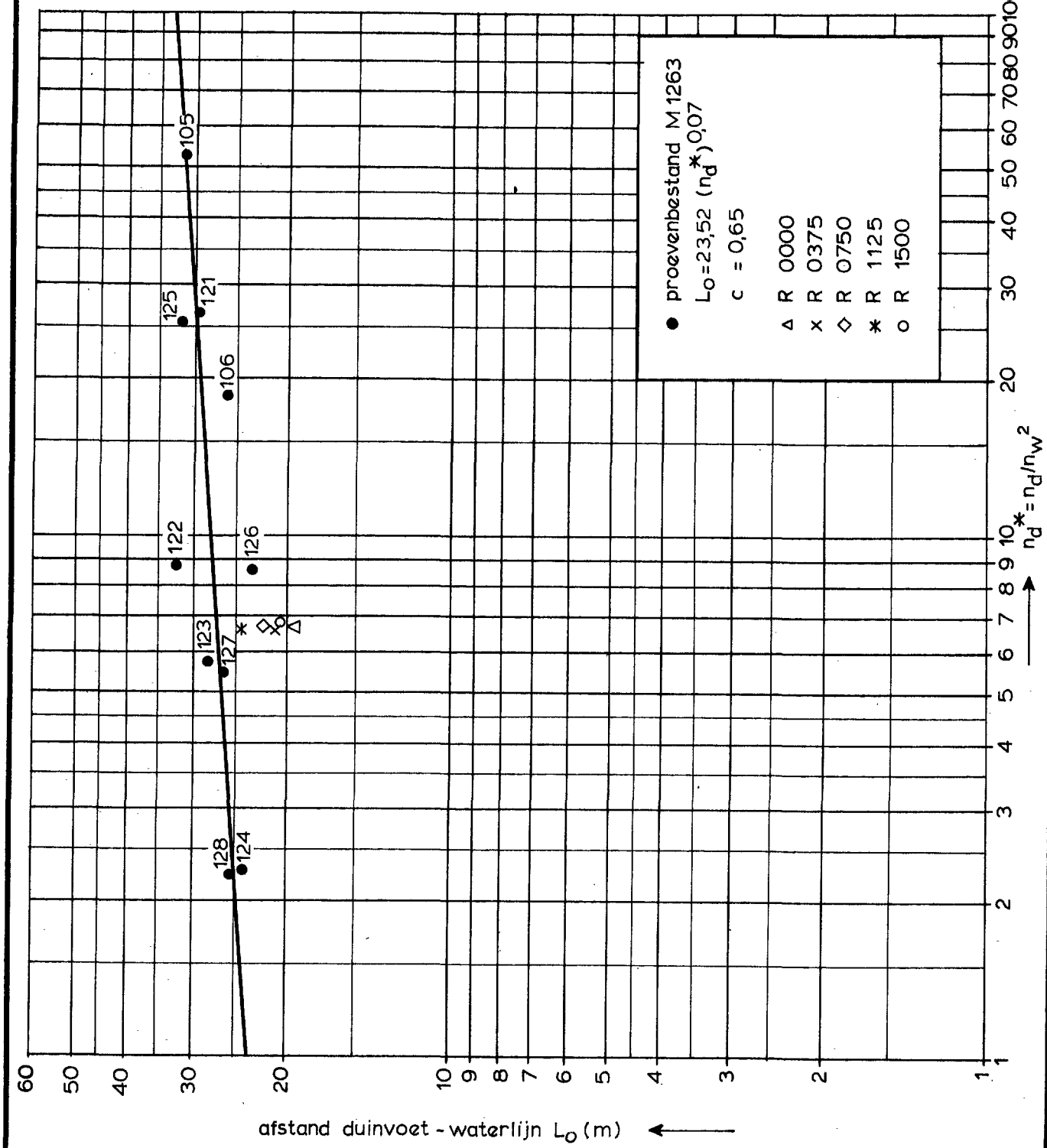
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM



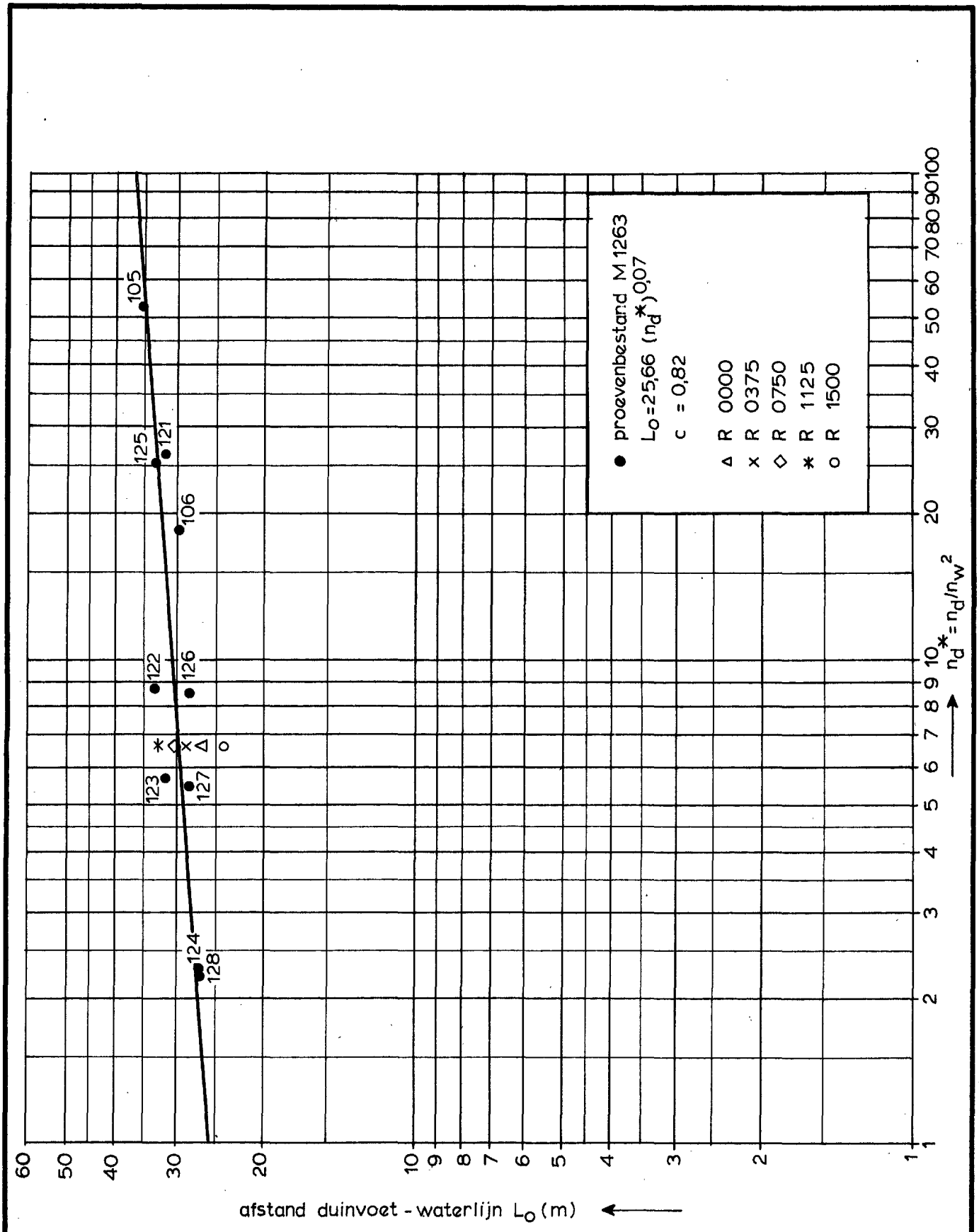
EXTRAPOLATIE AFSTAND DUINVOET-WATERLIJN, t = 1 uur PROTOTYPE	$n_d^* = 6{,}77$	P 003
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1653	FIG. 110



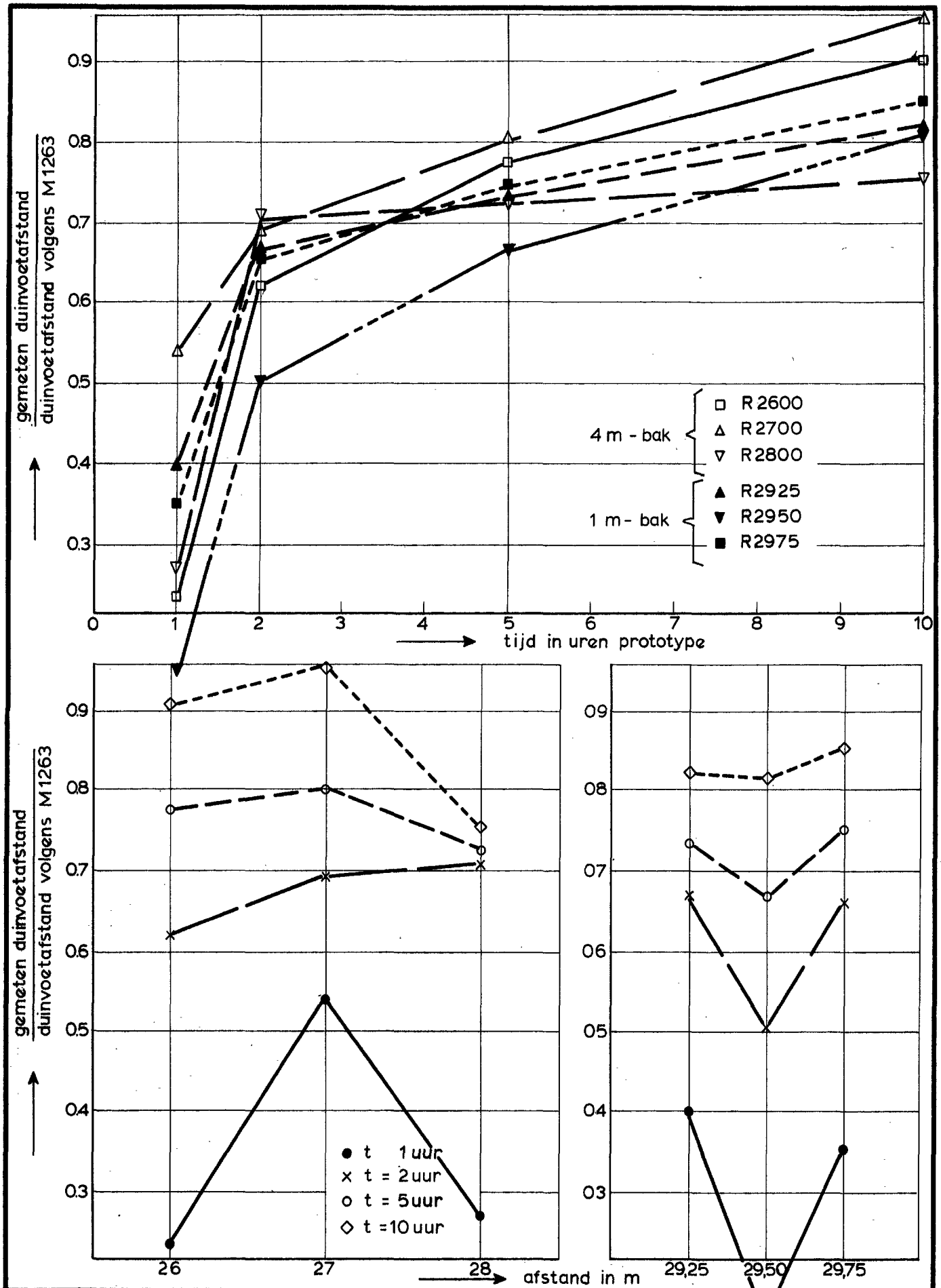
EXTRAPOLATIE AFSTAND DUINVOET-WATERLIJN, t = 2 uur PROTOTYPE	$n_d^* = 6{,}77$	P 003
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1653	FIG. 111



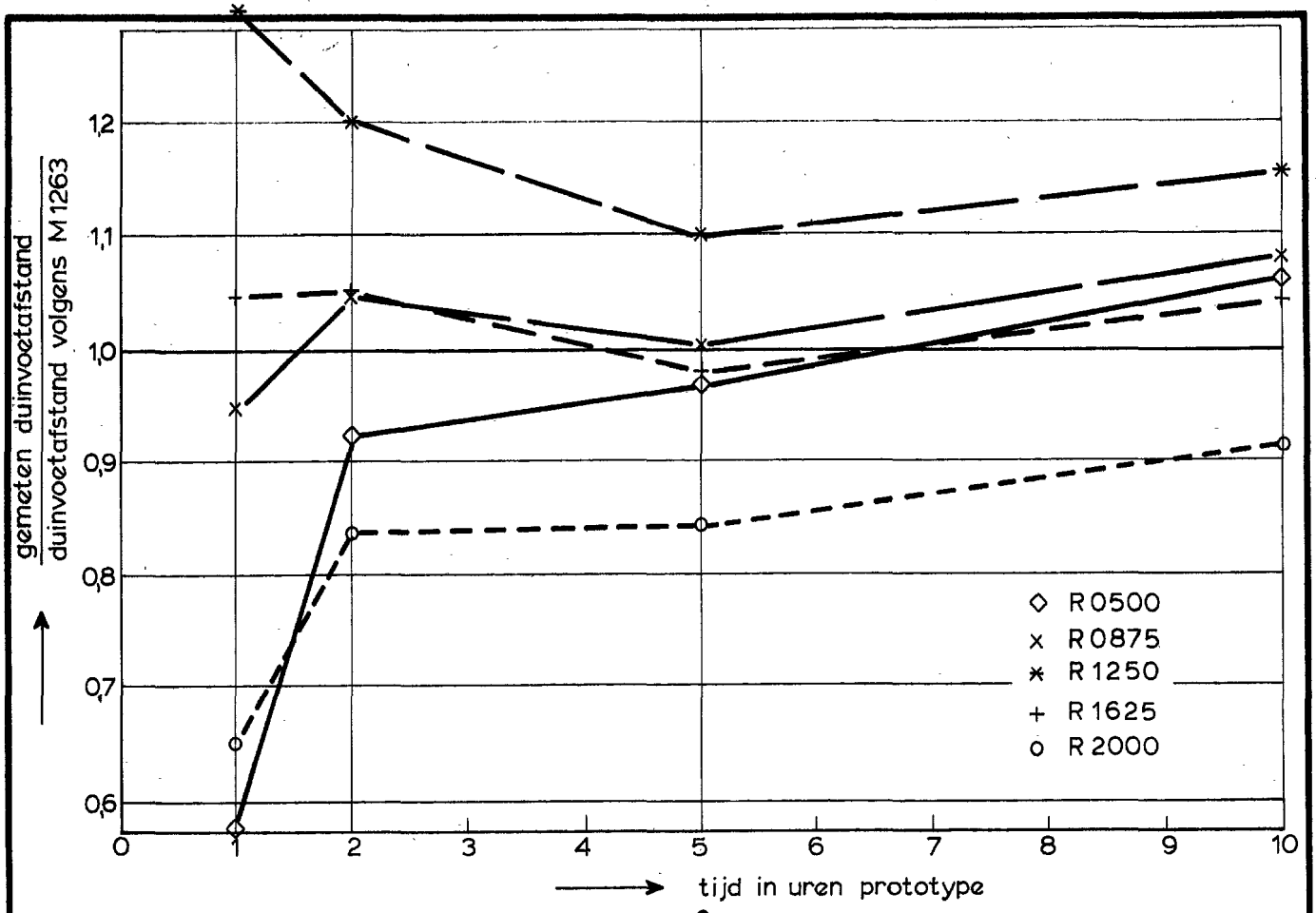
EXTRAPOLATIE AFSTAND DUINVOET-WATERLIJN, t = 5 uur PROTOTYPE	$n_d^* = 6{,}77$	P 003
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1653	FIG. 112

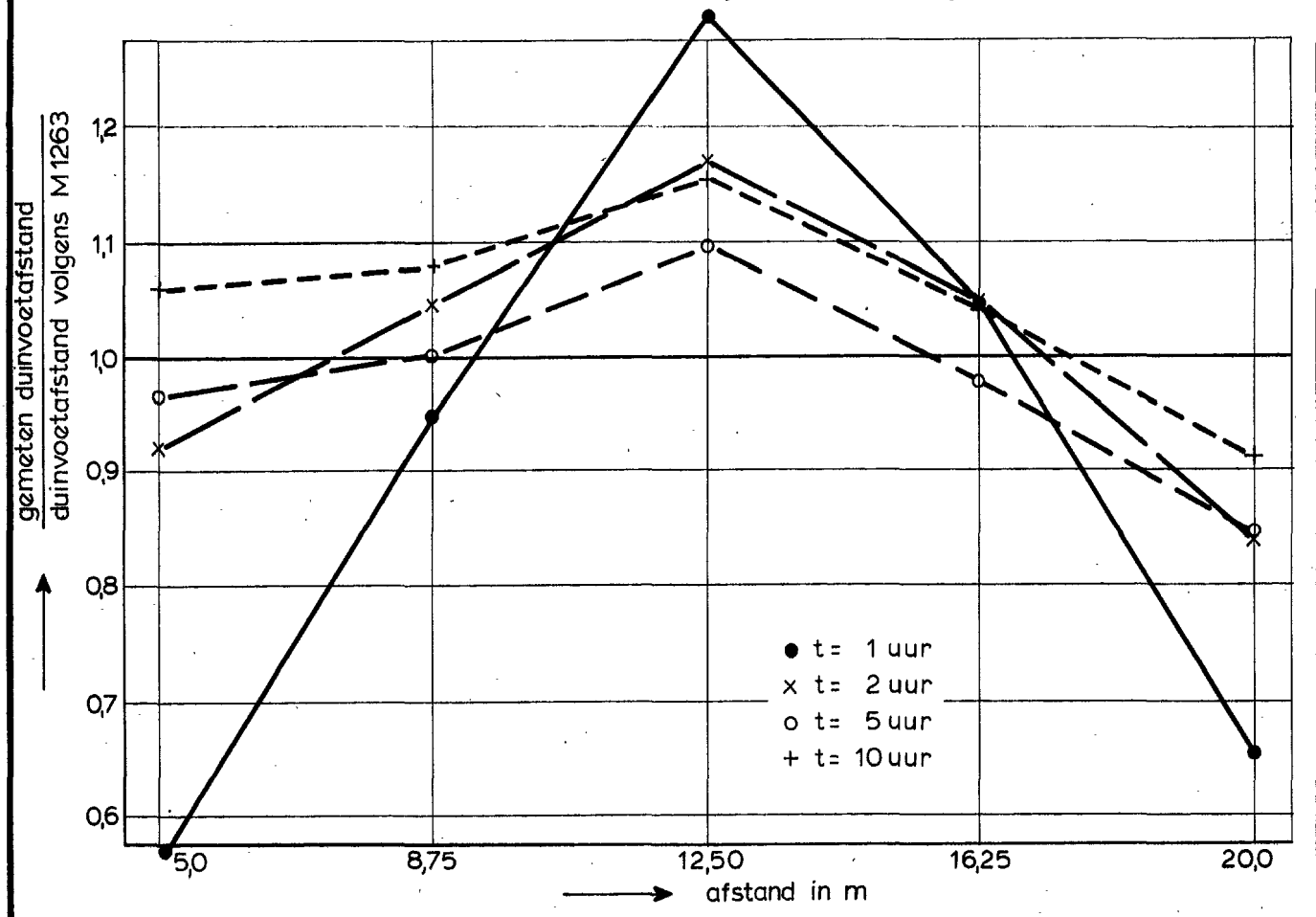


EXTRAPOLATIE AFSTAND DUINVOET-WATERLIJN, t = 10 uur PROTOTYPE	n_d^* = 6,77	P 003
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1653	FIG. 113

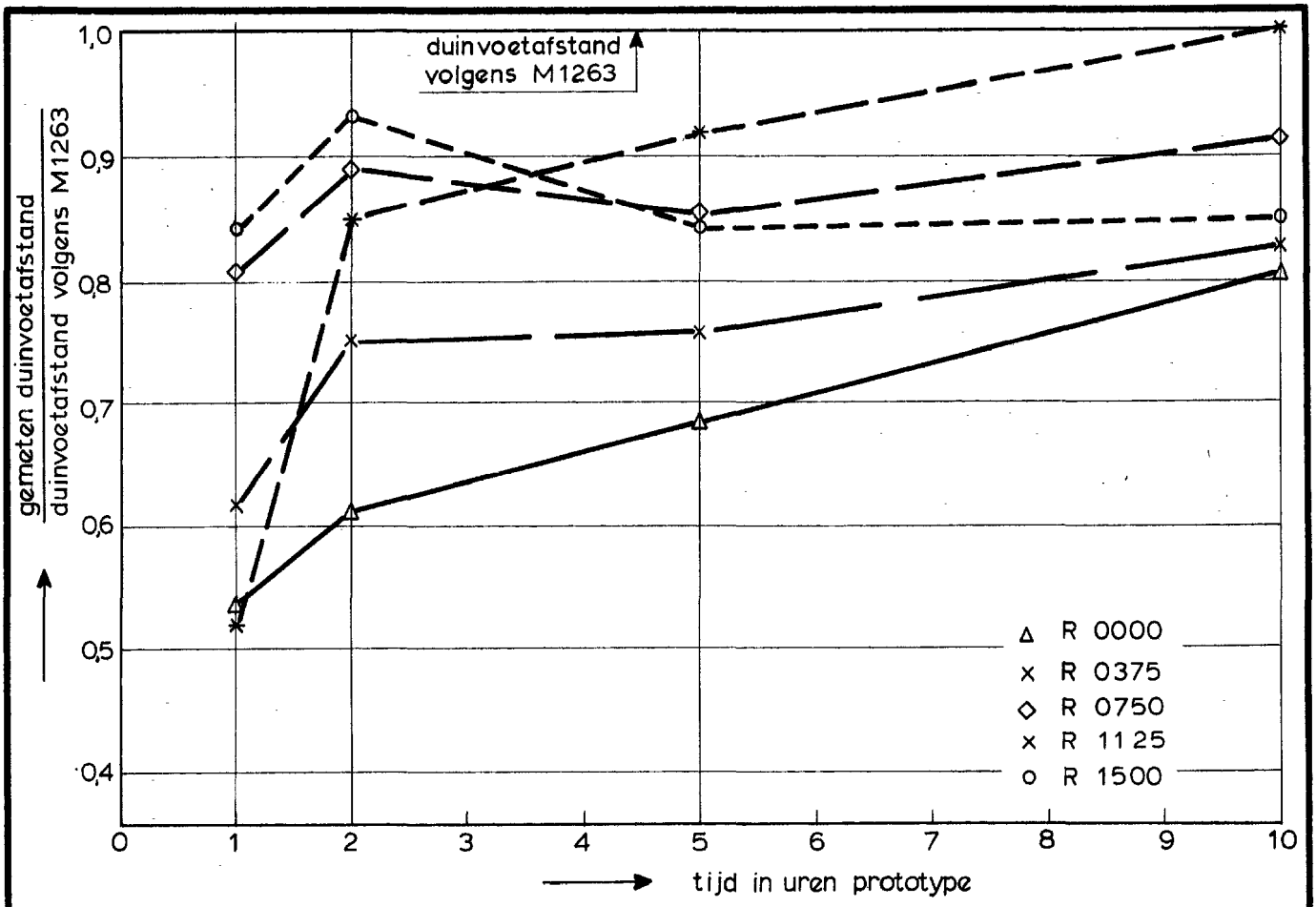


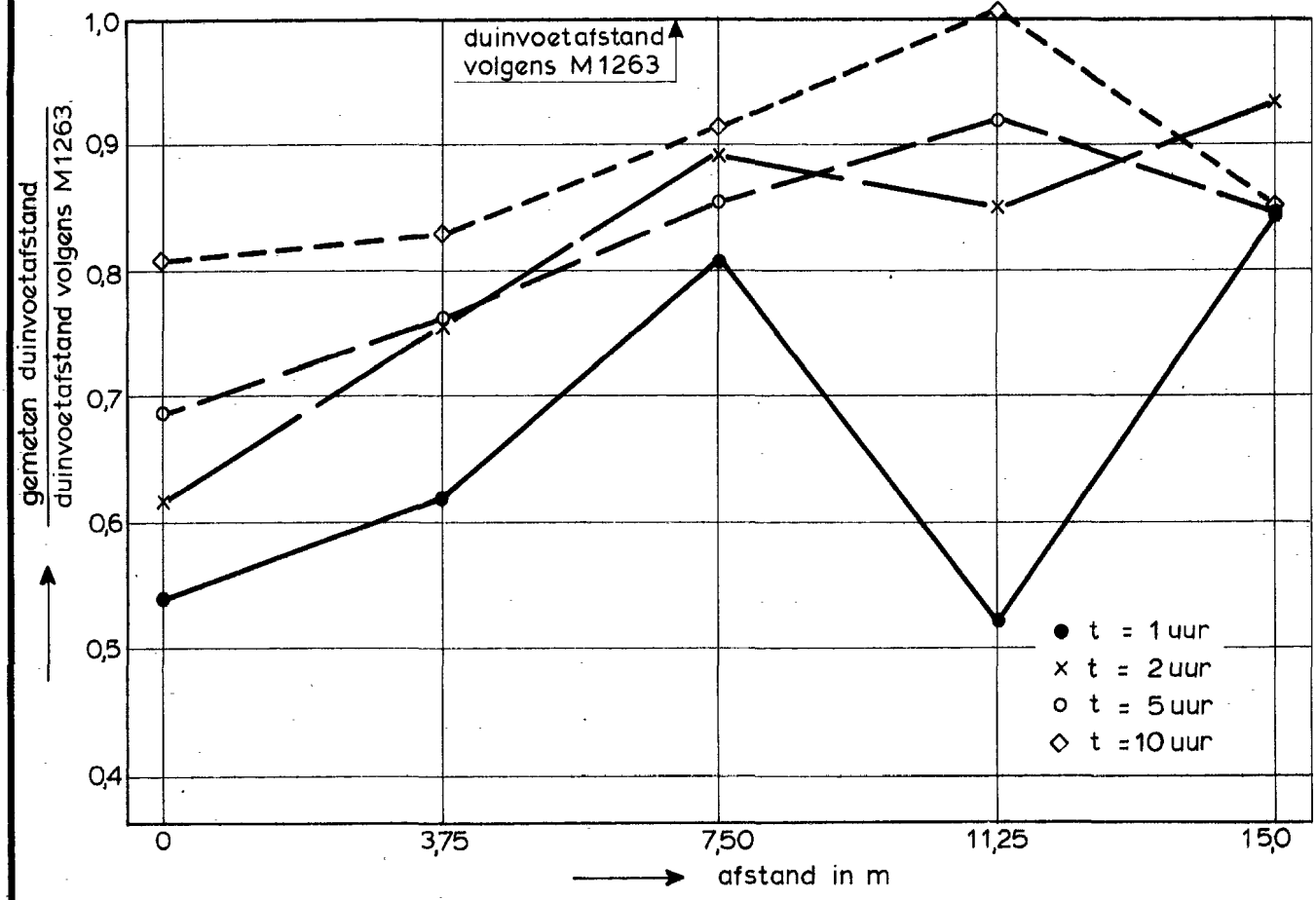
ONTWIKKELING AFSTAND DUINVOET-WATERLIJN		P001
	4 m - bak ; 1m - bak	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1653	FIG. 114



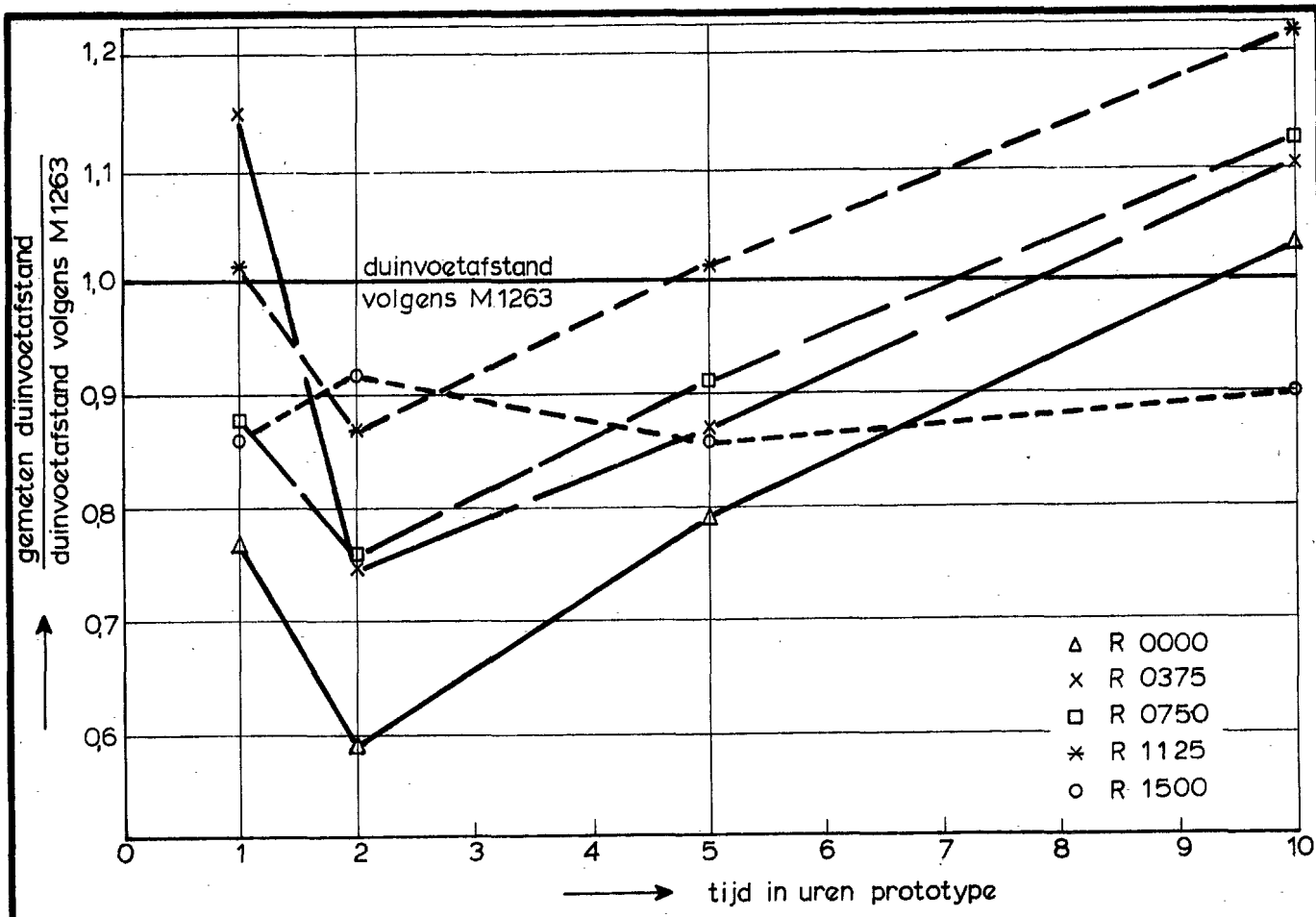


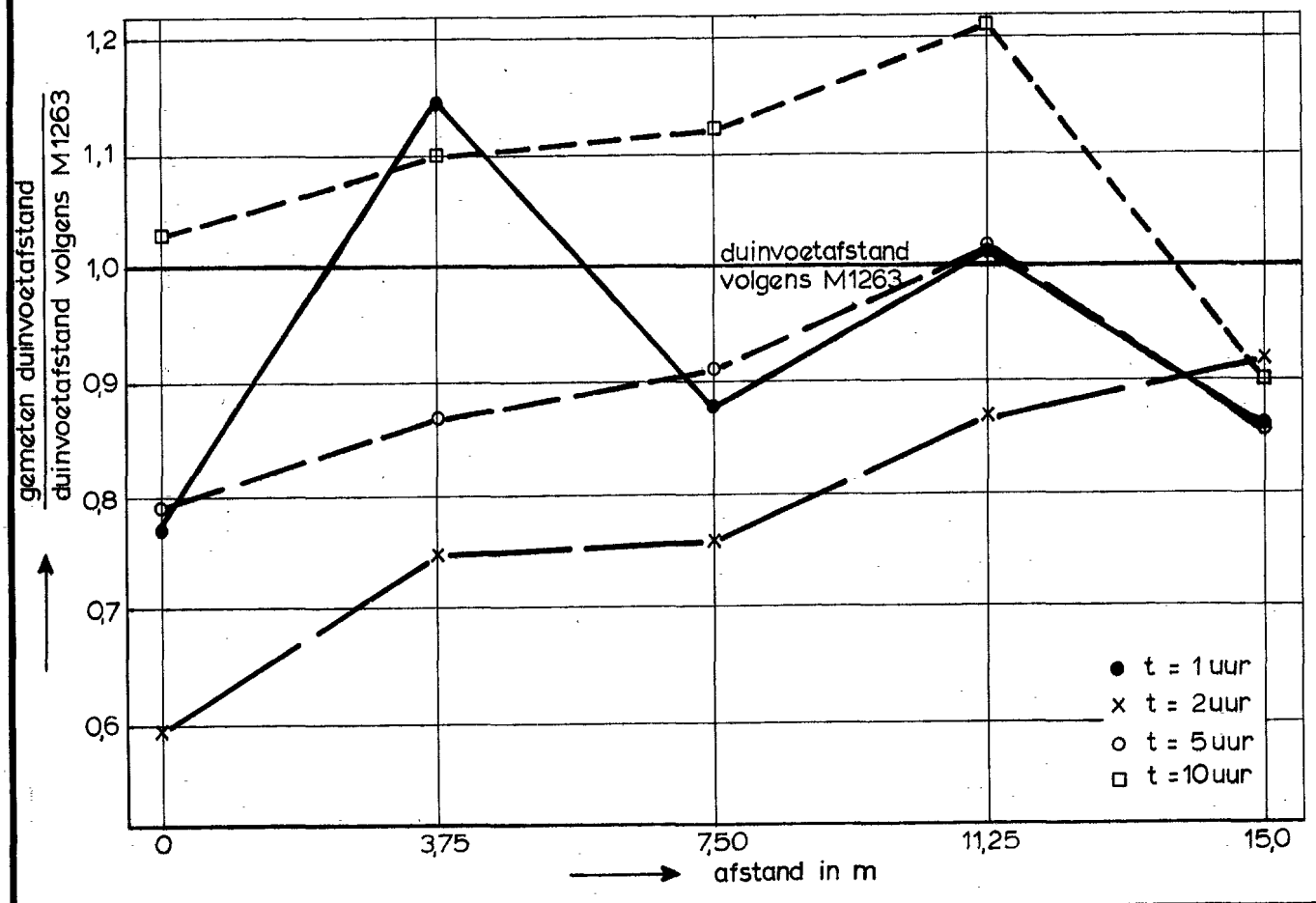
ONTWIKKELING AFSTAND DUINVOET - WATERLIJN	P 001
	25 m - bak
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1653 / FIG. 115



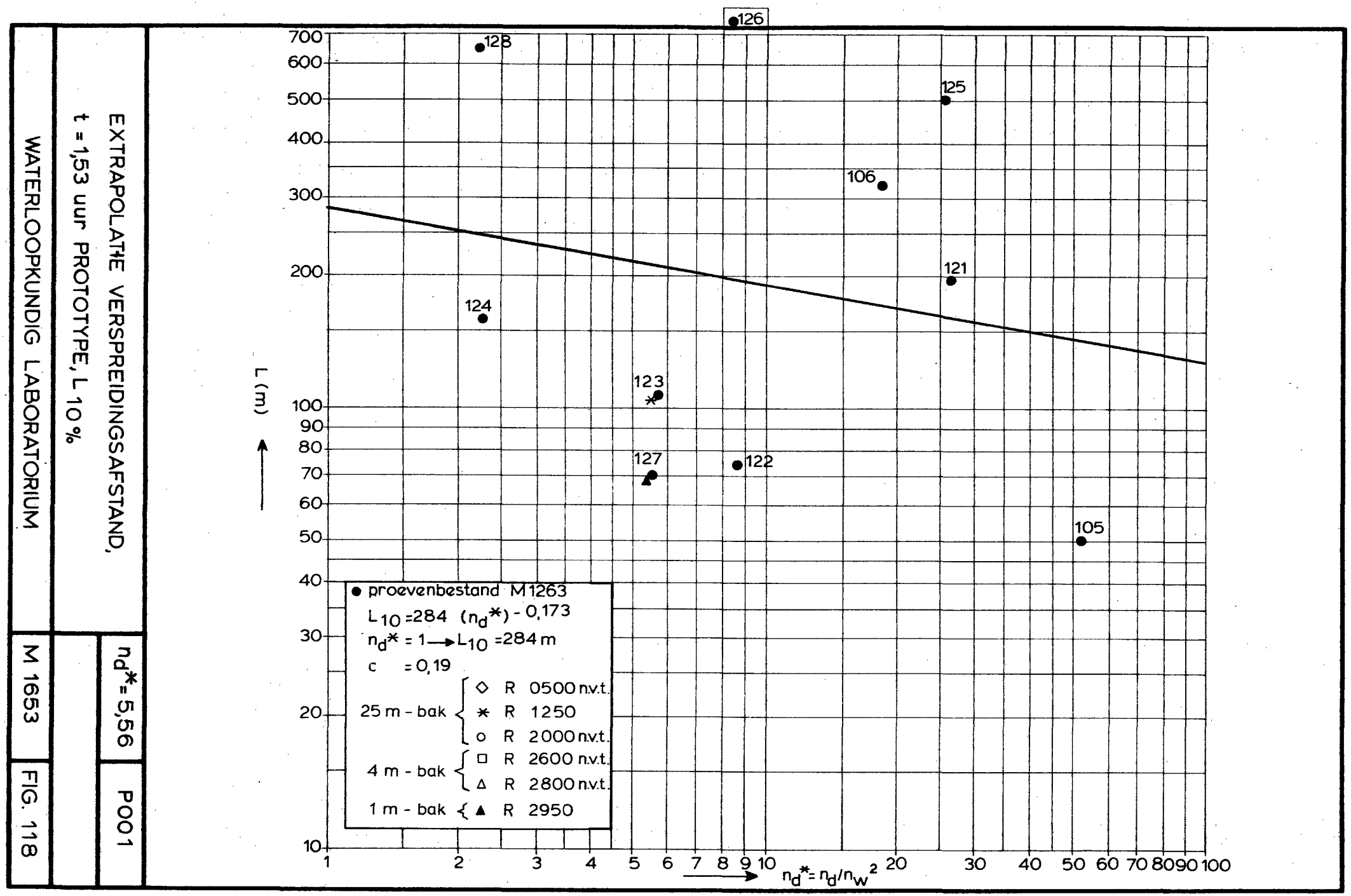


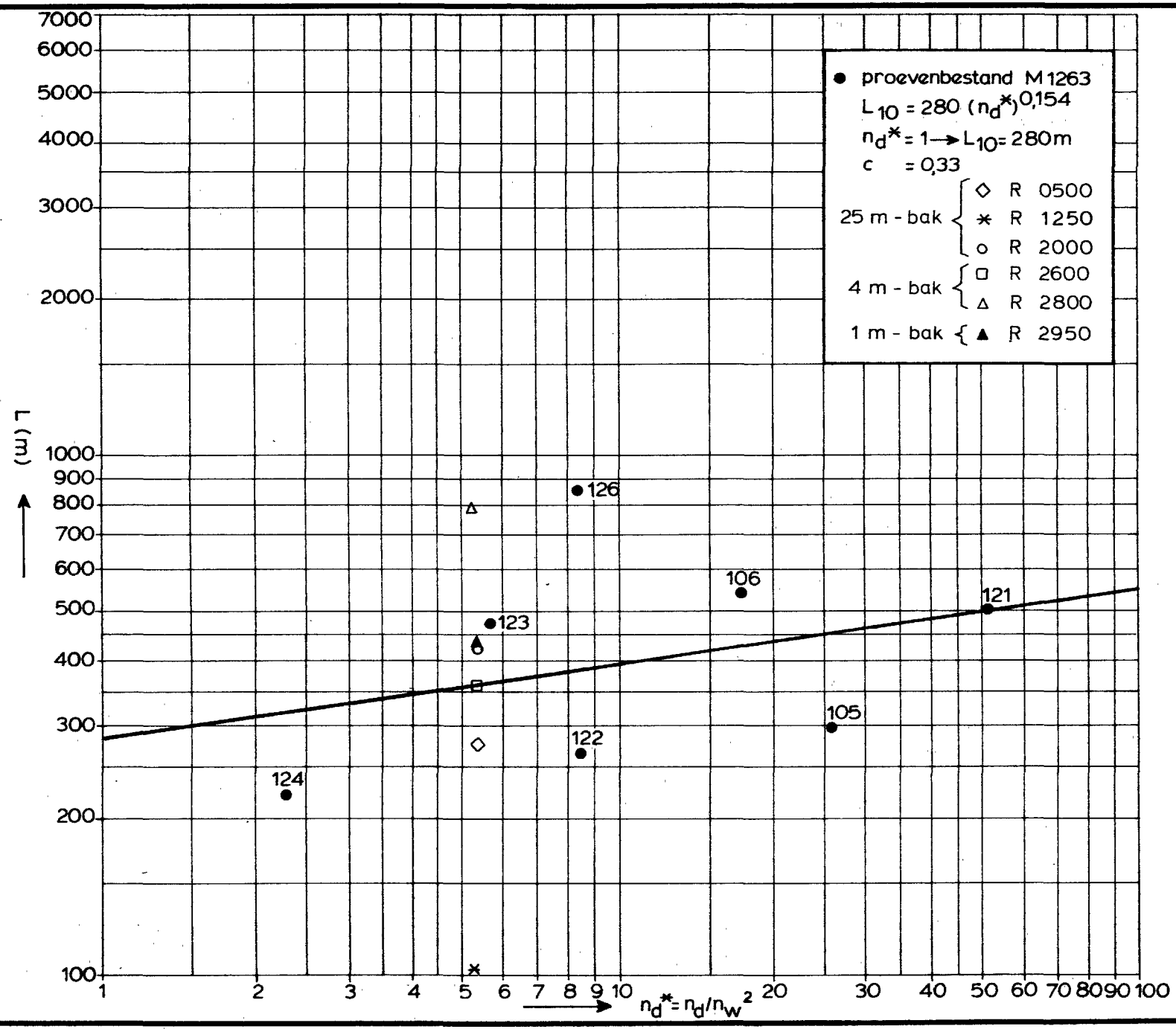
ONTWIKKELING AFSTAND DUINVOET-WATERLIJN		P.002
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1653	FIG. 116





ONTWIKKELING AFSTAND DUINVOET - WATERLIJN		P003
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1653	FIG. 117


EXTRAPOLATIE VERSPREIDINGSAFSTAND,
t = 1,53 uur PROTOTYPE, L 10 %
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM
M 1653
FIG. 118
n_d^*= 5,56
P001
L (m)
$n_d^* = n_d/n_w^2$
126
128
125
106
121
124
123
127
122
105
● proevenbestand M1263
L_{10} =284 (n_d^*) - 0,173
n_d^* = 1 → L_{10} =284 m
c = 0,19
25 m - bak ◇ R 0500 n.v.t.
25 m - bak * R 1250
25 m - bak o R 2000 n.v.t.
4 m - bak □ R 2600 n.v.t.
4 m - bak △ R 2800 n.v.t.
1 m - bak ▲ R 2950



EXTRAPOLATIE VERSPREIDINGSAFSTAND,

t = 5,10uur PROTOTYPE, L 10 %

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

n_d^* = 5,56

P001

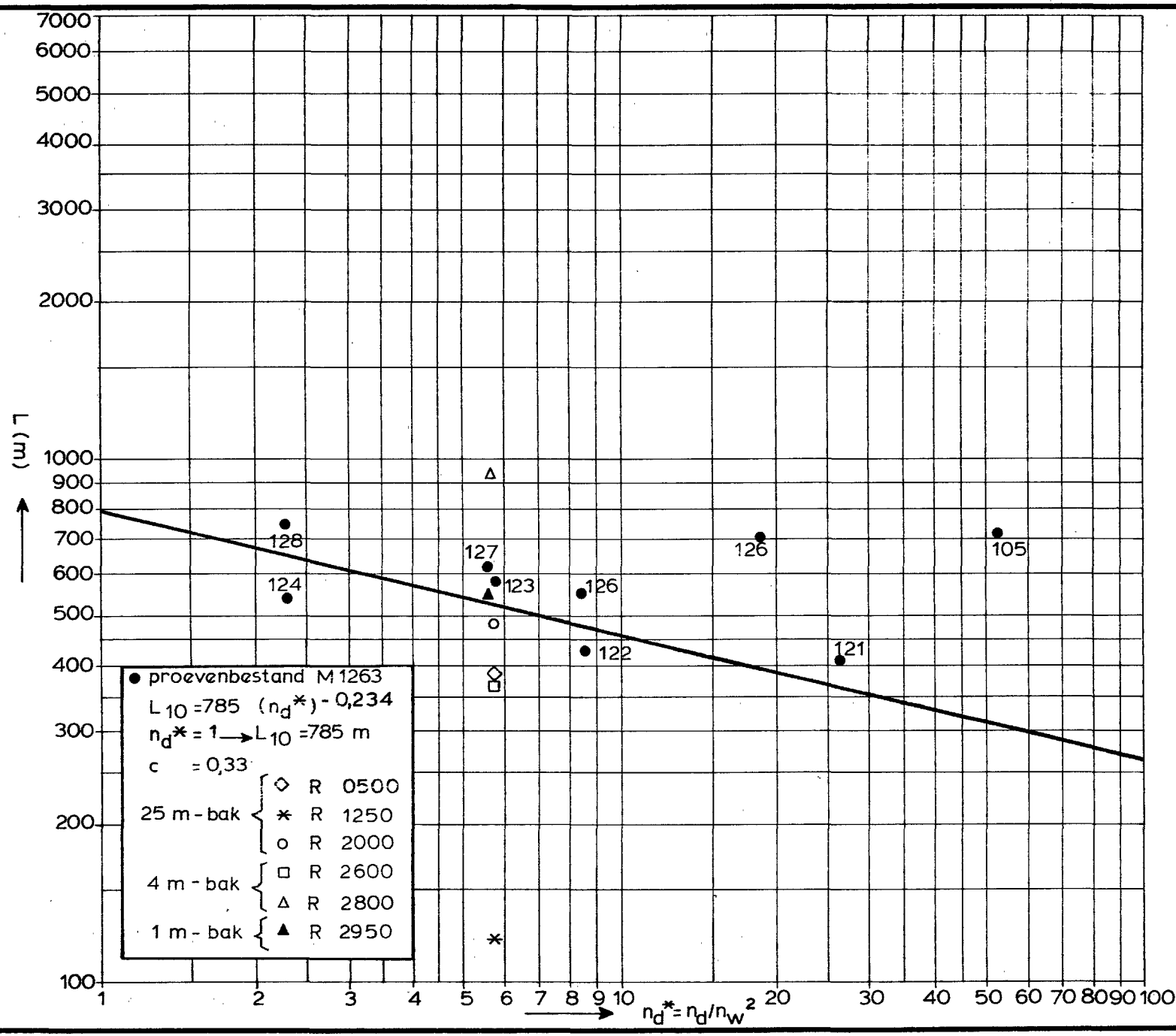
M 1653

FIG. 119

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

EXTRAPOLATIE VERSPREIDINGSAFSTAND,

t = 15,30 uur PROTOTYPE, L10 %



$n_d^* = 5{,}80$

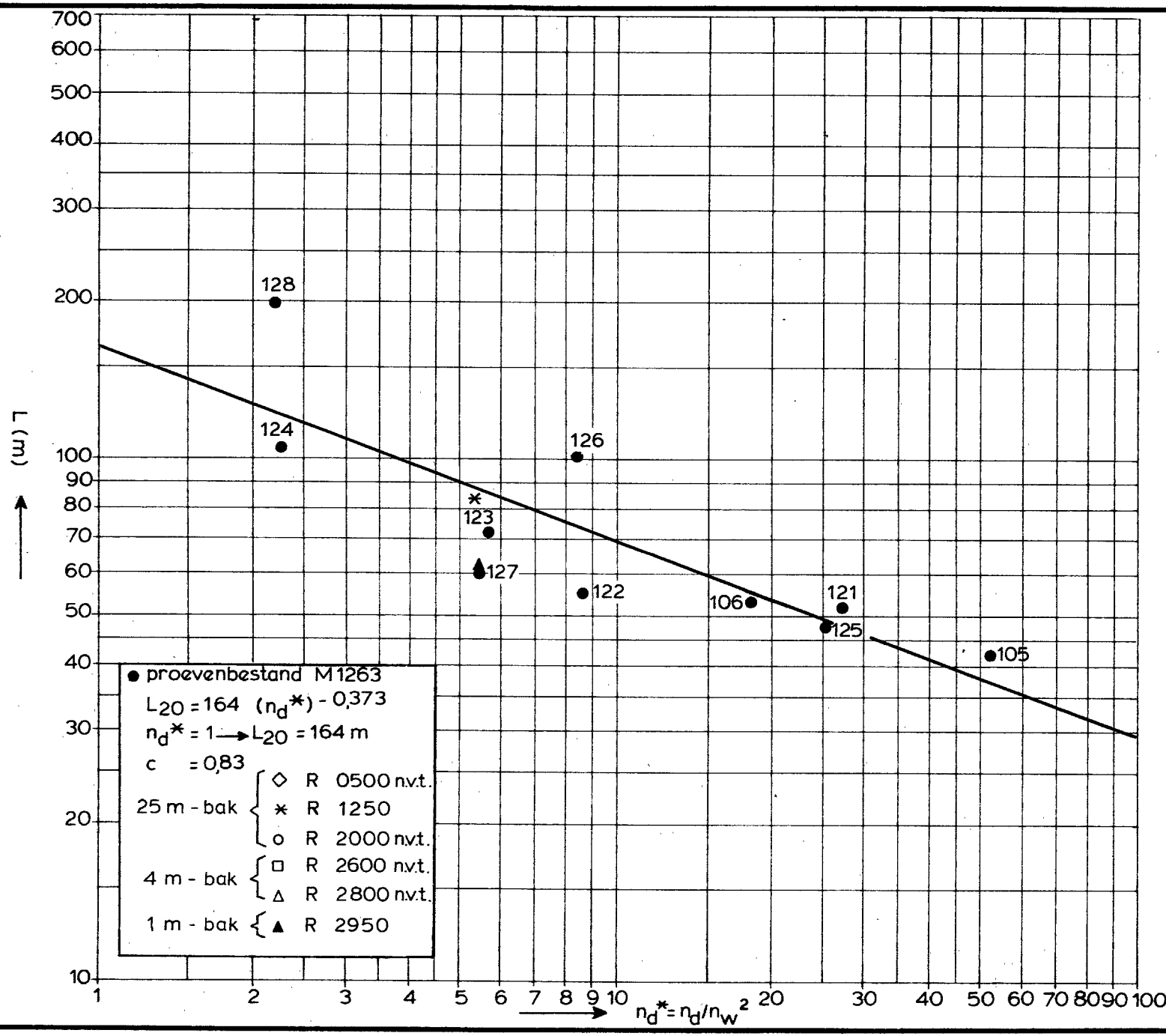
P001

M 1653

FIG. 120

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

EXTRAPOLATIE VERSPREIDINGSAFSTAND,
t = 1,53 uur PROTOTYPE, L 20 %

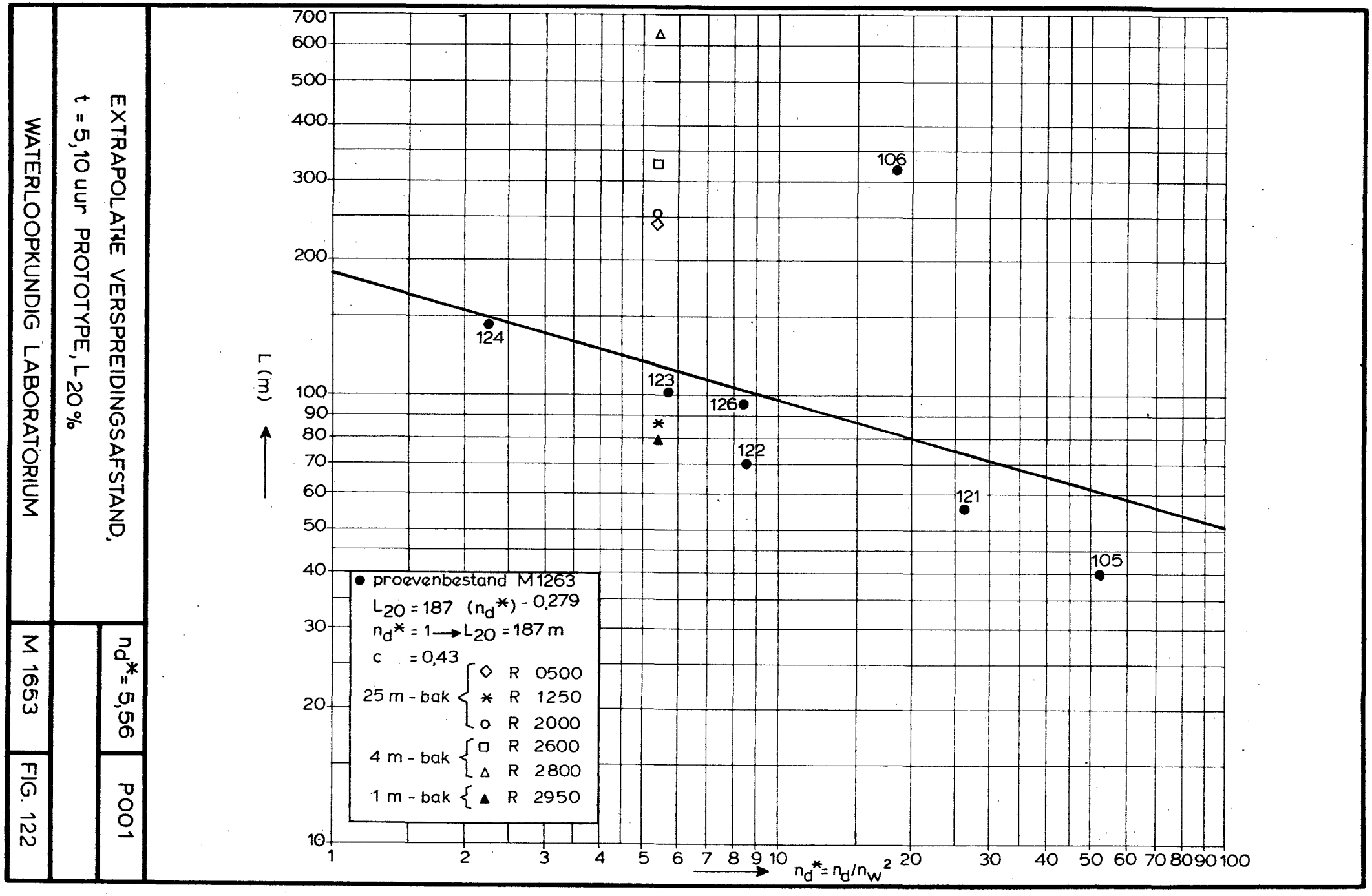


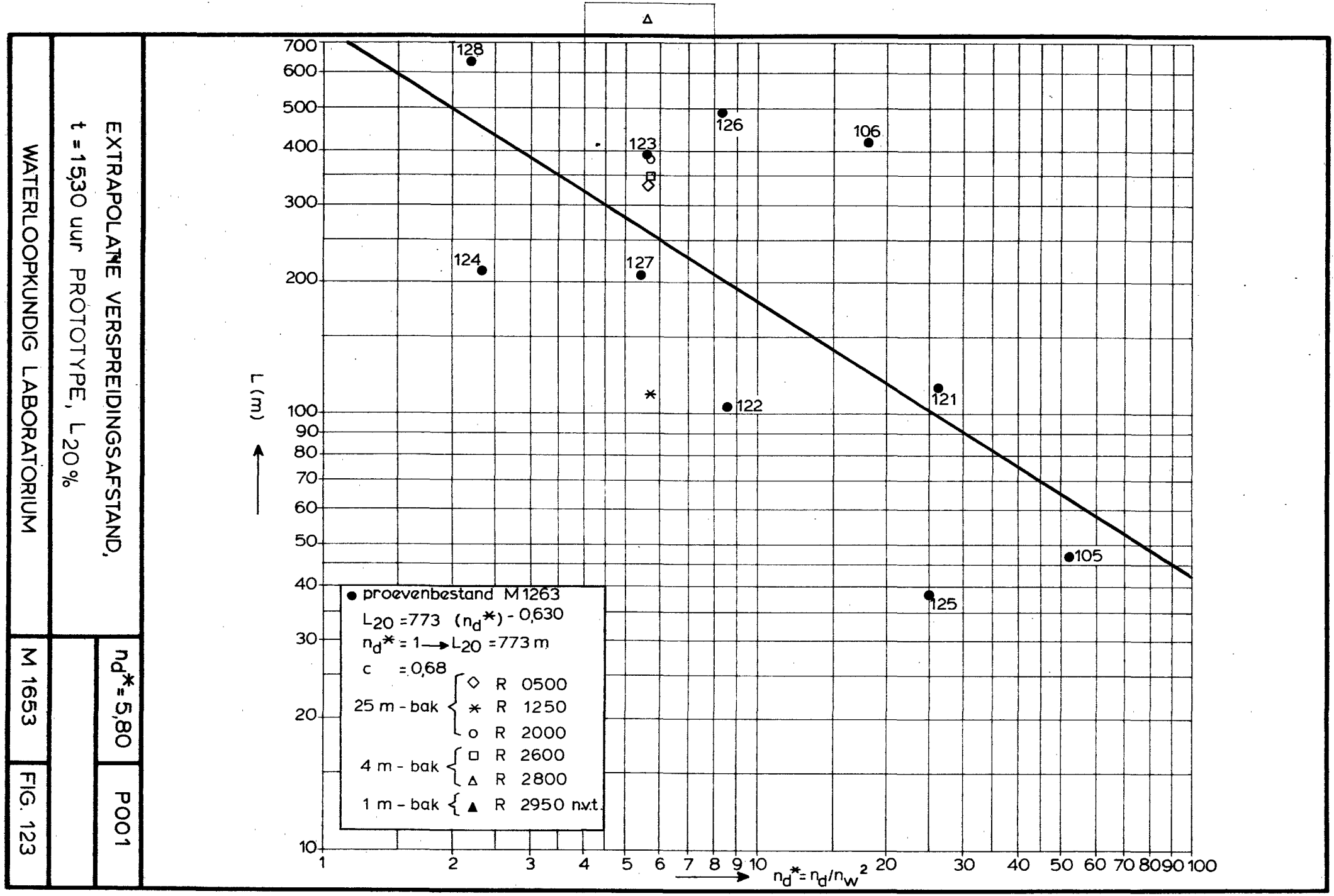
$n_d^* = 5{,}56$

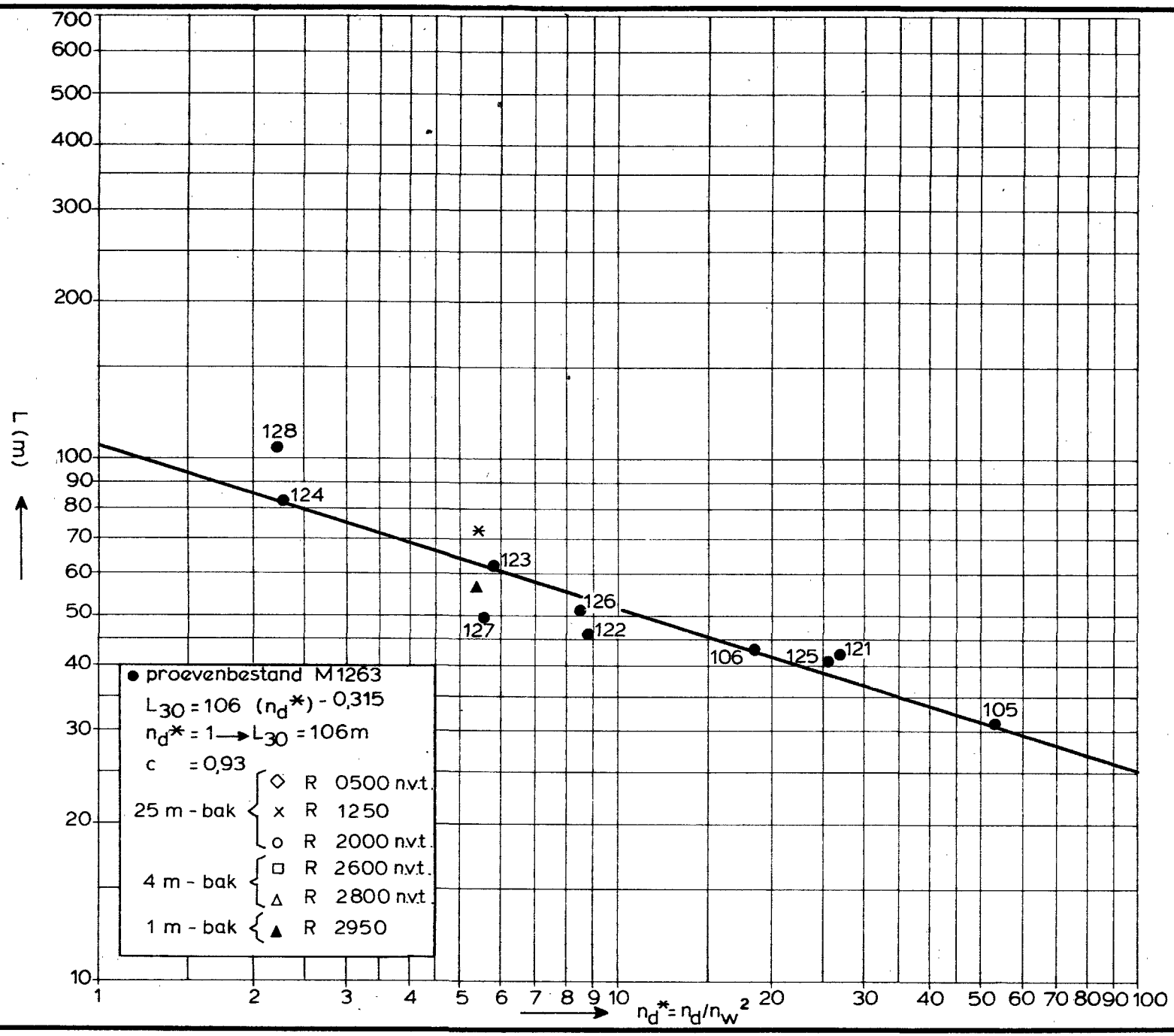
M 1653

FIG. 121

P001


EXTRAPOLATIE VERSPREIDINGSAFSTAND,
t = 5,10 uur PROTOTYPE, L 20 %
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM
M 1653
FIG. 122
n_d^*= 5,56
P001
L (m)
$n_d^* = n_d/n_w^2$
106
124
123
126
122
121
105
● proevenbestand M1263
$L_{20} = 187\ (n_d^*) - 0{,}279$
$n_d^* = 1 \rightarrow L_{20} = 187$ m
c = 0,43
25 m - bak ◇ R 0500
25 m - bak * R 1250
25 m - bak o R 2000
4 m - bak □ R 2600
4 m - bak △ R 2800
1 m - bak ▲ R 2950


EXTRAPOLATIE VERSPREIDINGSAFSTAND,
t = 15,30 uur PROTOTYPE, L20 %
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM
M 1653
FIG. 123
nd*= 5,80
P001
L (m)
nd*= nd/nw2
128
126
106
123
124
127
122
121
105
125
proevenbestand M1263
L20 =773 (nd*) - 0,630
nd* = 1 → L20 =773 m
c =0,68
25 m - bak ◇ R 0500
* R 1250
o R 2000
4 m - bak □ R 2600
△ R 2800
1 m - bak ▲ R 2950 n.v.t.



EXTRAPOLATIE VERSPREIDINGSAFSTAND,

t = 1,53 uur PROTOTYPE, L_{30} %

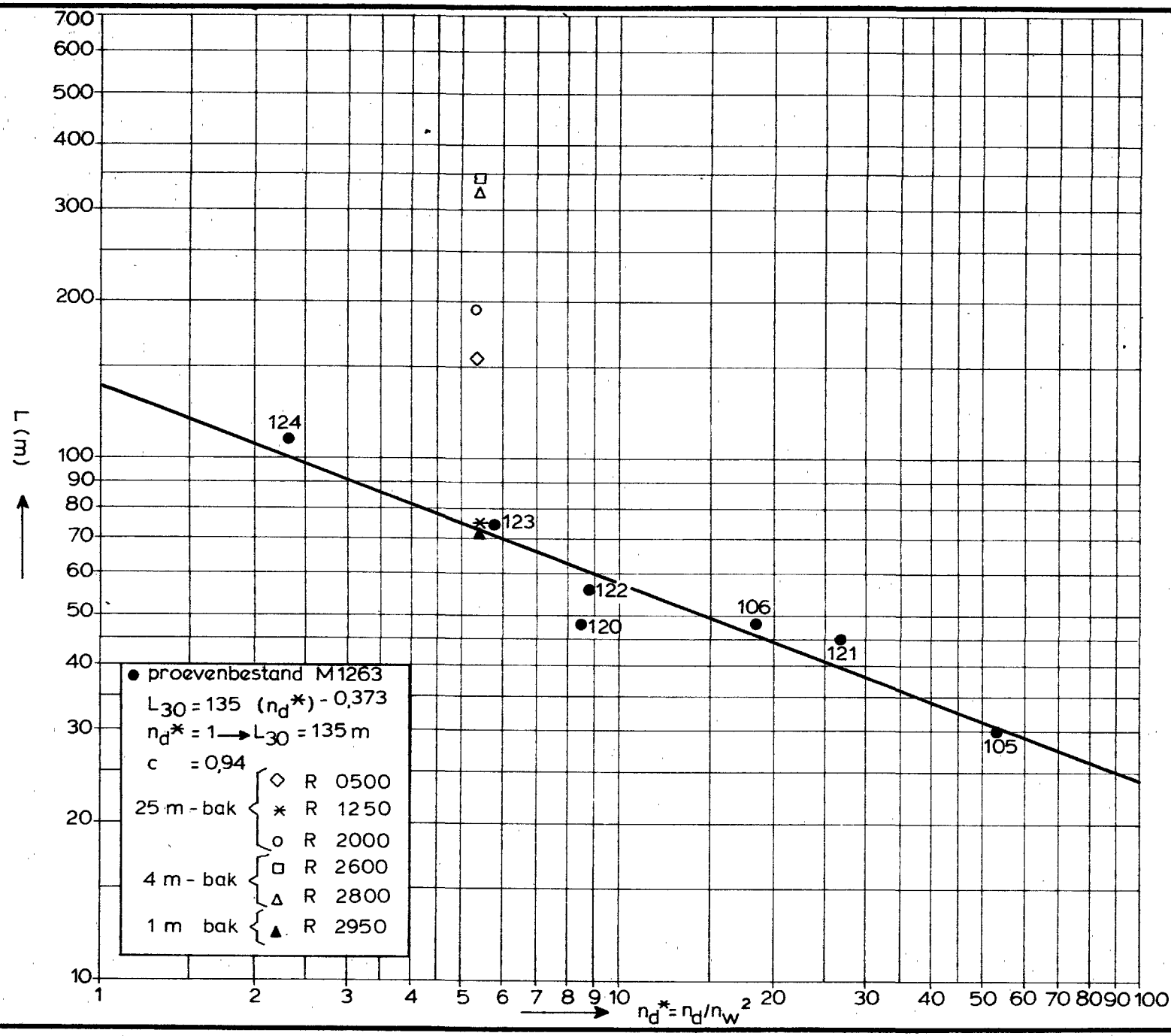
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

$n_d^* = 5,56$

P001

M 1653

FIG. 124



EXTRAPOLATIE VERSPREIDINGSAFSTAND,

t = 5,10 uur PROTOTYPE, L 30 %

$n_d^* = 5{,}56$

P001

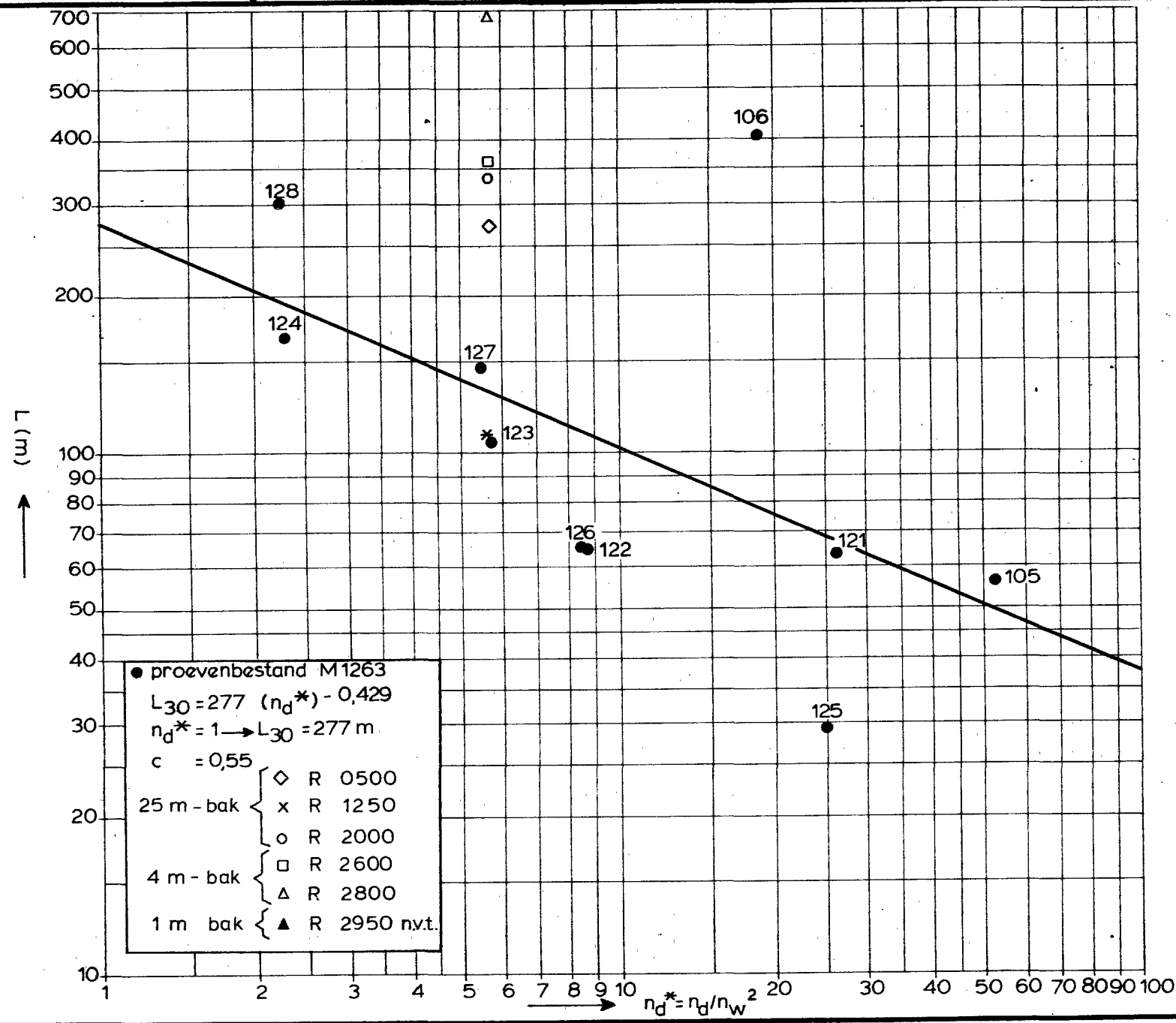
M 1653

FIG. 125

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

EXTRAPOLATIE VERSPREIDINGSAFSTAND,

t = 15,30 uur PROTOTYPE, L 30 %



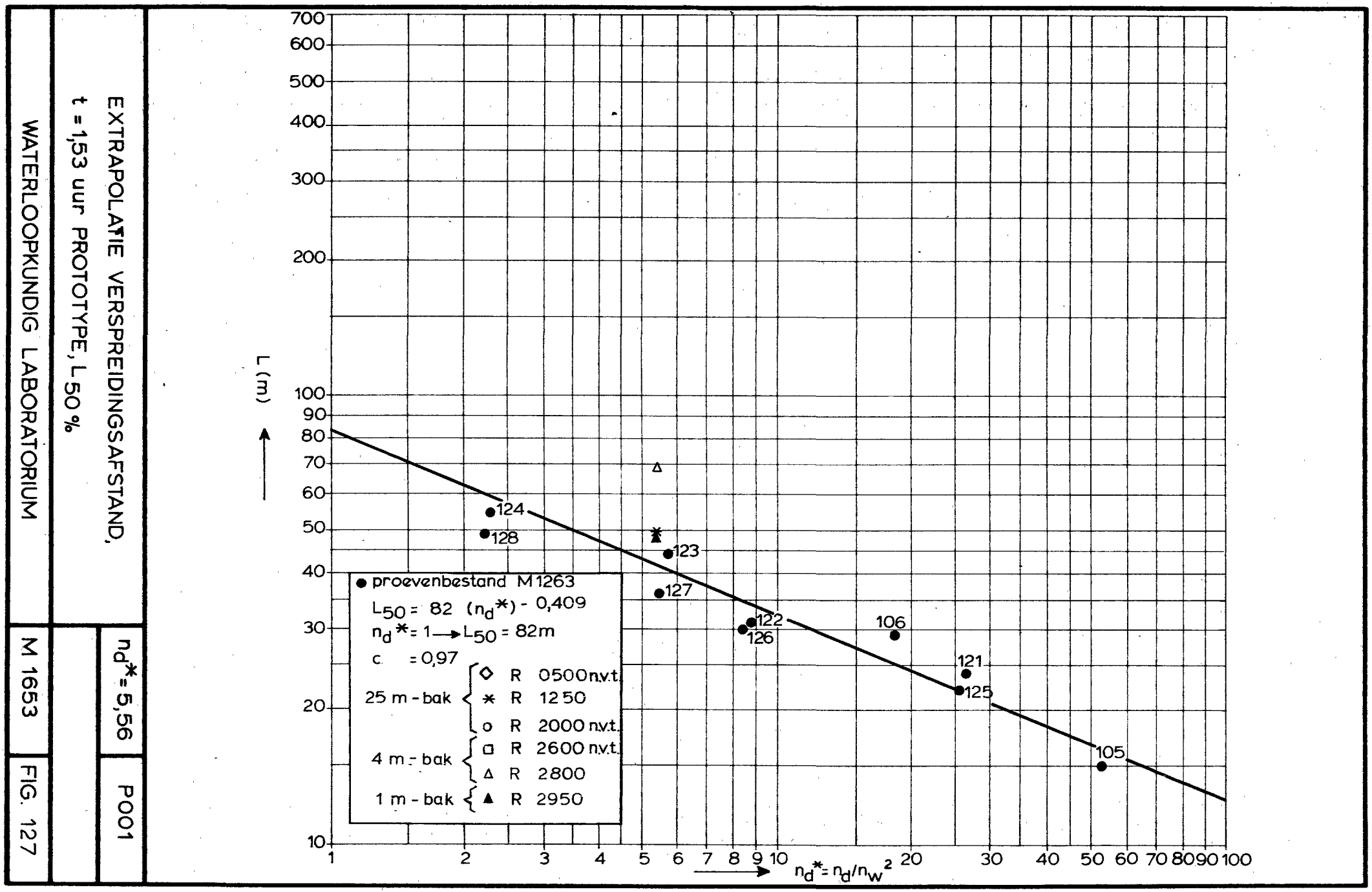
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

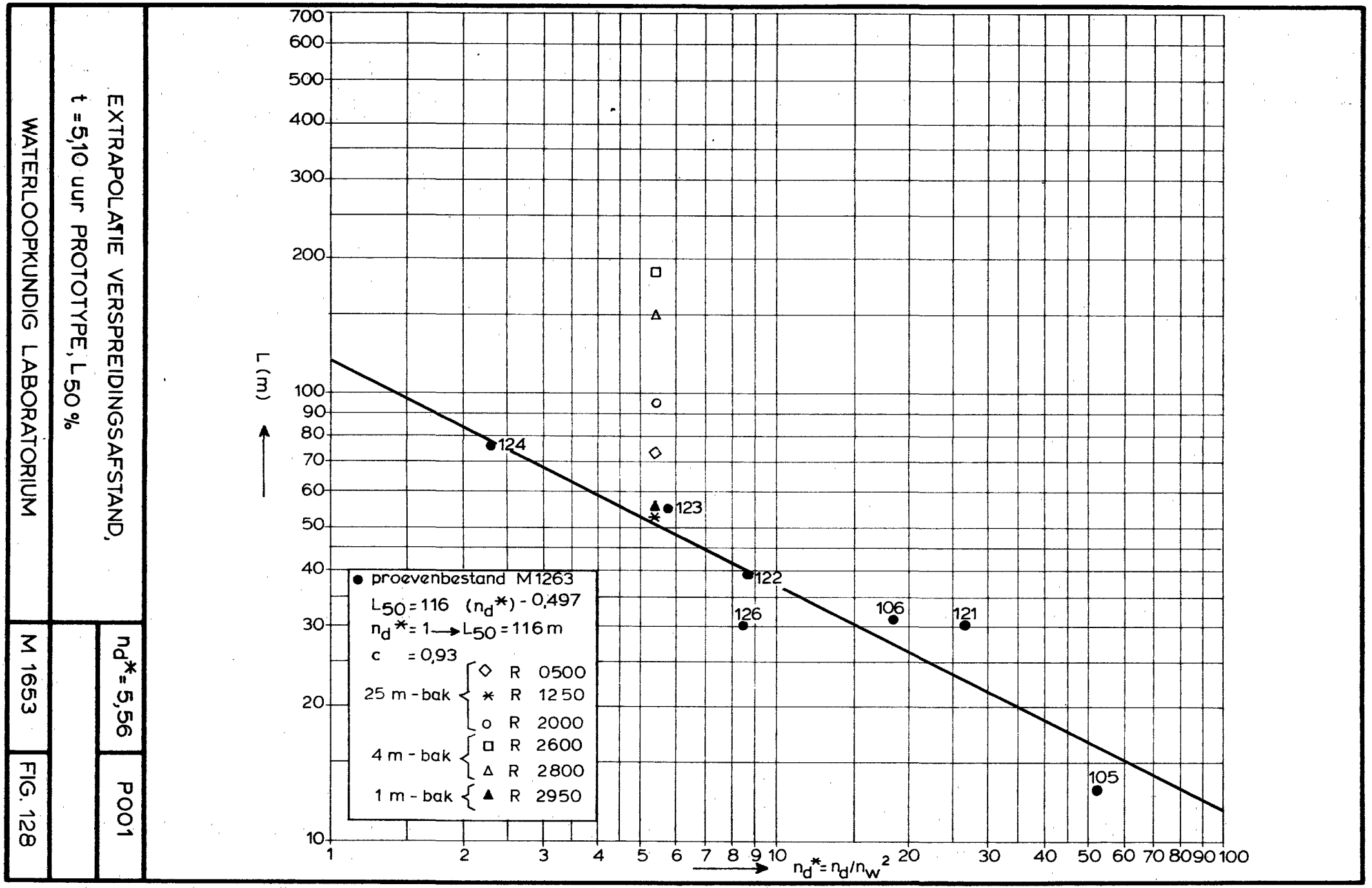
M 1653

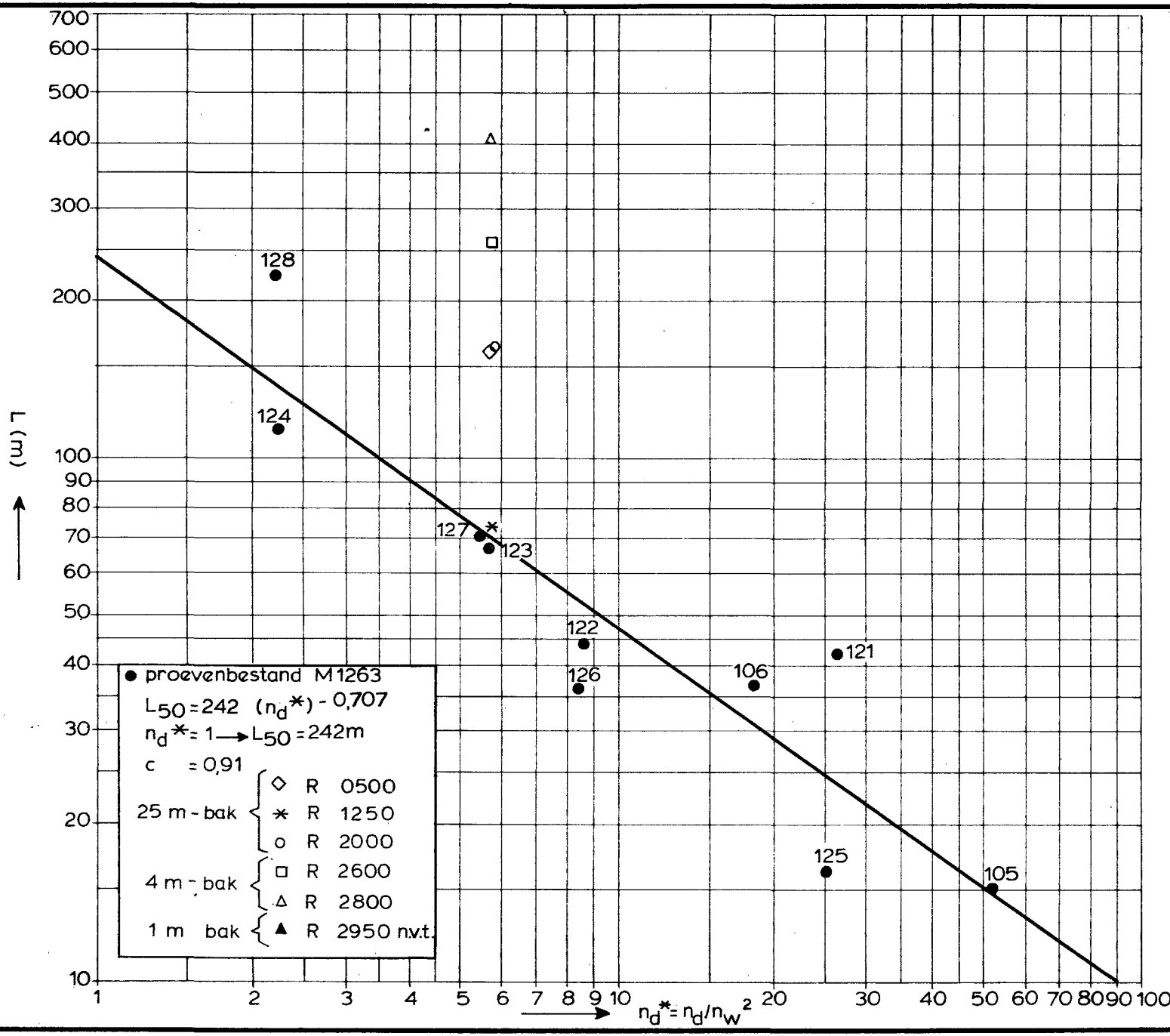
FIG. 126

$n_d^* = 5{,}80$

P001


EXTRAPOLATIE VERSPREIDINGSAFSTAND,
t = 1,53 uur PROTOTYPE, L 50 %
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM
M 1653
FIG. 127
n_d*= 5,56
P001
L (m)
n_d* = n_d/n_w²
● proevenbestand M1263
L_{50} = 82 (n_d*) - 0,409
n_d* = 1 → L_{50} = 82m
c = 0,97
25 m - bak
◇ R 0500 n.v.t.
* R 1250
o R 2000 n.v.t.
4 m - bak
□ R 2600 n.v.t.
△ R 2800
1 m - bak
▲ R 2950
124
128
123
127
122
126
106
121
125
105


EXTRAPOLATIE VERSPREIDINGSAFSTAND,
t = 5,10 uur PROTOTYPE, L 50 %
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM
M 1653
FIG. 128
n_d^*= 5,56
P001
L (m)
700
600
500
400
300
200
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
$n_d^* = n_d/n_w^2$
124
123
122
126
106
121
105
● proevenbestand M1263
L_{50} = 116 (n_d^*) - 0,497
n_d^* = 1 → L_{50} = 116 m
c = 0,93
25 m - bak ◇ R 0500
25 m - bak * R 1250
25 m - bak o R 2000
4 m - bak □ R 2600
4 m - bak △ R 2800
1 m - bak ▲ R 2950



EXTRAPOLATIE VERSPREIDINGSAFSTAND,

t = 15,30 uur PROTOTYPE, L_{50} %

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1653

$n_d^* = 5{,}80$

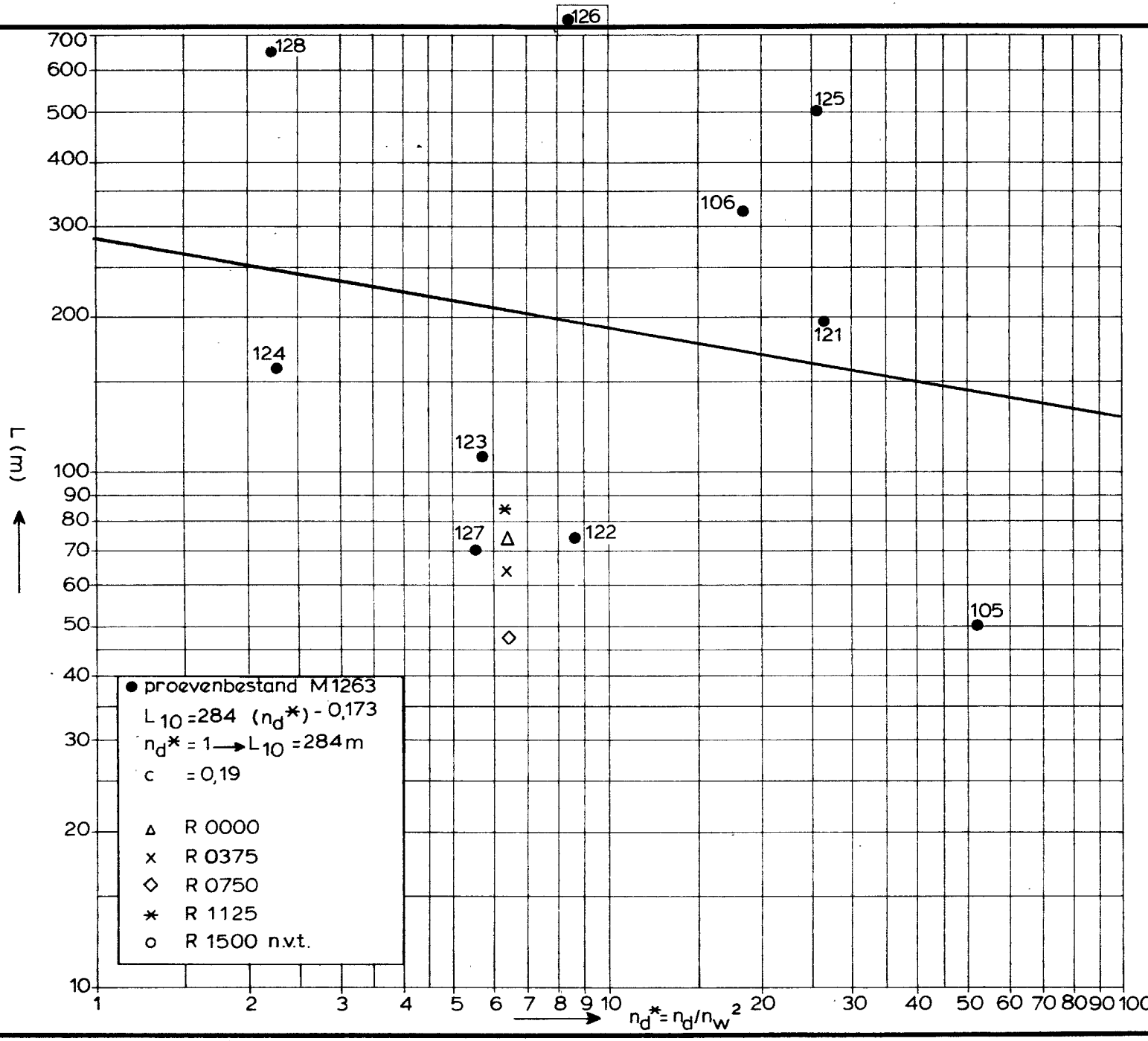
P001

FIG. 129

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

EXTRAPOLATIE VERSPREIDINGSAFSTAND,

t = 1,53 uur PROTOTYPE, L 10 %

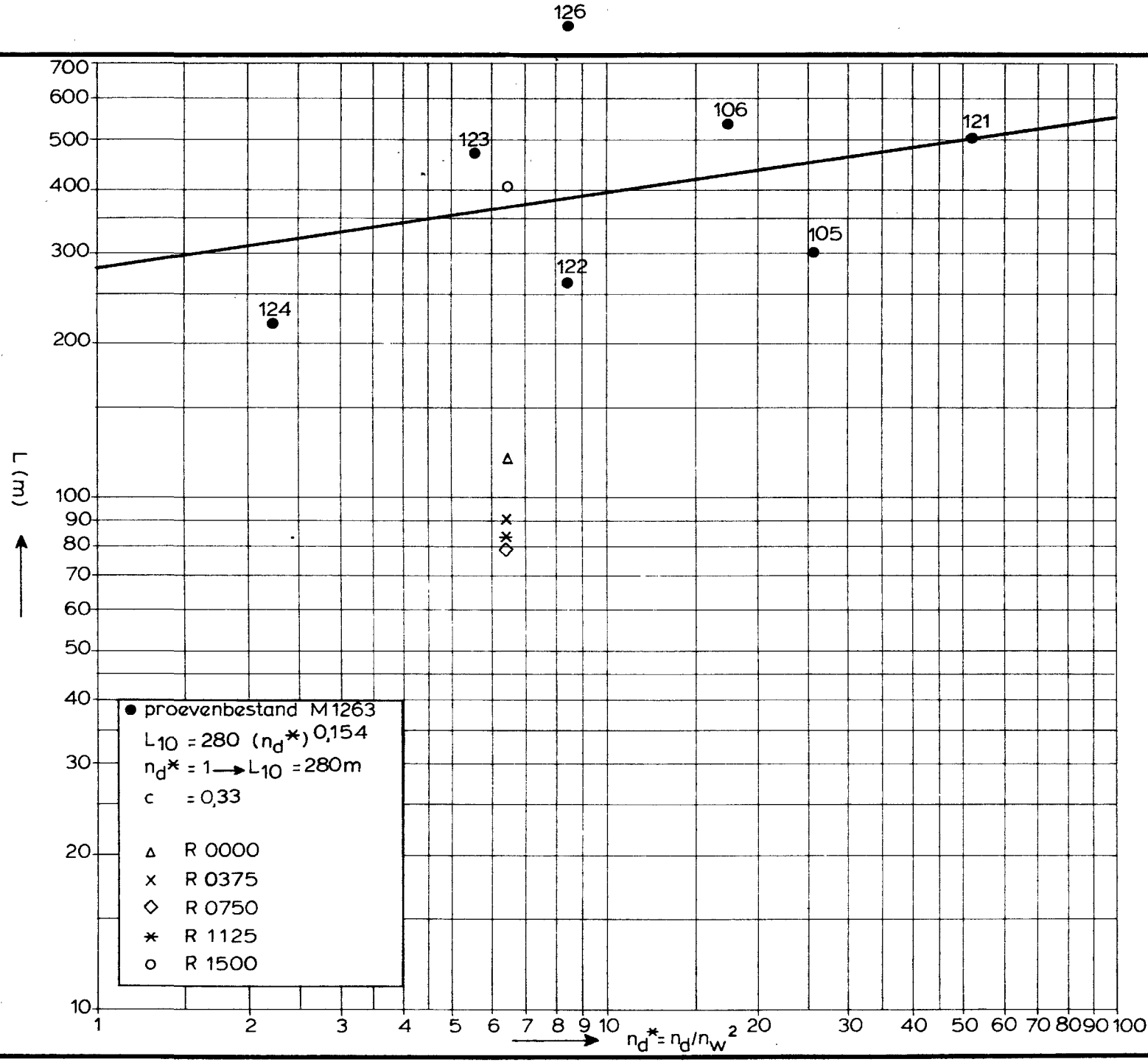


M 1653

$n_d^* = 6{,}43$

P002

FIG. 130



EXTRAPOLATIE VERSPREIDINGSAFSTAND,

t = 5,10 uur PROTOTYPE, L 10 %

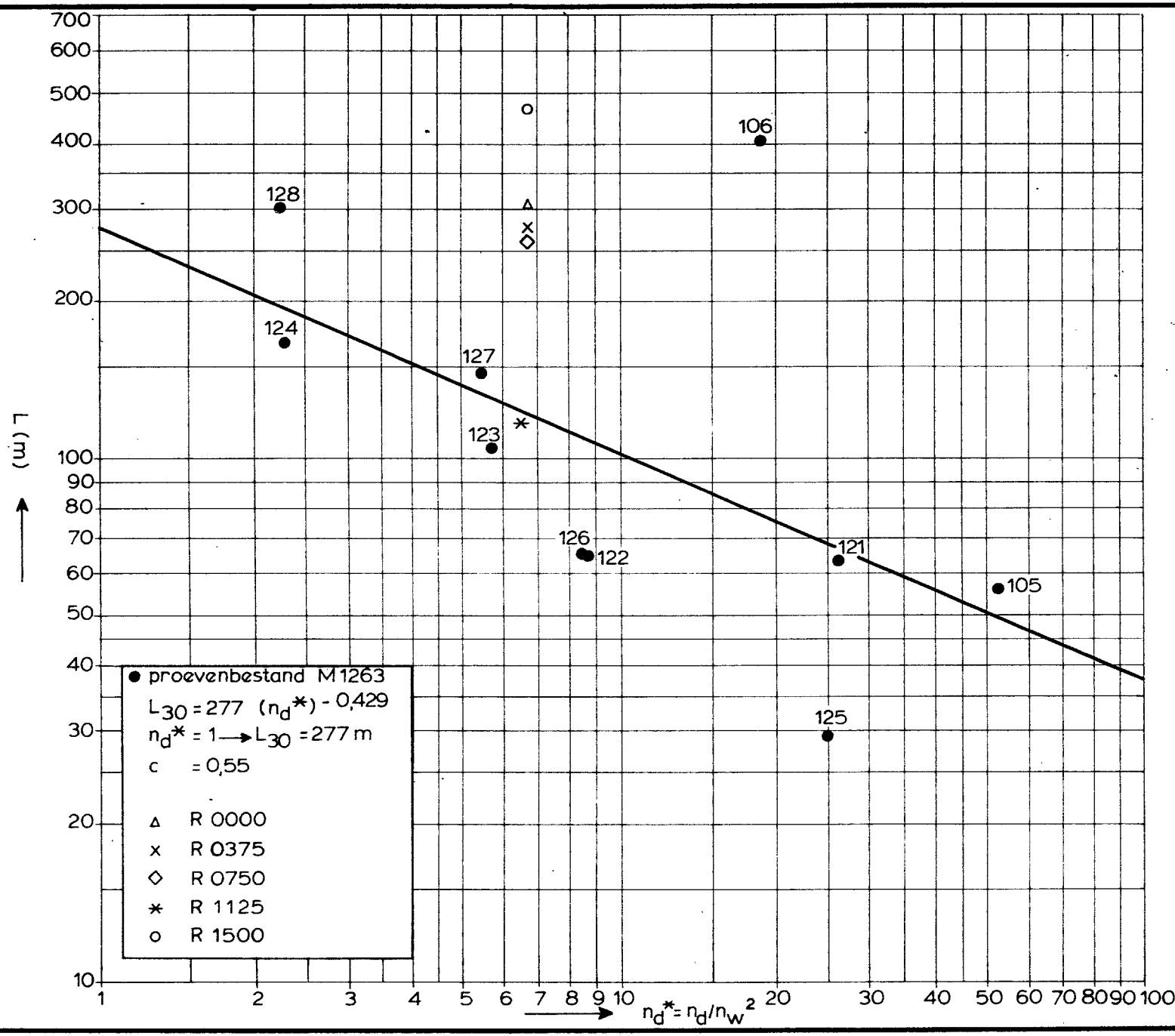
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1653

n_d^* = 6,43

P002

FIG. 131



EXTRAPOLATIE VERSPREIDINGSAFSTAND,

t = 15,30 uur PROTOTYPE, L 30%

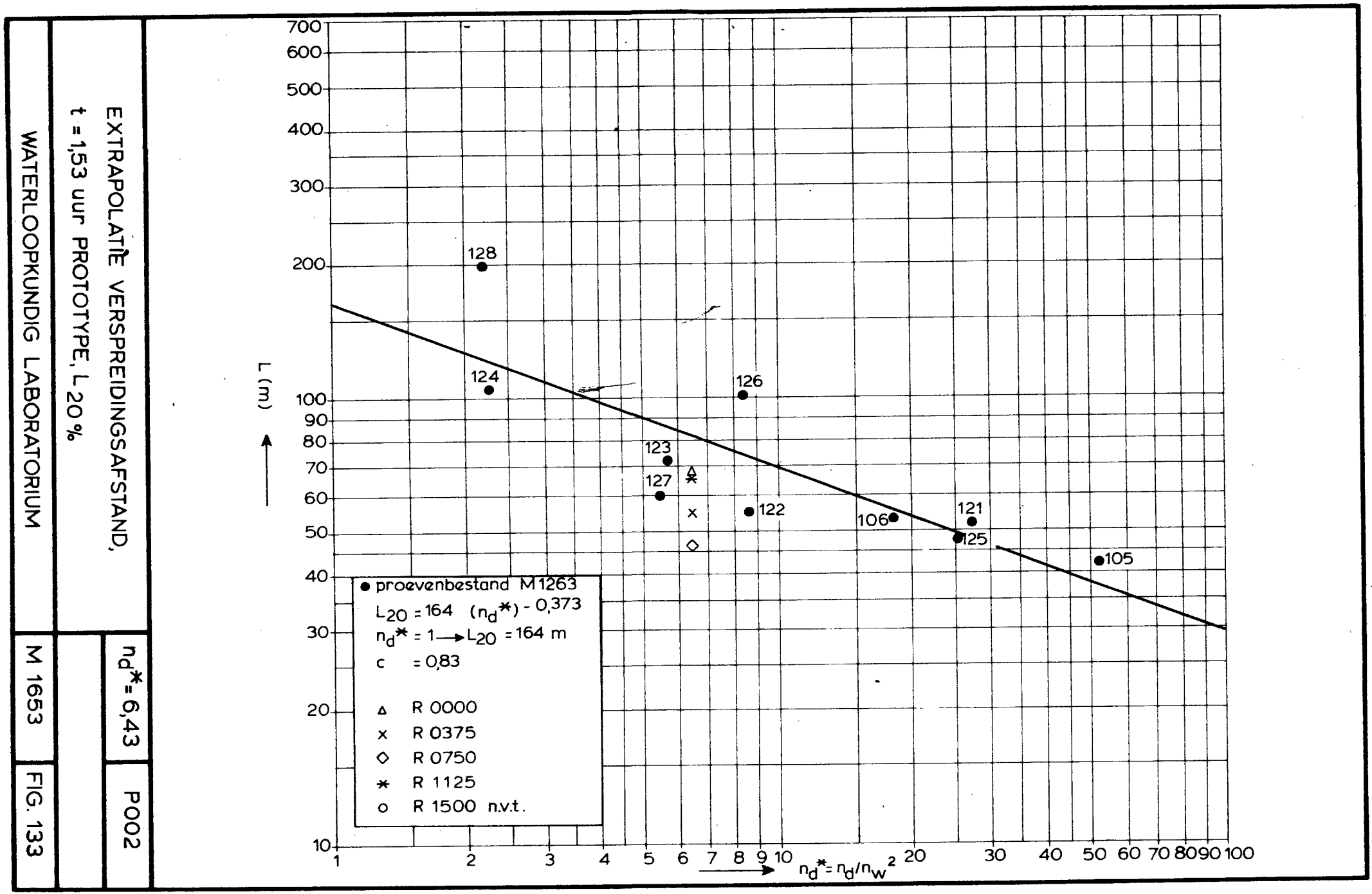
$n_d^* = 6{,}85$

P002

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

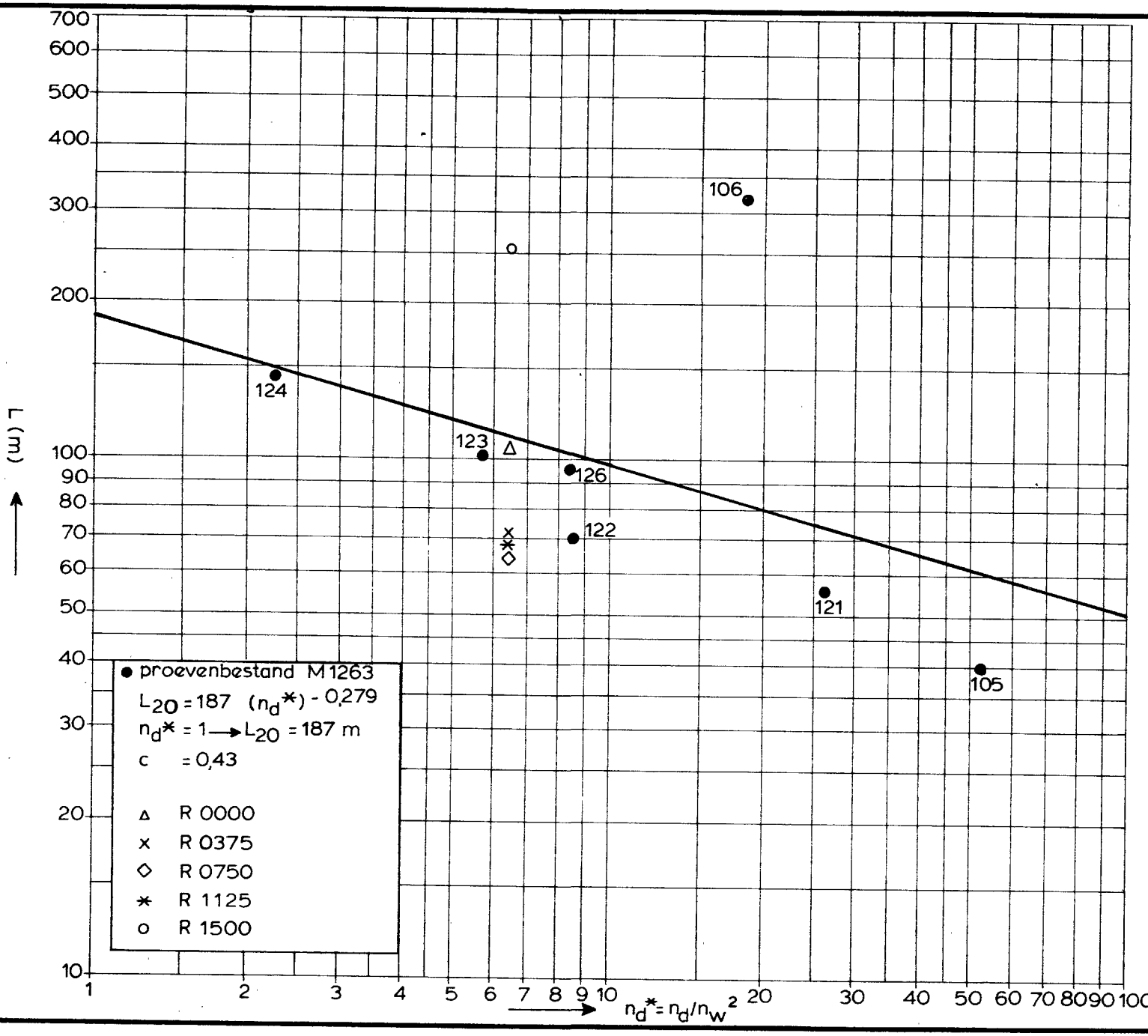
M 1653

FIG. 132


EXTRAPOLATIE VERSPREIDINGSAFSTAND,
t = 1,53 uur PROTOTYPE, L 20 %
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM
M 1653
FIG. 133
n_d^*= 6,43
P002
L (m)
$n_d^* = n_d/n_w^2$
● proevenbestand M1263
L_{20} = 164 (n_d^*) - 0,373
n_d^* = 1 → L_{20} = 164 m
c = 0,83
△ R 0000
× R 0375
◇ R 0750
✱ R 1125
o R 1500 n.v.t.
128
124
126
123
127
122
106
121
125
105

EXTRAPOLATIE VERSPREIDINGSAFSTAND,

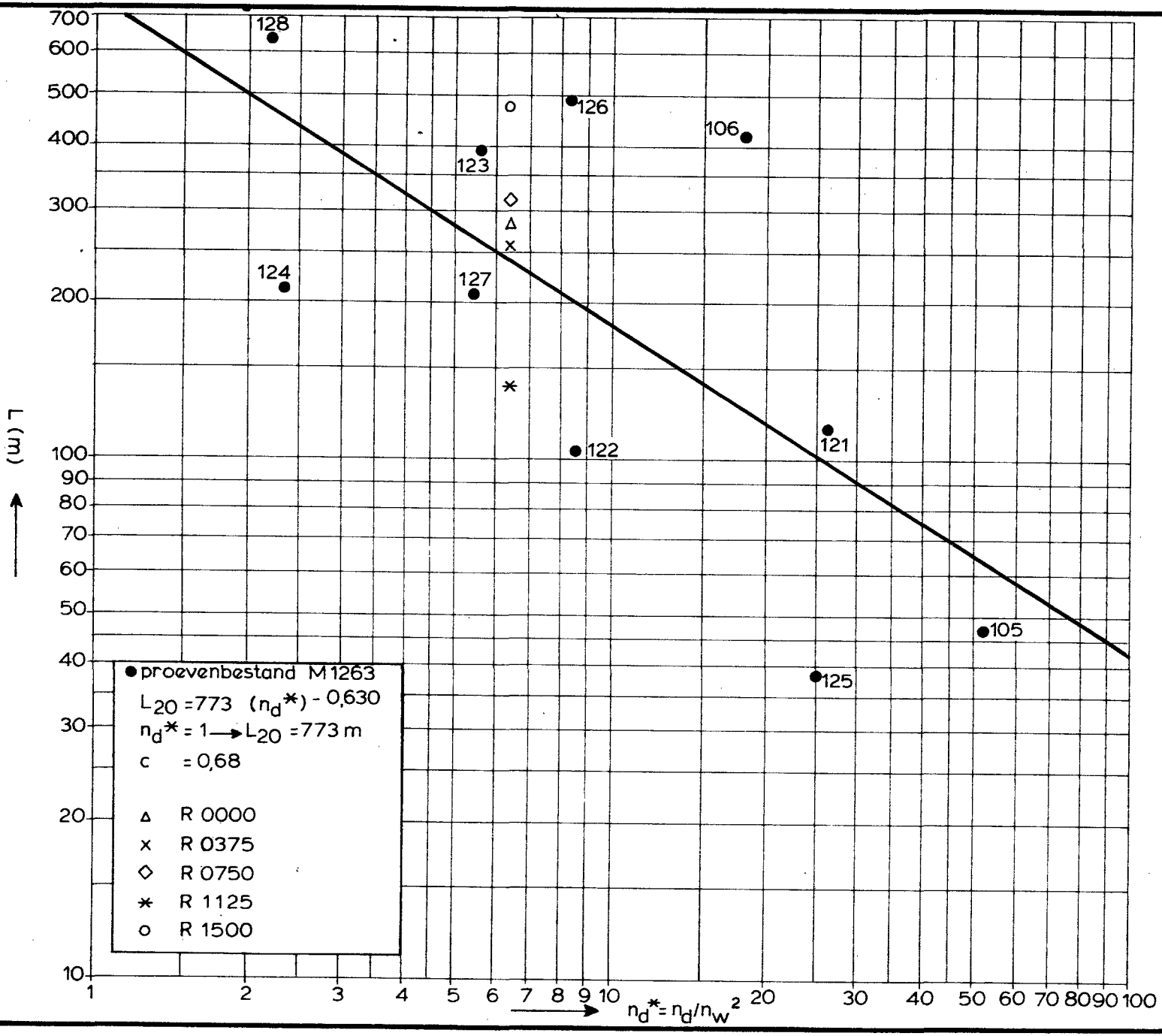
t = 5,10 uur PROTOTYPE, L_{20} %



WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM		n_d* = 6,43
M 1653		P002
FIG. 134		

EXTRAPOLATIE VERSPREIDINGSAFSTAND,

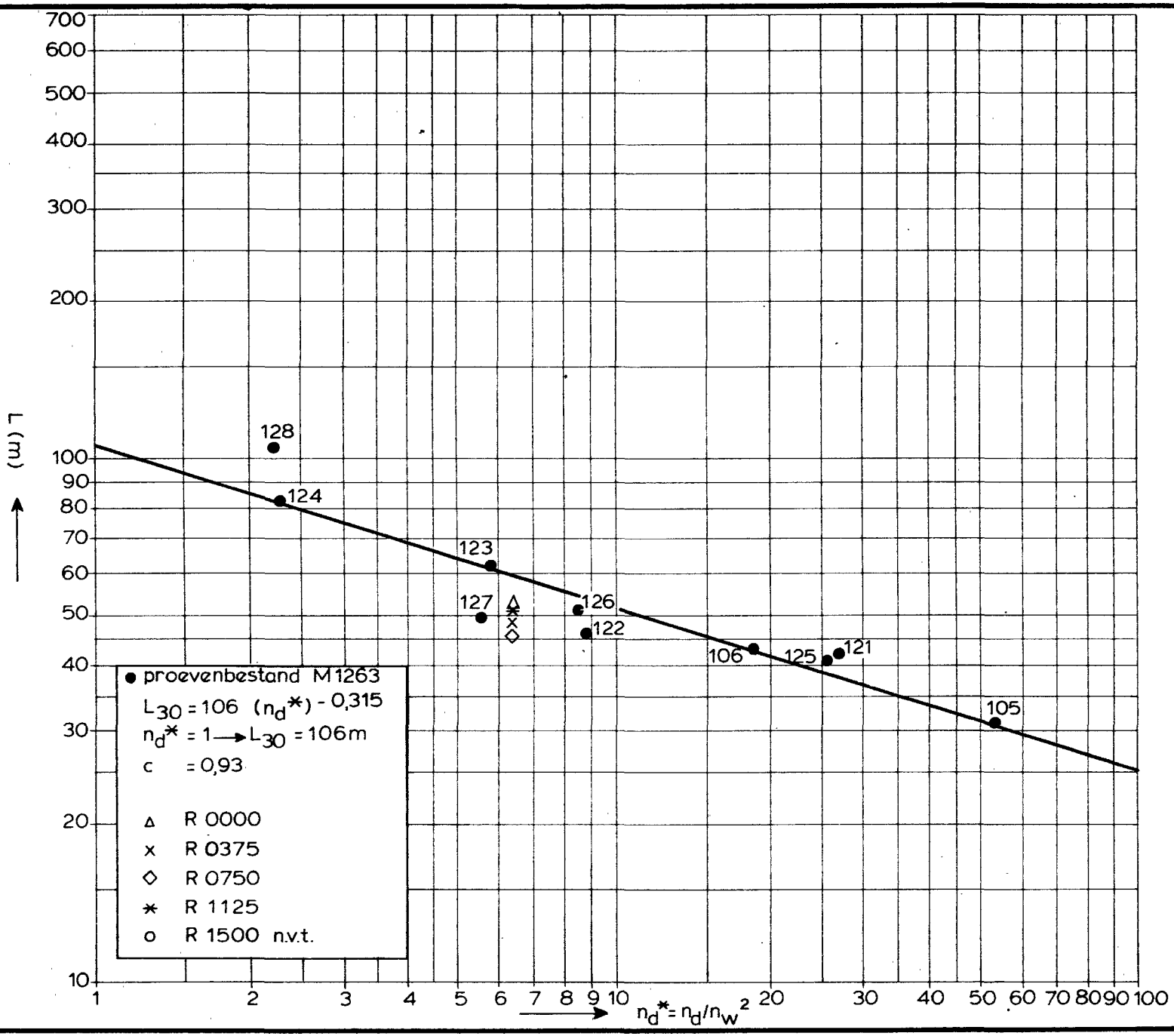
t = 15,30 uur PROTOTYPE, L_{20} %



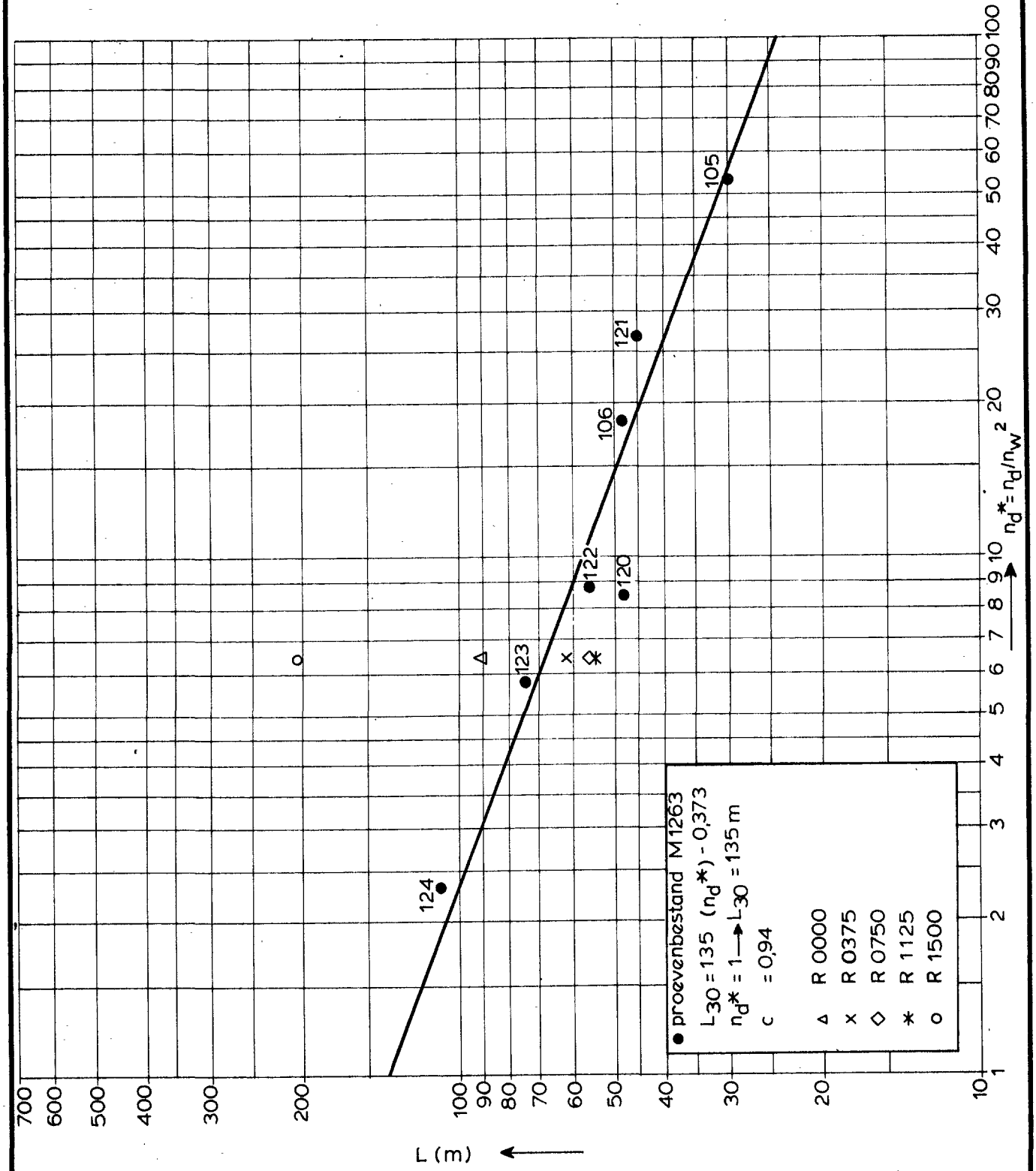
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM		n_d* = 6,85
M 1653		P002
FIG. 135		

EXTRAPOLATIE VERSPREIDINGSAFSTAND,

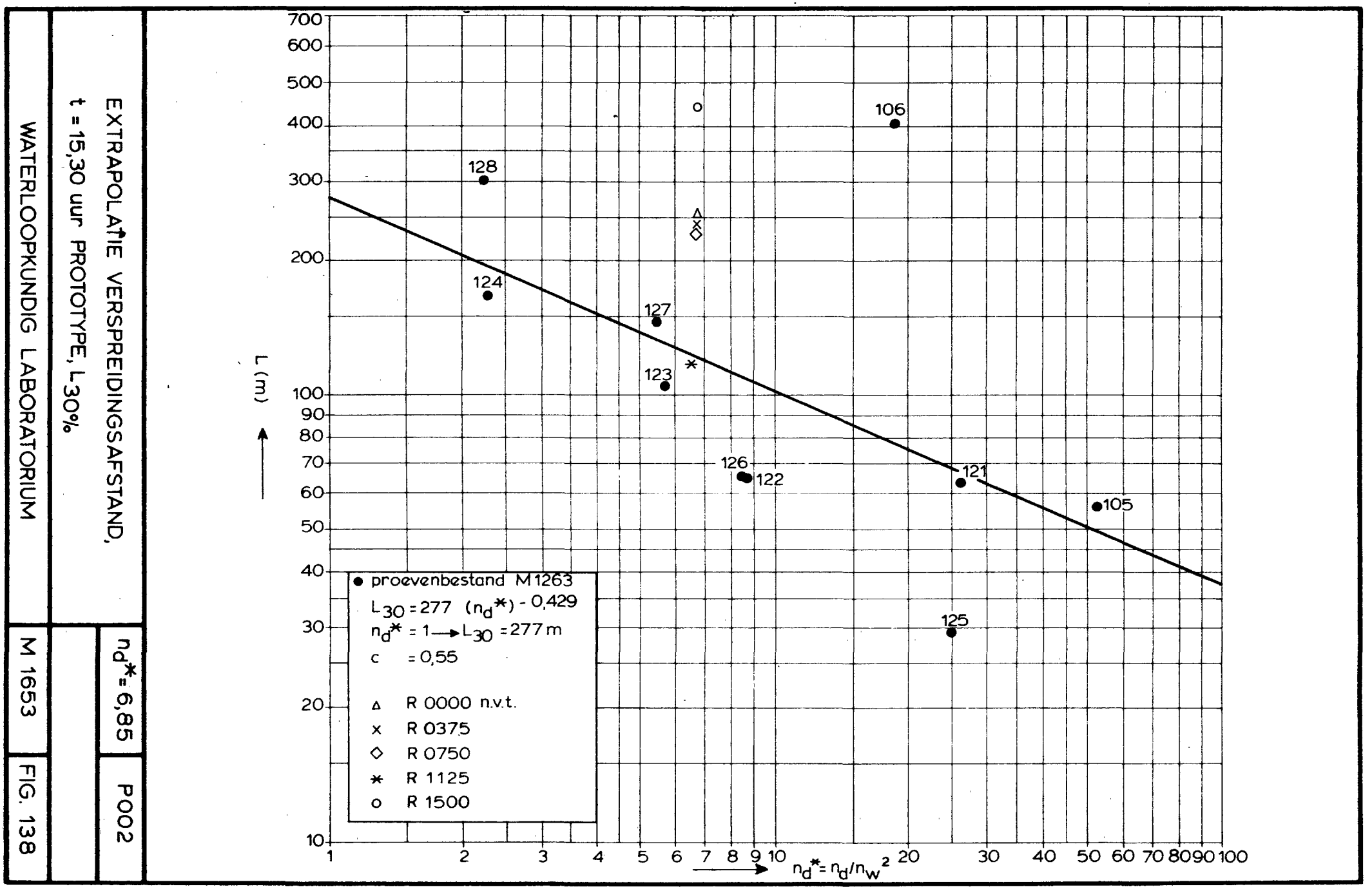
t = 1,53 uur PROTOTYPE, L 30 %

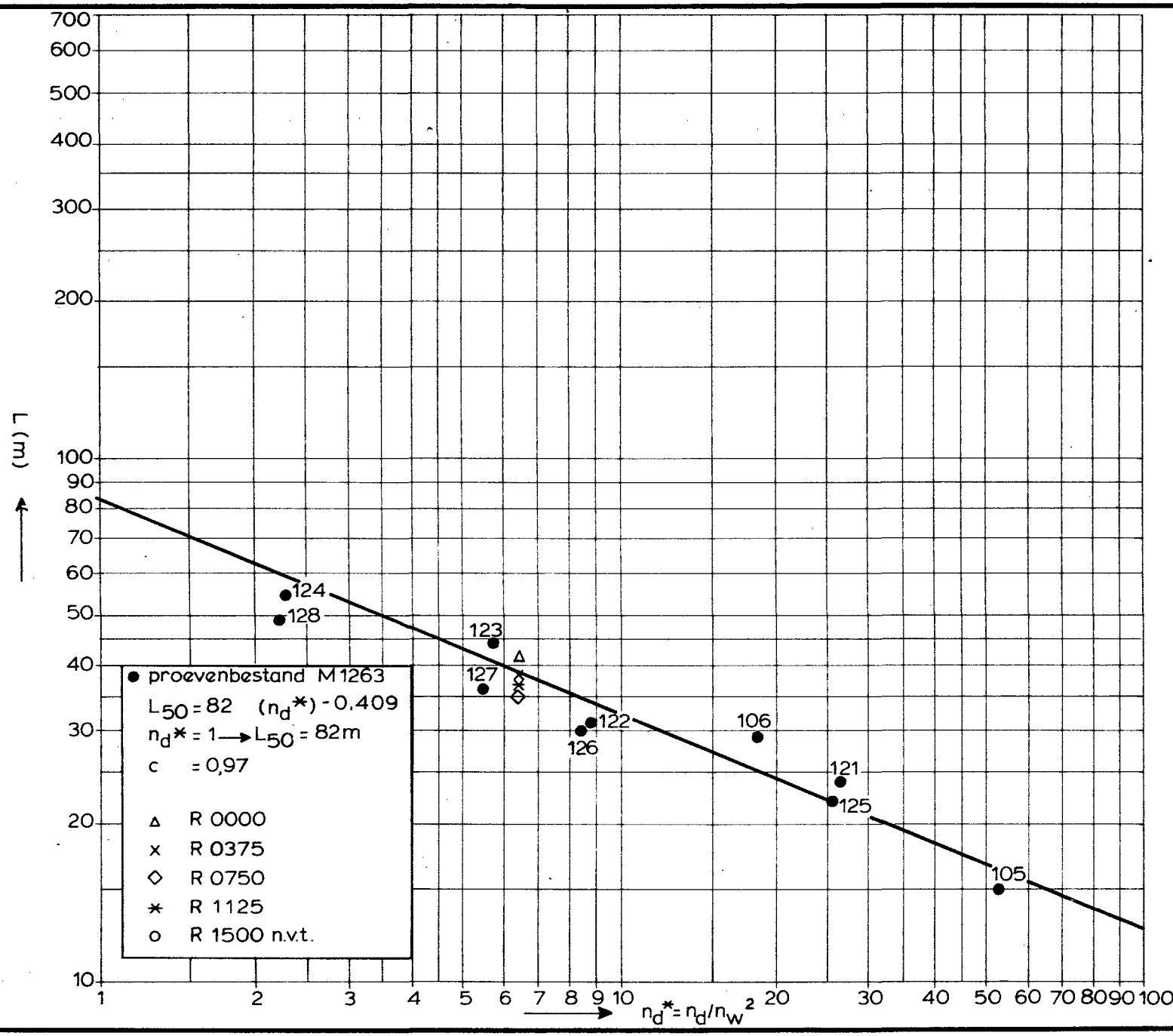


WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	$n_d^* = 6{,}43$	P002
M 1653		
FIG. 136		



EXTRAPOLATIE VERSPREIDINGSAFSTAND, t = 5,10 uur PROTOTYPE, L_{30} %	n_d^* = 6,43	P002
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1653	FIG. 137


EXTRAPOLATIE VERSPREIDINGSAFSTAND,
t = 15,30 uur PROTOTYPE, L30%
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM
M 1653
FIG. 138
nd*= 6,85
P002
L (m)
nd* = nd/nw²
700
600
500
400
300
200
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
106
128
124
127
123
126
122
121
105
125
proevenbestand M1263
L30 = 277 (nd*) - 0,429
nd* = 1 → L30 = 277 m
c = 0,55
R 0000 n.v.t.
R 0375
R 0750
R 1125
R 1500



EXTRAPOLATIE VERSPREIDINGSAFSTAND,

t = 1,53 uur PROTOTYPE, L_{50} %

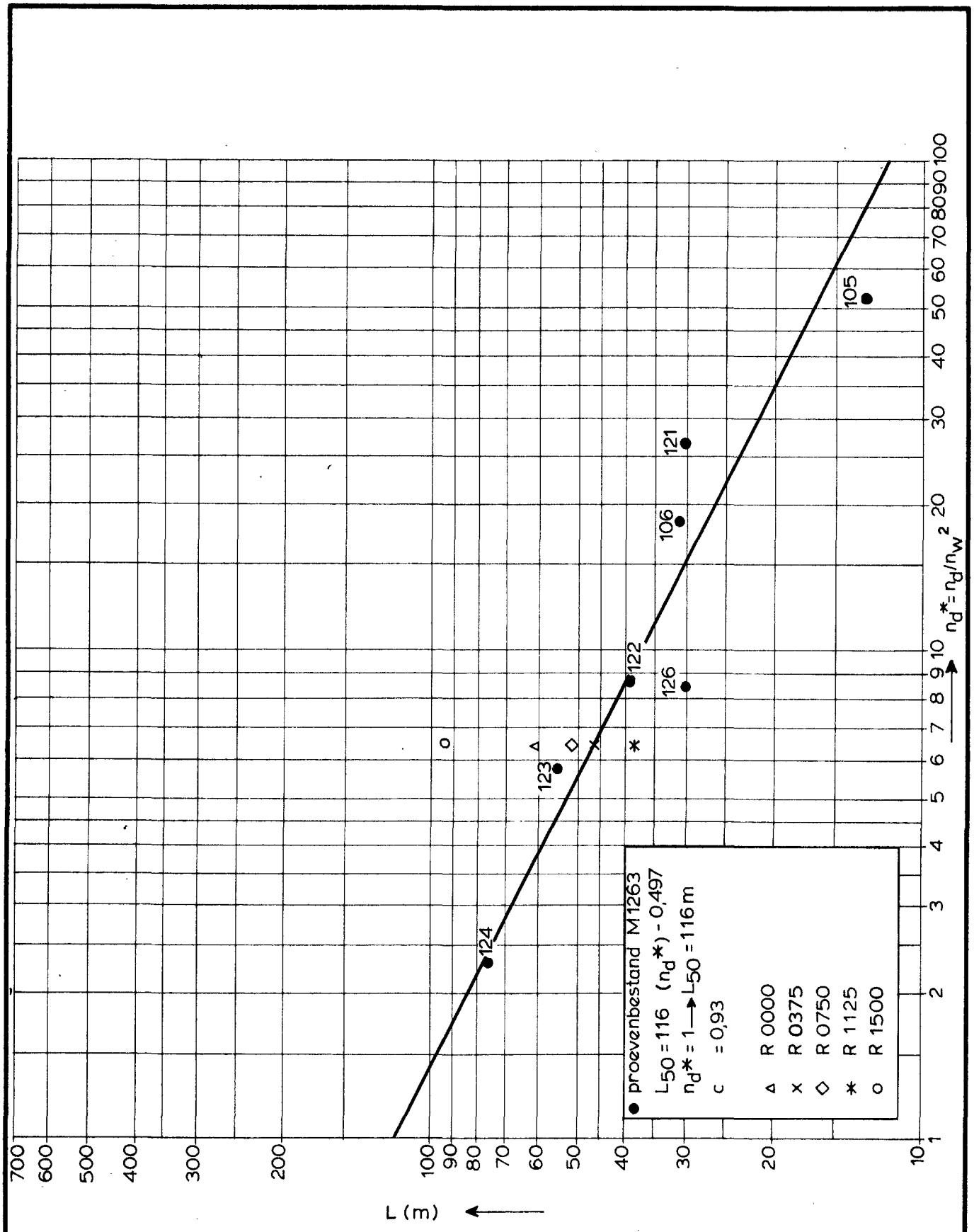
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

n_d^* = 6,43

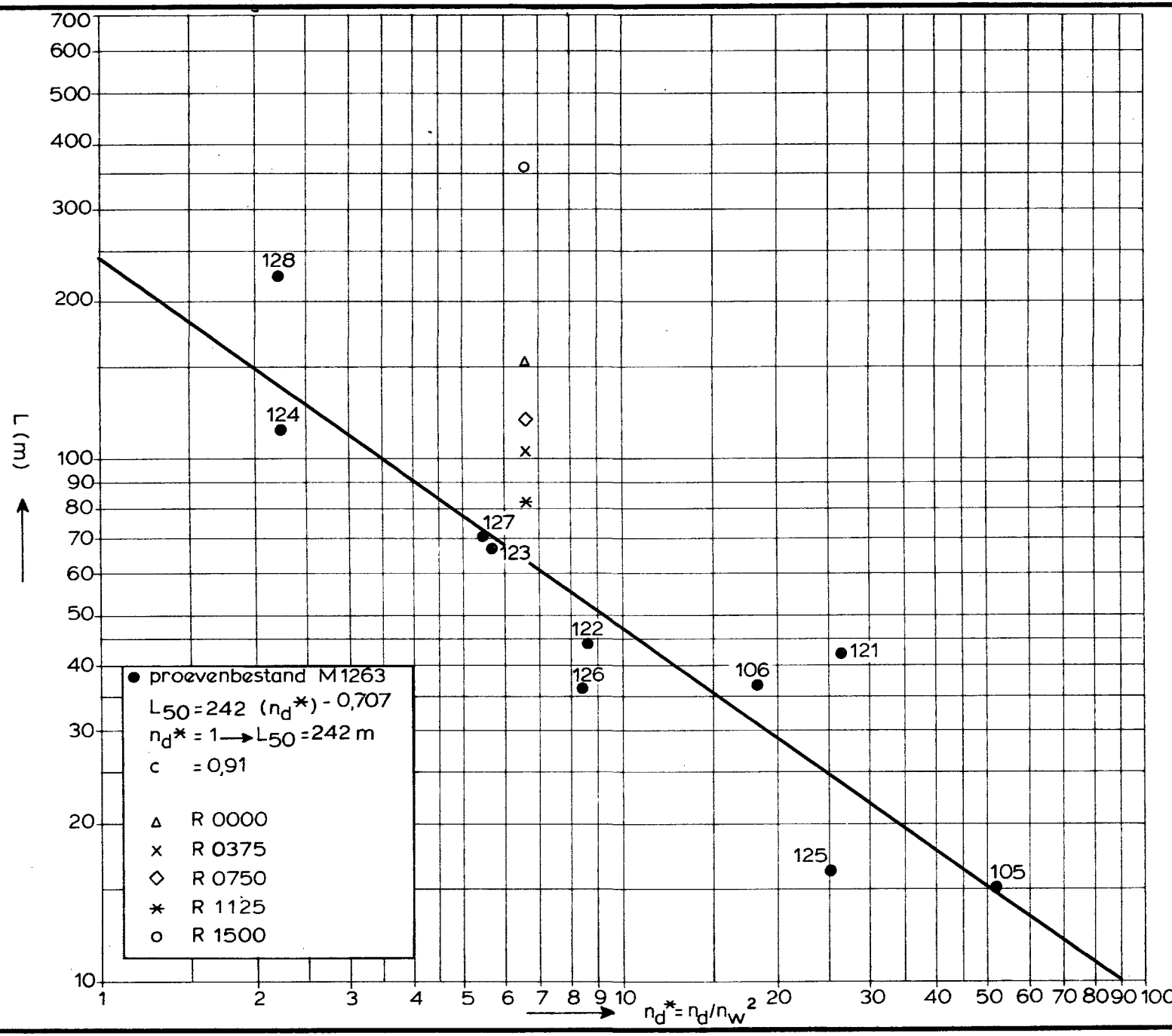
M 1653

P002

FIG. 139



EXTRAPOLATIE VERSPREIDINGSAFSTAND, t = 5,10 uur PROTOTYPE, $L_{50\,\%}$	$n_d^* = 6{,}43$	P002
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1653	FIG. 140



EXTRAPOLATIE VERSPREIDINGSAFSTAND,

t = 15,30 uur PROTOTYPE, L 50 %

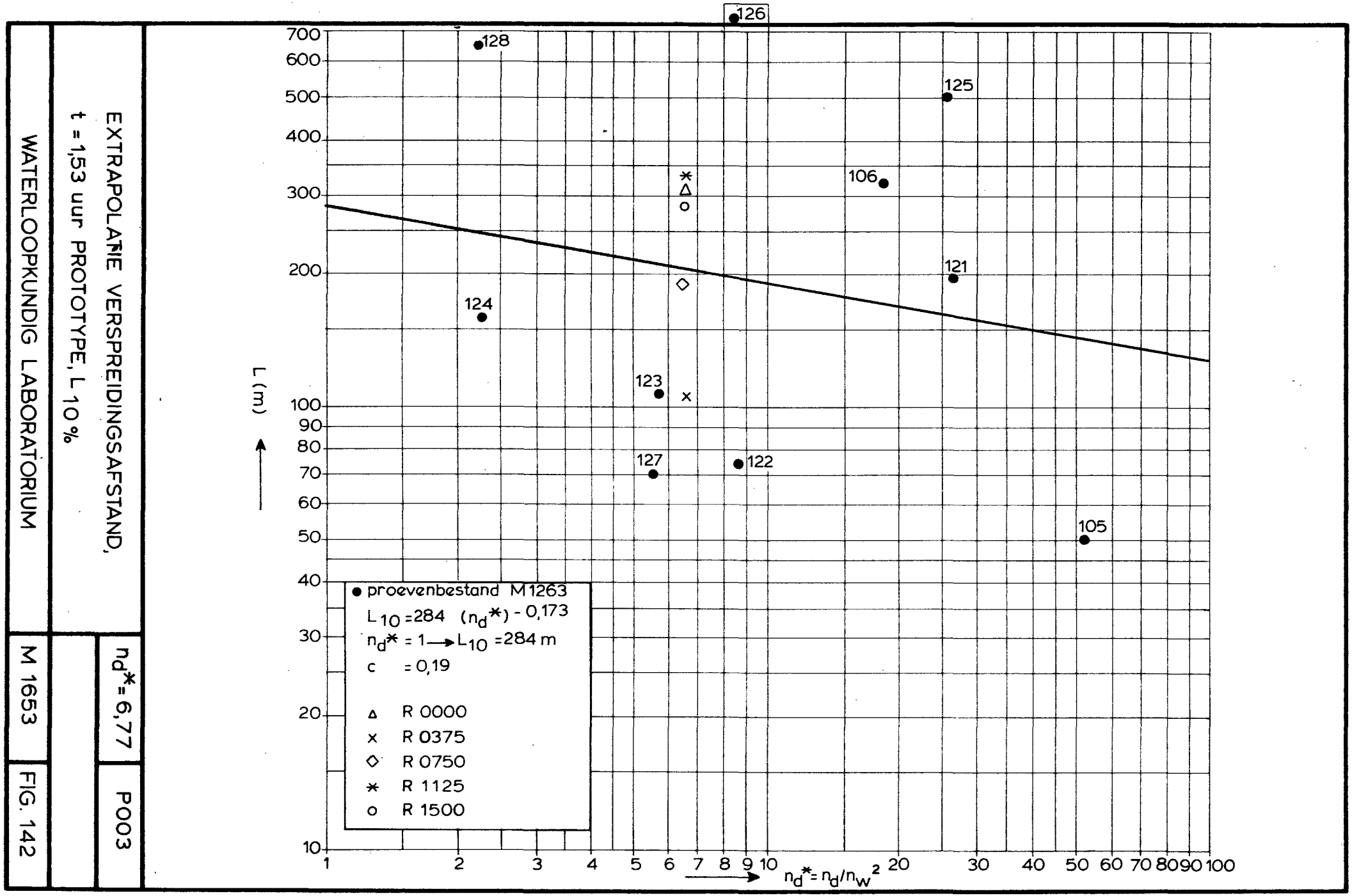
$n_d^* = 6{,}85$

P002

M 1653

FIG. 141

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM



EXTRAPOLATIE VERSPREIDINGSAFSTAND,

t = 1,53 uur PROTOTYPE, L 10 %

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1653

$n_d^* = 6{,}77$

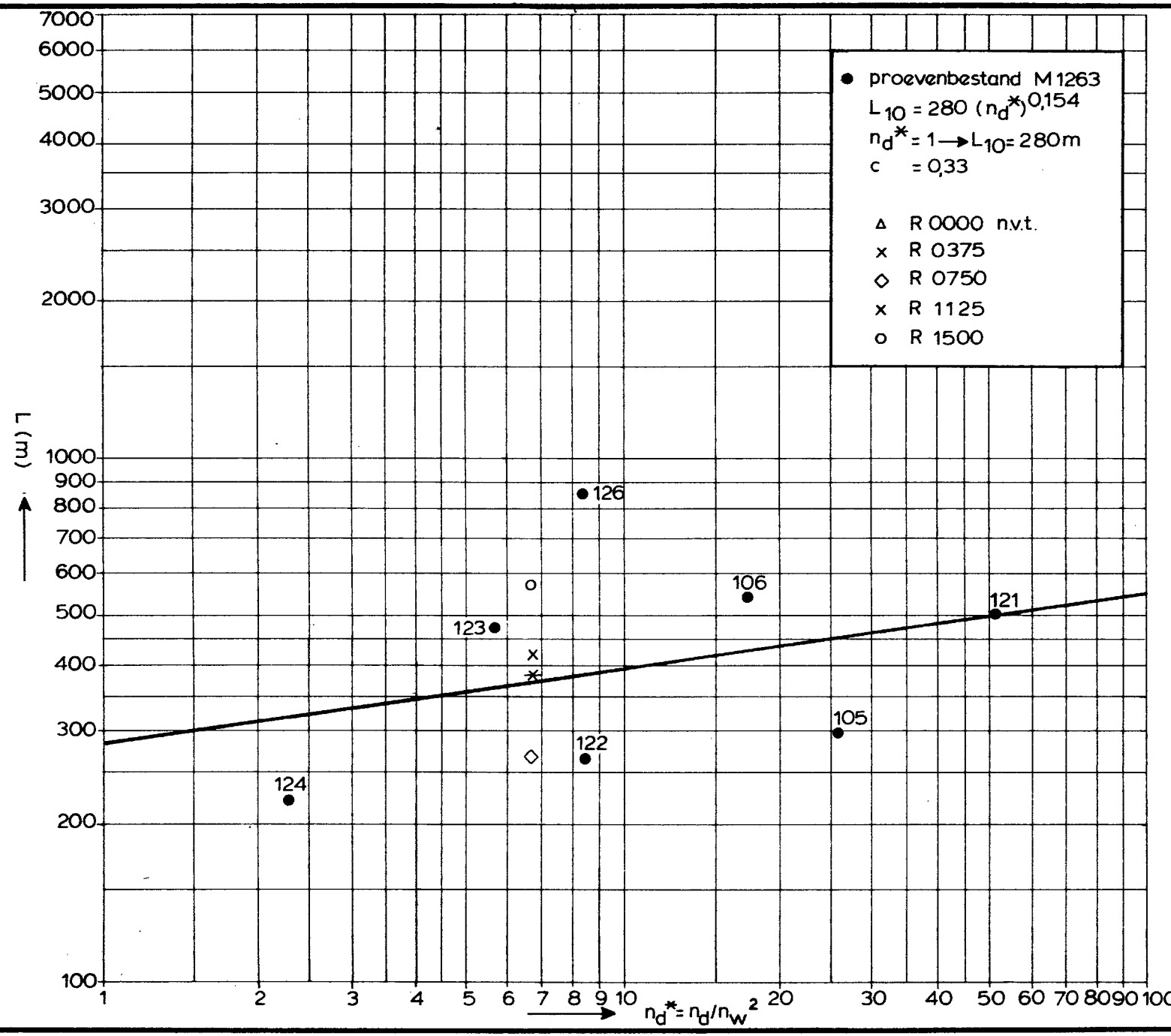
P003

FIG. 142

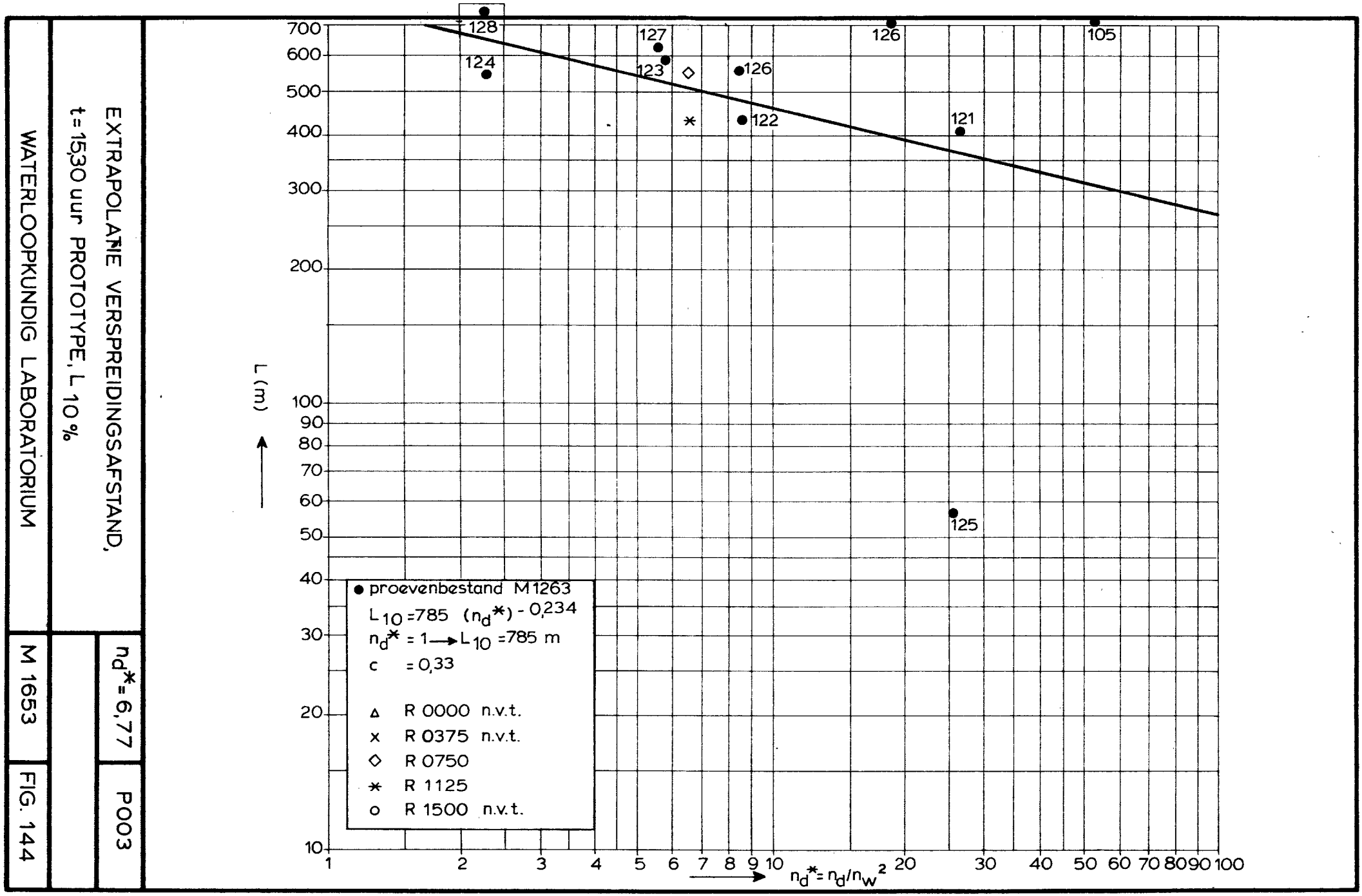
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

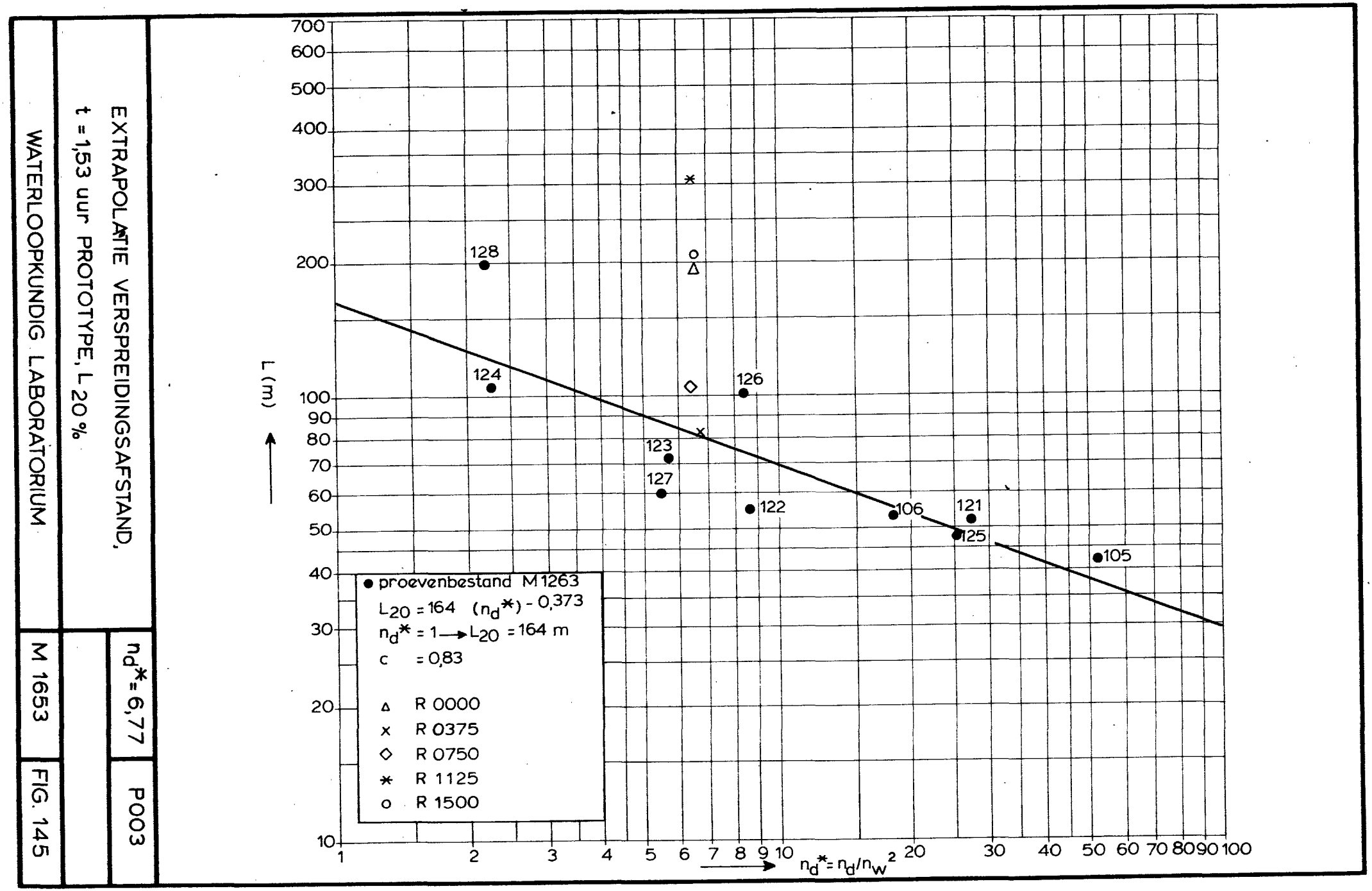
EXTRAPOLATIE VERSPREIDINGSAFSTAND,

t = 5,1 uur PROTOTYPE, L 10%



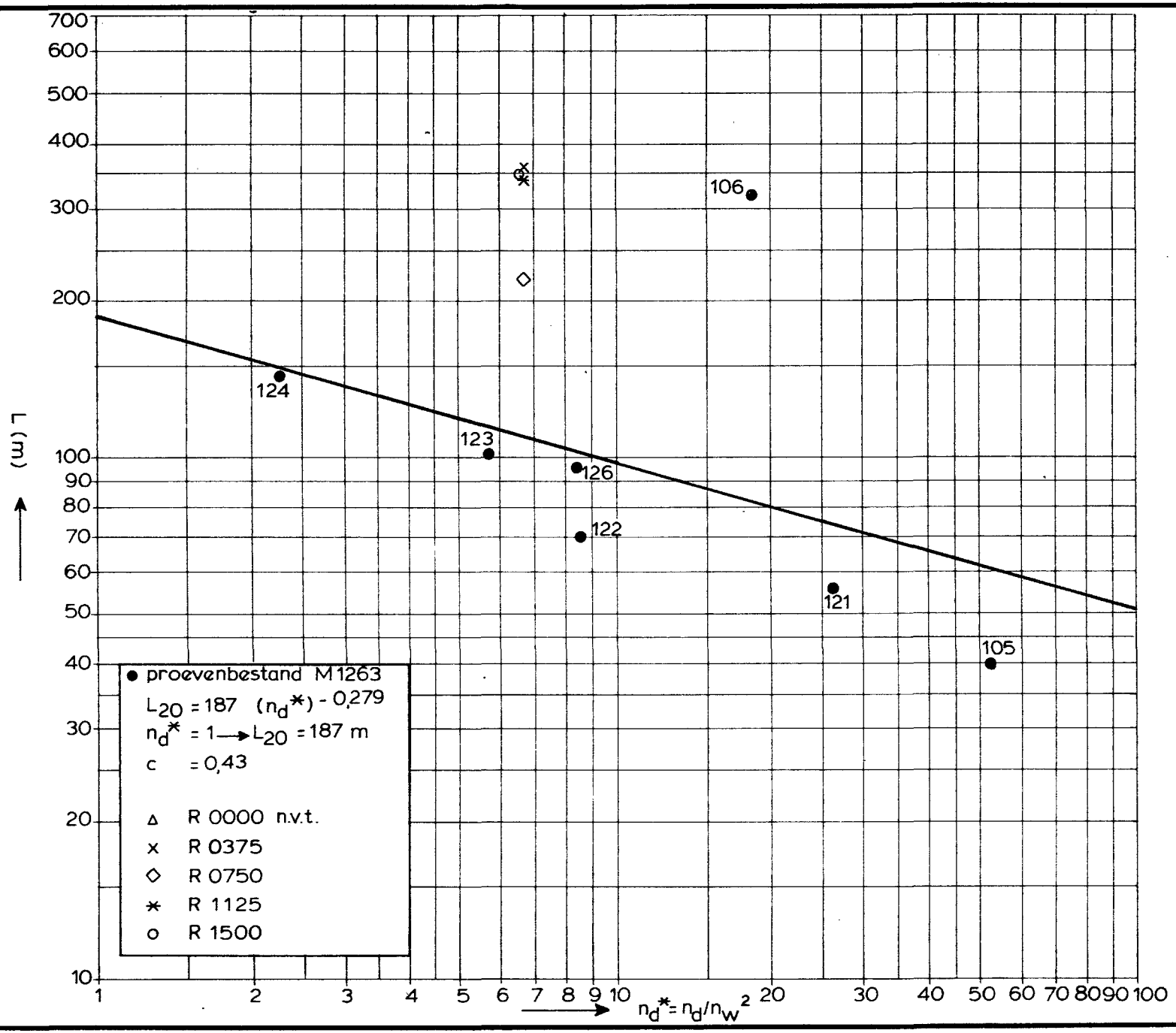
M 1653	$n_d^* = 6,77$	P003
FIG. 143		


EXTRAPOLATIE VERSPREIDINGSAFSTAND,
t = 15,30 uur PROTOTYPE, L 10 %
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM
M 1653
FIG. 144
n_d^* = 6,77
P003
L (m)
$n_d^* = n_d/n_w^2$
700
600
500
400
300
200
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
128
124
127
123
126
122
126
121
105
125
● proevenbestand M1263
L_{10} = 785 (n_d^*) - 0,234
n_d^* = 1 → L_{10} = 785 m
c = 0,33
△ R 0000 n.v.t.
× R 0375 n.v.t.
◇ R 0750
✳ R 1125
○ R 1500 n.v.t.


EXTRAPOLATIE VERSPREIDINGSAFSTAND,
t = 1,53 uur PROTOTYPE, L 20 %
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM
M 1653
FIG. 145
n_d^*= 6,77
P003
L (m)
$n_d^* = n_d/n_w^2$
● proevenbestand M 1263
L_{20} = 164 (n_d^*) - 0,373
n_d^* = 1 → L_{20} = 164 m
c = 0,83
Δ R 0000
x R 0375
◇ R 0750
* R 1125
o R 1500
128
124
126
123
127
122
106
121
125
105

EXTRAPOLATIE VERSPREIDINGSAFSTAND,

t = 5,10 uur PROTOTYPE, L 20 %



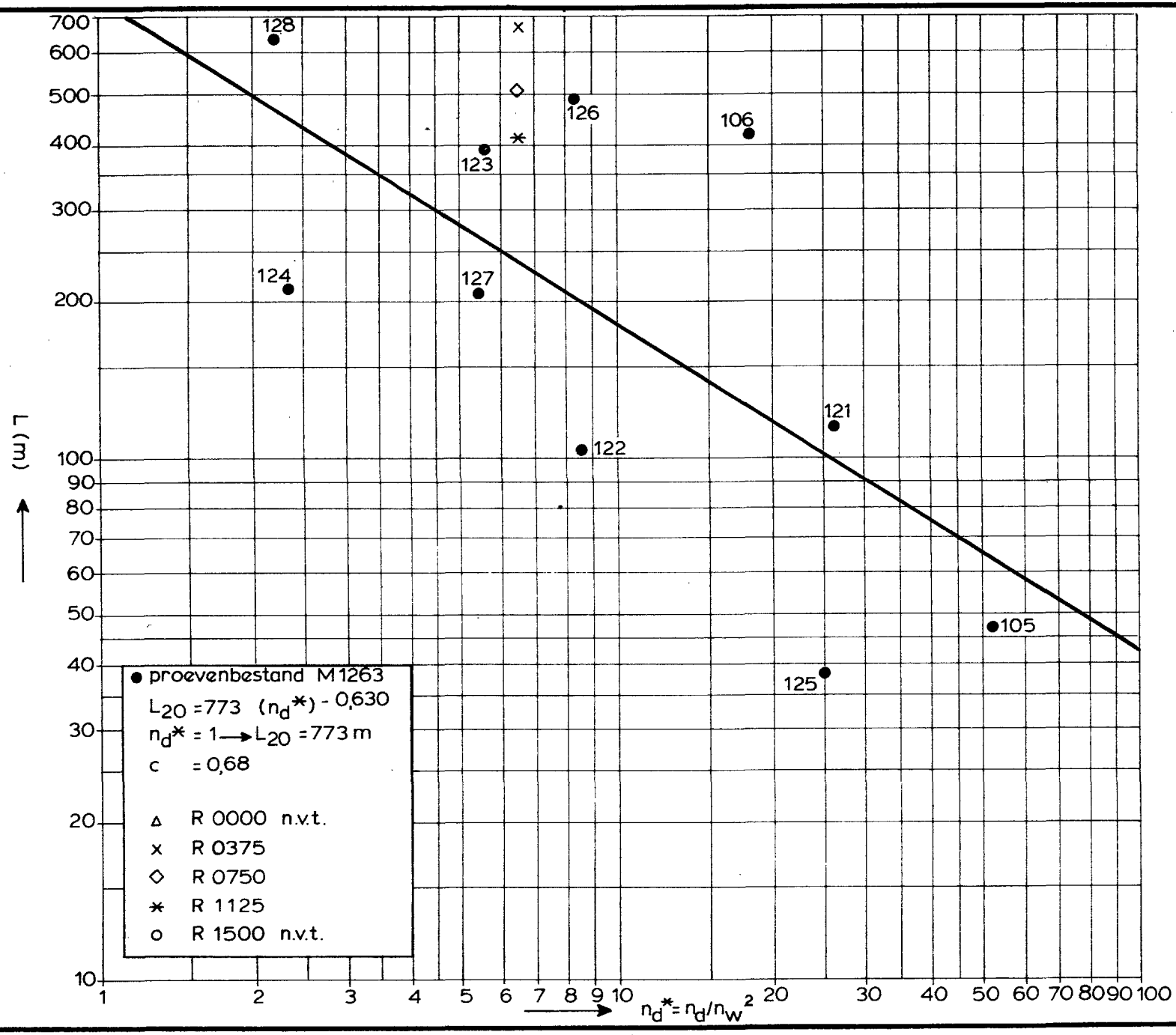
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

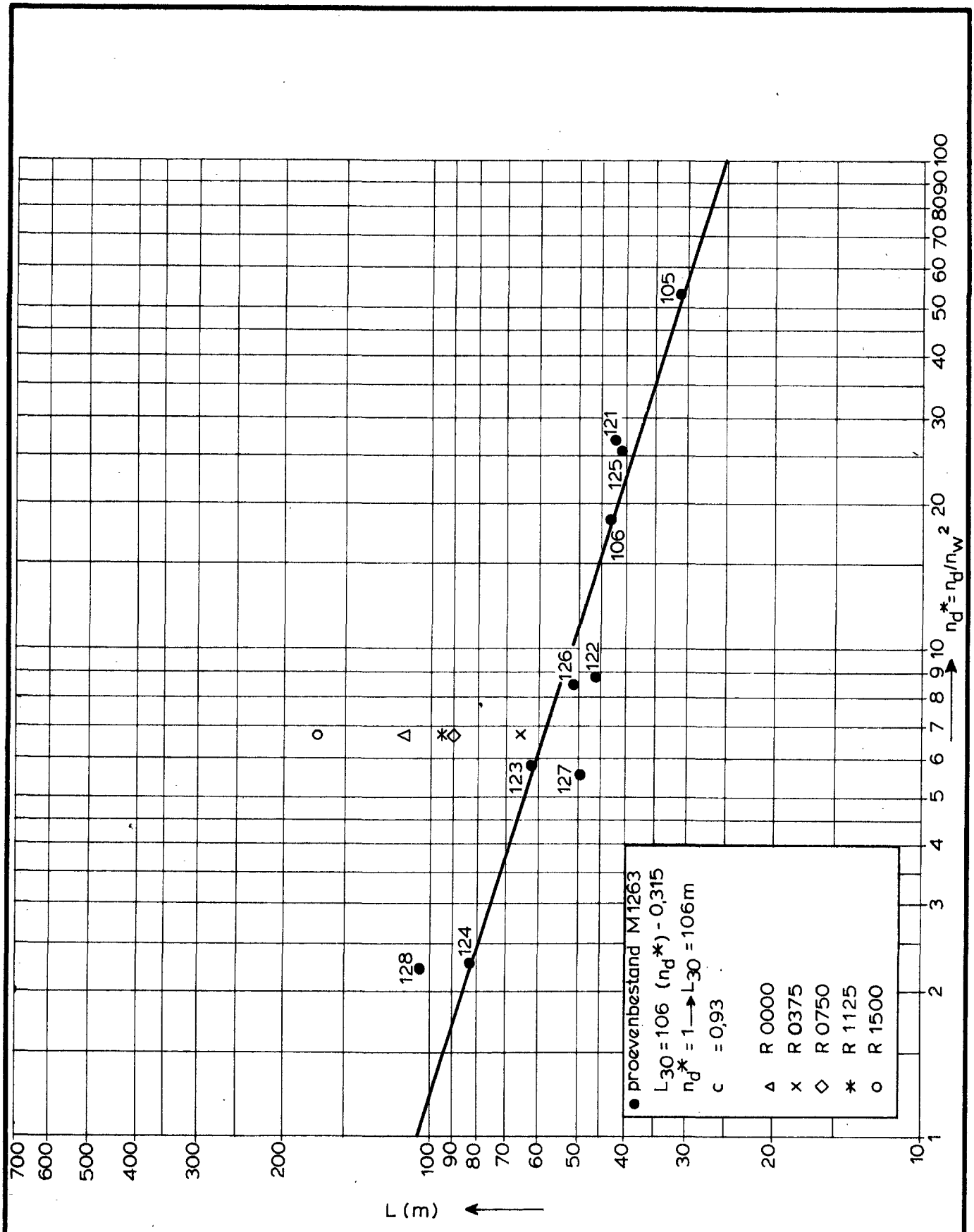
M 1653

$n_d^* = 6{,}77$

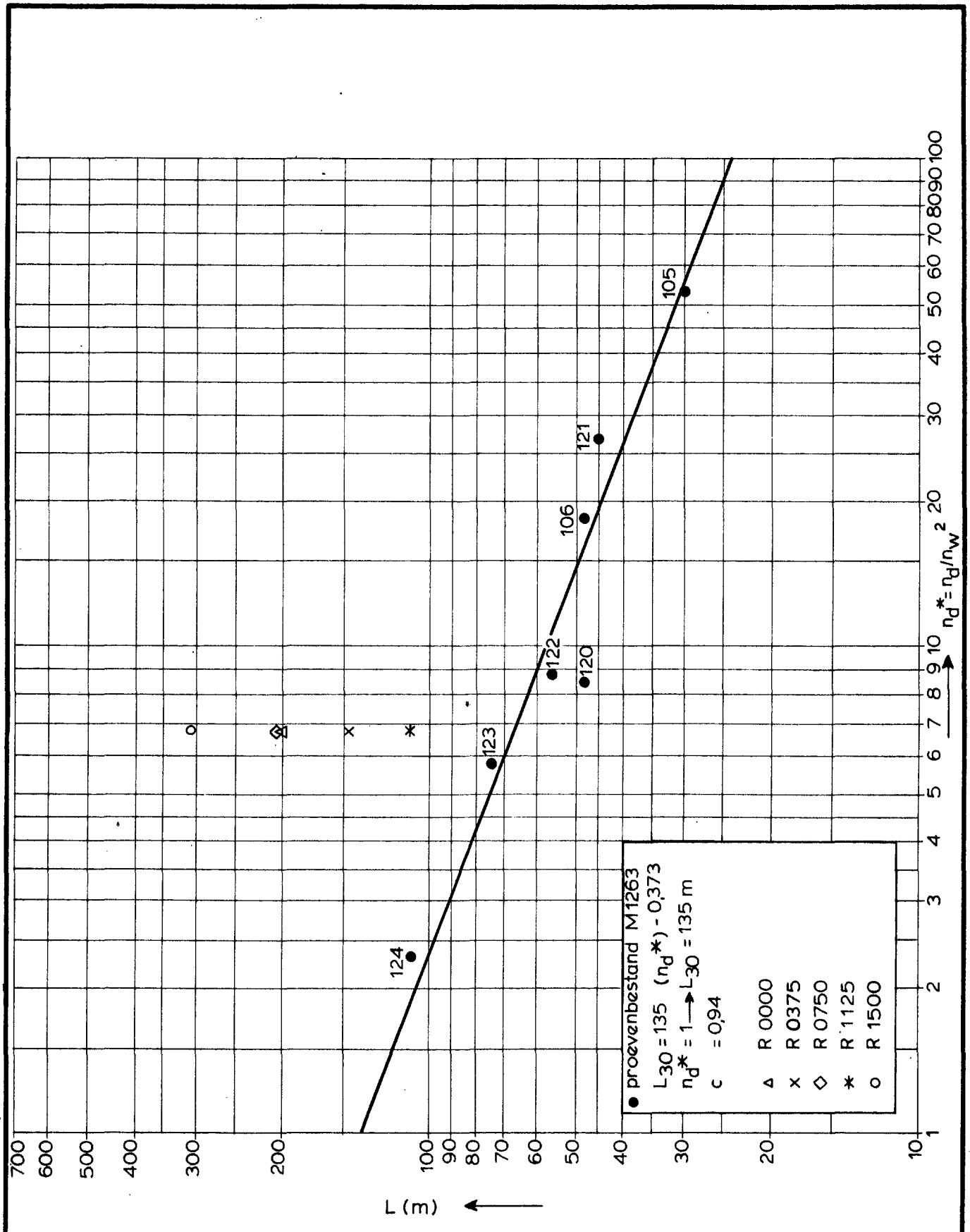
P003

FIG. 146

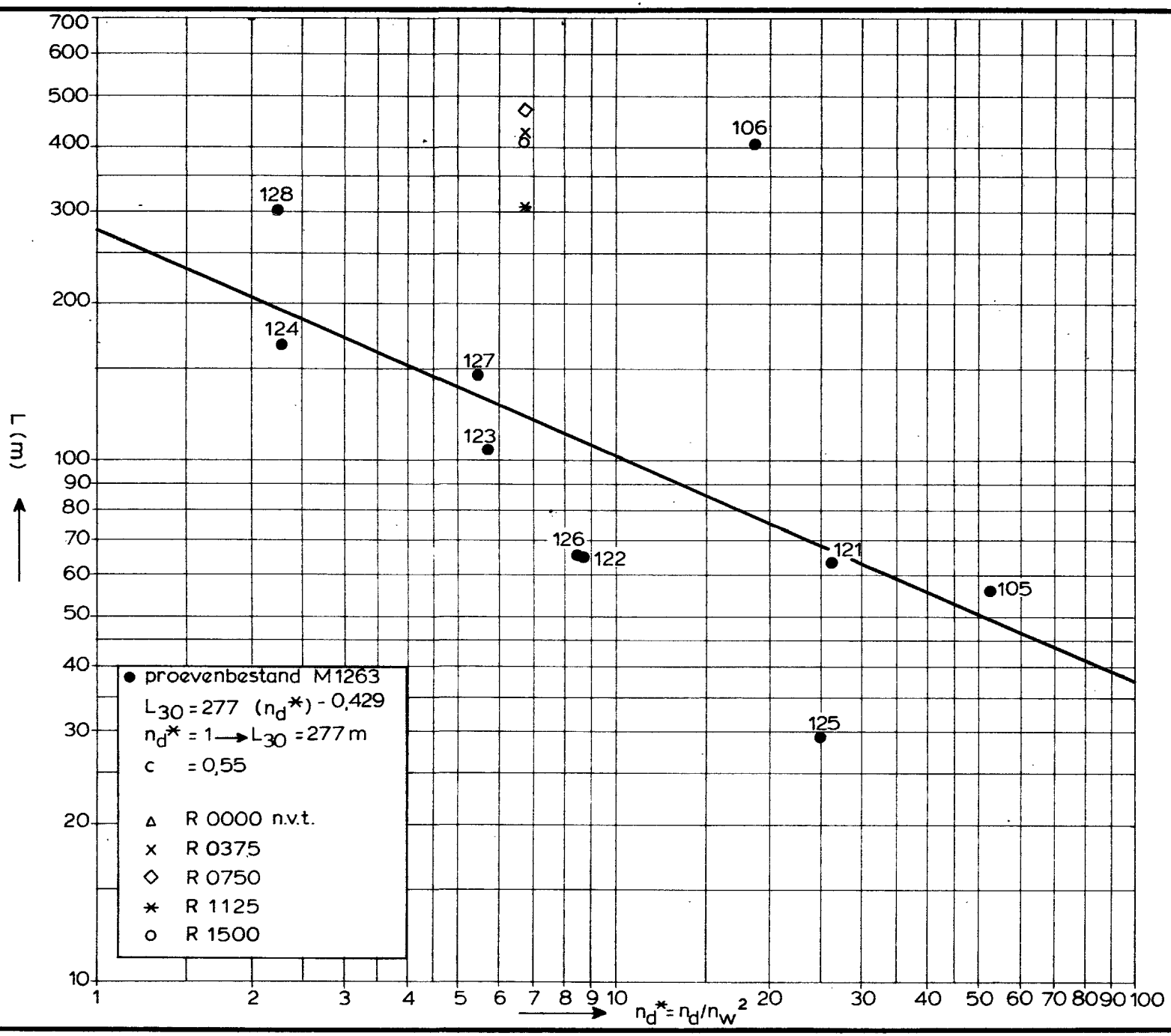

EXTRAPOLATIE VERSPREIDINGSAFSTAND,
t = 15,30 uur PROTOTYPE, L 20 %
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM
M 1653
FIG. 147
n_d^* = 6,77
P003
L (m)
$n_d^* = n_d/n_w^2$
● proevenbestand M1263
L_{20} = 773 (n_d^*) - 0,630
n_d^* = 1 → L_{20} = 773 m
c = 0,68
Δ R 0000 n.v.t.
x R 0375
◇ R 0750
* R 1125
o R 1500 n.v.t.
128
126
106
123
124
127
121
122
105
125



EXTRAPOLATIE VERSPREIDINGSAFSTAND, t = 1,53 uur PROTOTYPE, $L_{30\,\%}$	$n_d^* = 6{,}77$	P003
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1653	FIG. 148



EXTRAPOLATIE VERSPREIDINGSAFSTAND, t = 5,10 uur PROTOTYPE, L_{30} %	$n_d^* = 6{,}77$	P003
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1653	FIG. 149



EXTRAPOLATIE VERSPREIDINGSAFSTAND,

t = 15,30 uur PROTOTYPE, L_{30}%

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

$n_d^* = 6,77$

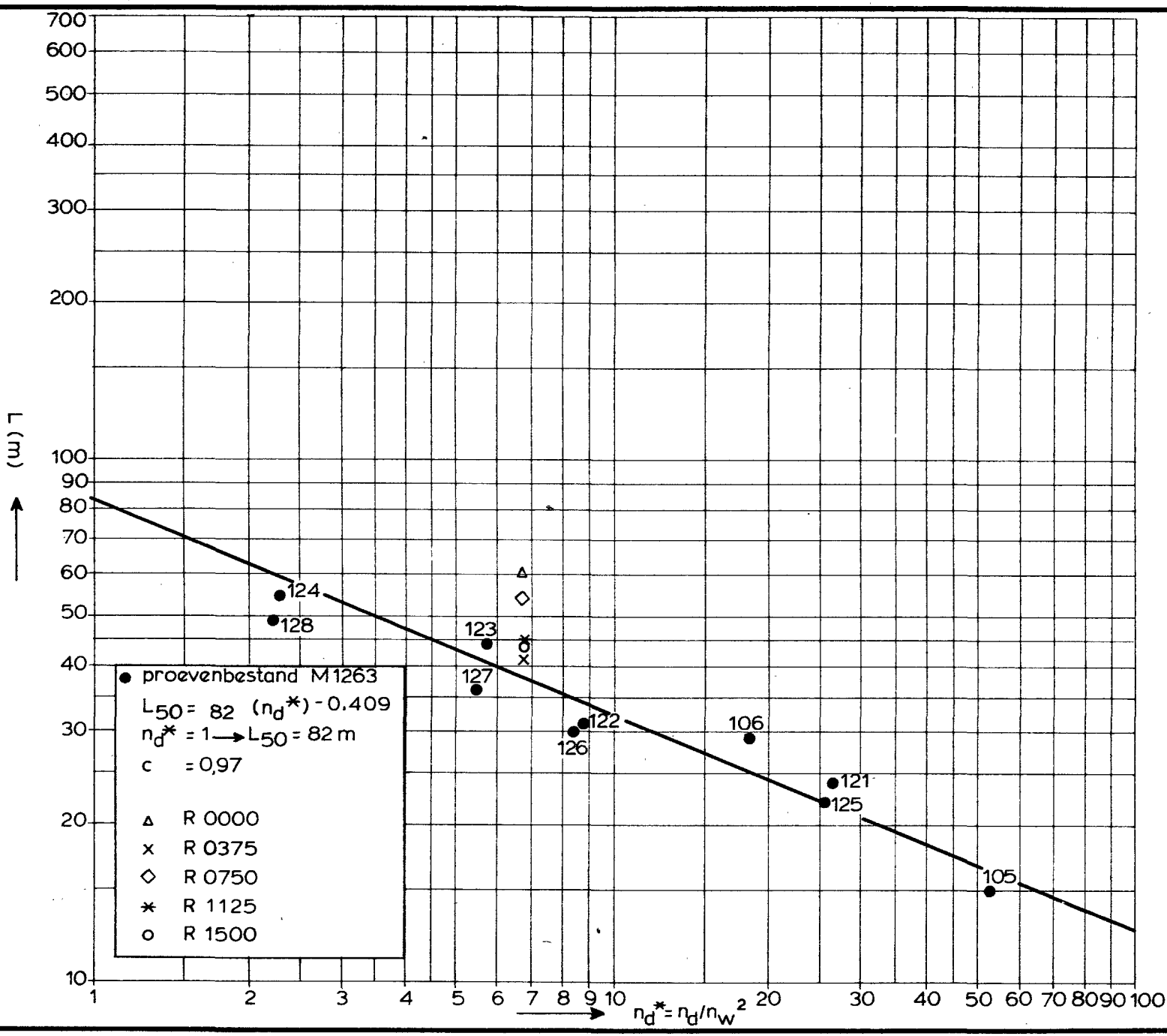
P003

M 1653

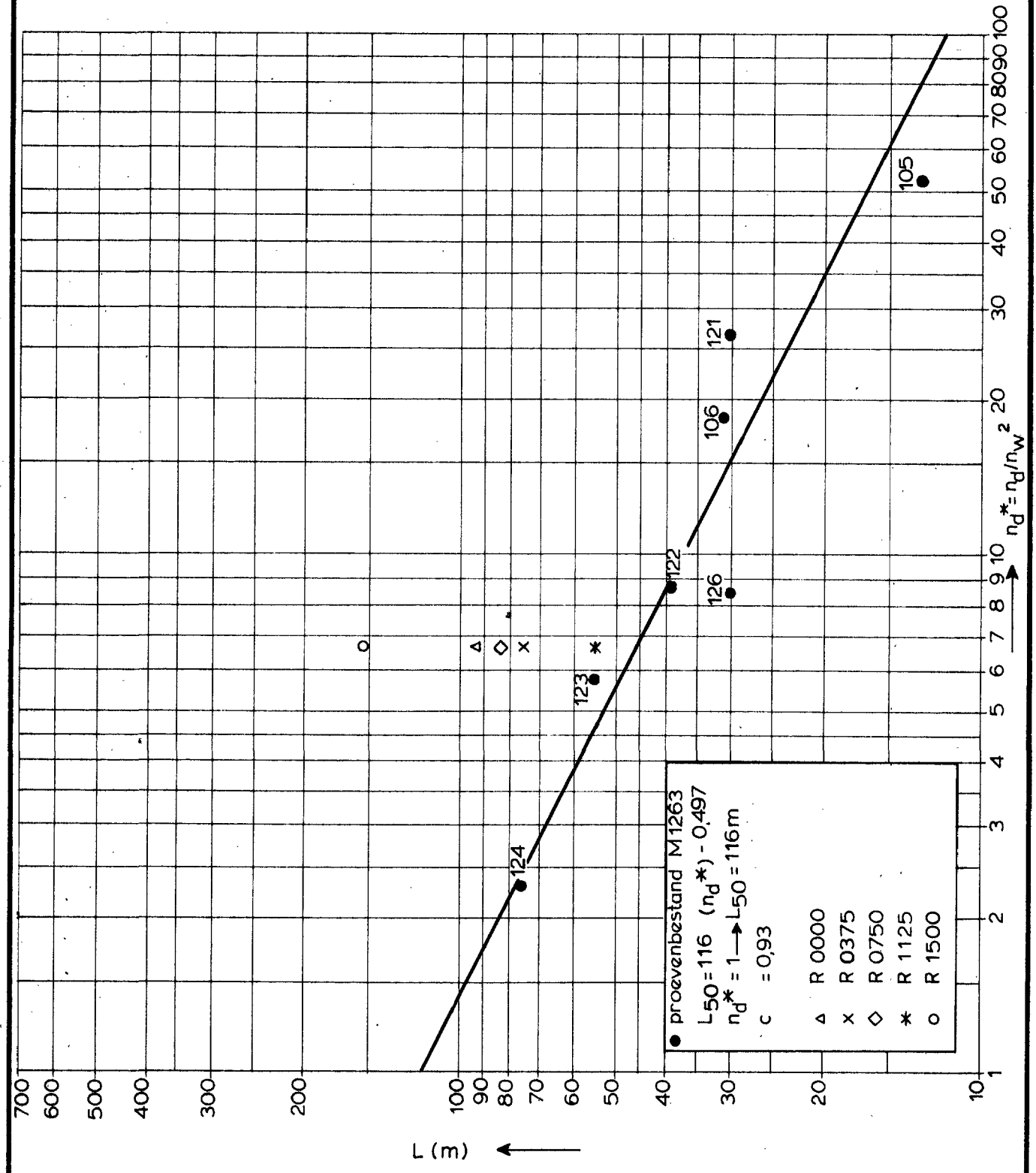
FIG. 150

EXTRAPOLATIE VERSPREIDINGSAFSTAND,

t = 1,53 uur PROTOTYPE, L_{50} %



WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM		$n_d^* = 6,77$
M 1653		P003
FIG. 151		

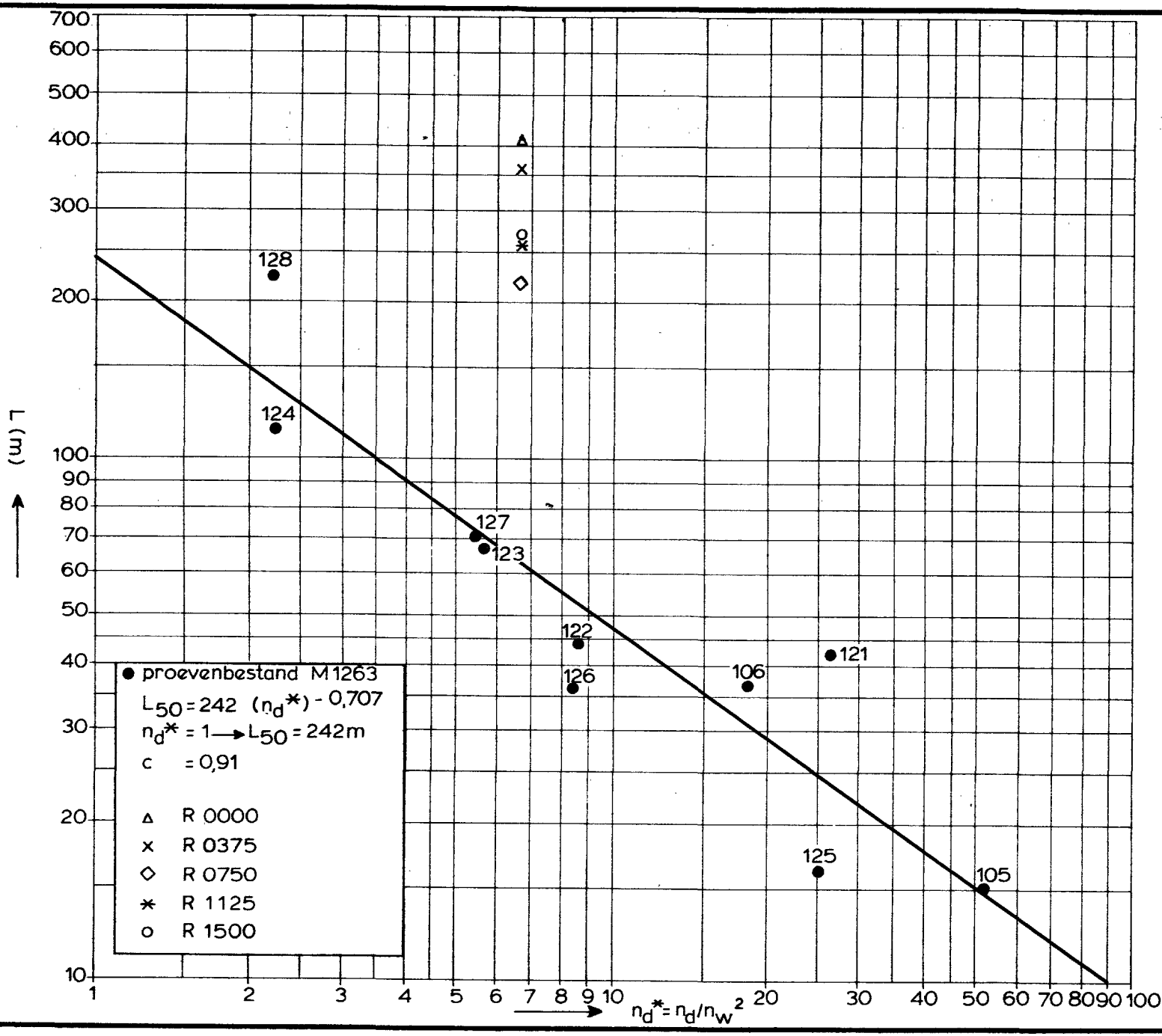


EXTRAPOLATIE VERSPREIDINGSAFSTAND, t = 5,10 uur PROTOTYPE, L_{50} %	$n_d^* = 6{,}77$	P003
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1653	FIG. 152

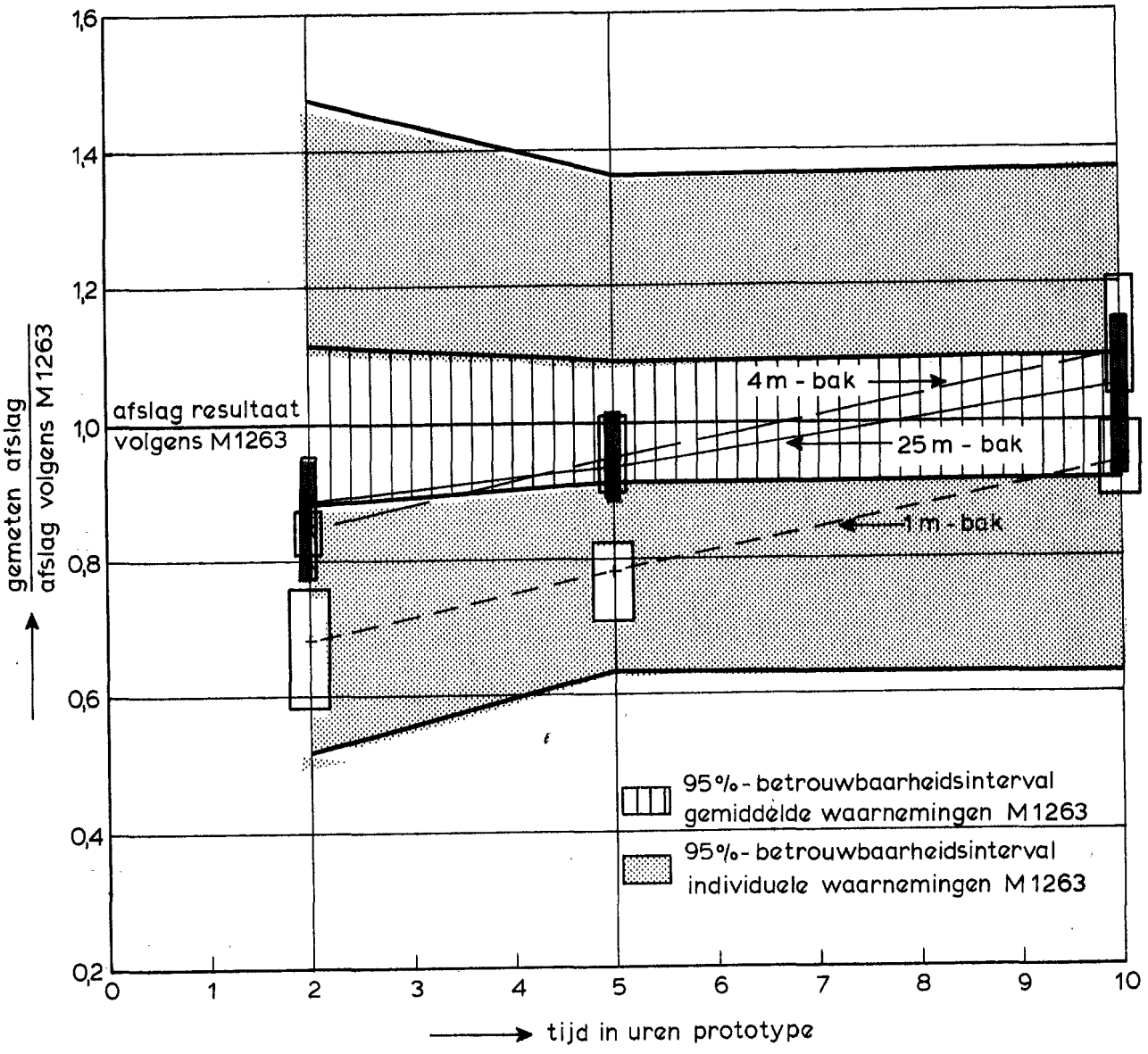
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

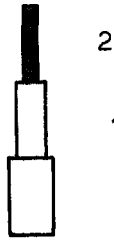
EXTRAPOLATIE VERSPREIDINGSAFSTAND,

t = 15,30 uur PROTOTYPE, L_{50} %



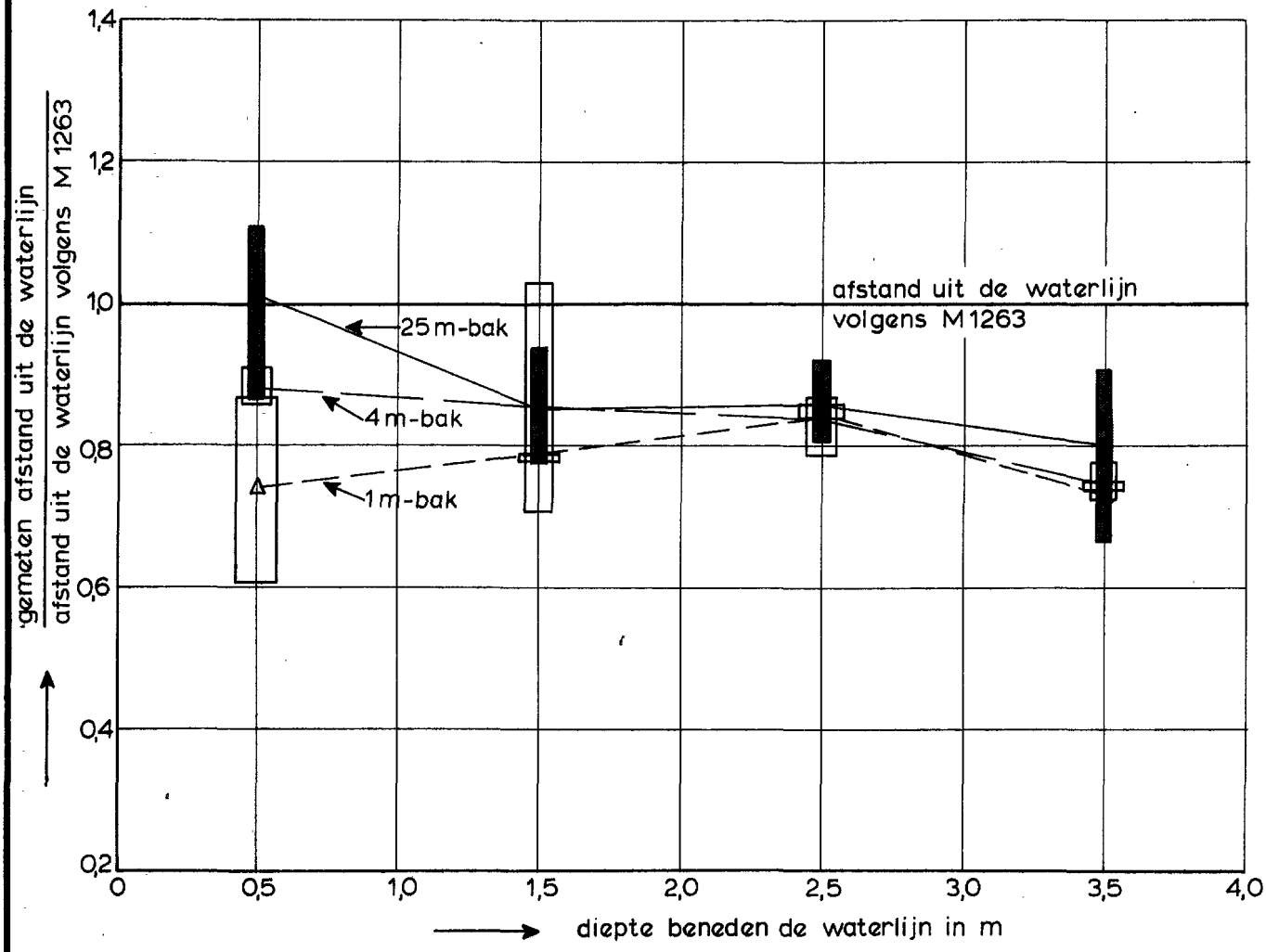
M 1653		$n_d^* = 6{,}77$
FIG. 153		P003

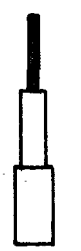




spreiding in de individuele waarnemingen

VERGELIJKING PROTOTYPE AFSLAGRESULTAAT VOOR DE VERSCHILLENDE KUSTLENGTEN		P001
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1653	FIG. 154





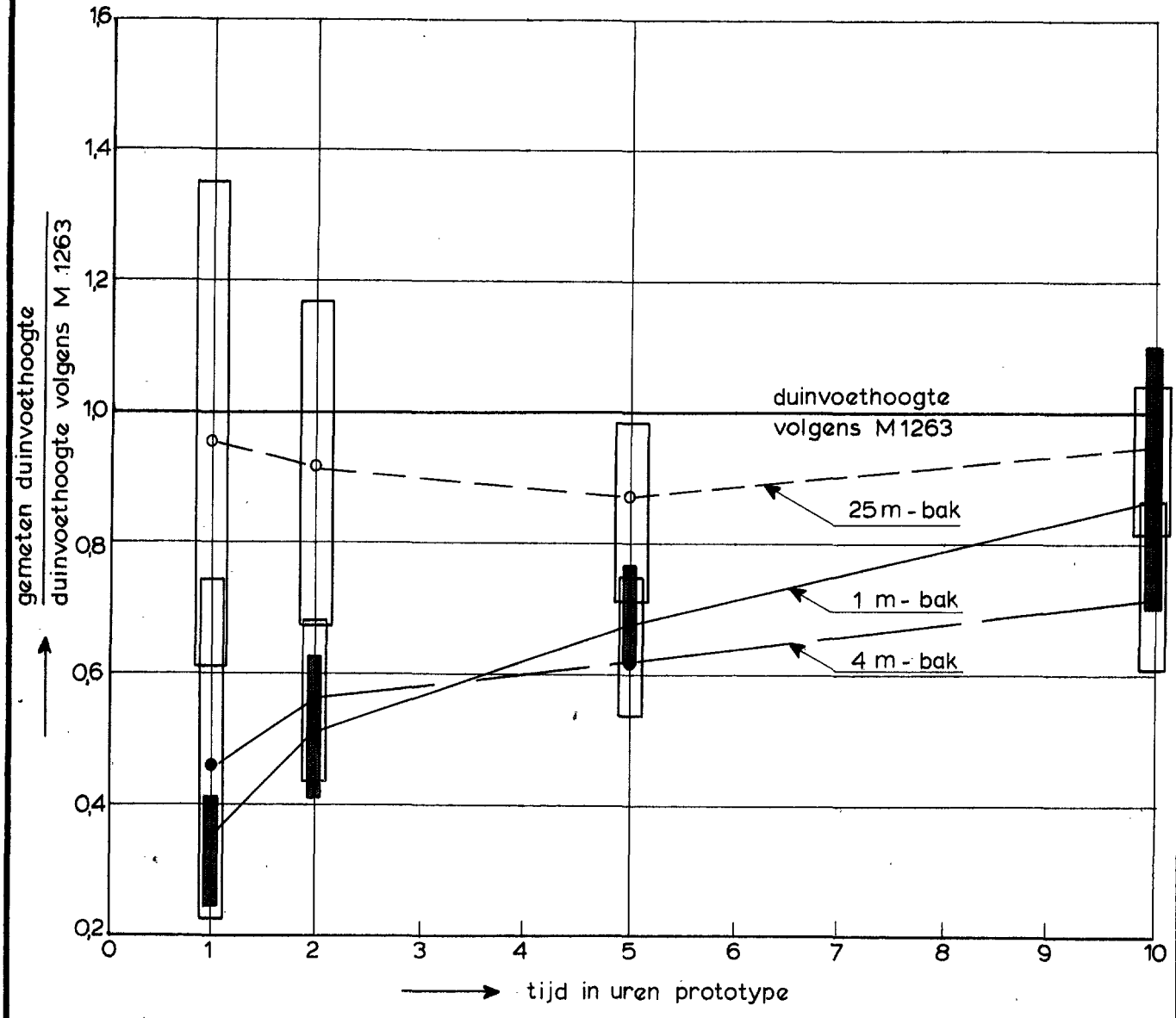
25 m - bak

4 m - bak

1 m - bak

spreiding in de individuele waarnemingen

VERGELIJKING PROFIELVORMEN VOOR DE VERSCHILLENDE KUSTLENGTEN		P 001
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1653	FIG. 155



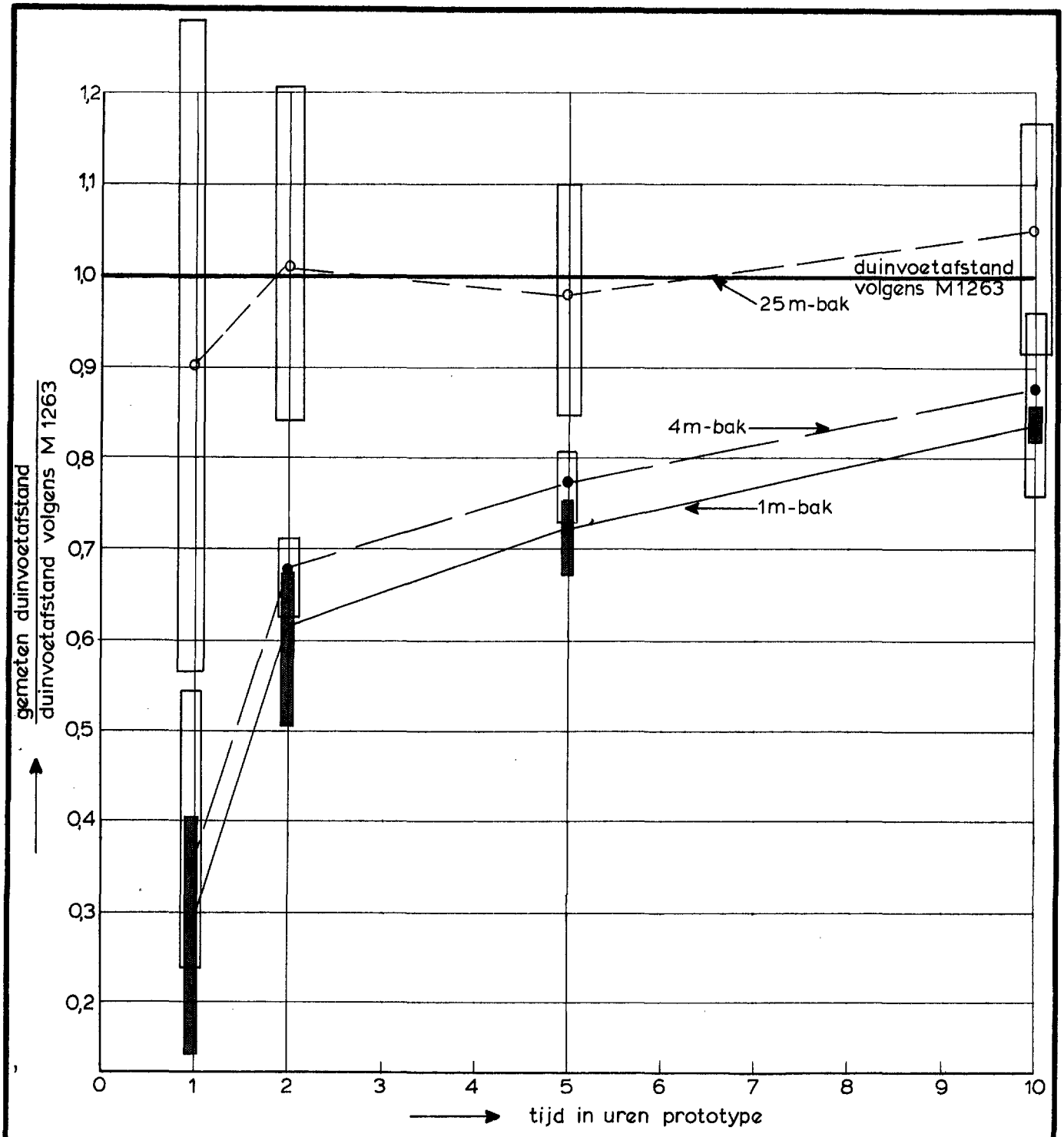
1 m - bak

4 m - bak

25 m - bak

spreiding in de individuele waarnemingen

VERGELIJKING DUINVOETHOOGTEN VOOR DE VERSCHILLENDE KUSTLENGTEN		P 001
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1653	FIG. 156



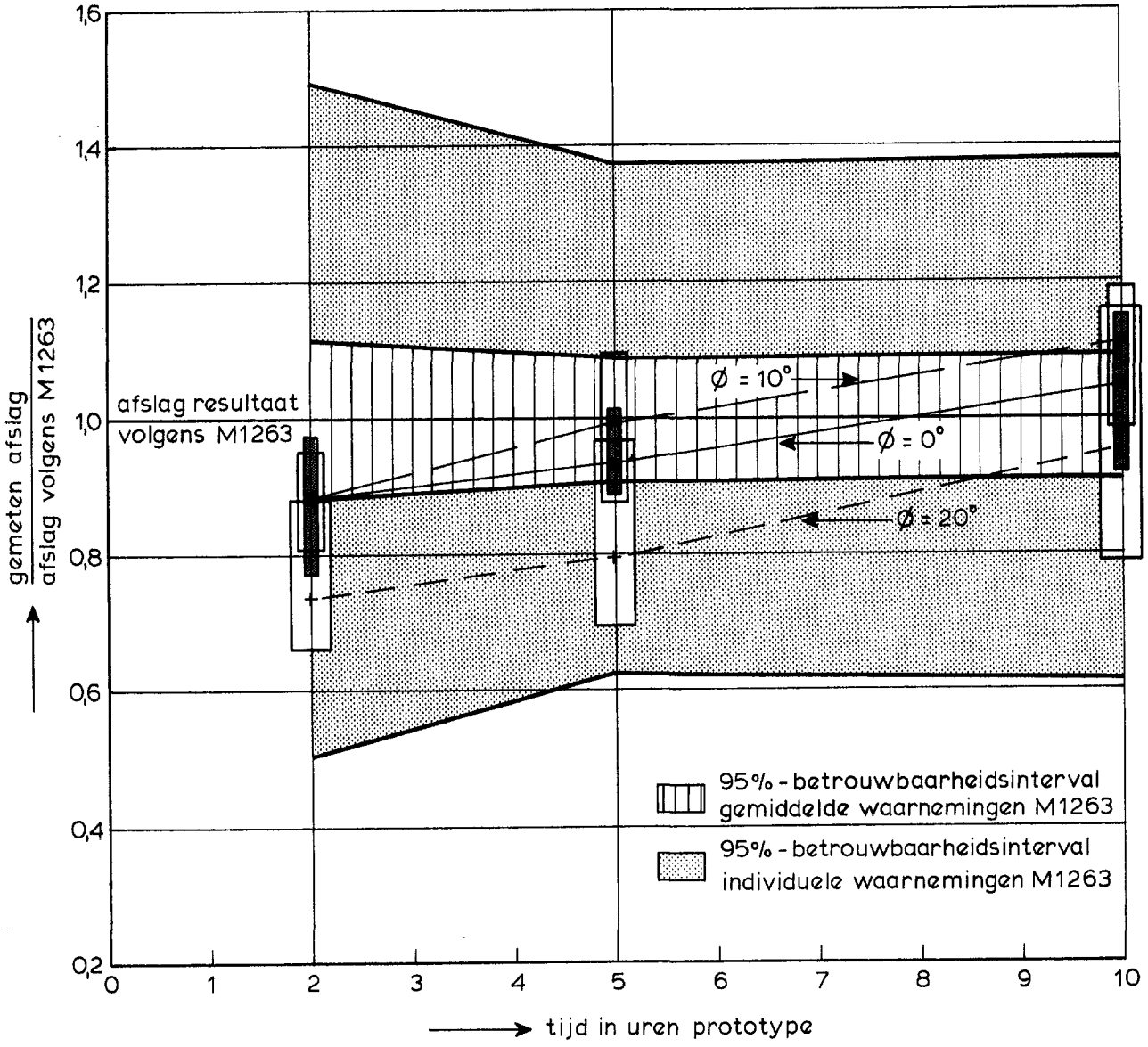
1m-bak

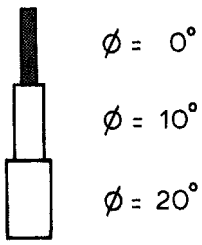
4m-bak

25m-bak

spreiding in individuele waarnemingen

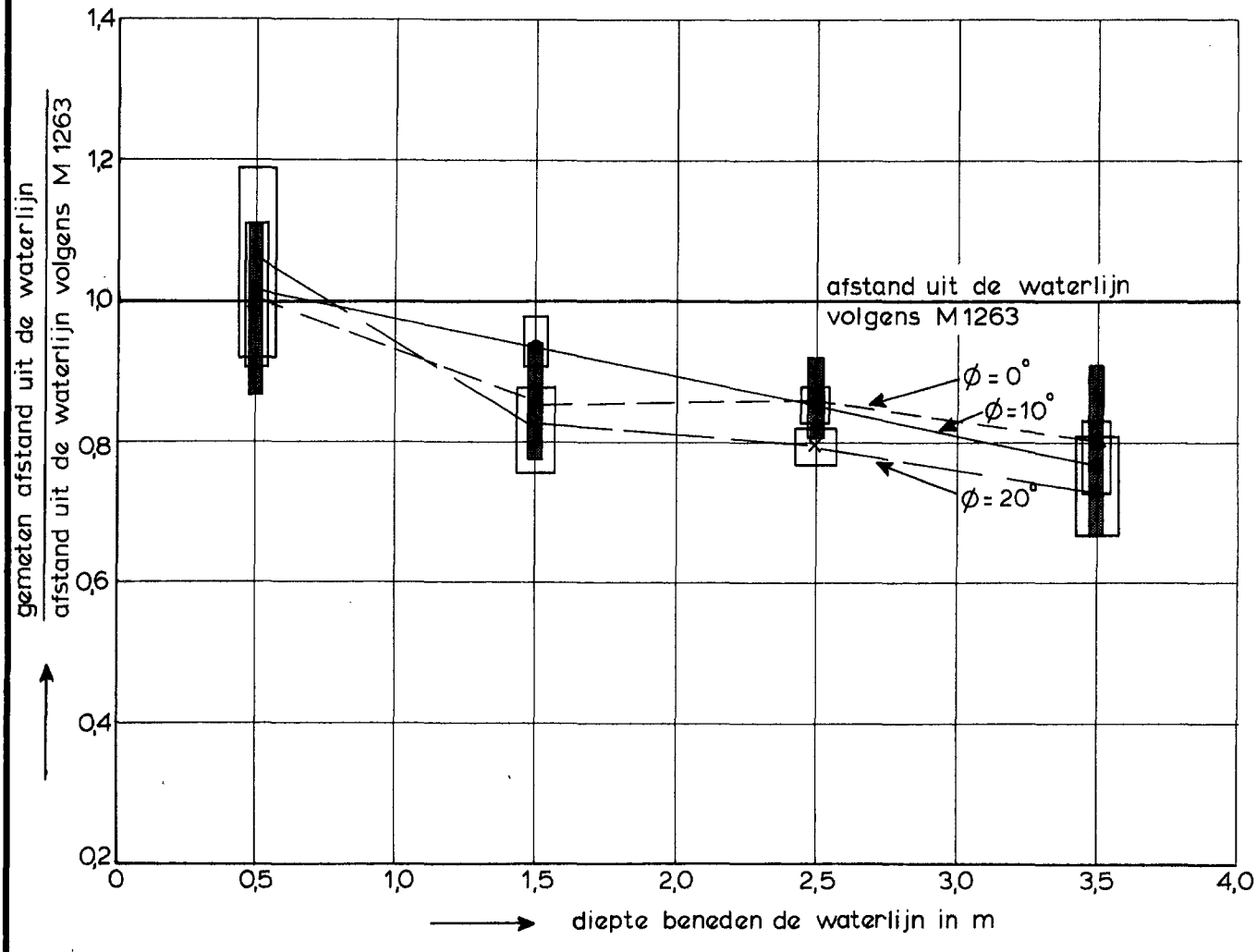
VERGELIJKING DUINVOETAFSTANDEN VOOR DE VERSCHILLENDE KUSTLENGTEN		P 001
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1653	FIG. 157

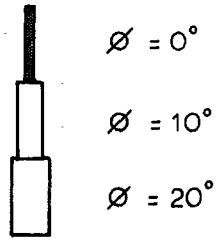




spreiding in de individuele waarnemingen

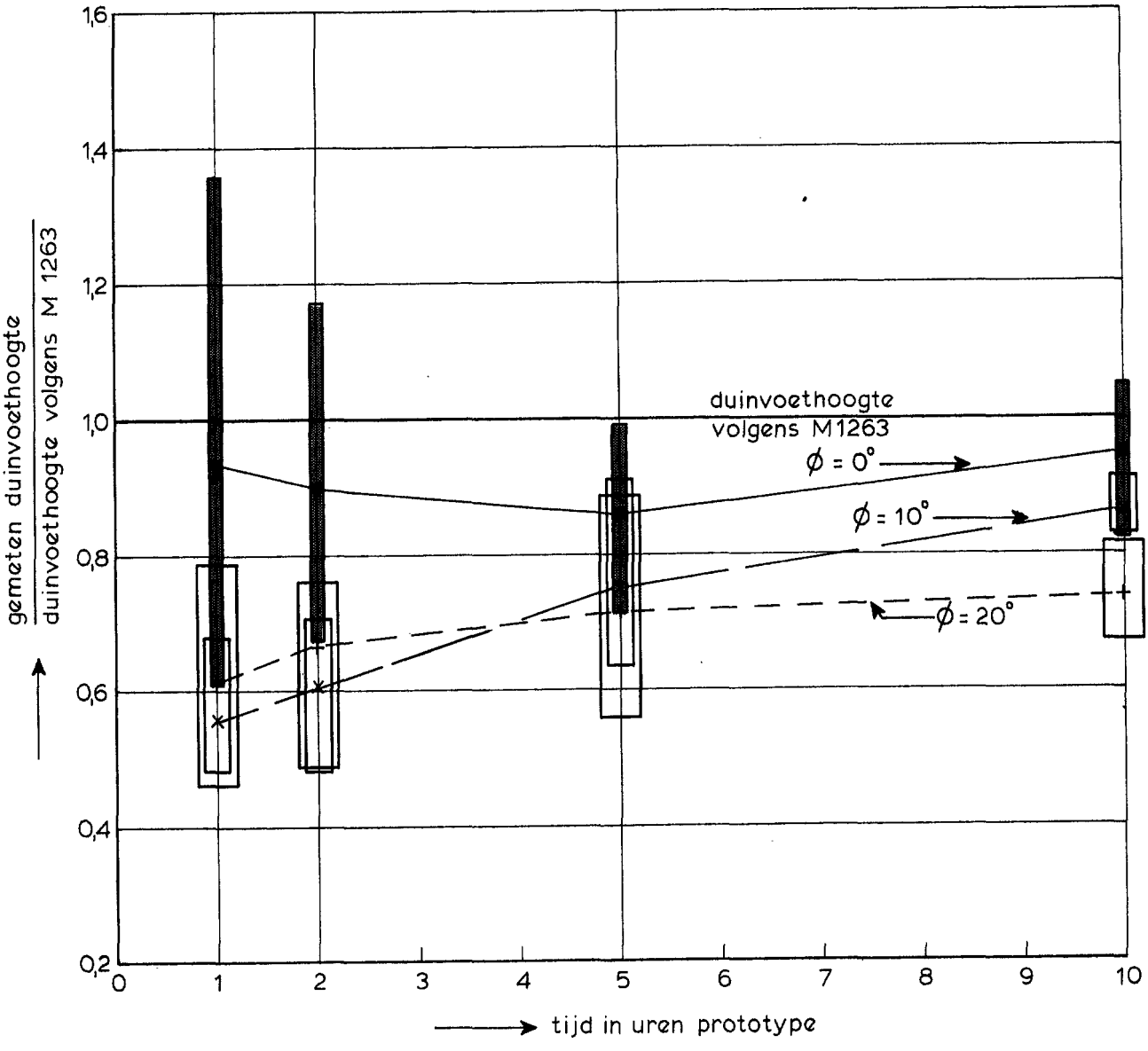
VERGELIJKING PROTOTYPE AFSLAGRESULTAAT VOOR DE VERSCHILLENDE GOLFINVALSRICHTINGEN		
	ALLE PROEVEN MET VASTE WATERSTAND	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1653	FIG. 158

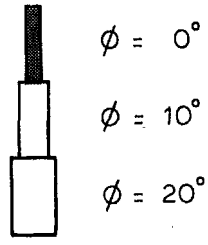




spreiding in de individuele waarnemingen

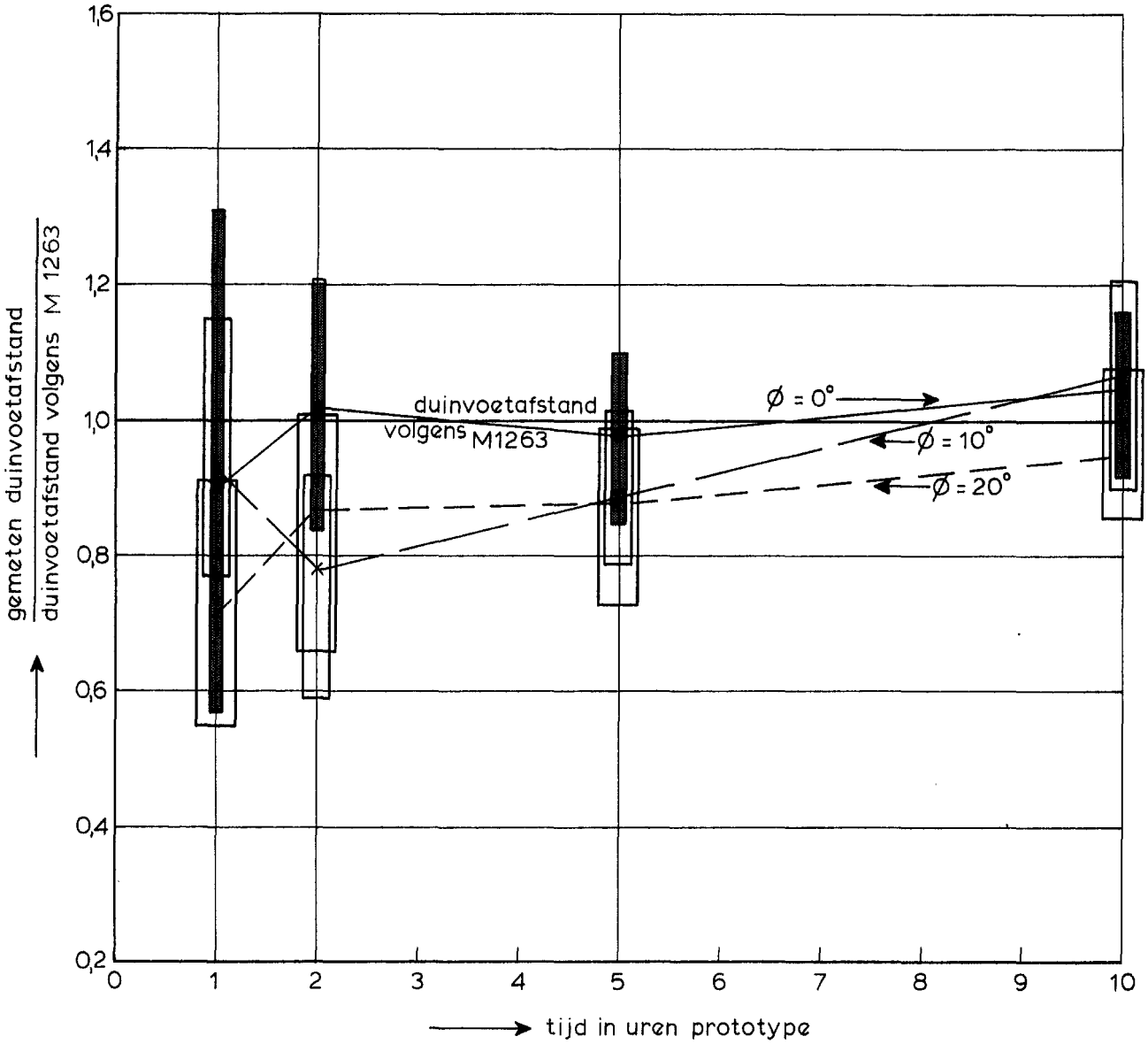
VERGELIJKING PROFIELVORMEN VOOR DE VERSCHILLENDE GOLFINVALSRICHTINGEN		
	ALLE PROEVEN MET VASTE WATERSTAND	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1653	FIG. 159

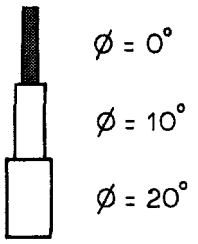




spreiding in de individuele waarnemingen

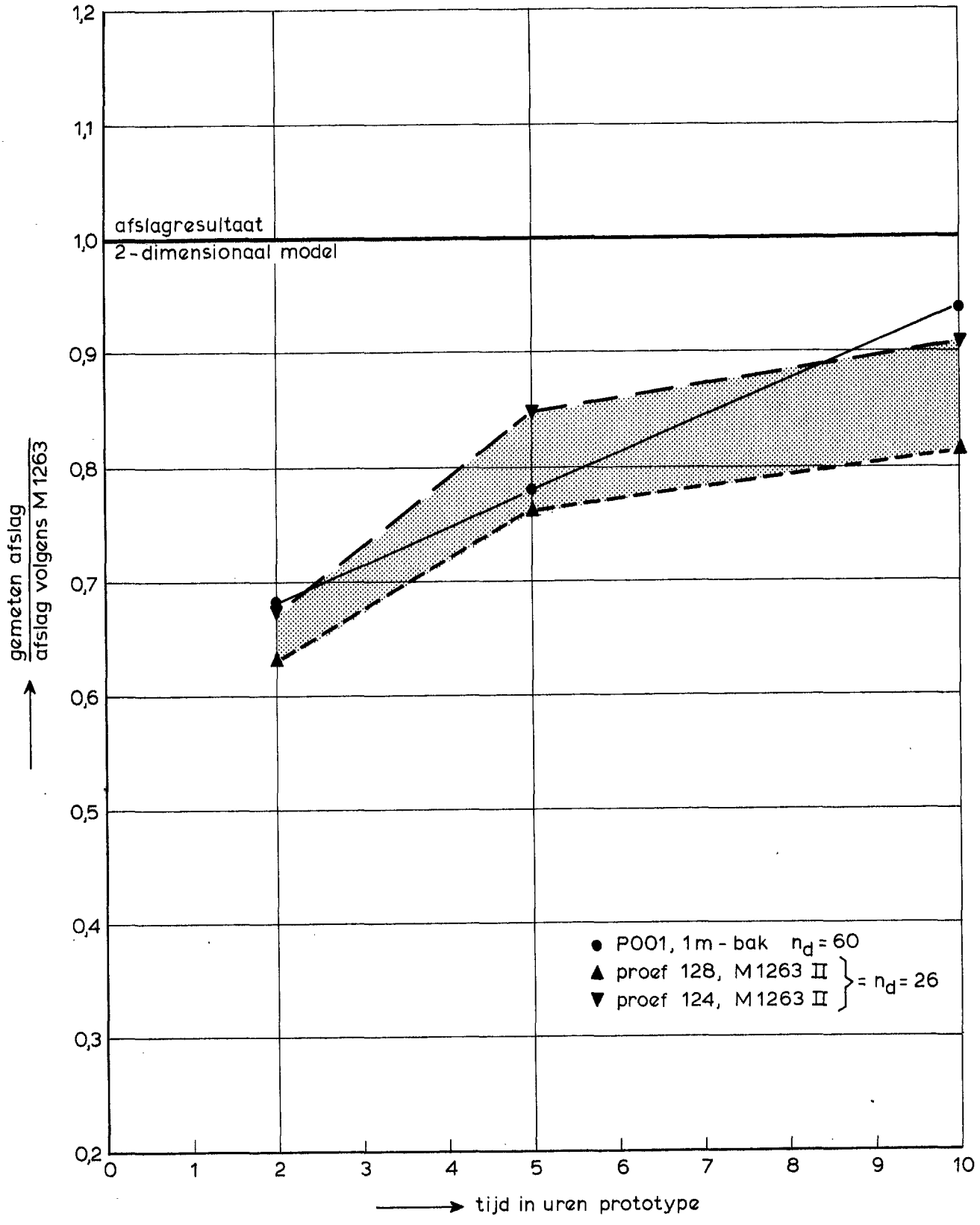
VERGELIJKING DUINVOETHOOGTEN VOOR DE VERSCHILLENDE GOLFINVALSRICHTINGEN		
	ALLE PROEVEN MET VASTE WATERSTAND	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1653	FIG. 160





spreiding in de individuele waarnemingen

VERGELIJKING DUINVOETAFSTANDEN VOOR DE VERSCHILLENDE GOLFINVALSRICHTINGEN		
	ALLE PROEVEN MET VASTE WATERSTAND	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1653	FIG. 161



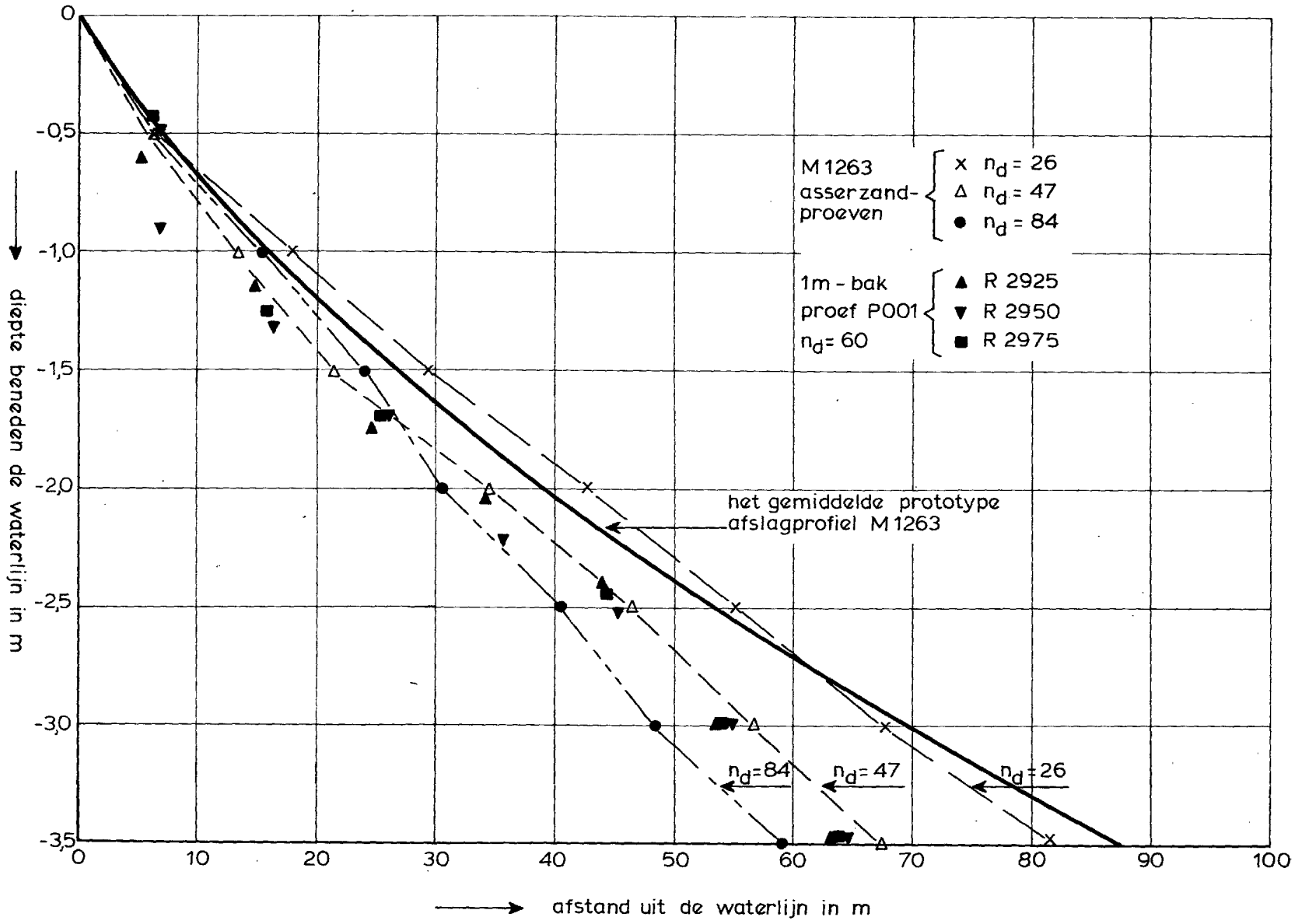
TOETSING PROTOTYPE AFSLAGRESULTAAT ASSERZANDPROEVEN TWEE- EN DRIE-DIMENSIONAAL MODEL		
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1653	FIG. 162

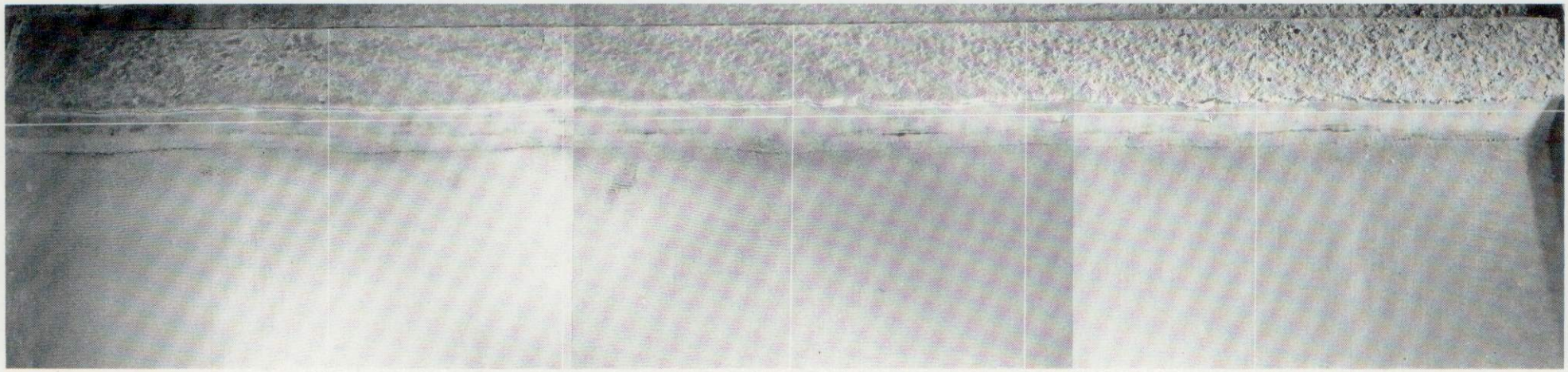
TOETSING PROTOTYPE AFSLAGPROFIELEN
ASSERZANDPROEVEN TWEE- EN DRIE-DIMENSIONAAL MODEL

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1653

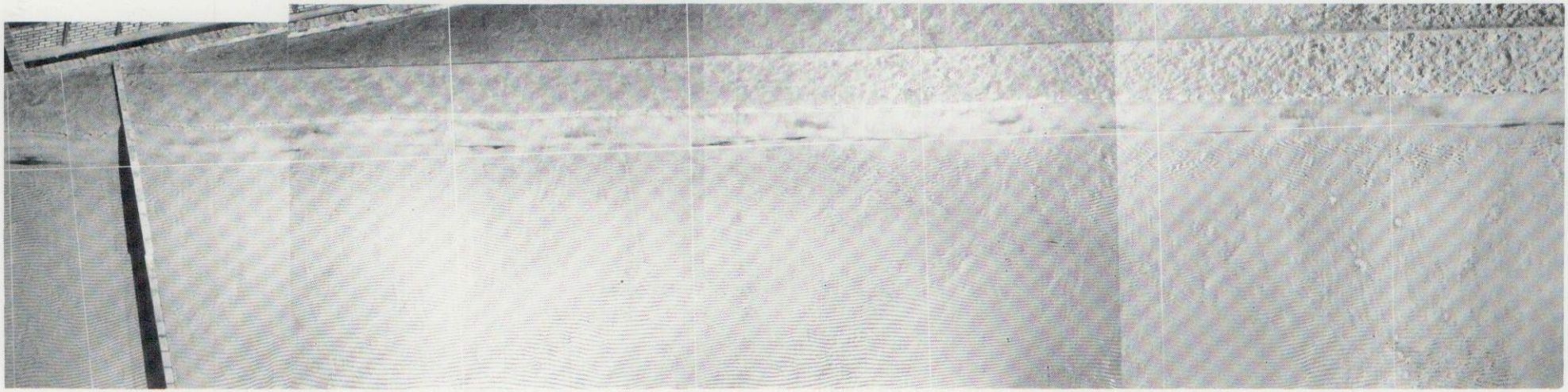
FIG. 163





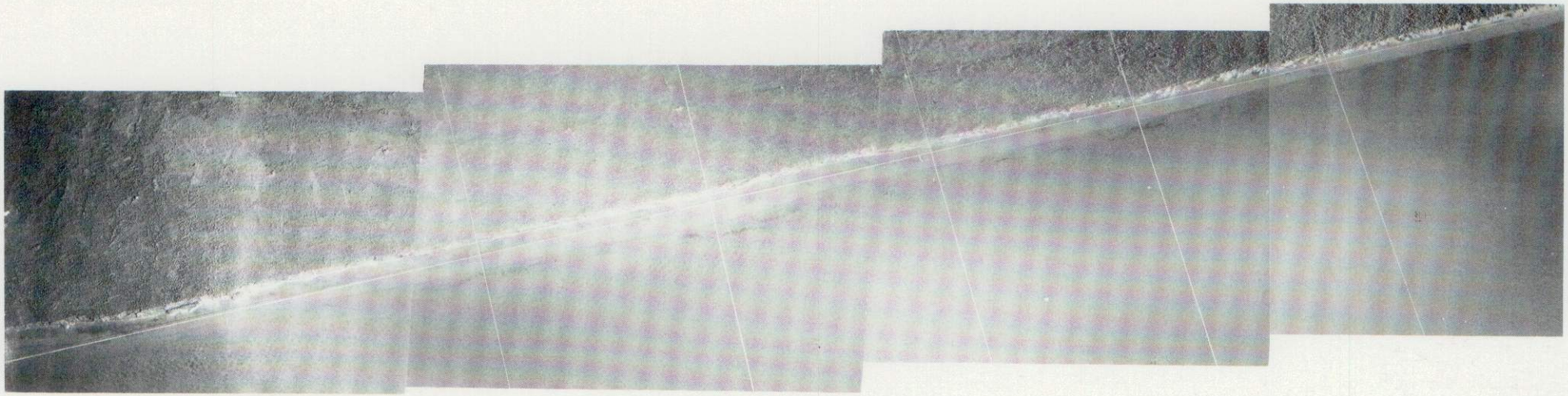
1 P001 Modeloverzicht bij loodrechte golfinval na 1 uur
(vaste waterstand)

N.B. De rechte lijnen geven de ligging van de oorspronkelijke kruinlijn en de meetraaien aan



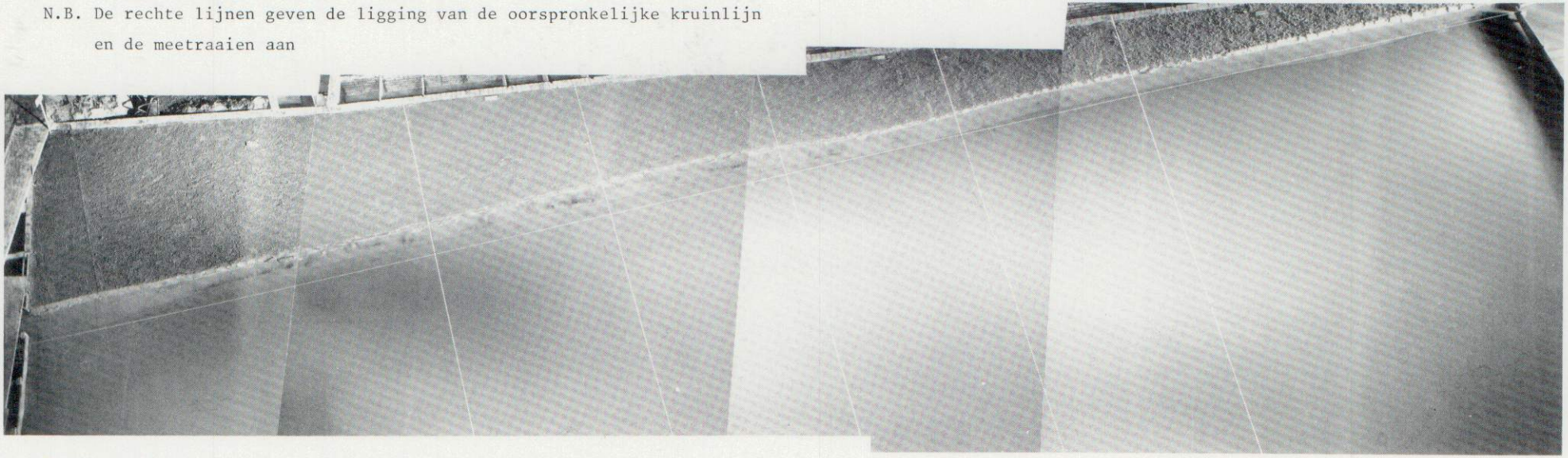
2 P001 Modeloverzicht bij loodrechte golfinval na 10 uur
(vaste waterstand)

N.B. De rechte lijnen geven de ligging van de oorspronkelijke kruinlijn en de meetraaien aan



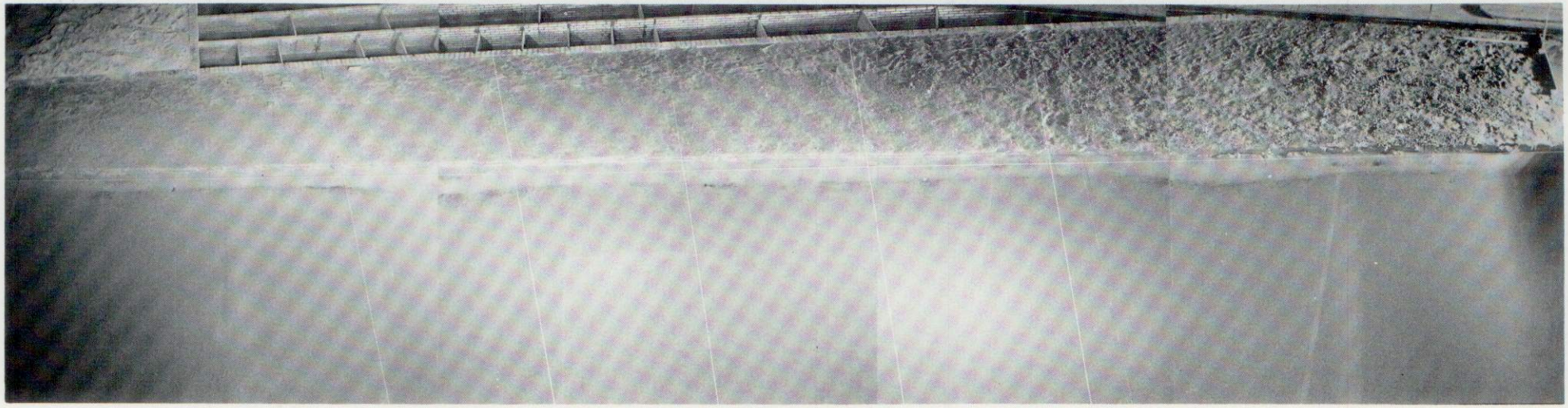
3 P002 Modeloverzicht bij schuine golfinval 20 graden na 1 uur (vaste waterstand)

N.B. De rechte lijnen geven de ligging van de oorspronkelijke kruinlijn en de meetraaien aan



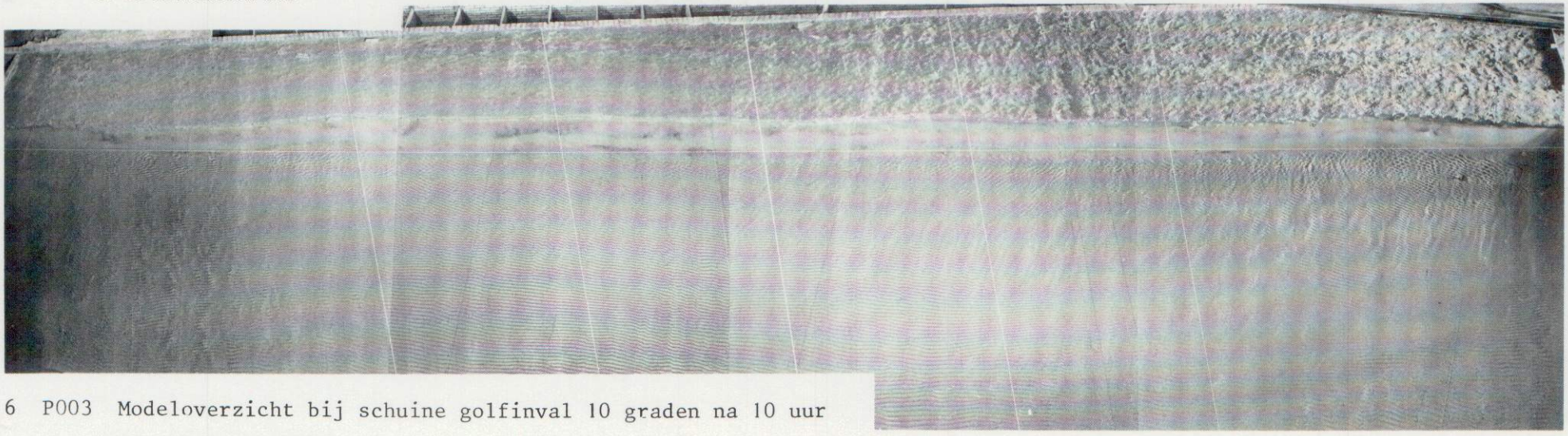
4 P002 Modeloverzicht bij schuine golfinval 20 graden na 10 uur (vaste waterstand)

N.B. De rechte lijnen geven de ligging van de oorspronkelijke kruinlijn en de meetraaien aan



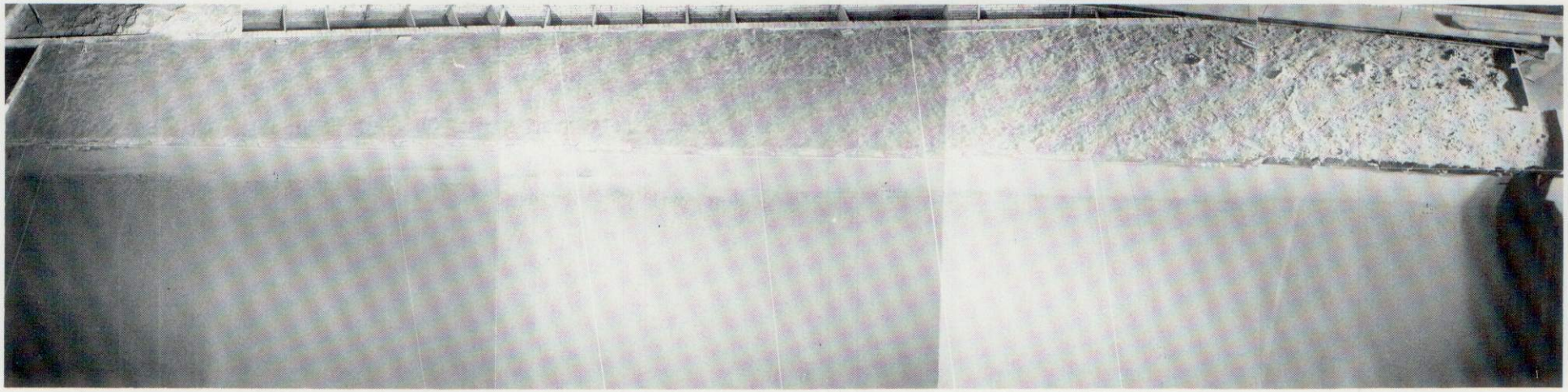
5 P003 Modeloverzicht bij schuine golfinval 10 graden na 1 uur
(vaste waterstand)

N.B. De rechte lijnen geven de ligging van de oorspronkelijke kruinlijn
en de meetraaien aan



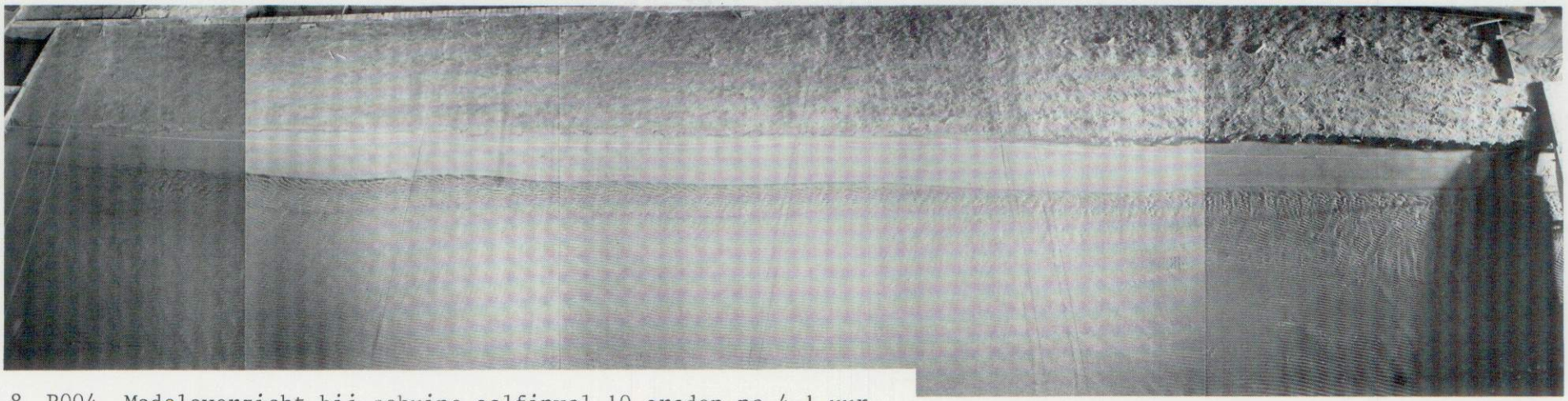
6 P003 Modeloverzicht bij schuine golfinval 10 graden na 10 uur
(vaste waterstand)

N.B. De rechte lijnen geven de ligging van de oorspronkelijke kruinlijn
en de meetraaien aan



7 P004 Modeloverzicht bij schuine golfinval 10 graden na 2,75 uur (variërende waterstand)

N.B. De rechte lijnen geven de ligging van de oorspronkelijke kruinlijn en de meetraaien aan



8 P004 Modeloverzicht bij schuine golfinval 10 graden na 4,1 uur (variërende waterstand)

N.B. De rechte lijnen geven de ligging van de oorspronkelijke kruinlijn en de meetraaien aan

p.o. box 177 2600 mh delft the netherlands

Notitie betreffende het mogelijke waterstandverloop gedurende een superstormvloed

1. Inleiding

De primaire zeewaterkeringen moeten alle voldoen aan de eisen gesteld door de Deltacommissie wat betreft de te keren waterstand. Deze wordt bepaald door de waterstand welke gemiddeld één maal per 10.000 jaar wordt overschreden, gecorrigeerd met een economische reductie. Beide factoren zijn een functie van de plaats langs de kust.
De duinen vormen een belangrijk deel van de primaire zeewaterkeringen en moeten derhalve bovengenoemde waterstand kunnen keren. Tijdens een storm kan duinafslag optreden door de gecombineerde werking van waterstand en golven. Bij een superstormvloed is dan ook een aanzienlijke hoeveelheid duinafslag te verwachten.
Het opstellen van een richtlijn voor duinafslag is de taak van werkgroep 5 van de Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen. In 1972 is een voorlopige richtlijn verschenen. Deze berust echter op onvoldoende gegevens. Vanwege de onbekendheid van de mathematisch-fysische grondslag van het duinafslagproces is door het WL een schaalserie uitgevoerd, met behulp waarvan door middel van extrapolatie de duinafslag in het prototype kan worden bepaald. De gevonden schaalregels zullen binnenkort worden getoetst in de Deltagoot. Zowel in het proevenprogramma voor de Deltagoot als voor het nu lopende onderzoek in het drie-dimensionale model (havenbak) is een proef opgenomen waarin de superstormvloed wordt gesimuleerd met variërende waterstand. Bij de schaalserie is steeds een vaste waterstand aangehouden met een prototype waarde van NAP + 5,0 m en een significante golfhoogte met een prototype-waarde van 7,60 m op dieptelijn NAP - 20 m en een periode van 12 seconden. Deze waarden zijn gemiddelde waarden voor de Nederlandse kust. De werkelijkheid is echter een variërende waterstand. Het doel van deze notitie is een aannemelijk verloop van de waterstand gedurende een superstormvloed aan te geven.

2. Stormvloeden

Men spreekt van een stormvloed, wanneer de wind de waterstand opstuwt tot het grenspeil of hoger in één van de daartoe aangewezen hoofdpeilmeetstations.
Er zijn een aantal factoren die de "zwaarte" van een stormvloed be-

palen. Genoemd kunnen worden:

1. de windsterkte en windrichting.
2. de duur van de storm.
3. de hoogte van het astronomisch getij.
4. het al dan niet samenvallen van astronomisch hoogwater en maximum stormeffect.
5. de stormvloed ontwikkeling op de Noordzee.
6. afvoer oppervlaktewater.

ad 1. Alleen stormen uit overwegend NW-richting geven, gezien de geografische situatie van Nederland en de Noordzee, een aanzienlijke opstuwing aan de Nederlandse kust.
Dat zal in de superstorm dan ook zeker de windrichting zijn.
Voor het opstuwen van het water tot stormvloedniveau is een windsterkte vereist tenminste overeenkomend met windkracht 8 op de schaal van Beaufort (ca. 17 m/s - 21 m/s).
Ter illustratie: De maximale geregistreerde uurgemiddelden van de windsnelheid gedurende de februari-storm van 1953 te Den Helder, IJmuiden en Vlissingen waren respectievelijk 25, 27 en 21 m/s (Beaufort 10 en 9), met stoten tot boven 32 m/s (Beaufort 12).
Uit een overzicht uit het "Verslag over de stormvloed 1953" van Rijkswaterstaat (§I.o.i, blz. 22) blijkt dat deze windsnelheden geen uitersten waren.

ad 2. In hetzelfde verslag wordt vermeld dat meteorologisch gesproken de storm van 1953 als een langdurige kan worden aangemerkt. Bovendien wordt opgemerkt dat de lange duur niet in eerste instantie bepalend is voor de bereikte grootste hoogte, maar de effectieve lengte van de baan van water waarop de wind werkt (mits de duur van de storm niet te kort is). Dit wordt bevestigd door vergelijking van de figuren 1 en 2.
Vanwege de tijdsafhankelijke aard van het duinafslagproces speelt daar de lange duur wel een rol.

ad 3. Tijdens de stormvloed van 1 febr. 1953 was het hoogwater een springtij. Echter de maan stond in het zgn. apogeum (afstand aarde-maan maximaal). Hierdoor was het springtij zelfs lager

dan gemiddeld hoog water (behalve in Vlissingen). Het hoogste astronomische getij is 50 à 60 cm hoger dan dat van 1-2-1953. Het samenvallen van een dergelijk getij en een storm als van 1-2-1953 zou een 50 à 60 cm hogere waterstand opgeleverd hebben.

ad 4. De hoogte van de maximale waterstand hangt sterk af van de tijdstippen van maximum stormeffect (verheffing van de zeespiegel t.o.v. de feitelijke getijbeweging) en astronomisch hoogwater ten opzichte van elkaar. Dit wordt geïllustreerd in figuur 3.
Er is nog nooit verband gevonden tussen het optreden van zware stormen en de fase van de maan. Het maximum stormeffect heeft dus geen voorkeur voor het samenvallen met een bepaalde fase van het getij.
Uit de figuren 4 en 5 kan worden afgeleid dat de extreme waterstand met een frequentie van 10^{-4} per jaar wel zeer waarschijnlijk zal worden bereikt door samenvallen van maximum stormeffect en astronomisch hoogwater, zoals ook in febr. 1953 het geval was in Zuidwest-Nederland (figuur 6). Dit duidt op geval a van figuur 3.

ad 5. Hetgeen zich voor de Nederlandse kust voordoet is onderdeel van wat op de Noordzee tot ontwikkeling komt.
hieromtrent valt voor de superstormvloed weinig te zeggen. De omstandigheden kunnen mogelijk nog ongunstiger zijn dan in 1953.

ad 6. De verhoging van de stormvloed door de afvoer van oppervlaktewater speelt alleen voor een deel van de benedenrivieren een rol. Aan de kust heeft dit geen invloed.

Samenvattend kan gesteld worden dat de superstormvloed zeer waarschijnlijk zal worden gegenereerd door de volgende combinaties van factoren:

a. een hogere opstuwing van de waterstand door ongunstiger meteorologische omstandigheden en ongunstiger ontwikkeling op de Noordzee als geheel.

b. Samenvallen van maximum stormeffect en astronomisch hoogwater.

c. Het astronomisch getij in een hoog springtij.

d. De duur van de storm is niet te kort.

Wat betreft de duur van de storm is getracht aan de hand van een aantal gegevens van geanalyseerde stormvloeden een uitspraak te doen omtrent de te verwachten waarde voor de superstormvloed. Dit komt in het nu volgende hoofdstuk aan de orde.

3. De stormduur

Ter beschikking staan 38 geselecteerde stormen welke plaatsvonden in de periode 1921-1970. Het selectiecriterium was dat in tenminste één van de hoofdpeilmeetstations het daar van toepassing zijnde grenspeil werd overschreden.
De metingen van deze stormvloeden in Zierikzee zijn geanalyseerd. De verkregen stormduren en maximale windopzet staan in tabel 1. Deze gegevens zijn verstrekt door de Deltadienst van Rijkswaterstaat. Onder de duur van een storm wordt hier verstaan de basis van de windopzet kromme (stormeffect), zoals deze benaderd is door een $\sin^2$-functie (figuur 3).
Het gaat er nu om te onderzoeken of er een duidelijk verband bestaat tussen stormduur en max. opzet, zodat bij een geschatte opzet bij de superstormvloed een goede schatting van de stormduur gemaakt kan worden. Deze geldt dan strikt genomen alleen voor Zierikzee. Aangenomen wordt dan dat de aldus gevonden waarde ook voor andere plaatsen een goede benadering geeft.

In figuur 7 zijn de verschillende duur-opzet combinaties uitgezet. Er lijkt van een duidelijk verband geen sprake.

De correlatiecoëfficiënt voor deze punten is $r = 0{,}0877$ en is dus zeer klein.

Stel dat de correlatiecoëfficiënt $\rho = o$ dus H_o (nulhypothese): $\rho = o$.
De steekproefcorrelatiecoëfficiënt $\underline{r}$ heeft een erg ingewikkelde kansverdeling. Er is echter een functie van $\underline{r}$ welke onder de nulhypothese $\rho = o$ een bekende verdeling heeft. Deze functie kan dan gebruikt worden als toetsingsgrootheid.
De functie is:

$$\underline{t} = \frac{\underline{r}\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-\underline{r}^2}}, \quad n = \text{grootte van de steekproef.}$$

De grootheid $\underline{t}$ heeft een Student-verdeling met n-2 vrijheidsgraden.

Toegepast op het bovenstaande levert dit:

$$t = \frac{0{,}0877\ \sqrt{38-2}}{\sqrt{1-0{,}0877^2}} = 0{,}53$$

$t_{0,05}\ (36) = 1{,}69$ De nulhypothese wordt dus niet verworpen.

Deze toets gecombineerd met figuur 7 toont voldoende aan dat er geen lineair verband bestaat tussen opzet en stormduur en dat langs de weg van de correlatieanalyse van de gegeven stormen geen uitspraak valt te doen omtrent de te verwachten duur van de superstormvloed.
Ten overvloede is in figuur 8 een drie-dimensionaal histogram weergegeven. Het cijfer in een hokje geeft het aantal punten in dat hokje weer.
In een later stadium zijn ook voor Hoek van Holland duur-opzet-combinaties bestudeerd. Hiervoor is gebruik gemaakt van nota K 576 van de Deltadienst. Hierin worden getijlijnen gepresenteerd van stormvloeden waarbij te H.v.H. het grenspeil werd overschreden. Tevens zijn aangegeven de astronomische hoog- en laagwaterstanden. Dit omvat de periode 1904-1967. Met de verschillen op de tijdstippen van hoogwater en laagwater tussen de geregistreerde waterstanden en de waterstanden volgens de getijtafel is voor elke stormvloed het verloop van het windeffect geschat. Van elke kromme is de hoogste waarde en de zo goed mogelijk geschatte tijdbasis genomen.
De aldus verkregen combinaties zijn uitgezet in figuur 8a.
Deze figuur bevestigt de voorgaande conclusie omtrent de te verwachten duur van de superstormvloed.

In §2 ad 2. is reeds opgemerkt, dat meteorologisch gesproken de storm van 1953 als een langdurige kan worden aangemerkt.
Daarbij werd onder de duur verstaan de periode dat de gemiddelde windsnelheid onafgebroken boven de 20 m/sec lag.
Hetzelfde kan worden gezegd over de duur volgens de hier geldende definitie. Van de zwaarste 10 stormvloeden heeft die van 1953 duidelijk de langste duur (zie figuur 7).
Hieruit kan worden geconcludeerd dat de duur van de superstormvloed waarschijnlijk niet langer zal duren dan de stormvloed van 1953.
In de volgende paragraaf zal nu worden ingegaan op de gevolgen van

een langere of kortere duur voor duinafslag.

4. Duinafslag

In het kader van de schaalserie duinafslag uitgevoerd door het Waterloopkundig Laboratorium "de Voorst" (3) zijn een aantal proeven uitgevoerd met variërende waterstand.
Voor het waterstandsverloop van de superstormvloed is toen het waterstandsverloop toegepast zoals dat werd geregistreerd in 1953 bij Vlissingen, maar waarbij er voor gezorgd is dat de top op NAP + 5,0 m (prototype) kwam te liggen.
De resultaten en de vergelijking met de proef met vaste waterstand is weergegeven in figuur 9. Deze figuur is afkomstig uit (3). Voor de tijdschaal is hier $n_t = 1$ toegepast. In dezelfde nota wordt na nadere analyse van de proefresultaten gevonden dat deze tijdschaal niet juist was, maar dat $n_t = \sqrt{n_d}$ (Froude) een betere tijdschaal is. Het waterstandsverloop is dus ca. 5 maal te langzaam geweest in de proef. Het model heeft dus teveel tijd voor afslag en aanzanding gekregen.
Ondanks deze "fout" in de proef kan worden gesteld dat de hoeveelheid afslag in hogé mate wordt bepaald door de top van het waterstandsverloop. De vorm van deze top wordt hoofdzakelijk bepaald door de getijkromme (zie ook figuur 3a) en is niet erg gevoelig voor de breedte van de stormeffect kromme.
De conclusie die hieruit kan worden getrokken is dat de duur van de superstorm geen kritische grootheid is voor de hoeveelheid duinafslag en dat deze duur zonder bezwaar gekozen kan worden uit een tamelijk brede range, daarbij onrealistisch grote en kleine waarden vermijdend.

De vraag kan rijzen of de tweetoppige storm welke samengesteld kan worden gedacht uit dezelfde componenten als de superstorm, waarbij echter het maximum stormeffect samenvalt met astronomisch laagwater (figuur 3b), meer duinafslag zal geven dan de eentoppige. Weliswaar ligt de top lager, er zijn er echter twee. De vraag is dus wat het effect van die tweede top zal zijn. Figuur 9 geeft hieromtrent informatie. Het is opvallend dat na de top de afslag monotoon daalt, d.w.z. dat er aanzanding optreedt. De verhoging van de waterstand in de tweede lage top verandert daar kwalitatief niets aan. Vanwege de verkeerde tijdschaal zal de aanzanding in

werkelijkheid waarschijnlijk minder zijn, in het ongunstigste geval nul.
Dit duidt erop dat de tweede top van een tweetoppige storm op zijn maximum invloed zal hebben, welke maar kort duurt.
Gecombineerd met het feit dat de afslag van de eerste top minder is dan bij de enkeltoppige (lagere waterstand), kan gesteld worden dat het ééntoppige waterstandverloop maatgevend is voor duinafslag.

5. Voorgesteld waterstandsverloop

Uit het voorgaande kunnen reeds de volgende gevolgtrekkingen voor de superstorm worden gedaan:

a. De hoogste waterstand wordt gehouden op NAP + 5,0 m.
Deze waterstand is in het gehele duinafslagonderzoek gebruikt. Voor goede vergelijking is het gewenst dit niveau aan te houden.

b. Maximum stormeffect en astronomisch hoogwater vallen samen.

c. Het astronomisch getij is een hoog springtij.
De richtlijn voor duinafslag zal gelden voor de gesloten kust en de rechte stukken van de waddeneilanden.
Voor Zeeland dient een aparte richtlijn te worden gemaakt.
Het is daarom realistischer niet een getijkromme van Vlissingen te nemen maar een hoog springtij langs de gesloten kust. Langs de kust is de getijamplitude geen constante. Bestudering van de getijtafels voor Nederland 1980 leert dat een springtij
lopend van NAP - 0,55 m tot NAP + 1,45 m een
redelijke weergave is van een fors springtij te Hoek van Holland.
Noordelijker is de getijamplitude kleiner. Voorgesteld wordt de getijkromme met een sinusfunctie te beschrijven. De vorm van de getijkromme verschilt van plaats tot plaats. Verschijnselen als agger blijken weinig invloed te hebben op duinafslag (figuur 9).
Een gestileerde vorm als de sinusvorm lijkt derhalve geschikt.

d. De getijkromme wordt beschreven door een sinusvormige functie welke fluctueert tussen NAP + 1,45 m en NAP - 0,55 m.
De periode is 12 uur 25 minuten = 12,42 uur.

Uitgaande van de hoogste waarde van de waterstand in de superstorm van NAP + 5,0 m resulteert een maximum opzet door de wind van 5,0 - 1,45 = 3,55 m.
De stormeffectkrommen kunnen redelijk benaderd worden door een $\sin^2$-functie (zie figuur 1). Voorgesteld wordt deze benadering ook voor de superstormvloed toe te passen.
Gezien het gestelde in de paragrafen 3 en 4 wordt voorgesteld dezelfde orde van grootte van de duur van de februaristorm 1953 als duur aan te houden: 45 uur.

e. De stormeffectkromme wordt beschreven door een $\sin^2$ -vormige functie met een basis van 45 uur en een maximum opzet van 3,55 m.

Het bovenstaande combinerend, kan het waterstandsverloop t.o.v. NAP beschreven worden met de volgende formule:

$$H = 45 + 100 \cos \frac{2\pi(t-t_1)}{12,42} + 355 \cos^2 \frac{\pi(t-t_1)}{45}$$

voor $t_1 - D/2 \leqslant t \leqslant t_1 + D/2$

hierin is: H = waterstand in cm t.o.v. NAP.
t_1 = tijdstip van de maximale waterstand in uren.
t = tijd in uren.

Het waterstandsverloop is getekend in figuur 10.

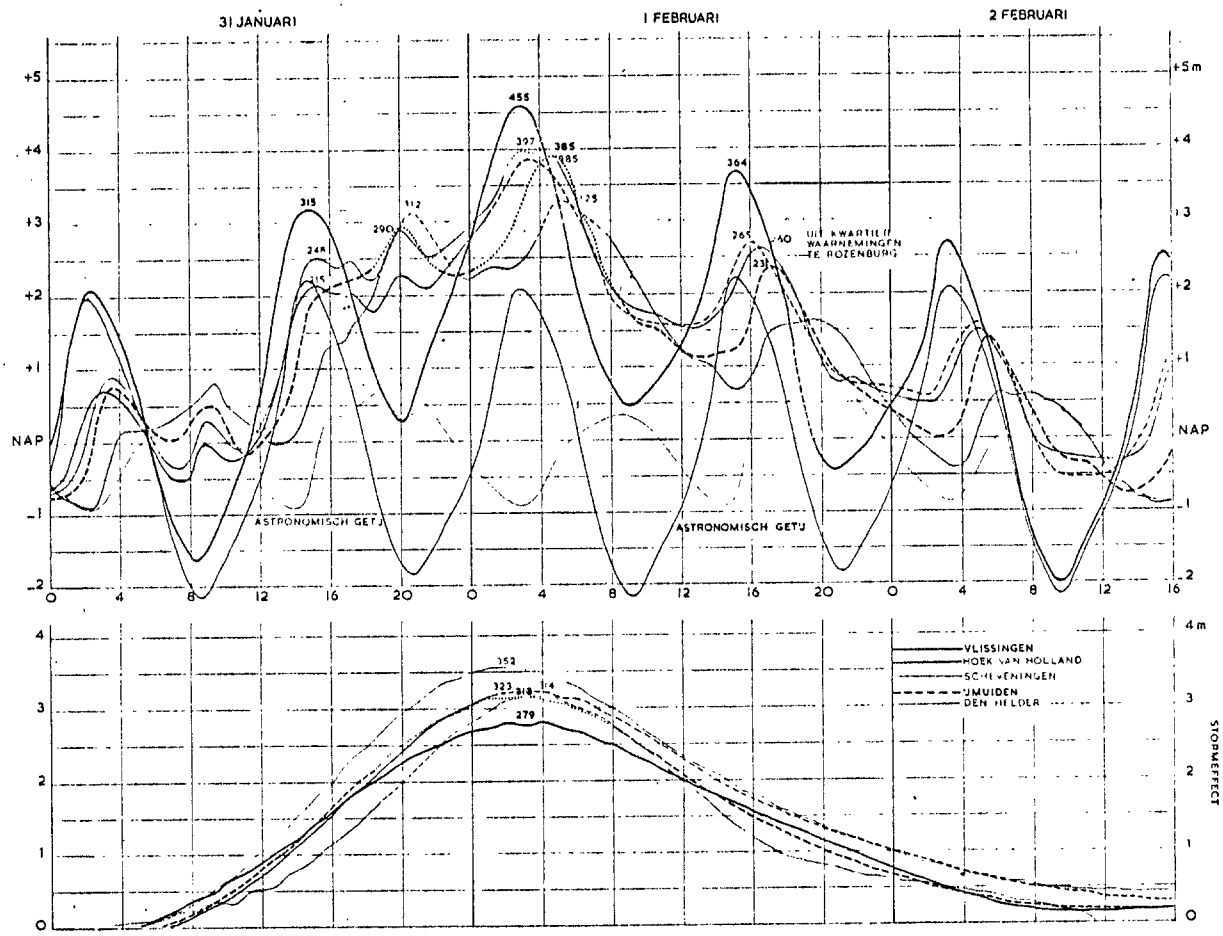
6. Literatuur

1. Verslag over de stormvloed 1953 Rijkswaterstaat.
2. Rapport Deltacommissie deel 4.
3. Schaalserie Duinafslag M 1263 II nota mei 1978 WL
4. Richtlijn voor de berekening van duinafslag ten gevolge van een stormvloed TAW.

mei 1980
ir. D. Dillingh.

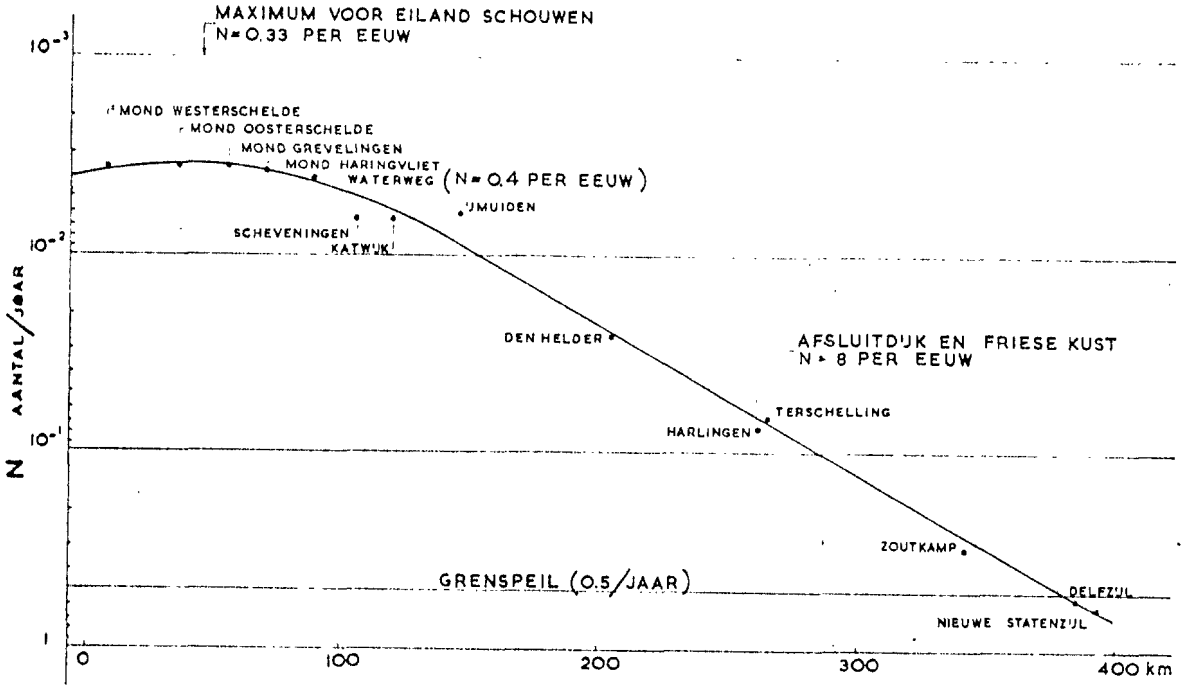
Tabel 1. Stormgegevens van 38 stormvloeden in de periode 1921-1970 gemeten in Zierikzee.

Nr.	datum	max. opzet (cm)	stormduur (uren)
1	21-11-06	182	27,7
2	26-10-10	186	29,2
3	28-12-26	216	39,8
4	30-11-23	209	31,6
5	32-11-28	136	23,0
6	36-12-01	150	36,1
7	38-04-03	120	27,7
8	40-12-06	168	33,2
9	43-04-07	236	24,8
10	44-01-26	174	19,2
11	51-11-29	124	26,4
12	52-11-07	156	57,7
13	53-02-01	302	45,6
14	54-01-16	152	50,8
15	54-12-23	238	33,1
16	58-01-07	155	27,3
17	58-10-16	113	41,2
18	59-01-12	145	61,2
19	60-01-20	214	19,0
20	60-09-21	130	30,1
21	61-03-21	148	21,1
22	62-01-17	198	36,2
23	62-11-15	110	22,1
24	62-12-16	222	32,2
25	64-12-03	161	47,7
26	65-02-14	161	42,2
27	63-10-31	173	28,9
28	65-11-30	173	41,8
29	65-12-10	164	34,9
30	66-11-16	188	36,5
31	66-12-01	176	21,5
32	67-10-05	93	24,7
33	67-02-28	130	21,5
34	69-02-02	151	32,0
35	69-11-10	161	27,1
36	70-10-03	148	40,3
37	70-10-19	137	55,2
38	70-02-20	126	17,3



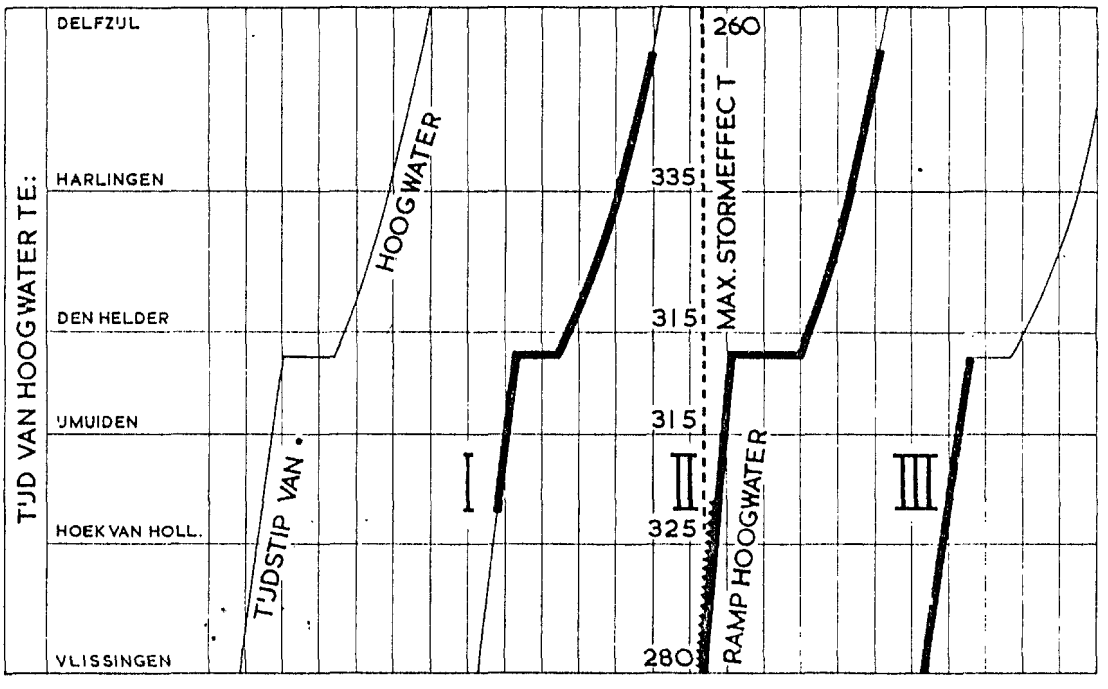
Geregistreerde waterstanden en stormeffectkrommen van enige waarnemingsstations langs de Noordzeekust (1,2)

figuur 1 uit (1,2)



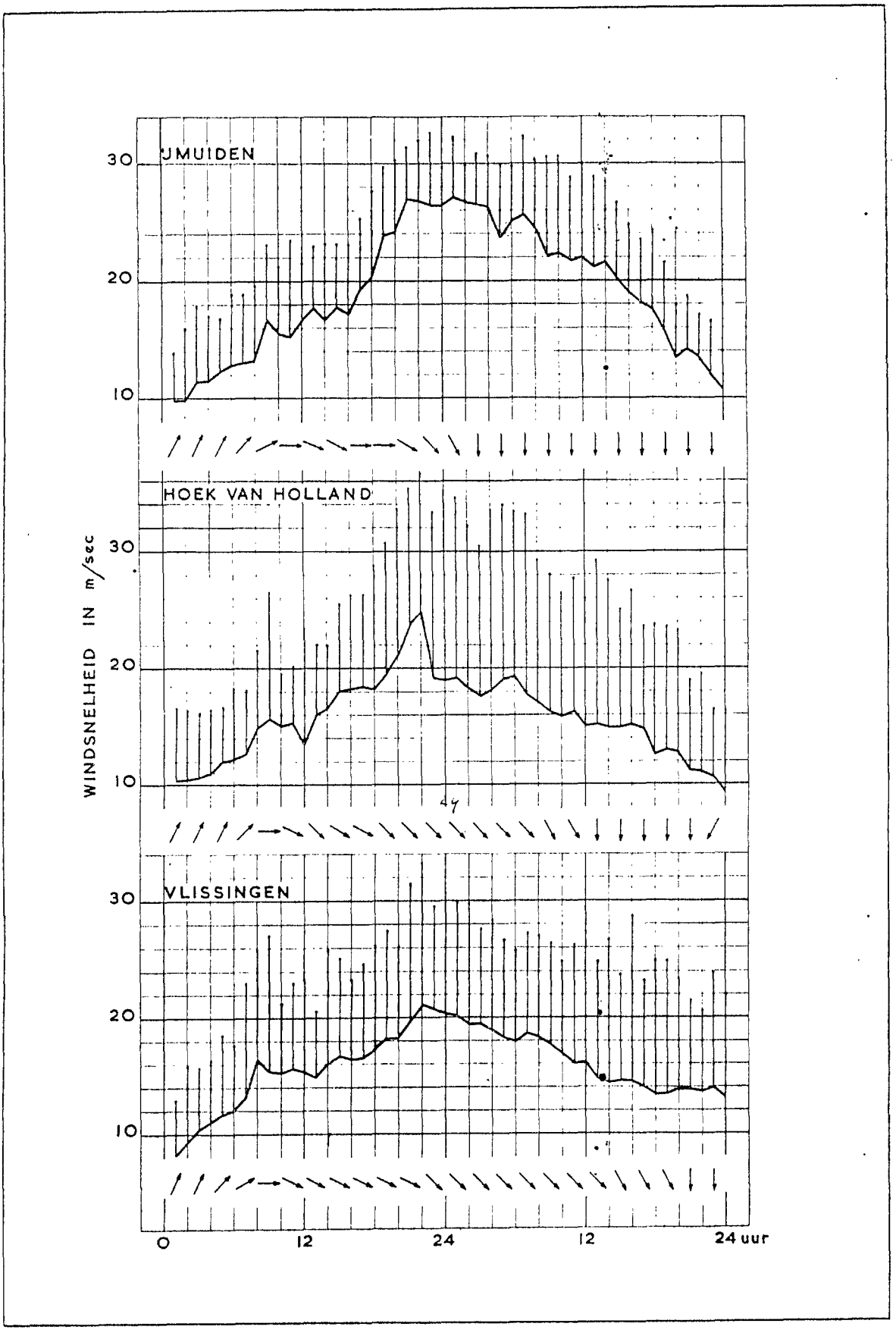
De overschrijdingsfrequentie van de stormvloed 1953 langs de kust

figuur 5 uit (1)



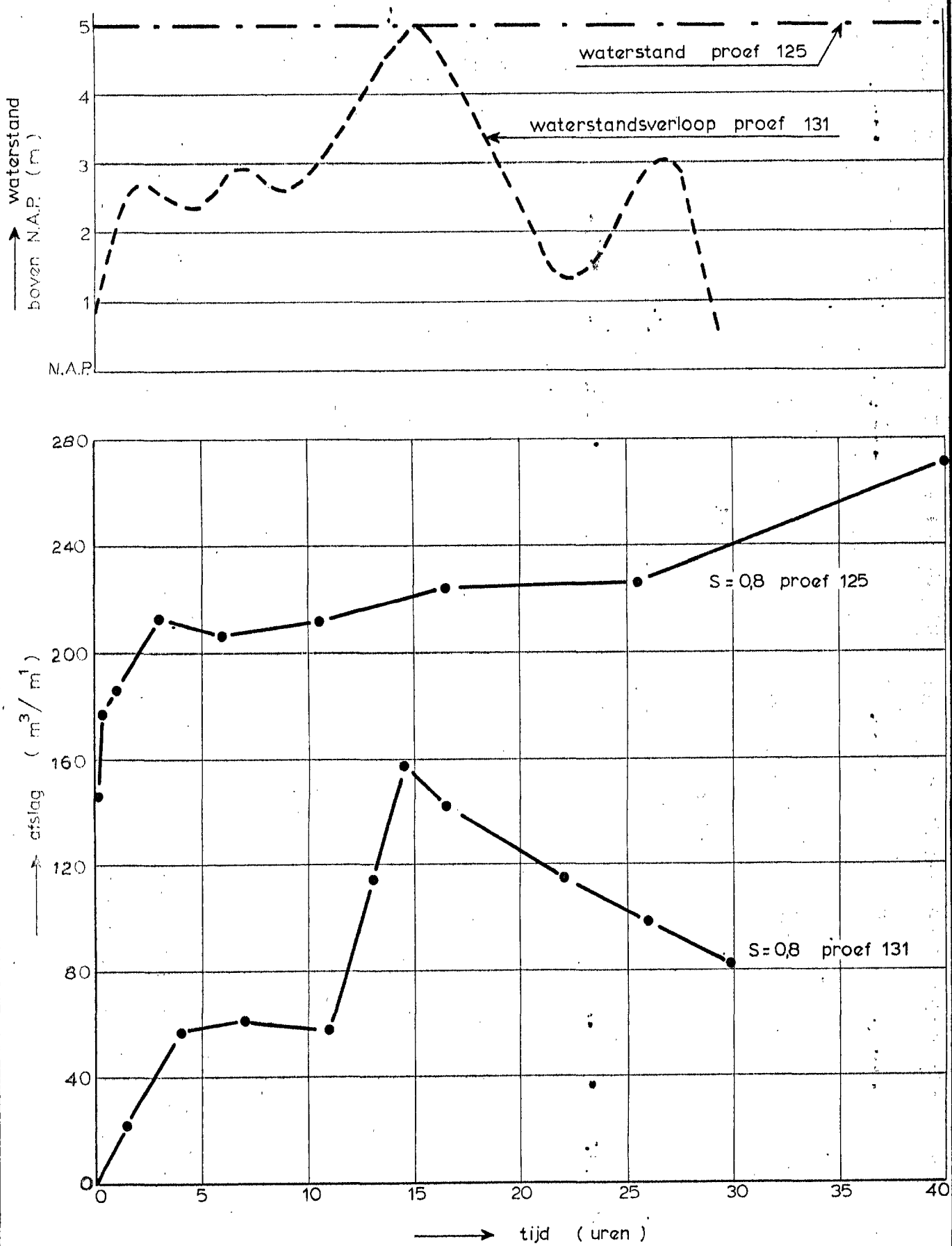
Het samentreffen van de stormvloed met de regelmatige reeks van astronomische hoogwaters. Door de storm zijn de hoogwaters I, II en III over het zwaar getekende gedeelte opgezet tot boven het „grenspeil". De geblokte lijn geeft het moment van optreden van het maximum stormeffect aan

figuur 6 uit (1)



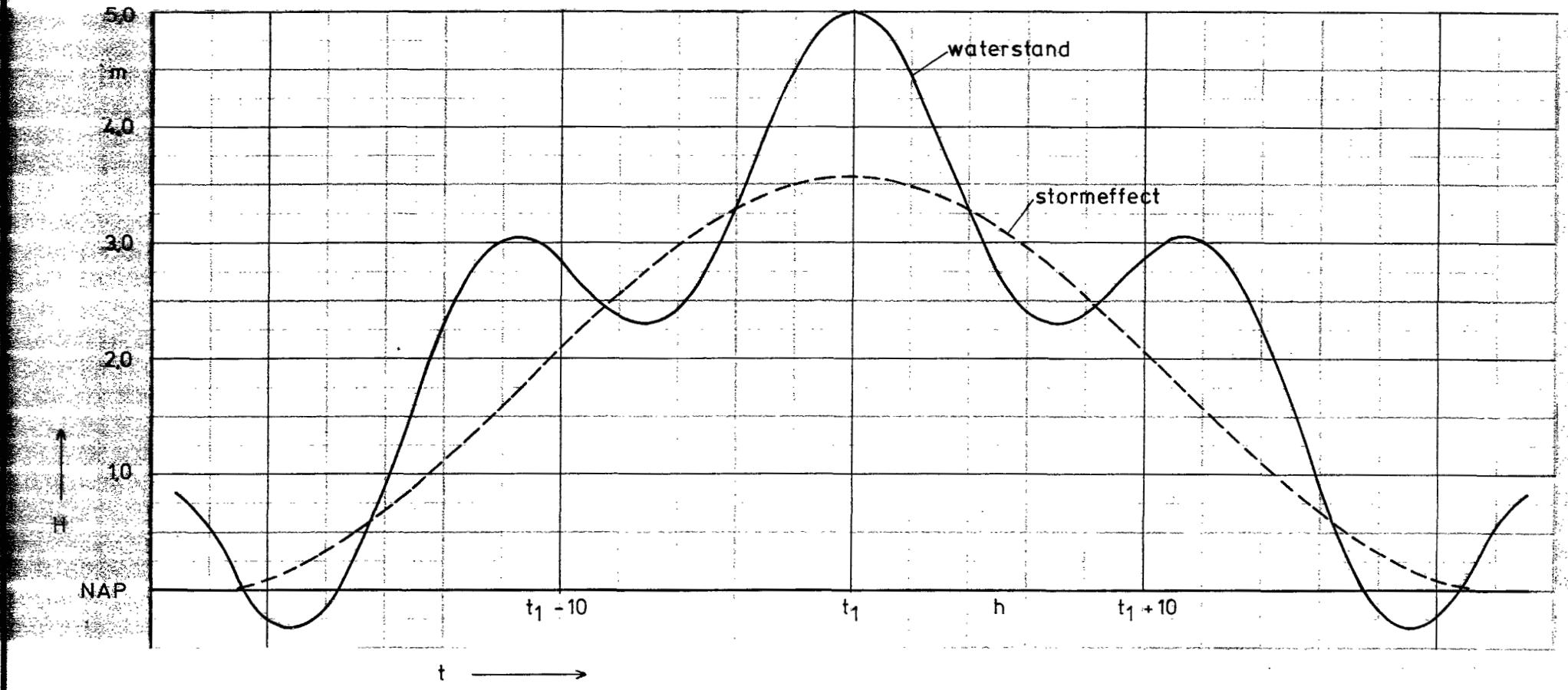
Geregistreerde uurgemiddelden van de windsnelheid met maximum-stoot voor elk uur

figuur 2 uit (1)



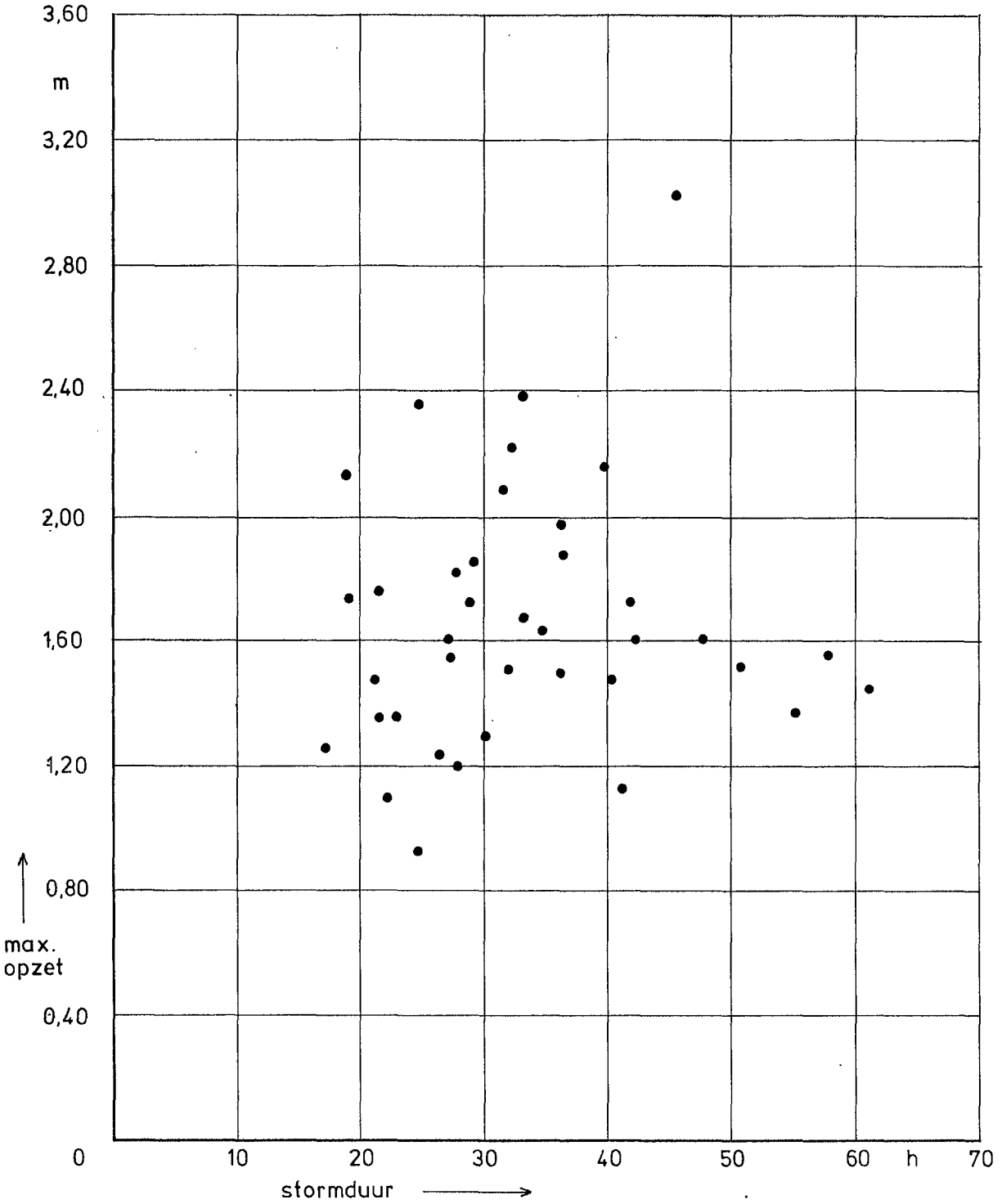
DUINAFSLAG MET VASTE EN VARIERENDE WATERSTAND		DUINZAND
	PROEVEN n_d = 26	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1263 II	FIG. 91

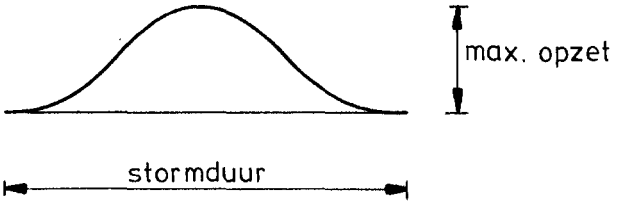
figuur 9 uit (3)



figuur 10

COW Centrum voor Onderzoek Waterkeringen	voorstel simulatie waterstandsverloop tijdens superstormvloed	get	gew	gez	Schaal –	Bijlage
					werknr	tek nr A4- 80.073

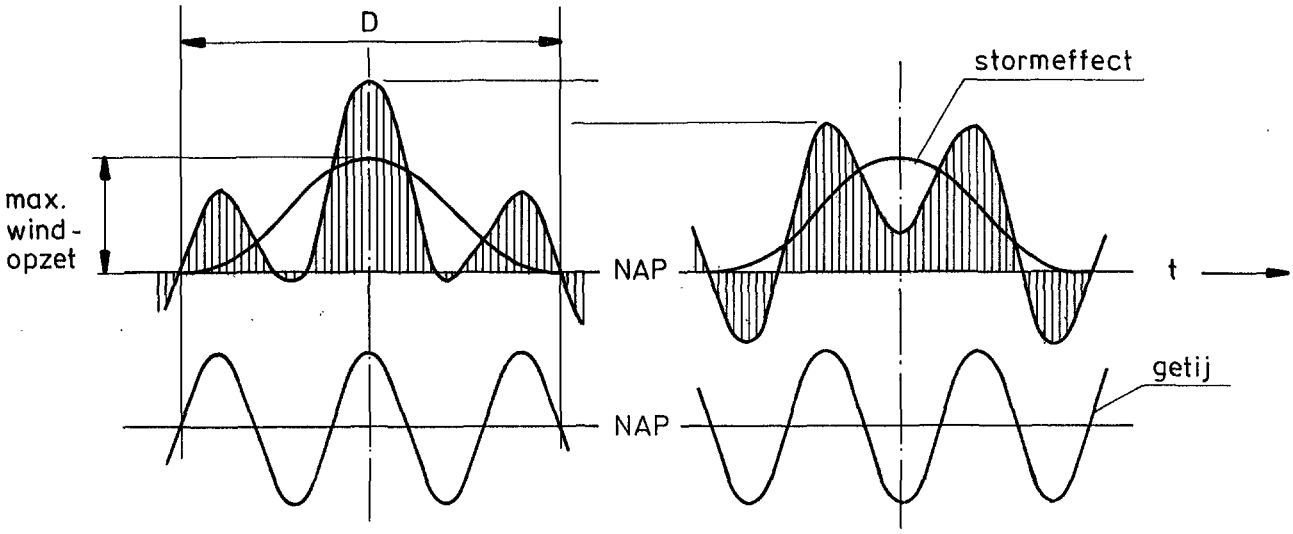




figuur 7

maximum windopzet - stormduur , combinaties van 38 stormvloeden (1921 - 1970) te Zierikzee

COW Centrum voor Onderzoek Waterkeringen	get	gew	gez	Schaal –	Bijlage
	80 04 24 vdl		28/4/80	werknr	tek nr A4 - 80.062



a. ééntoppig

max. stormeffect en getijtop

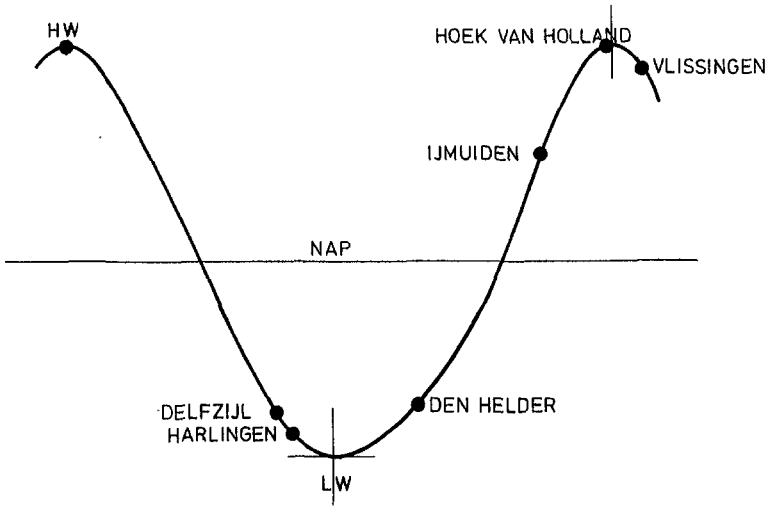
" in fase"

b. tweetoppig

max. stormeffect en getijtop

" in tegenfase"

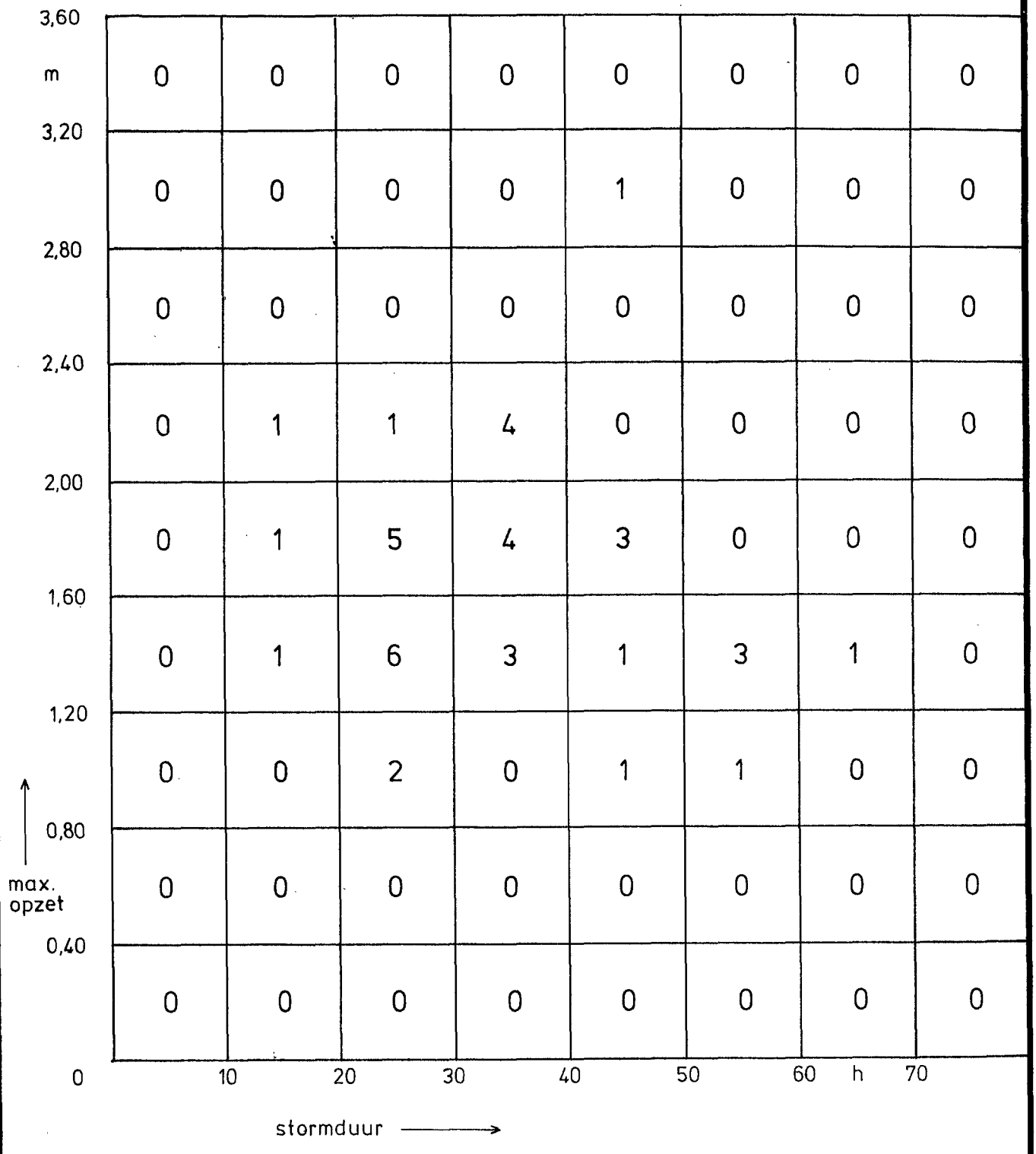
figuur 3 (definitieschets)



tijdstip van maximum stormeffect t.o.v. het astronomisch getij

figuur 4 uit (1) - stormvloed febr. 1953

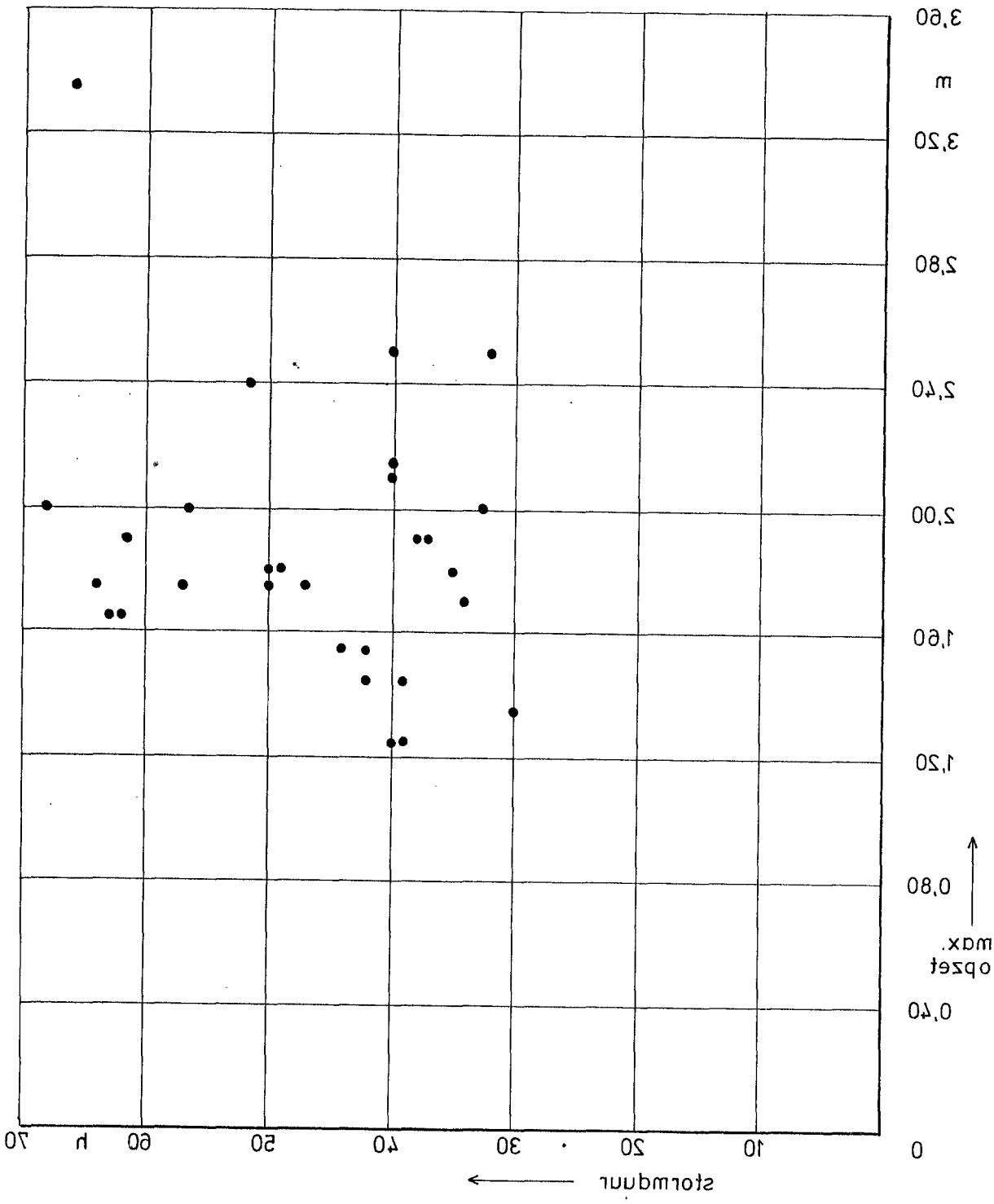
	get	gew	gez		
COW Centrum voor Onderzoek Waterkeringen	80 04 24 vdl		28/4 80	Schaal –	Bijlage
				werknr	tek nr A4 - 80.059



figuur 8

3-dimensionaal histogram
(uit fig. 7)

CUW Centrum voor Onderzoek Waterkeringen	get	gew	gez	Schaal –	Bijlage
	80/04/25 vdl		28/4/80	werknr	tek nr A4 - 80.064



figuur 8a

maximum windopzet - stormduur, combinaties van
29 stormvloeden (1904 - 1967) te Hoek van Holland

COW Centrum voor Onderzoek Waterkeringen	get	gew	gez	Schaal -	Bijlage
	80/04/27 vdl		28/4/80	werknr	tek nr A4 - 80.063