

2

WIT 15



Rapport Beunbezinking
Deel II: Uitzakkingsonderzoek

J.M. Groot

Technische Hogeschool Delft
Afdeling der Civiele Techniek
Vakgroep Kustwaterbouwkunde

Rapport Beunbezinking
Deel II: Uitzakkingsonderzoek

J.M. Groot

R A P P O R T B E U N B E Z I N K I N G

Deel II : Uitzakkingsonderzoek

Afstudeeronderzoek

J.M. Groot

februari 1982.

INHOUD

blz.

1.- Inleiding	1
2.- Samenvatting	2
3.- Beschrijving van het ^{Computer model} computerprogramma	3
3.1.- Inleiding	3
3.2.- Fysisch uitzakmechanisme	3
3.3.- Wiskundig model	7
3.3.1.- Uitgangspunten en diffusievergelijking	7
3.3.2.- Rand- en beginvoorwaarden	10
3.4.- Numerieke opzet van het programma	11
3.5.- In- en uitvoerparameters	13
3.6.- Voorbeelden van de invloeden van enkele parameters	13 14
4.- Beschrijving van de gootproeven	17 15
4.1.- Inleiding	17 15
4.2.- Gootopstelling	17 15
4.3.- Gootproeven-programma	21
4.3.1.- Proeven met water alleen	21
4.3.1.1.- Snelheidsverdelingen	21
4.3.1.2.- Turbulentieverloop	22
4.3.1.2.1.- Inleiding	22
4.3.1.2.2.- Turbulentiemetingen + analyse	22
4.3.1.2.3.- Schatting van coëfficiënten A en B	24
4.3.1.2.4.- Verklaring voor het gebruik van de waterdiepte in vgl. 4.2.4	30
4.3.1.2.5.- Vergelijking van de goot- en hoppermodelturbulentiemetingen	31
4.3.2.- Proeven met water en zand	33
4.3.2.1.- Uitvoering van de proeven	33
4.3.2.2.- Variatie van parameters tijdens de proevenserie	36
4.3.2.3.- Bodemprofielen	40
4.3.2.4.- Vergelijking van de gootresultaten met de uitkomsten van het computerprogramma	41
4.3.2.5.- Concentratieverdelingen in de vertikaal	42
4.3.2.6.- Dichtheidsstromen ^{om}	43
4.3.2.7.- Bepaling D_{50} van een zandsort	45
4.3.2.8.- Bepaling van het poriëngetal ^{van een zandsort}	46
5.- Conclusies	47

Appendix : "Rensdburg" prototype-metingen

Symbolenlijst

Literatuurlijst

Bijlagen - 1 t/m 96

Voorwoord

In het kader van een samenwerkingsovereenkomst tussen de Aannemingsmaatschappij Zanen Verstoep N.V. en de vakgroep Kustwaterbouwkunde van de afdeling Civiele Techniek van de Technische Hogeschool Delft heeft een onderzoek plaatsgevonden naar het bezinkingsproces in de hopper van een sleepopperzuiger.

In het nu voorliggende rapport zijn de voornaamste resultaten van dat onderzoek samengevat.

Als afstudeeropdracht wordt een meer uitgebreide rapportage voorbereid.

In dat rapport zullen eveneens toepassingen worden behandeld.

Dit bezinkingsonderzoek ^{Interim}sluit aan op een eerder onderzoek in samenwerking met Zanen Verstoep (zie: Rapport Beunbezinking, deel I).

Beide onderzoeken hebben van februari 1981 t/m februari 1982 plaatsgevonden.

De medewerkers van de vakgroep Kustwaterbouwkunde hebben de samenwerking met de vertegenwoordigers van Zanen Verstoep als uitermate plezierig en stimulerend ervaren. In het bijzonder de intensieve begeleiding van en ^{de} daadwerkelijke deelneming aan de onderzoeken van Ir. N. van Dam van Zanen Verstoep is in hoge mate gewaardeerd.

1. Inleiding

Gedurende het laadproces van een sleephopperzuiger treden overvloeiverliezen op.

Het overvloeiverlies op een bepaald tijdstip is die fractie (in procenten) van de ingebrachte hoeveelheid sediment die weer via een overlaatsysteem uit de hopper verdwijnt. De overvloeiverliezen hangen af van verschillende parameters, zoals: samenstelling van het sediment (korreldiameter), debiet, concentratie, turbulentie-intensiteit en geometrie van de hopper.

De invloeden van deze genoemde parameters afzonderlijk en in combinatie op de overvloeiverliezen zijn niet eenduidig bekend.

In het streven naar een optimaal hopperrendement (gedefiniëerd als: $1 - \text{overvloeiverlies}$) is getracht een theoretisch onderbouwd verband tussen deze parameters en het hopperrendement te formuleren.

100 -

2. Samenvatting

Er is een rekenmodel opgezet dat het verband aangeeft tussen het hopperrendement en de parameters die daarop van invloed zijn.

Het rekenmodel gaat uit van de diffusievergelijking waarmee het fysische uitzakproces mathematisch kan worden beschreven.

M.b.v. een numerieke methode kan deze vergelijking door een computer worden opgelost.

Het rekenmodel is getoetst aan de resultaten van een modelonderzoek. De metingen in dit onderzoek waren voornamelijk gericht op het verkrijgen van gegevens met betrekking tot het uitzakproces van het sediment.

Tevens zijn enkele prototype-metingen verricht. Deze metingen kunnen eveneens worden gebruikt voor de toetsing van het rekenmodel.

In dit rapport worden het rekenmodel, de modelproeven en de prototype-metingen beschreven en worden enkele resultaten van het modelonderzoek vergeleken met uitkomsten van het rekenmodel.

3. Beschrijving computermodel

3.1 Inleiding

Doel van het totale onderzoek is het hopperrendement te kunnen bepalen als functie van: turbulentie-intensiteit, debiet, concentratie, korreldiameter en geometrie van de hopper. De afzonderlijke invloeden van de genoemde parameters zijn in principe wel bekend. Gecombineerd echter lijken ze elkaar dermate te beïnvloeden, dat het eindresultaat in vele gevallen onvoorspelbaar wordt.

Teneinde deze invloeden goed te kunnen overzien is het nuttig om het fysische uitzakproces in een wiskundig model te beschrijven. Fundamentele kennis omtrent het uitzakmechanisme is in dat geval een eerste vereiste. Deze wiskundige beschrijving kan numeriek worden opgelost. Het is uiteindelijk dit numerieke model waarmee, via een gevoeligheidsanalyse, de invloed van de diverse parameters op het hopperrendement kan worden bepaald.

3.2 Fysisch uitzakmechanisme

Het uitzakmechanisme kan in z'n eenvoudigste vorm worden beschreven m.b.v. een bolvormig deeltje dat onder invloed van de zwaartekracht in stilstaand water naar beneden zakt. De valsnelheid w is afhankelijk van de grootte (D) en de dichtheid (ρ_s) van het deeltje, en de dichtheid (ρ) en viscositeit (ν) van het water. Na een aanvankelijke versnelling van het deeltje ontstaat er evenwicht tussen de zwaartekracht en de van de snelheid van het deeltje afhankende weerstandskracht:

$$\frac{1}{6} \pi D^3 (\rho_s - \rho) g = \left(\frac{1}{2} C_D \rho w^2 \right) \left(\frac{1}{4} \pi D^2 \right) \quad (3.1)$$

De weerstand hangt af van de vormweerstandscoefficiënt C_D . C_D is een functie van de Reynoldswaarde $\frac{w \cdot D}{\nu}$ van de korrel. Er zijn twee gebieden te onderscheiden:

- Stokes : $C_D = Re^{-1}$ (Re = getal van Reynolds)

- Newton : $C_D = \text{constant} (\approx 1)$

Voor Reynoldswaarden kleiner dan 0,1 à 0,5 is het Stokes' gebied van toepassing met:

$$w \approx \frac{\Delta \cdot g \cdot D^2}{18 \nu} \quad \left(\frac{\Delta}{\Delta} = \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right) \quad (3.2)$$

In dit geval is de stroming om de korrel zuiver visceus. Voor Reynoldswaarden groter dan circa 1000 is het Newton-gebied van toepassing met:

$$w \approx \left[\frac{4}{3} \cdot D \cdot \Delta \cdot g \right]^{1/2} \quad (3.3)$$

In dit geval is de stroming om de korrel turbulent.

Zandkorrels zijn in de praktijk nooit zuiver bolvormig. De afwijking van de bolvorm wordt gegeven door de vormfactor s :

$$s = \frac{c}{(a \cdot b)^{1/2}} \quad (3.4)$$

a, b en c zijn resp. de grootste, middelste en kleinste diameter in 3 onderling loodrechte richtingen.

Afwijking van de bolvorm is van invloed op de C_D -waarde van de korrel en dientengevolge op de valsnelheid (fig. 1 en 2).

De valsnelheden van zandkorrels in water (20° C) in de bovengenoemde twee gebieden en het tussengelegen gebied zijn experimenteel bepaald [1]. Hierbij is een vormfactor s van 0,7 aangehouden. Uit deze experimenten is het volgende empirische verband tussen de valsnelheid en de korreldiameter gevonden:

$$\log \left(\frac{1}{w} \right) = 0,447 \left(\log D_{50} \right)^2 + 1,961 \log D_{50} + 2,736 \quad (3.5)$$

(fig.3)

In de hopper spelen naast deze korreldiameter - valsnelheidsrelaties nog twee andere zaken een belangrijke rol:

- 1.- Het sediment bevindt zich in een turbulente stroming.
- 2.- De valsnelheid wordt gereduceerd als gevolg van de hoge zandconcentraties.

SECTIE 18.90:

Bezinking van vaste stoffen.

Sub

april 1964

Diagram: Nieuw grafiek bezinking

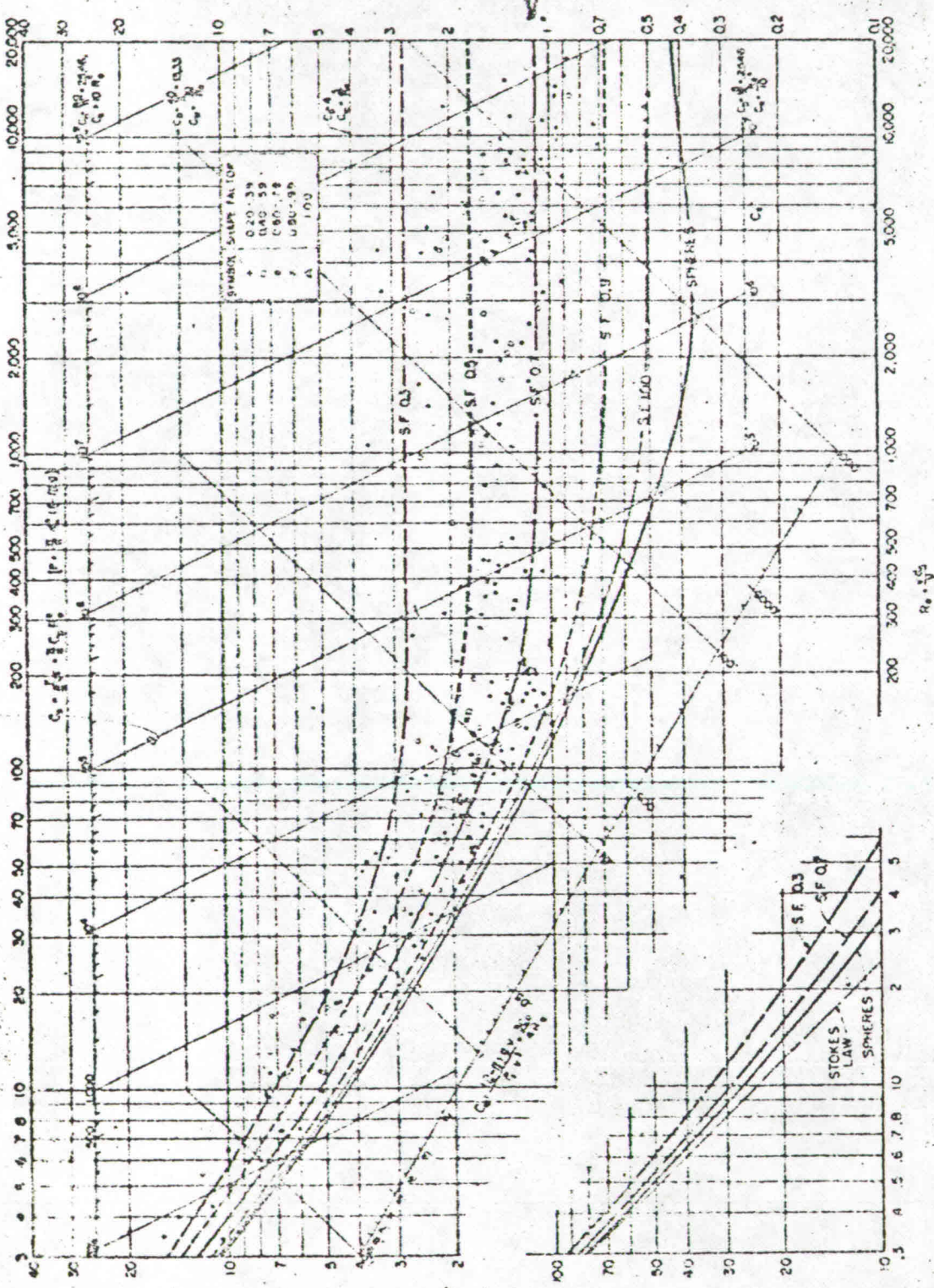


FIG 1 - C_0 vs Re RELATIONS

SECTIE 18.90: Bezinking van vaste stoffen.

Sub :

april 1964

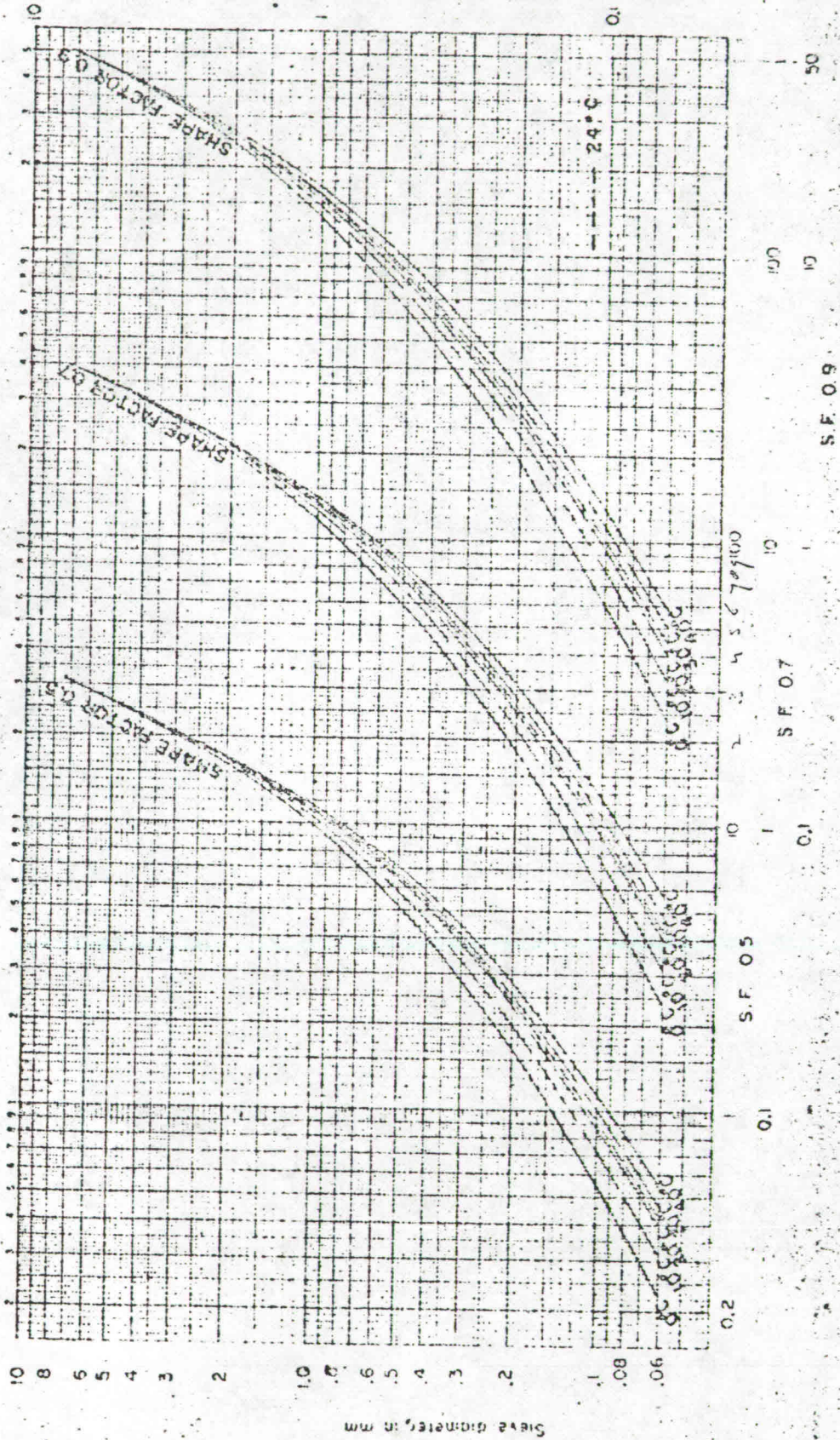


FIG. 2 RELATIE VALSNELHEID - ZEEFDIAMETER

SECTIE 13.90: Bezinking van vaste stoffen.

Sub 1

april 1964

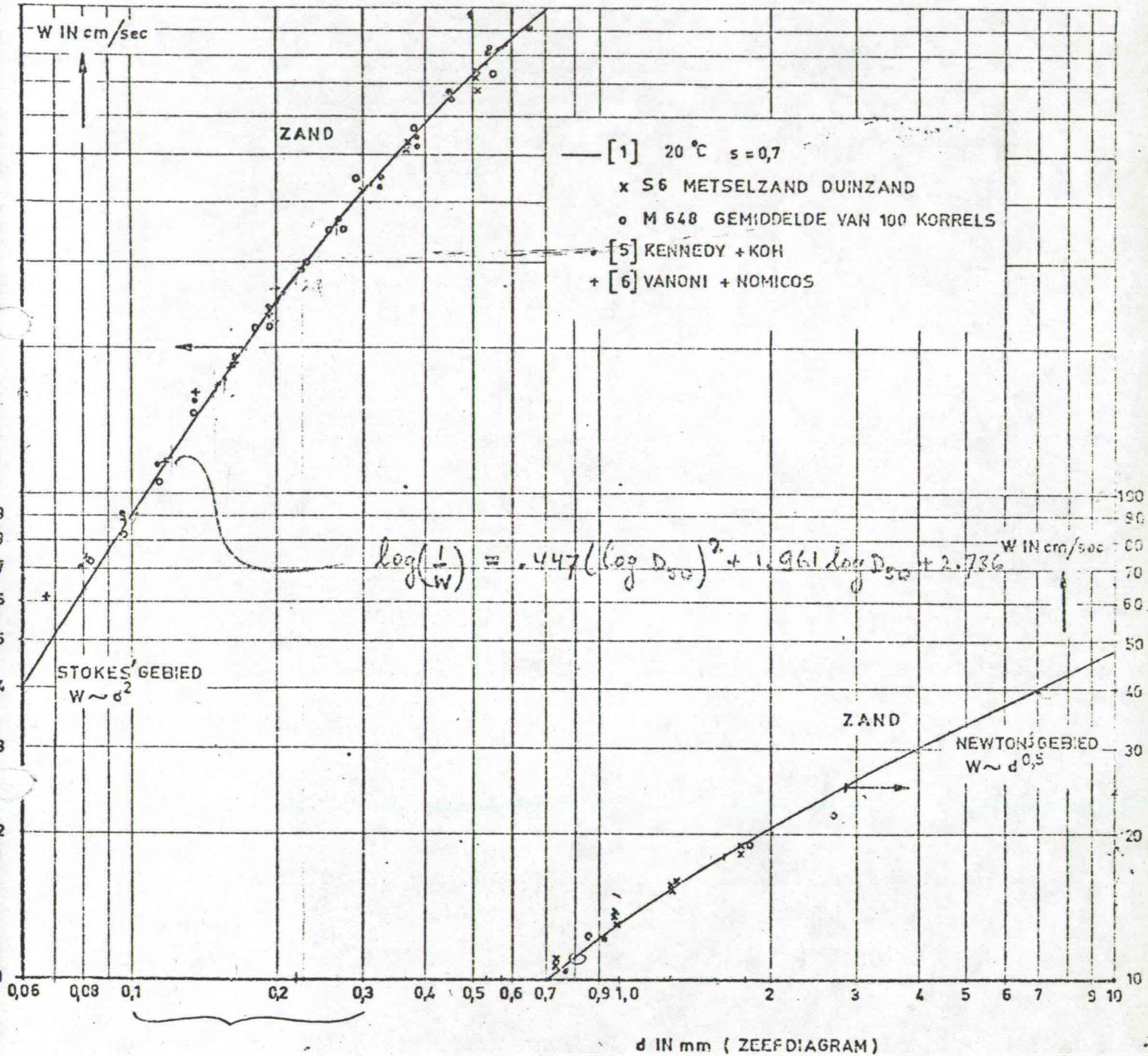


FIG. 3 VALSNELHEID VAN ZAND IN WATER 20 °C

ad 1. Ten gevolge van de turbulente stroming treedt diffusief transport op dat afhankelijk is van de concentratiegradiënt over de hoogte. Deze afhankelijkheid kan als volgt worden verduidelijkt:

Indien de concentratie uniform over de hoogte is verdeeld zoals in fig.4, zal,

wanneer er een vloeistofpakketje van nivo 1 naar nivo 2 wordt verplaatst, de concentratie in nivo 2 niet veranderen, aannemende dat de zandkorrels met het vloeistofpakketje meebewegen. Deze aanname is gerechtvaardigd wanneer de interne snelheidsfluctuaties groot zijn t.o.v. de valsnelheid van de korrel.

Uit continuïteitsoverwegingen zal tegelijkertijd nivo 1 worden aangevuld met een vloeistofpakketje uit nivo 2, waardoor de concentratie in nivo 1 eveneens onveranderd blijft.

Wanneer echter de concentratie over de vertikaal niet constant is, en er dus een gradiënt is (fig.5), zal verplaatsing van een vloeistofpakketje van nivo 1 naar nivo 2 een toename van de concentratie in nivo 2 tot gevolg hebben. Tegelijkertijd zal een verplaatsing van nivo 2 naar nivo 1 een afname van de concentratie in nivo 1 betekenen.

Turbulente uitwisseling leidt in dit geval dus tot een vermindering van de concentratiegradiënt.

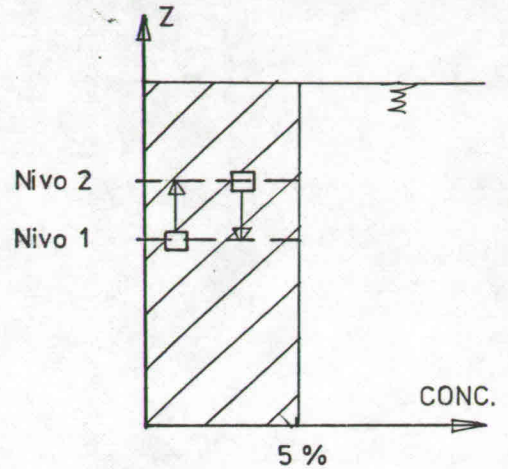


Fig.4 Uniforme concentratieverdeling

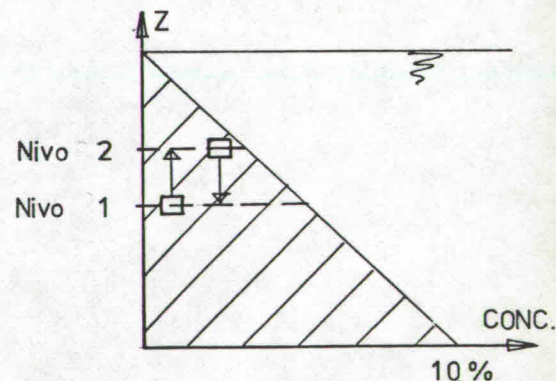


Fig.5 Driehoekskoncentratieverdeling

De mate van uitwisseling van het water wordt weergegeven door de diffusie-coëfficiënt ϵ . Deze is gewoonlijk niet uniform over de vertikaal verdeeld, maar heeft in geval van een logaritmische snelheidsverdeling een parabolisch verloop. (Zie blz. 30.)

ad 2. Wanneer een deeltje naar beneden zakt, vindt er rond dit deeltje een opwaartse vloeistofstroom plaats. Andere deeltjes in de directe omgeving worden daardoor gehinderd in "hun" valproces. Uit proeven blijkt dat de valsnelheid afneemt naarmate de concentratie toeneemt.

kan niet

Richardson en Zaki [1] hebben deze zogenaamde "hundred settling" in zeer veel proeven bekeken. De voornaamste resultaten zijn:

$$Re = \frac{w \cdot D}{\nu} < 0,2 \rightarrow w_{rel} = (1 - c)^{4,65} \tag{3.6}$$

$$0,2 < Re < 1 \rightarrow w_{rel} = (1 - c)^{4,35} Re^{-0,03} \tag{3.7}$$

$$1 < Re < 200 \rightarrow w_{rel} = (1 - c)^{4,45} Re^{-0,1} \tag{3.8}$$

$$Re > 500 \rightarrow w_{rel} = (1 - c)^{2,39} \tag{3.9}$$

waarbij $w_{rel} = \frac{w(c)}{w} = \frac{\text{gereduceerde valsnelheid}}{\text{valsnelheid van één korrel}}$

Een aantal onderzoekers hebben geprobeerd een theoretisch verband tussen de valsnelheid en de concentratie af te leiden.

kan niet

Oliver [1] vond:

$$w_{rel} = \left[1 - kc^{1/3} \right] \quad k = \text{konstante} \tag{3.10}$$

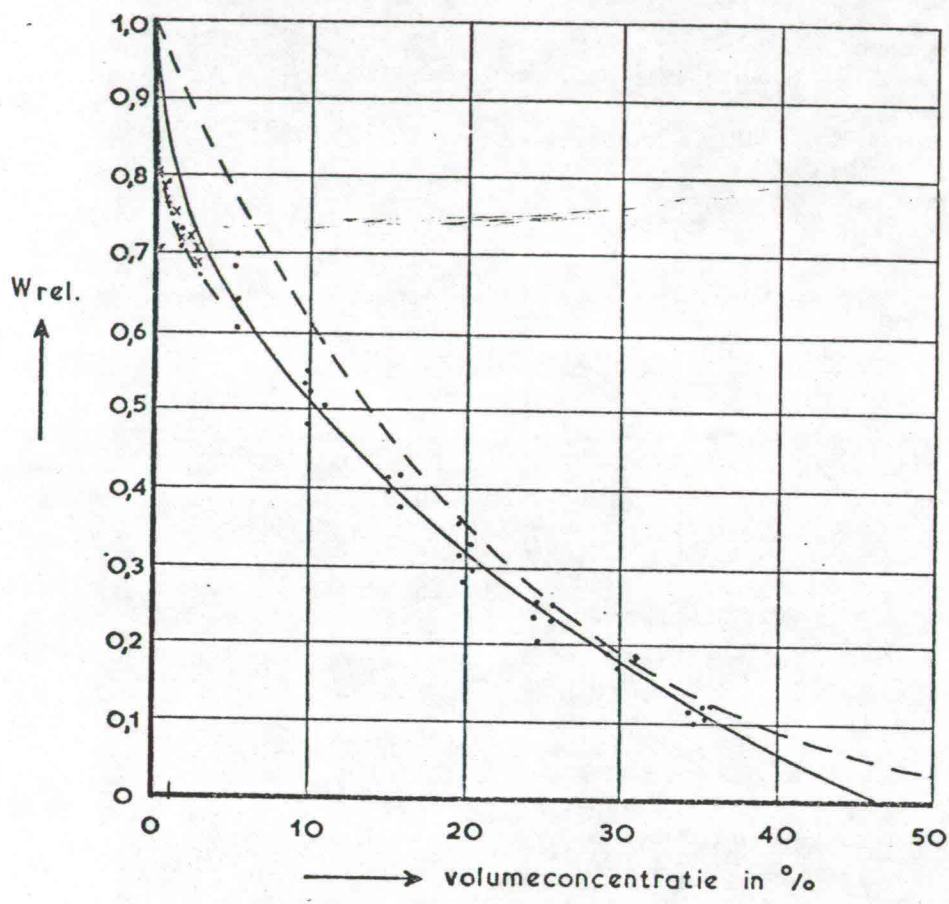
Aanpassing aan de meetresultaten leverde:

$$w_{rel} = \left[1 - 2,15 c \right] \left[(1 - 0,75 c)^{1/3} \right] \tag{3.11}$$

(fig.6A)

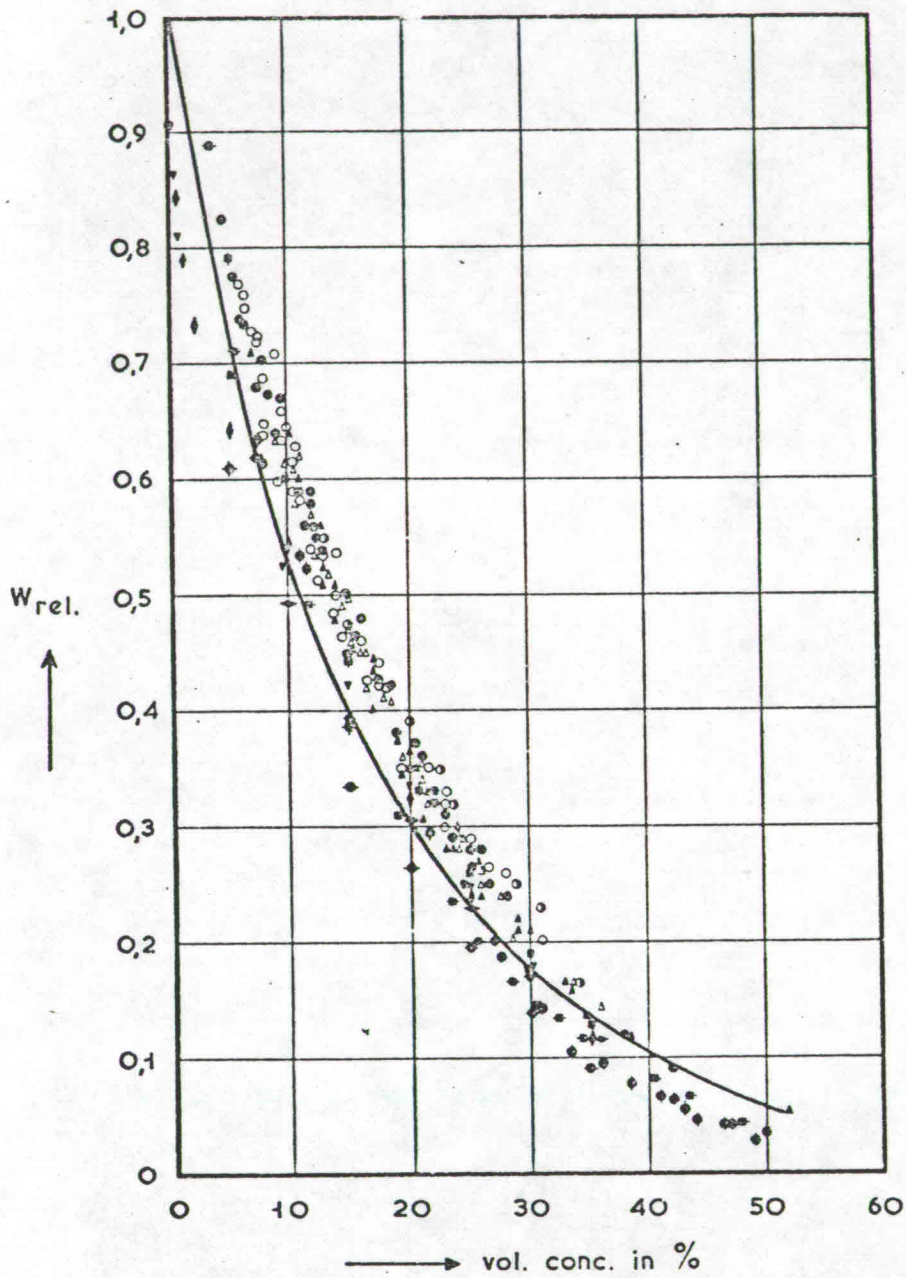
?

Oliver maakt in zijn theorie geen gebruik van Re-waarden van de korrels. Vergelijking (3.11) is alleen geldig voor kleine Re-getallen ($Re < 0,2$).

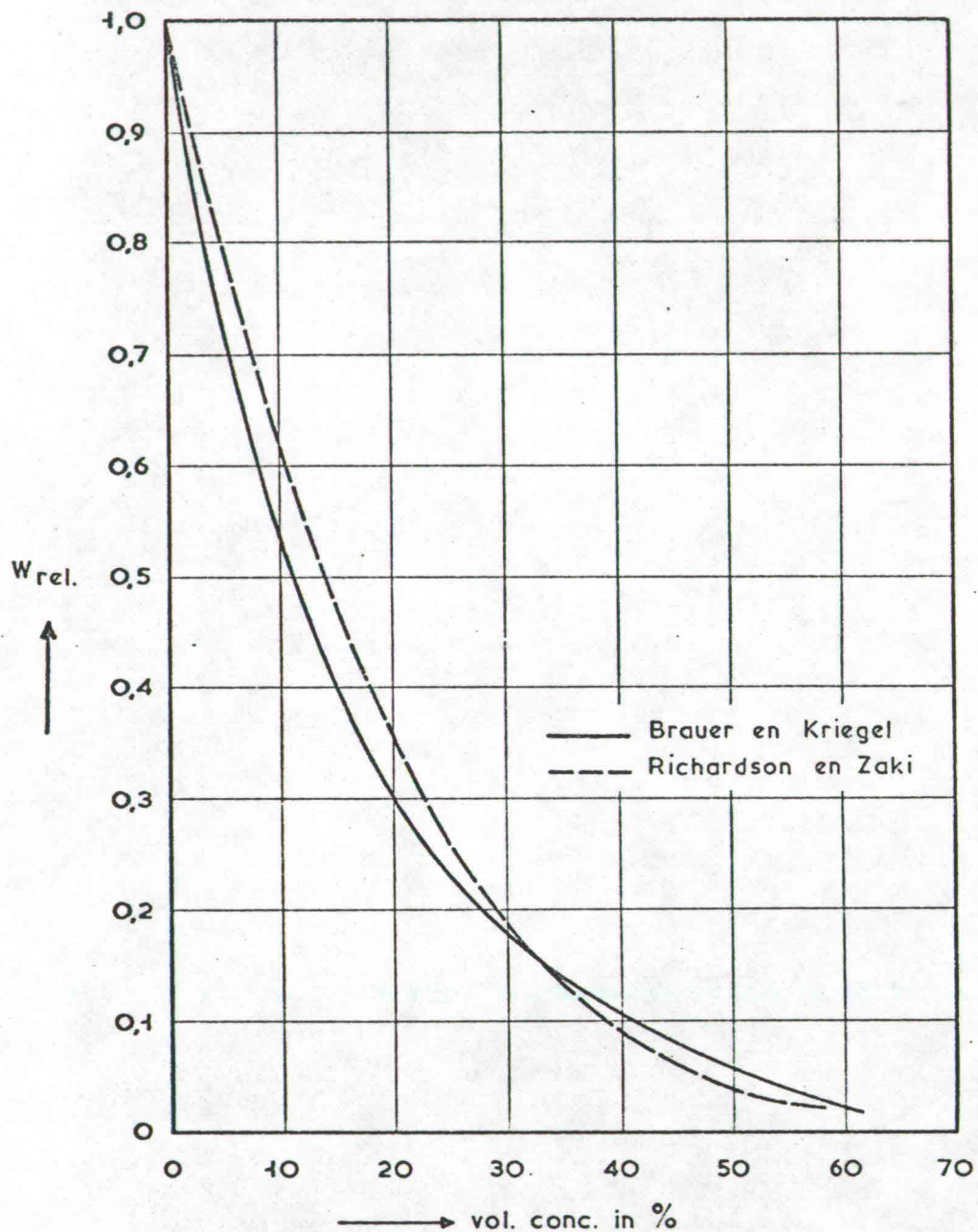


- Oliver
- · - McNown en Lin
- - - Richardson en Zaki
- x proeven van McNown en Lin
- . proeven van Oliver

INVLOED CONCENTRATIE OP VALSNELHEID
 Re KLEIN



INVLOED CONCENTRATIE OP VALSNELHEID
VOLGENS BRAUER EN KRIEGEL



VERGELIJKING THEORETISCHE FORMULE VAN
BRAUER EN KRIEGEL MET EMPIRISCHE
FORMULE VAN RICHARDSON EN ZAKI

Brauer en Kriegel [3] zijn bij hun afleiding uitgegaan van de volgende twee principes:

- Door het verplaatsen van de korrels ontstaat een retourstroom. De gemiddelde snelheid van deze retourstroom moet in mindering worden gebracht op de "bruto" valsnelheid.
- De aanwezigheid van de korrels verstoort het stroombeeld en veroorzaakt tijdelijk en plaatselijk grote snelheidsfluctuaties, waarmee een verhoogde impulsuitwisseling gepaard gaat (te vergelijken met verhoogde viscositeit). Hierdoor ontstaat een extra vertragingseffect.

De volgende relatie werd opgesteld:

(3.12)

$$w_{rel} = \frac{1 - c}{\left\{ 1 + \frac{c}{(1-c)^2} \right\} \left\{ 1 + \frac{1,2}{\left[1 + \left(\frac{\pi/12}{c} \right)^2 \right]^{1/2}} - \frac{1}{2} \right\}}$$

(fig.6B).

Voor kleine waarden van het getal van Reynolds ($Re < 0,2$) stemt de empirische formule van Richardson en Zaki goed overeen met de theoretische formule van Brauer en Kriegel (fig.6C).

De formules van Richardson en Zaki zijn afgeleid voor uitzakken in niet stilstaand water, en aangezien deze formules vrij eenvoudig zijn, zullen deze verder in dit rapport worden gebruikt. Met name (3.7) en (3.8) zullen worden gebruikt, omdat de aangegeven Re-waarden corresponderen met die van de bij de gootproeven gebruikte zanden:

$$\left(\begin{array}{l} 100 \mu\text{m} \rightarrow Re \approx 0,9 \\ 300 \mu\text{m} \rightarrow Re \approx 13 \end{array} \right)$$

3.3. Wiskundig model

3.3.1 Uitgangspunten en diffusievergelijking

Teneinde het uitzakproces dat in de hopper optreedt met een wiskundig model te kunnen beschrijven, is van de volgende veronderstellingen uitgegaan:

- In de hopper bevindt zich tussen de inbrengzone en de overvloeizone een relatief ongestoord gebied, waarin de stroming gelijkmatig over de breedte en de hoogte van de hopper is verdeeld (fig.7).
- Het is een quasi-stationair proces, in die zin, dat de tijdsintervallen Δt zodanig gekozen moeten worden dat de bodemstijging in dat tijdsinterval niet van invloed is op de concentratie.
- Hoewel er snelheidscomponenten in 3 richtingen zullen optreden, wordt alleen de hoofdrichting beschouwd, aangegeven door de x-as. (Gemiddeld zijn de snelheden in beide andere richtingen 0).

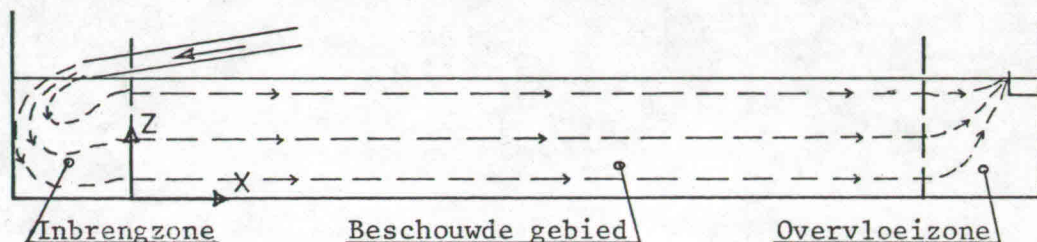
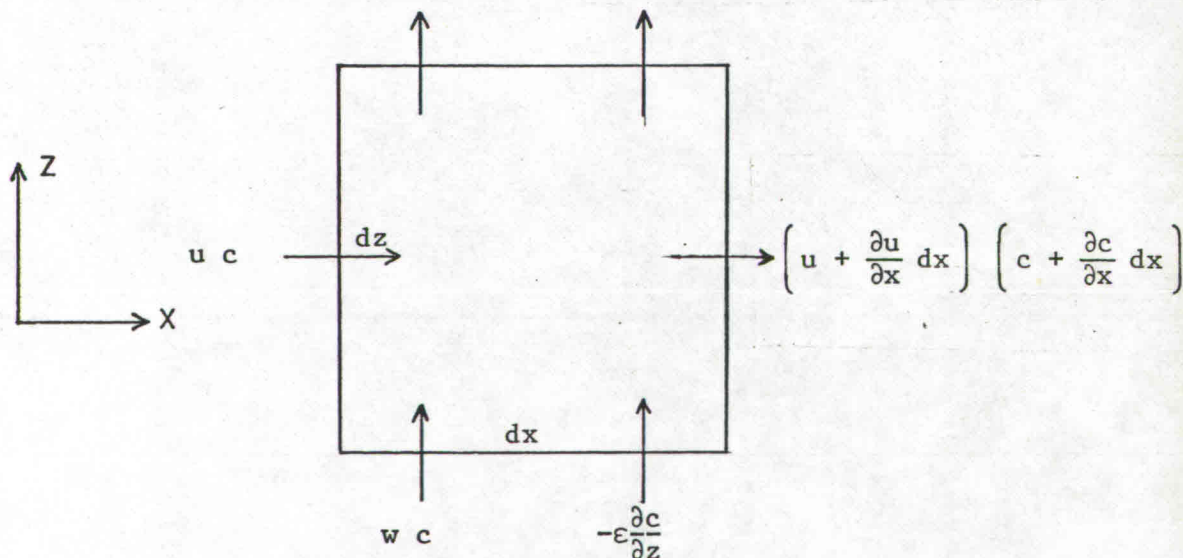


Fig.7 Langsdoorsnede hopper

De opzet van het model is gebaseerd op de massabalans van het sediment. Gesteld wordt dat de concentratie in een klein vloeistofelementje met vaste ruimtecoördinaten gedurende een tijdsinterval t ^{of Δt ?} niet in de tijd verandert. Tweedimensionaal ziet het evenwicht van een elementje er als volgt uit:

$$\left(w + \frac{\partial w}{\partial z} dz \right) \cdot \left(c + \frac{\partial c}{\partial z} dz \right) - \left(\epsilon + \frac{\partial \epsilon}{\partial z} dz \right) \cdot \left(\frac{\partial c}{\partial z} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} dz \right)$$



Bij de diffusie-term staat een min-teken, omdat in geval van een positieve concentratiegradiënt het transport in de negatieve z-richting plaatsvindt.

De valsnelheid is in de positieve z-richting getekend en krijgt dus een negatieve waarde.

$$\text{In : } ucdz + wcdx - \epsilon \frac{\partial c}{\partial z} dx \quad (3.13)$$

$$\begin{aligned} \text{Uit: } & - \left(w + \frac{\partial w}{\partial z} dz \right) \left(c + \frac{\partial c}{\partial z} dz \right) dx + \left(\epsilon + \frac{\partial \epsilon}{\partial z} dz \right) \left(\frac{\partial c}{\partial z} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} dz \right) dx + \\ & - \left(u + \frac{\partial u}{\partial x} dx \right) \left(c + \frac{\partial c}{\partial x} dx \right) dz \end{aligned} \quad (3.14)$$

Behoud van massa levert voor het elementje:

$$(3.13) + (3.14) = 0 \rightarrow \text{(met verwaarlozing van 2e orde termen)}$$

$$u \frac{\partial c}{\partial x} + c \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial c}{\partial z} + c \frac{\partial w}{\partial z} - \epsilon \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} - \frac{\partial \epsilon}{\partial z} \frac{\partial c}{\partial z} = 0 \quad (3.15)$$

Met $\frac{\partial u}{\partial x} = 0$ en w is negatief levert dit tenslotte:

$$u \frac{\partial c}{\partial x} - \frac{\partial(wc)}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial z} \left(\epsilon \frac{\partial c}{\partial z} \right) = 0 \quad (3.16)$$

Dit is de diffusievergelijking voor het tweedimensionale geval.

De vergelijking kan in deze vorm echter niet direct voor de beunsituatie worden gebruikt. De parameters u , w en ϵ zijn namelijk niet constant:

$$\begin{aligned} u &= f(x, z) && \text{(b.v. Logaritmisch snelheidsprofiel)} \\ w &= f(c) && \text{(Richardson en Zaki; blz. 6)} \\ \epsilon &= f(x, z) && \text{(Gekoppeld aan energie-inbreng en bodem-} \\ &&& \text{ruwheid; zie hoofdstuk 4.3.1.2)} \end{aligned}$$

De diffusievergelijking kan nu als volgt worden weergegeven:

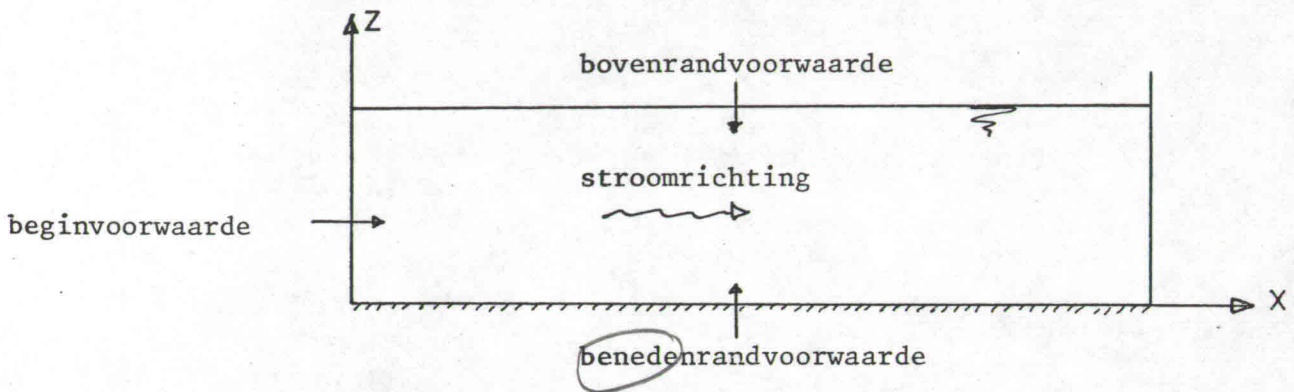
$$u(x, z) \frac{\partial c}{\partial x} - w(c) \frac{\partial c}{\partial z} - c \frac{\partial w(c)}{\partial c} \frac{\partial c}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial z} \left(\epsilon(x, z) \frac{\partial c}{\partial z} \right) = 0 \quad (3.17)$$

Deze partiële diffusievergelijking vormt de basis van het computerprogramma. Oplossen van de vergelijking levert de concentratie in ieder punt (x,z).

3.3.2 Rand- en beginvoorwaarden

Alvorens tot een oplossing te kunnen komen, dienen de rand- en beginvoorwaarden bekend te zijn.

In onderstaande figuur is het beschouwde gebied getekend.



- Voor de bovenrand (het wateroppervlak) geldt dat het ^{verticale} sedimenttransport ter plaatse nul moet zijn, omdat door de rand geen zand kan verdwijnen of binnenkomen. Het vertikaal zandtransport is dus nul:

$$wc + \epsilon \frac{\partial c}{\partial z} = 0 \tag{3.18}$$

- De bodemrandvoorwaarde is veel minder eenduidig te bepalen. In de literatuur [6,7,8] worden twee mogelijkheden genoemd:

$$\frac{\partial c}{\partial z} = 0 \tag{3.19}$$

en

$$c_{\text{bodem}} = c_e \tag{3.20}$$

(c_e = evenwichtsbedconcentratie).

(3.19) wordt gebruikt in de sedimentatiezone, waar $\frac{\partial s}{\partial x} < 0$ (s = lokale sedimenttransport-capaciteit).

Een sluitende fysische verklaring hiervoor is niet te geven.

Als argument is slechts aan te voeren dat het verticale transport t.g.v. turbulente diffusie aan de bodem daardoor automatisch nul wordt ($\epsilon \frac{\partial c}{\partial z} = 0$, als $\frac{\partial c}{\partial z} = 0$).

(3.20) wordt gebruikt in de erosiezone, waar $\frac{\partial s}{\partial x} \geq 0$.

Tengevolge van snelheden nabij de bodem (eventueel schuifspanningen) woelen korrels van de bodem los. Afhankelijk van de omstandigheden zal daardoor een zekere basisconcentratie (c_e) aan de bodem ontstaan in een laag ter dikte van enkele korreldiameters.

Beide genoemde randvoorwaarden worden gebruikt bij "normaal" zandtransport. Bij het laden van een beun treedt een andere situatie op. Materiaal zakt uit en zet zich af op de bodem. De optredende concentraties zijn veel hoger dan de evenwichtsconcentratie (behalve bij de evenwichtsdiepte, zie hoofdstuk 4.3.2.3). De concentratievertikaal is als het ware oververzadigd. In dat geval is het moeilijk om te bepalen hoe groot de basisconcentratie is. De situatie is enigszins te vergelijken met de sedimentatiezone bij "normaal" zandtransport. Daarbij treedt ook oververzadiging op. In dat geval zou randvoorwaarde (3.19) moeten worden gebruikt.

- Als beginvoorwaarde dient duidelijk te zijn hoe de beginconcentratie over de vertikaal verdeeld is. Bij het verifiëren van het programma met de gootresultaten kunnen de gemeten concentratievertikalen als uitgangspunt dienen.

3.4 Numerieke opzet van het programma

Het oplossen van de diffusievergelijking (3.17) m.b.v. een computer kan pas plaatsvinden nadat deze partiële differentiaalvergelijking via een differentie-schema in een differentie-vergelijking is omgezet. Dit kan op twee manieren gebeuren:

- 1.- differentiemethode
- 2.- eindige-elementenmethode.

ad 1. Alvorens een differentiemethode toe te kunnen passen, moet de vergelijking gediscretiseerd worden. Meest gebruikelijk is het karakteriseren van een functie door een eindig aantal functiewaarden op discrete afstanden. Een tweedimensionale functie wordt op een rooster in het vlak gekarakteriseerd. Dit betekent in ons geval dat de concentratie alleen bekend is op roosterpunten in het x,z-vlak.

Elk differentie-schema heeft z'n eigen definitie van de wijze waarop de afgeleiden bepaald moeten worden. Het hangt van de gewenste nauwkeurigheid af welk schema men kiest. Daarbij wordt verder nog onderscheid gemaakt tussen expliciete en impliciete methoden. Bij een expliciete methode is de afgeleide zodanig gedefiniëerd dat een nieuw roosterpunt direct uit de voorgaande roosterpunten kan worden berekend. (Eén vergelijking met één onbekende.)

Bij een impliciete methode zijn de afgeleiden zodanig gedefiniëerd dat per vergelijking twee of meer onbekenden voorkomen. Pas na gelijktijdig oplossen van het stelsel vergelijkingen (matrix-berekening) vindt men de gevraagde nieuwe waarden.

Een voordeel van een expliciete methode is dat het eenvoudig op te lossen is. Een nadeel is dat de stapgrootte beperkt dient te blijven i.v.m. de stabiliteit van het rekenproces.

Een voordeel van een impliciete methode is z'n ongevoeligheid voor stabiliteitsvoorwaarden. De stapgrootte kan onbeperkt worden gekozen. In dat geval is de nauwkeurigheid de beperkende factor. Een nadeel is de ingewikkelde structuur.

Bij beide methoden is het gebruik van randvoorwaarden noodzakelijk.

- ad 2. Een eindige-elementenmethode onderscheidt zich van een differentiemethode doordat de discretisering op een andere wijze tot stand komt. De onbekende functie wordt geschreven als een lineaire combinatie van een aantal basisfuncties ϕ_i . Vermenigvuldiging met een gewichtsfunctie ϕ_j en minimalisering van de fout levert een stelsel differentiaalvergelijkingen die met behulp van een matrix-berekening kunnen worden opgelost. Het oplossen van deze vergelijkingen levert per keer de nieuwe concentraties in de volgende raai.

Uiteindelijk is voor de eindige-elementenmethode gekozen, omdat hiermee een variabele roosterverdeling kan worden genomen. Dit is van belang wanneer van te voren ^{niet} bekend is waar grote gradiënten zullen optreden. In die gebieden kan de roosterverdeling fijner worden gekozen.

3.5 In- en uitvoerparameters

De invoerparameters van het programma zijn in vijf categorieën onder te brengen:

- Hopper-geometrie : Beunbreedte [m]
Beunlengte [m]
Waterdiepte [m]
- Energie-inbreng : Uittreesnelheid diffusor [m/s]
Hoogte diffusor boven waterspiegel [m]
- Mengselparameters : D_{50} [m]
Relatieve dichtheid [-]
Debiet [m³/s]
- Zandbedeigenschappen : Ruwheid [m]
Poriëngehalte [%]
- Programmaparameters : Tijdsduur [s]
Snelheidsprofiel
Beginconcentratie-profiel
Stapgrootte in x-richting [m]
Stapgrootte in z-richting [m]
Stapgrootte in de tijd [s]

De uitvoer van het programma is op dit moment toegespitst op het verifiëren van de gootproeven en bestaat uit drie elementen:

- De concentratieverdeling in verschillende raaien.
- De fractie van het sediment dat in een raai nog in suspensie is (overvloeiverlies in de laatste raai).
- De bodemstijging gedurende tijdsduur Δt en het uiteindelijke bodemprofiel.

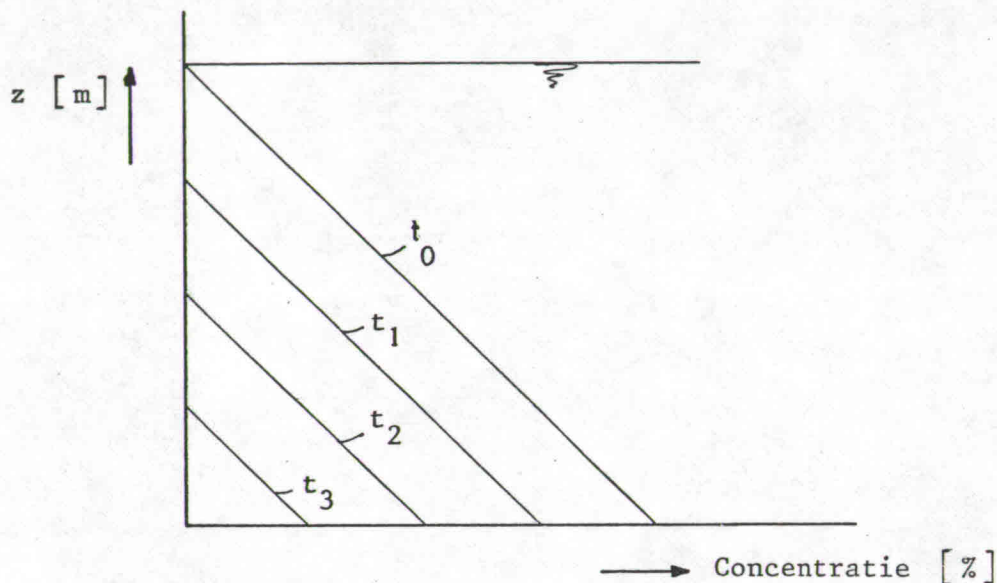
3.6 Voorbeelden van de invloeden van enkele parameters

Om het uitzakproces te verduidelijken zal de invloed van enkele belangrijke parameters m.b.v. eenvoudige voorbeelden worden behandeld. In alle voorbeelden is de concentratie in de beginraai driehoekig verdeeld aangenomen.

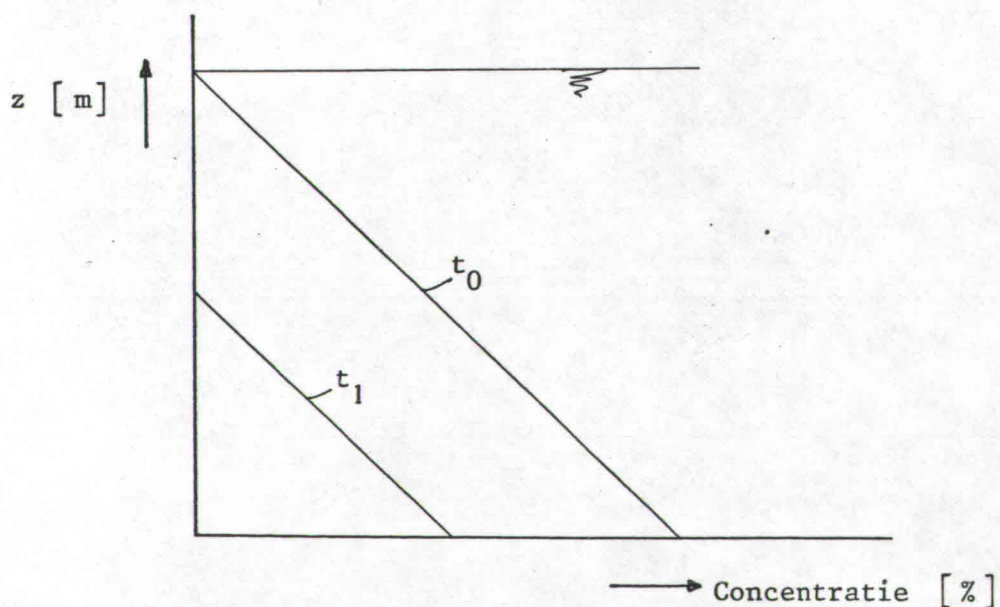
Behandeld worden resp. de korreldiameter, de gereduceerde valsnelheid en de diffusiecoëfficiënt.

- Voorbeeld 1:
- Korreldiameter 100μ
 - Geen reductie van de valsnelheid
 - Geen turbulentie ($\epsilon = 0$)

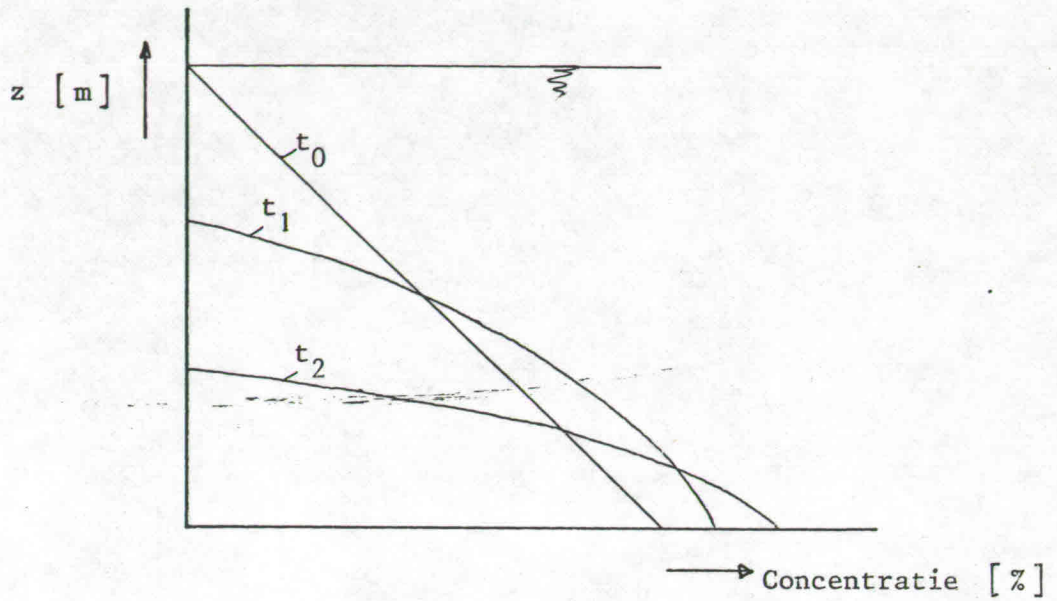
De concentratie ziet er op opeenvolgende tijdstippen (raaien) als volgt uit:



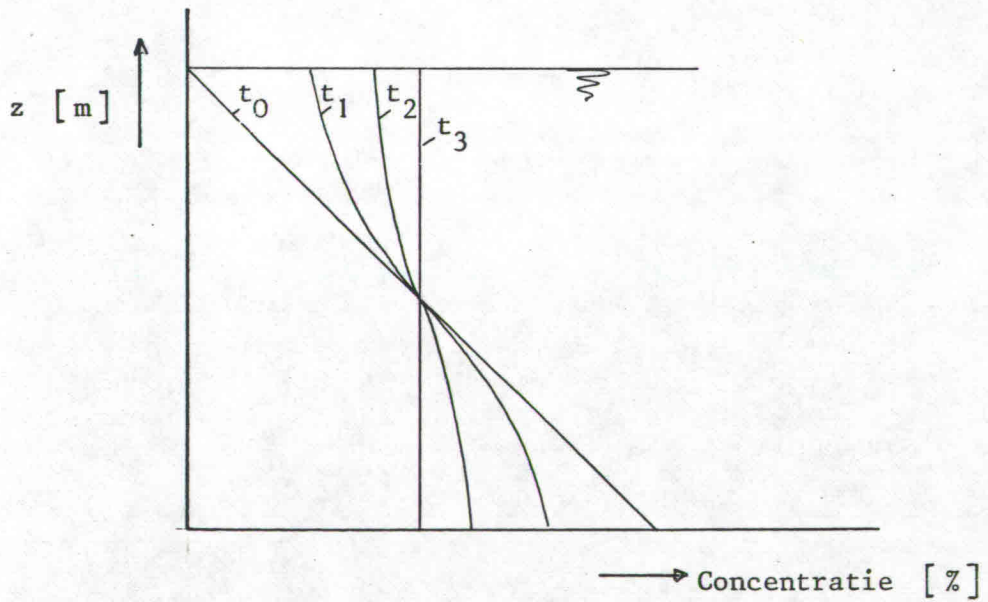
- Voorbeeld 2:
- Korreldiameter 200μ
 - Geen reductie van de valsnelheid
 - Geen turbulentie ($\epsilon = 0$).



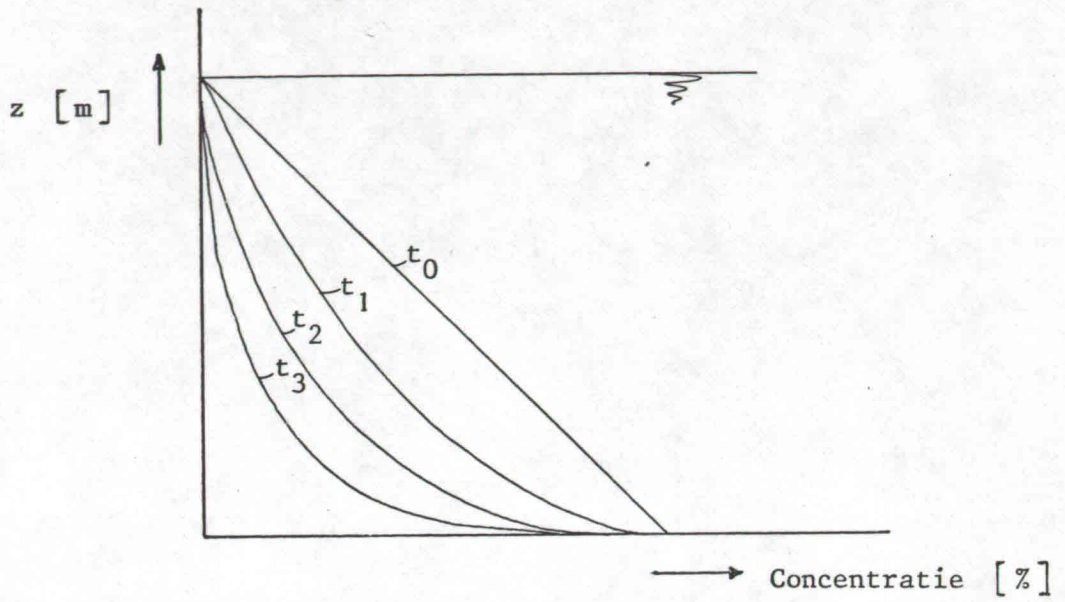
- Voorbeeld 3:
- Korreldiameter 100μ
 - Reductie van de valsnelheid t.g.v. de concentratie
 - Geen turbulentie ($\epsilon = 0$).



- Voorbeeld 4:
- Korreldiameter $\rightarrow 0$
 - Geen reductie van de valsnelheid
 - Turbulentie.



- Voorbeeld 5: - Korreldiameter 100μ
- Geen reductie van de valsnelheid
- Turbulentie.



4. Beschrijving van de gootproeven

4.1 Inleiding

De gootproeven, waarbij het fysische uitzakproces is gesimuleerd, dienen ter verificatie van het computerprogramma. Het computerprogramma, dat de oplossing geeft van het wiskundige uitzakmodel, zal immers op betrouwbaarheid moeten worden getest. Hiertoe kunnen de uitzakresultaten van de gootproeven worden gebruikt. Wanneer blijkt dat de gootresultaten redelijk met de voorspellingen van het model overeenkomen, mag worden aangenomen dat het computermodel ook voor prototype-omstandigheden redelijk zal voldoen.

De gootproeven zijn gedurende drie maanden in het "Laboratorium voor Vloeistofmechanica" van de afdeling Civiele Techniek verricht. (Oktober t/m december 1981.)

4.2 Gootopstelling

Bij de keuze van het debiet en de geometrie van goot is uitgegaan van de hoppersituatie van de "Hendrik Zanen" (één van de sleepzuigers van Zanen Verstoep) aan het eind van de laadcyclus. Er bestaan aanwijzingen dat de overvloeiverliezen bij normaal bedrijf bij fijn zand (100 - 200 μ) sterk toenemen zodra de gemiddelde waterdiepte in de hopper tot circa 2 meter is afgenomen. De gemiddelde stroomsnelheid in het beun bedraagt in dit geval circa 0,25 m/s. Bij een beunlengte van 60 meter is de lengte - diepteverhouding 30.

Deze gegevens dienen als uitgangspunt bij de keuze van de gootconfiguratie opdat het uitzakproces in de goot op soortgelijke wijze kan plaatsvinden als in de hopper. Het is echter geenszins de bedoeling de goot te beschouwen als schaalmodel van de hopper, teneinde de gootresultaten rechtstreeks naar prototype-resultaten te kunnen omrekenen. Het fysisch uitzakproces in turbulente stroming is een proces dat in z'n algemeenheid onafhankelijk van de modelgeometrie kan worden beproefd. Enkele voorwaarden zijn dat de stroming turbulent is, en dat het gebruikte korrelmateriaal bij het uitzakken aan dezelfde fysische wetten onderhevig is als het sediment in de hopper. Het is voor het bepalen van de invloed van de turbulentie van belang om juist die zanden te beproeven, waarbij diffusief transport optreedt. Daarom mag niet te grof materiaal worden beproefd. Bij de gootproeven zijn zanden gebruikt met D_{50} 's van 100, 150 en 200 μ .

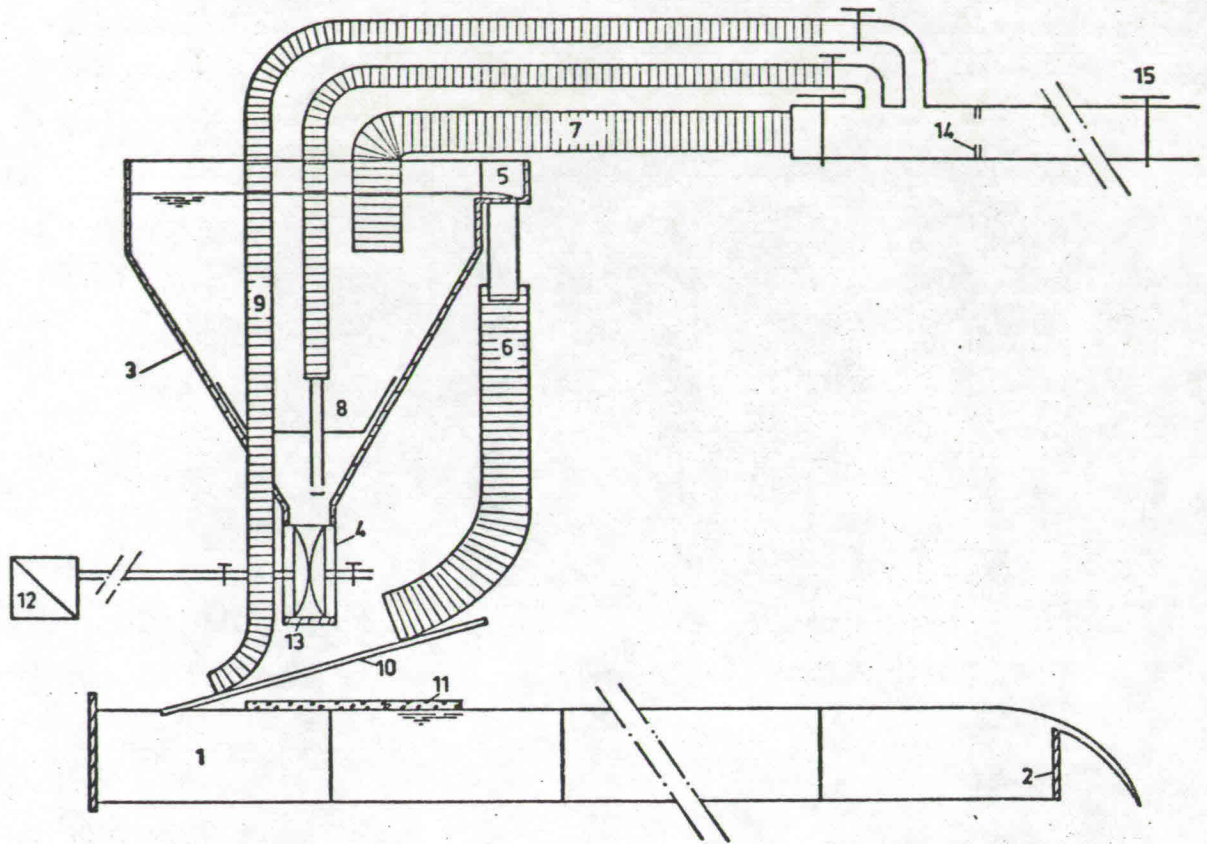
Bij zanden met kleinere D_{50} 's gaan visceuze en elektrische krachten bij het uitzakken een rol spelen, terwijl bij grotere D_{50} 's de val-snelheid te veel gaat overheersen, zodat de turbulente diffusie niet meer merkbaar is.

Er werd van een bestaande metalen goot gebruik gemaakt met de volgende afmetingen:

- Lengte : 10 m
- Breedte : 0,4 m
- Diepte : 0,47 m

Op blz. 19 is een schets van de opstelling weergegeven.





- | | |
|--------------------------------------|---|
| 1. Metalen goot | 11. "Golfscherm"
(ter reductie van oppervlakte golven) |
| 2. Overlaat van de goot | 12. Compressor |
| 3. ^{stalen} Houten trechter | 13. Diafragmaplaat |
| 4. Balgafsluiter | 14. Meetflens |
| 5. Overlaat van de trechter | 15. Hoofdafsluiter |
| 6. Overlaatslang | |
| 7. Hoofddebietslang | |
| 8. Sputlans | |
| 9. Hulpdebietslang | |
| 10. Inbrenggoot | |

Fig. 8 Gootopstelling

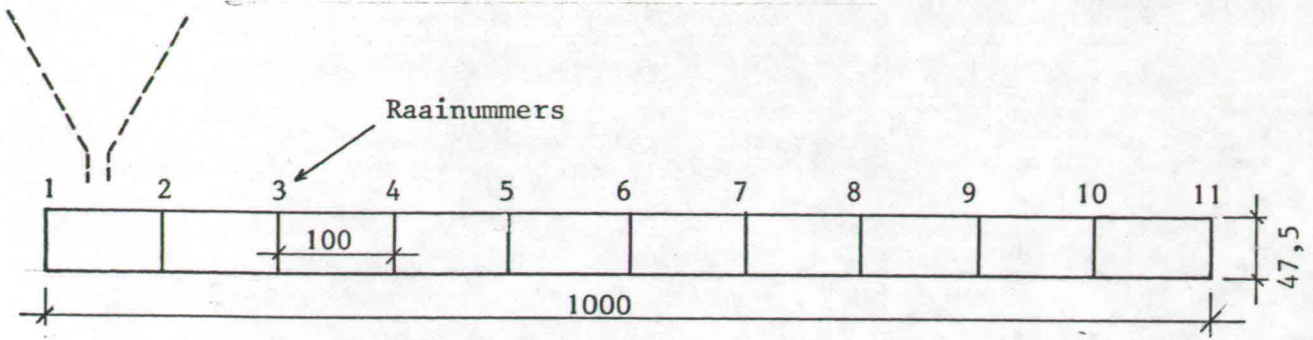


Fig.9 Overzicht van de meetraaien + afmetingen
(maten in cm)

4.3 Gootproeven-programma

Het gootonderzoek bestaat uit twee delen:

- 1.- Stromen met water alleen; bepaald worden:
 - a.- Snelheidsverdelingen
 - b.- Turbulentieverloop
- 2.- Stromen met water en zand, teneinde te bepalen:
 - a.- Bodemprofielen
 - b.- Concentratieverdelingen over de hoogte.

4.3.1 Proeven met water alleen

4.3.1.1 Snelheidsverdelingen

Met behulp van een micromolen (dezelfde die bij de metingen in het hoppermodel is gebruikt; zie Rapport Beunbezinking, deel I) zijn snelheidsprofielen over de hoogte gemeten. De snelheden zijn in raai 7 en 10 (fig.9) in 6 meetpunten over de vertikaal gemeten (bijlagen 1 en 2).

De onderste helft van het gemeten profiel geeft iets hogere waarden dan het aangenomen logaritmische snelheidsprofiel, terwijl de bovenste helft te lage waarden aangeeft. De snelheid neemt naar het oppervlak toe zelfs af. Aanvankelijk werd verondersteld dat dit aan de oppervlaktegolven te wijten was. Na toepassing van een golfscherm (fig.8) aan het begin van de goot op het wateroppervlak bleek het fenomeen echter nog steeds aanwezig te zijn. De eigenlijke oorzaak is waarschijnlijk de manier waarop het water in de goot werd ingebracht. In figuur 10 is dit schetsmatig aangegeven. Het debiet is geconcentreerd in de onderste helft van het doorstroomoppervlak.

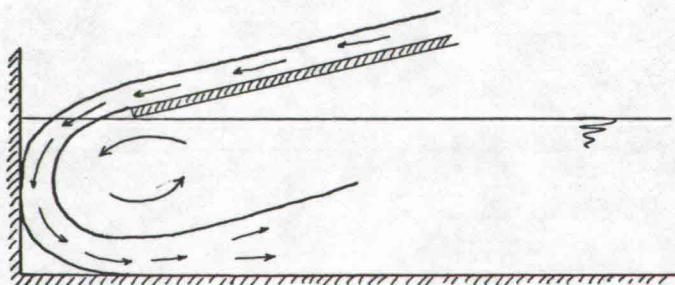


Fig. 10 Inbrengsysteem

Tijdens het bepalen van deze snelheidsprofielen is ook de turbulentie-intensiteit in dezelfde meetpunten gemeten. Dit is op identieke wijze gedaan als bij het hoppermodel-onderzoek. De RMS-waarde van de fluctuaties van de micromolen is een goede maat voor de turbulentie.

Naar het oppervlak toe bleek de relatieve turbulentie u' / \bar{u} sterk toe te nemen. Na toepassing van het golfscherm bleek deze toename veel minder sterk aanwezig te zijn (bijlage 3). Hieruit blijkt dat de orbitaalbeweging van het water door de micromolen als schijnbare turbulentie wordt gemeten. Het is dus noodzakelijk om de turbulentiemetingen niet te dicht onder het wateroppervlak te verrichten.

4.3.1.2. Turbulentieverloop

4.3.1.2.1 Inleiding

Het doel van de turbulentiemetingen is te trachten het verband te vinden tussen de hoeveelheid ingebrachte energie en het verloop van de grootte van de turbulente snelheidsfluctuaties.

(De ingebrachte energie is de som der potentiële en kinetische energie van de hoeveelheid mengsel die per seconde in de goot wordt ingebracht, gemeten t.o.v. het waterniveau in de goot.)

Met dit verband kan namelijk een redelijke schatting van het verloop van de diffusiecoëfficiënt in lengterichting van het beun worden verkregen via:

$$\epsilon = v' \cdot l \quad (\text{Rouse, p.187 [2]}) \quad (4.1)$$

waarin l de mengweglengte (zie blz. 30), ϵ de diffusiecoëfficiënt en v' de turbulente snelheid in de z -richting voorstellen. Kennis omtrent het verloop van ϵ in de stroomrichting is van belang voor het op juiste wijze invoeren van de turbulentie in het computerprogramma.

Bij de metingen zijn alleen de turbulente snelheidsfluctuaties in x -richting (u') gemeten. Gezien het feit dat u' en v' sterk gecorreleerd zijn ($u' \approx v'$), kan ook u' worden gebruikt om het verloop van ϵ te schatten.

4.3.1.2.2 Turbulentiemetingen + analyse

Er zijn drie series turbulentiemetingen over de lengte van de goot verricht. Op onderlinge afstanden van 1 meter zijn driemaal per meetpunt, gedurende 100 seconden, de turbulente snelheidsfluctuaties in x -richting gemeten. De micromolen was daarbij in het midden van de stroom op halve hoogte gesitueerd.

De turbulentie is onder drie verschillende omstandigheden bepaald:

- 1.- Groot debiet, klein vermogen / debiet (ca 3.000 J/m³)
- 2.- Klein debiet, groot vermogen / debiet (ca 25.000 J/m³)
- 3.- Groot debiet, groot vermogen / debiet (ca 25.000 J/m³)

Uit de meetresultaten zijn direct enkele conclusies te trekken.

Het blijkt dat de relatieve turbulentie (u' / \bar{u}) enigszins hyperbolisch over de lengte van de goot verloopt. Bovendien blijkt dat het debiet geen invloed heeft op de relatieve turbulentie (u' / \bar{u}), maar dat de manier van inbrengen wel grote invloed heeft (bijlage 4). (Opgemerkt dient te worden dat de conclusies op een zeer beperkt aantal proeven gestoeld zijn.)

De relatieve turbulentie kan opgebouwd worden gedacht uit twee delen die op elkaar gesuperponeerd kunnen worden. In de eerste plaats een deel t.g.v. het omzetten van de ingebrachte energie in turbulentie. Deze turbulentie is maximaal bij de inbreng en neemt in de lengterichting van de goot af t.g.v. dissipatie. Dit deel blijkt goed beschreven te kunnen worden volgens:

$$\frac{u'}{\bar{u}} = \frac{C}{x} \quad (4.2.1)$$

Met: $\frac{u'}{\bar{u}}$ = de relatieve turbulentie [-]
 C = constante, afhankelijk van de energie-inbreng [m]
 x = afstand in lengterichting vanaf de inbreng [m]

De relatieve turbulentie neemt volgens een hyperbool in lengterichting af.

In de tweede plaats bestaat de relatieve turbulentie uit een stationair deel. Deze wordt veroorzaakt door wand- en bodemwrijving en kan geschreven worden als:

$$\frac{u'}{\bar{u}} = B \quad (4.2.2)$$

Met: B = constante, afhankelijk van de randvoorwaarden [-].
 Superpositie van beide delen levert:

$$\frac{u'}{\bar{u}} = \frac{C}{x} + B \quad (4.2.3)$$

Om C dimensieloos te maken kan de waterdiepte (h) worden gebruikt.

Op blz. 31 wordt aangetoond waarom juist de waterdiepte wordt genomen.

Vergelijking (4.2.3) kan nu geschreven worden als:

$$\frac{u'}{\bar{u}} = A \cdot \frac{h}{x} + B \quad (4.2.4)$$

Met: $A =$ constante, afhankelijk van de energie-inbreng $[-]$.

Door toepassing van regressie-analyse op de meetwaarden zijn voor de drie series turbulentiemetingen per serie de coëfficiënten A en B bepaald:

$$\text{Serie 1: } \frac{u'}{\bar{u}} = 0,11 \cdot \frac{h}{x} + 0,0003 \quad (r = 0,999) \quad (4.2.5)$$

$$\text{" 2: } \frac{u'}{\bar{u}} = 0,32 \cdot \frac{h}{x} - 0,009 \quad (r = 0,986) \quad (4.2.6)$$

$$\text{" 3: } \frac{u'}{\bar{u}} = 0,36 \cdot \frac{h}{x} - 0,01 \quad (r = 0,994) \quad (4.2.7)$$

r is in dit geval de correlatie-coëfficiënt. Uit het feit dat deze bijna de waarde 1 heeft blijkt dat de gemeten waarden goed met vergelijking (4.2.4) zijn te beschrijven. De term B blijkt in alle gevallen verwaarloosbaar klein te zijn t.o.v. de ingebrachte turbulentie.

De absolute waarden van de coëfficiënten A en B zijn niet relevant, omdat de micromolen niet de juiste waarde voor de turbulentie aangeeft. De werkelijke waarden liggen een factor 5 à 20 hoger. De oorzaak hiervan is dat de molen slechts in een beperkt frequentie-interval heeft gemeten (1 - 20 Hz). Bovendien hapert de molen zodra de momentane snelheid kleiner wordt dan circa 3 cm/sec. Dit gebeurt veelvuldig wanneer de turbulentie zo hevig is dat de momentane snelheid van teken omkeert. Ondanks het feit dat de absolute waarden van A en B niet relevant zijn, kan wel wat worden gezegd over de verhouding tussen de ene meting en de andere. Bovendien ligt het verloop van de relatieve turbulentie in lengterichting vast. Wanneer één waarde van u' in absolute zin bekend is, kunnen m.b.v. vergelijking (4.2.4) de andere waarden van u' langs de goot-as worden berekend.

Hierna zal worden aangegeven hoe uit de randvoorwaarden aannemelijke waarden voor A en B kunnen worden geschat.

4.3.1.2.3 Schatting van coëfficiënten A en B

Coëfficiënt A is afhankelijk van de manier van inbrengen.

De manier van inbrengen kan worden gekarakteriseerd door de energiehoogte H, die het water (mengsel) bezit voordat het in de goot komt. De energiehoogte wordt gemeten t.o.v. het waterniveau in de goot en wordt geschreven als:

$$H = a + \frac{u^2}{2g} \quad (4.3)$$

(zie ook Rapport Beunbezinking, deel I, blz.50).

Hierbij is a de hoogte van het water (mengsel) boven het gootniveau. De ingebrachte energie wordt in de goot omgezet in warmte-, golf- en bewegingsenergie. In eerste instantie is dat vrijwel hoofdzakelijk bewegingsenergie van het water. Het water schiet met een snelheid van circa 6 m/s in de goot terwijl de gemiddelde snelheid circa 0,10 m/s bedraagt. De kinetische energie kan niet meteen in warmte worden omgezet en zal resulteren in een hoog turbulentieniveau met turbulente snelheidsfluctuaties (u') die veel groter zijn dan de gemiddelde snelheid \bar{u} . Dat coëfficiënt A een functie is van H kan als volgt aannemelijk worden gemaakt. Voor de energiehoogte H van het water in de goot geldt:

$$2gH = u^2 + v^2 + w^2 \quad (4.4)$$

$$\begin{aligned} \text{met: } u &= \bar{u} + u' \\ v &= \bar{v} + v' \quad (\bar{v} = 0) \\ w &= \bar{w} + w' \quad (\bar{w} = 0) \end{aligned}$$

$$\text{Dit levert: } 2gH = \bar{u}^2 + 2\bar{u}u' + u'^2 + v'^2 + w'^2 \quad (4.5)$$

Wanneer $u' \gg \bar{u}$ (vlakbij de inbreng) kan (4.4) worden geschreven als:

$$2gH \approx u'^2 + v'^2 + w'^2 \quad (4.6)$$

De turbulente snelheidsfluctuaties in de drie hoofdrichtingen zijn in orde van grootte aan elkaar gelijk:

$$u' \approx v' \approx w' \quad (4.7)$$

Vergelijking (4.6) kan nu worden geschreven als:

$$2gH \approx 3 \cdot (u')^2 \quad (4.8)$$

$$\rightarrow u' \equiv H^{1/2} \quad (\equiv : \text{evenredig met}) \quad (4.9)$$

Uit:
$$\frac{u'}{\bar{u}} = \frac{A \cdot h}{x} + B \quad (4.10)$$

volgt met \bar{u} , h en B constant dat:

$$u' \equiv A \quad (4.11)$$

Uit (4.9) en (4.11) volgt dat A evenredig is met $H^{1/2}$.

De berekende coëfficiënten A voldoen goed aan de energiebeschouwing, wanneer naar de verhouding wordt gekeken tussen de coëfficiënt van meting 1 t.o.v. die van meting 2 en 3. Bij meting 1 werd het totale debiet via twee slangen circa 0,1 meter boven het waterniveau in de goot ingelaten. Het debiet bedroeg circa $0,023 \text{ m}^3/\text{s}$, hetgeen met een totale slangdoorsnede van: $\frac{1}{4} \pi 0,11^2 + \frac{1}{4} \pi 0,05^2 = 0,011 \text{ m}^2$ neerkomt op een uittreesnelheid van circa 2 m/s .

De energiehogte bedraagt in dat geval:

$$H_1 = 0,1 + \frac{2^2}{2 \cdot g} \approx 0,3 \text{ m} \quad (4.12)$$

Bij meting 2 en 3 werd het totale debiet via de trechter ingelaten, waarbij de vrije waterspiegel in de trechter circa 2,5 m boven het waterniveau in de goot lag. Verwaarlozing van de in de trechter optredende weerstands- en vertragsingsverliezen levert voor de energiehogte:

$$H_{2,3} \approx 2,5 \text{ m}. \quad (4.13)$$

De energiehogte ligt bij meting 2 en 3 een factor 8,3 hoger dan bij meting 1.

Wanneer $A \equiv H^{1/2}$, moet $A_{2,3}$ een factor $\sqrt{8,3} = 2,9$ groter zijn dan A_1 .

De via regressie-analyse berekende coëfficiënten A_2 en A_3 zijn een factor 3 à 3,3 groter dan A_1 (zie vgl. 4.25 t/m 4.2.7). De overeenkomst is dus redelijk.

Wanneer de energiehogte H bekend is, kan A worden geschat via (4.8) en (4.10):

$$2gH \approx 3 \cdot (u')^2 \quad (4.8)$$

Anders geschreven:

$$u' \approx \left(\frac{2}{3} gH\right)^{1/2} \quad (4.14)$$

Delen door de gemiddelde snelheid levert:

$$\frac{u'}{\bar{u}} \approx \frac{\left(\frac{2}{3} gH\right)^{1/2}}{\bar{u}} \quad (4.15)$$

Combineren van (4.10) en (4.15) geeft:

$$\frac{\left(\frac{2}{3} gH\right)^{1/2}}{\bar{u}} \approx A \cdot \frac{h}{x} + B \quad (4.16)$$

Indien wordt aangenomen dat alle ingebrachte energie aan het begin van de goot wordt omgezet in turbulentie in een gebied met als karakteristieke lengtemaat de waterdiepte (h), dan geldt aan het eind van dit gebied (x = h) (zie ook fig.11):

$$\frac{\left(\frac{2}{3} gH\right)^{1/2}}{\bar{u}} \approx A + B \quad (4.17)$$

Met $B \ll A$ levert dit tenslotte:

$$A \approx \frac{\left(\frac{2}{3} gH\right)^{1/2}}{\bar{u}} \quad (4.18)$$

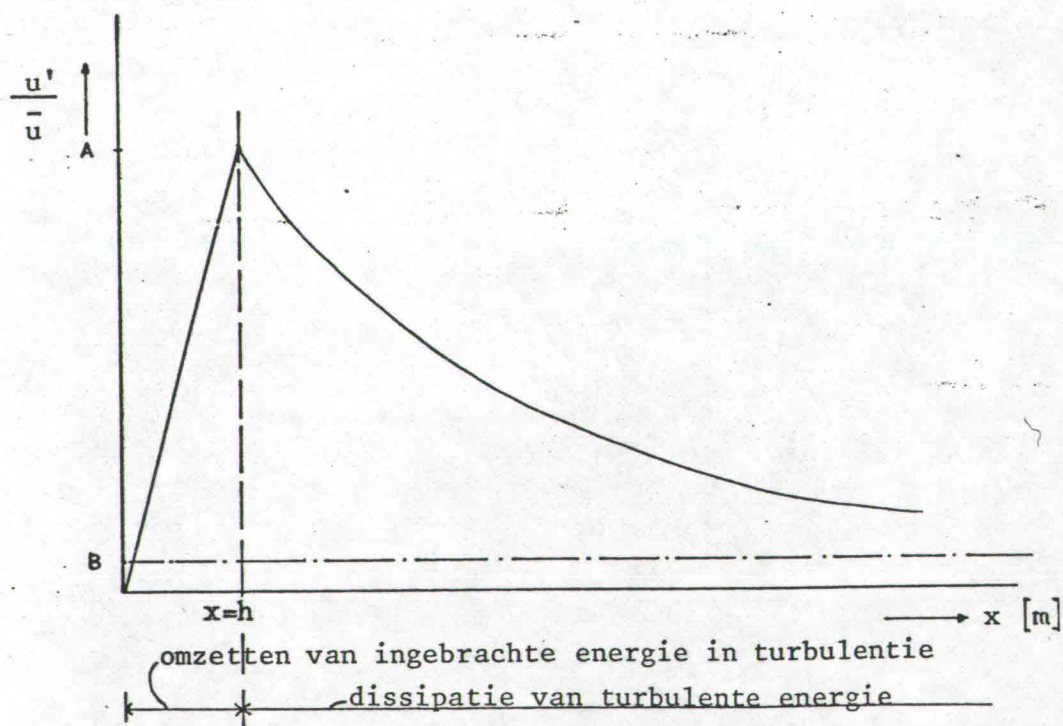


Fig.11 Aanname voor de energiehuishouding

Coëfficiënt B wordt bepaald door de bodem- en wandwrijving. Aan het begin van de goot is de bijdrage van de stationaire turbulentie aan het geheel te verwaarlozen. Gaande in de lengterichting van de goot neemt dit aandeel relatief gezien toe t.g.v. het afnemen van het quotiënt $\frac{h}{x}$. Daarom is deze term B toch niet te verwaarlozen. De stationaire relatieve turbulentie, weergegeven door B, wordt groter naarmate de bodem en de wanden ruwer worden. B kan dus geschreven worden als een functie van de ruweidparameter C (coëfficiënt van Chezy).

$$\left(\frac{u'}{\bar{u}} \right)_{\text{stat.}} = f \left(\frac{1}{C} \right) \quad (4.19)$$

Aangezien C niet dimensieloos is (dimensie: $\frac{m}{s}^{1/2}$), kan (4.19) dimensieloos worden gemaakt m.b.v. de zwaartekrachtsversnelling g:

$$\left(\frac{u'}{\bar{u}} \right)_{\text{stat.}} = f \left(\frac{\sqrt{g}}{C} \right) \quad (4.20)$$

Dit verband kan ook als volgt worden afgeleid:

De turbulente schuifspanning wordt geschreven als:

$$\tau = \rho u' v' \approx \rho (u')^2 \quad (4.21)$$

Verder geldt voor de schuifspanning op halve hoogte:

$$\tau = \frac{1}{2} \rho g h i \quad (4.22)$$

met: ρ = soortelijke massa

h = waterdiepte

i = verhang

Substitutie van (4.21) en (4.22) levert:

$$u' \approx \sqrt{\frac{1}{2} g h i} \quad (4.23)$$

De formule van Chezy luidt:

$$\bar{u} = C \sqrt{h i} \quad (4.24)$$

Combineren van (4.23) en (4.24) levert tenslotte:

$$\left(\frac{u'}{\bar{u}} \right)_{\text{stat.}} \approx \frac{\sqrt{\frac{1}{2} g}}{C} \quad (4.25)$$

Hieruit volgt dus direct een redelijke schatting voor B:

$$B \approx \frac{\sqrt{\frac{1}{2}g}}{C} \quad (4.26)$$

De Chezy-coëfficiënt wordt berekend met de waterdiepte (h) en de equivalente zandruwheid (k) volgens:

$$C = 18 \log \frac{12h}{k} \quad (4.27)$$

Bij beddingen waarop sedimenttransport plaatsvindt heeft k een waarde van circa 5 à 10 cm.

(Zie voor de berekening van C-waarden van de hopper ook: Rapport Beunbezinking, deel I, blz. 7).

In bijlage 6 zijn voor enkele ruwheden de bijbehorende maximale diffusiecoëfficiënten in het stationaire geval, dus t.g.v. bodem- en wandwrijving, berekend:

De basisuitdrukking voor de diffusiecoëfficiënt is gegeven in vergelijking (4.1)

$$\epsilon = v' \cdot l \quad (4.1)$$

De mengweglengte (l) kan worden geschreven als:

$$l = \kappa z \left(1 + \frac{z}{h} \right) \quad (4.28)$$

met: κ = constante van von Kármán ($\approx 0,4$)

z = verticale afstand vanaf de bodem;
positief naar boven toe

h = waterdiepte [m].

Vergelijking (4.1) kan ook worden geschreven als:

$$\epsilon = \left(1 \cdot \frac{\partial u}{\partial z} \right) \cdot l \quad [2] \quad (4.29)$$

Als er een logaritmische snelheidsverdeling geldt, is:

niet waakt

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{u_*}{l} \quad (4.30)$$

met: u_* = schuifspanningssnelheid = $\frac{\sqrt{g \cdot \bar{u}}}{C}$

Daaruit volgt:

$$\varepsilon = u_* \cdot l \quad (4.31)$$

Dit leidt tot de bekende uitdrukking:

$$\varepsilon = \kappa \cdot u_* \cdot z \left(1 - \frac{z}{h} \right) \quad (4.32)$$

ε is maximaal voor $z = \frac{1}{2} h$:

$$\hat{\varepsilon} = \frac{\kappa}{4} \cdot u_* \cdot h \quad (4.33)$$

Met behulp van deze uitdrukking is in bijlage 6 voor verschillende ruwheden $\hat{\varepsilon}$ in het stationaire geval getekend. Daarnaast is in deze bijlage het verloop van $\hat{\varepsilon}$ getekend zoals deze is berekend uit de goot-resultaten.

4.3.1.2.4 Verklaring voor het gebruik van de waterdiepte in vergelijking 4.2.4.

De volgende redenering kan worden aangewend om aan te tonen waarom de waterdiepte (h) in de hyperboolvergelijking voorkomt.

Bij het opstellen van de energiebalans in geval van dissipatie van turbulente energie blijkt uit dimensie-overwegingen dat het volgende verband geldt:

$$\frac{\bar{u}}{x} = C_1 \cdot \frac{u'}{L} \quad (\text{Tennekes en Lumley, p.72 [5]}) \quad (4.34)$$

waarbij x de afgelegde weg, C_1 een constante en L de maximale grootte van de wervels in het begin voorstelt.

Vergelijking (4.34) kan ook worden geschreven als:

$$\frac{u'}{u} = C_2 \cdot \frac{L}{x} \quad (4.35)$$

De maximale grootte van de wervels volgt eenvoudig uit de afmetingen van het doorstroomprofiel, omdat een wervel nooit groter kan zijn dan het doorstroomprofiel. In beunsituaties is de kleinste afmeting van het doorstroomprofiel altijd de waterdiepte. Daarom kan (4.35) geschreven worden als:

$$\frac{u'}{u} = C_3 \cdot \frac{h}{x} \quad (4.36)$$

Opmerking

Het gevonden verloop van de relatieve turbulentie over de lengte van de goot, zoals beschreven in vergelijking (4.10), geldt alleen voor stromen met water alleen. In dat geval verandert de bodemligging niet en is de waterdiepte constant.

Zodra met water-zandmengsels wordt gestroomd, verandert de waterdiepte in de tijd tengevolge van het uitzakken van zand. In dit geval behoeft vergelijking (4.10) een kleine uitbreiding.

Aangenomen wordt dat alle ingebrachte energie aan het begin van de goot wordt omgezet in turbulentie in een gebied ter lengte van de maximale waterdiepte (h_0). De afmetingen van dit gebied veranderen niet veel tijdens een proef hetgeen het gevolg is van het ontstaan van een ontgrondingskuil. Aan het eind van deze kuil ($x \approx h_0$) is de turbulentie maximaal. Daarna neemt deze weer af tengevolge van dissipatie. De dissipatiesnelheid is afhankelijk van de grootte van de wervels en is dus direct afhankelijk van de minimum waterdiepte (h). Er wordt nu een nieuwe oorsprong voor de x-as gekozen. Wanneer het begin van de nieuwe oorsprong aan het eind van de ontgrondingskuil wordt gekozen ($x_{\text{oud}} = h_0$; $x_{\text{nieuw}} = 0$), dan kan (4.10) worden geschreven als:

$$\frac{u'}{\bar{u}} = A \cdot \frac{h}{x + h} + B \quad (4.10^a)$$

waarbij h de waterdiepte na de ontgrondingskuil voorstelt.

4.3.1.2.5 Vergelijking van de goot- en hoppermodel-turbulentie-metingen

In bijlage 4 is m.b.v. een gearceerde vierhoek het gebied aangegeven, waarbinnen de verschillende turbulentiemetingen in het hoppermodel [9] gelegen zijn. Het turbulentieniveau hiervan blijkt vooral nabij de inbreng lager te liggen dan in de goot. De oorzaak hiervan is dat het water met relatief veel meer energie in de goot werd ingebracht dan in het hoppermodel.

Aan het eind van het model ($\frac{x}{h} > 18$) liggen de meeste waarden juist hoger dan die aan het eind van de goot. De oorzaak hiervan is waarschijnlijk het feit dat de ruwheid van het hoppermodel groter is dan de ruwheid van de goot ($C_{\text{model}} \approx 20$; $C_{\text{goot}} \approx 60$).

Daardoor ligt het stationaire deel van de turbulentie immers ook hoger.

Toepassing van regressie-analyse op de turbulentiemetingen van het hoppermodel geven de volgende resultaten:

$$\begin{array}{l} \text{- Gesloten diffusor} \\ \text{(IV, V en VI)} \end{array} : \frac{u'}{\bar{u}} = 0,046 \cdot \frac{h}{x} + 0,0057 \quad (4.37)$$

$$\begin{array}{l} \text{- Open diffusor} \\ \text{(VII t/m X)} \end{array} : \frac{u'}{\bar{u}} = 0,085 \cdot \frac{h}{x} + 0,0075 \quad (4.38)$$

$$\begin{array}{l} \text{- Verdronken diffusor} \\ \text{(XI)} \end{array} : \frac{u'}{\bar{u}} = 0,042 \cdot \frac{h}{x} + 0,0027 \quad (4.39)$$

De bovenstaande waarden voor A en B zijn de gemiddelden van de tussen haakjes aangegeven proeven.

Vergelijking van deze waarden met die van de gootmetingen (blz. 24) toont aan dat de maximum waarden van coëfficiënt A bij de goot een factor $\frac{0,36}{0,085} = 4,2$ hoger liggen dan bij het model. Dit zou impliceren dat de energie-inbreng in de goot een factor $4,2^2 \approx 18$ groter is dan in het model ($A \propto H^{1/2}$):

De maximale energiehogte in de goot bedraagt:

$$\hat{H}_{\text{goot}} \approx 2,5 \text{ m.} \quad (\text{blz. 26})$$

De maximale energiehogte in het hoppermodel bedraagt:

$$\hat{H}_{\text{model}} = \frac{H_{\text{open diffusor}}}{\text{lengteschaal}} \approx \frac{3,68}{20} = 0,18 \text{ m}$$

(zie Rapport Beunbezinking, deel I, blz. 52).

De verhouding tussen de energiehogten is in dat geval 14.

De overeenkomst is redelijk. Het verschil bedraagt circa 25%.

Onderling vergelijken van de hoppermodel-metingen, wat betreft de verhouding tussen energiehogten en de coëfficiënten A, leverde het volgende resultaat:

$$\begin{array}{l} A_{\text{open diff.}} : A_{\text{gesloten diff.}} : A_{\text{verdronken diff.}} = 1:0,54:0,49 \\ H^{\frac{1}{2}}_{\text{open diff.}} : H^{\frac{1}{2}}_{\text{gesloten diff.}} : H^{\frac{1}{2}}_{\text{verdronken diff.}} = 1:0,59:0,18 \end{array}$$

Het grote verschil tussen A verdrongen en $H^{\frac{1}{2}}$ verdrongen wordt veroorzaakt door een verschil in de aangenomen referentiehoogte en de opgetreden waterhoogte bij de berekening van de energiehogte (zie daarvoor ook: deel I, blz. 53).

Verder blijkt de overeenkomst tussen theorie ($A \equiv H^{\frac{1}{2}}$) en praktijk ook hier redelijk.

In bijlage 5 zijn o.a. twee uitersten van de hoppermodel-metingen weergegeven (VII en XI). Daarnaast is ter vergelijking gootmeting 1 weergegeven.

Het feit dat de hoppermodel-metingen niet convergeren, is waarschijnlijk te wijten aan de invloed van golven op het meten van turbulentie (zie ook blz. 22).

Deze golven ontstaan t.g.v. het inbrengen en zijn heviger naarmate het water met meer energie wordt ingebracht. Het gevolg hiervan is dat deze golfbeweging als een schijnbaar stationair deel van de turbulentie wordt gemeten. Naarmate er meer golfbeweging is zal de ondergrens van de turbulentie-intensiteit (term B) schijnbaar hoger komen te liggen.

Ook dit fenomeen zou een mogelijke oorzaak kunnen zijn voor het feit dat de turbulentieniveau's aan het eind van het model hoger liggen dan die aan het eind van de goot.

Concluderend kan worden opgemerkt dat de overeenkomst tussen theorie en experiment, wat betreft de evenredigheid van coëfficiënt A met de wortel uit de ingebrachte energie, zowel bij de goot- als bij de hoppermodel-metingen zeer redelijk is. Dat dit voor de term B veel minder het geval is, is eigenlijk van ondergeschikt belang, omdat de bijdrage van de wand- en bodemwrijving aan de relatieve turbulentie gering is.

4.3.2 Proeven met water en zand

4.3.2.1 Uitvoering van de proeven

Bij het uitvoeren van de uitzakproeven is als volgt te werk gegaan: Van de te verwerken hoeveelheid zand - gemiddeld zo'n 300 liter (inclusief poriën) - werd het volume van de vaste stof bepaald door het zand uit de goot in een bak te scheppen en water bij te vullen tot alle poriën met water waren gevuld. Opmeten van het volume en het gewicht van dit mengsel, bestaande uit water en zand, leverde de zand-fractie (x) via:

$$x \cdot 2650 + (1 - x) \cdot 1000 = \text{totale massa} \quad (4.40)$$

Wanneer x bekend is volgt de hoeveelheid vaste stof uit:

$$\text{Hoeveelheid zand} = x \cdot \text{mengselvolume.}$$

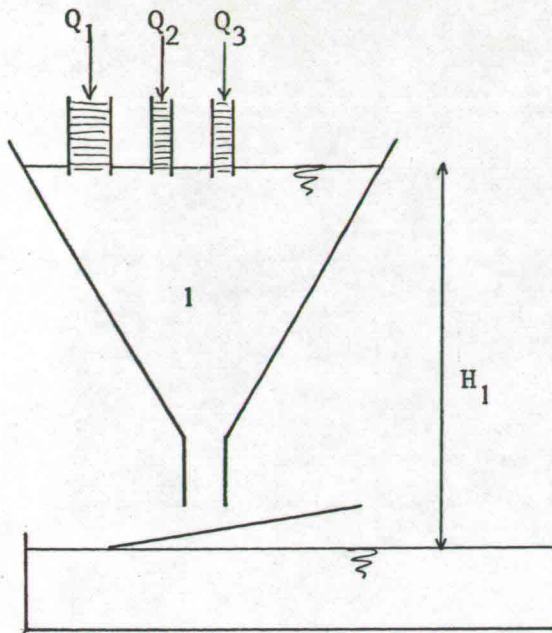
Deze hoeveelheid mengsel werd in de trechter ingebracht die aan de onderkant d.m.v. een balgafsluiter was afgesloten. Het gewenste mengseldebiet werd m.b.v. een meetflens en een vlinderklep in de hoofdwateraanvoerleiding ingesteld. Deze leiding splitste zich in 3 kleinere apart regelbare aanvoerleidingen om resp. in de aanvoer van de spuitlans, de trechter en de inbrenggoot te kunnen voorzien (blz. 19).

Het doel van het splitsen van deze hoofdleiding in aanvoer in de trechter en aanvoer onder de trechter was tweeledig. In de eerste plaats was het noodzakelijk het waterniveau in de trechter constant te houden gedurende de proef om berging van het debiet in de trechter te voorkomen.

Wanneer deze waterspiegel gedurende de proef zou zakken, zou het gootdebiet groter worden dan was ingesteld. Om dit niveau ook bij een te grote aanvoer constant te houden, was boven in de trechter een overlaat aangebracht, waarlangs het overschotdebiet tijdens de proef en het totale trechterdebiet voor de proef via twee flexibele slangen naar de inbrenggoot werd afgevoerd (blz. 19).

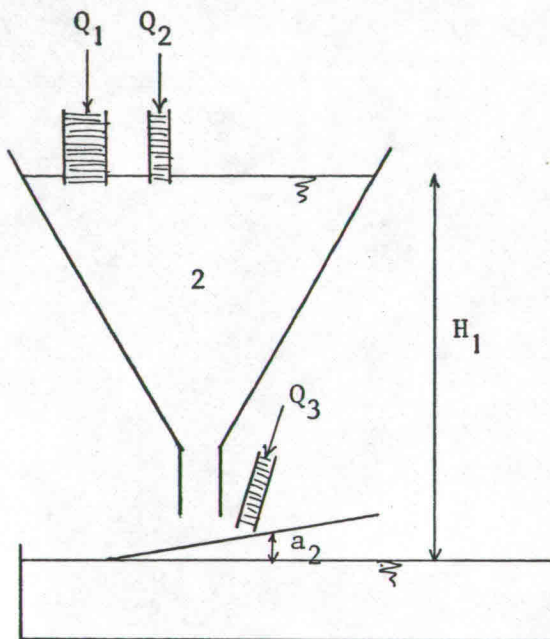
In de tweede plaats werd gedacht dat d.m.v. deze opsplitsing de turbulentie in de goot te variëren zou zijn. In werkelijkheid viel dat erg tegen, omdat verreweg het grootste deel van het totale debiet via de trechter ingebracht moest worden, om het niveau in de trechter constant te kunnen houden. In dat geval maakt het namelijk weinig uit of een klein deel boven in de trechter of beneden in de goot wordt ingebracht, omdat het grootste deel van de energie-inbreng wordt gevormd door het mengsel uit de trechter (zie figuur 12).

Wanneer het debiet was ingesteld, de trechter was gevuld en de vleihoogte in de goot was opgebouwd, werd de balgafsluiter opengezet waarna het zand-watermengsel begon te stromen. Zodra al het zand uit de trechter was verdwenen (vaak moeilijk te beoordelen), werd de balgafsluiter weer gesloten door de persluchtkraan open te draaien. De tijd tussen openen en weer sluiten van de afsluiter werd genoteerd. Uit deze tijdsduur kan de gemiddelde inbreng-concentratie gedurende de proef worden berekend, indien het totale debiet en de hoeveelheid zand bekend zijn.



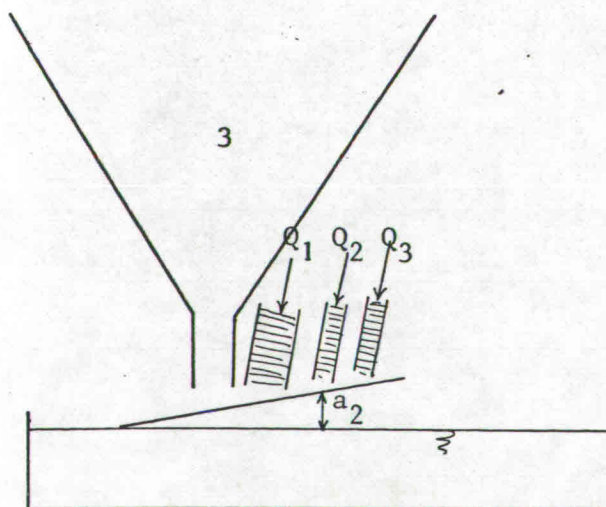
Gegeven: $Q_1 = 10 \text{ l/sec}$
 $Q_2 = Q_3 = 3 \text{ l/sec}$
 $H_1 = 2,5 \text{ m}$
 $a_2 = 0,3 \text{ m}$

$$P = \rho g Q_{123} H_1 = 400 \text{ Watt}$$



$$P = \rho g Q_{12} H_1 + \rho g Q_3 a_2 + \rho g Q_3 \frac{v^2}{2g} =$$

$$325 + 9 + 3,5 = 337,5 \text{ W}$$



$$P = \rho g Q_{123} a_2 + \rho g Q_{12} \frac{v_1^2}{2g} + 2 \rho g Q_3 \frac{v_3^2}{2g} =$$

$$48 + 5 + 7 = 60 \text{ W}$$

Fig. 12 Drie verschillende inbrengmethoden

Na het sluiten van de balg werd nog even met alleen water doorge-
stroomd, om het laatst ingebrachte zand gelegenheid te geven over
de totale gootlengte uit te zakken. Direct daarna werd het bodem-
profiel opgemeten.

4.3.2.2 Variatie van parameters tijdens de proevenserie

- Zanddiameter. In totaal zijn 31 proeven gedaan waarbij 3 verschil-
lende zanden zijn gebruikt.

Bij proef 1 t/m 8 is Zilverzand gebruikt met:

$D_{10} = 103 \mu\text{m}$	} volgens zeefanalyse (bijlagen 8 en 9)
$D_{50} = 147 \mu\text{m}$	
$D_{90} = 172 \mu\text{m}$	

Proef 9 t/m 22: Trip-Popkezand met:

$D_{10} = 77 \mu\text{m}$	} volgens zeefanalyse	$69 \mu\text{m}$	} volgens valkolom
$D_{50} = 115 \mu\text{m}$		$94 \mu\text{m}$	
$D_{90} = 143 \mu\text{m}$		$158 \mu\text{m}$	

(bijlagen 10-21)

Proef 23 t/m 31: Duinzand met:

$D_{10} =$	} volgens zeefanalyse	$119 \mu\text{m}$	} volgens valkolom
$D_{50} = 158 \mu\text{m}$		$198 \mu\text{m}$	
$D_{90} = 220 \mu\text{m}$		$347 \mu\text{m}$	

(bijlagen 22-27)

(zie ook hoofdstuk 4.3.2.7).

- Turbulentie. Het was niet goed mogelijk de turbulentie flink te
variëren. Toch is bij proef 15 en 16 een poging gedaan de turbu-
lentie te verlagen door meer water beneden de trechter in te brengen.
Vergelijking met proef 13 en 14, waarbij het totale debiet via de
trechter werd ingebracht, levert geen verschil in bodemprofiel.
Hieruit mag nog niet worden geconcludeerd dat de energie-inbreng geen
gevolgen heeft voor het uitzakproces, omdat het verschil tussen de
energie-niveau's in de beide gevallen zeer gering was (zie ook figuur
11, 1 en 2).

- Concentratie. Getracht is met twee concentraties te werken, door de opening onder de balgafsluiter te variëren. Er zijn twee "diafragma's" gebruikt met diameters van resp. 5 en 7 cm. In dat geval verhouden de doorstroomopeningen zich als 1:2. De concentraties liggen over alle proeven bezien tussen de 6 en 14%. Hierbij stelt de concentratie het volumepercentage voor van de zandkorrels (zonder poriën) in een volume-eenheid mengsel.
De concentratie tijdens een proef werd berekend uit drie gegevens, namelijk de tijdsduur, het debiet en de hoeveelheid zand in de trechter. Het debiet kan circa 10% om de ingestelde waarde schommelen t.g.v. het afnemen van de vleihoogte in de trechter. Deze afwijking is berekend m.b.v. de inhoud van de waterlaag die tijdens de proef verdwijnt. De tijdsduur is de minst nauwkeurig gemeten parameter in het proces. Het was namelijk zeer moeilijk te bepalen wanneer het zand uit de trechter verdwenen was. Fouten in de tijdsduur tot 50% zijn waarschijnlijk soms opgetreden. Geschat wordt dat de gemiddelde fout circa 10% bedraagt.
De hoeveelheid zand is over het geheel genomen vrij nauwkeurig bepaald.
- Debiet. Het debiet is niet veel gevariëerd en het schommelt rond de 16 liter/sec, hetgeen overeenkomt met een gemiddelde stroomsnelheid van circa 11 cm/sec (bij een waterdiepte van 36 cm).
Er zijn twee redenen waarom het debiet niet veel gevariëerd is. In de eerste plaats was een zeker minimum debiet noodzakelijk om de waterspiegel in de trechter tijdens de proef op peil te houden. Dit debiet bedroeg circa 15 liter/sec. Een kleiner debiet kon dus niet worden beproefd.
De tweede reden is dat, achteraf gezien, de modelopstelling minder geschikt bleek te zijn opgezet. Zodra een groter debiet werd ingesteld door de vlinderklep van de grote slang wijder open te zetten, kreeg de spuitlans te weinig druk om het zand in de trechter te fluïdiseren. Het gevolg hiervan was dat het zand zeer langzaam uit de trechter liep (zie proef 31, bijlage 57; tijdsduur = 870 sec).
- Duur van de proef. De duur van de proef is afhankelijk van de hoeveelheid zand die bij de proef wordt gebruikt. Bij het bepalen van die hoeveelheid spelen de volgende overwegingen een rol:

Een kleine hoeveelheid zand geeft een grote afwijking bij het bepalen van de concentratie, omdat het precieze tijdstip van het begin van de proef en het eind van de proef meer gewicht krijgt bij het bepalen van een tijdsgemiddelde. Vooral het eind van een proef beslaat een zeker tijdsinterval van circa 10-15 seconden waarin het mengsel, dat uit de trechter komt, langzaam van kleur verandert. Deze kleurverandering was het teken waarop de proef werd beëindigd.

Een grote hoeveelheid zand in één keer heeft als nadeel dat die proef minder informatie verschaft dan wanneer dezelfde hoeveelheid zand in twee delen zou worden geloosd, met de mogelijkheid om tussentijds het bodemprofiel op te meten.

Gekozen is voor hoeveelheden van circa 300 liter zand (inclusief poriën) per proef. De gemiddelde tijdsduur bedroeg in dat geval circa 2 minuten.

In de tabel op bladzijde 39 wordt een overzicht gegeven van de proeven en de parameters die zijn gevariëerd.

Gootproeven-overzicht

Nr.	Debiet [1/s]	Tijd [s]	D ₅₀ [μm]	Hoeveelheid SiO ₂ [l]	Concentratie [%]	Conc.meting	Opmerking
3	16,4	130	150	133	6,2	-	diafragma 5 cm
4	17,5	194	150	208	6,1	-	
5	18,3	152	150	207	7,4	-	
6	13,5	129	150	200	11,5	-	
7	16	170	150	239	8,8	-	
8	14,3	90	150	135	10	-	
9	16,2	279	95	200	4,4	-	
10	≈ 6	≈ 120	95	194	27	-	vervolg op 9
11	17	206	95	239	6,8	-	turb. >
12	17	36	95	121	< 20	-	vervolg op 11
13	15	218	95	204	6,3	Raai 2	turb. >
14	15	110	95	111	6,7	Raai 4	vervolg op 13
15	15	169	95	211	8,3	Raai 2	turb. <
16	15	136	95	130	6,4	Raai 6	vervolg op 15
17	16,1	150	95	213	8,8	Raai 3	turb.>; diafragma 7 cm
18	16	< 100	95	86	6,3	Raai 10	vervolg op 17
19	16	125	95	171	8,5	Raai 2	
20	16	105	95	152	9,1	Raai 3	vervolg op 19
21	16	175	95	192	6,8	Raai 2,75	Palengordijn
22	16	75	95	99	8,2	Raai 2,75	Fijn rooster
23	16	135	200	258	12	Raai 2,5	diafragma 7 cm
24	16	130	200	228	11	-	vervolg op 23
25	16	60	200	220	≈ 9	Raai 4	
26	-	-	200	-	-	Raai 6	vervolg op 25; trech- ter eerder leeg
27	16	68	200	160	15	Raai 11	
28	16	60	200	123	13	-	vervolg op 27
29	16	126	200	269	13,4	-	diafragma 5 cm
30	16	190	200	260	8,6	-	
31	20,8	870	200	259	1,4	-	

4.3.2.3 Bodemprofielen

Het doel van deze uitzakproeven is - zoals reeds hiervoor is vermeld - het verkrijgen van betrouwbare meetresultaten van het uitzakproces, om daarmee het computermodel te verifiëren. Daarbij is de proefopstelling zodanig ingericht dat het uitzakproces tijdens de proef op soortgelijke wijze plaatsvindt als in de hopper zelf. Aan het begin van de goot wordt een zand-watermengsel via een hellende stortgoot ingebracht. Deze hellende goot werkt als een "open" diffusor en dient om het mengsel regelmatig over de breedte te verspreiden.

Gedurende de verblijftijd van het mengsel in de goot krijgt het zand gelegenheid om uit te zakken. Daardoor wordt tijdens de proef een bodemprofiel gevormd. Zand dat aan het eind van de goot nog in suspensie is verdwijnt met het water over de overlaat en draagt bij aan het overvloeiverlies. Het na een experiment gevormde bodemprofiel leent zich goed om nauwkeurig te worden opgemeten. Uit de dikte van het zandbed is direct af te leiden welke fractie van het zand in dat deel van de goot is uitgezakt.

De totale inhoud van het zandpakket in de goot geeft een indruk van de overvloeiverliezen, wanneer het poriëngetal en de oorspronkelijke hoeveelheid zand bekend zijn.

Tenslotte is, indien van toepassing, uit het gemeten bodemprofiel een evenwichtsdiepte te destilleren. Met evenwichtsdiepte wordt die waterdiepte bedoeld, waarbij onder de gegeven omstandigheden netto geen zand meer uitzakt. Deze evenwichtsdiepte kenmerkt zich in het bodemprofiel als een horizontaal stuk aan het begin van de goot.

Het opmeten van het bodemprofiel geschiedde in eerste instantie met een provo (profielvolger). De provo bestaat uit een vertikaal beweegbare staaf, waarvan het uiteinde d.m.v. een elektronische schakeling in staat is op een gefixeerde afstand boven het zandpakket te blijven tijdens beweging van de provo in horizontale richting. Gemonteerd op een met constante snelheid rijdende meetwagen boven de goot geeft de provo via een schrijver het profiel van het zandbed in de goot.

Toch is voor de onderhavige metingen van dit schijnbaar ideale apparaat afgestapt, omdat de provo slechts een beperkt deel van de goot bestreek en omdat de meetwagen niet met een voldoende constante snelheid bleek te rijden.

Daarom is overgegaan op het meten van het profiel met de hand.



Daartoe werd in iedere raai, om de meter, de hoogte van het zandbed op 3 punten in de breedte m.b.v. een lineaal met een platte voet opgemeten (zie foto).

In bijlagen 28 t/m 57 zijn de bodemprofielen getekend.

Algemeen kan worden gezegd dat de profielen zijn opgebouwd uit resp. een ontgrondingskuil, een stukje evenwichtsprofiel, een rechte helling en een vrij vlakke teen bij het grovere zand. Bij het fijne zand (100 μ) is alleen sprake van een ontgrondingskuil en een zeer flauwe helling (1/100 à 1/200). Bij de beschikbare hoeveelheid zand trad geen evenwichtsprofiel op, omdat nergens de evenwichts-waterdiepte werd bereikt.

In deze bijlagen zijn tevens de resultaten van het computerprogramma weergegeven. De getrokken lijnen geven het bodemprofiel op verschillende tijdstippen aan. De onderbroken lijn geeft het gemeten bodemprofiel weer. De overeenkomsten tussen de berekende en de gemeten profielen blijken zeer redelijk te zijn.

4.3.2.4 Vergelijking van de gootresultaten met de uitkomsten van het computerprogramma

In bijlagen 30^b t/m 43^b (steeds de b-versies) zijn de resultaten van het computerprogramma vergeleken met de uitkomsten van de gootproeven. De figuren geven het x,z-vlak met daarin de bodem getekend op verschillende tijdstippen gedurende het uitzakproces. De tussenliggende tijdsintervallen Δt bedragen 1/8 deel van de tijdsduur van de proef. Gedurende deze intervallen wordt verondersteld dat de bodemstijging niet van invloed is op de concentratie.

Met een onderbroken lijn is in deze figuren de gemeten bodemligging in de goot weergegeven.

Als invoerparameters zijn de in de a-versies van bijlagen 30 t/m 43 vermelde gegevens gebruikt. Daarnaast is een hyperbolisch over de goot-as verlopende ϵ gebruikt, zoals vermeld in bijlage 6.

In de vertikaal verloopt ϵ vanaf de bodem ($z = 0$) parabolisch tot op halve hoogte. Daarna is ϵ constant tot het oppervlak:

$$\epsilon(z) = \kappa \cdot u' \cdot z \left(1 - \frac{z}{h} \right) ; \quad 0 < z < \frac{1}{2} h \quad (4.41)$$

$$\epsilon(z) = \frac{\kappa}{4} \cdot u' \cdot h \quad ; \quad z \geq \frac{1}{2} h \quad (4.42)$$

Gerekend wordt niet vanaf $z = 0$, maar vanaf $z = \frac{\text{ruwheid}}{33}$.

Daardoor heeft ϵ een zekere waarde $\neq 0$ op de "bodem".

Het snelheidsprofiel is logaritmisch aangenomen en de beginconcentratie is uniform verdeeld aangenomen.

De overeenstemming is zeer behoorlijk.

4.3:2.5 Concentratieverdelingen in de vertikaal

Om een indruk te krijgen van de concentratieverdelingen over de hoogte, zijn tijdens een groot aantal proeven op verschillende raaien monsters afgeheveld. Per proef werden op één raai 4 literflessen vol geheveld met buisjes die op 4 verschillende hoogten in de goot waren gefixeerd.

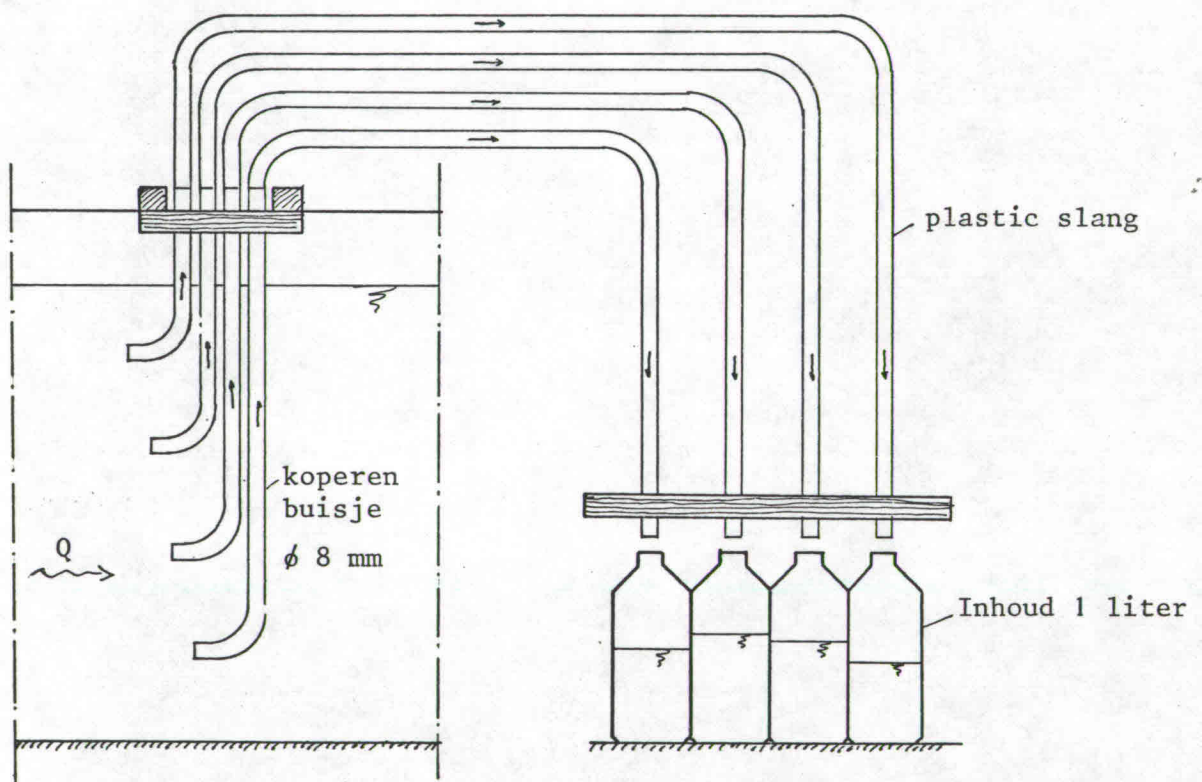


Fig.13 Afhevelen van het mengsel ter bepaling van de concentratie (langsdoorsnede van de goot)

In eerste instantie lukte dit niet goed, omdat de slangen te lang waren, waardoor het zand in de bochten achterbleef. Daardoor bleken de gezogen concentraties veel lager dan uit berekening zou moeten volgen.

Na inkorten van de slangen was het zelfs mogelijk concentraties groter dan tien procent af te hevelen.

Om een representatieve concentratie af te zuigen, is het noodzakelijk isokinetisch af te zuigen. Dat wil zeggen dat moet worden afgezogen met dezelfde snelheid en in dezelfde richting als de ongestoorde stroom. Dit was om twee redenen niet goed te verwezenlijken.

In de eerste plaats veranderde de gemiddelde stroomsnelheid tijdens een proef t.g.v. de bodemstijging. In sommige gevallen veranderde de snelheid zelfs een factor 7.

De tweede reden was dat het snelheidsprofiel niet bekend was. Deze bleek namelijk niet logaritmisch verdeeld te zijn. De oorzaak hiervan was het optreden van een dichtheidsstroom.

4.3.2.6 *Dichtheidsstroom*

Geconstateerd is dat het ingebrachte mengsel zich over een groot deel van de goot in een laag ter dikte van circa 10 cm over de bodem beweegt met een snelheid die een factor 3 à 4 hoger ligt dan de gemiddelde snelheid. Er zijn 3 mogelijke oorzaken aan te wijzen waardoor het optreden van de waargenomen dichtheidsstroom kan worden verklaard.

Ten eerste de manier van inbrengen. Het mengsel wordt in een dunne laag over de hele breedte via de hellende goot ingebracht. Tegen het beginschot gekomen keert deze stroom om en vervolgt als een onderstroom z'n weg over de bodem (zie ook figuur 10, blz.21).

De tweede mogelijke oorzaak volgt uit het krachtenevenwicht van een moot uit de goot. Links van de moot heerst de hydrostatische druk van het mengsel met dichtheid ρ_1 . Rechts heerst de hydrostatische druk van het mengsel met een dichtheid $\rho_2 < \rho_1$ (omdat inmiddels zand is uitgezakt).

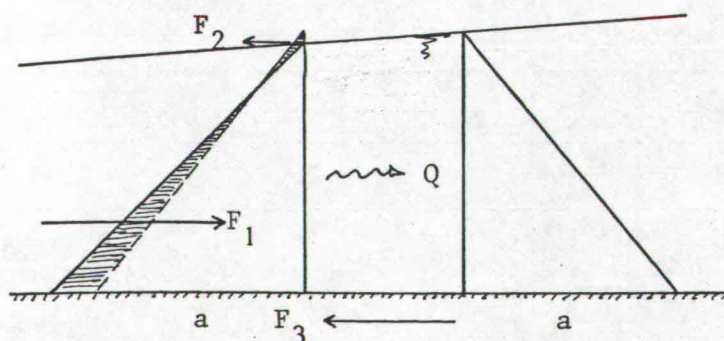


Fig. 14 Krachtenevenwicht van een vloeistofmoot.

Daarnaast werkt er een wrijvingskracht op de bodem tegen de stroomrichting in. Tenslotte is er ook nog een kracht t.g.v. het verhang. Deze is tegen de gemiddelde stroomrichting in gericht. Dat bleek uit het feit dat het water aan het oppervlak tegen de gemiddelde stroomrichting in stroomde. In fig. 14 is m.b.v. het gearceerde gebied de resulterende drukverdeling weergegeven. Daarnaast zijn de resulterende krachten op de moot aangegeven. Uit de figuur blijkt dat er een resulterende kracht dicht bij de bodem (F_1) aangrijpt. Deze veroorzaakt uiteindelijk de grote stroomsnelheden dicht bij de bodem. Als derde mogelijke oorzaak voor de aandrijvende kracht kan het verhang van de bodem worden genoemd. Wanneer het mengsel over de evenwichtsdiepte de helling bereikt, zal het als zijnde een zwaardere vloeistof met de helling mee naar beneden stromen.

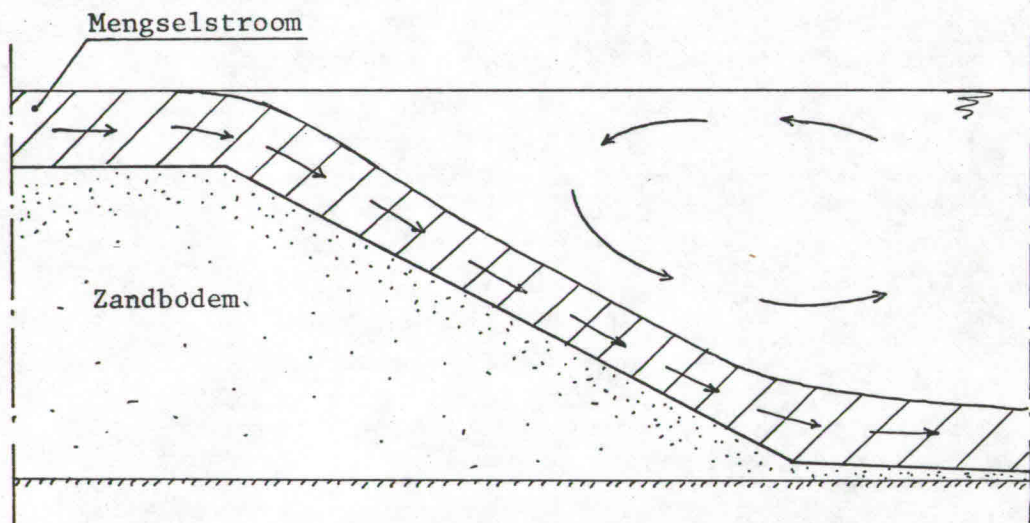


Fig.15 Dichtheidsstroom langs helling

Deze situatie kan enigszins worden vergeleken met het stromen van water over een volkomen overlaat. (figuur 15)

Vrijwel bij iedere proef is het optreden van een dichtheidsstroom waargenomen. Tijdens de laatste 3 proeven is getracht de snelheid in de dichtheidsstroom te meten m.b.v. een Ott-molen. Dit is gedaan op 5 cm van de bodem in raai 7, 8 en 9 (fig. 9). Deze raaien zijn gekozen, omdat daar de bodemstijging zeer gering is tijdens de proef, zodat de molen niet onder het zand zou geraken.

De resultaten van deze metingen zijn zeer bevredigend en geven een gemiddelde snelheid in de dichtheidsstroom van circa 30 cm/sec. De snelheid aan het oppervlak is m.b.v. drijvers opgemeten en bedraagt circa 10 cm/sec tegen de gemiddelde stroomrichting in.

4.3.2.7 *Bepaling D_{50} van een zandsoort*

Van de drie gebruikte zandsoorten in de goot zijn op twee manieren de D_{50} bepaald, namelijk m.b.v. een zeefanalyse en m.b.v. een valkolom. Daartoe zijn per zandsoort 3 of 2x3 monsters uit de goot genomen. Deze monsters representeren het uitgezakte zand op 3 verschillende plaatsen in de goot, resp. raai 2, 6 en 10 (fig. 9).

Uit de resultaten blijkt dat de korrelverdeling fijner wordt naarmate het monster verder in de goot werd genomen (fig. 15). Ook is er een verschil tussen de resultaten van de valkolom t.o.v. die van de zeefanalyse. De D_{50} bepaald door de valkolom ligt gemiddeld zo'n 15% lager dan die bepaald door de zeefanalyse. Dit is eventueel te verklaren door de korrelvorm. De valsnelheid van een korrel met een zeker gewicht is, namelijk ook afhankelijk van de vorm van de korrel (zie blz. 6) (Bijlagen 8-27).

In onderstaande figuur is aangegeven hoe de D_{50} over de lengte van de goot variëert:

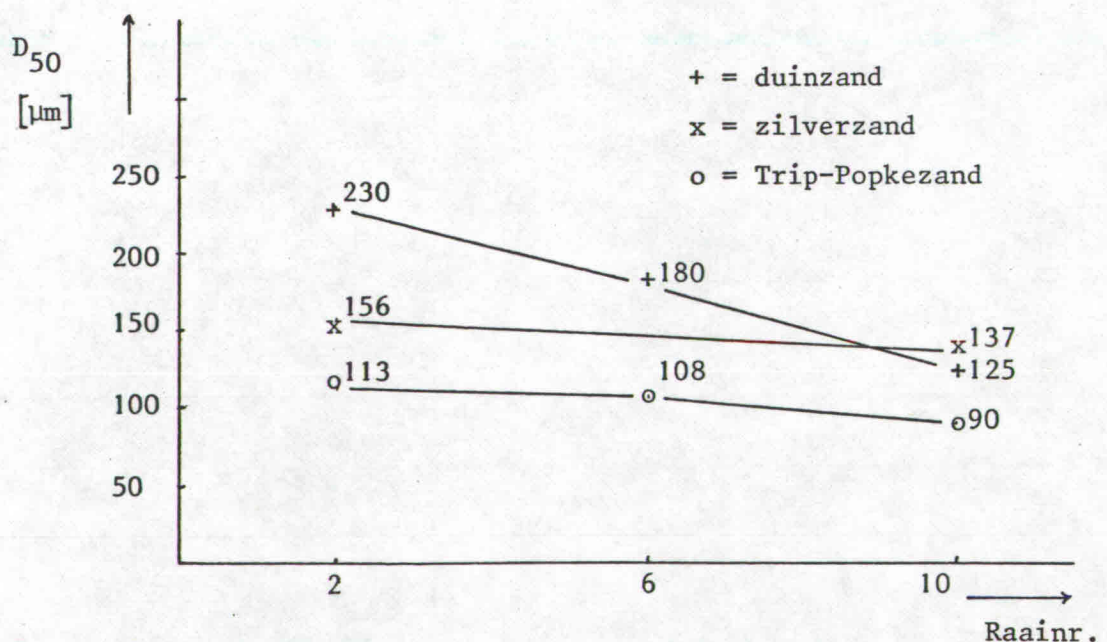


Fig.16 Relatie D_{50} -raainummer

4.3.2.8 Bepaling poriëngetal van een zandsort

Bij de proeven met fijn zand is getracht het poriëngetal van het uitgezakte zand te bepalen. Daarbij werd een plexiglasbuisje ($\emptyset = 2$ cm) op het bed gezet, waarna door licht aan het andere uiteinde te zuigen het buisje tot op de gootbodem wegzakte. Vervolgens werd het boven-eind afgesloten met een rubberstop, waarna het buisje uit het bed kon worden getrokken. Daarbij lukte het soms om de hele zandpilaar in het buisje vanaf de bodem omhoog te lichten. Opmeten van de lengte van de zandpilaar en wegen van het daarna gedroogde zand leidde tot poriëngetallen van circa 0,38 tot 0,42.

5. Conclusies

- Het computerprogramma lijkt goed te voldoen. De overeenkomsten tussen de gootmetingen en de uitkomsten van het computerprogramma zijn zeer redelijk.
- De gootproeven hebben sterk bijgedragen tot het inzicht in de voortgang van het proces. De bodemstijging blijkt bij fijn zand (100 - 200 μ) naar boven toe begrensd te worden door een minimum waterdiepte. Deze waterdiepte (de evenwichtsdiepte) wordt onder de gegeven omstandigheden gekenmerkt door een evenwicht tussen afzetting en erosie van sediment.
In tegenstelling tot het verwachte logaritmische snelheidsverloop, blijkt het mengsel zich in een dichtheidsstroom over de bodem te bewegen met een snelheid van circa 3 maal de gemiddelde stroomsnelheid. Het turbulentieverloop in de lengterichting van de goot blijkt wiskundig redelijk te kunnen worden beschreven.

APPENDIX "Rendsburg" prototype-metingen

Ten behoeve van het verkrijgen van prototype-metingen van het concentratieverloop zijn op de "Rendsburg" enkele proeven verricht.

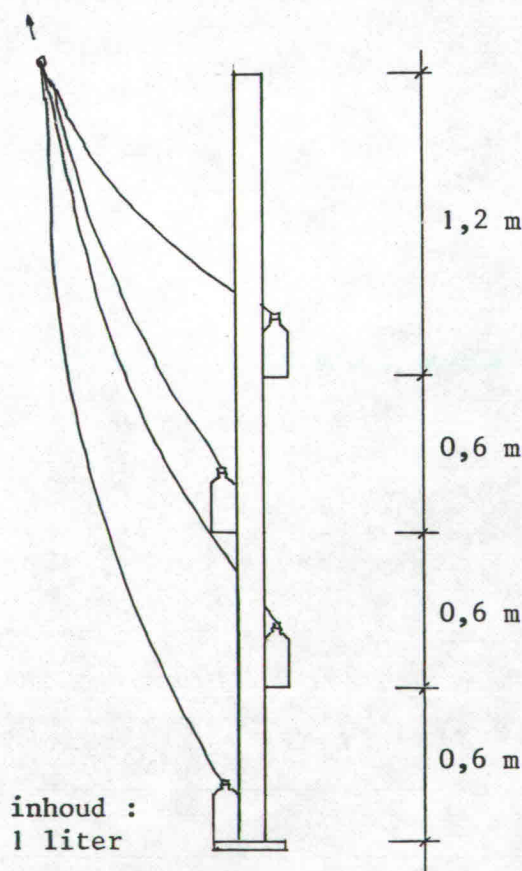
Tussen Ipswich en Felixstowe heeft de "Rendsburg" baggerwerkzaamheden uitgevoerd, waaronder ook het zuigen van fijn materiaal.

De "Rendsburg" is een kleine sleephopperzuiger met een laadvermogen van 1515 ton en een beunlengte van circa 46 m.

Tijdens het laadproces zijn op de volgende wijze monsters uit het beun genomen:

Per proef werden op 4 verschillende raaien, verdeeld over de lengte van het beun, per raai 4 monsters genomen.

Het "monstername-apparaat" bestond uit een kleine badding, waaraan op regelmatige afstanden 4 monsterflessen waren bevestigd. De flessen waren met kurken afgesloten en konden gelijktijdig worden geopend door aan de met de kurken verbonden draden te trekken. De badding werd tot en met de bovenste fles onder de waterspiegel gehouden tijdens de monstername.



Figuur 17. "Monsternameapparaat"

Begonnen werd met twee monsterflessen vlakbij de inlaat te vullen. Gelijk daarna werd raai 1 bemonsterd (zie figuur 18). Na een tijd Δt_1 , gegeven door:

$$\Delta t_1 = \frac{\text{gemiddelde stroomsnelheid}}{\text{afstand tussen raai 1 en 2}}$$

werd raai 2 bemonsterd.

Dit werd voortgezet tot en met raai 4, waarna nog twee monsters rond de overvloeikoker werden genomen.

In totaal zijn 4 proevenseries gedaan, verdeeld over twee laadprocessen. Deze zijn aangegeven door de Romeinse cijfers I, II, IV en V, met per serie genummerde flessen van 0 t/m 18.

Voorts zijn 20 flessen, aangegeven door het Romeinse cijfer III, gevuld met het mengsel uit de overvloei.

Bij het analyseren van de monsters in het laboratorium is de dichtheid van het mengsel t.o.v. water bepaald en tevens de korrelverdeling, nadat het slib door uitspoelen was verwijderd (zie bijlagen 58 t/m 96).

Het blijkt dat de D_{50} en de dichtheid naar beneden toenemen.

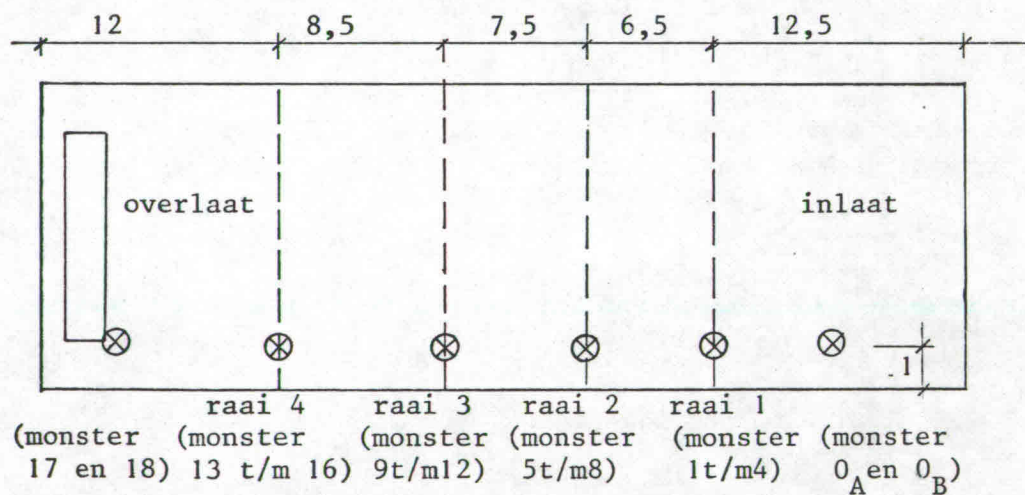


Fig.18 Overzicht van de beunmeetpunten (bovenaanzicht beun) (maten in meters)

De monsters van de proefnemingen op de "Rendsburg" zijn alle m.b.v. de zeefanalyse geanalyseerd. Daartoe werden de monsters vóór het zeven gedecanteerd. Dat wil zeggen dat de slibfractie door middel van langzaam uitspoelen van de overige fractie werd gescheiden. Het sediment kon namelijk alleen droog worden gezeefd. Aanwezigheid van slib zou na het drogen leiden tot klontering (bijlagen 58 t/m 96).

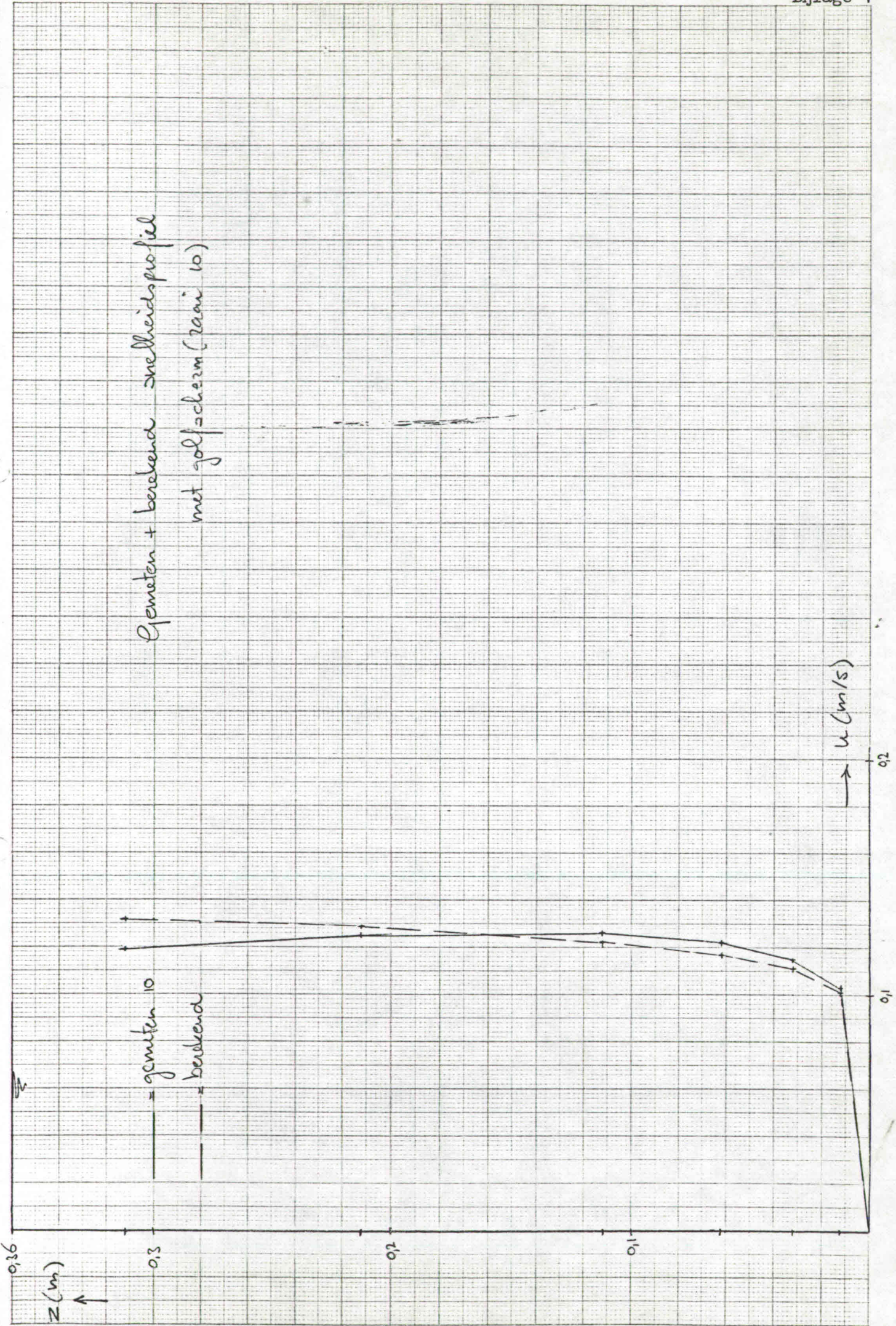
SYMBOLENLIJST

<u>Symbol</u>	<u>Definitie</u>	<u>Eenheden</u>
A	Hyperboolconstante	-
a	Grootste korreldiameter	m
a	Hoogte t.o.v. referentienivo	m
B	Hyperboolconstante	-
b	Middelste korreldiameter	m
C	Chezy-constante	$m^{1/2}/s$
C_D	Vormweerstandscoefficiënt	-
$C_{1,2,3}$	Constanten	-
c	Kleinste korreldiameter	m
c	Concentratie	%
D	Korreldiameter	μm
D_{50}, D_{10}, D_{90}	Diameter door resp. 50, 10 en 90% van het gewicht van het zandmengsel overschreden	μm
g	Zwaartekrachtsversnelling	m/s^2
H	Energiehoogte	m
h	Waterdiepte	m
h_o	Maximale waterdiepte	m
i	Verhang	-
k	Constante	-
l	Mengweglengte	m
P	Vermogen	Watt (Joule/s)
Q	Debiet	m^3/s
Re	Getal van Reynolds	-
r	Regressie-coëfficiënt	-
s	Vormfactor van een zandkorrel	-
t	Tijd	s
u, v, w	Snelheid resp. in x-, z- en ij-richting	m/s
u', v', w'	Turbulente snelheidsfluctuatie resp. in x-, z-, en ij-richting	m/s
u_x	Schuifspanningssnelheid	m/s
w	Valsnelheid van een zandkorrel in water	m/s
w(c)	Gereduceerde valsnelheid	m/s
w_{rel}	$w(c)/w$	-

<u>Symbol</u>	<u>Definitie</u>	<u>Eenheden</u>
Δ	Relatieve dichtheid	-
ϵ	Diffusie-coëfficiënt	m^2/s
κ	Constante van von Kârmân	-
ν	Kinematische viscositeit	m^2/s
ρ	Soortelijke massa van water	kg/m^3
ρ_s	Soortelijke massa van sediment	kg/m^3
τ	Schuifspanning	N/m^2

Literatuurlijst

1. Breusers, H.N.C. - *Valsnelheid van korrelvormige deeltjes*.
W.L. Delft. Informatie Nr. V 146, april 1964.
2. Rouse H. - *Fluid mechanics for hydraulic engineers*.
McGraw-Hill. 1938.
3. Wijngaarden, N.J. van - *Zandtransport is suspensie*.
W.L. Delft, R 783, deel I, december 1973.
4. Vreugdenhil, C.B. - *Waterloopkundige berekeningen I*.
Collegedictaat b84, THD, CT, 1979
5. Tennekes en Lumley - *A first course in turbulence*.
MIT-Press, 1973.
6. Kerssens, P.J.M. en Rijn, L.C. van - *Model for non-steady suspended sediment transport*.
17th IAHR Congress, Baden-Baden, augustus 1977.
7. Kerssens, P.J.M., Prins A. en Rijn L.C. van - *Model for suspended sediment transport*.
Journal of the Hydraulics Division, mei 1979.
8. Rijn, L.C. van - *Model for sedimentation predictions*.
19th IAHR Congress, New Delhi, februari 1981.
9. Groot. J.M. - *Interim rapport beunbezinking, deel I*.
Stromingsonderzoek, juni 1981.

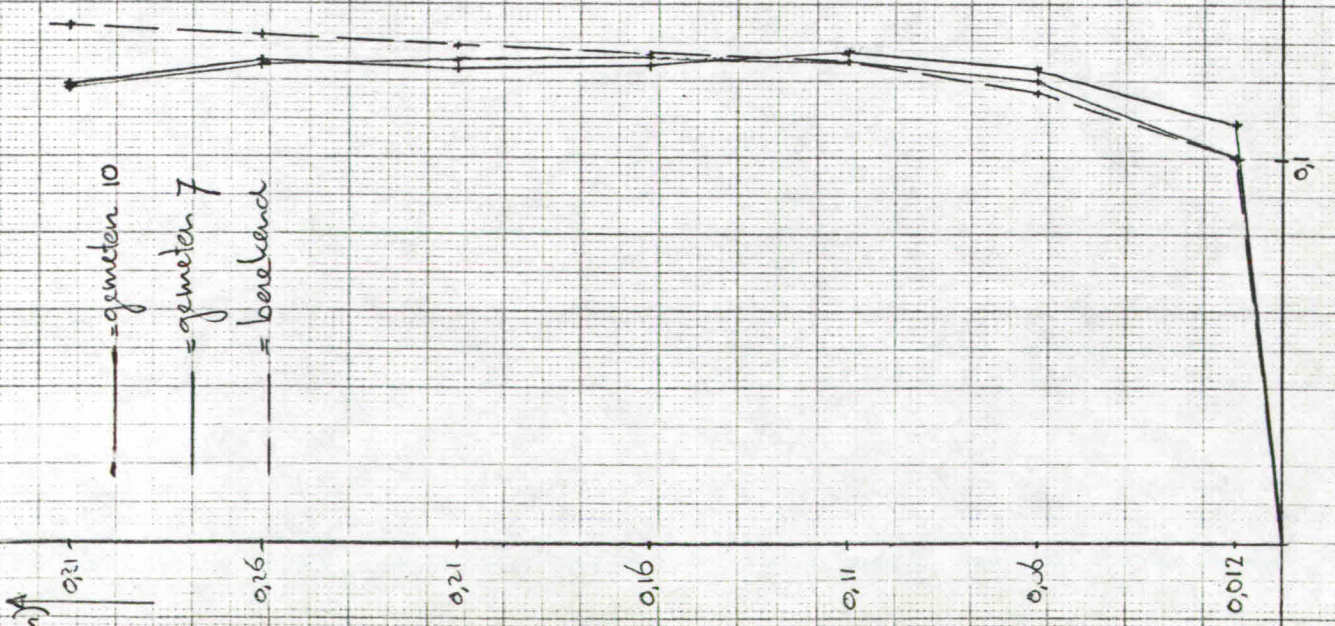


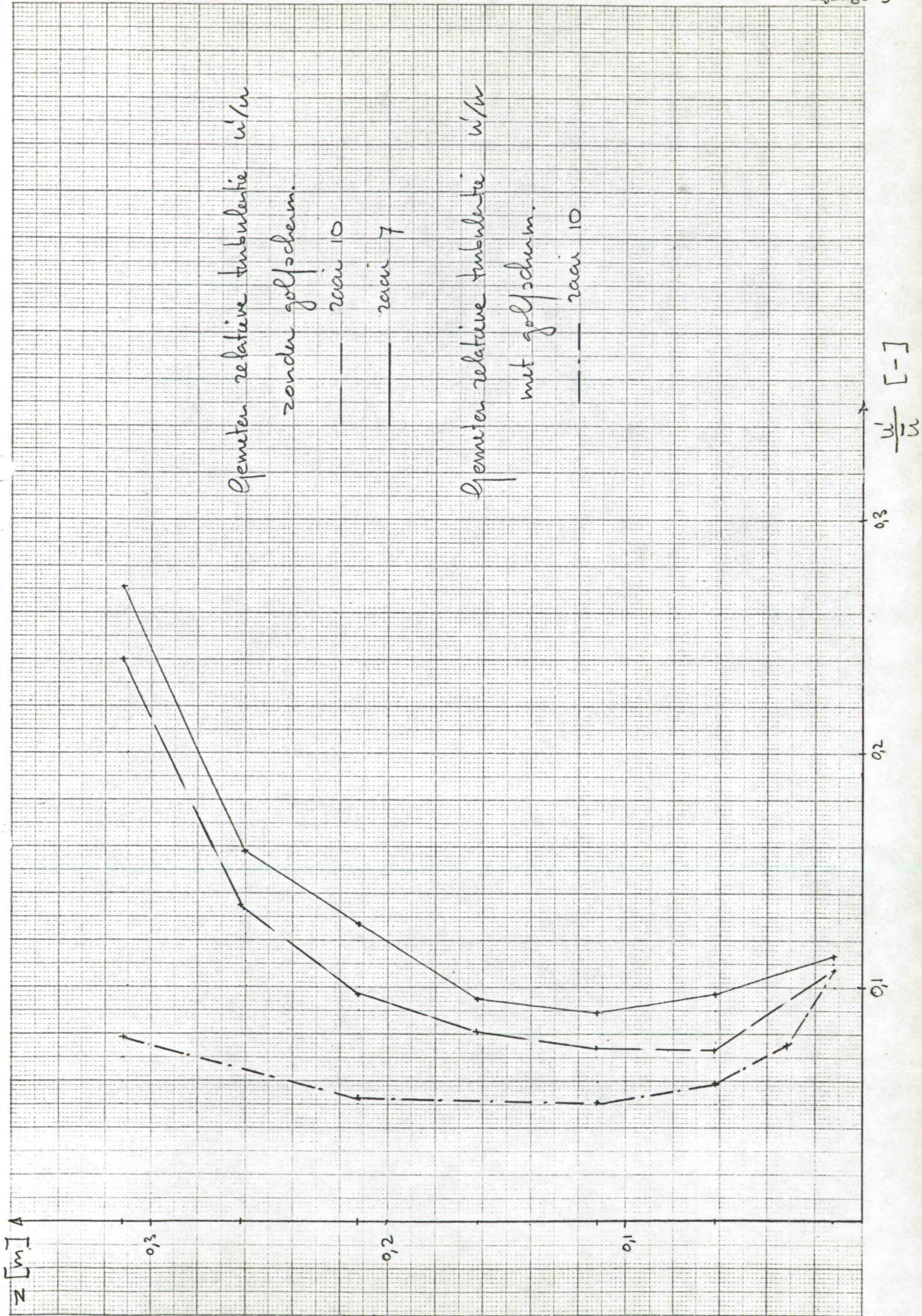
Gemeten + berekende snelheidsprofielen.
zonder golfseem in de rassen 7 en 10

z (m) ↑

— = gemeten 10
— = gemeten 7
— = berekend

→ u [m/s]






Turbulentmetingen.

Spotmeting.	Q [l/s]	P [Joule/m ³]
3.	≈ 23	≈ 25000
2.	≈ 18	≈ 25000
1.	≈ 23	≈ 3000

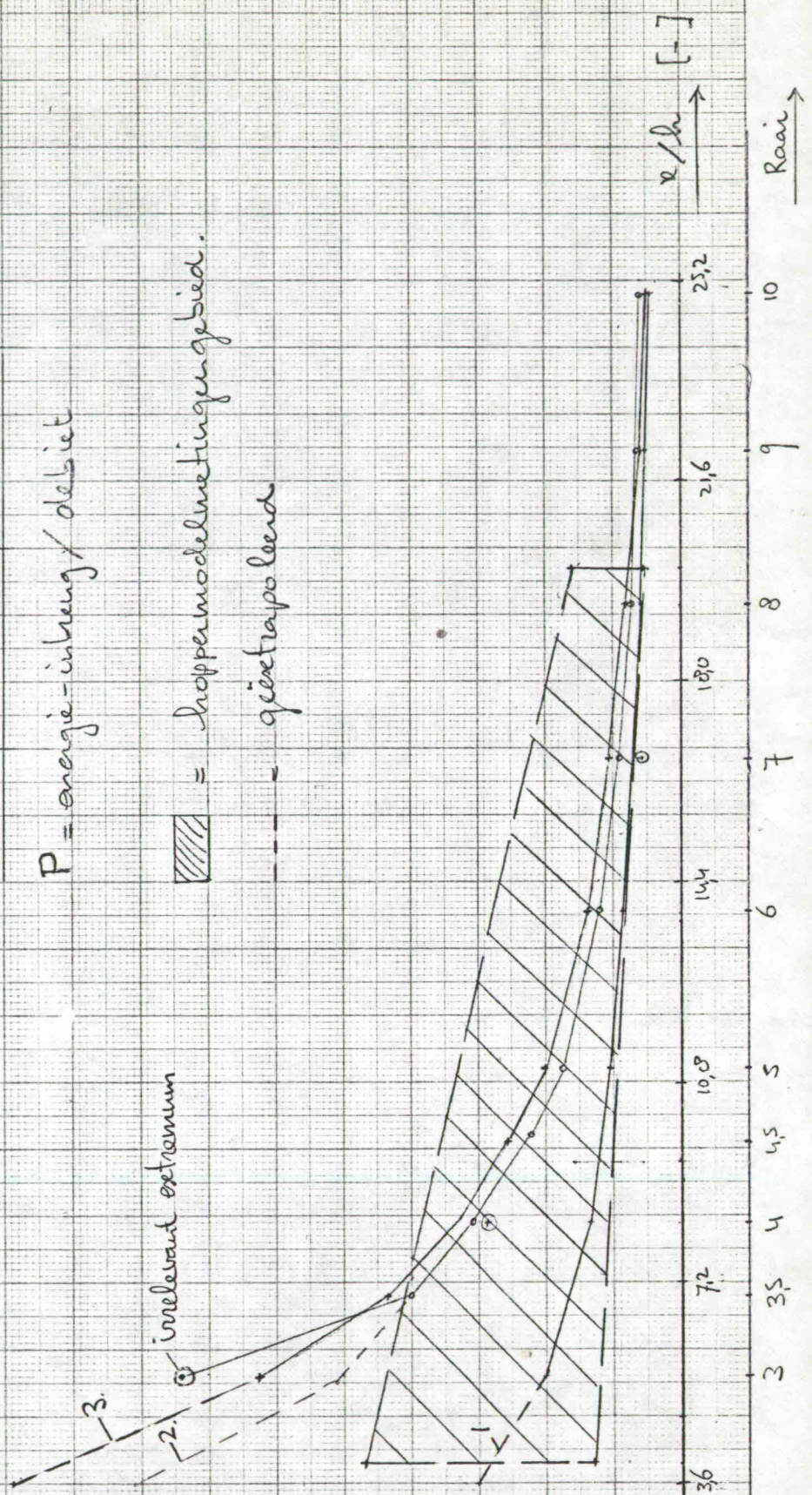
P = energie-inhoud / debiet

 = hoppersmodelmetingsgebied.

 = gèestrapo leed

w/w [-]

0,10
0,09
0,08
0,07
0,06
0,05
0,04
0,03
0,02
0,01



v/h [-]

10

9

8

7

6

5

4,5

4

3,5

3

3,6

7,2

10,8

14,4

18,0

21,6

25,2


Raai →

Turbulentie metingen.

o---o = Open diffusor (chooppermodel) VII

x---x = Verdonken diffusor (idem) XI

+---+ = Spoot meting I

 = Gebied waarbinnen de modelmetingen
gelegen zijn.

$\frac{S}{L}$ [-]

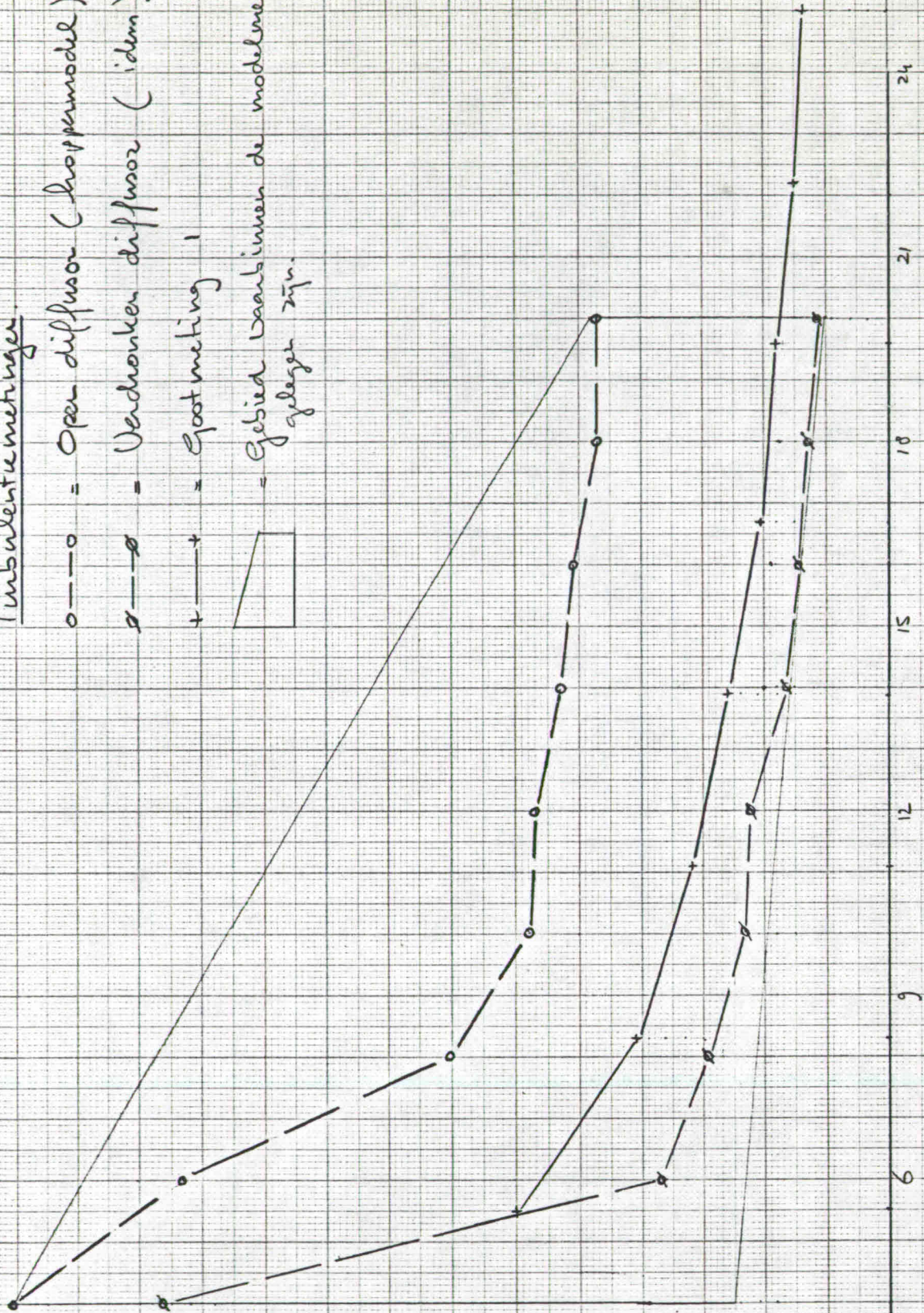
0,04

0,03

0,02

0,01

0



x/L [-]

24

21

18

15

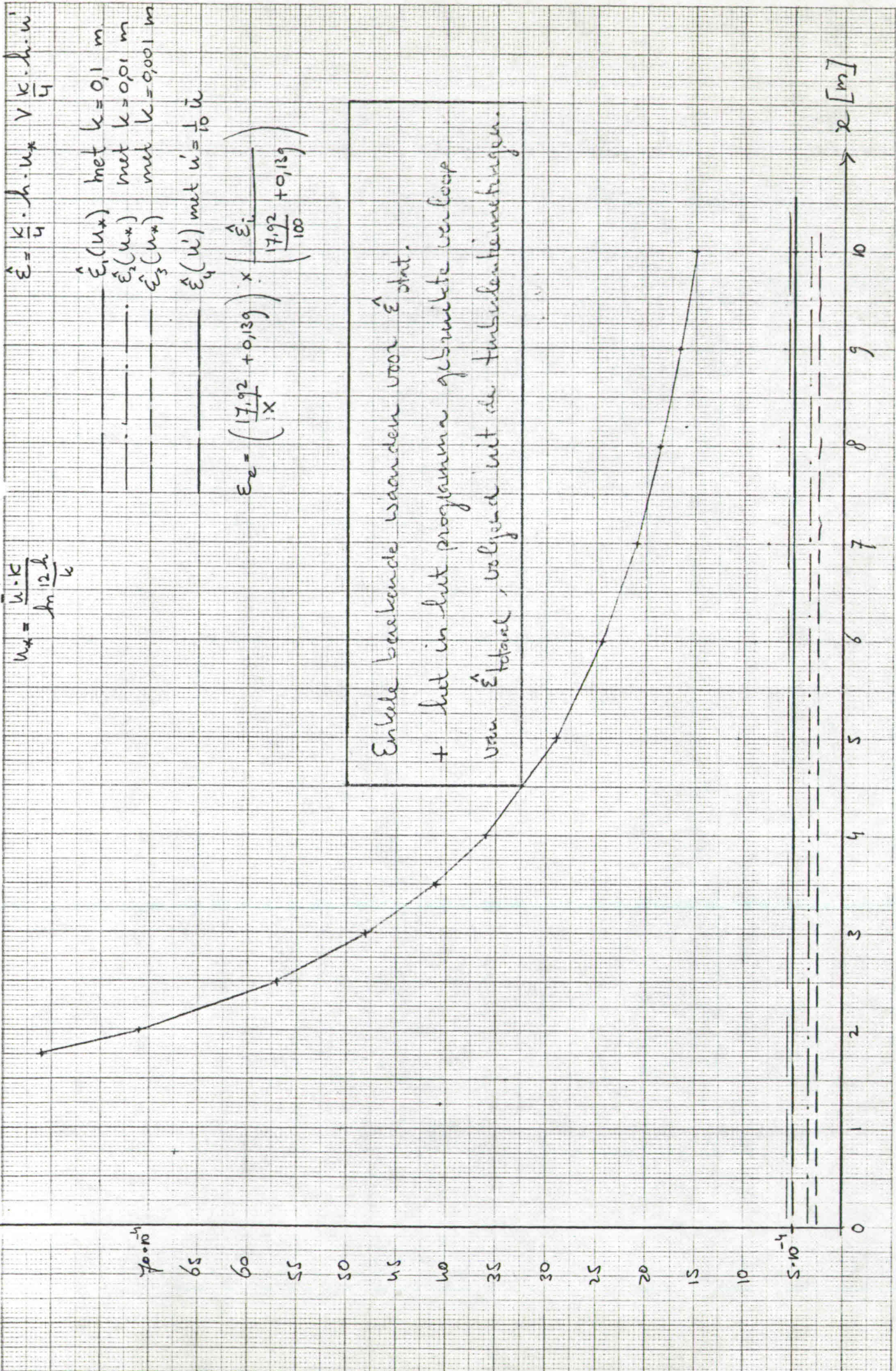
12

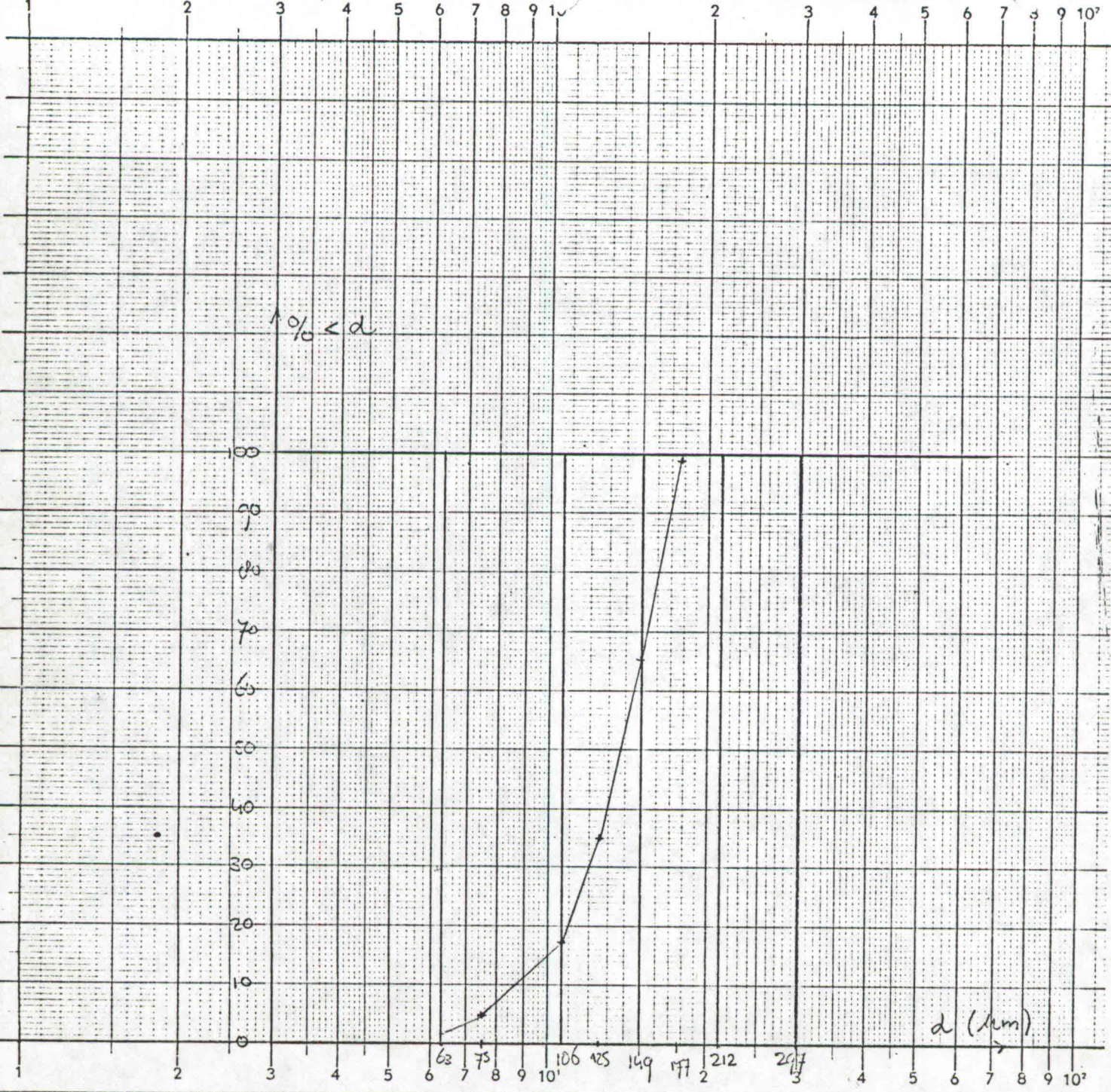
9

6

3

0





Zilverzand

Monster: aan het eind van de goot.

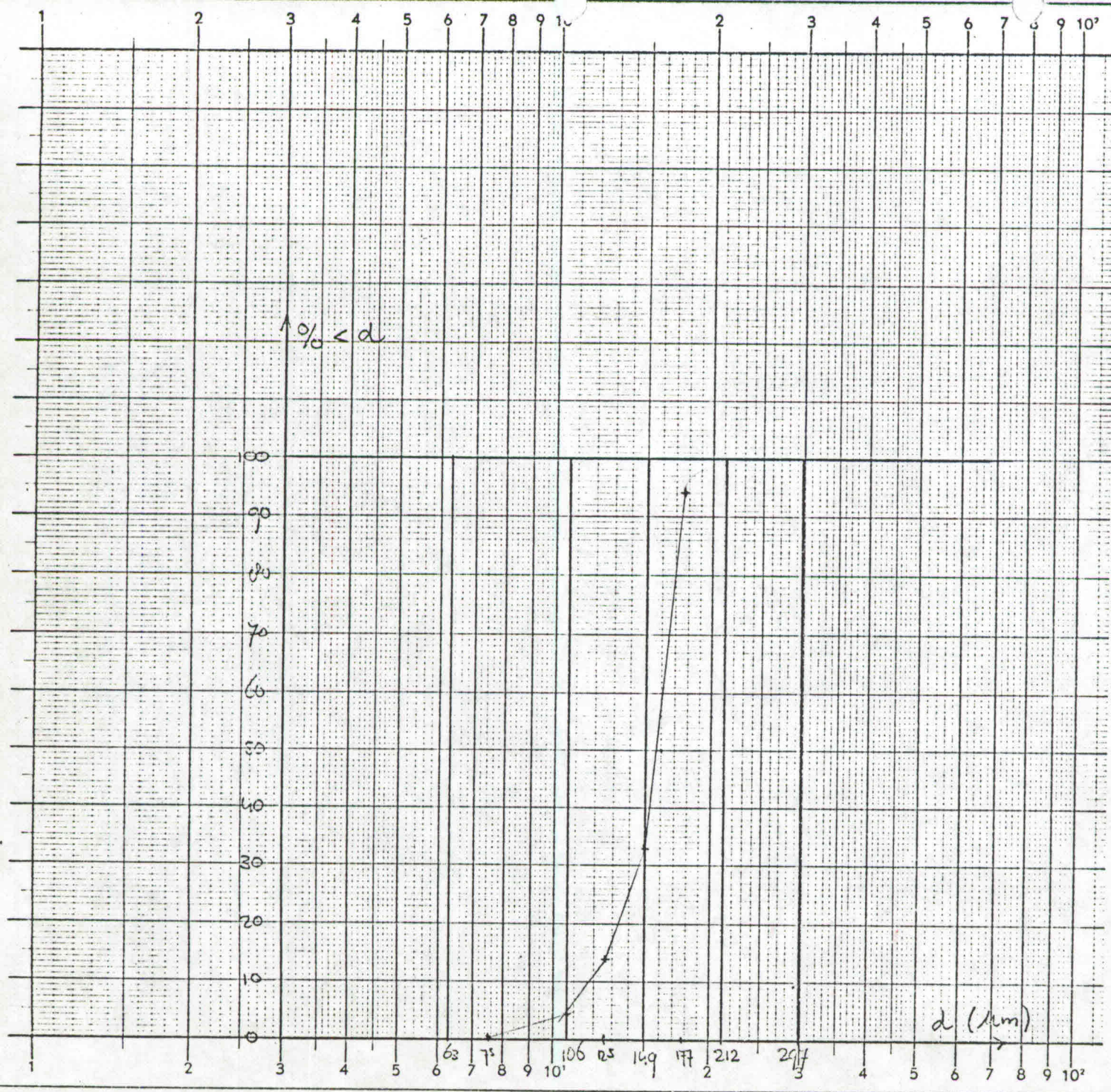
D₅₀: 137 μm

Dichtheid mengsel:

Sediment (totaal): _____ gram/liter

Sediment > 63 μ: _____ gram/liter

Sediment < 63 μ: _____ gram/liter



Zilverzand

Monster: Begijn vd goot

D₅₀: 156 μm

Dichtheid mengsel: _____

Sediment (totaal): _____ gram/liter

Sediment > 63 μ: _____ gram/liter

Sediment < 63 μ: _____ gram/liter

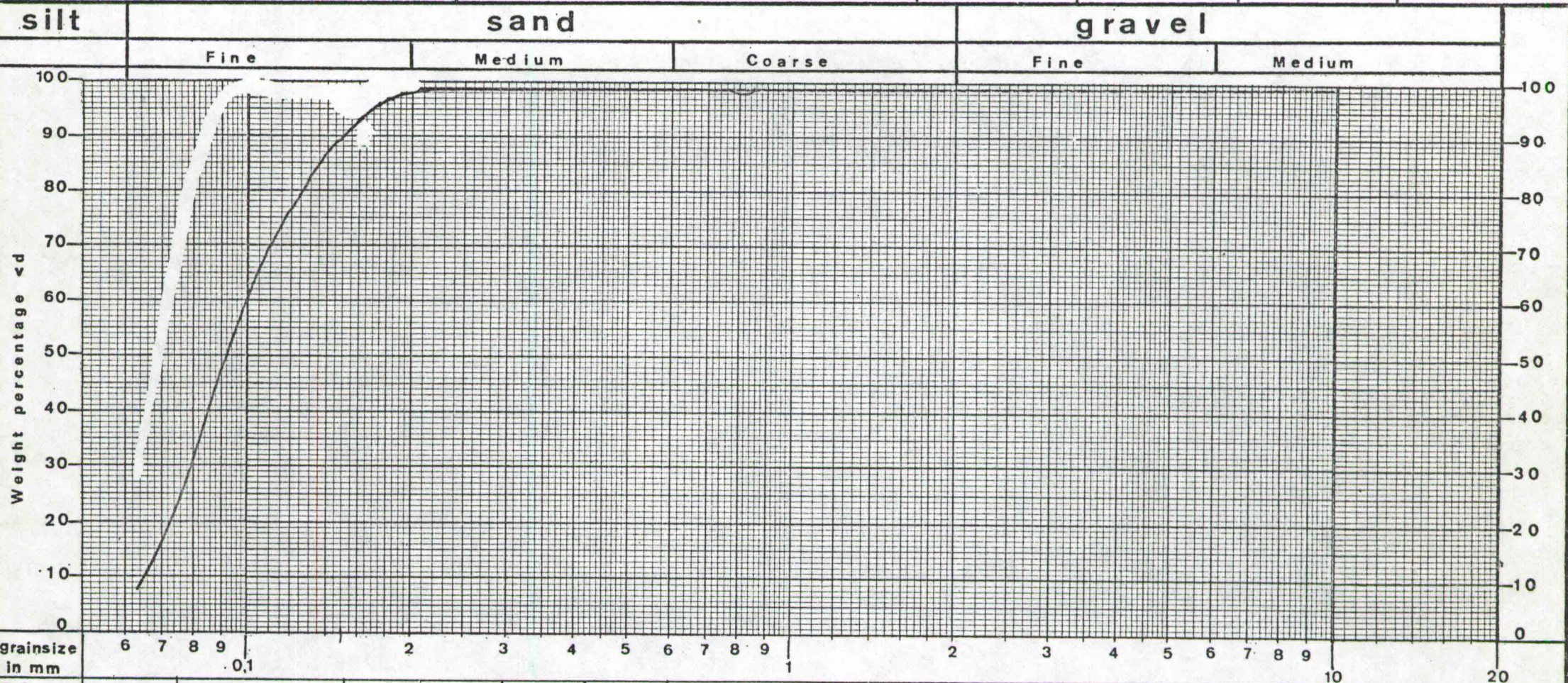
TENDER TH
 LOCATION monster 1

grain_size curve

signature

date:

n r:



grainsize in mm	6	7	8	9	0.1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	20
BS sieve		200			100		52	36		25				14		7				3/16"			1/2"	3/4"
sieve		75			150	210	300			600				1200		2400				3/16"			1/2"	3/4"

BORING NO.	SAMPLE NO.	DEPTH M.	LEVEL M.	CURVE SIGNATURE	MEDIUM GRAIN SIZE d50% (mm)	REMARKS
					0.092	Bepaling v/d D ₅₀ m.b.v. - valkolom Trip Boeke zand prof 15 Raai 2

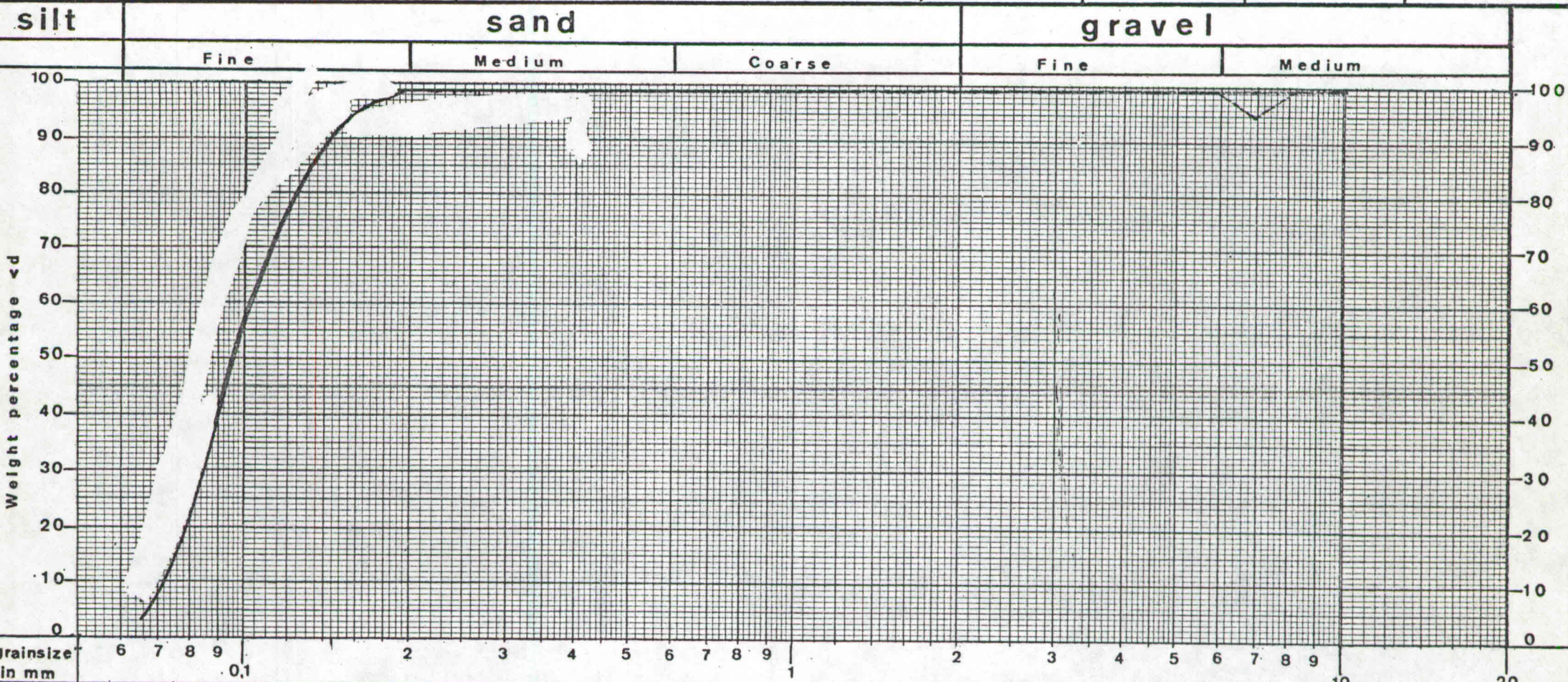
TENDER TM
 LOCATION monster 2

grain-size curve

signature

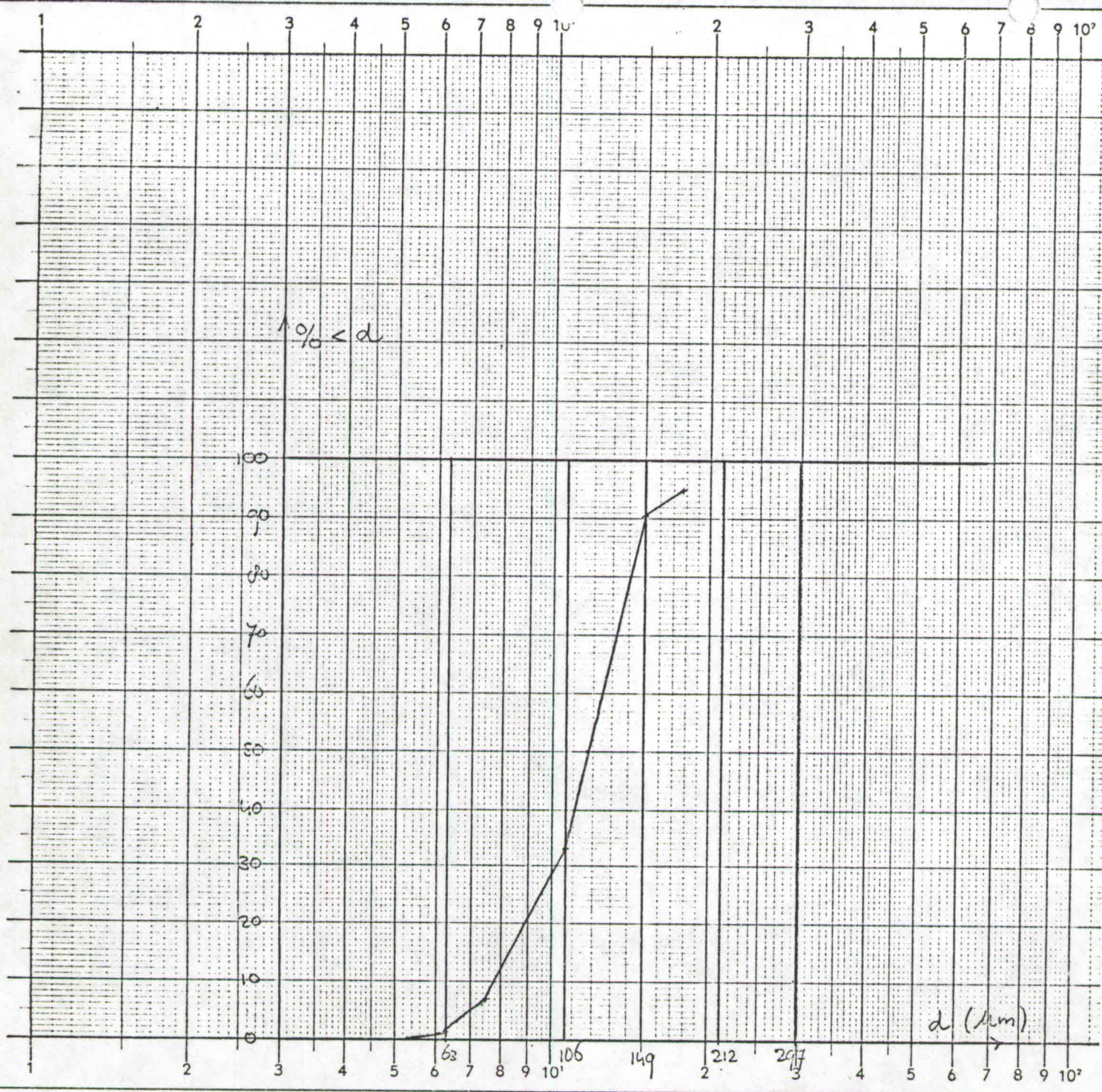
date:

n r:



grain size in mm	6	7	8	9	0.1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	20
US sieve		200				100		52		36		25		14		7		3/16"		1/2"		3/4"		
EU sieve		75				150		210		300		600		1200		2400		3/16"		1/2"		3/4"		

BORING NO.	SAMPLE NO.	DEPTH M.	LEVEL M.	CURVE SIGNATURE	MEDIUM GRAIN SIZE d50% (mm)	REMARKS
					0.095	Bepaling v/d D ₅₀ m b v. de valkeboom Trip Popke raad prof 15 Raai 6



Trip Popke zand.

Monster: Ravi 2 prof 15

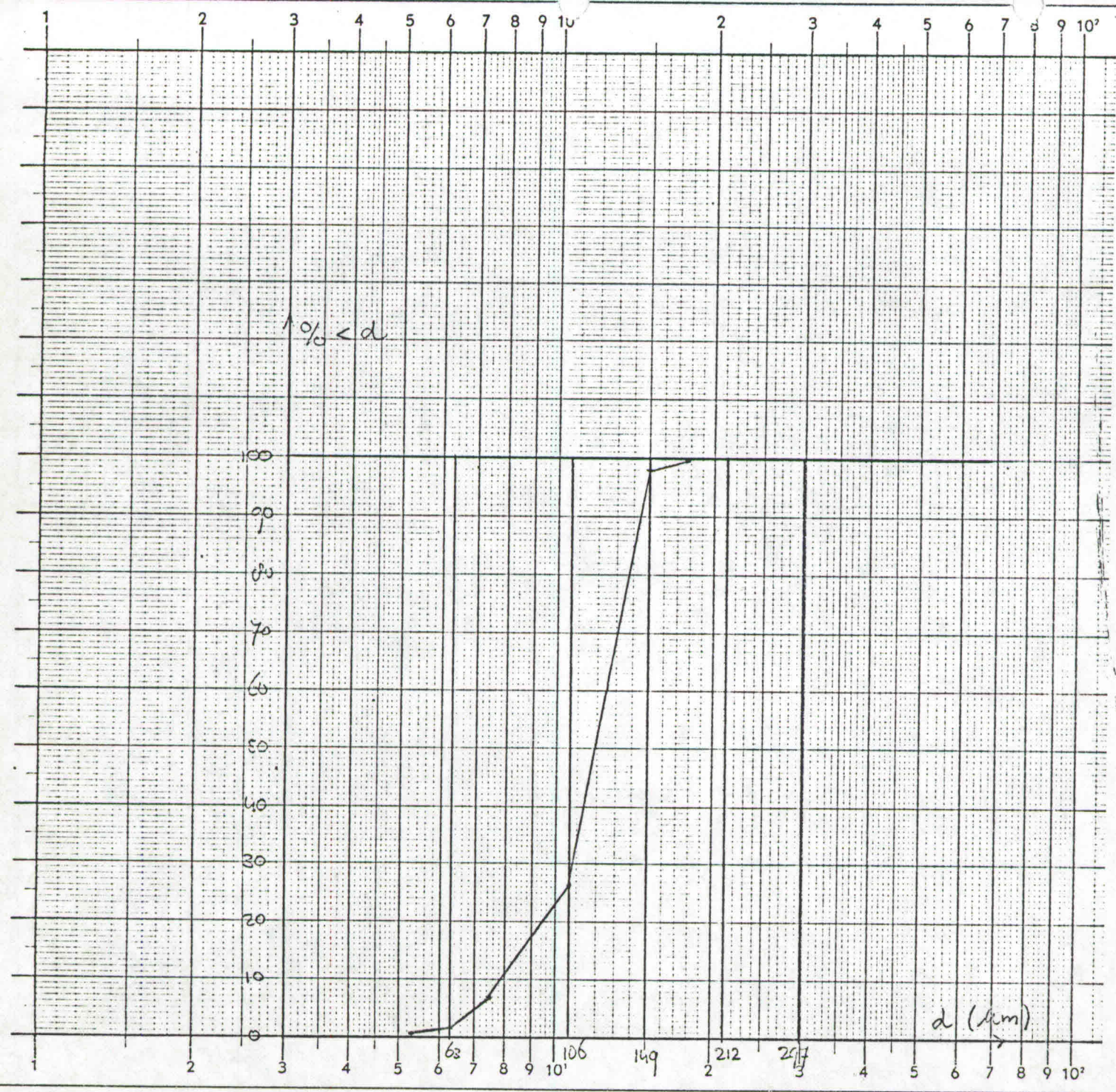
D_{50} : 117 mm

Dichtheid mengsel:

Sediment (totaal): gram/liter

Sediment > 63 μ : gram/liter

Sediment < 63 μ : gram/liter



Trip Popke zand

Monster: Raai 6 prof. 15

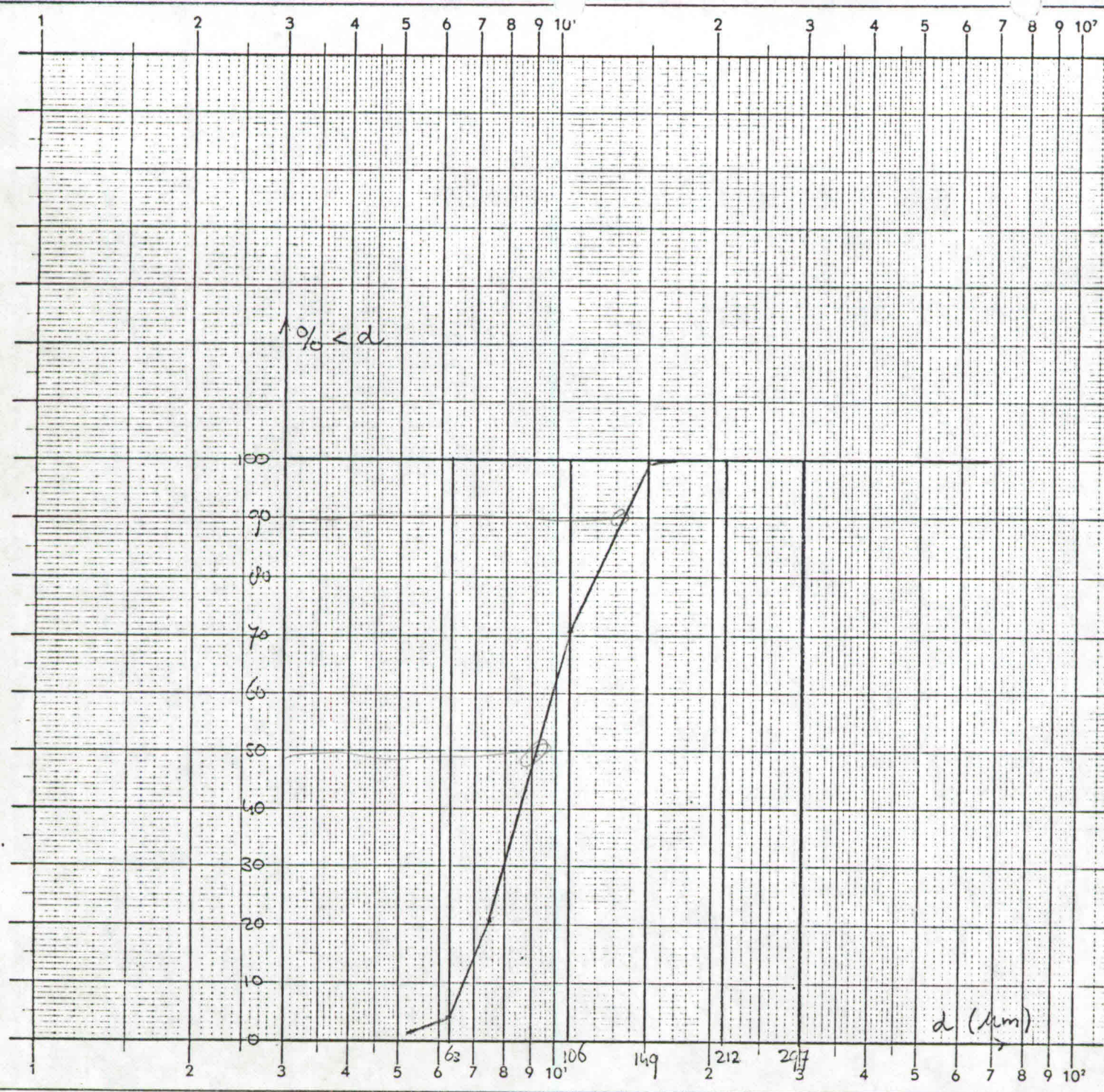
D_{50} : 119 μm

Dichtheid mengsel:

Sediment (totaal): gram/liter

Sediment > 63 μ : gram/liter

Sediment < 63 μ : gram/liter



Trip Popla

Monster: Racii 10 prof 15

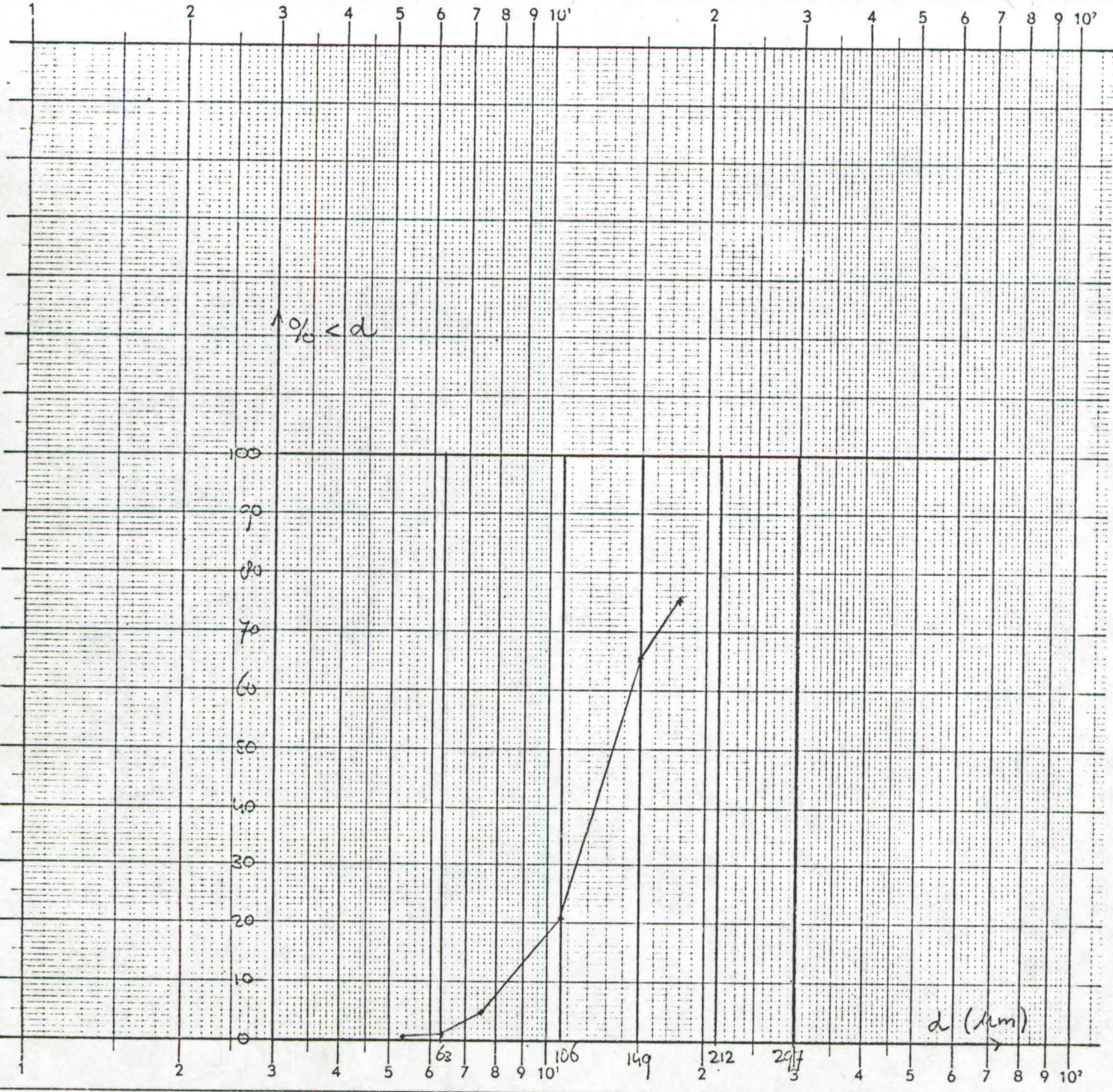
D₅₀: 92 μm

Dichtheid mengsel: _____

Sediment (totaal): _____ gram/liter

Sediment > 63 μ: _____ gram/liter

Sediment < 63 μ: _____ gram/liter



Trip Popke zand

Monster: Raai 2 prof 19

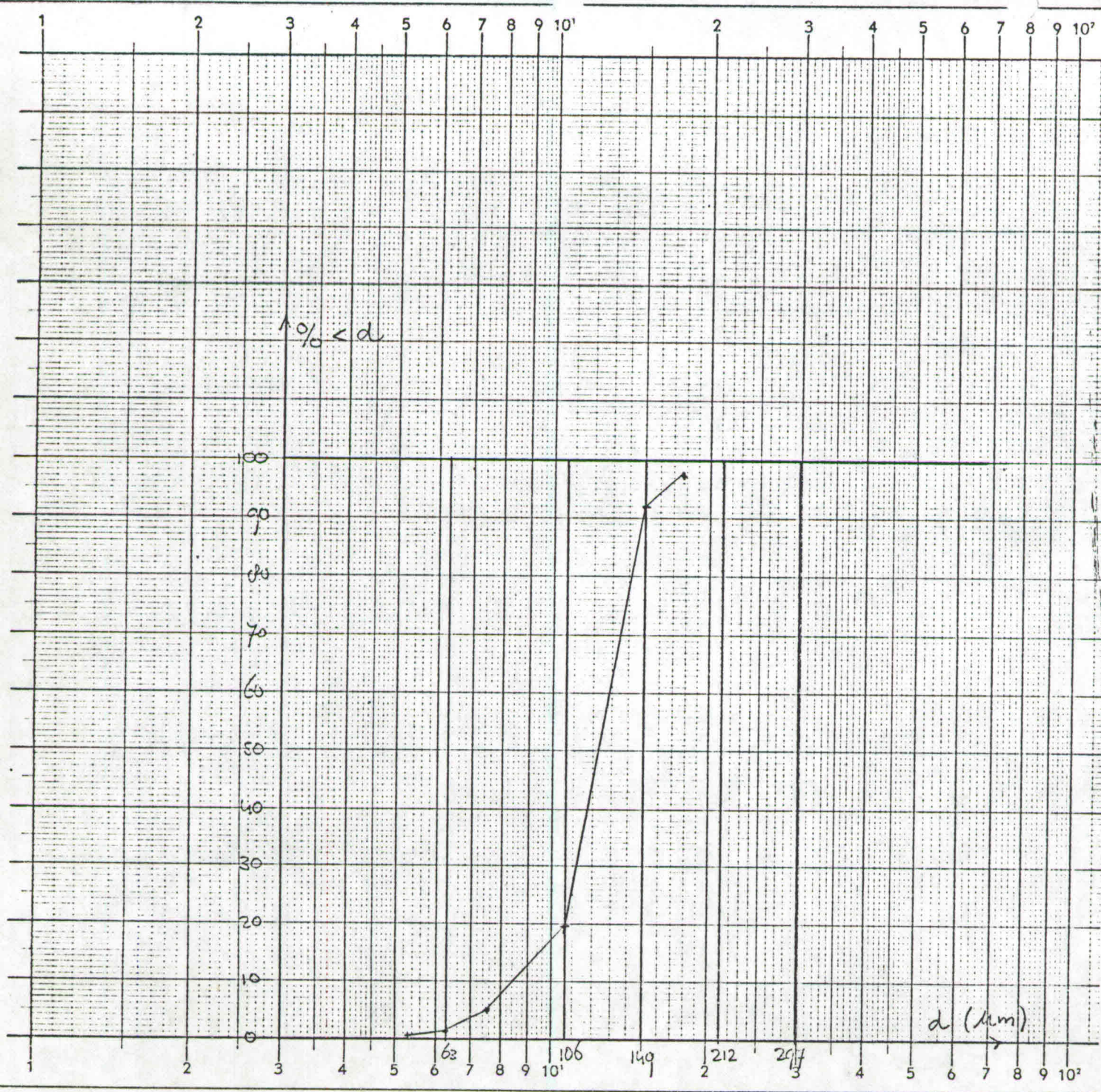
D₅₀: 133 μm

Dichtheid mengsel:

Sediment (totaal): gram/liter

Sediment > 63 μ: gram/liter

Sediment < 63 μ: gram/liter



Trip Popke zand

Monster: Raai 6 proef 19

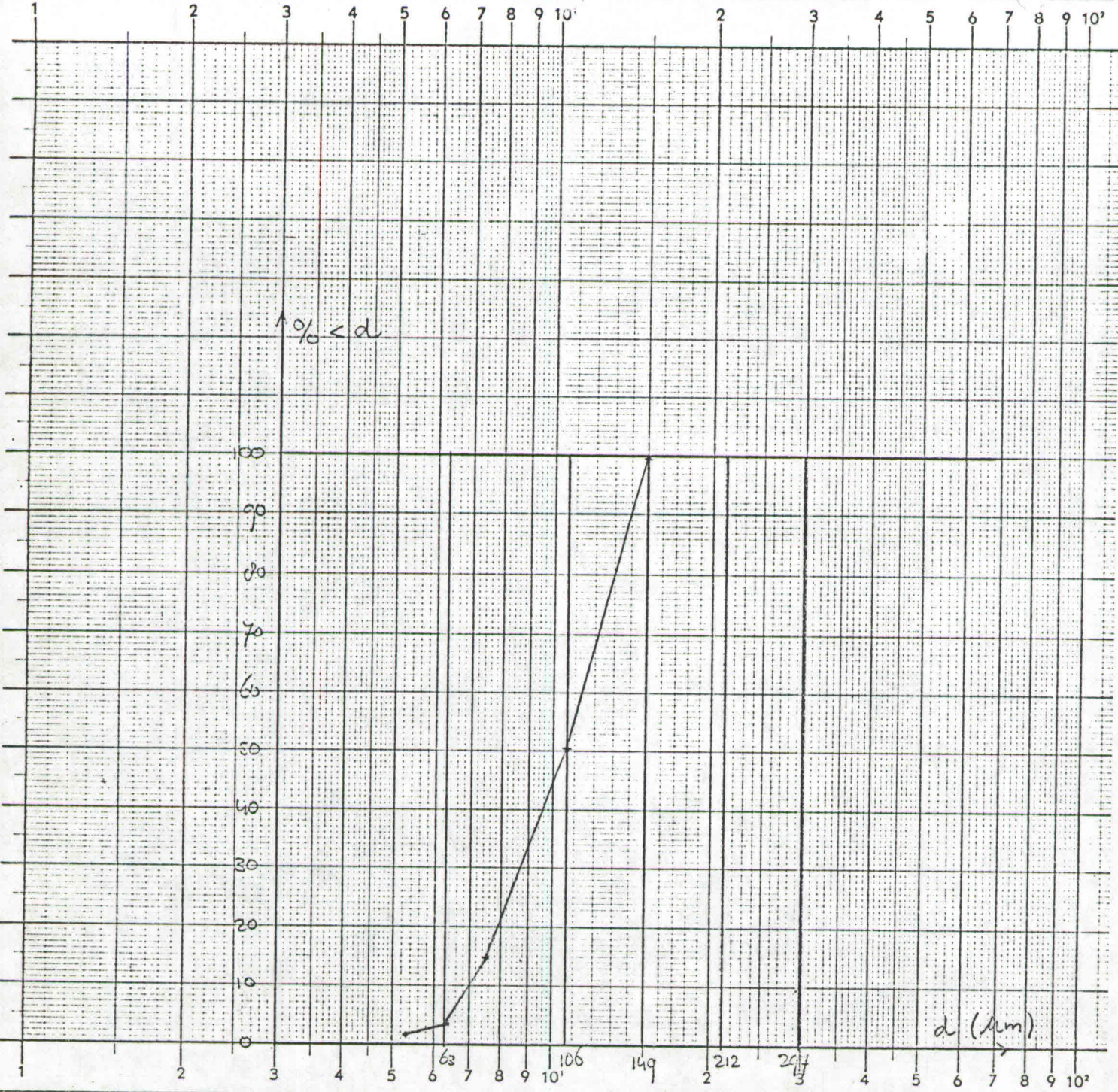
D₅₀: 123 mm

Dichtheid mengsel:

Sediment (totaal): gram/liter

Sediment > 63 μ: gram/liter

Sediment < 63 μ: gram/liter



Trip Poplar zand

Monster: Raai 10 proef 19

D_{50} : 105 μm

Dichtheid mengsel:

Sediment (totaal): gram/liter

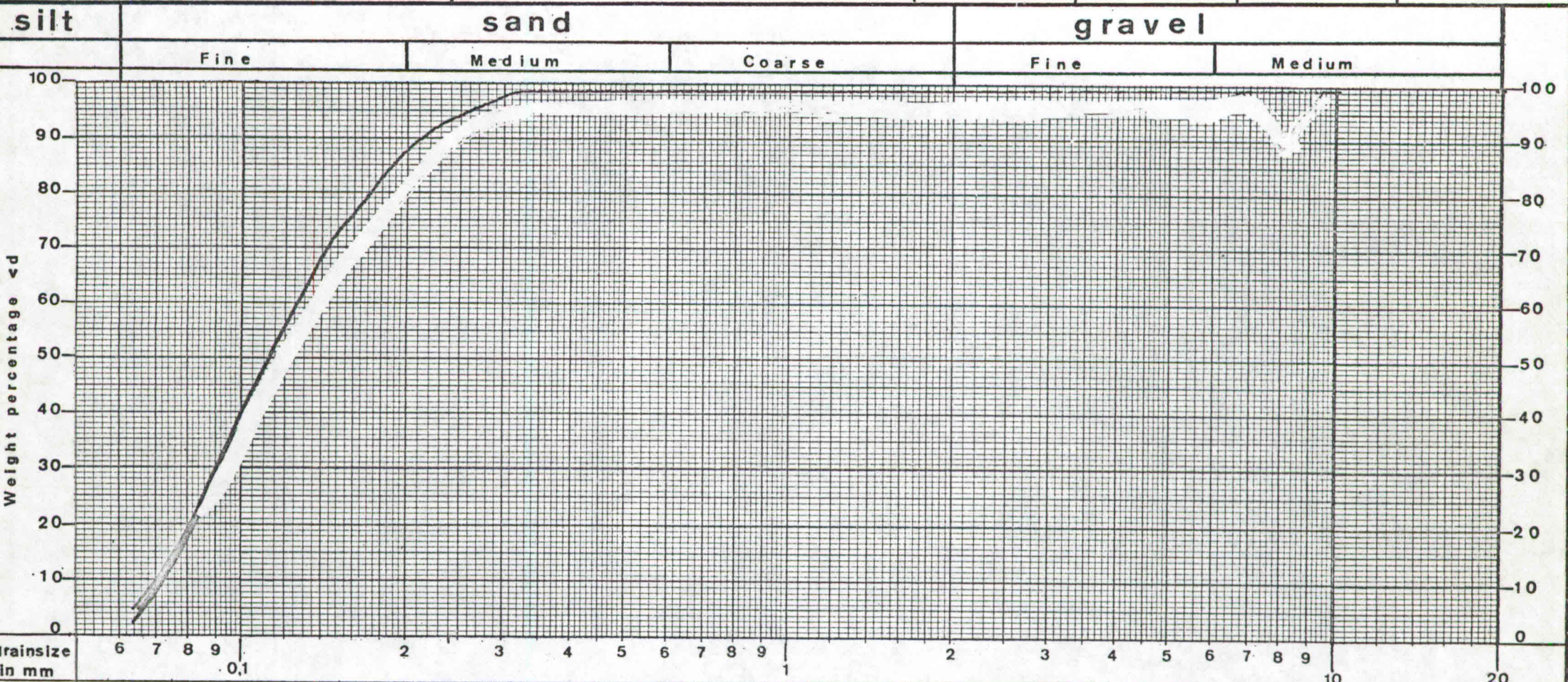
Sediment $> 63 \mu$: gram/liter

Sediment $< 63 \mu$: gram/liter

TENDER TH
 LOCATION 1

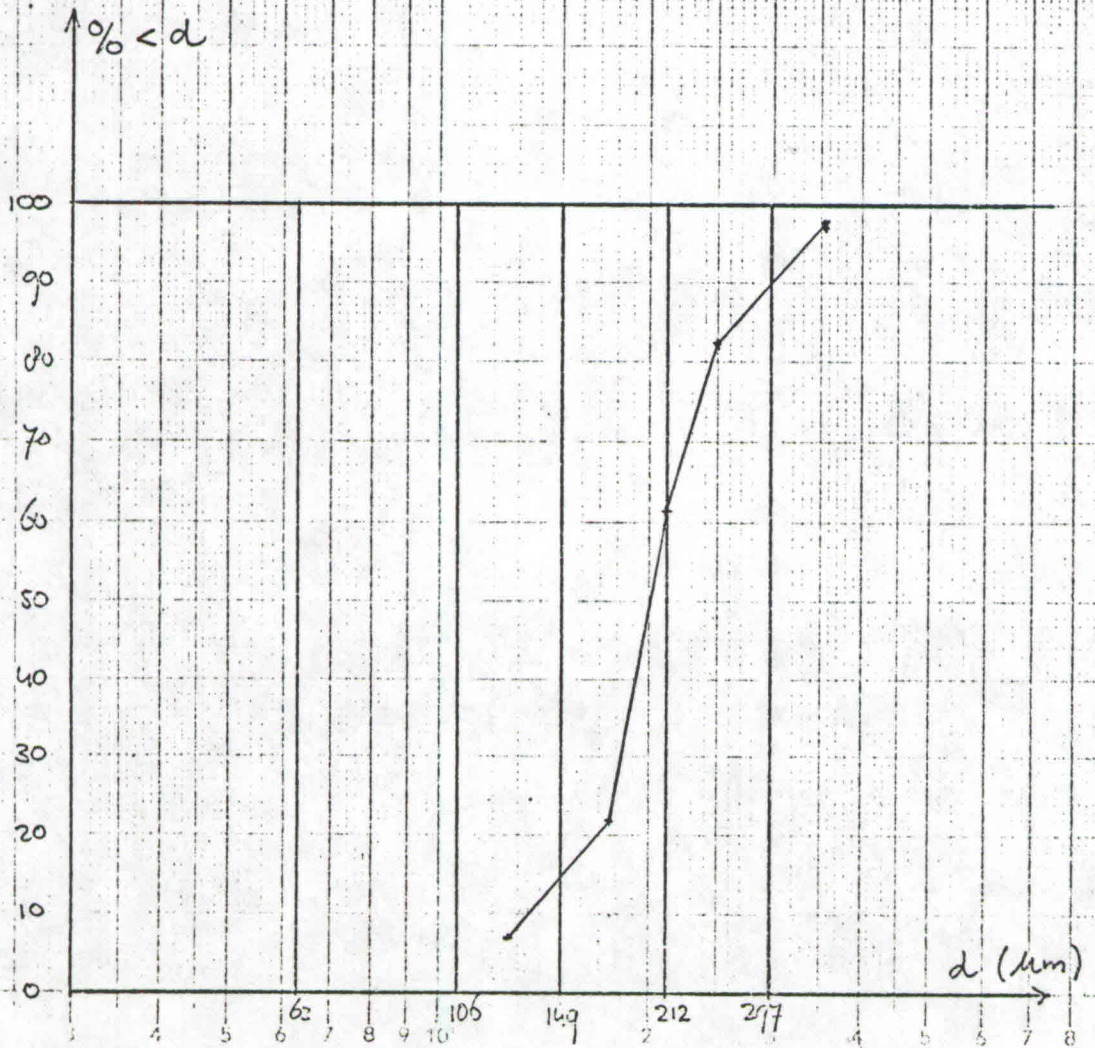
grain_size curve

signature _____ date: prof 19 n.r: _____



grain size in mm	6	7	8	9	0.1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	20		
3 S sieve		200			100		52	36		25				14						7			3/16"	3/16"		
sieve		75			150	210	300			600				1200						2400			3/16"	3/16"	1/2"	3/4"

BORING NO.	SAMPLE NO.	DEPTH M.	LEVEL M.	CURVE SIGNATURE	MEDIUM GRAIN SIZE d50% (mm)	REMARKS
					0,112	Trip Popke zand Raai 2



Duinzand.

Monster: Raai 2 proef 23

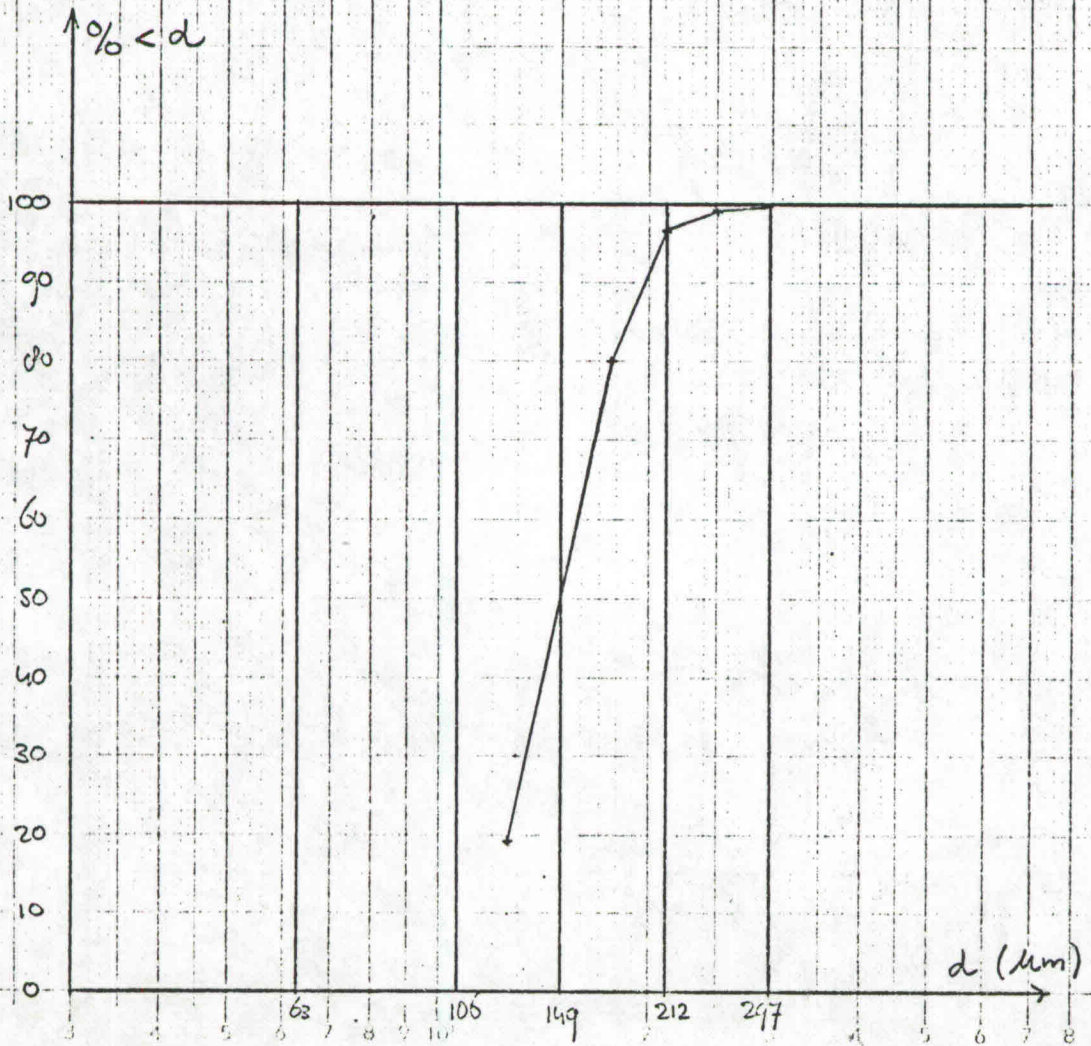
D₅₀: 200 μm

Dichtheid mengsel:

Sediment (totaal): gram/liter

Sediment > 63 μ: gram/liter

Sediment < 63 μ: gram/liter



Dunzand

Monster: Reai 6 proef 23

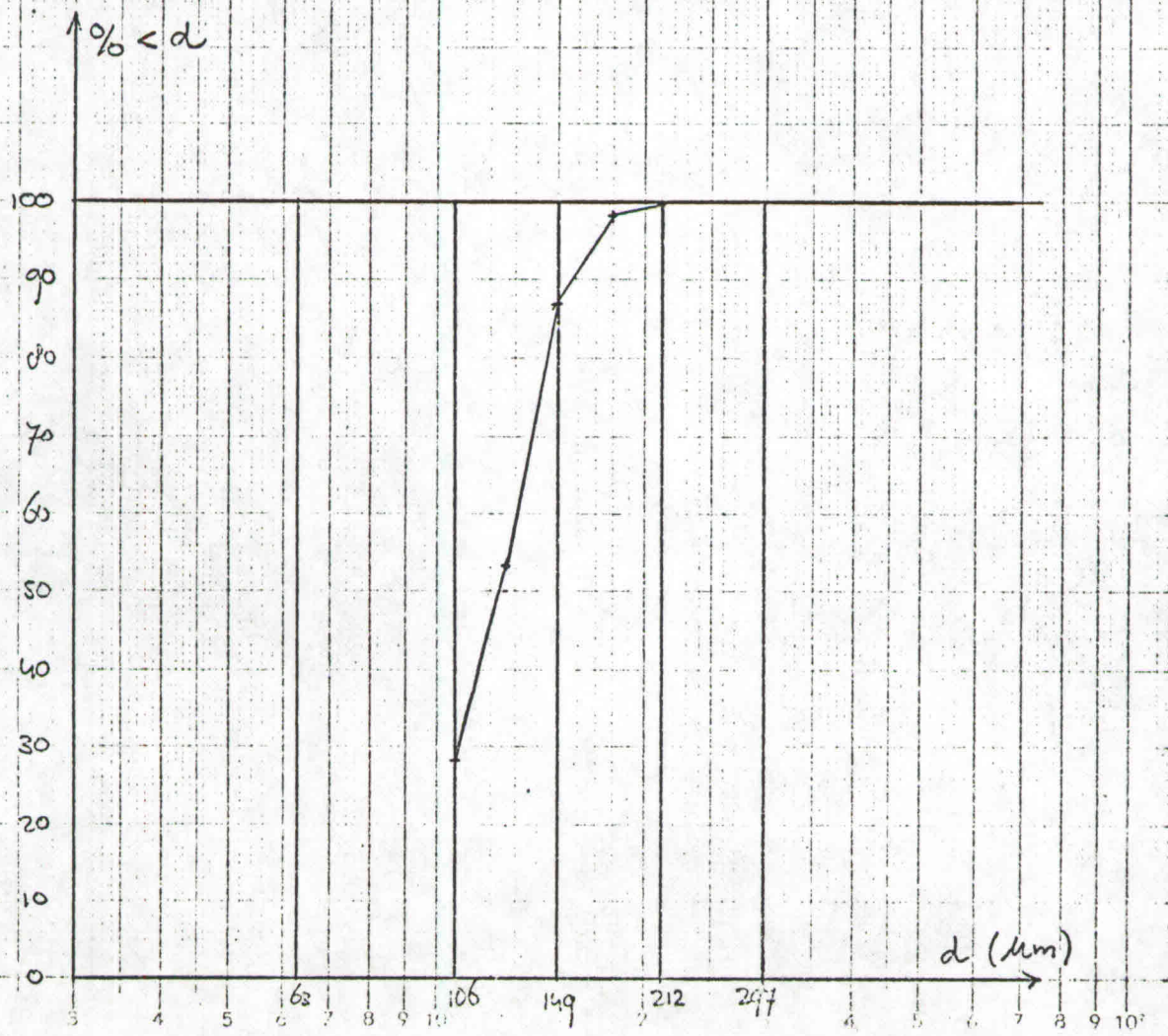
D_{50} : 150 μm

Dichtheid mengsel: _____

Sediment (totaal): _____ gram/liter

Sediment > 63 μ : _____ gram/liter

Sediment < 63 μ : _____ gram/liter



Duinzand

Monster: Regen in prof 23

D₅₀: 123 μm

Dichtheid mengsel: _____

Sediment (totaal): _____ gram/liter

Sediment > 63 μ: _____ gram/liter

Sediment < 63 μ: _____ gram/liter

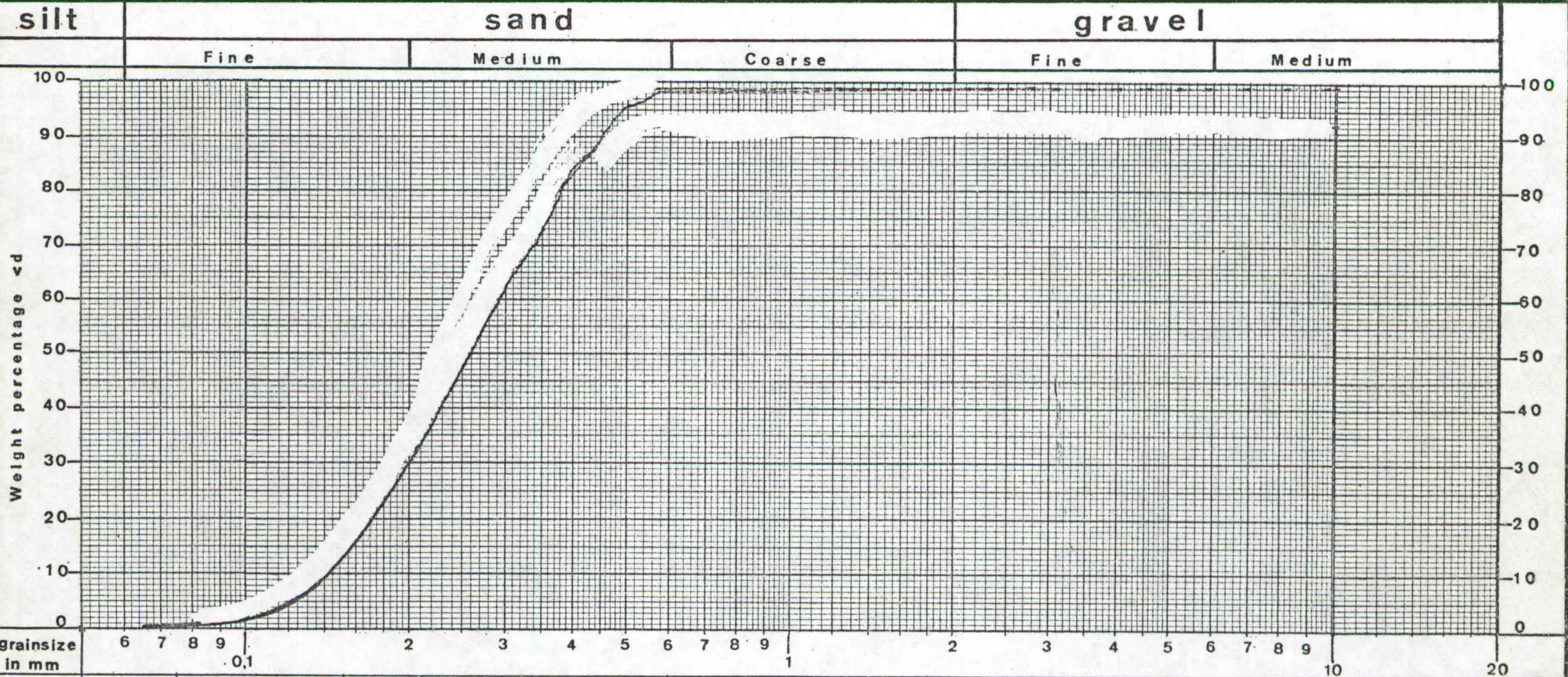
TENDER _____
 LOCATION _____

grain_size curve

signature _____

date: _____

n r: _____



grainsize in mm	6	7	8	9	0,1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	20
BS sieve		200			100		52	36	25		14			7			3/16"				1/2"		3/4"	
sieve		75			150	210	300		600		1200			2400			3/16"				1/2"		3/4"	26

BORING NO.	SAMPLE NO.	DEPTH M.	LEVEL M.	CURVE SIGNATURE	MEDIUM GRAIN SIZE d50% (mm)	REMARKS
					0,425	monstet ples 1 16-12-81
						Duin sand
						Roos 2

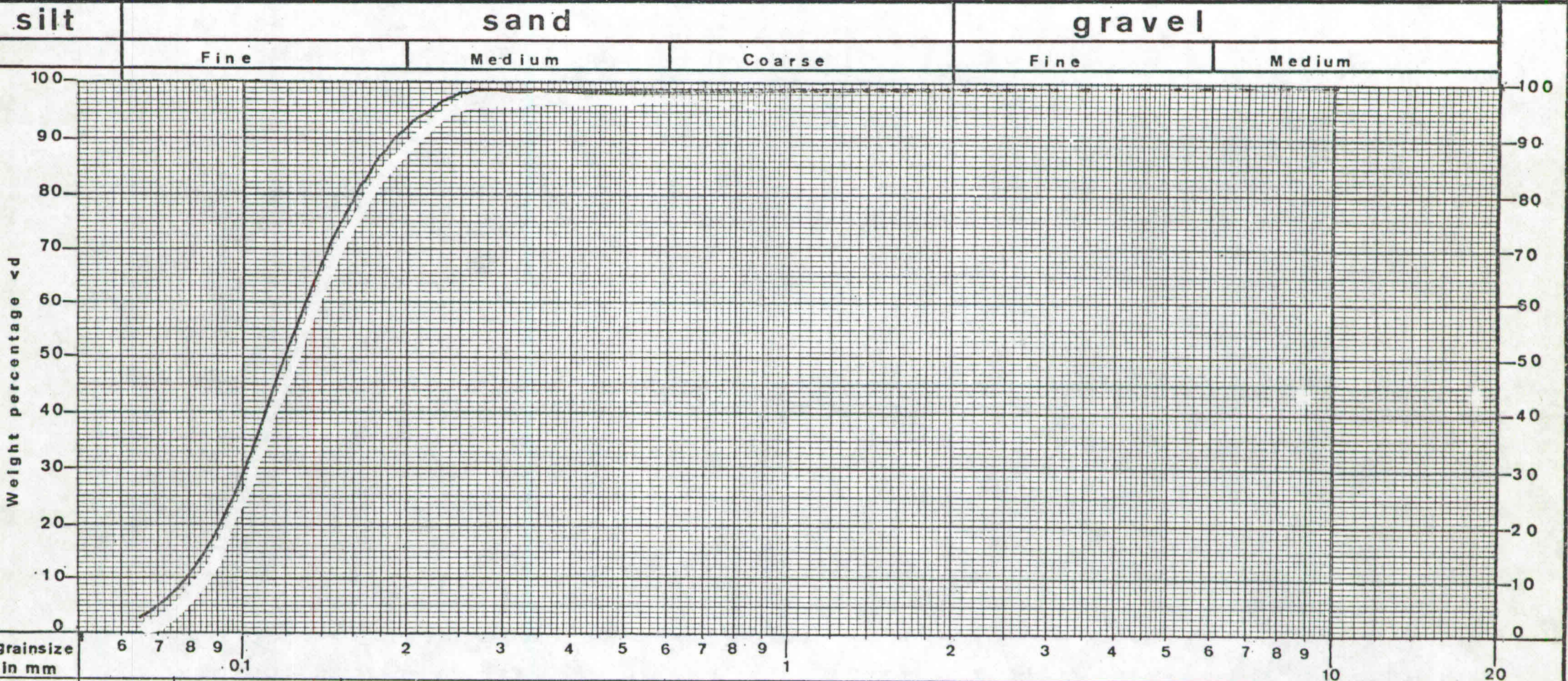
TENDER _____
 LOCATION _____

grain_size curve

signature _____

date: _____

n r: _____



grainsize in mm	6	7	8	9	0.1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	20	
BS sieve		200				100		52		.36		25		14		7									
sieve		75				150		210		300		600		1200		2400									

BORING NO.	SAMPLE NO.	DEPTH M.	LEVEL M.	CURVE SIGNATURE	MEDIUM GRAIN SIZE d50% (mm)	REMARKS
					0,125	monster pier 3 Duisland Raai 10

16-12-81

Hoogte zandbed [cm]

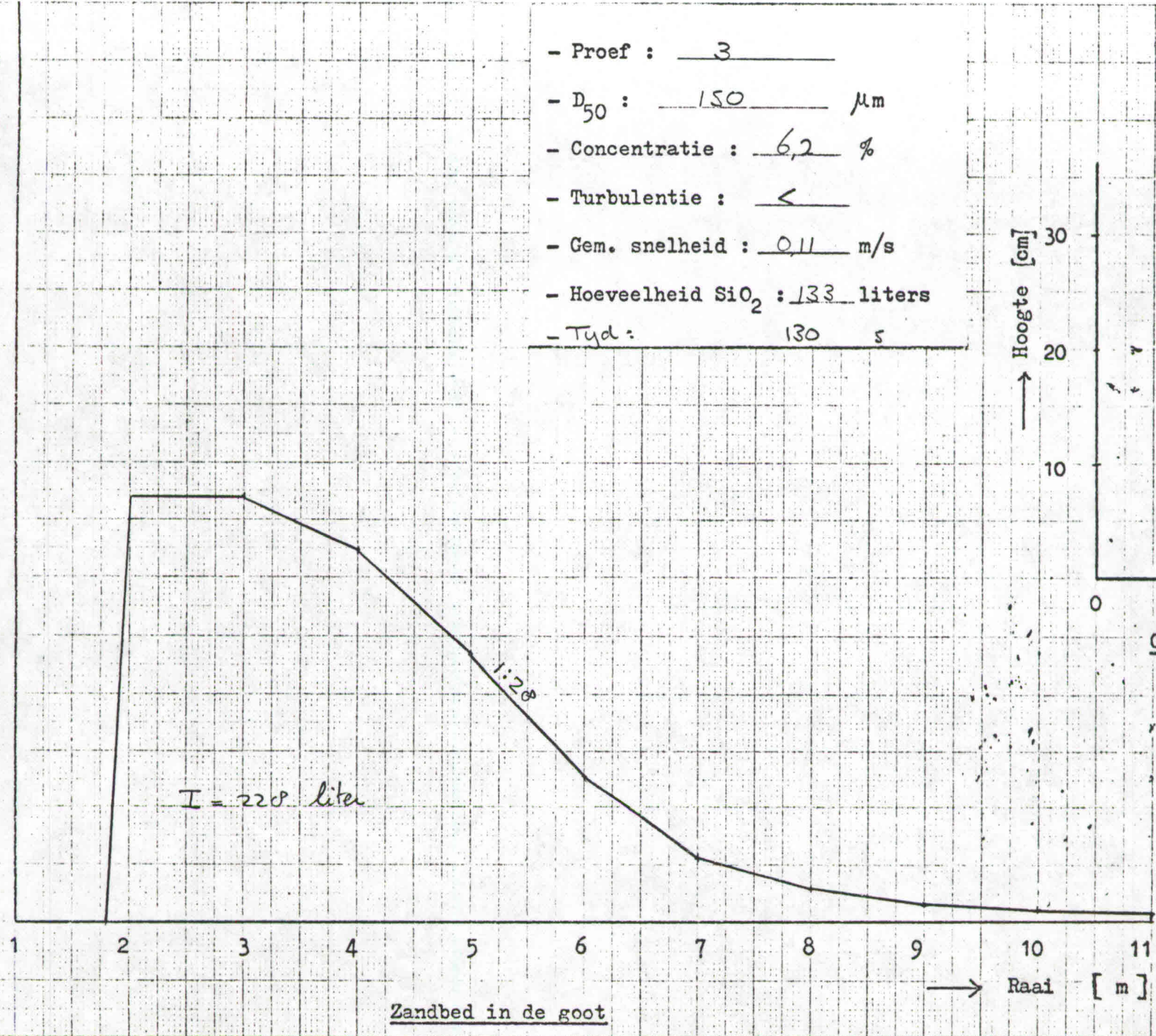
- Proef : 3
- D_{50} : 150 μm
- Concentratie : 6,2 %
- Turbulentie : <
- Gem. snelheid : 0,11 m/s
- Hoeveelheid SiO_2 : 133 liters
- Tyd : 130 s

Hoogte [cm]

Concentratievertikaal

Raai

Raai [m]



↑ Hoogte zandbed [cm]

- Proef : 4
- D_{50} : 150 μm
- Concentratie : 6,1 %
- Turbulentie : <
- Gem. snelheid : 0,12 m/s
- Hoeveelheid SiO_2 : 200 liters
- Tyd : 194 s

↑ Hoogte [cm]

Raai

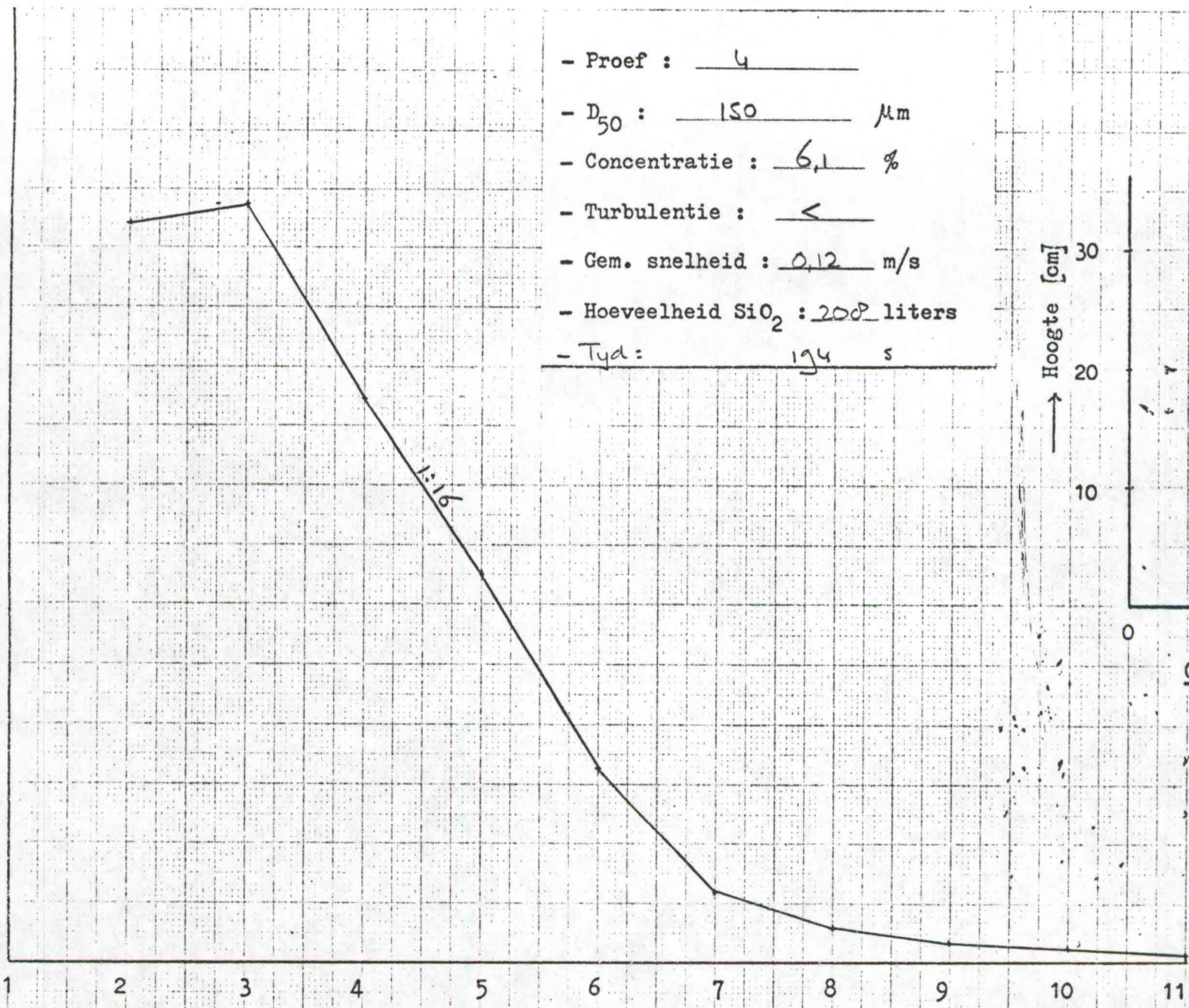
0 5 10 [%]

Concentratievertikaal

→ Raai [m]

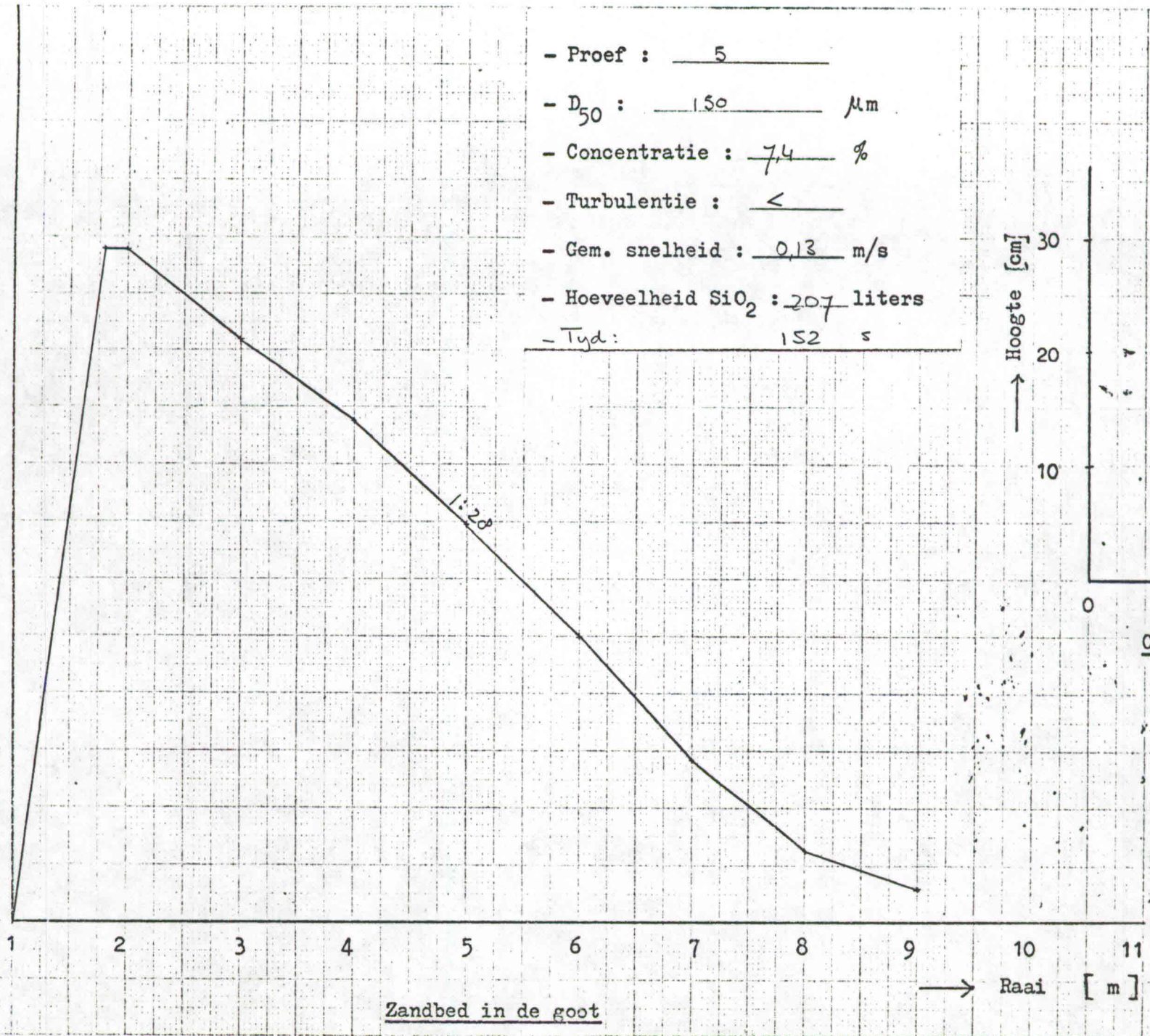
Zandbed in de goot

1:16

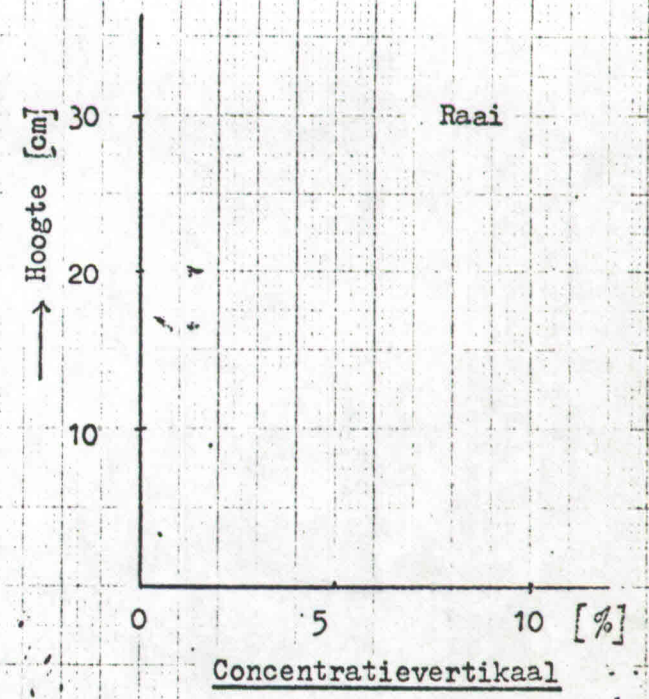


Hoogte zandbed [cm]

- Proef : 5
- D_{50} : 150 μm
- Concentratie : 7.4 %
- Turbulentie : <
- Gem. snelheid : 0.13 m/s
- Hoeveelheid SiO_2 : 207 liters
- Tyd : 152 s

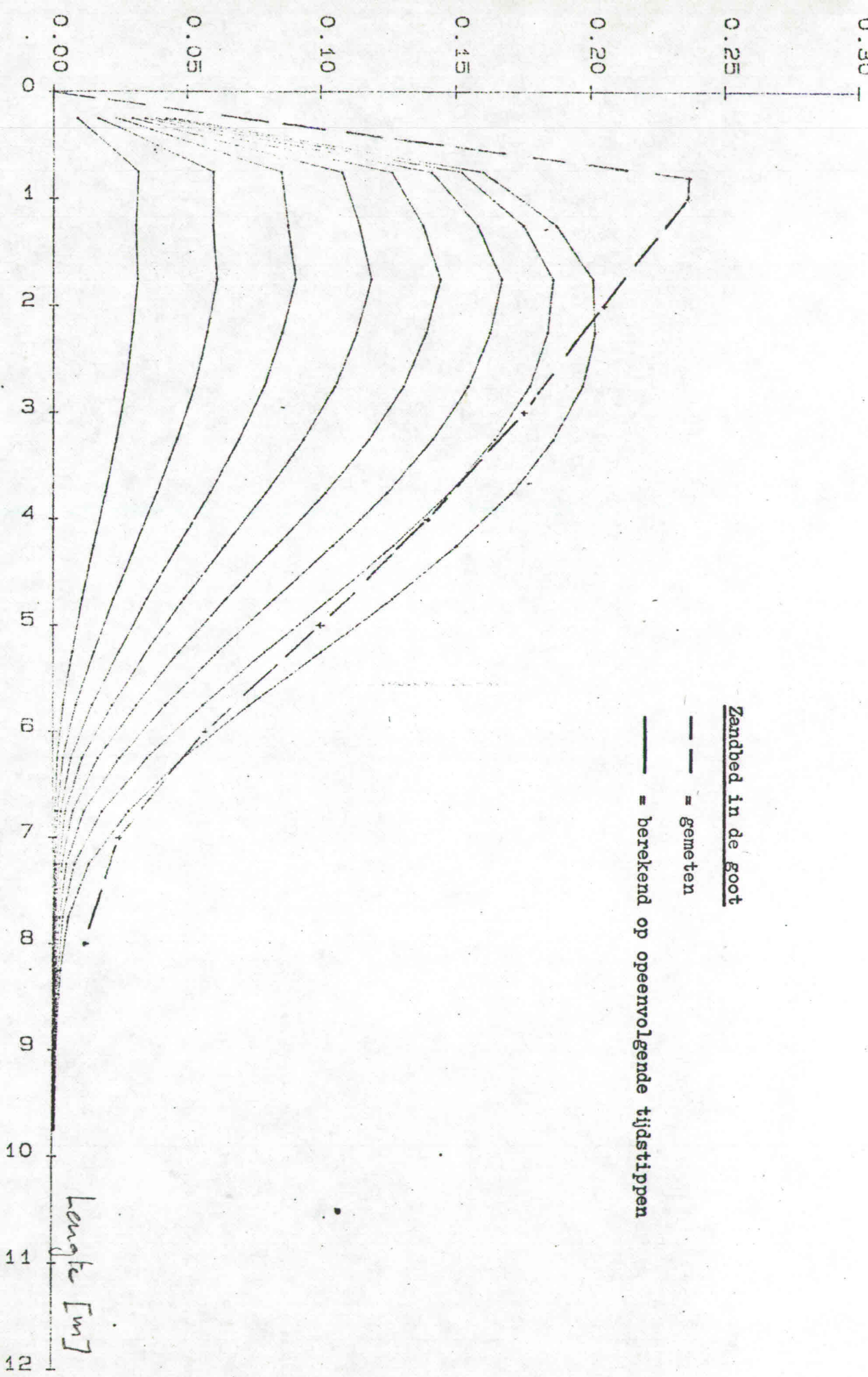


Hoogte [cm]



Raai [m]

Zandbed in de goot

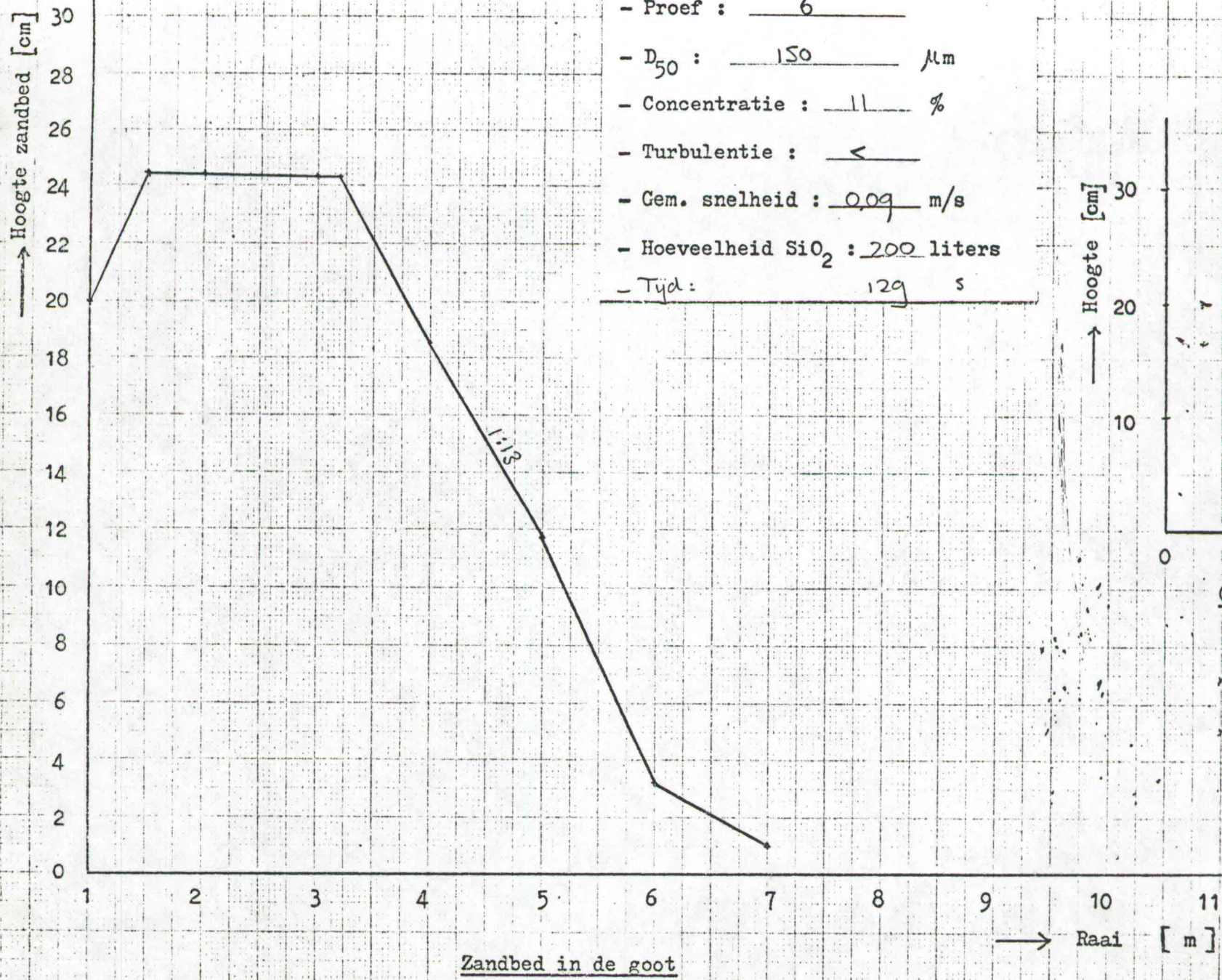


Zandbed in de goot

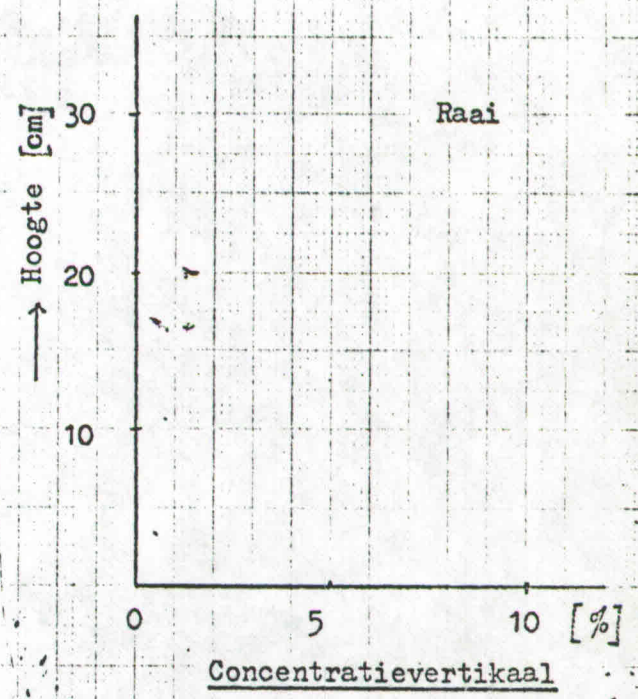
--- = gemeten

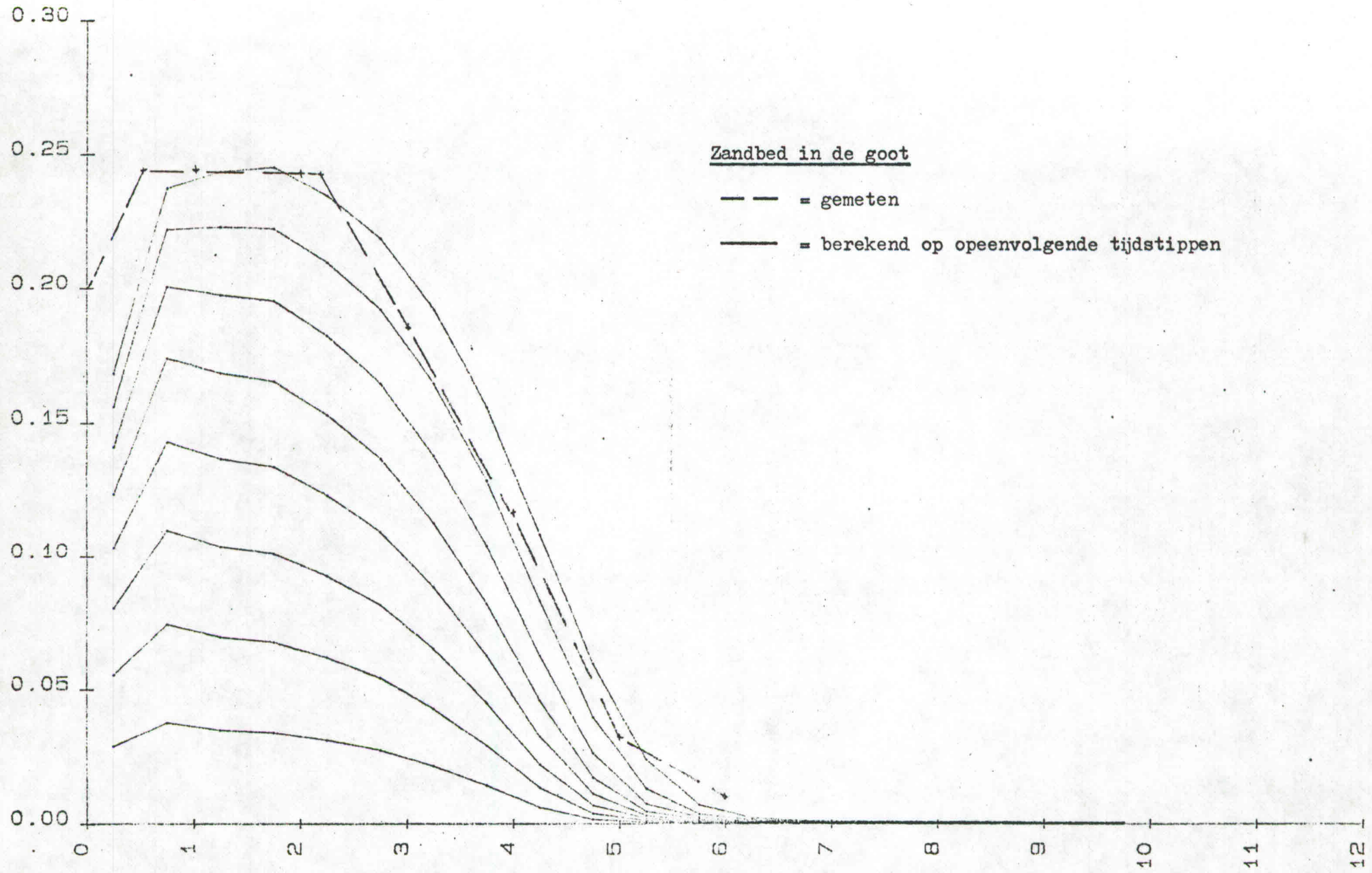
— = berekend op opeenvolgende tijdstippen

HOLL. AANN. BEDR.	onderwerp	benaming	
ZANEN VERSTOEP n.v.		datum	blad



- Proef : 6
- D_{50} : 150 μm
- Concentratie : 11 %
- Turbulentie : <
- Gem. snelheid : 0.09 m/s
- Hoeveelheid SiO_2 : 200 liters
- Tyd : 129 s

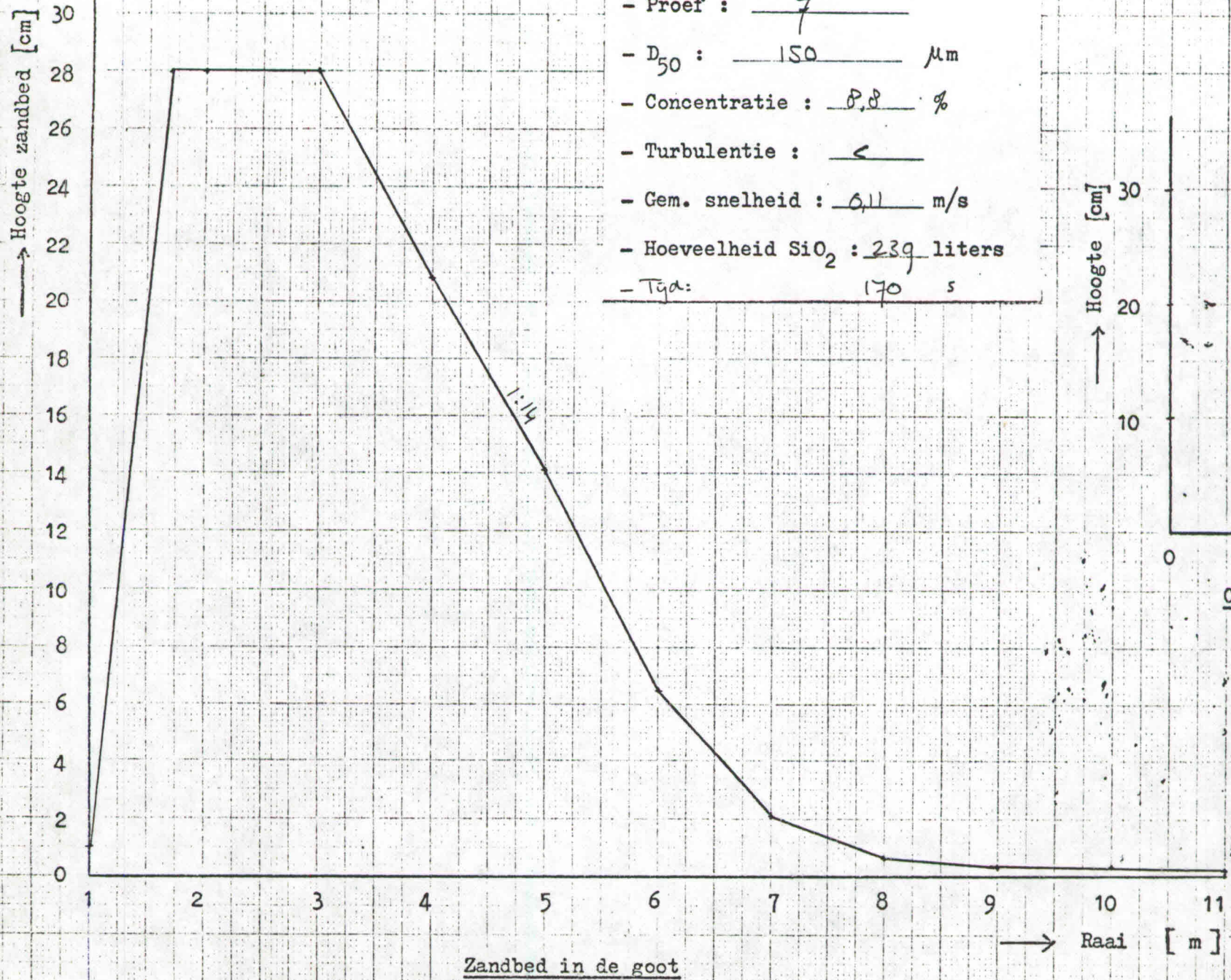




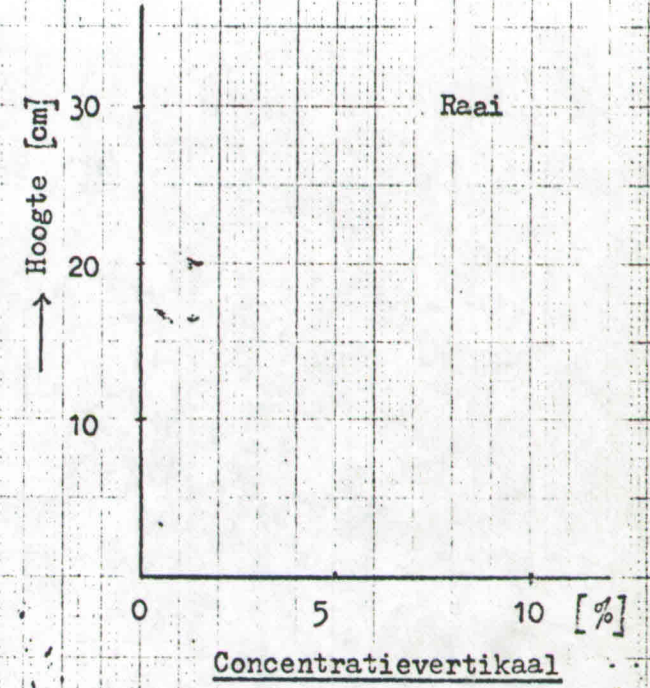
benaming		blad
onderwerp		datum
HOLL. AANN. BEDR.		
ZANEN VERSTOEP n.v.		

↑ Hoogte zandbed [cm]

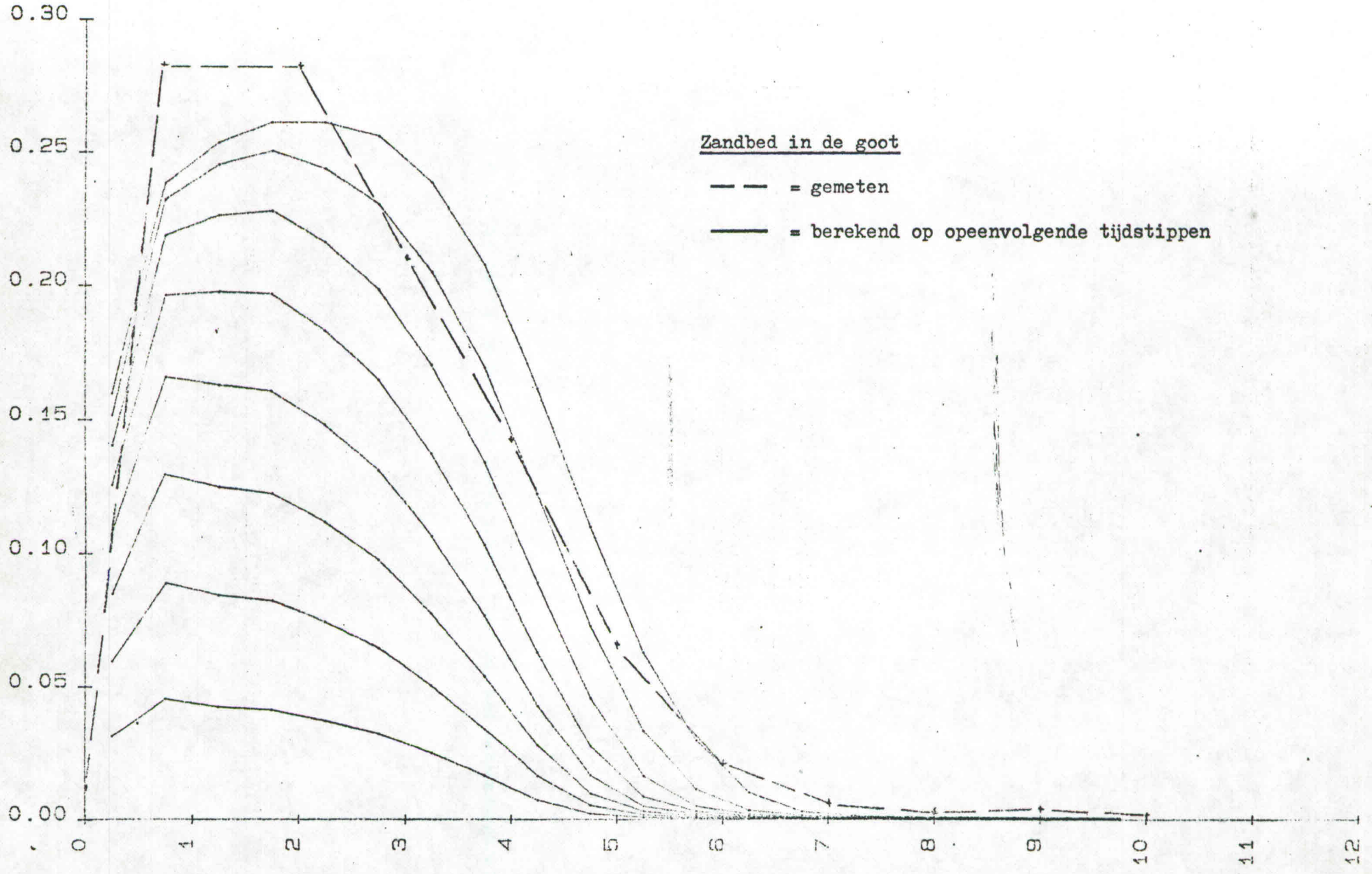
- Proef : 7
- D_{50} : 150 μm
- Concentratie : 0,8 %
- Turbulentie : <
- Gem. snelheid : 0,11 m/s
- Hoeveelheid SiO_2 : 239 liters
- Tgd : 170 s



↑ Hoogte [cm]



→ Raai [m]



HOLL. AANN. BEDR.

Onderwerp

benaming

ZANEN VERSTOEP n.v.

datum

blad

↑ Hoogte zandbed [cm]

- Proef : 8
- D_{50} : 150 μm
- Concentratie : 10 %
- Turbulentie : <
- Gem. snelheid : 0,10 m/s
- Hoeveelheid SiO_2 : 135 liters
- Tijd : 90 s

↑ Hoogte [cm]

Raai

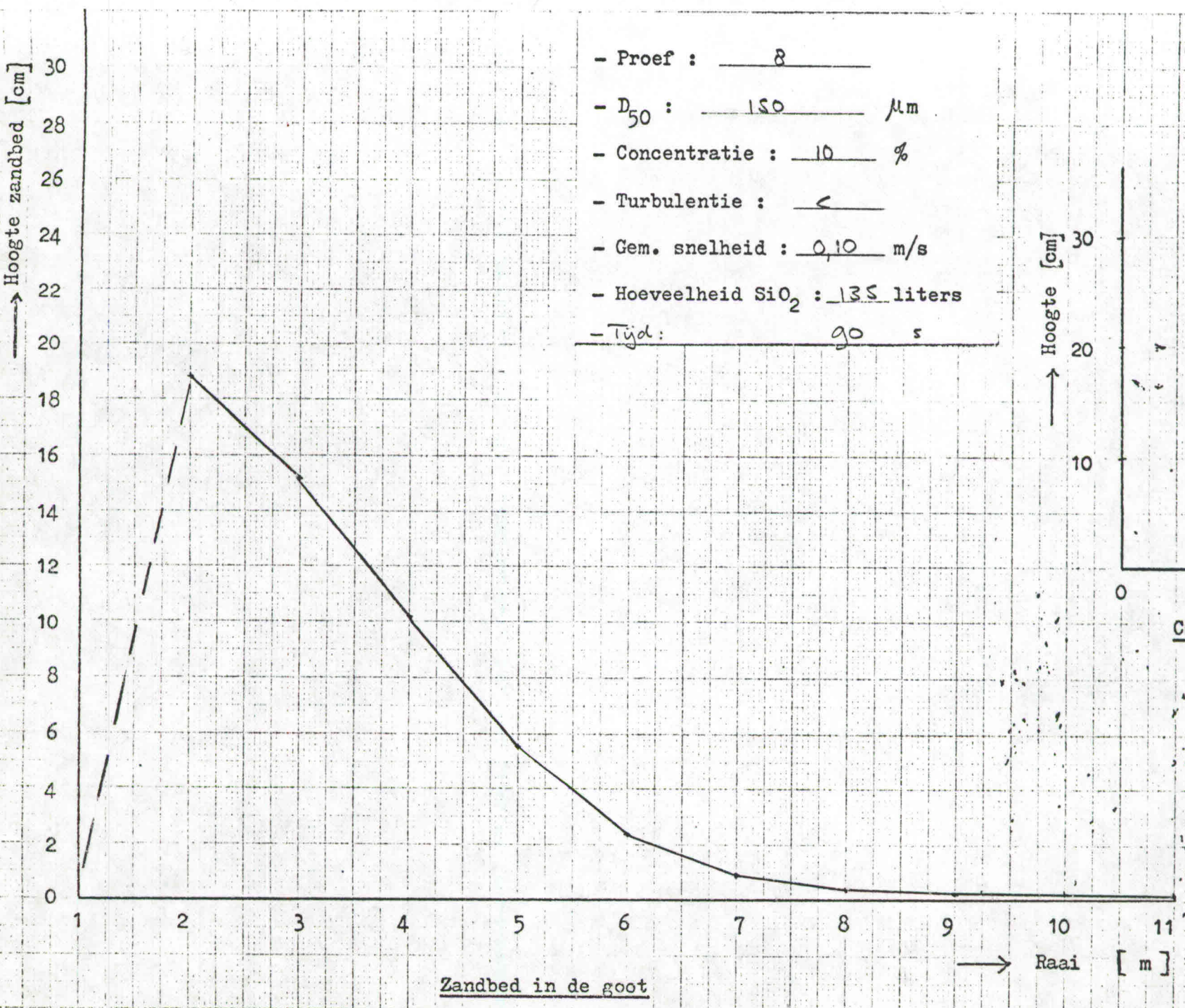
0 5 10 [%]

Concentratievertikaal

→ Raai [m]

Zandbed in de goot

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11



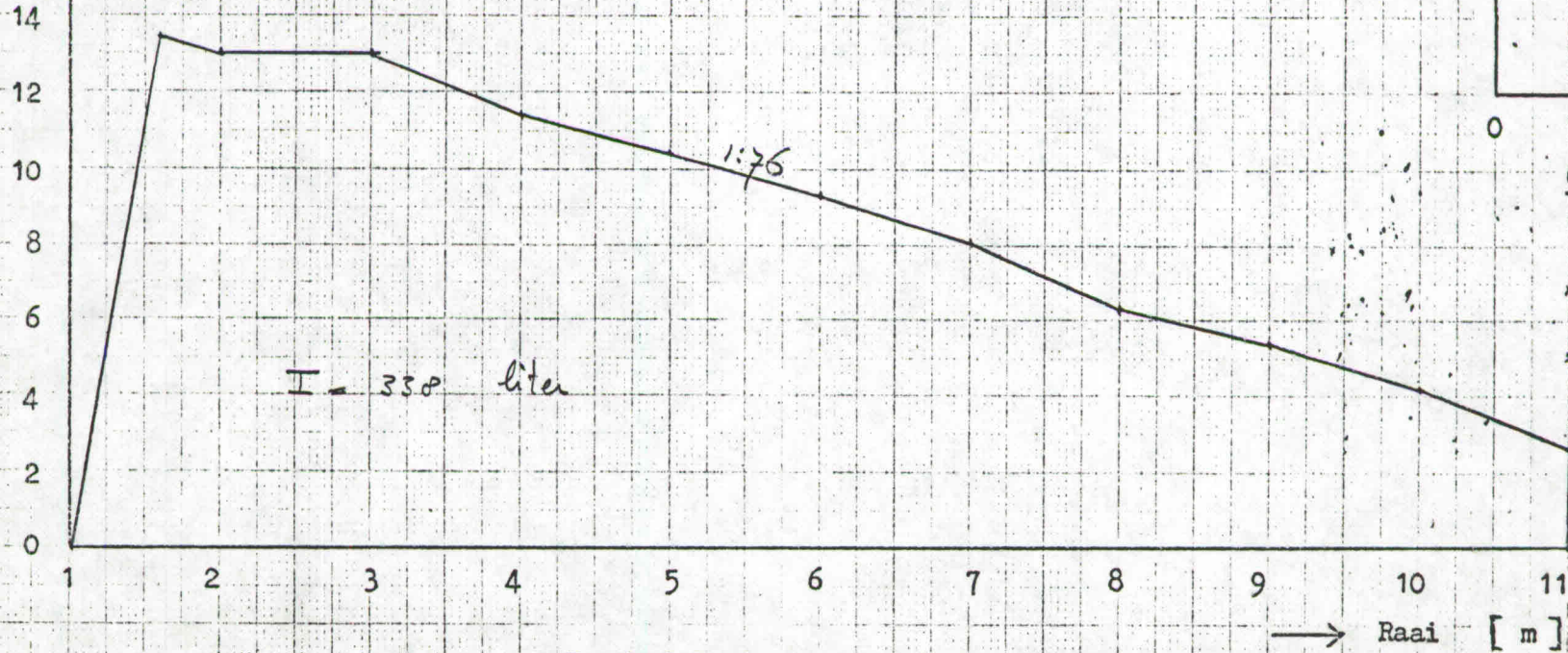
↑ Hoogte zandbed [cm]

- Proef : 9
- D_{50} : 95 μm
- Concentratie : 4,4 %
- Turbulentie : <
- Gem. snelheid : 0,11 m/s
- Hoeveelheid SiO_2 : 200 liters
- Tjck : 279 s

↑ Hoogte [cm]

Raai

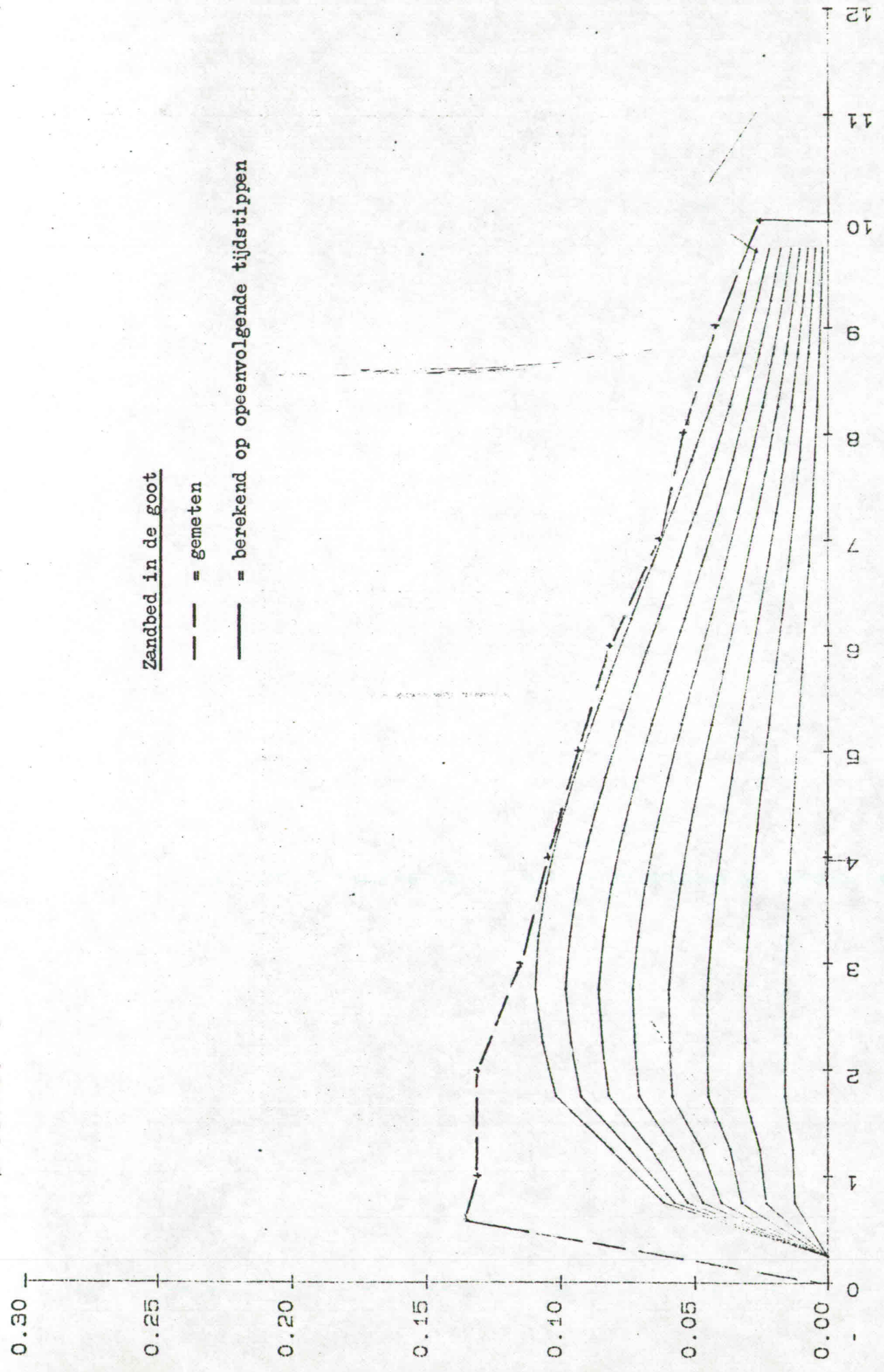
0 5 10 [%]
Concentratievertikaal



Zandbed in de goot

→ Raai [m]

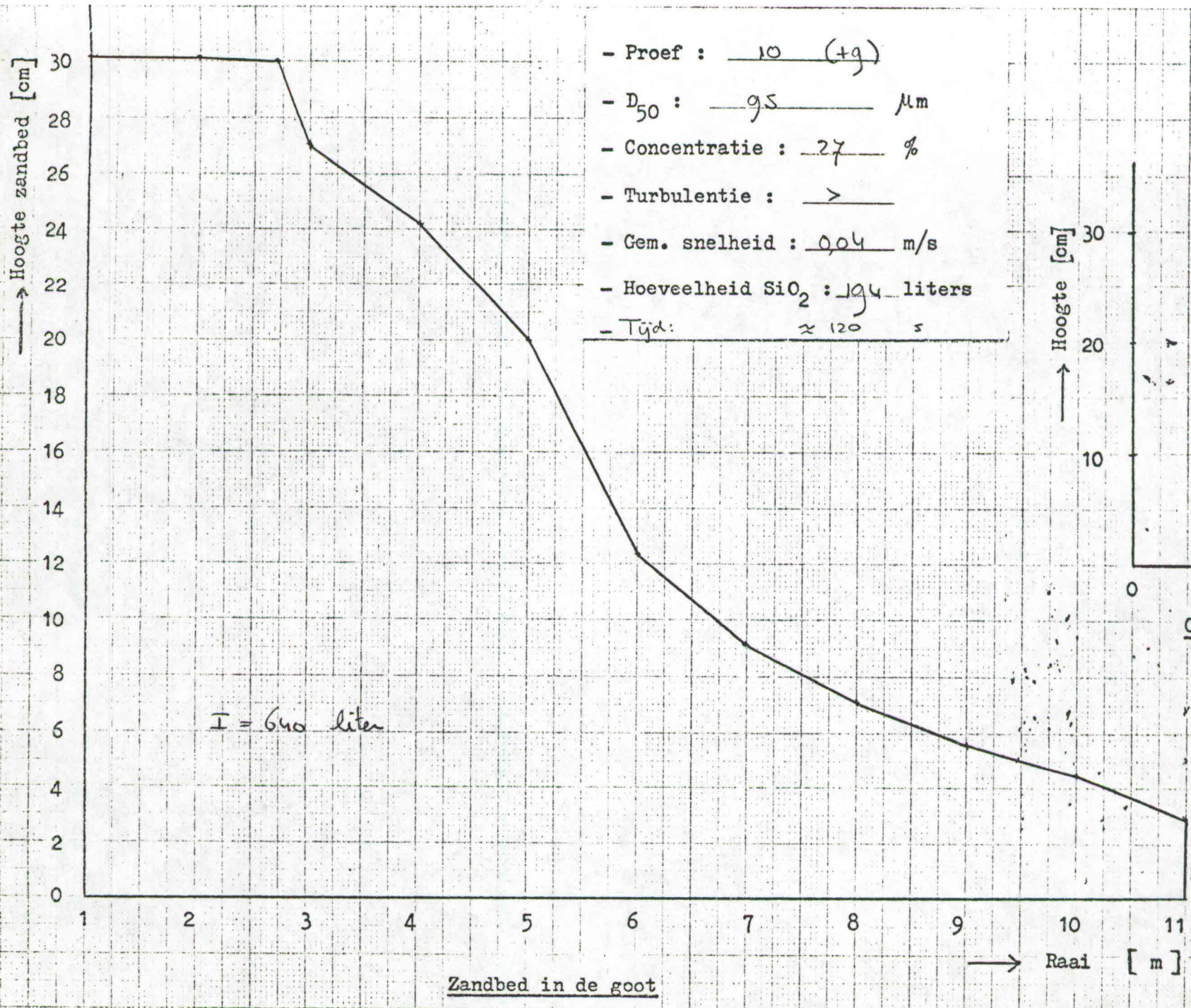
proefno. 9



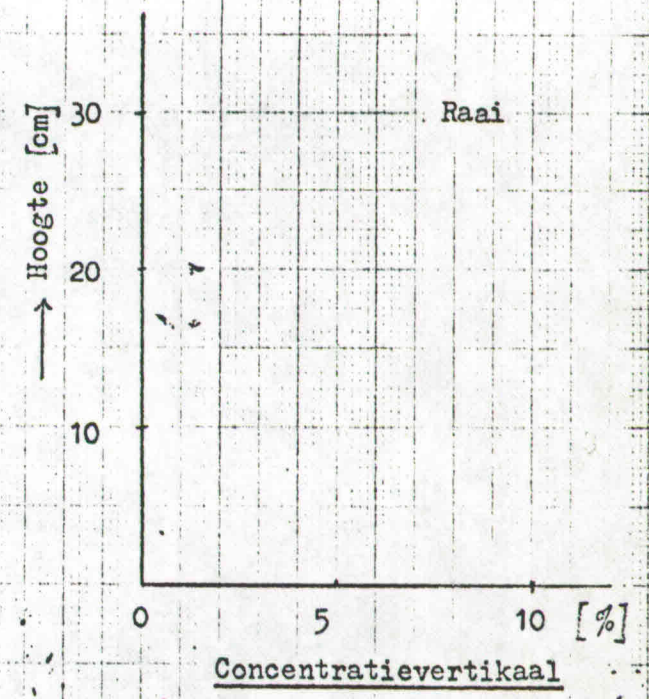
Zandbed in de goot

-- = gemeten

- · - = berekend op opeenvolgende tijdstippen



- Proef : 10 (+g)
- D_{50} : 95 μm
- Concentratie : 27 %
- Turbulentie : >
- Gem. snelheid : 0,04 m/s
- Hoeveelheid SiO_2 : 194 liters
- Tijd : ≈ 120 s



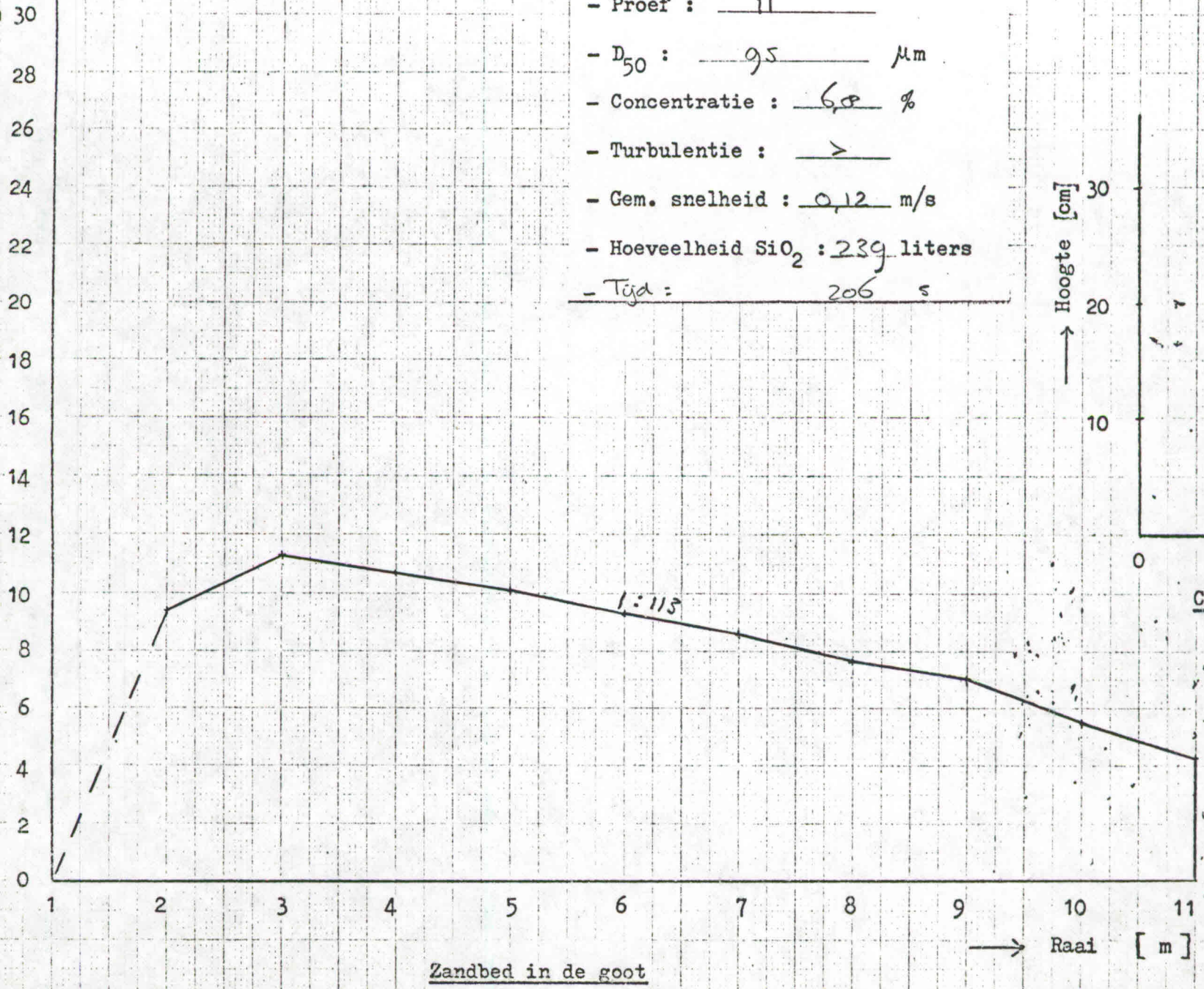
↑ Hoogte zandbed [cm]

- Proef : 11
- D_{50} : 95 μm
- Concentratie : 6,8 %
- Turbulentie : >
- Gem. snelheid : 0,12 m/s
- Hoeveelheid SiO_2 : 239 liters
- Tijd : 206 s

↑ Hoogte [cm]

Raai

0 5 10 [%]
Concentratievertikaal



Zandbed in de goot

→ Raai [m]

Hoogte zandbed [cm]

- Proef : 11²
- D_{50} : 95 μm
- Concentratie : 6,8 %
- Turbulentie : >
- Gem. snelheid : 0,12 m/s
- Hoeveelheid SiO_2 : 239 liters
- Tijd : 206 s

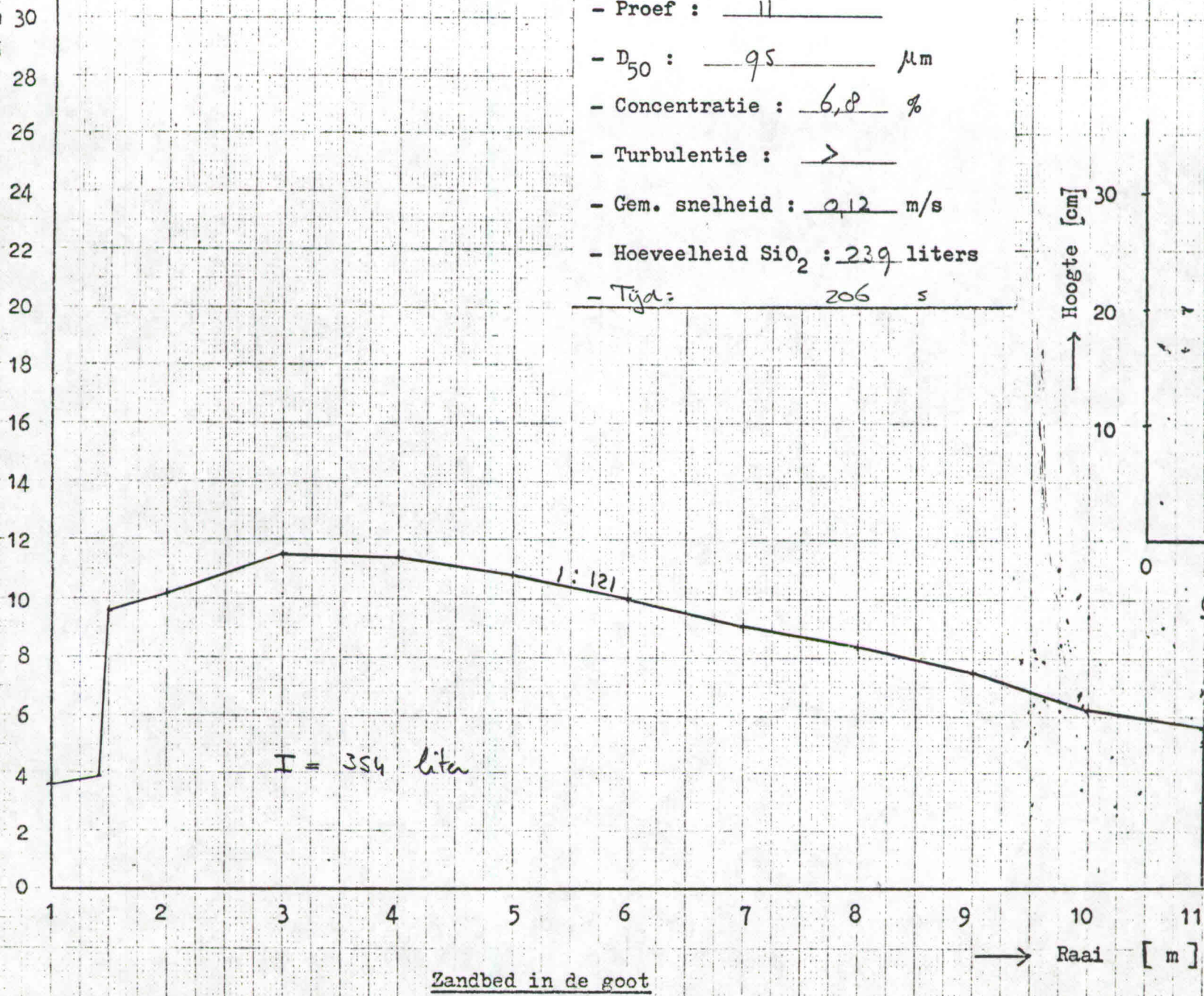
Hoogte [cm]

Raai

↑

0 5 10 [%]

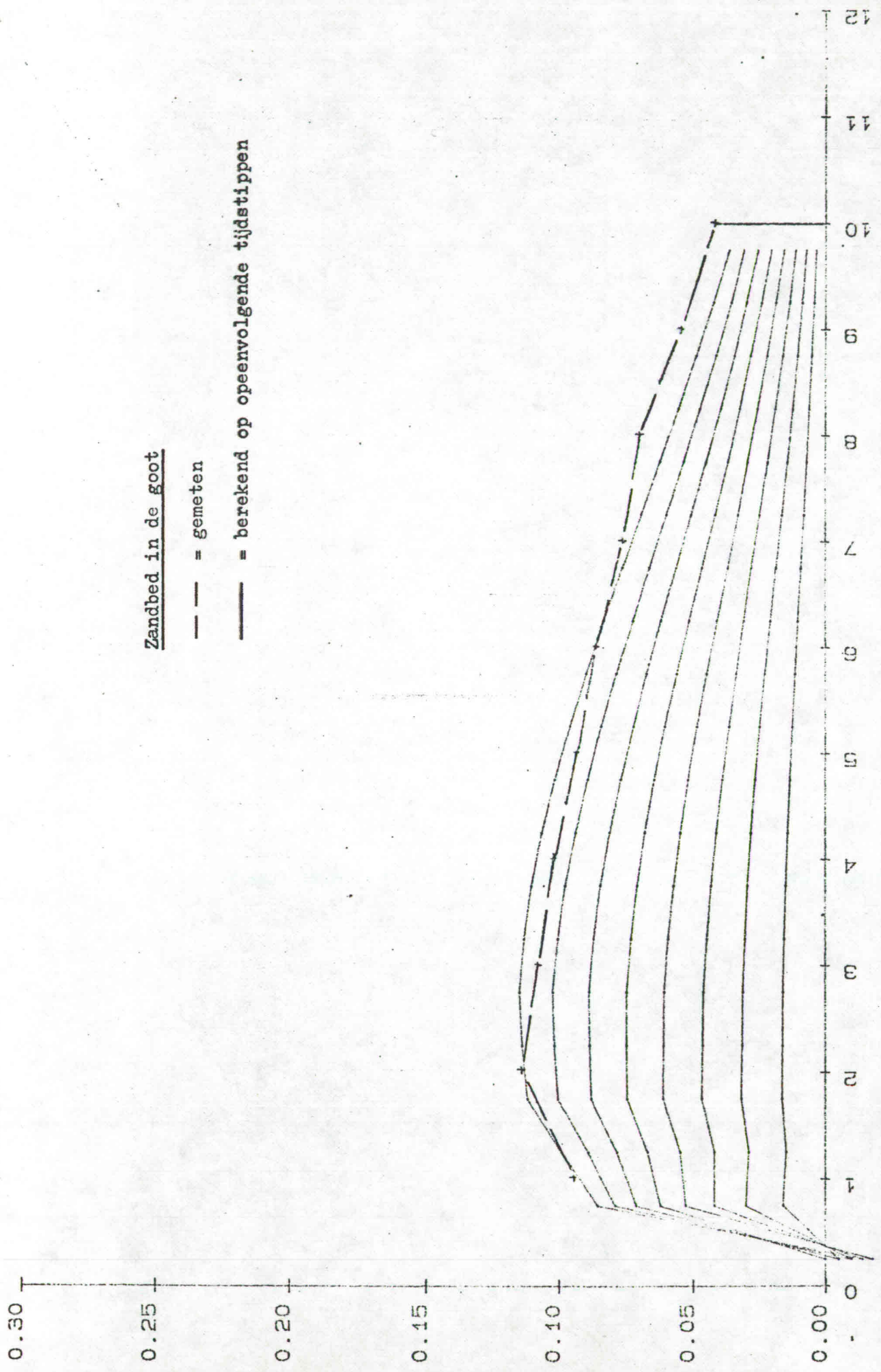
Concentratievertikaal



Zandbed in de goot

→ Raai [m]

proefno. 11



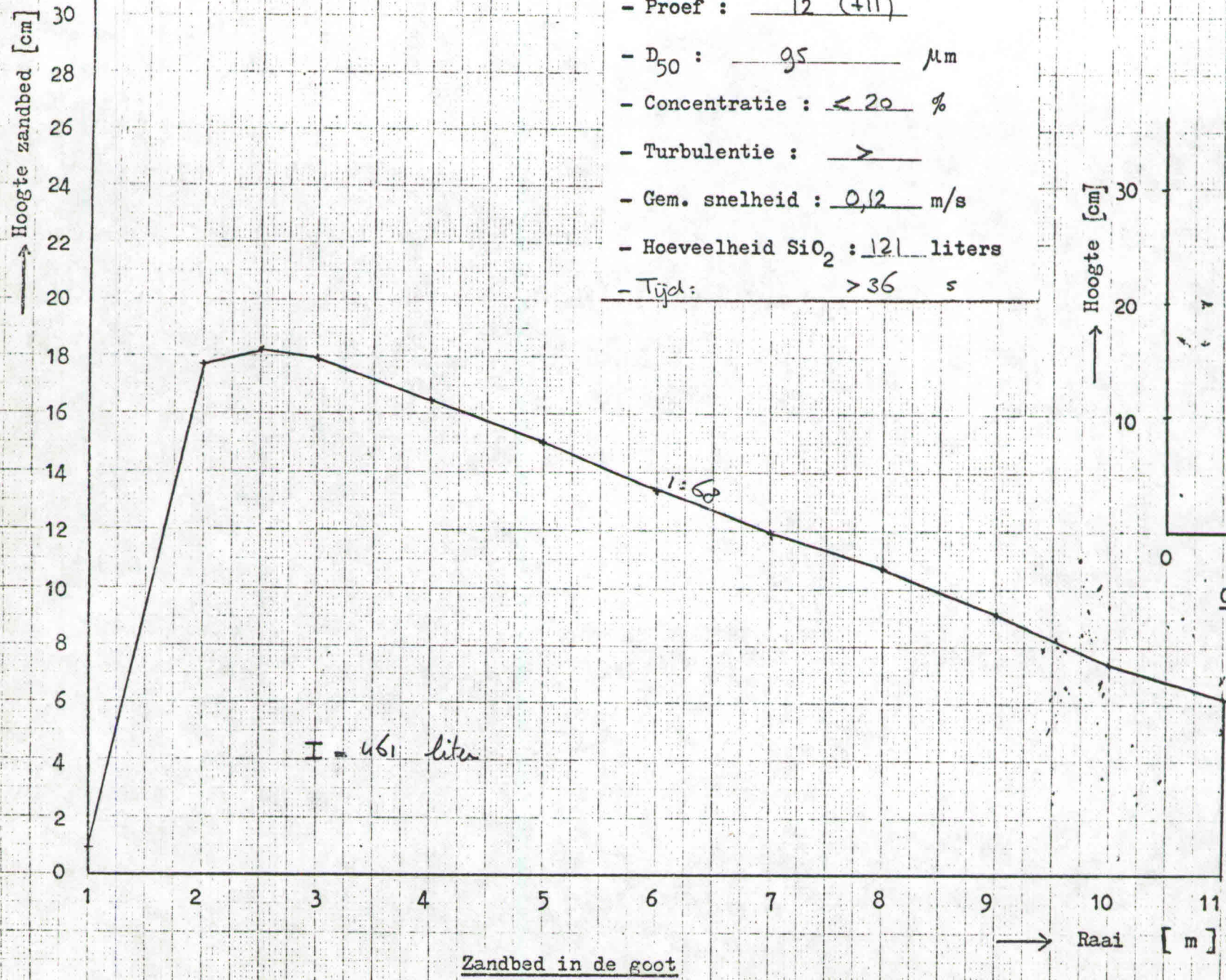
↑ Hoogte zandbed [cm]

- Proef : 12 (+11)
- D_{50} : 95 μm
- Concentratie : < 20 %
- Turbulentie : >
- Gem. snelheid : 0,12 m/s
- Hoeveelheid SiO_2 : 121 liters
- Tijd : > 36 s

↑ Hoogte [cm]

Raai

0 5 10 [%]
Concentratievertikaal



Zandbed in de goot

→ Raai [m]

- Proef : 13
- D_{50} : 95 μm
- Concentratie : 6,3 %
- Turbulentie : >
- Gem. snelheid : 0,10 m/s
- Hoeveelheid SiO_2 : 204 liters
- Tijd : 218 s

Hoogte zandbed [cm]

30
28
26
24
22
20
18
16
14
12
10
8
6
4
2
0

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11

Zandbed in de goot

$I = 335$ liter

1:0,1

Raai [m]

hoogte [cm]

30
20
10
0

Concentratievertikaal

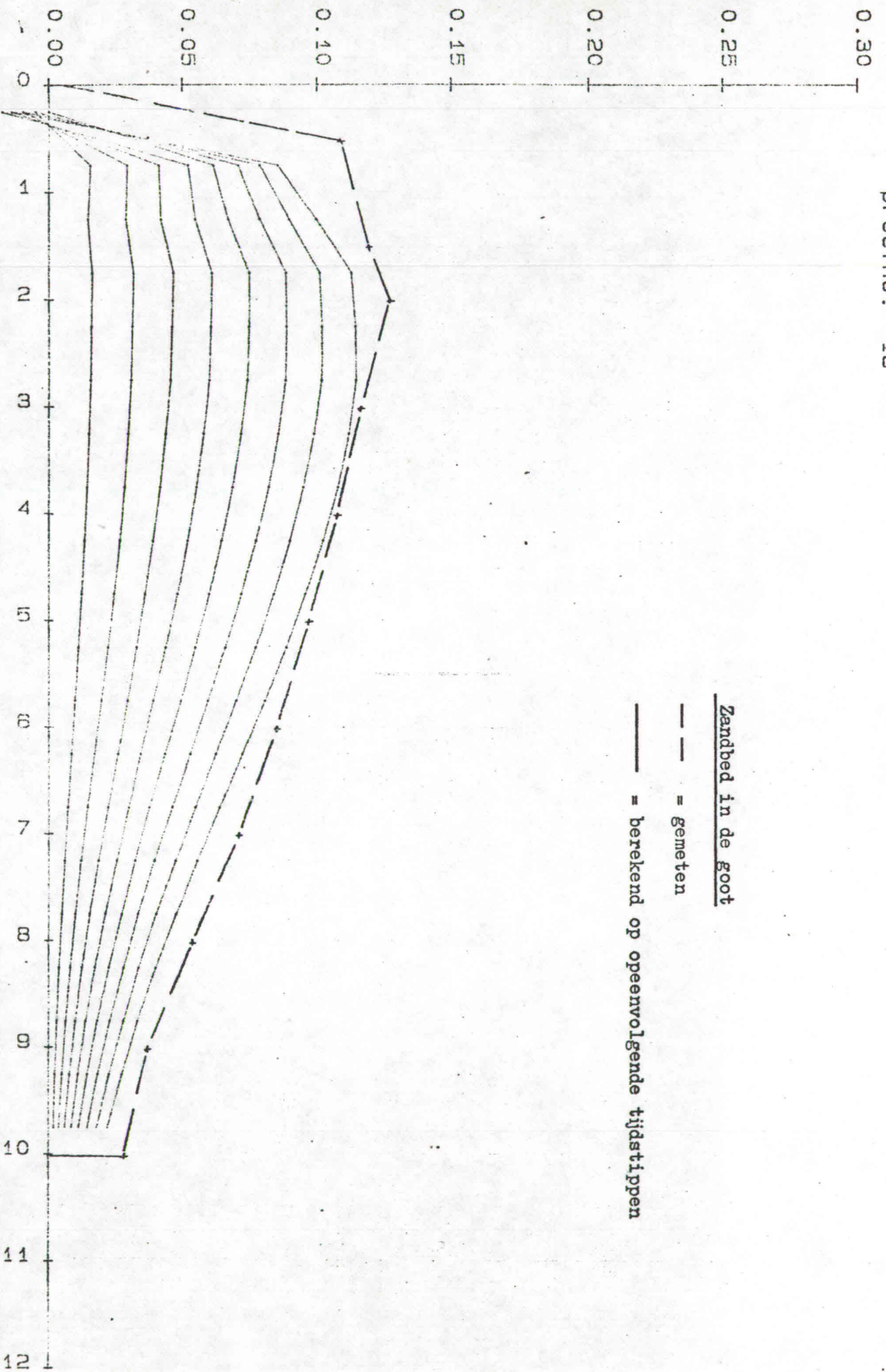
0 5 10 [%]

bodem voor de proef

bodem na de proef

Raai 2

wataspiegel



HOLL. ANNN. BEDR.

ZANEN VERSTOEP n.v.

onderwerp

benaming

datum

blad

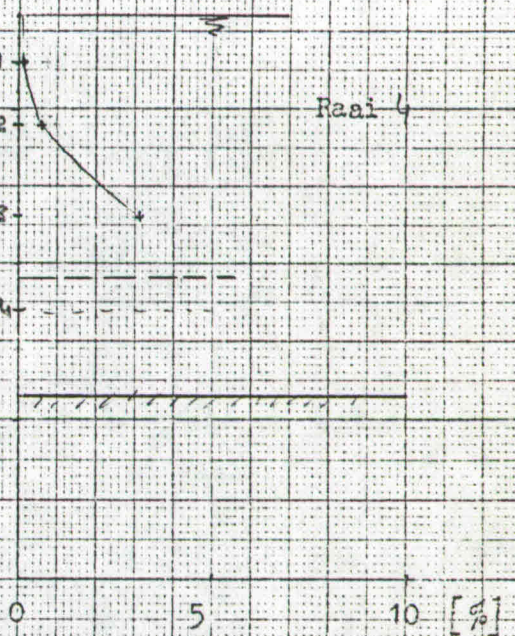
Hoogte zandbed [cm]

30
28
26
24
22
20
18
16
14
12
10
8
6
4
2
0

- Proef : 14 (+13)
- D_{50} : 95 μm
- Concentratie : 6,7 %
- Turbulentie : >
- Gem. snelheid : 0,10 m/s
- Hoeveelheid SiO_2 : 111 liters
- Tijd : 110 s

Hoogte [cm]

30
20
10



$V = 405$ liter

12 liter

Zandbed in de goot

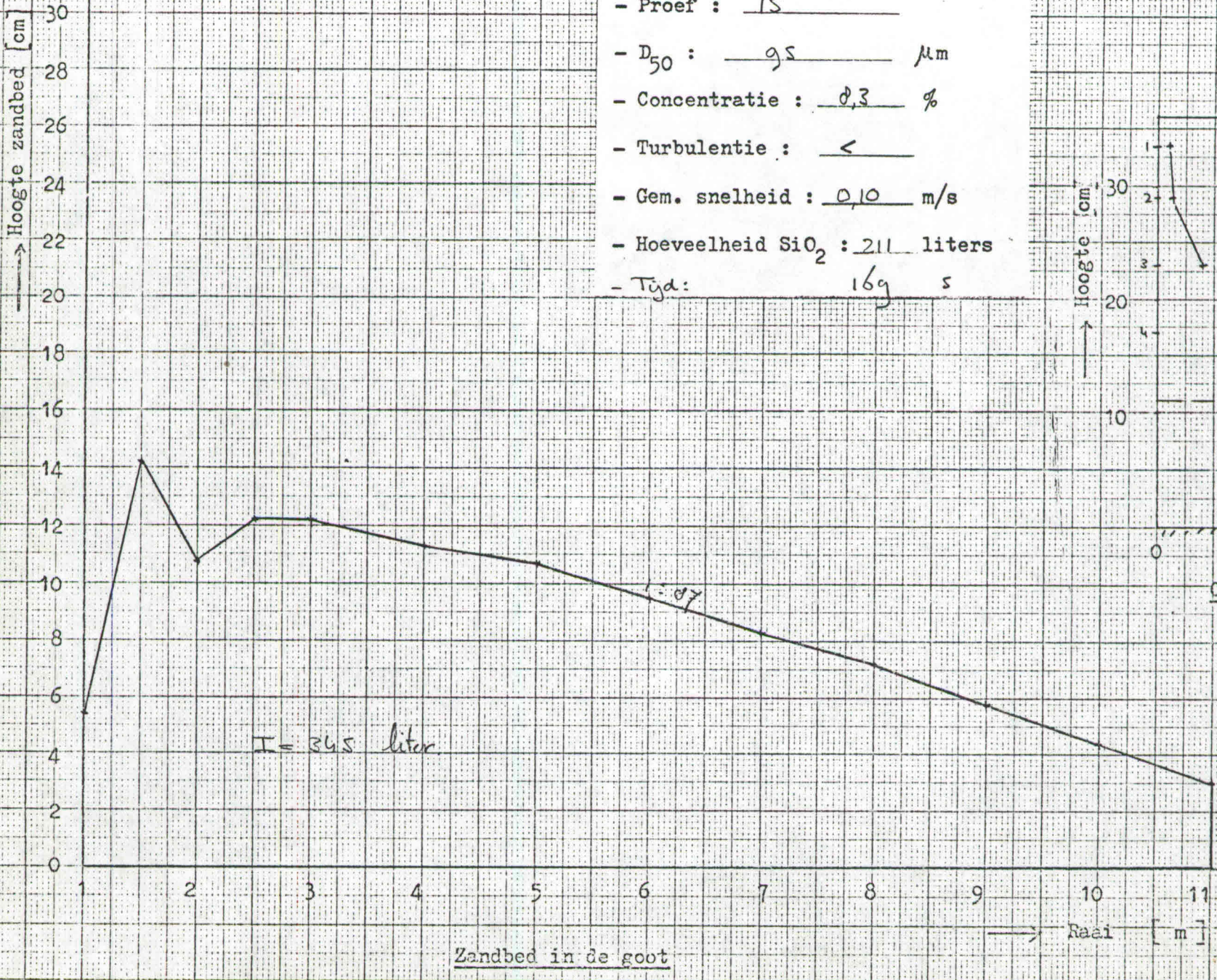
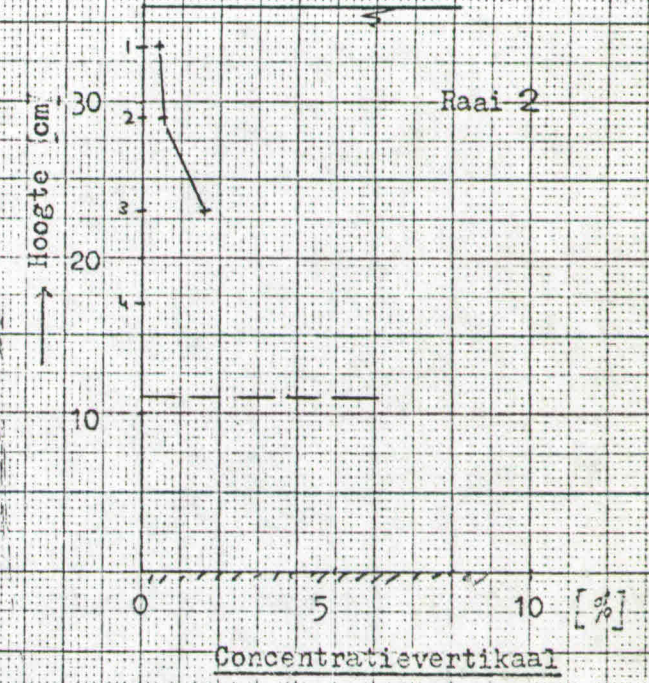
Raai [m]

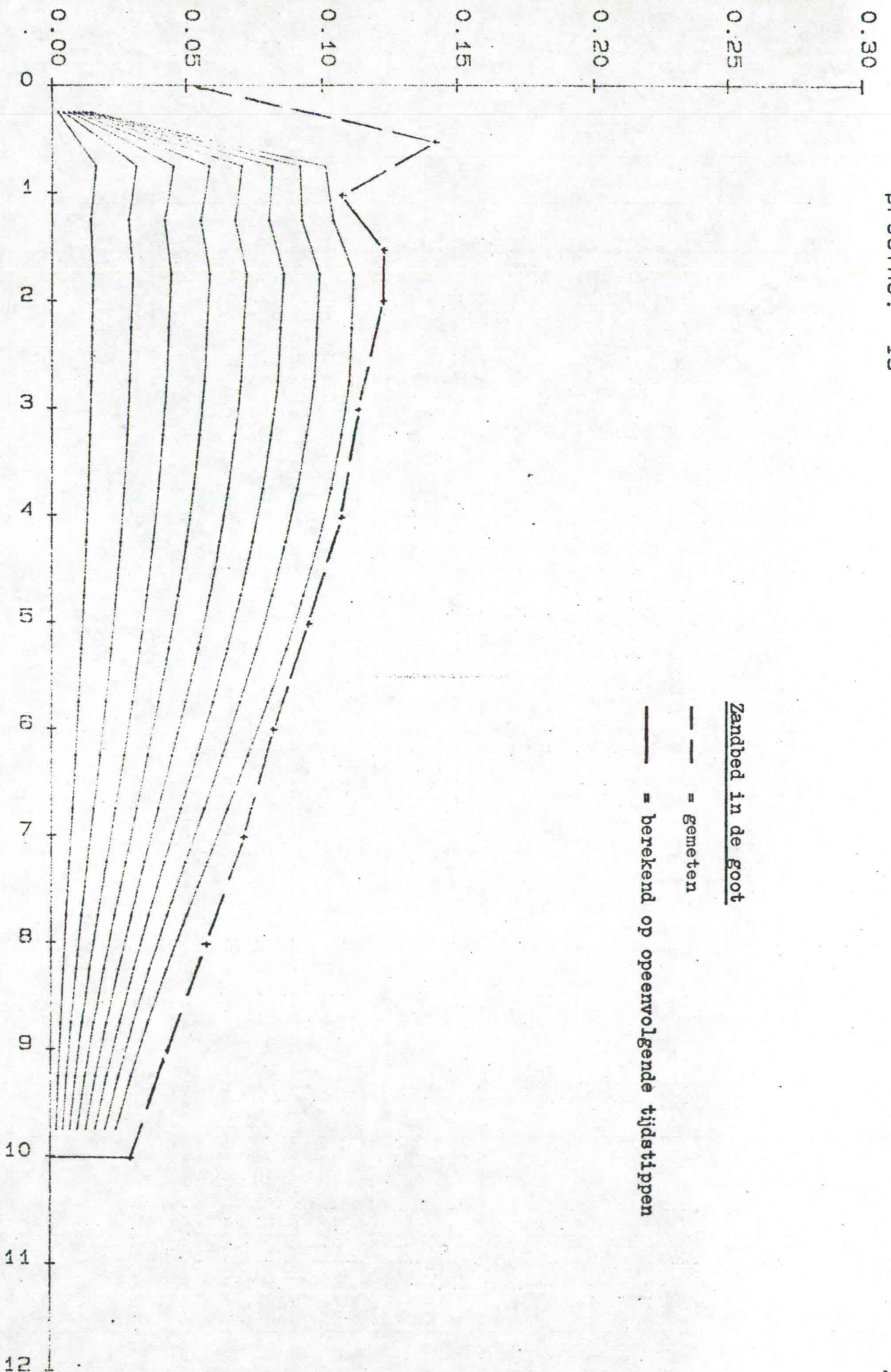
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11

Hoogte zandbed [cm]

- Proef : 15
- D_{50} : 95 μm
- Concentratie : 0,3 %
- Turbulentie : <
- Gem. snelheid : 0,10 m/s
- Hoeveelheid SiO_2 : 211 liters
- Tijd : 16g s

Hoogte [cm]





Zandbed in de goot

— = gemeten
— = berekend op opeenvolgende tijdstippen

HOLL. AANN. BEDR.

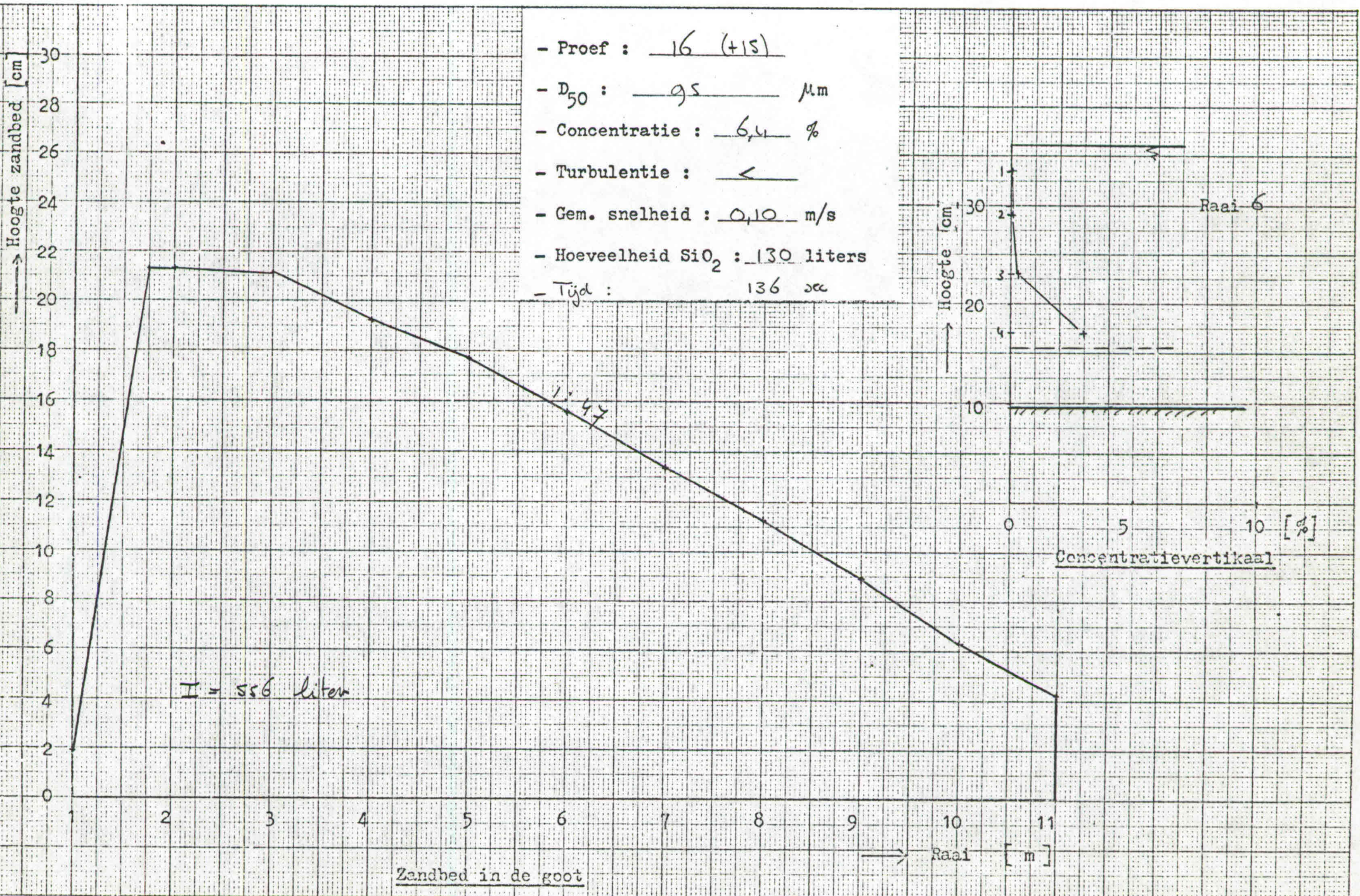
onderwerp

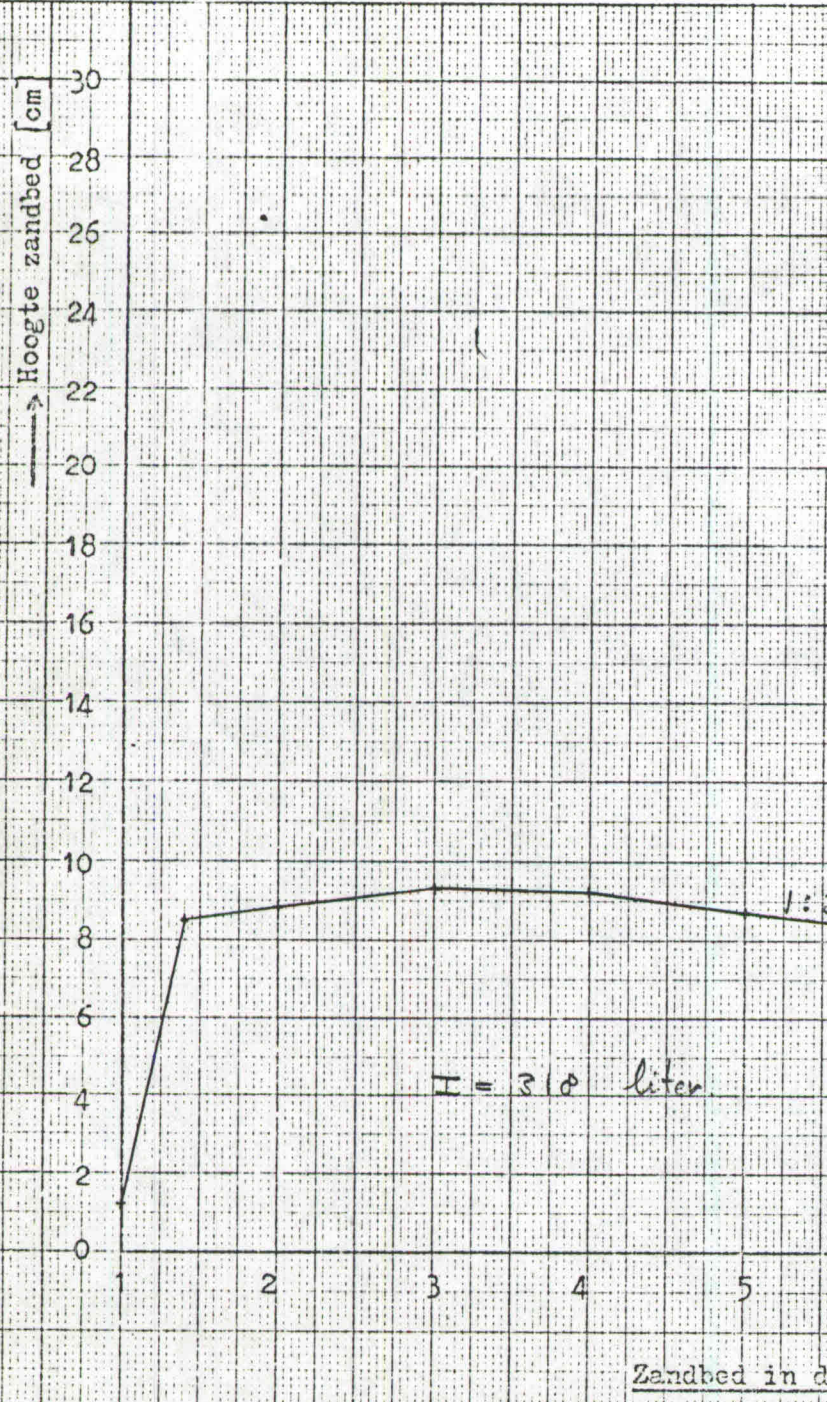
benaming

ZANEN VERSTOEP n.v.

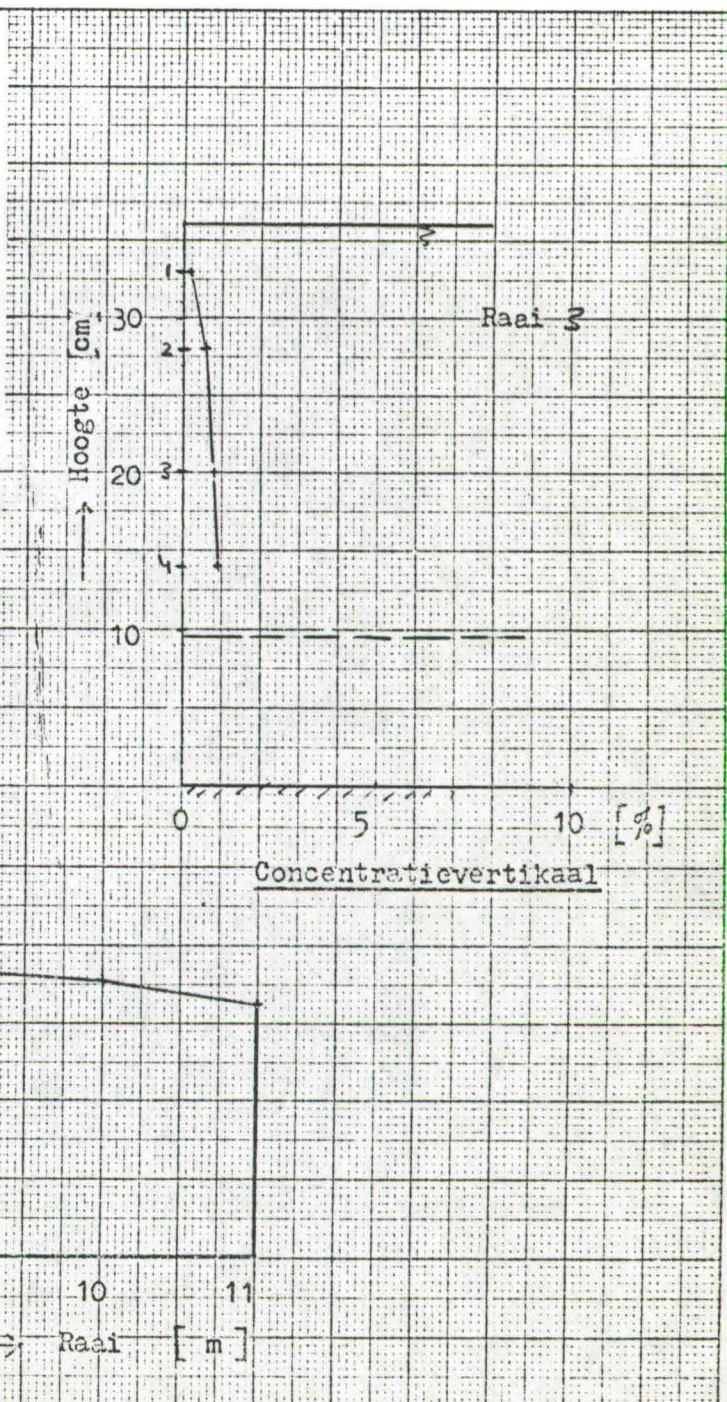
datum

blad





- Proef : 17
- D_{50} : 95 μm
- Concentratie : 0,8 %
- Turbulentie : >
- Gem. snelheid : 0,11 m/s
- Hoeveelheid SiO_2 : 213 liters
- Tja : 150 s



$V = 310$ liter

1:275

Zandbed in de goot

Raai [m]

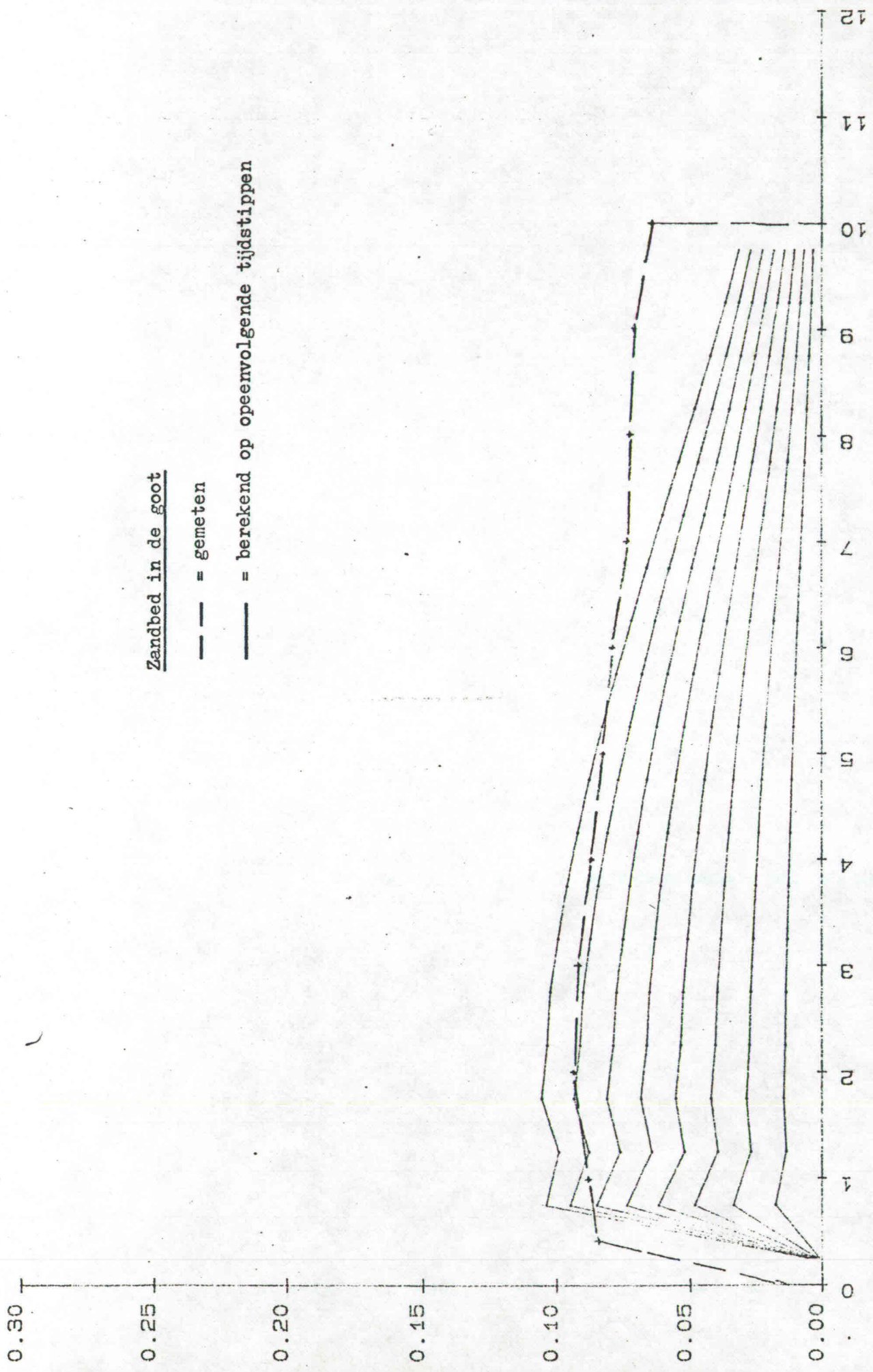
Concentratievertikaal

proefno. 17

Zandbed in de goot

--- = gemeten

— = berekend op opeenvolgende tijdstippen



Hoogte zandbed [cm]

- Proef : 18 (+17)
- D_{50} : 95 μm
- Concentratie : $\geq 6,3$ %
- Turbulentie : >
- Gem. snelheid : 0,11 m/s
- Hoeveelheid SiO_2 : 86 liters
- Tijd : 80 s

Hoogte [cm]

Raal 10

Concentratievertikaal

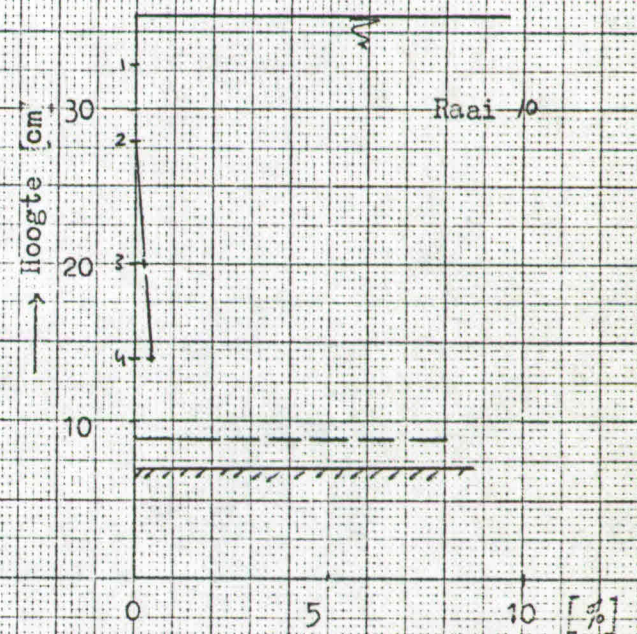
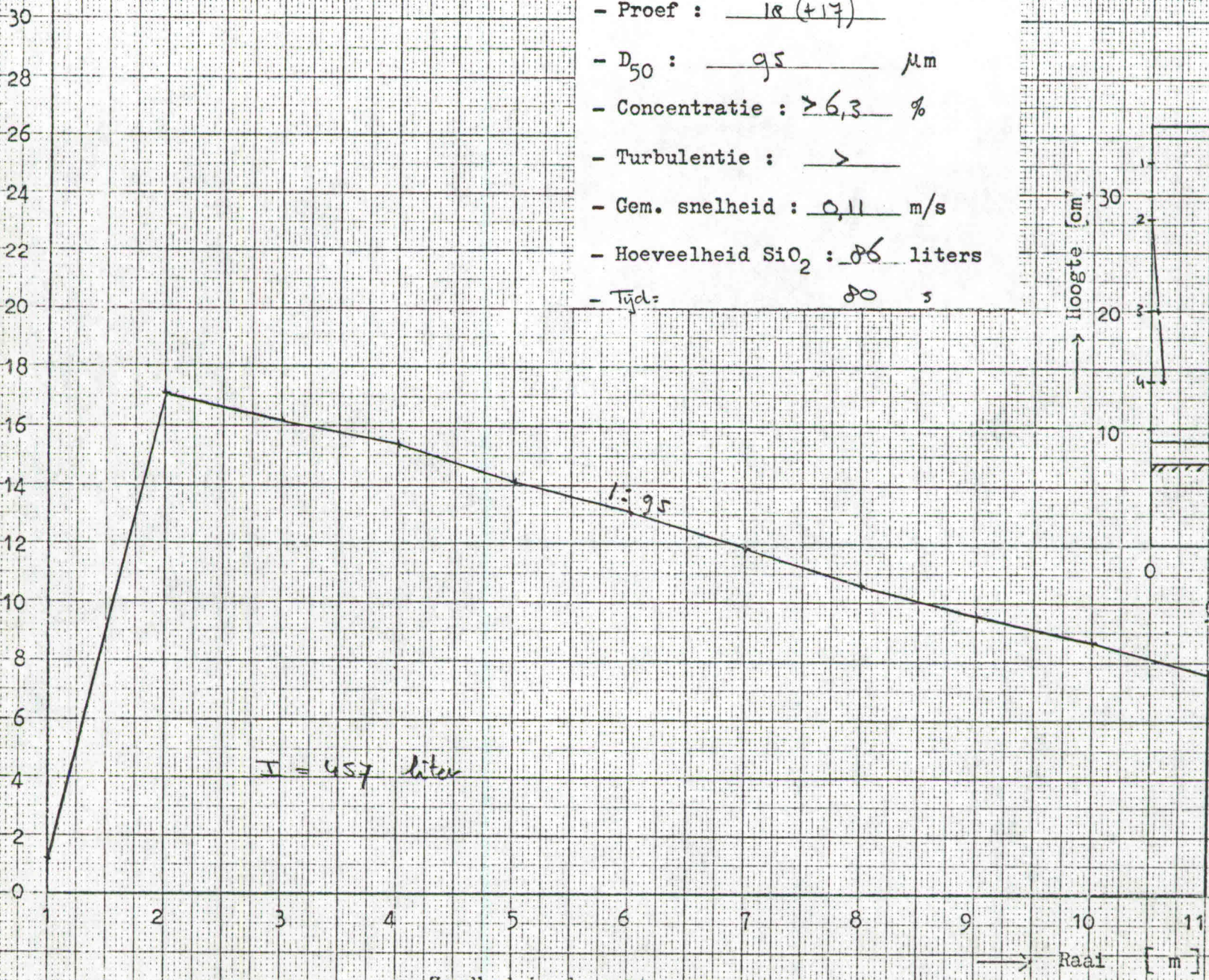
0 5 10 [%]

Raal [m]

Zandbed in de goot

$V = 457$ liter

1: 95



↑ Hoogte zandbed [cm]

- Proef : 19
- D_{50} : 95 μm
- Concentratie : 2.5 %
- Turbulentie : >
- Gem. snelheid : 0.11 m/s
- Hoeveelheid SiO_2 : 171 liters
- Tijd : 125 s

↑ Hoogte [cm]

Raai

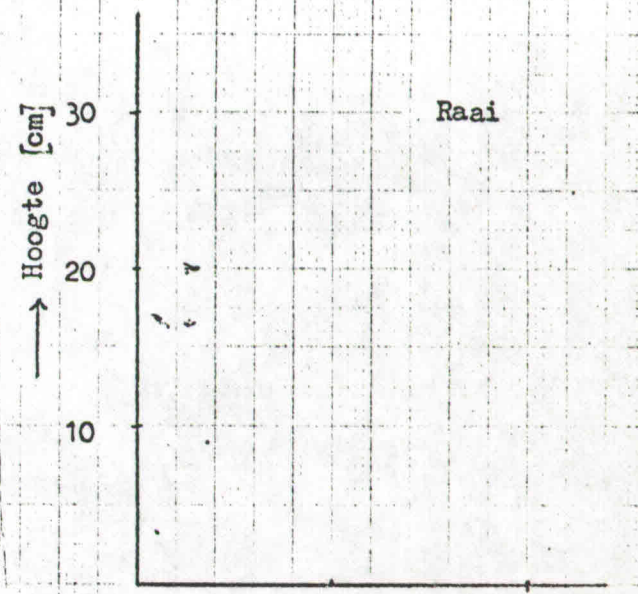
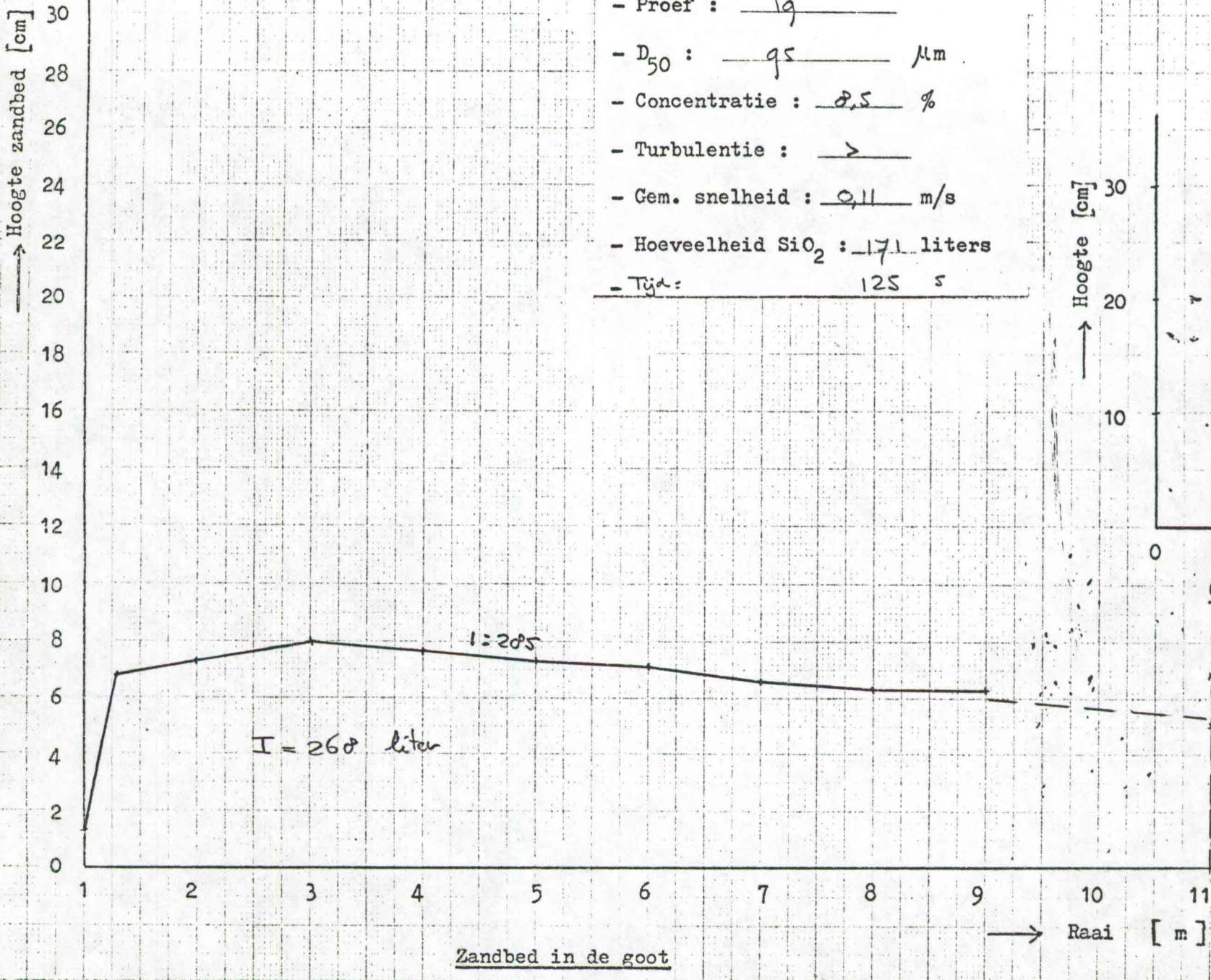
Concentratievertikaal [%]

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11
→ Raai [m]

Zandbed in de goot

I = 268 liter

I = 205



Hoogte zandbed [cm]

30
28
26
24
22
20
18
16
14
12
10
8
6
4
2
0

- Proef : 20 (419)
- D_{50} : 95 μm
- Concentratie : 9,1 %
- Turbulentie : >
- Gem. snelheid : 0,11 m/s
- Hoeveelheid SiO_2 : 152 liters
- Tijd : 105 s

1:111

I = 500 liter

Zandbed in de goot

hoogte [cm]

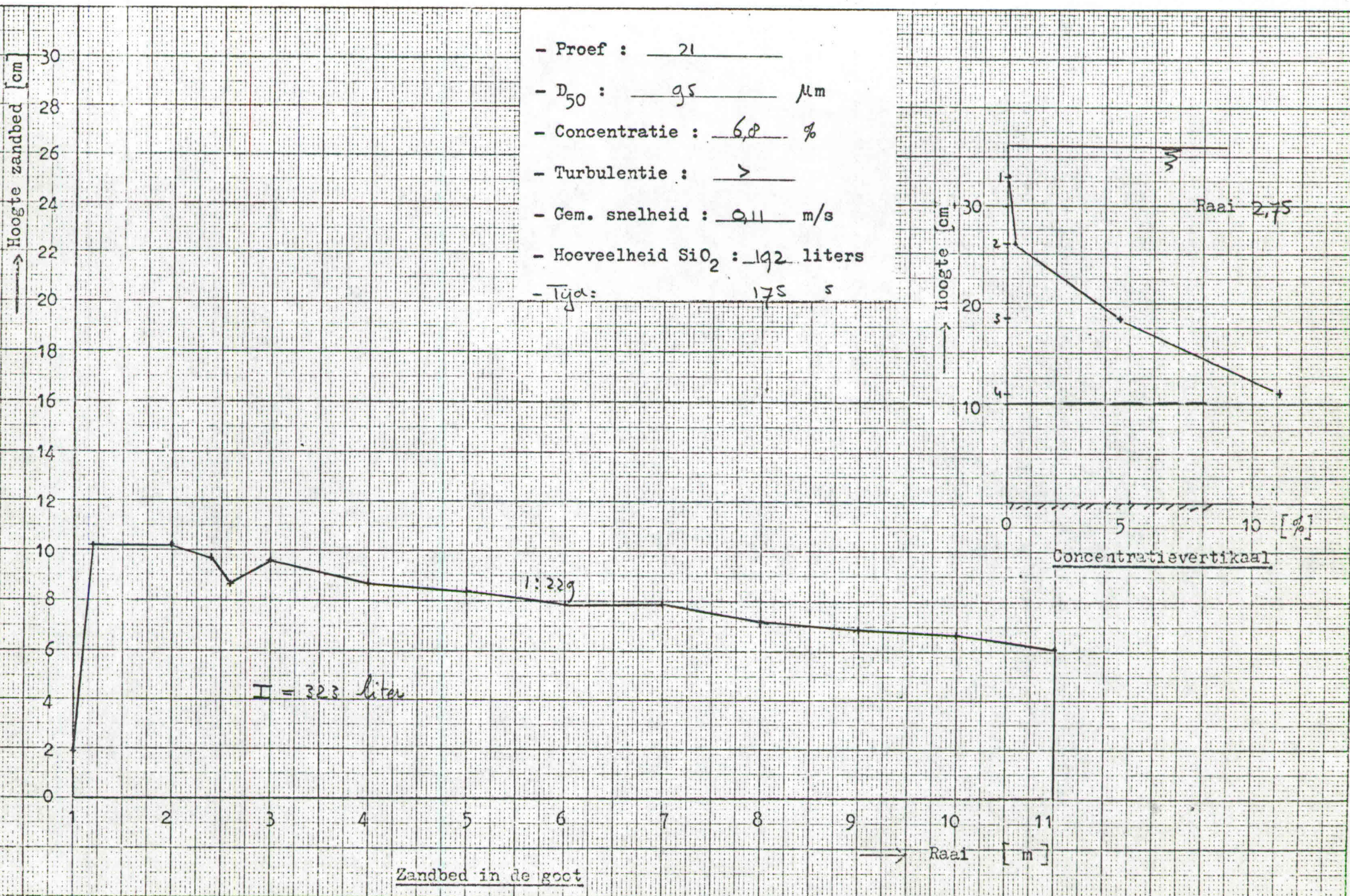
30
20
10

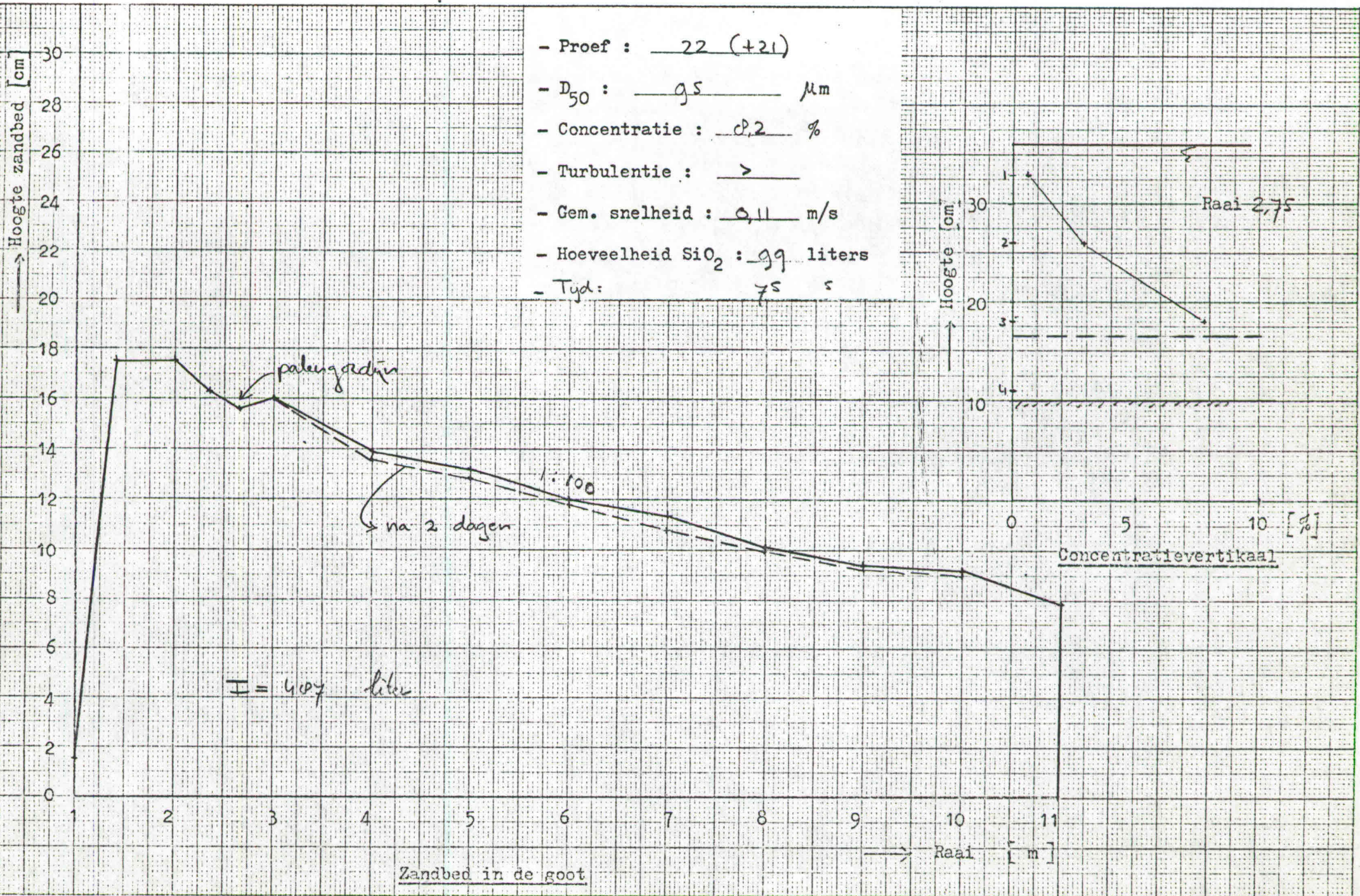
Concentratievertikaal

0 5 10 [%]

Raai [m]

Raai 3





Hoogte zandbed [cm]

- Proef : 23
- D_{50} : 200 μm
- Concentratie : 12 %
- Turbulentie : >
- Gem. snelheid : 0,11 m/s
- Hoeveelheid SiO_2 : 250 liters
- Tijd : 135 s

$V = 460$ liter

Zandbed in de goot

Hoogte [cm]

Raai 2,5

Concentratievertikaal

Raai [m]

↑ Hoogte zandbed [cm]

watersprong

- Proef : 24 (+23)
- D_{50} : 200 μm
- Concentratie : 11 %
- Turbulentie : >
- Gem. snelheid : 0,11 m/s
- Hoeveelheid SiO_2 : 220 liters
- Tijd : 130 s

1:10

I = 0,35 liter

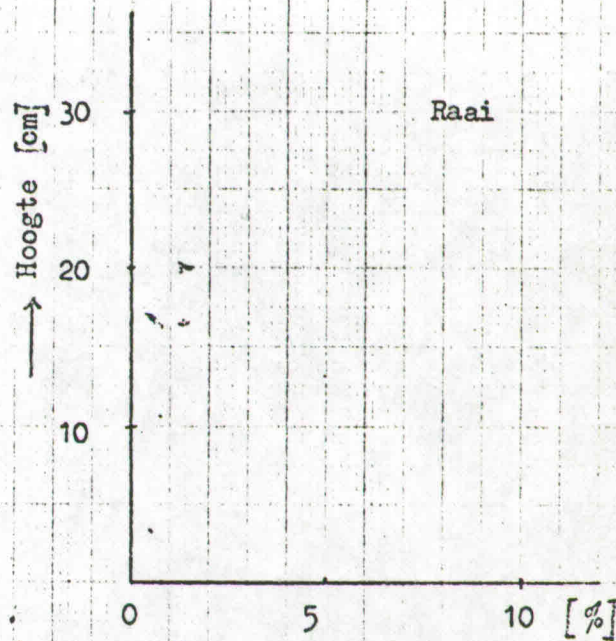
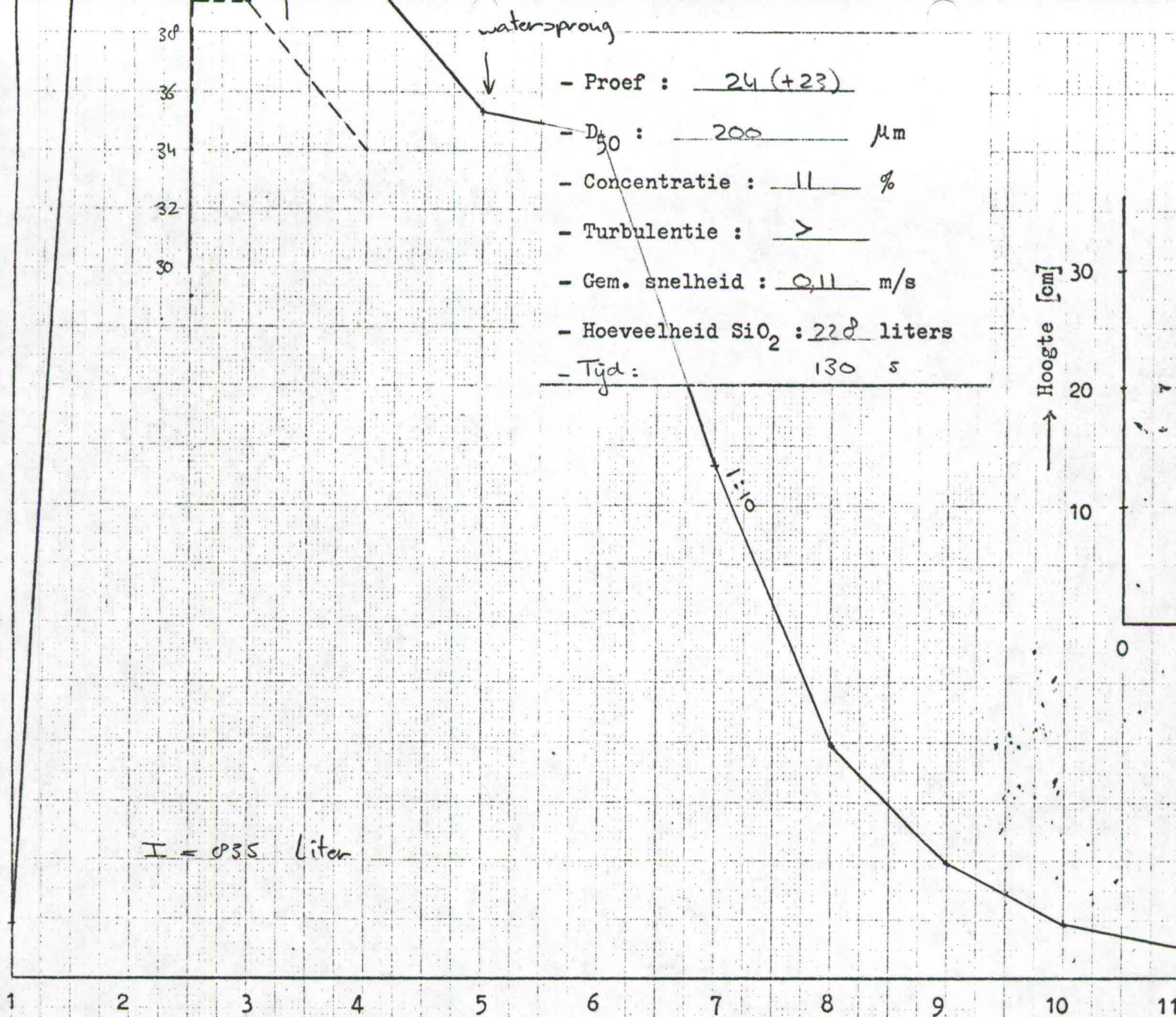
↑ Hoogte [cm]

Raai

Concentratievertikaal

→ Raai [m]

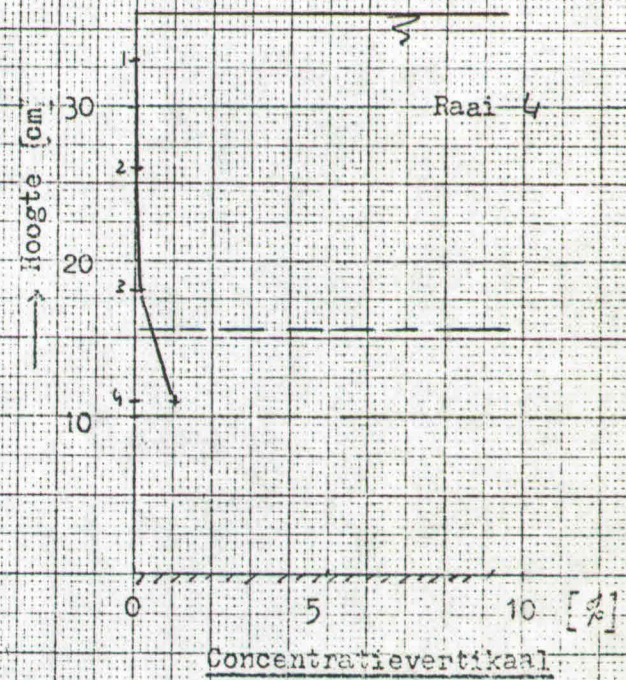
Zandbed in de goot



Hoogte zandbed [cm]

- Proef : 25
- D_{50} : 200 μm
- Concentratie : ≈ 9 %
- Turbulentie : >
- Gem. snelheid : 0,11 m/s
- Hoeveelheid SiO_2 : 220 liters
- $T_{\gamma\alpha}$: 60 s

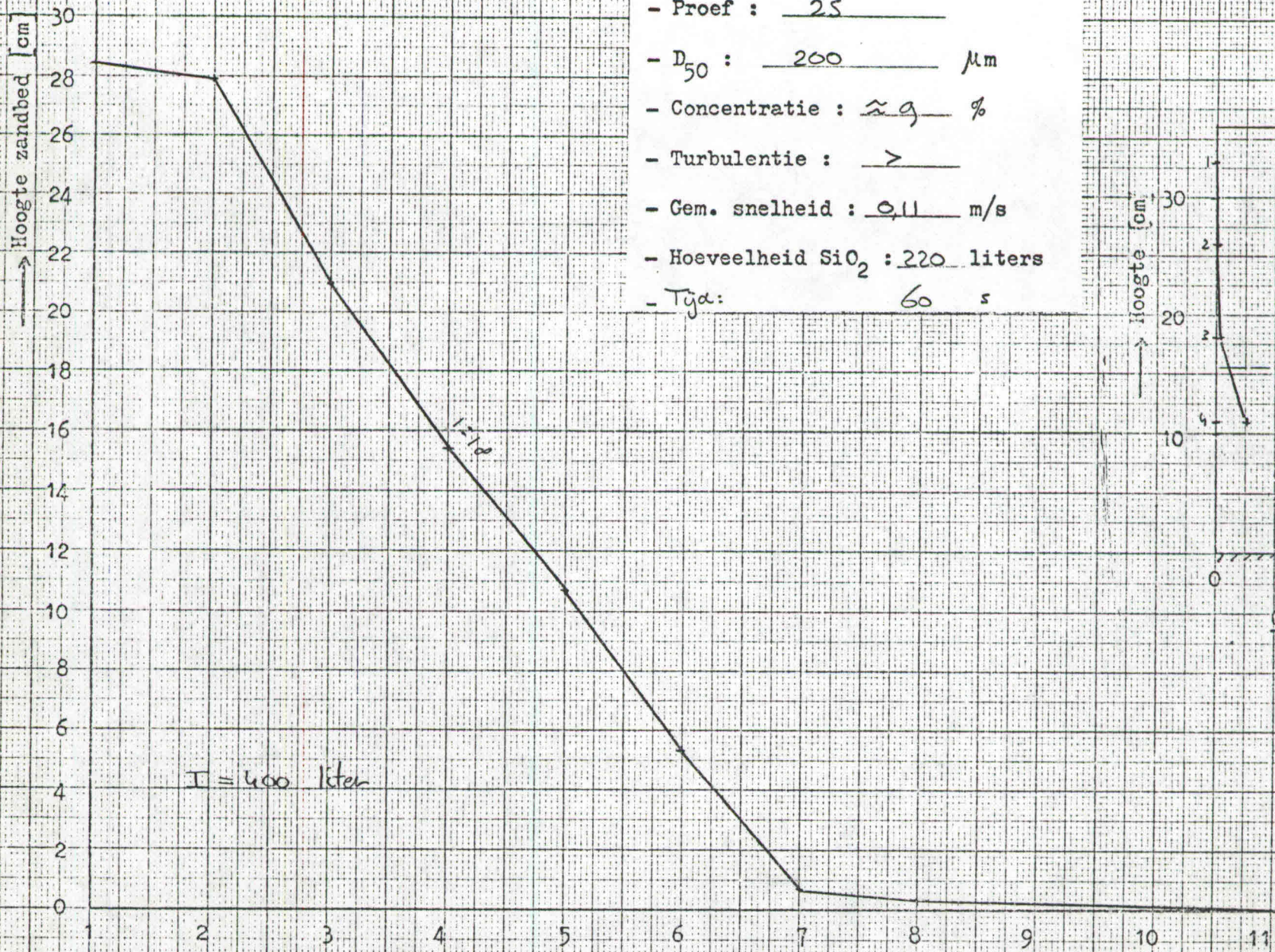
Hoogte [cm]

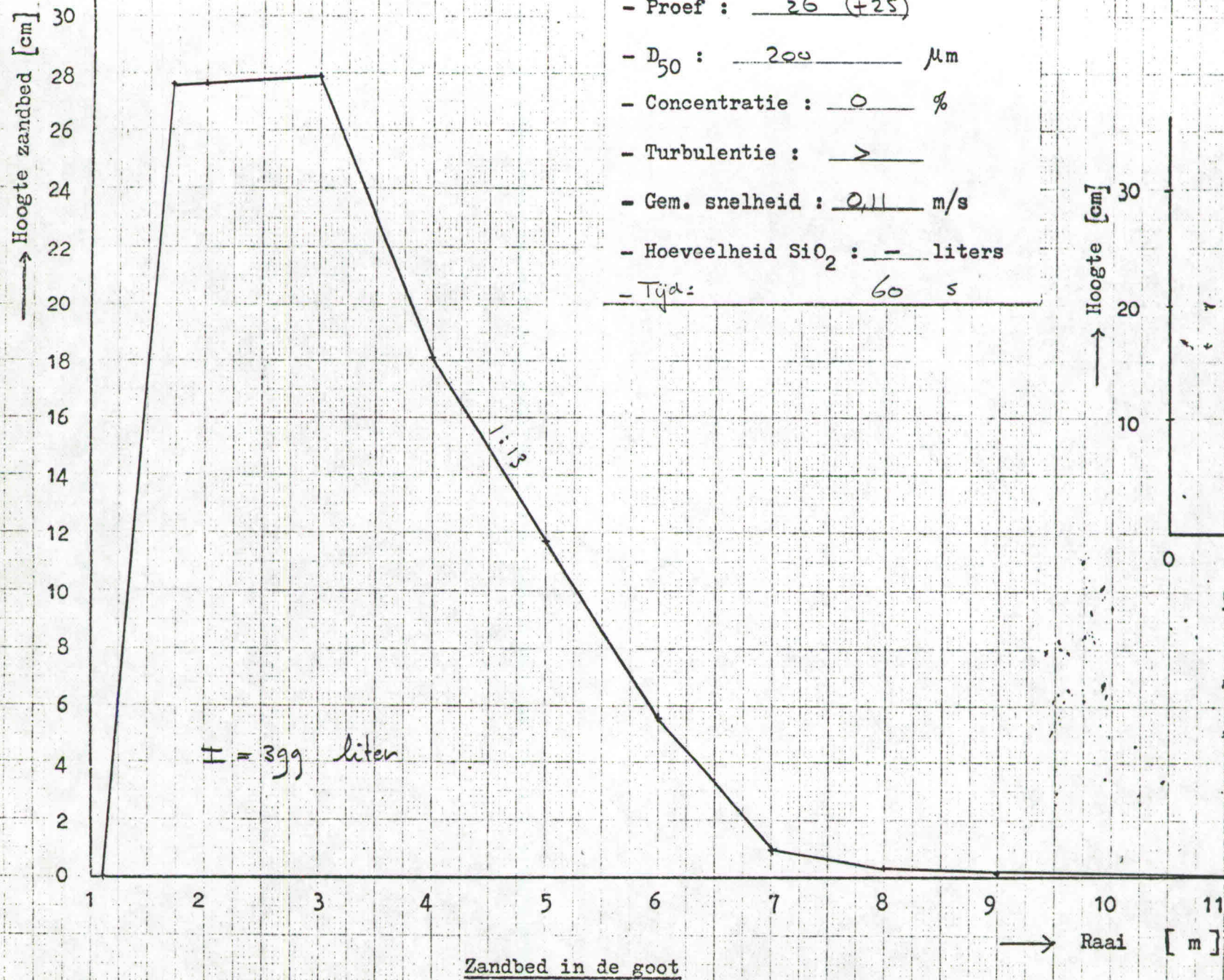


$I = 400$ liter

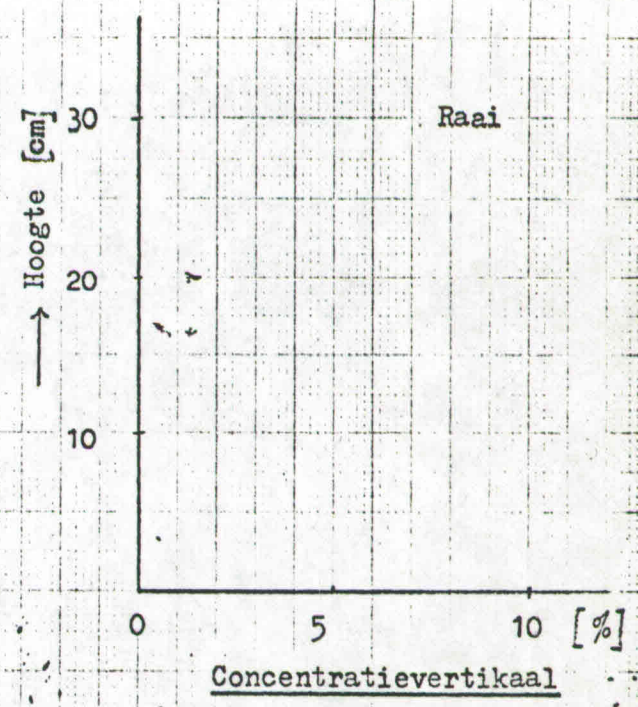
Zandbed in de goot

Raai [m]





- Proef : 26 (+25)
- D_{50} : 200 μm
- Concentratie : 0 %
- Turbulentie : >
- Gem. snelheid : 0,11 m/s
- Hoeveelheid SiO_2 : - liters
- Tijd : 60 s



Hoogte zandbed [cm]

- Proef : 27
- D_{50} : 200 μm
- Concentratie : 15 %
- Turbulentie : >
- Gem. snelheid : 0,11 m/s
- Hoeveelheid SiO_2 : 160 liters
- Tijd : 60 s

Hoogte [cm]

Raai

0 5 10 [%]

Concentratievertikaal

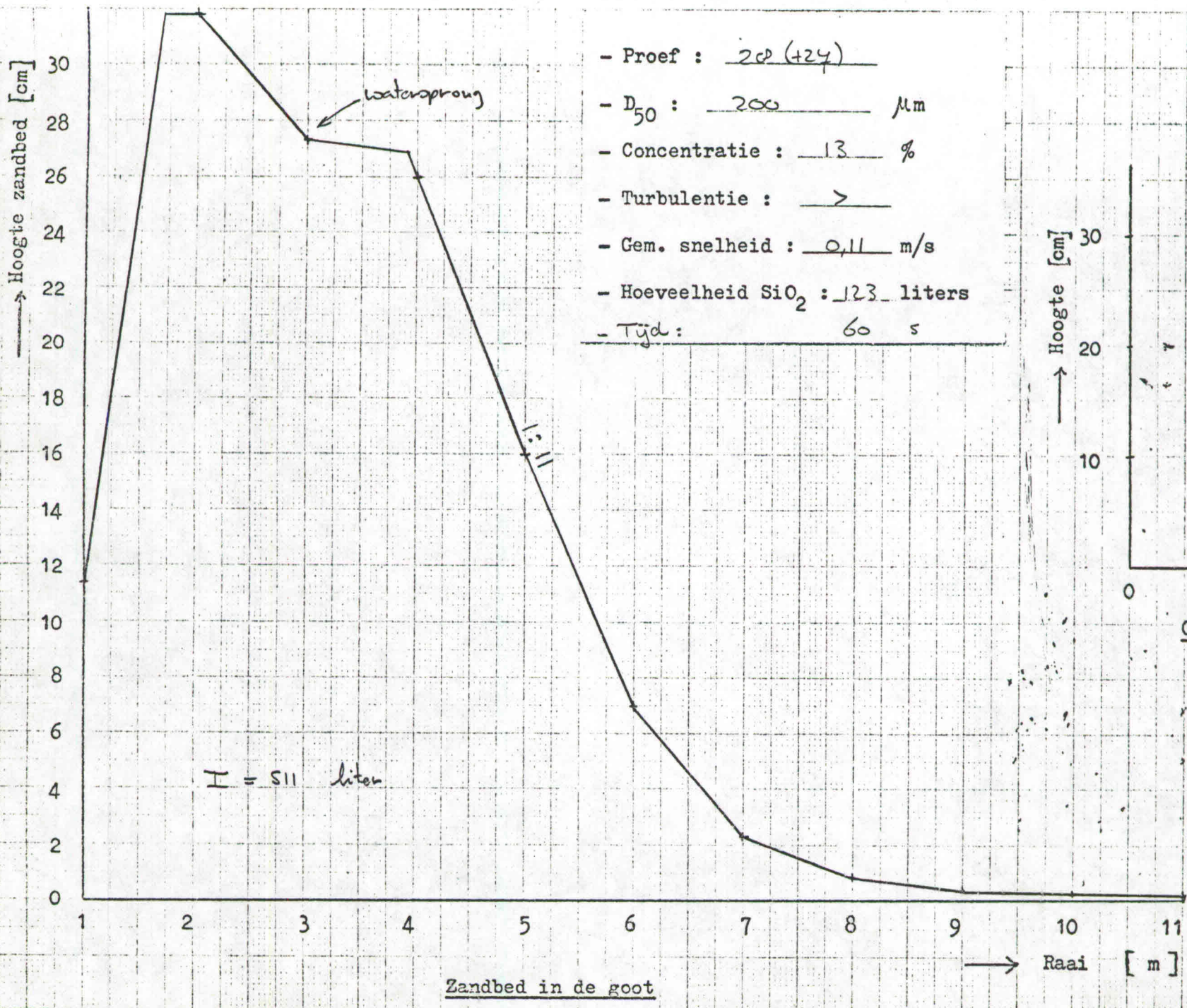
$I = 200$ liter

1:10

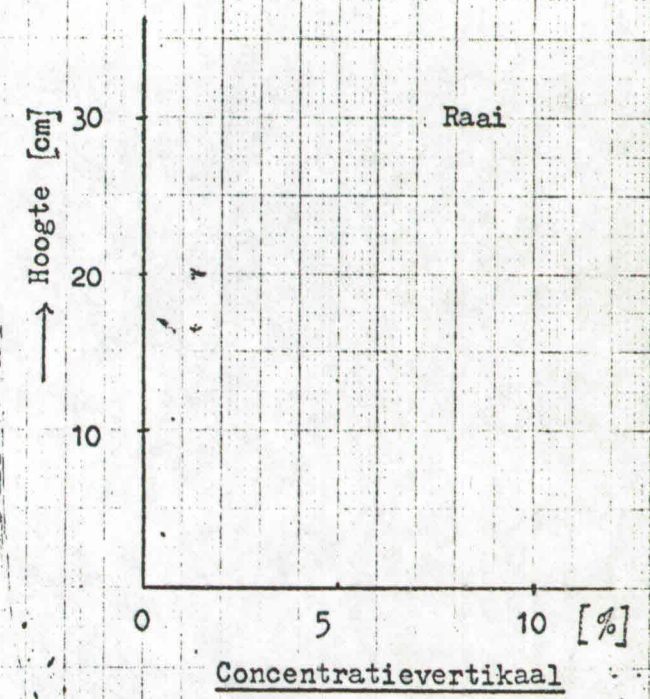
Zandbed in de goot

→ Raai [m]

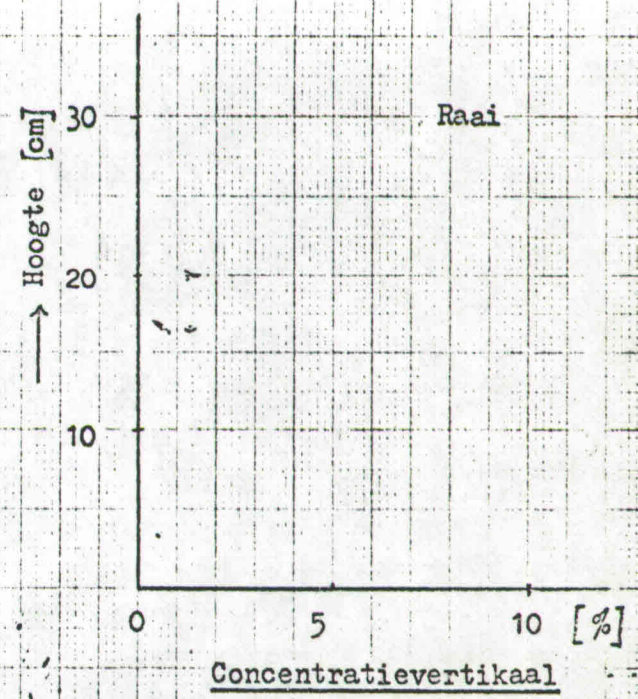
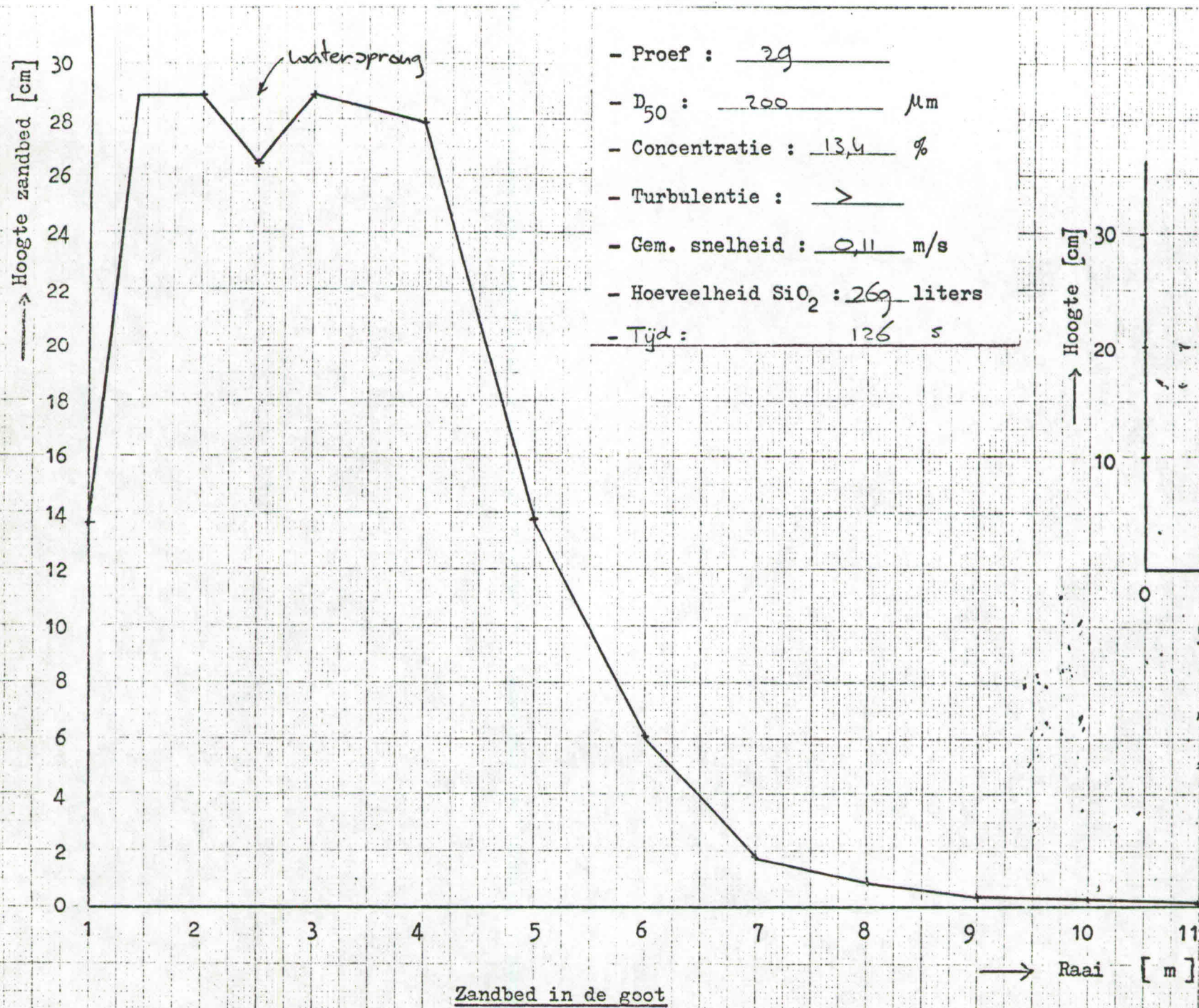
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11

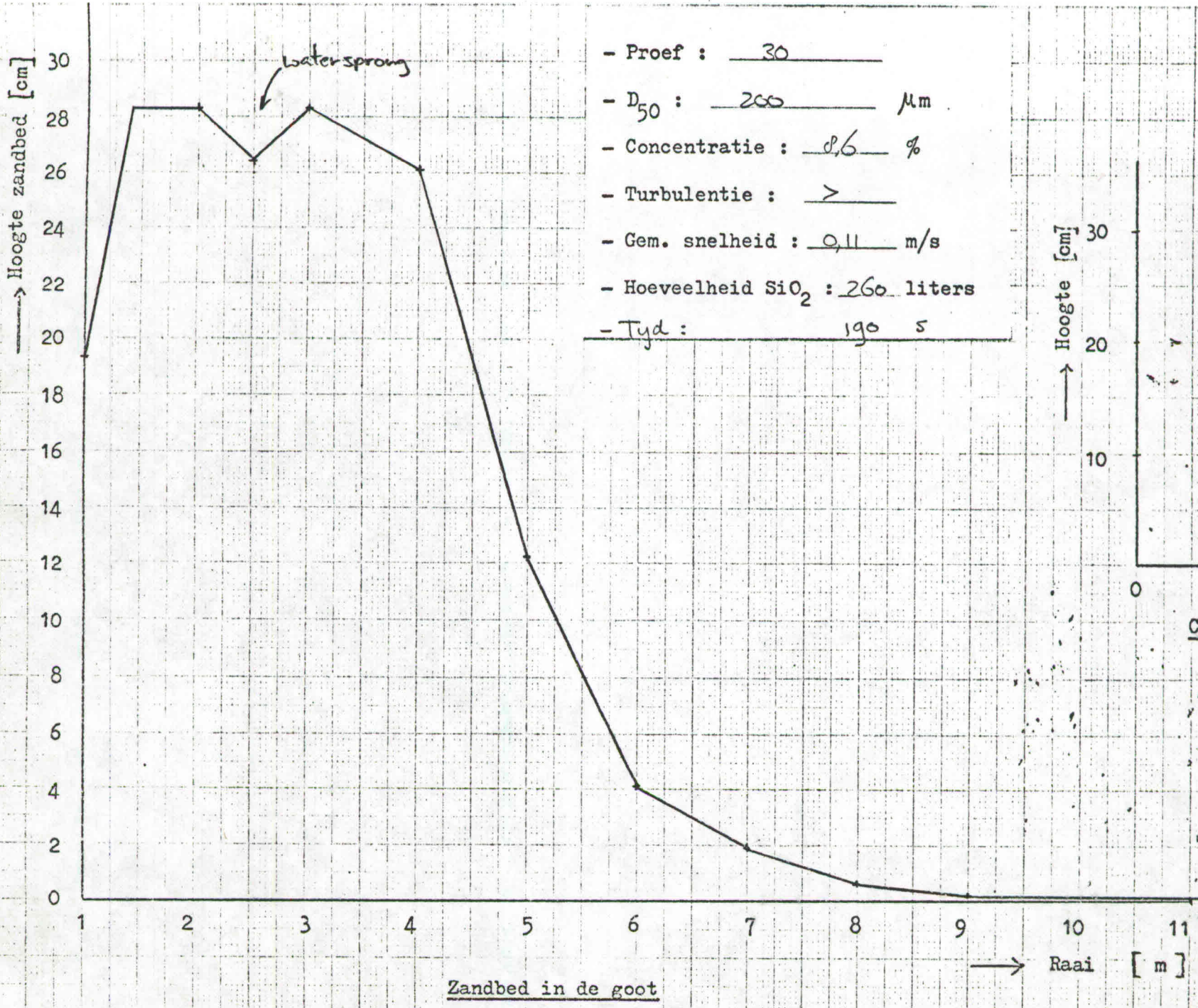


- Proef : 20 (+24)
- D_{50} : 200 μm
- Concentratie : 13 %
- Turbulentie : >
- Gem. snelheid : 0,11 m/s
- Hoeveelheid SiO_2 : 123 liters
- Tijd : 60 s

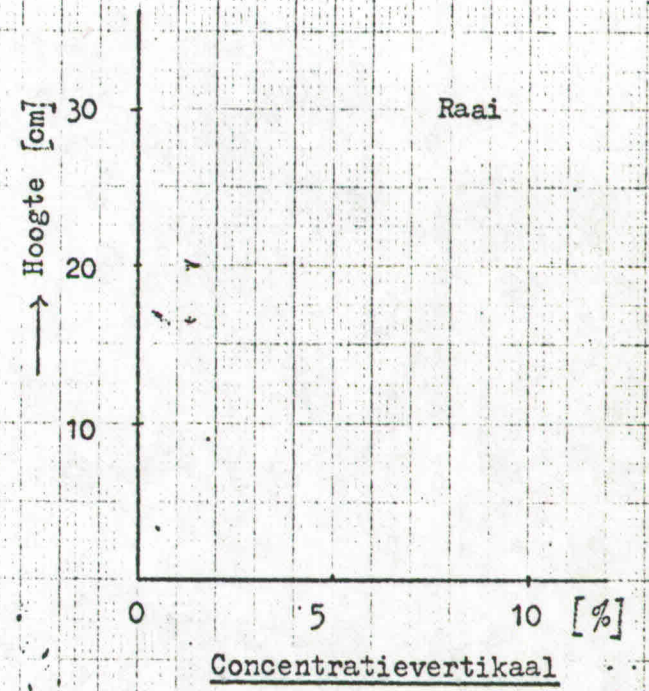


Zandbed in de goot





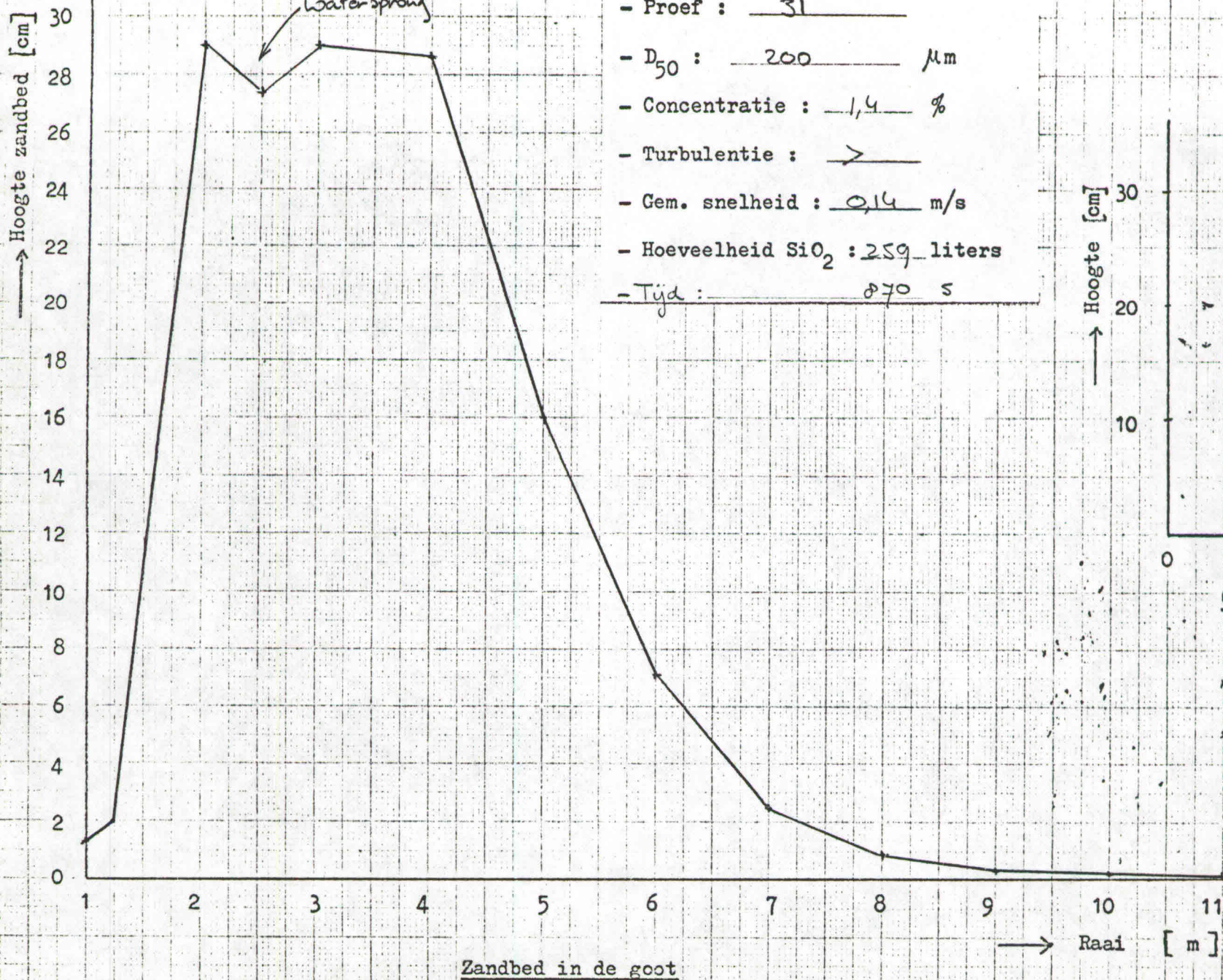
- Proef : 30
- D_{50} : 200 μm
- Concentratie : 0,6 %
- Turbulentie : >
- Gem. snelheid : 0,11 m/s
- Hoeveelheid SiO_2 : 260 liters
- Tyd : 190 s



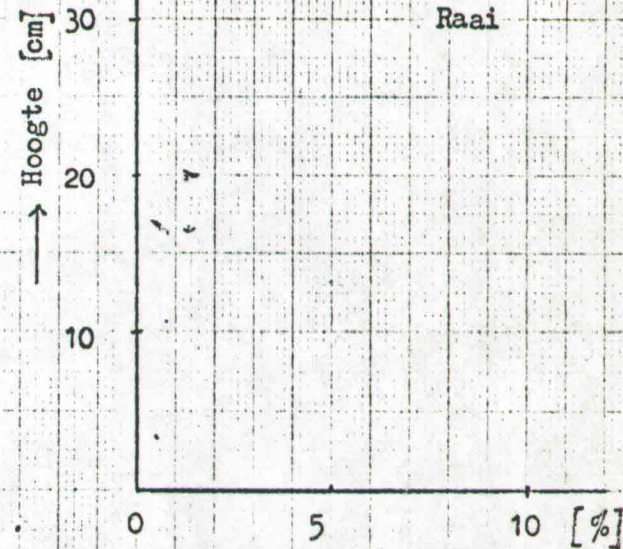
Zandbed in de goot

→ Raai [m]

↑ Hoogte zandbed [cm]



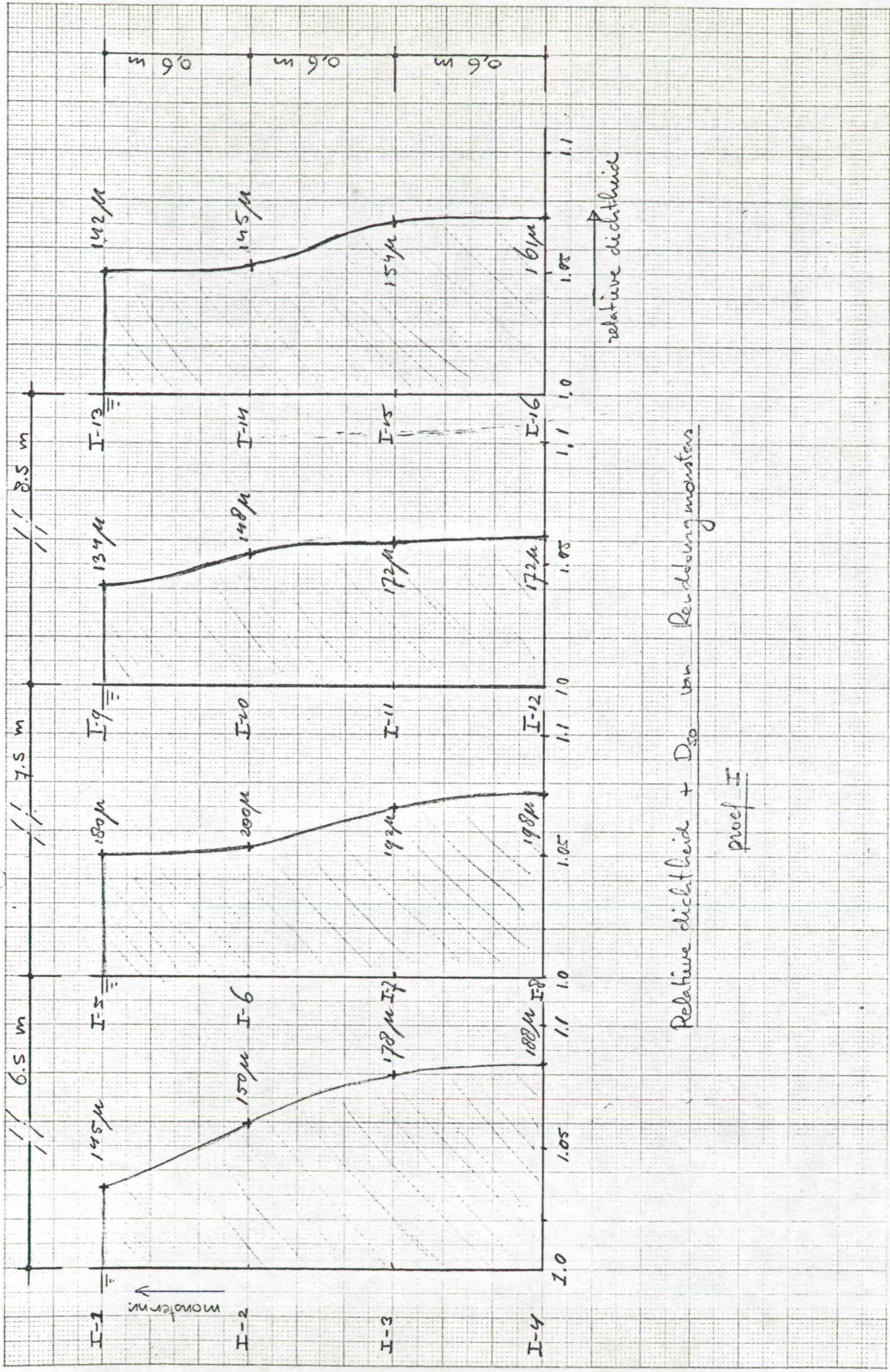
↑ Hoogte [cm]



Concentratievertikaal

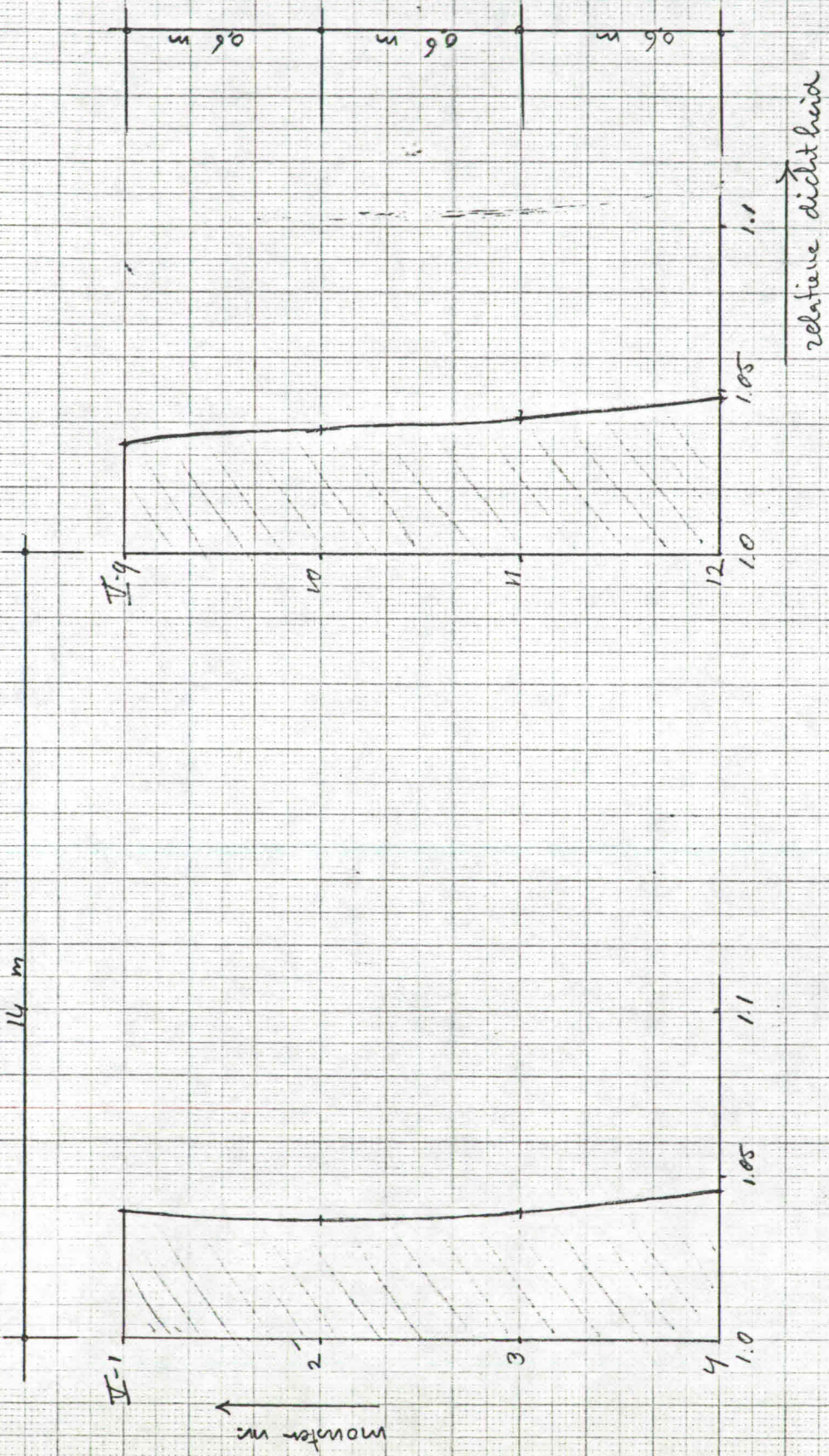
→ Raai [m]

Zandbed in de goot



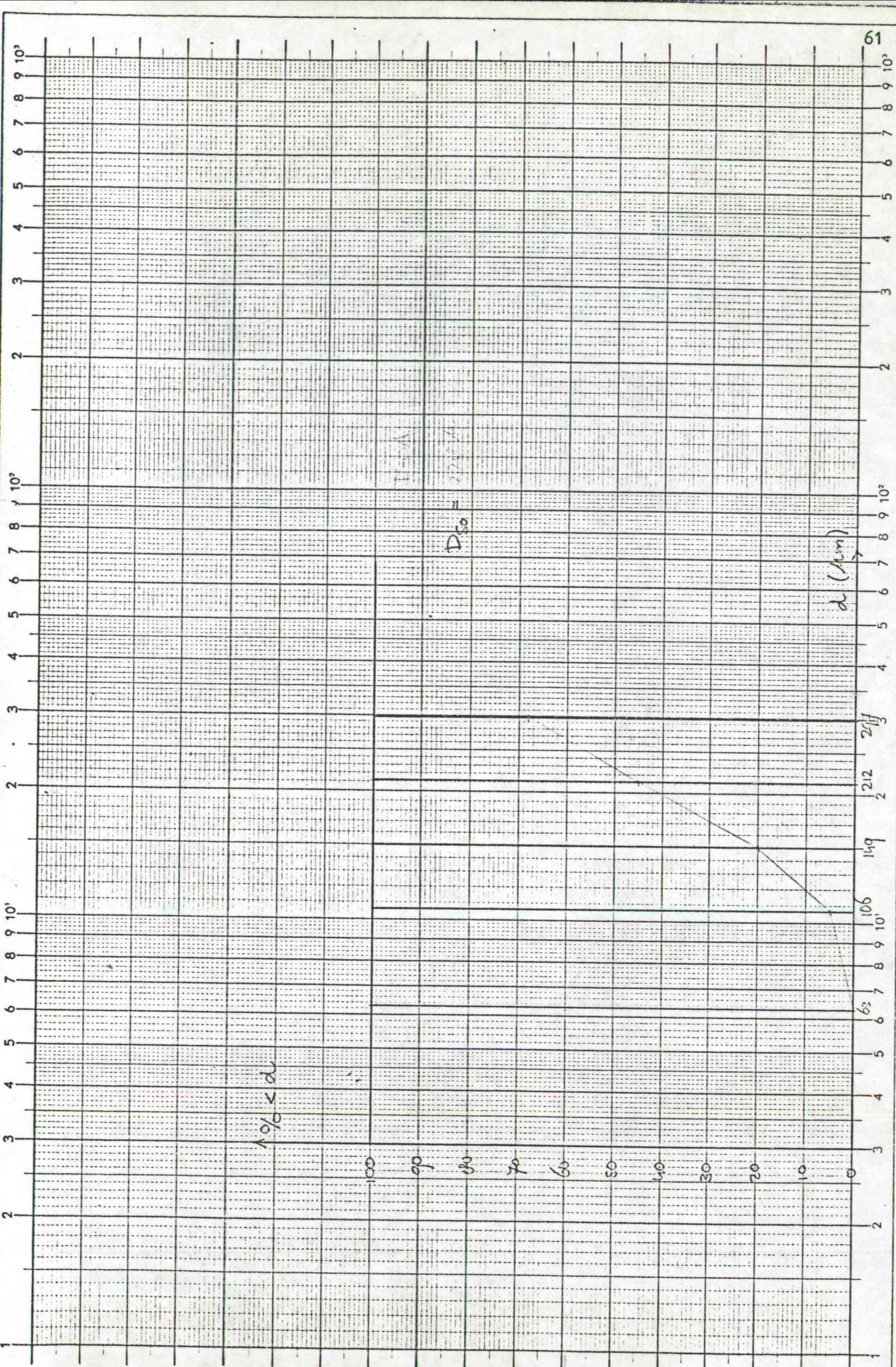
Relative dichtheid + D_{50} van Rozendingsmonsters

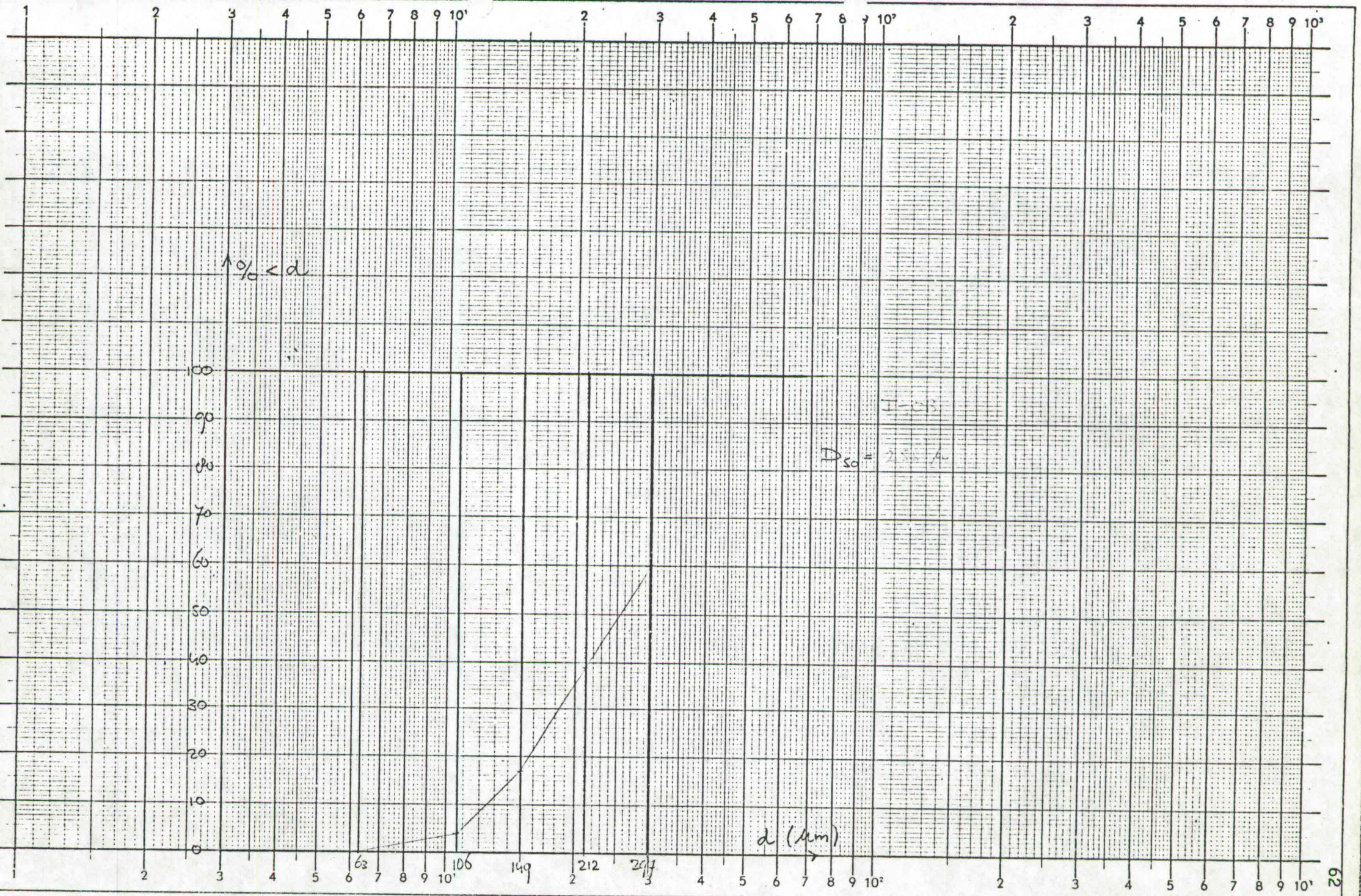
proef III

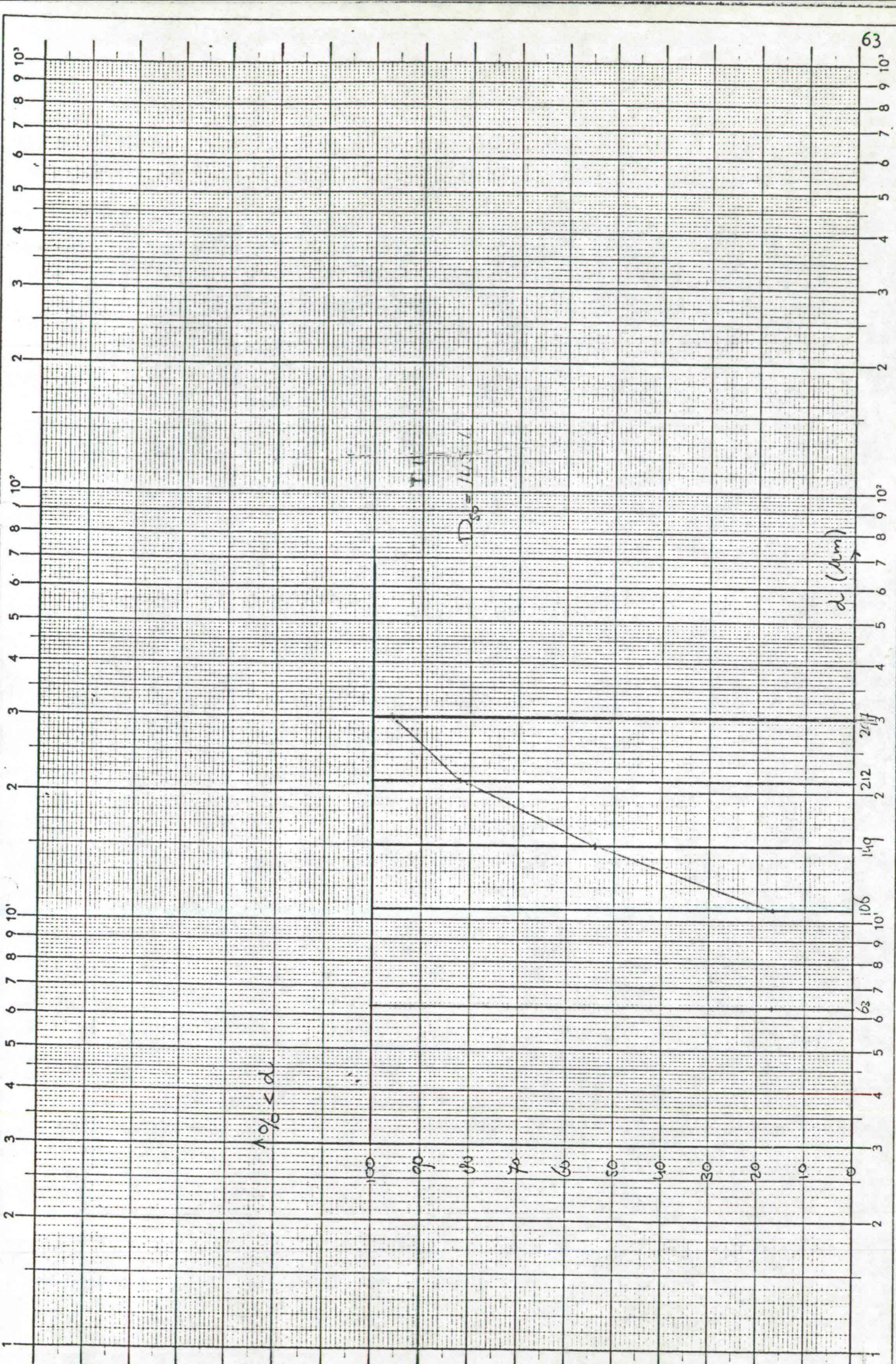


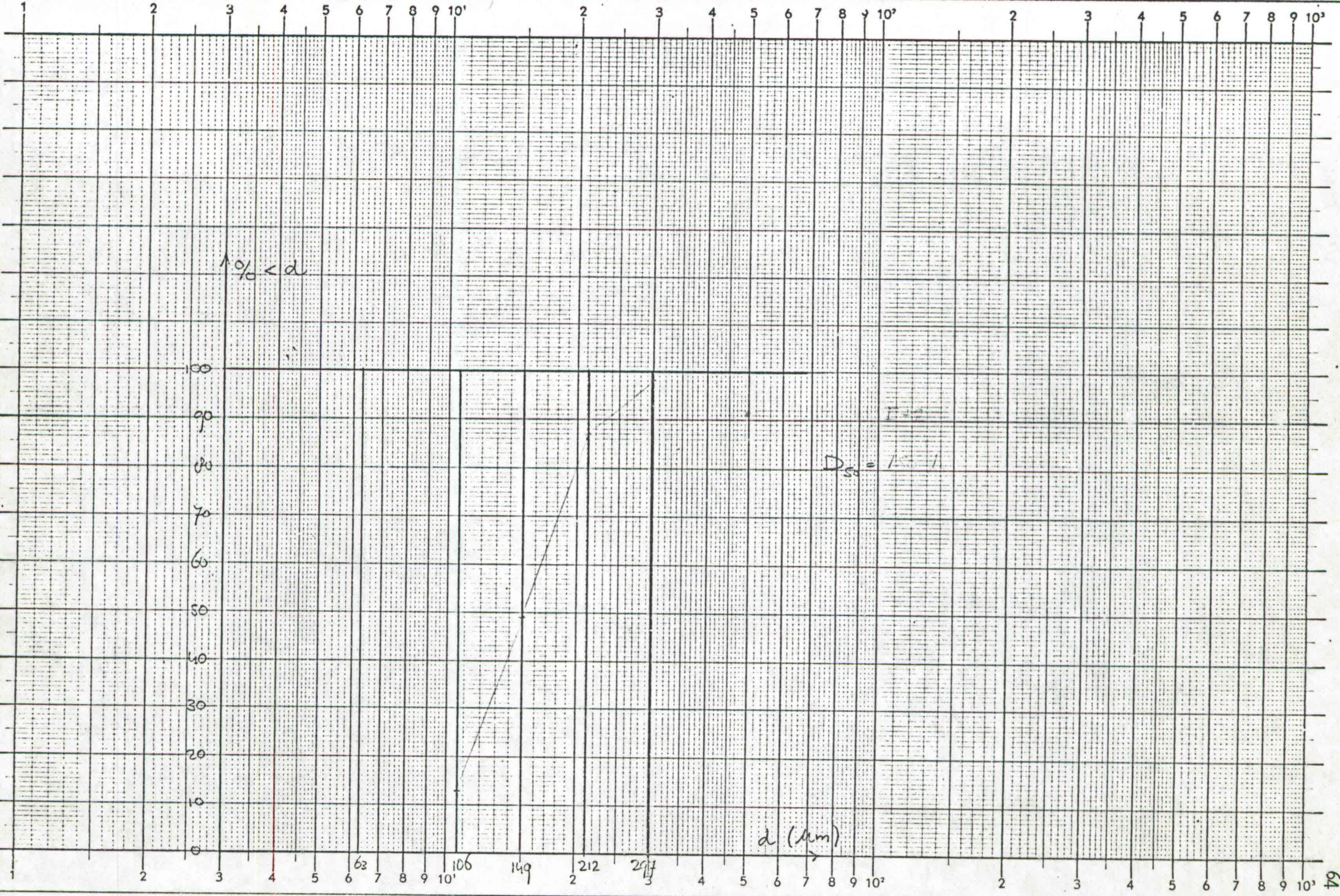
Relative dichtheid Randboring monster

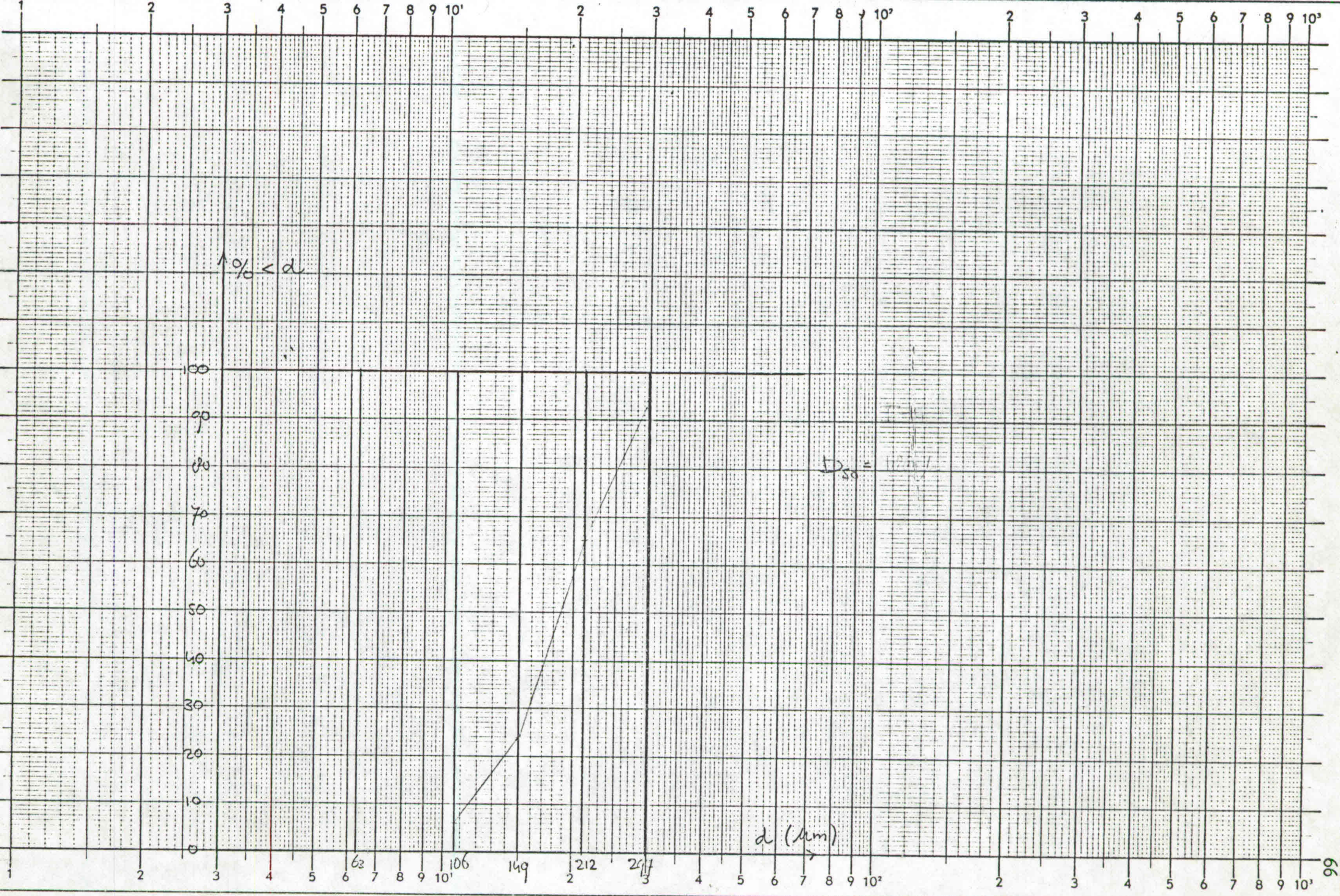
Proef II

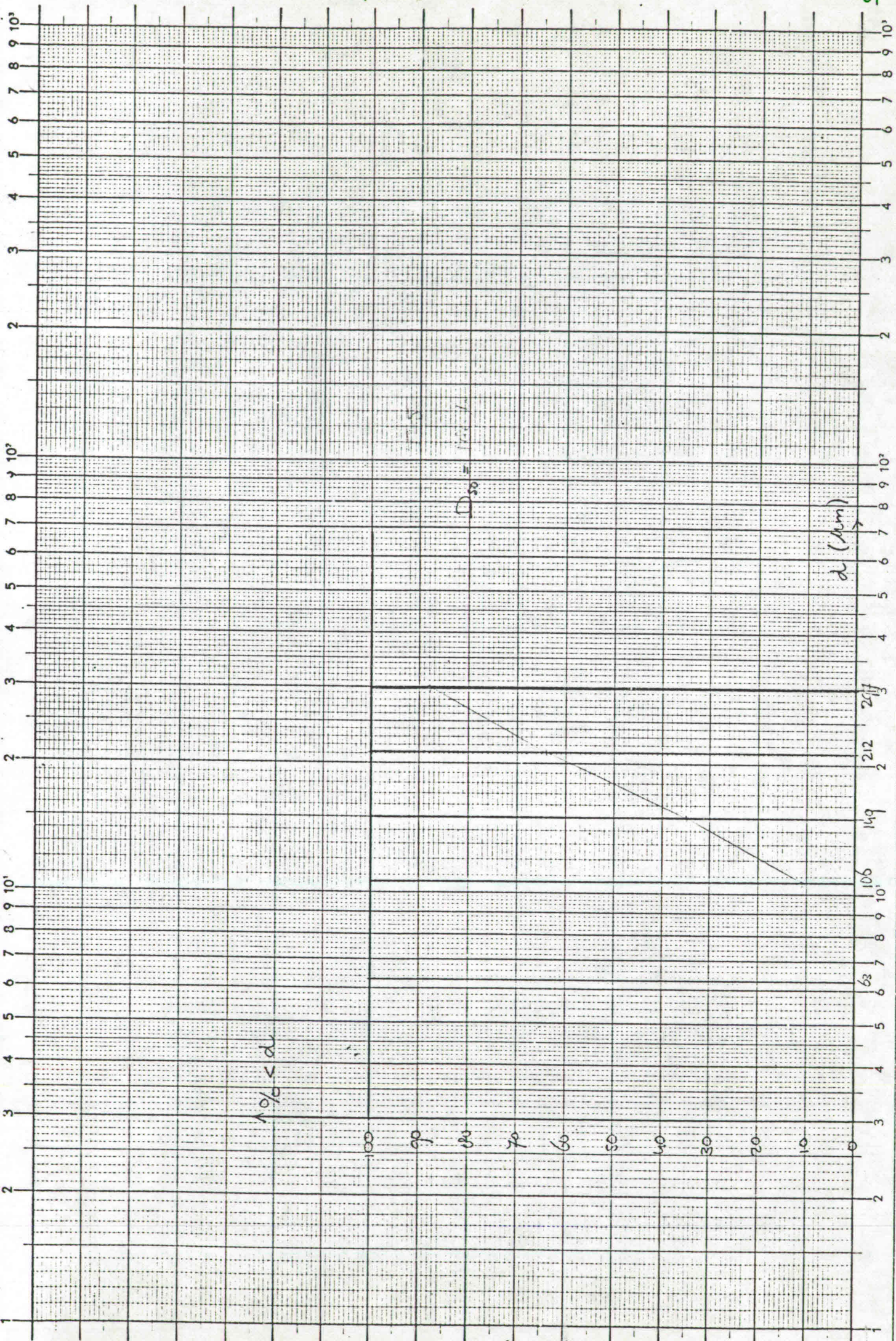


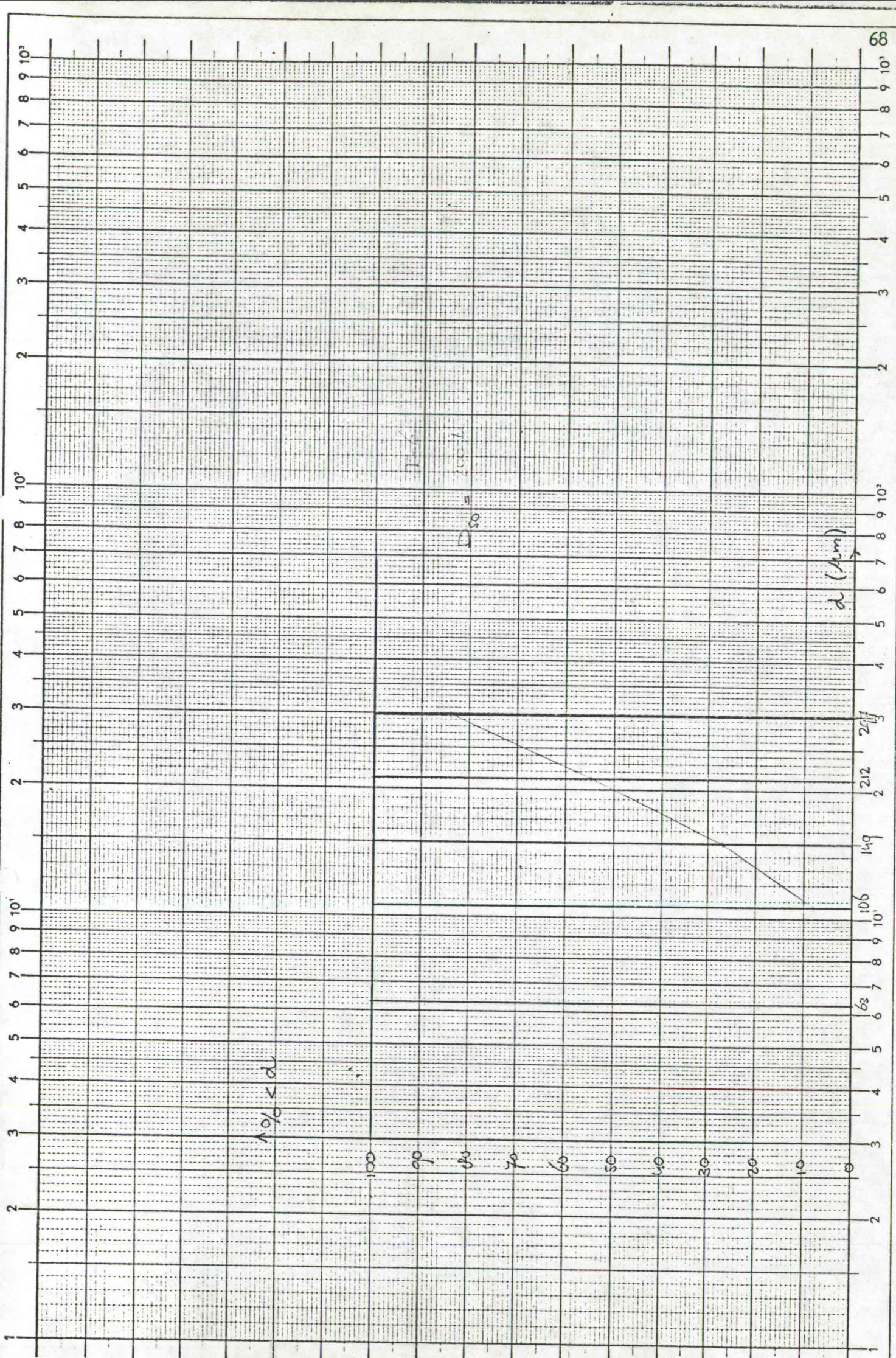


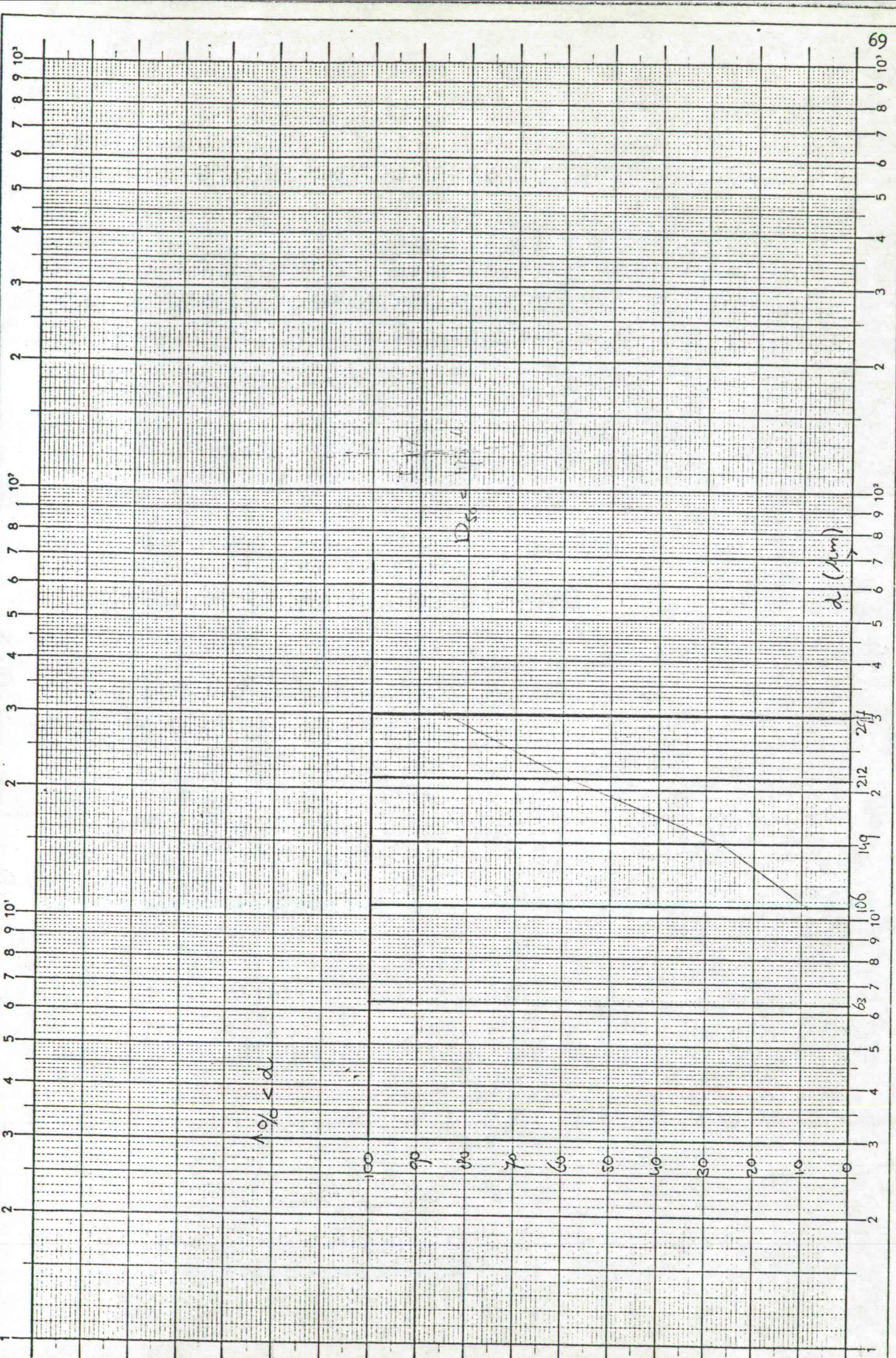


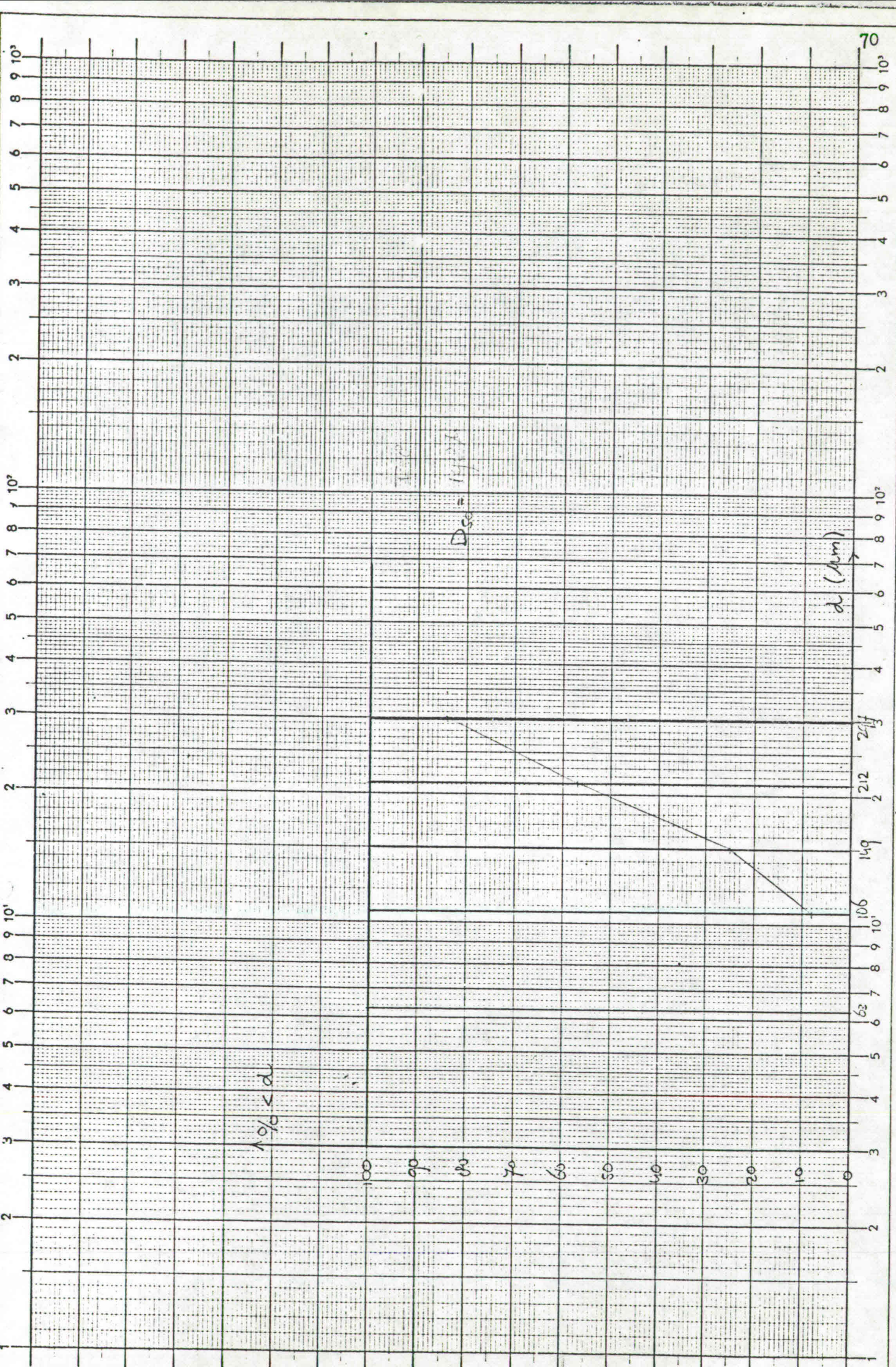


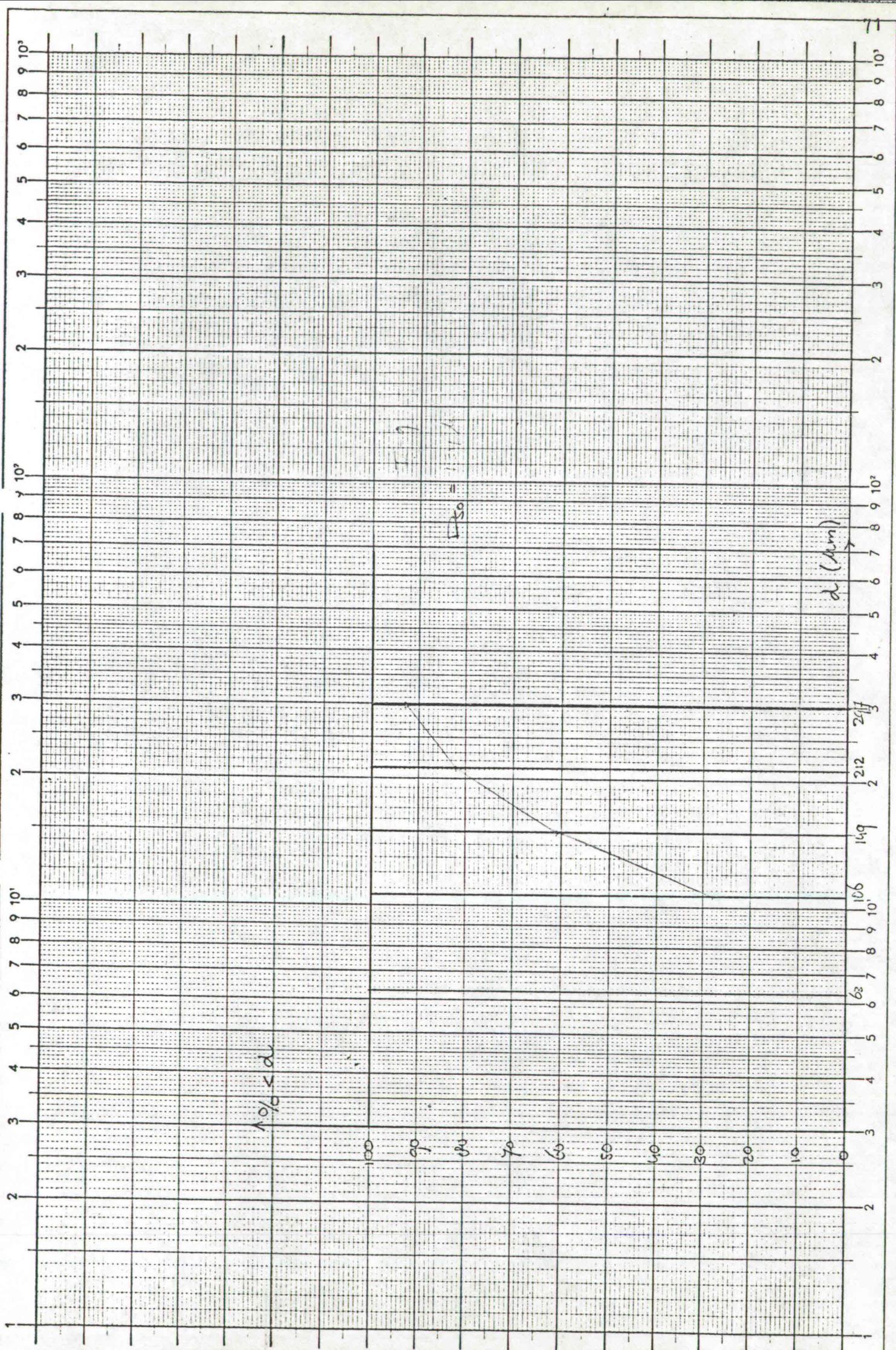


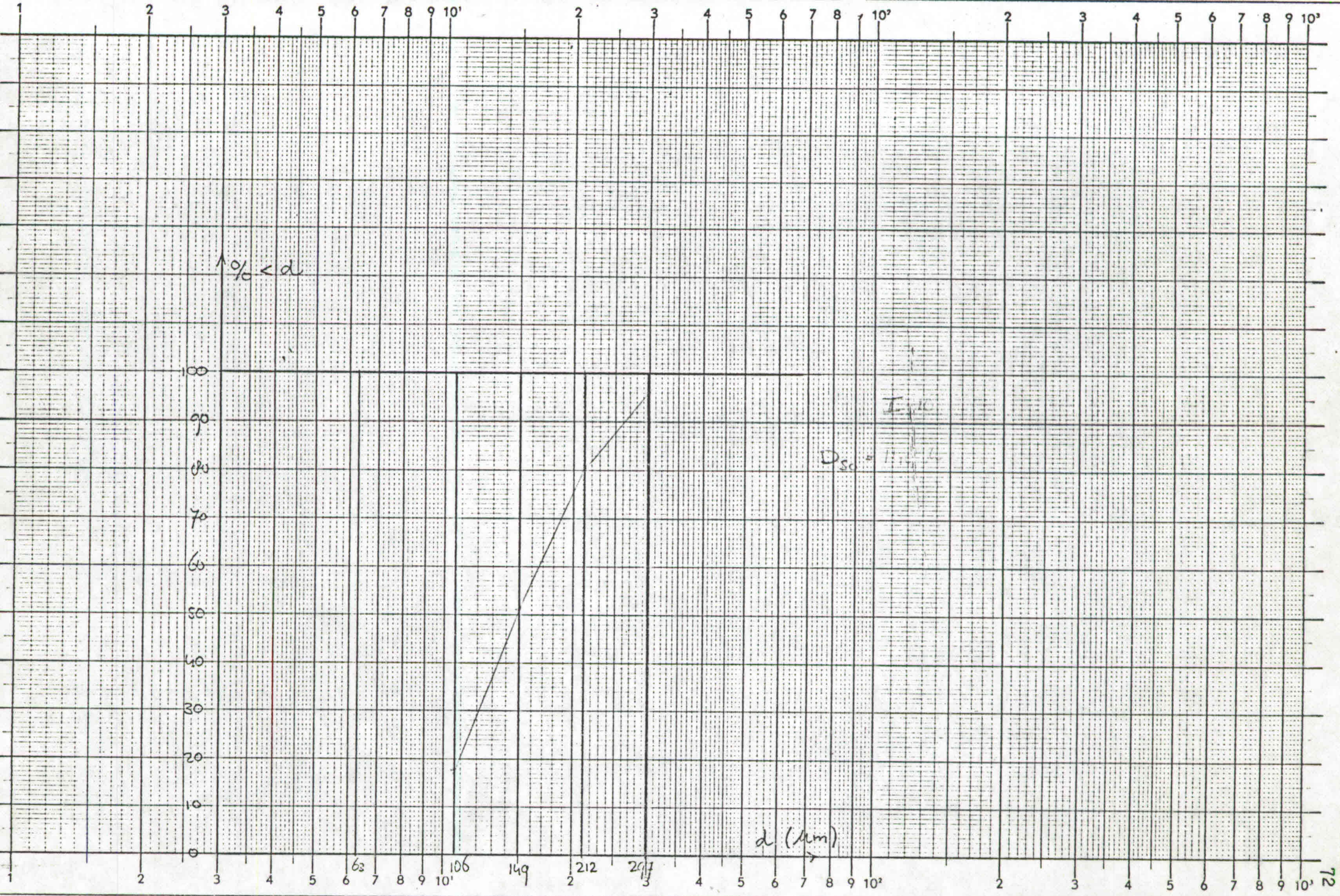


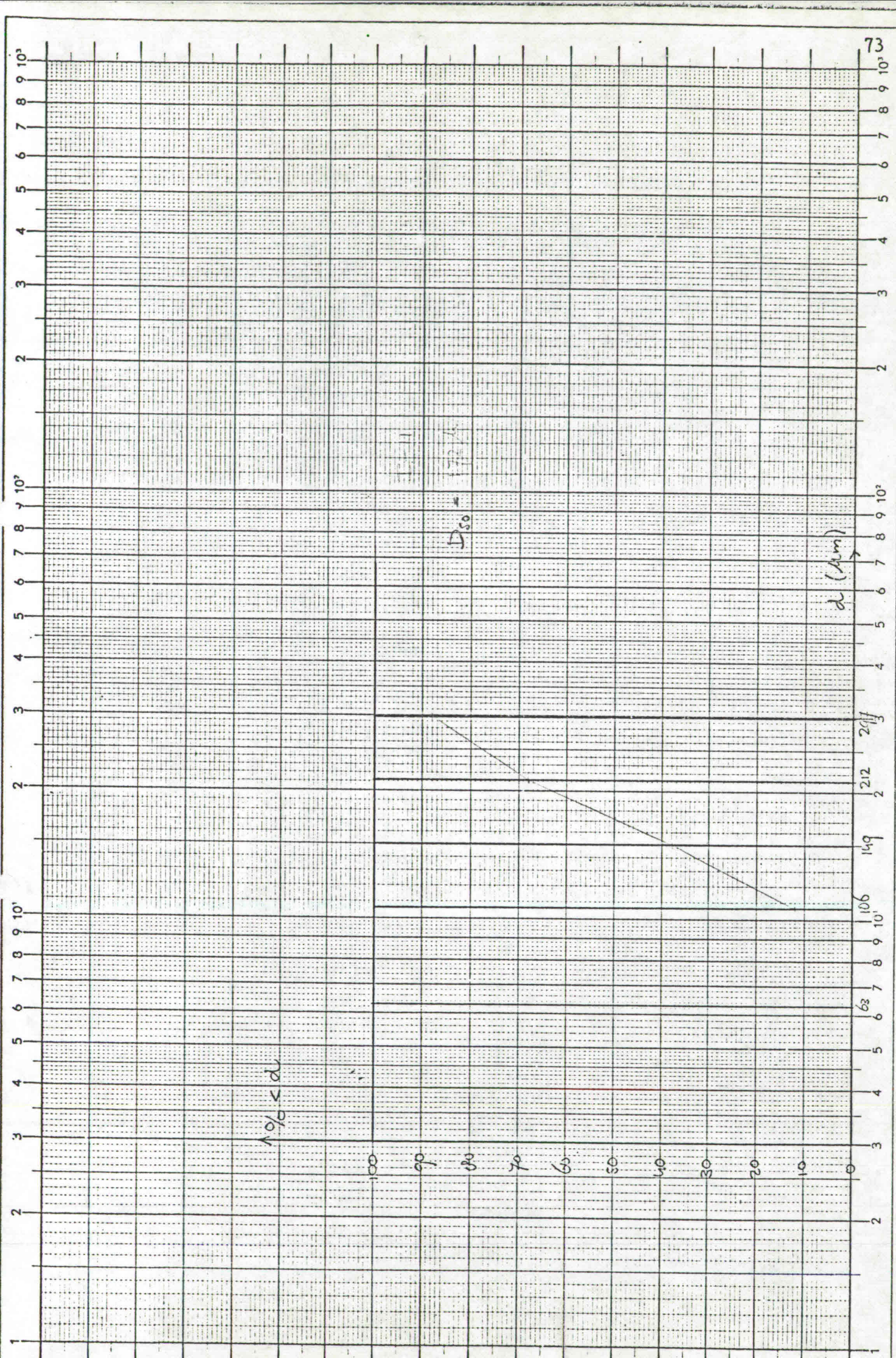


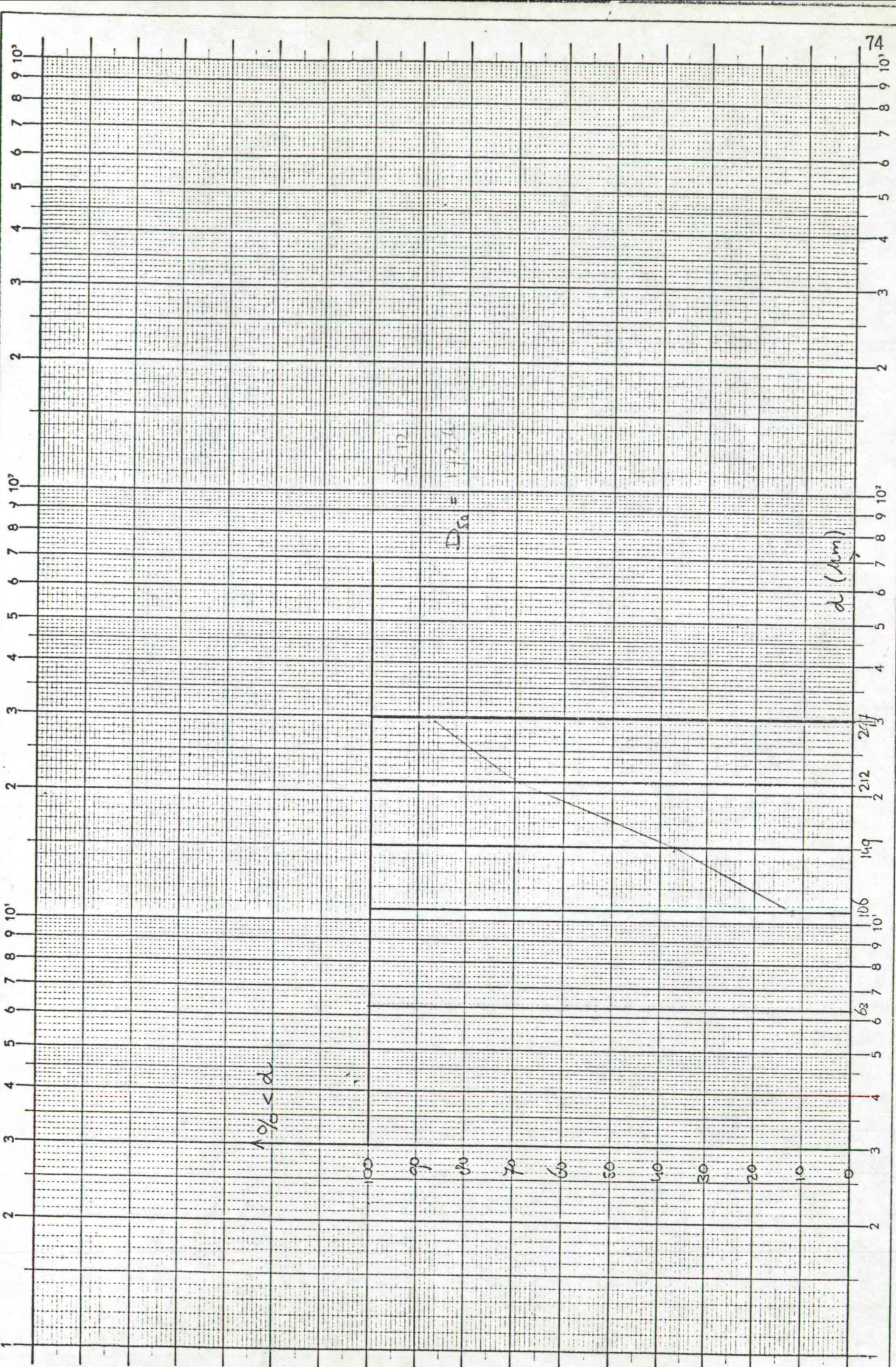


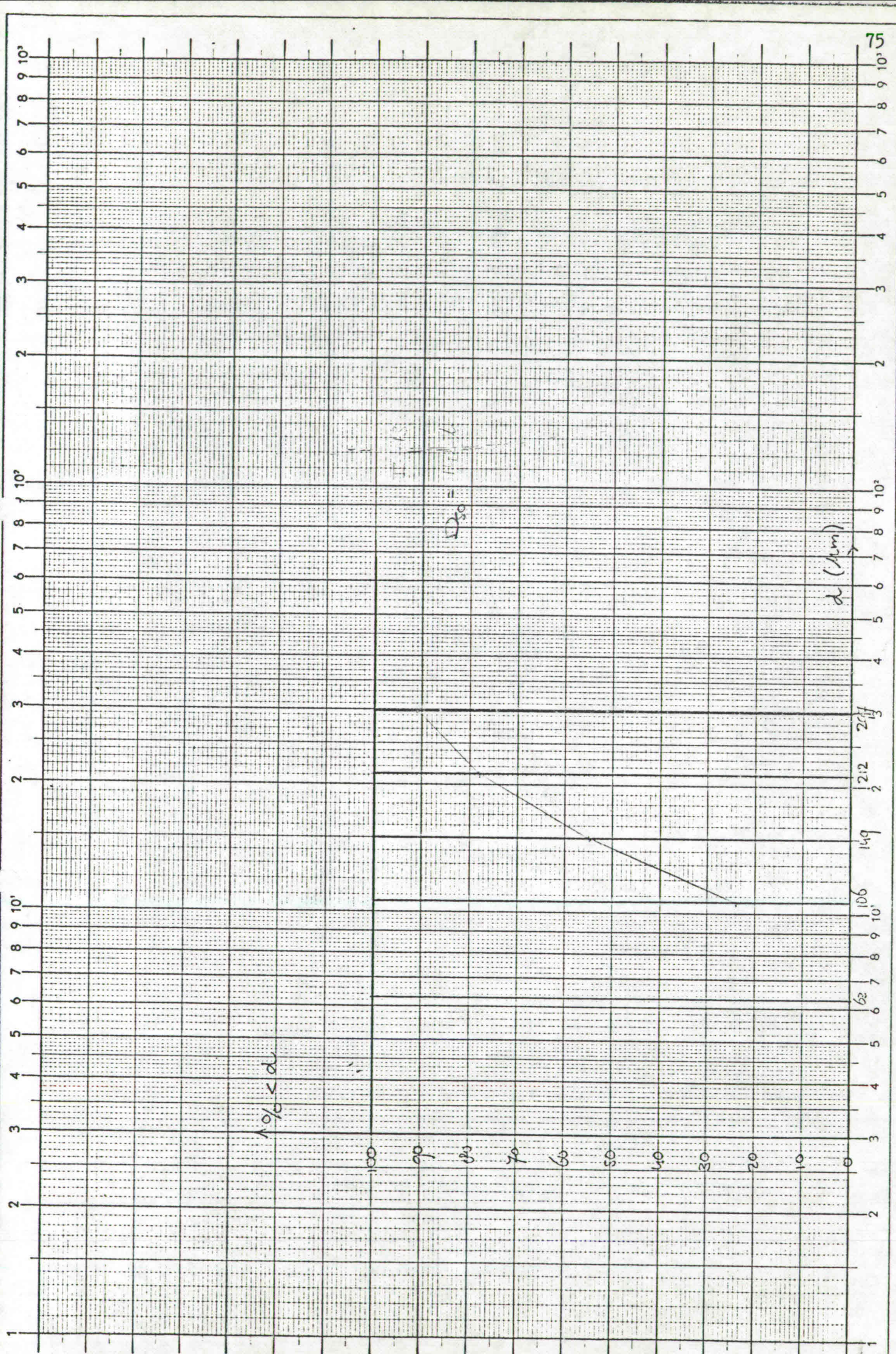


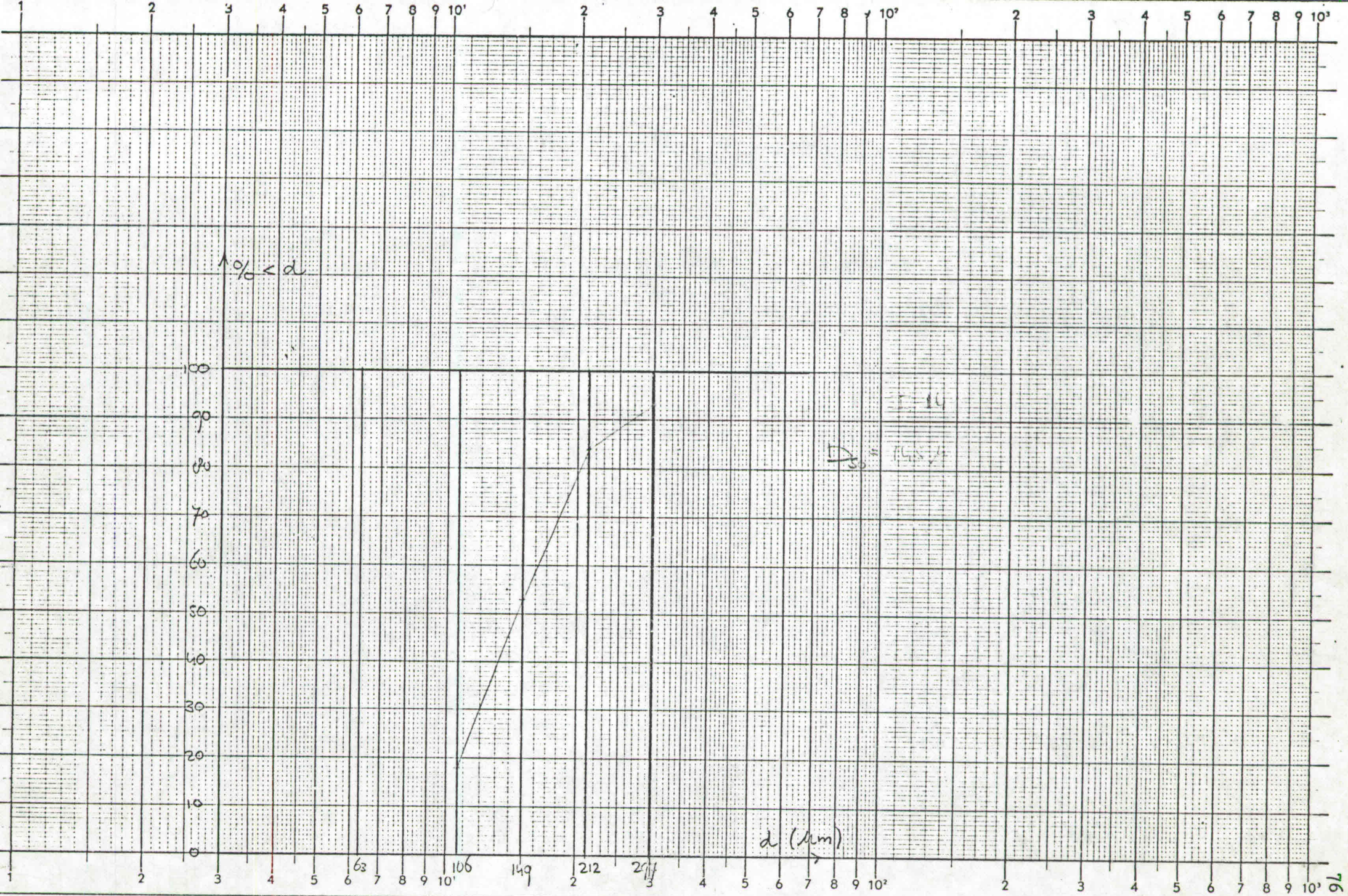


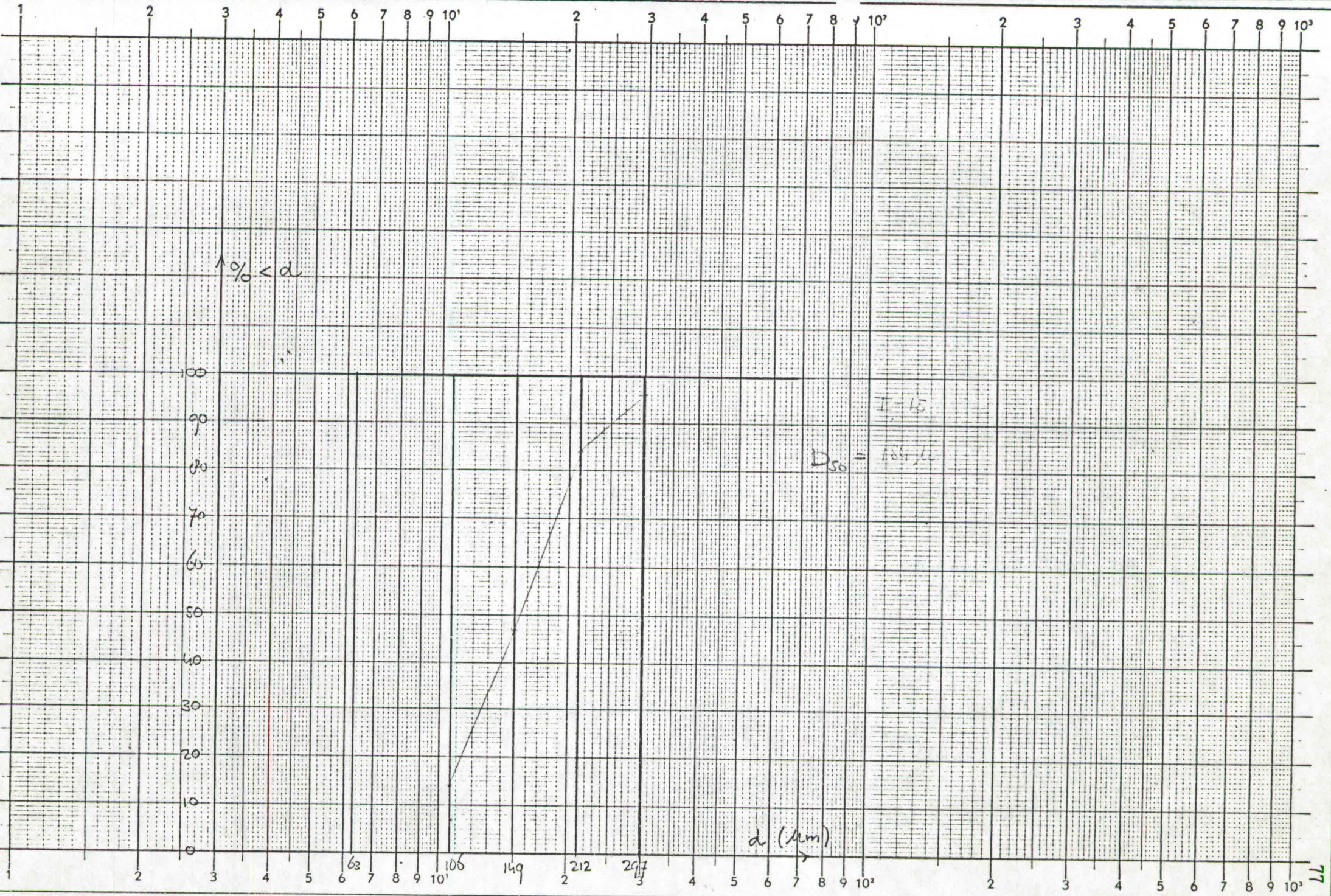


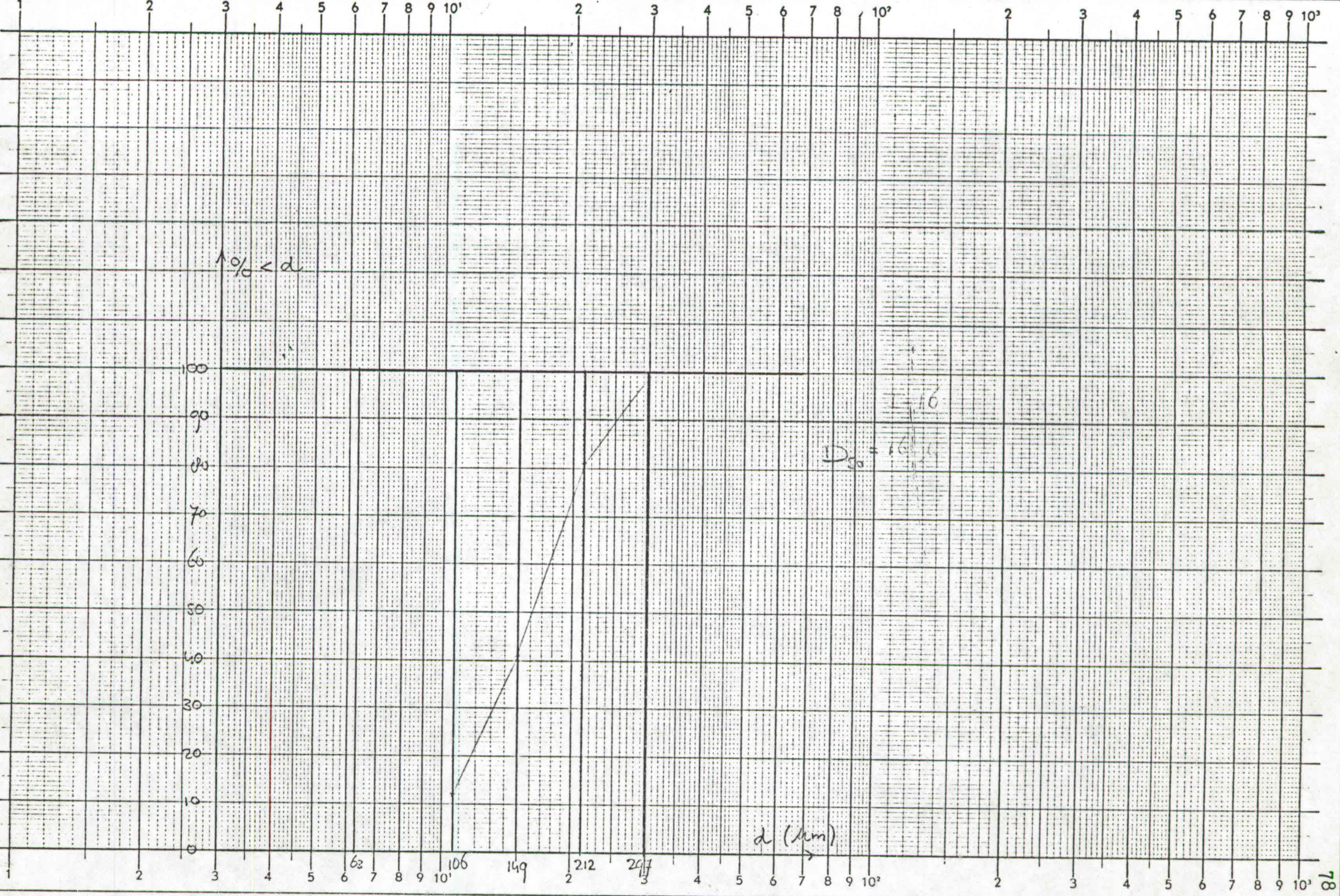


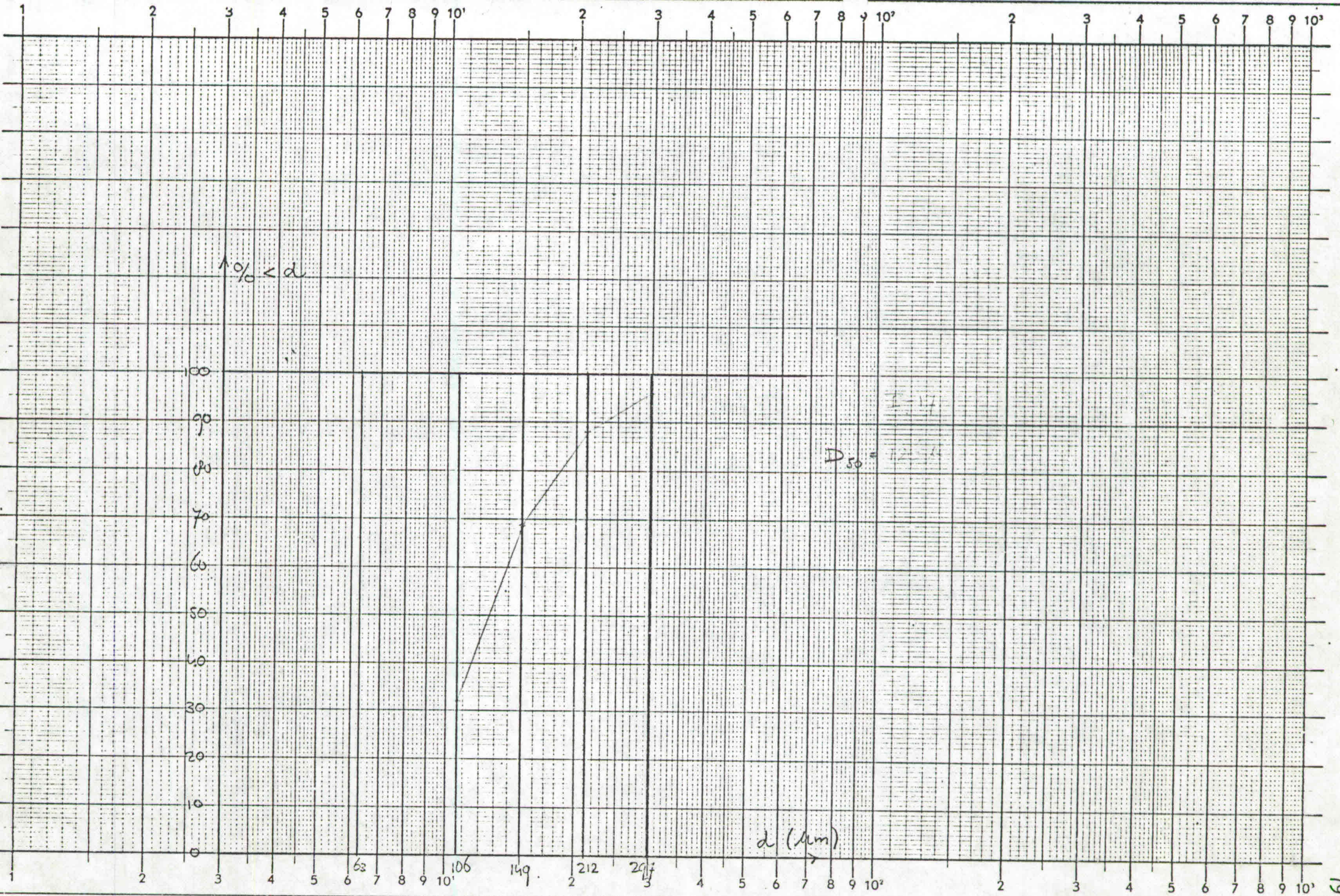


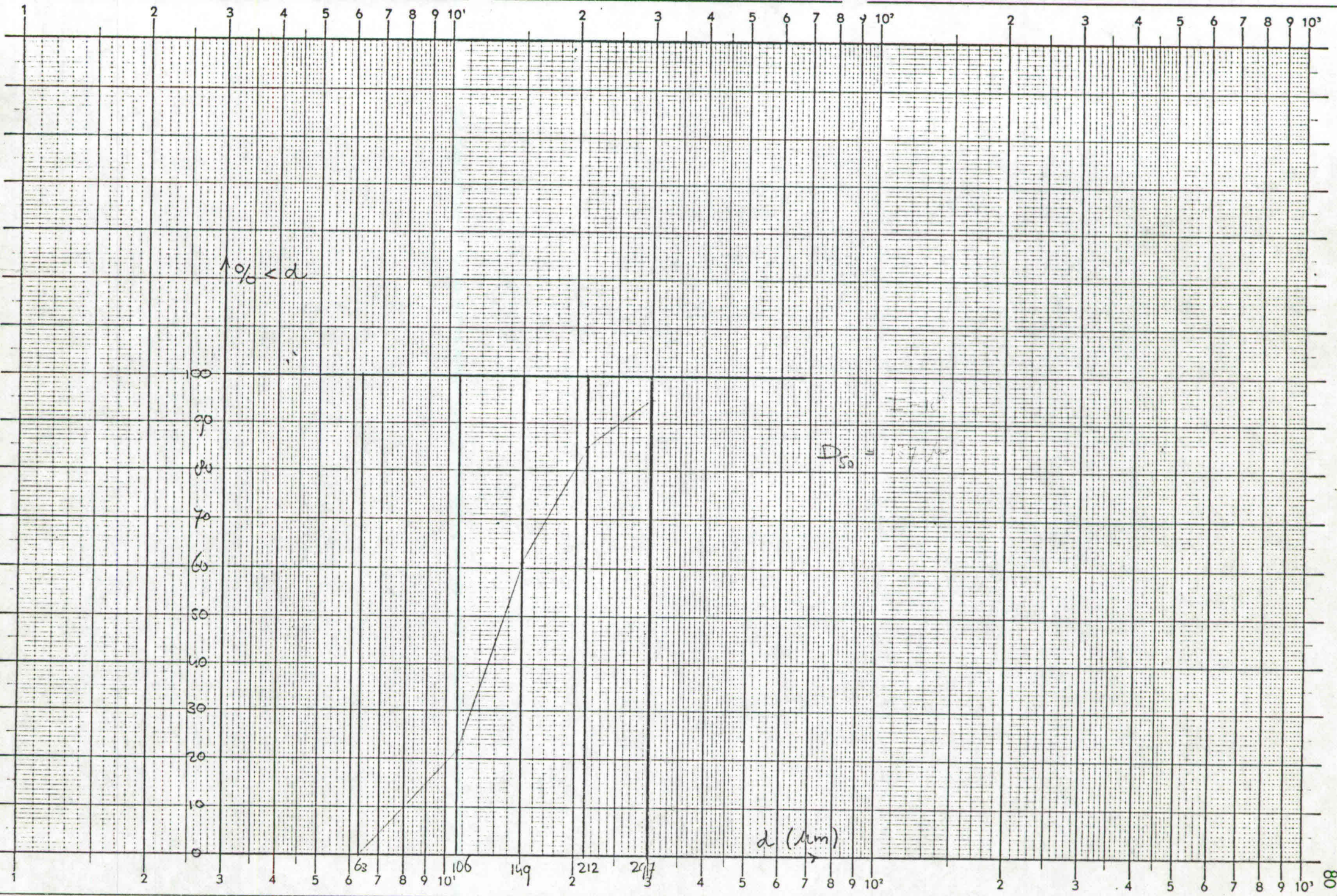


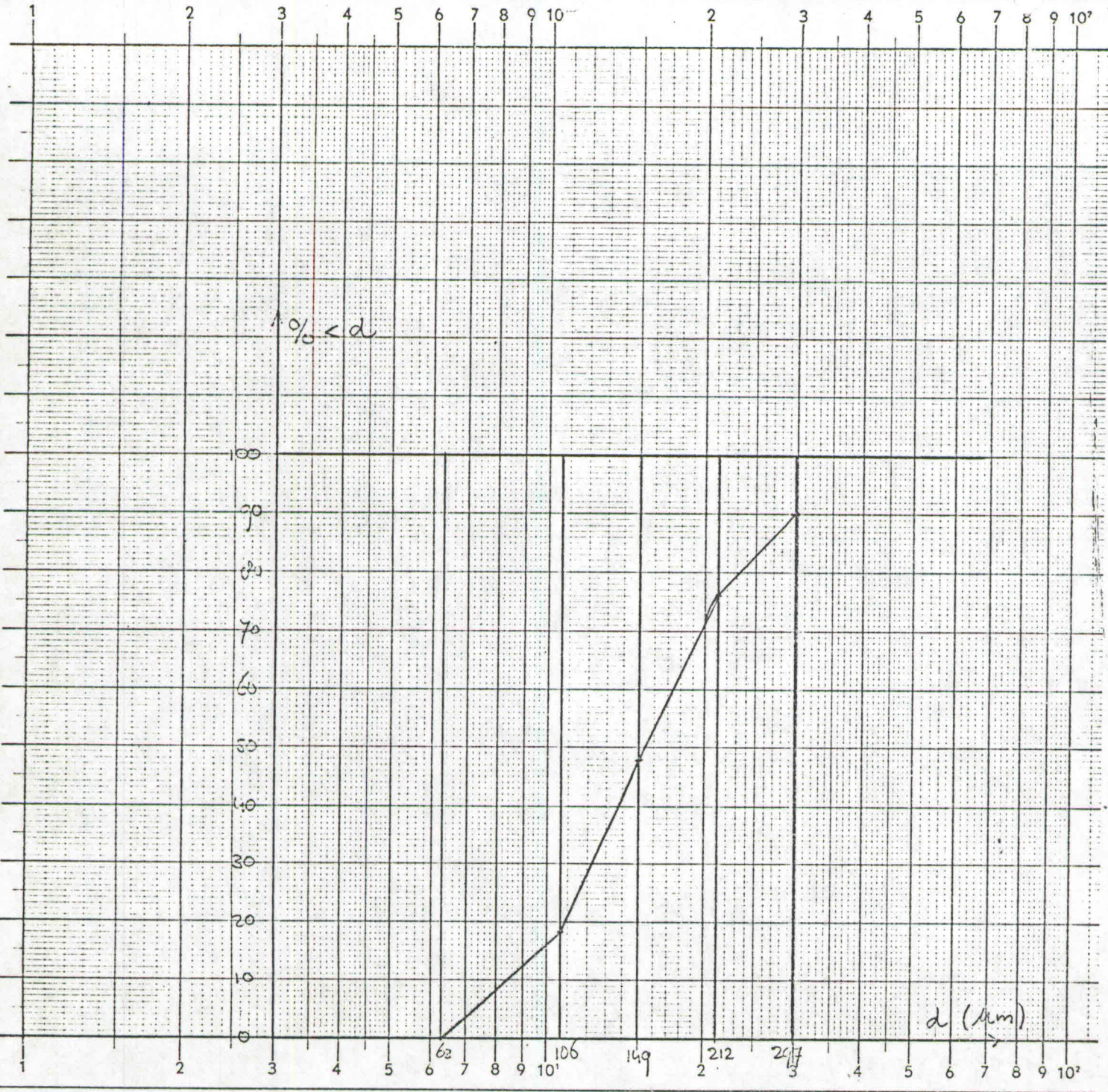




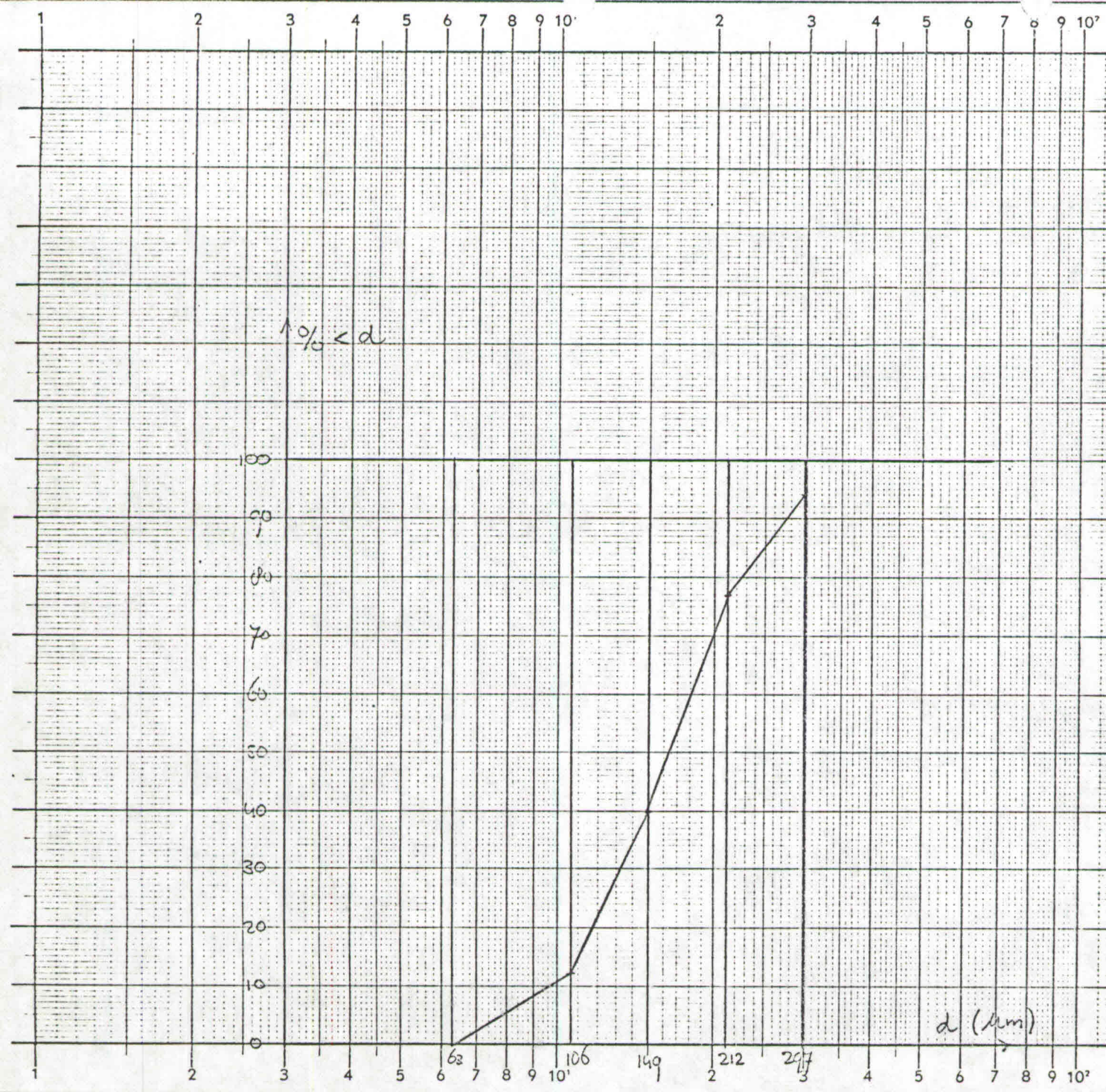








Monster: IV-1
 D₅₀: 154 μm
 Dichtheid mengsel: 1,025
 Sediment (totaal): 6,46 gram/liter
 Sediment > 63 μ: 6,12 gram/liter
 Sediment < 63 μ: 0,34 gram/liter



Monster: IV - 2

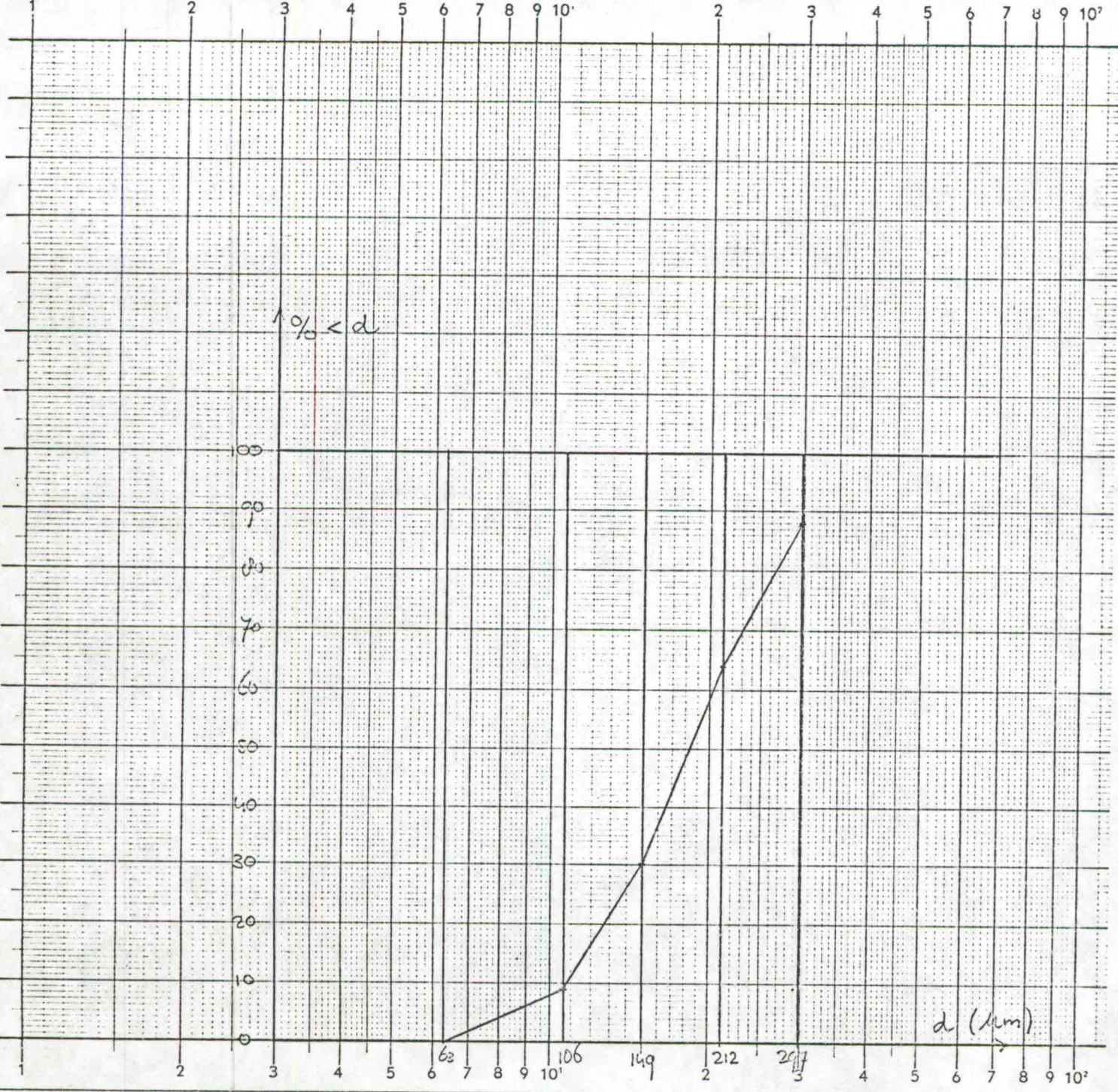
D_{50} : 164 μm

Dichtheid mengsel: 1,029

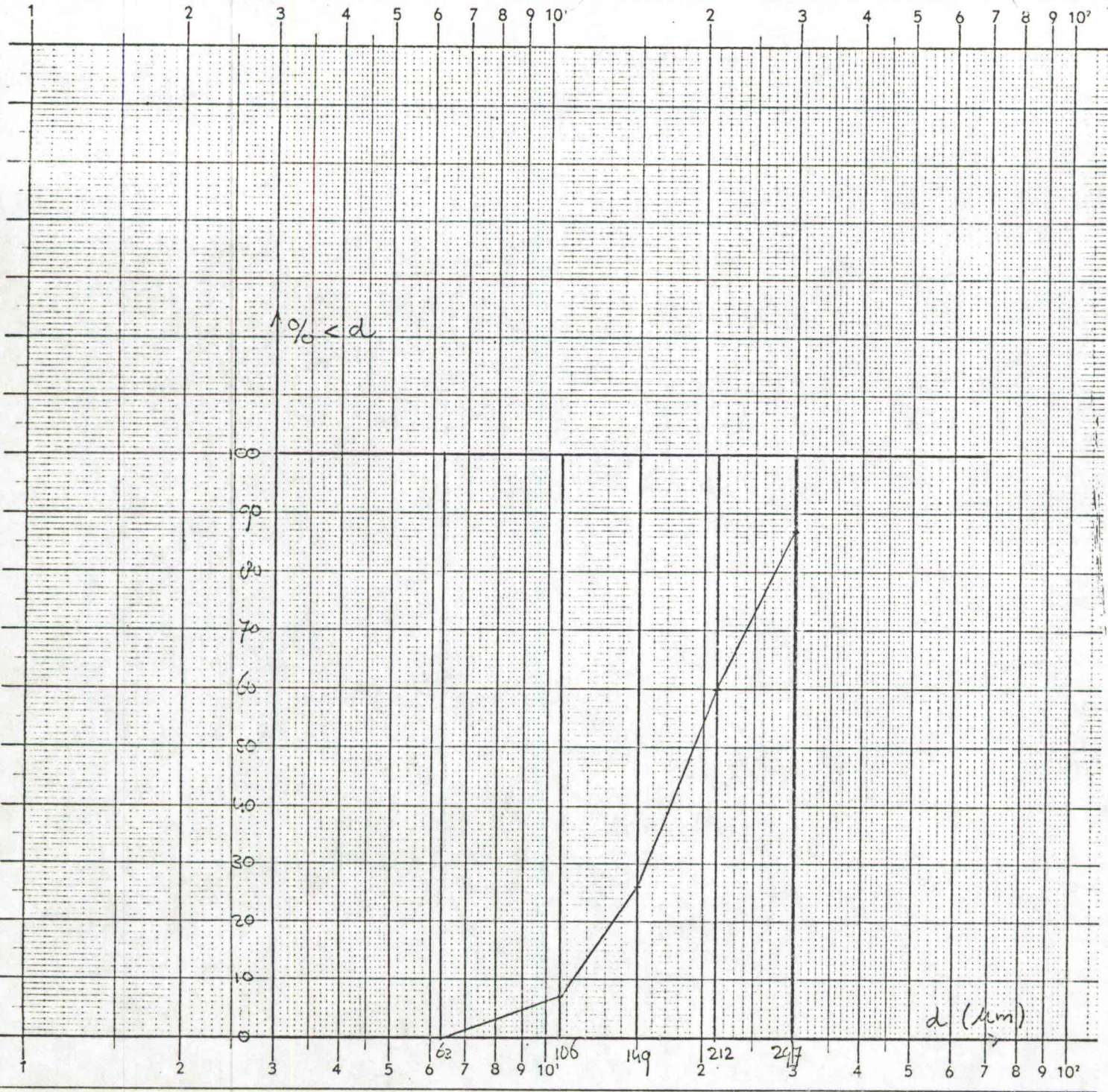
Sediment (totaal): 13,64 gram/liter

Sediment > 63 μ: 8,95 gram/liter

Sediment < 63 μ: 4,69 gram/liter



Monster: IV-3
 D₅₀: 103 μm
 Dichtheid mengsel: 1,028
 Sediment (totaal): 11,57 gram/liter
 Sediment > 63 μ: 12,62 gram/liter
 Sediment < 63 μ: -1,05 gram/liter



Monster: III-4

D₅₀: 191 μm

Dichtheid mengsel: 1,034

Sediment (totaal): 2,55 gram/liter

Sediment > 63 μ: 18,13 gram/liter

Sediment < 63 μ: 3,42 gram/liter

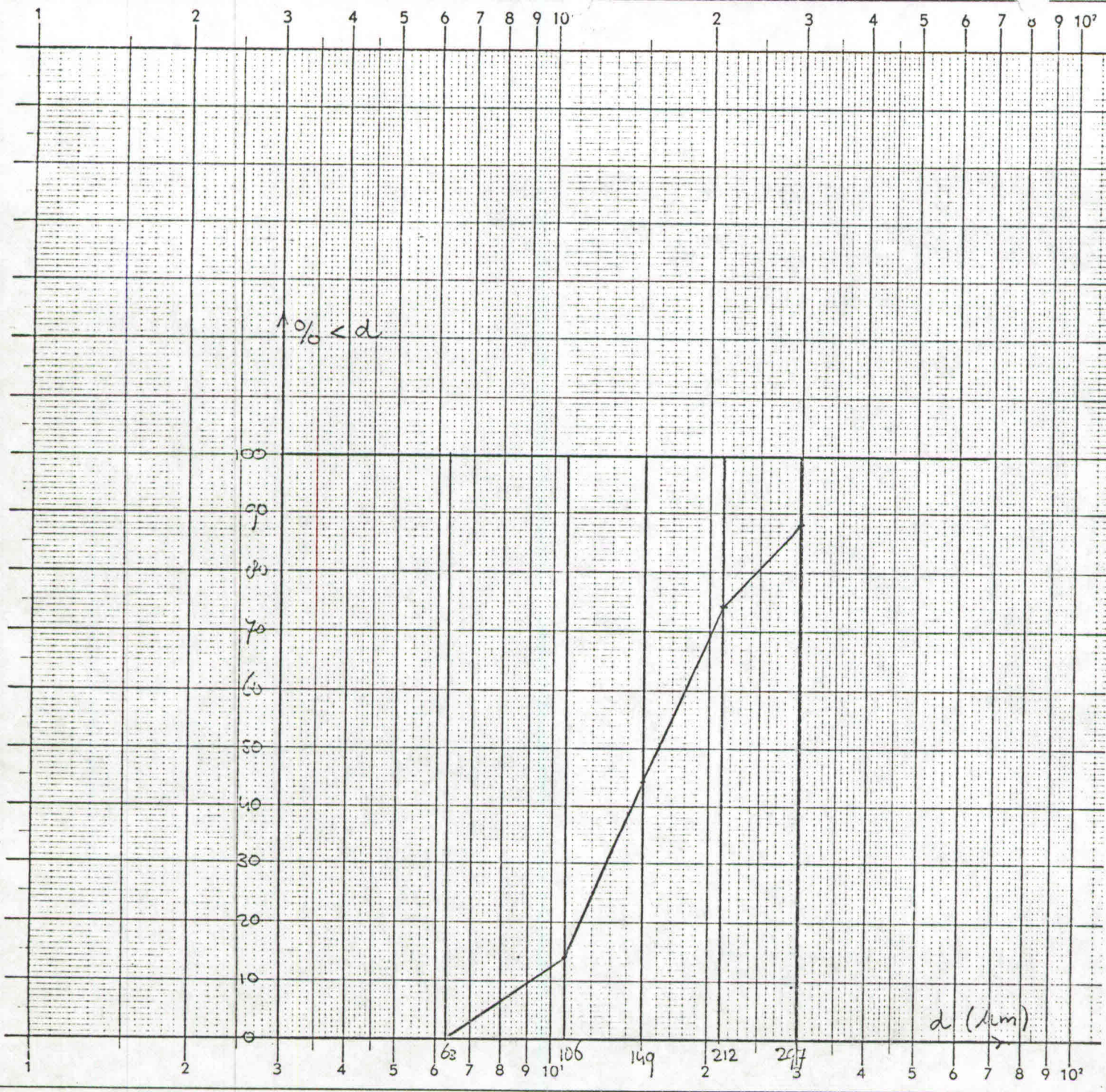
1% < d

100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0

d (µm)

63 106 149 212 250

Monster: IV-5
D₅₀: 145 µm
Dichtheid mengsel: 1,022
Sediment (totaal): 2,31 gram/liter
Sediment > 63µ: 3,01 gram/liter
Sediment < 63µ: 0,7 gram/liter



Monster: IV-6

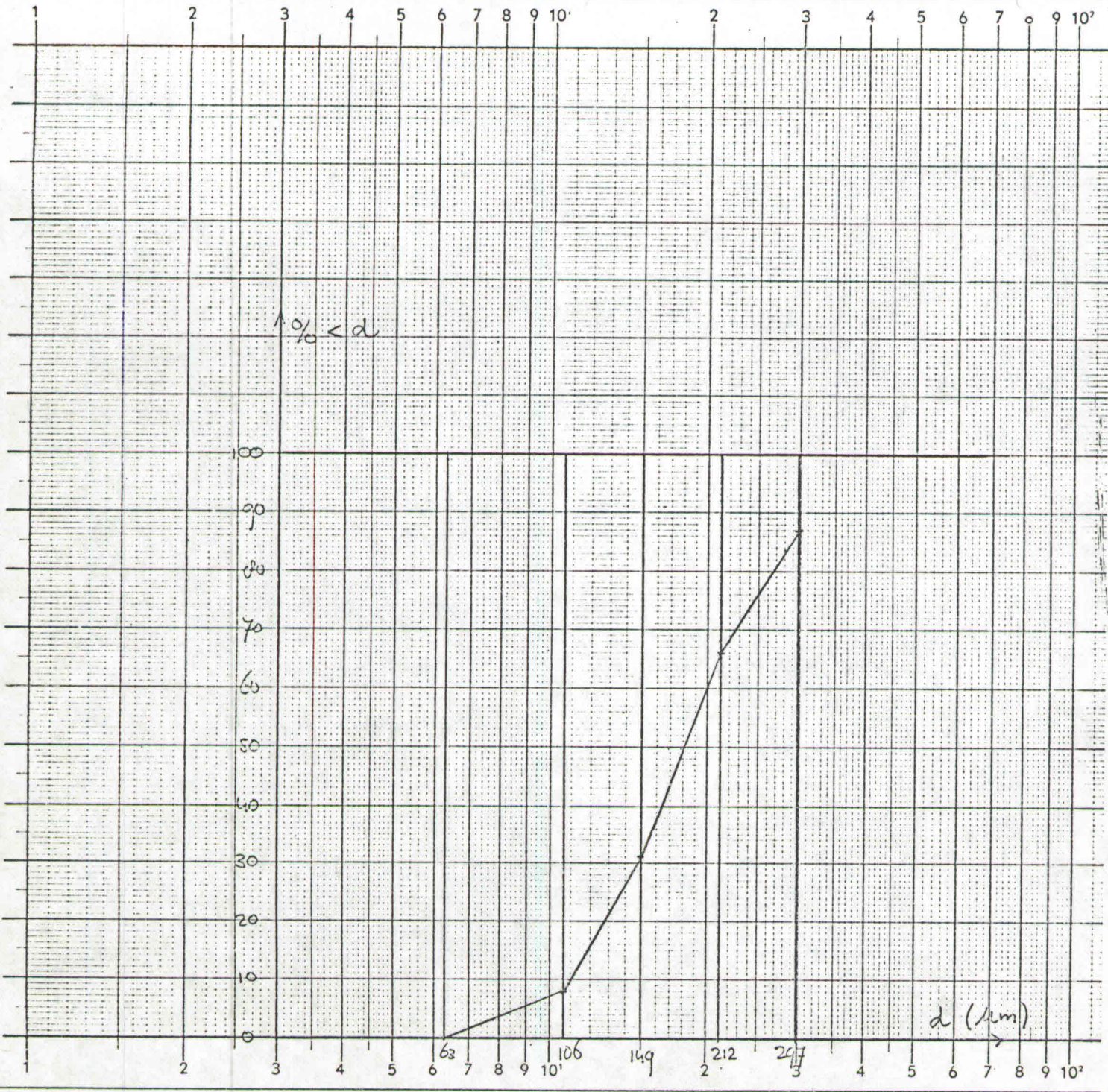
D₅₀: 160 μm

Dichtheid mengsel: 1,028

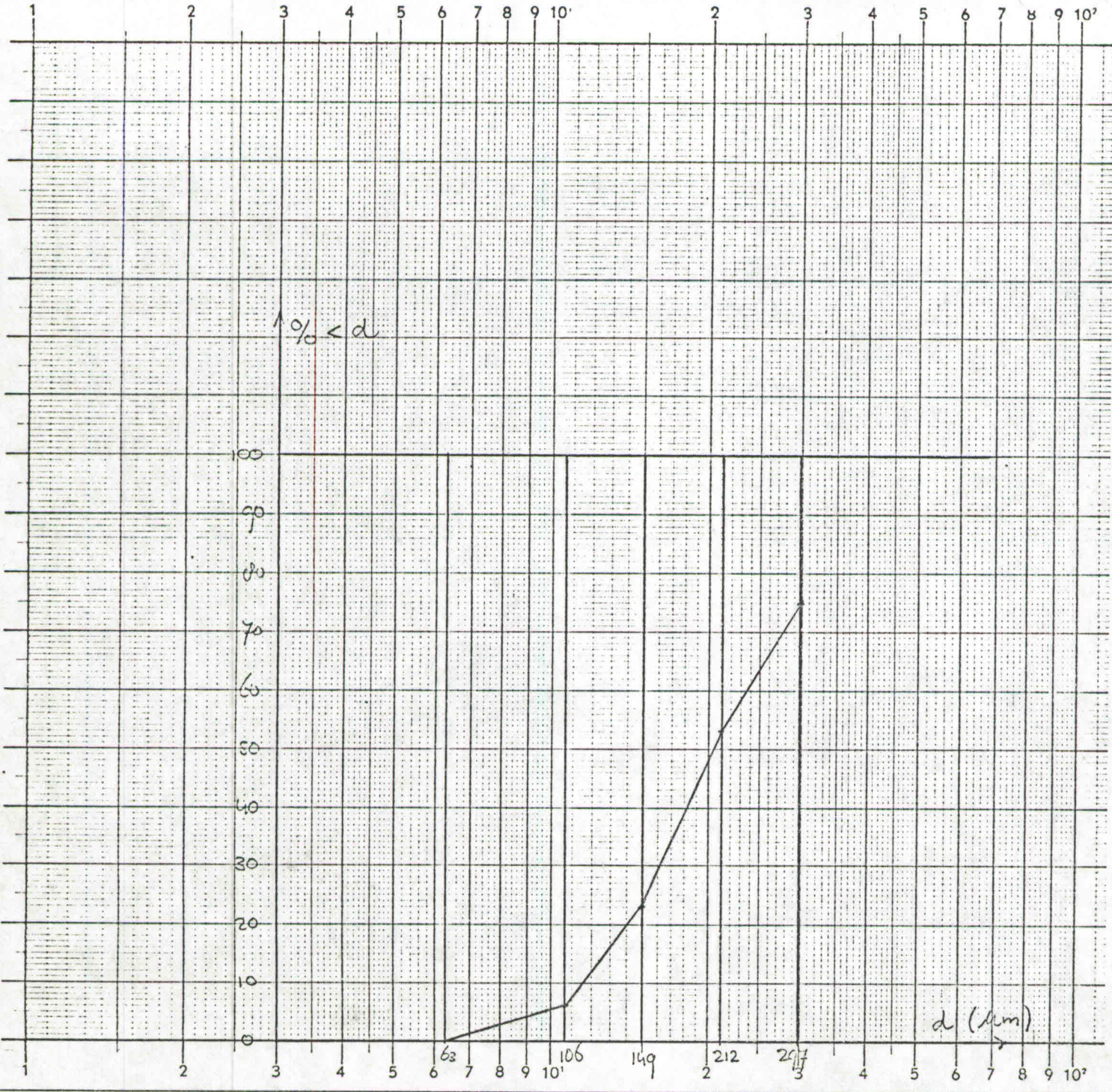
Sediment (totaal): 10,64 gram/liter

Sediment > 63 μ: 7,77 gram/liter

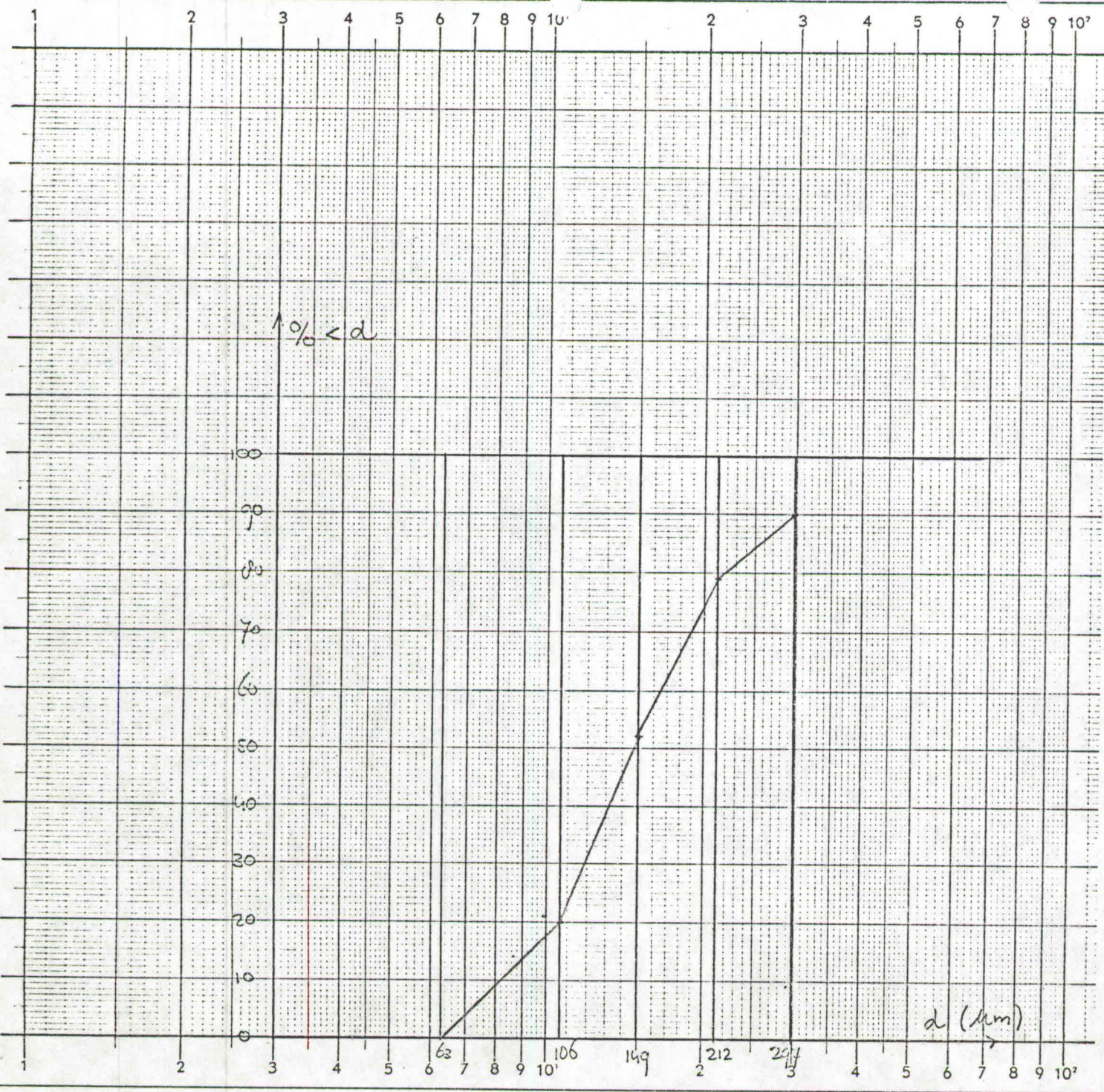
Sediment < 63 μ: 2,87 gram/liter



Monster: IV-7
 D₅₀: 180 μm
 Dichtheid mengsel: 1,029
 Sediment (totaal): 13,26 gram/liter
 Sediment > 63 μ: 14,31 gram/liter
 Sediment < 63 μ: -1,05 gram/liter



Monster: IV-9
 D₅₀: 204 μm
 Dichtheid mengsel: 1,036
 Sediment (totaal): 23,90 gram/liter
 Sediment > 63 μ: 22,30 gram/liter
 Sediment < 63 μ: 1,60 gram/liter



Monster: 10-9

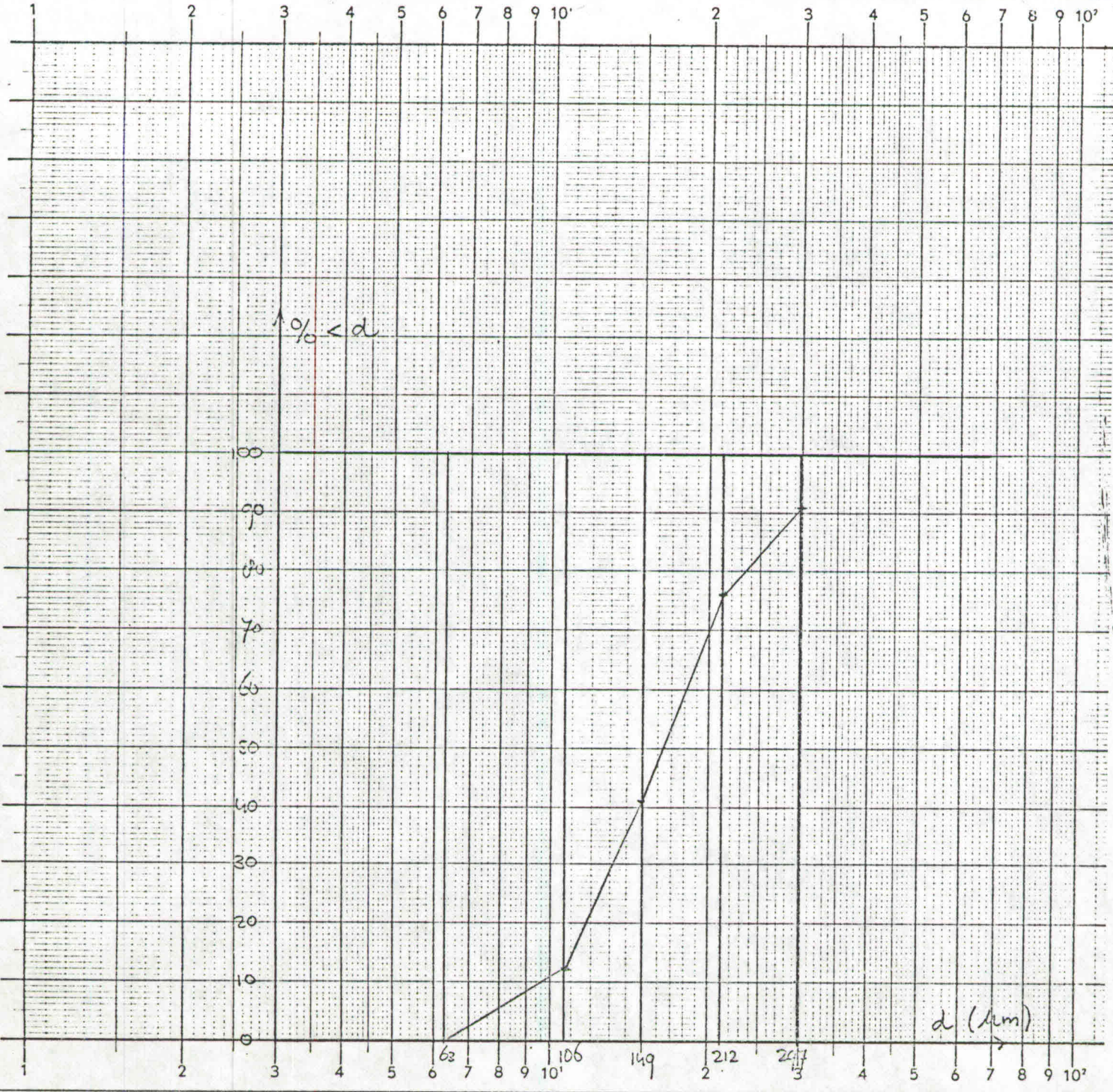
D₅₀: 147 μm

Dichtheid mengsel: 1,019

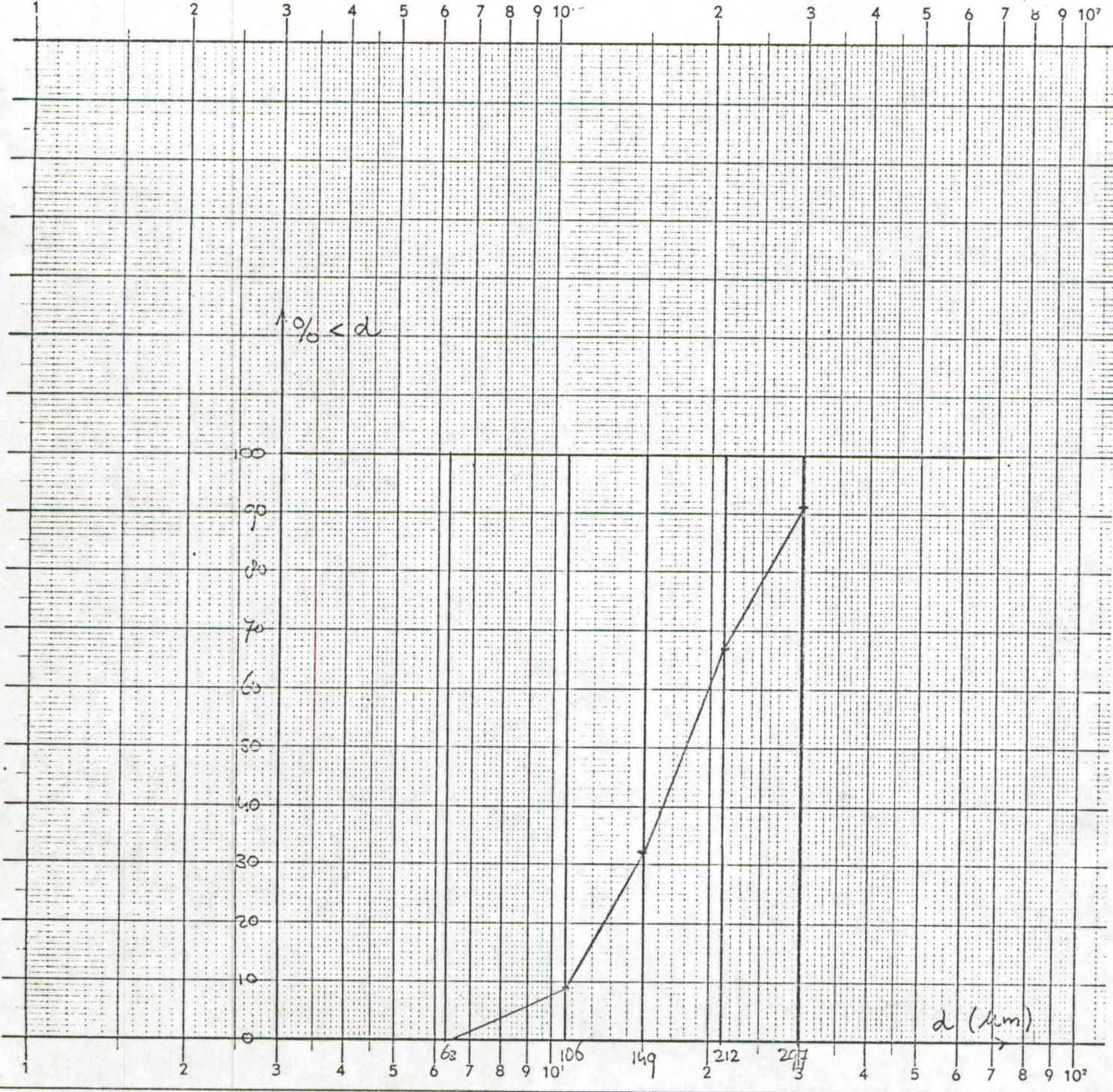
Sediment (totaal): _____ gram/liter

Sediment > 63 μ: 3,60 gram/liter

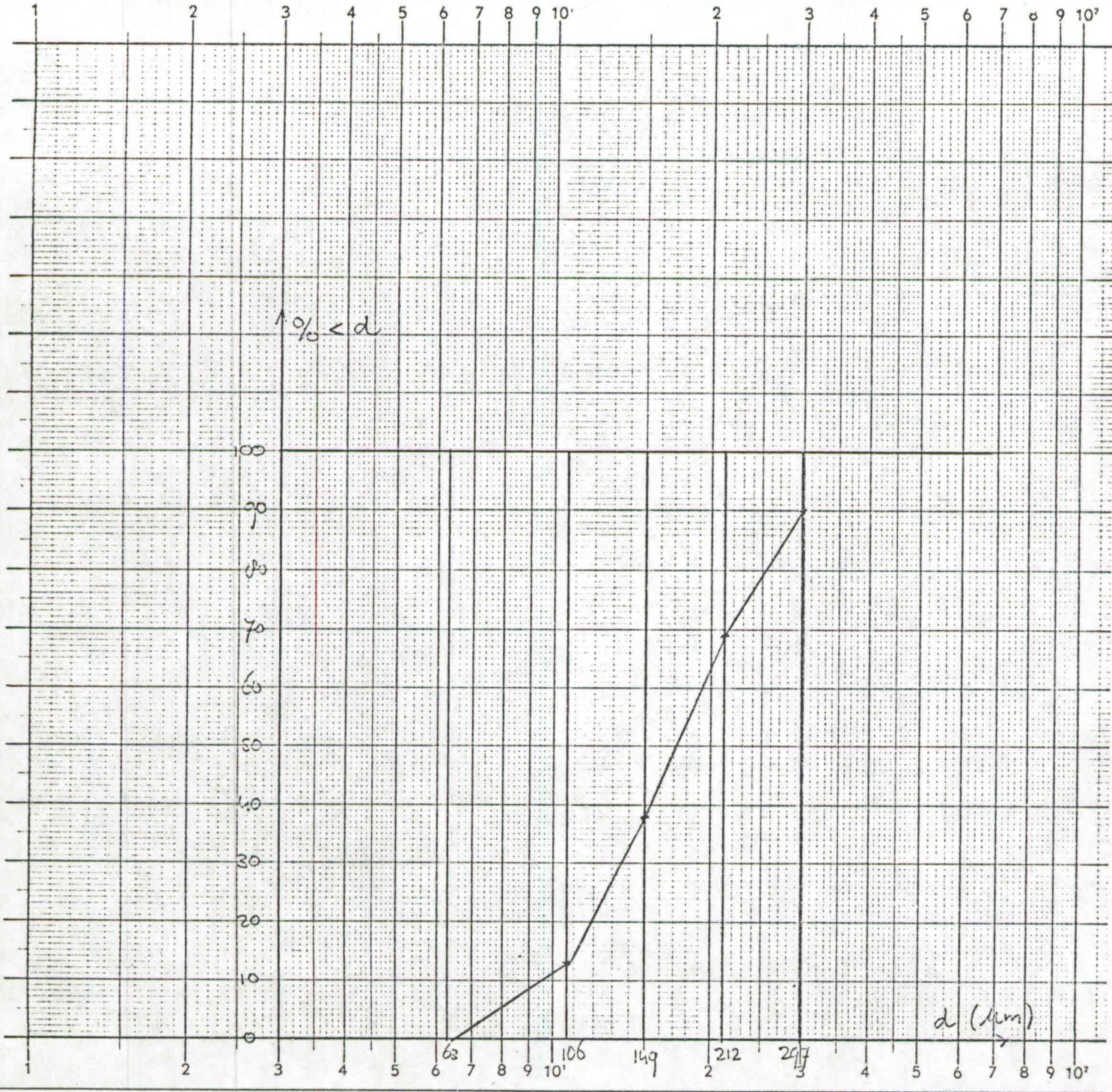
Sediment < 63 μ: _____ gram/liter



Monster: 10-60
 D₅₀: 154 μm
 Dichtheid mengsel: 1,020
 Sediment (totaal): 11,26 gram/liter
 Sediment > 63 μ: 6,97 gram/liter
 Sediment < 63 μ: 4,29 gram/liter



Monster: IV - 11
 D₅₀: 180 μm
 Dichtheid mengsel: 1,026
 Sediment (totaal): 8,83 gram/liter
 Sediment > 63 μ: 11,99 gram/liter
 Sediment < 63 μ: - gram/liter



Monster: IV-12

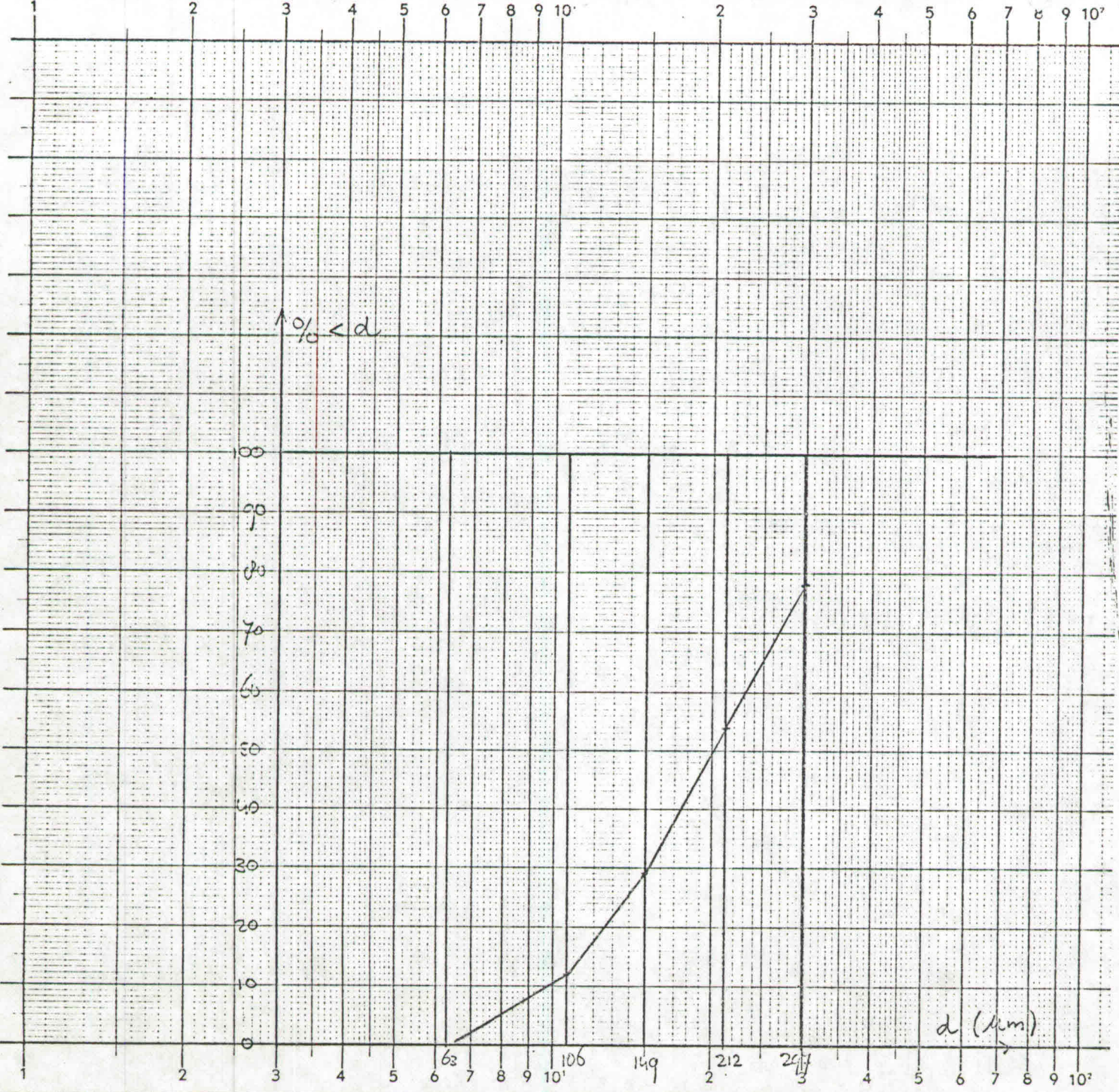
D_{50} : 172 μm

Dichtheid mengsel: 1,030

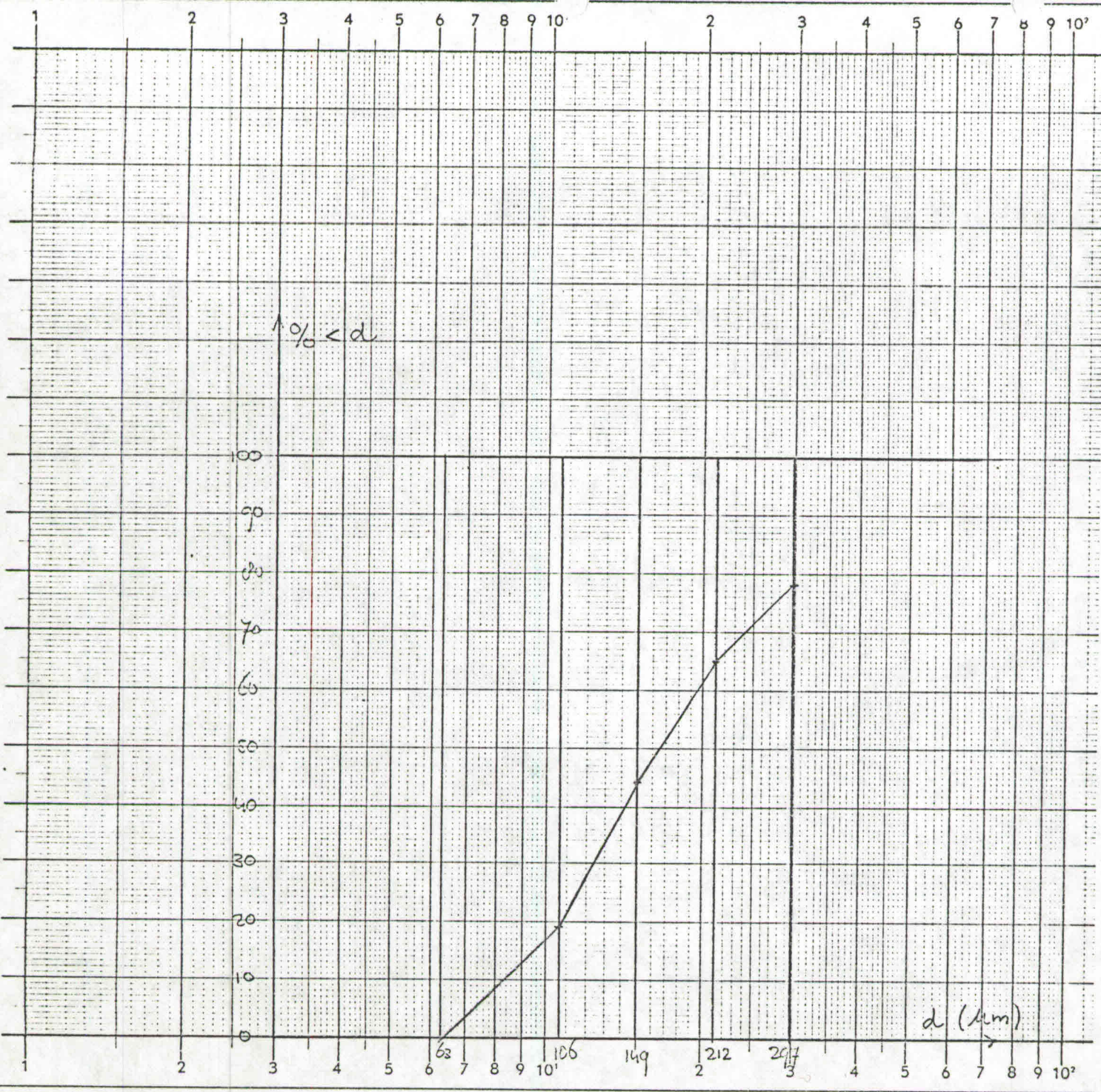
Sediment (totaal): 14,33 gram/liter

Sediment $> 63\mu$: 10,00 gram/liter

Sediment $< 63\mu$: 4,33 gram/liter



Monster: III-13
 D₅₀: 200 μm
 Dichtheid mengsel: 1,024
 Sediment (totaal): 4,29 gram/liter
 Sediment > 63 μ: 5,21 gram/liter
 Sediment < 63 μ: = gram/liter



Monster: W-14

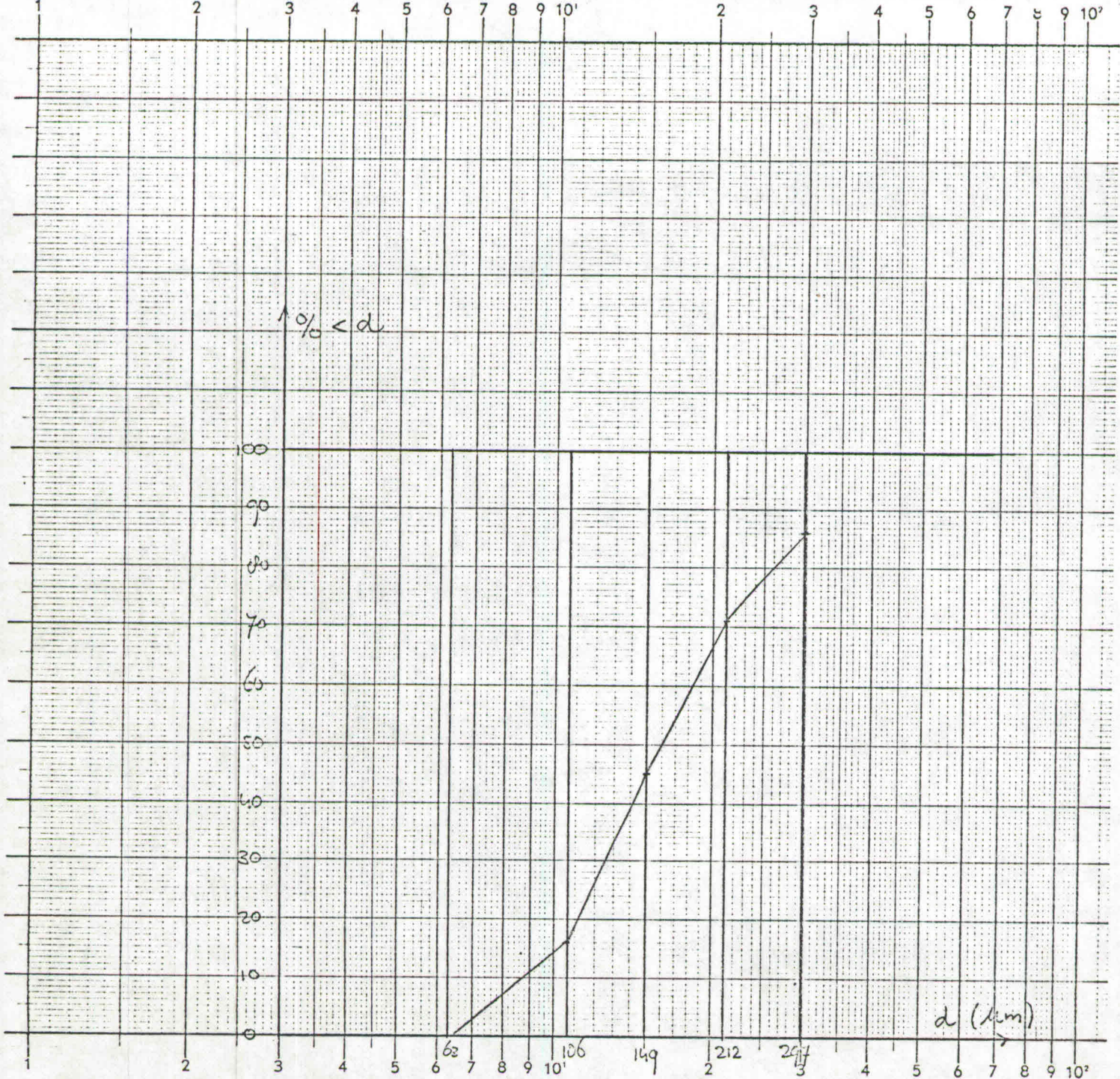
D₅₀: 165 μm

Dichtheid mengsel: 1,027

Sediment (totaal): 9,30 gram/liter

Sediment > 63 μ: 4,93 gram/liter

Sediment < 63 μ: 4,45 gram/liter



Monster: II - 15

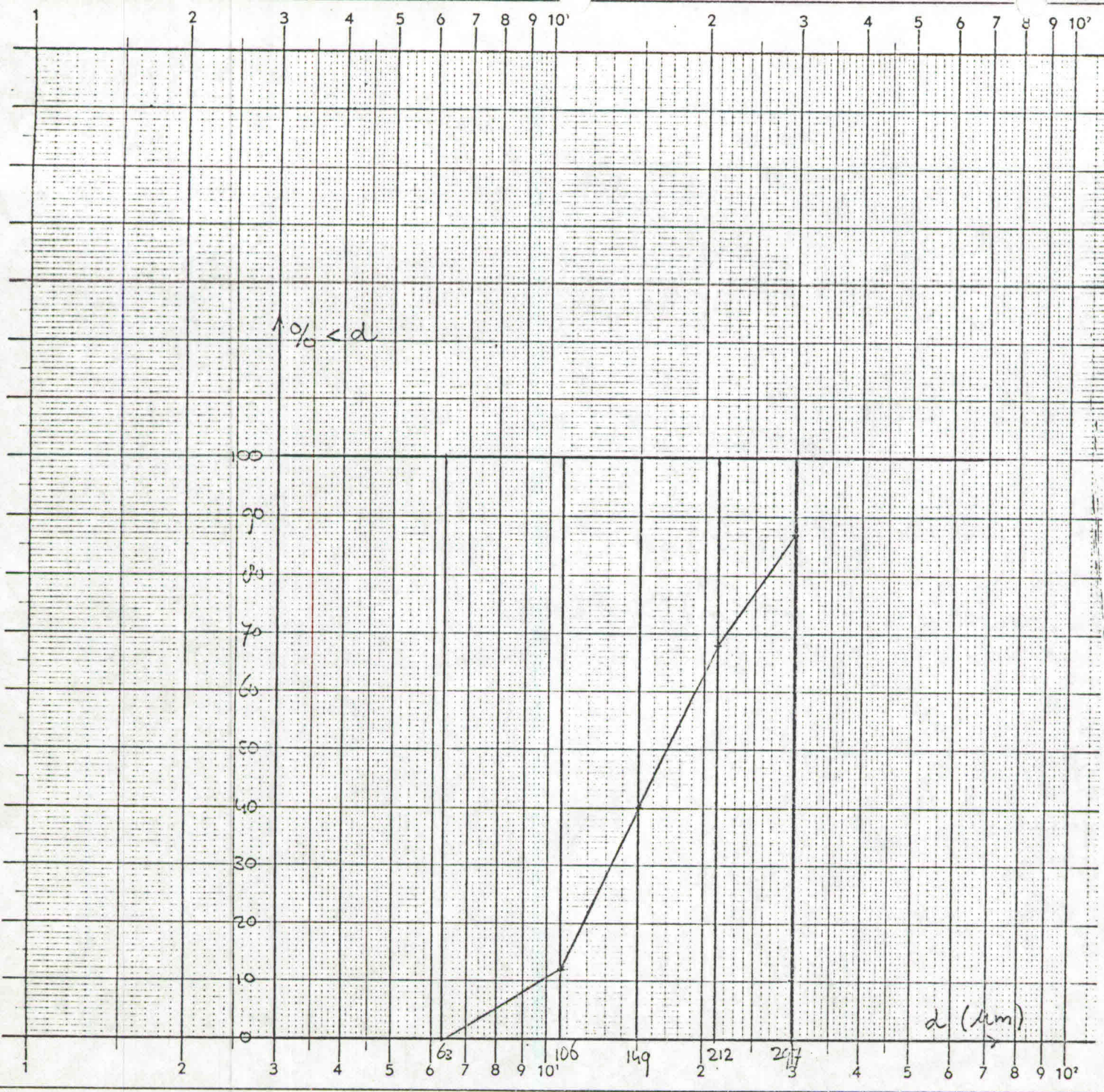
D₅₀: 160 μm

Dichtheid mengsel: 1,027

Sediment (totaal): 10,41 gram/liter

Sediment > 63 μ: 7,98 gram/liter

Sediment < 63 μ: 2,43 gram/liter



Monster: III-16
 D₅₀: 170 μm
 Dichtheid mengsel: 1,030
 Sediment (totaal): 13,88 gram/liter
 Sediment > 63 μ: 10,04 gram/liter
 Sediment < 63 μ: 3,84 gram/liter

