



waterloopkundig laboratorium

diffusie in estuaria

schaalonderzoek in
prototype en hydraulische modellen van het
estuarium Brouwershavense gat - Grevelingen
in samenwerking met
rijkswaterstaat-fysische afdeling

verslag model- en prototypeonderzoek

M 1010

maart 1974

M1010-2

diffusie in estuaria

schaalonderzoek in
prototype en hydraulische modellen van het
estuarium Brouwershavense gat - Grevelingen
in samenwerking met
rijkswaterstaat-fysische afdeling

verslag model-en prototypeonderzoek

M 1010

maart 1974

INHOUD

	blz.
<u>1</u> <u>Inleiding</u>	1
1.1 Probleemstelling en doel van het onderzoek	1
1.2 Opdracht	2
1.3 Konklusies	2
<u>2</u> <u>Proeven in model M 600</u>	6
2.1 Inleiding	6
2.2 Opzet van de proeven	6
2.3 Verloop van de proeven	7
2.4 Methode van uitwerken	7
2.5 Massakontrolle	8
<u>3</u> <u>Proeven in model M 886</u>	10
3.1 Inleiding	10
3.2 Opzet van de proeven	11
3.3 Verloop van de proeven	11
3.4 Methode van uitwerken	12
3.5 Massakontrolle	12
<u>4</u> <u>Proef in het prototype</u>	15
4.1 Inleiding	15
4.2 Opzet van de proef	15
4.3 Verloop van de proef	16
4.4 Methode van uitwerken	16
4.5 Massakontrolle en korrektie voor afbraak	16
<u>5</u> <u>Betrouwbaarheid van de resultaten</u>	19
5.1 Fouten bij monsternamen	19
5.2 Nauwkeurigheid fluorometer	20
5.3 Fouten in verwerking van monsters en meetresultaten	20
5.4 Betrouwbaarheid van afbraakkorrektie	21
5.5 Afwijking in proefomstandigheden	21
5.6 Bemonsteringsdichtheid naar tijd en plaats	23

INHOUD (vervolg)

	blz.
<u>6</u> <u>Theoretische achtergronden</u>	24
6.1 Reproductie van diffusieverschijnsel in model	24
6.2 Maximum concentratie in hart van afvalwatervlek	28
<u>7</u> <u>Interpretatie van de resultaten</u>	30
7.1 Algemene tendensen	30
7.2 Middenstandsverhoging	31
7.3 Getij	33
7.4 Samentrekking	33
7.5 Vergelijking model met prototype	36

REFERENTIES

SYMBOLEN

TABELLEN

Tabel 1	Gegevens van de proefomstandigheden
2	Monstername-schema's
3	Massakontrolle
4	Resultaten oriënterende berekeningen naar de uit het meet- gebied gestroomde hoeveelheid rhodamine-B
5	Schaaleffekt in diffusiecoëfficiënten in model

FIGUREN

- 1 Situatie
- 2 Situatie afsluitdam en profiel tracé
- 3 Net van monsternamepunten in de modellen
- 4.1 Tijdstippen van monstername M 600
- 4.2 Tijdstippen van monstername M 600-II en M 886
- 5 Getijregistraties M 600 en M 886
- 6 Gegevens horizontaal getij M 600-I
- 7.1-13 Koncentratieverloop als functie van de tijd -
proeven M 600-I en M 600-II
- 8.1 Maximum concentratie in de vlek als functie van de tijd -
proef M 600-I
- 8.2 Maximum concentratie in de vlek als functie van de tijd -
proef M 600-II
- 9 Massakontroles
- 10.1-30 Koncentratieverloop als functie van de tijd -
proeven M 600-II, M 886-I en M 886-II en prototypeproef
- 11.1 Maximum concentratie in de vlek als functie van de tijd -
proef M 886-I
- 11.2 Maximum concentratie in de vlek als functie van de tijd -
proef M 886-II
- 12.1 Maximum concentratie in de vlek als functie van de tijd -
prototypeproef zonder correctie voor afbraak
- 12.2 Maximum concentratie in de vlek als functie van de tijd -
prototypeproef met correctie voor afbraak
- 13 Schematisch verband tussen maximum concentratie in de vlek,
tijd na lozing en geometrie estuarium
- 14 Maximum concentratie in de vlek als functie van de tijd -
proeven M 886-I en M 886-II
- 15 Maximum concentratie in de vlek als functie van de tijd -
proeven M 600-I en M 600-II
- 16 Maximum concentratie in de vlek als functie van de tijd -
proeven M 600-II, M 886-I, M 886-II en prototypeproef

1 Inleiding

1.1 Probleemstelling en doel van het onderzoek

Niet-samengetrokken hydraulische modellen - (d.w.z. hydraulische modellen met dezelfde horizontale en verticale schaal) - zijn een geschikt middel voor het bestuderen van de verspreiding van op open water gebrachte merkstoffen zonder invloed van dichtheidsverschillen zoals beschouwd in dit verslag. Dit is gebleken uit vergelijkende metingen uitgevoerd in de IJssel en in een onvertrokken model van deze rivier (Ref. 1).

Bij reproductie van de verspreiding van merkstoffen in samengetrokken hydraulische modellen - (d.w.z. hydraulische modellen met een sterkere verkleining van de horizontale afmetingen dan van de verticale afmetingen) - dient men bedacht te zijn op afwijkingen tussen het model en het prototype (Ref. 1 en 2). Of en in welke mate de afwijkingen optreden hangt af van de aard van het te bestuderen verschijnsel. Zo is het waarschijnlijk dat het verschil uitmaakt of de merkstof wordt geloosd in een permanente stroming (rivier) dan wel in een niet permanente stroming (estuarium met getij).

In hoe verre een samengetrokken hydraulisch model een geschikt middel is ter bestudering van de verspreiding van merkstoffen in een permanente stroming wordt nagegaan door het uitvoeren van vergelijkende metingen in de Waal en in een samengetrokken model van deze rivier (o.a. Ref. 1). Het in dit verslag beschreven onderzoek is uitgevoerd om na te gaan in hoeverre een samengetrokken hydraulisch model kan worden gebruikt voor de bestudering van de verspreiding van merkstoffen in een estuarium met getijbeweging, vloed- en eb-scharen en periodiek droogvallende platen.

In het kader van dit onderzoek is de verspreiding van momentaan geïnjecteerde rhodamine B in het estuarium Brouwershavense Gat - Grevelingen zowel in het prototype als in het model van de Beneden Rivieren M 600 (horizontale schaal 1 : 2400, verticale schaal 1 : 64, samentrekking 37,5) en in het model van het estuarium Brouwershavense Gat - Grevelingen M 886 (horizontale schaal 1 : 300, verticale schaal 1 : 100, samentrekking 3) onderzocht.

Het unieke feit dat twee modellen met een onderlinge samentrekking 12,5 voor het onderzoek beschikbaar waren maakte het mogelijk de invloed van een samentrekking 12,5 op de verspreiding uitsluitend op basis van laboratorium-proeven te beoordelen. Dit is een gunstige omstandigheid omdat bij proeven als de onderhavige het verzamelen van meetgegevens in een model eenvoudiger is dan in het prototype. Hierdoor waren bij het hier beschreven onderzoek meer gegevens beschikbaar voor het vergelijken van de modellen onderling dan voor het vergelijken van de modellen met het prototype.

Een overzicht van de situatie wordt gegeven in Fig. 1. Hierop zijn tevens de modelgrenzen in zee van beide modellen aangegeven.

Het rapport is in samenwerking met de Fysische Afdeling van Rijkswaterstaat tot stand gekomen en werd samengesteld door ir. W.D. Eysink.

1.2 Opdracht

De opdracht voor het onderzoek is door de Mathematisch Fysische Afdeling (M.F.A.) van Rijkswaterstaat gegeven tijdens besprekingen in Delft d.d. 19 juni 1968 en 29 augustus 1968. Hierbij werd besloten het onderzoek gezamenlijk uit te voeren, waarbij de M.F.A. de uitvoering van de prototypeproeven zou verzorgen en het Waterloopkundig Laboratorium (W.L.) de uitvoering van de proeven in de modellen.

Tijdens de bespreking te 's-Gravenhage dd. 26 februari 1971 werd overeengekomen, dat de rapportering gezamenlijk zou worden uitgevoerd waarbij het W.L. de redactie zou verzorgen.

1.3 Konklusies

Het onderzoek heeft geleid tot de in de volgende paragrafen gegeven konklusies en indrukken ten aanzien van de problematiek rond verspreiding van afvalstoffen (zonder dichtheidsinvloeden) in een estuarium met getijbeweging.

1.3.1 Reproductie van afvalverspreiding in hydraulische modellen

1 - Theoretisch worden turbulente diffusieve transporten die worden veroorzaakt door bodemwrijving niet juist in een samengetrokken model (met gezien de

vereiste stromingsweerstand juiste ruwheid) weergegeven. Indien de verspreiding van stof alleen door het diffusieve transport ten gevolge van bodemwrijving wordt bepaald, dan treden in samengetrokken hydraulische modellen schaaleffekten op, omdat de diffusiecoëfficiënt in horizontale richting een faktor (samentrekking)^{3/2} te groot en in verticale richting een faktor (samentrekking)^{1/2} te klein wordt weergegeven.

Hierdoor wordt de horizontale variantie (karakteristieke lengtemaat) van de concentratieverdeling in model een faktor overeenkomend met (samentrekking)^{3/4} te groot en de verticale variantie van de concentratieverdeling in model een faktor (samentrekking)^{1/4} te klein (zie paragraaf 6.1).

- 2 - De verspreiding van afvalstof in een estuarium als het Brouwershavense Gat - Grevelingen kan in een samengetrokken hydraulisch model juist worden weergegeven. Dit blijkt uit vergelijking van in het prototype verzamelde meetgegevens en meetgegevens verzameld in de modellen M 600 en M 886 (paragrafen 7.4 en 7.5). De goede overeenkomst tussen de meetresultaten in de beide modellen met een onderlinge samentrekking van 12,5 betekent een belangrijke ondersteuning van deze konklusie.
- 3 - Voor het verkrijgen van een goede reproductie van de verspreiding van afvalwater in een samengetrokken hydraulisch model van een estuarium als het estuarium Brouwershavense Gat - Grevelingen dient aan de volgende voorwaarden te worden voldaan:
 - Het estuarium dient voldoende ondiep te zijn ten opzichte van de breedte van het estuarium om op relatief korte afstand van het lozingspunt een nagenoeg gelijkmatige verdeling van de afvalstof over de vertikaal te verkrijgen. Als aan deze voorwaarde wordt voldaan worden de modelresultaten praktisch niet beïnvloed door het feit dat formeel in een samengetrokken model de verticale turbulente diffusie in verhouding tot het prototype te zwak is.
 - De horizontale turbulente diffusie dient in hoofdzaak tot stand te worden gebracht door mechanismen die wervels veroorzaken met verticale as en die worden gekenmerkt door een horizontale stroomsnelheid en een horizontale lengtemaat ($D :: \bar{u}l$). Uit paragraaf 6.1 blijkt dat o.a. getijbeweging in een gebied met dieptevariatiëes een mechanisme is dat aan deze voorwaarde voldoet.

- De waterbeweging (het snelheidsveld) dient op juiste wijze in het hydraulisch model te worden gereproduceerd. Indien niet aan deze voorwaarde wordt voldaan zou ten gevolge van fouten in het advektieve transport (meevoeren van afvalstof door zich verplaatsende waterpakketten) een onjuiste concentratieverdeling ontstaan. Deze voorwaarde impliceert dat in model M 600 ondanks de samentrekking van 37,5 een goede reproductie van de waterbeweging werd verkregen.

4 - Een goede indruk van de nauwkeurigheid van een model voor afvalwaterver spreiding in een estuarium als het estuarium Brouwershavense Gat - Grevelingen kan worden verkregen uit de resultaten van proef M 600-II ten opzichte van die van proef M 886-I in de punten 16 en 17 (Fig. 10.17 en 10.19). De resultaten van deze punten worden minimaal beïnvloed door de aanwezige kleine verschillen in proefomstandigheden (iets andere damsituatie, bodemconfiguratie en lozingswijze), maar worden in hoofdzaak beïnvloed door schaafeffekten in diffusieve en advektieve transporten. Vergelijking van deze resultaten toont aan dat reeds vanaf een halve getijperiode na lozing slechts kleine verschillen worden gekonstateerd. Daarnaast kan een goede indruk van de nauwkeurigheid van een model worden verkregen uit de proefresultaten met betrekking tot de maximum concentratie in de eindfase van de proeven (beginfase om meettechnische reden onbetrouwbaar - zie paragraaf 5.6 - punt s) die gegeven zijn in Fig. 16.

1.3.2 Algemene tendensen in verspreiding van afvalstof in estuaria

5 - De maximum concentratie in het hart van de vlek blijkt, in tegenstelling tot wat L.J. Fisher (Ref. 9) heeft gevonden, niet evenredig te zijn met t^{-p} , waarbij p konstant is (zie Fig. 13 en 16). Uit de proefresultaten kan worden gekonstateerd, dat onmiddellijk na lozing $p \approx 0$ moet zijn (driedimensionale diffusie, waarbij vlekafmeting en de voor verspreiding maatgevende wervelgrootte zo klein zijn dat diffusie gering is). Vervolgens neemt p toe tot een maximum waarde (maximaal $p = 3$ voor tweedimensionale dispersie op zee en in kustwateren - o.a. Ref. 5, 6, 7 en 8) om daarna op een tijdstip, dat afhankelijk zal zijn van getijbeweging en afmetingen van het estuarium, weer af te nemen tot $p = 0,5$ (ééndimensionale dispersie in kanaal of rivier - Ref. 10) (zie paragraaf 7.1).

- 6 - De invloed van driftstromen op de verspreiding van afvalstof lijkt niet belangrijk, mits de horizontale afmetingen van de vlek veel groter zijn dan de waterdiepte (paragraaf 7.5). In dat geval zullen de door de wind opgewekte wervels met horizontale as klein zijn ten opzichte van de vlek en geen belangrijke bijdrage kunnen leveren in de verspreiding van afvalstof. Indien de vlek klein is ten opzichte van de waterdiepte geldt dit niet. Bovendien kan de vlek in dat geval in belangrijke mate verplaatst worden door driftstromen, in het bijzonder indien de vlek zich in de bovenste waterlaag bevindt.

- 7 - Een relatief geringe middenstandsverhoging had geen merkbare invloed op de verspreiding van de rhodamine (paragraaf 7.2).

- 8 - De grootte van de getijamplitude heeft invloed op de verspreiding van afvalstoffen. Een hoger getij geeft een snellere verspreiding van afvalstof (paragraaf 7.3).

2 Proeven in model M 600

2.1 Inleiding

Met toestemming van de Waterloopkundige Afdeling van de Deltadienst van Rijkswaterstaat zijn twee proeven in het model M 600 uitgevoerd. De eerste proef (M 600-I) is op 21 augustus 1968 uitgevoerd met een gemiddeld getij terwijl de tweede proef (M 600-II) op 10 september 1968 is uitgevoerd met een springtij.

Het doel van deze proeven is:

- a vergelijken met een proef in model M 886
- b vergelijken met een proef in prototype
- c vergelijken M 600-I met M 600-II om een indruk van de getij-invloed te verkrijgen.

Enkele nadere gegevens van de proeven worden gegeven in tabel 1. Hieruit blijkt dat de damsituaties voor de beide proeven verschillend waren. Dit verschil houdt in dat in proef M 600-I de kleine middengeul, waar slechts 6% van het debiet doorheen ging, niet was afgesloten (Fig. 2). Dit zal echter het diffusiepatroon in het estuarium slechts plaatselijk beïnvloeden, zodat de resultaten van de twee proeven rechtstreeks mogen worden vergeleken alsof in beide gevallen de middengeul was afgesloten.

Beide proeven zijn voorbereid en uitgevoerd onder leiding van ir. W.D. Eysink.

2.2 Opzet van de proeven

Na uitvoering van een oriënterende proef met kleurstof en rhodamine B werd een schema opgezet voor het nemen van watermonsters met behulp waarvan de vlekuitbreiding kon worden bepaald. Het net van monstername-punten voor de proeven in het model M 600 is weergegeven in Fig. 3. De tijdstippen van monstername per getijcyclus waren gekozen op kentering en maximum getijstroom zoals aangegeven in Fig. 4.1, 5 en 6. Deze tijdstippen werden afgelezen op een getijklok welke cycli draaide van 24.50 uur op modelschaal. Voor dit model was de tijdschaal 1/300, zodat 1 seconde modeltijd overeen kwam met 5 minuten in prototype. De duur van de proeven omvatte 8 getijcycli van 12.25 uur met vier monstername-tijdstippen per getijcyclus, zodat per monstername-punt maximaal 32 watermonsters werden genomen. Het monstername-schema is weergegeven in tabel 2.

2.3 Verloop van de proeven

Tijdens laagwaterkentering werd een hoeveelheid (2 cc) rhodamine B-oplossing met een concentratie van 10^{-2} kg/l ter plaatse van het injectiepunt in de geul gebracht. Dit werd met behulp van een pipet en een glasplaatje gedaan, opdat de initiële menging van de rhodamine B minimaal zou zijn en de initiële vlek zoveel mogelijk bij de oppervlakte zou blijven.

Het tijdstip waarop de rhodamine B werd geïnjecteerd wordt aangeduid als tijdstip 0. De hierna volgende monstername-tijdstippen zijn genummerd van 1 t/m 32. De monsters werden volgens het in tabel 2 gegeven schema op de in Fig. 3 aangegeven plaatsen met behulp van cuvetjes (± 5 cc) genomen.

Op drie plaatsen werden gedurende de eerste vier getijdycli eveneens dieptemonsters genomen ter controle van de verdeling van de concentratie over de vertikaal.

De cuvetjes met de watermonsters waren genummerd naar plaats, aard en tijdstip van monstername.

2.4 Methode van uitwerken

De genomen watermonsters zijn door de M.F.A. zo snel mogelijk na de proef met twee Turner-fluorimeters op fluorescentie doorgemeten. De gevonden waarden zijn met behulp van ijkgrafieken omgerekend naar concentraties, zodat voor elk monstername-punt het concentratieverloop als functie van de tijd redelijk bekend is (Fig. 7.1 - 7.13). Ook zijn de concentraties voor alle punten op de monstername-tijdstippen bekend met behulp waarvan, gesteund door foto's van de vlekuitbreiding, kaartjes getekend konden worden waarop lijnen van gelijke concentraties zijn aangegeven (deze kaartjes zijn niet in rapport verwerkt, maar wel in het archief van het Waterloopkundig Laboratorium beschikbaar).

Uit deze gegevens is zo goed mogelijk het verloop van de maximum concentratie in de vlek als functie van de tijd bepaald. Dit is gedaan door de maximum gemeten waarde als ondergrens te nemen en daarbij de bovengrens door extrapolatie uit de kaartjes met de lijnen van gelijke concentraties te schatten. Op deze wijze zijn grenzen verkregen waarbinnen de werkelijke concentratie zich zal bevinden (Fig. 8.1 en 8.2).

2.5 Massakontrolle

Voor de tijdstippen met laagwater-kentering zijn massakontrolle-berekeningen uitgevoerd. Hierbij is als volgt te werk gegaan. Het estuarium Brouwershavense Gat - Grevelingen is in kleine vakken verdeeld, waarbij de ondiepten en de geulen zoveel mogelijk gescheiden zijn gehouden. Vervolgens zijn de oppervlakken tussen lijnen van gelijke concentraties van de vlek in elk vak bepaald. De gevonden oppervlakken zijn daarna via een faktor, waarin de schaalfactoren en de gemiddelde diepte van het betreffende vak verwerkt zijn, omgerekend naar een inhoudsmaat in liters behorende bij het model M 600. Het totale volume water met een concentratie tussen twee lijnen van gelijke concentraties werd nu gevonden door de berekende volumina voor dat concentratieinterval voor de verschillende vakken op te tellen. De gemiddelde concentratie in dat interval werd door lineaire interpolatie tussen de beschouwde grenzen bepaald, terwijl voor het gebied met de maximum concentratie is genomen

$$\bar{c} = c_{\text{rand van gebied}} + \frac{2}{3} (c_{\text{max}} - c_{\text{rand van gebied}}) \quad (1)$$

waarbij voor de maximum concentratie c_{max} de waarde wordt genomen welke gevonden wordt uit Fig. 8.1 en 8.2.

Uit de voor de massakontrolle uitgevoerde berekeningen is gebleken dat het grootste gedeelte van de geloosde massa wordt teruggevonden in de gedeelten van de vlek met de hoge concentraties. Uit de resultaten van de massakontrolle voor de proeven M 600-I en II blijkt ook, dat in de beginfase van de proeven te weinig rhodamine B wordt teruggevonden (tabel 3 en Fig. 9). De teruggevonden massa neemt toe naarmate de vlek zich verder heeft verspreid. Deze onnauwkeurigheid in de massakontrolle wordt voornamelijk door drie factoren bepaald, namelijk:

- Het monsternet is voor de beginfase van de proeven vrij grof, waardoor de isokoncentratielijnen onbetrouwbaar zijn. In het bijzonder het gedeelte van de vlek met de hoge concentraties kan daardoor verloren gaan.
- De berekeningsmethode waarmee de massakontrolle is uitgevoerd werkt met omrekeningsfactoren waarin de gemiddelde diepte van een vak is verwerkt. Vooral in de beginfase van de proef bevindt de vlek zich in het diepe gedeelte van de geul, waardoor de gemiddelde diepte behorend bij het velkgedeelte met hoge concentraties groter kan zijn dan de in de omrekeningsfactoren verwerkte gemiddelde vakdiepten. Dit kan een faktor 2 verschil opleveren voor de bijdrage van een voor de massa belangrijk deel.

- De berekeningsmethode gaat uit van over de vertikaal homogeen verdeelde concentraties. In de beginfase van de proef kan deze aanname leiden tot te hoge concentraties die in rekening worden gebracht en aldus tot te grote teruggevonden massa's.

De resultaten van tabel 3 en Fig. 9 maken het waarschijnlijk dat in het bijzonder de eerstgenoemde faktor de onnauwkeurigheid heeft veroorzaakt. Naarmate de vlek zich verder verspreidt worden de gradiënten in de concentraties geringer en neemt de invloed van genoemde factoren af. Het feit dat de teruggevonden massa oploopt tot ongeveer 100% bevestigt het vermoeden, dat gezien de afwezigheid van slib en direkt zonlicht en gezien de korte duur van de proeven verwacht mag worden dat geen afbraak van rhodamine B heeft plaats gevonden. De gemeten concentraties behoeven daarom niet voor afbraak te worden gecorrigeerd.

3 Proeven in model M 886

3.1 Inleiding

Evenals in het model M 600 zijn, met toestemming van de Waterloopkundige Afdeling van de Deltadienst, in het model M 886 twee proeven uitgevoerd.

De eerste proef (M 886-I) is op 3 maart 1970 uitgevoerd met hetzelfde springtij als in proef M 600-II (Fig. 5). Op 4 maart 1970 is de tweede proef (M 886-II) uitgevoerd met een getij, dat zo goed mogelijk was aangepast aan het springtij met storm tijdens de prototypemeting die in november 1969 werd uitgevoerd.

Dit werd bereikt door bij het voor de proeven M 600-II en M 886-I gebruikte springtij de volgende middenstandsverhogingen aan te brengen:

0 tot T	-	geen verhoging	(0 = Lozingstijdstip
T tot 2T	-	0,25 m verhoging	op LW-kentering)
2T tot 8T	-	0,50 m verhoging	(T = getijperiode)
8T tot 9T	-	0,25 m verhoging	
9T tot 16T	-	geen verhoging.	

De keuze van de getijden was erop gebaseerd om een zo goed mogelijke vergelijkingsbasis te scheppen tussen

- a M 886 en M 600, en
- b M 886 en het prototype.

Door middel van deze twee vergelijkende proevenseries en de vergelijking van proef M 886-I met proef M 886-II is tevens een indirecte vergelijking tussen M 600 en het prototype mogelijk.

Enkele nadere gegevens van de proeven worden in tabel 1 gegeven. Uit deze gegevens en Fig. 2 en 3 blijkt dat de bodemsituatie en de damsituatie afwijken van die in het model M 600. De verandering in de bodemsituatie is echter niet belangrijk, daar het geulenpatroon niet gewijzigd is, maar alleen detailwijzigingen in de geulen zelf zijn opgetreden. Ook de damsituatie is niet in belangrijke mate gewijzigd. Slechts de landhoofden voor de sluitgaten zijn aangebracht en de bodem in het noordelijk sluitgat is vlak gemaakt en beschermd tegen de stroomsnelheden die tijdens de sluiting zullen optreden. Het door het sluitgat gaande debiet werd niet belangrijk door deze wijzigingen beïnvloed, zodat ook het diffusiebeeld in het estuarium niet beïnvloed werd, behalve mogelijk in geringe mate ter plaatse van het sluitgat zelf.

Beide proeven in model M 886 zijn door ir. R.Thabet en ir. W.D. Eysink in samenwerking met de M.F.A. voorbereid en onder leiding van ir. R. Thabet uitgevoerd.

3.2 Opzet van de proeven

Op grond van de ervaring opgedaan met de proeven in het model M 600 zijn verschillende wijzigingen in de opzet van de proeven aangebracht om een maximum aan informatie te verkrijgen uit het beschikbare aantal watermonsters. De duur van de proeven werd uitgebreid van 8 naar 16 getijdycli van 12.15 uur, terwijl de monstername-tijdstippen - rekening houdend met de tijdstippen voor M 600 - min of meer met de logaritmie van de tijd na lozing afnamen met een minimum van één monster per getijdyclus, zoals aangegeven op Fig. 4.2.

Het net van monstername-punten is aan de hand van de ervaring met de proeven in model M 600 en in het prototype beter aangepast aan de vlekuitbreiding en is weergegeven in Fig. 3. De tijdstippen van monstername per getijdyclus werden afgelezen op een getijklok welke cycli draaide van 24.30 uur op modelschaal. Voor dit model was de tijdschaal 1/30, zodat 1 seconde modeltijd overeenkwam met 30 seconden in prototype. Er waren 23 monstername-tijdstippen, zodat per monstername-punt maximaal 23 watermonsters werden genomen. Het monstername-schema is weergegeven in tabel 2.

3.3 Verloop van de proeven

Om een beginvoorwaarde voor de diffusie te verkrijgen, die zo dicht mogelijk bij die voor de prototypeproef lag, is bij de proeven in het model M 886 de rhodamine B-oplossing (82 cc met een concentratie van 10^{-2} kg/l) zodanig in het model gebracht dat een vlek werd gereproduceerd welke in het prototype 1,5 uur na injectie was gefotografeerd. Dit werd gedaan om de invloeden die de wind en het schip in de beginfase op de vlekuitbreiding hebben uit de vergelijking te elimineren. Deze reproductie van de vlekvorm in het model werd verkregen door de vlek met een leegstromende pipet te tekenen. Dit is bij de eerste proef (M 886-I) niet volledig gelukt, wat mogelijk enige invloed op de proefresultaten kan hebben.

De monstername-tijdstippen na de rhodamine B-injectie zijn genummerd van 1 t/m 23. Op deze tijdstippen zijn volgens het in tabel 2 gegeven schema monsters

genomen op dezelfde wijze als bij de proeven in model M 600.

Ter controle van de verdeling in de vertikaal zijn op drie plaatsen dieptemonsters genomen gedurende twee getijcycli.

De watermonsters waren ook voor deze proeven op overeenkomstige wijze als bij de proeven in model M 600 genummerd.

3.4 Methode van uitwerken

De methode van uitwerken van de resultaten van de proeven in het model M 886 is identiek aan die voor de proeven uitgevoerd in model M 600. De resultaten zijn ook uitgewerkt in de vorm:

- verloop van de concentratie als functie van de tijd voor elk monstername-punt (Fig. 10.1 - 10.30).
- kaartjes met lijnen van gelijke concentraties voor de tijdstippen op H.W.- en L.W.-kentering, en
- verloop van de maximum concentratie in de vlek als functie van de tijd (Fig. 11.1 en 11.2).

3.5 Massakontrolle

De massabalans is voor deze modelproeven op een andere wijze opgemaakt als voor de proeven in model M 600. In deze gevallen is het estuarium Brouwershavense Gat - Grevelingen aan de hand van de monstername-punten opgedeeld in vakken. De grenzen van deze vakken worden bepaald door de middelloodlijnen op de verbindingslijnen tussen de verschillende monstername-punten. De inhoud van deze vakken kunnen voor de verschillende waterstanden worden bepaald. Door de in het monstername-punt gevonden concentratie te beschouwen als de gemiddelde concentratie in het betreffende vak wordt het zich in dat vak bevindende deel van de totale massa gevonden. Sommatie hiervan voor alle vakken levert de totale zich in het estuarium bevindende hoeveelheid rhodamine B op. De resultaten van de massakontrolle voor de proeven M 886-I en II zijn gegeven in tabel 3 en Fig. 9.

De nauwkeurigheid van de massakontrolle volgens de hier toegepaste kontrolle wordt bepaald door de volgende factoren:

- De dichtheid van het monstername-net. Doordat het monstername-net bij deze proeven aangepast werd aan de grootte van de vlek wordt reeds in de begin-

fase van de proef de onnauwkeurigheid ten gevolge van deze faktor sterk gereduceerd.

- De afwijking van de voor het vak representatief gestelde concentratie van de optredende gemiddelde concentratie in het vak. De steile gradiënten in de concentraties, in het bijzonder in de verticale richting geven in de beginfase van de proef aanleiding tot onnauwkeurigheden in de massakontrolé. Daar de rhodamine B zich in de beginfase van de proef nog voornamelijk aan de oppervlakte bevindt, waar de monsternamé plaatsvindt, zullen de resultaten van de massakontrolé in deze fase te hoog kunnen zijn. Dit laatste blijkt ook het geval te zijn.

Het afnemen van de teruggevonden hoeveelheid rhodamine B tot minder dan de ingebrachte hoeveelheid in de latere fase van de proeven is te verklaren doordat rhodamine B over de regelrand van het model is weggestroomd. Dit verschijnsel trad in model M 886 sterker en eerder op dan in model M 600, omdat het zeegebied in M 886 kleiner was dan in M 600 (Fig. 1). Bovendien is dit verschijnsel in M 886 ook beter tot uiting gekomen, omdat de duur van de proeven in dit model verdubbeld was ten opzichte van de proeven in M 600.

Het lijkt niet aannemelijk dat rhodamine B tijdens de proeven in model M 886 aan afbraak onderhevig is geweest, omdat het water geen slib bevatte en omdat de duur van de proeven gering was. Om enige bevestiging van deze veronderstelling te krijgen is door middel van enige oriënterende berekeningen nagegaan of het gevonden rhodamineverlies volledig toegeschreven kan worden aan advektief transport naar zee en over de regelrand van het model. Voor de berekening van het naar zee getransporteerde percentage van de geïnjecteerde rhodamine B is de volgende sterk vereenvoudigde formule gebruikt:

$$\frac{\Delta M_o}{M_o} = \frac{\frac{2}{3} Q_{eb, \max} \cdot \text{uittstroomtijd} \cdot \frac{1}{2} C_{LW, \text{Zuidgeul}}}{M_o} 100 \quad (2)$$

of

$$\frac{\Delta M_o}{M_o} = Q_{eb, \max} \cdot C_{LW, \text{Zuidgeul}} \cdot 10^{-6} \quad \% \quad (3)$$

waarin: $\Delta M_o / M_o$: naar zee getransporteerde percentage rhodamine B op tijdstip van laagwaterkentering

$Q_{eb, \max}$: maximum debiet t.p.v. damtracé tijdens eb = 12.000 m³/s (gemiddeld getij)
= 16.000 m³/s (springtij)

$C_{LW, \text{Zuidgeul}}$: rhodamine B-koncentratie in de Zuidgeul t.p.v.
damtracé tijdens LW-kentering uitgedrukt in 10^{-8} kg/m^3
 M_0 : geloosde hoeveelheid rhodamine B.

Het resultaat van bovenstaande formule geeft bij benadering aan welk percentage van de geloosde hoeveelheid rhodamine B uit het estuarium was gestroomd op het moment van LW-kentering. Het gevonden percentage kan als ondergrens beschouwd worden voor de verloren gegane hoeveelheid rhodamine B, indien gesteld wordt dat tijdens vloed alle uitgestroomde rhodamine B weer terug is gestroomd in het estuarium. Worden de percentages, die voor de opeenvolgende LW-kenteringen zijn gevonden gesommeerd, dan wordt de bovengrens voor de verloren gegane rhodamine B gevonden, daar in dat geval in feite gesteld wordt dat alle naar buiten stromende rhodamine B door zeestromingen en/of over de modelrand in zee werd afgevoerd uit het meetgebied. De resultaten van deze oriënterende berekeningen, zowel voor de proeven in M 600 als in M 886, zijn in tabel 4 en in Fig. 9 weergegeven. Uit de resultaten blijkt direkt, dat voor de modellen de afname van de hoeveelheid rhodamine B in het meetgebied, zoals die door middel van de massakontrolé gevonden is verklaard kan worden door afvoer van rhodamine B naar zee en over de modelrand. Uit een nadere beschouwing blijkt dat per getijcyclus gemiddeld 35 à 50% van de naar buiten gestroomde hoeveelheid rhodamine B niet meer bij de volgende vloed terug kwam. Een dergelijk percentage lijkt voldoende aannemelijk om de indruk te bevestigen dat in het model geen afbraak van rhodamine B heeft plaats gevonden.

4 Proef in het Prototype

4.1 Inleiding

De proef in het prototype, waarvan de resultaten als uiteindelijke vergelijkingsbasis moeten dienen voor de modelresultaten, is uitgevoerd van 7 november tot 15 november 1969. De periode waarin de proef is uitgevoerd is zo gekozen dat het te verwachten getij zo dicht mogelijk het voor beide modellen beschikbare springtij van 28 september 1965 zou benaderen. Deze benadering werd gedeeltelijk weer teniet gedaan doordat tijdens de meting een storm opstak, waardoor de waterstanden door opwaaiing werden verhoogd.

De situatie van de afsluitdam is dezelfde als die voor de proeven welke in het model M 886 zijn uitgevoerd (zie tabel 1 en Fig. 2) zodat hier geen reden aanwezig is om afwijkingen tussen de proefresultaten te verwachten. De bodemsituatie daarentegen wijkt zowel af van model M 600 (situatie 1954) als van model M 886 (bodemsituatie 1965). Omdat echter het geulenpatroon niet in hoofdzaken maar slechts in details is gewijzigd tast dit het diffusiebeeld niet aan.

De prototypeproef is geheel door de M.F.A. voorbereid en uitgevoerd.

4.2 Opzet van de proef

Omdat het gebied in prototype te uitgebreid is en de proefduur van 16 getijdycli van 12.25 uur te lang, was het onmogelijk om de proef op dezelfde wijze op te zetten als gedaan is voor de modellen. Uit praktische overwegingen is gekozen voor een boot als varend monstername-punt met continue bemonstering en plaatsbepaling. Op deze wijze kon toch een aanzienlijke hoeveelheid gegevens worden verzameld. Hierbij zijn relatief veel gegevens verzameld van het hart van de rhodamine B-vlek, omdat het verloop van de maximum concentratie in de vlek als functie van de tijd een goede indicatie geeft van het verloop van de verspreiding en deze concentratie tamelijk goed gemeten kan worden.

De gegevens werden zodanig gemeten en verzameld, dat verder verwerken met behulp van een computer mogelijk was.

4.3 Verloop van de proef

Tijdens L.W.-kentering om 7.00 uur dd. 7 november 1969 werd 2.700 l rhodamine B-oplossing met een concentratie van $8,0 \cdot 10^{-2}$ kg/l ter plaatse van het injectiepunt in de Grevelingen geloosd. Vervolgens werd enkele uren gewacht met het bemonsteren van de vlek, totdat de vlek voldoende groot was. Hierdoor werd voorkomen dat het schip het diffusiebeeld in belangrijke mate zou verstoren.

In verband met de diepgang van het schip was het alleen mogelijk de diepere plaatsen (geulen) te bemonsteren zodat geen gegevens boven de platen bekend zijn, iets wat in de modellen overigens ook niet het geval is.

Naast de bemonstering aan de "oppervlakte" op 3,2 m diepte zijn eveneens monsters genomen op grotere diepte ter controle van de verdeling van de rhodamine B in de vertikaal.

4.4 Methode van uitwerken

De gegevens welke op het schip verzameld werden tijdens de proef zijn met behulp van een computer verwerkt tot concentraties als functie van plaats en tijd. Het belangrijkste resultaat ter vergelijking met de modelresultaten is het verloop van de maximum concentratie in de vlek als functie van de tijd (Fig. 12.1). Daarnaast konden van enkele punten concentraties bepaald worden voor verschillende tijdstippen (Fig. 10.1 - 10.30).

4.5 Massakontrolle en korrektie voor afbraak

De massakontrolle voor de prototypeproef is op vrijwel identieke wijze uitgevoerd als die voor de proeven in het model M 886. Het enige verschil is de bepalingwijze van de gemiddelde concentratie welke op een bepaald tijdstip aan een bepaald vak moet worden toegekend. Omdat in het prototype de concentraties niet simultaan in de monsternamenpunten gemeten konden worden, moesten de gemiddelde concentraties voor alle vakken op bepaalde tijdstippen noodgedwongen met een andere methode uit de meetgegevens van het varende meetpunt worden bepaald. Uit deze meetgegevens kon voor elk vak bepaald worden wanneer hierin gemeten was en hoe hoog de gemeten concentraties op dat moment waren.

Deze concentraties werden weer als gemiddelde concentratie voor het gehele vak beschouwd, zodat voor elk vak de concentratie min of meer als functie van de tijd kon worden bepaald. Indien in een vak redelijk frekwent gemeten was, kon

tussen twee tijdstippen geïnterpoleerd worden. Op deze wijze was het mogelijk voor bepaalde tijdstippen met voldoende gegevens in alle vakken de gemiddelde concentratie voor alle vakken te bepalen en een massabalans op te maken. De resultaten hiervan worden gegeven in tabel 3 en Fig. 9.

Evenals bij de proeven in het model M 886 blijkt deze methode alleen betrouwbaar te zijn in de latere fase van de proef wanneer de gradiënten in de concentraties klein zijn en de rhodamine B zich over het gehele profiel van de geulen heeft verdeeld. Dit blijkt na ongeveer 3 getijcycli het geval te zijn (zie meetpunten 14, 14A, 16, 16A, 18 en 18A - Fig. 7.8, 7.9, 7.11, 10.14, 10.15, 10.17, 10.18, 10.21 en 10.22).

Het afnemen van de teruggevonden hoeveelheid rhodamine B met de tijd wordt waarschijnlijk veroorzaakt doordat rhodamine B hecht aan slib in het water en aan de bodem en doordat rhodamine B door het "diffusie"-verschijnsel uit het estuarium naar zee verdwijnt waar niet meer gemeten werd. Uit het feit dat de afname van de teruggevonden massa met de tijd in het prototype tweemaal zo snel verloopt als in het model M 886 mag worden gekonkludeerd, dat in het prototype de rhodamine B in belangrijke mate wordt afgebroken. De gemeten concentraties moeten in verband met deze afbraak worden gekorrigeerd.

Het bepalen van de grootte van de korrektiecoëfficiënt geeft enige moeilijkheden, omdat de afname van de massa in het model M 886 enigzins versneld wordt door de regelrand op zee. De over de rand uit het model stromende rhodamine B komt bij vloed niet of slechts beperkt terug in tegenstelling tot in het prototype en in het model M 600, waar het pas in een veel latere fase van de proef naar zee respectievelijk over de regelrand verdwijnt. De korrektiefactor voor afbraak zal daardoor moeten liggen tussen de waarden:

$$\frac{M_{t, M 886}}{M_{t, \text{proto}}} \leq f(t) \leq \frac{M_{0, \text{proto}}}{M_{t, \text{proto}}} \quad (4)$$

- waarin: $M_{0, \text{proto}}$: geloosde hoeveelheid rhodamine B in het prototype in procenten = 100%
- $M_{t, \text{proto}}$: op tijdstip t na de lozing in het prototype teruggevonden percentage van de geloosde hoeveelheid rhodamine B
- $M_{t, M 886}$: op tijdstip t na de lozing (prototypetijd) in het

model M 886 teruggevonden percentage van de geloosde
hoeveelheid rhodamine B

$f(t)$: korrektiefactor voor "afbraak" van rhodamine B door
zonlicht en hechting aan slib.

Vergelijking van de overeenkomstige proeven M 600-II, waarvoor het verloop van de in het meetgebied aanwezige hoeveelheid rhodamine B aan de hand van de resultaten van de oriënterende berekeningen is geëxtrapoleerd, en M 886-I lijkt aan te geven dat in M 600 minder rhodamine verdwijnt dan in M 886 (30% t.o.v. 40% na 16T). Dit is in overeenstemming met het feit dat het model M 600 een groter zeegebied heeft dan het model M 886. Omdat het prototype geen rhodamine B over een regelrand kan verliezen terwijl anderzijds het zeegebied van het model M 600 vrij groot was lijkt het aannemelijk te veronderstellen dat het na 16T naar zee getransporteerde percentage rhodamine B ongeveer 25% zal hebben bedragen. Met deze veronderstelling en het na 16T in het prototype teruggevonden percentage van de geloosde hoeveelheid rhodamine B van 30% (Fig. 9) kan de korrektiefactor $f(t)$ bepaald worden. Uitgaande van een exponentieel verlopend afbraakproces wordt dan gevonden:

$$f(t) = e^{-kt} \quad \text{met } k = 0,05725 \quad (t \text{ in T}) \quad (5)$$
$$k = 0,00458 \quad (t \text{ in h}).$$

De in het prototype gemeten concentraties dienen in verband met het afbraakproces met een faktor $1/f(t)$ te worden gekorrigeerd ten einde een goede vergelijking tussen de resultaten van de proef in het prototype met de resultaten van de modelproeven mogelijk te maken. De gekorrigeerde resultaten voor het verloop van de maximum concentratie in de vlek met de tijd worden in Fig. 12.2 gegeven.

5 Betrouwbaarheid van de resultaten

De betrouwbaarheid van de resultaten van het onderzoek hangt formeel redenerend van een groot aantal factoren af. In welke mate deze factoren het uiteindelijke resultaat van dit onderzoek kunnen beïnvloeden wordt in de volgende paragrafen behandeld.

5.1 Fouten bij monstername

Het monster dat op een bepaald tijdstip voor een bepaalde plaats genomen werd hoeft niet volledig representatief te zijn voor de werkelijke concentratie op die plaats en voor het gewenste tijdstip door de volgende mogelijke oorzaken:

- a Verwisselen van twee cuvetjes, hetgeen verwisseling van monstername-tijdstip betekent. De kans hierop is door de wijze van bemonsteren minimaal gemaakt.
- b Afwijkingen van de monstername plaatsen ten opzichte van de "ideale" plaats. Een maximale afwijking in model van 5 cm lijkt mogelijk. Dit betekent voor M 600 en M 886 respectievelijk 120 m en 15 m prototypemaat. In de beginfase van een proef, wanneer de horizontale gradiënten in de concentraties nog hoog zijn kan dit voor M 600 aanleiding tot afwijkingen geven.
- c Afwijkingen van de monstername-tijdstippen ten opzichte van het "ideale" tijdstip. Een maximale afwijking in model van 2 à 3 seconden lijkt mogelijk. Dit betekent voor M 600 en M 886 respectievelijk 10 à 15 minuten en 1 à 1,5 minuten prototypetijd. Dit kan voor M 600 in de beginfase en in het bijzonder voor de tijdstippen met maximum eb of vloed aanleiding tot afwijkingen geven.
- d Afwijkingen door turbulente fluktuaties. Indien de tijdsduur waarin het monster genomen wordt relatief te kort is om de invloed van turbulente fluktuaties uit te middelen, dan behoeft het monster niet geheel representatief te zijn voor de "ideale" concentratie. Geschat wordt dat een monster in 1 à 2 seconden wordt geschept (respectievelijk 5 à 10 min. en 0,5 à 1 min. prototypetijd) hetgeen voor model M 886 mogelijk aanleiding kan zijn tot geringe afwijkingen.

5.2 Nauwkeurigheid fluorometer

De fluorometer is een apparaat waarmee de fluorescentie van water gemeten kan worden. Deze fluorescentie wordt bepaald door de aanwezigheid van een stof met fluorescerende eigenschappen, zoals onder andere rhodamine B, terwijl de mate van fluorescentie afhankelijk is van de concentratie waarin de stof in het water aanwezig is. Het meetbereik van de fluorometer kan met behulp van diafragma's eventueel aangevuld met filters naar wens ingesteld worden. De meetbereiken overlappen elkaar gedeeltelijk. Binnen een meetbereik kan de fluorescentie op een schaal van 0 tot 100 afgelezen worden. Het verband tussen aflezing en concentratie wordt door middel van ijkgrafieken, die regelmatig gecontroleerd worden, bepaald. De nauwkeurigheid van de resultaten die met de fluorometer kunnen worden behaald worden bepaald door:

- e Nauwkeurigheid van het apparaat. Deze kan samen met de nauwkeurigheid van de ijkgrafiek gesteld worden op ongeveer 1%.
- f Afleesnauwkeurigheid. Deze wordt gesteld op 0,5 schaaldeel. In combinatie met de correctie voor de achtergrondsfluorescentie geeft dit een nauwkeurigheid van ongeveer 1 schaaldeel. Dit impliceert dat e en f samen een nauwkeurigheid geven van ongeveer 2 à 3% voor concentraties die tussen de 50 en de 100 schaaldelen afgelezen worden. Voor een concentratie behorend bij 0,5 à 1 schaaldeel is een afwijking van $\pm 100\%$ mogelijk.

5.3 Fouten in verwerking van monsters en meetresultaten

Bij het doormeten van de monsters en bij de verwerking van de meetresultaten kunnen een aantal incidentele fouten gemaakt worden, zoals:

- g Verwisselen van de monsters bij het doormeten. Deze kans is evenals bij de monsternamen minimaal, omdat dezelfde werkwijze wordt toegepast.
- h Fout in het noteren van het gebruikte diafragma van de fluorometer. Dit geeft een fout van een faktor 3, 10 of 30. Een dergelijke fout zal wel opvallen, maar is niet meer controleerbaar.
- i Reken- of ponsfouten bij het omrekenen van fluorescentie naar rhodamine B-koncentratie. Ook hier zullen ernstige fouten wel opvallen, maar zullen vrijwel niet controleerbaar zijn.

5.4 Betrouwbaarheid van afbraakkorrektie

Deze faktor speelt alleen een rol bij de prototypewaarnemingen en hangt af van de volgende factoren:

- j Betrouwbaarheid waarmee de op tijdstip 16T nog in het estuarium aanwezige hoeveelheid rhodamine B uit de resultaten van de massakontrolle kan worden gehaald.
- k Invloed van de modelranden in zee op de onder j genoemde grootheid.
- l Betrouwbaarheid van de veronderstellingen dat de afbraak exponentieel verloopt met de tijd en onafhankelijk is van de concentratie van de rhodamine B.

Uitgaande van de volgende in vergelijking 4 te substitueren veronderstellingen voor de massa op tijdstip 16T (zie Fig. 9)

$$M_{t, 886} = 55 \text{ à } 65\%$$

$$"M_{0, \text{proto}}" = 85 \text{ à } 95\% \quad (\text{redelijke korrektie voor uit het estuarium gestroomde massa toegepast})$$

$$M_{t, \text{proto}} = 25 \text{ à } 40\%$$

$$f(t) = 2,5 \quad (\text{uitgangspunt voor gekozen afbraakfaktor})$$

kan worden aangetoond, dat de betrouwbaarheid van de gekozen afbraakfaktor \pm 50% bedraagt. De invloed hiervan is in de vorm van betrouwbaarheidsgrenzen (afbraakkorrektie) weergegeven in Fig. 12.2 en 16.

5.5 Afwijking in proefomstandigheden

Ten gevolge van niet gewenste afwijkingen in de omstandigheden van de verschillende proeven kan de basis om vergelijking tussen bepaalde proeven mogelijk te maken verzwakt worden. Deze niet gewenste afwijkingen kunnen optreden in:

- m Reproductie van waterstanden en waterbeweging. De reproductie van de waterstanden in de modellen is zeer goed, terwijl de gemiddelde waterbeweging goed te noemen is. Afwijkingen in de waterbeweging is in detail mogelijk ten gevolge van het ontbreken van driftstromen en door schaaleffekten ten gevolge van vertrekken van de modellen. Het bepalen van deze twee invloeden op de diffusie is het belangrijkste doel van het onderzoek.

- n Topografie van het estuarium. De topografie van het estuarium Brouwershavense Gat - Grevelingen met bijbehorende ruwheden is zo nauwkeurig mogelijk in de modellen gereproduceerd. Doordat de modellen na elkaar gebouwd en bedreven zijn bestaan er echter verschillen, omdat de meest recente topografie steeds is ingebouwd en vervolgens moeilijk te wijzigen was. Zoals reeds eerder vermeld is echter het geulenpatroon in de loop der jaren niet gewijzigd, maar zijn de geulen slechts in detail gewijzigd (zie Fig. 2 en 3). Dit heeft naar verwachting geen merkbare invloed op de verspreiding van de rhodamine B gehad.
- o Situatie van de Brouwershavense Gat-dam. In de periode waarin het onderzoek is uitgevoerd hebben door het voortgaan van de werkzaamheden aan de sluiting van het Brouwershavense Gat enkele kleine wijzigingen in de damsituatie plaatsgevonden. Deze wijzigingen werden echter van ondergeschikt belang geacht met betrekking tot het "diffusie"-patroon in het estuarium, omdat het slechts voorbereidende werkzaamheden waren voor de definitieve afsluiting en de waterbeweging hierdoor niet merkbaar werd beïnvloed.
- p Plaats van de regelranden op zee. Zoals reeds in paragraaf 4.5 is gesteld wordt in de modellen de afname van de hoeveelheid rhodamine B in het estuarium enigszins versneld door de aanwezigheid van de regelrand op zee. Uit de resultaten van de massakontroles voor de modellen M 600 en M 886 en uit het feit dat de gradiënt in de concentraties op zee zeer gering is kan redelijkerwijs worden gekonkludeerd, dat de modelranden voldoende ver op zee lagen om een merkbare invloed op de concentratieverdeling in het estuarium Brouwershavense Gat - Grevelingen te voorkomen.
- q Plaats, tijdstip en wijze van lozing. Bij deze faktor spelen onder andere overeenkomstige afwijkingen als b en c een rol. De gevolgen hiervan zijn naar verwachting verwaarloosbaar ten opzichte van de afwijkingen tengevolge van de invloed van de verschillen in de wijze van lozing voor M 600, M 886 en prototype, waarbij bovendien de aangepaste lozingswijze bij proef M 886-I ten dele mislukt is. Naar alle waarschijnlijkheid zal dit zich manifesteren in de vorm van een faseverschuiving in de verspreiding van de rhodamine. Deze faseverschuiving zal kunnen liggen tussen 0 uur (geen merkbare invloed van de wijze van lozing) en 1,5 uur (tijdstip na start-proef waarop aangepaste lozing op aangepast lozingspunt in M 886 werd uitgevoerd) in prototypetijd.

5.6 Bemonsteringsdichtheid naar tijd en plaats

Bij het uitwerken en het interpreteren van de resultaten is gebleken, dat ten gevolge van de toegepaste bemonsteringsdichtheden naar tijd en plaats, ondanks de grote hoeveelheid informatie die hiermee verkregen werd, de resultaten niet eenduidig geïnterpreteerd kunnen worden. Dit wordt veroorzaakt door:

- r Bemonsteringsdichtheid naar tijd. Door onvoldoende bemonstering in de tijd moet het concentratieverloop in de tijd voor elke monstername-plaats aan de hand van slechts enkele punten per getijperiode en aan de hand van de vermoedelijke waterbeweging, geschat uit kaartjes met isokoncentratielijnen voor de verschillende monstername-tijdstippen en het vertikale getij, bepaald worden, waardoor maximum en minimum concentraties die per plaats optreden niet bekend zijn. De op deze wijze bepaalde figuren geven een redelijke maar gezien de mogelijke faseverschuivingen en fouten geen al te harde vergelijkingsbasis voor de beginfase van de proeven.
- s Bemonsteringsdichtheid naar plaats. Voor een goede benadering van de maximum concentratie in het hart van de rhodamine B-vlek is een dichte bemonstering nodig, vooral in de beginfase van de proeven gezien de sterke gradiënten in de concentraties. Ten gevolge van de toegepaste bemonsteringsmethoden mag verwacht worden dat de gevonden maximum concentraties voor de proef in het prototype het dichtst bij de werkelijke maximum waarden zullen liggen, omdat de boot het hart van de vlek kon opzoeken, met daarop volgend de resultaten voor de proeven in M 886 en dat de minst goede benadering in M 600 gevonden zal worden. In de eindfase van de proeven zijn de gradiënten in de concentraties zo gering, dat in alle proeven de maximum concentratie in het hart van de vlek goed benaderd zal worden. Het probleem dat hierdoor ontstaat is dat niet op een direkte en betrouwbare manier bepaald kan worden of de in de beginfase van de proef gevonden verschillen veroorzaakt worden door:
 - fouten in diffusie ten gevolge van vertrekkingsinvloed,
 - faseverschuiving ten gevolge van wijze van lozing, of
 - verschil in bemonsteringsdichtheid naar plaats.

6 Theoretische achtergronden

Om enige theoretische achtergrond aan het onderzoek te geven wordt in de volgende paragrafen ingegaan op enkele wiskundige aspecten van problemen betreffende de verspreiding van afvalstof in water zonder invloeden van dichtheidsverschillen.

6.1 Reproductie van diffusieverschijnsel in model

In zijn algemeenheid wordt een probleem betreffende verspreiding van een afvalstof in water, waarbij dichtheidsverschillen geen rol spelen, beschreven door de bewegingsvergelijking en de continuïteitsvergelijking voor water en de continuïteitsvoorwaarde voor de afvalstof. De laatste kan worden geschreven als:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} T_x + \frac{\partial}{\partial y} T_y + \frac{\partial}{\partial z} T_z = 0 \quad (6)$$

waarin: c : concentratie van afvalstof in elementair watervolume
x : horizontale ko-ordinaat van orthogonaal assenstelsel
y : horizontale ko-ordinaat
z : verticale ko-ordinaat
u : snelheid in x-richting
v : snelheid in y-richting
w : snelheid in z-richting
t : tijd
T : turbulent diffusiefttransport in richting aangegeven door index.

Het is gebruikelijk om aan te nemen dat het turbulent diffusieve transport voldoet aan de wet van Fick;

$$\begin{aligned} T_x &= - D_x \frac{\partial c}{\partial x} \\ T_y &= - D_y \frac{\partial c}{\partial y} \\ T_z &= - D_z \frac{\partial c}{\partial z} \end{aligned} \quad (7)$$

waarin D : turbulente diffusiecoëfficiënt voor het turbulent diffusieve transport in richting aangegeven door index.

Uit vgl. 6 en 7 volgt dat de turbulente diffusiecoëfficiënt een dimensie heeft van een snelheid maal een lengte. De turbulente diffusie wordt dus bepaald door een karakteristieke snelheid en een karakteristieke lengtemaat. Vier combinaties van karakteristieke snelheden en lengten zijn denkbaar:

$$D \propto u_* l$$

$$D \propto u_* h$$

$$D \propto \bar{u} l$$

$$D \propto \bar{u} h$$

(8)

waarin u_* : schuifspanningssnelheid

\bar{u} : gemiddeldé stroomsnelheid in hoofdstroomrichting

l : karakteristieke horizontale lengte

h : karakteristieke verticale lengte.

Voor deze combinaties is in tabel 5 de verhouding aangegeven tussen de werkelijke schaal waarop de diffusie wordt weergegeven in model (vgl. 8) en de voor reproductie volgens vgl. 6 (2e en 5e term respectievelijk 2e en 7e term) en vgl. 7 vereiste schaal. Bij het samenstellen van tabel 5 is er van uitgegaan dat de snelheid en de bodemruwheid volgens de schaalregels van Froude in het model zijn ingesteld. Uit de resultaten van tabel 5 blijkt dat de verticale diffusie in een samengetrokken model steeds te klein wordt weergegeven en dat de horizontale diffusie in een samengetrokken model te groot wordt weergegeven tenzij de horizontale diffusie wordt bepaald door wervels gekenmerkt door een horizontale stroomsnelheid en een horizontale lengtemaat. In dat geval wordt de horizontale diffusie in model juist weergegeven.

Als mechanismen die de verschillende karakteristieke diffusiecoëfficiënten geven kunnen de volgende voorbeelden worden genoemd:

$$\underline{D \propto u_* l}$$

- wandwrijving

- bodemwrijving in een geul met diepteverschillen in breedterichting van de geul

$$\underline{D \propto u_* h}$$

- bodemwrijving

D :: $\bar{u} l$

- getijgolf in een gebied met diepteverschillen loodrecht op de voortplantingsrichting van de getijgolf
- samenvloeien van twee geulen met onderling verschillende stroomsnelheden
- afstromen van water van ondiepe gedeelten in een geul, waarbij een snelheidsgradiënt in breedterichting ontstaat
- natuurlijke of kunstmatige situaties waar wervels ontstaan met verticale as (b.v. kribben).

D :: $\bar{u} h$

- natuurlijke of kunstmatige situaties waar wervels ontstaan met horizontale as (bodempwrijving, uitmonding brede geul in diepere geul, (sterke) diepteverschillen in langsrichting van de geul).

In een breed rechthoekig kanaal met een in breedterichting niet variërende snelheidsverdeling wordt de verspreiding van afvalstof uitsluitend bepaald door turbulente diffusie ten gevolge van bodempwrijving ($D :: u_* h$ of $D :: \bar{u} h$). Voor een dergelijk geval kan aangetoond worden dat het volgende verband bestaat tussen de variantie van de concentratieverdeling en de turbulente diffusiecoëfficiënt:

$$\sigma^2 = \frac{2 D x}{\bar{u}} \quad (9)$$

waarin σ : variantie van concentratieverdeling.

Hieruit kan direkt worden afgeleid dat voor diffusie ten gevolge van bodempwrijving in een model geldt:

$$\text{Afwijking } \sigma = (\text{Afwijking } D)^{1/2} \quad (10)$$

Ook voor niet permanente homogene getijstroming (geen invloed van dichtheidsverschillen) wordt in het algemeen uitgegaan van de veronderstelling $D :: u_* h$ (Ref. 3 en 4). Het is evenwel mogelijk dat de getijbeweging er de oorzaak van is dat de dwarsdiffusie (ook) het gevolg is van wervels met als kenmerkende grootheden een horizontale snelheid en een horizontale lengte ($D_y :: \bar{u} l$). Dit kan als volgt worden aangetoond:

Getijgolven (lange golven) zijn een mechanisme, waardoor het water ter plaatse van het golffront wordt versneld. De voortplantingssnelheid van de golf hangt

af van de waterdiepte en van de watersnelheid voor aankomst van de golf. Derhalve kan de voortplantingssnelheid goed worden weergegeven in een vertrokken model. De hoogte van een lange golf hangt af van de beginhoogte en van de invloed van de bodemwrijving geïntegreerd over het door de golf afgelegde traject. Beide worden goed weergegeven in een samengetrokken model met reproductie van de bodemwrijving volgens de schaalregels van Froude. Derhalve worden de grootte van de versnellingen en de horizontale verdeling van de aangrijpingspunten ervan juist in een samengetrokken model weergegeven.

De grootte van de versnellingen varieert met de golfhoogte en met de waterdiepte. Derhalve worden nabijgelegen waterpakketten over de gehele diepte in verschillende mate versneld als de waterdiepte in dwarsrichting varieert. Dit gaat gepaard met wervels met een horizontale snelheid als kenmerkende snelheid en met een horizontale lengte als kenmerkende lengtemaat en derhalve met een goede bijdrage in de reproductie van de horizontale diffusie in model. Vaak is de waterdiepte klein in verhouding tot de breedte van het te bestuderen gebied. Dan wordt op zekere (korte) afstand van het lozingspunt een nagenoeg gelijkmatige verdeling van de afvalstof over de diepte verkregen. Onder deze omstandigheden is het onbelangrijk dat de verticale diffusie formeel redenerend te zwak is in het model en mag goede reproductie van de verspreiding van de afvalstof worden verwacht als de reproductie van de horizontale diffusie in model juist is. Gedurende een zekere (korte) tijd na een momentane lozing of binnen een zekere (kleine) afstand van een continue lozingsbron zal de verspreiding van een stof in een samengetrokken model in verticale richting te gering zijn (Ref. 4 en tabel 5).

Naarmate de omvang van het gebied waarin zich de afvalstof bevindt toeneemt, kan de verspreiding van de afvalstof door grotere wervels beïnvloed worden. Door de grotere effectiviteit van wervels met afmetingen in dezelfde orde als het door afvalstof besmette gebied kan de invloed van wervels met verticale as, zoals die tengevolge van getij en dieptevariaties, al spoedig belangrijker voor de verspreiding van afvalstof zijn dan de wervels ten gevolge van bodemwrijving. Dit is direkt het gevolg van het verschil in schaal tussen de beide werveltypen (bovengrens wervels ten gevolge van bodemwrijving is de waterdiepte; voor wervels ten gevolge van getij en diepte-variaties is dit de breedte van het estuarium). Om deze reden is het mogelijk dat de verspreiding van een afvalstof in een estuarium met sterke diepte-variaties en een grote breedte ten op-

zichte van de diepte juist in een samengetrokken model kan worden gereproduceerd.

Of bovenstaande ook geldt voor het estuarium Brouwershavense Gat - Grevelingen kan op betrekkelijk betrouwbare wijze worden bepaald uit de resultaten van de proeven in beide modellen van dit estuarium. Beide modellen waren gebaseerd op de schaalregels van Froude, waarbij zij opgemerkt dat de extra ruwheid in M 600 niet op de bodem was aangebracht, maar over de volle waterdiepte. Ook werd in beide modellen het Coriolis-effekt gereproduceerd door middel van het Magnus-effekt bij roterende cilinders. Model M 600 kan derhalve als een model van M 886 worden beschouwd met een horizontale schaal 1 : 8 en een samentrekking 12,5. Indien bodemwrijving het enige mechanisme zou zijn dat bijdraagt in de verspreiding van de rhodamine B, dan zouden de horizontale afmetingen van de rhodaminevlek in model M 600 relatief een faktor 6,65 te groot moeten zijn ten opzichte van de afmetingen van de vlek in model M 886 (vgl. 10 en tabel 5).

6.2 Maximum concentratie in hart van afvalwatervlek

Naast de algemene beschrijvingswijze van verspreiding van afvalstof met behulp van een vast assenstelsel (Euler), wordt, in het bijzonder bij verspreiding van een momentane lozing van een hoeveelheid afvalstof, vaak gebruik gemaakt van een beschrijvingswijze gebaseerd op een met het hart van de vlek meebewegend assenstelsel (Lagrange). Dit leidt tot een andere beschrijvingswijze van de continuïteitsvergelijking voor de afvalstof en wel:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + (u - u_c) \frac{\partial c}{\partial x} + (v - v_c) \frac{\partial c}{\partial y} + (w - w_c) \frac{\partial c}{\partial z} - \frac{\partial T_x}{\partial x} - \frac{\partial T_y}{\partial y} - \frac{\partial T_z}{\partial z} = 0 \quad (11)$$

waarin u_c, v_c, w_c : snelheidscomponenten van het hart van de vlek,
c.q. van het assenstelsel.

Omdat vergelijking 11 niet is op te lossen daar in de meeste gevallen onvoldoende stroomgegevens bekend zijn wordt vergelijking 11 meestal vereenvoudigd tot:

$$\frac{\partial c}{\partial t} - \frac{\partial T_x}{\partial x} - \frac{\partial T_y}{\partial y} = 0 \quad (12)$$

Hierbij wordt met over de konstant veronderstelde diepte gemiddelde grootheden gewerkt uitgaande van de veronderstelling dat de afvalstof in betrekkelijk korte tijd gelijkmatig over de diepte wordt verdeeld, waardoor de termen in

z-richting vervallen. Het effect van de verschillen in stroomsnelheden, die binnen het gebied waarover de afvalstof zich heeft verspreid optreden, wordt verwaarloosd en hiermee impliciet in de termen voor het horizontale turbulente transport gestopt, om welke reden in vergelijking 12 de notatie T' in plaats van T is gebruikt (evenzo behoort D' , K_1' en K_2' gebruikt te worden).

Omdat met behulp van de vergelijkingen 7 en 12 op betrekkelijk eenvoudige wijze "diffusie"-coëfficiënten kunnen worden afgeleid door slechts de waterdiepte en de concentratieverdeling in de vlek als functie van de tijd te meten, zijn hiervoor veel gegevens in de literatuur beschikbaar. Voor situaties in open zee en nabij een kust is aan de hand van vele experimenten gevonden (Ref. 5, 6, 7 en 8):

$$D' \quad :: \quad \sigma^{4/3} \quad (13)$$

Langs mathematische weg kan worden bewezen dat indien vergelijking 13 geldt ook moet gelden:

$$c(o,t) \quad :: \quad t^{-3} \quad (14)$$

waarin $c(o,t)$: maximum concentratie in het hart van de afvalwater-vlek op tijdstip t na lozing.

Dat dit verband bestaat is ook uit experimentele waarnemingen gevonden. Hieruit blijkt, dat het verloop van de maximum concentratie in het hart van de vlek als functie van de tijd een karakteristieke grootte is met betrekking tot diffusie. Algemeen kan hiervoor worden gesteld:

$$c(o,t) \quad :: \quad t^{-p} \quad (15)$$

waarin p : dimensieloze konstante.

Onderzoekingen hebben aangetoond dat p afhankelijk is van de situatie (Ref. 9). Voor een vlek in relatief open water (zee, oceaan) geldt, zoals reeds genoemd $p = 3$. In een meer begrensde water met geringe getijwerking en geen of weinig stroom zou $p = 2,5$ zijn. Voor grote baaien werd $p = 2$ bepaald, terwijl in kleine baaien met nauwe intreepening voor het getij de waarde $p = 1$ zou gelden.

De resultaten van de uitgevoerde proevenserie ten behoeve van het onderhavige onderzoek kunnen aan deze gegevens worden getoetst.

7 Interpretatie van de resultaten

Het onderzoek had tot doel om na te gaan in hoeverre hydraulische modellen geschikt zijn voor het bestuderen van verspreiding van afvalwater en om het inzicht in deze verspreidingsproblematiek te verruimen. Ten aanzien van dit laatste aspect bestaat, zoals reeds in de paragrafen 2.1 en 3.1 is vermeld, de mogelijkheid om de resultaten van de uitgevoerde proeven met elkaar te vergelijken. Op deze wijze kunnen meerdere factoren, die van belang kunnen zijn bij de verspreiding van afvalstoffen, waarbij dichtheidsverschillen geen rol spelen, worden bestudeerd. In de volgende paragrafen worden deze factoren nader beschouwd.

7.1 Algemene tendensen

Uit de resultaten van de uitgevoerde proeven zijn enige tendensen gevonden die kunnen leiden tot nieuwe inzichten in de verspreiding van afvalstof in een estuarium. In het bijzonder uit de resultaten van de proeven M 886-I en II en van de prototypeproef (t.g.v. dichtere bemonstering van het hart van de vlek en de langere meetperiode - zie paragraaf 5.6 punt s) blijkt dat de maximum concentratie in de vlek niet met vergelijking 15 (paragraaf 6.2) beschreven kan worden. De macht p blijkt duidelijk afhankelijk van de tijd te zijn (zie Fig. 11.1, 11.2 en 12.2). Vanaf 6 à 10 uur na lozing (vóór deze periode geen of onvoldoend betrouwbare informatie) tot 40 à 50 uur na lozing is p ongeveer 2 en neemt vervolgens af tot 0,5 voor de periode na 100 à 150 uur na lozing. Dit resultaat is niet in overeenstemming met het in paragraaf 6.2 vermelde resultaat van L.J.Fisher (Ref. 9). Deze stelt dat p wel afhankelijk is van de geometrie en de getijomstandigheden, maar konstant is.

De gevonden afhankelijkheid van p met de tijd kan op de volgende wijze worden verklaard. Vlak na lozing van de rhodamine bevindt deze zich met een bepaalde maximum concentratie, die ten gevolge van enige initiële menging bij het inbrengen lager is dan de initiële concentratie bij lozing, in de bovenlaag van het water in het estuarium. Indien het gevonden verband tussen de maximum concentratie en de tijd na lozing geëxtrapoleerd wordt naar het lozingstijdstip, dan blijkt dat dit verband asymptotisch tot de maximum concentratie op het tijdstip 0 moet naderen; ofwel $p = 0$ vlak na het lozingstijdstip. Vervolgens verspreidt de rhodamine zich over de diepte en zal p asymptotisch naderen tot $p = 3$ indien het estuarium voldoende breed is en vergelijking 13 (paragraaf 6.2) geldt.

In de volgende fase wordt de verspreiding van de rhodamine door de aanwezigheid van de oevers vertraagd en gaat de tweedimensionale verspreiding over in een ééndimensionale verspreiding in langsricting van het estuarium. Dit komt tot uiting in het afnemen van $p = 3$ (of indien het estuarium onvoldoende breed is van $0,5 < p < 3$) tot $p = 0,5$, zoals uit de proefresultaten blijkt. Het tijdstip waarop, respektievelijk de waarde van p waarbij p weer gaat afnemen hangt naar alle waarschijnlijkheid samen met de breedte-diepteverhouding van de geulen in het estuarium en de gekompliceerdheid van het geulenstelsel. Het bovenstaande is schematisch in Fig. 13 weergegeven.

De waarde van $p = 0,5$ wordt theoretisch afgeleid (Ref. 10) voor een ééndimensionaal dispersieprobleem met konstante waarde voor D_x' . Uitgaande van een beschrijvingswijze als in vergelijking 8 (paragraaf 6.1) en aannemende dat \bar{u} de over de getijperiode gemiddelde absolute snelheid is, is D_x' voor de uitgevoerde proeven niet konstant, omdat \bar{u} afhankelijk is van de komberging en dus van x . Welk effect dit heeft op de theoretische waarde van p voor dit geval is niet bekend, doch lijkt gezien de gevonden proefresultaten gering. Het lijkt redelijk aan te nemen dat de vlekuitbreiding bij konstante dispersiecoëfficiënt langzamer zal plaats vinden dan bij een dispersiecoëfficiënt die vanaf de plaats met maximum concentratie tot aan de mond van het estuarium toeneemt. Deze veronderstelling impliceert dat $p = 0,5$ voor dit soort problemen een ondergrens is.

Dat de in de eindfase van de proeven (meer dan 100 à 150 uur na lozing) gevonden waarde $p = 0,5$ korrespondeert met het verschijnsel ééndimensionale dispersie blijkt uit de waargenomen concentratieverdeling in het estuarium. In deze fase zijn de gradiënten in de concentratieverdeling in dwarsrichting van het estuarium gering, terwijl de plaats waar de maximum concentratie waargenomen wordt verschoven is van het oorspronkelijke hart van de vlek (in de buurt van het injectiepunt bij LW en afhankelijk van het getij tussen de punten 5, 16, 3 en 14 bij HW) naar het eind van de hoofdgeul van het estuarium (punt 13). De dan optredende situatie komt, behoudens de dispersiecoëfficiënt, overeen met het theoretische ééndimensionale dispersieprobleem.

7.2 Middenstandsverhoging

Door vergelijking van de resultaten van de proeven M 886-I en II kan een indruk worden verkregen van de invloed van het verhogen van de middenstand van het getij. Dit is mogelijk, omdat proef M 886-I is uitgevoerd met hetzelfde getij

als proef M 600-II om een goede vergelijking tussen beide modellen mogelijk te maken en omdat proef M 886-II is uitgevoerd met hetzelfde getij aangevuld met de in paragraaf 3.1 genoemde middenstandsverhogingen om een zo goed mogelijke vergelijking tussen model M 886 en het prototype mogelijk te maken.

Naast het verschil in middenstand bij de proeven M 886-I en II was er ook enig verschil in de wijze van lozen (zie paragraaf 3.3), hetgeen eveneens van invloed kan zijn geweest op de uitbreiding van de rhodaminevlek. Daar dit laatste een initiële invloed is, zou dit een systematische afwijking moeten geven tussen de resultaten van de twee proeven in model M 886. Uit de resultaten voor de maximum concentratie blijkt dat gedurende de eerste getijperiode, waarin nog geen verschillen in het getij aanwezig waren, de voor M 886-I gevonden waarden hoger zijn dan die voor M 886-II (Fig. 14). In de eindfase van de proeven (100 tot 200 uur na lozing) blijkt juist dat er een tendens is dat de voor M 886-I gevonden waarden lager zijn dan die voor M 886-II, terwijl zoals hierna verklaard zal worden eerder het tegengestelde verwacht had mogen worden. Omdat geen systematische afwijking tussen de maximum concentraties van beide proeven is gevonden en ook het beeld van isokoncentratielijnen daartoe geen duidelijke aanleiding gaf is het redelijk te stellen dat de invloed van het verschil van lozing binnen de betrouwbaarheid van de resultaten valt.

Een verandering van de middenstand tijdens de proef wordt in een periode van 0,5 à 1 uur in het begin van de betreffende getijperiode aangebracht. Dit houdt in dat in deze periode een extra hoeveelheid water in of uit het estuarium stroomt met als gevolg een gedurende korte tijd optredende snelheidspiek in de stroomsnelheden en een extra verplaatsing van de rhodaminevlek. Dit laatste blijkt duidelijk uit de waarnemingen ten aanzien van de plaats waar de maximum concentratie werd gemeten (voor de meettijdstippen $1/2T$, $3/2T$, $5/2T$, $7/2T$ en $9/2T$ werd de maximum concentratie voor de proeven M 886-I en II respectievelijk gemeten in de punten 3' t.o.v. 25, 15 t.o.v. 24, 15 t.o.v. 14, 14 t.o.v. 3 en $4/15$ t.o.v. 14) en uit de gemeten concentratie als functie van de tijd voor de punten 1 en 2 (Fig. 10.1 en 10.2). Het effect van de perioden met verhoogde stroomsnelheden op de vlekuitbreiding is, zoal aanwezig, niet direkt te constateren uit de meetresultaten. Als er van uitgegaan wordt dat de in de eerste getijperiode (geen verschil in middenstand) gemeten maximum concentraties bij beide proeven in M 886 ook representatief zijn voor deze beide proeven, dan wordt voor beide proeven hetzelfde verband gevonden voor de maximum concentratie als functie van de tijd (Fig. 14).

Hieruit blijkt, dat ook de invloed van de toegepaste middenstandsverhogingen zo gering is dat deze binnen de betrouwbaarheidsmarge van de gevonden resultaten valt. Een verklaring hiervoor zou kunnen zijn dat de hoeveelheid energie die in het verspreidingsproces gestopt wordt evenredig is met het getijvolume dat zich in en uit het estuarium beweegt. De extra energie die door het op en neer bewegen van de middenstand aan de door het getij geleverde energie wordt toegevoegd is slechts zo gering dat het effect op de verspreiding niet weergevonden wordt.

7.3 Getij

Uit de resultaten van de proeven M 600-I en II kan enige indruk worden verkregen van de invloed van het getij op de verspreiding van afvalstof in een estuarium. De omstandigheden voor beide proeven waren gelijk op een onbelangrijk verschil in de damsituatie na en behalve het getij. Proef M 600-I is uitgevoerd met het modelgetij "gemiddeld getij 1951-0" (Fig. 5) met getijverschillen van 2,20 m en 2,60 m ter plaatse van raai VI-zuidgeul, terwijl proef M 600-II is uitgevoerd met een in model nagebootst springtij dat in het prototype is gemeten op 28 september 1965 (Fig. 5). Dit getij heeft waterstandsverschillen van 2,60 m en 2,90 m (Tracé-zuidgeul) en is afhankelijk van de dagelijkse ongelijkheid en de plaats in het estuarium 12 à 30% hoger dan het gemiddeld getij 1951-0 met een gemiddelde verhoging van ongeveer 21%. Naast deze verhoging van de getijamplitude heeft het getij van proef M 600-II ook een verhoging van ongeveer 0,4 m (prototypemaat) van de middenstand (Fig. 5), die permanent aanwezig was. Met redelijke benadering kan worden gesteld dat deze verschillen in getijomstandigheden gemiddeld een verhoging van 15 à 20% in de snelheden geeft en een verhoging van 2 à 4% in de gemiddelde diepte in de hoofdgeulen. Uit de resultaten voor de maximum concentraties als functie van de tijd blijkt dat deze verhogingen een verlaging van de maximum concentratie als functie van de tijd van ongeveer 15% geven, zonder dat de aard van het verband (macht p) wordt gewijzigd (Fig. 15).

7.4 Samentrekking

De invloed van het samentrekken van de geometrie van het prototype (horizontale schaal ongelijk aan verticale schaal) kan zowel worden bepaald uit vergelijking van de resultaten van de proeven M 600-II en M 886-I als uit vergelijking van de resultaten van de proef M 886-II met die van de prototypeproef. In beide gevallen wordt de vergelijking enigszins bemoeilijkt door andere invloeden naast

de samentrekkingsinvloed (zie tabel 1). Gezien de mogelijke grootte van de andere invloeden, de hoeveelheid uit de modellen verkregen informatie en gezien de grootte van de samentrekking lijkt vergelijking van de resultaten van de proeven M 600-II en M 886-I het meest betrouwbaar te zijn voor de bepaling van de samentrekkingsinvloed.

Vergelijking van de maximum concentraties voor de proeven M 600-II en M 886-I in de periode van 5T (62,5 h) tot 8T (100 h) na lozing, een periode waarin het net van monstername-punten voor beide proeven vrijwel identiek was en de gevonden resultaten vrij betrouwbaar zijn, geeft aan dat de voor M 600-II gevonden waarden in die periode slechts 0 à 10% hoger zijn dan die voor M 886-I (Fig. 16). Deze verschillen liggen in de eerste plaats binnen de betrouwbaarheidsgrenzen van de resultaten. In de tweede plaats zou gezien de in model M 600 verwachte te grote horizontale diffusie (paragraaf 6.1) door de 12,5 maal sterkere samentrekking eerder mogen worden verwacht dat de voor M 600-II gevonden waarden lager zouden zijn dan die voor M 886-I. Uitgaande van dit resultaat kan worden gekonkludeerd dat de verspreiding van de rhodaminevlek na verloop van vijf getijperioden in beide modellen identiek verloopt.

Vergelijking van de maximum concentraties voor de proeven M 600-II en M 886-I in de periode van 0 tot 5T geeft duidelijke verschillen aan. Deze verschillen kunnen in principe door verschillende oorzaken ontstaan zijn en wel door:

- a verschil in lozingstijdstip, lozingswijze en lozingsplaats,
- b verschil in monstername-net, of
- c schaaleffekten in verspreiding door samentrekkingsinvloed.

Uit de kaartjes met isokoncentratielijnen blijkt dat er geen duidelijke verschillen tussen de vlekuitbreiding in de beide modellen optreden die het gevolg van punt c zouden zijn. Wel blijkt dat de vlek in M 600 ten opzichte van de vlek in M 886 wat meer landinwaarts ligt, hetgeen door het onder a genoemde verschil veroorzaakt zal zijn. Het verschil in positie van de rhodaminevlek blijkt eveneens uit het concentratieverloop in de tijd voor de punten 1, 2 en 13 (punten ten oosten van de vlek - Fig. 10.1, 10.2 en 10.13) punten 9, 18 en 21 (punten ten westen van de vlek - Fig. 10.9, 10.21 en 10.26).

Het verschil in samentrekking tussen de twee modellen is een faktor 12,5. Dit heeft volgens de in paragraaf 6.1 afgeleide betrekking (vergelijking 10 en tabel 5) tot gevolg dat, althans in de fase met tweedimensionale turbulente diffusie, door een te sterk horizontaal diffusief transport t.g.v. bodemwrijving

in M 600 de horizontale afmetingen van de vlek 6,65 maal groter zouden moeten zijn dan in M 886 indien bodemwrijving bepalend zou zijn voor de verspreiding. Evenzo zouden de verticale afmetingen van de vlek in M 600 door te lage verticale diffusie t.g.v. bodemwrijving 1,88 maal kleiner moeten zijn dan in M 886. Zoals reeds vermeld werden dergelijke verschillen niet waargenomen.

De verschillen in de kaartjes met isokoncentratielijnen zijn zelfs zo gering dat ze vermoedelijk binnen de reproduceerbaarheid (nauwkeurigheid) van een proef in het model liggen. Het is daarom zeer waarschijnlijk dat de (in het begin van de proef grote) verschillen in de maximum concentraties voor beide proeven in de periode van 0 tot 5T worden veroorzaakt door het verschil in de dichtheid van monsternamen in deze fase van de proeven (paragraaf 5.6 - punt s). Dit houdt tevens in dat, ondanks de grote fout in de reproductie van de diffusieve transporten t.g.v. bodemwrijving, geen duidelijke aantoonbaar schaal-effekt in de resultaten van beide modellen wordt gevonden.

Vergelijking van het concentratieverloop als functie van de tijd in de verschillende meetpunten voor de proeven M 600-II en M 886-I laat zien dat er over het algemeen een zeer goede overeenkomst is tussen beide proefresultaten. Hiervoor is reeds aangetoond dat er verschillen zijn die verklaard kunnen worden doordat de posities van de vlek in de twee modellen niet volledig met elkaar overeenkomen. Dit veroorzaakt dat aan de oostzijde van de vlek (o.a. punten 1, 2 en 13 - respectievelijk Fig. 10.1, 10.2 en 10.13) de concentraties van proef M 600-II hoger zijn dan die van M 886-I en dat aan de westzijde van de vlek (o.a. punten 9, 18 en 21 - respectievelijk Fig. 10.9, 10.21 en 10.26) het omgekeerde het geval is. Voor de punten in de buurt van het hart van de vlek zal het (niet al te grote) verschil in lozingstijdstip, lozingswijze en lozingsplaats geen belangrijke verschillen geven, in het bijzonder niet tijdens HW- en LW-kentering. Dat in dit gebied goede overeenkomst tussen de resultaten van beide proeven wordt gevonden (o.a. punten 3, 4, 7, 15, 16 en 17 - respectievelijk Fig. 10.3, 10.4, 10.7, 10.16, 10.17 en 10.19) in het bijzonder vlak bij het hart van de vlek (punten 16 en 17) bevestigt nog eens dat geen belangrijke schaafeffekten in de vlekuitbreiding optreden ondanks de sterke samentrekking van M 600 ten opzichte van M 886.

Uit dit feit kan de konklusie worden getrokken dat het turbulente diffusieve transport t.g.v. bodemwrijving ($D :: u_* h$) geen belangrijke bijdrage levert bij de verspreiding van een stof in de beschouwde situaties. Derhalve moeten de in paragraaf 7.3 gevonden verschillen veroorzaakt zijn door verschillen in de diffusieve transporttermen (vergelijking 6, respectievelijk 11) waarin de

diffusiecoëfficiënten niet worden bepaald door wervels met horizontale assen (u_h of \bar{u}_h) maar door wervels met verticale assen (u_v of \bar{u}_v) en wel in het bijzonder door wervels gekenmerkt door \bar{u}_v (zie tabel 5 en vergelijking 10).

7.5 Vergelijking model met prototype

De vergelijking van het model met het prototype is onder meer gebaseerd op het verloop van de maximum (gemeten) concentratie als functie van de tijd. Vergelijking van de in het prototype gevonden en voor afbraak gecorrigeerde verband tussen maximum concentratie en tijd met het voor M 886 gevonden overeenkomstige verband, dat is bepaald uit de resultaten van proef M 886-II aangevuld met de in de eerste getijperiode gemeten maximum concentraties van proef M 886-I, geeft een overeenkomstig beeld als bij de vergelijking tussen M 600 en M 886 in paragraaf 7.4 (Fig. 16). In de eindfase van de proeven worden maximum concentraties gevonden die binnen de nauwkeurigheid van de afbraakkorrektes met elkaar overeenkomen, terwijl ook hier in de beginfase van de proeven verschillen worden gevonden die het direkte gevolg kunnen zijn van de gebruikte meettechnieken (paragraaf 5.6 - punt s). Dat dit laatste ook hier naar alle waarschijnlijkheid het geval is kan aannemelijk worden gemaakt, op grond van het feit dat in paragraaf 7.4 op redelijke gronden is aangetoond, dat een samentrekking 12,5 geen duidelijk aantoonbaar verschil geeft in de verspreiding van afvalstof in een estuarium met sterke getijbeweging, terwijl M 886 slechts een samentrekking 3 heeft ten opzichte van het prototype, zodat deze geringe samentrekking geen duidelijke invloed op het proefresultaat zal hebben.

Naast de invloed van de samentrekking van het model heeft de in het prototype opgestoken storm invloed gehad op de verspreiding van de rhodamine. De storm heeft naast de in de proef M 886-II verwerkte middenstandsverhoging door opwaaiing ook extra turbulenties door driftstromen opgewekt. In paragraaf 7.2 is op redelijk betrouwbare manier aangetoond dat het effect van de middenstandsverhoging slechts een verplaatsing van de rhodaminevlek tot gevolg heeft en geen merkbare invloed heeft op vlekuitbreiding. De invloed van de extra turbulenties door driftstromen op de verspreiding van de rhodamine blijkt gezien de resultaten voor de prototypeproef en de proef M 886-II in elk geval kleiner te zijn dan de invloed van het meetsysteem en de eventuele invloed van de samentrekking van het model. Deze laatste twee invloeden, in het bijzonder het meetsysteem, geeft aanleiding tot gemeten maximum concentraties in het

prototype die hoger zijn dan in het model M 886 (zie Fig. 16), terwijl de driftstromen slechts een versnelling van de verspreiding van de vlek en aldus een verlaging van de concentraties zullen geven. Het lijkt waarschijnlijk dat ook de invloed van de door de driftstromen opgewekte turbulenties geen grote invloed hebben gehad op de vlekuitbreiding, omdat de storm pas een getijperiode na lozing is opgestoken. Op dat tijdstip was de vlek reeds zo groot, dat deze turbulenties te kleine afmetingen hadden om op effectieve wijze de verdunning in de vlek en de vlekuitbreiding te beïnvloeden. Wel bestaat de mogelijkheid dat de vlek is verplaatst.

Ook vergelijking van de in de modellen gemeten concentratieverlopen in een aantal meetpunten met de overeenkomstige, in het prototype gemeten en voor afbraak gecorrigeerde concentratieverlopen toont aan dat over het algemeen goede overeenkomst wordt gevonden (Fig. 10.2-10.8, 10.13, 10.14, 10.16, 10.17, 10.19-10.21, 10.23-10.27 en 10.30). De faseverschuivingen tussen de concentratieverlopen in de modellen en die in het prototype (Fig. 10.17, 10.19 en 10.21) worden mogelijk veroorzaakt door een verplaatsing van de vlek in het prototype ten gevolge van de storm. Het is echter niet uitgesloten dat deze faseverschuivingen ten gevolge van onzekerheden in de concentratieverlopen, die op relatief weinig meetgegevens zijn gebaseerd, grotendeels slechts schijnbaar zijn. Zo blijkt dat in punt 17'/17" (Fig. 10.20) een dergelijke faseverschuiving niet wordt gevonden.

Resumerend kan worden gesteld dat, gezien de meetresultaten en de interpretatie van de verschillen of schijnbare verschillen tussen de modellen en het prototype, de overeenkomst tussen het diffusieverschijnsel in de samengetrokken modellen en in het prototype goed is.

SYMBOLLEN

c	koncentratie
$c(o,t)$	maximum concentratie in hart van vlek
C	Chézy-koëfficiënt
D	turbulente diffusiekoëfficiënt
D'	dispersiekoëfficiënt
$f(t)$	korrektiefactor voor afbraak
h	waterdiepte, verticale maat
k	afbraakconstante
K	uitwendige kracht per eenheid van massa
K_1, K_2	diffusieconstanten
K'_1, K'_2	dispersieconstanten
l	horizontale maat
n	schaalverhouding (modelmaat/prototypemaat)
p	dimensieloze konstante
P	druk werkend op elementair watervolume
t	tijd
T	getijperiode
T_x, T_y, T_z	turbulent diffusief transport in resp. x-, y- en z-richting
T'_x, T'_y, T'_z	dispersief transport in resp. x-, y- en z-richting
u	snelheid in x-richting
\bar{u}	gemiddelde snelheid in x-richting
u_x	schuifspanningssnelheid
v	snelheid in y-richting
w	snelheid in z-richting
x	horizontale ko-ordinaat van orthogonaal assenstelsel
y	horizontale ko-ordinaat
z	vertikale ko-ordinaat
ρ	dichtheid van water
σ	variantie van concentratieverdeling (karakteristieke maat)

REFERENTIES

- Ref. 1 HOLLEY, E.R. and KARELSE, M.
Model-prototype comparison for transverse mixing in rivers,
15th Conference of I.A.H.R., Istanbul, Sept. 1973.
- 2 HARLEMAN, D.R.F.
The significance of longitudinal dispersion in the analysis of
pollution in estuaries,
Paper I-13, Second Int. Conf. on Water Poll. Res., Tokyo, 1964.
- 3 HOLLEY, E.R., HARLEMAN, D.R.F. and FISCHER, H.B.
Dispersion in homogeneous estuary flow,
Proc. A.S.C.E., Journ. of Hydr. Div., 96, No. HY 8, Aug. 1970,
pp. 1691 - 1709.
- 4 CRICKMORE, M.J.
Tracer tests of eddy diffusion in field and model,
Proc. A.S.C.E., Journ. of Hydr. Div., 98, No. HY 10, Oct. 1972,
pp. 1737 - 1752.
- 5 OKUBO, A.
A new set of oceanic diffusion diagrams,
Techn. report 38, Chesapeake Bay Inst., The John Hopkins Univ.,
June 1968.
- 6 DAM, G.C. van
Dispersie van opgeloste en zwevende stoffen in zee gebracht op
3 km uit de Nederlandse kust ter hoogte van Wijk aan Zee,
Nota MFA 6812, Rijkswaterstaat, Math. Fys. Afd., 1968.
- 7 PEARSON, E.A.
Some developments in marine waste disposal,
J. Proc. Inst. Sew. Purif., 1966.
- 8 DAM, G.C. van and DAVIDS, J.A.G.
Radio active waste disposal and investigations on turbulent diffusion
in the Netherlands' coastal area, pp. 233-248 of "Disposal of radio
active wastes into seas, oceans and surface waters", Intern. Atomic
Energy Agency, Vienna, 1966.

Ref. 9 FISHER, L.J.

Preliminary results and comparison of dye tracer studies conducted in harbours, estuaries and coastal waters, Coastal Eng., Vol. I and II, Chapt. 83, pp. 1481-1493, Sept. 1966.

10 DOBBINS, W.E.

Diffusion and mixing,

Journ. of Boston Soc. of Civ. Eng., Vol. 52 - no. 2, pp. 108-128, April, 1965.

Proef	Datum	Bodem-situatie	Damsituatie	Getij	Geïnjecteerde rhodamine B	Opmerkingen
M 600-I	21- 8-'68	1954	1965	gemiddeld getij 1951	$2 \cdot 10^{-5}$ kg	In afwijking met de overige proeven is de midden-geul in het damtracé nog open. Hierdoor treden echter geen belangrijke veranderingen op in het verspreidingspatroon (paragraaf 2.1). Middengeul afgesloten.
M 600-II	10- 9-'68	1954	1967	springtij 28-9-'65	$2 \cdot 10^{-5}$ kg	
M 886-I	3- 3-'70	1965	1969 - 1970	springtij 28-9-'65	$82 \cdot 10^{-5}$ kg	Middengeul afgesloten en de landhoofden in de sluitgaten aangebracht evenals de drempels met bodembescherming in de sluitgaten. Deze voorzieningen geven geen wijziging in de getijdebieten, zodat ook het verspreidingspatroon niet aangetast wordt. De bodemsituatie is slechts in detail iets gewijzigd t.o.v. 1954.
M 886-II	4- 3-'70	1965	1969 - 1970	springtij 28-9-'65 aan- gepast aan de getijomstan- digheden tij- dens de proef i.h.prototype	$82 \cdot 10^{-5}$ kg	Het springtij van 28-9-'65 is voor deze proef door middel van middenstandsverhogingen zo goed mogelijk aangepast aan het getij tijdens de prototype-meting om een zo goed mogelijke vergelijkings-basis te verkrijgen.
Prototype	7-11-'69 tot 15-11-'69	1969	1969	7-11-'69 tot 15-11-'69 (springtij)	216 kg	De bodemsituatie is slechts in detail iets gewijzigd t.o.v. 1954 en 1965. Tijdens de meting is een periode met storm opgetreden.

Tabel 1 - Gegevens van de proefomstandigheden

Punt	M 600			M 886		
	te nemen monsters	aantal monsters	aard v.d. monsters	te nemen monsters	aantal monsters	aard v.d. monsters
1	1 - 32	32	opp.	7 - 23	17	opp.
2	1 - 16	16	"	7 - 23	17	"
3	1 - 32	32	"	1 - 23	23	"
3'	-	-	"	1 - 6	6	"
4	1 - 16	16	"	1 - 12	12	"
4'	-	-	"	1 - 6	6	"
5	1 - 32	32	"	1 - 23	23	"
5'	-	-	"	1 - 6	6	"
6	3 - 32	30	"	1 - 23	23	"
6'	-	-	"	1 - 6	6	"
7	3 - 32	30	"	1 - 23	23	"
8	7 - 32	26	"	7 - 23	17	"
9	7 - 32	26	"	7 - 23	17	"
10	15 - 32	18	"	13 - 23	11	"
11	15 - 32	18	"	13 - 23	11	"
12	17 - 32	16	"	-	-	"
12'	-	-	"	13 - 23	11	"
13	1 - 32	32	"	1 - 23	23	"
14	1 - 16	16	"	1 - 23	23	"
14A	2, 4, ..., 16	8	diepte	2-6, 8, 10	7	diepte
14'	-	-	"	1 - 6	6	opp.
15	1 - 32	32	opp.	1 - 12	12	"
15'	-	-	"	1 - 6	6	"
16	1 - 32	32	"	1 - 23	23	"
16A	2, 4, ..., 16	8	diepte	2-6, 8, 10	7	diepte
16'	-	-	"	1 - 6	6	opp.
17	1 - 32	32	opp.	1 - 23	23	"
17'	-	-	"	1 - 6	6	"
17"	-	-	"	1 - 6	6	"
18	3 - 32	30	"	1 - 23	23	"
18A	2, 4, ..., 16	8	diepte	2-6, 8, 10	7	diepte
18'	-	-	"	6 - 12	6	opp.
19	3 - 32	30	opp.	7 - 23	17	"
19'	-	-	"	7 - 23	17	"
20	11 - 32	22	"	7 - 23	17	"
21	17 - 32	16	"	7 - 23	17	"
22	17 - 32	16	"	-	-	"
23	3 - 32	30	"	1 - 23	17	"
24	-	-	"	1 - 12	12	"
25	-	-	"	1 - 6	6	"
26	-	-	"	1 - 6	6	"
27	-	-	"	1 - 6	6	"
28	-	-	"	1 - 6	6	"
29	-	-	"	7 - 23	17	"
30	-	-	"	7 - 23	17	"
4/15	-	-	"	13 - 23	11	"
17'/17"	-	-	"	7 - 23	17	"
	Totaal:	604			596	

Tijdens de prototypeproef is kontinu bemonsterd vanaf een varend meetpunt

Tabel 2 - Monsternamen-schema's

Tijdstip na lozing	Teruggevonden hoeveelheid rhodamine B (%)				
	M 600-I	M 600-II	M 886-I	M 886-II	Prototype
1/2T	-	-	175	-	-
T	51	68	-	-	-
3/2T	-	-	115	-	-
2T	69	68	131	-	-
5/2T	-	-	105	-	-
3T	71	80	90	-	-
7/2T	-	-	77	75	-
4T	67	75	92	103	93
9/2T	-	-	80	73	-
5T	78	82	88	94	-
6T	88	100	76	86	65
7T	88	103	82	92	63
8T	87	106	76	-	62
10T			67	73	38
12T			67	69	39
14T			65	67	40
16T			62	62	-

De waarden voor de eerste fase van de proeven zijn niet betrouwbaar t.g.v. de bepalingswijze, de steile concentratiegradiënten en het niet gelijkmatig over de vertikaal verdeeld zijn van de rhodamine B

Tabel 3 - Massakontrolle

Tijd	Proef							
	M 600-I		M 600-II		M 886-I		M 886-II	
	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.
T	100	100	100	100	100	100	100	100
2T	100	100	100	100	99,8	99,8	97,6	97,6
3T	100	100	100	100	99,0	99,2	95,0	97,4
4T	99,5	99,5	99	99	96,7	97,7	91,2	96,2
5T	98,5	99	98	99	92,9	96,2	86,5	95,3
6T	97	98,5	95	97	88,1	95,2	80,5	94
7T	94	97	92	97	82,3	94,2	74,3	93,8
8T	90,5	96,5	88	96	75,8	93,5	67,7	93,4
9T					69,3	(93,5)	60,4	(92,7)
10T					62,4	93,3	52,3	91,9
11T					55,9	(93,5)	44,3	(92,0)
12T					49,7	93,8	36,3	92,0
13T					43,2	(93,5)	28,3	(92,0)
14T					36,7	93,5	20,3	92,0
15T					30,2	(93,5)	12,3	(92,0)
16T					24,7	94,5	5,2	92,9

Resultaten uitgedrukt in percentage rhodamine B dat nog in het estuarium Brouwershavense Gat - Grevelingen aanwezig is tijdens LW-kentering

Tabel 4 - Resultaten oriënterende berekeningen naar de uit het meetgebied gestroomde hoeveelheid rhodamine B

Diffusiekoëff. gekenmerkt door:(vgl. 8)	n_D optredend in model	n_D vereist in model (vgl.6 en 7)		Afwijking	
	hor./vert.	hor.	vert.	hor.	vert.
$D :: u_* l$	$n_h n_l^{1/2}$	$n_h^{1/2} n_l$	$n_h^{5/2} n_l^{-1}$	$n_h^{1/2} n_l^{-1/2}$	$n_h^{-3/2} n_l^{3/2}$
$D :: u_* h$	$n_h^2 n_l^{-1/2}$	$n_h^{1/2} n_l$	$n_h^{5/2} n_l^{-1}$	$n_h^{3/2} n_l^{-3/2}$	$n_h^{-1/2} n_l^{1/2}$
$D :: \bar{u} l$	$n_h^{1/2} n_l$	$n_h^{1/2} n_l$	$n_h^{5/2} n_l^{-1}$	1	$n_h^{-2} n_l^2$
$D :: \bar{u} h$	$n_h^{3/2}$	$n_h^{1/2} n_l$	$n_h^{5/2} n_l^{-1}$	$n_h n_l^{-1}$	$n_h^{-1} n_l$

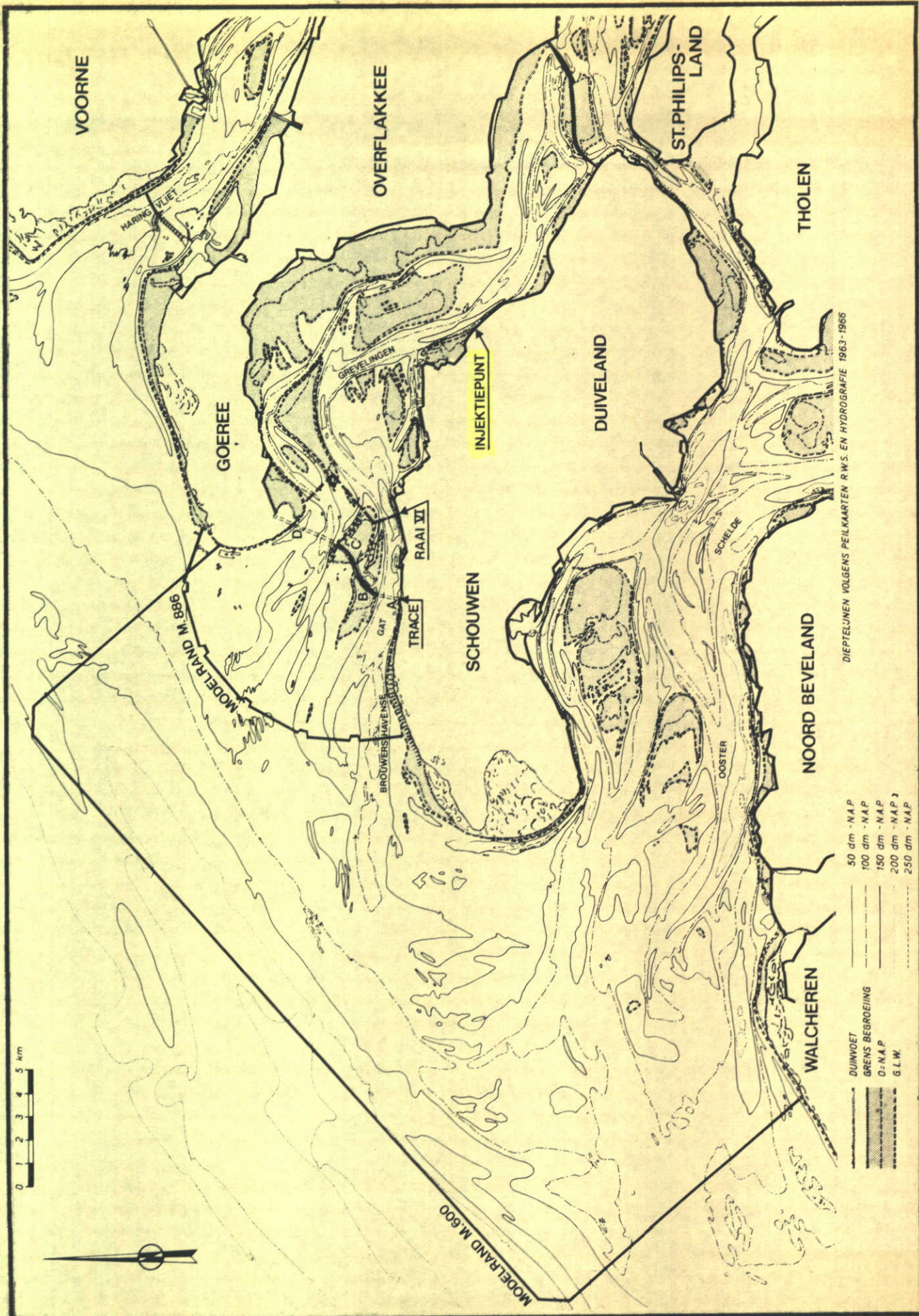
N.B. Bovenstaande is afgeleid voor model gebaseerd op de schaalregels van Froude:

snelheidsschaal: $n_u = n_h^{1/2}$

ruwheidsschaal : $n_\lambda = n_h n_l^{-1}$ of $n_C = n_h^{-1/2} n_l^{1/2}$

1 \equiv 3 resp 2 \equiv 4 indien aan 5 en 6 wordt voldaan in het model.
(andere afwijking = $n_\lambda^{1/2}$ en $u_* = \sqrt{\lambda} u$)

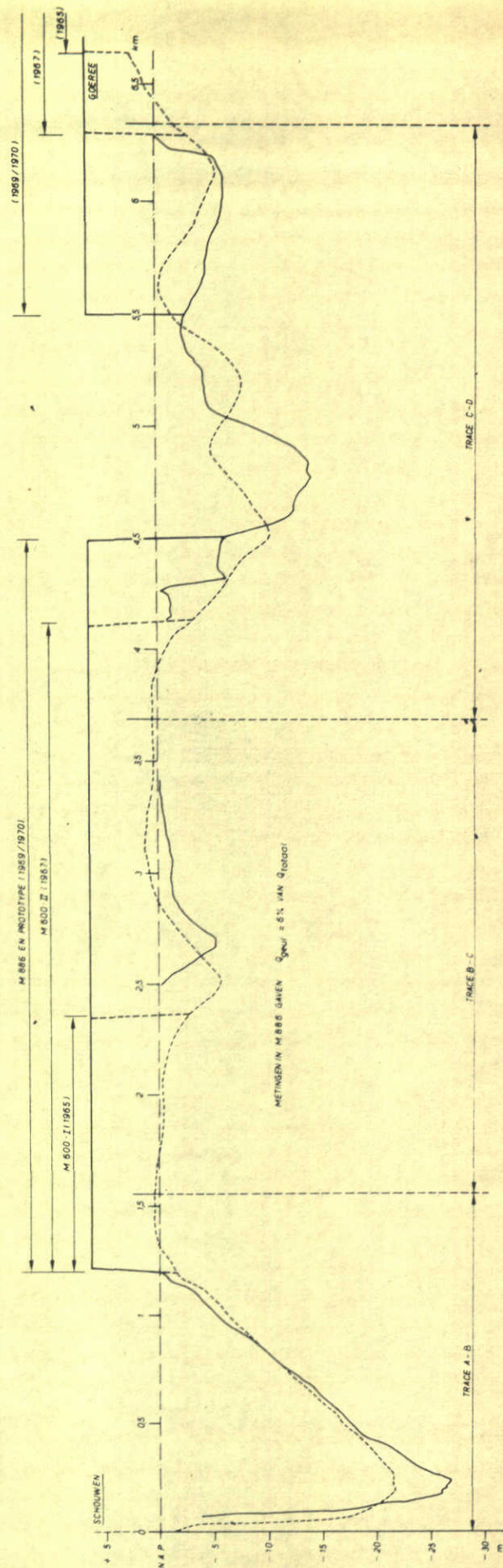
Tabel 5 - Schaafeffect in diffusiecoëfficiënten in model



DIEPLIJNEN VOLGENS PEILKAARTEN R.W.S. EN HYDROGRAFIE 1963-1966

- 50 dm - N.A.P.
 - 100 dm - N.A.P.
 - 150 dm - N.A.P.
 - 200 dm - N.A.P.
 - 250 dm - N.A.P.
- DUNVOET
 GRENZ BEGROEIJING
 0-N.A.P.
 G.L.W.

SITUATIE		j.z.
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M. 1010 - 1071	A4 FIG. 1



PROFIEL TRACE BROUWERSHAVENSE DAM DAM IN PROTOTYPE EN MODEL
 PROTOTYPE OEFENINGEN VAN R.W.S. NOTA H.534.2, TEK. NR. 44/65-66BT
 MODEL - BODEMLIGGING VOLGENS LODINGEN 1954

→ DAMSTUWIJE S

SITUATIE AFSLUITDAM EN PROFIEL TRACE

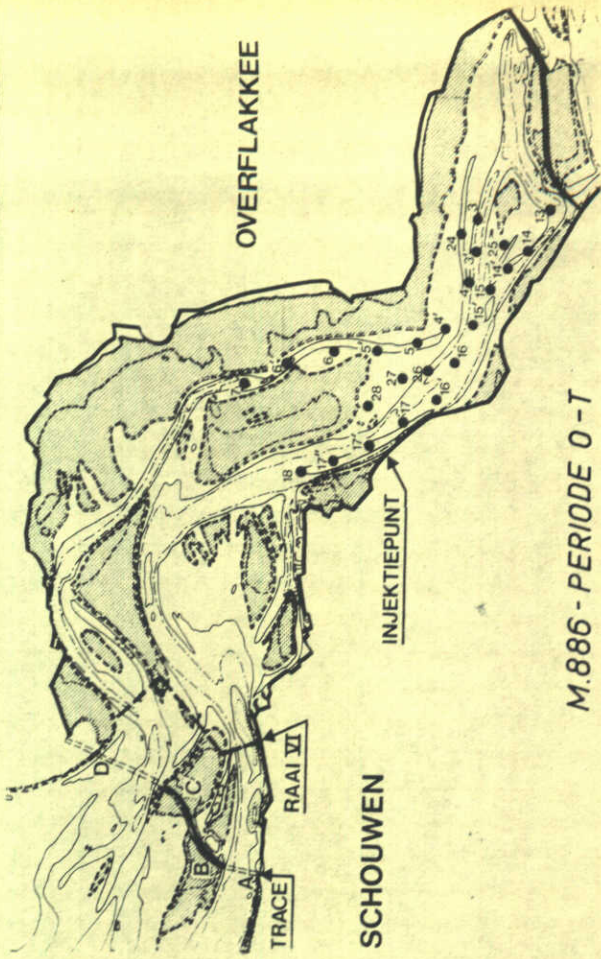
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

j.z.

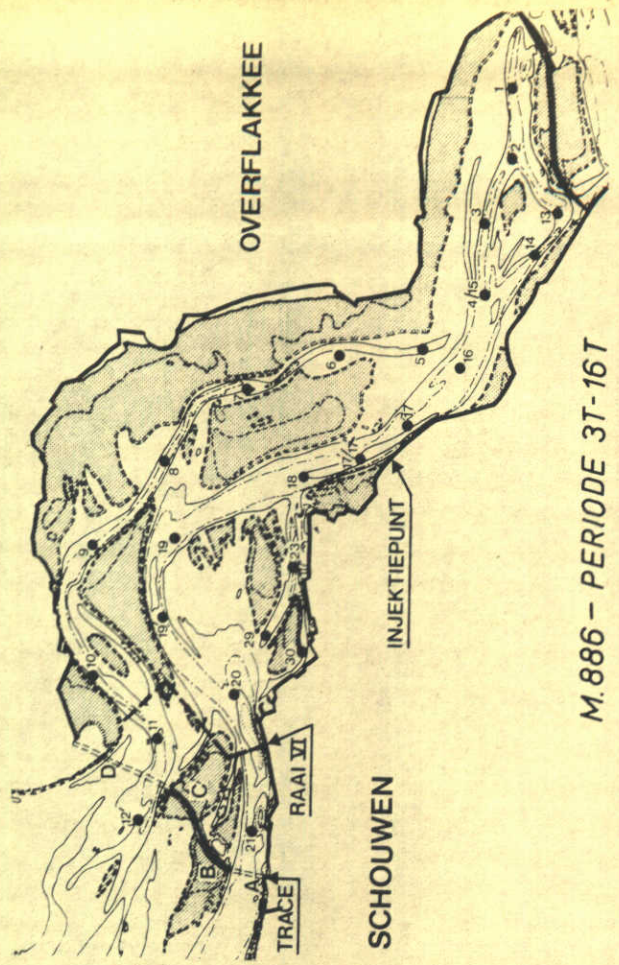
A4

M.1010 - 1072

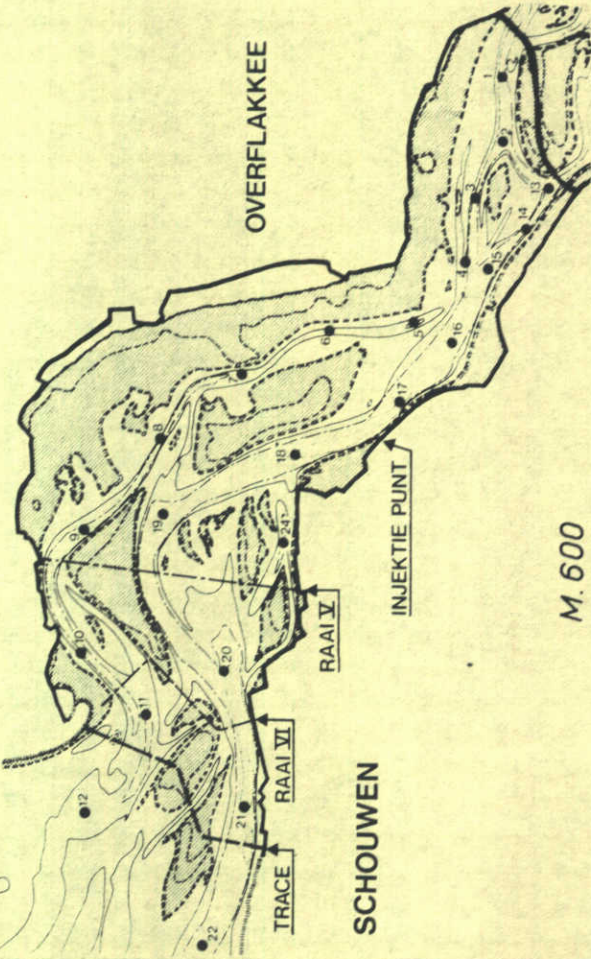
FIG. 2



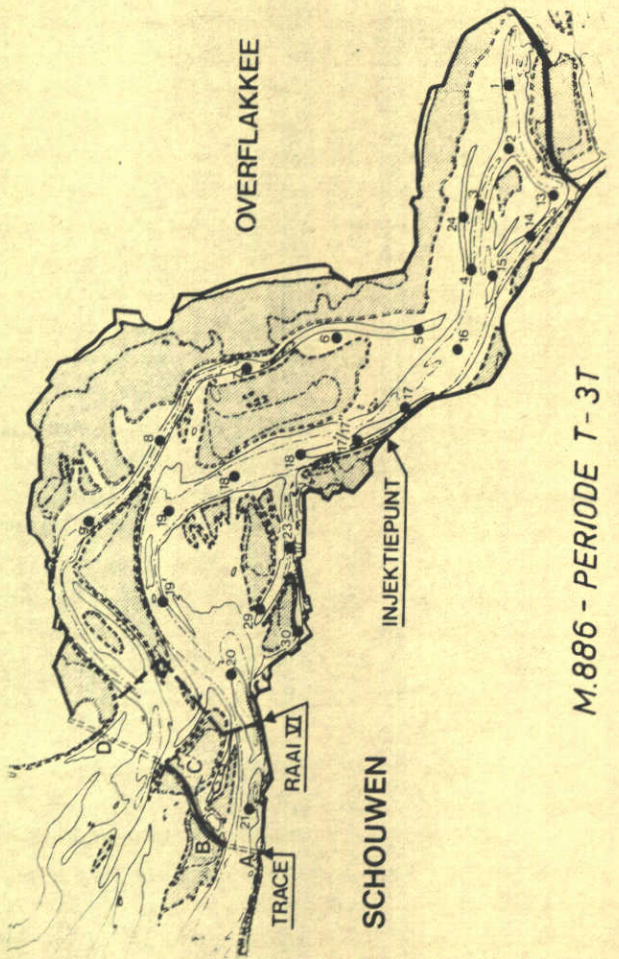
M.886 - PERIODE 0-T



M.886 - PERIODE 3T-16T



M.600



M.886 - PERIODE T-3T

NET VAN MONSTERNAMEPUNTEN IN DE MODELLEN

0 1 2 3 4 5 km

j.z.

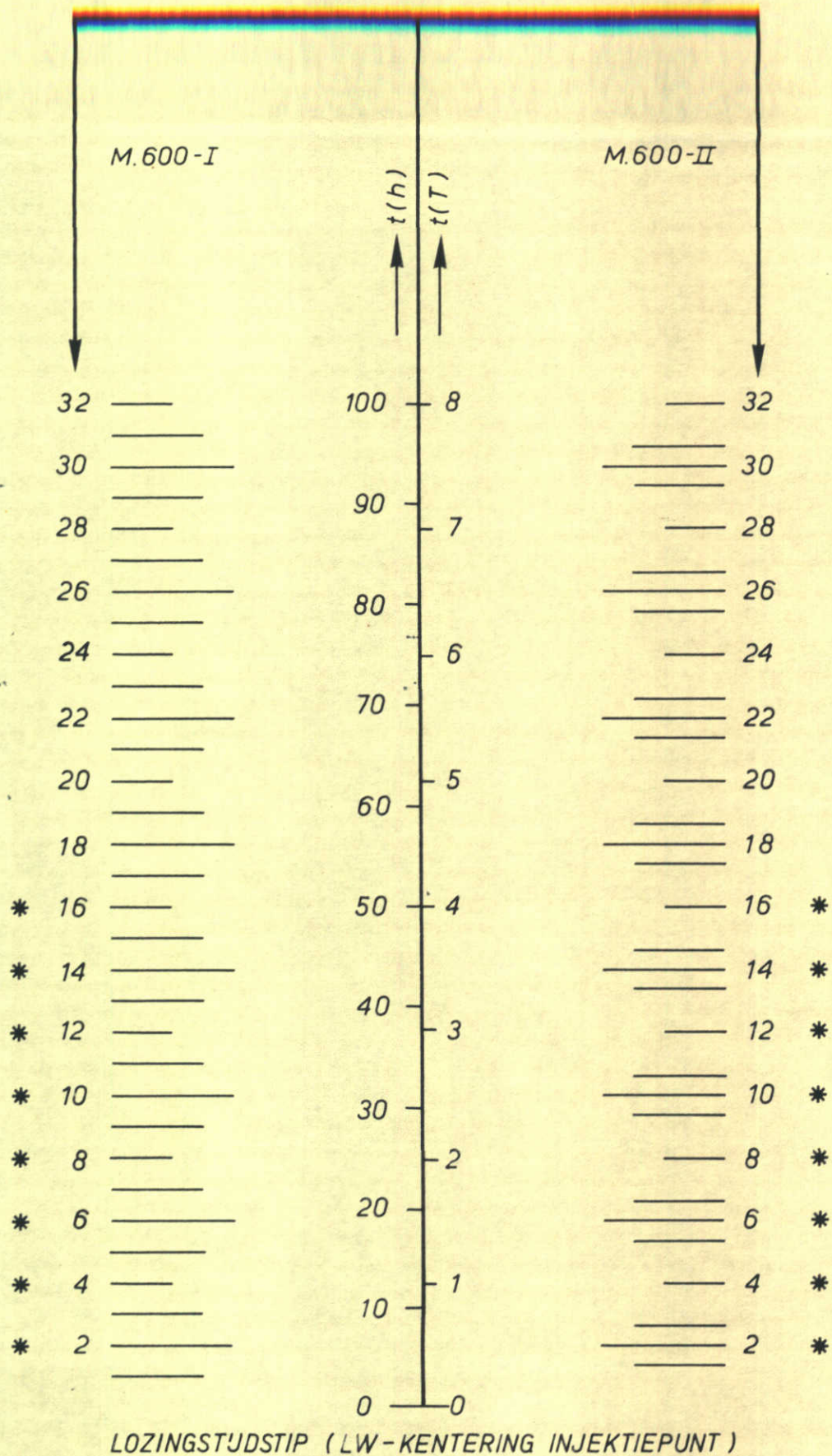
A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

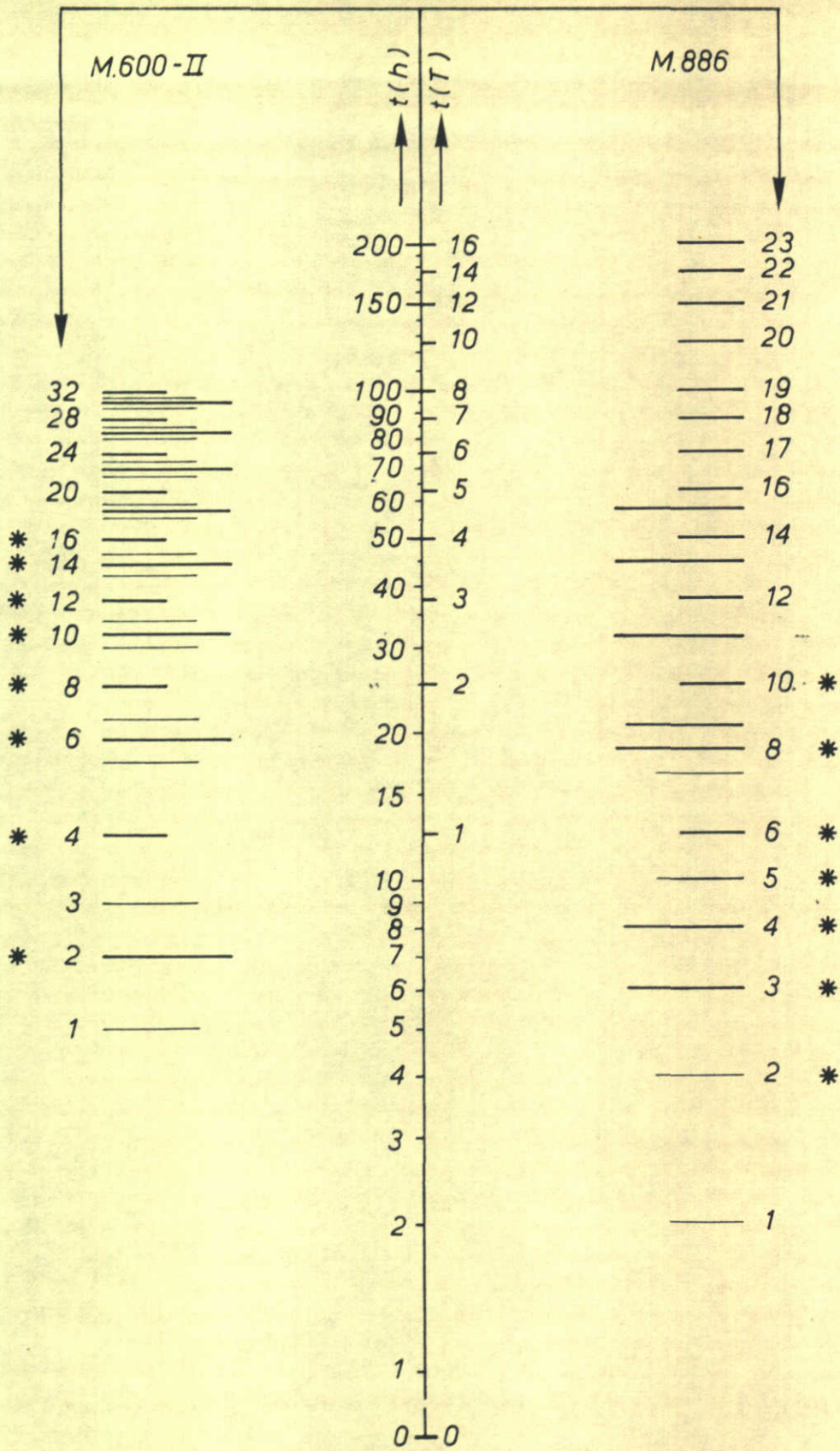
M.1010 - 1073

FIG. 3

MONSTERNAME TIJDSTIPPEN (*OOK DIEPTEMONSTER)



MONSTERNAME TJDSTIPPEN (* OOK DIEPTEMONSTER)

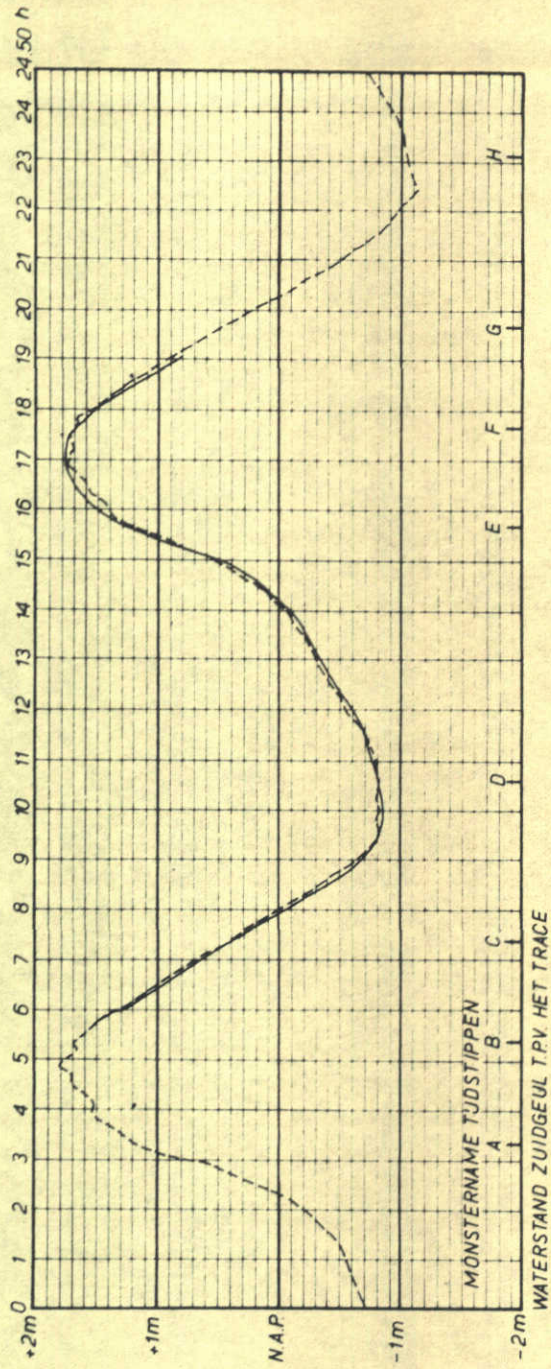
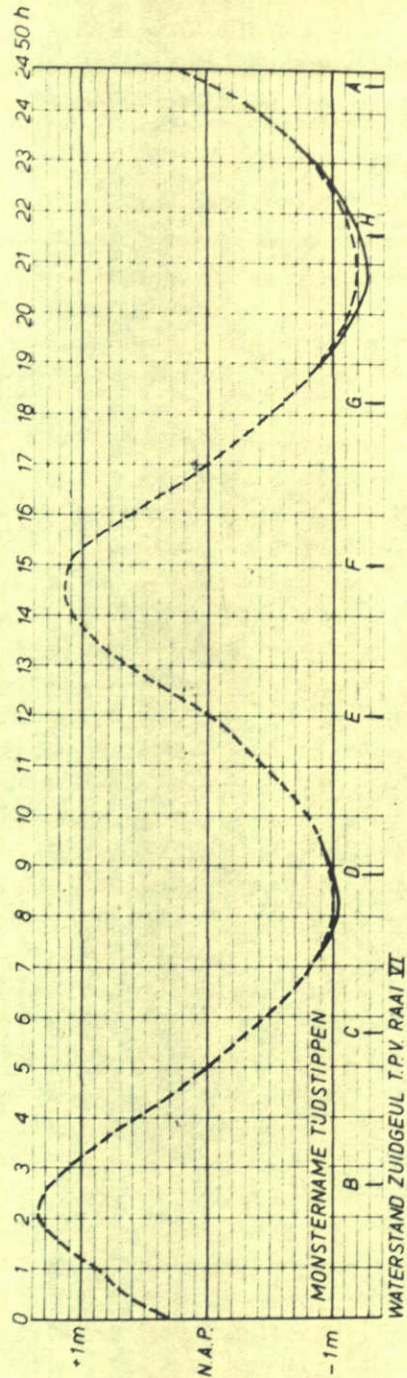


LOZINGSTJDSTIP (LW - KENTERING INJEKTIEPUNT)

TJDSTIPPEN VAN MONSTERNAME M.600-II EN M.886

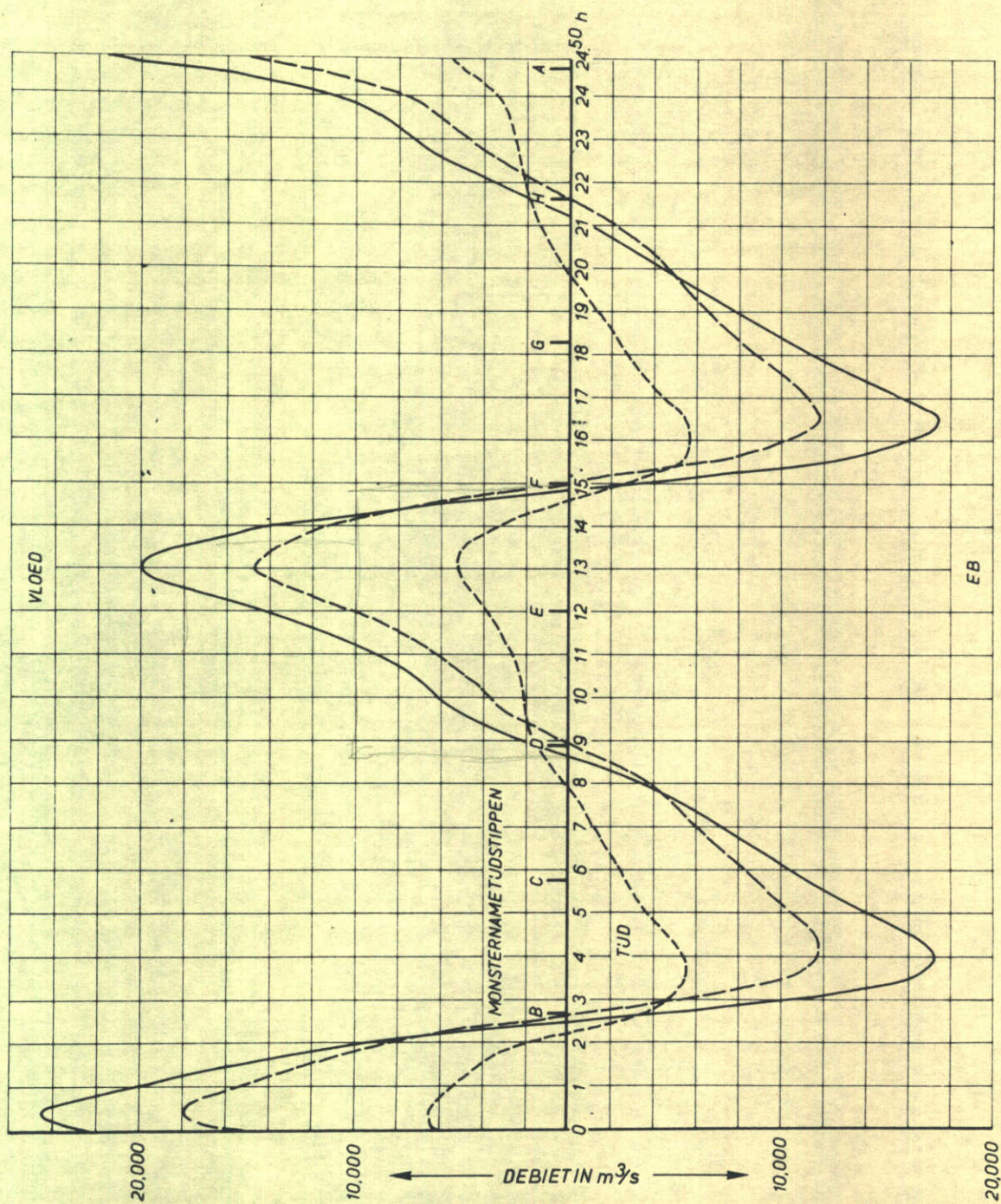
j.z.

A4



PROEF M 886-II/4-3-1970/T 122-A
 GETJ 28-9-1965 MET MIDDENSTANDSVERHOOGINGEN VAN 0 m VAN 0 TOT T
 0,25 m VAN T TOT 2T
 0,50 m VAN 2T TOT 8T
 0,25 m VAN 8T TOT 9T
 0 m VAN 9T TOT 16T

GETJREGISTRATIES M.600 EN M.886



GEMIDDELD GETJ 1951-0

- TOTAAL GETJEBIET RAAI VI
- - - GETJEBIET RAAI VI - ZUIDGEUL
- · - · - GETJEBIET RAAI VI - NOORDGEUL

GEDEVENS HORIZONTAL GETJ M.600 - I

j.z.

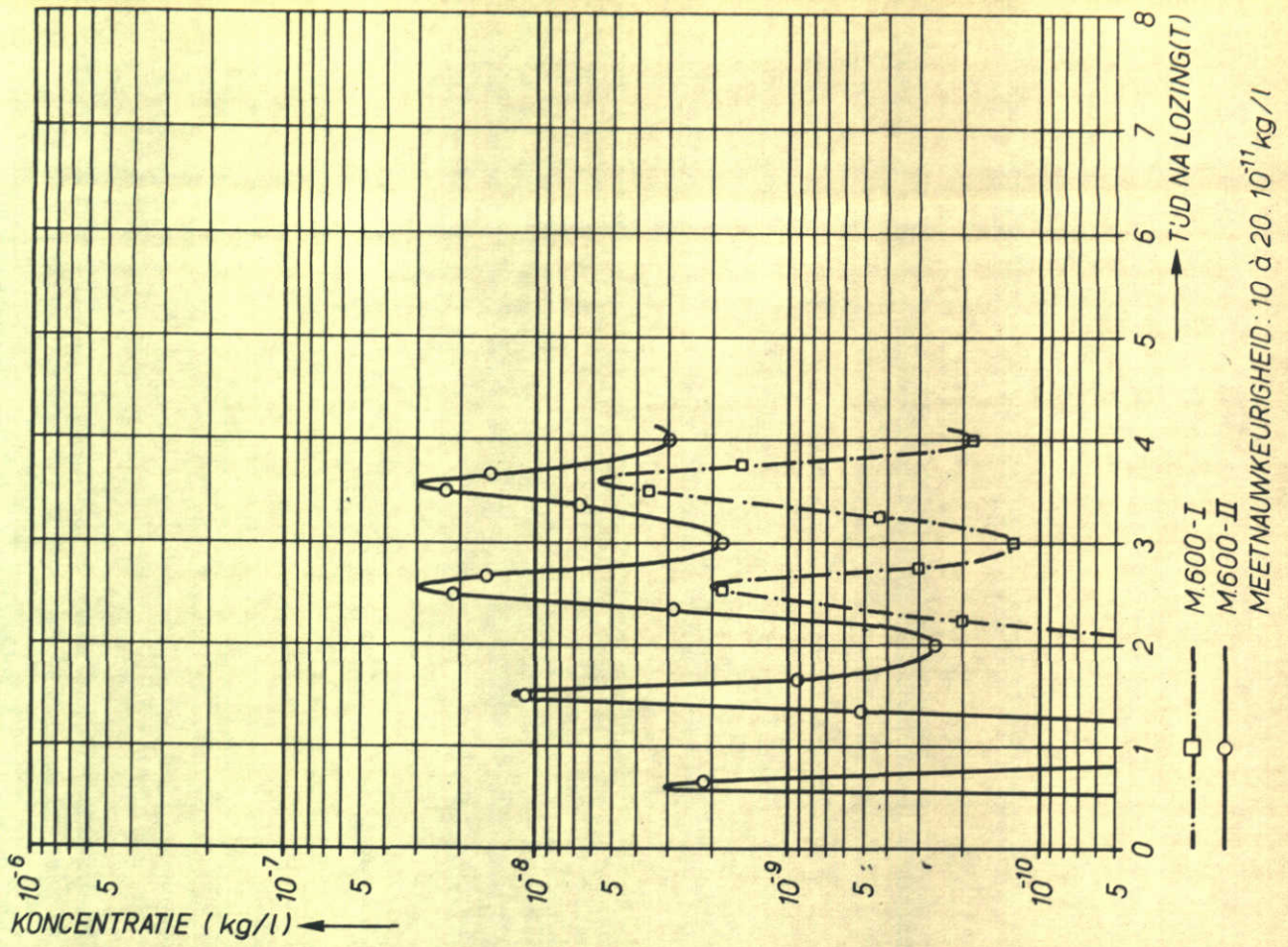
A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

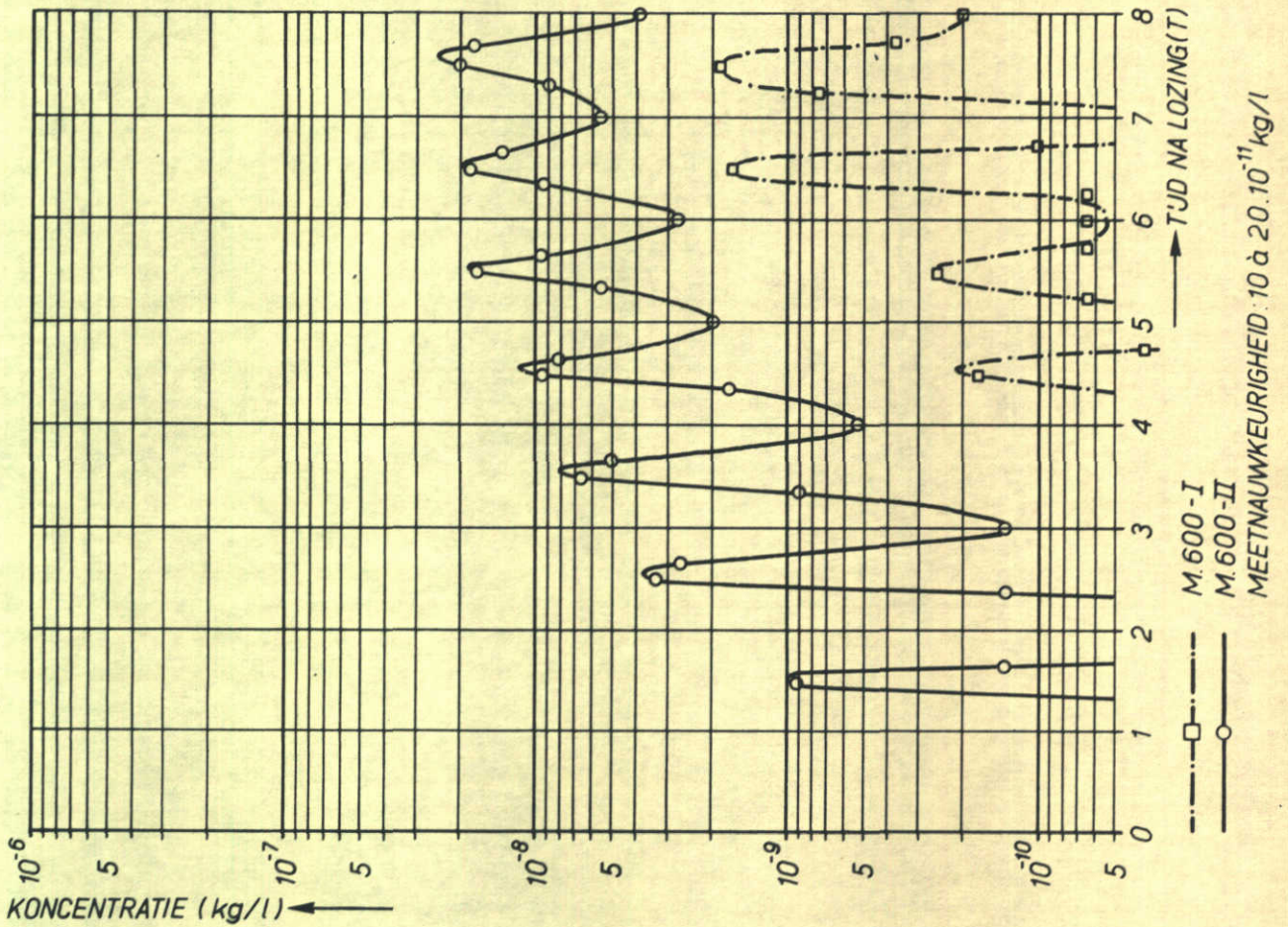
M.1010 - 1077

FIG. 6

PUNT 2



PUNT 1

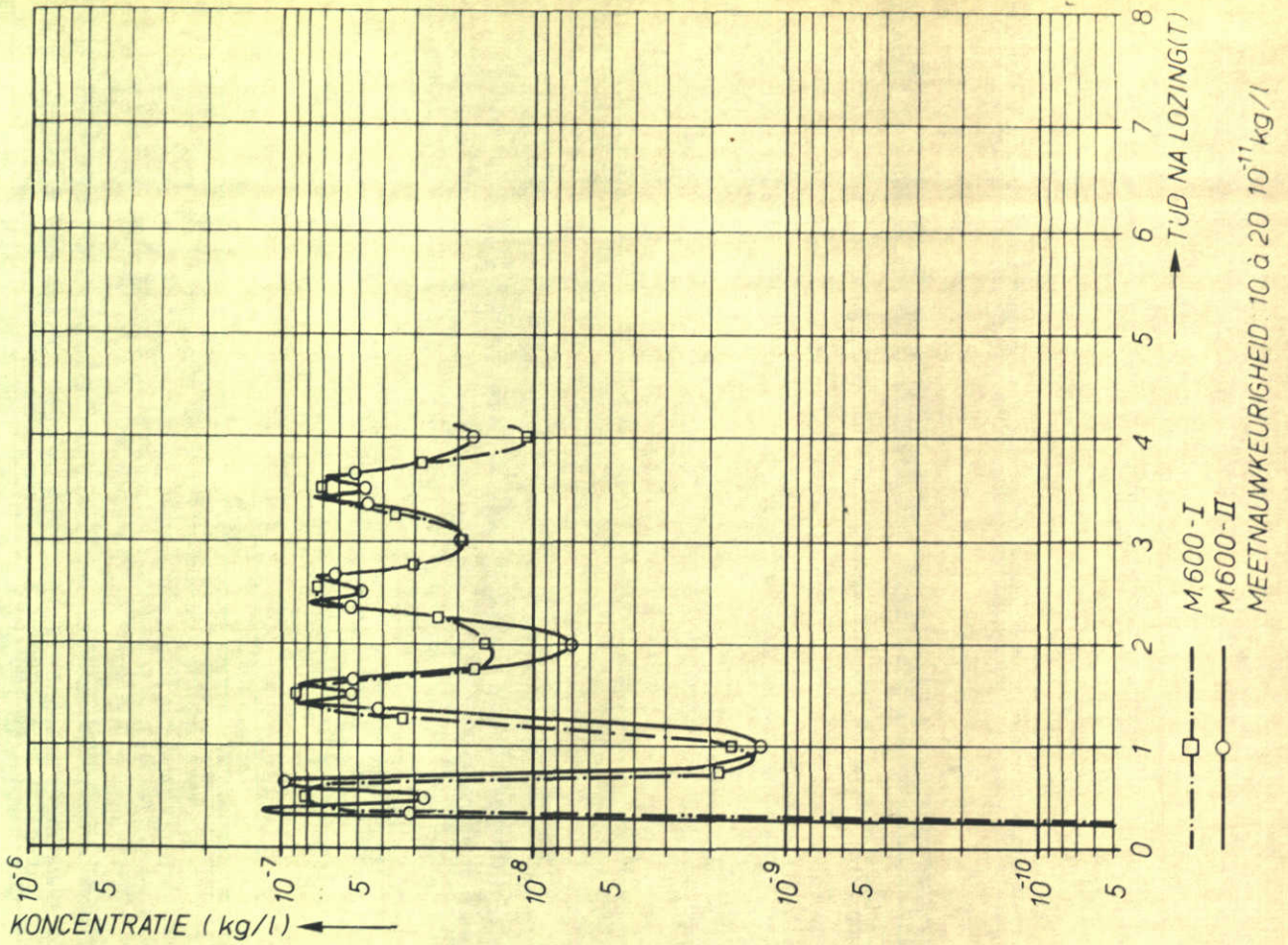


KONCENTRATIEVERLOOP ALS FUNKTIE VAN DE TJD
PROEVEN M.600-I EN M.600-II

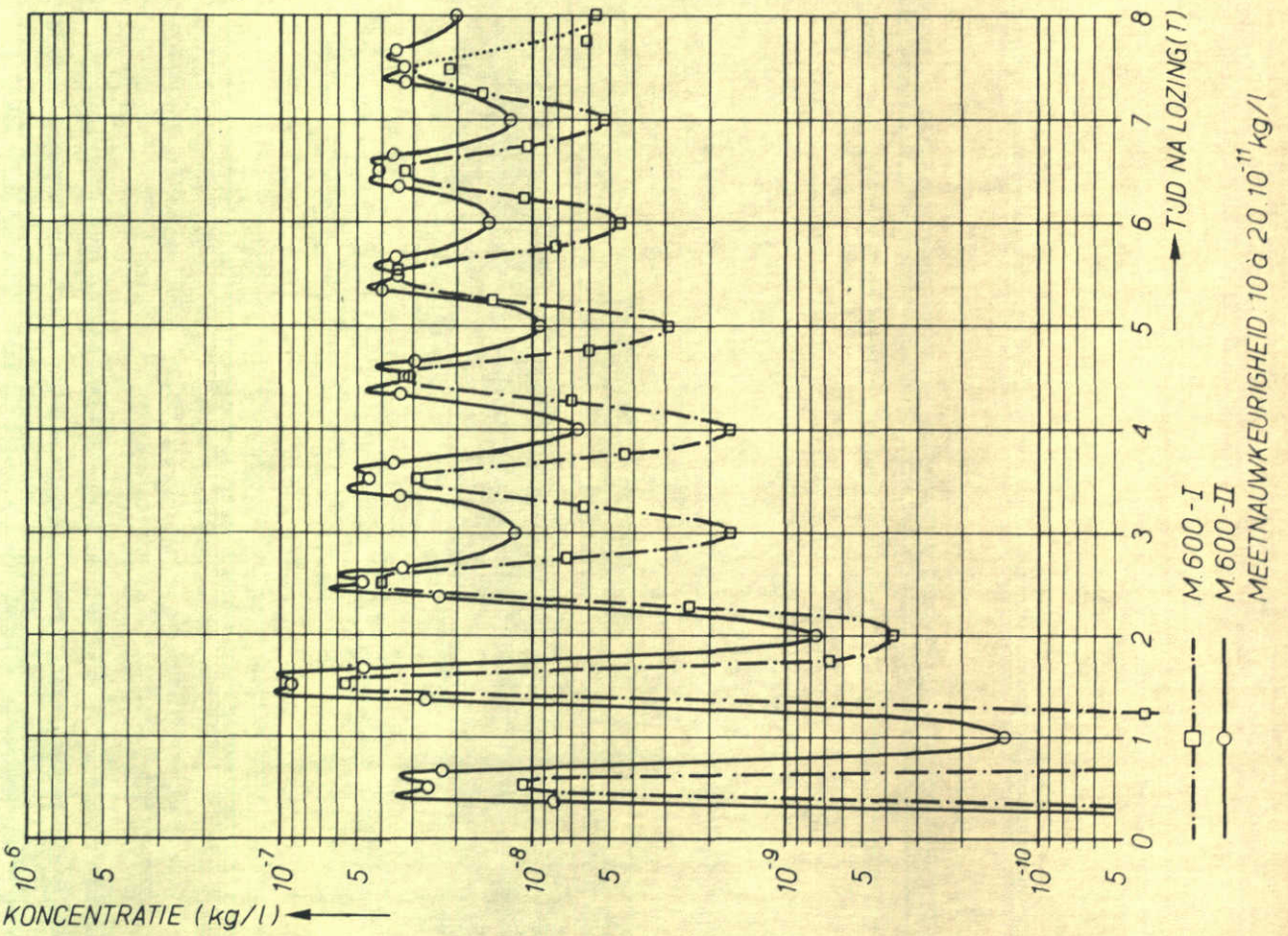
j.z.

A4

PUNT 4



PUNT 3

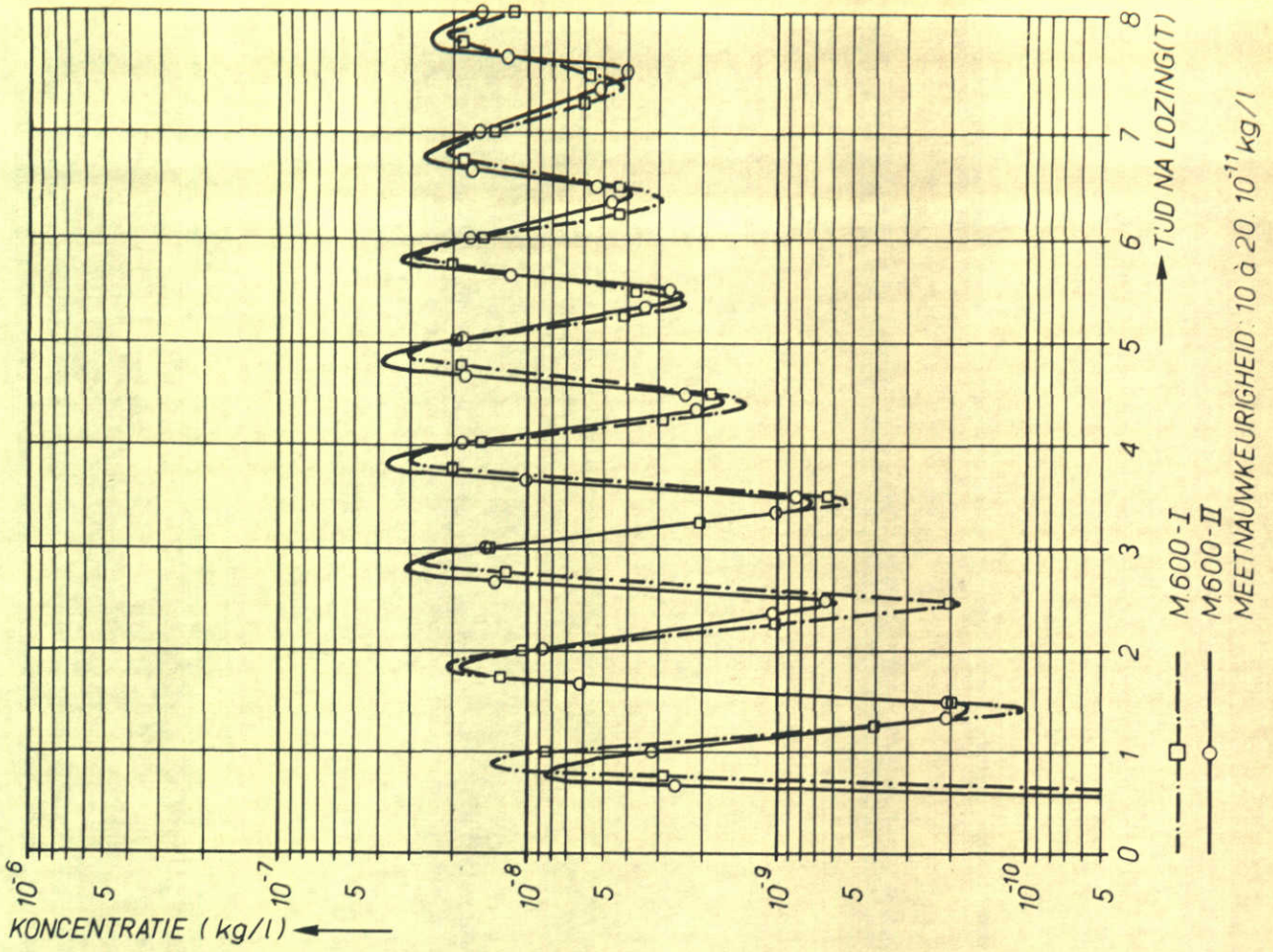


KONCENTRATIEVERLOOP ALS FUNKTIE VAN DE TJD
 PROEVEN M.600-I EN M.600-II

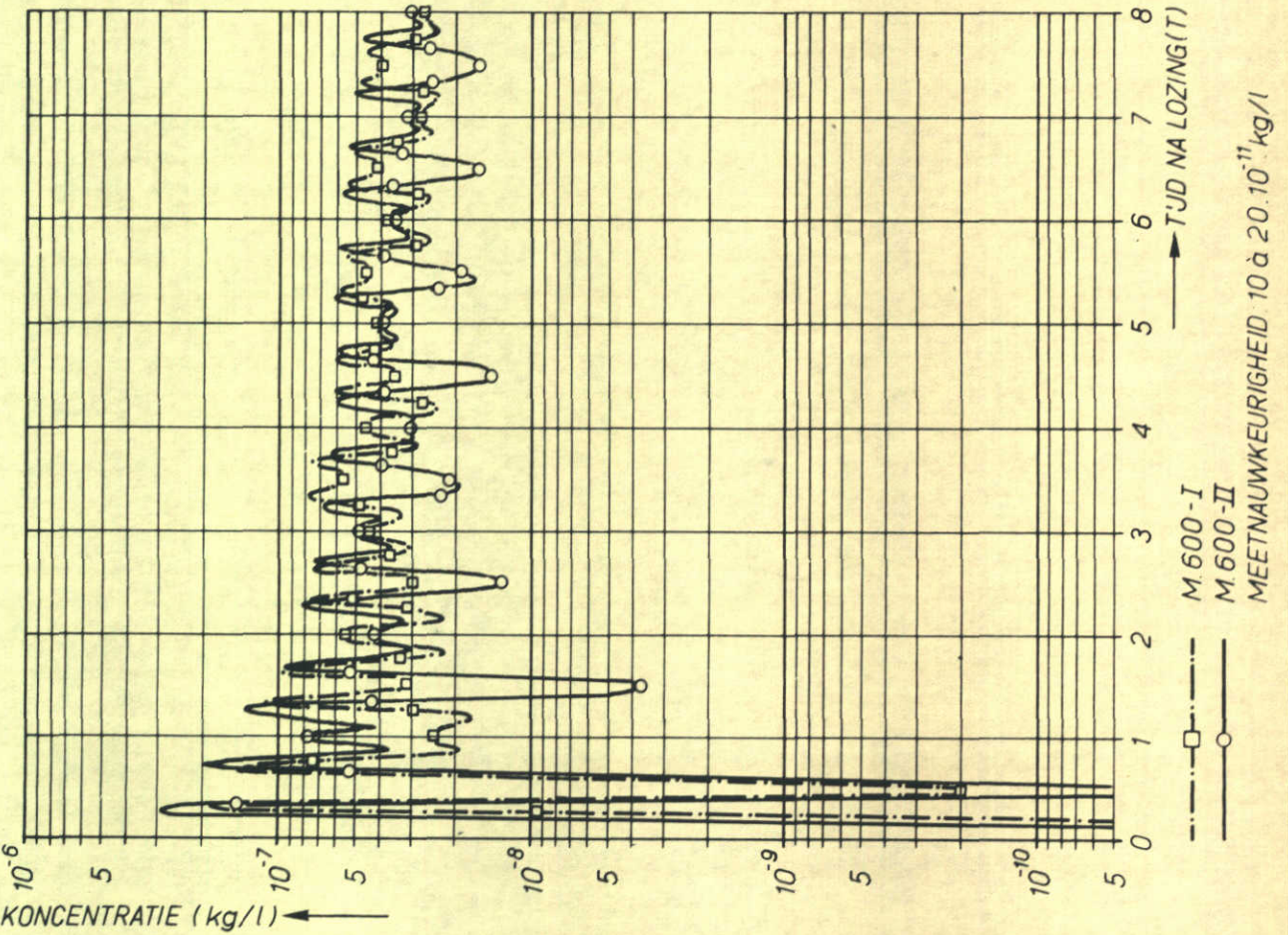
JZ.

A4

PUNT 6



PUNT 5

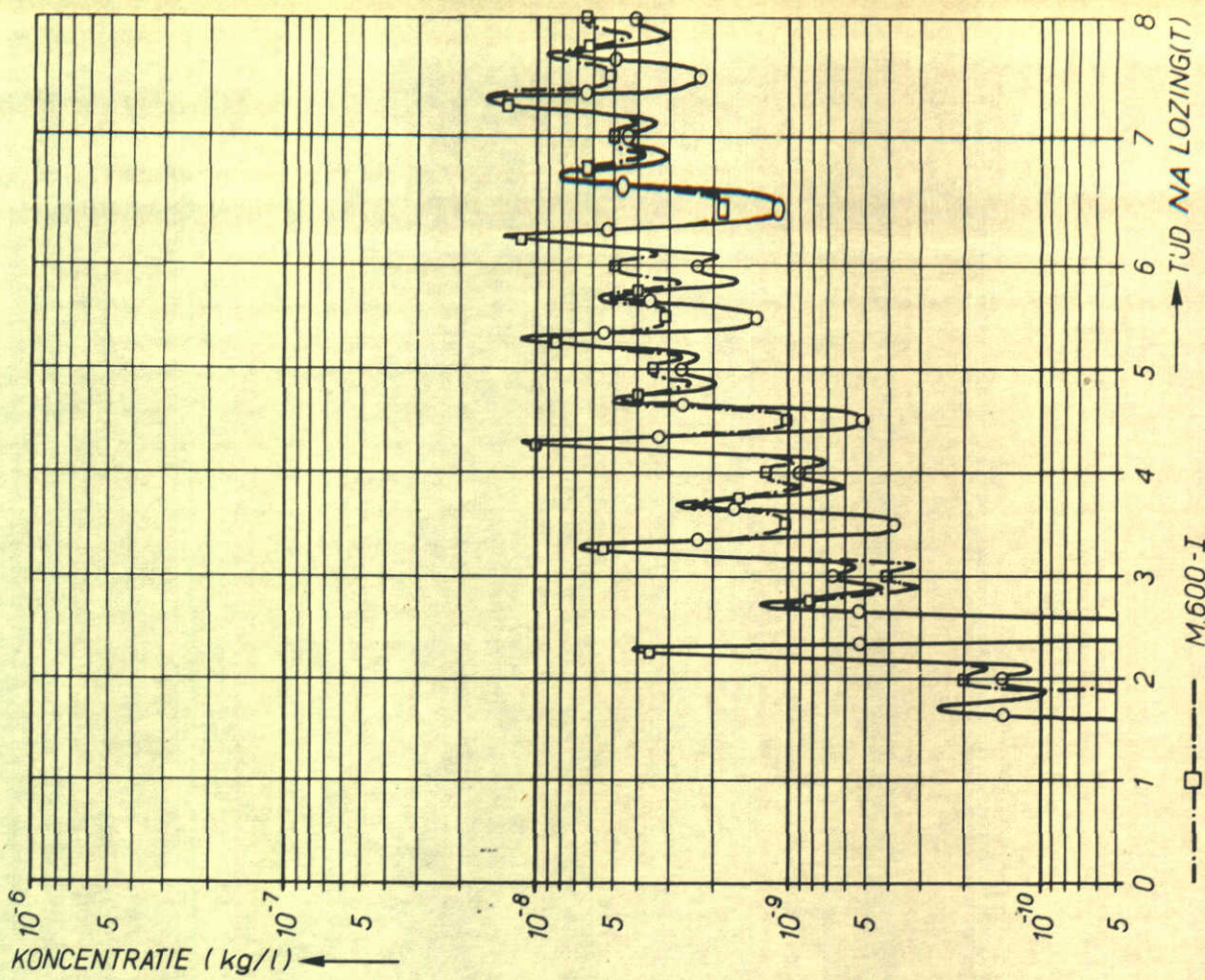


KONCENTRATIEVERLOOP ALS FUNKTIE VAN DE TJD
 PROEVEN M.600-I EN M.600-II

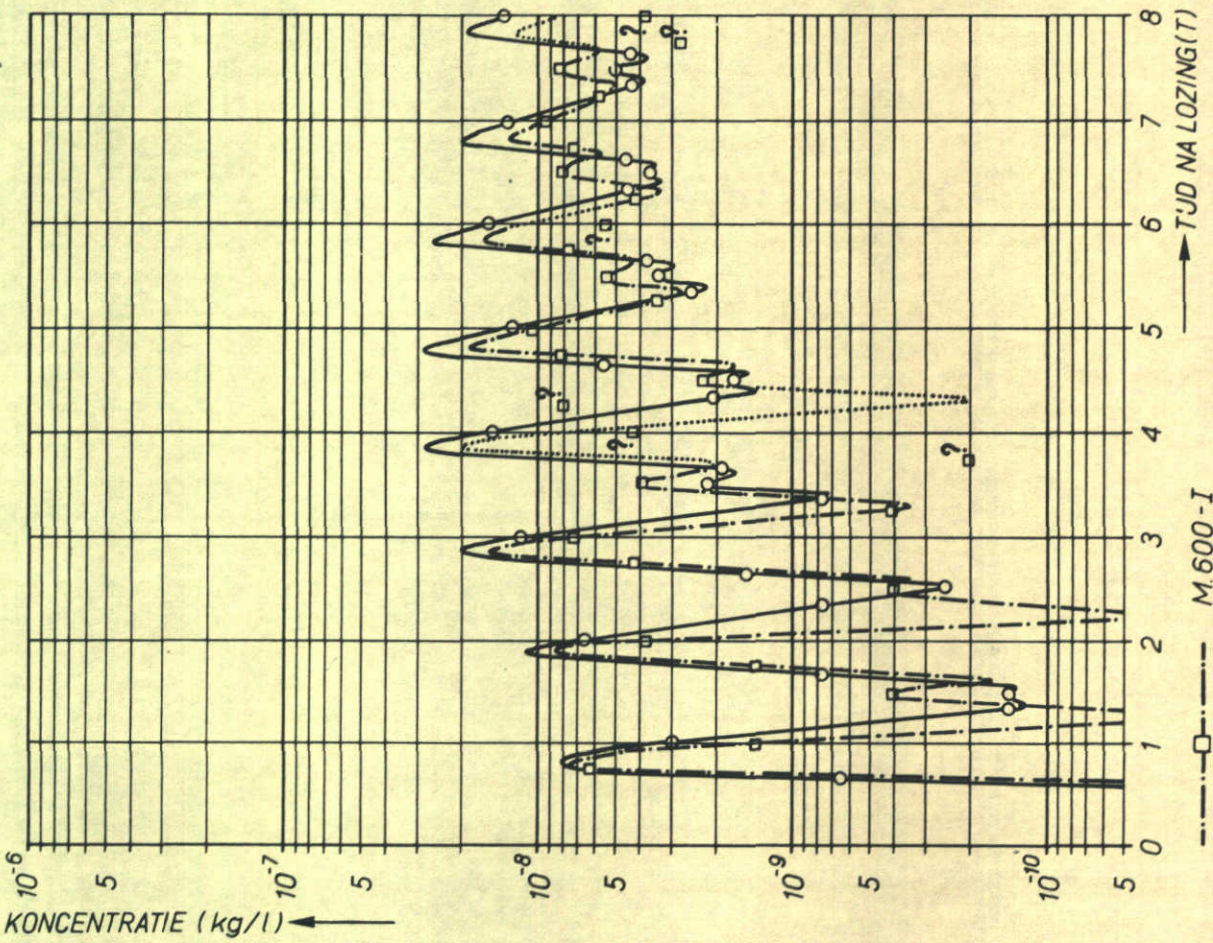
JZ

A4

PUNT 8



PUNT 7

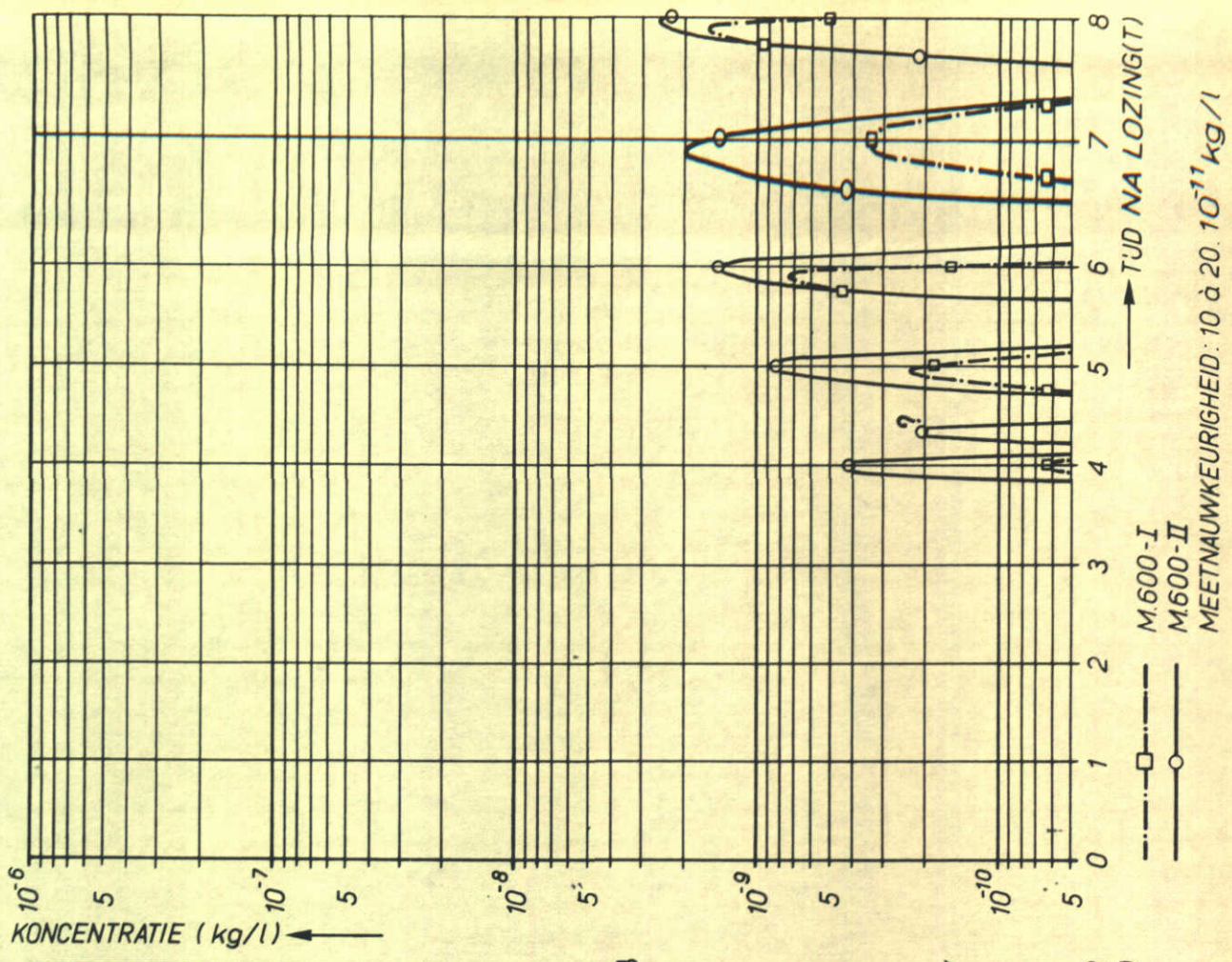


KONCENTRATIEVERLOOP ALS FUNKTIE VAN DE TJD
PROEVEN M.600-I EN M.600-II

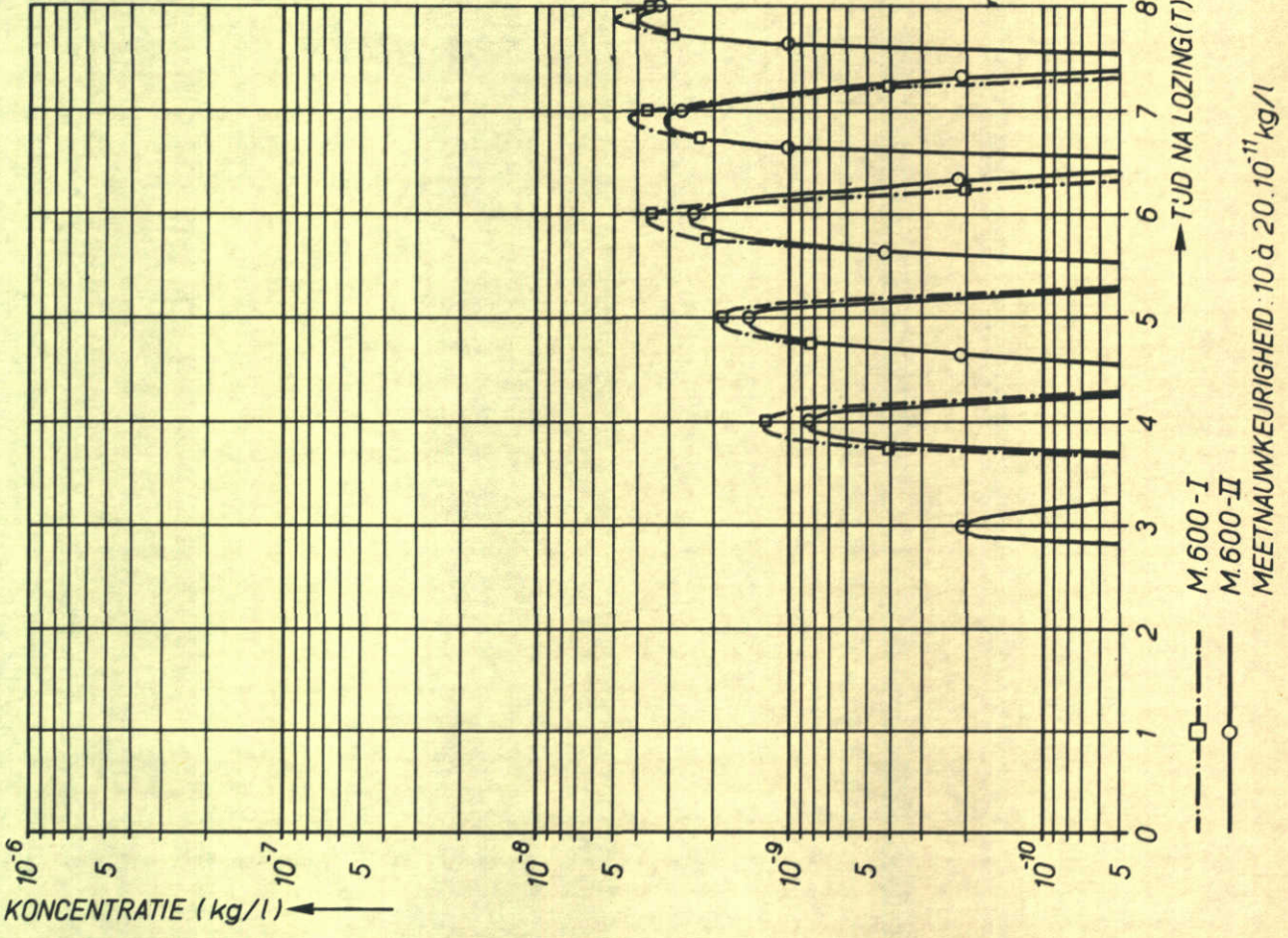
j.z.

A4

PUNT 10



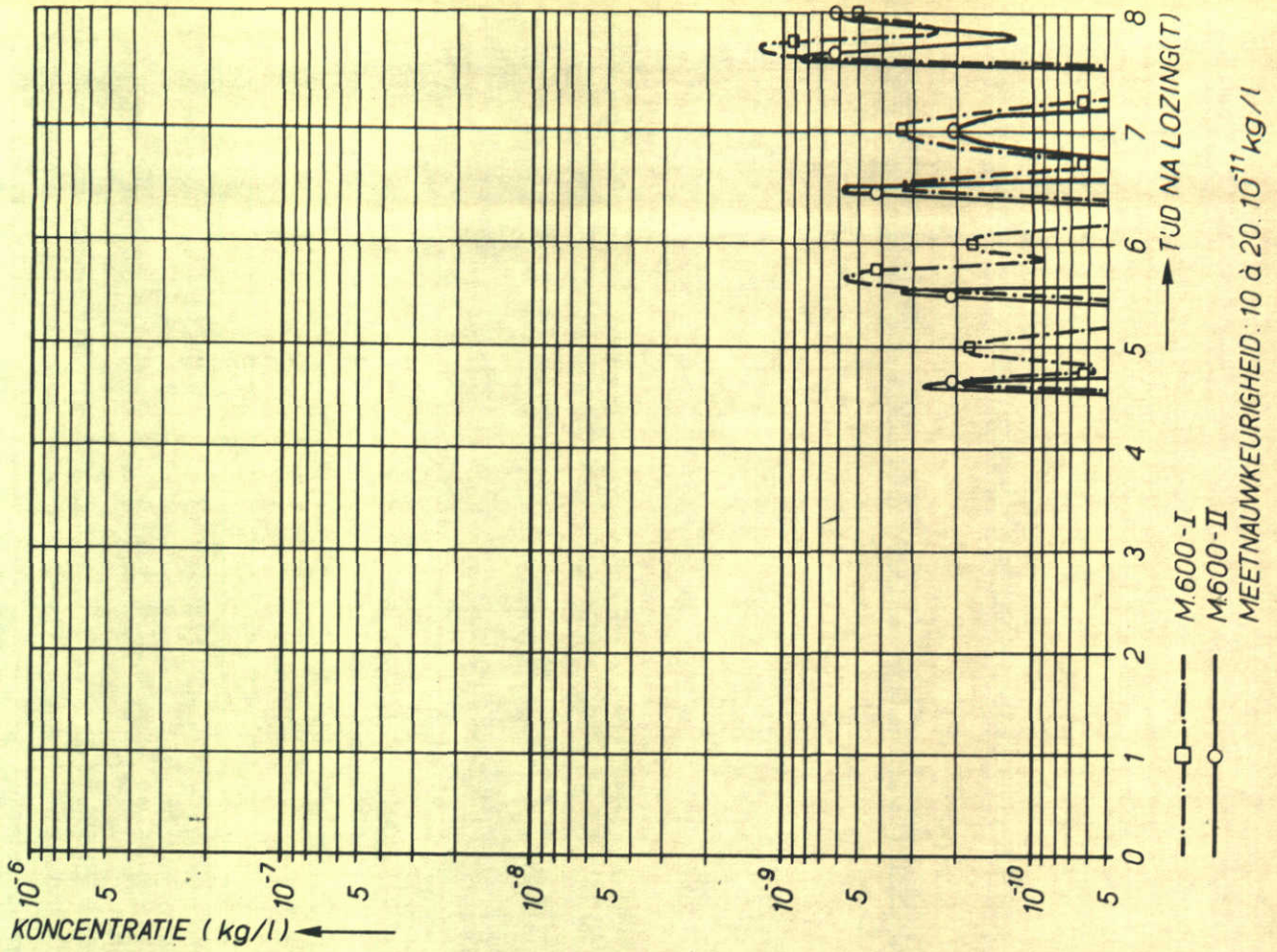
PUNT 9



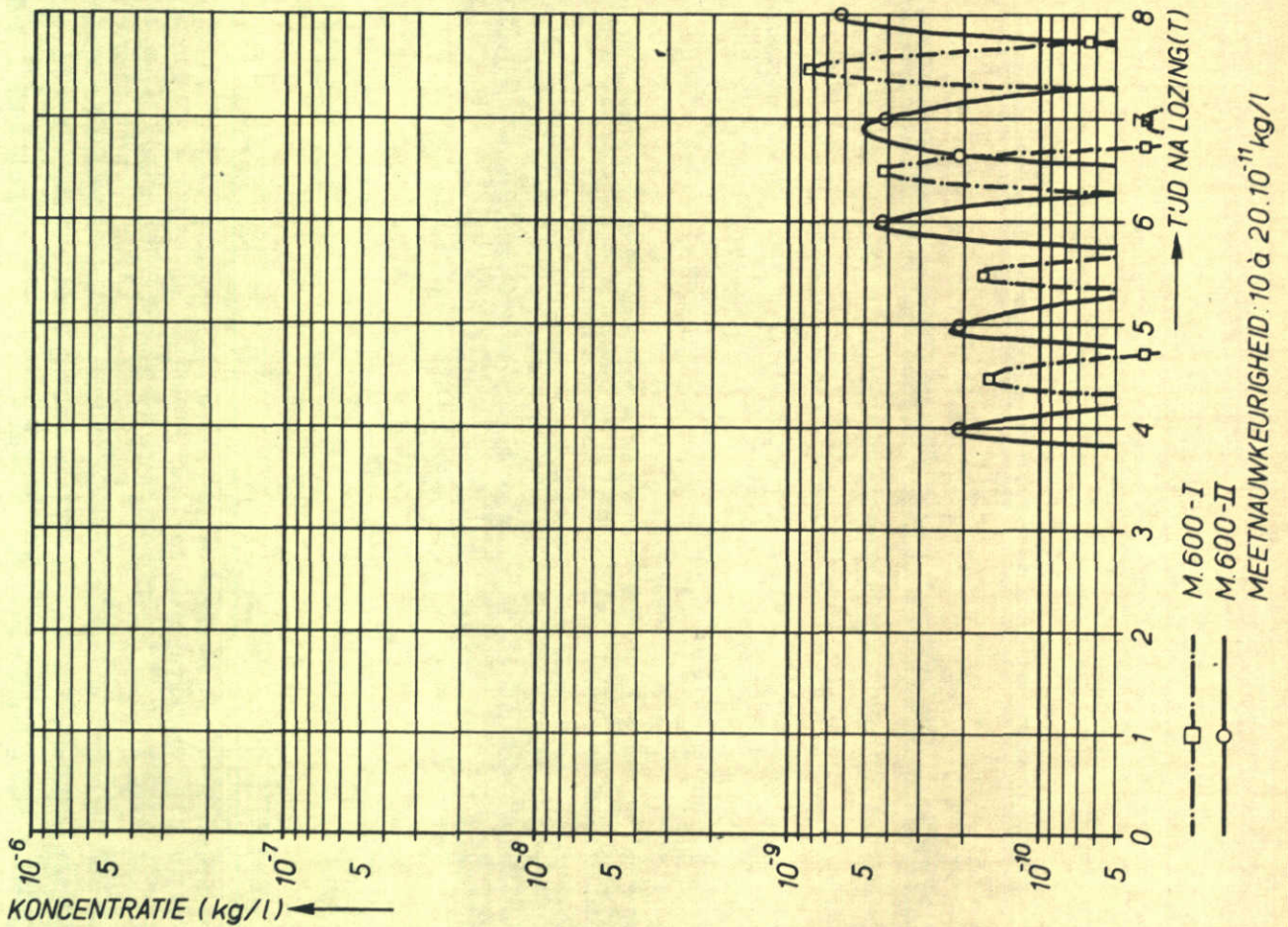
KONCENTRATIEVERLOOP ALS FUNKTIE VAN DE TJD
PROEVEN M.600-I EN M.600-II

j.z.
A4

PUNT 12



PUNT 11

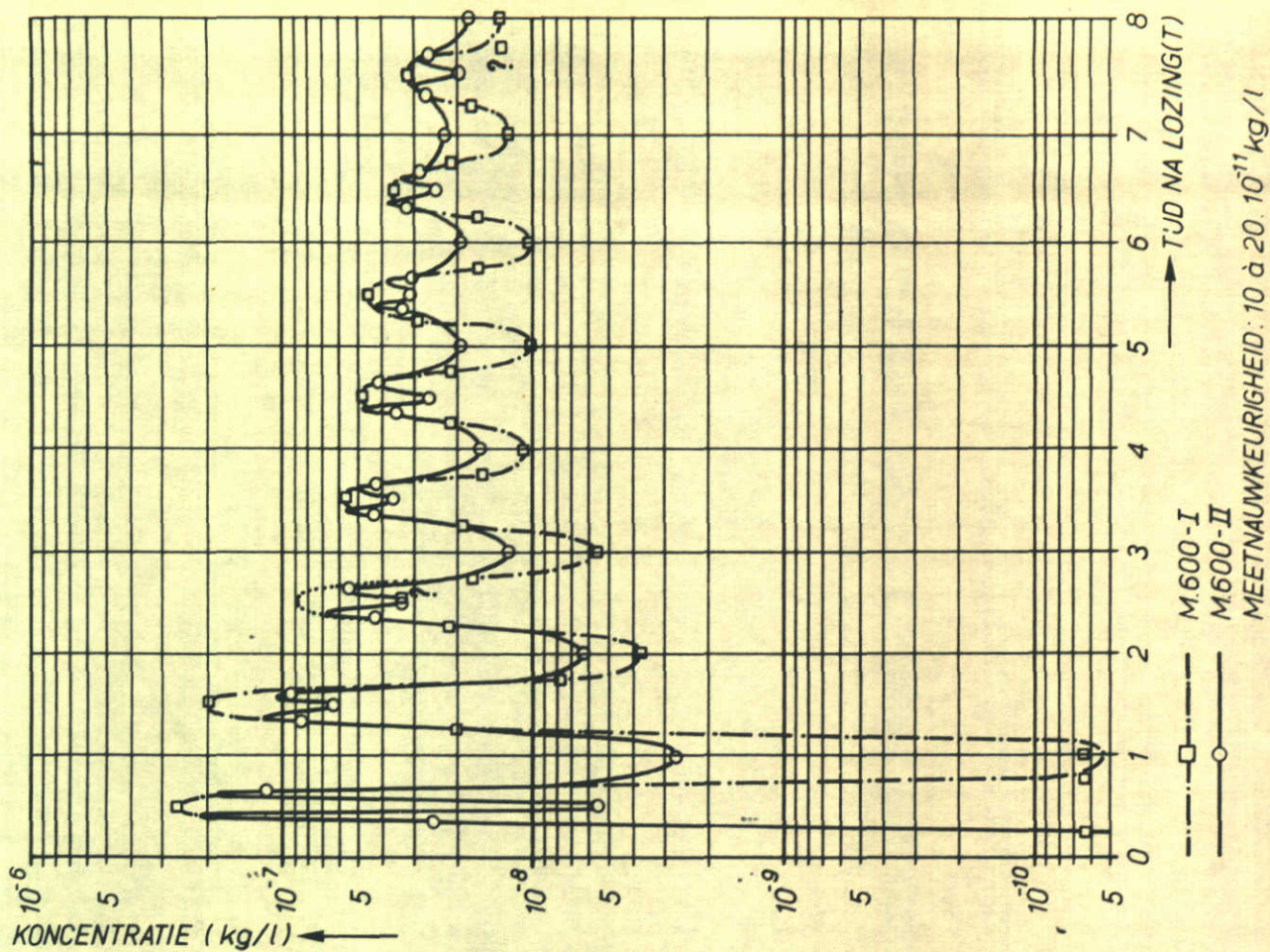


KONCENTRATIEVERLOOP ALS FUNKTIE VAN DE TJD
 PROEVEN M.600-I EN M.600-II

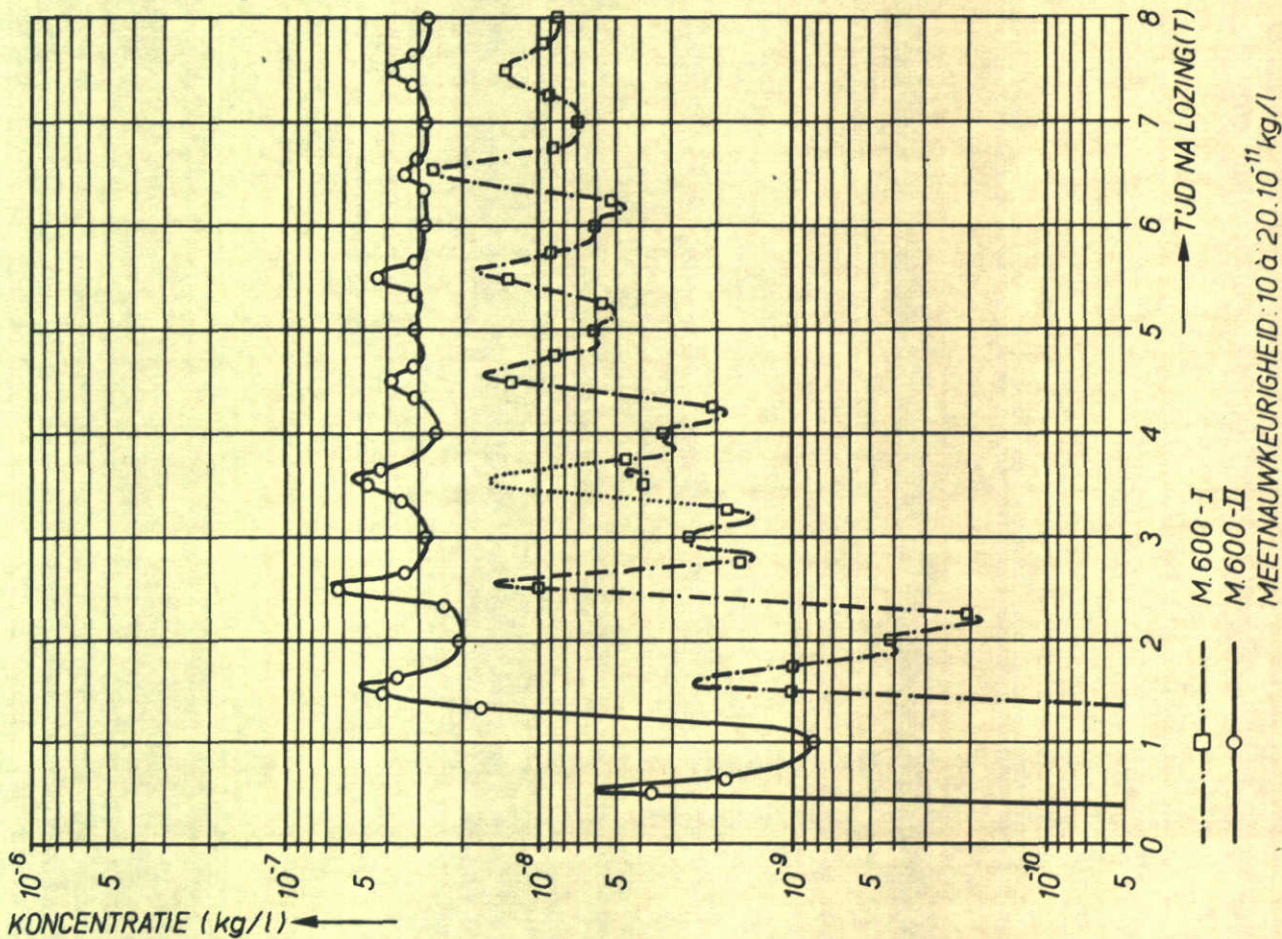
j.z.

A4

PUNT 15



PUNT 13

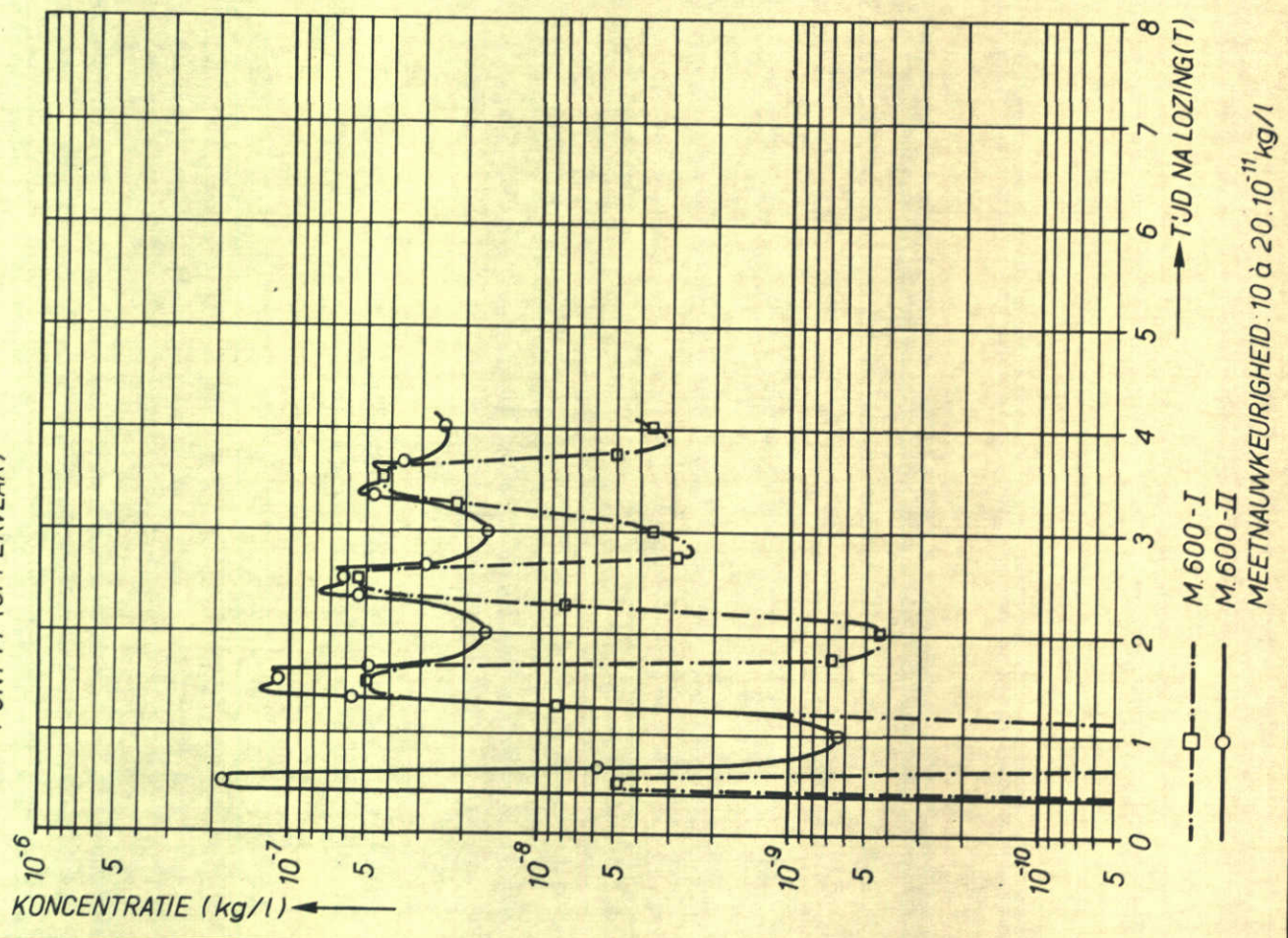


KONCENTRATIEVERLOOP ALS FUNKTIE VAN DE TJD
 PROEVEN M.600-I EN M.600-II

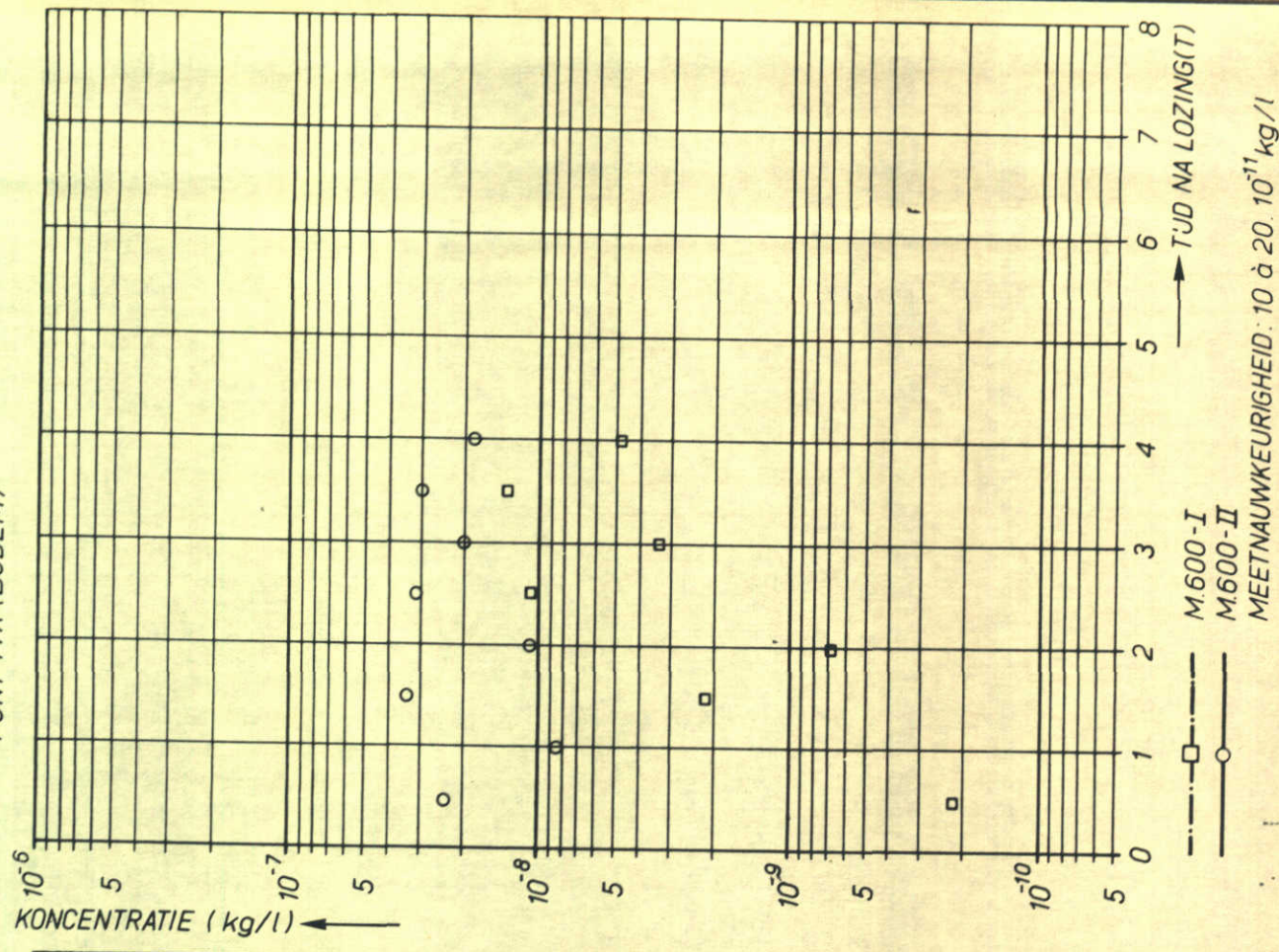
j.z.

A4

PUNT 14 (OPPERVLAK)

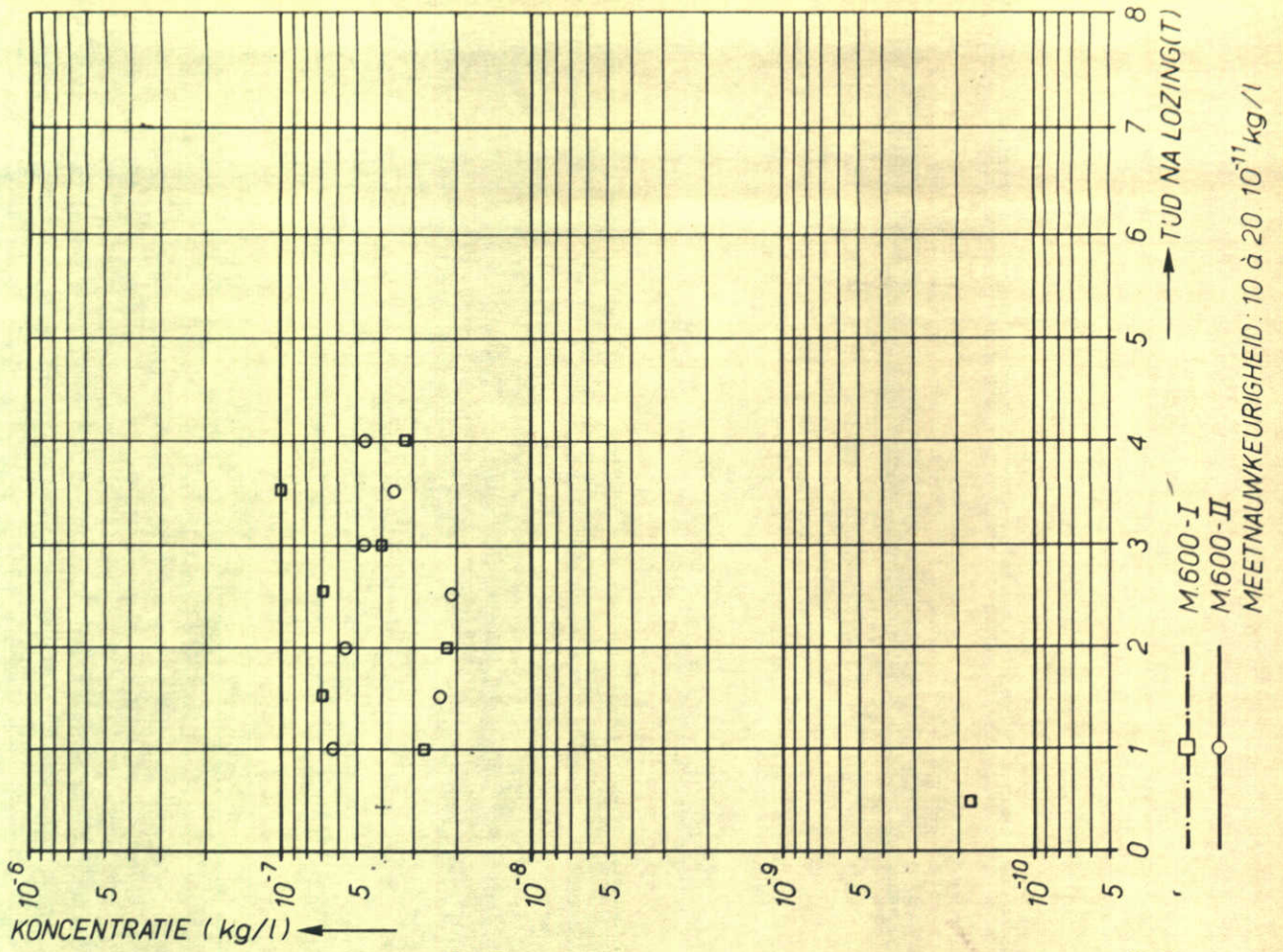


PUNT 14 A (BODEM)

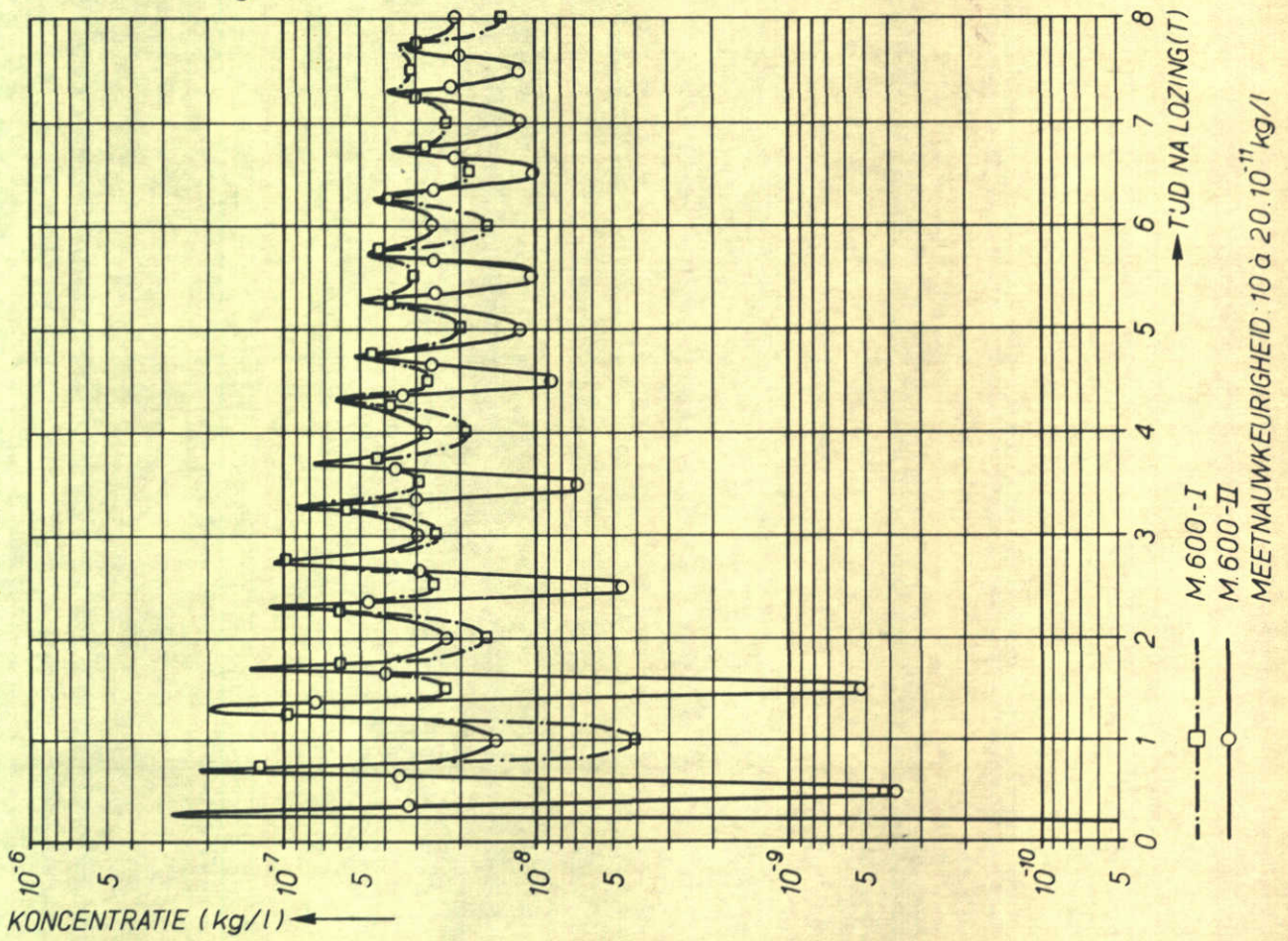


KONCENTRATIEVERLOOP ALS FUNKTIE VAN DE TJD
PROEVEN M.600-I EN M.600-II

PUNT 16 A (BODEM)



PUNT 16 (OPPERVLAK)

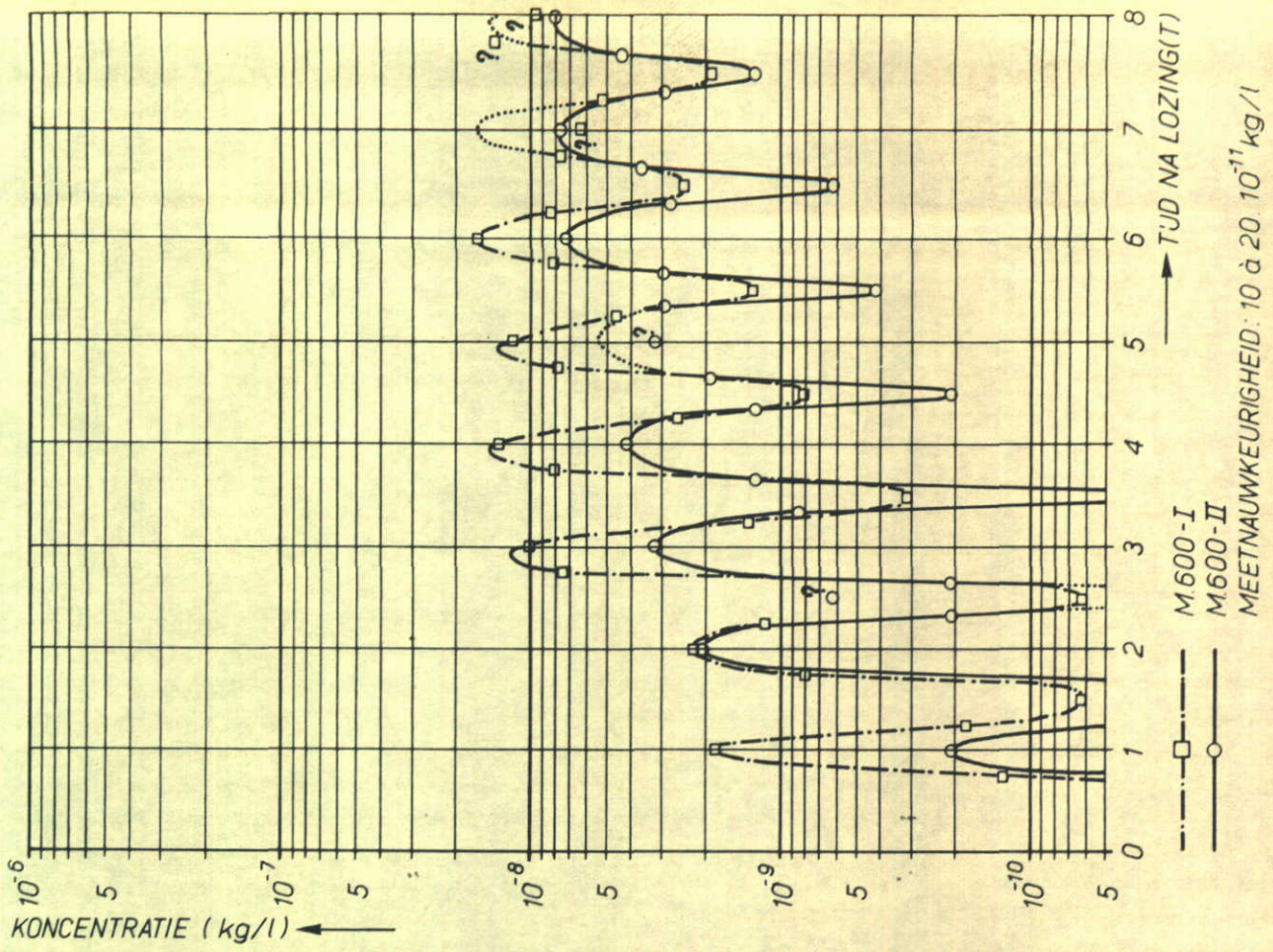


KONCENTRATIEVERLOOP ALS FUNKTIE VAN DE TJD
PROEVEN M.600-I EN M.600-II

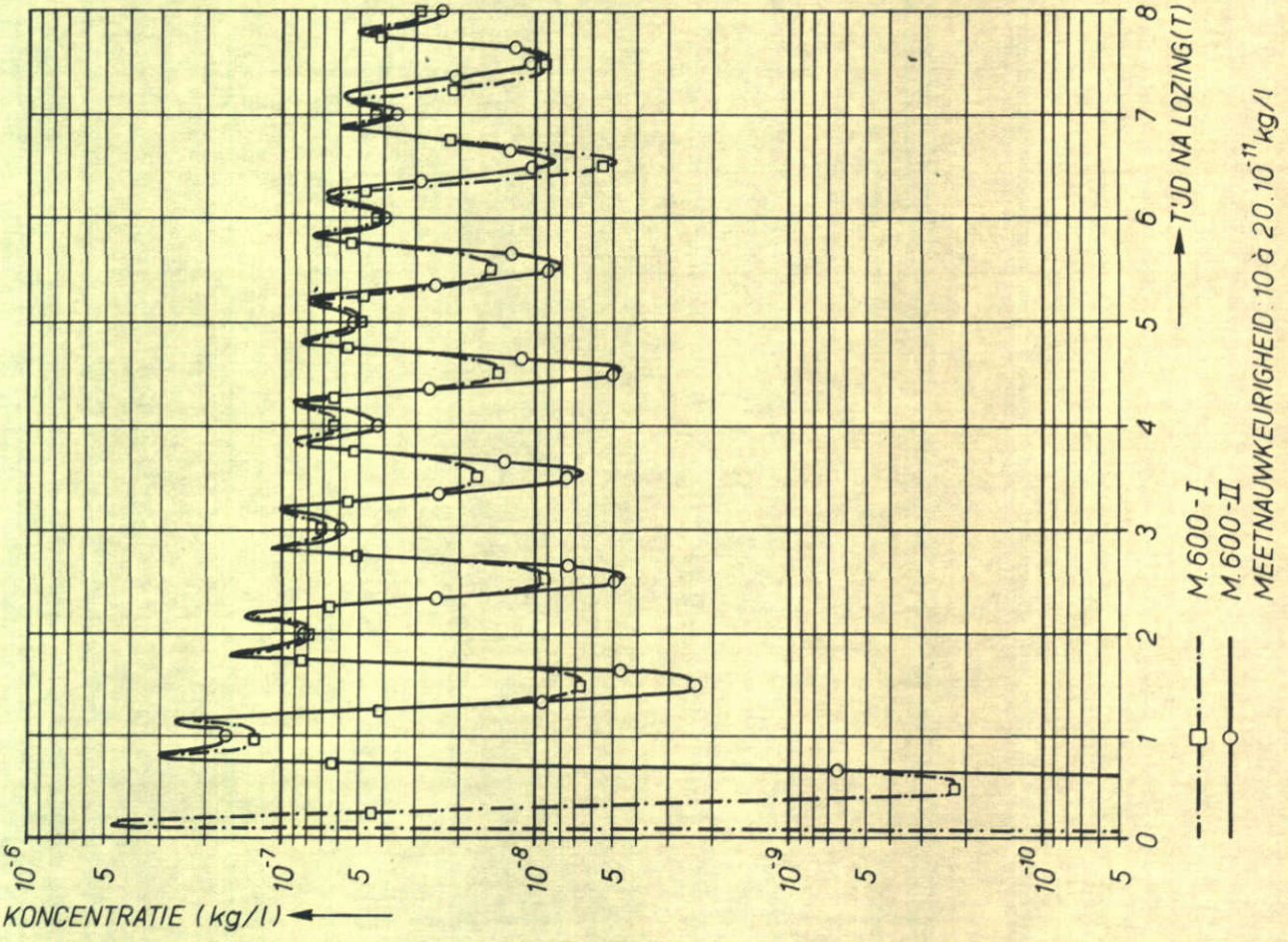
j.z.

A4

PUNT 19



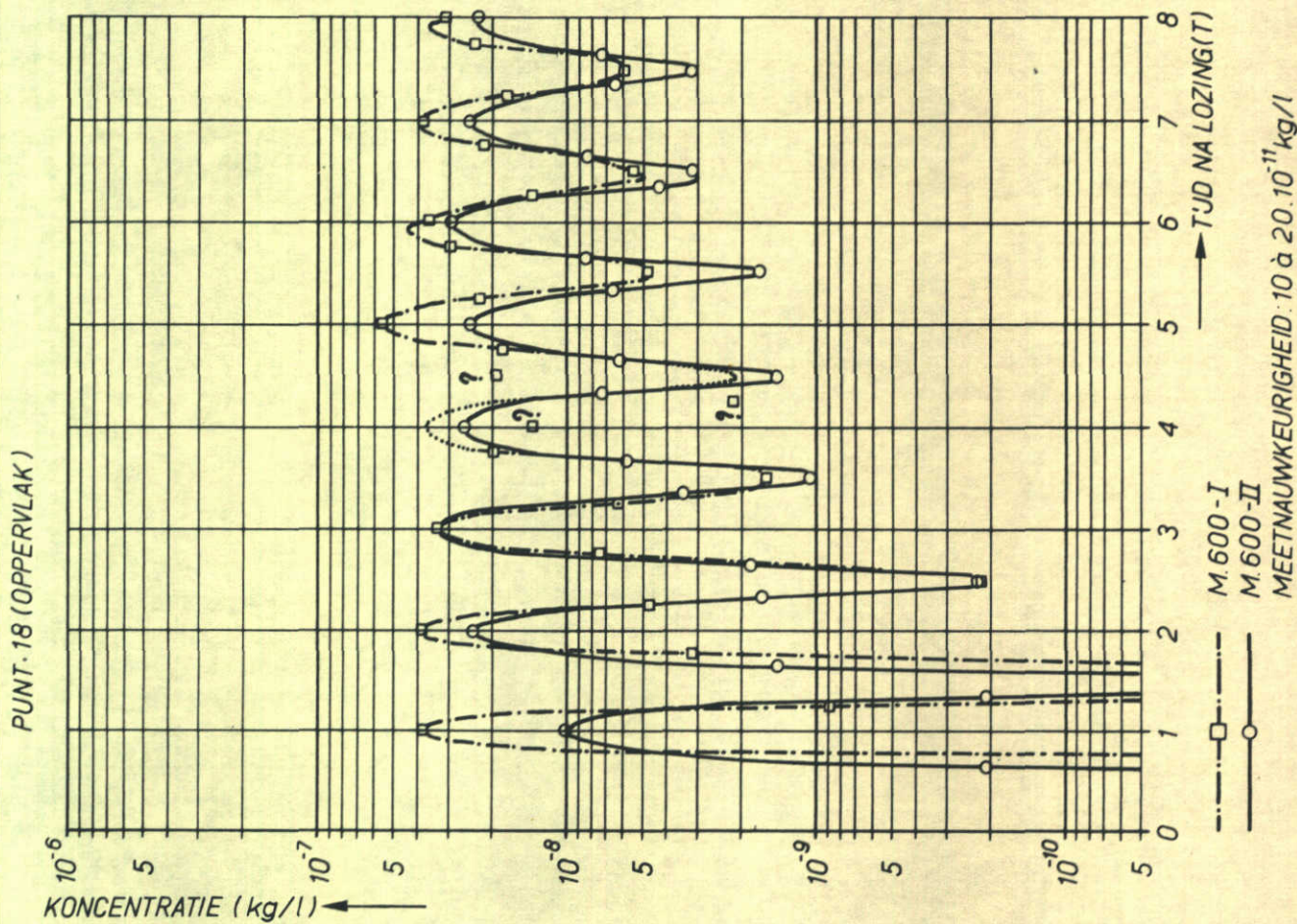
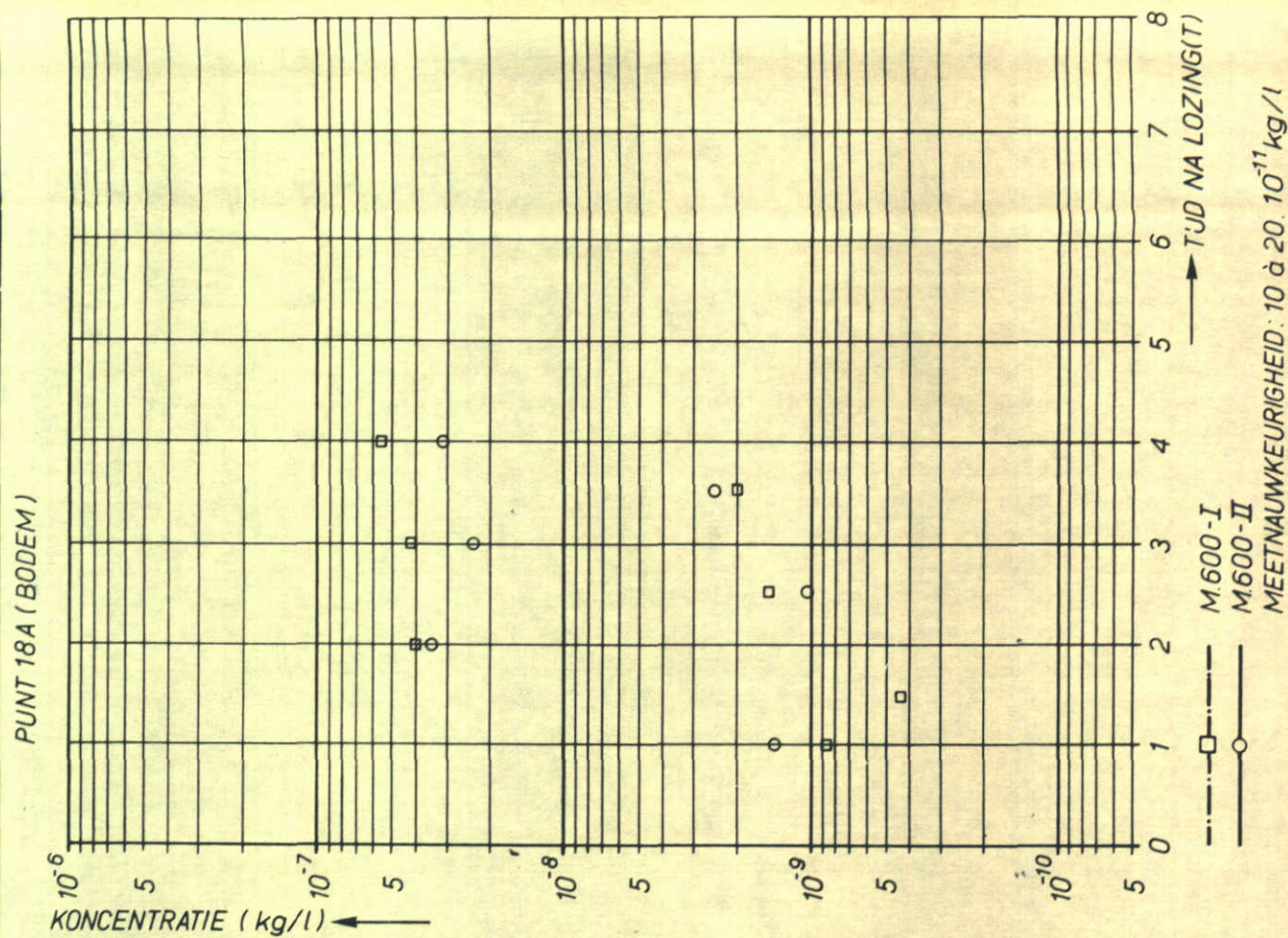
PUNT 17



KONCENTRATIEVERLOOP ALS FUNKTIE VAN DE TJD
 PROEVEN M.600-I EN M.600-II

j.z.

A4

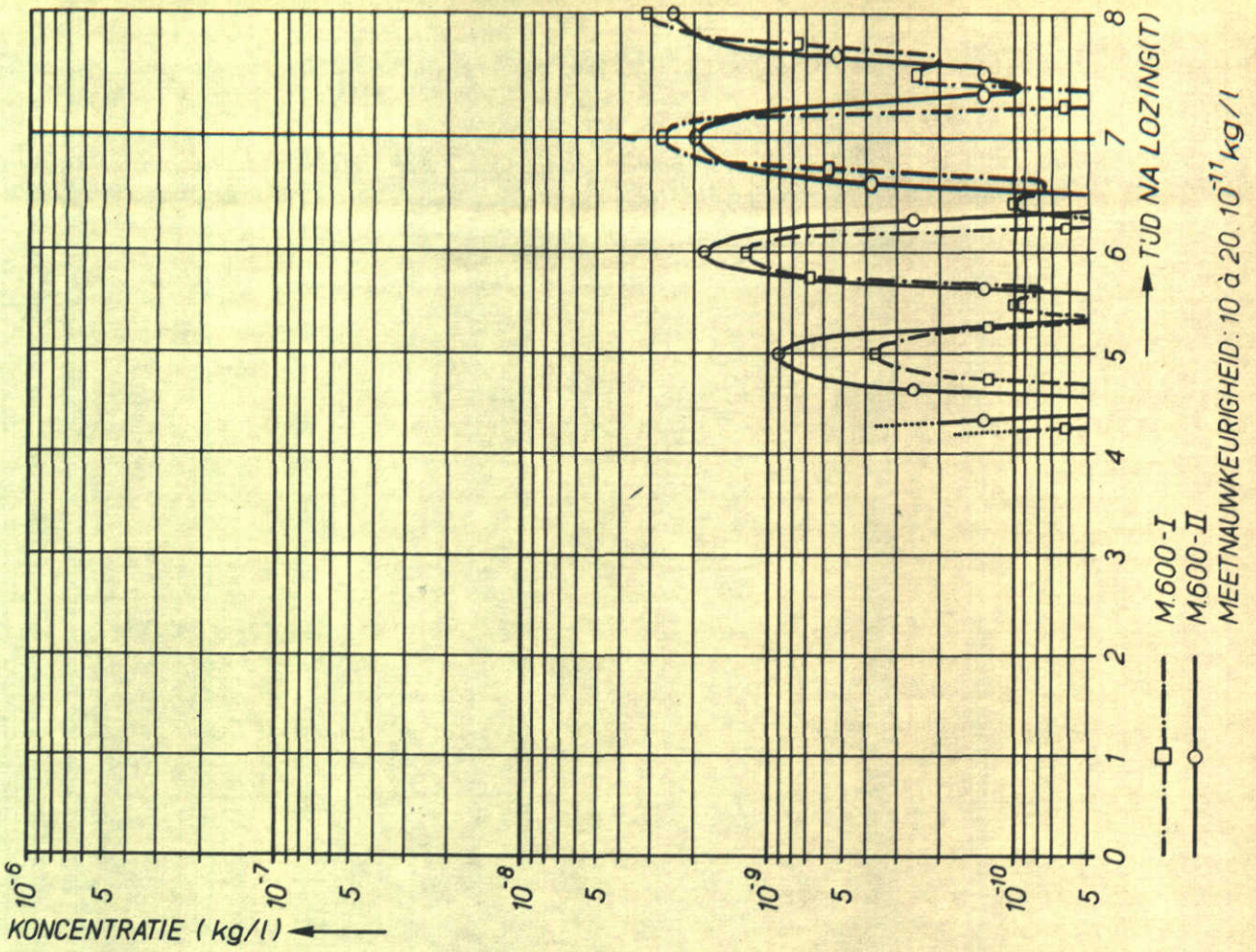


KONCENTRATIEVERLOOP ALS FUNKTIE VAN DE TJD
PROEVEN M.600-I EN M.600-II

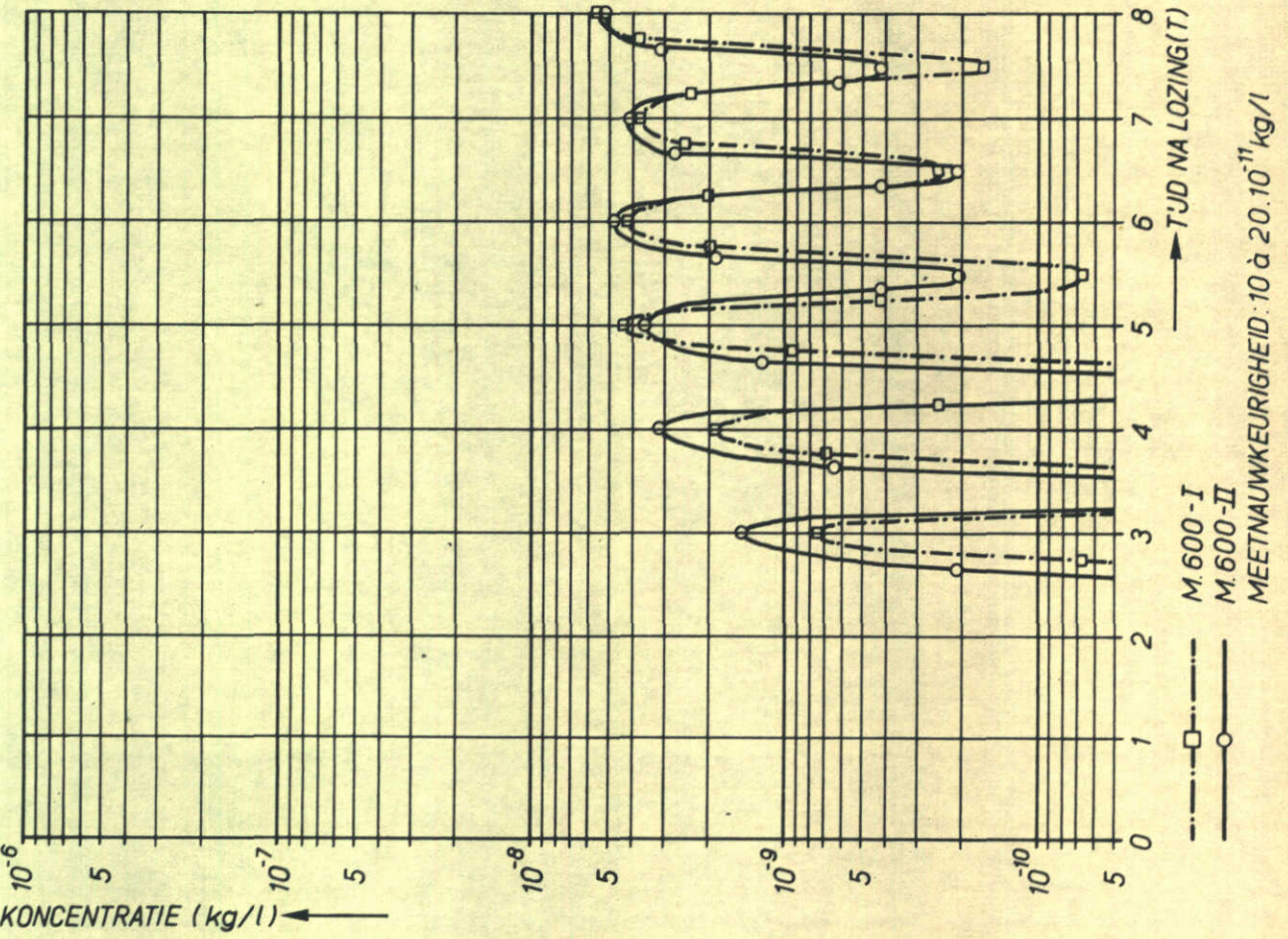
j.z.

A4

PUNT 21



PUNT 20

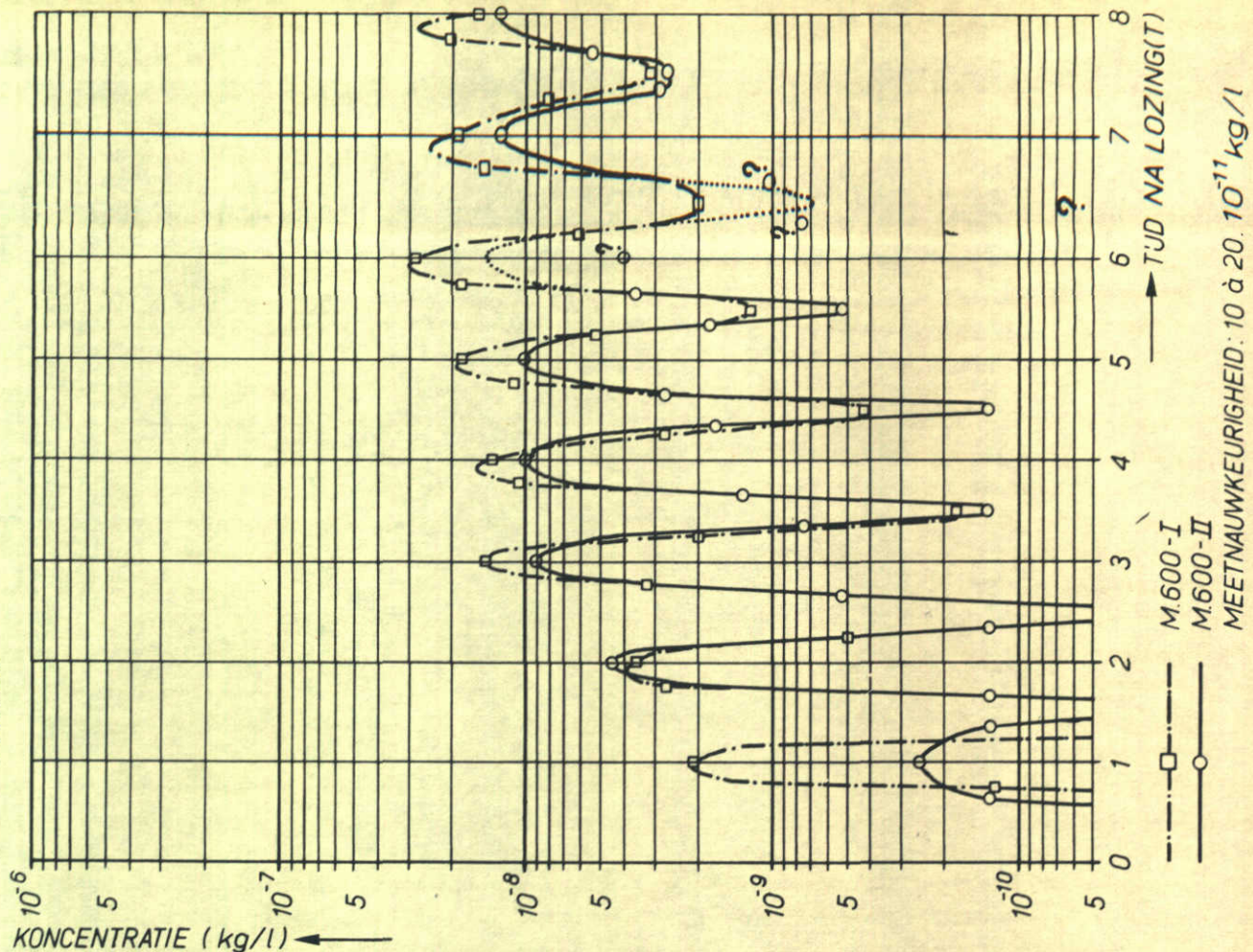


KONCENTRATIEVERLOOP ALS FUNKTIE VAN DE TJD
PROEVEN M.600-I EN M.600-II

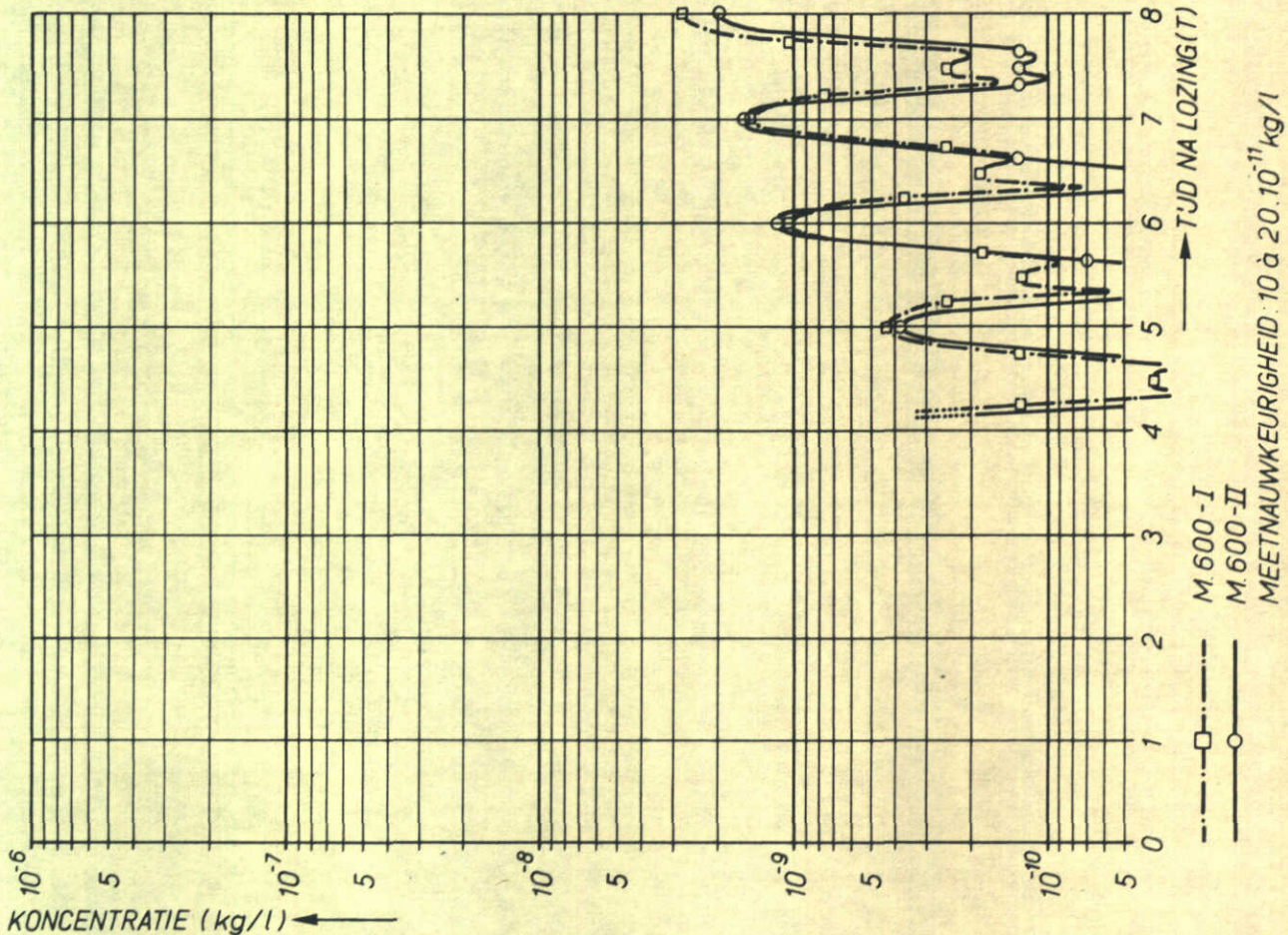
j.z.

A4

PUNT 23



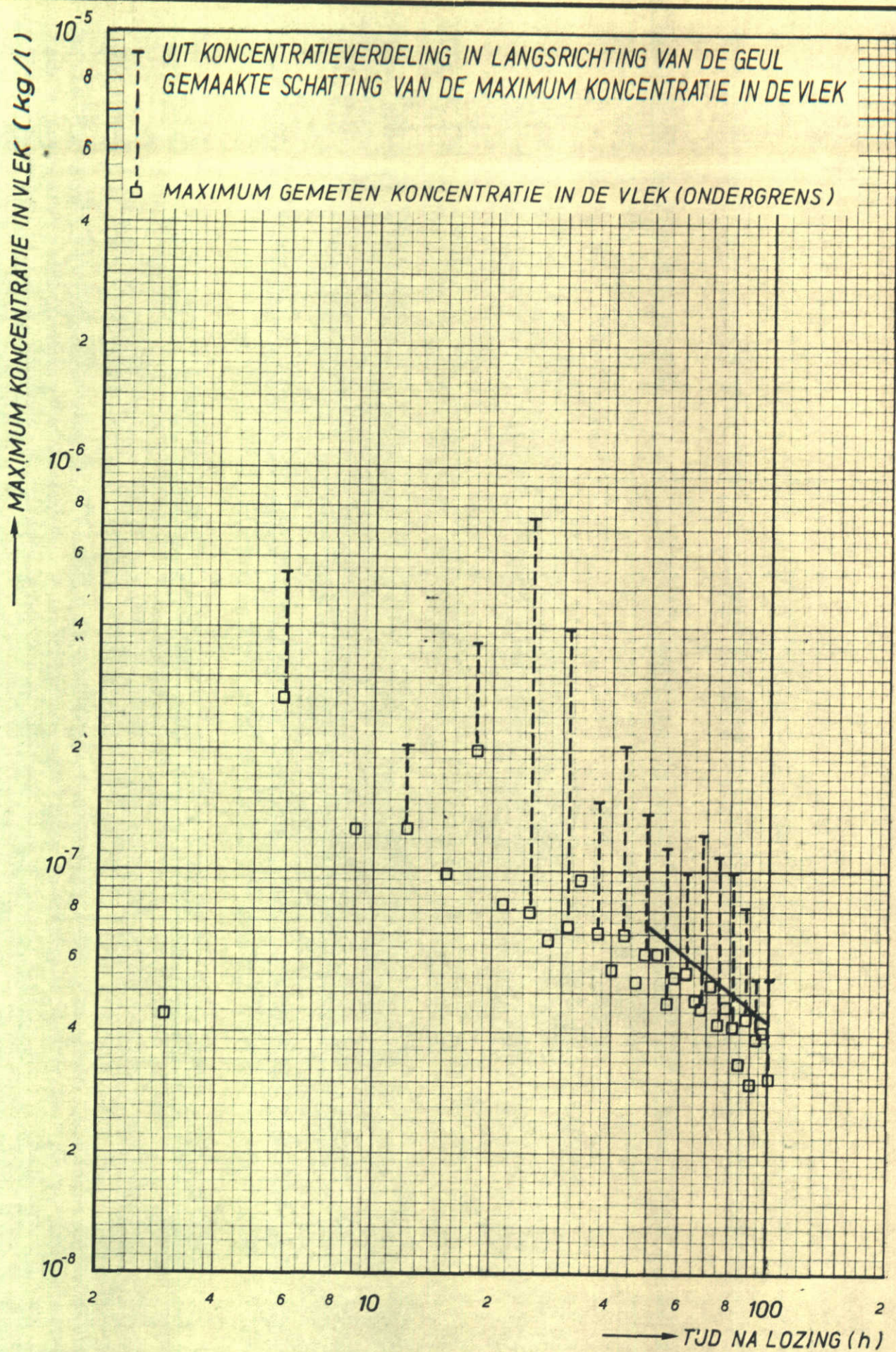
PUNT 22



KONCENTRATIEVERLOOP ALS FUNKTIE VAN DE TJD
PROEVEN M.600-I EN M.600-II

j.z.

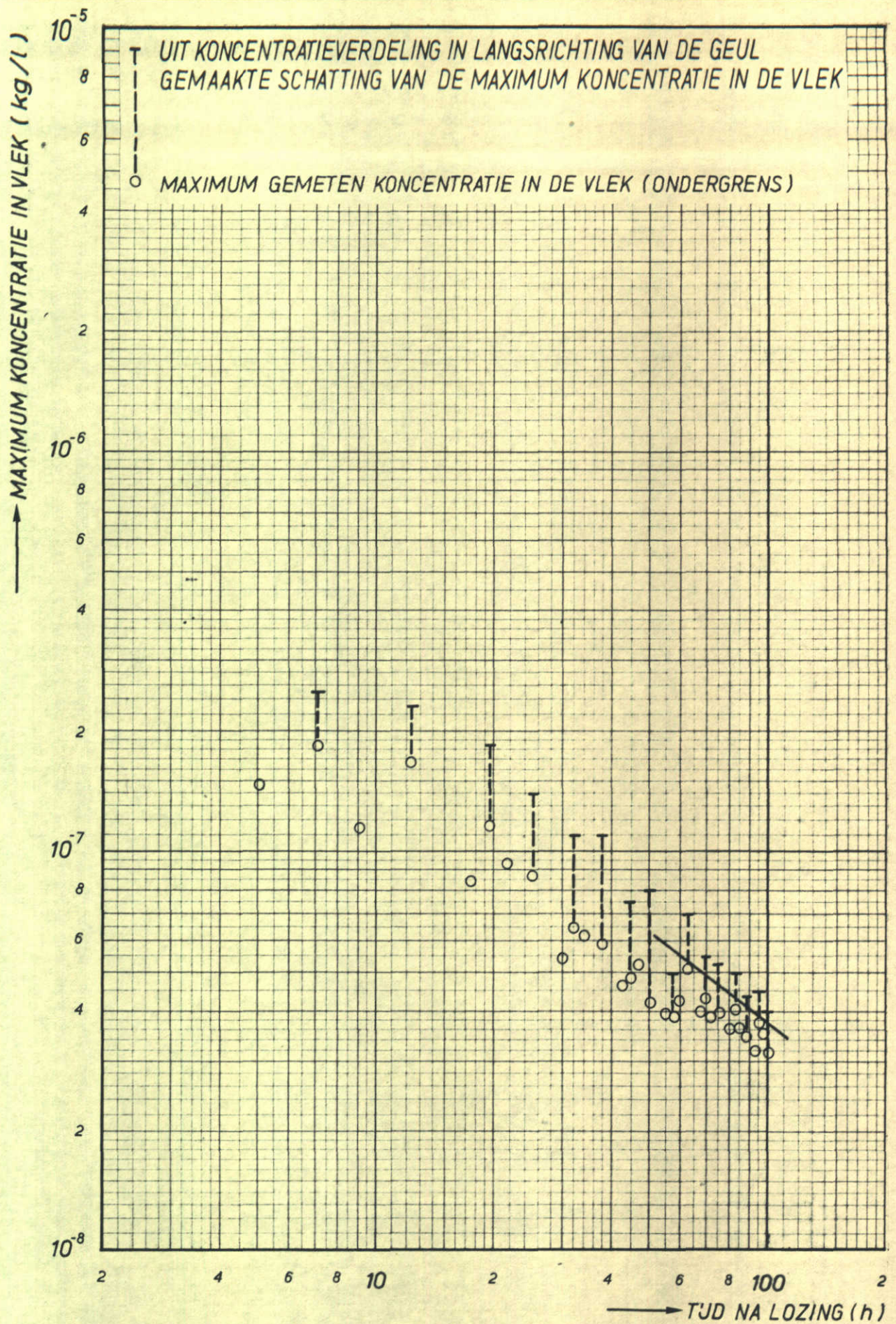
A4



MAXIMUM KONCENTRATIE
 ALS FUNKTIE VAN DE TJD - PROEF M.600-I

j.z.

A4

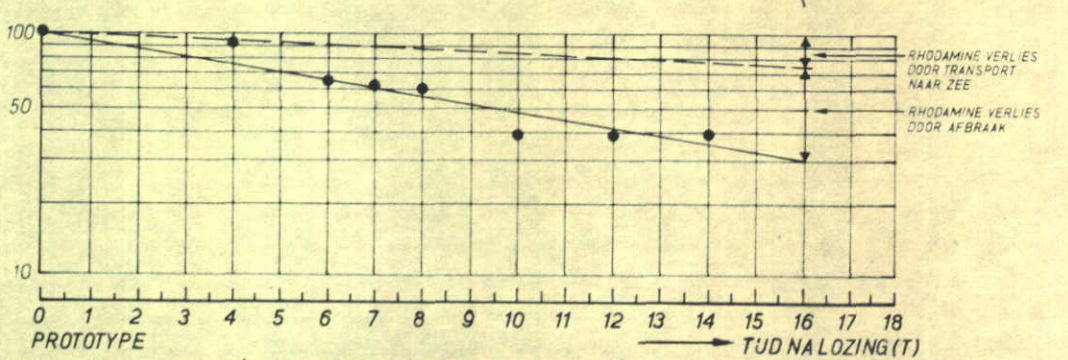
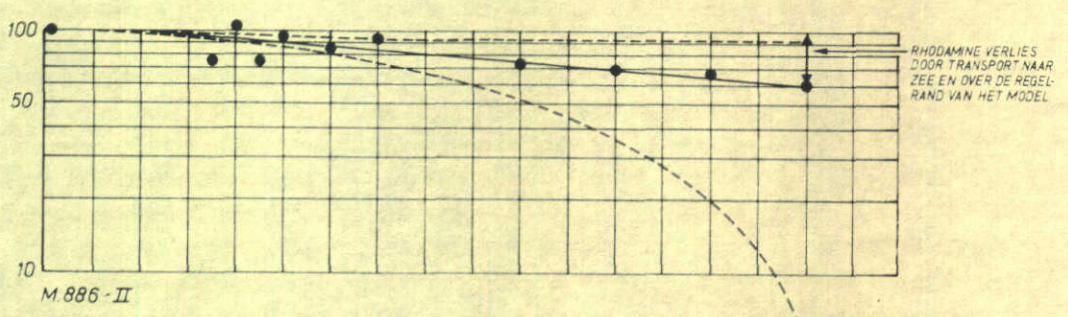
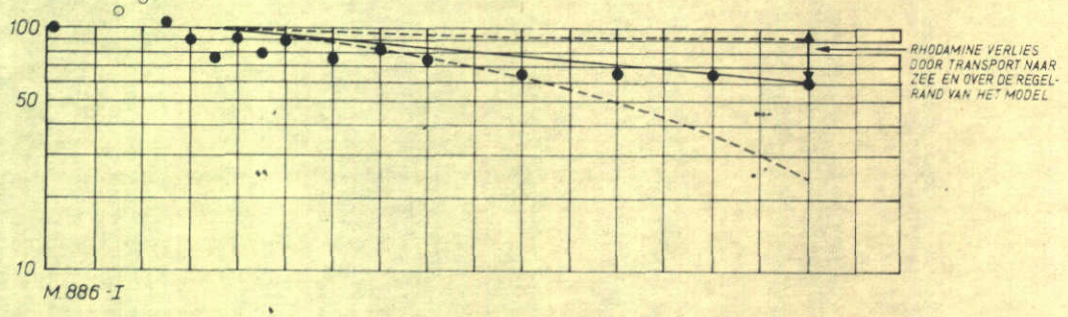
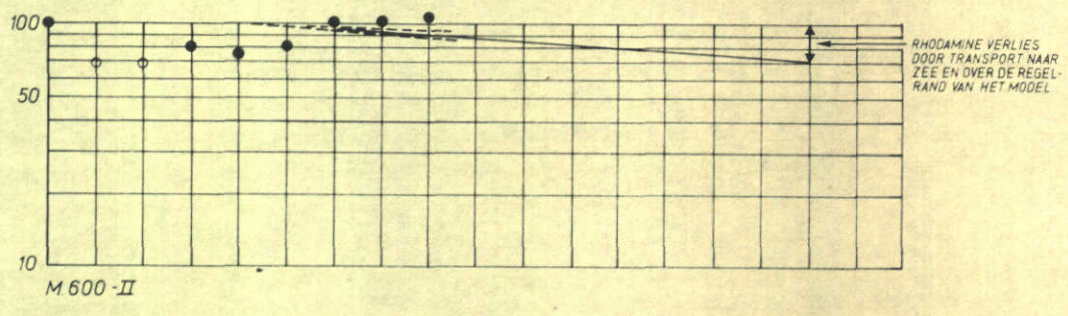
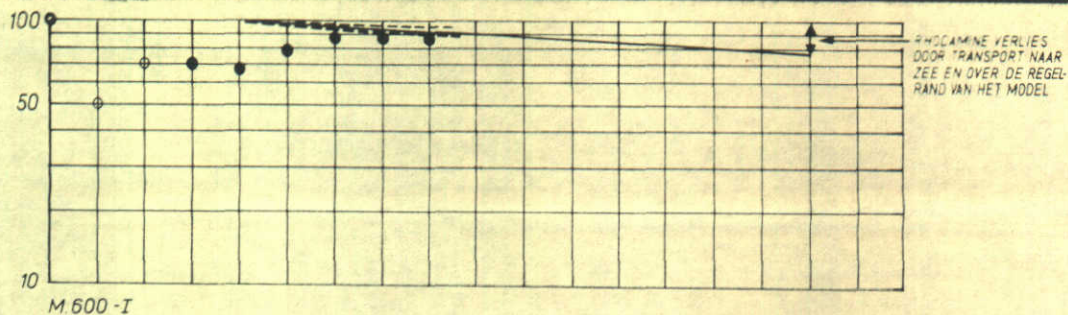


MAXIMUM KONCENTRATIE
 ALS FUNKTIE VAN DE TJD - PROEF M. 600-II

j.z.

A4

TERUGGEVONDEN MASSA %

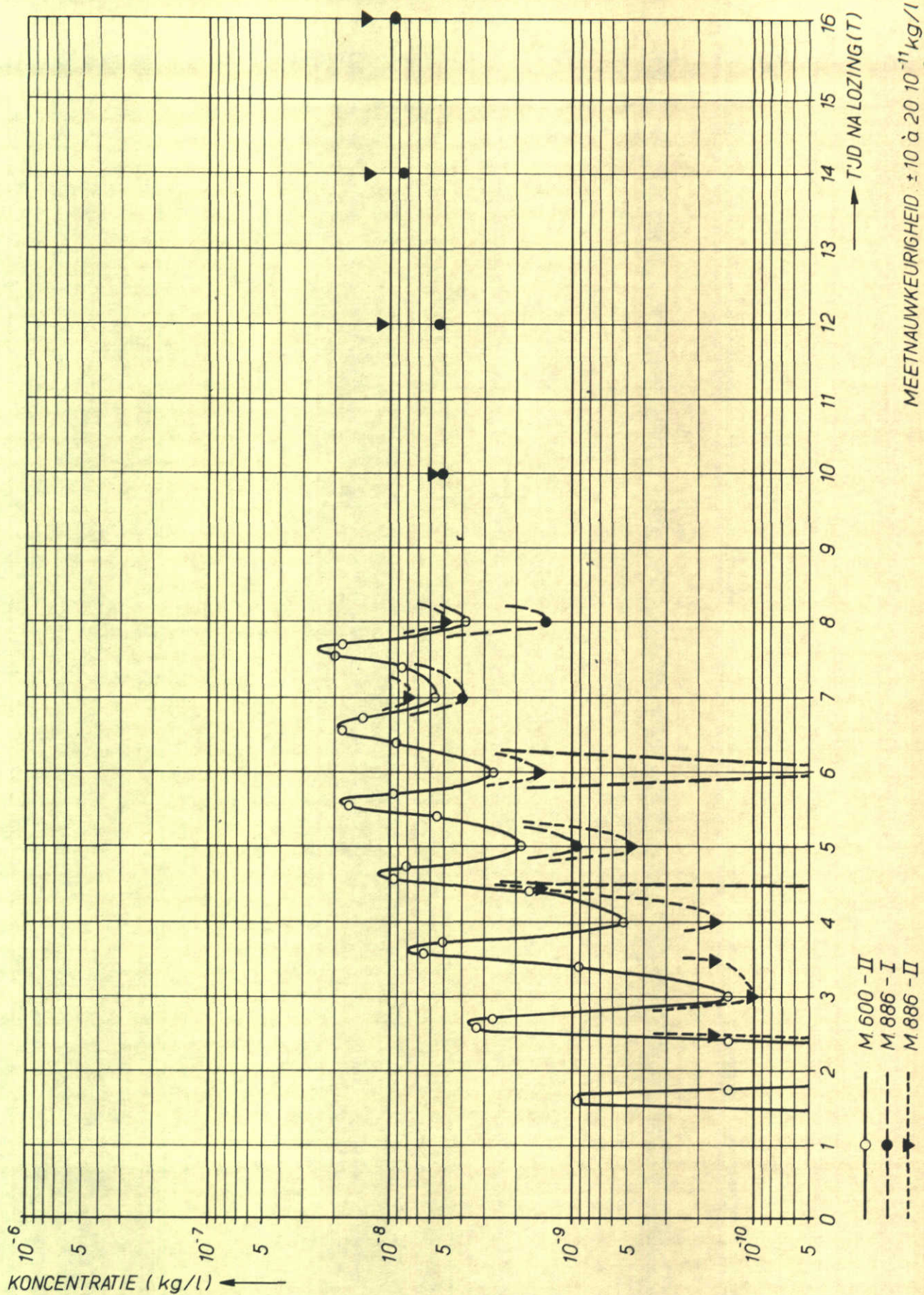


- MINDER BETROUWBARE WAARDEN
- REDELIJK BETROUWBARE WAARDEN
- GELOOSDE MASSA VERMINDERD MET DE BUITEN HET MEETGEBIED GETRANSPORT-TEERDE MASSA OP DE L.W.-KENTERINGEN WAARBUJ DE UITGESTROOMDE MASSA BIJ H.W.-KENTERING WEER VOLLEDIG NAAR BINNEN STROOMT (BOVENGRENS) RESP. VOLLEDIG VERLOREN GAAT OP ZEE EN NIET WEER NAAR BINNEN STROOMT (ONDERGRENS)

MASSA KONTROLES

j.z.

A4

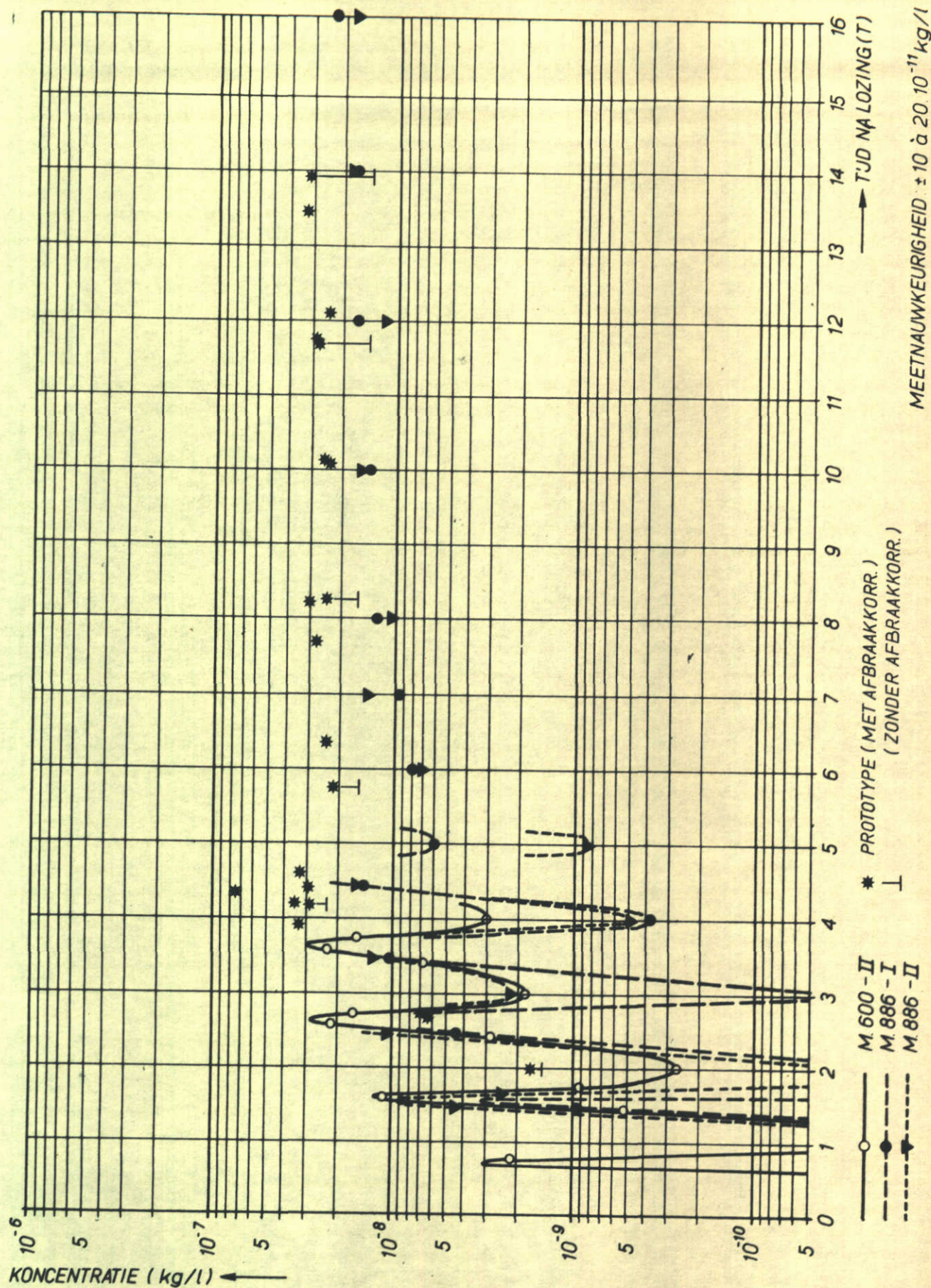


KONCENTRATIEVERLOOP ALS FUNKTIE VAN DE TJD
 PROEVEN M.600-II, M.886-I EN M.886-II

PUNT 1

j.z.

A4



KONCENTRATIEVERLOOP ALS FUNKTIE VAN DE TJD
 PROEVEN M.600-II, M.886-I EN M.886-II
 EN PROTOTYPEPROEF

PUNT 2

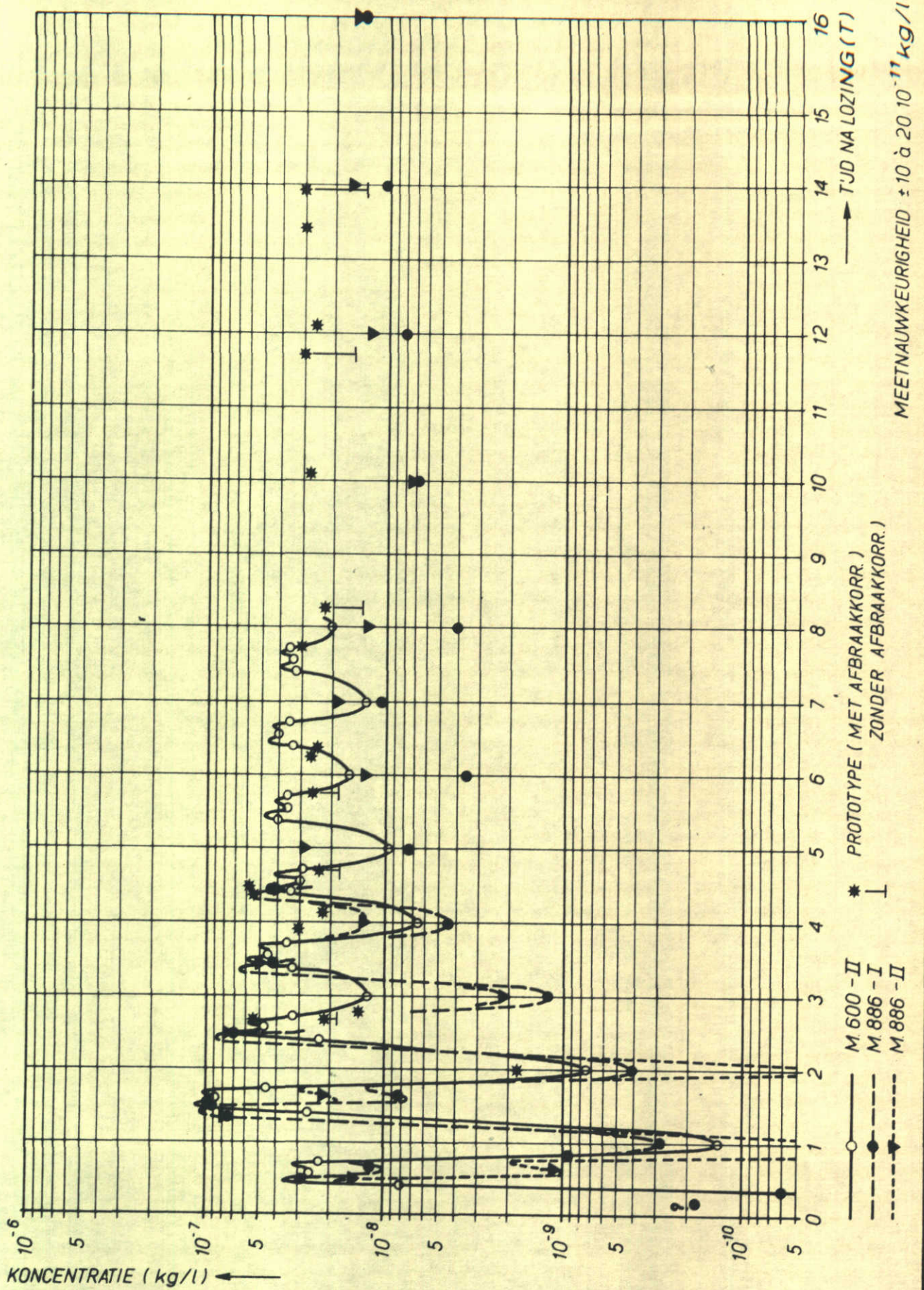
j.z.

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M.1010-1095

FIG.10.2



KONCENTRATIEVERLOOP ALS FUNKTIE VAN DE TJD
 PROEVEN M.600-II, M.886-I EN M.886-II
 EN PROTOTYPEPROEF

PUNT 3

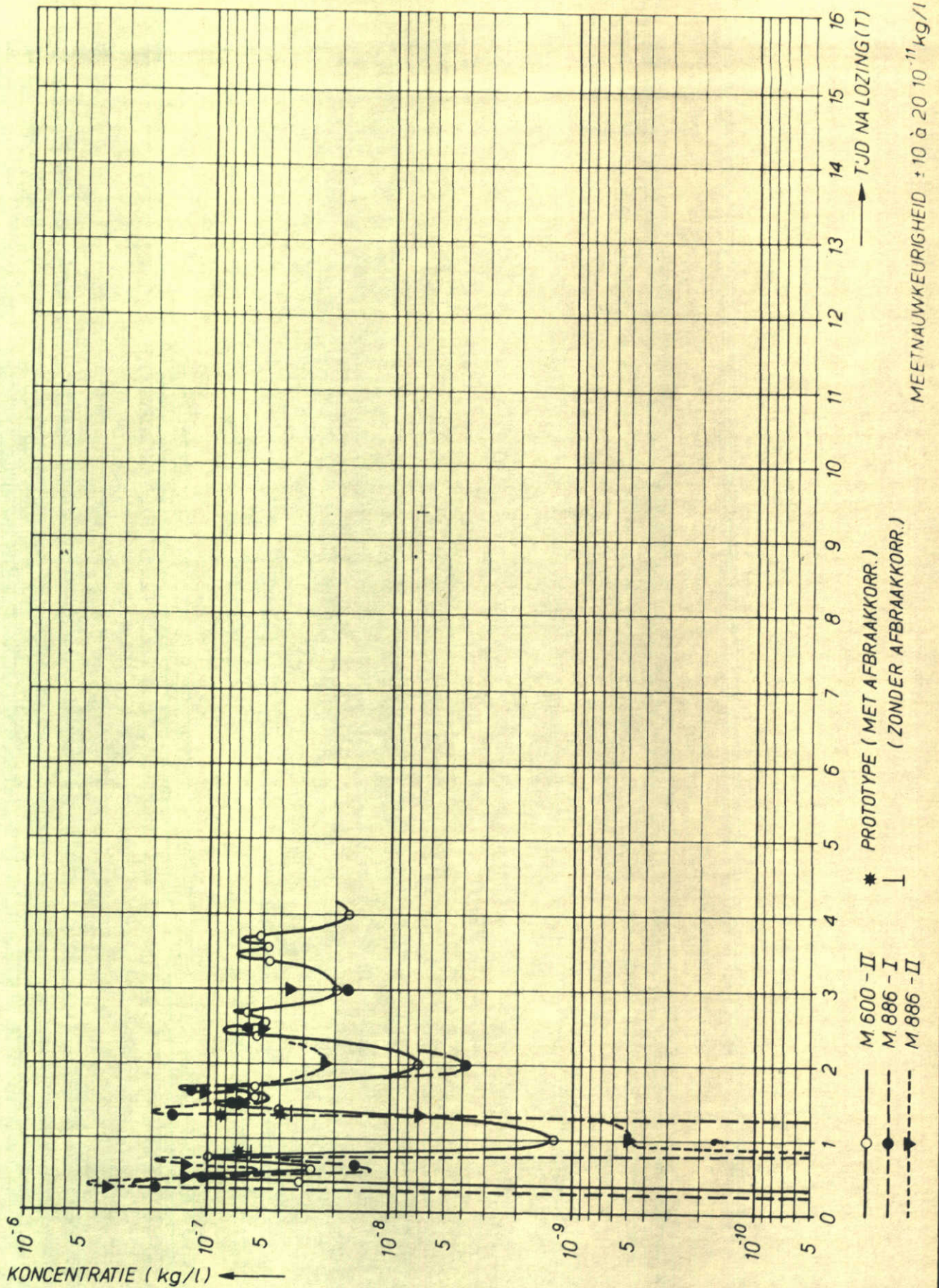
J.Z.

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M.1010-1096

FIG.10.3



KONCENTRATIEVERLOOP ALS FUNKTIE VAN DE TJD
 PROEVEN M.600-II, M.886-I EN M.886-II
 EN PROTOTYPEPROEF

PUNT 4

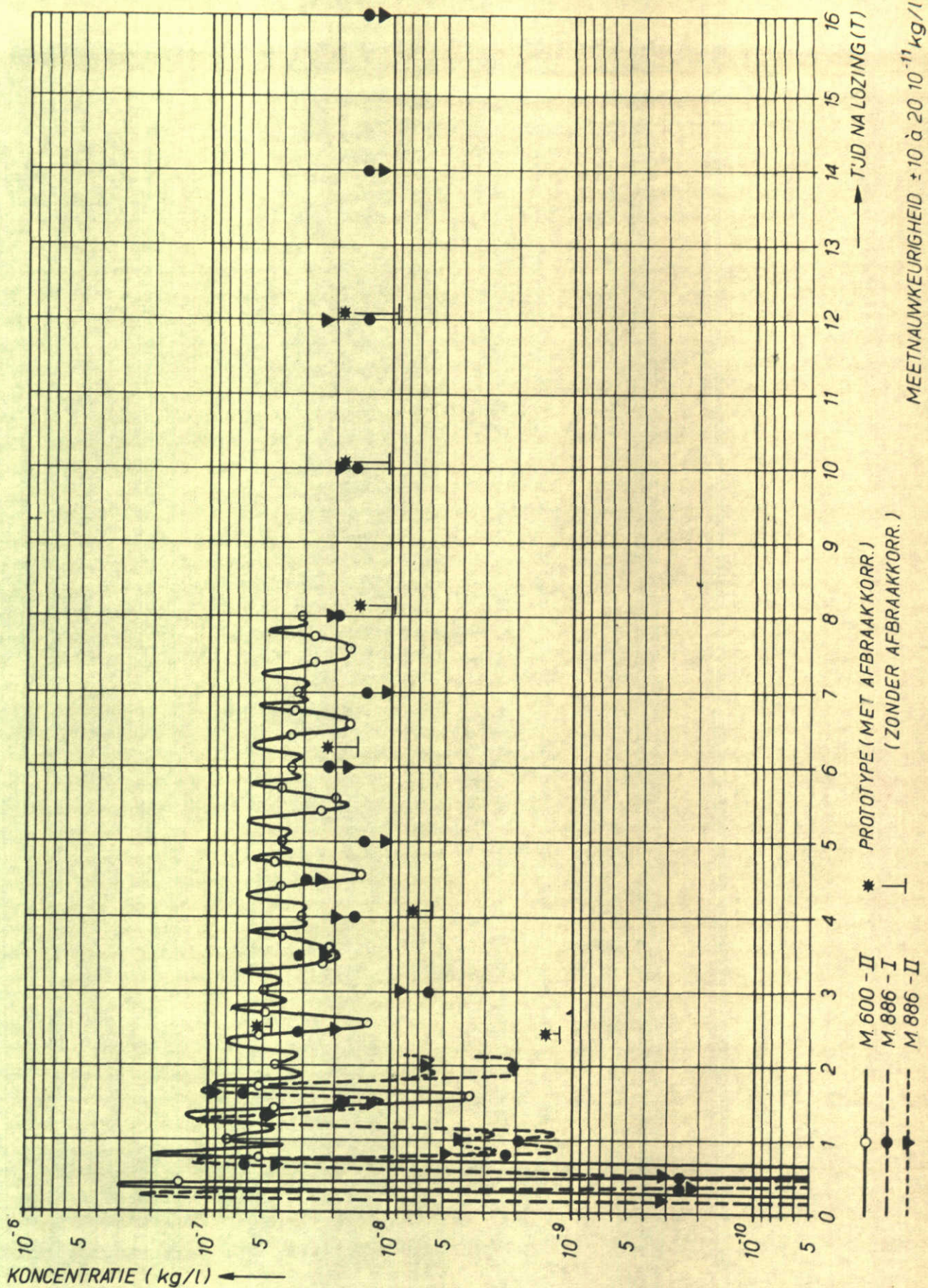
JZ

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M.1010-1097

FIG 10.4



KONCENTRATIEVERLOOP ALS FUNKTIE VAN DE TJD
 PROEVEN M.600-II, M.886-I EN M.886-II
 EN PROTOTYPEPROEF

PUNT 5

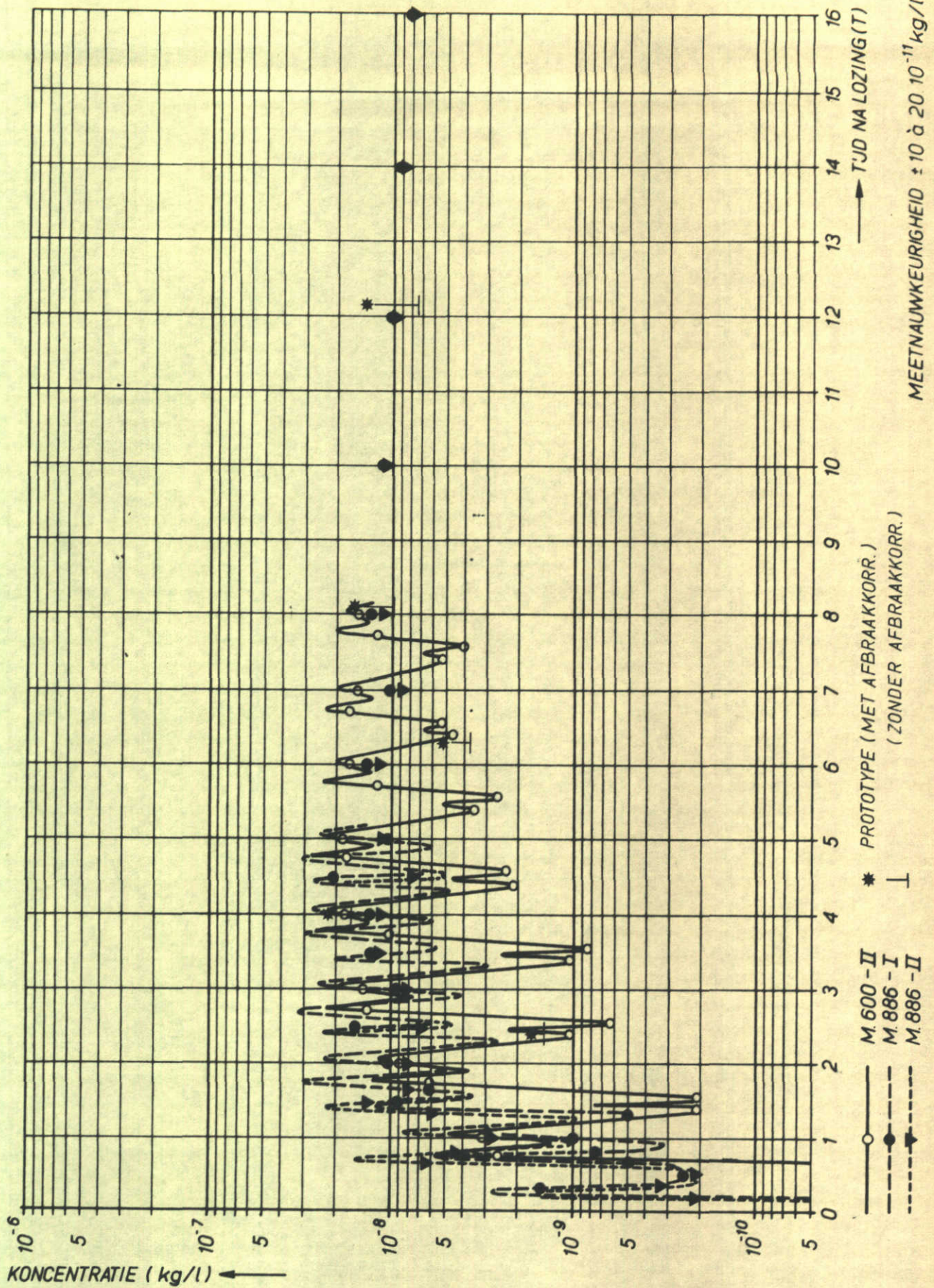
JZ

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M.1010 - 1098

FIG.10.5



KONCENTRATIEVERLOOP ALS FUNKTIE VAN DE TJD
 PROEVEN M.600-II, M.886-I EN M.886-II
 EN PROTOTYPEPROEF

PUNT 6

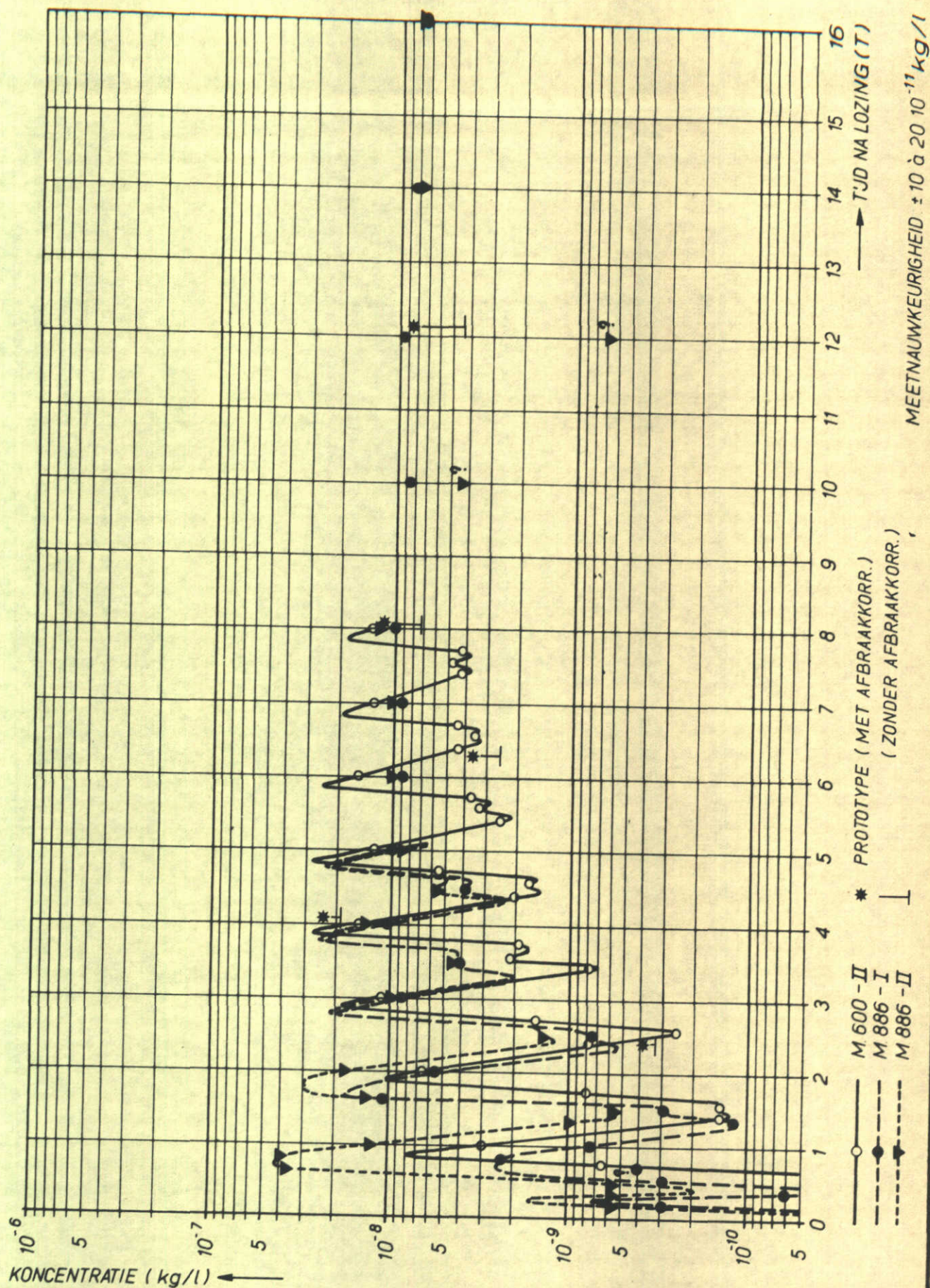
j.z.

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M.1010-1099

FIG.10.6

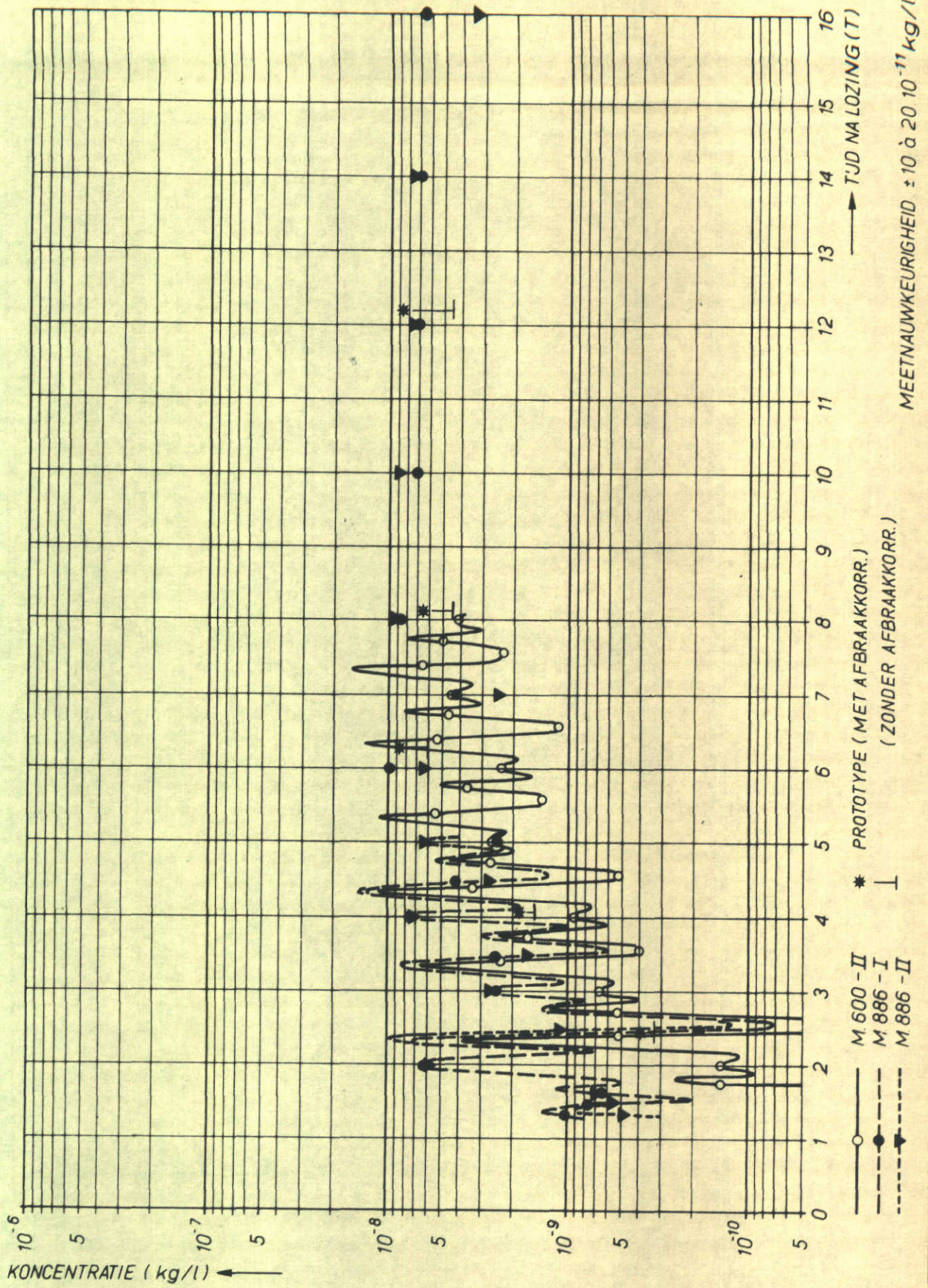


KONCENTRATIEVERLOOP ALS FUNKTIE VAN DE TJD
 PROEVEN M.600-II, M.886-I EN M.886-II
 EN PROTOTYPEPROEF

PUNT 7

J.Z.

A4

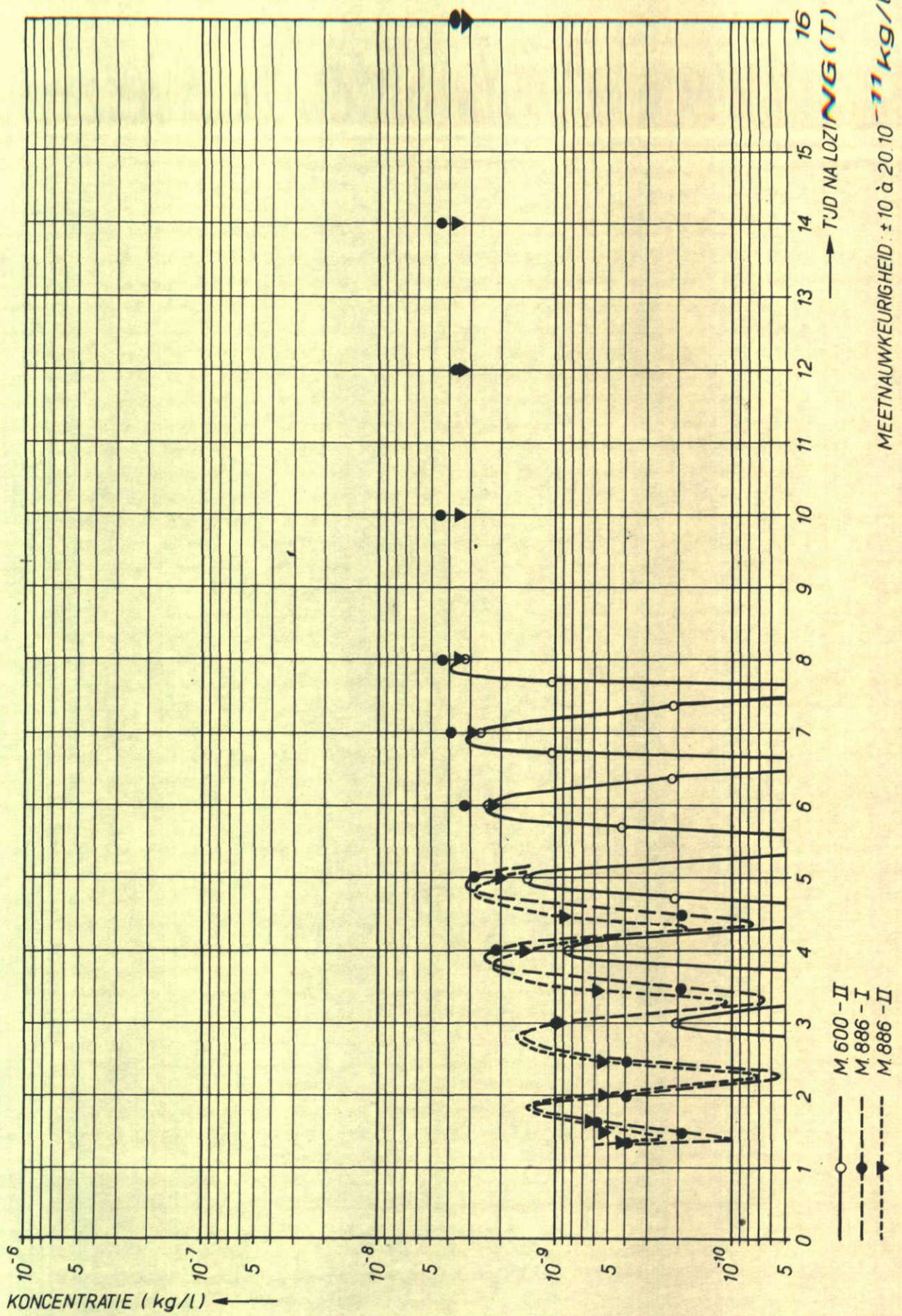


KONCENTRATIEVERLOOP ALS FUNKTIE VAN DE TJD
 PROEVEN M.600-II, M.886-I EN M.886-II
 EN PROTOTYPEPROEF

PUNT 8

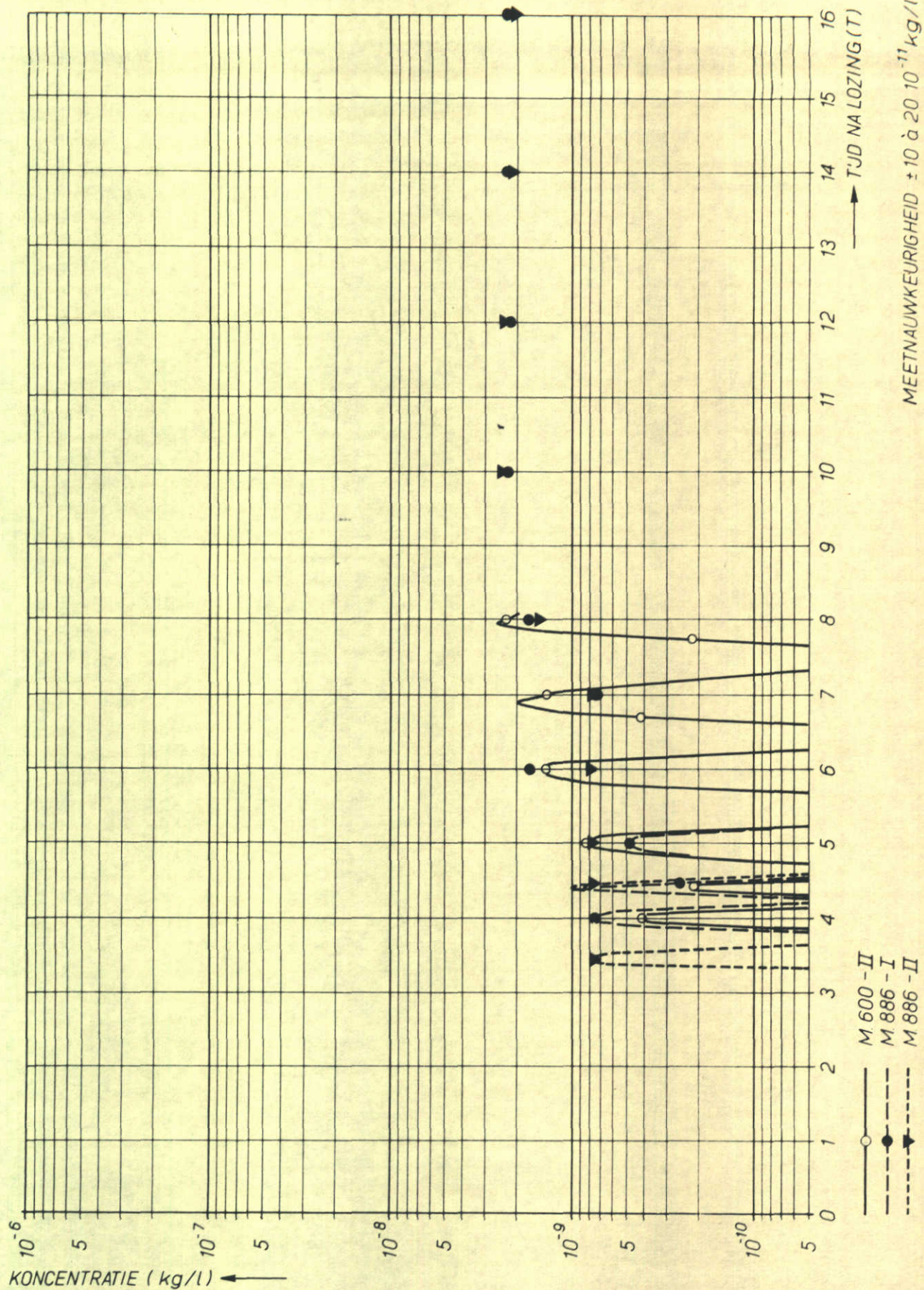
JZ

A4



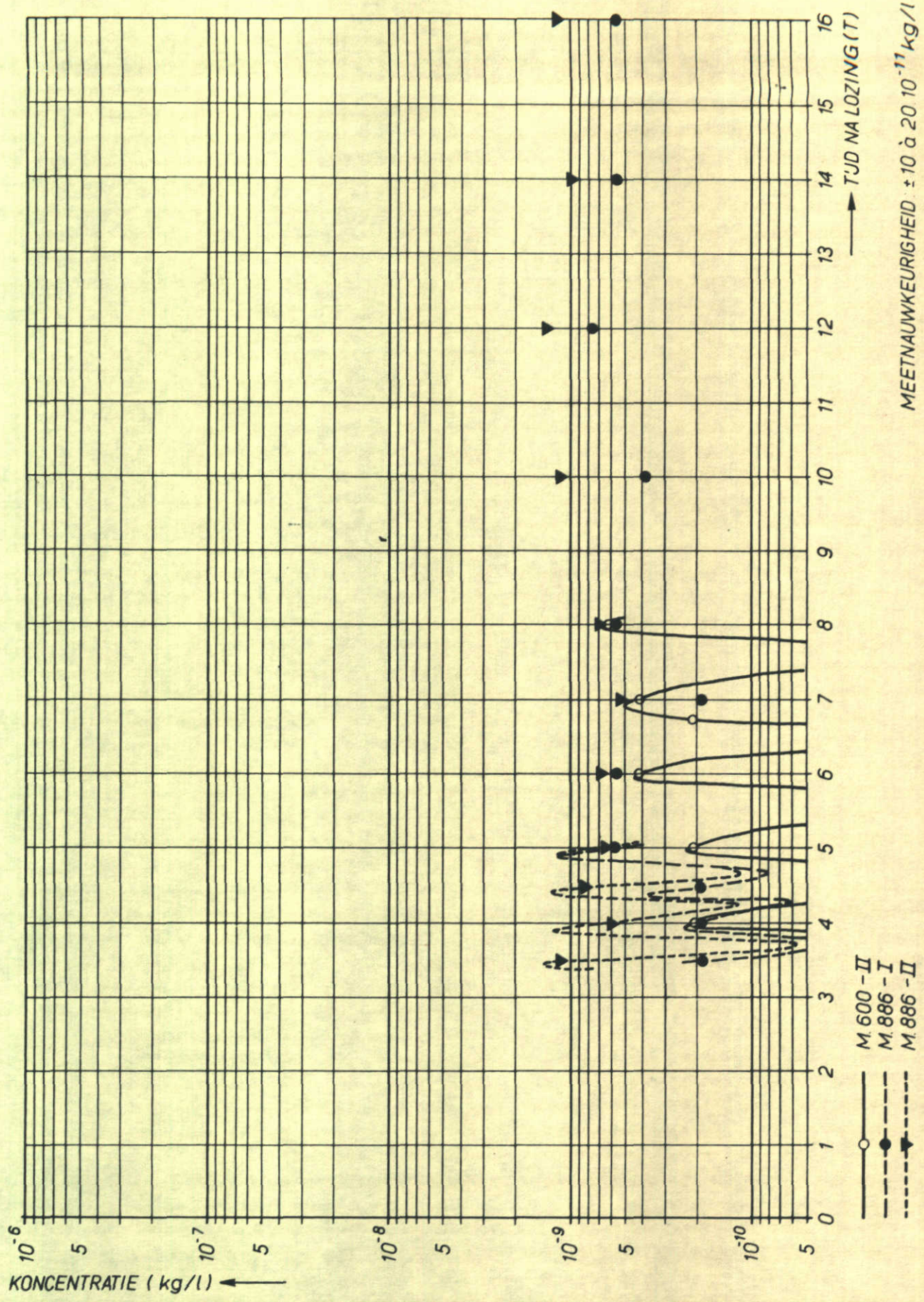
KONCENTRATIEVERLOOP ALS FUNKTIE VAN DE TJD
 PROEVEN M.600-II, M.886-I EN M.886-II

PUNT 9	j.z.
	A4



KONCENTRATIEVERLOOP ALS FUNKTIE VAN DE TJD
 PROEVEN M.600-II, M.886-I EN M.886-II

PUNT 10	JZ.
	A4

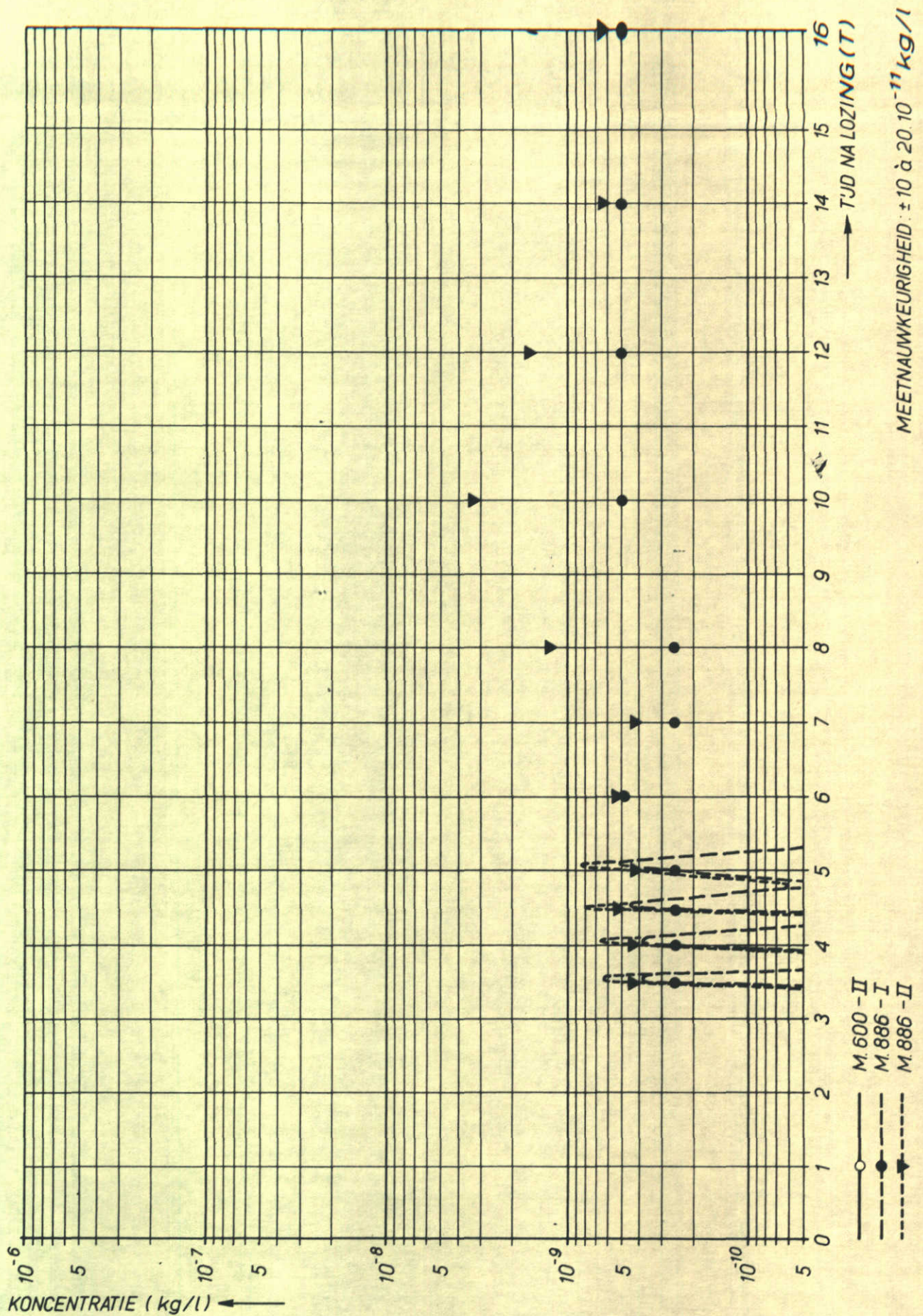


KONCENTRATIEVERLOOP ALS FUNKTIE VAN DE TJD
 PROEVEN M.600-II, M.886-I EN M.886-II

PUNT 11

J.Z.

A4

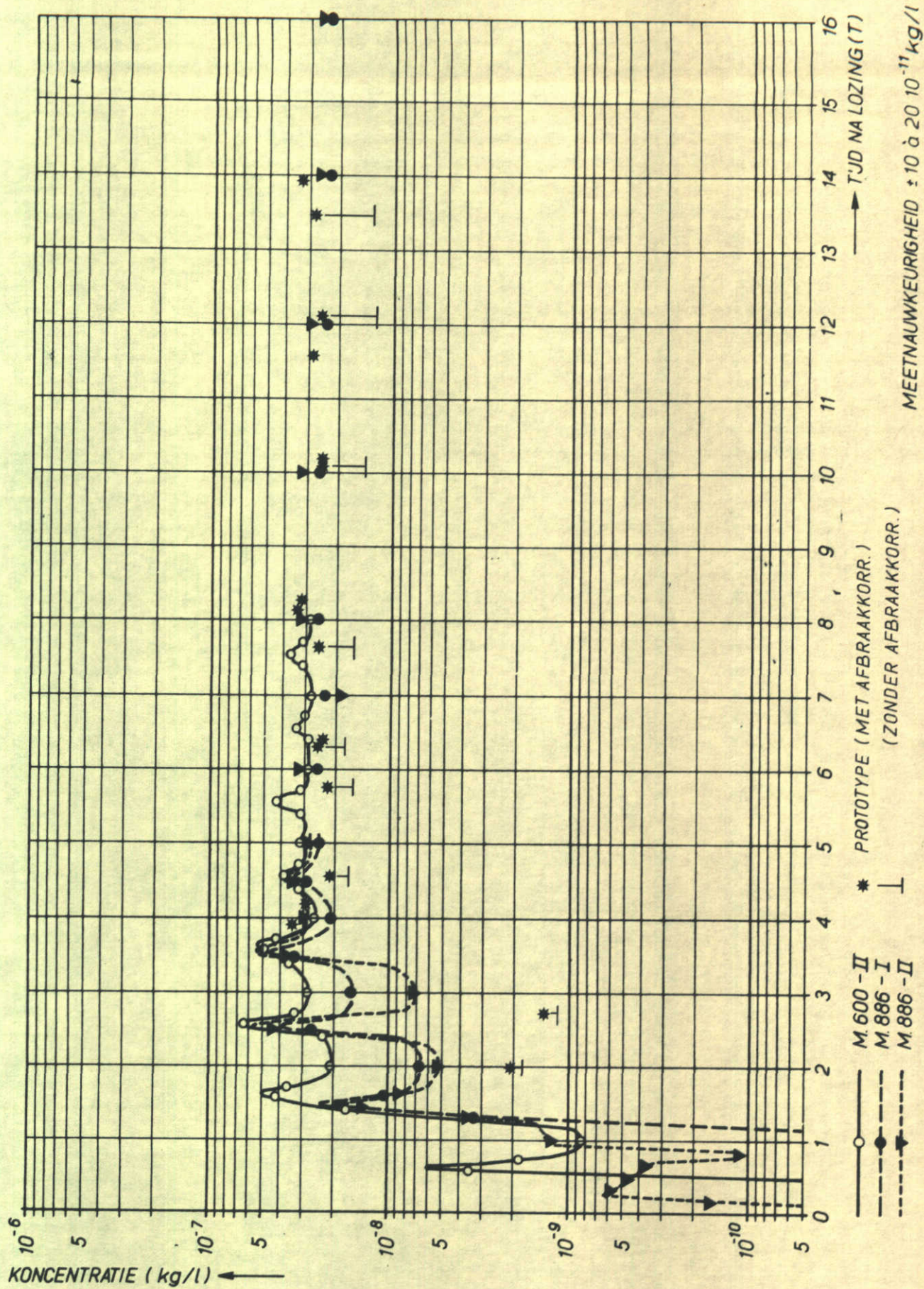


KONCENTRATIEVERLOOP ALS FUNKTIE VAN DE TJD
 PROEVEN M.600-II, M.886-I EN M.886-II

PUNT 12^I

j.z.

A4



KONCENTRATIEVERLOOP ALS FUNKTIE VAN DE TJD
 PROEVEN M.600-II, M.886-I EN M.886-II
 EN PROTOTYPEPROEF

PUNT 13

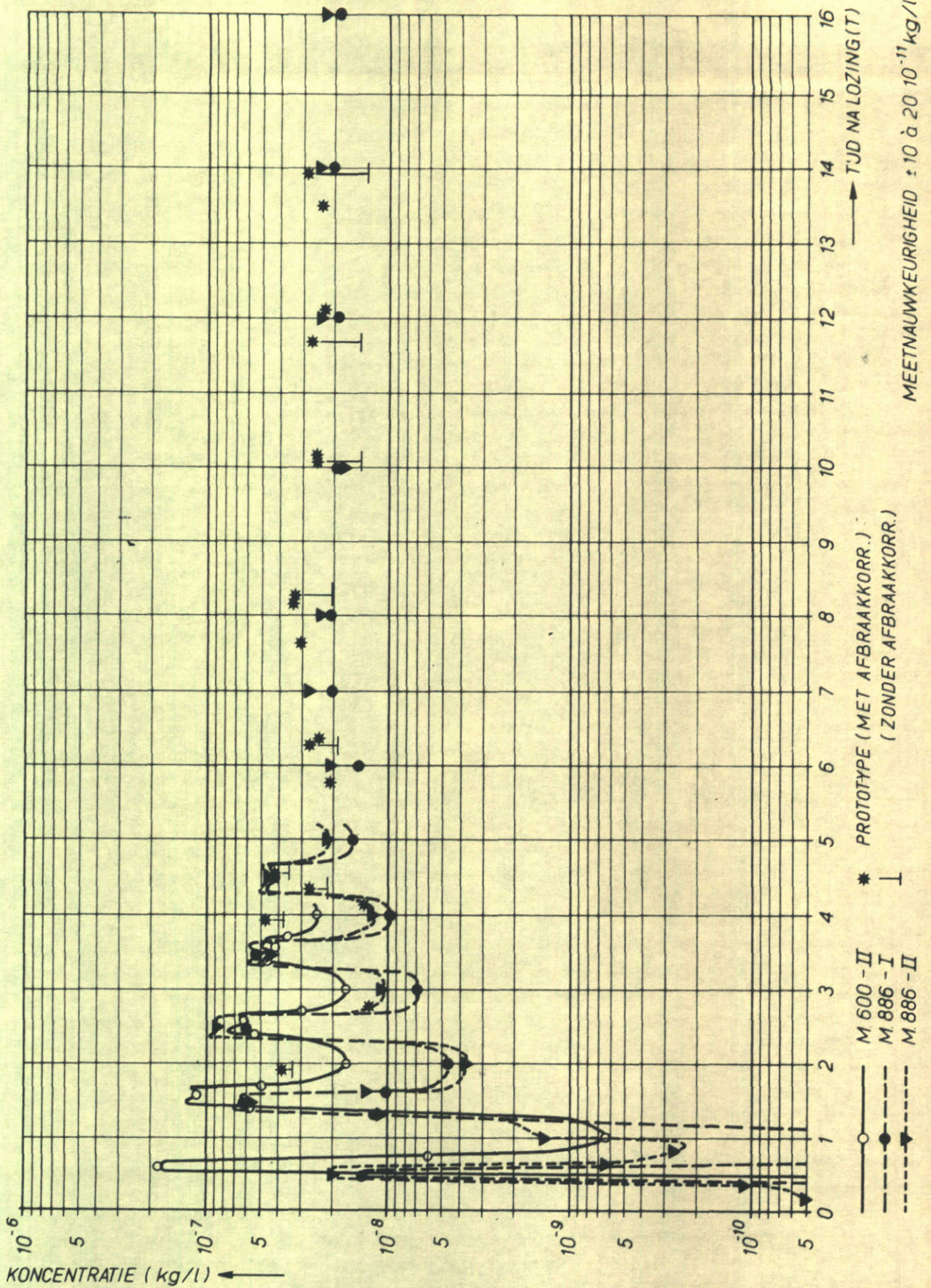
J.Z.

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M.1010-1106

FIG.10.13



KONCENTRATIEVERLOOP ALS FUNKTIE VAN DE TJD
 PROEVEN M.600-II, M.886-I EN M.886-II
 EN PROTOTYPEPROEF

PUNT 14

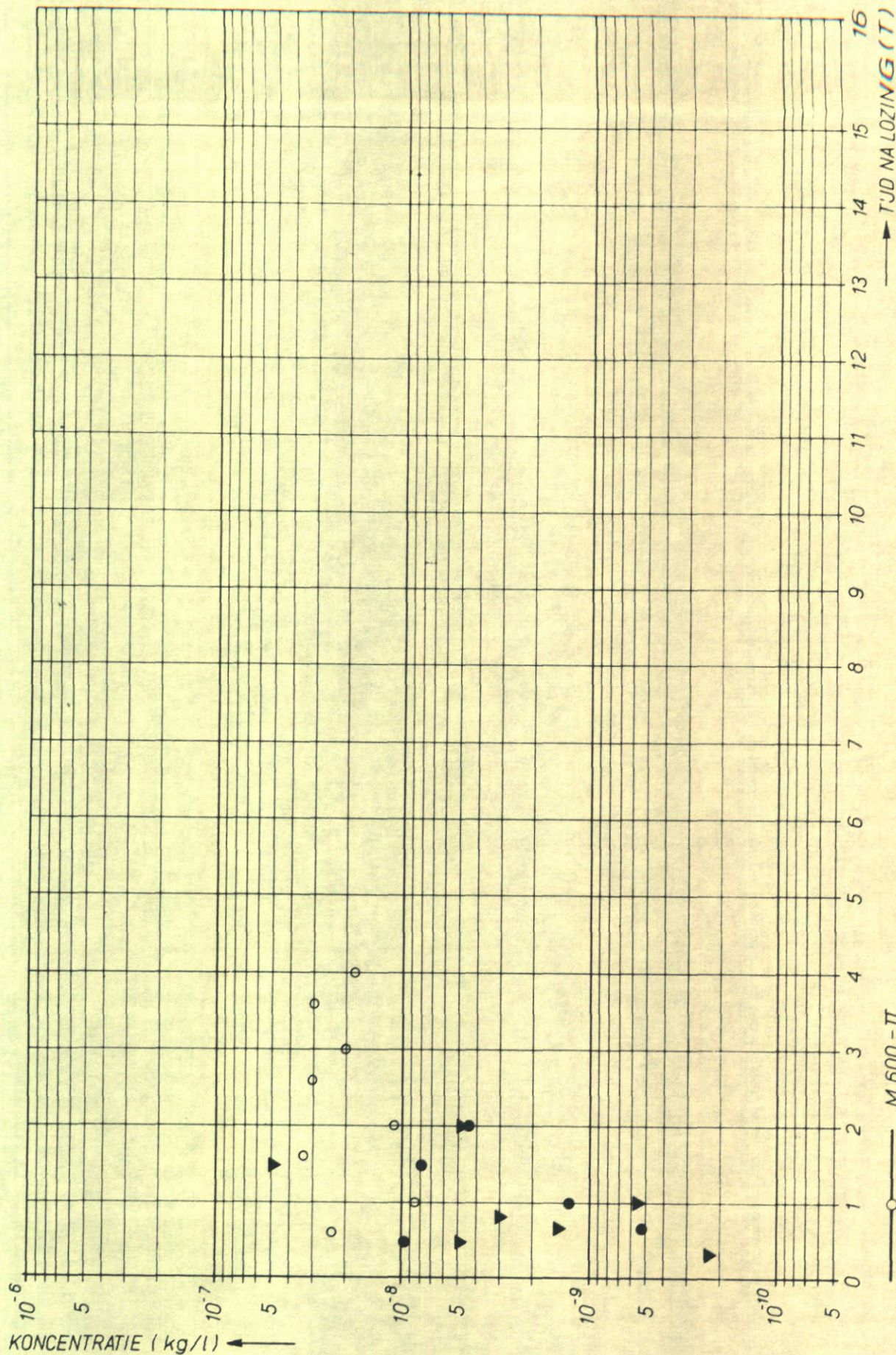
J.Z.

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M.1010-1107

FIG. 10.14

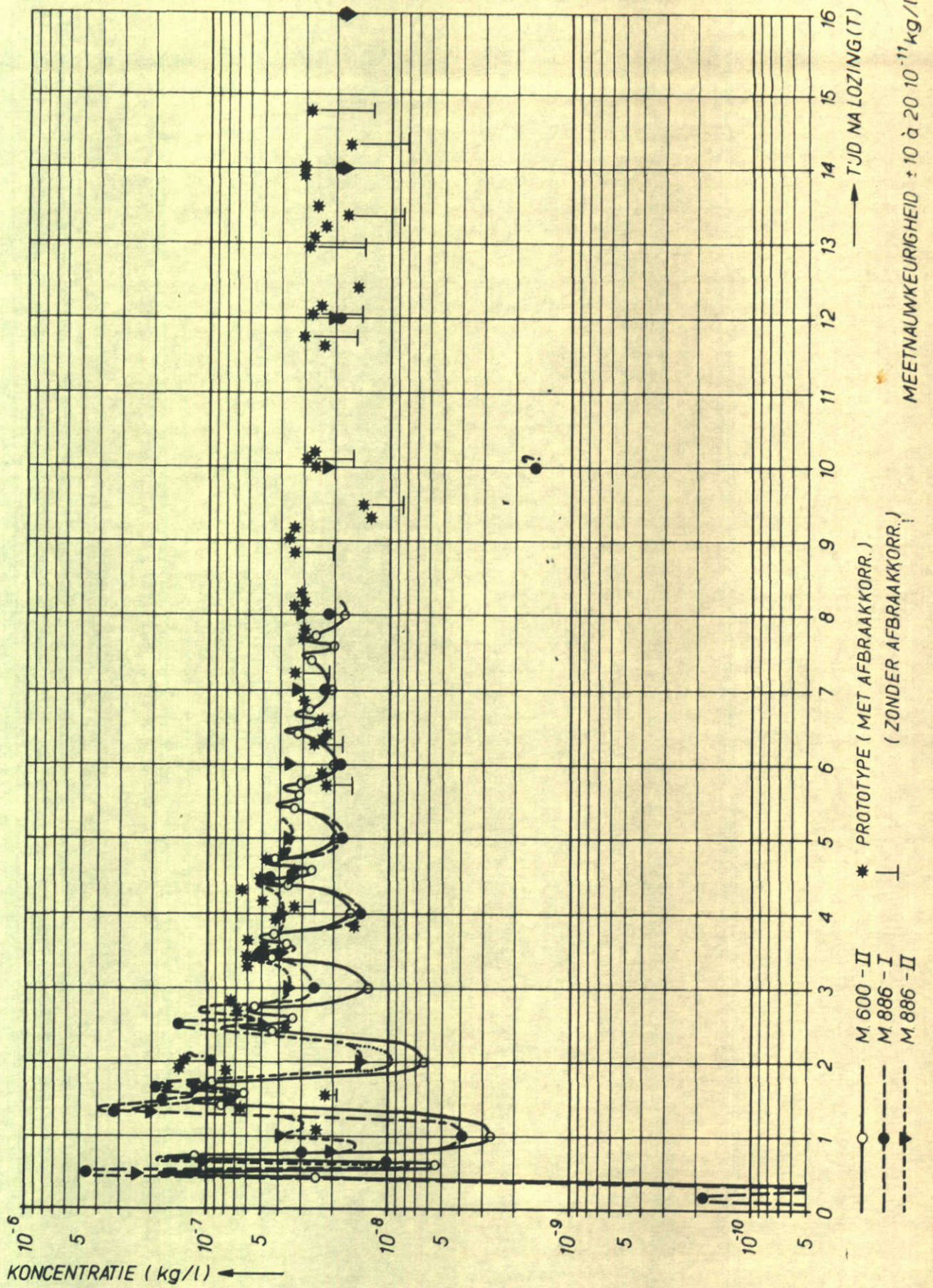


KONCENTRATIEVERLOOP ALS FUNKTIE VAN DE TJD
 PROEVEN M.600-II, M.886-I EN M.886-II

PUNT 14 A

J.Z.

A4

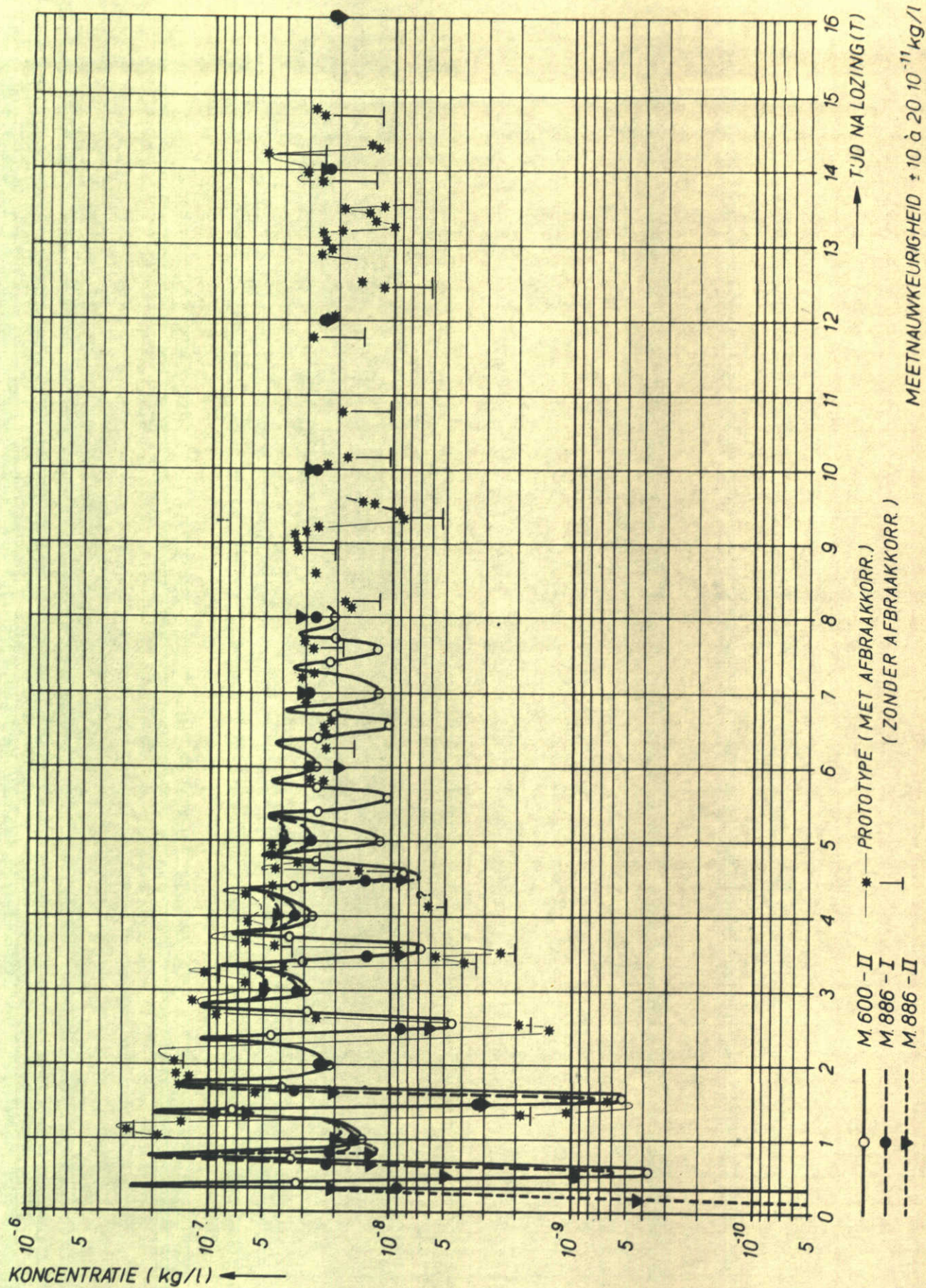


KONCENTRATIEVERLOOP ALS FUNKTIE VAN DE TJD
 PROEVEN M.600-II, M.886-I EN M.886 -II
 EN PROTOTYPEPROEF

PUNT 15-4/15

J.Z.

A4



KONCENTRATIEVERLOOP ALS FUNKTIE VAN DE TJD
 PROEVEN M.600-II, M.886-I EN M.886 -II
 EN PROTOTYPEPROEF

PUNT 16

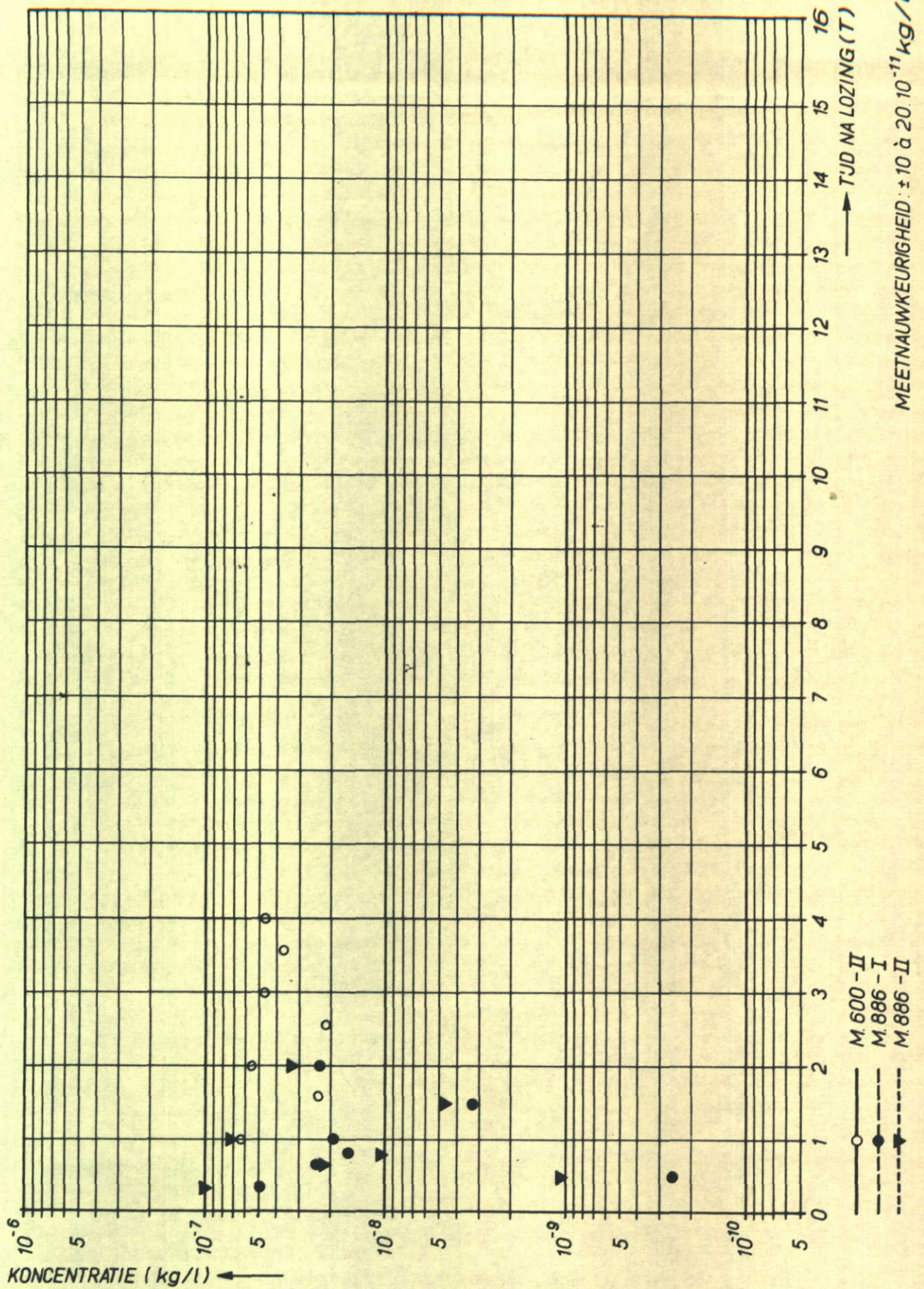
j.z.

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M.1010 - 1110

FIG.10.17

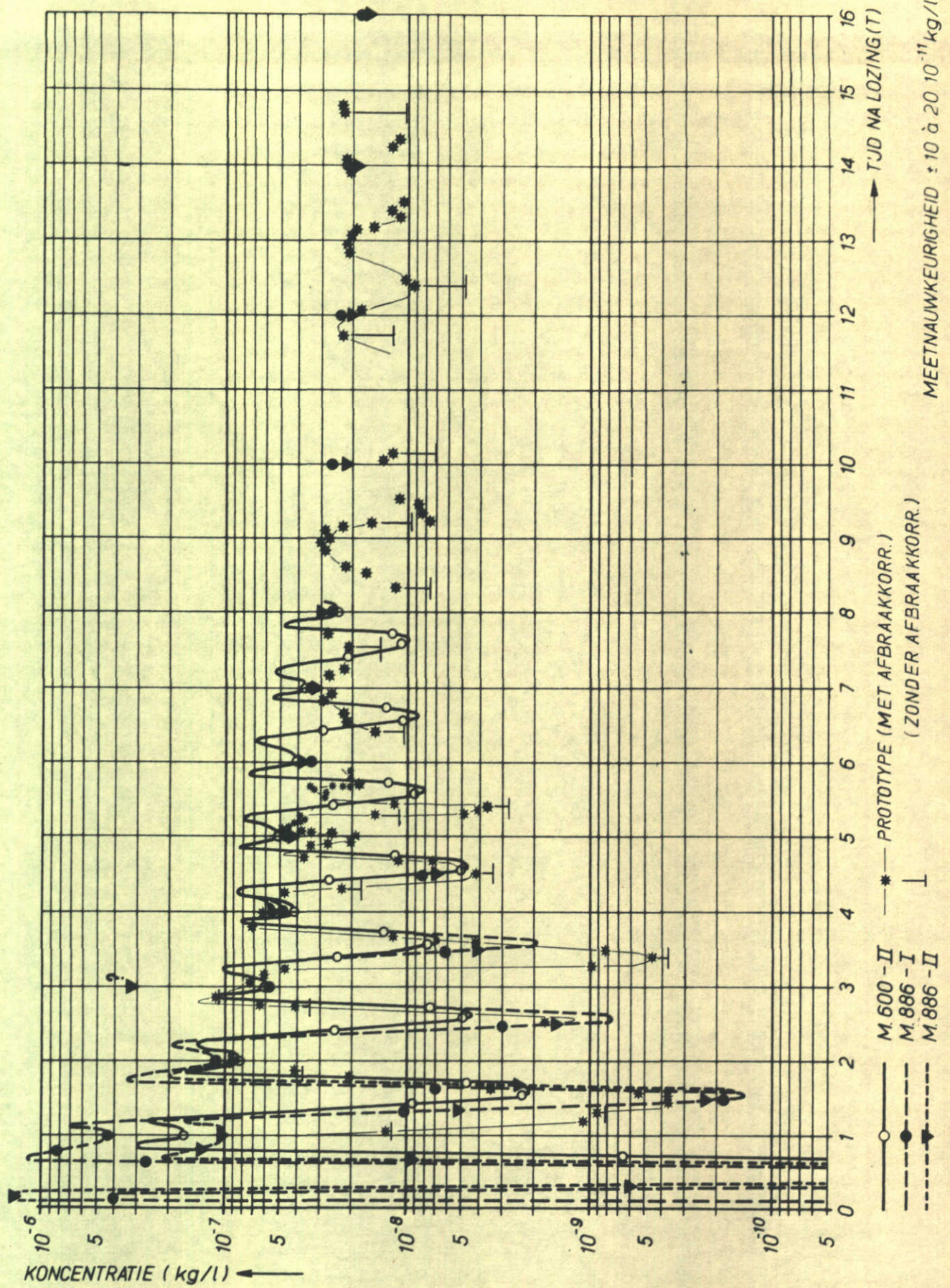


KONCENTRATIEVERLOOP ALS FUNKTIE VAN DE TJD
 PROEVEN M.600-II, M.886-I EN M.886-II

PUNT 16 A

j.z.

A4

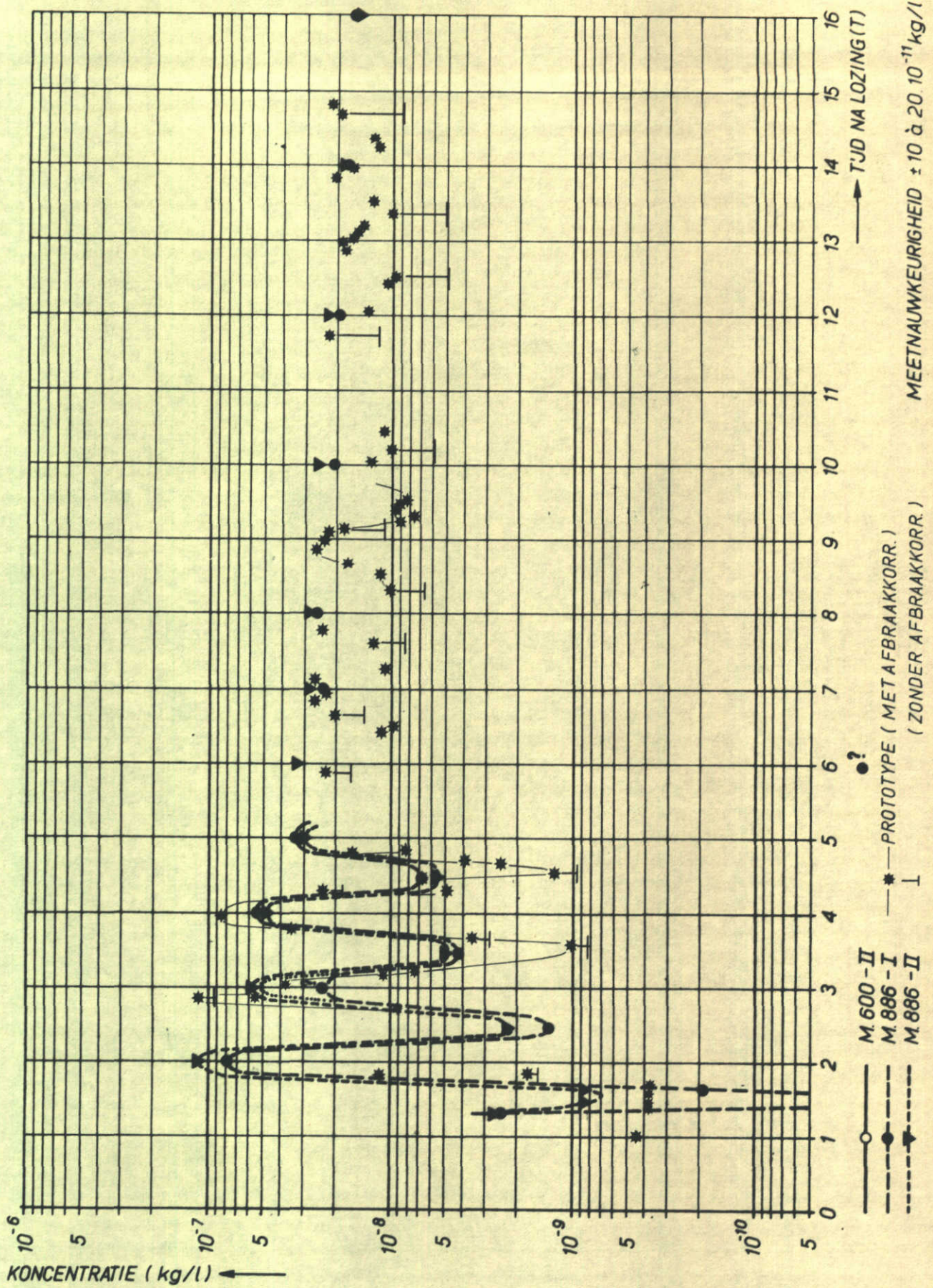


MEETNAUWKEURIGHEID : 10 à 20 10⁻¹¹ kg/l

KONCENTRATIEVERLOOP ALS FUNKTIE VAN DE TJD
 PROEVEN M.600-II, M.886-I EN M.886-II
 EN PROTOTYPEPROEF

PUNT 17 j.z.

A4



KONCENTRATIEVERLOOP ALS FUNKTIE VAN DE TJD
 PROEVEN M.600-II, M.886-I EN M.886-II
 EN PROTOTYPEPROEF

PUNT 17^I/17^{II}

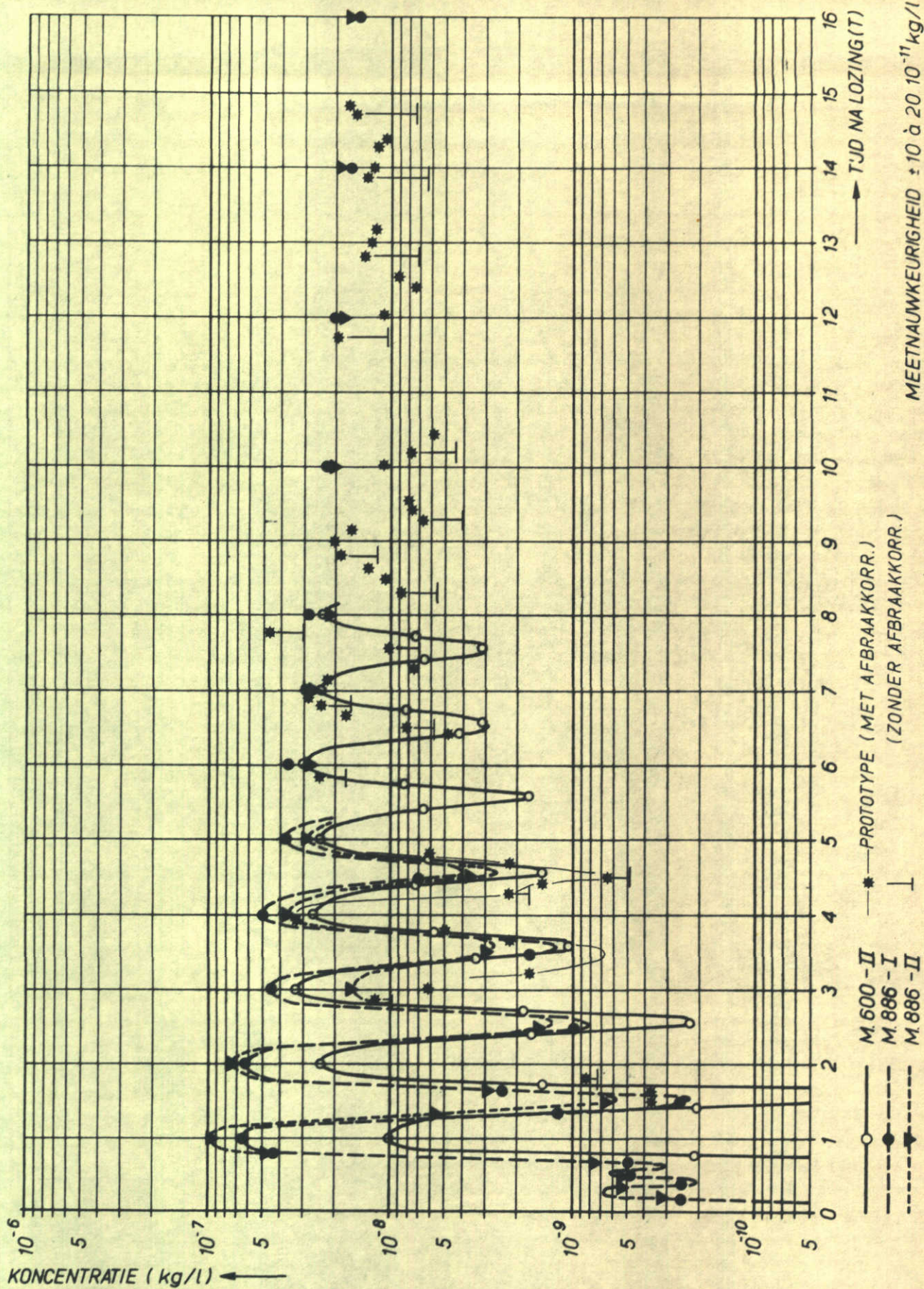
j.z.

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M.1010-1113

FIG. 10.20



KONCENTRATIEVERLOOP ALS FUNKTIE VAN DE TJD
 PROEVEN M.600-II, M.886-I EN M.886-II
 EN PROTOTYPEPROEF

PUNT 18

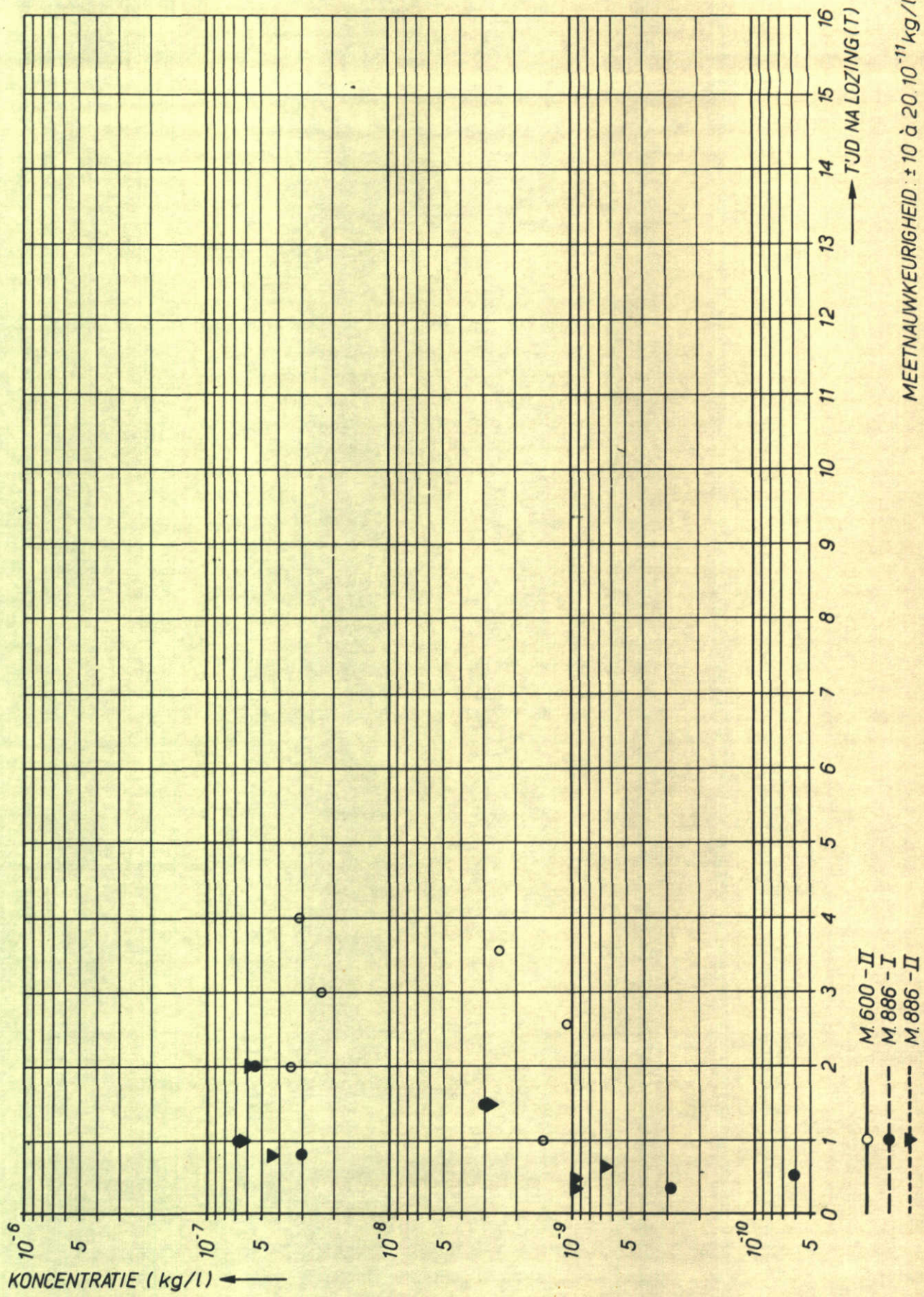
J.Z.

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

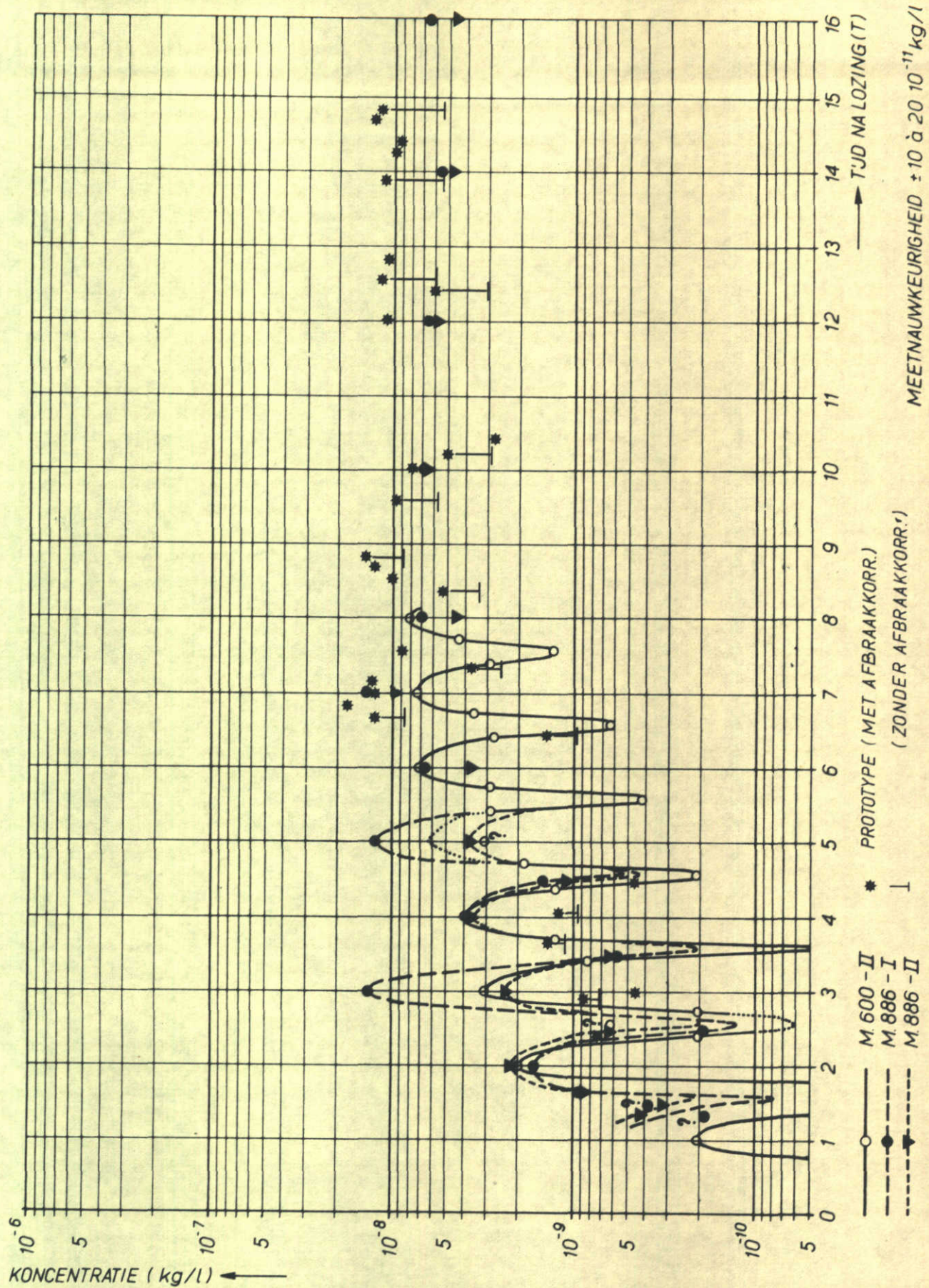
M.1010-1114

FIG. 10.21



KONCENTRATIEVERLOOP ALS FUNKTIE VAN DE TJD
 PROEVEN M.600-II, M.886-I EN M.886-II

PUNT 18 A	j.z.
	A4



KONCENTRATIEVERLOOP ALS FUNKTIE VAN DE TJD
 PROEVEN M.600-II, M.886-I EN M.886-II
 EN PROTOTYPEPROEF

PUNT 19

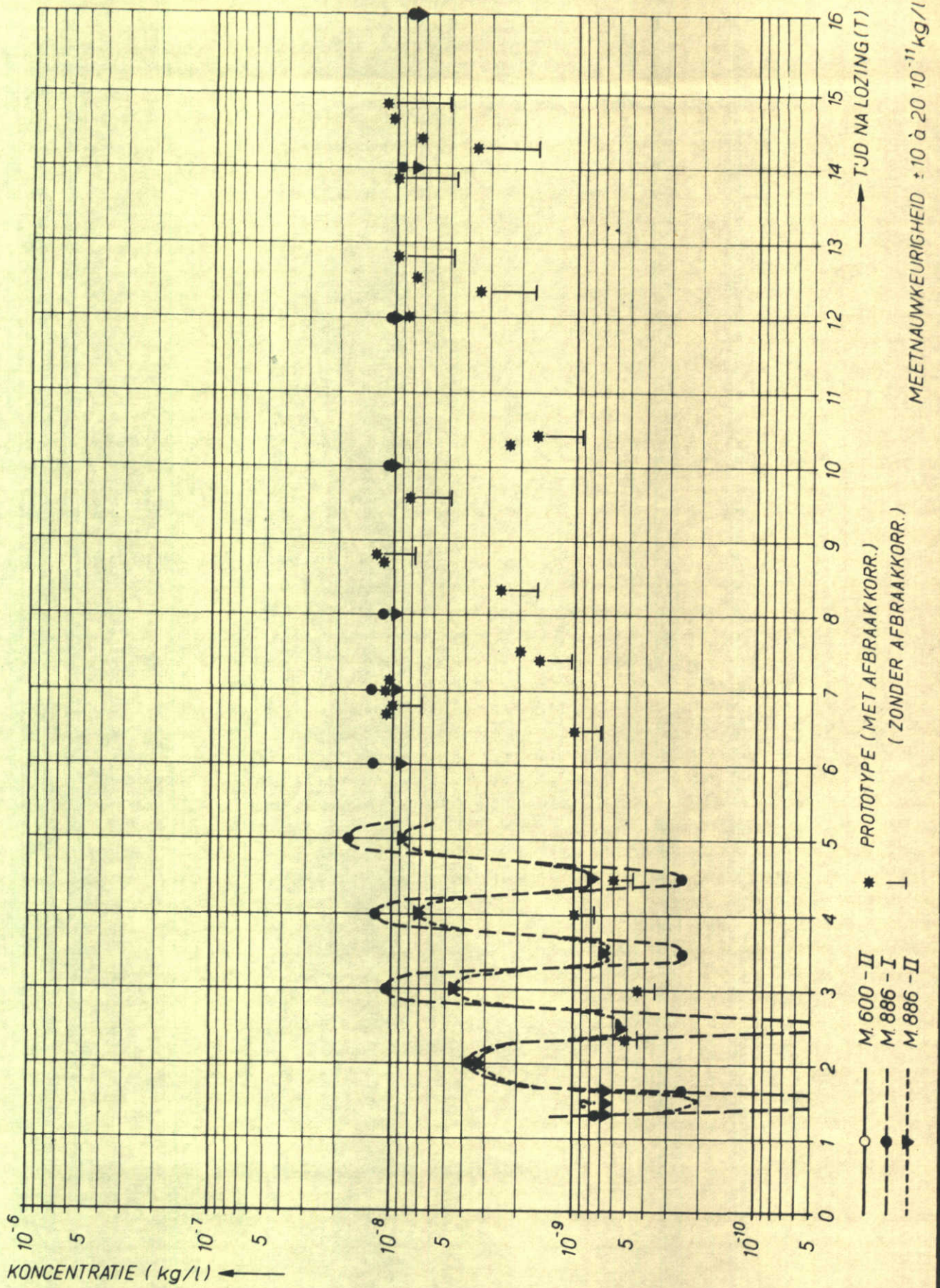
J.Z.

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M.1010-1116

FIG.10.23



KONCENTRATIEVERLOOP ALS FUNKTIE VAN DE TJD
 PROEVEN M.600-II, M.886-I EN M.886-II
 EN PROTOTYPEPROEF

PUNT 19'

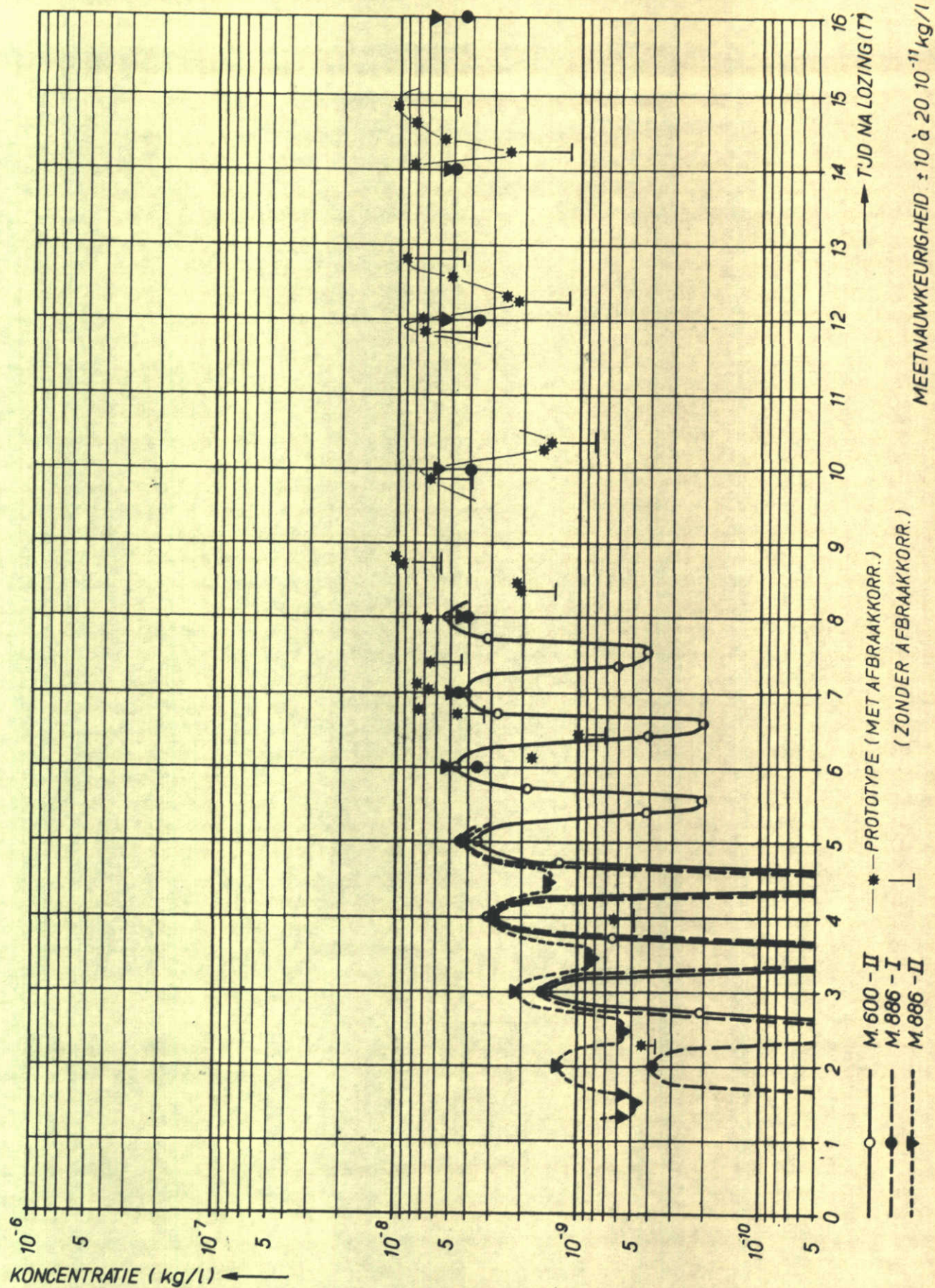
J.Z.

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M.1010-1117

FIG.10.24



KONCENTRATIEVERLOOP ALS FUNKTIE VAN DE TJD
 PROEVEN M.600-II, M.886-I EN M.886-II
 EN PROTOTYPEPROEF

PUNT 20

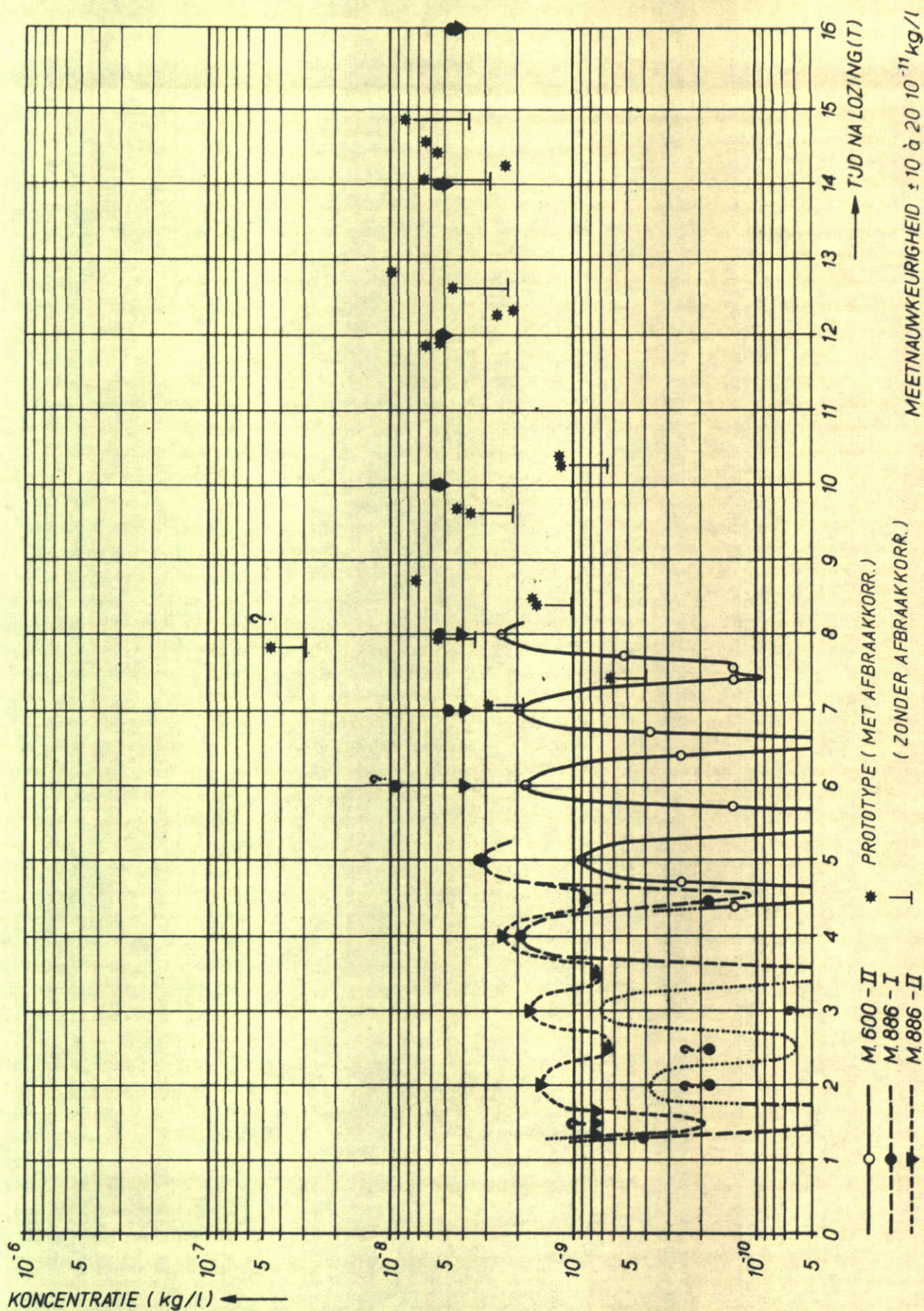
j.z.

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M.1010-1118

FIG.10.25

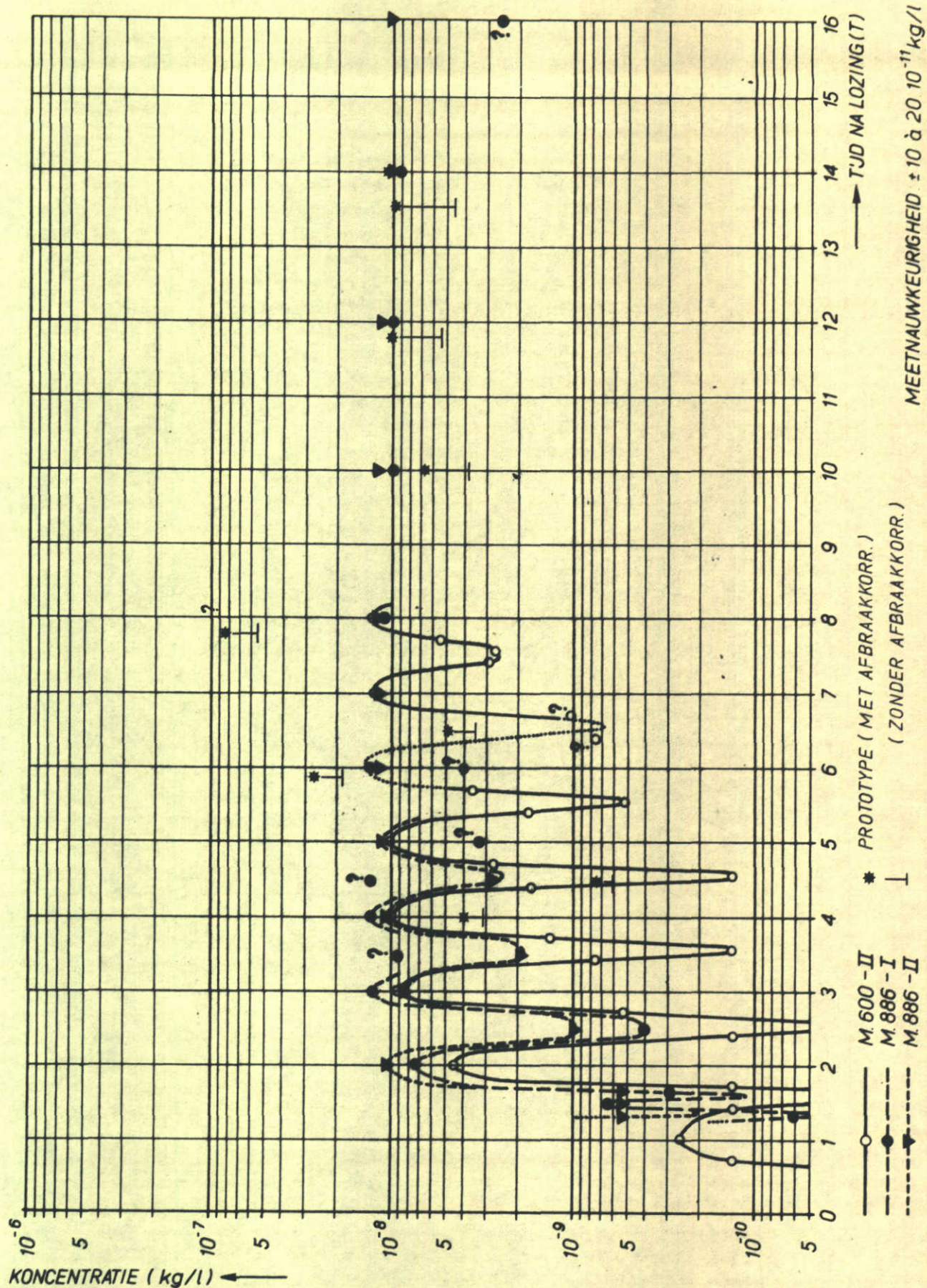


KONCENTRATIEVERLOOP ALS FUNKTIE VAN DE TJD
 PROEVEN M.600-II, M.886-I EN M.886-II
 EN PROTOTYPEPROEF

PUNT 21

j.z.

A4



KONCENTRATIEVERLOOP ALS FUNKTIE VAN DE TJD
 PROEVEN M.600-II, M.886-I EN M.886-II
 EN PROTOTYPEPROEF

PUNT 23

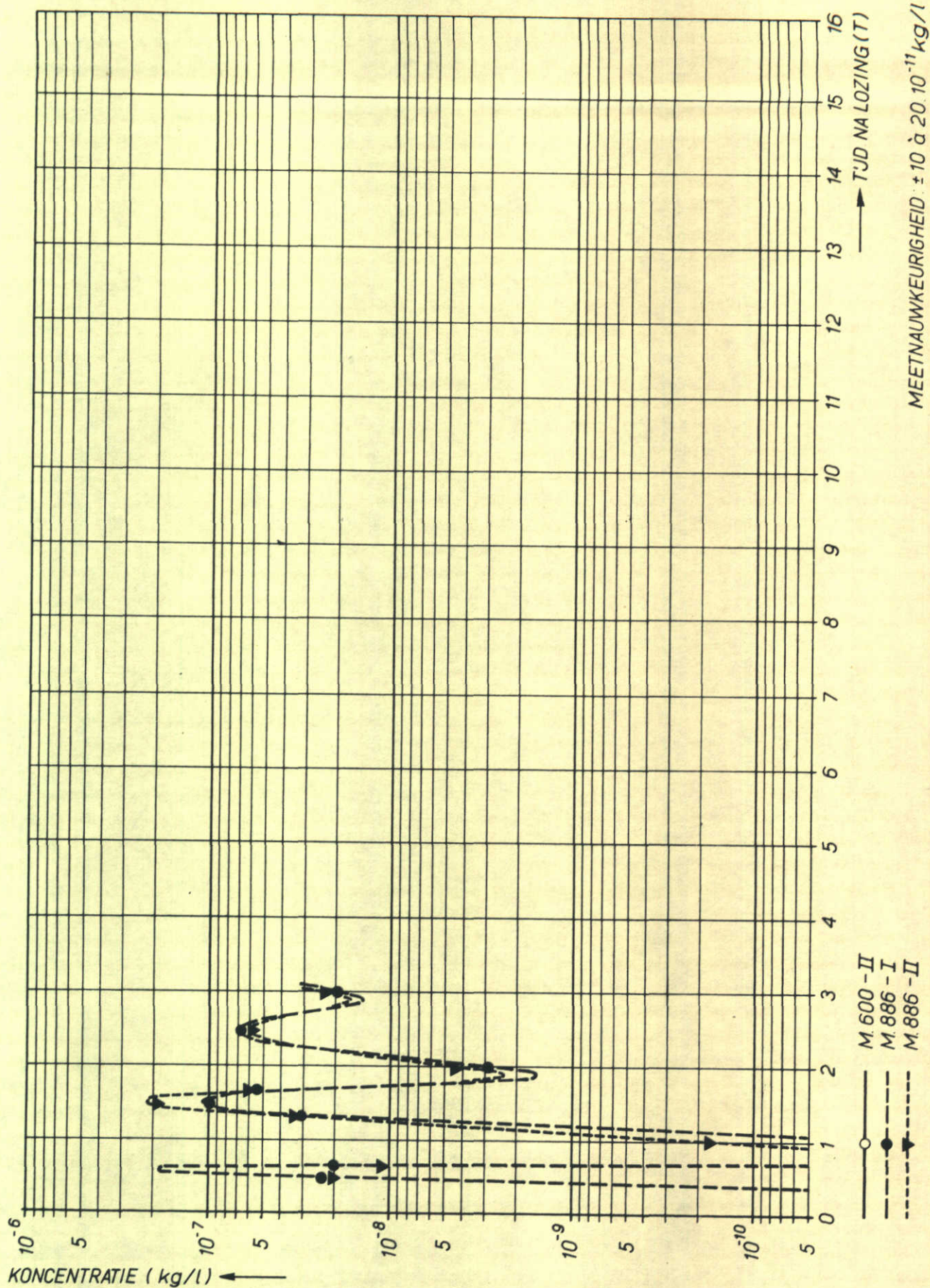
j.z.

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M.1010-1120

FIG.10.27



KONCENTRATIEVERLOOP ALS FUNKTIE VAN DE TJD
 PROEVEN M.600-II, M.886-I EN M.886-II

PUNT 24

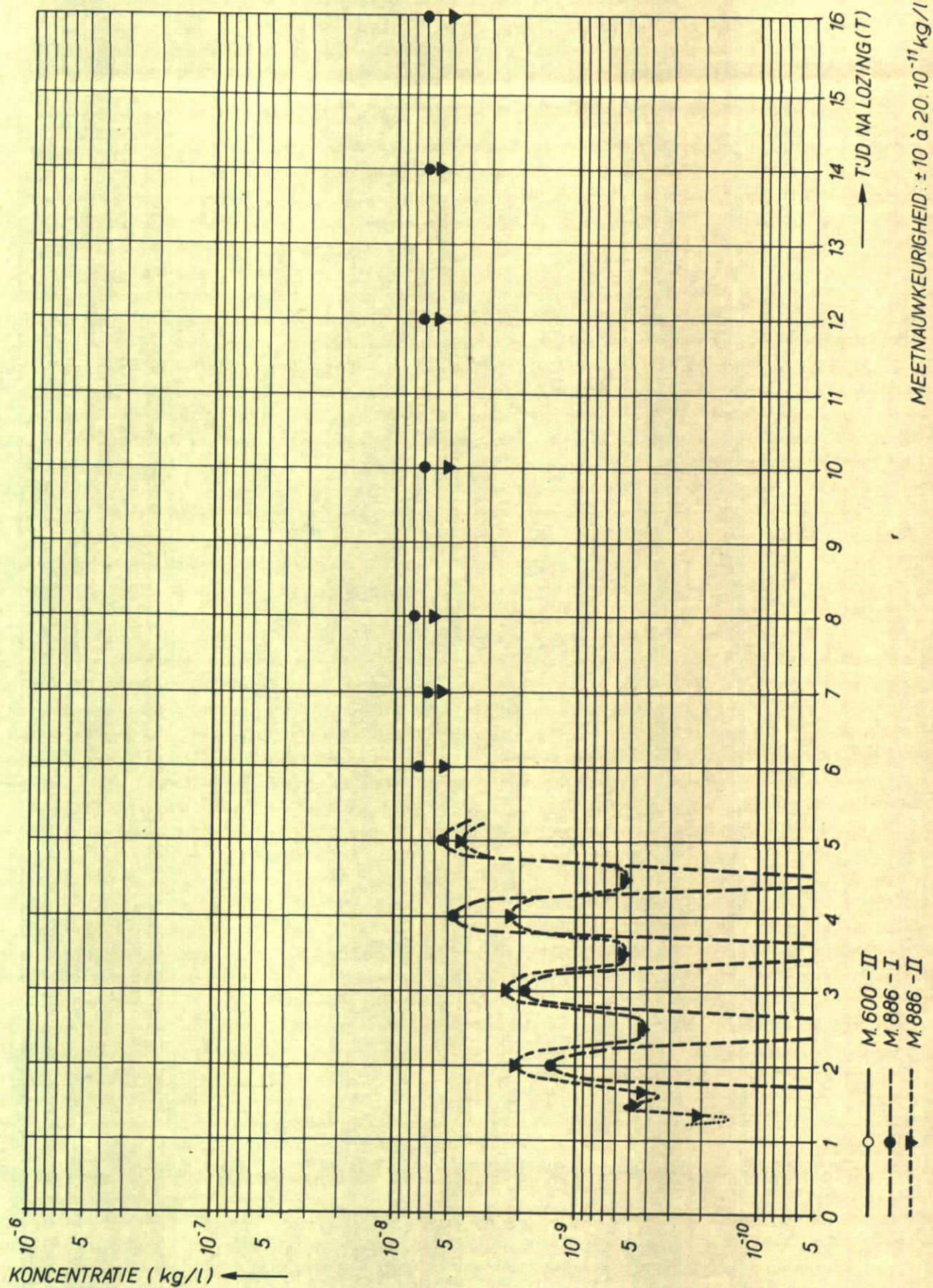
j.z.

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M.1010-1121

FIG.10.28



KONCENTRATIEVERLOOP ALS FUNKTIE VAN DE TJD
 PROEVEN M.600-II, M.886-I EN M.886-II

PUNT 29

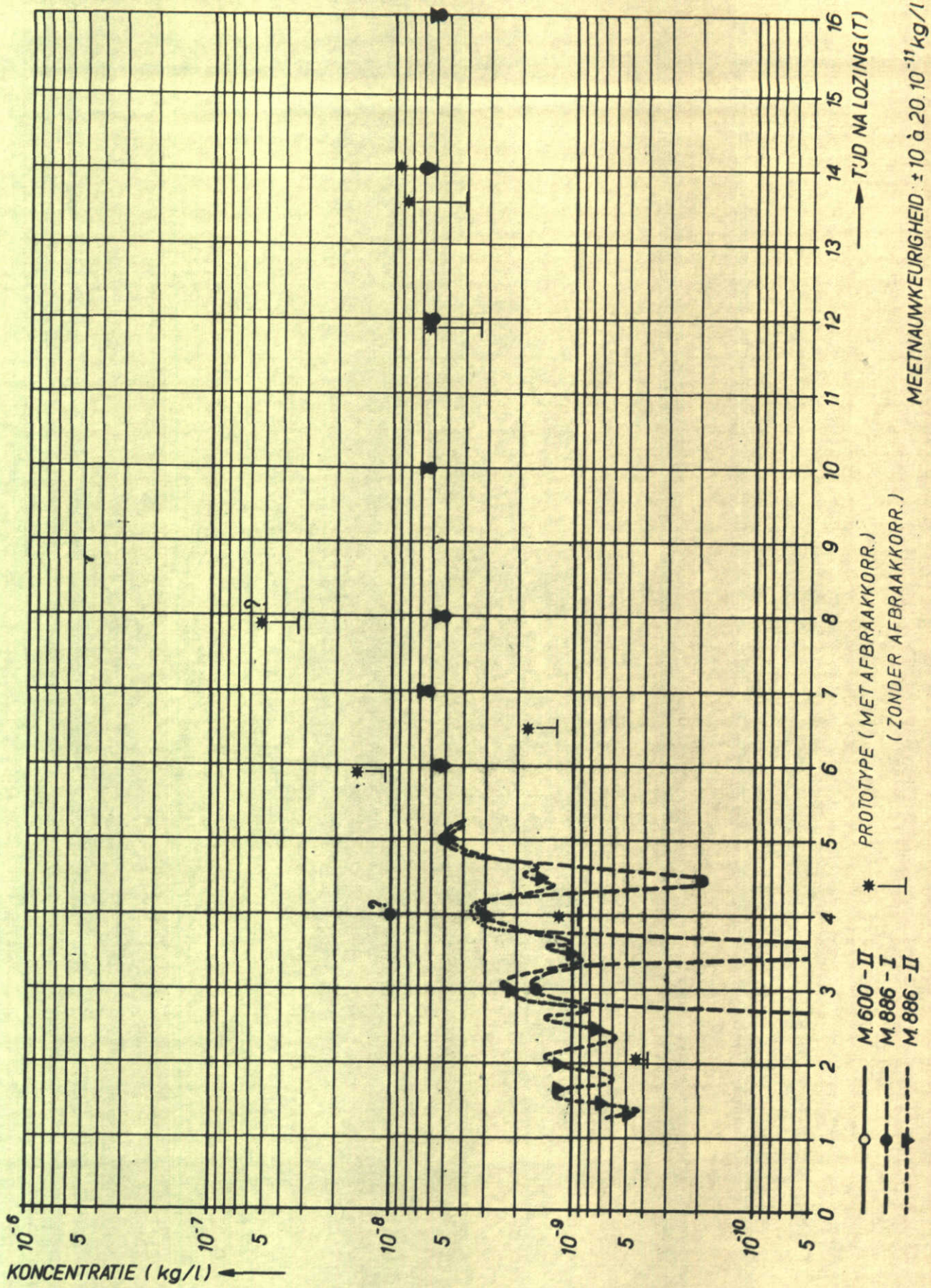
j.z.

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M.1010-1122

FIG.10.29

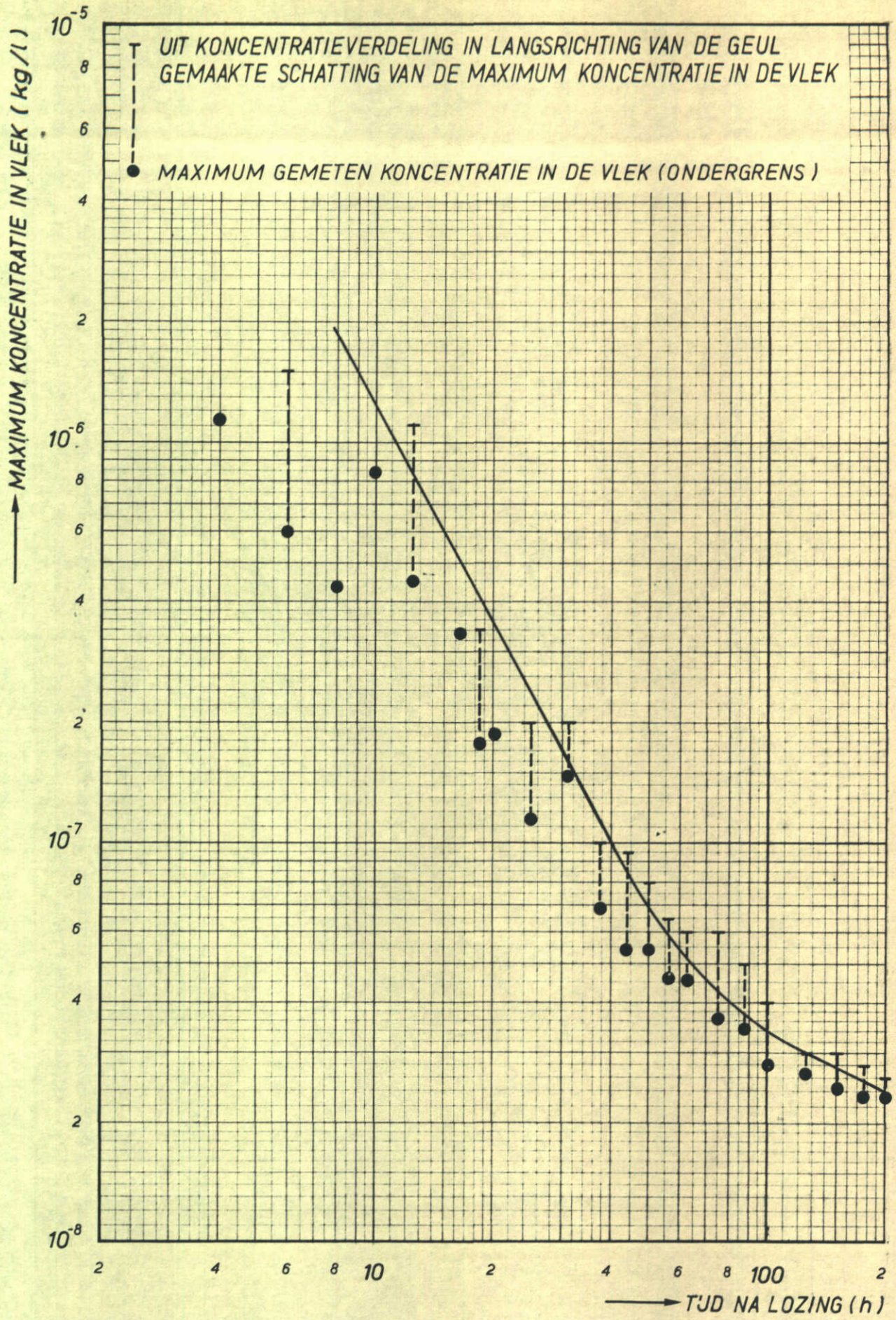


KONCENTRATIEVERLOOP ALS FUNKTIE VAN DE TJD
 PROEVEN M.600-II, M.886-I EN M.886-II
 EN PROTOTYPEPROEF

PUNT 30

j.z.

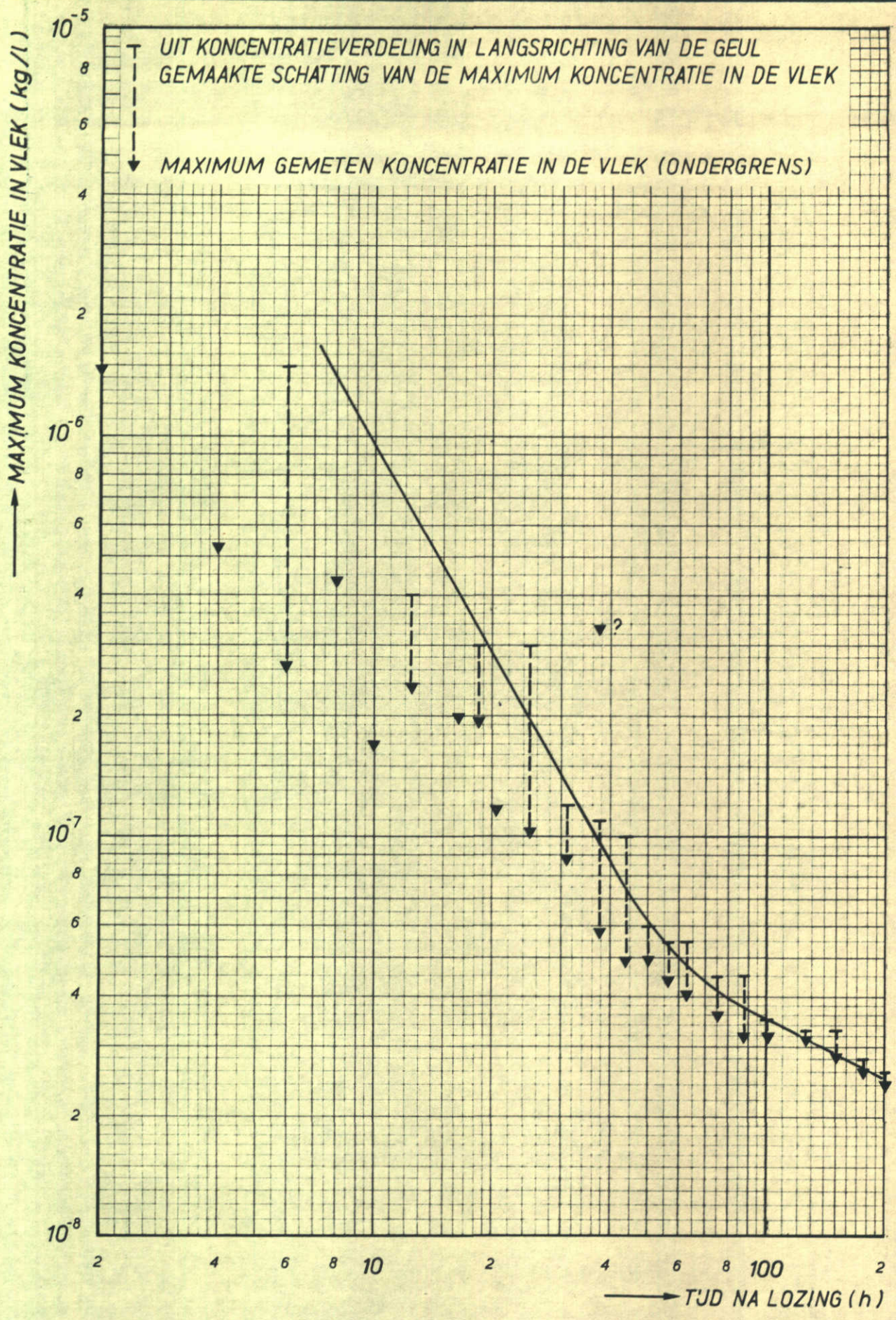
A4



MAXIMUM KONCENTRATIE
 ALS FUNKTIE VAN DE TJD - PROEF M.886-I

j.z.

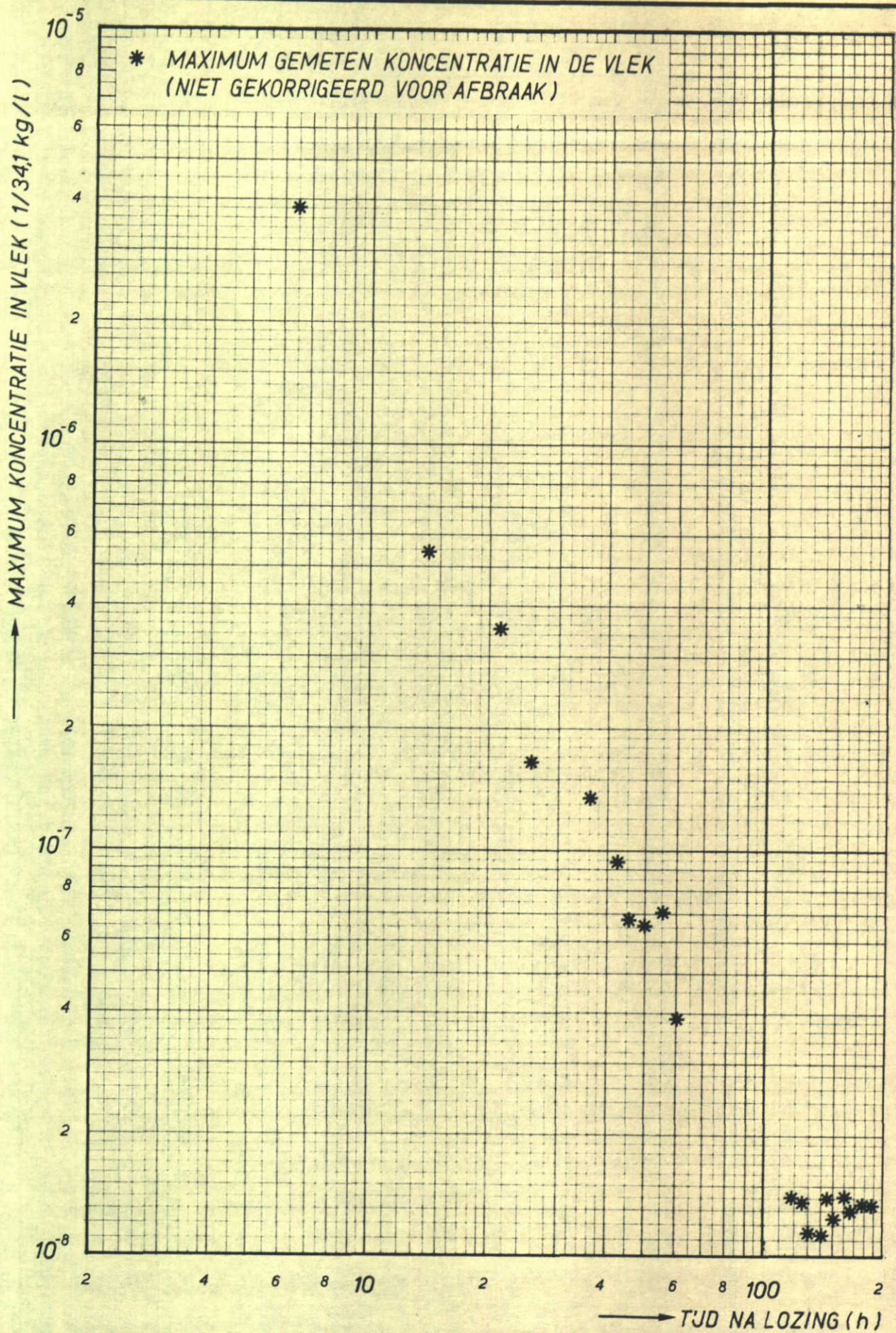
A4



MAXIMUM KONCENTRATIE
 ALS FUNKTIE VAN DE TJD - PROEF M.886-II

j.z.

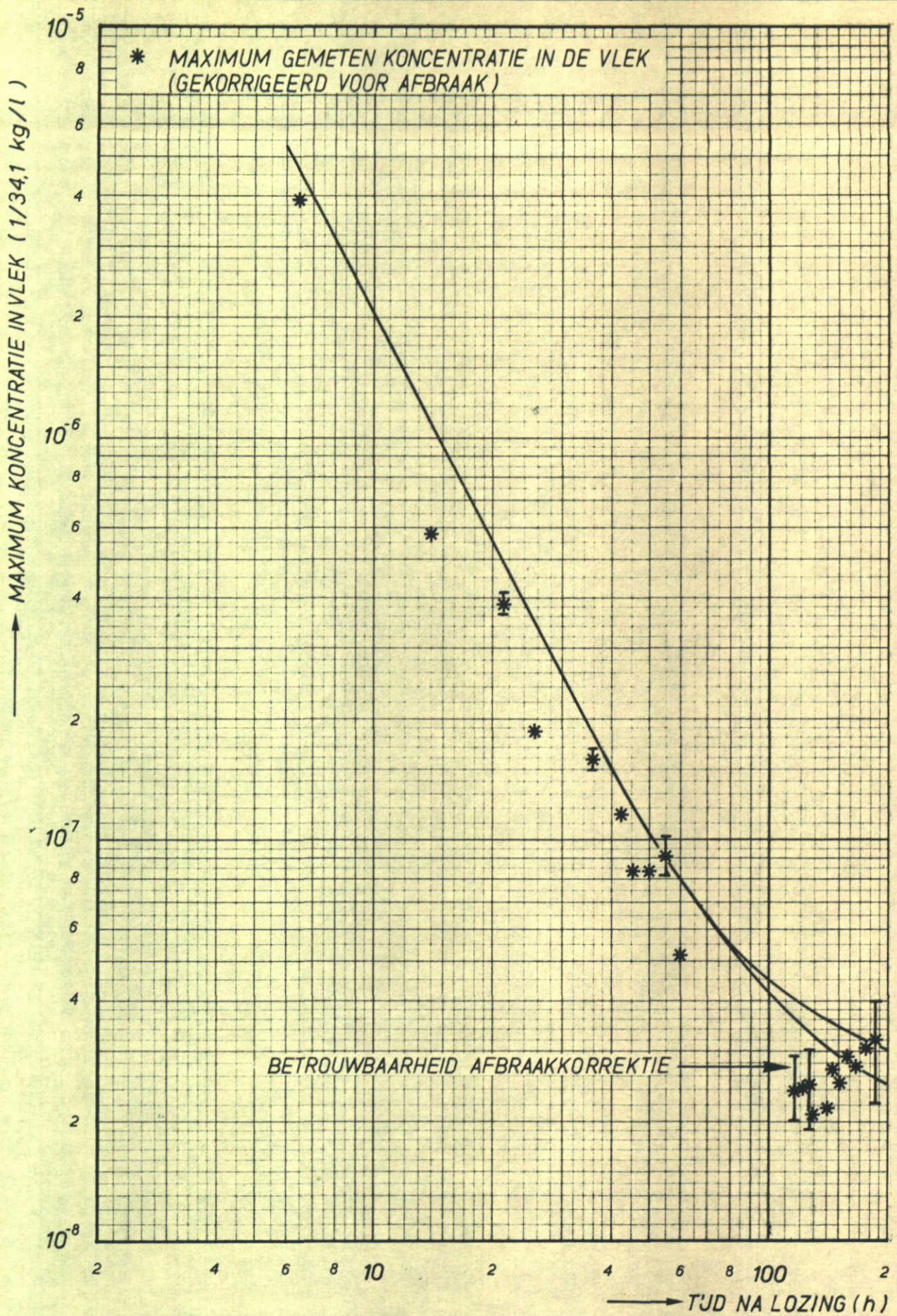
A4



MAXIMUM KONCENTRATIE
ALS FUNKTIE VAN DE TJD
PROEF IN PROTOTYPE ZONDER AFBRAAKKORREKTIE

j.z.

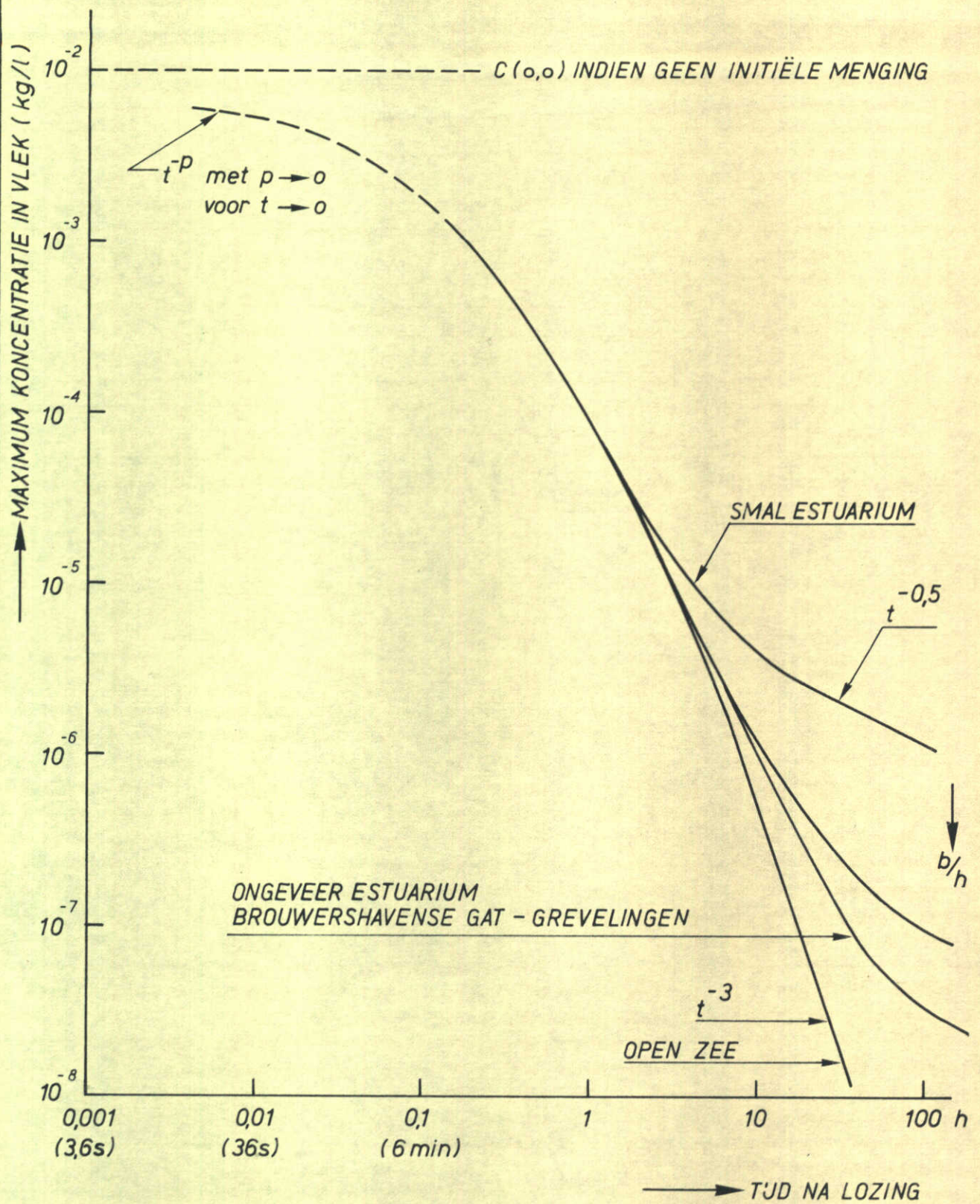
A4



MAXIMUM KONCENTRATIE
ALS FUNKTIE VAN DE TJD
PROEF IN PROTOTYPE MET AFBRAAKKORREKTIE

j.z.

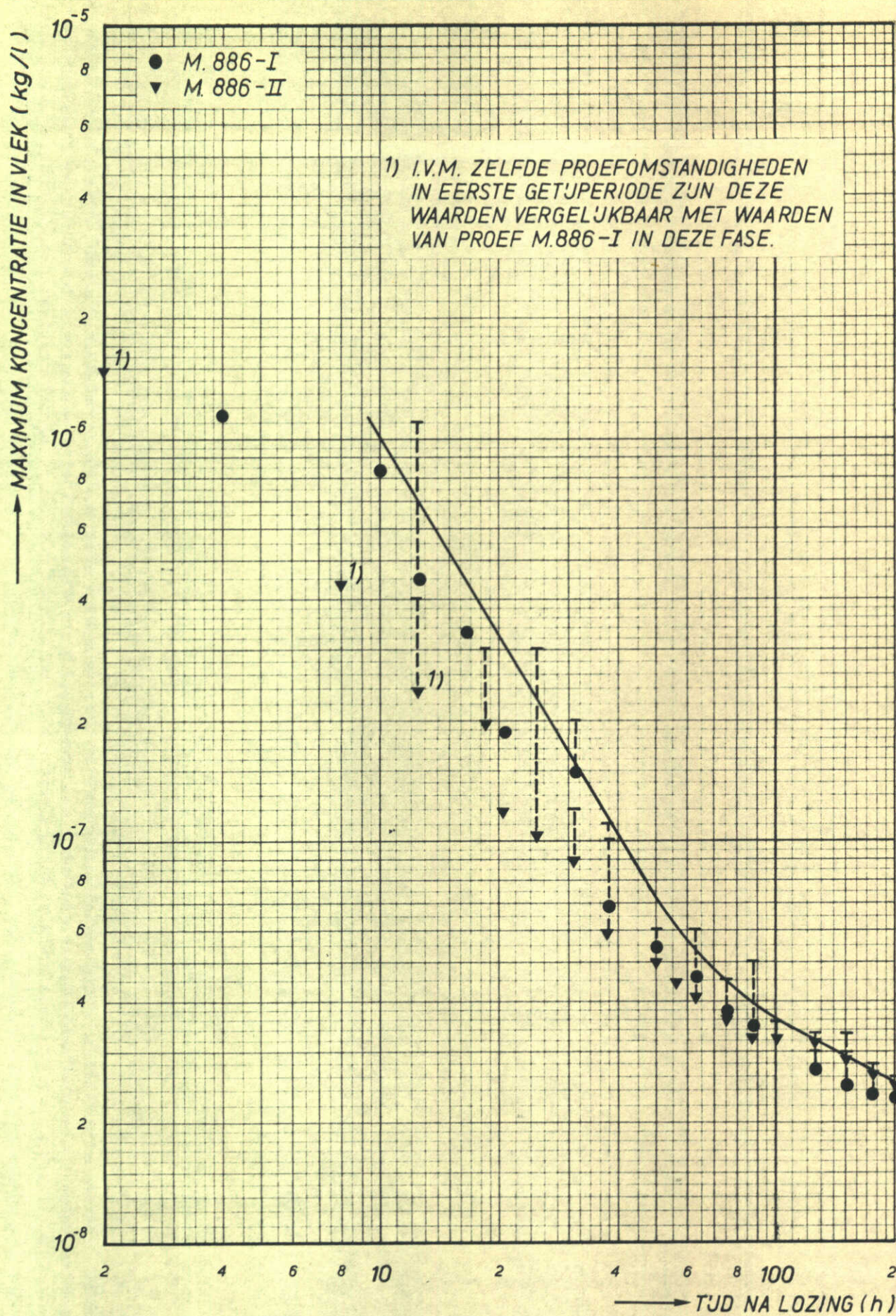
A4



SCHEMATISCH VERBAND TUSSEN MAXIMUM
KONCENTRATIE IN DE VLEK, TJD NA LOZING
EN GEOMETRIE ESTUARIUM

j,z.

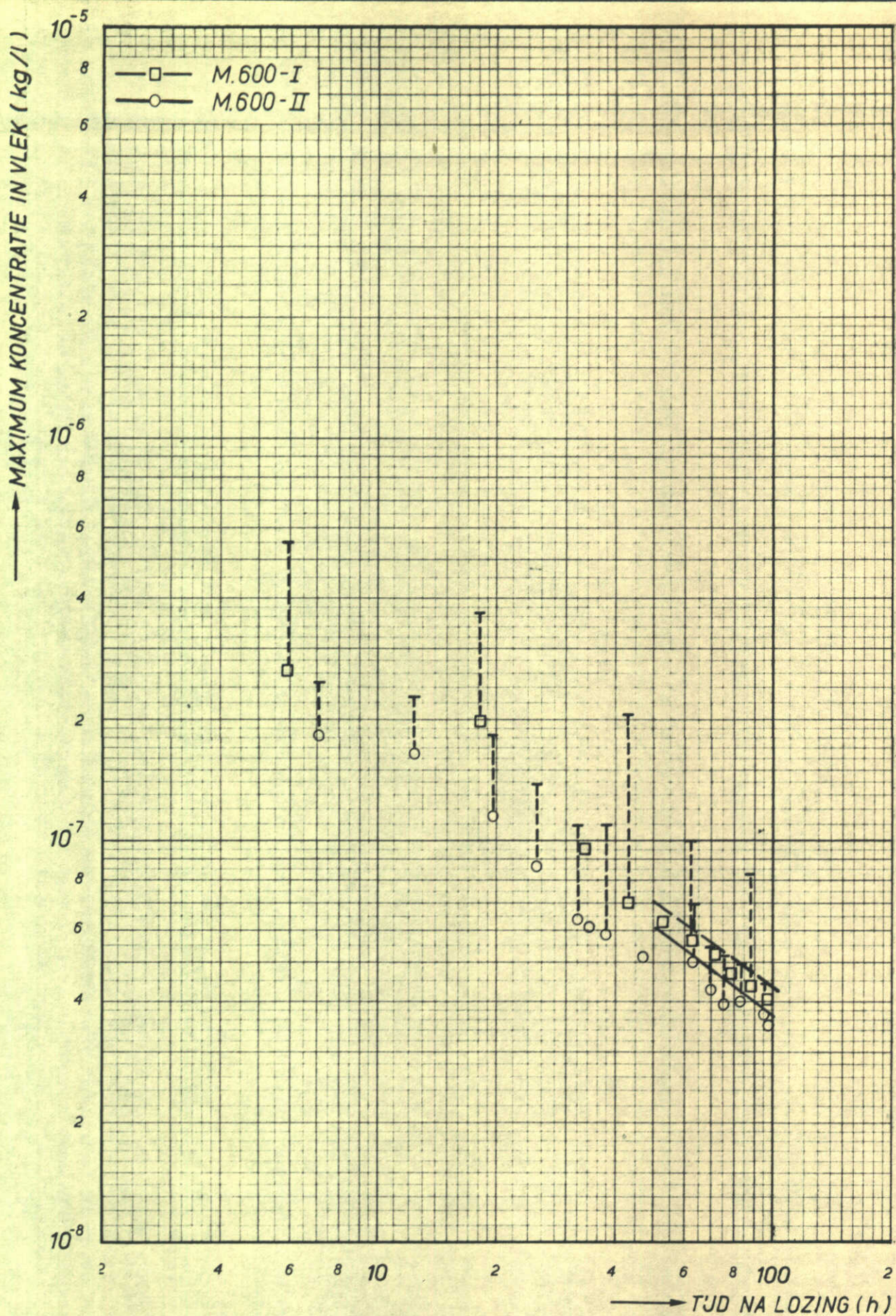
A4



MAXIMUM KONCENTRATIE
 ALS FUNKTIE VAN DE TJD - PROEVEN M.886-I EN M.886-II

j.z.

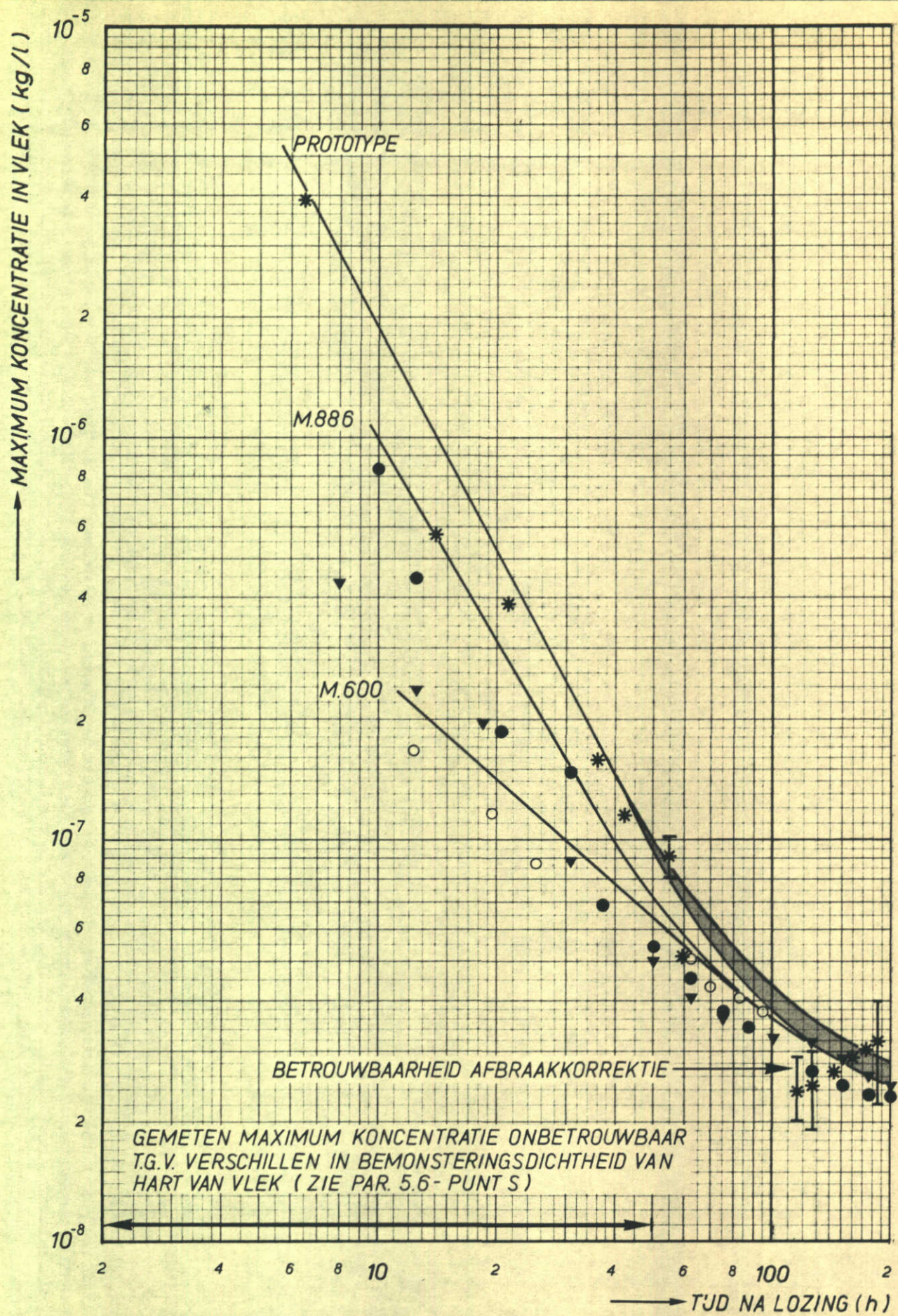
A4



MAXIMUM KONCENTRATIE
ALS FUNKTIE VAN DE TJJD - PROEVEN M.600-I EN M.600-II

j.z.

A4



MAXIMUM KONCENTRATIE ALS FUNKTIE VAN DE TJD
 PROEVEN M.600-II, M.886-I, M.886-II EN PROTOTYPEPROEF

j.z.

A4

waterloopkundig laboratorium postbus 177 delft