

rijkswaterstaat

directie zeeland
projectbureau zierikzee

rijkswaterstaat
dienst getijdewateren
bibliotheek
grenadiersweg 31 -
4338 PG middelburg

nota

ZL-87.0002

Konfrontatie sedimenttransportformules
met metingen van het suspensief zand-
transport in de Westerschelde en de
Eendracht

titel:

auteur(s): Dr. J.H. van den Berg

datum: april 1987

bijlagen: 10 figuren, 1 appendix

samenvatting:

Er zijn betrekkelijk weinig literatuurgegevens over het sedimenttransport onder omstandigheden van een fijnzandige bodem, een waterdiepte van minder dan 5 m en een stroomsnelheid groter dan 1 m/s. In deze nota worden, als aanvulling op onderzoek door het WL in dit bereik, gegevens gepresenteerd van bij genoemde omstandigheden gemeten transporten in de Westerschelde en de Eendracht. De resultaten worden vervolgens vergeleken met voorspellingen van het evenwichtstransport volgens formules van Engelund en Hansen, Morra & Kalinske en Van Rijn. Met deze formules zijn berekeningen uitgevoerd met een vaste waarden van de ruwheidslengte (k_s), zoals aangenomen bij de berekeningen van de zandsluitingen van de Compartimenteringswerken en met een variabele ruwheid als functie van de stroomsnelheid. Tevens wordt van enkele gedetailleerde metingen het verloop van de verticale gradiënt van de zandconcentratie vergeleken met berekeningen daarvan.

rijkswaterstaat
dienst getijdewateren
bibliotheek
grenadiersweg 31 -
4338 PG middelburg

INHOUDSOPGAVE

blz.

Opgave Tabellen	II
Lijst van figuren	III
Inleiding	1
De metingen	3
De meetuitkomsten	5
Konfrontatie van meetresultaten met berekeningen	6
- transportmetingen	6
- enkele resultaten van de statiefmeting d.d. 860821	9
Konklusies	13
Aanbevelingen	14
Literatuur	16
	17
Tabellen	
Figuren	
Appendix	

behoort bij: nota

nr. 87.0002

bladnr.: II

OPGAVE TABELLEN

- I Overzicht metingen
- II Basisgegevens gemeten zandtransport
- III Statiefmeting d.d. 860821 : stroomsnelheden en zandconcentraties

LIJST VAN FIGUREN

- 1 A t/m F Meetdata en meetlocaties.
- 2 A t/m D Echogrammen meetlocaties Westerschelde d.d. 860312 en 860206.
- 3 Echogrammen meetlocaties Schaar van Valkenisse d.d. 860312.
- 4 A t/m D Zandtransportmeting d.d. 860821: gemeten zandtransporten in de onderste meter van de waterkolom.
- 5 A en B Zandtransportmeting d.d. 860821: stroomsnelheid, sedimentconcentratie en zandtransport vertikalen gemeten met de meetvis.
- 6 A t/m C Zandtransportmeting d.d. 860821: verticale zandconcentratie verdelingen; resultaten meting en berekening.
- 7 A t/m F Verhouding berekend/gemeten zandtransport als functie van de diepte - gemiddelde stroomsnelheid bij een effectieve bodemruwheid $k_s = 0.02$ m.
- 8 Effectieve bodemruwheid als functie van de stroomsnelheid.
- 9 A t/m F Verhouding berekend/gemeten zandtransport als functie van de diepte - gemiddelde stroomsnelheid bij een variabele effectieve bodemruwheid.
- 10 Zandconcentraties op 0.05 m boven de bodem: vergelijking meetresultaten Schaar van Valkenisse d.d. 860821 met literatuurgegevens.

INLEIDING

Tijdens of ten gevolge van de aanleg van waterbouwkundige werken kunnen zich omstandigheden voordoen waarbij hoge stroomsnelheden optreden. Het is van groot belang te weten in hoeverre de daarbij optredende afvoer van zand de voortgang van het werk kan vertragen of elders tot problemen kan leiden, bijvoorbeeld door de afzetting van afgevoerd zand in een vaargeul of de ondermijning van dijkwalen buiten het werk. Bij de Oosterscheldewerken was deze problematiek voortdurend aan de orde. In de laatste fase van de uitvoering daarvan was de voorspelling van de zandverliezen bij de aanleg van de sluitdammen van de Compartimenteringswerken van cruciale betekenis voor het ontwerp van die zandsluitingen. Om deze reden werden door het Waterloopkundig Laboratorium "de Voorst" de formules van Englund & Hansen, Morra-Kalinske en van Van Rijn, die voor toepassing bij de zandsluitingen het meest in aanmerking leken te komen, in een vergelijkende studie getoetst aan de meetgegevens van Amerikaanse rivieren met een soortgelijke fijnkorrelige zandbodem als die welke in de getijdewateren van Zuidwest Nederland wordt aangetroffen (1). Bij dit onderzoek bleek, dat er geen gegevens van gemeten zandtransporten beschikbaar waren van relatief kleine waterdiepten gekombineerd met hoge stroomsnelheden ($h < 5\text{m}$, $\bar{u} > 1\text{ms}^{-1}$). Om in deze leemte te voorzien werden een aantal experimenten uitgevoerd in de Grote Stroomgoot van eerder genoemd lab. Hoewel dit onderzoek (2) het inzicht in de betrouwbaarheid van de formules in snel stromend ondiep water belangrijk heeft vergroot moet er toch rekening gehouden worden met de mogelijkheid, dat door onvermijdelijke gooteffekten de gesimuleerde naturomstandigheden aanzienlijk van de realiteit af kunnen wijken. Met name kan daarbij gedacht worden aan de kuilvorming aan het begin van de goot en andere instabiliteiten in de bodemligging over de lengte van de goot met de daaraan gekoppelde extra turbulentie. Verder roept de door wrijving met de zijwanden van de goot veroorzaakte vervorming van het verticale stroomsnelheidsprofiel met verlaging van het gebied met maximale snelheden twijfels op over de representativiteit. Daarom zijn als aanvulling op genoemde onderzoeken (1,2) een aantal metingen uitgevoerd in de Westerschelde en de Eendracht. Bij deze metingen werd op een aantal hoogten boven de bodem het zandtransport vastgesteld, waarna door interpolatie over de waterkolom het totaal zandtransport werd berekend.

.In deze nota zullen de gemeten transporten samen met de voor de berekening met genoemde zandtransportformules benodigde parameters worden gepresenteerd. Uitgaande van de bij de berekening van de zandsluiting gebruikte waarden van enkele coëfficiënten in de formules zullen vervolgens voor metingen waarbij de diepte-gemiddelde stroomsnelheid groter was dan 1 ms^{-1} de zandtransporten worden berekend en vergeleken met de gemeten transporten. Tevens zullen berekeningsresultaten worden vergeleken, waarbij in plaats van een vaste coëfficiënt voor de hydraulische ruwheid de waarde van deze coëfficiënt, op grond van literatuurgegevens werd gevarieerd als functie van de stroomsnelheid. Tenslotte zullen enkele resultaten worden besproken van een gedetailleerde meting van de stroomsnelheids- en zandconcentratievertikaal in een ondiepe geul van de Westerschelde.

DE METINGEN

De meetdata en meetlokaties zijn aangegeven op Fig. 1A t/m F en tabel I. Alle metingen in de Westerschelde werden uitgevoerd omstreeks springtij en, met uitzondering van een meting op 860313 in het Zuidergat, tijdens de vloedfase; meestal werd met twee boten gemeten die in de stroom op enige afstand achter elkaar waren verankerd. Op 860206 (doodtij) en 860312 (springtij) werd tijdens hoogwaterkentering ter plaatse van de meetlokaties van de zandtransportmetingen in de Westerschelde een echogram opgenomen. Een aantal daarvan is gepresenteerd in Fig. 2A t/m D. Op 860821 en 861203 werden in het meetgebied Schaar van Valkenisse tijdens zandtransportmetingen regelmatig echogrammen opgenomen van hetzelfde traject. In fig. 3 zijn de echogrammen van 861203 gepresenteerd.

De metingen in de Eendracht werden uitgevoerd in een gebied waar ten gevolge van de sluiting van het Tholensche Gat de stroomsnelheid sterk was toegenomen. De stroomsnelheid en zandconcentratie werd opgaand gemeten met behulp van een Akoestische Zand Transport Meter (AZTM) op de meethoogte bodem +0.5 m, +1 m, +2 m, ... tot maximaal 1 m beneden het wateroppervlak. Bij de metingen van 860311, 860312, 860314, 860821 en 861203 werd voor het eerste meetpunt van een vertikaalmeting de AZTM-carrier op de bodem gezet (meetvolume op bodem +0.2 m). Per meetpunt werd gedurende 120 s met een inwinfrequentie van 2Hz de stroomsnelheid en zandconcentratie gemeten. Het zandtransport als produkt van gemiddelde concentratie en snelheid werd in transportvertikalen uitgezet. Het transport nabij de bodem werd lineair vanuit de onderste twee meetpunten geëxtrapoleerd. Voor de waarde van het transport aan het wateroppervlak werd de helft van de waarde van het transport in het bovenste meetpunt aangenomen. De keuze van deze extrapolatie is intuïtief. Het verloop van de transporten zal in werkelijkheid van deze extrapolatie zijn afgeweken. Dit kan met name nabij de bodem tot een fout in de bepaling van het totaal transport hebben geleid die bij metingen waarbij het AZTM-statief niet op de bodem werd gezet van enige betekenis kan zijn geweest. Hierop zal bij de analyse van de resultaten nader worden ingegaan.

Tijdens de metingen in de Westerschelde werden bodemonsters genomen met een Van Veenhapper. Van deze monsters werd een korrelgrootte analyse uitgevoerd m.b.v. een klopzeef met maaswijdten 420, 300, 250, 212, 180, 150, 125, 106, 75 en 53 μm .

Voor wat betreft het bodemmateriaal t.p.v. de meetlokaties in de Eendracht werd uitgegaan van gegevens van eerder uitgevoerd grondonderzoek (3).

Op 860821 werd naast de gebruikelijke vertikaalmetingen het gesuspendeerde zand bemonsterd via een aantal dunne buisjes die op een tiental meetpunten boven elkaar aan de voorzijde en met de opening in bovenstroomse richting op een AZTM-carrier waren aangebracht. De buisjes waren via dunne slangen (3 mm $\varnothing$ binnenwerks) verbonden met een serie verdringingspompjes waarmee het zand-watermengsel opgepompt werd. Het mengsel werd vervolgens afgefilterd via 50 μ m zeven, waarbij het water werd opgevangen in emmers met een 0.1 litermaat-verdeling. Op deze wijze werd 3.0 tot 3.6 l water afgefilterd per pompje en per meetperiode van 7 minuten (opzuigsnelheid 1 tot 1.2 ms⁻¹).

Op drie meethoogten in dit statief werd tevens de stroomsnelheid bepaald: ter plaatse van het AZTM-meetvolume, en daarboven en -onder met een Ott-schoep-stroommeter (C-31).

Om inzanding of scheefzakken van het statief te voorkomen werd het statief na elke meting gelicht en vlak voor het begin van een volgende meting opnieuw op de bodem gezet. Op 861203 werd een soortgelijke statiefmeting uitgevoerd, waarvan de gegevens echter nog niet zijn uitgewerkt. Gekonstateerd werd toen, dat het statief vrij diep in het sediment zakte. Op grond hiervan wordt aangenomen dat op 860821 het statief 0.08 m in het sediment zakte. Aldus zijn de volgende meethoogten gerekonstrueerd.

instrument	meethoogte boven de bodem (m)
Ott	0.075, 0.725
AZTM	0.275
Zuigbuis	0.01, 0.025, 0.035, 0.065, 0.075, 0.125, 0.155, 0.275, 0.325, 0.645

De statiefmetingen startten bij het begin van een vertikaalmeting; per meting bedroeg de meet- of bemonsteringsduur van de Ott, AZTM en zuigbuis resp. 10, 9 en 7 minuten.

DE MEETUITKOMSTEN

De uitkomsten van de totale over de vertikaal gemeten momentane suspensieve zandtransporten, zoals berekend volgens de in de voorgaande paragraaf aangegeven methode zijn vermeld in tabel II. Tevens zijn hierin aangegeven de waarden van de basisgegevens die voor de berekening van het zandtransport met een zandtransportformule nodig zijn, met uitzondering van een aanduiding voor de hydraulische ruwheid, aangezien deze onder omstandigheden van veranderlijke (getij) stromingen niet in het veld kan worden gemeten.

De uitkomsten van de statiefmeting van 860821 zijn vermeld in tabel III. Uitgaand van een logarithmische snelheidsverdeling in de vertikaal nabij de bodem zijn vanuit de drie stroomsnelheidsmeetpunten in het statief stroomsnelheden ter hoogte van de zuigbuis monsterpunten berekend en zijn vervolgens door vermenigvuldiging met ter plaatse gemeten concentraties lokale zandtransporten bepaald. Deze transporten zijn uitgezet tegen de hoogte boven de bodem in Fig. 4A-O. Tijdens de statiefmetingen van 860821 zijn op dezelfde plaats vertikaalmetingen uitgevoerd met behulp van een AZTM-metvis. De daarmee bepaalde stroomsnelheids- en zandconcentraties en zandtransportvertikalen zijn opgenomen in Fig. 5A-B.

Voor drie meetcycli van 860821 waarbij de diepte gemiddelde stroomsnelheid groter was dan 1 ms^{-1} zijn de in het statief en met de meetvis bepaalde concentraties uitgezet als functie van een dimensieloze hoogte boven de bodem in Fig. 6A-C.

CONFRONTATIE VAN MEETRESULTATEN MET BEREKENINGEN

Transportmetingen

Met de gegevens van tabel II zijn momentane zandtransporten voorspeld volgens de formules van Engelund & Hansen, Morra-Kalinske en Van Rijn zoals aangegeven in een appendix die aan deze nota is toegevoegd.

Een moeilijkheid bij het gebruik van sedimenttransportformules in een getijdegebied is de bepaling van de effectieve hydraulische ruwheid. Deze kan immers niet aan de hand van metingen in het veld worden bepaald. Door de steeds veranderende stroomsnelheid spelen traagheidseffekten een grote rol, zodat de ruwheid niet uit het langsverhang kan worden bepaald. Een ander effect is dat de meestal grote - bodemvormen steeds najlen in hun aanpassing op de stroomsnelheidsveranderingen, zodat deze ook geen betrouwbare indicatie van de ruwheid geven. Het gebruik bij de berekening voor de zandsluiting en in de Oosterschelde is om uit te gaan van $k_s = 0,02$ m.

Bij de konfrontatie van de bij snelheden groter dan 1 ms^{-1} gemeten transporten met de berekeningsresultaten waarbij van een vaste k_s -waarde van 0.02 m werd uitgegaan blijkt het volgende (zie Fig. 7A-F):

- A - de formules van Engelund & Hansen en Van Rijn vertonen beide een trend van toenemende overschatting van het gemeten transport bij hogere stroomsnelheden;
- B - de met de formule van Morra-Kalinske verkregen resultaten vertonen een relatief grote spreiding.

Ad. A Voor gegeven vaste waarde van de korreelparameters, waterdiepte, effectieve ruwheid en watertemperatuur kunnen de zandtransportformules worden uitgedrukt in de vorm

$$S_s = a \bar{u}^b$$

waarin S_s = suspensietransport, $\bar{u}$ = dieptegemiddelde stroomsnelheid, a , b = coëfficiënten, waarbij de waarde van de coëfficiënten vast (Engelund & Hansen) of variabel (Morra-Kalinske, Van Rijn) zijn.

Bij een waterdiepte van 5 m, een effectieve ruwheid $k_s = 0.02$ m, een watertemperatuur van 10°C en een korrelgrootte van het bodemmateriaal $D_{50} = 175 \cdot 10^{-6}$ kunnen bijvoorbeeld voor de stroomsnelheidsrange $0.75 - 2.0 \text{ ms}^{-1}$ de volgende gemiddelde waarde van de coëfficiënten a en b worden bepaald:

	a	b
Engelund & Hansen	0.36	5.00
Morra-Kalinske	2.28	3.75
Van Rijn	0.67	5.01

Bij empirisch onderzoek naar het zandtransport als functie van de stroomsnelheid in de Oosterschelde (4, 5) en de Westerschelde (6) bleken de volgende coëfficiënten:

Oosterschelde

	a	b
Hammen (eb + vloed)	0.229	4.0
Schaar van Roggenplaat (eb + vloed)	0.192	3.4
Roompot (eb + vloed)	0.133	3.1
Engelsche Vaarwater (vloed)	0.668	3.4

Westerschelde

Schaar van Waarde (vloed)	0.02	3.6
Zuidergat (vloed)	1.14	2.5

Op grond van deze feiten was reeds te verwachten dat bij toepassing van de formule van Engelund & Hansen en van Van Rijn een trend van overschatting van het zandtransport bij hoge snelheden zou optreden. Een verklaring voor deze discrepantie zou kunnen zijn dat de aanname van een onveranderlijke effectieve ruwheidswaarde niet strookt met de realiteit. Waarnemingen in een aantal Noord-Amerikaanse rivieren wijzen sterk in die richting; door Van Rijn (1) werd vastgesteld dat voor stroomsnelheden groter dan 1 ms^{-1} de bodemruwheid afneemt als functie van de stroomsnelheid (zie Fig. 8).

In het getijgebied impliceert een variabele ruwheid als functie van de stroomsnelheid een zeer snelle aanpassing van de beddingvormen aan het verloop van de getijstroom. Dit lijkt alleen aannemelijk bij hoge stroomsnelheden en kleine beddingvormen. Een aanwijzing dat bij hoge snelheden een min of meer vlakke bodem kan ontstaan wordt gevormd door de echogrammen van de meetlokatie Schaar van Valkenisse: doodtij 860206: ribbels met een hoogte van ca. 0.2 m (Fig 2B); springtij 860312: vrijwel vlakke bodem (Fig. 2C). Deze echogrammen werden opgenomen bij hoogwater. OP 860821 en 861203 werden tijdens de zandtransportmetingen in de Schaar van Valkenisse enkele trajekten langs de meetboot frequent gelood. De verkregen echogrammen (Fig. 3) geven geen bevestiging van de eerder gekonstateerde uitvlakking. Er kan zelfs geen enkele significante verandering in de ribbelmorfologie worden gekonstateerd. Het lijkt er dus op dat veranderingen in de ribbelhoogte pas op gaan treden bij zeer hoge stroomsnelheden boven 1.5 ms^{-1} ; omstandigheden die tijdens de opnamen van 860821 en 861203 niet voorkwamen. Desondanks zal de hydraulische ruwheid bij snelheden lager dan 1.5 ms^{-1} niet konstant zijn. Verbanden die door de verschillende onderzoeken gevonden zijn tussen de ribbelmorfologie en de hydraulische ruwheid (7) gelden immers voor omstandigheden waarbij stroom en beddingvormen met elkaar in evenwicht zijn en daarvan is bij zandduinen in de getijsituatie zeker geen sprake.

Voor de berekening van het sedimenttransport met k_s als variabele grootheid is het volgende verband tussen de dieptegemiddelde stroomsnelheid u en k_s aangenomen (zie ook Fig. 8).

$$1 < \bar{u} < 2 \text{ m/s, dan } k_s = 10e^{-4.6\bar{u}} \text{ m}$$

$$\bar{u} \geq 2 \text{ m/s, dan } k_s = 0.001 \text{ m}$$

Dit verband vormt een "kompromis" tussen de metingen in de Noord-Amerikaanse rivieren (1) en de bij het onderzoek in de Grote Stroomgoot aangenomen waarden (2). Het verband tussen $\bar{u}$ en k_s voor waarden $\bar{u} < 1$ is niet gedefinieerd. In dit gebied is het verloop van k_s onder evenwichtsomstandigheden niet eenduidig.

Voor het snelheidsbereik $\bar{u} \geq 1 \text{ ms}^{-1}$ en genoemd verband tussen k_s en $\bar{u}$ zijn de transporten opnieuw berekend en vergeleken met de opgetreden waarden (Fig. 9A-F). Gekonkludeerd kan worden dat in vergelijking met de berekeningen met een vaste waarde voor k_s de trend van overschatting bij hogere stroomsnelheden van het gemeten zandtransport met de formule van Van Rijn gedeeltelijk en met die van Engelund & Hansen geheel verdwijnt, hetgeen een aanzienlijke verbetering in de voorspelling betekent. Wel is het zo dat nu met laatstgenoemde formule het gemeten zandtransport in de Eendracht voor het gehele snelheidsbereik wordt onderschat. Voor wat betreft de uitkomsten met de formule van Morra-Kalinske is veel minder sprake van een verbetering.

Enkele resultaten van de statiefmeting d.d. 860821

Uit waarnemingen van duikers tijdens de tweede statiefmeting op 861203 is gebleken dat de verzwaarde AZTM-carrier die als statief werd gebruikt dieper in de bodem wegzakte dan was verwacht. Het is niet precies bekend hoe diep het statief tijdens de meting van 860821 in de bodem zakte.

Aangenomen is een vaste waarde van de inzakking die op dit moment het meest waarschijnlijk wordt geacht. Door deze onzekerheid moet aan de resultaten van deze statiefmetingen niet meer dan een indicatieve waarde worden gehecht.

In Fig. 4 is het zandtransport nabij de bodem uitgezet zoals dat uit de statiefmetingen in de Schaar van Valkenisse (tabel III) kan worden afgeleid. Tevens is aangegeven het niveau a boven de bodem waarop volgens de sedimenttransportformule van Van Rijn de referentieconcentratie c_a is gedefinieerd. Voor grote waterdiepte ligt dit nivo op éénhonderdste van de waterdiepte boven de bodem ($a = 0.01 h$). In de formule is het sedimenttransport boven dit nivo gedefinieerd als suspensief zandtransport, daaronder als bodemtransport. In Fig. 4 zijn tevens enkele waarnemingen opgenomen van de vertikaalmetingen die naast het statief werden uitgevoerd. De volledige met de meetvis bepaalde transportvertikalen zijn weergegeven in Fig. 5. In het algemeen stemmen de statiefmetingen goed overeen met de gegevens die met de meetvis zijn verkregen.

Bij sterk toenemende stroom (vertikaal 9, 10, 11) is de verticale transportgradient bij de waarnemingen van de meetvis echter veel minder groot dan uit de statiefmetingen kan worden afgeleid. Bij sterk afnemende stroomsnelheid (vertikaal 14, 15) geldt juist het omgekeerde. Deze afwijkingen vinden hun verklaring in het feit dat de statiefmetingen simultaan zijn uitgevoerd, terwijl bij de waarnemingen van de meetvis eerst het onderste meetpunt en daarna achtereenvolgens met een tijdsverschil van steeds 3 minuten hoger gelegen meetpunten. Bij het opgaand meten worden de hogere stroomsnelheden nabij het wateroppervlak pas laat in de meetcyclus gemeten, terwijl de hogere concentraties aan de bodem juist in het begin van de meetcyclus worden geregistreerd. Dit leidt ertoe, dat bij toenemend getijstroom de uit de metingen bepaalde vertikaal gemiddelde stroomsnelheid hoger uitkomt en het transport lager dan wanneer volledig simultaan zou zijn gemeten. Voor afnemende getijstroom geldt het omgekeerde. Genoemde effecten worden nog verder versterkt door de naijling van het momentaan zandtransport op veranderingen in de stroomsnelheid. Afhankelijk van de snelheid van toename of afname van de getijstroom zal het quotient van berekend en "gemeten" zandtransport door deze effecten resp. groter dan wel kleiner worden. Hiermee kan een belangrijk deel van de spreiding in de uitkomsten van de confrontatie van berekend en gemeten zandtransporten worden verklaard; in de meeste gevallen blijken de grootste overschattingen van het gemeten zandtransport immers te relateren aan omstandigheden van toenemende stroomsnelheid (zie Fig. 7 en 9). In de Eendracht is het verloop van de getijstroom, anders dan in de Westerschelde, min of meer blokvormig; vlak na de stroomkentering neemt de stroom snel toe tot een maximum wordt bereikt, daarna blijft de stroomsnelheid geruime tijd vrijwel konstant, waarna vlak voor de volgende kentering weer een snelle afname volgt. Tijdens het stroommaximum is er dus nauwelijks sprake van versnelling of vertraging van de stroom. Hierdoor is de spreiding in de quotienten van berekend en gemeten zandtransporten in de Eendracht bij hogere stroomsnelheden dan ook relatief klein (zie Fig. 7D-F en 9D-F).

In de formule van Van Rijn wordt de referentieconcentratie C_a berekend volgens:

$$C_a = 0.015 \frac{D50}{a} T^{1.5} D^{*-0.3} \quad (2)$$

(voor een verklaring van de symbolen, zie appendix).

Deze vergelijking werd gecalibreerd aan de hand van een beperkt aantal stroomgoot en veld waarnemingen (8). Een vergelijking van vrgl. 2 met de proeven van Van Rijn in de Grote Stroomgoot (2) is te vinden in Fig. 10. Een betere overeenkomst met deze metingen wordt gevonden bij:

$$C_a = 0.001 \frac{D50}{a} T^{1.5} D^{*-0.3} \quad (3)$$

In Fig. 10 zijn tevens waarnemingen aangegeven zoals die volgen uit interpolatie van resultaten van de statiefmetingen van 860821 in de Schaar van Valkenisse. De waarde van de schuifspanningssnelheid betrokken op de korrels is berekend volgens:

$$u_*' = \bar{u}_g^{0.5} (18 \log 4h/D90)^{-1} \quad (4)$$

Vrgl. 2 blijkt het best met de waarneming overeen te stemmen. Een nog betere overeenstemming daarmee zou worden bereikt als naijlingseffekten in rekening zouden worden gebracht; de waarnemingen bij toenemende stroom liggen immers beneden de evenwichtsconcentratie volgens vrgl. 2 (onderverzadigd), terwijl de waarnemingen bij afnemende stroom daarboven liggen (oververzadigd).

In Fig. 6 worden de in het statief op 860821 gemeten zandconcentraties in de Schaar van Valkenisse vergeleken met de concentraties in de bodemtransportlaag C_a en de concentratieverdeling in de vertikaal volgens het door Van Rijn (8) voorgestelde stelsel van vergelijkingen (zie appendix).

In het onderste gedeelte van de laag met suspensief zandtransport blijkt de zandconcentratiegradient veel minder steil te verlopen dan voorspeld. Dit duidt op een veel intensere of effectievere menging. De verklaring hiervoor zou wellicht gelegen zijn in een effectieve menging door de vortex beweging van het water achter de aanwezige grote beddingvormen. Van grote betekenis is verder de zeer sterke toename van de zandconcentratie in de bodemtransportlaag die bij stroomsnelheden boven 1 ms^{-1} kan worden gekonstateerd. Uitgaand van een logaritmische vertikale snelheidsverdeling nabij de bodem wijzen de metingen op een lineair vertikale transportgradient in de onderste 3 cm van de bodemtransportlaag (zie ook Fig. 4). De hiermee bepaalde bodemtransporten blijken een faktor 2 à 3 groter te zijn dan berekend volgens Van Rijn (zie appendix):

	meting 860821		
meting nr.	V11	V12	V13
gemeten bodemtransport	0.233	0.627	$0.622 \text{ kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$
voorspeld bodemtransport volgens Van Rijn	0.137	0.217	$0.180 \text{ kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$
voorspeld totaal transport volgens Van Rijn	1.213	2.065	$1.678 \text{ kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$

Bij verrekening van het aldus gemeten bodemtransport met het volgens de formule van Van Rijn voorspelde totaal zandtransport neemt dit bij meting V11 met 8.9% toe en bij meting V12 en V13 met resp. 22.2 en 29.5%. Aangezien deze bevindingen echter gebaseerd zijn op slechts drie metingen waarvan de ligging t.o.v. de bodem niet nauwkeurig is vastgesteld hebben zij slechts indicatieve waarde. Voor wat betreft het effect van een twee tot driemaal zo groot bodemtransport bij hoge stroomsnelheden kan overigens worden opgemerkt dat hierdoor de overschatting van het sedimenttransport die bij de confrontatie van de formule van Van Rijn met de metingen in de Westerschelde en de Eendracht steeds aanwezig bleef (Fig. 7C, 7F, 9C, 9F) zal verminderen, zodat de voorspelde waarde er niet onder lijdt.

Bij de proeven in de Grote Stroomgoot van het W.L. bevond het dichtst bij de bodem gelegen monsterpunt zich juist in de overgang naar, of, bij proeven met zeer hoge snelheden, boven de zone van 0 - 0.03 m boven de bodem waarin de Westerschelde metingen een excessieve toename van de zandconcentratie indiceren. Een vergelijking met resultaten van deze gootproeven is hierdoor niet mogelijk.

KONKLUSIES

De konfrontatie van de in dit onderzoek geanalyseerde stroomsnelheids- en zandconcentratie metingen in de Westerschelde en de Eendracht met berekening- en leidt tot de volgende konklusies:

1. Bij aanname van een (gebruikelijke) vaste waarde van de effectieve bodemruwheid (k_g -waarde) is een duidelijke trend van overschatting van het gemeten zandtransport bij hogere stroomsnelheden aanwezig als dit transport wordt voorspeld met de formules van Engelund & Hansen en van Van Rijn. Een veel betere overeenstemming met de gemeten transporten wordt verkregen als uit wordt gegaan van een afnemende k_g -waarde bij hogere stroomsnelheden (van $k_g = 0.1$ m bij een gemiddelde stroomsnelheid $\bar{u} = 1 \text{ ms}^{-1}$ tot de effectieve bodemruwheid van een vlakke bodem bij stroomsnelheden boven 2 ms^{-1}). De voorspelde waarde van deze beide formules is dan veel groter dan die van de formule van Morra-Kalinske, waarvan de konfrontatie met de metingen een veel grotere spreiding oplevert.
2. Voor getijomstandigheden is er geen relatie tussen de k_g -waarde die het best in een transportformule kan worden aangenomen en de effectieve ruwheid zoals die door de zandduinen wordt gesuggereerd.
3. De experimenten in de Grote Stroomgoot (2) indiceerden een ander verband tussen de schuifspanningssnelheid betrokken op de korrels (u'_x) en de referentieconcentratie (C_a) dan uit eerder onderzoek (7) naar voren kwam. De bij statiefmetingen in de Westerschelde bepaalde referentieconcentraties passen het best bij de oorspronkelijke vergelijking (vgl. 2).
4. De verticale gradient van het suspensief zandtransport in het onderste deel van de waterkolom (tot op ééntiende van de waterdiepte van de bodem) verloopt minder sterk dan uit de berekening volgens Rouse volgt. (Zie appendix vrgl. 6a). Wellicht is dit een gevolg van een effectieve menging in de vortex beweging van het water achter de zandduinen.

5. Enkele metingen in de Westerschelde van de zandconcentratie nabij de bodem suggereren bij diepte - gemiddelde stroomsnelheid boven 1 m/s de aanwezigheid van een ca. 0.03 m dikke grenslaag boven de bodem waarin de zandconcentratie excessief toeneemt. Het zandtransport in de bodemtransportlaag zou hierdoor een faktor 2 tot 3 groter zijn dan berekend volgens Van Rijn (zie appendix, vrgl. 4).

AANBEVELINGEN

1. Bij de voorspelling van het zandtransport onder omstandigheden van een fijnzandige bodem en stroomsnelheden ($\bar{u}$) tussen 1 en 2 m/s is het gebruik van de totaal transport formule van Van Rijn of de formule van Engelund & Hansen te verkiezen boven de formule van Morra-Kalinske. In plaats van een vaste waarde van de effectieve ruwheid (k_s) kan bij de voorspelling van een afnemende waarde bij toenemende stroomsnelheid (van $k_s=0.1$ m bij $\bar{u}=1\text{ms}^{-1}$ naar $k_s=0.001$ m bij $\bar{u}=2\text{ms}^{-1}$).
2. Resultaten van enkele metingen van de sedimentconcentratie nabij de bodem wijken sterk af van berekende waarde, met name in de onderste 0.03 m. Het totaal sedimenttransport over de gehele waterkolom zou hierdoor bij hogere stroomsnelheden enkele tientallen procenten hoger kunnen zijn dan uit metingen waarbij het transport nabij de bodem door lineaire extrapolatie vanuit hoger gelegen meetpunten werd afgeleid. Voor een betere bepaling van het sedimenttransport is daarom verder onderzoek van het verloop van de sedimentconcentratie dicht bij de bodem aan te bevelen.

LITERATUUR

1. Van Rijn, L.C. 1985 Vergelijking zandtransportformules van Morra-Kalinske, Engelund & Hansen, Ackers & White en Van Rijn. Rapport R2142 Waterloopkundig Laboratorium Delft.
2. Van Rijn, L.C. 1985 Sand transport at high velocities. Report M2177 Delft Hydraulic Laboratory.
3. Granneman, C.C.O.N., J.J.P. Lodder, J.H. van den Berg & G.J.H. Vergeer 1986 Morfologie Eendracht na sluiting Tholensche Gat. Nota Z.BC86-20.003 Rijkswaterstaat.
4. Van Wijngaarden, N.J. 1977 Stormvloedkering Oosterschelde berekening aanzanding cunetten; globale berekening. Rapport E1267 deel I Waterloopkundig Laboratorium Delft.
5. Van den Berg, J.H. 1985 Meting en berekening van bodemtransport in een megaribbelveld ten noorden van de Galgeplaat, Oosterschelde. Geomor nota 85.01 Rijkswaterstaat.
6. Van Rijn, L.C. 1985 Zandtransportmodel Westerschelde; stochastisch onderzoek zandtransportformule. Rapport S582 Waterloopkundig Laboratorium Delft.
7. Van Rijn, L.C. 1984 Sediment transport, Part III: bed forms and alluvial roughness. Journal of Hydraulic Engineering 110, 1733 - 1754.
8. Van Rijn, L.C. 1984 Sediment transport, Part II: suspended load transport. Journal of Hydraulic Engineering 110, 1613 - 1641.

TABEL 1 OVERZICHT METINGEN

DATUM	LOKATIE	INSTRUMENT	TYPE METING	GETIJ	
860312	Zuidergat	echolood	raailoding	springtij	HW kentering
860206	Schaar van Valkenisse	echolood	raailoding	springtij	HW kentering
860312	Schaar van Valkenisse	echolood	raailoding	springtij	HW kentering
860312	Zimmermangeul	echolood	raailoding	springtij	HW kentering
861203	Schaar van Valkenisse	echolood	raailoding	springtij	HW kentering
8601019	Schaar van Valkenisse	AZTM (2x)	vertikaal	springtij	vloed
860127	Schaar van Valkenisse	AZTM (2x)	vertikaal	springtij	vloed
860312	Schaar van Valkenisse	AZTM (2x)	vertikaal	springtij	vloed
860821	Schaar van Valkenisse	AZTM (2x)	vertikaal	springtij	vloed
861203	Schaar van Valkenisse	AZTM (2x)	vertikaal	springtij	vloed
860314	Zuidergat	AZTM (2x)	vertikaal	springtij	eb
860312	Zimmermangeul	AZTM (2x)	vertikaal	springtij	vloed
861101	Eendracht	AZTM (3x)	vertikaal	gemiddeld tij	eb + vloed
861102	Eendracht	AZTM (3x)	vertikaal	springtij	eb + vloed
861031	Eendracht	AZTM (2x)	vertikaal	gemiddeld tij	eb + vloed
861025	Eendracht	AZTM (2x)	vertikaal	gemiddeld tij	eb
860821/ 861203	Schaar van Valkenisse	AZTM (1x) zuigbuis (10x)	detail ver- tikaal me- ting nabij de bodem	springtij	vloed

lokatie	meet-punt	datum	korrelgrootte percentielen				tempe-ratuur	water-diepte	stroom-snelheid	Zand-transport
			D ₁₅ (μ m)	D ₅₀ (μ m)	D ₈₅ (μ m)	D ₉₀ (μ m)				
Wijkersluis							(°C)	(m)	(m/s)	(kg m ⁻¹ s ⁻¹)
Schaar van Valkenisse (vloed)	1	860109	170	196	234	250	5	1.0 ⁰	0.53	0.014
								1.0 ⁰	0.57	0.014
								1.9	0.67	0.021
								2.1	0.76	0.040 ⁰
								2.3	0.77	0.060
								2.3	0.87	0.090
								2.6	1.06	0.132
								2.7	1.10	0.205
								3.1	1.22	0.407
								3.7	1.23	0.829
								3.0 ⁰	1.31	1.041
								4.1	1.23	1.002
								4.2	1.13	1.012
								4.4	1.04	0.796
Schaar van Valkenisse (vloed)	2	860109	170	196	234	250	5	3.6	0.56	0.022
								3.7	0.65	0.044
								3.8	0.84	0.166
								4.2	1.01	0.340
								4.5	1.09	0.609
								4.8	1.15	0.725
								5.1	1.06	0.705
								5.3	0.90	0.503
5.5	0.66	0.102								

TABEL II	BASIS GEGEVENS ZANDTRANSPORTMETINGEN	BLAD 1
----------	--------------------------------------	--------

lokatie	meet-punt	datum	korrelgrootte percentielen				tempe-ratuur	water-diepte	stroom-snelheid	zand-transport
			D ₁₅ (µm)	D ₅₀ (µm)	D ₈₅ (µm)	D ₉₀ (µm)				
Westerschelde							(°C)	(m)	(m/s)	(kg m ⁻¹ s ⁻¹)
Ichaar van Valkenisse (vloed)	3	060127	1071	230	264	263	5	2.0	0.55	0.000
								2.1	0.61	0.015
								2.2	0.66	0.033
								2.4	0.68	0.060
								2.4	0.71	0.086
								2.5	0.77	0.130
								2.7	0.83	0.203
								2.7	0.87	0.243
								3.0	1.06	0.340
								3.1	1.09	0.500
								3.4	1.23	0.666
								4.2	1.57	1.500
								4.2	1.33	0.065
								4.3	1.03	0.357
Ichaar van Valkenisse (vloed)	4	060127	146	195	225	250	5	3.5	1.20	0.430
								3.6	1.40	0.547
								4.0	1.65	0.920
								4.5	1.82	1.751
								4.8	1.74	1.563
								5.0	1.40	1.145
								5.3	1.11	0.562
								5.4	0.70	0.109
Ichaar van Valkenisse	5	060312	143	103	210	230	5	1.7	0.60	0.022
								1.9	0.72	0.055
TABEL II			BASIS GEGEVENS ZANDTRANSPORTMETINGEN							BLAD 2

lokatie	meet-punt	datum	korrelgrootte percentielen				tempe-ratuur	water-diepte	stroom-snelheid	zand-transport
			D ₁₅ (μ m)	D ₅₀ (μ m)	D ₈₅ (μ m)	D ₉₀ (μ m)				
Westerschelde							(°C)	(m)	(m/s)	(kg m ⁻¹ s ⁻¹)
Ichoat van Valkenisse (vloed)	5	060312	143	103	210	220	5	2.0	0.76	0.040
								2.0	0.73	0.034
								2.2	0.84	0.141
								2.5	0.53	0.265
								2.7	1.02	0.732
								2.9	1.13	0.563
								3.1	1.50	0.903
								3.5	2.04	2.776
								3.8	2.00	4.522
								4.2	1.87	4.532
								4.6	1.37	3.000
								4.8	1.15	1.176
Ichoat van Valkenisse (vloed)	6	060312	151	103	215	223	5	5.0	0.65	0.365
								3.3	0.67	0.007
								3.5	0.74	0.033
								3.8	0.84	0.106
								4.1	1.03	0.233
								4.5	1.37	0.621
								5.0	1.83	1.415
								5.6	2.06	3.371
Ichoat van Valkenisse	7	060321	157	108	224	235	20	6.1	1.73	3.465
								6.4	0.71	0.461
								3.2	0.63	0.163
								3.5	0.60	0.133

lokatie	meet-punt	datum	korrelgrootte percentielen				tempe-ratuur	water-diepte	stroom-snelheid	zand-transport
			D ₁₅ (μm)	D ₅₀ (μm)	D ₈₅ (μm)	D ₉₀ (μm)				
Westerschelde							(°C)	(m)	(m/s)	(kg m ⁻¹ s ⁻¹)
Ichaar van Valkenise (vloed)	7	060021	157	100	224	235	20	3.6 3.0 4.0 4.1 4.3 4.4 4.6 4.9 5.3 5.7 6.0 6.5 6.7	0.62 0.62 0.56 0.60 0.63 0.67 0.72 0.90 1.23 1.37 1.32 0.00 0.49	0.112 0.065 0.072 0.053 0.052 0.075 0.212 0.593 1.463 2.303 2.376 0.936 0.161
Ichaar van Valkenise (vloed)	8	061203	101	230	264	269	0.3	3.2 3.0 4.0 4.2 4.5 4.7 5.1 5.5 6.3 6.0	1.22 1.02 1.00 1.03 1.04 1.09 1.10 1.31 1.40 0.01	1.222 0.505 0.556 0.420 0.501 0.630 0.617 1.403 2.955 1.409
Zuidergat	9	060314	127	150	105	196	5	9.0	0.66	0.010

lokatie	meet-punt	datum	korrelgrootte percentielen				tempe-ratuur	water-diepte	stroom-snelheid	zand-transport
			D ₁₅ (μm)	D ₅₀ (μm)	D ₈₅ (μm)	D ₉₀ (μm)				
Westerschelde							(°C)	(m)	(m/s)	(kg m ⁻¹ s ⁻¹)
Zuidenjat (eb.)	9	060314	127	150 ⁰	10 ⁰ S	196	5	5.0	0.70	0.010 ⁰
								0.0 ⁰	0.0 ⁰ 7	0.176
								0.0 ⁰ 7	0.0 ⁰ 2	0.331
								0.0 ⁰ 3	0.0 ⁰ 7	0.606
								0.0 ⁰ 1	0.0 ⁰ 4	0.640 ⁰
								0.0 ⁰ 2	0.94	0.566
								7.0 ⁰	1.25	1.40 ⁰ 2
								7.0 ⁰	1.21	1.91 ⁰ 3
								7.5	1.14	1.00 ⁰ 3
								6.5	1.02	1.500 ⁰
								6.1	0.94	0.76 ⁰ 3
								5.9	1.00	1.074
								5.0 ⁰	0.61	1.070 ⁰
								5.3	0.0 ⁰ 3	0.000
								5.2	0.0 ⁰ 0	0.442
Zuidenjat (eb.)	10	060314	127	150 ⁰	10 ⁰ S	196	5	0.0 ⁰ 6	0.72	0.017
								0.0 ⁰ 7	0.79	0.035
								0.0 ⁰ 4	0.96	0.260
								0.0 ⁰ 1	0.94	0.421
								7.9	1.04	0.703
								7.6	0.95	0.097
								7.4	0.93	0.050 ⁰
								7.2	1.26	0.950 ⁰
								6.9	1.30	1.10 ⁰ 0
TABEL II BASIS GEGEVENS ZANDTRANSPORTMETINGEN									BLAD 5	

lokatie	meet- punt	datum	korrelgrootte percentielen				tempe- ratuur	water- diepte	stroom- snelheid	zand- transport
			D ₁₅ (μ m)	D ₅₀ (μ m)	D ₈₅ (μ m)	D ₉₀ (μ m)				
Westerschelde							(°C)	(m)	(m/s)	(kg m ⁻¹ s ⁻¹)
Zimmerman- jeul (vloed)	11	060312	175	244	303	320	5	5.2 5.7 5.7 6.3 6.4	1.11 1.35 1.29 1.63 0.95	0.775 1.400 ^p 2.321 3.060 ^p 1.630 ^p
Zimmerman- jeul (vloed)	12	060312	175	244	303	320	5	2.0 ^p 3.1 3.2 3.1 3.1 3.2 3.4 3.5 3.7 3.0 ^p 4.0 4.2 4.7 5.1 5.5 5.6 6.3 6.7 6.7	0.0 ^p 4 0.70 ^p 0.70 ^p 0.75 0.72 0.72 0.71 0.67 0.63 0.66 0.70 0.73 0.0 ^p 7 1.05 1.25 1.37 1.40 ^p 1.19 0.62	0.342 0.230 0.147 0.00 ^p 7 0.065 0.045 0.041 0.032 0.041 0.030 0.040 0.030 ^p 0.103 0.423 1.010 ^p 1.610 ^p 2.20 ^p 7 2.131 0.30 ^p 2

lokatie	meet-punt	datum	korrelgrootte percentielen				tempe-ratuur	water-diepte	stroom-snelheid	zand-transport
			D ₁₅ (μ m)	D ₅₀ (μ m)	D ₈₅ (μ m)	D ₉₀ (μ m)				
Oosterschelde							(°C)	(m)	(m/s)	(kg m ⁻¹ s ⁻¹)
Eendracht (eb)	1	06/11/01	100	100	260	270	10	6.2 5.5 5.0 5.3	1.01 1.01 1.01 1.55	4.396 4.362 4.650 2.487
Eendracht (eb)	1	06/11/02	100	100	260	270	10	7.0 6.0 6.4 6.1 6.2	1.32 1.70 1.76 1.54 1.27	1.420 4.515 5.306 2.745 1.402
Eendracht (eb)	2	06/11/01	100	100	260	270	10	6.1 5.6 7.5 7.7 6.5	0.75 1.00 1.25 1.00 0.94	0.372 0.941 2.070 1.071 1.112
Eendracht (eb)	2	06/11/02	100	100	260	270	10	0.2 7.5 0.2 0.1 0.1 7.0	1.25 1.30 1.36 1.17 1.00 0.70	1.501 2.741 4.013 2.616 1.200 0.404
Eendracht (eb)	3	06/11/01	100	100	260	270	10	0.0 7.0 6.9 7.0	0.04 1.02 1.05 0.66	1.072 1.334 1.355 0.546

lokatie	meet-punt	datum	korrelgrootte percentielen				tempe-ratuur (°C)	water-diepte (m)	stroom-snelheid (m/s)	zand-transport (kg m ⁻¹ s ⁻¹)
			D ₁₅ (µm)	D ₅₀ (µm)	D ₈₅ (µm)	D ₉₀ (µm)				
Dorkersluis										
Eendracht (eb)	3	06/11/02	100	100	260	270	10	7.7 0.5 0.0 7.6 5.0 7.2	1.09 1.49 1.22 1.06 1.01 0.62	1.176 6.520 2.504 1.009 0.621 0.173
Eendracht (vloed)	4	06/10/31	100	100	260	270	10	6.7 6.9 7.0 7.3 7.5 7.4	0.09 1.00 1.31 1.39 1.41 1.35	0.590 1.559 3.255 3.416 3.135 2.412
Eendracht (vloed)	4	06/11/01	100	100	260	270	10	6.9 6.7 6.9 7.1 7.3 7.4	1.12 1.43 1.50 1.54 1.41 1.30	1.500 4.020 4.560 5.353 4.614 2.049
Eendracht (vloed)	4	06/11/02	100	100	260	270	10	6.9 7.1 7.3 7.6 7.0	0.96 1.30 1.31 1.45 1.29	0.014 2.173 2.424 1.710 1.599
Eendracht	5	06/10/31	100	100	260	270	10	7.4	0.72	0.059

lokatie	meet- punt	datum	korrelgrootte percentielen				tempe- ratuur	water- diepte	stroom- snelheid	zand- transport
			D ₁₅ (μm)	D ₅₀ (μm)	D ₈₅ (μm)	D ₉₀ (μm)				
Dossenschelde										
Eendracht (vloed)	5	061031	100	100	260	270	10	7.6	0.92	0.342
								7.6	1.00	0.646
								0.0	1.00	0.720
								0.1	1.01	0.003
								0.1	1.02	1.037
Eendracht (vloed)	5	061101	100	100	260	270	10	7.0	0.05	0.207
								7.0	1.13	0.742
								7.3	1.04	0.730
								7.5	0.90	1.073
								7.7	1.00	1.540
								7.0	1.16	1.677
								0.1	1.07	1.320
Eendracht (vloed)	5	061102	100	100	260	270	10	6.6	0.72	0.113
								7.1	0.94	0.390
								6.6	0.98	0.554
								7.0	1.00	0.905
								9.1	1.04	1.330
Eendracht (eb)	6	061025	100	100	260	270	10	7.1	0.96	0.135
								7.0	1.27	0.931
								7.0	1.45	2.135
								6.0	1.60	3.033
								6.0	1.71	4.651
								6.0	1.75	5.062
								6.6	1.02	5.577

lokatie	meet-punt	datum	korrelgrootte percentielen				tempe-ratuur	water-diepte	stroom-snelheid	zand-transport
			D ₁₅ (μm)	D ₅₀ (μm)	D ₈₅ (μm)	D ₉₀ (μm)				
Oosterschelde							(°C)	(m)	(m/s)	(kg m ⁻¹ s ⁻¹)
Eendracht (eb)	6	06/10/25	100	100	260	270	10	6.3	1.06	5.046
								6.3	1.07	6.401
								6.3	1.00	6.665
								6.4	1.70	6.541
								6.3	1.76	6.250
								6.3	1.71	6.029

RESULTATEN METINGEN IN BODEMSTATIEF. SCHAAR V. VALKENISSE, 860821

NUMMER METING	START TIJD (MET.)	STROOMSNIELHEDEN		ZAND CONCENTRATIES	
		geschatte hoogte boven bodem (m)	gemiddelde stroomsnelheid (m/s)	geschatte hoogte boven bodem (m)	gemiddelde concentratie (mg/l)
V ₁	12.30			0.01	31297
				0.025	3642
				0.035	1994
				0.065	851
		0.075	0.30	0.075	479
				0.125	317
		0.275	0.40	0.155	317
				0.275	256
		0.725	0.54	0.325	177
				0.645	175
V ₂	12.45			0.01	1701
				0.025	949
				0.035	600
				0.065	369
		0.075	0.39	0.075	393
				0.125	291
		0.275	0.49	0.155	264
				0.275	230
		0.725	0.54	0.325	214
				0.645	123
V ₃	13.01			0.01	377
				0.025	329
				0.035	324
				0.065	214
		0.075	0.33	0.075	197
				0.125	190
		0.275	0.42	0.155	174
				0.275	133
		0.725	0.46	0.325	103
				0.645	82

TABEL III BLAD I

RESULTATEN METINGEN IN BODEMSTATIEF. JAAR V. VALKENIJSE. 860821

NUMMER METING	TIJD (MET.)	STROOMSNELHEDEN		ZAND CONCENTRATIES	
		geschatte hoogte boven bodem (m)	gemiddelde stroomsnelheid (m/s)	geschatte hoogte boven bodem (m)	gemiddelde concentratie (mg/l)
V4	13.15	0.075	0.30	0.01	351
				0.025	314
				0.035	241
		0.275	0.35	0.065	187
				0.075	174
				0.125	155
		0.725	0.44	0.155	137
				0.275	125
				0.325	118
V5	13.30	0.075	0.27	0.065	83
				0.075	03
				0.125	
		0.275	0.36	0.155	
				0.275	
				0.325	
		0.725	0.39	0.645	
V6	13.45	0.075	0.20	0.01	170
				0.025	149
				0.035	127
		0.275	0.37	0.065	117
				0.075	106
				0.125	89
		0.725	0.43	0.155	61
				0.275	75
				0.325	76
				0.645	47

RESULTATEN METINGEN IN BODEMSTATIEF, SCHAAR V. VALKENISSE, 860821

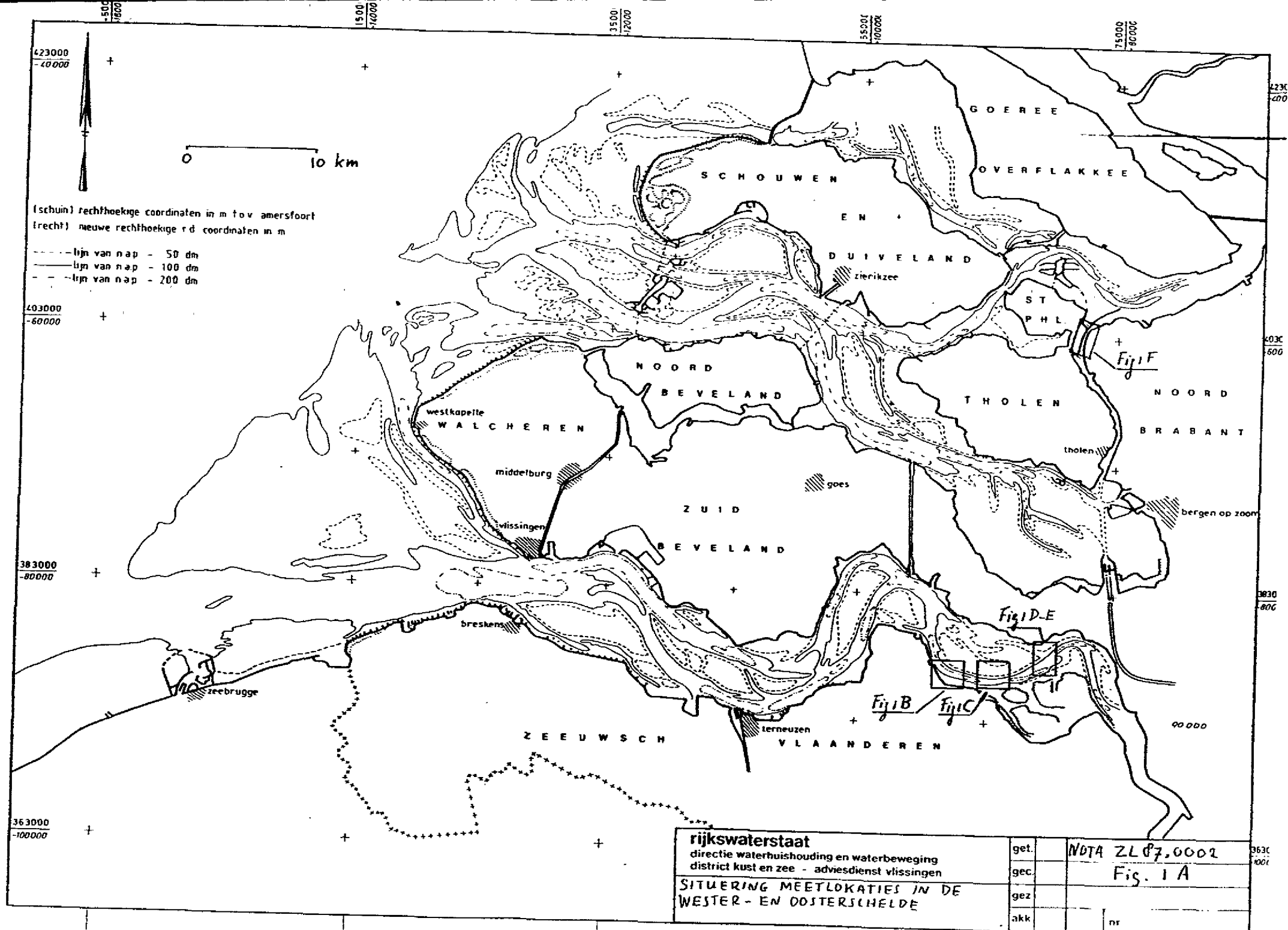
NUMMER METING	TIJD (MET.)	STROOMSNELHEDEN		ZAND CONCENTRATIES	
		geschatte hoogte boven bodem (m)	gemiddelde stroomsnelheid (m/s)	geschatte hoogte boven bodem (m)	gemiddelde concentratie (mg/l)
V ₇	14.00			0.01	150
				0.025	134
				0.035	118
				0.065	103
		0.075	0.27	0.075	97
				0.125	88
				0.155	86
		0.275	0.35	0.275	80
				0.325	70
		0.725	0.40	0.645	43
V ₈	14.15			0.01	214
				0.025	183
				0.035	164
				0.065	148
		0.075	0.30	0.075	136
				0.125	117
				0.155	114
		0.275	0.40	0.275	94
				0.325	83
		0.725	0.44	0.645	59
V ₉	14.30			0.01	368
				0.025	323
				0.035	283
				0.065	247
		0.075	0.37	0.075	233
				0.125	210
				0.155	209
		0.275	0.49	0.275	171
				0.325	169
		0.725	0.56	0.645	100

RESULTATEN METINGEN IN BODEMSTATIEF. SCHAAR V. VALKENIJSE. P60821

NUMMER METING	TIJD (M.E.T.)	STROOMSNELHEDEN		ZAND CONCENTRATIES	
		geschatte hoogte boven bodem (m)	gemiddelde stroomsnelheid (m/s)	geschatte hoogte boven bodem (m)	gemiddelde concentratie (mg/l)
V ₁₀	14.45			0.01	623
				0.025	568
				0.035	571
				0.065	458
		0.075	0.46	0.075	400
				0.125	377
		0.275	0.54	0.155	358
				0.275	244
		0.725	0.66	0.325	323
				0.645	216
V ₁₁	15.00			0.01	37208
				0.025	15992
				0.035	1820
				0.065	1386
		0.075	0.51	0.075	1188
				0.125	1170
		0.275	0.75	0.155	545
				0.275	787
		0.725	0.83	0.325	855
				0.645	600
V ₁₂	15.15			0.01	47100
				0.025	13824
				0.035	3051
				0.065	1961
		0.075	0.77	0.075	2014
				0.125	1619
		0.275	0.90	0.155	1676
				0.275	1750
		0.725	1.01	0.325	1246
				0.645	860

RESULTATEN METINGEN IN BODEMSTATIEF. SCHAAR V. VALKENISSE, 860821

NUMMER METING	TIJD (M.E.T.)	STROOMSNELHEDEN		ZAND CONCENTRATIES	
		geschatte hoogte boven bodem (m)	gemiddelde stroomsnelheid (m/s)	geschatte hoogte boven bodem (m)	gemiddelde concentratie (mg/l)
V13	15.30	0.075 0.275 0.725	0.71 0.81 1.04	0.01 0.025 0.035 0.065 0.075 0.125 0.155 0.275 0.325 0.645	53410 5140 0430 2500 2639 2022 2049 1544 1475 1000
V14	15.45	0.075 0.275 0.725	0.55 0.65 0.76	0.01 0.025 0.035 0.065 0.075 0.125 0.155 0.275 0.325 0.645	20094 1504 2611 906 1120 500 0000 752 724 540
V15	16.00	0.075 0.275 0.725	0.32 0.43 0.50	0.01 0.025 0.035 0.065 0.075 0.125 0.155 0.275 0.325 0.645	1676 309 354 273 274 255 257 231 200 160



B

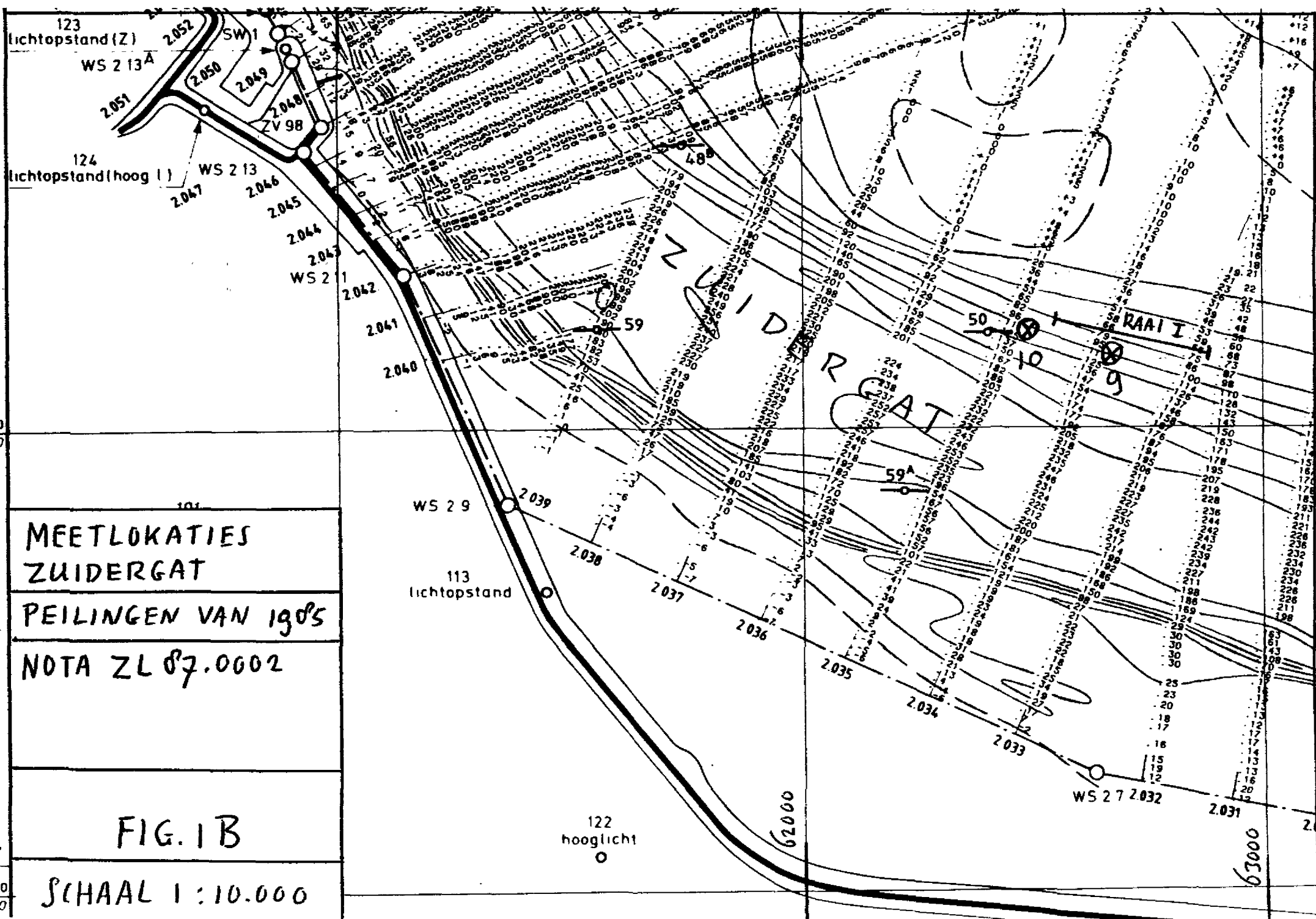
7000
6000MEETLOKATIES
ZUIDERGAT

PEILINGEN VAN 1905

NOTA ZL 87.0002

FIG. 1B

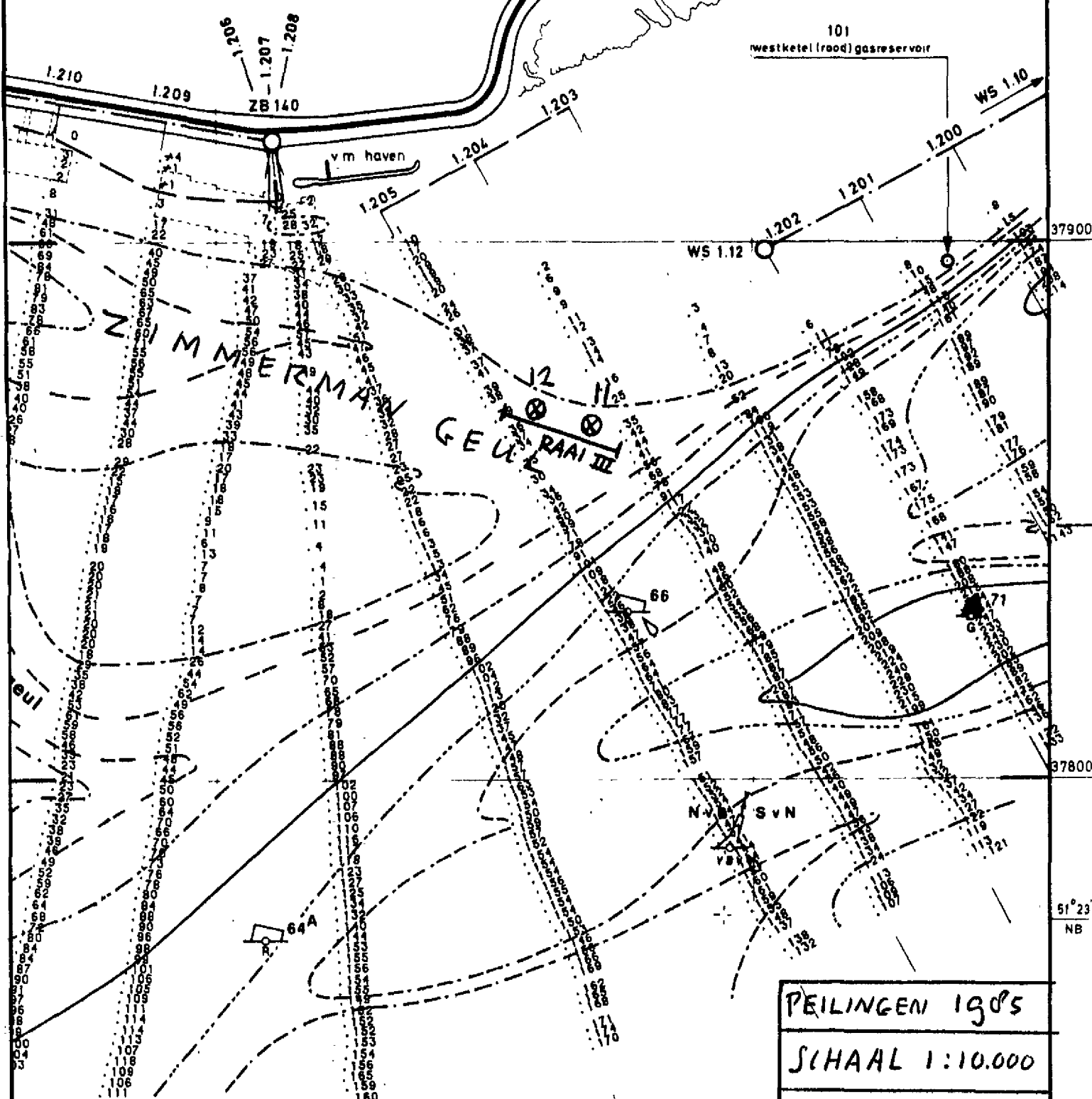
SCHAAL 1:10.000



BEVELAND

zimm-
mermanpolder

51°24'
NB



37900

37800

51°23'
NB

PEILINGEN 1905

SCHAAL 1:10.000

MEETLOKATIES

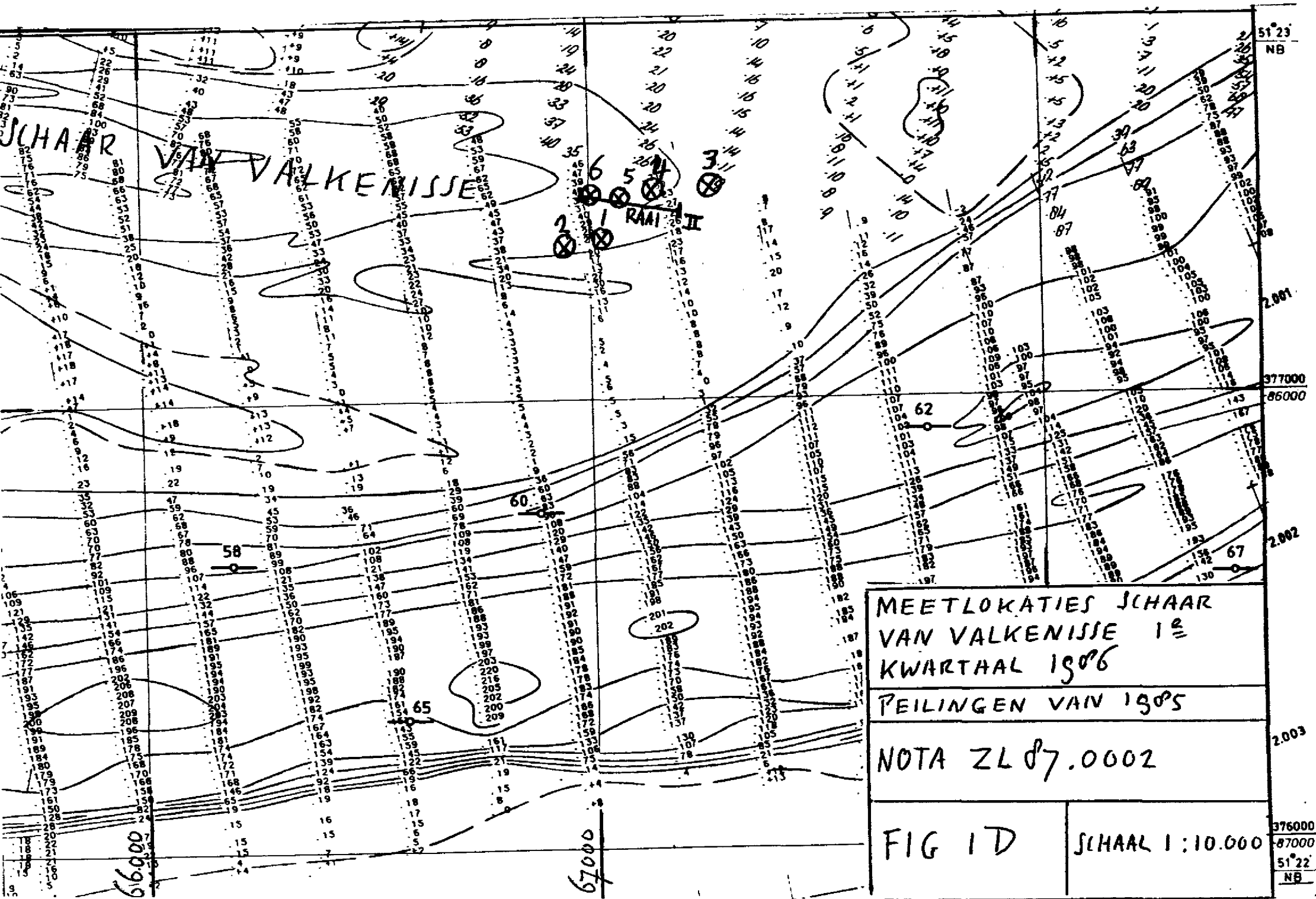
ZIMMERMANGEUL

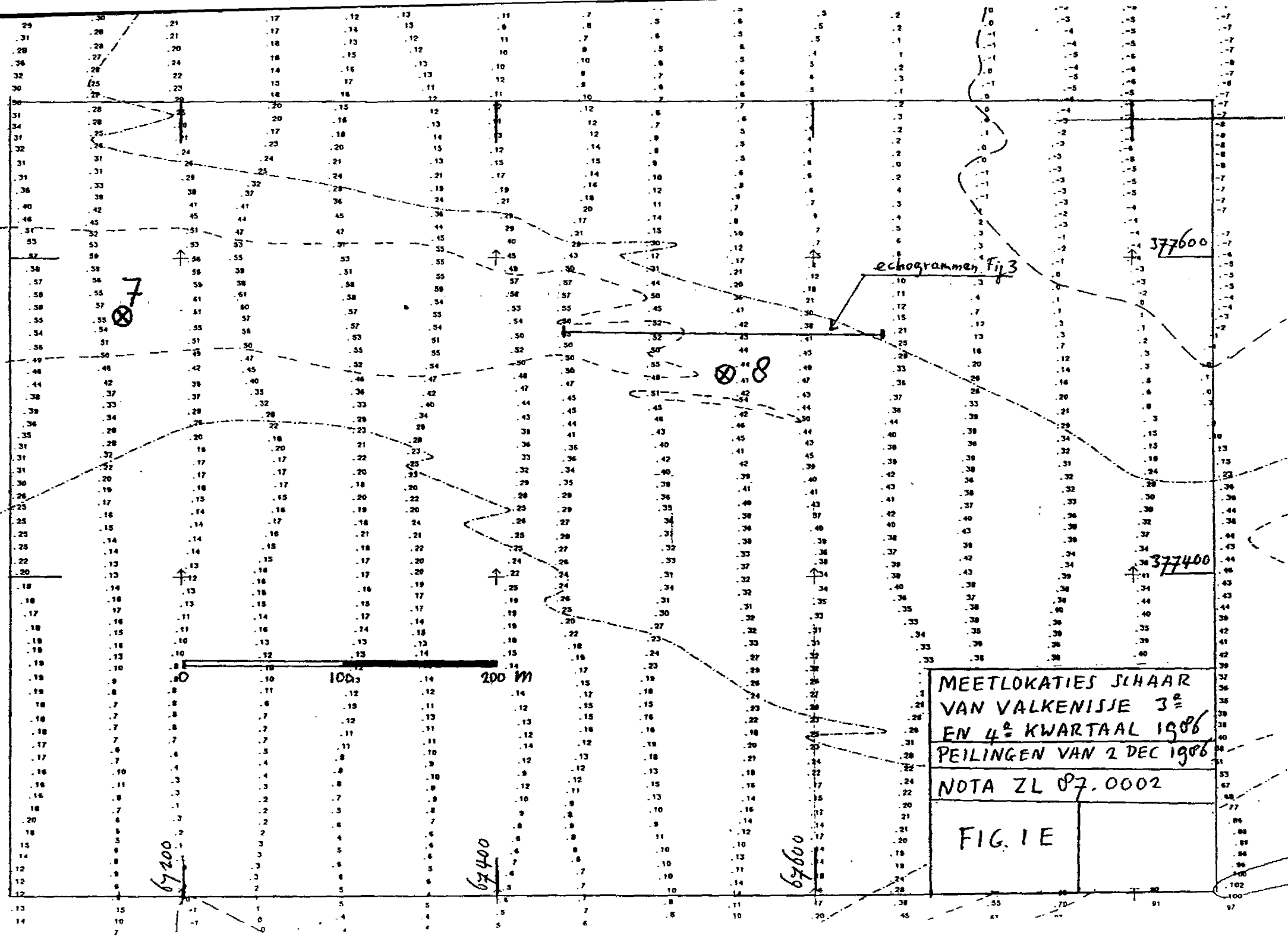
NOTA ZL 07.0002

FIG. 1 C

69000

70000





Echogrammen Fig 3

377600

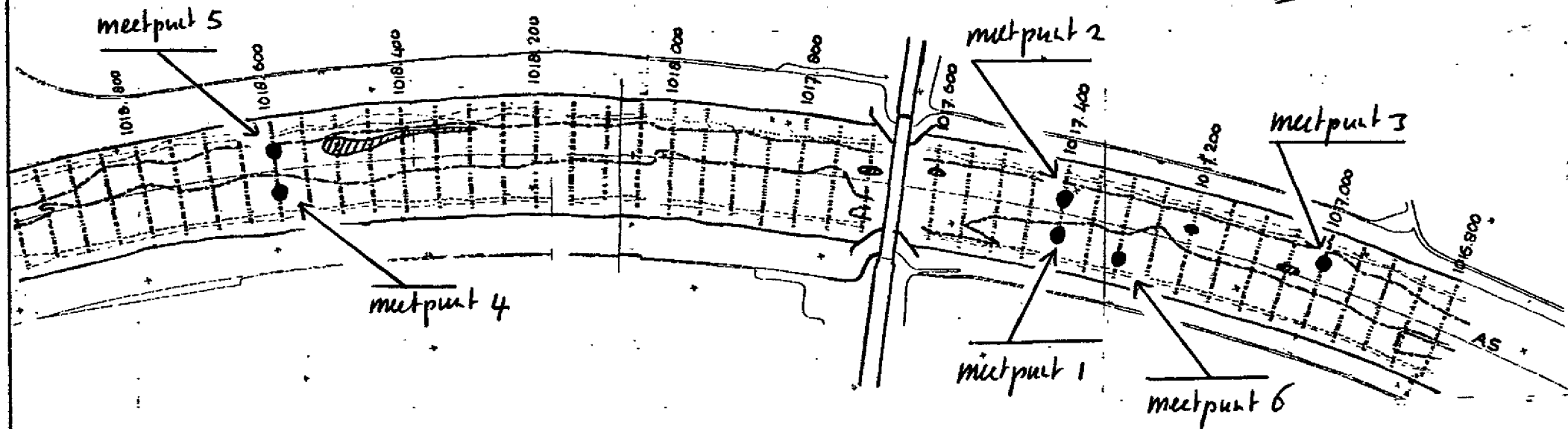
377400

MEETLOKATIES SCHAAR
VAN VALKENISSE 3^e
EN 4^e KWARTAAL 1986
PEILINGEN VAN 2 DEC 1986
NOTA ZL 07.0002

FIG. 1 E

0 200 400 m

PRINS HENDRIK POLDER



----- N.A.P. - 7.5 m
 // // // " - 10 m en meer

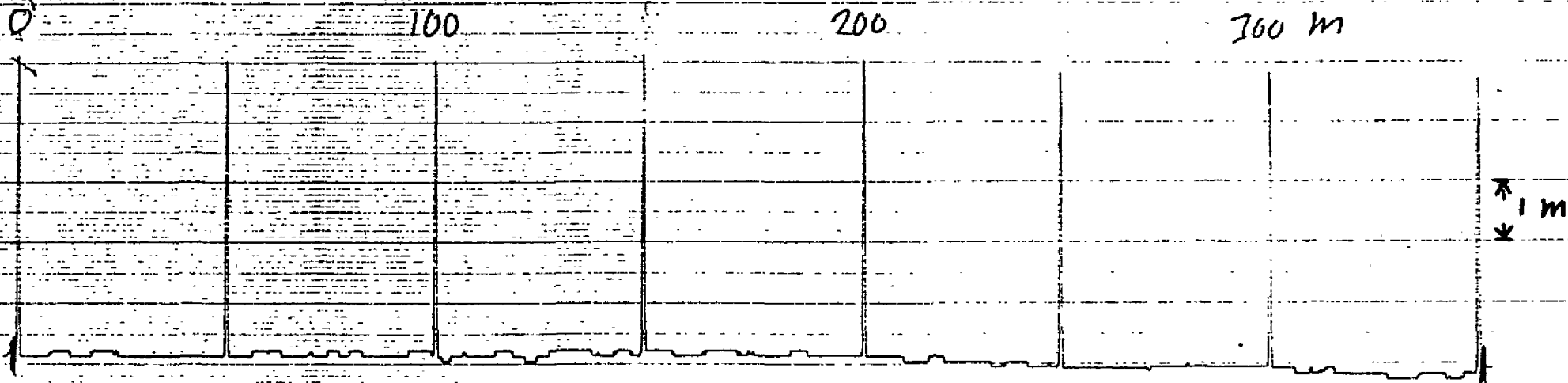
MEETLOKATIES IN DE EENDRACHT

NOTA ZL.0002

FIG. 1 F

005T

WEST

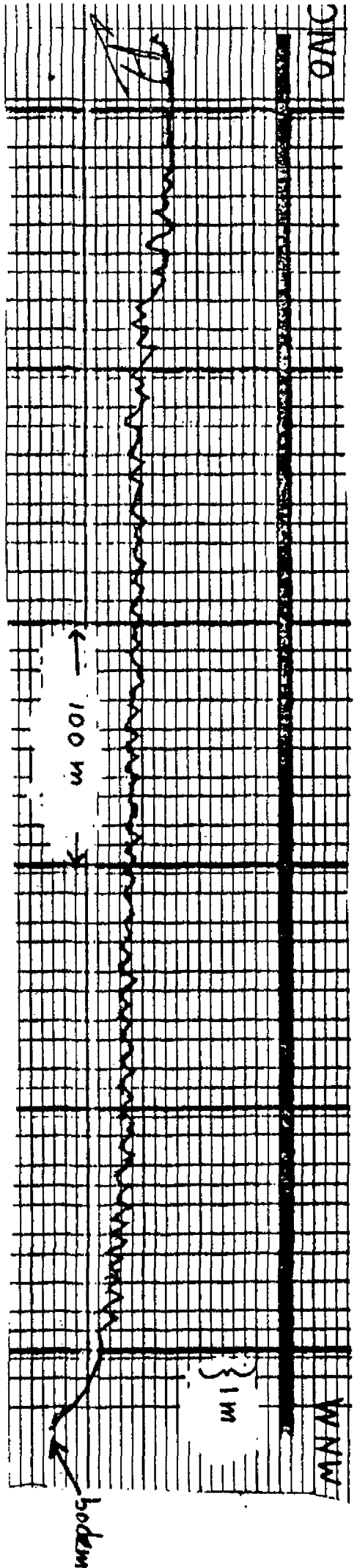


ECHOGRAM RAAI I 060312

NOTA ZL 07.0002

Fig 2 A

9280-0289 S



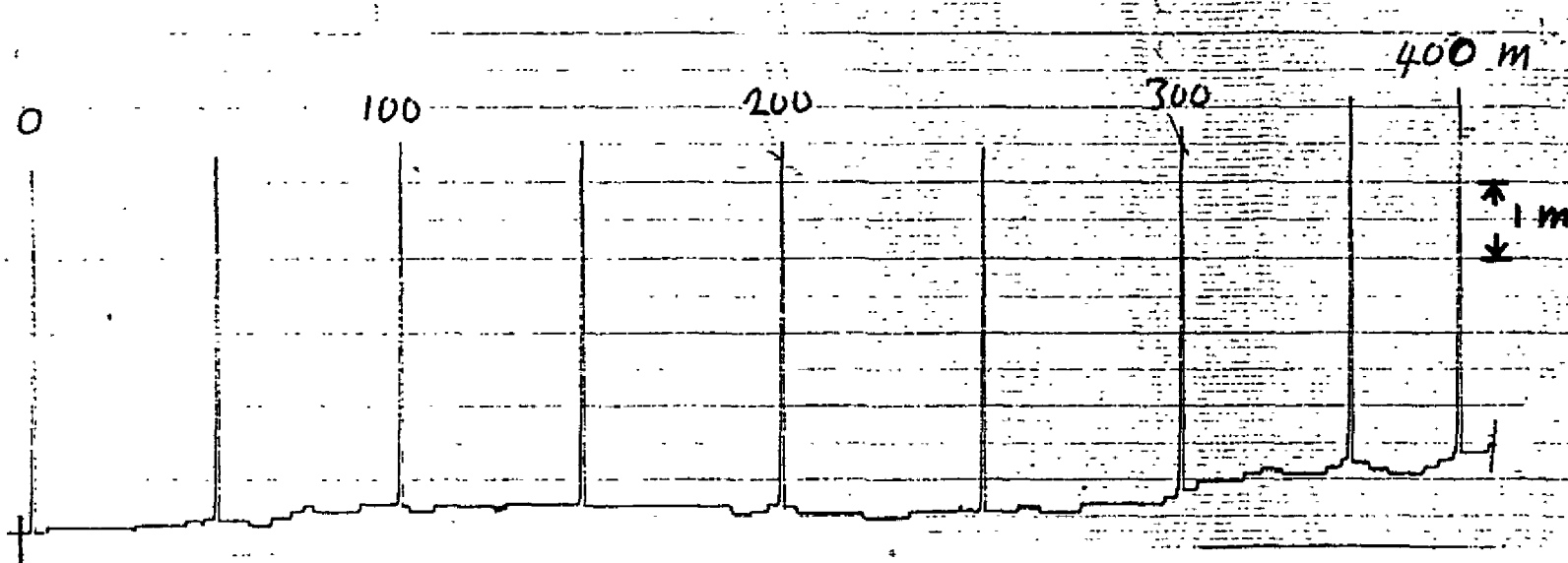
ECHOCARDIOGRAM RA41 II A 850206

NOTA ZL07.0002

Fig 2 B

WEST

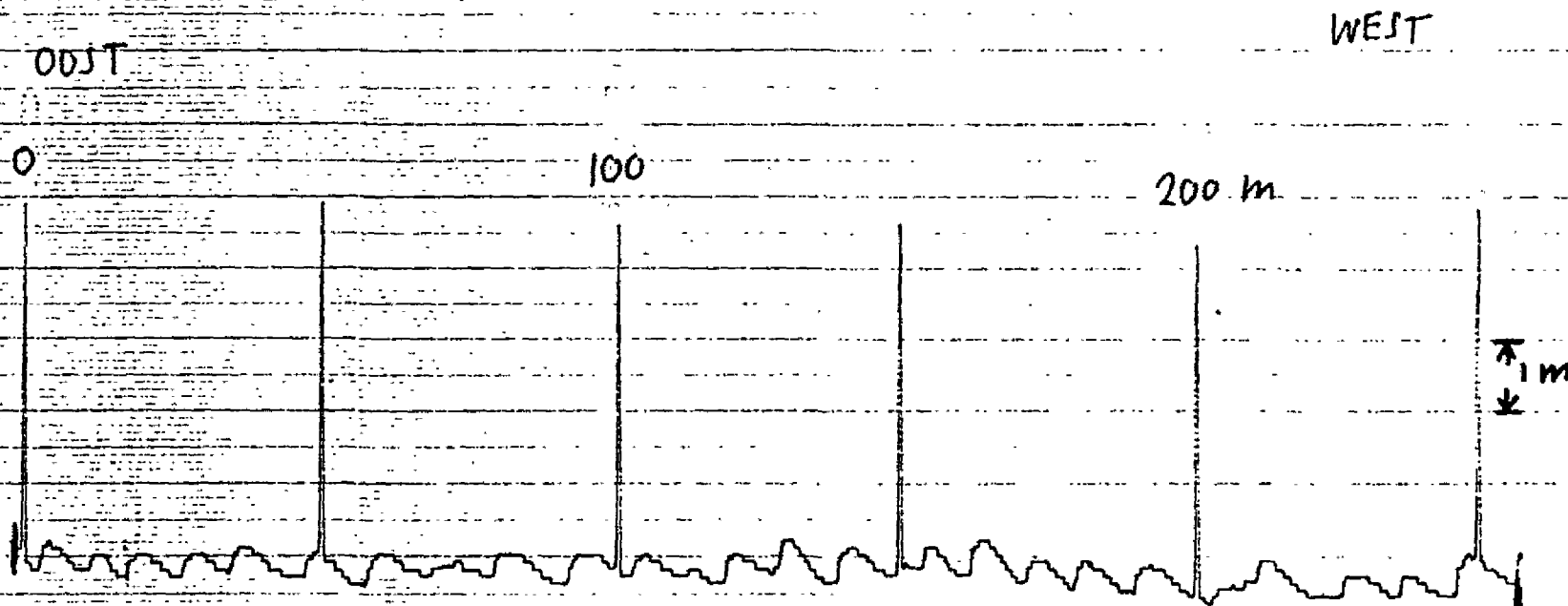
001T



ECHOGRAM II B 860312

NOTA ZL. 87.0002

Fig. 2C



9280-0288 S

ECHOGRAM RAAI III 060312	
NOTA ZL.07:0002	Fig. 2D

9280-0288 S

OOST

WEST

0 20 40 60 80 100 120 140 160 180 200 m

T.I.D.
(MET)

NABO

gemeten dieptezwaaide stroomsnelheid $\bar{u} = 1,0 \text{ m s}^{-1}$

12.44 - 12.48

-2
-4 m
0 $\bar{u} = 1,0$

13.08 - 13.12

-2
-4 m
0 $\bar{u} = 1,0$

13.31 - 13.35

-2
-4 m
0 $\bar{u} = 1,1$

13.53 - 13.57

-2
-4
-6 m
0 $\bar{u} = 1,3$

14.15 - 14.20

-2
-4
-6 m
0 $\bar{u} = 1,5$

14.42 - 14.45

-2
-4
-6 m
0 $\bar{u} = 0,8$

14.53 - 15.02

-2
-4
-6
-8 m
0

geen stroomsnelheid gemeten

15.12 - 15.15

-2
-4
-6
-8 m
0

geen stroomsnelheid gemeten

15.26 - 15.28

-2
-4
-6
-8 m
0

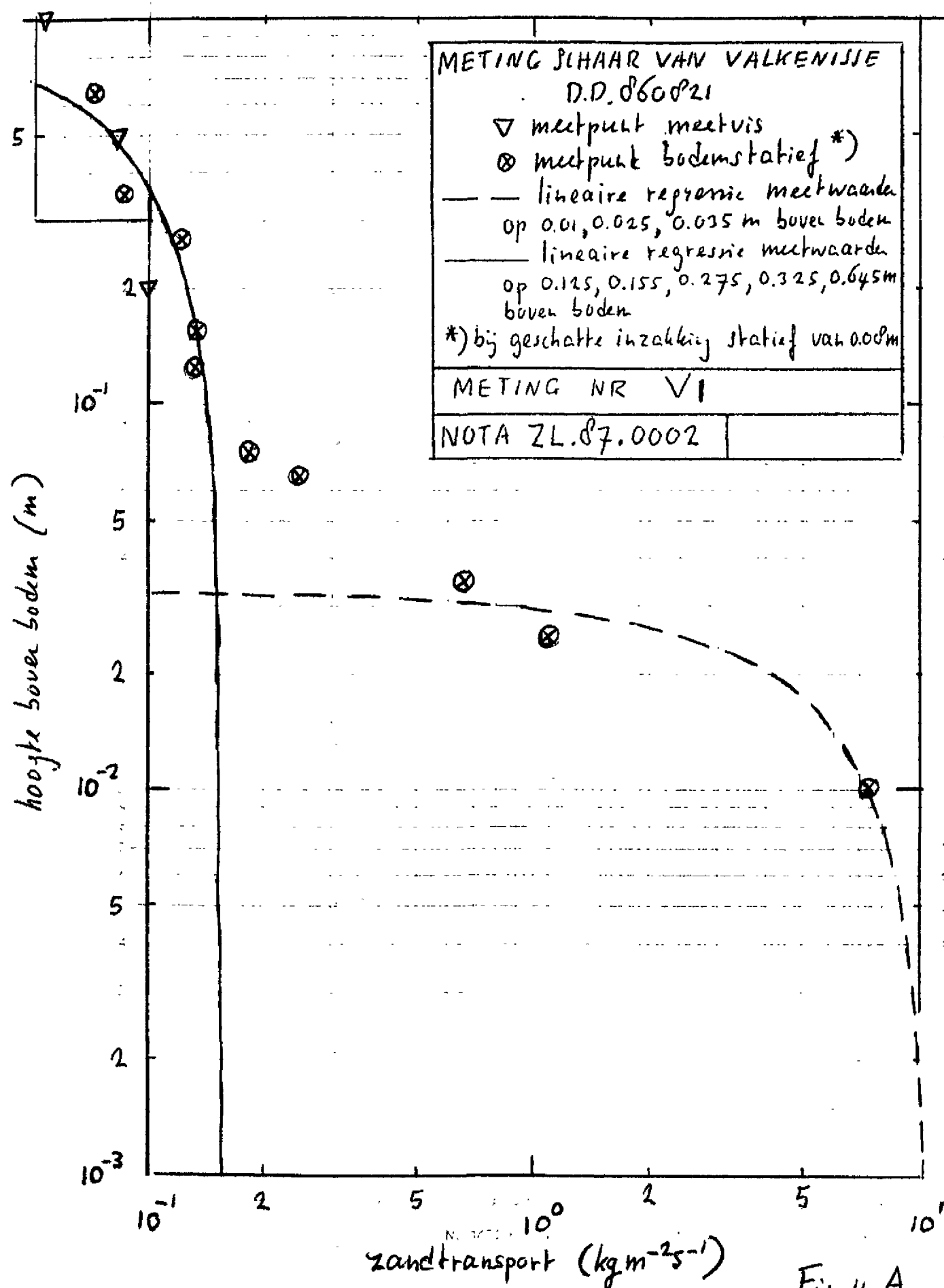
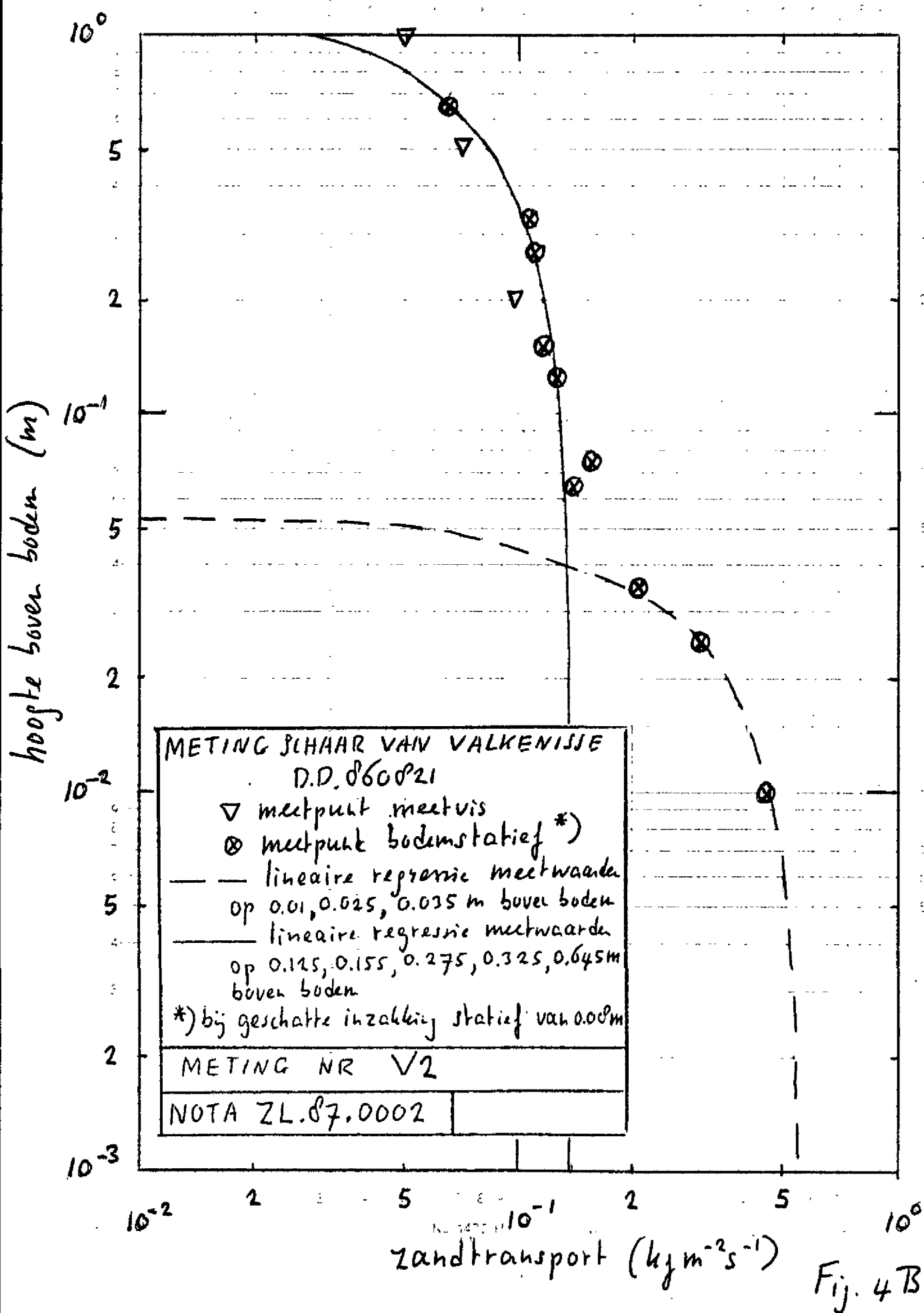
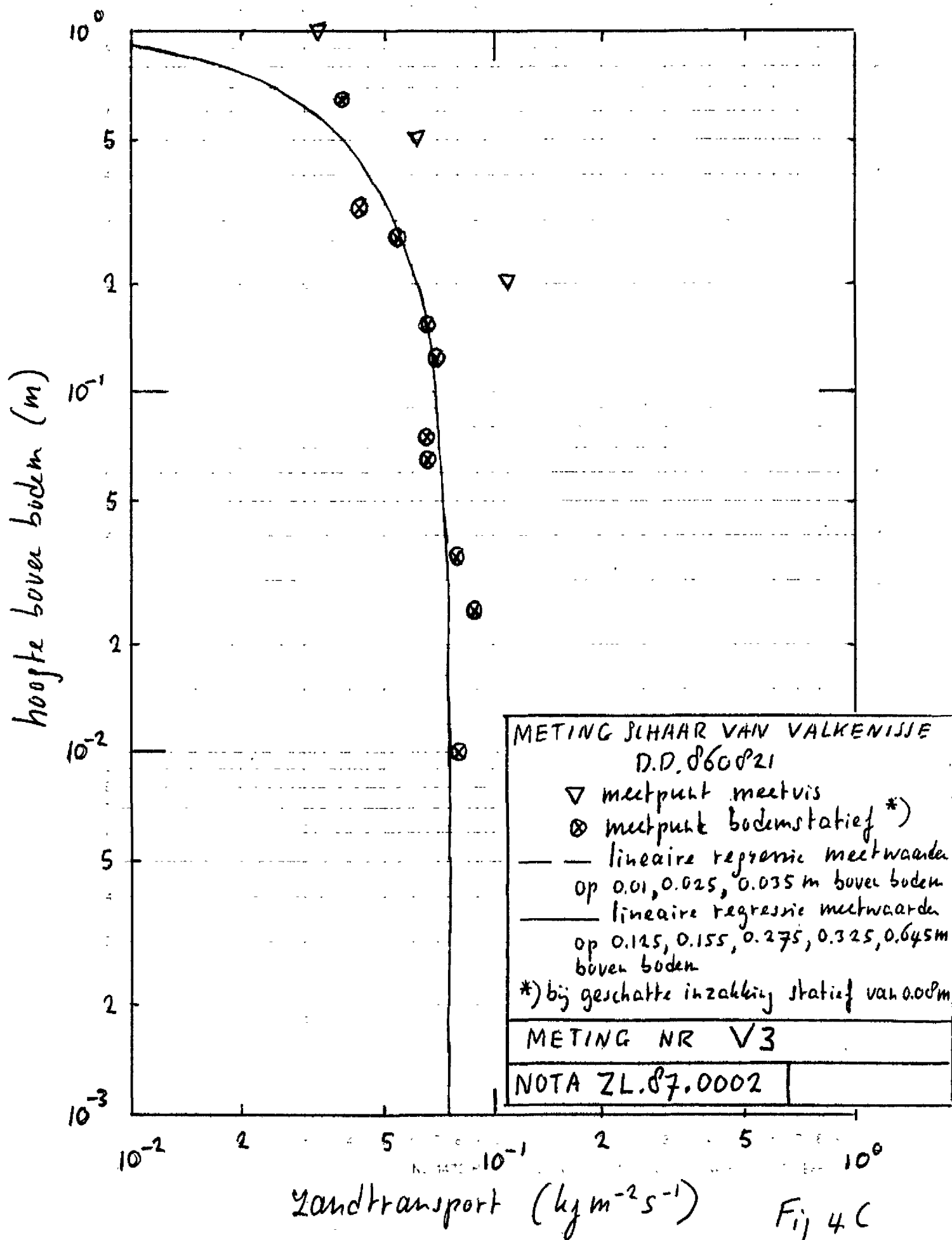
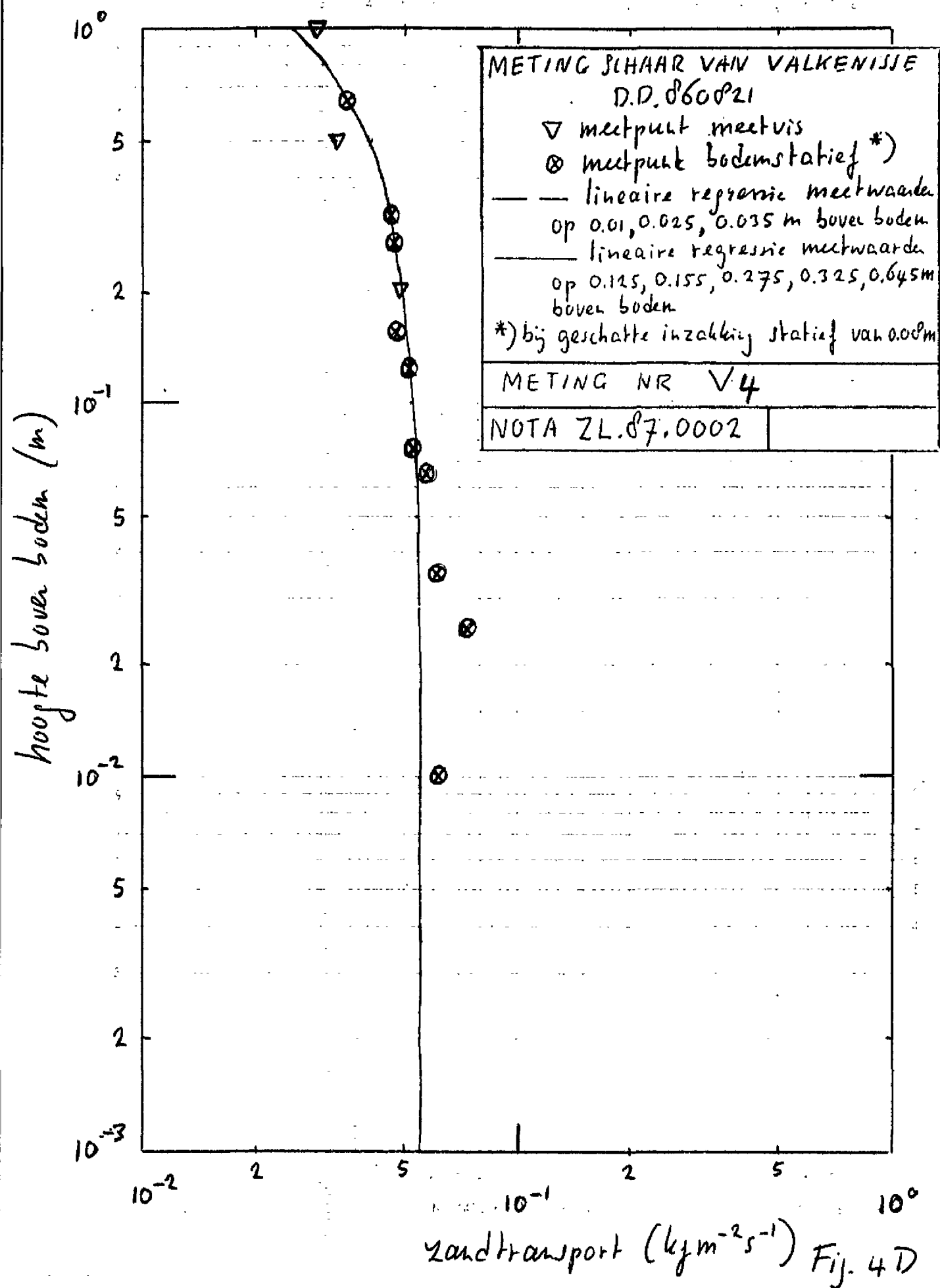
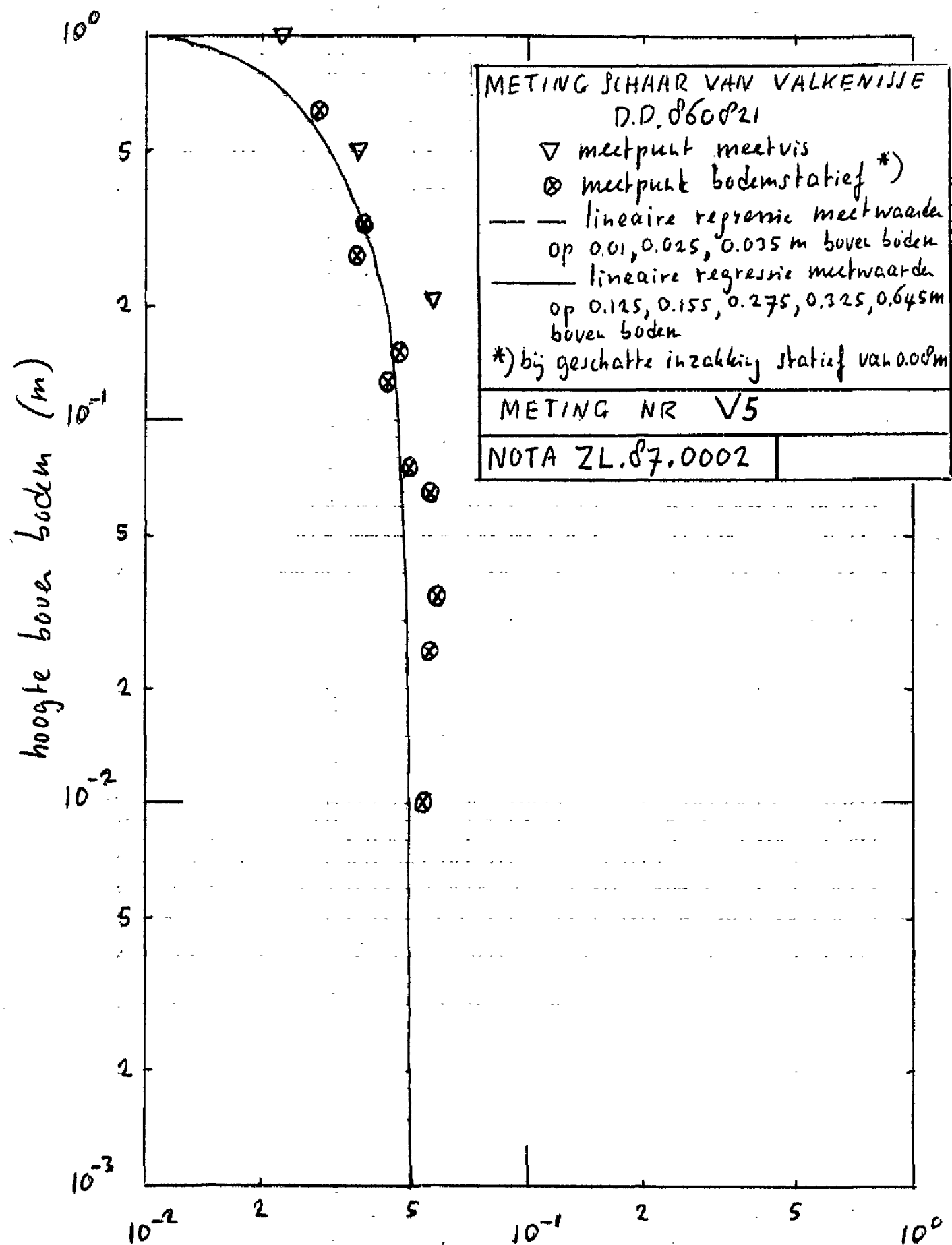


Fig. 4 A

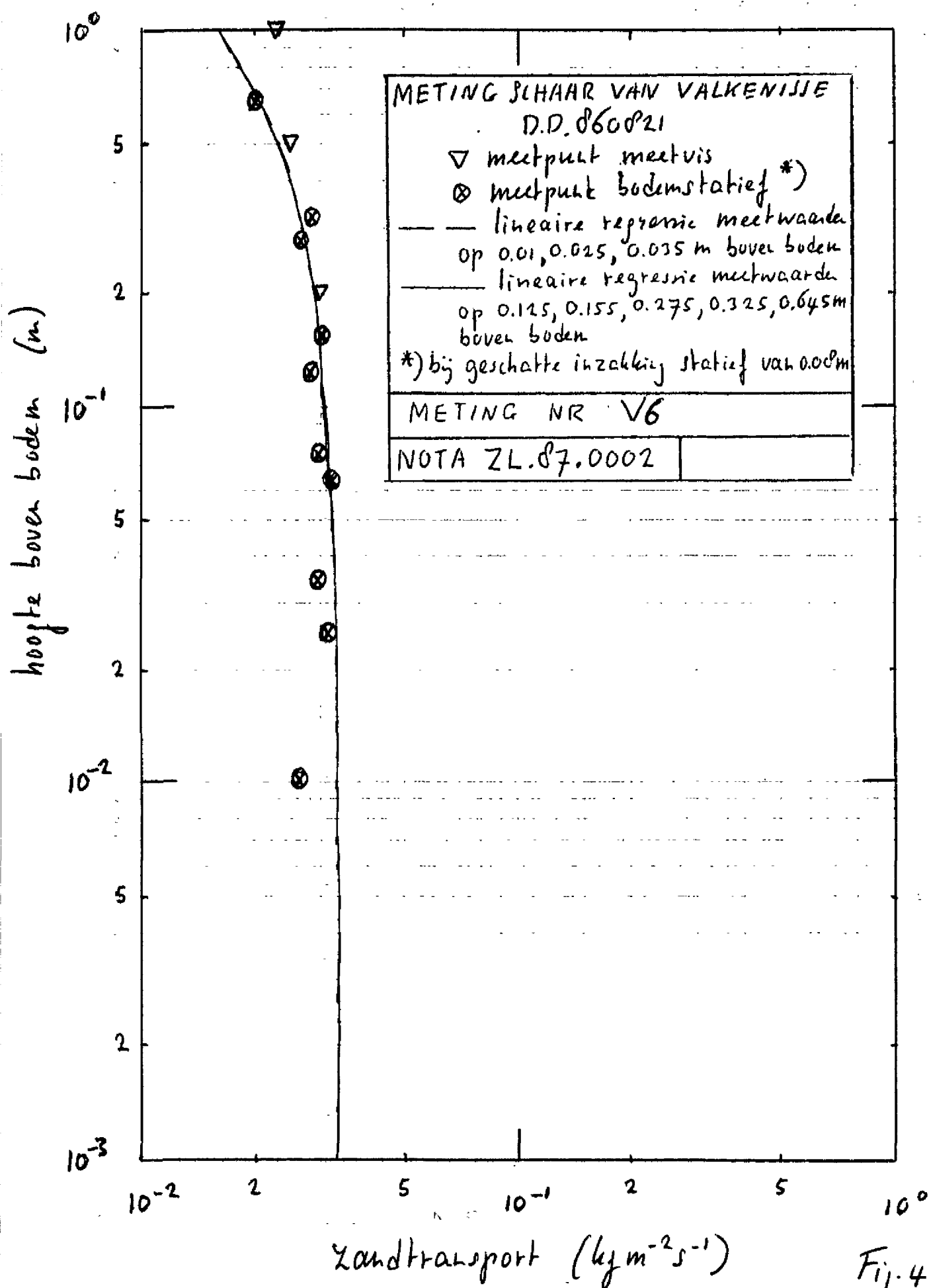




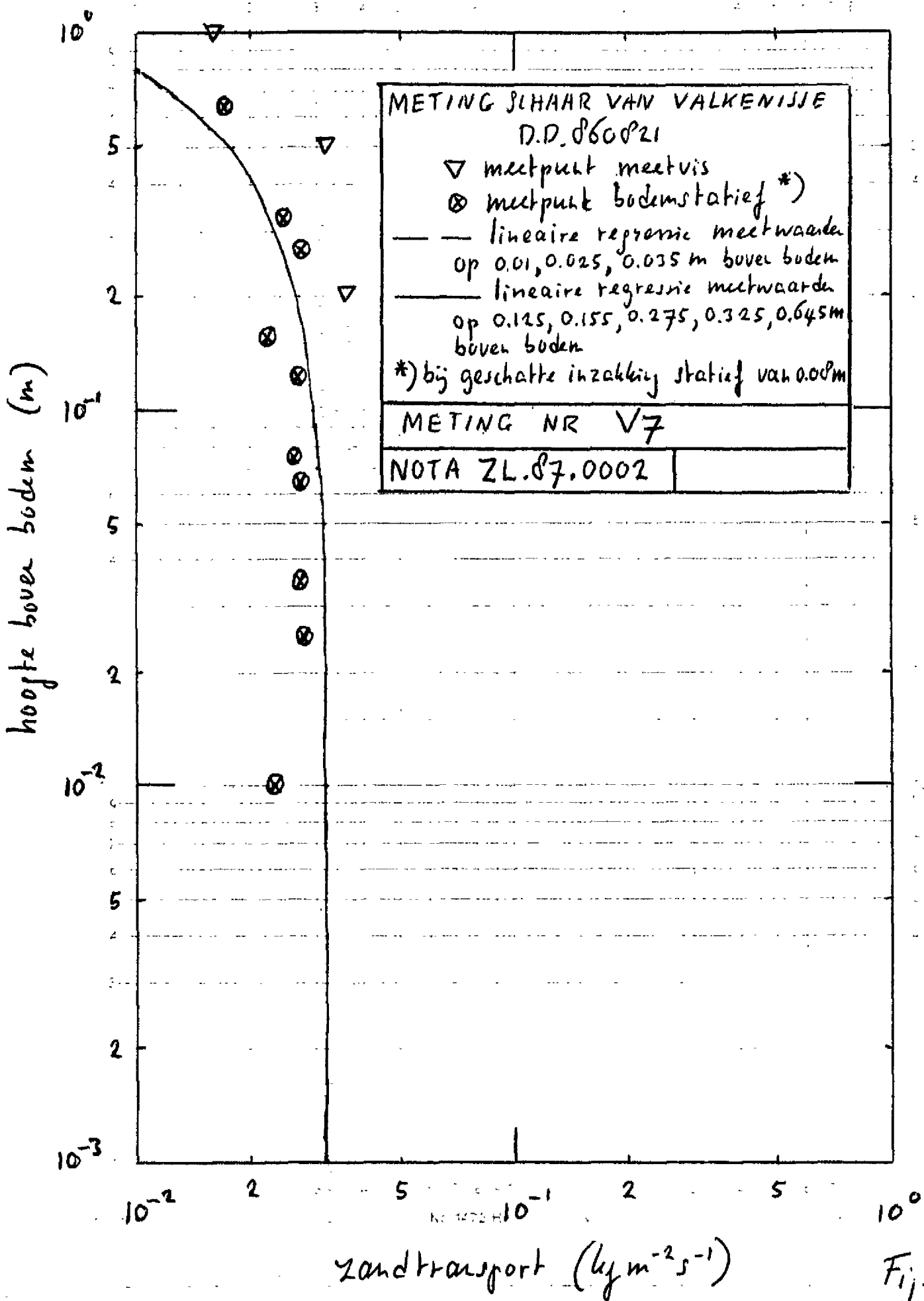




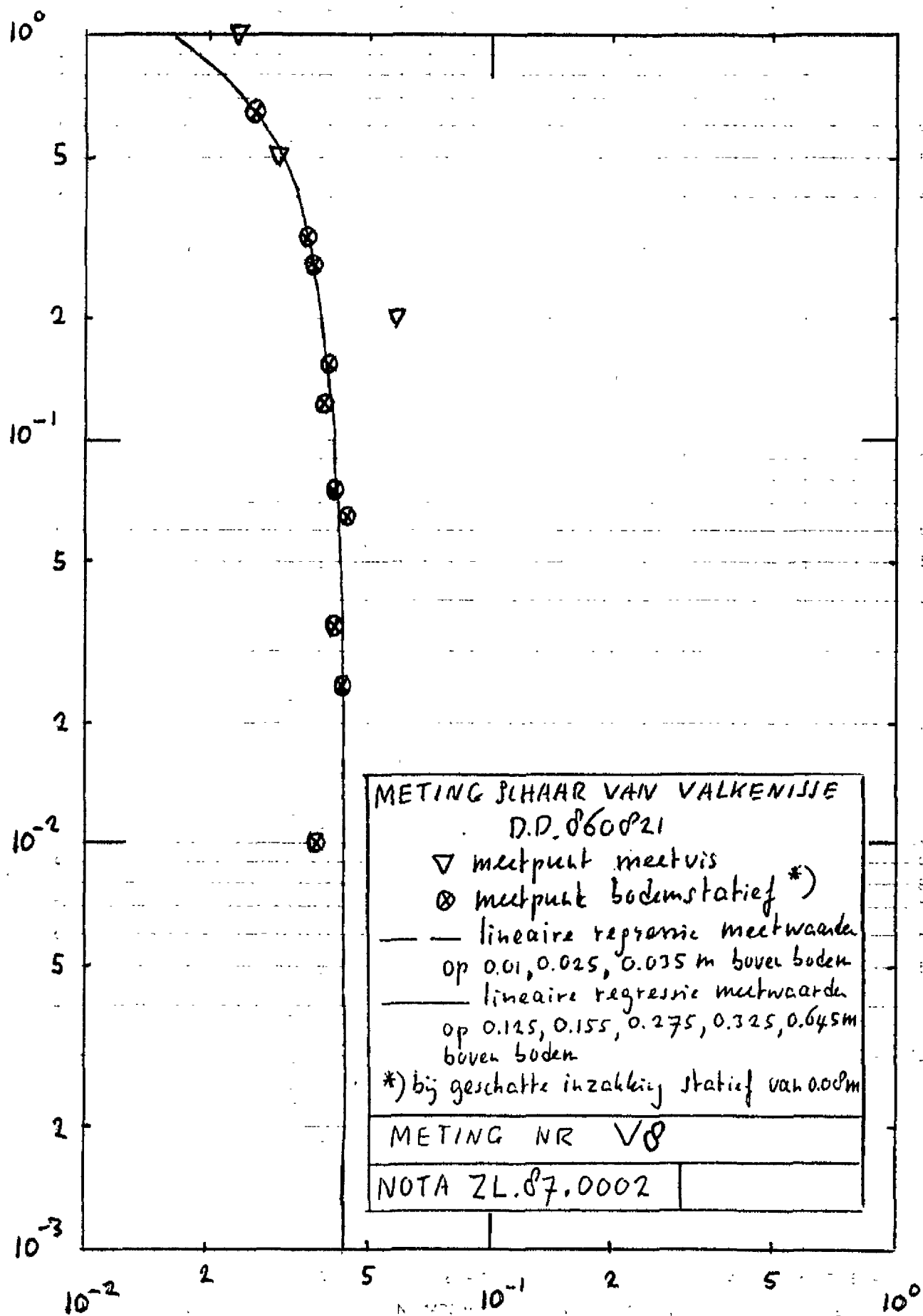
Fij. 4 E



Fij. 4 F

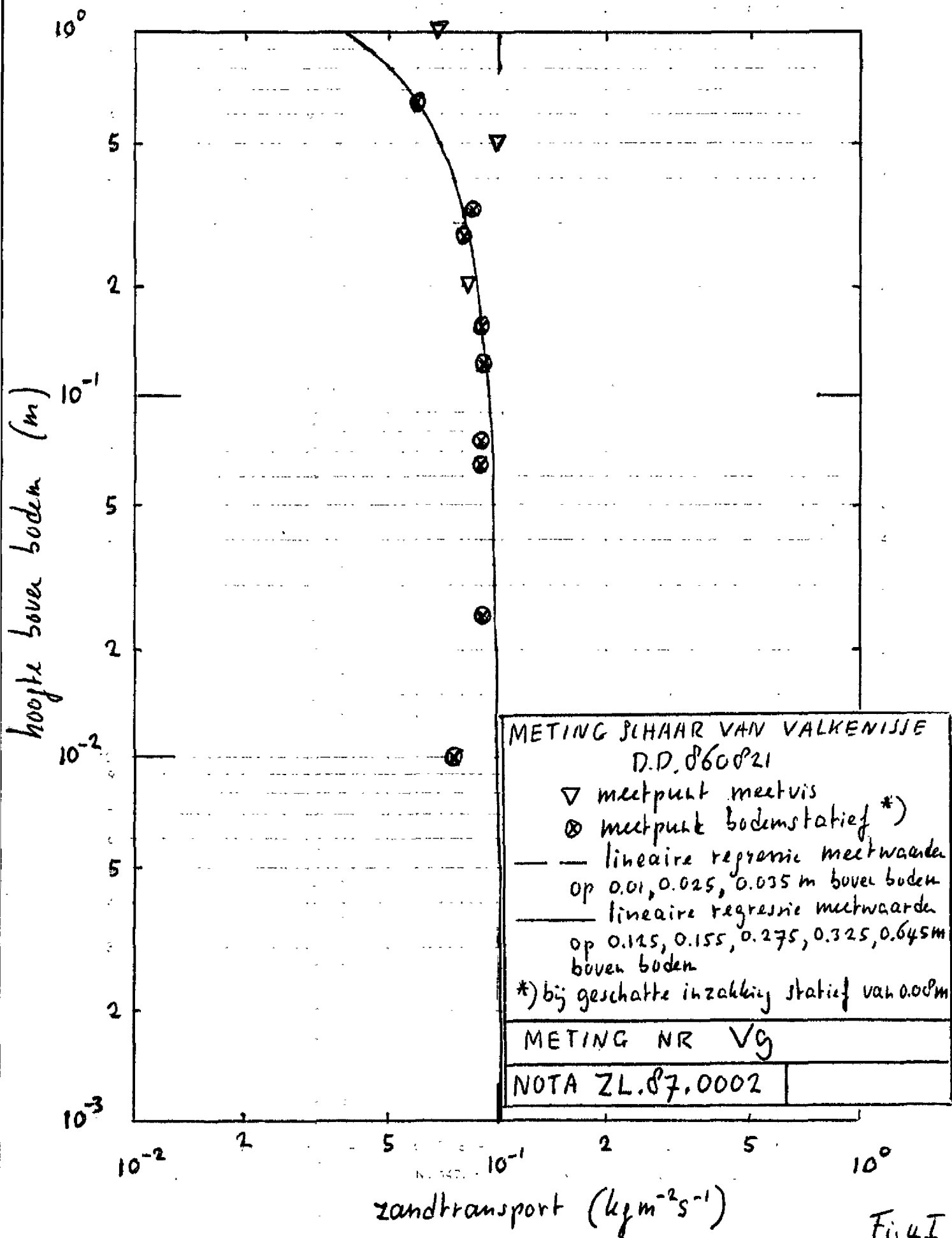


hoogte boven bodem (m)



Landtransport ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$)

Fij. 4 H



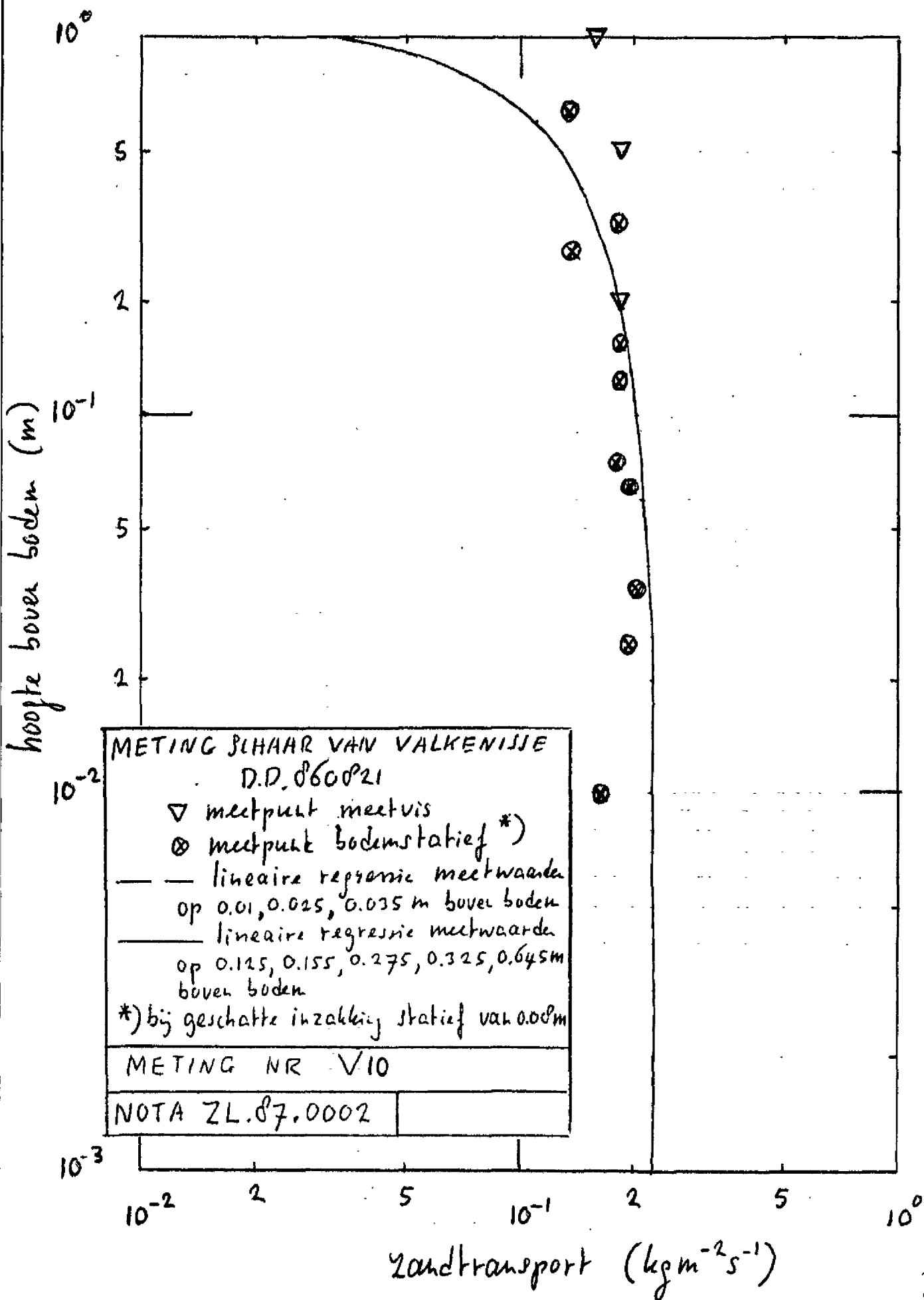
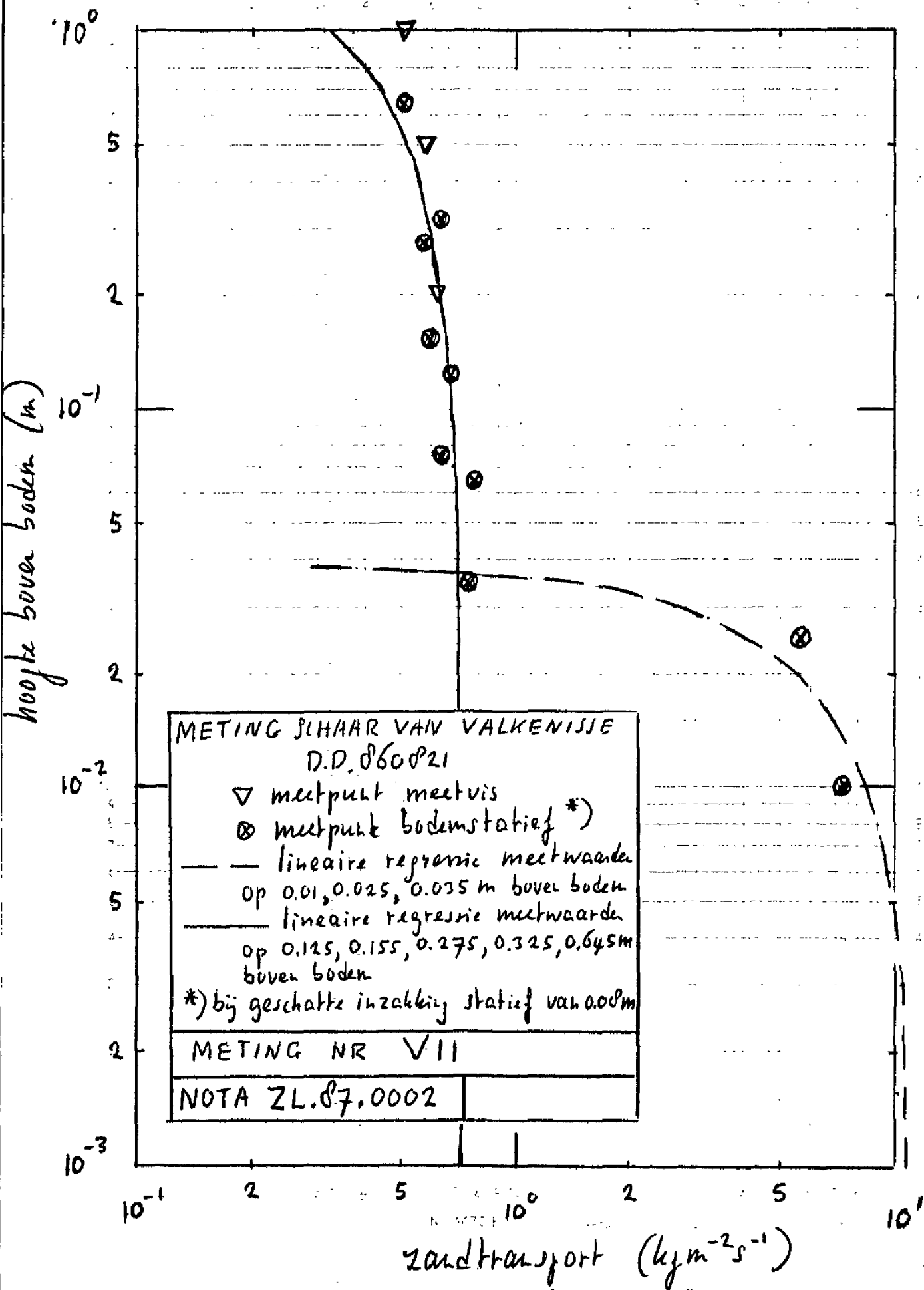
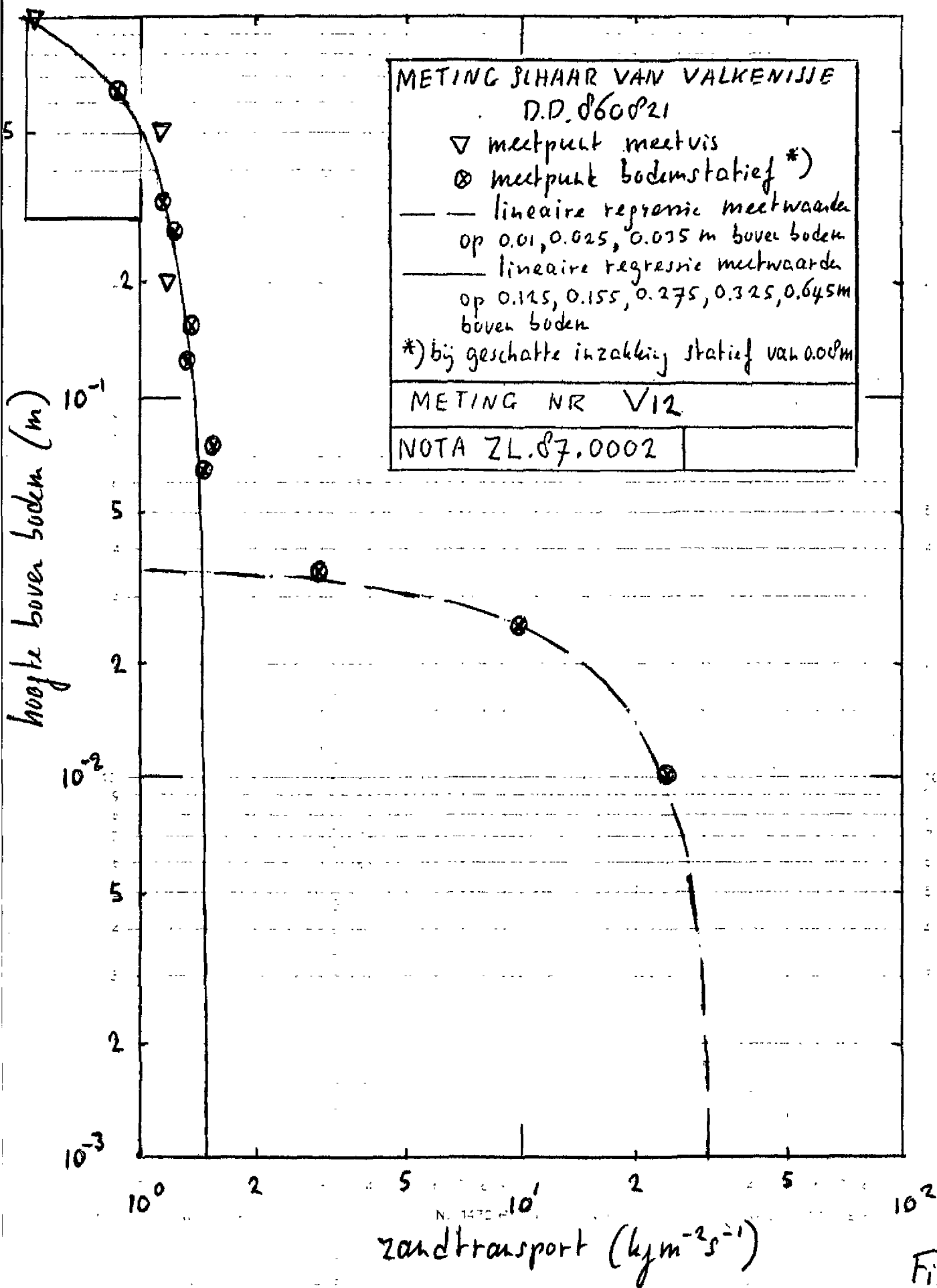
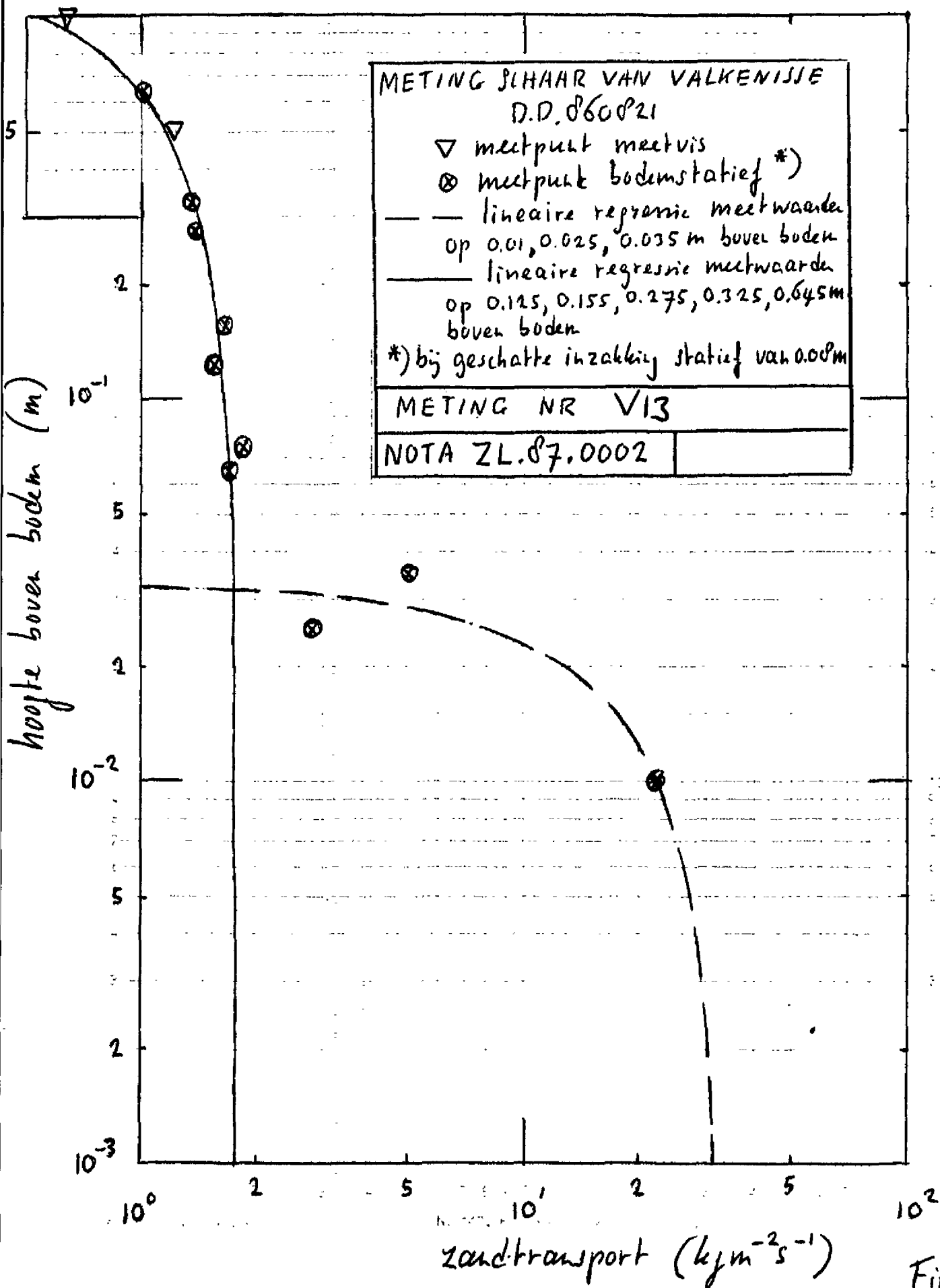


Fig 47

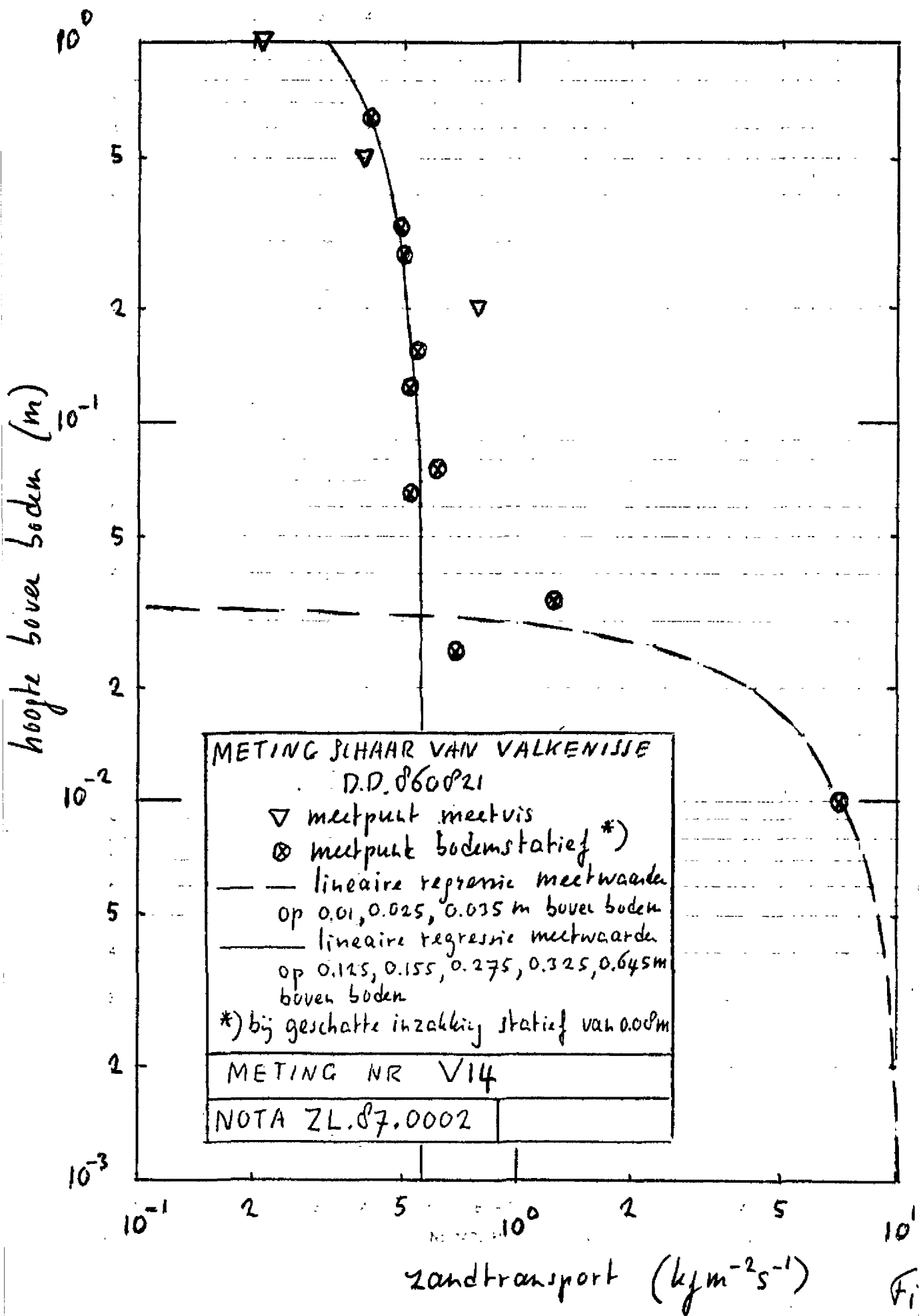




Fij 4 L



Fij 4 M

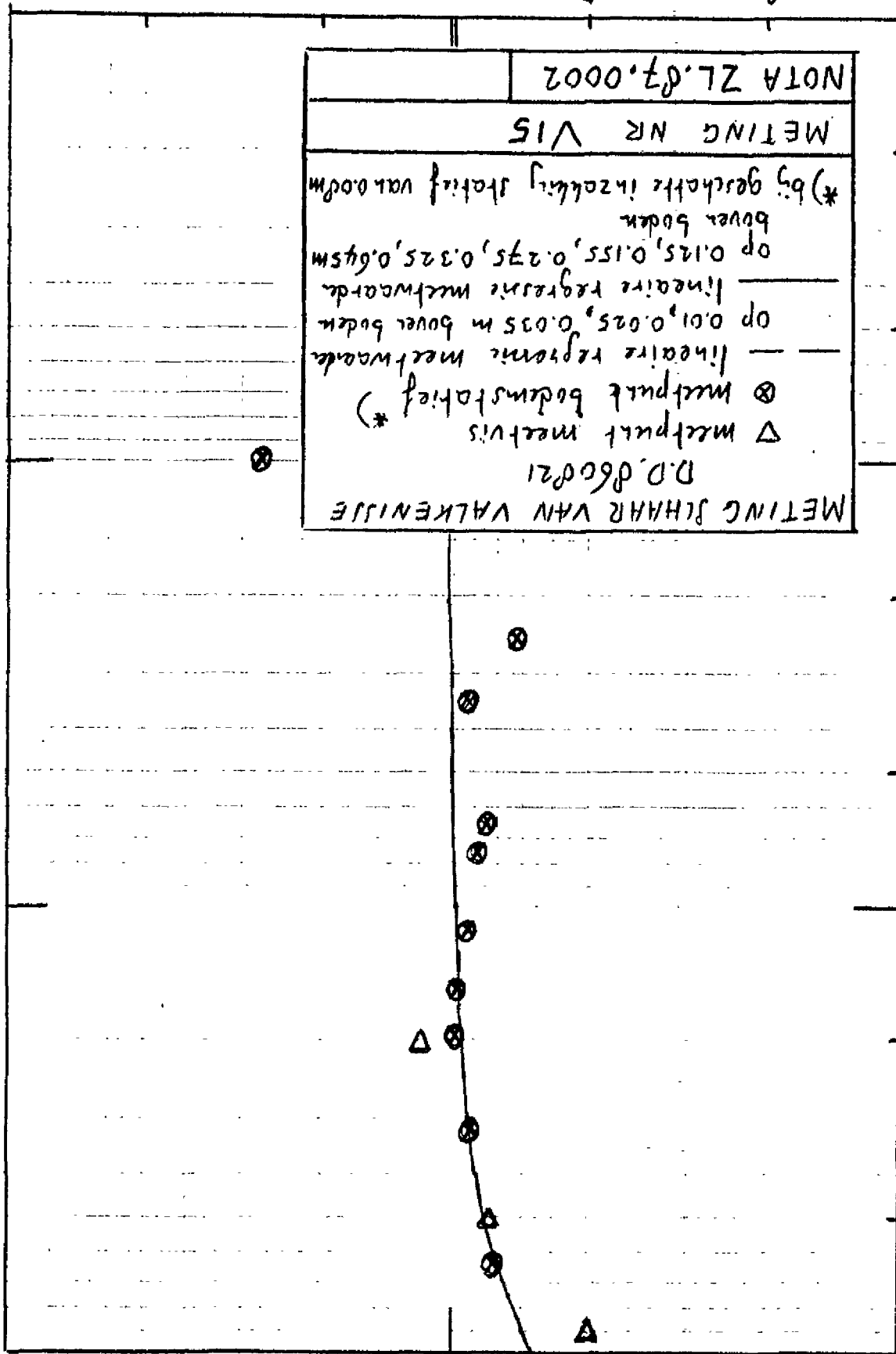


Fij 4 N

Zaadttransport ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$)

Fig 40

10°



10^-2

10^-3

2

5

10^-2

2

5

10^-1

2

5

10^0

2

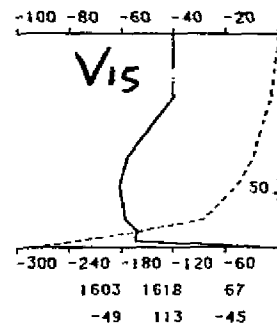
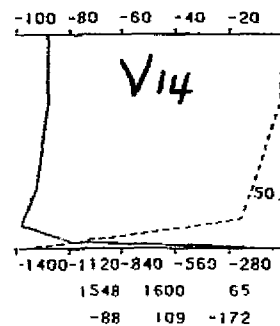
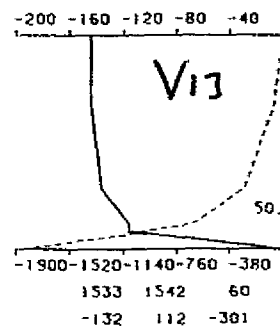
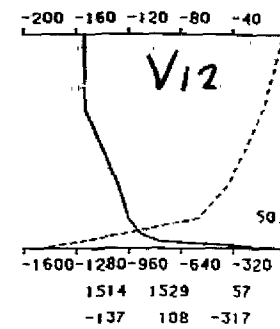
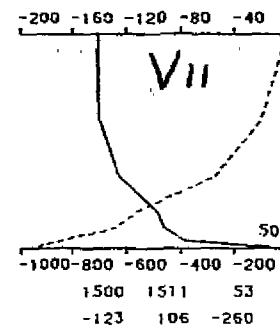
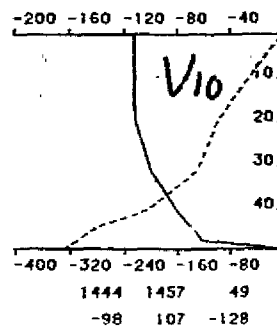
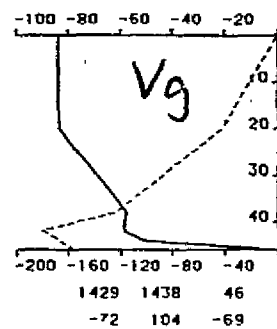
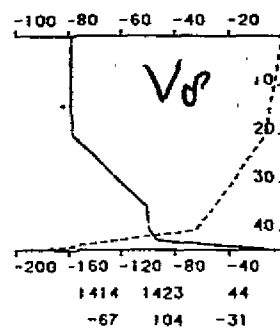
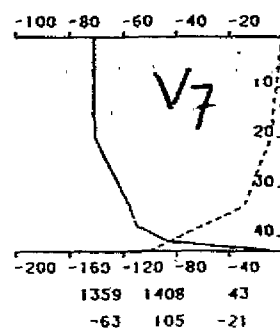
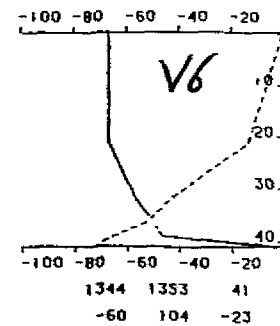
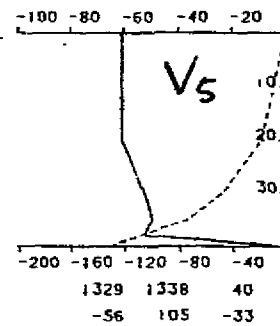
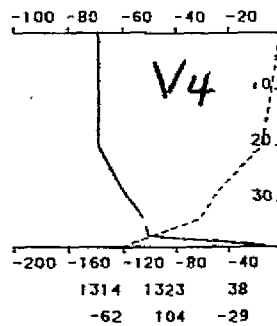
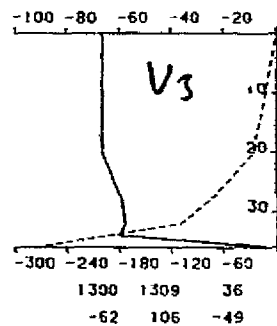
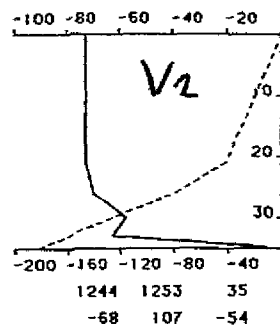
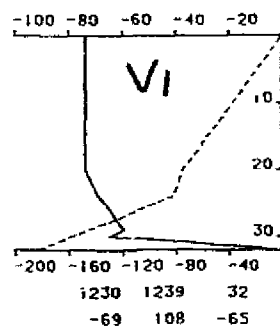
5

10^0

2

5

10^0



NOTA ZL87.0002

Fig 5A

RIJKSWATERSTAAT DELTADIENST
HOOFDAFD. WATERLOOPK.
AFD. ZIERIKZEE

SEDIMENTTRANSPORTMETING : SCH. V. VALKENISSE

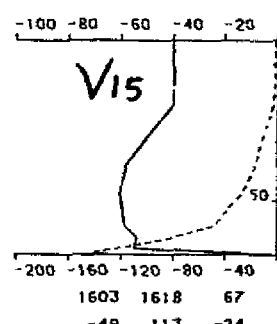
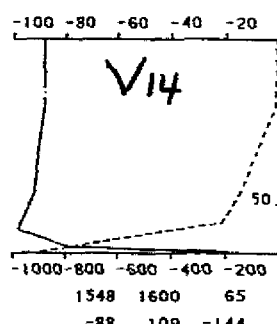
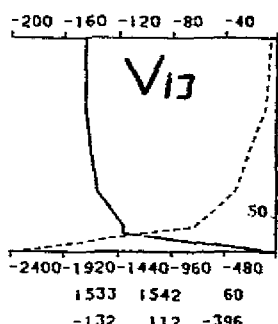
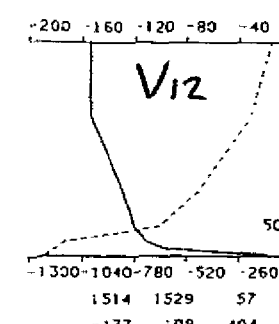
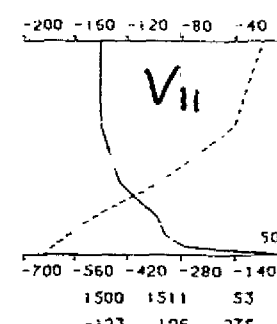
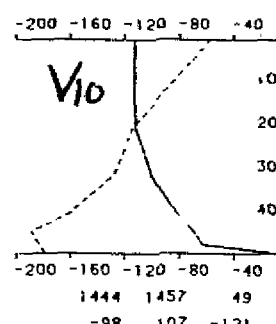
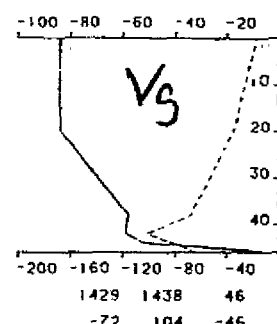
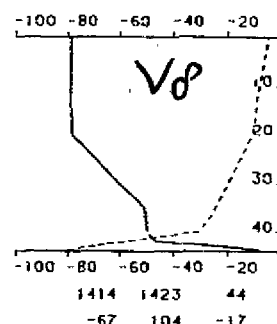
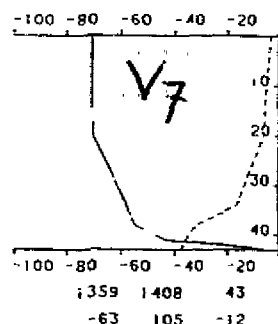
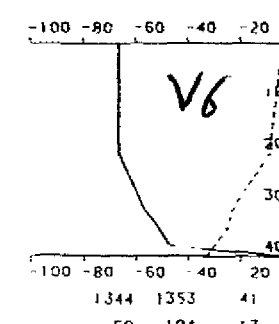
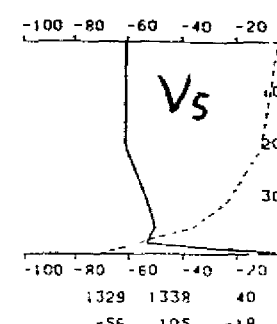
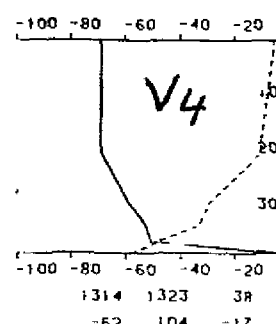
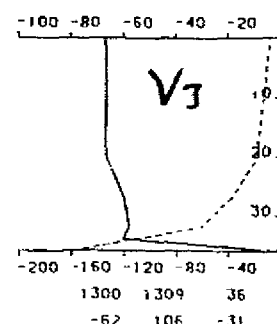
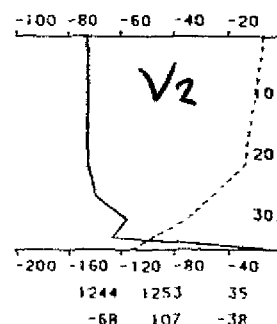
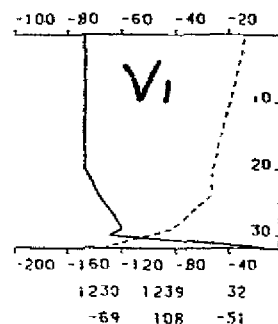
DATUM : 860821

RAAI : NVT DEELRAAI : NVT PUNT : NVT VAART : BIEZELINGE

X-COORDINAAT : 67160 Y-COORDINAAT : 377485

TOELICHTING OP DE VERTIKALEN

————— V
————— C
14.01 14.15 295 : BEGINTIJD EINDTIJD BODEMDIEPTE
100 265 120 : # R C ICEN) +EB -VLOED
VERTIKALE SCHAAI : DIEPTE IN DM TOV WATEROPP.
HORIZONTALE SCHAAI : SNEELHEID IN CM/S (BOVEN)
CONCENTRATIE IN MG/L (ONDER)



NOTA ZL87.0002

Fig. 5 B

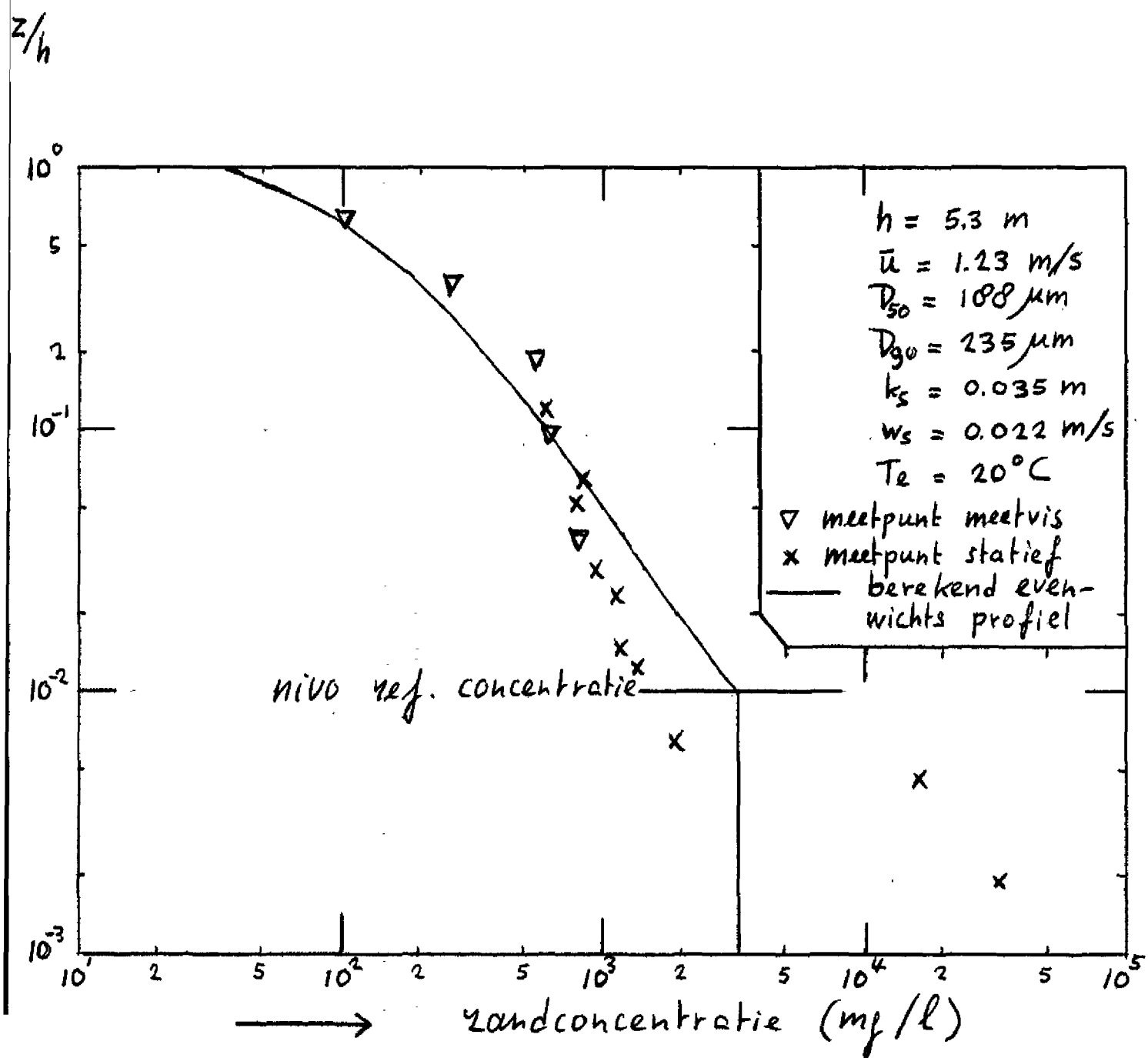
RIJKSWATERSTAAT DELTADIENST
HOOFDAFD. WATERLOOPK.
AFD. ZIERIKZEE

SEDIMENTTRANSPORTMETING : SCH. V. VALKENISSE
DATUM : 860821

RAAI : NVT DEELRAAI : NVT PUNT : NVT VAART : BIEZELINGE
X-COORDINAAT : 67160 Y-COORDINAAT : 377485

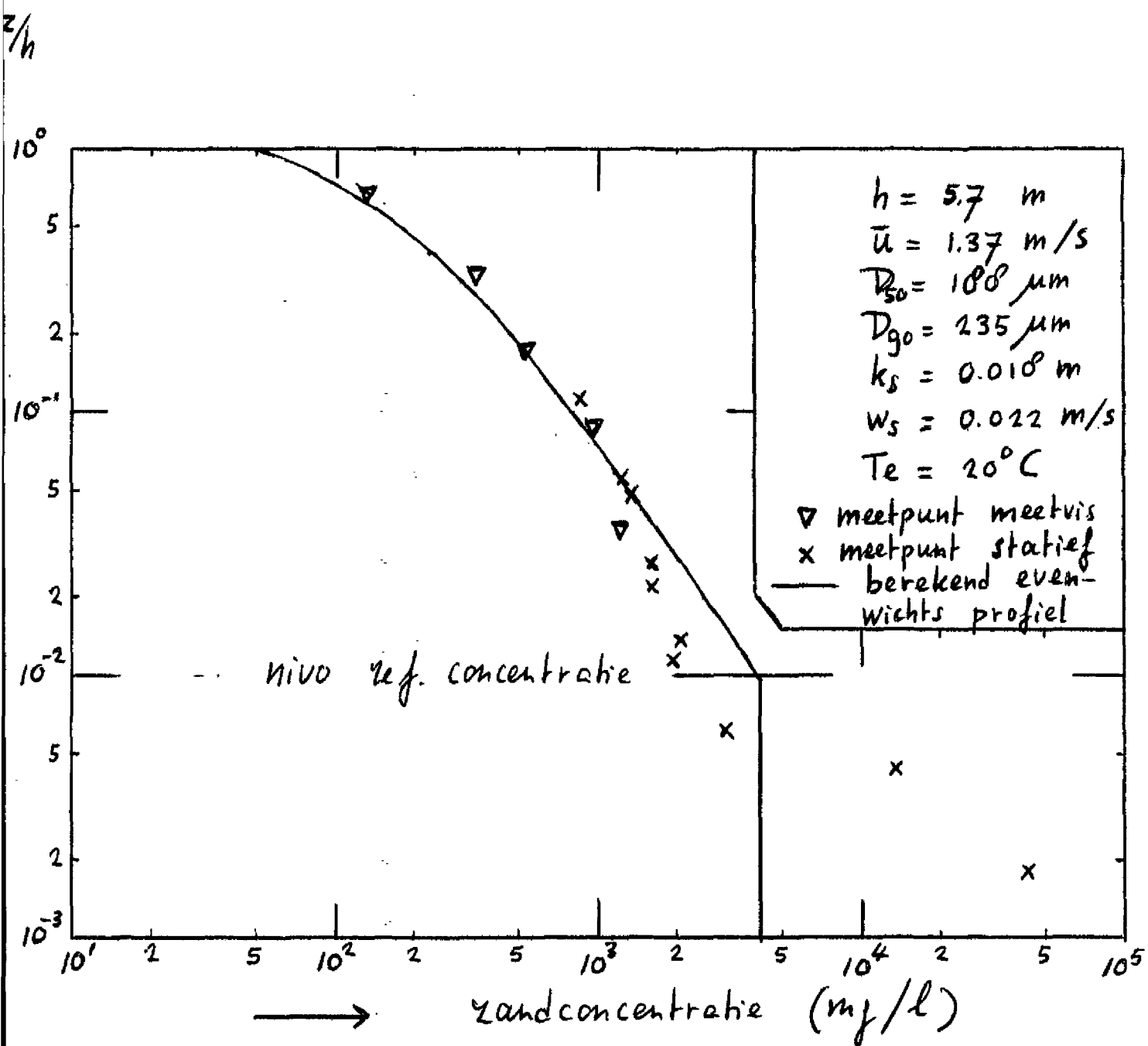
TOELICHTING OP DE VERTIKALEN

——— V ——— T
14.01 14.15 295 : BEGINTIJD EINDTIJD BODEMDIEPTE
100 265 120 : V R T (GFM) -EB -VLOED
VERTIKALE SCHAAL : DIEPTE IN DM TOV WATEROPP.
HORIZONTALE SCHAAL : SNELHEID IN CM/S (BOVEN)
TRANSPORT IN GR/M2.S (ONDER)



zandconcentratie vertikaal meting 060021 Ichaar van Valkenisse; toenemende vloedstroom, V_{11} .

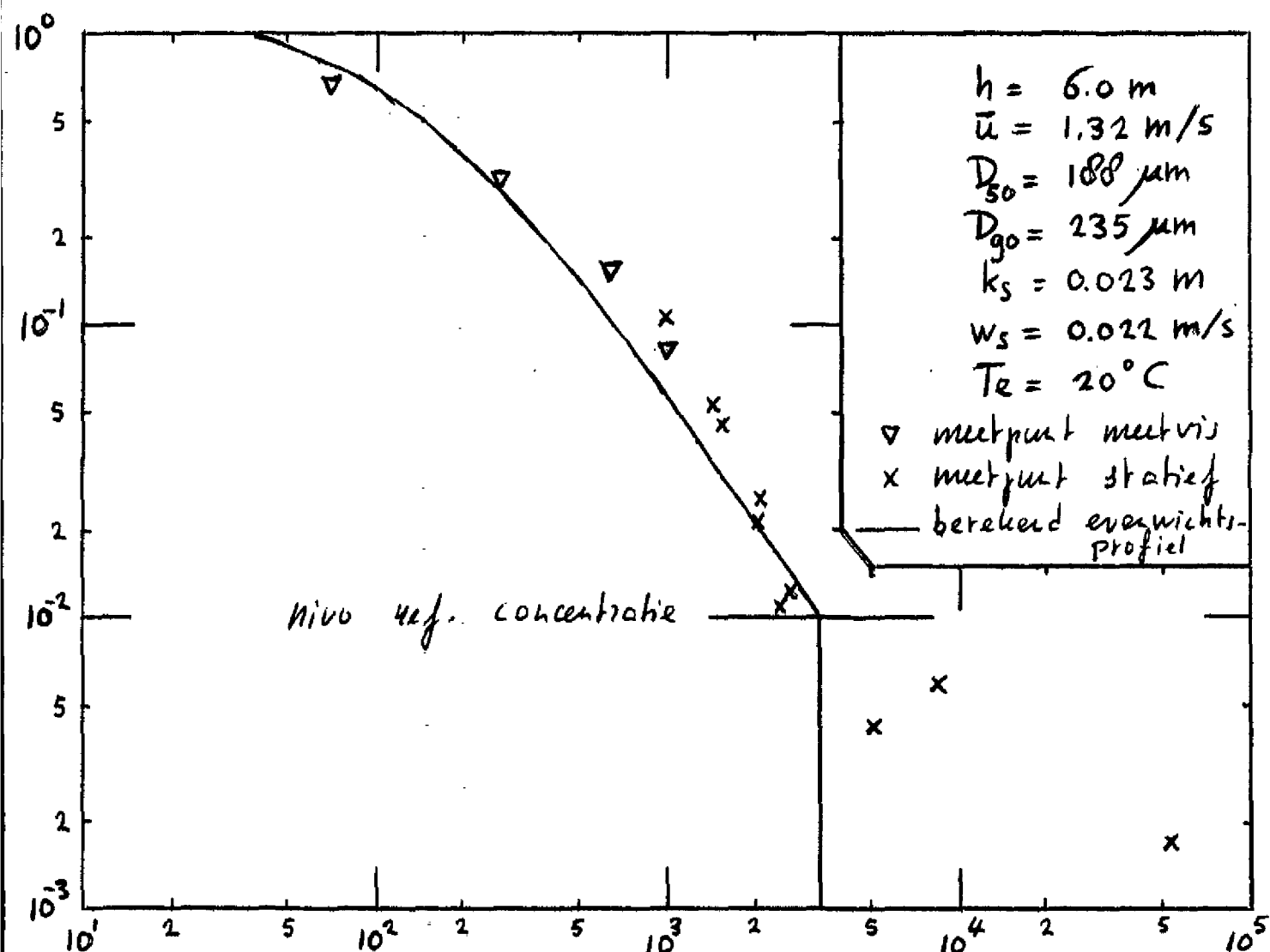
Fij. 6 A



zandconcentratie vertikaal meting 060021 Ichaar van Valkenisse ; maximum vloedstroom, V_{12}

Fij. 6B

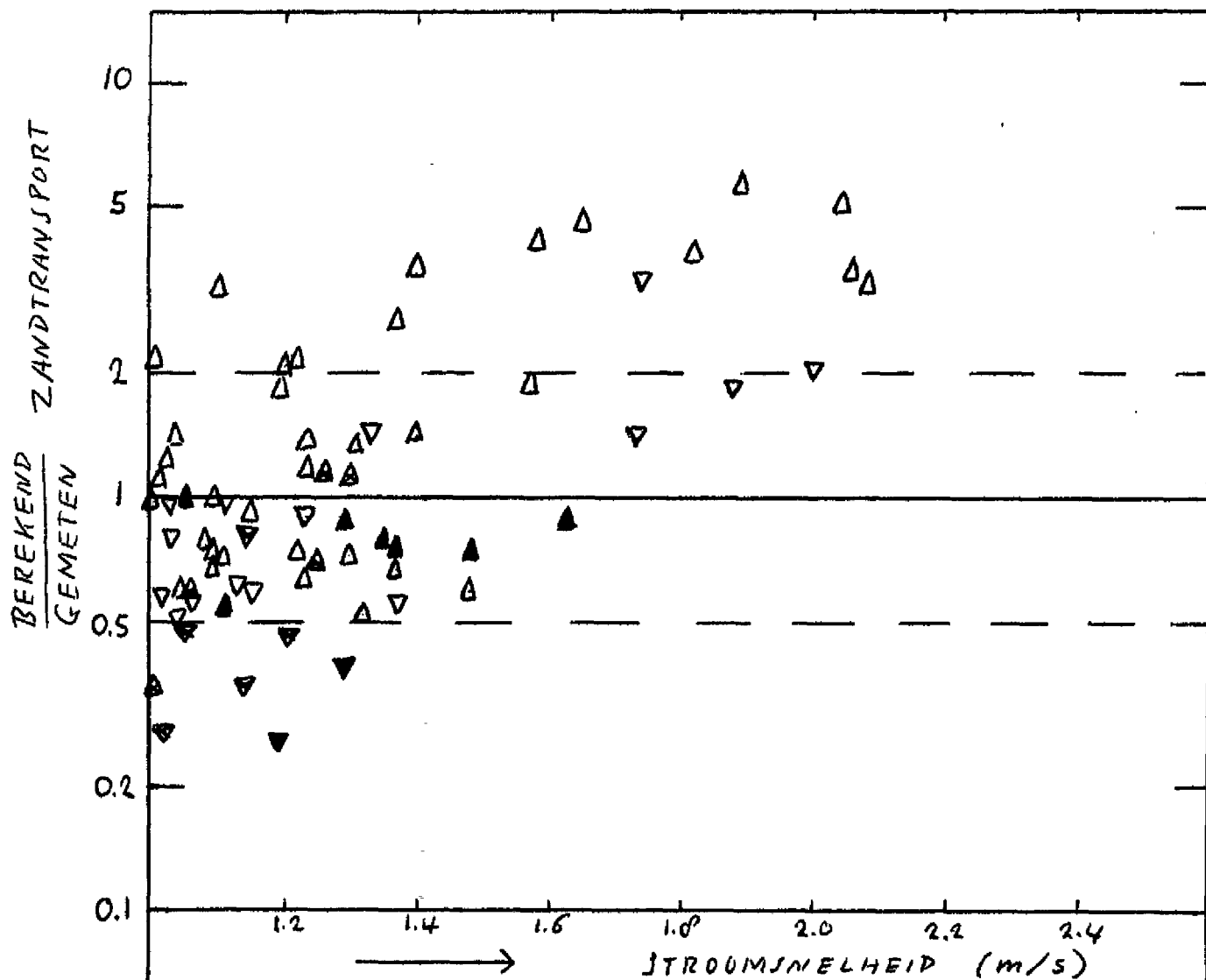
z/h



→ Zandconcentratie (mg/l)

Zandconcentratie vertikaal meting 860021 IJssan
van Valkenisse; afnemende vloedstroom, V13.

Fig. 6 C



VERHOUDING BEREKEND/GEMETEN ZANDTRANSPORT ALS
FUNKTIE VAN DE DIEPTE-GEMIDDELDE STROOMSNELHEID

FORMULE :

Engelund-Hansen

$k_s = 0.02 \text{ m}$

LOKATIE :

Sch. v. Valkenisse

Zuidergat

Zimmermanjeul

STROOMSNELHEID
toegenemend afnemend

Δ

▽

Δ

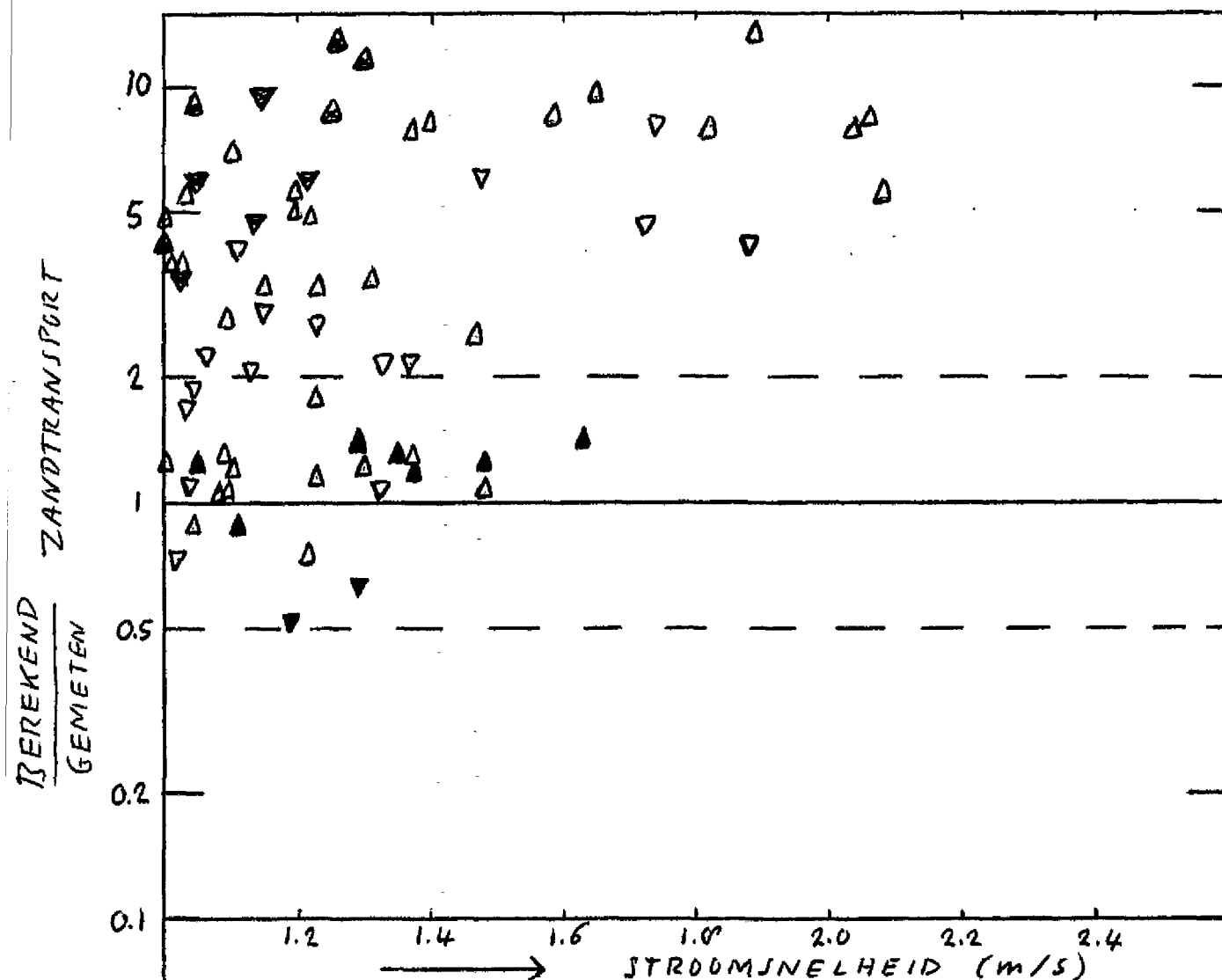
▽

Δ

▽

NOTA ZL.07.0002

Fig 7 A



VERHOUDING BEREKEND / GEMETEN ZANDTRANSPORT ALS
FUNKTIE VAN DE DIEPTE-GEMIDDELDE STROOMSNELHEID

FORMULE :

Morva-Kalinske

$k_s = 0.02 \text{ m}$

LOKATIE :

Jch. v. Valkenburg

Zuidergat

Zimmermanjeul

STROOMSNELHEID
toegenomen afgenomen

△

△

▲

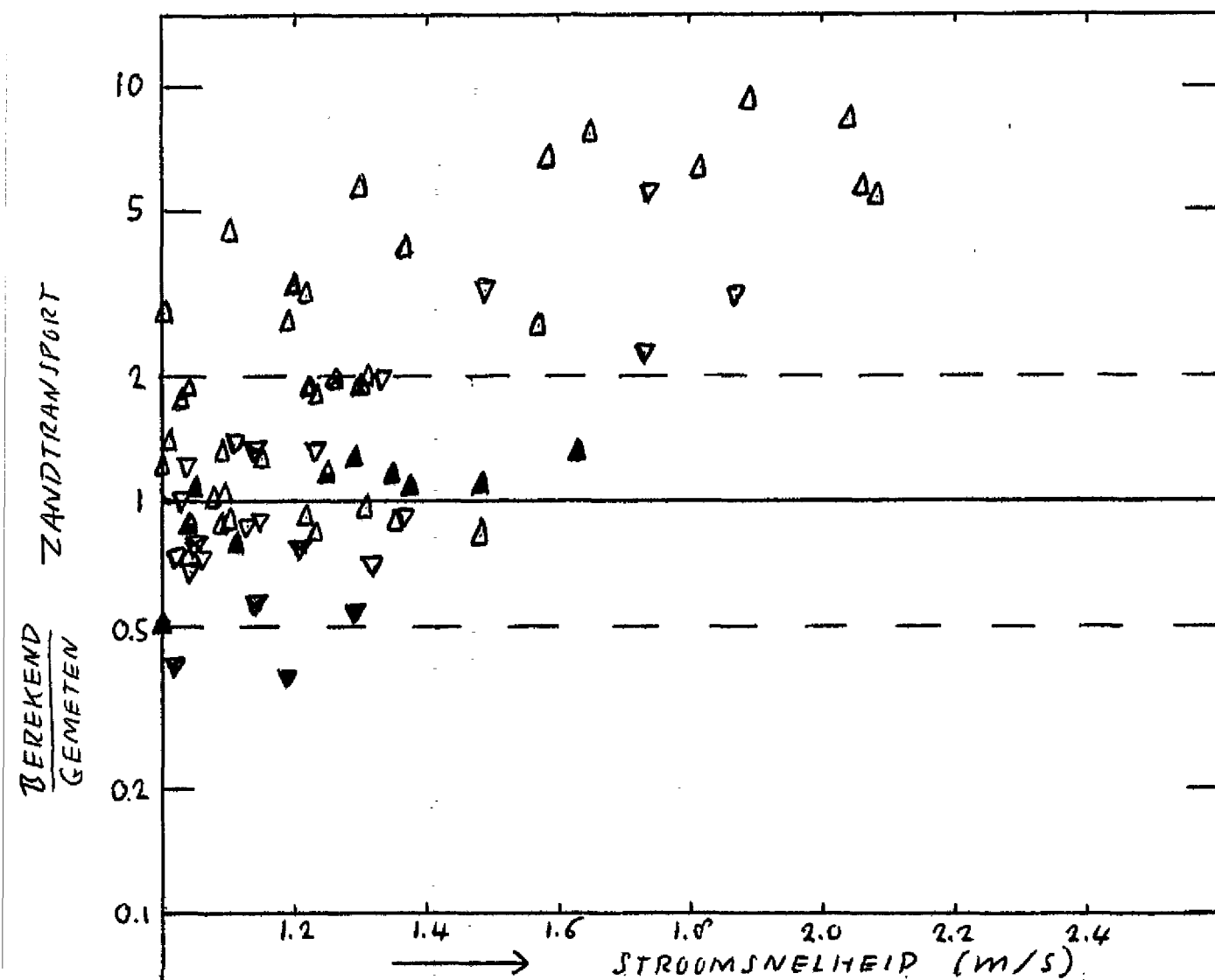
▽

▽

▽

NOTA ZL.07.0002

Fig. 7 B



VERHOUDING BEREKEND / GEMETEN ZANDTRANSPORT ALS
FUNKTIE VAN DE DIEPTE-GEMIDDELDE STROOMSNELHEID

FORMULE:

Van Rijn

$k_s = 0.02 \text{ m}$

LOKATIE:

Jch. van Valkenburg

Zuiderzjeb

Zimmermarjeb

STROOMSNELHEID
toegenemend afnemend

△

▽

△

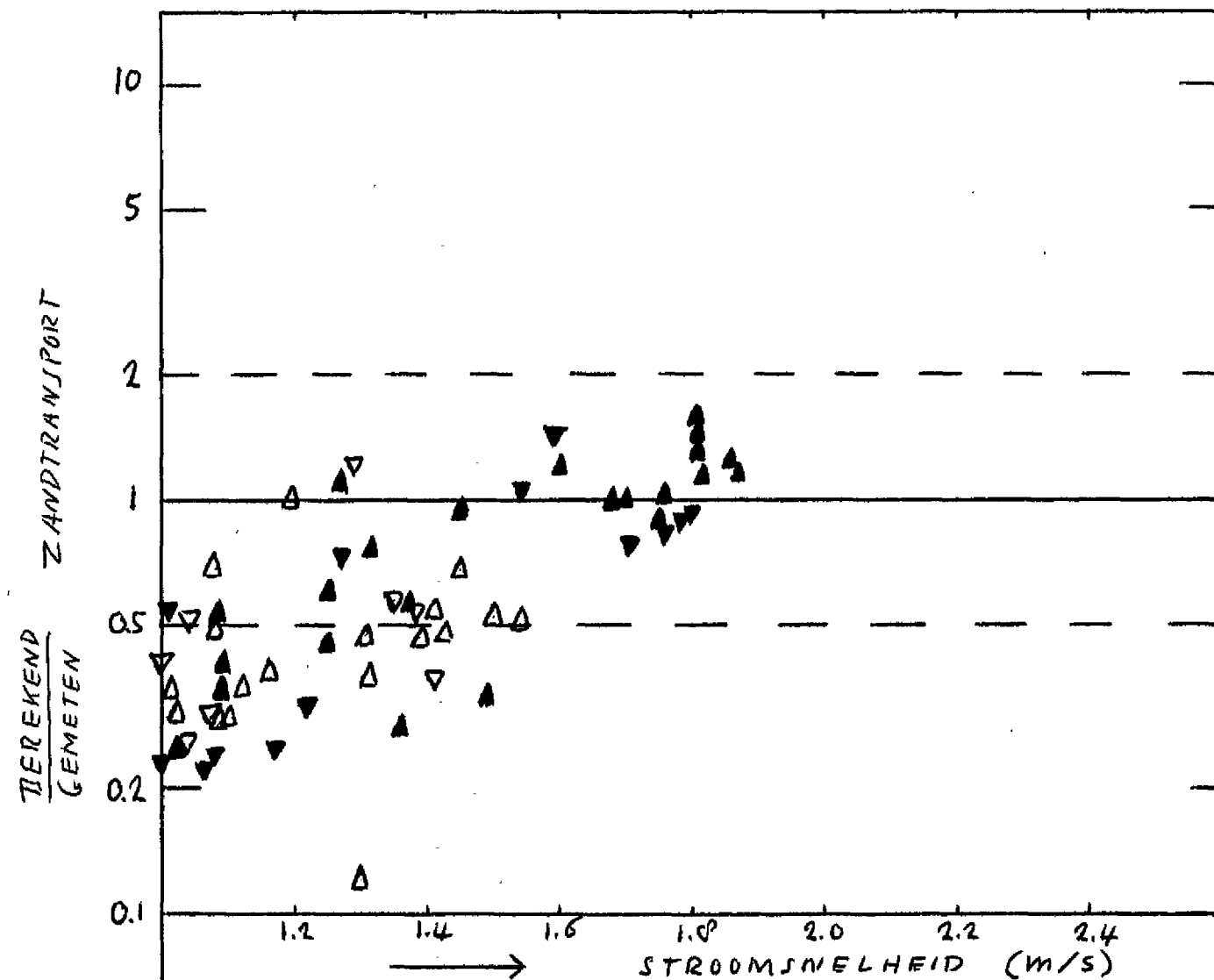
▽

▲

▼

NOTA ZL. 07.0002

Fij. 7C



VERHOUDING BEREKEND/GEMETEN ZANDTRANSPORT ALS
FUNKTIE VAN DE DIEPTE-GEMIDDELDE STROOMSNELHEID

FORMULE :

Engelund-Hansen

$k_s = 0.02 \text{ m}$

LOKATIE :

Eendracht

vloed

eb

STROOMSNELHEID

toename afname

△

▽

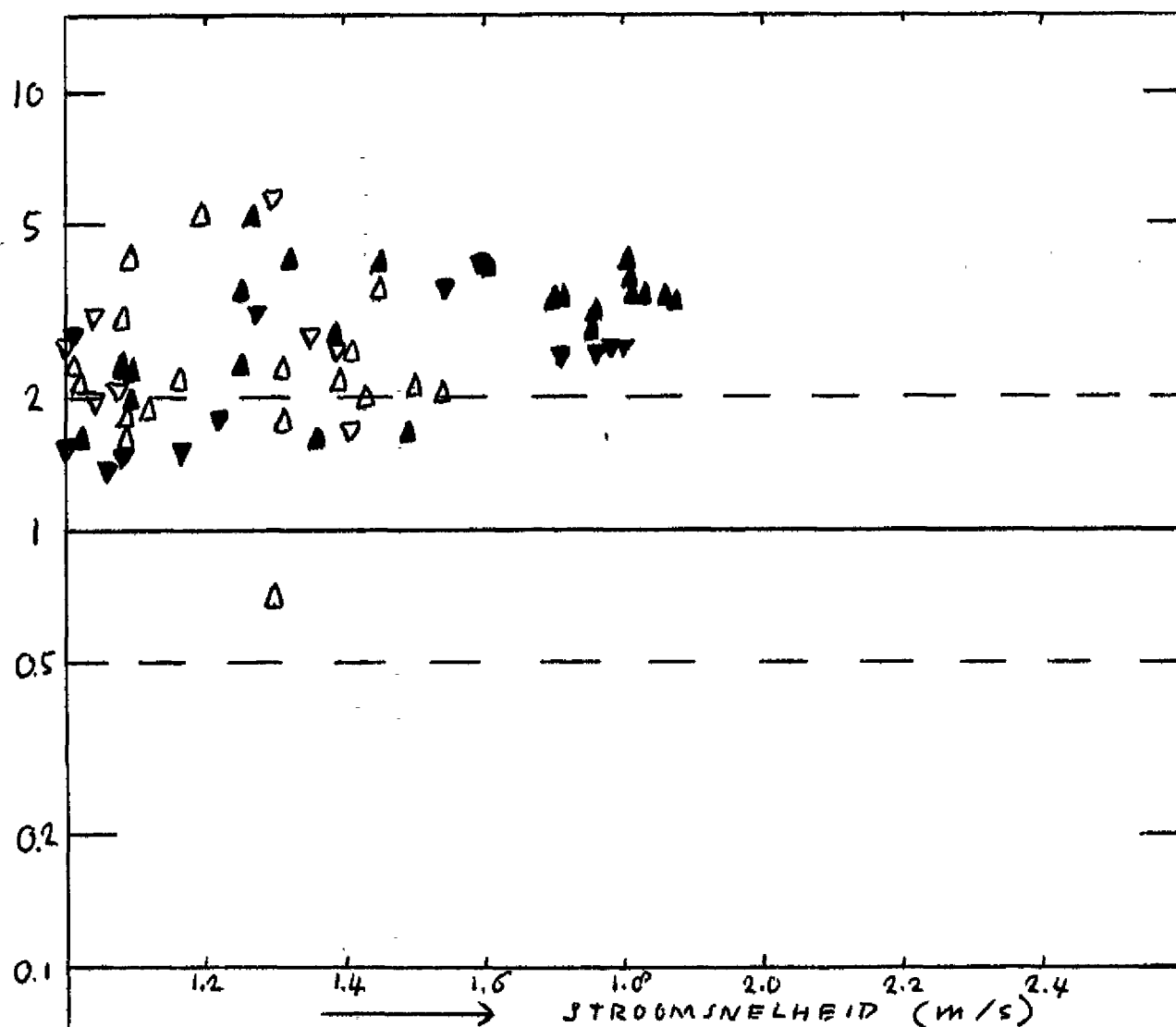
▲

▼

NOTA ZL.87.0002

Fij. 7D

DEREKEND
ZANDTRANSPORT
GEMETEN



VERHOUDING BEREKEND/GEMETEN ZANDTRANSPORT ALS
FUNKTIE VAN DE DIEPTE-GEMIPPELDE STROOMSNELHEID

FORMULE :

Morra-Kalinske

$k_s = 0.02 \text{ m}$

LOKATIE :

Eendracht

vloed

eb

STROOMSNELHEID
toegenemend afnemend

△

▽

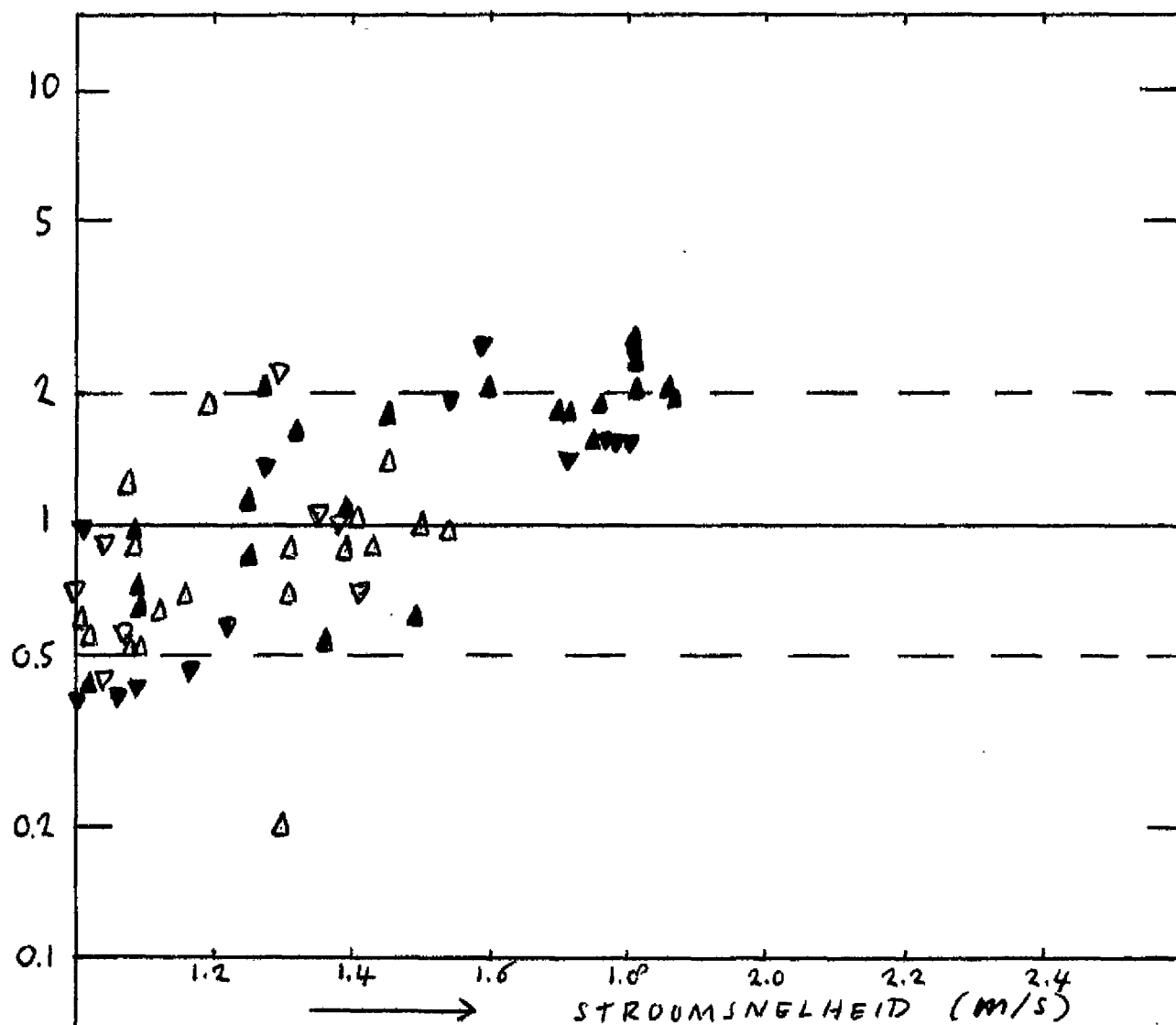
▲

▼

NOTA ZL 07.0002

Fig. 7 E

BEREKEND ZANDTRANSPORT
GEMETEN

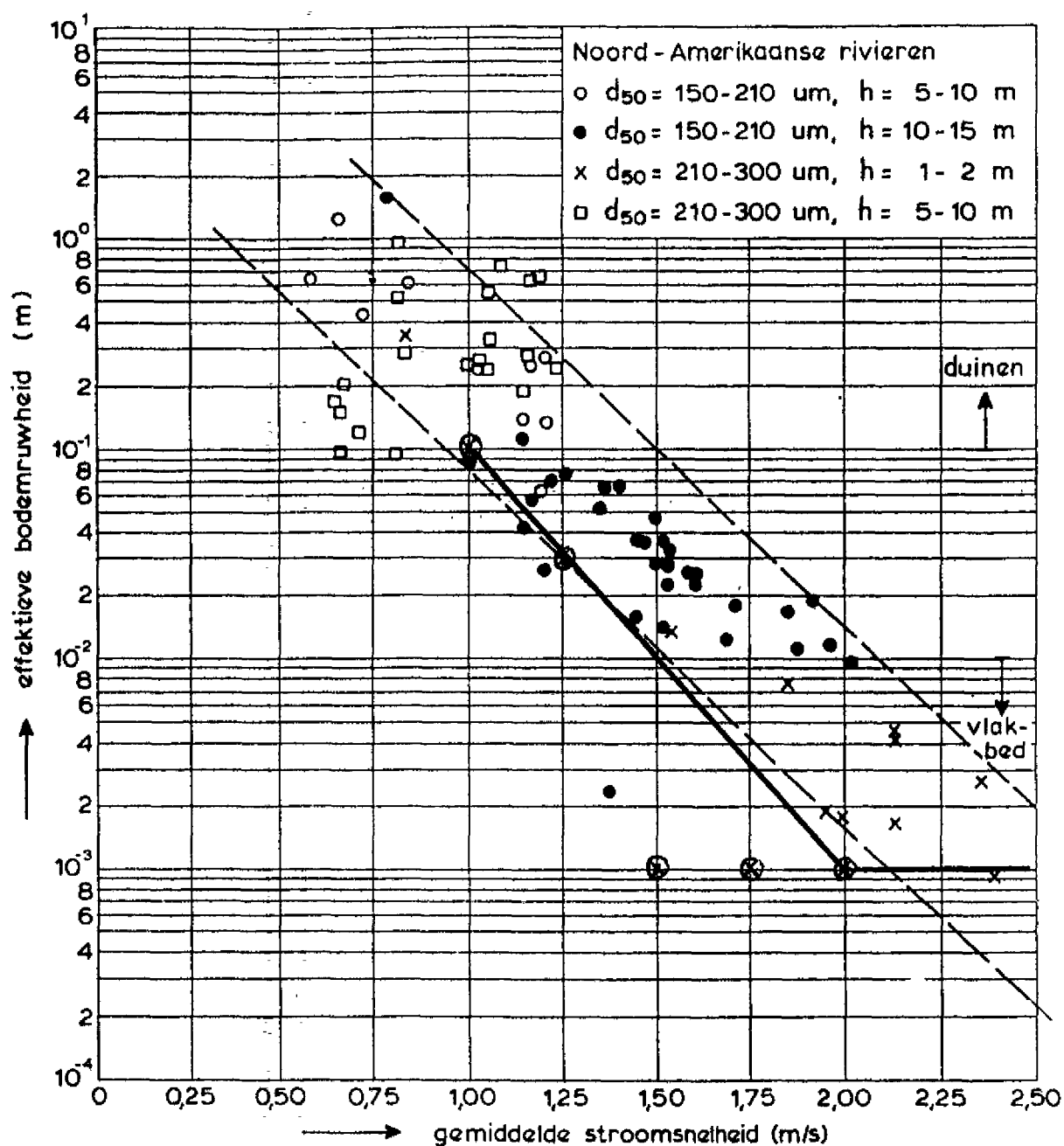


VERHOUDING BEREKEND/GEMETEN ZANDTRANSPORT ALS
FUNKTIE VAN DE DIEPTE-GEMIDDELDE STROOMSNELHEID

FORMULE:	LOKATIE:	STROOMSNELHEID	
Van Rijn	Eendracht	toenemend	afnemend
	vloed	Δ	∇
	eb	▲	▼

NOTA ZL. 07.0002

Fij. 7. F



⊗ aanname onderzoek rapport M2127

— aanname bij berekeningen in deze nota

EFFEKTIEVE BODEMRUWHEID ALS FUNKTIE
VAN STROOMSNELHEID

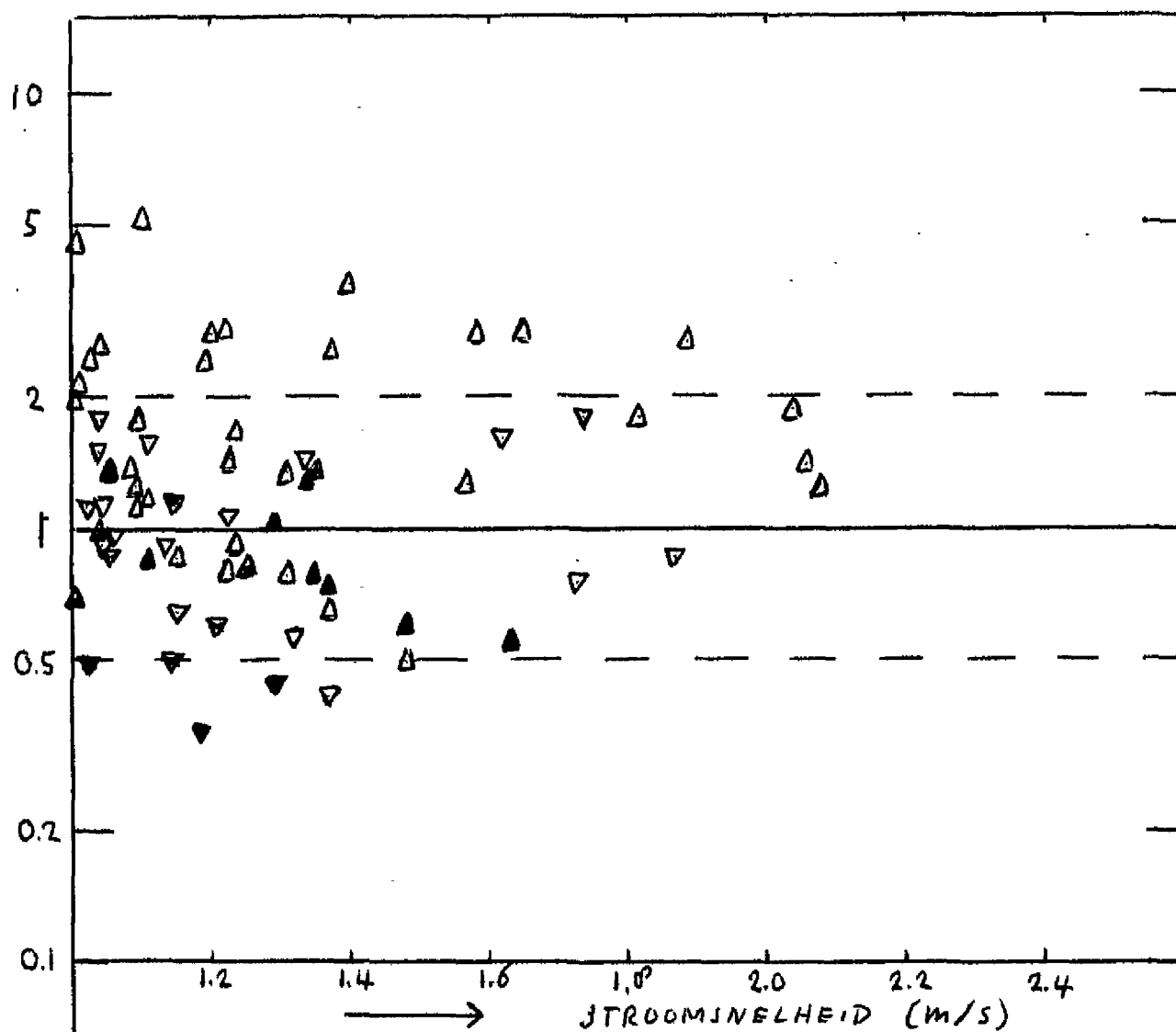
NOTA ZL.07.0002

uit: R 2142

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Fig 8

BEREKEND
ZANDTRANSPORT
GEMETEN



VERHOUDING BEREKEND/GEMETEN ZANDTRANSPORT ALS
FUNKTIE VAN DE DIEPTE-GEMIDDELTE STROOMSNELHEID

FORMULE:

Engelund-Hansen

$$k_s \begin{cases} 1 < \bar{u} \leq 2, k_s = 10e^{-4.6\bar{u}} \\ \bar{u} > 2, k_s = 0.001 \end{cases}$$

LOKATIE:

Johan v. Valkenburg

Zuidersgat

Limmermarjens

STROOMSNELHEID
toenemend afnemend

△

▽

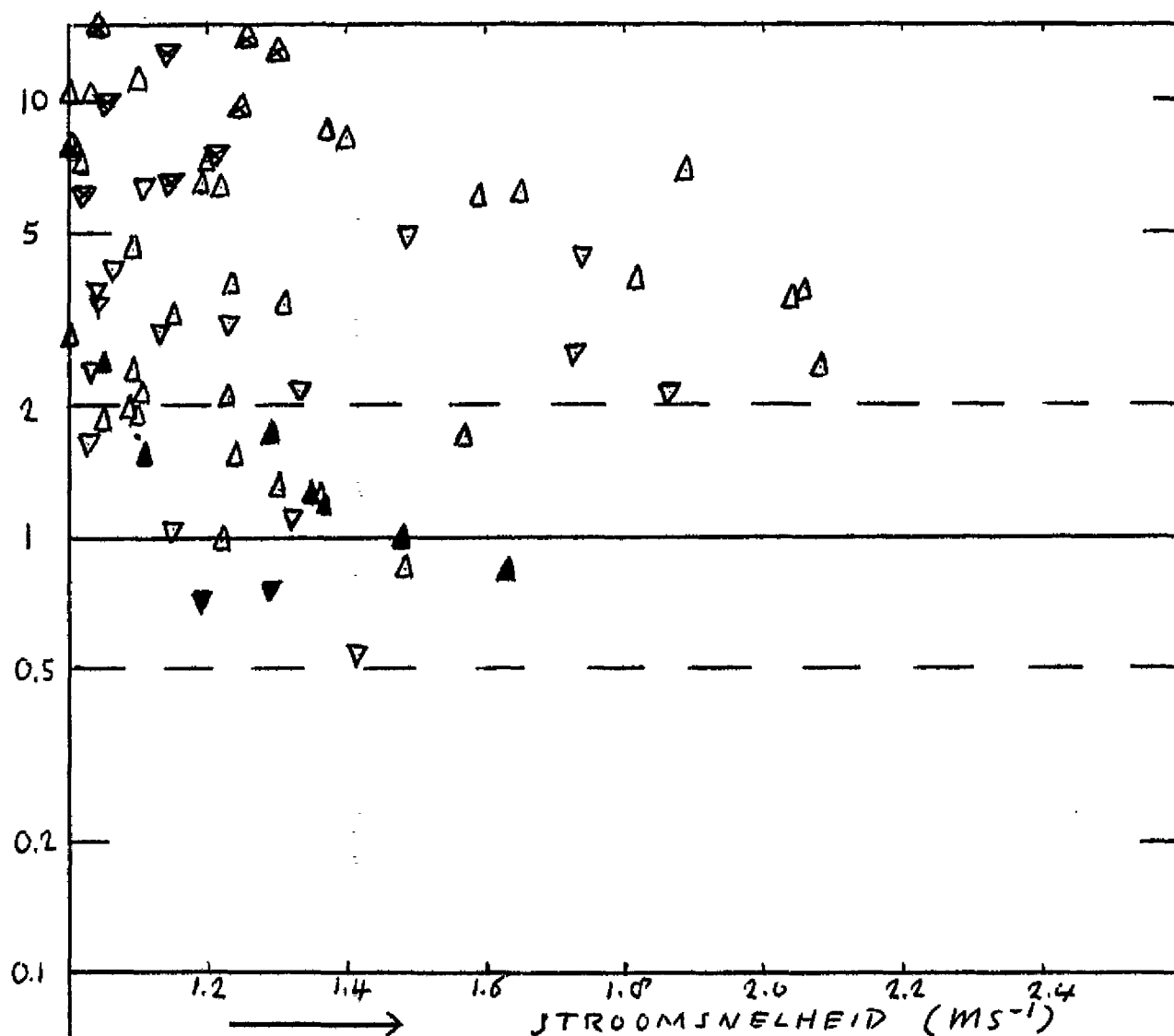
▲

▼

NOTA ZL.07.0002

Fijg A

BEREKEND
ZANDTRANSPORT
GEMETEN



VERHOUDING BEREKEND/GEMETEN ZANDTRANSPORT ALS
FUNKTIE VAN DE DIEPTE-GEMIDDELDE STROOMSNELHEID

FORMULE:

Morra - Kalinske

$$k_s \begin{cases} 1 < \bar{u} \leq 2, k_s = 10e^{-4.6\bar{u}} \\ \bar{u} > 2, k_s = 0.001 \end{cases}$$

LOKATIE:

Jch. v. Valkenisse
Linderjot
Zimmermanjot

STROOMSNELHEID

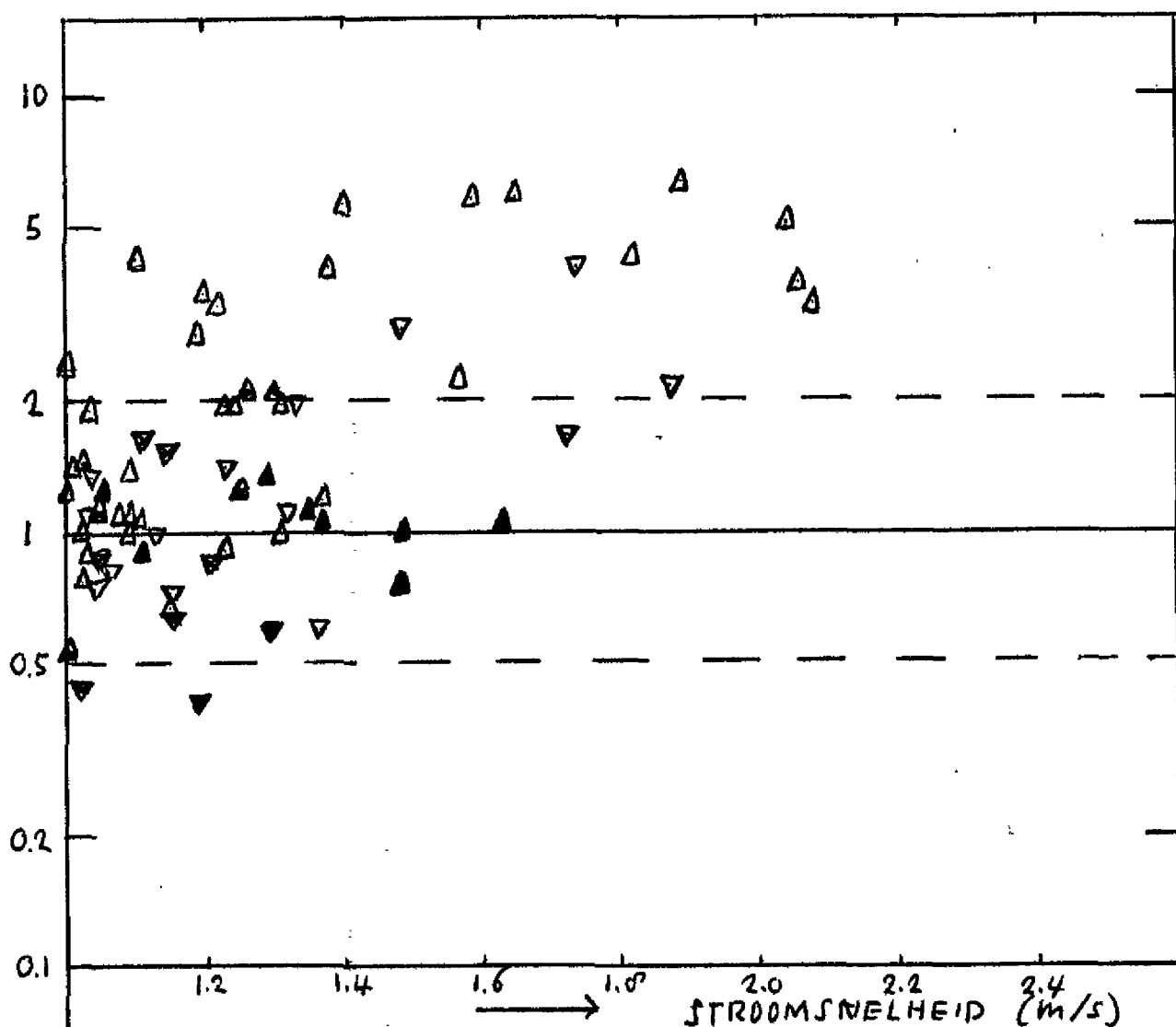
toenemend afnemend

Δ ∇
 Δ ∇
 $\blacktriangle$ $\blacktriangledown$

NOTA ZL.07.0002

Fij 5 B

BEREKEND
 ZANDTRANSPORT
 GEMETEN



VERHOUDING BEREKEND/GEMETEN ZANDTRANSPORT ALS
 FUNKTIE VAN DE DIEPTE-GEMIDDELDE STROOMSNELHEID

FORMULE:

Van Rijn
 $k_s \begin{cases} 1 < \bar{u} \leq 2, k_s = 10e^{-4.6\bar{u}} \\ \bar{u} > 2, k_s = 0.001 \end{cases}$

LOKATIE:

Jch. v. Valkenburg
 Zuiderzand
 Zimmermanjeul

STROOMSNELHEID
 toegenamd afnemamd

△

▽

△

▽

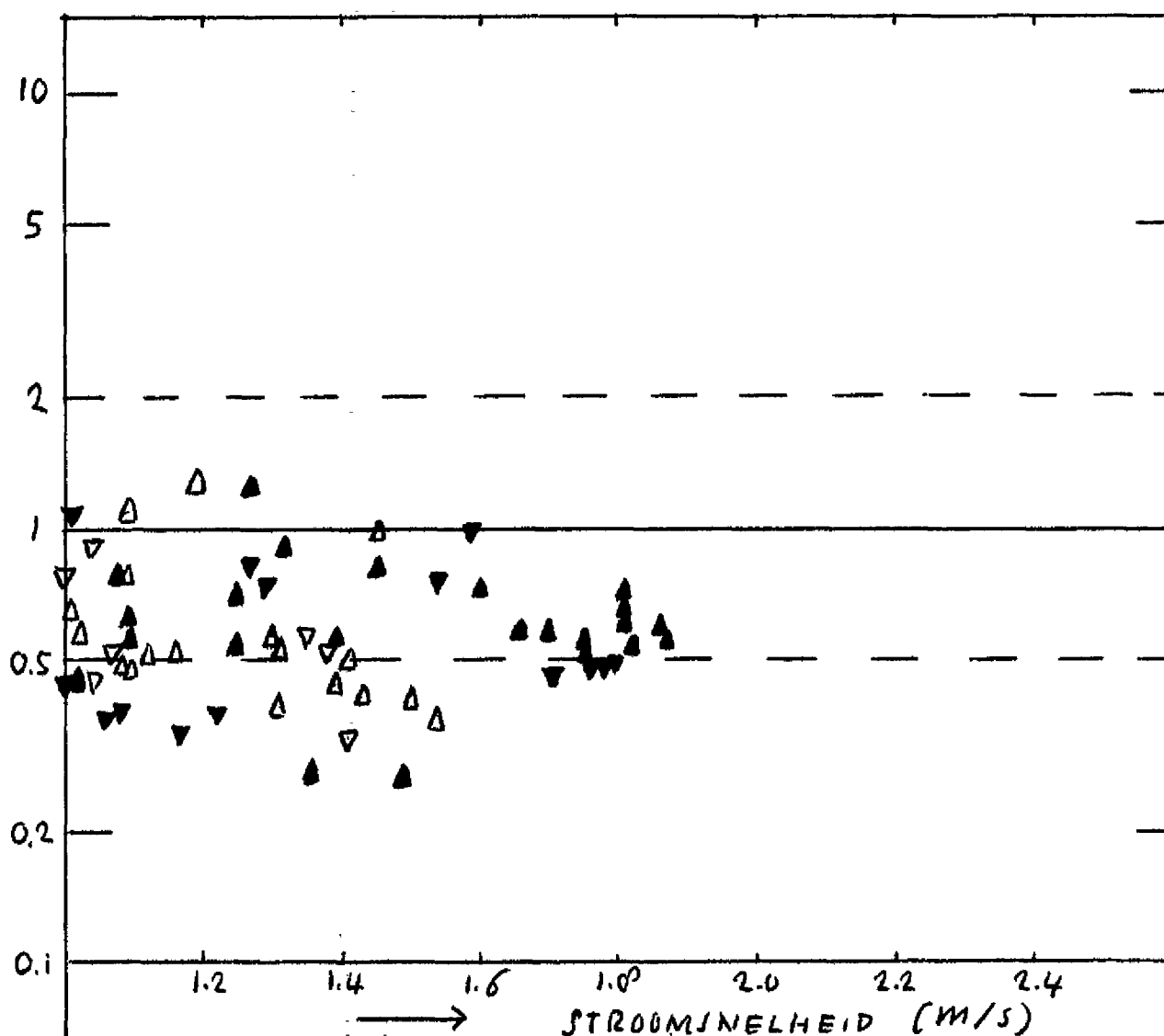
▲

▼

NOTA ZL.07.0002

Fig. g C

BEREKEND
ZANDTRANSPORT
GEMETEN



VERHOUDING BEREKEND/GEMETEN ZANDTRANSPORT ALS
FUNKTIE VAN DE DIEPTE-GEMIDDELTE STROOMSNELHEID

FORMULE:

Engelund-Hansen

$$k_s \begin{cases} 1 < \bar{u} \leq 2, k_s = 102^{-4.6\bar{u}} \\ \bar{u} > 2, k_s = 0.001 \end{cases}$$

LOKATIE:

Eendracht

vloed

eb

STROOMSNELHEID

toenemend afnemend

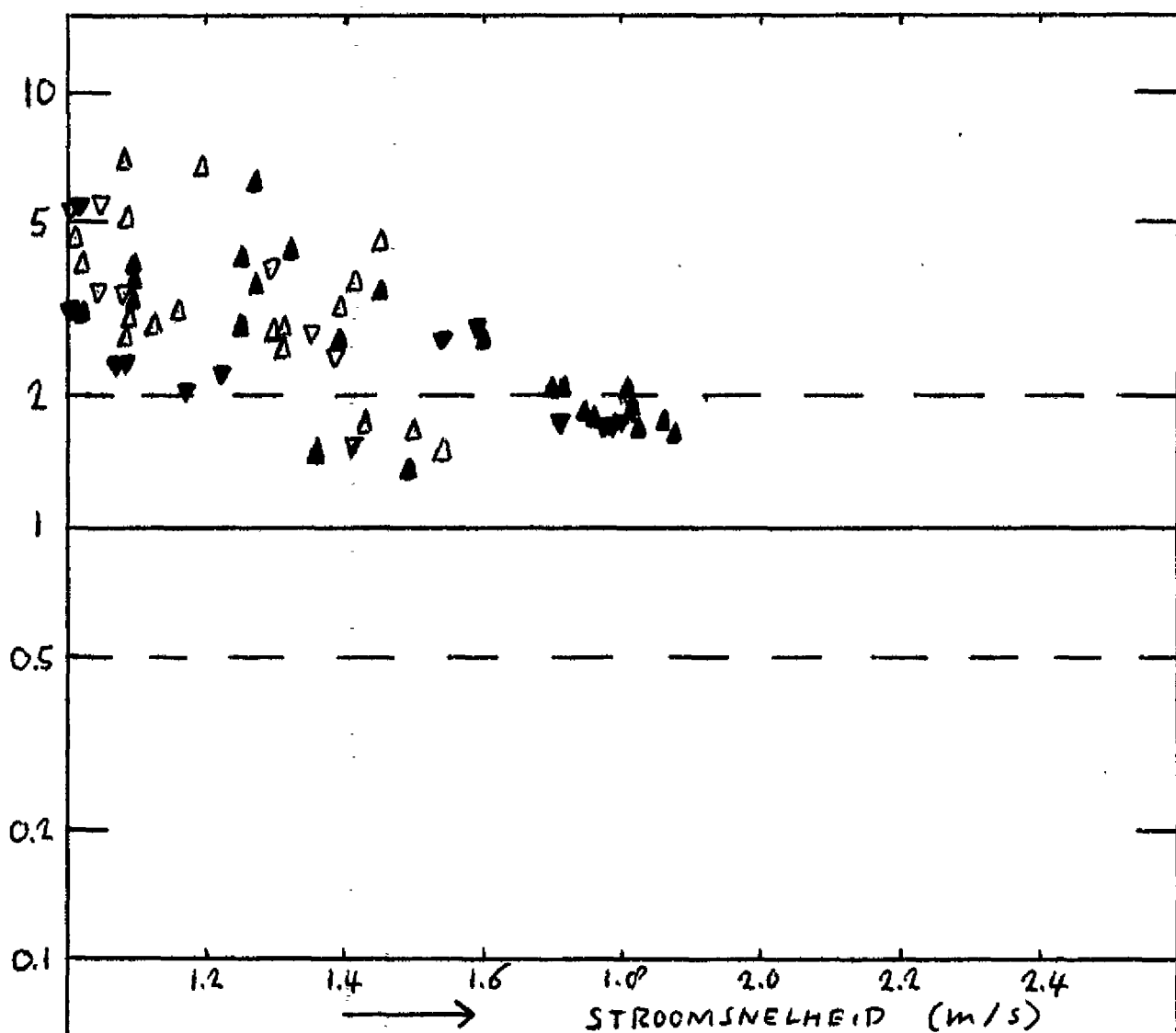
▲

▼

NOTA ZL. 87.0002

Fij. 9 D

BEREKENDE
ZANDTRANSPORT
GEMETEN



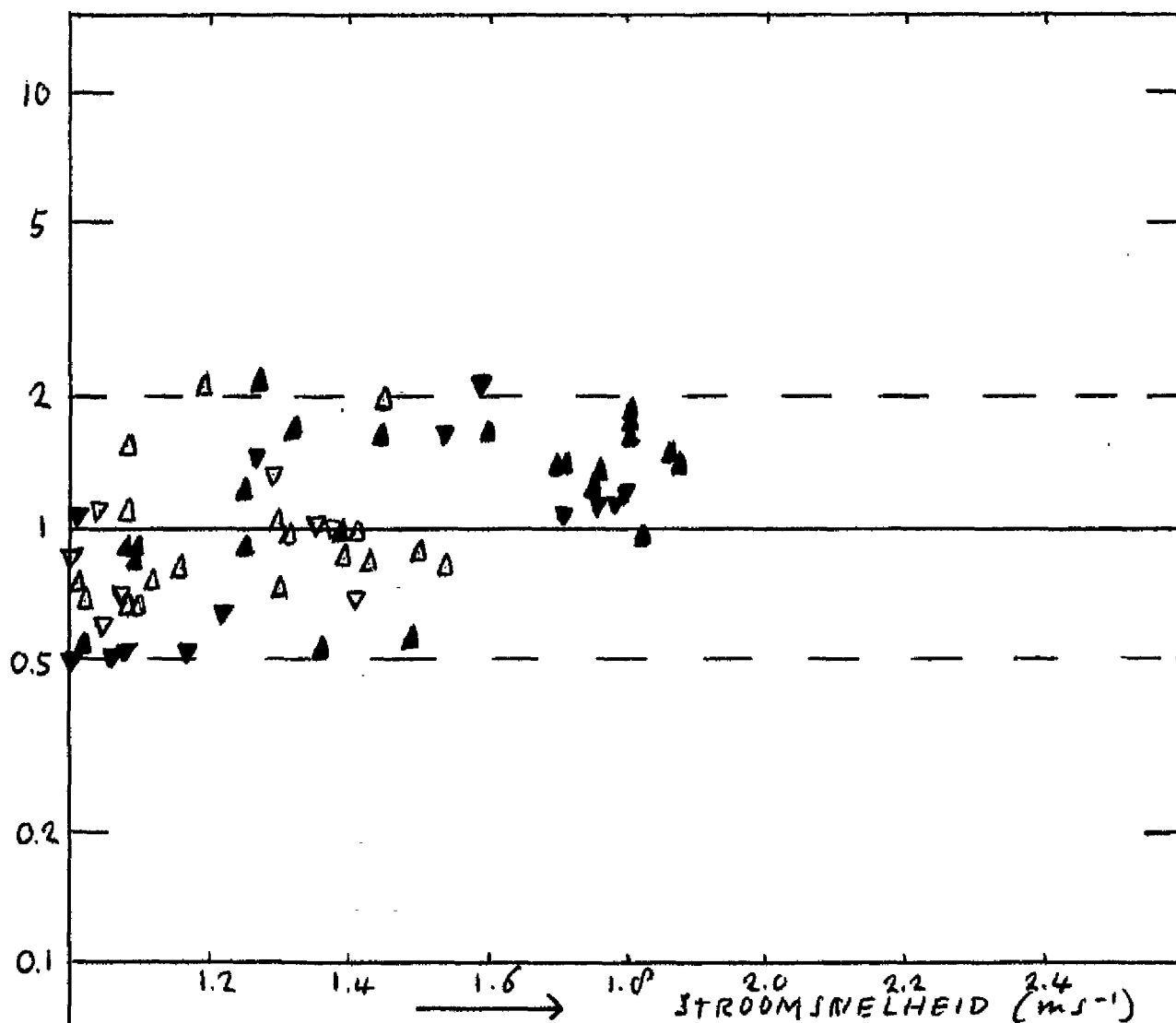
VERHOUDING BEREKENDE/GEMETEN ZANDTRANSPORT ALS
FUNKTIE VAN DE DIEPTE-GEMIDDELTE STROOMSNELHEID

FORMULE:	LOKATIE:	STROOMSNELHEID toenemend afnemend	
Morra - Kalinske	Eendracht	▲	▼
$k_s \left\{ \begin{array}{l} 1 < \bar{u} \leq 2, k_s = 10e^{-4.6\bar{u}} \\ \bar{u} > 2, k_s = 0.001 \end{array} \right.$	vloed	△	▽
	eb	▲	▼

NOTA ZL 07.0002

Fij. 9 E

BEREKEND
 ZANDTRANSPORT
 GEMETEN



VERHOUDING BEREKEND/GEMETEN ZANDTRANSPORT ALS
 FUNKTIE VAN DE DIEPTE-GEMIDDELDE STROOMSNELHEID

FORMULE:

Van Rijn

$$k_s \begin{cases} 1 < \bar{u} \leq 2, k_s = 10e^{-4.6\bar{u}} \\ \bar{u} > 2, k_s = 0.001 \end{cases}$$

LOKATIE:

Eendracht

vloed

eb

STROOMSNELHEID

toeneemt afneemt

Δ

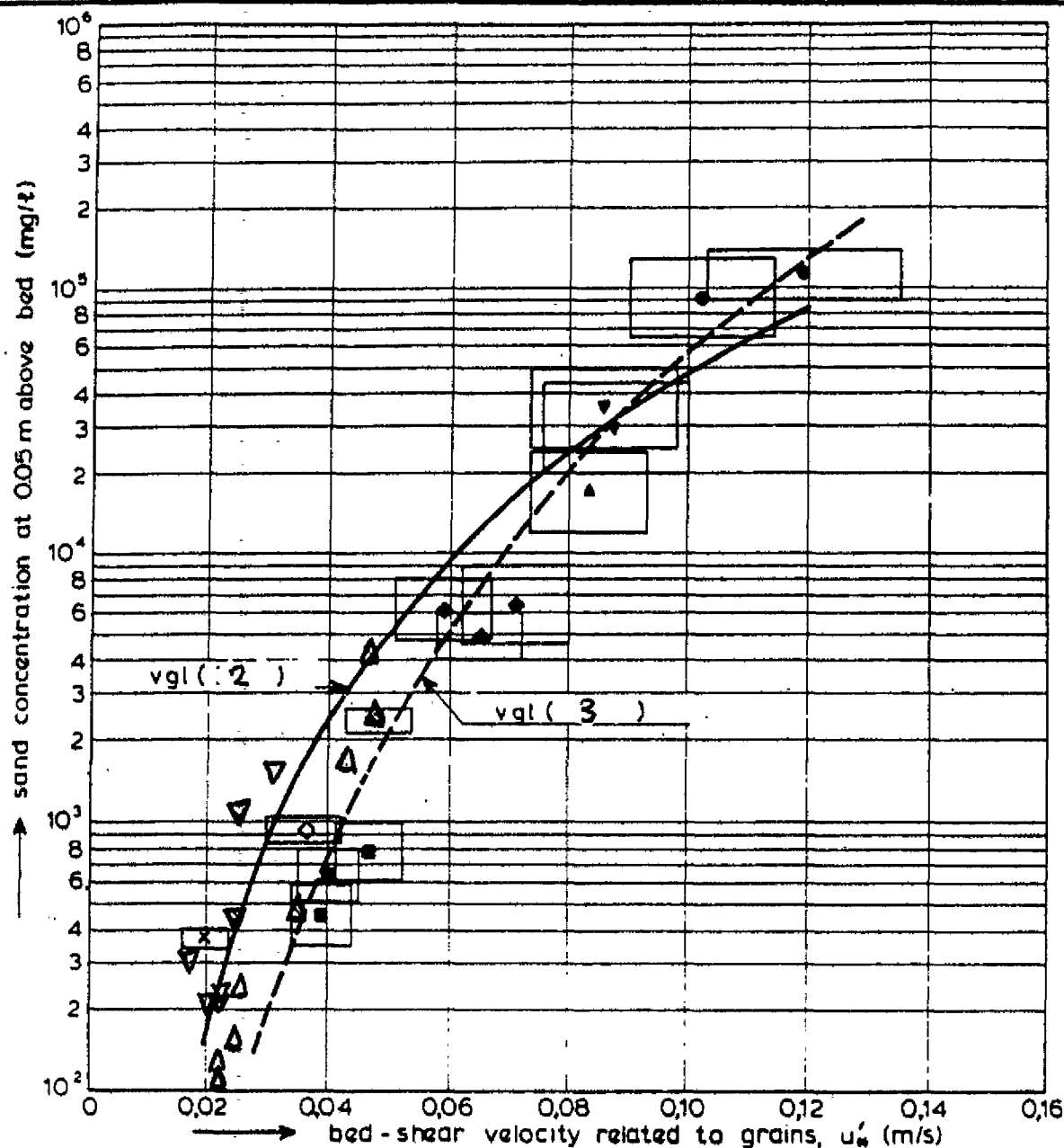
▽

▲

▼

NOTA ZL 07.0002

Fig. 9 F



source	symbol	bed material		water depth (m)	depth-averaged flow velocity (m/s)	bed forms
		D ₅₀ (μm)	D ₉₀ (μm)			
M2127 tests	T1 ■	210	270	0.90-1.05	0.95	smooth waves (0.05m)
	T2 ◆	210	270	0.95-1.00	1.50	flat bed, smooth waves
	T3 ▲	220	270	0.90-1.00	1.9-2.0	flat bed, smooth waves
	T4, T5 ▼	220	270	0.95-1.15	2.2-2.4	flat bed, smooth waves
	T6, T7 ●	220	270	0.95-1.05	2.3-2.8	flat bed, smooth waves
literature	x	220	280	1.6	0.5	ripples (0.01 - 0.03 m)
	◇	220	280	1.6	0.9	ripples and waves (0.01 - 0.05 m)
	□	220	280	1.6	1.15	dunes (0.1 - 0.2 m)
Westerschelde, Schaar van Valkenisse	Δ	188	235	4.1-5.7	0.6 - 1.37 (toenemend)	dunes (0.4 - 1.0 m)
	▽	188	235	3.2-6.7	0.56 - 1.32 (afnemend)	

ZAND CONCENTRATIES OP 0,05 m

AANVULLING OP
FIG. 35 VAN
W.L. RAPPORT M2127

NOTA ZL 87.0002

FIG 10

Appendix

- Formules voor de berekening van het zandtransport onder evenwichts-omstandigheden (overgenomen uit W.L. rapport M2127, lit. 2).

The suspended sand transport formula of Morra-Kalinske (Mulder, 1983) reads:

$$s_s = 1.2 f \rho_s \bar{u} h c_{bed} \quad (1)$$

in which

$$f = \int_0^1 \eta^{0.2} \exp(-15 \frac{w}{u_*} \eta) d\eta$$

$$c_{bed} = \frac{A}{2 \pi^{0.5}} \left[\frac{u_*}{\gamma w} \exp(-\frac{\gamma^2 w^2}{u_*^2}) - \pi^{0.5} + \pi^{0.5} \operatorname{erf}(\frac{\gamma w}{u_*}) \right]$$

$$\operatorname{erf}(\frac{\gamma w}{u_*}) = \frac{2}{\pi^{0.5}} \int_0^{\gamma w/u_*} \exp(-x^2) dx$$

$$w = [(0.67 \Delta g d_{50}^3 + (6\nu)^2)^{0.5} - 6\nu]/d_{50}$$

$$u_* = \frac{g^{0.5}}{C} \bar{u}$$

$$C = 18 \log(\frac{12 h}{k_s})$$

s_s	= suspended sand transport	(kg/sm)
$\bar{u}$	= depth-averaged flow velocity	(m/s)
h	= water depth	(m)
d_{50}	= particle size of bed material	(m)
g	= acceleration of gravity	(m/s ²)
k_s	= effective bed roughness of Nikuradse	(m)
f	= correction coefficient	(-)
c_{bed}	= bed concentration	(-)
w	= settling velocity of bed material	(m/s)
u_*	= bed-shear velocity	(m/s)
C	= Chazy coefficient	(m ^{0.5} /s)
A	= coefficient (= 39 10 ⁻⁴)	(-)
γ	= coefficient (= 1.36)	(-)
Δ	= relative density (= 1.65)	(-)
ν	= kinematic viscosity coefficient	(m ² /s)
ρ_s	= sediment density (= 2650)	(kg/m ³)

The total (bed and suspended) transport formula of Engelund-Hansen (1967) reads:

$$s_t = \frac{0.05 \rho_s \bar{u}^5}{\Delta^2 g^{0.5} d_{50} C^3} \quad (2)$$

in which:

s_t	= total transport	(kg/sm)
$\bar{u}$	= depth-averaged flow velocity	(m/s)
Δ	= relative density (= 1.65)	(-)
g	= acceleration of gravity	(m/s ²)
d_{50}	= median particle size of bed material	(m)
C	= Chézy-coefficient	(m ^{0.5} /s)
ρ_s	= sediment density (= 2650)	(kg/m ³)

The total transport formula (s_t) of Van Rijn (1984 a,b) reads:

$$s_t = s_b + s_s \quad (3)$$

$$s_b = 0.053 \rho_s (\Delta g)^{0.5} (d_{50})^{1.5} (D_*)^{-0.3} (T)^{2.1} \quad (4)$$

$$s_s = F \rho_s \bar{u} h c_a \quad (5)$$

in which:

$$D_* = d_{50} \left(\frac{\Delta g}{\nu^2} \right)^{1/3} \quad = \text{particle size parameter} \quad (-)$$

$$T = \frac{(u_*')^2 - (u_{*,cr})^2}{(u_{*,cr})^2} \quad = \text{bed-shear parameters } (T > 0) \quad (-)$$

$$c_a = 0.015 \frac{d_{50}}{a} \frac{T^{1.5}}{D_*^{0.3}} \quad = \text{bed concentration} \quad (-)$$

$$F = \frac{\left(\frac{a}{h} \right)^{Z'} - \left(\frac{a}{h} \right)^{1.2}}{\left(1 - \frac{a}{h} \right)^{Z'} (1.2 - Z')} \quad = \text{correction coefficient} \quad (-)$$

$$Z' = Z + \phi \quad = \text{suspension parameter} \quad (-)$$

Z	$= \frac{w_s}{\beta \kappa u_*}$	= suspension parameter	(-)
ϕ	$= 2.5 \left(\frac{w_s}{u_*}\right)^{0.8} \left(\frac{c_a}{c_o}\right)^{0.4}$	= correction coefficient related to turbulence damping effect ($\phi_{\max} = 1$)	(-)
w_s	$= \frac{10v}{d_s} \left[\left(1 + \frac{0.01 \Delta g d_s^3}{v^2}\right)^{0.5} - 1 \right]$	= settling velocity of representative particle size of suspended sand	(m/s)
d_s	$= (1 + 0.011 (\sigma_s - 1) (T - 25)) d_{50}$	= representative particle size of suspended sand ($d_s = d_{50}$ for $T > 25$)	(m)
β	$= 1 + 2 \left(\frac{w_s}{u_*}\right)^2$	= ratio of sediment and fluid mixing coefficient ($\beta_{\max} = 2$)	(-)
σ_s	$= \frac{1}{2} \left(\frac{d_{84}}{d_{50}} + \frac{d_{50}}{d_{16}} \right)$	= gradation coefficient of bed material	(-)
$u_{*,cr}$	$= (\Delta g d_{50} \theta_{cr})^{0.5}$	= critical bed-shear velocity according to Shields	(m/s)
θ_{cr}	$= 0.24 D_*^{-1}$	if $D_* < 4$	
θ_{cr}	$= 0.14 D_*^{-0.64}$	if $4 < D_* < 10$	
θ_{cr}	$= 0.04 D_*^{-0.1}$	if $10 < D_* < 20$	Shields' curve
θ_{cr}	$= 0.013 D_*^{0.29}$	if $20 < D_* < 150$	
θ_{cr}	$= 0.055$	if $D_* > 150$	
u_*'	$= \frac{g^{0.5}}{C'} \bar{u}$	= effective bed-shear velocity	(m/s)
u_*	$= \frac{g^{0.5}}{C} \bar{u}$	= Overall bed-shear velocity	(m/s)
C'	$= 18 \log \left(\frac{12h}{3 d_{90}} \right)$	= Chézy coefficient related to grains	(m ^{0.5} /s)

$$C = 18 \log\left(\frac{12 h}{k_s}\right) \quad = \text{Overall Chézy coefficient} \quad (m^{0.5}/s)$$

s_t	= total transport	(kg/sm)
s_b	= bed load transport	(kg/sm)
s_s	= suspended load transport	(kg/sm)
$\bar{u}$	= depth-averaged flow velocity	(m/s)
d_{50}	= median particle size of bed material	(m)
d_{16}, d_{84}, d_{90}	= particle diameters of bed material	(m)
h	= water-depth	(m)
k_s	= effective bed roughness of Nikuradse	(m)
g	= acceleration of gravity	(m/s ²)
a	= layer thickness of bed load transport ($a = k_s, a_{\max} = 0.05h, a_{\min} = 0.01h$)	(m)
c_0	= maximum concentration (= 0.65)	(-)
Δ	= relative density (= 1.65)	(-)
ν	= kinematic viscosity coefficient	(m ² /s)
κ	= constant of Von Karman (= 0.4)	(-)
ρ_s	= sediment density (= 2650)	(kg/m ³)

- Formules voor de berekening van het vertikaal zand concentratie profiel volgens de methode van Van Rijn (lit. 8):

$$\frac{c}{c_a} = \left[\frac{(a)(h-z)}{(z)(h-a)} \right]^Z, \quad \text{for } \frac{z}{h} < 0.5 \dots \dots \dots (6a)$$

$$\frac{c}{c_a} = \left[\frac{a}{h-a} \right]^Z [e]^{-4Z(z/h-0.5)}, \quad \text{for } \frac{z}{h} \geq 0.5 \dots \dots \dots (6b)$$

Met Z en C_a als gedefinieerd en berekend in vrgl. 5, en $a=0.01h$.

- C = concentratie op hoogte Z boven bodem (-)
 Z = hoogte boven de bodem (m)