WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

RAPPORT No.: M 1007

VEILIGHEID PERSLEIDINGEN BIJ DIJKEN

AUTEUR: Waterloopkundig Laboratorium

DATUM: september 1969

CODE No.:

INHOUD

1.	Opdracht	blz. 1
2.	Onderzoek	blz. 2
	2.1 Omvang onderzoek	blz. 2
	2.2 Berekening uitstromende debiet door leidingbreuk	blz. 2
	2.3 Ontgronding door leidingbreuk	blz. 16
	2.4 Praktijkvoorbeelden	blz. 20
3.	Voorstel verwerking resultaten in richtlijnen	blz. 23
4.	Conclusies	blz. 24

Figuren en fotobladen

1^A Toestand vóór leidingbreuk en in permanentie na leidingbreuk - gebruikte grootheden.

1^B Toestand vóór leidingbreuk en in permanentie na leidingbreuk - gebruikte grootheden.

1^C Toestand vóór leidingbreuk en direct na leidingbreuk - gebruikte grootheden.

1^D Toestand vóór leidingbreuk en direct na leidingbreuk - gebruikte grootheden.

1^E Pompkarakteristiek voor $n_s = 10$.

1^F Pompkarakteristiek voor $n_s = 250$.

2 t/m 6 Permanentie na breuk. Q_{uit}/Q_o als functie van $^1/L$ voor: gat in leiding $^d/D = 0,3$ en $V_o^2/2gH_o$: 10^{-4} - 10^{-3} - 10^{-2} - 10^{-1} - 0,99.

7 t/m 11 Permanentie na breuk. Q_{uit}/Q_o als functie van $^1/L$ voor: gat in leiding $^d/D = 0,6$ en $V_o^2/2gH_o$: 10^{-4} - 10^{-3} - 10^{-2} - 10^{-1} - 0,99.

12 t/m 16 Permanentie na breuk. Q_{uit}/Q_o als functie van $^1/L$ voor: gat in leiding $^d/D = 1,1$ en $V_o^2/2gH_o$: 10^{-4} - 10^{-3} - 10^{-2} - 10^{-1} - 0,99.

17 t/m 21 Permanentie na breuk. Q_{uit}/Q_o als functie van $^1/L$ voor: afschuiving leiding en $V_o^2/2gH_o$: 10^{-4} - 10^{-3} - 10^{-2} - 10^{-1} - 0,99.

22 t/m 26 Permanentie na breuk. Q_1/Q_o als functie van $^1/L$ voor: afschuiving leiding en $V_o^2/2gH_o$: 10^{-4} - 10^{-3} - 10^{-2} - 10^{-1} - 0,99.

27 t/m 30 Permanentie na breuk. Maxima Q_{uit}/Q_o als functie van $V_o^2/2gH_o$ en $^d/D$: 0,3 - 0,6 - 1,1 en afschuiving.

31 t/m 32 Direct na breuk. Q_{uit}/Q_o als funcite van $^1/L$ voor: gat in leiding $^d/D = 0,3$ en $V_o^2/2gH_o$: 10^{-4} - 10^{-3}, $0,01 \leq \frac{c}{g} V_o/H_o \leq 100$.

33 t/m 35 Direct na breuk. Q_{uit}/Q_o als functie van $^1/L$ voor: gat in leiding $^d/D = 0,6$ en $V_o^2/2gH_o$: 10^{-4} - 10^{-3} - 10^{-2},

$0{,}01 \leq \frac{c}{g} V_o/H_o \leq 100.$

36 t/m 38 <u>Direct na breuk.</u> Q_{uit}/Q_o als functie van $^1/L$ voor: gat in leiding $^d/D = 1{,}1$ en $V_o^2/2gH_o$: $10^{-4} - 10^{-3} - 10^{-2}$,

$0{,}01 \leq \frac{c}{g} V_o/H_o \leq 100.$

39 t/m 43 <u>Direct na breuk.</u> Q_1/Q_o als functie van $^1/L$ voor: afschuiving leiding en $V_o^2/2gH_o$: $10^{-4} - 10^{-3} - 10^{-2}$,

$0{,}01 \leq \frac{c}{g} V_o/H_o \leq 100.$

44 t/m 45 <u>Direct na breuk.</u> Q_2/Q_o als functie van $^1/L$ voor: afschuiving leiding en $V_o^2/2gH_o$: $10^{-4} - 10^{-3}$, $0{,}01 \leq \frac{c}{g} V_o/H_o \leq 100$

46 Verloop ontgrondingsafmetingen met de tijd.

47 Invloed snelheid en dekking op de ontgrondingsbreedte.

48 Invloed snelheid en dekking op de ontgrondingslengte.

49 Invloed snelheid en gatdiameter op de ontgrondingsbreedte.

50 Invloed snelheid en gatdiameter op de ontgrondingslengte.

51 Invloed buisdiameter op de ontgrondingsbreedte.

52 Resultaten buitenmeting

53 Ontgrondingsbreedte.

54 Ontgrondingslengte.

4 fotobladen

1. OPDRACHT

In het kader van de werkzaamheden van de Technische Adviescommissie voor de waterkeringen werd in de brief d.d. 19 juli 1968 door de Rijkswaterstaat - Directie Waterhuishouding en Waterbeweging aan het Waterloopkundig Laboratorium opdracht gegeven een onderzoek in te stellen naar ontgrondingen die zullen ontstaan als gevolg van breuk in een persleiding. Met de resultaten van dit onderzoek en adviezen over de stabiliteit van dijklichamen, verstrekt door het Laboratorium van Grondmechanica, zullen door de Adviescommissie richtlijnen voor het leggen van leidingen nabij waterkeringen worden opgesteld.

2. ONDERZOEK

2.1. Omvang onderzoek

Het onderzoek is in twee gedeelten gesplitst:

1°. Berekening van het uit een leidingbreuk stromende debiet. Berekeningen werden uitgevoerd voor een eenvoudig leidingsysteem bestaande uit een pomp, een horizontale leiding en een reservoir met constant peil. Meer gecompliceerde leidingsystemen zullen benaderd moeten worden met dit leidingschema of afzonderlijk beschouwd moeten worden.

2°. Modelonderzoek om de ontgrondingen vast te stellen die veroorzaakt worden door het uit een leiding breuk stromende debiet. Een uitgebreid aantal schaalproeven met leidingen ∅ 4,6 cm en ∅ 9,3 cm en enige controle metingen aan een praktijkleiding ∅ 60 cm werden uitgevoerd.

Met behulp van de resultaten van 1° en 2° werden de afmetingen van de ontgrondingskuilen geschat zoals die verwacht worden bij breuk in enkele bestaande transportleidingen. Tot slot wordt een suggestie gedaan in welke vorm de resultaten van de berekeningen en het modelonderzoek in een richtlijn kunnen worden opgenomen. Het onderzoek werd uitgevoerd en gerapporteerd door ir. H.N.C. Breusers en ir. J. Wijdieks.

2.2. Berekening uitstromend debiet door leidingbreuk

2.2.1. Algemeen

Direct na leidingbreuk zal een waterslagverschijnsel optreden waardoor gedurende de eerste tijd (max. enige minuten) een fluctuerend debiet uit de breuk zal stromen. Na enige tijd zal zich een permanente stroming instellen. Beschouwd zijn de debieten die direct na breuk (eerste aanzet) zullen optreden en de debieten die in de permanente stromingstoestand zullen optreden. Hierbij wordt opgemerkt dat het niet uitgesloten is dat elders in de leiding, in het bijzonder op hoge punten van het leidingtracé, vacuümvorming kan ontstaan als gevolg van optredende onderdrukgolven. Indien in dergelijke punten het vacuüm weer dichtloopt kunnen hoge drukken optreden die op hun beurt

weer nieuwe leidingbreuken tot gevolg kunnen hebben. Dit verschijnsel is niet in de berekeningen betrokken.

Wegens het grote aantal variabelen alsmede de grote spreiding hierin (diameter leiding 0 - 2 m, druk 0 - 100 atm. voor $D > 0,5$ m à 1,0 m, druk 0 - 150 atm. voor $D < 0,5$ m à 1,0 m, stroomsnelheden 0 - 10 m/sec voor alle leidingen, stroomsnelheid 3 m/sec voor meeste leidingen met $D > 0,5$ m à 1,0 m) zijn de berekeningen dimensieloos opgezet en de resultaten in dimensieloze grafiekvorm gegeven.

Voor een aantal gevallen kon aangetoond worden dat de permanente stromingstoestand maatgevend is. Waar dit niet zonder meer duidelijk was is voor een enkel geval het uittredende debiet als functie van de tijd berekend. Op grond hiervan en van de resultaten van de ontgrondingsproeven mag met redelijke waarschijnlijkheid geconcludeerd worden dat de permanente stromingstoestand bepalend is voor de grootte van de ontgrondingskuil.

De in de figuren 2 t/m 26 en 31 t/m 45 aangegeven lijnen gelden slechts in de rekenpunten. De lijnen zijn ruwe schattingen ten einde het overzicht te bevorderen.

2.2.2. Debiet bij permanente stromingstoestand

Het bij leidingbreuk uittredende debiet werd berekend voor een schema pomp-leiding-reservoir als aangegeven in fig. 1A - toestand vóór leidingbreuk. Hierbij is aangenomen dat het zuigpeil van de pomp overeenkomt met de hoogteligging van de leiding en dat de betreffende pomp vóór dat breuk optreedt in of zeer nabij zijn maximum rendementspunt werkt. Bij leidingbreuk zal de druk bij de pomp dalen en dat zal daardoor, afgezien van optreden van cavitatie in de pomp, meer debiet gaan leveren. De vorm van de pompkarakteristiek is hierbij van belang. In de permanente stromingstoestand na leidingbreuk zal het werkpunt van de pomp moeten blijven liggen op de pompkarakteristiek $\frac{H}{H_o} = f\left(\frac{Q}{Q_o}\right)$ (zie fig. 1A en 1B).

De vorm van de pompkarakteristiek hangt af van het toegepaste pomptype dat in het algemeen gekenmerkt is door het specifiektoerental $n_s = \frac{n\sqrt{Q}}{H^{3/4}}$ (n = toerental pomp in toeren/min, Q_o = pompdebiet in maximum rendementspunt in m^3/sec, H_o = opvoerhoogte in maximum rendementspunt in m vloeistofkolom). Beschouwd werden een uitgesproken centrifugaal pomp met $n_s = 10$ (zie figuur 1E) en een uitgesproken axiaal

pomp $n_s = 250$ (zie fig. 1F). Aangenomen werd dat de pomp blijft draaien en de energiehoogte ter plaatse van de breuk bepalend is voor het uittredende debiet. Uit de ontgrondingsproeven volgde dat de contractiecoëfficiënt voor $\frac{d}{D} = 0,3$ en $\frac{d}{D} = 0,6$ gesteld kan worden op $\mu \approx 0,65$, voor $\frac{d}{D} = 1,1$ op $\mu \approx 0,80$, en voor afschuining op $\mu = 1$. Het uittreeverlies bij stroming van de leiding naar het reservoir is op $1 \times \frac{v^2}{2g}$ gesteld. Het intreeverlies bij stroming uit het reservoir in de leiding is verwaarloosd..

De twee mogelijke stromingstoestanden die optreden in de permanentie na breuk zijn aangegeven in de figuren 1A en 1B. Het uittredende debiet wordt bepaald door de variabelen:

Q_o, L, D, H_o, H_W, n_s (kenmerken leiding en stromingstoestand) l, d of afschuining (kenmerken van de breuk).

Voor het geval een gat met diameter d in de leiding ontstaat kunnen met de Wet van Bernoulli en de continuïteitsvergelijking de volgende vergelijkingen opgesteld worden:

$$Q_1 - Q_2 = Q_{uit}$$

$$\frac{H_B - H_C}{H_W} = -\frac{Q_2^{\,2}}{Q_o^{\,2}}\left(1 - \frac{l}{L}\right) \text{ indien } Q_2 < 0$$

$$\frac{H_B - H_C}{H_W} = \frac{Q_2^{\,2}}{Q_o^{\,2}}\left(1 - \frac{l}{L}\right) + \frac{v_2^{\,2}}{2g} \text{ indien } Q_2 > 0$$

$$\frac{H_A - H_B}{H_W} = \left(\frac{Q_1}{Q_o}\right)^2 \cdot \frac{l}{L}$$

$$H_B = \frac{v_{uit}^{\,2}}{2g} = \frac{Q_{uit}^{\,2}}{\left(\frac{1}{4}\pi\,\hat{d}^2\right)^2\,2g} = \frac{Q_{uit}^{\,2}}{\left(\mu\,\frac{1}{4}\pi\,d^2\right)^2\,2g}$$

$$\frac{H_A}{H_o} = f\left(\frac{Q_1}{Q_o}\right)$$ waarin f gegeven is voor $n_s = 10$ en $n_s = 250$.

$$H_o - H_W = H_C + \frac{V_o^2}{2g}$$

Of dimensieloos geschreven:

$$\frac{Q_1}{Q_o} - \frac{Q_2}{Q_o} = \frac{Q_{uit}}{Q_o}$$

$$\frac{H_B}{H_W} - \frac{H_C}{H_W} = -\left(\frac{Q_2}{Q_o}\right)^2 \cdot \left(1 - \frac{1}{L}\right) \quad \text{indien } Q_2 < 0$$

$$\frac{H_B}{H_W} - \frac{H_C}{H_W} = +\left(\frac{Q_2}{Q_o}\right)^2 \cdot \left(1 - \frac{1}{L}\right) + \frac{Q_2}{Q_o} \cdot \frac{H_o}{H_W} \cdot \frac{V_o^2}{2gH_o} \quad \text{Indien } Q_2 > 0$$

$$\frac{H_A}{H_W} - \frac{H_B}{H_W} = \left(\frac{Q_1}{Q_o}\right)^2 \cdot \frac{1}{L}$$

$$\frac{H_B}{H_W} = \frac{Q_{uit}^2 \qquad Q_o^2}{\left(\mu \frac{1}{4} \pi d^2\right)^2 2g \, Q_o^2} \cdot \frac{1}{H_W} = \left(\frac{Q_{uit}}{Q_o}\right)^2 \cdot \left(\frac{D}{\sqrt{\mu} \cdot d}\right)^4 \cdot \frac{H_o}{H_W} \cdot \frac{V_o^2}{2gH_o}$$

$$\frac{H_o}{H_o} \cdot \frac{H_A}{H_W} = f\left(\frac{Q_1}{Q_o}\right)$$

$$\frac{H_o}{H_W} - 1 = \frac{H_C}{H_W} + \frac{H_o}{H_W} \cdot \frac{V_o^2}{2gH_o}$$

Dit zijn 6 vergelijkingen met 10 "onbekenden":

$$\frac{Q_1}{Q_o}, \frac{Q_2}{Q_o}, \frac{Q_{uit}}{Q_o}, \frac{H_B}{H_W}, \frac{H_C}{H_W}, \frac{H_A}{H_W}, \frac{H_o}{H_W}, \frac{1}{L}, \frac{d}{D}, \frac{V_o^2}{2gH_o}$$

Indien hiervan 4 worden gegeven zijn de overige 6 met behulp van de 6 vergelijkingen op te lossen. Op deze wijze kan $\frac{Q_{uit}}{Q_o}$ bepaald worden als functie van $\frac{1}{L}$, $\frac{d}{D}$, $\frac{V_o^2}{2gH_o}$ en $\frac{H_W}{H_o}$:

$$\frac{Q_{uit}}{Q_o} = f\left(\frac{1}{L}, \frac{d}{D}, \frac{V_o^2}{2gH_o}, \frac{H_W}{H_o}\right)$$

Oplossen van de vergelijkingen werd uitgevoerd met een electronische rekenmachine voor de waarden:

$\frac{l}{L}$: 0 - 0,1 - 0,2 - 0,3 - 0,4 - 0,5 - 0,6 - 0,7 - 0,8 - 0,9 - 1,0

$\frac{d}{D}$: $\frac{d}{D} = 0,3 \quad \mu = 0,65 \quad \frac{\hat{d}}{D} = 0,25$

$\frac{d}{D} = 0,6 \quad \mu = 0,65 \quad \frac{\hat{d}}{D} = 0,50$

$\frac{d}{D} = 1,1 \quad \mu = 0,80 \quad \frac{\hat{d}}{D} = 1,00$

$\frac{V_o^2}{2gH_o}$: 10^{-4} - 10^{-3} - 10^{-2} - 10^{-1} - 0,99

$\frac{H_W}{H_o}$: 0,01 - 0,1 - 0,2 - 0,4 - 0,6 - 0,8 - 0,99

voor $n_s = 10$ en $n_s = 250$

De betekenis van de dimensieloze coëfficiënten is:

$\frac{d}{D}$ geeft de gatgrootte aan en $\frac{l}{L}$ de plaats van het gat.

$\frac{V_o^2}{2gH_o}$ kan beschouwd worden als een maat voor het druktype van de leiding: $\frac{V_o^2}{2gH_o}$ klein betekent een leiding met relatief hoge druk,

$\frac{V_o^2}{2gH_o}$ groot betekent een leiding met relatief lage druk.

$\frac{H_W}{H_o}$ geeft de mate van wrijvingsverlies in de leiding aan: $\frac{H_W}{H_o} = 0$ betekent een wrijvingsloze leiding, waarin alle opvoerhoogte bestaat uit statische opvoerhoogte, $\frac{H_W}{H_o} = 1$ betekent dat alle verliezen in het leidingstelsel wrijvingsverliezen zijn. Dit laatste komt in Nederland vrij veel voor bij lange rioolwaterpersleidingen.

De resultaten van de berekeningen zijn samengevat in de figuren 2 t/m 16.

<u>Voor het geval afschuiving</u> van de leiding optreedt werden op analoge wijze de dimensieloze vergelijkingen afgeleid, waaruit het uittredende debiet bepaald kan worden (zie ook fig. 1^B):

$$\frac{H_A}{H_W} - \frac{H_{BL}}{H_W} = \left(\frac{Q_1}{Q_o}\right)^2 \cdot \frac{1}{L}$$

$$\frac{H_{BL}}{H_W} = \left(\frac{Q_1}{Q_o}\right)^2 \cdot \frac{H_o}{H_W} \cdot \frac{V_o^2}{2gH_o}$$

$$\frac{H_A}{H_W} \cdot \frac{H_W}{H_o} = f\left(\frac{Q_1}{Q_o}\right),$$ waarin f gegeven is voor $n_s = 10$ en $n_s = 250$

$$\frac{H_C}{H_W} - \frac{H_{BR}}{H_W} = \left(\frac{Q_2}{Q_o}\right)^2 \cdot \left(1 - \frac{1}{L}\right)$$

$$\frac{H_{BR}}{H_W} = \left(\frac{Q_2}{Q_o}\right)^2 \cdot \left(\frac{H_o}{H_W}\right) \cdot \frac{V_o^2}{2gH_o}$$

$$\frac{Q_{uit}}{Q_o} = \frac{Q_1}{Q_o} + \frac{Q_2}{Q_o}$$

$$\frac{H_o}{H_W} - 1 = \frac{H_C}{H_W} + \frac{H_o}{H_W} \cdot \frac{V_o^2}{2gH_o}$$

Hieruit is $\frac{Q_{uit}}{Q_o}$ als functie van $\frac{1}{L}$, $\frac{d}{D}$, $\frac{H_o}{H_W}$ en $\frac{V_o^2}{2gH_o}$ te bepalen:

Voor dezelfde waarden van: $\frac{d}{D}$, $\frac{1}{L}$, $\frac{H_o}{H_W}$ en $\frac{V_o^2}{2gH_o}$ als bij het geval "gat in leiding" werd $\frac{Q_{uit}}{Q_o}$ berekend.

De resultaten zijn aangegeven in de figuren 17 t/m 21.

$\frac{Q_{uit}}{Q_o}$ in deze figuren stelt voor de <u>som</u> van de debieten uit beide breukeinden. De verdeling van de debieten $\left(\frac{Q_1}{Q_{uit}}\right)$ is aangegeven in de figuren 22 t/m 26

De maximale debieten uit de figuren 2 t/m 21 zijn samengevat in de figuren 27 t/m 30. Er blijkt dat in veel gevallen het maximum uittredend debiet nabij het benedenstroomse leidingeinde optreedt en de grootte voornamelijk beïnvloed wordt door de reservoirdrukhoogte H_C. De bijdrage van de pompen aan het uittredende debiet is

dan meestal gering en zal, nog afgezien van cavitatie, ten hoogste ca 2 Q_o kunnen bedragen (zie pomp karakteristieken fig. 1^E en fig. 1^F).

2.2.3. Debiet direct na breuk

Het direct na leidingbreuk uitstromende debiet werd berekend volgens het schema als aangegeven in de figuren 1^C en 1^D. Beschouwd zijn weer breuk met een gat in de leiding en afschuiving van de leiding. Evenals bij de permanente stromingstoestand is aangenomen dat het energieniveau(H_B -ΔH) t.p.v. B direct na het ontstaan van de leidingbreuk bepalend is voor het uittredende debiet. Het aldus berekende debiet treedt slechts korte tijd op, omdat ten gevolge van de wrijving in de leiding de onderdrukgolven, die ontstaan zijn t.g.v. de leidingbreuk reflecteren en op deze wijze het uittredende debiet weer beïnvloeden.

Voor een gat in de leiding levert toepassing van de Wet van Bernoulle; de continuïteitsvergelijking en de formule van JOUKOWSKI* voor drukgolven* de vergelijkingen:

$$\Delta H = \frac{V_o^2}{2g} + \frac{c}{g}\,(V_1 - V_o) - \frac{V_1^2}{2g}$$

$$\Delta H = \frac{V_o^2}{2g} + \frac{c}{g}\,(V_o - V_2) - \frac{V_2^2}{2g}$$

$$\frac{V_{uit}^2}{2g} = H_B - \Delta H$$

$$Q_{uit} = Q_1 - Q_2$$

$$H_B = H_C + \frac{V_o^2}{2g} + (1 - \frac{1}{L})\,H_W$$

$$H_o - H_W = H_C + \frac{V_o^2}{2g}$$

$$V_1 \cdot 1/4\,\pi\,D^2 = Q_1$$

$$V_2 \cdot 1/4\,\pi\,D^2 = Q_2$$

$$V_{uit} \cdot 1/4\,\pi\,\hat{d}^2 = V_{uit} \cdot \mu\,1/4\,\pi\,d^2 = Q_{uit}$$

*

Voetnoot:

* $\Delta h = \frac{c}{g}$, ΔV, waarin ΔV = snelheidsverandering en c = voortplantingssnelheid van drukgolven in een gesloten leiding, meestal tussen 300 en 1400 m/sec, Δh = drukhoogteverandering als gevolg van snelheidsverandering ΔV.

Of dimensieloos geschreven:

$$\frac{\Delta H}{H_W} \cdot \frac{H_W}{H_o} = \frac{V_o^2}{2gH_o} + \frac{\frac{c}{g} V_o}{H_o} \left(\frac{Q_1}{Q_o} - 1\right) - \frac{V_o^2}{2gH_o} \left(\frac{Q_1}{Q_o}\right)^2$$

$$\frac{\Delta H}{H_W} \cdot \frac{H_W}{H_o} = \frac{V_o^2}{2gH_o} + \frac{\frac{c}{g} V_o}{H_o} \left(1 - \frac{Q_2}{Q_o}\right) - \frac{V_o^2}{2gH_o} \left(\frac{Q_2}{Q_o}\right)^2$$

$$\frac{H_o}{H_W} \cdot \left(\frac{Q_{uit}}{Q_o}\right)^2 \cdot \frac{V_o^2}{2gH_o} \cdot \left(\frac{D}{\sqrt{\mu d}}\right)^4 = \frac{H_B}{H_W} - \frac{\Delta H}{H_W}$$

$$\frac{Q_{uit}}{Q_o} = \frac{Q_1}{Q_o} - \frac{Q_2}{Q_o}$$

$$\frac{H_B}{H_W} = \frac{H_C}{H_W} + \frac{V_o^2}{2gH_o} \cdot \frac{H_o}{H_W} + \left(1 - \frac{l}{L}\right)$$

$$\frac{H_o}{H_W} - 1 = \frac{H_C}{H_W} + \frac{V_o^2}{2gH_o} \cdot \frac{H_o}{H_W}$$

Dit zijn 6 vergelijkingen van 11 "onbekenden":

$$\frac{\Delta H}{H_W}, \frac{V_o^2}{2gH_o}, \frac{H_o}{H_W}, \frac{\frac{c}{g} V_o}{H_o}, \frac{Q_1}{Q_o}, \frac{Q_2}{Q_o}, \frac{Q_{uit}}{Q_o}, \frac{d}{D}, \frac{H_B}{H_W}, \frac{H_C}{H_W}, \frac{l}{L}$$

Indien hiervan 5 worden gegeven zijn de overige met behulp van de 6 vergelijkingen op te lossen. Op deze wijze is $\frac{Q_{uit}}{Q_o}$ te bepalen als functie van $\frac{V_o^2}{2gH_o}, \frac{l}{L}, \frac{d}{D}, \frac{H_W}{H_o}, \frac{\frac{c}{g} V_o}{H_o}$:

$$\frac{Q_{uit}}{Q_o} = f\left(\frac{V_o^2}{2gH_o}, \frac{l}{L}, \frac{d}{D}, \frac{H_W}{H_o}, \frac{\frac{c}{g} V_o}{H_o}\right)$$

Oplossen van de vergelijkingen werd uitgevoerd met een electronische rekenmachine voor de waarden:

$\frac{l}{L}$: 0,1 - 0,25 - 0,5 - 0.75 - 0,9

$\frac{d}{D}$: $\frac{d}{D} = 0{,}3$ $\mu = 0{,}65$ $\hat{\frac{d}{D}} = 0{,}25$

$\frac{d}{D} = 0{,}6$ $\mu = 0{,}65$ $\hat{\frac{d}{D}} = 0{,}50$

$\frac{d}{D} = 1{,}1$ $\mu = 0{,}80$ $\hat{\frac{d}{D}} = 1{,}00$

$\frac{V_o^2}{2gH_o}$: 10^{-4} - 10^{-3} - 10^{-2} - 10^{-1} - 0,99

$\frac{H_W}{H_o}$: 0,01 - 0,1 - 0,2 - 0,4 - 0,6 - 0,8 - 0,99

$\frac{\frac{c}{g} V_o}{H_o}$: 0,01 - 0,1 - 1 - 10 - 100 - 1000

Dit zijn behoudens de coëfficient $\frac{\frac{c}{g} V_o}{H_o}$ dezelfde dimensieloze coëfficienten als bij de permanente stromingstoestand. $\frac{\frac{c}{g} V_o}{H_o}$ is een maat voor de voortplantingssnelheid van drukgolven. De resultaten van de berekeningen zijn samengevat in de figuren 31 t/m 38. Hierbij wordt opgemerkt dat niet alle combinaties van $\frac{\frac{c}{g} V_o}{H_o}$ en $\frac{V_o^2}{2gH_o}$ tot praktijkgevallen leiden. In het algemeen zal $\frac{\frac{c}{g} V_o}{H_o} / \frac{V_o^2}{2gH_o} \geqslant 100$ of $c > 50\ V_o$ zijn (c* voor kunststofleidingen met olie of water ca. 300 m/sec en $V_o < 6$ m/sec, c voor stalen of betonnen leidingen met olie of water ca. 1000 m/sec en $V_o < 10$ m/sec). Alleen de practische waarden zijn in de figuren aangegeven. Gevallen waarvoor $\frac{Q_{uit}}{Q_o} < 1$ zijn niet aangegeven.

* = voortplantingssnelheid drukgolven in een gesloten leiding.

Voor het geval afschuiving van de leiding optreedt kunnen op analoge wijze de volgende formules worden afgeleid (zie ook fig. 1^D):

$$\frac{Q_1}{Q_o} = \frac{\frac{\frac{c}{g}V_o}{H_o} + 1 - \frac{V_o^2}{2gH_o} - \frac{1}{L}\cdot\frac{H_W}{H_o}}{\frac{\frac{c}{g}V_o}{H_o}}$$

en

$$\frac{Q_2}{Q_o} = \frac{\frac{\frac{c}{g}V_o}{H_o} - 1 + \frac{V_o^2}{2gH_o} + \frac{1}{L}\cdot\frac{H_W}{H_o}}{\frac{\frac{c}{g}V_o}{H_o}}$$

Een positieve waarde van $\frac{Q_2}{Q_o}$ betekent dat direct na breuk geen vloeistof uit het rechterleidingeinde stroomt...

2.2.4 <u>Vergelijking debiet in permanente stromingstoestand met debiet direct na breuk</u>

Ten einde na te gaan in welke gevallen het debiet direct na breuk kleiner is dan het debiet in de permanente stromingstoestand na breuk zijn in de navolgende tabellen de waarden van $\frac{Q_{uit}}{Q_o}$ gegeven voor breuk op de <u>ongunstigste</u> plaats $(0 \leq \frac{1}{L} \leq 1)$ in de leiding voor practische waarden van $\frac{\frac{c}{g}V_o}{H_o}$ $(0{,}01 \leq \frac{\frac{c}{g}V_o}{H_o} \leq 100)$ en voor $n_s = 10$ en resp $n_s = 250$

$\frac{d}{D} = 0,3$				
$\frac{V_o^2}{2gH_o}$	Perm. $\frac{Q_{uit}}{Q_o}$		Direct na br. $\frac{Q_{uit}}{Q_o}$	
	$H_W/H_o=0,01$	$H_W/H_o=0,99^*$	$H_W/H_o=0,01$	$H_W/H_o=0,99^*$
10^{-1}	0,2	0,2	0,2	0,2
10^{-2}	0,6	0,5	0,5	0,5
10^{-3}	2,0	1,1	1,9	1,8
10^{-4}	6,4	1,6	6,2	5,9

$\frac{d}{D} = 0,6$				
$\frac{V_o^2}{2gH_o}$	Perm. $\frac{Q_{uit}}{Q_o}$		Direct na br. $\frac{Q_{uit}}{Q_o}$	
	$H_W/H_o=0,01$	$H_W/H_o=0,99^*$	$H_W/H_o=0,01$	$H_W/H_o=0,99^*$
10^{-1}	0,7	0,6	0,2	0,2
10^{-2}	2,5	1,2	1,4	1,3
10^{-3}	8,0	1,7	6,5	6,0
10^{-4}	25	2,5	24	22

$\frac{d}{D} = 1,1$				
$\frac{V_o^2}{2gH_o}$	Perm. $\frac{Q_{uit}}{Q_o}$		Direct na br. $\frac{Q_{uit}}{Q_o}$	
	$H_W/H_o=0,01$	$H_W/H_o=0,99^*$	$H_W/H_o=0,01$	$H_W/H_o=0,99^*$
10^{-1}	3,0	1,4	0,2	0,2
10^{-2}	9,9	1,7	1,9	1,8
10^{-3}	32	3	16	15
10^{-4}	100	10	86	80

* Voor $\frac{V_o^2}{2gH_o} = 10^{-1}$ is wegens $H_C>0$ $(\frac{H_W}{H_o} < 1 - \frac{V_o^2}{2gH_o})$ de waarde van $\frac{Q_{uit}}{Q_o}$ gegeven bij $\frac{H_W}{H_o} = 0,8$.

Afschuiving				
$\frac{V_o^2}{2gH_o}$	Perm. $\frac{Q_{uit}}{Q_o}$		Direct na br. $\frac{Q_{uit}}{Q_o}$	
	$H_W/H_o=0,01$	$H_W/H_o=0,99$ *	$H_W/H_o=0,01$	$H_W/H_o=0,99$ *
10^{-1}	4,7	2,1	1,1	1,1
10^{-2}	12	1,9	2	1,9
10^{-3}	33	4.0	20	18
10^{-4}	105	11	198	180

Hieruit blijkt dat <u>voor leidingen met relatief grote statische opvoerhoogte</u> H_C <u>t.o.v. de totale opvoerhoogte</u> H_o <u>van de pomp</u> (d.i. relatief weinig wrijvingsverlies $\frac{H_W}{H_o} \approx 0$) het debiet bij permanente stromings na breuk voor alle waarden van $\frac{V_o^2}{2gH_o}$ maatgevend is.

<u>Voor leidingen met relatief geringe statische opvoerhoogte</u> H_C t.o.v. de totale opvoerhoogte H_o van de pomp (relatief veel wrijvingsverlies $\frac{H_W}{H_o} \approx 1$) is dit bij benadering alleen het geval voor $\frac{V_o^2}{2gH_o} \geqslant 10^{-2}$.

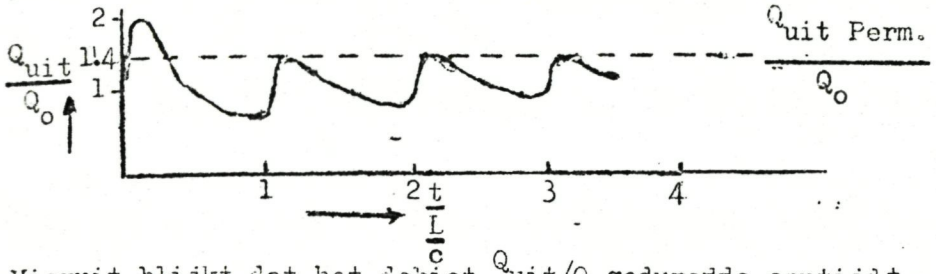
Indien $\frac{V_o^2}{2gH_o} \leqslant 10^{-3}$ stroomt direct na breuk meer vloeistof uit de breuk dan in de permanente stromingstoestand na breuk. Om na te gaan of dit bepalend kan zijn voor de grootte van de ontgrondingskuil zijn met het waterslag-rekenmachineprogramma van het Waterloopkundig Laboratorium enige oriënterende waterslagberekeningen uitgevoerd. Bepaald is het debiet als functie van de tijd voor:

$$\frac{V_o^2}{2gH_o} = 10^{-3} \text{ en } \frac{V_o^2}{2gH_o} = 10^{-4}$$

$$\frac{d}{D} = 1,1 \text{ en } \frac{l}{L} = 0,5 \quad \frac{H_W}{H_o} = 0,99$$

$$\frac{\frac{c}{g} V_o}{H_o} = 0,5$$ (Deze waarde is gekozen, omdat dit bij veel oliepersleidingen het geval blijkt)

De resultaten van deze berekening waren als volgt:



Hieruit blijkt dat het debiet Q_{uit}/Q_o gedurende eentijdt $= \frac{1}{3}\frac{L}{c}$ groter is dan Q_{uit}/Q_o in permanente stromingstoestand na breuk. Voor een aangenomen wrijvingsfactor $\lambda = 0{,}02$ zijn deze resultaten in dimensionele vorm aangegeven in navolgende tabel:

	$\frac{V_o^2}{2gH_o}$	L	D	Q_o	V_o	H_o	Q_{uit} Dir.	$\frac{1}{3}\frac{L}{c}$	Q_{uit} Perm.
	--	Km	m	m^3/sec	m/sec	m.v.k *	m^3/sec	sec	m^3/sec
$\lambda=0{,}02$ $C=1000$ m/sec $\frac{\frac{c}{g}V_o}{H_o}=0{,}5$	10^{-3}	10	0,2	0,126	4	800	0,25	3	0,18
	4.10^{-4}	25	0,2	0,050	1,6	320	0,10	8	0,07
	10^{-4}	100	0,2	0,013	0,4	80	0,03	30	0,02
	10^{-3}	20	0,4	0,500	4	800	1,00	6	0,70
	4.10^{-4}	50	0,4	0,200	1,6	320	0,40	17	0,28
	10^{-4}	200	0,4	0,050	0,4	80	0,10	60	0,07
	10^{-3}	30	0,6	1,35	4	800	2,70	10	1,9
	4.10^{-4}	75	0,6	0,45	1,6	320	0,90	25	0,6
	10^{-4}	300	0,6	0,14	0,4	80	0,27	100	0,2
	10^{-3}	50	1,0	3,1	4	800	6,2	17	4,4
	4.10^{-4}	125	1,0	1,25	1,6	320	2,5	42	1,8
	10^{-4}	500	1,0	0,3	0,4	80	0,6	170	0,4

Op grond van de resultaten van het ontgrondingsonderzoek (zie 2.2.5) mag verwacht worden dat de relatief korte tijd waarin $\frac{Q_{uit}}{Q_o}$ direct na breuk groter is dan $\frac{Q_{uit}}{Q_o}$ in permanente stromingstoestand na breuk niet bepalend is voor de grootte van de ontgrondingsafmetingen.

* m.v.k. = meters vloeistof kolom.

Voor andere waarden van $\frac{l}{L}$, $\frac{H_W}{H_o}$ en $\frac{\frac{c}{g} V_o}{H_o}$ zullen voor gevallen, waarbij $\frac{Q_{uit}}{Q_o}$ direct na breuk groter is dan $\frac{Q_{uit}}{Q_o}$ in de permanente stromingstoestand na breuk nadere berekeningen moeten worden uitgevoerd. Verwacht wordt dat ook hierbij de tijdsduur waarover $\frac{Q_{uit}}{Q_o}$ direct na breuk groter is dan $\frac{Q_{uit}}{Q_o}$ in de permanentie na breuk zo kort is dat de permanentie na breuk bepalend is voor ontgrondingsafmetingen.

2.3 Ontgronding door leidingbreuk

2.3.1 Inleiding

Bij een breuk van een transportleiding kan door de uitstromende vloeistof een kuil worden geërodeerd. De grootte van deze ontgronding is van belang voor de vaststelling van richtlijnen voor de afstand van de leiding tot een dijklichaam. De mate van ontgronding zal behalve van de leidingparameters, zoals snelheid en druk ook sterk afhangen van de grondeigenschappen. Daar deze in de natuur zeer sterk variëren is veiligheidshalve uitgegaan van een weinig erosiebestendig materiaal: schoon fijnzand.
Omtrent de grootte van de ontgronding is getracht inzicht te krijgen door middel van schaalproeven, waarbij gevarieërd zijn de leidingsnelheid, de buisdiameter, de gronddekking, de gat grootte en de gatoriëntatie.Ter aanvulling van de proeven zijn twee metingen in de natuur gedaan met persleidingen van zandzuigers.

2.3.2 Schaalproeven

De proeven zijn gedaan met twee buisdiameters (inwendig ϕ 4.64 en 9,3 cm) in een bak met duinzand (d_{50} = 220 μ). De afmetingen van de ontgrondingskuil werden als functie van de tijd gemeten met behulp van foto's en peilingen van de maximale kuildiepte. Een voorbeeld van het verloop van de ontgronding met de tijd is gegeven in fig. 46 en fotoblad 1. Bij vrijwel alle proeven werd na circa 5 minuten, onafhankelijk van de snelheid, gatgrootte etc., een evenwichtstoestand bereikt.
De maximale waarde van de ontgrondingsbreedte (afmeting van de kuil loodrecht op de buis, gemeten vanuit de buisas) is in fig. 47 gegeven voor de series:

A d/D =1 buis recht afgesneden,
C d/D =1 gat in de buiswand,
D d/D =1 twee buizen afstand D $\perp$ buisas verschoven,
E d/D =1 twee buizen afstand D // buisas verschoven,
(d = gatdiameter D = buisdiameter) Zie ook fotoblad 2.

Bij de series D en E was het debiet uit beide buizen gelijk.

De ontgrondingsbreedte nam evenredig met de snelheid in het gat tot de macht 2/3 toe. Bij toenemende gronddekking nam de ontgronding af in breedte. De ontgrondingslengte (afmeting van de kuil evenwijdig aan de buis, gemeten vanaf het gat) voor deze series is gegeven in fig. 48.
De ontgronding bij kleinere gaten in de buiswand is gegeven in fig. 49 en 50 voor de series:

B . d/D =0,5 gat in buiswand

F d/D =0,25 gat in buiswand (zie fotoblad 3.)

Bij afnemende waarden van d/D neemt de ontgronding af bij gelijke snelheid in het gat (berekend als debiet/gat doorsnede).
De ontgrondingsbreedte is maximaal bij een gat met horizontale as; de lengte is maximaal bij een gat met vertikale as. De invloed van de buisdiameter is gegeven in fig. 51. Voor de series A en C blijft de verhouding ontgronding/buisdiameter vrijwel gelijk bij gelijke snelheid, terwijl deze verhouding wat afneemt met de buisdiameter bij kleinere waarden van d/D. De proeven met de leiding ∅ 60 cm liggen voor serie A duidelijk lager en die voor serie B iets lager indien ze op dezelfde wijze worden uitgezet. De toename met de snelheid is bij deze laatste proeven sterker dan bij de modelproeven.

2.3.3 Buitenmetingen

Met medewerking van de dienst "Zuiderzeewerken" en twee aannemers ("Van Hattum en Blankevoort N.V." en "Holland") konden op twee zandstorten proeven worden gedaan met buizen ∅ 60 cm.
De eerste proef werd gedaan bij Swifterbont met een recht afgesneden buis (serie A) en een dekking van 1,2 m. Voor de resultaten van de proeven zie fig. 52 en fotoblad 2.
De tweede proef werd gedaan met een gat in de zijwand (serie B d/D = 0,5). Hier werd alleen de druk in de buis voor de uitstroming gemeten. Door vergelijking met de modelproeven kon hieruit de uittreesnelheid worden bepaald. De dekking bedroeg hier eveneens 1,2 m. In alle gevallen werd vrij snel een evenwicht bereikt n.l. na 5 à 10 minuten. De diepte van de ontgronding was vrij

gering na het weer bezinken van het in suspensie zijnde zand. Dit komt overeen met de modelproeven. De toename van de kuilgrootte met de snelheid was bij de buitenmetingen groter dan bij de modelproeven. Mogelijk geeft de grootte van het wegstromende debiet een schaalinvloed.

2.34 Interpretatie

Over ontgronding door stralen is in de literatuur weinig gegeven. Het meest uitvoerig is het werk van CLARKE[1] waaruit blijkt dat vooral de impuls van de straal belangrijk is. De impuls van een straal die uit een gat in de buiswand komt is gelijk aan $Q_{uit} \cdot V_{uit}$, waarin V_{uit} de snelheid in de gecontraheerde straal ($\hat{d}$) is, en Q_{uit} het debiet $= \pi/4\ \hat{d}^2\ V_{uit}$

Uit de proeven vanCLARKE volgde dat de ontgrondingsafmetingen evenredig met de straalimpuls tot de macht 1/3 toenamen. Dit betekent voor het huidige geval dat de ontgronding evenredig met de snelheid tot de macht 2/3 en met de gatgrootte tot de macht 2/3 moet toenemen, terwijl bij gelijke verhouding d/D de ontgronding bij gelijke V_{uit} met de buisdiameter tot de macht 2/3 toe zou nemen.
De invloed van de korrelgrootte was zeer gering: de ontgronding nam af met de valsnelheid tot de macht 1/10.
Uit andere door het laboratorium verrichte proeven over de ontgronding achter dammen en bij brugpijlers bleek dat de ontgronding evenredig met de lengtemaat (hier de diameter D) toenam indien de snelheid gelijk bleef.
De proefresultaten liggen ongeveer tussen deze gevallen in.
De toename met de snelheid is evenredig met de macht 2/3 (impuls) maar de invloed van D bij gelijke V_{uit} is soms $D^{2/3}$ (vooral bij de kleinere gaten), soms $\sim$ D (vooral bij de grote waarden van d/D).
CLARKE geeft na een wat andere bewerking van zijn proeven. Ontgronding $\sim D^{0,78}$ bij gelijke snelheid

[1] R.W. CLARKE, The action of submerged jets on moveable material Diss London 1962

Om nu toch een redelijk bruikbare correlatie te krijgen is in fig.53 en 54 de ontgrondingsbreedte en- lengte uitgezet tegen de impuls

$$I = \rho \dot{Q}_{uit} \cdot V_{uit} = \rho \dot{Q}_{uit}^{2} (\pi/4d^{2})^{-1} \mu^{-1}$$

μ is een contractie coëffient, bepaald uit de gemeten drukverliezen over het gat. De waarden van μ bedragen respectievelijk voor de series:

A, D, E,	1,0
C	0,8
B, F	0,65

Uit figuur 53 en 54 blijkt dat als praktische bovengrens voor de ontgrondingsbreedte b respectievelijk ontgrondingslengte λ kon worden gegeven

$$b = 7 (I/\rho q)^{1/3}$$

$$\lambda = 12 (I/\rho g)^{1/3}$$

2.4 Praktijkvoorbeelden

Voor een aantal bestaande leidingen zijn de uitstromende debieten bepaald in geval van breuk op de ongunstigste plaats langs de leiding. Hierbij wordt opgemerkt dat het debiet direct na breuk het grootst is nabij de pomp. Dit neemt echter ten gevolgde van reflecties van de onderdrukgolf tegen de pomp in korte tijd af: beschouwd is daarom het debiet direct na breuk halverwege de leiding.

De permanentie na breuk bleek in alle gevallen bepalend. De ontgrondingsafmetingen zijn hiervoor bepaald.

Olieleiding I:

$Q_o = 0{,}84\ m^3/sec$
$D = 0{,}6\ m$
$V_o = 3\ m/sec$
$L = 50\ Km$
$H_o = 620$ m oliekolom
$H_C = 20$ m oliekolom
$H_W = 600$ m oliekolom
ρ olie $= 890\ kg/m^3$

$$\frac{H_W}{H_o} = 0{,}97$$

$$\frac{V_o^2}{2gH_o} = 7.10^{-4}$$

$$\frac{\frac{c}{g} V_o}{H_o} \approx 0{,}5$$

4 Permanentie na breuk voor een gat $\frac{d}{D} = 1{,}1$ ($\mu = 0{,}80$):

$\frac{Q_{uit}}{Q_o} = 3{,}6$ optredend nabij benedenstrooms leidingeinde.

$Q_{uit} = 3\ m^3/sec$

$V_{uit} = 10{,}6\ m/sec$

$I = \rho\ Q_{uit}\ V_{uit} = 28.000$ Newton (2,8 ton)

$\left(\frac{I}{\rho g}\right)^{1/3} = 1{,}5$

Ontgrondingsafmetingen volgens formules par. 2.3:

$\xi = 11$ m

$\lambda = 18$ m

Direct na breuk voor een gat $\frac{d}{D} = 1{,}1$ ($\mu = 0{,}80$):

$\frac{Q_{uit}}{Q_o} \approx 3$, optredend halverwege de leiding. Niet bepalend voor ontgrondingsafmetingen.

Olieleiding II:

Q_o = 0,11 m^3/sec
D = 0,2 m
V_o = 3,5 m/sec
L = 15 Km
H_o = 850 m oliekolom
H_C = 10 m oliekolom
H_W = 840 m oliekolom
ρ olie = 890 kg/m^3

$\frac{H_W}{H_o} = 0,99$

$\frac{V_o^2}{2gH_o} = 6.10^{-4}$

$\frac{\frac{c}{g} V_o}{H_o} \approx 0,4$

Permanentie breuk door afschuiving met μ = 1:

$\frac{Q_{uit}}{Q_o} = 5$ $\frac{Q_{uit\ R}}{Q_o} \approx 4$ $\frac{Q_{uit\ L}}{Q_o} \approx 1$

$Q_{uit\ R}$ = 0,44 m^3/sec $V_{uit\ R}$ = 14 m/sec

$Q_{uit\ L}$ = 0,11 m^3/sec $V_{uit\ L}$ = 3,5 m/sec

I = ρ olie ($Q_{uit\ R}$. $V_{uit\ R}$ + $Q_{uit\ L}$. $V_{uit\ L}$) = 5900 Newton (0,6 ton)

$(\frac{I}{\rho g})^{1/3} = 0,9$

Ontgrondingsafmetingen volgens formules par. 2.3:

ξ = 7 m

λ = 11 m

Direct na breuk door afschuiving uit μ = 1:

$\frac{Q_{uit}}{Q_o} \approx 2,5$, optredend halverwege de leiding.

Niet bepalend voor ontgrondingsafmetingen.

Rioolwaterleiding I:

Q_o = 0,250 m^3/sec
D = 0,75 m
V_o = 0,6 m/sec
L = 6 Km.
H_o = 8 m waterkolom

$\frac{H_W}{H_o}$ 0,4

$\frac{V_o^2}{2gH_o} = 2,10^{-3}$

$\frac{\frac{c}{g} V_o}{H_o} \approx 7$

H_C = 5 m waterkolom

H_W = 3 m waterkolom

ρ water = 1000 kg/m^3

<u>Permanentie na breuk</u> voor een gat $\frac{d}{D} = 1{,}1$ ($\mu = 0{,}80$):

$\frac{Q_{uit}}{Q_o} = 17$, optredend nabij benedenstrooms leidingeinde.

$Q_{uit} = 4{,}25$ m^3/sec

$V_{uit} = 9{,}5$ m /sec

$I = \rho\, Q_{uit}\, V_{uit} = 40.000$ Newton (4ton)

$(\frac{I}{\rho g})^{1/3} = 1{,}6$

<u>Ontgrondingsafmetingen</u> volgens formule par. 2.3:

$\beta = 12$ m

$\lambda = 20$ m

<u>Direct na breuk</u> voor een gat $\frac{d}{D} = 1{,}1$ ($\mu = 0{,}80$):

$\frac{Q_{uit}}{Q_o} < 1$, optredend halverwege de leiding.

Niet bepalend voor ontgrondingsafmetingen.

<u>Rioolwaterleiding II:</u>

Q_o = 2 m^3/sec

D = 1,4 m

V_o = 1,3 m/sec

L = 30 Km

H_o = 34 m

H_C = 5m

H_W = 29 m

ρ water = 1000 kg/m^3

$\frac{H_W}{H_o} \approx 0{,}85$

$\frac{V_o^2}{2gH_o} = 2{,}5 \cdot 10^{-2}$

$\frac{\frac{c}{g} V_o}{H_o} \approx 4$

<u>Permanentie na breuk</u> voor een gat $\frac{d}{D} = 1{,}1$ ($\mu = 0{,}80$):

$\frac{Q_{uit}}{Q_o}$ = 2,5 optredend nabij benedenstrooms leidingeinde.

$Q_{uit} = 5 m^3/sec$

$V_{uit} = 3,3$ m/sec

$I = \rho\ Q_{uit}\ V_{uit} = 16.500$ Newton (1.65 ton)

$(\frac{I}{\rho g})^{1/3} = 1,2$

<u>Ontgrondingsafmetingen</u> volgens formules par. 2.3:

$\beta = 9$ m

$\lambda = 15$ m

<u>Direct na breuk</u> voor een gat $\frac{d}{D} = 1,1$ ($\mu = 0,80$):

$\frac{Q_{uit}}{Q_o} < 1$, optredend halverwege de leiding.

Niet bepalend voor ontgrondingsafmetingen.

3. VOORSTEL VERWERKING RESULTATEN IN RICHTLIJNEN

Uit de ontgrondingsproeven volgt:

$$\text{Ontgrondingsbreedte} = C_1 \left(\frac{\rho\ V_{uit}^2 . \mu . 1/4\ \pi\ d^2}{\rho g}\right)^{1/3}$$

$$\text{Ontgrondingslengte} = C_2 \left(\frac{\rho\ V_{uit}^2 . \mu . 1/4\ \pi\ d^2}{\rho g}\right)^{1/3}$$

Dimensieloos geschreven wordt dit:

$$\frac{\beta}{D} = f\left(\frac{Q_{uit}}{Q_o}, \frac{d}{D}, \mu, \frac{Q_o^2}{gD^5}\right)$$

$$\frac{\lambda}{D} = g\left(\frac{Q_{uit}}{Q_o}, \frac{d}{D}, \mu, \frac{Q_o^2}{gD^5}\right)$$

Indien de permanente stromingstoestand na breuk als maatgevend voor de ontgrondingsafmetingen is:

$$\frac{\beta}{D} = f\left(\frac{V_o^2}{2gH_o}, \frac{H_W}{H_o}, \frac{d}{D}^{*}, \frac{l}{L}, \frac{Q_o^2}{gD^5}\right)$$

$$\frac{\lambda}{D} = g\left(\frac{V_o^2}{2gH_o}, \frac{H_W}{H_o}, \frac{d}{D}^{*}, \frac{l}{L}, \frac{Q_o^2}{gD^5}\right)$$

* μ is als functie van $\frac{d}{D}$ aangenomen.

Gezien de grote invloed van $\frac{l}{L}$ op $\frac{Q_{uit}}{Q_o}$ nabij het benedenstroomse leidingeinde zouden grafieken opgesteld kunnen worden voor breuk in een gebied $\frac{l}{L} < 0{,}9$ en in een gebied $\frac{l}{L} \geqslant 0{,}9$.

Voor elk van deze gebieden kan dan voor ca. 5 waarden van $\frac{Q_o^2}{gD^5}$, het verband tussen de ontgrondingsafmetingen ($\frac{\ell}{D}$ en $\frac{\lambda}{D}$) en $\frac{V_o^2}{2gH_o}$ gegeven worden voor bijv. 3 constante waarden van $\frac{H_W}{H_o}$ (0 - 0,5 - 1) en $\frac{d}{D}$ (0,3 - 0,6 - 1,1). Dit levert dan 10 grafieken.

Bij het samenstellen van de grafieken kan voor $\frac{Q_{uit}}{Q_o}$ voor $\frac{l}{L} < 0{,}9$ resp. $\frac{l}{L} \geqslant 0{,}9$ de maximale waarde van $\frac{Q_{uit}}{Q_o}$ gekozen worden uit het gebied $0 \leqslant \frac{l}{L} \leqslant 0{,}9$ resp. $0{,}9 \leqslant \frac{Q_{uit}}{Q_o} \leqslant 1$.

4. Conclusies

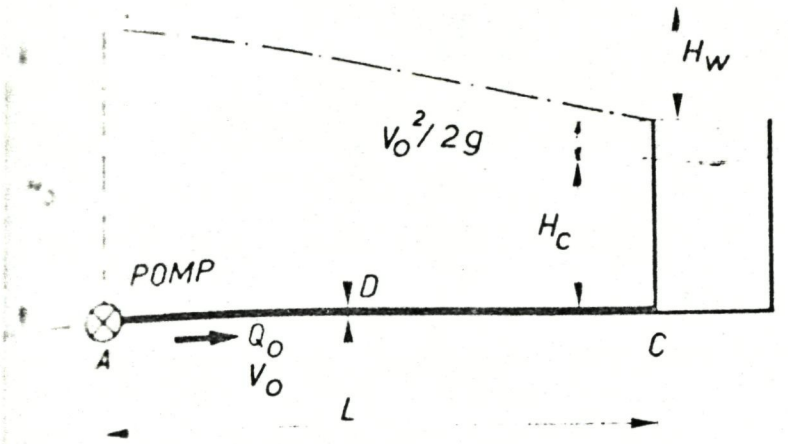
1. Met redelijke waarschijnlijkheid kan worden aangenomen, dat de permanente stromingstoestand na breuk van de leiding bepalend is voor de uitgestrektheid van de ontgrondingskuil.
2. De uittreedebieten die optreden in de permanente stromingstoestand na breuk zijn aangegeven in de figuren 2 t/m 30.
3. De ontgrondingsafmetingen voldoen aan de formule:

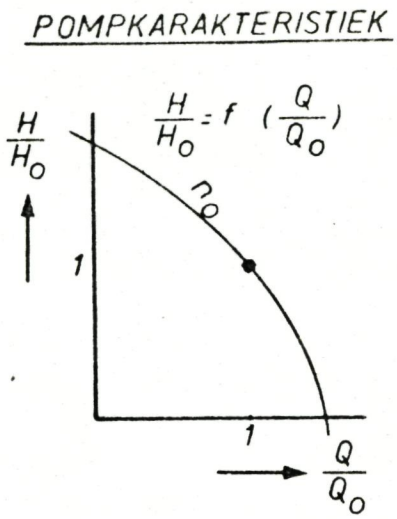
$$\ell \approx 7 \left(\frac{\rho\, V_{uit}^2 . \mu . \frac{1}{4}\pi d^2}{\rho g}\right)^{1/3}$$

$$\lambda \approx 12 \left(\frac{\rho\, V_{uit}^2 . \mu . \frac{1}{4}\pi d^2}{\rho g}\right)^{1/3}$$

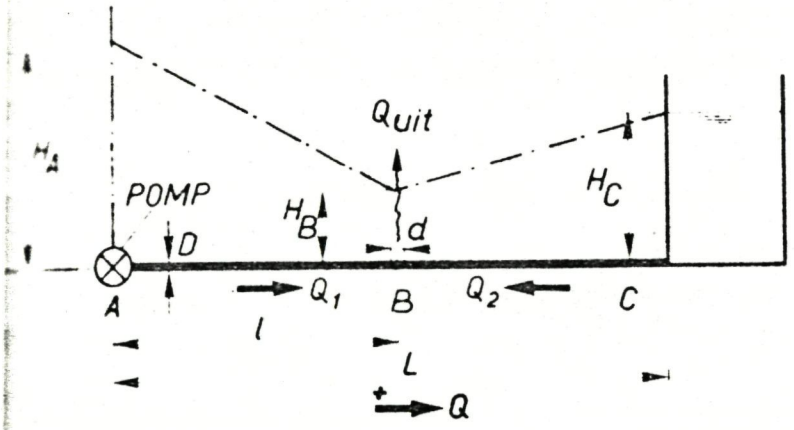
waarin ℓ de ontgrondingsbreedte gemeten vanuit de leidingen en λ de ontgrondingslengte voorstelt.

4. Voor het verwerken van de resultaten in een richtlijn lijkt verdeling in 2 gebieden, waarin leidingbreuk kan optreden ($0 \leq \frac{l}{L} \leq 0{,}9$ en $0{,}9 \leq \frac{l}{L} \leq 1$) aan te bevelen. Voor breuk in het gebied $0{,}9 \leq \frac{l}{L} \leq 1$ zal meestal de reservoirdruk H_C bepalend zijn. Indien in de werkelijkheid geen reservoir is toegepast zullen de op deze wijze berekende uittreedebieten c.q. ontgrondingsafmetingen aan de ongunstige kant zijn.
5. Bij de berekeningen is geen rekening gehouden met het ontstaan van vacuüm elders in de leiding als gevolg van de onderdrukgolven die bij leidingbreuk door de leiding lopen. De berekende debieten voor de permanente stromingstoestand na breuk zullen dan ook alleen optreden indien geen breuken elders in de leiding optreden als gevolg van deze onderdrukgolven.

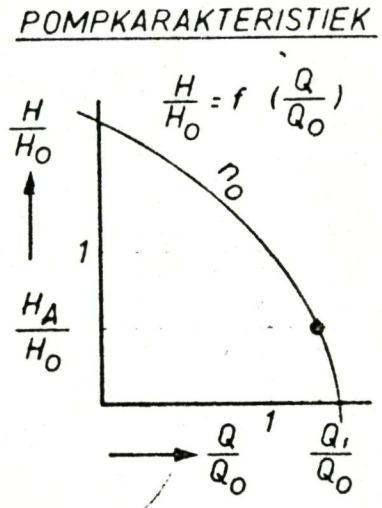


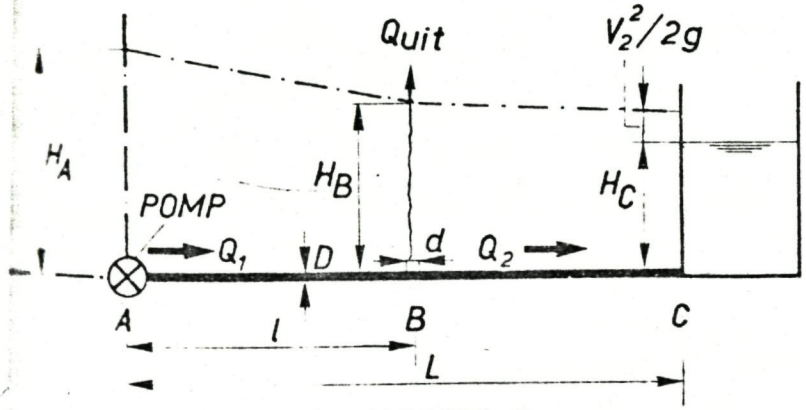


TOESTAND VOOR LEIDINGBREUK

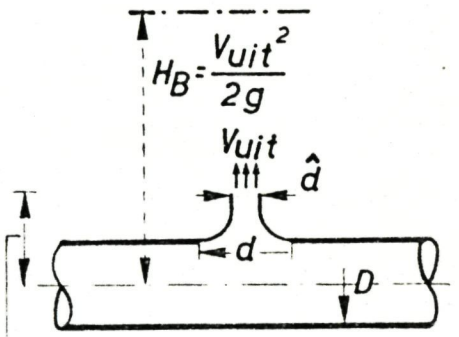


MOGELIJKHEID 1





MOGELIJKHEID 2



AFSTAND VERWAARLOOSD

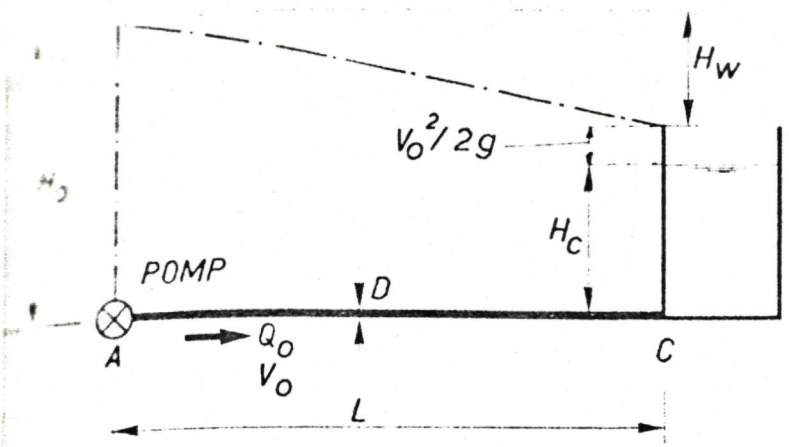
VERGELIJKINGS VLAK

"GAT IN LEIDING"

PERMANENTIE NA LEIDINGBREUK

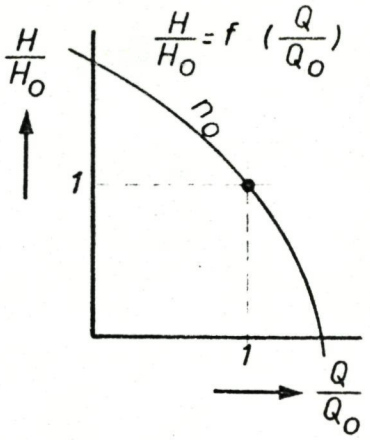
TOESTAND NABIJ BREUKPUNT B

TOESTAND VÓÓR LEIDINGBREUK EN PERMANENTIE NA LEIDINGBREUK - GEBRUIKTE GROOTHEDEN		JB
		A4
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1007-1055	FIG. 1A

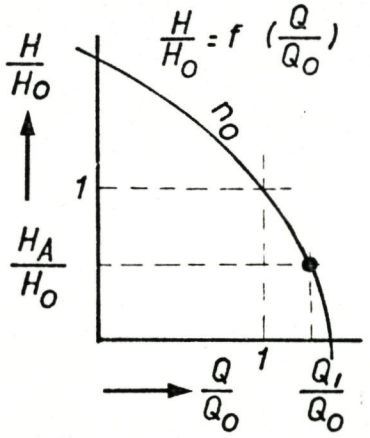


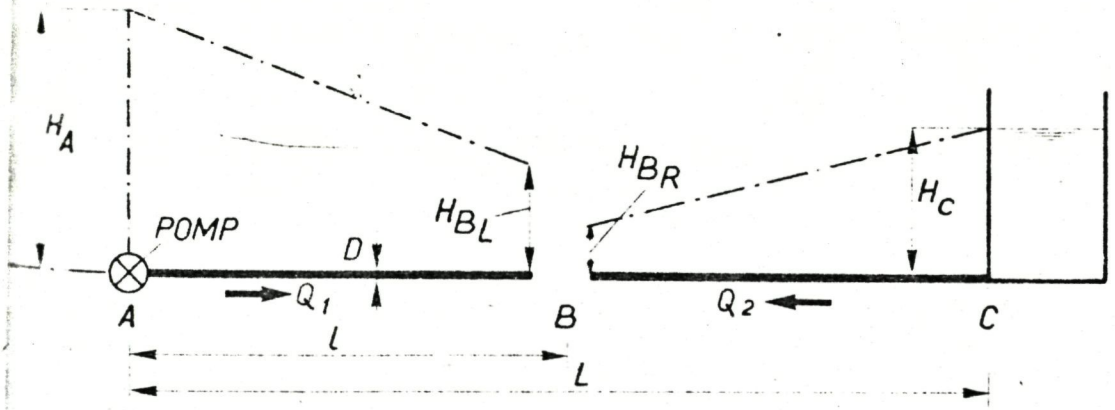
TOESTAND VOOR LEIDINGBREUK

POMPKARAKTERISTIEK



POMPKARAKTERISTIEK



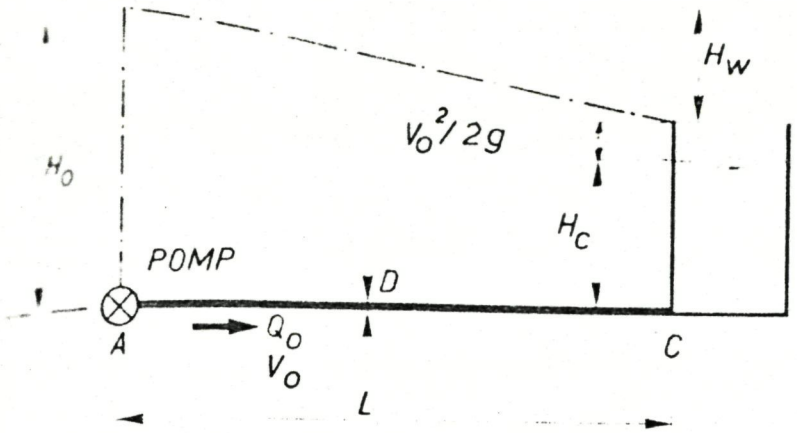


„AFSCHUIVING VAN LEIDING"

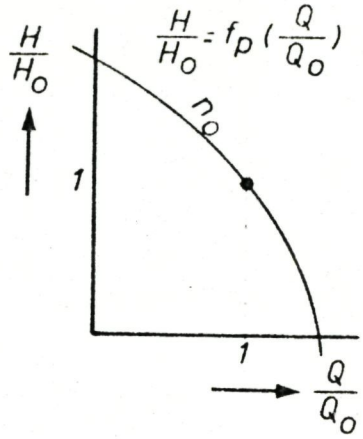
PERMANENTIE NA LEIDINGBREUK

TOESTAND VÓÓR LEIDINGBREUK EN PERMANENTIE NA LEIDINGBREUK – GEBRUIKTE GROOTHEDEN		JB
		A4
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M. 1007-1056	FIG. 1B

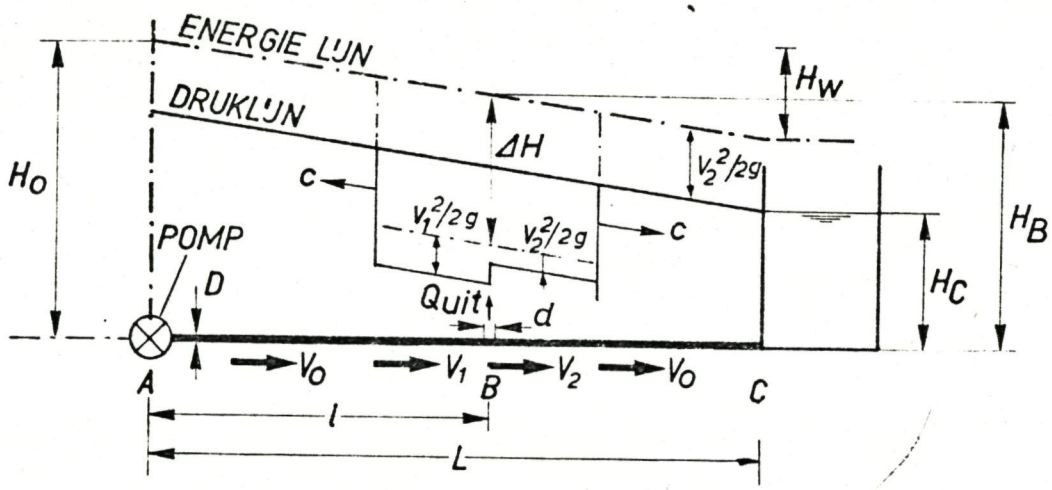
TOESTAND VOOR LEIDINGBREUK

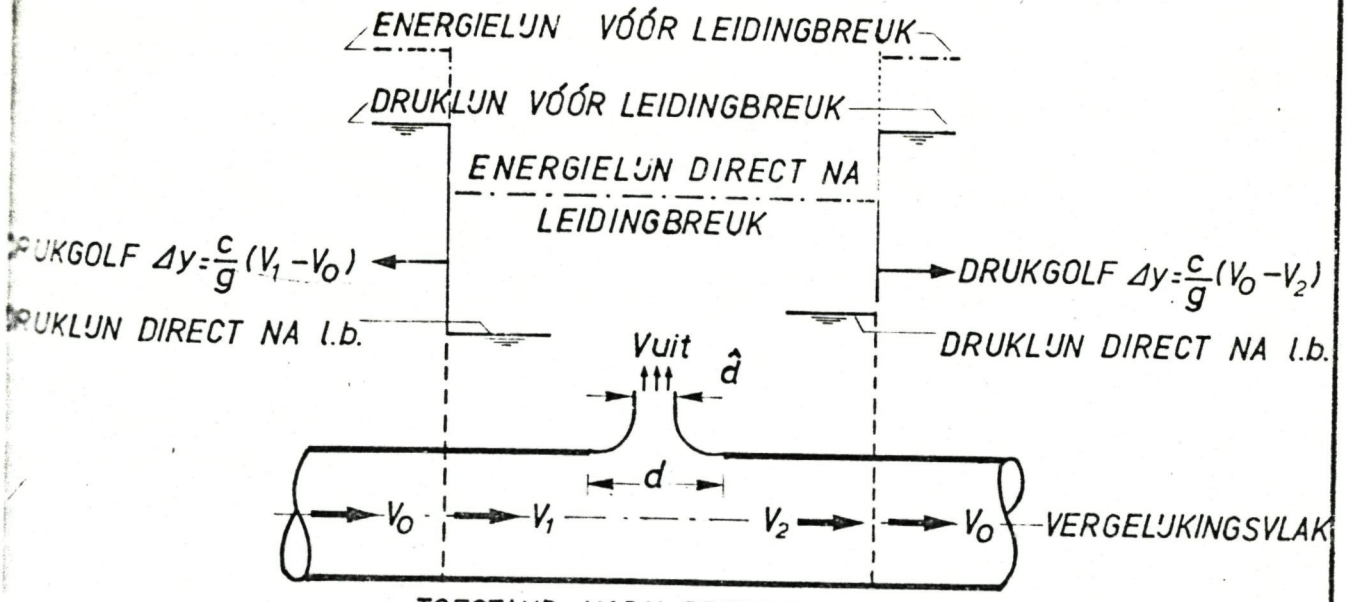


POMPKARAKTERISTIEK



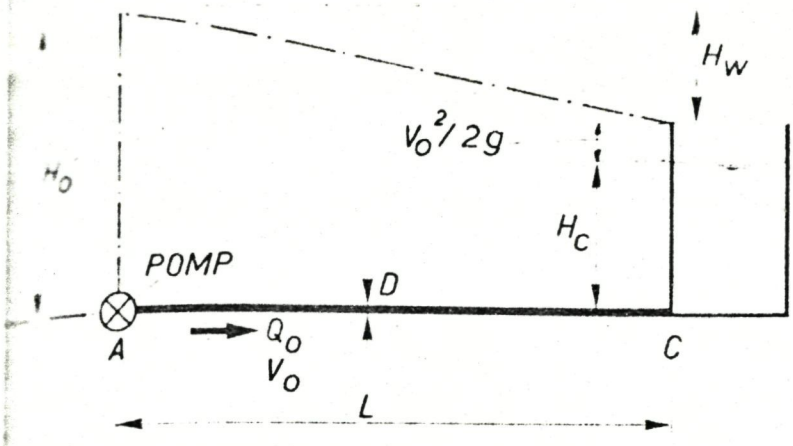
DIRECT NA LEIDINGBREUK „GAT IN LEIDING"





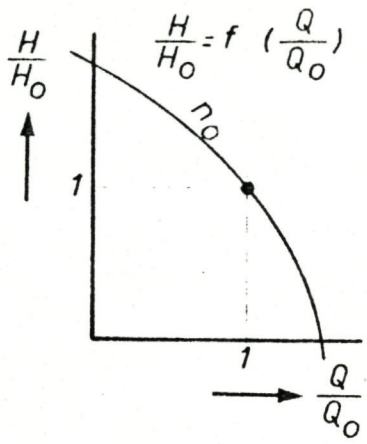
TOESTAND NABIJ BREUKPUNT B

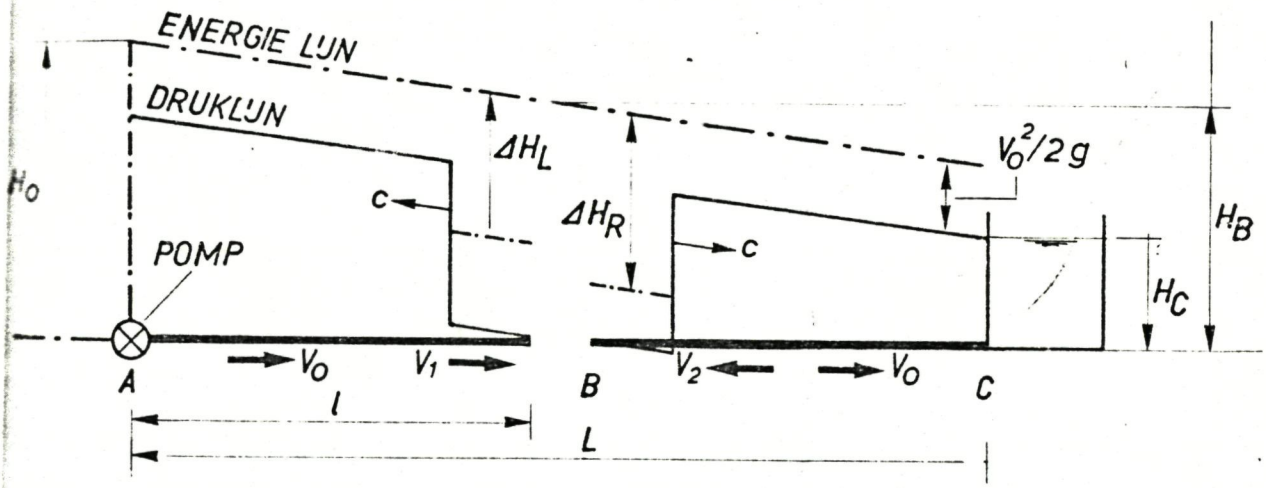
TOESTAND VÓÓR LEIDINGBREUK EN DIRECT NA LEIDINGBREUK – GEBRUIKTE GROOTHEDEN		JB
		A4
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M. 1007 - 1057	FIG. 1C



TOESTAND VOOR LEIDINGBREUK

POMPKARAKTERISTIEK

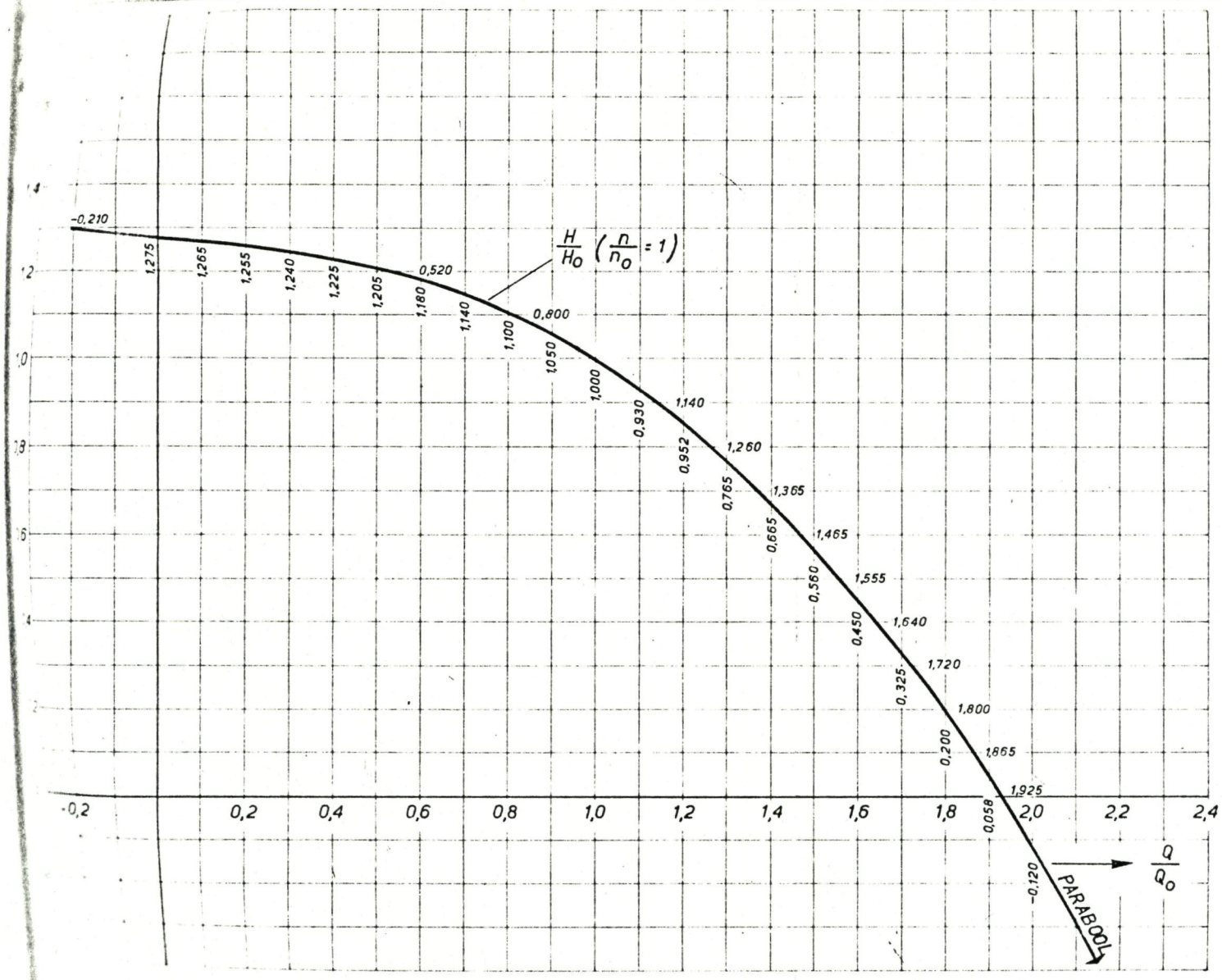




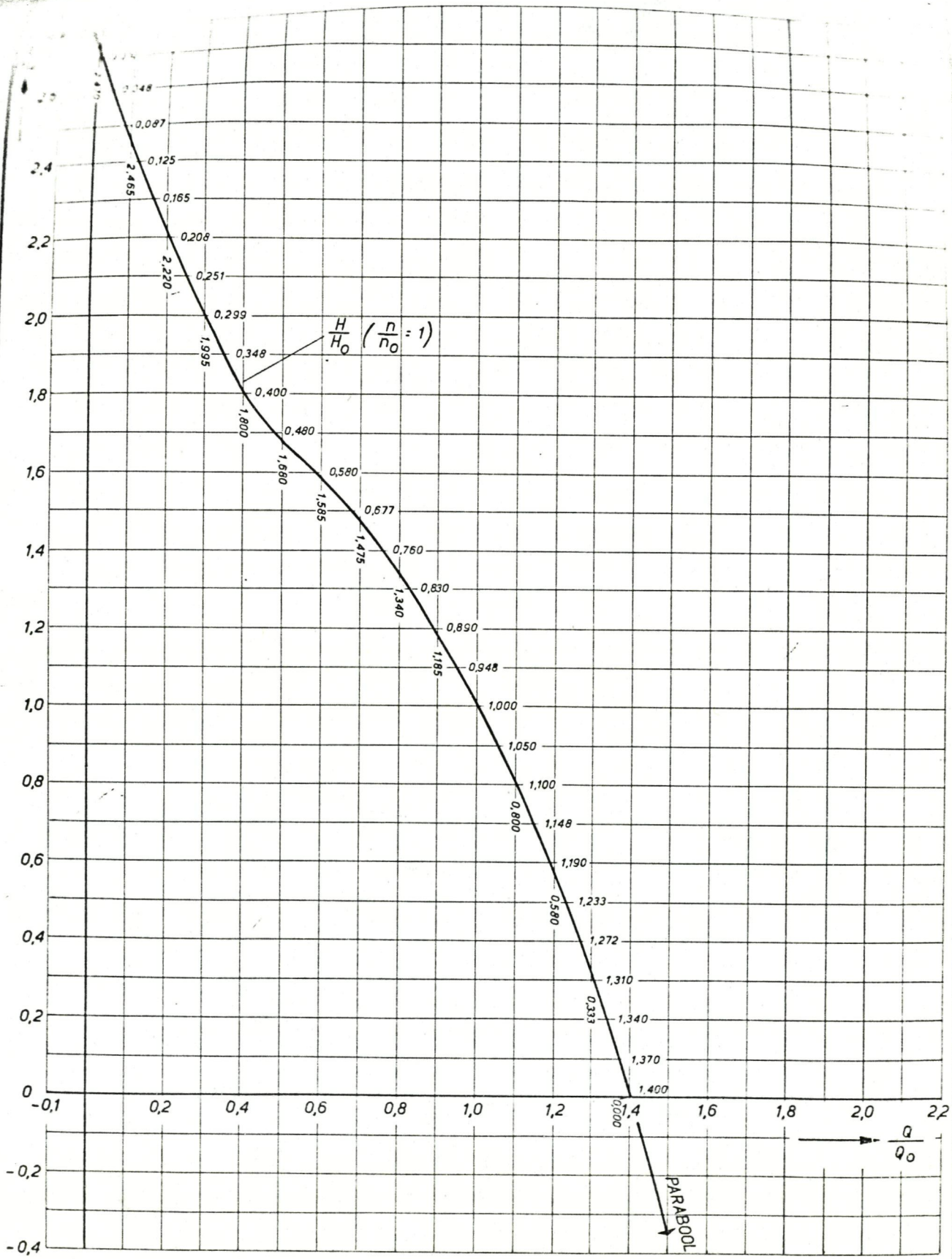
"AFSCHUIVING VAN LEIDING"

DIRECT NA LEIDINGBREUK

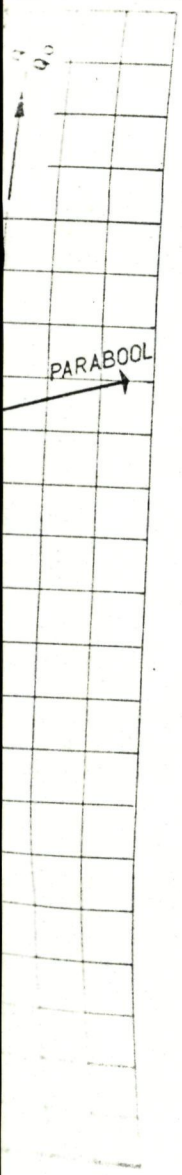
TOESTAND VÓÓR LEIDINGBREUK EN DIRECT NA LEIDINGBREUK – GEBRUIKTE GROOTHEDEN		JB
		A4
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M. 1007 - 1058	FIG. 1D

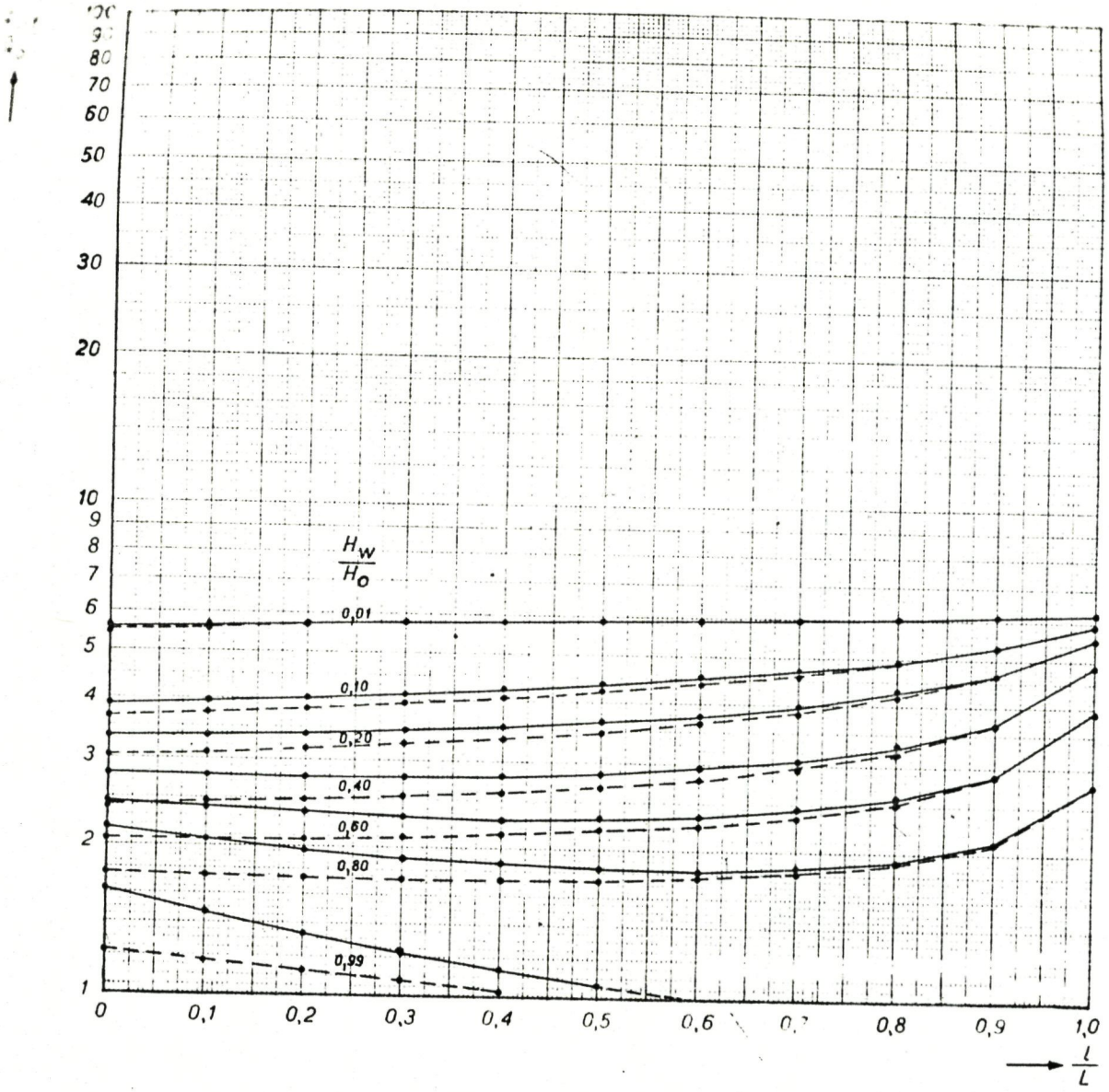


[illegible] FOR n_s = 10			JB
			A 3
[illegible] LABORATORIUM	M 1007-1053	FIG 1E	



M 1007-1054	
FIG 1F	A 3
	JB



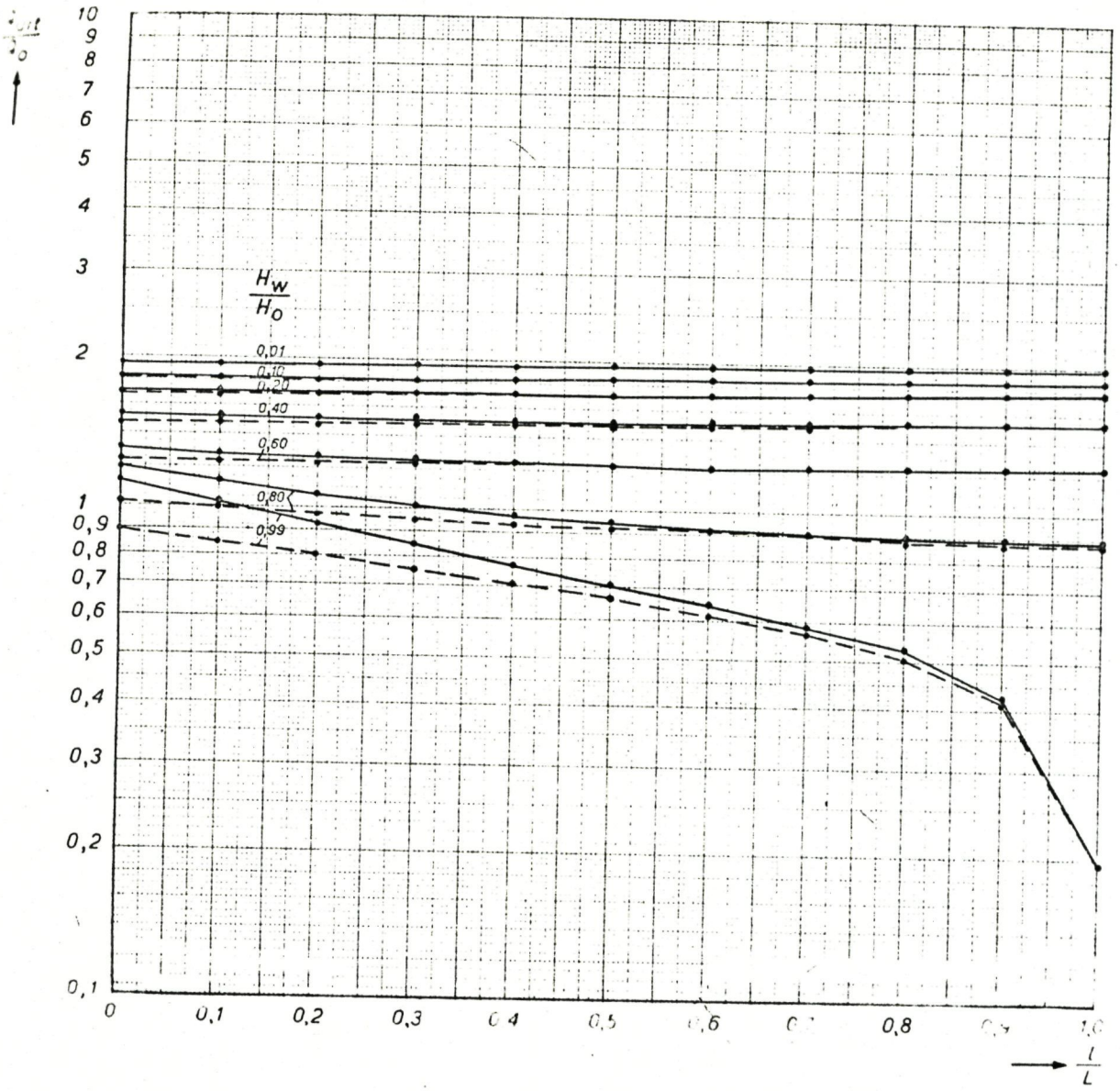


POMPTYPE

——— n_s = 10

– – – – n_s = 250

NA BREUK Q_{uit}/Q_o ALS FUNCTIE VAN l/L d/D : 0,3 EN $V_o^2/2gH_o$: 0,0001		j.w. A3
OPKUNDIG LABORATORIUM	M 1007 - 1002	FIG. 2

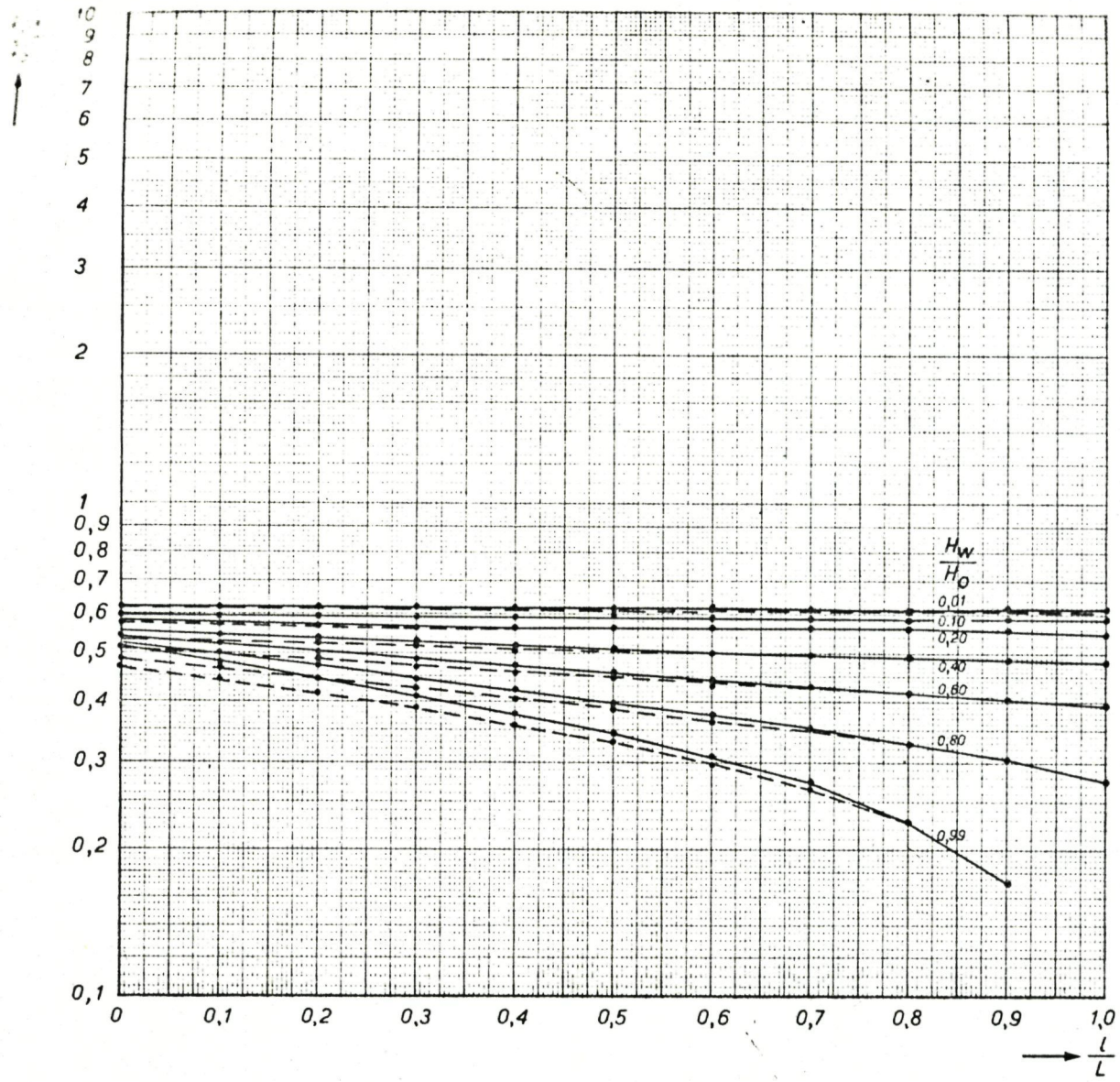


POMPTYPE

——— n_s = 10

- - - - - n_s = 250

Q_{uit}/Q_o ALS FUNCTIE VAN l/L			jw
0,3 EN $V_o^2/2gH_o$ = 0,001			A3
LABORATORIUM	M 1007 - 1006	FIG 3	

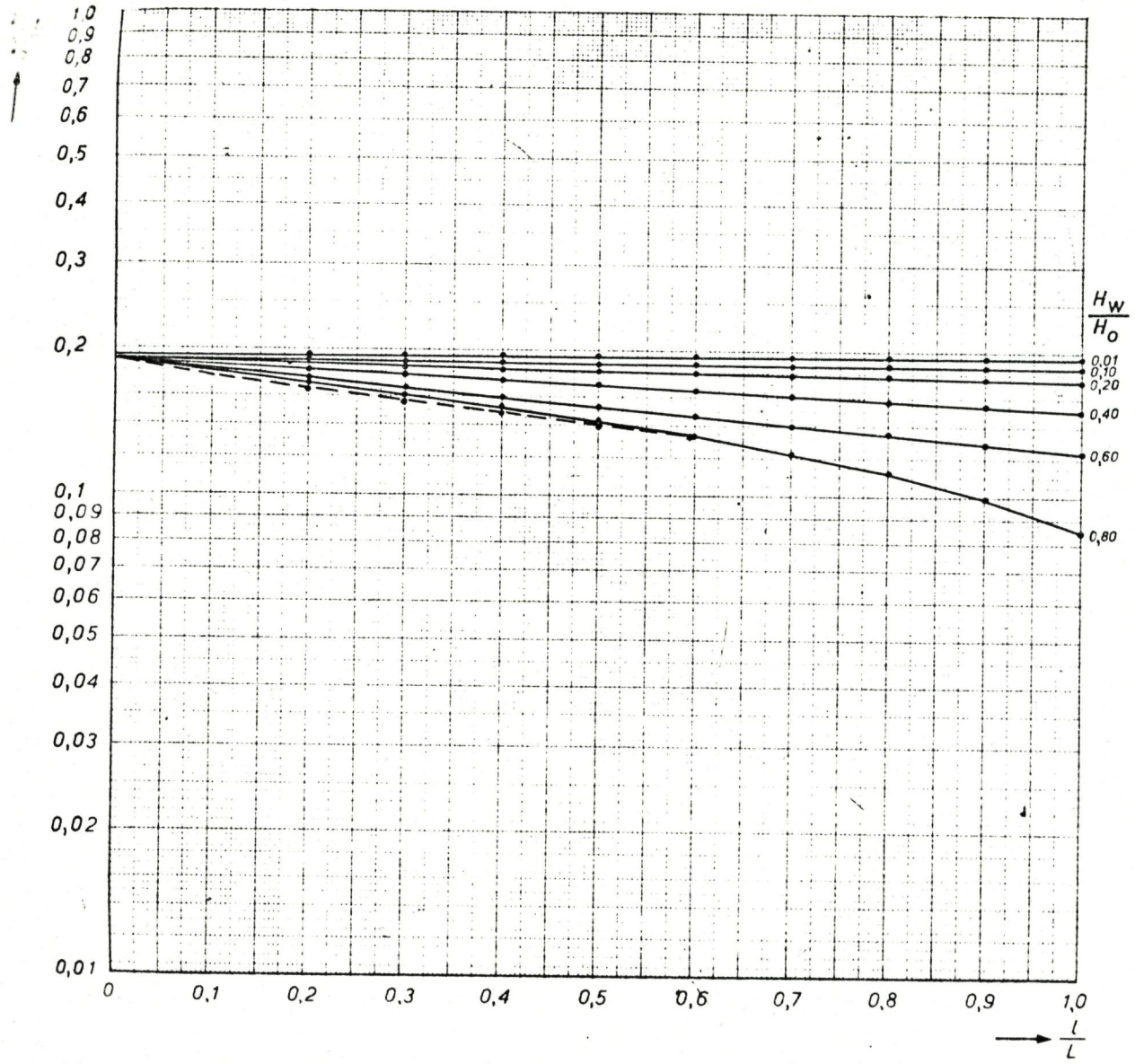


POMPTYPE

——— n_s = 10

– – – – – n_s = 250

NA BREUK Q_{uit}/Q_o ALS FUNCTIE VAN l/L DING d/D = 0,3 EN $V_o^2/2gH_o$ = 0,01		j.w. A3
OOPKUNDIG LABORATORIUM	M. 1007 - 1010	FIG. 4

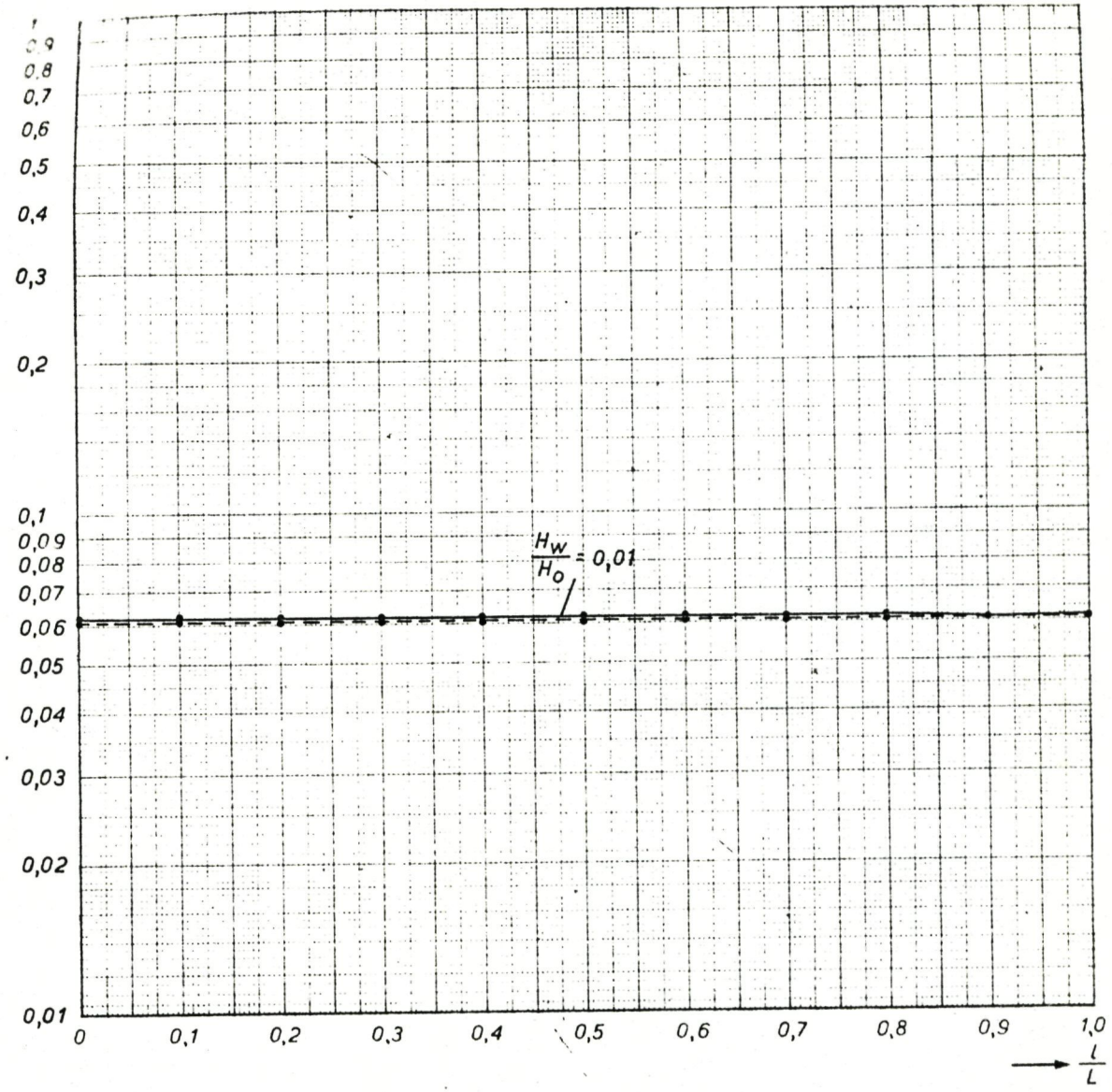


POMPTYPE

——— n_s = 10

– – – – – n_s = 250

Q_w/Q_o ALS FUNCTIE VAN l/L 03 EN $v_o^2/2gH_o$ = 0,1			j.w
			A3
LABORATORIUM	M 1007 - 1014	FIG 5	

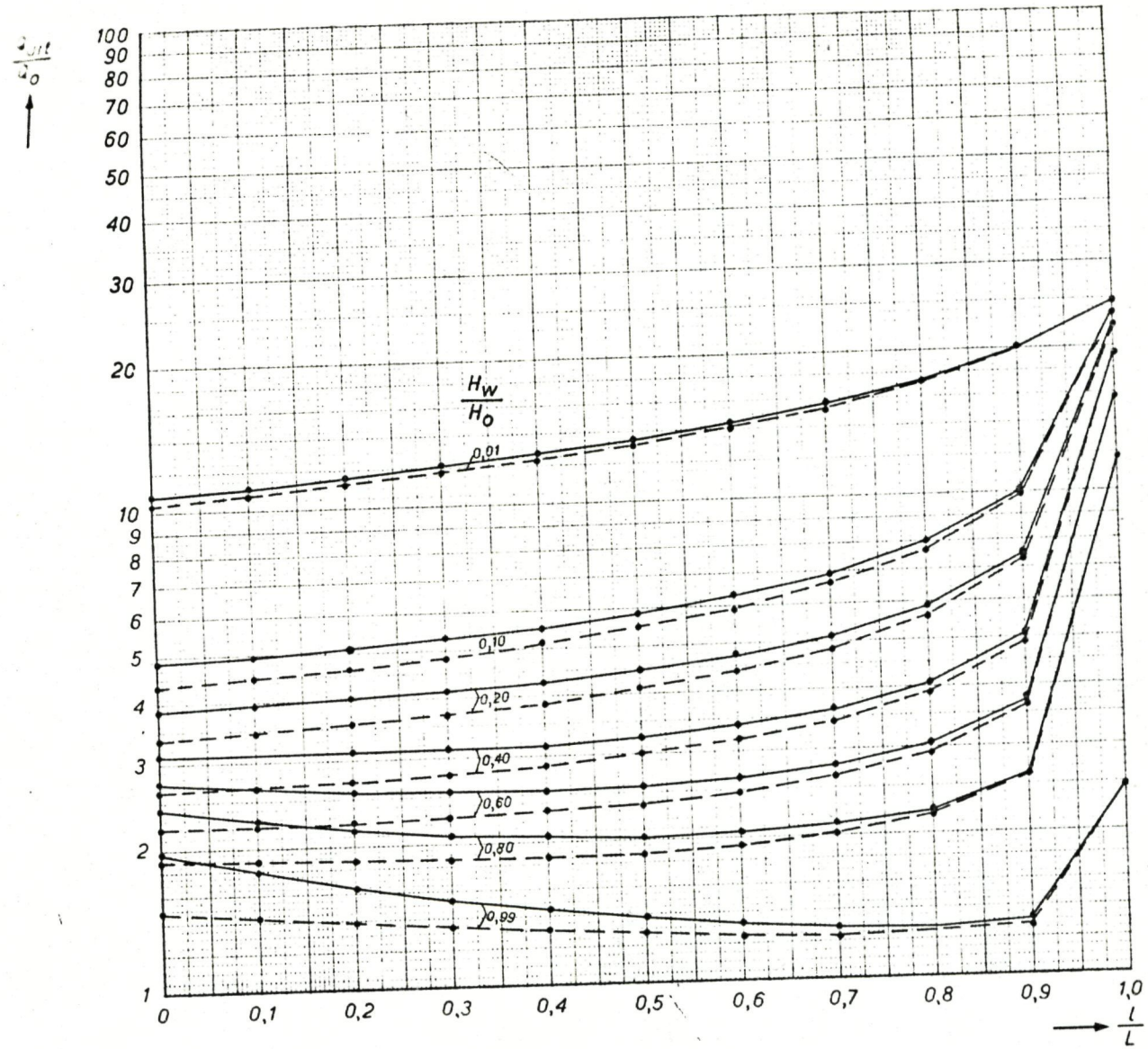


POMPTYPE

——— $n_s = 10$

– – – – – $n_s = 250$

...NA BREUK Q_{uit}/Q_o ALS FUNCTIE VAN l/L		jw
... d/D 0,3 EN $V_o^2/2gH_o = 0,99$		A3
...ONDIG LABORATORIUM	M 1007 - 1018	FIG. 6

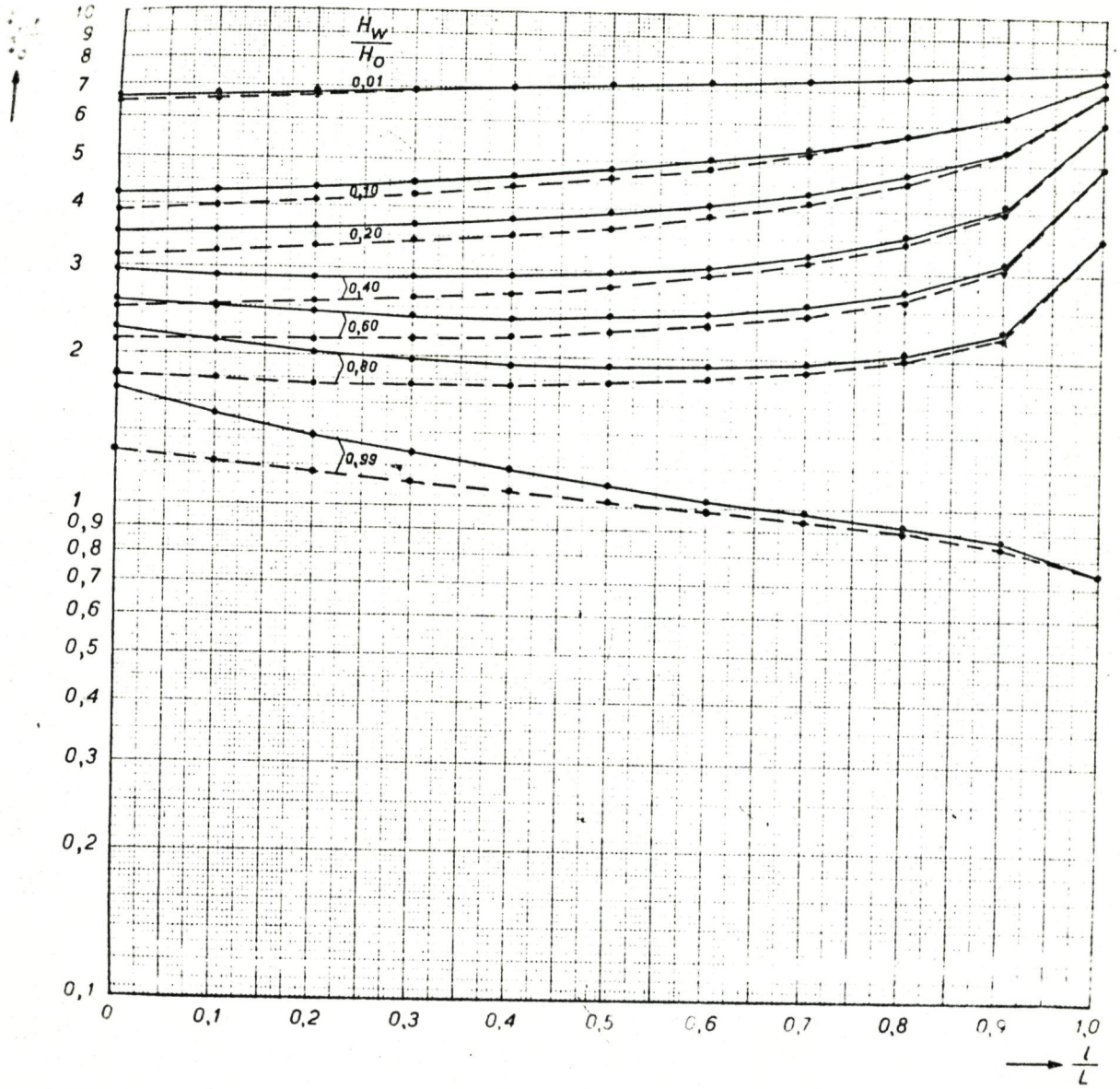


POMPTYPE

——— n_s = 10

– – – – – n_s = 250

...E NA BREUK Q_{uit}/Q_o ALS FUNCTIE VAN l/L		j.w.
...N LEIDING d/D = 0,6 EN $V_o^2/2gH_o$ = 0,0001		A3
...LOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1007 - 1003	FIG. 7

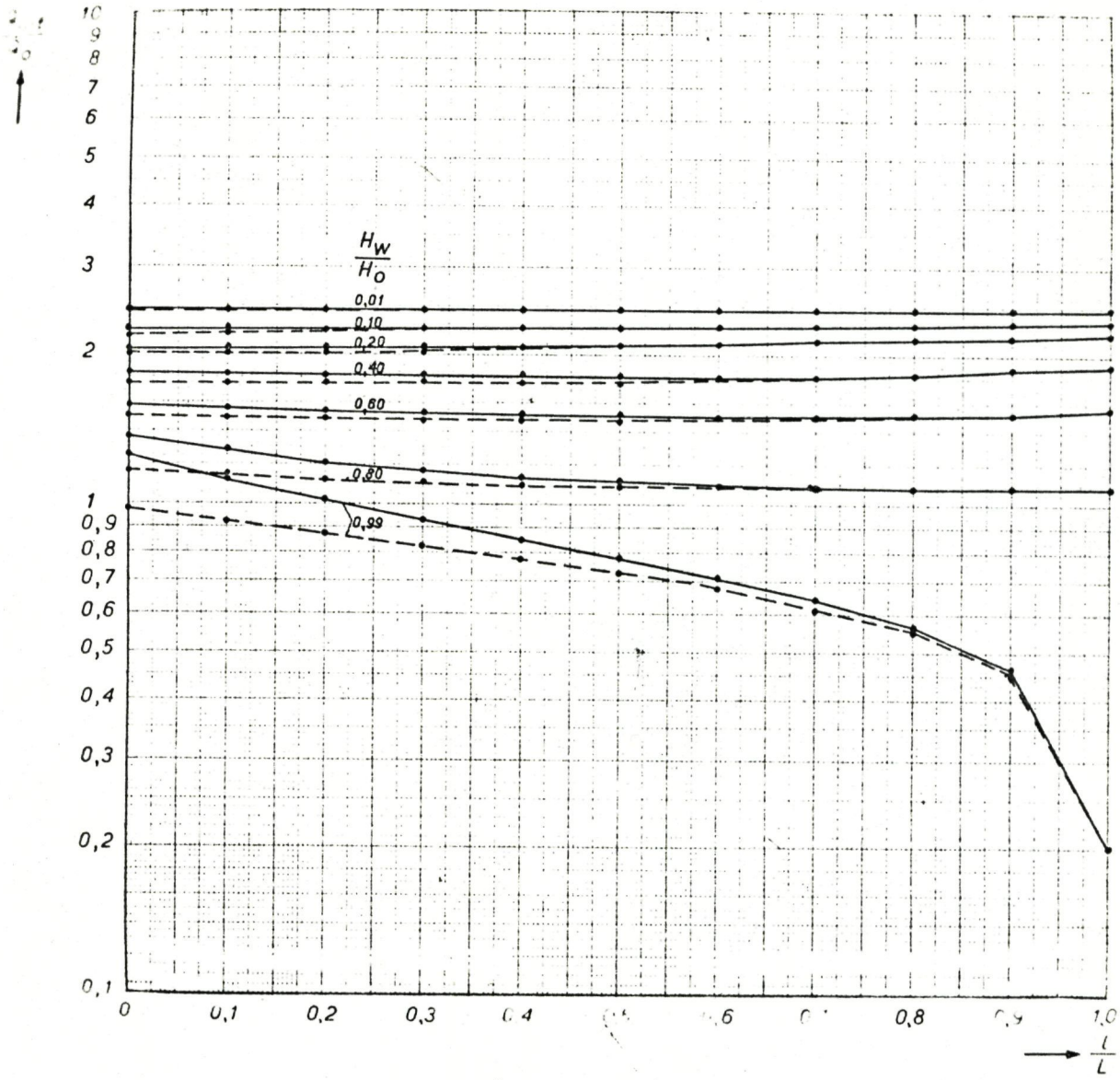


Q_{uit}/Q_0 ALS FUNCTIE VAN l/L EN $V_0^2/2gH_0 = 0,001$			JW
			AR
LABORATORIUM	M 1007 - 1007	FIG 8	

POMPTYPE

——— $n_s = 10$

- - - - $n_s = 250$

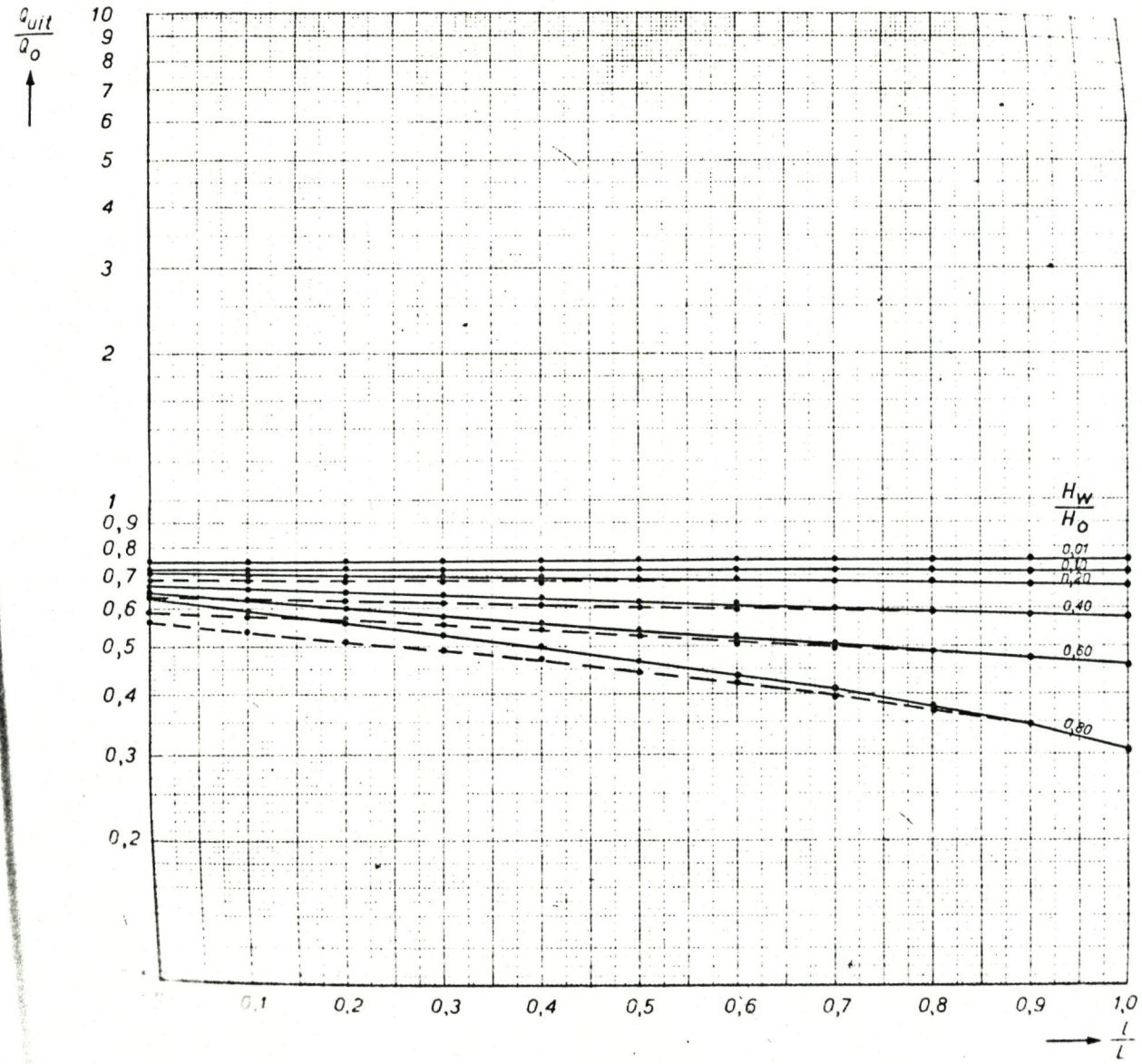


POMPTYPE

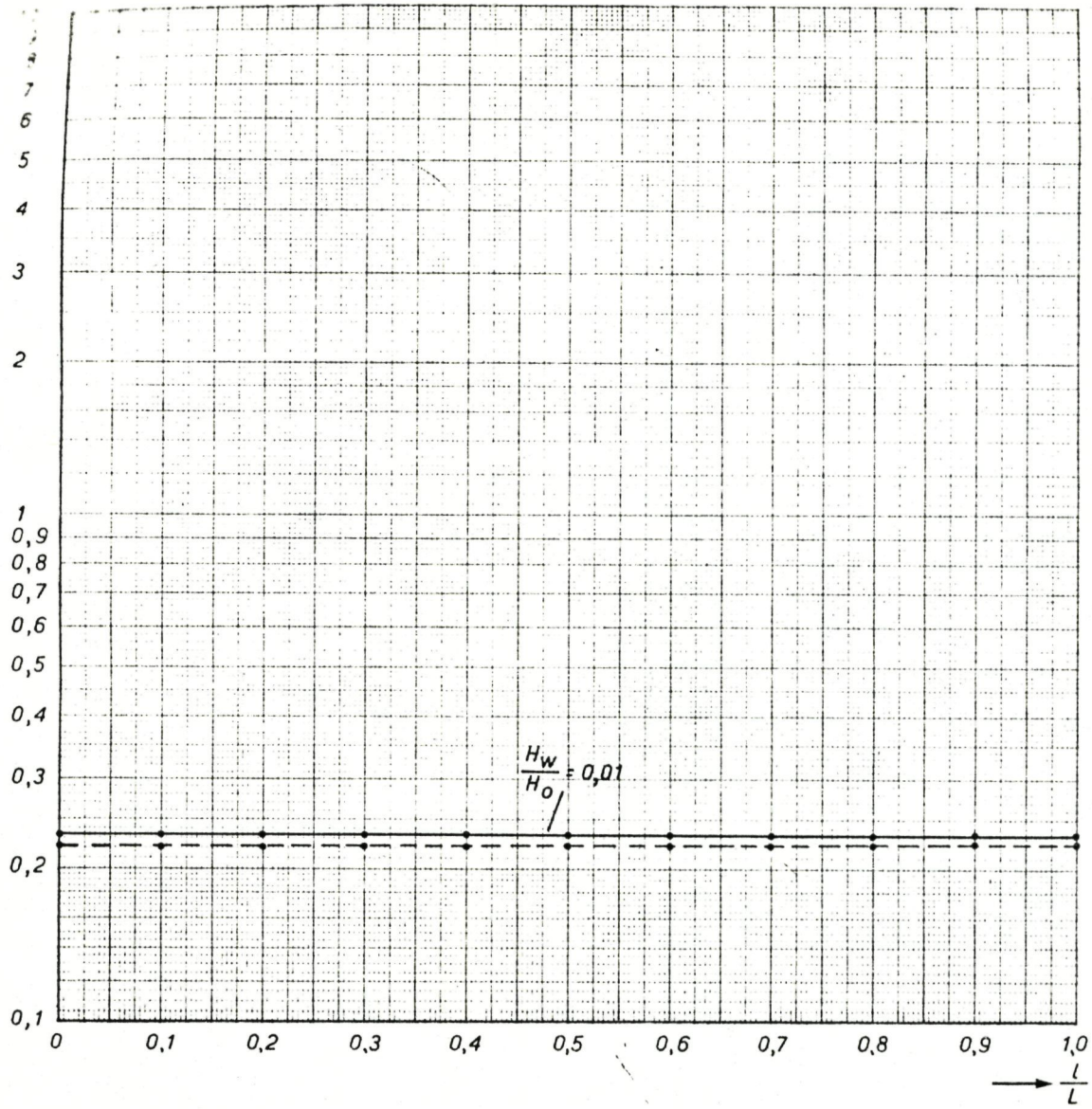
——— n_s = 10

- - - - - n_s = 250

Q_{uit}/Q_o ALS FUNCTIE VAN l/L EN $V_o^2/2gH_o$ = 0,01		jw
		A3
LABORATORIUM	M 1007 - 1011	FIG 9


Quit / Qo
10
9
8
7
6
5
4
3
2
1
0,9
0,8
0,7
0,6
0,5
0,4
0,3
0,2
Hw / Ho
0,01
0,10
0,20
0,40
0,60
0,80
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
0,7
0,8
0,9
1,0
l / L

POMPTYPE

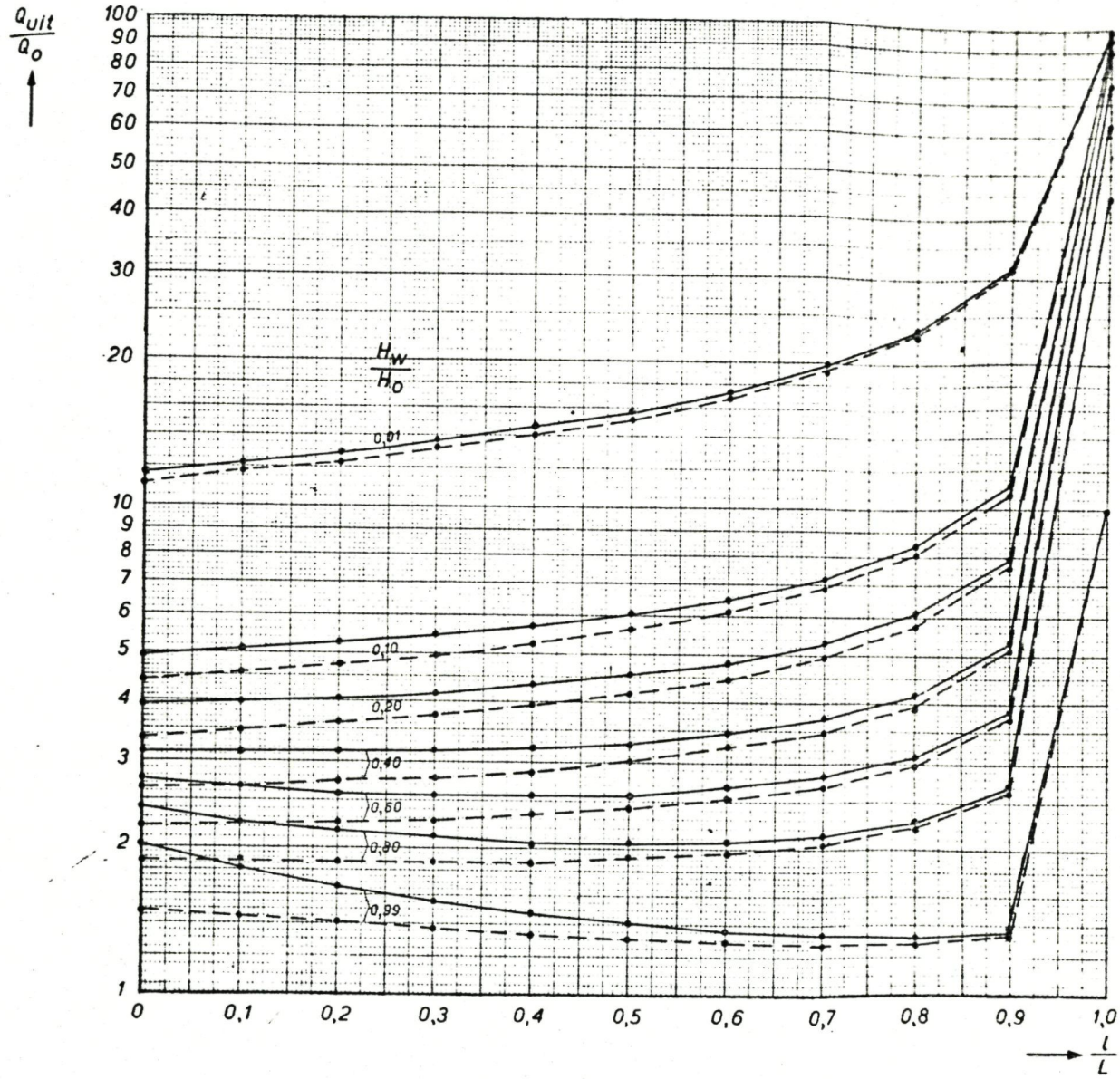


POMPTYPE

——— $n_s = 10$

– – – – – $n_s = 250$

[illegible] BREUK Q_{uit}/Q_o ALS FUNCTIE VAN l/L [illegible] $d/D = 0,5$ EN $V_o^2/2gH_o = 0,99$		j.w.
		A3
[illegible]OPKUNDIG LABORATORIUM	M. 1007 – 1019	FIG. 11

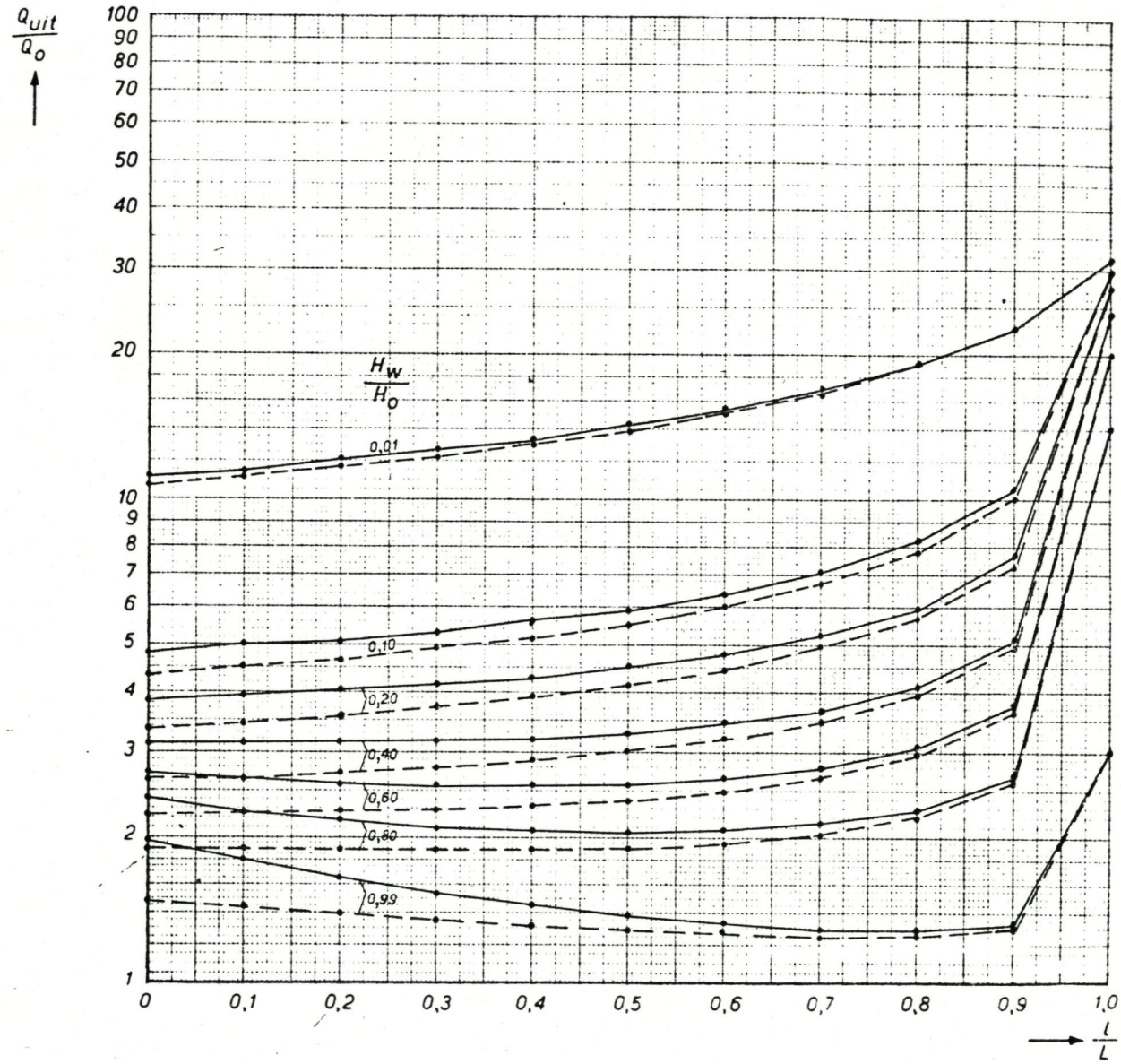


POMPTYPE

——— n_s = 10

– – – – n_s = 250

PERMANENTIE NA BREUK. Q_{uit}/Q_o ALS FUNCTIE VAN l/L COR: GAT IN LEIDING d/D = 1,1 EN $V_o^2/2gH_o$ = 0,0001		j.w. A3
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M. 1007 - 1004	FIG. 12

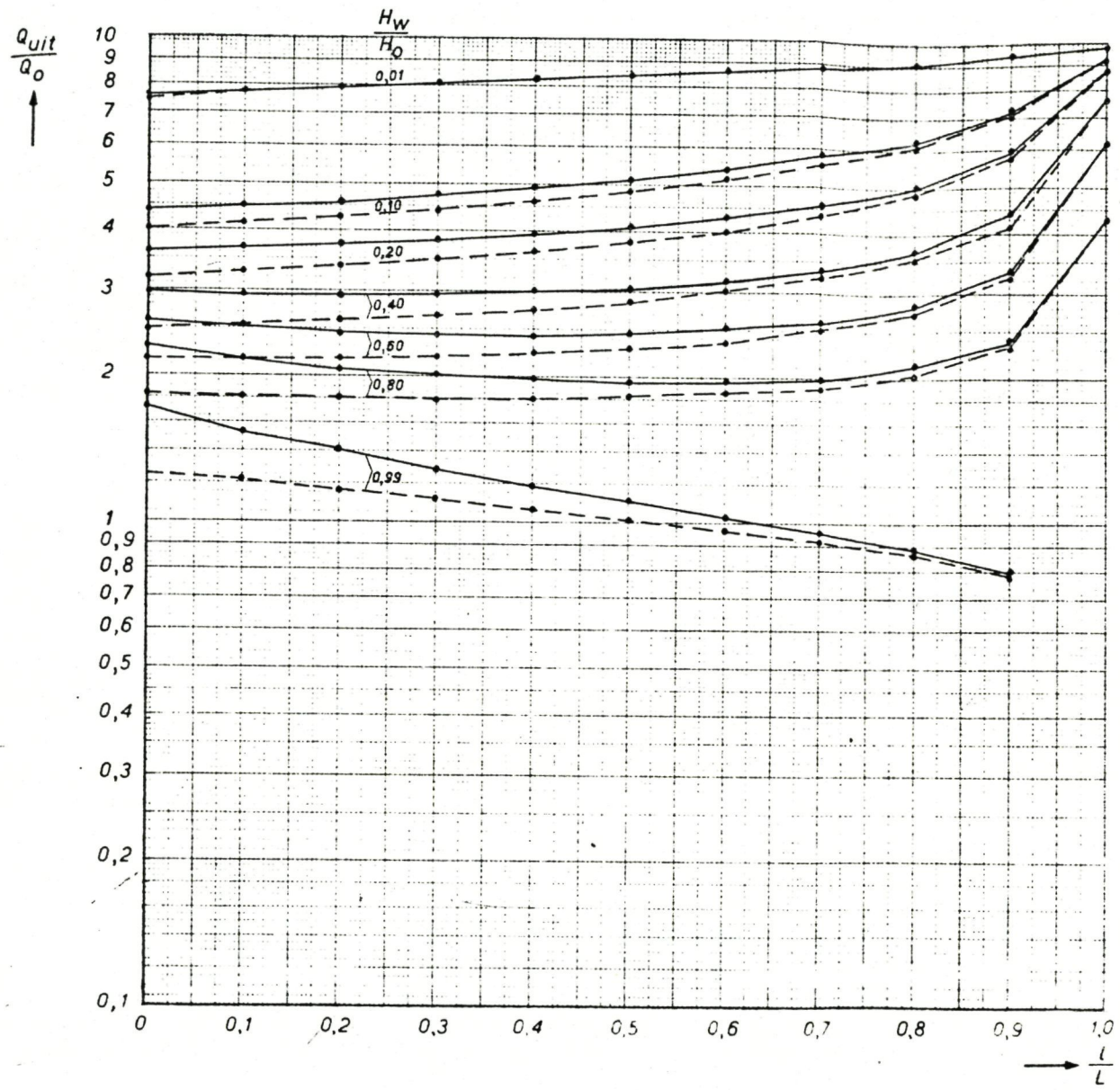


POMPTYPE

——— n_s = 10

– – – – – n_s = 250

PERMANENTIE NA BREUK. Q_{uit}/Q_o ALS FUNCTIE VAN l/L			j.w.
GAT IN LEIDING d/D = 1,1 EN $V_o^2/2gH_o$ = 0,001			A3
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M. 1007 - 1008	FIG. 13	

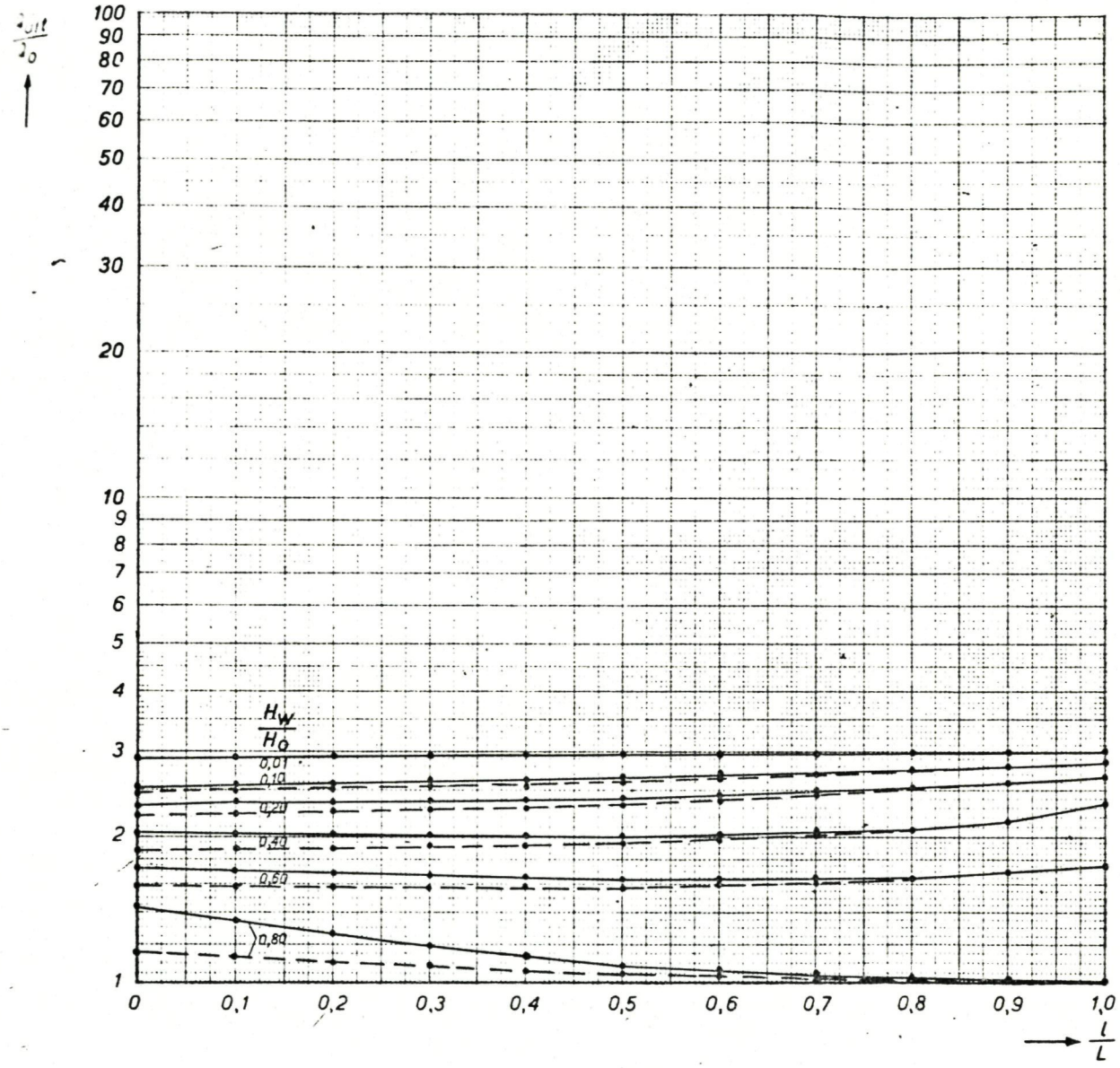


POMPTYPE

——— n_s = 10

– – – – – n_s = 250

PERMANENTIE NA BREUK Q_{uit}/Q_o ALS FUNCTIE VAN l/L COR: GAT IN LEIDING d/D = 1,1 EN $V_o^2/2gH_o$ = 0,01		j.w. A3
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M. 1007 - 1012	FIG. 14

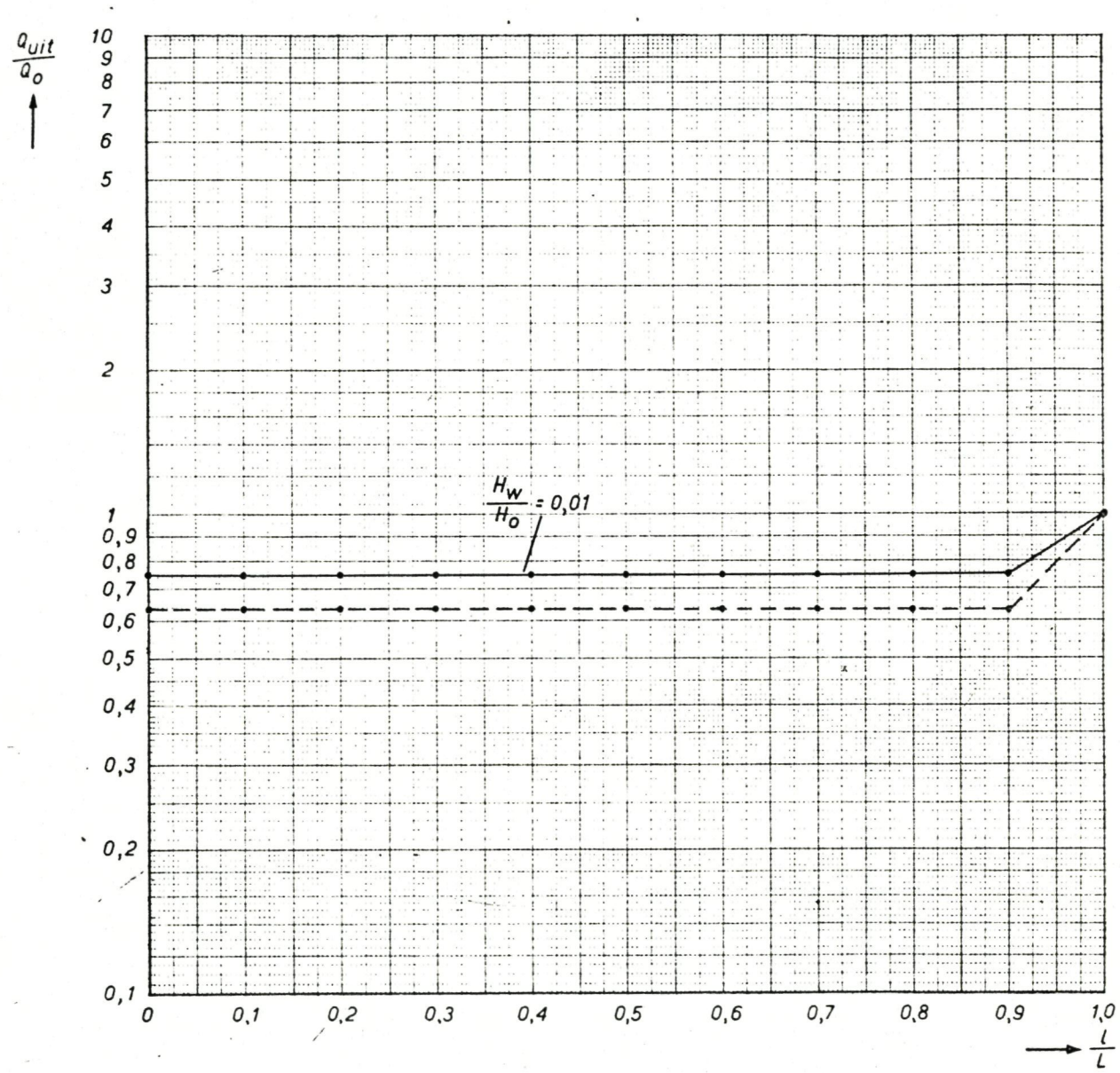


POMPTYPE

——— n_s = 10

– – – – – n_s = 250

FERMANENTIE NA BREUK Q_{uit}/Q_o ALS FUNCTIE VAN l/L		j.w.
COR: GAT IN LEIDING d/D 1,1 EN $V_o^2/2gH_o$ = 0,1		A3
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M. 1007 - 1016	FIG. 15

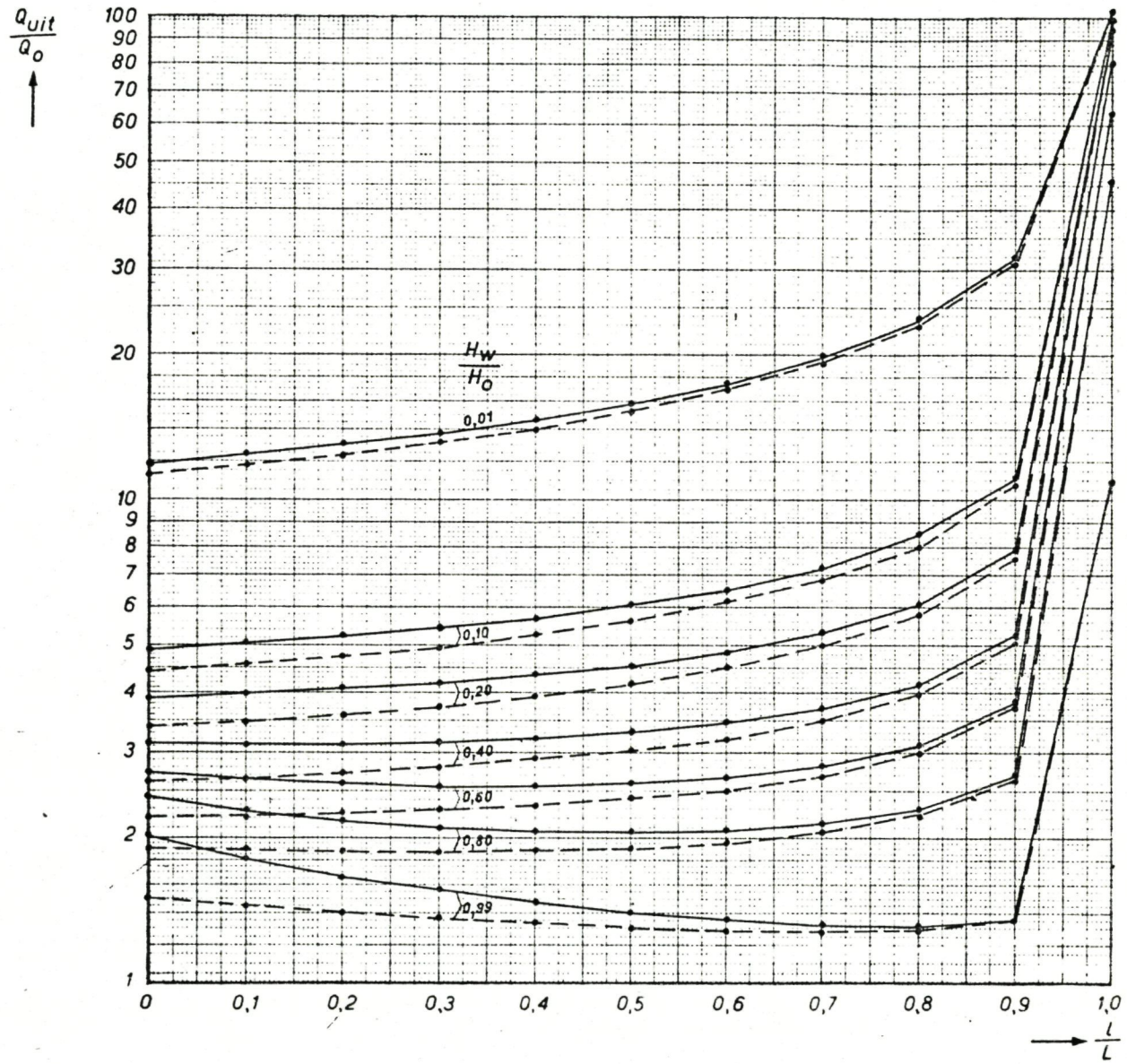


POMPTYPE

——— $n_s = 10$

– – – – $n_s = 250$

PERMANENTIE NA BREUK Q_{uit}/Q_o ALS FUNCTIE VAN l/L		j.w.
COR: GAT IN LEIDING d/D = 1,1 EN $V_o^2/2gH_o = 0,99$		A3
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M. 1007 - 1020	FIG. 16

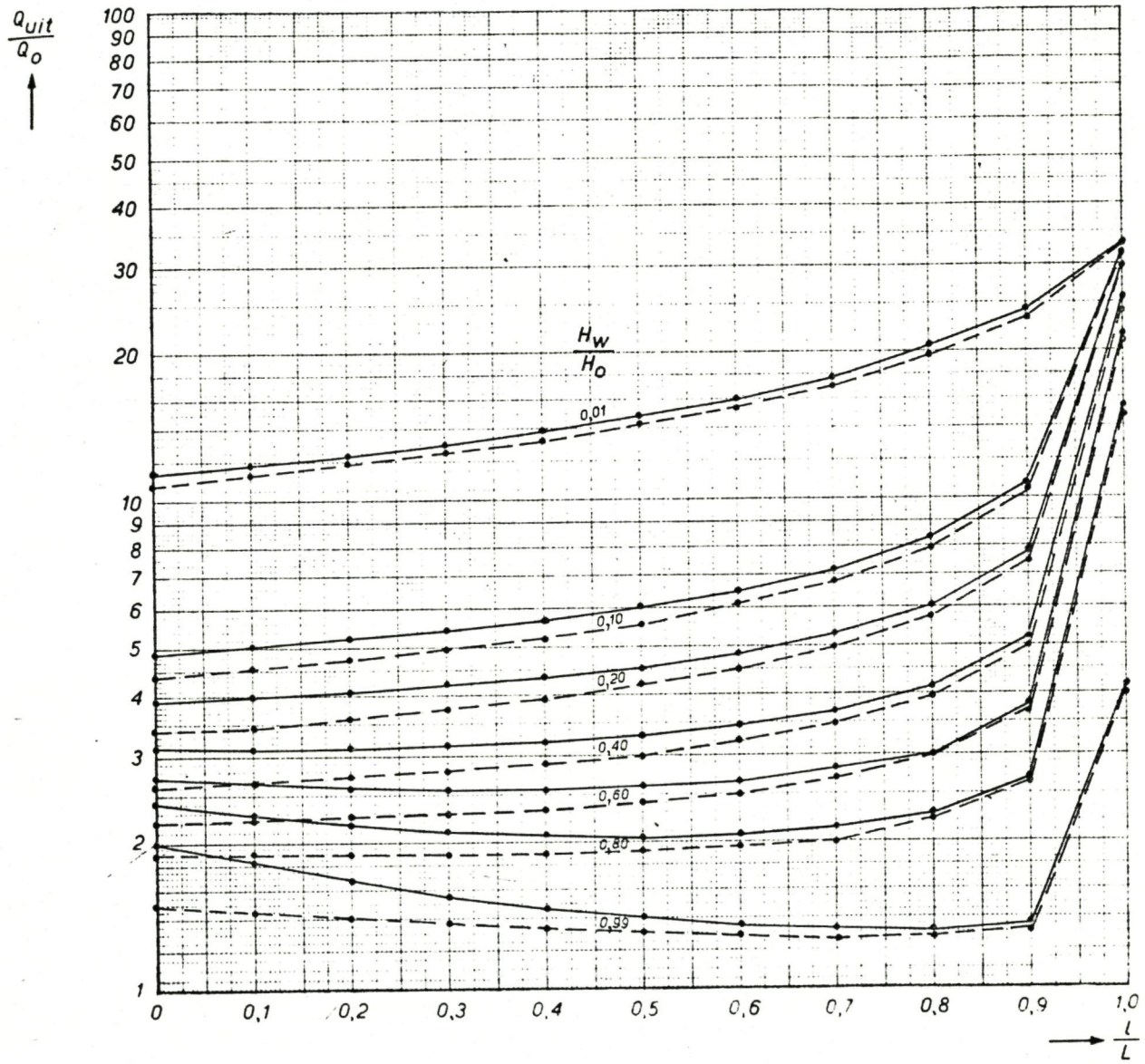


POMPTYPE

——— n_s = 10

– – – – – n_s = 250

PERMANENTIE NA BREUK Q_{uit}/Q_o ALS FUNCTIE VAN l/L OP AFSCHUIVING LEIDING EN $V_o^2/2gH_o$ = 0,0001		j.w.
		A3
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M. 1007 – 1005	FIG. 17

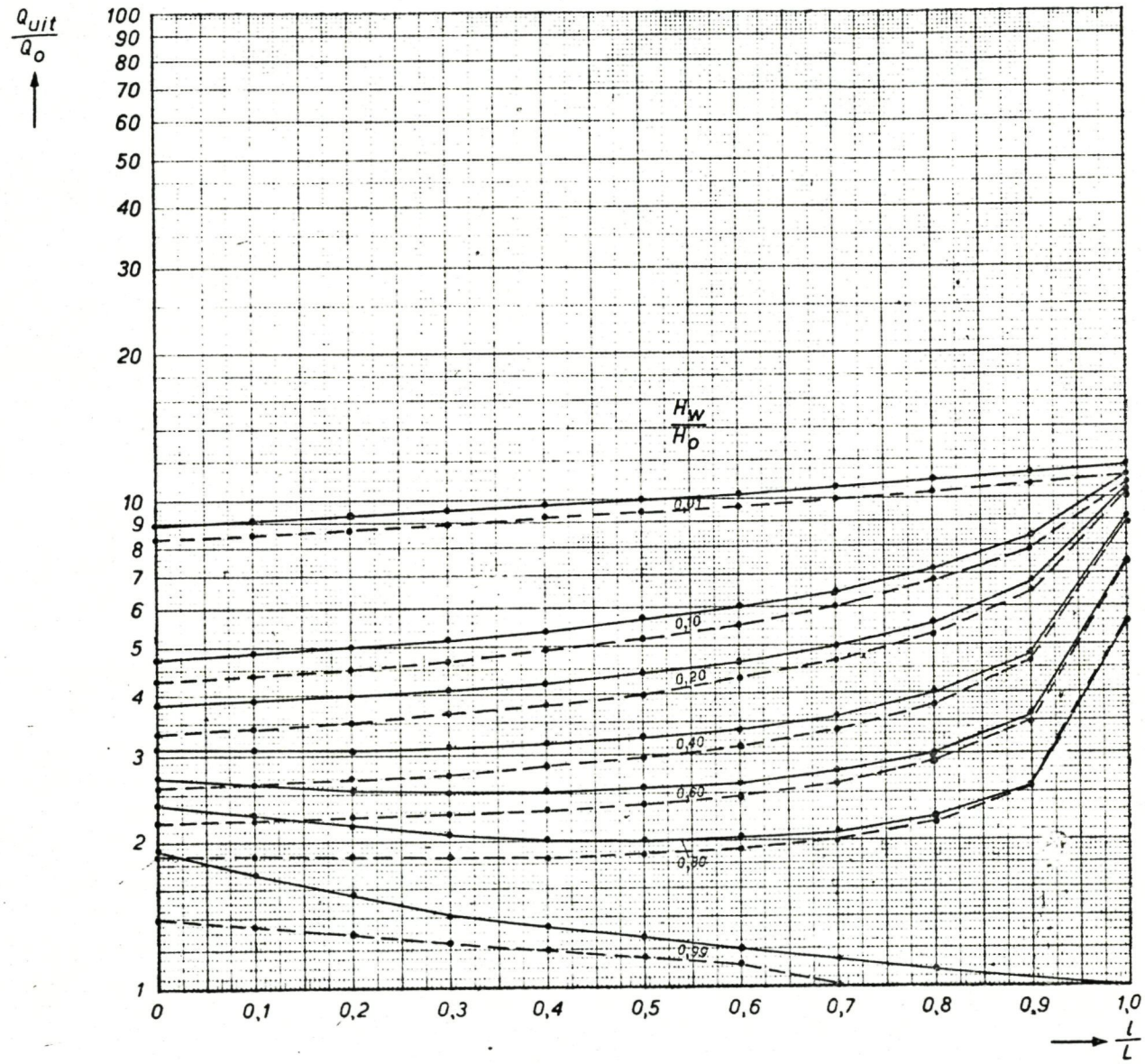


POMPTYPE

——— n_s = 10

– – – – – n_s = 250

PERMANENTIE NA BREUK. Q_{uit}/Q_o ALS FUNCTIE VAN l/L VOOR AFSCHUIVING LEIDING EN $V_o^2/2gH_o$ = 0,001		j.w.
		A3
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M. 1007 - 1009	FIG. 18

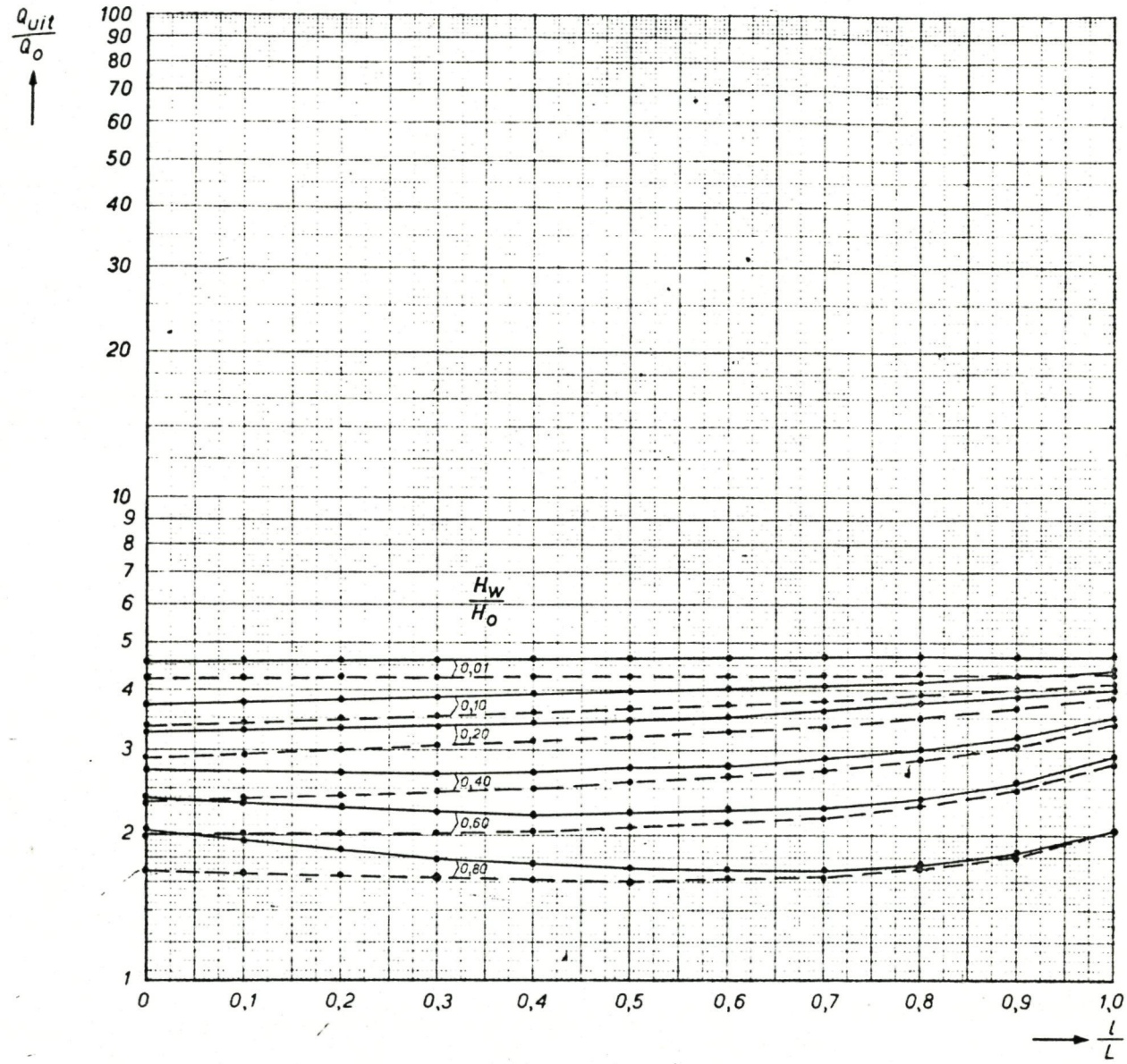


POMPTYPE

——— n_s = 10

– – – – – n_s = 250

PERMANENTIE NA BREUK Q_{uit}/Q_o ALS FUNCTIE VAN l/L			j.w.
VOOR AFSCHUIVING LEIDING EN $V_o^2/2gH_o$ = 0,01			A3
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M. 1007 - 1013	FIG. 19	

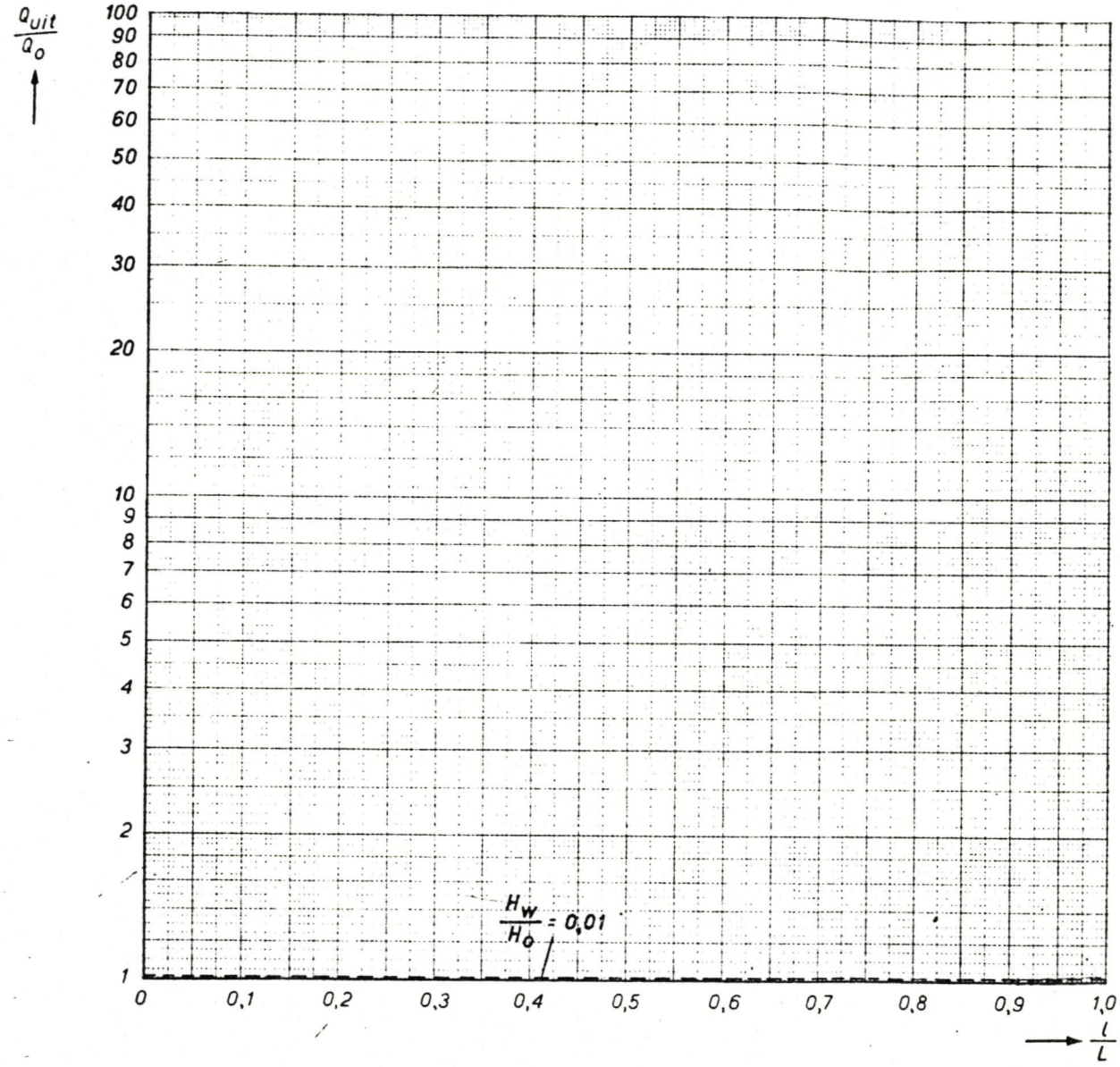


POMPTYPE

——— n_s = 10

– – – – – n_s = 250

MANENTIE NA BREUK Q_{uit}/Q_o ALS FUNCTIE VAN l/L			j.w.
AFSCHUIVING LEIDING EN $V_o^2/2gH_o$ = 0,1			A3
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M. 1007 - 1017	FIG. 20	

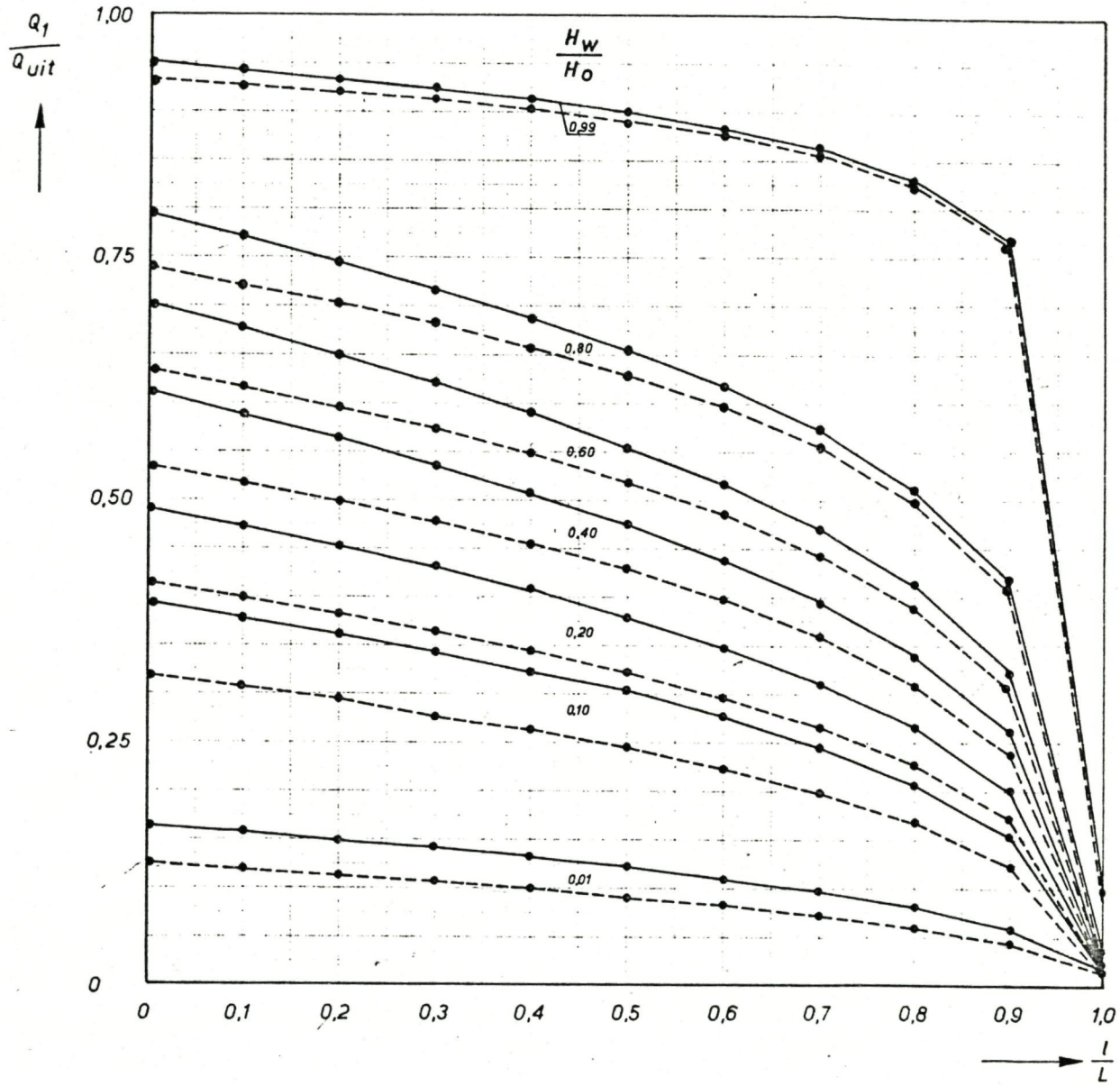


POMPTYPE

——— $n_s = 10$

– – – – – $n_s = 250$

PERMANENTIE NA BREUK Q_{uit}/Q_o ALS FUNCTIE VAN l/L EN AFSCHUIVING LEIDING EN $V_o^2/2gH_o = 0,99$		j.w.
		A3
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M. 1007 - 1021	FIG. 21

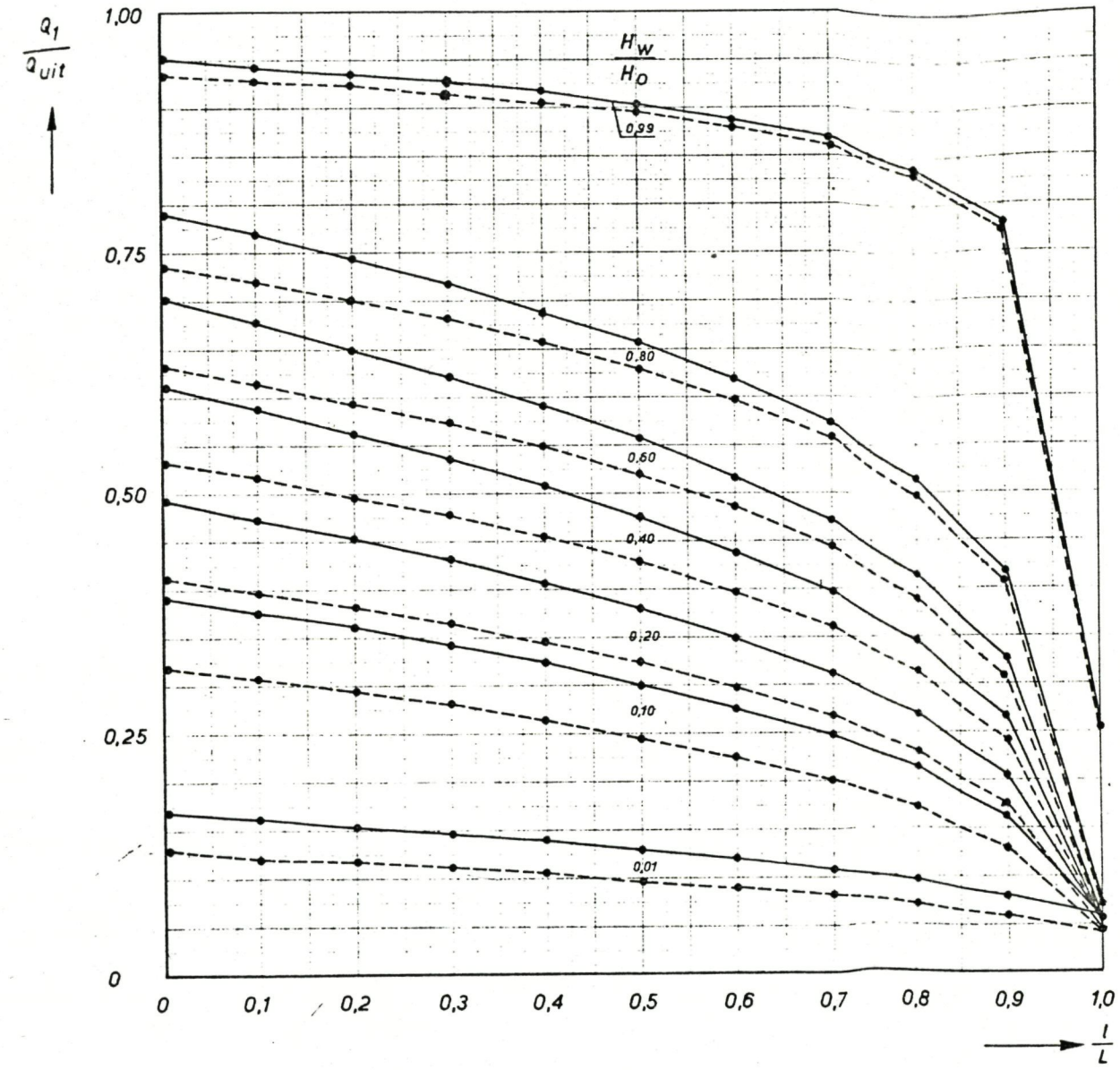


POMPTYPE

——— n_s = 10

- - - - - n_s = 250

PERMANENTIE NA BREUK Q_1 / Q_{uit} ALS FUNCTIE VAN l/L		JE
VOOR AFSCHUIVING LEIDING EN $V_0^2/2gH_0$ = 0,0001		A 3
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M. 1007-1048	FIG. 22

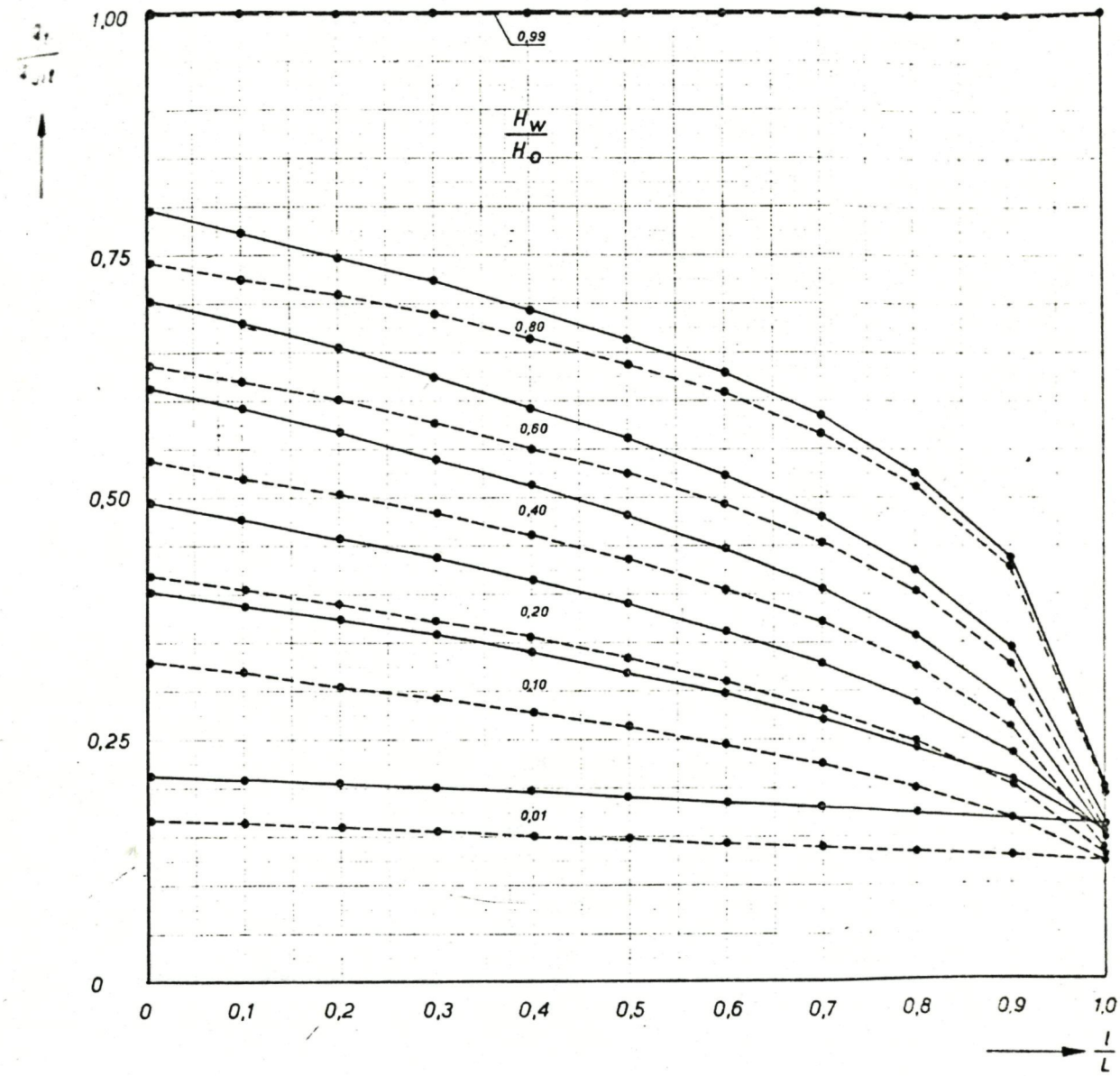


POMPTYPE

n_s = 10

n_s = 250

...ENTIE NA BREUK Q_1 / Q_{uit} ALS FUNCTIE VAN l/L			E
...SCHUIVING LEIDING EN $V_0^2/2gH_0$ = 0,001			A 3
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M. 1007-1049	FIG. 23	

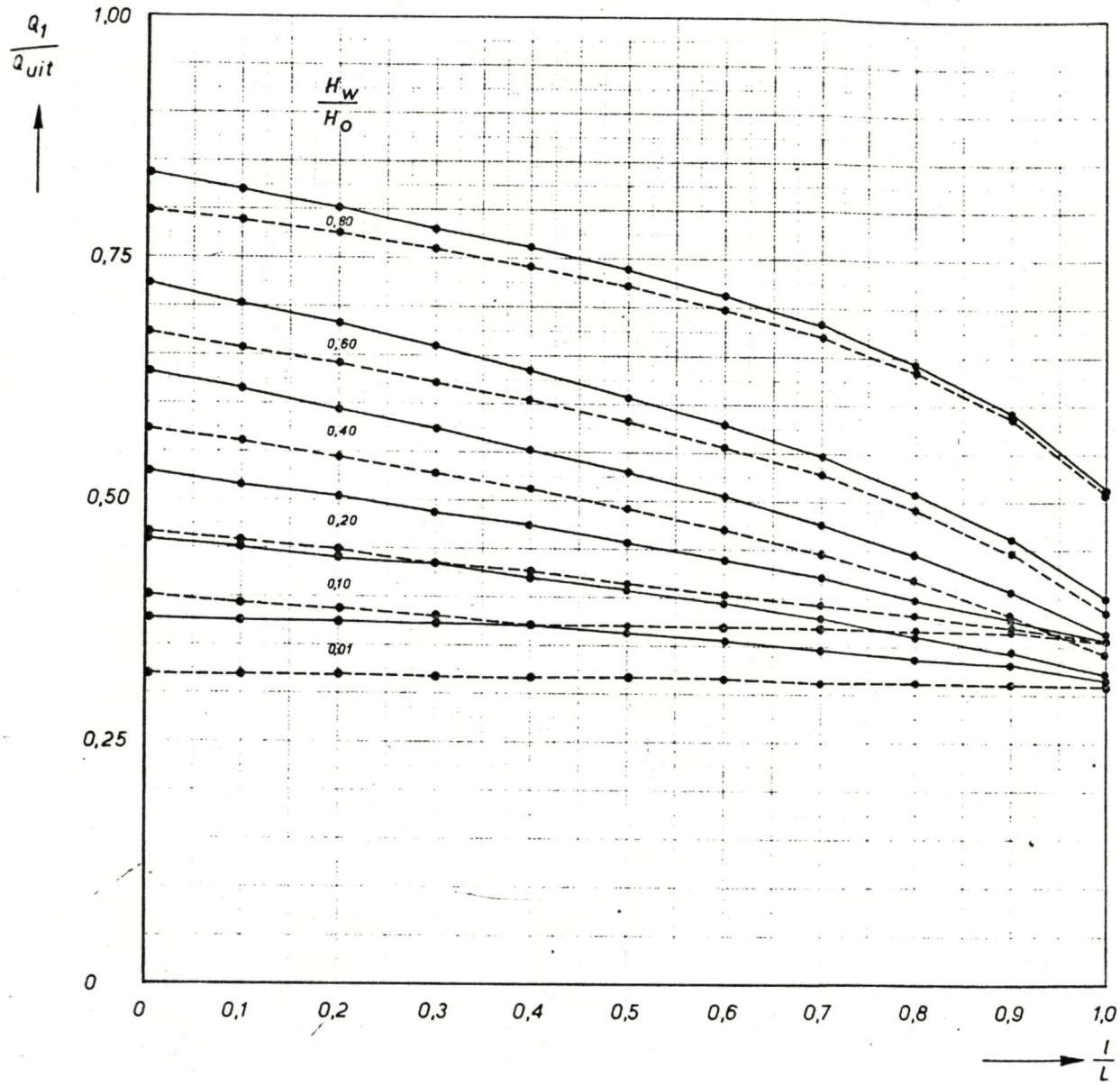


POMPTYPE

——— n_s = 10

- - - - - n_s = 250

...ENTIE NA BREUK. Q_1 / Q_{uit} ALS FUNCTIE VAN l/L		E
...SCHUIVING LEIDING EN $V_0^2/2gH_0$ = 0,01		A 3
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M. 1007-1050	FIG. 24

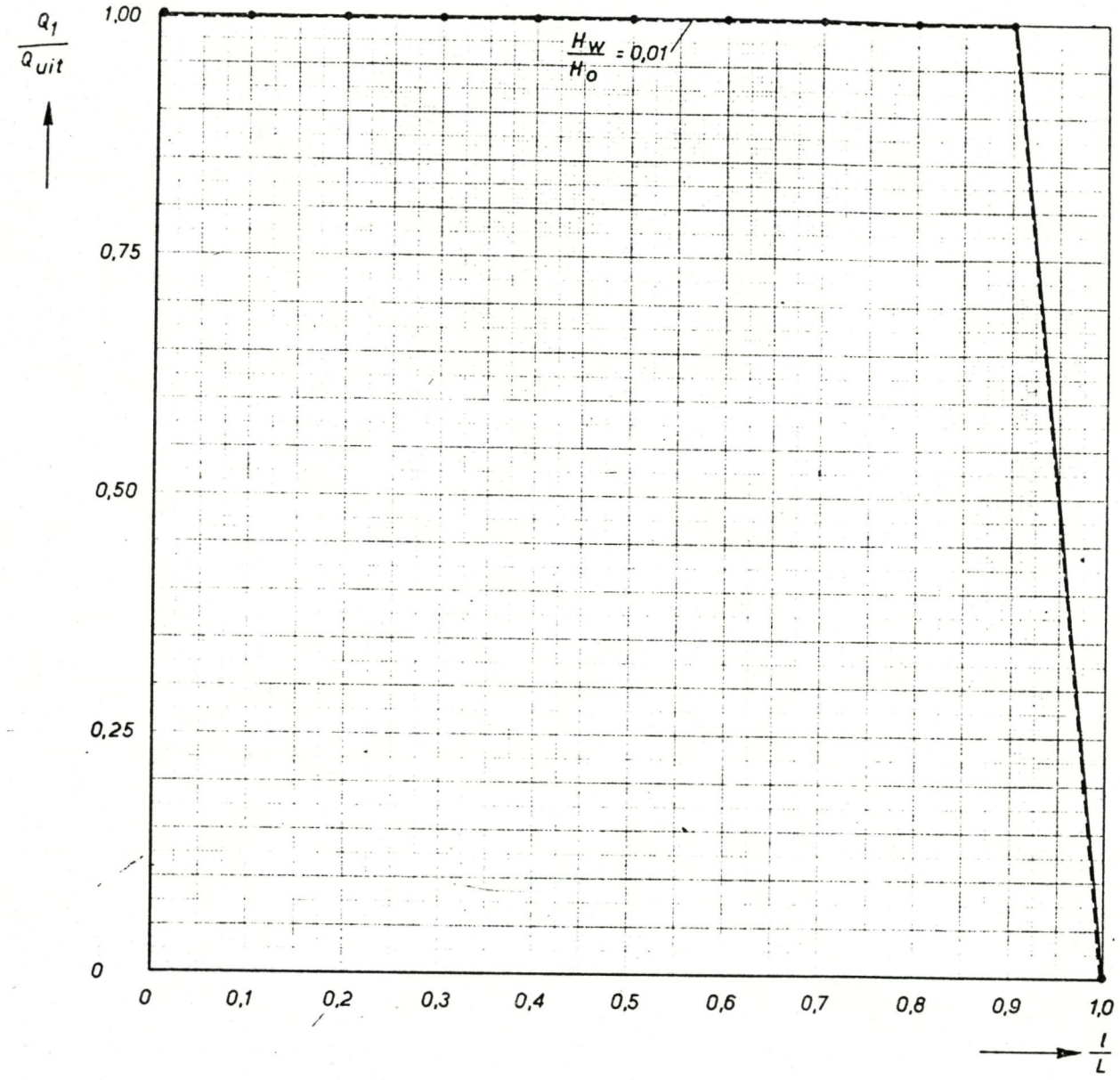


ENTIE NA BREUK Q_1 / Q_{uit} ALS FUNCTIE VAN l/L			E
SCHUIVING LEIDING EN $V_o^2/2gH_o = 0,1$			A 3
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M. 1007-1051	FIG. 25	

POMPTYPE

——— $n_s = 10$

- - - - - - $n_s = 250$

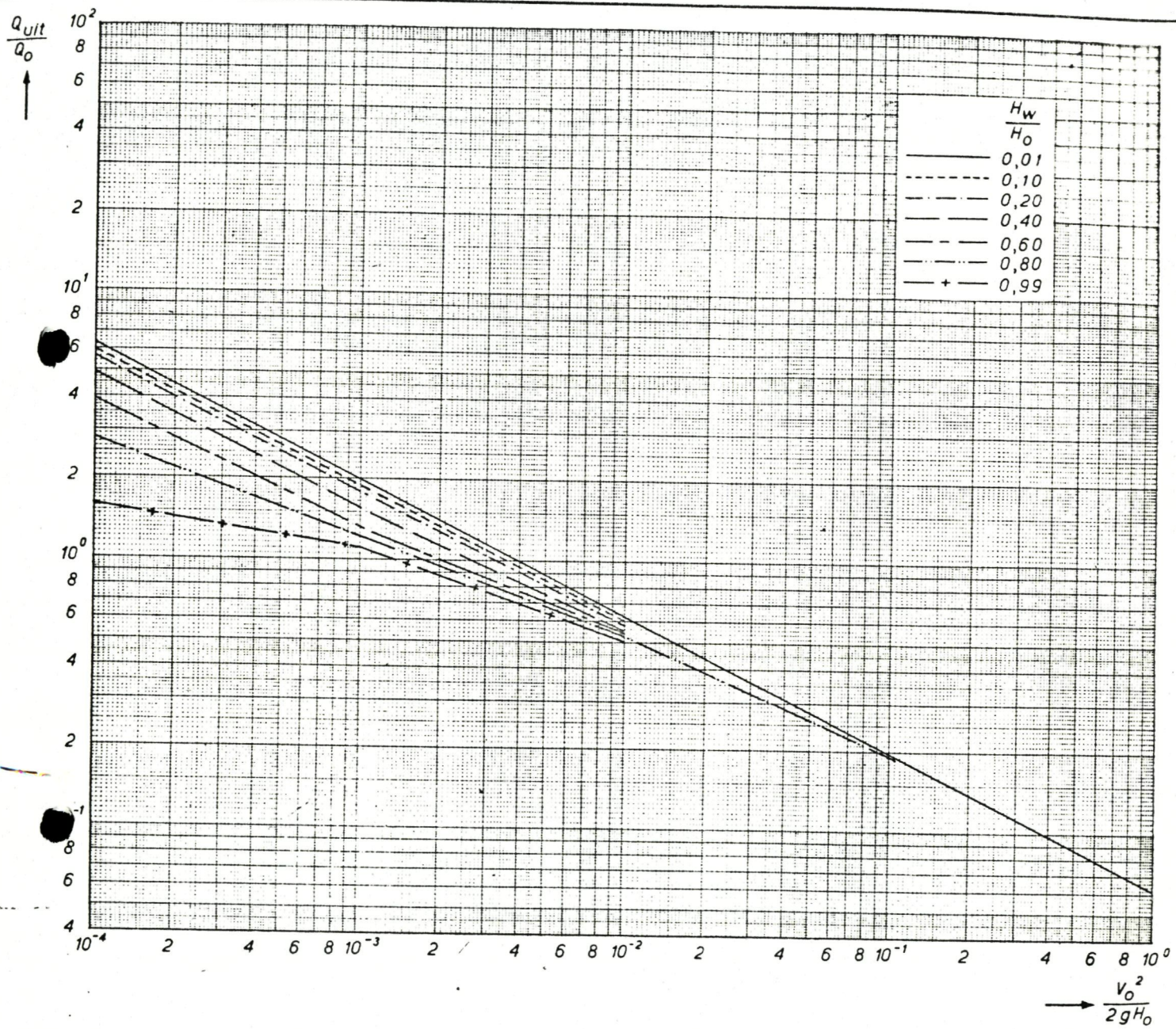


PERMANENTIE NA BREUK. Q_1/Q_{uit} ALS FUNCTIE VAN l/L			JE
VOOR AFSCHUIVING LEIDING EN $V_o^2/2gH_o = 0,99$			A 3
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M. 1007-1052	FIG. 26	

POMPTYPE

——— $n_s = 10$

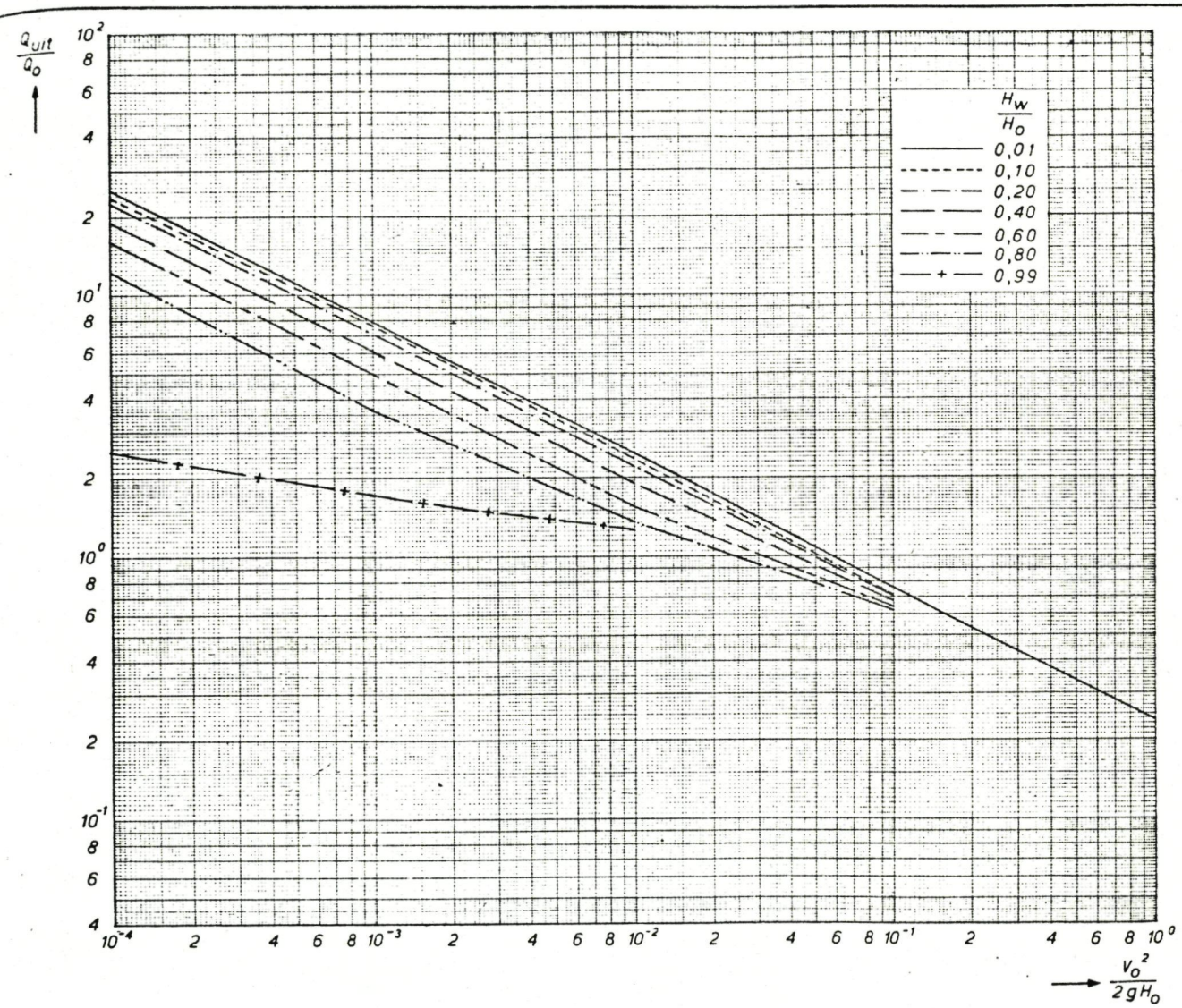
- - - - - - $n_s = 250$



TIE NA BREUK. MAXIMA Q_{uit}/Q_o ALS FUNCTIE ^2gH_o VOOR GAT IN LEIDING $d/D = 0,3$		j.w.
		A3
ATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M. 1007 - 1022	FIG. 27

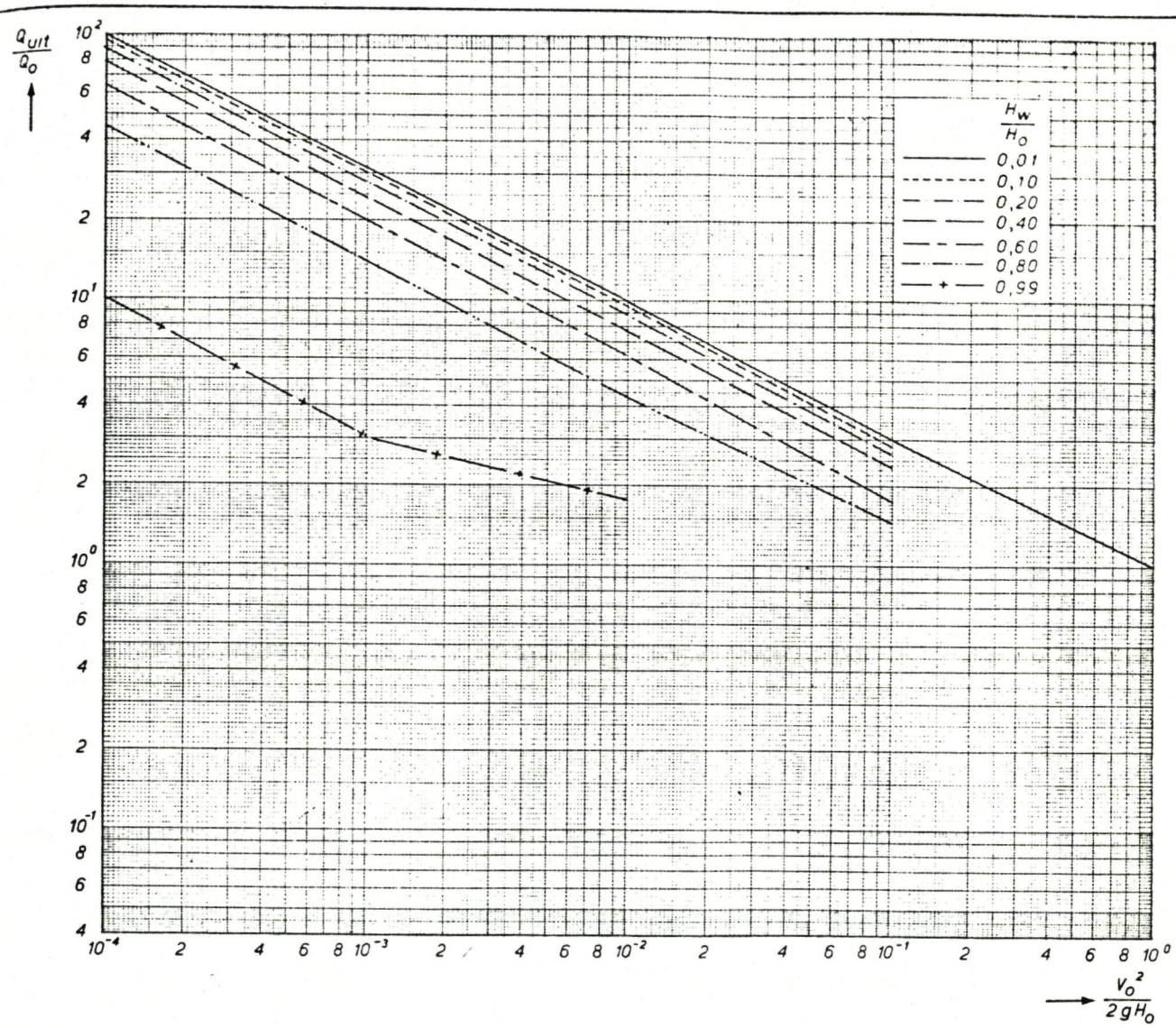
$H_c \geqslant 0$ LEVERT

VOORWAARDE $\frac{V_o^2}{2gH_o} \leqslant 1 - \frac{H_w}{H_o}$



MANENTIE NA BREUK MAXIMA Q_{uit}/Q_o ALS FUNCTIE VAN $V_o^2/2gH_o$ VOOR GAT IN LEIDING $d/D = 0,6$		jw
		A3
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M. 1007-1023	FIG. 28

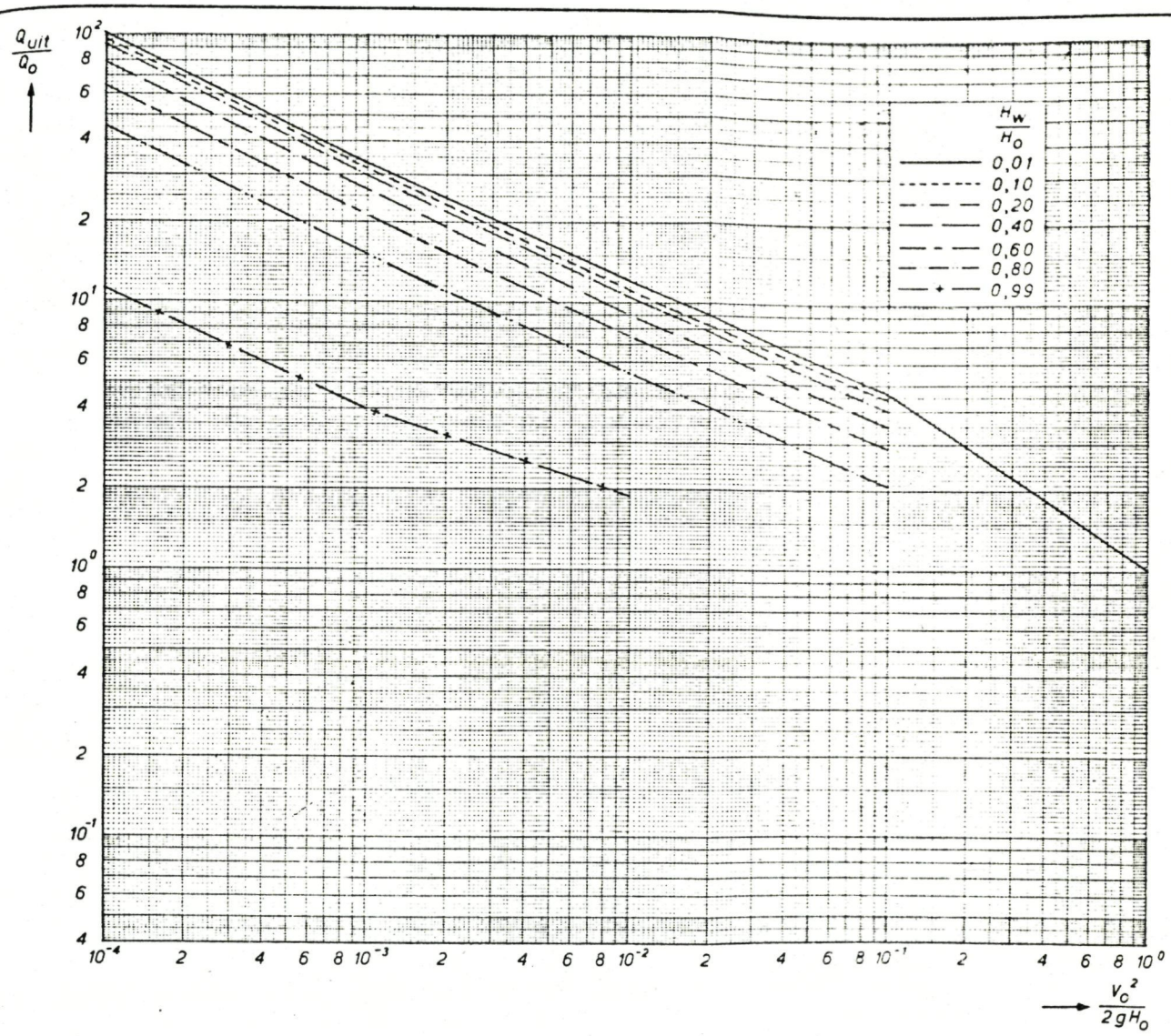
$H_c \geqslant 0$ LEVERT VOORWAARDE $\frac{V_o^2}{2gH_o} \leq 1 - \frac{H_w}{H_o}$



NENTIE NA BREUK. MAXIMA Q_{uit}/Q_o ALS FUNCTIE $V_o^2/2gH_o$ VOOR GAT IN LEIDING $d/D = 1,1$		J.W
		A3
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1007-1024	FIG. 29

$H_c \geqslant 0$ LEVERT

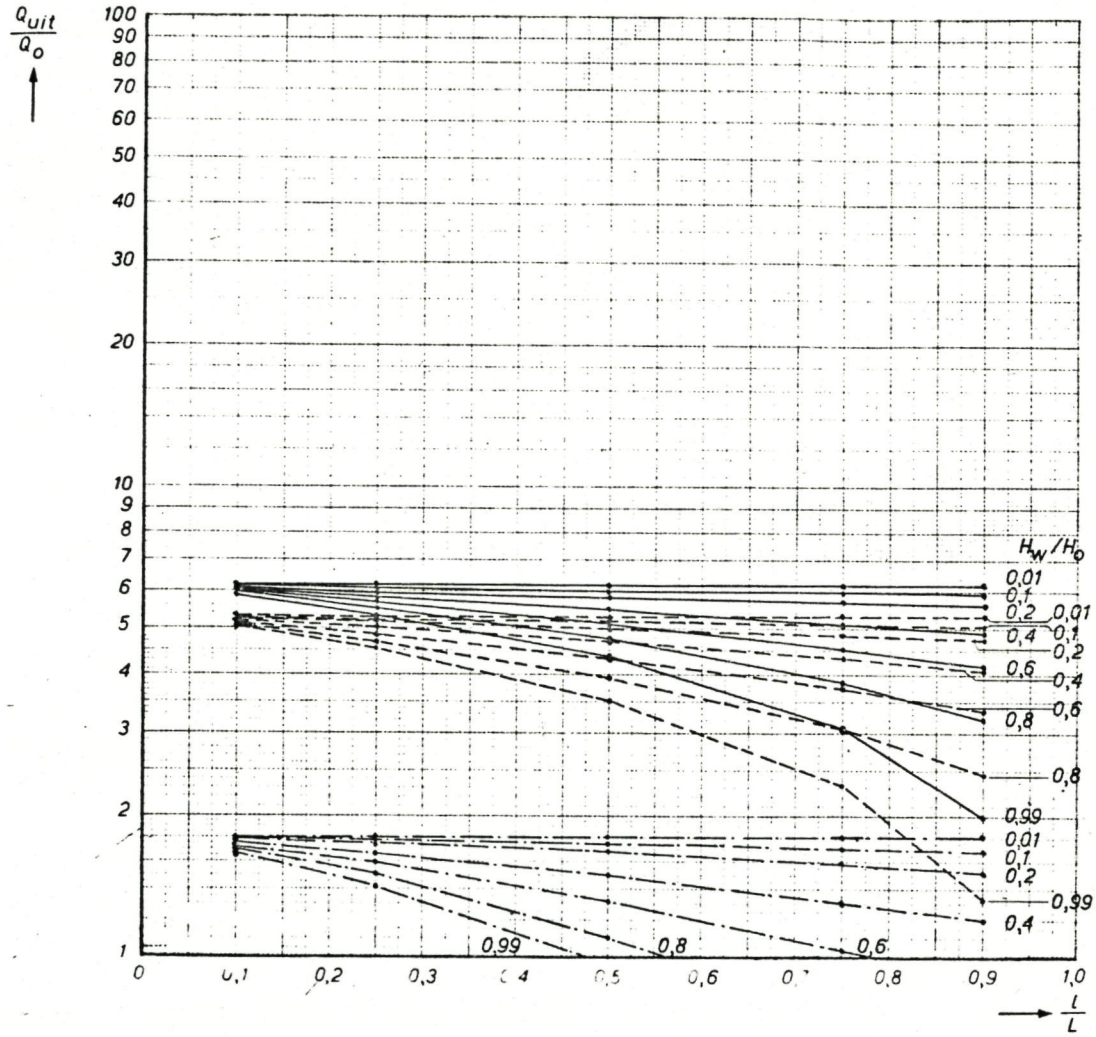
VOORWAARDE $\frac{V_o^2}{2gH_o} \leq 1 - \frac{H_w}{H_o}$



$H_c \geq 0$ LEVERT

VOORWAARDE $\frac{V_o^2}{2gH_o} \leq 1 - \frac{H_w}{H_o}$

PERMANENTIE NA BREUK MAXIMA Q_{uit}/Q_o ALS FUNCTIE VAN $V_o^2/2gH_o$ VOOR AFSCHUIVING LEIDING		j.w.
		A3
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1007 - 1025	FIG. 30

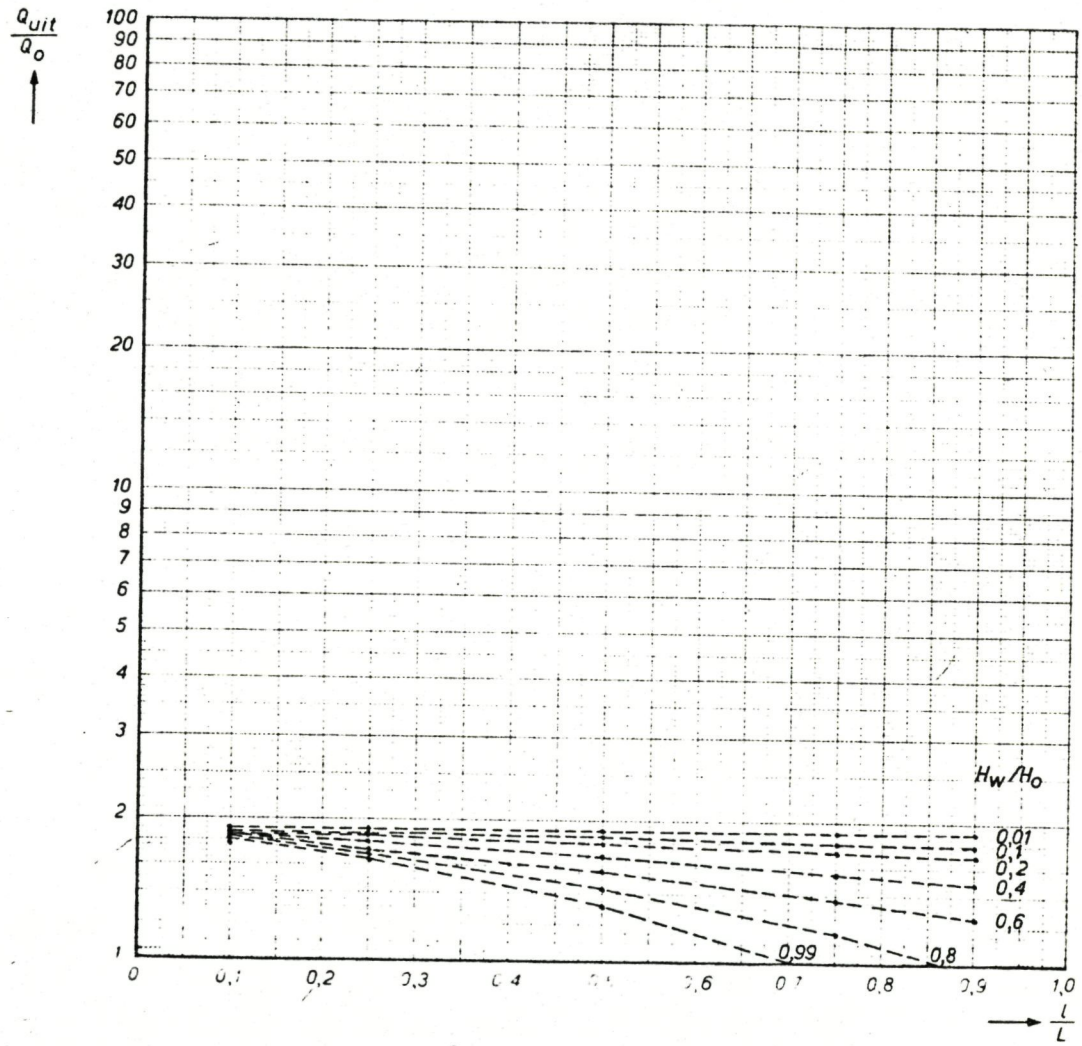


N.B. VOOR $\frac{c}{g} V_o / H_o \geq 1 \longrightarrow Q_{uit}/Q_o < 1$

DIRECT NA BREUK Q_{uit}/Q_o ALS FUNCTIE VAN l/L VOOR: GAT IN LEIDING $d/D = 0{,}3$, $V_o^2/2gH_o = 0{,}0001$ EN $0{,}01 \leq \frac{c}{g} V_o/H_o \leq 100$	j.w.	
	A3	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1007 - 1046	FIG. 31

PRACTISCHE WAARDE VAN $\frac{\frac{c}{g} V_o}{H_o}$

0,01
0,1
1
10
100

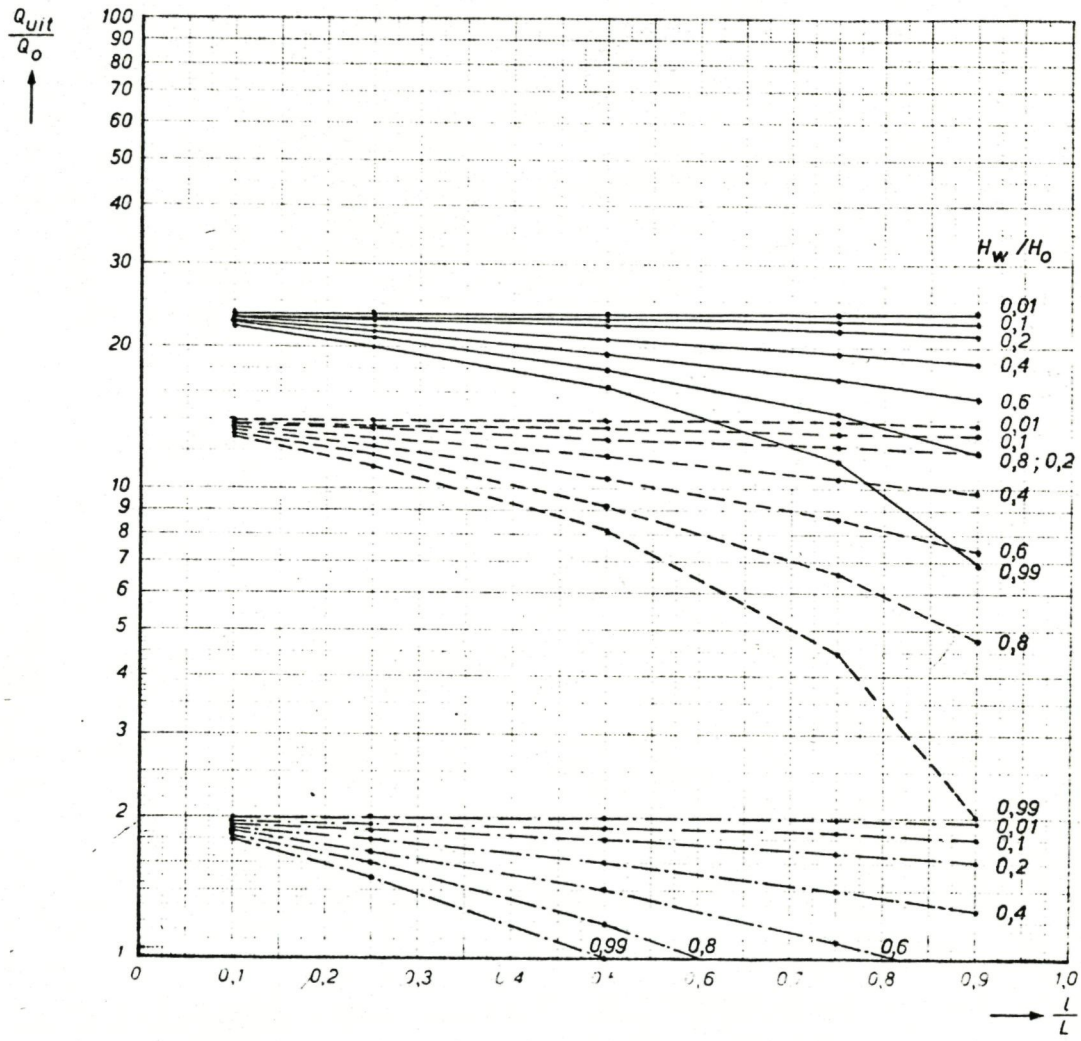


N.B. VOOR $\frac{c}{g} V_o / H_o \geq 1 \longrightarrow Q_{uit}/Q_o < 1$

DIRECT NA BREUK Q_{uit}/Q_o ALS FUNCTIE VAN l/L VOOR GAT IN LEIDING $d/D = 0,3$, $V_o^2/2gH_o = 0,001$ EN $0,1 \leq \frac{c}{g} V_o/H_o \leq 100$		jw / A3
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1007 - 1047	FIG. 32

0,01
0,1
1
10
100

PRACTISCHE WAARDE VAN $\frac{\frac{c}{g} V_o}{H_o}$

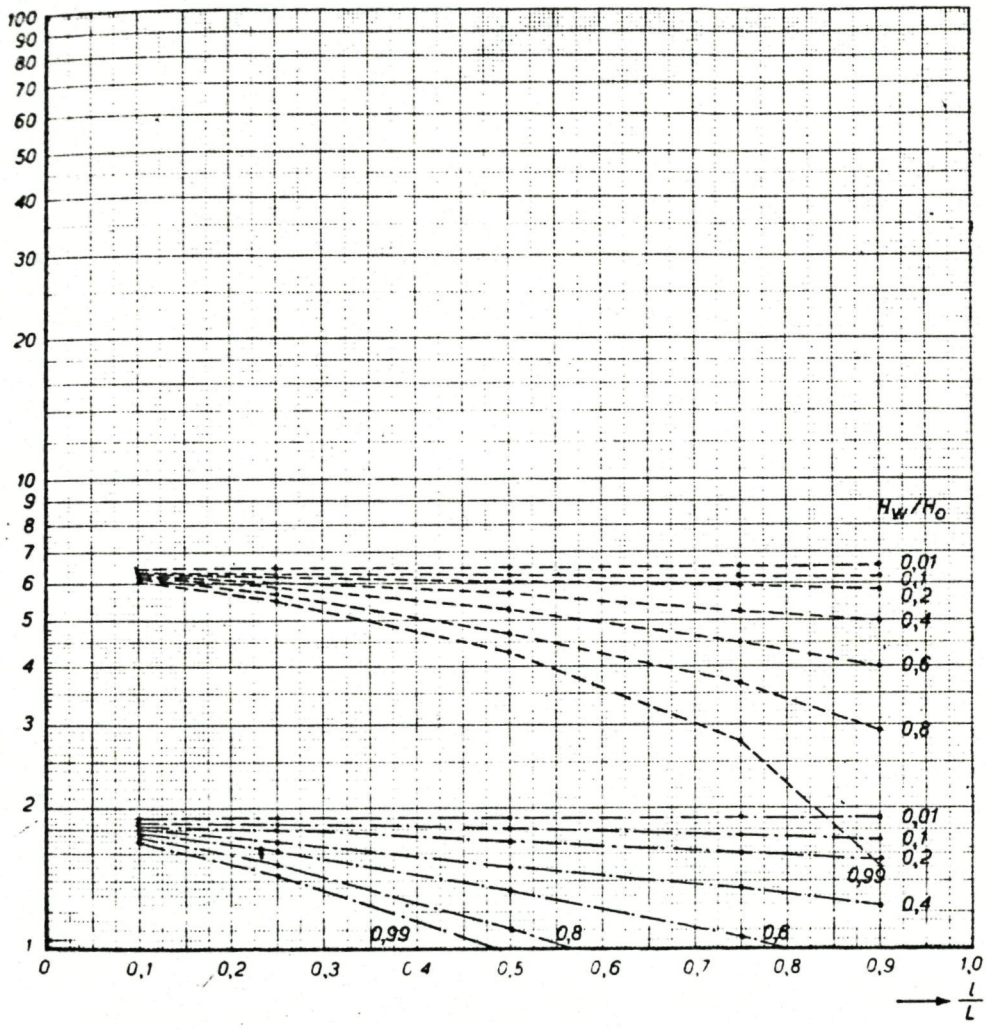


N.B. VOOR $\frac{c}{g} V_o / H_o \geq 10 \longrightarrow Q_{uit}/Q_o < 1$

DIRECT NA BREUK Q_{uit}/Q_o ALS FUNCTIE VAN l/L VOOR GAT IN LEIDING $d/D = 0{,}6$, $V_o^2/2gH_o = 0{,}0001$ EN $0{,}01 \leq \frac{c}{g} V_o/H_o \leq 100$		JW
		A3
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M. 1007 - 1043	FIG. 33

0,01
0,1
1
10
100

PRACTISCHE WAARDE VAN $\frac{\frac{c}{g} V_o}{H_o}$

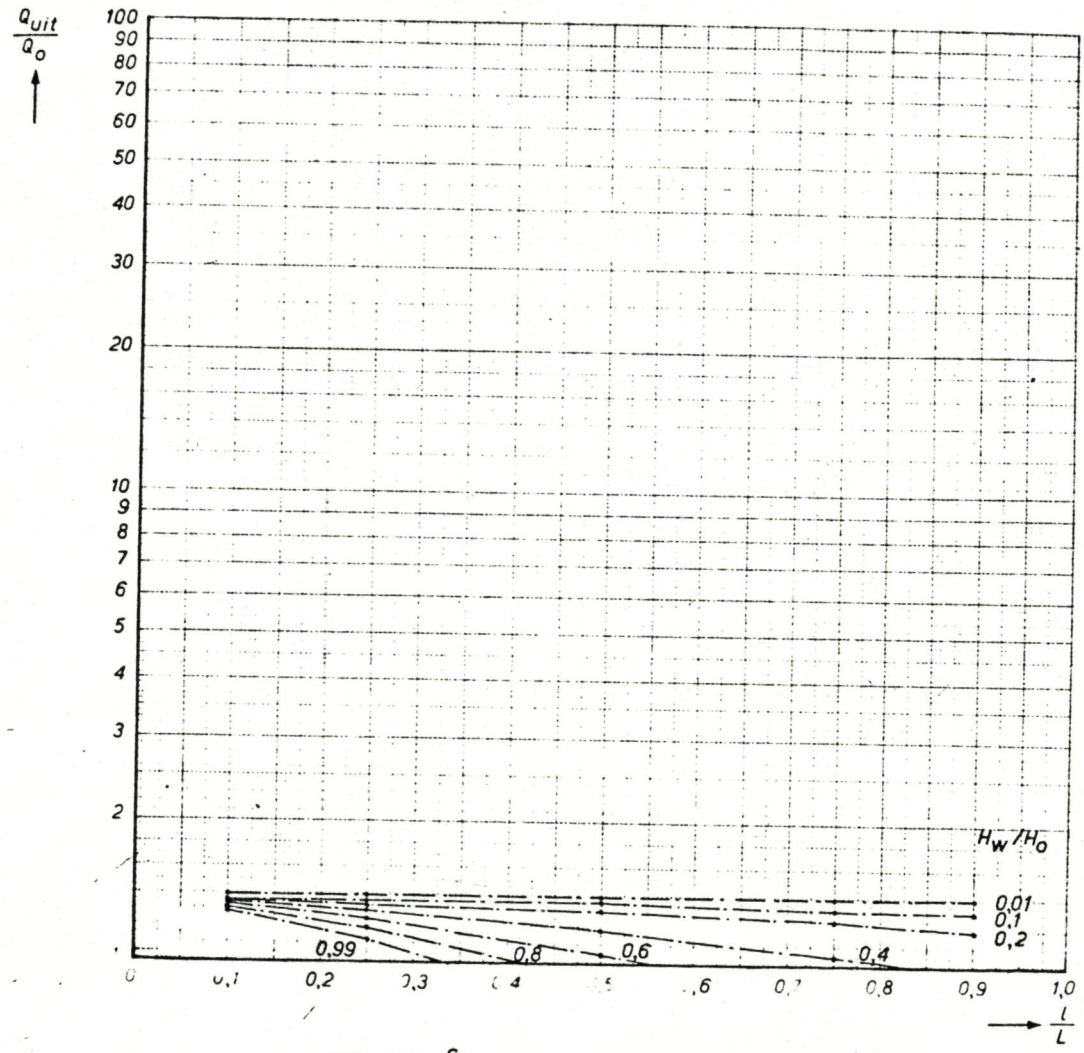


N.B. VOOR $\frac{c}{g} V_o / H_o \geq 10 \longrightarrow Q_{uit} / Q_o < 1$

NA BREUK	Q_{uit} / Q_o ALS FUNCTIE VAN l/L VOOR:		j.w.
AT IN LEIDING	$d/D = 0{,}6$, $V_o^2/2gH_o = 0{,}001$ EN $0{,}1 \leq \frac{c}{g} V_o / H_o \leq 100$		A3
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M. 1007 - 1044	FIG. 34	

PRACTISCHE WAARDE VAN $\frac{\frac{c}{g} V_o}{H_o}$

- 0,1
- 1
- 10
- 100

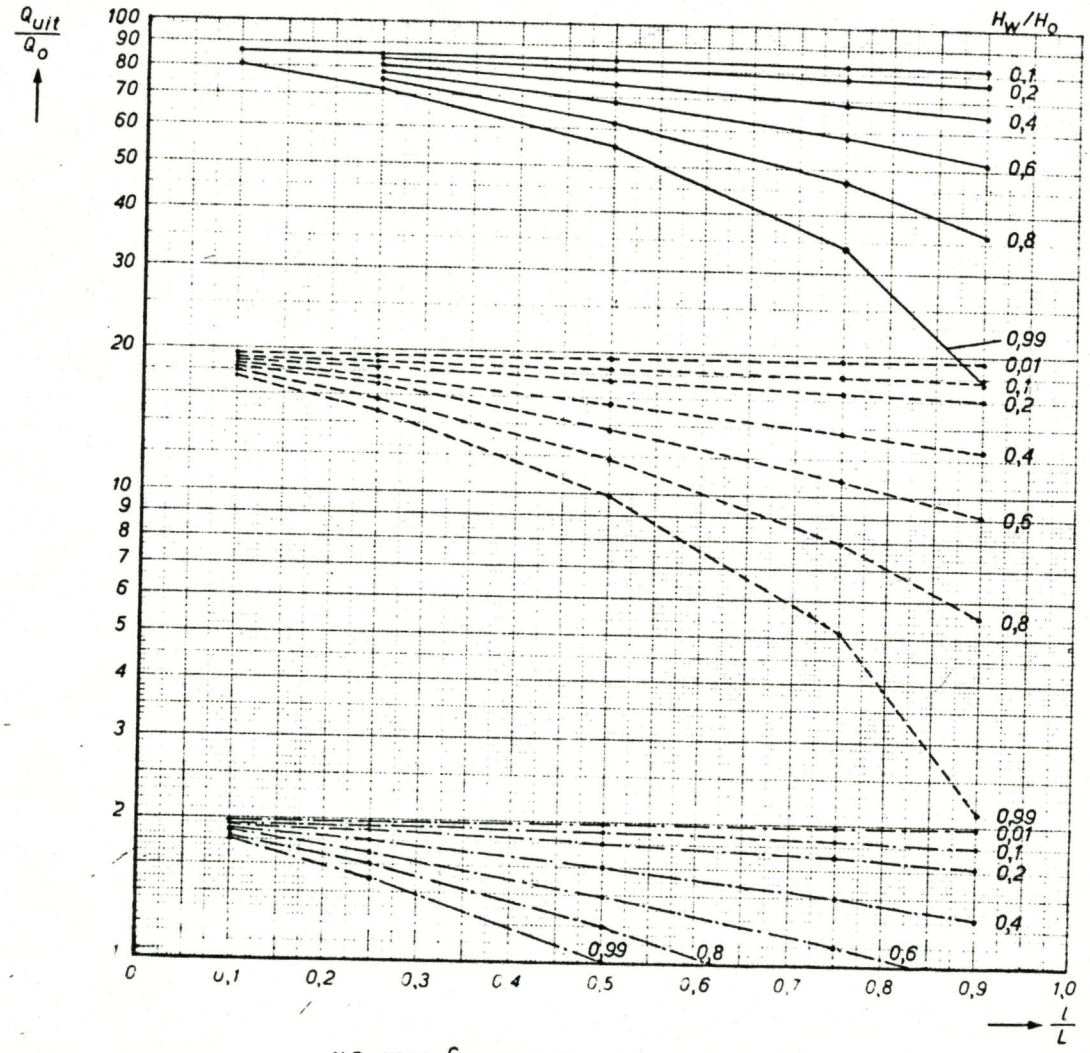


N.B. VOOR $\frac{c}{g} V_o / H_o \geq 10 \longrightarrow Q_{uit}/Q_o < 1$

DIRECT NA BREUK Q_{uit}/Q_o ALS FUNCTIE VAN l/L VOOR: GAT IN LEIDING $d/D = 0{,}6$, $V_o^2/2gH_o = 0{,}01$ EN $1 \leq \frac{c}{g} V_o/H_o \leq 100$			j.w.
			A3
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1007 - 1045	FIG. 35	

PRACTISCHE WAARDE VAN $\frac{\frac{c}{g} V_o}{H_o}$

— · — · — 1
— — — 10
— — · — 100

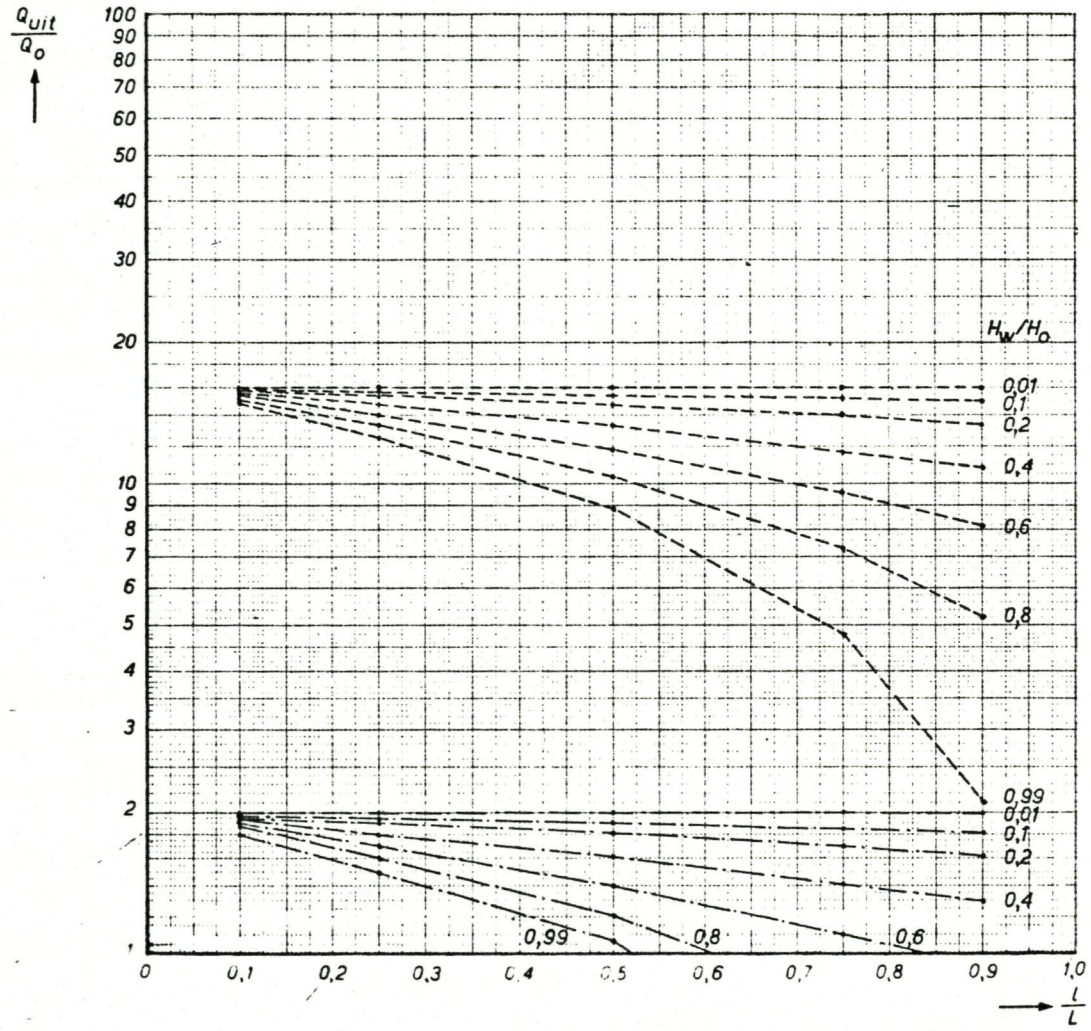


N.B. VOOR $\frac{c}{g} V_o / H_o \geq 10 \longrightarrow Q_{uit}/Q_o < 1$

DIRECT NA BREUK Q_{uit}/Q_o ALS FUNCTIE VAN l/L VOOR: GAT IN LEIDING $d/D = 1{,}1$, $V_o^2/2gH_o = 0{,}0001$ EN $0{,}01 \leq \frac{c}{g} V_o/H_o \leq 100$	j.w.	
	A3	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M. 1007 - 1038	FIG. 36

0,01
0,1
1
10
100

PRACTISCHE WAARDE VAN $\frac{\frac{c}{g} V_o}{H_o}$

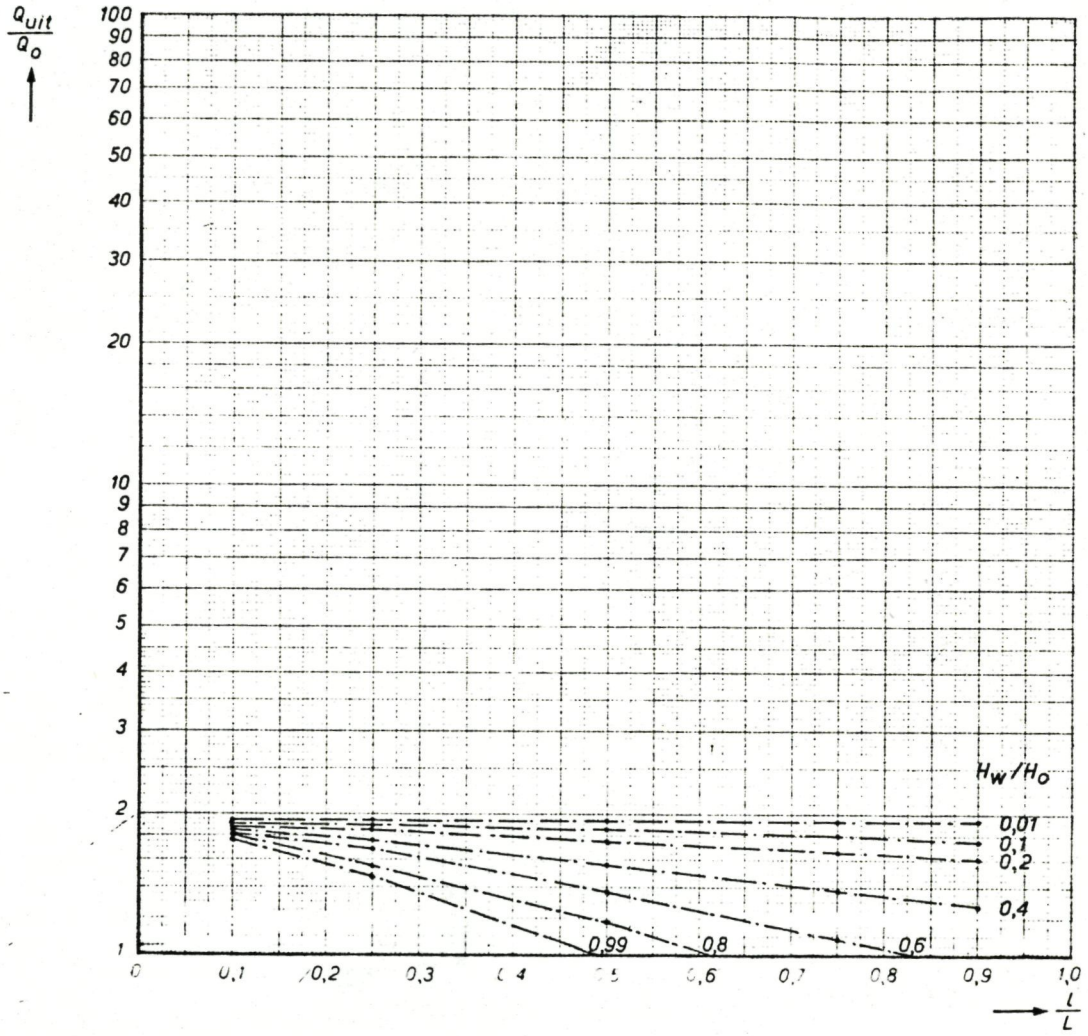


N.B. VOOR $\frac{c}{g} V_o / H_o \geq 10 \longrightarrow Q_{uit}/Q_o < 1$

DIRECT NA BREUK Q_{uit}/Q_o ALS FUNCTIE VAN l/L VOOR:			j.w.
GAT IN LEIDING $d/D = 1{,}1$, $V_o^2/2gH_o = 0{,}001$ EN $0{,}1 \leq \frac{c}{g} V_o/H_o \leq 100$			A3
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M. 1007 – 1041	FIG. 37	

PRACTISCHE WAARDE VAN $\frac{c}{g} \frac{V_o}{H_o}$

- 0,1
- 1
- 10
- 100

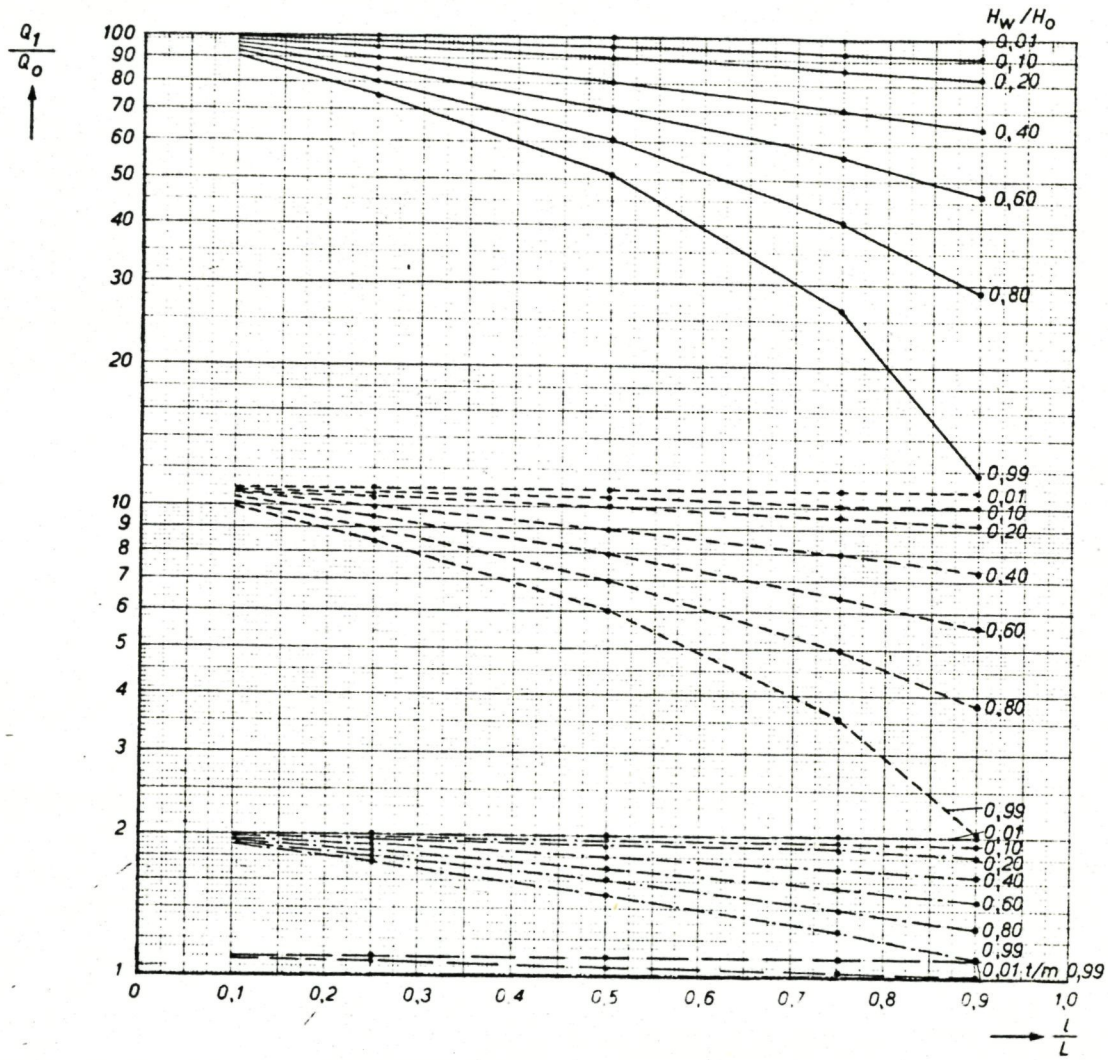


N.B. VOOR $\frac{c}{g} V_o / H_o \geq 10 \longrightarrow Q_{uit}/Q_o < 1$

DIRECT NA BREUK Q_{uit}/Q_o ALS FUNCTIE VAN l/L VOOR GAT IN LEIDING $d/D = 1{,}1$, $V_o^2/2gH_o = 0{,}01$ EN $0{,}1 \leq \frac{c}{g} V_o/H_o \leq 100$		j.w.
		A3
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1007 - 1042	FIG. 38

PRACTISCHE WAARDE VAN $\frac{\frac{c}{g} V_o}{H_o}$

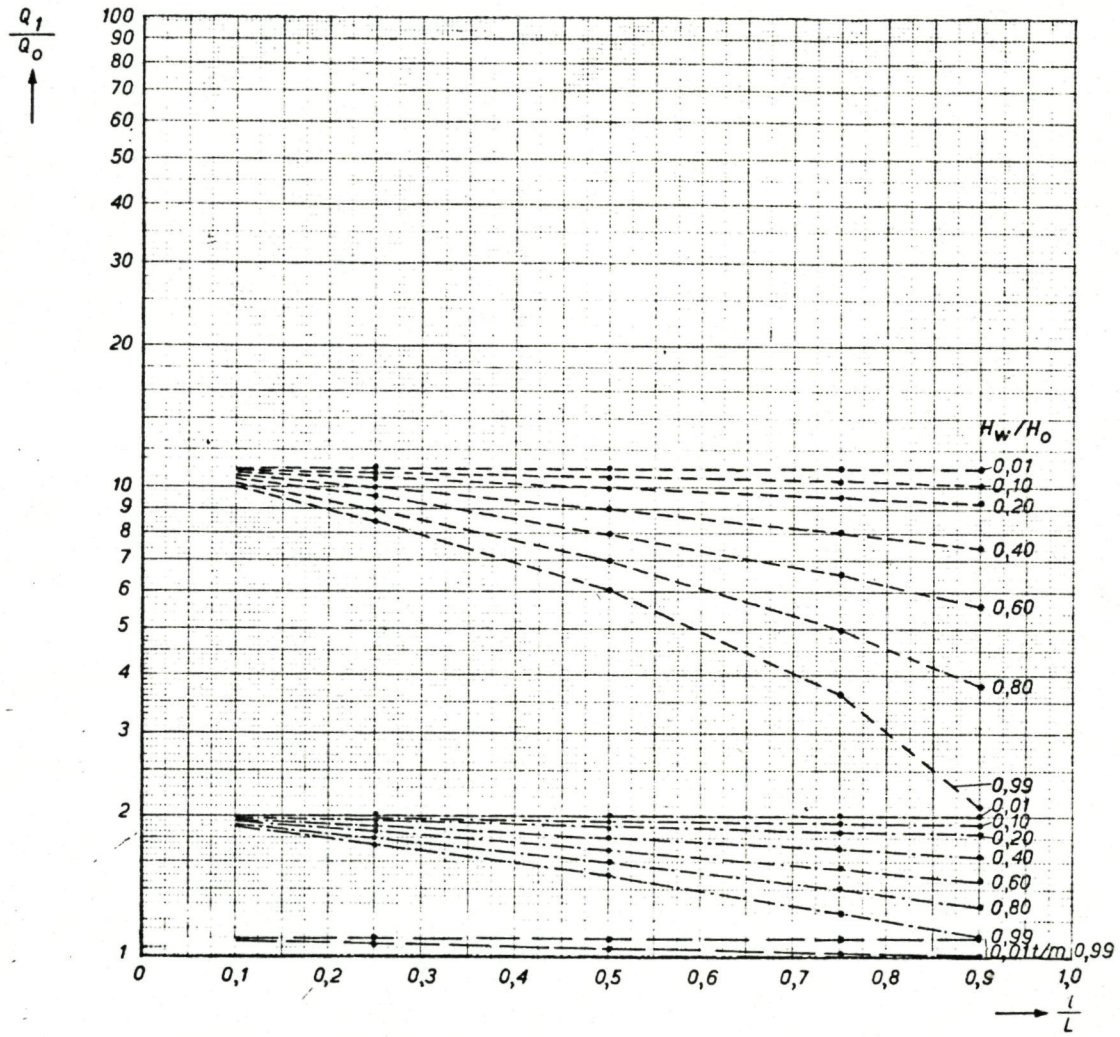
1
10
100



PRACTISCHE WAARDEN VAN $\frac{\frac{c}{g}V_o}{H_o}$

0,01
0,1
1
10
100

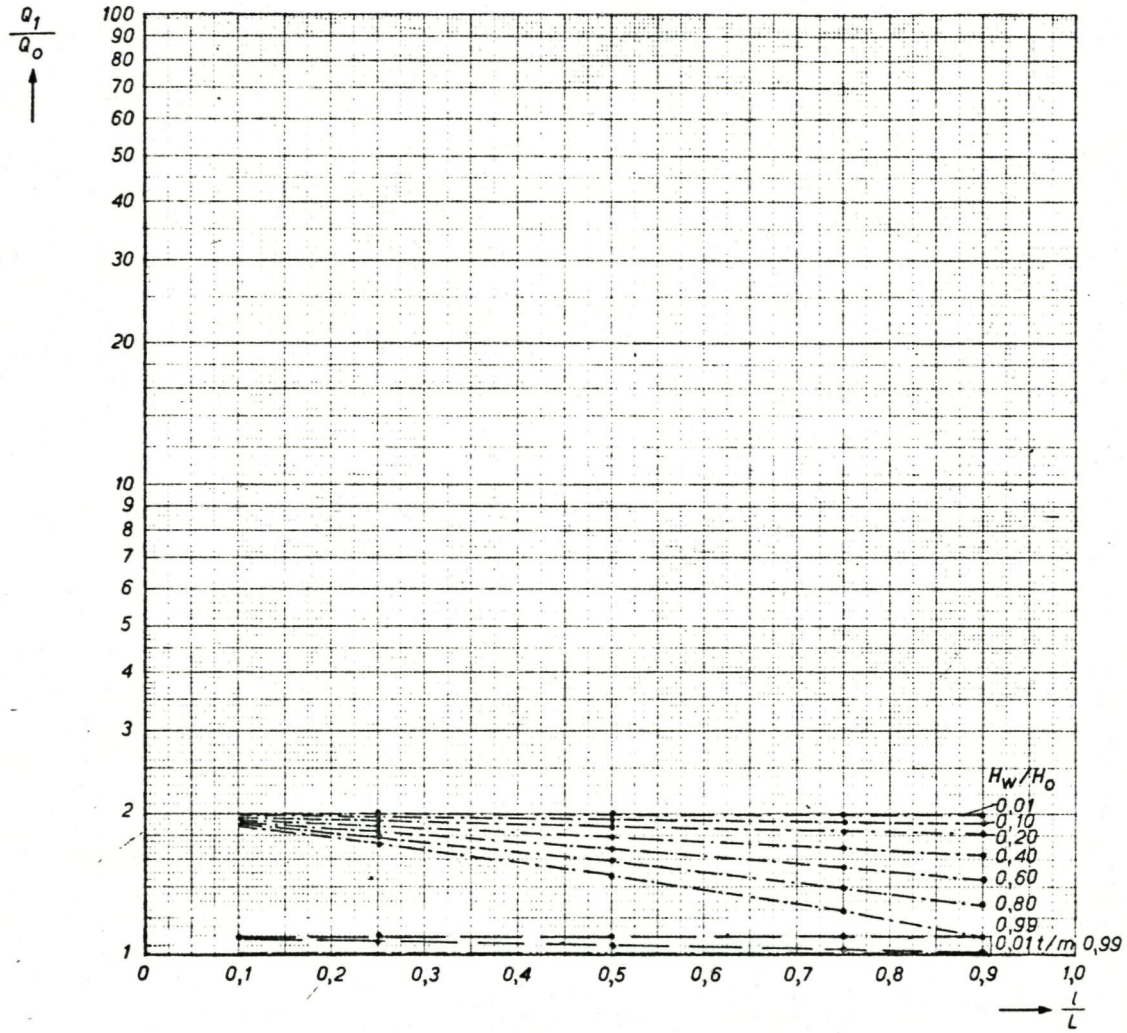
DIRECT NA BREUK Q_1/Q_o ALS FUNCTIE VAN l/L VOOR AFSCHUIVING LEIDING $V_o^2/2gH_o=0{,}0001$ $0{,}01 \leq \frac{c}{g}V_o/H_o \leq 100$	LINKERDEEL	J.W. A3
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1007 - 1026	FIG. 39



DIRECT NA BREUK Q_1/Q_o ALS FUNCTIE VAN l/L VOOR:			j.w.
AFSCHUIVING LEIDING $V_o^2/2gH_o = 0{,}001$ $0{,}1 \leq \frac{c}{g} V_o/H_o \leq 100$	LINKERDEEL		A3
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1007 - 1027	FIG. 40	

PRACTISCHE WAARDEN VAN $\frac{c}{g} \frac{V_o}{H_o}$

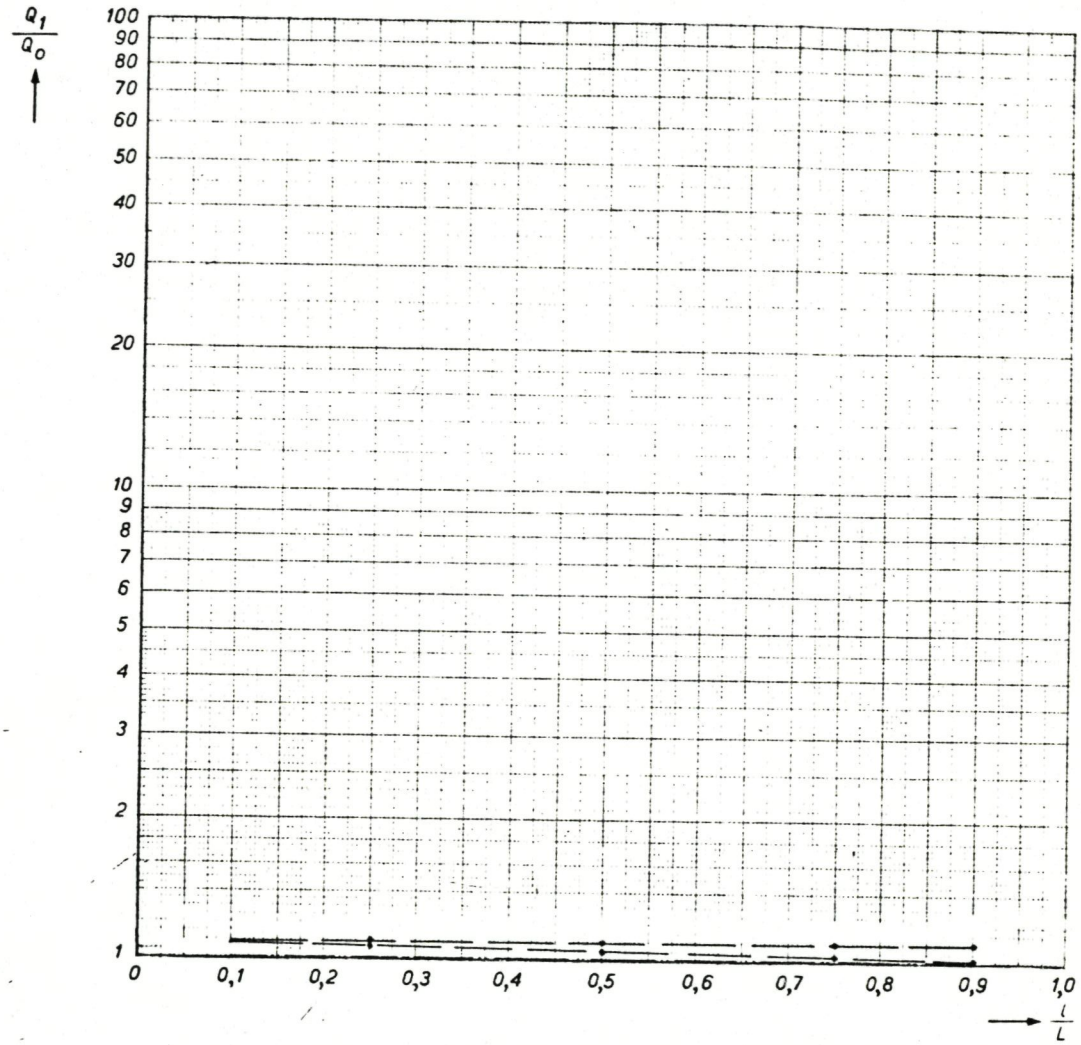
- 0,1
- 1
- 10
- 100



DIRECT NA BREUK Q_1/Q_o ALS FUNCTIE VAN l/L VOOR:		j.w.
AFSCHUIVING LEIDING $V_o^2/2gH_o = 0{,}01$ $1 \leq \frac{c}{g} V_o/H_o \leq 100$	LINKERDEEL	A3
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M. 1007 - 1028	FIG. 41

PRACTISCHE WAARDEN VAN $\frac{\frac{c}{g} V_o}{H_o}$

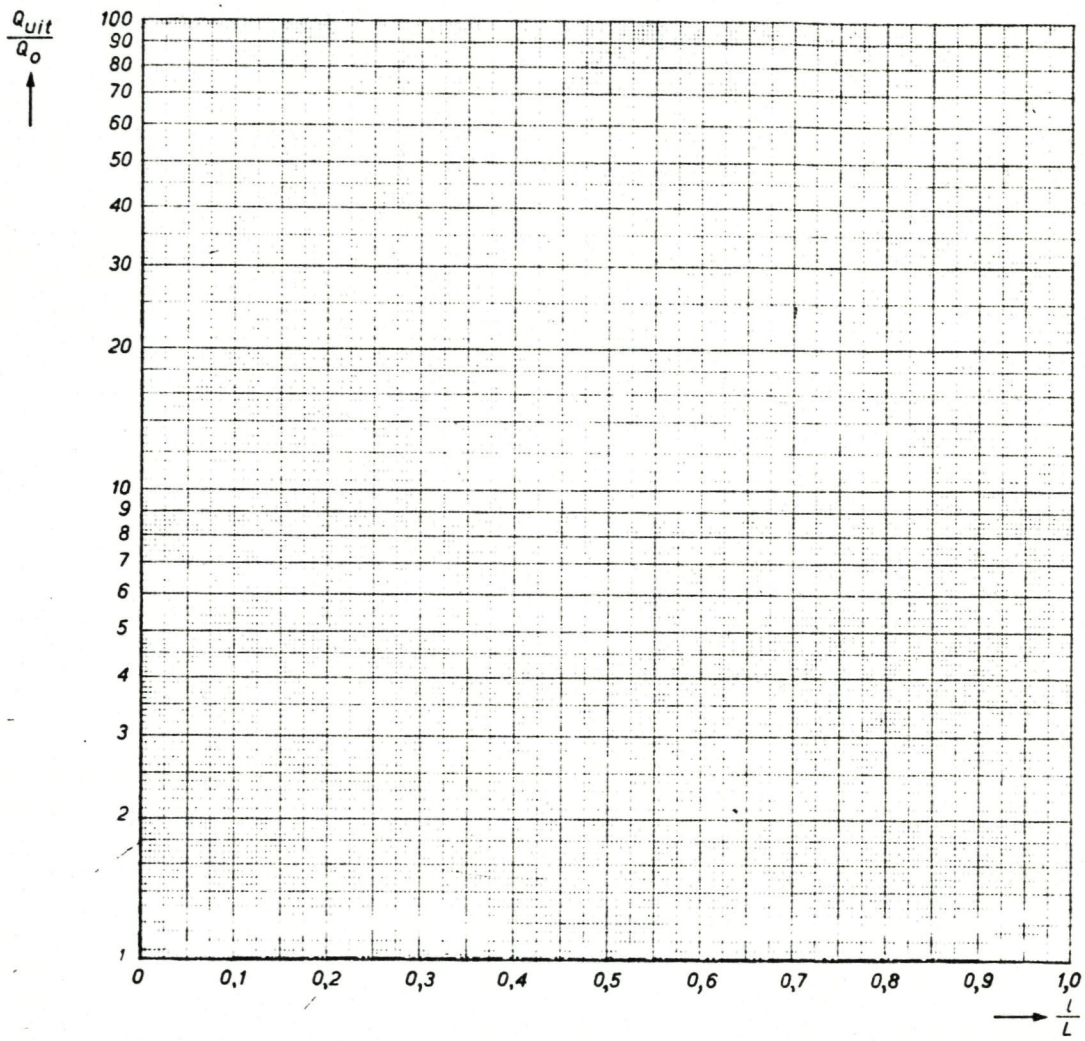
1
10
100



DIRECT NA BREUK Q_1/Q_o ALS FUNCTIE VAN l/L VOOR:		J.W.
AFSCHUIVING LEIDING $V_o^2/2gH_o = 0,1$ $10 \leq \frac{c}{g} V_o/H_o \leq 100$	LINKERDEEL	A3
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M. 1007 - 1029	FIG. 42

PRACTISCHE WAARDEN VAN $\frac{c}{g} \frac{V_o}{H_o}$

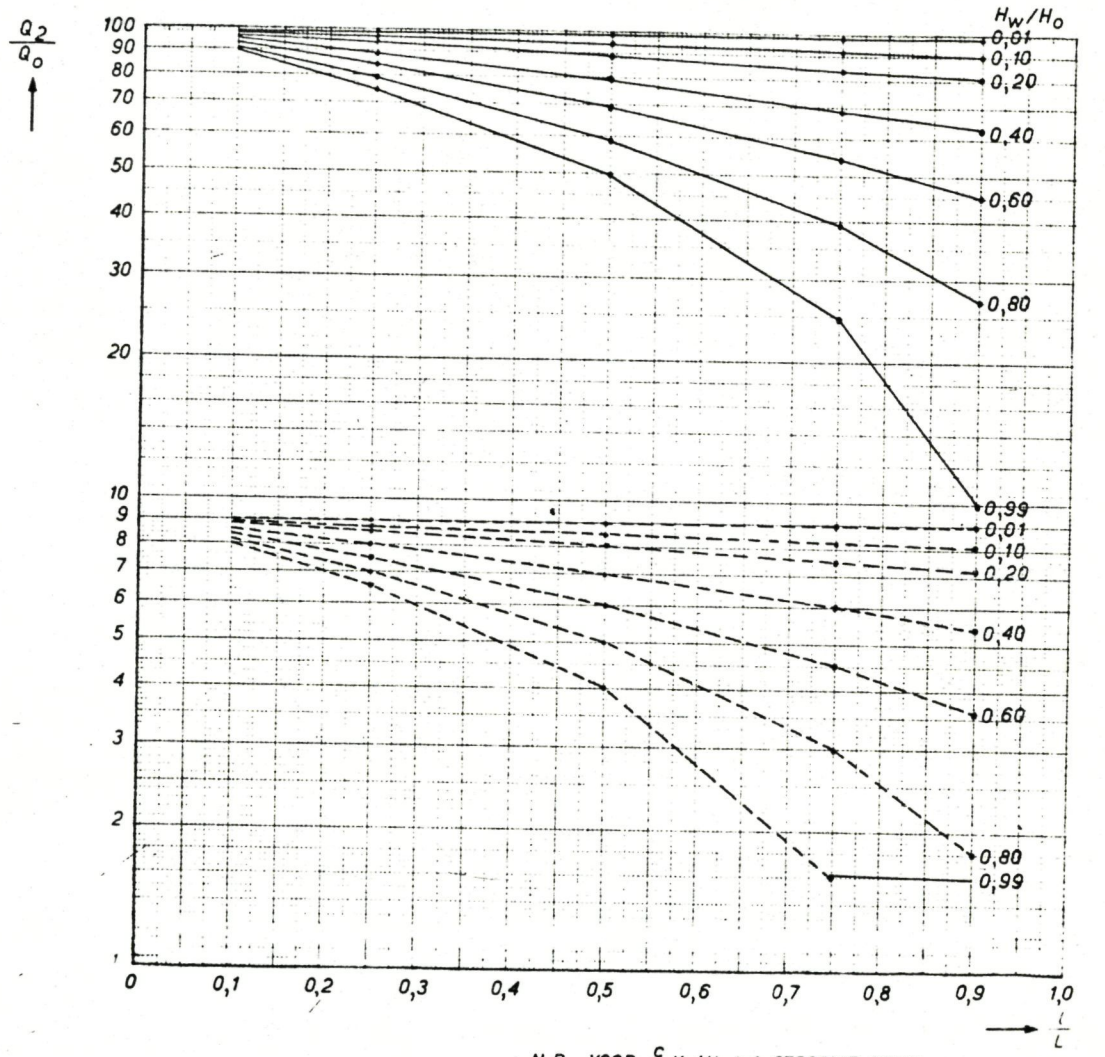
—— —— 10
—·—·— 100



DIRECT NA BREUK Q_{uit}/Q ALS FUNCTIE VAN l/L VOOR:			j.w.
AFSCHUIVING LEIDING $V_o^2/2gH_o = 0{,}99$ $\frac{c}{g} V_o/H_o = 100$	LINKERDEEL		A3
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M. 1007 - 1030	FIG. 43	

PRACTISCHE WAARDE VAN

—·—·—·— 100 } $\frac{\frac{c}{g} V_o}{H_o}$

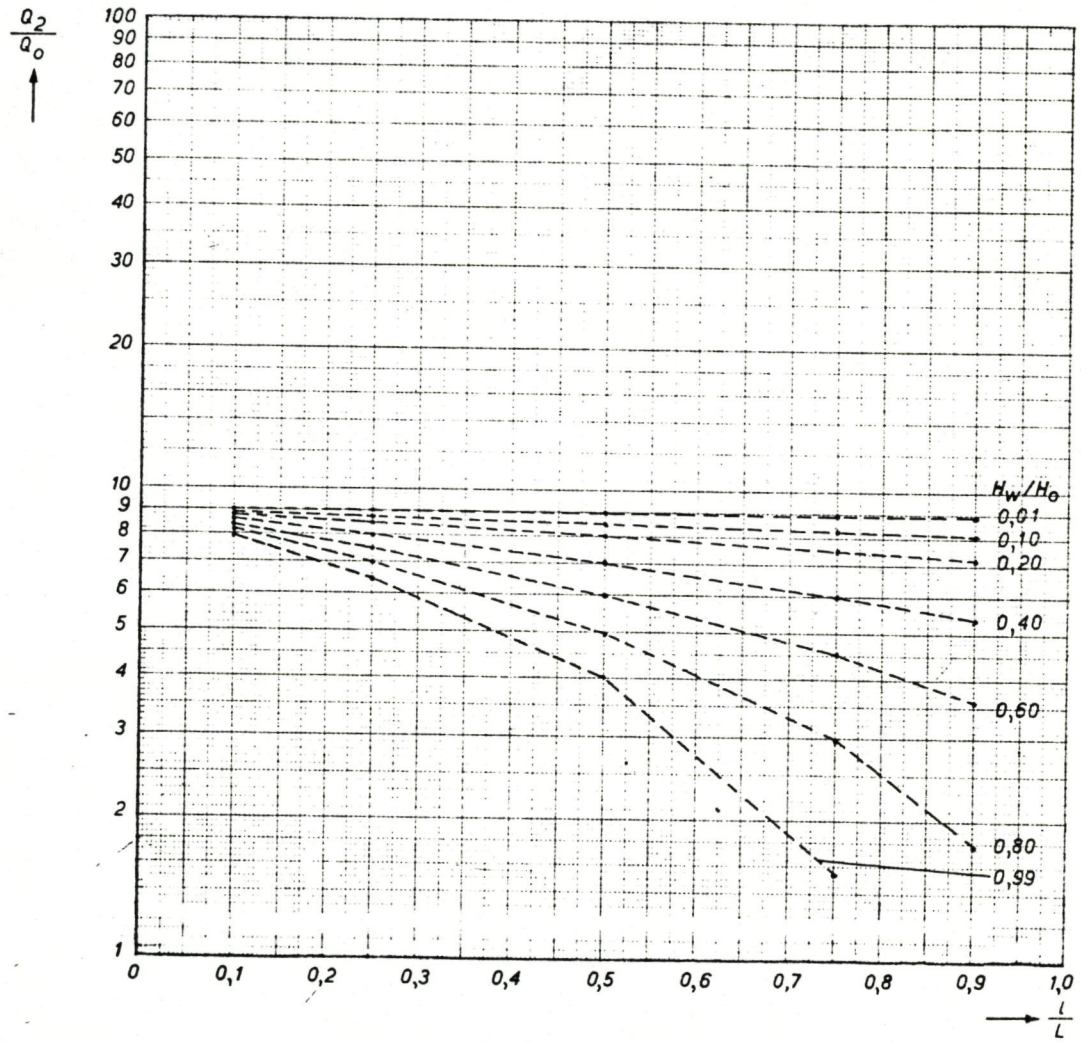


N.B. VOOR $\frac{c}{g} V_o/H_o \geq 1$ STROOMT GEEN DEBIET UIT HET RECHTERDEEL

PRACTISCHE WAARDEN VAN $\frac{c}{g} V_o / H_o$

——— 0,01
- - - - - 0,1

DIRECT NA BREUK Q_2/Q ALS FUNCTIE VAN l/L VOOR AFSCHUIVING LEIDING $V_o^2/2gH_o = 0{,}0001$ $0{,}01 \leq \frac{c}{g} V_o/H_o \leq 0{,}1$	RECHTERDEEL	J.W. A3
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1007 - 1031	FIG. 44

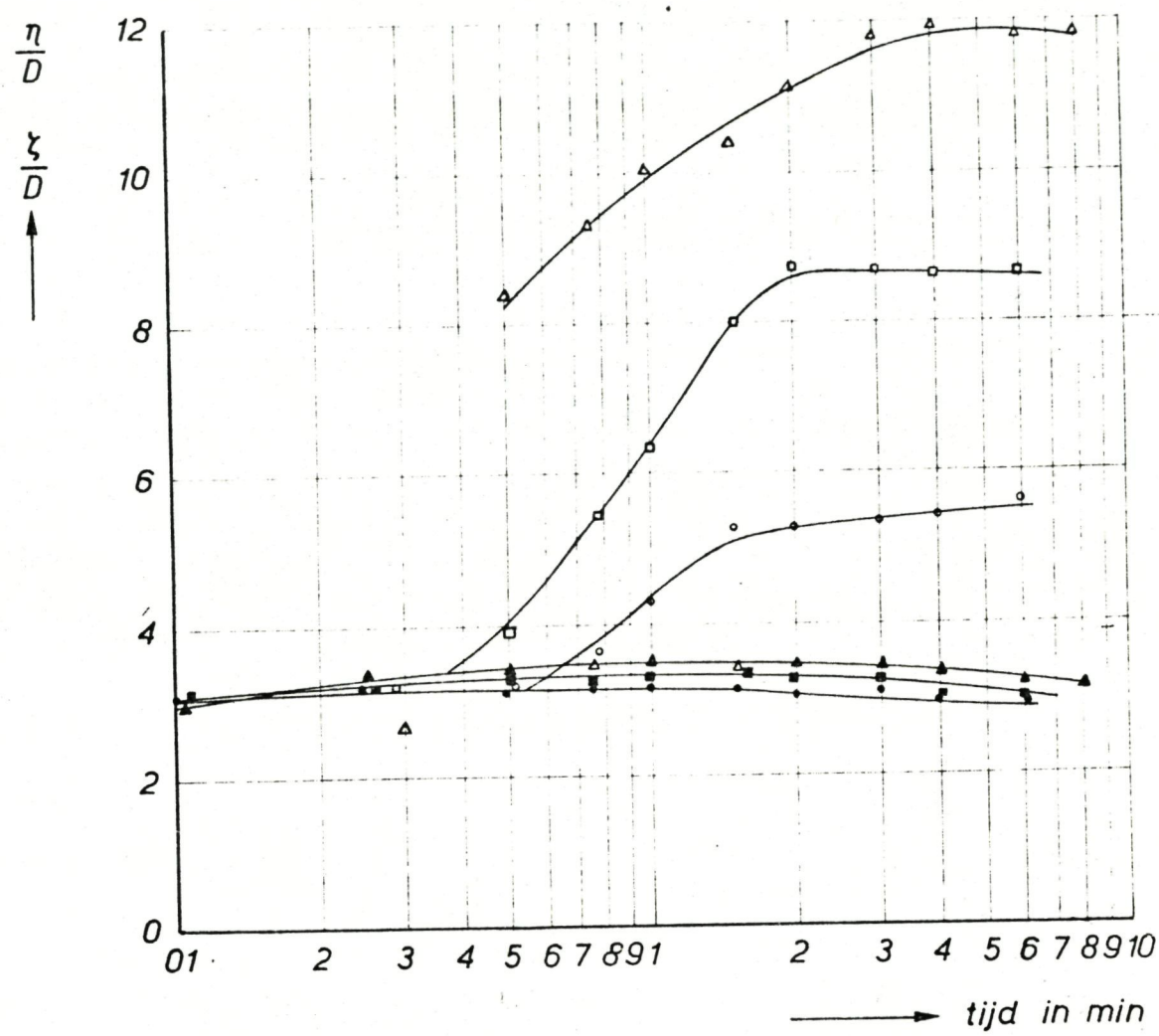


N.B. VOOR $\frac{c}{g} V_o/H_o \geq 1$ STROOMT GEEN DEBIET UIT HET RECHTERDEEL

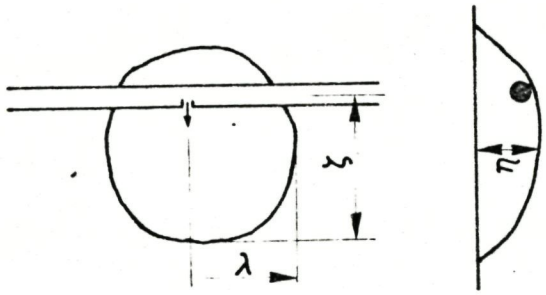
PRACTISCHE WAARDE VAN $\frac{c}{g} \frac{V_o}{H_o}$

-------- 0,1

DIRECT NA BREUK Q_2/Q ALS FUNCTIE VAN l/L VOOR: AFSCHUIVING LEIDING $V_o^2/2gH_o = 0{,}001$ $\frac{c}{g} V_o/H_o = 0{,}1$	RECHTERDEEL	j.w. A3
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M. 1007 - 1032	FIG. 45



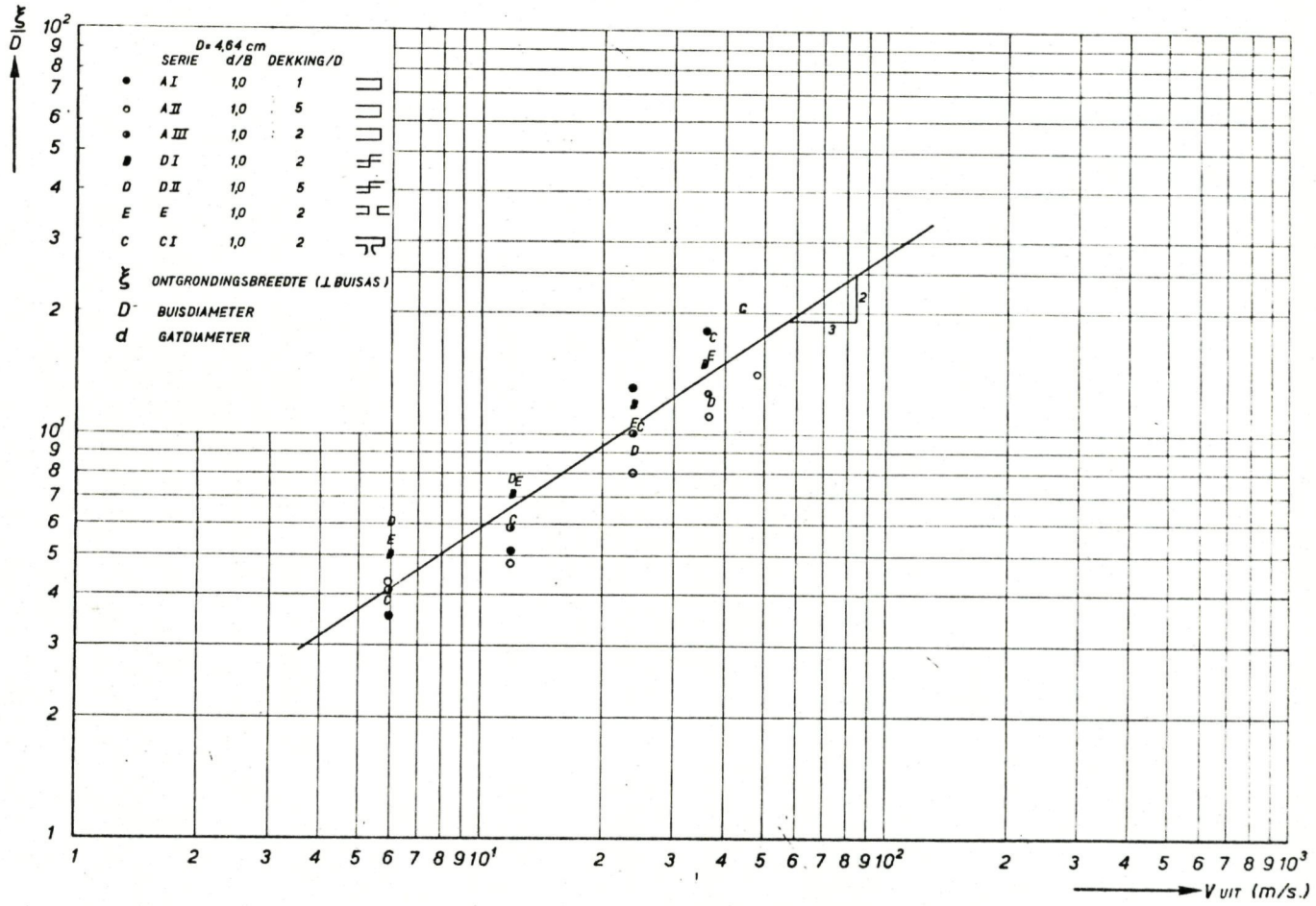
ζ/D	η/D	Q l/sec	V_{UIT} m/sec
○	●	1	2,4
□	■	2	4,8
△	▲	3,6	8,6



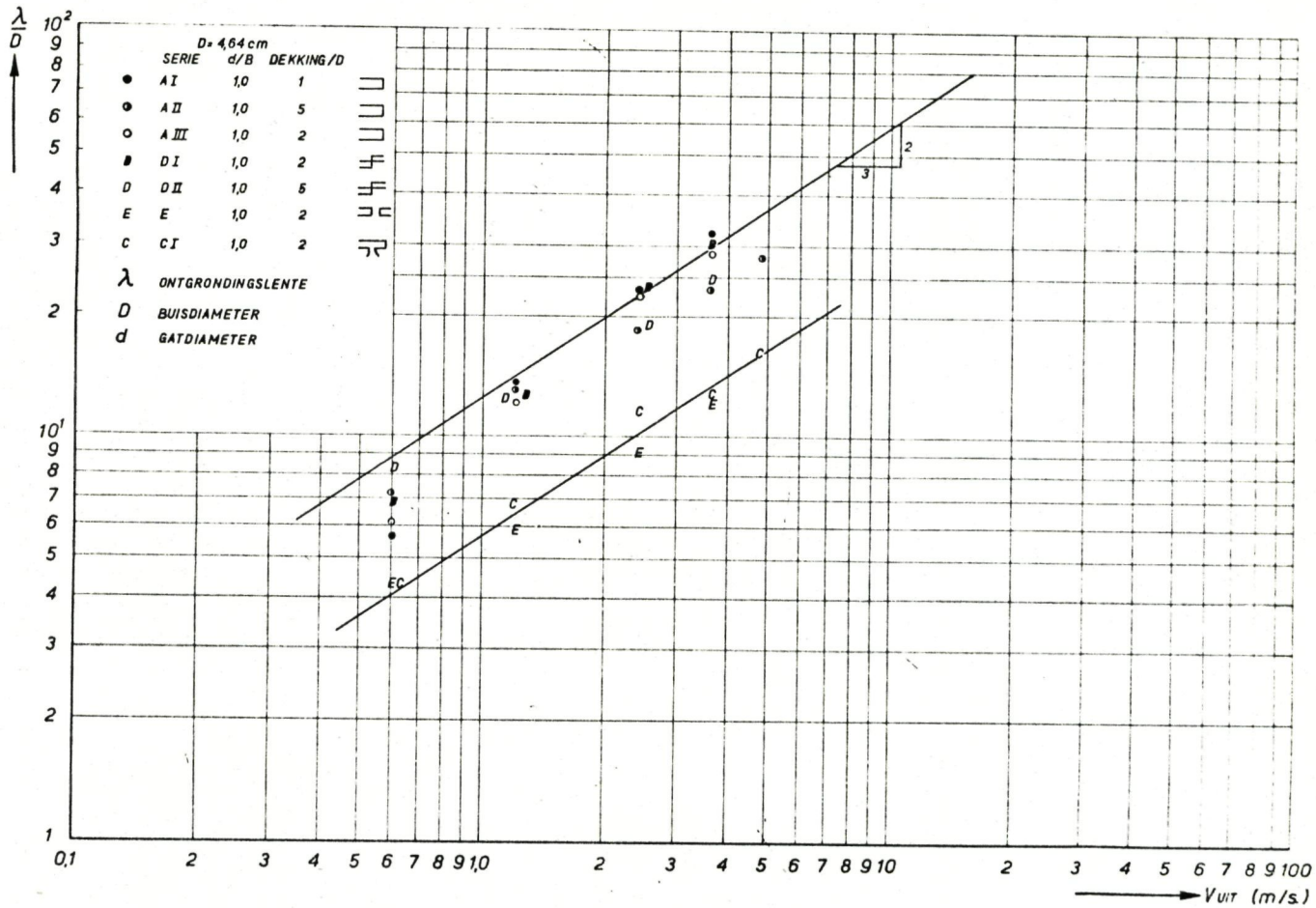
ζ = GAT BREEDTE (⊥ BUISAS)
η = GAT DIEPTE (VANAF MAAIVELD)

SERIE F D = 9,3 d/D = 1/4 GAT HORIZONTAAL DEKKING = 2D

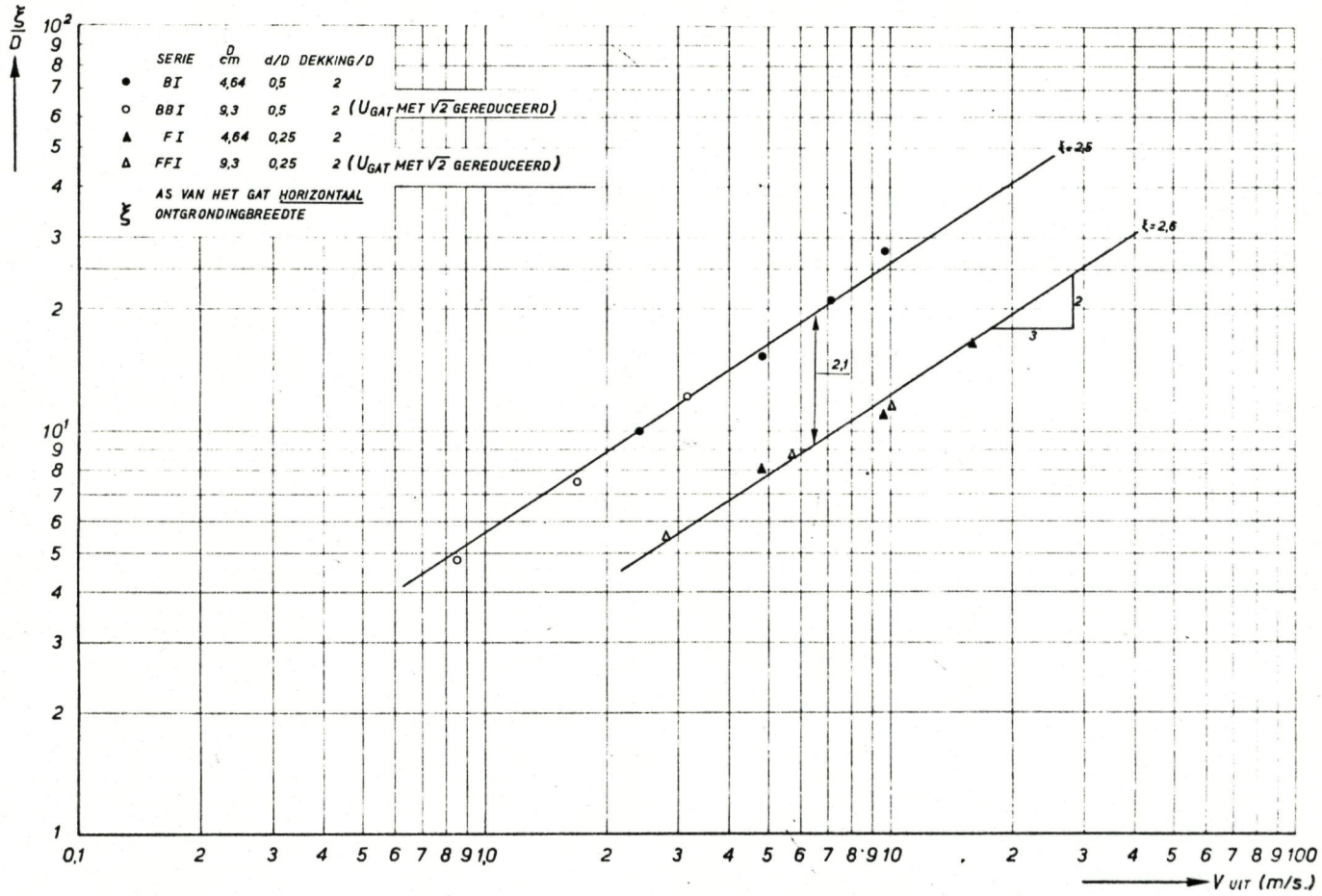
VERLOOP ONTGRONDINGSAFMETINGEN		JB
		A4
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M.1007-1059	FIG. 46



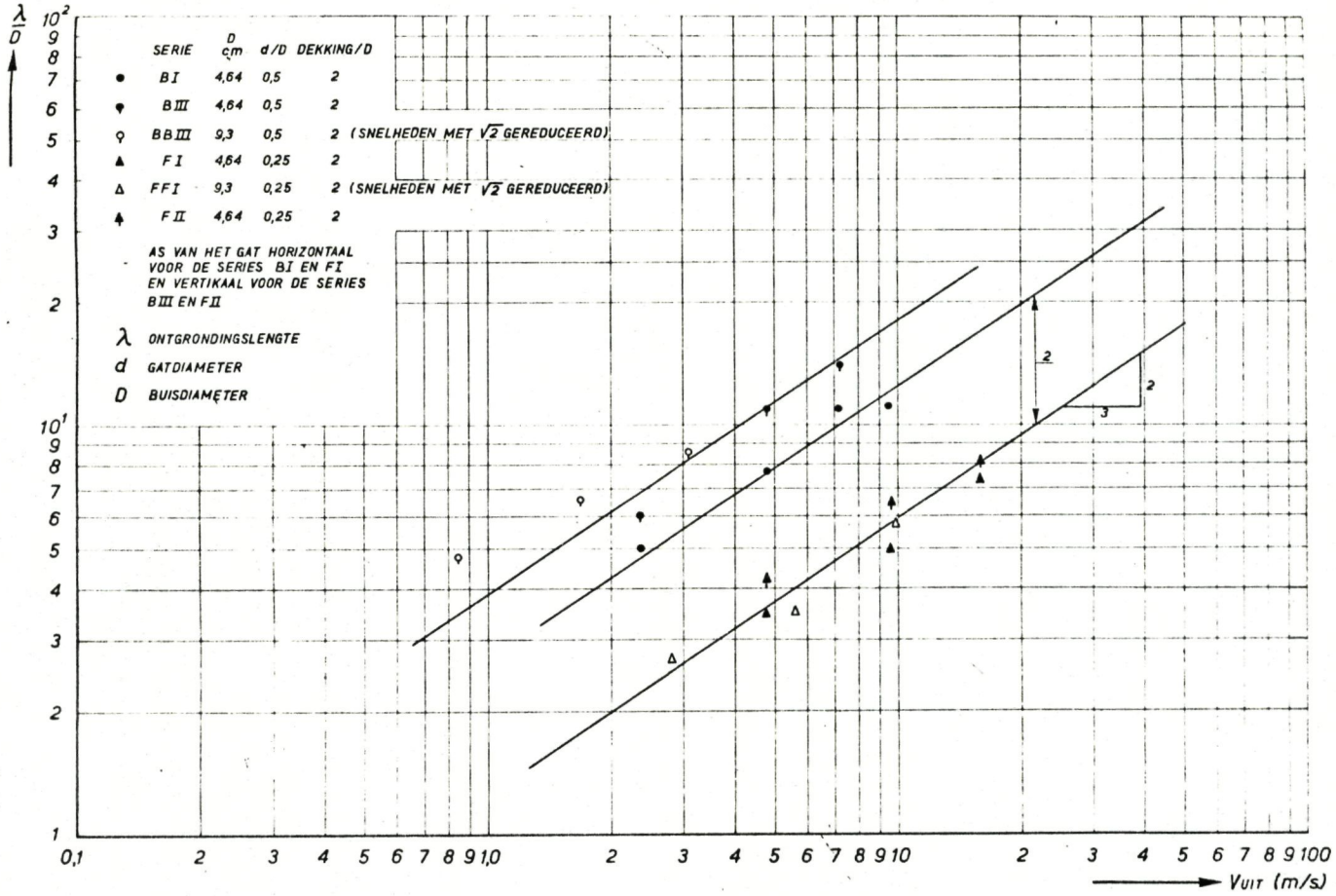
INVLOED SNELHEID EN DEKKING OP DE ONTGRONDINGSBREEDTE			JB
			A3
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M.1007-1033	FIG.47	



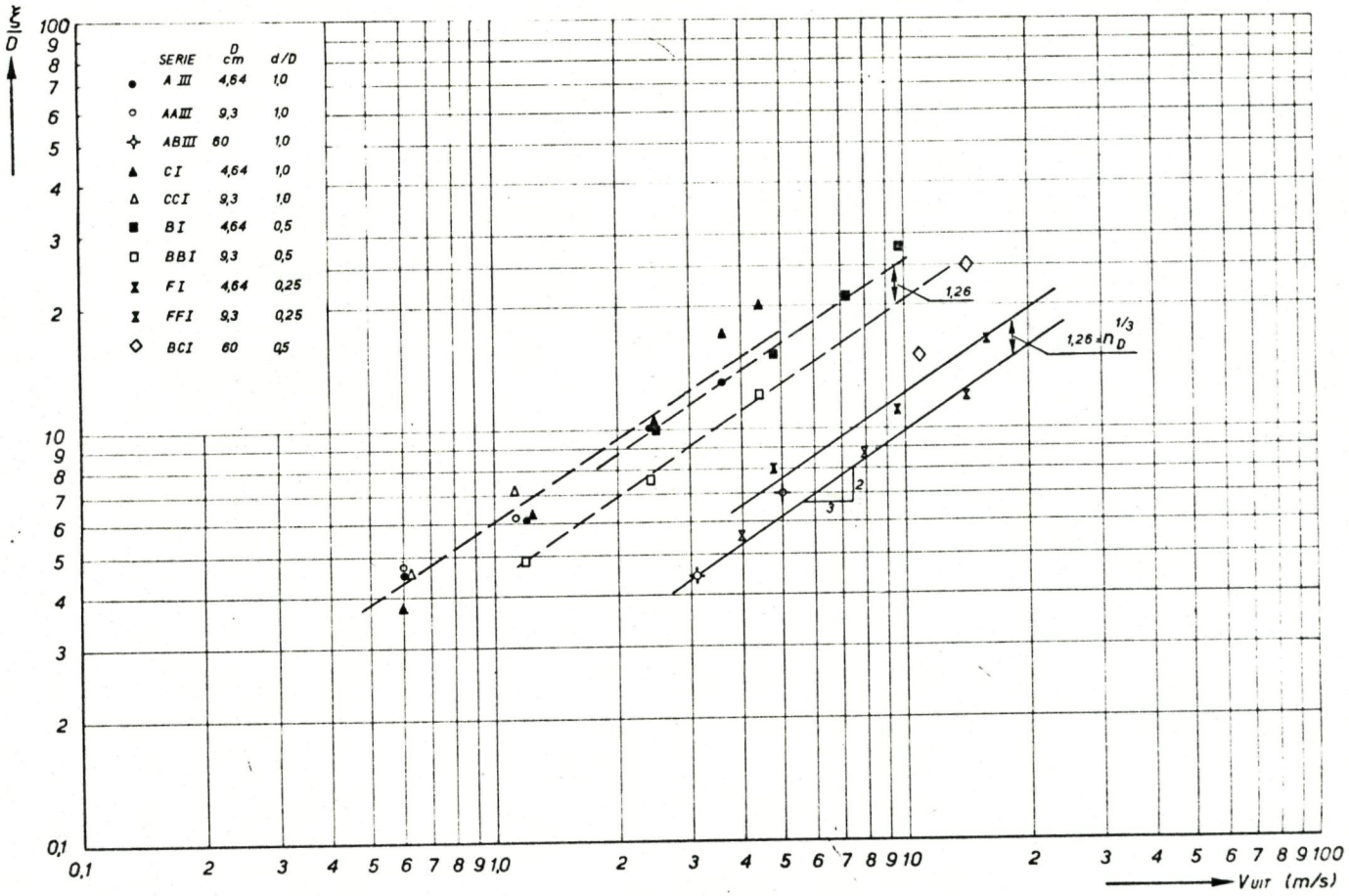
INVLOED SNELHEID EN DEKKING OP DE ONTGRONDINGSLENGTE			JB
			A3
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M.1007-1034	FIG. 48	



INVLOED SNELHEID EN GATDIAMETER			JB
OP DE ONTGRONDINGSBREEDTE			A3
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1007-1035	FIG. 49	



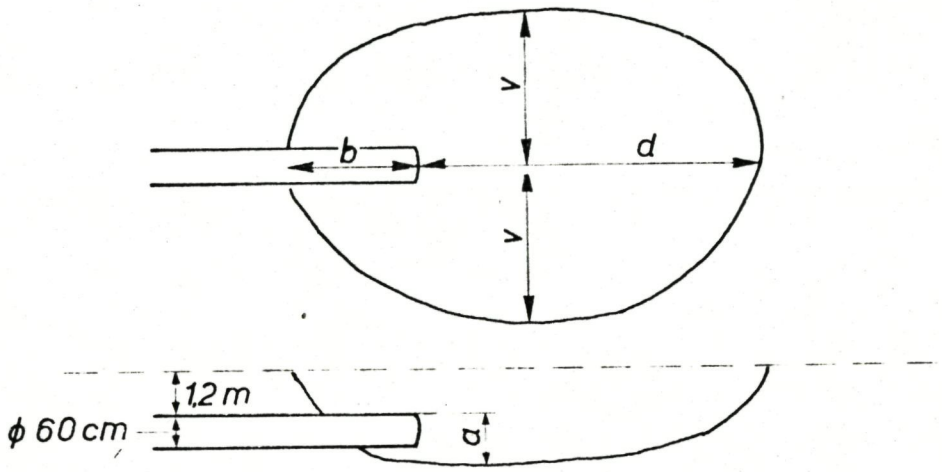
INVLOED SNELHEID EN GATDIAMETER OP DE ONTGRONDINGSLENGTE			JB
			A3
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M.1007-1036	FIG. 50	



INVLOED BUISDIAMETER			JB
OP DE ONTGRONDINGSBREEDTE			A3
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1007-1037	FIG 51	

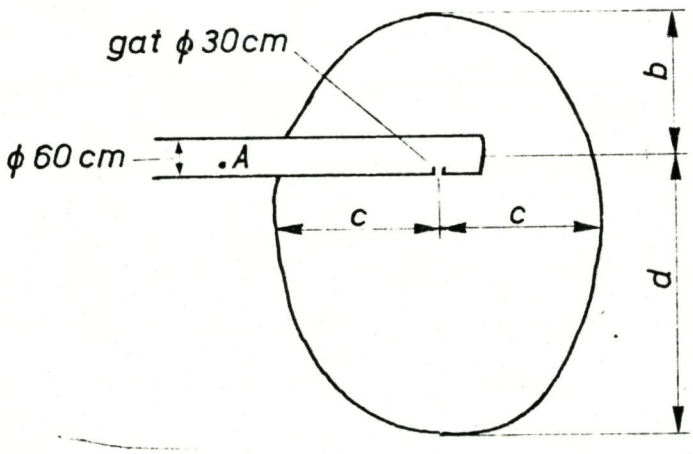
METING 1 SWIFTERBANT, ZAND d_{50}=350μ d_{16}=210μ d_{84}=650μ

V_{UIT}	a	b	c	d
3,15m/s	0,6m	2,2m	2,7m	3,6m
5,0 m/s	0,65m	3,6m	4,25m	8,2m



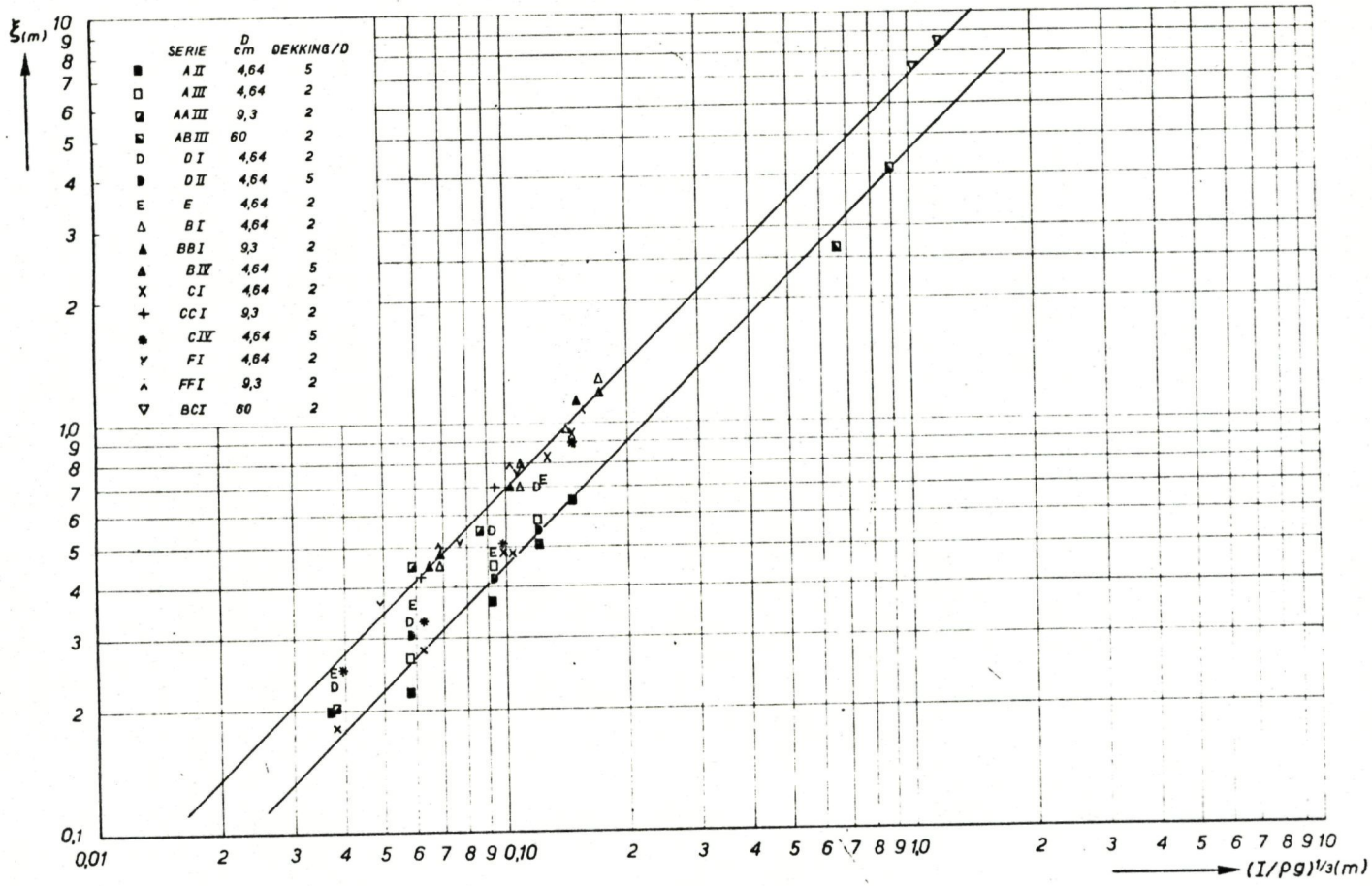
METING 2 NUKERK, ZAND d_{50}=200μ d_{16}=140μ d_{84}=290μ

DRUK IN A	a	b	c	d
15 m.wk	0,8m	2m	4,5m	9m
25 m.wk	0,8m	3m	7,5m	15m

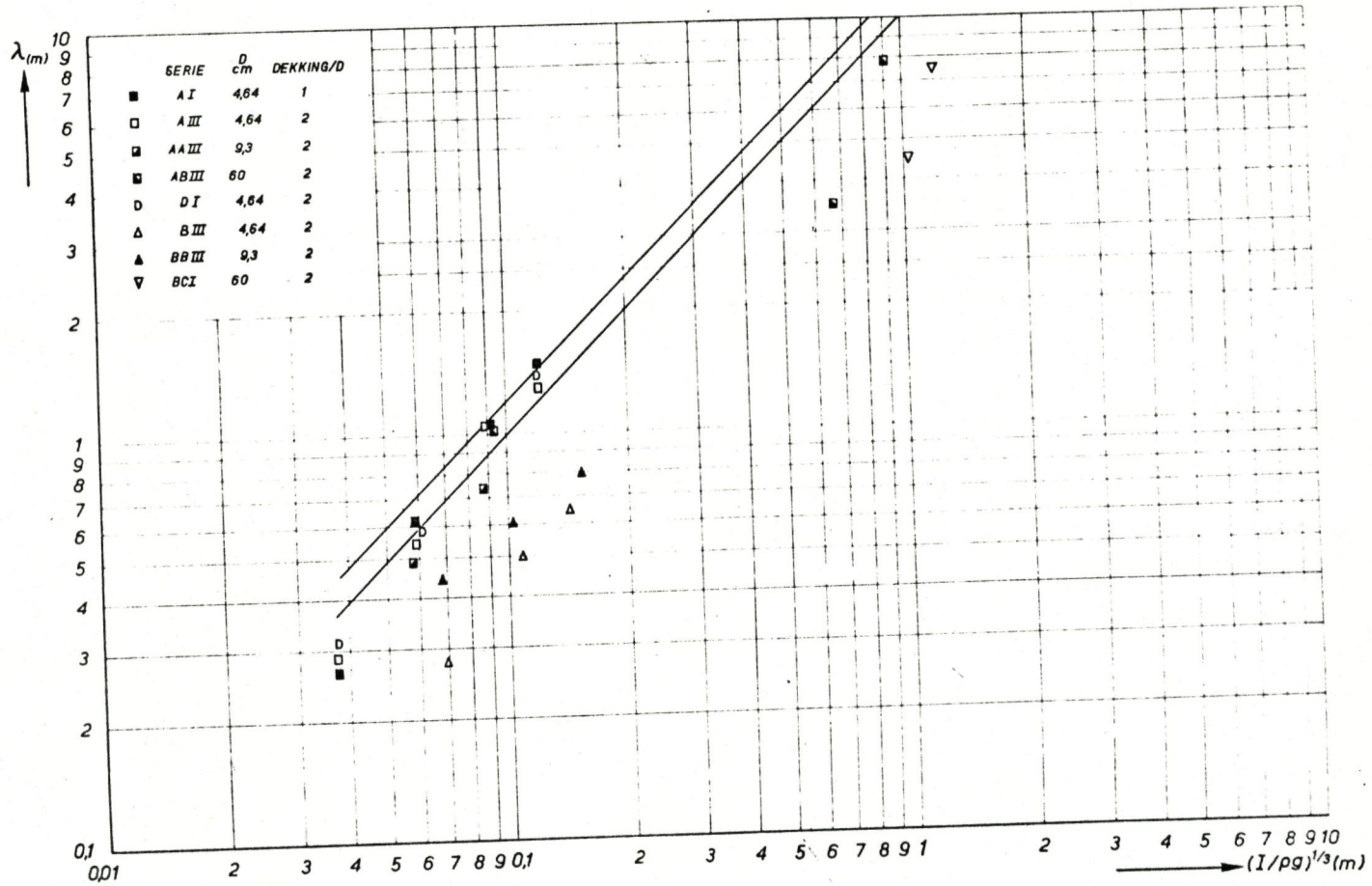


a = DIEPTE VANAF BOVENKANT BUIS

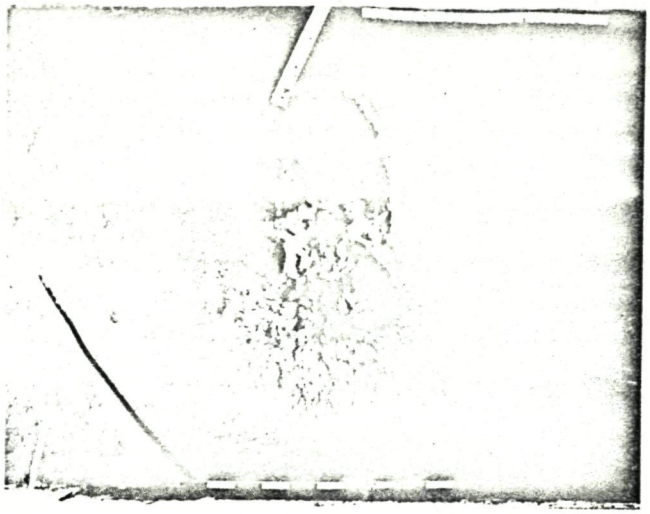
RESULTATEN BUITENMETINGEN		JB
		A4
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M. 1007-1060	FIG. 52



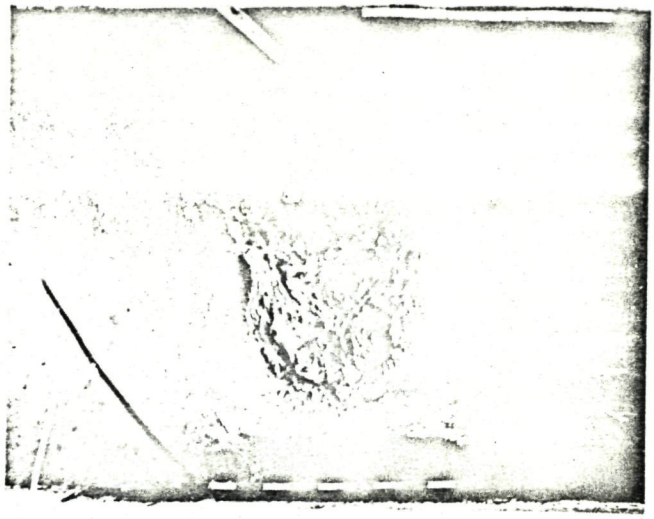
ONTGRONDINGSBREEDTE			JB
			A3
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M.1007-1039	FIG.53	



ONTGRONDINGSLENGTE			JB
			A3
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1007-1040	FIG.54	

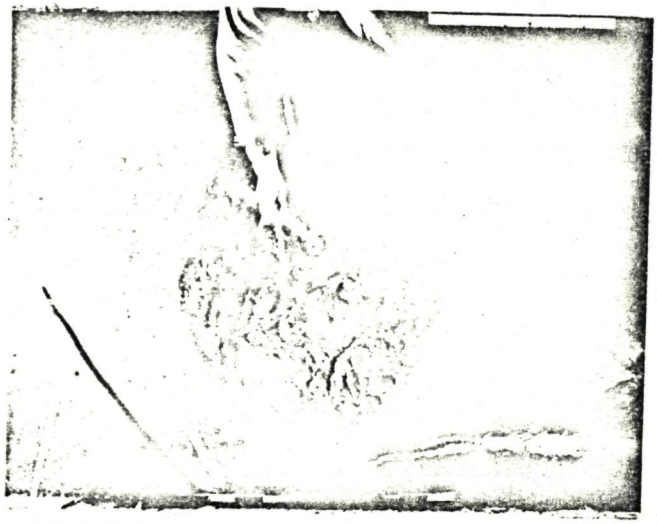


TOESTAND NA 0,5 min

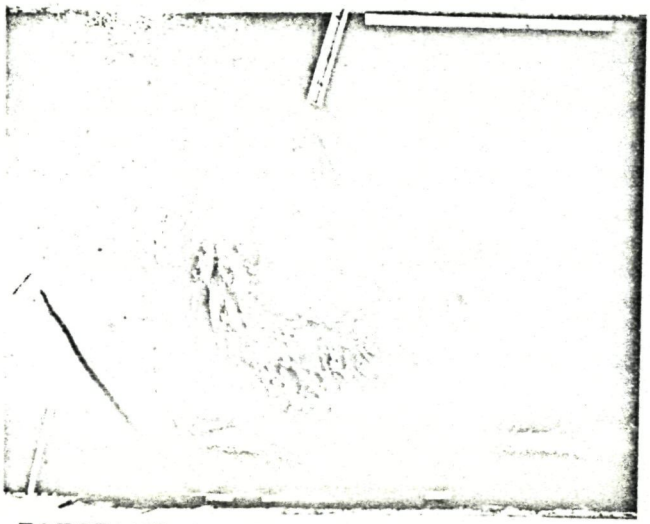


TOESTAND NA 1 min

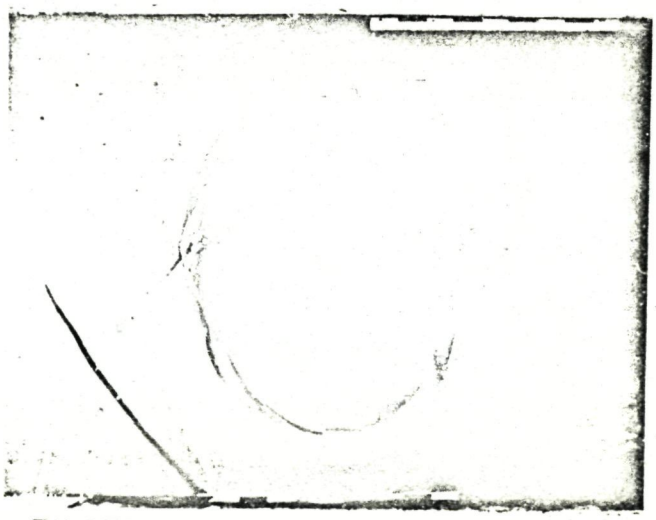
TOESTAND NA 2 min



TOESTAND NA 4 min



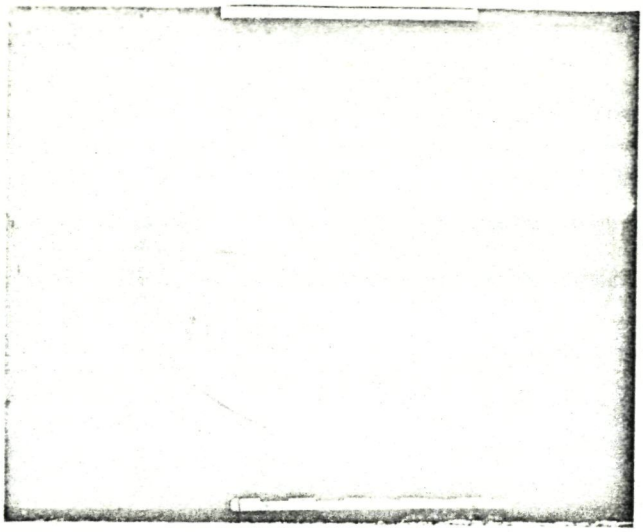
TOESTAND NA 6 min



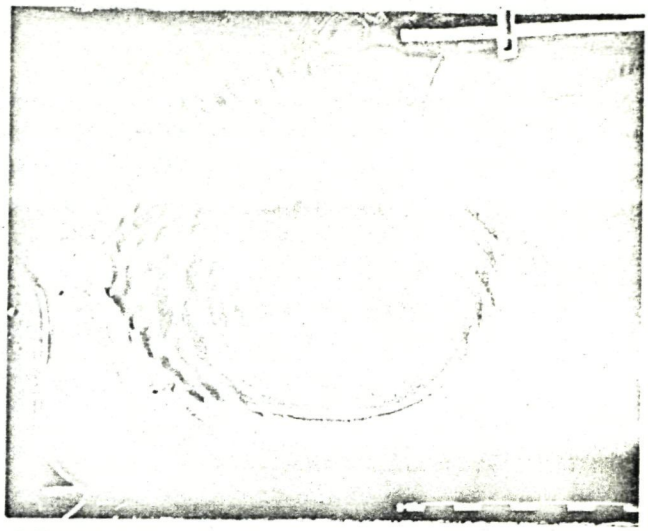
EINDTOESTAND

0 50 100 cm

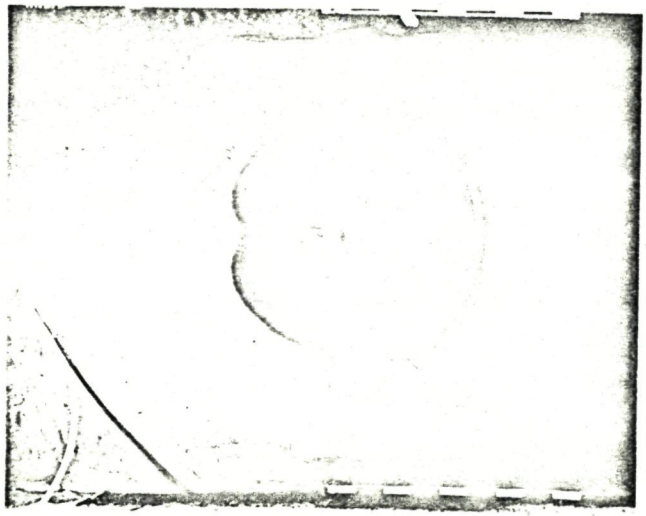
FOTOBLAD 1 SERIE F D = 9,3 cm d/D = 1/4 GAT HORIZONTAAL M. 1007



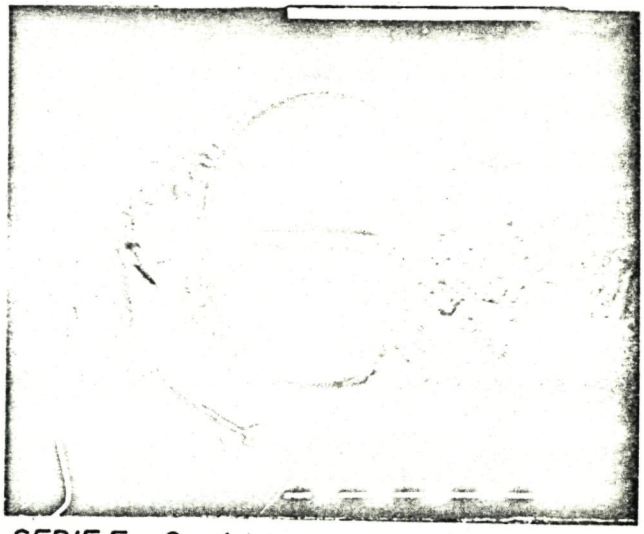
SERIE A Q = 4 l/s



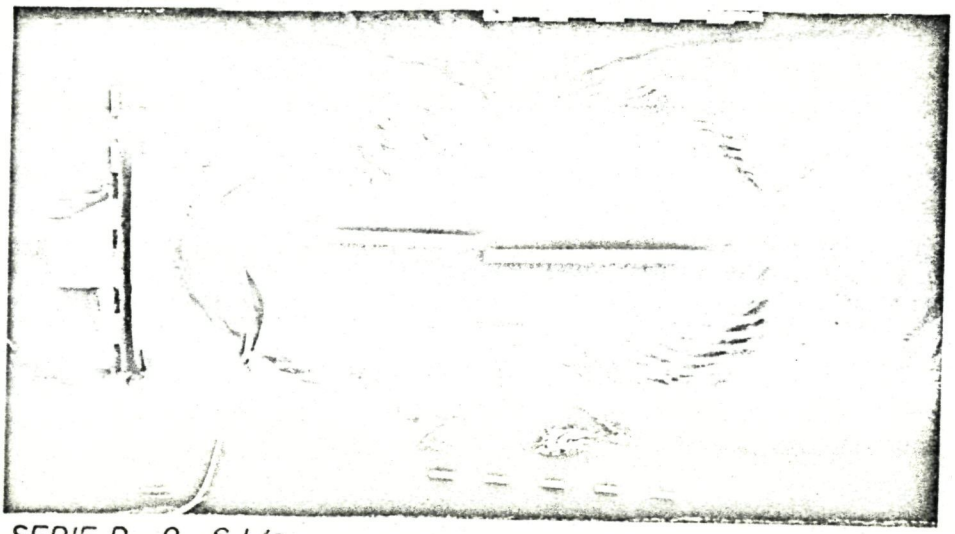
SERIE C I Q = 6 l/s GAT HORIZONTAAL



SERIE C III Q = 4 l/s GAT VERTIKAAL



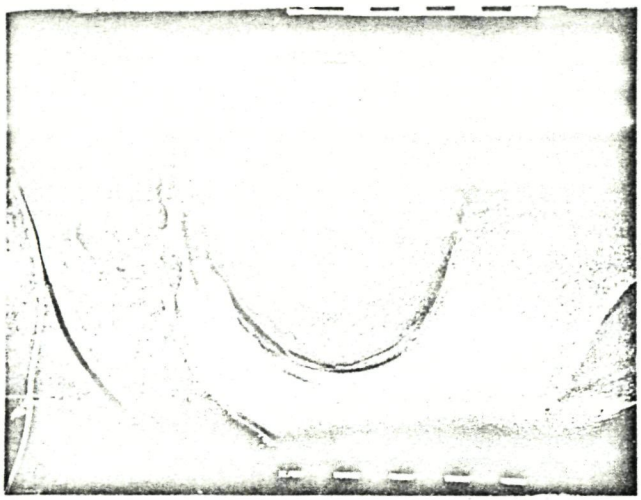
SERIE E Q = 4 l/s



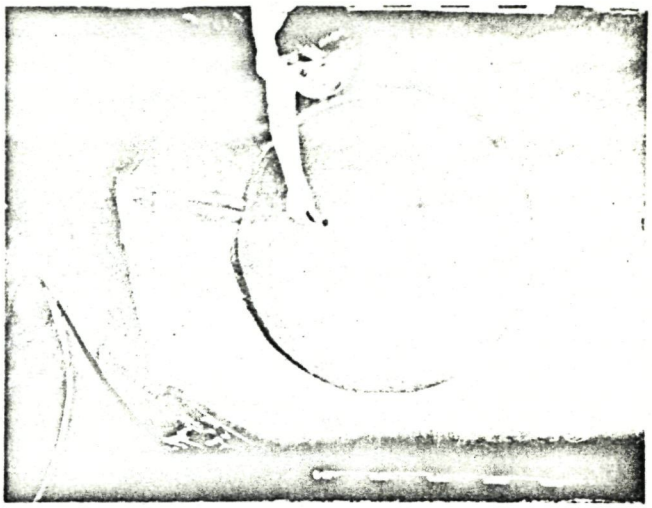
SERIE D Q = 6 l/s

0 50 100 cm

FOTOBLAD 2 OVERZICHT PROEVENSERIES d/D = 1 D = 4,64 cm M. 1007



SERIE B I d/D = 0,5 Q = 3 l/s
GAT HORIZONTAAL



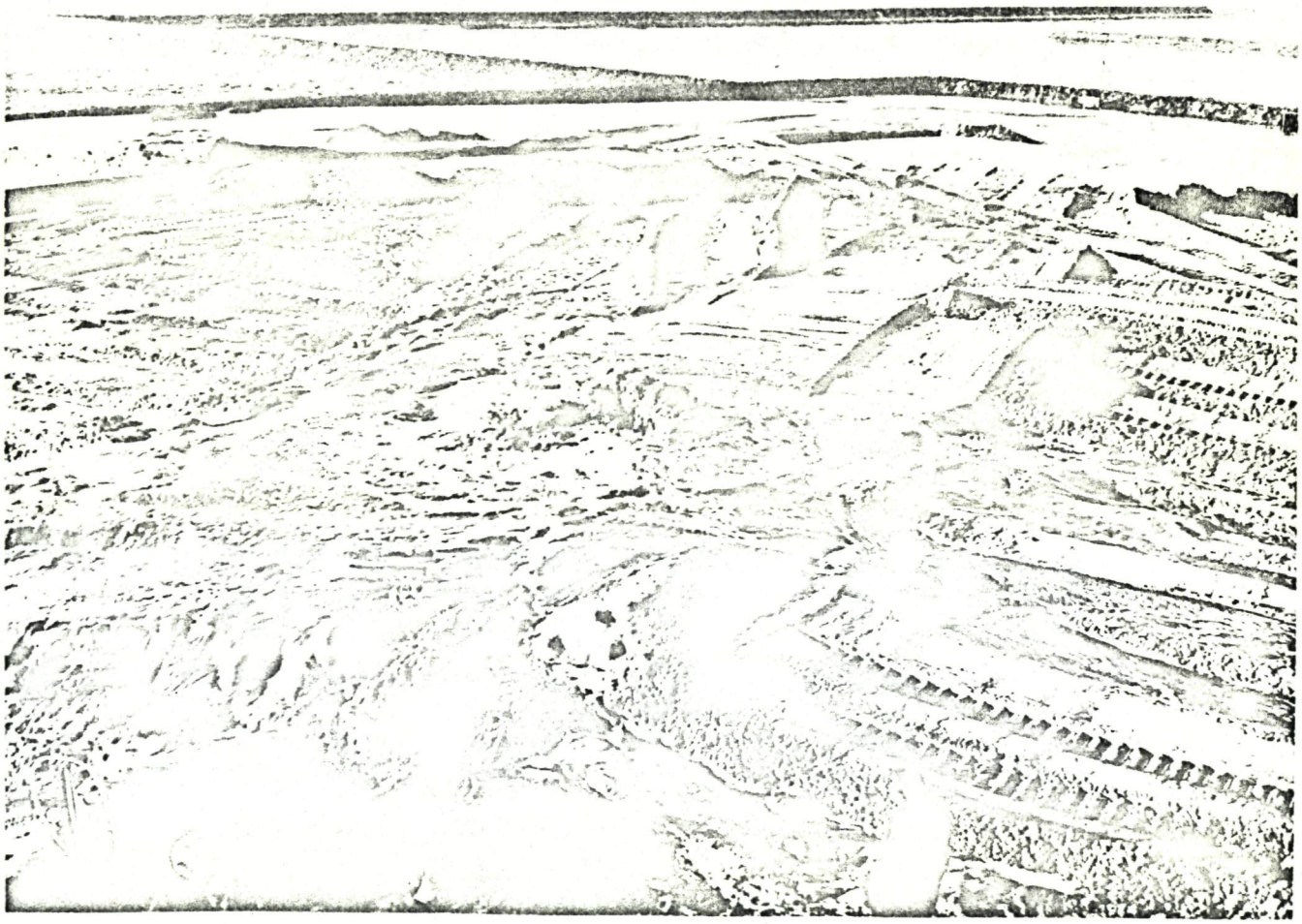
SERIE B III d/D = 0,5 Q = 3 l/s
GAT VERTIKAAL

SERIE F I d/D = 0,25 Q = 1 l/s
GAT HORIZONTAAL

SERIE F II d/D = 0,5 Q = 1 l/s
GAT VERTIKAAL

0 50 100 cm

FOTOBLAD 3 OVERZICHT PROEVENSERIES d/D = 0,5 EN 0,25 D = 4,64 cm M.1007



FOTOBLAD 4 VERGELIJKING MODEL - PROTOTYPE SERIE A M.1007