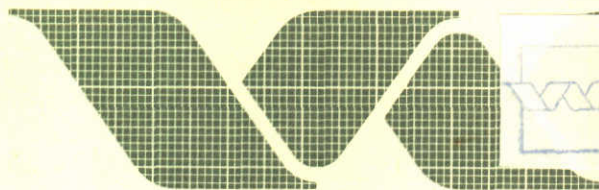


M 1755



bibliotheek  
postbus 177 - 2600 MH Delft  
waterloopkundig laboratorium IWT

## waterloopkundig laboratorium delft hydraulics laboratory

toetsing van het computerprogramma ZANTRI aan  
een hydraulisch onderzoek voor onttrekking  
van water



bibliotheek  
postbus 177 - 2600 MH Delft  
waterloopkundig laboratorium IWT

verslag modelonderzoek

M 1755

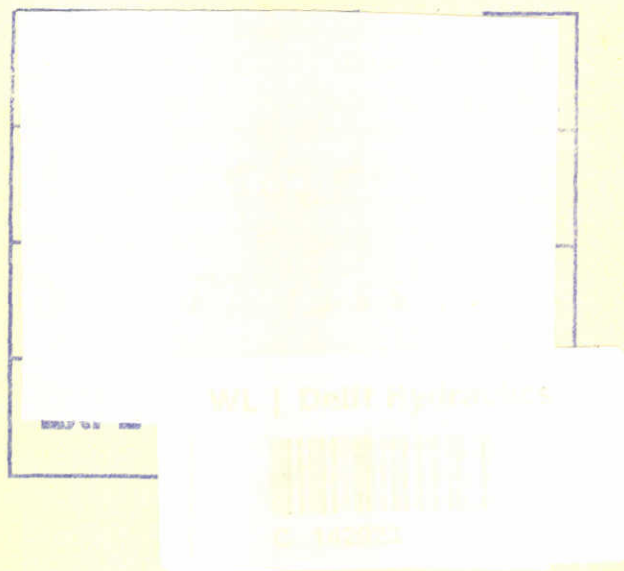
maart 1983

M1755

BIBLIOTHEEK  
Waterloopkundig Laboratorium  
Postbus 177 - DELFT  
NEDERLAND

---

toetsing van het computerprogramma ZANTRI aan  
een hydraulisch onderzoek voor onttrekking  
van water



verslag modelonderzoek

---

M 1755

maart 1983

## INHOUD

### SYMBOLLEN

### SAMENVATTING

	blz.
1. <u>Inleiding</u> .....	1
1.1 Opdracht.....	1
1.2 Doel van het onderzoek.....	1
1.3 Opzet van het onderzoek.....	2
2. <u>Theoretische beschouwingen wateronttrekking</u> .....	6
2.1 Evenwichtsligging bij permanente onttrekking.....	6
2.2 Tijdsafhankelijke bodemveranderingen.....	10
3. <u>Het onderzoek in de Zandgoot</u> .....	11
3.1 Algemeen.....	11
3.2 Inrichting model en meetstelsel.....	12
3.3 Verwerking van de meetgegevens.....	14
3.4 Resultaten en analyse van de metingen.....	18
4. <u>Het wiskundig modelonderzoek</u> .....	23
4.1 Algemeen.....	23
4.2 Aanpassingen wiskundig model en randvoorwaarden voor de Zandgoot....	24
5. <u>Vergelijking wiskundig model met de metingen in de Zandgoot</u> .....	29
5.1 Algemeen.....	29
5.2 Resultaten voor de verschillende onttrekkingsproeven.....	29
5.3 Nauwkeurigheid van de voorspellingen.....	33
6. <u>Conclusies en aanbevelingen</u> .....	35

### LITERATUUR

## TABELLEN

1. Tijdschema onderzoek en intensiteit van de metingen
2. Overzicht van grootheden voor het prototype en de Zandgoot
3. Overzicht meetresultaten evenwichtssituaties
4. Overzicht van waterdiepteverschillen tijdens evenwichtssituaties

## FIGUREN

- 1 Overzicht van de Zandgoot
- 2,3 Theoretische bodemveranderingen bij wateronttrekking
- 4 Resultaten van op verschillende manieren bepaalde, voortschrijdende gemiddelden: meting nr. 4 d.d. 1980.11.29
- 5 Onderzoek afvlakking bodemdiscontinuïteit
- 6 Toepassing lineair filter op metingen bodemligging

Proefberekening T2, 3x voortschrijdend gemiddelde over:

- 7 101 punten
- 8 135 punten

Registratie bodemligging in 3 langsraaien

- 9 meting nr. 1 1980.11.21
- 10 meting nr. 20 1980.11.21

Vergelijking ZANTRI met zandgootmetingen:

- 11 evenwichtssituatie T01/T1
- 12 evenwichtssituatie T02/T2
- 13 evenwichtssituatie T03/T3

Bodemligging zandgoot, hydraulisch model

- 14 T1 van -0.05 uur tot 12.31 uur
- 15 T1 van 16.31 uur tot 121.16 uur
- 16 T2 van -0.09 uur tot 12.31 uur
- 17 T2 van 16.31 uur tot 121.16 uur
- 18 T3 van -0.09 uur tot 12.31 uur
- 19 T3 van 16.31 uur tot 118.47 uur

Tijdsafhankelijk verloop van de bodemligging T01/T1

- 20 meetpunten 501 en 1501
- 21 meetpunten 801 en 901

Tijdsafhankelijk verloop van de bodemligging T02/T2

- 22 meetpunten 501 en 1501
- 23 meetpunten 801 en 901

FIGUREN (vervolg)

Tijdsafhankelijk verloop van de bodemligging T03/T3

24 meetpunten 501 en 1501

25 meetpunten 801 en 901

Vergelijking gemeten en berekend zandtransport in Zandgoot

26  $S/\sqrt{g\Delta D^3} \sim 0.15$

27  $S/\sqrt{g\Delta D^3} \sim 0.30$

28 Verdeling doorstroomprofiel volgens Einstein

Bodemligging na 6 uur:

29 T1

30 T2

31 T3

ZANTRI-berekeningen:

32 T1

33 T2

34 T3

Bodemligging Zandgoot; hydraulisch en wiskundig model T01/T1

35 T = 0 uur en T = 0,5 uur

36 T = 1 uur en T = 2 uur

37 T = 4 uur en T = 6 uur

38 T = 8 uur en T = 16 uur

39 T = 49 uur en T = 73 uur

Bodemligging zandgoot; hydraulisch en wiskundig model T02/T2

40 T = 0 uur en T = 0,5 uur

42 T = 1 uur en T = 2 uur

43 T = 4 uur en T = 16 uur

44 T = 49 uur en T = 73 uur

Bodemligging zandgoot; hydraulisch en wiskundig model T03/T3

45 T = 0 uur en T = 0,5 uur

46 T = 1 uur en T = 2 uur

47 T = 4 uur en T = 6 uur

48 T = 8 uur en T = 16 uur

49 T = 49 uur en T = 74 uur

FIGUREN (vervolg)

50 Vergelijking ZANTRI met zandgootmetingen; berekend met Engelund en Hansen

Tijdsafhankelijk verloop van de waterstand

- 51 T01/T1; meetpunt 1
- 52 T01/T1; meetpunt 3001
- 53 T02/T2; meetpunt 1
- 54 T02/T2; meetpunt 3001
- 55 T03/T3; meetpunt 1
- 56 T03/T3; meetpunt 3001
- 57 T01/T1; meetpunt 830 beneden
- 58 T01/T1; meetpunt 830 boven
- 59 T02/T2; meetpunt 830 beneden
- 60 T02/T2; meetpunt 830 boven

Tijdsafhankelijk verloop van de waterdiepte

- 61 T01/T1; meetpunt 1
- 62 T01/T1; meetpunt 800
- 63 T01/T1; meetpunt 900
- 64 T01/T1; meetpunt 3001
- 65 T02/T2; meetpunt 1
- 66 T02/T2; meetpunt 800
- 67 T02/T2; meetpunt 900
- 68 T02/T2; meetpunt 3001
- 69 T03/T3; meetpunt 1
- 70 T03/T3; meetpunt 800
- 71 T03/T3; meetpunt 900
- 72 T03/T3; meetpunt 3001

FOTO'S

1. Wijze van onttrekken
2. Overzicht versmalde goot met plaats van onttrekking
3. Meetstuwen voor de controle van het onttrekkingsdebiet



## BIJLAGEN

- A Voorbeeld standaard gegevensverwerking
- B Berekende bodemligging en bodemhelling per meting in geselecteerde gebieden
- C Verwerkte meetgegevens evenwichtsligging proef T2
- D Waterstandsverloop voor proef T2 op boven- en benedenrand van het meettraject en in het onttrekkingspunt

SYMBOLLEN

A, A', A'', b	coëfficiënten in een algemene transportrelatie	-
B	breedte	L
C	ruwheidscoëfficiënt van Chézy	$L^{\frac{1}{2}}T^{-1}$
C <sub>90</sub>	ruwheidscoëfficiënt van Chézy met betrekking tot D <sub>90</sub>	$L^{\frac{1}{2}}T^{-1}$
D	korreldiameter	L
D <sub>35</sub>	korreldiameter bodemmateriaal waarvoor 35% fijner is	L
D <sub>50</sub>	korreldiameter bodemmateriaal waarvoor 50% fijner is	L
D <sub>90</sub>	korreldiameter bodemmateriaal waarvoor 90% fijner is	L
D <sub>gr</sub>	} dimensieloze parameters in Ackers/White transportrelatie	
C <sub>gr</sub>		
F <sub>gr</sub>		
A		
m		
n		
g	versnelling van de zwaartekracht	$LT^{-2}$
h	waterdiepte	L
Δh	verandering van de waterdiepte	L
h <sub>n</sub>	normaaldiepte	L
i	verhang	-
k <sub>w</sub>	wandruwheid zandgoot	L
L	lengtemaat	L
n	schaalfactor	-
Q	debiet	$L^3T^{-1}$
ΔQ	onttrekkingsdebiet	$L^3T^{-1}$
R	hydraulische straal	$L^3T^{-1}$
R <sub>w</sub>	hydraulische straal zijwand	$L^3T^{-1}$
s	sedimenttransport per eenheid van breedte	L
S	sedimenttransport	L
t	tijd	T
$\bar{u}$	gemiddelde watersnelheid	$LT^{-1}$
u <sub>*</sub>	schuifspanningssnelheid	$LT^{-1}$
Δz	bodemverandering	L
Δ	relatieve dichtheid transportmateriaal	-
δ <sub>w</sub>	dikte visceuze grenslaag	L
ε	poriëngehalte bodemmateriaal	-
ν	kinematische viscositeit	$L^2T^{-1}$
μ	reductie (ribbel) factor in de transportrelatie	-

TOETSING VAN HET COMPUTERPROGRAMMA ZANTRI AAN EEN HYDRAULISCH ONDERZOEK VOOR ONTTREKKING VAN WATER

Samenvatting

Op grond van de beschikbare basisvergelijkingen voor water en sediment is een rekenmodel ontwikkeld met de naam ZANTRI. Met dit rekenmodel kunnen onder andere de gevolgen van wateronttrekking aan een alluviale waterloop worden voorspeld. Een globale beschrijving van het rekenmodel wordt gegeven.

Ter toetsing van het rekenmodel zijn in een hydraulisch model proeven met wateronttrekking uitgevoerd. Aandacht wordt besteed aan de inrichting van het model, het meetstelsel en de verwerking van de meetgegevens, voornamelijk wat betreft de specifieke zaken met betrekking tot het onttrekkingsonderzoek. Enige aandacht is besteed aan de nauwkeurigheid van de metingen van de waterspiegel en de resulterende verhanglijn.

De specifieke aanpassingen welke in het rekenmodel zijn aangebracht ten behoeve van de toetsing worden besproken. De gebruikte transportformule is die volgens Ackers & White (1973).

De resultaten van het rekenmodel en de metingen uit het laboratoriumonderzoek worden vergeleken. Op grond van de vergelijking kan worden vastgesteld dat de veranderingen als gevolg van het onttrekken van water uit een alluviale waterloop met het programma ZANTRI goed worden weergegeven.

TOETSING VAN HET COMPUTERPROGRAMMA ZANTRI AAN EEN HYDRAULISCH ONDERZOEK VOOR  
ONTTREKKING VAN WATER

1. Inleiding

1.1 Opdracht

Het Hoofd van het District Zuid-Oost, Directie Waterhuishouding en Waterbeweging van de Rijkswaterstaat, heeft in zijn brief, nr. 1612 d.d. 4 augustus 1980, het Waterloopkundig Laboratorium opdracht verleend tot het verrichten van een nader onderzoek naar de morfologische gevolgen van wateronttrekking. Het fysisch modelonderzoek hiervoor, dat kan worden beschouwd als een vervolgonderzoek op de wateronttrekkingsproeven, uitgevoerd in het model van de Waal bij St. Andries (M 1442), is uitgevoerd in de Zandgoot in Laboratorium de Voorst. Door het Waterloopkundig Laboratorium is eveneens een wiskundig modelonderzoek uitgevoerd met behulp van het computerprogramma ZANTRI. Hierbij zijn de resultaten van de wateronttrekkingsproeven in de zandgoot vergeleken met de resultaten die met het wiskundig model werden verkregen voor dezelfde condities.

Het onderzoek is uitgevoerd onder leiding van ir. P.J.M. Kerssens, die tevens dit verslag samenstelde. De eindredactie werd verzorgd door ir. J.H.A. Wijbenga. De dagelijkse leiding van de betreffende gegevensverwerking was in handen van ing. B. Bakker. Het wiskundig modelonderzoek en de vergelijking van de resultaten van gootonderzoek en wiskundig model werden uitgevoerd door de heer R. Buysrogge.

1.2 Doel van het onderzoek

Ten behoeve van de zoetwatervoorziening van Midden- en West-Nederland bestaat de wens om gedurende droge perioden een hoeveelheid water te onttrekken aan de Waal. In een alluviale waterloop zal benedenstreams van het onttrekkingspunt aanzanding van de bodem optreden. De mate van aanzanding kan worden voorspeld met het computerprogramma ZANTRI.

Ter toetsing van het rekenmodel ZANTRI zijn in 1977 in het Waalmodel (M 1442)[1] proeven uitgevoerd waarbij water aan het model werd onttrokken. De nauwkeurigheid van de resultaten van dit onderzoek werd nadelig beïnvloed door een aantal factoren zoals de relatief onnauwkeurige wijze van bodempeilen, de

driedimensionale stromingsomstandigheden en het gebruik van bakeliet als bodem-materiaal, in het model. Op grond hiervan werd een toetsing van ZANTRI onder sterk geconditioneerde omstandigheden aanbevolen. De toetsing diende antwoord te geven op de vraag of het morfologisch proces, dat met de wateronttrekking gepaard gaat, met het programma ZANTRI goed kan worden weergegeven.

Indien met behulp van het rekenprogramma ZANTRI voldoende nauwkeurige voorspellingen kunnen worden gedaan omtrent de gevolgen van wateronttrekking uit een alluviale waterloop, dan kunnen de gevolgen van verschillende onttrekkingsdebeten op relatief goedkope wijze worden onderzocht.

Uiteraard dient hierbij te worden beseft dat slechts een ééndimensionale weergave van de bodemveranderingen in een rivier kan worden verkregen met het computerprogramma ZANTRI. Indien twee- of driedimensionale effecten, zoals lokale sedimentatie, een belangrijke rol zullen spelen, dan verdient onderzoek met behulp van een fysisch (hydraulisch) modelonderzoek of een tweedimensionaal morfologisch rekenprogramma de voorkeur.

### 1.3 Opzet van het onderzoek

Voor het toetsen van een wiskundig model kan gebruik gemaakt worden van hetzij prototypegegevens, hetzij gegevens verkregen uit modelonderzoek in het laboratorium. Voor de eerste methode is het noodzakelijk dat het te onderzoeken verschijnsel in het prototype al heeft plaatsgevonden. Een uitgebreide serie prototypegegevens met grote nauwkeurigheid is noodzakelijk om aan een dergelijke toetsing enige wetenschappelijke waarde te kunnen toekennen. Voor de wateronttrekking aan de Waal bij Tiel is eendergelijke aanpak door Rijkswaterstaat al eens uitgevoerd [2,3]. Hierbij is voor de toetsing gebruik gemaakt van het computerprogramma ZANTRI [4], dat bij het Waterloopkundig Laboratorium is ontwikkeld om tijdsafhankelijke morfologische veranderingen in een rivier met bodemtransport te voorspellen [9,10]. Op grond van de resultaten van dit onderzoek kon de voorspellende waarde van het ZANTRI-model nog niet in voldoende mate worden aangetoond, wat het gevolg zou kunnen zijn van een minder adequate beschrijving van de fysica in het wiskundig model en/of een onvoldoende nauwkeurigheid van de prototypegegevens. Voor een vergelijkbare prototypesituatie vond in het Laboratorium de Voorst van het Waterloopkundig Laboratorium een hydraulisch modelonderzoek plaats [1]. Vanwege de oorzaken zoals vermeld in paragraaf 1.2 waren de resultaten hiervan minder nauwkeurig dan gewenst en kon ook hiermede de toetsing van het

ZANTRI-model niet op bevredigende wijze worden uitgevoerd.

Met verwijzing naar het bovenstaande kan worden gesteld dat zowel een toetsing aan een prototypesituatie als een toetsing aan de resultaten van het modelonderzoek niet goed mogelijk bleek vanwege uiteenlopende oorzaken (onnauwkeurigheid in de metingen, driedimensionale effecten etc.). Op grond hiervan is geconcludeerd dat een toetsing van het programma ZANTRI aan model (en/of prototype) resultaten verkregen onder sterk geconditioneerde omstandigheden een vereiste was. Deze omstandigheden konden worden gerealiseerd in de Zandgoot van het Laboratorium De Voorst, in gebruik voor het T.O.W. In deze goot is het mogelijk om onder nagenoeg één-dimensionale omstandigheden water te onttrekken, terwijl het onderzoek kan worden uitgevoerd onder sterk geconditioneerde omstandigheden wat betreft de afvoer, de watertemperatuur, waterstand, zanddosering etc. Tevens kan gebruik worden gemaakt van nauwkeurige meetapparatuur voor het bepalen van de bodemligging en de waterspiegel en van geavanceerde programmatuur voor de verwerking van de meetgegevens.

Bij het onderzoek wordt onderscheid gemaakt in een instroomfase en een onttrekkingsfase. De instroomfase dient om het model op evenwicht te laten komen, zónder onttrekking, na het instellen van gewenste afvoer, waterstand en zanddosering. Dit evenwicht wordt gekenmerkt door het in balans zijn van het transport (sedimentdosering bovenstrooms = sedimentvangst benedenstrooms), een constant verhang en een constante waterdiepte. Na het bereiken hiervan begint de onttrekkingsfase, waarbij het verloop van bodemligging en waterspiegel zeer frequent en nauwkeurig moet worden gemeten om het tijdsafhankelijke verschijnsel goed te kunnen vastleggen.

Het volgende tijdschema werd voorzien voor het onderzoek:

Aanpassen Zandgoot, aanbrengen onttrekkingsmiddelen ca. 4 weken

Tijdsduur per onttrekkingsproef, instroomfase ca. 3 weken

onttrekkingsfase ca. 3 weken

In de oorspronkelijke opzet zou een eerste onttrekkingsproef worden uitgevoerd bij een breedte van de zandgoot van 1.5 m (de maximale breedte). Daarop aansluitend was een tweede onttrekkingsproef voorzien, uit te voeren in een versmalde zandgoot (0.5 m). Op grond van budgettaire overwegingen werd echter besloten om in eerste instantie voor het jaar 1980 alléén opdracht voor een eerste proef te verlenen, waarna mede op grond van de resultaten van deze proef

voor 1981 eventueel een tweede proef zou kunnen worden uitgevoerd. Aldus werd begin november 1980 begonnen met het onderzoek in de Zandgoot, lopende tot eind december van hetzelfde jaar. Het wiskundig modelonderzoek werd eind november 1980 aangevangen en liep tot april 1981, tezamen met het gehele gegevensverwerkingsprogramma en de vergelijking van de resultaten van Zandgoot en wiskundig model. In mei/juni 1981 hebben nog enkele herberekeningen met ZANTRI plaatsgevonden ter correctie van enkele onnauwkeurigheden in de initiële voorwaarden.

Op grond van het feit dat in het T.O.W. onderzoek Rivieren, voorafgaand aan het onderhavige onttrekkingsonderzoek, gebruik werd gemaakt van de Zandgoot met een breedte versmald tot 0.5 m, werd besloten hiervan gebruik te maken voor de eerste onttrekkingsproef en een eventuele tweede proef uit te voeren met de volle breedte. Eveneens bleek uit het voorafgaande T.O.W. onderzoek dat de bodemveranderingen in de Zandgoot sneller bleken op te treden dan was verwacht, althans voor de condities met versmalde Zandgoot en gewenst transport, waterdiepte en afvoer voor de betreffende proeven. Om deze reden werd besloten ongeveer dezelfde condities aan te houden voor de eerste onttrekkingsproef, zodat de aanzandingsprocessen eveneens relatief snel zouden plaatsvinden. Voorts werd de eerste onttrekkingsproef in overleg met het Distrikt Zuidoost van de Rijkswaterstaat uitgebreid, zodat uiteindelijk drie verschillende onttrekkingsafvoeren zijn onderzocht. Het tijdsschema zag er uiteindelijk als volgt uit:

1980:

week 45	Aanpassen Zandgoot	
46	aanbrengen onttrekkingsmiddelen	
47	Instroom fase Proef, T01	$Q = 0.160 \text{ m}^3/\text{s}$
48	Onttrekkingsproef 15%, T1	$Q = 0.160 \text{ m}^3/\text{s}, \Delta Q = 0.24 \text{ m} / \text{s}$
49	Uitstroom/Instroomfase, T02	$Q = 0.160 \text{ m}^3/\text{s}$
50	Onttrekkingsproef 25%, T2	$Q = 0.160 \text{ m}^3/\text{s}, \Delta Q = 0.40 \text{ m} / \text{s}$
51	Uitstroom/Instroomfase, T03	$Q = 0.160 \text{ m}^3/\text{s}$
52	Onttrekkingsproef 5%, T3	$Q = 0.160 \text{ m}^3/\text{s}, \Delta Q = 0.08 \text{ m} / \text{s}$

1981:

week 1	Uitstroomfase, T04	$Q = 0.160 \text{ m}^3/\text{s}$
--------	--------------------	----------------------------------

De instelling van de onttrekking vond steeds op maandag om 10.00 uur plaats. Van circa een half uur vóór tot circa 30 uur nã dit tijdstip werd uitgebreid

gemeten. De frequentie van de metingen, die in het begin van voornoemde periode eenmaal in de 10 minuten werden uitgevoerd, werd geleidelijk aan verminderd tot eenmaal meten in de twee uur. Na de eerste 30 uur werden de metingen voortgezet met een frequentie van eenmaal meten in 3 uur. Tijdens de eerste 30 uur was bij de drie onttrekkingsproeven permanent personeel bij de goot aanwezig ter bewaking van het functioneren van de pompen die het water onttrokken. Gedurende de overige tijd van de onttrekkingsproeven en voor de instroom- en uitstroomfase werd gebruik gemaakt van het automatische alarmsysteem van de goot zelf. Eventuele storingen in de periode na de eerste 30 uur na het instellen van de onttrekking werden minder ernstig geacht omdat de belangrijkste tijdsafhankelijke processen inmiddels zouden zijn voltooid. Overigens hebben zich geen storingen van enige omvang voorgedaan.

Op elke vijfde dag van de onttrekking werd voor elke proef een intensieve serie van 20 evenwichtsmetingen met een meetfrequentie van eenmaal in de 10 minuten uitgevoerd. Deze metingen werden gebruikt om de gemiddelde evenwichtstoestand voor de betreffende situatie vast te stellen.

In tabel 1 is een overzicht gegeven van het tijdschema van het onderzoek en de intensiteit van de metingen. Een overzicht van de Zandgoot is in figuur 1 gegeven, terwijl voor nadere details met betrekking tot de goot, het doseringssysteem, het meetsysteem en de gegevensverwerking wordt verwezen naar de relevante T.O.W. verslagen [5,6].

De foto's 1, 2 en 3 geven een beeld van de goot, de wijze van onttrekking en van de meetstuwten voor de controle van het onttrekkingsdebiet. Een nadere beschrijving van de inrichting van het model en het meetsysteem wordt in hoofdstuk 3 gegeven.



## 2. Theoretische beschouwingen wateronttrekking

### 2.1 Evenwichtsligging bij permanente onttrekking

De invloed van een wateronttrekking op de evenwichtsligging en de waterspiegel van een rivier kan worden bepaald met de beschikbare vergelijkingen voor de beweging en de continuïteit van het water en het sediment [9,11]. Voor de beweging van het water wordt gebruik gemaakt van de Chézy-vergelijking, en voor de beweging van het sediment wordt een willekeurige transportformule genomen in de vorm van  $S = f (hi/\Delta D)$ . Dit geeft aldus:

$$\text{water} \quad Q = C B h_n^{\frac{3}{2}} i^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

$$\text{sediment} \quad S = A \left( \frac{h i}{\Delta D} \right)^{\frac{b}{2}}, \text{ ofwel} \quad (2)$$

$$S = A' u^{-b} \quad (2a)$$

Vergelijkingen (1) en (2) kunnen worden gecombineerd, wat na enig omwerken leidt tot:

$$S = A'' Q^{\frac{b}{3}} i^{\frac{b}{3}} \quad (3)$$

met  $A'' = f (B, C, \Delta, D, g)$

Deze algemene (bewegings)vergelijking moet zowel gelden voor de evenwichtstoestand van de rivier zónder als mèt onttrekking.

Aangezien het sedimentaanbod van bovenstrooms in principe niet zal worden beïnvloed door de onttrekking moet in de uiteindelijke situatie benedenstrooms van de onttrekking dezelfde hoeveelheid sediment worden getransporteerd met een gereduceerde hoeveelheid water. De volgende continuïteitsvergelijkingen gelden hiervoor:

$$\text{water} \quad Q_1 = Q_0 - \Delta Q \quad (4)$$

$$\text{sediment} \quad S_1 = S_0,$$

waarin index 0 de situatie zonder en index 1 de situatie met onttrekking aangeeft en  $\Delta Q$  het onttrekkingsdebiet.

Indien wordt aangenomen dat de breedte en de ruwheid niet of nauwelijks worden beïnvloed door de onttrekking, dan blijven de coëfficiënten A" en b constant. Aldus leiden vergelijkingen (3) en (5) tot de volgende uitdrukking:

$$Q_1 i_1 = Q_0 i_0 \quad (6)$$

Hieruit blijkt direct dat tengevolge van een wateronttrekking het rivierverhang benedenstrooms van het onttrekkingspunt zal gaan toenemen tot een nieuw evenwicht met een steiler verhang is ontstaan. Combinatie van (4) en (6) geeft:

$$i_1 = \frac{Q_0}{Q_0 - \Delta Q} i_0 \quad (7)$$

Een soortgelijke uitdrukking kan worden afgeleid voor de normaaldiepte  $h_n$ . Uitgaande van de continuïteit van het sediment en van het constant blijven van de coëfficiënten in de transportvergelijking kan uit vergelijking (2) worden afgeleid dat het produkt  $h_n i$  constant moet blijven.

Met vergelijking (7) volgt dan direct:

$$h_{n1} = \frac{Q_0 - \Delta Q}{Q_0} h_{n0} \quad (8)$$

De normaaldiepte (ofwel evenwichtsdiepte) zal dus afnemen tengevolge van de onttrekking.

In figuur 2 is voor een algemeen geval geschetst hoe een rivier zich, wat betreft bodemligging en waterspiegel, zal aanpassen aan een wateronttrekking. In figuur 2A staat de oorspronkelijke situatie van de rivier aangegeven, evenals de waterspiegel op het tijdstip  $t = 0$ , het moment dat de onttrekking begint. Twee gevallen kunnen worden onderscheiden wat betreft het verloop van de waterspiegel. In het eerste geval wordt verondersteld dat de waterspiegel aan de benedenstroomse rand vast is, dus niet beïnvloedbaar door de onttrekking, bijvoorbeeld zoals bij uitstroming in een zee of een meer met min of meer constant waterniveau. In het tweede geval wordt de waterstand op de rand wèl beïnvloed door de onttrekking, wat het geval zal zijn bij een rivier waar het waterniveau op de benedenstroomse rand wordt bepaald door een volkomen overlaat, zoals bijvoorbeeld bij een stuw kan voorkomen. Aangenomen is hier dat de waterspiegel-daling op de benedenrand gelijk is aan het verschil in evenwichtsdiepte.

In figuur 2B is geschetst hoe de uiteindelijke evenwichtssituatie voor het geval met vaste waterspiegel eruit zal zien. Ter plaatse van de onttrekking zal een bodemverhoging  $\Delta z$  optreden tengevolge van de verhangtoename, terwijl over het gehele benedenstroomse gedeelte een constante bodemverhoging optreedt tengevolge van (en gelijk aan) de dieptevermindering  $\Delta h$ . De waarden hiervan kunnen als volgt worden uitgedrukt:

$$\Delta z = (i_1 - i_0) L = \left( \frac{Q_0}{Q_0 - \Delta Q} \right) i_0 L \quad (9)$$

$$\Delta h = h_{n0} - h_{n1} = \left( 1 - \frac{Q_0 - \Delta Q}{Q_0} \right) h_0 \quad (10)$$

In figuur 3 is in C aangegeven hoe de uiteindelijke evenwichtssituatie zal worden voor een geval met verlaagde waterspiegel op de benedenrand. De waterspiegelverlaging is hier aangenomen gelijk te zijn aan  $\Delta h$ , het verschil in evenwichtsdiepte voor de oude en nieuwe situatie. In feite zal overigens de waterspiegel-daling op  $t = 0$  in een dergelijk geval niet gelijk zijn aan  $\Delta h = h_{n0} - h_{n1}$ , maar  $\Delta h = h_{n0} - h'_{n1}$ , met

$$h'_{n1} = (Q_1^2 / B^2 C^2 i_0)^{\frac{1}{3}} \quad (11)$$

Aangezien de verhangtoename slechts langzaam plaatsvindt zal in eerste instantie de nieuwe evenwichtsdiepte worden bepaald door het oorspronkelijke verhang. Voor de eenvoud is hier geen rekening mee gehouden bij de waterspiegeldaling op de benedenrand.

Voor de bepaling van  $\Delta z$  en  $\Delta h$  kunnen de vergelijkingen (9) en (10) eveneens worden gebruikt. De werkelijke waarde van de waterspiegeldaling is overigens niet zo erg relevant, omdat een verschil hierin slechts een algehele verschuiving van bodem en waterspiegel in verticale zin inhoudt.

Het zal duidelijk zijn dat de verhouding van de waarden  $\Delta z$  en  $\Delta h$  bepaalt of bovenstrooms van het onttrekkingspunt erosie dan wel sedimentatie op zal treden (zie hiertoe figuur 3C).

In werkelijkheid zal bij onderzoek aan een lage rivier zowel voor een wiskundig als voor een schaalmodel de benedenrand niet ter plaatse van de uitstroming worden genomen, maar op een redelijke afstand benedenstrooms van het onttrekkingspunt. Uiteraard zal op een dergelijke rand gelden dat de waterstand beïnvloed wordt door de onttrekking, en in eerste instantie volgens de geldende  $Q$ - $h$  relatie.

Het kiezen van de benedenrand op één punt waar een dergelijke relatie bekend is, heeft dus zeker voordelen. Gebleken is dat in het algemeen, zowel voor het prototype als het schaalmodel, het waterstandsverschil  $\Delta h(Q)$ , verkregen uit de Q-h relatie, kleiner is dan het verschil in evenwichtsdiepte  $\Delta h$ .

Dit betekent dat de waterspiegel slechts gedeeltelijk zal dalen op de benedenrand, een combinatie van de gevallen 2B en 3C dus. Op lange termijn echter, vanaf het moment dat de invloed van de onttrekking op de bodemligging de benedenrand bereikt, zal de waterstand op deze rand gaan stijgen, totdat een nieuwe evenwicht is bereikt. Dit kan worden ingezien met behulp van figuur 2, door als benedenrand een punt te nemen op een afstand van bijvoorbeeld  $1/3 L$  van het onttrekkingspunt. Aanvankelijk daalt de waterstand (2A) maar uiteindelijk ontstaat de situatie als geschetst in 2B met gestegen waterspiegel.

Een dergelijke situatie is bij het huidige onderzoek opgetreden. De benedenrand, zowel voor de Zandgoot als voor het wiskundig model, ligt op enige afstand van het onttrekkingspunt. De waterstand daar zal in het prototype in eerste instantie een verlaging volgens de Q-h relatie ondergaan. De toename van het verhang zal zich echter in principe uitstrekken vanaf het onttrekkingspunt tot het uitstromingspunt (zeeniveau), en dientengevolge zal ook de waterstand op de "modelrand" na verloop van tijd gaan stijgen. De mate en het verloop van deze stijging zijn niet bekend; wél kan met behulp van de bovenstaande theoretische beschouwingen de evenwichtstoestand worden bepaald.

De benedenrand van de Zandgoot, bestaande uit de schuif aan het eind van de zandvang ligt op circa 35 m benedenstrooms van het onttrekkingspunt. De waterstand op de schuif wordt bepaald door de Q-h relatie ter plaatse. De schuifstand zelf werd tijdens de proeven niet gewijzigd. Deze situatie is geschetst in figuur 3D. De waterspiegeldaling op de rand is  $\Delta h(Q)$ , welke waarde kleiner is dan  $\Delta h = h_{n0} - h_{n1}$ . Tengevolge hiervan komt de bodem over de gehele lengte van de goot omhoog met een waarde  $\Delta h - \Delta h(Q)$ . Op het onttrekkingspunt komt daar nog eens de invloed van de verhangtoename  $\Delta z$  bij, als weergegeven door vgl. (9). Het diepteverschil op het onttrekkingspunt blijft uiteraard  $\Delta h$ .

Om het prototype goed weer te geven zou na verloop van tijd de waterstand op de "modelrand" moeten gaan stijgen tengevolge van de sedimentatie en de toename van het verhang. In de goot gebeurt dit uiteraard niet vanzelf, aangezien de schuif benedenstrooms van de zandvang ligt en de waterstand op de schuif geheel onafhankelijk is van het "sedimentgebeuren" bovenstrooms. Aangezien niet bekend is hoe het verloop van deze waterstand zou moeten zijn, is ook geen kunstmatige

bijregeling van de schuif toegepast. Tengevolge hiervan ontstaat dus een verschil in het verloop van de berekende bodemligging en de in de Zandgoot gemeten bodemligging. De gemeten bodemligging zal ten opzichte van de berekende bodemligging in verticale zin zijn verschoven (zie figuur 3D). Om deze reden is de absolute bodemligging bij de onttrekkingsproeven niet relevant, maar moeten (relatieve) bodemveranderingen in beschouwing worden genomen.

Met behulp van bovenstaande theorie kunnen schattingen worden gemaakt van aanzanding en erosie in het geval van wateronttrekking. Er dient echter te worden opgemerkt, dat de theorie alléén bruikbaar is voor evenwichtssituaties. Door het relatief trage karakter van de Nederlandse grote rivieren [12] en de relatief korte duur van onttrekking (enkele maanden per jaar) zal een dergelijke evenwichtstoestand in het prototype nooit optreden. In dit verband dient te worden opgemerkt, dat in de Zandgoot wél zo lang is doorgestroomd, dat voor elke toestand min of meer sprake was van een evenwichtssituatie.

## 2.2 Tijdsafhankelijke bodemveranderingen

Voor het bepalen van tussenliggende situaties wat betreft bodemligging en waterspiegel in het geval van wateronttrekking lenen bovenstaande beschouwingen zich niet. In hoeverre deze tussenliggende situaties van belang zijn hangt onder andere af van de (morfologische) reactiesnelheid van de rivier op gewijzigde stromingsomstandigheden. Is deze reactiesnelheid relatief klein dan mag worden verwacht dat deze situaties belangrijker zijn dan in het geval dat de reactiesnelheid relatief groot is. Voor een methode met betrekking tot het classificeren naar morfologische reactiesnelheid wordt verwezen naar [12]. Op grond van deze methode wordt bevestigd dat de Waal een langzaam reagerende rivier is, voornamelijk tengevolge van het kleine verhang en het relatief kleine sedimenttransport.

De bodemligging en de waterspiegel zowel van het prototype als van de Zandgoot kunnen voor tussenliggende situaties alleen worden gesimuleerd met behulp van een wiskundig model. Zoals reeds in de inleiding is beschreven is één van de belangrijkste motieven van het onderhavige onderzoek het toetsen van het wiskundig model ZANTRI, in het bijzonder wat betreft het tijdsafhankelijke gedrag van bodem en waterspiegel relatief kort na het begin van de onttrekking. Daartoe zijn met het wiskundig model volledige simulatieberekeningen uitgevoerd voor de drie onttrekkingsproeven in de zandgoot.

### 3. Het onderzoek in de Zandgoot

#### 3.1 Algemeen

Het onderzoek naar de gevolgen van wateronttrekking voor de morfologie ter ijking van het wiskundig model ZANTRI heeft plaatsgevonden in de Zandgoot van het Laboratorium de Voorst, van begin november tot eind december 1981. Het belangrijkste motief om de Zandgoot te gebruiken was het feit dat de omstandigheden hierin uitstekend beheerst kunnen worden. Zoals reeds in de inleiding vermeld, heeft een voorgaand modelonderzoek naar de morfologische gevolgen van wateronttrekking aan de Waal problemen opgeleverd met betrekking tot de nauwkeurigheid van de resultaten. Mede doordat de omstandigheden niet voldoende nauwkeurig in de hand konden worden gehouden liet bijvoorbeeld de reproduceerbaarheid van de referentieproeven te wensen over. De Zandgoot met zijn goed geconditioneerde omstandigheden wat betreft afvoer, waterstand, sedimenttransport, temperatuur e.d. biedt hiertoe veel betere mogelijkheden. Bovendien kan gebruik gemaakt worden van het geavanceerde meetsysteem, het computersysteem en de programmatuur voor de gegevensverwerking die in het kader van het T.O.W. werden ontwikkeld. Het uitsluiten van driedimensionale effecten, een van de problemen waarmee het voorgaande onderzoek M1442 eveneens te kampen heeft gehad, kan in de Zandgoot met de normale breedte bepaald niet worden gegarandeerd. In voorgaande onderzoeken, o.a. in het kader van T.O.W. is duidelijk gebleken dat driedimensionale effecten zeker een rol (kunnen) spelen. In het onderhavige onderzoek echter, met de goot versmald tot 0.5 m, bleek dit niet het geval te zijn. De beddingvormen in de goot bijvoorbeeld bleken zuiver tweedimensionaal, d.w.z. identiek over de gehele breedte van de goot, te zijn. In een ander deel van dit hoofdstuk zal dat nader worden aangetoond.

Een nadeel van het gebruik van de Zandgoot voor een dergelijk morfologisch onderzoek is dat de relatie tot het prototype door middel van "schalen" wat moeilijk te leggen is. In feite moet een dergelijk onderzoek daarom meer als op zichzelf staand worden beschouwd. Uiteraard kunnen met het rekenprogramma ZANTRI wel de optredende verschijnselen in de goot worden nagerekend. Met in achtname van de opgelegde randvoorwaarden zoals de bovenstroomse aanvoer van water en sediment, het onttrekkingsdebiet en de benedenstroomse waterspiegel. Om een inzicht te krijgen in de snelheid van de morfologische reactie, vertaald naar prototype omstandigheden, heeft de opdrachtgever verzocht toch enige aandacht te besteden aan het terugschalen van de gootomstandigheden naar het prototype. Hiertoe is

gebruik gemaakt van prototype-omstandigheden van de Waal, zoals gebruikt bij de onderzoeken M1251 en M1442 [1]. Deze gegevens zijn, tezamen met de basisgegevens van de referentietoestand voor het onderhavige onderzoek in de Zandgoot weergegeven in tabel 2. Op basis hiervan zijn de volgende schaalfactoren voor de diverse grootheden berekend:

lengte & breedte	$n_L$	=	480
hoogte	$n_h$	=	12,3
snelheid	$n_u$	=	1,87 (1,84)
debiet	$n_Q$	=	10940 (10860)
gemiddelde korreldiameter ( $D_m$ )	$n_D$	=	2,18
relatieve dichtheid sediment	$n_\Delta$	=	1
ruwheid	$n_C$	=	1,64 (6,25)
transport	$n_S$	=	1080 (1545)
tijd (hydraulisch)	$n_{th}$	=	261 (257)
tijd (morfologisch)	$n_{tm}$	=	2624 (1834)

Tussen haakjes zijn de waarden gegeven die de schaalfactoren op grond van theoretische overwegingen zouden moeten hebben. De ruwheidsschaal wijkt in sterke mate af van de theoretisch gewenste waarde voor het weergeven van het stroombeeld en de driedimensionale bodemtopografie. Aangezien dat laatste echter juist geen rol speelt bij het onderhavige onderzoek is het niet voldoen aan de ruwheidsschaal niet ernstig.

Voor het berekenen van de theoretische zogenaamde "ideale snelheidsschaal" is daarom gebruik gemaakt van de waarde  $n_C = 1,64$ , de werkelijk optredende waarde in plaats van de theoretische. Tenslotte dient te worden opgemerkt dat, met behulp van de  $D_{90}$  waarden voor prototype en Zandgoot, de  $C_{90}$  waarden werden bepaald op 75 en 90  $m^{1/2}/s$  respectievelijk, leidend tot een waarde  $n_\mu = 1.74$ .

### 3.2 Inrichting model en meetsysteem

De inrichting en de mogelijkheden van de bestaande Zandgoot zullen hier niet uitgebreid beschreven worden aangezien hieraan in diverse T.O.W. verslagen reeds voldoende aandacht is besteed (zie o.a. [5,6]). Wel zullen de speciaal aangebrachte voorzieningen voor het wateronttrekkingsonderzoek nader worden beschreven. Zoals vermeld was in het T.O.W. onderzoek, voorafgaand aan het onderhavige onderzoek, de Zandgoot versmald van de oorspronkelijke breedte van 1,5 m tot een breedte

van 0,5 m. Dit werd tot stand gebracht met behulp van perspex tussenwanden en een ondersteuningsconstructie van staalprofielen tussen de beide perspexwanden en de glazen gootwanden. Ter weerszijden van de versmalde goot ontstonden hierdoor loze ruimten, waarvan gebruik werd gemaakt om voorzieningen voor de wateronttrekking aan te brengen. Ter plaatse van het onttrekkingspunt werden compartimenten in de loze ruimten afgescheiden en werd een aantal gaten  $\phi$  0,10 m in beide perspexzijwanden geboord. De onderlinge afstand van de gaten in stromingsrichting bedroeg 0.21 m. De totale onttrekking (zie foto 1) vond plaats over een afstand van circa 0.70 m. Ongeveer driekwart van de te onttrekken hoeveelheid water vond evenwel plaats over een afstand van circa 0.30 m. Door aan beide zijden van de versmalde goot onttrekkingspompen te plaatsen kon op deze wijze het gewenste debiet worden onttrokken.

De onttrokken hoeveelheid water werd via slangen naar een meetconstructie aan het einde van de goot gebracht. Deze constructie bestond uit 2 instroombakken met beide een V-vormige meetstuw aan het eind. Via de bekende Q-h relatie van deze meetstuw kon het onttrekkingsdebiet direct worden bepaald door het aflezen van de waterstand bij de meetstuw. Het regelen van het onttrekkingsdebiet was mogelijk door het veranderen van de debietverhouding tussen de afvoerleiding naar de meetstuw en de vrije uitstroomleiding van de onttrekkingspompen, die water terugvoerde naar de compartimenten. De lokatie van de afsluiter waarmee de afvoerverdeling kan worden geregeld is in foto 2 aangegeven. Aan het bepalen van de benodigde hoeveelheid gaten voor het maximale onttrekkingsdebiet, de juiste afstellingen van de weerstanden in de afvoerleidingen per instelling van het gewenste onttrekkingsdebiet etc. is vóór het begin der werkelijke proeven extra aandacht besteed, om later ongewenste vertragingen te voorkomen. Een overzicht van de Zandgoot is in figuur 1 gegeven, terwijl foto's 1, 2 en 3 een impressie geven van de aangebrachte voorzieningen voor het onttrekken van water en van de meetstuw voor de debietcontrole.

Wat betreft het meetsysteem van de Zandgoot kan worden verwezen naar de T.O.W. verslagen, zie onder meer [5]. De uitvoering van een meting met de meetwagen omvatte de verzameling van de navolgende gegevens in de meetsectie van 14.75 m tot 44.75 m. (Voor de lokatie van het nulpunt zie figuur 1).

- het bemonsteren van de afvoer, de positie van de benedenstroomse schuif, het energieniveau op een tweetal plaatsen met een onderlinge afstand van 35 m; met het verschil in energieniveau werd het energieverhang bepaald.



- het meten van de bodemligging in drie langsraaien (provo's) en de waterspiegel in het midden van de goot (wapro) met een afstandsinterval van 0.01 m; de onderlinge afstand van de provo's bedroeg bij de metingen 0,17 m.

Direkt na de meting werden ter controle van het meetproces een aantal bewerkingen uitgevoerd. Berekend werden onder meer, de gemiddelde bodemligging, de gemiddelde waterdiepte, het verhang van het energieniveau, hydraulische straal van de bodem, C-waarde van de bodem, getal van Reynolds, getal van Froude en de Darcy-Weisbach coëfficiënt. Een voorbeeld van de printuitvoer is gegeven in bijlage A. De waterstand en de bodemliggingen zijn hierop slechts per meter afgedrukt.

Het dient te worden opgemerkt dat voor de berekende parameters als b.v. hydraulische straal, C-waarde etc. steeds het totale debiet, de gemiddelde diepte en gemiddeld verhang over de gehele lengte van de meetsectie wordt gebruikt door het verwerkingssysteem. Voor de onttrekkingsproeven geven de uitgevoerde resultaten daarom een onjuist beeld aangezien het gedeelte benedenstrooms van de onttrekking (punt 830) ruim 70% van het gehele meettraject beslaat. In een later stadium zijn daarom voor een aantal metingen de C-waarden, e.d., apart voor de gedeelten bovenstrooms en benedenstrooms van het onttrekkingspunt met de hand berekend.

### 3.3 Verwerking van de meetgegevens

Afgezien van de gebruikelijke verwerking van de meetgegevens, leidend tot de standaarduitvoer als beschreven in de voorgaande paragraaf, zijn op de verzameling meetgegevens nog een flink aantal bewerkingen losgelaten. Het belangrijkste doel hiervan was het "afvlakken" of uitmiddelen van de beddingvormen om een goede vergelijking met de resultaten van het wiskundig model mogelijk te maken. De afvlakkingsprocedure was eveneens nodig om de te verwachten sprong in het zandbed van de goot ter plaatse van het onttrekkingspunt goed te kunnen onderscheiden.

In de beginfase van het onttrekkingsonderzoek is getracht de bodemsprong, het verschil in waterdiepte én het verhang te detecteren door het meettraject te verdelen in secties: vóór (bovenstrooms) het onttrekkingspunt, een bodemstijgingsgebied en een (onbeïnvloed) gebied nà de bodemstijging. Zie de ter illustratie in figuur 5 aangegeven trajecten A, B en C. Voor elke sectie werd de bodemhelling de gemiddelde bodemhoogte én de lengte bepaald. In bijlage B is voor de eerste

30 uur van proef T2 hiervan een voorbeeld gegeven. De bodemdaling bovenstrooms van het onttrekkingspunt komt goed tot uitdrukking, maar de weergave van de bodemhelling is nogal warrig, waarschijnlijk omdat het traject relatief (te) kort is en het bodemverhang daardoor wellicht teveel wordt beïnvloed door de lokale beddingvormen. In het bodemstijgingsgebied is het omhoogkomen van de bodem inderdaad goed waarneembaar, maar wat betreft het verhang bestaat er tot ongeveer meting 40 nogal een sterke variatie, weer veroorzaakt door de relatief kleine lengte van het traject. Het beeld van de bodemstijging wordt overigens enigszins versluierd door het feit dat met toename van de tijd meer punten benedenstrooms worden meegerekend, waardoor het gemiddelde enigszins omlaag wordt getrokken. Het gebied benedenstrooms van de bodemstijging, dat nog niet beïnvloed wordt door de onttrekking, neemt uiteraard af in de tijd en verdwijnt uiteindelijk. Vanwege het feit dat met deze methode waterspiegelvariatiën en dus de waterdiepte-veranderingen niet worden gereflecteerd én vanwege bovengenoemde problemen is verder afgezien van deze bewerkingen.

Het filteren van de bodemregistraties ten einde de invloed van beddingvormen te verminderen is in het algemeen geen probleem indien een hoeveelheid metingen over een bepaalde tijdsperiode tezamen kunnen worden genomen om hieruit een gemiddelde te bepalen. Dat is bijvoorbeeld het geval voor de evenwichtssituatie, waarvoor de gemiddelde bodemligging én waterspiegel voor elke proef bepaald zijn uit een serie van 20 tot 30 evenwichtsmetingen. In bijlage C is een voorbeeld gegeven van een dergelijke bewerking voor proef T2, waarbij de berekende gemiddelde bodemligging steeds om de 0.25 m is weergegeven. Tevens zijn gegeven de berekende gemiddelde diepte en de helling van de waterspiegel beneden- en bovenstrooms van het onttrekkingspunt, en de in de tijd gemiddelde waterstanden in het onttrekkingspunt en aan de boven- en benedenrand van de meetsectie. De resultaten van de bovenbeschreven bewerkingen zijn voor de 6 afzonderlijke proeven verzameld in tabel 3.

De gemiddelde bodemligging tijdens evenwichtsomstandigheden is met behulp van de kleinste kwadratenmethode bepaald. Daarbij werden voor elke proef de bodemgegevens met een onderlinge afstand van 0.25 m gebruikt. Voor de proeven met onttrekking werd het meettraject gesplitst in een gedeelte boven- en benedenstrooms van het onttrekkingspunt. Voor het bovenstroomse gedeelte zijn de resultaten echter minder nauwkeurig vanwege de relatief kleine lengte van het traject. Deze resultaten zijn eveneens in tabel 3 afgedrukt. Het resultaat van deze kleinste kwadraten bewerking is nogal verrassend, aangezien in alle gevallen het bodemverhang 20 à 30% groter is dan het waterspiegelverhang. In de volgende paragraaf wordt hierop teruggekomen.

In bijlage D tenslotte is als voorbeeld voor proef T2 het waterstandsverloop in de punten 1,831 en 3001 weergegeven. Deze gegevens zijn gebruikt om de nauwkeurigheid van het evenwichtsverhang te controleren, als omschreven in de volgende paragraaf.

Het elimineren van de beddingvormen door middel van een tijdsgemiddelde uit een serie metingen is niet zinvol voor de metingen direct na begin (c.q. stopzetting) van de onttrekking. Aangezien de interesse uitgaat naar het tijdsafhankelijke verschijnsel betreffende het opbouwen van de "zanddrempel" benedenstrooms van het onttrekkingspunt, is een versluierend effect ten opzichte van middelen over een aantal metingen in de tijd ongewenst. Om deze reden is gekozen voor de methode waarbij de beddingvormen worden uitgefilterd door middel van bewerkingen van de bodemligging (plaatspunten) per enkele meting. Een simpel voorbeeld hiervan is het bepalen van een voortschrijdend gemiddelde voor de plaatspunten, welke methode voor de onderhavige proeven op verschillende manieren is toegepast om een optimale filtering te verkrijgen zonder al te veel verlies van het relevante signaal.

In eerste instantie werd gekozen voor een voortschrijdend gemiddelde over 101 punten waarbij de procedure driemaal werd herhaald. Als alternatief werd eenzelfde procedure toegepast voor een gemiddelde over 201 punten met herhalingsfactor 2 en over 301 punten, enkel en met eveneens een herhalingsfactor 2. De resultaten voor een van de metingen zijn weergegeven in figuur 4, waaruit blijkt dat de methode (2 \* 301) punten duidelijk de meeste afvlakkig geeft en (3 \* 101) punten de minste.

Een belangrijk punt is echter dat de discontinuïteit ter plaatse van het onttrekkingspunt niet al te veel wordt afgevlakt door de middelingsprocedure, aangezien de vorm en steilheid van de sprong in de bodem een der hoofdpunten van het onderzoek is. Daartoe is voor een fictieve bodemdiscontinuïteit nagegaan wat de invloed is van de voortschrijdend gemiddelde procedure met een variabel aantal punten en variabele herhalingsfactor. De resultaten zijn in figuur 5 weergegeven, waaruit blijkt dat de methode (3 \* 101) de bodemsprong het beste in tact laat. De methode (2 \* 301) vlakt weliswaar de beddingvormen goed af, maar laat ook weinig over van de discontinuïteit.

Behalve de procedure voor het voortschrijdend gemiddelde is nog gezocht naar een ander filter dat mogelijk selectiever werkt, met andere woorden een filter dat wél de duinen doet verdwijnen maar de discontinuïteit min of meer in stand laat.

Essentieel hiertoe is bekendheid met de frequentie, of eigenlijk de frequentieverdeling van het ingangssignaal, zijnde de bodemligging inclusief de beddingvormen. Voor het onderhavige onderzoek is geen frequentieverdeling gemaakt, maar is de duinlengte (gemiddeld 1.35 m) gebruikt voor een schatting van de gemiddelde frequentie en de uit te filteren frequentieband. Door middel van een juiste keuze van filter en afbreekfrequenties kan dan mogelijk de ruis worden geëlimineerd en wordt een uitgangssignaal verkregen waarin de discontinuïteit in stand wordt gehouden. In het onderhavige onderzoek is getracht met dergelijke filters een goed beeld van de tijdsafhankelijke bodemligging te krijgen. Het bleek echter nauwelijks mogelijk de beddingvormen te elimineren zonder de discontinuïteit al te sterk aan te tasten. Dit is wellicht een gevolg van het feit dat een dergelijke sterke discontinuïteit is opgebouwd uit een serie harmonischen door het gehele frequentiedomein. Bij het filteren verdwijnen er dan ook componenten uit deze serie, waardoor de afvlakking optreedt. In figuur 6 worden de resultaten gepresenteerd van een filter dat de discontinuïteit redelijk in tact laat, maar wat betreft het uitmiddelen van de beddingvormen nauwelijks betere resultaten geeft dan de voortschrijdende gemiddelde procedure.

Op grond van bovenstaande resultaten is gekozen voor de toepassing van de procedure van voortschrijdende gemiddelden. Op basis van de gemiddelde duinlengte van 1.35 m is nog een proef uitgevoerd met een middeling over  $(3 * 135)$  punten. Er wordt nl. véél demping verkregen indien de frequentie van het filter ongeveer gelijk is aan de frequentie van het signaal, m.a.w. als de lengte van het traject voor de voortschrijdende gemiddelden ongeveer gelijk aan de duinlengte is. In figuur 7 is voor een  $(3 * 101)$  methode het resultaat van de berekeningen van het voortschrijdend gemiddelde gegeven voor enkele metingen uit proef T2. In figuur 8 is het resultaat te vinden voor de berekening over  $(3 * 135)$  punten. De laatste methode geeft inderdaad méér afvlakking van de duinen, maar daarentegen wordt bij de eerste methode de discontinuïteit, zowel wat betreft hoogte als steilheid, beter in stand gehouden. Besloten is daarom voor de diverse proeven de  $(3 * 101)$  methode voor voortschrijdende gemiddelden toe te passen op de tijdsafhankelijke bodemligging, over de eerste 30 uur na het begin van de onttrekking.

Opgemerkt dient nog te worden dat eveneens berekeningen zijn uitgevoerd met de voortschrijdend gemiddelde  $(3 * 101)$  procedure, waarbij niet over de discontinuïteit werd heen gerekend, maar waarvoor het meettraject werd gesplitst in een gedeelte boven- en benedenstrooms van het onttrekkingspunt. Het enige resultaat hiervan is

echter dat in 150 punten (1,5 m) boven- zowel als benedenstrooms onttrekkingspunt géén voortschrijdend gemiddelde berekend kan worden terwijl in het overige gebied de resultaten hetzelfde zijn als voor de dóórgaande berekening.

#### 3.4 Resultaten en analyse van de metingen

Zoals reeds eerder vermeld is het onderhavige onderzoek in de Zandgoot uitgevoerd met, onder andere, als reden dat hierin driedimensionale effecten een minder grote rol zouden spelen dan bij het voorgaande wateronttrekkingsonderzoek in het Waalmodel (M1442). Om de invloed van driedimensionale effecten in de bodemligging na te gaan zou een proef met de volledige gootbreedte (1,5 m) en een proef met versmalde goot (0,5 m) moeten worden uitgevoerd. In dit verslag wordt de proevenserie met de versmalde goot beschreven.

In de figuren 9 en 10 zijn bodemliggingen weergegeven van twee specifieke metingen voor T01 op 21 november 1980. De signalen van de drie provo's, één in het midden en twee provo's op 0,17 m rechts respectievelijk links van het midden zijn elk apart gegeven. Uit de figuren blijkt dat de beddingvormen in de drie profielen nagenoeg identiek zijn. De conclusie kan dan ook zijn dat driedimensionale effecten in de goot in sterke mate zijn onderdrukt. Dit laatste geldt zeker voor meting 10 d.d. 21 november 1980 (figuur 10). Wel dient te worden opgemerkt dat in meting 1 (figuur 9) op ca. 27 m en op ca. 36 m een lichte tendens tot het vormen van "alternating bars" te vinden is. Verder treedt voor beide metingen het effect op dat de getrokken lijn (0,17 m links van het midden) in de dalen om en om vaak het hoogst respectievelijk het laagst ligt. Een lichte tendens naar een driedimensionaal patroon lijkt op grond hiervan dus ook aanwezig. Uiteraard zijn er meer geavanceerde technieken om aan te tonen dat de drie afzonderlijke signalen sterk gecorreleerd zijn. Op grond van visuele observatie van de figuren 9 en 10 kan echter met voldoende zekerheid worden geconcludeerd dat driedimensionale effecten een zeer ondergeschikte rol spelen. Om deze reden is besloten de drie signalen voor de metingen van de bodemligging bij de gegevensverwerking te middelen. Het resulterende gemiddelde signaal, al dan niet met toepassing van het filter van de voortschrijdende gemiddelden over ( $3 * 101$ ) punten, is gebruikt voor het bepalen van de tijdsafhankelijke bodemliggingen, de evenwichtssituatie en voor de toetsingen aan het wiskundig model ZANTRI.

In de figuren 11, 12 en 13 zijn de evenwichtsbodemliggingen voor de 6 afzonderlijke proeven T01, T1, T02, T2, T03 en T3 weergegeven. Eveneens zijn hierin de regressielijnen voor de bodemligging getrokken, verkregen via de kleinste

kwadratenprocedure. De resultaten van de proeven zijn samengevat in tabel 3. In tabel 4 worden tenslotte de berekende resultaten ten aanzien van de veranderingen in waterdiepte vergeleken met de meetresultaten. Voor de vergelijking kunnen de resultaten op verschillende manieren worden bewerkt.

In de evenwichtssituatie van de ZANTRI-berekening zal boven- en benedenstrooms van het onttrekkingspunt een uniforme stroming optreden. Het verschil in bodemhoogte ter plaatse van het onttrekkingspunt komt overeen met het verschil in waterdiepte boven- en benedenstrooms van het onttrekkingspunt. Doordat bij de meetresultaten geen exacte uniforme stroming bestond zal de verandering van de waterdiepte ter plaatse van het onttrekkingspunt afwijken van het verschil in gemiddelde waterdiepte van het traject bovenstrooms en benedenstrooms van de onttrekking. Op grond hiervan werd besloten de resultaten van de metingen op een aantal verschillende manieren te presenteren. In tabel 4 worden ten aanzien van de gootproeven de navolgende getallen gegeven:

- het waterdiepteverschil (= bodemhoogte verschil) ter plaatse van het onttrekkingspunt, berekend als niveauverschil tussen de regressielijnen door de meetpunten benedenstrooms en bovenstrooms van het onttrekkingspunt.
- het verschil in de gemiddelde waterdiepte van het traject bovenstrooms en benedenstrooms van het onttrekkingspunt.
- het verschil in de gemiddelde waterdiepte van het benedenstroomse traject tussen de proef met en zonder onttrekking van water.

Wordt ervan uitgegaan dat het programma ZANTRI onder meer de veranderingen in de waterdiepte als gevolg van wateronttrekking goed moet kunnen voorspellen dan ligt het voor de hand om voor de toetsing van het programma een vergelijking te maken tussen de berekende en gemeten verandering in de waterdiepte die na het instellen van de onttrekking in het benedenstroomse traject is opgetreden (eerste en laatste regel van tabel 4). Gesteld kan worden dat het rekenprogramma en de gootmetingen goed met elkaar overeenkomen.

Wat betreft een vergelijking tussen de berekende waterdiepteverschillen en de resultaten als vermeld op regel 2 en 3 van tabel 4 blijken de resultaten onderling meer te verschillen. Wellicht moet de oorzaak hiervan worden gezocht in het niet geheel uniform zijn van de stroming.

Wat betreft de veranderingen van het verhang wordt minder goed voldaan aan de theoretische verwachting. Op grond van het theoretische model zou het evenwichtsverhang benedenstrooms van het onttrekkingspunt moeten toenemen volgens vergelijking (7). Met andere woorden voor de proeven T1, T2 en T3 zou de verhangtoename ten opzichte van T01, T01 en T03 respectievelijk circa 18%, 33% en 5% moeten zijn. Uit tabel 3 blijkt voor het traject benedenstrooms van het onttrekkingspunt de wijziging in

- het bodemverhang voor de proeven T1, T2 en T3 respectievelijk 49%, 58% en -2% te bedragen
- het waterspiegelverhang voor de proeven T1, T2 en T3 respectievelijk -2%, 6% en 10% te bedragen
- het energieverhang voor de proeven T1, T2 en T3 respectievelijk 23%, 55% en -3% te bedragen.

Opgemerkt wordt dat het waterspiegelverhang op dezelfde wijze is bepaald als de evenwichtsbodemligging, namelijk door de toepassing van een kleinste kwadraten methode. De in tabel 3 vermelde waterspiegelverhangen voor het bovenstroomse en benedenstroomste traject betreffen de met de WAPRO gemeten waterstanden in respectievelijk de trajecten  $x = 0,01 \dots 7,51$  en  $x = 9,01 \dots 30,01$  vanaf het begin van de meetsectie. De begrenzing van deze trajecten zijn zo gekozen dat invloeden van de overgang van een laaggelegen bodemligging voor het onttrekkingspunt naar een hoger gelegen bodemligging nà het onttrekkingspunt verwaarloosd kunnen worden.

Met betrekking tot het verhang van de energielijn kan worden opgemerkt dat deze ook is berekend voor het bovenstroomse en benedenstroomse traject. De berekening van het energieverhang verliep als volgt. Uitgaande van de gemiddelde waterstanden in de punten 1,831 en 3001 van het meettraject en van de gemiddelde bodemhoogte voor deze punten tijdens de serie evenwichtsmetingen (zie voorbeeld bijlage C), werd met behulp van het debiet de snelheidshoogte in de punten 1,831 en 3001 berekend. Daarna kon de helling van de energielijn worden berekend. Daarbij dient te worden opgemerkt dat voor punt 831, het onttrekkingspunt, gerekend is met het volledige debiet van 0,160 m/s maar met de gemiddelde diepte voor het benedenstroomse traject, vanwege de positieve stuwkromme die bovenstrooms optreedt (zie ook figuren 2 en 3). Hiermee komt de relatief grote snelheidshoogte ter plaatse van het onttrekkingspunt goed tot uitdrukking. Een alternatieve methode is het gebruiken van de gemiddelde waterdiepte van boven- en benedenstrooms

traject voor het berekenen van de snelheidshoogte in punt 831, met het volledige debiet. Dit blijkt ook beter met de werkelijkheid overeen te komen, zie tabel 3.

Voorts moet worden opgemerkt dat de nauwkeurigheid van het energieverhang berekend op de voornoemde wijze niet erg groot is. Dit kan als volgt worden ingezien:

Gebruikmakend van de getallen in bijlage D is voor de punten 1,830 en 3001 de standaardafwijking berekend van de gemiddelde waterstand in de evenwichtssituatie. Dit bleek voor T2 b.v.  $0,4 \text{ à } 0,5$  cm per punt te zijn, wat voor het waterspiegelverhang over het bovenstroomse, benedenstroomse en totale traject een standaardafwijking van ca.  $0,95 * 10^{-3}$ ,  $0,43 * 10^{-3}$  en  $0,3 * 10^{-3}$  respectievelijk betekent! Het zal duidelijk zijn dat, door de grove berekening van de snelheidshoogte in het onttrekkingspunt, ook het energieverhang voor boven- en benedenstrooms traject niet erg nauwkeurig is.

Door deze variatie in energie- en waterspiegelverhang is het constateren van het al dan niet in evenwicht zijn van het verhang moeilijk. Op grond van evenwicht wat betreft sedimenttransport en waterdiepte wordt blijkbaar te snel geconcludeerd dat er een werkelijke evenwichtssituatie bestaat. Een trendmatige verandering in het energieverhang op de computeruitvoer tengevolge van aanpassingen in het bodemverhang wordt moeilijk onderkend ten gevolge van de grote standaardafwijking in waterspiegel, energiehoogte, c.q. verhangmetingen.

De serie metingen van de waterspiegel is eveneens gebruikt om na te gaan of de serie van 20 evenwichtsmetingen over een periode van ruim 3 uur een representatieve afspiegeling geeft van het werkelijke evenwicht. Het is n.l. mogelijk dat langperiodieke schommelingen optreden in het model en een serie metingen rond  $\frac{1}{4}$  T of  $\frac{3}{4}$  T, waarin T de periode is, zou dan een compleet verkeerd beeld van de evenwichtsligging geven. Aangezien de waterstanden gemiddeld over een 3-daagse periode in de evenwichtstoestand (vrijdag, zaterdag, zondag) nagenoeg identiek waren aan die over de serie evenwichtsmetingen kan worden geconcludeerd dat deze serie voldoende representatief is. Dat wil overigens nog niet zeggen dat geen langperiodieke verschijnselen optreden!

Het is opvallend dat voor alle proeven behalve T03/T3 het bodemverhang nogal sterk afwijkt van het waterspiegel- c.q. energieverhang. In proef T01, en T02



in mindere mate, is duidelijk een negatieve stuwkromme aanwezig, terwijl in T1 bovenstrooms van het onttrekkingspunt nog een positieve stuwkromme optreedt. Deze verschijnselen duiden erop dat, ondanks het evenwicht tussen sedimenttoevoer bovenstrooms en sedimentafvoer vanuit de zandvang, blijkbaar toch nog geen werkelijke evenwichtssituatie is bereikt voor de diverse proeven. De aanpassing van de waterdiepte treedt klaarblijkelijk veel sneller op dan de aanpassing van het (bodem)verhang.

Tenslotte dient te worden opgemerkt dat de Zandgoot wat betreft de sedimenttransportkarakteristieken niet geheel voldoet aan het gesimplificeerde model als gepresenteerd in paragraaf 2.1. Het transport voor de goot wordt het beste benaderd door de relatie van Ackers en White (zie hoofdstuk 4), waarin onder andere een term voor het begin van beweging aanwezig is. Op grond hiervan is wellicht een verhangtoename volgens het theoretische model van paragraaf 2.1 geen reële verwachting.

Het tijdsafhankelijke verloop van de bodemligging voor de proeven T1, T2 en T3 gefilterd met de methode van voortschrijdende gemiddelden over 101 punten met herhalingsfactor 3, is voor verschillende tijdstippen gegeven in de figuren 14 t/m 19. Zowel de sprong in de bodem ter plaatse van het onttrekkingspunt als het voortschrijden van de bodemverstoring kunnen hierin goed worden onderscheiden. Door de relatief kleine wateronttrekking is voor proef T3 het beeld wat minder duidelijk.

In de figuren 20 tot en met 25 tenslotte is de tijdsafhankelijke bodemligging weergegeven in de punten 501/1501 en 801/901 voor de proeven T1, T2 en T3. Hierin kan, zeker voor T1 en T2, de tijdsafhankelijke opbouw van de sprong in de bodem goed worden gevolgd. Aangezien zuivere, ongefilterde metingen zijn gebruikt wordt het beeld nog wel enigszins vertroebeld door de beddingvormen.

Tenslotte dient te worden opgemerkt dat de sprong in de bodem ter plaatse van het onttrekkingspunt zich redelijk snel en over relatief korte afstand voltrekt. Uit de figuren 11 tot en met 13 blijkt dat de bodemverhoging grotendeels optreedt tussen de punten 750 en 900, een afstand van 1,5 m. De figuren 14, 16 en 18 vertonen een dergelijk beeld en tonen verder duidelijk aan dat het proces van het opbouwen van de sprong in de goot vrijwel onmiddellijk optreedt, binnen  $\frac{1}{2}$  à 1 uur na het begin van de onttrekking. Dit laatste wordt, zij het in minder duidelijke mate, bevestigd door de figuren 21, 23 en 25. Rekening houdend met de in hoofdstuk 3 gegeven tijdschaal voor het morfologisch proces betekent dit evenwel voor de Waal een opbouw van de drempel in 50 à 100 dagen.

#### 4. Het wiskundig modelonderzoek

##### 4.1 Algemeen

Ter toetsing van het rekenprogramma ZANTRI zijn de morfologische gevolgen van wateronttrekking in een waterloop met de afmetingen van de Zandgoot ook met voornoemd programma berekend. De tijdsafhankelijke bodemvariaties na het instellen van de wateronttrekking zijn berekend. De tijdsafhankelijke bodemvariaties optredend via het stopzetten van de onttrekkingsproeven zijn daarentegen niet met het wiskundig model nagebootst. Wél is steeds eenzelfde serie intensieve metingen als bij de onttrekkingsproeven zélf over de eerste 30 uur uitgevoerd zodat de meetgegevens beschikbaar zijn voor eventuele latere verwerking en vergelijking.

Het wiskundig model is gebaseerd op de bewegings- en continuïteitsvergelijkingen voor het water en het sediment [9,11]. Als randvoorwaarden vereist het kennis van de waarde van de afvoer en de benedenstroomse waterstand ( $Q$ - $h$  kromme), terwijl als beginvoorwaarde kennis noodzakelijk is van de initiële bodemligging. Op het onttrekkingspunt moet uiteraard de waarde van het te onttrekken debiet worden opgegeven. Een essentiële onderdeel van het wiskundig model is voorts de te gebruiken transportformule. Hiervoor zijn verschillende mogelijkheden beschikbaar. De keuze wordt in de volgende paragraaf toegelicht. Voor een meer uitgebreide beschrijving van de uitgangspunten, de rekenmethode en de mogelijkheden van genoemd wiskundig model wordt tenslotte verwezen naar de literatuur [3, 9, 10, 11].

In paragraaf 2.1 wordt nader ingegaan op enkele aangebrachte wijzigingen in het rekenprogramma, noodzakelijk om berekeningen voor de Zandgoot mogelijk te maken. Tevens dient te worden opgemerkt dat in de gebruikte versie van ZANTRI een andere methode voor het oplossen van de bodemcontinuïteitsvergelijking wordt toegepast dan in vroegere versies. Ter verhoging van de rekennauwkeurigheid wordt sinds eind 1979 de zogenaamde "modified lax" oplossing in ZANTRI gehanteerd met een rekenschema dat het behoud van massa waarborgt. Tevens worden hierbij discontinuïteiten in de bodem minder sterk afgevlakt. Tenslotte wordt in de tegenwoordige versie van ZANTRI afgezien van het onmiddellijk, op  $t = 0$ , aanbrengen van een bodemsprong ter plaatse van een interne rand (in dezen het onttrekkingspunt). De bodemligging en de tijdsafhankelijke variaties ter plaatse van de interne rand worden niet meer beheerst door de aanname dat  $v_{\text{bovenstr}} = v_{\text{benedenstr}}$

(omdat  $S_{\text{bov.}} = S_{\text{ben.}}$  ), maar op de bovenrand van het benedenstroomse gedeelte wordt gesteld dat niet aan  $S = A \bar{u}^{-b}$  (vgl. 2a) voldaan hoeft te worden. Het transport dat het benedenstroomse vak binnenkomt is slechts afhankelijk van de toevoer van bovenstrooms. Het verschil met de transportcapaciteit wordt in het eerste (reken)vak opgevangen. In feite wordt op deze wijze een geleidelijke overgang gecreëerd van omstandigheden behorend bij de stroming zonder onttrekking naar omstandigheden met onttrekking. De lengte waarover de overgang plaatsvindt bedraagt eenmaal de maaswijdte. Op de interne rand traden in het verleden plotselinge wijzingen op.

Een vergelijking van de resultaten van het wiskundige model met de meetresultaten in de Zandgoot wordt in hoofdstuk 5 beschreven.

#### 4.2 Aanpassingen wiskundig model en randvoorwaarden voor de Zandgoot

Zoals in de voorgaande paragraaf vermeld, is de juiste keuze van een sedimenttransportformule een essentiële onderdeel bij de opzet van het wiskundig model. In hoofdstuk 3 is al aangegeven dat het transport in de Zandgoot het beste beschreven kan worden met de relatie van Ackers en White [7]. Hiertoe zijn enige toetsingsberekeningen uitgevoerd met de bekende basisgegevens van de referentieproef in de Zandgoot (zie tabel 2), waarbij de voorspellende waarde wordt onderzocht van de transportformules van Meyer-Peter/Müller, Ackers/White, Engelund/Hansen en Einstein/Brown.

Eveneens werd gebruik gemaakt van ervaringen uit het T.O.W. onderzoek, waarbij ook gebleken was dat over het algemeen Ackers/White de beste beschrijving van het transport gaf. Dit is te zien in de figuren 26 en 27, waarin de rekenresultaten voor de referentieproef in de Zandgoot eveneens zijn aangegeven.

Het zal duidelijk zijn dat inderdaad Ackers/White het werkelijk optredende transport het beste benadert. Er is daarom besloten voor het onderhavige wiskundig modelonderzoek gebruik te maken van deze transportrelatie, zij het met een vermenigvuldigings-correctiefactor van 0,78. Deze factor is bepaald als de verhouding tussen het werkelijk gemeten transport in de goot en het met Ackers en White voorspelde transport onder evenwichtsomstandigheden.

De Ackers/White transportrelatie heeft de volgende gedaante [6]:

$$S = B \frac{C}{1-\epsilon} \bar{u} D_{35} (\bar{u}/u_{*})^n \left( \frac{F}{A} - 1 \right)^m \quad (12)$$

$$\text{waarin: } F_{gr} = \bar{u} (g\Delta D_{35})^{-\frac{1}{2}} (\bar{u}/u_{*})^n (\sqrt{32} \log 10\bar{h}/D_{35})^{n-1} \quad (13)$$

$$A = 0,23/\sqrt{D_{gr}} + 0,14 \quad (14)$$

$$m = 9,66/D_{gr} + 1,34 \quad (15)$$

$$n = 1 - 0,56 \log D_{gr} \quad (16)$$

$$\log C_{gr} = 2,86 \log D_{gr} - (\log D_{gr})^2 - 3,53 \quad (17)$$

$$D_{gr} = D_{35} [g\Delta/v^2]^{1/3} \quad (18)$$

Om het transport te kunnen berekenen dient dus allereerst de dimensieloze korreldiameter  $D_{gr}$  te worden bepaald, alsmede de factoren  $A$ ,  $m$ ,  $n$ ,  $C_{gr}$  en de transportparameter  $F_{gr}$ .

Voor  $D_{gr} \geq 60$  geldt:

$$n = 0$$

$$A = 0,17$$

$$m = 1,5$$

$$C_{gr} = 0,025$$

Het programma ZANTRI gaat er vanuit dat de breedte/diepte verhouding van de rivier, c.q. kanaal, in behandeling zó groot is dat met de gemiddelde diepte gerekend kan worden in plaats van met de hydraulische straal. Dit is voornamelijk van belang in de wrijvingsterm van de bewegingsvergelijking voor het water. Aangezien in de Zandgoot de B/h verhouding bij deze proeven ongeveer 1 was, moesten flinke aanpassingen en correcties in het rekenprogramma worden aangebracht om de stuwkrommeberekening, en resulterend dus ook de transport- c.q. bodemveranderingsberekeningen, goed te doen verlopen. Gebruik is gemaakt van een procedure die bij de gegevensverwerking van de zandgootmetingen standaard wordt toegepast om de hydraulische straal te berekenen. Hierbij wordt het gootprofiel verdeeld in 3 secties volgens de methode van Einstein, aannemende dat de gemiddelde stroomsnelheid in elk der secties gelijk is (zie figuur 28). De volgende vergelijkingen zijn van toepassing ter bepaling van de hydraulische straal van wand en bodem [6]:

$$R_w = Q^2 / [B^2 h^2 i \{18 \log (12 R_w / (K_w + \delta_w / 3,5))\}^2] \quad (19)$$

$$\text{met } \delta_w = 11,6 \nu / \sqrt{g R_w i} \quad (20)$$

$$R = h - 2 R_w h/B \quad (21)$$

Voor de wandruwheid van de goot ( $k_w$ ) wordt een waarde van  $0,5 * 10^{-3}$  m, ofwel 0,5 mm, aangehouden. Het zal duidelijk zijn dat een eerste ruwe schatting van  $R_w$  nodig is om met behulp van de vergelijkingen (19) en (20), en bekende waarden voor Q, B, h en i, iteratief tot een juiste waarde van  $R_w$  te komen. Er dient te worden opgemerkt dat in het algemeen de bijdrage van  $k_w$  in vergelijking (19) klein is en om die reden kan worden verwaarloosd. Aangezien de procedure in het rekenprogramma ZANTRI is ingebouwd, kon de term evenwel gemakkelijk worden meegenomen. Voor een eerste schatting van  $R_w$  werd de halve diepte aangehouden, waarmee in de meeste gevallen vrij snel de juiste waarde werd bereikt (7 à 8 iteraties).

Nadat met vergelijking (21) de "totale" hydraulische straal was berekend werd een correctiefactor R/h bepaald die in het programma werd toegepast om de gemiddelde diepte te vervangen door de hydraulische straal. Berekeningen toonden aan dat, met de beschreven correctieprocedure, de waterspiegel in de zandgoot voldoende nauwkeurig kon worden beschreven.

De lengte van het gesimuleerde stuk zandgoot in het wiskundig model bedraagt 55,5 m. De benedenrand van het model ligt op punt 47,50 m, ongeveer overeenkomend met de meest benedenstroomse pitotbuis waar waterstand en energiehoogte in de zandgoot werden geregistreerd. Ter plaatse van deze rand moet als benedenrandvoorwaarde een waterstand, of waterstandsverloop in de tijd, worden opgegeven. Als alternatief kan voor deze rand een Q-h relatie worden opgelegd. Uit het waterstandsverloop blijkt, zie b.v. bijlage 4, dat de waterstand op de benedenrand niet constant in de tijd is, onder meer als gevolg van de langsttrekkende beddingvormen. De variaties zijn echter zó klein, en de gemiddelde waarde voor de evenwichtssituatie (79,41 cm voor T2) wordt zó snel bereikt (ca. 1 uur voor alle proeven), dat vanaf het begin van de onttrekking een constante waterstand op de benedenrand kon worden opgelegd. Dit is gebeurd door het definiëren van een afvoerwaterstandsrelatie voor de, tijdens de proeven in te stellen, afvoeren ter plaatse van de benedenstroomse pitotbuis.

Aan de bovenrand van het wiskundig model moeten als bovenrandvoorwaarden de afvoer en de zanddosering worden opgelegd. Voor alle proeven zijn dit constante

waarden, met name een afvoer  $Q = 0,160 \text{ m}^3/\text{s}$  en een transport  $S = 1,296 \text{ m}^3/\text{dag}$ . In het rekenmodel werd de bovenrand aanvankelijk ter plaatse van het nulpunt van de goot aangenomen. Doordat in de goot de voornoemde randvoorwaarden meer bovenstrooms waren gelegen en doordat stuwkromme effecten in het bovenstroomse gedeelte een grotere snelheid tot gevolg hadden ontstond ter plaatse van het nulpunt van de goot een verschil in transportcapaciteit. In de gootproeven was de laatste door het optreden van grotere stroomsnelheden groter. Op grond hiervan werd besloten het rekenmodel in bovenstroomse richting te verlengen. Het begin van het rekenmodel werd ter plaatse van de zanddosering gelegd, 8 m bovenstrooms van het nulpunt. Op deze wijze werd gezorgd voor identieke boven-randvoorwaarden in het rekenmodel en het hydraulisch model.

Ter plaatse van het onttrekkingspunt moeten zogenaamde interne randvoorwaarden worden opgelegd. Voor het onderhavige onderzoek betekent dat niets anders dan het opleggen van het onttrekkingsdebiet op de juiste plaats. Verdere aannamen, die al in het wiskundig model zijn ingebouwd, zijn de continuïteit van het transport ter plaatse van de interne rand (het onttrekkingspunt) en een geleidelijke aanpassing van de transportcapaciteit over het vak direkt benedenstrooms van het onttrekkingspunt.

Voor het starten van de berekeningen is een beginvoorwaarde nodig wat betreft de bodemligging. Uit voorgaand T.O.W. onderzoek en uit de instroomfase van dit onderzoek bleek een gemiddeld energielijnverhang van circa  $1,68 \times 10^{-3}$  aanwezig voor de evenwichtssituatie zonder onttrekking. Aangenomen werd dat deze waarde eveneens gebruikt kon worden voor het bodemverhang, waarmee tezamen met de benedenstroomse waterstand en de gemiddelde diepte van 0,48 m de beginbodemligging in het wiskundig model was bepaald. Voor zowel T1, T2 als T3 is deze beginvoorwaarde gebruikt. Bij de vergelijking van de resultaten van het wiskundig model en de Zandgoot bleek later dat er toch afwijkingen optraden in het bodemverhang. Zoals reeds in hoofdstuk 3 is beschreven bleek er wat betreft de verhangen nog geen evenwicht te zijn voor de diverse proeven. Ook waterspiegel- en energielijnverhang verschilden, en varieerden voor de onderlinge referentieproeven T01, T02 en T03, hoewel hiervoor een gemiddelde waarden van ca.  $1,58 \times 10^{-3}$  redelijk zou zijn. Het bodemverhang voor de proeven zonder onttrekking bleek echter in sterke mate te variëren, zodat een kleinste kwadratenmethode op de gemiddelde bodemligging voor de series evenwichtsmetingen was toegepast. Om de invloed van het beginbodemverhang op de rekenresultaten na te gaan zijn de berekeningen herhaald met een bodemverhang van  $1,95 \times 10^{-3}$ ,  $1,89 \times 10^{-3}$ ,  $1,88 \times 10^{-3}$  voor respectievelijk de proeven T1, T2 en T3.

De berekeningen met ZANTRI, uitgaande van een bodemverhang van  $1,58 \times 10^{-3}$ ,  $1,95 \times 10^{-3}$ ,  $1,89 \times 10^{-3}$  en  $1,88 \times 10^{-3}$  voor respectievelijk de proeven T1, T2 en T3 verschillen echter maar weinig van elkaar (zie figuur 29...31, waar de berekende bodemligging wordt weergegeven voor het tijdstip  $t = 6$  uur na het instellen van de onttrekking). Op grond van de geringe verschillen is besloten alleen de resultaten van de laatstgenoemde berekeningen te vergelijken met de resultaten van het hydraulisch model.

De berekeningen voor de onttrekkingsproeven zijn uitgevoerd met een constante C-waarde van  $28,5 \text{ m}^{\frac{1}{2}}/\text{s}$ , een waarde verkregen uit de referentieproef T01 in de Zandgoot. Berekening van de C-waarde per meting vindt standaard plaats in de gegevensverwerking (zie Bijlage 1). Zoals reeds eerder vermeld zou voor de onttrekkingsproeven het meettraject echter gesplitst moeten worden in een gedeelte bovenstrooms en een gedeelte benedenstrooms van het onttrekkingspunt aangezien zowel afvoer als diepte en verhang verschillen. Met de hand zijn enige globale proefberekeningen uitgevoerd om na te gaan in welke mate de C-waarden in de beide trajecten afwijken van de referentiewaarde.

Afhankelijk van de gebruikte waarden voor het verhang variëren de C-waarden van ca.  $26 \text{ m}^{\frac{1}{2}}/\text{s}$  in het benedenstroomse traject tot ca.  $30 \text{ m}^{\frac{1}{2}}/\text{s}$  bovenstrooms. Op grond van het feit dat deze waarden niet sterk afwijken van de gebruikte referentie C-waarde van  $28,5 \text{ m}^{\frac{1}{2}}/\text{s}$  en vanwege de genoemde onzekerheden in de gemeten verhangen is besloten gedurende de berekeningen een constante C-waarde (=  $28,5 \text{ m}^{\frac{1}{2}}/\text{s}$ ) te gebruiken.

Dit is temeer een reëel uitgangspunt daar voor een prototypesituatie vaak ook niet kan worden voorspeld hoe de C-waarden boven- c.q. benedenstrooms van het onttrekkingspunt zich zullen ontwikkelen en aldus ook met een constante C gerekend zal (moeten) worden.

Tenslotte dient te worden vermeld dat de berekeningen zijn uitgevoerd met een plaatsstap  $\Delta x = 0,5 \text{ m}$  en een tijdstap  $\Delta t = 0,166 \text{ uur} = 10 \text{ minuten}$ . Ten gevolge van automatische tijdstapaanpassingen in het rekenprogramma, om instabiliteiten te vermijden, vinden de berekeningen en dus de uitvoer echter niet altijd op een veelvoud van 10 minuten plaats. Zoals in het volgende hoofdstuk zal blijken bemoeilijkt dat de vergelijking met de meetresultaten enigszins.

## 5. Vergelijking wiskundig model met de metingen in de Zandgoot

### 5.1 Algemeen

In dit hoofdstuk worden de resultaten van de berekeningen met het wiskundig model, gebaseerd op het morfologische programma ZANTRI, getoetst aan de meetresultaten voor de drie onttrekkingsproeven in de Zandgoot. Voornamelijk zal aandacht besteed worden aan de tijdsafhankelijke bodemveranderingen, terwijl ook naar het waterstandsverloop en het verloop van de waterdiepte op enige relevante punten zal worden gekeken.

Zoals in hoofdstuk 3 reeds uitgebreid is beschreven, moesten de metingen van de bodemligging in de Zandgoot worden gefilterd alvorens deze te kunnen gebruiken voor de toetsing. Dit is een direct gevolg van de aanwezigheid van de beddingvormen in de goot. De tijdsafhankelijke bodemliggingen, als gemeten over de initiële periode van 30 uur na begin van de onttrekking, zijn hiertoe bewerkt met behulp van een voortschrijdend gemiddelde procedure in de plaats. De evenwichtsbodemliggingen zijn bepaald door middel van een tijdsgemiddelde over een serie evenwichtsmetingen.

Zoals reeds vermeld, is de invloed van driedimensionale effecten op de gemeten bodemligging in de goot vrijwel verwaarloosbaar. Op grond hiervan zijn de gemeten drie bodempunten per dwarsprofiel gemiddeld, en is een goede toetsing aan het één-dimensionale morfologisch model mogelijk.

### 5.2 Resultaten voor de verschillende onttrekkingsproeven

In de figuren 32...34 zijn de resultaten van de berekeningen met het wiskundig model gegeven voor de onttrekkingsproeven T1, T2 en T3. De opbouw en de tijdsafhankelijke voortplanting van de "zanddrempel" komen hierin goed tot uitdrukking. De sprong in de bodem ter plaatse van het onttrekkingspunt bouwt zich snel op tot de uiteindelijke waarde. Dit vindt zijn oorzaak in het feit dat het verschil in transportcapaciteit tussen de bovenrand en benedenrand van het eerste vak benedenstrooms van het onttrekkingspunt direct wordt gebruikt om de bodemligging in dat vak aan te passen.

In de figuren 35 ... 49 zijn de gefilterde metingen van de bodemligging in de Zandgoot tezamen met de berekeningsresultaten van het wiskundig model uitgezet. Zoals reeds in hoofdstuk 4 is vermeld, wordt in het wiskundig model soms (automatisch) tijdstaapaanpassing toegepast, om instabiliteiten in de berekeningen



te voorkomen. Als criterium voor de tijdstapaanpassing wordt het zogenaamde Courant getal dat voor stabiliteit steeds kleiner dan één moet zijn, gehanteerd. Het gevolg hiervan is dat de computeruitvoer soms niet exact op de gewenste tijdstippen uitvoer kan leveren. Ook wat betreft de metingen in de Zandgoot is het tijdschema van opvolgende metingen niet altijd even regelmatig. Aldus kunnen kleine verschillen optreden in de tijdstippen van met elkaar te vergelijken meet- en rekenresultaten.

Uit de figuren kan worden geconcludeerd dat de resultaten van de metingen en de berekeningen redelijk goed met elkaar overeenkomen. Zeker de hoogte van de bodemsprong en de bodemligging in zowel boven- als benedenstrooms gedeelte worden goed weergegeven. De voortplantingssnelheid van de bodemverstoring blijkt in werkelijkheid groter te zijn dan met het wiskundig model wordt berekend voor de proeven T1, T2 en T3. Wat betreft de steilheid van de sprong kan uiteraard geen uitspraak worden gedaan aangezien deze in het wiskundig model als lokale discontinuïteit wordt behandeld.

Tenslotte kan uit de figuren 35 ... 49 goed worden afgelezen dat de voortplantingssnelheid van de bodemverstoring zowel voor het wiskundig model als de onttrekkingsproeven in de goot niet of nauwelijks afhankelijk is van het onttrekkingsdebiet. In tegenstelling tot de hoogte van de sprong in de bodem is voor alle drie proeven de voortplantingssnelheid van het front nagenoeg identiek. De oorspronkelijke stromingscondities, watersnelheid, diepte, sedimenttransport spelen hierin een dominante rol.

De berekende evenwichtsliggingen met behulp van het wiskundig model tezamen met de gemiddelde bodemligging uit de serie evenwichtsmetingen zijn voor de proeven T1, T2 en T3 respectievelijk gegeven in de figuren 11, 12 en 13. Geconcludeerd mag worden dat het wiskundig model de evenwichtsligging van de bodem, zowel bovenstrooms als benedenstrooms van het onttrekkingspunt, vrij goed beschrijft. Wel is duidelijk te zien dat voor de proeven T1 en T2 het uiteindelijke bodemverhang benedenstrooms van de onttrekking door het rekenprogramma wordt onderschat; het gemeten verhang blijkt steiler te zijn dan het verhang volgens de berekeningen. Dit is wellicht deels een gevolg van het feit dat gerekend is met de referentiewaarde voor de Chézy-coëfficiënt, terwijl in werkelijkheid de C-waarde benedenstrooms van het onttrekkingspunt zal afnemen. Verder blijkt uit de figuren 29...31 dat de steilheid van het bodemverhang benedenstrooms van het onttrekkingspunt en berekend met het programma ZANTRI enigszins toeneemt indien het initiële bodemverhang dat in het programma wordt ingevoerd, toeneemt.

Een alternatieve berekening met het wiskundig model werd uitgevoerd voor proef T2 om na te gaan of de afwijking in het berekende verhang benedenstrooms van de onttrekking een gevolg was van de gebruikte transportformule. Daartoe is de formule van Ackers/White vervangen door de transportrelatie van Engelund/Hansen [7]. Uit de resultaten, zie figuur 50, bleek dat het bodemverhang benedenstrooms nauwelijks toenam, maar dat de bodemverandering qua hoogte werd overdreven bij gebruik van Engelund/Hansen. Aangezien deze transportrelatie overigens voldoet aan het theoretische model zoals beschreven in hoofdstuk 2 is de bodemsprong  $\Delta h$  ter plaatse van het onttrekkingspunt gelijk aan de theoretische waarde van 0.12 m.

Met betrekking tot de waterstanden worden in de figuren 51...56 de gemeten en berekende waterstanden in de meetpunten 1 en 3001 met elkaar vergeleken. Voorts is voor de proeven T01/T1 en T02/T2 het verloop van de waterstand in het meetpunt 830 juist bovenstrooms en juist benedenstrooms van de onttrekking weergegeven in de figuren 57...60. Het verloop van de gemeten en berekende waterstanden in voornoemde punten voor proef T03/T3 is identiek, zij het dat de waterstandsverandering ten gevolge van de onttrekking geringer zal zijn doordat de hoeveelheid onttrokken water geringer is.

Uit de figuren kan worden afgeleid dat de tijdsafhankelijke verandering in de meetpunten 1 en 830 door het rekenprogramma goed wordt weergegeven.

Tenslotte wordt het verloop van de waterdiepte voor de meetpunten 1, 800, 900 en 3001 voor de proeven T01/T1, T02/T2 en T03/T3 in de figuren 61...72 weergegeven. De tendens van de zich wijzigende waterdiepten in de verschillende trajecten wordt door het rekenprogramma goed weergegeven. In enkele gevallen voorspelt het rekenprogramma grotere waterdiepten in meer bovenstrooms gelegen punten (zie bijvoorbeeld figuur 61, 62, 66). De oorzaak hiervan moet gevonden worden in de aanname die in het rekenmodel ten aanzien van de Chézy-waarde wordt gedaan. In het rekenmodel wordt verondersteld dat de Chézy-waarde in de hele goot vóór en tijdens het onttrekken constant is. Op eenvoudige wijze kan evenwel worden aangetoond dat de Chézy-waarde in de goot door twee aspecten wordt beïnvloed.

Enerzijds zal direkt na het begin van de onttrekking de in de goot aanwezige beddingvorm niet zijn veranderd, terwijl de waterdiepte als gevolg van de onttrekking in een gedeelte van de goot is afgenomen. Anderzijds zal de grootte van de beddingvorm zich benedenstrooms van het onttrekkingspunt gaan aanpassen

aan de nieuwe stromingscondities. In het onderhavige geval zal daar een kleinere beddingvorm ontstaan.

Het eerstgenoemde effect zorgt er via de definitie van de Chézy-waarde,  $C = 18 \log (12 h/k)$ , voor dat de Chézy-waarde direkt na het onttrekkingspunt afneemt. Een lagere C-waarde leidt tot grotere waterdiepten in vergelijking tot een konstante C-waarde. Het tweede aspect zorgt ervoor dat de Chézy-waarde toeneemt (kleinere k), resulterend in een kleinere waterdiepte. Helaas kan vooraf niet worden aangegeven of in de uiteindelijke toestand na de initiële daling van de waterstand een grotere dan wel kleinere waterdiepte in de verschillende meetpunten zal worden gevonden. Wel kan worden vastgesteld dat direkt na het instellen van de onttrekking in de meer bovenstrooms gelegen punten ten opzichte van de berekening een grotere waterdiepte zal worden gevonden, omdat dan nog geen aanpassing van de beddingvorm heeft plaatsgevonden, zie de figuren 61, 65 en 69.

Uit een nadere analyse van het verloop van de bodemhoogten (zie de figuren 32...49) en het verloop van de waterdiepten (zie de figuren 61...72) kan worden afgeleid dat de in de inleiding beschreven toestand van figuur 3D in de Zandgoot optreedt.

In de meetpunten 1 en 800 blijkt de bodemligging na het instellen van de onttrekking aanvankelijk konstant te zijn (zie met name de figuren 35...39, 40...44 en 45...49). De waterstand in deze punten neemt direkt na het instellen van de onttrekking eerst af om daarna geleidelijk toe te nemen tot een nieuwe evenwichtswaarde, vergelijk de beginwaterstanden van de figuren 51, 53, 55 en 57...60 met de in tabel 3 gegeven waterstanden. Voor bijvoorbeeld proef T02/T2 ligt de evenwichtswaarde voor punt 1 bij de metingen op circa 0,8475 m. In de uiteindelijke evenwichtstoestand tijdens het onttrekken is zowel de bodem als de waterstand in het meetpunt 1 gezakt ten opzichte van de beginsituatie, overeenkomstig figuur 3D.

De geleidelijke toename van de waterdiepte in de meetpunten 1 en 800 is een gecombineerd gevolg van:

- de opbouw van een hogere bodemligging benedenstrooms van het onttrekkingspunt in de tijd. Doordat de waterdiepte hierover toenemende lengte geleidelijk afneemt wordt de weerstandsterm in de waterdiepte over toenemende lengte groter, zodat een geleidelijke toename van de waterstand ontstaat. Het stuwkromme-effect van de onttrekking wordt teniet gedaan.
- de bodemligging in het gedeelte bovenstrooms van de onttrekking geleidelijk afneemt.

Een soortgelijke beschouwing kan worden gegeven ten aanzien van de metingen in het punt 900. Na de eerste afname van de waterstand direkt na het instellen van de onttrekking, neemt zij weer toe. De bodemhoogte verandert aanvankelijk niet, maar begint na enige tijd af te nemen als gevolg van de geringere transportcapaciteit. Gedurende het eerste uur (zie de figuren 63, 67 en 71) neemt het bodemniveau relatief sterk toe in vergelijking tot de veranderingen in de waterstand. Hierdoor neemt de waterdiepte in dit punt relatief sterk af. In de eropvolgende uren neemt het bodemniveau af (als gevolg van de dwingende eis dat de bodemligging in de zandgoot gemiddeld op hetzelfde niveau blijft) terwijl de waterstand toeneemt. Beide effecten geven uiteindelijk een lichte toename in waterdiepte te zien na het eerste uur.

Met betrekking tot het verloop van de waterdiepte in het meetpunt 3001 kan worden vastgesteld dat de waterstand na het instellen van de onttrekking gedurende geruime tijd vrij konstant blijft (zie figuur 50, 54 en 58). Na circa 10 à 15 uur neemt de waterstand uiteindelijk iets toe. Het verloop van de waterdiepte geeft omstreeks dit tijdstip een plotselinge afname te zien, die wordt veroorzaakt door de zandtransportgolf die op dat moment punt 3001 passeert.

### 5.3 Nauwkeurigheid van de voorspellingen

Zonder uitgebreide nauwkeurighedsanalyse van zowel het hydraulische model als het wiskundige model kan weinig met zekerheid worden gezegd over de nauwkeurigheid van de met ZANTRI uit te voeren voorspellingen voor de wijzigingen in bodemligging. Uitgaande van de in de Zandgoot gemeten en met ZANTRI berekende resultaten, als vermeld in tabel 4, kan evenwel een indruk worden verkregen van de nauwkeurigheid van de voorspelling met ZANTRI.

Het ligt het meest voor de hand om de veranderingen in waterdiepte volgens ZANTRI te vergelijken met de veranderingen in waterdiepte die zijn gemeten ten opzichte van de proef zonder het onttrekken van water (laatste regel tabel 4).

De gemeten waterdiepteverandering in de proeven T1, T2 en T3 wijken respectievelijk 2,9%, 0% en -13,6% of van berekende waarden. De hoeveelheid water die werd onttrokken bedroeg respectievelijk 15%, 25% en 5%. De afwijking in de waterdiepte blijkt het grootst te zijn bij de proef waarbij het debiet van de onttrekking het kleinst is. In absolute waarde verschillen de afwijkingen

tussen voorspelling en meting bij proef T3 echter niet wezenlijk van het verschil bij proef T1. Bij proef T2 werd toevalligerwijs geen afwijking tussen meting en berekening geconstateerd.

Als belangrijkste oorzaken voor de verschillen kunnen worden genoemd:

- de in het hydraulische model aanwezige "ruis" in de gemeten waterdiepte. Deze is onder meer afhankelijk van het toegepaste meetstelsel en het aantal metingen waarover wordt gemiddeld. Bij circa 20 metingen en een waterdiepte van 0,35 à 0,50 m bedraagt de mogelijke fout in de waterdiepte in orde van grootte 0,005 m, zie [6].
- het niet volledig op evenwicht zijn van de proeven
- onvolkomenheden in de formulering van het wiskundig programma.

Ervan uitgaande dat het gemeten verschil bij proef T3, gezien de geringe wijzigingen in waterdiepte, niet als representatief mag worden beschouwd en de geconstateerde verschillen bij de proeven T1 en T2 in aanmerking nemende zou met een onnauwkeurigheid van 3 à 5% van de te verwachten verandering in bodemhoogte mogen worden gerekend. Gelet echter op de verschillen tussen de metingen en de berekeningen, als vermeld in tabel 4 (regels 1...3) verdient het aanbeveling om voorshands te rekenen op een mogelijke afwijking van circa 10% van de verandering in waterdiepte als voorspeld met het programma ZANTRI. Door evaluatie van gegevens uit het prototype kan deze waarde wellicht later worden getoetst en eventueel worden aangepast.

## 6. Conclusies en aanbevelingen

Op grond van de resultaten voor de uitgevoerde onttrekkingsproeven, zowel verkregen uit het onderzoek in de Zandgoot als door toepassing van het mathematisch model ZANTRI kan als belangrijkste conclusie worden gesteld dat het tijdsafhankelijk verloop en de uiteindelijke veranderingen in waterstanden, bodemligging en waterdiepten als gevolg van ingrepen in stromingscondities van een alluviale rivier met het programma ZANTRI goed kunnen worden berekend.

Voorts blijkt dat:

- de sprong in de bodem ter plaatse van het onttrekkingspunt zich in de goot snel opbouwt (binnen circa 1 uur). Uitgaande van de in hoofdstuk 3 gegeven schalen zou de aanpassing in het prototype in circa 100 dagen plaatsvinden.
- de opbouw van de bodemdiscontinuïteit in het wiskundig model in enkele tijdstappen plaatsvindt.
- de voortplantingssnelheid van de bodemverstoring volgens het wiskundig model iets afwijkt van de gemeten voortplantingssnelheid in de Zandgoot; het geconstateerde verschil in voortplantingssnelheid speelt in het onderhavige onderzoek geen rol omdat het verschil tot uitdrukking komt in een verschuiving van de tijdas. Deze is klein ten opzichte van de tijdschaal, zie de figuren 51...60.
- de voortplantingssnelheid van de bodemverstoring niet of nauwelijks afhankelijk is van het onttrekkingsdebiet; bepalende factoren daarin zijn de originele stromingscondities en het sedimenttransport.
- de evenwichtsverhangen van het rekenmodel minder goed overeenkomen met de metingen in de Zandgoot; het rekenmodel geeft benedenstrooms van het onttrekkingspunt een minder steil verhang. Voor de toepassing van het rekenmodel zal dit doorgaans niet bezwaarlijk zijn.
- de onnauwkeurigheid in de voorspelde waterdiepteverandering met ZANTRI voorshands wordt geschat op 10% van zijn waarde.

Op grond van de verkregen resultaten kan worden vastgesteld dat een tweede proevenserie voor zuiver tweedimensionale omstandigheden geen nieuwe informatie zal verschaffen. De stroming in een bredere goot zal zich evenwel meer driedimensionaal gedragen. Als de driedimensionale invloed bij de toetsing van ZANTRI als variabele moet worden ingebracht dan dient het onderzoek te worden herhaald in een bredere goot.

## LITERATUUR

- 1 Morfologische gevolgen van wateronttrekking aan de Waal  
Verslag Modelonderzoek M 1442  
Waterloopkundig Laboratorium, november 1978
- 2 VELD, J. van de  
Prototype-onderzoek naar de invloed van de wateronttrekking bij Tiel op de bodemligging van de Waal  
Rijkswaterstaat, Directie Waterhuishouding en Waterbeweging, Distrikt Zuidoost, Nota 77.4, 1977
- 3 DIXHOORN, K. van  
Aanvulling nota 77.4 inzake de wateronttrekking 1975-1976 bij Tiel  
Rijkswaterstaat, Directie Waterhuishouding en Waterbeweging, Distrikt Zuidoost, Nota 81.4, 1981
- 4 ZANTRI, een programma voor het berekenen van niet-permanent bodemtransport  
Gebruikershandleiding/invoerbeschrijving  
Dienst Informatie Verwerking, Rijkswaterstaat/Waterloopkundig Laboratorium, januari 1971/maart 1976
- 5 BAKKER, B.  
Reorganisatie gegevensverwerking zandgoot  
Waterloopkundig Laboratorium nota R 657-III, 1976
- 6 WIJBENGA, J.H.A.  
Toetsing gootproeven en nauwkeurigheid parameters  
Waterloopkundig Laboratorium, nota R 657-VI, 1979
- 7 ACKERS, P. and WHITE, W.R.  
Sediment transport: new approach and analysis  
Proc. ASCE, Journal of the Hydraulics Division, 99, HY11, Nov. 1973
- 8 ENGELUND, F., and HANSEN, E.  
A monograph on sediment transport in alluvial streams  
Teknisk Forlag, Copenhagen, 1967

LITERATUUR (vervolg)

- 9 VREUGDENHIL, C.B.  
Waterloopkundige berekeningen I, Handleiding college b84  
Technische Hogeschool Delft, Afdeling der Civiele Techniek, augustus 1979
- 10 VREUGDENHIL, C.B. and DE VRIES, M.  
Computations on non-steady bed-load transport by a pseudo-viscosity method,  
XII IAHR Congress Fort Collins, 1967  
Waterloopkundig Laboratorium publicatie no. 45
- 11 DE VRIES, M.  
Solving river problems by hydraulic and mathematical models,  
Conf. Jablonna, June 1969  
Waterloopkundig Laboratorium publicatie no. 76 b
- 12 DE VRIES, M.  
A morphological time scale for rivers  
XVI IAHR Congress Sao Paulo, July 1975  
Waterloopkundig Laboratorium publicatie no. 147



maand	NOVEMBER				DECEMBER				
	3...7	10...14	17...21	24...28	1...5	8...12	15...19	22...26	29...31
	45	46	47	48	49	50	51	52	53/1
voorbereiding									
proef T01									
proef T1									
proef T02									
proef T2									
proef T03									
proef T3									
proef T04									

x serie van 20 evenwichtsmetingen, interval 10 minuten

■ intensieve meetserie, begin onttrekking c.q. stopzetting onttrekking wordt beschouwd als  $t = 0$ ; de metingen zijn als volgt uitgevoerd:

0,5 uur tot 4 uur, tijdsinterval 10 minuten

4 uur tot 12 uur, tijdsinterval 30 minuten

12 uur tot 25 uur, tijdsinterval 1 uur

25 uur tot 31 uur, tijdsinterval 2 uur

— "normale" meetintensiteit, tijdsinterval 3 uur

Tabel 1 Tijdschema onderzoek en intensiteit van de metingen

omschrijving	sym- bool	dimen- sie	prototype (Waal)	zandgoot	schaal- factoren
debiet	Q	m <sup>3</sup> /s	1750	0,160	10940
sedimenttransport	S	m <sup>3</sup> /hr	58,3	0,054	1080
gemiddelde waterdiepte	$\bar{h}$	m	5,90	0,48	12,3
verhang	i	-	$1,25 \cdot 10^{-4}$	$1,68 \cdot 10^{-3}$	0,074
gemiddelde diameter	D <sub>m</sub>	m	$1,7 \cdot 10^{-3}$	$0,78 \cdot 10^{-3}$	2,18
korreldiameter ten opzichte waarvan 90% v.h. materiaal fijner is	D <sub>90</sub>	m	$4,5 \cdot 10^{-3}$	$0,84 \cdot 10^{-3}$	5,36
relatieve dichtheid	Δ	-	1,65	1,65	1
coëfficiënt van Chézy	C	m <sup>1/2</sup> /s	46	28	1,64
gemiddelde snelheid	$\bar{u}$	m/s	1,25	0,67	1,87
gemiddelde breedte	$\bar{B}$	m	240	0,5	480

Tabel 2 Overzicht van grootheden voor het prototype en de Zandgoot

(waarden zandgoot verkregen uit enkele metingen gedurende instromen referentie-  
toestand én uit voorgaand T.O.W. onderzoek)

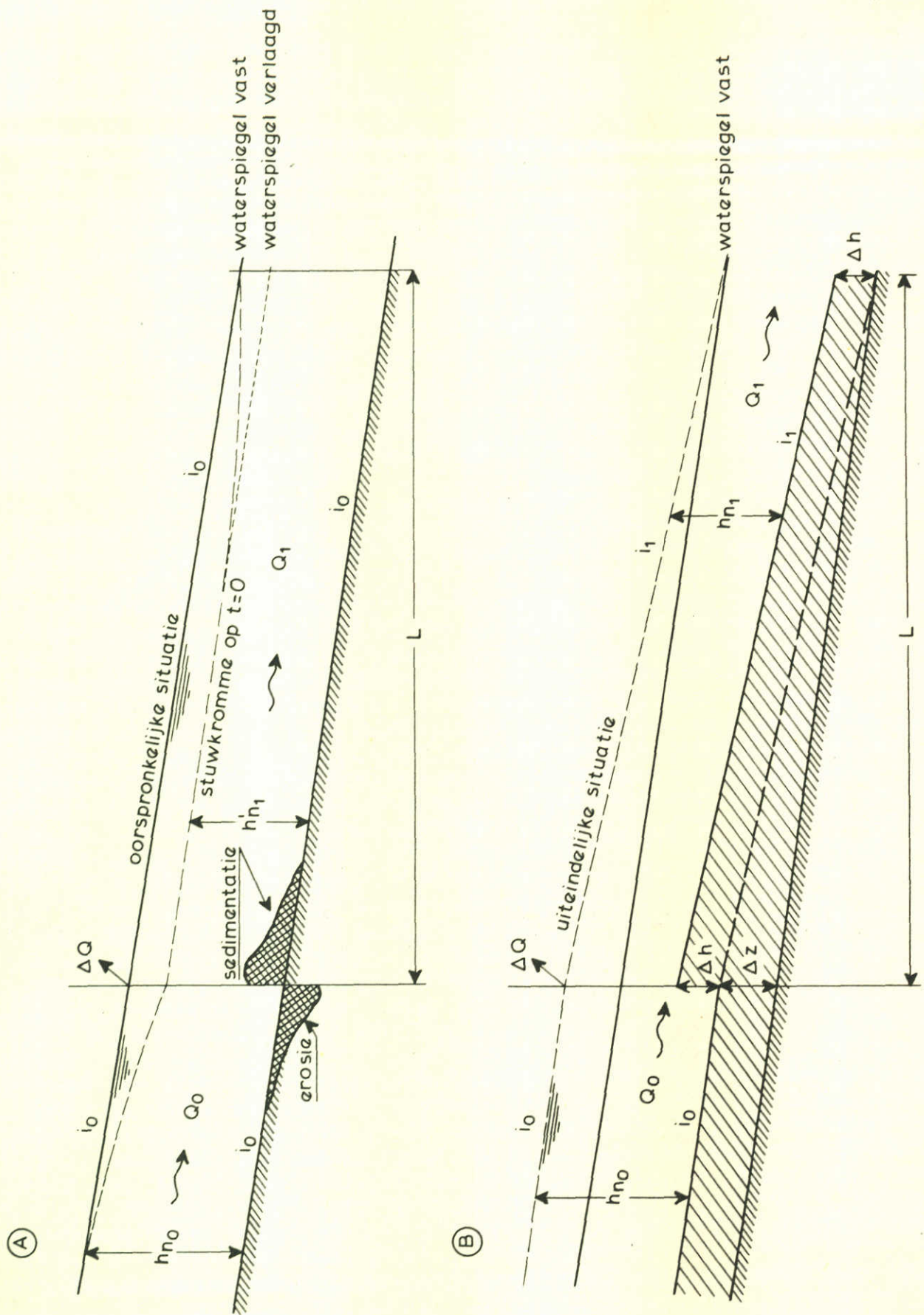
	T01	T1	T02	T2	T03	T3
debiet in m <sup>3</sup> /s	0,160	0,160	0,160	0,160	0,160	0,160
onttrekking in m <sup>3</sup> /s	-	0,024	-	0,040	-	0,008
<u>gemiddelde diepte in m</u>						
bovenstr. ontrr. punt	0,4730	0,4727	0,4720	0,4737	0,4743	0,4695
benedenstr. ontrr. punt	0,4814	0,4119	0,4789	0,3657	0,4752	0,4564
<u>gem. waterstand in m</u>						
punt 1, bovenrand meetsektie	0,8798	0,8611	0,8748	0,8469	0,8745	0,8704
punt 831, ontrr. punt	0,8661	0,8439	0,8618	0,8351	0,8631	0,8572
punt 3001, benedenr. meetsektie	0,8334	0,8118	0,8282	0,7995	0,8268	0,8243
<u>waterspiegelverhang (*10<sup>-3</sup>)</u>						
bovenstr. ontrr. punt	1,65	2,07	1,55	1,41	1,38	1,59
benedenstr. ontrr. punt	1,51	1,48	1,55	1,64	1,67	1,52
totaal	1,55	1,64	1,55	1,58	1,59	1,54
<u>regressielijn bodemligging</u>	Y = a - bX a en b via kleinste kwadraten methode					
X = 1 3001 a (cm)	40,50		40,6		40,08	
bodemverhang b (*10 <sup>-3</sup> )	1,95		1,89		1,88	
X = 1 751 a (cm)		38,14		37,18		39,97
bodemverhang b (*10 <sup>-3</sup> )		0,694		1,57		1,24
X = 901 3001 a (cm)		47,19		50,95		41,95
bodemverhang b (*10 <sup>-3</sup> )		2,90		2,99		1,84
<u>energielijnverhang (*10<sup>-3</sup>)</u>						
bovenstr. ontrr. punt	1,69	1,18	1,59	neg.	1,49	1,42
benedenstr. ontrr. punt	1,52	1,87	1,56	2,42	1,68	1,63
totaal	1,57	1,68	1,57	1,62	1,63	1,57
(alternatief, bovenstr. zie par. 3.4, ben. str.)		(1,67)		(0,66)		(1,51)
		(1,69)		(1,99)		(1,60)

Tabel 3 Overzicht meetresultaten evenwichtssituaties

	T1 (m)	T2 (m)	T3 (m)
waterdiepteverschil t.p.v. het onttrekkingspunt bepaald met het rekenprogramma ZANTRI	0,068	0,113	0,022
waterdiepteverschil t.p.v. het onttrekkingspunt bepaald uit niveauverschil van de regressielijnen door de gemeten bodemligging	0,072	0,126	0,015
verschil in gemiddelde waterdiepte van het traject bovenstrooms en benedenstrooms van het onttrekkingspunt	0,061	0,108	0,013
verschil in gemiddelde waterdiepte van het benedenstroomse traject tussen de proef met en zonder onttrekking van water	0,070	0,113	0,019

Tabel 4 Overzicht van waterdiepteverschillen tijdens evenwichtssituaties



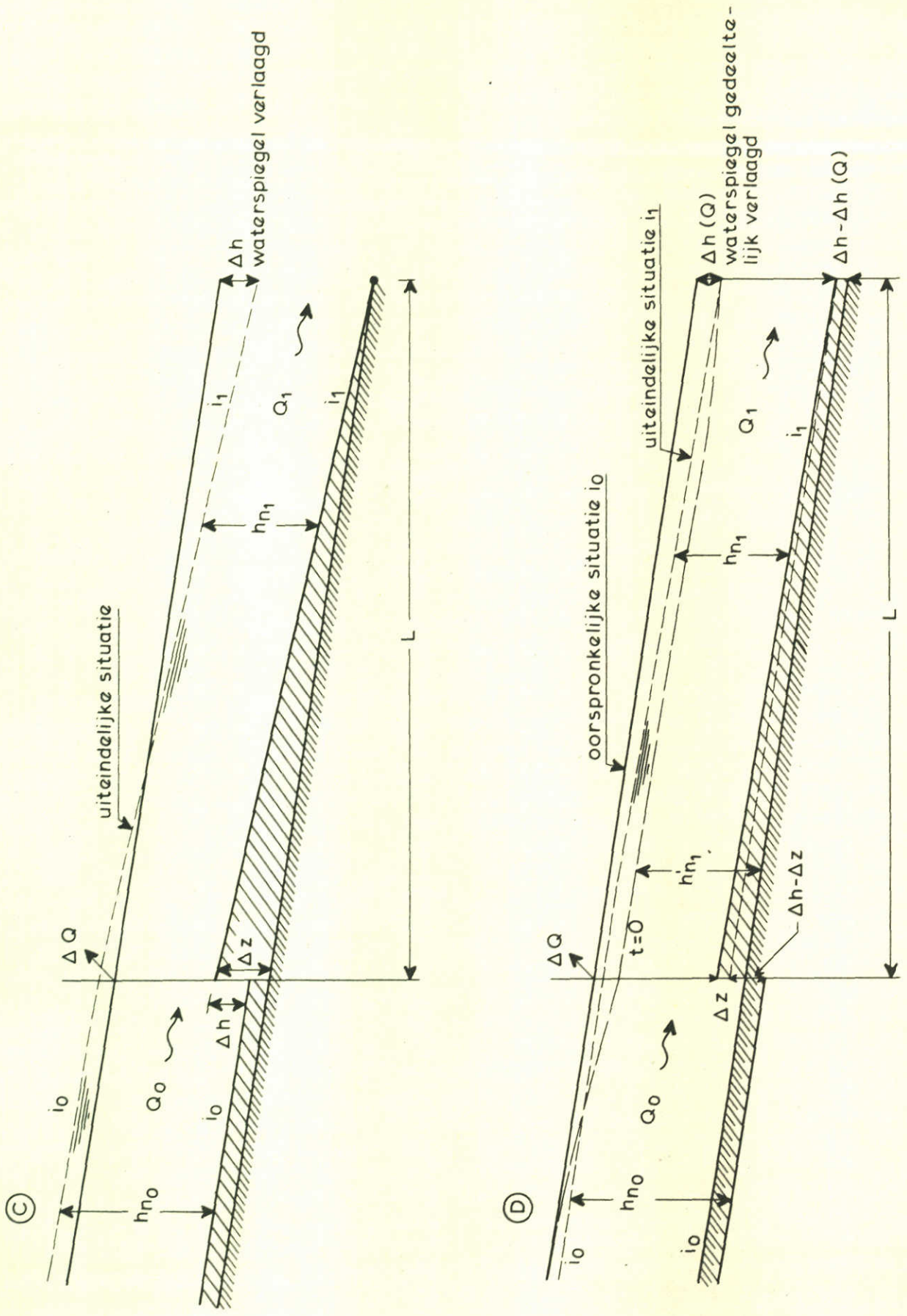


THEORETISCHE BODEMVERANDERINGEN  
 BIJ WATERONTTREKING

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1755

FIG. 2

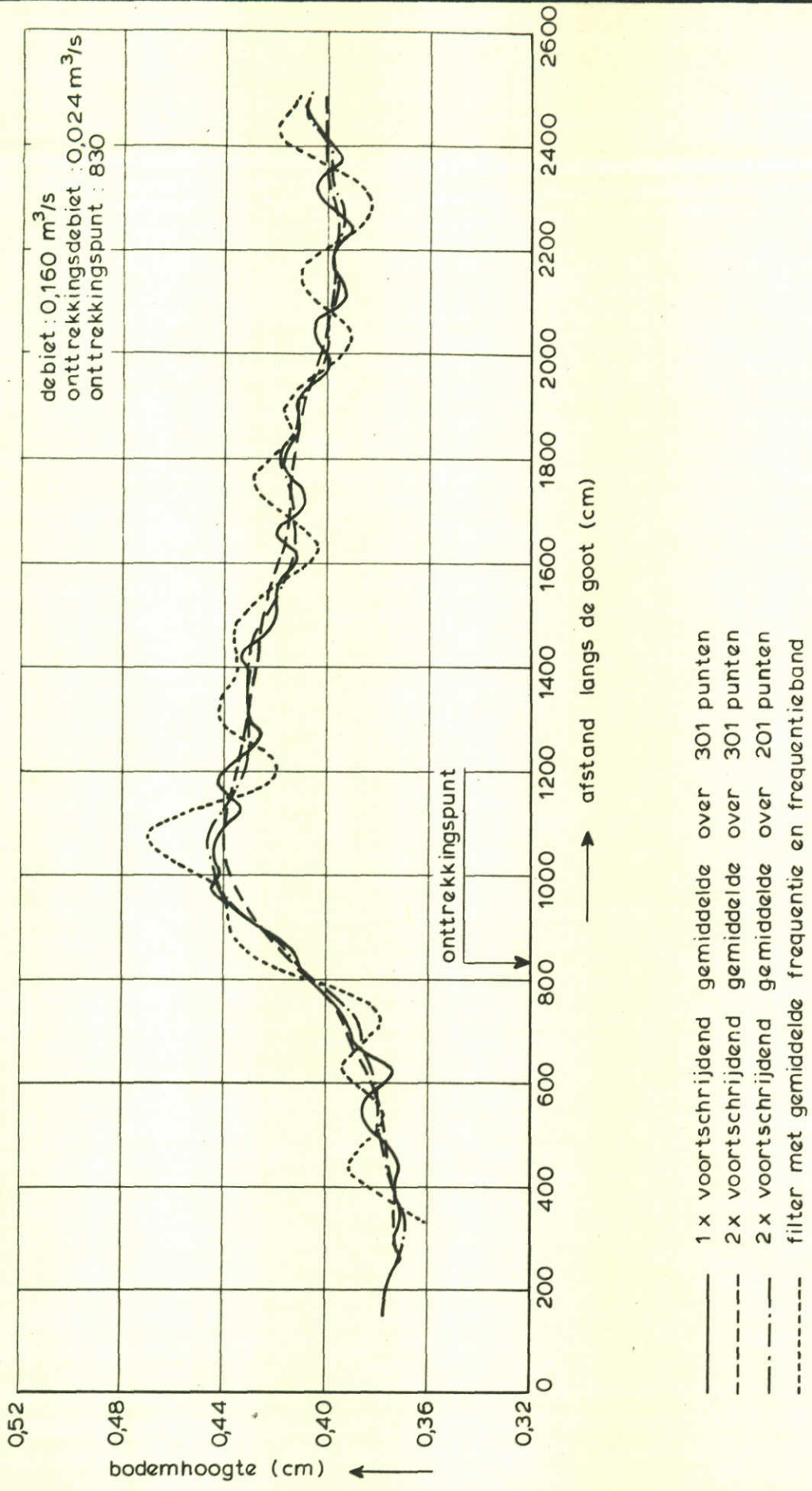


THEORETISCHE BODEMVERANDERINGEN  
 BIJ WATERONTTREKking

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1755

FIG. 3



RESULTATEN VAN OP VERSCHILLENDE MANIEREN  
BEPAALE VOORTSCHRJDENDE GEMIDDELDEN;  
METING NR. 4 DATUM 1980-11-29

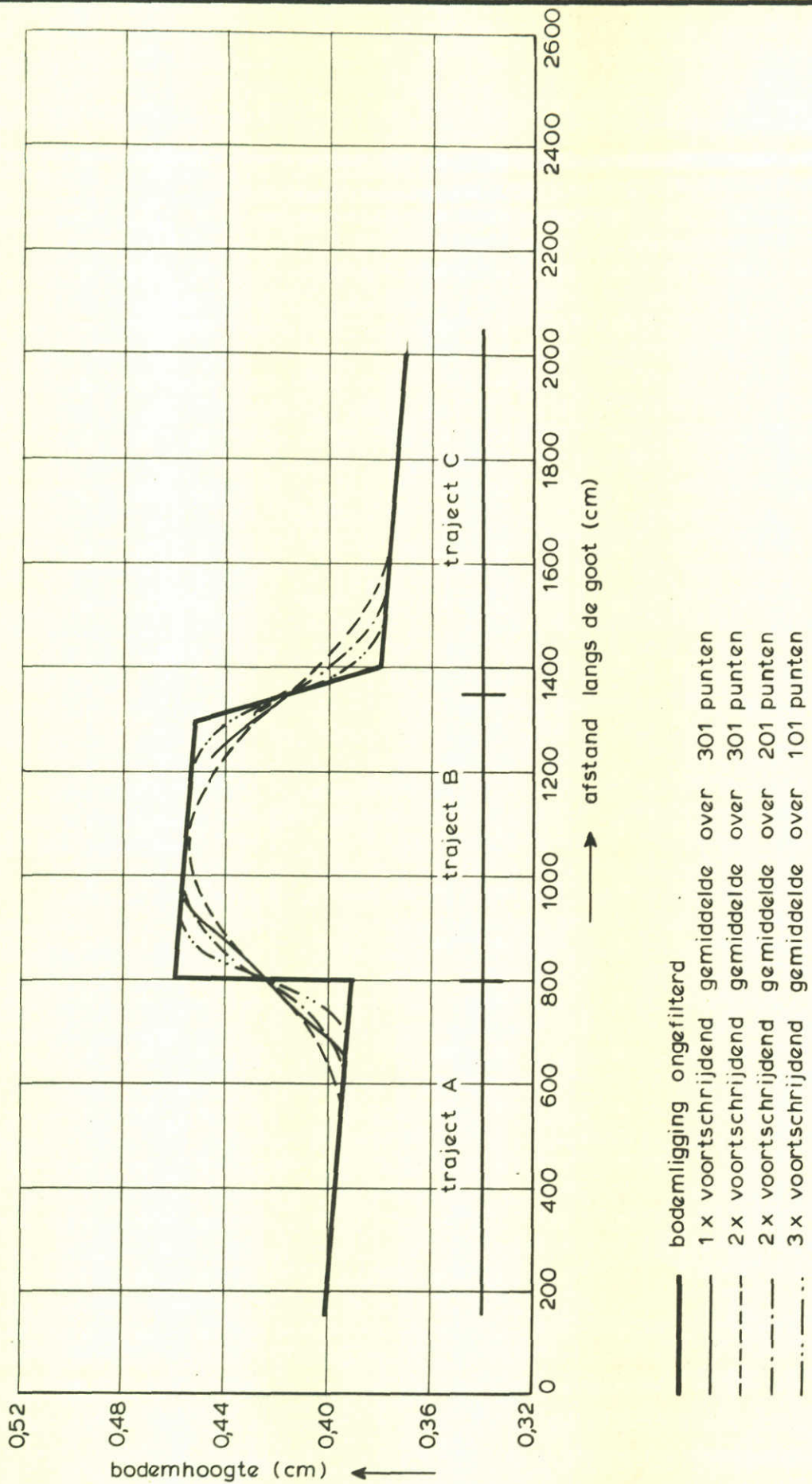
T 1

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1755

FIG. 4



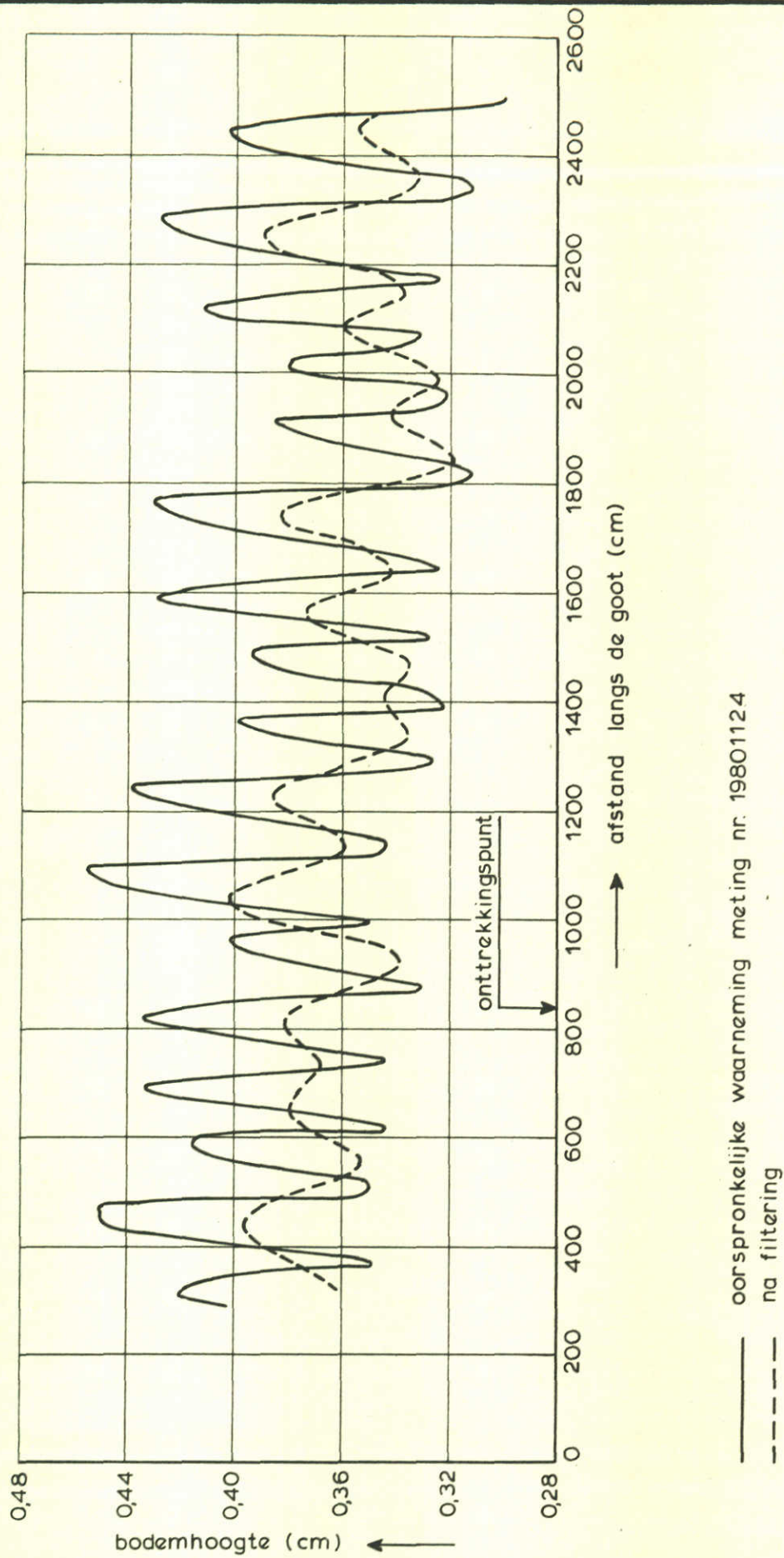


ONDERZOEK AFVLAKKING BODEMDISCONTINUITEIT

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1755

FIG. 5

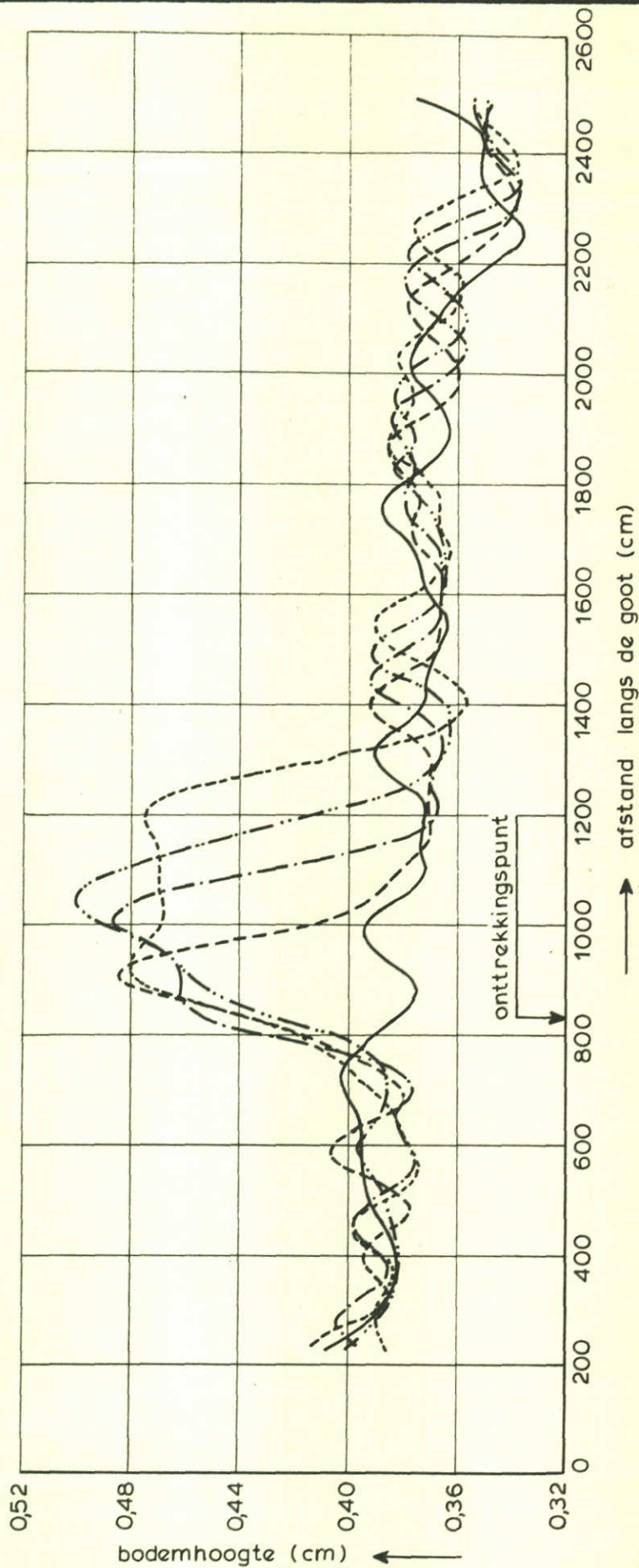


TOEPASSING LINEAR FILTER OP METINGEN  
BODEMLIGGING

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M1755

FIG. 6



—	meting nr. 7 ,	1980.12.08	T = 0 uur	0 min.
- - -	meting nr. 11 ,	1980.12.08	T = 0 uur	38 min.
- · - · -	meting nr. 14 ,	1980.12.08	T = 1 uur	8 min.
- - - - -	meting nr. 17 ,	1980.12.08	T = 1 uur	38 min.
· · · · ·	meting nr. 20 ,	1980.12.08	T = 2 uur	8 min.

PROEFBEREKENING T2 , 3x VOORTSCHRJDEND  
GEMIDDELDE OVER 101 PUNTEN

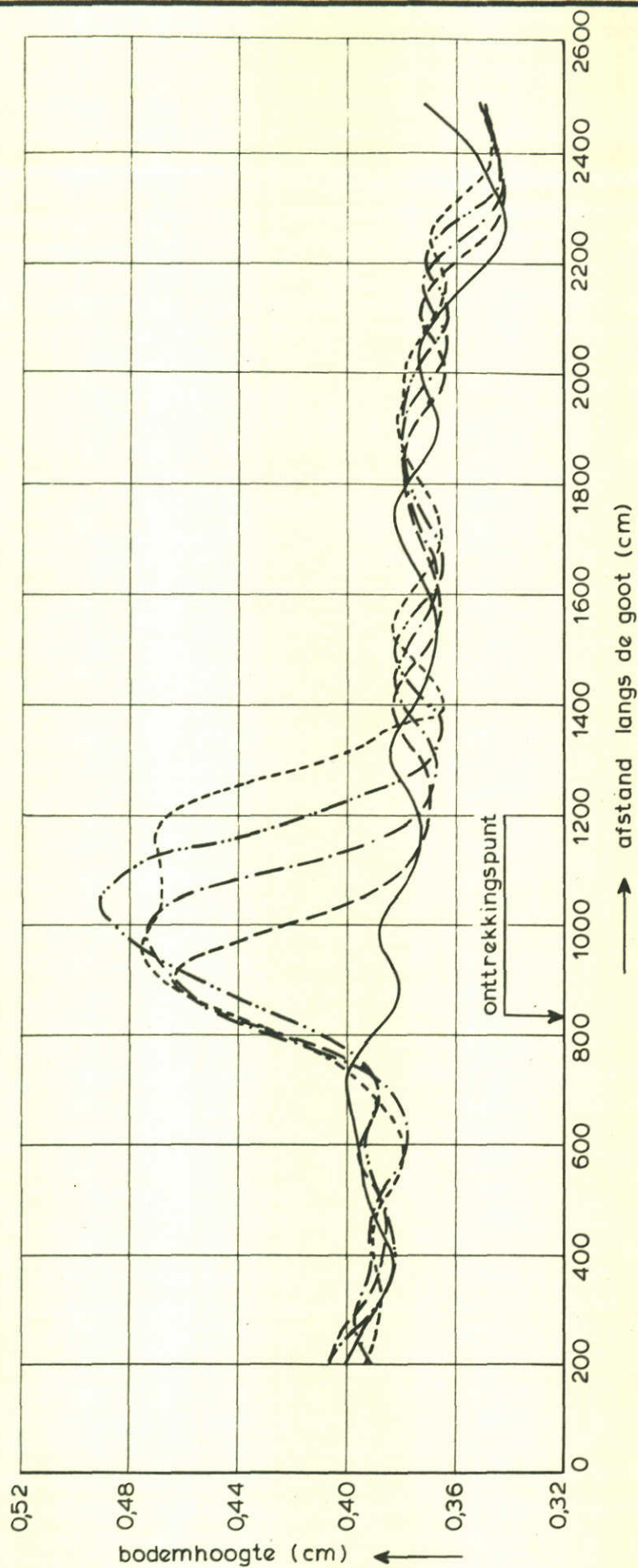
T2

$\Delta Q = 0.15Q$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1755

FIG. 7



meting nr. 7 , 1980.12.08 T = 0 uur 0 min.  
 meting nr. 11 , 1980.12.08 T = 0 uur 38 min.  
 meting nr. 14 , 1980.12.08 T = 1 uur 8 min.  
 meting nr. 17 , 1980.12.08 T = 1 uur 38 min.  
 meting nr. 20 , 1980.12.08 T = 2 uur 8 min.

PROEFBEREKENING T2 , 3x VOORTSCHRJDEND  
 GEMIDDELDE OVER 135 PUNTEN

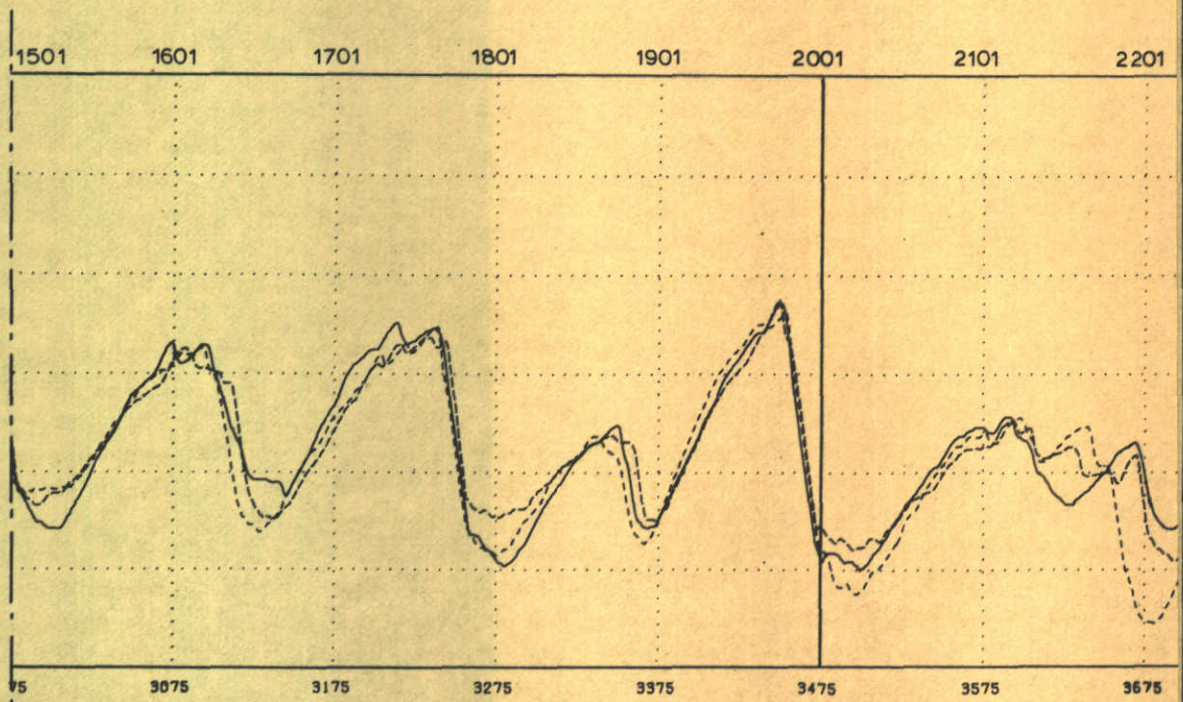
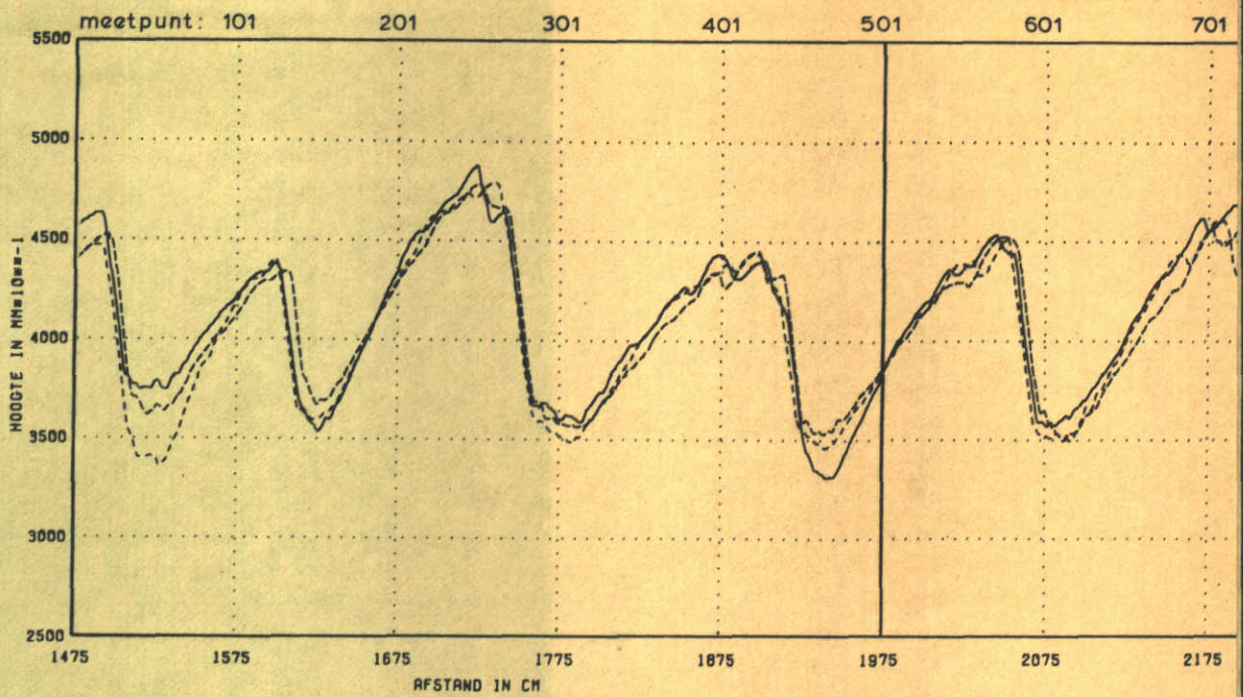
T2

$\Delta Q = 0.25Q$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1755

FIG. '8

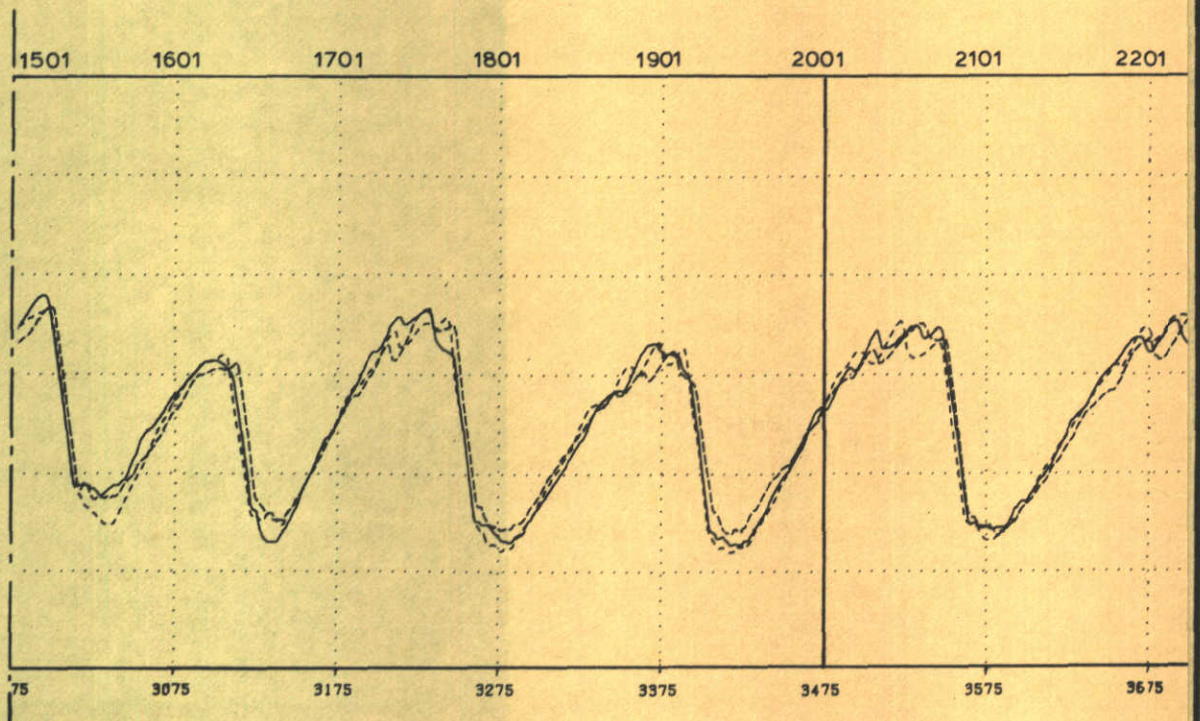
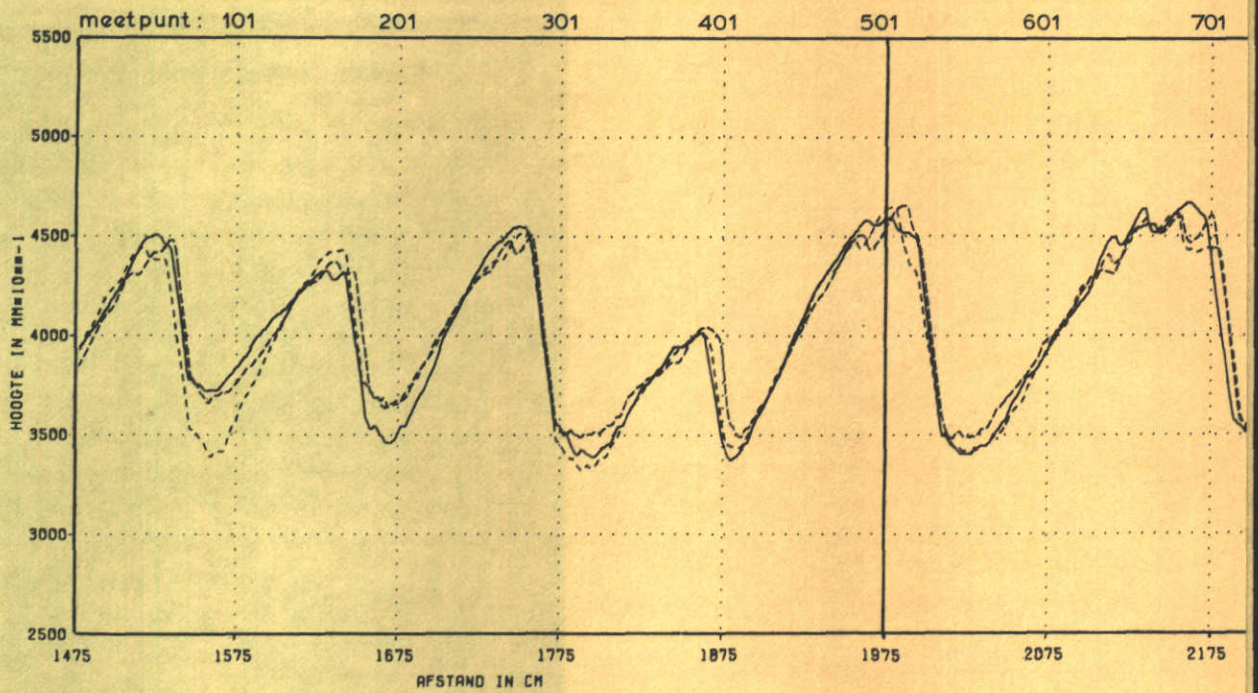


REGISTRATIE BODEMLIGGING IN 3 LANGSRAAIEN  
 METING NR.1 ,1980-11-21

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M1755

FIG. 9



REGISTRATIE BODEMLIGGING IN 3 LANGSRAAIEN  
 METING NR.1 , 1980-11-21

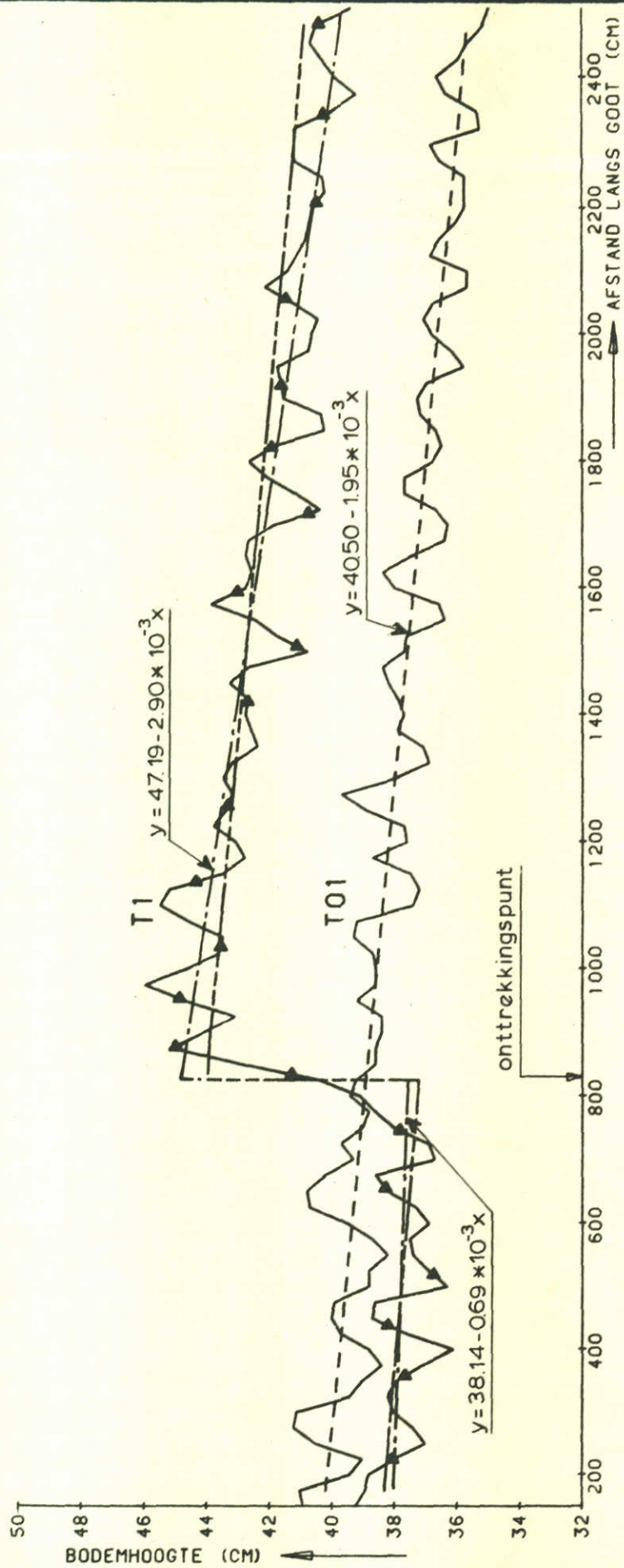
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1755

FIG. 10

DEBIET : 0.160 M<sup>3</sup>/S  
 ONTTREKKINGSDEBIET : 0.024 M<sup>3</sup>/S  
 ONTTREKKINGSPUNT : 830

— TIJDSGEMIDDELDE EVENWICHTSLIGGING HYDR. MODEL  
 - - - 0 U WISK. MODEL  
 — TIJDSGEMIDDELDE EVENWICHTSLIGGING HYDR. MODEL  
 - - - 120 U WISK. MODEL  
 - . - . REGRESSIE LUN DOOR BODEMGLIGGING VAN HYDR. MODEL



VERGELIJKING ZANTRI MET ZANDGOOTMETINGEN  
 EVENWICHTSSITUATIE T01/T1

T01/T1

$\Delta Q = 0,15Q$

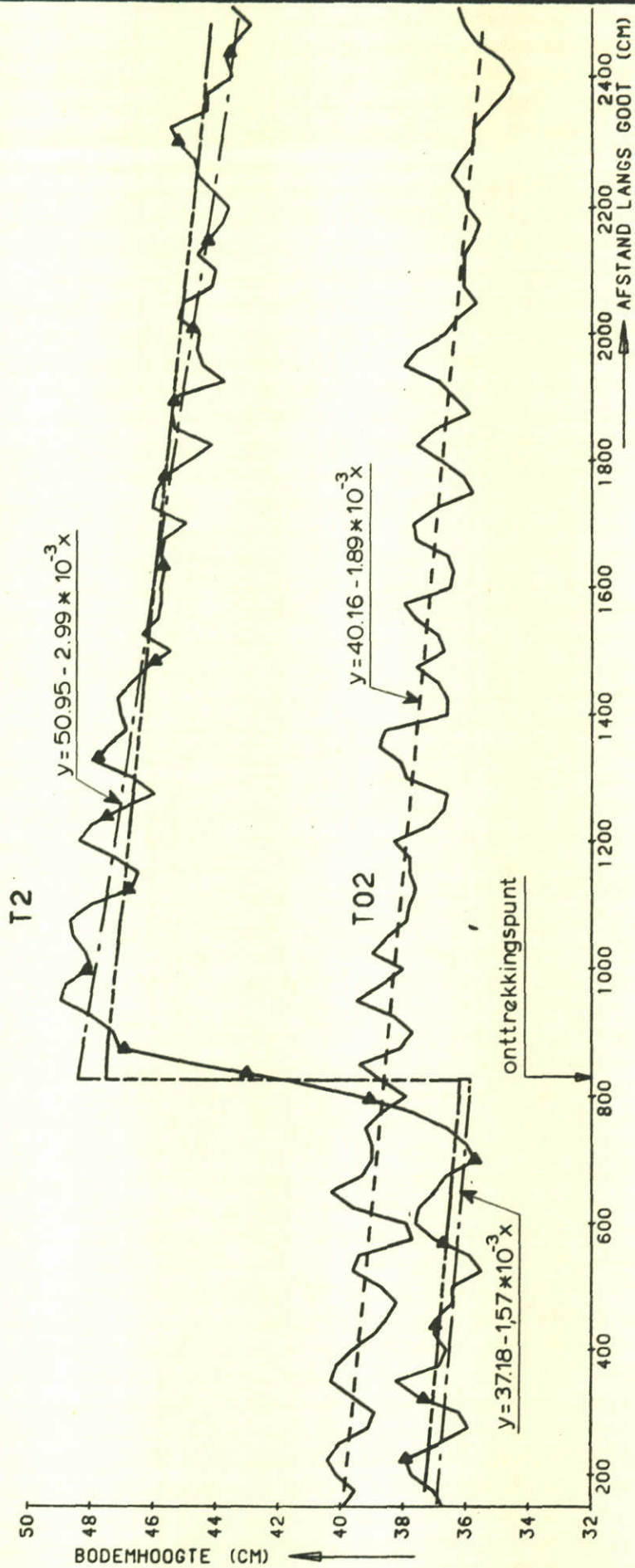
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M1755

FIG. 11

DEBIET 10.160 M<sup>3</sup>/S  
 ONTTREKKINGSDEBIET 0.040 M<sup>3</sup>/S  
 ONTTREKKINGSPUNT 830

TIJDGEMIDDELDE EVENWICHTSLIGGING HYDR. MODEL  
 T=0 U WISK. MODEL  
 TIJDGEMIDDELDE EVENWICHTSLIGGING HYDR. MODEL  
 T=120 U WISK. MODEL  
 REGRESSIE LIJN DOOR BODEMLIGGING VAN HYDR. MODEL



VERGELIJKING ZANTRI MET ZANDGOOTMETINGEN  
 EVENWICHTSSITUATIE T02/T2

T02/T2

$\Delta Q = 0,15 Q$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

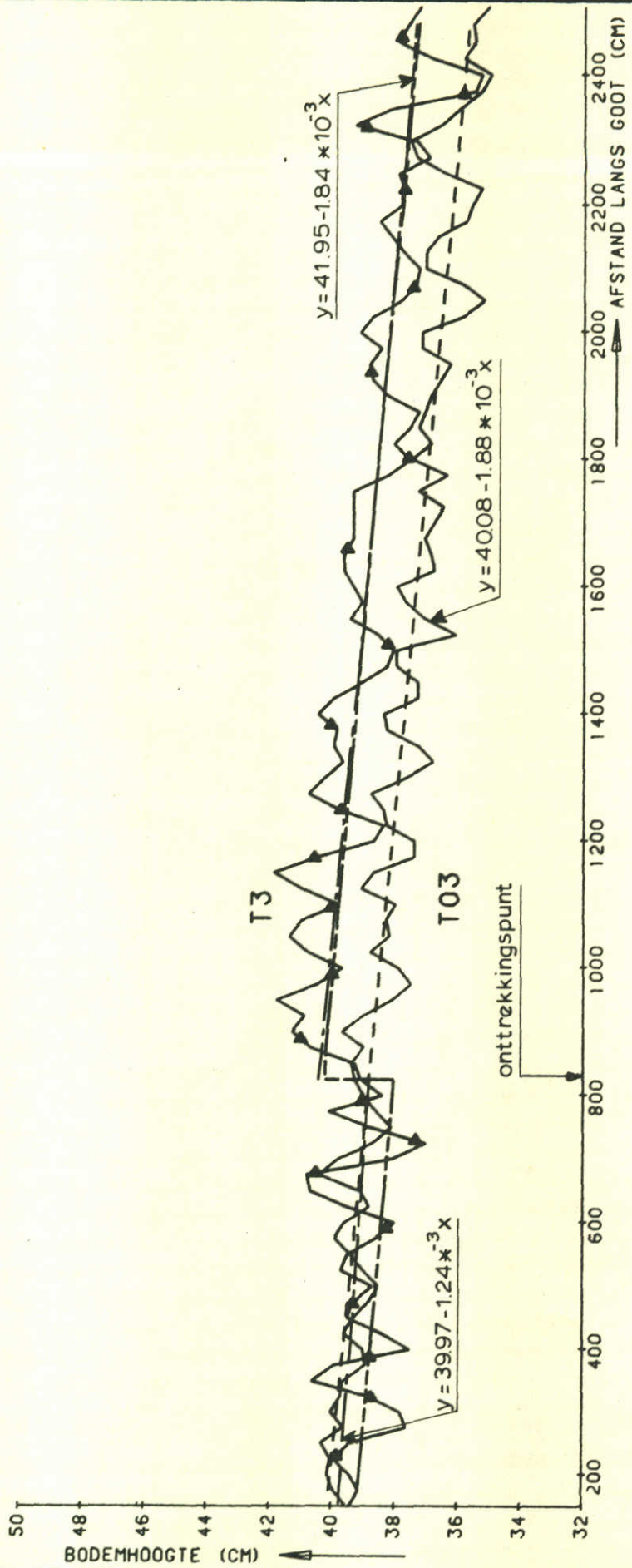
M1755

FIG. 12



DEBIET : 0.160 M<sup>3</sup>/S  
 ONTTREKKINGSDEBIET : 0.008 M<sup>3</sup>/S  
 ONTTREKKINGSPUNT : 830

- TIJDSGEMIDDELDE EVENWICHTSLIGGING HYDR. MODEL
- - - T = 0 U WISK. MODEL
- ▲- TIJDSGEMIDDELDE EVENWICHTSLIGGING HYDR. MODEL
- - - T = 120 U WISK. MODEL
- · - · - REGRESSIE LIJN DOOR BODEMLIGGING VAN HYDR. MODEL



VERGELIJKING ZANTRI MET ZANDGOOTMETINGEN  
 EVENWICHTSSITUATIE T03/T3

T03/T3

$\Delta Q = 0,05Q$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

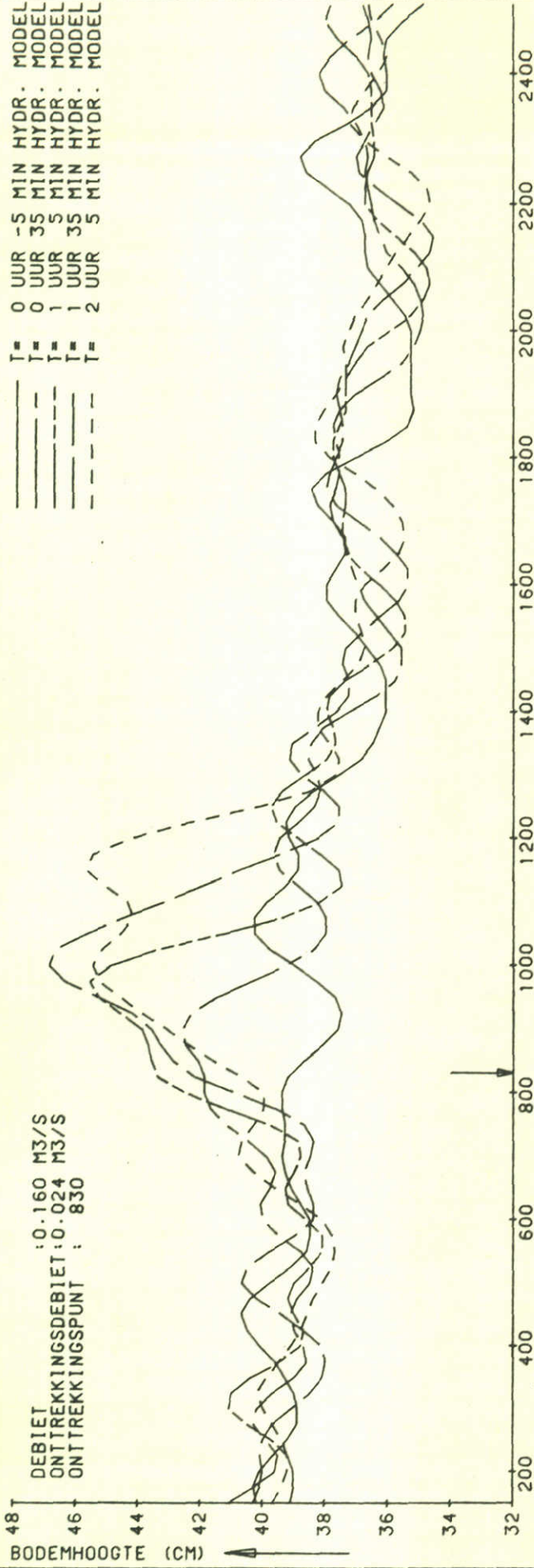
M1755

FIG. 13

T= 0 UUR -5 MIN HYDR. MODEL  
 T= 0 UUR 35 MIN HYDR. MODEL  
 T= 1 UUR 5 MIN HYDR. MODEL  
 T= 1 UUR 35 MIN HYDR. MODEL  
 T= 2 UUR 5 MIN HYDR. MODEL

———  
 - - -  
 - - -  
 - - -

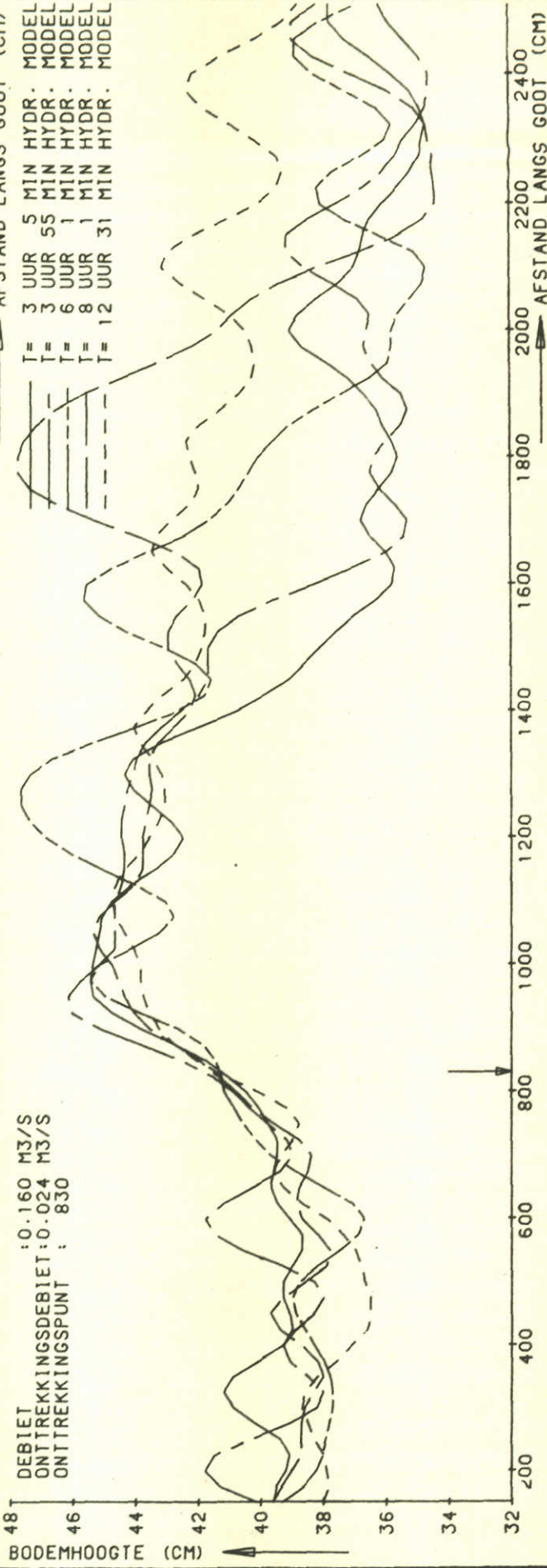
DEBIET : 0.160 M<sup>3</sup>/S  
 ONTTREKKINGSDEBIET : 0.024 M<sup>3</sup>/S  
 ONTTREKKINGSPUNT : 830



T= 3 UUR 5 MIN HYDR. MODEL  
 T= 3 UUR 55 MIN HYDR. MODEL  
 T= 6 UUR 1 MIN HYDR. MODEL  
 T= 8 UUR 1 MIN HYDR. MODEL  
 T= 12 UUR 31 MIN HYDR. MODEL

———  
 - - -  
 - - -  
 - - -

DEBIET : 0.160 M<sup>3</sup>/S  
 ONTTREKKINGSDEBIET : 0.024 M<sup>3</sup>/S  
 ONTTREKKINGSPUNT : 830



BODEMLIGGING ZANDGOOT  
 HYDRAULISCH MODEL

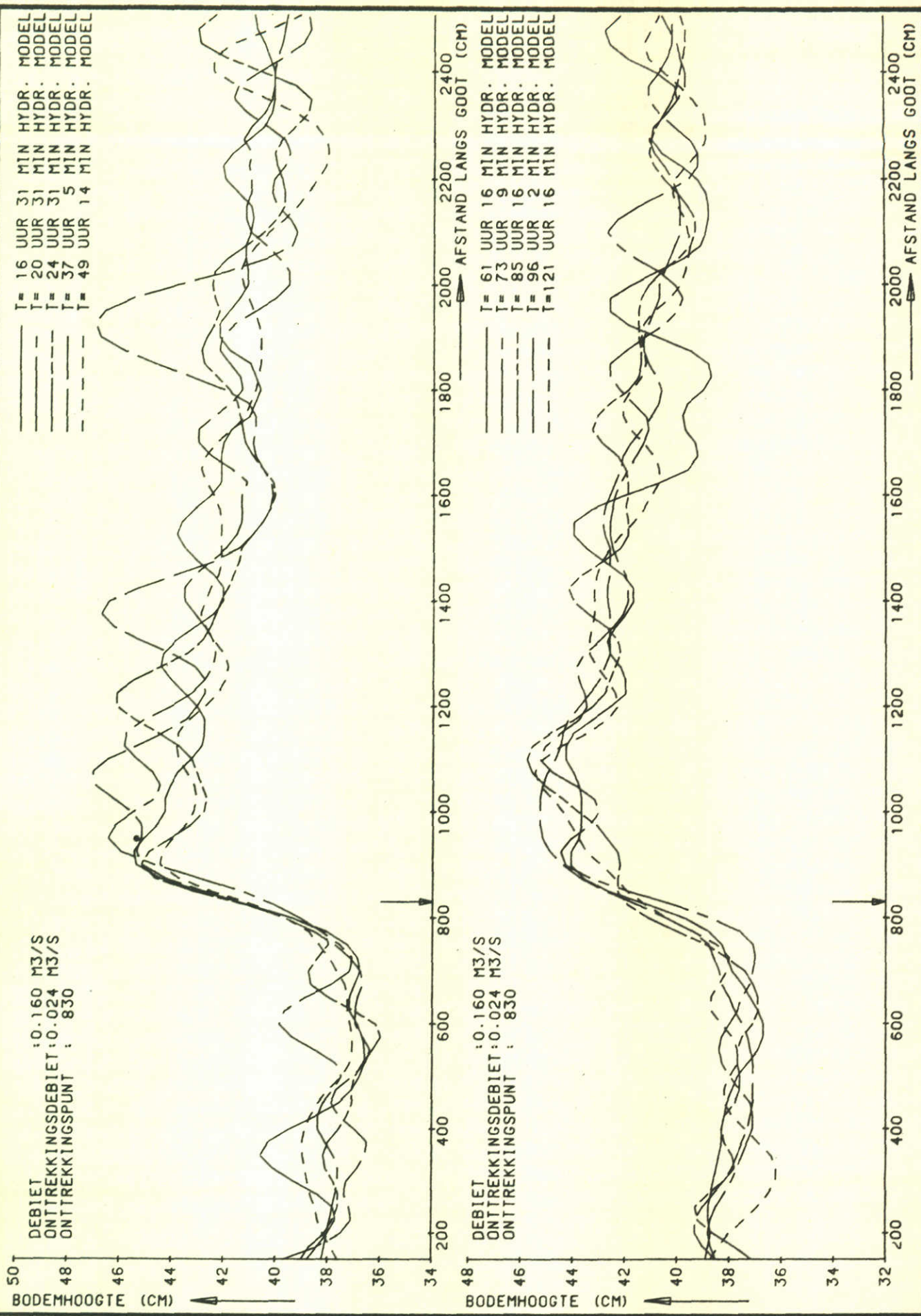
T1

$\Delta Q = 0,15Q$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M1755

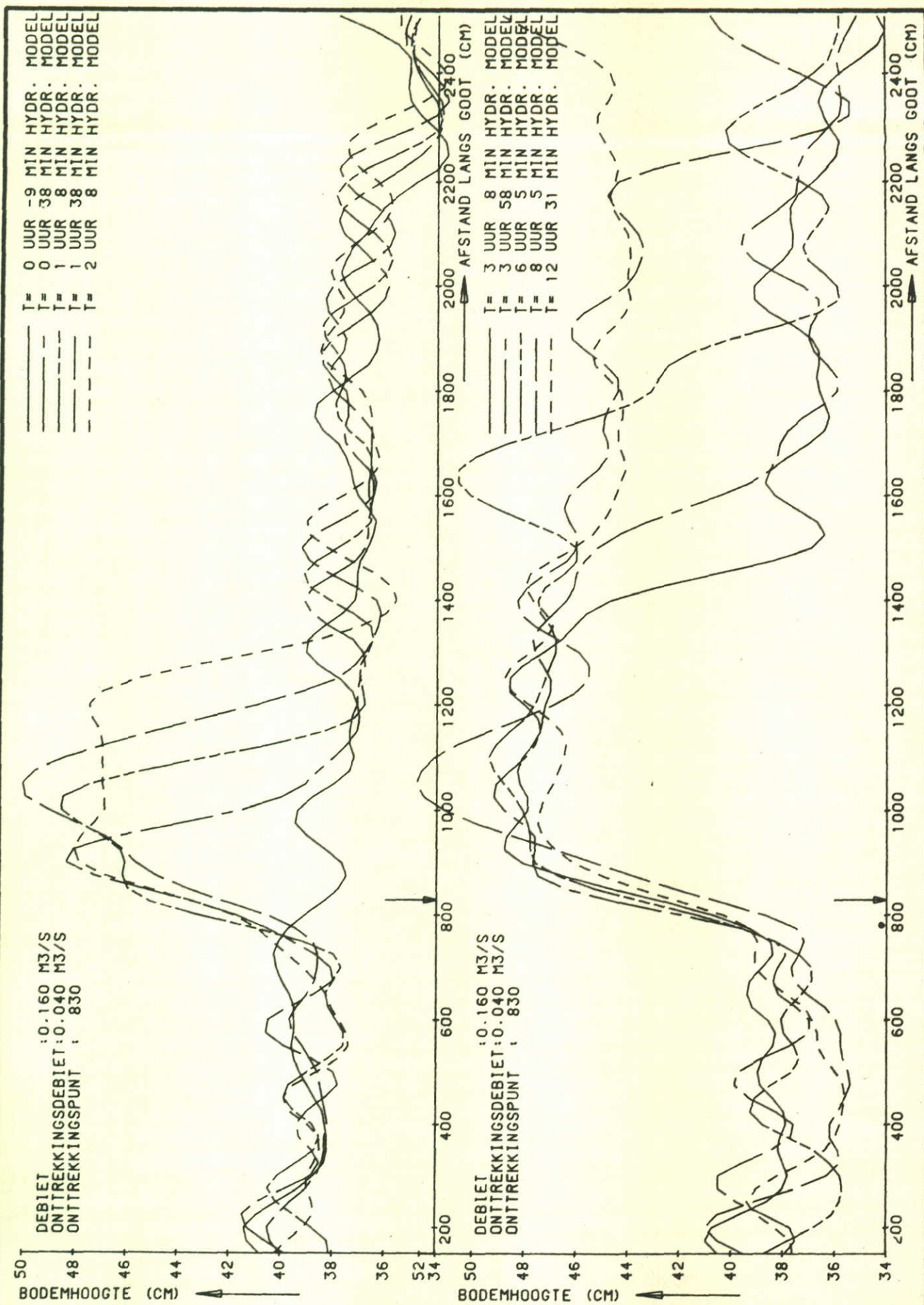
FIG. 14



BODEMLIGGING ZANDGOOT  
HYDRAULISCH MODEL

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

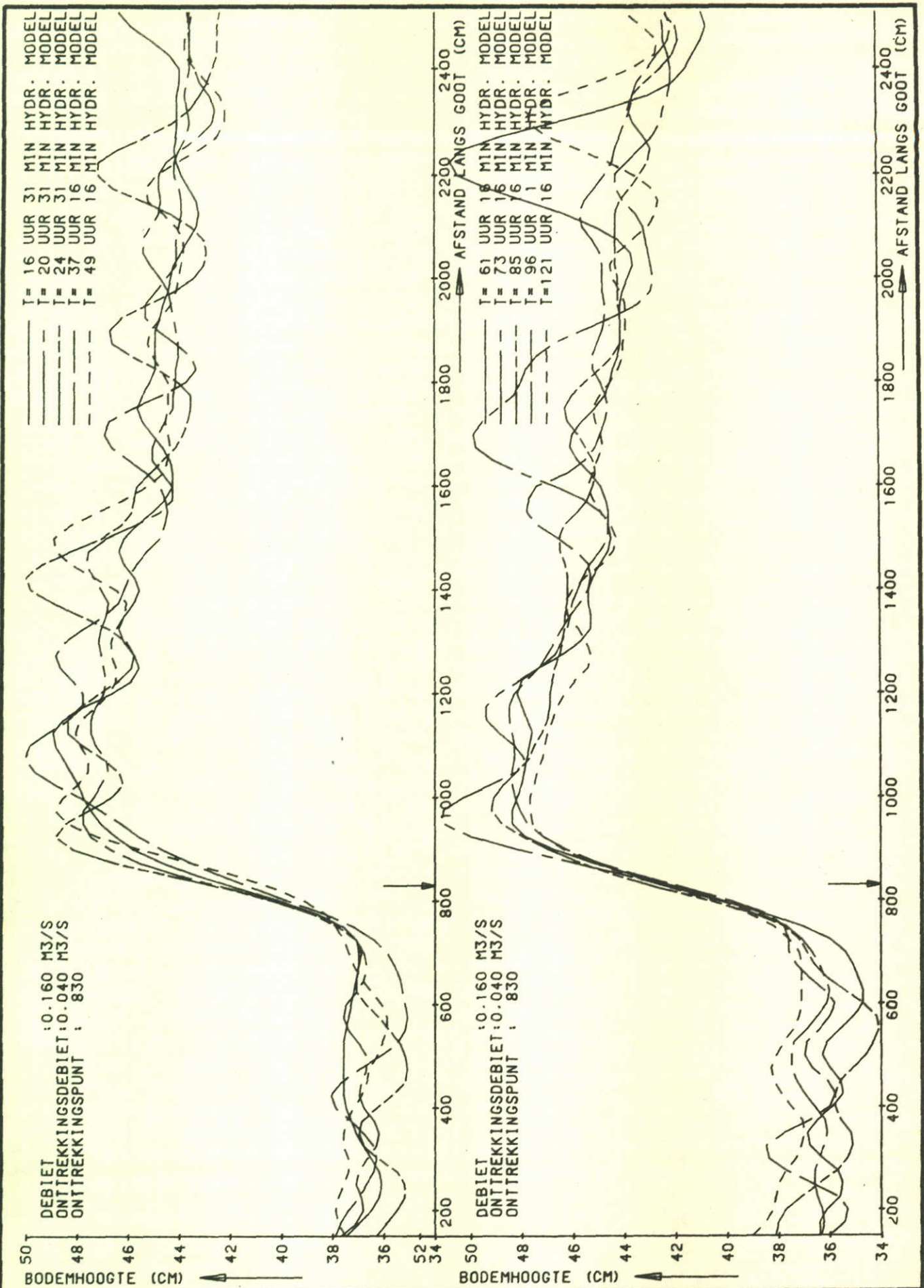
T1	$\Delta Q = 0,15Q$
M1755	FIG. 15



BODEMLIGGING ZANDGOOT  
 HYDRAULISCH MODEL

T2	$\Delta Q = 0,25Q$
M1755	FIG. 16

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM



<b>BODEMLIGGING ZANDGOOT</b> <b>HYDRAULISCH MODEL</b>	T2	$\Delta Q = 0,25Q$
	MI755	FIG. 17

MODEL  
MODEL  
MODEL  
MODEL  
MODEL

HYDR.  
HYDR.  
HYDR.  
HYDR.  
HYDR.

MIN  
MIN  
MIN  
MIN  
MIN

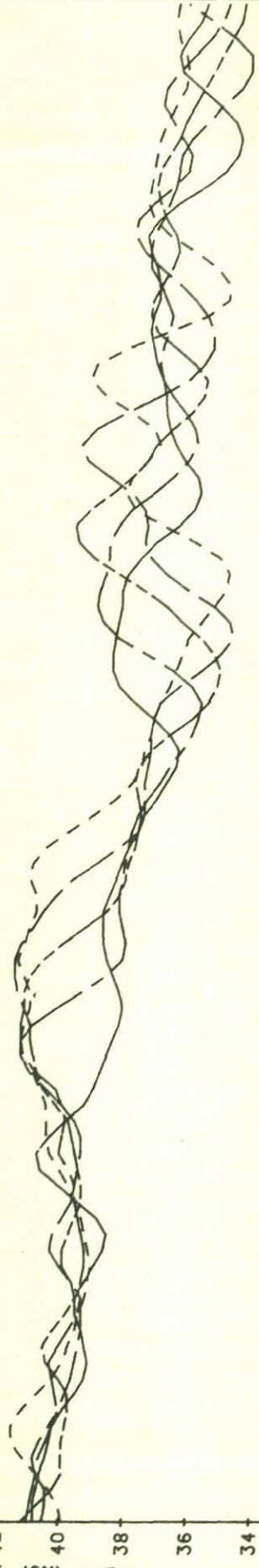
UUR  
UUR  
UUR  
UUR  
UUR

0  
0  
0  
1  
1

—  
—  
—  
—  
—

DEBIET : 0.160 M<sup>3</sup>/S  
ONTTREKKINGSDEBIET : 0.008 M<sup>3</sup>/S  
ONTTREKKINGSPUNT : 830

BODEMHOOGTE (CM) 46 44 42 40 38 36 34 32 30



AFSTAND LANGS GOOT (CM) 2000 2200 2400

MODEL  
MODEL  
MODEL  
MODEL  
MODEL

HYDR.  
HYDR.  
HYDR.  
HYDR.  
HYDR.

MIN  
MIN  
MIN  
MIN  
MIN

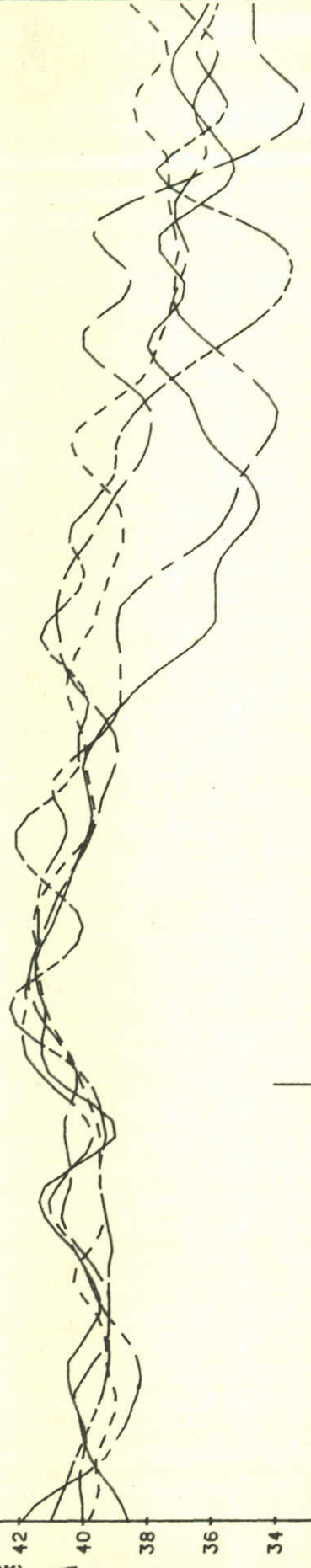
UUR  
UUR  
UUR  
UUR  
UUR

2  
3  
6  
8  
12

—  
—  
—  
—  
—

DEBIET : 0.160 M<sup>3</sup>/S  
ONTTREKKINGSDEBIET : 0.008 M<sup>3</sup>/S  
ONTTREKKINGSPUNT : 830

BODEMHOOGTE (CM) 48 46 44 42 40 38 36 34 32



AFSTAND LANGS GOOT (CM) 2000 2200 2400

BODEMLIGGING ZANDGOOT  
HYDRAULISCH MODEL

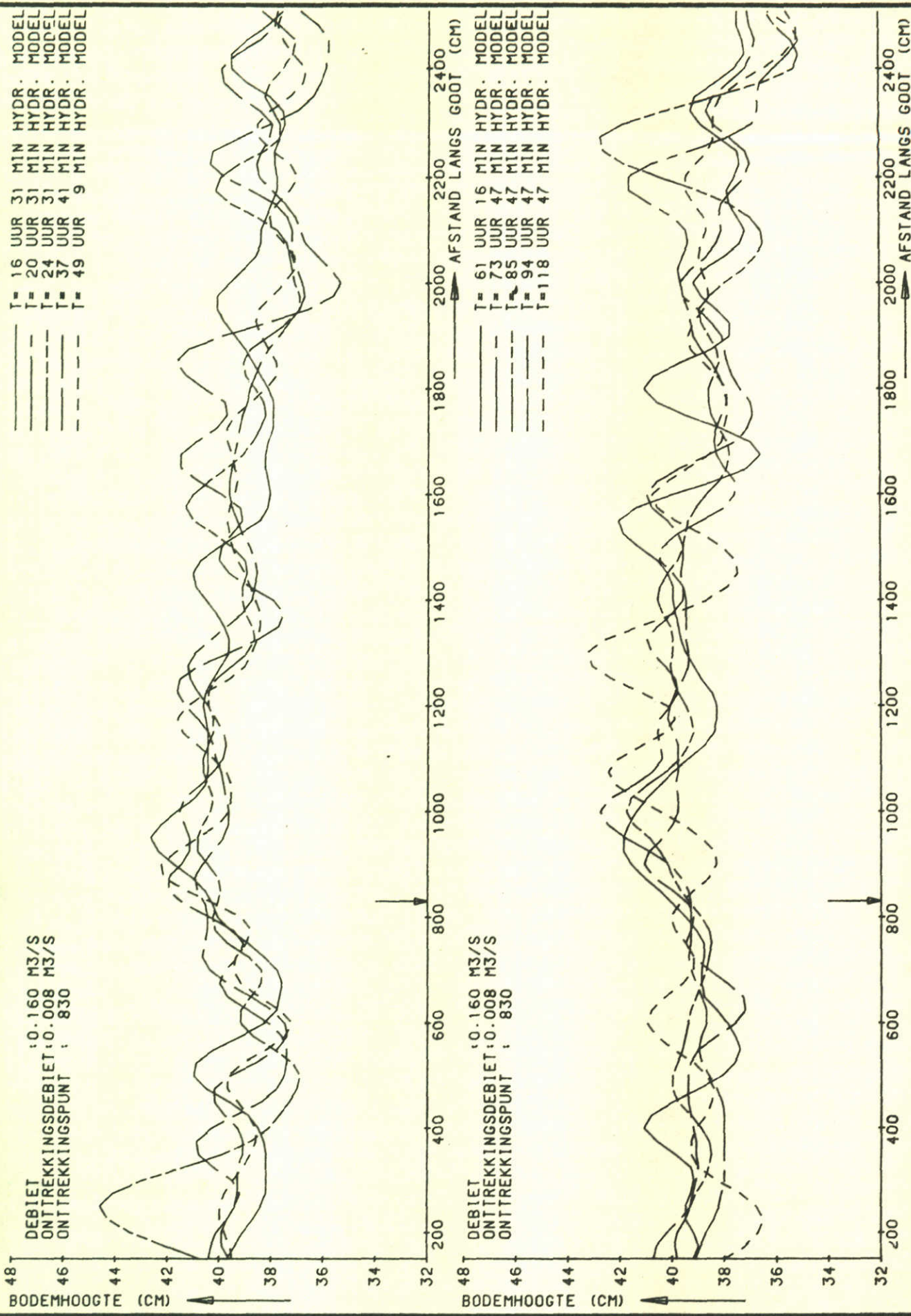
T3

$\Delta Q = 0,05Q$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M1755

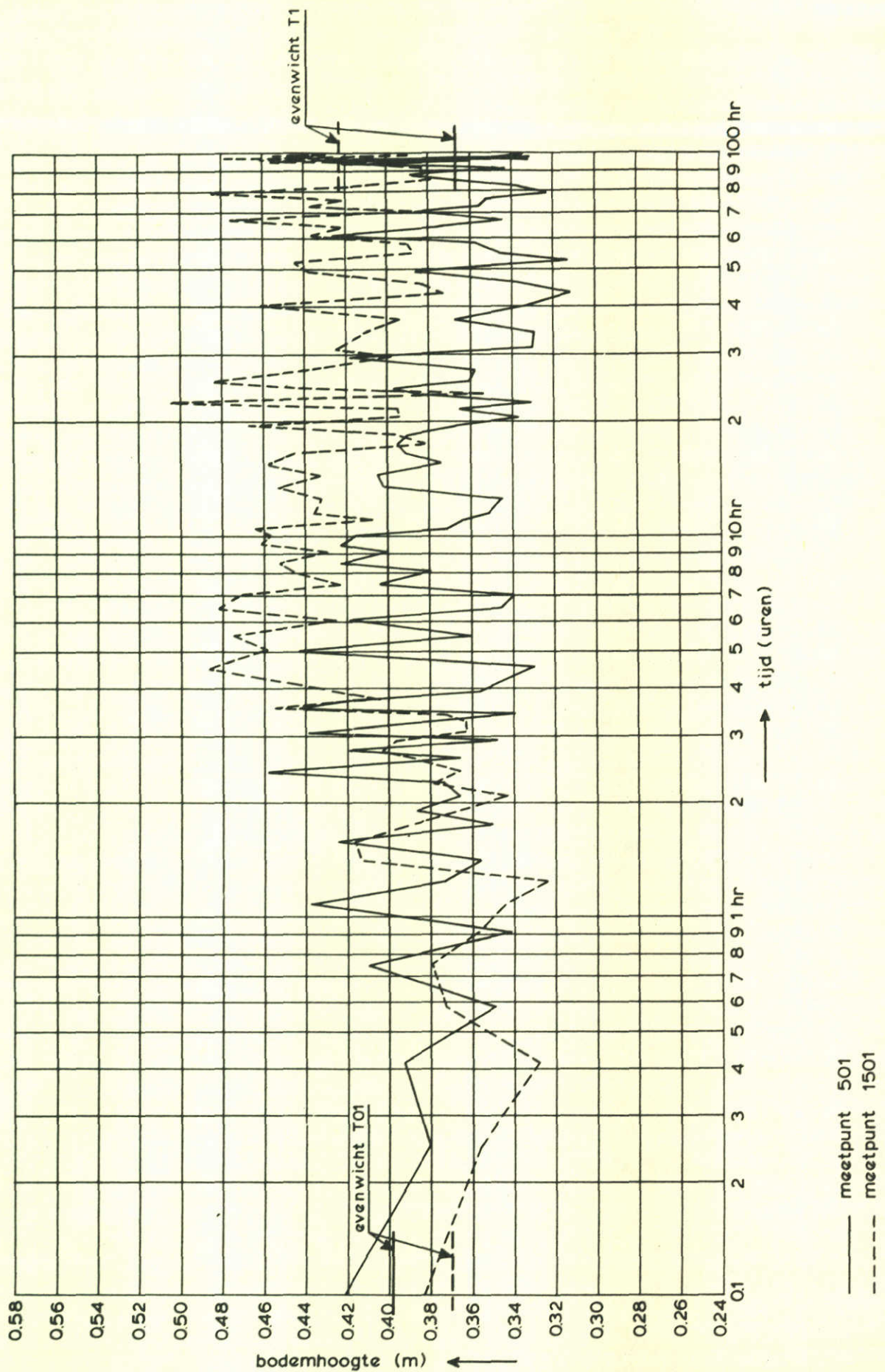
FIG. 18



BODEMLIGGING ZANDGOOT  
 HYDRAULISCH MODEL

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

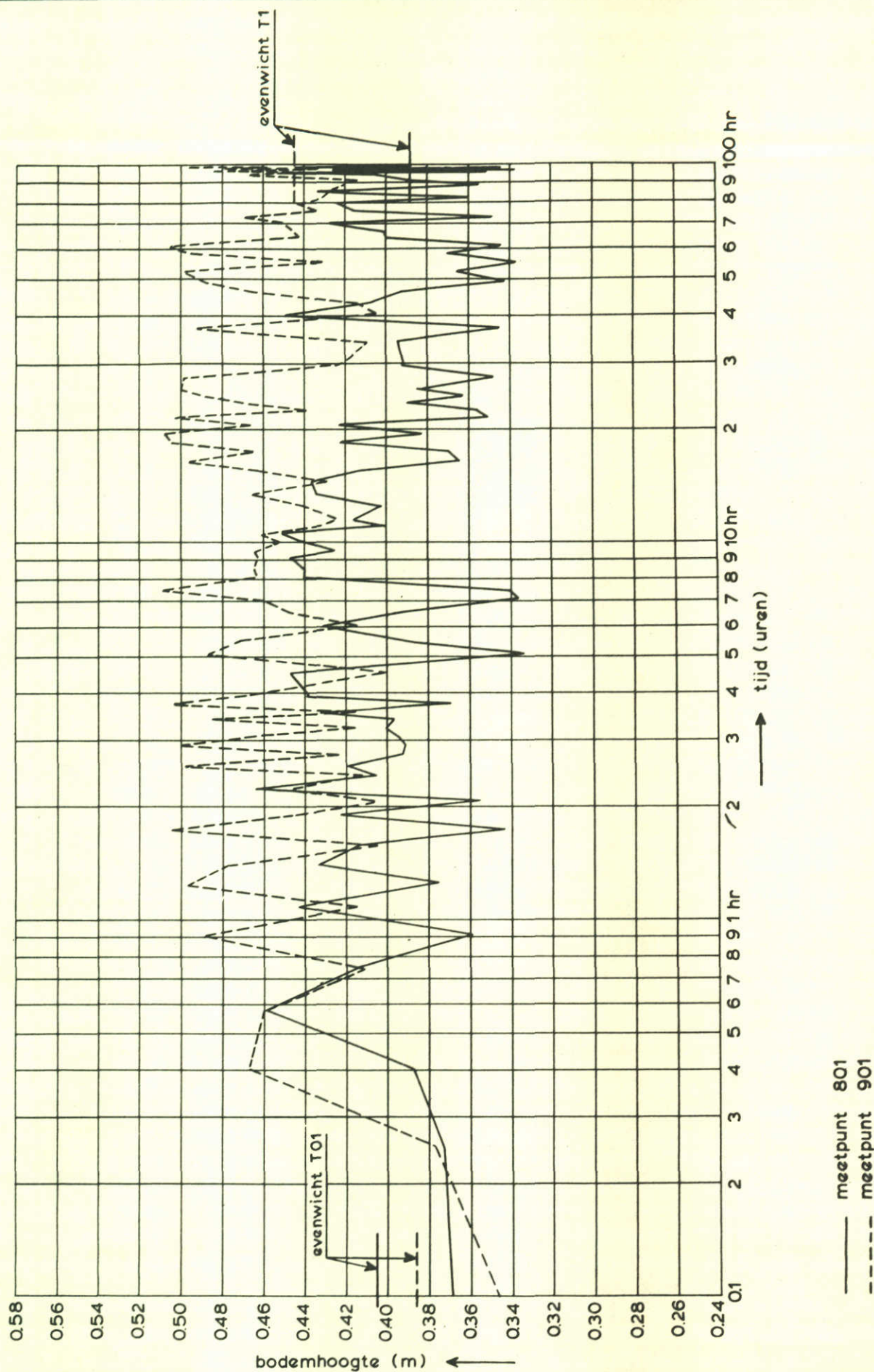
T3	$\Delta Q = 0.05Q$
M1755	FIG. 19



T'JDSAFHANKELIJK VERLOOP VAN DE BODEMLIGGING  
MEETPUNTEN 501 EN 1501

T01/T1       $\Delta Q = 0,15Q$





TJDSAFHANKELIJK VERLOOP VAN DE BODEMLIGGING  
MEETPUNTEN 801 EN 901

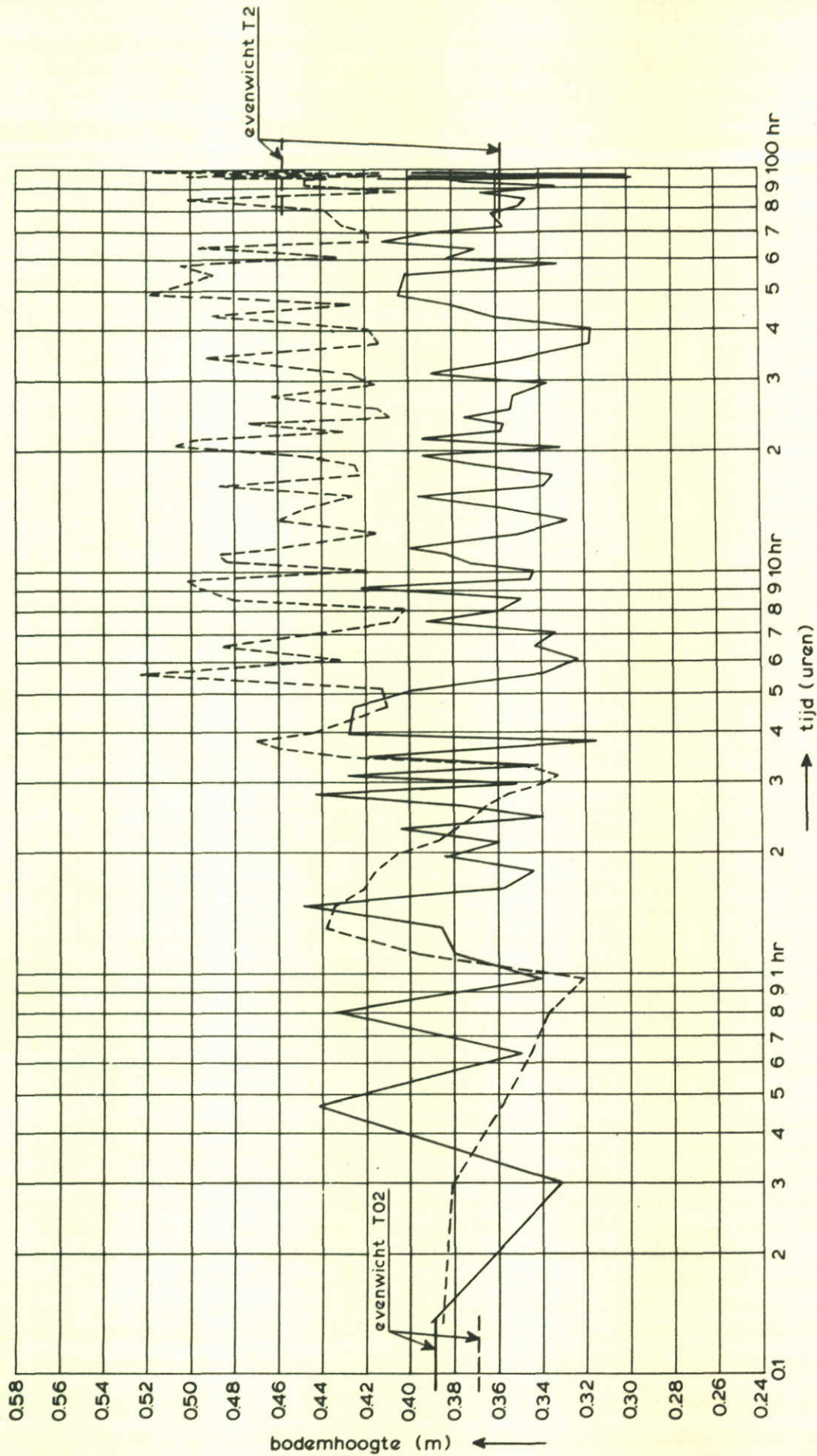
T01/T1

$\Delta Q = 0,15Q$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M1755

FIG. 21



— meetpunt 501  
 - - - meetpunt 1501

TJDSAFHANKELIJK VERLOOP VAN DE BODEMLIGGING  
 MEETPUNTEN 501 EN 1501

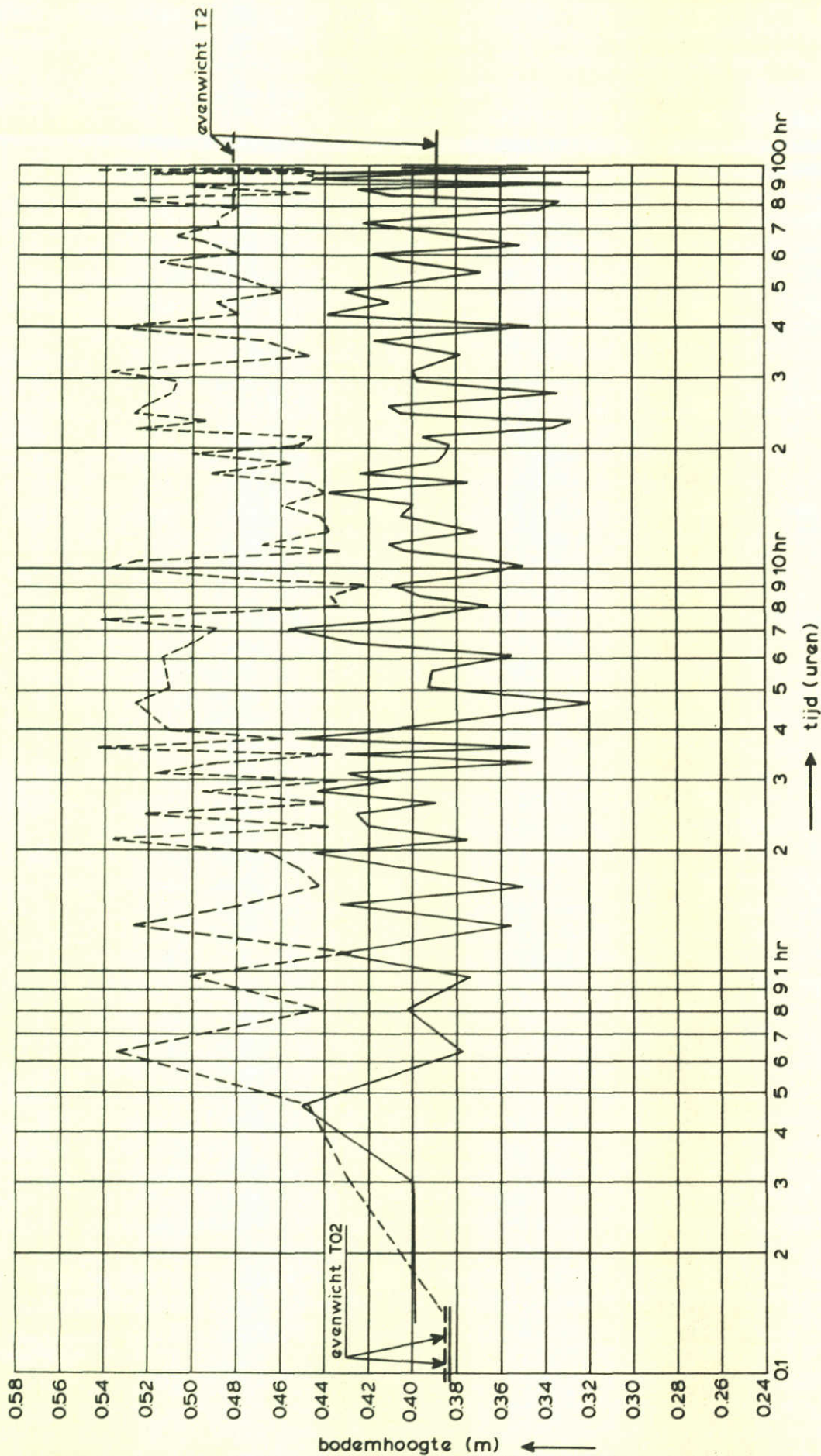
T02/T2

$\Delta Q = 0,15Q$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M1755

FIG. 22



— meetspunt 801  
 - - - meetspunt 901

TJDSAFHANKELIJK VERLOOP VAN DE BODEMLIGGING  
 MEETPUNTEN 801 EN 901

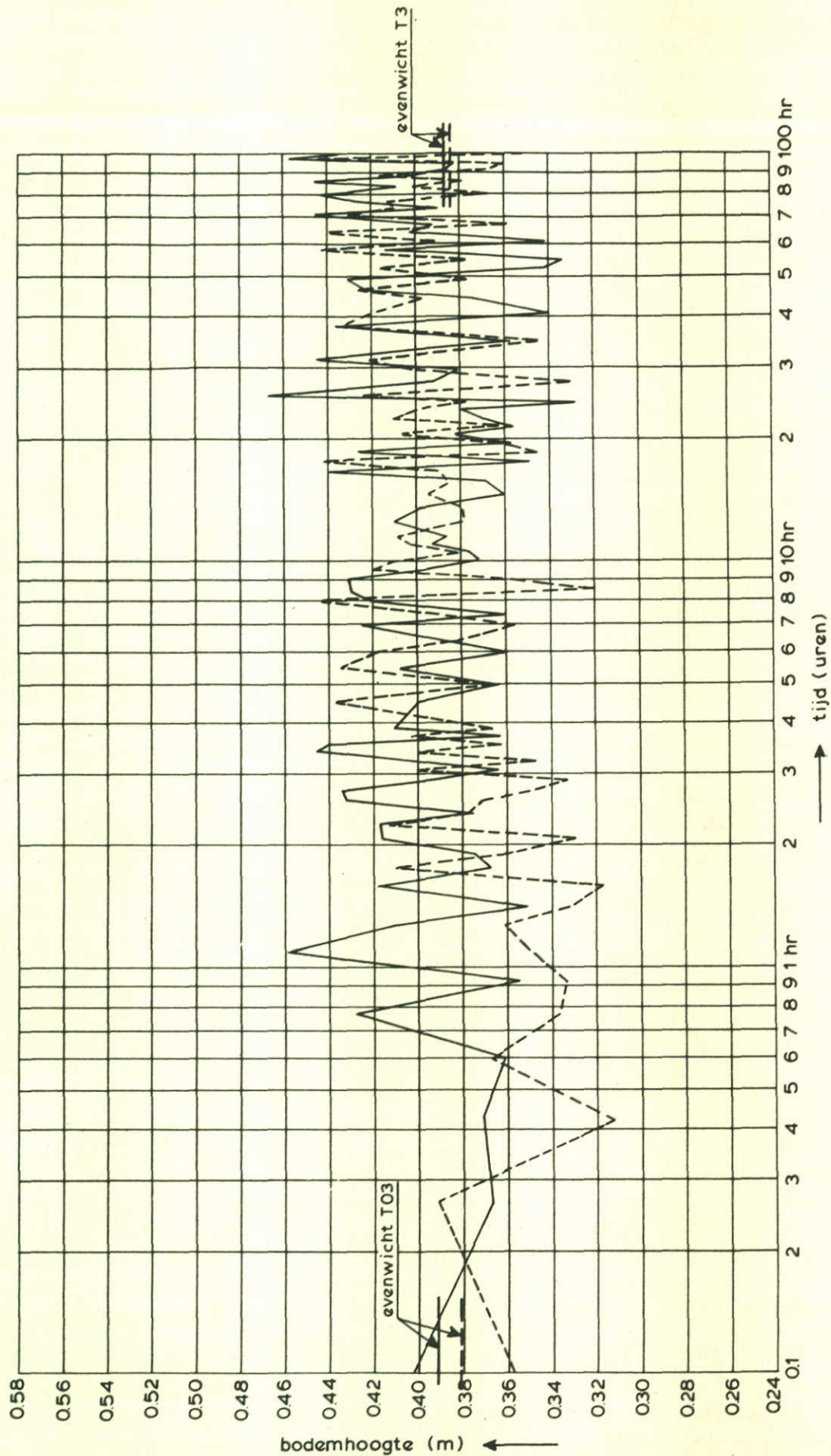
T02/T2

$\Delta Q = 0,15Q$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M1755

FIG. 23



TJDSAFHANKELIJK VERLOOP VAN DE BODEMLIGGING  
MEETPUNTEN 501 EN 1501

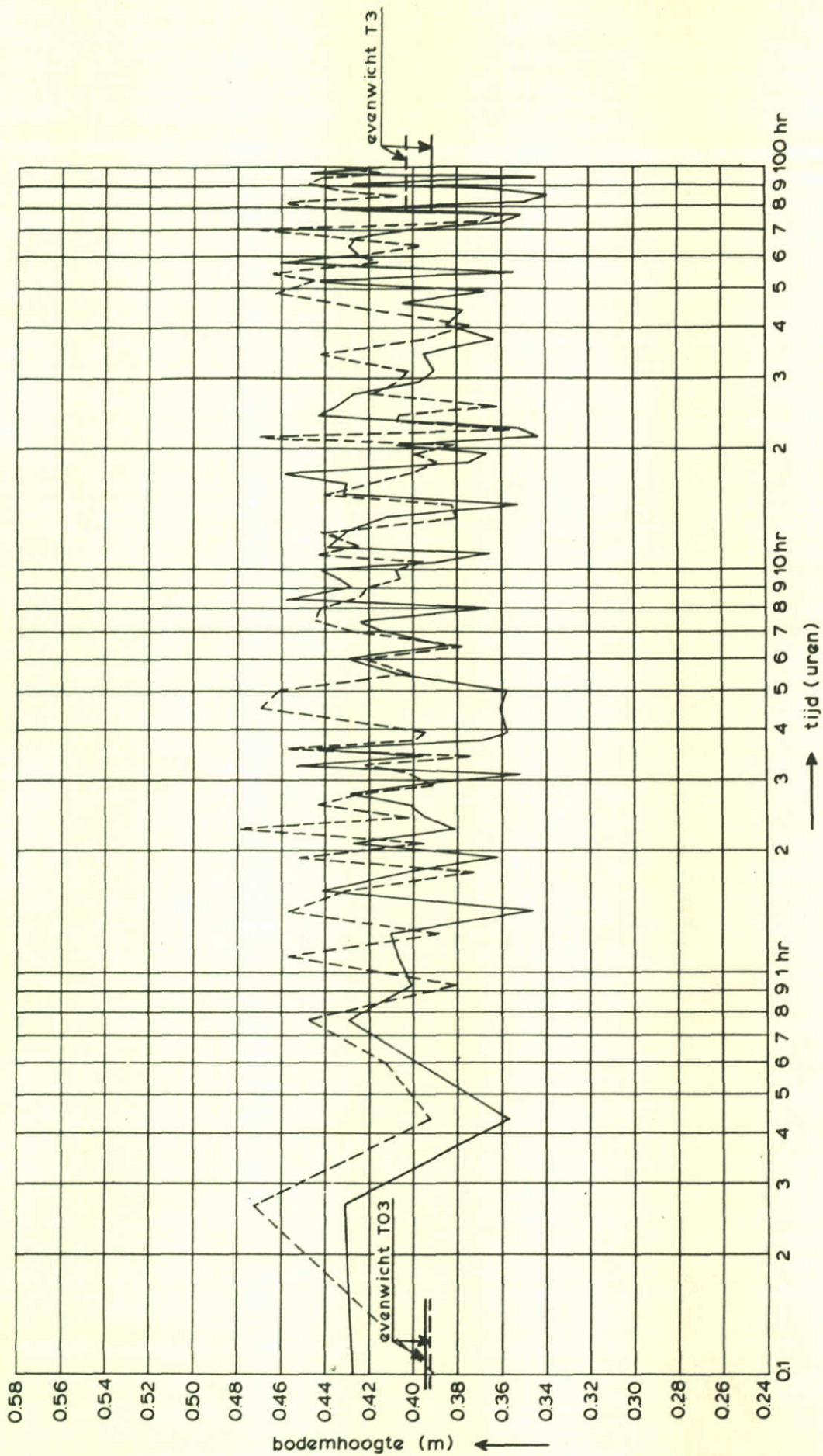
T03/T3

$\Delta Q = 0,15Q$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M1755

FIG. 24



T'JDSAFHANKELJK VERLOOP VAN DE BODEMLIGGING  
MEETPUNTEN 801 EN 901

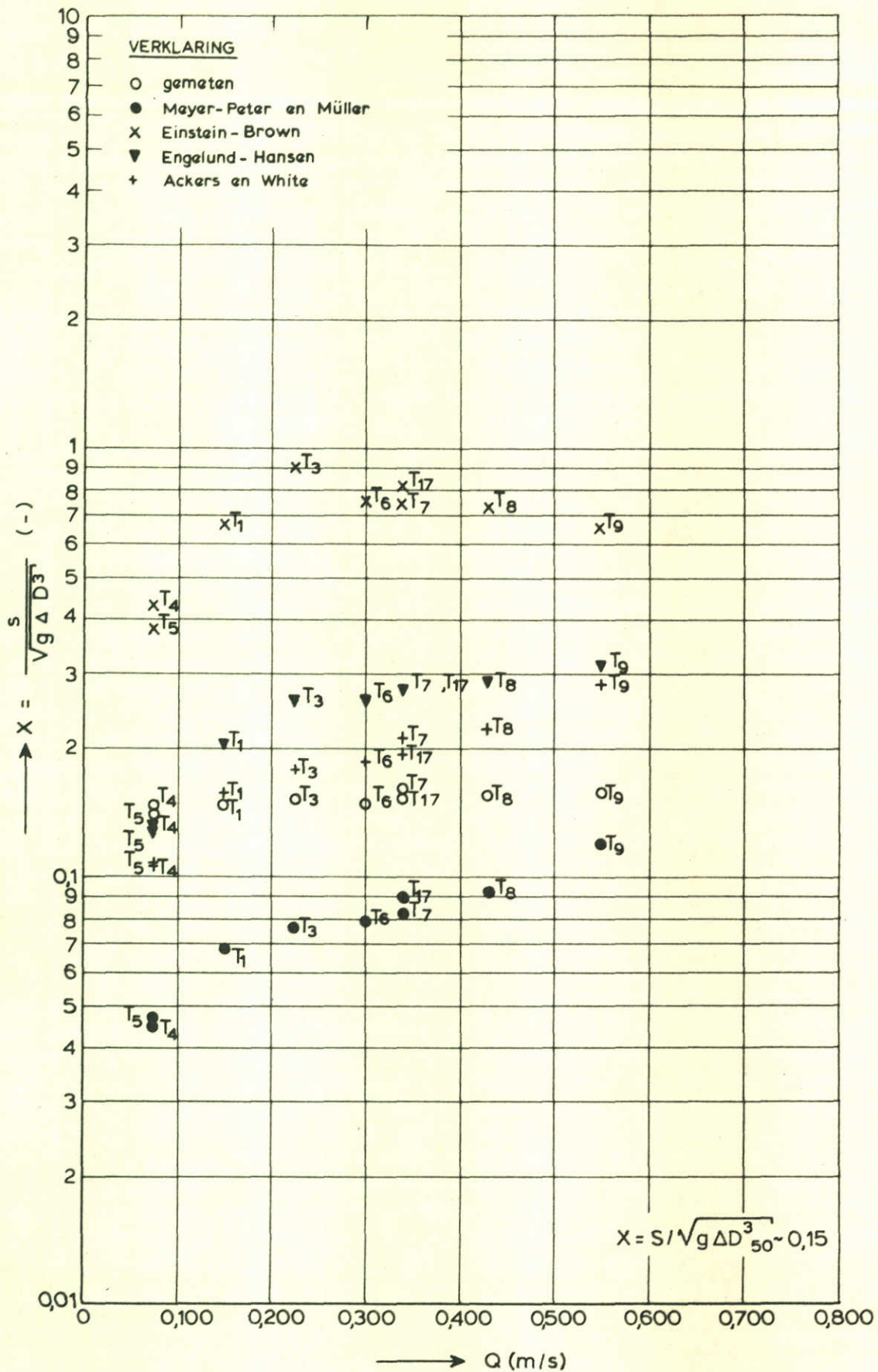
T03/T3

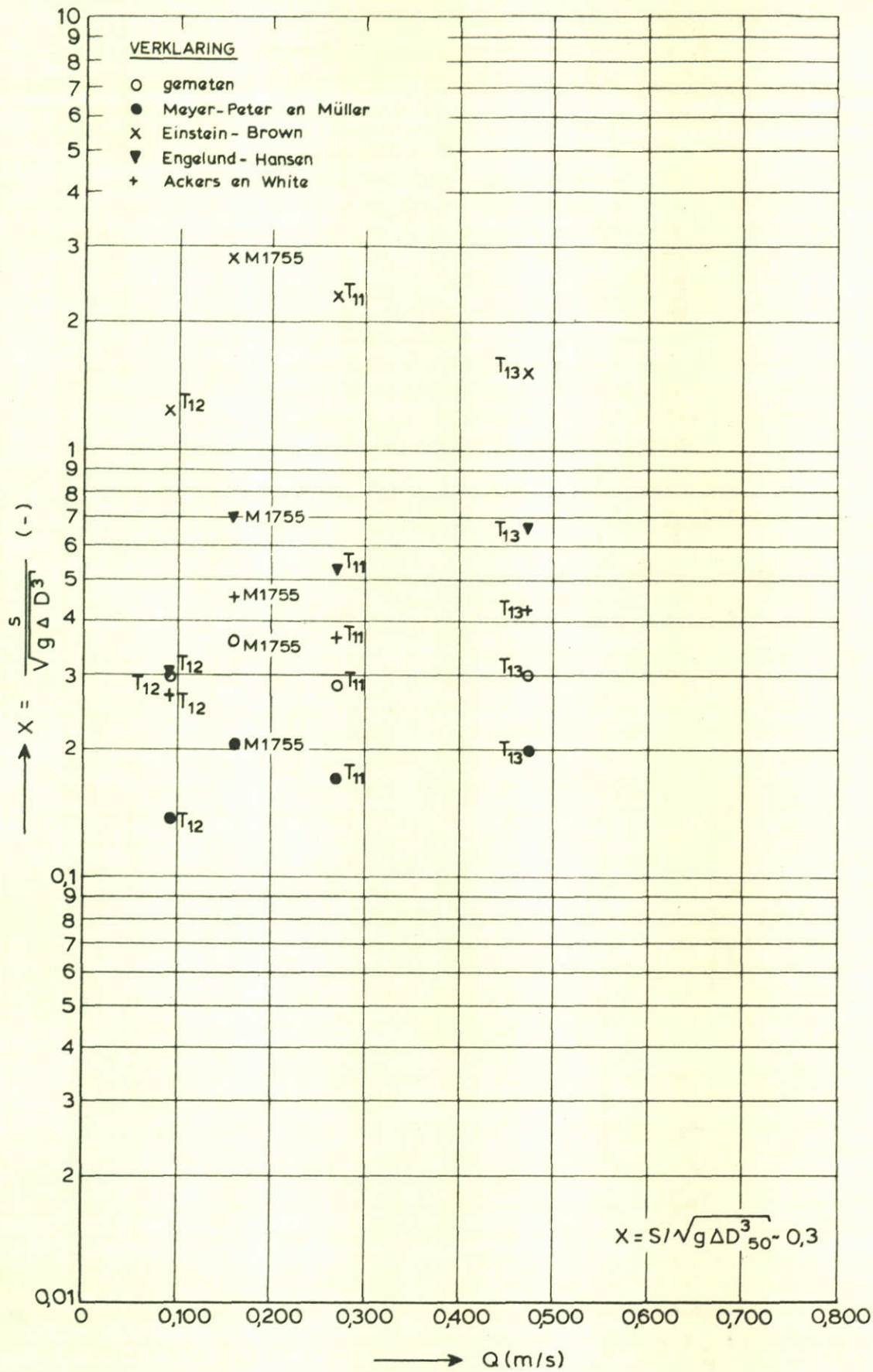
$\Delta Q = 0,15Q$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

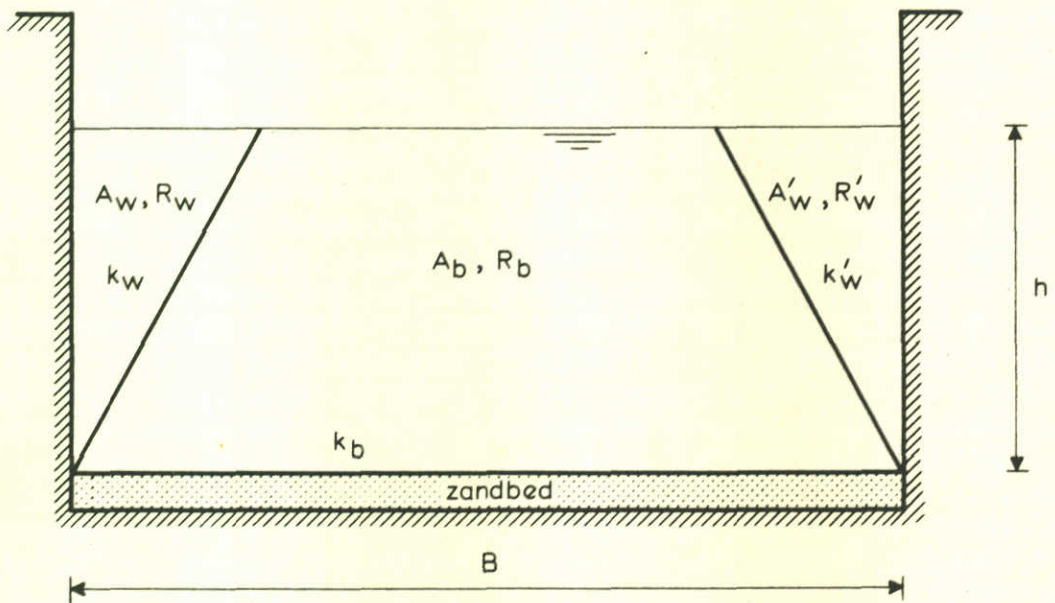
M1755

FIG. 25





VERGELIJKING GEMETEN EN BEREKEND  
ZANDTRANSPORT IN ZANDGOOT



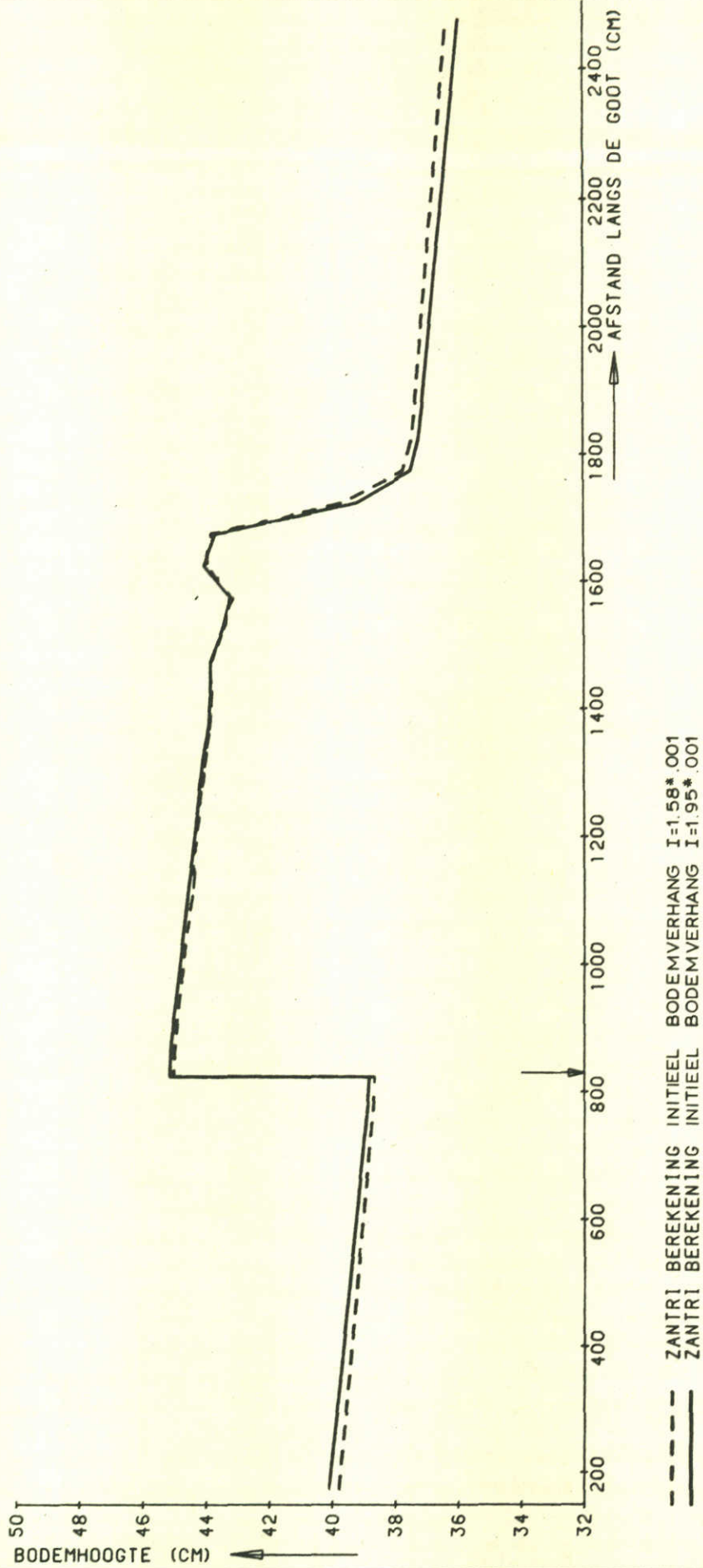
VERDELING DOORSTROOMPROFIEL VOLGENS EINSTEIN

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1755

FIG. 28





BODEMLIGGING NA 6 UUR

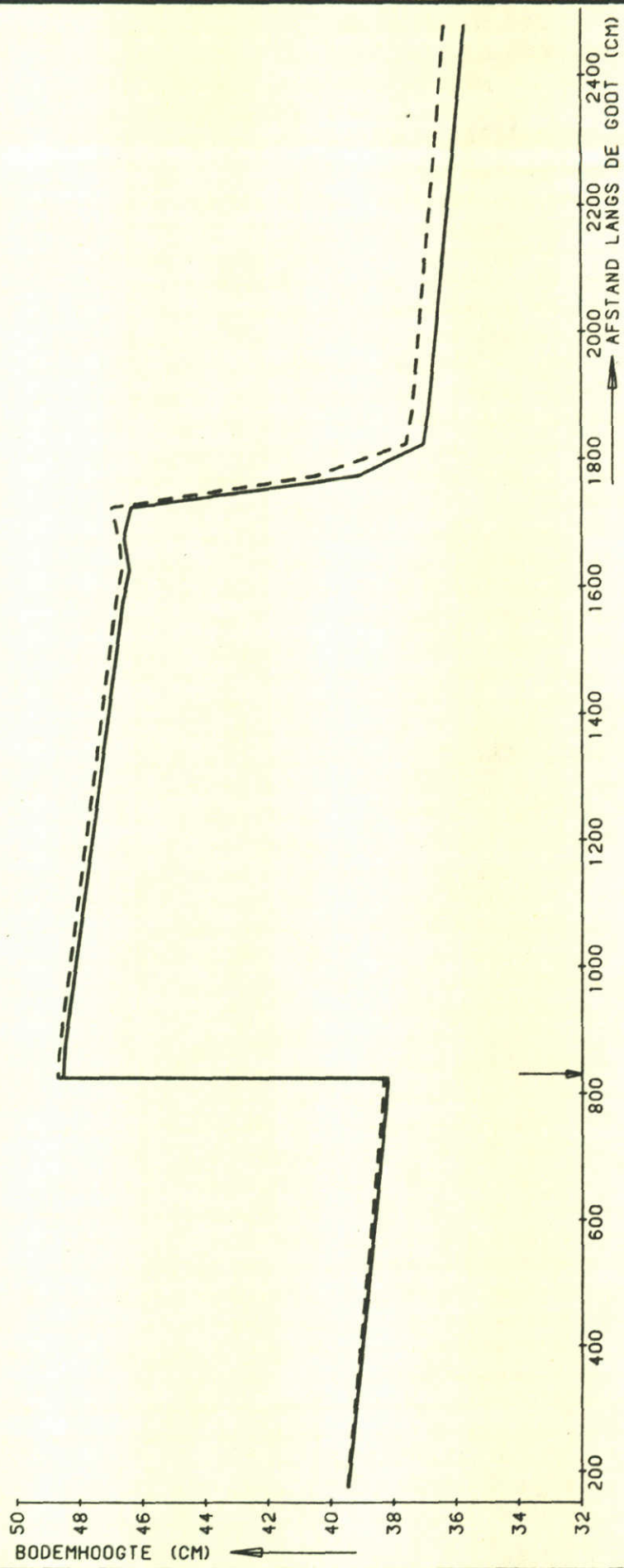
T1

$\Delta Q = 0,15Q$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

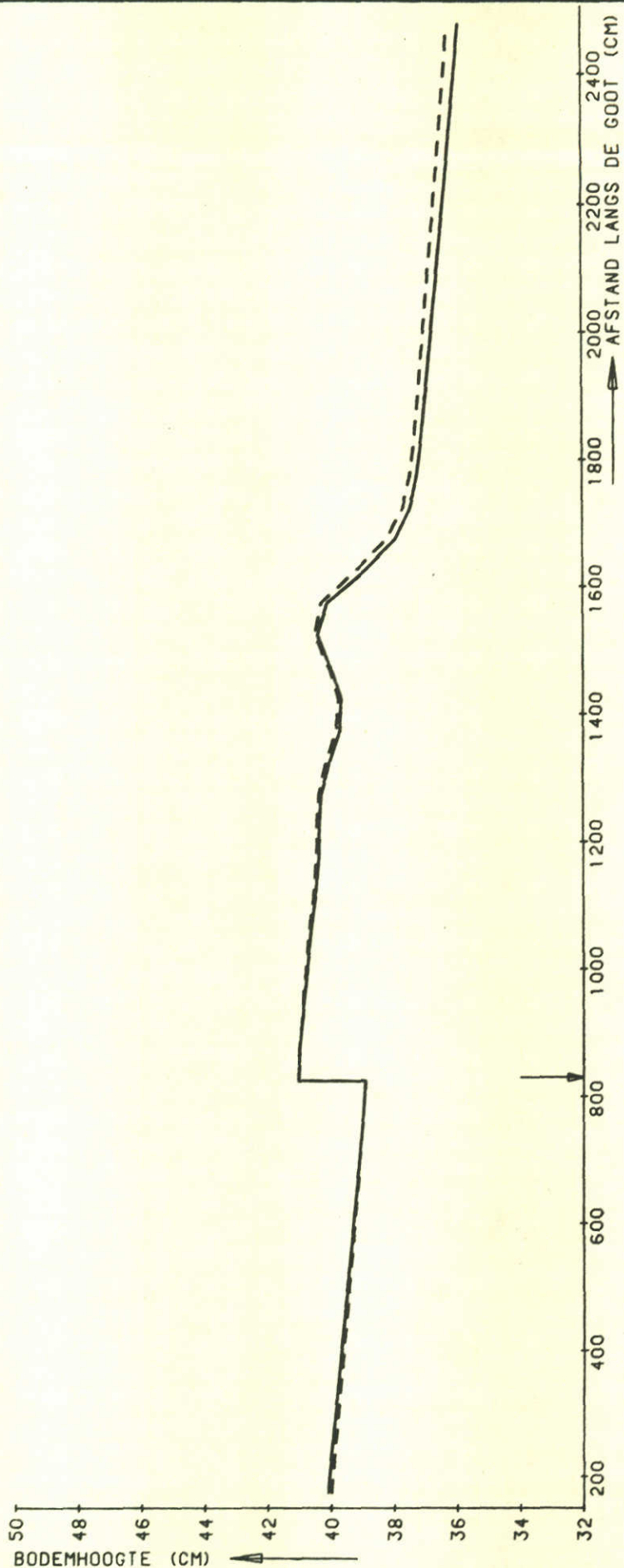
M 1755

FIG. 29



- - - ZANTRI BERKENING INITIEEL BODEMVERHANG I=1.58\*.001  
 ——— ZANTRI BERKENING INITIEEL BODEMVERHANG I=1.89\*.001

BODEMLIGGING NA 6 UUR	T2	$\Delta Q = 0,25Q$
	WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1755
		FIG. 30



- - - ZANTRI BEREKENING INITIEEL BODEMVERHANG I=1.58\*.001  
 ——— ZANTRI BEREKENING INITIEEL BODEMVERHANG I=1.88\*.001

BODEMLIGGING NA 6 UUR

T3

$\Delta Q = 0,05Q$

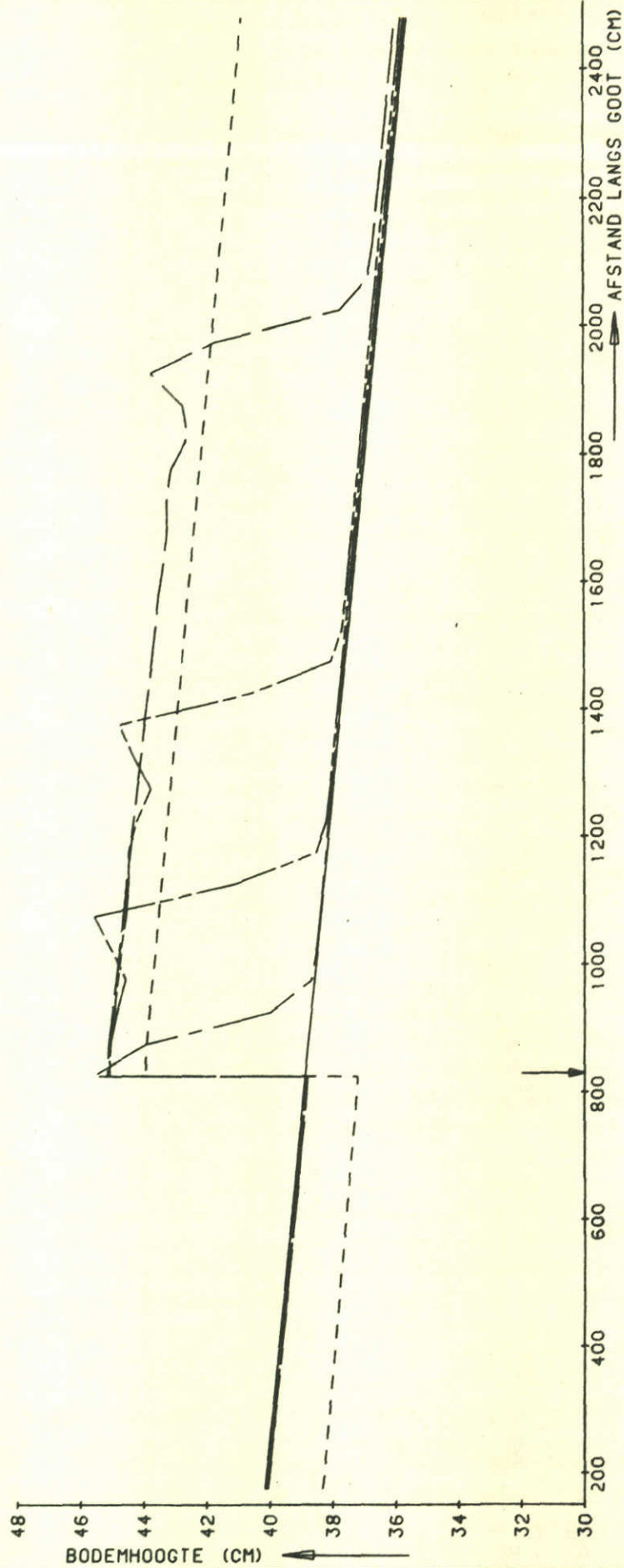
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1755

FIG. 31

DEBIET : 0.160 M<sup>3</sup>/S  
 ONTTREKKINGSDEBIET : 0.024 M<sup>3</sup>/S  
 ONTTREKKINGSPUNT : 830

T = 0 U 30 M  
 T = 0 U 30 M  
 T = 2 U 4 U  
 T = 4 U 8 U  
 T = 8 U 10 M



ZANTRI BEREKENINGEN

T1

$\Delta Q = 0,15Q$

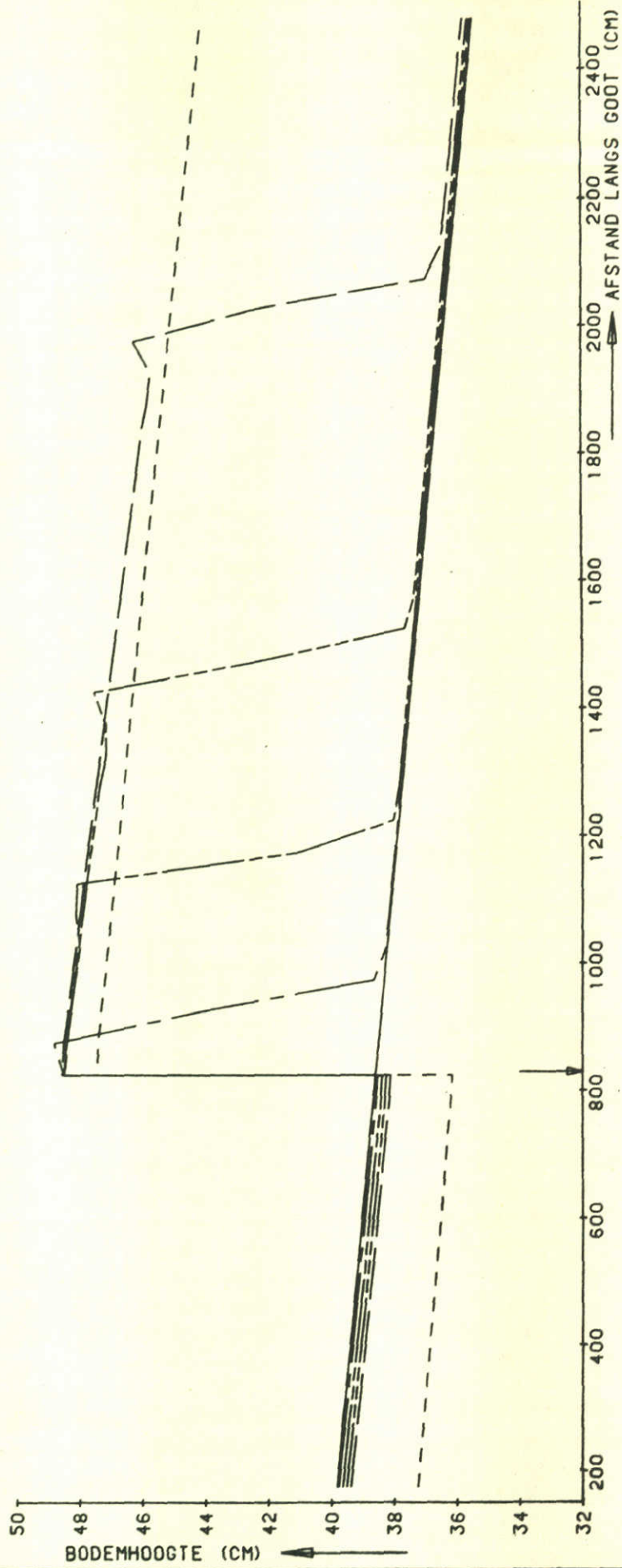
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M1755

FIG. 32

DEBIET : 0.160 M<sup>3</sup>/S  
 ONTTREKKINGSDEBIET : 0.040 M<sup>3</sup>/S  
 ONTTREKKINGSPUNT : 830

T = 0 U 38 M M  
 T = 2 U 6 M M  
 T = 4 U 8 M M  
 T = 8 U 7 M M  
 T = 73 U 17 M M



ZANTRI BEREKENINGEN

T2

$\Delta Q = 0,25Q$

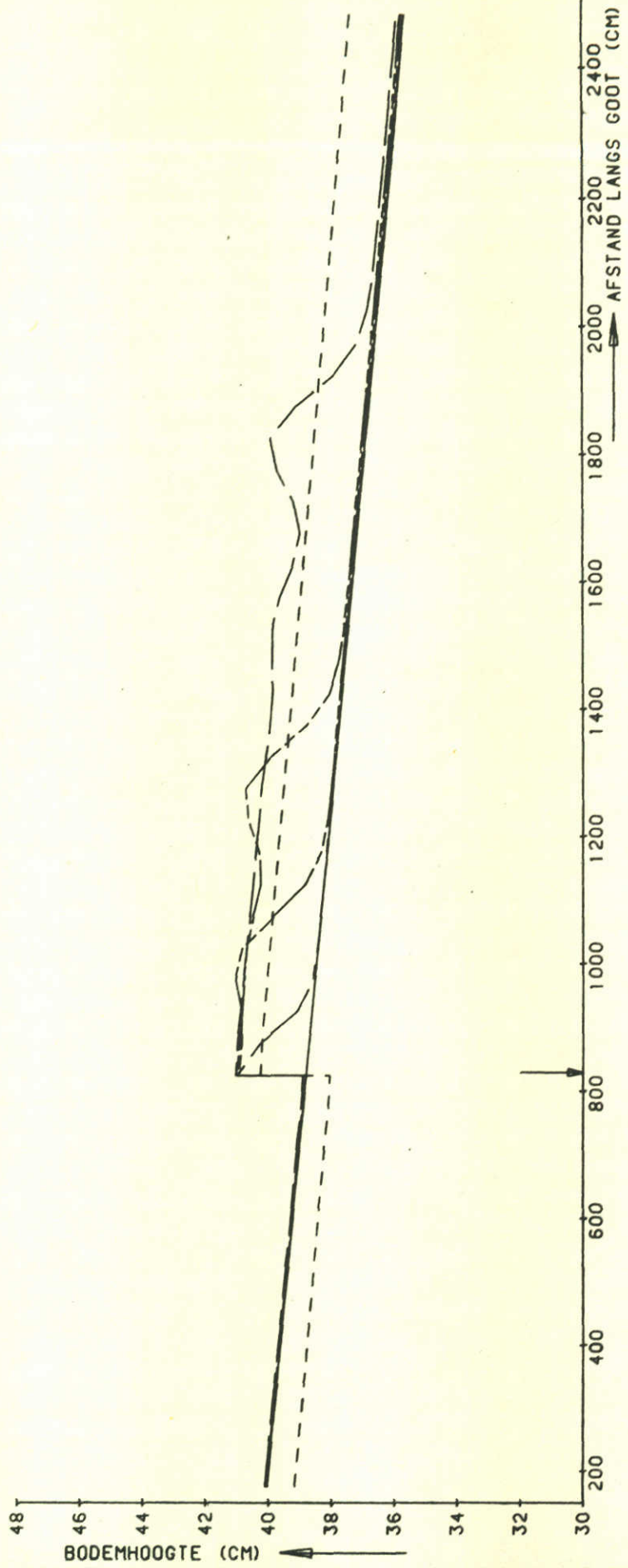
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M1755

FIG. 33

DEBIET : 0.160 M<sup>3</sup>/S  
 ONTTREKKINGSDEBIET : 0.008 M<sup>3</sup>/S  
 ONTTREKKINGSPUNT : 830

T = 0 U 30 M  
 T = 0 U 30 M  
 T = 2 U 30 M  
 T = 4 U 30 M  
 T = 8 U 30 M  
 T = 73 U 50 M



ZANTRI BEREKENINGEN

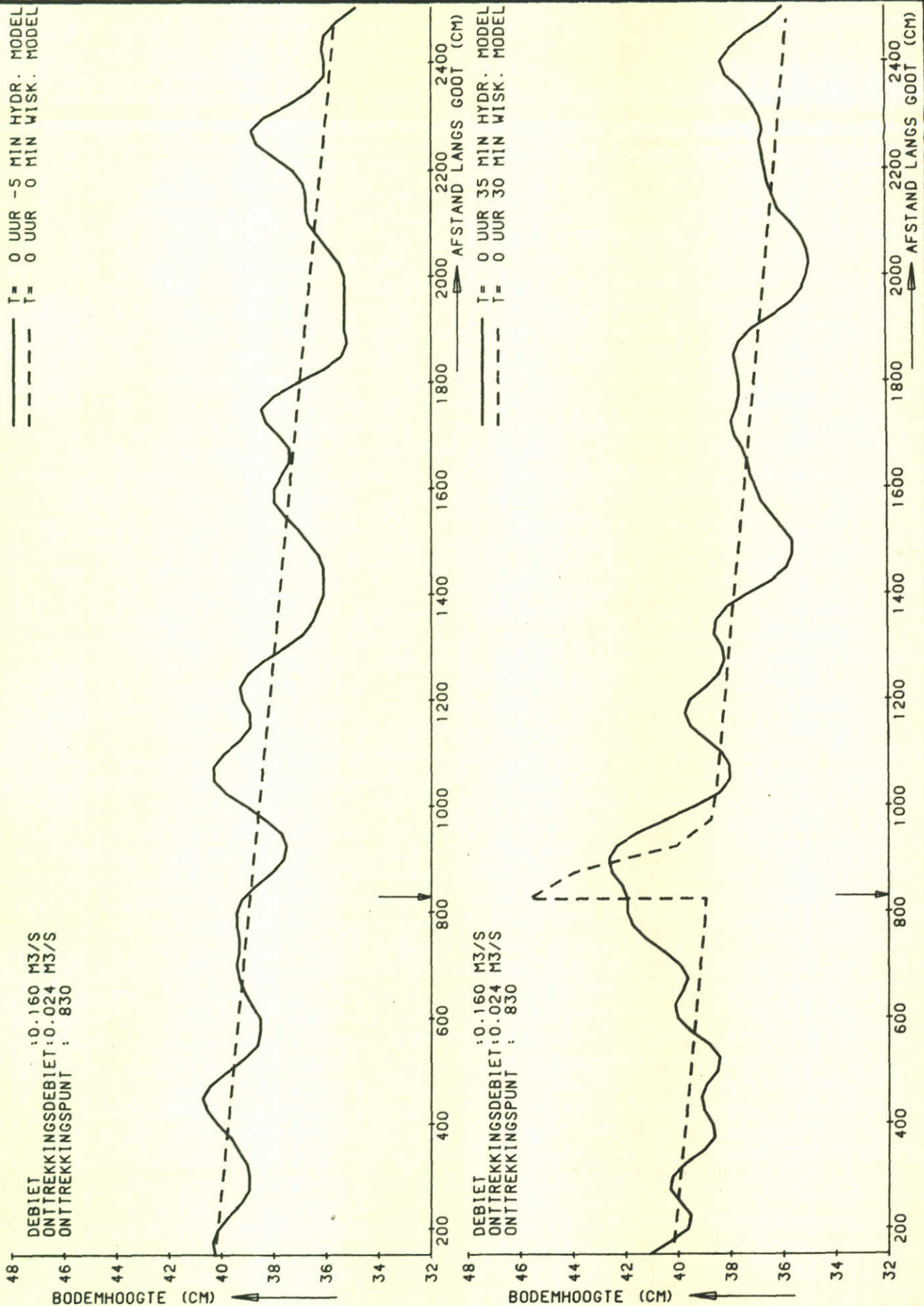
T3

$\Delta Q = 0,05Q$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M1755

FIG. 34



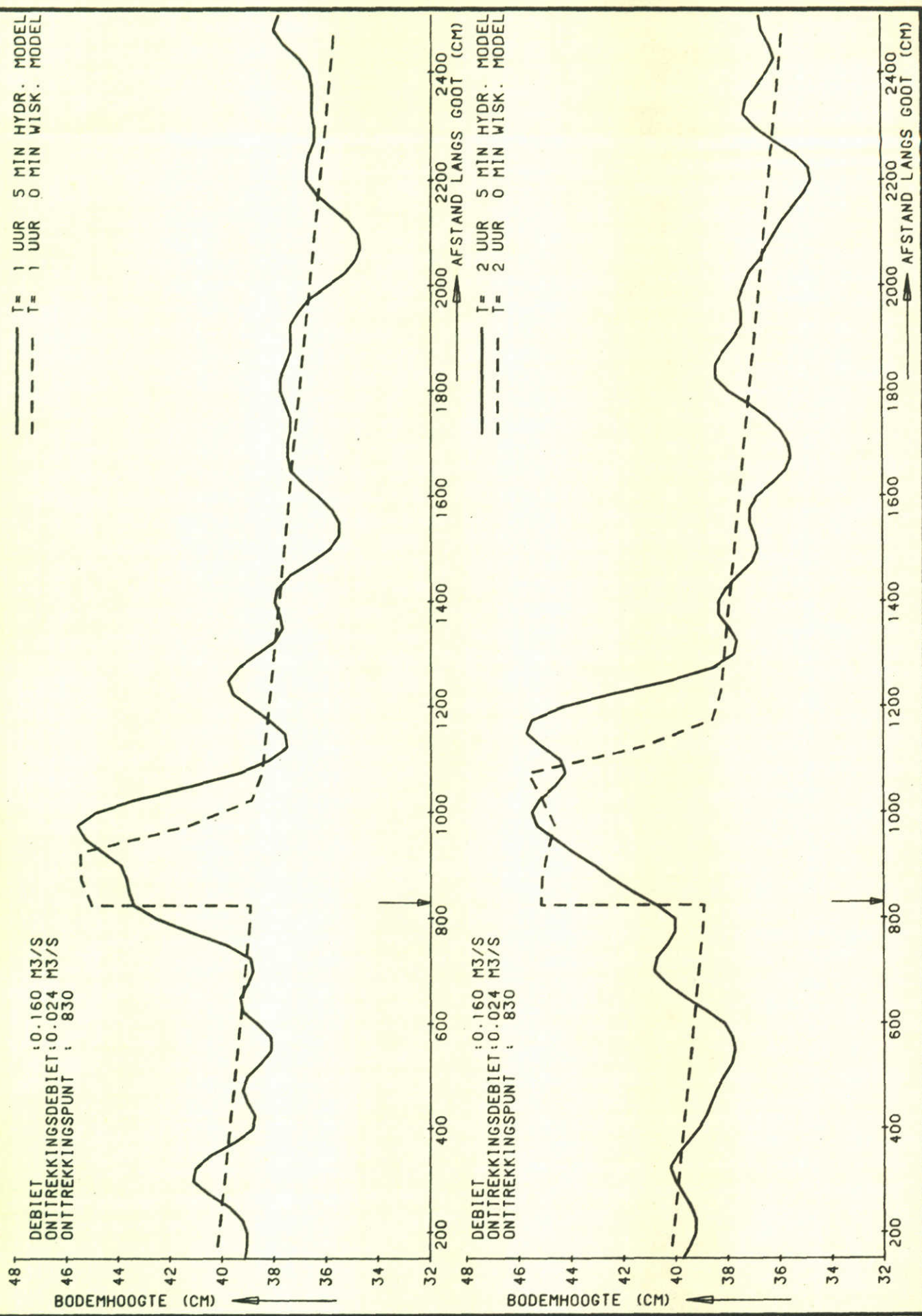
BODEMLIGGING ZANDGOOT  
 HYDRAULISCH EN WISKUNDIG MODEL

T01/T1      ΔQ=0,15 Q

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

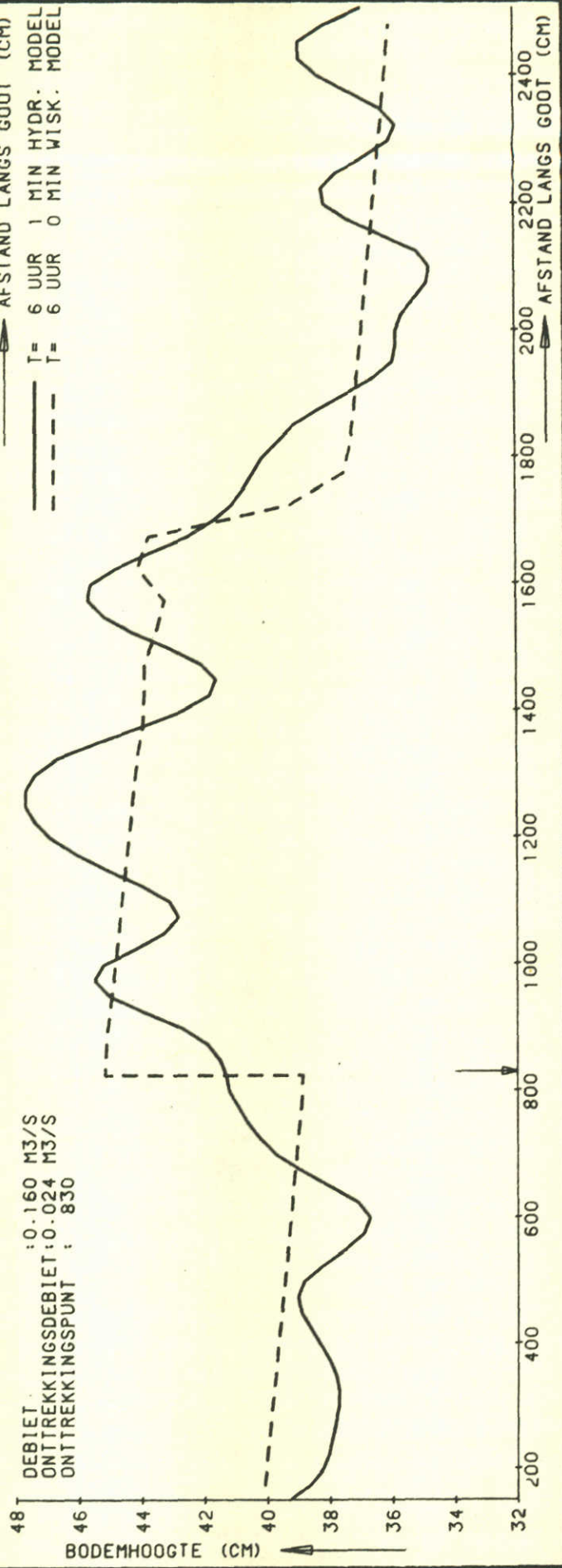
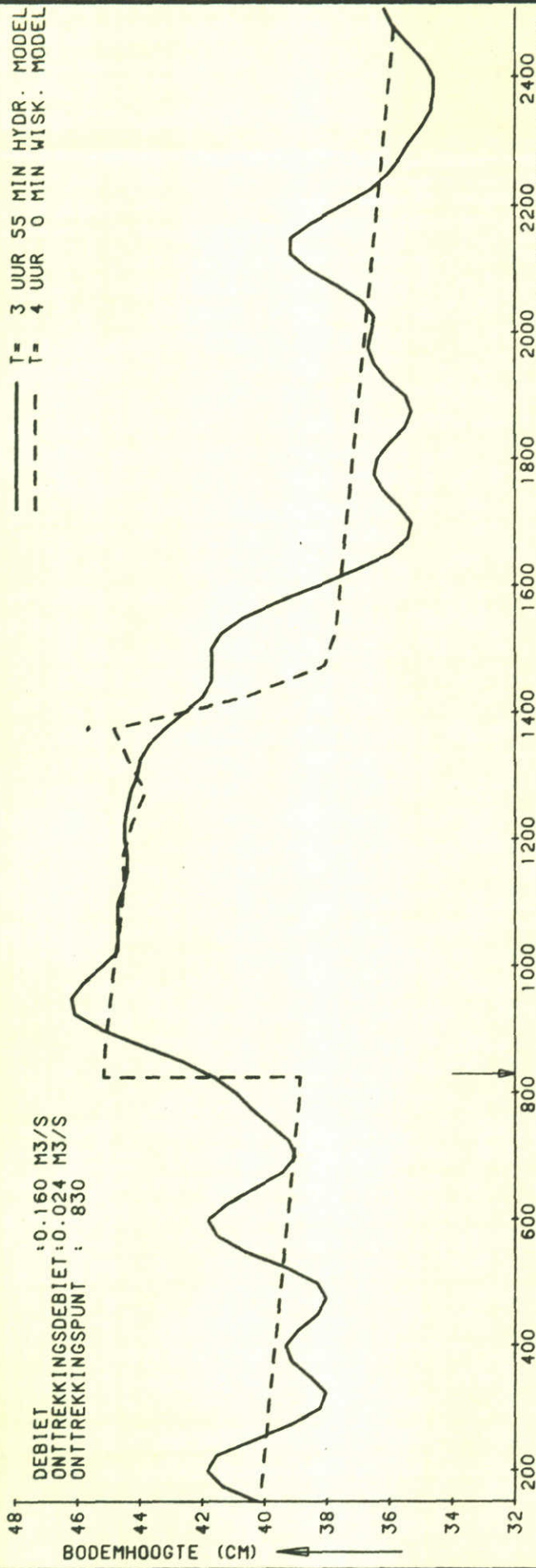
M1755

FIG. 35

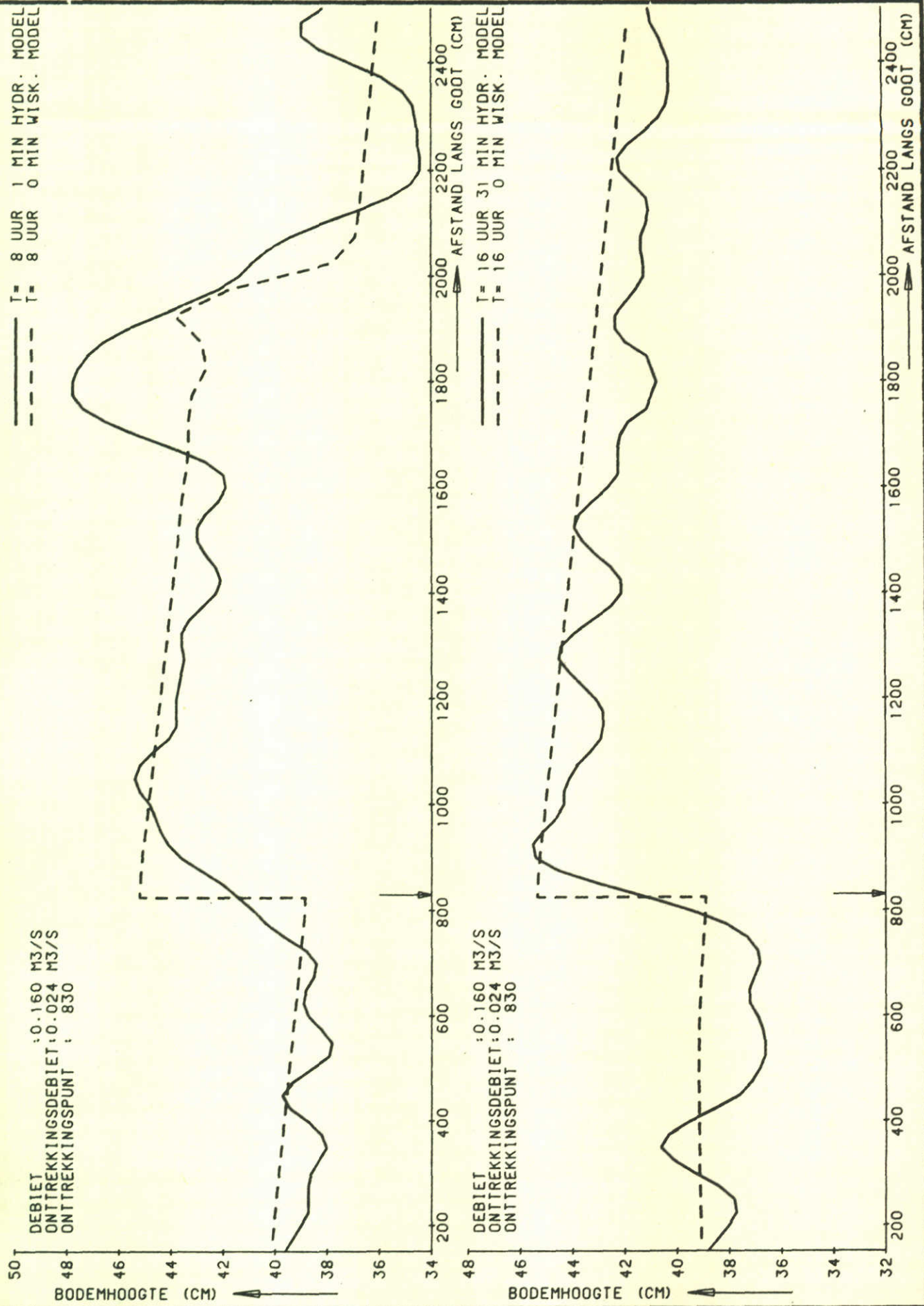


BODEMLIGGING ZANDGOOT HYDRAULISCH EN WISKUNDIG MODEL	T 01/T1	$\Delta Q = 0,15Q$
	MI755	FIG. 36

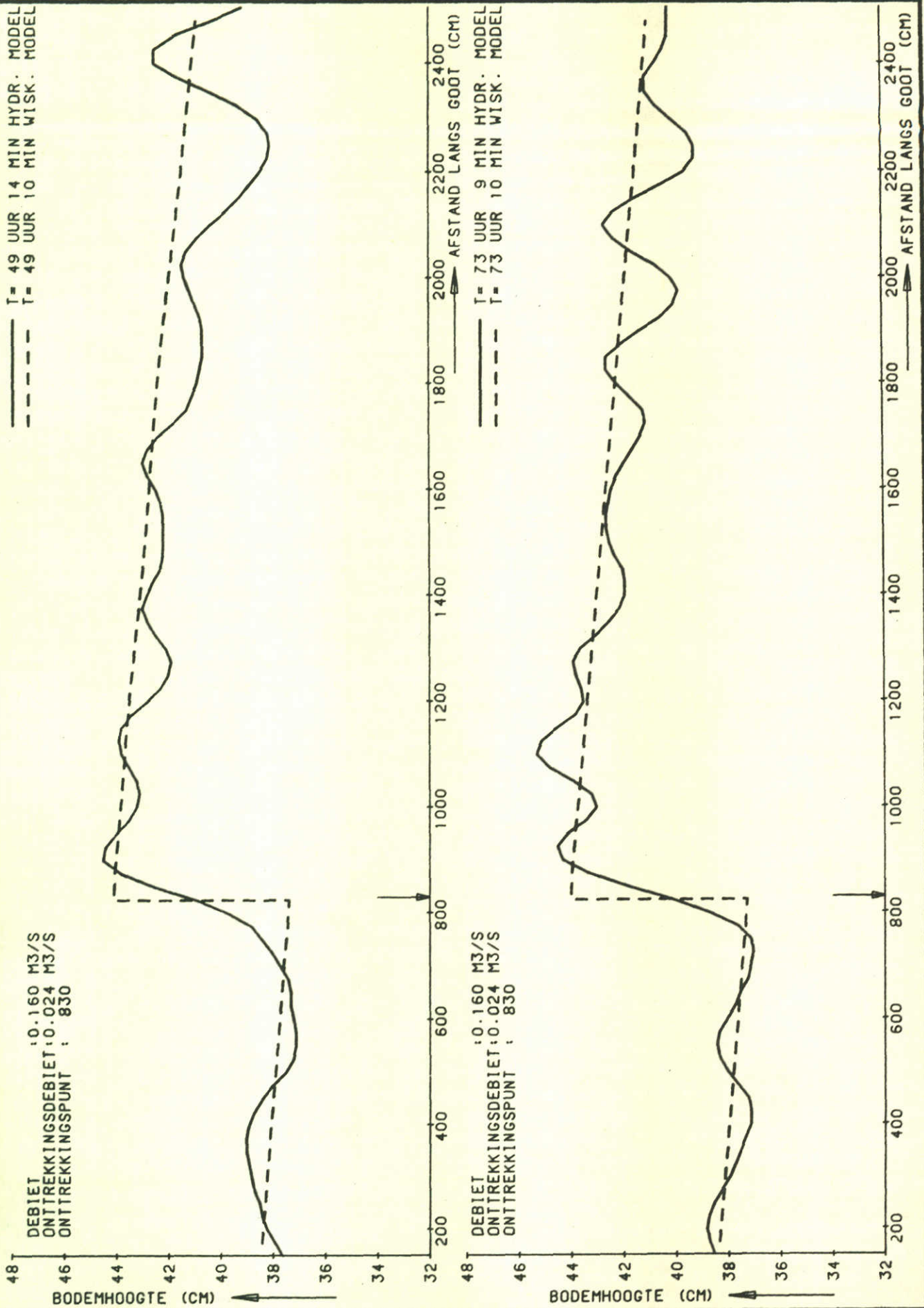




<b>BODEMLIGGING ZANDGOOT</b> <b>HYDRAULISCH EN WISKUNDIG MODEL</b>	TO1/T1	$\Delta Q = 0,15Q$
	M1755	FIG. 37
<b>WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM</b>		



<b>BODEMLIGGING ZANDGOOT</b> <b>HYDRAULISCH EN WISKUNDIG MODEL</b>	T01/ T1	$\Delta Q = 0,15Q$
	M1755	FIG. 38
<b>WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM</b>		



BODEMLIGGING ZANDGOOT

T01 / T1

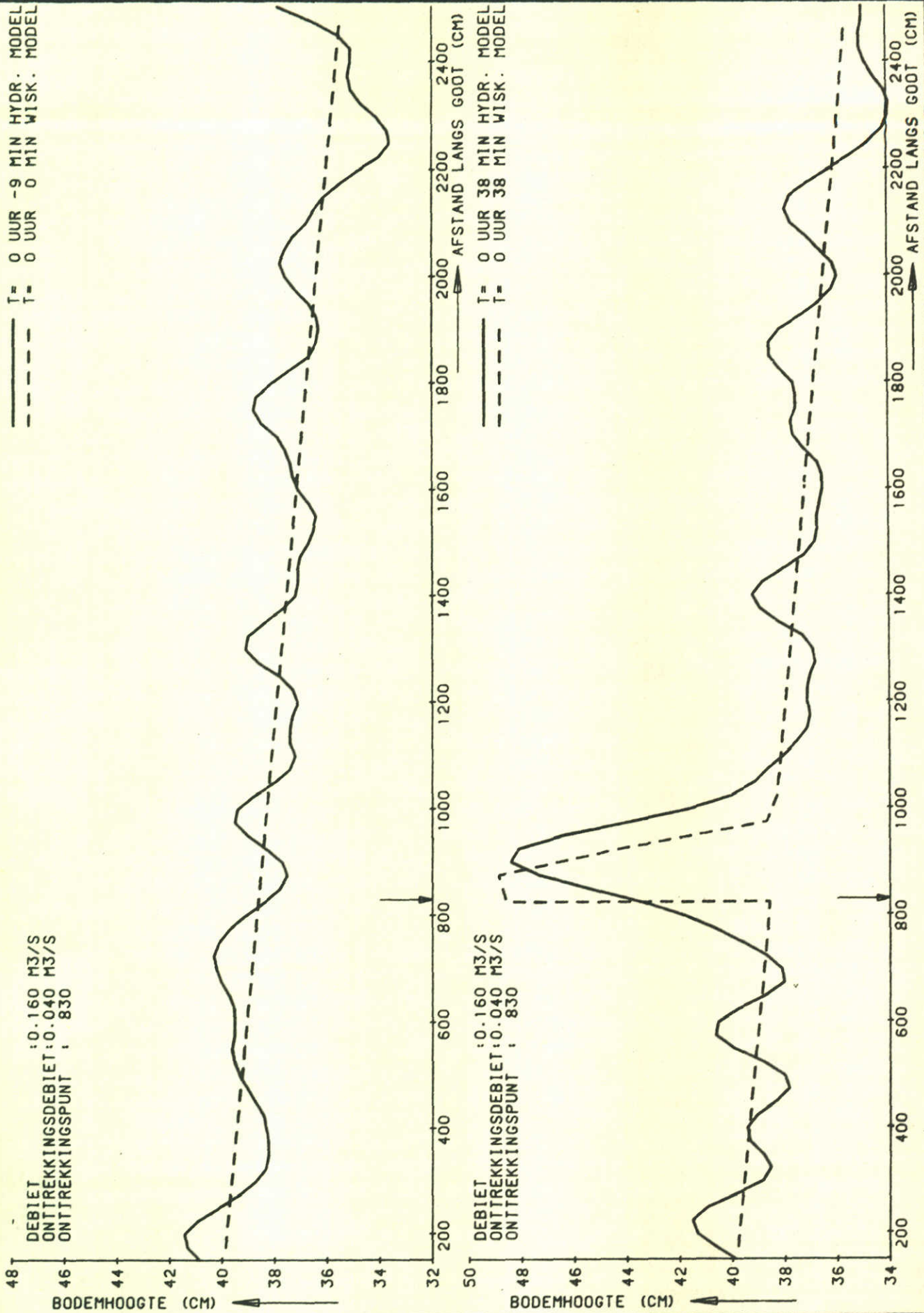
$\Delta Q = 0,15Q$

HYDRAULISCH EN WISKUNDIG MODEL

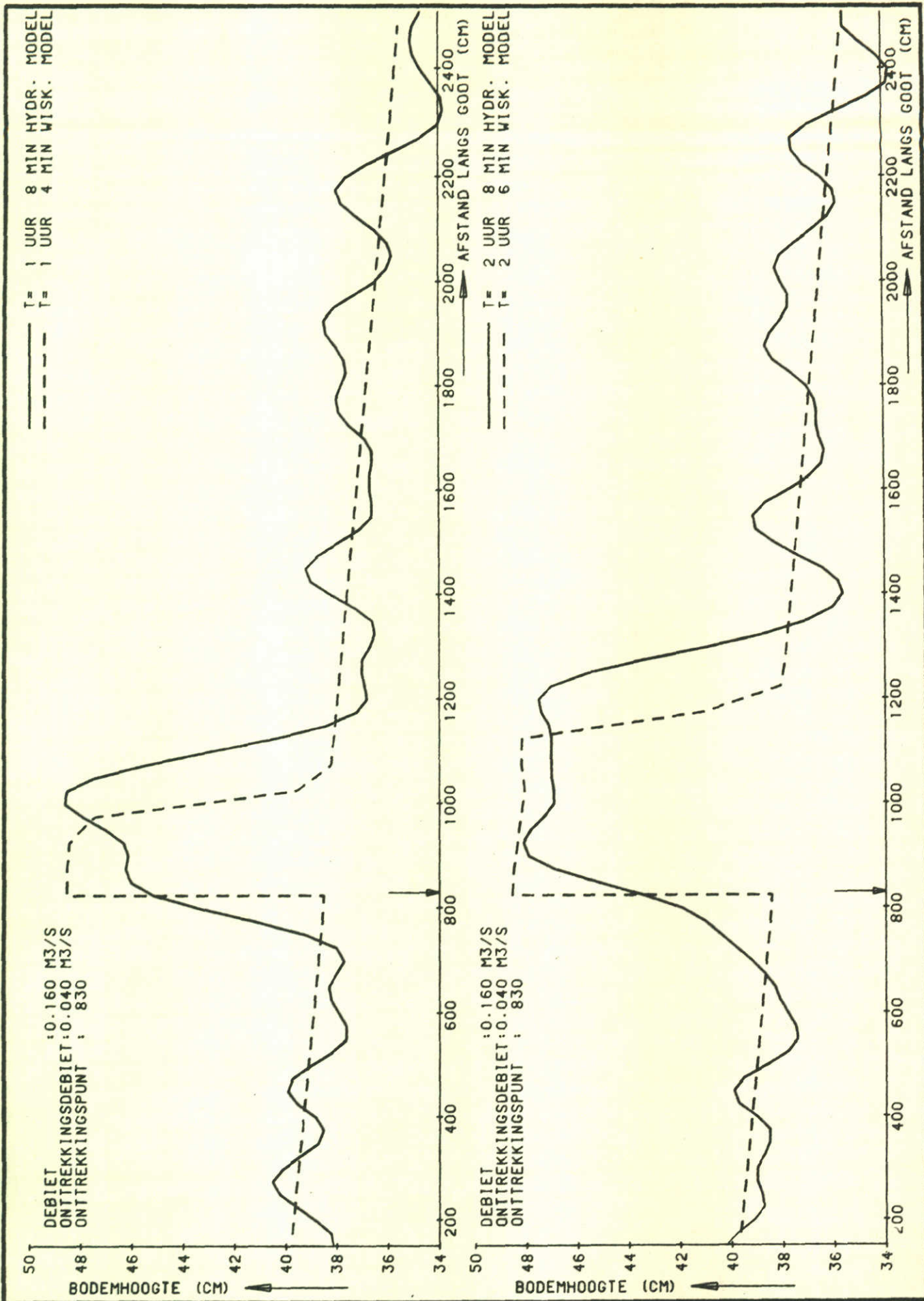
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M1755

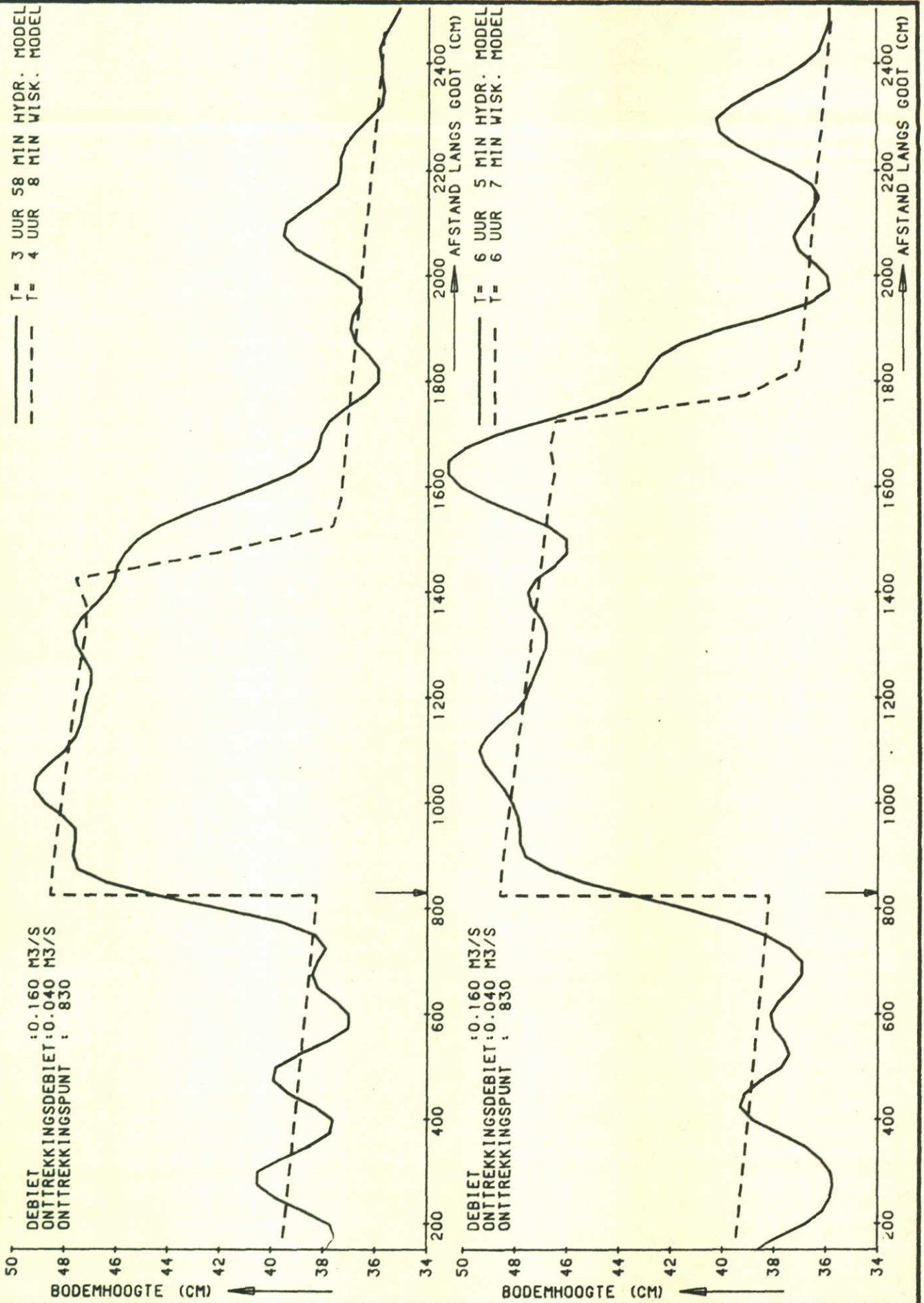
FIG. 39



<b>BODEMLIGGING ZANDGOOT</b> <b>HYDRAULISCH EN WISKUNDIG MODEL</b>	T <sub>02</sub> /T <sub>2</sub>	ΔQ = 0,25 Q
	M1755	FIG. 40
<b>WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM</b>		



<b>BODEMLIGGING ZANDGOOT</b> <b>HYDRAULISCH EN WISKUNDIG MODEL</b>	T02/T2	$\Delta Q = 0,25Q$
	M1755	FIG. 41
<b>WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM</b>		



BODEMLIGGING ZANDGOOT  
 HYDRAULISCH EN WISKUNDIG MODEL

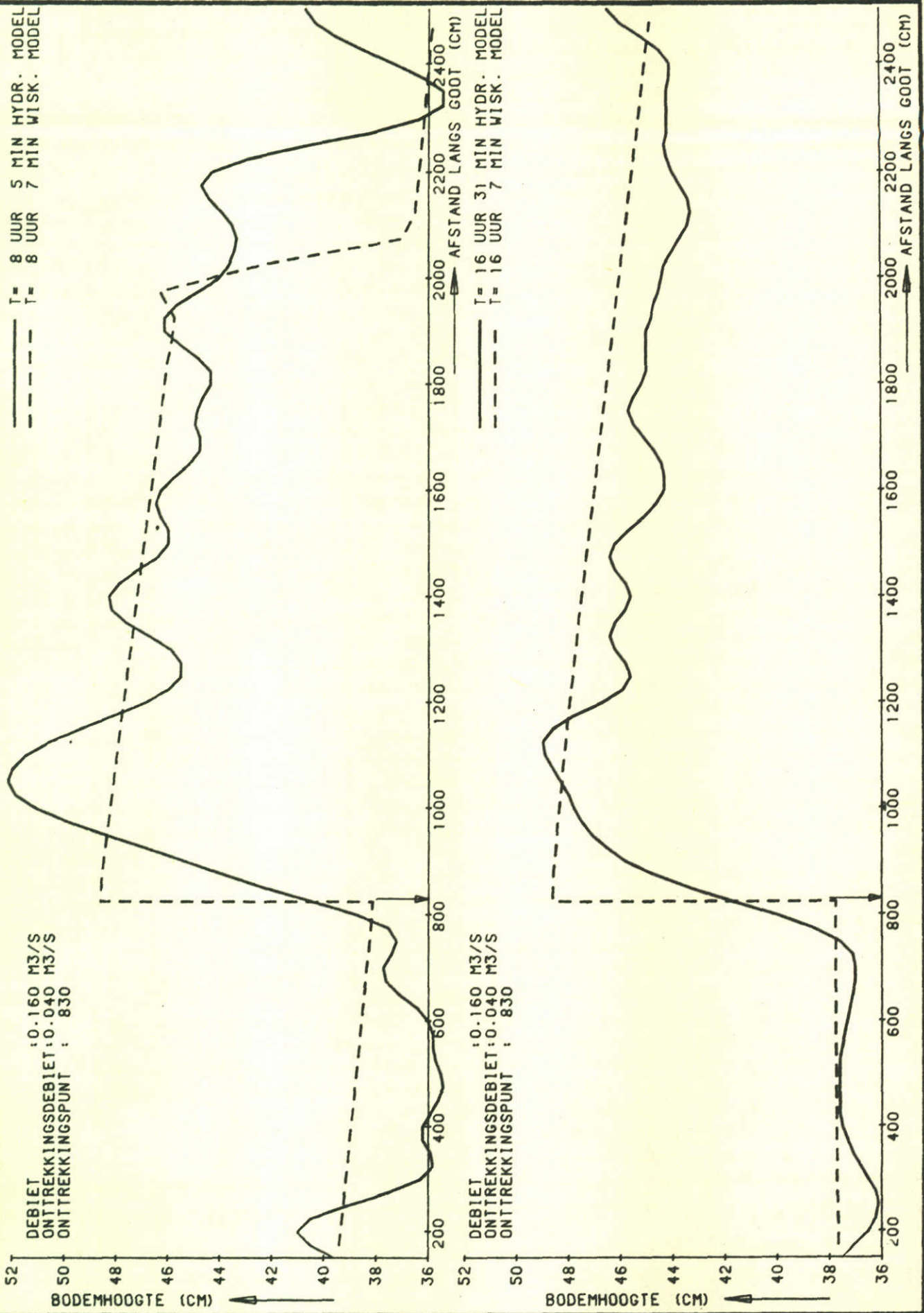
T02/T2

$\Delta Q = 0,25 Q$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M1755

FIG. 42



BODEMLIGGING ZANDGOOT

T<sub>02</sub>/T<sub>2</sub>

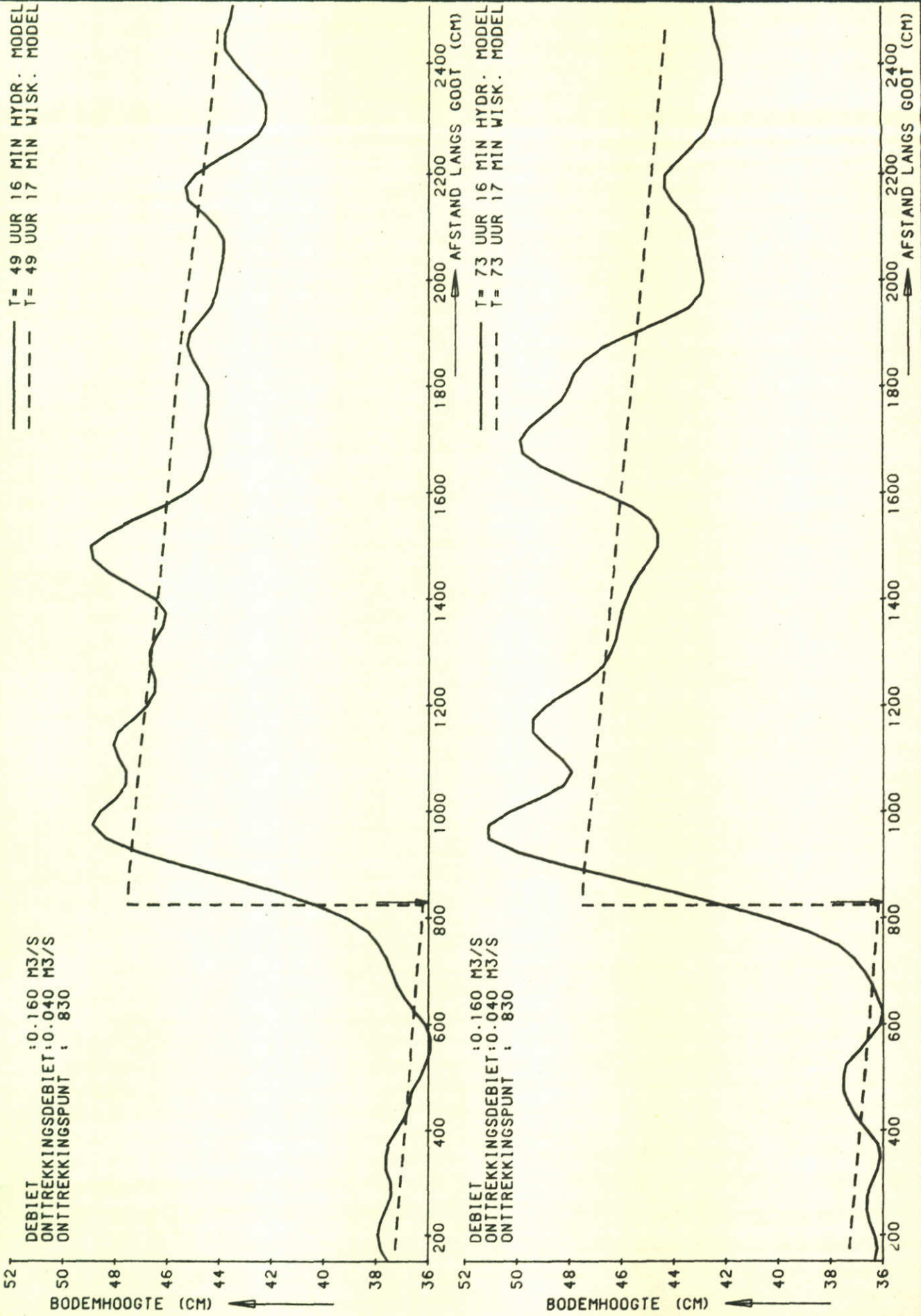
$\Delta Q = 0,25 Q$

HYDRAULISCH EN WISKUNDIG MODEL

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

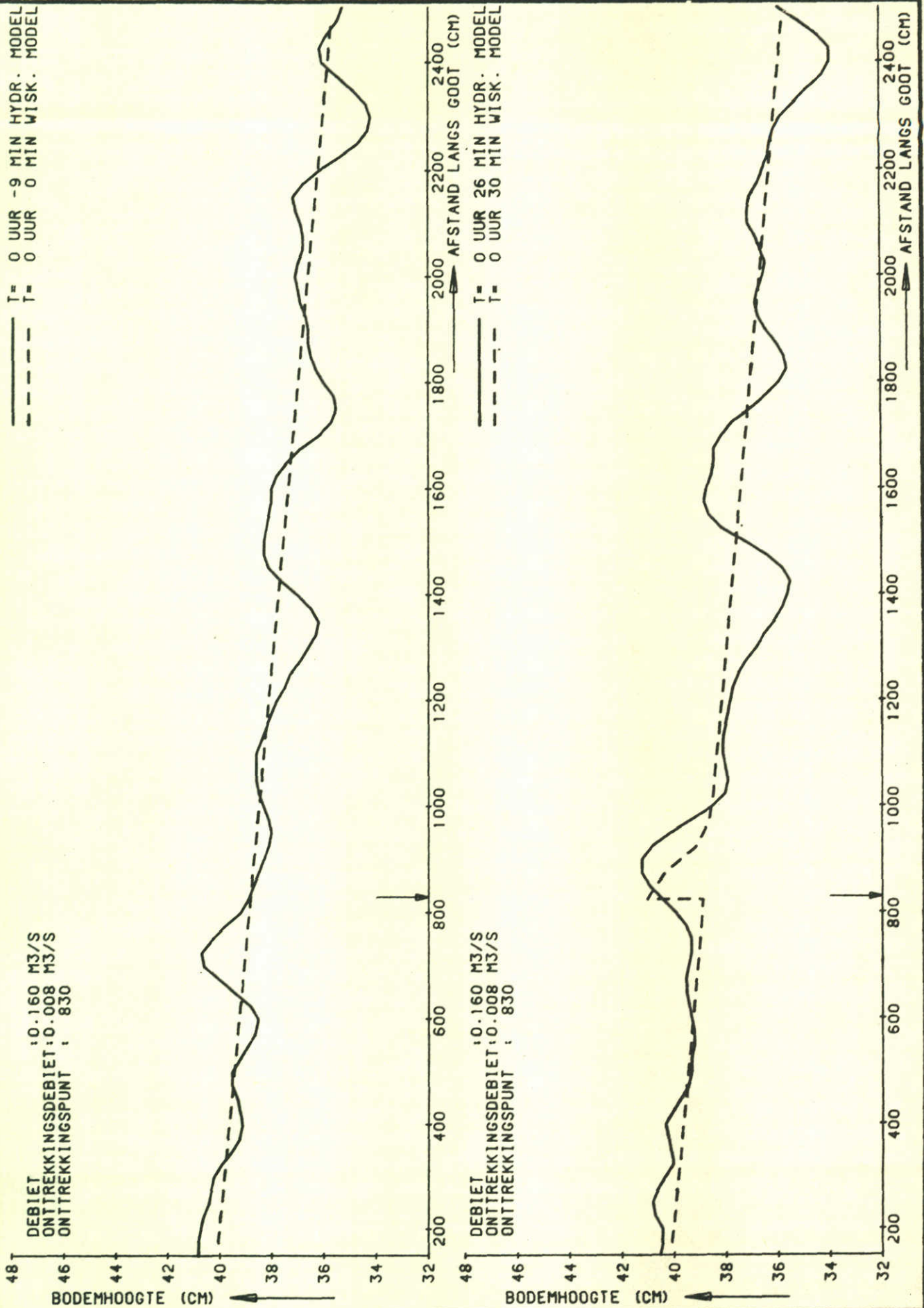
M1755

FIG. 43



BODEMLIGGING ZANDGOOT HYDRAULISCH EN WISKUNDIG MODEL	T02/T2	$\Delta Q = 0,25Q$
	WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M1755
		FIG. 44

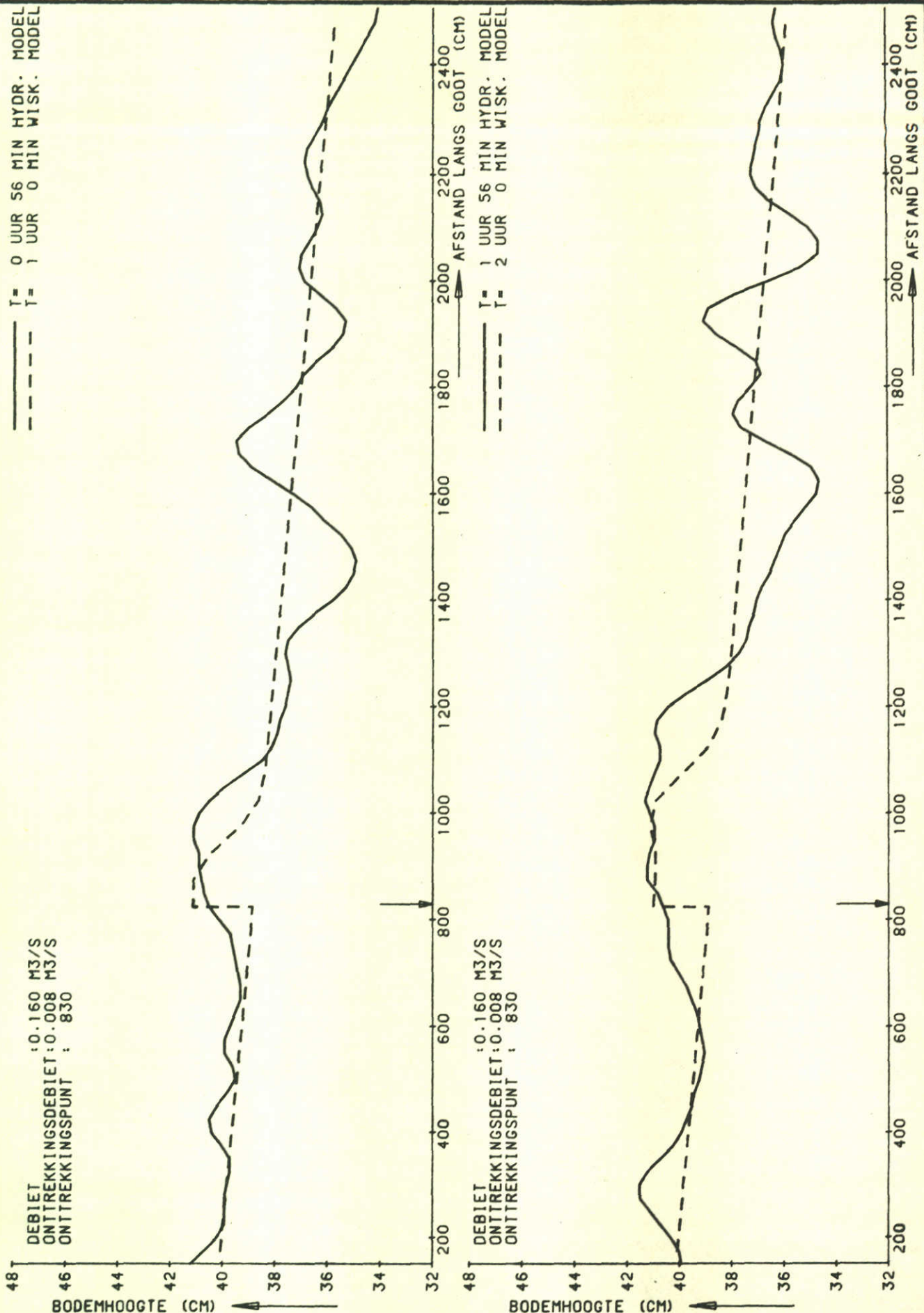




DEBIET : 0.160 M<sup>3</sup>/S  
 ONTTREKKINGSDEBIET : 0.008 M<sup>3</sup>/S  
 ONTTREKKINGSPUNT : 830

DEBIET : 0.160 M<sup>3</sup>/S  
 ONTTREKKINGSDEBIET : 0.008 M<sup>3</sup>/S  
 ONTTREKKINGSPUNT : 830

BODEMLIGGING ZANDGOOT HYDRAULISCH EN WISKUNDIG MODEL	T03 / T3	$\Delta Q = 0,05Q$
	WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M1755



BODEMLIGGING ZANDGOOT

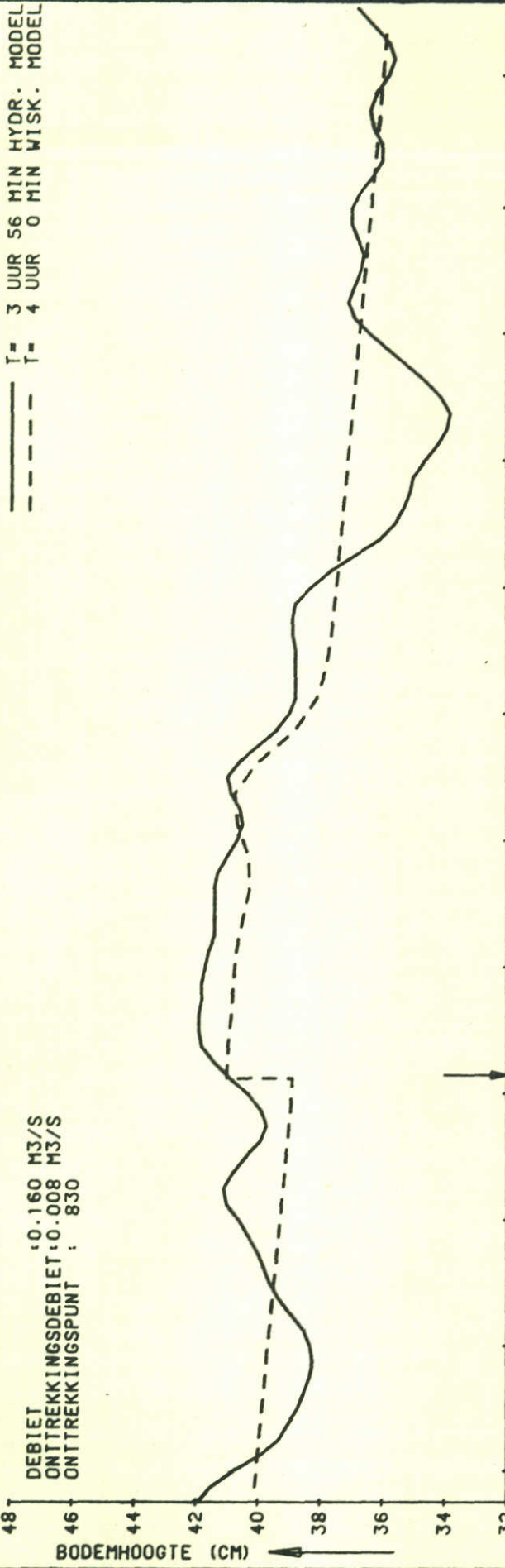
HYDRAULISCH EN WISKUNDIG MODEL

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

TO3/T3      ΔQ=0,05Q

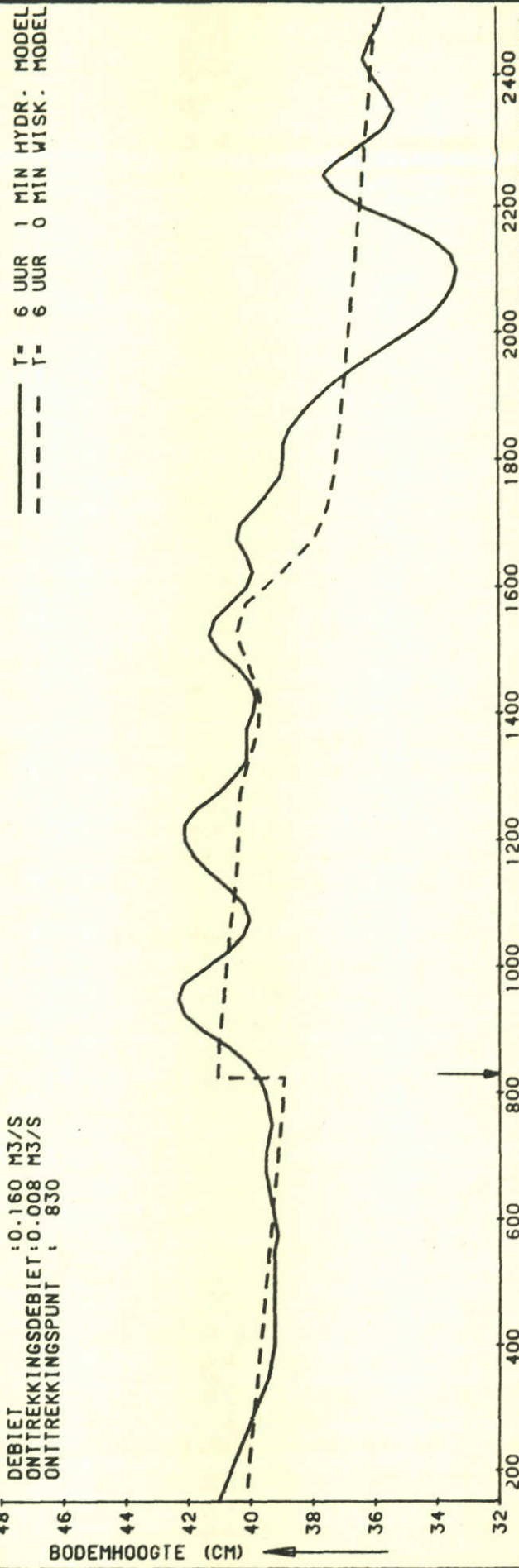
M1755      FIG. 46

T = 3 UUR 56 MIN HYDR. MODEL  
 T = 4 UUR 0 MIN WISK. MODEL



DEBIET : 0.160 M<sup>3</sup>/S  
 ONTTREKKINGSDEBIET : 0.008 M<sup>3</sup>/S  
 ONTTREKKINGSPUNT : 830

T = 6 UUR 1 MIN HYDR. MODEL  
 T = 6 UUR 0 MIN WISK. MODEL



DEBIET : 0.160 M<sup>3</sup>/S  
 ONTTREKKINGSDEBIET : 0.008 M<sup>3</sup>/S  
 ONTTREKKINGSPUNT : 830

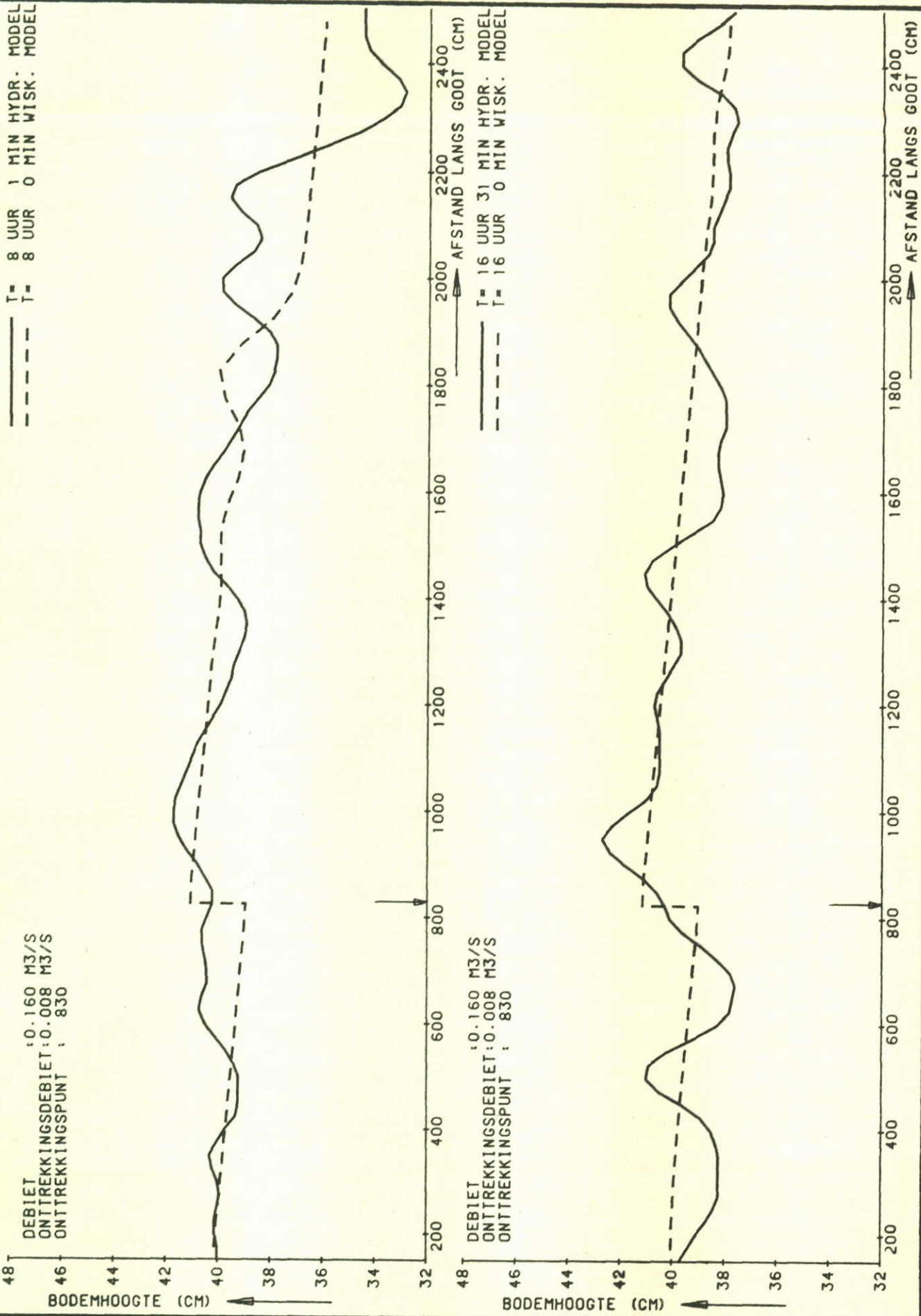
**BODEMLIGGING ZANDGOOT**  
**HYDRAULISCH EN WISKUNDIG MODEL**

TO3/T3      ΔQ = 0,05Q

**WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM**

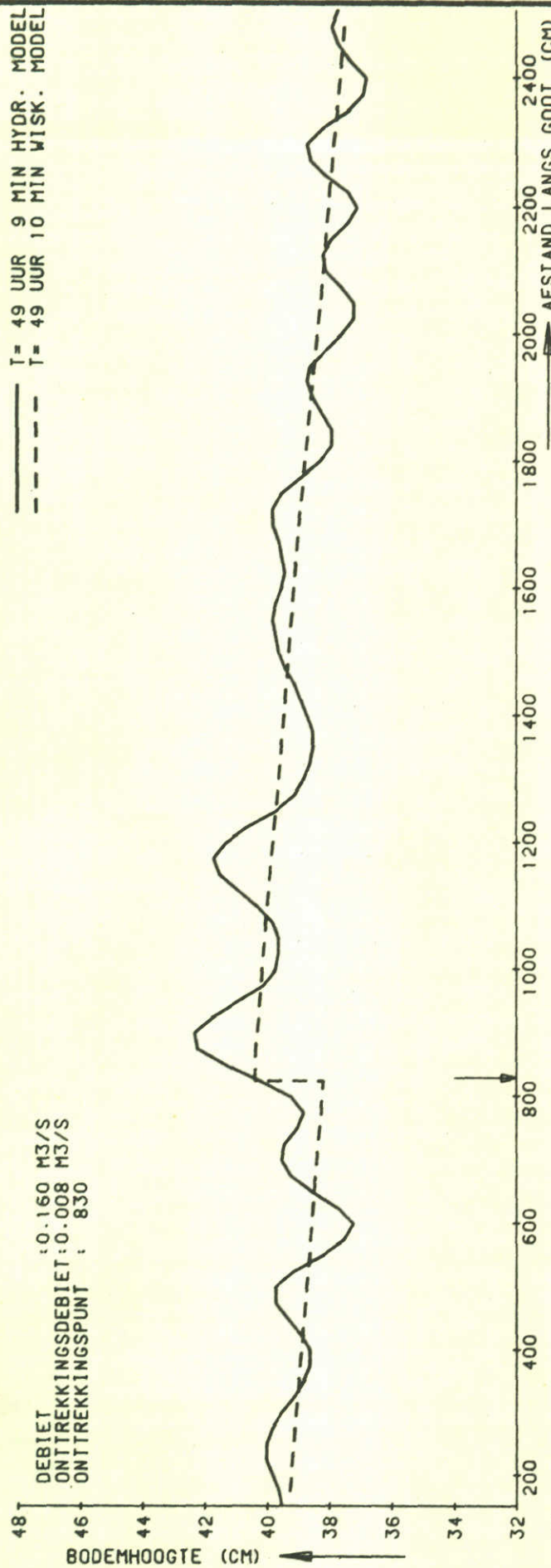
M1755

FIG. 47

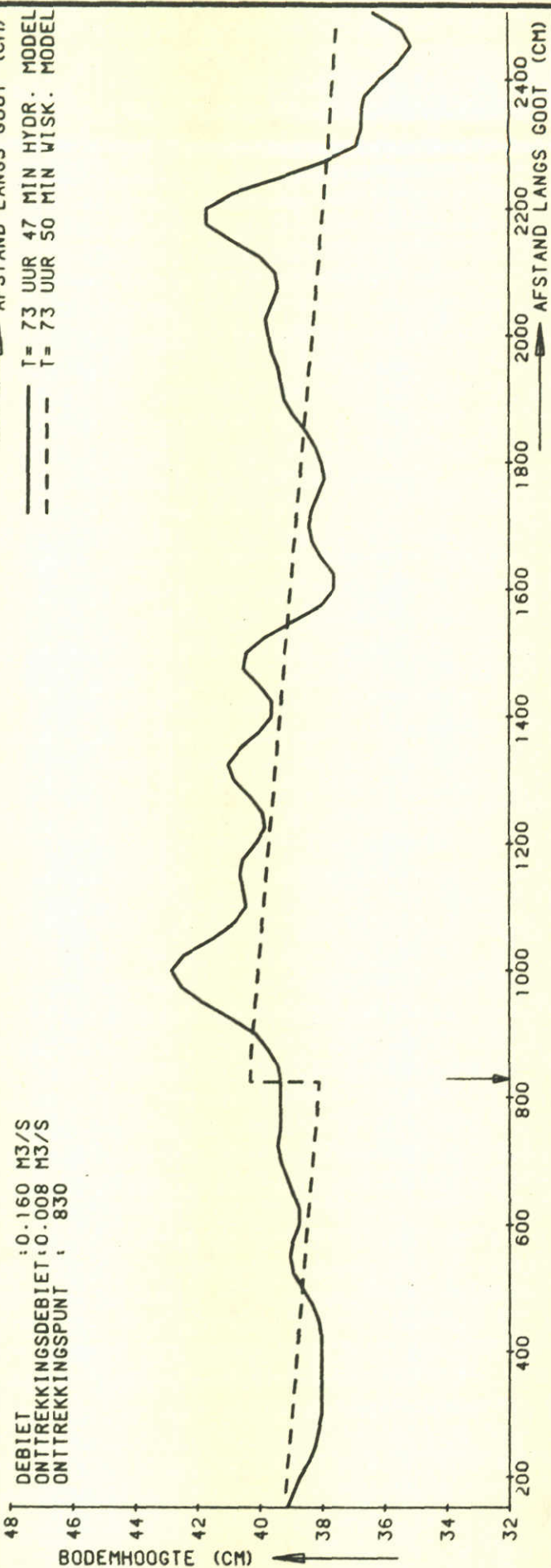


BODEMLIGGING ZANDGOOT HYDRAULISCH EN WISKUNDIG MODEL	T03/T3	$\Delta Q = 0,05Q$
	WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M1755

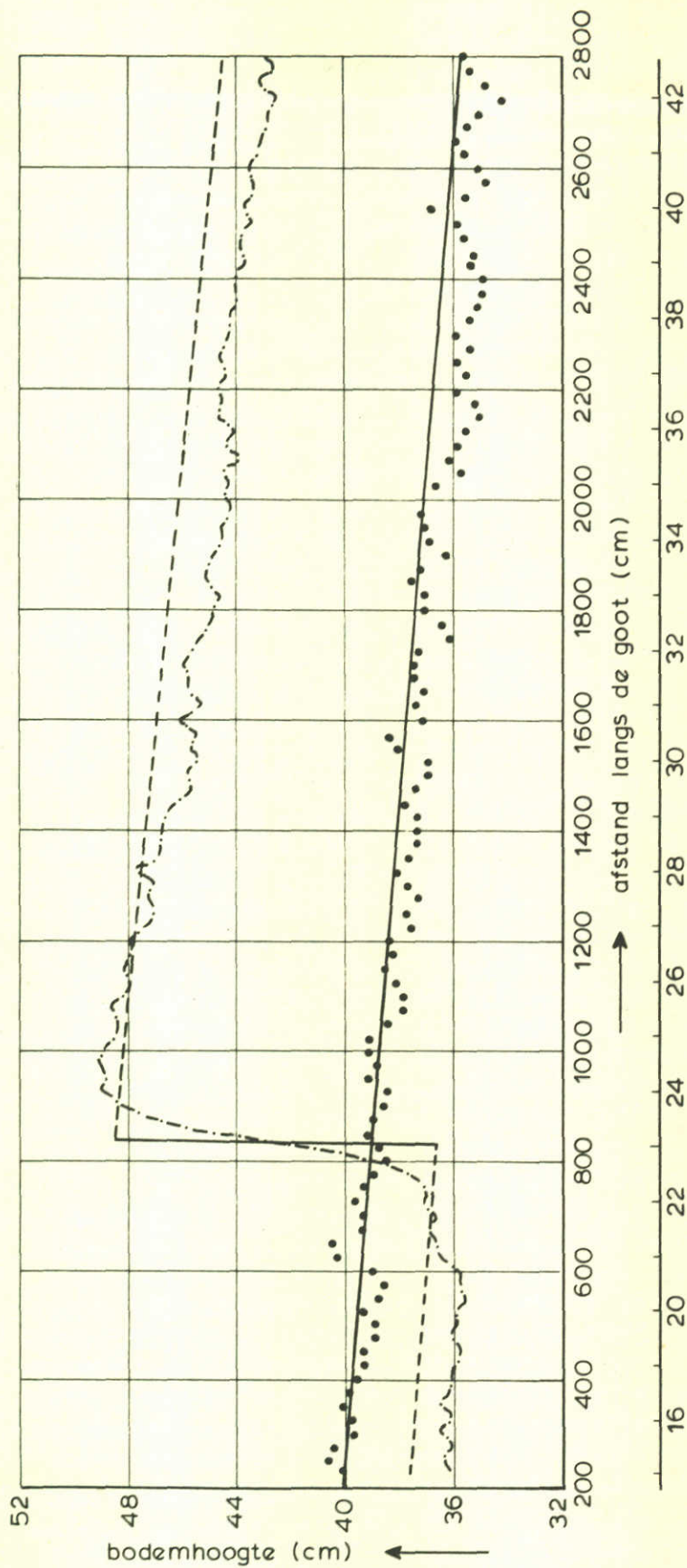
———— T = 49 UUR 9 MIN HYDR. MODEL  
 - - - - - T = 49 UUR 10 MIN WISK. MODEL



———— T = 73 UUR 47 MIN HYDR. MODEL  
 - - - - - T = 73 UUR 50 MIN WISK. MODEL



BODEMLIGGING ZANDGOOT HYDRAULISCH EN WISKUNDIG MODEL	T03/T3	$\Delta Q = 0,05Q$
	WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M1755



— t=0.00 hr. ZANTRI  
 ..... t=0.00 hr. zandgoot  
 - - - t=120.00 hr. ZANTRI  
 - · - · t = tijds gemiddelde bodemligging zandgoot

VERGEL'JKING ZANTRI MET ZANDGOOTMETINGEN,  
BEREKEND MET ENGELUND/HANSEN

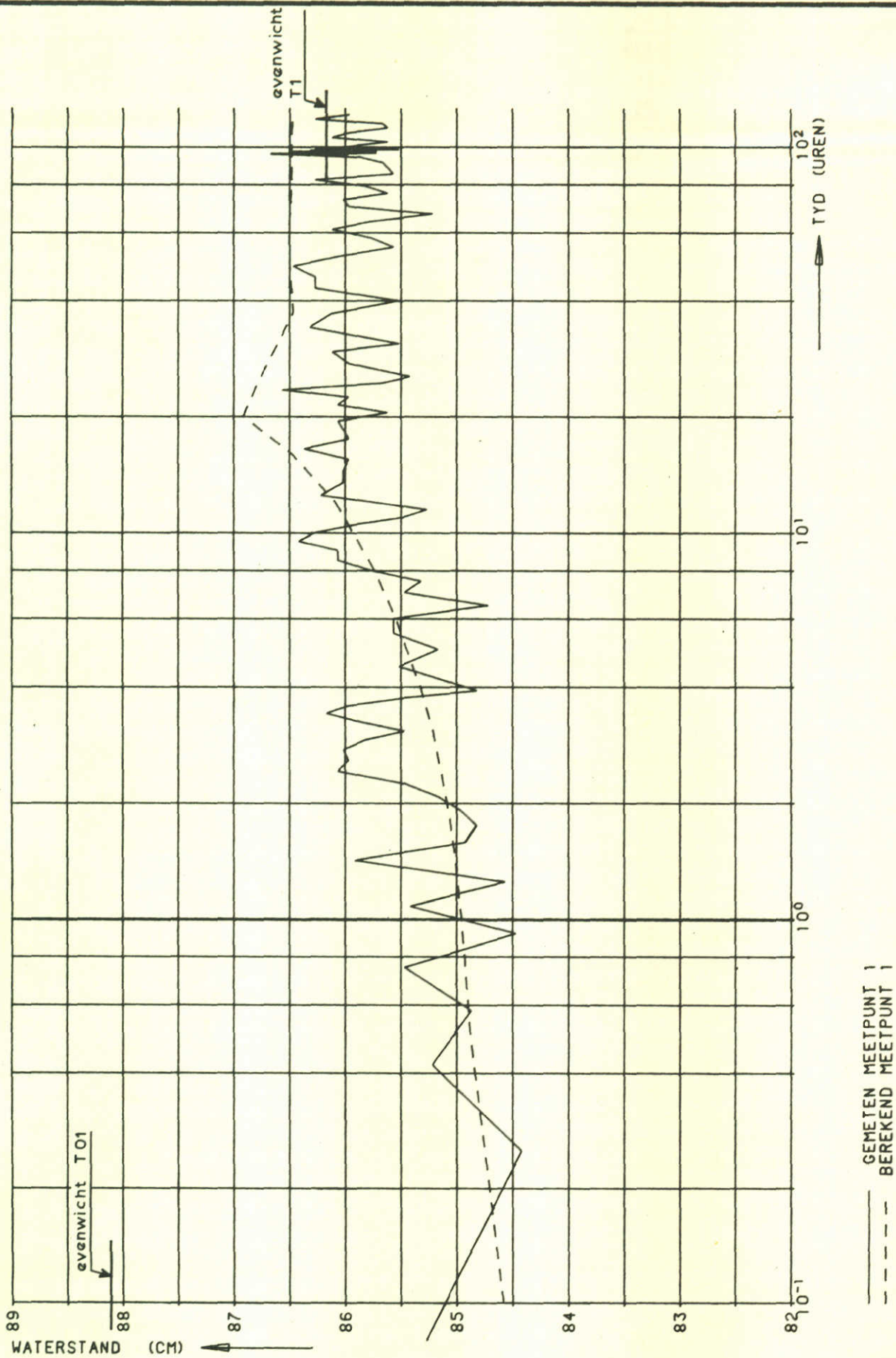
T02/T2

$\Delta Q=0,25Q$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1755

FIG. 50



TIJDSAFHANKELIJK VERLOOP VAN DE  
WATERSTAND IN MEETPUNT 1

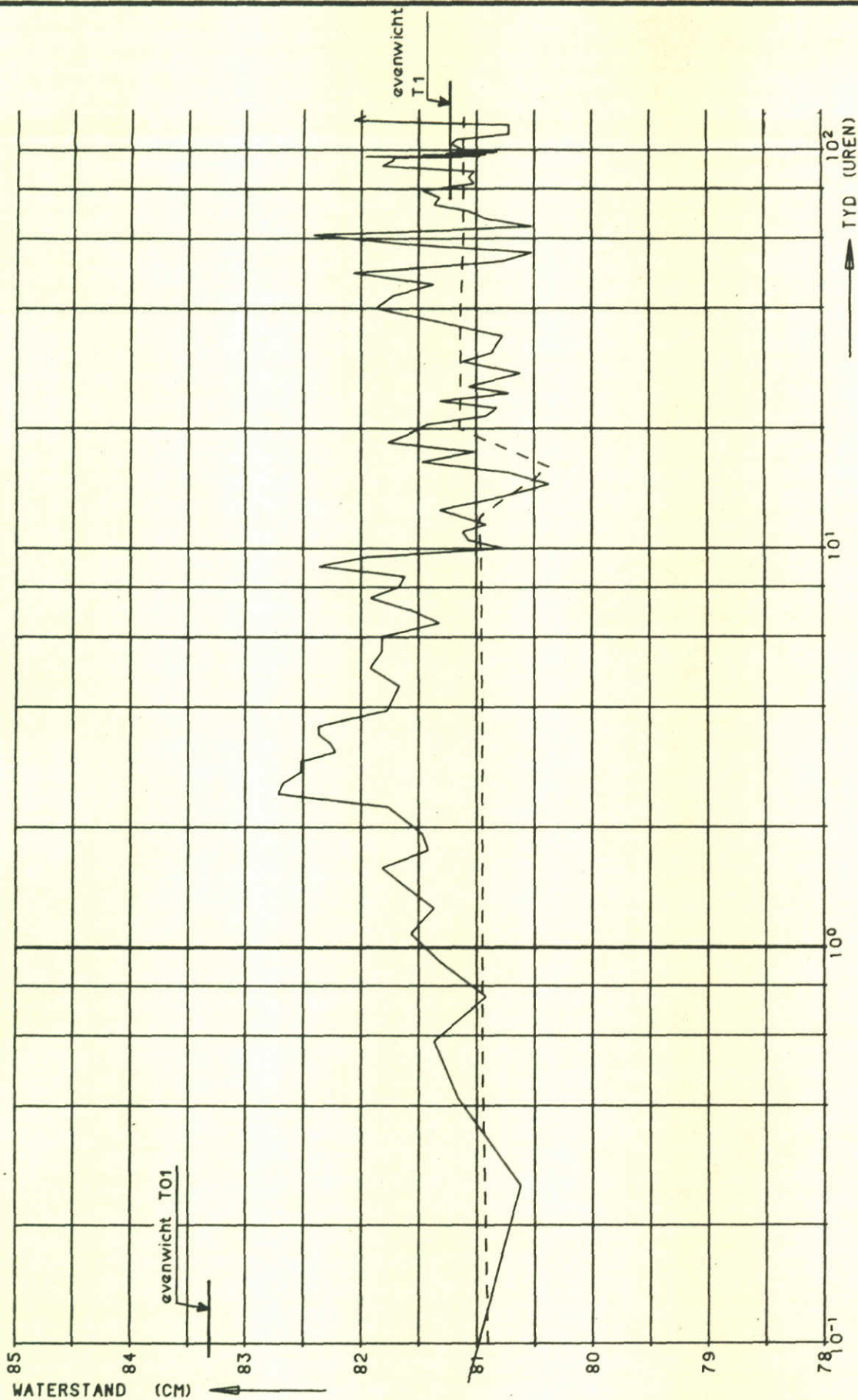
T01/T1

$\Delta Q = 0,15 Q$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1755

FIG. 51



— GEMETEN MEETPUNT 3001  
 - - - BEREKEND MEETPUNT 3001

TIJDSAFHANKELIJK VERLOOP VAN DE  
 WATERSTAND IN MEETPUNT 3001

T01/T1

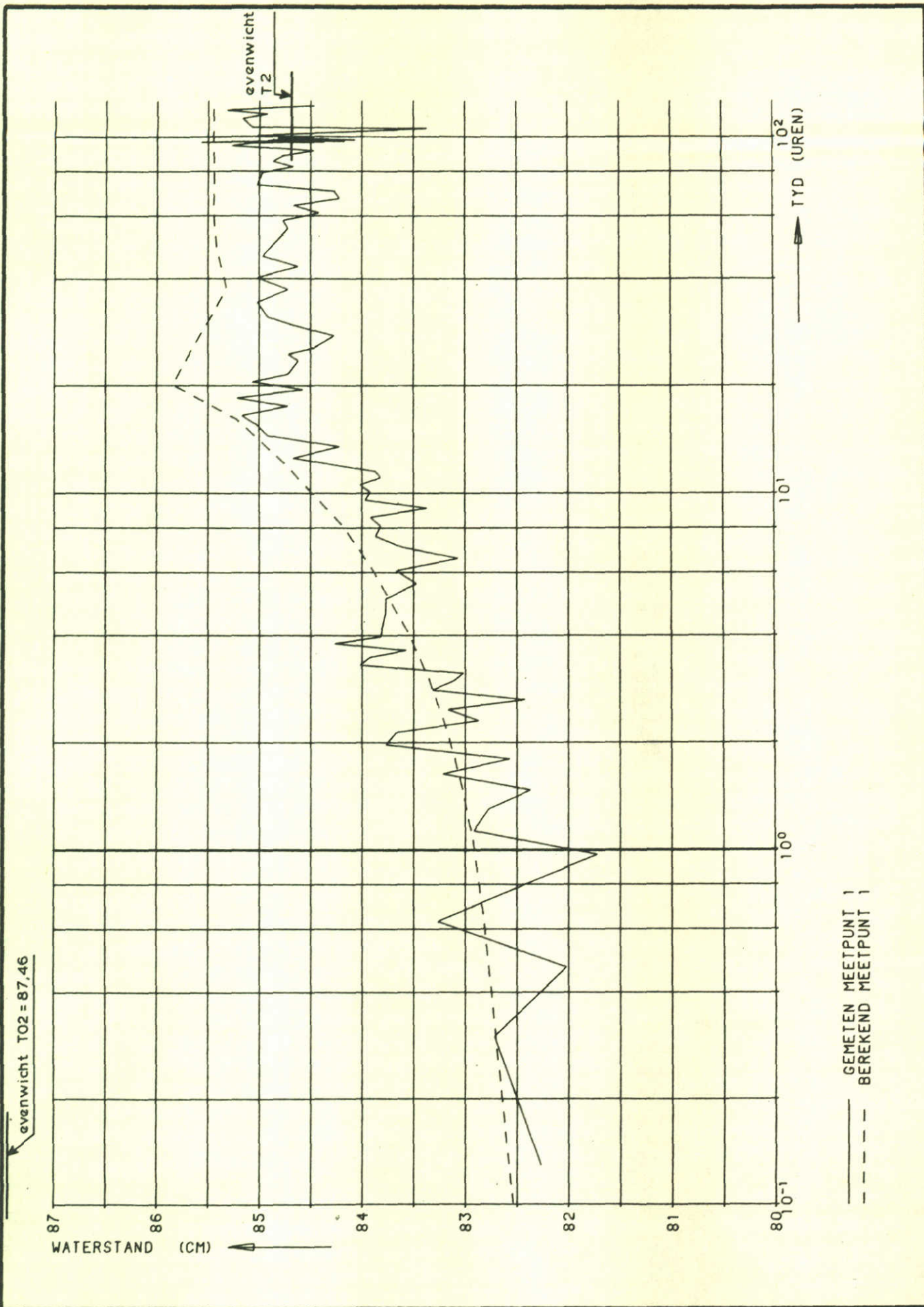
$\Delta Q = 0,15Q$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1755

FIG. 52





TIJDSAFHANKELIJK VERLOOP VAN DE  
WATERSTAND IN MEETPUNT 1

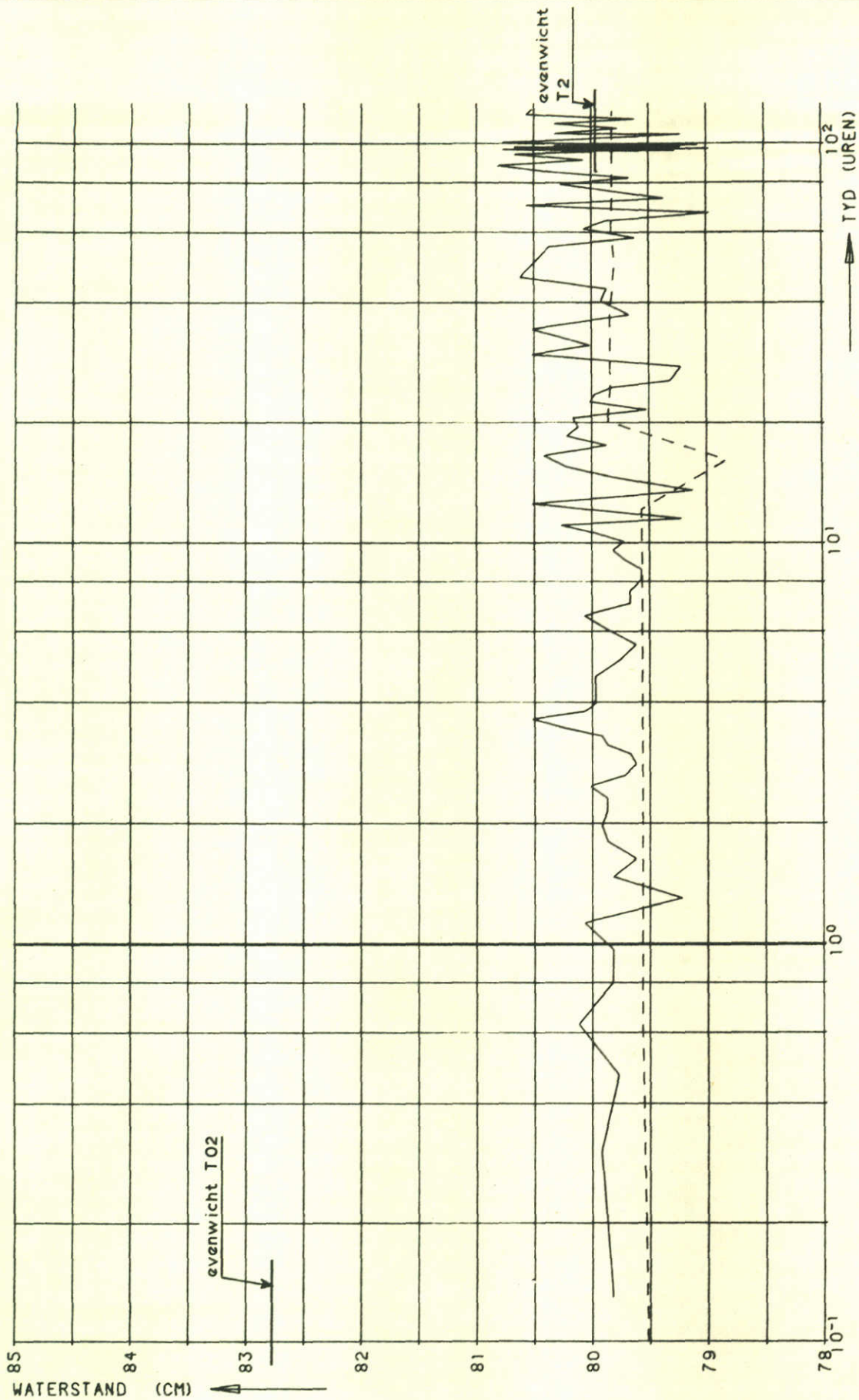
$T_{02}/T_2$

$\Delta Q = 0,25Q$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1755

FIG. 53



— GEMETEN MEETPUNT 3001  
 - - - BEREKEND MEETPUNT 3001

TIJDSAFHANKELIJK VERLOOP VAN DE  
 WATERSTAND IN MEETPUNT 3001

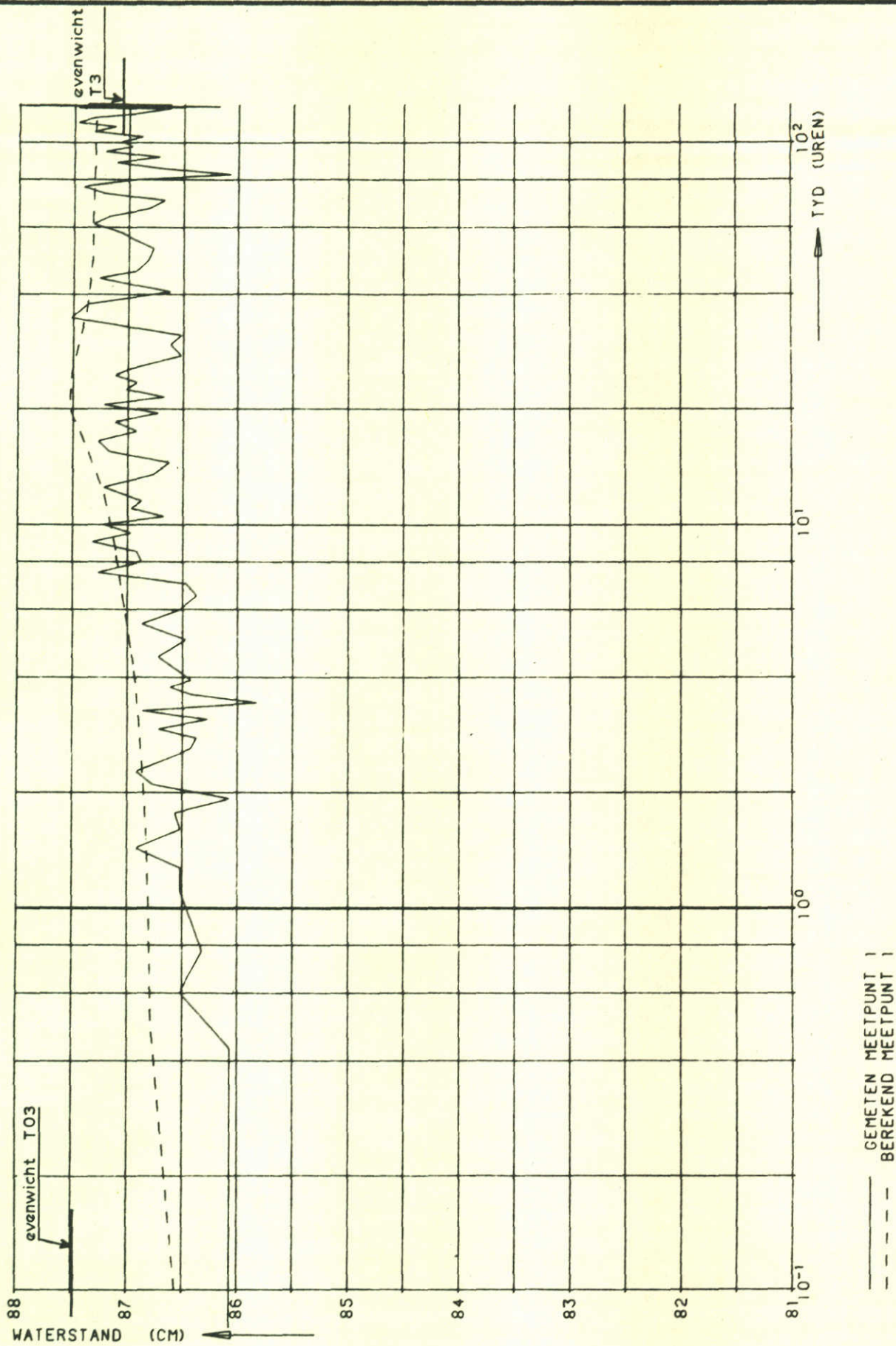
T02/T2

$\Delta Q = 0,25Q$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1755

FIG. 54



TIJDSAFHANKELIJK VERLOOP VAN DE  
WATERSTAND IN MEETPUNT 1

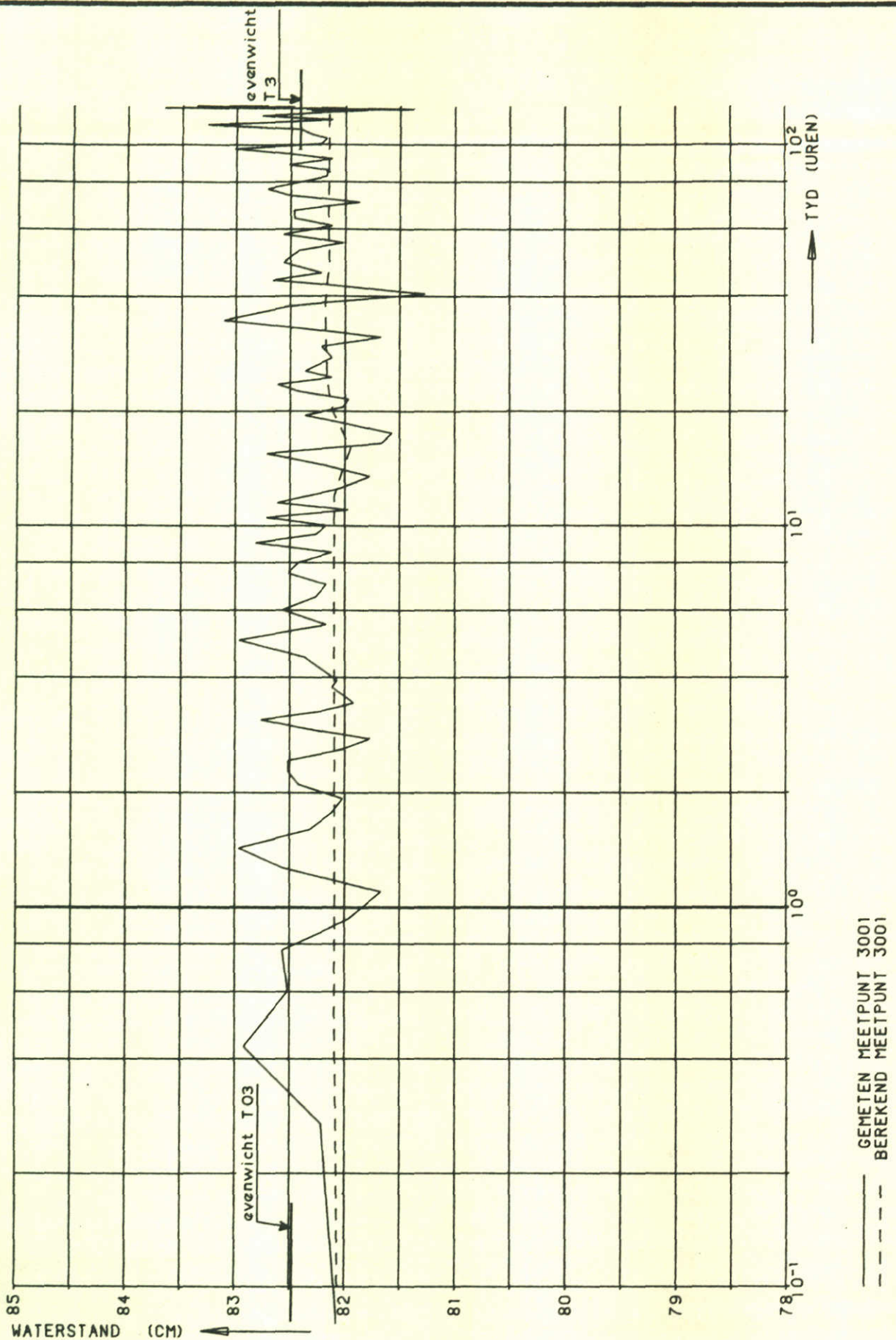
T03/T3

$\Delta Q = 0,05Q$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1755

FIG. 55



TIJDSAFHANKELIJK VERLOOP VAN DE  
WATERSTAND IN MEETPUNT 3001

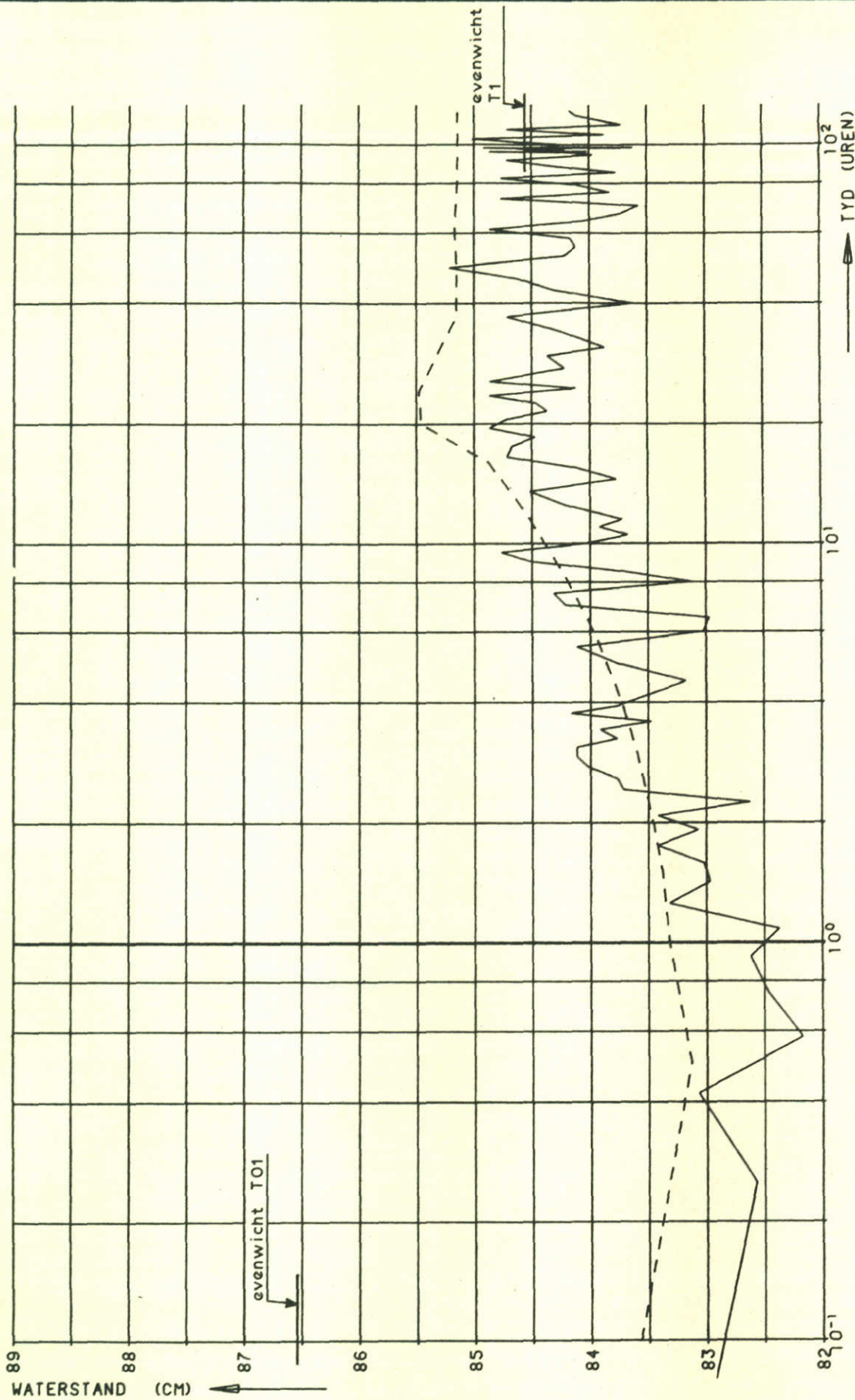
T03/T3

$\Delta Q = 0,05Q$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1755

FIG. 56

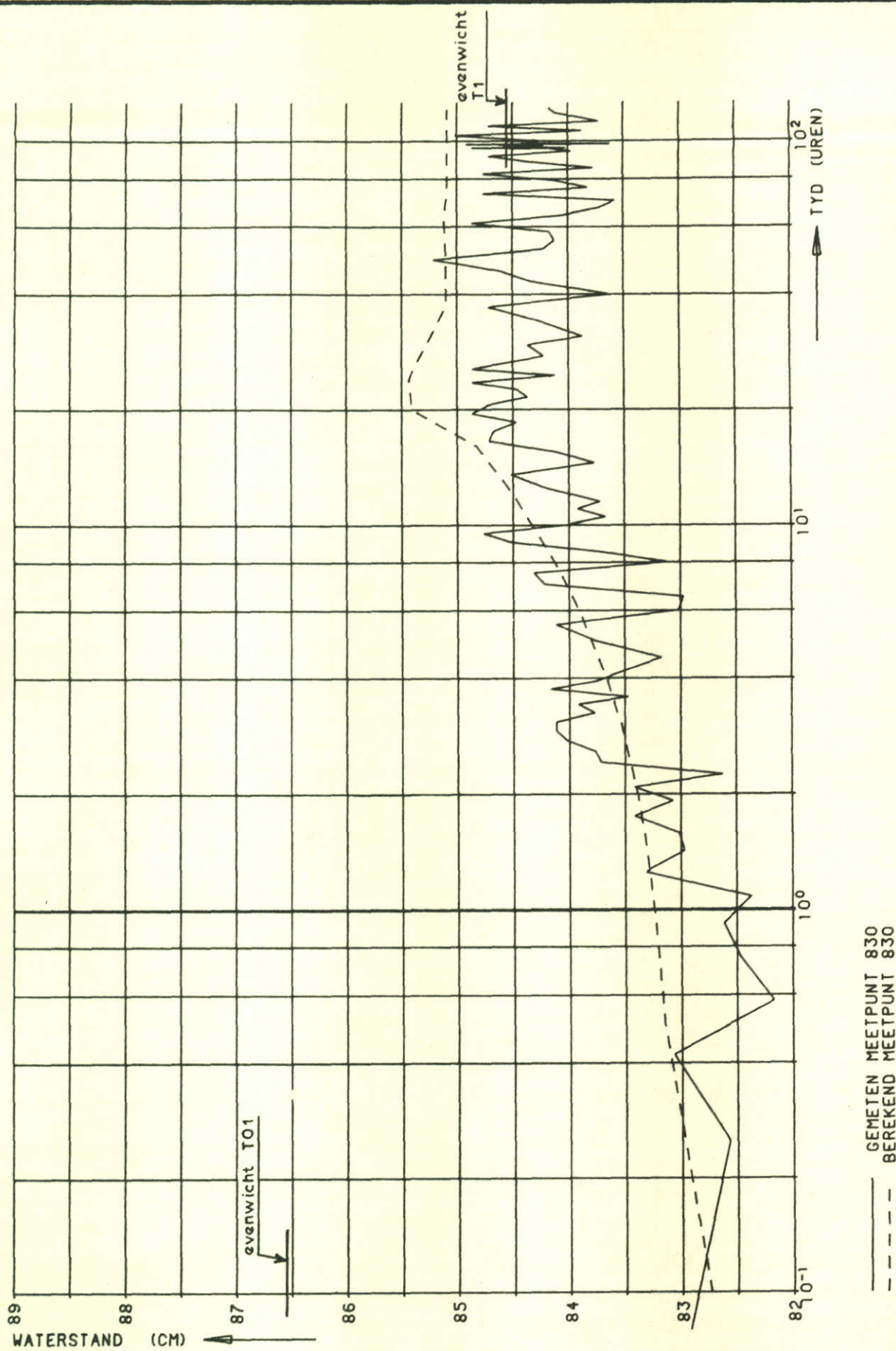


— GEMETEN MEETPUNT 830  
 - - - BEREKEND MEETPUNT 830

TIJDSAFHANKELIJK VERLOOP VAN DE  
 WATERSTAND IN MEETPUNT 830 BENEDEN

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

T01/T1	$\Delta Q = 0,15Q$
M 1755	FIG. 57



TIJDSAFHANKELIJK VERLOOP VAN DE  
WATERSTAND IN MEETPUNT 830 BOVEN

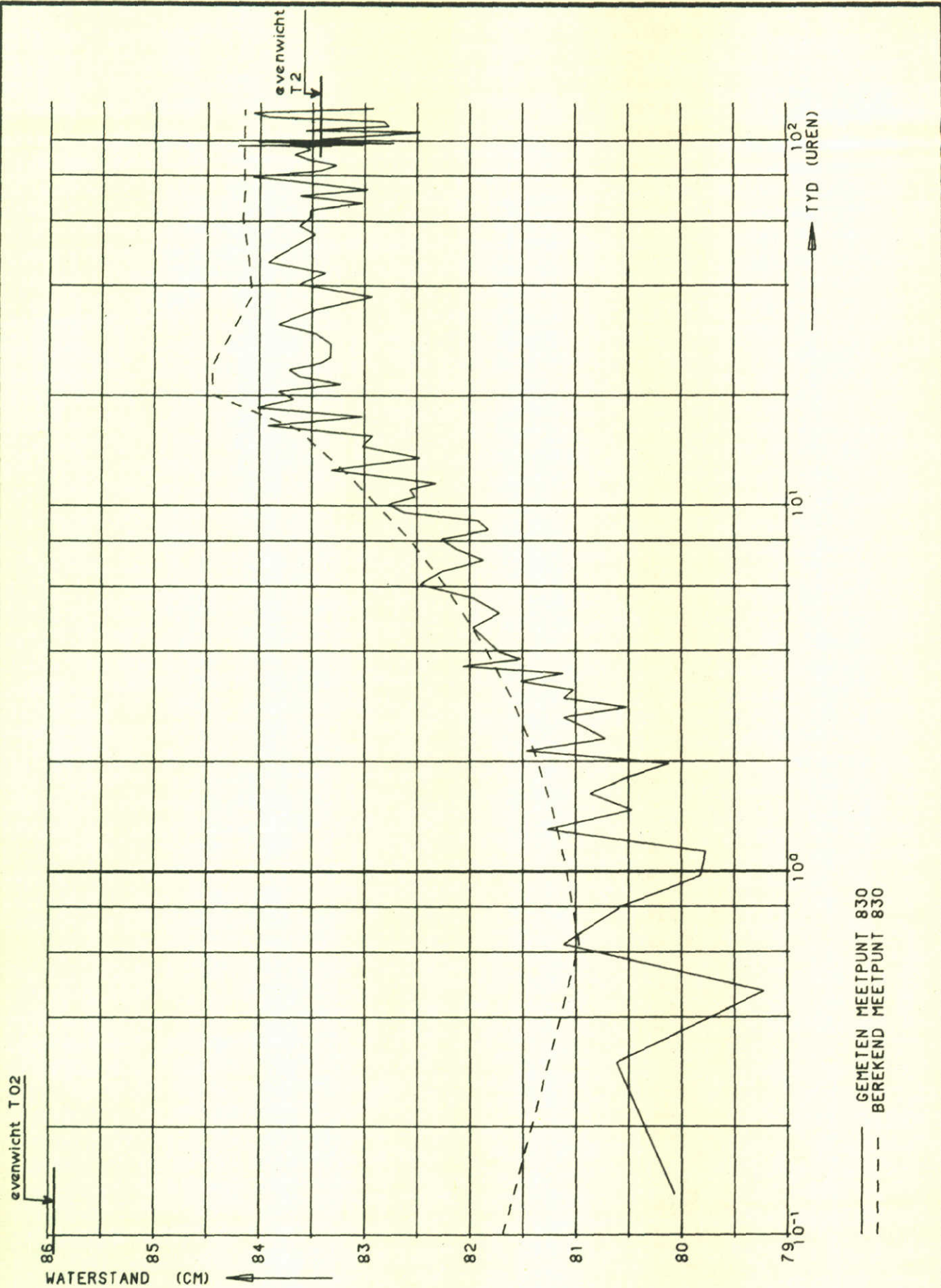
T01/T1

$\Delta Q = 0,15 Q$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1755

FIG. 58



TIJDSAFHANKELIJK VERLOOP VAN DE  
 WATERSTAND IN MEETPUNT 830 BENEDEN

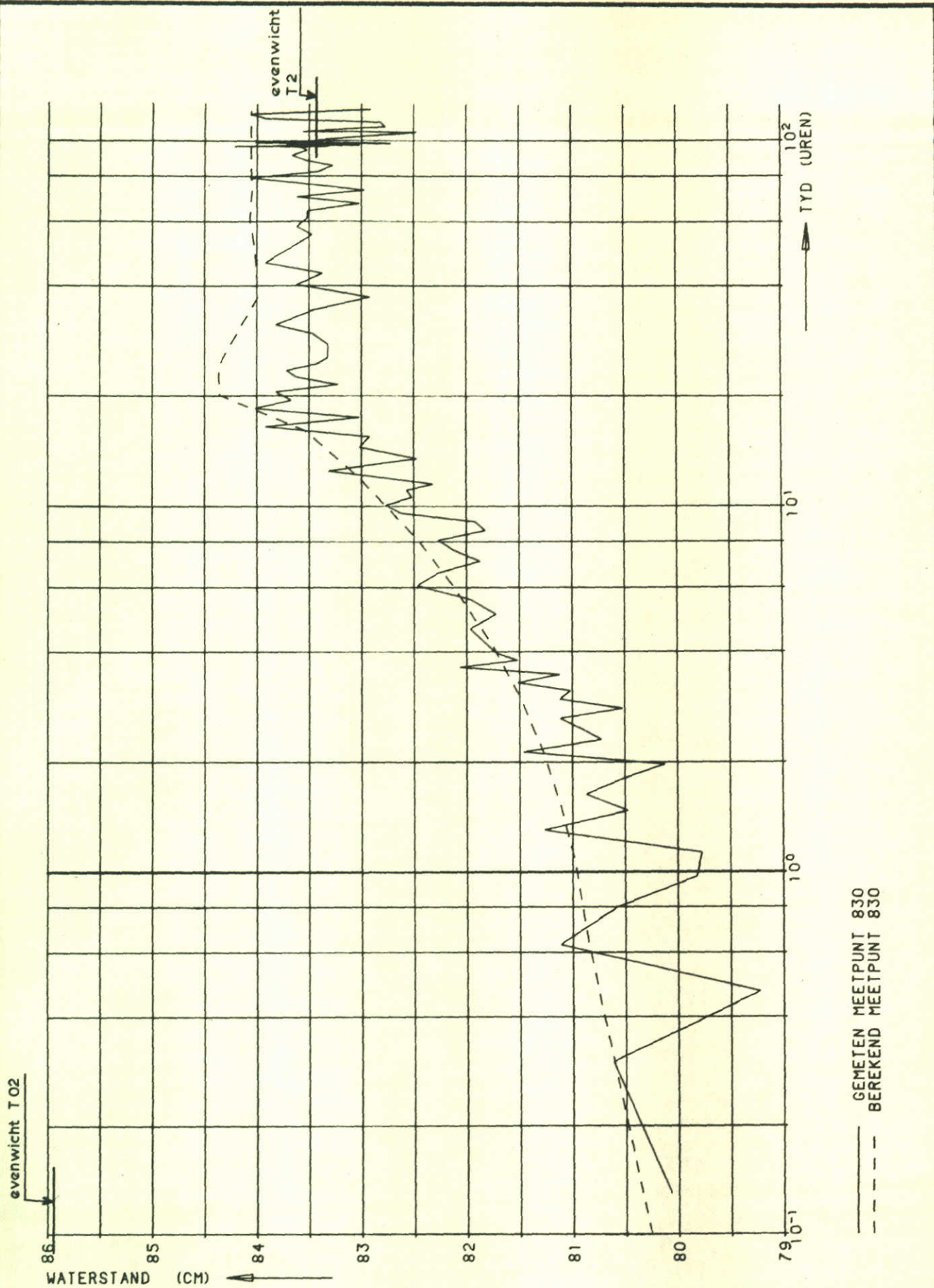
T02/T2

$\Delta Q = 0,25Q$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1755

FIG. 59



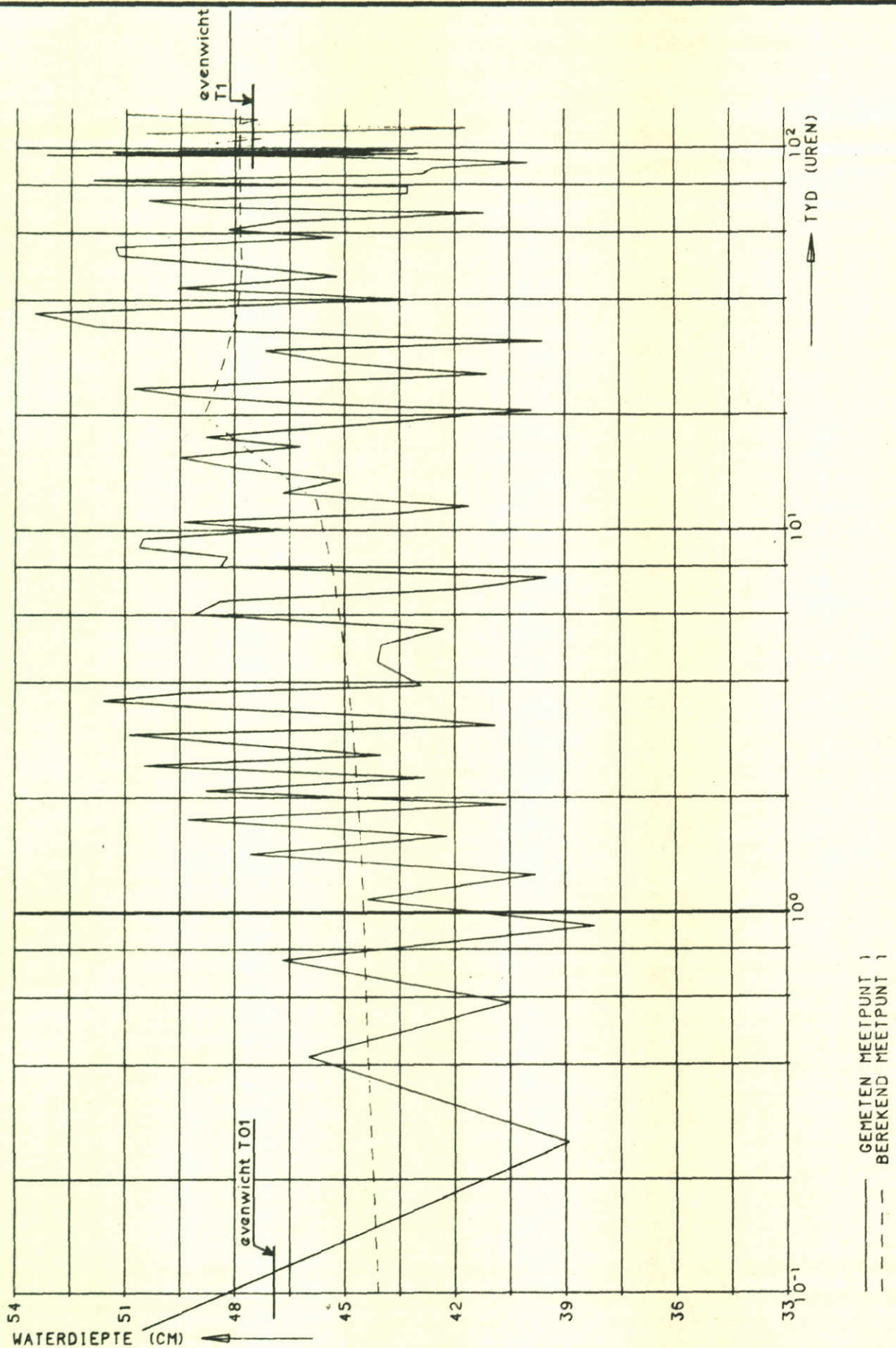
TIJDSAFHANKELIJK VERLOOP VAN DE  
WATERSTAND IN MEETPUNT 830 BOVEN

T02/T2     $\Delta Q = 0.25Q$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1755    FIG. 60





TIJDSAFHANKELIJK VERLOOP VAN DE  
WATERDIEPTE IN MEETPUNT 1

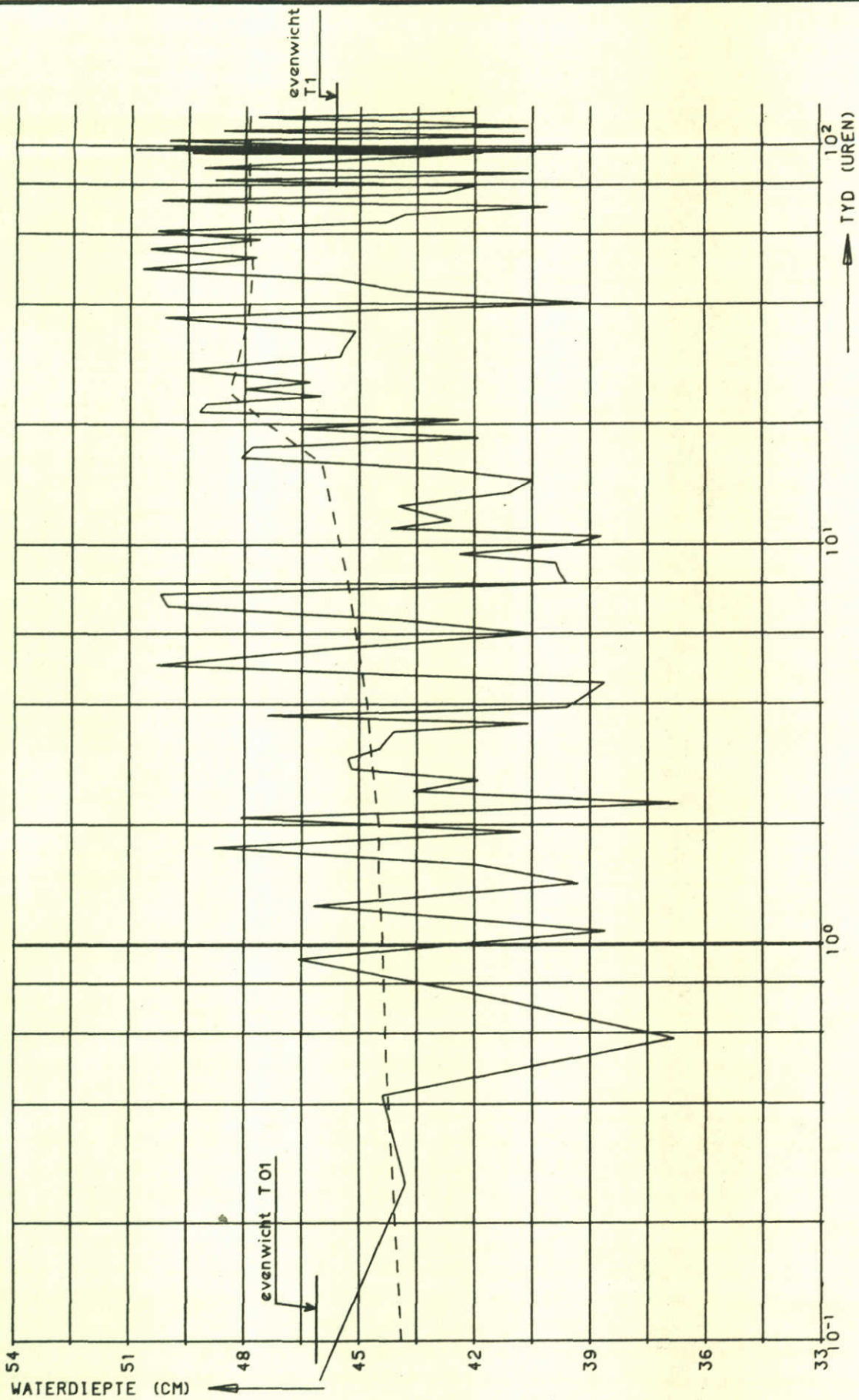
T01/T1

$\Delta Q = 0,15Q$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1755

FIG. 61



— GEMETEN MEETPUNT 800  
 - - - BEREKEND MEETPUNT 800

TIJDSAFHANKELIJK VERLOOP VAN DE  
 WATERDIEPTE IN MEETPUNT 800

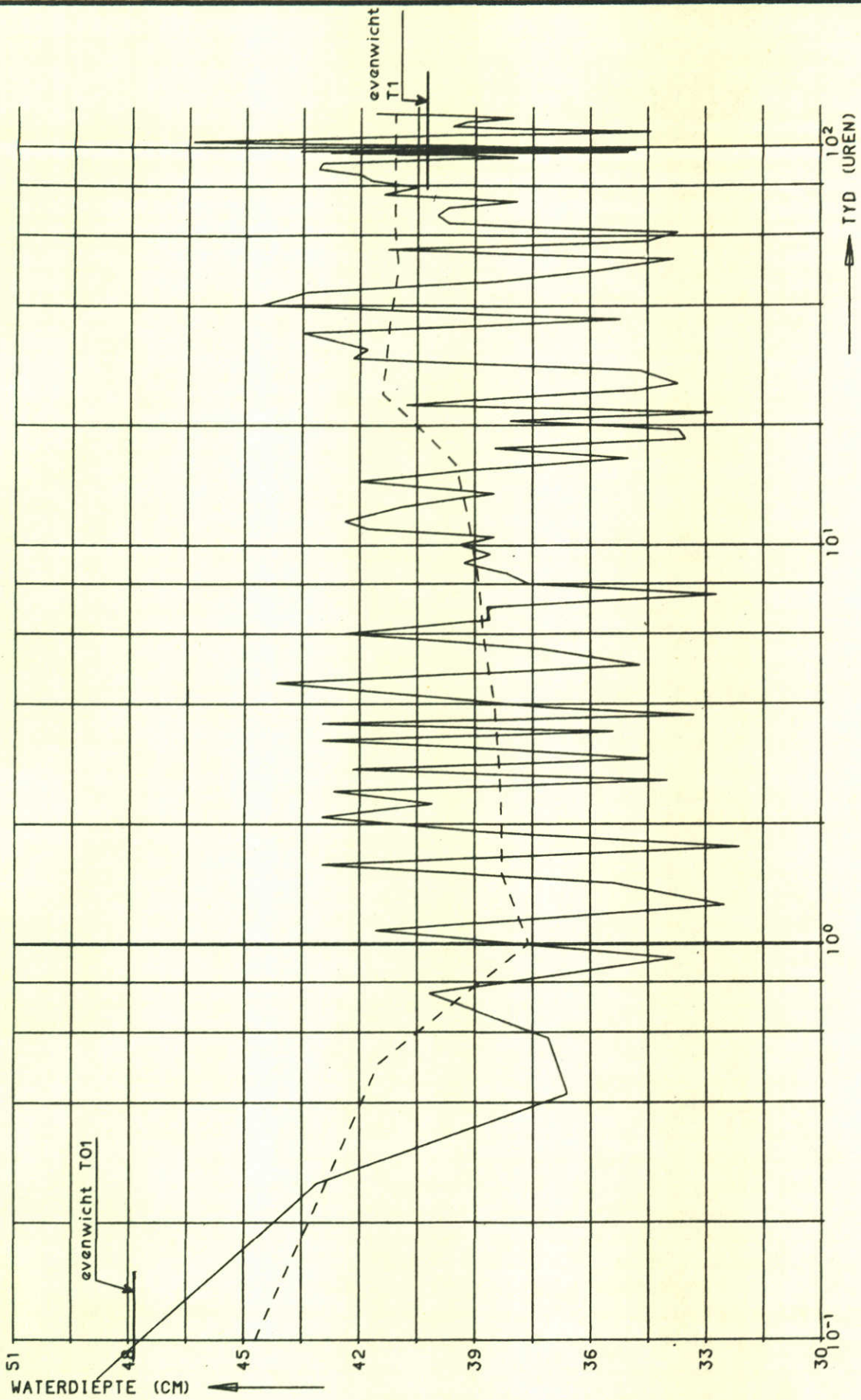
$T_{01}/T_1$

$\Delta Q = 0,15Q$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1755

FIG. 62



— GEMETEN MEETPUNT 900  
 - - - BEREKEND MEETPUNT 900

TIJDSAFHANKELIJK VERLOOP VAN DE  
 WATERDIEPTE IN MEETPUNT 900

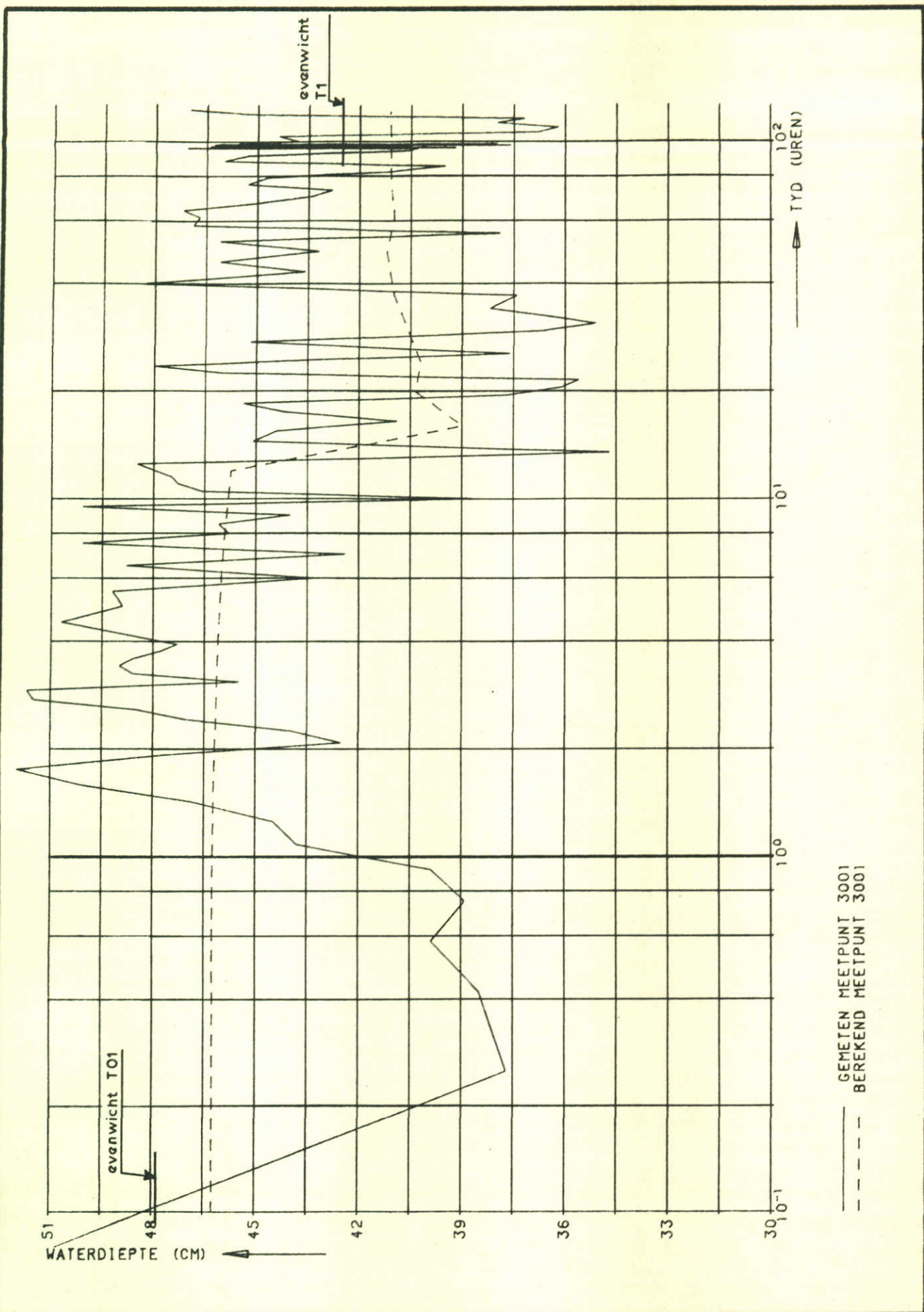
T01/T1

$\Delta Q = 0,15 Q$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1755

FIG. 63

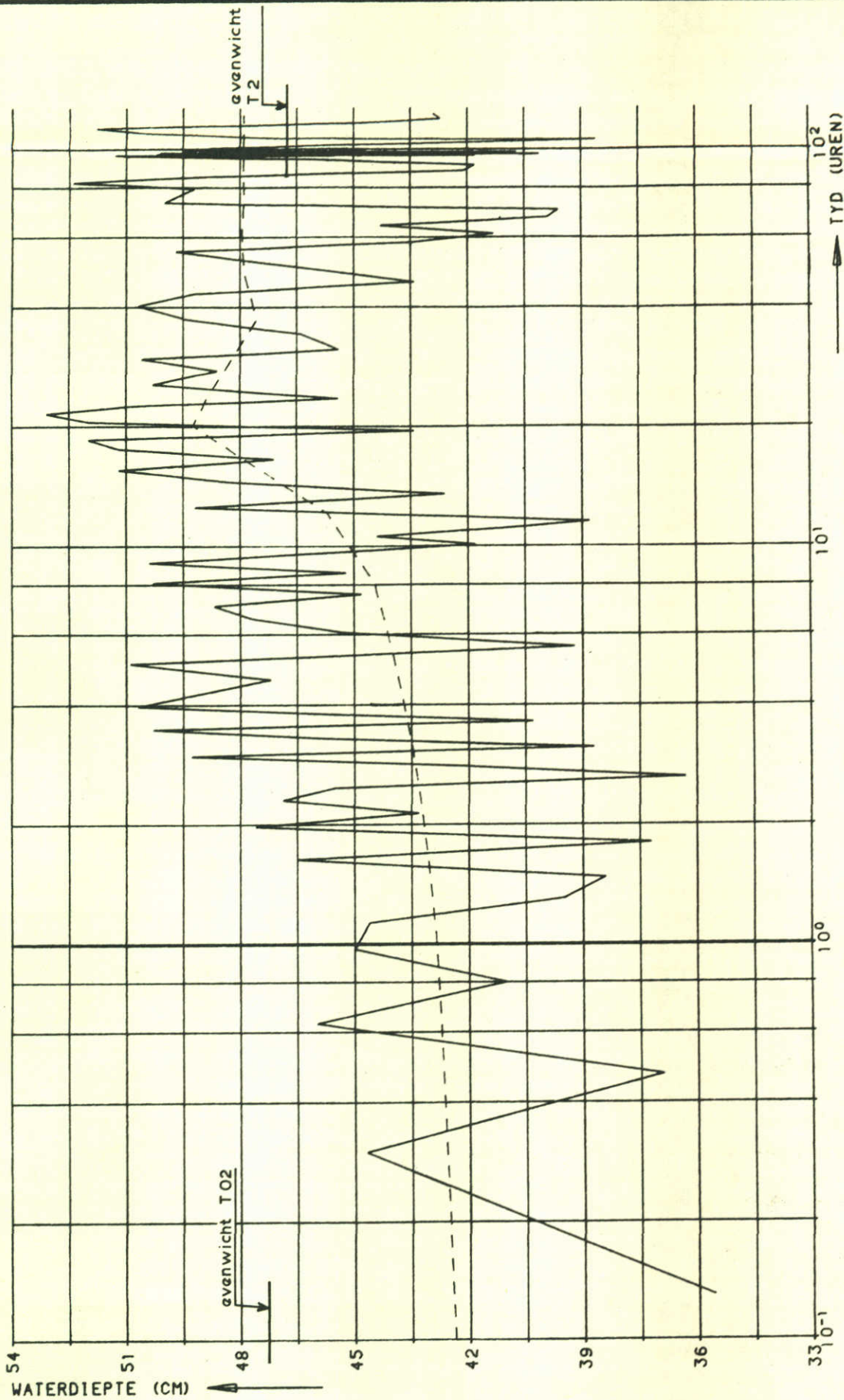


TIJDSAFHANKELIJK VERLOOP VAN DE  
WATERDIEPTE IN MEETPUNT 3001

T01/T1	$\Delta Q = 0,15Q$
--------	--------------------

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1755	FIG. 64
--------	---------



——— GEMETEN MEETPUNT 1  
 - - - BEREKEND MEETPUNT 1

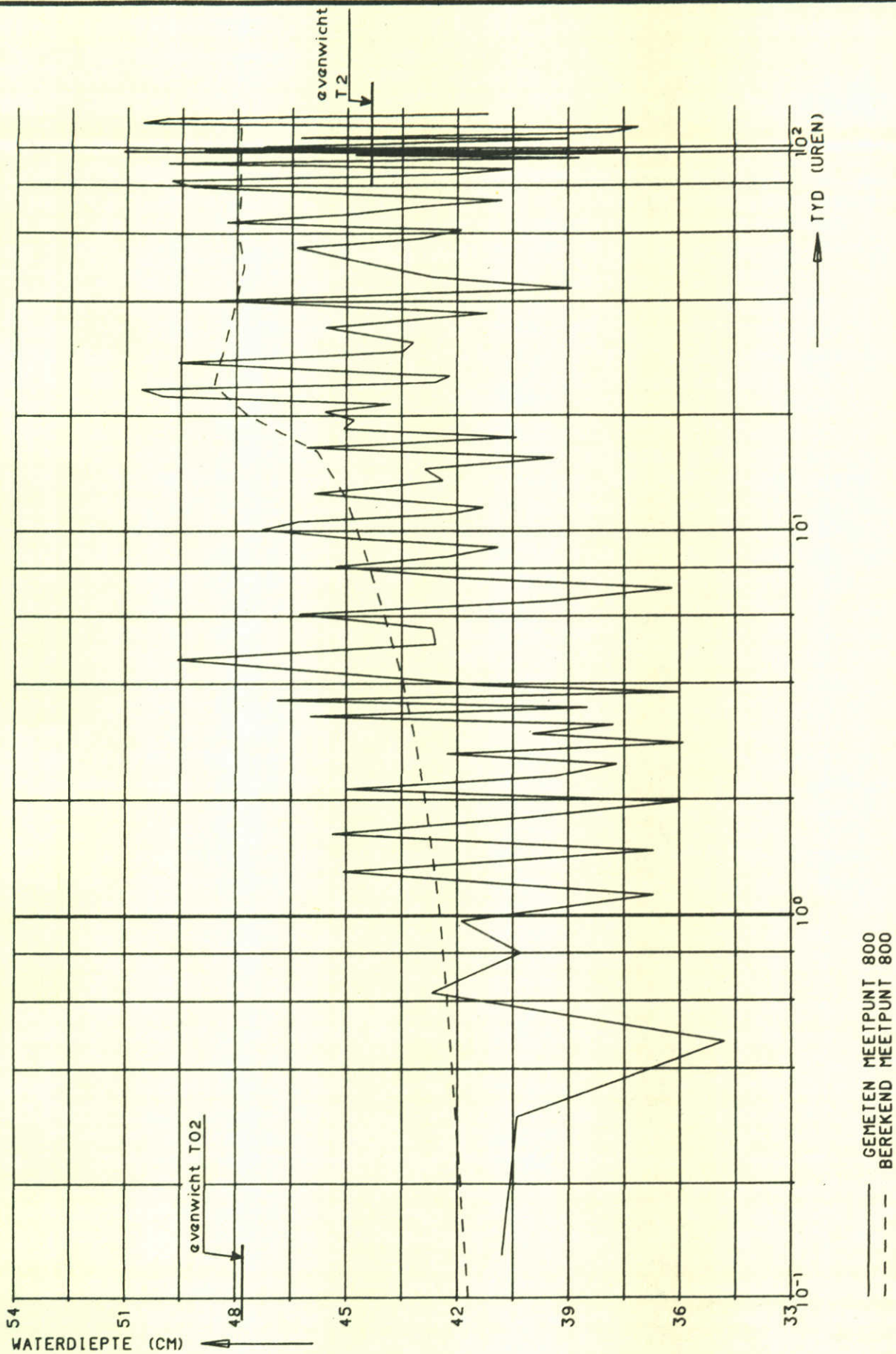
TIJDSAFHANKELIJK VERLOOP VAN DE  
 WATERDIEPTE IN MEETPUNT 1

T02/T2    ΔQ=0,25Q

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1755

FIG. 65



TIJDSAFHANKELIJK VERLOOP VAN DE  
 WATERDIEPTE IN MEETPUNT 800

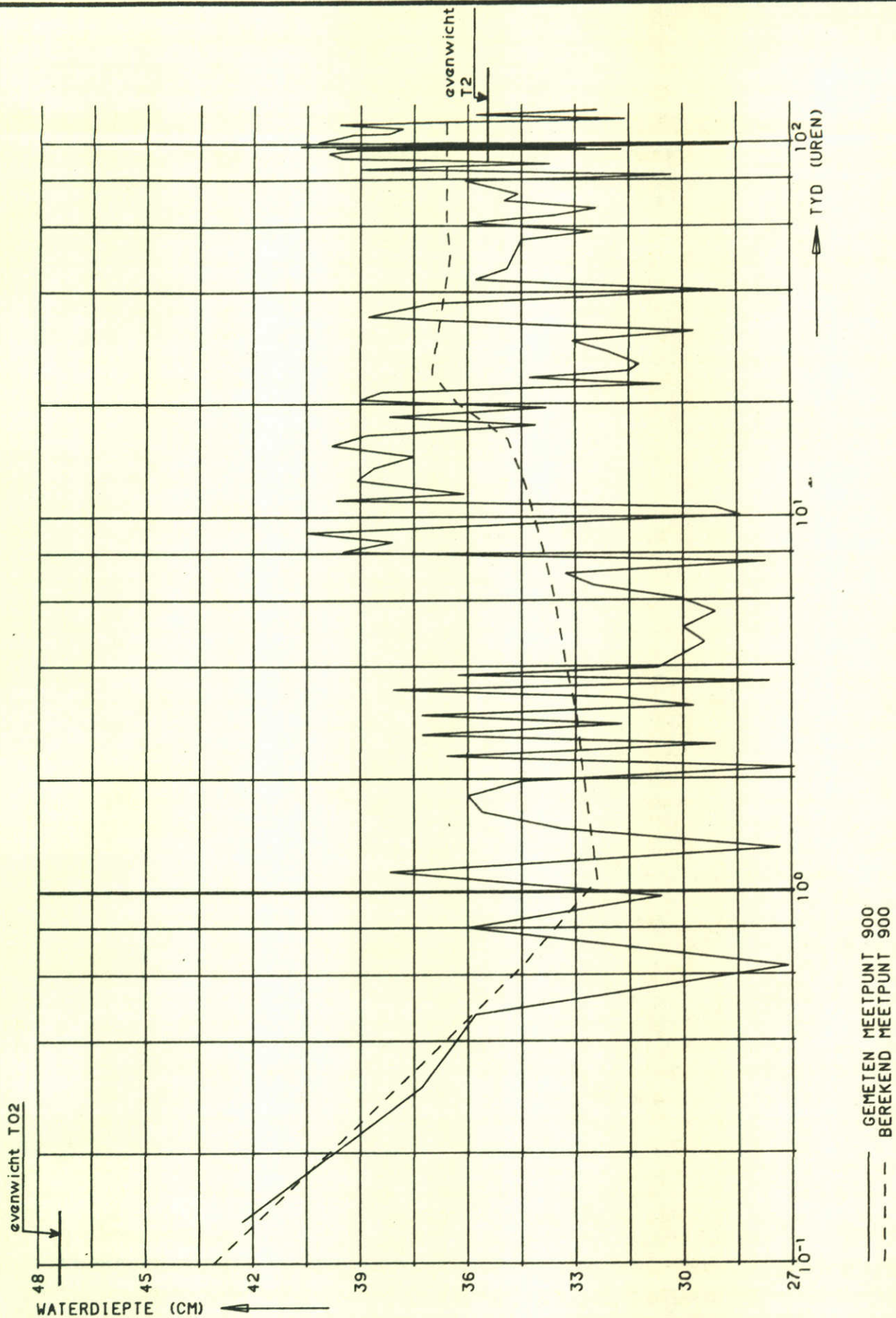
T02/T2

$\Delta Q = 0,25Q$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1755

FIG. 66



TIJDSAFHANKELIJK VERLOOP VAN DE  
WATERDIEPTE IN MEETPUNT 900

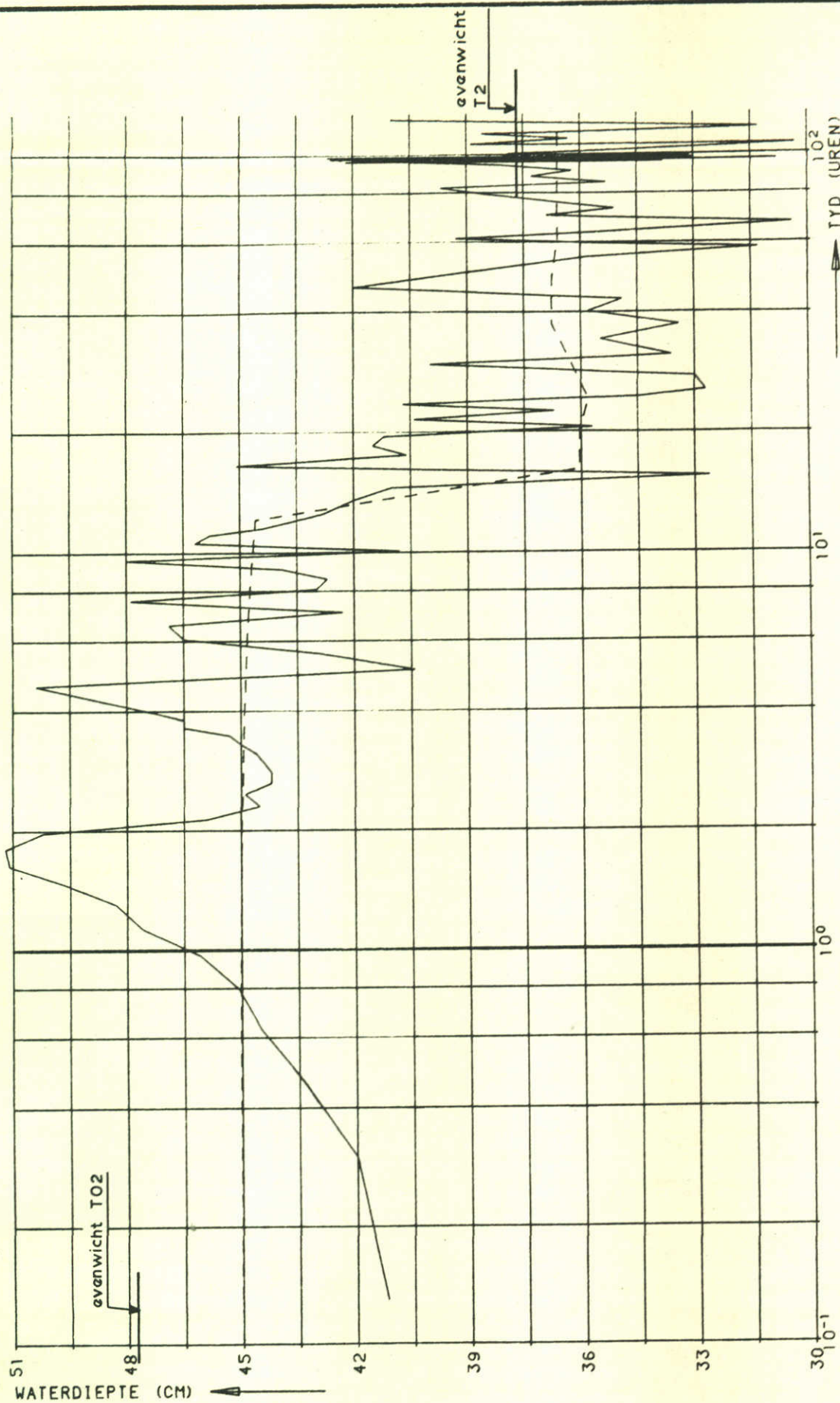
T02/T2

$\Delta Q = 0,25 Q$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1755

FIG. 67



— GEMETEN MEETPUNT 3001  
 - - - BEREKEND MEETPUNT 3001

TIJDSAFHANKELIJK VERLOOP VAN DE  
 WATERDIEPTE IN MEETPUNT 3001

T02/T2

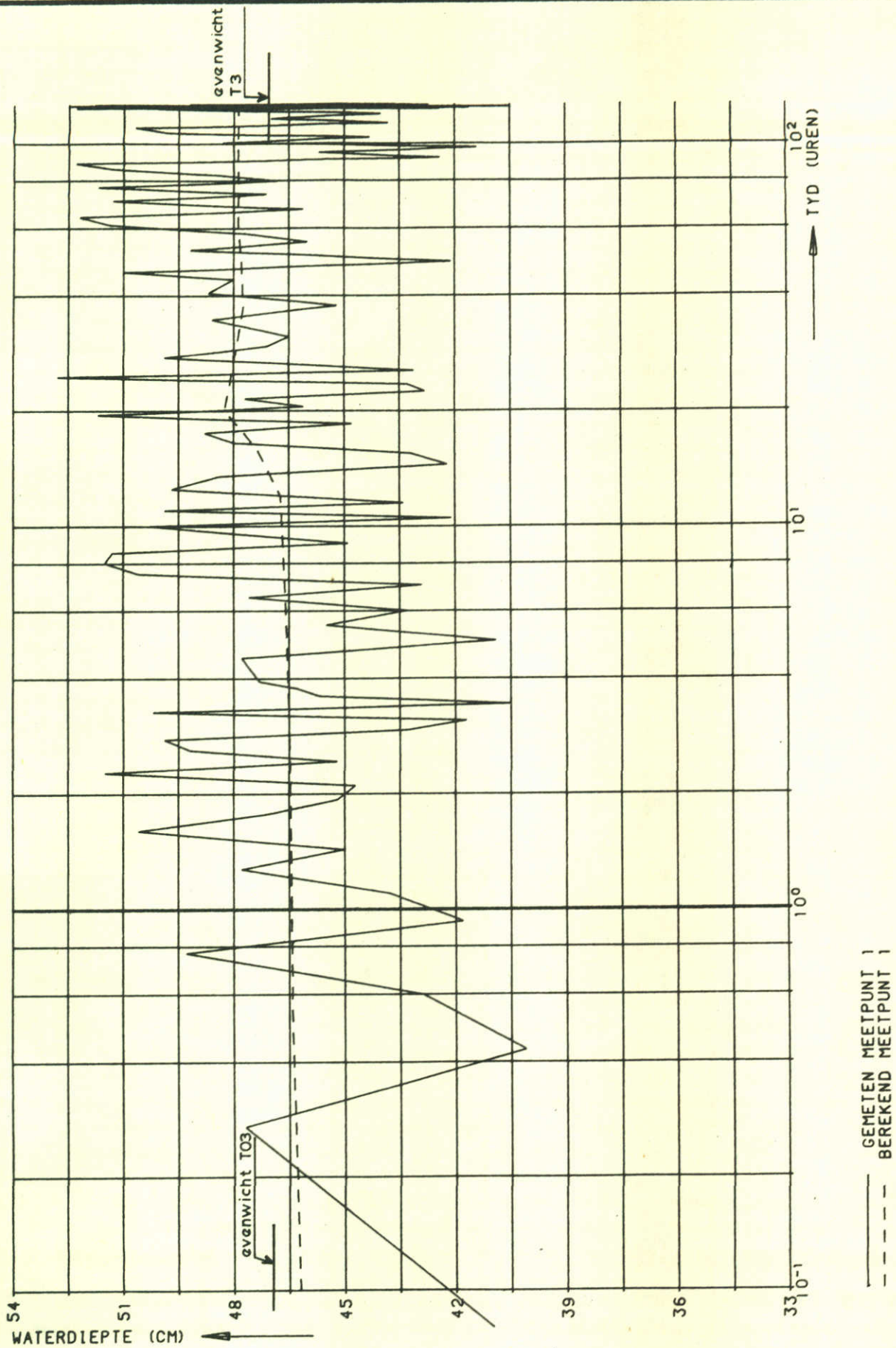
$\Delta Q = 0,25Q$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1755

FIG. 68





TIJDSAFHANKELIJK VERLOOP VAN DE  
 WATERDIEPTE IN MEETPUNT 1

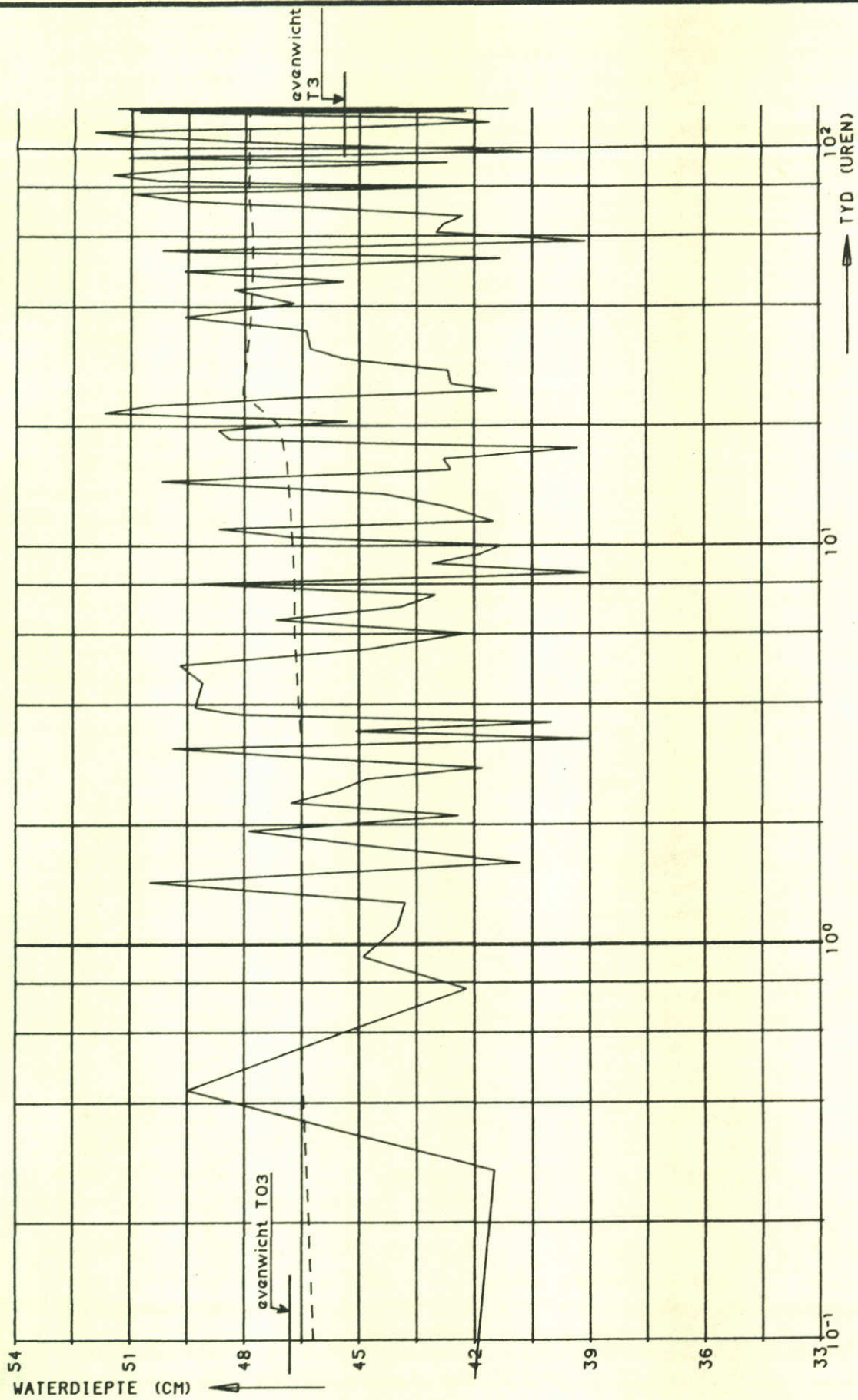
T03/T3

$\Delta Q = 0,05Q$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1755

FIG. 69



TIJDSAFHANKELIJK VERLOOP VAN DE  
WATERDIEPTE IN MEETPUNT 800

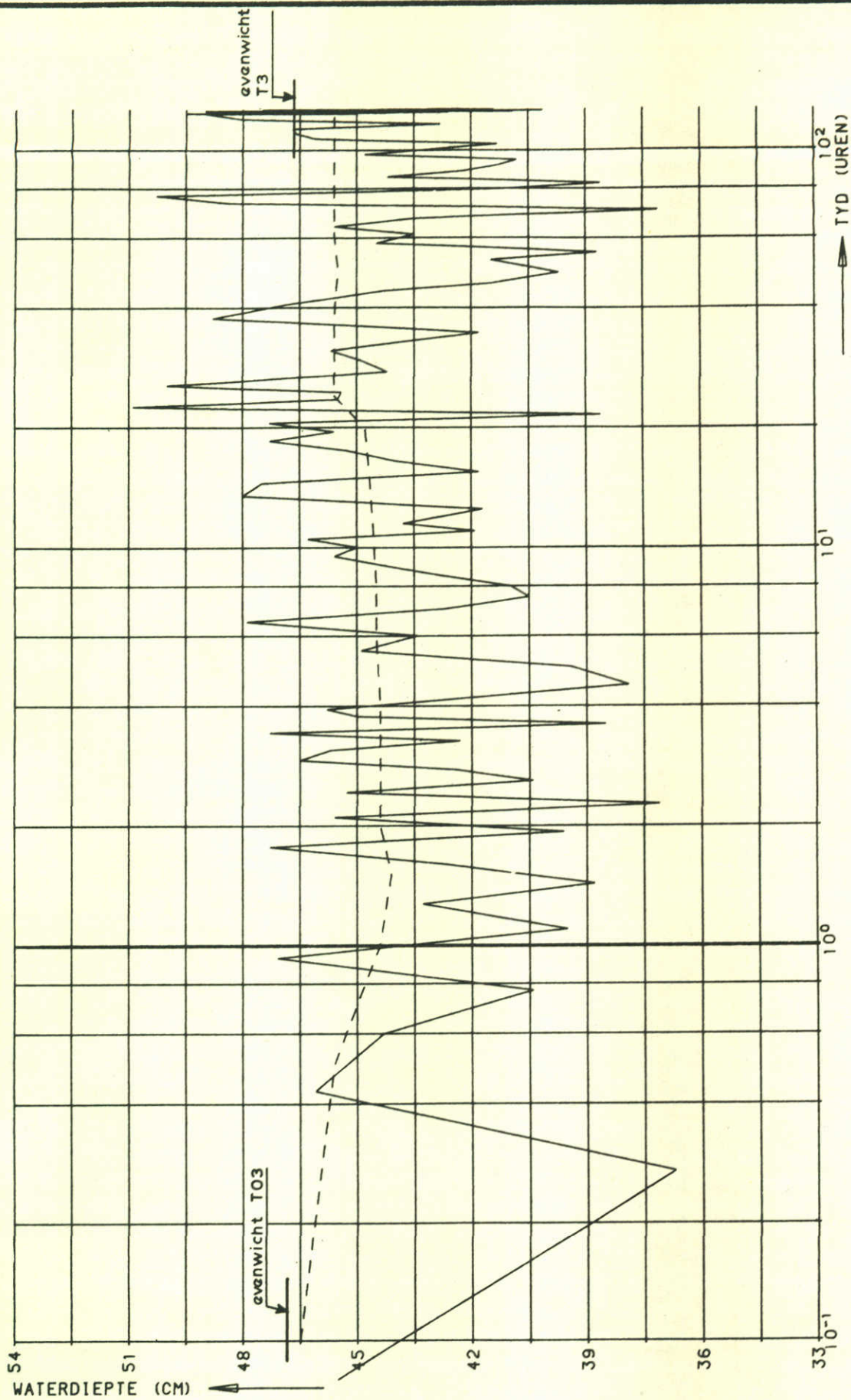
T03/T3

$\Delta Q = 0,05Q$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

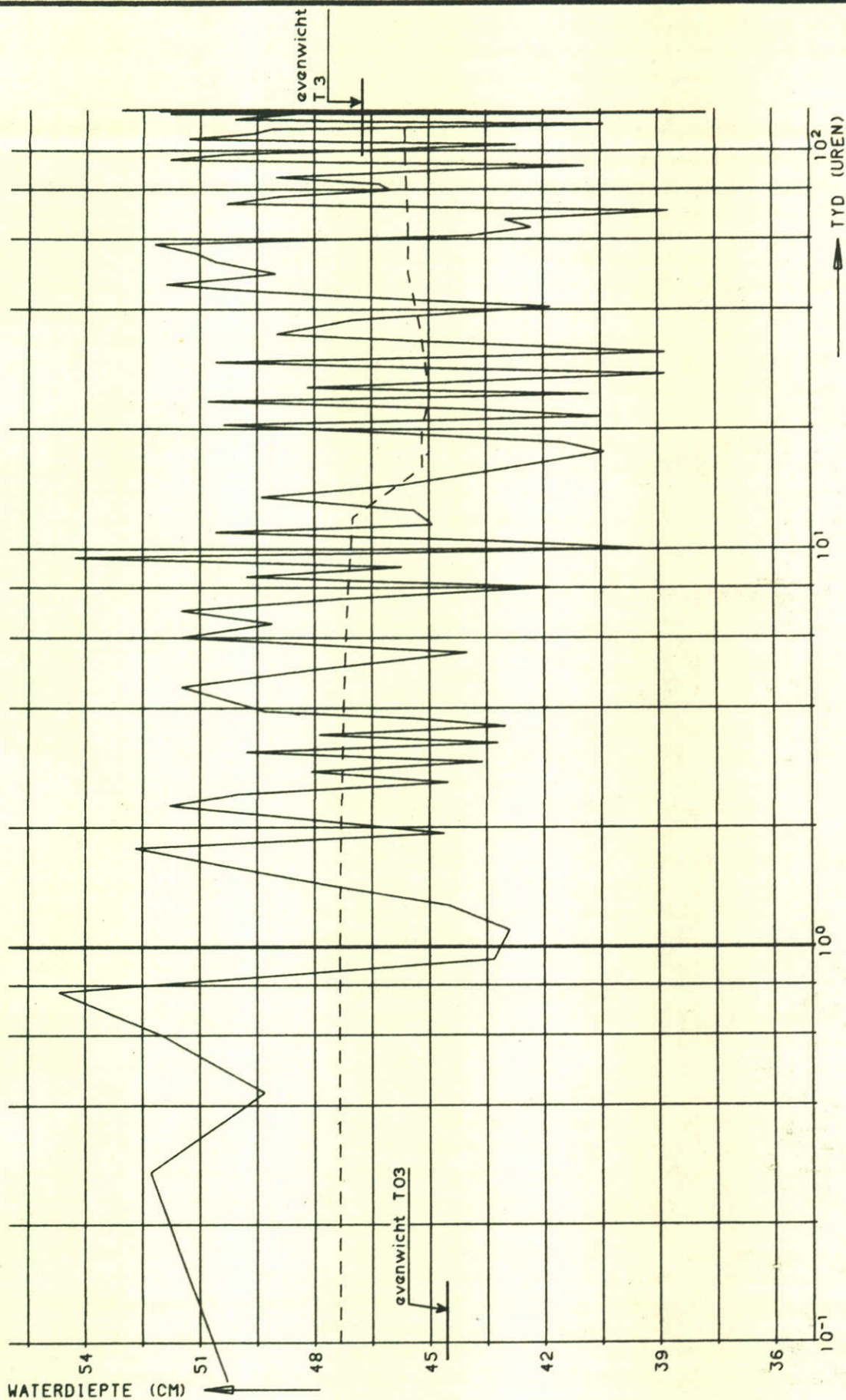
M 1755

FIG. 70



— GEMETEN MEETPUNT 900  
 - - - BEREKEND MEETPUNT 900

TIJDSAFHANKELIJK VERLOOP VAN DE WATERDIEPTE IN MEETPUNT 900	T03/T3	$\Delta Q = 0,05Q$
	WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1755



— GEMETEN MEETPUNT 3001  
 - - - BEREKEND MEETPUNT 3001

TIJDSAFHANKELIJK VERLOOP VAN DE  
 WATERDIEPTE IN MEETPUNT 3001

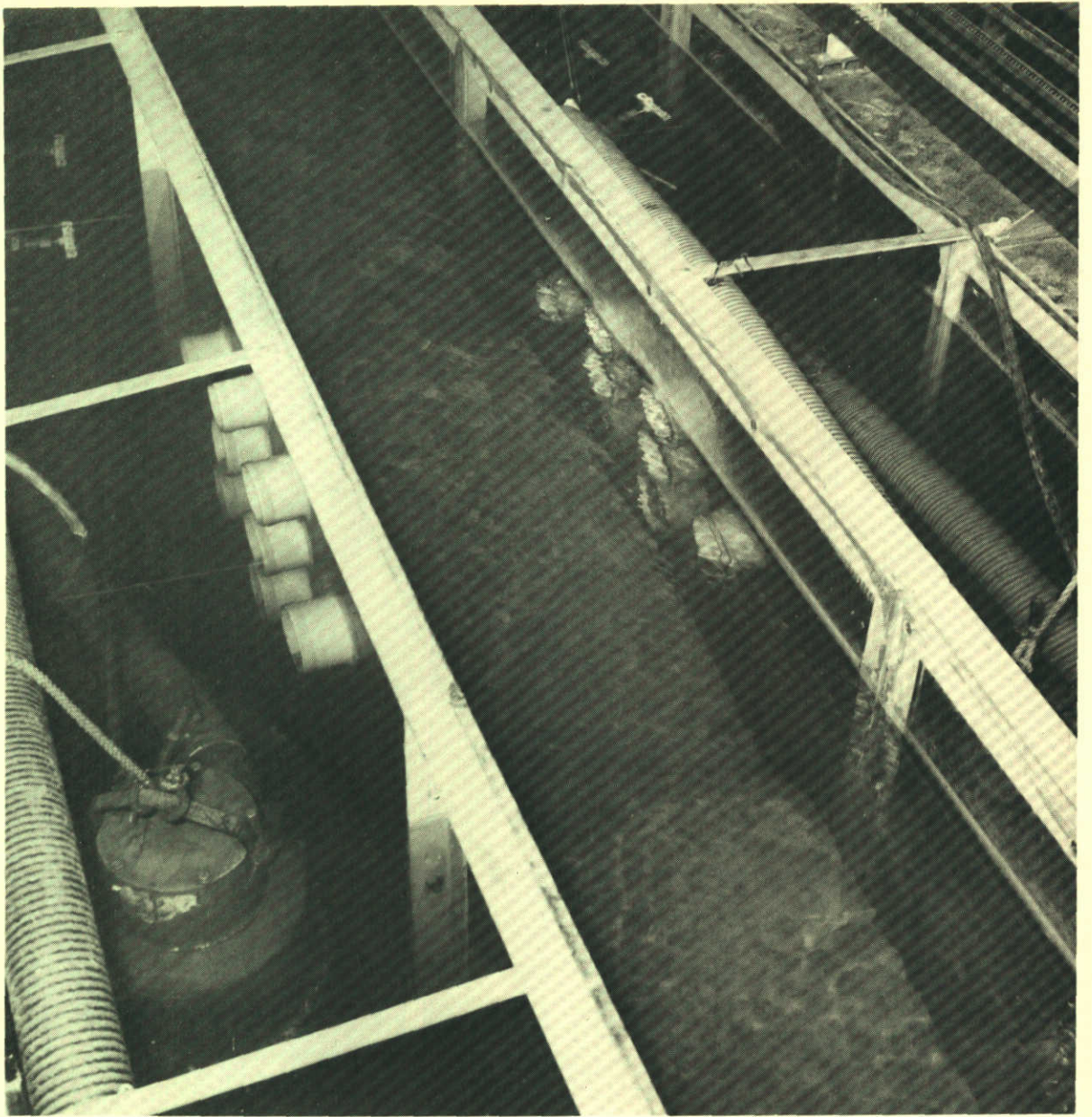
T03/T3

$\Delta Q = 0,05Q$

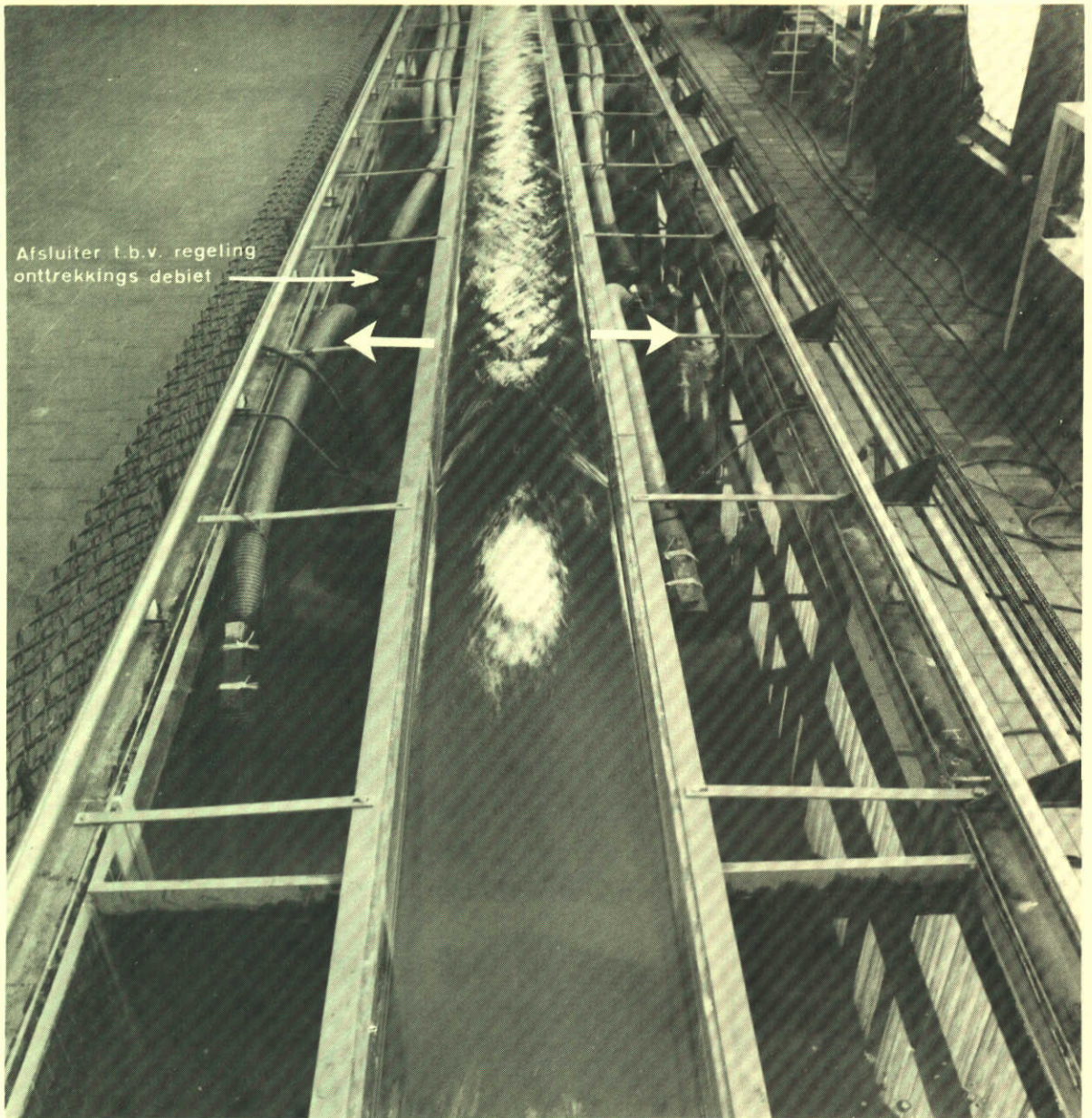
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1755

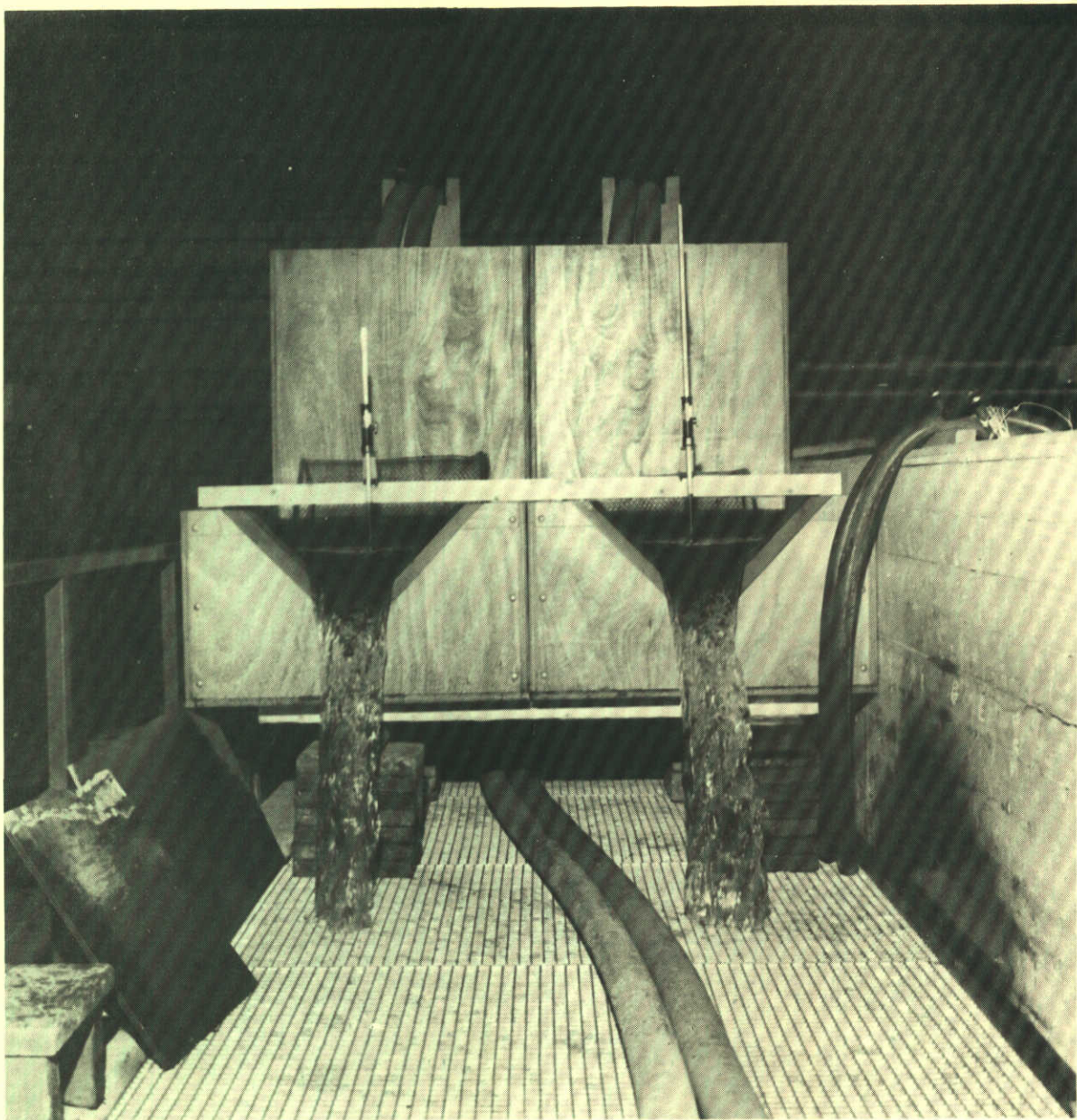
FIG. 72



1. Wijze van onttrekken



2. Overzicht versmalde goot met plaats van onttrekking



3. Meetstuwen voor de controle van het onttrekkingsdebiet

## Bijlage A

Voorbeeld standaard gegevensverwerking



toestand: T 1 datum: 5/12/80 nr. meting: 20  
 schuifstand: 685 mm debiet: 160 l/s korr. debiet: 3 l/s  
 dosering: 27 kg per 1800 sek. (gewicht onder water)  
 materiaal: zand 0.71 tot 0.85 m

instrument	meetwagen		instrumentencircuit
	positie		
	z-richting	x-richting	
WAPRO 1	0 cm	-44 cm	opening Romijn
PROVO 1	-17 cm	88 cm	WAVO 1 (waterstand)
PROVO 2	0 cm	88 cm	WAVO 2 (energiehoogte)
PROVO 3	17 cm	88 cm	WAVO 3 (energiehoogte)
***** 0	0 cm	0 cm	schuif
***** 0	0 cm	0 cm	temperatuur

begin meetsektie: 1475 cm einde meetsektie: 4475 cm  
 bemonsteringsafstand: 1 cm gootbreedte: 500 mm  
 afstand nulpunt goot tot elektronisch oog: 195 cm  
 afstand pitotbuizen: 3499 cm

mp	positie	WAPRO 1	PROVO 1	PROVO 2	PROVO 3	***** 0	***** 0
1	1475	8797	3932	3877	4013	0	0
101	1575	8727	3821	4047	4178	0	0
201	1675	8737	3671	3792	3680	0	0
301	1775	8687	4127	4142	3934	0	0
401	1875	8707	4277	4223	4263	0	0
501	1975	8662	3341	3406	3456	0	0
601	2075	8607	4367	4288	4307	0	0
701	2175	8667	4022	3997	4013	0	0
801	2275	8617	3451	3506	3436	0	0
901	2375	8587	4407	4348	4447	0	0
1001	2475	8622	3901	3827	3884	0	0
1101	2575	8607	3942	3957	4018	0	0
1201	2675	8572	3646	3701	3580	0	0
1301	2775	8582	3406	3376	3296	0	0
1401	2875	8552	3206	3260	3251	0	0
1501	2975	8552	3341	3436	3222	0	0
1601	3075	8487	3286	3371	3286	0	0
1701	3175	8492	4157	4188	4033	0	0
1801	3275	8507	3836	3782	3690	0	0
1901	3375	8472	4002	3987	3984	0	0
2001	3475	8442	3176	3250	3212	0	0
2101	3575	8427	3521	3596	3401	0	0
2201	3676	8442	3866	3802	3680	0	0
2301	3775	8377	4107	4077	4018	0	0
2401	3875	8407	3071	3110	3142	0	0
2501	3975	8432	3561	3501	3570	0	0
2601	4075	8382	3621	3606	3635	0	0
2701	4175	8282	3962	3882	3904	0	0
2801	4275	8347	3471	3386	3515	0	0
2901	4375	8327	3156	3316	3271	0	0
3001	4475	8257	4227	4057	3894	0	0

gemiddelde waarde over de meetsektie

8521	3722	3745	3724	0	0
------	------	------	------	---	---

gemiddelde waterdiepte: 4791 m

	begin meting	einde meting
tijd	21H16M18S	21H19S 9M
gemeten debiet	158L/S	158L/S
opening Romijn	4.91 cm	4.91 cm
waterstand	82.22 cm	82.22 cm
energiehoogte 1	91.24 cm	91.56 cm
energiehoogte 2	85.53 cm	85.66 cm
schuifstand	68.49 cm	68.50 cm
temperatuur	17.6 °C	17.6 °C
verhang energielijn	.0016 m	.0017 m
hydr. straal bodem	.3313 m	.3351 m
C-bodem	28.3664m**0.5/s	27.7485m**0.5/s
getal van Reynolds	53.	54.
getal van Froude	.30	.30
koef. Darcy-Weiszb.	.10	.10

## Bijlage B

Berekende bodemligging en bodemhelling per meting in geselecteerde gebieden

***** METING *****									
TOESTAND	DATUM	VOLGNR.		***** VOOR ONTTREKING *****		***** BODEMSTIJGINGSGBIED *****		*** GEBIED NA BODEMSTIJGING ***	
		* BODEMHEL- * KLING * (X10E-3)	RODEMHHEL- GEMIDDELDE LENGTE VAN GE- BIED(CM)*	TE (CM)	* BODEMHEL- * KLING * (X10E-3)	RODEMHHEL- GEMIDDELDE LENGTE VAN GE- BIED(CM)*	TE (CM)	* BODEMHEL- * KLING * (X10E-3)	RODEMHHEL- GEMIDDELDE LENGTE VAN GE- BIED(CM)*
81280	B	1.815	39.58	800	2.594	45.07	75	2.033	36.37
81280	9	3.838	39.72	800	32.51	45.79	121	2.142	36.32
81280	10	.798	39.31	800	32.18	45.88	162	2.267	36.29
81280	11	1.576	39.65	800	-69.4	47.03	180	2.284	36.27
81280	12	2.345	39.09	800	-10.6	47.18	239	2.259	36.17
81280	13	3.228	39.15	800	-21.5	45.71	293	2.265	36.12
81280	14	3.595	39.03	800	8.319	46.79	325	2.250	36.09
81280	15	4.002	38.95	800	-8.57	47.73	346	2.049	36.08
81280	16	1.034	38.99	800	-11.3	47.07	381	2.000	36.08
81280	17	2.707	39.07	800	-6.05	46.89	416	1.993	36.11
81280	18	1.218	38.94	800	-4.51	46.87	441	2.023	36.16
81280	19	1.403	39.16	800	-11.4	47.34	449	1.814	36.17
81280	20	1.047	39.07	800	-7.26	47.04	489	1.826	36.17
81280	21	.855	38.54	800	2.730	47.05	535	1.812	36.16
81280	22	.448	38.95	800	1.826	46.57	576	1.778	36.15
81280	23	1.760	38.40	800	3.267	47.06	596	1.731	36.08
81280	24	1.146	39.31	800	-1.78	46.71	618	1.827	36.10
81280	25	2.426	38.57	800	4.130	47.07	651	1.986	36.10
81280	26	2.039	38.93	800	-0.75	47.15	661	2.085	36.11
81280	27	2.344	39.26	800	-7.34	46.92	691	2.230	36.10
81280	28	.916	38.68	800	2.773	46.91	724	2.419	36.13
81280	29	.633	38.79	800	.685	47.13	734	2.413	36.14
81280	30	1.015	38.92	800	.985	47.06	765	2.418	36.12
81280	31	1.510	38.27	800	4.778	47.08	810	2.590	36.15
81280	32	1.324	38.53	800	3.281	46.71	925	2.194	36.29
81280	33	1.492	38.16	800	3.724	46.94	983	1.754	36.25
81280	34	1.108	37.57	800	5.276	46.83	1087	2.257	36.06
81280	35	1.223	37.41	800	2.556	47.00	1130	2.427	36.08
81280	36	1.69	37.74	800	.404	46.81	1185	2.008	36.28
81280	37	1.91	37.66	800	.213	46.57	1262	2.812	36.25
81280	38	5.708	36.95	800	5.535	45.95	1474	5.322	36.37
81280	39	3.458	36.92	800	3.547	46.08	1492	4.458	36.25
81280	40	4.932	37.15	800	3.615	45.98	1563	4.358	36.49
81280	41	3.067	37.08	800	3.687	45.76	1647	4.068	36.56
81280	42	3.049	37.75	800	2.255	45.76	1682	4.013	36.65
81280	43	3.590	37.72	800	2.129	45.78	1741	6.155	36.86
81280	44	2.112	37.27	800	3.521	45.06	2035	-18.5	33.28
81280	45	1.572	36.93	800	3.436	45.09	2086	-49.8	33.27
81280	46	1.275	37.13	800	3.014	45.03	2134	-66.9	32.04
81280	47	1.848	37.35	800	2.519	44.94	2201		
81280	48	2.366	36.92	800	1.839	45.31	2201		
81280	1	1.863	37.09	800	1.906	45.04	2201		
81280	2	.314	36.67	800	1.974	44.96	2201		
81280	3	1.126	37.35	800	1.739	44.88	2201		
81280	4	1.34	36.96	800	2.427	44.78	2201		
81280	5	2.157	36.45	800	2.400	45.03	2201		
81280	6	2.035	36.88	800	2.324	44.86	2201		
81280	7	1.378	36.95	800	2.326	44.91	2201		
81280	8	2.504	37.05	800	2.459	44.99	2201		
81280	9	.910	36.71	800	2.628	45.04	2201		
81280	10	-1.50	36.65	800	2.507	45.00	2201		
81280	11	-1.48	36.45	800	2.435	45.00	2201		
81280	12	-1.06	35.99	800	2.373	45.12	2201		
81280	13	.686	35.99	800	1.373	45.12	2201		
81280	14	1.067	36.48	800	1.304	44.71	2201		
81280	15	1.645	37.16	800	1.508	44.52	2201		
81280	16	2.366	36.84	800	2.763	44.48	2201		
81280	17	2.492	36.69	800	2.434	44.87	2201		
101280	1	1.815	37.34	800	2.216	44.92	2201		
101280	2	.143	37.23	800	1.528	45.00	2201		
101280	3	-1.67	36.91	800	2.206	44.81	2201		
101280	4	1.131	37.27	800	1.688	45.00	2201		

Bijlage C

Verwerkte meetgegevens evenwichtsligging proef T2

serie van 20 evenwichtsmetingen

toestand: 2

datum: 12-12-80 volgnr. 4 t/m datum: 12-12-80 volgnr. 23

meetpunten om de 25 cm geprint

1	37.9	37.5	37.3	37.7	37.4	37.3	37.4	36.8	36.8	36.2
251	36.4	36.1	36.5	36.1	36.5	36.2	36.1	35.9	35.7	36.1
501	35.8	35.9	35.6	35.8	35.8	36.5	36.6	36.8	36.6	37.1
751	36.8	37.6	38.9	41.8	45.5	47.4	48.2	48.9	48.8	49.0
1001	48.8	48.4	48.4	48.6	48.0	48.0	48.1	47.8	47.9	47.3
1251	47.0	47.3	47.0	47.7	46.8	46.8	46.7	46.6	46.1	45.6
1501	45.8	45.4	45.7	45.5	46.3	45.3	45.8	45.8	46.0	45.7
1751	45.4	44.9	44.9	44.6	45.1	45.1	44.8	44.5	44.6	44.2
2001	44.5	44.2	44.5	43.8	44.4	44.1	44.8	44.6	44.8	44.3
2251	44.7	44.4	44.2	44.3	44.0	44.0	44.0	43.6	43.8	43.9
2501	43.3	43.7	43.3	43.4	43.5	43.1	43.1	42.7	42.9	42.5
2751	43.2	42.6	43.0	43.0	43.0	42.5	43.1	42.3	42.6	42.1
3001	42.3									

gemiddelde waterdiepte bovenstrooms de onttrekking : 47.37 cm

gemiddelde waterdiepte benedenstrooms de onttrekking: 36.57 cm

helling waterspiegel bovenstrooms de onttrekking :  $1.414 \cdot 10^{-3}$

helling waterspiegel benedenstrooms de onttrekking :  $1.641 \cdot 10^{-3}$

Bijlage C Verwerkte meetgegevens evenwichtsligging Proef T2

Bijlage D

Waterstandsverloop voor proef T2 op boven- en benedenrand van het meettraject  
en in het onttrekkingspunt

toestand	datum	volgnr.	WAPRO op meetpunt 1	WAPRO op meetpunt 830	WAPRO op meetpunt 3001
2	8-12-80	8	82.27	80.07	79.82
2	8-12-80	9	82.72	80.62	79.92
2	8-12-80	10	82.02	79.22	79.77
2	8-12-80	11	83.27	81.12	80.12
2	8-12-80	12	82.42	80.57	79.82
2	8-12-80	13	81.72	79.82	79.82
2	8-12-80	14	82.92	79.77	80.07
2	8-12-80	15	82.77	81.27	79.22
2	8-12-80	16	82.37	80.47	79.82
2	8-12-80	17	83.22	80.87	79.62
2	8-12-80	18	82.57	80.52	79.87
2	8-12-80	19	83.77	80.12	79.92
2	8-12-80	20	83.67	81.47	79.87
2	8-12-80	21	82.87	80.72	79.87
2	8-12-80	22	83.17	80.92	80.02
2	8-12-80	23	82.42	81.12	79.72
2	8-12-80	24	83.32	80.52	79.62
2	8-12-80	25	83.12	81.12	79.67
2	8-12-80	26	83.02	81.02	79.87
2	8-12-80	27	84.02	81.52	79.92
2	8-12-80	28	83.92	81.12	80.27
2	8-12-80	29	83.57	82.07	80.52
2	8-12-80	30	84.27	81.52	80.07
2	8-12-80	31	83.82	81.72	79.97
2	8-12-80	32	83.77	81.97	79.97
2	8-12-80	33	83.77	81.72	79.77
2	8-12-80	34	83.47	81.97	79.62
2	8-12-80	35	83.67	82.47	79.87
2	8-12-80	36	83.07	82.27	80.07
2	8-12-80	37	83.62	81.87	79.67
2	8-12-80	38	83.87	82.12	79.67
2	8-12-80	39	83.82	82.27	79.57
2	8-12-80	40	83.92	81.82	79.57
2	8-12-80	41	83.37	81.92	79.72
2	8-12-80	42	83.97	82.62	79.82
2	8-12-80	43	83.92	82.77	79.72
2	8-12-80	44	84.02	82.52	79.97
2	8-12-80	45	83.82	82.57	80.27
2	8-12-80	46	83.87	82.32	79.22
2	8-12-80	47	84.67	83.32	80.52
2	8-12-80	48	84.22	82.47	79.12
2	9-12-80	1	84.92	83.02	79.77
2	9-12-80	2	85.02	82.92	80.22
2	9-12-80	3	85.17	83.92	80.42
2	9-12-80	4	84.72	83.02	79.87
2	9-12-80	5	85.22	84.02	80.22
2	9-12-80	6	84.57	83.67	80.12
2	9-12-80	7	85.07	83.82	80.17
2	9-12-80	8	84.72	83.22	79.52
2	9-12-80	9	84.67	83.62	80.02
2	9-12-80	10	84.62	83.72	79.97
2	9-12-80	11	84.72	83.42	80.82
2	9-12-80	12	84.47	83.32	79.32
2	9-12-80	13	84.27	83.32	79.22
2	9-12-80	14	84.67	83.47	80.52
2	9-12-80	15	84.92	83.82	80.02
2	9-12-80	16	85.02	83.47	80.52
2	9-12-80	17	84.72	82.92	79.67
2	10-12-80	1	85.02	83.62	79.92
2	10-12-80	2	84.62	83.37	79.87
2	10-12-80	3	84.97	83.92	80.62
2	10-12-80	5	84.72	83.47	80.37
2	10-12-80	6	84.77	83.62	79.62
2	10-12-80	7	84.42	83.52	80.07
2	11-12-80	1	84.67	83.52	79.87
2	11-12-80	2	84.22	83.02	78.97
2	11-12-80	3	84.27	83.62	80.57
2	11-12-80	4	85.02	82.97	79.37
2	11-12-80	5	84.97	84.07	80.27
2	11-12-80	6	84.67	83.42	79.67
2	11-12-80	7	84.87	83.27	80.37
2	12-12-80	1	84.77	83.52	80.82
2	12-12-80	2	84.47	83.67	80.07
2	12-12-80	3	85.27	83.52	80.67
2	12-12-80	4	85.07	83.57	79.87
2	12-12-80	5	84.82	83.62	79.27
2	12-12-80	6	84.72	83.67	80.22
2	12-12-80	7	84.37	83.32	79.97
2	12-12-80	8	85.57	84.22	80.77
2	12-12-80	9	85.27	83.97	80.52
2	12-12-80	10	84.82	83.67	78.97
2	12-12-80	11	84.17	83.02	79.82
2	12-12-80	12	84.47	83.52	80.32
2	12-12-80	13	84.92	83.47	79.92
2	12-12-80	14	84.47	83.47	79.92
2	12-12-80	15	84.52	83.52	79.87
2	12-12-80	16	84.77	83.72	80.67
2	12-12-80	17	84.07	82.92	79.22
2	12-12-80	18	84.62	82.72	80.02
2	12-12-80	19	84.32	82.87	80.32
2	12-12-80	20	84.67	82.97	80.02
2	12-12-80	21	84.82	83.57	80.32
2	12-12-80	22	84.77	84.02	79.92
2	12-12-80	23	84.47	83.37	79.07
2	12-12-80	24	85.02	83.42	80.77
2	12-12-80	25	83.87	82.47	79.22
2	12-12-80	26	85.07	83.57	80.32
2	12-12-80	27	85.12	82.77	79.77
2	13-12-80	1	85.17	82.82	80.32
2	13-12-80	2	84.92	83.92	79.62
2	13-12-80	3	85.32	84.07	80.57
2	13-12-80	4	84.47	82.92	80.52
2	13-12-80	5	85.07	83.17	80.27
2	13-12-80	6	85.07	83.57	80.22
2	13-12-80	7	84.47	83.07	80.22
2	13-12-80	8	84.57	83.77	79.02
2	14-12-80	1	84.82	82.97	79.92
2	14-12-80	2	84.92	83.57	79.92
2	14-12-80	3	84.42	83.12	79.22
2	14-12-80	4	85.02	83.47	79.27
2	14-12-80	5	84.37	82.92	79.77
2	14-12-80	6	85.02	84.12	80.57
2	14-12-80	7	85.22	83.62	80.47
2	14-12-80	8	85.02	83.52	80.77
2	15-12-80	1	84.42	83.37	80.12
2	15-12-80	2	85.22	83.47	79.62
2	15-12-80	3	84.72	83.92	79.97
2	15-12-80	4	85.37	82.77	80.42
2	15-12-80	5	85.02	82.27	79.22
2	15-12-80	6	84.82	83.12	80.22

waterloopkundig laboratorium postbus 177 delft