

I Bd 1155

2e exemplaar

VERGELIJKING VAN GEMETEN EN
BEREKENDE ZANDTRANSPORTEN
BIJ PERMANENTE STROMING

VERSLAG MODELONDERZOEK

AFGEHANDELD

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM
DELFT

M 1155

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Vergelijking van gemeten en berekende zandtransporten bij permanente stroming

Verslag modelonderzoek

M 1155

januari 1972

INHOUD

	blz.
<u>1. Inleiding</u>	
1.1. Opdracht en opzet van het onderzoek	1
1.2. Overzicht van de methode volgens Morra	1
<u>2. Model</u>	
2.1. Inrichting model	4
2.2. Meetapparatuur	4
<u>3. Beschrijving van de proef</u>	5
<u>4. Uitwerking van de metingen</u>	
4.1. Transporten uit snelheids- en concentratiemetingen	7
4.2. Transporten uit verschilpeilingen	8
<u>5. Beschouwing van de resultaten</u>	
5.1. Snelheidsverticalen	9
5.1.1. Snelheidsverticalen bij evenwichtstoestand	9
5.1.2. Snelheidsverticalen in raai 54 (geen zandtoevoer) ...	9
5.2. Zandgehalteverticaal	10
5.2.1. Zandgehalteverticalen bij evenwichtstoestand	10
5.2.2. Zandgehalteverticalen in raai 54 (geen zandtoevoer).	10
5.3. Ruwheidsfactor van Manning	11
5.4. Valsnelheid	11
5.5. De waarde van $\Delta F(c)$	12
<u>6. Beschouwing over de factor P</u>	13
<u>7. Conclusies</u>	14

FIGUREN

1. Inrichting model.
2. Zeefkromme en valsnelheden van wadzand.
3. Voedingskarakteristiek.
4. Zandtransport door raai 100.

Bodemligging en transport.

5. Van $t = 4,83$ uur tot $t = 5,33$ uur.
6. Van $t = 13,5$ uur tot $t = 14,0$ uur.
7. Van $t = 29,0$ uur tot $t = 29,5$ uur.
8. Van $t = 44,5$ uur tot $t = 45,0$ uur.
9. Opbouw van het zandbed in raai 38 en raai 49.
10. Opbouw van het zandbed in raai 40 en raai 54.
11. Plaats en tijd van het bereiken van de evenwichtshoogte.
12. Snelheidsverticaal Raai 25, $t = 15.0$ uur.
13. Zandgehalteverticaal Raai 25, $t = 15.0$ uur.
14. Zandtransportverticaal Raai 25, $t = 15.0$ uur.
15. Snelheidsverticaal Raai 30, $t = 16.5$ uur.
16. Zandgehalteverticaal Raai 30, $t = 16.5$ uur.
17. Zandtransportverticaal Raai 30, $t = 16.5$ uur.
18. Snelheidsverticaal Raai 34, $t = 18.9$ uur.
19. Zandgehalteverticaal Raai 34, $t = 18.9$ uur.
20. Zandtransportverticaal Raai 34, $t = 18.9$ uur.
21. Snelheidsverticaal Raai 36, $t = 20.5$ uur.
22. Zandgehalteverticaal Raai 36, $t = 20.5$ uur.
23. Zandtransportverticaal Raai 36, $t = 20.5$ uur.
24. Snelheidsverticaal Raai 38, $t = 24.25$ uur.
25. Zandgehalteverticaal Raai 38, $t = 24.25$ uur.
26. Zandtransportverticaal Raai 38, $t = 24.25$ uur.
27. Snelheidsverticaal Raai 40, $t = 25.42$ uur.
28. Zandgehalteverticaal Raai 40, $t = 25.42$ uur.
29. Zandtransportverticaal Raai 40, $t = 25.42$ uur.
30. Snelheidsverticaal Raai 42, $t = 27.65$ uur.
31. Zandgehalteverticaal Raai 42, $t = 27.65$ uur.
32. Zandtransportverticaal Raai 42, $t = 27.65$ uur.
33. Snelheidsverticaal Raai 42, $t = 28.65$ uur.
34. Zandgehalteverticaal Raai 42, $t = 28.65$ uur.
35. Zandtransportverticaal Raai 42, $t = 28.65$ uur.
36. Berekende en gemiddeld gemeten snelheidsverticaal bij evenwichtstoestand.
37. Berekende en gemiddeld gemeten zandgehalteverticaal bij evenwichtstoestand.
38. Berekende en gemiddeld gemeten zandtransportverticaal bij evenwichtstoestand.
- 39, 40. Gemiddelde zandgehalteverticaal bij evenwicht.

FIGUREN (vervolg)

41. Snelheidsverticaal Raai 54,	t = 39.5 uur.
42. Zandgehalteverticaal Raai 54,	t = 39.5 uur.
43. Zandtransportverticaal Raai 54,	t = 39.5 uur.
44. Snelheidsverticaal Raai 54,	t = 41.0 uur.
45. Zandgehalteverticaal Raai 54,	t = 41.0 uur.
46. Zandtransportverticaal Raai 54,	t = 41.0 uur.
47. Snelheidsverticaal Raai 54,	t = 42.25 uur.
48. Zandgehalteverticaal Raai 54,	t = 42.25 uur.
49. Zandtransportverticaal Raai 54,	t = 42.25 uur.
50. Snelheidsverticaal Raai 54,	t = 43.5 uur.
51. Zandgehalteverticaal Raai 54,	t = 43.5 uur.
52. Zandtransportverticaal Raai 54,	t = 43.5 uur.
53. Snelheidsverticaal Raai 54,	t = 45.0 uur.
54. Zandgehalteverticaal Raai 54,	t = 45.0 uur.
55. Zandtransportverticaal Raai 54,	t = 45.0 uur.
56. Vergelijking van transporten. Raai 38.	
57. Vergelijking van transporten. Raai 45.	
58. Vergelijking van transporten. Raai 49.	
59. Vergelijking van transporten. Raai 54.	
60. Relatie factor P en snelheid U_b .	

FOTO

1. Hengelmolen.

SYMBOLLEN

		eenheden
a	relatieve hoogte = h/H	-
A	constante = 39	-
A_n	σ/R , constante afhankelijk van aantal waarnemingen	-
c_n	valsnelheid in water	m/s
C	ruwheidsfactor van Chézy	$m^{1/2}/s$
e	grondtal van de natuurlijke logaritme	-
g	versnelling van de zwaartekracht	m/s^2
h	hoogte boven de zandbodem	m
H	waterdiepte	m
l	verhang van de waterspiegel	-
k_1	constante = $\sqrt{0,27}$	-
m_1	constante = c/ϵ_h	-
Z	concentratie	m^3/m^3
Z_0	concentratie op hoogte $h = 0$	m^3/m^3
Z_a	concentratie op hoogte a	m^3/m^3
Z_z	concentratie op hoogte z	m^3/m^3
n	ruwheidsfactor van Manning	$s/m^{1/3}$
P	vermenigvuldigingsfactor voor de formule van Morra bij ophoging in stromend water	-
Q	debiet	m^3/s
q	graad van de parabool van de snelheidsverticaal	-
R	hydraulische straal	m
R_n	spreidingsbreedte (verschil tussen grootste en kleinste waarneming)	m^3/u
r	constante = $c/\sqrt{g H l}$	-
s	constante afhankelijk van q	-
T	zandtransport door de stroomgoot	m^3/u
t	stroomtijd in decimale uren	u
t'	constante = $u'/\sqrt{g H l}$	-
U	stroomsnelheid	m/s
U_1	stroomsnelheid op hoogte $h = 1$	m/s
u'	snelheidsfluctuatie in stroomrichting	m/s
V	zandvoeding	m^3/u
w	constante = $t'/\sqrt{2 k_1^2}$	-
w_c	constante = $r/\sqrt{2 k_1^2}$	-
x_c	afstand in stroomrichting	m
z	relatieve hoogte boven de zandbodem = h/H	-
ϵ	percentage holle ruimte	-
ϵ_x	uitwisselingscoëfficiënt in stroomrichting	m^2/s
ϵ_h	uitwisselingscoëfficiënt in verticale richting	m/s
χ	constante van Von Karman $\approx 0,4$	-
ρ	dichtheid van vloeistof	kg/m^3
σ	standaardafwijking in het zandtransport	m^3/u

Vergelijking van gemeten en berekende zandtransporten bij permanente stroming

1. Inleiding

1.1. Opdracht en opzet van het onderzoek

In 1948 heeft R.H.J. Morra een methode ontwikkeld om het zwevend zandtransport te bepalen in situaties waar de snelheidsverticaal is aangepast aan de bodemruwheid en de zandbodem in evenwicht is. Onder evenwicht wordt die situatie verstaan, waarbij per tijdseenheid evenveel zanddeeltjes van de bodem worden opgenomen als bezinken.

Op de bespreking van 25 september 1969 werd door de Waterloopkundige Afdeling van de Deltadienst van Rijkswaterstaat aan het Waterloopkundig Laboratorium gevraagd deze methode aan de hand van metingen te verifiëren.

In een stroomgoot (zie 2.1) werd aan het bovenstroomse einde zand toegevoerd, dat zich gedeeltelijk in de goot afzette en gedeeltelijk door de stroom werd meegevoerd. Na enige tijd stelde zich een evenwichtstoestand in.

Het zandtransport was uit de zandtoevoer bekend. Als controle werd de bodemligging regelmatig gepeild en uit de bodemliggingen werd ook het transport berekend.

Om de oorzaak van eventuele verschillen tussen de getransporteerde hoeveelheid zand en de hoeveelheid zand die volgens de berekeningsmethode van Morra wordt getransporteerd te kunnen nagaan, werden benedenstrooms in de goot ook snelheids- en zandgehalteverticalen gemeten.

Tenslotte werd tijdens het onderzoek de waarde bepaald van een factor P, die gedefinieerd is als de verhouding tussen de totale gemeten hoeveelheid zand die door een raai passeert vanaf de begintoestand tot het bereiken van evenwicht en de totale hoeveelheid zand, die volgens de berekeningsmethode van Morra door dezelfde raai in dezelfde tijd kan passeren.

De proeven werden uitgevoerd in de grote stroomgoot van het Laboratorium De Voorst onder leiding van ir. J. Jorritsma, die tevens dit verslag samenstelde.

1.2. Overzicht van de methode volgens Morra

Een kort overzicht van de methode Morra, overgenomen uit: "De zandbeweging in het getijgebied" door R.H.J. Morra, kan als volgt worden samengevat.

De differentiaalvergelijking die de zandbeweging in stationaire stromen beschrijft, luidt:

$$\frac{dN}{dt} = -\frac{\partial}{\partial h} \left(-\epsilon_h \frac{\partial N}{\partial h} \right) - c \frac{\partial N}{\partial h} - \frac{\partial}{\partial x} \left(-\epsilon_x \frac{\partial N}{\partial x} \right) - u \frac{\partial N}{\partial x} \quad (1)$$

(Voor notatie zie de lijst van symbolen)

Voor de evenwichtsvoorwaarde (geen uitschuring of aanzanding) wordt deze vergelijking:

$$0 = -\frac{\partial}{\partial h} \left(-\epsilon_h \frac{\partial N}{\partial h} \right) - c \frac{\partial N}{\partial h} \quad (2)$$

Termen met $\frac{\partial N}{\partial x}$ zijn verwaarloosd omdat $\frac{\partial N}{\partial x} \ll \frac{\partial N}{\partial h}$.

Na integreren volgt uit (2):

$$\ln \frac{N_h}{N_{h'}} = -c \int_{h'}^h \frac{1}{\epsilon_h} dh \quad (3)$$

Uitgaande van de parabolische snelheidsverdeling:

$$U_h = U_1 h^{1/q} \quad (4)$$

waarin de graad q van de parabool afhankelijk is van χ , C en g volgens $q = \chi \cdot C / \sqrt{g}$ en uitgaande van de betrekking:

$$\tau = \epsilon_h \frac{d(\rho U)}{dh} \quad (5)$$

kan voor ϵ_h de volgende uitdrukking worden afgeleid:

$$\epsilon_h = \frac{g \sqrt{H I} \cdot q^2 H (1-z) z^{\frac{q-1}{q}}}{C (q+1)} \quad (6)$$

Voor ϵ_m (= de gemiddelde waarde van ϵ_h over de hoogte) wordt gevonden:

$$\epsilon_m = \frac{H \sqrt{H I} \cdot s}{c} \quad (7)$$

waarbij $s = 1,62q$ voor $q \geq 5$.

Uit (3) en (6) volgt:

$$\frac{N_z}{N_a} = \left\{ \frac{(1-z)^{z^{1/q}} \cdot e^{-(q+1)z^{1/q}}}{(1-a)^{a^{1/q}} \cdot e^{-(q+1)a^{1/q}}} \right\} \frac{r}{\chi} \quad (8)$$

waarin $r/\chi = \frac{c \cdot C}{q g \sqrt{H I}}$

Uit (3) en (7) volgt:

$$\frac{N_z}{N_a} = e^{-\frac{C \cdot \sqrt{g}}{s} r (z-a)} \quad (9)$$

Uitgaande van de logarithmische snelheidsverdeling

$$U = U_m + \frac{\sqrt{g H l}}{\chi} \left(1 + \ln \frac{h}{H}\right) \quad (10)$$

kan met behulp van (5) worden afgeleid

$$\epsilon_h = \chi \cdot H \sqrt{g \cdot H \cdot l} \cdot (1-z) \cdot z, \quad (11)$$

terwijl aan de voor de gemiddelde waarde van ϵ wordt gevonden:

$$\epsilon_m = \frac{\chi \cdot H \sqrt{g \cdot H \cdot l}}{6} \quad (12)$$

Uit (3) en (10) volgt:

$$\frac{N_z}{N_a} = \left(\frac{1-z}{z} \cdot \frac{a}{1-a} \right)^{r/\chi} \quad (13)$$

en uit (3) en (12):

$$\frac{N_z}{N_a} = e^{-6 \frac{r}{\chi} (z-a)} \quad (14)$$

Formule (14) is gelijk aan formule (9) omdat uit (10) en (4) afgeleid kan worden:

$$\chi = \frac{a \cdot \sqrt{g}}{C} \quad (15)$$

Bij een vergelijking van de formules (8) en (13) met enkele prototype-metingen, blijkt formule (13) niet goed bij de gemeten waarden aan te sluiten. Bovendien wordt bij formule (13) het zandgehalte nabij de bodem als z tot nul nadert, oneindig. Om praktische redenen was het echter niet mogelijk de formule (8) toe te passen, zodat Morra bij de samenstelling van zijn tabellen ter berekening van het totale zwevende zandtransport uitgaat van formule (14) en als snelheidsverdeling de betrekking (4) aanhoudt, omdat (10) bij de bodem oneindig negatief wordt. Bij de berekening van het verloop van de zandgehalteverticaal van figuur 37 is gebruik gemaakt van betrekking (8). Vergelijking (14) geeft alleen de verhouding van de gehalten en nog geen absolute waarde. Om absolute waarden te leren kennen moet een punt van de gehalteverticaal zijn gegeven. Kalinske ontwikkelde op grond van een waarschijnlijkheidsbeschouwing een verband tussen het bodemmateriaal en zwevend materiaal. Deze formule luidt:

$$\frac{N_o}{\Delta F(c)} = \frac{A}{\sqrt{\pi}} \left[\frac{1}{2 w_c} \cdot e^{-w_c^2} - \frac{\sqrt{\pi}}{2} \left(1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{w_c} e^{-w^2} dw\right) \right] \quad (16)$$

waarin

$$w_c = \frac{r}{\sqrt{2k_1^2}}$$

De constanten A en k_1 zijn gevonden door een aantal gehalteverticalen te extrapoleren met behulp van (14) en daarna (16) aan te passen. Het blijkt dat (16) redelijk voldoet als $A = 39$ en $k_1^2 = 0,27$.

Morra stelt dat de gevonden waarde van N_o vrij fictief is, in die zin dat de gehalten in werkelijkheid groter zijn, ook al door het gebruik van ϵ_m .

2. Model

2.1. Inrichting model

De stroomgoot waarin de proeven zijn uitgevoerd is 103 m lang en 3 m breed, terwijl de waterdiepte 2,60 m bedraagt. In lengterichting werden drie raaien, L, M en R, aangebracht. In dwarsrichting werden op onderlinge afstanden van 1 m raaien uitgezet, genummerd 1 t/m 103 in stroomafwaartse richting (zie figuur 1).

Tussen raai 19 en 20 werd de toevoer van de zandvoeding gemonteerd. Het zand werd in de stroomgoot gebracht in de vorm van een zand-water mengsel. In een silo werd het zand met het water vermengd en vervolgens werd het mengsel door een buizenstelsel naar de stroomgoot gevoerd. De gebruikte zandsoort was wadzand, waarvan de zeefkromme in figuur 2 is weergegeven. Tevens zijn in deze figuur de valsnelheden voor diverse korrelgrootten aangegeven.

Over de gootrand waren drie wagens verrijdbaar opgesteld: Een wagen waarop met behulp van hengelmolens tegelijkertijd de stroomsnelheden gemeten konden worden in de langsraaien L, M en R, een wagen waarop met behulp van hevelbuisjes in de raaien L, M en R zand-water monsters isokinetisch uit de stroom werden afgezogen en een wagen van waaruit de ligging van het zandbed gepeild werd met behulp van een peilstok.

In raai no. 100 was een opstelling gemaakt waarmee gedurende de gehele proef zowel de stroomsnelheden als de zandgehalten werden gemeten. In de raaien 14, 22, 35, 50 en 70 werd de waterstand elk half uur gemeten om het verhang te kunnen bepalen.

2.2. Meetapparatuur

De keuze voor de stroomsnelheidsmeters is gevallen op de hengelmolen (foto 1), omdat deze molen goed blijft functioneren als met de stroom zand-deeltjes worden meegevoerd. Dicht bij de bodem, waar veel zand getransporteerd wordt, kunnen met dit instrument betrouwbare gegevens worden verkregen. In elk meetpunt werd gedurende 100 seconden gemeten.

De zand-water monsters werden direct na de stroomsnelheidsmeting met behulp van hevelbuisjes isokinetisch afgetapt. De tijd die nodig was om een monster te nemen bedroeg circa 20 seconden. Na drogen en wegen werd het gehalte van het mengsel bepaald. Bij het berekenen van volumina uit gewichten werd de holle ruimte van het zandbed in de goot, $\epsilon = 41$ o/o aangehouden.

Het verhang van de waterspiegel werd in de raaien 14, 22, 35, 50 en 70 gemeten met behulp van pitot-buizen.

3. Beschrijving van de proef

Het zand werd bij raai 20, onder een hellingshoek van circa 25° met het wateroppervlak, boven het water in de stroomrichting in de stroom gespoten. In verband met de aanvoer van zand met een dragline is de toevoer niet constant. Door enige voorzieningen werd de toevoer van zand in de stroomgoot zo constant mogelijk gehouden. In figuur 3 is de variatie van de zandvoeding als functie van de tijd weergegeven. Het percentage holle ruimte van het gebruikte wadzand buiten de goot was $\epsilon = 50 - 52\%$. De waarde van ϵ in het zandbed in de goot was $40 - 42\%$. Een hoeveelheid van 14 m^3 zand buiten de goot komt dus overeen met $11,2$ à $12,1 \text{ m}^3$ zand in de stroomgoot.

Volgens de methode van Morra treedt, als het zandtransport $T = 14 \text{ m}^3/\text{u}$ is, met $\epsilon = 50$ à 52% en $\bar{u} = 1 \text{ m/s}$ een evenwicht op bij een waterdiepte $H = 1 \text{ m}$. Bij de aanvang van de proef werd bij de zandvoeding $V = 14 \text{ m}^3/\text{u}$ met $\epsilon = 50 - 52\%$ een waterdebiet $Q = 3 \text{ m}^3/\text{s}$ ingesteld. De gemiddelde stroomsnelheid in de goot is dan $3/3.2,60 = 0,38 \text{ m/s}$. Bij deze snelheid treedt volgens de methode Morra nagenoeg geen transport op, zodat het transport door raai 100 te verwaarlozen behoort te zijn. Omdat echter een groot transport gemeten werd in raai 100 (zie figuur 4) werd het debiet na een stroomtijd van 2,4 uur verlaagd tot $Q = 1,5 \text{ m}^3/\text{s}$. Toen het zandbed in raai 25 een hoogte bereikt had van 1,75 m werd het debiet verhoogd tot $Q = 2,4 \text{ m}^3/\text{s}$ op $t = 13$ uur. Er stelde zich toen een evenwicht in bij $\bar{u} = 1 \text{ m/s}$ en een waterdiepte $H = 0,80 \text{ m}$. Na $t = 13$ uur werd het zandlichaam dus niet hoger, maar er ontstond een horizontaal gedeelte dat in stroomafwaartse richting aangroeide.

De ontwikkeling van het zandlichaam is weergegeven in de figuren 5 t/m 10, en in figuur 11 is het verband weergegeven tussen de stroomtijd en het raainummer tot waar het zandbed in evenwicht was.

Na ca. 29 uur stromen, (het horizontale deel had raai 44 bereikt), werden de transporten door raai 100 snel groter (zie figuur 4). De zandvoeding werd daarom op $t = 33$ uur gehalveerd en vanaf $t = 38,3$ uur werd gestroomd zonder voeding. Op $t = 45$ uur werd de proef beëindigd.

Na $t = 13$ uur werden de stroomsnelheden en de zandconcentraties aan het benedenstroomse einde van het horizontale gedeelte van het zandlichaam gemeten. Aan het einde van het horizontale deel is de snelheidsverticaal zoveel mogelijk aangepast aan de bodemruwheid en zal de zandconcentratieverticaal meer de vorm benaderen die in de evenwichtstoestand optreedt dan op een andere plaats op het horizontale gedeelte. In totaal werden bij de evenwichtstoestand van het zandbed acht transportmetingen uitgevoerd respectievelijk in de raaien 25, 30, 34, 36, 38, 40 en 42 (2x) en na het stopzetten van de zandvoeding is in raai 54 het transport vijfmaal gemeten (zie figuur 11).

De snelheidsverticaal werd vanaf circa 5 cm boven de zandbodem gemeten in 7 à 10 punten, waarvan de onderlinge afstanden kwadratisch met de hoogte toenemen. In verband met oneffenheden in de zandbodem zoals ribbels, kon niet steeds gemeten worden vanaf 5 cm boven de zandbodem, volgend uit het niveau van de peilingen.

In dezelfde punten waar de stroomsnelheden werden gemeten, werd direct na het meten van de snelheid isokinetisch een zand-water mengsel afgetapt.

In raai 100 werd gedurende de gehele proef het zwevend zandtransport bepaald. In raai 100 werd de snelheid gemeten met een Ott-molen. Na het meten van de snelheid in een punt werd isokinetisch gedurende circa 30 minuten zand-water in dat punt uit de stroom afgetapt. Het afgetapte zand-water werd naar een bassin geleid, waarin het zand bezonk.

Gedurende de gehele proef werd de ligging van het zandbed elk half uur gepeild (figuur 5 t/m 8).

4. Uitwerking van de metingen

4.1. Transporten uit snelheids- en concentratiemetingen

Door de gemeten waarden van de snelheids- en concentratieverticaal te vermenigvuldigen wordt de transportverticaal verkregen, waaruit door planimetrieren het zwevend zandtransport kan worden verkregen.

De stroomsnelheden en de zandconcentraties in de verticaal konden gemeten worden tot circa 5 cm boven de zandbodem. Het zandtransport tussen de bodem en circa 5 cm erboven is echter niet te verwaarlozen. Voor het verloop over de onderste 5 cm van de stroomsnelheids- en concentratieverticaal is daarom een extrapolatie uit de hoger gelegen meetpunten gebruikt.

Daar de methode Morra gebruik maakt van een parabolische snelheidsverdeling zijn de gemeten punten in de verticaal benaderd volgens de methode van de kleinste kwadraten door de parabool $U = U_0 \sqrt{h/q}$. De gemeten snelheidsverticalen en de benaderde snelheidsverticalen zijn weergegeven in de figuren 12, 15, 18, 21, 24, 27, 30, 33, 41, 44, 47, 50 en 53. De waarden van q blijken met uitzondering voor de raai 54 (zandvoeding = 0) uitzonderlijk hoog te zijn. In hoofdstuk 5.1.1. wordt hier nog nader op teruggekomen. Tevens blijkt een nogal onregelmatige verloop in de verticalen op te treden, hetgeen waarschijnlijk te wijten is aan de relatief korte meettijd.

De gemeten waarden voor de zandgehalteverticaal zijn benaderd volgens de methode van de kleinste kwadraten met behulp van de theoretisch gevonden uitdrukking voor de gehalteverticaal:

$$N_h = N_0 \cdot e^{-m \cdot h},$$

waarbij N_0 en m zodanig zijn gekozen dat de som van de kwadraten van de afwijkingen minimaal zijn. Voor de onderste 5 cm van de gehalteverticaal is voor de transportberekening gebruik gemaakt van de waarden van de geëxtrapolerde benadering van de gemeten punten (figuren 13, 16, 19, 22, 25, 28, 31, 34, 42, 45, 48, 51 en 54).

Uit de op bovenstaande wijze verkregen snelheids- en gehalteverticaal kon de transportverticaal worden verkregen door de gemeten waarden van de snelheids- en gehalteverticaal te vermenigvuldigen. Voor het deel van de verticaal vanaf de bodem tot ca. 5 cm boven de bodem werden de parabolische en exponentiële benaderingen van respectievelijk de snelheids- en gehalteverticaal gebruikt (figuren 14, 17, 20, 23, 26, 29, 32, 35, 43, 46, 49, 52 en 55). Deze benaderingen zijn niet voor de gehele verticaal gebruikt, omdat het de bedoeling was de methode van Morra te testen en deze methode gebruik maakt van de parabolische en exponentiële verdeling voor de snelheids- en gehalteverticaal.

In totaal werden bij evenwichtsligging van het zandbed de transporten op deze wijze op acht plaatsen gemeten en bepaald. De gemiddelde waarde van de hieruit volgende transporten bedroeg $10,0 \text{ m}^3/\text{u}$ hetgeen een factor 1,2 lager is dan de zandvoeding bij raai 20. De standaardafwijking σ werd geschat met behulp van de spreidingsbreedte R , volgens $\sigma = A \cdot R$. De factor A is afhankelijk van het aantal waarnemingen en bedraagt voor acht waarnemingen

0,35 (volgens tabel IV.2 uit Toegepaste Statistiek A van Prof. ir.³J.W. Sieben). De op deze wijze bepaalde standaardafwijking bedroeg hier $3,0 \text{ m}^3/\text{u}$ ofwel 33% van het gemiddelde.

De oorzaak van een dergelijke grote spreiding kan het gevolg zijn van

- a) Het niet constant zijn in de tijd van de zandvoeding.
- b) Het niet constant zijn van het transport tengevolge van bijvoorbeeld snelheidsfluctuaties.

Er zijn twee aanwijzingen in de richting van laatstgenoemde oorzaak. In de eerste plaats bedroeg de maximale afwijking in de zandvoeding ten opzichte van de gemiddelde waarde 13%. In de tweede plaats gaf de vijfmaal herhaalde transportmeting in raai 54 na het stopzetten van de zandvoeding een standaardafwijking van 38% van de gemiddelde waarde te zien (zie figuur 11).

4.2. Transporten uit verschilpeilingen

Uit de verschillende bodemliggingen op twee tijdstippen is in elke raai 20 t/m 100 het transport berekend, dat in de beschouwde periode van een half uur tussen twee bodempeilingen de bodemligging benedenstrooms van elke raai deed veranderen. In de aldus gevonden transporten is het bodemtransport begrepen. Om het totale transport te verkrijgen, moet bij het transport uit de bodempeilingen nog het zwevend zandtransport door raai 100 opgeteld worden.

In de figuren 56 t/m 59 zijn voor enkele dwarsraaien namelijk 38, 45, 49 en 54, de zandtransporten uitgezet, zoals die berekend zijn uit de verschilpeilingen, vermeerderd met het gemeten zwevend transport door raai 100. Het totaal transport is in de figuren 56 t/m 59 gesplitst in zwevend en rollend transport, dat berekend is met de formule van Kalinske.

De grote spreiding kan verklaard worden uit de korte intervallen waarmee gepeild werd en uit de nauwkeurigheid van het peilen. De bodem werd elk half uur gepeild. In een half uur is de verandering in de bodemligging van de zelfde grootte-orde als de peilnauwkeurigheid. De gemiddelde waarde van het transport uit de peilingen is daarom bepaald door het transport te berekenen over een tijdsinterval van enkele uren.

Het zwevend transport door raai 100 werd bepaald met behulp van hevelbuisjes met isokinetische afzuiging. In elk punt werd hier, door een bezinkbassin te gebruiken, langere tijd gemeten.

Uit de gesommeerde hoeveelheid zwevend transport door raai 100, vermeerderd met de hoeveelheid zand in de goot bleek de zandtoevoer $11,8 \text{ m}^3/\text{u}$ geweest te zijn bij een holtepercentage van circa 41%.

5. Beschouwing van de resultaten

5.1. Snelheidsverticalen

5.1.1. Snelheidsverticalen bij evenwichtstoestand

Bij de afleiding van de formule voor het zwevend zandtransport volgens Morra is er van uitgegaan dat de snelheidsverticaal aangepast is aan de bodemruwheid en dat het verloop parabolisch is.

In het model was het verloop van de snelheidsverticaal niet aangepast aan de bodemruwheid, hetgeen uit het volgende moge blijken.

Uit verhangmetingen op het horizontale deel is berekend dat de gemiddelde Chézy-waarde $35 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ was. De berekende waarden lagen alle tussen $31 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ en $39 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$. De Chézy-waarde kan echter ook uit het verloop van de snelheidsverticaal worden berekend, als de bodemruwheid en de snelheidsverticaal met elkaar in overeenstemming zijn, met de formule $C = q \sqrt{g} / \chi$. De Chézy-waarde op deze wijze berekend voor de benaderde snelheidsverticalen uit de figuren 12, 15, 18, 21, 24, 27, 30 en 33 lag tussen $120 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ en $500 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ met een gemiddelde van $260 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$. Hieruit kan worden afgeleid dat de snelheidsverticaal nog niet aan de bodemruwheid was aangepast. De gemeten snelheidsverticalen konden dan ook niet goed worden benaderd door een parabool.

De gemeten verticaal kan opgebouwd gedacht worden uit parabolisch verlopende stukken. Vlak bij de bodem is de graad van de parabool 1 à 2, terwijl q nabij het wateroppervlak zeer groot wordt.

Daar uit verhangmetingen werd berekend dat $C \approx 35 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ kon met behulp van de relatie $C = q \sqrt{g} / \chi$ worden berekend dat bij een aangepaste snelheidsverdeling de graad van de snelheidsparabool $q = 4,5$ zou zijn. Ter vergelijking van de gemeten snelheidsverdelingen met de parabolische snelheidsverdeling met $q = 4,5$ is in figuur 36 de gemiddeld gemeten snelheidsverticaal en de berekende snelheidsverticaal weergegeven.

5.1.2. Snelheidsverticalen in raai 54 (geen zandtoevoer)

De snelheidsverdeling was in raai 54 beter aan de bodemruwheid aangepast dan op het bovenstrooms gelegen horizontale deel van het zandbed bij evenwichtsligging het geval was (figuur 41, 44, 47, 50 en 53). De gemiddelde Chézy-waarde, zoals deze uit de benaderde snelheidsverticalen met de formule $C = q \sqrt{g} / \chi$ kon worden afgeleid bedroeg $61 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$, terwijl de uitersten $31 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ en $102 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ waren. Omdat hier sprake was van een vertragsgebied, kon de waarde van C niet worden bepaald uit verhangmetingen.

5.2. Zandgehalteverticaal

5.2.1. Zandgehalteverticalen bij evenwichtstoestand

Uit de figuren 13, 16, 19, 22, 25, 28, 31 en 34 is de gemiddeld gemeten gehalteverticaal afgeleid (zie figuur 37). De gemeten gehaltegradiënt nabij de bodem is aanmerkelijk groter dan de berekende gehaltegradiënt.

Bij de berekening van de gehalteverticaal wordt gebruik gemaakt van een q -waarde die constant is over de gehele hoogte, dus van een parabolische snelheidsverdeling. Is echter de q -waarde niet constant over de hoogte, dan ondergaat ook de gehalteverticaal wijzigingen. Voor het gebied nabij de bodem, waar de q klein is, moet dan de gehaltegradiënt groot zijn (vergelijk formule 8). Dit is in overeenstemming met de metingen.

In het deel van de gehalteverticaal boven 20 à 30 cm boven het zandbed is de gemeten gehaltegradiënt kleiner dan de berekende. In figuur 37 bedraagt voor de gemeten verticaal dN/dh gemiddeld over de bovenste 50 cm ongeveer $10^{-3} \text{ m}^2/\text{m}^3$, terwijl voor de berekende gehalteverticaal dN/dh in hetzelfde gebied ongeveer $4,5 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{m}^3$ is. Hiervoor kan een overeenkomstige verklaring gegeven worden voor het onderste deel van de verticaal. In de figuren 39 en 40 is op respectievelijk dubbel- en enkel logaritmisch papier de gemiddeld gemeten zandgehalteverticaal voor de evenwichtstoestand in het model gegeven. Uit figuur 39 blijkt dat, althans in het model met niet aangepaste snelheidsverticaal, de zandgehalteverticaal goed benaderd kon worden door een hyperbolische functie. Omdat bij een hyperbolisch verloop op een hoogte $h = 0$ een oneindige waarde voor de concentratie gevonden wordt, voldoet de hyperbolische vergelijking daar niet. Uit figuur 40 blijkt echter dat de gehalteverticaal bij de bodem ook benaderd kon worden door een exponentiële functie, die wel een eindige waarde voor het zandgehalte op de bodem geeft. De zandgehalteverticaal kon in het model dus goed worden benaderd door een exponentiële verloop nabij de bodem en een hyperbolisch verloop voor een afstand groter dan $1/5 H$ boven het zandbed.

5.2.2. Zandgehalteverticalen in raai 54 (geen zandtoevoer)

In de periode zonder zandtoevoer vond erosie plaats op de bodem van het horizontale deel. De zandgehalteverticaal bevatte toen dus uitsluitend materiaal dat van de bodem was opgenomen en door de verticale turbulentie over de verticaal was verdeeld. Uit de lage waarden, die voor de zandgehalten werden gemeten toen er geen zandtoevoer was, kan worden geconcludeerd dat de afstand van raai 20 tot raai 54 (34 meter) niet groot genoeg was om de stroom voldoende zand op te laten nemen (zie figuur 59).

5.3. Ruwheidsfactor van Manning

Om rekentechnische redenen wordt bij de methode van Morra voor de bepaling van C gebruik gemaakt van de uitdrukking van Manning. Uit de formule van Manning $\bar{v} = R^{2/3} \cdot I^{1/2}/n$ en de formule van Chézy $\bar{v} = C \sqrt{RI}$ volgt $C = R^{1/6}/n$. De waarde van n is echter niet eenvoudig te bepalen. Verscheidene onderzoekers hebben waarden van n in tabelvorm gegeven voor een groot aantal kanalen van verschillende vorm, afmeting en bodemgesteldheid (Ven te Chow: Open Channel Hydraulics). Aan de hand van deze tabellen kan de waarde van n worden geschat. Pogingen om n analytisch te bepalen zijn gedaan door Cowan (W.L. Cowan: Estimating hydraulic roughness coefficients, Agricultural Engineering, vol 37, 1956), die de coëfficiënten in zijn formule op soortgelijke tabellen baseert als hierboven zijn vermeld. Ter illustratie van de invloed van n kan worden berekend dat voor de omstandigheden in het model, $c = 0,011$ m/s, $\bar{v} = 1$ m/s en $H = 0,80$ bij gebruik van $n = 0,027$ een transport wordt berekend dat 1,3 maal hoger is dan bij toepassing van $n = 0,024$ s.m^{-1/3} gevonden wordt.

Omdat de Chézy-waarde grote invloed heeft op de uitkomst van een transportberekening lijkt het beter de C-waarde te bepalen met de formule $C = 18 \log 12 R/(k + \delta/7)$.

5.4. Valsnelheid

Evenals het getal van Manning heeft ook de valsnelheid van het zand in water een grote invloed op het berekende transport. Bij de methode van Morra wordt voor de valsnelheid van zand met $d_{50} = 140 \mu$ aangehouden $c = 0,014$ m/s. Uit valsnelheidsproeven met het gebruikte zand, die bij de tijdens de proeven heersende temperatuur van 5° C werden gedaan, bleek dat $c = 0,011$ m/s.

Het gebruik van de valsnelheid $c = 0,011$ m/s levert in de berekening een transport op dat, als $n = 0,027$ en $\bar{v} = 1,0$ m/s een factor 1,8 hoger ligt, dan wanneer $c = 0,014$ m/s wordt gebruikt. Als in de berekeningen worden gebruikt $c = 0,011$ en $n = 0,027$ wordt een transport berekend dat 2,3 maal zo hoog is dan wanneer $c = 0,014$ en $n = 0,024$ worden gebruikt.

In het prototype zullen deze afwijkingen ten gevolge van het niet juist gebruiken van n en c kleiner zijn dan in het model omdat:

- De waterdiepte gewoonlijk groter zal zijn dan 0,80 m en de C-waarde eveneens groter zal zijn. Voor $H = 10$ m en $C = 60$ m^{1/2}/s geldt $n = 0,024$ s.m^{-1/3}.
- De temperatuur van het water doorgaans hoger zal zijn dan 5° C, waardoor de valsnelheid toeneemt. Voor natuurlijk zand met vormfactor $l_1/\sqrt{l_2 \cdot l_3} = 0,7$, waarin l_1, l_2, l_3 , de afmetingen in de drie hoofdrichtingen van het zanddeeltje zijn, geldt dat bij 5° C de valsnelheid 0,011 m/s is en bij 20° C 0,014 m/s.

5.5. De waarde van $\Delta F(c)$

De hoeveelheid materiaal die wordt opgenomen uit de bodem wordt in de beschouwingen van Morra verondersteld evenredig te zijn met:

1. het tijdspercentage dat de opwaartse turbulentiesnelheid de waarde van de valsnelheid overschrijdt;
2. de maximale waarde van de turbulentiesnelheid als deze de valsnelheid overschrijdt;
3. het relatieve aantal der deeltjes dat in de bodem aanwezig is met een valsnelheid, behorend bij de beschouwde korreldiameter.

De onder 3. genoemde grootte $\Delta F(c)$ wordt in de nota van Morra als volgt bepaald. Als a_1 % van het bodemmateriaal een valsnelheid heeft van $c < c_1$ en a_2 % heeft een valsnelheid van $c < c_2$, dan is het percentage van het bodemmateriaal met een valsnelheid $c = 1/2 (c_1 + c_2)$ gelijk aan $(a_1 - a_2)$ %.

De grootte van het verschil $(a_1 - a_2)$ ligt echter niet eenduidig vast en daardoor is de waarde van $\Delta F(c)$ ook niet eenduidig vast te stellen.

Bij de hier uitgevoerde berekeningen is voor $\Delta F(c)$ steeds 100 genomen en is als maatgevende korrel de d_{50} aangehouden. Dat deze aanname voor het gebruikt wadzand juist is, blijkt uit de volgende berekening. De diverse fracties van het wadzand werden verdeeld in intervallen ter breedte van 20μ . In elk interval kan de valsnelheid voor de fracties tussen de grenzen van dat interval constant worden aangenomen als de valsnelheid behorende bij de korrelgrootte $1/2 (d_1 + d_2)$, als d_1 en d_2 de grenzen van het interval zijn. Voor elk interval werd nu de berekening uitgevoerd en voor $\Delta F(c)$ werd per interval die waarde aangehouden die overeenkwam met het percentage waarin de beschouwde fractie voorkwam. De transporten van de diverse fracties werden vervolgens gesommeerd. Het aldus gevonden transport was gelijk aan het transport dat werd berekend bij gebruikmaking van $\Delta F(c) = 100$ en de d_{50} van het wadzand.

6. Beschouwing over de faktor P

Tijdens het ophogen van een zandlichaam in stromend water zal het toegevoerde zand gedeeltelijk neerslaan en gedeeltelijk door de stroom meegevoerd worden. In de figuren 56 t/m 59 zijn voor de raaien 38, 45, 49 en 54 zowel het berekende transport op grond van de peilingen als het transport volgens de methode Morra weergegeven.

Het tijdstip waarop begonnen wordt met het ophogen van het zandbed in een bepaalde raai wordt $t = t_b$ genoemd en het moment waarop het evenwicht in die raai is bereikt $t = t_e$. Het tijdstip $t = t_b$ zal normaal gesproken samenvallen met $t = 0$ en het tijdstip $t = t_e$ zal later vallen naarmate de beschouwde raai verder stroomafwaarts ligt.

De totale gemeten hoeveelheid zand die door een bepaalde raai wordt getransporteerd van $t = t_b$ tot $t = t_e$, gedeeld door de totale hoeveelheid zand die volgens de methode Morra kan worden getransporteerd door dezelfde raai in hetzelfde tijdsbestek, wordt P genoemd.

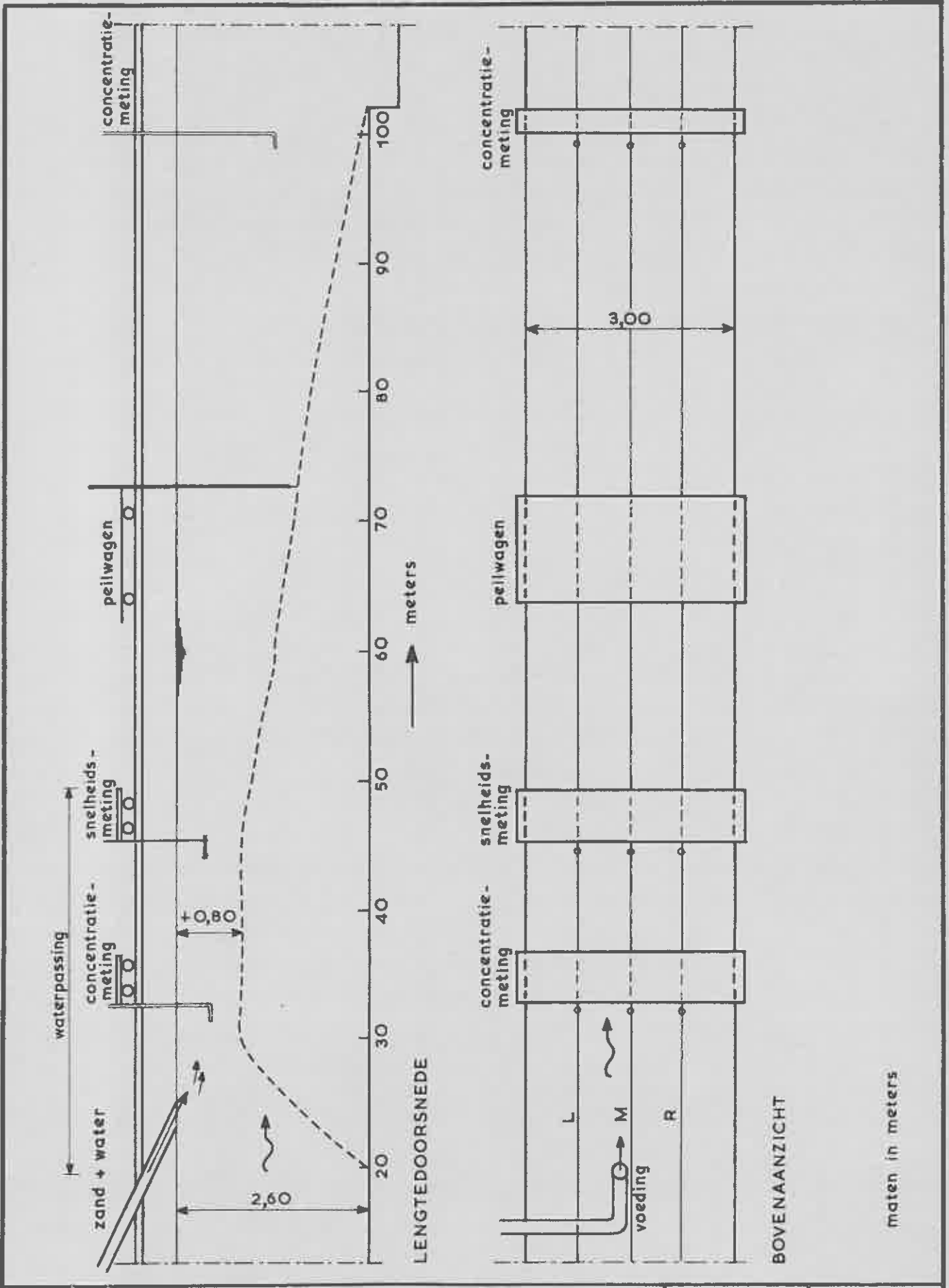
Tijdens de opbouwfase van het zandbed in het model kan men op elk moment zeggen dat op dat moment begonnen wordt met de opbouw van het zandbed als het reeds aanwezige zand als bestaande bodem wordt beschouwd. Het tijdstip $t = t_b$ valt dan niet samen met $t = 0$. De stroomsnelheid op $t = t_b$ wordt groter naarmate t_b groter wordt. De factor P neemt dan af, omdat het verschil tussen het transport dat volgens de methode van Morra kan optreden en het gemeten transport kleiner wordt naarmate de evenwichtssituatie meer wordt benaderd. Het verband tussen de factor P in het model en de stroomsnelheid ten tijde van $t = t_b$ is grafisch weergegeven in figuur 60 voor de raaien 38, 45 en 49. In het model was U_b gelijk aan 0,31 m/s, dat was de snelheid bij lege goot en het debiet $Q = 2,4 \text{ m}^3/\text{s}$. Omdat van het begin van ophoging tot het bereiken van evenwicht het debiet in de goot niet constant was, werd de waarde van t_b gevonden door extrapolatie van het tijd-zandhoogte verloop van $t = 33$ uur tot $t = 13$ uur naar het moment waarop $h = 0$, en dus $t = t_b \neq 0$. Door nu het verloop van het zandverlies en de berekende transporten (bij 56 t/m 59) vanuit het interval $13 \text{ uur} < t < 33 \text{ uur}$ te extrapoleren tot $t = t_b$ (< 13 uur) kon de waarde van P voor $U_b = 0,31 \text{ m/s}$ worden bepaald.

Met nadruk wordt er op gewezen dat de hier bepaalde factor P betrekking heeft op de specifieke omstandigheden in het model: permanente stroom en beperkte hoogte, terwijl de zandvoeding bij het wateroppervlak plaatsvond.

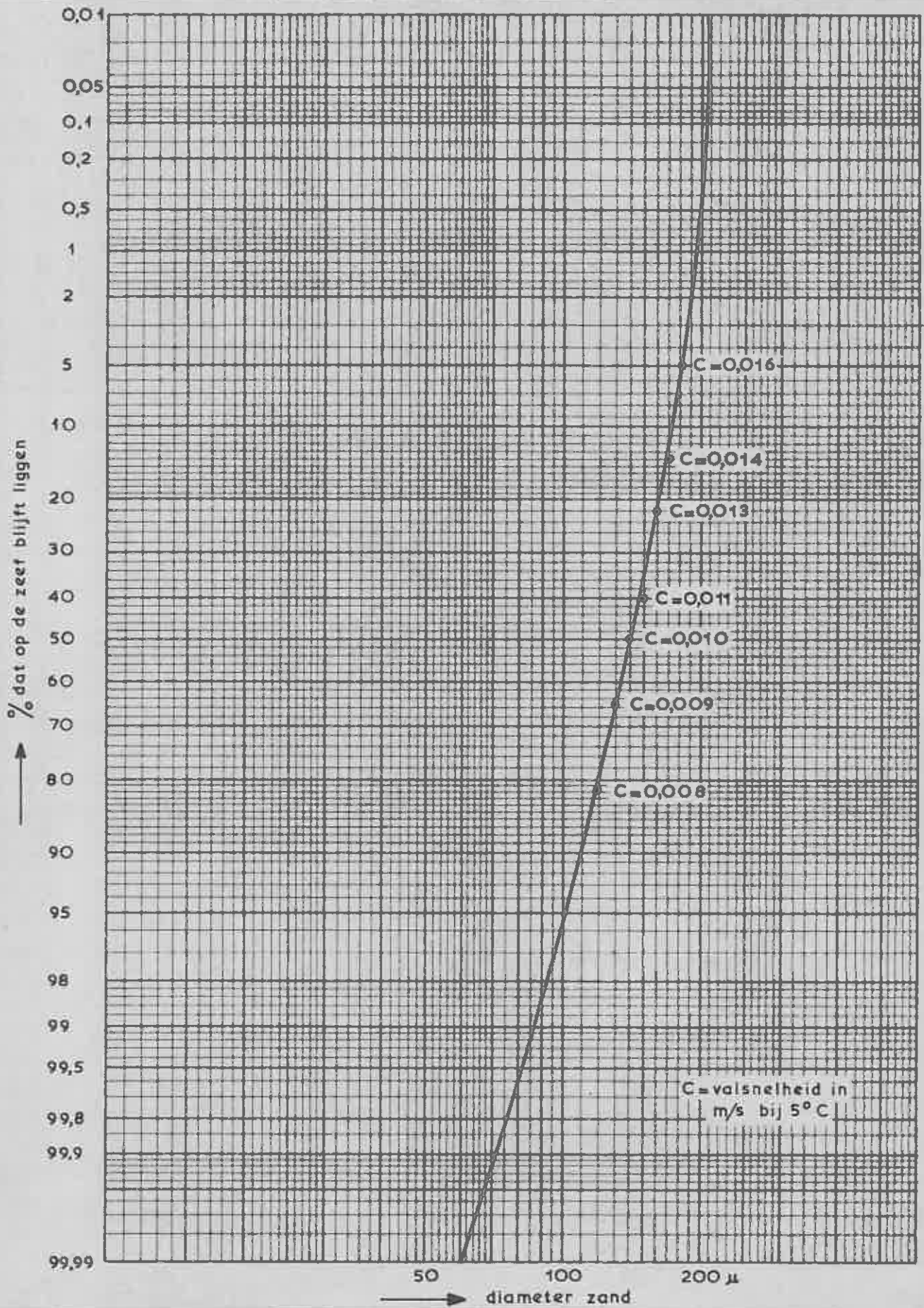
7. Conclusies

1. Bij het berekenen van de transporten speelt de valsnelheid van het zand een belangrijke rol. Omdat de valsnelheid van een zandkorrel afhankelijk is van de temperatuur moet voor verschillende temperaturen met verschillende valsnelheden worden gewerkt.
2. De bodemruwheid is eveneens van veel belang. Omdat de factor n in de formule van Manning moet worden geschat, lijkt het beter de Chézy-waarde op andere wijze te bepalen (bijvoorbeeld $C = 18 \log 12 R/k$).
3. Voor de homogene zandsorten geldt $\Delta F(c) = 100$. Voor niet homogene zandsorten ligt de waarde van $\Delta F(c)$ niet vast. Een onderzoek met grotere spreiding in de korreldiameter lijkt hiervoor gewenst.
4. Bij gebruik van de juiste waarden voor n , c en $\Delta F(c)$ geeft de berekeningsmethode volgens Morra, bij een snelheidsverticaal die niet aan de bodemruwheid is aangepast te hoge uitkomsten. Bij gebruik van de waarden voor n , c en $\Delta F(c)$ volgens de gegevens van Morra waren de uitkomsten meer in overeenstemming met het gemeten transport, hoewel ook hier het berekende transport te hoog is.
5. Nabij de bodem werd een grotere zandgehaltegradiënt gemeten dan uit de berekening volgt. In het bovenste deel van de verticaal was de zandgehaltegradiënt kleiner dan de berekening aangeeft. Genoemde afwijkingen zijn in overeenstemming met de vorm van de snelheidsverticaal.
6. In het model was de beschikbare lengte niet groot genoeg om de snelheidsverticaal zich aan de bodemruwheid te laten aanpassen. Mogelijkheden om de snelheidsverticaal wel aan de bodemruwheid aangepast te laten zijn, moeten worden gezocht in vergroting van de lengte-diepte verhouding van de waterlaag op het horizontale deel van het zandbed. Bij de gebruikte faciliteit is deze mogelijkheid aanwezig door:
 - a) een waterdiepte van 0,80 m in te stellen, zodat geen zandophoging tot ontwikkeling kan komen. In raai 100 kunnen dan de snelheids- en concentratiemetingen worden gedaan zodat voor de meetopstelling 80 m horizontale bodem aanwezig is.
 - b) een geringere waterdiepte toepassen voor een situatie met zandophoging.

Omdat bij kleinere waterdiepte de extrapolatie naar het prototype groter wordt, lijkt de onder b genoemde mogelijkheid minder gewenst.

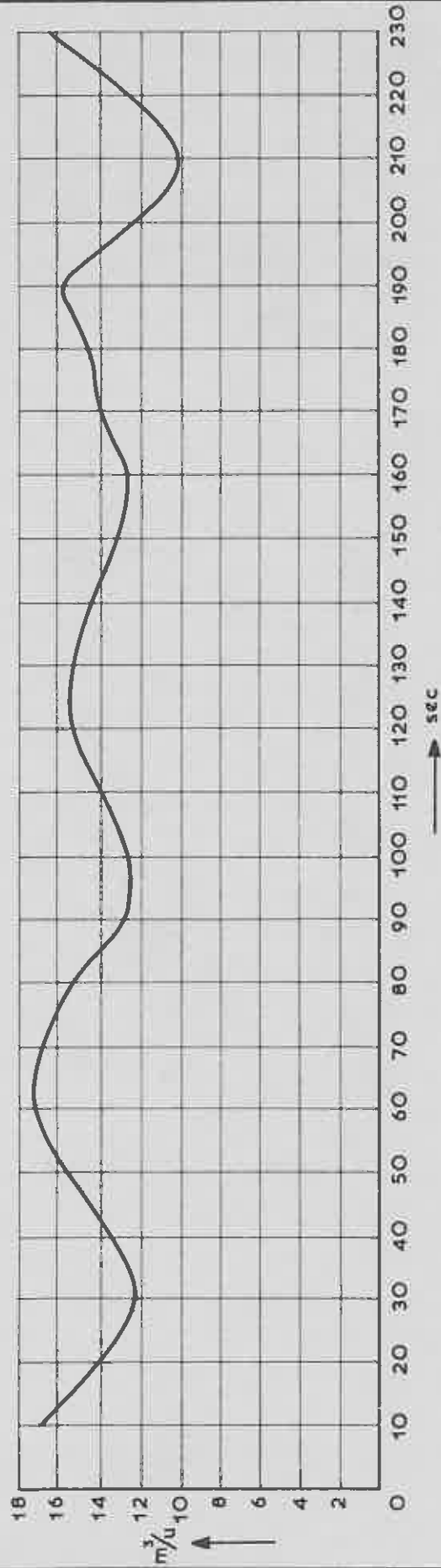


INRICHTING MODEL



ZEEFKROMME EN VALSNELHEDEN
VAN WADZAND

holle ruimte 50% - 52%

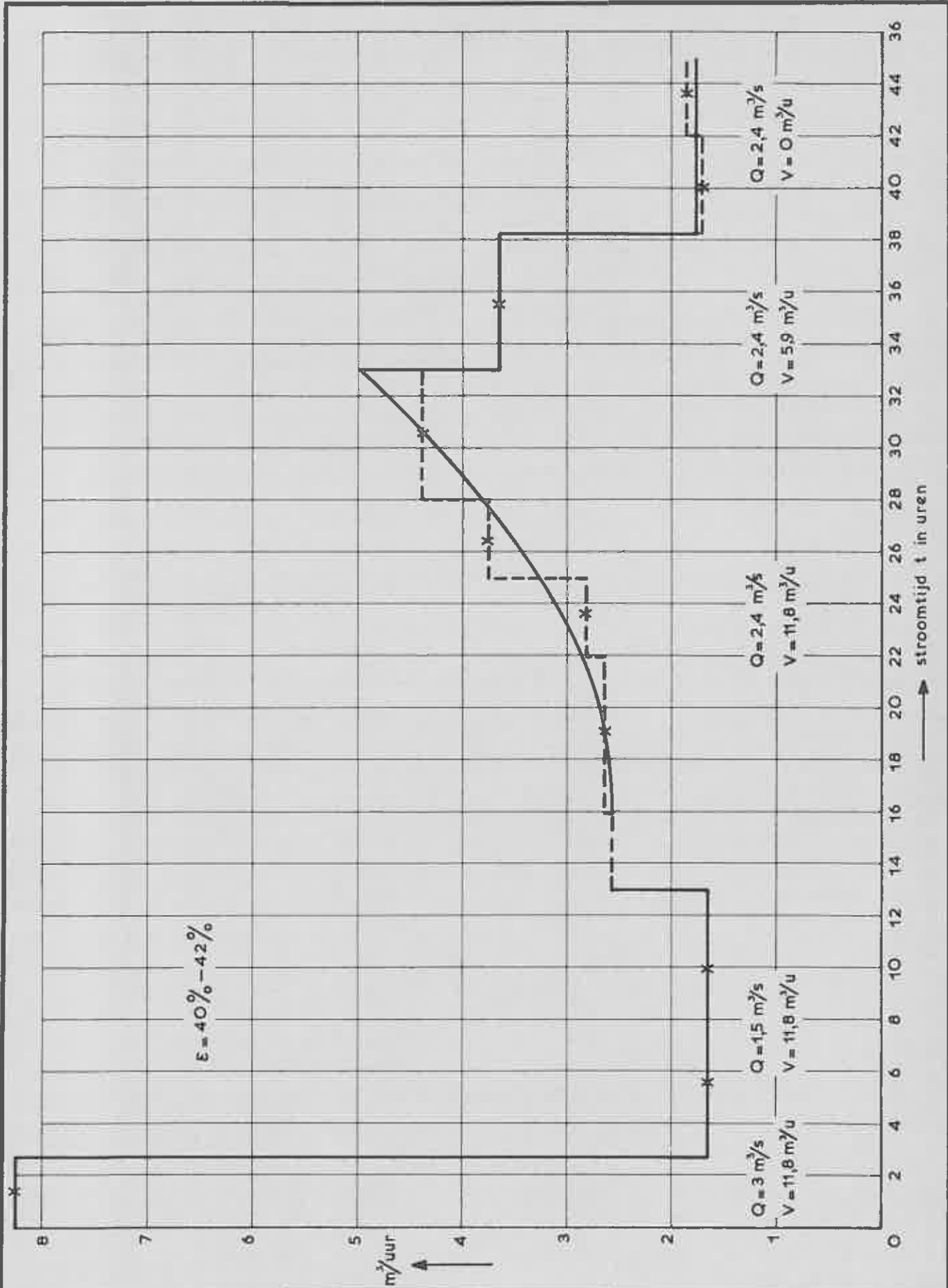


VOEDINGSKARAKTERISTIEK

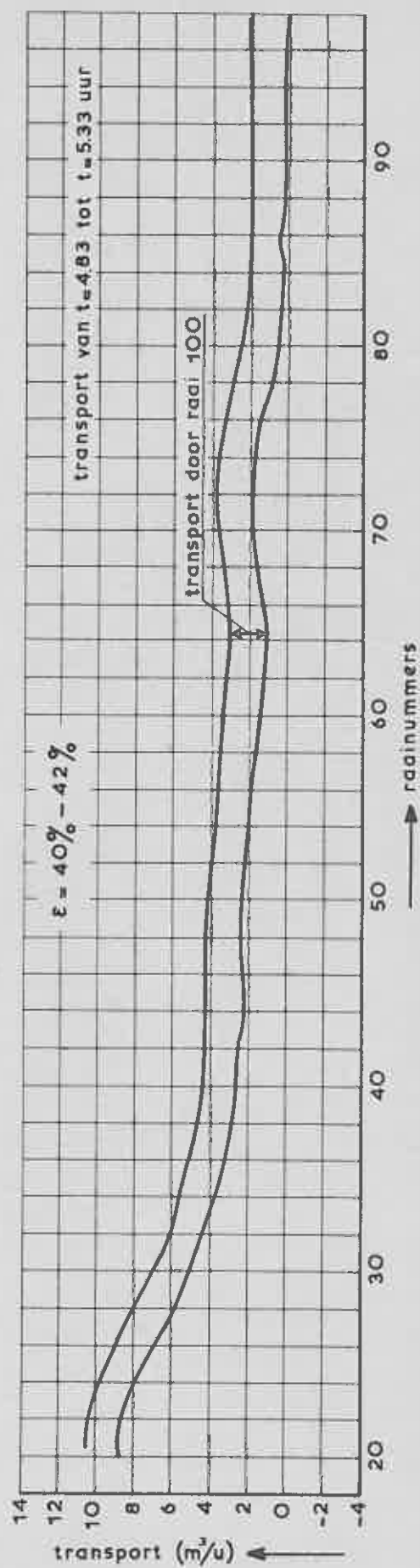
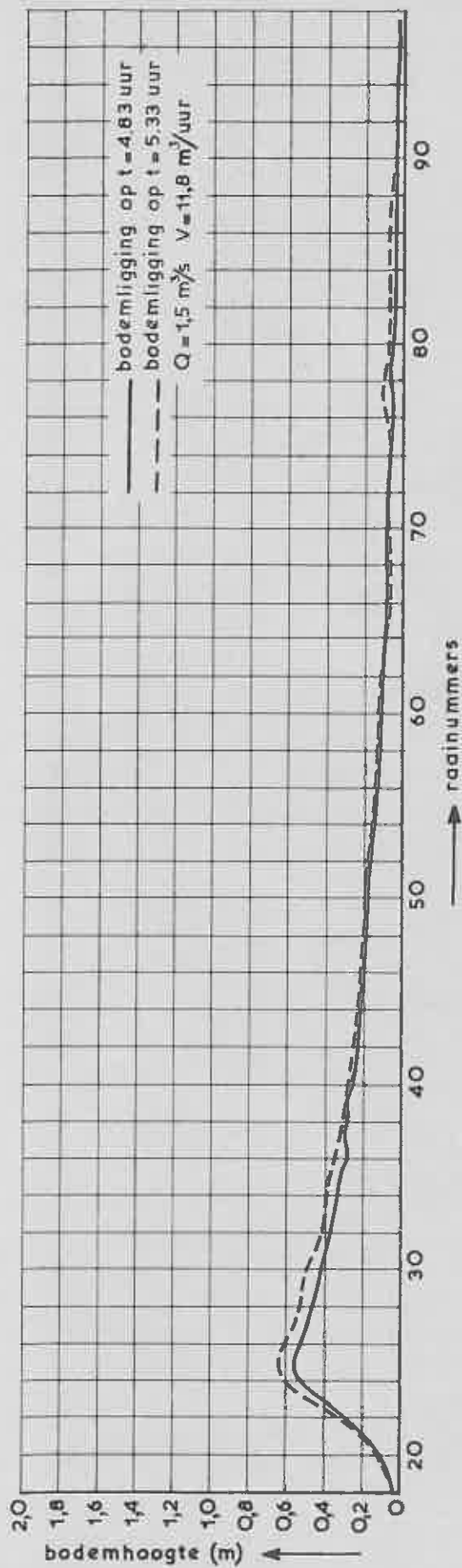
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M. 1155

FIG. 3



ZANDTRANSPORT DOOR RAAI 100



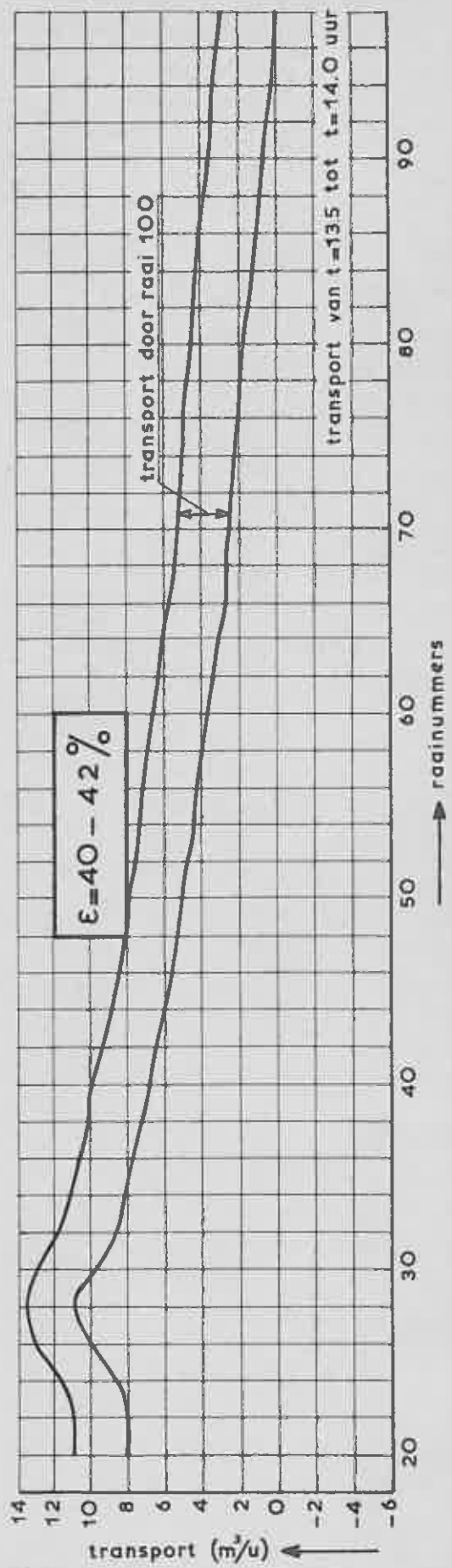
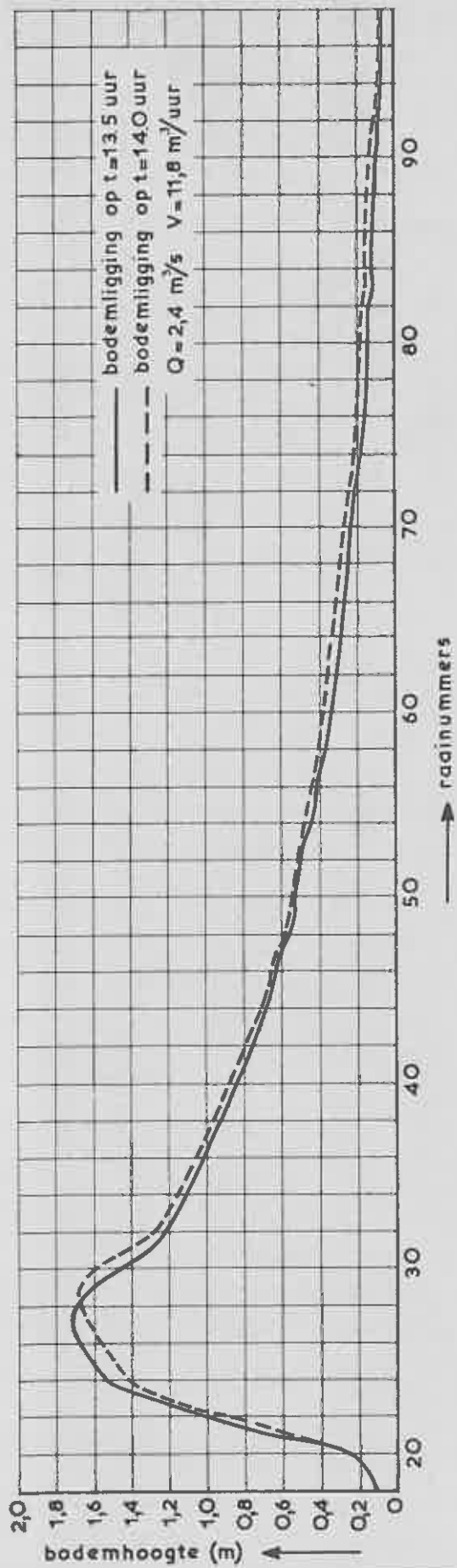
BODEMLIGGING EN TRANSPORT

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

$t = 4.83$ tot $t = 5.33$ u

M. 1155

FIG. 5



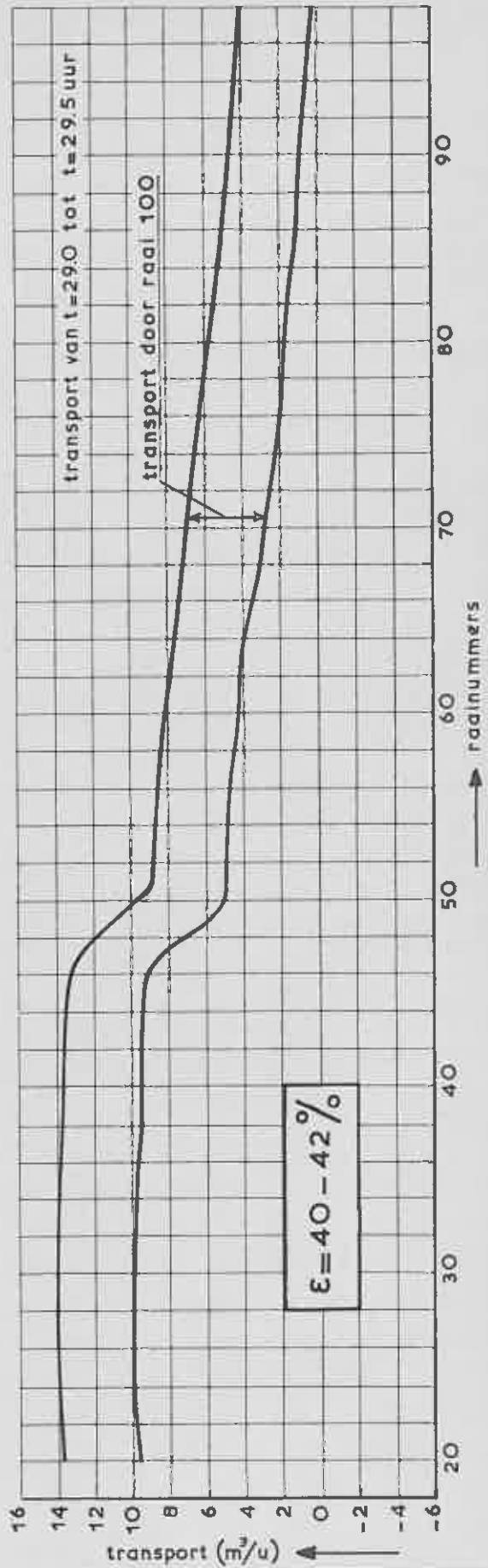
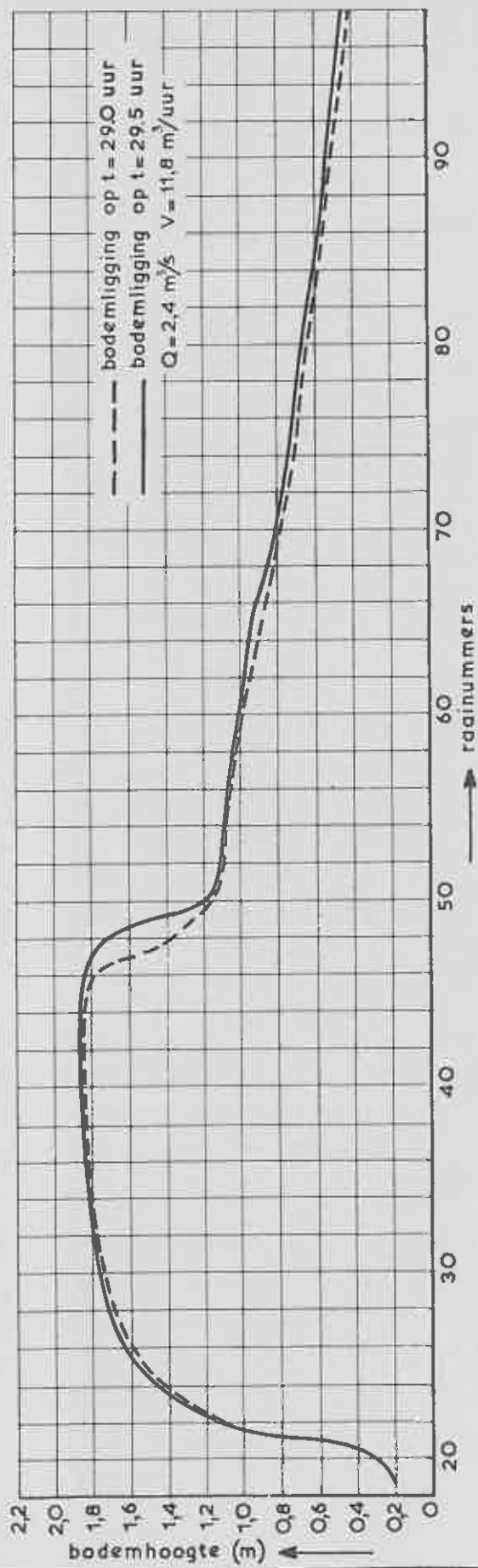
BODEMLIGGING EN TRANSPORT

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

t=13.5 tot t=14.0u

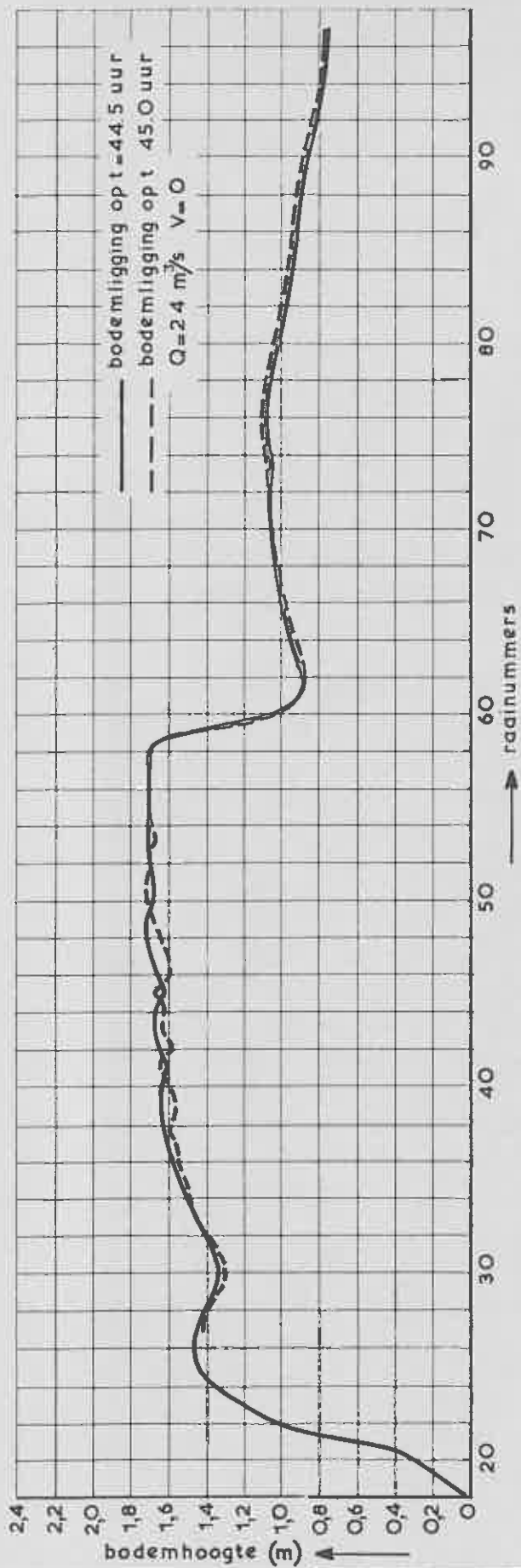
M. 1155

FIG. 6



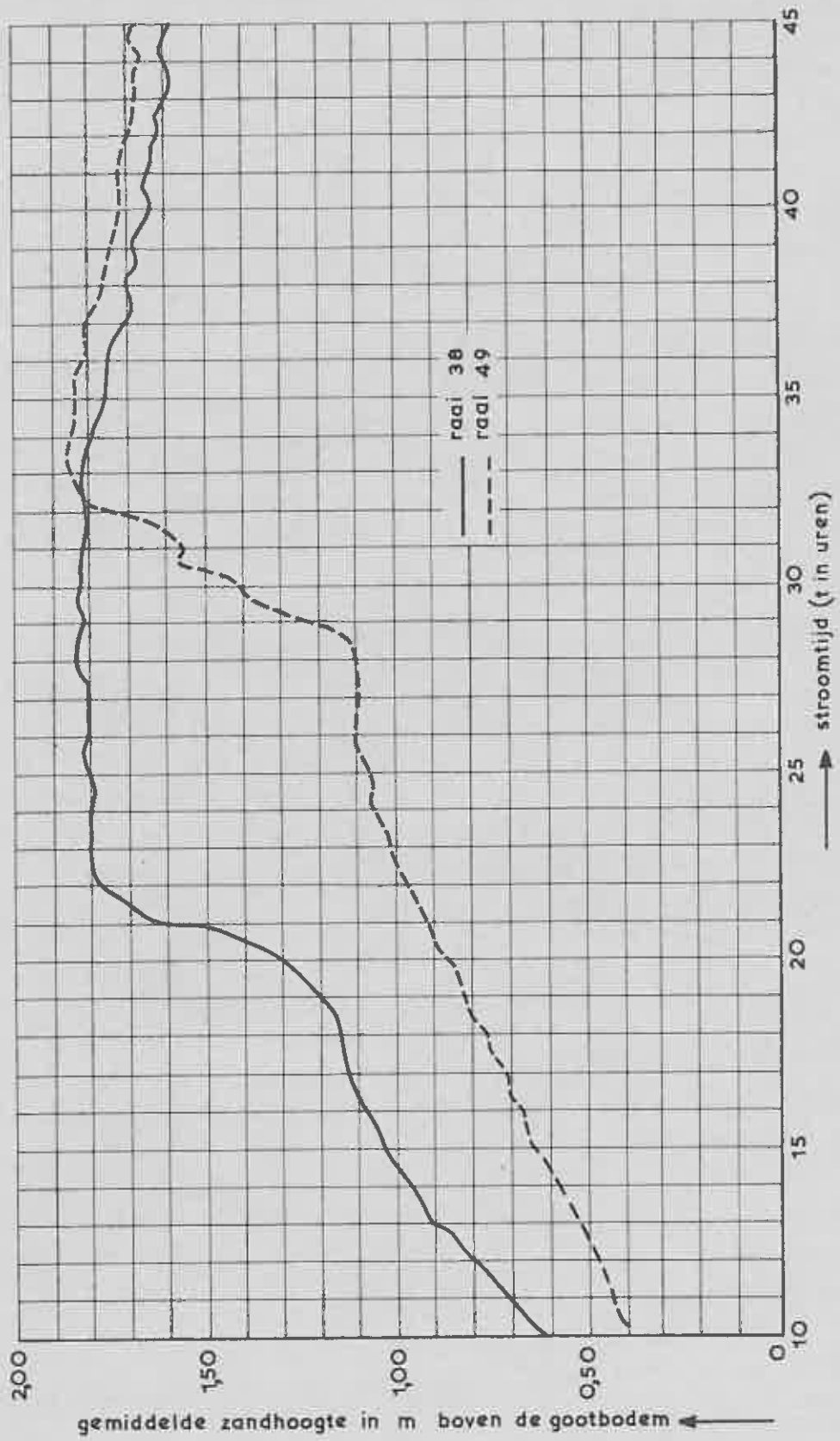
BODEMLIGGING EN TRANSPORT

$t=29.0$ tot $t=29.5$ u

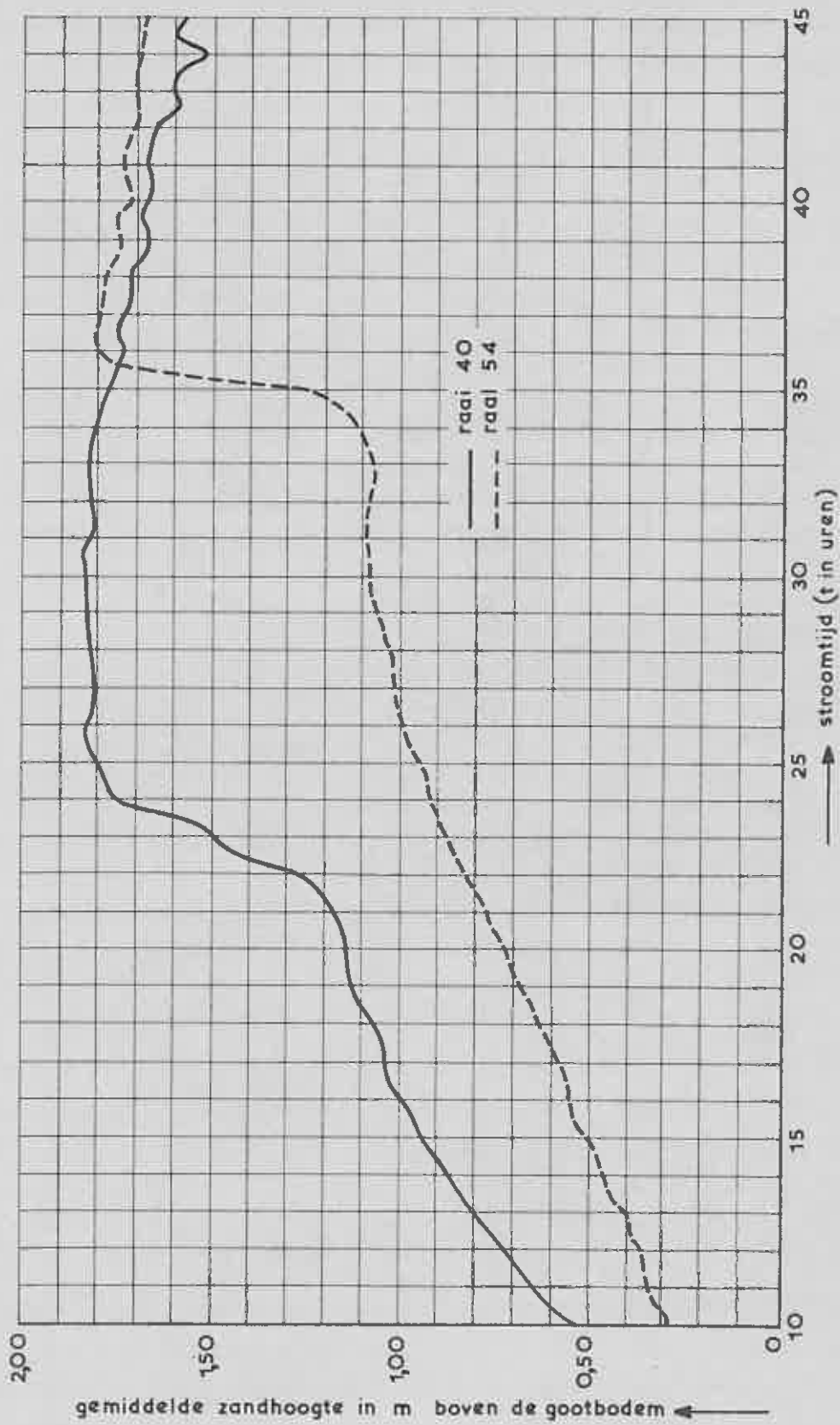


BODEMLIGGING EN TRANSPORT

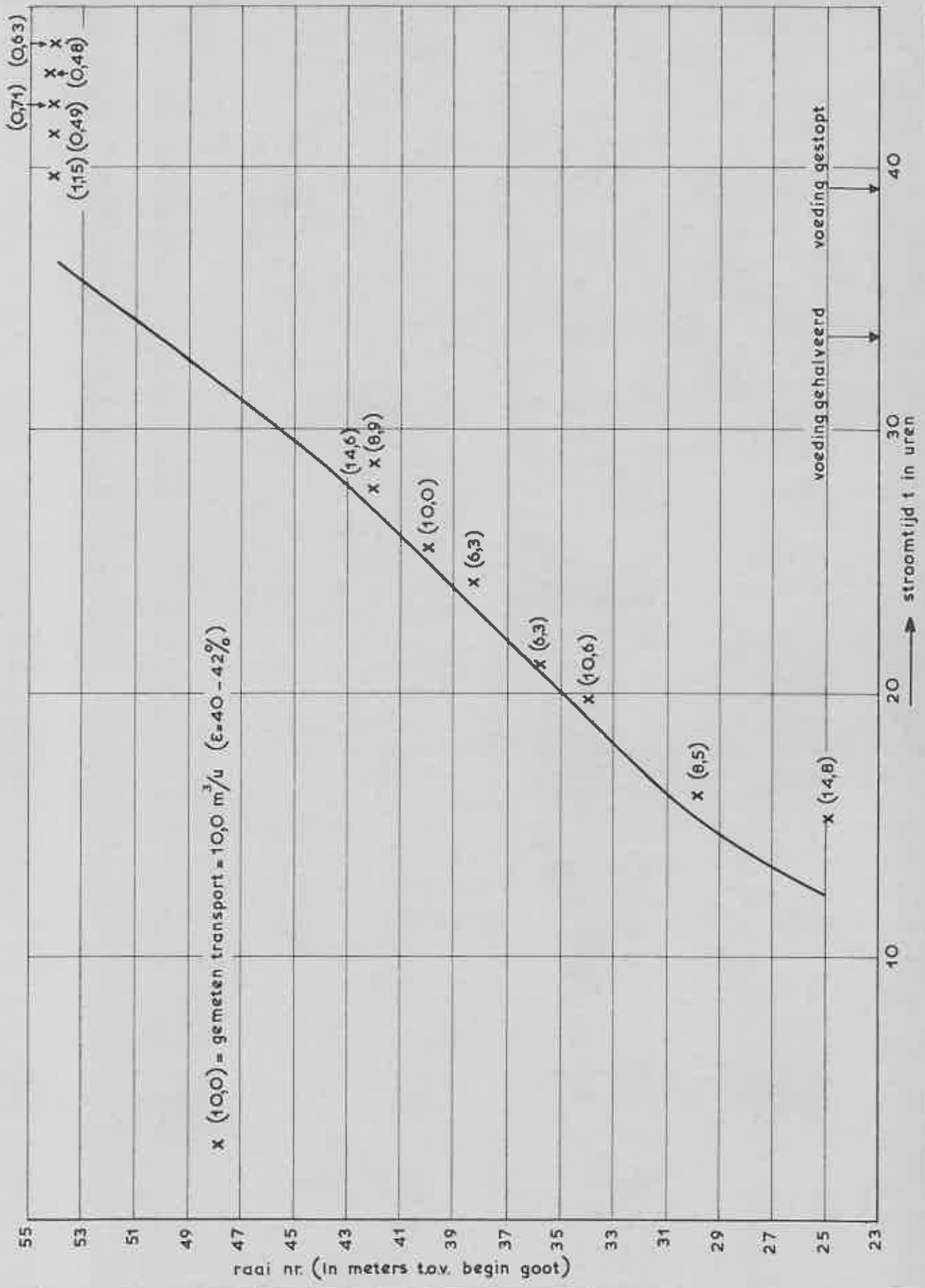
$t=44.5$ tot $t=45.0$ u



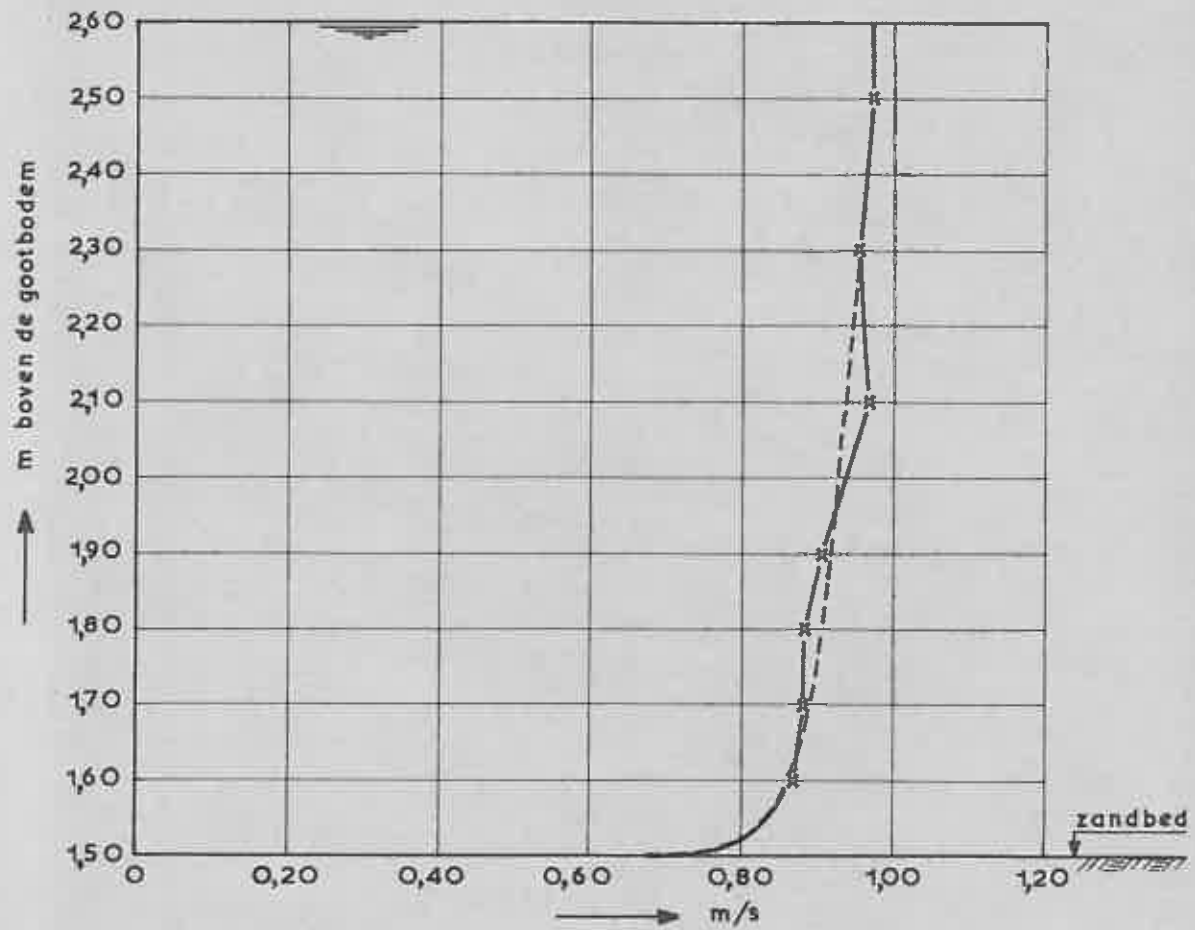
OPBOUW VAN HET ZANDBED IN RAAI 38 EN RAAI 49



OPBOUW VAN HET ZANDBED IN RAAI 40 EN RAAI 54



PLAATS EN TJD VAN HET BEREIKEN
VAN DE EVENWICHTSHOOGTE



x — gemeten
 - - - benaderd ($q = 23$)

SNELHEIDSVERTICAAL

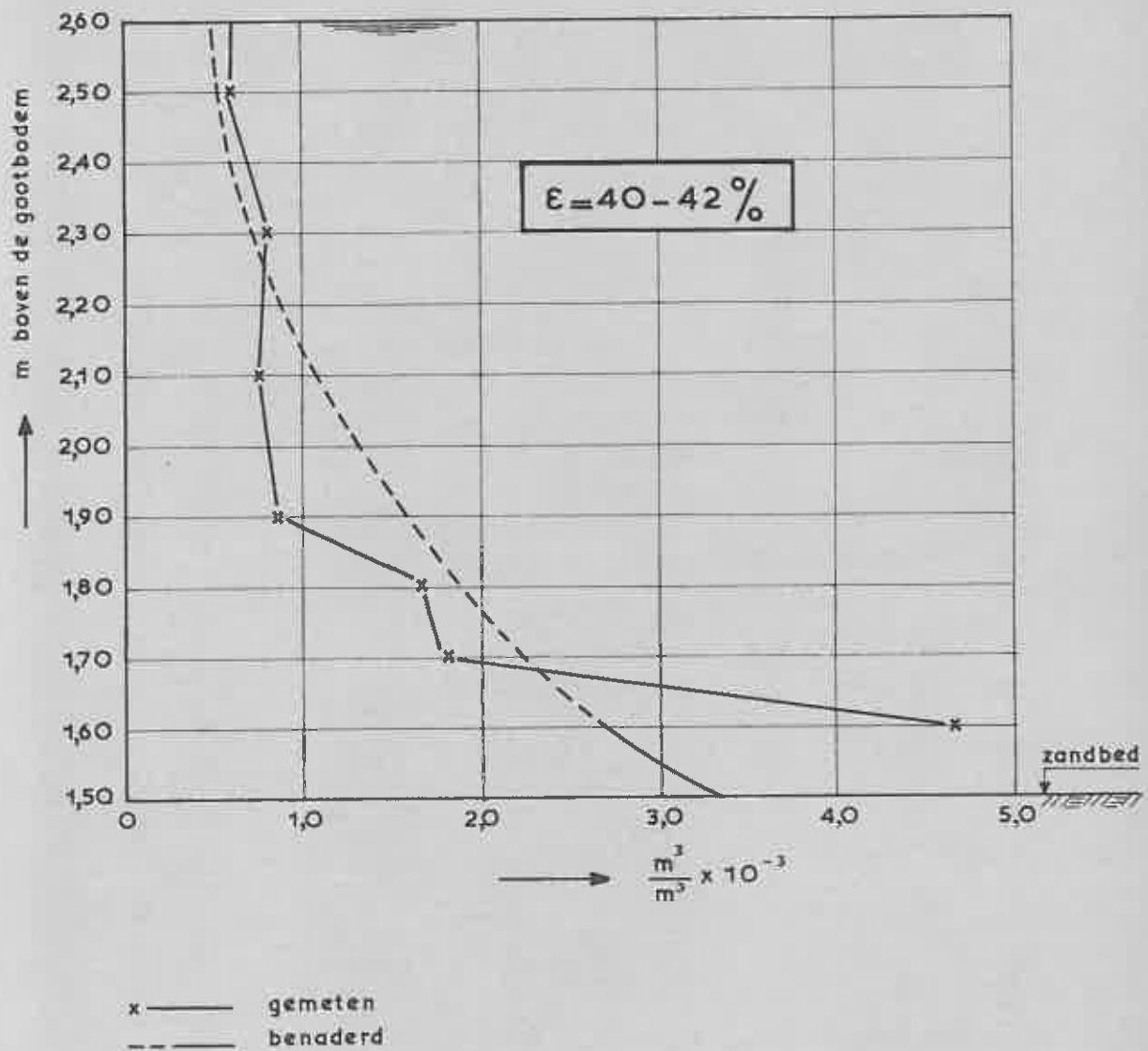
$t = 15,0 u$

RAAI 25

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M. 1155

FIG. 12



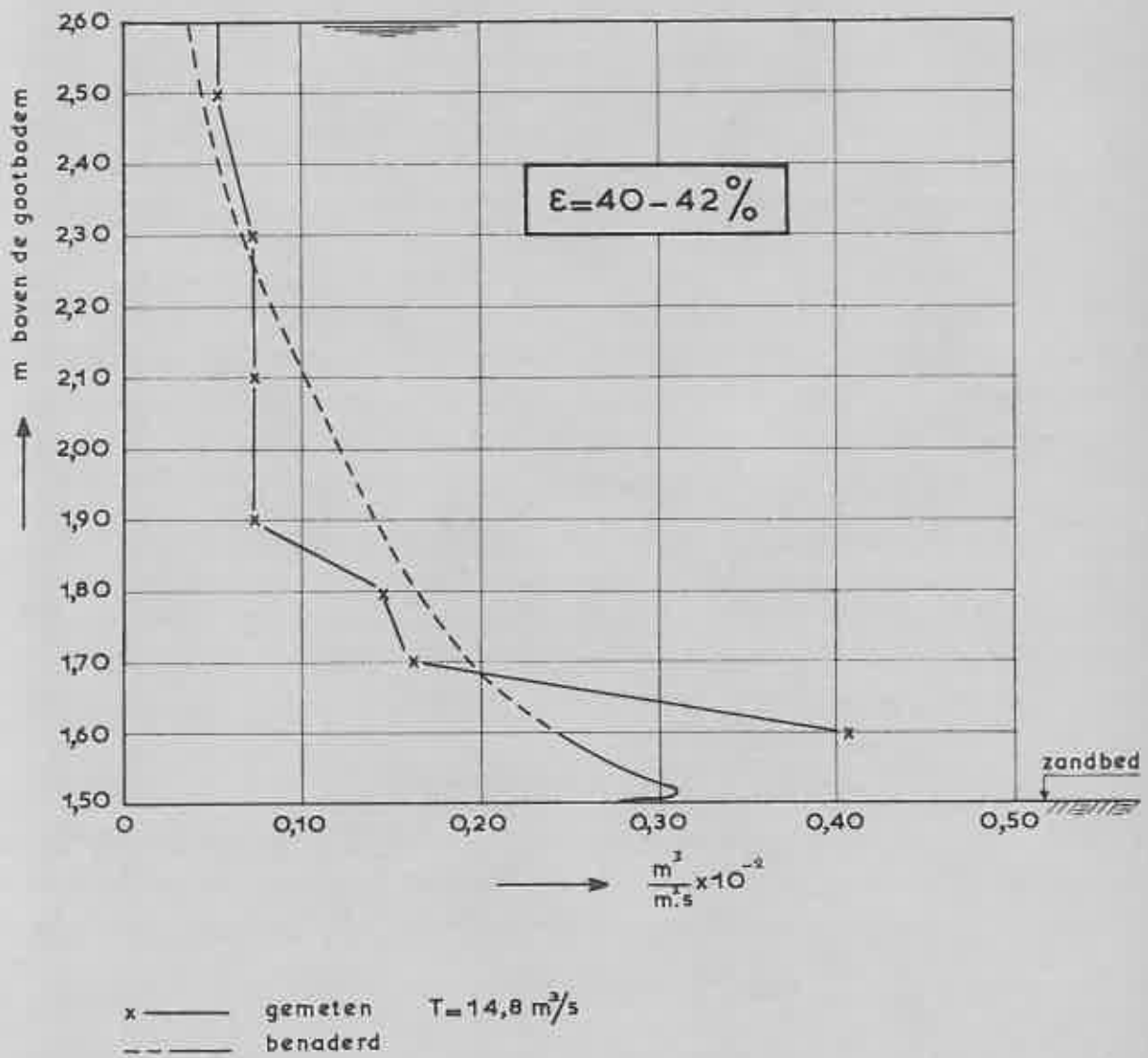
ZANDGEHALTEVERTICAAL

t = 15.0 u RAAI 25

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M. 1155

FIG. 13



ZANDTRANSPORTVERTICAAL

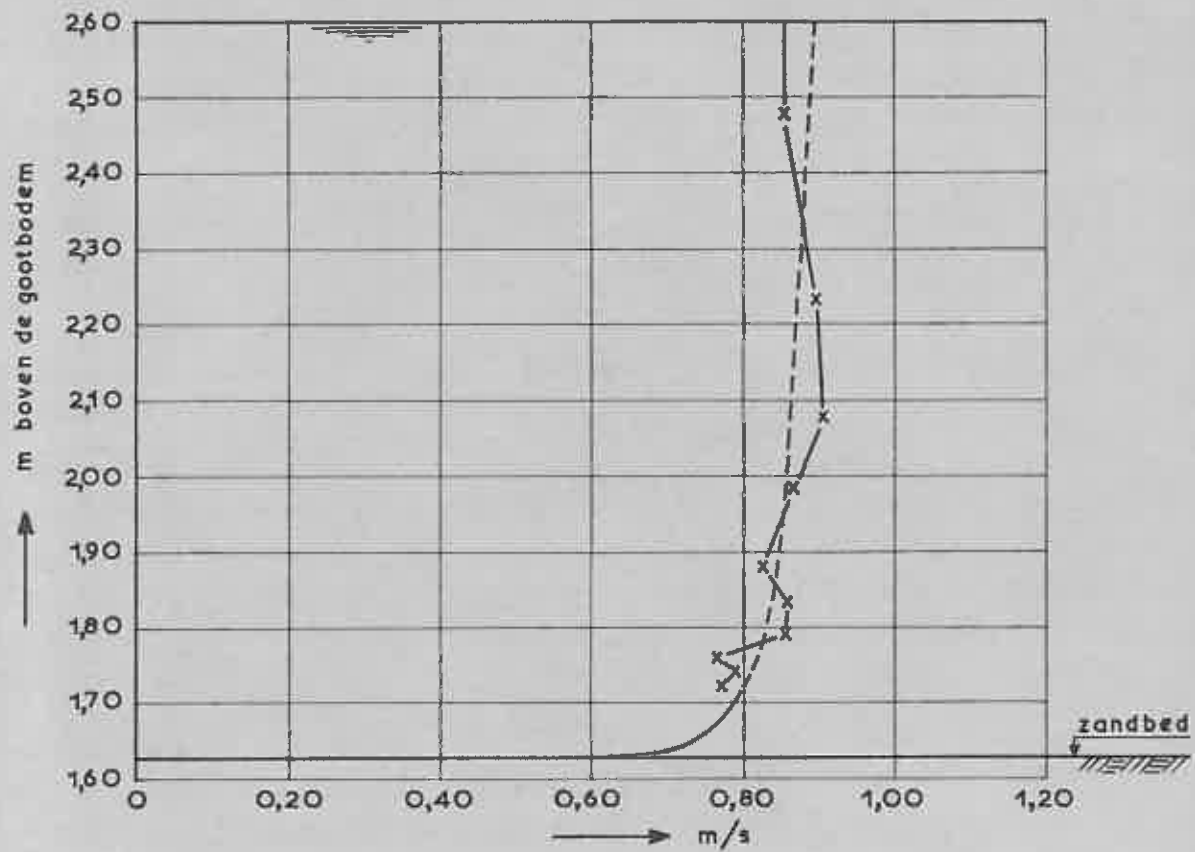
$t = 150 \text{ u}$

RAAI 25

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M. 1155

FIG. 14



x — gemeten
 - - - benaderd ($q = 21$)

SNELHEIDSVERTICAAL

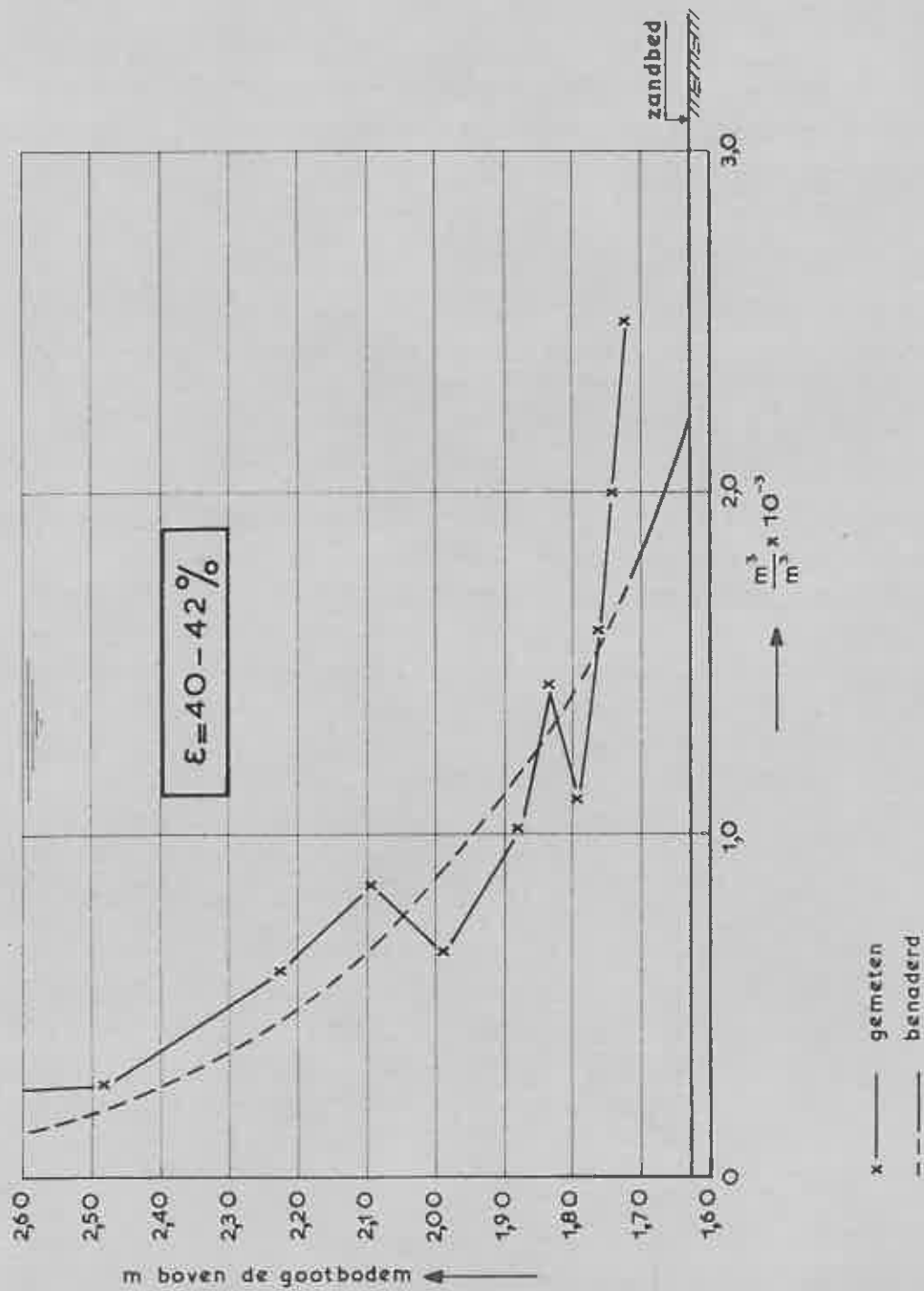
$t = 16.5u$

RAAI 30

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M. 1155

FIG. 15



ZANDGEHALTEVERTICAAL

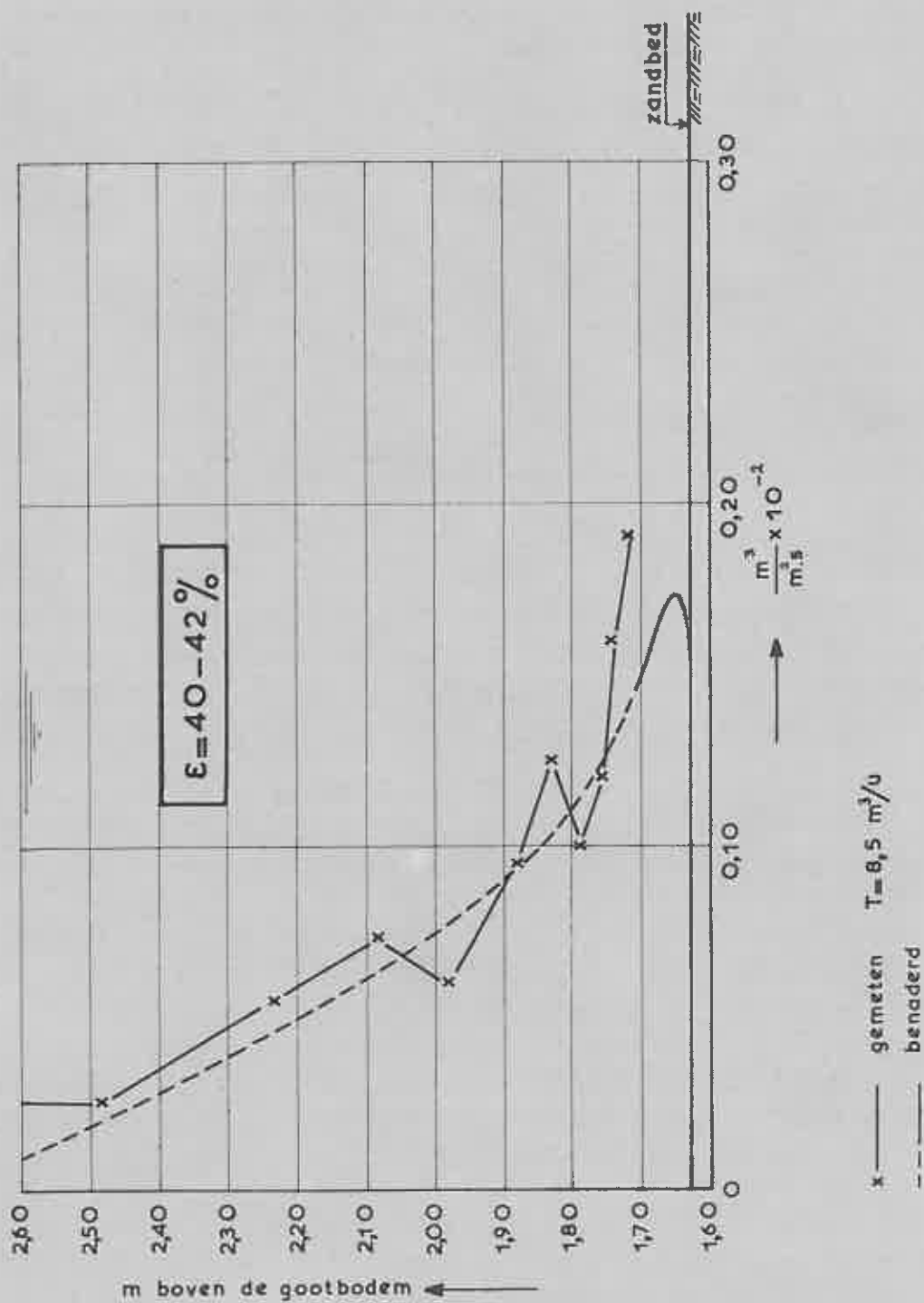
$t=16.5 u$

RAAI 30

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M. 1155

FIG. 16



ZANDTRANSPORTVERTICAAL

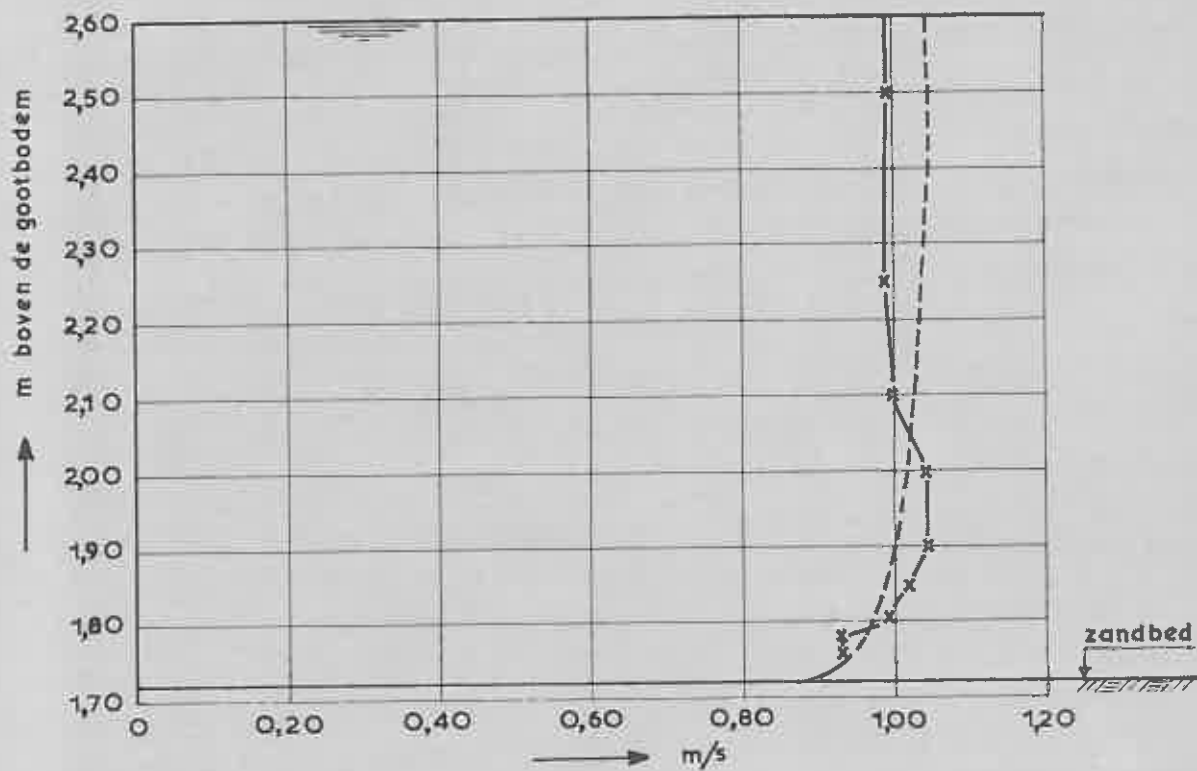
$t = 16.5u$

RAAI 30

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M. 1155

FIG. 17



x ——— gemeten
 - - - - - benaderd (q = 28)

SNELHEIDSVERTICAAL

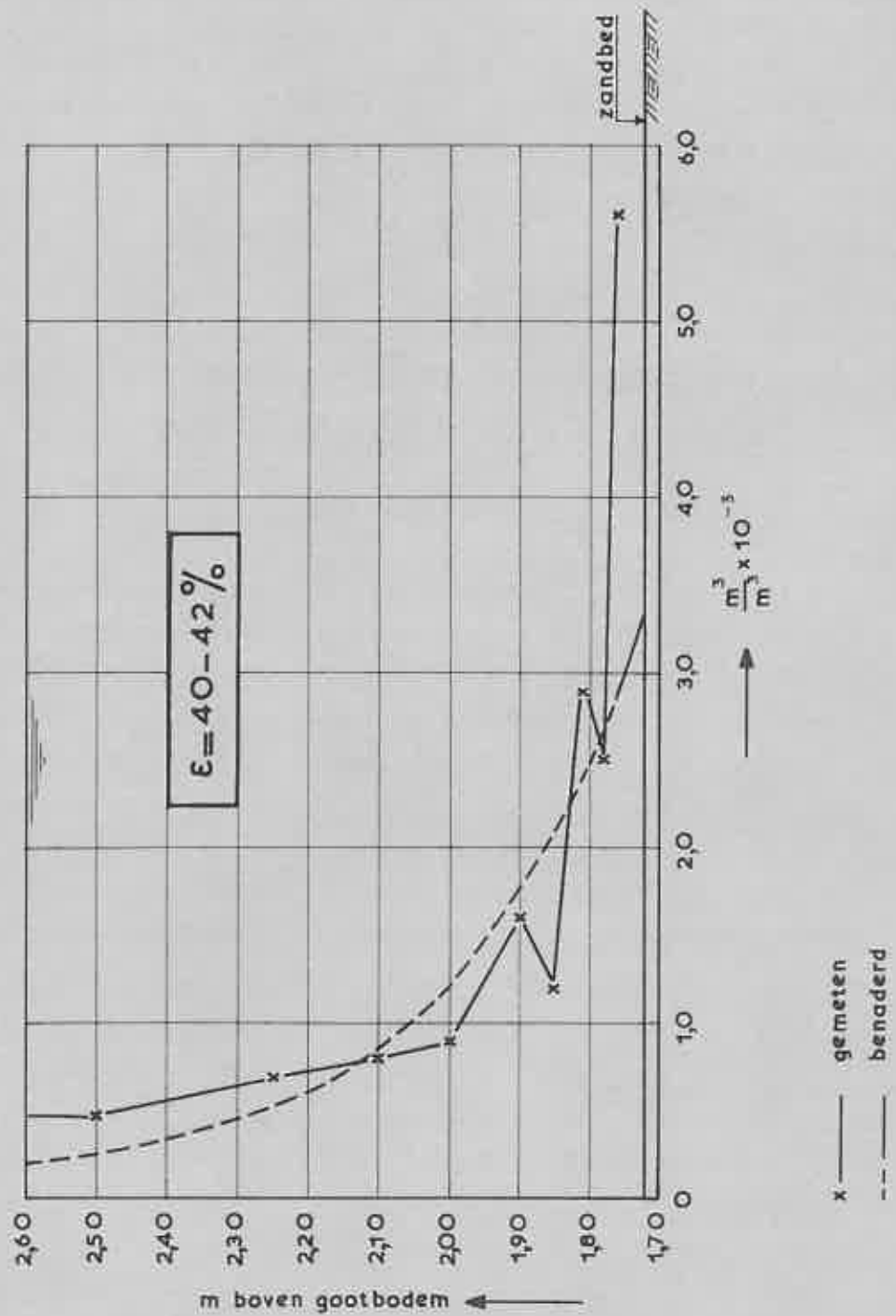
t = 18.9 u

RAAI 34

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M. 1155

FIG. 18



ZANDGEHALTEVERTICAAL

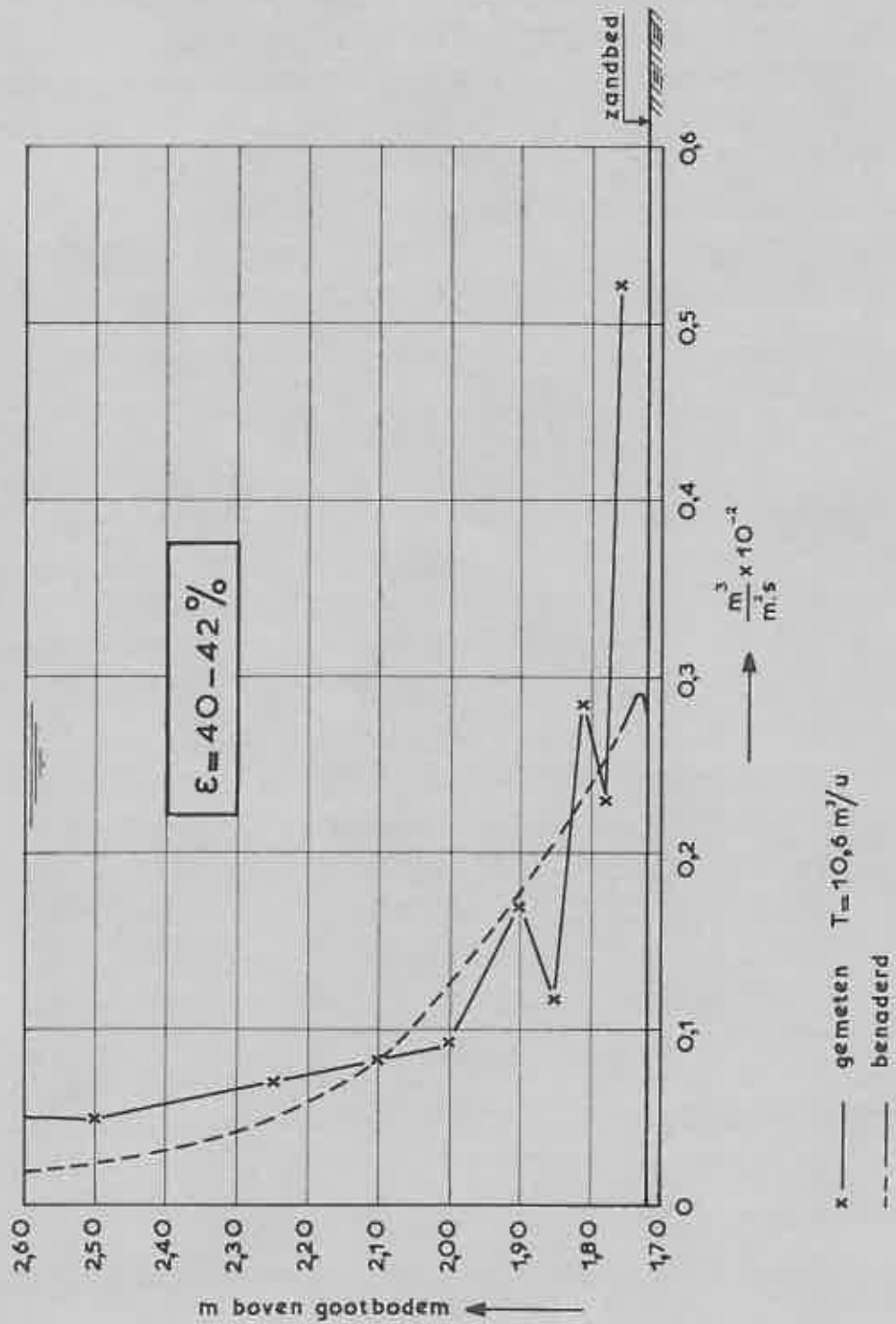
t = 18.9 u

RAAI 34

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M. 1155

FIG. 19



ZANDTRANSPORTVERTICAAL

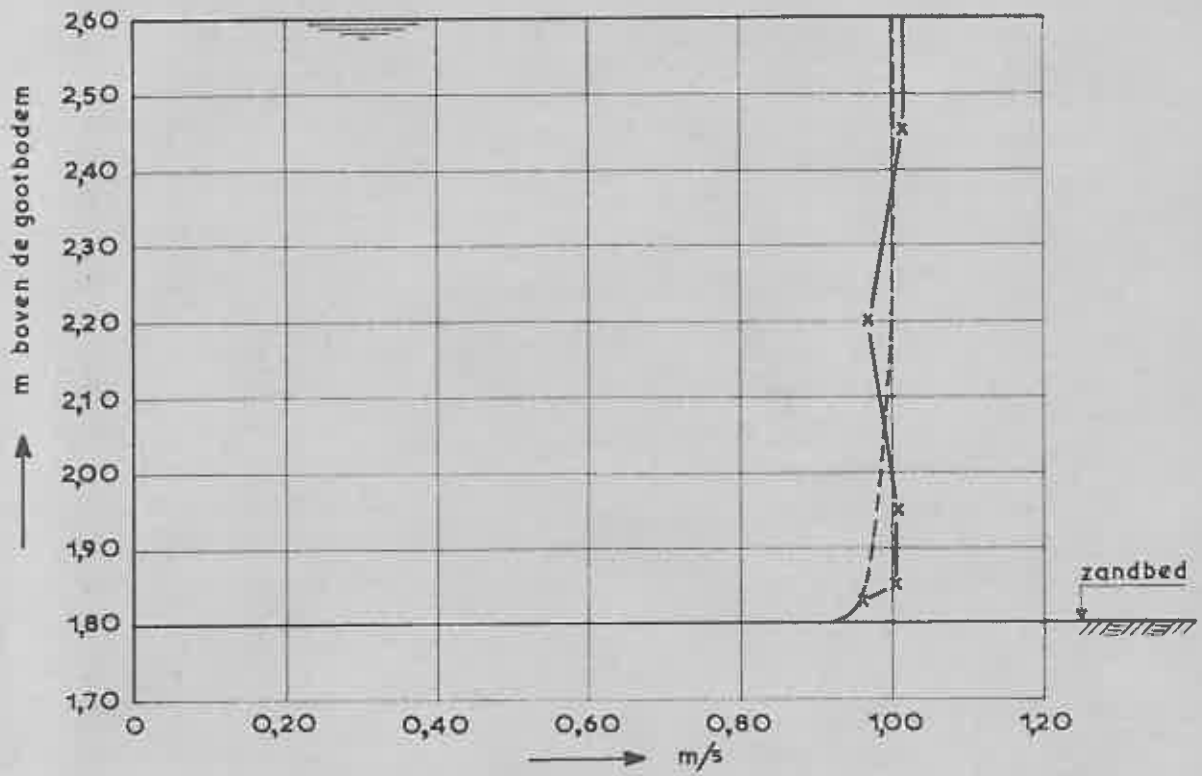
$t = 18.9 \text{ u}$

RAAI 34

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M. 1155

FIG. 20



x ——— gemeten
 - - - - - benaderd ($q = 62$)

SNELHEIDSVERTICAAL

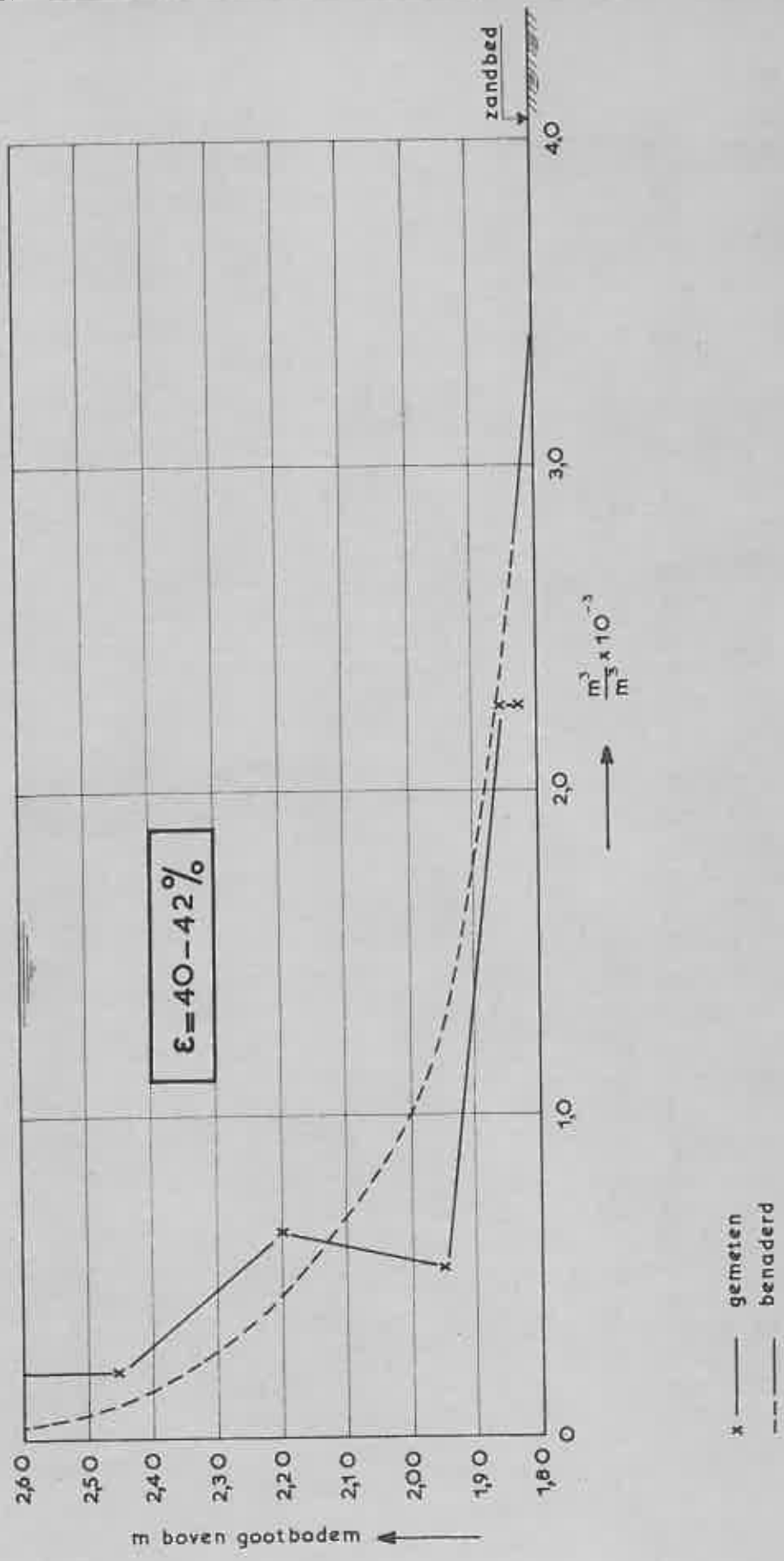
$t = 20.5 u$

RAAI 36

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

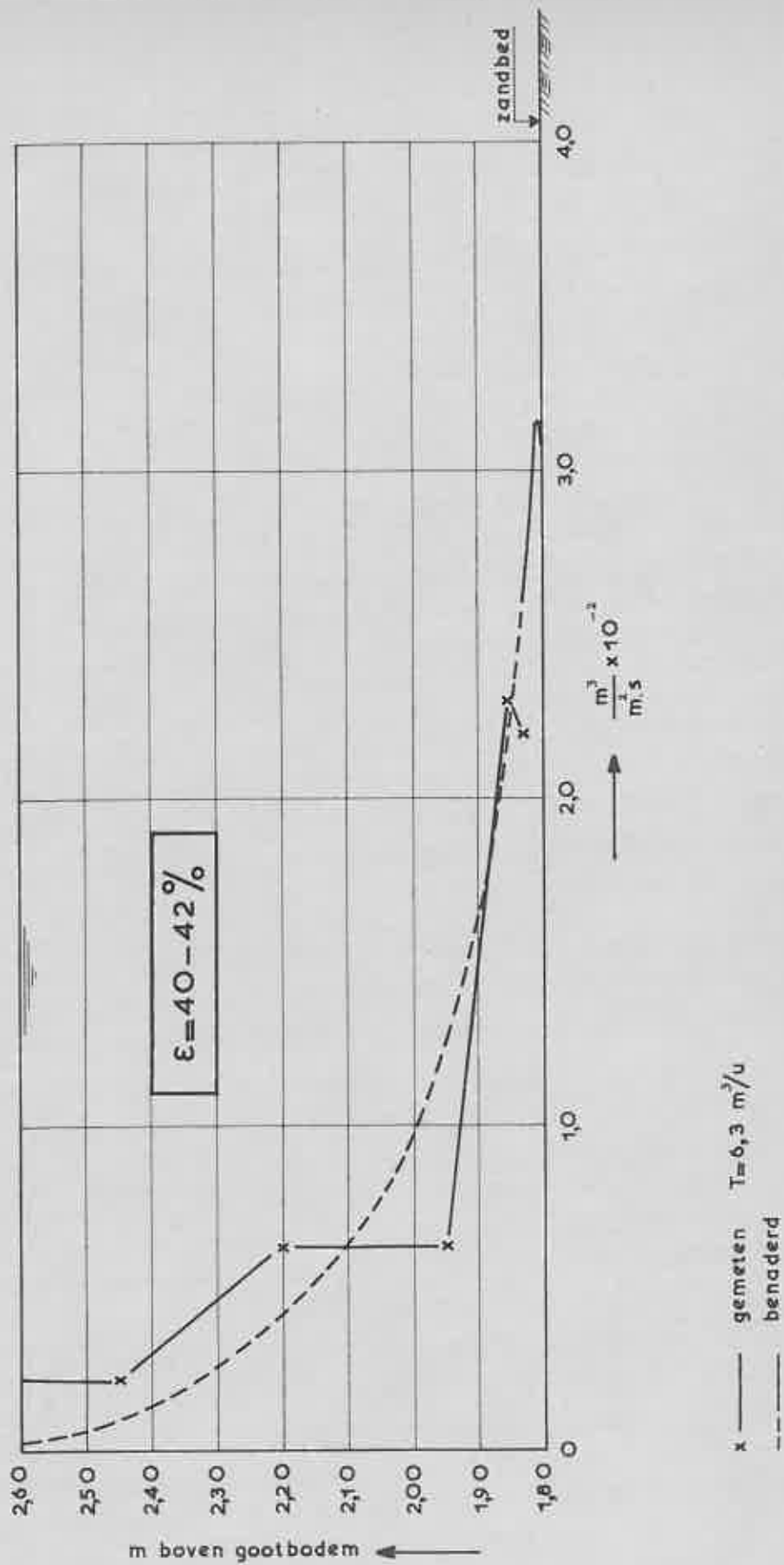
M. 1155

FIG. 21



ZANDGEHALTEVERTICAAL

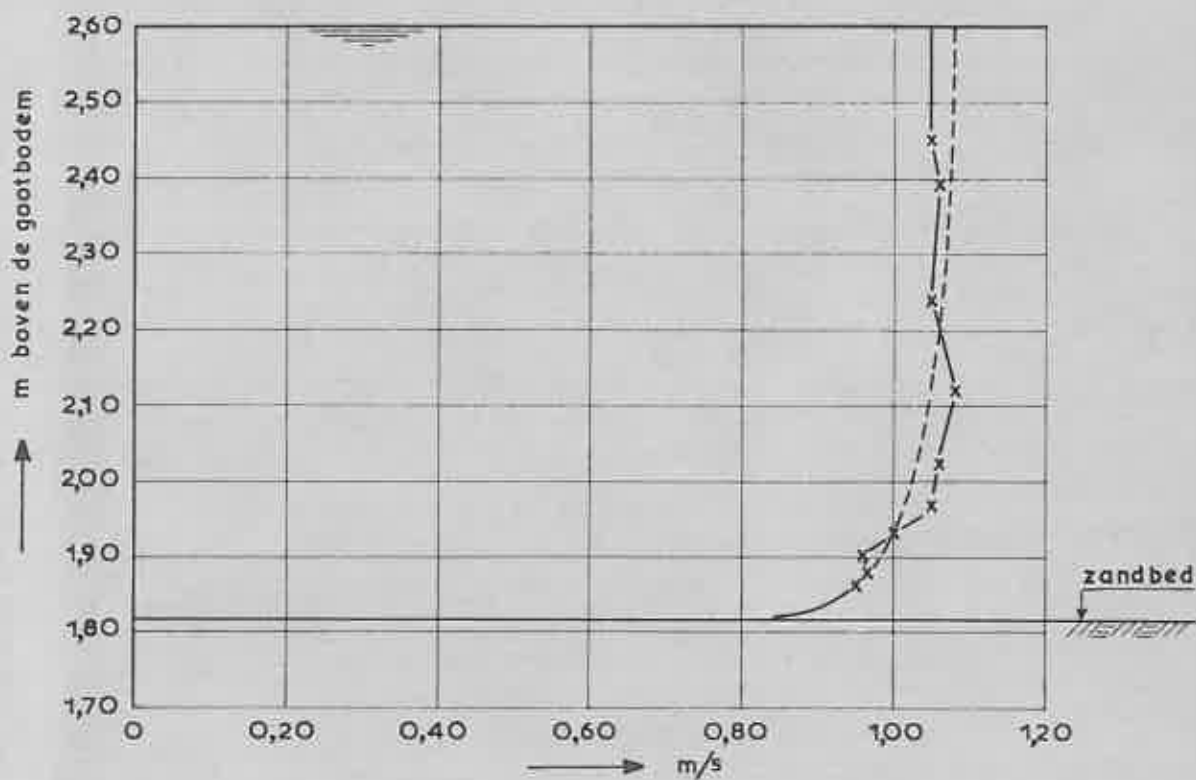
t=20.5u RAAI 36



ZANDTRANSPORTVERTICAAAL

$t = 20.5u$

RAAI 36



x — gemeten
 - - - benaderd (q = 27)

SNELHEIDSVERTICAAL

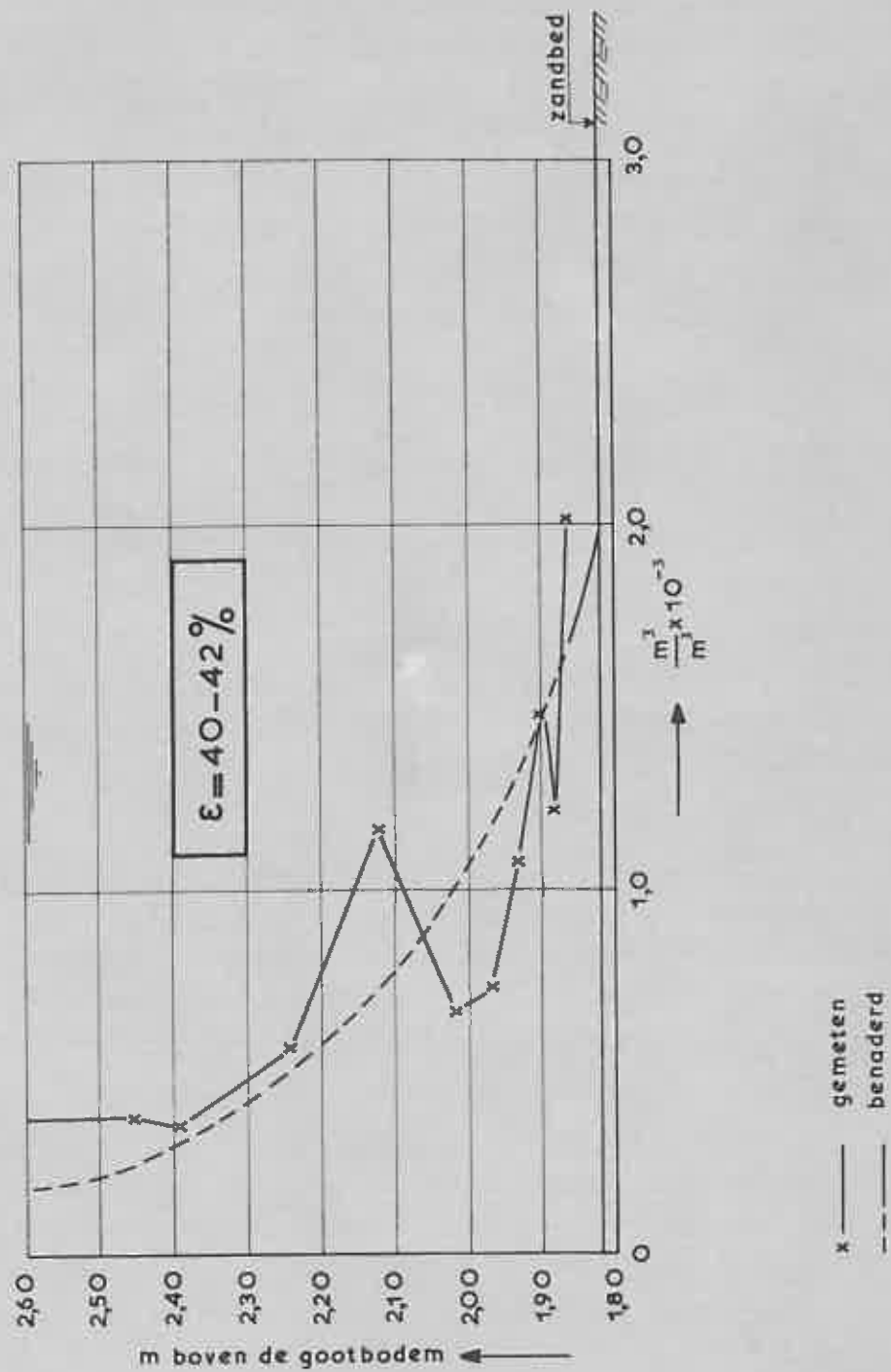
t = 24.25 u

RAAI 38

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M. 1155

FIG. 24



ZANDGEHALTEVERTICAAL

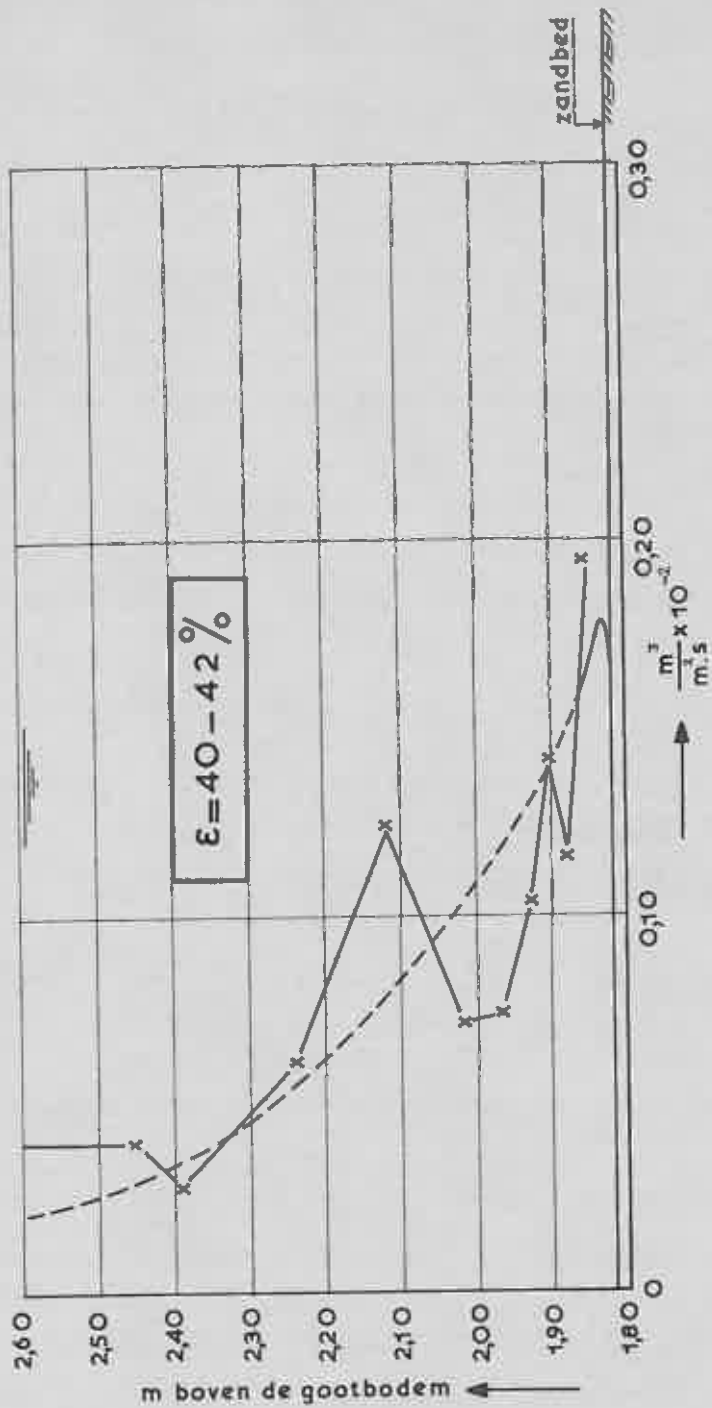
t = 24.25 u

RAAI 38

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M. 1155

FIG. 25



ZANDTRANSPORTVERTICAAL

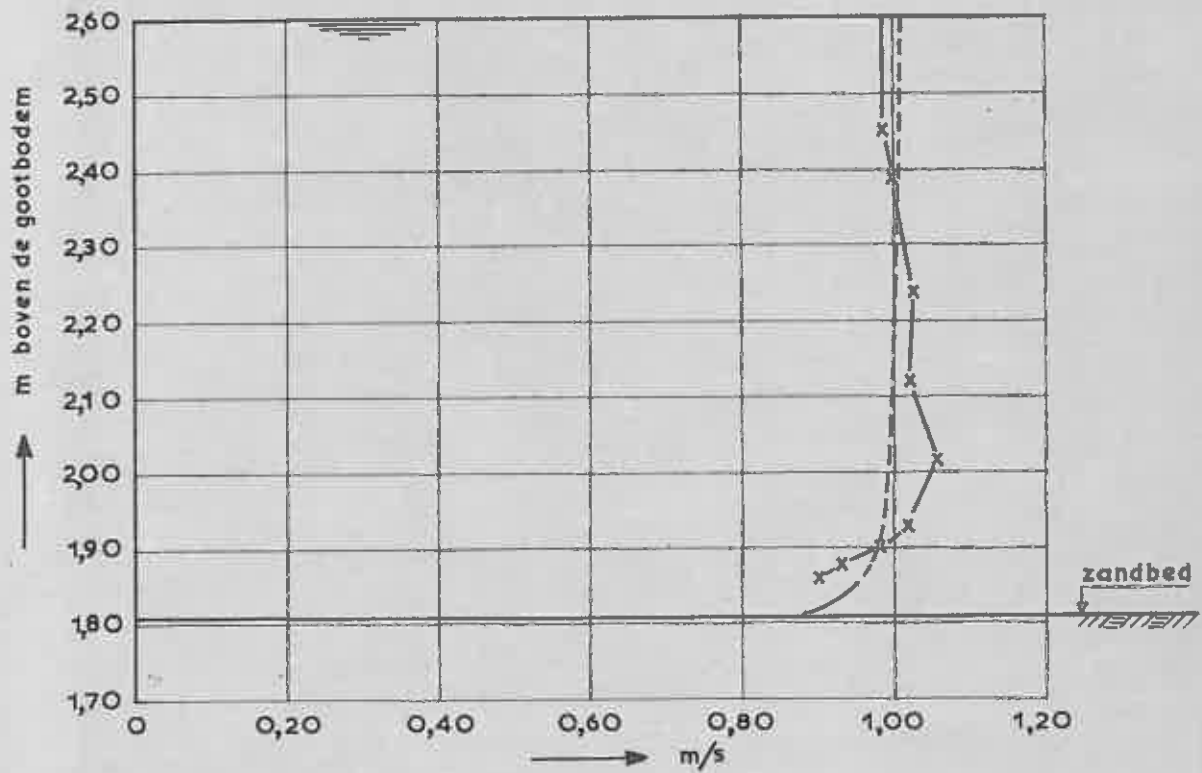
t=24.25u

RAAI 38

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M. 1155

FIG. 26



x — gemeten
 - - - benaderd (q = 63)

SNELHEIDSVERTICAAL

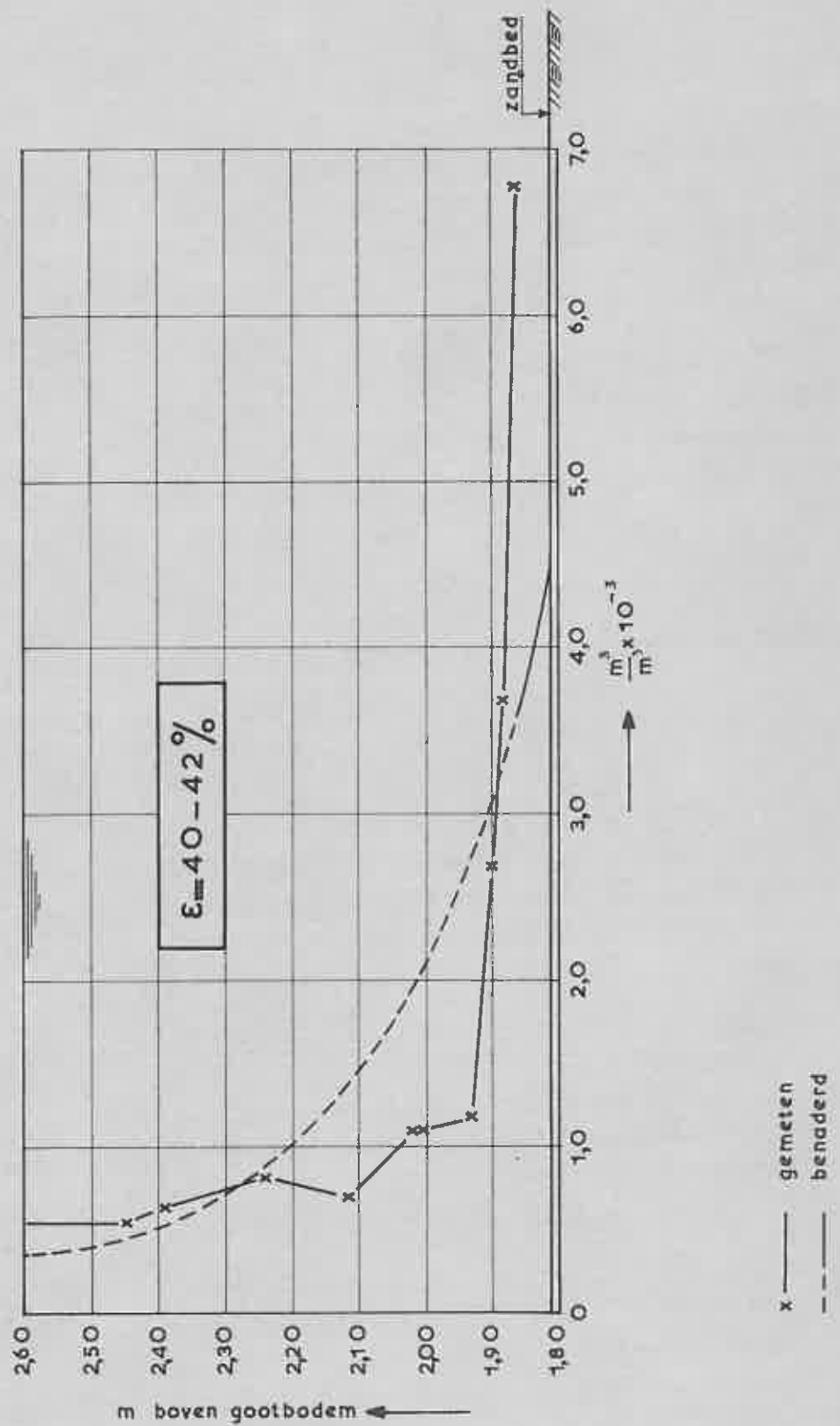
t = 25.42 u

RAAI 40

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

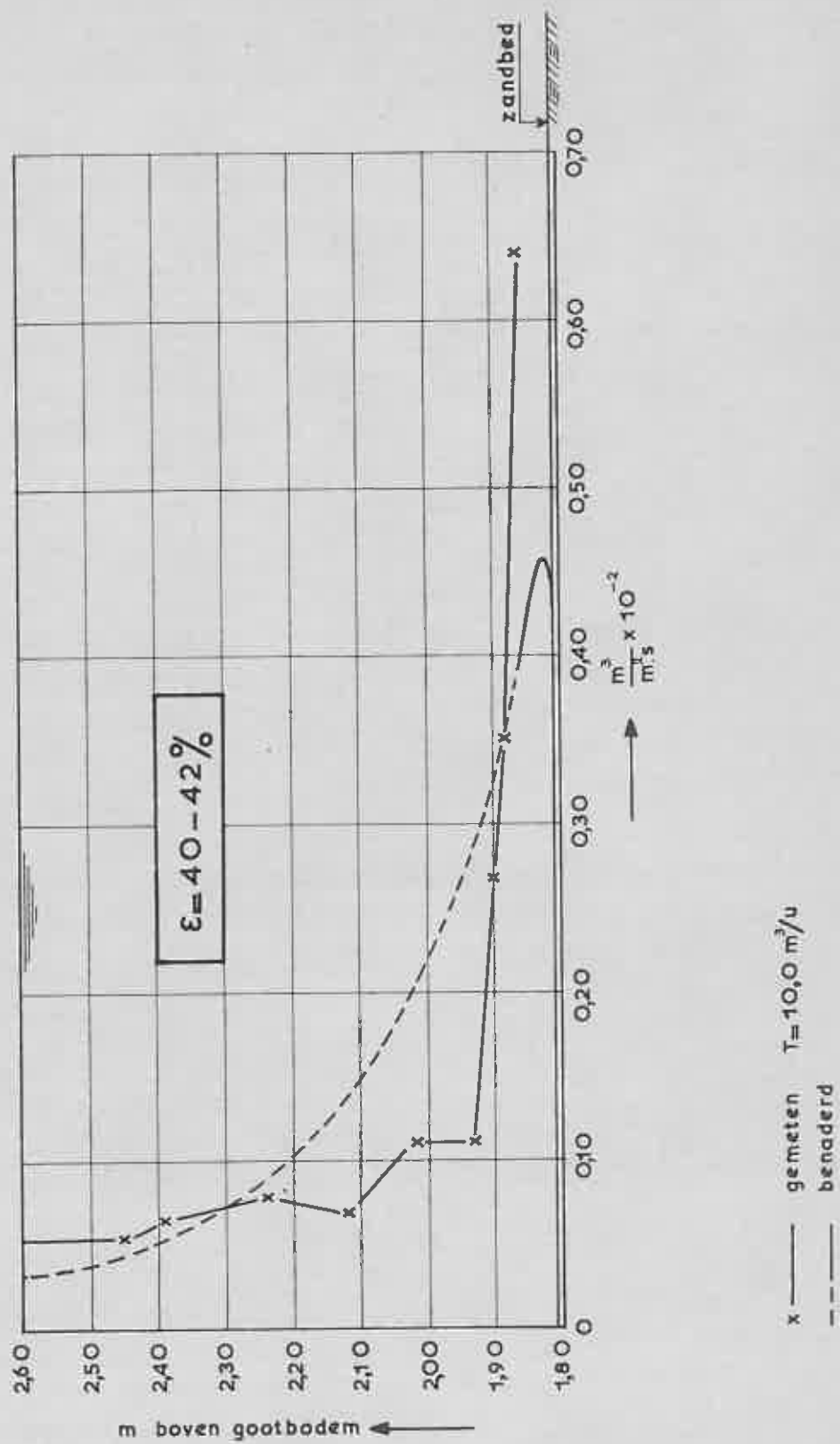
M. 1155

FIG. 27



ZANDGEHALTEVERTICAAL

$t = 25.42 u$ RAAI 40



ZANTRANSPORTVERTICAAL

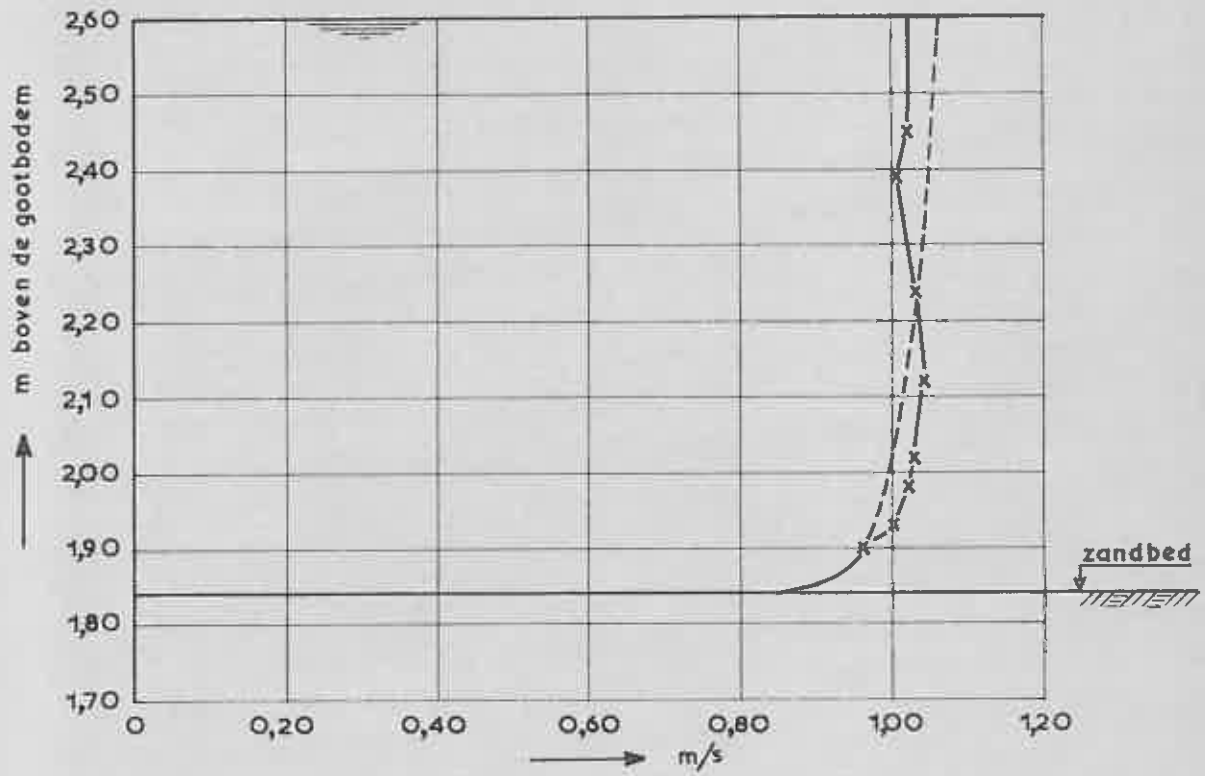
$t = 25.42 \text{ u}$

RAAI 40

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M. 1155

FIG. 29



x — gemeten
 - - - benaderd (q = 15)

SNELHEIDSVERTICAAL

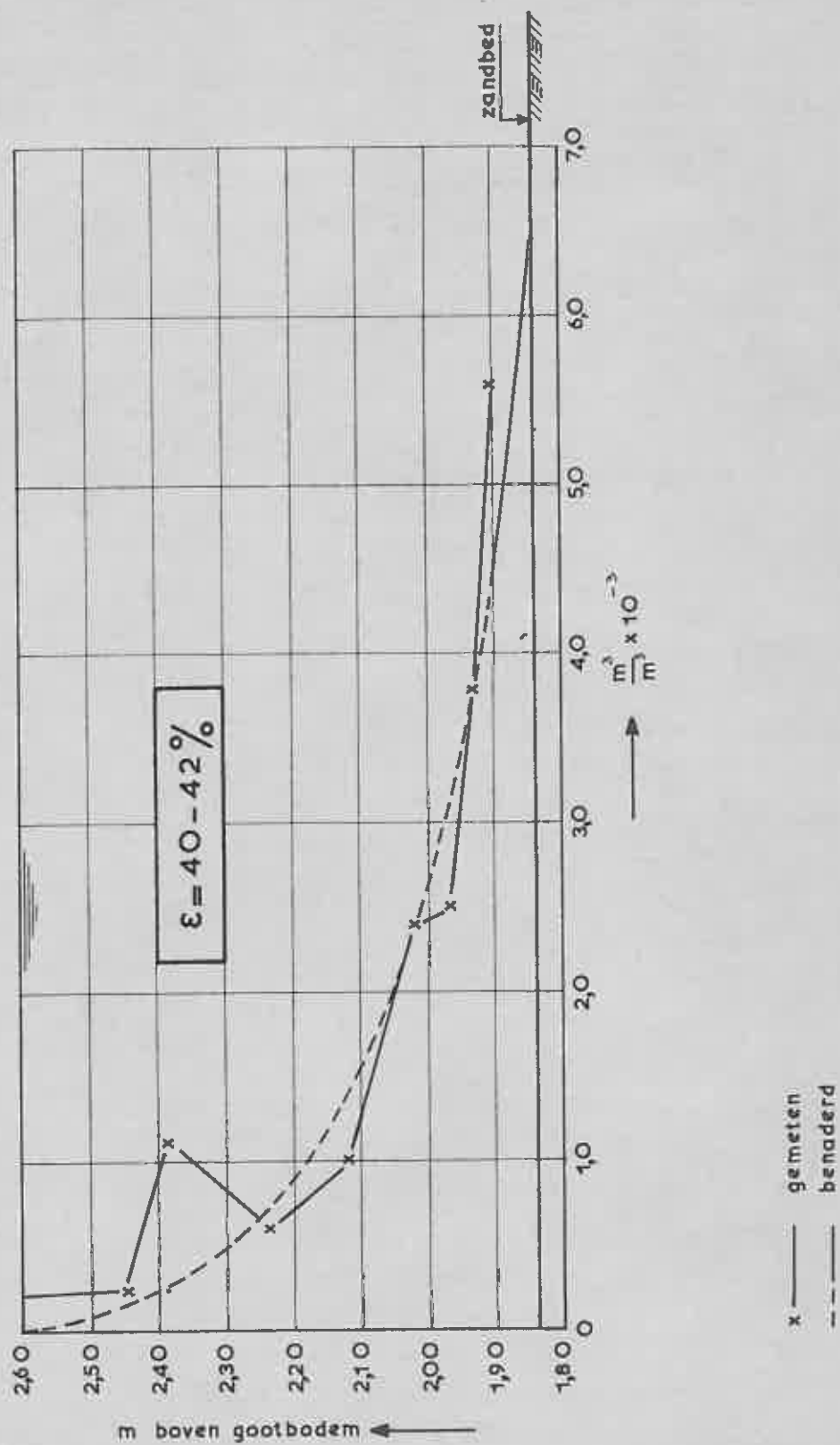
t = 27.65 u

RAAI 42

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M. 1155

FIG. 30



ZANDGEHALTEVERTICAAL

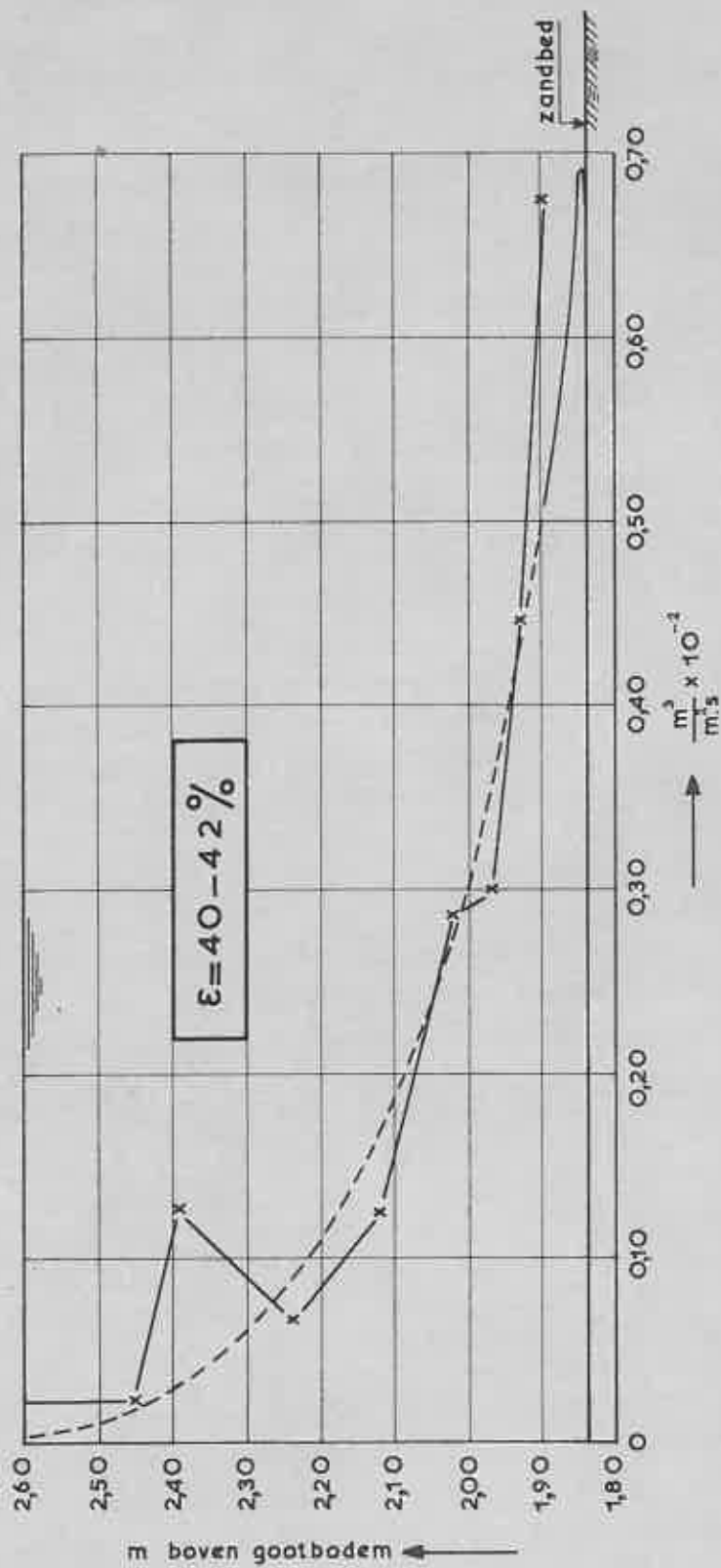
$t = 27.65 u$

RAAI 42

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M. 1155

FIG. 31



x — gemeten $T = 14.6 \text{ m/s}$
 - - - benaderd

ZANTRANSPORTVERTICAAAL

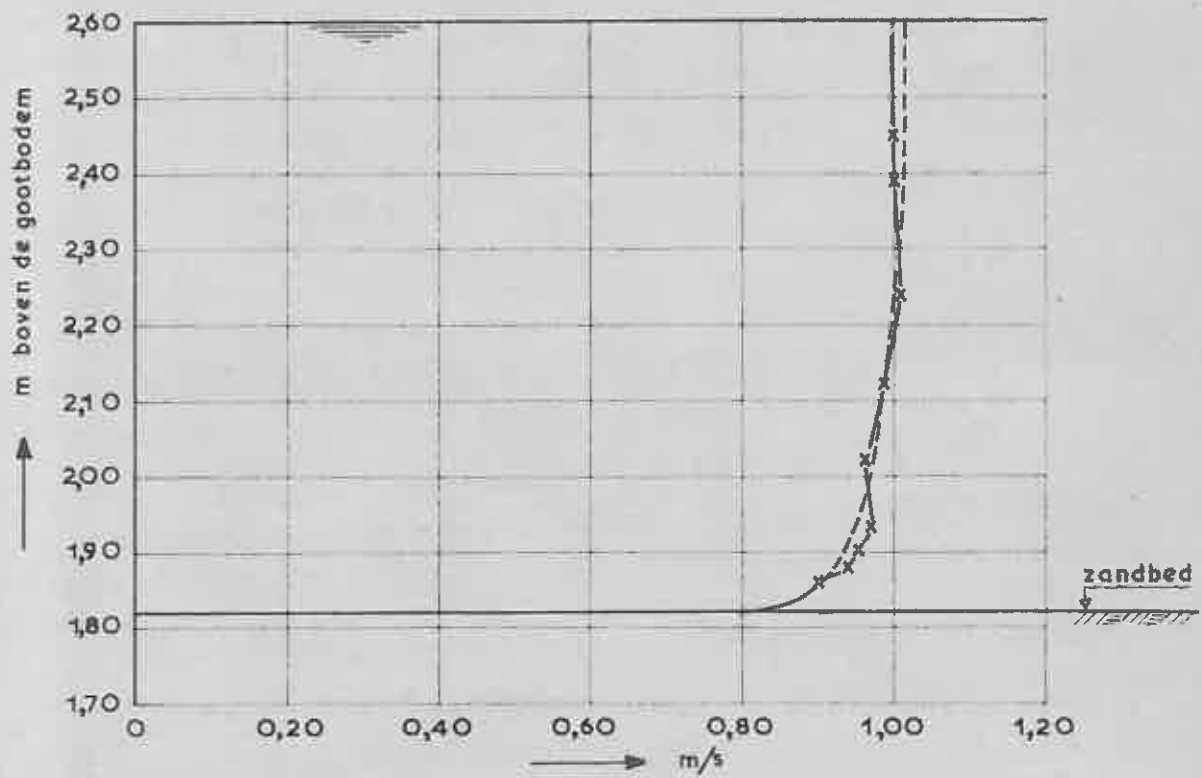
$t = 27.65 \text{ u}$

RAAI 42

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M. 1155

FIG. 32



x — gemeten
 - - - benaderd (q = 25)

SNELHEIDSVERTICAAL

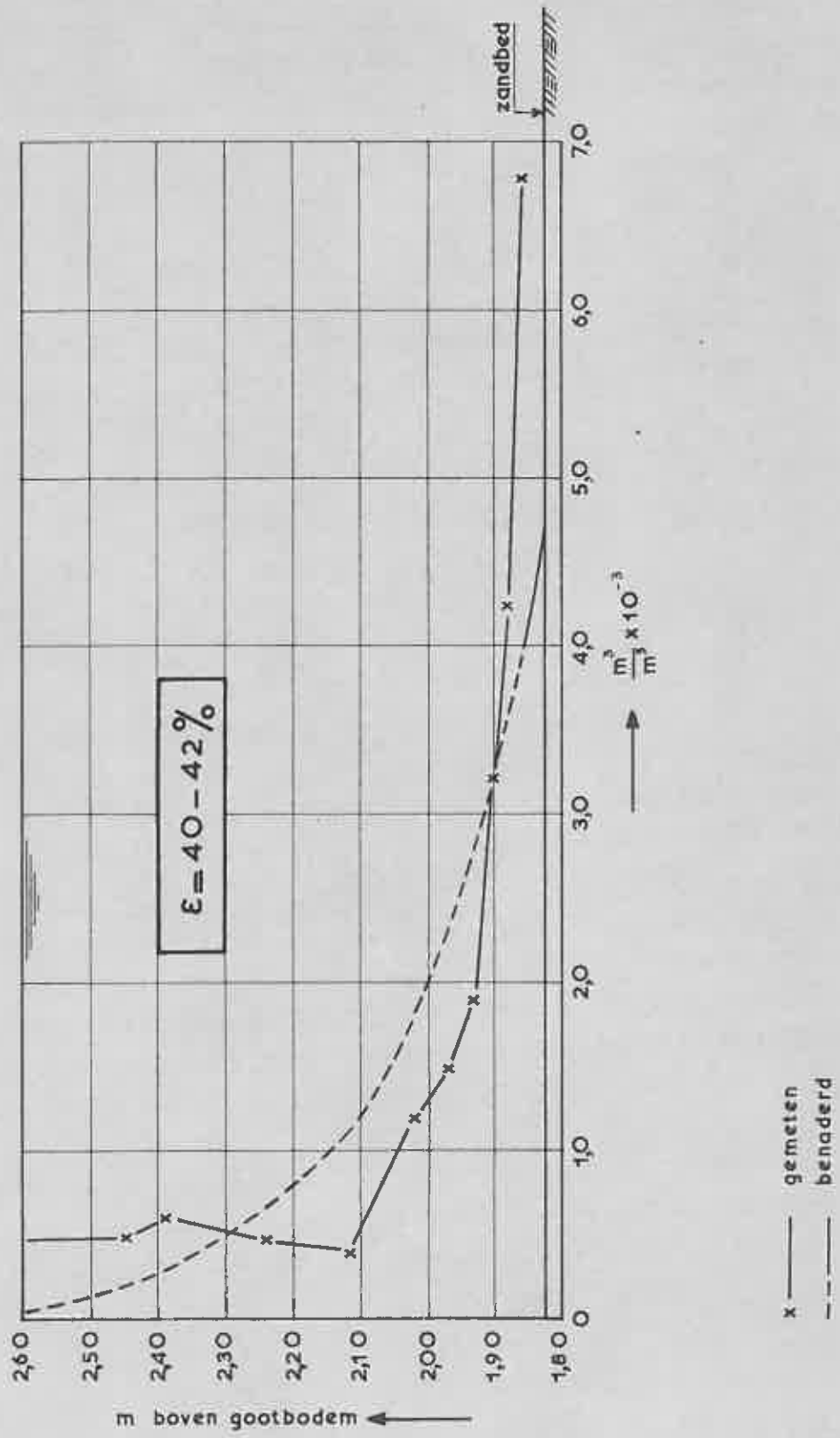
t = 28.65 u

RAAI 42

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M. 1155

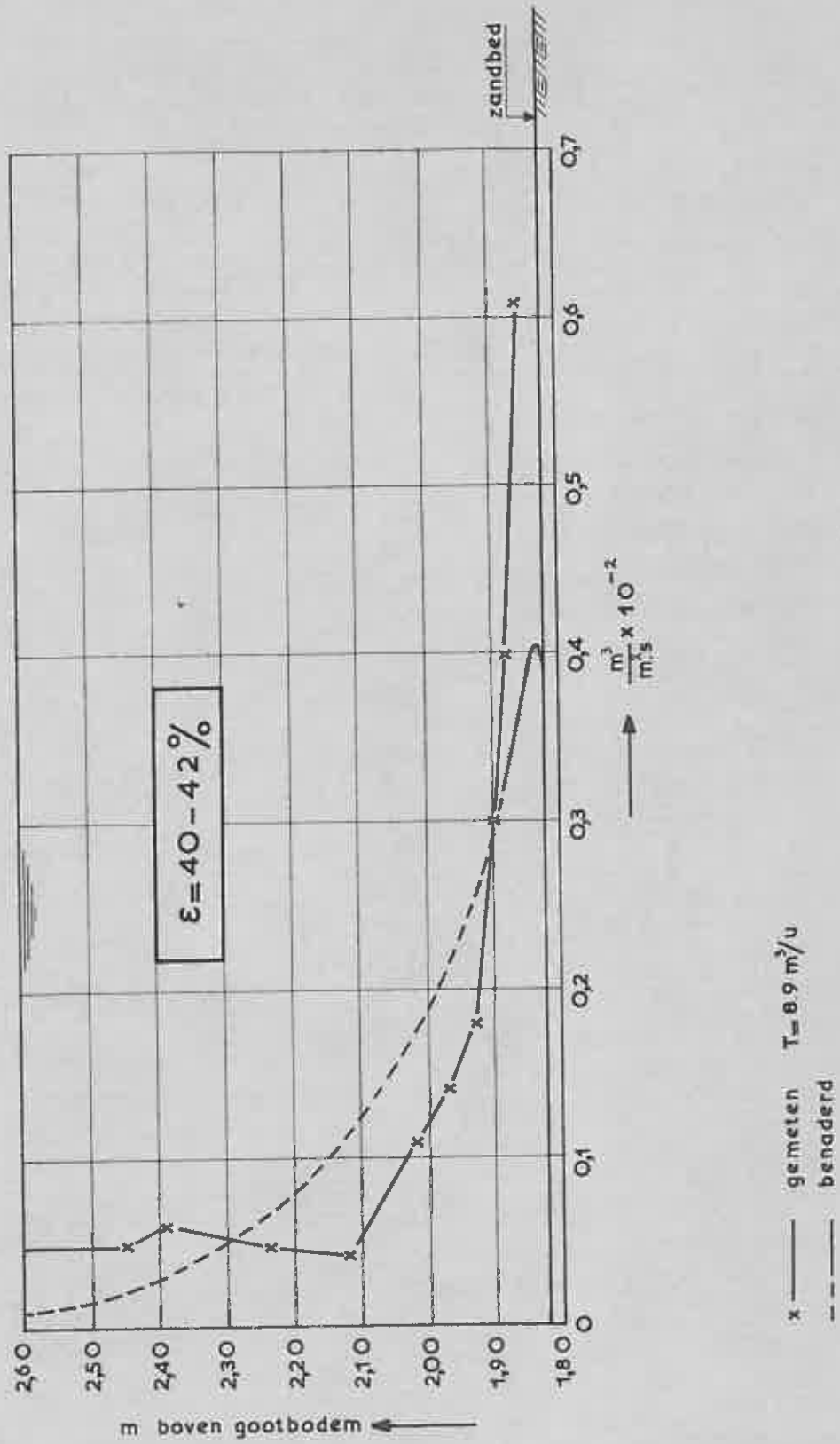
FIG. 33



ZANDGEHALTEVERTICAAL

$t = 28.65u$

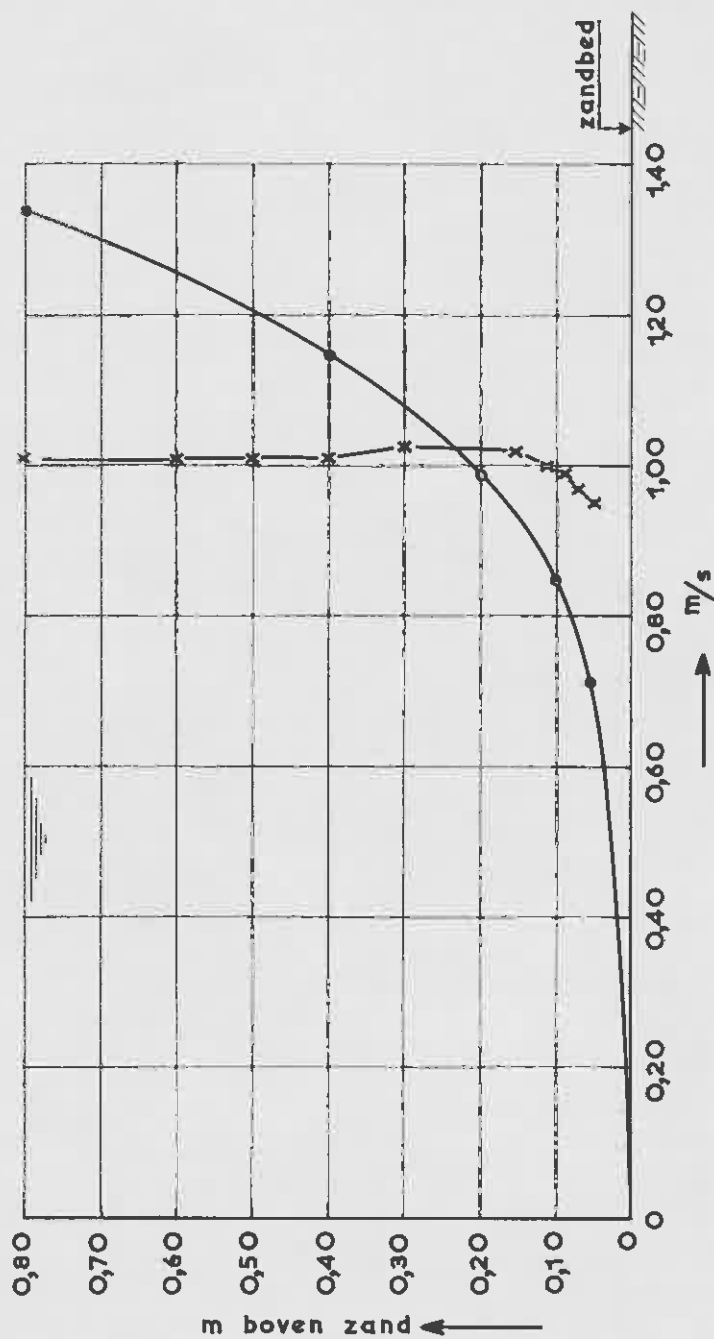
RAAI 42



ZANDTRANSPORTVERTICAAL

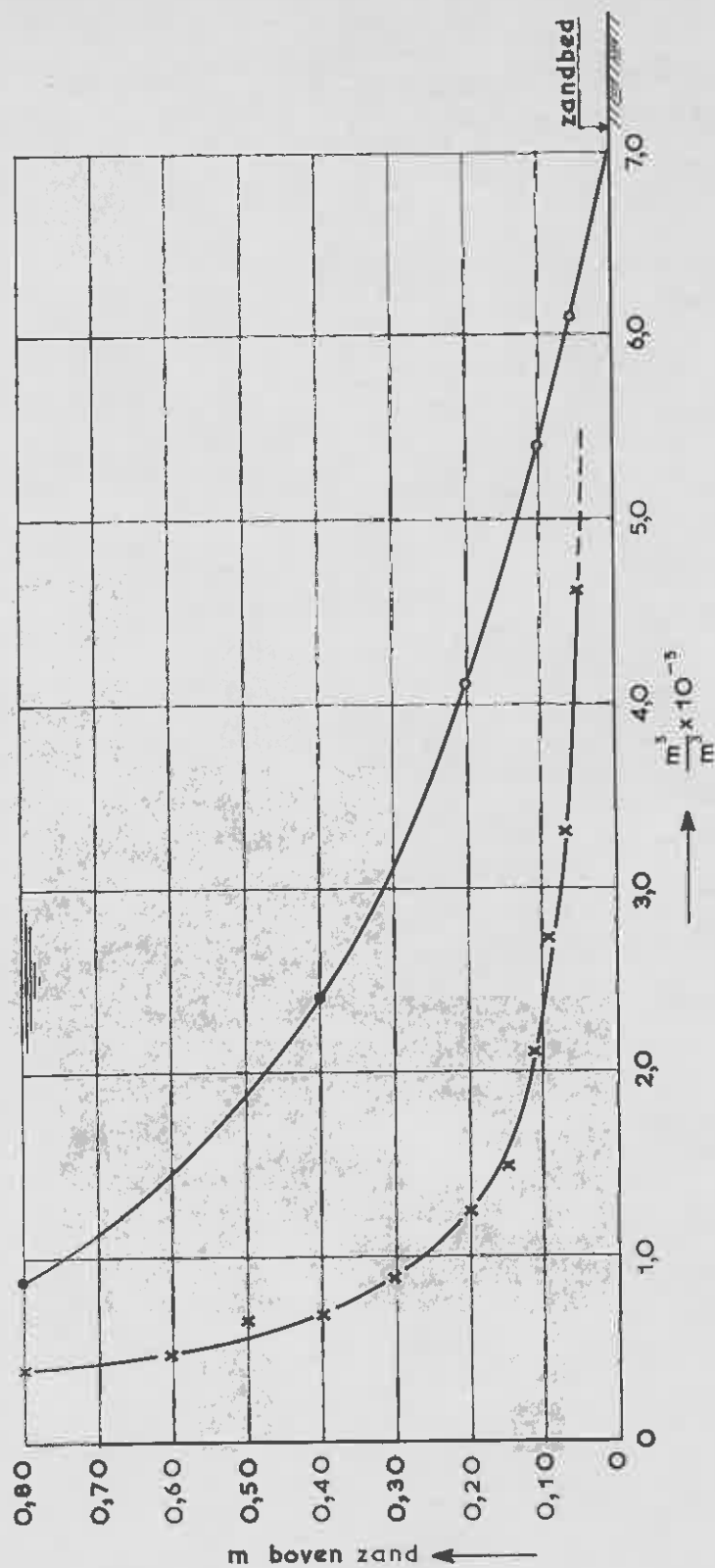
$t = 28.65 \text{ u}$

RAAI 42



x — gemiddelde van gemeten waarden
 uit fig. 12, 15, 18, 21, 24, 27, 30 en 33
 o — berekend met $q=4,5$ $C=35$ $\frac{1}{4}$ m/s

BEREKENDE EN GEMIDDELD
 GEMETEN SNELHEIDSVERTICAAL
 BIJ EVENWICHTSTOESTAND

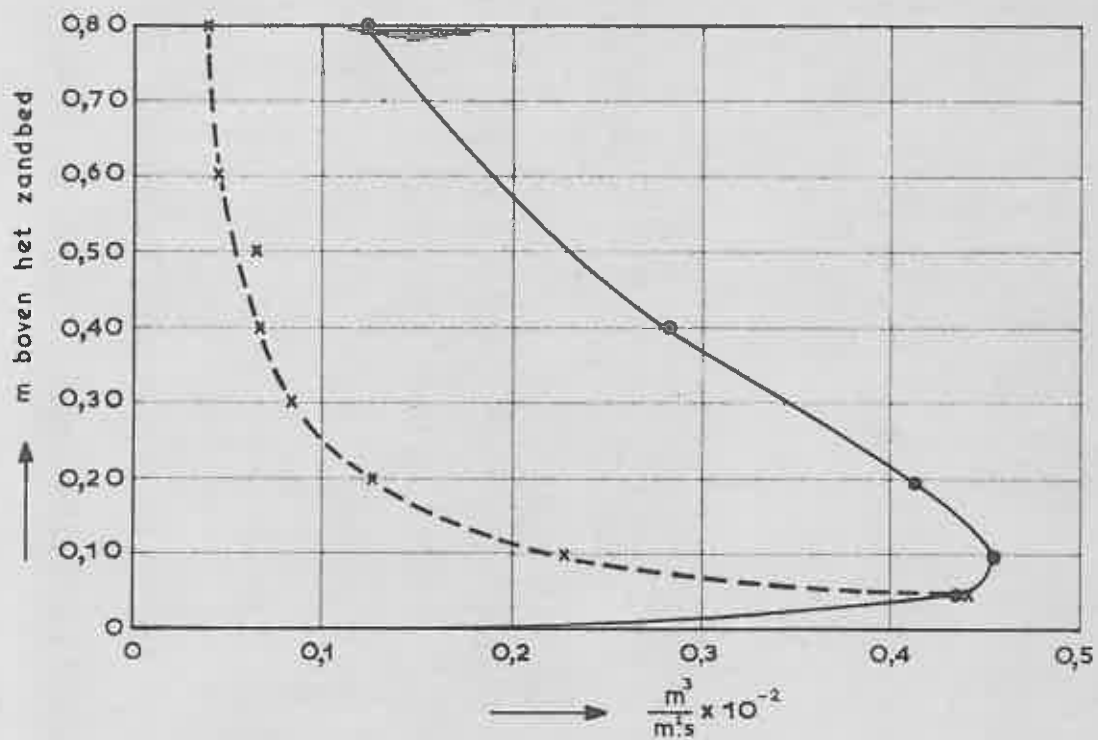


x — gemiddelde van gemeten waarden uit

fig. 13, 16, 19, 22, 25, 28, 31 en 34

o — berekend met $n=0,027 \text{ s.m}^{-1}$; $c=0,011 \text{ m/s}$; $q=4,5$;
 $C=35 \text{ m}^2/\text{s}$; $E=41\%$

BEREKENDE EN GEMIDDELD
 GEMETEN ZANDGEHALTEVERTICAAL
 BIJ EVENWICHTSTOESTAND



● — ● berekend

$$\eta = 0,0275 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$$

$$c = 0,011 \text{ m/s}$$

$$\epsilon = 41 \%$$

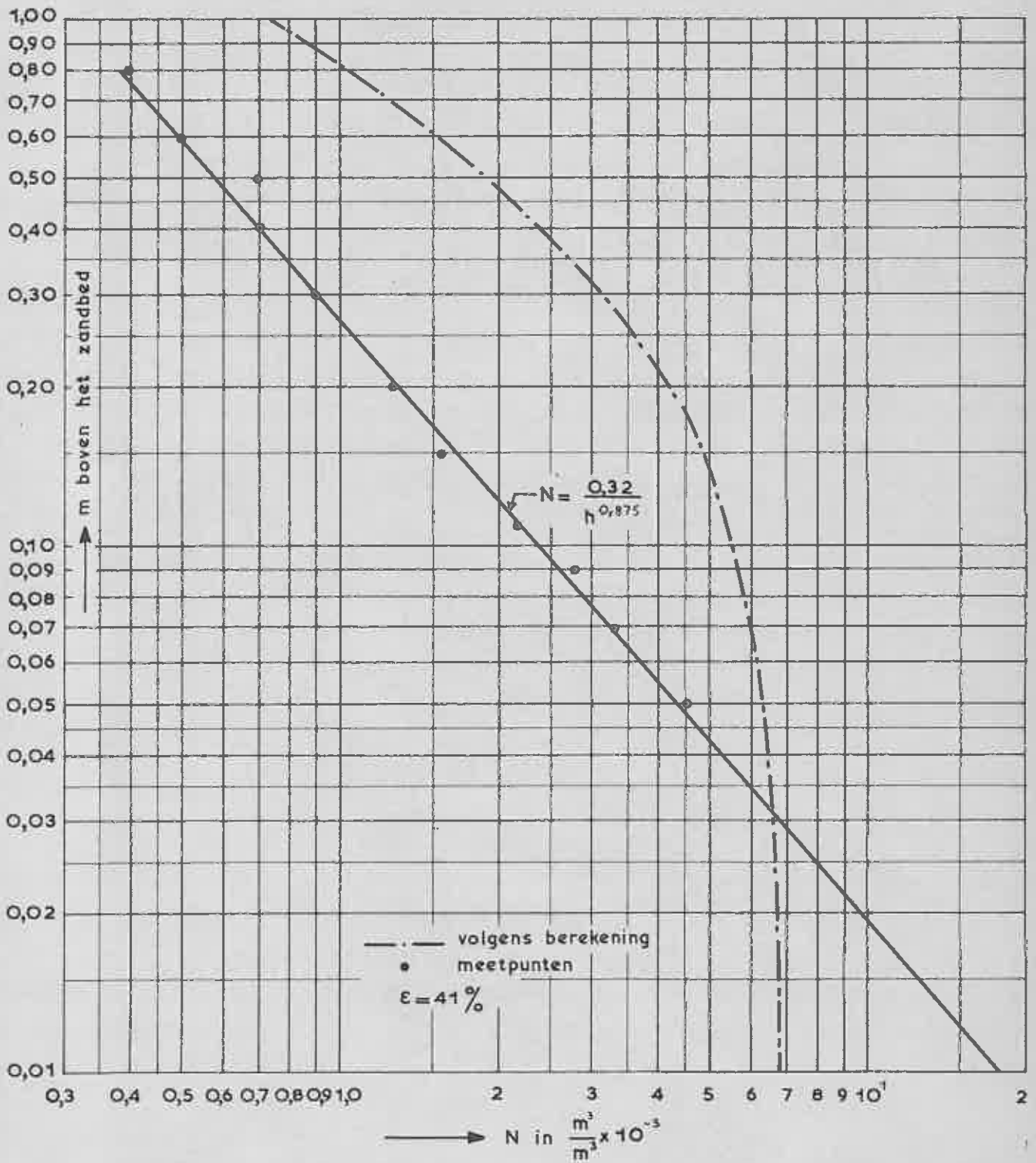
$$C = 35 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$$

$$q = 4,5$$

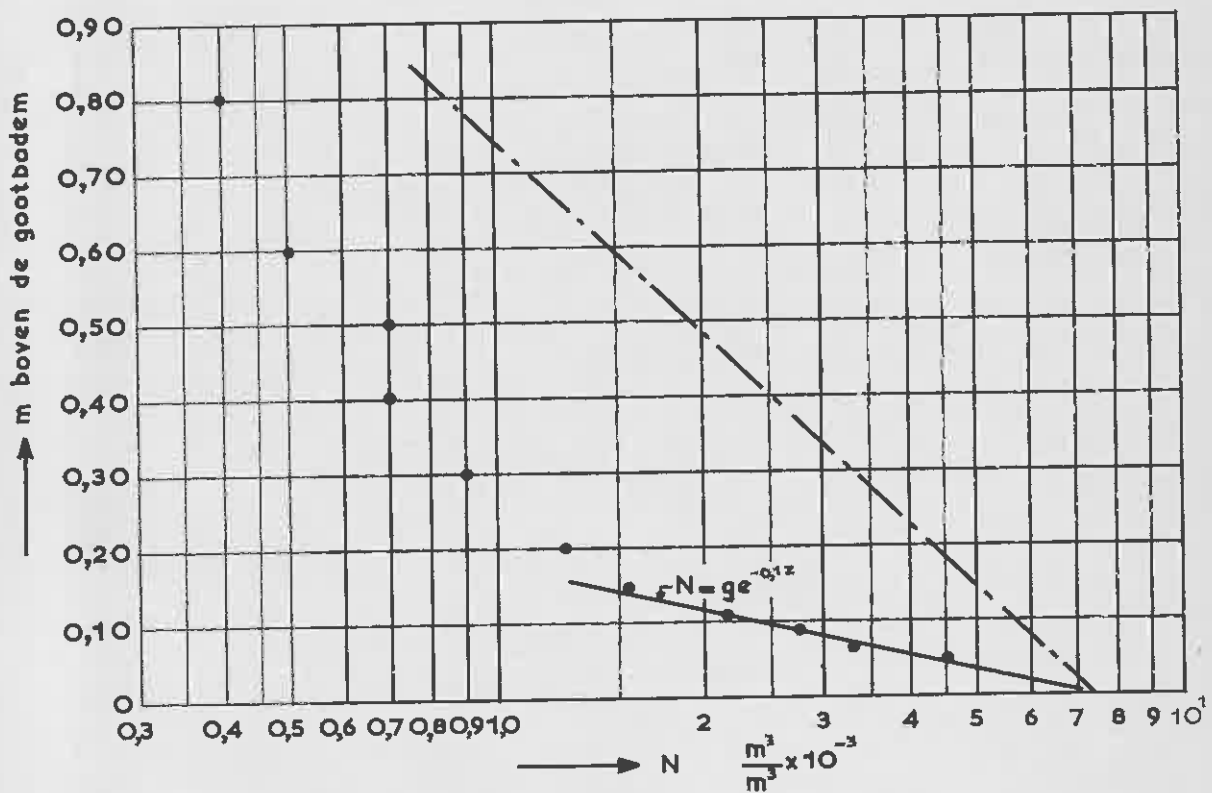
x — — x

gemiddelde van de gemeten
waarden van de figuren
14,17,20,23,26,29,32 en 35

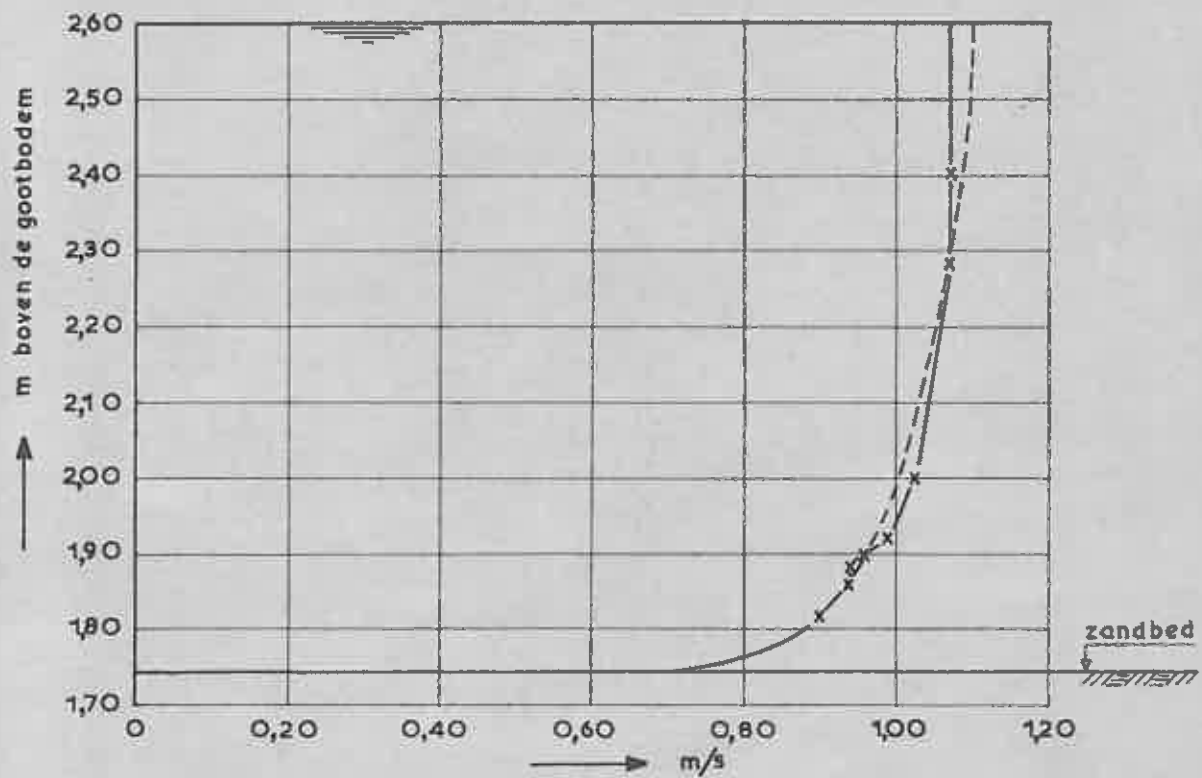
BEREKENDE EN GEMIDDELD
GEMETEN ZANDTRANSPORTVERTICAAL
BIJ EVENWICHTSTOESTAND



GEMIDDELDE ZANDGEHALTEVERTICAAL
 BIJ EVENWICHT



GEMIDDELDE ZANDGEHALTEVERTICAAL
 BIJ EVENWICHT



x — gemeten
 - - - benaderd ($q = 13,3$)

SNELHEIDSVERTICAAL

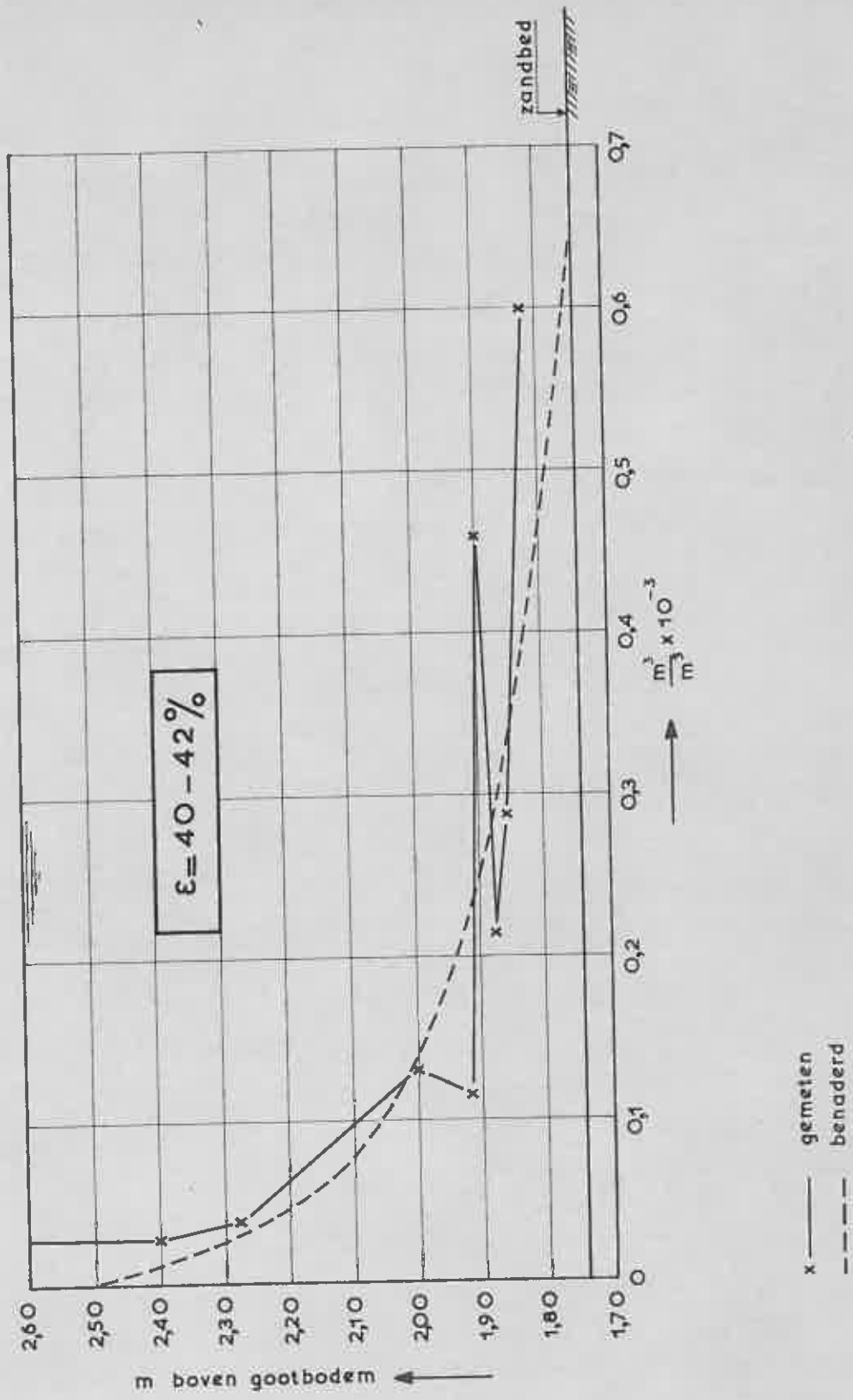
$t = 39.5$ u

RAAI 54

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

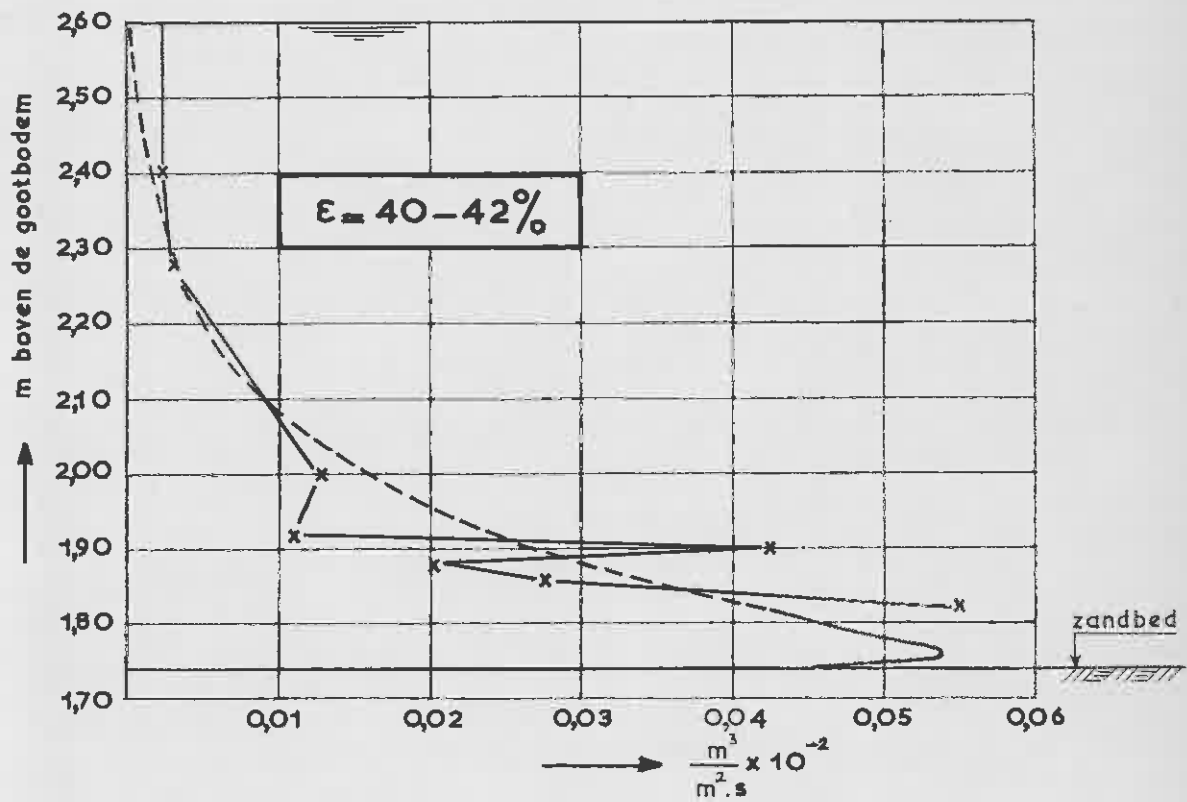
M. 1155

FIG. 41



ZANDGEHALTEVERTICAAL

$t = 39.5 u$ RAAI 54



x — gemeten $T=12,8 \text{ m}^3/\text{u}$
 - - - benaderd

ZANDTRANSPORTVERTICAAL

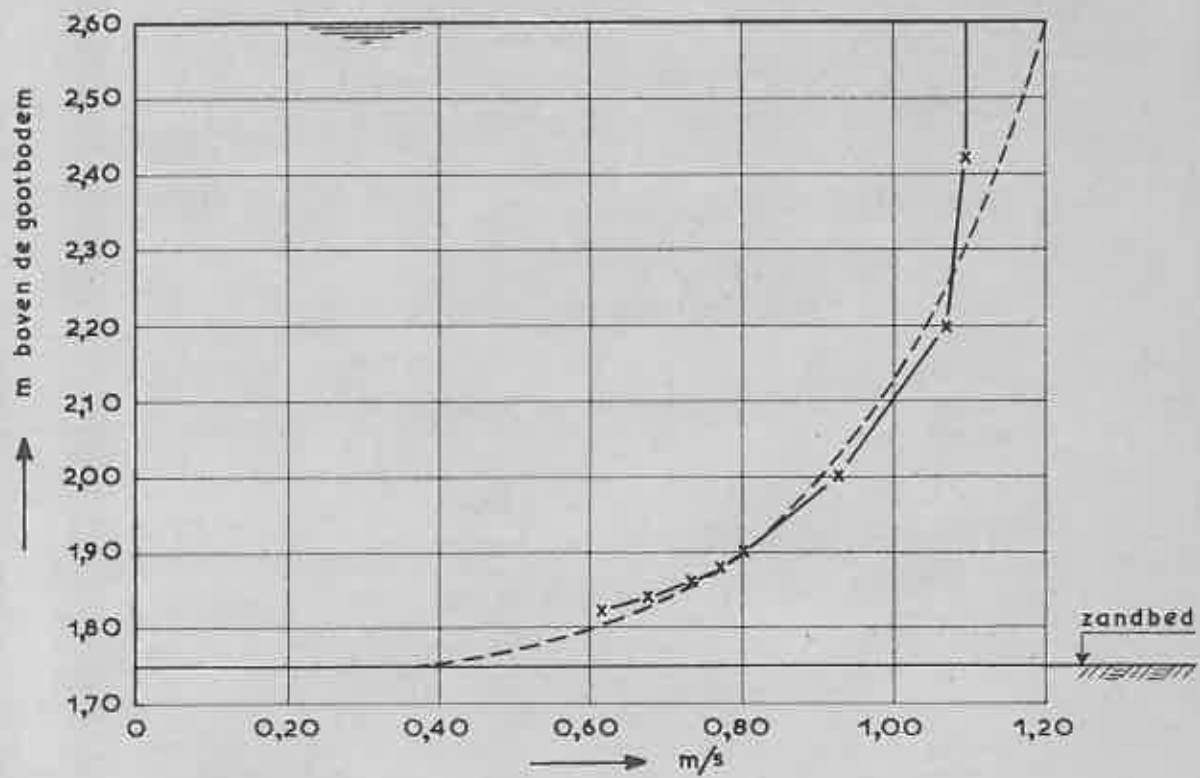
$t=39.5 \text{ u}$

RAAI 54

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M. 1155

FIG. 43



x ——— gemeten
 - - - - - benaderd ($q = 4,0$)

SNELHEIDSVERTICAAL

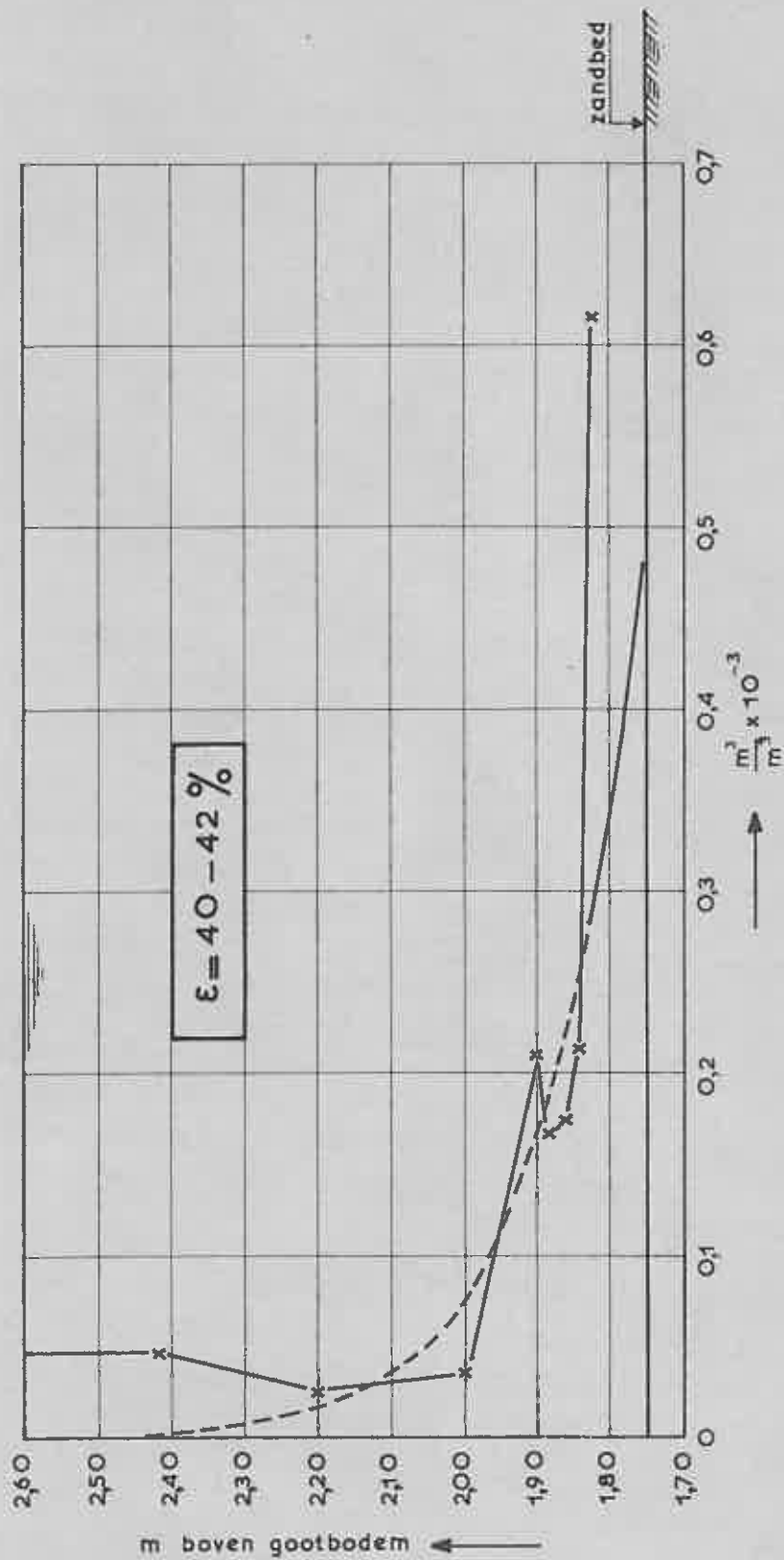
$t = 41.0 u$

RAAI 54

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M. 1155

FIG. 44



ZANDGEHALTEVERTICAAL

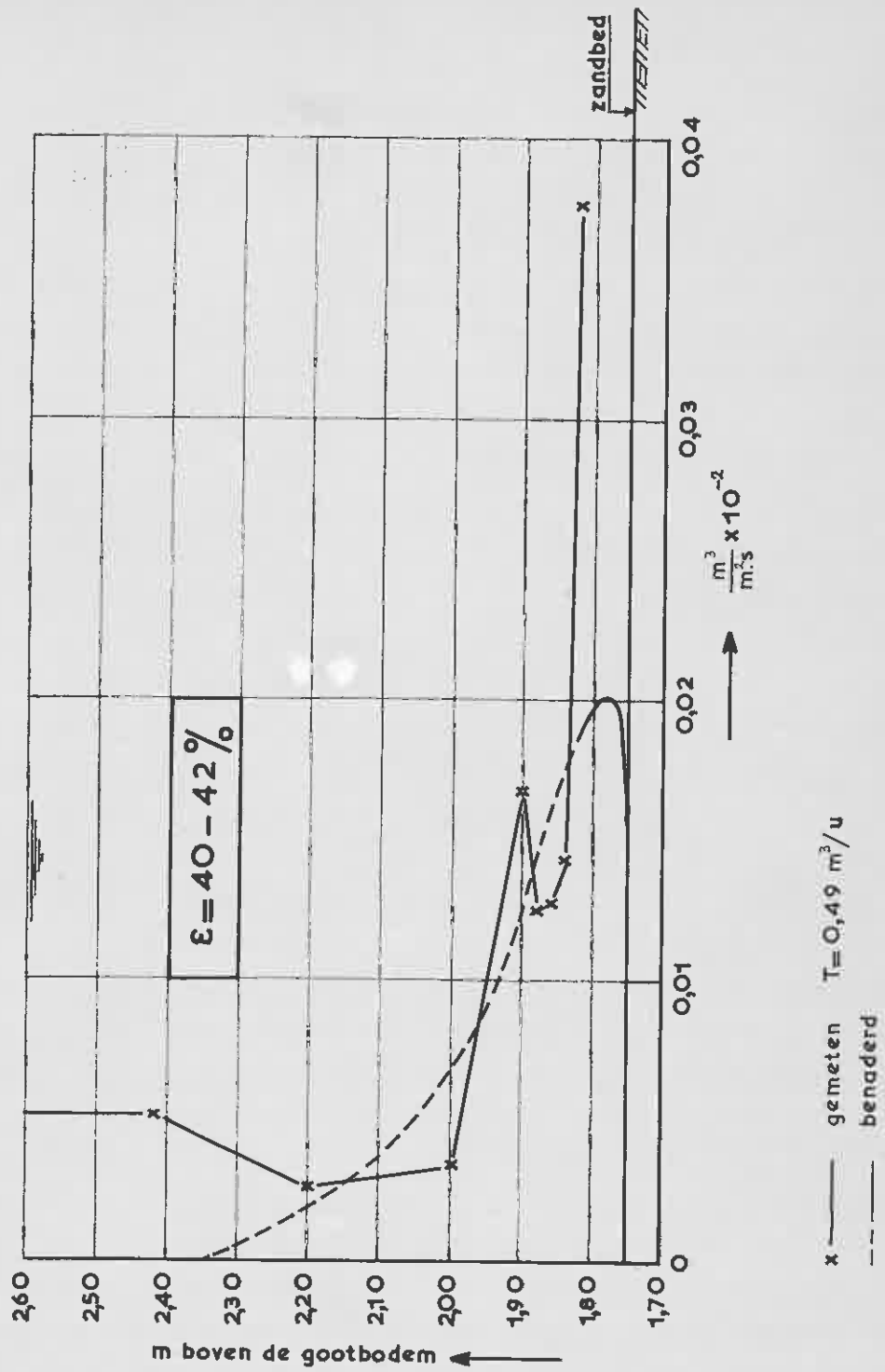
t = 41.0 u

RAAI 54

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M. 1155

FIG. 45



ZANDTRANSPORTVERTICAAL

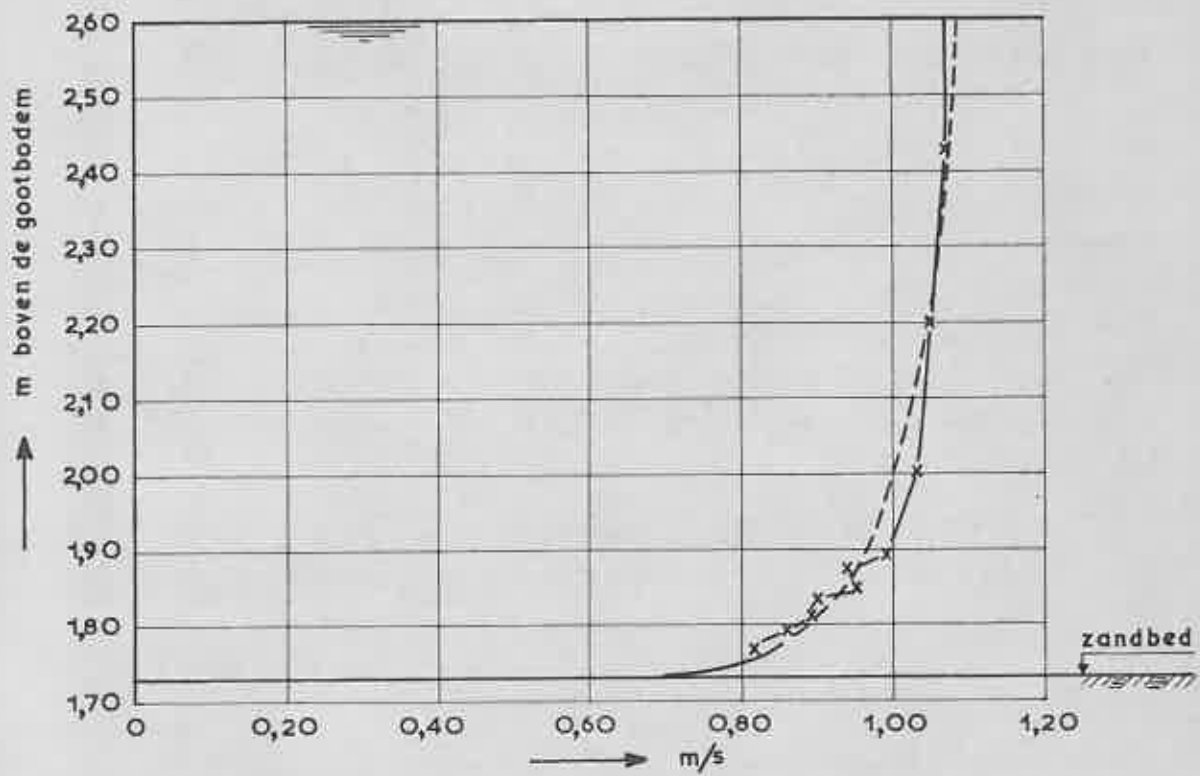
$t = 41.0 \text{ u}$

RAAI 54

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M. 1155

FIG. 46



x — gemeten
 - - - benaderd (q = 12,0)

SNELHEIDSVERTICAAL

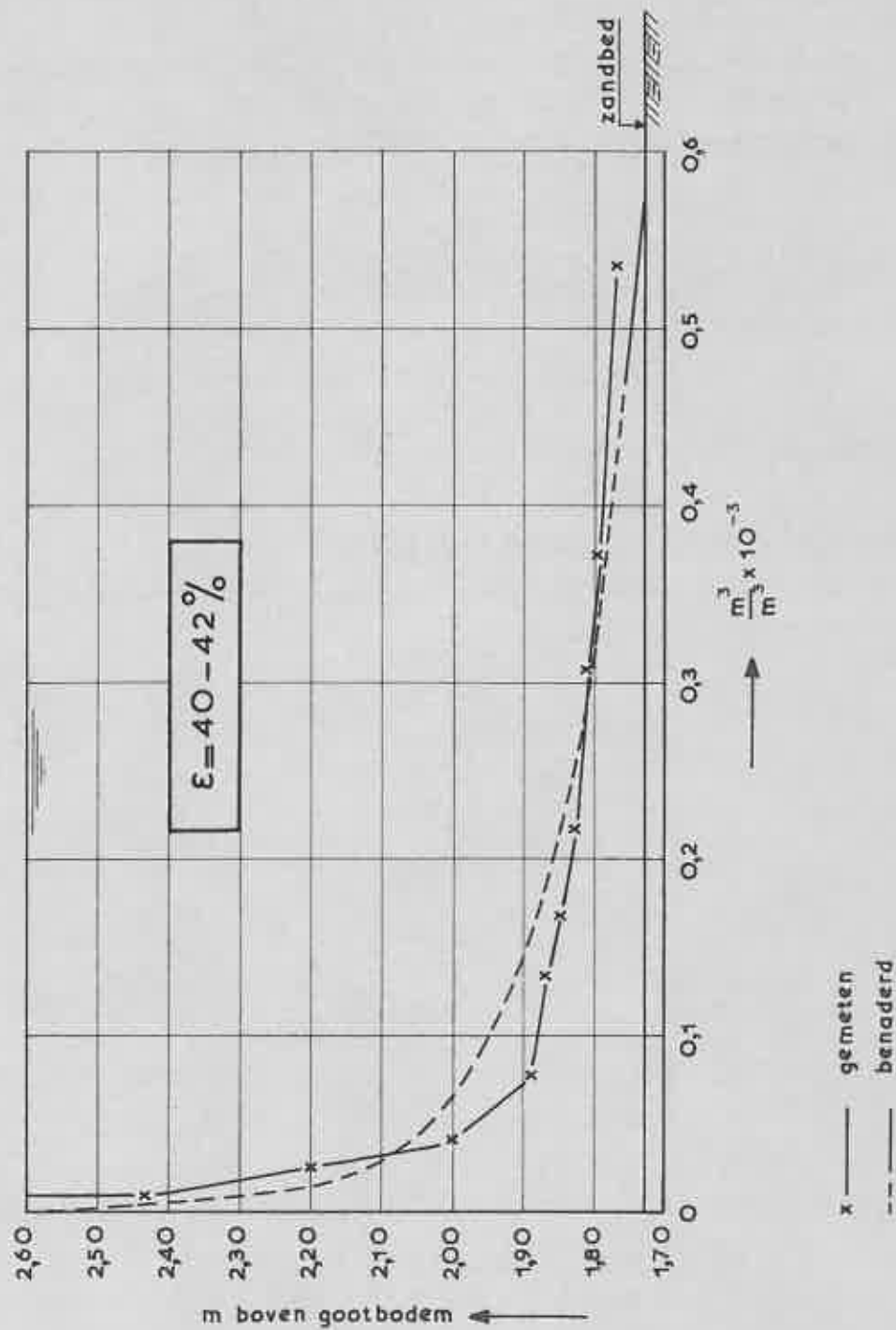
t = 42.25 u

RAAI 54

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M. 1155

FIG. 47



ZANDGEHALTEVERTICAAL

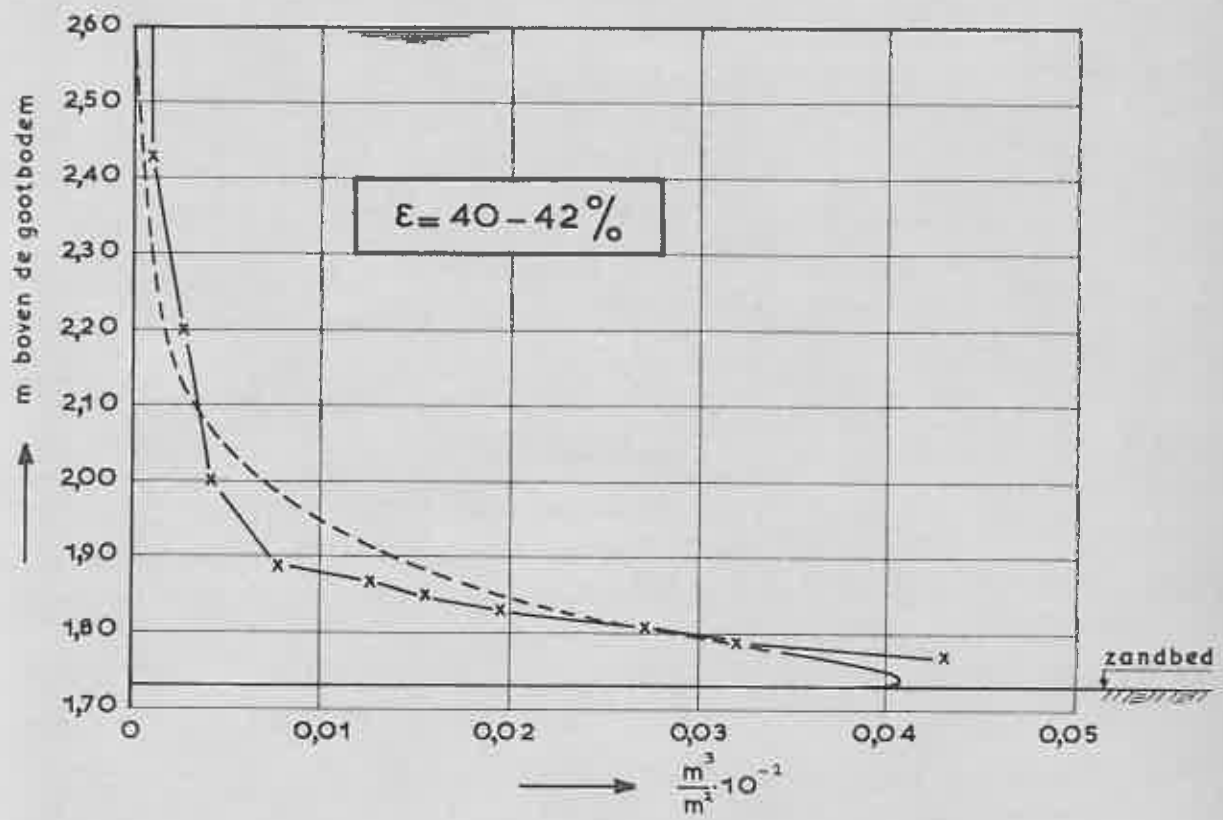
$t = 42.25$ u

RAAI 54

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

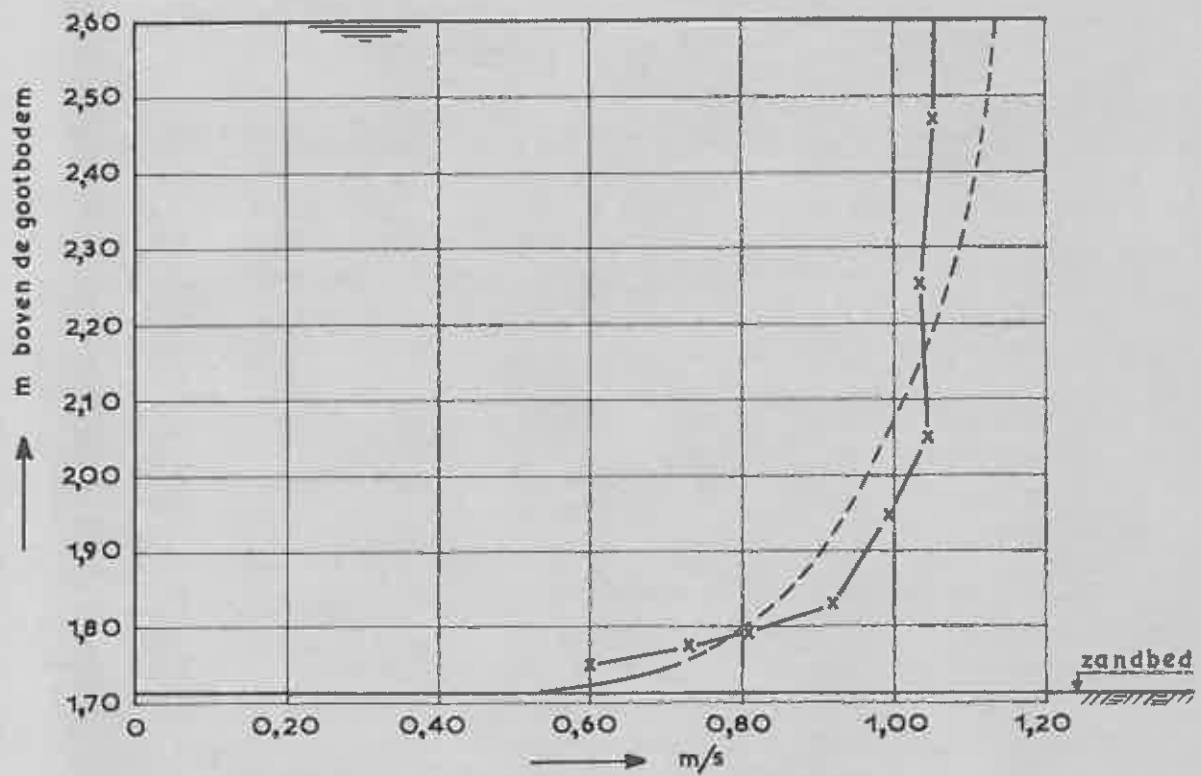
M. 1155

FIG. 48



x — gemeten $T = 0,71 \text{ m}^3/\text{u}$
 - - - benaderd

ZANDTRANSPORTVERTICAAAL	t = 42.25u	RAAI 54
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M. 1155	FIG. 49



x — gemeten
 --- benaderd ($q = 6,2$)

SNELHEIDSVERTICAAL

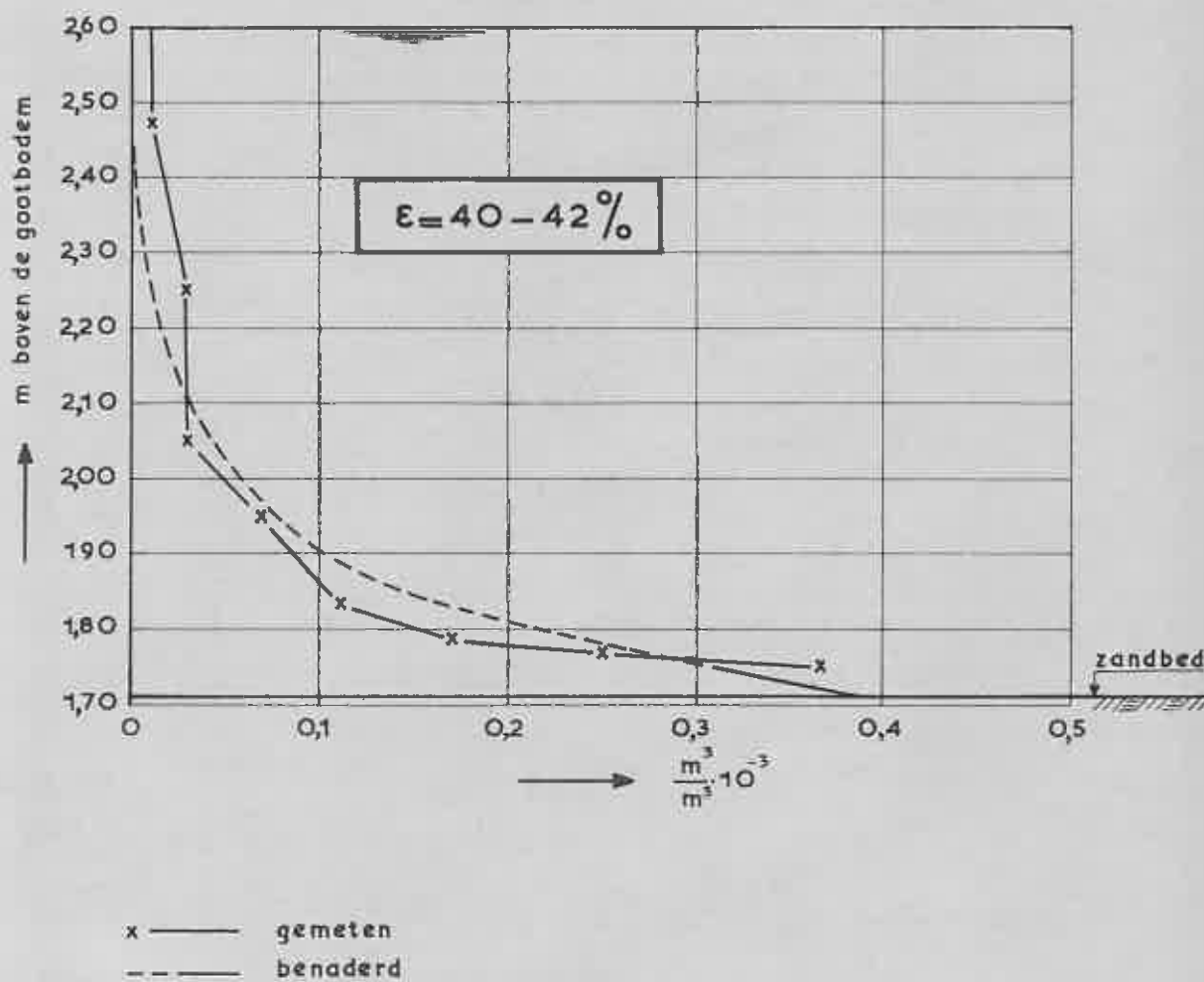
$t = 43.5 u$

RAAI 54

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M. 1155

FIG. 50



ZANDGEHALTEVERTICAAL

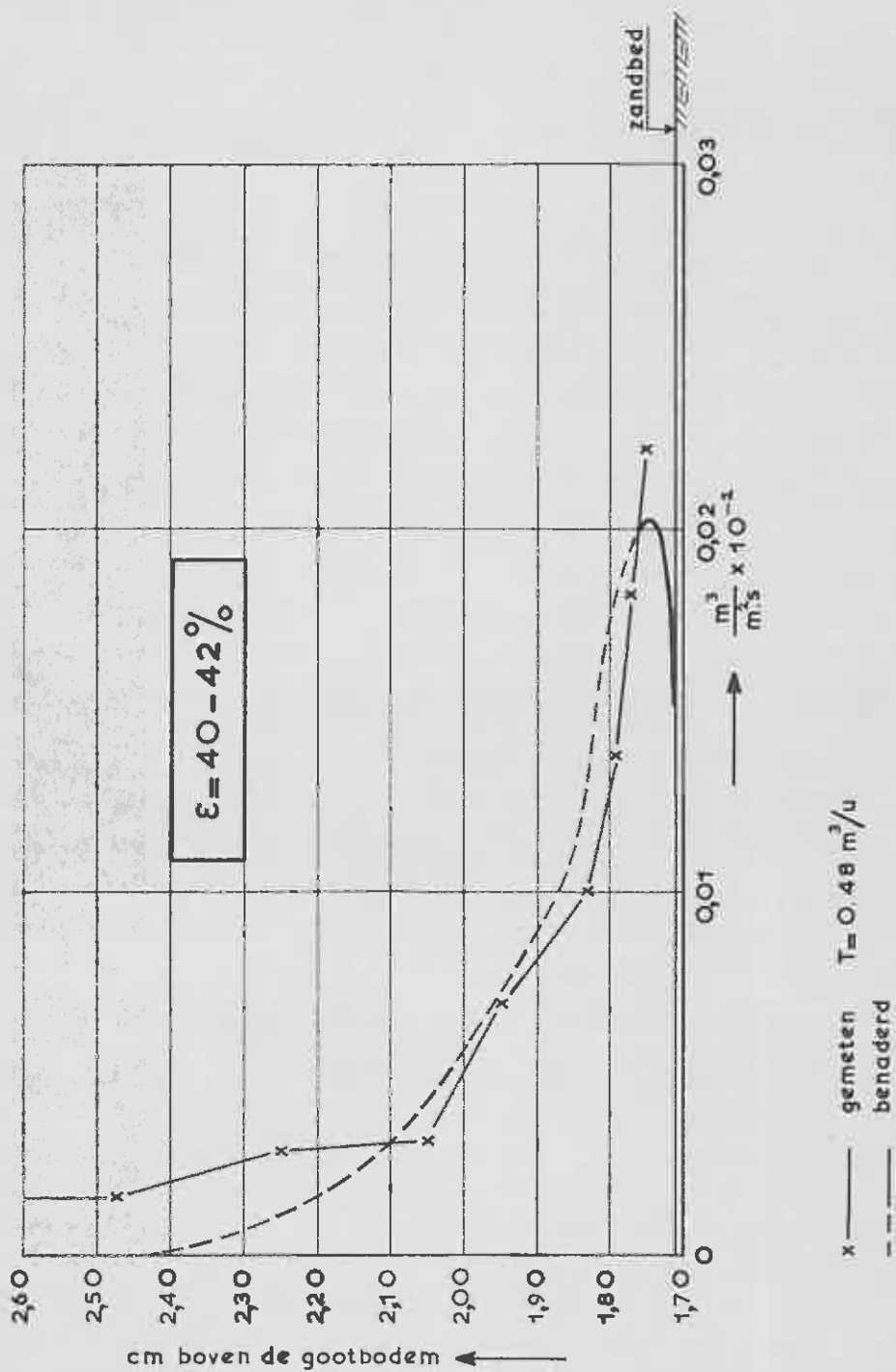
$t = 43.5u$

RAAI 54

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M. 1155

FIG. 51



ZANDTRANSPORTVERTICAAL

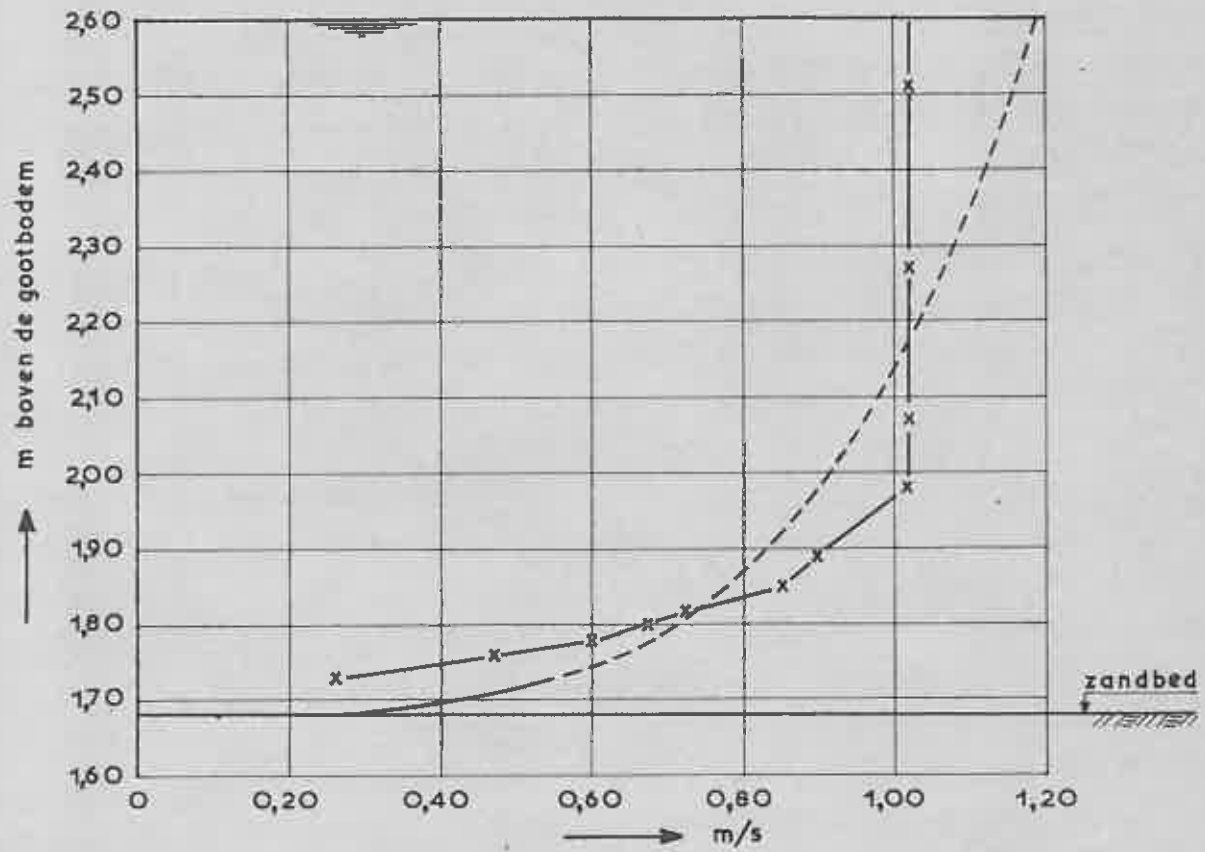
$t = 43.5 \text{ u}$

RAAI 54

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M. 1155

FIG. 52



x — gemeten
 - - - benaderd (q = 4)

SNELHEIDSVERTICAAL

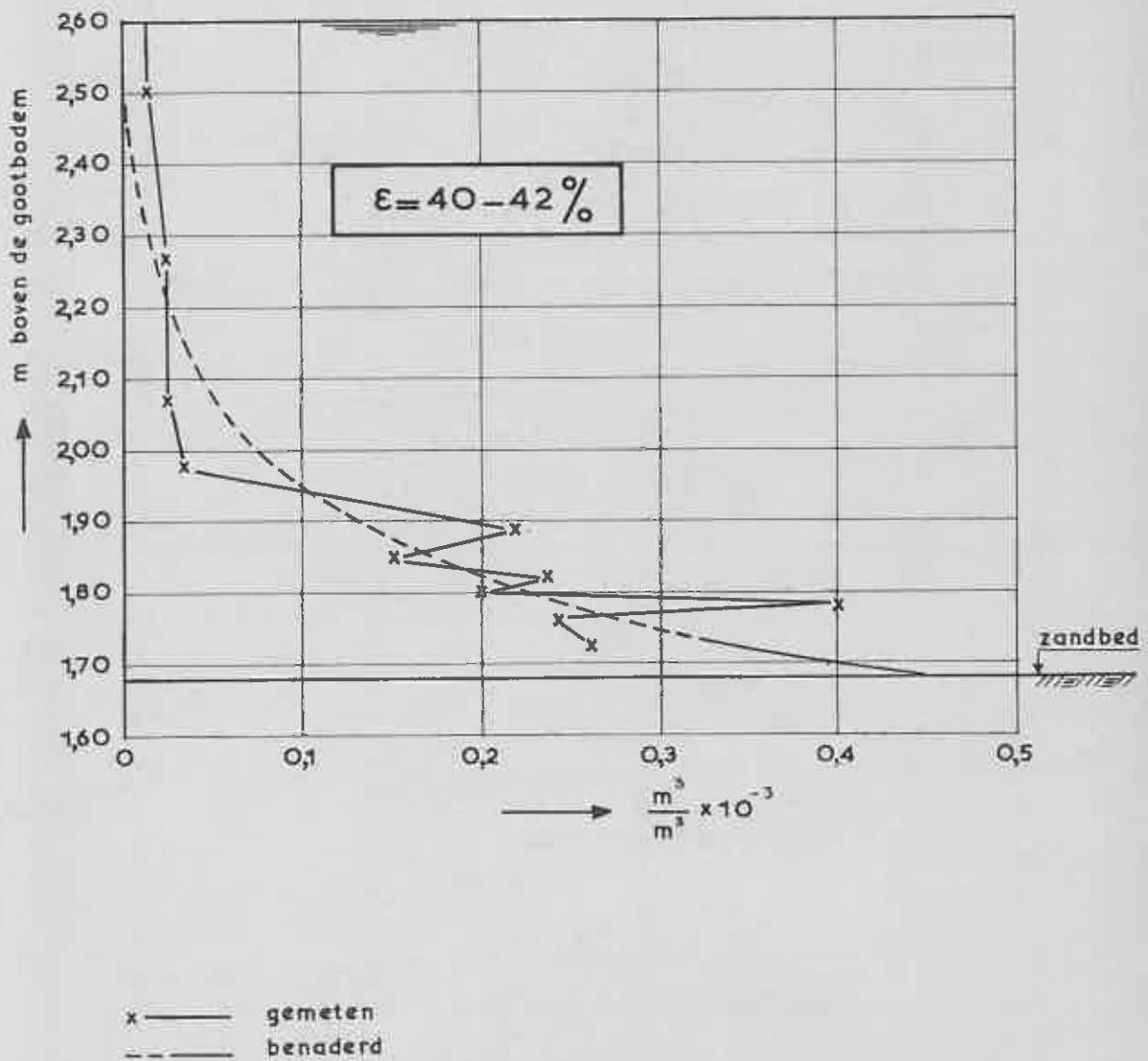
t = 45,0 u

RAAI 54

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M. 1155

FIG. 53



ZANDGEHALTEVERTICAAAL

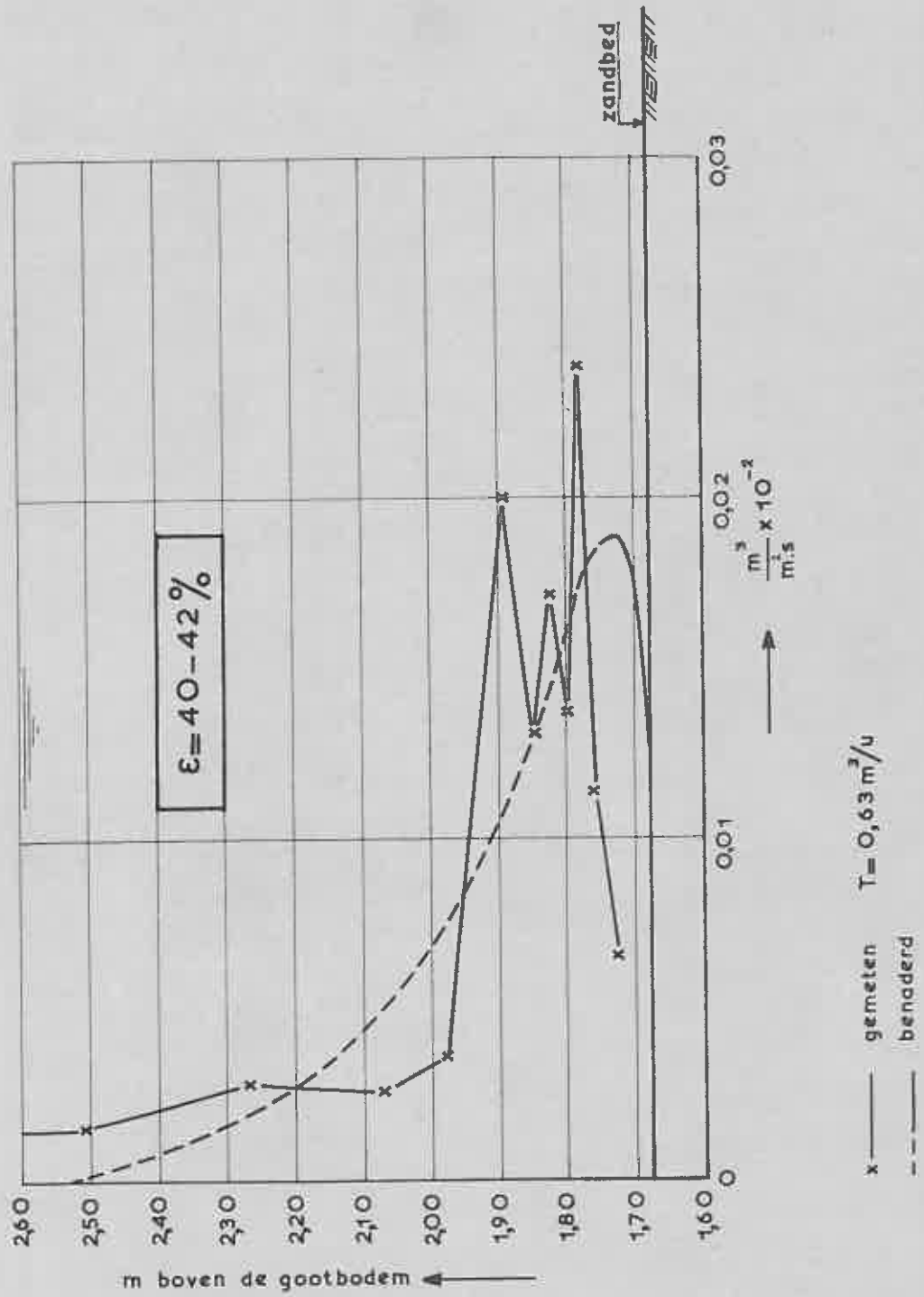
t=45.0u

RAAI 54

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M. 1155

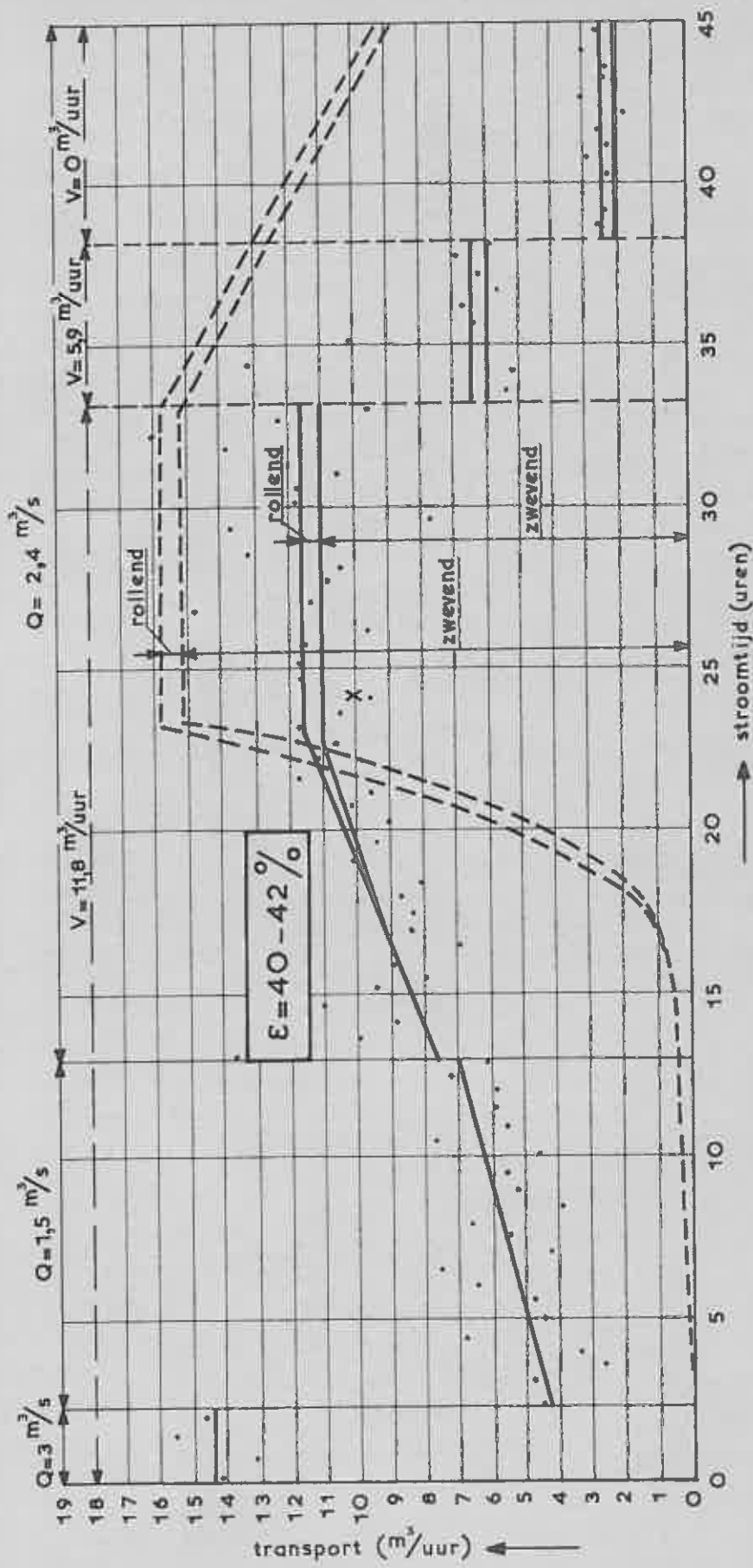
FIG. 54



ZANDTRANSPORTVERTICAAL

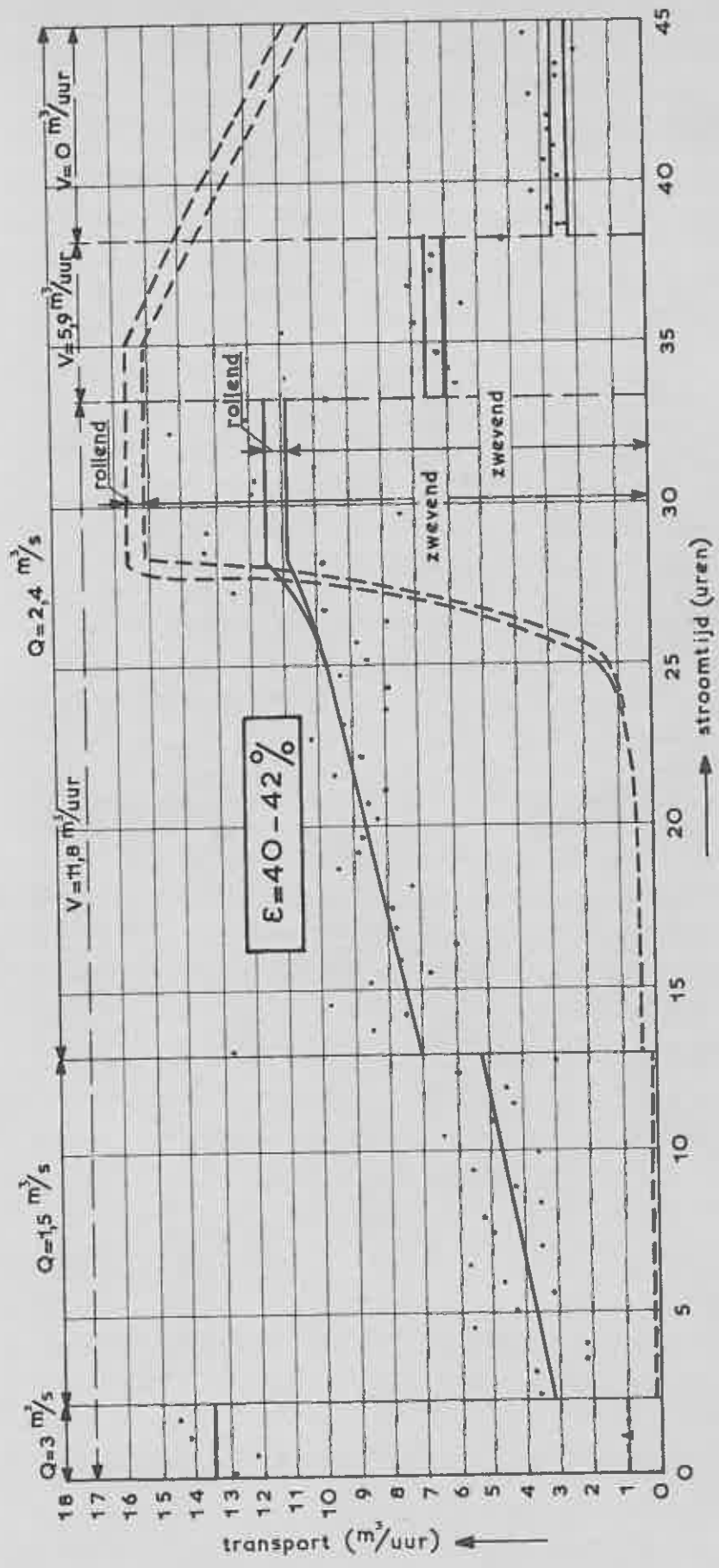
t=45.0u

RAAI 54



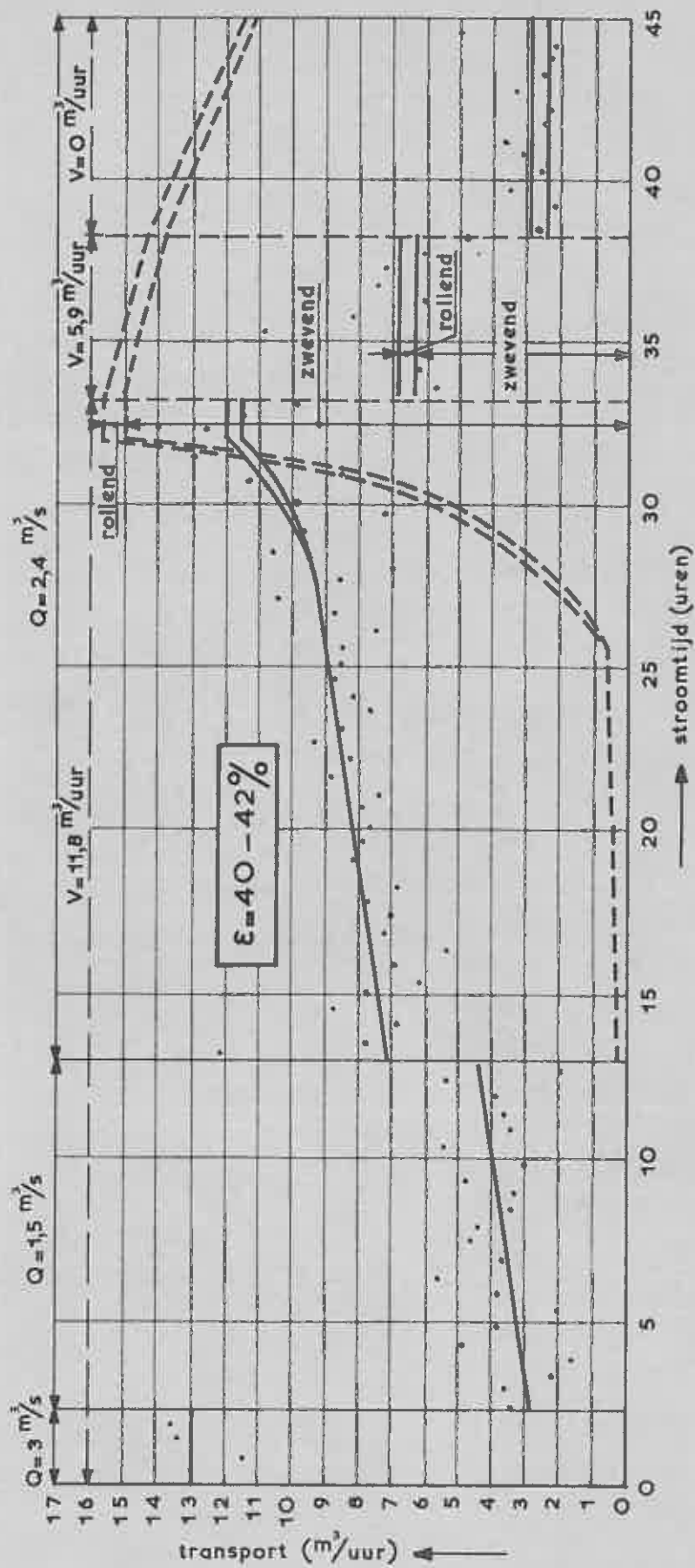
VERGELUKING VAN TRANSPORTEN

RAAI 38



VERGEL'JING VAN TRANSPORTEN

RAAI 45



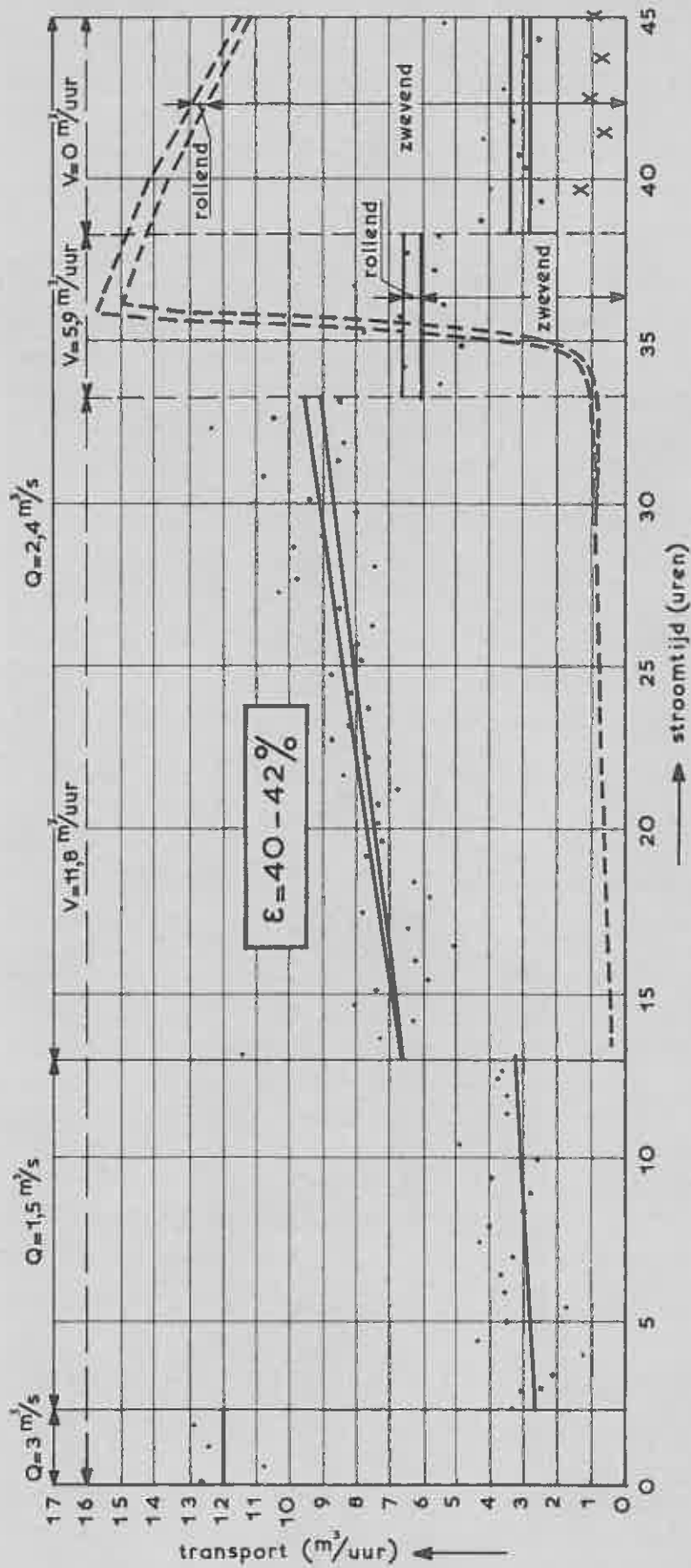
VERGELIJKING VAN TRANSPORTEN

RAAI 49

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M. 1155

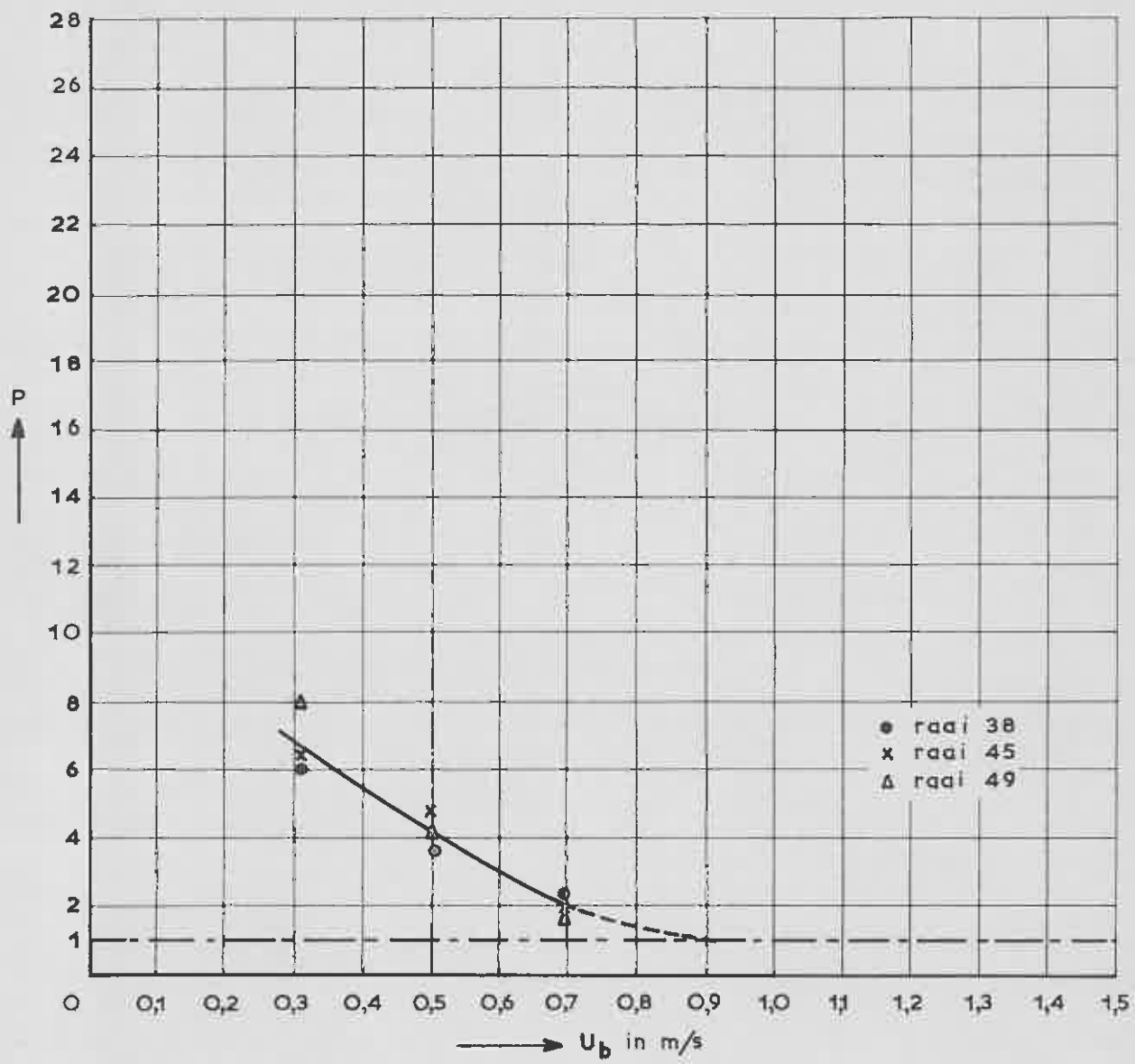
FIG. 58



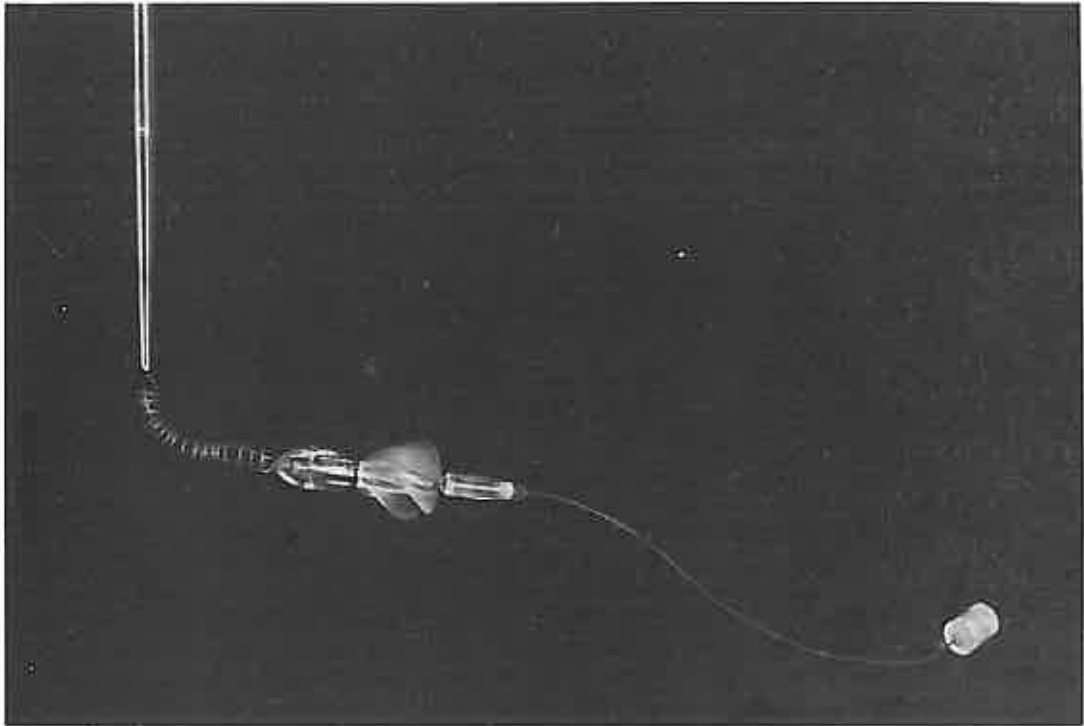
- transport uit verschillingen
- transport volgens Morra, $n = 0.027 \frac{s}{m}$; $c = 0.014 m/s$
- - - - transport volgens concentratiemetingen
- X Q = debiet
- V = voeding

VERGELIJKING VAN TRANSPORTEN

RAAI 54



RELATIE FACTOR P EN SNELHEID U_b



1 Hengelmolen

